

国内の酷暑環境下で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究

申, 相澈

<https://hdl.handle.net/2324/1937167>

出版情報 : 九州大学, 2018, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

国内の酷暑環境下で施工される構造体コンクリートの
品質管理に関する研究

平成 30 年 4 月

申相澈

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景及び目的	1
1.2 研究の範囲及び方法	4
1.3 本論文の構成	6
参考文献	8
第2章 暑中コンクリートに関する既往の研究	10
2.1 近年の地球温暖化による気候変化	10
2.1.1 世界における平均気温の変化	10
2.1.2 日本における平均気温の変化	12
2.1.3 日本近海の海面水温の変化	12
2.1.4 日本における日最高気温と日最低気温の変化	13
2.1.5 日本における暑中期間の変化	14
2.1.6 将来における気温変化の予測	16
2.1.7 2.1節のまとめ	17
2.2 暑中環境におけるコンクリートの特性	18
2.2.1 コンクリートの温度	18
2.2.2 スランプ	20
2.2.3 空気量	21
2.2.4 蒸発及びブリーディング	21
2.2.5 凝結及び水和	24
2.2.6 プラスティックひび割れ	25
2.2.7 含水率分布	26
2.2.8 細孔分布	27
2.2.9 強度発現性状	28
2.2.10 2.2節のまとめ	29
2.3 暑中コンクリートに関する関連規定・仕様書の国際比較	30
2.3.1 構成システム	31
2.3.2 定義および適用期間	32
2.3.3 施工対策と品質管理	33

2.3.4	他の国の標準	35
2.3.5	2.3節のまとめ	35
2.4	第2章のまとめ	36
	参考文献	37
第3章	暑中コンクリートの初期水分移動及び凝結性状	40
3.1	第3章の概要	40
3.2	実験内容	41
3.2.1	実験概要	41
3.2.2	使用材料及び調合	42
3.2.3	測定項目及び方法	43
3.3	実験結果及び考察	46
3.3.1	フレッシュ性状	46
3.3.2	水分移動	47
3.3.3	凝結性状	54
3.4	第3章のまとめ	57
	参考文献	59
第4章	暑中環境で施工される構造体コンクリートの強度管理に関する研究	61
4.1	第4章の概要	61
4.2	実験内容	62
4.2.1	実験概要	62
4.2.2	使用材料及び調合	62
4.2.3	養生方法	64
4.2.4	測定項目及び方法	64
4.3	実験結果及び考察	66
4.3.1	フレッシュ性状	66
4.3.2	温度性状	67
4.3.3	圧縮強度	68
4.3.4	含水率	71
4.3.5	結合水率	72
4.3.6	細孔量	73
4.4	暑中コンクリートにおける強度管理方法の提案	75

4.5	第4章のまとめ	77
	参考文献	79
第5章	暑中環境で施工される床スラブコンクリートの養生方法に関する研究	81
5.1	第5章の概要	81
5.2	実験内容	82
5.2.1	実験構成	82
5.2.2	使用材料及び調合	83
5.2.3	打込み及び養生方法	84
5.2.4	測定項目及び方法	86
5.3	「実験Ⅰ」－給水養生の効果に関する実験	90
5.3.1	「実験Ⅰ」の概要	90
5.3.2	「実験Ⅰ」の結果考察	90
5.3.3	「実験Ⅰ」のまとめ	95
5.4	「実験Ⅱ」－養生開始時期及び期間の影響に関する実験1	96
5.4.1	「実験Ⅱ」の概要	96
5.4.2	「実験Ⅱ」の結果考察	97
5.4.3	「実験Ⅱ」のまとめ	100
5.5	「実験Ⅲ」－養生開始時期及び期間の影響に関する実験2	101
5.5.1	「実験Ⅲ」の概要	101
5.5.2	「実験Ⅲ」の結果考察	101
5.5.3	「実験Ⅲ」のまとめ	106
5.6	「実験Ⅳ」－散水養生の効果に関する実験1	107
5.6.1	「実験Ⅳ」の概要	107
5.6.2	「実験Ⅳ」の結果考察	108
5.6.3	「実験Ⅳ」のまとめ	114
5.7	「実験Ⅴ」－散水養生の効果に関する実験2	115
5.7.1	「実験Ⅴ」の概要	115
5.7.2	「実験Ⅴ」の結果考察	117
5.7.3	「実験Ⅴ」のまとめ	120
5.8	床スラブコンクリートにおける養生方法の提案	121
5.9	第5章のまとめ	125
	参考文献	127

第6章 暑中環境で施工される壁体コンクリートのコールドジョイントに関する研究	129
6.1 第6章の概要	129
6.2 実験内容	130
6.2.1 実験構成及び概要	130
6.2.2 試験体の性状及び打込み方法	133
6.2.3 測定項目及び方法	133
6.3 「実験Ⅰ」の結果考察	136
6.3.1 フレッシュ性状	136
6.3.2 水分移動	136
6.3.3 凝結性状	139
6.3.4 打重ね時の先打ちコンクリートの状態	140
6.3.5 透気性状	141
6.3.6 曲げ強度	143
6.4 「実験Ⅱ」の結果考察	144
6.4.1 フレッシュ性状	144
6.4.2 水分移動	144
6.4.3 凝結性状	147
6.4.4 透気性状	147
6.4.5 吸水性状	149
6.5 暑中コンクリートにおけるコールドジョイントの評価方法の提案	150
6.5.1 コールドジョイント評価基準の検討	150
6.5.2 凝結性状が硬化コンクリートのコールドジョイントに及ぼす影響	152
6.5.3 コールドジョイント評価方法の提案	155
6.6 第6章のまとめ	156
参考文献	157
第7章 人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリートの品質向上に関する研究	159
7.1 第7章の概要	159
7.2 実験内容	160
7.2.1 実験構成及び概要	160
7.2.2 コンクリートの製造	161
7.2.3 使用材料	162
7.2.4 測定項目及び方法	163

7.3 「実験Ⅰ」の結果考察	167
7.3.1 フレッシュ性状	167
7.3.2 水分移動	167
7.3.3 凝結性状	168
7.3.4 床スラブの仕上げ作業性の評価	169
7.3.5 密度の上下分布	169
7.3.6 圧縮強度	170
7.3.7 透気性状	171
7.3.8 中性化抵抗性	172
7.4 「実験Ⅱ」の結果考察	173
7.4.1 フレッシュ性状	173
7.4.2 水分移動	173
7.4.3 凝結性状	175
7.4.4 床試験体内部の湿度	176
7.4.5 圧縮強度	176
7.4.6 透気性状	178
7.4.7 吸水性状	179
7.4.8 細孔径分布	179
7.4.9 水酸化カルシウム生成量	181
7.4.10 反射電子像による画像解析	181
7.5 第7章のまとめ	183
参考文献	184
第8章 結論	186

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究の背景及び目的

近年、温室効果による地球温暖化は、世界的な問題としてとらえられている。「IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第5次評価報告書」¹⁻¹⁾ (2014)によると、1880～2012年の世界平均気温は約0.85℃上昇した。これは2001年に発表された「IPCC 第3次評価報告書」で示されていた1901～2000年の100年当たり0.6℃の上昇傾向よりも大きくなっている。特に最近30年の各10年間の世界平均気温は、1850年以降のどの10年間よりも高温となっている。過去50年の気温の上昇は、自然の変動ではなく、人類が引き起こしたものと考えられる。今後、温室効果ガス濃度がさらに上昇し続けると、気温はさらに上昇すると予測されている。また、「IPCC 第5次評価報告書」によると、2100年末には温室効果ガスの排出量が最も少なく抑えられた場合(RCP2.6シナリオ)でも0.3～1.7℃の気温上昇、最も多い最悪の場合(RCP8.5シナリオ)には最大4.8℃の気温が上昇すると予測されている^{1-1) 1-2)} (いずれも、1986～2005年を基準とする)。日本において排出される温室効果ガスの90%以上は二酸化炭素であるが、メタンなどの他の温室効果ガス、とりわけフロンなどの人工の温室効果ガスは二酸化炭素の数千倍の温室効果があり、わずかな量でもその影響が心配されている¹⁻³⁾。

建築分野においても、地球温暖化に対する影響は大きな問題として認識されている。建築工事は、環境要因の影響を受けやすい施工現場で実施されるが、近年の地球温暖化に伴い夏期における施工環境は高温化かつ長期化の一途を辿っている^{1-4) 1-5)}。この傾向は今後も継続すると予想され、将来の建築生産への悪影響が懸念されるため、これに関する研究が重要な課題である。特に、建築材料の中で最も多く使用されているコンクリートはセメントの水和反応によって強度が発現され、硬化されたコンクリートの品質は初期材齢のコンクリートが接する周囲の温度によって大きく影響を受けることが一般的である。

コンクリートは、他の建築材料と異なり、フレッシュ状態で現場に搬入されて、環境に適した現場の品質管理により最終的に高品質の製品となる半製品(half-finished goods)としての特性を有している。本来、コンクリートは温度による品質変動が大きい材料であり、打込み後所要の品質を確保するためには、季節の特性を把握し、コンクリートの養生条件と環境を適切な範囲に維持して有害な作用を受けないように注意する必要がある。暑中コンクリート工事は、コンクリートの品質が気候条件(温度、相対湿度、風速及び直射一光など)により影響を強く受ける代表的な事例である。一般的に夏期の暑中環境下で打設、養生されたコンクリートの初期強度は、標準温度(20±2℃)と湿度(60±5%)で製造されたコンクリートの初期強度よりも高いが、これは高温によりセメントの水和反応が促進され、強度発現が早く進行されたことがその原因である。しかし、長期強度は、標準期に施工されたコンクリートよりも低下する。また、

強度以外にも温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れや、中性化などの耐久性の面でも品質上不利になる可能性がある。さらに、暑中環境ではコンクリートの凝結が早く、また表面の乾燥が速いため、仕上げがしにくい、プラスチック収縮ひび割れが発生しやすいなど、施工時の問題も多い。

暑中環境において高い外気温と強烈な日射の影響により変化されるコンクリートの特性を整理すれば、以下のとおりである。

- 材料とコンクリートの温度上昇
- 単位水量の増大
- 空気連行性低下・スランプロス
- 水和反応促進
- 凝結時間の短縮
- ブリーディング水量減少
- 表面水の蒸発
- 初期ひび割れの増大
- コールドジョイント発生
- 強度増進の鈍化・耐久性低下

以上の悪影響に対する対応策として、コンクリートを打設する時と打設直後にはできるだけコンクリートの温度が低くなるよう材料の取り扱い、混合、運搬、打設および養生などについて適切な措置を講じると同時に、作業員への配慮など人的影響に配慮する必要がある。

以上の背景から、暑中環境で製造・施工されるコンクリートに関して各種工事仕様書・指針類などが定められ、特別な管理ツールを適用するよう規定している。例えば、日本建築学会では「日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事」¹⁻⁶⁾や「暑中コンクリートの施工指針・同解説」¹⁻⁷⁾、土木学会では「コンクリート標準仕様書施工編」¹⁻⁸⁾など、関連規定に暑中コンクリートの対策を詳しく述べている。これらの関連規定を比較してみると、いずれも暑中コンクリートの品質管理が必要となる適用期間の目安として日平均気温 25℃以上、コンクリート温度の上限値は 35℃を基準としている¹⁻⁷⁾。JASS5 によると¹⁻⁶⁾、暑中コンクリートの適用期間に関しては過去の気象データを参考し日平均気温の平年値が 25℃を超える期間を基準として定めると書かれている。また、荷卸し時のコンクリート温度に関しては、原則として 35℃以下とし、35℃を超えないように材料・調合を変更したり、材料やコンクリートを冷却する場合は工事監理者の承認を受け、更に、35℃を超える場合に備えて、工事監理者とコンクリートの品質変化に対策を講じておくこととなっている¹⁻⁶⁾。しかし、これらの仕様書・指針類の規定値は絶対的なものではなく何らかの対策が施されていればその値を超えることも許容されるが、その具体的な対策や方法に関しては、仕様書・指針類に明記されていないのが現状である¹⁻⁹⁾¹⁻¹⁰⁾。実際の現場では、上記の標準仕様書や指針類と現場ごとに技術仕様書及び施工計画書等で現場を管理しているが、暑中コンクリートの品質管理項目に関して明確に理解していない現場も少

なくない状況にある。それで、管理者ごとに異なる経験とノウハウで現場を管理しており、品質が一定せず、様々な不具合が発生するなど、品質管理に大きな問題となっているのが実情である。

従って本研究では、暑中環境におけるコンクリート施工に関して、良好な品質を確保し不具合の発生を減らすために、様々な暑中環境条件の試験と品質管理項目の分析を行い、暑中環境における施工指針や施工計画書の作成に必要な具体的な品質管理に関する基礎資料の提示を目的としている。また、本研究は地球温暖化という世界的な問題に立向かう現時点で、国際的にも貢献できる研究であると考えられる。得られた成果は、将来の日本の暑中環境のみならず、温暖化の進行する世界各地での建築生産における品質向上に貢献することができると考えている。

1.2 研究の範囲及び方法

暑中コンクリート工事に関する既存の研究¹⁻¹¹⁾¹⁻¹²⁾¹⁻¹³⁾などは、実験室で直径10cm×高さ20cm程度の大きさの試験体を使用して人為的に一定に適用した温度環境下での実験を断片的に実施したものがほとんどであり、この場合実験結果を実際の現場に適用できない。しかも、実大レベルの模擬部材を用いて実際の暑中環境下における施工性や水和温度、強度発現、耐久性などのコンクリート特性を検討した研究は不足している実情である。また、同じ暑中環境であっても、従来の暑中環境である比較的激しくない「軽微な暑中期」と今後予想される一層過酷化する「極暑中期」のように分けて、それぞれの暑中環境下で変化するコンクリートの物性や品質管理対策について検討した事例は少ないと言える。従って、本研究では、気候変動により過酷化する近年の施工環境において、高温がコンクリートの特性に及ぼす影響について検討し、硬化されたコンクリートの品質を高めることができる品質管理技術について実大レベルで検討した。つまり、本研究では、柱、床スラブ、壁部材を模擬した試験体を対象として、暑中環境の程度による影響を検討するために、外気温30℃以上の「極暑中期」及び30℃以下の「軽微な暑中期」のように実験環境を想定し、それぞれに対して実験を行った。その詳細な内容は以下に示す。

暑中環境で施工されるコンクリートは、標準期に比べて、ブリーディング水量が少なく、早期に終了し、その一方で水分蒸発量は大きくなるため、コンクリートの表面は早期に乾燥状態になる。また、凝結も非常に早くなる。こういう打込み初期の水分移動及び凝結特性は、硬化後のコンクリートの品質にも大きく影響を及ぼす¹⁻¹⁴⁾。従って、実際の暑中環境（極暑中及び軽微な暑中）下で製造するコンクリートのブリーディング及び蒸発量を測定し、打込み後一定時間が過ぎた時点における表面含水率を把握し、その関係を分析した。同時に、プロクター貫入試験とN式貫入試験を行い時間経過に伴う凝結程度を検討した。最終的に、極暑中環境と軽微な暑中環境、そして標準環境で打ち込まれたコンクリートを対象とし、種々の初期水分移動と凝結特性データを得て、環境条件により異なる物性について整理した。

上記のフレッシュコンクリートの特性は、最終的に硬化コンクリートの強度や耐久性に強く影響を及ぼす。コンクリート温度が高いほど水和反応が促進され、初期材齢における強度増進が大きくなるが、長期材齢における強度の増進は一般に小さくなる。特に、初期養生を怠ると、暑中期には強度不足を生じる恐れがある。JASS5¹⁻⁶⁾において、構造体強度補正值 S を 6N/mm^2 とすることにより、コンクリート温度が高くなる暑中期間の長期強度増進の低下に対応しているが、暑中環境の程度に対する検討は行われていない状況である。本研究では、極暑中環境及び軽微な暑中環境下で製造されるコンクリートの強度管理を目的として、実際の暑中環境下で実大レベルの実験を行い、構造体コンクリートにおける温度変化、内部の水分量、水和反応、細孔構造などを検討し、暑中環境の様々の要因が構造体コンクリートの強度性状に及ぼす影響について調べた。最終的には、 S 値を検討することにより、関連規定値の妥当性を評価し、暑中環境の程度に応じて構造体コンクリートの強度品質を改善できる管理手法を提示した。

床スラブコンクリートは、外気に直接触れる面積が大きいいため、直射日光や風の影響を受けやすく、表面からの水分蒸発が甚だしい。このため強度低下やひび割れ発生などの極端な品質低下や、表面の密実性の低下による耐久性の低下が懸念される。これらに対する施工時の対策として積極的に養生を行うべきことは論を俟たない。伊藤らは、暑中環境におけるコンクリートの養生に関して詳細な検討を行い、養生は表面の乾燥が始まるブリーディング水の消失時期には開始する必要があること、その方法は失われる水分を積極的に供給する給水養生が望ましく、保水養生は次善の策であること、打込み翌日に養生を開始しても効果が少ないことなどを実験室実験の結果から提唱している¹⁻¹³⁾。しかし、養生の開始時期や継続期間の影響を実機レベルで体系的に検討した例は少ない。本研究では、表層での水分蒸発、水和反応が活発化する時期およびこれに及ぼす温度の影響を定量的に検討し、どの時点で開始すべきかを論理的に検証した。また、継続期間においても硬化したスラブ表層の密実性との関係から具体的な日数を提示している。最終的に、実際の現場条件を考えた上で採用できる養生方法について優先順位をつけて提案した。

柱、壁のような鉛直部材を夏期に施工する場合、コールドジョイントによるひび割れ及び耐久性の低下に対する対策が強く要求される。コールドジョイントは、先に打ち込んだコンクリートの上に次のコンクリートを同日に打ち込む際に、両者が一体とならない現象であり、現在は、これを防ぐためコンクリートの硬化開始前に打重ねを行うこととなっている。一般的な凝結試験で得られる始発以前に打ち重ねてもコールドジョイントが生じること、また、コールドジョイント発生において打重ね面の乾燥が影響を及ぼしていることを実大レベルで確認している¹⁻¹⁵⁾。壁体のコールドジョイント発生において打重ね面の乾燥が影響を及ぼしていることを実大レベルで確認し、乾燥防止や水分供給などの具体的な対策を検討した。また、コールドジョイントの発生を従来よりも的確に評価するための方法、ならびにコールドジョイントの発生を抑制するための品質管理基準について提案した。

柱や梁など構造部材の強度性状において、現在一般的に使用している材料のみでの対応では限界がある。よって、内部に多くの水分を含有できる人工軽量細骨材を、単なる砂の代替としてではなく、内部養生材として積極的に活用することを検討した。河川や海浜からの砂採取は環境面からも禁止される方向にあり、これを補う効果も期待できる。本研究では、材料置換のみならず、養生材料として人工軽量骨材の自己養生効果の有効性について、柱や床スラブなどの模擬部材を用いて検討した。最後に、人工軽量骨材を使用することによる品質改善効果について、人工軽量骨材の自己養生効果のメカニズムをセメントの水和反応の観点から明らかにし、品質とコストの両方を考慮した最適な混入量を提示した。

以上のように、高い外気温と強烈な日射の影響でコンクリートが乾燥しやすい条件になる暑中環境がフレッシュ状態及び硬化状態のコンクリートに及ぼす影響について具体的に検討した。なお、暑中コンクリートの対策として強度管理、養生管理、施工管理の様々な側面から広範かつ定量的な検討を行った。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めた以下の8章で構成されており、 1.1 に本研究のフローチャートを示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的、範囲と方法及び構成を示した。

第2章 暑中コンクリートに関する既往の研究

近年の地球温暖化による気候変化について調べて、年々過酷化する暑中環境がコンクリートに及ぼす影響について文献調査を行った。また、暑中コンクリートに関する世界各国の標準仕様書と関連規定およびガイドライン等を比較分析し、その結果を整理した。日本、韓国、アメリカ、イギリスの標準に対して、暑中コンクリート工事の定義及び適用期間、コンクリート温度上限値や施工上考慮事項などを比較検討した。

第3章 暑中コンクリートの初期水分移動及び凝結性状

気象条件により変化するフレッシュコンクリートの特性を検討するために、標準期（外気温20℃程度）、軽微な暑中期（同30℃未満）、極暑中期（同30℃以上）と想定した環境条件下で製造したコンクリートのフレッシュ性状と初期水分移動及び凝結特性を測定し、その関係を示した。

第4章 暑中環境で施工される構造体コンクリートの強度管理に関する研究

暑中環境で施工される構造体コンクリートの温度及び内部の水分挙動が強度発現に及ぼす影響について検討するために、極暑中環境及び軽微な暑中環境下で実大模擬試験体を用いた実験を行い、温度、含水率、結合水率、ポロシティを中心に測定し、強度性状との関係を検討、構造体強度補正值を評価した。また、暑中環境に対応できる構造体コンクリートの強度管理方法を提示した。

第5章 暑中環境で施工される床スラブコンクリートの養生方法に関する研究

暑中コンクリートの養生方法に関して、養生方法と養生開始時期および養生期間が硬化体の強度及び耐久性状に及ぼす影響について、実大レベルの床スラブ試験体を用いて検証した。また、品質向上に最も有効な養生方法、ならびに実際の現場における適用可能な範囲の養生方法について示した。

第6章 暑中環境で施工される壁体コンクリートのコールドジョイントに関する研究

暑中環境で施工される壁体コンクリートにおいてコールドジョイントの発生に影響を及ぼす様々な要因を総合的に検討することを目的とし、コンクリートの運搬時間と打重ね時間間隔により異なる打重ね面の品質を検討した。また、壁体コンクリートのコールドジョイントによる品質低下に対する対策及び適切な評価方法と品質管理方法について示した。

第7章 人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリートの品質向上に関する研究

人工軽量骨材の自己養生効果に着目し、フレッシュ状態では人工軽量骨材の補水性が初期水分移動及び凝結特性に及ぼす影響について検討し、床スラブの表面仕上げ作業性に関して評価した。硬化体においては、強度及び耐久性に及ぼす人工軽量細骨材の有効性について検討した。

第8章 結論

本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題を示した。

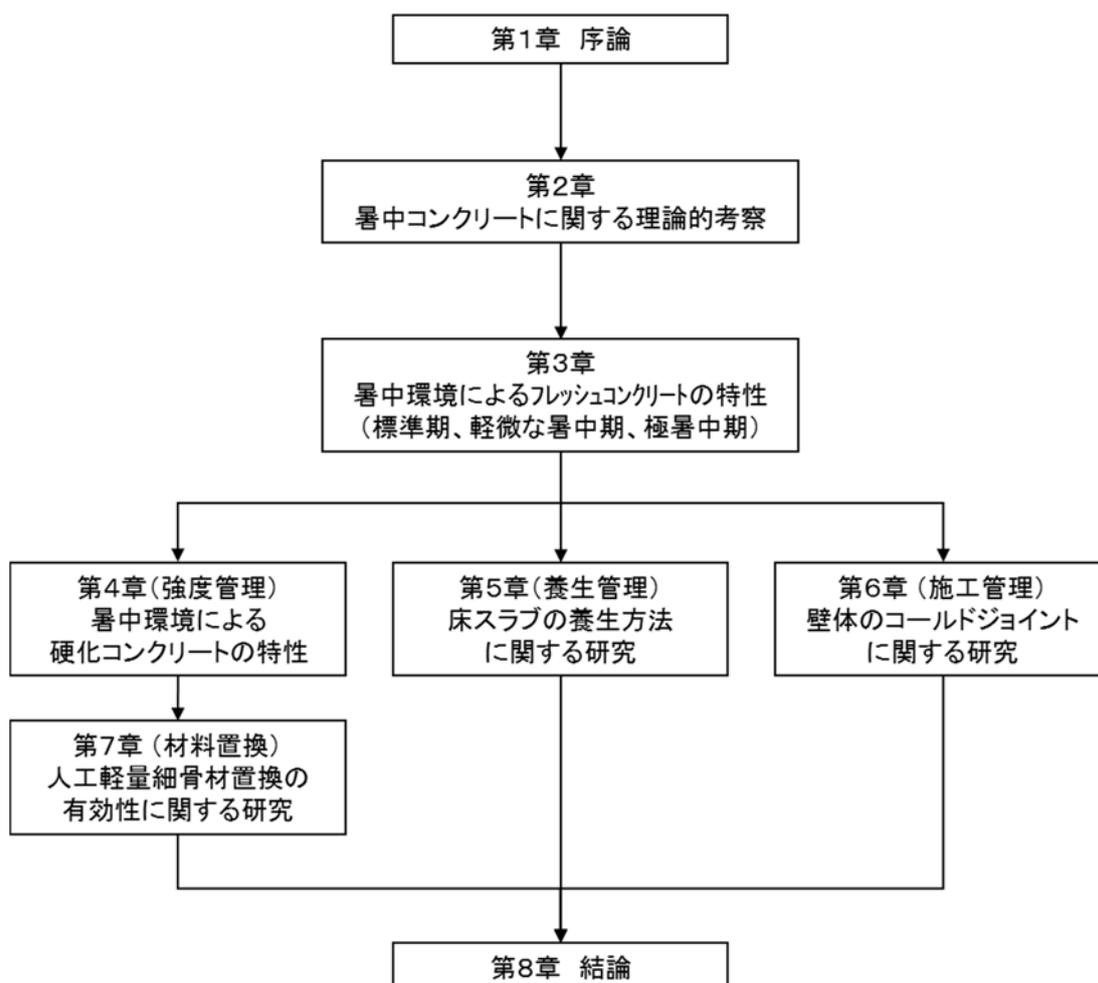


図 1.1 本研究のフローチャート

参考文献

- 1-1) Intergovernmental Panel on Climate Change : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis (Working Group I), 2013
- 1-2) 全国地球温暖化防止活動推進センター : IPCC 第 5 次評価報告書特設ページ, <http://jccca.org/ipcc/index.html>
- 1-3) 気象庁 : 気候変動監視レポート 2016 「世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況」, 2017
- 1-4) 気象統計情報, 気象庁, 2012
- 1-5) 特集暑中コンクリート対策温暖化により暑中コン適用期間は長期化, コンクリートテクノ, Vol.29, No.7, 2010
- 1-6) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015.07
- 1-7) 日本建築学会 : 暑中コンクリートの施工指針・同解説, 2000.09
- 1-8) コンクリート標準仕様書施工編, 土木学会, 2012
- 1-9) 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清 : 日本建築学会建築工事標準仕様書における暑中コンクリートの対策, コンクリート工学, Vol.51, No.5, pp.384-389, 2013.05
- 1-10) 気候変動下における暑中コンクリート工事の課題と対策, 日本建築学会材料施工委員会, 88p, 2014.09
- 1-11) 重藤和之 : 暑中コンクリートの材令 119 日までの長期強度性状とスランプ性状に関する実験, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, Vol.32, pp.101-104, 1991.03
- 1-12) 石塚良一, 森永繁 : 暑中コンクリートの養生方法に関する研究 その 1 強度に及ぼす影響, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol.10, pp.29-32, 1996.03
- 1-13) 伊藤是清ほか : 暑中コンクリートにおける養生方法がコンクリートの強度および耐久性に及ぼす影響に関する研究, 九州東海大学工学部建築学科, 森永研究室卒業論文, 1998.01
- 1-14) 中島草太, 小山智幸, 湯浅昇, 小山田英弘, Victor Sampebulu, 原田志津男, 伊藤是清, 陶山裕樹, 松本侑也 : 暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 —強度発現に及ぼす温度と水分の影響について—, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, Vol.22, pp.167-174, 2012.07
- 1-15) 申相澈, 小山智幸, 本田悟, 伊藤是清, 小山田英弘, 湯浅昇, 原康隆 : 暑中環境で施工される鉛直部材のコールドジョイントに及ぼすコンクリート打重ね時間間隔の影響, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, Vol.30, pp.51-60, 2016.07

第2章

暑中コンクリートに関する既往の研究

第2章 暑中コンクリートに関する既往の研究

2.1 近年の地球温暖化による気候変化

2.1.1 世界における平均気温の変化

図 2.1 は、世界の年平均気温の変化（1891～2016 年）を示したものである。世界の年平均気温は、様々な変動を繰り返しながら上昇しており、上昇量は 100 年あたり 0.72°C である²⁻¹⁾²⁻²⁾。北半球、南半球ともに最も高い値になった。北半球、南半球ともに年平均気温は上昇しており、上昇量はそれぞれ 100 年あたり 0.77°C 、 0.68°C である。このように地球の平均気温は、徐々に高くなっており、特に北半球の中・高緯度地域は過去長期的な寒冷化傾向にあったが、20 世紀以降の年平均気温の上昇がその傾向を反転させたことがわかる²⁻³⁾。なお、2016 年の世界の年平均気温と 1981～2010 年の平均気温からの差は、 $+0.45^{\circ}\text{C}$ （北半球： $+0.59^{\circ}\text{C}$ 、南半球： $+0.31^{\circ}\text{C}$ ）で、統計開始年である 1891 年以降最も高い値となっており、2014 年以来 3 年連続の高温記録の更新となった。2016 年の世界の年平均気温が特に高くなった要因の一つは、2014 年夏から 2016 年春まで続いたエルニーニョ現象の影響が考えられる²⁻¹⁾。

図 2.2 と図 2.3 に緯度経度を 5 度ごとに見た年平均気温変化傾向を示す²⁻¹⁾。図 2.2 は、1891～2016 年、図 2.3 は 1979～2016 年の期間の変化傾向であり、10 年あたりの変化量を示している。図から見ると、長期的な統計ではほとんどの地域で上昇傾向がみられる。短期的な統計では地域的な変動が現れやすいため一部地域では下降傾向がみられるものの、最近の約 40 年の上昇率（図 2.3）は多くの地域でそれ以前と比べてより大きくなっている。これらの年平均気温の経年変化には、二酸化炭素などの温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化の影響に、数年～数十年程度で繰り返される自然変動が重なって現れているものである。

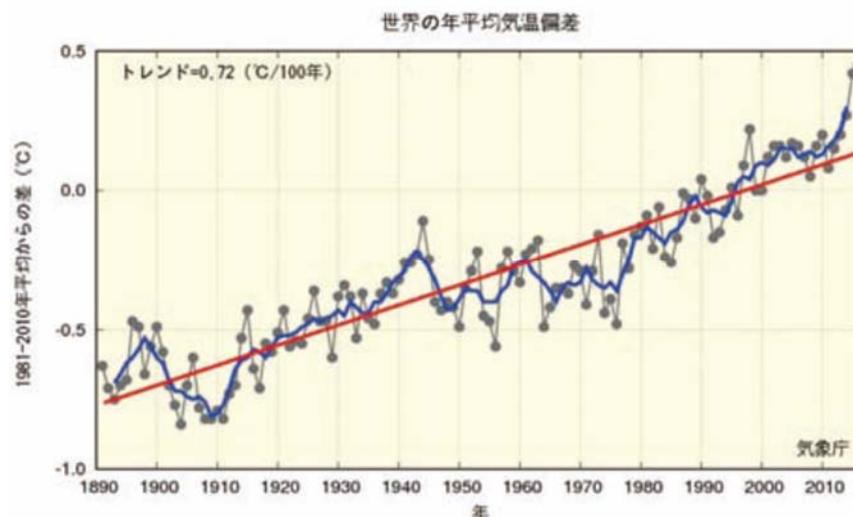


図 2.1 世界の年平均気温の変化²⁻¹⁾

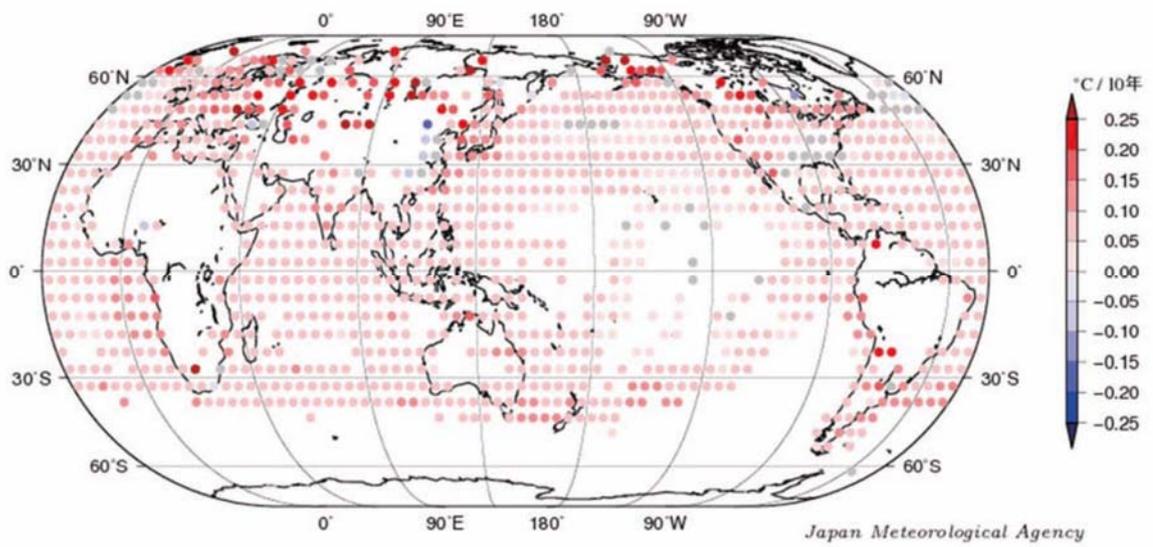


図 2.2 過去約 130 年の年平均気温の変化傾向（1891～2016 年）²⁻¹⁾

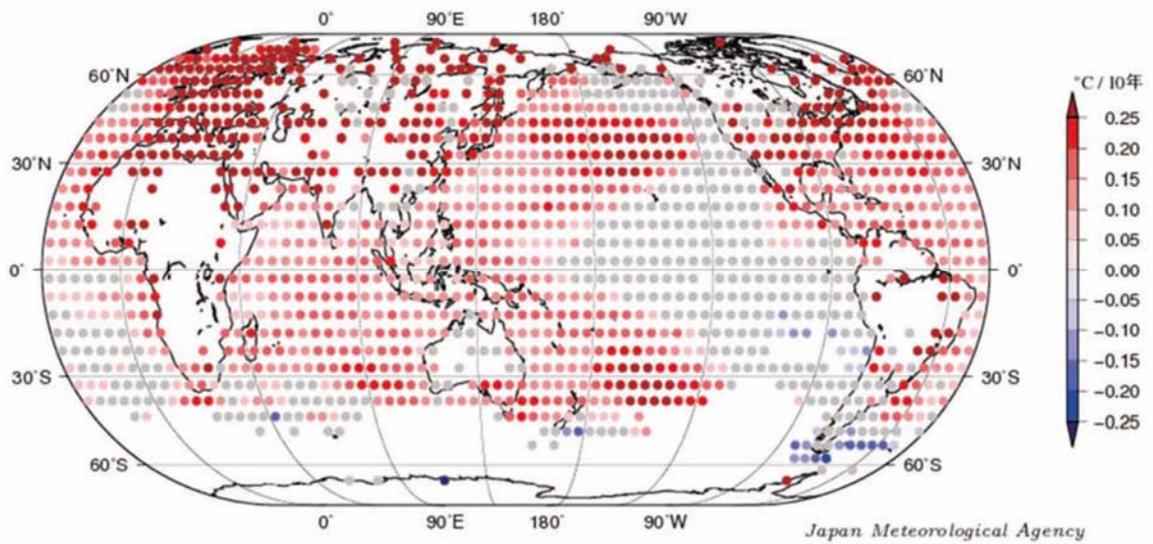


図 2.3 過去約 40 年の年平均気温の変化傾向（1979～2016 年）²⁻¹⁾

2.1.2 日本における平均気温の変化

図 2.4 に日本における 1898～2016 年の年平均気温の偏差を示す²⁻¹⁾。2016 年の日本の年平均気温の偏差は+0.88℃で、1898 年以降で最も高い値となっており、世界の平均気温上昇量より 0.43℃高くなっている。様々な変動を繰り返しながら日本の年平均気温は上昇しており、上昇率は 100 年あたり 1.19℃である。季節別には、それぞれ 100 年あたりで、冬は 1.11℃、春は 1.38℃、夏は 1.08℃、秋は 1.20℃の割合で上昇している。1940 年代までは比較的低温の期間が続いたが、その後上昇に転じ、1960 年頃を中心とした高温の時期、それ以降 1980 年代半ばまでのやや低温の時期を経て、1980 年代後半から急速に気温が上昇した。日本の気温が顕著な高温を記録した年は、おおむね 1990 年代以降に集中している。全体的な傾向は、世界の年平均気温変化と同様であるが、世界平均気温より高いことは疑いの余地がない。

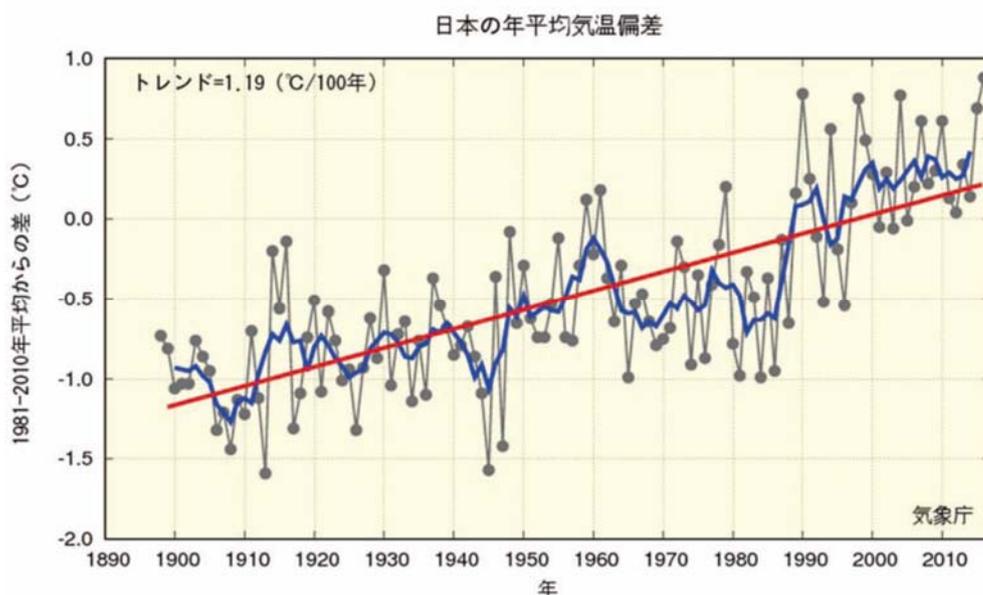


図 2.4 日本における年平均気温の経年変化（1898～2016 年）²⁻¹⁾

2.1.3 日本近海の海面水温の変化

気象庁が収集している船舶やブイ等の現場観測データと 100 年以上にわたる海面水温のデータ（COBE-SST）を用いて、日本近海における 100 年あたりの海域別海面水温の上昇率を求めた²⁻⁴⁾。同図では、海面水温の特性が類似している 13 の海域に分けられている。図 2.5 に日本近海（海域別）の年平均海面水温の長期変化傾向を示す。日本近海における、2016 年までのおよそ 100 年間にわたる海域平均海面水温の上昇率は、+1.09℃/100 年となっており、北太平洋全体で平均した海面水温の上昇率（+0.50℃/100 年）よりも大きく、日本の気温の上昇率（+1.19℃/100 年）と同程度の値となっている。海域別に多少差異はあるが、全体的に海面水温が大きくなっている。

2.1.4 日本における日最高気温と日最低気温の変化

図 2.6 と図 2.7 は、日最高気温 30℃以上及び 35℃以上となった年間日数の経年変化を示したものである。30℃、35℃ともに、統計期間中増加する傾向が現れた。図 2.8 と図 2.9 に日最低気温 0℃未満及び 25℃以上となった年間日数の経年変化を示す。日最低気温が 0℃未満となる日数は、統計期間 1931～2016 年で減少しており、日最低気温が 25℃以上となった日数は同期間で増加している。以上から、日最高気温と日最低気温両方が上昇傾向にあることが認められる。

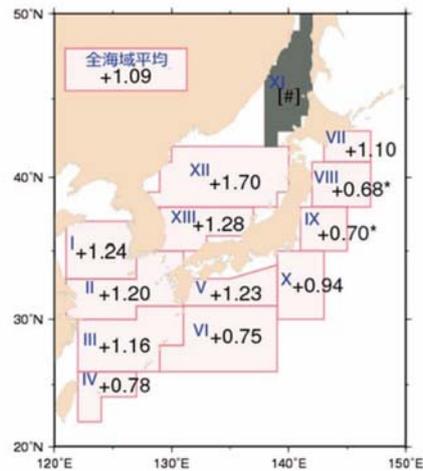


図 2.5 日本近海の海域平均海面水温の変化傾向 (℃/100 年)

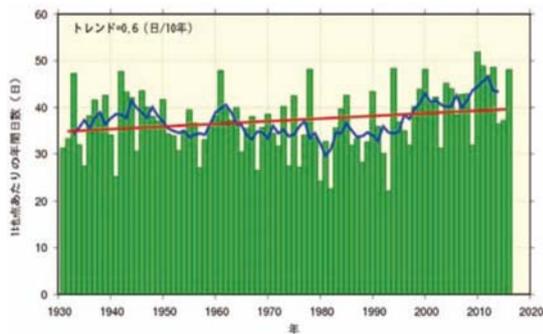


図 2.6 日最高気温 30℃以上の年間日数

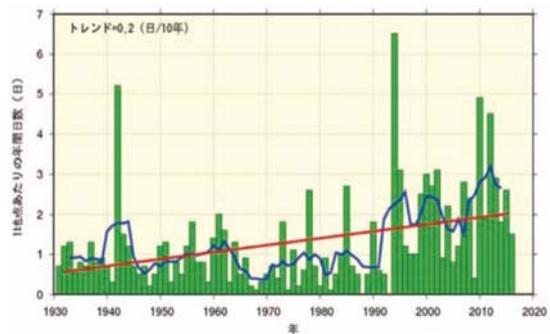


図 2.7 日最高気温 35℃以上の年間日数

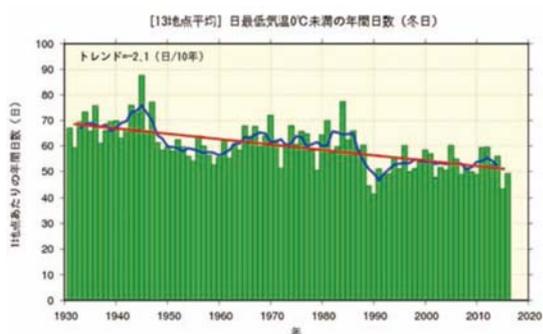


図 2.8 日最低気温 0℃未満の年間日数

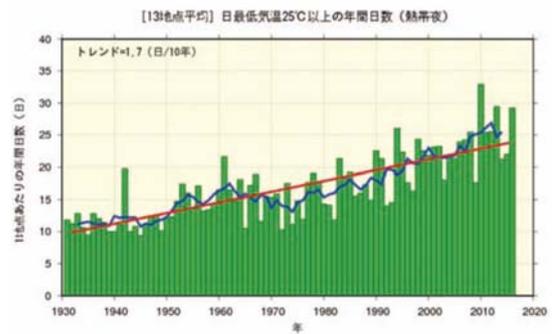


図 2.9 日最低気温 25℃以上の年間日数

2.1.5 日本における暑中期間の変化

表 2.1 に JASS5 に示している、代表的な都市（東京、大阪、福岡）について過去の気象データから算出した日平均気温の平年値が 25℃を超える期間を示す。なお、JASS5 の改定により算出に用いた期間は、2003 年度版では 1961～1990 年、2009 年度版では、1971～2000 年、2015 年度版は 1981～2010 年である。いずれの都市においても JASS5 の改定とともに暑中期間の日数は増えており、このことから暑中環境は徐々に激しくなっていることがわかる。1981～2010 年（2015 年度版 JASS5）における日平均気温が 25℃を超える日数は、1961～1990 年の期間（2003 年度版 JASS5）と比べて、いずれも 6～7 日程度増加している。

表 2.2 は、最新版 JASS5（2015 年版）で示している 1981 年から 2010 年までの気象データを用い、各 10 年の平年値が 25℃を超える期間及び日数を示したものである。算出方法は、通常の平年値と同様に KZ フィルターを用いて移動平均を 3 回繰り返すこととした。同期間の 30 年平年値（表 2.1 参照）に対して各 10 年間の暑中期間を比べると、1981～1990 年では暑中日数が少なく、1991～2000 年の期間においてはほぼ同程度であったが、2001～2010 年の暑中日数は 9 日程度長く

表 2.1 日平均気温が 25℃を超える期間（JASS5、過去 30 年間の平年値）

地名	JASS5 の改定年度 ¹⁾	日平均気温の平年値が 25℃を超える期間		
		始まり	終わり	暑中日数
東京	2003	7月14日	9月6日	55日
	2009	7月13日	9月8日	58日
	2015	7月10日	9月9日	62日
大阪	2003	7月3日	9月11日	71日
	2009	7月2日	9月12日	73日
	2015	6月30日	9月15日	78日
福岡	2003	7月4日	9月9日	68日
	2009	7月2日	9月9日	70日
	2015	7月1日	9月12日	74日

1) 基準となるデータ：2003 年度版 1961～1990、2009 年度版 1971～2000、2015 年度版 1981～2010

表 2.2 日平均気温が 25℃を超える期間（過去 10 年間の平年値）

期間	日平均気温の平年値が 25℃を超える期間		
	東京	大阪	福岡
1981～1990	7月15日～9月7日 (55日)	7月5日～9月12日 (70日)	7月4日～9月9日 (68日)
1991～2000	7月9日～9月9日 (63日)	6月29日～9月15日 (79日)	7月2日～9月11日 (72日)
2001～2010	7月3日～9月13日 (73日)	6月25日～9月19日 (87日)	6月26日～9月16日 (83日)

なっている。10年間の平年値から算出した暑中期間の増加傾向は、標 2.1 で示した JASS5 の改定により増えた暑中日数より多く、近年の暑中環境がさらに過酷化・長期化されることが認められた。現行の JASS5 においては、気温上昇があまり激しくなかった 1980 年代のデータ（図 2.4 参照）まで含めて 30 年の平年値としているため、近年の暑中環境について現状を反映した暑中期間であるとは言えにくいと考えられる。従って、暑中期間の設定においては、近年の気温上昇の加速化及び将来の激しい暑中環境を考えながら対応する必要がある、直近の 10 年間もしくは 20 年間の気象データから算出するなど安全側の設定とすることが望ましい。

また、図 2.10 と図 2.11 に各都市における日平均気温が 25℃及び 30℃を超える期間を示す。図からわかるように、日平均気温が 25℃を超える期間は長くなっており、そのうち 30℃を超過する日数も長期的に増加する傾向にある。1981 年以降日平均気温が 30℃を超える日数は、東京では最大 20 日程度、大阪と福岡では最大 40 日に近い期間となった。本研究で想定している 30℃以上の極暑中期の範囲となる暑中日数は短くなく、将来にもっと長期化されることを考慮し、施工品質低下に対応する必要がある。

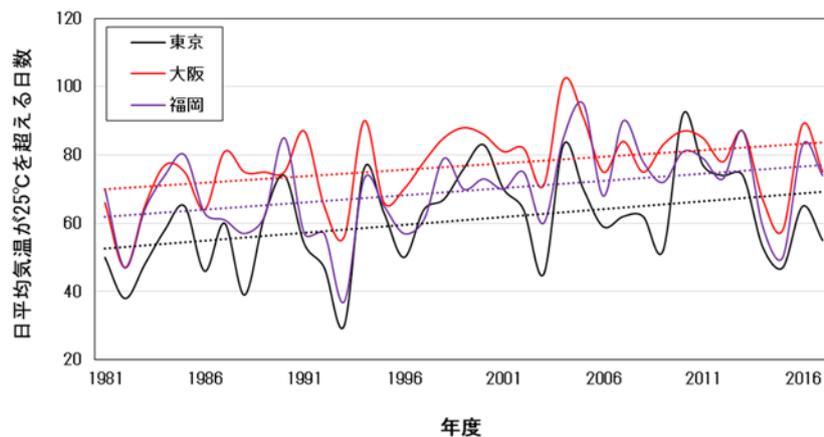


図 2.10 各都市における日平均気温が 25℃を超える日数（1981～2017）

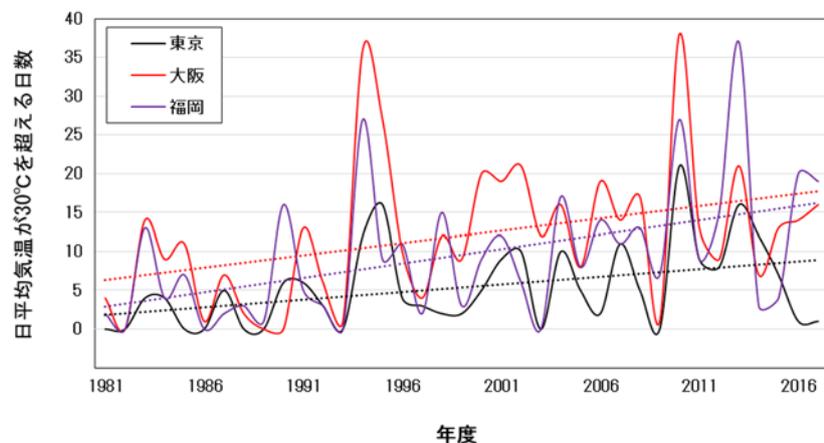


図 2.11 各都市における日平均気温が 30℃を超える日数（1981～2017）

2.1.6 将来における気温変化の予測

IPCC 第4次評価報告書で使用した SRES シナリオ (Special Report on Emission Scenario) の代わりに、IPCC 第5次評価報告書では、RCP シナリオ (Representative Concentration Pathways, 代表濃度経路シナリオ) を新たなシナリオとして採用し、これに基づいて気候の予測や影響評価等を行っている²⁻⁵⁾。図 2.12 に4つの RCP シナリオによる将来の世界平均地上気温の予測値を示す。全ての RCP において、世界平均気温は 21 世紀にわたって上昇する傾向にあり、21 世紀半ば頃から、地球温暖化の速度はシナリオに強く依存し始める。1986~2005 年と比較した 2081~2100 年の世界平均地上気温の上昇量は、RCP シナリオにより異なるが、いずれも気温上昇を予測している。それぞれの予測値は、0.3°C~1.7°C (RCP2.6) , 1.1°C~2.6°C (RCP4.5) , 1.4°C~3.1°C (RCP6.0) , 2.6°C~4.8°C (RCP8.5) である。

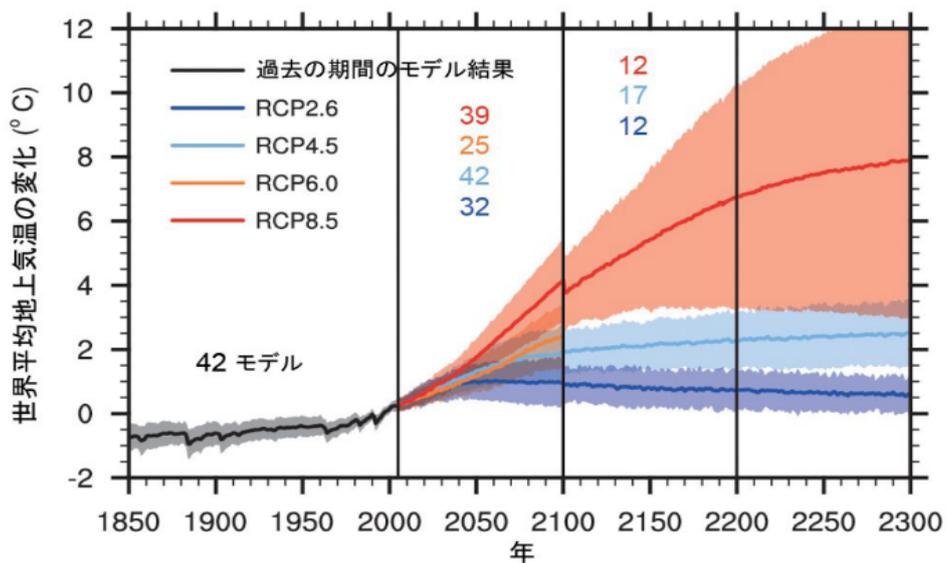


図 2.12 RCP シナリオによる将来の気温予測

2.1.7 2.1節のまとめ

近年の地球温暖化による気候変化について調査を行い、以下の結果を得られた。

- 1) 世界の年平均気温の上昇量は 100 年あたり 0.72°C であり、日本の場合はそれより高い 1.19°C で徐々に上昇傾向を持続してきた。特に、最近の約 40 年の上昇率は多くの地域でそれ以前と比べてより大きくなっている。
- 2) 日本における 2016 年の年平均気温は、統計開始年である 1898 年以降最も高い値となっており、1981~2010 年の平均気温からの差は、 $+0.88^{\circ}\text{C}$ で、世界の平均気温上昇量より 0.43°C 高い。また、日本近海における年平均海面水温も、気温上昇量と同程度のレベルで上昇している。
- 3) 日本において、日最高気温 30°C 以上及び 35°C 以上となる年間日数は年々増加しており、日最低気温が 0°C 未満となる日数は減少、日最低気温が 25°C 以上となる日数は同期間で増加傾向にある。
- 4) JASS5 で提示している暑中コンクリート工事の適用期間は、過去 30 年の日平均気温の平年値から算出したことであるが、最近の暑中環境を代表するには無理がある。それで、近年の急速な気温上昇を反映して算出する方法が安全の側面でも望ましい。
- 5) 日平均気温が 30°C を超える日数は、長期的に増加傾向にあり、この極暑中期に対する対策を立てて対応する必要がある。
- 6) 将来の気候変化においては、温室効果ガスの排出量が最も少なく抑えられた場合 RCP2.6 シナリオでも $0.3\sim 1.7^{\circ}\text{C}$ の気温が上昇し、最も多い最悪の RCP8.5 シナリオの場合には $2.6\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ の気温が上昇すると予測されている。

2.2 暑中環境におけるコンクリートの特性

2.2.1 コンクリートの温度

JASS5 によれば、コンクリートの荷卸し時の温度は 35℃以下と規定しているが、コンクリートの練上がり温度に関しては上限値を定めず、外気温や輸送時間を考慮したうえで、荷卸し時に 35℃を超えないように適切に温度管理を行えばよいことにしている。しかし、高い気温や日射の影響で輸送中のコンクリート温度が上昇することから、荷卸し時の温度はさらに高くなる。暑中環境下におけるコンクリートの性質の変化は温度が上昇するに従って徐々に変化する性質のものであるため、最初の練上がり温度より管理をする必要がある。JASS5 によると、練上がり時または荷卸し時のコンクリート温度は式 (2.1) を用いて算出する²⁻⁶⁾。

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_r + \beta) \cdot \exp(-\alpha t) + \theta_r \quad \text{式 (2.1)}$$

ここに、

$\theta(t)$: 時刻 t におけるコンクリート温度 (°C)

θ_0 : 式 (2.2) で求められる温度 (°C)

θ_r : 外気温(アジテータドラム内の空気温度) (°C)

α : 外気とコンクリートとの熱の伝達の割合を表す係数

β : セメントの水和熱および材料間の摩擦熱による温度上昇量 (°C)

t : 輸送時間 (時間)

ここに、

$$\theta_0 = \frac{\alpha_c \theta_c W_c + \alpha_a \theta_a W_a + \alpha_m \theta_m W_m}{\alpha_c W_c + \alpha_a W_a + \alpha_m W_m} \quad \text{式 (2.2)}$$

w_c, θ_c, α_c : セメントの質量 (kg), 温度(°C), 比熱(0.836kJ/kg・K)

w_a, θ_a, α_a : 骨材の質量(kg), 温度(°C),

下式から算出される含水状態での骨材の比熱(kJ/kg・K)

w_m, θ_m, α_m : 水の質量(kg), 温度(°C), 比熱(4.18kJ/kg・K)

$$\alpha_a = \frac{\alpha_{a0} + \alpha_m \mu_a + \alpha_m f_a (1 + \mu_a)}{(1 + f_a)(1 + \mu_a)}$$

α_{a0} : 絶乾状態の骨材の比熱(0.836kJ/kg・K)

μ_a : 骨材の吸水率(%)×1/100

f_a : 骨材の表面水率(%)×1/100

また、コンクリート温度の経時変化は、外気温とコンクリート温度との差に比例して生じると仮定すれば式 (2.3) が得られる²⁻⁷⁾。

$$\theta(t) = (\theta_0 - R(0) + \beta_1 + \beta_2) \cdot \exp(-\alpha t) + R(t) \quad \text{式 (2.3)}$$

$$R(t) = \frac{A_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0 - \tan^{-1}(\omega_0 / \alpha))}{\{1 + (\omega_0 / \alpha)^2\}^{1/2}} + B_0$$

ここに、

$\theta(t)$: コンクリート温度

α : 外気とコンクリートとの熱の伝達の割合を表す係数 (=0.4~1.8)

β_1 : セメントの水和熱による温度上昇量 (°C)

β_2 : 摩擦熱による温度上昇量 (°C)

t : 輸送時間 (時間)

A_0 : 気温の振幅 = 日較差

B_0 : 平均気温

B_0 は日平均気温を用いてよい。外気温度を一定 θ_r と仮定する場合は $R(0)=R(t)=\theta_r$ とする。図 2.13 に各種環境下における輸送中のコンクリート温度の変化について、上式で求められた解析値と実測値の比較を示しているが、よく一致していることがわかる。

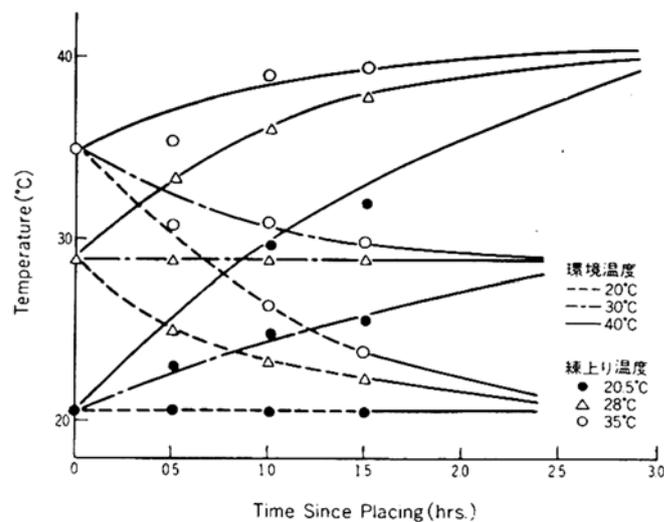


図 2.13 各種環境下における輸送中のコンクリート温度の変化²⁻⁸⁾

2.2.2 スランプ

図 2.14 にコンクリートの練上がり温度とスランプの関係を示す²⁻⁹⁾。スランプの温度依存性が極端に大きく、図中の関係式から練上がり温度が高いほど温度の増加に対するスランプ低下の割合が大きくなることから分かる。例えば、練上がり温度 1°C の変化に対するスランプの変化は、20°C～25°C の範囲では約 0.45cm、35°C 近傍では約 1cm である。従って、同一スランプを得るために必要な単位水量は高温ほど増大する。一般にコンクリート温度が高くなるほど時間経過に伴うスランプの低下は大きくなる。その一例として、図 2.15 に恒温実験室内における練り置き時間とスランプの関係を示す²⁻¹⁰⁾。概して、コンクリート温度が 30°C 程度の高温になるとスランプ低下が著しくなる。そして 20°C のスランプ低下との間に、経過時間 60 分以内の 1cm～2cm 程度の差異が 60 分を超えるとさらに増大することがうかがえる。輸送および運搬中のスランプ低下を補うためには単位水量を大きくするなどの対策が取れるが、増大しすぎるとコンクリートの品質低下につながるため注意が必要である。

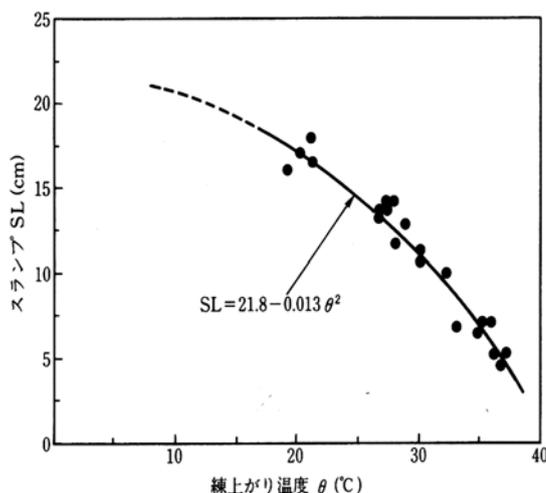


図 2.14 練上がり温度とスランプの関係（恒温室内実験）²⁻⁹⁾

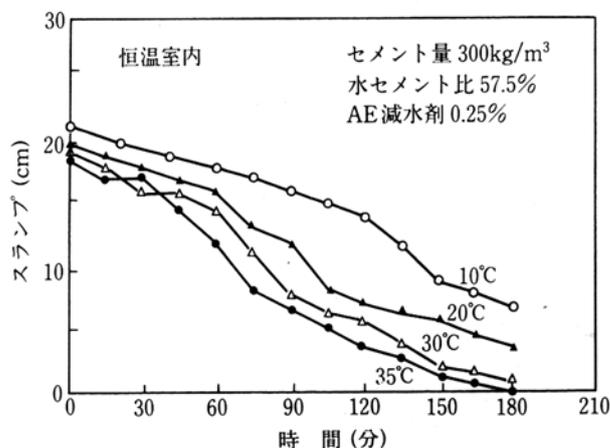


図 2.15 スランプの経時変化（恒温室内実験）²⁻¹⁰⁾

2.2.3 空気量

図 2.16 に練上がり温度の空気量への影響を示す²⁻¹¹⁾。練上がり温度が高くなるほど空気の流れ性は低下する。コンクリート温度 20℃の場合を基準として練上がり温度が 10℃高くなると、およそ 2 割ほど空気量は減少する。特に高温下では、連行された空気泡は粗大化したり消失したりするなど不安定となりやすい傾向がある。

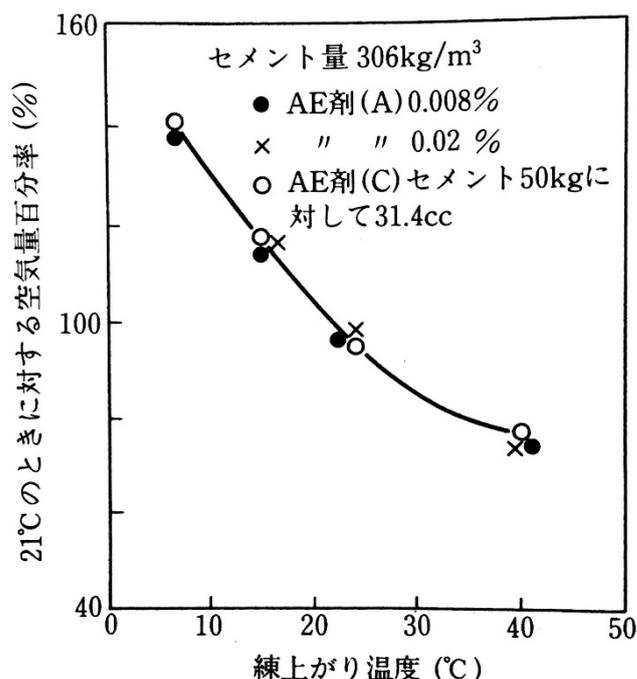


図 2.16 練上がり温度の空気量への影響²⁻¹¹⁾

2.2.4 蒸発及びブリーディング

図 2.17 に温度条件による水分蒸発速度の経時変化を示す²⁻¹²⁾。みられるように、湿度が一定の場合、打込み後数時間は外気温が高いほどコンクリート表面からの水分蒸発速度は大きくなる。また、打込み後 2~3 時間までは練上がり時のコンクリート温度が高いほど水分蒸発速度は大きな値を示す。図 2.18 に各種セメント及び温度によるブリーディング率を示す²⁻¹³⁾。暑中環境では、外気温とコンクリート温度が高く、コンクリート表面の水分蒸発速度が速いためブリーディングは早期に終了し、その量も少なくなる。図から見ると、コンクリート温度が高いほどブリーディング率が減少する。この結果は、セメント種類に関わらず同様の傾向を示している。結局、コンクリート温度が高いほど水分蒸発速度は大きくなり、これに加えてブリーディングが減少するため、コンクリート表層部の乾燥は促進される。また、初期の収縮は速やかに生じる。このような作用は、初期ひび割れや強度増進に影響を及ぼす。

図 2.19 に ACI (American Concrete Institute) で提示しているコンクリート温度, 気温, 湿度, 風速とコンクリート表面からの水分蒸発速度との関係を示す²⁻¹⁴⁾。湿度が一定の場合, 外気温が高くコンクリート温度が高くなるほど, また, 風が作用すると, コンクリート表面からの蒸発速度量は多くなり, また, 高温などの条件と組み合わせられるとさらに悪影響が顕在化する。表面部の水分の急激な蒸発とコンクリートの沈降によって打込み後 2~3 時間で表層部にプラスチックひび割れが発生することがある。

