

## 改良型の高炉セメントC 種を用いたコンクリートの 土木構造物への適用に向けた研究

橋本, 学

<https://doi.org/10.15017/2534436>

---

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学) , 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

改良型の高炉セメント C 種を用いた  
コンクリートの土木構造物への適用  
に向けた研究



九州大学大学院工学府 建設システム工学専攻

橋 本 学

MANABU HASHIMOTO



# 目 次

<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 研究の目的および位置付け .....	3
1.3 本論文の構成 .....	4
1.4 用語の定義 .....	6
<b>第 2 章 既往の研究</b> .....	9
2.1 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの変遷 .....	9
2.2 高炉スラグ微粉末の特長 .....	13
2.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに関する研究 .....	16
2.3.1 フレッシュコンクリートの性質 .....	17
2.3.2 コンクリートの断熱温度上昇 .....	18
2.3.3 強度特性 .....	19
2.3.4 空隙特性 .....	20
2.3.5 収縮特性 .....	21
2.3.6 水密性 .....	22
2.3.7 中性化 .....	23
2.3.8 遮塩性 .....	26
2.3.9 コンクリート中の鉄筋の防食性 .....	27
2.3.10 ASR .....	28

2.4 改良型の高炉セメント C 種に関する先導研究	30
2.4.1 セメントの組成に関する研究	30
2.4.2 化学混和剤に関する研究	32
2.4.3 セッコウに関する研究	34
2.5 まとめ	37

### 第 3 章 改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートのフレッシュ性

状態および発熱特性に関する研究	45
3.1 はじめに	45
3.2 改良型の高炉セメント C 種専用の混和剤を用いたフレッシュコンクリートの性状	47
3.2.1 専用混和剤と汎用混和剤との比較	47
(1) 使用材料	47
(2) スランプおよび空気量の経時変化	49
(3) コンクリートのブリーディング特性	51
3.2.2 セメント中に含まれる SO <sub>3</sub> 量の違いが専用混和剤を用いたコンクリートのフレッシュ性状に与える影響	52
3.2.3 専用混和剤を用いた改良型の高炉セメント C 種と汎用混和剤を用いた高炉セメント B 種とのフレッシュコンクリートの性状比較	55
3.3 改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの発熱特性	61
3.3.1 熱膨張係数	61
3.3.2 断熱温度上昇量	62
3.4 まとめ	64

<b>第 4 章 改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの強度特性および耐久性に関する研究</b>	67
4.1 はじめに	67
4.2 改良型の高炉セメント C 種の強度特性	68
4.2.1 高炉セメント C 種との比較	68
4.2.2 高炉セメント B 種との比較	74
4.3 中性化に関する検討	76
4.3.1 促進中性化試験	76
4.3.2 水分浸透速度係数	77
4.4 41 年経過した高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの長期耐久性に関する検討	79
4.4.1 実験概要	79
(1) 暴露試験概要	79
(2) 測定項目および方法	81
4.4.2 実験結果および考察	83
(1) 外観調査	83
(2) 力学的特性	84
(3) 中性化の進行に関する考察	85
(4) 中性化進行に伴うセメント硬化体の物理的特性の変化	88
(5) 中性化の進行に伴うセメント水和物の変質	91
4.5 まとめ	94
<b>第 5 章 実規模試験体によるコンクリートの施工性ならびに各種物性の検証</b>	97

5.1 はじめに	97
5.2 施工性に関する実験Ⅰ（冬期）	98
5.2.1 使用材料およびコンクリートの配合	98
5.2.2 施工性に関する実験Ⅰの概要	99
5.2.3 施工性に関する実験Ⅰの結果	101
5.2.4 スランプ 8cm の改良 BC 配合の施工性能に関する考察	102
5.2.5 試験体の表面状況および表層の透気性	104
5.3 施工性に関する実験Ⅱ（夏期）	106
5.3.1 施工性能を改善した改良 BC 配合による施工性に関する実験	106
5.3.2 使用材料およびコンクリートの配合	106
5.3.3 試験体の概要および施工方法	107
5.3.4 試験結果および施工状況	107
5.4 冬期および夏期における改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの硬化性状	111
5.4.1 実規模試験体の概要	111
5.4.2 試験項目	112
5.4.3 圧縮強度	114
5.4.4 細孔径分布	118
5.5 夏期および冬期における改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの発熱特性	121
5.5.1 発熱特性および熱膨張係数試験の概要	121
5.5.2 発熱性状の評価方法	121
5.5.3 発熱特性の評価	124
5.5.4 熱膨張係数	125

5.5.5 温度応力解析概要	126
5.5.6 温度ひび割れに関する評価	127
5.6 まとめ	129
<b>第6章 実施工による施工性ならびに温度ひび割れの抑制効果の検証</b>	<b>133</b>
6.1 はじめに	133
6.2 改良型の高炉セメントC種の適用に至った経緯	133
6.3 室内試験による配合選定	135
6.3.1 実験概要	135
6.3.2 実験結果	136
6.4 実機ミキサによる練混ぜおよび実施工	139
6.4.1 南側（標準期）の施工実績	140
6.4.2 北側（夏期）の施工実績	142
6.4.3 強度特性	146
6.5 温度ひび割れの評価	147
6.5.1 断熱温度上昇式の算出	147
6.5.2 ひずみの比較およびひび割れ指数による温度ひび割れの評価	149
6.6 まとめ	152
<b>第7章 環境影響評価について</b>	<b>155</b>
7.1 環境影響評価に関する基本的な考え方	155
7.2 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのCO <sub>2</sub> 削減量	157
7.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの環境負荷低減率の算定	158
7.3.1 改良型の高炉セメントC種のエネルギー原単位の試算	158



7.3.2 改良型の高炉セメント C 種の市場規模の試算および環境負荷低減効果	159
7.3.3 CO <sub>2</sub> 削減効果および環境負荷低減効果	160
7.3.4 高炉スラグ微粉末の市場規模および供給体制	161
7.4 高炉セメント利用拡大のための施策	163
7.4.1 国・地方公共団体・民間等の取組み	163
(1) グリーン購入法における高炉セメントの特定調達品目としての指定	163
(2) 地球温暖化対策における混合セメントの使用促進	163
7.4.2 土木分野での取組み	164
7.4.3 建築分野での取組み	165
7.5 まとめ	167
<b>第 8 章 結論</b>	<b>169</b>
8.1 本研究のまとめ	169
8.2 今後の課題	176
8.2.1 技術的課題および必要となる取組み	176
8.2.2 施策・仕様等の制度上の課題および必要となる取組み	176

## 謝辞

# 第 1 章

## 序論



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

コンクリートは日々の暮らしと社会経済活動を支える様々なインフラ整備に欠かすことができない基幹材料であるが、残念なことに「自然」や「環境」とは相容れないものと認識されることも少なくない。現実には産業副産物・廃棄物がセメント製造の原材料や燃料等として多量に利用されており、そのリサイクル率は多くの工業材料の中で群を抜いている。我が国でセメントを1t製造する際には産業副産物や廃棄物が450kg以上も使われるなど、コンクリートの環境への寄与は非常に大きい。一方で、深刻化する地球温暖化への問題に対応するため、更なるCO<sub>2</sub>の削減が先進各国に求められている。その取組みの一環として地球温暖化対策の新たな国際的な枠組である「パリ協定」(2015年合意)や、パリ協定で合意した各国の目標値を実現に向けた具体的な手法を定めるための国際会議「COP24」(2018年実施)にて議論が進められている最中である。我が国においても様々な取組みが行われているが、全産業の排出量の約4%を占めるセメント製造時のCO<sub>2</sub>をさらに削減することが課題と考えられている。

セメントに由来するCO<sub>2</sub>を削減する手段の一つとして高炉スラグ微粉末等の副産物の利用促進が挙げられる。高炉スラグ微粉末は製鉄所から副産物として生成され、原料からのCO<sub>2</sub>の排出がなく、ポルトランドセメントに混合することでほぼ全量がCO<sub>2</sub>削減に寄与する。高炉スラグ微粉末に関しては現在のところ、高炉スラグ微粉末を40%程度含む高炉セメントB種が広く市販され、使用されている。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、中性化が大きくなるといった課題があるものの、水和熱による温度上昇の抑制、ASR(アルカリシリカ反応)の抑制、海水や硫酸塩に対する化学抵抗性の向上、塩化物イオンや酸素の浸透に対する抵抗性に優れるといった特長を有する。CO<sub>2</sub>削減の観点から、さらに高

高炉スラグ微粉末の含有率（分量）を高めた高炉セメント C 種を使用することが望まれる。しかし、高炉セメント C 種を用いたコンクリートは、高炉スラグ微粉末の含有率が多くなることでコンクリート中の水酸化カルシウム（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）が減少し、中性化が大きくなることはさることながら、スランプロスが大きいこと、ブリーディングが多くなることや低温時において初期強度が低いこと、自己収縮や乾燥収縮といった収縮が大きくなるなどの課題があり、現状ではほとんど使用されていない。最近では、高炉セメント C 種を用いたコンクリート特有のこれらの課題に対し、セメント中の  $\text{SO}_3$  量を増やすこと [1.1] や専用の化学混和剤 [1.2] を用いること等によって、高炉セメント C 種が持つ課題を克服した「改良型の高炉セメント C 種」の開発を進めており [1.3]、建築分野での実構造物への適用実績 [1.4] も増えつつある。また、土木学会および建築学会から高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末に関する指針 [1.5]、[1.6] が刊行され、土木、建築の両分野において高炉スラグ微粉末を積極的に利用する体制が整備され始めている。このような背景のもと低炭素社会の実現に向け、将来的には、現状において土木構造物で汎用的に用いられている高炉セメント B 種から高炉セメント C 種へ徐々にではあるが移行していくものと考えられる。そうした場合に、高炉セメント C 種を用いたコンクリートに関する各種物性を明らかにすることは重要であり、とくに、単位水量が少なく、スランプ 12cm 程度の土木用の構造物に適したコンクリートの配合に関する知見は少なく、それら各種物性ならびに実施工での施工性、実部材での強度特性、内部温度、ひび割れ評価に関するデータを明らかにすることが求められている。

## 1.2 研究の目的および位置付け

1.1 で述べたように、高炉セメント C 種を用いたコンクリートのうち、とくに、単位水量が少なく、スランプが 12cm 程度の土木用の構造物に適したコンクリートに関する各種物性を明らかにすることが求められている。

そこで本研究では高炉セメント C 種を実用化するために、初期強度や収縮特性を改善した「改良型の高炉セメント C 種」を用いるとともに、単位水量が少なく、スランプが 12cm 程度の土木構造物用のコンクリートの配合とした場合においても、経時によるスランプロス等が生じることなく、良好なフレッシュ性状が確保できるような高炉セメント C 種専用の化学混和剤を用いた。それら材料を用いたコンクリートの配合を選定し、フレッシュ性状および硬化物性のうち強度、耐久性といった各種物性を明らかにした。また、実構造物を見据えた実規模試験体による実大施工実験によりコンクリートの施工性の把握ならびに試験体よりコア供試体等を採取し、各種物性の検証を行った。さらには、実際に海洋構造物に適用し、温度ひび割れ抑制効果に関する検証を行った。これらの得られた知見をもとに、環境影響評価に関する検証を行った。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を図-1.1に示す。本論文は、第1章から第8章までの全8章で構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、序論として本研究の背景および目的を述べた。

第2章では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの既往の研究について取りまとめるとともに、改良型の高炉セメントC種に至るまでの先導研究に関する内容について、さらには、高炉セメントC種専用の混和剤に関する検討について整理した。

第3章では、改良型の高炉セメントC種および高炉セメントC種専用の混和剤を用いて、土木用の構造物に適したコンクリートの配合を選定するとともに、それらの配合におけるコンクリートのフレッシュ性状および発熱特性について実験的に検討した。

第4章では、改良型の高炉セメントC種を用いた土木構造物に適したコンクリートの配合をもとに、中性化抵抗性、収縮特性、水の浸透に対する抵抗性等を求めた。さらに、41年間暴露した供試体の化学組成等を調査し、長期耐久性に関する検証を行った。

第5章では、ボックスカルバートの側壁部を模擬した部材において改良型の高炉セメントC種を用いた土木用コンクリートによる実大の施工実験を行った。施工実験では施工性を確認し、試験体から採取したコア供試体より圧縮強度等の各種物性を明らかにするとともに、実構造物への適用性について検証した。

第6章では、海洋構造物を対象として、実構造物に改良型の高炉セメントC種を用いたコンクリートを適用し、フレッシュ性状および実際の中心温度およびひずみのデータを計測した結果を用いて、温度ひび割れ抑制効果の検証を行った。

第7章では、本研究で得られた知見をもとに、将来的に汎用セメントとして利用されることを想定して、CO<sub>2</sub>削減効果、環境負荷低減効果を算出し、環境影響評価に関して検証した。

第 8 章では、本研究で得られた知見を取りまとめ、総括するとともに、今後の課題について述べた。

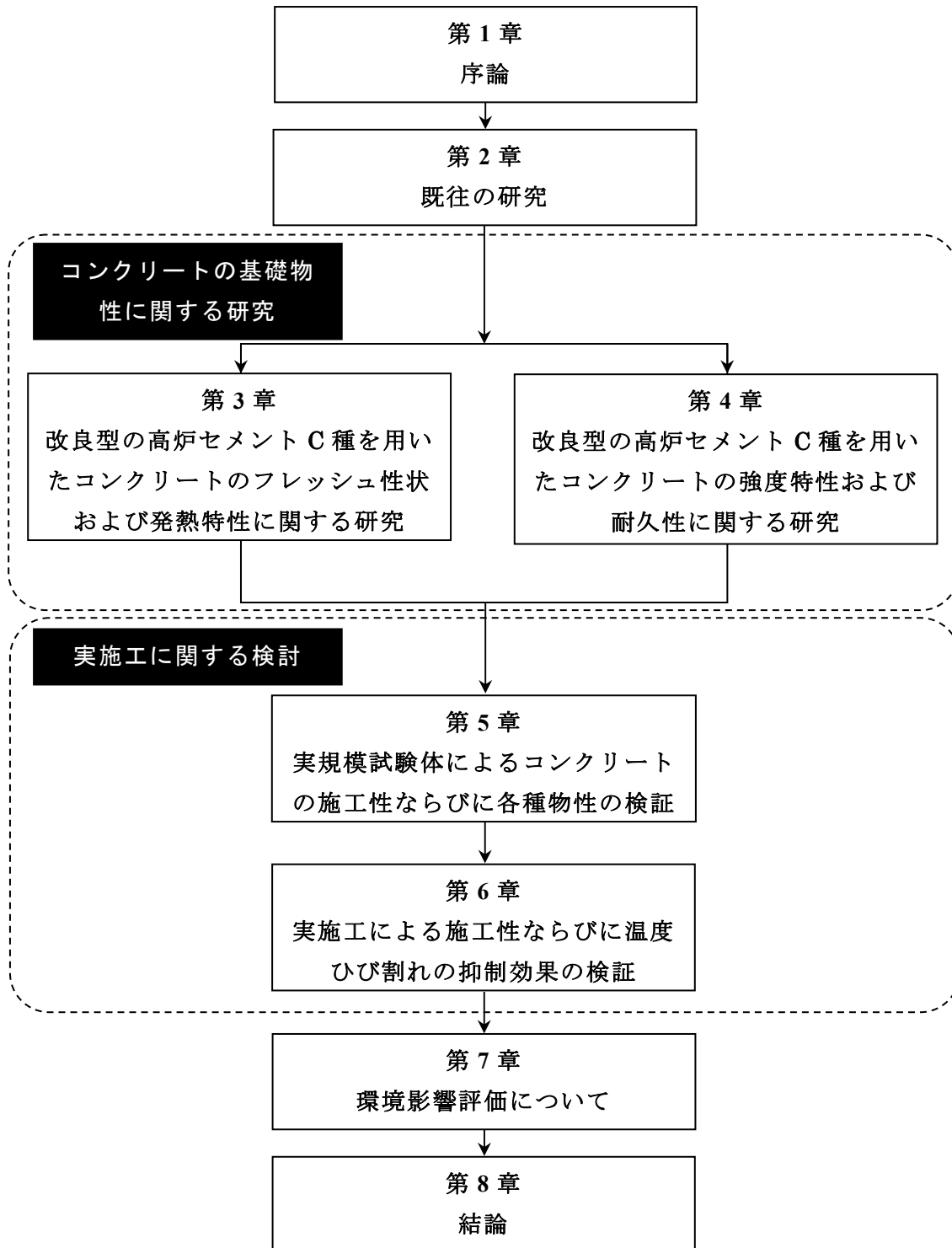


図-1.1 本論文の構成



## 1.4 用語の定義

本研究では、用語を次のように定義し、これら以外については、原則として、JIS、土木学会コンクリート標準示方書等による定義に従うものとした。

**高炉スラグ微粉末**：溶鉱炉で銑鉄と同時に生成する熔融状態の高炉スラグを水によって急冷した後、これを乾燥・粉砕したもの、またはこれに少量のセッコウを添加したもの。

**置換率**：混和材として用いる高炉スラグ微粉末の質量を、結合材の質量で除した値を百分率で表したもの。とくにことわりのない限り、結合材はポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の質量の和とする。

**分量**：高炉スラグを製造の過程で予め混合したセメントについて、セメント中に含まれる高炉スラグ質量を、セメントの質量で除した値を百分率で表したもの。

**粉末度**：JIS A 6206 の試験方法によって測定された高炉スラグ微粉末の細かさ。比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) で表す。

### 【参考文献】

- [1.1] 坂井悦郎, 安齋剛史, 新 大軌, 池尾陽作：初期水和性状を考慮した高炉スラグ高含有セメントの材料設計, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.20-26, 2011
- [1.2] 新 大軌, 玉木伸二, 宮内雅浩, 坂井悦郎：分子構造の異なる高分子系分散剤を添加した高炉セメントの流動特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.28-32, 2012
- [1.3] 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉渕 清, 木之下光男, 釜野博臣：エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム：コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010.9

- [1.4] 辻大二郎，岩清水隆，小島正朗，玉木伸二，井上和政，齊藤和秀，米澤敏男，植木康知：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎躯体への適用，日本建築学会学術講演梗概集，pp.539-540，2015.9
- [1.5] 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，コンクリートライブラリー151，2018.9
- [1.6] 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説，2017



## 第 2 章

### 既往の研究



## 第 2 章 既往の研究

### 2.1 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの変遷


高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの変遷について、「高炉セメント百年史」（鉄鋼スラグ協会）から引用・加筆し、以下に述べる。

高炉セメントは、クリンカー、高炉水砕スラグおよびセッコウの組合せであるが、高炉セメントの開発当初からこの組合せが使用されていたわけではない。B.Belider（独）は、1739年に鉄鋼スラグと消石灰でモルタルを製造した。水砕スラグの技術は確立されておらず、高炉徐冷スラグと消石灰の組合せに近いと考えられる。このようにして「消石灰スラグセメント」が誕生した。また、A.J.Loriot（仏）は、1774年に「ロリオールモルタル」と呼ばれる消石灰スラグ系の水硬性防水モルタルを製造している。その後、1870年代には、消石灰スラグセメントが英・独・仏で盛んに生産されるようになり、1880年代にはドイツで約60万t程度が生産されたと記録されている。この消石灰スラグセメントは、遅硬性であること、十分な水の供給がなければ性能を発揮できなかったことから、1900年前後に衰退していった。1830年にはJ.B.Neilson（英）によって熱風の高炉吹込み法と、石灰石を使用して塩基性スラグとする技術が確立された。この方法では、熔融状態の鉄と高炉スラグを密度差で効率よく分離できるようになっただけでなく、高炉スラグの反応性が高く、良質なものを生成することができるようになった。また、1853年にはCunningham（英）が、高炉スラグを大量の水を使用して冷却・破碎する水砕スラグを製造した。さらに、1862年にはE.Langen（独）により水砕スラグの潜在水硬性が発見された。これらの開発により、現在の水砕スラグに近いものが製造される技術が確立した。

現在のようなクリンカーと高炉スラグ微粉末の組合せによる高炉セメントは、1882年にG.Prussing（独）がVorwoleセメント工場生産を始めた。このときの配合割合は、クリン

カー70%と高炉スラグ 30%と記録されている。その後、1901年に「鉄ポルトランドセメント」と命名され、1909年に規格化された(現在の欧州ポルトランド高炉セメント規格 EN 197 CEM II : 高炉スラグの分量 6~35%に相当)。さらに、P.Prussing (独) が、高炉スラグの分量が 60~70%の高炉セメントを 1907年に生産し、1917年に規格化された。この高炉セメントが、現在日本で使用されている高炉セメントの原型となっている(現在の欧州高炉セメント規格 EN 197 CEM III/B : 高炉スラグの分量 66~80%に相当)。水砕スラグの研究はこの間も続けられ、1902年には H.Passow (独) によって、スラグの潜在水硬性には、アルカリによる刺激が必要なことが証明された。次いで、1908年には H.Kuhl (独) によって、セッコウなどの硫酸塩による刺激によっても、潜在水硬性を有することが発見された。この時期、日本は製鉄技術やスラグの利用技術等をドイツから導入しており、こうした知見が、日本の高炉セメント開発に大きな影響を与えたものと考えられる。

日本における高炉セメントの歴史は、1901年(明治34年)に官営八幡製鐵所(現日本製鐵)が創業し、アジア初の銑鋼一貫製鐵所が稼働したと同時に、高炉スラグ微粉末も製造されるようになった。高炉スラグ微粉末の当時の用途は、高炉セメントの他に建築用煉瓦や工場用地の埋立材料等に利用されていた。当時の高炉セメントは、高炉スラグの分量が 60~70%であり、P.Prussing (独) の開発した高炉セメント(Hochofenzement)が大きな影響を与えていたものと考えられる。また、当初はクリンカーを購入し、水砕スラグと混合粉砕して製造された。高炉セメント専門工場として、クリンカーからの一貫生産体制が整ったのは1918年(大正7年)である。八幡製鐵所では、高炉スラグ微粉末の有効利用を図るために、高炉セメントの製造を自らで行っていたが、その後はセメント会社も、製鐵会社から高炉スラグ微粉末の供給を受け、高炉セメントの製造を行うようになった。

太平洋戦争に突入すると物資の不足によりセメントの生産量は減少し、品質も低下した。高炉セメントは高炉スラグ微粉末を混合するため、少量のクリンカーで製造することができることから、 図-2.1 に示すように生産比率が急激に高くなった。また、セメント不足

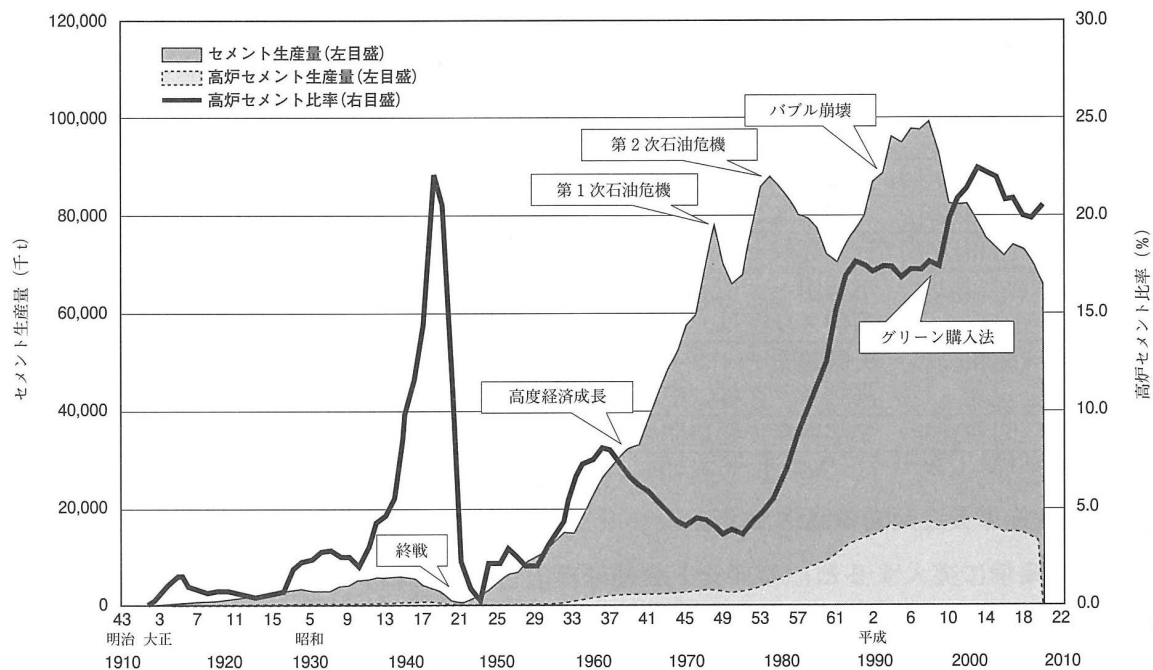


図-2.1 全国のセメント生産量と高炉セメント比率の推移 [2.1]

を補うため、高炉スラグ微粉末を主原料として様々なアルカリ刺激材を混合し、クリンカーをほとんど使用しない「雑用セメント」や「石灰スラグセメント」として規格化された。これらのセメントは品質が低かったが、終戦後も10年ほど使用され、高炉セメントと混同されることもあった。このため、高炉セメントのイメージを低下させ、高炉セメント普及の阻害要因の一つとなった。戦後の復興工事や高度経済成長の中の建設ラッシュによりセメントの需要が高まり、次第に高炉セメントも汎用品として認識されるようになった。

1980年代より、高炉スラグ微粉末の製造・販売体制が整備され始め、使用実績も徐々に増加してきたことから、土木学会では、1986年（昭和61年）に土木学会規準「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格（案）」を制定し、1988年（昭和63年）にはコンクリートライブラリー63「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案）」が定められた。その後、製造方法に改良が加えられ、高粉末度の製品の製造が可能となるなど、使用実績の増加とともに高炉スラグ微粉末の品質や特性が明確となったこと等を背景として、1995年（平成7年）には、高炉スラグ微粉末のJISとしてJIS A 6206「コンクリート用高



炉スラグ微粉末」が制定された。JIS の制定にあわせて、1996 年（平成 8 年）には、コンクリートライブラリー86「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」が制定された。さらに、2008 年（平成 20 年）に JIS A 6206 の改正が行われたこと、また、最近では、環境負荷低減の観点等から高炉スラグ微粉末の使用量が、高炉セメント C 種の範疇に入るコンクリートの実用化に関する研究も進んでおり、JIS の改正に伴う内容の更新と最新の知見を反映させた内容として、コンクリートライブラリー151「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」が 2018 年（平成 30 年）に制定された。

## 2.2 高炉スラグ微粉末の特長

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、使用する高炉スラグ微粉末の種類と置換率に応じて、フレッシュコンクリートの性状、水和・発熱性状、強度発現特性、劣化および物質の透過に対する抵抗性等が異なり、使用方法によって多様な性能を発揮することができる。このことは、コンクリートの混和材として高炉スラグ微粉末を使用することの利点である一方、使用する高炉スラグ微粉末の種類やその置換率の選定が適切でなければ、所要の品質が得られないことになりかねない。高炉スラグ微粉末の種類により程度の差はあるものの、高炉スラグ微粉末を使用することにより①水和熱による温度上昇の抑制、②ASR（アルカリシリカ反応）の抑制、③硫酸塩や海水に対する化学抵抗性の向上、④塩化物イオンや酸素および水の浸透に対する抵抗性に優れているため、鋼材腐食に対する抵抗性が向上するなどの効果が期待される。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの室内試験結果によると、中性化速度は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて大きい。しかしながら、高炉セメントを用いて入念に施工された水結合材比が65%以下のコンクリート構造物に関する調査結果については、後述するように、50年程度経過した場合でも、中性化深さは20mmを超すものがほとんどないことも事実である。したがって、コンクリートの中性化については、我が国の気象条件下において、置換率が50%程度以下で、水結合材比が55%程度以下の場合に、コンクリートの初期養生を十分に行えれば、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同様に取り扱うことができる。なお、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、ポルトランドセメントを用いた場合に比べて湿潤養生期間を長く取る必要があり、湿潤養生が十分でないとき期待した効果が得られないばかりか、コンクリートの品質を低下させることにもなりかねないので、施工の際には留意が必要である。

高炉スラグ微粉末の品質は、粉末度やセッコウ添加の有無などにより異なる。JIS A 6206では、高炉スラグ微粉末は表-2.1に示すように、比表面積の大きさに応じて、高炉スラ

表-2.1 高炉スラグ微粉末の種類と比表面積

種類	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
高炉スラグ微粉末 3000	2 750 以上 3 500 未満
高炉スラグ微粉末 4000	3 500 以上 5 000 未満
高炉スラグ微粉末 6000	5 000 以上 7 000 未満
高炉スラグ微粉末 8000	7 000 以上 10 000 未満

表-2.2 高炉スラグ微粉末の品質規定 (JIS A 6206)

品質		高炉スラグ 微粉末 3000	高炉スラグ 微粉末 4000	高炉スラグ 微粉末 6000	高炉スラグ 微粉末 8000
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積	cm <sup>2</sup> /g	2750 以上	3500 以上	5000 以上	7000 以上
		3500 未満	3500 未満	7000 未満	10000 未満
活性度指数 %	材齢 7 日	—	55 以上	75 以上	95 以上
	材齢 28 日	60 以上	75 以上	95 以上	105 以上
	材齢 91 日	80 以上	95 以上	—	—
フロー値比	%	95 以上	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウム	%	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下
三酸化硫黄	%	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下
強熱減量	%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
塩化物イオン	%	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下

グ微粉末 3000 (比表面積 2750 以上 3500cm<sup>2</sup>/g 未満), 高炉スラグ微粉末 4000 (比表面積 3500 以上 5000cm<sup>2</sup>/g 未満), 高炉スラグ微粉末 6000 (比表面積 5000 以上 7000cm<sup>2</sup>/g 未満) および高炉スラグ微粉末 8000 (比表面積 7000 以上 10000cm<sup>2</sup>/g 未満) の 4 種類が規定されている。なお, 高炉スラグ微粉末 8000 は, コンクリート用の混和材として用いられていない。また, 表-2.2 の高炉スラグ微粉末の品質規定に示されるように, 高炉スラグ微粉末にセッコウを添加する場合は, 三酸化硫黄 (SO<sub>3</sub>) 量に換算して 4.0%以下と規定されている。高炉スラグ微粉末 3000 および高炉スラグ微粉末 4000 は, 置換率や組み合わせるセメントの種類を変えることにより, コンクリートの温度上昇の抑制に効果がある。高炉スラグ微粉末 6000 は, 流動性とブリーディングを含めた材料分離抵抗性に優れ, 初期材齢における強度発現性も改善される。したがって, 初期強度を必要とする場合や高強度コンクリートへの適用, 流動性と材料分離抵抗性がとくに要求される高流動コンクリートにも適し

表-2.3 高炉セメントの品質 (JIS R 5211)

セメントの種類		高炉セメント		
種類		A種	B種	C種
比表面積	cm <sup>2</sup> /g	≥ 3000	≥ 3000	≥ 3000
凝結	始発 (min)	≥ 60	≥ 60	≥ 60
	終結 (h)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
安定性	パット法	良	良	良
	ルシャテリエ法 (mm)	10 以下	10 以下	10 以下
圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )	3 日	≥ 12.5	≥ 10.0	≥ 7.5
	7 日	≥ 22.5	≥ 17.5	≥ 15.0
	28 日	≥ 42.5	≥ 42.5	≥ 40.0
化学成分	酸化マグネシウム (%)	≤ 5.0	≤ 6.0	≤ 6.0
	三酸化硫黄 (%)	≤ 3.5	≤ 4.0	≤ 4.5
	強熱減量 (%)	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0
構成	混合材 (質量%)	5 越え 30 以下	30 越え 60 以下	60 越え 70 以下
	少量混合成分 (質量%)	5 以下*		

※クリンカー，セッコウおよび少量混合成分の含量に対する質量 (%) で，主混合材は混合成分に含まれない。

た材料である。本研究で用いた改良型の高炉セメント C 種は，表-2.3 の高炉セメントのうち，高炉セメント C 種に該当するもので，高炉スラグ微粉末には，最も汎用性の高い高炉スラグ微粉末 4000 を使用している。

### 2.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに関する研究

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート研究については、図-2.2 に示すように、1926年（大正15年）に吉田徳次郎先生によって書かれた「高爐セメント混凝土」[2.2]の中で、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの流動性に関する検討や収縮特性、酸に対する抵抗性の検討、鉄筋の腐食に対して長期暴露試験の必要性等が述べられている。また、水セメント比と強度の関係の考え方等は、当時としては斬新で示唆に富んだ指摘であり、これらの考え方は、この論文が発刊されてから90年以上が経過した現在においても最新の研究に通じる内容であると言える。以降、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの特性について述べる。

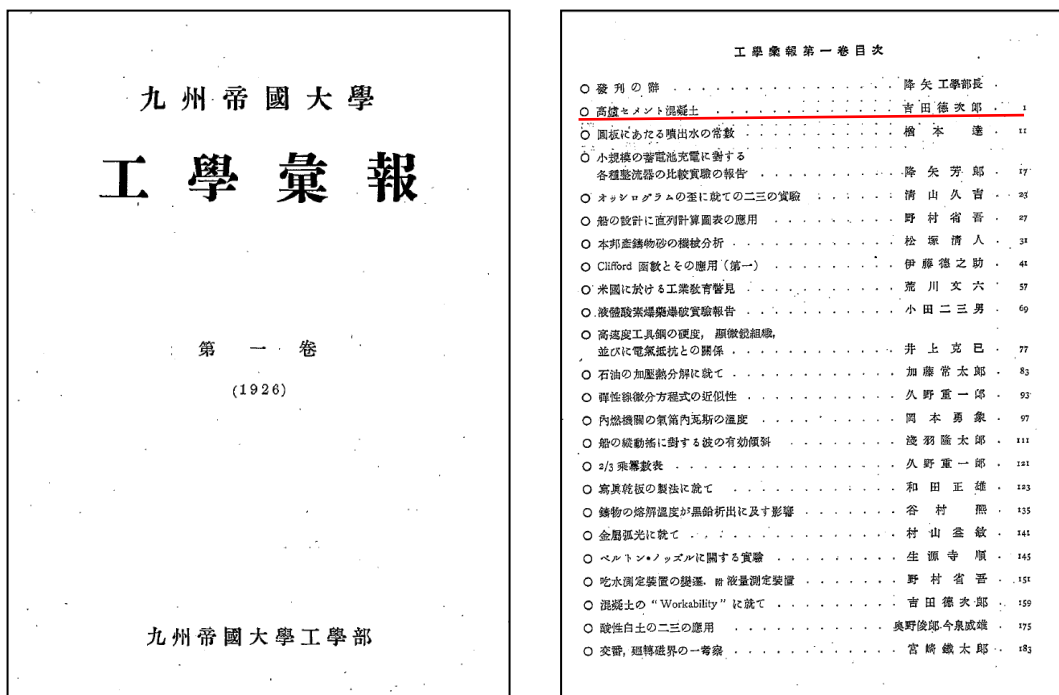


図-2.2 九州帝國大學工學彙報 第一卷 (1926) 表紙および目次

### 2.3.1 フレッシュコンクリートの性質

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの所要のスランプを得るための単位水量は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して、高炉スラグ微粉末の置換率が30%から70%の範囲では、2~5%程度小さくなる傾向を示す [2.3], [2.4]。空気量に関して、所要の空気量を得るために必要な AE 剤の使用量は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて、高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるに従い、使用量も増加する傾向にある [2.4]。ブリーディングについては図-2.3 に示すように、置換率 50~70% の場合、普通ポルトランドセメントに比べて最終のブリーディング率は低減し、置換率が80%および90%になると、早期にブリーディング率は増加するものの終了時間が早くなるため、最終のブリーディング率は普通ポルトランドセメントよりも小さくなる傾向にある [2.5]。凝結時間については、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど凝結時間は遅くなり、置換率が55%の場合、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて、凝結時間が2~3時間程度遅くなる [2.6]。