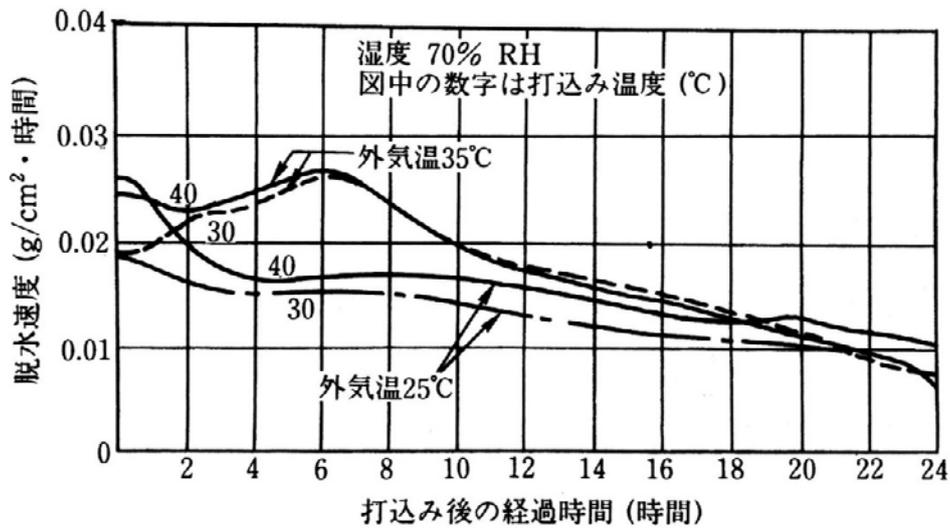


図 2.17 水分蒸発速度の経時変化²⁻¹²⁾

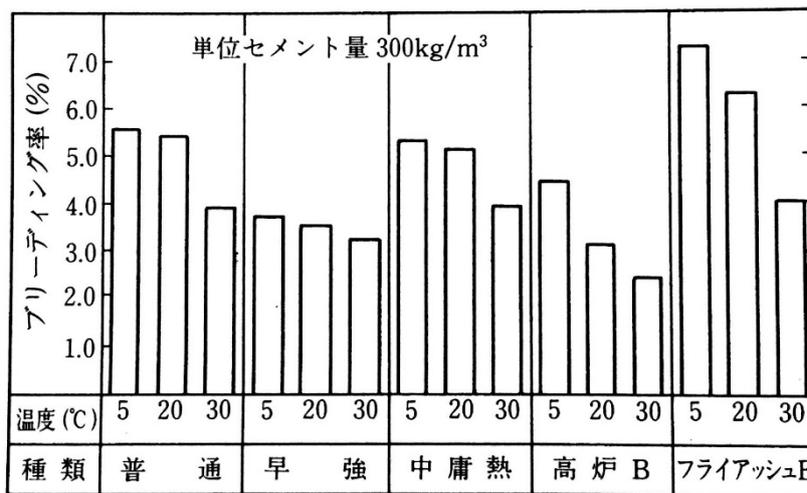


図 2.18 各種セメント・温度別のブリーディング²⁻¹³⁾

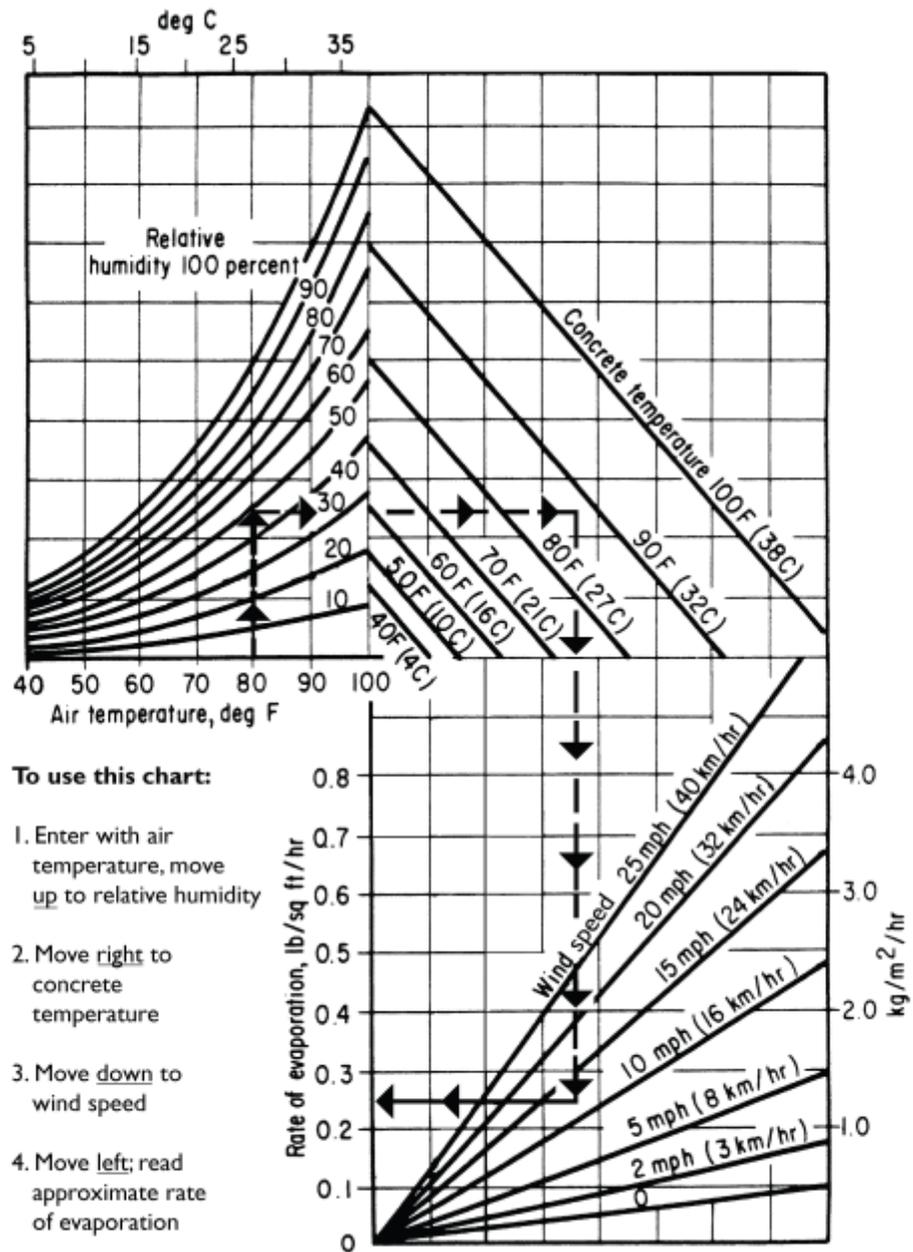


図 2.19 コンクリート温度, 気温, 湿度, 風速と
コンクリート表面からの水分蒸発速度との関係²⁻¹⁴⁾

2.2.5 凝結及び水和

図 2.20 にコンクリートの貫入抵抗値に及ぼす温度の影響を示す²⁻¹⁵⁾。コンクリート温度が高いほどセメントの水和反応における誘導期は短縮され、コンクリートの凝結は早められて、それに次ぐ硬化が開始する時期が早められる。一定貫入抵抗値に達するに要する時間を、20℃の場合と比べると、30℃ではおよそ20%、40℃では35%程度短縮される。

図 2.21 に水セメント比 57%条件における普通ポルトランドセメント中の C₃S の温度別水和率を示す²⁻¹⁶⁾。温度はコンクリートの水和に最も大きく影響を及ぼす。セメントの初期水和段階における温度は、ポルトランドセメントの水和及び硬化体の強度を最も支配する C₃S の加速期に強く影響し、凝結・硬化と初期強度の発現に影響を大きく及ぼすことになる。反面、後期反応においては、水和の速さは一方的に低下し続けるため、高温が水和反応の速さに及ぼす影響は小さくなっていく。結局、C₃S の水和は、初期段階では高温ほど速く進むが、材齢の進行につれて、逆に高温ほど水和反応の進行が鈍化する傾向を示す。

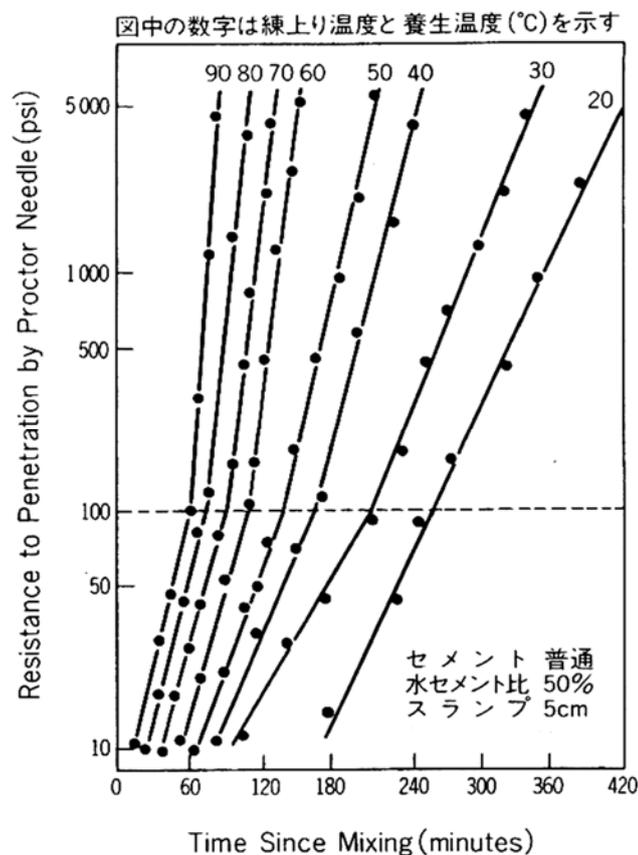


図 2.20 貫入抵抗値の温度別の測定結果²⁻¹⁵⁾

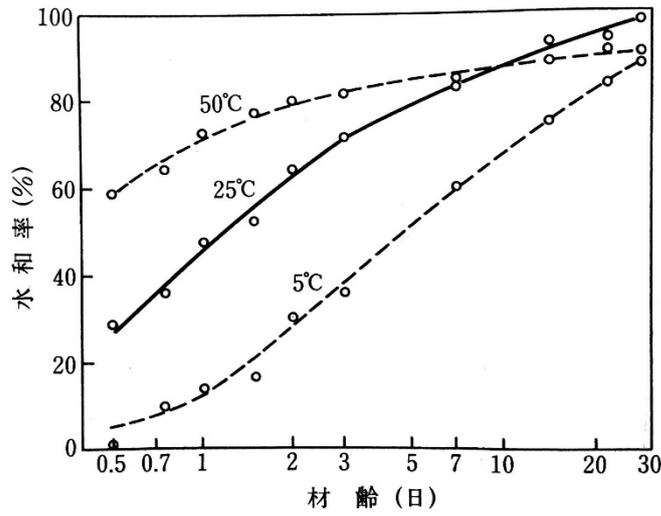


図 2.21 普通ポルトランドセメント中の
C₃S の温度別水和率 (W/C57%)²⁻¹⁶⁾

2.2.6 プラスティックひび割れ

プラスチックひび割れに対するコンクリートの変形能力は、図 2.22 に示すように水分蒸発速度がピークを迎えるのとほぼ同時期に最小となり、また温度が高いほど小さくなる²⁻¹⁷⁾。

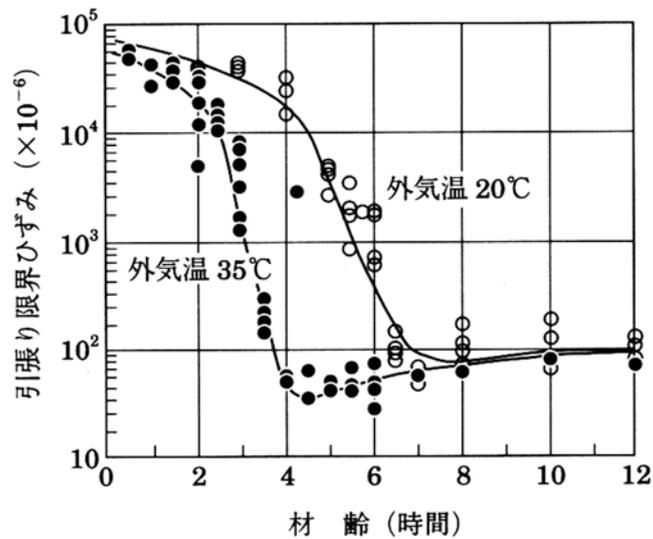


図 2.22 引張り限界ひずみと外気温の関係²⁻¹⁷⁾

2.2.7 含水率分布

図 2.23 にコンクリート表層部から内部にかけての含水率分布を示す²⁻¹⁸⁾。高温になるほど同一乾燥期間内における含水率が全体に低く、表面近傍の含水率分布が急であり、温度が高いほど乾燥が速やかである。

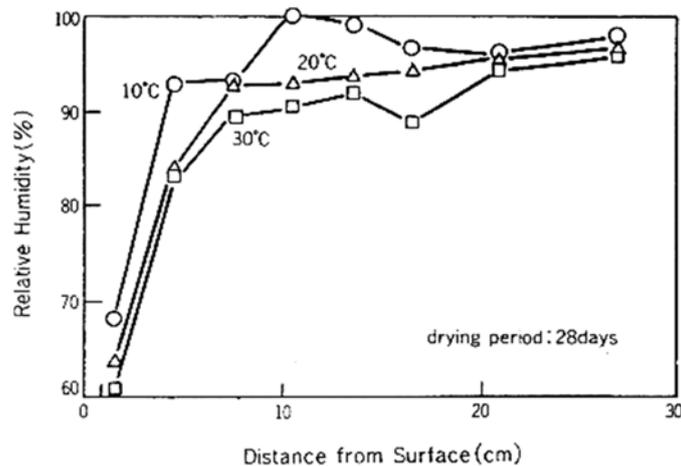


図 2.23 含水率分布²⁻¹⁸⁾

圧力が一定の場合の 1 次元非線形拡散方程式は次のように与えられる。

$$\text{基礎方程式} \quad \partial R / \partial t = (D \partial R / \partial x) \partial x \quad \text{式 (2.4)}$$

$$\text{初期条件} \quad R(x)_{t=0} = 100$$

$$\text{境界条件} \quad \partial R / \partial n + \alpha_m (H_s - H_0) = 0$$

ここに、

R : 相対含水率 (%) , (任意の時間, 位置における要素の含水率の飽和水の含水時の含水率に対する比)

t : 時間(day)

x : 乾燥面からの距離

n : 乾燥面の法線ベクトル

α_m : 表面係数(cm/day), 例えば 3.9cm/day

H_s, H_0 : それぞれ乾燥面および雰囲気の相対湿度(%)

D : 拡散係数(cm^2 / day)

相対湿度Hに対応する拡散係数は温度の上昇に伴って増加する。拡散係数が大きいほうが水分移動は速やかであり、コンクリートの乾燥収縮が一般に湿度の低い冬場よりも温度の高い夏場でよりいっそう進行する²⁻¹⁸⁾。

2.2.8 細孔分布

コンクリート表面は材齢初期から乾燥を受けて水和が阻害されるために長期的に径の大きい細孔が残存し、小さい径の細孔が減少する。この傾向は表面に近いほど、水セメント比が大きいほど顕著である。

Balshin は金属セラミックについて式 (2.5) を、Ryshkewich は焼結アルミナとジルコニアについて式 (2.6) が成立することを示しており²⁻¹⁹⁾²⁻²⁰⁾、多くの論文でこれらの強度式がコンクリートにも適用されている。

$$\sigma = \sigma_0(1 - P)^k \dots \text{(Bal'shin 式)} \quad \text{式 (2.5)}$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-kP) \dots \text{(Ryshkewich 式)} \quad \text{式 (2.6)}$$

σ : 強度

σ_0 : 空隙量のときの強度

P : 空隙率

k : 定数

Griffith は物体内には微細なクラックが潜在しており、クラック端部での応力集中が破壊を助長するという考えを基に、脆性材料の強度に式 (2.7) が成立することを提唱した²⁻²¹⁾。

$$F = \sqrt{\frac{4\gamma E}{\pi D}} \dots \text{(Griffith 式)} \quad \text{式 (2.7)}$$

γ : 単位面積あたりの表面エネルギー

E : 弾性係数

D : 内在クラックの直径

高温化では、表層部のコンクリートは、表面に近いほど径の大きい細孔が残存する傾向が助長される。

2.2.9 強度発現性状

図 2.24 に温度別初期強度発現性状，図 2.25 に長期材齢までの強度発現性状を示す²⁻²²⁾²⁻²³⁾。養生温度や荷卸し時のコンクリート温度が高くなると，セメントの水和反応が促進されるので，温度 20℃に比較して初期材齢の強度発現は非常に大きい。近年では暑中環境下で打設を行った試験体の圧縮強度は多くの場合材齢 1 日で 10N/mm²を超える強度発現性状を示す。一方で，長期材齢において強度増進は低下する。なお，強度発現性状には上術の影響のほか，初期の急激な蒸発により水和反応が阻害され，強度増進性が低下する場合もある。

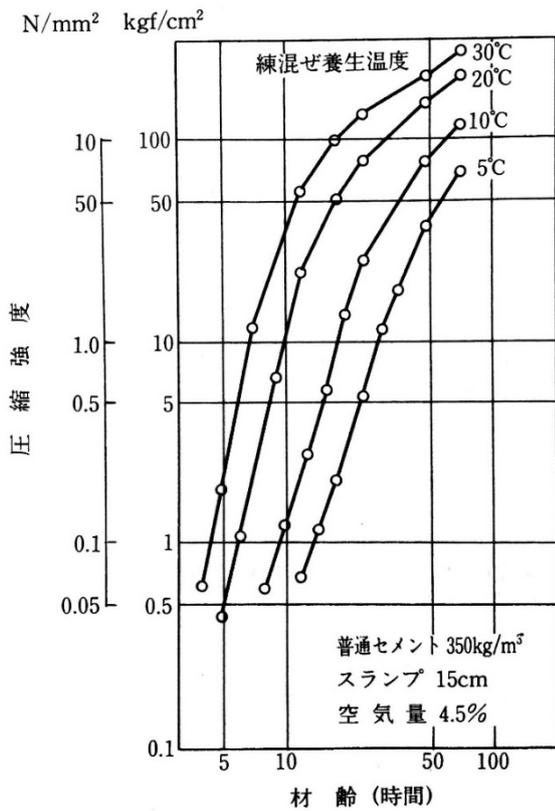


図 2.24 温度別初期強度発現性状²⁻²²⁾

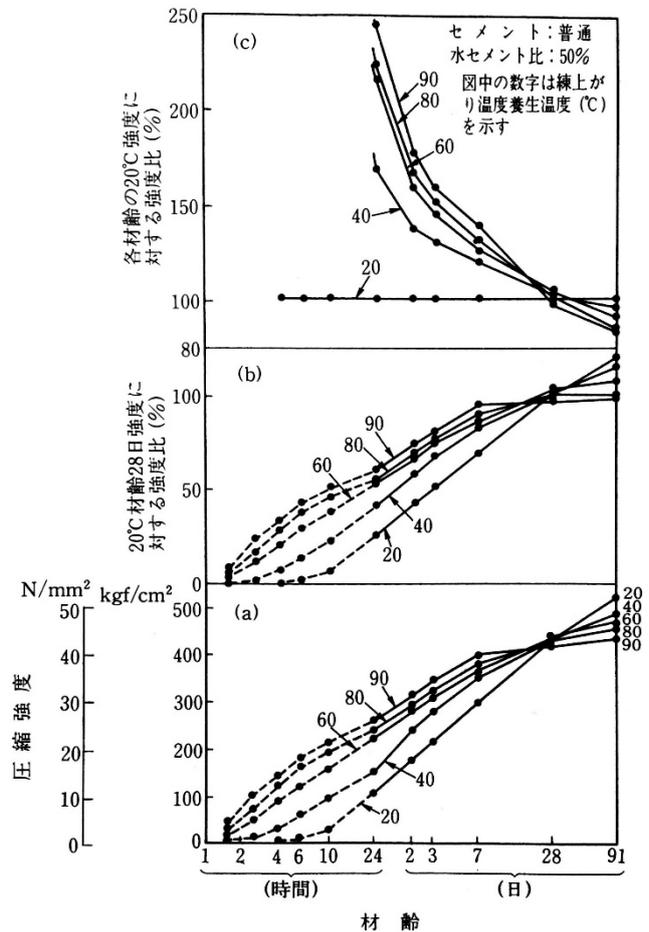


図 2.25 温度別強度発現性状²⁻²³⁾

2.2.10 2.2節のまとめ

暑中環境における打込み前、打込み後、硬化後のコンクリートの特性に対する文献調査を行い、以下の結果を得られた。

1) 打込み前

暑中環境で製造されるコンクリートは、高い外気温と日射の影響で練混ぜ時のコンクリート温度は高温になり、また、輸送中のコンクリート温度が上昇することから荷卸し時の温度はさらに高くなる。暑中環境下におけるコンクリートの性質の変化は温度が上昇するに従って徐々に変化する性質のものであるため、最初の練上がり温度より管理をする必要がある。なお、コンクリートの温度が高いほどスランプや空気連行性は低下し、施工性にも影響を及ぼす。

2) 打込み後

湿度が一定の場合、コンクリート温度が高いほど水分蒸発速度は大きくなり、これに加えてブリーディングが減少するため、コンクリート表層部の乾燥は促進される。また、コンクリート上面が早く乾燥するため、表面近傍の含水率は低下し、プラスチックひび割れと呼ばれる初期乾燥ひび割れの発生の危険性が高まる。なお、コンクリート温度が高いほどセメントの水和反応における誘導期は短縮され、コンクリートの凝結は早められて、それに次ぐ硬化が開始する時期が早められる。

3) 硬化後

荷卸し時のコンクリート温度や養生温度が高くなると、セメントの水和反応が促進されるので、標準環境と比べて初期材齢の強度発現は非常に大きい。一方で、長期材齢において強度増進は低下する。また、コンクリート表面は材齢初期から乾燥を受けて水和が阻害されるため、長期的に径の大きい細孔が残存し、小さい径の細孔が減少する。

2.3 暑中コンクリートに関する関連規定・仕様書の国際比較

地球温暖化は、地球の大気と海の平均温度が上昇することであり、19世紀後半から発生し、今後さらに持続する見込みである。20世紀以来、地球の平均温度の上昇の約2/3は、1980年以降に生じたもので、約0.8℃程度上昇した。これはまたコンクリート産業に大きな影響を及ぼしている。気温が25℃を超える暑中期には、急速な凝結、ひび割れ、強度や耐久性の低下など様々な問題がコンクリートに発生する可能性が高い。世界各国は暑中環境で施工されるコンクリートに関する研究を実施し、各国の実情に応じた規準や規定を制定してきた。本節では暑中コンクリートに関する国内外の標準仕様書やガイドライン等を比較分析し、その違いを検討した。本節で参考した文献は、日本建築学会の「建築工事標準仕様書 JASS5」²⁻⁶⁾、大韓建築学会の「建築工事標準仕様書 KASS5」²⁻²⁴⁾、アメリカコンクリート学会の ACI305.1-06 Specification for Hot Weather Concreting²⁻¹⁴⁾ (暑中コンクリート施工法のための仕様) および ACI305R.10 Guide to Hot Weather Concreting²⁻²⁵⁾ (暑中コンクリート施工の手引き)、イギリスの BS8110²⁻²⁶⁾ および BS8500²⁻²⁷⁾ などである。まず、各標準の構成システムを検討し、暑中コンクリートの定義と適用期間を調査した。また、施工対策と品質管理に対して分析した。なお、シンガポール、インド、中東地域、アフリカなど他の国の規準について簡単に調べた。

2.3.1 構成システム

表 2.3 に各標準の構成システムについて示す。日本における暑中コンクリートの規定は、JASS5 の 13 節に示されている。九つのセクションで構成されており、各セクションは詳細な数値データや規定を提示している。韓国の場合、一般情報、材料、施工の三つの部分に分けられる。しかし、ほとんど短い規定にとどまっている。アメリカの ACI は、8 つのセクションで構成されており、各セクションは詳細な内容を提示している。これは最も詳細な規定であり、世界的な影響力を有しているため全世界においてこの規定を考慮としている。英国の BS8500 は、暑中コンクリート工事の材料について示しており、BS8110 においては施工の内容を示す。なお、表 2.4 に各標準について簡単に比較したものを示す。日本とアメリカの規定がより詳しく説明されていることがわかる。

表 2.3 各標準の構成システム

JASS-5	KASS-5	ACI305R.10	BS
1. 総則	1. 一般事項	1. Introduction and scope	
2. 品質	2. 材料	2. Notation and definitions	
3. 材料	3. 施工	3. Potential problems and practice	
4. 調合	3.1 調合	4. Effect of hot weather on concrete properties	
5. 発注・製造	3.2 製造	5. Production and delivery	
6. 運搬	3.3 運搬・打込み	6. Placing and curing	—
7. 打込み	3.4 養生	7. Testing and inspection	
8. 養生	3.5 品質管理・検査	8. Reference	
9. 品質管理・検査		Appendix A - Estimating concrete temperature Appendix B - Methods for cooling fresh concrete	

表 2.4 各標準における簡単な比較

	項目	JASS	KASS	ACI	BS
一般事項	暑中環境の影響	◎	—	●	—
	定義	●	◎	●	—
	適用期間	●	◎	●	—
品質管理	材料	●	○	●	○
	調合	●	○	●	—
	製造	●	○	●	—
	運搬	●	○	●	○
	打込み	●	○	●	○
	養生	●	○	●	○
	検査	●	○	●	—

●：詳細な数値を提示 ◎：比較的簡単に記述 ○：簡単にコメント —：言及なし

2.3.2 定義および適用期間

日本では、外気温およびコンクリート温度が高いことが原因となり、単位水量の増加、スランブ低下、凝結促進、コンクリート表面からの水分の急激な蒸発などによって、コールドジョイント・ひび割れの発生および長期強度の増進不良など種々の問題が発生しやすい時に暑中コンクリート工事として施工する必要があると規定されている。また、暑中コンクリートの適用期間は、特記によるが、特記のない場合、施工者は日平均気温の平年値が 25℃を超える期間を基準として定め、工事監理者の承認を受ける。韓国では、日平均気温が 25℃を超えたり、日最高気温が 30℃を超える場合には、暑中コンクリートとして施工すると規定している。アメリカの ACI では、暑中コンクリートを「フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質に悪影響を与えたり、あるいはコンクリートに悪い特性を招く可能性のある高温、低湿度、速い風速などの組合」と定義している。また、適用期間は水分の損失とセメントの水和速度が速くなる現場条件で、外気温 27℃以上で、水分蒸発速度 1kg/m²/hr を超える乾燥状況としている。ACI では、外気温のみならず、コンクリート温度、相対湿度、風速の影響まで深く考慮していることがわかる。なお、イギリスの規準において暑中コンクリートの定義と適用期間の内容は含まれていない。

2.3.3 施工対策と品質管理

表 2.5 に各標準における細部内容に対して比較・整理したものを示す。

日本の JASS5 では、材料、調合、製造、運搬、打込み、養生などの項目に関する施工対策と品質管理の技術を詳細に説明している。暑中コンクリートの品質管理において最も重要な項目の一つであるコンクリート温度は、荷卸し時のコンクリート温度を原則として 35℃としている。また、このコンクリート温度基準値を満足させるために、各材料の温度と運搬中のコンクリートの温度上昇の影響について示している。また、コンクリートの温度推定式を具体的に提示している。各セクションでは、様々な実測のデータを使用し、コンクリートの特性変化と品質管理技術について提示する。なお、建設計画、使用材料、温度制御方法及び作業者の労働条件などの多くの部分について示している。

KASS5 の内容は全体的に JASS5 と同様であるが、より簡単に説明している。他の仕様書との違いは、日最高気温が 30℃を超える場合にも暑中コンクリート施工を適用することである。一般的にコンクリートの打設は、日中に行うため短い時間であってもコンクリートの特性に高温の悪影響が及ぶことを考慮したと解釈できる。また韓国の規準におけるコンクリート温度は、荷卸し時の温度を基準とする日本の JASS5 とは異なり、打込み時のコンクリート温度を 35℃と制限している。なお、検査における扱いは、一般のコンクリートと同様である。

アメリカの ACI においては、暑中コンクリートの特性に及ぼす影響を多くのデータ、グラフ、算定式で記述している。「コンクリート表面の水分蒸発速度に及ぼすコンクリートの温度と気温、相対湿度、風速の影響」の項は、他の規準類にはない内容である。また ACI は、それぞれの品質管理技術（例えば、氷の使用）の実験データだけでなく、推奨事項を添付することから暑中コンクリートの品質管理技術としての信頼性を与えることができると考えられる。付録では、コンクリートの温度推定方程式とフレッシュコンクリートの冷却方法を提供する。一方、フレッシュコンクリート温度の上限は 35℃で規定している。これは、JASS5 と同様に、荷卸し時の温度値を基準としており、例外規定も付帯し、もし 35℃を超える場合においては管理者の承認を受けて許容される場合もある。

BS 標準の暑中コンクリートの部分は、他の標準に比べて簡単に提示している。コンクリートの温度を下げるための化学混和剤と結合材の使用を提案して、コンクリート工事の各工程のギャップを短縮することなどを提示する。

表 2.5 各標準の細部内容比較

Type	JASS-5	KASS-5	ACI305R.10	BS8110/8500
Effect of hot weather	<ul style="list-style-type: none"> Decrease of slump and air content as time passed Increase of rate of setting time and hydration Decrease of bleeding Reduction of long-term strength Cold joint and cracks 	—	<ul style="list-style-type: none"> Increase <ul style="list-style-type: none"> Water demand Rate of slump loss Rate of setting time Rate of hydration Cold joint Surface drying Plastic shrinkage Thermal cracks Water evaporation Concrete temperature Decrease <ul style="list-style-type: none"> Bleeding Long-term strength Durability 	<ul style="list-style-type: none"> Loss of mix water by evaporation and accelerated hydration Unacceptable levels of early-age thermal cracking and reductions in the ultimate quality of the concrete The stability of the entrained air content is reduced at placing temperatures above about 30°C Reduction in strength and durability
Production	<ul style="list-style-type: none"> Materials <ul style="list-style-type: none"> Use the blended cement Use the chemical admixture by special standard Use the admixture such as fly ash, silica fume, blast furnace slag Control coefficient of surface moisture of aggregate Mix design <ul style="list-style-type: none"> Check the quality through trial mixing Use low temperature materials (cement, aggregate, water) Concrete temperature must control 35°C or less 	<ul style="list-style-type: none"> Materials <ul style="list-style-type: none"> Use low temperature materials (cement, aggregate, water) Use air entraining and water reducing agent Mix design <ul style="list-style-type: none"> Minimize unit weight of water and cement Design according to terms of mixing, delivery, placing Check the quality through trial mixing Concrete temperature must control 35°C or less 	<ul style="list-style-type: none"> Temperature control <ul style="list-style-type: none"> Aggregate cooling Use of white mixer drum Project plan (heat pump, water chillers etc.) Use of slow-setting cement Supplement of cementitious materials Use of water reducing agent & retarding admixture Use of flowing concrete Batching & mixing <ul style="list-style-type: none"> Slump control Hydration control Mixer control 	<ul style="list-style-type: none"> Avoiding reductions in the working life of the fresh concrete Preventing a high temperature rise in the concrete Using admixtures to retard the hydration and/or increase the initial workability Using a cement or combination that has a low heat evolution Cooling of water and aggregates Avoidance of high temperature cement
Construction	<ul style="list-style-type: none"> Delivery <ul style="list-style-type: none"> Operation plan with considering the traffic, weather and construction conditions Minimizing the waiting time of ready mixed truck Protect the mixer and plumbing from direct sunlight Protection successive pours surface from direct sunlight Curing <ul style="list-style-type: none"> Prevent rapid evaporation of moisture Conduct wet curing by (8.2.a) 	<ul style="list-style-type: none"> Delivery and placing <ul style="list-style-type: none"> Operation plan with considering the traffic, weather and construction conditions Control the concrete temperature and form to low Sprinkle with water on form in advance Curing <ul style="list-style-type: none"> Prevent rapid evaporation of moisture Protection from direct sunlight Maintain a wet condition 	<ul style="list-style-type: none"> Delivery <ul style="list-style-type: none"> Minimize delivery time Operation plan with considering the traffic Placing <ul style="list-style-type: none"> Planning hot weather placement Preparing for ambient conditions Expediting placement Consolidation equipment Curing <ul style="list-style-type: none"> Protection against moisture loss Moisture curing Membrane curing 	<ul style="list-style-type: none"> Placing, compacting and protecting the concrete as soon as possible after mixing Curing of surface not protected by forms should commence immediately after compaction Curing with sheets of impervious material
Inspection	<ul style="list-style-type: none"> The temperature of the materials must be thoroughly managed Measure the temperature of the concrete when unloaded, and check whether 35°C or less Control the entrained air within the tolerance Manage the time from mixing to pouring due to concern about slump loss Check the construction sites due to high temperature and humidity Specimens should be kept in environment similar to the structure 	Same as inspections of normal concrete construction	<ul style="list-style-type: none"> All water added to the concrete with corresponding mixing times; Time batched, time discharge started, and time discharge completed; Concrete temperature at time of delivery and after concrete is placed; Observations on the appearance of concrete as delivered and after placing in forms; Slump of concrete at point of delivery; Protection methods; Initial curing method used; Final curing method used; Where a curing membrane is used, the time and rate of application and visual appearance of concrete; 	—

2.3.4 他国の標準

シンガポールはイギリスの BS8110 を採択し、英国標準機関の許可を受けた²⁻²⁸⁾。インドの場合、暑中コンクリートの施工のための様々な技術が IS7861 に示されているが、この規準の内容は、ACI と同様である²⁻²⁹⁾。中東地域では、コンクリートの温度限界を 30～32℃に厳格に規定する。また、混合と打設の間隔を 30 分以下に規制している²⁻³⁰⁾。これらの規定は、中東地域の気候特性を考慮して、スランプロスやコールドジョイントを最小化するために設計されたものである。アフリカの暑中コンクリートの標準は、まだ示されていないが、多くの研究者が ACC (African Concrete Code) に含まれる暑中コンクリートの施工に関する内容を提示している²⁻³¹⁾。

2.3.5 2.3節のまとめ

世界各国における暑中コンクリートに関する関連規定・仕様書の国際比較を行い、以下の結果を得られた。

- 1) 内容の違いは少しあるがすべての標準・規定で、コンクリートの温度上昇に対する対策を立てており、打込み後の養生管理を通じてコンクリートの品質低下に対応している。
- 2) 暑中環境の影響と品質管理項目についての情報は、日本の JASS5 とアメリカの ACI 規定にさらに詳細に説明されている。
- 3) 暑中コンクリートの適用期間は、日本と韓国では日平均気温が 25℃を超える時期に暑中コンクリートとして施工しており、韓国では日最高気温に関しても考慮し 30℃以上の条件では適用している。アメリカでは、外気温 27℃以上で、水分蒸発速度 1kg/m²/hr を超える乾燥状況とし、外気温のみならずコンクリート温度、相対湿度、風速の影響まで深く考慮している。
- 4) コンクリート温度の上限値に関しては、日本とアメリカにおいては、原則として荷卸し時のコンクリートの温度を 35℃と制限しており、韓国では打込み時の温度を 35℃以下とする。
- 5) 他国の標準は、ACI および BS に基づいて作成される。特に中東地域は、コンクリートの温度上限値を 30～32℃、練混ぜから打込みまでの時間を 30 分以下と厳格に規定している。

2.4 第2章のまとめ

本章では、暑中コンクリートに関する文献調査を行い、既往の研究の限界及び本研究の背景と必要性などについて示した。地球温暖化による気候変化及びコンクリートの特性変化、暑中コンクリートに対する世界各国の対応などについて調べた。本章から得られた結果を以下に示す。

- 1) 日本における暑中環境は、以前には東南アジアや中東地域ほど激しくなかったが、近年においては、先に述べた温暖化の影響で過酷化・長期化されており、結果的に暑中期間の日数は徐々に長くなっていることが確認された。これは、暑中環境で品質が低下するコンクリートに対応するために行った本研究の背景である。
- 2) 既往の研究から得られた暑中コンクリートの特性は、ほとんどが小規模の恒温室内実験による結果であり、これらの結果が実際の現場における施工されるコンクリートに及ぼす暑中環境の影響を代表するとは言いにくい。従って、本研究では実際の暑中環境下で模擬部材を用いて実大実験を行い、実際の施工条件に近い暑中環境の影響を定量的に検討し、問題点、対策などについて扱った。
- 3) 日本の現規準は、暑中コンクリートの適用期間や荷卸し時のコンクリート温度の上限値などにおいて、定量的な根拠が必ずしも明らかになっていない。ただ便宜的に区切りのよい値を慣用している、もしくは本来閾値を定めることが困難なものもある等の問題もいまだ残っている。実際、数年前に実施された JASS 5 改定に先立ち実施されたアンケートでは、荷卸し時のコンクリート温度の上限値 35°C に対して、「根拠を示してほしい」、「緩和してほしい」といった要望が寄せられた²⁻³²⁾。
- 4) 暑中環境の程度について、従来の暑中環境である比較的激しくない「軽微な暑中期」と今後予想される一層過酷化する「極暑中期」の 2 つに区分して管理する国はどこにもない状況である。コンクリートの品質変化や品質管理項目及び基準をそれに応じて定量的に明らかにし提示する必要があると思われ、本研究では、極暑中期及び軽微な暑中期と分けてそれぞれに対して扱うことを考え、関連規定や仕様書の改定に役に立つことを目的としている。

参考文献

- 2-1) 気象庁：気候変動監視レポート2016「世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況」， pp.33~38， 2017
- 2-2) 気象庁ホームページ， <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/index.html>
- 2-3) Intergovernmental Panel on Climate Change：Climate Change 2013：The Physical Science Basis (Working Group I)， 2013
- 2-4) Ishii M., A. Shouji, S. Sugimoto and T. Matsumoto：Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century Using ICOADS and the KOBE Collection， International Journal of Climatology， Vol.25， pp. 865-879， 2005
- 2-5) 全国地球温暖化防止活動推進センター：IPCC 第5次評価報告書特設ページ， <http://jccca.org/ipcc/index.html>
- 2-6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事， 2015.07
- 2-7) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針・同解説， 2000.09
- 2-8) 松藤泰典， 大久保孝昭， 小山智幸， 眞方山美穂， 野原博志， 神代泰道：暑中環境下で練混ぜ， 運搬されるモルタル試験体の温度分布， 日本建築学会九州支部研究報告， Vol.32， 1991
- 2-9) Y.Matufuji・V.Sampebulu・T.Ohkubo・S.Harada：Workability Characteristic of Fresh Concrete Mixed and Agitated in High Temperature Ambience， コンクリート工学年次論文報告集， Vol.10， pp.815， 1998
- 2-10) 服部健一：スランプロスのメカニズムおよびその対策， 材料， Vol.29， No.38， 1990
- 2-11) 武田昭彦：暑中の生コンクリート， コンクリートジャーナル， Vol.1.4， No.6， 1966
- 2-12) 日本建築学会材料施工委員会：暑中コンクリート小委員会資料（大久保孝昭）， 1991.12
- 2-13) 大塩明ほか：各種セメントを用いたコンクリートの基礎的諸性質， セメント技術年報， Vol.1.4， pp.180-183， 1988
- 2-14) ACI Committee 305， Specification for Hot Weather Concrete， American Concrete Institute， 2007
- 2-15) 仕入豊和， 地濃茂雄：コンクリートの凝結・硬化に及ぼす温度条件（20～90℃）の影響ープロクター貫入抵抗値経時変化からの考察ー， 日本建築学会論文報告集， Vol.1.313， pp.1-11， 1982.03
- 2-16) Copeland L. E. ， D. L. Kantro：Proc. Of 5th International symposium on Chemistry of Cement， Vol.2， pp.387， 1986
- 2-17) 小山智幸， 松藤泰典， 杉田均：グリーンコンクリートの引張り限界ひずみの定式化に関する研究， 日本建築学会大会学術講演梗概集， pp.251-252， 1989
- 2-18) 藤原忠司ほか：温度条件の異なる乾燥過程でのコンクリート内部における水分移動， 第46回セメント技術大会講演集， 1992

- 2-19) M. Y. Balshin : Dependence of mechanical properties of metal powders on porosity and limiting properties of metal-ceramic materials, Doklady Akademii Nauk USSR 67, pp. 831-834, 1949
- 2-20) E. Ryshkewitch : Compression strength of porous sintered alumina and zirconia, Journal of American Ceramic Society, Vol.36, pp. 65- 68, 1953
- 2-21) Griffith A. : Phil. Trans. Roy. Soc, Vol.21, pp.163, 1920
- 2-22) 秩父セメント : コンクリートの凝結および初期強度に関する試験例, コンクリートニュース, No.6, pp.1-7, 1984
- 2-23) 地濃茂雄, 仕入豊和 : コンクリートの強度発現性状におよぼす温度履歴条件 (20~900°C) の影響, 日本建築学会論文報告集, Vol.337, pp.9, 1984
- 2-24) 大韓建築学会 : 建築工事標準仕様書 KASS5 コンクリート工事, 2013.07
- 2-25) ACI Committee 305, Guide to Hot Weather Concreting, American Concrete Institute, 2010
- 2-26) British Standard 8110, British Standards Institution, 1997
- 2-27) British Standard 8550, British Standards Institution, 2002
- 2-28) Singapore Standard SS CP 65 Part 1, 1999
- 2-29) Indian Standard 7861-1 Code of Practice for Extreme Weather Concreting PART 1 Recommended Practice for Hot Weather Concreting, Bureau of Indian Standards, 1975
- 2-30) Sejin Jeon, Myoungsung Choi, Jaekang Yoo, Yongjic Kim, Youngjin Kim : Quality Control of Mass and Hot Weather Concrete in the Middle East Countries, Journal of Korea Concrete Institute, Vol.20, No.6, 2008.11
- 2-31) M.N. Haque : Provisions in the African Concrete Code for Designing Durable Structures, African Concrete Code Symposium, pp.127~144, 2005
- 2-32) 日本建築学会 : コンクリート技術の動向と JASS5 改定の方角, 日本建築学会大会材料施工部門研究協議会資料, pp.59, 2006.09

第3章

暑中コンクリートの初期水分移動及び凝結性状

第3章 暑中コンクリートの初期水分移動及び凝結性状

3.1 第3章の概要

暑中コンクリートは、日平均気温の平年値が 25℃を超える期間に施工されるコンクリートを意味する。日本建築学会の JASS5³⁻¹⁾では、暑中コンクリートの適用期間は日平均気温の平年値が 25℃を超える期間を基準として定めるよう規定されている。日平均気温が 25℃を超える暑中環境下で製造、施工されるコンクリートは、外気温や日射の影響でコンクリートの温度が高くなる。その結果、標準期と比較して水和反応は促進され、凝結時期が早くなる。また水分移動の観点から見ると、ブリーディング水量は減少し、一方でその蒸発速度は大きくなるため、コンクリート上面からブリーディング水が消失する時期は早くなる。これらの影響で、暑中環境においてはコンクリートの上面付近がより早く乾燥状態になり、水和に必要な水分が不足し、反応が停滞しがちになる。暑中コンクリートにおいて長期強度の増進が鈍化し、耐久性が低下しやすいこと、初期ひび割れが生じやすいことの要因としても、このような凝結と上面の乾燥状態の影響が挙げられる³⁻²⁾³⁻³⁾。

また、外気温 25℃以上の適用期間内でも日平均気温が 30℃を上回ることが少なくなく、盛夏には日最高気温が 40℃を超える場合もあることから、例えば、日平均気温「25℃～30℃」、 「30℃以上」のように区分し、暑中環境における程度の違いがコンクリートに及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。

本章では、実際の暑中環境で実験を行い、フレッシュコンクリートの初期水分移動及び凝結特性に及ぼす気象条件の影響について検討し、その結果を定量化した。コンクリート表面の水分量において、暑中工事ではプラスの要因であるブリーディング水量とマイナスとなる蒸発量を測定し、経時的に変化するコンクリート表面付近の含水状態を検討した。また、コンクリートの表面乾燥が凝結に及ぼす影響に関して調べるために、プロクター貫入試験とN式貫入試験³⁻⁴⁾を行い、コンクリートに及ぼす暑中環境の影響について検証した。

3.2 実験内容

3.2.1 実験概要

本実験では、2015年度から2017年度まで3年間行った暑中コンクリートの実機実験におけるフレッシュコンクリートの特性を中心としてまとめた。通常の外気温 25℃以上の暑中環境であっても、標準期に近い条件、外気温 30℃程度の軽微な暑中期、そして外気温 30℃以上の極暑中期が想定できる。それで、コンクリート工事が行われる現場の外気温、湿度、風速、直射日光などの環境条件によって異なる暑中コンクリートのデータ収集が必要であり、本章では得られた測定値を比較分析し定量化した。

暑中コンクリートにおける打込み初期の水分移動及び凝結特性は、本研究で品質管理の対象としている床スラブの給水や散水量算定、壁体コンクリートのコールドジョイントに及ぼす打重ね部の特性把握、自己養生効果を持っている人工軽量骨材の最適使用量推定に、必要な基礎資料である。従って本実験では、暑中環境下で製造・施工されるコンクリートのブリーディング及び蒸発量を測定し、打込み後一定時間が過ぎた時点におけるコンクリート表面付近の含水率（単位水量と換算して示す）を把握し、その関係を分析する。なお、打込み初期の凝結性状を調べるためにプロクター貫入試験と、プロクター貫入試験でわかりにくい打込み初期の凝結程度を評価するためにN式貫入試験を行った。

表 3.1 実験条件の概要

ID	実験環境	日付	大気温度 (°C) ¹⁾		外気温 (°C) ²⁾			湿度 (%) ²⁾			練混ぜ時間	打込み時間	運搬時間 ³⁾
			日平均	日最高	最低	最高	平均	最低	最高	平均			
実験 1	極暑中期	16/07/27	29.5	34.7	28.4	39.0	33.3	38.0	66.0	54.5	9:00	10:30	90
実験 2		16/08/18	30.2	35.5	29.1	37.6	33.3	45.0	65.0	56.4	13:00	14:00	60
実験 3		17/08/02	29.6	35.0	29.6	37.6	33.1	41.0	68.0	56.8	9:50	10:50	60
実験 4		17/08/08	31.6	35.8	29.5	37.3	33.5	43.0	71.0	61.2	10:45	11:50	65
実験 5	軽微な暑中期	15/08/27	25.7	30.8	26.1	34.6	29.0	-	-	-	12:00	12:30	30
実験 6		16/09/01	25.7	27.8	26.1	29.6	27.6	55.0	75.0	64.1	12:00	12:40	40
実験 7		17/06/23	25.2	30.3	25.8	32.5	28.6	39.0	71.0	56.5	10:00	10:40	40
実験 8		17/06/30	27.9	33.2	26.4	33.2	29.5	54.0	79.0	69.4	10:00	10:40	40
実験 9	標準期	15/12/02	12.5	14.5	11.2	15.5	13.6	60.0	93.0	80.1	11:30	12:00	30
実験 10		16/11/18	15.6	20.7	15.0	20.6	18.3	49.0	90.0	78.1	12:00	13:30	90
実験 11		16/12/02	11.6	15.1	8.9	18.4	12.8	44.0	80.0	62.0	12:00	12:50	50
実験 12		17/06/08	21.5	25.6	18.9	27.4	23.1	43.0	70.0	56.0	10:00	10:40	40

1) 気象庁の過去データを参照

2) 外気温と湿度は実験場所における打込みから 24 時間までの測定値

3) コンクリートの練混ぜから打込みまでの経過時間

本実験では、表 3.1 に示すように極暑中期と軽微な暑中期及び標準期実験を実施し、総 12 回の検討結果を分析している。表中の大気温度は、過去の気象庁データから得た福岡地域の気温を意味し、外気温と湿度は、いずれも実験当日実験場所におけるコンクリートの打込みから 24 時間までの測定値である。本研究では外気温の平均値を基準として、30℃未満を軽微な暑中期、30℃以上を極暑中期と想定し実験を行った。

暑中期の実験においては、外気温の平均値が 27.6～33.5℃の範囲にあり、最高気温は「実験 1」で 39.0℃、最低気温は「実験 7」で 25.8℃であった。標準期実験の場合には、外気温の平均値は 12.8～23.1℃となり、ほぼ 10℃に近い差があった。また、湿度は、「実験 9」と「実験 10」で約 80%の高湿の状態となっており、それ以外のすべての条件で 60%程度の水準を示した。

3.2.2 使用材料及び調合

表 3.2 に本実験の使用材料を示す。いずれも福岡地域で一般的に用いられる範囲であり、普通ポルトランドセメントと海砂，砕石を用い，混和剤は標準形 I 種（標準期）及び遅延型 I 種（暑中期）の AE 減水剤を使用した。コンクリートの調合は，実験ごとに少し違うが，表 3.3 に示すようにいずれも「普通 27-18-20N」の調合を用いた。コンクリートは福岡市内のコンクリート工場に隣接する屋根付きの実験場にて打設，測定を行った。

表 3.2 使用材料

種類	品名及び物性
セメント	普通ポルトランドセメント，密度 3.15g/cm ³
細骨材	玄界灘産海砂，表乾密度 2.57g/cm ³ ，吸水率 1.80%
粗骨材	古賀市谷山産砕石，表乾密度 2.72g/cm ³ ，吸水率 0.71%
混和剤	AE 減水剤（暑中期：遅延型 1 種，標準期：標準型 1 種）

表 3.3 コンクリートの調合（普通 27-18-20N）

実験名	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					C	W	S	G	混和剤
実験 1&3&10	18±2.5	4.5±1.5	53.0	46.4	348	184	789	963	4.55
上記以外の実験				45.0	350	185	763	985	

3.2.3 測定項目及び方法

表 3.4 に試験項目を示す。生コン工場で練り混ぜたコンクリートは、実験場所に移動し、スランプ、空気量、温度などのフレッシュ性状を確認した後、水分移動データ（水分蒸発量、ブリーディング、表面の単位水量）及び凝結性状（プロクター貫入抵抗試験、N式貫入試験）を検討した。各々の試験方法は、以下のとおりである。

1) フレッシュ性状

スランプは JIS A 1101、空気量は、JIS A 1128 に準拠し、コンクリート温度は棒型温度計を用いて測定した。

2) 水分移動

ブリーディングは $\phi 250 \times 285 \text{mm}$ の JIS 規格容器による JIS ブリーディング試験及び図 3.1 に示す複合法ブリーディング試験³⁻⁵⁾の二種類で測定した。複合法ブリーディング試験は、コンクリートを $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の簡易型枠に入れて JIS ブリーディング試験法と同様にブリーディング水量を測定した後、ブリーディング水の消失時点でビューレット付着の装置を被せると同時に水を注入し、その水位変化からコンクリートの中に吸い込まれる量を測定する方法である。水分蒸発量は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の簡易型枠及び $\phi 250 \times 250 \text{mm}$ の円筒を用い、コンクリートの質量を 5 分間隔で測定し、時間経過に対する重量減少値から求めた。単位水量は、N 式貫入試験用試料の表層部から採取し、5mm ふるいで粗骨材を取り除いたモルタル試料について電子レンジを用いる高周波加熱乾燥法で行った。

表 3.4 測定項目及び方法

測定項目	方法
スランプ	JIS A 1101 に準拠
空気量	JIS A 1128 に準拠
JIS ブリーディング	JIS A 1123 に準拠
複合法ブリーディング	$\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の簡易型枠からブリーディング水量を測定し、終了時点で図 3.1 のビューレット付着の装置を被せ、吸込み量を測定
水分蒸発量	$\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の簡易型枠及び $\phi 250 \times 500 \text{mm}$ の円筒容器にコンクリートを打込み、質量を測定
単位水量	高周波加熱乾燥法により、コンクリート表層部のモルタルの含水率を測定
プロクター貫入	JIS A 1147 に準拠
N式貫入	突き棒($\phi 15 \text{mm}$, $L=50 \text{cm}$)を、高さ 75 cm から自由落下させ、コンクリートに突き刺さった深さを測定

3) 凝結性状

プロクター貫入抵抗試験は、JIS A 1147 に準じて行った。N 式貫入試験³⁻⁴⁾は、 $\phi 250 \times 500\text{mm}$ の円筒に高さ 450mm までコンクリートを打込み、棒状バイブレータで加振したものについて実施した。所定の時間に図 3.2 のように一般的なコンクリート実験で使用する突き棒 ($\phi 15\text{mm}$, $L=500\text{mm}$) を、高さ 75cm から自由落下させ、コンクリートに突き刺さった深さを測定した。この方法は、プロクター貫入試験における貫入抵抗値 $0.0\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲内での凝結程度を検討することが可能である。

また、以上の各実験の様子を写真 3.1 に示す。

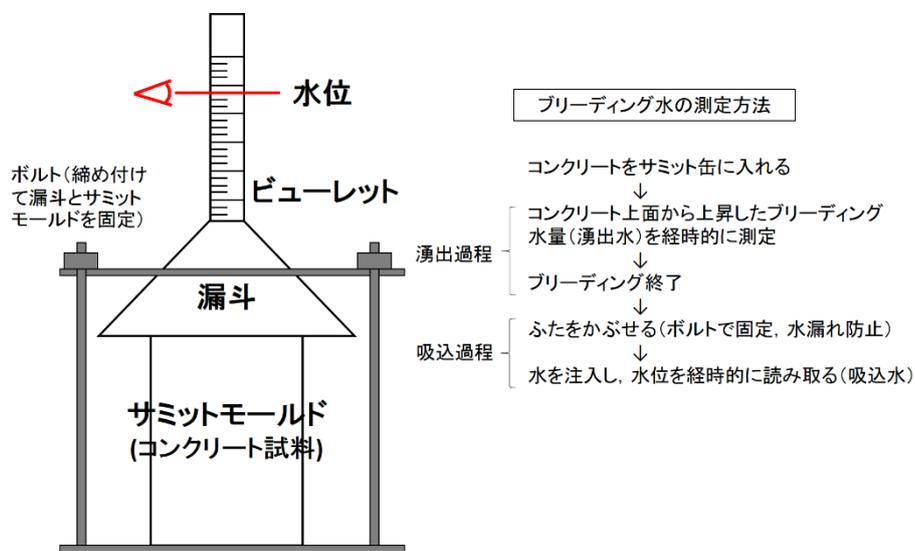


図 3.1 複合法ブリーディング試験³⁻⁵⁾

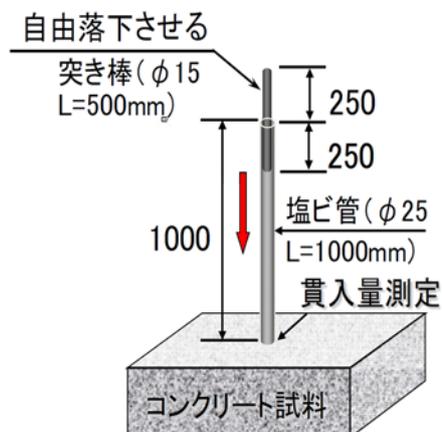


図 3.2 N 式貫入試験の概要³⁻⁴⁾



JIS ブリーディング試験



プロクター貫入抵抗試験



蒸発試験



単位水量試験



複合法ブリーディング試験



N 式貫入試験

写真 3.1 各試験の様子

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 フレッシュ性状

表 3.5 に打込み時のフレッシュ性状の試験結果，表 3.6 に各環境条件における平均値を示す。

スランプ試験結果，「実験 3」以外のすべての実験で目標した $18 \pm 2.5 \text{cm}$ を満足した。しかし，外気温によるスランプ値は極暑中期では $15.0 \sim 16.5 \text{cm}$ ，軽微な暑中期では $19.5 \sim 20.0 \text{cm}$ ，標準期の場合には， $18.0 \sim 20.5 \text{cm}$ となった。標準期及び外気温 30°C 未満の軽微な暑中期では，設計値よりも若干高いスランプを見せた反面，外気温 33°C 程度の極暑中期の条件では，目標値を満足しているが，十分なスランプが出ないことが分かった。従って， 33°C 以上の暑中条件では，軽微な暑中期よりもスランプロス恐れが大きいため，これに対する対策と品質管理が必要になると判

表 3.5 フレッシュ性状（打込み時のデータ）

ID	実験環境	スランプ (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	外気温：実験場所における材齢 1 日までの平均気温 ($^\circ\text{C}$)
実験 1	極暑中期	16.5	4.9	33.0	33.3
実験 2		15.5	3.7	35.0	33.3
実験 3		15.0	4.0	33.5	33.1
実験 4		16.0	4.3	34.5	33.5
実験 5	軽微な暑中期	20.0	3.7	32.0	29.0
実験 6		19.5	3.9	32.0	27.6
実験 7		20.0	4.0	29.5	28.6
実験 8		19.5	4.0	31.0	29.5
実験 9	標準期	20.5	4.0	19.0	13.6
実験 10		18.0	4.5	22.0	18.3
実験 11		19.0	5.0	20.0	12.8
実験 12		20.0	5.9	27.0	23.1

表 3.6 フレッシュ性状の平均値

対象	スランプ (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)
暑中期全体	17.6	4.1	32.7
極暑中期	15.9	4.3	34.0
軽微な暑中期	19.8	3.9	31.1
標準期	19.4	4.9	22.0

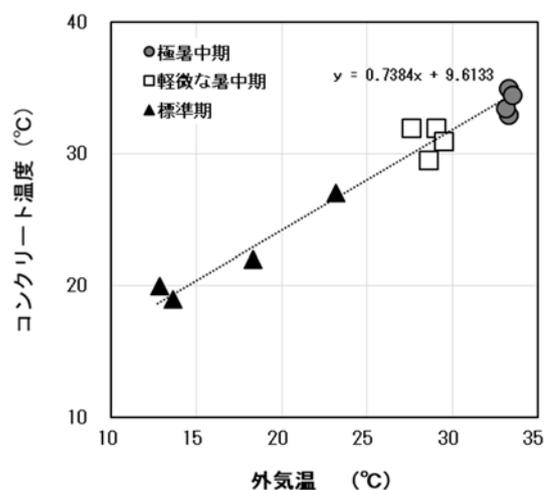


図 3.3 外気温とコンクリート温度の関係

断される。

空気量測定の結果、暑中期では、3.7～4.9%、標準期では4.0～5.9%の値となり、暑中環境においては標準環境よりも空気量が若干小さくなった。コンクリートの空気量が減少することは、暑中コンクリートの問題点の一つとして指摘されているが、本実験の範囲では大きな問題はないと考えられる。

図 3.3 に外気温とコンクリート温度の関係を示す。コンクリート温度は、外気温が高いほど大きくなるが JASS5 などの規定で提案している具体的なコンクリート温度限界値である 35℃となる外気温は、本実験の範囲では約 33℃であった。

表 3.6 によれば、軽微な暑中期と極暑中期でのフレッシュコンクリートの性状は違いがあり、その平均値を暑中期全体の品質として考えることは無理があると思われる。外気温 33℃程度の極暑中環境は、コンクリートの温度が 35℃まで上がる恐れがあり、同時にスランプが低下する環境であることが認められた。関連規定で提示している日平均気温 25℃以上で暑中コンクリートの施工をするという規定はフレッシュ性状の観点から不具合が生じなくても望ましいと思われるが、それに加えて、コンクリートの温度上昇及びスランプロスが心配になる外気温 33℃もしくは 30℃以上の暑中環境での品質管理と対策についてさらに追加されるべきであると考えられる。

3.3.2 水分移動

1) 水分蒸発

打込み直後から材齢 5 日までの蒸発試験結果を図 3.4 に示す。まず、狭い黒点線の「実験 5」の測定値は、軽微な暑中期にもかかわらず他の暑中期実験結果よりも大きくなっている。これは時期的に一番早い 2015 年 8 月に行われた実験であり、蒸発試験において風速の影響を考えずに行なったということで、実験場所にて風の影響に対する対策なく実験を行ったことである。これ以外の 11 シリーズの実験では、合板を試験場所周囲に取り囲んで風の影響を最小限に抑えた。そこで、「実験 5」の場合には風の影響を受けて蒸発量が大きくなったと思われる。

数値的に比較すると、打込みから 24 時間までの蒸発量は、極暑中期では 0.29～0.33g/cm²、軽微な暑中期では 0.26～0.29g/cm²、標準期では 0.11～0.13g/cm² の範囲（「実験 12」を除く）となり、外気温が高くなるとコンクリートの蒸発が加速する明確な傾向が確認された。「実験 12」の場合は、標準期実験と分類しているが、外気温 23℃程度の条件では暑中期に打ち込んだコンクリートと同様の蒸発量となることが確認された。暑中コンクリート施工の基準となる日平均気温 25℃以下の条件でも蒸発性状は暑中期と同じ傾向になる可能性があることから、蒸発の影響を強く受ける床スラブなどの面積が大きい部材においては、施工時速い蒸発に注意する必要があると考えられる。

材齢 5 日までの総蒸発量は、極暑中期、軽微な暑中期、標準期に対して、それぞれ 0.39～0.43g/cm²、0.37～0.39g/cm²、0.26～0.35g/cm² の範囲となった。極暑中期及び軽微な暑中期環境では、打込みから 24 時間まで急激に脱水されたが、材齢 1 日よりゆるやかに増加する傾向が認め

られた。反面、標準環境では、時間経過につれて蒸発速度が遅くなったが、その変化は小さく、材齢 5 日まで持続的に脱水現象が続いている。材齢 5 日までの総蒸発量に対する材齢 1 日までの蒸発量を百分率と換算すれば、極暑中期は 75%，軽微な暑中期は 70%，標準期では 35～40% となった。従って、暑中環境では打込み当日の蒸発量が大きいため、コンクリート打込み当日の水分蒸発を防ぐ対策が必要である。

また、「実験 12」を除いた標準期実験結果では、材齢 1 日までの蒸発量は同程度であったが、その以降の蒸発性状は実験によって違いが生じた。材齢 2 日から 5 日まで 4 日間の外気温と相対湿度の平均値は、実験 9：11.6°C/63.8%，実験 10：18.9°C/77.2%，実験 11：12.6°C/68.8% の値であった。この区間の蒸発量は、相対湿度が低いほど大きくなることから、外気温 20°C 以下の環境下における蒸発性状に及ぼす影響は、外気温よりも相対湿度の方が大きいと考えられる。

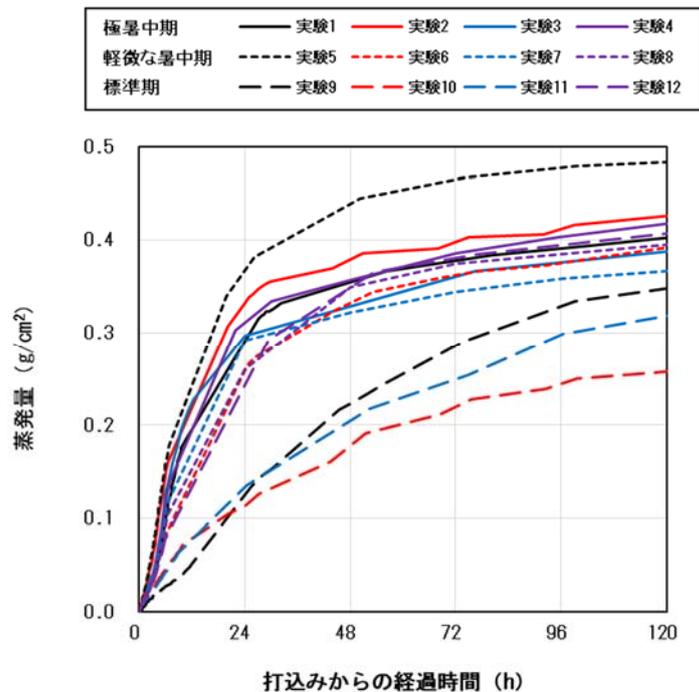


図 3.4 蒸発試験結果

2) ブリーディング

図 3.5 及び図 3.6 は JIS 規定によるブリーディング試験結果を示したものである。図 3.6 の横軸には、実験当日の気温及び湿度を示している。

まず、暑中期の実験結果から分析すれば、ブリーディングは「実験 2」と「実験 5」で約 2.2 時間、それら以外の暑中実験では、2.5～3.0 時間後に終了した。これは「実験 2」及び「実験 5」の蒸発量が大きかったためコンクリートの表面が早期に乾燥状態になったと考えられる。「実験 5」の場合は、軽微な暑中期の実験であるが、前述のように風の影響で蒸発速度が速くなり、その結果ブリーディングも早く終わることが確認された。暑中期実験の総ブリーディング水量において

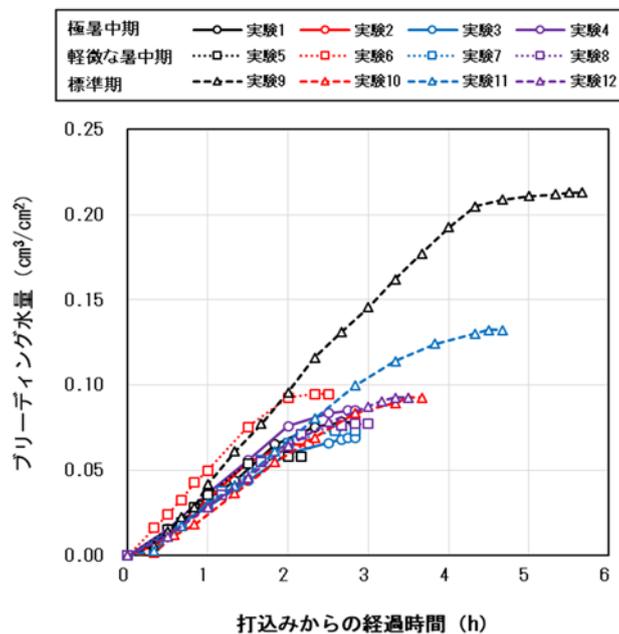


図 3.5 JIS ブリーディング試験結果 (1)

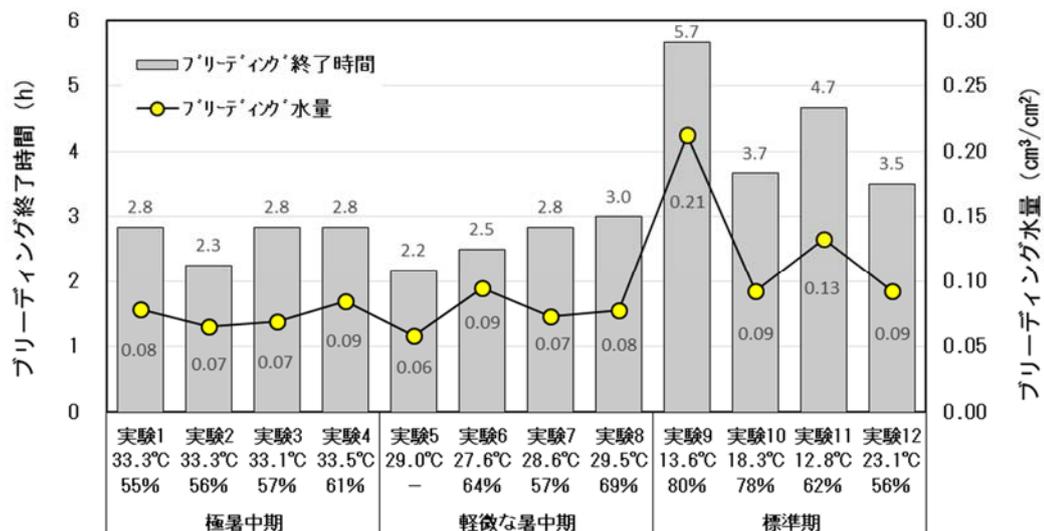


図 3.6 JIS ブリーディング試験結果 (2)

は、 $0.06\sim 0.09\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の範囲となっており、外気温の影響、つまり極暑中期と軽微な暑中期の差異は見られなかった。結果的に、暑中環境下で製造・施工されたコンクリートは、 $0.09\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下の水分が湧出されており、打込みから約 2.2~3.0 時間が過ぎた時点で乾燥状態となる。

一方で、標準期実験の結果から見ると、「実験 10」と「実験 12」では、約 3.5 時間後ブリーディングは終了し、そこまでのブリーディング水量は、 $0.09\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となり、暑中期実験の結果範囲内にあった。「実験 10」の場合、「実験 12」と比較して外気温は低く、相対湿度は高いためブリーディング挙動がより活発になりやすい条件であるが、結果は「実験 12」と同程度となった。一般的にコンクリートの運搬時間が長くなるとブリーディング水量は少なくなるが³⁻⁶⁾、「実験 10」は、コンクリートの練混ぜから打込みまでの時間が 90 分で他の実験よりも長かったことがその原因であると判断している（表 3.1 参照）。外気温が最も低かった「実験 9」と「実験 11」では、ブリーディング水量は大きく、終了時間は長くなった。特に「実験 9」は、外気温が低くて相対湿度が高かったため、ブリーディング水量と時間がそれぞれ $0.21\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と 5.7 時間という最大値を示した。

図 3.7 に外気温がブリーディング水量及び終了時間に及ぼす影響について示す。外気温 25°C を基準にすると、 25°C 真下の環境条件で製造したコンクリートのブリーディング水量は、暑中期と比べて大きな増加傾向は見えなかった。ただし、ブリーディング終了時間は、暑中期よりも 30 分~1 時間程度遅くなった。それで、暑中コンクリート施工におけるブリーディング挙動の問題点は、コンクリート表面から出てくる水分量が減少することよりは、ブリーディング終了時間が短縮されコンクリート表面が早期に乾燥状態に入ることであると考えられる。

また、図 3.8 によれば、暑中コンクリートのブリーディングは、蒸発速度と関連が深く、図上で打込み後 4 時間までの蒸発量が大きくなるほど、ブリーディングは早く終了することが確認できる。従って、暑中環境においてコンクリートのブリーディング挙動に影響を及ぼす重要な因子は蒸発性状であり、実際施工現場の気温や湿度だけでなく、風速、直射日光など蒸発に影響する要因について検討し、コンクリートの表面乾燥を遅らせるための品質管理が必要である。

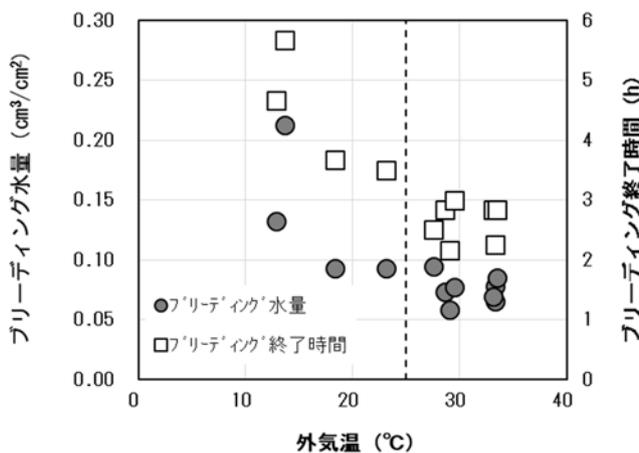


図 3.7 外気温とブリーディングの関係

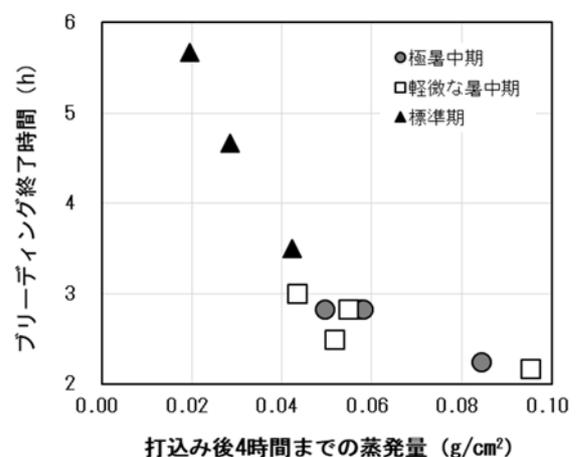


図 3.8 蒸発量とブリーディングの関係

3) 複合法ブリーディング

図 3.9 に複合法ブリーディング試験による水分移動の経時変化を示す。グラフ上のピーク点は、ブリーディング水が消失し表面の乾燥が始まる時点で湧出量を意味する。ブリーディング終了時間においては、JIS ブリーディング試験結果とほぼ同様の結果となった。総ブリーディング水量に関しては、JIS ブリーディング試験よりも小さくなっているが、複合法ブリーディング試験に用いた容器には蓋がないため、コンクリート表面に上がってくるブリーディング水の一部が蒸発したことがその原因と考えられる。よって、ブリーディング終了時点までのブリーディング挙動は、全体的に JIS ブリーディング試験結果と一致している。

図 3.10 に各試験における湧出量（ブリーディング水量）と材齢 5 日までの吸込み量を示す。暑中環境における湧出量は一部例外はあったが、約 $0.04\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の値となった。標準期では、 $0.04\sim 0.27\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となり、各試験間の測定値の範囲が JIS ブリーディング試験結果よりは大きくなった。吸込みにおいては、全ての条件で材齢 1 日までの吸込み速度が最も速く、その以降コンクリートの組織が緻密化することにより、吸込み量は徐々に小さくなる傾向が確認された。材齢 5 日まで吸い込まれた水分量は、全体的に $0.30\sim 0.35\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の水準となっており、最大値は軽微な暑中期実験の「実験 5」で $0.44\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となった。この結果から、コンクリートが乾燥状態になった後コンクリート内部への吸込み性状において、外気温や環境条件の影響はないことが認められた。

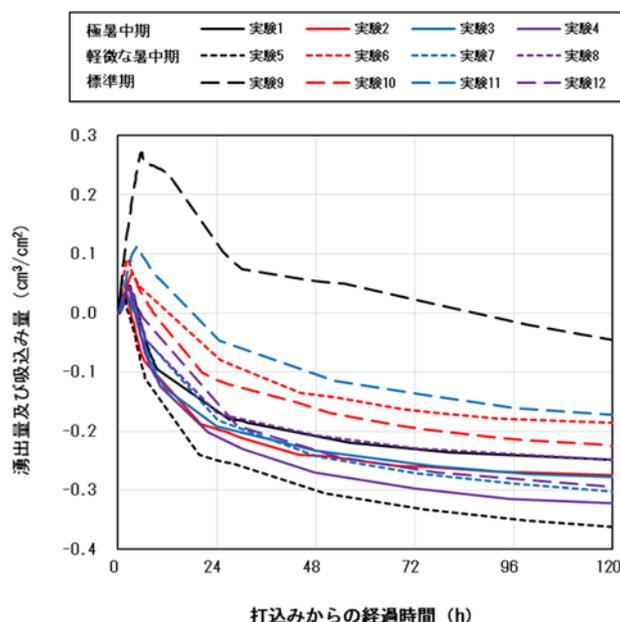


図 3.9 複合法ブリーディング試験結果 (1)

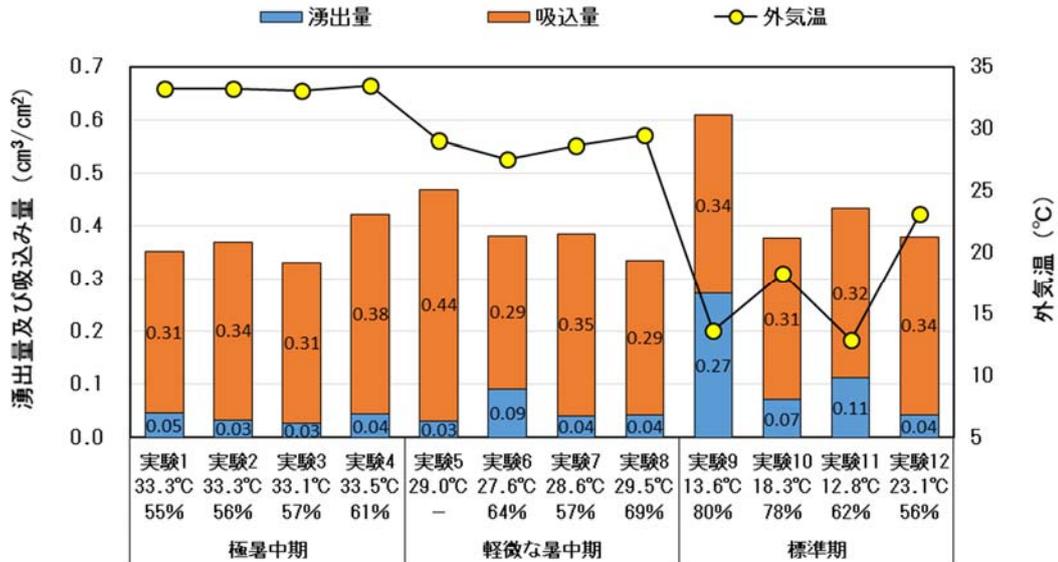


図 3.10 複合法ブリーディング試験結果（2）

4) コンクリート表面部の単位水量

コンクリートの単位水量推定試験は、施工中にレディーミクストコンクリート工場や打設現場で実施されるため、簡便かつ迅速に行えることが求められる³⁻⁷⁾。本実験で採用している高周波加熱乾燥法は、単位水量の推定原理がわかりやすく、比較的簡便で迅速に実施できる推定方法の一つである。一般に、電子レンジを用いる高周波加熱乾燥法によるコンクリートの単位水量は、式(3.1)によって求められる³⁻⁷⁾³⁻⁸⁾。

$$W = \frac{(W_b - W_c) \times (1 + \alpha)}{(W_b - W_a)} \times (C_0 + W_0 + S_0) + \frac{X}{100} \times C_0 - \frac{P}{100 + P} \times S_0 \quad \text{式 (3.1)}$$

ここに、

W : フレッシュコンクリートの単位水量の推定値 (kg/m³)

W_a : 容器の質量 (g)

W_b : 採取した試料と容器の合計質量 (g)

W_c : 乾燥後の試料と容器の合計質量 (g)

W_0 : 調合上の単位水量 (kg/m³)

C_0 : 調合上の単位セメント量 (kg/m³)

S_0 : 調合上の単位細骨材量 (kg/m³)

X : セメント質量に対する結合水量の比率 ($X=1.4$)

α : 試験法による係数

P : 細骨材の吸水率 (%)

本実験では、打ち込まれたコンクリートの表面の水分移動の観点から、蒸発量とブリーディングを測定し、最終的に表面付近の含水率の経時変化が蒸発やブリーディング試験結果とよく対応しているかを確認した。図 3.11 は、コンクリート表面の単位水量試験結果を示したものである。ここで、高周波加熱乾燥法による単位水量の推定試験は、採取した試料の中に含まれている骨材の量やバイブレータの操作などにより実験結果において誤差発生の可能性が比較的大きい。また、1g の乾燥量でも結果値は大きく違うようになること、表面付近の試料を採取する際の量や深さなどによってばらつきが生じるため、測定値自体よりも全体的な傾向を見て考察した。

本実験シリーズにおいては、「実験 12」を除いた大部分の実験で打込み時あるいは打込み直後の単位水量が調合上の単位水量である 185kg/m^3 を比較的に満足することが確認された。単位水量は、打込み後若干増加する傾向にあったが、約 2~3 時間以後逆に小さくなっている。単位水量の増加量は、実験によって異なるが、 10kg/m^3 程度の値が大きくなっており、3 時間以後には調合上単位水量の 185kg/m^3 水準、又はその以下に減少している。単位水量が減少する時期は、JIS ブリーディング試験で表面の水が消失される時期とほぼ同時である。それで、コンクリート表面の乾燥が始まるタイミングに単位水量が減少することは、打込み初期の水分移動に関する検討結果の信頼性が高く、各々のデータの関連性が高いと評価できる。一方、標準環境の実験結果、外気温が少し高い「実験 12」では暑中期と同様の傾向を見せたが、他の実験においては単位水量が持続的に増加することがわかる。グラフ上の最後のデータ以降には、表面乾燥とともに単位水量が小さくなると思われる。

以上の結果より、暑中環境で製造したコンクリートは、蒸発量が大きく、表面の水分が早くなることによって、標準期よりも早期に乾燥状態になることが定量的に明らかになった。

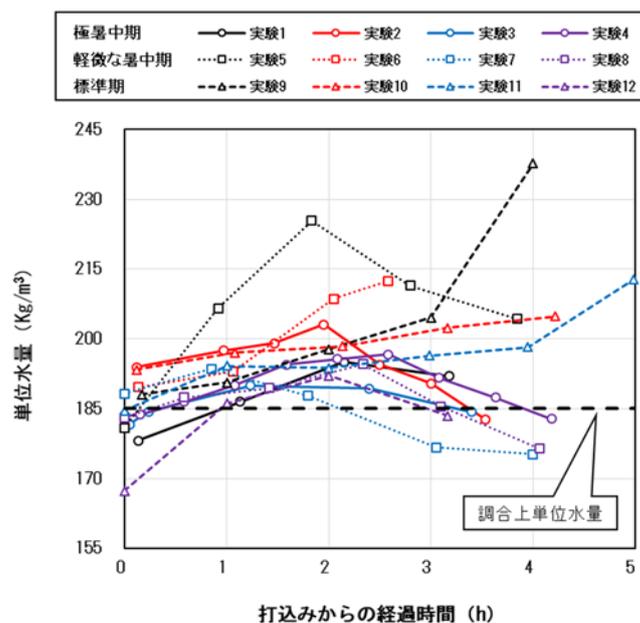


図 3.11 単位水量試験結果

3.3.3 凝結性状

1) プロクター貫入抵抗値

図 3.12 にプロクター貫入試験の結果を示す。

当然の結果であるが、暑中環境で打ち込んだコンクリートの凝結が速くなり、気温が低いほど凝結時間は遅くなることが確認された。暑中期実験においては、「実験 2」と「実験 5」の凝結が最も早く進行されたが、図 3.14 に示すように、ブリーディング終了時間が早ければ早いほど凝結は促進されることが認められた。コンクリートの凝結性状は蒸発による表面乾燥の影響を強く受けることが確認できた。しかし、標準期実験の「実験 10」は「実験 12」と比べて、ブリーディング水の消失時点が殆ど同時期であったが、凝結は 2 時間程度遅れた。これは、「実験 12」の外気温が約 5℃高く、打込みから 2 時間が過ぎた時期以後の蒸発速度が「実験 10」より早くなったことがその理由だろうと思われる。

図 3.13 に始発に達する時間と始発から終結までの経過時間を示す。

まず、始発に達する時間は、極暑中期では 4.0～5.0 時間、軽微な暑中期では 3.6～4.4 時間、標準期の場合には 4.8～7.8 時間がかかった。外気温 30℃未満以下の軽微な暑中期のほうがむしろ 33℃程度の極暑中期よりも早期に始発になることがわかる。外気温 25℃以上の暑中環境における始発時間は、外気温の高低よりも打ち込まれたコンクリートの水分移動特性により影響を受けると考えられる。外気温 33℃条件の「実験 1」と外気温 23℃条件の「実験 12」は、始発に達する時間が同様である。「実験 1」は遅延型 AE 減水剤、「実験 12」では標準型 AE 減水剤を用いたことが一つの原因と挙げられるが、ここで重要なことは、30℃未満の軽微な暑中期あるいは 25℃真下の条件においても速い凝結による品質低下を防止する対策が必要になったことである。一方で、始発から終結までの経過時間は、極暑中期で 0.9～1.2 時間、軽微な暑中期では 1.2～1.5 時間、標

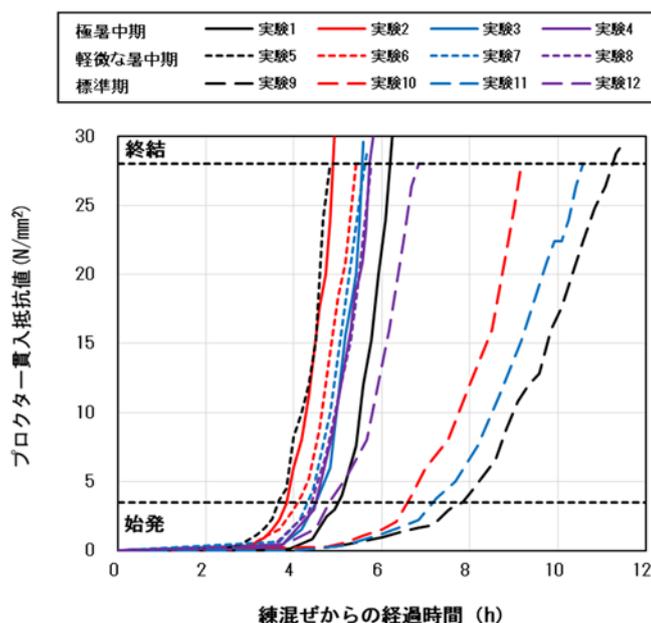


図 3.12 プロクター貫入試験結果 (1)

準環境では1.8～3.4時間となった。図 3.15 にも示すが、始発から終結までの経過時間は外気温の影響を強く受けることが認められた。一旦始発に達すると、その以降の凝結速度は、外気温が高いほど速くなると言える。

結局、暑中環境で施工されるコンクリートは、蒸発量が大きくなることによりブリーディング水が早期になくなり、その結果コンクリート表面は乾燥し始まり、凝結・硬化は促進されることが本実験の結果から数値的にも明らかになった。

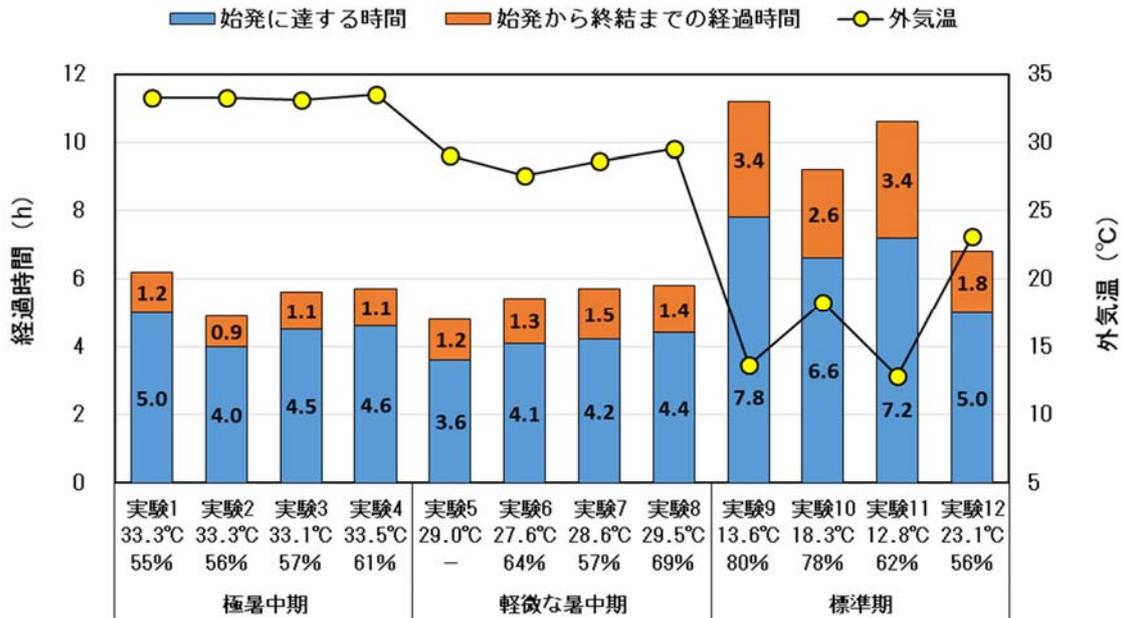


図 3.13 プロクター貫入試験結果 (2)

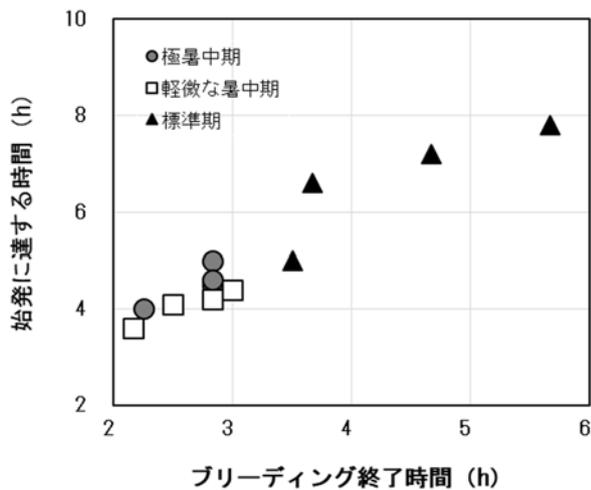


図 3.14 ブリーディング終了時間と凝結の関係

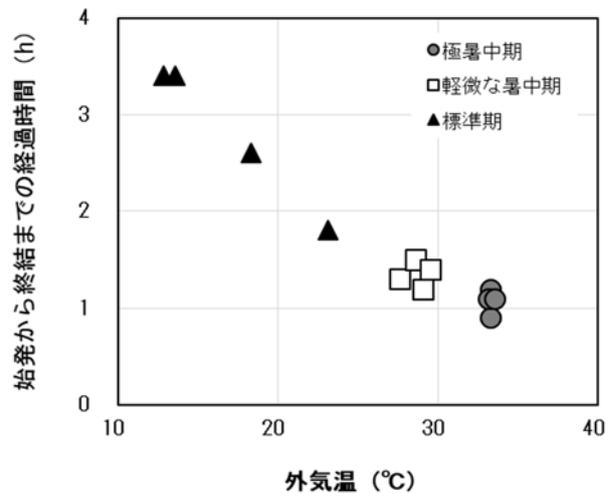


図 3.15 外気温と凝結の関係

2) N式貫入量

図 3.16 にN式貫入試験結果を示している。一部例外はあるが、外気温が高い環境であればあるほどN式貫入量は小さくなっている。暑中期実験結果が標準期実験結果よりグラフの下側に位置することからある程度は、プロクター貫入試験で確認できない範囲の凝結程度を確認することができると思われる。ただし、4 時間までの測定値においては、データの範囲が大きく、ばらついているため、今の段階ではN式貫入量が凝結程度を必ずしも代表するとは見られない。練混ぜから 4 時間が過ぎた時点におけるN式貫入量は、プロクター貫入試験の結果と同様の傾向を見せたことから、コンクリート品質管理ツールとしての可能性は確認できた。

この試験は、モルタルでなくコンクリートを対象として行われる簡易試験であるため、打込み初期には粗骨材の影響を受ける可能性がある。それで、ウェットスクリーニングしてモルタル試料に対して実験を行うことが一つの方案であると考えられるが、何よりも多くのデータを蓄積して一連のデータベースを構築することが必要である。

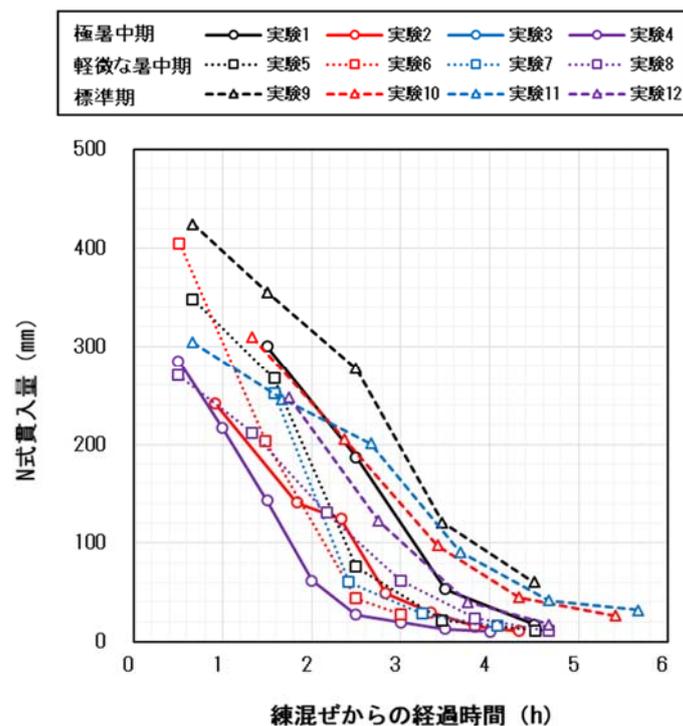


図 3.16 N式貫入試験結果

3.4 第3章のまとめ

本章では、フレッシュコンクリートの初期水分移動及び凝結特性に及ぼす気象条件の影響について調べるために、2015年度から2017年度まで3年間行ったコンクリート実機実験におけるフレッシュ性状、蒸発、ブリーディング、単位水量及び凝結性状を比較検討した。本章によって得られた結果を以下に示す。

- 1) フレッシュ性状の測定結果、外気温 30℃未満の軽暑中環境では、スランプ、空気量、コンクリート温度に及ぼす悪影響は確認されなかったが、外気温 30℃以上の極暑中環境（本実験では約 33℃）においては、コンクリートの温度上昇及びスランプロスの恐れが大きくなるため、フレッシュ性状に対する品質管理に注意する必要がある。
- 2) 暑中環境では、材齢 5 日までの総蒸発量の約 70～75%が材齢 1 日以内に蒸発するため、コンクリート打込み当日の水分蒸発を防ぐことが重要である。なお、外気温が低いほどコンクリートの蒸発量が小さくなることは明確な理論であるが、暑中コンクリート施工の基準となる日平均気温 25℃真下の条件でも蒸発性状は暑中期と同様の傾向になる可能性もある。
- 3) 暑中環境におけるコンクリートのブリーディング水量は、 $0.06\sim 0.09\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の範囲となっており、打込みから約 2.2～3.0 時間が過ぎた時期に終了しコンクリート表面は乾燥状態になる。また、暑中環境においてコンクリートのブリーディング挙動に影響を及ぼす重要な因子は蒸発性状であり、実際施工現場の気温、湿度、風速、直射日光など蒸発に影響する要因について検討しコンクリートの表面乾燥を遅らせることが好ましい。
- 4) 複合法ブリーディング試験による吸込み量は、全体的に $0.30\sim 0.35\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。コンクリートが乾燥状態になった後のコンクリート内部への吸込み性状において、外気温や環境条件の影響は大きくないことが認められた。
- 5) コンクリート表面付近の単位水量は、暑中環境下においては、打込み後若干増加する傾向にあったが、ブリーディング水がなくなってコンクリート表面の乾燥が始まることと同時に小さくなっている。一方、標準環境では単位水量が持続的に増加することが確認された。以上の結果より、暑中環境で製造されるコンクリートは、蒸発量が大きく、表面の水分が早い時期になくなることによって、標準期よりも早期に乾燥状態になることが明らかになった。

- 6) 暑中コンクリートの凝結実験結果，ブリーディング終了時間が早ければ早いほど凝結は促進される。外気温 25℃以上の暑中環境における始発時間は，外気温の高低よりも打ち込まれたコンクリートの水分移動特性により影響を受けると考えられる。ただし，始発後終結に達する時間は外気温の影響を強く受けることが認められた。
- 7) N式貫入試験によりプロクター貫入試験で確認できない範囲の凝結程度をある程度確認することができた。練混ぜ後 4 時間が過ぎた時点におけるN式貫入量は，プロクター貫入試験の結果と同様の傾向となっており，コンクリート品質管理ツールとしての可能性を確認した。
- 8) 極暑中期の条件では，軽微な暑中期と比べてコンクリート温度やスランプロスが大きくなる可能性があるが，蒸発，ブリーディング，凝結性状に関しては顕著な違いは現れなかった。暑中環境の程度がフレッシュコンクリートの水分移動及び凝結性状に及ぼす影響は大きくはないと言える。なお，軽微な暑中期のように比較的激しくない暑中環境でも，風などの影響で水分蒸発量が大きくなると，表面乾燥や凝結は同じ暑中期の範囲でも最も促進されることが認められた。従って，軽微な暑中期において，打込み後コンクリートの水分蒸発に対する対策をしっかりと講じないと，気温がより高い条件よりも早い時期に乾燥，凝結することにより，硬化コンクリートの品質に悪影響を及ぼす可能性がある。
- 9) 以上の実験結果から，暑中環境で施工されるコンクリートは，蒸発量が大きくなることによりブリーディング水が早期になくなる。その結果コンクリートの表面乾燥・凝結・硬化は促進されることが定量的に明らかになった。

参考文献

- 3-1) 暑中コンクリートの施工指針・同解説，日本建築学会，2000.09
- 3-2) 立山創一：暑中コンクリートの品質に関する研究，安藤建設技術研究所報，Vol. 18，pp.19-26，2015
- 3-3) 水田実，加藤淳司，寺澤正人：再振動締固めの強度増進効果および実施方法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011
- 3-4) 土木学会：コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策，2000.07
- 3-5) 伊藤是清ほか：暑中コンクリートにおける養生方法がコンクリートの強度および耐久性に及ぼす影響に関する研究，九州東海大学工学部建築学科，森永研究室卒業論文，1998.01
- 3-6) 小林聖，渡邊賢三，坂田昇，細田暁：ブリーディング抑制型 AE 減水剤によるコンクリートの表層品質の向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，2014
- 3-7) 松田拓，蓮尾孝一，谷口秀明，西本好克：高周波加熱乾燥法による単位水量の推定に及ぼす各種要因の検討，三井住友建設技術研究所報告，Vol.2，pp.157-162，2005
- 3-8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法ーフレッシュコンクリートの単位水量の高周波加熱乾燥法による試験方法，pp.293-297，2007

第4章

暑中環境で施工される構造体コンクリートの 強度管理に関する研究

第4章 暑中環境で施工される構造体コンクリートの強度管理に関する研究

4.1 第4章の概要

暑中環境下で製造・施工されるコンクリートは、外気温や日射の影響で温度が高くなりやすい。打ち込まれたコンクリートが高温になることは、水和反応の進行に繋がり、初期材齢における水和反応が活発になり、初期強度の発現は大きくなる。しかし、硬化体組織の密実性が標準期のコンクリートと比較して鈍化するため、長期強度の増進が少なくなる、耐久性が低下するなどの問題が生じる⁴⁾¹⁾⁴⁾²⁾。しかも暑中環境は近年の気候変動に伴い高温化かつ長期化の一途を辿っているため、暑中コンクリートの強度品質管理は今後さらに重要な課題である。一方、コンクリート材料も時代とともに変化しており、例えばセメントは、普通ポルトランドセメントにおいても初期強度が高くなる傾向にある。また使用されるコンクリートも年々高強度化している。これらは、水和発熱の増大に繋がり、暑中環境の過酷化と相まってコンクリート温度のさらなる上昇を招くことになる。結果的に、先に述べた暑中コンクリートの特徴は長所短所ともに顕在化する方向にあると考えられる。

第3章で得られた結果から、暑中環境の影響でフレッシュコンクリートの蒸発量が大きくなることによりブリーディング水が早期になくなり、打ち込まれたコンクリートの表面乾燥・凝結・硬化は促進されることがわかる。フレッシュコンクリートのこれらの性質が、構造体コンクリートの強度や耐久性にはどのような影響をするかについて明らかにする必要がある。高温により品質が低下する暑中コンクリートの性状に関しては、これまでも種々検討がなされてきたが、多くは小型試験体を用いた実験室実験であり、打込み後の温度のみならず、乾燥や内部の水分移動、水和反応による水分の消費状況などが実構造物とは異なるため、現象を定量的に評価するには無理がある。一方、実大模擬試験体を用いた既往の研究では、暑中環境下で施工された構造体コンクリートは、標準期に施工された場合と比較して、標準養生された管理用供試体に対する強度低下が大きくなる傾向にあること、対策として養生期間を長くしても強度に関しては効果が小さいことなどを確認している⁴⁾³⁾⁴⁾⁴⁾。しかしながら、上記の結果に関する定量的な根拠は必ずしも明らかになっていない。

このような状況下で、暑中コンクリートにおける品質変化に対して可能な限り定量化し、これらを適切に位置づけながら、合理的かつ現実的な対策を明示していく必要がある。本研究はその一助となることを目的とし、実大レベルの構造体コンクリートにおける温度が内部の水分分布と水和反応、最終的にはコンクリートの諸物性に及ぼす影響を検討したものである。

4.2 実験内容

4.2.1 実験概要

本実験は実構造物として施工されるコンクリートの硬化過程における温度が、内部の水分移動や水和反応、細孔構造、最終的には強度、耐久性に及ぼす影響を検討するものである。

表 4.1 に試験体及び検討項目を示す。実験環境は第 3 章と同じように極暑中期、軽微な暑中期、標準期とし、荷卸し時のコンクリート温度の目標値は、暑中期においては 35℃、標準期は 20℃としている。試験体は、図 4.1 に示すように柱を模擬して寸法を幅 1m×奥行 1m×高さ 1mとし、上下を厚さ 20cm の断熱材で覆った（以下、柱試験体）。これらの構造体の強度管理用供試体として簡易型枠に打設したφ10×20cm の円柱型試験体を用いた。柱試験体は、表面からの乾燥による構造体強度への影響を検討するために、それぞれにせき板を材齢 7 日で脱型する試験体と脱型を行わない試験体を作成した。脱型を行う試験体は、打込みから養生終了までは側面 4 面がせき板と直接接することになる。検討項目として、材齢 7 日まで所定の位置において温度測定を行い、所定の材齢にて圧縮強度、セラミックセンサによる含水率、強熱減量による結合水率、水銀圧入ポロシメータによる細孔量を測定した。

4.2.2 使用材料及び調合

表 4.2 および表 4.3 に各試験体の使用材料および調合を示す。実験に用いた材料はいずれも福岡地域で一般的に用いられる範囲のものである。調合は普通ポルトランドセメント単味の「普通 27-18-20N」を用いた。

表 4.1 実験概要

試験体	寸法	コンクリート温度の目標値 (℃)	養生方法	検討項目
柱	1.0×1.0×1.0m	35 (極暑中期&軽微な暑中期)	材齢 7 日に型枠脱型	<ul style="list-style-type: none"> フレッシュ性状：温度、スランプ、空気量、単位容積質量を測定 内部温度：材齢 7 日まで 10 分間隔 圧縮強度：材齢 7, 28, 91 日に上面から鉛直方向にコア抜きし測定、管理用供試体も同時に実施 含水率¹⁾：所定の材齢に含水率センサで測定 結合水率¹⁾：材齢 7, 28, 91 日に抜いたコアに対して測定 細孔量¹⁾：材齢 91 日に測定
		20 (標準期)	無脱型 ¹⁾	
管理用	φ10×20cm	35 (極暑中期&軽微な暑中期) 20 (標準期)	標水 ¹⁾²⁾	
			標水 ²⁾	
			現場水中	
			現場封緘	
			現場気中	

1) 極暑中期のみ採用

2) 生コン工場における生産管理と、施工現場における管理を想定し 2 種類の水中共養生を設定

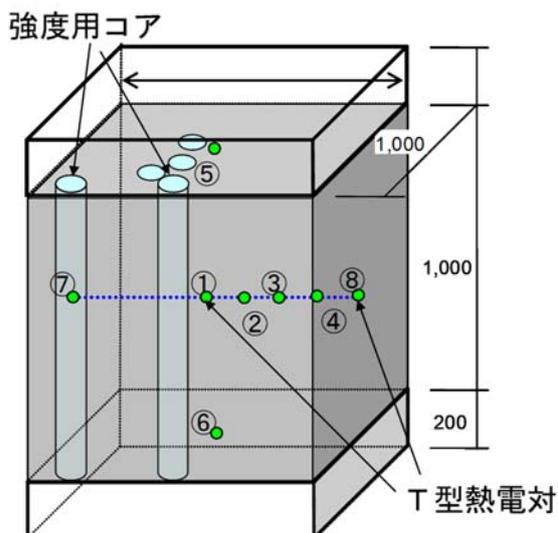


図 4.1 柱試験体の概要

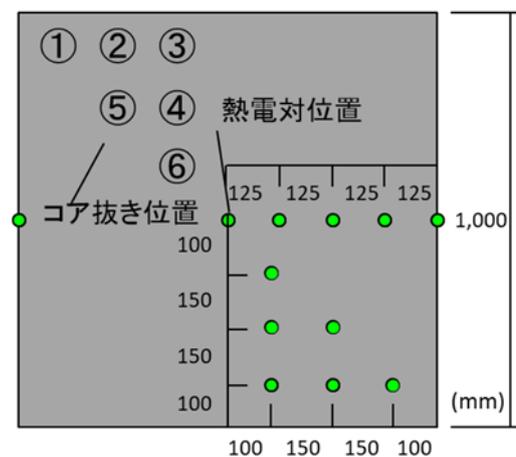


図 4.2 温度の測定位置とコア抜き位置（平面図）

表 4.2 使用材料

種類	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³
水	地下水
細骨材	福岡県朝倉産砕砂 絶乾密度：2.70g/cm ³ 吸水率：0.64% 粗粒率：2.70
粗骨材	福岡県朝倉産碎石 絶乾密度：2.74g/cm ³ 吸水率：0.60% 実積率：59.5%
混和剤	AE 減水剤(遅延形 I 種) AE 減水剤(標準形 I 種)

表 4.3 コンクリートの調合（普通 27-18-20N）

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		C	W	S	G	混和剤
50	45.5	368	184	852	947	4.05

4.2.3 養生方法

柱試験体の湿潤養生の方法は、JASS 5.8.2「湿潤養生」の a 項に示される種々の方法のうち「透水性の小さいせき板による被覆」を採用した。以後、湿潤養生の終了時期として「せき板の脱型時期」あるいは単に「脱型時期」を用いる。脱型時期は内部温度測定が終了する材齢 7 日とした。また、暑中期実験の場合は、脱型による表面乾燥の影響を検討するために無脱型試験体を追加した。管理用供試体の養生方法は、標準養生（20℃水中）2 種類、現場水中、現場封緘、現場気中養生とし、柱試験体から得られる構造体コンクリート強度と比較した。標準養生においてはレディミクストコンクリート工場における生産管理、および施工現場における強度管理を想定し、それぞれ試験体を作成した。すなわち「標準養生 1」は工場で練混ぜ直後に試験体を採取し、約 20℃の試験室内に材齢 1 日まで静置後、脱型して 20℃水中養生を開始した。「標準養生 2」は打込み現場にて採取し、材齢 1 日まで現場に静置後、翌日脱型して 20℃水中養生を開始した。他の試験体は、標準養生 2 と同様、材齢 1 日まで現場に静置後、現場水中および現場気中養生用試験体は脱型してそれぞれ曝露室に設置した水槽内ならびに曝露室内に静置した。現場封緘養生用試験体は、打込み直後より曝露室内に静置した。管理用供試体はいずれも各々 9 体で、材齢 7, 28, 91 日で強度試験を行い、柱試験体との比較を行った。

4.2.4 測定項目及び方法

以下に各測定項目及び方法を示す。

1) 内部温度

柱試験体においては、図 4.1 及び図 4.2 に示す位置でコンクリート温度の経時変化を材齢 7 日まで測定した。温度測定には T 熱電対を使用し、10 分間隔で自動測定した。

2) 圧縮強度

柱試験体は、材齢 7, 28 及び 91 日でコア抜きし、圧縮強度およびヤング率を測定した。コア抜き位置を図 4.2 に示す。図上のコア番号①～③においては構造体コンクリートの表面部、コア④～⑥においては内部と想定し、強度に及ぼす表面乾燥の影響を検討した。コア抜きは上面から鉛直方向に行い、得られた $\phi 10 \times 100\text{cm}$ のコアから、上下端のそれぞれ 15cm 程度を切除した約 70cm の残部から、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体を 3 本作成した。また、この 3 本に挟まれる 2 本の $10 \times 4\text{cm}$ の試験体を作成し、次節に示す結合水率などの測定を行った。管理用試験体の圧縮強度の測定は、材齢 7, 28, 91 日で行った。コア、管理用いずれも強度試験においては載荷時の上下面は軽微な研磨仕上げを行った。また、載荷試験に先立ち密度の測定を行った。

3) 含水率

構造体コンクリート強度に及ぼす温度の影響を部材内部における水分の挙動から検討するために、柱試験体の中心部から表層にかけての含水率を測定した。柱試験体内部に表層から 0.5cm, 2.5cm, 5cm, 7.5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm の位置に取り付けた埋め込みセラミックセンサ⁴³⁾の電気抵抗値を携帯型測定器で測定し、これをインピーダンス測定器(LCRメータ)による電気抵抗に変換し、含水率を求めた⁴⁴⁾。センサの設置位置を図4.3および写真4.1に示す。測定は材齢1日から91日まで実施した。

4) 結合水率

先に述べた鉛直方向コアから切り出した試料を用いて結合水率の測定を行った。まず、試料を酸化させないように注意して粉碎作業を行い、アセトン中で水和反応を停止させ保管した。次に、この試料を105°Cの電気炉内に約24時間入れて絶乾状態にして質量(質量1)を測定した後、電気炉内で500°Cまで熱して約20分間保ち、温度が下がった質量(質量2)を測定した。得られた質量の差(質量1-質量2)から結合水率の値を出した。

5) 細孔量

細孔量測定用試料は、材齢91日に抜いたコアの所定の位置で破碎したコンクリートから得たモルタル分を2.5~5.0mmの粒度に調整した後、アセトン処理及びD-dry処理を行って作製した。これを水銀圧入式ポロシメータにより試験体の細孔空隙の分布を測定した。

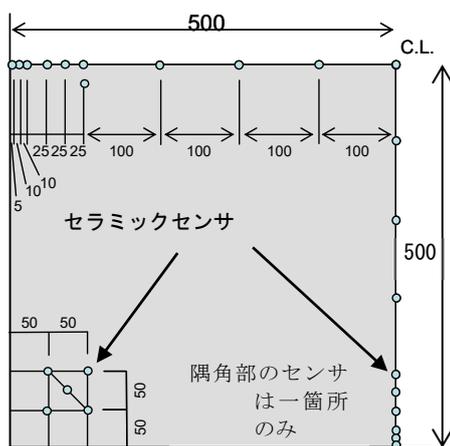


図 4.3 含水率センサの設置位置



写真 4.1 含水率センサの設置状況

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 フレッシュ性状

表 4.4 に練上がり時及び荷卸し時におけるコンクリート温度，スランプ，空気量，単位容積質量の測定値をそれぞれ示している。環境条件による日平均気温と日最高気温は，それぞれに対して，極暑中期では 30.0，35.5℃，軽微な暑中期では 27.8，29.9℃，標準期は 17.5，22.8℃程度で，第 3 章の測定値と同様の水準であった。極暑中期，軽微な暑中期，標準期いずれも大きなエアロスはみられなかったが，極暑中期のコンクリートにおいて，練上がりから荷卸しまでの間にスランプロスがみられた。また，それぞれのコンクリートの単位容積質量が違う。この要因としては，暑中期の実験においては，荷卸温度の目標値を満たすために練混ぜ時に，熱した水をポンプ圧送し，手動により計量器に注水したためと考えられる。

表 4.4 フレッシュコンクリートの性状

	打込み時期	コンクリート温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	外気温 (℃)	
						日平均気温	日最高気温
極暑中期	2013.08.06	34.0	13.5	4.0	2.39	30.0	35.5
		35.5	7.0	4.2	2.39		
軽微な暑中期	2014.08.01	34.0	18.5	4.9	2.49	27.8	29.9
		35.3	18.0	5.0	2.32		
標準期	2013.11.06	20.0	19.0	5.8	2.29	17.5	22.8
		22.0	17.0	5.9	2.28		

* 上段：練上がり時，下段：荷卸し時

4.3.2 温度性状

図 4.4 と図 4.5 に、図 4.1 に示す位置で測定した温度の変化である。極暑中期においては中心部の最高温度は 80°C 程度まで上昇し、最高温度に達する時間は約 17 時間であった。また、中心部と表面部の最高温度の温度差は 20°C 程度となった。軽微な暑中期の場合は、図は省略するが、中心部の最高温度は約 70°C、表面部は約 60°C となっており、極暑中期と比べて表面部の最高温度は同程度であるが、中心部の最高温度は 10°C 程度低いことが確認された。標準期においては、中心部の最高温度は 60°C 程度であり、暑中期に比べて 10~20°C 程度低く、最高温度に達する時間も少し遅くなる。また、特に標準期において顕著なように、いずれの試験体も表面に近づくに従い外気温の変動に影響を受け、温度上昇の幅も小さくなっている。

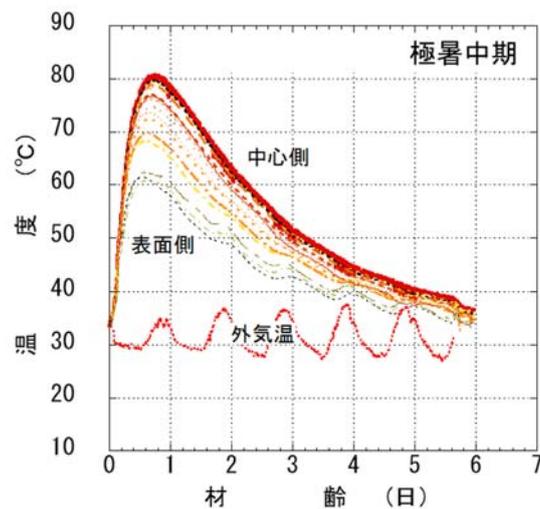


図 4.4 温度性状（極暑中期）

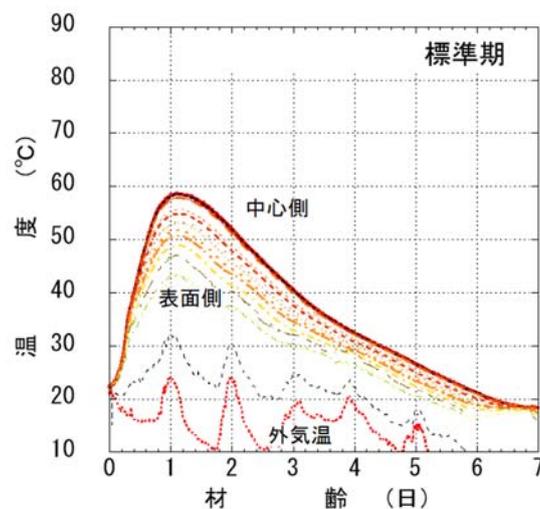


図 4.5 温度性状（標準期）

4.3.3 圧縮強度

図 4.6 に極暑中期実験の管理用供試体及び柱試験体から抜き取ったコアの強度発現性状を示す。極暑中環境における管理用供試体では、「現場気中」の強度が最も低く、長期での増進もほとんど見られない。91 日の強度値は「標水 1」と比べて約 17N/mm^2 低く、いずれの管理用供試体の 7 日強度よりも低い値となった。他の管理用供試体では、「標水 1」の強度が最も高く、「標水 2」と「現場水中」はほぼ同程度、「現場封緘」それらより若干低い値となった。

極暑中期実験の構造体強度では、いずれの試験体においても管理用供試体のうち、「現場気中」と同程度または少し高い値であり、材齢に伴う強度増進も小さい。まず、材齢 7 日に脱型した試験体においては、表面部 (①, ②, ③) よりも内部 (④, ⑤, ⑥) の強度が若干高くなった。暑中コンクリートの長期強度増進の鈍化について、本実験では温度が高くなることと脱型後の表面乾燥の二つの要因を挙げられるが、実験結果から表面部は温度の影響よりも、乾燥・水分蒸発が影響していると考えられ、温度よりも表面乾燥による強度低下が大きいことが確認された。これは、表面部コアの密度が内部コアに比べて低くなって、強度低下を引き起こしている結果である。すなわち、表面部は乾燥・水分の蒸発により、水分を失い、水和反応が停滞し、強度が低下し、材齢にともなう強度増進も鈍化すると推測できる。

反面、表面乾燥及び水分蒸発が起こさないように配慮した無脱型試験体においては、表面部の強度が内部の強度よりも高くなった。これは、せき板による養生の効果と推測される。また、試験体の中心部と表面部の最高温度の差が 20°C 程度であったことから、乾燥がない条件ではコンクリート温度が高温になるほど長期強度に悪影響を及ぼすことが確認された。つまり、暑中環境で施工されるコンクリートは温度コントロールと養生の両方から品質管理をする必要があると考えられる。脱型有無による強度性状は、91 日強度の平均値がそれぞれ 31.6N/mm^2 と 31.7N/mm^2 で一致している。無脱型試験体においては、表面乾燥により強度低下を抑制して 7 日脱型試験体より高い強度を期待したが、本実験結果ではそのような傾向は見られなかった。これは締固め状態などの他の要因を挙げられるが、試験体ごとにコア内部と表面部の強度性状を考察することには問題ないと思われる。

図 4.7 に軽暑中環境における強度発現性状を示す。「現場封緘」供試体は標準水中養生を行った供試体と同等の強度を示し、軽暑中環境の管理用供試体においては保水養生でもその効果が十分であることが認められた。「現場気中」供試体の強度は最も低くなっており、91 日材齢において他の試験体との強度差は最大約 15N/mm^2 で極暑中期の実験結果と同様の傾向を見せた。しかし、構造体コンクリートの強度において、極暑中期実験では「現場気中」供試体の強度と同程度であったが、軽微な暑中期では表面部、内部いずれも「現場気中」供試体より 7N/mm^2 程度大きくなっている。これは、同じ暑中環境でも比較的気温が低い軽微な暑中期に施工された場合の強度発現性が大きいことを意味する。コアの位置については、表面部と内部の強度が一致している。このことから、軽微な暑中期においては、表面部の乾燥や内部の高温化による強度低下のリスクが極暑中期よりも小さいことが認められた。つまり、コンクリートの内部温度が約 70°C 程度まで上

昇する軽微な暑中期の場合には、高温による強度低下が極暑中期より小さく、コア位置に関わらず同様に強度が増進されることが明らかになった。

図 4.8 に標準期実験の圧縮強度測定結果を示す。管理用供試体の強度は、7 日と 28 日強度は「標水 1」と「標水 2」が若干高い値であり、91 日強度は「現場気中」以外の試験体はほとんど同程度となった。「現場気中」の 91 日強度は、他の管理用供試体より約 13N/mm^2 低く、構造体強度よりも最大 10N/mm^2 程度小さくなった。これは、材齢 1 日から乾燥状況にあったこと、試験体の寸法が小さいことがその原因であると考えている。コア強度においては、7 日と 28 日の強度はコア試験体の位置によって違いがみられないが、28 日から 91 日までの強度発現は表面部で顕著である。この試験体も 7 日に脱型を実施したため、標準期でも乾燥による悪影響はなく、内部より低い温度が長期強度をもっと増進させたと思われる。

以上の結果から S 値（材齢 91 日の構造体強度と 28 日の標準養生供試体強度の差）を検討して図 4.9 に示す。極所中期の 7 日脱型試験体では 6.1N/mm^2 、無脱型試験体では 5.8N/mm^2 となって、両方とも $_{28}S_{91}$ 値は 3.0N/mm^2 を超えることとなった。特に、7 日脱型試験体の表面部と無脱型試験体の内部においては S 値が 6.0N/mm^2 を超えて、極暑中環境における表面部の乾燥及び内部の高温化による強度低下の問題点を確かに見せている。半面、軽微な暑中期の S 値は、 2.3N/mm^2 となって極暑中期より大幅に小さくなった。JASS5 では、暑中コンクリート工事適用期間における構造体強度補正值 S を外気温 25°C 未満の条件では 3.0N/mm^2 、外気温 25°C 以上の条件では 6.0N/mm^2 と規定しているが、本実験結果からみるとこの規定値は軽微な暑中期においては過度であると思われる。軽微な暑中期でも S 値 6.0N/mm^2 を考慮して調合設計を行うとコスト上昇に繋がるため、適切な対応とは言えず、第 3 章で述べたように、打込み初期の水分蒸発及び乾燥に対する対策をよく立てれば標準期の S 値 3.0N/mm^2 でも十分に強度管理ができると考えられる。ただし、極暑中期においては 6.0N/mm^2 という管理基準値は妥当性があり、この値を下げるための品質管理が重要であり、「4.4 暑中コンクリートの強度管理方法」で強度低下に対する対策について記述する。一方、標準期の S 値は、コア④で 3.0N/mm^2 を少し超えているが、平均値は 1.7N/mm^2 となった。

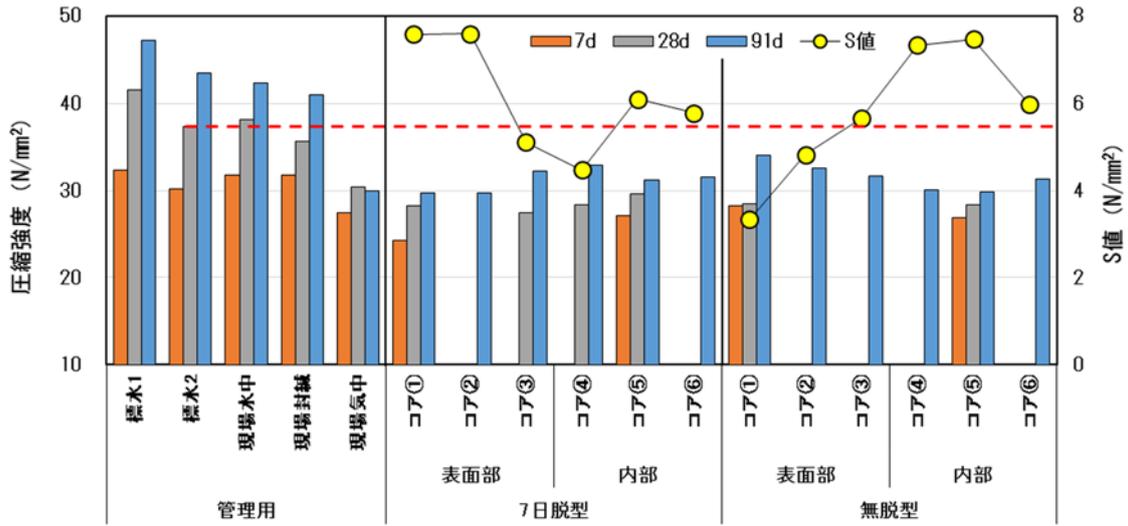


図 4.6 圧縮強度測定結果（極暑中期）

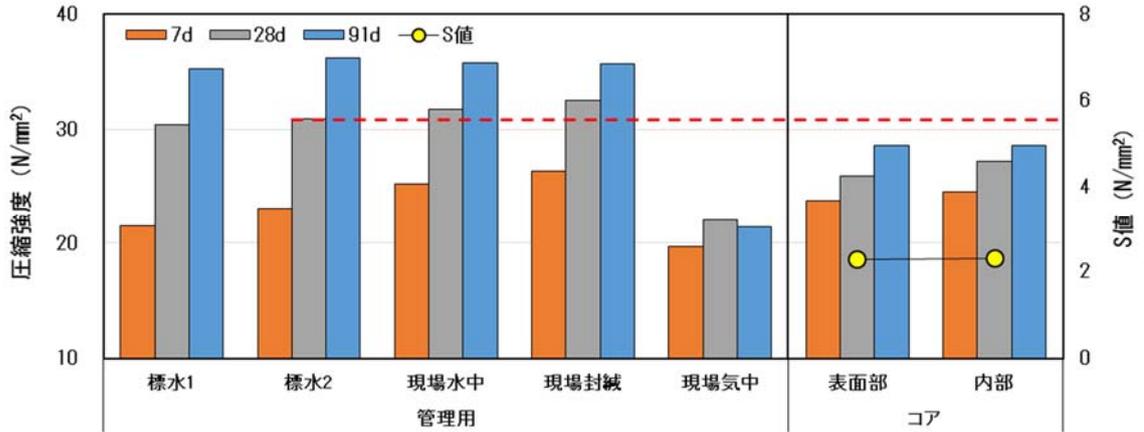


図 4.7 圧縮強度測定結果（軽微な暑中期）

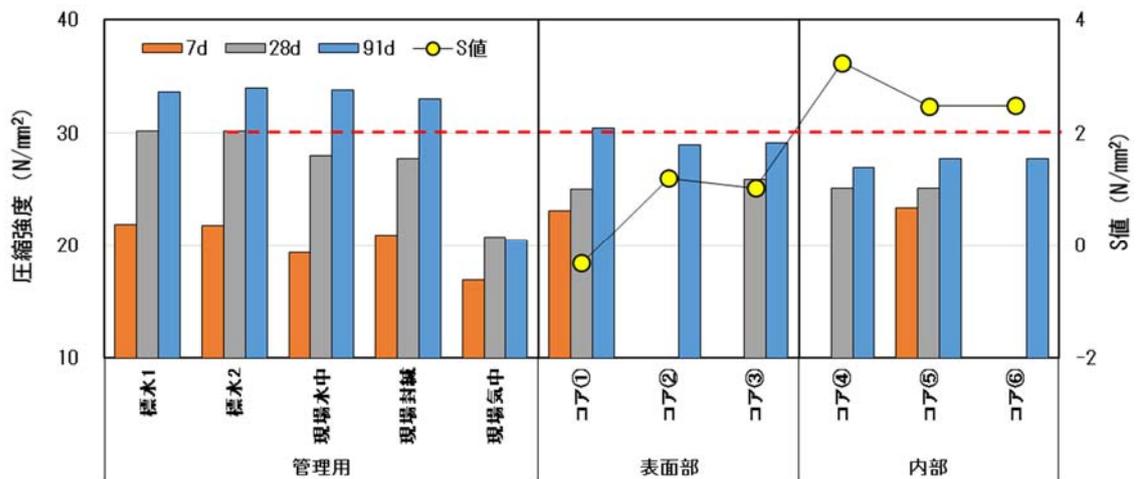


図 4.8 圧縮強度測定結果（標準期）

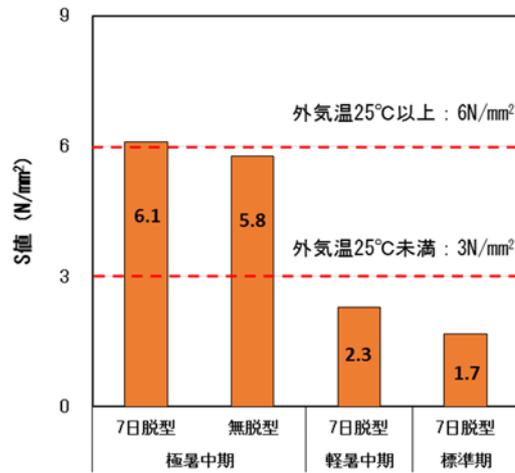


図 4.9 S 値の検討結果

4.3.4 含水率

図 4.10 に極暑中期実験におけるセラミックセンサによって測定された含水率を示す。なお、センサの故障により結果をまとめられなくなり、この項では同様の時期に同様の条件で行った既往の研究^{4,5)}から得られた結果を示す。図上の黒塗りは脱型前の状態で、材齢 5 日まで養生しており、5 日以前の乾燥は水和に伴う自己乾燥である。材齢 5 日までの含水率は、柱試験体の中心部に行くほど若干高くなったが、これは大差ないと思われる。反面、材齢 5 日以降乾燥が開始されることに伴い、柱試験体の乾燥面から水分が蒸発し含水率が低下しており、乾燥が顕著な範囲は表面から 10 cm 程度となる。また、柱試験体内部の含水状態は、材齢が経過してもあまり乾燥が進まない結果となった。以上のことから、強度試験用に鉛直方向にコア抜きした試験体のうち、表面部のものがこの領域を一部含むことになり、内部コアに比べて表面コアの強度が低くなっていると考えられる。すなわち、脱型後の表面からの水分の逸散により水和反応に必要な水分が不足し、水和が促進されず、強度低下を招くということである。

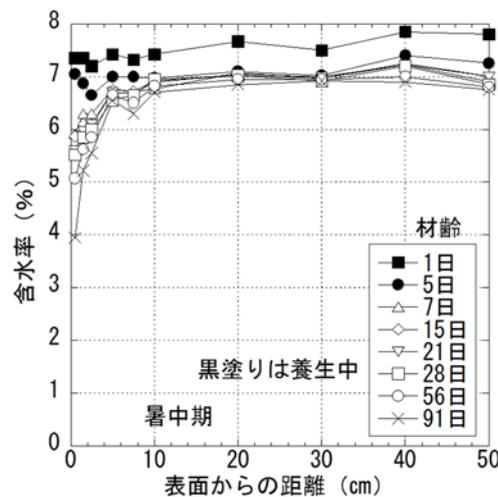


図 4.10 含水率測定結果 (極暑中期)

4.3.5 結合水率

図 4.11 に極暑中期実験における結合水率と圧縮強度の関係を示す。管理用供試体は、材齢 7, 28, 91 日に対して 1 本ずつ、コア試験体は、材齢 91 日に対して 3 本ずつ示したものである。管理用供試体においては、結合水率が高くなれば、圧縮強度が高いという相関があることが分かる。しかし、「現場気中」供試体の結合水率は材齢経過につれてあまり変わらない結果となり、長期強度における水和反応が停滞したことが確認された。一方、コア試験体の場合には、材齢 91 日での結合水率は約 12.1~13.6%となった。既往の研究⁴⁾⁶⁾から得た実験結果(約 14%)よりは若干小さい結果となった。ここに示さないが、標準期に行った実験では、材齢 28 日で約 14%, 91 日で最大 20%となって、標準環境では長期材齢に行くほど結合水率の増加が見られ、水和反応が持続的に起こることが認められる。また、コア位置や脱型有無による測定値の大小は見られなく、圧縮強度とは異なり、高温と乾燥が結合水率に及ぼす影響については明確な説明ができない。なお、同程度の結合水率を有する試験体の圧縮強度は管理用供試体の方が構造体試験体よりも大きいことがわかる。このことは、構造体コンクリートにおいて、水和に必要な水分の保有能力が高く、水和反応が起こる領域が広いためであると考えられる。ただし、管理用供試体のように積極な養生が不可能であるため、現場条件を考慮した最適な技術を立てる必要がある。

図 4.12 に既往の研究⁴⁾⁶⁾から得た結合水率と圧縮強度の関係を極暑中期と標準期で比較して示している。極暑中期においては結合水率と圧縮強度の相関が標準期より低い。また、極暑中期と標準期の結合水率が同程度であっても、硬化体組織が緻密とならず、強度増進につながりにくいことが伺える。

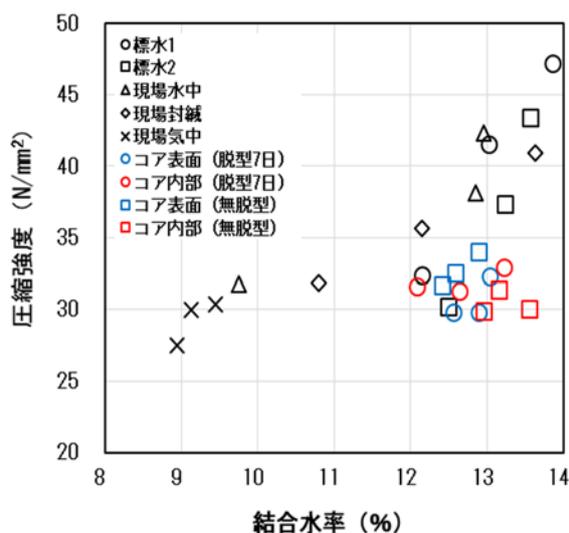


図 4.11 結合水率と圧縮強度の関係 (極暑中期)