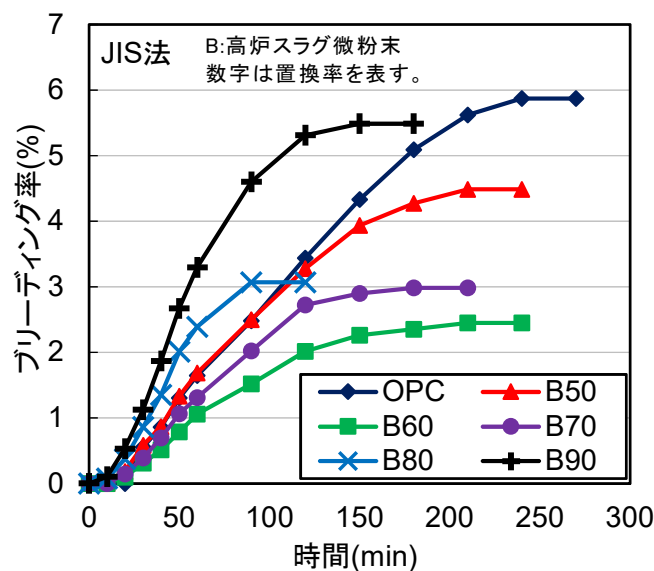


図-2.3 ブリーディング率の経時変化 [2.5]

コンクリートスランブの経時変化については、高炉スラグ微粉末で置換してもほとんど変わらないという知見がある [2.7] 一方で、スランブおよびスランブフローの経時保持性が低下するという報告もある [2.8]。後者の場合では、とくに、練上がり温度 30℃ の場合においてその傾向が顕著となる。

### 2.3.2 コンクリートの断熱温度上昇

単位結合材量が 320kg/m<sup>3</sup> のコンクリートの断熱温度上昇試験結果を図-2.4 に示す [2.9]。高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートの初期の温度上昇速度は、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴って遅くなることが認められるが、置換率が 55% 以下の材齢 3 日以降では、普通ポルトランドセメントを用いた場合の温度上昇量よりも大きくなる傾向にある。これは、結合材中の高炉スラグ微粉末の共存がクリンカー鉱物の水和を促進するためと考えられる。置換率が 70% 程度になると、最終の断熱温度上昇量も普通ポルトランドセメントと同等以下になる [2.6], [2.9], [2.10]。SO<sub>3</sub> (セッコウ) の影響については、図-2.5 に示すように高炉スラグ微粉末中の SO<sub>3</sub> 量が増加することで最終の断熱温度上昇量は低下する傾向を示すが、温度上昇速度の係数  $\gamma$  値は大きくなる [2.11]。

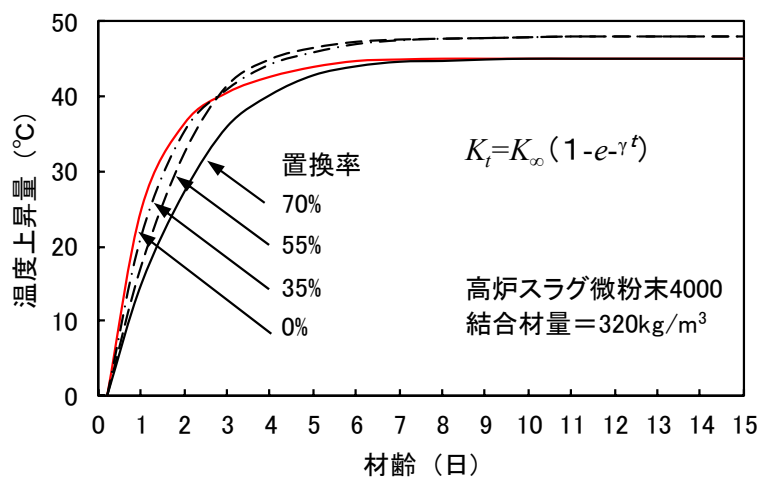


図-2.4 高炉スラグ微粉末の置換率と断熱温度上昇量の関係 [2.7]

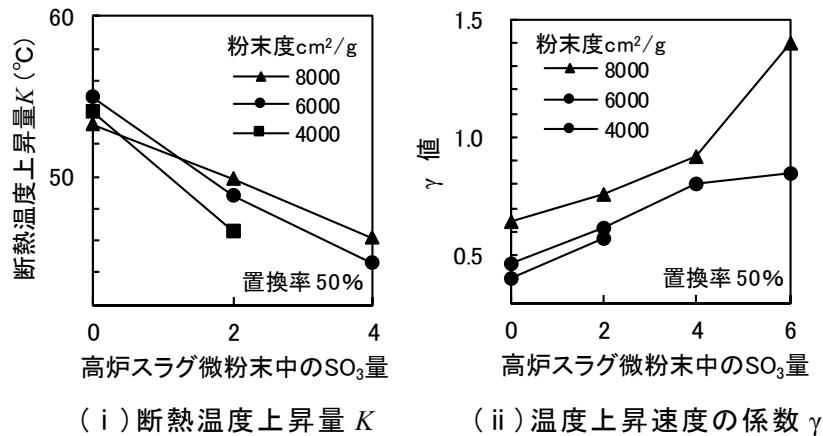


図-2.5 断熱温度上昇量に関する特性値 [2.11]

### 2.3.3 強度特性

圧縮強度について、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従って圧縮強度は小さくなる傾向にある。とくに材齢3日、7日といった若材齢において顕著であるが、材齢の経過に伴い、置換率が35%から70%の範囲のコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の強度発現性を有する。また、材齢91日、1年といった長期材齢においては、高炉スラグ微粉末の増加に伴って圧縮強度が増加することも報告されている [2.3], [2.12], [2.13]。さらに、屋外で水中養生をし続けた場合、材齢1年以降も強度は緩やかに伸び、とくに高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど長期材齢における強度増進の割合が大きいとの報告もある [2.14]。

セッコウの影響について、結合材中にセッコウを添加することでコンクリートの初期強度を若干改善することができるが、長期強度はセッコウの添加量が増加するに従って小さくなる傾向にある。ただし、セッコウの添加率が2~4%程度であれば、長期強度にはとくに影響を及ぼさないことが示されている [2.15], [2.16]。

水分供給の影響について、屋外で水中に暴露された高炉スラグ微粉末の置換率が65%のコンクリートの強度は、初期強度は小さいものの長期強度の増進は大きい [2.14]。一方で、高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートは、脱型直後より乾燥環境に曝されると強度発



現が停滞し、標準養生を行った場合に比べて圧縮強度は60%程度となり、普通ポルトランドセメントよりも乾燥による影響が大きい [2.17]。このように、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、外部からの水分の供給によって反応が長期に渡って継続するため、強度発現性に影響を及ぼす大きな要因となる。

### 2.3.4 空隙特性

高炉スラグ微粉末の置換率とモルタル中の全細孔量との関係を図-2.6 に示す [2.18]。水結合材比 W/B=50%と一定にして、材齢7日および28日にてセッコウのあり、なしでの全細孔量の測定結果を示す。図より、材齢初期では高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど細孔量が大きくなる傾向にあるが、材齢28日では高炉スラグ微粉末の置換率が50%においても細孔量は減少し、密実な硬化体が形成されていると考えられる。セッコウの添加の有無については、全細孔量はセッコウの添加によって若干大きくなる傾向にある。また、図-2.7 より高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて細孔径の小さい空隙が形成される傾向にある [2.19]。

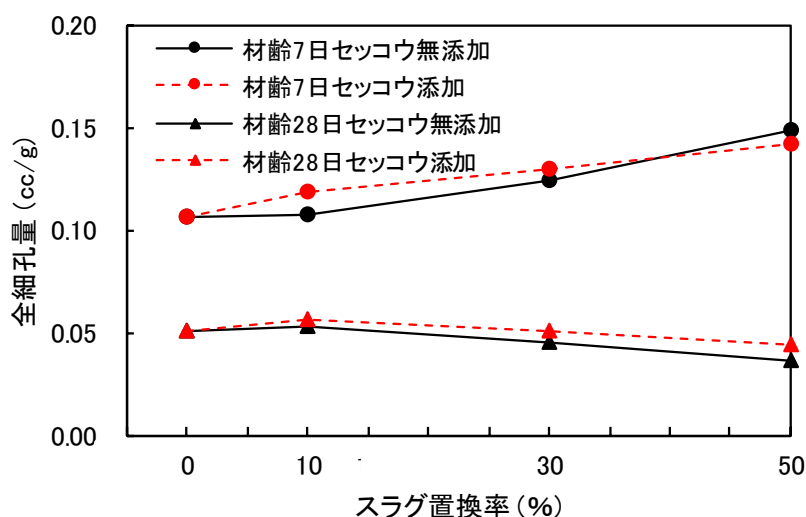


図-2.6 全細孔量と高炉スラグ微粉末の置換率との関係 [2.18]

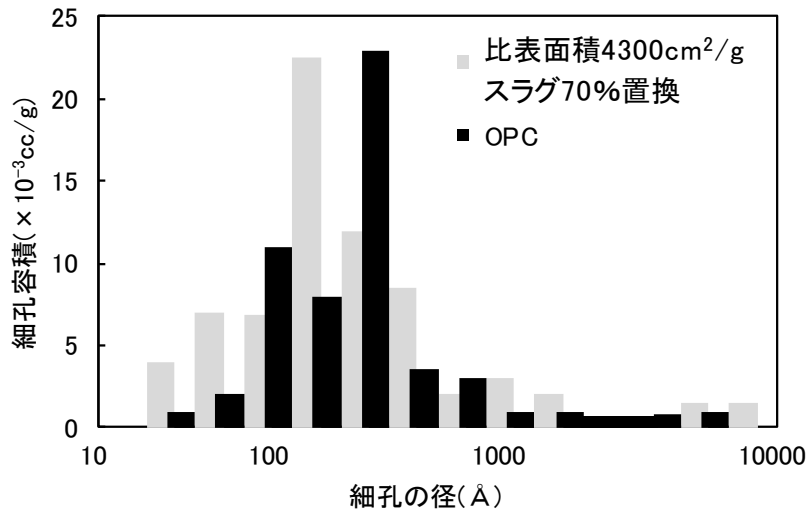
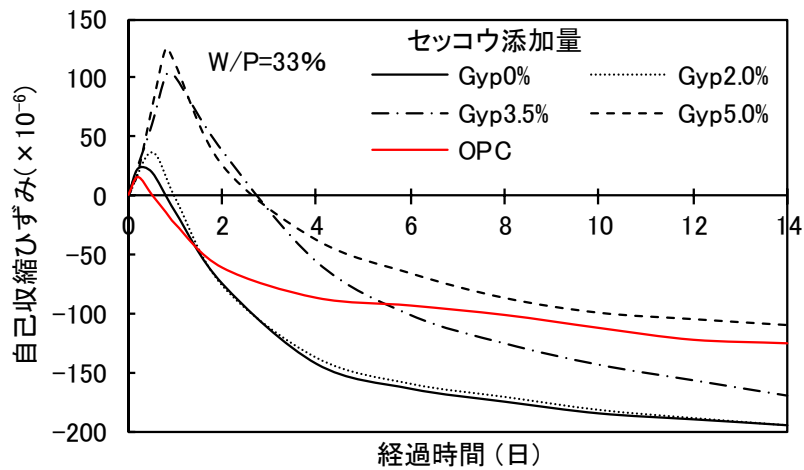


図-2.7 細孔分布の比較 [2.19]

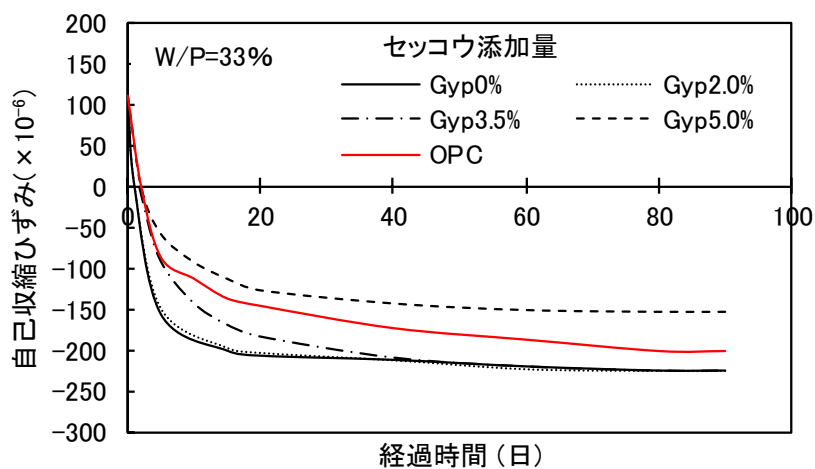
### 2.3.5 収縮特性

乾燥収縮は JIS A 1129 に従った試験において、乾燥材齢が 3 週間程度までの乾燥初期段階における高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮は、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従ってやや増加する傾向にある。それ以降は次第に小さくなり、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同程度になる [2.20]。湿潤養生期間の影響については、28 日間湿潤養生したコンクリートは、7 日間湿潤養生したものと比較して 3 割程度乾燥収縮ひずみが小さくなる結果が得られている [2.21]。これは、湿潤養生と細孔構造との関係によるもので、湿潤養生期間が長いほど細孔構造は小さくなる傾向にある [2.19]。

自己収縮ひずみについて、一般的に、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントの場合と比較して、自己収縮ひずみが大きくなる傾向にある [2.22]。図-2.8 に高炉スラグ微粉末の置換率が 50% のコンクリートのセッコウの添加による自己収縮ひずみと材齢の関係を示す。セッコウの添加量が SO<sub>3</sub> 量換算で 2.0% では、自己収縮の低減効果は認められなかったが、3.5% まで添加量を増やすと材齢 7 日まではセッコウなしと比較して自己収縮ひずみが低減する傾向を示す。さらに、5.0% まで添加量を増やした



( i ) 材齢 14 日まで



( ii ) 材齢 91 日まで

図-2.8 材齢と自己収縮ひずみの関係 [2.23]

場合，長期材齢においても自己収縮の低減効果が認められ，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの場合と比較して小さくなる。ただし，セッコウの添加量が多すぎると，コンクリートの強度低下を引き起こす可能性がある [2.23]。

### 2.3.6 水密性

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの透水係数は，高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従い小さくなる傾向にある [2.19]。高炉スラグ微粉末の置換率が 20%で普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比べて 1/3 程度に，また置換率が 50%以上では 1/10 程度まで低減することができる。この理由として，高炉スラグ微粉末を用いること

で、セメントペースト中の細孔半径の小さな空隙が生じることで説明することができる [2.18], [2.21]。ただし、これは十分に湿潤養生が行われた場合であり、収縮特性において述べたように、十分な水分を得られない場合は粗大な空隙構造となる傾向にあり、水密性の確保が難しい。

### 2.3.7 中性化

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して大きくなる傾向にある。とくに、その結果は促進中性化試験を実施すると顕著に表れる。同一の水結合材比における高炉スラグ微粉末の置換率のみを変化させた場合の中性化速度係数との関係を図-2.9に示す [2.24]。高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従い中性化速度係数が大きくなる傾向にあり、とくに置換率が50%以上の増加の割合が著しいことが分かる。

一方で、実構造物を対象とした中性化調査の結果や実環境下に置かれたコンクリート試験体を対象とした中性化に関する実験結果では、高炉スラグ微粉末の置換率がB種相当以下である場合、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度である結果が示されている [2.25], [2.26], [2.27], [2.28], [2.29]。例えば松田ら [2.25] は、鉄道関連

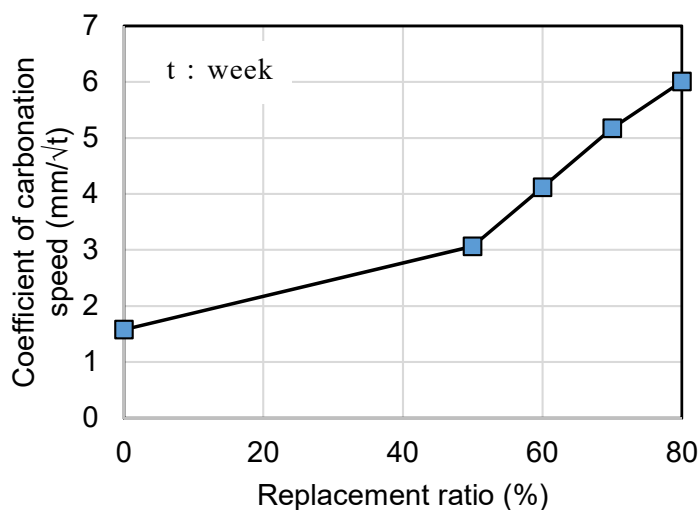


図-2.9 置換率と中性化速度係数の関係 [2.24]

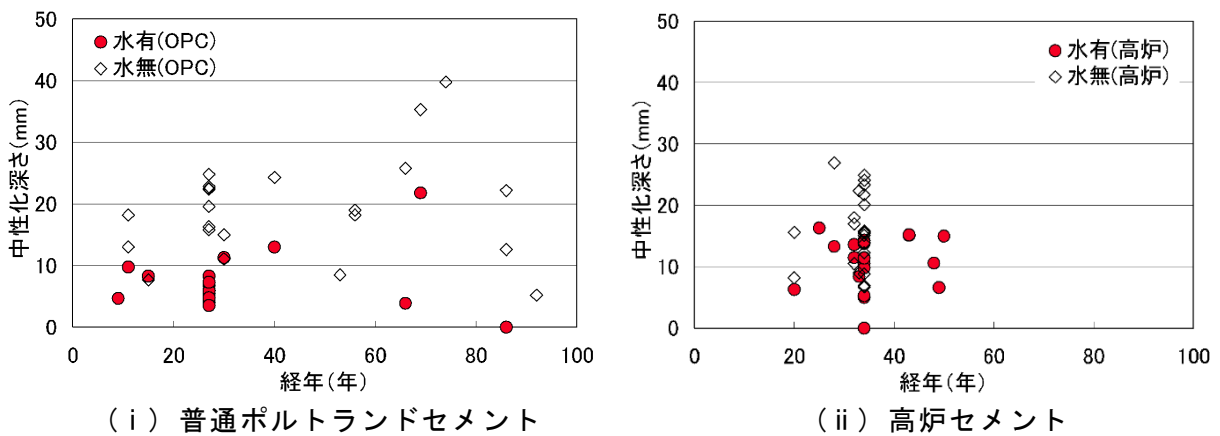


図-2.10 水の影響の有無による比較 (OPC と高炉セメント) [2.25]

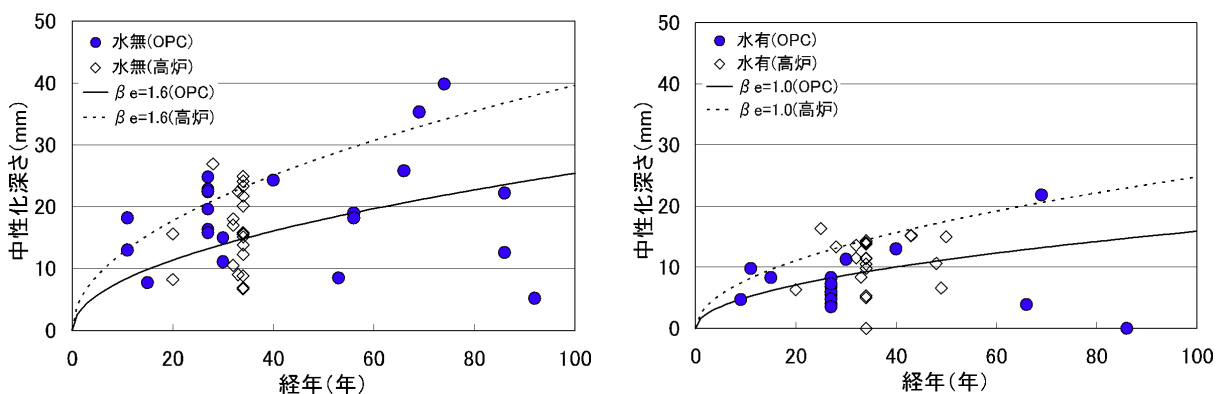


図-2.11 セメント種類による比較 (水の影響の有無) [2.25]

の実構造物を対象に現地調査および実構造物から採取したコア供試体を用いた促進中性化試験を行っている。図-2.10は、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントを用いた実構造物の中性化深さを経年数との関係を示した図であるが、水の影響の有無によって、中性化深さの差が明確に現れていることが分かる。とくに、水の影響を受けた位置では中性化深さが小さく、時間の経過に関わらず高炉セメントを用いたコンクリートであっても15mm程度に留まっている結果が示されている。図-2.11は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと高炉セメントを用いたコンクリートのセメントの中性化深さの実測値を示した結果である。図中には、土木学会の中性化予測式 [2.30] を用いて、 $W/C=55\%$ とした場合の乾燥しやすい環境 ( $\beta e=1.6$ ) と乾燥しにくい環境 ( $\beta e=1.0$ ) における中性化深さの経年変化の算定値が示されている。これらの結果より、普通ポルトランドセメン

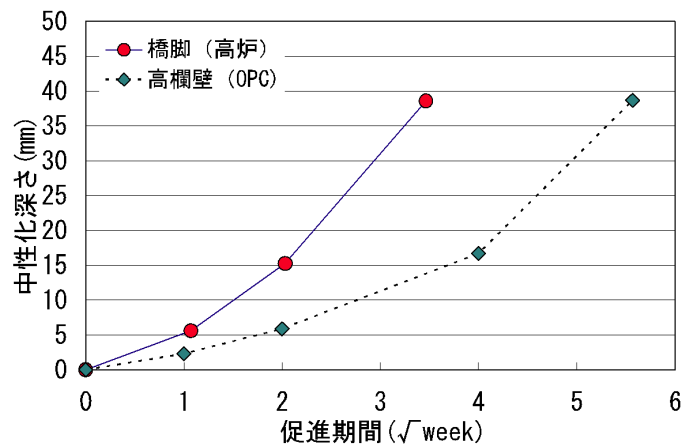


図-2.12 促進中性化試験結果 [2.25]

トを使用したと推定されるコンクリートと、高炉セメントを使用したと推定されるコンクリートの中性化深さには大きな違いが認められず、実環境下の構造物においては、中性化の進行性に差が生じない可能性が示されている。図-2.12は、実構造物より採取したコア試験体による促進中性化試験の結果である。コア供試体を採取した実構造物の中性化深さの実測データは、普通ポルトランドセメントを使用した高欄壁が経年29年、雨水の影響を受ける環境であり、中性化をしていない結果が得られた。また、高炉セメントを使用した橋脚は経年33年、水の影響が少ない環境にあり、中性化深さは20mm程度であった。促進中性化試験の高濃度CO<sub>2</sub>環境下では、高炉セメントを用いたコンクリートコア供試体の中性化速度が大きいことが分かる。土木学会の中性化予測式によれば、高炉セメントを用いた場合、混和材の種類により定まる定数 $k$ を0.7と設定するため、中性化速度係数は大きく算定される。すなわち、促進中性化試験の結果と土木学会式の取扱いは整合するが、実構造物の中性化深さの調査結果では、普通ポルトランドセメントと高炉セメントとの中性化深さに大きな差がみられない結果も得られている[2.25]。このことは、セメント種類を変えた際に、実構造物における中性化の進行が促進中性化試験の結果と定性的に異なる可能性を示唆している。これは、促進中性化試験ではCO<sub>2</sub>濃度が相当に高く常に乾燥状況下で行われるのに対し、実環境下ではCO<sub>2</sub>濃度が低く降雨や湿度の影響を受けるなど、幾つかの相違点があるためと考えられる。

### 2.3.8 遮塩性

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの塩化物イオンの侵入に対する抵抗性は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも高い。普通ポルトランドセメントのセメントペーストとセメントの65%を高炉スラグ微粉末で置換したペーストの塩化物イオンの拡散係数を表-2.4に示す[2.31]。普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べ、高炉スラグ微粉末を用いたものでは塩分浸透深さを1/2~1/3程度に低減することができる。

高炉スラグ微粉末4000を普通ポルトランドセメントに置換して、置換率を変化させた場合のコンクリートを海洋環境に暴露した結果を図-2.13に示す。置換率が大きいほど見掛けの拡散係数は小さくなるが、置換率が40%以上では拡散係数はほとんど同じ値になる傾向が認められる。養生の影響について、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、封緘養生期間を長くしたもののほど塩分浸透深さが小さくなる効果が持続される[2.32]。水中養

表-2.4 セメントペースト (W/B=50%) の塩化物イオン拡散係数 [2.31]

セメントの種類	拡散係数 ( $10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ )
普通ポルトランドセメント	4.47
フライアッシュ (置換率 30%)	1.47
高炉スラグ微粉末 (置換率 65%)	0.41

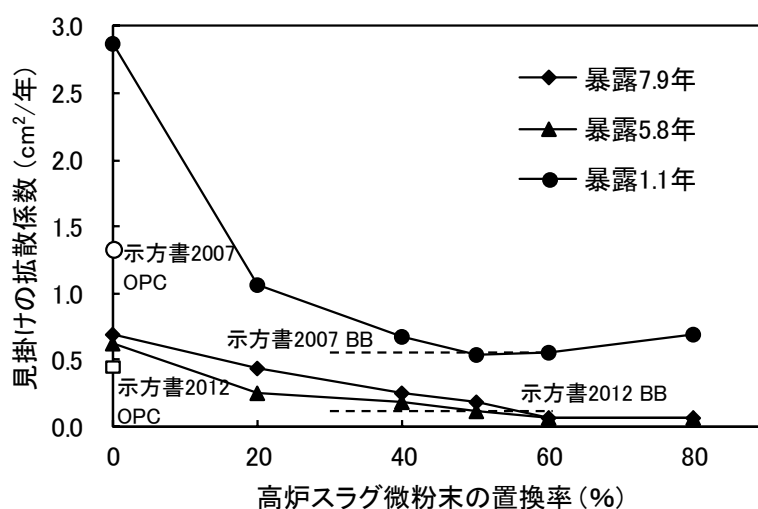
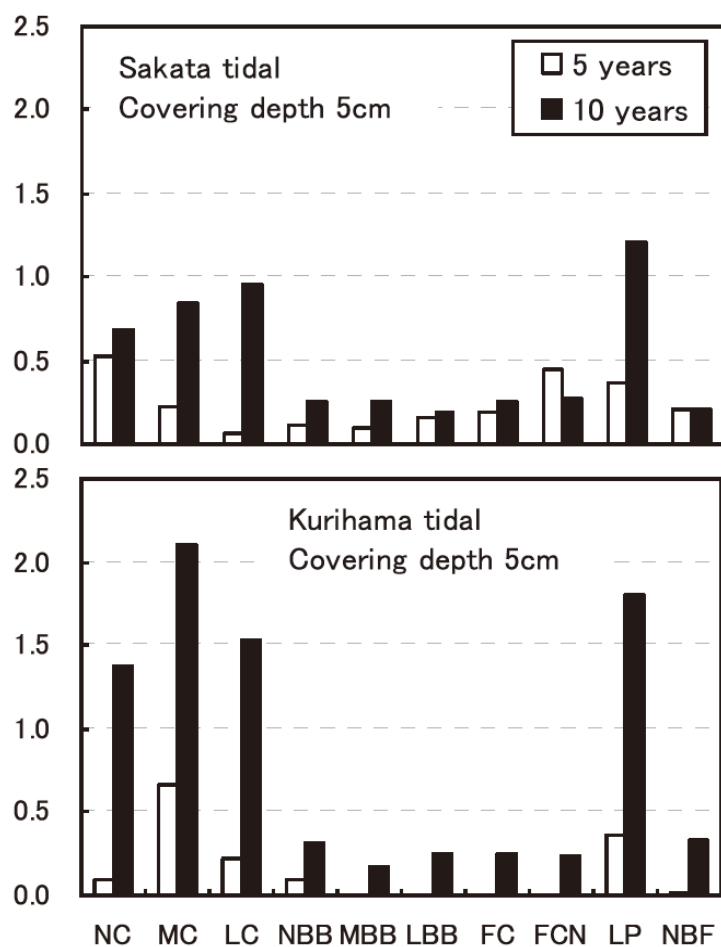


図-2.13 置換率と塩化物イオン拡散係数(海洋暴露) [2.32]

生期間の場合でも封緘養生と同様で、養生期間が長いほど塩化物イオンの浸透深さは小さくなるとの報告がある [2.33]。

### 2.3.9 コンクリート中の鉄筋の防食性

コンクリート中の鉄筋の腐食は水および酸素が十分あり、かつ、不動態が中性化あるいは



- ※ 「NC」：普通ポルトランドセメント
- ※ 「MC」：中庸熱ポルトランドセメント
- ※ 「LC」：低熱ポルトランドセメント
- ※ 「NBB」：NC+高炉スラグ微粉末 4 000（置換率 50%）
- ※ 「MBB」：MC+高炉スラグ微粉末 4 000（置換率 50%）
- ※ 「LBB」：LC+高炉スラグ微粉末 4 000（置換率 50%）
- ※ 「FC」：NC+フライアッシュⅡ種（置換率 30%）
- ※ 「FCN」：NC+フライアッシュⅢ種（置換率 30%）
- ※ 「LP」：NC+石灰石微粉末（置換率 30%）
- ※ 「NBF」：NC+高炉スラグ微粉末 4 000+フライアッシュⅡ種（比率 1：2：1）

図-2.14 各種セメントを使用したコンクリート中の鉄筋質量減少率（感潮帯暴露）  
[2.34]



は塩化物イオンの存在によって破壊された場合に開始および進行する。また、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比べて、水密性は同程度かやや優れ、酸素および塩化物イオンの侵入に対する抵抗性は優れるが、中性化の進行はやや速いという特徴がある。そのため、かぶり小さく、CO<sub>2</sub>濃度が高い環境では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの防食性能は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも劣ることが考えられる。しかしながら、中性化深さがかぶりに対して十分に小さい場合、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの防食性能は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも優れる。とくに、海洋環境では、塩化物イオンの侵入が腐食の主な要因になるので、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートが防食上有利となる。感潮帯に5、10年暴露した水結合材比50%のコンクリート中の鉄筋（かぶり5cm）の質量減少率の測定結果を図-2.14に示す[2.34]。本検討では、各種ポルトランドセメントおよび混合セメントを用いたコンクリートについて検討している。これによると、鉄筋の腐食は暴露5年ではほとんど認められなかったが、10年ではすべての条件で認められた。とくに、ポルトランドセメントおよび石灰石微粉末を混入させたものは5から10年の間における腐食が著しく進行した。ポルトランドセメントおよび石灰石微粉末を混入させたものよりも混合セメントを用いたコンクリートの腐食の進行が少ないのは、混合セメントの場合、コンクリートが緻密になるため、塩化物イオンのコンクリート内部への拡散速度が小さくなり、さらに酸素の侵入を防いだことが理由として考えられる。

### 2.3.10 ASR

天然骨材を用いた場合には、図-2.15に示す例のように、いくつかの骨材とスラグを組み合わせた実験から、ASRの抑制効果が認められる[2.35]。高炉スラグ微粉末には天然骨材に対してもアルカリの希釈効果だけでなく、ASRの抑制効果も認められる。

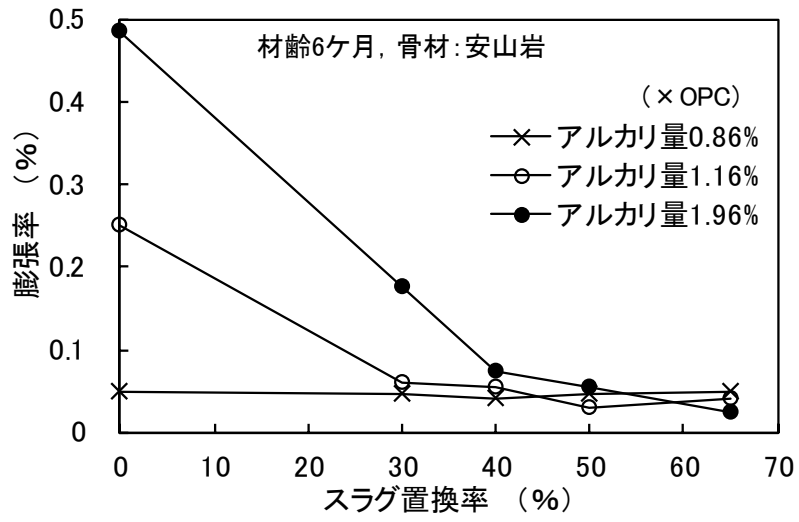


図-2.15 スラグ置換率と膨張率の例 [2.35]

## 2.4 改良型の高炉セメントC種に関する先導研究

### 2.4.1 セメントの組成に関する研究

高炉スラグ高含有セメントの材料設計については、坂井ら [2.36] によって検討が行われている。高炉スラグ微粉末が高含有となった際の初期強度を改善するために、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を添加することを前提として、無水セッコウの添加量、OPC の添加量、高炉スラグ微粉末の粉末度および石灰石微粉末の置換量などを変化させた検討を行っている。その結果、初期水和性状を改善するためには、高炉スラグ高含有セメント中の高炉スラグ微粉末の比表面積  $6000\text{cm}^2/\text{g}$  程度とし、OPC 量は 20～30%程度とするか、高炉スラグ微粉末の比表面積が  $4000\text{cm}^2/\text{g}$  の場合には OPC 量は 30%程度とする必要がある。高炉スラグ微粉末の比表面積が  $4000\text{cm}^2/\text{g}$  で OPC 量が 30%の場合、石灰石微粉末によりセメントの一部を置換することで初期水和性状は改善される。この機構は置換率により異なり、10%置換では微粉末効果により OPC の反応が促進されたものと考えられ、20%置換ではヘミカーボネートなどを生成することによる高炉スラグ微粉末の反応促進が理由として考えられている。とくに、高炉スラグ微粉末の比表面積が  $4000\text{cm}^2/\text{g}$  のものを用いる場合の無水セッコウの添加量は、水和後の無水セッコウの残存量から、高炉スラグ微粉末と無水セッコウの比率を 90:10あるいは 95:5程度とするのが適当であると結論付けている。改良型の高炉セメントC種としてのセメント組成は、上記の研究成果が基礎となっている。

前述の坂井らによる研究で示したセメント組成をもとに、土木構造物用のセメントに関する検討を植木ら [2.37] によって実施している。土木構造物は橋脚等大断面のマスコンクリートとなることから、セメントの水和発熱により部材温度が上昇し、温度ひび割れ抑制を考慮した材料設計が必要となる。土木構造物用のセメントとして最適な組成とするために、普通ポルトランドセメントを 25～35%、高炉スラグ微粉末を 60～70%、無水セッコウを 5%としたセメントを用い、図-2.16 に示す、モルタルの圧縮強度と断熱温度上昇量の関係を求めた [2.37]。高炉スラグ微粉末の粉末度を  $3200\sim 6200\text{cm}^2/\text{g}$  の範囲で変化させ

ると、粉末度の小さい場合には断熱温度上昇量は低下するが、同様に圧縮強度も低下することから所定の性能を確保するためには、粉末度の最適化が必要となる。図より、低発熱性を確保しつつ、高炉セメント B 種と同程度の強度を確保することを前提とした場合、高炉スラグ微粉末の粉末度は  $4000\sim 4500\text{cm}^2/\text{g}$  程度、高炉スラグ微粉末の置換率で 65%程度が最適であると判断された。これらセメントの組成に関して、3 工場にてセメントを試製し、それぞれが要求性能を満足することを確認している。