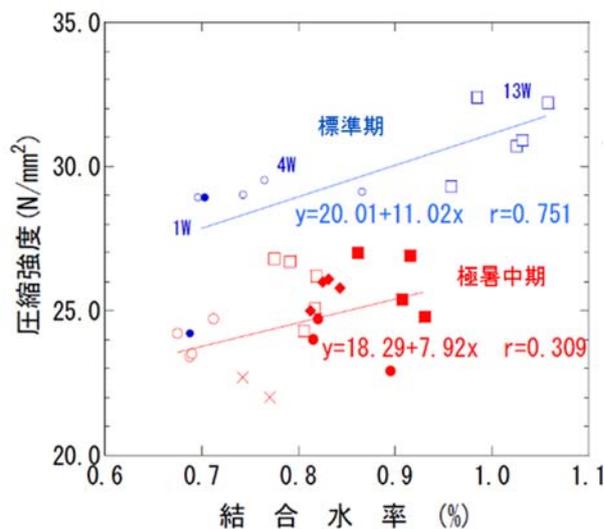


図 4.12 結合水率と圧縮強度の関係

4.3.6 細孔量

図 4.13 に極暑中期における各試験体の全細孔量，全細孔量のうち直径 50nm 以上の細孔量及び圧縮強度を示す。全細孔量は，全体的に 12～16%の範囲となった。

管理用供試体では，全細孔量が大きくなると 50nm 以上の細孔量も増加していることがわかる。また，その傾向とともに圧縮強度の大小も一致している。「現場気中」の養生を行った試験体においては，50nm 以上の細孔量が他の管理用試験体よりも大幅に増加し，このことが原因で圧縮強度も堅調に小さくなった。一般的に 50nm 以上の細孔径が強度に悪影響を及ぼすと知られているが，本実験でもそのような傾向が確認された。当然ながら打ち込まれたコンクリートの水分消失を抑制し，養生温度は低くすることが，細孔構造を緻密化させ，力学的に優れるコンクリートを製造することができると言える。

また，構造体コンクリートの測定結果において，無脱型試験体の場合は，表面から抜いたコアにおける 50nm 以上の細孔量が約 5.2%で内部コアの測定値 6.7%より小さいことに伴い，圧縮強度は大きくなっている。これは，柱試験体中心部の温度が高くなることにより，粗雑な硬化組織を生成しているためと考えられる。7 日脱型試験体では，内部コアの全細孔量及び 50nm 以上の細孔量が表面コアと同程度であったが，圧縮強度は 1.5MPa 程度高くなった。このことから，必ずしも細孔量と圧縮強度が相関関係にあるとは言えないが，先に述べた通り養生終了後表面付近で乾燥が始まり，含水率が減少することにより，水和反応を阻害していると判断される

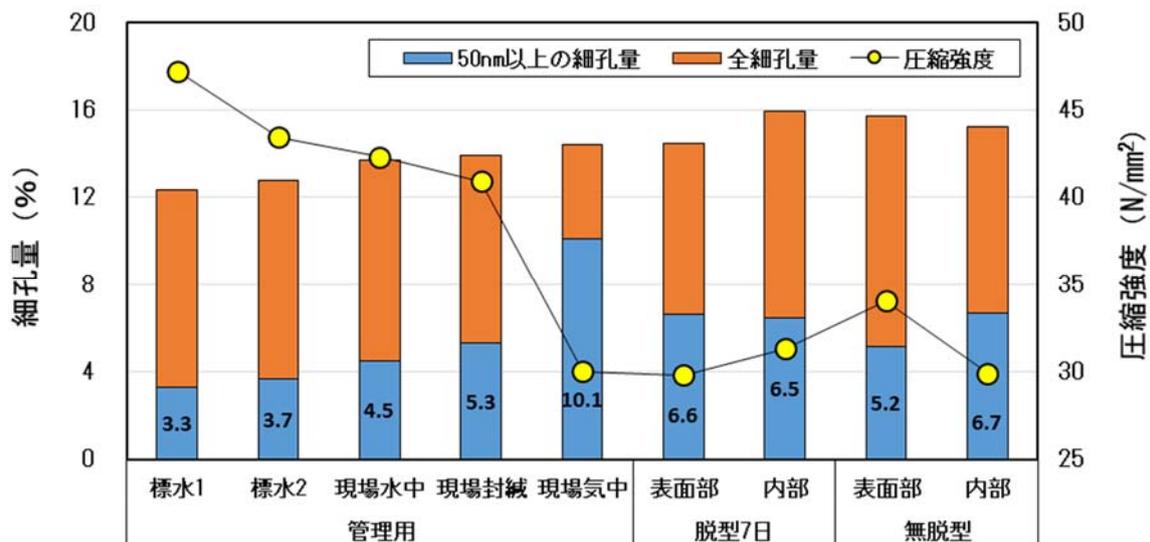


図 4.13 細孔量測定結果（極暑中期）

図 4.14 に細孔量と圧縮強度の関係を示す。高温の影響を受ける 7 日脱型試験体と無脱型試験体の内部（赤色の丸&四角）と乾燥条件を想定した 7 日脱型試験体の表面部（青色丸）における細孔直径 50nm 以上の細孔量及び圧縮強度は、おおよそ同様な値となった。ここで、比較的水和温度が低く、乾燥の影響を受けないようにした無脱型試験体の表面部（青色四角）の場合は、圧縮強度、細孔構造ともに品質向上効果が認められた。従って、暑中環境下ではコンクリートの高温及び乾燥を防ぐことが健全なコンクリートを製造する最適な方法であると考えられる。

図 4.15 に極暑中期及び標準期における細孔直径 50nm 以上の細孔量と圧縮強度との関係を示す。極暑中期の細孔構造は粗大であり圧縮強度が低い値となっていることを考慮すると、標準期の場合は水和の進行に伴って硬化体組織が緻密となり強度が増進するのに対して、暑中期の場合には長期の水和が停滞していることが認められる。

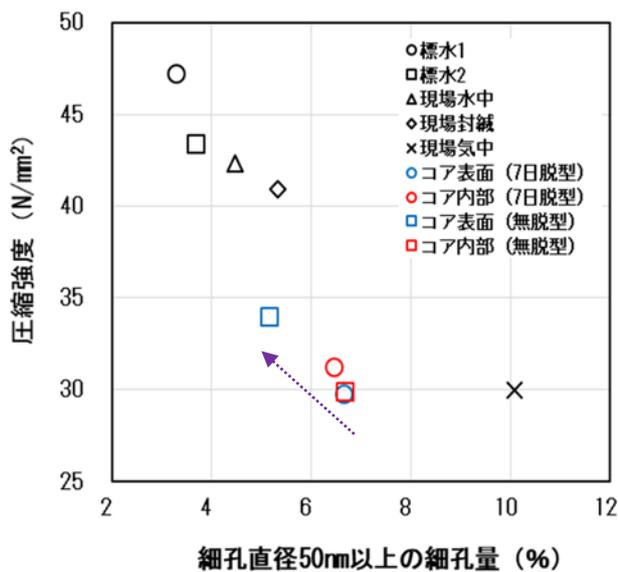


図 4.14 細孔量と圧縮強度の関係（極暑中期）

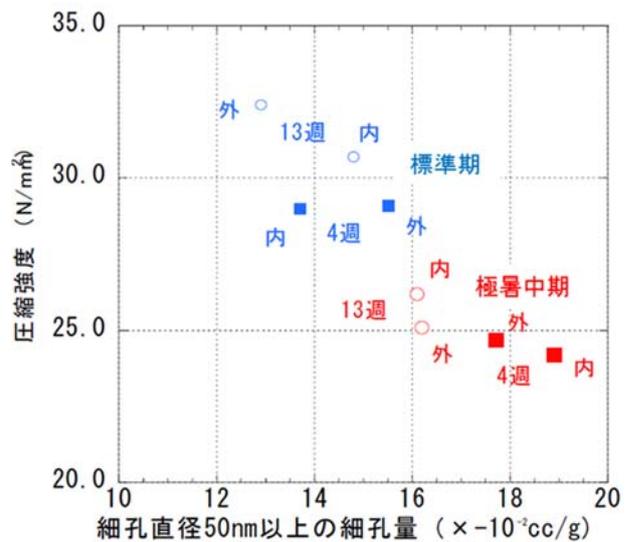


図 4.15 細孔量と圧縮強度の関係

4.4 暑中コンクリートにおける強度管理方法の提案

「4.3 実験結果及び考察」から、極暑中環境で製造・施工されるコンクリートは、コンクリート内部の高温化及び表面部の乾燥により粗雑な硬化体組織の生成され、結果的に構造体コンクリートの圧縮強度が低下することが確認された。半面、軽暑中環境では、強度低下が小さく構造体強度補正值 S を大きく低減できることを明らかにした。しかし、暑中コンクリートに関する現在の関連規定や仕様書では、軽微な暑中期や極暑中期の区分がなく、両方同時に扱っているが、これは品質管理の側面で望ましくない。暑中環境の程度（本実験では打込みから 24 時間までの平均気温 30°C を基準とする）が構造体の強度性状に及ぼす影響は大きく異なるため、極暑中期と軽微な暑中期に対してそれぞれの強度管理方法を提示する必要がある。本節では、暑中コンクリートの S 値を低減するための強度管理方法について極暑中期と軽微な暑中期と分けて示している。

管理用供試体の実験結果、極暑中環境でも給水や保水養生を行うことでコンクリートの圧縮強度が高くなることがわかる。しかし、実際の現場で部材の養生を管理用供試体のように実施することは非常に難しいため、他の方法で強度管理を行う必要がある。

表 4.5 に暑中コンクリートの強度管理方法について示す。まず、極暑中期と軽微な暑中期いずれも温度上昇を小さくすることが重要である。本研究の範囲では、構造体コンクリート中心部の温度が 70°C まで上昇しても（軽微な暑中期の場合）、強度にはあまり影響しなかったため、 70°C を温度上昇の限界とすることが好ましいと考えられる。さらに極暑中期のように表面部の乾燥による強度低下が見られず、型枠の存置期間に対する負担も大きくないが、型枠をできるだけ長期間存置し、型枠を外した以後散水などを実施し乾燥に対応することがよいと考えられる。

表 4.5 暑中コンクリートの強度管理方法

環境条件	実験結果						強度管理方法
	最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)		S 値 (N/mm^2)		強度低下の原因		
	表面部	内部	表面部	内部	表面部	内部	
軽微な暑中期	60	70	2.3	2.3	乾燥や高温化による強度低下が大きい		基本的な管理方法でよい 1. 温度管理 練混ぜ時のコンクリート温度調節（低温水など） 内部温度が 70°C 水準以下になるようにする 2. 乾燥防止（省略可能） 型枠をできるだけ長く存置する 乾燥開始の時期に散水する
極暑中期	60	80	6.8	5.5	乾燥	高温化	上記に加えて積極的な管理方法が必要 1. 設計基準強度を高める 2. MPC, FA, BB などを使用する 3. デキストリンを添加する 4. 人工軽量骨材を置換する（第 7 章）

一方、極暑中期の場合には、温度上昇と表面乾燥の両方から悪影響を受けるので、これらに対応できる積極的な管理方法が必要であり、以下にいくつかの方法を提示する。

① コンクリートの設計基準強度を高くする

普通ポルトランドセメントをそのまま使用しながら圧縮強度を高めて S 値を低減させる方法である。しかし、この方法はコストが上昇し、単位セメント量が多くなることによりコンクリートの内部温度はさらに高くなる恐れがあるため、合理的な対応とは言いにくい。

② MPC, FA, BB などを使用する

中庸熟ポルトランドセメント (MPC) , フライアッシュ (FA) , 高炉セメント (BB) を使用して暑中コンクリートの強度低下に対する対策を検討した既往の研究⁴⁻⁶⁾⁴⁻⁷⁾から得られた S 値の検討結果を図 4.16 に示す。結果的に、MPC, FA, BB を使用することは、水中及び封緘養生を行った管理用供試体と同程度の強度を発現させることが可能であり、図から分かるように S 値の低減策として有効である。

③ デキストリンなどの混和剤を使用する

焙焼デキストリンとは、澱粉を酸で加水分解し、加熱した加工澱粉の一種であり、コンクリートの水和を抑制する効果があり、暑中コンクリートの品質改善が期待できる。これまで暑中コンクリート分野では検証されていない焙焼デキストリンというものを使用し、コンクリート温度の低減及び長期強度の品質改善を目標に検討を行っている。今は研究中の段階であるため本論文には示さないが、構造体内部の温度上昇を抑制し S 値を低減 (約-7.7N/mm²) させる効果が確実に検証できた。

④ 人工軽量骨材を使用する

人工軽量骨材の自己養生効果に着目し、細骨材の一部に対して置換すると、長期にわたって水和反応が進行、結果的に強度を高めることが可能である。本論文の第 7 章に詳細に述べる。

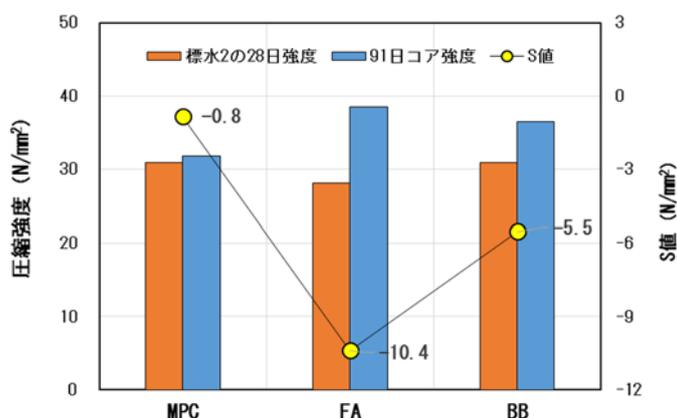


図 4.16 既往の研究⁴⁻⁶⁾⁴⁻⁷⁾における S 値の検討結果

4.5 第4章のまとめ

本章では、暑中環境で施工される構造体コンクリートの温度ならびに内部の水分挙動が強度発現に及ぼす影響について検討することを目的として、実大模擬試験体を用いた実験を行い、温度、含水率、結合水率、ポロシティを中心に測定し、強度性状との関係を検討した。実験により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 極暑中期においては、中心部の最高温度は 80℃程度まで上昇し、表面部の最高温度は中心部と比べて約 20℃程度低い。軽微な暑中期においては、中心部で 70℃、表面部で 60℃水準となり、極暑中期と比べて内部の温度上昇は 10℃程度低くなった。標準期実験においては、中心部の最高温度は 60℃程度であり、暑中環境における表面部の最高温度と同程度である。また、いずれの試験体も表面に近づくに従い外気温の変動に影響を受け、温度上昇の幅も小さい。
- 2) 極暑中環境下で打ち込まれたコンクリートは、長期材齢における強度の増進が鈍化する。この傾向は、サイズの小さい管理用供試体よりも断面の大きい構造体コンクリートにおいて顕著となった。しかし、暑中環境が比較的激しくない軽微な暑中期においては強度低下が極暑中期ほど大きくなかった。
- 3) 極暑中環境下で施工された構造体コンクリートの 91 日強度と標準養生供試体の 28 日強度の差から求められる S 値は、すべての条件で 3N/mm²を超えてしまい、JASS5 で規定されている 6N/mm² で管理する必要がある。半面、軽微な暑中期では 2.3N/mm² となって標準期の規定である 3N/mm² 以下の範囲となっており、強度低下のリスクが極暑中期より小さいことが確認された。従って、同じ暑中環境であっても、軽微な暑中期に対して JASS5 の S 値を適用することは過度であるため、暑中環境のレベルに応ずる S 値についてさらなる検討する必要があると考えられる。
- 4) 極暑中期実験における無脱型試験体の高温となるコンクリート内部における圧縮強度は低い値となっている。これは、高温による急速な水和反応により、硬化過程初期に粗雑な硬化体組織を生成し、さらに、長期における水和反応を阻害しているためと考えられる。その反面中心部より温度が低く、乾燥の影響を受けないように配慮した表面部においては、他の条件と比べて、空隙量が少なく、強度が高くなった。
- 5) 極暑中期実験において、材齢 7 日に脱型を行った試験体の表面から 100mm は脱型以降に含水率が低下しており、材齢に伴い内部と比べて、乾燥していることが認められた。この表面部のコア強度は、低い結果となっており、表面からの乾燥・水分消失が強度の低下を招く要因

の一つであることが分かる。従って、できるだけ長期型枠の存置により、表面部における強度低下を多少防止できると考えられる。

- 6) 以上の結果から、暑中環境における構造体の強度低下を引き起こす、粗雑な硬化体組織の生成の要因は、コンクリート内部の高温化及び表面からの乾燥・水分の逸散である。ここで、軽微な暑中期の場合には、コンクリートの高温化及び乾燥を防止するために比較的簡単な方法で強度管理が可能であるが、極暑中期の場合は、中庸熱ポルトランドセメントやフライアッシュ、高炉セメント、人工軽量骨材などを用いて積極的に強度管理を行う必要がある。ただし、この場合品質は確保できるが工事費用が上がる問題点が指摘されているが、過酷な暑中環境では、コストが上がってもこのような対策をとるべきであると考えられる。また、暑中コンクリートの品質とコスト両方を満足させる品質管理技術に関する持続的な研究が必要である。

参考文献

- 4-1) 小山智幸, 湯浅昇, 小山田英弘, Victor Sampebulu, 原田志津男, 伊藤是清, 陶山裕樹: 暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 その1 研究概要, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 51, pp.181-184, 2012
- 4-2) 小山智幸, 小山田英弘, 原田志津男, 伊藤是清, 陶山裕樹: 暑中期に打設される重要構造物マスコンクリートに関する研究 その1 実験概要および強度発現性状, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 49, pp.157-160, 2010.3
- 4-3) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率の測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 498, pp. 13-20, 1997
- 4-4) 湯浅昇, 杓掛文夫, 笠井芳夫, 佐々木隆, 西田健治: セラミックセンサを用いたコンクリートの含水率測定に使用する携帯型測定器,]SNDI シンポジウム, コンクリート構造物への非破壊検査の展開, pp.23-26, 2007
- 4-5) 三浦彰吾, 湯浅昇, 小山智幸, 伊藤是清, 松本備也, 野中英: 暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 その5 含水率, 細孔構進および透気性の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 52, pp.197-200, 2013
- 4-6) 小山智幸, 湯浅昇, 伊藤是清, 小山田英弘, 白川敏夫, 陶山裕樹, 石橋宏一郎, 松本備也, 中島草太: 暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 その6 柱試験体の強度性状, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 52, pp.201-204, 2013
- 4-7) 中島草太, 小山智幸, 湯浅昇, 小山田英弘, Victor Sampebulu, 原田志津男, 伊藤是清, 松本備也: 暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 その2 柱試験体の強度性状, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 51, pp.181-184, 2012

第5章

暑中環境で施工される床スラブコンクリートの 養生方法に関する研究

第5章 暑中環境で施工される床スラブコンクリートの養生方法に関する研究

5.1 第5章の概要

コンクリートの強度及び耐久性は、初期材齢のコンクリートが接する周囲の温度によって大きく影響を受ける。暑中コンクリート工事は、硬化されたコンクリートの性質が外気温や湿度などの気候条件により影響を強く受ける代表的な事例である。従って、暑中環境におけるコンクリートの施工では、材料及び調合の決定、コンクリートの製造及び運搬、施工、養生の全般的なプロセスで品質管理をする必要がある⁵⁻¹⁾。

床スラブは、壁スラブのように周囲をせき板で囲まれる部材と異なり、外気に直接触れる面積が大きいため、その影響を強く受ける。特に夏期には直射日光と風の影響を受けやすく、また表面からの水分蒸発が甚だしい。このため強度低下やひび割れ発生などの極端な品質低下や、表面の密実性の低下による耐久性の低下が懸念される。これらに対する施工時の対策として重要なのは適切な養生であることは論を俟たないが、開口部があまりにも広いことや、形状による制約、また仕上げや翌日の工程の都合上、十分に養生できないことも多くい。また実機レベルでのデータも少ない。

暑中コンクリートの養生においては、その開始時期と継続期間が重要であることは古くより指摘されてきた⁵⁻¹⁾。また散水養生をあまりにも早く開始すると表面を傷めてしまうとの指摘がある一方で、初期にはむしろ乾燥させた方が(early short time evaporation)、見かけ上の水セメント比が低下するため強度や耐久性が向上するという意見もあった⁵⁻¹⁾。

今まで報告された暑中コンクリートの養生技術をまとめると⁵⁻¹⁾⁵⁻²⁾⁵⁻³⁾、床スラブは、コンクリートを打ち込んだ後できるだけ早めに養生を開始し、高温や風及び日光などからコンクリートの表面が乾燥しないように配慮することが定められている。アメリカの場合には、少なくとも7日間の湿潤養生を勧奨しており、7日以前に養生方法を変えようとする場合は必ず3日経過した後行うと規定している⁵⁻⁴⁾。日本建築学会の「暑中コンクリートの施工指針・同解説」⁵⁻⁵⁾では、原則として外部から水を供給する給水養生、もしくは次善の策としてシート養生などの保水養生を提案してきた。しかしこれは、試験室規模の実験から得られた結果に基づいている。

従って、本研究は上記の施工指針から提案している暑中コンクリートの養生方法に関して、実大レベルの床スラブ試験体で検証したものである。詳しくは、床スラブコンクリートを対象とし、養生方法（給水養生、シート養生、膜養生、散水養生）、養生開始時期及び養生期間が硬化体の強度及び耐久性に及ぼす影響について検討した。

5.2 実験内容

5.2.1 実験構成

暑中期に施工される床スラブコンクリートの養生技術と関連して、現場に適用可能な最も合理的な方法を調べる実機実験を数年にわたり行った。本章は、2013年度（実験Ⅰ）から2017年度（実験Ⅴ）まで5年間行った実験結果をまとめたものであり、各実験の概要を表5.1に示す。実験は、いずれも実際の暑中環境下で行い、実験当日の日平均大気温度と実験場所における打込み後24時間までの平均気温（本論文では外気温と呼ぶ）は、表5.1のとおりである。暑中環境の判定は、先に述べた通り外気温30℃を基準としており、「実験Ⅱ」の場合軽微な暑中期、それ以外の試験体はいずれも「極暑中期」の環境条件が想定できる。「実験Ⅰ」においては、比較のために標準期実験も行い環境条件により異なる養生の効果について検討した。コンクリートは福岡県内のレディーミクストコンクリート工場（3工場）で練混ぜを行い、「実験Ⅰ」においては工場内のテント、「実験Ⅱ」は九州大学の材料実験室、「実験Ⅲ」～「実験Ⅴ」の場合には同工場に隣接する屋根付きの室内倉庫にて打込み、養生を行った。毎年先行研究から得た結果に基づいて、養生方法や養生開始時期及び養生期間が床スラブ硬化体の強度と耐久性に及ぼす影響について検討を重ねた。本章では、各々の実験内容に関して順次考察し、最後に現場に適用可能な合理的な範囲の養生方法を提案する。

表 5.1 各実験の概要

実験名	日付	練混ぜ場所	打込み場所	大気温度 ¹⁾ (°C)	暑中環境	
					外気温 ²⁾ (°C)	判定
実験Ⅰ	2013.08.20 2013.11.06	福岡県内A工場	工場内のテント	32.5 17.5	32.5 17.5	極暑中期
実験Ⅱ	2014.08.01	福岡市内B工場	九大材料実験室	27.8	29.6	軽微な暑中期
実験Ⅲ	2015.07.30	福岡市内C工場	工場近所の 室内倉庫	29.4	32.5	極暑中期
実験Ⅳ	2016.08.18	福岡市内C工場		30.4	33.3	極暑中期
実験Ⅴ	2017.08.08	福岡市内C工場		28.5	33.5	極暑中期

1) 気象庁の過去データを参考

2) 実験場所における打込みから24時間の平均気温、30℃以上：極暑中期、30℃未満：軽微な暑中期

5.2.2 使用材料及び調合

表 5.2 に本実験で用いた材料を示す。セメントはいずれも密度 3.15g/cm^3 の普通ポルトランドセメントを、粗骨材と細骨材は福岡地域で得られる範囲のものを、混和剤は AE 減水剤遅延形 1 種を使用した。コンクリートの調合は、工場によって少し違うが、全ての条件で「普通 27-18-20N」の調合を使用した。調合は表 5.3 に示す。

表 5.2 使用材料

	実験 I	実験 II	実験 III ~ 実験 V
セメント	普通ポルトランドセメント 密度： 3.15g/cm^3	普通ポルトランドセメント 密度： 3.15g/cm^3	普通ポルトランドセメント 密度： 3.15g/cm^3
水	地下水	地下水及び上澄水	地下水及び上澄水
細骨材	福岡県朝倉産砕砂 絶乾密度： 2.70g/cm^3 吸水率：0.64% 粗粒率：2.70	玄界灘産砂 表乾密度： 2.58g/cm^3 粗粒率：2.50	玄界灘産海砂 表乾密度： 2.57g/cm^3 吸水率：1.80% 粗粒率：2.55
粗骨材	福岡県朝倉産砕石 絶乾密度： 2.74g/cm^3 吸水率：0.60% 実積率：59.5%	福岡県古賀産砕石 表乾密度： 2.72g/cm^3 実積率：60%	古賀市谷山産砕石 表乾密度： 2.72g/cm^3 吸水率：0.71% 実積率：59%
混和剤	AE 減水剤(遅延形 I 種) AE 減水剤(標準形 I 種)	AE 減水剤(遅延形 I 種)	AE 減水剤(遅延形 I 種)

表 5.3 コンクリートの調合 (普通 27-18-20N)

実験名	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			C	W	S	G	混和剤
実験 I	50.0	45.5	368	184	852	947	4.05
実験 II	53.0	46.4	348	184	792	963	3.48
実験 III ~ 実験 V	53.0	45.0	350	185	763	985	4.55

5.2.3 打込み及び養生方法

本研究では先に述べた目的のため、厚さが200mmの床スラブを模擬し、図5.1に示すような、756mm×756mm×200mmの試験体を作成した(以下、床スラブ試験体)。せき板には通常の工事と同様に化粧合板を用いている。コンクリートの製造は、福岡県にあるレディーミクストコンクリート工場で行った。練り上がったコンクリートは、生コン車に投入して実験場所に移動し、直射日光が当たらないよう設置した型枠に打ち込んだ。型枠はできるだけ通常の建築現場の状況に近づけるため、地面に直接置かず、単管足場によって地上40cm程度の高さに設置した。打ち込んだコンクリートの表面は、鍍仕上げを行い、実験ごとに設定している養生方法を所定の時間に開始した。床スラブの底板は、現場条件を考慮して材齢4週まで存置した。

本実験では養生方法として、無養生、給水養生、シート養生、膜養生、散水養生、噴霧養生の合計六つの種類を採用した。無養生は、他の養生方法を利用した試験体との比較のために、打込み後そのまま気中養生を行ったものである。給水養生は、外部から水分を積極的に供給することで、スラブ上面に2~3cm程度の水張りを行った。打込み直後に水張りを行う際には、コンクリート上面を痛めないように配慮した。水は現場の温度に一晚程度馴染ませたものを、一定時間おきに自動的に給水し、水が途切れないようにした。養生終了時に床スラブ表面の水を除去した。シート養生は、ポリ塩化ビニル製のシートを用い、型枠上面を密封した。この養生方法は、打ち込まれたコンクリート内部の水分蒸発を防ぐ保水養生であり、施工指針では、給水や散水が困難な場合は、この方法を次善策として提案している。膜養生は、市販のコンクリート被膜養生剤をブリーディング終了後に100ml/m²の標準使用量として散布した。写真5.1に無養生、給水養生、シート養生、膜養生の様子を示す。散水養生と噴霧養生は、実際現場での施工性を考慮し、所定の養生開始時間から予め定めた水量をコンクリート表面に散水もしくは噴霧する方法である。散水量の算定は、コンクリートの水分移動に関する実験結果を踏まえて定めた。詳細な散水量、散水時期、回数などは、表5.10に示す。また、管理用供試体として簡易型枠に打設したφ100×200mmの円柱形試験体を用いて床スラブ試験体と同様な養生を行い、さらに標準水中養生を加えた。

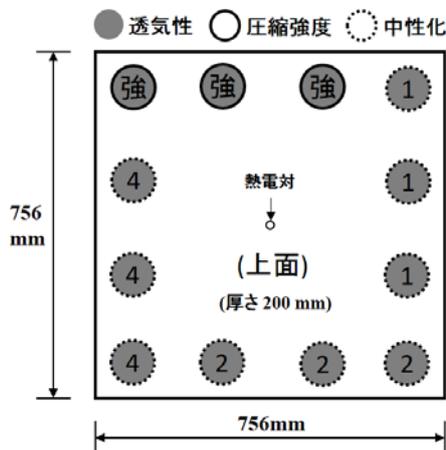


図 5.1 床スラブ試験体の概要

図 5.2 に養生開始時期及び期間についての一例を示す。図上の打直, BL0, BL4, 24h などは、養生開始時期を意味し、後ろの 5d, 3d は養生持続時間を示す。例えば、「打直-5d」はコンクリートの打込み直後養生を始め 5 日間維持することであり、「BL4-3d」の場合はブリーディング終了後 4 時間が過ぎた時点で養生を開始し 3 日後打ち切りをすることである。

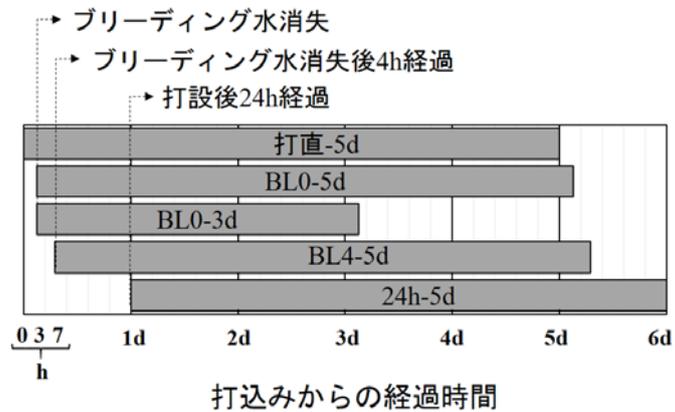


図 5.2 養生開始時期及び期間



無養生



給水養生



シート養生



膜養生

写真 5.1 養生の様子

5.2.4 測定項目及び方法

各測定項目は、JIS 規格もしくは以下に示す測定方法に基づいて実施した。

1) フレッシュ状態での測定

製造されたコンクリートは、スランプ、空気量、コンクリート温度、単位容積質量を測定した。以後、床スラブ試験体を打ち込む同時に蒸発、ブリーディング、単位水量などの水分移動について検討した。凝結性状は、プロクター貫入試験と N 式貫入試験で確認した。各々の試験方法は、「3.2.3 試験方法」に示している。また、打ち込まれたコンクリートの温度は、養生方法ごとに 10 分間隔で 5 日間測定した。

2) 圧縮強度

硬化コンクリートは、材齢 1, 4, 13 週に管理用供試体の圧縮強度を測定し、材齢 13 週には床スラブ試験体から抜いたコア試験体の圧縮強度試験も実施した。試験は JIS A 1107 及び JIS A 1108 に準じて行った。

3) 透気試験

本実験では、コンクリート表層部の物性値として透気性状に着目し、養生が透気性状及びその結果として強度や耐久性に及ぼす影響を検討した。透気試験の測定位置は、図 5.1 に示すように、床スラブ試験体の表面から 12 箇所で測定し、シングルチャンバー法による透気速度及びトレント法による透気係数を検討した。透気性状は近年非破壊試験も可能となり、現場での簡易な確認方法としても期待されている実験である。これらは 15cm のコアを用いて行う従来の、RILEM TC116-PCD による試験方法と比較して簡易であり、品質管理を行う上でも有用と考えられる。図 5.3 及び図 5.4 にシングルチャンバー法透気試験とトレント法透気試験の概要を示す。

シングルチャンバー法透気試験⁵⁻⁷⁾⁵⁻⁸⁾は内径 85mm、容積 167cm³ のデシケータの蓋をゴム製のパットとパッキング材によりコンクリート表面に取り付け、真空ポンプでデシケータの蓋の内部を減圧した後、コンクリート表面からの空気の流入により真空度が 13.3kPa から 33.3kPa に低下する時間を計測した。このとき、低下した真空度 20kPa を時間で割った値をシングルチャンバー法透気速度と呼び、透気性の指標とした。

トレント法透気試験⁵⁻⁹⁾⁵⁻¹⁰⁾はコンクリート表面に減圧したチャンバー（内部チャンバーと外部チャンバーの二重セル構造のチャンバー）を設置し、その内部チャンバーの圧力の変化時間から透気係数を算出した。これは、測定中の内部チャンバーと外部チャンバーの圧力が等しくなるように外部チャンバーの圧力を制御することによって、内部チャンバー内への外部表層からの空気の流入が物理的に排除され、シングルチャンバー法などで懸念されることを根本的に解決した試験方法である。

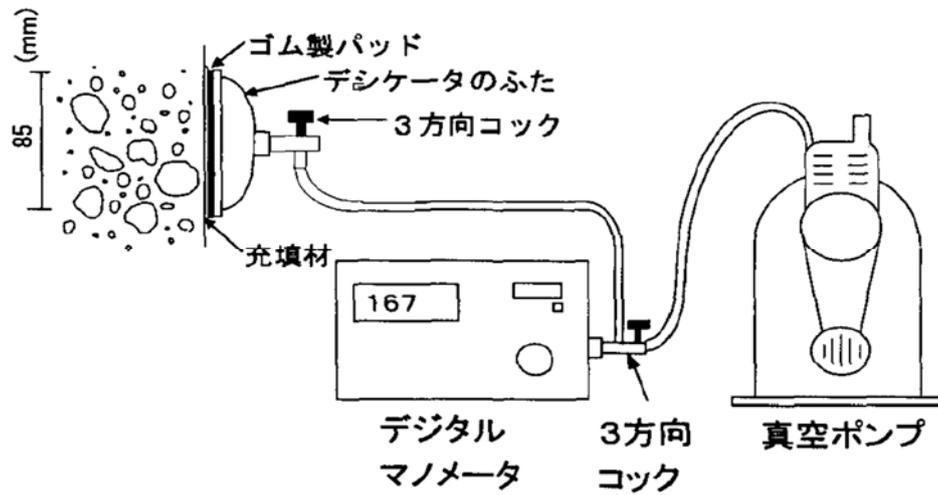


図 5.3 シングルチャンバー法透気試験の概要⁵⁻⁸⁾

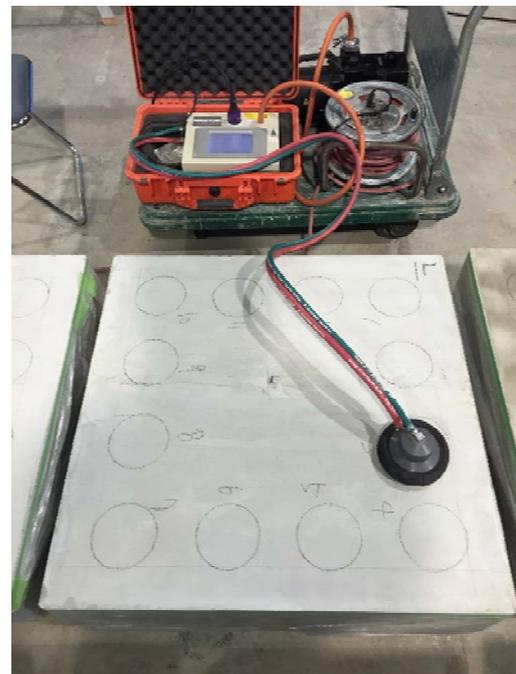
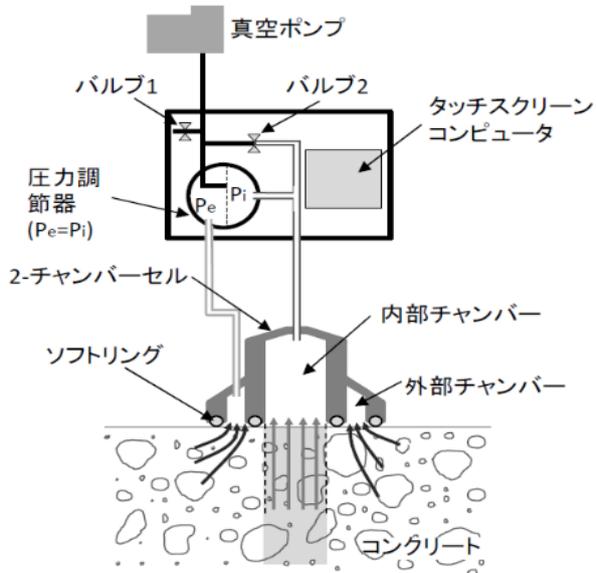


図 5.4 トレント法透気試験の概要⁵⁻⁹⁾

写真 5.2 床スラブのトレント試験

4) 促進中性化試験

促進中性化試験は、材齢 13 週で脱型およびコア抜きし、8 週間乾燥した後に実施した。試験条件は、温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 5% であり、試験開始後材齢 1, 2, 4 週で中性化深さを測定した。中性化用試験体は、長さ方向に割裂した後、1% のフェノールフタレイン溶液を噴霧し、試験体の表面から発色した部分までの深さを測定した。中性化速度係数は、コンクリートの中性化深さと時間の平方根との間の比例定数であり、測定した中性化深さを時間の平方根で除することで求めた。写真 5.3 に本試験に使用した中性化促進試験装置を、写真 5.4 に中性化測定用試験体を示す。



写真 5.3 中性化促進試験装置

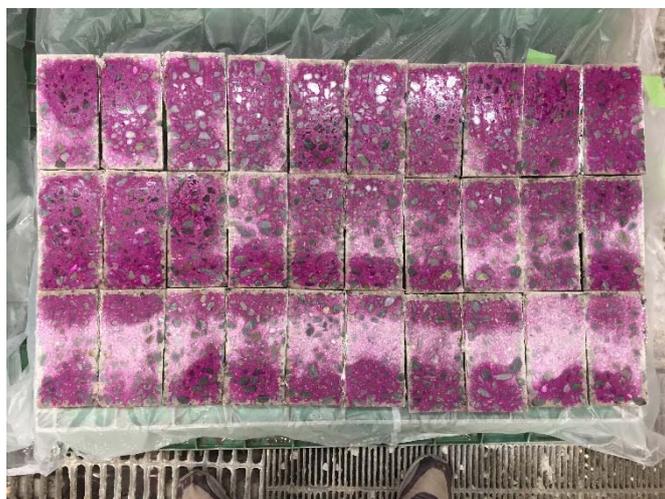


写真 5.4 中性化測定用試験体

5) ポロシティ

材齢 13 週にコア抜きした試験体を対象として、水銀圧入法により試験体の中心部の細孔分布を測定した。試料に水銀を高圧で注入し、加えた圧力と注入された水銀の量との関係を基に細孔径分布を求めた。圧力の増加させると水銀はより微細な孔に注入されることから、圧力を段階的に変化させる同時に水銀の注入量を求め、その圧力に相当する大きさの細孔の累積量とした。

6) 反発度

材齢 13 週にシュミットハンマによる反発度を測定し、測定値から圧縮強度推定値を算出した。反発度は、床スラブ試験体の表面（透気性状を測定した位置）と材齢 13 週まで型枠を存置した横側に対して測定した。反発度(R)から推定強度(F)を求める際、日本建築学会の共同実験で求められた以下の式 (5.1) を採用した⁵⁻¹¹⁾。

$$F=7.3R+100 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \text{式 (5.1)}$$

7) 吸水試験

床スラブコンクリートの表層部の品質を評価するために、透気試験とともに吸水試験を行った。この試験によると、表層部コンクリートの緻密性を測定しコンクリートの耐久性を評価することができる⁵⁻¹²⁾。また、透気試験の結果と比較しその関係を分析した。この試験方法については、「6.4.2 測定方法及び方法」で詳細に示す。

なお、以上の測定項目において、各実験ごとに検討した項目が異なるため、それらを整理して表 5.4 に示す。

表 5.4 各実験における測定項目

実験名	フレッシュ性状	温度	水分移動	凝結	圧縮強度	透気試験		中性化	反発度	ポロシティ	吸水試験
						S 法 ¹⁾	T 法 ¹⁾				
実験 I	○	○			○	○	○	○			
実験 II	○	○			○	○	○				
実験 III	○	○	○	○	○		○	○	○		
実験 IV	○	○	○	○	○		○	○		○	
実験 V	○		○	○	○		○				○

1) S 法：シングルチャンバー法透気試験，T 法：トレント法透気試験

5.3 「実験Ⅰ」－ 給水養生の効果に関する実験

5.3.1 「実験Ⅰ」の概要

表 5.5 に実験Ⅰの概要を示す。本実験は、暑中期と標準期に分けて実験を行い、調合、使用材料、測定項目、実験場所などは、同じ条件とした。なお夏期の実験では、練上がり温度を調節するために、約 60℃の水を準備し、プラントの貯蔵タンクを介さずに、手で計量器に投入して練混ぜ水の温度を調節した。実験Ⅰの目的は、実機実験における養生の効果を確認することであり、詳しくは給水養生の開始時期による養生の効果を検討した。養生は、無養生、給水養生、シート養生の 3 種類とし、ここで給水養生の開始時期は、打込み直後、ブリーディング終了時、ブリーディング終了後 1 時間、2 時間、4 時間が過ぎた時点、打込から 24 時間後と設定した。また、シート養生も材齢 1 日に養生を行った。測定項目は、表 5.5 のとおりである。

5.3.2 「実験Ⅰ」の結果考察

1) フレッシュ性状

コンクリート温度、フレッシュ性状等を表 5.6 に示している。暑中期には 35℃を超える温度となったが、スランプ、空気量は目標値以内であった。

表 5.5 「実験Ⅰ」の概要

コンクリート温度(℃) ¹⁾	試験体	養生 ²⁾				測定項目
		方法	ID	開始時期	期間	
35±3 (暑中期) 20±2 (標準期)	床スラブ & 管理用 供試体	無養生	無	-	-	<ul style="list-style-type: none"> スランプ 空気量 コンクリート温度 単位容積質量 内部温度変化 圧縮強度 シングルチャンバー法透気実験 トレント法透気実験 促進中性化
		給水	打直-5d	打込み直後	5 日	
			BL ³⁾ 0-5d	BL 水消失直後		
			BL1-5d	BL 水消失後 1 時間		
			BL2-5d	BL 水消失後 2 時間		
			BL4-5d	BL 水消失後 4 時間		
		シート ^{※3)}	24h-5d	打込み後 24 時間		

1) 荷卸し時の目標値

2) 材齢 4 週まで底面のせき板を存置

3) BL：ブリーディング

表 5.6 フレッシュ性状 (実験Ⅰ)

	状態	コンクリート温度(℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/l)
暑中期	練上がり時 (工場)	35.5	18.5	4.1	2.34
	荷卸し時 (圧送前)	37.1	17.0	3.9	2.35
標準期	練上がり時 (工場)	20.0	19.0	5.8	2.29
	荷卸し時 (圧送前)	20.0	18.5	5.8	2.29

2) 温度性状

暑中期と標準期における打込み後のコンクリートの温度変化を図 5.5 に示す。温度測定の対象は無養生試験体であり、図 5.1 に示す床スラブの中心部で、上面から 0.5, 5, 10(中心部), 15, 20cm(底面)の 5 点で TypeT 熱電対により測定している。なお暑中期ではテントの漏水による測定器の故障のため 2 日間のデータのみ得られている。暑中期のコンクリート温度は、打設後約 38℃ から最高温度の 51℃まで約 13℃の温度上昇を示し、約 9 時間程度かかった。一方、標準期の最高温度は約 28℃で 11 時間に 6℃程度上昇した。暑中期に製造したコンクリートの温度が高くなるのは当然であるが、その上昇量は体積が大きな柱試験体よりも大きくないことがわかる。先行研究⁵⁻¹³⁾で行った柱試験体の内部の最高温度が約 80℃まで上昇したことと比較すると、床試験体は温度上昇量が小さく最高温度が低い。一方、外気温度の変化によるコンクリートの温度変化は大きいことから、厚さが薄く面積が大きい床スラブコンクリートは、外気温の影響を他の部材よりも多めに受けることが認められた。

また、床試験体中の測定位置ごとの温度変化を見ると、中心部よりもむしろ下部の温度がより高くなっており、中心部の温度が最も高くなる柱試験体とは傾向が異なる。上面は、外気と接する部分であり、蒸発潜熱の影響もあって最も低い温度を示した。打込み直後と同程度のコンクリート温度に戻るまでの時間は、暑中期と標準期のいずれも約 1.5 日(柱試験体では 6~7 日)であった。

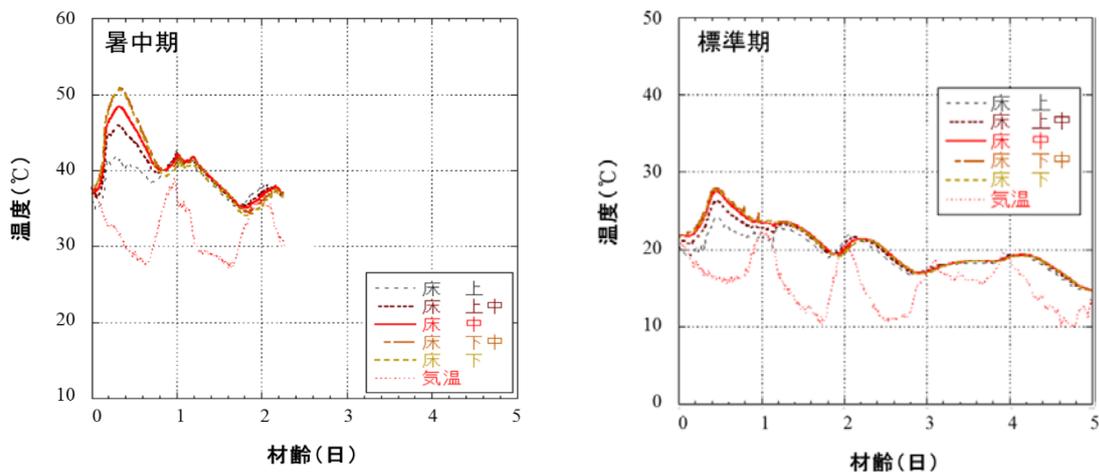


図 5.5 コンクリート温度測定結果 (実験 I)

3) 圧縮強度

図 5.6 は、暑中期と標準期に製造した試験体の圧縮強度を示したものである。管理用供試体のうち、「無養生」供試体についてはテントの漏水で水に浸かったため表示していない。

暑中期の管理用の供試体の場合、材齢に関係なく、標準水中養生を行った試験体の圧縮強度が高く、打込み後初期に給水養生を開始した試験体が同程度、シート養生の試験体が最も低い強度となり、全体の差は約 8.4MPa であった。材齢 91 日のコア試験体は、打込み後初期に給水養生した試験体では約 36~38MPa、給水養生をしていない試験体では約 28MPa 程度の強度を示した。このことからコア試験体においても、給水養生の効果が確認された。給水養生の開始時期の影響については、打設直後からブリーディング消失後 4 時間までの範囲では、強度の差は見られなかった。打込み後 24 時間でシート養生を開始した床試験体の強度は、無養生の強度と大差なく、養生の効果が見られなかった。また、コア試験体と管理用供試体の強度差は約 7MPa あり、コア試験体は、管理用供試体より試験体間の強度差が大きいことから、実際の現場での品質管理が重要であるといえる。

なお、今回暑中期に打ち込んだコンクリートの強度は、これまでに実施した同調合のコンクリートの強度⁵⁻¹³⁾よりも高い値となった。標準水中養生供試体の強度自体が高いことから、暑中環境の影響ではなく、材料や、先に示した温度調節のため通常と異なる計量方法を暑中期のみ採用したこと等が原因として考えられるが、確証が得られていない。暑中期の試験体相互の比較を行うことに支障はないものと判断している。なお標準期のコンクリートは既往と同程度の強度となっている。

標準期の圧縮強度をみると、管理用供試体ではすべての条件で 32.4~35.4MPa 程度の 91 日強度を表しており、養生による大きな差はみられなかった。コア試験体においては、無養生試験体が給水養生の BL0-5d とシートより少し高い強度値を示したが、やはり大きな違いはなかった。また、管理用供試体とコア試験体の強度差は約 2.6MPa であった。

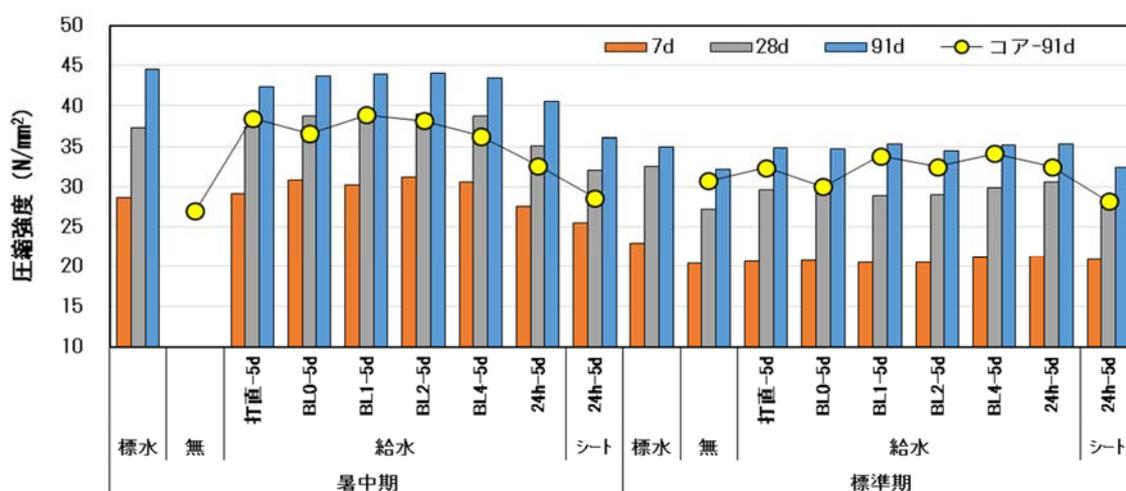


図 5.6 圧縮強度試験結果 (実験 I)

4) 中性化抵抗性

図 5.7 に促進中性化試験による中性化抵抗性についての実験結果を示した。

管理用供試体では、外気温に関わらず標準水中養生の試験体の中性化速度係数が最も小さい値となった。給水養生を行った試験体では養生開始時期が遅くなるほど中性化抵抗性は高くなること、またシート養生も給水養生の値と同程度となり養生の効果があることが確認された。コア試験体の場合では、無養生試験体が他の養生方法のものよりも大きな値となった。また、給水養生とシート養生の品質向上に効果的であった。このように今回検討を行った範囲では、中性化抵抗性において給水養生の効果は明らかであり、打込み後 24 時間で開始しても養生の効果を確認された。さらに、保水養生であるシート養生を打込み後翌日に開始しても効果が認められた。

このように、養生方法や開始時期の影響に関して、圧縮強度と中性化ではほぼ同様の傾向が見られたが、打込み後 24h に給水養生を開始した試験体の場合には、両方で異なる傾向となった。すなわち中性化性状は早期に給水養生を開始した試験体と同程度であったが、圧縮強度は低い値となった。中性化は外気に接する試験体の表面から数 cm 程度までの部分の物性が、逆に圧縮強度は試験時の加圧面となる表層以外の部分の物性が測定値に影響すると考えられるが、打込み翌日の給水養生により表層部の性状が改善されることを示唆しているものと思われる。いずれにしても、強度と中性化抵抗性の両方で品質を確保するためには、打ち込んだ当日に給水養生を開始した方がよいと判断される。

標準期実験のコア試験体においては、標準水中養生の試験体の中性化深さが最も小さかったが、養生方法による差が小さく、同程度の中性化深さであった。

なお、暑中期の試験体が標準期の試験体よりも中性化深さが小さいのは、3.3 項で述べたように暑中期の試験体の強度が何らかの原因で高くなったためと考えられる。

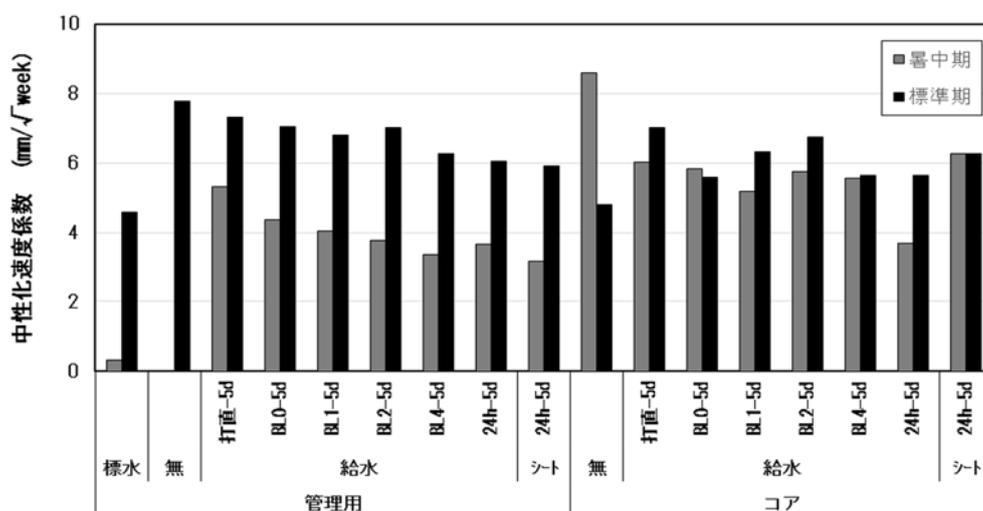


図 5.7 促進中性化試験結果 (実験 I)

5) 透気性状

コンクリートの中性化は、大気中の CO₂ がコンクリート表面から浸入し、内部の非中性化域に達することで進行する。従って、表層部分の物性、特に CO₂ の拡散速度を左右する透気性状は中性化と密接な相関があると考えられる。よって本節では、これらの測定方法として、非破壊試験であるシングルチャンバー法⁵⁻⁸⁾とトレント法⁵⁻¹⁰⁾を採用して検討を行った。図 5.8 に透気試験の測定結果を示している。左図のシングルチャンバー法による透気速度および右図のトレント法による透気係数とも、図 5.1 に示した床試験体上面における測定個所の値を平均したものである。給水養生を行った試験体は、透気速度及び透気係数ともに小さく、打込み後 24 時間でシート養生を開始した場合や無養生の場合は大きい値を示した。透気係数のグレーディングによる評価を併記しているが、無養生とシート 24 時間の試験体は「最悪」、それ以外の試験体は「普通」となって、給水養生の効果が認められた。また給水養生開始時期の影響は、打込み後 24 時間の範囲では明確な差が見られなかった。これらの結果は先に示した促進中性化試験の結果と一致しており、適切な養生により表層部の密実性が確保され、中性化抵抗性が向上すること、ならびにここで用いた非破壊試験により中性化性状を評価可能であることが確認された。

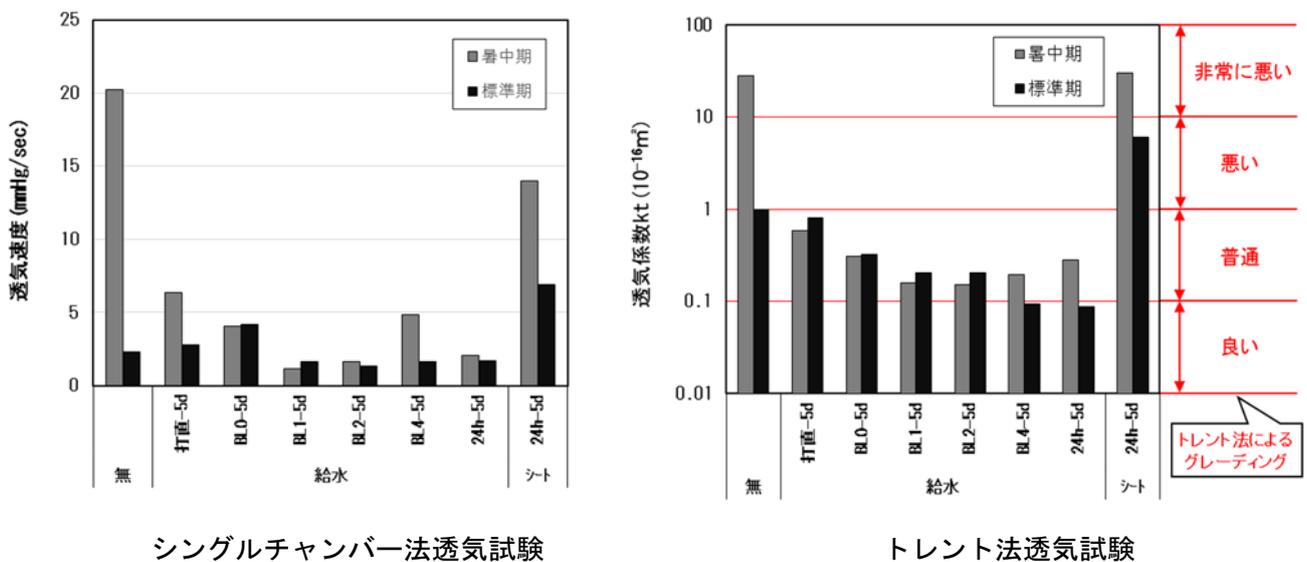


図 5.8 透気性状試験結果 (実験 I)

5.3.3 「実験Ⅰ」のまとめ

「実験Ⅰ」の結果から以下の成果を得た。

- 1) 床スラブコンクリートは、体積に対して表面積が大きいので、暑中期に施工する場合でも水和熱による温度上昇はそれほど大きくない反面、外気温度の変動により影響を大きく受ける。
- 2) 1)と同じ理由で、標準期に施工される場合と比較すると、暑中期の場合は養生方法によって試験体の圧縮強度の差が生じやすい。養生方法に関しては、外部から水を供給する給水養生の効果が確認された。ただし打込み後 24 時間で給水養生を開始しても効果は小さかった。また、従来から指摘されている、打込み直後に養生を開始することの悪影響は確認されなかった。
- 3) 促進中性化試験結果、給水養生は養生開始時期に関わらず中性化抵抗性を高める効果が確認された。また、打込み翌日のシート養生でも給水養生と同程度の品質を示した。
- 4) 表層部の透気性状として、給水養生の効果が確認されており、材齢 24 時間から給水しても品質の変化は見られない。打込み翌日に養生を始めたシート養生の場合は、透気性状は悪くなった。
- 5) シート養生の場合、中性化抵抗性には養生の効果が確認されたが、透気性状の観点からは無養生試験体と同様の品質であったため、これに対するさらなる検討が必要である。
- 6) 標準期に打ち込んだコンクリートの圧縮強度と中性化抵抗性は、養生によらず同程度の値を示しており、顕著な差はみられなかった。これに対して、暑中期の圧縮強度や中性化抵抗性は、養生を適切に実施しないと大きく低下する。言いかえれば、暑中期における養生は、標準期に比較して重要であり、その効果も大きいと言える。
- 7) 上記の結果を総合すると、暑中期において強度および耐久性状の両者を満足するためには、打込み後数時間で給水養生を開始すると効果的であることが実大レベルで確認された。

5.4 「実験Ⅱ」－ 養生開始時期及び期間の影響に関する実験 1

5.4.1 「実験Ⅱ」の概要

「実験Ⅰ」から打込み直後から数時間以内に給水養生を開始すると強度と耐久性の側面で有効であることと、打込み後 24 時間にシート養生を開始するのは強度の側面から無意味であることが確認された⁵⁻¹⁴⁾。軽微な暑中期と想定した本実験では、極暑中期である「実験Ⅰ」から得た結果をもう一度確認し、暑中環境の程度に対する養生の効果について検討を行った。特に養生期間の影響と打込み当日のシート養生の効果に関して検討を加えた。表 5.7 に「実験Ⅱ」の概要を示す。養生方法は「実験Ⅰ」と同様であるが、BL0 に対して 3 日間の養生を行う試験体を追加して養生期間の影響を検討しようとした。また、打込み当日のシート養生試験体も 3 体設定した。コンクリート温度は、全ての養生方法に対して測定した。なお、本実験を行う際の大気温度と実験場所における材齢 1 日までの平均気温は 30℃及び 27.5℃であった。

表 5.7 「実験Ⅱ」の概要

コンクリート 温度(℃)	試験体	養生				測定目
		方法	I.D	開始時期	期間	
35±3 (暑中期)	床スラブ & 管理用 供試体	無養生	無	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • スランプ • 空気量 • コンクリート温度 • 単位容積質量 • 内部温度変化 • 圧縮強度 • シングルチャンバー法透気実験 • トレント法透気実験
		給水	打直-5d	打込み直後	5日	
			BL0-3d	BL 水消失直後	3日	
			BL0-5d		5日	
			BL4-5d	BL 水消失後 4 時間	5日	
			24h-5d	打込み後 24 時間		
		シート	BL0-3d	BL 水消失直後	3日	
			BL0-5d		5日	
			BL4-5d	BL 水消失後 4 時間	5日	
			24h-5d	打込み後 24 時間		

5.4.2 「実験Ⅱ」の結果考察

1) フレッシュ性状

製造されたコンクリートの温度、スランプ、空気量及び単位容積質量は、それぞれ 30.1℃、18.5cm、4.0%、2,327kg/m³ となった。軽暑中環境の影響でコンクリートの温度が若干低くなっており、他の物性は目標値以内であった。

2) 温度性状

図 5.9 は、打込み後のコンクリートの温度変化を示したものであり、それぞれの養生方法について測定した値を示す。無養生と給水養生を行った試験体の最高温度は約 40℃以下であり、シート養生の試験体は約 45℃程度となった。シート養生の場合、型枠の上面が塩化ビニルで密封されているため、コンクリートの水和熱が外部に放出されない一種の断熱効果によって若干高い温度を示したと考えられる。極暑中期である「実験Ⅰ」の結果（無養生試験体：最高温度約 50℃）と比べて、最高温度は約 10℃程度低くなって、第 4 章の柱試験体の結果と同様の傾向となった。軽微な暑中期に施工される床スラブ試験体においても、外気温とコンクリート温度が低いため、同じ暑中環境であっても温度上昇は大きくないことが再確認された。

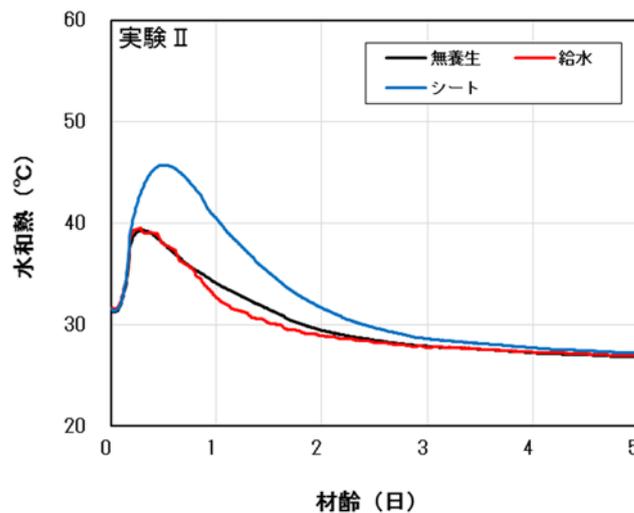


図 5.9 コンクリートの温度測定結果（実験Ⅱ）

3) 圧縮強度

図 5.10 は軽微な暑中期における養生方法による床スラブ試験体と管理用供試体の圧縮強度試験結果を示したものである。

まず養生方法においては、給水養生とシート養生の両方で強度が高くなり、特に給水養生がより効果的であった。「実験Ⅰ」の結果と同様、既応の研究で示されている床スラブに対する給水養生の効果が実大レベルで再度確認された。また、打込み当日に養生を開始した試験体の強度は養生開始時間に関係なく無養生の場合よりも高くなっている。しかし、打込みから 24 時間後に養生を行った試験体の圧縮強度は、養生方法によって差が生じた。給水養生の場合、他の給水養生試験体より少し低くなったが、シート養生よりは高い強度を発現している。翌日に給水養生を開始する方法はシート養生のどの試験体よりも強度が高い点と通常午後に打設が終了される現場与件を考慮すれば、適切な養生方法としての可能性があるかと判断され、BL4 と 24h の間の開始時間に対する検討も必要であると考えられる。反面シートの 24h 試験体は無養生と同程度の強度となって「実験Ⅰ」と同様の傾向が認められた。

一方、養生持続時間に関しては、実験室実験の結果に比べて、若干異なる傾向が確認された。以前の研究結果（管理用供試体）では、養生持続時間が長いほど、圧縮強度が増加することに対し、本実大実験では、給水養生の場合 5 日間養生した試験体が 3 日間養生した試験体より約 2MPa 程度大きくなっているが、管理用供試体では差がない結果となった。これは本実験の環境が軽微な暑中期であったことがその原因であると思われる。なお、実験の水準および要因をさらに細分化し、明らかにする必要がある。

結果的に、軽微な暑中期においても給水養生の効果が最も大きく、シート養生も強度向上の効果があること、しかし打込み翌日にシート養生を行うことは極暑中期、軽微な暑中期両方で効果が小さいことが認められた。

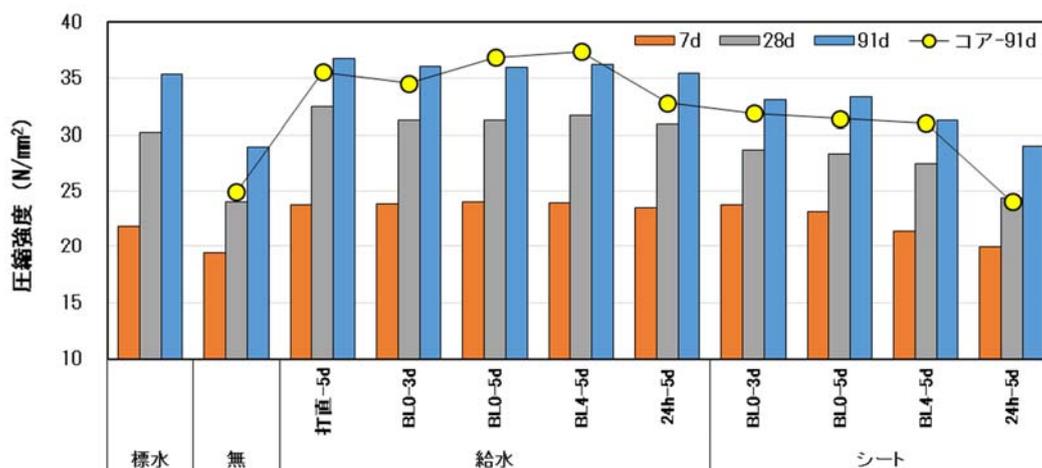


図 5.10 圧縮強度試験結果（実験Ⅱ）

4) 透気性状

図 5.11 にシングルチャンバー法及びトレント法による透気試験結果を示す。

シングルチャンバー法による結果、圧縮強度が低い無養生とシートの 24h 試験体の透気速度は逆に低く、同じ養生を行った試験体間の差が大きくなり、傾向を把握するのは困難であった。

「実験 I」の結果と比較すると、給水試験体は同程度、無養生及びシート養生の値が大幅に小さくなったことがわかる。本実験の実験環境が「実験 I」ほど暑くなかった軽微な暑中期の範囲にあったことにより、無養生試験体や養生効果が小さいシートの 24h-5d の品質低下が生じなかったと思われる。また、同時期に行った暑中コンクリート実験の壁試験体の場合、シングルチャンバー法とトレント法の測定結果が同じようになった。壁試験体の側面はせき板に接するため平滑であるが、床試験体の上面は鰻上げであるため、表面状態の違いによる結果であると判断される。

一方トレント法によると、無養生試験体が $9.21 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、給水養生は $0.15 \sim 0.31 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、シート養生の場合 $0.89 \sim 2.83 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の範囲を示している。グレードによる評価をすると、給水養生は「普通」、打込み当日のシート養生は「普通」と「悪い」の境界となった。耐久性についても給水養生がさらに効果的であることが認められた。また、養生開始時間については若干の差があるが、明確ではない。24 時間後シート養生を行った試験体の透気係数は、無養生試験体と同様に「悪い」等級となっているが、数値的には無養生試験体より低くなって、品質が改善されたことが確認できる。このことから、極暑中期の結果（強度及び透気性状いずれも効果が少ない）とは異なり、軽微な暑中期において打込み翌日に開始するシート養生は、透気性状の観点からある程度効果があることが認められた。一方、養生持続時間の影響において、圧縮強度と同じように一定の傾向は見い出せなかった。

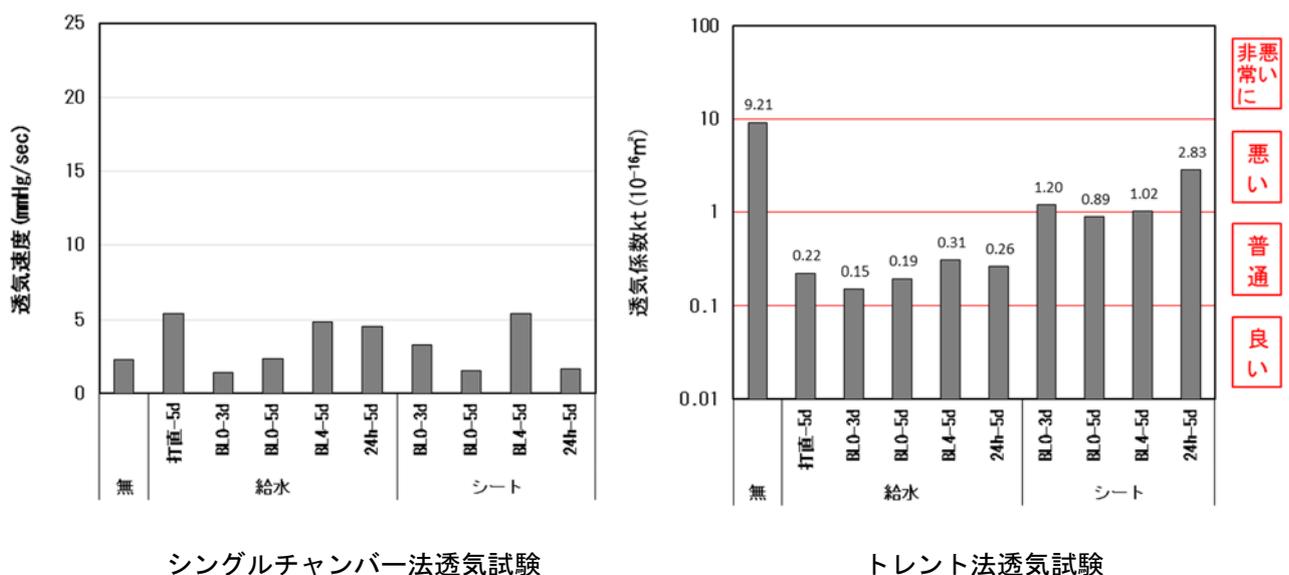


図 5.11 透気性状試験結果 (実験 II)

5.4.3 「実験Ⅱ」のまとめ

「実験Ⅱ」の結果から得られた成果を以下に示す。

- 1) 極暑中環境と想定した「実験Ⅰ」の結果と比べて、外気温とコンクリート温度が低いことにより、軽微な暑中期における床スラブコンクリートの温度上昇は大きくない。
- 2) 軽微な暑中期における強度性状は、全体的に極暑中期と同様であった。打設後数時間以内に給水養生を行った試験体の圧縮強度が最も高くなったが、養生期間による効果は今回検討を行った範囲では明瞭には見られなかった。シート養生は、打込み当日養生を実施すれば、強度改善の効果が期待できるが、給水養生試験体よりは小さい。また、打込み翌日に養生を開始する場合には、シート養生は効果がなく、給水養生では強度増進効果が確認された。
- 3) トレント法による透気性状は、給水養生を行った試験体で小さくなったが、養生期間による傾向は発見されなかった。ただし、軽微な暑中期において打込み翌日にシート養生を開始すれば若干の効果は見られた。
- 4) 総合的な分析結果、外気温 30℃未満の軽微な暑中期においても、養生を行うことにより強度及び耐久性の両者の品質確保が可能であった。特に、打込み当日に給水養生を実施する方法が一番効果的である。また、翌日に行う給水養生も比較的良い方法である。なお、養生開始及び持続時間の影響に関してはもっと検討する必要がある。

5.5 「実験Ⅲ」－ 養生開始時期及び期間の影響に関する実験 2

5.5.1 「実験Ⅲ」の概要

「実験Ⅰ」と「実験Ⅱ」の結果、暑中環境で施工される床スラブコンクリートの品質向上のためには、打込み当日に給水養生を行うことが有効であることが明らかになった。しかし、養生期間の影響は明確に説明することは困難である。本実験では、表 5.8 に示すように、BL4 に対して養生期間の影響を確認するために養生時間を 2 日、3.5 日、5 日とした。また、実験当日養生と翌日養生の違いをよりしっかりするために打込みから 12h 後養生を開始する試験体についても検討を行った。なお、シート養生においては、BL0-5d と BL4-5d の圧縮強度値が床スラブ試験体と管理用供試体で違う傾向になったため、その関係に関しても再確認した。それに、膜養生試験体を追加して合計 13 体の試験体から実験を行った。一方、測定項目に関しては、フレッシュ状態で水分移動及び凝結を測定し、材齢 13 週には、床スラブコンクリートの表面と横側にてシュミットハンマによる反発度を検討した。

表 5.8 「実験Ⅲ」の概要

コンクリート 温度(℃)	試験体	養 生				測定項目	
		方法	I.D	開始時期	期間		
35±3 (暑中期)	床スラブ & 管理用 供試体	無養生	無	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • スランプ • 空気量 • コンクリート温度 • 単位容積質量 • 内部温度変化 • 蒸発 • JISブリーディング(蓋有&無) • 単位水量 • プロクター貫入試験 • N式貫入試験 • 圧縮強度 • 反発度 • トレント法透気実験 • 促進中性化 	
		給水	BL4-2d	BL 水消失後 4 時間	-		2 日
			BL4-3.5d				3.5 日
			BL4-5d				5 日
			12h-5d	打込み後 12 時間	5 日		
			24h-5d	打込み後 24 時間			
		シート	BL0-5d	BL 水消失直後	2 日		
			BL4-2d	BL 水消失後 4 時間	-		2 日
			BL4-3.5d				3.5 日
			BL4-5d				5 日
			12h-5d	打込み後 12 時間	5 日		
			24h-5d	打込み後 24 時間			
		膜養生	膜	BL 水消失直後	-		

5.5.2 「実験Ⅲ」の結果考察

1) フレッシュ性状

コンクリートの温度、スランプ、空気量及び単位容積質量は、練上がり時に 33.0℃、17.5cm、4.5%、2,318kg/m³、荷卸し時に 34.0℃、16.5cm、4.4%、2,320kg/m³ となった。すべての項目において目標値を満足した。

2) 温度性状

図 5.12 にコンクリートの内部温度の経時変化を示す。給水養生と無養生の試験体では約 1 2 時間で最高温度 約 47°Cに達した。一方でシート養生の試験体に関しては、最高温度が約 52°Cと他の試験体と比べて高くなった。これは今までのデータと同様の傾向であり、シートが一種の断熱効果をもたらしているためである。「実験Ⅰ」, 「実験Ⅱ」のデータと比べると、外気温とコンクリート温度が高いほど打込み後コンクリートの温度も高くなった。

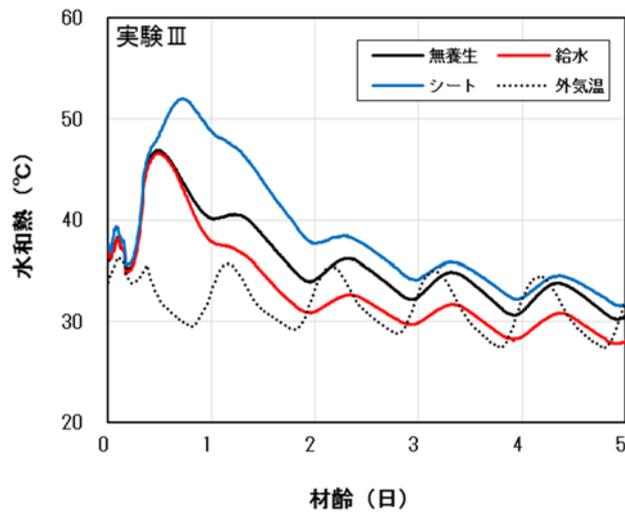


図 5.12 コンクリートの温度測定結果 (実験Ⅲ)

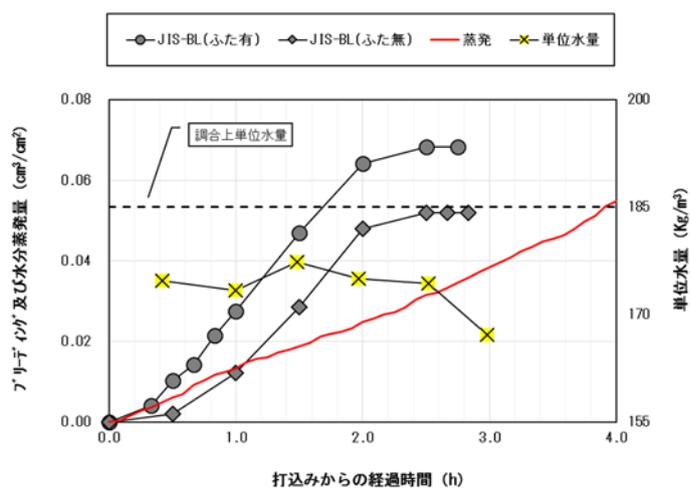


図 5.13 水分移動試験結果 (実験Ⅲ)

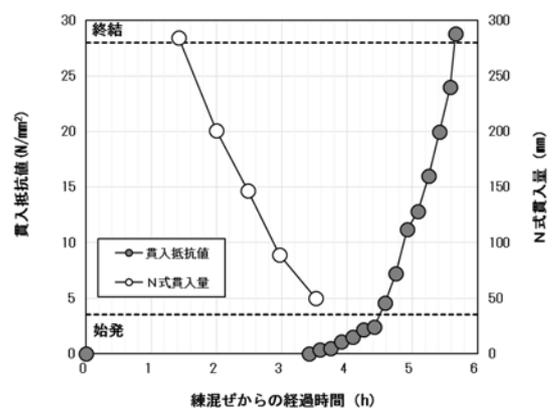


図 5.14 凝結試験結果 (実験Ⅲ)

3) 水分移動及び凝結

図 5.13 にブリーディング水量と水分蒸発量、表面単位水量などの水分移動特性を示す。ブリーディングは、JIS に準拠した容器に対して蓋有・無の 2 種類で行った。蓋がない容器は蒸発の影響を受けブリーディング水量が少し小さくなっているが、ブリーディング水の消失時期は、蓋有無にかかわらず両方で打込みから 3 時間後となった。また、表面の単位水量においては、調合上の単位水量と違うが、全体的な傾向を見るとブリーディングが終了した 3 時間以降から大きく減少し、表面が乾燥していくことがわかる。

図 5.14 に N 式貫入試験およびプロクター貫入試験の結果を示す。プロクター貫入試験では、貫入抵抗値が加水から約 3.5 時間で上昇し始め、約 4.5 時間後に凝結始発、約 5.5 時間後に終結となった。凝結の開始時間が約 3.5 時間であり、暑中の場合、ブリーディングが終了し、表面含水率が大きく低下した時間とほぼ一致する。ブリーディングが終了した後、凝結が始まり活発に水和反応が行われ、コンクリート表面が乾燥するため、ブリーディングが終了する前後から養生を始めるのが好ましいと思われる。

4) 圧縮強度

図 5.15 に圧縮強度試験の結果を示す。養生方法によって違いはあるが、材齢 24h でのシート養生を開始した場合を除いたすべての養生方法で、無養生のものに比べると圧縮強度が高くなっていることがわかる。養生ごとの傾向としては、給水養生が最も効果的であり、シート養生と膜養生は同程度の効果であった。材齢 24h のシート試験体に関しては、「実験Ⅱ」と同様に無養生と同程度の結果となっており、材齢が 24 時間以上経過してしまうと、シート養生の効果が薄いことがわかる。暑中期における床スラブコンクリート工事では、初期の養生が強度に与える影響が非常に大きいと言える。今回仮定した範囲では、コア試験体の給水養生では、養生の開始時間が早いほど圧縮強度は大きくなっており、また養生期間が長いほど圧縮強度は大きくなる傾向にある。シート養生を行ったコア試験体でも、養生の開始時期が早いほど、養生期間が長いほど圧縮

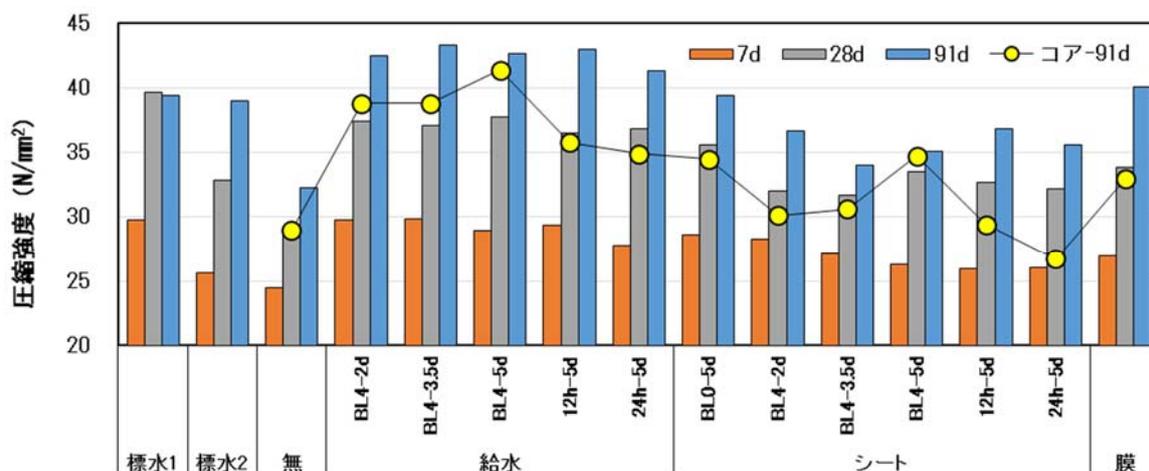


図 5.15 圧縮強度試験結果 (実験Ⅲ)

強度は大きくなっている。以上のことから暑中期における養生は、既往の結果と同様、ブリーディング終了後数時間以内に開始し、できるだけ長く行うのが望ましいと言える。膜養生剤を用いた膜養生試験体では、管理用供試体とコア試験体の両方において、開始時期が同じであるシートBL0の試験体と近い結果となった。膜養生試験体に関しては養生剤を散布してから試験実施まで養生をした状態であったため、養生期間に差はあるが、膜養生剤にはシート養生に近い養生効果があると考えられる。

5) 透気性状

図 5.16 にトレント法による透気試験の結果を示す。すべての試験体で、養生を行うことで透気性状が無養生のものより向上することが確認された。シートの 24h に関しては無養生のものと同程度の透気性状となっている。これは圧縮強度と同様の傾向であり、材齢 24 時間経過後のシート養生は透気性状の観点からも効果が薄いことがわかる。「実験Ⅱ」の結果、シートの 24h 試験体でも透気性状がよくなる結果であったが、本実験と異なることはやはり暑中の程度の影響であると考えられる。つまり、気温が高いほど養生の必要性が高いといえる。養生ごとの傾向としては、「実験Ⅱ」と同様に、シート養生よりも給水養生の透気性状が優れている。養生の開始時期と養生期間に関しては、給水養生とシート養生の両方で、今回仮定した範囲では、開始時期が早いほど透気性状が優れているが、養生期間の長さはあまり透気性状には影響しないという結果となった。膜養生は、圧縮強度と同様にシート養生と近い結果となった。このことから膜養生はシート養生に近い養生であると考えられる。以上のことから、透気性状の側面からも給水養生が養生として良好であり、シート養生に関してはブリーディング水消失後できるだけ早い養生が必要であると考えられる。

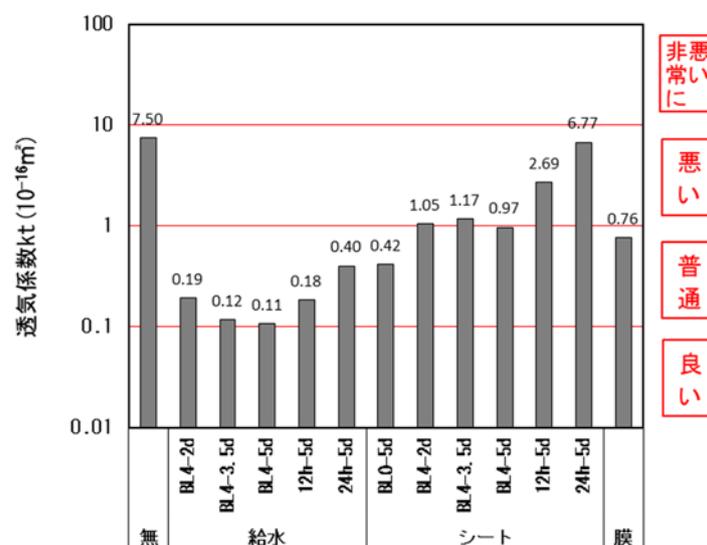


図 5.16 透気性状試験結果 (実験Ⅲ)

6) 中性化抵抗性

図 5.17 に促進中性化試験結果を示す。管理用供試体とコア試験体の両方で、無養生の試験体の品質が最も悪いが、これは養生を実施することにより中性化速度係数を低めることができた。養生方法に関しては、程度の違いはあるが、すべての給水養生試験体、12h と 24h 以外のシート養生試験体、膜養生試験体の中性化抵抗性が同程度となった。シート養生の場合には、透気性状の結果と同様に、打込み後早期に養生を開始することが重要である。また、給水養生及びシート養生に関して、養生開始時期と養生期間の格段の違いは見られない。

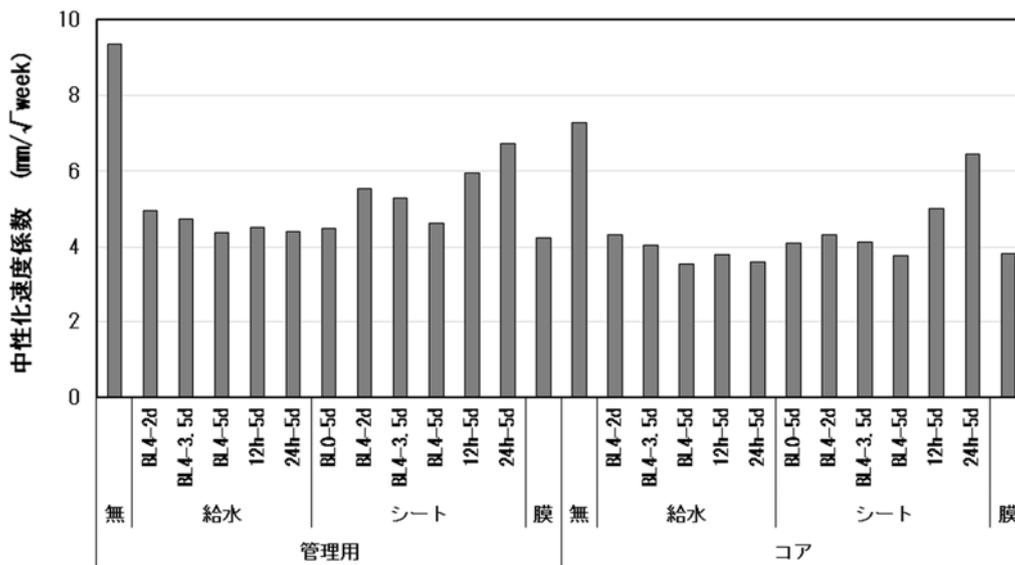


図 5.17 促進中性化試験結果 (実験Ⅲ)

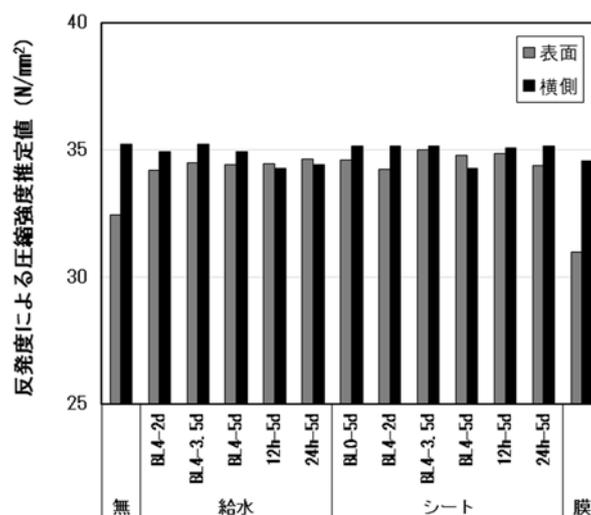


図 5.18 反発度による圧縮強度推定値 (実験Ⅲ)

7) 反発度

図 5.18 にシュミットハンマによる反発度より定めた強度推定値を示す。給水養生とシート養生では、養生開始時間及び養生期間にかかわらず、約 35N/mm^2 となった反面、無養生と膜養生試験体の表面では $31\sim 32\text{N/mm}^2$ 程度と低くなった。それで、養生を実施することによりコンクリート表面の反発度が向上することがわかる。なお、膜養生における表面の強度推定値が低いのは、被膜養生剤の成分がコンクリート表面に残っているためと判断している。一方で、横側からの強度推定値は養生方法に関係なく、同程度であった。反発度より推定した強度と実際のコア試験体の強度が異なることと、強度試験の際試験体の上下面を数 mm 研磨することを考慮すれば、床スラブにおいて養生の効果は、コンクリート表面だけではなく、内部の組織構成にも影響を及ぼしたと考えられる。

5.5.3 「実験Ⅲ」のまとめ

本実験の結果は以下のとおりである。

- 1) 暑中期に製造・施工される床スラブコンクリートの養生は、ブリーディングが終了し、凝結により表面が乾燥してくるタイミングで開始するのが望ましい。
- 2) 養生の開始時期が早いほど、養生期間が長いほど圧縮強度は大きくなっている。従って、暑中期における養生は、ブリーディング終了後数時間以内に開始し、できるだけ長く行うのが望ましいと言える。特にシート養生に関しては、強度及び耐久性の向上のためにはブリーディング水消失後できるだけ早期に養生を行う必要があると考えられる。
- 3) 圧縮強度と透気性状を踏まえると、給水養生が最も優れているものの、実際の現場では長時間の給水は困難である。そのため、散水などを適宜行って、給水状態にできるだけ近いような状態をつくるのが重要である。もしくは、以降の作業に支障が出ない程度にシート養生を行うのがよい。

5.6 「実験Ⅳ」－ 散水養生の効果に関する実験 1

5.6.1 「実験Ⅳ」の概要

「実験Ⅰ」から「実験Ⅲ」までの実験結果から、暑中期の床スラブコンクリートに関してはブリーディング水消失後数時間以内に養生を始め、できるだけ長く持続することが強度や耐久性の観点から好ましいということが認められた。しかし、実際の現場状況を考慮すると、継続的に水を供給する方法や大きな床スラブの面積にシートを被せる方法は、作業上無理である。従って、「実験Ⅳ」では、養生期間中数回散水する散水養生の効果について検討した。表 5.9 に本実験の概要を示す。これまでの実験から行ってきた無養生，給水養生，シート養生，膜養生に，散水養生 3 水準，噴霧養生 2 水準を追加し，6 種類の養生方法で合計 15 体の床スラブ試験体を設計した。

散水及び噴霧養生の計画を表 5.10 に示す。散水養生は，所定の養生開始時間から 1 日 2 回，1 回につきおよそ 1.5 kg の水を試験体表面に散水した。この散水量の算定に関しては表 5.10 に示すように，先行実験にて行ってきた水分移動に関する実験を踏まえて，打込みから 24 時間までの蒸発量と吸込み量分の水と決定した。床スラブの面積に対する打込み後 24 時間までの蒸発量及び吸込み量は 2,914g となったため，一回の散水量はその半分の約 1.5kg とした。噴霧養生は，霧吹きにて噴霧する方法であり，30 分に 1 回のペースで霧吹きにて 200g/m² 程度の水を試験体表面に満遍なく水を撒いた。噴霧 1 では 1 日目と 2 日目で合計 21 回，噴霧 2 では 2 日目のみに 13 回噴霧を行った。また，散水養生と噴霧養生に関しては，コンクリート表面が損傷しないよう養生開始時期をブリーディング直後でなく，貫入抵抗値が 3.5N/mm² となった時点を基準とした。なお，床スラブから抜いたコア試験体を対象として水銀圧入法によるポロシティを測定した。

表 5.9 「実験Ⅳ」の概要

コンクリート温度(℃)	試験体	養生				測定項目	
		方法	I.D	開始時期	期間		
35±3 (暑中期)	床スラブ & 管理用供試体 (標水)	無養生	無	-	-	<ul style="list-style-type: none"> スランプ 空気量 コンクリート温度 内部温度変化 蒸発 JISブリーディング(蓋有&無) 円筒ブリーディング 複合法ブリーディング 単位水量 プロクター貫入試験 N式貫入試験 圧縮強度 トレント法透気実験 促進中性化 ポロシティ 	
		給水	BL0-2d	BL 水消失直後	2 日		表 5.10 による
			BL0-5d		5 日		
			BL4-5d	BL 水消失後 4 時間	5 日		
			24h-5d	打込み後 24 時間			
		シート	BL0-2d	BL 水消失直後	2 日		
			BL0-5d		5 日		
			BL4-5d	BL 水消失後 4 時間	5 日		
			24h-5d	打込み後 24 時間			
		散水	散水 1-5d	貫入抵抗値 3.5N/mm ²	表 5.10 による		
			散水 1-5d				
			散水 2-5d				打込み後 24 時間
		噴霧	噴霧 1	貫入抵抗値 3.5N/mm ²	表 5.10 による		
			噴霧 2				打込み後 24 時間
		膜養生	膜	BL 水消失直後	-		

表 5.10 散水養生及び噴霧養生の計画

方法	I.D	開始時期	期間			
散水	散水 1-2d	プロクター貫入抵抗値 3.5N/mm ²	2 日間, 2 回/日			
	散水 1-5d		5 日間, 2 回/日			
	散水 2-5d	材齢 24 時間	5 日間, 2 回/日			
		打込み初期 24 時間までの結果 (試験容器)		散水量判定		
		面積(cm ²)	量(g)	単位量(g/cm ²)	単位量(g/m ²)	床の散水量(g)
		蒸発量	490.9	139.0	0.283	2,830
	吸込み量	78.5	17.8	0.227	2,270	1,297
	蒸発量+吸込み量(g)			5,100	2,914	
噴霧	噴霧 1	プロクター貫入抵抗値 3.5N/mm ²	2 日間, 0.02g/cm ² , 数回/日			
	噴霧 2	材齢 24 時間	1 日間, 0.02g/cm ² , 数回/日			

5.6.2 「実験Ⅳ」の結果考察

1) フレッシュ性状

「実験Ⅳ」で製造されたフレッシュコンクリートの物性値は、スランプ 15.5 cm, 空気量 4.4%, コンクリート温度は 35.0°C となった。コンクリート温度は関連規定の上限値である 35°C 以下となったが、スランプが若干小さくなった。

2) 温度性状

図 5.19 にコンクリート温度の経時変化を示す。無養生, 給水養生, シート養生の結果は, 今までの発熱傾向と同様であった。今回新たな養生方法として追加した散水養生においては, 打込み初期から材齢 5 日まで給水養生に近い値を示しており, 最高温度から減少する区間は無養生の試験体と比べて内部温度は急に低くなっている。このことから, 床スラブ試験体において, 外部から水分を供給する給水養生や散水養生は, 無養生の場合と比べて最高温度は同程度となるが, 温度が下がる速度は速いことが確認された。

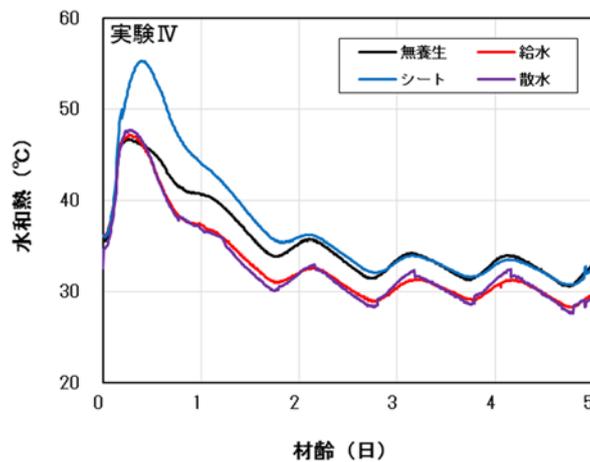


図 5.19 コンクリートの温度測定結果 (実験Ⅲ)

3) 水分移動及び凝結

図 5.20 にブリーディング、水分蒸発量、表面含水率の試験結果を示す。打込みから 2 時間の時点でブリーディングが終了し、以降表面含水率が大きく低下している。ブリーディング試験では、蓋の有無によるブリーディング水量の差が水分蒸発量の値とほぼ一致している。このことからブリーディング終了までの期間で試験体表面から失われる水分は、蒸発で失われるものが主であり、その後の期間においては、水和と蒸発により水分が大きく失われる。なお、複合法ブリーディング試験結果は、蓋なしの JIS ブリーディング試験結果に近い結果となった。

図 5.21 にプロクター貫入試験および N 式貫入試験の結果を示す。練混ぜから約 3 時間、打込みから約 2 時間の時点で凝結が始まっており、表面含水率が低下していく時間と一致している。「実験Ⅲ」でも述べたが、表面からの蒸発と水和により多くの水が失われるため、このタイミングで養生を開始するのが好ましいと考えられる。

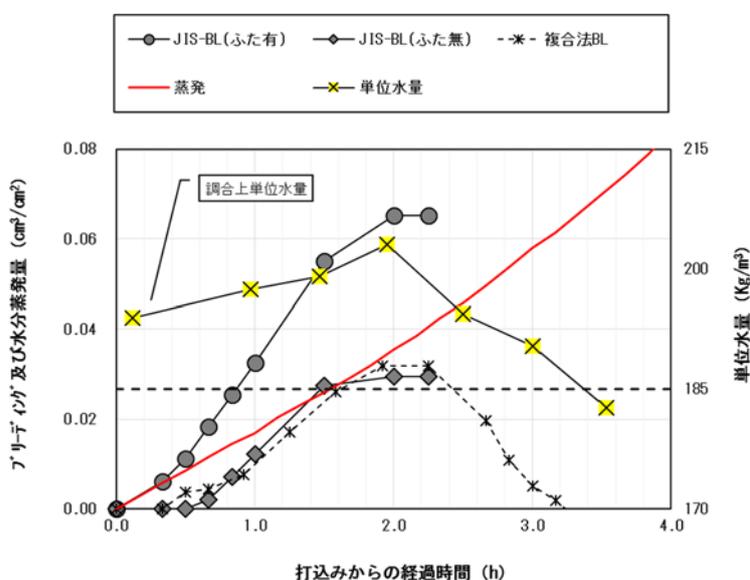


図 5.20 水分移動試験結果 (実験Ⅳ)

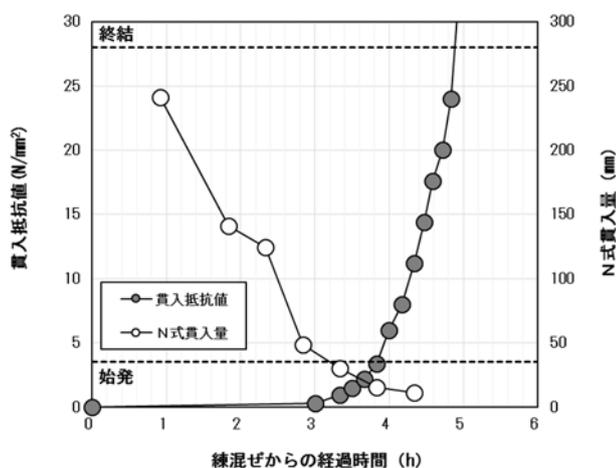


図 5.21 凝結試験結果 (実験Ⅳ)

4) 圧縮強度

図 5.22 に圧縮強度試験の結果を示す。養生を行ったすべての試験体において、無養生の試験体と比べて圧縮強度が高くなっている。給水養生が養生開始時期や期間に関わらず強度が高くなる傾向にある。今回の実験から新たに行った散水養生では、給水養生に近い結果が得られていることがわかる。今回は与える水の量を水分蒸発量と吸い込み量を実験により測定して決定したが、給水養生に近い強度が得られていることから、給水養生による給水は過剰であり、少なくとも今回の実験で散水した水量程度でも十分に養生の効果が得られることが分かった。なお、今回算定した散水量に関して、5日間同じ量を散水することは適切な散水量としては見られない。実際にコンクリートから失われる水分が小さくなる材齢3日からコンクリート表面に水分が残っていたため現場条件を考慮した散水方法とは言えない。一方で、噴霧して水を散布した試験体では、シート養生の試験体と近い値となった。噴霧器による今回程度での水量でも無養生のものに比べると圧縮強度が高くなっていることから、少なくとも水を表面に撒く程度でも無養生のものに比べると、コンクリートの品質改善が望めることがわかる。

5) 透気性状

図 5.23 にトレント法による透気試験の結果にトレント法のグレーディングによる評価を併記したものを示す。すべての養生方法において無養生のものに比べると透気係数が小さくなっている。材齢24時間で養生を開始したシート養生ではそれほど大きな効果は見られず、無養生に近い値となったが、これは今までの透気性状と同様の傾向である。養生ごとの比較としては、給水養生と散水養生の2種類が近い値となっており、良好な透気性状を示した。これは圧縮試験の結果と同じであり、散水養生が給水養生と同程度に有効であることが圧縮強度試験と透気試験の両方で確認できた。シート養生ではブリーディング終了後に養生を開始し、2日間と5日間それぞれ養生した試験体についてはグレーディングでも「普通」の範囲内に収まっており、比較的良好な値を示した。しかし、ブリーディング終了から4時間で養生を開始した試験体では透気係数が $1.24 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となり、「悪い」という評価となっている。このことからシート養生の開始時期はブリーディング終了後できるだけ早い時期が良いことがわかる。噴霧養生を行った試験体は「悪い」という評価の範囲に収まっており、シート養生の材齢24時間で養生を開始したものに値が近くなっている。無養生の試験体よりも透気係数自体は小さくなってはいるが、その効果はあまり大きくなく、給水や他の散水養生ほど十分な養生効果があるとは言えない。噴霧による散水を行った試験体では噴霧一回の養生で約 0.02g/cm^2 散水を行っているため、噴霧1と噴霧2でそれぞれ 0.42g/cm^2 と 0.26g/cm^2 の水を試験体に加えたことになる。シートのBL4-5dの打込みから養生終了までの期間で蒸発によって失われる水量が 0.43g/cm^2 である。噴霧1で蒸発分と同じ程度の水量、噴霧2で蒸発量より若干少ない程度の水量を与えたことになる。このことからシート養生は本来蒸発していくはずだった水量分の水を与える場合と同程度の養生効果であり、十分な水和に必要な水を保有することができておらず、給水および散水養生ほどは圧縮強度と透気性状の

両面で大きな改善は見込めないことがわかった。

圧縮強度と透気性状の両試験の結果より、散水養生は今回散水した打込みから 24 時間までの蒸発量と吸込み量の合計分の水量を 1 日 2 回に分けて散水する程度でも、十分これまでの給水養生と同程度の結果が得られることがわかった。これまでの給水養生だと常に試験体表面に水を張る必要があり、実際の施工現場だと現実的な養生方法とは言えなかったが、散水であれば散水の回数や水の量次第ではあるが、幾分現実的である。一方でシート養生は、あくまでコンクリートが有する水分の蒸発を防ぐ程度の養生効果であり、十分な水和に必要な水を確保するための養生としては不十分であり、次善の策でしかないと考える。

結果的に、散水養生に必要となる水の量と適切な散水の回数を把握できれば、より効率良く現場での適用を考えた養生方法とすることが可能である。

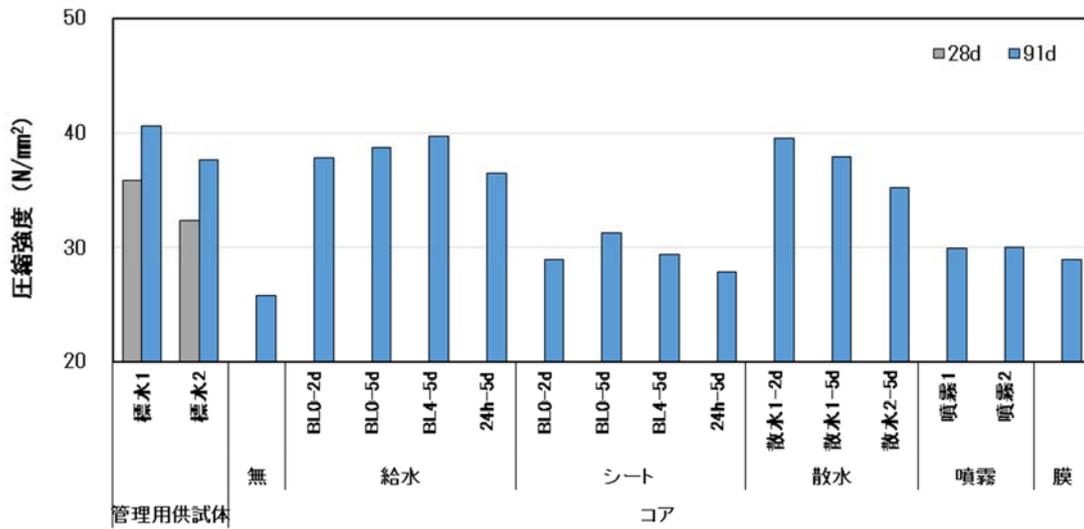


図 5.22 圧縮強度試験結果 (実験Ⅳ)

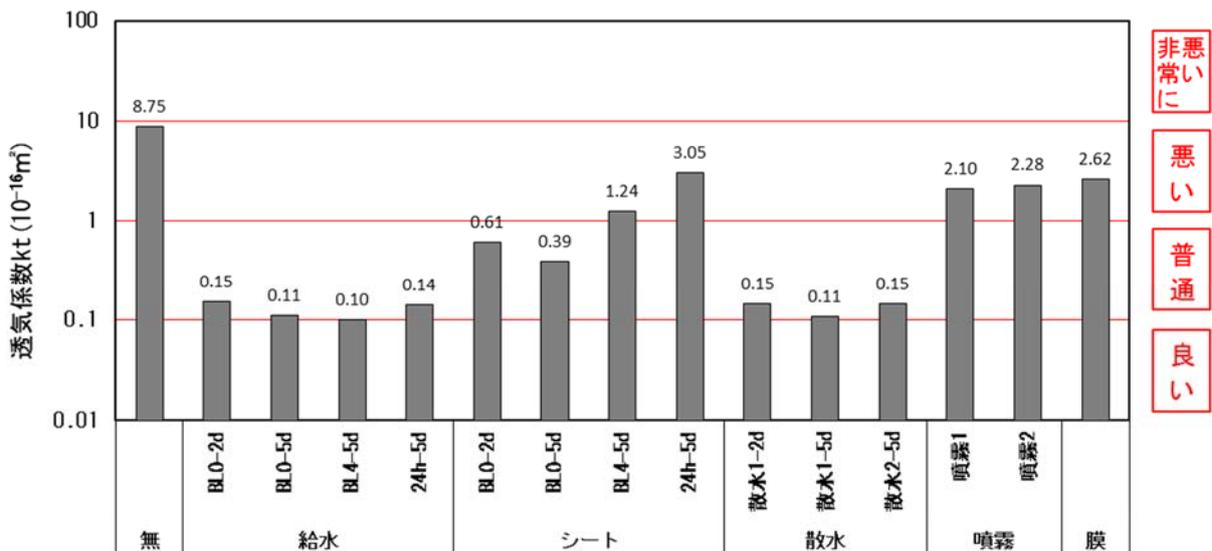


図 5.23 透気性状試験結果 (実験Ⅳ)

6) 中性化抵抗性

図 5.24 に促進中性化試験の測定結果を示す。まず水中養生を行った管理用供試体の中性化抵抗性が最も優れていることがわかる。床スラブ試験体の結果では、無養生の試験体が 8.0 (mm/√week) となっており、養生を行った試験体では中性化に対する抵抗性が高くなった。数値的に見ると、膜養生を除いたすべての試験体で 4.1~5.4 (mm/√week) の範囲となった。散水養生は、圧縮強度、透気性状試験結果と同様に給水養生の結果と同じ水準の値となり、中性化抵抗性の側面からもその効果が明らかになった。一方で、シート養生と噴霧養生の場合は圧縮強度と透気性状の品質に関して、給水や散水を行った試験体よりも養生の効果が小さい結果となったが、中性化においては、測定値はが少し大きいと同程度の品質と見ることも可能である。これは、全体的に「実験Ⅲ」の結果とも一致しているが、シート 24h-5d 試験体の傾向は異なっている。なお、「実験Ⅲ」の中性化試験結果では、給水養生やシート養生と同じレベルの値を示した膜養生は、今回の測定からは他の養生方法と比べて大きくなっている。膜養生は、これまで検討したすべての物性値がシート養生と同程度であったことを考えれば、中性化抵抗性は、シート養生と無養生の真中に位置しているが、シート養生の品質に近いと思われる。

図 5.25 に「実験Ⅲ」と「実験Ⅳ」の結果による透気係数と中性化速度係数を示す。実験ごとに少し違うが、全体的に見ると透気係数 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下の範囲における中性化速度係数は、4.0~5.0 (mm/√week) 程度となっており、その以上の中性化速度係数では、透気係数が急に増加することがわかる。このことから、図 5.23 の透気係数の品質判定グレーディングを適用すれば、中性化速度係数は、約 4.0~5.0 (mm/√week) 以下の値を基準とすることで品質管理ができると考えられる。

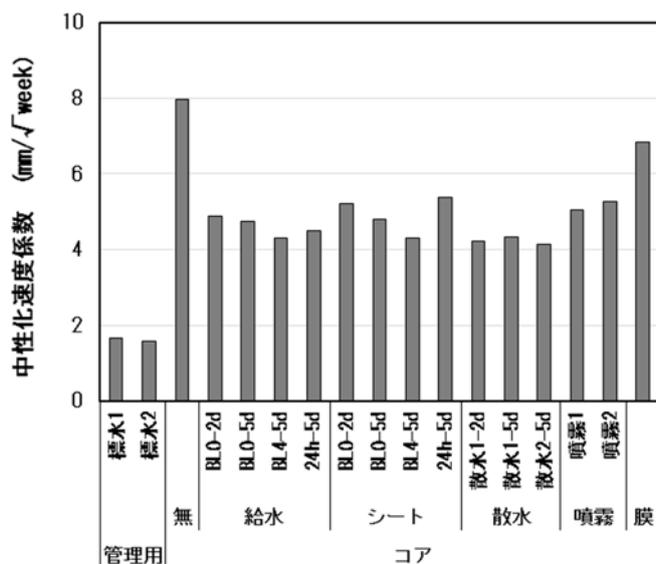


図 5.24 促進中性化試験結果 (実験Ⅳ)

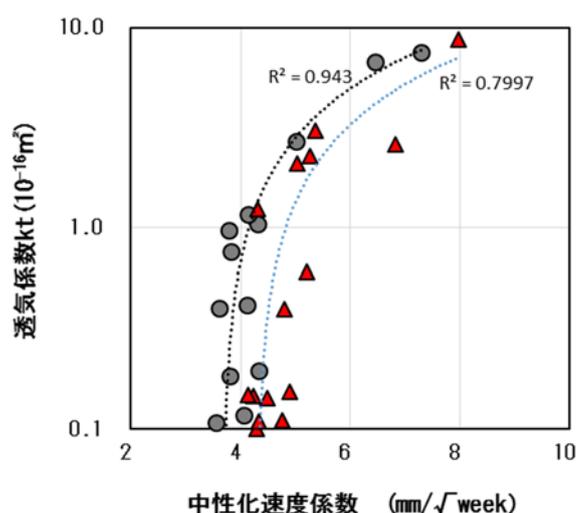


図 5.25 透気係数と中性化速度係数の関係

7) 細孔量

図 5.26 に細孔量の測定結果を、図 5.27 に全細孔量に対する細孔径 50nm 以上の割合と圧縮強度を示す。全細孔量は、すべての試験体で約 12~16% となって大きな差は見られなかった。圧縮強度に影響する 50nm 以上の細孔量から考察すると、圧縮強度が低い試験体においては 50nm 以上の細孔量が多く、全細孔量に対する割合も大きいことがわかる。圧縮強度が最も低い無養生試験体の場合は、50nm 以上の細孔量が全細孔量の半分以上を占めている。また、強度向上効果が大きくないシート養生や噴霧養生の試験体では、約 46% 以上の比率を示した。反面、散水養生試験体は、細孔径 50nm 以上の量は約 35% となり、給水養生に近い細孔構造を持っていることが認められた。このことから全細孔量に対する 50nm 以上の細孔量の割合から強度試験結果を説明することが可能であった。結局、暑中期には、外部から水分を供給すると、水和が促進され内部組織が緻密化することが認められた。暑中コンクリートの養生と関連して何よりも重要なことは水分であることが細孔構造によっても明らかになった。

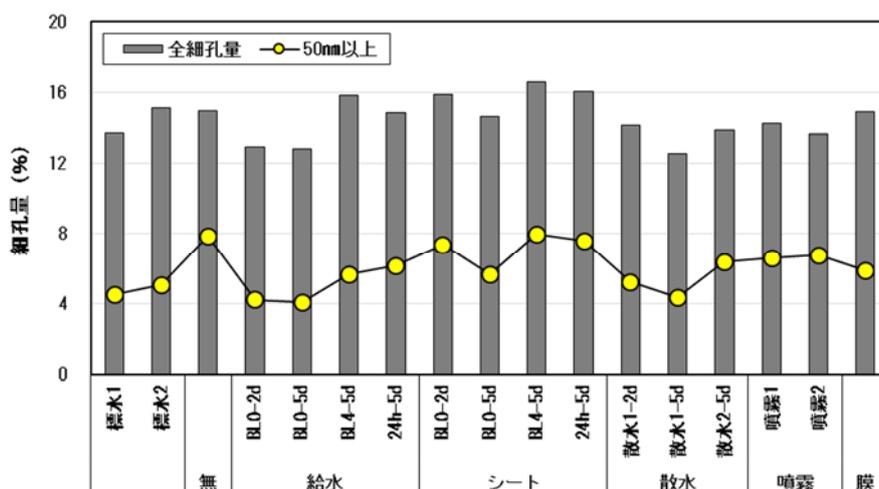


図 5.26 細孔量測定結果 (1)

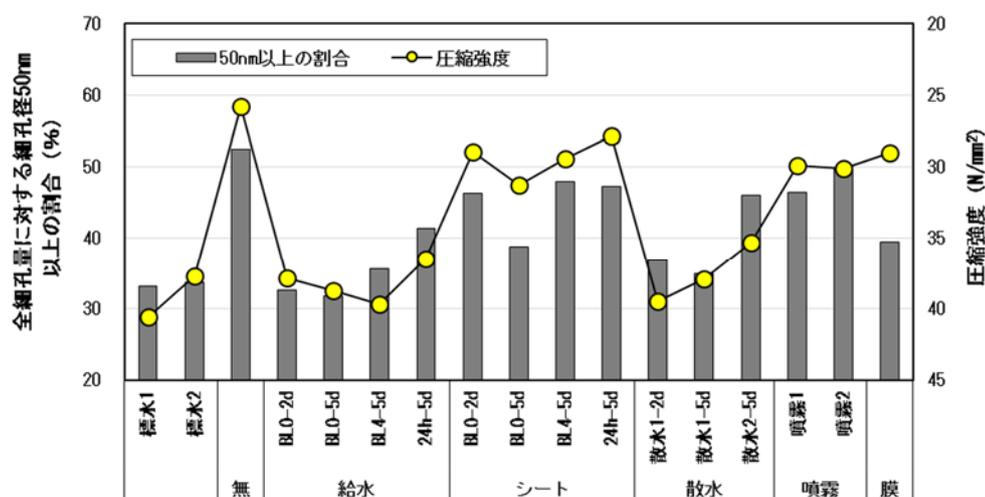


図 5.27 細孔量測定結果 (2)

5.6.3 「実験Ⅳ」のまとめ

本実験の結果を以下に示す。

- 1) 床スラブ試験体の温度性状において、外部から水分を供給する給水養生や散水養生は、無養生と比べて最高温度は同程度となるが、温度が下がる速度は速いことが確認された。
- 2) 散水養生を行うことは、圧縮強度、透気性状、中性化抵抗性の品質において、無養生の試験体よりも良好な結果が得られることがわかった。
- 3) 噴霧養生でも無養生のものに比べると圧縮強度が高くなっていることから、少なくとも水を表面に撒く程度でも無養生よりはコンクリートの品質改善が望めることがわかる。
- 4) 透気係数と中性化速度係数との関係によると、中性化速度係数が約 $4.0\sim 5.0$ ($\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$) 以上になると、透気係数は急に増加する。
- 5) 給水養生及び散水養生を行った試験体の細孔分布は、 50nm 以上の細孔量が少ないため、コンクリート内部の組織がより緻密化し、結果的に圧縮強度が向上された。
- 6) これまで行ってきた給水養生では水の供給が過剰であり、より適切な散水する量と回数を把握することで、効率よく床スラブ試験体のコンディションを改善することができる。

5.7 「実験Ⅴ」－ 散水養生の効果に関する実験2

5.7.1 「実験Ⅴ」の概要

表5.11に実験概要を示す。「実験Ⅳ」により、散水養生の有用性を十分に確認したため、「実験Ⅴ」においては、散水養生に関してさらに細かく検討するために、散水量と散水のタイミングを水準にして実験を行った。比較のために無養生，給水養生，シー養生，膜養生を先行研究と同じく実施し、散水養生においては、散水量とタイミングに応じて合計11体と設定した。

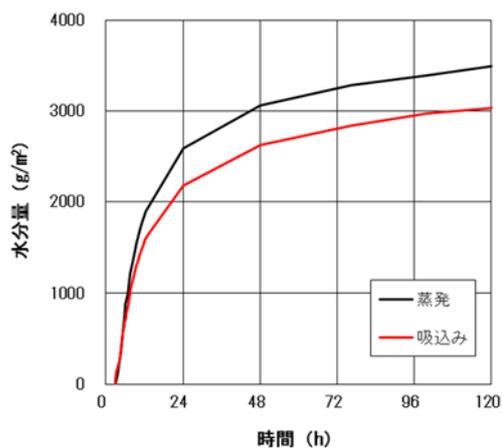
散水養生方法及び散水量算定根拠を図5.28に示す。「実験Ⅳ」の実験より、打設後24時間までの蒸発量と吸込み量を毎日散水すると良好な結果が得られたが、暑中期に製造したコンクリートの蒸発量と吸込み量は、打込み当日の水量が非常に大きいため、材齢5日まで打込み当日分の水量を散水することは過度であると考え得る。それで、本実験の1週間前に予備実験を行い、材齢5日までの蒸発量と吸込み量を測定し、各日に必要となる水分量を散水量の基準とした。まず大きく分けて散水1と散水2とした。基準となる散水量は、散水1は蒸発量と吸込み量の合計量、散水2はそれより少ない蒸発量のみを考慮した。散水養生のAは、材齢5日までの総量を打込み当日に供給する方法である。Bは、Aの散水量を半分に分け1日目と2日目に散水した。Cは、材齢5日までの各日に失われる蒸発量と吸込み量を当日に補充することである。Dは、打込み当日に当日分の水分を散水し、2日目に残りの水分量を全部散水した。Eは、Aと同じ水分量を材齢2日目（24時間後）に供給する方法である。Fは、打込み当日にAと同様に散水し3日目に同量をもう一回散水したものである。また、散水の開始時期はスラブ表面への影響を考慮して凝結始発のタイミングとし、以後24時間おきに散水を行った。

なお、本実験では材齢13週に吸水試験を行い、透気性状とともに耐久性を評価した。

表5.11 「実験Ⅴ」の概要

コンクリート 温度(°C)	試験体	養生				測定項目
		方法	I.D	開始時期	期間	
35±3 (暑中期)	床スラブ & 管理用 供試体 (標水)	無養生	無	-	-	<ul style="list-style-type: none"> スランプ 空気量 コンクリート温度 蒸発 JISブリーディング 複合法ブリーディング 単位水量 プロクター貫入試験 N式貫入試験 圧縮強度 トレント法透気実験 吸水試験
		給水	BL0-5d	BL水消失直後	5日	
		シート	BL0-5d			
		散水	散水1-A	貫入抵抗値 3.5N/mm ²	図5.28 による	
			散水1-B			
			散水1-C			
			散水1-D			
			散水1-E			
			散水1-F			
			散水2-A			
			散水2-B			
			散水2-C			
			散水2-D			
		散水2-E				
膜養生	膜	BL水消失直後	-			

予備実験結果 (g/m ²)						
		1日	2日	3日	4日	5日
蒸発	当日分	2600	450	200	150	100
	累積	2600	3050	3250	3400	3500
吸込み	当日分	2200	450	150	150	100
	累積	2200	2650	2800	2950	3050



床スラブ面積に対する散水量 (g)											
1. 散水量：蒸発 + 吸込み						2. 散水量：蒸発					
1-A	3735					2-A	2000				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1-B	1868	1868				2-B	1000	1000			
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1-C	2735	520	220	150	110	2-C	1485	270	110	70	65
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1-D	2735	1000				2-D	1485	515			
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1-E		3735				2-E		2000			
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1-F	3735		3735								
	1	2	3	4	5						

図 5.28 散水養生方法及び散水量の算定根拠 (実験 V)

5.7.2 「実験V」の結果考察

1) フレッシュ性状

「実験V」で使用したコンクリートの温度、スランプ、空気量は、打込み時に 34.5℃、16.0cm、4.3%となった。スランプがやや小さい値であるが、通常の暑中コンクリートの物性値の範囲内にあった。

2) 水分移動及び凝結

図 5.29 に水分移動の実験結果を示す。ブリーディングは約 0.085cm³/cm² となり、打込み後約 2.5~3.0 時間で終了した。床スラブ試験体の表面においても、同時期に表面の水分がなくなり、給水、シート、膜養生の開始時期は、打込みから約 3 時間後となった。コンクリート表面の単位水量は、最初の測定値が調合上の単位水量とほぼ一致しており、減少する時点もブリーディング試験結果に対応していることがわかる。

図 5.30 にプロクター貫入試験及びN式貫入試験の結果を示す。練混ぜ後 4.5 時間で始発、5.5h で終結した。散水養生は練混ぜ開始から 4.5 時間後から行った。

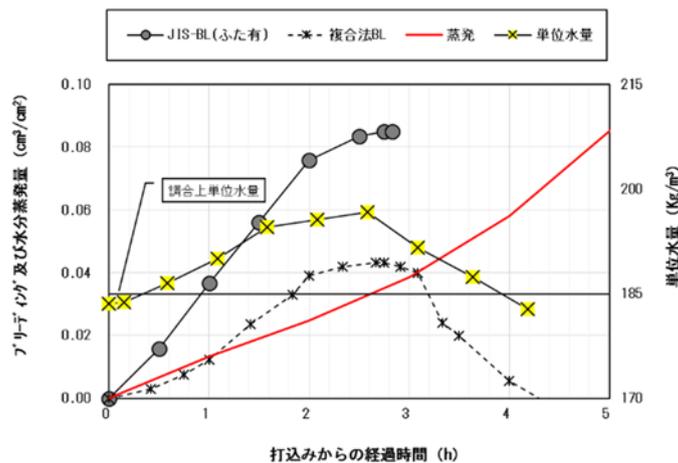


図 5.29 水分移動実験結果 (実験V)

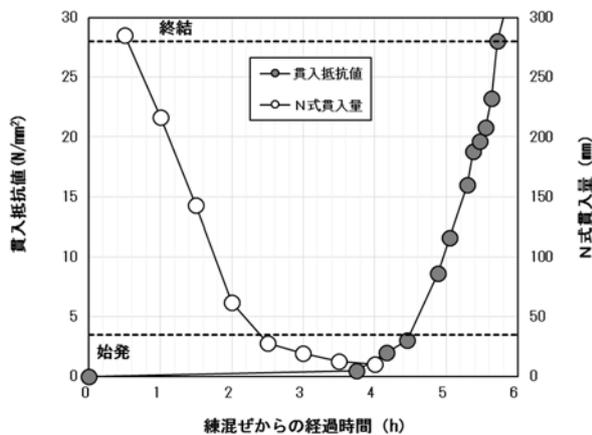


図 5.30 凝結試験結果 (実験V)

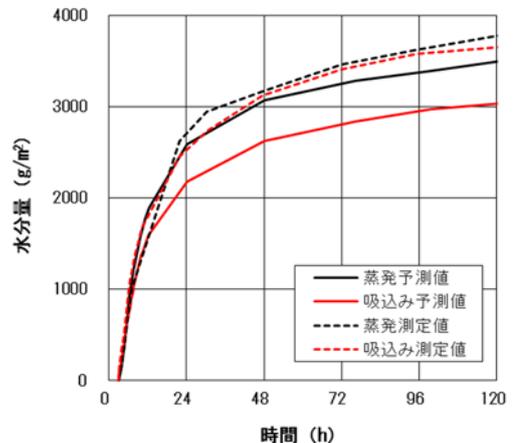


図 5.31 蒸発量と吸込み量 (実験V)

図 5.31 に予備実験から算定した散水量と実際の測定値を示す。点線の実測値は、蒸発量に関しては材齢 1 日以降少し大きくなっているが、全体的にはほぼ同程度となったが、吸込み量は最初から予測値より大きくなっており、材齢 5 日では約 600g/m^2 増加した。結果的に散水した量は、実験当日の散水量を正確に定められなかった。気温や湿度などの環境要因から散水量を決定することは、今後の課題である。

3) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図 5.32 に示す。いずれの養生方法を行っても無養生よりも高い値となり、無養生を除いて標準水中養生の 4w 強度と比べて同程度もしくはその以上の値となった。給水、シート、膜養生に関しては、今までの研究の傾向と同様の結果となり、それぞれの有効性を再確認した。散水養生に関しては、散水量が少ない散水 2 の試験体では、既存の養生方法であるシート養生や膜養生と比較して良好な結果が得られず、また散水のタイミングによる違いもさほど見られなかった。このことは、散水養生は上面の水が蒸発して上面が乾燥する時間が長かったことによると考えられ、散水 2 の散水量では不足していたことが分かる。散水 1 に関しては、1-B が著しく低い値となっているが、散水 2 の A と B の値を参考してみると型枠からの水漏れがあったと思われる。散水 1-B を除いて考察を進めると、1-A, 1-C, 1-D, 1-E はシートや膜養生と同程度であり、1-F は給水養生と同程度の結果となった。1-A と 1-F 試験体は、打込み翌日にコンクリート表面が乾燥状態にあったが、そのまま乾燥状態が続いてきた 1-A より 3 日目に再度散水した 1-F の強度性状が優れている。このことから、床スラブが乾燥したとしても再度水を供給すると強度向上に効果があることが認められた。結果的に、図 5.29 のように打ち込まれたコンクリートから実際に失われた水分より少ない水分量でも打込み当日と 3 日目に散水することによって 5 日間給水を維持した場合と同等の品質を得られる。水分量に関しては、蒸発量だけでは足りなく、蒸発量と吸込み量の総水分量は十分であると考えられる。

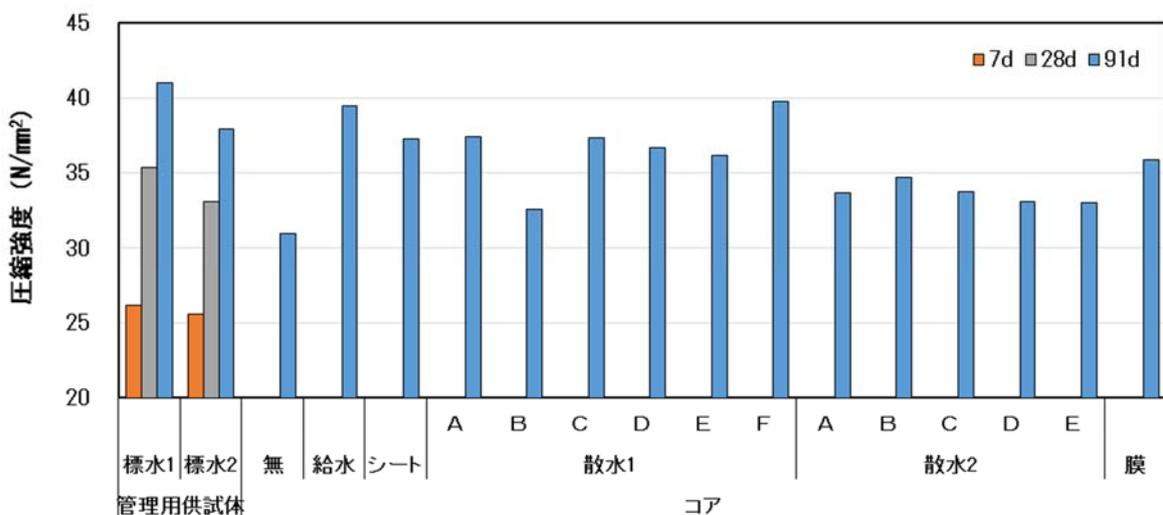


図 5.32 圧縮強度試験結果 (実験 V)