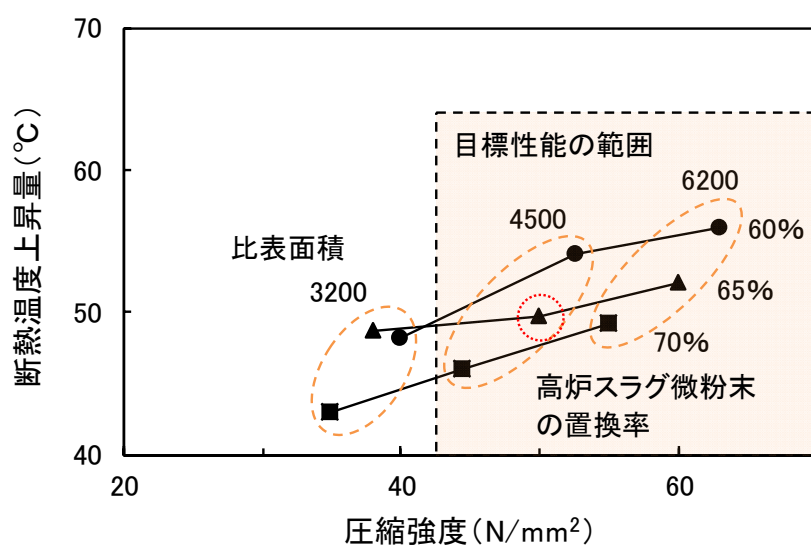


図-2.16 モルタルの圧縮強度と断熱温度上昇量の関係 [2.37]

## 2.4.2 化学混和剤に関する研究

化学混和剤に関して高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの場合、高炉スラグ微粉末を多量に含むため、所定のフレッシュ性状を得るための減水作用が大きくなる傾向にある。そのため、従来の混和剤では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同等のスランプを得るための混和剤の添加量が少なくなり、結果としてスランプの経時保持性が低下することがある。そこで、新ら [2.38] は分子構造の異なる楕形高分子系分散剤の高炉セメントへの吸着・分散作用に着目し、高炉スラグ置換率が流動性に及ぼす影響に関する検討を行っている。分子構造の異なる楕形高分子系分散剤を図-2.17に示す。使用する分散剤はメタクリル酸系の分散剤で、側鎖のエチレンオキシド付加モル数が

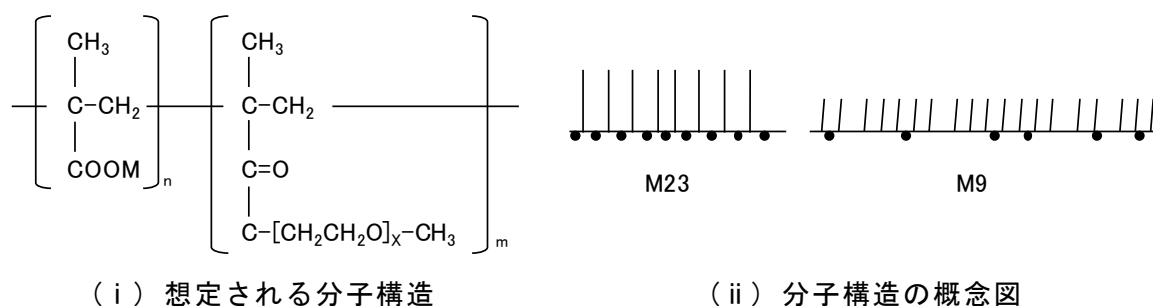


図-2.17 M9 および M23 の楕形高分子分散剤 [2.38]

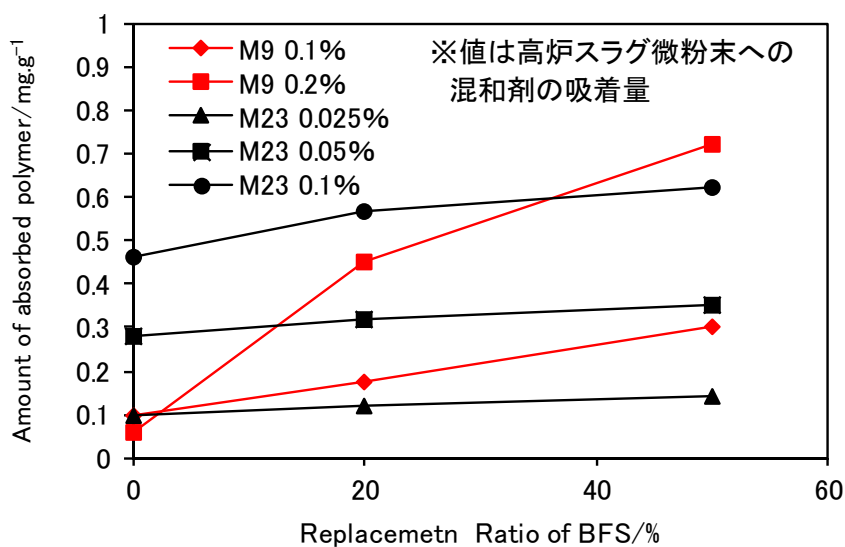


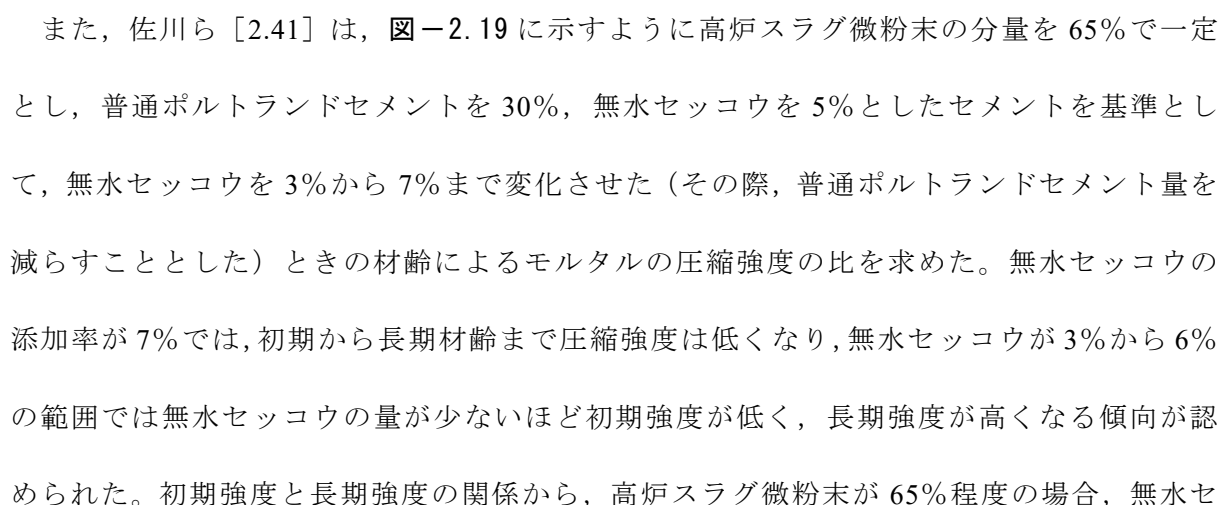
図-2.18 分散剤の違いによるスラグ置換率とセメントペーストの見掛けの粘度の関係 [2.38]

23mol (M23) のものと 9mol (M9) で官能基が少ないものである。図中の分子構造の概念図に示すように分散剤の吸着サイトとなる官能基を黒丸で示しており、M9 は M23 に比べ分子中の官能基が少なくなっている。このため M23 および M9 は粒子への吸着特性が大きく異なるものと考えられる。M23, M9 を添加したセメントペーストの分散剤吸着量に及ぼす高炉スラグ微粉末(高炉スラグ微粉末 4000)の置換率の影響について実験を行っており、その結果を図-2.18 に示す。M23 を用いた場合、高炉スラグ微粉末の置換率が増加しても分散剤吸着量には大きな変化が認められない。M23 は高炉セメント中の OPC と高炉スラグ微粉末の両者へ分散剤が吸着することで粒子を分散させ、流動性を確保していると考えられる。一方で、M9 を用いた場合、高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると分散剤吸着量が増加しており、分散剤の添加率が大きくなるほどその傾向が著しいことが分かる。M9 の OPC への吸着量は低い、OPC を高炉スラグ微粉末で置換したセメントには吸着量は比較的大きな値を示し、高炉スラグ微粉末の置換率が増大しても流動性は変化しない。これは M9 が OPC よりも高炉スラグ微粉末に吸着しやすい分散剤であり、高炉スラグ微粉末を分散させることにより流動性を確保しているためであると考えられる。

以上の結果より、楕形高分子系分散剤の分子構造の違いによってセメントおよび高炉スラグ微粉末への吸着特性が大きく異なることを明らかとしている。また、セメントへの吸着性が低い楕形高分子系分散剤を添加した場合は高炉スラグ置換率が増大しても流動性が低下しないこと、セメントへの吸着性が高い楕形高分子系分散剤を添加した場合は高炉スラグ微粉末の置換率が増大すると流動性が低下することを明らかとしている。セメントへの吸着性が低く、高炉スラグ微粉末への吸着性が高い楕形高分子系分散剤が高炉スラグ含有セメントの分散剤として有効である可能性が示され、この知見が改良型の高炉セメント C 種専用の化学混和剤の基材として用いられている。

### 2.4.3 セッコウに関する研究

セッコウはポルトランドセメントの急結性を緩和するために欠くことのできないものとなっている。ポルトランドセメント中のクリンカーに含まれる  $C_3A$  や  $C_4AF$  といった間隙相あるいはガラス相等アルミナを含む相は一般的に急結性を持ち、これを遅延するにはセッコウの添加が最も有効な方法とされている。このような目的から凝結緩和剤として加えられるセッコウの形態としてはアルミネートに先立ち急速に溶解する性質を持つ二水セッコウ、半水セッコウおよび可溶性無水セッコウが適当で、溶解速度の小さい不溶性無水セッコウは望ましくない。一般にポルトランドセメントの凝結遅延に必要なセッコウの添加量はセメント中の  $SO_3$  含有量として 1.1~1.3% の範囲で十分な場合が多いが、セッコウの添加は凝結を緩和する以外に初期強度を高め、水和膨張と乾燥収縮を減らし、水和発熱を低下させ、さらに化学抵抗性を向上させるなど多くの効果を伴うことを、近藤 [2.39] は明らかとしている。また、高炉セメントの場合、無水セッコウを適度な範囲で添加することを推奨しており、2~5% の範囲で添加することで、初期強度の増進、適度の水和膨張により収縮が抑制することを明らかとしている。さらに、無水セッコウの添加量を高めた高炉セメントの場合では、無水セッコウの添加量を 5~10% の範囲で添加することでその効果はさらに著しく、長期強度についても優れ、乾燥収縮を抑制しつつ化学抵抗性が向上することから、近藤 [2.40] は無水セッコウの適量の添加を推奨している。

また、佐川ら [2.41] は、に示すように高炉スラグ微粉末の分量を 65% で一定とし、普通ポルトランドセメントを 30%、無水セッコウを 5% としたセメントを基準として、無水セッコウを 3% から 7% まで変化させた（その際、普通ポルトランドセメント量を減らすこととした）ときの材齢によるモルタルの圧縮強度の比を求めた。無水セッコウの添加率が 7% では、初期から長期材齢まで圧縮強度は低くなり、無水セッコウが 3% から 6% の範囲では無水セッコウの量が少ないほど初期強度が低く、長期強度が高くなる傾向が認められた。初期強度と長期強度の関係から、高炉スラグ微粉末が 65% 程度の場合、無水セ

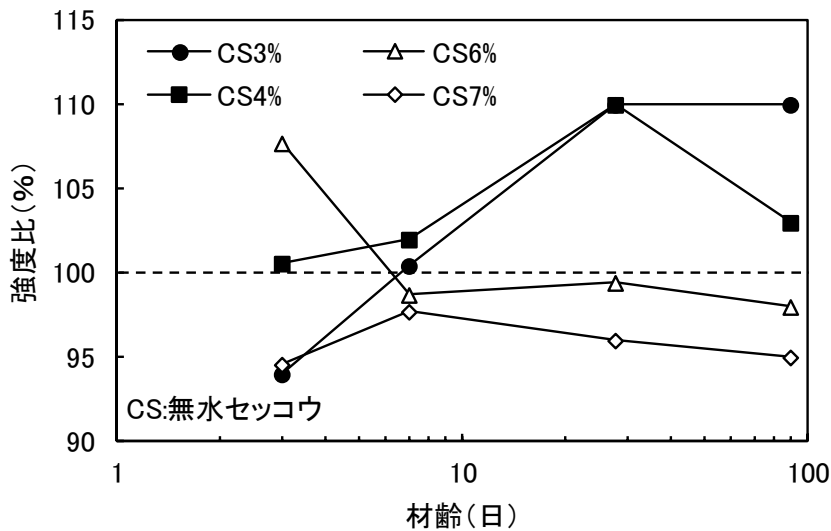


図-2.19 無水セッコウ 5%を基準としたときの材齢による圧縮強度比 [2.41]

ッコウの最適な添加量は 5%程度と考えられた。なお，高炉スラグ微粉末が 65%，普通ポルトランドセメントが 30%，無水セッコウが 5%の結合材中に含まれる SO<sub>3</sub> 量は，3.5%程度となる。

和知ら [2.42]，[2.43] は，高炉スラグ微粉末の置換率が 60%の高炉スラグ高含有セメントについて，セメント中に含まれる SO<sub>3</sub> 量を 6.4%まで多く添加した検討を行っている。その中で，同一水結合材比の条件での圧縮強度は材齢 1 日の強度が低くなるが，材齢 7 日および 28 日では普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種と同等となることを明らかにしている。また，乾燥収縮および自己収縮の結果を図-2.20 および図-2.21 に示す。乾燥収縮および自己収縮は高炉セメント B 種よりも大幅に少なく，ひび割れに対する抵抗性や長期の変形に対して優れた性能を有していると結論付けている。一方で，辻ら [2.44] は高炉スラグ含有率が 60~70%程度の高炉スラグ高含有セメントの SO<sub>3</sub> 量がコンクリート硬化体の火災時の爆裂抵抗性に及ぼす影響について検討を行っている。その中で，高炉スラグ高含有セメント中の SO<sub>3</sub> 量が増加するほど火災加熱時の爆裂が生じやすい傾向にあることから，SO<sub>3</sub> 量を安全側に 4%以下に設定することで，高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの火災時の爆裂抵抗性を確保できると結論付けている。SO<sub>3</sub> 量が多いほ



ど爆裂しやすい原因として、100～140℃付近のエトリングタイトの急激な脱水量の増加に起因しており、コンクリート内部の蒸気圧の増加を引き起こす要因となる、爆裂が生じ易くなったと考察している。

以上の結果を踏まえると、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートでは、セメント中に含まれるSO<sub>3</sub>量には最適な量があり、初期強度や乾燥収縮および自己収縮、火災加熱時の爆裂等を鑑みたときに、3.5%程度に設定することが推奨される。この値は、高炉セメントのJIS R 5211の高炉セメントC種のSO<sub>3</sub>量の上限值4.5%以下を満足する値であり、JISの規格値の観点からも最適な量と考えられる。

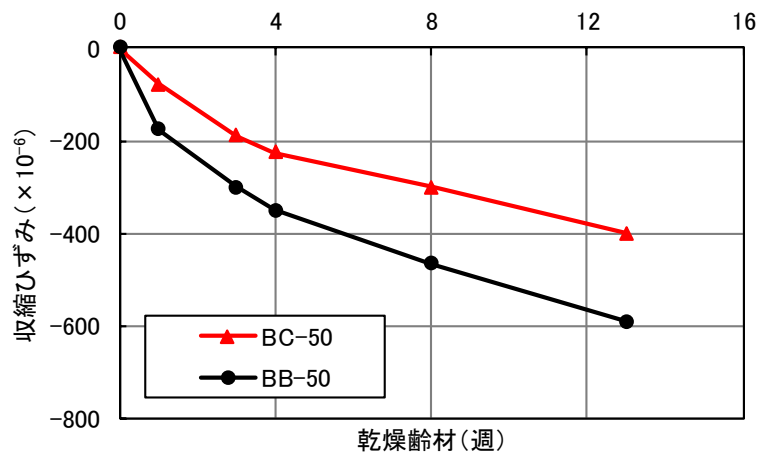


図-2.20 乾燥収縮ひずみ [2.43]

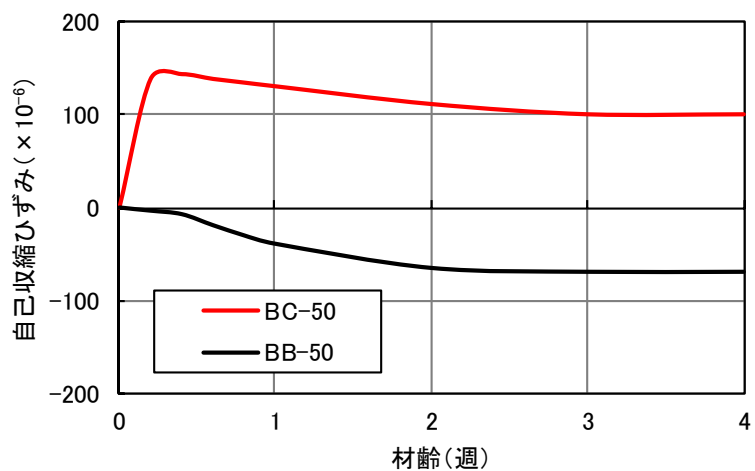


図-2.21 自己収縮ひずみ [2.43]

## 2.5 まとめ

本章では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの既往の研究について整理した。その結果、これまでに、概ね以下の点が明らかとなっている。

- ・フレッシュコンクリートの性質は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるに従い、所要のスランプを得るための単位水量が小さくなる。また、置換率の増加に伴って、凝結時間は遅くなる傾向にある。スランプの経時変化については、高炉スラグ微粉末を置換してもほとんど変わらない場合と、経時保持性が低下する場合がある。
- ・高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートの初期の温度上昇速度は、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴って遅くなることが認められるが、置換率が55%以下で材齢3日以降では、普通ポルトランドセメントを用いた場合の温度上昇量よりも大きくなる場合もある。
- ・圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従って小さくなる傾向にある。とくに材齢3日、7日といった若材齢において顕著であるが、材齢の経過に伴い、置換率が35%から70%の範囲のコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の強度発現性を有する。また、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、水分の供給によって長期の強度増進に影響を及ぼす。
- ・収縮特性について、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従って、乾燥初期の段階ではやや増加する傾向にあり、それ以降は次第に小さくなり、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同程度になる。自己収縮ひずみについても、一般的に、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントの場合と比較して、大きくなる傾向にある。
- ・中性化について高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントの場合と比較して、大きくなる傾向にあるが実構造物の中性化深さの調査結果では、

普通ポルトランドセメントと高炉セメントとの中性化深さに大きな差が認められない結果も得られている。

- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、高い遮塩性および ASR の抑制効果が認められ、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、その効果も高くなる傾向にある。
- ・高炉セメント C 種相当の高炉スラグ高含有セメントに関して、セッコウの添加量を通常よりも多くすることで初期の水和反応を改善できる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が多くなると化学混和剤への吸着性能も異なり、高炉スラグ微粉末と相性の良い分子構造を持つ分散剤が存在する。
- ・土木用のコンクリートの配合としての最適なセメントの組成は、高炉スラグ微粉末の粉末度を  $4000\sim 4500\text{cm}^2/\text{g}$  とし、高炉スラグ微粉末が 65%程度、普通ポルトランドセメントが 30~35%、無水セッコウが 5%程度で結合材中の  $\text{SO}_3$  量を 3.5%程度とすることである。それによって水和熱を抑制し、初期強度および収縮特性を改善することができる。
- ・高炉スラグ高含有セメントへのセッコウの添加によって、初期強度や収縮特性を改善できる一方で、添加量が多い場合には火災加熱時の爆裂等が生じやすくなる。これらの特性を鑑みた場合、最適なセッコウ添加量が存在する。

これまでに研究された知見を活かして、土木構造物に適した改良型の高炉セメント C 種としての最適なセメント組成を定め、そのセメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状のうちスランプ保持性を有する専用の混和剤を開発する必要がある。さらに、実用化に向けた課題を整理する必要がある。

## 【参考文献】

[2.1] 鉄鋼スラグ協会：高炉セメント百年史，p.6，2010.8

- [2.2] 吉田徳次郎：高炉セメント混凝土，九州帝国大學工學彙報 第一卷 第一号，  
pp.1-10，1926
- [2.3] 遠藤裕悦，児玉和巳，中川 修，高田 誠：高炉スラグ微粉末がコンクリートの  
配合と強度におよぼす影響について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用  
に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [2.4] 鷹野 明，星 秀明，栗原通了：高炉スラグ微粉末コンクリートのスランプ低下  
傾向について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム  
論文集，土木学会，1987.3
- [2.5] 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，コンクリ  
ートライブラリー151，p.105，2018.9
- [2.6] 森山容州，沼田晋一，木島 徹，小林明夫：高炉スラグ微粉末コンクリートの配  
合及び強度発現性について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関する  
シンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [2.7] 太田 実，小野金造，佐取一男：高炉水砕スラグ粉末を用いたコンクリートの品  
質に関する試験，土木研究所資料，1274号，p.79，1977.3
- [2.8] 荒巻卓見，中田善久，大塚秀三，柘田佳寛：練混ぜ時期が異なる各種結合材を用  
いたフレッシュコンクリートの性状に関する一考察，コンクリート工学年次論文  
集，Vol.37，No.1，pp.1087-1092，2015.7
- [2.9] 國府勝郎，村田芳樹，阿部立実：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱  
温度上昇，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文  
集，土木学会，1987.3
- [2.10] 國府勝郎，村田芳樹，高橋 茂，安齋浩幸：高炉スラグ微粉末を用いたコンク  
リートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究，土木学会論文集，No.396/V-9，  
1988.8

- [2.11] 石川陽一，鯉淵 清，村上武衡：高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材への適用研究（その2・水和熱と断熱温度上昇），日本建築学会大会学術講演梗概集，1991
- [2.12] 今井益隆，大橋 猛，斉藤敦志：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの諸性質，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [2.13] 松下博通：スラグ高含有セメントの強度性状に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.174-179，1990
- [2.14] 植木康知，大塚勇介，平本真也，檀 康弘：45年経過した混合セメントコンクリートの長期強度発現性について，コンクリート工学論文集，Vol.23，No.2，pp.71-79，2012.5
- [2.15] 曾根徳明，重倉祐光：低発熱型高炉セメントに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第451号，1993.9
- [2.16] 遠藤裕悦，児玉和巳，高田 誠：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長期強度に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，11-1，1989
- [2.17] 檀 康弘，伊代田岳史，大塚勇介，佐川康貴，濱田秀則：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集 E，Vol.65，No.4，pp.431-441，2009.10
- [2.18] 依田彰彦：高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性質，材料，Vol.43，No.491，pp.943-948，1994.8
- [2.19] 檀 康弘，近田孝夫，永浜一孝：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.22-227，1991
- [2.20] 小林和夫，井上 晋，津田 章：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮とクリープに関する研究，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に

関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3

- [2.21] 米倉亜州夫，田中敏嗣：高炉スラグ微粉末の使用がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [2.22] 臼井達哉，宮原茂禎，丸屋 剛，大友 健：異なる養生条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.1，pp.92-103，2014
- [2.23] 加藤弘義，宮川豊章，中村明則，土井宏行：高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの自己収縮に与えるセッコウおよび石灰石微粉末の影響，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.111-124，2002.8
- [2.24] Takeshi Iyoda: EFFECT FOR CONCRETE PROPERTIES ON BLENDING RATE OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG, The 12th SEATUC Symposium (SEATUC 2018), pp.106-111, 2018.3
- [2.25] 松田芳範，上田 洋，石田哲也，岸 利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010
- [2.26] 本名英理香，伊代田岳史：セメント種類や環境条件の違いが実構造物の炭酸化に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.723-728，2016
- [2.27] 中村英佑，石井 豪，渡辺博志：暴露試験と促進試験による混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.202-207，2014
- [2.28] 中村英佑，石井 豪，渡辺博志：暴露試験と促進試験に基づく混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.97-102，2015

- [2.29] 中村英佑, 栗原勇樹, 古賀裕久 : 暴露 40 ヶ月後の混和材を多量に用いたコンクリートの中性化抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.171-176, 2016
- [2.30] 土木学会 : 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], p.155, 2017
- [2.31] C.L. Page, N.R. Short and W.R. Holden : The Influence of different cements on chloride-Induced Corrosion of Reinforcing steel, Workshop on Slag Cement & Concrete, 1985.10
- [2.32] 与那嶺一秀, 山路 徹, 審良善和 : 長期海洋暴露試験に基づく高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたコンクリートの塩分浸透性に関する検討, 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, Vol.40, V-20, 2017
- [2.33] 中村英佑, 石井 豪, 鈴木雅博, 渡辺博志 : 混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に関する実験的研究, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.53-58, 2014.10
- [2.34] 島崎 泰, 泉尾英文, 石中正人, 審良善和 : 海洋環境下に長期暴露した各種セメントを用いたコンクリートの物性と鉄筋腐食, セメント・コンクリート論文集, Vol.65, pp.326-333, 2011.3
- [2.35] 小林茂敏, 河野広隆, 沼田晋一, 近田孝夫 : 高炉スラグ微粉末のアルカリ骨材反応抑制効果について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3
- [2.36] 坂井悦郎, 安齋剛史, 新 大軌, 池尾陽作 : 初期水和性状を考慮した高炉スラグ高含有セメントの材料設計, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.20-26, 2011

- [2.37] 植木康知, 大塚勇介, 平本真也, 檀 康弘: 高粉末度を変化させた高炉スラグ高含有セメントの強度・発熱特性について, 第 67 回セメント技術大会, pp.140-141, 2013.5
- [2.38] 新 大軌, 玉木伸二, 宮内雅浩, 坂井悦郎: 分子構造の異なる高分子系分散剤を添加した高炉セメントの流動特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.28-32, 2012
- [2.39] 近藤連一: 無水セッコウのセメントへの利用, 石膏と石灰, No.43, pp.47-49, 1959
- [2.40] 近藤連一: ポルトランドセメントおよび高炉セメントの欠点とその改良について, セメント技術年報, No.14, pp.206-219, 1960
- [2.41] 佐川孝広, 小倉 束, 若杉伸一: 高炉スラグ高含有セメントの強度および発熱特性に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響, 第 67 回セメント技術大会, pp.140-141, 2013.5
- [2.42] 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.485-490, 2010
- [2.43] 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす  $\text{SO}_3$  量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.203-208, 2011
- [2.44] 辻大二郎, 小島正朗, 野口貴文, 大塚勇介: 高炉スラグ高含有セメントの  $\text{SO}_3$  量が火災時の爆裂抵抗性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.756, pp.119-127, 2011.2





## 第3章

改良型の高炉セメントC種を用いた  
コンクリートのフレッシュ性状およ  
び発熱特性に関する研究



## 第3章 改良型の高炉セメントC種を用いたコンクリートのフレッシュ性状および発熱特性に関する研究

### 3.1 はじめに

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのフレッシュ性状に関して、高炉セメントC種の範疇では、高炉スラグ微粉末の置換率（分量）が60%を超え70%以下と多量に含むことから、高炉セメントB種に比べてさらに減水作用が大きくなる。そのため、従来の化学混和剤（以下、混和剤）では普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同等のスランピングを得るのに必要な混和剤の量が少なくなり、結果としてスランピングが時間経過に伴い流動性が急激に低下したり、コンクリートの粘性が高くなったりすることがある。また、注水直後の高炉スラグ微粉末の特有の反応 [3.1] により、とくに30分以降のスランピングが著しく低下する傾向にある。一方で、最近では、高炉スラグ微粉末を多量に用いたコンクリートに適するように、スランピングの保持性能を高めたり、粘性を低減させたりすることができるような専用のAE減水剤や高性能AE減水剤の開発が進んでいる。これら高炉スラグ高含有用の混和剤を組み合わせることで、フレッシュ性状を改善できる可能性がある。

発熱特性については、第2章で述べたように、高炉スラグ微粉末の置換率が多くなるに従い、終局断熱温度上昇量が低くなる傾向にある。改良型の高炉セメントC種においても同様の長を有しているものと考えられる。

本章では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのフレッシュ性状のうち、スランピングおよび空気量とそれら経時変化について、また、同コンクリートの凝結特性、ブリーディング特性、発熱特性について検討を行った。なお、本章以降で使用する改良型の高炉セメントC種の物性と高炉セメントB種のセメントの組成を表-3.1に示す。製造ロット等によってセメントの組成は多少異なるが、改良型の高炉セメントC種は、高炉スラグ微粉末

表-3.1 改良型の高炉セメントC種と高炉セメントB種のセメント組成の比較

品質		改良 BC	BB
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.98	3.04
比表面積	cm <sup>2</sup> /g	4000	3800
化学成分	SiO <sub>2</sub>	28.13	26.05
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.90	9.17
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.22	1.87
	CaO	49.12	54.06
	MgO	4.62	3.57
	SO <sub>3</sub>	3.60	2.26
	Na <sub>2</sub> O	0.27	0.29
	K <sub>2</sub> O	0.30	0.31
	TiO <sub>2</sub>	0.48	0.40
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.08
MnO	0.23	0.32	

の分量が 63%程度であり、セメント中に含まれる SO<sub>3</sub> 量は、汎用の高炉セメント B 種で 2.0%程度であるのに対して、改良型の高炉セメント C 種では 3.5%程度まで高めた設計となっている。これは、セメント中の SO<sub>3</sub> 量を高めることで、初期強度の改善や収縮抑制を目的としたものである。

### 3.2 改良型の高炉セメント C 種専用の混和剤を用いたフレッシュコンクリートの性状

本検討では、土木構造物に一般的に用いられるような水セメント比が 50% 程度のコンクリートの配合を対象とし、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートに最適な混和剤を新しく開発することを目的とした。この用途の混和剤としては、とくに経済性を重視する必要があるため、高性能 AE 減水剤より経済性の良い高機能タイプの AE 減水剤の JIS A 6204（コンクリート用化学混和剤）に適合する混和剤を対象とした。既存の混和剤による実験 [3.2] では、練混ぜ後の流動性が経時的に大きく低下することや、ブリーディングの発生量が多いことが報告されている。そこで、それらの課題に対して、混和剤の減水成分であるポリカルボン酸（塩）系化合物を改良し、特定の流動保持剤を一液化することについて検討した。

#### 3.2.1 専用混和剤と汎用混和剤との比較

##### (1) 使用材料

使用材料を表-3.2 に示す。混和剤には汎用の AE 減水剤（標準形、高機能タイプ）を Ad1、その遅延形を Ad3 とした。また、Ad2 は既存の混和剤であるメタクリル酸（塩）系ポリカルボン酸化合物に変成リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸を一液混合した 3 つの成分から構成される高機能タイプを使用した。高炉スラグ高含有用の混和剤の分散剤には、メタクリル酸（塩）系ポリカルボン酸化合物のうち、図-3.1 に示す、共重合モノマーの比率（図中の a と b の比率）を調整し、セメントへの吸着点となる a の比率を減じて合成したものを使用した。また、流動保持成分を持つ混和剤として有機酸を主成分とするものを用いた。これら分散剤と流動保持成分の割合を質量比で 6:4 の割合で混合し、20%濃度の水溶液に調整した。なお、Ad4 は Ad2 の遅延形の混和剤である。その他の使用材料は表に示すとおりである。なお、セメントはそれぞれ高炉セメント C 種の範囲（高炉スラグ微粉末の置換率が 60~70%）となるものを使用しており、BC1 は普通ポルトランド

セメント，高炉スラグ微粉末，無水セッコウのそれぞれをセメント中に含まれる SO<sub>3</sub> 量が 2.00% となるように予め混合したものである。また，BC2 はセメント中の SO<sub>3</sub> 量が 3.60% で高添加となる改良型の高炉セメント C 種である。コンクリートの配合を表-3.3 に示す。

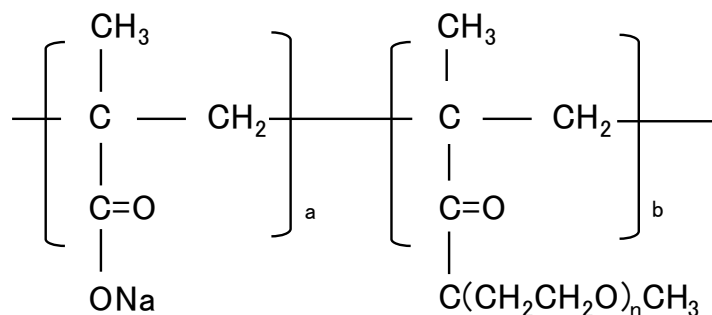


図-3.1 メタクリル酸（塩）系ポリカルボン酸化合物の構造式

表-3.2 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	BC1	普通ポルトランドセメント：高炉スラグ微粉末：無水セッコウ＝35.0:62.9:2.1，普通ポルトランドセメントの比表面積：3280cm <sup>2</sup> /g，高炉スラグ微粉末の比表面積：4540cm <sup>2</sup> /g，無水セッコウ：3780cm <sup>2</sup> /g，結合材中の SO <sub>3</sub> 量：2.00%
	BC2	改良型の高炉セメント C 種，スラグ含有率：65%，SO <sub>3</sub> 量：3.60%，高炉スラグ微粉末の比表面積：4410cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S1	砕砂，表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup> ，山砂，表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> ，ブレンド比＝8:2，混合密度：2.63g/cm <sup>3</sup>
	S2	山砂砕砂混合砂，表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	碎石 2010，表乾密度：2.64g/cm <sup>3</sup> ，碎石 1005，表乾密度：2.64g/cm <sup>3</sup> ，ブレンド比＝6:4，混合密度：2.64g/cm <sup>3</sup>
	G2	碎石 2015 と碎石 1505 の混合碎石，密度：2.65g/cm <sup>3</sup>
混和剤	Ad1,Ad3	AE 減水剤（標準形，遅延形，高機能タイプ），汎用品，リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	Ad2,Ad4	AE 減水剤（標準形，遅延形，高機能タイプ），BC 専用（改良），リグニンスルホン酸化合物，オキシカルボン酸とポリカルボン酸化合物の複合体

表-3.3 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	目標 SL (cm)	目標 Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	BC1	S1	G1	Ad
汎用	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320	849	963	Ad1,Ad3
改良	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320	849	963	Ad2,Ad4

(2) スランプおよび空気量の経時変化

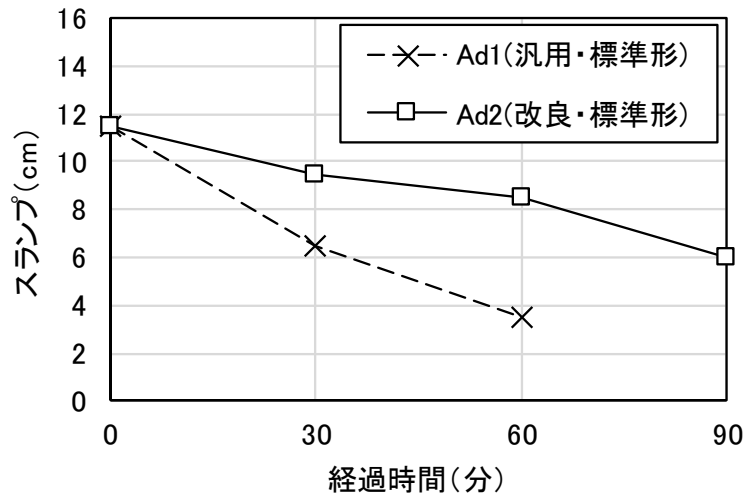
20℃および 30℃の条件にてスランプ (SL) および空気量 (Air) の経時変化を測定した。