4) 透気性状

透気試験結果を図 5.33 に示す。また、「トレント法によるグレーディング」を参照して評価する。給水養生は最も良好でシート、膜養生に関しても「普通」に近い評価となり、先行研究の傾向と一致した。圧縮強度の結果と同様に散水 1-B は著しく悪い透気性を示した。散水養生に関しては、散水量が少なかった散水 2 のすべての試験体において透気係数が「悪い」評価となり、蒸発だけに対する散水量で透気性状に対しても水分が不足していたことが分かる。散水 1-A ではシート養生と同程度で「普通」に近い評価であり、これは圧縮強度と同様の結果となった。よって、打込み当日に一度散水することは、5 日間シート養生を行った効果が得られるため、現場における養生方法として適用可能であると思われる。また、1-F において、1-A より良好な結果が得られたことから、3 日目以降の散水による耐久性の向上効果も確認された。ただし、1-C の結果が良好ではないことから、1 回の散水量が少なく上面が乾燥している時間が長い場合にはその効果が十分に見られないことが分かった。

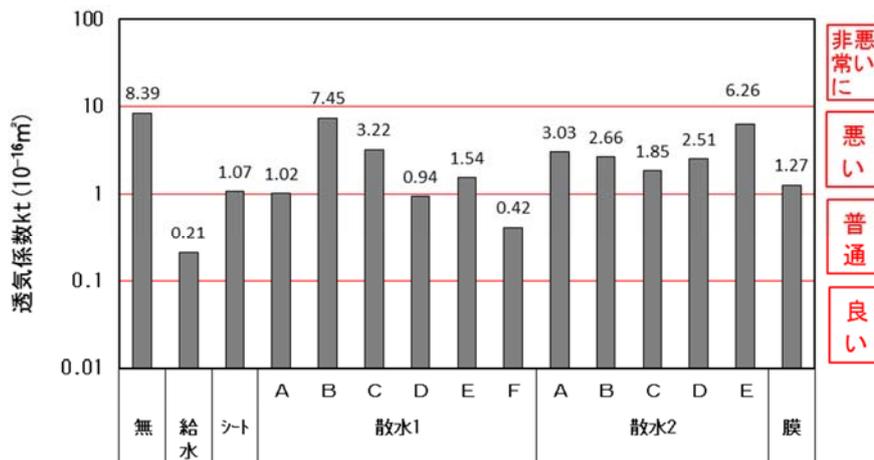


図 5.33 透気性状試験結果 (実験 V)

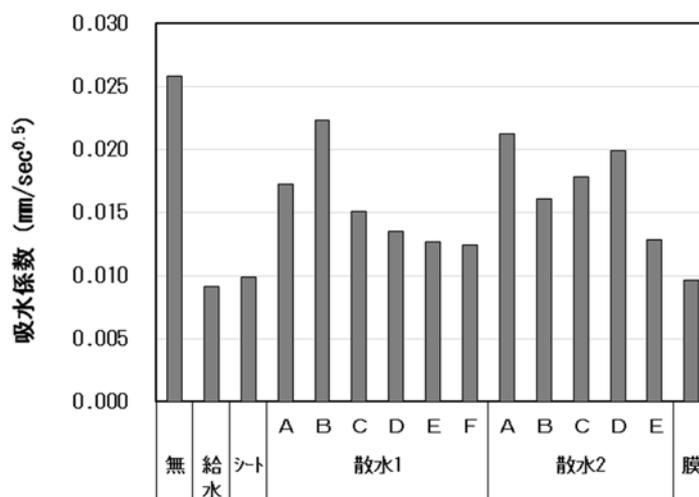


図 5.34 吸水試験結果 (実験 V)

5) 吸水試験

吸水試験の結果を図 5.34 に示す。吸水係数でもこれまでの結果と同様に無養生試験体の値が最も高くなっており、養生を実施したすべての試験体で品質改善効果が確認された。従来から検討してきた給水、シート、膜養生の効果は認められた。しかし、これらと比較して散水養生の効果は大きくなかった。概ね透気試験の傾向と一致しているが、明確な傾向は見られなかった。1回の散水量が同じである A と E に関して、1日目に散水する A よりも2日目に散水する E の方が散水1、散水2ともに良好な結果となった。また散水2の B, C, D に関して、透気試験の傾向とは異なった。一方で 1-F 試験体は散水養生のなかで最も低い吸水係数を示して、品質向上のために多い水分が要求されることは、吸水試験でも同じ傾向となった。

5.7.3 「実験V」のまとめ

本実験の結果は以下のとおりである。

- 1) 散水養生は打込み当日に散水することが重要であり、打込み当日と3日目に散水することによって5日間給水を維持した試験体と同様の品質が得られる。
- 2) 水分量に関しては、蒸発量だけでは足りなく、蒸発量と吸込み量の総水分量は十分であると考えられる。
- 3) 床スラブ表面の耐久性の評価方法として、透気係数と吸水係数で大まかな傾向は一致するが、異なる部分があり今後これを解明得ることが現時点の課題である。

5.8 床スラブコンクリートにおける養生方法の提案

表 5.12 は、「実験Ⅰ」～「実験Ⅴ」のすべての養生条件に対して品質向上効果を評価したものである。評価は、圧縮強度、透気性状、中性化抵抗性を基準とし、「●：非常に良い」，「○：良い」，「△：普通」，「×：悪い」の4等級で示した。圧縮強度の評価は、S 値及び強度値の両方を検討した。S 値の検討方法は、「票水 2」供試体の 28 日強度と床スラブから抜いたコアの 91 日強度の差を基準とし、「0 以下：●，0～3：○，3～6：△，6 以上：×」と判定した。また、「実験Ⅴ」の場合、極暑中環境にあったとしても、無養生試験体の S 値が 2.2N/mm^2 程度となって、S 値だけを比較する方法で養生の効果を検討することは難しい。それで、無養生試験体の強度値を基準とし、それぞれのコア試験体の強度値との差から「6 以上：●，3～6：○，0～3：△，0 以下：×」のように判定した。透気性状に対する養生効果においては、先に示したトレント法透気係数の判定グレーディングとは異なるが、「0.5 以下：●，0.5～1：○，1～5：△，5 以上：×」に基づいて評価した。

全体的に、圧縮強度が高くなると、透気性状と中性化抵抗性などの耐久性もよくなることがわかる。いずれの養生を行っても、養生を行わなかった試験体よりは、少しでも品質が高まることが確認された。

給水養生は、開始時期と持続期間に関わらず、最も効果的な養生方法である。しかし、本実験で想定した給水養生は、スラブ上面に 2～3cm 程度の水張りを行うことであり、この方法を実際の現場で実施することは不可能に近いと言える。シート養生は、給水養生と比べて、養生の効果が小さいが、外部から水分を供給しにくい現場条件においては、ある程度養生による品質改善が期待できる。ただし、打込み当日ブリーディング水がなくなった次第できる限り早めに養生を行って長期間養生を持続する必要がある。なお、打込みから 12 時間後に養生を開始すると圧縮強度の伸びが小さくなっており、打込み翌日に行ったシート養生試験体の圧縮強度は、無養生と同程度となって、強度性状に対する養生の効果が認められなかった。軽微な暑中期におけるシート養生は、極暑中期と比べて強度増進効果が大きくなったが、24 時間後の養生開始する方法は極暑中期と同様に効果が見えなかった。膜養生は、同じ保水養生であるシート養生と同程度の品質向上効果を示した。28～30 の散水養生は、「実験Ⅳ」のものであり、散水量（予備実験から得た材齢 1 日までの蒸発量+吸込み量を、1 日 2 回、5 日間供給）がとても多かったため、床スラブの表面は乾燥しない状態となり、結果的に給水養生と同等の条件であった。噴霧養生は、養生の効果はある程度確認されたが、また現実的に実施できない方法である。33～43 の散水養生は、現場作業容易性を、1 回散水は「○」，2 回散水は「△」，3 回以上は「×」と評価した。この中で最も養生効果が高い方法は、「散水 1-F」であり、強度、耐久性ともに給水養生と同様な品質を得られることが確認された。次に、予め定めた散水量を打込み当日 1 回のみ散水する「散水 1-F」と打込み後 5 日間各日に必要な水量を散水する「散水 1-C」も養生の効果が明らかになった。しかし、毎日散水する「散水 1-C」は、現場作業容易性が良くないため、推薦しにくいと思われる。

表 5.12 養生方法別品質向上効果の評価

番号	実験環境	養生方法	養生条件		現場作業容易性	品質向上効果 ¹⁾				
			開始時期 ²⁾	持続期間		強度		耐久性		
						S 値	強度値	透気性状	中性化	
1	軽暑中期	給水養生	打設直後	5d	×	●	●	●	—	
2			BL0	3d	×	●	●	●	—	
3				5d	×	●	●	●	—	
4				BL4	5d	×	●	●	●	—
5				24h	5d	×	●	●	●	—
6		シート養生	BL0	3d	△	●	●	△	—	
7				5d	△	●	●	○	—	
8			BL4	5d	△	●	●	○	—	
9			24h	5d	△	×	×	△	—	
10	極暑中期	給水養生	打設直後	5d	×	●	●	●	○	
11			BL0	2d	×	●	●	●	○	
12				5d	×	●	●	●	○	
13			BL1	5d	×	●	●	●	○	
14			BL2	5d	×	●	●	●	○	
15			BL4	2d	×	●	●	●	○	
16				3.5d	×	●	●	●	○	
17				5d	×	●	●	●	○	
18			12h	5d	×	●	●	●	○	
19			24h	5d	×	●	●	●	○	
20			シート養生	BL0	2d	△	△	○	○	○
21					5d	△	●	○	●	○
22				BL4	2d	△	○	△	△	○
23					3.5d	△	○	△	△	○
24		5d			△	○	○	△	○	
25		12h			5d	△	△	△	○	
26		24h	5d	△	×	×	×	○		
27		膜養生	BL0	—	△	○	○	△	○	
28		散水	当日	2d, 2回/d	×	●	●	●	○	
29			当日	5d, 2回/d	×	●	●	●	○	
30			翌日	5d, 2回/d	×	●	●	●	○	
31		噴霧 1	当日	2d, 数回/d	×	○	○	△	○	
32		噴霧 2	翌日	1d, 数回/d	×	○	○	△	○	
33		散水 1-A	図 5.28 による			○	●	●	○	—
34		散水 1-B				△	○	△	×	—
35		散水 1-C				×	●	●	△	—
36		散水 1-D				△	●	○	○	—
37		散水 1-E				○	●	○	△	—
38		散水 1-F				△	●	●	●	—
39		散水 2-A				○	●	△	△	—
40		散水 2-B				△	●	○	△	—
41		散水 2-C				×	●	△	△	—
42		散水 2-D				△	●	△	△	—
43		散水 2-E				○	○	△	×	—

1) 判定方法 (●:非常に良い, ○:良い, △:普通, ×:悪い)

2) BL0:ブリーディング水消失直後, BL1:ブリーディング水消失後1時間, BL2:ブリーディング水消失後2時間, BL4:ブリーディング水消失後4時間, 12h:打込み後12時間, 24h:打込み後24時間

表 5.13 は、実際の施工現場における養生方法の優先順位を検討して整理したものである。現場で行いにくい給水養生、28~30 の散水養生、31~32 の噴霧養生、毎日散水する方法 (35 と 41) は、この検討に入れない。また、「散水 1-B」の散水量 (3,735g/2d) が「散水 2-B」の散水量 (2,000g/2d) より多いにもかかわらず、養生の効果が小さくなったため、これらの検討も省略した。優先順位の検討は、圧縮強度を最も重要な検討項目と考え、「圧縮強度：非常に良い (●) & 透気性状：普通 (△) 以上」を A、「圧縮強度：良い (○) & 透気性状：普通 (△) 以上」を B、「圧縮強度：普通 (△) & 透気性状：普通 (△) 以上」を C というランクで評価した。

以上のことから、暑中環境で製造・施工される床スラブコンクリートの適切な養生方法について表 5.14 のように提案する。これは表 5.13 から得られた結果を、養生効果が最も大きい A ランク、次に効果的な B ランク、合格ライン上にある C ランクの養生方法について示している。

A ランクからみると、現実的に (31) の 2 回散水養生が一番望ましいと考える。この方法によれば、打込み後始発の際に 1 回散水して 2 日目は省略、3 日目にもう 1 回散水することで、強度及び耐久性が 5 日間水張りを行った場合と同様に、大幅に品質を改善することができる。しかし、現場条件上余裕があれば、2 日目にも散水を行うことがよいと思われる。次に推薦する方法は、(33) の 1 回散水方法である。これは、打込み当日 1 回散水するだけで、積極的にシート養生を行った場合と同等以上の効果が出る。以上の散水養生における散水量は、いずれも暑中環境に置かれるコンクリートの「材齢 5 日までの蒸発量+吸込み量」を基準とし、本研究の範囲では 6.550 /m²を用いた。

次善の策 (B ランク) としては、打込み当日に 1 日分の必要水分量を散水し 2 日目に残りの水分量を散水する「散水 1-D」や 2 日目に 1 回散水する「散水 1-E」の養生方法も考慮できる。しかし、この散水方法は、A の二つの散水方法と比較して、作業性やコストの側面で違いがないため、散水が可能な現場では、A ランクの散水を行うことがよいと思われる。なお、施工現場都合上水を散水することが困難な場合には、水分の蒸発を防ぐ保水養生であるシート養生を行い、コンクリートの品質を高めることができる。この場合、コンクリート表面が乾燥し始める時に、できるだけ早くシートをかぶせて、少なくとも 5 日間維持することが好ましいと思われる。また、幕養生剤を散布する方法もあるが、これはコストの上昇に繋がるデメリットがある。

一方、打込み翌日において、シートをかける「シート 24h-5d」や蒸発のみを考慮した水分量を散水する「散水 2-E」は、品質改善効果が少ないため、暑中環境に対応できないと判定された。これら以外のシート養生及び散水養生は、品質上合格ラインの最小限となる C ランクとなった。現場状況を考慮して A や B の養生が行いにくし際には、この C ランクの養生も考えられる。

最後に、日平均気温 30℃以下の軽微な暑中期では、極暑中期において B ランクであったシート養生が A ランクとなり、極微な暑中期よりも養生の効果が高く、比較的軽微な養生を行っても品質向上の効果が高いと考えられる。第 4 章の結果と同様に極暑中期よりは品質管理上比較的余裕があると言える。しかし、軽微な暑中期においても打込み翌日のシート養生は効果が少ないため、暑中環境におけるシート養生は必ず打込み当日に実施するべきである。

表 5.13 現場における適切な養生方法の優先順位検討

		強度性状					
		● (非常に良い)	○ (良い)	△ (普通)	× (悪い)		
透気性状	●	散水 1-F (38)	A	シート BL0-5d (21)	B	C	
	○	散水 1-A (33) シート BL0-5d (7) ¹⁾ シート BL4-5d (8) ¹⁾		散水 1-D (36)			シート BL0-2d (38)
	△	シート BL0-3d (6) ¹⁾		シート BL4-5d (24) 膜養生 (27) 散水 1-E (37)			シート BL4-2d (22) シート BL4-3.5d (23) シート 12h-5d (25) 散水 2-A (39) 散水 2-D (42)
	×						散水 2-E (43) シート-24h-5d (9) ¹⁾

1) 軽微な暑中期に適用した場合

表 5.14 床スラブの適切な養生方法の提案

優先順位	養生方法	打込み当日				2日目	3日目	4日目	5日目
		BL終了直後	始発	BL終了後4h	打込み後12h				
A	1 散水1-F								
	2 散水1-A								
B	1 シートBL0-5d	シート	-----						
	2 散水1-D								
	散水1-E								
	3 シートBL4-5d			シート	-----				
	膜養生	養生剤 散布							
C	1 シートBL0-2d	シート	-----						
	シートBL4-2d			シート	-----				
	シートBL4-3.5d			シート	-----				
	2 シート12h-5d				シート	-----			
	散水2-A								
	散水2-D								

5.9 第5章のまとめ

本章では、暑中期に施工される床スラブコンクリートの適切な養生方法について明らかにするために、実大レベルで模擬した床スラブコンクリートを対象とし、養生方法（無養生、水張養生、保水養生）、養生開始時期及び養生期間が硬化体の強度及び耐久性に及ぼす影響について検討し考察した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 床スラブコンクリートは、厚さが薄く表面積が大きいいため、暑中期に施工する場合でも水和熱による温度上昇量は大きくないが、外気温の変動による影響を大きく受ける。シート養生の場合、湿度変化が小さく、型枠の上面が密封されているため、コンクリートの水和熱が外部に放出されない一種の断熱効果によって若干高い温度を示した。無養生、給水養生、散水養生の最高温度はシート養生より 5~8℃程度低くなった。また、軽微な暑中期の場合には、外気温とコンクリート温度が極暑中期よりも低いことにより、床スラブコンクリートの最高温度は極暑中期より 10℃程度低くなった。
- 2) 圧縮強度と透気性状を踏まえると、ブリーディング水消失後数時間以内に給水養生を始め、できるだけ長く持続することが望ましい。また、打込み翌日に給水養生を行ってもシート養生より品質が高くなる。ただし、実際の現場では長時間の給水は困難であり、水の供給量が過剰であるため、散水などを適宜行って、給水状態にできるだけ近いような状態をつくることが重要である。
- 3) 散水養生に必要な水量は、コンクリートの蒸発量だけでは足りなく、蒸発量と吸込み量の総水分量とした方が好ましい。また、打込み当日に散水することが重要であり、打込み当日散水後 3 日目に再度散水することによって 5 日間水張を維持した試験体と同様の品質が得られる。この場合、2 日目にコンクリート表面が乾燥状態になることはコンクリートの品質に影響を及ぼさない。
- 4) シート養生は、打込み当日に養生を開始すれば、強度改善の効果が期待できるが、給水養生試験体よりは養生の効果が小さい。また、打込み翌日にシート養生を開始する方法は、軽微な暑中期、極暑中期ともに養生の効果は小さいことが認められた。従って、シート養生を採用する場合には、打込み当日ブリーディング水の消失後できるだけ早い養生開始が必要であると考えられる。
- 5) 膜養生剤を用いた膜養生試験体は、保水養生の一種であり、シート養生に近い養生効果が認められた。なお、噴霧して水を供給した試験体においても、シート養生の試験体に近い品質

を見せた。少なくとも水を表面に撒く程度でも無養生のものと比べると、コンクリートの品質改善が望めることが確認された。

- 6) 養生の開始時期が早いほど、養生期間が長いほど圧縮強度は大きくなっている。透気性状に関しては、養生期間よりも開始時期が品質に影響を強く及ぼす。しかし、中性化速度係数は、養生開始時期と養生期間の格段の違いは見られない。
- 7) 透気係数 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下の範囲における中性化速度係数は、 $4.0 \sim 5.0$ ($\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$) 程度となっており、その以上の中性化速度係数では、透気係数が急に増加することが確認された。ここに、透気係数の品質判定グレーディングの「普通」等級を適用すれば、中性化速度係数は、約 $4.0 \sim 5.0$ ($\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$) 以下の値を基準とすることで品質管理ができると考えられる。
- 8) 給水養生及び散水養生を行った試験体の細孔分布は、 50nm 以上の細孔量が少なくなり、その結果圧縮強度が向上された。従って、暑中環境の床スラブコンクリートに水分を供給することは、表面だけではなく、セメントマトリックスの微細構造が緻密化することが認められた。
- 9) 現場状況を考慮した最も最適な養生方法として、「材齢 5 日までの蒸発量+吸込み量」を打込み当日及び 3 日目に散水する 2 回散水養生を提案する。また、施工現場条件上散水が困難な場合には、シート養生を行って品質を改善することができるが、この場合できるだけ早い時期に養生を開始し、少なくとも 5 日間維持することが望ましい。
- 10) 外気温 30°C 未満の軽微な暑中期においては、比較的軽微な養生を行っても品質向上の効果が高くなって、極暑中期よりは品質管理上比較的余裕があると言える。しかし、軽微な暑中期においても打込み翌日のシート養生は効果が少ないため、暑中環境におけるシート養生は必ず打込み当日に開始する必要がある。

参考文献

- 5-1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015.07
- 5-2) 伊藤是清ほか：暑中コンクリートにおける養生方法がコンクリートの強度および耐久性に及ぼす影響に関する研究，九州東海大学工学部建築学科，森永研究室卒業論文，1998.01
- 5-3) 小山智幸ほか，暑中環境で施工される床スラブコンクリートの品質管理に関する研究 その1 研究の概要と速報，日本建築学会九州支部研究報告，vol.53，pp.21-24，2014.3
- 5-4) ACI Committee 305：Guide to Hot Weather Concreting，American Concrete Institute，pp.16-19，2010
- 5-5) 暑中コンクリート施工指針・同解説，日本建築学会，2000
- 5-6) 中島草太ほか：暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究—強度発現に及ぼす温度と水分の影響について—，九州大学大学院人間環境学研究院紀要，vol.22，pp.167-174，2012.7
- 5-7) 井上翔，秋山仁志，岸利治，魚本健人：現場簡易透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価とその相互比較，第35回土木学会関東支部技術研究発表会，2008.3
- 5-8) 国本正恵，湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：構造体コンクリートのコールドジョイント評価方法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.433-434，2000.09
- 5-9) 野中英：簡易透気試験による構造体コンクリートの品質評価方法に関する研究，日本大学博士学位論文，pp.2-9，2015
- 5-10) R.J. Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover onsite. *Materials and Structures*，vol.25，No.6，pp.358-365，1992
- 5-11) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，1983
- 5-12) 白川敏夫：表面吸水試験を用いた場合の吸水量の経時変化に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.433-434，2015.09
- 5-13) 中島草太，小山智幸，湯浅昇，小山田英弘，Victor Sampebulu，原田志津男，伊藤是清，陶山裕樹，松本侑也，暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究—強度発現に及ぼす温度と水分の影響について—，都市建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要，vol.22，pp.167-pp.174，2012.7
- 5-14) 小山智幸ほか，暑中環境で施工される床スラブコンクリートの品質管理に関する研究 その1 研究の概要と速報，日本建築学会九州支部研究報告，vol.53，pp.21-24

第6章

暑中環境で施工される壁体コンクリートの コールドジョイントに関する研究

第6章 暑中環境で施工される壁体コンクリートのコールドジョイントに関する研究

6.1 第6章の概要

暑中環境で製造・施工されるコンクリートは高い外気温の影響を受け、コンクリートの温度が上昇するため、セメントの水和反応が促進され、凝結・硬化の進行が早くなる。故にコンクリートのワーカビリティが低下し、運搬中のスランプの低下、空気量の減少、表面水分の急激な蒸発などの問題が発生しやすくなる。結果的には、先に打込まれたコンクリートと後で打込むコンクリート間の一体性を失い、コールドジョイントと呼ばれる不良継ぎ目が生じる危険性が高くなる。特に、柱、壁のような鉛直部材を夏期に施工する場合、コールドジョイントによるひび割れ及び耐久性の低下に対する対策が強く要求される⁶⁻¹⁾⁶⁻²⁾⁶⁻³⁾。

コールドジョイントの発生は、先に打たれているコンクリートの凝結の程度、練混ぜから打込み終了までの時間、打重ね時間間隔、コンクリート温度、打重ね部の締固め方法などによって左右される。JASS5では、打重ね時間間隔の限度を外気温25℃未満の場合2.5時間、25℃以上の場合2時間としている⁶⁻¹⁾。また、コンクリートの練混ぜから打込み終了までの時間の限度は、外気温が25℃未満で120分、25℃以上で90分としている。しかし、練混ぜ時間と現場での待機時間、打込み作業時間などを考慮すれば、実際の運搬可能時間は最大60分程度に過ぎない。従って、外気温25℃以上の暑中環境下では、練混ぜから打込み終了までの時間及び打重ね時間間隔が不足であるのみならず、関連規定の時間を守ったとしても環境条件の影響でコンクリートの凝結が既に進行されている可能性もある。

また、JASS5では、コールドジョイントを生じさせないようにする限界として、一般の部材においては貫入抵抗値が $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ になる時点を参考にしている⁶⁻¹⁾。既往の研究は、この値を超えたかどうかで、コールドジョイント発生の有無を判定することが一般的で、実際にコールドジョイントの発生を確認した事例は少ない。特に凝結時間が非常に早い暑中環境におけるコールドジョイントの発生について検討したものは十分ではない状況である⁶⁻⁴⁾。

このような背景から本研究は、暑中コンクリート工事においてコールドジョイントの発生に影響を及ぼす様々な要因を総合的に検討することを目的としている。そのために、実大レベルで模擬制作した壁試験体を対象とし、先に打込んだコンクリートの練混ぜから打込みまでの時間（以後、先打ち時間）及び後から打込むコンクリートの練混ぜから打込みまでの時間（以後、後打ち時間）、その打重ね時間間隔の三つの要因により変わるコンクリートの初期水分移動及び凝結特性が打重ね部に及ぼす影響について検討した。最終的には、硬化体の打重ね部で曲げ強度と透気性、吸水性、曲げ強度を測定し、コールドジョイントによる強度性状及び耐久性性状について評価した。また、比較対象として同様の材料・調合・実験方法で行った標準期のデータを提示する。

6.2 実験内容

6.2.1 実験構成及び概要

表 6.1 に実験概要を示す。本実験は、2 年間の実験結果をまとめたことであり、2015 年度の「実験Ⅰ」と 2016 年度の「実験Ⅱ」と構成される。実験の要因と水準は、先打ち時間及び後打ち時間をそれぞれ 0.5, 1.5 時間とし、その打重ね時間間隔を 1, 2, 3 時間で設定して打込み時間及び打重ね時間間隔の影響について検討した。

コンクリートの製造は、暑中期及び標準期に福岡市内のレディーミクストコンクリート工場で行い、試験場所（屋根がある室内倉庫）までトラックアジテータで運搬した。打込み計画は表 6.1 に示すように 5 バッチのコンクリートを所定の時間に打込み、合計 16 体の試験体を作成した（図 6.2 参照）。例えば、試験体「0.5-2-1.5」は、バッチ 1 のコンクリートを練混ぜから 30 分後に壁型枠の 1/2 の高さまで打込み、2 時間後に練混ぜから 1.5 時間経過したバッチ 2 のコンクリートを上層に打重ねたことを意味している。また、「実験Ⅰ」における「1.5-2W-1.5」と「1.5-3W-1.5」試験体は、打ち重ねる直前に先打ちコンクリートの表面に散水し（標準期は除去）、その効果を検討した。「バッチ 1 のコンクリートは実験当日正午頃に練混ぜを開始し、30 分及び 90 分後に打込みを終了した。バッチ 2~5 のコンクリートも事前に定められた時間に同様の方法で練混ぜから打込みまでの作業を繰り返した。養生は、実験場所でそのまま屋内養生とした。コンクリートの調合を表 6.2 に示す。

「実験Ⅱ」は、「実験Ⅰ」の結果から見られた透気性状のバラツキに対する欠点を補完するために行ったものである。補完策として「実験Ⅰ」と違うことは、型枠の剛性を高めるために全ての試験体においてアルミ鋼管を使用し、締固め方法としてバイブレータの挿入間隔を 30cm から 15cm に狭めたことである。耐久性状においては、データの信頼性を確保するために、吸水試験を追加的に行い透気試験結果と比較した。また、透気性低下の要因としてレイタンス等が上がってくるがあったため、「1.5-2L-1.5」及び「1.5-3L-1.5」の試験体を追加し、先打ちコンクリートの表面のレイタンスを除去してその効果を検証した。基本的には、「実験Ⅱ」における実験の要因と水準、使用材料及び調合、実験方法などは、「実験Ⅰ」同様である。

表 6.2 コンクリートの調合 (27-18-20N)

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				C	W	S	G	混和剤
18±2.5	4.5±1.5	53.0	45.0	350	185	763	985	4.55

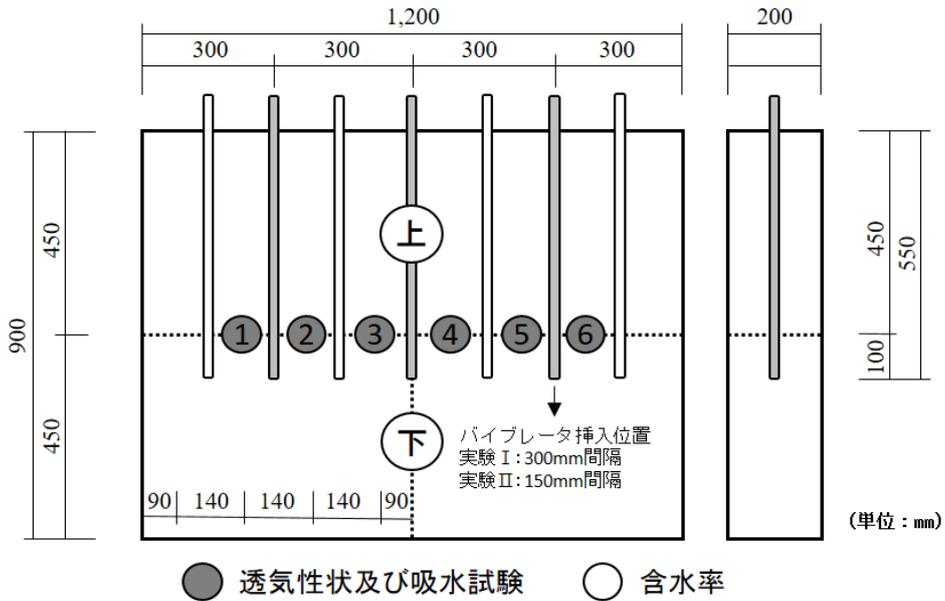


図 6.1 壁試験体の形状及び測定位置

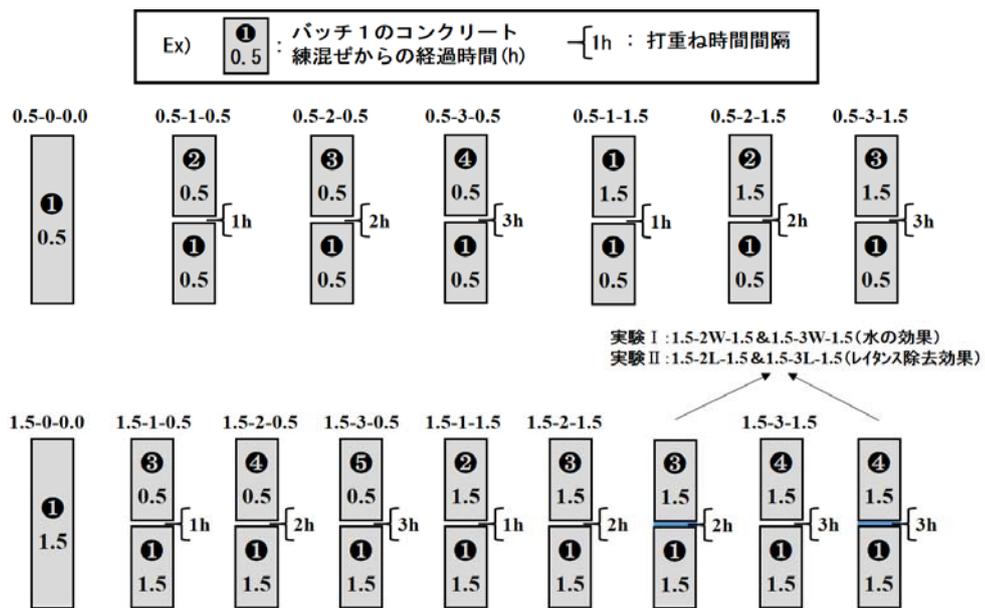


図 6.2 各試験体の模式図

6.2.2 試験体の性状及び打込み方法

図 6.1 及び図 6.2 に本研究で用いた模擬試験体を示す。試験体は幅 1200mm×奥行 200mm×高さ 900mm（以下、壁試験体）のサイズで作製した。壁試験体は、先打ちコンクリートを 450mm の高さまで打込み、所定の打重ね時間が経過した後、後打ちコンクリートを打込んだ。締固めは図 6.1 に示すように、「実験Ⅰ」では 300mm 間隔、「実験Ⅱ」では 150mm 間隔で棒状バイブレータにより 15 秒間加振し、後打ちコンクリートの打設の際の加振は先打ちコンクリートへ棒状バイブレータの先端を 10cm 挿入させ再振動を行った。

6.2.3 測定項目及び方法

表 6.1 に試験項目を示す。フレッシュ状態ではスランプ、空気量、コンクリート温度、ブリーディング、水分蒸発量、表面含水率、プロクター貫入抵抗試験及び N 式貫入試験を行った。硬化体については、管理用供試体の圧縮強度と壁試験体に対して含水率、シングルチャンバー及びトレントにより透気性状を測定した後、最後に曲げ強度を測定した。しかし、「実験Ⅱ」においては、シングルチャンバーによる透気速度及び曲げ強度試験を省略し、吸水試験による吸水係数を検討した。以下に各試験方法を示す。

1) フレッシュコンクリートの性状

コンクリートのスランプ、空気量及びコンクリート温度は、練混ぜ直後と先打ち時間 0.5 時間及び 1.5 時間（バッチ 1~4）で測定し、運搬時間に伴う特性変化を検討した。

2) 水分移動 — ブリーディング、水分蒸発量、単位水量

水分移動は、バッチ 1 のコンクリートの先打ち時間 0.5 時間及び 1.5 時間の試料を対象とした。

ブリーディングは $\phi 250 \times 285\text{mm}$ の JIS 規格容器（ふた有・無の二個）と $\phi 250 \times 500\text{mm}$ の円筒及び図 3.1 に示す複合法の三種類で測定した。円筒ブリーディングは、いくつかの容器を用意し、ブリーディング水の累積値ではなく、測定した時点（打込みから 1, 2, 3 時間後）の湧出量を測定した。水分蒸発量は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の簡易型枠及び $\phi 250 \times 500\text{mm}$ の円筒を用い、時間経過により減少するコンクリートの質量を測定した。ブリーディングおよび水分蒸発試験に用いた円筒容器は、壁試験体のコンクリート打込み高さを考慮したものであり、壁試験体の先打ちコンクリートと同じ高さ 450mm までコンクリートを打込み、棒状バイブレータで加振した。単位水量は、N 式貫入試験用試料の表層部から採取し、5mm ふるいで粗骨材を取り除いたモルタル試料について実施した。

3) 凝結性状

プロクター貫入抵抗試験は、JIS A 1147 に準拠して行った。N 式貫入試験⁶⁻⁷⁾は、 $330 \times 200 \times 540\text{mm}$ の長方形容器に高さ 450mm までコンクリートを打込み、棒状バイブレータで加振したものについて実施した。詳細な試験方法は、「3.2.3 実験方法」に示すとおりである。

4) 透気性状

透気性試験の測定位置は、図 6.1 に示すとおりである。図 6.3 にシングルチャンバー法透気試験の概要を示す。シングルチャンバー法透気試験は内径 85mm、容積 167cm³ のデシケータの蓋をゴム製のパットとパッキング材によりコンクリート表面に取り付け、真空ポンプでデシケータの蓋の内部を減圧した後、コンクリート表面からの空気の流入により真空度が 13.3kPa から 33.3kPa に低下する時間を計測した。このとき、低下した真空度 20kPa を時間で割った値をシングルチャンバー法透気速度と呼び、透気性の指標とした。トレント法透気試験はコンクリート表面に減圧したチャンバーを設置し、その内部チャンバーの気圧変化から透気係数を算出した。なお、シングルチャンバー法透気試験及びトレント法透気試験は比較として先打ちコンクリート及び後打ちコンクリートの打設高さの中央部付近での透気性の測定も実施した。なお、シングルチャンバー法透気試験及びトレント法透気試験は、打重ね面との比較として、先打ちコンクリート及び後打ちコンクリートの打設高さの中央付近での透気試験も実施した。

5) 曲げ強度

図 6.3 に曲げ強度試験の試験体の切断位置を示す。材齢 91 日以後に幅 100mm に切断したもの 4 つに対して行った。壁試験体をスパン 600mm の三等分載荷試験とした。実際曲げ強度試験の様子を写真 6.1 に示す。

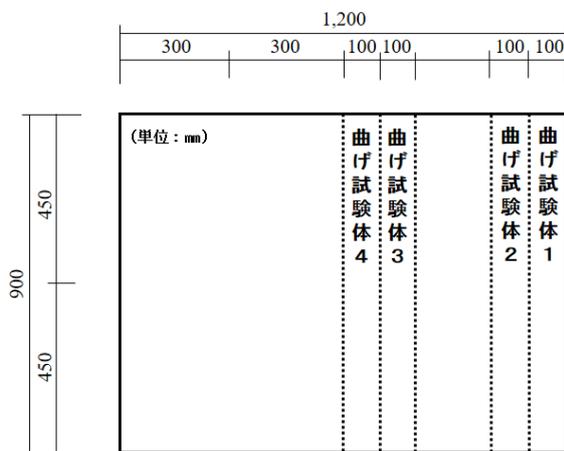


図 6.3 曲げ試験用試験体の概要



写真 6.1 曲げ試験の様子

6) 吸水試験

吸水試験装置の概要を図 6.4 に、実際の試験様子を写真 6.2 に示す。本試験装置は、基本的に壁面の測定を対象としており、三つのチャンバーで構成される。チャンバー 1 は、吸引ポンプによりチャンバー内を負圧にすることにより、構造物への取り付けを行えるようにした。また、チャンバー 3 は、取り付けしたコンクリート構造物に吸水試験が行えるようにした。なお、吸水量測定のため、メモリを付した長さ 300mm の吸水パイプを取り付けた。また、チャンバー 2 は、チャンバー 1 が吸引ポンプにより負圧となり、チャンバー 3 の吸水試験への影響を除くために作製した。表面吸水試験は、まずチャンバー 1 を負圧にすることにより壁試験体に取り付け、次にチャンバー 2 に給水し、最後にチャンバー 3 に給水するとともに、吸水パイプへ給水した。吸水量は、チャンバー 3 に圧力センサーを取り付け、圧力を 10 秒間隔で 10 分間測定し圧力差により吸水量を求めた⁶⁻⁵⁾。測定間隔を 10 秒間隔としたことにより、吸水初期においては、吸水量が時間の平方根に比例しないため、吸水 3 分から 10 分までのデータを用い、吸水係数を算出した。酒井ら⁶⁻⁶⁾は、コンクリートの空隙中の液状水の浸入についての駆動力を毛細管張力とし、吸水量が時間の平方根に比例するとしている。よって、次の式 (6.1) により吸水係数を定められた

$$V = S\sqrt{t} + V_0 \quad \text{式 (6.1)}$$

ここに、

V : 吸水量 (mm^3/mm^2)

S : 吸水係数 ($\text{mm}/\text{sec}^{0.5}$)

t : 吸水時間 (sec)

V_0 : 初期吸水量 (mm^3/mm^2)

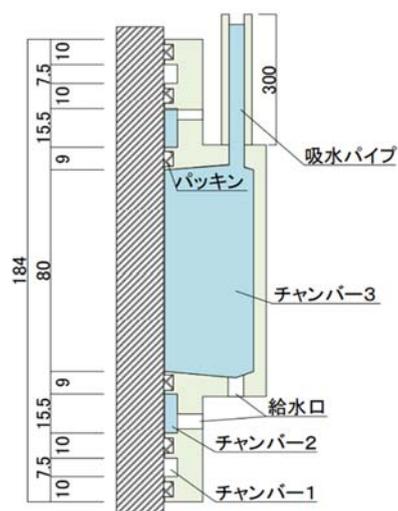


図 6.4 吸水試験装置の概要



写真 6.2 吸水試験の様子

6.3 「実験Ⅰ」の結果考察

6.3.1 フレッシュ性状

練混ぜ直後、30分後、90分後のフレッシュコンクリートの性状を表6.3に示す。暑中期では、「実験Ⅰ」練混ぜ直後の値と比較して運搬時間が長くなるほど、スランプが若干減少したが、目標した値以内であった。空気量とコンクリート温度は大きな変化が見られなかった。標準期においても同様の値となっており、外気温度は13℃程度で少し低く、相対湿度は80%と高かったが、コンクリート温度は19℃であった。総じて、実験環境に関わらず運搬時間によるフレッシュコンクリートの品質変化はほとんど見られなかった。

表 6.3 フレッシュコンクリートの性状（実験Ⅰ）

実験名	実験環境	状態	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	外気温 (℃)
実験Ⅰ	暑中期	練混ぜ直後	20.5	3.8	32.0	32.0
		0.5 時間後	20.0	3.7	32.0	32.0
		1.5 時間後	19.0	4.3	32.0	31.0
	標準期	練混ぜ直後	20.5	4.0	19.0	13.0
		0.5 時間後	20.5	4.0	19.0	13.0
		1.5 時間後	20.0	3.7	19.0	13.0

6.3.2 水分移動

図 6.5～図 6.8 に「実験Ⅰ」の水分蒸発量、ブリーディング水量及び表面の単位水量などの水分移動の関係を、暑中期と標準期について示している。

打込み後 3 時間までの水分蒸発量は、暑中期では約 0.065～0.080g/cm²、標準期では、0.015～0.016g/cm² 程度となり、暑中環境では水分の蒸発が非常に速いことがわかる。なお、先打ち時間による蒸発量の差は大きくないことがわかる。

コンクリート表面の含水率を単位水量に換算して示している。まず暑中期の場合、打込み後 1 時間までは、打込みからの経過時間が同じであれば先打ち時間に関係なく同程度であった。また、JIS ブリーディング試験結果でも、打込み後 1 時間までは、ブリーディング水量は先打ち時間にかかわらず同程度であった。しかし、打込み後 1 時間以降からは異なる傾向となり、先打ち時間 0.5h では約 2 時間、1.5h の場合は 1.5 時間が過ぎた時点で最大となった。このように暑中期では先打ち時間が遅い場合、コンクリートの表面付近の水分増加は小さく、打込み後早期の打重ねが可能な時間（練混ぜ後 1.5h+打重ね 2h→練混ぜ後 3.5h）内に減少する傾向が見られた。また、打込み時の単位水量は、調合上の単位水量とほぼ一致している。一方、標準期では、打込み後 4 時間を経過してもブリーディングは生じており、打重ねが可能な時間（練混ぜ後 2h+打重ね 2.5h→練混ぜ後 4.5h）内では含水率の上昇が続いていた。

ブリーディング水量に関しては、先ず JIS 規格容器を用いた測定では、暑中期の先打ち時間 0.5h の場合、ブリーディングは打込み後 1.5～2 時間で終了し、累積ブリーディング水量はふた有の場合は $0.058\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度、ふた無では $0.024\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度となった。暑中期の先打ち時間 1.5h では、打込みから約 1.5 時間後にブリーディングが終了し、ブリーディング水量はふたをした条件では $0.047\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、ふた無の場合は $0.020\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度となった。標準期の場合は、水分蒸発の影響が小さいため、ふた有無の影響が少なく、 $0.14\sim 0.21\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度で暑中期より多く、終了時間も長いことを確認した。。

先打ちコンクリートと同じ深さの円筒容器を用いた結果では、暑中期の先打ち 0.5h では、打込み後 1 時間までは湧出量が増加し、その量は蒸発量と同程度であったが、その後低下した。また、先打ち時間 1.5h の場合は湧出量が小さく、常に蒸発量よりも小さい値となった。なお、先打ちコンクリートの打込み時間にかかわらず、打込みから 2 時間経過すると、コンクリート上面のブリーディング水はなくなった。一方、標準期の場合は、打込みから 2 時間までは、他の実験方法によるブリーディング累積量とよく対応しており、その後表層部のブリーディング水幕の影響で湧出量は若干減少した。また、湧出量が暑中期よりも多く、逆に蒸発量は少ないため、常に湧出量が蒸発量よりも大きくなった。

複合法による結果では、湧出終了時間は先打ち時間 0.5h で約 2 時間、1.5h の場合は約 1.5 時間で、JIS 法と同時期となった。その後、養生水の吸水過程に転じたが、標準期には測定時間内の吸水は見られなかった。これらは表面含水率の傾向ともよく対応している。

これらを総合すると、暑中期では標準期と比較して、先打ちコンクリート上面における水分蒸発量が大きく、ブリーディング水量が小さいため、乾燥しやすい状況にあるといえ、さらに上面での吸水現象が生じることなどの影響により、目視観察でも上面の浮き水は標準期しか見られなかった。

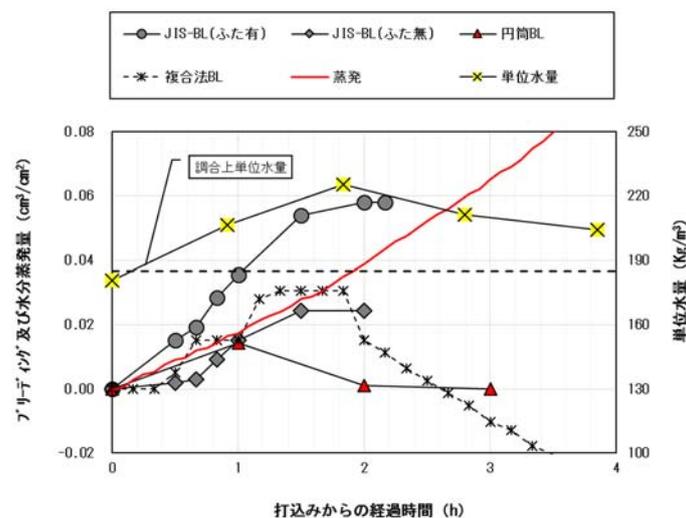


図 6.5 水分移動試験結果—先打ち時間 0.5h, 暑中期 (実験 I)

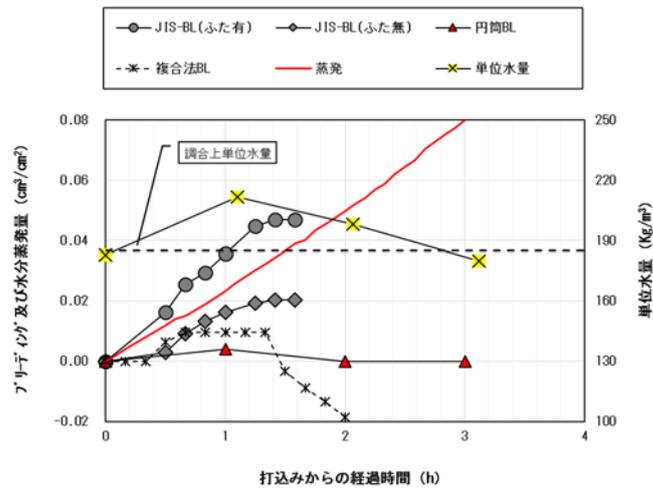


図 6.6 水分移動試験結果—先打ち時間 1.5h, 暑中期 (実験 I)

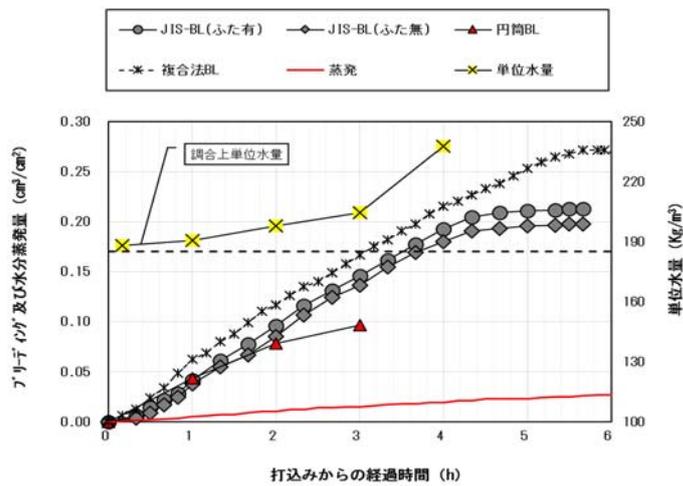


図 6.7 水分移動試験結果—先打ち時間 0.5h, 標準期 (実験 I)

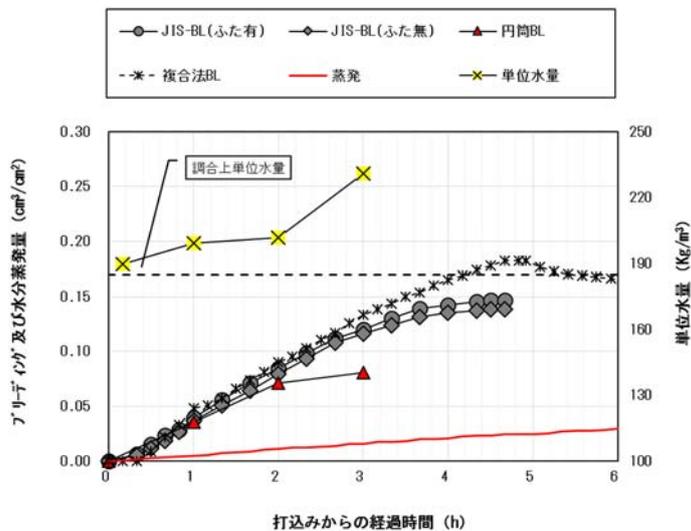


図 6.8 水分移動試験結果—先打ち時間 1.5h, 標準期 (実験 I)

6.3.3 凝結性状

図 6.9 にと図 6.10 に暑中期と標準期のプロクター貫入抵抗値および N 式貫入試験の突き棒貫入深さを示す。暑中期の貫入抵抗値は、先打ち時間にかかわらず練混ぜ後 2.5 時間まで $0\text{N}/\text{mm}^2$ 、3 時間 40～50 分で始発となり、終結まではさらに 1 時間程度かかった。JASS5 で打重ねの目安とされる $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ の値を考慮すれば、練混ぜ後約 3 時間をコールドジョイントの発生抑制の限界とし、その時間以内に打込み管理をする必要がある。本実験の範囲では、先打ち時間 0.5h では打重ね時間間隔 3h、先打ち時間 1.5h では打重ね時間間隔 2h と 3h の試験体の品質が悪くなる可能性があることになる。反面、標準期では、練混ぜ後 7.5h で始発、11.5h で終結となり、暑中期に比べると約 2 倍以上の時間がかかった。また、打重ねが可能な時間である練混ぜ後 5h 内では $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の貫入抵抗値となって、先打ちコンクリートの打込み時間が遅くなくても、後続の打込み作業にて余裕が持てると考えられる。一方、N 式貫入試験結果では、プロクター貫入試験による測定が困難な打込み後初期範囲での凝結特性が確認され、より初期の性状変化を評価できていることがわかる。一方、表 6.4 のプロクター貫入抵抗値と N 式試験結果から見ると、暑中期では、 $0.17\text{N}/\text{mm}^2$ 、76mm（先打ち 0.5h－打重ね 2h）となり、標準期では、 $0.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、60mm（先打ち 1.5h－打重ね 3h）となって、暑中期における打込み初期のコンクリートはプロクター貫入抵抗値が大きいにもかかわらず、N 式貫入深さは大きくなる可能性がある。

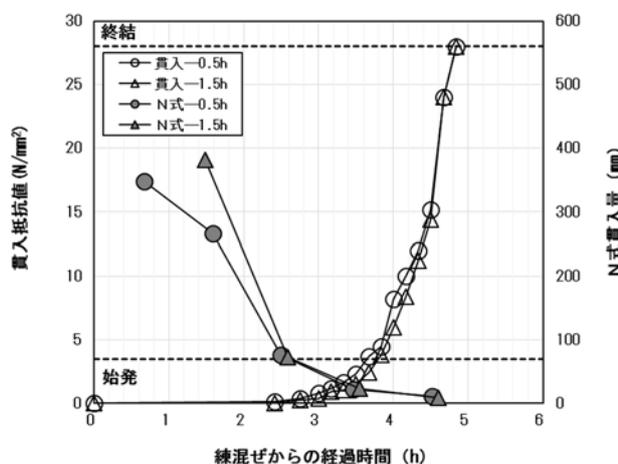


図 6.9 凝結試験結果－暑中期（実験 I）

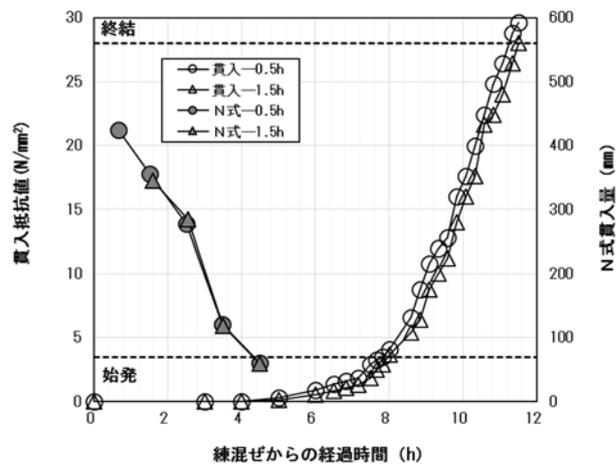


図 6.10 凝結試験結果－標準期（実験 I）

6.3.4 打重ね時の先打ちコンクリートの状態

表 6.4 は打重ねを行うそれぞれの時点において、先打ちコンクリートの状態について整理したものである。コールドジョイントの発生を防ぐための品質管理項目として、先打ちコンクリートの性状の評価基準を、「ブリーディング終了時、貫入抵抗値 0.5N/mm^2 、突き棒深さ $60\sim 70\text{mm}$ 」とすれば、暑中期の先打ち時間 0.5h では2時間以内、先打ち時間 1.5h では、1時間以内に後打ちコンクリートを施工する必要があると思われる。一方、標準期では、今回採用した打重ね時間等のいずれの条件でも後打ちコンクリートを打込むことが可能であると判断される。また、標準期の打重ね時間間隔 3h の場合は、JASS5の規定値を超えているが、先打ちコンクリートの性状は、先打ち時間にかかわらず、良好な状態であった。なお、暑中期において、先打ちコンクリートの製造から打重ねられる時点までの時間が同一な「先打ち 0.5h —打重ね 2h 」と「先打ち 1.5h —打重ね 1h 」を比較すると、打重ね時間が遅れることよりも先打ち時間が遅くなるのが、ブリーディング水が出ている状態であるため、硬化体の品質は高くなる可能性があると考えられる。

表 6.4 表打重ね時の先打ちコンクリートの状態

実験環境	打重ね時間間隔	物性	先打ち時間 0.5h	先打ち時間 1.5h
暑中期	1時間	ブリーディング	61%進行	61%進行
		水分蒸発量	$0.014\text{cm}^3/\text{cm}^2$	$0.022\text{cm}^3/\text{cm}^2$
		表面含水率*	16.6% (114%)	17.0% (115%)
		プロクター貫入抵抗	0.0N/mm^2	0.05N/mm^2
		突き棒貫入深さ	265mm	72mm
	2時間	ブリーディング	終了時点	終了後 0.5 時間経過
		水分蒸発量	$0.035\text{cm}^3/\text{cm}^2$	$0.047\text{cm}^3/\text{cm}^2$
		表面含水率	18.0% (123%)	15.9% (108%)
		プロクター貫入抵抗	0.17N/mm^2	1.5N/mm^2
		突き棒貫入深さ	76mm	22mm
	3時間	ブリーディング	終了後 1 時間経過	終了後 1.5 時間経過
		水分蒸発量	$0.059\text{cm}^3/\text{cm}^2$	$0.075\text{cm}^3/\text{cm}^2$
		表面含水率	17.0% (116%)	14.5% (98%)
		プロクター貫入抵抗	2.3N/mm^2	14.4N/mm^2
		突き棒貫入深さ	22mm	9mm
標準期	1時間	ブリーディング	20%進行	27%進行
		水分蒸発量	$0.002\text{cm}^3/\text{cm}^2$	$0.000\text{cm}^3/\text{cm}^2$
		表面含水率*	15.4% (101%)	16.0% (105%)
		プロクター貫入抵抗	0.0N/mm^2	0.0N/mm^2
		突き棒貫入深さ	355mm	284mm
	2時間	ブリーディング	45%進行	58%進行
		水分蒸発量	$0.008\text{cm}^3/\text{cm}^2$	$0.004\text{cm}^3/\text{cm}^2$
		表面含水率	15.9% (105%)	16.2% (106%)
		プロクター貫入抵抗	0.0N/mm^2	0.0N/mm^2
		突き棒貫入深さ	277mm	118mm
	3時間	ブリーディング	68%進行	82%進行
		水分蒸発量	$0.012\text{cm}^3/\text{cm}^2$	$0.008\text{cm}^3/\text{cm}^2$
		表面含水率	16.4% (108%)	18.4% (121%)
		プロクター貫入抵抗	0.0N/mm^2	0.0N/mm^2
		突き棒貫入深さ	120mm	60mm

* () は、打込み直後の含水率に対する百分率

6.3.5 透気性状

シングルチャンバー法の透気速度試験結果を図6.11，トレント法の透気係数試験結果を図6.12に示す。各図中の赤点線は先打ちコンクリート（下部），黒点線は後打ちコンクリート（上部）の測定結果を示している。

1) シングルチャンバー法透気試験

シングルチャンバー法による透気速度は，先ず暑中期では，全体的に打重ね時間間隔が大きくなるほど透気速度は増加する傾向となっており，特に打重ね時間間隔3時間では透気速度が顕著に増大している。ここで，先打ち時間0.5hでは，打重ね時間間隔1hと2hの透気速度の変化が大きくない反面，先打ち時間1.5hでは直線的に大きくなっている。従って，打重ね時間間隔2hでは，先打ちコンクリートの打込み時間により品質低下が生じる可能性がある。標準期では，一体打ち試験体と1時間で打重ねたすべての試験体で暑中期の測定値より高いが，品質変化の勾配は大きくなかった。また，標準期でも先打ち時間0.5hでは，一体打ちコンクリートと比べて，打重ね時間間隔2hまでの変化は小さい。先打ち時間1.5hの場合は，打重ね時間間隔1hまでは同等の値であったが，打重ね時間間隔2hから増加することが分かる。なお，「1.5-2W-1.5」と「1.5-3W-1.5」試験体では，打重ね時間間隔2hまでは認められず，打重ね時間間隔3hでは悪化しており，打重ね直前の散水及び水分除去の効果は認められなかった。

2) トレント法透気試験

トレント法による透気係数は，シングルチャンバー法の透気速度と同様に，一部の試験体を除き，全体的に打重ね時間間隔の増大に伴い透気係数は大きくなっている。また，本研究の範囲では，先打ちコンクリート及び後打ちコンクリートの打込み時間よりも，打重ね時間間隔の要因が品質に支配的に影響すると判断している。その反面，標準期では，打重ね時間間隔1hまでは，一体打ちコンクリートと同様の性能を示し，打重ね時間間隔2hからは，透気係数が高くなっているが，先打ち時間が短いほど透気性状は良くなる傾向が確認された。

既往の研究⁶⁻⁷⁾にて提案しているトレント法による透気係数のグレーディング評価方法によると，暑中期と標準期のいずれも一体打ちコンクリートは「普通」という評価となった。暑中期の場合は，打重ね時間間隔1hに関してはほとんどの試験体が「普通」と「悪い」の境界となっており，打重ね時間2hでは「悪い」，打重ね時間間隔3hでは「非常に悪い」のグレーディングとなった。従って，暑中環境で施工されるコンクリートの打重ね時間間隔は，規定時間内であっても，短縮することによりコールドジョイントに対する品質改善が可能であると考えられる。

一方，標準期では，打重ね時間間隔1時間までは「普通」となっており，打重ね時間間隔2hにおいては，先打ち時間0.5hでは「普通」，先打ち時間1.5hでは「悪い」という評価となった。よって，標準期では，打重ね時間1hは確かに品質低下の恐れがなく，打重ね時間間隔2時間以上の場合は，耐久性が若干悪くなるが，先打ち時間の管理などにより品質管理ができるものと考えられる。また，標準期では，打重ねる直前の先打ちコンクリートの状態は表6.4のとおり，ブリーディング水が出ていて，凝結は始まる前であったが，硬化体の透気性状は悪くなる場合もあった。

なお、暑中期の透気係数は、標準期と比較して、早期に乾燥し、凝結し始める先打ちコンクリートの性状により、品質低下の時点が早くなったものの、透気係数自体が急激に増加したわけではない。

以上の結果を総合すると、壁コンクリートの透気性状において、先打ち時間や後打ち時間よりも打重ね時間間隔という要因が最も強く影響することがわかる。

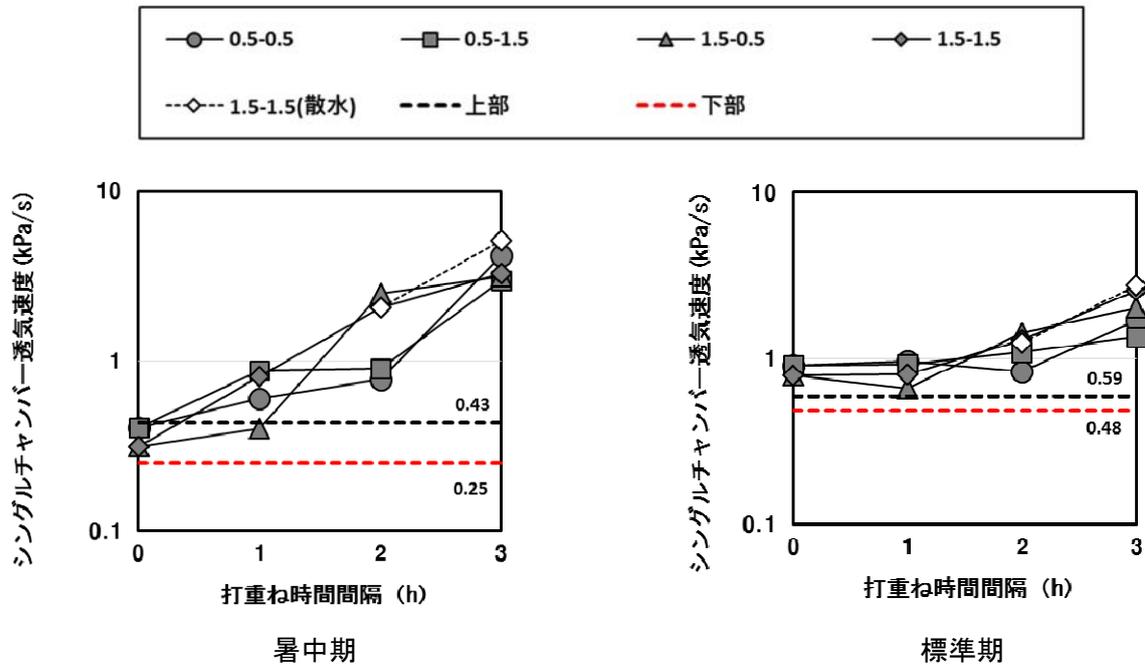


図 6.11 シングルチャンバー法透気試験結果 (実験 I)

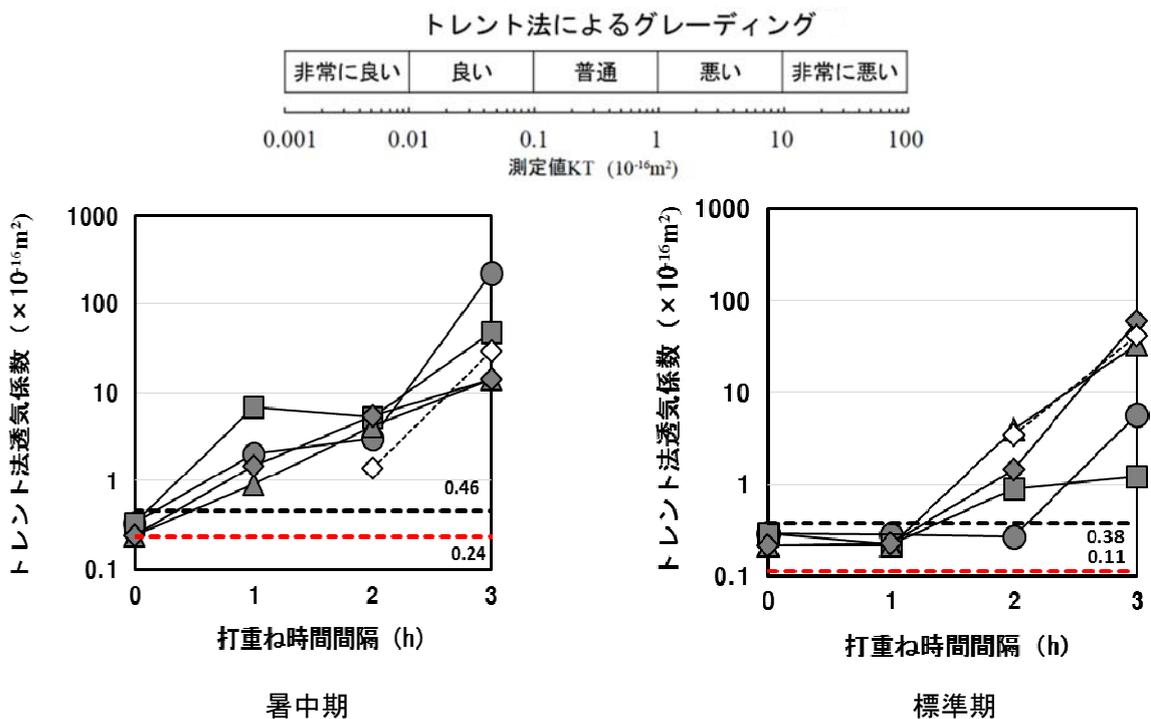


図 6.12 トレント法透気試験結果 (実験 I)