20℃の結果を表-3.4 および図-3.2 に示す。

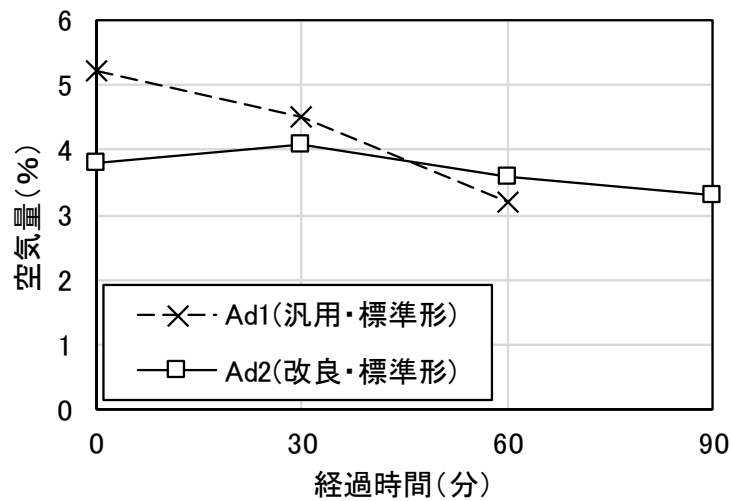
表-3.4 試験結果 (20℃)

AE 減水剤の種類	AE 減水剤の添加率 (B×%)	練上がりからの経過時間 (分)	試験結果	
			SL (cm)	Air (%)
Ad1 汎用 (標準形)	0.95	0	11.5	5.2
		30	6.5	4.5
		60	3.5	3.2
		90	—*	—*
Ad2 改良 (標準形)	0.95	0	11.5	3.8
		30	9.5	4.1
		60	8.5	3.6
		90	6.0	3.3

※90分で流動性が著しく低下したため、測定不能とした。



(i) スランプ



(ii) 空気量

図-3.2 スランプおよび空気量の経時変化 (20℃)

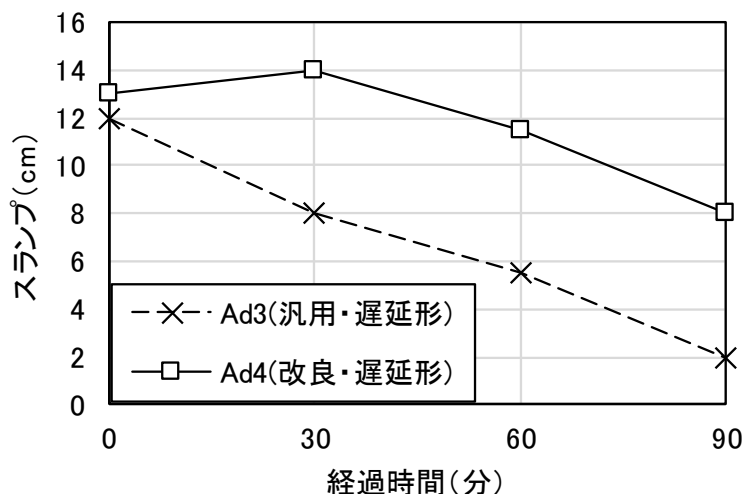


Ad1 (汎用・標準形) では、経時 30 分で 11.5cm から 6.5cm へと 5cm 低下し、経時 60 分では 11.5cm から 3.5cm まで 8cm 低下した。一方で、Ad2 (改良・標準形) では、経時 90 分で 11.5cm から 6.0cm へと低下した。また、空気量は、経時 90 分においても大きく低下することなく、フレッシュコンクリートの性状は良好であった。

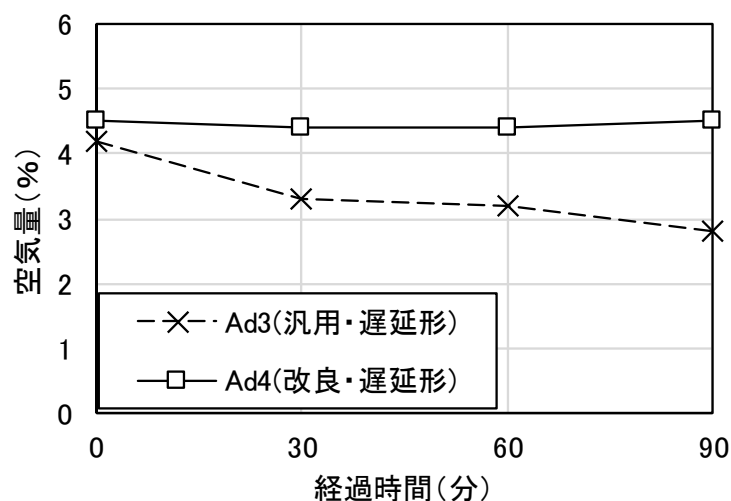
次に、30℃における測定結果を表-3.5 および図-3.3 に示す。スランプの低下量は、Ad3 (汎用・遅延形) のものでは、経時 30 分で 12cm から 8cm に低下し、経時 60 分で 5.5cm となった。一方で、Ad4 (改良・遅延形) では経時 90 分で 13cm から 8cm で 5cm の低下であった。空気量についても、Ad4 では経時によるロスは認められず 30℃においても良好なフレッシュ性状が得られた。

表-3.5 試験結果 (30℃)

AE 減水剤の種類	AE 減水剤の添加率 (B×%)	練上がりからの経過時間 (分)	試験結果	
			SL (cm)	Air (%)
Ad3 汎用 (遅延形)	0.85	0	12.0	4.2
		30	8.0	3.3
		60	5.5	3.2
		90	2.0	2.8
Ad4 改良 (遅延形)	1.05	0	13.0	4.5
		30	14.0	4.4
		60	11.5	4.4
		90	8.0	4.5



(i) スランプ



(ii) 空気量

図-3.3 スランプおよび空気量の経時変化 (30°C)

### (3) コンクリートのブリーディング特性

ブリーディング試験 (JIS A 1123) を実施したコンクリートの配合を表-3.6 に、ブリーディング試験の結果を図-3.4 示す。ブリーディング試験は 20°C 条件のみで実施した。所定のスランプ 8cm を得るための混和剤の添加量は、Ad1 (汎用・標準形) で  $B \times 1.0\%$ 、Ad2 (改良・標準形) で  $B \times 0.8\%$  であった。ブリーディング量は Ad1 (汎用・標準形) で  $0.21\text{cm}^3/\text{cm}^2$  に対して、Ad2 (改良・標準形) では  $0.12\text{cm}^3/\text{cm}^2$  と改良型の混和剤を用いることでブリーディング量が減少する結果が得られた。この理由として定かではないが、改良前の分散剤と改良後の分散剤の種類の違いや流動保持成分を持つ混和剤と変成リグニンスルホン酸化合物の混合量の違いが考えられた。

表-3.6 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	目標 SL (cm)	目標 Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	BC2	S2	G2	Ad
汎用	50.0	46.0	8.0	4.5	150	300	852	1007	Ad1 $B \times 1.0\%$
改良	50.0	46.0	8.0	4.5	150	300	852	1007	Ad2 $B \times 0.8\%$

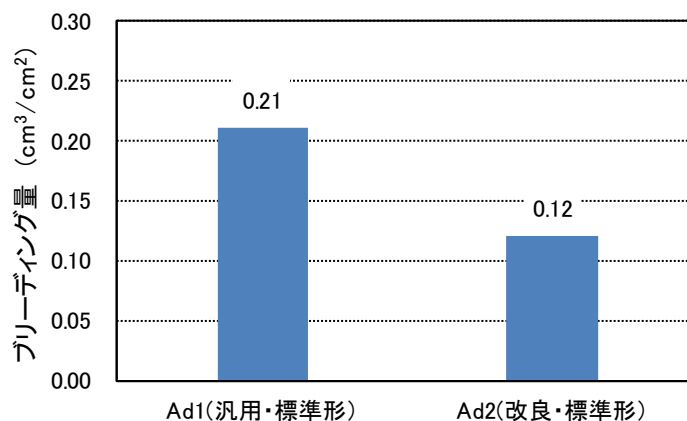


図-3.4 ブリーディング量の比較 (20°C)

### 3.2.2 セメント中に含まれる SO<sub>3</sub> 量の違いが専用混和剤を用いたコンクリートのフレッシュ性状に与える影響

高炉セメント C 種は初期の強度発現性が低いなどの課題があり、その課題に対して、結合材中に含まれる SO<sub>3</sub> 量を増やすことで改善できるという研究成果が既往の研究によって得られている [3.3]。ここでは、SO<sub>3</sub> 量の異なる高炉セメント C 種を用いたコンクリートのフレッシュ性状の比較について検討した。

使用材料を表-3.7 に示す。結合材は高炉セメント C 種の範疇となるように、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末 (セッコウなし)、無水セッコウのそれぞれを計量した。表-3.8 に示すように、普通ポルトランドセメントを 35%、高炉スラグ微粉末と無水セッコウを 65% として混合した。一般的に、高炉セメント中には SO<sub>3</sub> 量が 2.0% 程度含まれることから、結合材中に含まれる SO<sub>3</sub> 量が 2.00% となるように調整したケースを標準のケースとし、3.60% を高添加のケースとした。また、混和剤について、SO<sub>3</sub> 量が 2.00% のケースは Ad1 および Ad2 を、3.60% のケースでは Ad3 および Ad4 を用いた。なお、Ad2 および Ad4 は遅延形の混和剤であり、30°C の条件において使用した。コンクリートの配合を表-3.9 に示す。目標スランプを 12cm、目標空気量を 4.5% とし、所定の空気量を満足するように AE 剤の添加量を調整した。

表-3.7 使用材料

材料名	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3280cm <sup>2</sup> /g, SO <sub>3</sub> 量:2.24%
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末(セッコウなし)4000, 密度:2.90g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3780cm <sup>2</sup> /g
	Gyp	無水セッコウ, 密度:2.90 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3780 cm <sup>2</sup> /g, SO <sub>3</sub> 量:57.8%
細骨材	S	①砕砂, 表乾密度:2.63g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率:2.83 ②山砂, 表乾密度:2.62g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率:1.79 (ブレンド比;①:②=8:2)
粗骨材	G	①砕石 2010, 表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> , 実積率:60.1% ②砕石 1005, 表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> , 実積率:59.9% (ブレンド比;①:②=6:4)
混和剤	Ad1,Ad2	C 種用 AE 減水剤(標準形,遅延形), 主成分:リグニンスルホン酸塩とポリカルボン酸エーテルの複合体
	Ad3,Ad4	C 種用(SO <sub>3</sub> 高添加用) AE 減水剤(標準形,遅延形), 主成分:変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体

表-3.8 結合材の混合比

結合材の種類	記号	混合比	結合中に含まれる SO <sub>3</sub> 量
SO <sub>3</sub> -2.0	OPC:BFS:Gyp	35.0:62.9:2.1	2.00%
SO <sub>3</sub> -3.6	OPC:BFS:Gyp	35.0:60.0:5.0	3.67%

表-3.9 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	B(OPC+BFS+Gyp)	S	G	Ad1, Ad2	Ad3, Ad4
SO <sub>3</sub> -2.0-50%	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320	849	963	B×0.8%	—
SO <sub>3</sub> -3.6-50%	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320	849	963	—	B×0.85%

図-3.5 にスランプの経時変化を示す。結合材中に含まれる SO<sub>3</sub> は、C<sub>3</sub>A との水和初期の反応でエトリンガイトの生成により、スランプの経時変化や凝結特性などフレッシュ性への影響が考えられる。30分経過時点では、どのケースについてもスランプの低下は1cm程度であり、良好なスランプ保持性能を有していることが確認された。60分経過時点で、30℃では SO<sub>3</sub> 量が 3.60% のケースのみが 4cm の低下が認められた。今回の試験では、試料は静置した状態で実施していることから、十分なスランプ保持性能を有しているものと考え

えられた。以上の結果より、SO<sub>3</sub> 量の違いがスランプの経時変化に与える影響は小さいと考えられた。

凝結試験の結果を図-3.6 に示す。SO<sub>3</sub> 量が 3.60% のケースにおいて、始発および終結時間が遅くなる結果が得られた。この理由について定かではないが、SO<sub>3</sub> 量が 3.60% のケースでは SO<sub>3</sub> 高添加用の AE 減水剤を用いており、それに含まれる遅延成分が SO<sub>3</sub> 量 2.00% のものとは異なっているため、その違いが影響しているものと考えられた。ただし、2 時間程度の凝結の遅延であれば、施工を行う上では問題にならないと考えられる。

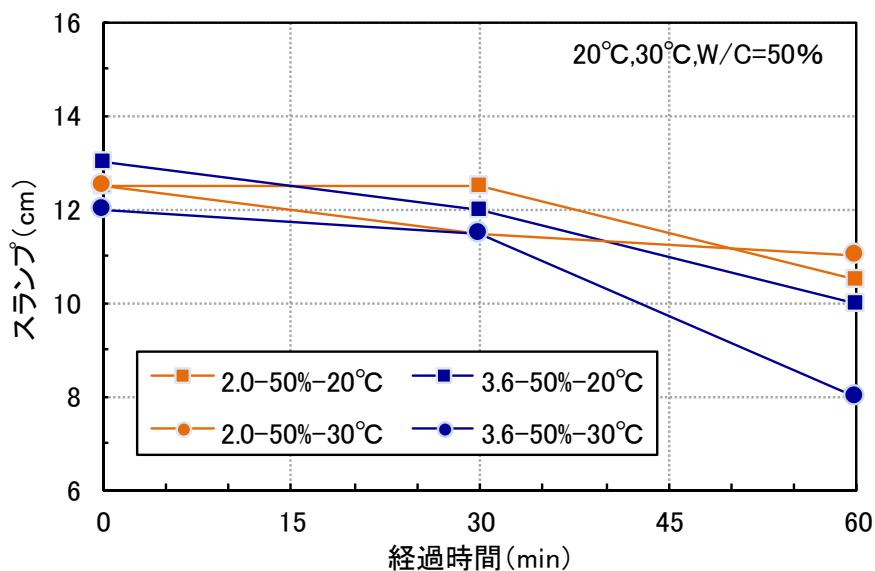


図-3.5 スランプの経時変化

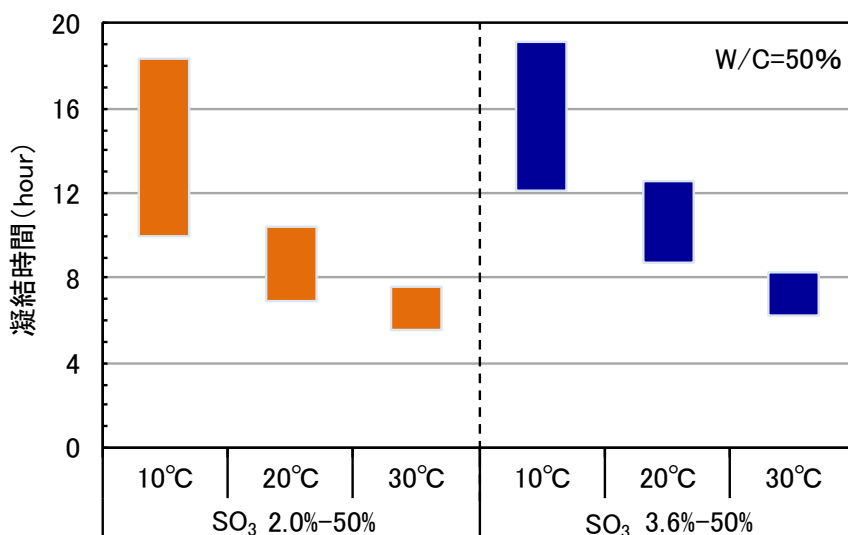


図-3.6 凝結試験の結果

### 3.2.3 専用混和剤を用いた改良型の高炉セメント C 種と汎用混和剤を用いた高炉セメント

#### B 種とのフレッシュコンクリートの性状比較

本検討では、土木構造物に汎用的に使用される高炉セメント B 種（以降、BB）と改良型の高炉セメント C 種（以降、改良 BC）を用いたスランブおよびブリーディングの性状の比較を行った。

コンクリートの配合を表-3.10 に示す。改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートに配合については、高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等の強度および耐久性を有するように、初期の強度発現性の改善と中性化に対する抵抗性の向上を目的として水

表-3.10 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	B	S1	G1	Ad <sup>*</sup>
BB 配合	55.0	48.0	12.0	4.5	165	300 (BB)	846	950	Ad1,Ad2 C×0.9%
改良 BC 配合	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320 (改良 BC)	848	963	Ad3,Ad4 C×0.8%

※Ad1,Ad2:汎用 AE 減水剤 (Ad1:標準形, Ad2:遅延形)

Ad3,Ad4:改良型の高炉セメント C 種専用の AE 減水剤 (Ad3:標準形, Ad4:遅延形)

結合材比の低減を図った。BB を用いたコンクリートの配合の水結合材比は 55%，単位セメント量は 300kg/m<sup>3</sup> に対して，改良 BC 配合の水結合材比は，BB 配合と中性化に対する抵抗性を同等に設定するために，BB 配合の水結合材比を 55% から 5% 減じて 50% とした。これらの内容については，第 4 章にて詳述する。また，高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど同一のスランプを得るために必要な単位水量が小さくなる [3.4] ことから，改良 BC 配合では BB 配合より単位水量を 5kg/m<sup>3</sup> 低減した。

高炉スラグ微粉末の置換率が多い配合の場合は，高炉スラグ微粉末の反応により練上がりから 30 分以降のスランプが著しく低下する傾向がある [3.1]。改良 BC 配合におけるスランプの経時変化は図-3.7 に示すように，BB 配合との比較において，とくに 20℃ 条件では良好であった。これは改良 BC 専用の混和剤を用いており，その成分の中に高炉スラグ微粉末への選択的吸着性を有する成分を有している [3.5] ためと考えられた。

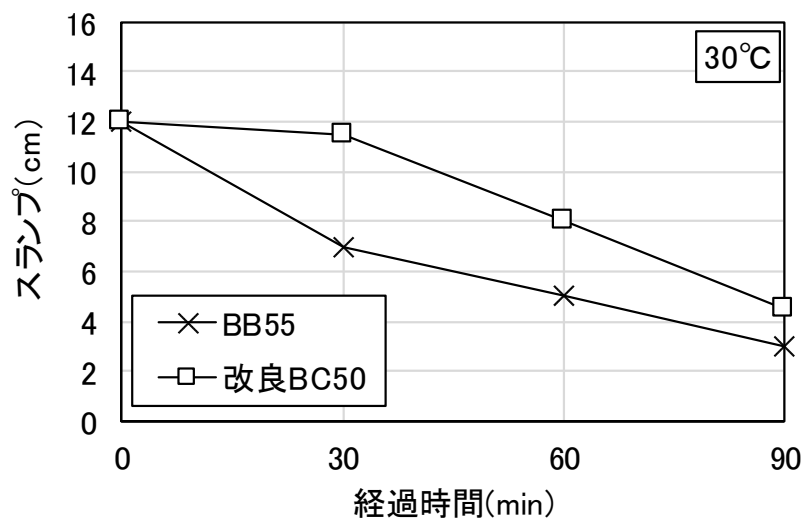
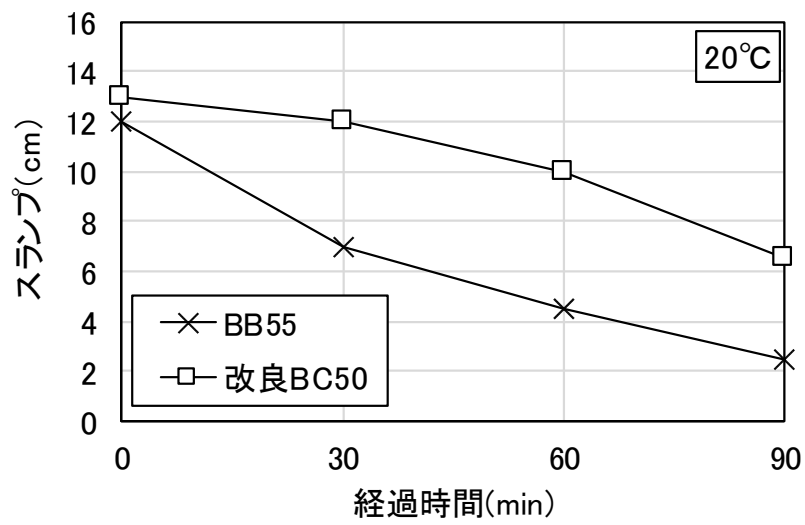
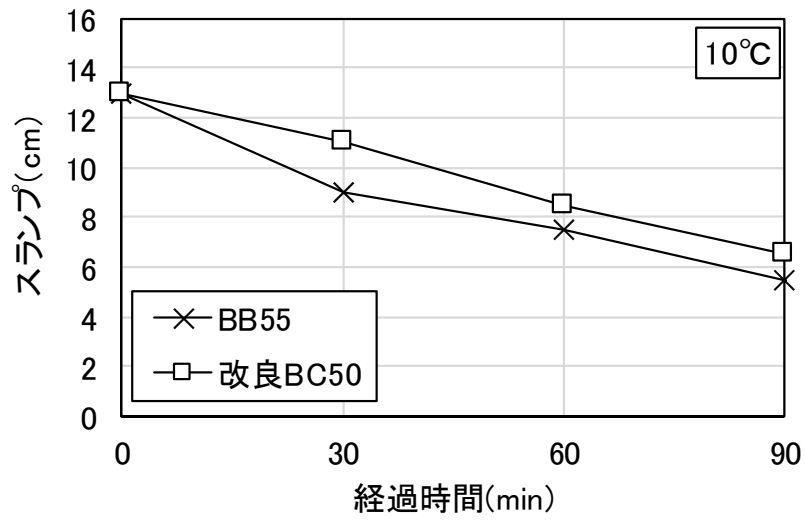


図-3.7 スランプの経時変化



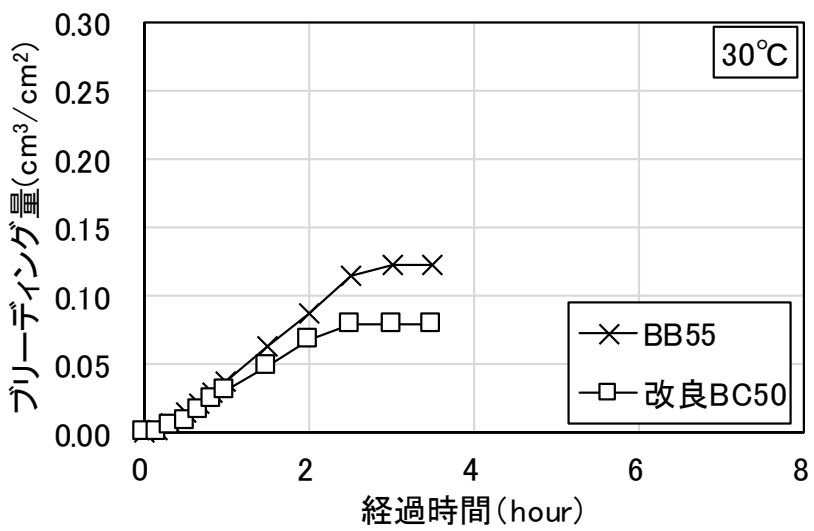
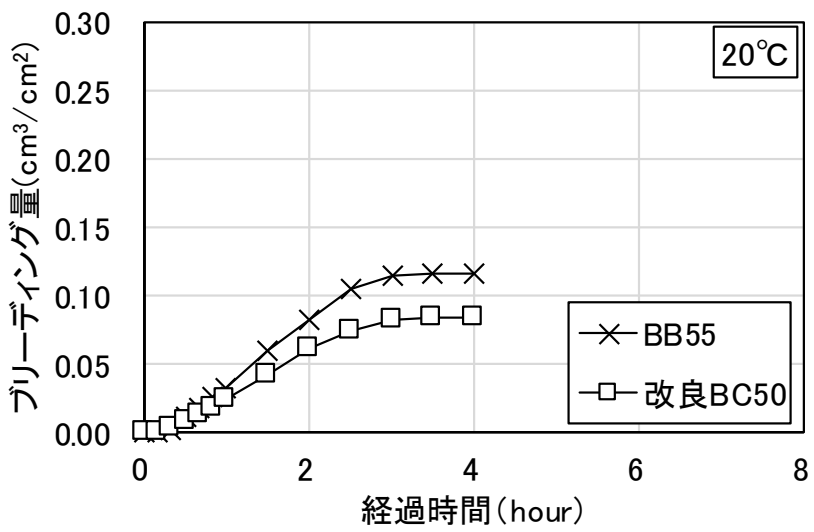
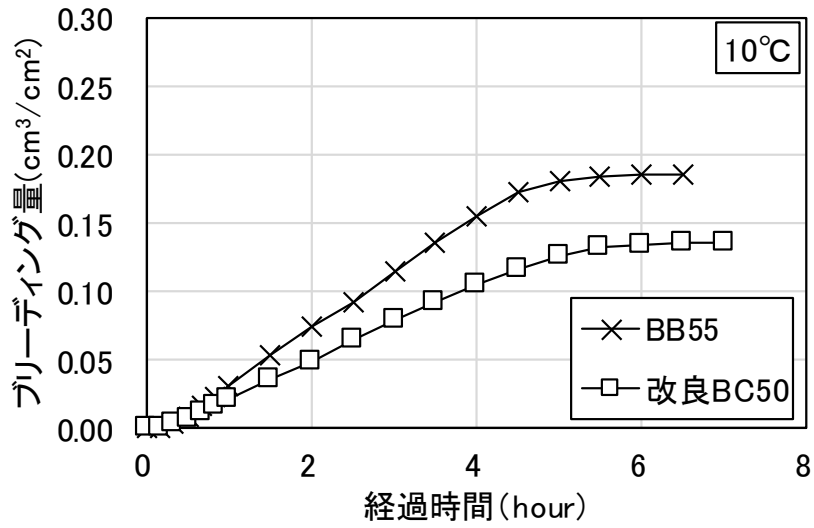


図-3.8 ブリーディング量の比較

ブリーディング試験の結果を図-3.8に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど水和反応が遅くなるため、ブリーディング量は多くなる傾向にあるが、本実験結果においては、BB配合と比較して改良BC配合の方が全ての温度条件において $0.10\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と小さくなった。これは、単位水量を $5\text{kg}/\text{m}^3$ 低減したことと、水セメント比の低減によるものと考えられた。また、BB配合と改良BC配合ともに $20^\circ\text{C}$ と $30^\circ\text{C}$ のブリーディング量が同程度であったが、これは $30^\circ\text{C}$ では遅延形のAE減水剤を用いており、その遅延成分が影響したものと考えられた。今回の実験結果の範囲では、全ての配合において、一般的なブリーディング量の指標である $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下[3.6]であった。

加圧ブリーディング試験の結果を図-3.9に示す。加圧ブリーディング試験は、JSCE-F502（加圧ブリーディング試験方法）に従い実施し、その結果は圧送性の指標として用いられており[3.7]、脱水量の上限値（標準曲線B）および下限値（標準曲線C）を併せて示す。改良BC配合の脱水量はBB配合と比較して100秒経過までは同程度で、最終的に17ml小さい値となった。これは、上記のブリーディング試験と同様に、単位水量を低減したことで、改良BC配合の脱水量が小さくなったものと考えられた。また、脱水量は、改

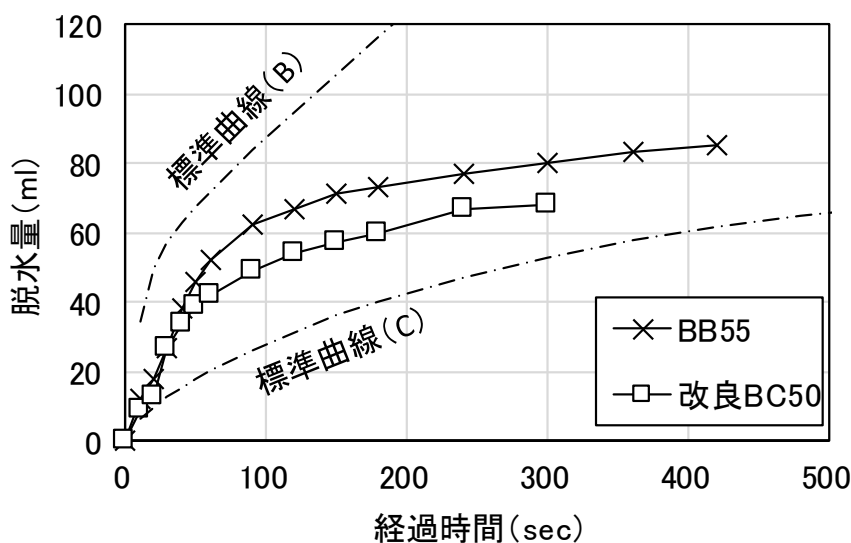


図-3.9 加圧ブリーディング量の比較

良 BC 配合と BB 配合ともに標準曲線の上限値 (B) と下限値 (C) の範囲に収まっており、良好な圧送性を有するものと考えられる。

以上の結果より、ブリーディングはセメントの種類よりも水セメント（結合材）比および単位水量に依存するものと考えられ、改良 BC 配合は BB 配合よりも水セメント比を 5% 低減したことと、単位水量を  $5\text{kg/m}^3$  低減したことで、結果的にブリーディング量および加圧ブリーディングによる脱水量ともに減少することが確認された。

### 3.3 改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの発熱特性

本検討では改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの発熱特性を把握することを目的として検討を行った。既往の研究においては、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるに従い、断熱温度上昇量は同等 [3.8]、もしくは小さくなる傾向 [3.9] にあることを示している。発熱特性に関する物性は、実構造物の温度ひび割れ評価を行う上で有益なデータであり、同じ条件で高炉セメント B 種を用いたコンクリートと比較することで改良型の高炉セメント C 種の温度ひび割れ抵抗性を正しく把握することができる。発熱特性では、以下の表-3.11 に示すコンクリートの配合にて検討した。単位セメント量  $C=300\text{kg/m}^3$  を一定とし、改良 BC 配合では、 $W/C=50\%$ 、BB 配合では  $W/C=55\%$  とした。

#### 3.3.1 熱膨張係数

試験方法の詳細は、第 5 章 (pp.122-123) にて述べる。温度変化量とひずみの関係を図-3.10 に示す。改良 BC 配合の熱膨張係数は、温度上昇時と降下時の平均値は  $9.80\ \mu/\text{°C}$  で、BB 配合の  $9.70\ \mu/\text{°C}$  と同程度であり、一般的なコンクリートの熱膨張係数とされる  $10\ \mu/\text{°C}$  と比較しても同等の結果であった。コンクリート標準示方書 [3.10] では、BB の熱膨張係数は  $12\ \mu/\text{°C}$  程度とされており、今回得られた結果は、改良 BC 配合、BB 配合ともに小さい値であった。熱膨張係数は、一般的に、粗骨材の影響が大きい [3.11] とされており、本実験で使用した粗骨材は砂岩系の骨材であることから、これが熱膨張係数に影響したものと考えられた。

表-3.11 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S*	GI*
BB 配合	55.0	44.1	8.0	4.5	165	300	803	1021
改良 BC 配合	50.0	43.1	8.0	4.5	150	300	801	1062

※細骨材の表乾密度: $2.63\text{g/cm}^3$ 、粗骨材 (砂岩) の表乾密度: $2.65\text{g/cm}^3$ 、混和剤:BB は汎用の AE 減水剤、BC は改良型の高炉セメント C 種専用の混和剤

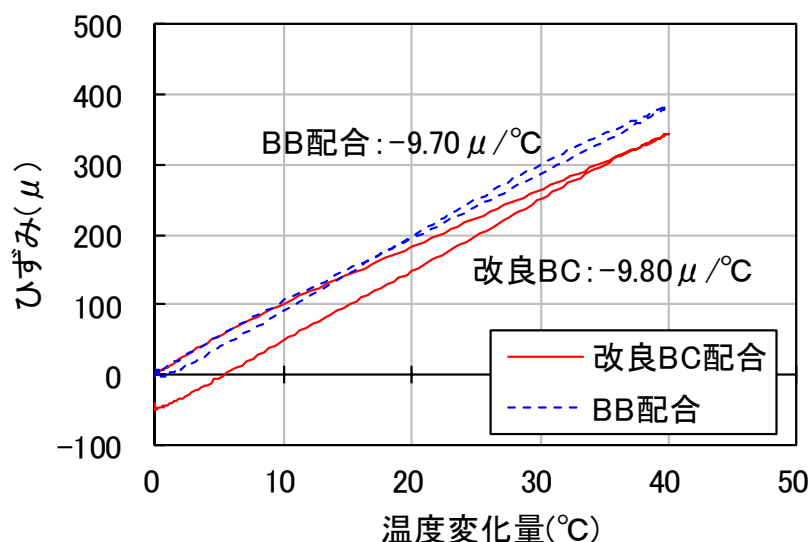


図-3.10 温度変化量とひずみの関係

### 3.3.2 断熱温度上昇量

材齢と断熱温度上昇量の関係を図-3.11に示す。改良BC配合とBB配合の材齢2日程度までの断熱温度上昇の履歴は、ほぼ同様であるが、改良BC配合の終局温度 $Q_{\infty}$ は41.0°Cであり、BB配合の51.6°Cに比べて10°C程度低い結果であった。また、上昇速度を表す係数 $\gamma$ は改良BC配合が0.82に対し、BB配合では0.61であった。終局温度 $Q_{\infty}$ は、改良BC配合とBB配合の単位セメント量を同一にしたため、クリンカー量の少ない改良BC配合の発熱量が小さくなったものと考えられ、断熱温度上昇速度 $\gamma$ が改良BC配合とBB配合で同程度の値になったことについては、理由は定かではないが高炉スラグ微粉末の潜在水硬性は水和初期においても反応する[3.8]ことから、クリンカー量と高炉スラグ微粉末量がトレードオフの関係となり、単位結合材量が一定の場合では同程度の値になるものと考えられた。

改良BC配合では、BB配合と比較して終局温度で10°C程度低くなることから、温度ひび割れに対する抵抗性が高くなる可能性が示唆される結果が得られた。

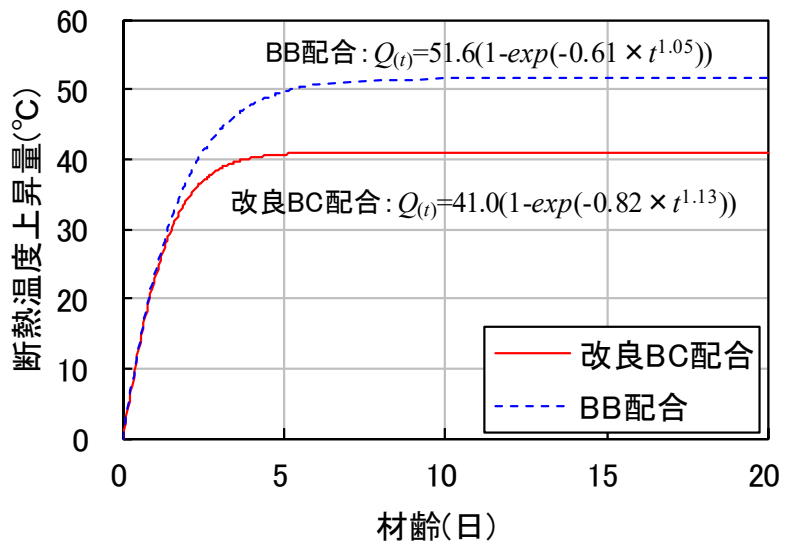


図-3.11 材齡と断熱温度上昇量の関係

### 3.4 まとめ

本章では、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートのフレッシュ性状および発熱特性について検討した。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・改良したメタクリル酸（塩）系のポリカルボン酸分散剤と流動保持剤を組み合わせた改良型の高炉セメント C 種専用の混和剤を用いることで、フレッシュ性状のうち流動保持性を改善できることが確認された。
- ・高炉セメント C 種専用の混和剤に関して、標準形、遅延形ともに良好なスランプ保持性を有しており、室内試験の静置した状態での経時 90 分においても大きくスランプロスすることなく、フレッシュコンクリートの性状は良好である。
- ・コンクリートのブリーディングに関して、高炉セメント C 種専用の混和剤を用いることで、ブリーディング量が少なくなることが確認された。また、高炉セメント B 種との比較においては、単位水量および水セメント（結合材）比の低減によって、ブリーディング量が少なくなることが確認された。
- ・改良型の高炉セメント C 種は、セメント中の  $\text{SO}_3$  量 3.5% 程度まで高めているが、 $\text{SO}_3$  量がコンクリートのフレッシュ性状に与える影響は小さいことが明らかになった。
- ・加圧ブリーディング試験については、圧送の指標で用いられる標準曲線内に収まる結果であり、良好な圧送性を有する。
- ・改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの熱膨張係数は、高炉セメント B 種と同程度の値であり、今回の実験では  $10 \mu / ^\circ\text{C}$  程度であった。
- ・改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性は、高炉セメント B 種と比較して  $10^\circ\text{C}$  程度低くなる。
- ・改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートは、高炉セメント B 種のそれと比較して温度ひび割れに対する抵抗性が高くなる可能性がある。

## 【参考文献】

- [3.1] 西 祐宜, 根岸 稔, 檜垣 誠: 高炉スラグ微粉末を大量混合したコンクリートの経時安定性改善に関する一提案, その1, その2, 土木学会第67回学術講演会, V462-463, pp.923-926, 2012.9
- [3.2] 太田 実, 小野金造, 佐取一男: 高炉水砕スラグ粉末を用いたコンクリートの品質に関する試験, 土木研究所資料, 1274号, p.79, 1977.3
- [3.3] 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼすSO<sub>3</sub>量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.203-208, 2011.6
- [3.4] 鷹野 明, 星 秀明, 栗原通了: 高炉スラグ微粉末コンクリートのスランプ低下傾向について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3
- [3.5] 新 大軌, 玉木伸二, 宮内雅浩, 坂井悦郎: 分子構造の異なる高分子系分散剤を添加した高炉セメントの流動特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.28-32, 2012
- [3.6] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針(案)・同解説, p.106, 2005
- [3.7] 土木学会: コンクリートポンプ施工指針 [2012], pp.208-209, 2012
- [3.8] 國府勝郎, 村田芳樹, 阿部立実: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3
- [3.9] 國府勝郎, 村田芳樹, 高橋 茂, 安齋浩幸: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究, 土木学会論文集, No.396/V-9, pp.39-47, 1988.8



- [3.10] 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.44，2017
- [3.11] 川口 徹：コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について，マス  
コンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.15-18，  
1982.9

## 第4章

改良型の高炉セメントC種を用いた  
コンクリートの強度特性および耐久  
性に関する研究



## 第4章 改良型の高炉セメントC種を用いたコンクリートの強度特性 および耐久性に関する研究

### 4.1 はじめに

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度特性に関して、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるに従い、とくに材齢初期の強度発現性が低くなる傾向にある [4.1]。改良型の高炉セメント C 種は、JIS に定める範囲でセメント中に含まれる  $\text{SO}_3$  量の含有量を 3.5%程度まで多くすることによって、材齢初期の強度発現性を改善したものである。本章では、改良型の高炉セメント C 種を用いた場合と、一般の高炉セメント B 種および C 種との強度発現性を比較した結果について詳述する。

また、高炉スラグ微粉末の分量が 60%以上となる高炉セメント C 種は、B 種よりもさらに化学性抵抗性や耐海水性に優れる。一方で、中性化に関して、高炉セメントを用いたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントの場合と比較して大きくなることは一般的に知られているが、第 2 章でも述べたように、促進試験と実環境では  $\text{CO}_2$  濃度が異なることや、水掛かりの有無によって中性化深さが大きく異なり、実環境下では、高炉セメントと普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは同程度の中性化深さであることを示している [4.2]。本章では、改良型の高炉セメント C 種を用いた場合の促進中性化試験結果を示すとともに、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート試験体の 41 年経過した時点での中性化深さおよび化学組成を示すことで、長期耐久性について詳述する。

## 4.2 改良型の高炉セメント C 種の強度特性

### 4.2.1 高炉セメント C 種との比較

結合材の混合比を表-4.1に示す。BCのSO<sub>3</sub>量は、汎用的な高炉セメントC種となるように、SO<sub>3</sub>量を2.00%としたものである。改良BCはSO<sub>3</sub>高添加型の高炉セメントC種となるように、セメント中のSO<sub>3</sub>量を3.67%とした。コンクリートの配合を表-4.2に示す。

JIS A 1108に従い、圧縮強度を測定した結果を表-4.3、図-4.1に示す。比較として、BCと改良BCの圧縮強度の比についても図-4.2に示す。なお、養生条件は全て20℃水中養生とした。

改良BCはBCと比較して、初期の材齢を含めて1.20倍以上の強度増進が認められた。これは、SO<sub>3</sub>量を増加させることで高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を含む初期の水和反応が促進されたものと考えられ、材齢初期の段階から強度増進できることが確認された。ま

表-4.1 結合材の混合比

結合材の種類	記号*	混合比	セメント中のSO <sub>3</sub> 量
BC	OPC:GGBS:Gyp	35.0 : 62.9 : 2.1	2.00%
改良BC	OPC:GGBS:Gyp	35.0 : 60.0 : 5.0	3.67%

※OPC：普通ポルトランドセメント，GGBS：高炉スラグ微粉末 4000，Gyp：無水セッコウ

表-4.2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	BC*	改良* BC	S	G
BC-55	55.0	48.0	12.0	4.5	160	291	—	880	958
BC-50	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320	—	849	963
BC-45	45.0	46.0	12.0	4.5	160	356	—	817	963
改良BC-55	55.0	48.0	12.0	4.5	160	—	291	880	958
改良BC-50	50.0	47.0	12.0	4.5	160	—	320	849	963
改良BC-45	45.0	46.0	12.0	4.5	160	—	356	817	963

※BCはセメント中のSO<sub>3</sub>量が2.00%，改良BCはSO<sub>3</sub>量が3.67%

表-4.3 圧縮強度試験結果

セメント種類	W/B (%)	温度(℃)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			
			材齢 (day)			
			3	7	28	91
改良BC	55	20	12.6	21.6	37.4	47.6
	50		15.8	26.8	44.0	53.7
	45		19.4	32.7	51.0	62.7

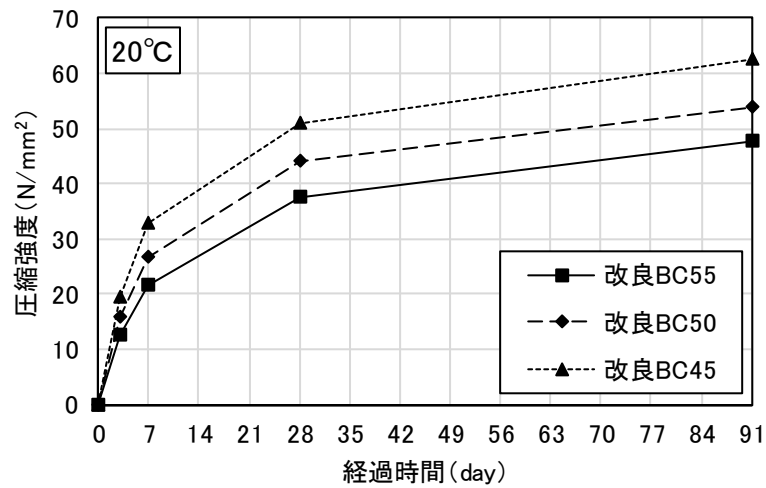


図-4.1 改良 BC の圧縮強度 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

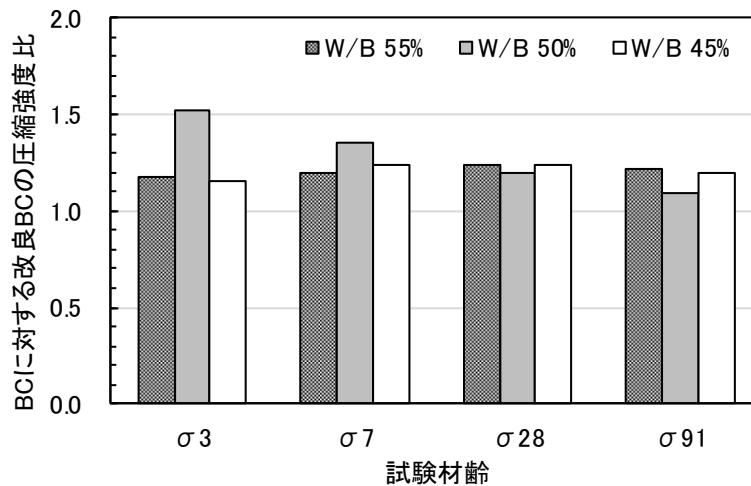


図-4.2 BC に対する改良 BC の圧縮強度比 (20°C, W/B=45, 50, 55%)

た、長期強度についても改良 BC は BC よりも大きくなる結果であった。改良 BC を用いたコンクリートの結合材水比と圧縮強度の関係について図-4.3 に示す。改良 BC と結合材水比と圧縮強度の関係は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同様に直線関係を示すことが確認された。

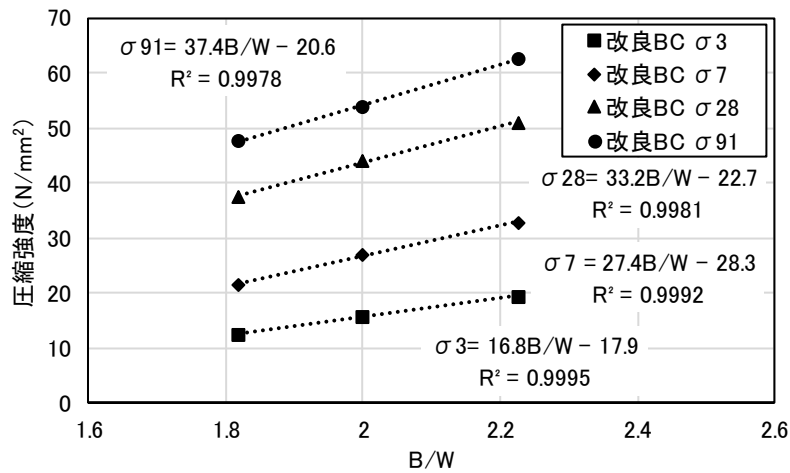


図-4.3 改良 BC の結合材水比と圧縮強度の関係

改良 BC を用いたコンクリートの引張強度を JIS A 1113 に従って測定した結果を表-4.4 および図-4.4 に示し、BC と改良 BC の引張強度比を図-4.5 に示す。引張強度も圧縮強度同様、改良 BC の方が BC よりも高くなる結果であった。また、図-4.6 に示すように、BC および改良 BC において、圧縮強度と引張強度には相関関係が認められた。

表-4.4 引張強度試験結果

セメント 種類	W/B (%)	温度(°C)	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )		
			材齢 (day)		
			7	28	91
改良 BC	55	20	2.2	3.5	3.8
	50		2.7	3.8	4.5
	45		3.2	4.1	5.0

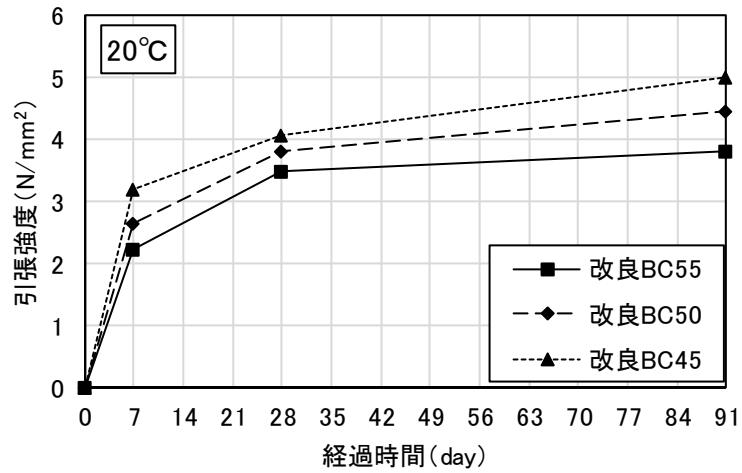


図-4.4 改良 BC の引張強度 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

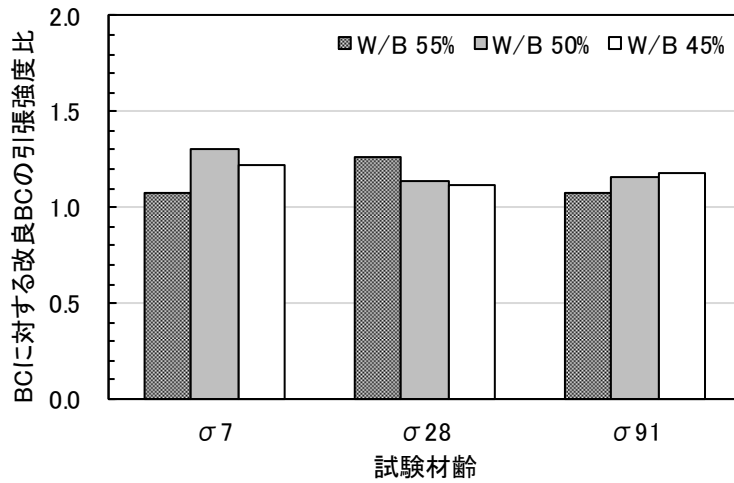


図-4.5 BCに対する改良 BC の引張強度比 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

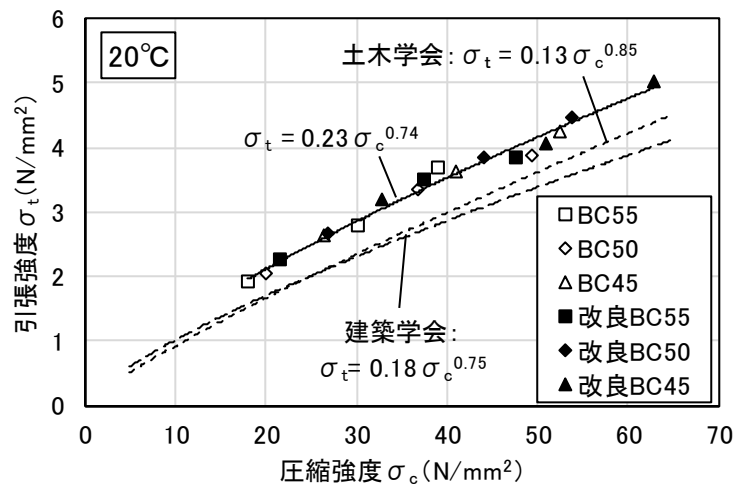


図-4.6 圧縮強度と引張強度の関係



改良 BC を用いたコンクリートの静弾性係数について JIS A 1149 に従い測定した結果を表-4.5 および図-4.7 に示し、BC と改良 BC の静弾性係数の比を図-4.8 に示す。また、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4.9 に示す。静弾性係数についても圧縮強度同様、改良 BC の方が BC よりも高くなる結果が得られ、圧縮強度と静弾性係数についても相関関係が認められた。

表-4.5 引張強度試験結果

セメント種類	W/B (%)	温度(°C)	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )		
			材齢 (day)		
			7	28	91
改良 BC	55	20	25.1	32.7	36.5
	50		26.6	33.8	38.0
	45		28.6	34.4	36.8

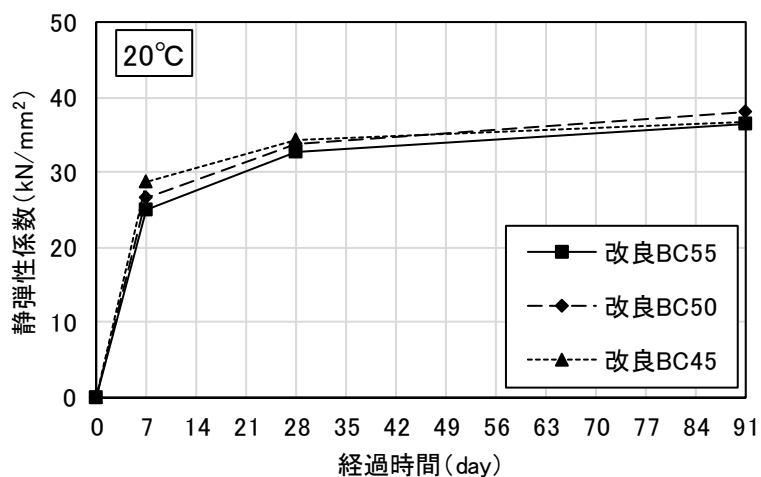


図-4.7 改良 BC の静弾性係数 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

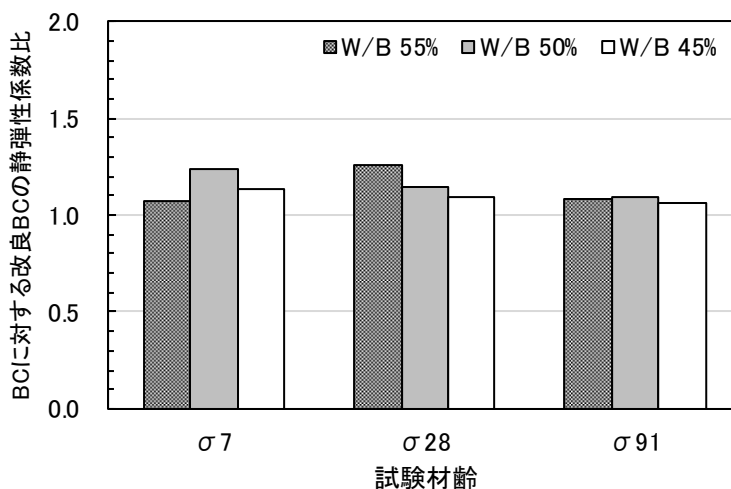


図-4.8 BC に対する改良 BC の静弾性係数比 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

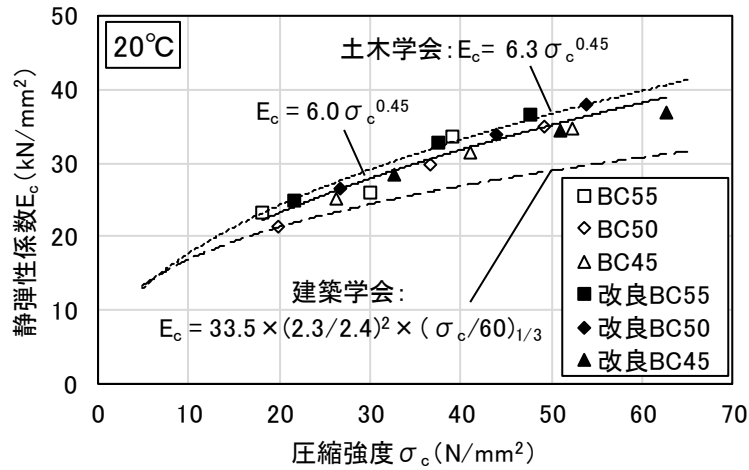


図-4.9 圧縮強度と静弾性係数の関係

改良 BC を用いたコンクリートの曲げ強度について JIS A 1106 に従い測定した結果を表-4.6 および図-4.10 に示し、BC に対する改良 BC の曲げ強度比を図-4.11 に示す。曲げ強度についても圧縮強度同様、改良 BC の方が BC よりも高くなる結果であった。

表-4.6 曲げ強度試験結果

セメント種類	W/B (%)	温度(°C)	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> )		
			材齢 (day)		
			7	28	91
改良 BC	55	20	4.6	7.0	7.6
	50		5.0	7.2	8.2
	45		5.4	7.8	8.4

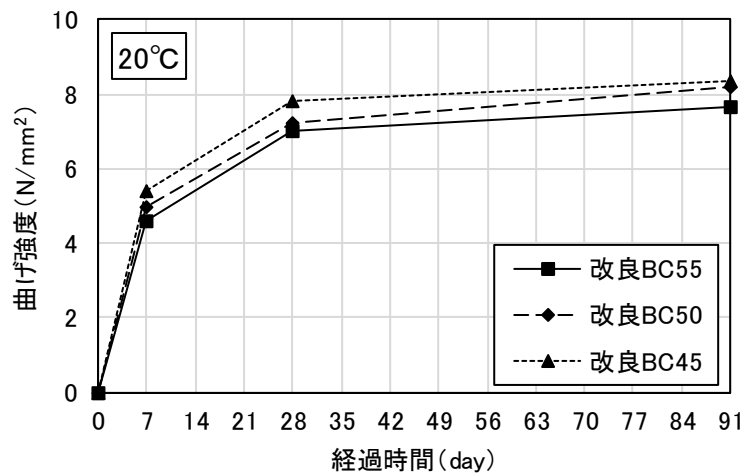


図-4.10 改良 BC の曲げ強度 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

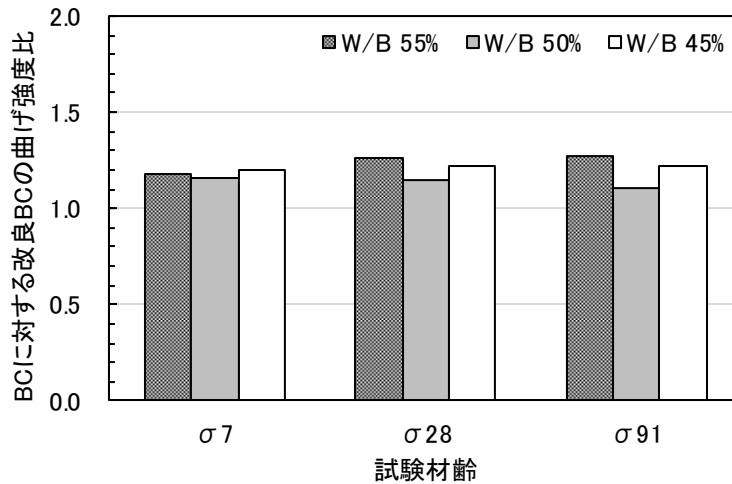


図-4.11 BCに対する改良BCの曲げ強度比 (20°C, W/B=55, 50, 45%)

#### 4.2.2 高炉セメントB種との比較

本検討では第3章と同様に、一般的な土木構造物に適用されている高炉セメントB種と改良型の高炉セメントC種を用いた強度特性の比較を目的として行った。コンクリートの配合を表-4.7に示す。配合の考え方については第3章と同様であるため、本章では説明を割愛する。圧縮強度の比較を図-4.12に示す。改良BCの場合、初期の強度発現性が小さいことが懸念されたが、20°Cの条件下では、改良BC配合とBB配合の圧縮強度は同程度であった。この理由として、改良BC配合では、セメント中に含まれるSO<sub>3</sub>量を一般的な2.00%から3.67%まで増やしたことに加え、BB配合の水結合材比よりも5%低減したことによるものと考えられた。以上の結果より、改良BC配合は、材齢初期においてもBB配合と同程度の強度発現性を有することが確認された。

表-4.7 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	B	S*	G*
BB配合	55.0	48.0	12.0	4.5	165	300(BB)	846	950
改良BC配合	50.0	47.0	12.0	4.5	160	320(BC)	848	963

※細骨材の表乾密度：2.63g/cm<sup>3</sup>，粗骨材の表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>

混和剤：BB配合では汎用のAE減水剤，改良BC配合では改良型の高炉セメントC種専用のAE減水剤を使用した。

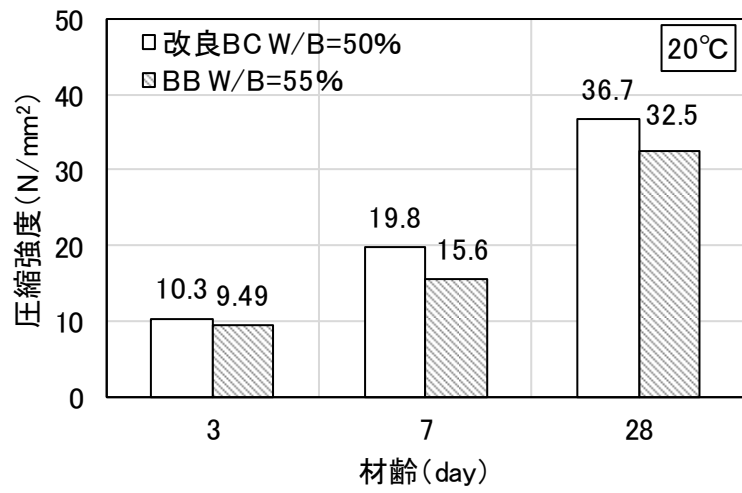


図-4.12 改良BCとBBの圧縮強度の比較

### 4.3 中性化に関する検討

#### 4.3.1 促進中性化試験

改良 BC および BB それぞれを用いたコンクリートについて、水セメント比と中性化速度係数の関係を把握するために促進中性化試験を行った。次に、その実験結果から BB 配合 (W/C=55%) と同等の中性化速度係数が得られる改良 BC 配合の水セメント比を算出することを目的とした。促進中性化試験に供したコンクリートの配合を表-4.8 に示す。促進中性化試験は、養生日数および測定材齢を含め JIS A 1153 のコンクリートの促進中性化試験方法 (20°C, 60%R.H., CO<sub>2</sub> 濃度 5%) に従った。コンクリートの配合は単位セメント量 C=300kg/m<sup>3</sup> を一定とし、単位水量のみを変えた。また、スランプの目標値は設けず、材料分離等が生じていないことを確認した後、供試体を作製した。

促進中性化試験の結果を表-4.9 に、水セメント比と中性化速度係数の関係を図-4.13 に示す。中性化速度係数 ( $A$ ) は、中性化深さ ( $y$ ) が養生期間 ( $t$ ) の平方根に比例する  $\sqrt{t}$  則を基に  $y=A\sqrt{t}$  として導いた。図に示すように、BB の中性化速度係数が 0.69 (W/C=45%) ~ 3.60 (W/C=55%) の範囲にあったのに対して、改良 BC の中性化速度係数は 2.01

表-4.8 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	BB	改良* BC	S	G
BB-45	45.0	43.6	—	4.5	135	300	—	830	1078
BB-50	50.0	43.6	—	4.5	160	300	—	813	1056
BB-55	55.0	43.6	—	4.5	165	300	—	796	1033
改良 BC-45	45.0	43.6	—	4.5	135	—	300	828	1075
改良 BC-55	55.0	43.6	—	4.5	165	—	300	794	1030

※細骨材の表乾密度：2.63g/cm<sup>3</sup>，粗骨材の表乾密度：2.65g/cm<sup>3</sup>，混和剤：BB 配合では汎用の AE 減水剤，改良 BC 配合では改良型の高炉セメント C 種専用の AE 減水剤を使用した。

表-4.9 促進中性化試験の結果

配合名	W/C (%)	測定材齢 (週)	1	4	8	13	26
BB-45	45.0	中性化深さ (mm)	0.6	2.4	3.5	3.9	3.5
BB-50	50.0		1.8	3.7	6.6	8.6	10.1
BB-55	55.0		3.4	7.3	10.6	14.0	18.4
改良 BC-45	45.0		1.8	3.8	6.6	8.6	10.3
改良 BC-55	55.0		5.3	8.3	12.2	15.5	24.3

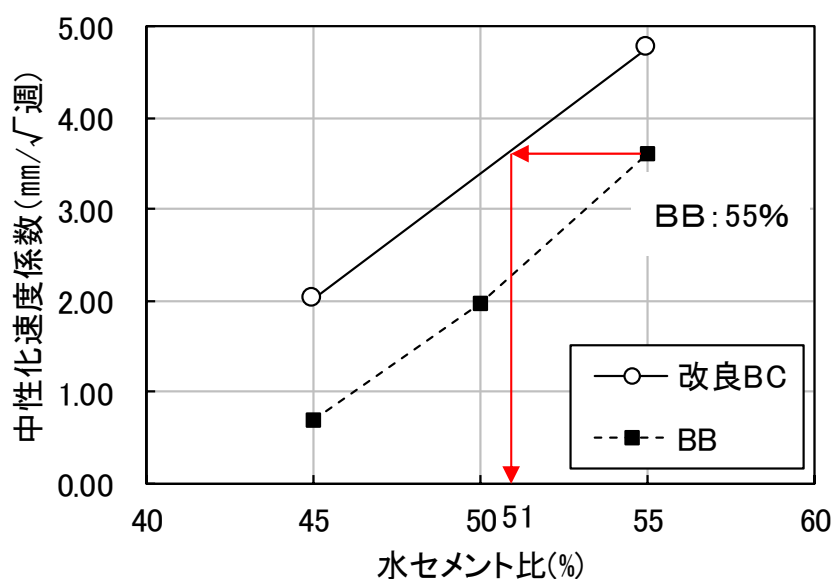


図-4.13 水セメント比と中性化速度係数の関係

(W/C=45%)～4.76 (W/C=55%)であり、同一の水セメント比では改良 BC の方が 1.0 (mm/√週) 程度大きくなる傾向を示した。また、今回の実験で得られた BB の中性化速度係数は、既往の研究 [4.3] やセメントメーカーの技術資料 [4.4] に示される値と同程度であり、一般的な土木用コンクリートの中性化速度係数として妥当な値と考えられる。したがって BB の中性化速度係数を基準とし、これと同程度の値が得られるように水セメント比を定めることで改良 BC の中性化抵抗性が確保できるものと考えられた。同図から、BB の W/C=55% と同等の中性化速度係数が得られる改良 BC の水セメント比は W/C=51% であることから、改良 BC 配合では水セメント比を 50% として設定した。

#### 4.3.2 水分浸透速度係数

2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編] [4.5] では、中性化に伴う鋼材腐食に対する照査に関して、水分の浸透に着目した考え方が新たに取り入れられている。これは、水掛かりのある箇所では鋼材の腐食が生じやすく、乾燥した環境では中性化が鋼材近傍に達しても鋼材腐食が生じにくいいためである。以下、普通ポルトランドセメント、高炉セメ

ント B 種，改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートについて，JSCE-G 582-2018 「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」に従い，水分浸透速度係数を算出した。コンクリートの配合を表-4.10 に，水分浸透速度係数の比較を図-4.14 に示す。なお，供試体は 20°C標準水中養生として，養生日数を 28 日とした。水セメント比 W/C=50%の同一の条件において，改良型の高炉セメント C 種を用いることで，普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種を用いた場合より，水分浸透速度係数が小さくなり，水の浸透に対する抵抗性が大きくなることが分かる。また，2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編] [4.5] に準じ算出した水分浸透係数 (7.81mm/√hr) と比較して，試験で得られた値はそれぞれ小さい値となった。以上の結果より，改良型の高炉セメント C 種を用いることで水和組織が緻密化し，普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種と比較して水分の浸透に対して高い抵抗性を有することが確認された。

表-4.10 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	OPC	BB	改良BC	S	G
OPC-50	50.0	47.0	12.0	4.5	165	330	—	—	846	960
BB-50	50.0	47.0	12.0	4.5	165	—	330	—	841	954
改良 BC-50	50.0	47.0	12.0	4.5	160	—	—	320	848	963

※細骨材の表乾密度：2.63g/cm<sup>3</sup>，粗骨材の表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>，混和剤：OPC および BB では汎用の AE 減水剤，改良 BC では改良型の高炉セメント C 種専用の AE 減水剤を使用した。

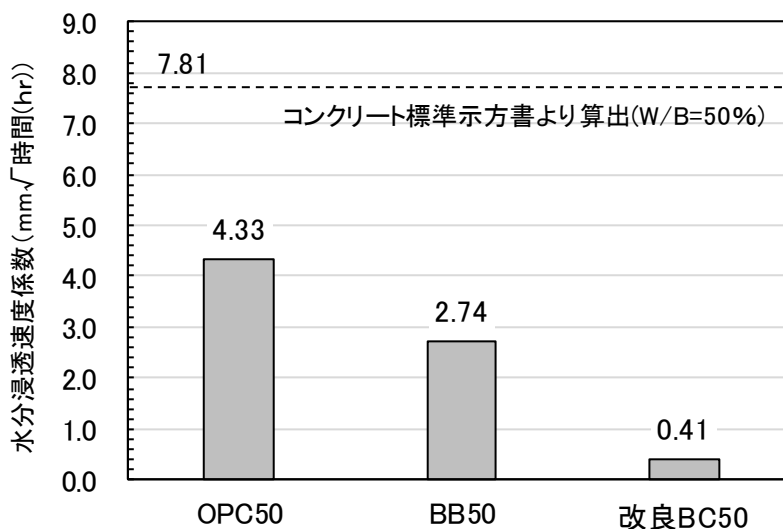


図-4.14 水分浸透速度係数の比較

#### 4.4 41年経過した高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの長期耐久性に関する 検討

高炉セメント C 種以上となる高炉スラグ微粉末の置換率（分量）が 60%以上のコンクリートでは、実環境に長期間暴露したデータはほとんど報告されておらず、とくに土木構造物で使用される水結合材比  $W/B=50\%$ 程度のデータはほとんど存在しない。したがって、実環境下における高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの諸性状に関するデータは、耐久性を適切に評価する上で重要であると考えられる。

筆者らは、高炉スラグ微粉末の比表面積と置換率の異なる高炉セメント高含有セメントおよび高硫酸塩スラグセメントを用いた水結合材比  $W/B=50\%$ 程度のコンクリートブロック試験体の暴露試験を 1975 年より継続的（材齢 91 日、11 年および 21 年）に行っている [4.6]。その中で材齢 41 年目のコンクリートの外観や強度、中性化深さなどの基礎物性と、セメント硬化体の物性やセメント水和物の分析結果を関連付けて整理することで、高炉スラグ微粉末を高含有したセメントを用いたコンクリートの長期耐久性について評価した。

##### 4.4.1 実験概要

###### (1) 暴露試験概要

暴露試験で用いた高炉スラグ微粉末 4000 の化学組成を表-4.11 に、結合材の内訳を表-4.12 に示す。なお、高炉スラグ微粉末 2000 の化学組成については、データが存在しなかったため併記しなかった。結合材の種類として、高炉スラグ微粉末の種類と置換率の異なる 3 種類の高炉スラグ高含有セメントおよび高硫酸塩スラグセメント（以下、BS）を使用した。高炉スラグ高含有セメントは、普通ポルトランドセメントに対し、高炉スラグ微粉末 4000（比表面積  $3860\text{cm}^2/\text{g}$ ）を 68.5%、88.5%置換したもので、それぞれ B4-70、B4-90 とした。また、高炉スラグ微粉末 2000 を 68.5%置換したものを B2-70 とした。なお、硬化促進剤として  $\text{CaCl}_2$  を 1.5%の割合でそれぞれに混合した。BS は高炉スラグ微粉末 4000



表-4.11 高炉スラグ微粉末の組成および密度・比表面積

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱 減量 (%)	化学組成(%)								
				Insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	S
GGBS ※4000	2.90	3860	0.1	0.3	33.6	17.0	0.8	1.0	41.6	4.5	0.0	1.0