6.3.6 曲げ強度

図 6.13 に暑中期実験の曲げ強度試験結果を示す。一体打ちコンクリートは、先打ち時間に関係なく 4.3N/mm^2 程度の値となり、透気性状と同様な傾向にある。全体的に打重ね時間間隔が大きくなると曲げ強度は減少している。打重ね時間間隔 3 時間では、顕著な強度低下がみられたが、打重ね時間間隔 1 時間と 2 時間の強度値は、約 3N/mm^2 と大きく見ると同程度の強度性状を持っていることがわかる。全般的にシングルチャンバー法透気試験の結果と同じ傾向であったが、例外として 1.5-2-1.5 の試験体は、一体打ちコンクリートに近い強度となった。結果的に、暑中期では打重ね時間間隔 1 時間から強度低下傾向が認められ、一体打ちと比べて、打重ね時間間隔 1 時間では 56~84%，打重ね時間間隔 2 時間では 70~98%，打重ね時間間隔 3 時間では 28~57% となっている。また、散水効果は認められなかった。

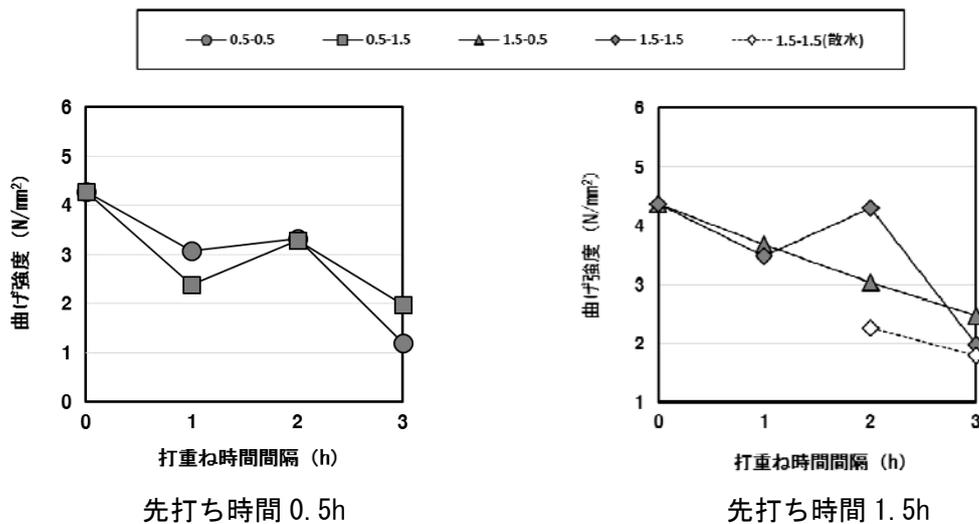


図 6.13 曲げ強度試験結果 (実験 I)

6.4 「実験Ⅱ」の結果考察

6.4.1 フレッシュ性状

表 6.5 に「実験Ⅱ」のフレッシュ性状を示す。「実験Ⅰ」と同様にコンクリートの運搬時間が長いほどスランプは低くなったが、本来設定した 18cm 以上の値となっており、「実験Ⅰ」及び「実験Ⅱ」における検討結果からは、スランプロスによる施工性低下の問題は見られなかった。なお、「実験Ⅱ」は、打込み時期が夏期の中でも少し遅かったこともあり、「実験Ⅰ」よりも気温が低かった。このことは諸性状に少なからず影響があると思われる。標準期でも、フレッシュコンクリートの性状において、運搬時間による品質変化は大差ない。

表 6.5 フレッシュコンクリートの性状（実験Ⅱ）

実験名	実験環境	状態	スランプ ^a (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
実験Ⅱ	暑中期	練混ぜ直後	20.0	3.9	31.0	27.0
		0.5 時間後	19.5	3.9	32.0	27.0
		1.5 時間後	18.5	3.9	31.0	27.0
	標準期	練混ぜ直後	19.5	5.4	20.0	15.0
		0.5 時間後	19.0	5.0	20.0	14.0
		1.5 時間後	19.0	5.0	20.0	14.0

6.4.2 水分移動

図 6.14～図 6.17 に水分移動実験結果を示す。

先打ち時間による蒸発量の違いはほとんどみられず、打込みからの経過時間が 4 時間程度では、暑中期は標準期の 1.5～2.0 倍の蒸発量となった。「実験Ⅱ」の暑中期は「実験Ⅰ」より蒸発量が小さかったが、これは外気温の影響で、より暑かった「実験Ⅰ」の蒸発が大きくなったと思われる。また、暑中期では打込みからの経過時間が 24 時間ほどで蒸発量は減少したが、標準期では 120 時間後もほとんど一定の速度で蒸発し続けた。

単位水量は、暑中期と標準期でほとんど差が見られず、また先打ち時間にも左右されず同程度となった。「実験Ⅰ」のデータと比べると、「実験Ⅰ」はブリーディング終了後に先打ち時間に限りなく暑中期では低下し標準期では上昇したが、本実験ではブリーディング終了後に暑中期の単位水量が上昇する結果となった。単位水量はブリーディング終了のタイミングで変動することを考えれば、打込み後 3 時間で測定を行ったら低下する傾向になる可能性が高いと考えられる。

JIS ブリーディング試験結果、暑中期においては、先打ち時間 0.5 時間では、打込みから約 2.0～2.5 時間でブリーディングが終了し、先打ち時間 1.5 時間では、打込みから約 1.0～1.5 時間でブリーディングが終了した。この結果は、「実験Ⅰ」の結果とほぼ同様な傾向である。ブリーディング水量は、先打ち時間 0.5 時間の方が多かった。標準期については、先打ち時間 0.5 時間では、打込みから約 4.5 時間でブリーディングが終了し、先打ち時間 1.5 時間では、打込みから約

3.5 時間でブリーディングが終了した。これにより、ブリーディング終了のタイミングは、外気温の影響を受けなく、練混ぜからの経過時間によることが認められた。

JIS 容器でのふた無ブリーディング試験に関しては、蒸発量を足すと JIS 容器でのふた有ブリーディングの結果にほぼ一致している。また壁試験体の先打ちコンクリートと同じ高さの円筒容器によるブリーディング試験結果は、暑中期の先打ち 1.5 時間では打込み直後から蒸発量を下回っており、暑中期において運搬時間が長くなると、コンクリート表面が打込み直後から乾燥状態にある可能性があると考えられる。

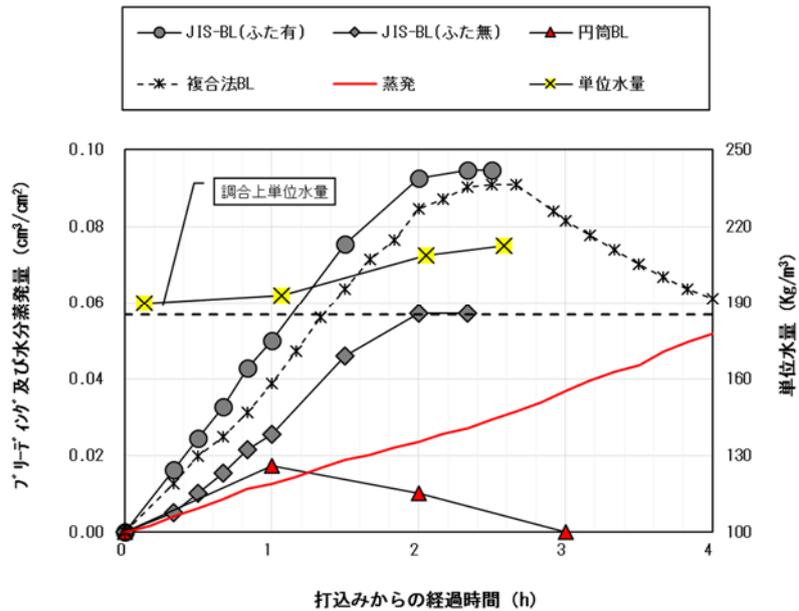


図 6.14 水分移動試験結果—先打ち時間 0.5h, 暑中期 (実験Ⅱ)

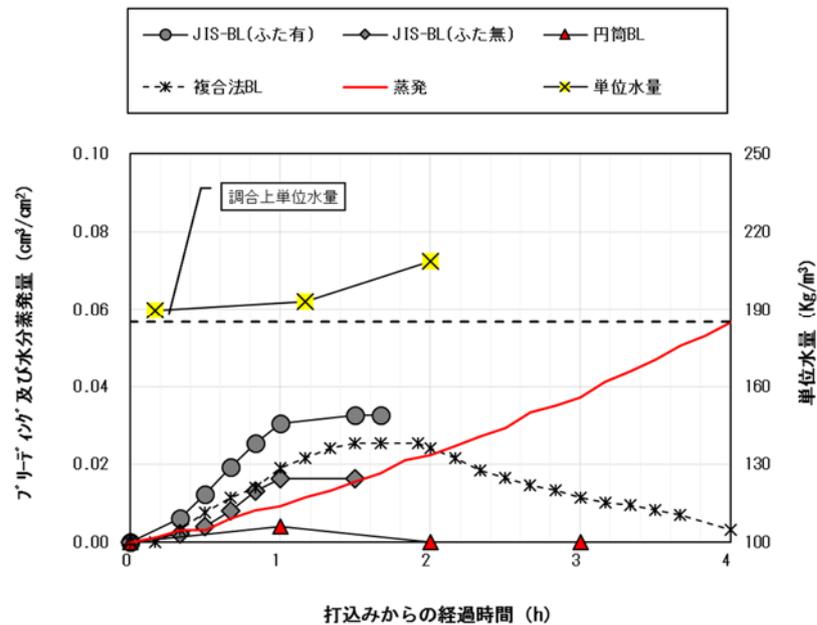


図 6.15 水分移動試験結果—先打ち時間 1.5h, 暑中期 (実験Ⅱ)

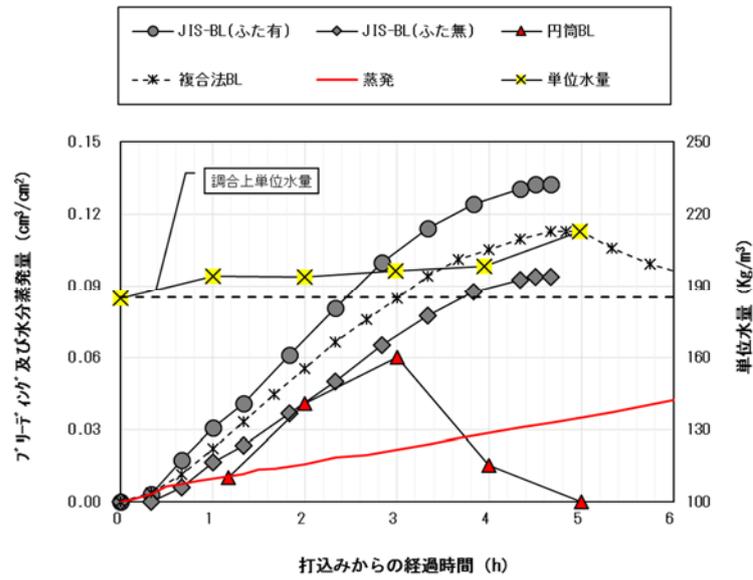


図 6.16 水分移動試験結果—先打ち時間 0.5h, 標準期 (実験Ⅱ)

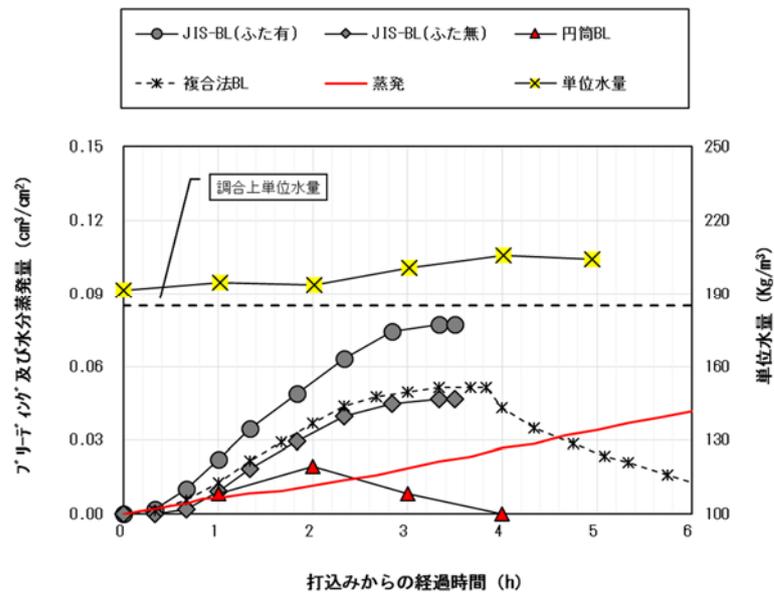


図 6.17 水分移動試験結果—先打ち時間 1.5h, 標準期 (実験Ⅱ)

6.4.3 凝結性状

図 6.18 と図 6.19 に凝結試験結果を示す。

プロクター貫入試験と N 式貫入試験のどちらにおいても、先打ち時間に関わらず、打込みからの経過時間で同程度に凝結が進んでいることが認められた。それで、外気温などの環境条件に関わらずコンクリートの凝結特性に及ぼす運搬時間の影響は少ないと考えられる。貫入抵抗値は、暑中期においては練混ぜ後約 4 時間で始発、約 5.5 時間で終結となり、「実験 I」よりは少し遅くなったが、それでも非常に速い凝結特性を見せた。標準期においては練混ぜ後約 7 時間で始発、約 10.5 時間で終結となって、「実験 I」の標準期結果と同程度の凝結速度を示した。JASS5 による打重ねの限界である貫入抵抗値 0.5N/mm^2 の値を考慮すると、「実験 II」においても暑中期には練混ぜ後約 3 時間以内に打重ねを行う必要がある。従って、暑中期においては、練混ぜから 3 時間以上経過するとコールドジョイント発生の危険性が高いと思われる。N 式貫入試験は、先打ち時間 0.5 時間と先打ち時間 1.5 時間の貫入量の値が同程度になっており、プロクター貫入試験と同様の挙動を示していることがわかる。

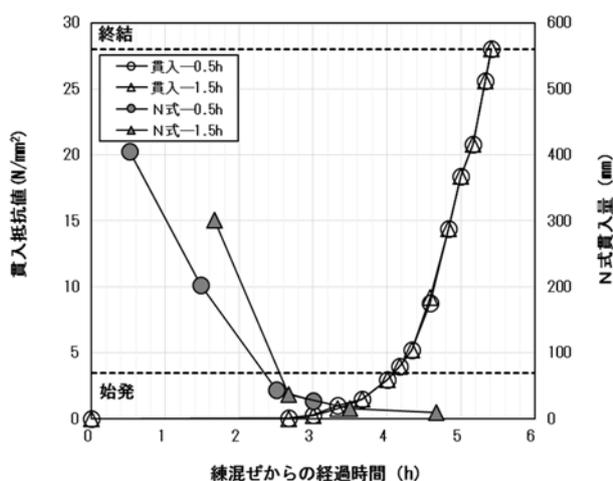


図 6.18 凝結試験結果－暑中期（実験 II）

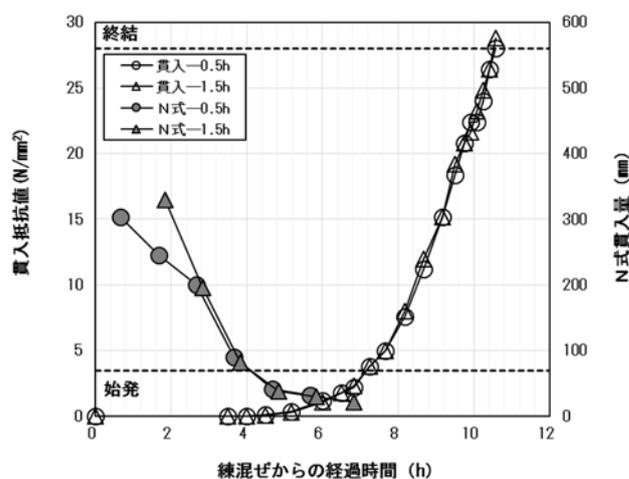


図 6.19 凝結試験結果－標準期（実験 II）

6.4.4 透気性状

図 6.20 にトレント法透気試験による透気係数を示す。

暑中期実験では、打重ね時間間隔が大きくなるほど透気係数が増加する結果となっており、一部試験体を除いて打重ね時間間隔 3 時間では透気係数が大幅に増加した。打重ね時間間隔 1 時間の結果において、先打ち時間 0.5h の二つの試験体のトレントのグレーディングは一体打ちコンクリートの同様な「普通」となった。「実験 I」とは異なり、先打ち時間 1.5h の試験体の品質低下が打重ね時間間隔 1 時間でも大きくなった。全体的に分析すれば、打重ね時間間隔 2 時間までは、「普通」もしくは「悪い」等級となり、打重ね時間間隔 3 時間になると「非常に悪い」判定となる。つまり、暑中期では打重ね時間間隔 1 時間でも品質低下の恐れがあり、規定値を超えて 2 時

間以後に打ち重ねると顕著に悪くなることが確認された。しかし、打重ね時に先打ちコンクリートの表面にあるレイタンスを除去することは、コールドジョイントの発生に対する効果があることが数値的にも認められた。打重ね時間間隔 2 時間の場合、レイタンスなどの脆弱部を除去すると透気係数の判定は「普通」となり一体打ちコンクリートに近い品質を得ることが可能である。この効果は、打重ね時間間隔 3 時間でも認められた。

一方、標準期実験では、打重ね時間間隔 1 時間までは品質変化が見られず「普通」となっており、打重ね時間間隔 2h においては、先打ち時間 0.5h では「普通」、先打ち時間 1.5h では「悪い」となった。標準期の結果は「実験 I」の結果とほとんど一致することがわかる。なお、レイタンス除去による品質改善効果は、標準期でも確かに認められた。コールドジョイントの発生において最も不利な条件である「1.5-3-1.5」試験体のレイタンスを除去するだけで、打重ね時間間隔 1 時間で施工したコンクリートと同様の品質が確保できる。それで、標準期では、打重ね時間間隔 1 時間は品質低下の恐れが少なく、打重ね時間間隔 2 時間以上の場合、耐久性が少し悪くなる可能性があるが、レイタンスを除去してその悪影響を防止することが可能であると考えられる。

なお、壁体の打重ね面におけるトレント法透気試験は、これで 2 回目であるが、床や柱など不連続面がない部材の結果と比較すれば、測定値がばらついていて得た結果も幅が広がった。しかも、2 年間得られた結果は、同様の傾向になったと評価している。

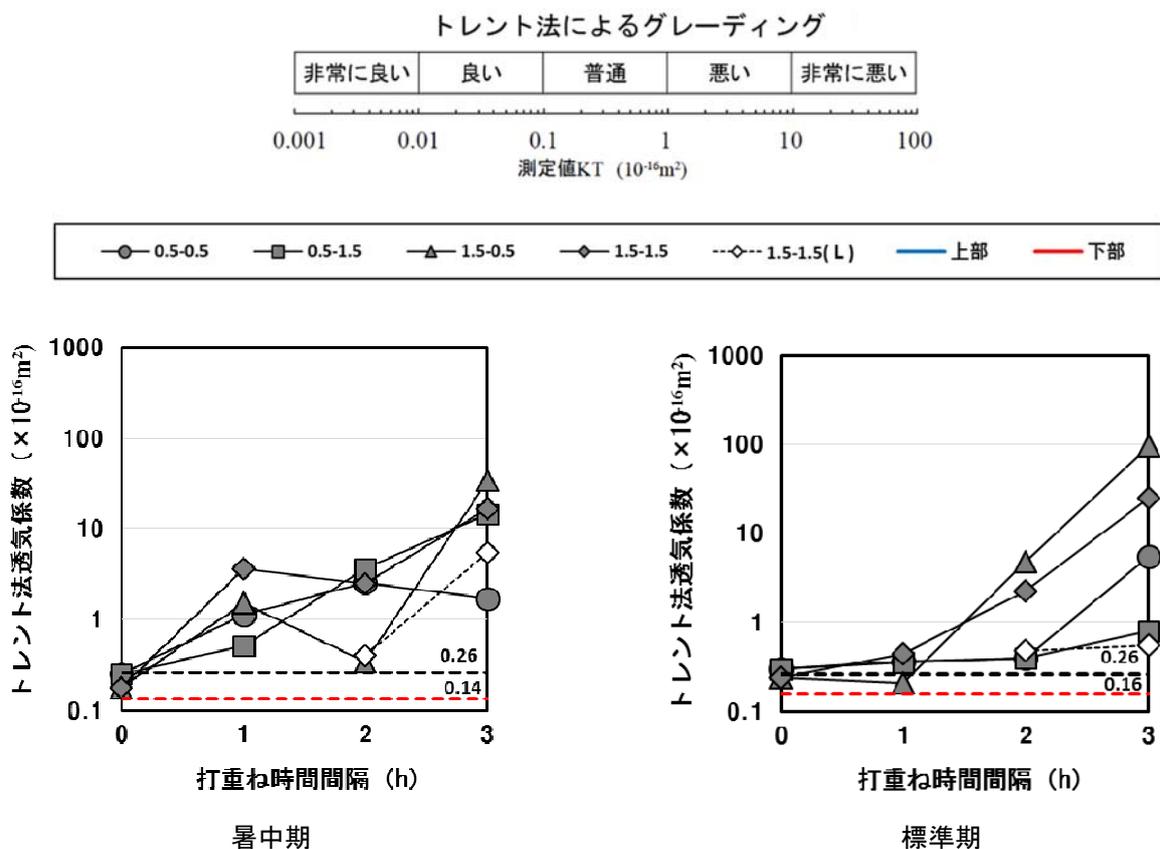


図 6.20 トレント法透気試験結果 (実験 II)

6.4.5 吸水性状

図 6.21 に吸水試験により得た吸水係数を示す。暑中期実験の吸水係数は、2 時間までは変化が生じなかったが、3 時間では 0.5-3-0.5 試験体を除けば大きくなるのがわかる。吸水試験でも打重ね時間間隔 2 時間以後の品質低下がはっきり見られた。また、吸水試験でも先打ちコンクリート表面の脆弱層除去による品質向上が認められた。標準期実験では、暑中期のように 2 時間までは同程度の値であったが、3 時間で高くなる事が確認された。1.5-3-1.5 試験体は暑中期実験結果に近く大きくなったが、この試験体の透気係数は $96.8 \times 10^{-16} \text{m}^2$ で最も悪かったため、透気試験と吸水試験はある程度対応していると思われる。それで、大枠から見るとトレント法透気試験の結果と同様な傾向であり、壁体のコールドジョイント評価方法として有効であると考えられる。

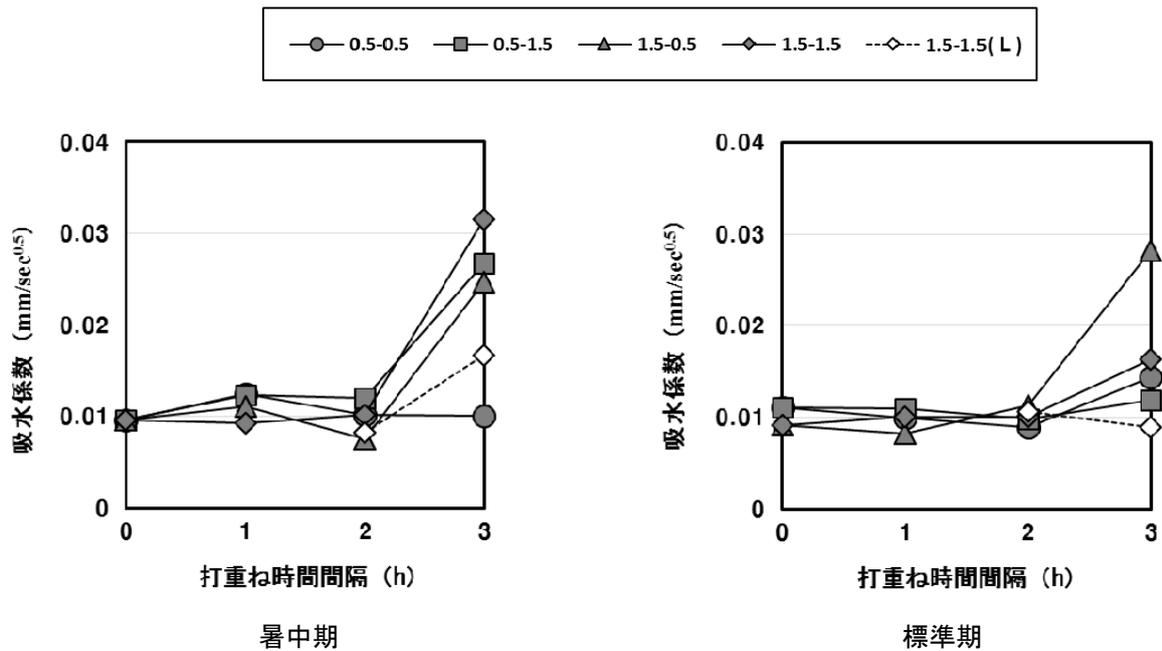


図 6.21 吸水試験結果

6.5 暑中コンクリートにおけるコールドジョイントの評価方法の提案

JASS5⁶⁻¹⁾や土木学会の「コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策」⁶⁻⁸⁾においては、練混ぜから打込み終了までの時間を施工時の気温により 90~120 分に制限してコールドジョイントの発生を抑制するように規定している。また、コールドジョイントが発生しない目安として、打ち重ねる時における下部コンクリートの貫入抵抗値を 0.5N/mm^2 以下としている。しかし、その発生条件や発生したという判定基準、防止対策法などは、まだ不明確である。さらに、コールドジョイント発生の評価を単純に時間や貫入抵抗値を指標とすることは根拠が不足である。従って本節では、「実験Ⅰ」及び「実験Ⅱ」の結果から、コールドジョイントの発生に影響を及ぼす要因を明らかにし、コールドジョイントの評価方法を提案する。

6.5.1 コールドジョイント評価基準の検討

本研究では、コールドジョイントの評価方法としてトレント法透気試験による透気係数に着目した。透気係数の品質基準値は、中性化速度係数と透気係数相互関係から閾値を定めた。一般的なコンクリートのかぶり厚さ 40mm で耐用年数 65 年を満足するために必要となる促進中性化試験による中性化速度係数は $7.7\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$ 程度である。図 6.22 に本研究の範囲で測定した中性化速度係数と透気係数の関係を示しているが、中性化速度係数 $7.7\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$ に対応する透気係数は $7.0 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 程度となっており、この値をコールドジョイントの評価基準と考えることができる。

図 6.12 と図 6.20 の透気係数のグレーディングを見ると、暑中期実験では、規定時間以内である打重ね時間間隔 1 時間及び 2 時間では、ほとんどの試験体で $1.0 \times 10^{-16}\text{m}^2 \sim 10 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 範囲の「悪い」等級を示した。標準期実験においても、打重ね時間間隔 2 時間（規定は 2.5 時間以内）の一部の試験体が $1.0 \times 10^{-16}\text{m}^2$ を超えて「悪い」となった。一方、打重ね時間間隔 3 時間の場合は、暑中期、標準期ともに多くの試験体で $10 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 以上の「非常に悪い」というグレーディングとなった。第 4 章に述べたとおり暑中環境で施工されるコンクリートは粗雑な硬化組織を生成し耐久性が低下すること、そしてこれらの判定結果が、鉛直部材コンクリートの上・下部の連結部位での測定値であることを考慮して、先に述べた $7.0 \times 10^{-16}\text{m}^2$ よりも大きい「悪い」の最大値である $10 \times 10^{-16}\text{m}^2$ をコールドジョイントが発生する基準と考えた。

また、図 6.23 と図 6.24 は先打ち時間 0.5h と 1.5h それぞれにおける透気係数と曲げ強度との関係を示したものである。横軸はトレント法透気係数、縦軸は一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比を示している。先打ち時間 0.5h では相関係数 0.93 で非常に高い相関関係を示しており、先打ち時間 1.5h の場合は、一部ばらついているがある程度関連していることが確認された。図上の回帰線によると、コールドジョイント発生の判定基準を上記のように透気係数 $10 \times 10^{-16}\text{m}^2$ （赤実線）とすれば、一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比は先打ち時間に関わらず、0.6 程度となった。このことから、本研究で想定した範囲及び条件では、コールドジョイントの発生により曲げ強度の低下率はおよそ 60%以下となることが認められた。

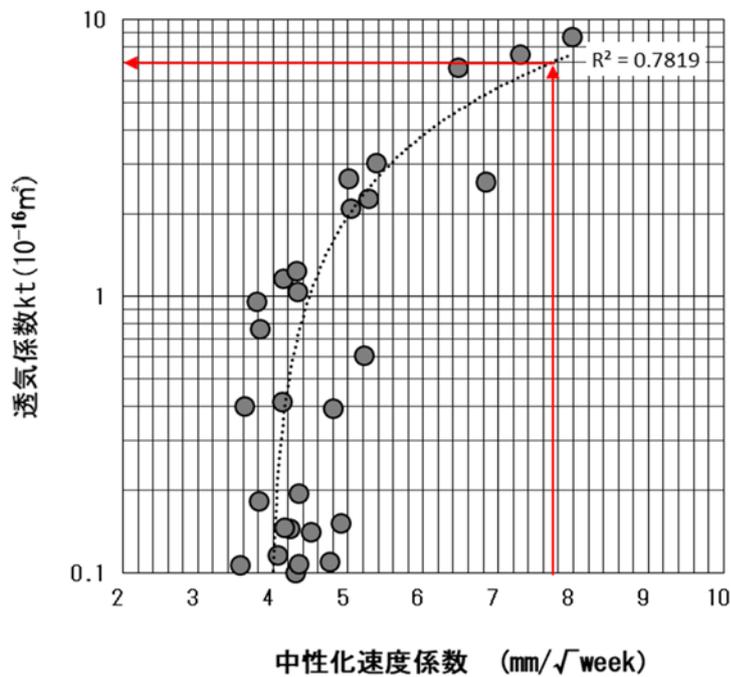


図 6.22 中性化速度係数と透気係数の関係

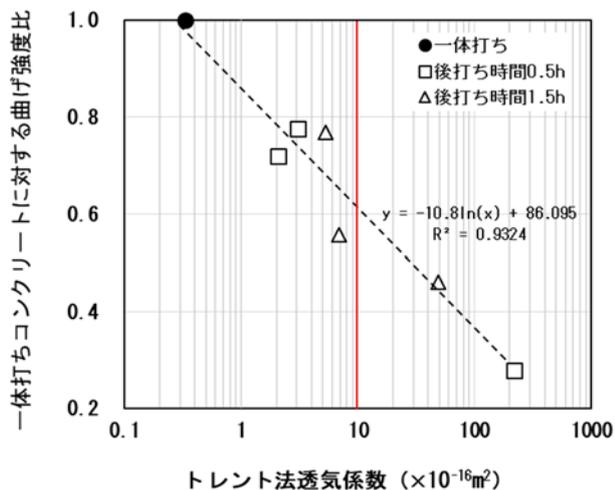


図 6.23 一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比 (先打ち時間 0.5h)

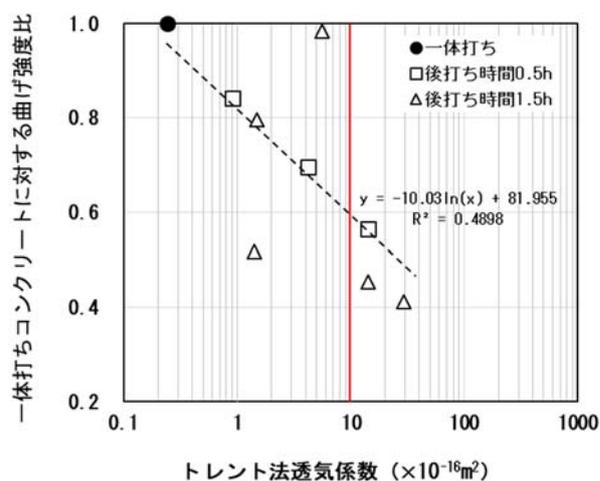


図 6.24 一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比 (先打ち時間 1.5h)

6.5.2 凝結性状が硬化コンクリートのコールドジョイントに及ぼす影響

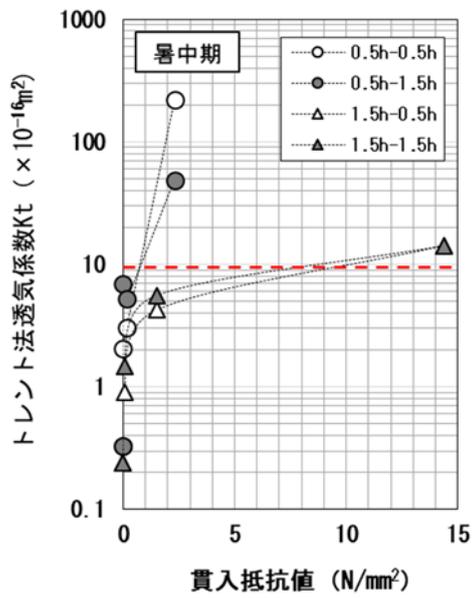
コールドジョイントの評価基準として透気係数 $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ に基づいて、打ち重ねる時のコンクリートの凝結状態（プロクター貫入抵抗値及び N 式貫入量）が硬化体の打重ね面の透気性状（コールドジョイント）に及ぼす影響について検討した。

図 6.25 と図 6.26 に、暑中期における透気係数と貫入抵抗値の関係、ならびに透気係数と N 式貫入量の関係について示す。図中の赤点線は、コールドジョイントの評価基準を示している。まず、貫入抵抗値と透気係数の関係を見ると、暑中期の貫入抵抗値 0.0N/mm^2 もしくは 0.0N/mm^2 に近い値において、一体打ちコンクリート以外の試験体の透気係数は $1.0 \sim 10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の範囲となっており、前述したトレント法透気係数のグレーディング上「悪い」の等級であった。また、「実験 I」，「実験 II」とともに貫入抵抗値が 1.0N/mm^2 以上の条件では、透気係数が $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を超える試験体が確認された。従って、硬化体の透気係数値をコールドジョイントの発生基準と考慮した本研究の範囲では、JASS5 の規定値 0.5N/mm^2 より若干大きい 1.0N/mm^2 の貫入抵抗値をコールドジョイントの発生限界と考えられる。

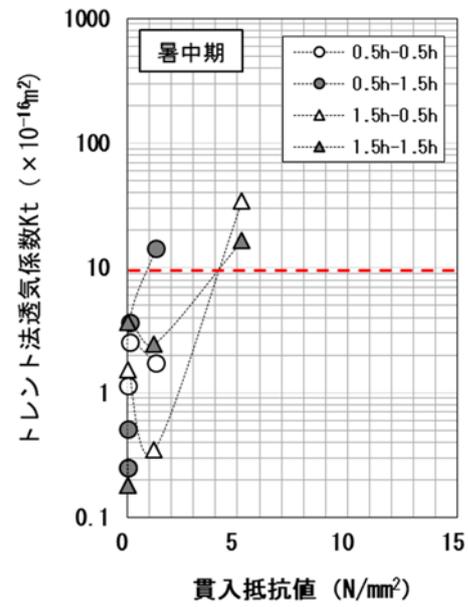
N 式貫入量と透気係数の関係は、打込み後初期には明確ではないが、全般的に良好な相関が認められた。透気係数が $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以上となった試験体の N 式貫入量の実測値は、「実験 I」では $9.0 \sim 22.0 \text{mm}$ ，「実験 II」では $9.5 \sim 27.8 \text{mm}$ の範囲である。N 式貫入量 30mm 以下の条件で透気係数が $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を超える可能性が高いということから、コールドジョイントに対する N 式貫入抵抗値の品質管理基準を 30mm と考えても無理ないと思われる。

図 6.27 と図 6.28 に、標準期における透気係数と貫入抵抗値の関係及び透気係数と N 式貫入量の関係について示す。標準期の貫入抵抗値は、先打ち時間と打重ね時間間隔に関係なく、いずれの試験体でも 0.0N/mm^2 の貫入抵抗値であったが、透気係数は「実験 I」では $0.2 \sim 60 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度、「実験 II」では $0.3 \sim 97 \times 10^{-16} \text{m}^2$ のように非常に広く分布した。N 式貫入量は、暑中期と比べて貫入量が高い範囲から透気係数の変化が生じた。

本研究でコールドジョイントの発生限界と想定した 1.0N/mm^2 の貫入抵抗値と 30mm の N 式貫入量を考慮すれば、貫入抵抗値 1.0N/mm^2 以下、N 式貫入量 30mm 以上の条件で透気性状が悪くなった（三角の凡例）。コールドジョイントが発生したと仮定される試験体は、「1.5-3-0.5」と「1.5-3-1.5」であるため、先打ちコンクリートの練混ぜから 4.5 時間が経過した時点で打ち重ねたことを意味する。標準期の打込み関連規定時間（練混ぜから打込み終了までの時間： 2 時間 + 打重ね時間間隔： 2.5 時間）を満足したが、結果的に硬化したコンクリートの品質が悪くなったため、標準期において、コンクリート打込み関連規定時間内であっても、できるだけ早く打ち重ねることが望ましい。なお、JASS5 で打重ねの目安としている 0.5N/mm^2 の貫入抵抗値は、本研究で想定した標準期環境においては適用しにくいと考えられる。

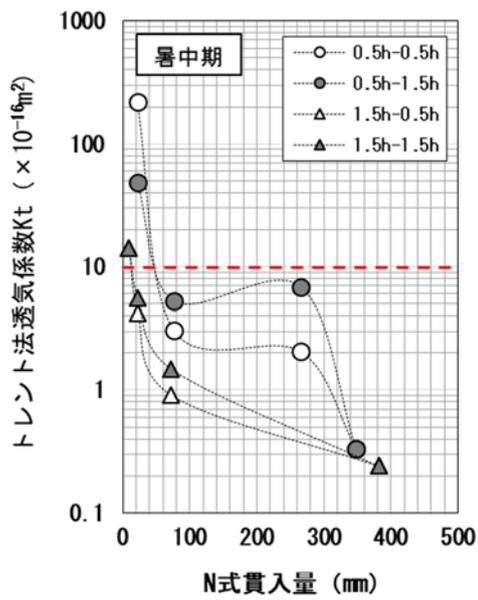


実験 I

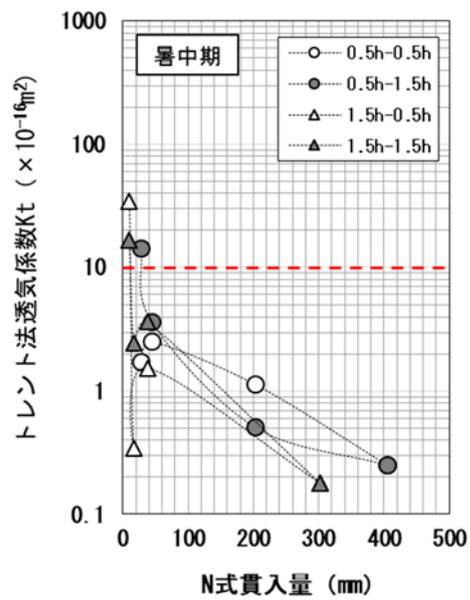


実験 II

図 6.25 暑中期における透気係数と貫入抵抗値の関係

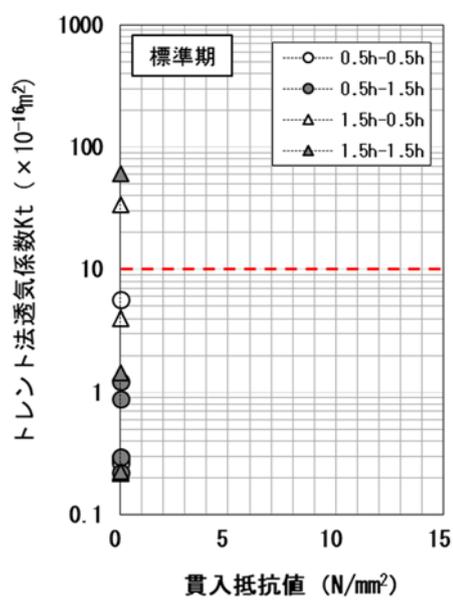


実験 I

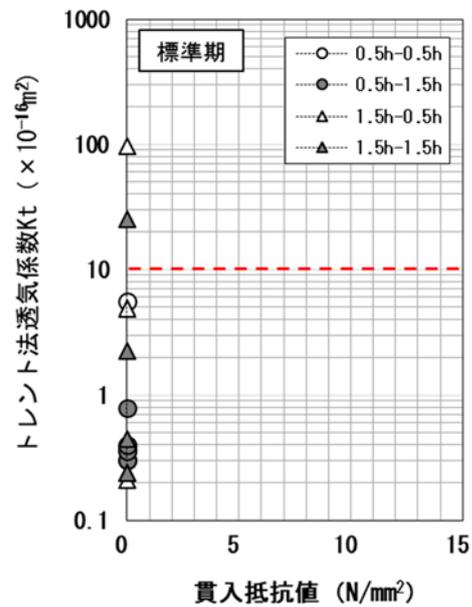


実験 II

図 6.26 暑中期における透気係数とN式貫入量の関係

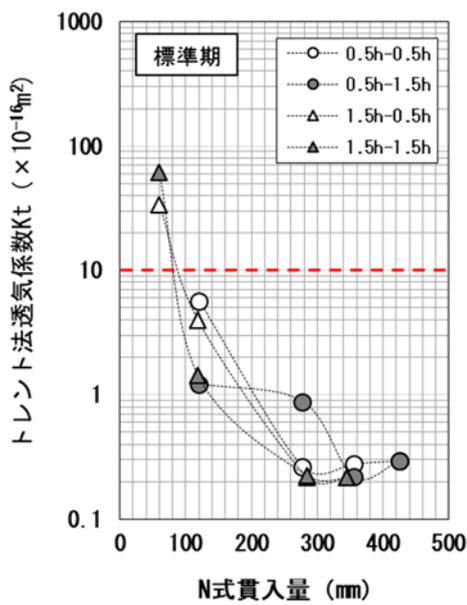


実験 I

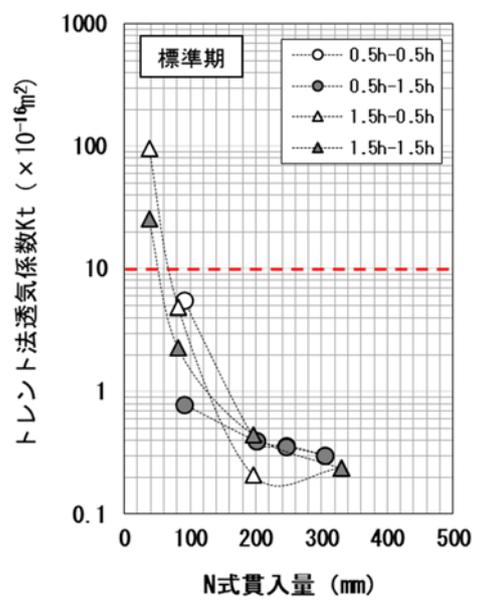


実験 II

図 6.27 標準期における透気係数と貫入抵抗値の関係



実験 I



実験 II

図 6.28 標準期における透気係数とN式貫入量の関係

6.5.3 コールドジョイント評価方法の提案

本研究で得られた、コールドジョイントに対する評価基準及び品質管理基準値を表 6.6 のように提案する。暑中期においてコールドジョイントが発生したという判定は、硬化体の打重ね面でトレント法による透気係数を測定し、「悪い」グレーディングの最大値である $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を基準として検討した。この場合、一体打ちコンクリートに対する打ち重ねたコンクリートの曲げ強度比は 0.6 以下となる。従って、本研究ではコールドジョイントの発生基準を、透気係数 $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、曲げ強度比 0.6 と強度及び耐久性の両方から提案する。また、コールドジョイントの発生を抑制するための打重ね時の指標として、貫入抵抗値は 1.0 N/mm^2 以下、N 式貫入量は 30mm 以上の条件とする。特に、実際の現場における N 式貫入試験は、プロクター貫入試験よりも簡単に品質変化がわかりやすいので品質管理に有効であると考えられる。一方、標準期においては、 $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の透気係数値でコールドジョイントの発生を検討することは可能であるが、貫入抵抗値あるいは N 式貫入量による品質管理は好ましくない。なお、ブリーディング及び凝結が遅くなるため、むしろ暑中期よりも数値的には厳しく管理した方が望ましい。

表 6.6 コールドジョイントに対する評価基準及び品質管理基準の提案

施工環境	項目		基準値
暑中期	評価基準	トレント法による透気係数	$10 \times 10^{-16} \text{m}^2$
		一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比	0.6
	品質管理基準	プロクター貫入抵抗値	1.0 N/mm^2
		N 式貫入量	30mm

6.6 第6章のまとめ

本章では、暑中期に施工される壁体コンクリートのコールドジョイントの発生に及ぼす影響について総合的に検討し、コールドジョイントによる品質低下に関する対策及び適切な評価方法について整理した。コンクリートの運搬時間と打重ね時間間隔を要因とし、実大レベルで模擬制作した 16 体の壁試験体を対象とし打重ね部の品質を検討した。実験により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 暑中環境においては、コンクリートの運搬時間が長くなるほどスランプが低下した。また、ブリーディングと凝結は、コンクリートの打込み時間に関わらず同時に終了するため、運搬時間が長い場合は、ブリーディング終了時間は早くなり、ブリーディング水量も少なくなることにより、打ち込まれたコンクリートの表面部はより早期に乾燥状態になる。従って、暑中コンクリート工事においては、できるだけ運搬時間を短縮させる配車計画が重要である。
- 2) 暑中期の凝結は非常に早く、練混ぜ後 5.5 時間程度で終結となる。JASS5 で提案している貫入抵抗値 0.5N/mm^2 を打重ねの限度とすれば、暑中期では練混ぜから 3 時間以内に後打ち作業を行う必要がある。
- 3) トレント法透気試験の判定基準によると、打重ね時間間隔 2 時間までは、「普通」もしくは「悪い」等級となり、打重ね時間間隔 3 時間になると「非常に悪い」等級となる。つまり、暑中期では打重ね時間間隔 1 時間でも品質低下の恐れがあり、規定値を超えて 2 時間以後に打ち重ねると顕著に悪くなる可能性が高い。また、この傾向は、曲げ強度や吸水試験結果でも一致している。
- 4) 打重ね面の強度及び耐久性状には、先打ちコンクリート及び後打ちコンクリートの打込み時間よりも、打重ね時間間隔の要因が品質に支配的に影響を及ぼす。ここで、打重ね時に先打ちコンクリート表面のレイタンスなど脆弱層を除去することにより、品質を高めることが可能である。打重ね時間の限度である打重ね時間間隔 2 時間の条件において、レイタンスを除去すれば一体打ちコンクリートに近い品質を得ることが明らかになった。また、この効果は打重ね時間間隔 3 時間でも認められた。
- 5) 本研究の範囲においては、透気係数 $10 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 、一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比 0.6 を暑中期におけるコールドジョイントの発生基準と提案する。また、コールドジョイントの発生を抑制するための品質管理基準として、打重ね時間間隔は 2 時間以内、貫入抵抗値は 1.0N/mm^2 以下、N 式貫入量は 30mm 以上の条件で打重ねる必要があると考えられる。

参考文献

- 6-1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015.07
- 6-2) 本田悟ほか：暑中環境で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに関する研究その 4 コンクリートの打込み時間の影響，日本建築学会九州支部研究報告，第 54 号，pp.29-32，2015.03
- 6-3) 陶佳宏ほか：打重ねコンクリートの耐久性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文論文集，Vol.23，No.2，pp.775-780，2001
- 6-4) 本田悟ほか：打込み時間が暑中環境で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに及ぼす影響 その 2 透気性によるコールドジョイントの評価，日本建築学会九州支部研究報告，Vol.55，pp.169-172，2016.03
- 6-5) 白川敏夫：表面吸水試験を用いた場合の吸水量の経時変化に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.433-434，2015.09
- 6-6) 酒井雄也他：微細空隙中を毛管張力により浸入する液状水挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文論文集，Vol.34，No.1，pp.730-735，2012
- 6-7) 井上翔，秋山仁志，岸利治，魚本健人：現場簡易透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価とその相互比較，第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会，2008.3
- 6-8) 土木学会：コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策，2000.07

第7章

人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリートの 品質向上に関する研究

第7章 人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリートの品質向上に関する研究

7.1 第7章の概要

人工軽量骨材を用いたコンクリートは、軽量性と断熱性などのメリットを持っており、良質な天然骨材の枯渇に対する代替効果や品質改善にも貢献できる。また、吸水率が高い人工軽量骨材を使用した場合、周囲の急激な乾燥に対して骨材に吸水された水が放出されることで乾燥収縮や自己収縮が小さくなるとともに、長期にわたってコンクリートの強度増進に寄与する。この特殊な性質は、人工軽量骨材の自己養生効果と呼ばれており、このため養生が困難な場合でも所定の強度が得られる⁷⁻¹⁾⁷⁻²⁾⁷⁻³⁾。近年、人工軽量骨材の高い吸水性が注目され、コンクリート内部で水分を滲出し水和反応に必要な水分を供給する自己養生効果の研究が進められており、自己収縮、乾燥収縮の低減のみならず、強度、耐久性の向上に寄与すると報告されている⁷⁻⁴⁾⁷⁻⁵⁾。

一般的に暑中コンクリートの施工においては、温度上昇や急激な乾燥による強度や耐久性の低下が問題とされており、十分な養生を行なうことが重要である。ここで人工軽量骨材の自己養生効果は、暑中コンクリートのように通常よりもコンクリートの温度が高く、乾燥しやすい条件でさらに効果を発揮することが期待される。

このような背景から、本研究では、人工軽量骨材を使用することによる自己養生効果に着目し、暑中環境で施工されるコンクリートを対象とし、その効果を模擬部材レベルで検討した。普通コンクリートに対して、普通コンクリートの細骨材の一部を人工軽量細骨材と置換してコンクリートの物性を比較した。さらに、参考として一般的な軽量コンクリート1種に関しても実験を行った。フレッシュ状態では人工軽量骨材の補水性が初期水分移動及び凝結特性に及ぼす影響について検討し、特に床スラブの表面仕上げ作業性に関して評価した。硬化体においては、圧縮強度、透気性状、吸水性状、中性化抵抗性などを測定し、暑中コンクリートの強度及び耐久性に及ぼす人工軽量細骨材の有効性を評価することを目的とした。また、人工軽量骨材の自己養生効果のメカニズムをセメントの水和反応の観点から明らかにするために、硬化体マトリクスの水和形態等にも着目し、細孔径分布や水酸化カルシウム生成量ならびに反射電子像を用いた画像解析から算出した水和度との関連性について評価した。

7.2 実験内容

7.2.1 実験構成及び概要

表 7.1 は、実験概要を示したものであり、本実験は「実験Ⅰ」（2016 年度）及び「実験Ⅱ」（2017 年度）と構成される。

まず、「実験Ⅰ」の実験環境は、荷卸し時のコンクリートの温度を基準とし、 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ とした。コンクリートの調合は、表 7.2 に示すように基準となる普通コンクリート（普通）に対して、細骨材の体積比で 25%（SL25）及び 50%（SL50）を軽量細骨材で置換したもの、及び普通と同様の設計条件における軽量コンクリート 1 種（軽量）の計 4 調合とした。模擬部材は、図 7.1 に示すとおり、各調合に対して、1m 角の柱試験体及び 20cm 厚の床スラブ試験体を作製した。床スラブ試験体の養生は、無養生、給水養生、シート養生の 3 種類を採用した。給水養生はスラブ上面に 1~2cm 程度の水張りを行い、シート養生はポリ塩化ビニル製のシートを用い、型枠上面を密封した。また、いずれの養生もブリーディング水が消失した直後に開始し、5 日間持続した。

「実験Ⅱ」では、「実験Ⅰ」に引き続き、実際の建築物への適用を考慮して、合理的な置換率を定めることを目的とし、普通コンクリートに対して人工軽量細骨材への置換率 15%、25%の試験体を対象として人工軽量骨材の自己養生効果の有効性を評価した。表 7.1 から分かるように、「実験Ⅱ」は、暑中期実験のみ行い、床スラブ部材の養生は無養生とシート養生の二つのみ採用した。また、柱試験体及び床スラブ試験体に対しては、吸水試験を追加的に行い、耐久性を評価した。また、セメントの水和反応の側面から人工軽量骨材の自己養生効果を確認するために、ポロシティや水酸化カルシウム生成量、反射電子像による画像解析を行った。

表 7.1 実験概要

区分	実験環境 ^{※1}	水準	部材	養生		
				方法	開始時期	期間
実験Ⅰ	暑中期 ($35\pm 2^{\circ}\text{C}$)	普通 SL25 SL50 軽量	柱(1m ³)	—	—	—
			床 (756×756 ×200mm)	無養生	—	—
				給水 シート	ブリーディング 終了直後	5 日間
実験Ⅱ		普通 SL15 SL25 軽量	柱(1m ³)	—	—	—
			床 (756×756 ×200mm)	無養生	—	—
				シート	上同	上同

7.2.2 コンクリートの製造

表 7.2 に本実験で用いたコンクリートの調合を示す。生コンクリートの製造は、バッチごとにフレッシュコンクリートの性状を確認し、管理目標範囲内となるように骨材の表面水率及び混和剤量を調整した。練り混ぜたコンクリートは、アジテータ車にて 60 分間待機させた後に品質試験を行い、現場に移動して打込みを行った。打込み時には、棒形振動機で振動を加えるとともに、型枠面を木槌で叩いて締め固めた。普通調合以外では過剰な振動を加えた場合に軽量骨材の浮きがやや見られたものの、概ね施工性に違いはなかった。柱試験体は、打込み後上面をコテ均しした後に発泡スチロールを被せて上下を断熱状態にし、材齢 7 日まで型枠を存置した。床スラブ試験体の表面仕上げは、打設直後に骨材を押さええて一次仕上げを行った後、概ね 30 分間隔でブリーディング終了まで表面状態を確認しながら、金コテを用いて平滑に仕上げた。

表 7.2 コンクリートの調合 (27-18-20-N)

水準	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S	SL	G	GL
普通	53	46.4	4.5	184	348	789	—	963	—
SL15				184	348	671	87	963	—
SL25				184	348	591	146	963	—
SL50				184	348	394	291	963	—
軽量	47	47.1	5.0	178	379	789	—	—	576

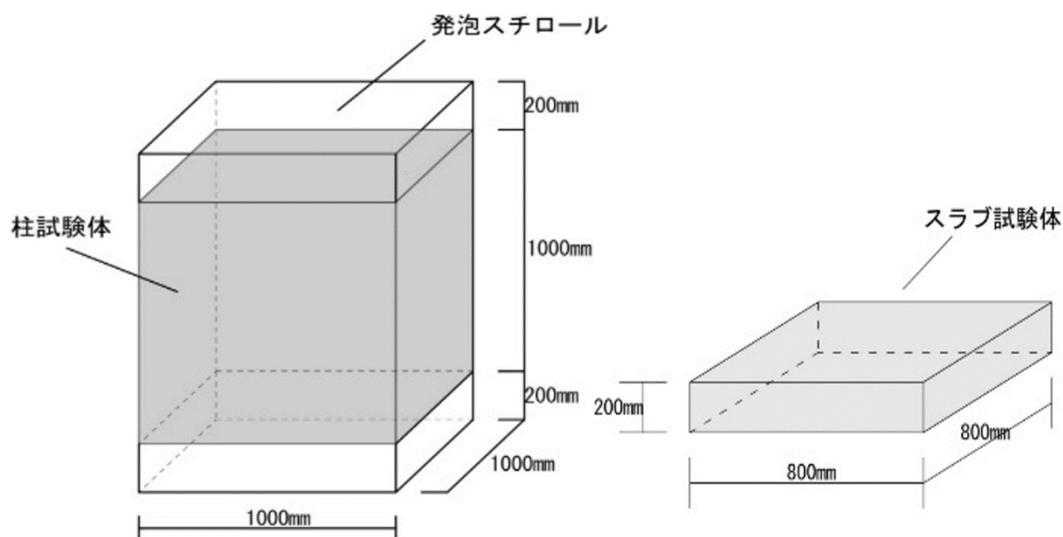


図 7.1 模擬試験体の概要

7.2.3 使用材料

本実験で使用した材料を表 7.3 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は海砂，粗骨材は砕石を用いた。人工軽量骨材は粗骨材，細骨材ともに膨張頁岩を原料として焼成された市販の製品（非造粒型，写真 7.1 参照）を用い，いずれも十分にプレウエッティングした状態で使用した。混和剤は AE 減水剤遅延形 I 種のものを使用した。

表 7.3 使用材料

種類	記号	品名及び物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度 3.15g/cm^3
細骨材	S	玄界灘産海砂，表乾密度 2.57g/cm^3 ，吸水率 1.80%
	SL	人工軽量骨材，表乾密度 1.90g/cm^3 ，吸水率 15.2%
粗骨材	G	古賀市谷山産砕石，表乾密度 2.72g/cm^3 ，吸水率 0.71%
	GL	人工軽量骨材，表乾密度 1.67g/cm^3 ，吸水率 31.4%
混和剤	AD	AE 減水剤（遅延形 1 種）
	AE	AE 助剤



粗骨材



細骨材

写真 7.1 人工軽量骨材の外観

7.2.4 測定項目及び方法

測定項目を表 7.4 に示しており、それぞれの測定方法を以下に示す。

1) フレッシュ状態

品質試験としてコンクリート温度、スランプ、空気量、単位容積質量を測定した。ブリーディングは、JIS A 1123 に準拠してφ250×285mm の JIS 規格容器で測定した。水分蒸発量は、φ250mm 容器(大)及びφ100mm 簡易型枠(小)を用い、コンクリートの質量を 10 分間隔で測定し、時間経過に伴う質量減少値から求めた。ブリーディングと蒸発量は部材と同一環境で試験を行い、床スラブ試験体の表面仕上げの作業容易性に及ぼす影響に関して検討した。表面仕上げ性の評価は、熟練作業者による定性的な評価とした。凝結は、貫入抵抗試験と N 式貫入試験を採用した。貫入抵抗試験は、JIS A 1147 に準じて行った。N 式貫入試験は、φ250×500mm の容器に高さ 450mm までコンクリートを打込み、棒状バイブレータで加振した中央部を除いた 4 点から実施した。所定の時間に突き棒を自由落下させ、コンクリートに突き刺さった深さを測定した。

2) 圧縮強度及び密度

硬化コンクリートにおいては、標準水中養生を行った管理用供試体と、柱及び床のコア試験体の密度と圧縮強度を測定した。柱部材から抜いたコア試験体は、図 7.2 のように密度と強度試験用に分けて採取し、密度用はさらに上端と下端の部分を三等分に切断してφ100×50mm の試験体を 8 個作製した。

表 7.4 測定項目

状態	対象	測定項目
フレッシュ	各 調 合	<ul style="list-style-type: none"> フレッシュ性状：コンクリート温度、スランプ、空気量、単位容積質量 ブリーディング：JIS A 1123 に準拠 蒸発量：φ250mm 容器及びφ100mm 簡易型枠で測定 貫入抵抗試験：JIS A 1147 に準拠 床スラブ表面の仕上げ作業性評価
硬化後	実験 I	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮強度：管理用供試体とコア試験体に対して 7d, 28d, 91d に実施 密度：コア試験体を切断し、上下密度差を測定 トレント法透気試験：91d 促進中性化：91d から 8 週間乾燥後実施
	実験 II	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮強度 温湿度：床試験体に対して超小型温湿度センサにより測定 細孔径分布：水銀圧入式ポロシメータ 水酸化カルシウム生成量：TG-DTA 水和度：反射電子像による画像解析 トレント法透気試験 吸水試験

3) 透気性状

床部材においては、スラブ表面の 12 箇所でトレント試験により透気性状を検討した。トレント透気試験は、コンクリート表面に二重チャンバーで密閉空間を作り、その内部チャンバーの気圧変化から透気係数を算出する方法で、測定結果の信頼性が比較的高く、完全な非破壊試験であるため近年は広く使用されている。

4) 床試験体上部および中心部の温湿度

無養生とした床試験体の表層部（上面より深さ約 20mm）および中心部（上面より深さ約 100mm）に直径約 50mm の円柱状の空間を打設時に設け、硬化後に超小型温湿度センサを設置し、コンクリート内部の温湿度履歴を測定した。設置した方法および位置を、図 7.3 に示す。測定は、普通と SL25 についてのみ行った。

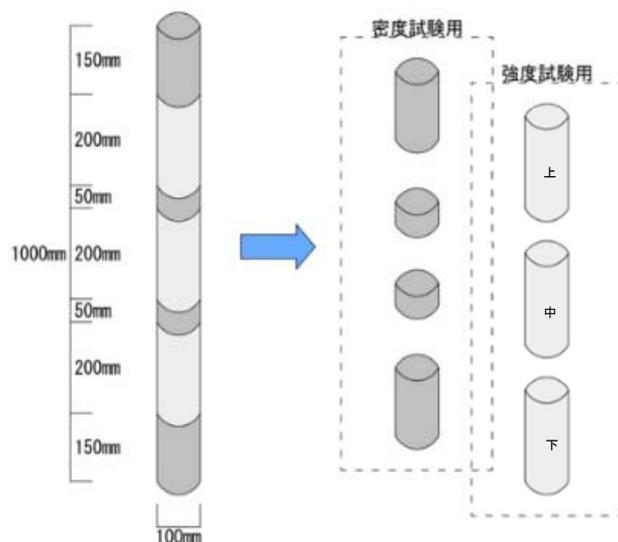


図 7.2 コア抜きした試験体の概要

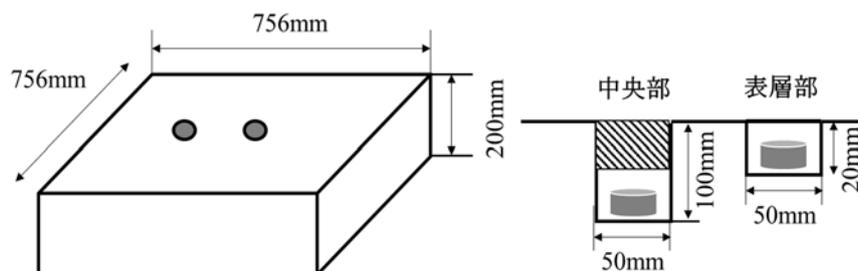


図 7.3 超小型温湿度センサ位置

5) 細孔径分布

細孔径分布では、床試験体から抜き取ったφ100×200mmのコア供試体を用いて試料調製を行った。所定材齢において各調合の供試体から打設表層部と中央部をそれぞれ厚さ15mmにダイヤモンドカッターで切断し、アセトンに浸漬して水和停止を行った。その後、11%RHの乾燥装置にて一週間乾燥を行い、モルタル部分を5mm角程度となるよう切断し、測定範囲が細孔半径3nm~10μmの水銀圧入式ポロシメータで細孔容積ならびに分布を測定した。

6) 水酸化カルシウム生成量

細孔径分布の測定と同じ調製試料を用い、粗骨材を取り除いたモルタル部分をめのう乳鉢にて粉碎した。TG-DTAにより毎分10℃で20℃から1000℃に加熱し、600℃までの強熱減量を求めた。脱炭酸の影響を排除するために、試料の減量の測定温度は600℃とした。また、450℃前後での水酸化カルシウム(CH)の脱水率から、CH生成量 V_{CH} を以下の式より算出した⁷⁻⁶⁾。

$$V_{CH} = \frac{m'}{(100-m)} \times 100 \quad \text{式 (7.1)}$$

ここに、

V_{CH} : 水酸化カルシウム生成量(%)

m' : 450℃前後での水酸化カルシウム脱水率(%)

m : 600℃までの試料の減量(%)

7) 反射電子像による画像解析

細孔径分布および結合水量の測定に用いた表層部と中央部の試料の中心部分から、一辺 15mm 角の小片試料を切断し（図 7.4），エポキシ樹脂で含浸硬化させた後，観察面を研磨し，炭素による蒸着を施して反射電子像観察用試料とした。加速電圧 15.0kV，観察倍率 200 倍および 500 倍で小片試料の研磨面を撮影した。観察には，反射電子（BSE）検出器を付属した電界放出形走査電子顕微鏡（SEM：日本電子㈱ JSM-7001F，BSE：日本電子㈱ SM-54060RBEI）を用いた。また，観察倍率 500 倍の粗骨材を含まないモルタル部分に対して約 10 箇所画像を取り込み，2 値化処理を行い，1 画像中に含まれる未水和セメントの面積率を求めた。ステレオロジーの法則に基づき，面積率は体積率に等しいとし，セメントペースト部分の水和度 α_{BEI} を以下の式により求めた⁷⁻⁷⁾。10 箇所画像それぞれの水和度 α_{BEI} の平均を代表値とした。

$$\alpha_{BEI} = 1 - \frac{V_{unh}}{V_{init}} \quad \text{式 (7.2)}$$

ここに，

α_{BEI} ：セメントペーストの水和度

V_{unh} ：未水和セメント体積率(cm^3/cm^3)

V_{init} ：調合上のセメント体積率(cm^3/cm^3)