※GGBS;高炉スラグ微粉末

表-4.12 結合材の内訳

結合材	普通ポルトランドセメント (wt.%)	高炉スラグ微粉末		刺激剤 (wt.%)
		比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	置換率 (wt.%)	
B4-70	30	3860	68.5	1.5(CaCl <sub>2</sub> )
B4-90	10	3860	88.5	1.5(CaCl <sub>2</sub> )
B2-70	30	2000	68.5	1.5(CaCl <sub>2</sub> )
BS	2	3860	85.0	13.0(CaSO <sub>4</sub> ・2H <sub>2</sub> O)

表-4.13 使用材料

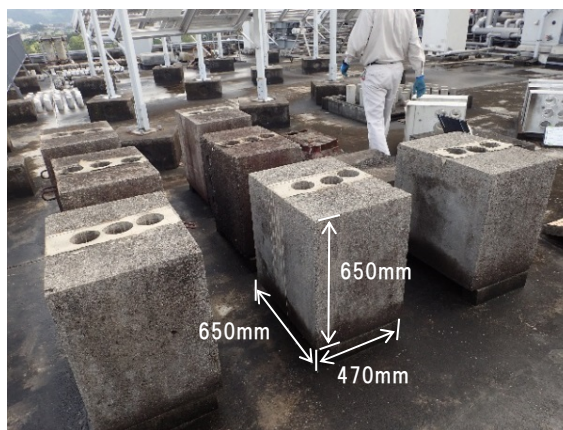
材料名	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント,密度:3.16g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ微粉末 4000	GGBS	密度:2.90 g/cm <sup>3</sup> (GGBS4000のみを記載)
硬化促進剤	CaCl <sub>2</sub>	塩化カルシウム
	CaSO <sub>4</sub> ・2H <sub>2</sub> O	二水セッコウ
細骨材	S	富士川産川砂,表乾密度:2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.6%,F.M.:3.07
粗骨材	G	青梅市成木産硬質砂岩碎石, 表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> ,F.M.:7.05
混和剤	Ad	AE減水剤,リグニンスルホン酸化合物

表-4.14 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

配合名	G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ および空気量	
				W	B*	S	G	SL (cm)	Air (%)
B4-70	25	48.8	43.0	156	320	868	1078	8.0	2.3
B4-90		47.5		152	320	812	1081	7.0	1.6
B2-70		50.0		160	320	805	1072	8.0	2.1
BS		50.0		160	320	805	1072	3.0	2.0

※B: 結合材 (OPC+GGBS+CaCl<sub>2</sub>または CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)

(比表面積 3860cm<sup>2</sup>/g) を 85%, 二水セッコウを 13%, 普通ポルトランドセメントを 2% の割合で混合したものをを用いた。使用材料を表-4.13に, コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状を表-4.14に示す。水結合材比は, 一般的な土木構造物に用いられる W/B=50%程度で, それぞれ B4-70: 48.8%, B4-90: 47.5%, B2-70: 50.0%, BS:

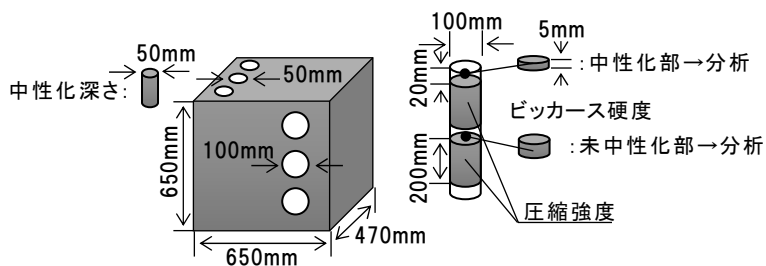


写真－4.1 試験体の暴露状況

50.0%とした。また、目標スランプは7.0cmで、粗骨材の最大寸法25mm、細骨材率43.0%、単位結合材量 $320\text{kg/m}^3$ を一定とし、単位水量を調整して配合を決定した。また、試験体の寸法は、長さ650mm、幅470mm、高さ650mmであり、実験施設（東京都調布市）の屋上に、1975年7月から41年間暴露した。屋上は雨掛りや日射を受ける場所であり、中性化が主な劣化要因として考えられる環境である。暴露状況を写真－4.1に示す。

## (2) 測定項目および方法

$\phi 100\text{mm}$  および  $\phi 50\text{mm}$  のコアを試験体より図－4.15に示す位置にて採取し、表－4.15に示す試験を実施した。中性化深さは、暴露上面より採取した $\phi 50\text{mm}$ のコア試験体3本を割裂し、JIS A 1152（コンクリートの中性化深さの測定）に従いフェノールフタレイン溶液を噴霧して、無呈色部分を中性化深さとして測定した。圧縮強度およびビッカース硬度



図－4.15 試料の採取位置

表-4.15 試験項目

試験項目	測定方法	備考
中性化深さ	JIS A 1152	φ50mmコア
圧縮強度	JIS A 1101およびJIS A 1108	φ100mmコア
静弾性係数	JIS A 1149	φ100mmコア
ビッカース硬度		表層から30mm
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータによる	中性化部 未中性化部
Ca(OH) <sub>2</sub> の定量	TG-DTAによる	
セメント水和物の同定	XRDによる	
C-S-Hの分解	FT-IRによる	
組織観察	SEMによる	

はφ100mmの供試体を用いた。なお、圧縮強度試験は表層から20mmの部分を切除して試験に供し、ビッカース硬度については、測定条件は荷重0.2HV（1.961N）、保持時間5秒、測定間隔は表面から深さ方向に2～3mm間隔とし、各測点において10点のビッカース硬度の平均値にて算出した。

細孔径分布と化学分析の分析箇所は、先行して測定した中性化深さの最小値が7mm程度であったことを踏まえ、φ100mmのコア試験体の表層から5mmの範囲を中性化部、220～240mmの範囲を未中性化部と区別した。細孔径分布は水銀圧入ポロシメーター（以下、MIP）にて、Ca(OH)<sub>2</sub>量は示差熱-熱重量測定（以下、TG-DTA）により測定した。MIPおよびTG-DTAの測定に用いた試料はモルタル部を回収後2.5～5.0mmに整粒し、アセトンに浸漬させた後に、真空乾燥を行った試料にて測定した。また、TG-DTAに用いた試料は、モルタル部分の細骨材が可能な限り混入しないように乳鉢を用いて粗砕し、100μmふるいでふるい分け、100μm以下の試料を分析試料とした。Ca(OH)<sub>2</sub>は、TG-DTAにて測定される400～500℃の脱水量と試料中に含まれる骨材由来の不溶残分を測定した不溶残分量から、ペースト量あたりに換算して算出した。

X線回折（以下、XRD）およびフーリエ変換赤外分光光度計（以下、FT-IR）の測定用の試料は、TG-DTAに用いた試料と同様の試料を分析試料とした。走査型電子顕微鏡（以下、SEM）を用いた水和組織の観察は、中性化部と未中性化部より採取したコンクリート試料より、5.0mm角のモルタル部を採取し、MIP同様に水和停止した試料を用いて、反射電子

像を撮影した。なお、観察条件は低真空モード、チャンバー内気圧 50Pa、加速電圧 10kV とし、観察倍率は 1000 倍とし、破断面の観察を行った。

#### 4.4.2 実験結果および考察

##### (1) 外観調査

暴露試験体の外観を図-4.16 に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が大きい場合炭酸化が進行しやすく、それに伴い、表層が脆弱化するアブサンデン現象 [4.7] が生じる可能性があることが指摘されている。B4-70 および B2-70 においては、表層部分の目立った劣化は認められず健全な状態であった。一方で、B4-90 の暴露上面および BS の暴露上面と暴露上面側の角において表層部のペーストの剥離が散見された。この傾向は、とくに BS において顕著であり、粗骨材が露出している箇所が確認された。魚本ら [4.7] は、高炉スラグ微粉末の置換率が高含有となる結合材において、普通ポルトランドセメントが 10%以上含まれる場合には、アブサンデン現象は生じなかったことを報告している。今回の結果についても結合材中の普通ポルトランドセメントの量で整理することができ、置換率が 10%以下

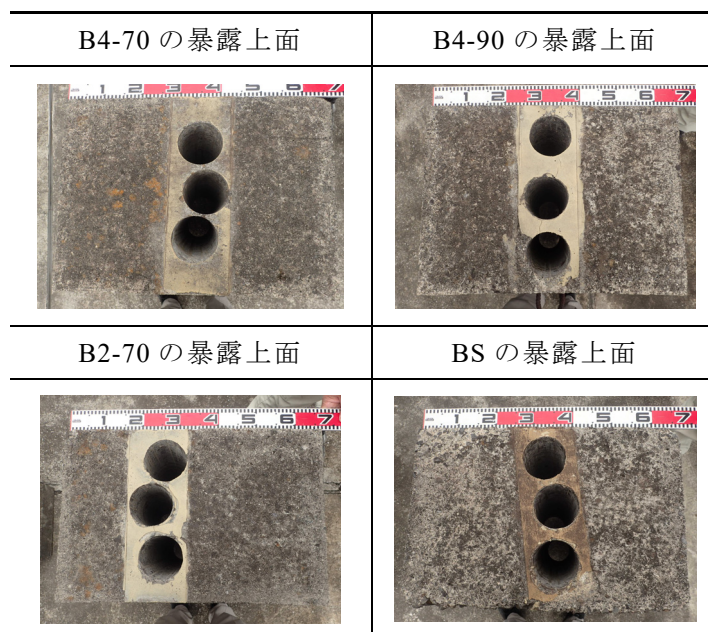


図-4.16 41年間暴露した試験体の外観

となる B4-90 および BS は表層部分の剥離等の劣化が確認されたのに対し、普通ポルトランドセメントの置換率が 30% の B4-70 および B2-70 では、表層部分の劣化は確認されなかった。よって、今回の劣化原因は、アブサンデン現象によって生じたものと考えられる。

## (2) 力学的特性

圧縮強度と材齢の関係を図-4.17 に示す。全ての配合において、材齢 91 日から 11 年にかけて圧縮強度が増加する傾向が確認された。その後は、B4-70 および BS においては 21 年から 41 年で圧縮強度が増加し、B4-90 および B2-70 においては 21 年よりわずかに低下したものの、同程度の圧縮強度が保持されている。また、材齢 41 年の圧縮強度は、B4-90 の方が B4-70 と比較して小さいものの、材齢 91 日から材齢 41 年での強度の増加率としては大きく、長期に亘って高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が発揮されたことで、長期強度が増進したものと考えられる。B2-70 の材齢 41 年の強度が B4-70 より小さい理由は、B2-70 の高炉スラグ微粉末 2000 の比表面積が B4-70 の GGBS 4000 よりも小さいため、潜在水硬性を発揮するための反応面積が小さくなったためであると考えられた。さらに、BS の圧縮強度は、他の配合と比較して 20~30N/mm<sup>2</sup> ほど大きい結果であった。これについては、未中性化部の細孔径分布および生成したセメント水和物の測定結果を踏まえて後述する。

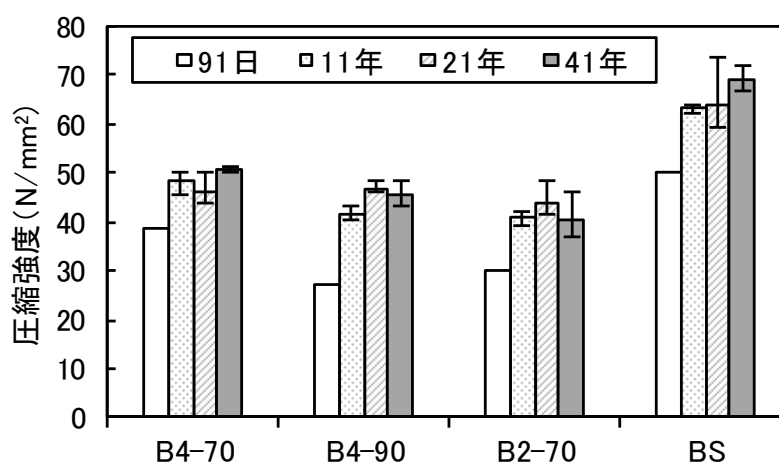
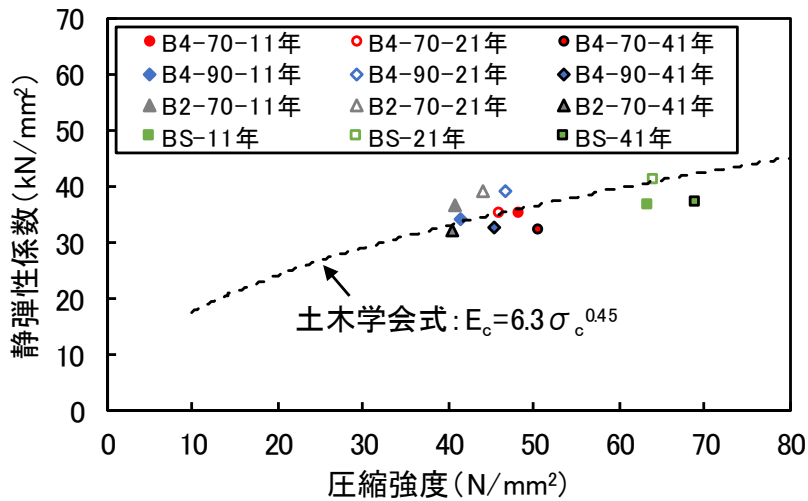


図-4.17 圧縮強度と材齢の関係



図－4.18 圧縮強度と静弾性係数の関係

次に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図－4.18に示す。なお、図中に土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕〔4.8〕の関係式を併せて示す。材齢11年、21年および41年における圧縮強度と静弾性係数の関係は、土木学会の関係式と概ね合致しており、一般的な土木構造物に用いられるコンクリートと同等の関係が得られた。

### (3) 中性化の進行に関する考察

一般的に高炉スラグ高含有セメントは、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合よりも中性化の進行が速いとされており、中性化速度を踏まえた上で実構造物への適用方法を検討する必要がある。そこで、コンクリート標準示方書〔設計編〕の中性化速度推定式(4.1)(以下、JSCE式)より算出される中性化深さと実測値の関係について検討した。JSCE式は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを実環境に暴露した時の中性化深さに基づき算出されており、材料定数 $k=0.7$ を用いることで高炉スラグ微粉末を用いる場合の中性化深さを推定している。各材齢における中性化深さを図－4.19に示す。また、JSCE式より算出した中性化深さを図中に併せて示す。推定式の条件を以下に示す。

$$y = -3.57 + 9.0W/(C_p + k \cdot A_d) \quad (4.1)$$

$$C_p = B \cdot (1 - P_{GGBS}) \quad (4.2)$$

$$A_d = B \cdot P_{GGBS} \quad (3) \quad (4.3)$$

ここに、 $y$ ：中性化速度係数（mm/√年）

$W$ ：単位体積あたりの水の質量（kg/m<sup>3</sup>）=160kg/m<sup>3</sup>

$C_p$ ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量（kg/m<sup>3</sup>）

$K$ ：混和材の種類により定まる定数（高炉スラグ微粉末の場合  $k=0.7$ ）

$A_d$ ：単位体積あたりの混和材質量

$B$ ：単位結合材量（kg/m<sup>3</sup>）=320kg/m<sup>3</sup>

$P_{GGBS}$ ：結合材中に占める GGBS の置換率（ $P_{GGBS}=45\%$ 、 $70\%$ 、 $90\%$ とした。）

高炉スラグ微粉末を 70%置換した結合材を用いたコンクリートの推定中性化深さは、B4-70 の中性化深さの実測値と比較して、材齢 11 年を除く材齢 91 日、21 年では同程度であり、材齢 41 年では 5mm 大きく評価する結果が得られた。また、高炉スラグ微粉末を 90%置換した結合材を用いたコンクリートの推定中性化深さは、B4-90 に対して材齢 41 年では

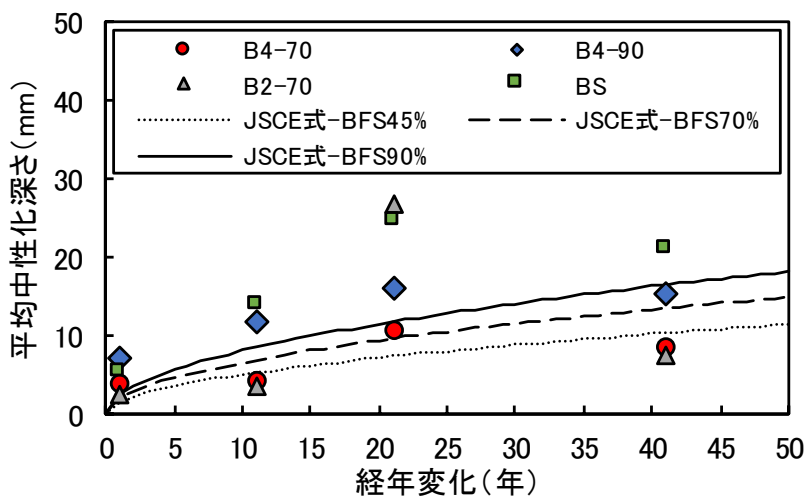


図-4.19 中性化深さの経年変化

同程度の値であり、それ以前の材齢 11 年，21 年においては，3mm 程度小さく評価する結果であった。また，材齢 41 年の B4-70，B2-70 の中性化深さは，高炉セメント B 種相当の高炉スラグ微粉末の置換率 45% のセメントを用いたコンクリートの推定中性化深さよりも小さい値となり，本実験の結果の範囲では，実環境下において高炉スラグ微粉末の置換率が 70% のセメントを用いたコンクリートの中性化は比較的緩やかに進行するものと考えられた。

次に，コンクリート中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  について考察する。既往の知見 [4.9] によると，結合材中の高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるに従い，生成される  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量は線形的に減少することが報告されている。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  はコンクリートの pH を高アルカリに維持する働きがあり，炭酸化によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  を消費した箇所から中性化が進行していくとされている。図-4.20 で示すように，暴露 41 年目の中性化深さと結合材中の普通ポルトランドセメントの割合の関係には相関があり，本結果においても結合材中に占める普通ポルトランドセメント量の割合の減少によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量の生成量が減少したことが，中性化の進行に対して支配的であったと推測される。

なお，21 年目では全ての配合において中性化深さが大きくなっているが，その明確な理由

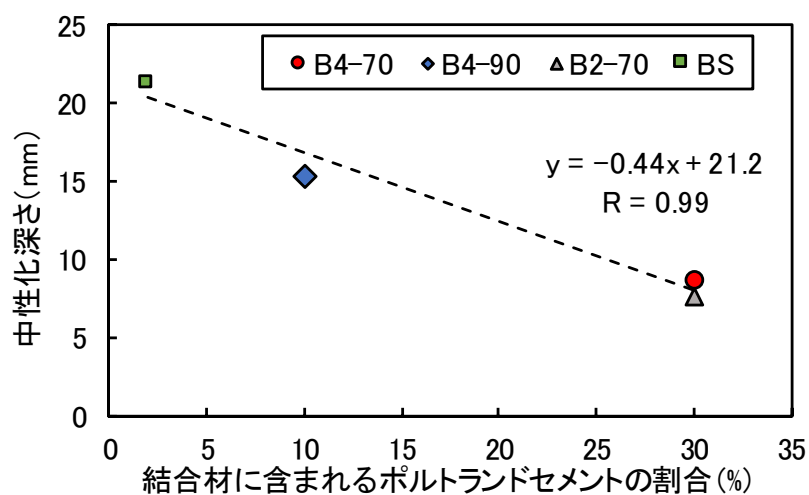


図-4.20 中性化深さと結合材中のポルトランドの割合



は確認できておらず、引き続き検討が必要である。とくに、B2-70 の中性化深さが大きく  
なっている理由については定かではないが、後述する中性化部の細孔量が最も大きい結果  
となっており、物質透過に対する抵抗性が低下した箇所では、より中性化が進行しやすく  
なったものと考えられる。一方で、松田ら [4.2] が検討した実構造物のデータにおいて、  
高炉セメント B 種のデータではあるが、雨掛かりがある環境条件では、40 年経過した時点  
でも中性化深さが 20mm 以下となることが示されており、41 年目の中性化深さの結果につ  
いては妥当であると考えられる。

#### (4) 中性化進行に伴うセメント硬化体の物理的特性の変化

ビッカース硬度について、表層からの深さ方向に対するビッカース硬度と中性化深さの  
関係を図-4.21 に示す。なお、各測点での標準偏差は 4HV 程度、相対標準偏差は 15%程  
度であった。中性化領域のビッカース硬度は B2-70 を除き、表層に近くなるに従い連続的  
にビッカース硬度が低下する傾向が確認された。未中性化部となる中心部で採取したコア  
試験体の圧縮強度の結果が、11～41 年の間に安定して推移していることを踏まえると、中  
性化の影響の及ばない領域のセメント水和物は長期間において健全な状態で存在するもの  
と考えられる。一方で、中性化領域については、セメント水和物の炭酸化に伴い細孔構造  
が疎になったことで、ビッカース硬度が表層に近くなるに従い低下したものと考えられる。  
なお、B2-70 のみコンクリートの表層に近くなるに従い、ビッカース硬度が大きくなる傾  
向を示したが、この理由については、以降に示す細孔径分布および反射電子像の結果と併  
せて考察する。

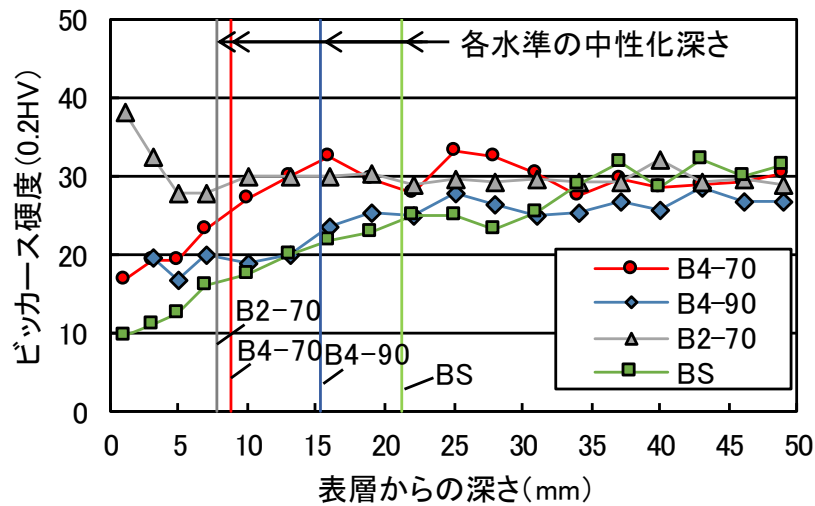


図-4.21 表層からの深さ方向に対するビッカース硬度

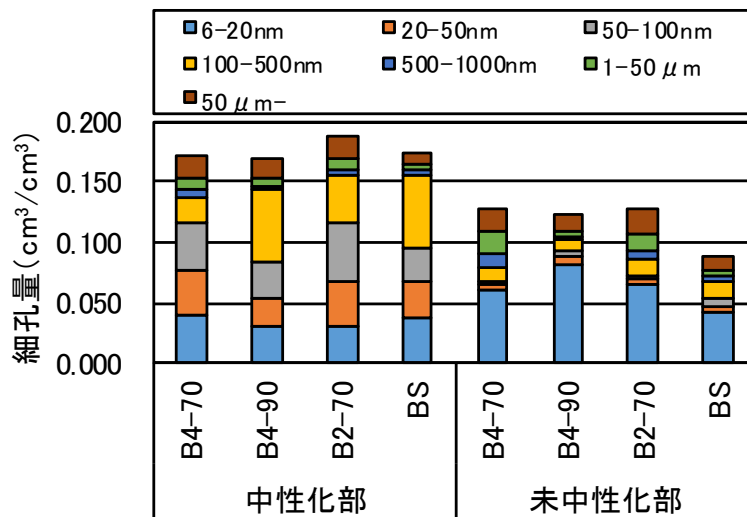


図-4.22 細孔径分布

細孔径分布について、中酸化部および未酸化部の細孔径分布を図-4.22に示す。全ての配合において、未酸化部と比較して中酸化部の細孔径分布は、6~20nmの細孔量の減少、および20~500nmの細孔量の増加、さらに細孔全体量の増加が確認された。上記のような、中酸化に伴う細孔量の増減は、高炉セメント由来のCa/Si比の低いC-S-Hの炭酸化に伴うC-S-Hの多孔化[4.10]によるものと考えられ、前述の中酸化領域におけるビッカース硬度の低下は細孔構造の多孔化によって生じたものと考えられる。また、未酸化部の全細孔量は、BSが最も小さい値となっており、緻密な空隙構造を有していることから、圧縮強度が他の配合と比較して大きくなったものと考えられた。

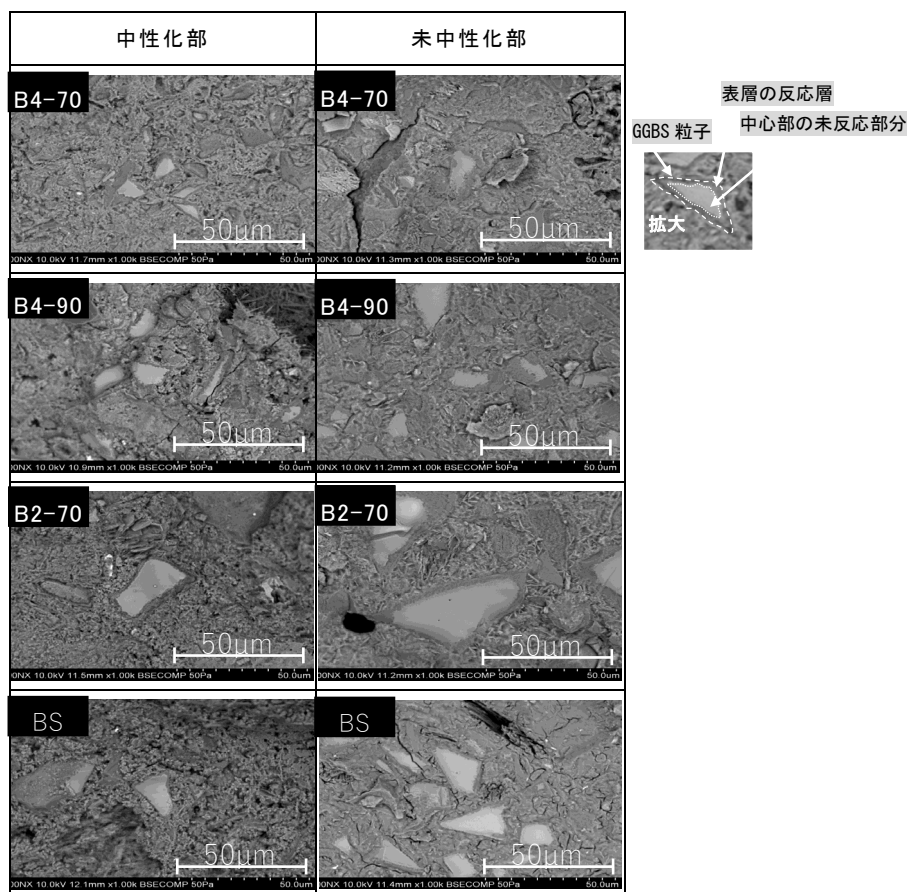


図-4.23 反射電子像

反射電子像について、SEMにより観察された反射電子像を図-4.23に示す。いずれの配合においても、中性化部は未中性化部と比較して、組織が疎になっていることが確認された。また、高炉スラグ微粉末の粒子を見ると、中性化部、未中性化部ともに粒子の中心部に未反応部分が、また表層部には反応層が確認された。

B2-70の表層部のビッカース硬度が大きくなった理由に関して、図-4.22および図-4.23に示されるように、B2-70の中性化部も他と同様に粗になっている一方で、B2-70は比表面積の小さい粗いスラグ微粉末を用いているため、他に比べて粗大な未水和スラグの粒子が確認される。未水和の粒子は水和した部位に比べ硬いことから[4.11]、他の水準とは異なるビッカース硬度の傾向を示した可能性があるが、今後、詳細な検討が必要である。

### (5) 中性化の進行に伴うセメント水和物の変質

1 炭酸化によるセメント水和物の変質について、XRD により同定した主なセメント水和物を図-4.24 に示す。全配合の未中性化部において、エトリンガイトおよび C-S-H のピークが確認された。C-S-H のピークは、結晶性が乏しいため、あまり明確ではないものの、エトリンガイトのピークはとくに BS で大きく、ほかの配合と比較して特異な組成であることが考えられた。このエトリンガイトの生成は、二水セッコウに由来するもの [4.12] と考えられ、BS の未中性化部において、空隙構造の緻密化や圧縮強度の増加に寄与したものと推察される。

次に、中性化部においては、全ての配合においてカルサイトが生成しており、また、BS を除く B4-70、B4-90、B2-70 において、バテライトの生成が確認された。カルサイトとバテライトは結晶構造の異なる  $\text{CaCO}_3$  であり、バテライトは、低 Ca/Si 比の C-S-H の炭酸化の際に生成しやすくなると報告されている [4.13]。今回用いた高炉スラグ微粉末の置換率が 70%以上となるセメントでは、普通ポルトランドセメントの割合が少ないため水和反応によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の生成量も少なくなる。そのため、Ca/Si 比が小さくなり、炭酸化によって組織が多孔化する恐れがある。そこで、C-S-H の炭酸化程度を把握する目的として、FT-IR の測定を行った。

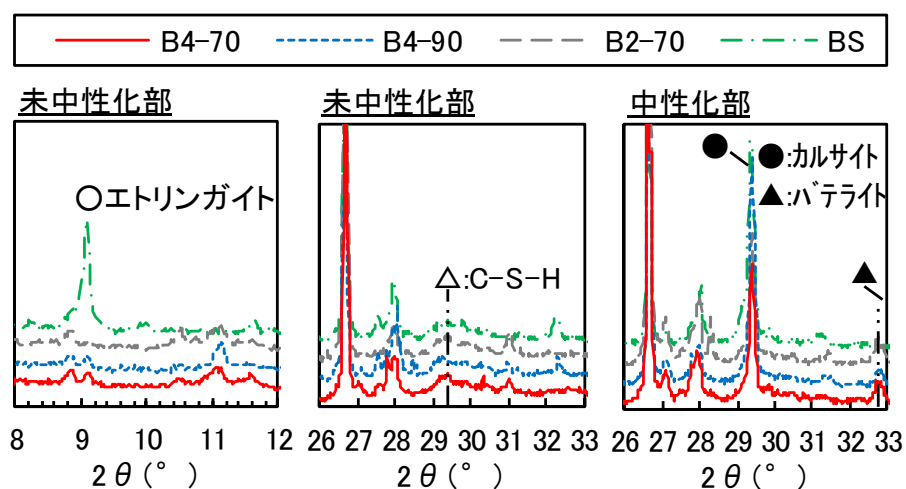


図-4.24 XRD 分析結果

B4-70 の FT-IR 分析結果を図-4.25 に示す。未中性化部は  $960\text{cm}^{-1}$  付近に C-S-H に起因するピークが確認され、中性化部では、 $960\sim 1020\text{cm}^{-1}$  にかけてブロードなピークが確認された。このピークの傾向は、B4-70 以外の他の配合においても同様の傾向が確認されている。C-S-H は炭酸化によって完全に分解された場合、シリカゲルとなり  $1080\text{cm}^{-1}$  にピークを示すとされている [4.14]。また、佐川ら [4.15] は、自然環境下に 52 年暴露された高炉セメント C 種を用いたコンクリートの実構造物において、FT-IR 分析結果により、 $980\sim 1080\text{cm}^{-1}$  にかけて C-S-H に起因するブロードなピークを示しており、中性化領域の C-S-H は炭酸化によって完全に分解しておらず、Ca/Si 比の低下した C-S-H と健全部が混在していると結論付けている。今回の結果は、佐川らの結果と同様の傾向を示していることから、高炉スラグ微粉末を 70% 以上置換した材齢 41 年のコンクリートにおいても、中性化領域では C-S-H が完全に分解されておらず、C-S-H として残存しているものと考えられる。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  の残存について、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の定量結果を表-4.16 に示す。B4-90 および BS は未中性化部において  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が検出されなかった。その理由として、結合材中のポルトランドセメント量が 2% および 10% と少ない場合は、ポルトランドセメントの水和によって生成する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が高炉スラグ微粉末の水和反応に伴い供給される Si, Al イオン等と反応し、

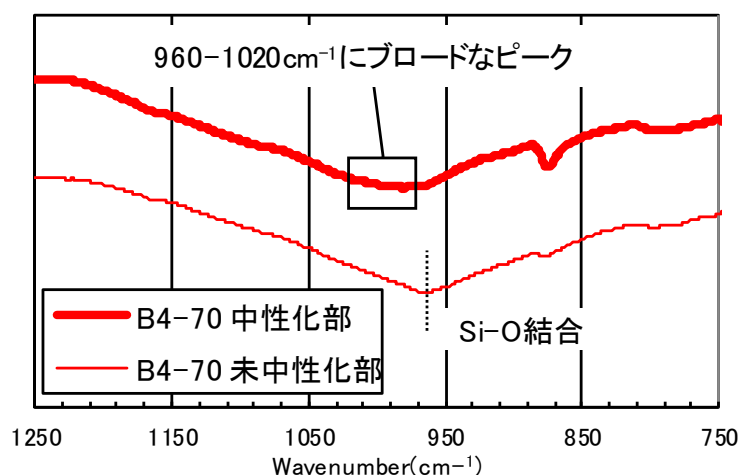


図-4.25 FT-IR 分析結果

表-4.16 未中性化部における  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の定量結果

	B4-70	B4-90	B2-70	BS
$\text{Ca}(\text{OH})_2(\%)$	3.2	0.0	3.1	0.0

C-S-H, C-A-H, エトリンガイト等の水和物の生成に消費されたため、未中性化部においても検出されなかったと考えられる。一方で、B4-70 および B2-70 では、未中性化部において、それぞれ 3.2%、3.1%の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が残存することが確認された。

材齢 41 年の中性化深さは、B4-70 および B2-70 では 10mm 以下であり、推定された高炉セメント B 種の中性化深さよりも小さい値であった。ポルトランドセメントの量が 30% であれば  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が残存した状態から中性化が進行するのに対し、BS, B4-90 のような 2% および 10% では  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が残存しない状態から中性化が進行しているものと考えられる。本研究の範囲において、B4-70 および B2-70 では、予測式より推定した高炉セメント B 種の中性化深さよりも小さかったことから、コンクリート中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の残存の有無により中性化進行のメカニズムが異なり、予測式と乖離した可能性が考えられる。また、コンクリート中の鉄筋を防食するという観点から、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  はコンクリート中の pH を保つ上で重要であり、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が残存していることで、pH は安定的な状態であると考えられる。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の残存によって、鉄筋防食効果が期待できるものと考えられ、実構造物へ適用できる可能性が示唆される結果であった。これに加えて、前述したとおり、高炉セメント C 種では水の浸透が普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種と比較して小さくなること [4.16] が知られており、鉄筋の防食という観点から耐久性が高いと言える。今回の結果を踏まえると、かぶりの設計を適切に行うことで、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートであっても、十分に実構造物に適用できるものと考えられた。

## 4.5 まとめ

本章では、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの強度特性および耐久性に関する検討結果について示した。その結果、以下の点を明らかにした。

- ・同一の水結合材比の条件において、改良 BC では BC と比較して、1.20 倍程度の強度増進が認められた。これは、結合材中の  $\text{SO}_3$  量を 3.5%程度まで増加させることで高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を含む初期の水和反応が促進されたものと考えられ、材齢初期の段階から強度増進できることが確認された。
- ・静弾性係数、曲げ強度や引張強度は、圧縮強度と相関があり、改良 BC では BC と比較して、全ての値において大きくなる。
- ・BB との比較において、改良 BC 配合は、材齢初期においても BB 配合と同程度の強度発現性を有する。
- ・BB の  $\text{W/C}=55\%$  と同等の中性化速度係数が得られる改良 BC の水セメント比は  $\text{W/C}=50\%$  程度であることが確認された。
- ・水分浸透速度係数に関して、改良型の高炉セメント C 種を用いることで水和組織が緻密化し、普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種と比較して水分の浸透に対して高い抵抗性を有する。
- ・41 年間の暴露試験の結果、高炉スラグ微粉末を 70%置換した供試体では、目立った表層品質の低下はなく健全な状態であった。一方で、90%置換したものでは暴露上面において、高硫酸塩スラグセメントの暴露上面および暴露上面側の角において表層部のペーストの剥離が認められた。
- ・41 年間の暴露試験では、全ての配合において材齢 91 日から 11 年にかけて圧縮強度が増加した。11 年から 41 年にかけては、著しい強度低下はなく健全であることが確認された。

- ・材齢 41 年目の中性化深さと各結合材に占める普通ポルトランドセメントの割合の関係には相関があり，結合材中に占める普通ポルトランドセメントの量の割合の減少によって  $\text{Ca(OH)}_2$  量の生成量が減少したことが，中性化の進行に対して支配的であったと推測される。
- ・材齢 41 年の高炉スラグ微粉末を 70% 置換した高炉セメントを使用したコンクリートにおいて，水結合材比が 50% の場合では中性化深さは 10mm 以下であり，未中性化部に  $\text{Ca(OH)}_2$  が残存することが確認された。

#### 【参考文献】

- [4.1] 橋本 学，倉田和英，林 大介： $\text{SO}_3$  量の異なる高炉セメント C 種を用いたコンクリートのフレッシュ性状および強度特性，土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集，V-208，pp.415-416，2018.9
- [4.2] 松田芳範，上田 洋，石田哲也，岸 利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010.6
- [4.3] 和地正浩，米澤敏男，三井健郎，井上和政：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす  $\text{SO}_3$  量の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.203-208，2011.6
- [4.4] 太平洋セメント（株）：セメント総合技術資料，p.40
- [4.5] 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p.152-153，2017
- [4.6] 中原 康，小谷一三，檜原 健，平田重信：スラグセメントコンクリートの研究（その 2），鹿島建設技術研究所年報，Vol.24，pp.19-24，1976
- [4.7] 魚本健人，小林一輔，星野富夫：高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコ



- ンクリートの劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, pp.69-72, 1980.6
- [4.8] 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編], p.155, 2017
- [4.9] 郭 度連, 國府勝郎, 宇治公隆：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの中性化進行速度の評価, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.49-59, 2005.5
- [4.10] 坂井悦郎, 金 尚奎, 大門正機：高炉スラグセメント硬化体の炭酸化反応による多孔化の抑制方法, セメント・コンクリート論文集, No.41, pp.714-719, 1995.3
- [4.11] Chuanlin Hu, Zongjin Li, Yueyi Gao, Yunge Han and Yamei Zhang : Investigation on microstructures of cementitious composites incorporating slag, *Advances in Cement Research*, 26(4), pp.222-232, 2014
- [4.12] 安齋剛史, 西川 真, 池尾陽作, 坂井悦郎：高炉スラグ高含有セメントの水和反応解析, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.22-27, 2009.3
- [4.13] 佐川孝広, 名和豊春：高炉セメントの水和反応に及ぼす養生条件と炭酸化の影響, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.3, pp.23-35, 2007.9
- [4.14] 鈴木一孝, 西川直宏, 林 知延：Ca/Si比の異なるC-S-Hの炭酸化, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.18-23, 1989.3
- [4.15] 佐川孝広, 植木康知, 松下哲郎, 閑田徹志, 米澤敏男, 坂井悦郎：高炉セメントC種を用い52年経過した構造物の長期耐久性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.28, pp.47-59, 2017.5
- [4.16] 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, コンクリートライブラリー151, pp.186-196, 2018

## 第 5 章

実規模試験体によるコンクリートの  
施工性ならびに各種物性の検証



## 第 5 章 実規模試験体によるコンクリートの施工性ならびに各種物性の検証

### 5.1 はじめに

本章では、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートを土木分野の実構造物へ適用することを目的とし、実規模試験体による施工性に関する実験を行った（実験Ⅰ）。この実験では、土木学会「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針」（コンクリートライブラリー145）[5.1]（以降、指針）に示す材料分離抵抗性，振動締固め性に関する照査図から充填性を考察した。次に，指針における適切なスランプを有する改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートによって，再度，実規模試験体による実験を行い（実験Ⅱ），かぶり部の充填性および表層部の緻密性等について検討を行った。

これら施工性に関する 2 つの実験は冬期および夏期に実施し，冬期および夏期における構造体強度を把握するとともに，それぞれの時期において作製したマスブロックより得られた熱特性と第 3 章で示した室内試験で得られた熱特性のデータをもとに，改良型の高炉セメント C 種の温度ひび割れ抑制効果に関する評価を行った。

## 5.2 施工性に関する実験 I (冬期)

### 5.2.1 使用材料およびコンクリートの配合

改良型の高炉セメント C 種 (以降, 改良 BC) のコンクリートの配合 (以降, 改良 BC 配合) として, 市販の高炉セメント B 種 (以降, BB) を用いたコンクリートの配合 (以降, BB 配合) の水セメント比  $W/C=55.0\%$  とし, 改良 BC については  $W/C=50.0\%$  とした。これは, 第 3 章で述べた配合思想に基づいて設定したものである。なお, 施工性に関する実験 I では, 目標スランプを 8cm とした。

改良 BC 配合は, BB 配合と比べて高炉スラグ微粉末の置換率が高くなることから, 単位結合材量におけるポルトランドセメントの絶対量が少なく, セメントと初期に反応する水を少なくすることができ, 単位水量を少なくできることが既往の研究 [5.2] で示されている。事前の試験練りにおいても同様の傾向が認められ, 所定のスランプ 8cm および空気量

表-5.1 使用材料

項目	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	BB	高炉セメント B 種 (密度: $3.04\text{g/cm}^3$ )
	改良 BC	改良型の高炉セメント C 種 (密度: $2.98\text{g/cm}^3$ )
細骨材	S1	東京都西多摩郡奥多摩産砕砂, 表乾密度: $2.65\text{g/cm}^3$ , 粗粒率:3.00
	S2	千葉県市原市万田野産山砂, 表乾密度: $2.58\text{g/cm}^3$ , 粗粒率:2.00
	S3	埼玉県秩父郡横瀬町産砕砂, 表乾密度: $2.65\text{g/cm}^3$ , 粗粒率:3.00
粗骨材	G	東京都西多摩郡奥多摩産碎石, 表乾密度: $2.66\text{g/cm}^3$ , 実積率:60.0%
混和剤	Ad1	改良型の高炉セメント C 種専用の AE 減水剤 (変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)
	Ad2	市販品 AE 減水剤 (変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)

表-5.2 コンクリートの配合

セメント 種類	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )						
				W	C	S1	S2	S3	G	混和剤
改良 BC	50.0	20	48.0	150	300	267	311	311	974	Ad1,C $\times$ 1.1%
BB	55.0	20	48.0	165	300	262	306	305	955	Ad2,C $\times$ 0.7%

4.5%を満足する単位水量として、BB 配合の単位水量  $W=165\text{kg}/\text{m}^3$  に対し、改良 BC 配合では  $W=150\text{kg}/\text{m}^3$  と  $15\text{kg}/\text{m}^3$  減じることができた。耐久性の観点より定めた BB 配合の水セメント比  $W/C=55\%$  と、改良 BC 配合の水セメント比  $W/C=50\%$  を勘案すると、結果として、それぞれの単位セメント量が同一の  $C=300\text{kg}/\text{m}^3$  となった。配合選定の際に用いた混和剤として、BB 配合は汎用の AE 減水剤 (Ad2) を、改良 BC については前述の高炉セメント C 種専用の AE 減水剤 (Ad1) を用いた。使用材料を表-5.1 に、コンクリートの配合を表-5.2 に示す。

### 5.2.2 施工性に関する実験 I の概要

施工性に関する実験で用いた試験体は、図-5.1 に示すように、ボックスカルバート（内空  $4.5\text{m}\times 8.0\text{m}$ ，壁厚  $1.0\text{m}$ ）の側壁部を模擬して製作した（図-5.2）。試験体は、改良 BC 配合と BB 配合の 2 体を作製し、配筋は主筋および配力筋ともに D13 の  $150\text{mm}$  ピッチとして、施工性やコンクリート表層の品質を比較した。打込み速度に関しては、一般的なボックスカルバートの施工方法を基にしており、1 層の打上がり高さを  $50\text{cm}$  として計 7 層にて打ち込むこととした。また、打込み速度として  $20\sim 30\text{m}^3/\text{h}$  を想定し、1 層打ち込むごとに 10 分間空けることで時間あたりの打込み速度の調整を行った。なお、試験体の施工は 12 月の冬期に実施した。

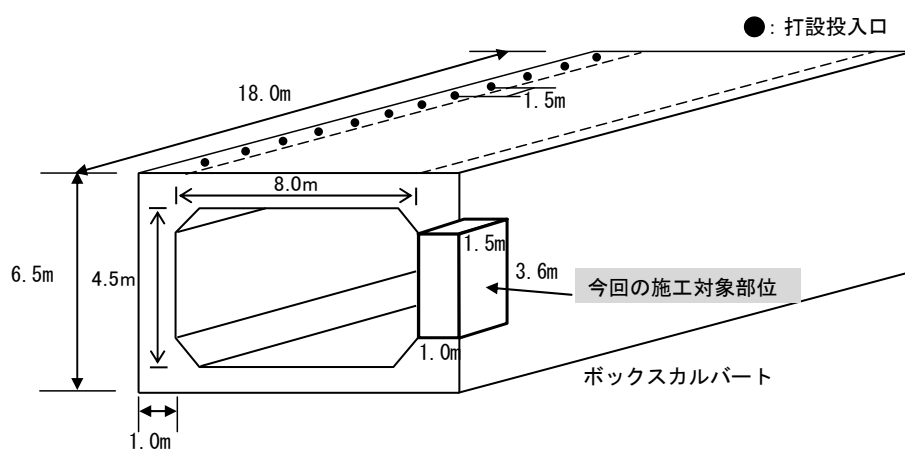


図-5.1 実規模試験体の概念図

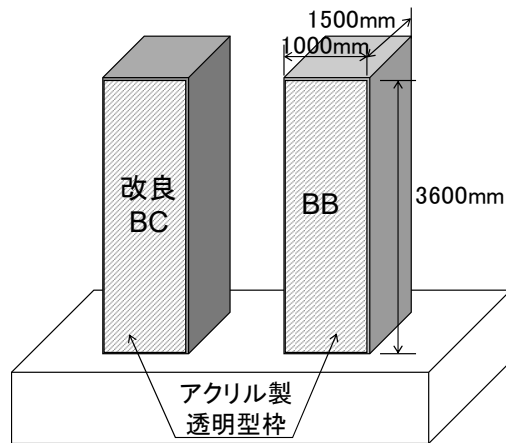


図-5.2 実規模試験体

側面型枠の1面に、アクリル製の透明型枠を使用することとし、随時、打込み状況を確認できるようにした。打込みは、 $0.5\text{m}^3$ のコンクリートバケットを使用し、壁部材の頂部に受けホッパを設けてサニーホースを取り付けた。打込み設備の配置状況を写真-5.1に示す。コンクリートの製造は、レディーミクストコンクリート工場の実機にて実施し、最大練混ぜ容量が $6.0\text{m}^3$ の強制二軸型ミキサ（IHI社製）にて、50秒間練り混ぜた。1回の練混ぜ量を $2.0\text{m}^3$ とし、2回に分けて練り混ぜ、 $4.0\text{m}^3$ をアジテータ車に積み込み運搬した。フレッシュ性状試験は、出荷時、現場到着時および到着後の経時30分でスランプ、空気量およびコンクリート温度を測定した。締固めは $\phi 50\text{mm}$ バイブレータにより10秒程度締固めを行った。養生については、材齢7日まで型枠を残置し、その後、養生マットにて材齢28日まで湿潤養生を実施した。その後、表層透気試験により表層の透気係数を測定した。



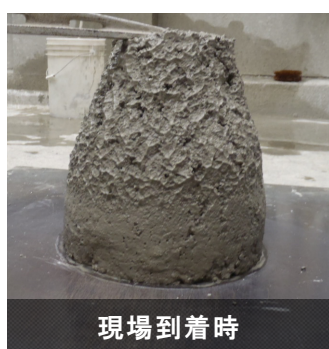
写真-5.1 打込み設備の配置状況

### 5.2.3 施工性に関する実験 I の結果

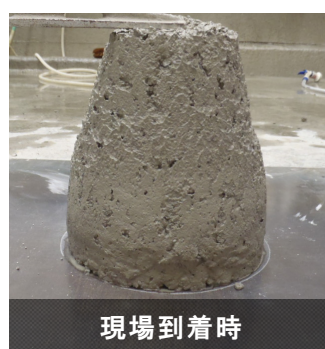
スランプ試験の結果を表-5.3 に示す。また、1 台目の現場到着時のスランプを写真-5.2 に示す。表より、出荷時、現場到着時および到着後 30 分経過のスランプを比較すると、改良 BC 配合の出荷時から現場到着時までのスランプの低下は 2cm 程度であり、その後は現場到着後 30 分まで顕著な変化は認められなかった。また、改良 BC 配合の現場到着時のスランプは BB 配合とほぼ同じ値であったが、スコップによる攪拌時の状況や目視観察では改良 BC 配合のワーカビリティが若干劣るよう見受けられた。実規模施工実験において BB 配合および BC 配合の施工性を確認するため、試験体側面のアクリル製の透明型枠からかぶり部へのコンクリートの打上がり状況を目視にて観察した。結果を図-5.3 に示す。

表-5.3 フレッシュ性状試験結果 (BB および改良 BC)

試験項目	目標値	配合	アジテータ車	出荷時	運搬後(分)	
					0	30
スランプ (cm)	8.0 cm	BB	1 台目	12.0	8.0	8.0
			2 台目	10.0	10.0	9.5
		改良 BC	1 台目	10.0	8.0	8.5
			2 台目	10.5	8.5	8.0
空気量 (%)	4.5%	BB	1 台目	4.5	4.5	3.8
			2 台目	4.1	3.3	3.7
		改良 BC	1 台目	4.6	4.8	5.3
			2 台目	5.3	5.8	5.5
コンクリート温度 (°C)	-	BB	1 台目	12.0	12.9	13.1
			2 台目	12.0	12.5	13.1
		改良 BC	1 台目	12.0	12.8	13.4
			2 台目	12.0	12.6	13.4



( i ) BB 8cm



( ii ) 改良 BC 8cm

写真-5.2 現場到着時のスランプの状況

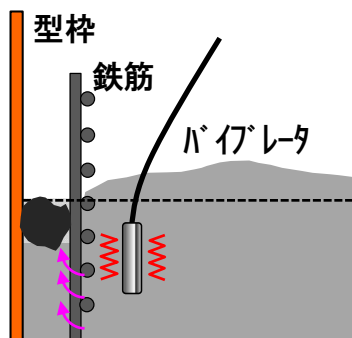




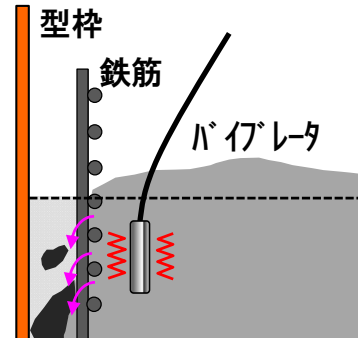
( i ) BB の充填状況



( ii ) 改良 BC の充填状況



( iii ) BB の充填状況模式図



( iv ) 改良 BC の充填状況模式図

図-5.3 スランプ 8cm の充填状況の比較

#### 5.2.4 スランプ 8cm の改良 BC 配合の施工性能に関する考察

前述の施工性に関する実験の結果について、指針に示されている良好な施工性が得られる打込みスランプと単位セメント量の関係と対比することにより考察する。図-5.4 は指針に示される壁部材における施工性能の照査図のうち、今回の施工性に関する実験の条件に該当するものである。

施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案）[5.3]では、「コンクリートの施工性能は、ワーカビリティを満足するフレッシュコンクリートの代表指標であるスランプで一義的に決定されるのではなく、スランプと材料分離抵抗性に関する単位粉体量と構造条件、施工条件の組合せで定量的に評価できる性能と考えた」（1.1 適用の範囲）と記述されている。また、材料分離抵抗性や振動締固め性の照査について、「そのメカニズムはきわめて複雑であるために、現時点ではまだ具体的な方法が整備されるに至っていない。そこで、当面の方法として、材料分離抵抗性や振動締固め性に対する影響の大きい単

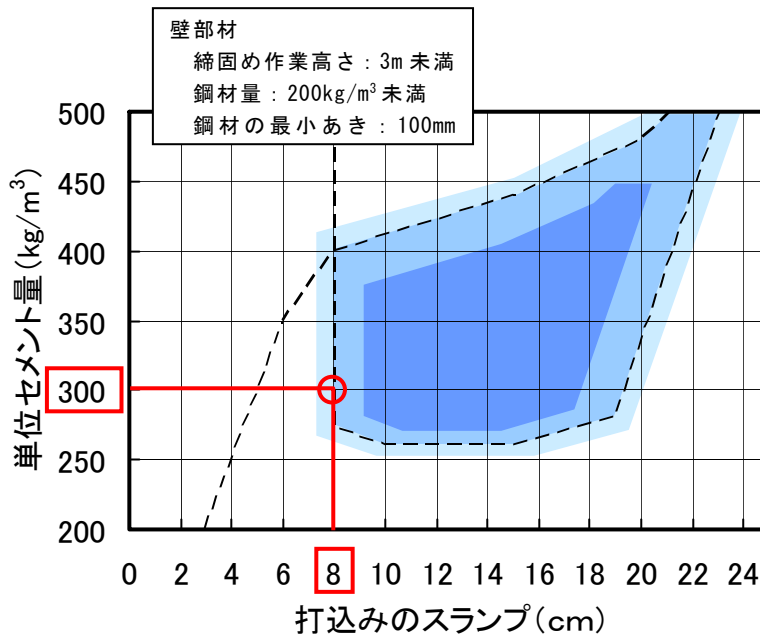


図-5.4 材料分離抵抗性，振動締固め性の照査図

位セメント量を指標として，これらの性能を確認することとした」(2.5.4 単位セメント量の解説)とされている。すなわち，指針の照査図は，コンクリートの施工性能において単位水量や単位セメント量，水セメント比，細骨材率，セメントの種類などの複数の要因が複雑に絡み合っていることを踏まえた上で，照査範囲を色分けによって表し，照査結果にある程度の幅を設けることで，流動性および材料分離抵抗性に与える様々な要因を排除し，指標を打込みのスランプと単位セメント量のみで絞って評価することとした簡易的な手法として示されている。評価対象となる配合のスランプと単位セメント量の組合せが，照査図の色の濃い部分に位置する場合には，流動性と材料分離抵抗性のバランスが良好であり，使用材料やその他の配合要因の影響を受けにくく，一般的な振動締固めにより容易に充填することができるものと考えられる。

一方で，実験における BB 配合と改良 BC 配合は，ともにスランプ 8cm，単位セメント量 300kg/m<sup>3</sup> (赤い円で示された付近)であり，図-5.4 によれば同じ施工性能を有する配合と判断される。しかし，実際の施工状況では，BB 配合では良好な充填性を示したが，改良 BC 配合については振動締固めによる充填がしづらい状況が確認された。BB 配合と改

良 BC 配合の違いを考慮すると、これはスランプと単位セメント量の組合せが照査図の境界線上に位置する場合、スランプと単位セメント量に加えてセメントの種類、単位水量、水セメント比などの影響が顕著となり、同じスランプであっても使用材料や配合によって振動締固めによる充填の容易さが異なることを示唆するものと考えられた。

### 5.2.5 試験体の表面状況および表層の透気性

脱型後の試験体の全景を写真-5.3 に、試験体側面におけるコンクリート表面の状況を写真-5.4 に示す。改良 BC 配合では、図-5.3 で示した前述の打上がり状況で確認されたように、部分的に表面気泡が集中する箇所が確認された。これに対して、BB 配合では、表面気泡はほとんどなく平滑であった。脱型時点での表層透気試験によって得られた各段の表層透気係数の3箇所の平均値を図-5.5 に示す。報告 [5.4] によれば、表層透気試験により得られた透気係数は5段階評価で「優」、「良」、「一般」、「劣」、「極劣」に区分される。図より、結果はすべて  $0.001 \sim 0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$  の透気性評価「優」および  $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$  の透気性評価「良」の範囲内であり、改良 BC の透気係数は上層に従い、「優」に近づく傾向であった。これは、打込みにおいて改良 BC は、下層から上層に従って、十分な締固めが行われたためであると考えられる。

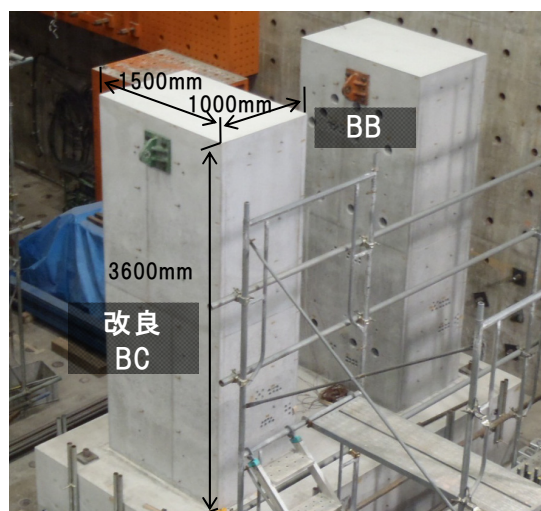


写真-5.3 脱枠後の試験体



( i ) 改良 BC ( 2 ~ 3 段目 )



( ii ) BB ( 2 ~ 3 段目 )

写真-5.4 コンクリートの表層の状況

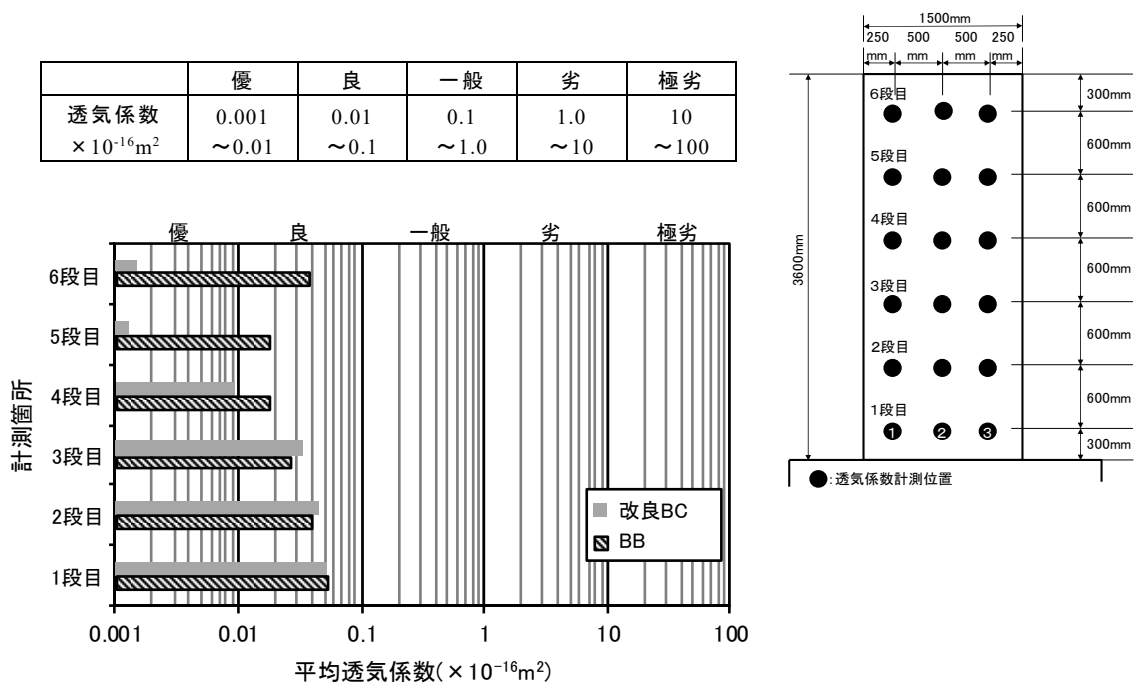


図-5.5 表層透気試験結果

### 5.3 施工性に関する実験Ⅱ（夏期）

#### 5.3.1 施工性能を改善した改良 BC 配合による施工性に関する実験

前述した改良 BC 配合の振動締固めによる充填性の課題を克服するために、配合を変えずに混和剤の添加量のみを増加させ、図-5.6 に示す照査範囲として色の濃い部分に該当する（白い円で示した箇所）打込みのスランプを 14cm とした改良 BC 配合によるフレッシュコンクリートの性状、かぶり部の施工性および表層透気試験によって硬化後の表層部の緻密性を評価するため実規模試験体による施工性に関する実験を行った。

#### 5.3.2 使用材料およびコンクリートの配合

目標スランプ 14cm の改良 BC 配合は、スランプを 8cm から 14cm に変更するために、混和剤の添加量のみをセメント質量に対して 1.1% から 1.45% にまで増加させ、所定のスランプを満足することを確認した。

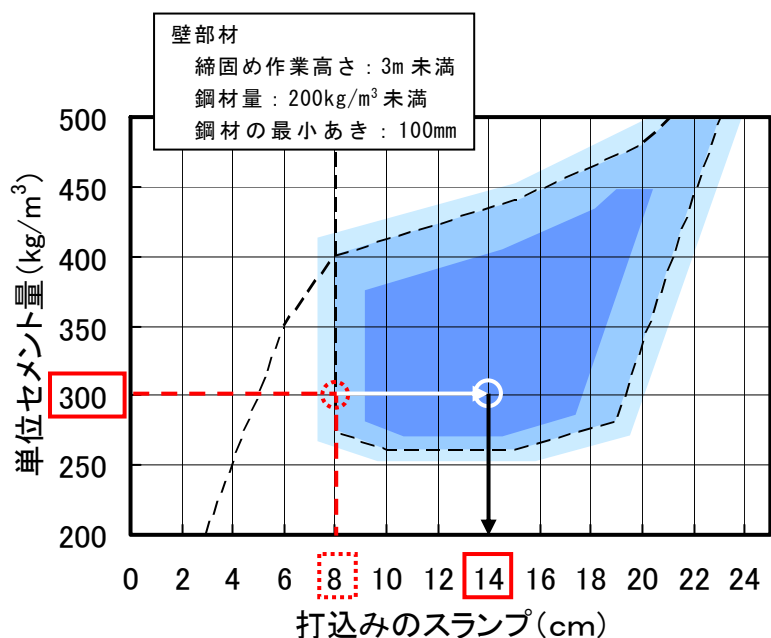


図-5.6 材料分離抵抗性，振動締固め性の照査図

### 5.3.3 試験体の概要および施工方法

本試験では図-5.7に示す壁部材の試験体（幅 0.7m×延長 10.0m×高さ 2.0m）を用い、配筋は主筋を D25、配力筋を D19 でそれぞれ 125mm ピッチにて配置した。打込みは 4t 級のスクイズ式ポンプ（IHI 社製）を用い、φ 50mm バイブレータを用いて締固めを行った。養生は材齢 7 日まで型枠を残置し、その後、ブルーシートにて封緘養生を行った。

### 5.3.4 試験結果および施工状況

コンクリートの打込み状況を写真-5.5 に、スランプ、空気量およびコンクリート温度の試験結果を表-5.4 に示す。また、1 台目の現場到着時のスランプを写真-5.6 に示す。

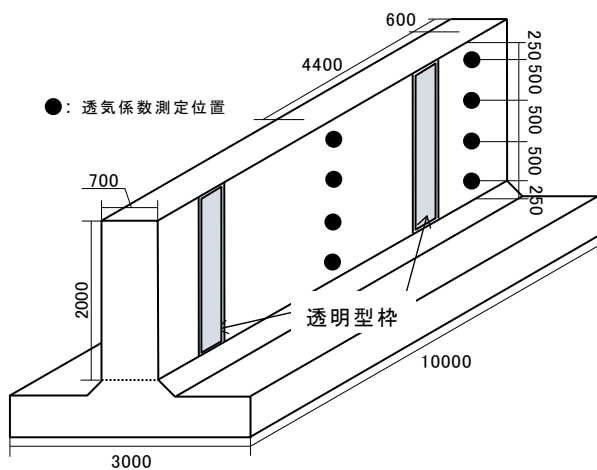


図-5.7 試験体全景



写真-5.5 コンクリートの打込み状況（壁）

表-5.4 フレッシュ性状試験結果（改良 BC 14cm）

試験項目	目標値	配合	アジテータ車	出荷	採取箇所	
					現着	筒先
スランプ (cm)	14.0	改良 BC 14cm	1 台目	12.0	13.5	15.5
			3 台目	13.5	12.0	—
空気量 (%)	4.5		1 台目	4.7	6.9	—
			3 台目	5.7	5.2	—
コンクリート温度(°C)	—		1 台目	28.0	28.4	—
			3 台目	27.0	28.4	—



(i) 出荷時



(ii) 現場到着時

写真-5.6 改良 BC 14cm のスランプの状態



写真-5.7 改良 BC 14cm の充填状況

表より、出荷時、現場到着時、筒先のスランプを比較すると出荷時から現場到着時までのスランプは、1 台目については 1.5cm 程度増加しており、3 台目については 1cm 程度の低下が認められた。筒先におけるスランプについても材料分離等の状況は確認されなかったことから、目標スランプ 14cm とした BC 配合のフレッシュ性状は良好であると判断された。

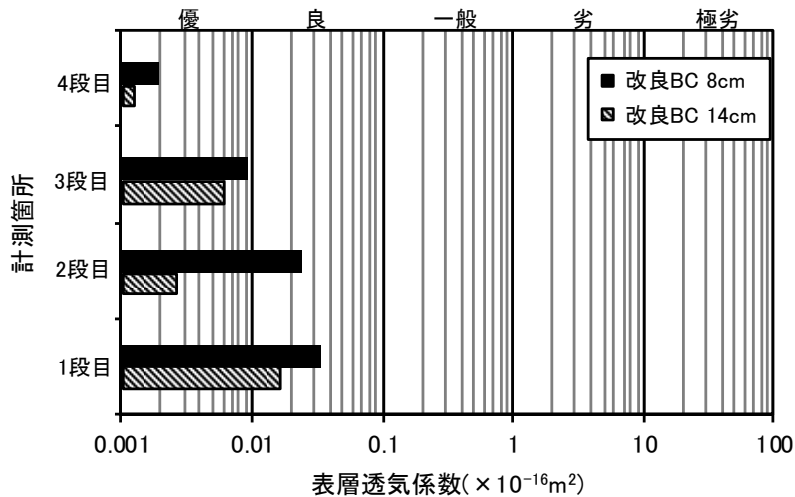


図-5.8 表層透気係数の比較

目標スランプ 14cm の改良 BC 配合においても鉄筋の内側に打ち込まれたコンクリートがバイブレータの振動によってその場で沈み込んでいき、写真-5.7 に示すように、同時にかぶり部の下方から上方にコンクリートが回り込むような状況が確認され、実験 I で確認された BB 配合と同様に良好な充填状況を示した。以上の結果より、照査図の色の濃い位置になるように、改良 BC 配合をスランプ 8cm から 14cm と変更することで、改良 BC を用い、かつ単位水量、単位セメント量を低減した配合においても、実験 I のようなかぶり部分の充填しづらい状況は認められなかった。このことから、図-5.6 に示した照査範囲として良好な施工性が得られる色の濃い部分に位置する単位セメント量、スランプの場合には、他の配合条件の影響を受けず良好な施工性が得られるものと考えられる。

脱型時点での表層透気試験にて得られた各段の透気係数（2 箇所 の 平均値）の比較を図-5.8 に示す。透気試験は図-5.7 で示す箇所 で 測定した。なお、測定した透気係数は、冬期に実施した改良 BC 8cm の結果と比較したもので示す。図より、改良 BC で目標スランプ 8cm の配合は、目標スランプ 14cm の配合ともに「優」および「良」の範囲内であり、振動締固めによってかぶり部分が良好に充填されているものと考えられる。目標スランプ 8cm の配合と目標スランプ 14cm の配合を比較すると、目標スランプ 14cm の配合の透気係



数が低くなっており、表層部が緻密になっているものと考えられる。この理由としては、前述のように目標スランプを 14cm とすることで、表層部の充填が良好になったことが考えられる。また、透気係数は下層から上層に従い、「良」から「優」となる傾向が認められるが、一般的な表層透気試験の傾向 [5.5] とは逆の結果であった。この理由については、引き続き、検討を進める。

## 5.4 冬期および夏期における改良型の高炉セメントC種を用いたコンクリートの硬化性状

改良 BC 配合の実規模試験体および供試体（テストピース）を用いて冬期および夏期の硬化性状のうち、圧縮強度および表層部の透気係数に関する比較を行った。

### 5.4.1 実規模試験体の概要

冬期および夏期に製作した実規模試験体の形状を図-5.9 に示す。施工方法等の詳細については、5.2（実験Ⅰ）および5.3（実験Ⅱ）に述べたとおりである。試験体の施工時期として、冬期試験は12月中旬（打設当日の最高気温 10.1℃）に、夏期試験は9月中旬（打設当日の最高気温 31.7℃）に東京都内（調布市）の実験場にて行った。

なお、夏期において、BB 配合との比較を行っているが、これは供試体（テストピース）のみを採取しており、BB 配合の供試体（テストピース）における硬化物性と改良 BC 配合の供試体（テストピース）およびコア供試体との比較を行った。冬期については、BB 配合でも試験体を製作しており、コア供試体での比較も併せて行っている。

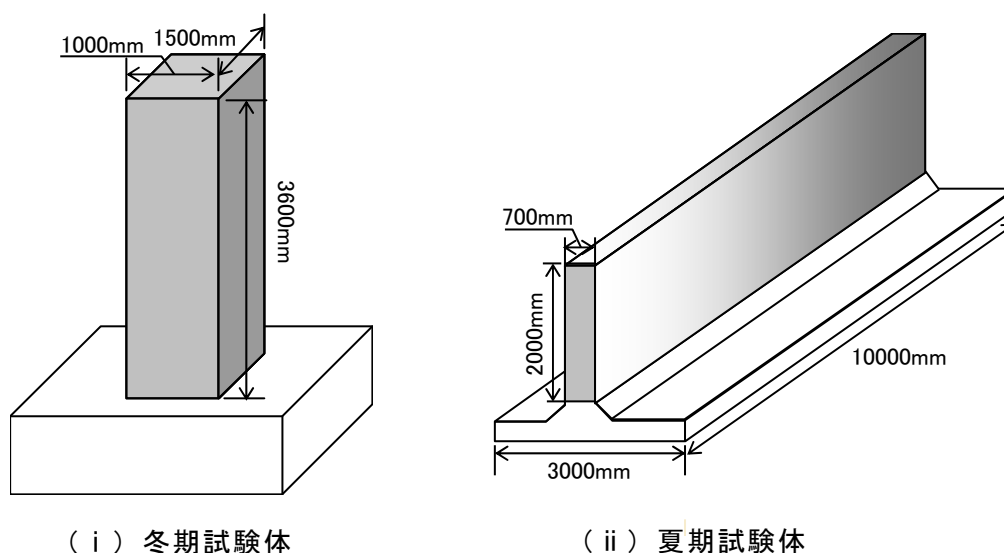


図-5.9 実規模試験体の形状

#### 5.4.2 試験項目

試験項目として、試験体内部の温度計測、テストピースおよびコア供試体による圧縮強度、水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った。