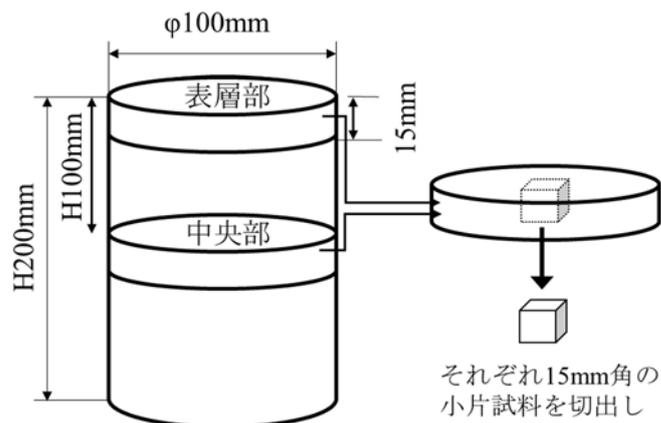


図 7.4 床コア試験体の概要

7.3 「実験Ⅰ」の結果考察

7.3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの性状を表 7.5 に示す。軽量骨材を用いた調合の空気量は、それぞれ骨材修正係数を SL25 : 0.2%, SL50 : 0.3%, 軽量 : 0.8%を差し引いた値を示している。軽量細骨材の混入量が多いほどスランプが大きくなったが、すべての調合において目標値（スランプ : 18 ±2.5cm, 空気量 : 4.5 (軽量は 5.0) ±1.5%) を満足した。また、コンクリート温度は暑中期の目標値とした 35±2°Cの範囲内であった。

表 7.5 フレッシュ性状 (実験Ⅰ)

水準		スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量(kg/L)	コンクリート 温度(°C)	外気温 (°C)
暑中期	普通	16.5	4.9	2,328	33	34
	SL25	18.5	4.3	2,282	34	36
	SL50	19.5	5.2	2,204	34	36
	軽量	17.5	5.2	1,898	34	34

7.3.2 水分移動

図 7.5 にブリーディング水量と水分蒸発量を示す。まず、ブリーディングにおいては、全ての調合で打込みから約 3 時間経過した時点で終了し、大きな差は見られなかつ

た。従って、気温と湿度などの環境条件が同一の場合は、調合上に骨材の種類及び量の違いがあっても、ブリーディング時間への影響は小さいことが分かる。ブリーディング水量は、普通コンクリートでは 0.08cm³/cm², 軽量細骨材を混入した SL25 と SL50 では 0.09cm³/cm² となり、若干大きな値となった。一方、W/C が他の調合より小さい軽量の場合、ブリーディング水量は 0.06cm³/cm² 程度と小さくなった。打込み後 4 時間までの水分蒸発量は、0.04~0.06cm³/cm² の範囲で、「SL25 > SL50 ≒ 軽量 > 普通」となっており、蒸発量自体が非常に小さい値ながらも軽量骨材を使用した調合が多くなる傾向を示した。

7.3.3 凝結性状

凝結特性を図 7.6 に示す。貫入抵抗試験の結果から、打込み後約 5.0～5.5 時間で始発となり、6.2～6.6 時間後に終結した。普通と軽量は同様の凝結速度を示しており、SL25 は普通よりも 15 分程度、SL50 は 30 分程度始発、終結ともに遅くなった。このように、軽量細骨材が凝結速度を少し遅らせる結果となった。

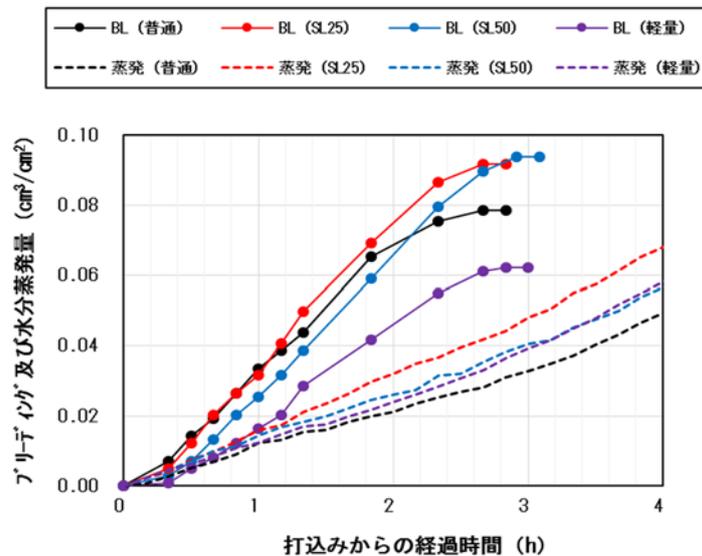


図 7.5 水分移動試験結果（実験 I）

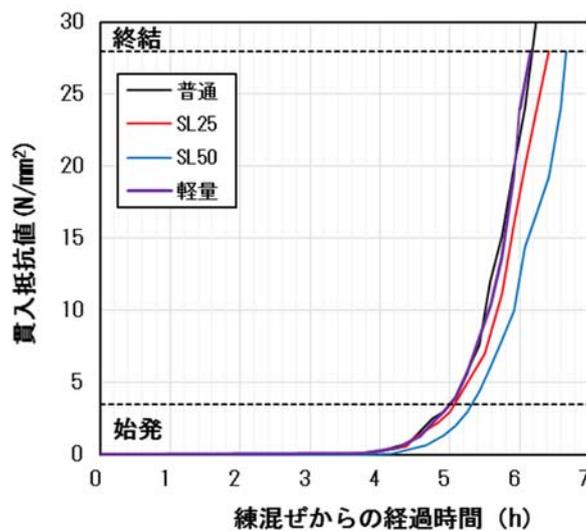


図 7.6 凝結試験結果（実験 I）

7.3.4 床スラブの仕上げ作業性の評価

仕上げ作業性に関して、軽量細骨材を含む SL25 及び SL50 の試験体では普通よりコテ均しを行える時間が多く確保でき、仕上げ作業が容易であった。また、表面のブリーディング水が少なくなったときのコテ均し時の抵抗（滑り）は、さほど違いを感じられなかった。これは、SL25 及び SL50 は普通と比べてブリーディング終了までの時間は同程度であったが、ブリーディング水量がやや多く、蒸発量も若干多く持続していることから、コンクリート表面付近の水分が高く保たれていたと推察され、このことによりコテ仕上げ作業が容易であったと考えられる。すなわち表面乾燥が早期に始まる暑中環境の床スラブコンクリートにおいては、コンクリートに人工軽量骨材を使用することにより、表面の水分が適度に保たれ、表面のこわばりが抑制されることから、仕上げ作業性が普通コンクリートよりも優れることが確認された。

7.3.5 密度の上下分布

図 7.7 に柱試験体から抜いたコアの絶乾密度の上下分布を示す。普通では、底面と上面の差が約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であったのに対し、SL25 及び SL50 は、上面に行くほど密度が小さくなっており、特に表面から 10cm 以内の部分の密度は顕著に小さくなった。これは、軽量細骨材が表面付近に多く分布したことが原因と考えられ、人工軽量細骨材を用いた場合には、締固めにおいて過度な振動による材料分離に注意する必要があると思われる。一方、軽量の試験体は、 $1.61\sim 1.74\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の密度分布で上下の密度差は小さくなっており、これは他の配合よりも水セメント比が小さく、材料分離が生じにくかったためと考えられる。

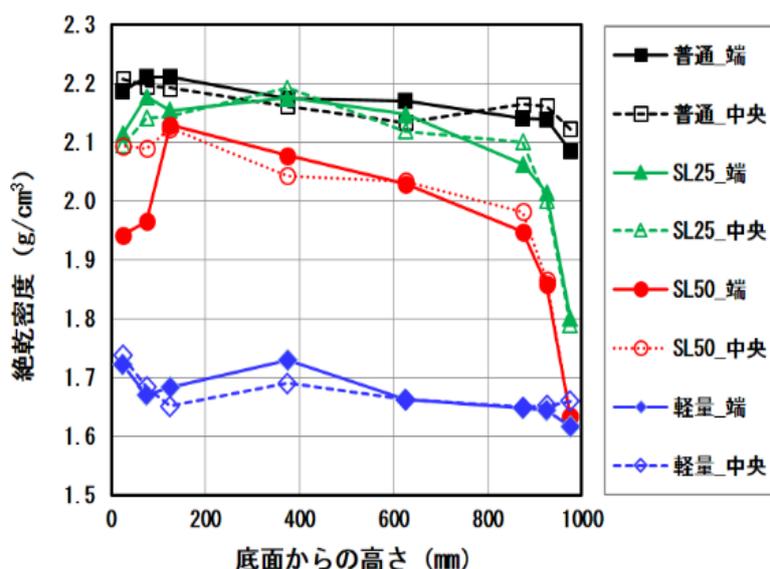


図 7.7 密度の上下分布

7.3.6 圧縮強度

図 7.8 に圧縮強度試験結果を示す。管理用供試体では、普通、SL25 及び SL50 の 3 つの調合で同様の強度性状を示した。それに対して、模擬試験体のコア強度は、人工軽量細骨材の混入量が多いほど、圧縮強度が高くなった。また、軽量コンクリートの場合、管理用供試体よりもコア試験体の強度は高いことが確認された。養生方法の違いについて調べると、程度の違いはあるが全ての調合において給水養生及びシート養生の効果が認められた。普通は、無養生と給水養生で圧縮強度が 10N/mm^2 程度違いが見られ、暑中コンクリートにおける養生の重要性が本実験でも確認された。SL25 は、普通と比べて無養生条件で強度が高くなり、さらに養生を積極的に実施すれば強度向上効果が確認された。SL50 は、無養生条件で他の試験体より最も強度が高く、普通コンクリートの給水養生試験体に相当する強度発現が得られた。軽量コンクリートも、養生方法による強度性状の違いは少ない。これらの結果から、人工軽量骨材の自己養生効果が暑中コンクリートの強度性状に有効であり、養生方法の違いによる強度性状のばらつきを改善できることが認められた。なお、柱コアの強度において、上中下 (図 7.2 参照) の強度差は認められなかった。これは、コア試験体の上下密度差が上部から 10cm の範囲に限定されるためと考えられる。

図 7.9 に材齢 13W における構造体強度と材齢 4W における標準養生供試体強度の差を示す。普通の柱は 4.0N/mm^2 の差であったが、部材の厚さが小さく乾燥の影響を受けやすい床の場合、無養生では 8.4N/mm^2 となり、適切な養生を行わない場合には強度差が大きくなることが確認された。しかし、軽量細骨材を混入した SL25 及び SL50 では、無養生の床の場合においても強度差が 4.0N/mm^2 以下で普通よりも小さくなっており、軽量骨材の補水性による自己養生効果が表れている。特に SL50 の場合、柱のコアは管理用供試体の 4W 強度とほぼ同程度、床のコアではむしろ大きな値を示した。なお、床の養生方法ごとに比較すると、養生を行うことに伴い、さらなる S 値低減効果が見られた。軽量コンクリートの場合には、全ての条件で 4W の管理用供試体の強度よりも高くなった。

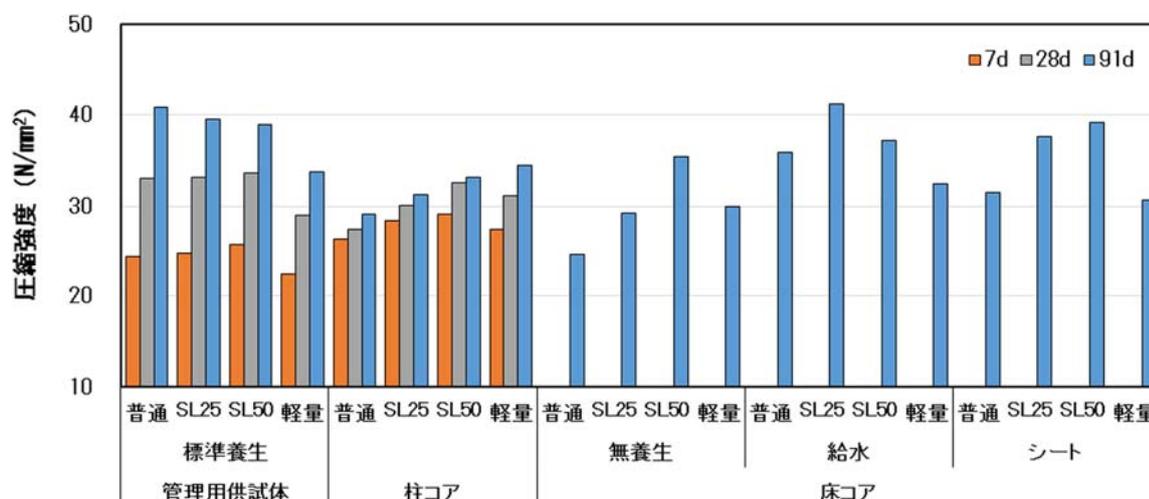


図 7.8 圧縮強度試験結果 (実験 I)

これらのことから、暑中コンクリートの施工において、人工軽量細骨材を普通骨材に対して置換することにより、養生条件による強度発現の差を小さくすることができ、構造体強度を確保できることから S 値を低減可能であることが示唆された。

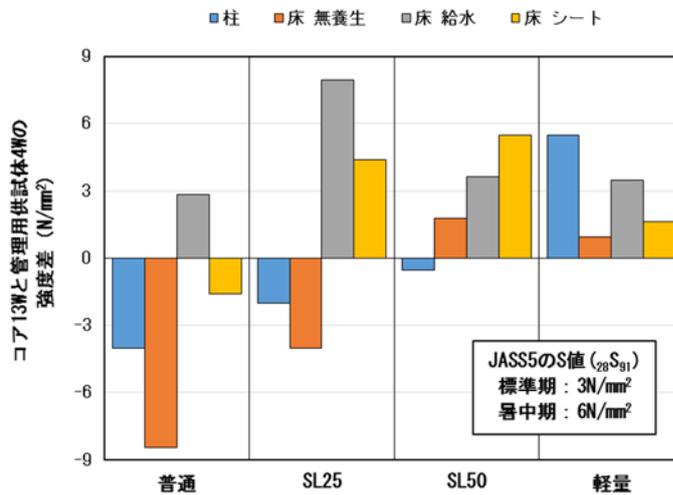


図 7.9 S 値の検討結果 (実験 I)

7.3.7 透気性状

透気係数は、耐久性に強く関連するコンクリート表層からの物質移動特性を表す有効な指標である⁷⁻⁸⁾⁷⁻⁹⁾⁷⁻¹⁰⁾。トレント透気試験による透気係数及び既往の研究¹⁰⁾から提示している透気係数の判定グレードを図 7.10 に示す。透気係数は、普通の無養生試験体が $21.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と最も高くなった。軽量細骨材を入れた SL25 及び SL50 の試験体では、養生を実施しなくても $3.09 \sim 6.39 \times 10^{-16} \text{m}^2$ まで大幅に改善されたものの、そのグレードが「不良」となるため、透気性状の観点からは給水もしくはシート養生を行い、品質を高めることが好ましい。また、軽量コンクリートは、養生方法にかかわらず「普通」のグレードとなり、養生が不要な結果となった。

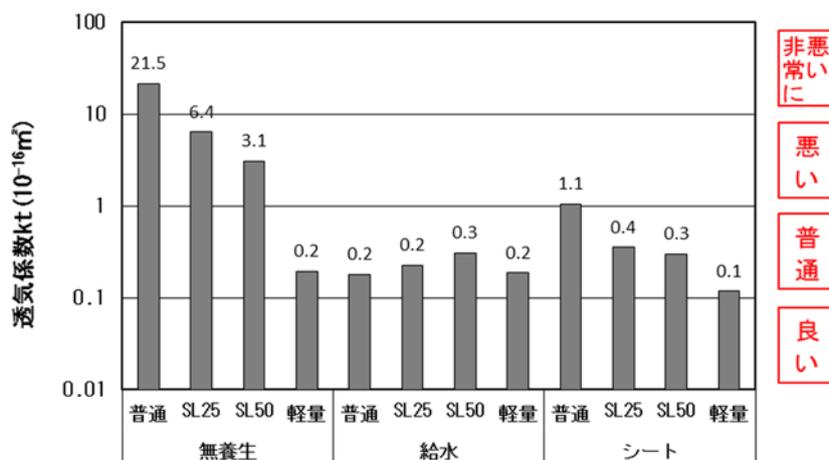


図 7.10 透気性状試験結果 (実験 I)

7.3.8 中性化抵抗性

図 7.11 に促進中性化試験結果を示す。中性化速度係数は、管理用供試体が最も小さい値 ($2.2\text{mm}\sqrt{\text{W}}$) となり、調合による違いは見られなかった。模擬部材の場合には、普通コンクリートは、 $9.3\text{mm}\sqrt{\text{W}}$ 程度であったが、人工軽量細骨材の混入量が多いほど、中性化抵抗性が向上する傾向が見られた。ただし、給水もしくはシート養生を行った全ての試験体の中性化速度係数は、材料構成に関係なく、同程度となって、コンクリートの内部からの自己養生効果と外部からの養生の二重効果は確認されなかった。

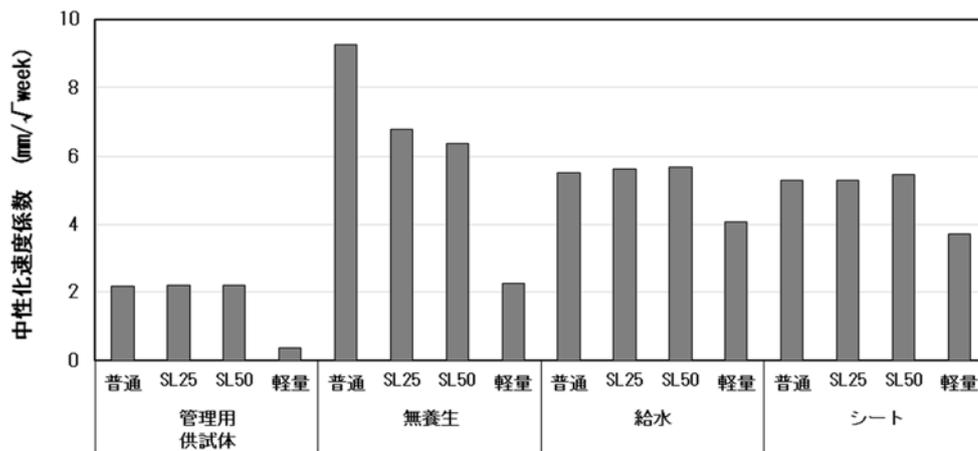


図 7.11 促進中性化試験結果

7.4 「実験Ⅱ」の結果考察

7.4.1 フレッシュ性状

「実験Ⅱ」において製造したコンクリートのフレッシュ性状を表 7.6 に示す。コンクリート温度は暑中期の目標値とした $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内であった。今回、練上がり時から AE 減水剤の添加率が一定となったが、打込み時のスランプは人工軽量骨材の置換率が大きいほど大きくなり、普通コンクリートよりも SL25 は 2.0 cm スランプが大きくなった。また、人工軽量骨材を用いた水準の空気量は、それぞれ骨材修正係数 0.2%、0.3%、0.8% を差し引いた値を示している。

表 7.6 フレッシュ性状（実験Ⅱ）

水準		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度($^{\circ}\text{C}$)	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)
暑中期	普通	15.0	4.0	33.5	36.0
	SL15	15.5	4.2	34.0	37.0
	SL25	17.0	4.3	35.0	37.5
	軽量	17.0	5.5	34.0	35.0

7.4.2 水分移動

図 7.12 に水分移動試験結果を示す。ブリーディング終了時間は各調合で打込みから約 3 時間程度となっており、調合による違いはほとんど見られなかった。軽量のブリーディング水量が小さくなっているのは、W/C や単位水量が他の調合よりも小さいためと考えられる。JIS ブリーディング挙動は、「実験Ⅰ」と同様な傾向である。また、図 7.13 に「実験Ⅰ」と「実験Ⅱ」の結果から人工軽量細骨材の置換率とブリーディング水量の関係を示す。「実験Ⅰ」の調合では人工軽量細骨材の置換率が 0%、25%、50% でブリーディング水量は順に $0.078\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.092\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.094\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、「実験Ⅱ」では置換率 0%、15%、25% で $0.069\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.072\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.079\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となった。実験ごとにブリーディング水量の差はあったが、人工軽量細骨材の置換率が大きくなるほど普通コンクリートよりも水が多く出ることが両方の実験から明らかになった。なお、全体として「実験Ⅱ」のブリーディング水量が小さな値となっている要因として、「実験Ⅱ」では AE 減水剤の添加量が 0.8% と「実験Ⅰ」(1.1~1.2%) よりも小さくなったためと考えられる。いずれの場合も、同じ環境条件下では人工軽量細骨材の混入量が多いほどブリーディング水量が大きくなる傾向が認められた。

各調合の単位水量を考察すれば、人工軽量細骨材の置換率が大きいほどコンクリート表面の単位水量が大きく増大しているが、これはブリーディング挙動と関係が深いといえる。人工軽量骨

材の置換率が 25%の範囲ではブリーディング水量は普通コンクリートよりも若干多い程度であったが、打込み 3 時間程度の表面含水量は普通コンクリートに比べて大きくなった。なお、人工軽量粗骨材を用いた軽量コンクリートの場合には、ブリーディング水量は他の調合より少なかったが、単位水量は最も大きい値となった。

以上の水分移動の関係から、暑中環境下では表面の乾燥やブリーディング水量が少ないことによりコテ仕上げ作業性が低下しやすいが、人工軽量細骨材を用いたコンクリートでは普通コンクリートと比較して、表面含水率が適度に大きくなり、その時間も長いため、仕上げ性も良好でコテ仕上げを行える時間が相対的に長く確保できた。

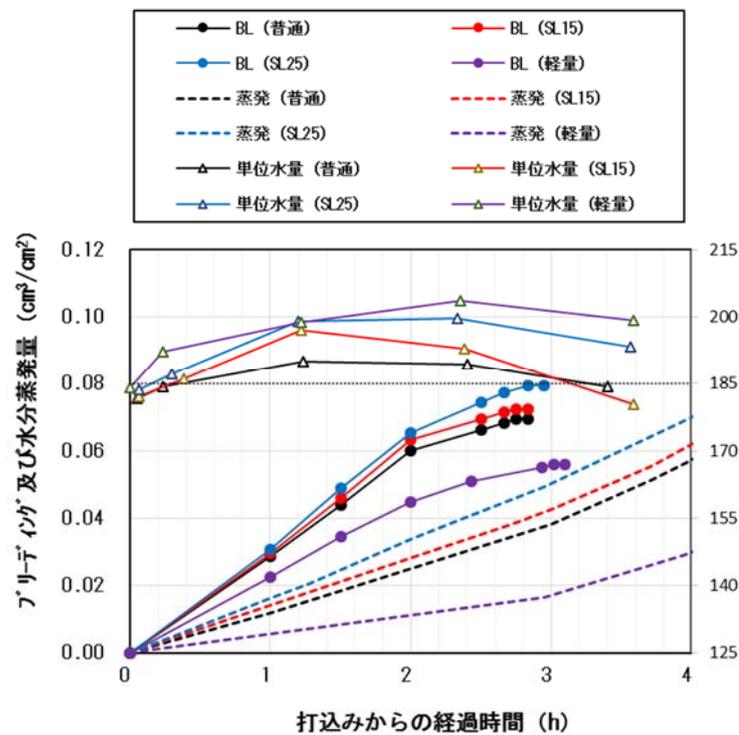


図 7.12 水分移動試験結果（実験Ⅱ）

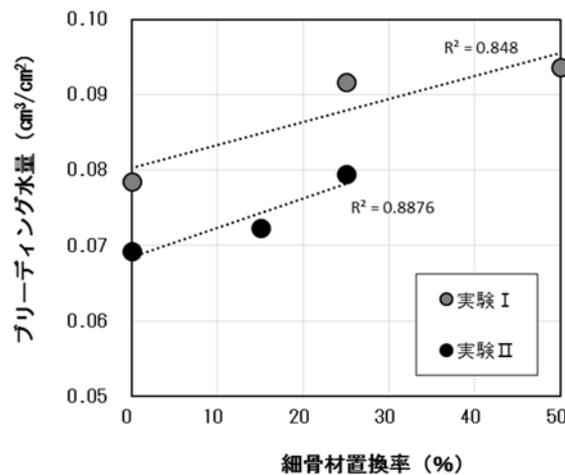


図 7.13 人工軽量細骨材の置換率とブリーディング水量

7.4.3 凝結性状

図 7.14 に凝結試験結果を示す。「実験Ⅱ」は「実験Ⅰ」よりも外気温が若干高く打込み初期の蒸発量が少し大きいことにより、ブリーディング水量は少なくなり、結果的に終結に達する時間も 0.5～1.0 時間程度早くなった。調査ごとに見れば、SL15 は普通よりも 10 分程度、SL25 は 20 分程度終結が遅くなった。軽量細骨材が凝結速度を少し遅らせる結果となったが、これは「実験Ⅰ」と同様の傾向である。

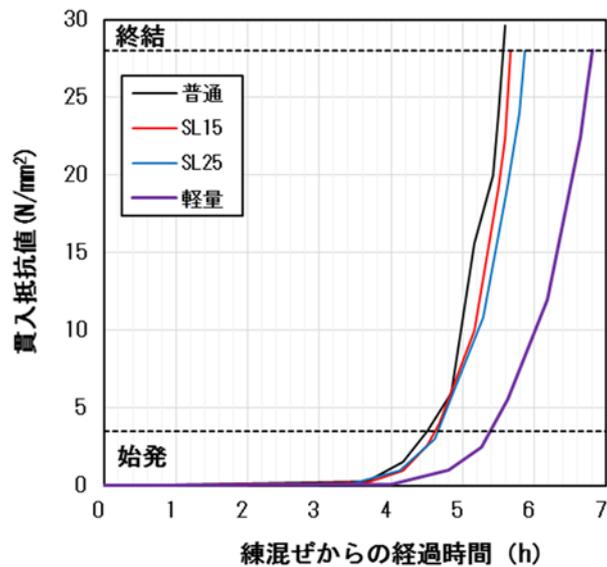


図 7.14 凝結試験結果（実験Ⅱ）

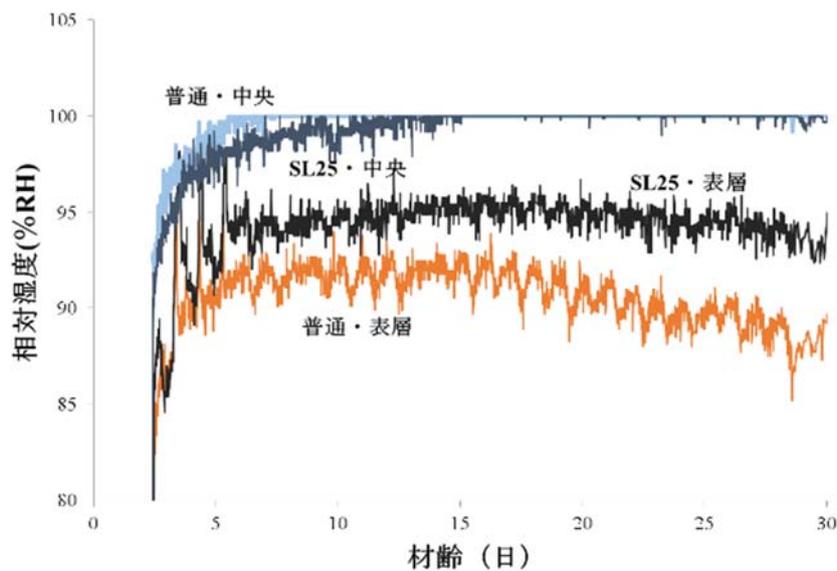


図 7.15 無養生の床試験体表層部の相対湿度履歴

7.4.4 床試験体内部の湿度

普通および SL25 における無養生の床試験体の表層部および中心部の材齢 30 日までの相対湿度の履歴を図 7.15 に示す。SL25 と普通では表層部の湿度に明確な違いが認められ、打込み直後から材齢 91 日までの平均相対湿度が、SL25 は 94.6%、普通は 90.9%であった。また、普通は材齢 15 日程度から徐々に湿度の低下が認められるが、SL25 の湿度低下は緩やかであり材齢 25 日程度まで 95%に近い値を維持していた。また、中心部の湿度はいずれも材齢 10 日程で 100%に近い値となり、材齢 91 日後も同等の値であった。これらのことから、極暑中期の過酷な条件下であっても、軽量細骨材を適量混入することで部材表層部の保湿性を高める効果が期待できる。

7.4.5 圧縮強度

図 7.16 に柱および床試験体から採取したコアおよび管理用供試体 1W, 4W, 13W における圧縮強度を示す。柱コア試験体ではすべての材齢で人工軽量骨材を用いた試験体が普通コンクリートよりも圧縮強度が大きくなっている。「実験 I」でも普通コンクリート、SL25, SL50 の柱コア試験体の圧縮強度は順に 29.1N/mm², 31.2N/mm², 33.1N/mm²となっており、実機柱試験体において人工軽量骨材の自己養生効果が強度発現に有効であることが再確認された。床コア試験体および管理用供試体では普通コンクリートと比べ、人工軽量骨材を用いた調合では、無養生の場合でも若干ではあるが強度が大きくなる傾向が認められた。また、シート養生を施すことにより効果はより顕著になっている。一方で、軽量コンクリートにおいては、前回同様自己養生効果が顕著に表れ、無養生においても良好な強度発現が認められた。

図 7.17 にコア供試体 13W と標準水中養生 4W の圧縮強度差による構造体補正值の検討結果を示す。普通コンクリートの柱コアの 13W 強度は標準養生 4W 強度よりも 4.5N/mm²程度小さくなった。一方、人工軽量細骨材を混入した SL15 及び SL25 は管理用供試体の 4W 強度より柱コアの 13W 強度のほうが大きくなった。床の養生方法ごとに比較して見れば、養生を行うことにより、S 値低減効果がみられた。なお、軽量コンクリートの場合には、全ての条件で 4W の管理用供試体の強度よりも高くなった。以上より、暑中コンクリートの施工において、人工軽量細骨材を一般骨材に対して置換することにより、S 値を低減することが可能であることが確認された。

SL15 試験体は、無養生の床スラブ試験体以外では普通コンクリートよりも高い強度が確保でき、SL25 試験体と比較しても大差はなく、柱の 13W 強度はむしろ SL25 よりも強度性状が優れていた。従って、人工軽量細骨材を 15%置換する方法は、コンクリートの品質及び施工費の両方の観点から、暑中コンクリートの品質管理のための対策として十分可能性があると考えられる。

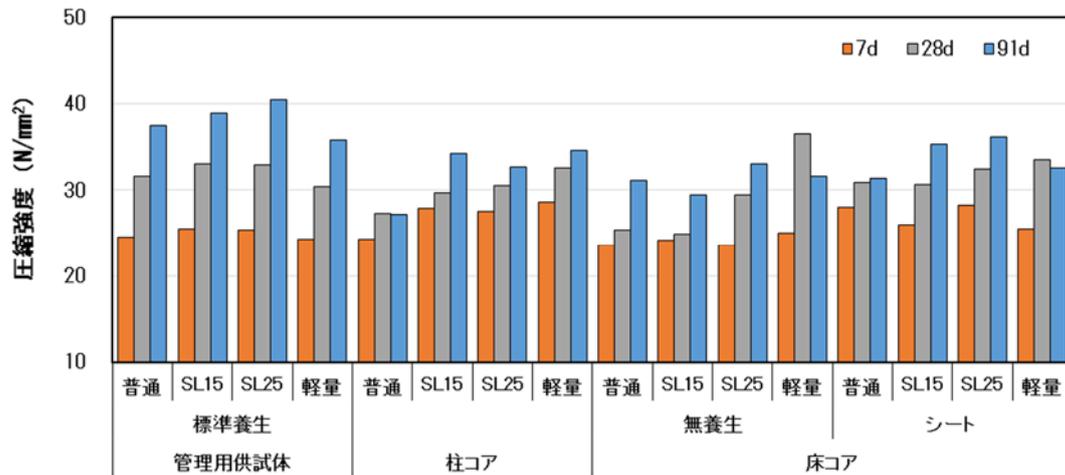


図 7.16 圧縮強度試験結果（実験Ⅱ）

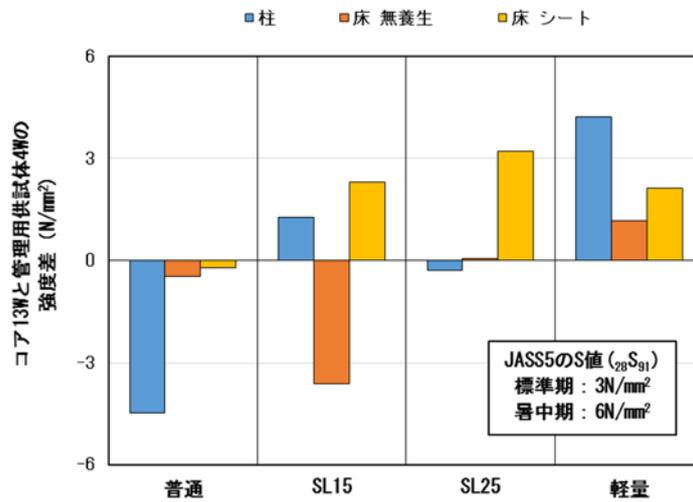


図 7.17 S 値の検討結果（実験Ⅱ）

7.4.6 透気性状

図 7.18 に床スラブ試験体を対象としたトレント法透気試験の結果に同法のグレーディングによる評価を併記したものを示す。「実験 I」と同様に人工軽量細骨材の置換率が大きくなるにつれて透気係数が小さくなった。人工軽量細骨材を置換した試験体では無養生状態でも若干ながら品質は向上したもののそのグレードが「不良」となるため、シート養生などを併用するのが望ましい。一方で、軽量コンクリートは、養生方法にかかわらず「普通」となり、養生が不要となった。透気試験結果は上記の圧縮強度結果と対応しており、直接外気に触れる面積が大きく、暑中環境による弊害を強く受ける床スラブにおいて、人工軽量骨材を混入したものは軽微な養生でも有効であることが透気試験と圧縮強度試験の両方で確認された。

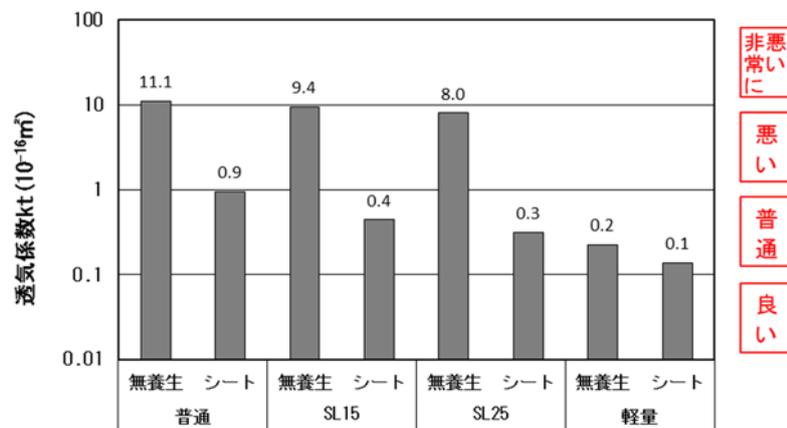


図 7.18 透気性状試験結果（実験 II）

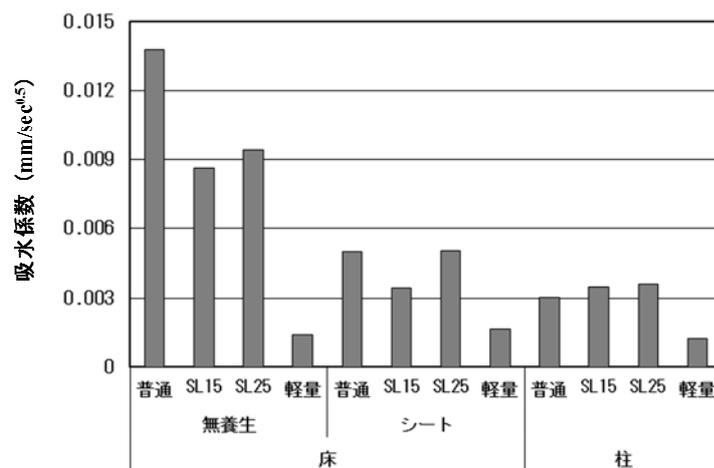


図 7.19 吸水試験結果

7.4.7 吸水性状

床スラブ試験体の吸水試験結果を図 7.19 に示す。吸水係数は透気係数と同様に、軽量細骨材を混入したものは自己養生効果により吸水係数が小さくなることが認められ、軽量コンクリートは養生方法にかかわらず良好な値が得られた。また、普通コンクリートの吸水係数の値が大きくなり、SL25 より SL15 が小さな値になったのはブリーディングの大小の関係もあり、上記の表層部の単位水量の結果と対応し、表層の W/C が相対的に上昇したことなどの影響も考えられる。なお、柱試験体の吸水係数は床スラブ試験体よりも小さい値となっているが、打込み後床スラブは外気に露出されたが、柱の場合は、型枠に囲まれていたため吸水に対する品質が高くなったと思われる。

7.4.8 細孔径分布

普通、SL25 および軽量 1 種に関し、材齢 91 日における床試験体のコア供試体から調製したモルタルの細孔径分布について、無養生の表層部の測定結果を図 7.20 に、無養生の表層部の測定結果を図 7.21 に、シート養生を施した中央部の測定結果を図 7.22 に示す。図 7.20 に示されるように、無養生の表層部では、普通において 500~1000nm のやや粗大な細孔が多く認められるが、SL25 ではより小径の細孔が多く存在した。また、図 7.21 より無養生の中央部では、普通および SL25 の細孔径分布は類似しており、いずれも 40nm 付近の細孔が多く、分布の形状は表層部とは大きく異なることが確認された。一方で、図 7.22 に示したシート養生を施した表層部は、図 7.21 に示した中央部と同様の分布形状を示しており、これはシート養生によって水分の蒸発が抑えられたためと思われる。即ち、表層部であってもシート養生を施すことにより中心部と同様の水和反応が進行していることが示唆される。

このように、暑中環境では、シート養生等により初期材齢において水分の逸散を防ぐことが重要であるが、養生が困難な場合であっても人工軽量細骨材を適量置換することでセメントの水和反応をある程度高める効果が期待できるものと考えられる。また、軽量 1 種に関しては、他の調合よりも水セメント比が低いために相対的な比較は難しいが、表層部および中央部ともに普通および SL25 よりも小径側に細孔が分布していることから、より緻密な硬化組織であると思われる。

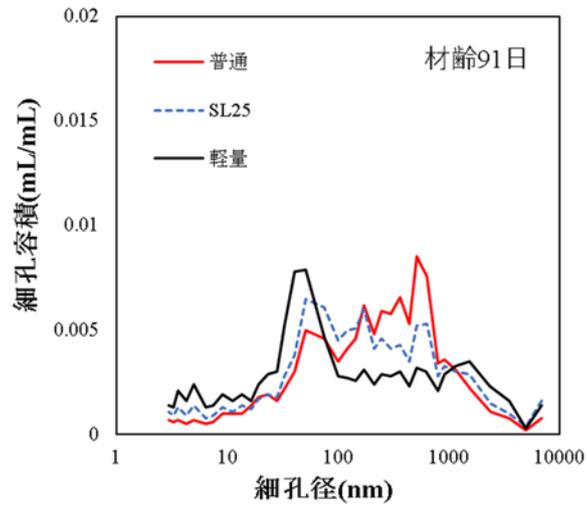


図 7.20 表層部の細孔径分布(無養生)

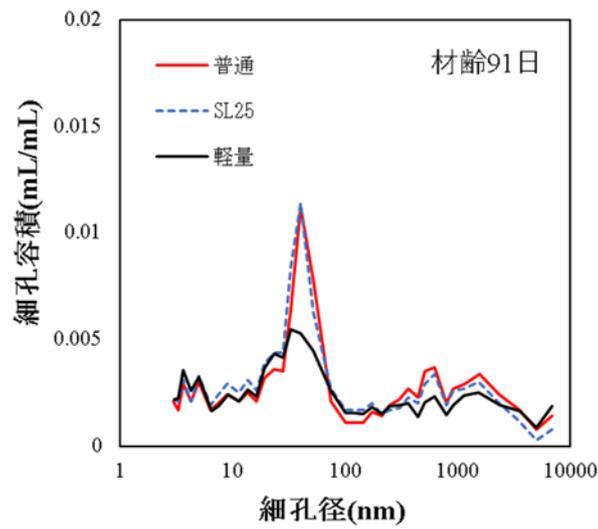


図 7.21 中央部の細孔径分布(無養生)

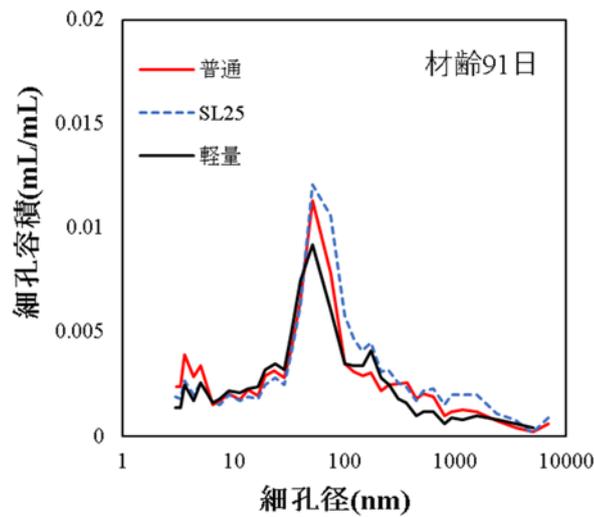


図 7.22 表層部の細孔径分布(シート養生)

7.4.9 水酸化カルシウム生成量

普通と SL25 の材齢 91 日における床試験体の表層部と中央部について、式 (7.1) により算出した CH 生成量を図 7.23 に示す。いずれも表層部より中央部の CH 生成量の方が高い値であった。材齢 91 日では、いずれも養生条件であっても表層部は乾燥に伴う脱水の影響で中央部に比べて水和反応が停滞したと考えられる。このことは、図 7.21、図 7.22 に示される細孔径分布からも推測でき、表層部は水和の停滞で中央部よりも組織が疎であったことが分かる。また、無養生では、SL25 の表層および中央部いずれも CH 生成量が高いことから、人工軽量骨材の使用により、水和反応が普通よりもやや進行していたと考えられる。

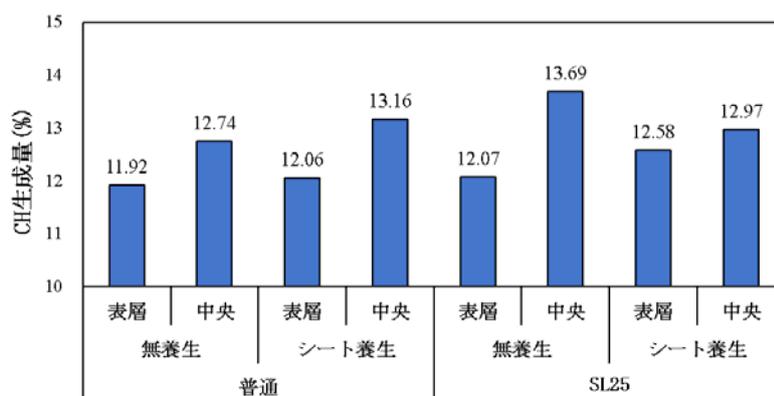


図 7.23 コア供試体の CH 生成量 (材齢 91 日)

7.4.10 反射電子像による画像解析

普通と SL25 の材齢 91 日における床試験体の表層部コンクリートの反射電子像(観察倍率 200 倍)を写真 7.2 に示す。写真中の白色部分は未水和のセメント粒子であり、灰色部分は水和生成物を、黒色部分は空隙を示している。細骨材(海砂)は濃い灰色部分で形が明確であるが、人工軽量細骨材の場合は骨材の内部に多くの空隙が存在するため球状の黒色部が認められる。ここでは細骨材(海砂および人工軽量細骨材)近傍に着目し観察を行った。普通の場合には、細骨材周辺に空隙が多く認められ、骨材に近接する遷移帯部の水和物が少ないことが判る。一方、人工軽量細骨材を含む SL25 では、骨材周辺の空隙が少なく、水和物も多く認められ、それらが骨材によく付着していることが判る。これは、吸水性の高い人工軽量骨材から骨材周辺のセメント粒子に水分が供給され、水和物の生成に寄与したものと考えられる。また、普通は白色部分である未水和セメント粒子の存在が多く目立つことから、SL25 よりも水和反応が不十分であることがうかがえる。さらに、普通は、空隙である黒色部分が水和生成物中に多く、多孔質で粗な構造をしていることがわかる。それに対し SL25 では人工軽量骨材中に認められる黒色部分を除くと、水和生成物中の空隙は普通コンクリートよりも少なく、未水和セメントを示す白色部分も少ない。この空隙の量については、前述の項目 3.5 においても、SL25 が普通と比較し、500~1000nm の粗大な

空隙が少ないことが確認されているため、反射電子像による観察結果とも一致した。未水和セメント粒子や空隙が少ない SL25 では、普通よりも水和反応が進行し水和生成物が緻密な構造を形成しているものと考えられる。これは、材齢 7 日の反射電子像においても同様であった。

撮影した反射電子像の画像解析から求めた普通および SL25 の水和度を図 7.24 に示す。無養生の表層部では、SL25 に比べて普通の水和度が明らかに低く、また中央部の水和度との差も大きい。このことは、画像観察において普通の無養生の表層部の方が未水和セメント粒子および空隙が多く認められた結果とも一致する。また、普通における無養生の場合は、表層と中央の水和反応の進行が不均一であり、それ故に、供試体の圧縮強度も SL25 に対し、低い値を示したものと考えられる。一方、SL25 は無養生であっても表層部は中央部と同様に水和度が高いために、良好な強度発現および耐透気性を示したものと思われる。

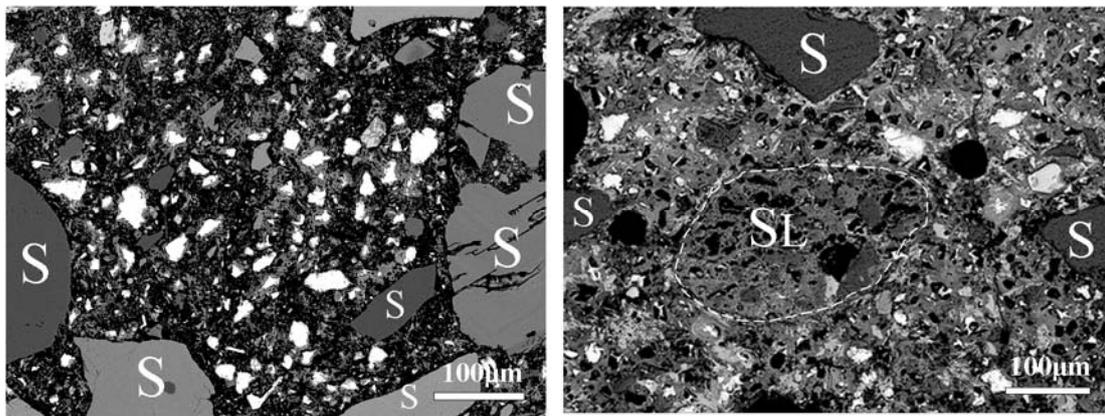


写真 7.2 材齢 91 日における床試験体コンクリート表層部の反射電子像（左：普通，右：SL25）

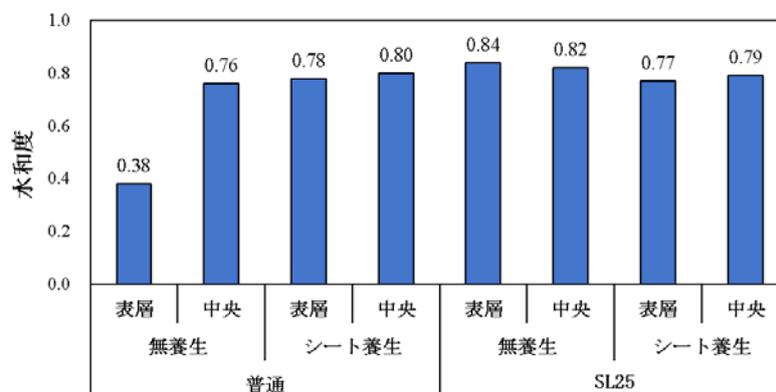


図 7.24 コア供試体の水和度（材齢 91 日）

7.5 第7章のまとめ

本章では、人工軽量骨材の自己養生効果に着目し、暑中期に施工されるコンクリートの品質向上の可能性を検討し、人工軽量細骨材の合理的な置換率を定めることを目的とした実大レベルの実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 人工軽量細骨材を混入したコンクリートは、ブリーディング量が若干多く、凝結は少し遅くなり、骨材の補水性が高いため表面のこぼりが抑制される。これらのことから、暑中環境の床スラブコンクリートにおいて仕上げ作業性が良好となった。
- 2) 反射電子像観察の結果、SL25 は人工軽量細骨材周辺である遷移帯部が緻密であり、骨材に密着している水和物が多く認められた。また、SL25 の水和生成物中には、未水和セメント粒子や空隙が少なく普通コンクリートよりも緻密な構造をしており、細孔径分布による結果とも一致した。
- 3) 普通コンクリートの無養生の表層部では、他に比べて明らかに水和度が低く中央部との差が大きいが、SL25 では、両者の差が小さかったことから、人工軽量骨材の使用により水和反応が普通よりもやや進行していたと考えられる。
- 4) 暑中環境などの過酷な条件下では、シート養生等により初期材齢時の水分の逸散を防ぐことが重要であるが、人工軽量細骨材を細骨材に 15~25%置換したコンクリートは、無養生条件下であっても強度や耐久性が向上し、セメントの水和反応の観点から人工軽量骨材の自己養生効果が有効であることが示された。
- 5) 人工軽量骨材の自己養生効果により強度発現性が向上し、透気係数、中性化速度係数、吸水係数による品質も普通コンクリートよりも高くなることが確認された。さらに、養生を行うことにより、強度及び耐久性をもっと高めることができるため、人工軽量細骨材を使用することは暑中コンクリートの施工対策として有効である。
- 6) 人工軽量細骨材を一般細骨材に対して 15%置換することは、暑中コンクリートにおける施工性、強度、耐久性能などすべての側面で品質向上の効果が十分であり、本研究で検討した範囲内ではコンクリートの品質と工事費両方を満足させる最適な混入量であると考えられる。

参考文献

- 7-1) 松藤泰典, 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清: 人工軽量骨材コンクリートの自己養生機能に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol.40, pp.173-176, 2001.7
- 7-2) 成川史春ほか: 人工軽量細骨材の自己収縮低減用材料としての適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.435-436, 2006.7
- 7-3) 河野克哉ほか: 人工軽量骨材を用いたコンクリートの収縮に及ぼす養生の影響, コンクリート工学年次論文論文集, Vol. 22, No. 2, pp.241-246, 2000
- 7-4) 谷口秀明, 佐々木亘, 樋口正典: 人工軽量細骨材を用いた高強度コンクリートの力学的性質と体積変化, 三井住友建設技術開発センター報告, Vol. 12, pp.47-54, 2014
- 7-5) 伊藤渉, 野々山聡, 今本啓, 廃石膏ボード微粉末 - 高炉スラグ - フライアッシュ混合セメントコンクリートにおける人工軽量骨材の内部養生効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 7-6) 伊代田岳史, 魚本健人: 材齢時の乾燥がセメント硬化体の内部組織形成と物理特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.1, pp.551-556, 2003.7
- 7-7) 井上豪, 五十嵐心一: 2, 3 の手法により求めたセメントの水和度の比較, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.1, pp.541-546, 2005.7
- 7-8) 田中章夫ほか: 表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.691, pp.1539-1544, 2013.9
- 7-9) 秋岡洋平ほか: 透気特性に基づくコンクリートの空隙構造同定と熱力学連成解析による耐久性予測, コンクリート工学年次論文論文集, Vol.30, No.1, pp.675-680, 2008
- 7-10) 唐沢智之ほか: 既存建物の調査事例に基づいた仕上塗材の透気係数と中性化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1265-1266, 2010.9

第 8 章

結論

第8章 結論

地球の大気と海の平均温度が上昇する地球温暖化は、19世紀末から発生し、今後さらに持続する見込みである。IPCC 第5次評価報告書の「RCP8.5 シナリオ」によると、2100年末には最大4.8°Cの気温が上昇すると予測されている。これは、環境要因の影響を受けやすい施工現場で実施される建築工事に大きな影響を及ぼす。コンクリートは、セメントの水和反応によって強度が発現され、硬化されたコンクリートの品質は初期材齢のコンクリートが接する周囲の温度によって大きく影響を受ける。近年の地球温暖化に伴い暑中環境で製造・施工されるコンクリートは、材料とコンクリートの温度が上昇することにより、ブリーディング水量が減少し、蒸発量が増大するためコンクリート上面は早期に乾燥状態になり、水和反応が促進され凝結は非常に早く進行される。それに、初期ひび割れやコールドジョイントが発生し、結果的に強度増進が鈍化し耐久性が低下するなど硬化体の品質において問題が生じる可能性が高くなる。こういう背景で本研究では、暑中環境における施工指針や関連規定の作成に必要な具体的な品質管理に関する基礎資料の提示を目的とし、気候変動により過酷化する近年の施工環境において、高温がコンクリートの特性に及ぼす影響について検討し、硬化されたコンクリートの品質を高めることができる品質管理技術について柱、床スラブ、壁部材を模擬した試験体を対象とする実大レベルの実験を行った。以下に本研究における各章の結論と今後の課題を示す。

第2章では、暑中コンクリートに関する理論的な考察を行った。近年の地球温暖化による気候変化の傾向と将来の予測について調べた。この気候変化により年々過酷化する暑中環境がフレッシュコンクリート及び硬化後のコンクリートに及ぼす影響について文献調査を行った。また、暑中コンクリートの品質管理のために制定された世界各国の関連規定・仕様書の国際比較を行った。日本、韓国、アメリカ、イギリスの標準に対して、暑中コンクリート工事の定義及び適用期間、コンクリート温度上限値や施工上考慮事項などを比較検討した。なお、シンガポール、インド、中東地域、アフリカなどの基準について簡単に示した。

第3章では、暑中コンクリートの初期水分移動及び凝結特性に及ぼす気象条件の影響について検討した。実験環境は標準期、極暑中期、軽微な暑中期の3水準と分け、コンクリートのフレッシュ性状、蒸発性状、ブリーディング挙動、コンクリート表面付近における単位水量の経時変化及び凝結性状について検討した。第3章の主な実験結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 暑中環境では、材齢5日までの蒸発量の約70~75%が材齢1日以内に蒸発するため、コンクリート打込み当日の水分蒸発を防ぐことが重要である。また、コンクリートのブリーディング挙動に影響を及ぼす重要な因子は蒸発性状であり、実際施工現場の気温、湿度、風速など蒸発に影響する要因について検討しコンクリートの表面乾燥を遅らせることが好ましい。

- 2) コンクリート表面付近の単位水量は、暑中環境下においては、打込み後若干増加する傾向にあったが、ブリーディング水がなくなってコンクリート表面の乾燥が始まることと同時に小さくなっている。反面、標準環境では単位水量が持続的に増加することが確認された。
- 3) 暑中コンクリートの凝結実験結果、ブリーディング終了時間が早ければ早いほど凝結は促進される。外気温 25℃以上の暑中環境における始発時間は、外気温の高低よりも打ち込まれたコンクリートの水分移動特性により影響を受けると考えられる。ただし、始発後終結に達する時間は外気温の影響を強く受けることが認められた。
- 4) 外気温が比較的高くない軽微な暑中期においても、打込み後コンクリートの水分蒸発に対する対策をしっかりと講じないと、気温がより高い極暑中期よりも早い時期に乾燥、凝結することにより、硬化コンクリートの品質に悪影響を及ぼす可能性がある。
- 5) 以上の実験結果から、暑中環境で施工されるコンクリートは、蒸発量が大きくなることによりブリーディング水が早期になくなる。その結果コンクリートの表面乾燥・凝結・硬化は促進されることが定量的に明らかになった。

第 4 章では、第 3 章に引き続き、暑中環境（極暑中及び軽暑中）の影響を受ける構造体コンクリートの強度特性について検討を行った。コンクリート中心部の高温化及び内部の水分挙動が強度発現に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、実大模擬試験体を用いて、温度、圧縮強度、含水率、結合水率、細孔構造などを測定し、最終的に強度管理方法について提案した。第 4 章の主な実験結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 構造体コンクリートの中心部の最高温度は、極暑中期では 80℃程度まで上昇し、軽微な暑中期においては 70℃で 10℃程度低くなって、日平均気温 25℃という暑中環境の範囲内でも外気温の高低によるコンクリート内部の温度上昇量は違うことが確認された。
- 2) 極暑中環境下で打ち込まれたコンクリートは、長期材齢における強度の増進が鈍化した半面、暑中環境が比較的激しくない軽微な暑中期では、強度低下が極暑中期ほど大きくなかった。
- 3) 極暑中期における構造体強度補正值は、すべての条件で 3N/mm² を超えてしまい、JASS5 で規定されている 6N/mm² で管理する必要がある。半面、軽微な暑中期では 2.3N/mm² となって標準期の規定である 3N/mm² 以下の範囲となっており、強度低下のリスクが極暑中期より小さいことが確認された。
- 4) 極暑中環境における構造体の強度低下を引き起こす、粗雑な硬化体組織の生成の要因は、コンクリート内部の高温化及び表面からの乾燥・水分の逸散である。しかし、軽微な暑中期の場合は、内部の高温化あるいは表面部の乾燥による強度低下は見せず、内部と表面部間の強度差は大きくなかった。
- 5) 軽微な暑中期の場合には、コンクリートの高温化及び乾燥を防止するために比較的簡単な方法で強度管理が可能であるが、極暑中期の場合は、中庸熟ポルトランドセメントやフライアッシュ、高炉セメント、人工軽量骨材などを用いて積極的に強度管理を行う必要がある。

第5章では、暑中期に施工される床スラブコンクリートの適切な養生方法について調べるために、実大レベルで模擬した床スラブコンクリートを対象とし、養生方法（無養生、給水養生、シート養生、散水養生、噴霧養生、膜養生）、養生開始時期及び養生期間が硬化体の強度及び耐久性に及ぼす影響について検討した。最終的には、現場条件を考慮した最適な養生方法を提案した。第5章の主な実験結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 圧縮強度と透気性状を踏まえると、ブリーディング水消失後数時間以内に給水養生を始め、できるだけ長く持続することが望ましい。また、打込み翌日に給水養生を行ってもシート養生より品質が高くなる。ただし、実際の現場では長時間の給水は困難であり、水の供給量が過剰であるため、散水などを適宜行って、給水状態にできるだけ近いような状態をつくることが重要である。
- 2) 散水養生に必要な水量は、コンクリートの蒸発量だけでは足りなく、蒸発量と吸込み量の総水分量とした方が好ましい。また、打込み当日に散水することが重要であり、打込み当日散水後3日目に再度散水することによって5日間給水を維持した試験体と同様の品質が得られる。
- 3) 給水養生及び散水養生を行った試験体の細孔分布は、50nm以上の細孔量が少なくなり、その結果圧縮強度が向上された。従って、暑中環境の床スラブコンクリートに水分を供給することは、表面だけではなく、セメントマトリックスの微細構造が緻密化することが認められた。
- 4) 現場状況を考慮した最も最適な養生方法として、「材齢5日までの蒸発量+吸込み量」を打込み当日及び3日目に散水する2回散水養生を提案する。また、施工現場条件上散水が困難な場合には、シート養生を行って品質を改善することができるが、この場合できるだけ早い時期に養生を開始し、少なくとも3日間維持することが望ましい。
- 5) 外気温30℃未満の軽微な暑中期においては、比較的軽微な養生を行っても品質向上の効果が高くなって、極暑中期よりは品質管理上比較的余裕があると言える。しかし、軽微な暑中期においても打込み翌日のシート養生は効果が少ないため、暑中環境におけるシート養生は必ず打込み当日に開始する必要がある。

第6章では、暑中期に施工される壁体コンクリートのコールドジョイントの発生に及ぼす影響について総合的に検討し、コールドジョイントによる品質低下に関する対策及び適切な評価方法について整理した。コンクリートの運搬時間と打重ね時間間隔を要因とし、実大レベルで模擬制作した16体の壁試験体を対象とし打重ね部の品質を検討した。第6章の主な実験結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 暑中環境においては、コンクリートの運搬時間が長くなるほどスランプが低下し、ブリーディング終了時間は早くなり、ブリーディング水量も少なくなることにより、打ち込まれたコンクリートの表面部はより早期に乾燥状態になる。従って、暑中期のコンクリート工事にお

いては、できるだけ運搬時間を短縮させる配車計画が重要である。

- 2) トレント法透気試験の判定基準によると、打重ね時間間隔 2 時間までは、「普通」もしくは「悪い」等級となり、打重ね時間間隔 3 時間になると「非常に悪い」等級となる。つまり、暑中期では打重ね時間間隔 1 時間でも品質低下の恐れがあり、規定値を超えて 2 時間以後に打ち重ねると顕著に悪くなる可能性が高い。また、この傾向は、曲げ強度や吸水試験結果でも一致している。
- 3) 打重ね面の強度及び耐久性状には、先打ちコンクリート及び後打ちコンクリートの打込み時間よりも、打重ね時間間隔の要因が品質に支配的に影響を及ぼす。ここで、打重ね時に先打ちコンクリート表面のレイタンスなど脆弱層を除去することにより、品質を高めることが可能である。打重ね時間の限度である打重ね時間間隔 2 時間の条件において、レイタンスを除去すれば一体打ちコンクリートに近い品質を得ることが明らかになった。また、この効果は打重ね時間間隔 3 時間でも認められた。
- 4) 本研究の範囲においては、透気係数 $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、一体打ちコンクリートに対する曲げ強度比 0.6 を暑中期におけるコールドジョイントの発生基準と提案する。また、コールドジョイントの発生を抑制するための品質管理基準として、打重ね時間間隔は 2 時間以内、貫入抵抗値は 1.0 N/mm^2 以下、N 式貫入量は 30mm 以上の条件で打重ねる必要があると考えられる。

第 7 章では、暑中環境下で施工されるコンクリートに及ぼす人工軽量骨材の自己養生効果の有効性について検討するために、人工軽量細骨材を普通コンクリートの細骨材の一部として置換したコンクリートを対象として暑中環境下で模擬部材を作製し、基本物性評価に加え、硬化体内部のセメントの水和反応性に着眼した各種アプローチを試みた。第 7 章の主な実験結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 人工軽量細骨材を混入したコンクリートは、ブリーディング量が若干多く、凝結は少し遅くなり、骨材の補水性が高いため表面のこわばりが抑制される。これらのことから、暑中環境の床スラブコンクリートにおいて仕上げ作業性が良好となった。
- 2) 人工軽量骨材を用いたコンクリートは、遷移帯部が緻密であり、骨材に密着している水和物が多く認められた。また、水和生成物中には、未水和セメント粒子や空隙が少なく普通コンクリートよりも緻密な構造をしており、細孔径分布による結果とも一致した。
- 3) 人工軽量骨材の自己養生効果により強度発現性が向上し、透気係数、中性化速度係数、吸水係数による品質も普通コンクリートよりも高くなることが確認された。さらに、養生を行うことにより、強度及び耐久性状をもっと高めることができるため、人工軽量細骨材を使用することは暑中コンクリートの施工対策として有効である。
- 4) 人工軽量細骨材を一般細骨材に対して 15%置換することは、暑中コンクリートにおける施工性、強度、耐久性能などすべての側面で品質向上の効果が十分であり、本研究で検討した範囲内ではコンクリートの品質と工事費両方を満足させる最適な混入量であると考えられる。

以上、本研究の成果により暑中環境で製造、施工されるコンクリートの初期水分移動及び凝結特性、硬化後の強度特性について定量的に明らかにし、床スラブ及び壁体コンクリートに関する品質管理技術、ならびに人工軽量細骨材による材料置換の有用性に関して確認した。しかしながら今後の課題として、暑中期の環境条件、つまり外気温、相対湿度、風速、日射量などにより異なる打込み初期の水分移動と凝結性状に関する予測ができるツールの開発が必要と考えられる。これができるれば、コンクリート調合と環境条件に応じて適用可能な品質管理技術のデータベースを構築することが可能である。本研究で検討した暑中環境の程度、すなわち外気温 30℃以上の極暑中期と 30℃未満の軽微な暑中期においては、硬化コンクリートの品質が確かに異なるため、関連規定や施工指針類の改定を考慮する必要があると考えられる。言い換えれば、過酷な極暑中環境においては、強度や耐久性状低下の要因を様々な観点から明らかにし、適切な対策を多様に提示し、軽暑中環境においては、今の規定を適用するには少し過度な品質管理と見える余地があるため、品質管理基準や対策を少しでも緩和する必要があると考えられ、このことに関してさらなる検討が欲しい。また、床スラブの最適散水量と関連して実際の現場における適用可能性について検証することが次段階の課題と考えられる。なお、壁体の打重ね面の品質評価法として透気性状と吸水性状などの非破壊検査結果の相互関係をより明確にし、コールドジョイントに対する品質管理及び評価基準をより論理的に立てることが残された状況である。最後に人工軽量骨材の自己養生効果に関しては、コンクリート内部の水分量、細孔構造、結合水率、水和物をより詳しく検討し定量的に提示する必要があると考えられる。前述のように残された課題に関しては、今後の研究を通じてさらに検討を進めるとともに、暑中環境におけるコンクリートの性状予測技法及び現場品質管理技術を確立することに少しでも役に立ちたいと考える。