試験体内部の温度計測は熱電対を使用し、冬期試験体では図-5.10に示す底版から高さ1800mmの位置に、中心および側面の2点に設置し、夏期試験体では図-5.11に示す高さ1000mmの位置にて、中心および側面の2箇所にて測定した。

硬化性状試験（圧縮強度試験・細孔径分布測定）の測定箇所を図-5.12および図-5.13に示す。圧縮強度試験は供試体（標準水中、現場気中封緘）および試験体から採取したコ

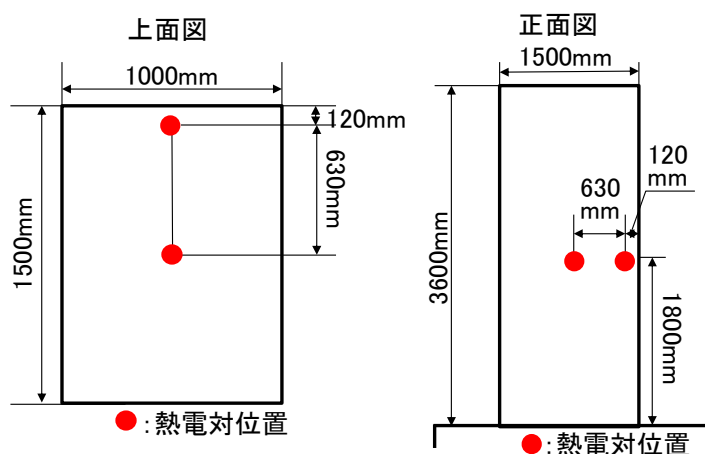


図-5.10 熱電対設置位置（冬期）

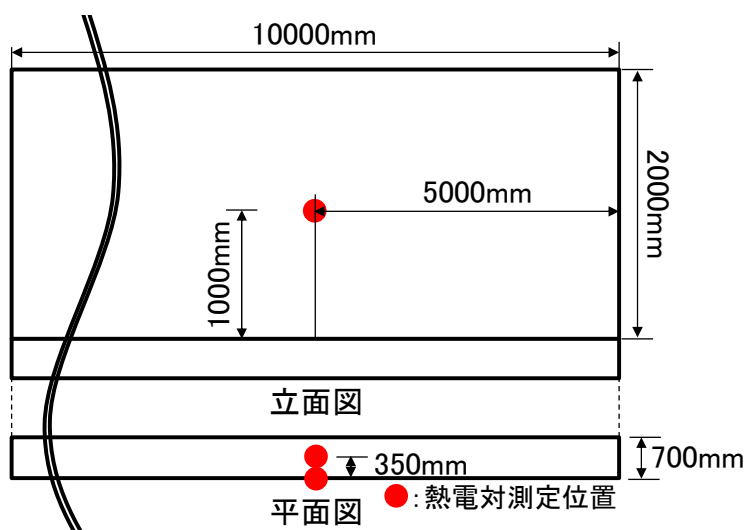


図-5.11 熱電対設置位置（夏期）

アを用いて JIS A 1107 に従って実施した。冬期では底版から 600mm, 2100mm, 2800mm の 3 箇所×3 段=計 9 箇所を  $\phi 100$ mm で採取し, 圧縮強度を平均値で求めた。夏期においては, 躯体中心から鉛直下向きに  $\phi 100$ mm でコアを採取して, 試験体天端から高さが 200mm となるようにコアを切断した。これらのコア (計 16 本) に対し圧縮強度試験を実施した。細孔径分布測定は一面のみとし, 冬期試験体は底版から高さ 425mm, 1550mm, 2825mm の 3 箇所から試料を採取した。夏期試験体は底版から 250mm の位置で, それ以降については高さ方向に 500mm ピッチで 4 箇所から試料を採取した。測定方法は水銀圧入法とした。

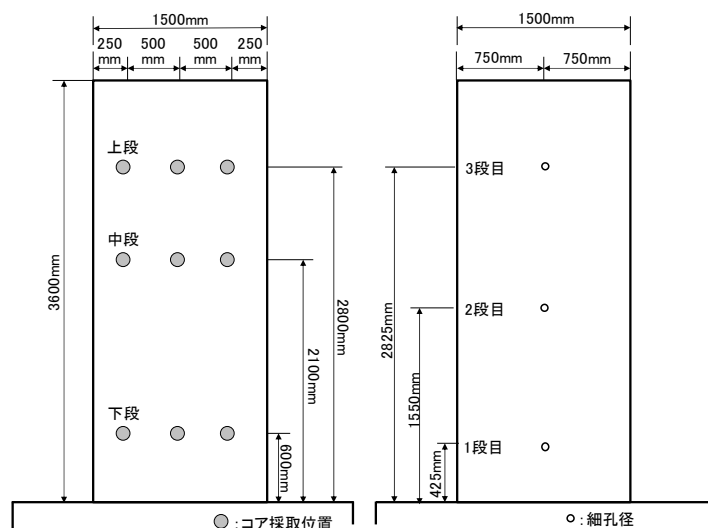


図-5.12 試料採取位置 (冬期)

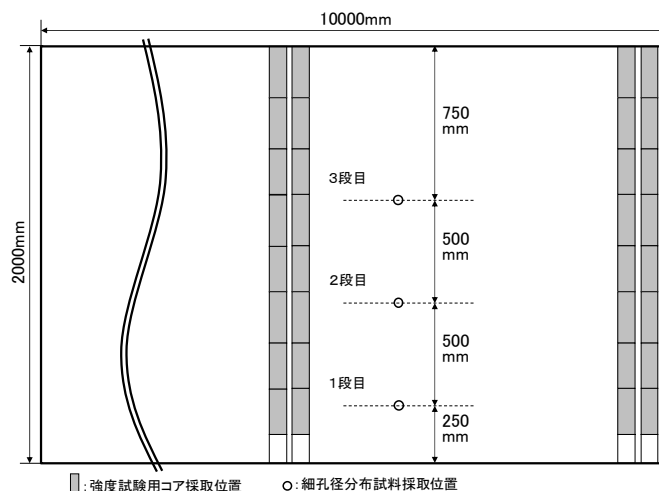


図-5.13 試料採取位置 (夏期)

### 5.4.3 圧縮強度

テストピースにおける圧縮強度試験結果を図-5.14に示す。標準水中養生の圧縮強度に関して、改良BC配合とBB配合では材齢28日強度で47.1N/mm<sup>2</sup>と45.2N/mm<sup>2</sup>となり、同等の強度発現性状を有することを確認した。現場気中養生について、材齢28日時点の圧縮強度は、冬期について改良BC配合とBB配合の強度は同程度であるのに対して、夏期については改良BC配合の強度が大きくなる傾向が認められた。この理由として、一般的に高炉スラグ微粉末は温度依存性が高く、外気温が高いほど、潜在水硬性が活性化され水和熱が大きくなる傾向が認められる [5.6] ことから、改良BC配合では、BB配合と比較して高炉スラグ微粉末の含有率が多くなることで、温度依存性が高くなり、改良BC配合の強度発現性が大きかったものと考えられる。夏期において、改良BC配合およびBB配合ともに、材齢28日以降の強度発現が小さいことについては気中養生としたことで、十分な水分供給がなされなかったためと考えられる [5.7]。

材齢28日における試験体から採取したコアの圧縮強度を図-5.15および図-5.16に示す。冬期配合においては高さ方向における強度の違いは認められなかったが、夏期配合においては試験体下層になるに従って強度が増加する傾向が見られた。この理由として、夏

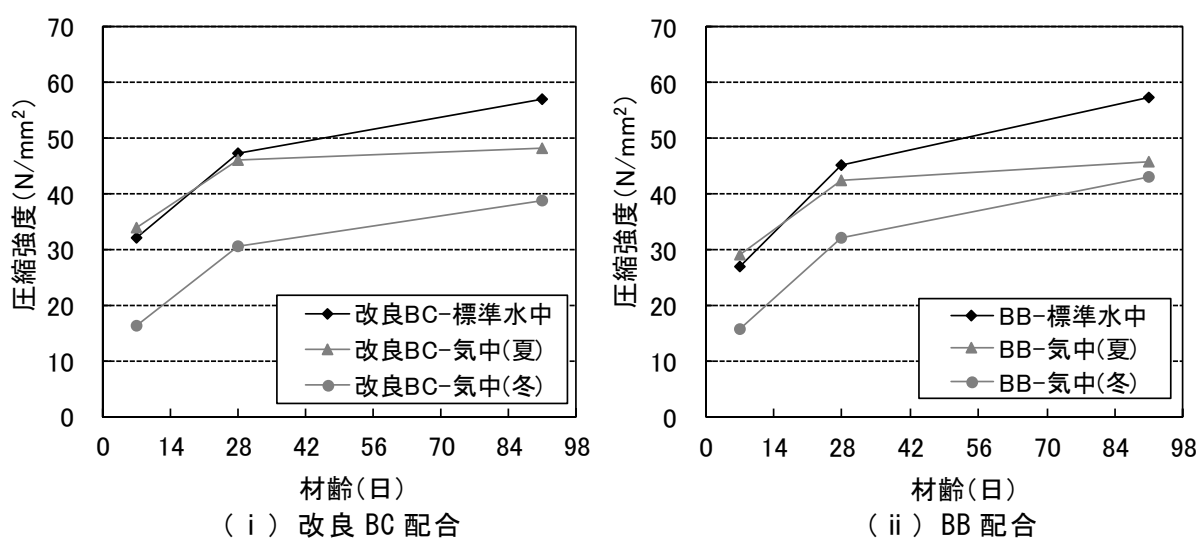


図-5.14 テストピースの圧縮強度

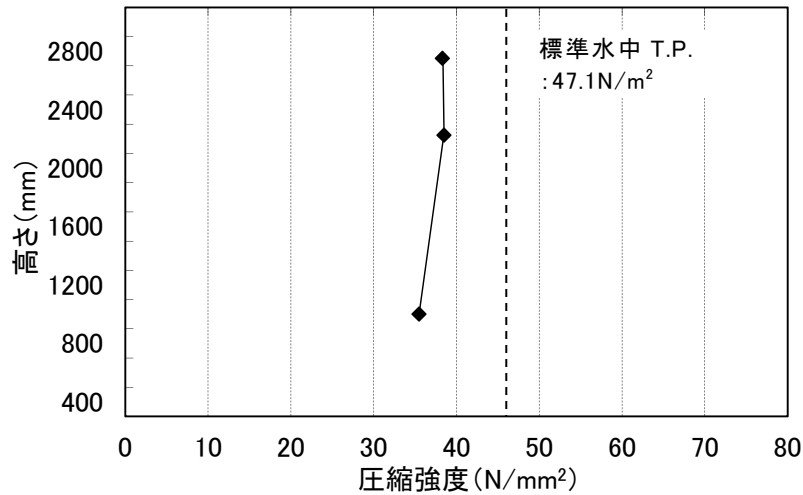


図-5.15 冬期における改良 BC のコア強度 (材齢 28 日)

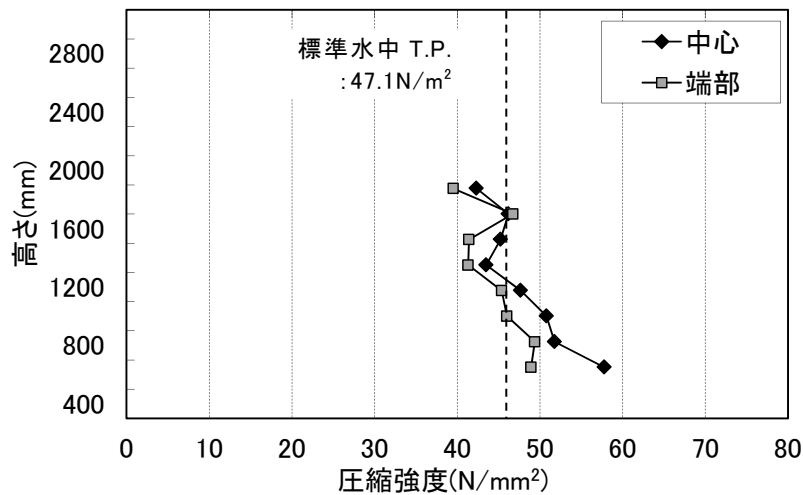


図-5.16 夏期における改良 BC のコア強度 (材齢 28 日)

期配合ではスランプを 14cm としたことで充填性が向上し、下層部では圧密（型枠の側圧）によって強度が増進するものと考えられ、その傾向はスランプが大きくなるに従い、より顕著になるものと考えられる。また、図-5.17 および図-5.18 に示すコアの密度も冬期配合では、高さ方向による密度の違いが認められないことに対し、夏期配合では下層になるに従い、密度が増加する傾向が認められた。

夏期配合において高さ方向で密度が異なる理由に関して、粗骨材等の材料分離による影響が考えられたため、採取したコアに含まれる粗骨材量の比較を行った。比較方法として、

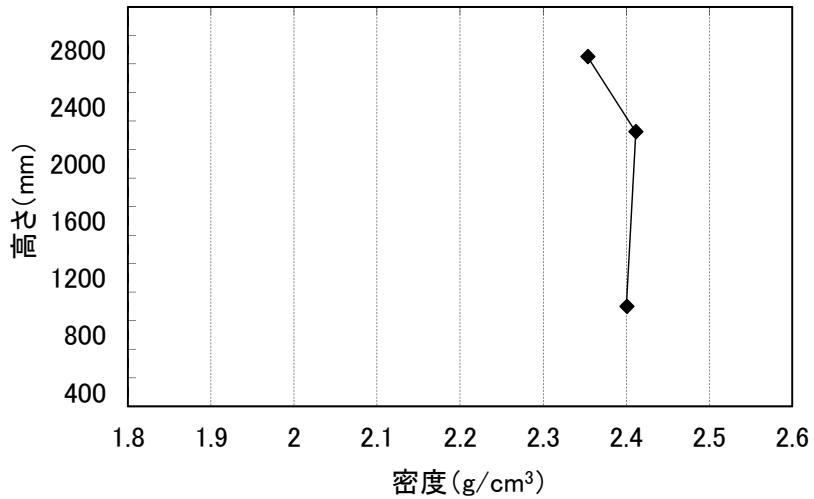


図-5.17 冬期における改良BCのコア密度(材齢28日)

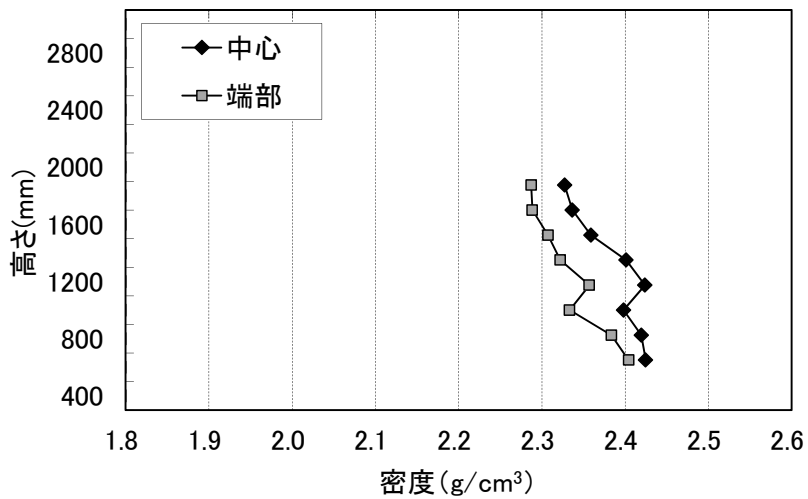


図-5.18 夏期における改良BCのコア密度(材齢28日)

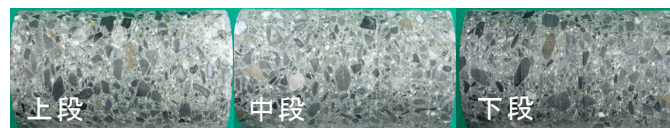


写真-5.8 コアの表面状況

採取したコアの4方向から写真を撮影した(写真-5.8)。写真は一方向のみを示した結果であるが、上段、中段、下段の粗骨材が均等に分布している状況が確認されることから、材料分離は生じていないものと考えられる。

BC 配合に関して積算温度と圧縮強度との関係を算出した。積算温度の算定は、図-5.19 に示す温度測定結果をもとに、コア供試体は実規模試験体の中心温度測定結果より、気中供試体については外気温よりそれぞれを求めた。材齢  $x$  日における積算温度  $M_x$  の算定には以下の式 (5.1) により算出した。

$$M_x = \sum_{z=1}^x (\theta_z + 10) \quad (\theta_z: \text{日平均気温 (}^\circ\text{C)}) \quad (5.1)$$

積算温度と圧縮強度の関係を図-5.20 に示す。図より、圧縮強度と積算温度で相関が認められることから、改良 BC 配合においても、積算温度と圧縮強度の関係に基づき、積算温度から圧縮強度を推定できるものと考えられる。

建築学会の構造体強度補正值の考え方をを用いて考察を行った。管理材齢 91 日とした場合の BC 配合の構造体強度補正值 ( $_{28}S_{91}$  値) を表-5.5 に示す。本実験の範囲では改良 BC 配合の冬期の  $_{28}S_{91}$  値は-3.3、夏期の  $_{28}S_{91}$  値は 2.7 で、JASS 5 で示される冬期 (13°C未満) および暑中期の BB の  $_{28}S_{91}$  値 6 を下回る結果であった。

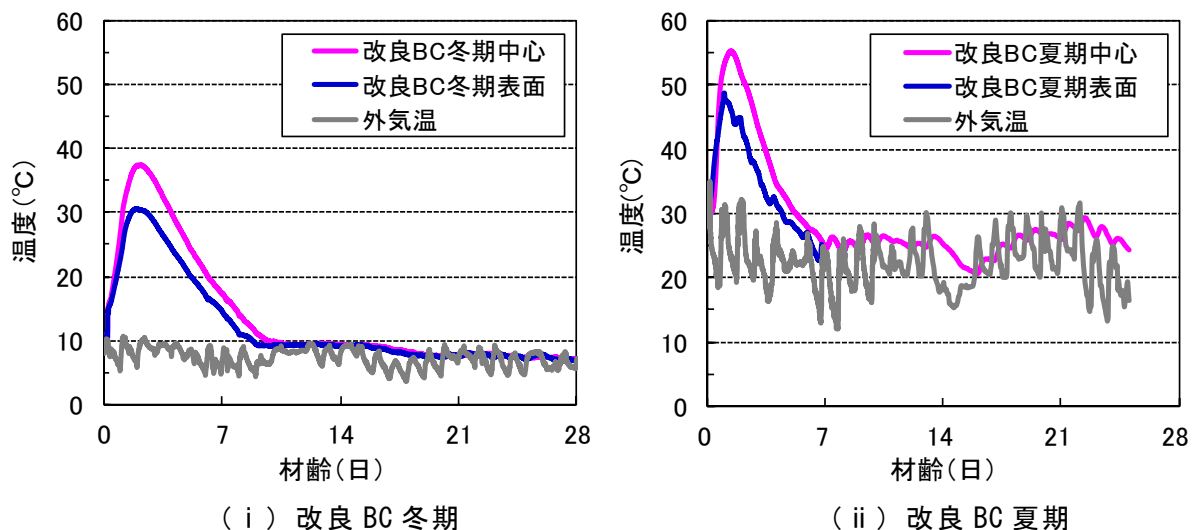


図-5.19 冬期および夏期の温度計測結果



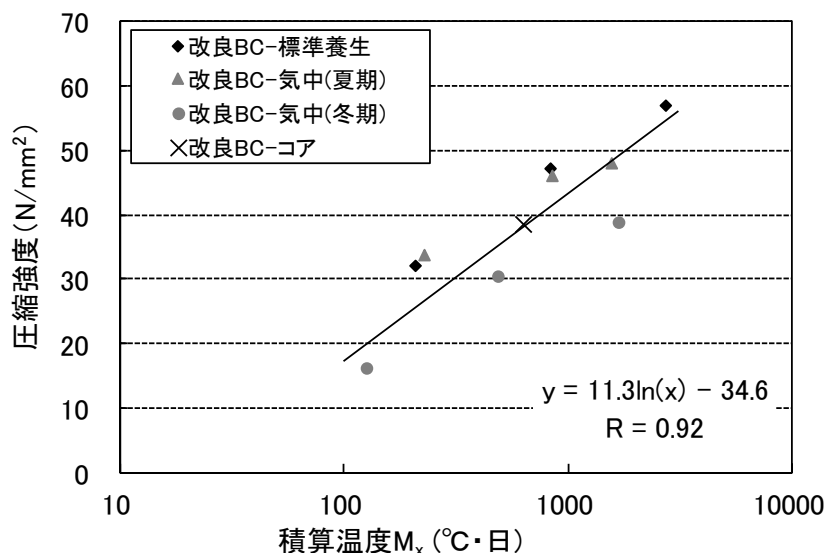


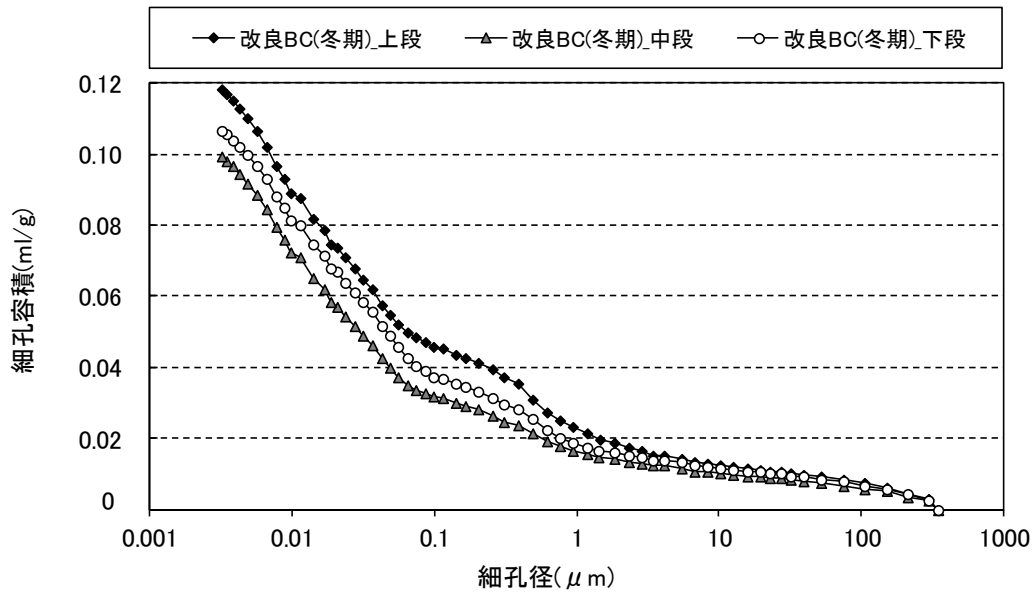
図-5.20 試料採取位置 (冬期)

表-5.5 構造体強度の補正值 ( $_{28}S_{91}$  値)

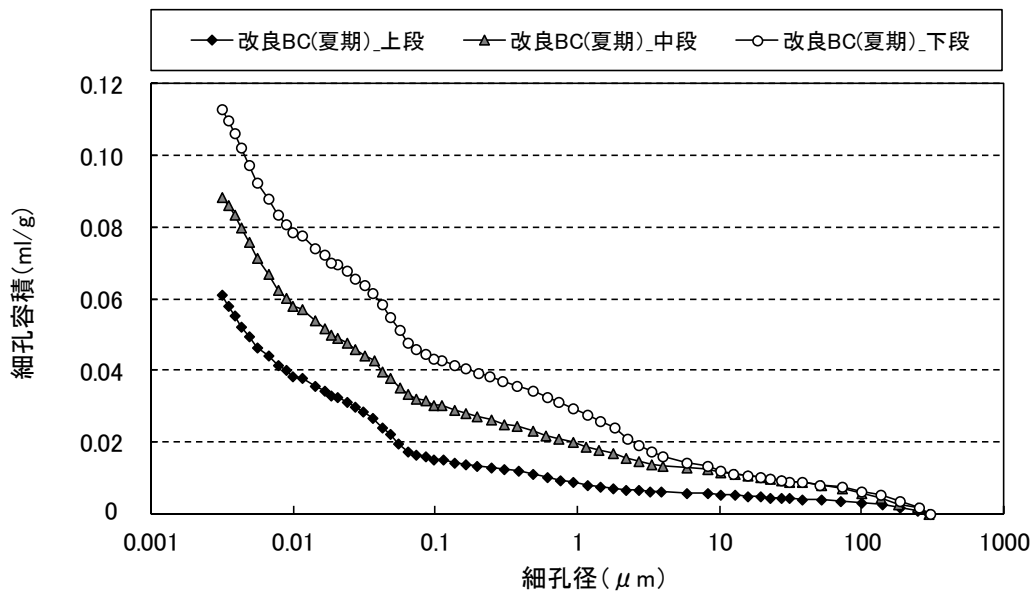
種別	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		$_{28}S_{91}$ 値 (N/mm <sup>2</sup> )
	標準水中養生	構造体強度	
冬期	43.1	46.4	<b>-3.3</b>
夏期	47.1	44.4	<b>2.7</b>

#### 5.4.4 細孔径分布

材齢 28 日における細孔径分布の測定結果を図-5.21 に示す。高炉スラグ微粉末を使用した場合、未反応の高炉スラグ微粉末により  $0.1\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$  付近の粗大な空隙が卓越することが報告されており [5.8]、この特徴は冬期配合、夏期配合ともに確認された。また、測定箇所別 (高さ方向) の平均細孔径を図-5.22 に示す。平均細孔径は冬期配合より夏期配合において小さくなる傾向が見られた。この理由として、夏期配合の方が材齢 28 日時点での強度発現性が高く、より緻密化しているためと考えられる。また、平均細孔径の分布が小さいほど、表層透気係数が小さくなる傾向を示しており、細孔構造と透気係数については既往の文献 [5.9] より相関があることが認められていることから、今回の実験においても同様の結果が得られたものと考えられる。



( i ) 改良 BC 冬期



( ii ) 改良 BC 夏期

図-5.21 測定箇所別の細孔径分布

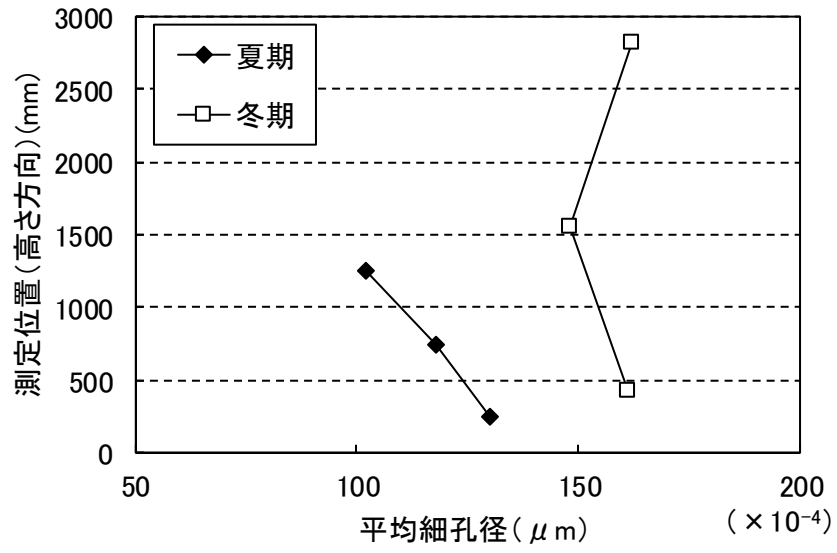


図-5.22 細孔径分布

## 5.5 夏期および冬期における改良型の高炉セメントC種を用いたコンクリートの発熱特性

マスブロックを作製して、発熱特性および熱膨張係数を確認した。また、それら得られた物性値を用いて、壁状構造物を対象とした温度応力解析を実施し、温度ひび割れに対する評価を行った。温度ひび割れの評価の際の比較用のデータとして夏期および冬期ともに、BBについてもマスブロックを作製し、比較・検討を行った。

### 5.5.1 発熱特性および熱膨張係数試験の概要

マスブロックの概要を図-5.23に示す。マスブロックのコンクリートの打込みは、夏期は9月中旬（打設当日の最高気温31.7℃）に、冬期では12月中旬（打設当日の最高気温10.1℃）に、東京都調布市内の実験場にて実施した。マスブロックには中心部に無応力容器および測温機能付きの埋込みひずみ計を設置し測定した。

### 5.5.2 発熱性状の評価方法

夏期および冬期における施工実験の発熱性状の評価として、実測値と解析値を比較することとした。ここで解析値とは、三次元有限要素法による温度応力解析ソフト（(株)計算力学センター、ASTEAMACS）を用い、温度解析によって得られた値である。温度解析の入力値として、断熱温度上昇特性は、3.3.2の打込み温度20℃の条件で得られた断熱温度

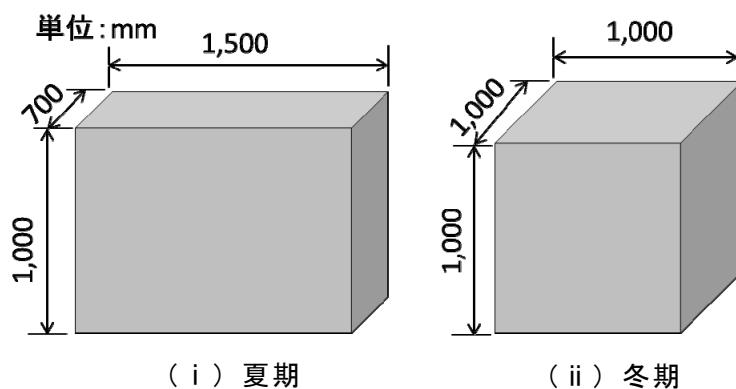


図-5.23 マスブロックの概要

- コンクリート
- 地盤
- 合板

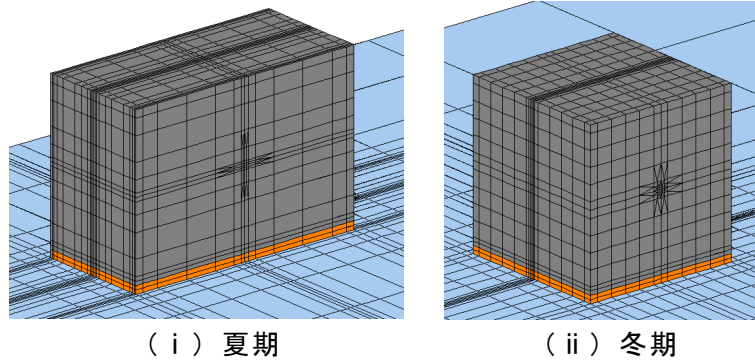


図-5.24 解析モデル

表-5.6 解析入力値

項目	種別	解析条件
熱伝導率 (W/m°C)	コンクリート	2.7
比熱 (kJ/kg°C)	コンクリート	1.15
密度 (kg/m³)	コンクリート	2400
表面熱伝達率 (W/m²°C)	コンクリート	上面 : 14 型枠面 : 8

上昇式の終局断熱温度上昇量を以下の式 (5.2) にて求め、 $K$  および  $\alpha$  の打込み温度による補正は、セメント技術資料 [5.10] に示される打込み温度との関係と同様の傾向にあると仮定して求めた。

$$T = K \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (5.2)$$

ここで、 $K$  : 終局断熱温度上昇量 (°C)

$\alpha$  : 温度上昇速度に関する定数

$t$  : 材齢 (日)

その他、解析モデルを図-5.24に、解析に用いた物性値を表-5.6に示す。夏期および冬期に実施したマスブロックによる試験では、打込み直後からの実ひずみと温度変化量から式(5.3)により熱膨張係数を求めることとした。

$$\gamma = \varepsilon / \Delta t \quad (5.3)$$

ここで、 $\gamma$  : コンクリートの熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

$\varepsilon$  : 実ひずみ,  $\Delta t$  : 温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )

室内試験では、以下に示す手順に従って熱膨張係数を求めた。試験に用いた供試体の概要を図-5.25に示す。

- ① 容量 20L のポリエチレン製容器に無応力容器および埋込みひずみ計を設置する。
- ② ポリエチレン製容器および無応力容器内にコンクリートを打ち込み、締固めを行う。
- ③  $20^{\circ}\text{C}$  の環境下で 28 日間封緘養生を行う。
- ④ 28 日間の養生後、ポリエチレン製容器を温度追従養生槽に入れ、供試体に温度履歴を与える。温度履歴は、供試体の温度が  $60^{\circ}\text{C}$  となるまで上昇させ、その後  $20^{\circ}\text{C}$  となるまで下降させる。温度変化の割合は、上昇・下降とも  $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$  とする。
- ⑤ 埋込みひずみ計からひずみと温度変化量を 30 分間隔で測定し、式(5.3)により熱膨張係数を求める。

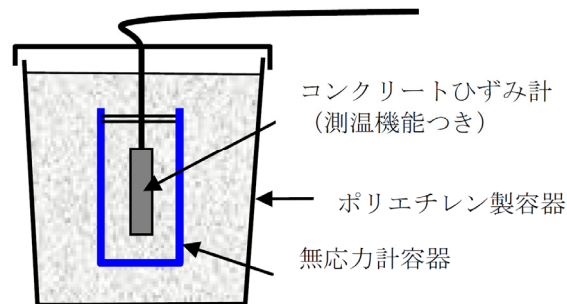


図-5.25 熱膨張係数の測定方法

### 5.5.3 発熱特性の評価

夏期および冬期における施工実験での実測値と解析値の比較を、図-5.26 および図-5.27 に示す。いずれの最高温度も実測値が解析値を上回る結果であった。夏期の比較において、実測値と解析値の最高温度の差は、改良BCでは6.5°C、BBでは1.8°Cであり、改良BCの方が大きい傾向であった。また、改良BCとBBの最高温度を比較すると、ほぼ等しい値であった。これらの原因は、高炉スラグ微粉末の特徴である温度依存性の高さに起因すると推察される。つまり、環境温度が高い条件下では、高炉スラグ微粉末の水和反応が活性化し発熱量が増えたものと考えられる。また、改良BCの方がBBよりも高炉スラグ微粉末の含有量が多いため、その影響がより顕著に表れたと推察される。冬期においては、

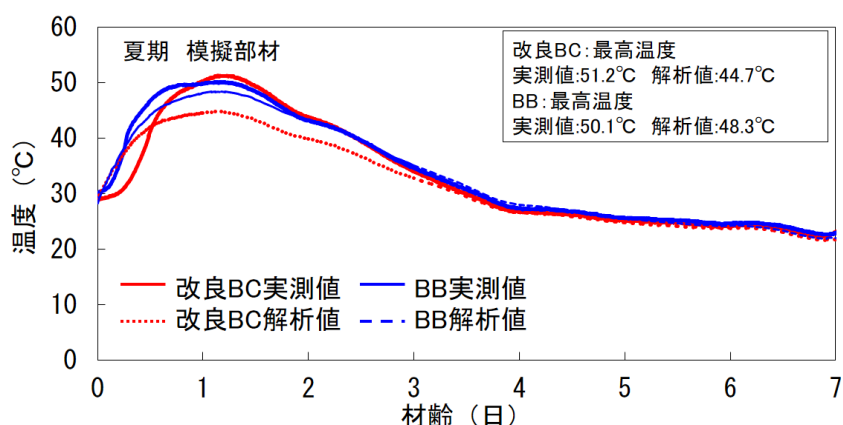


図-5.26 夏期における実測値と解析値の比較

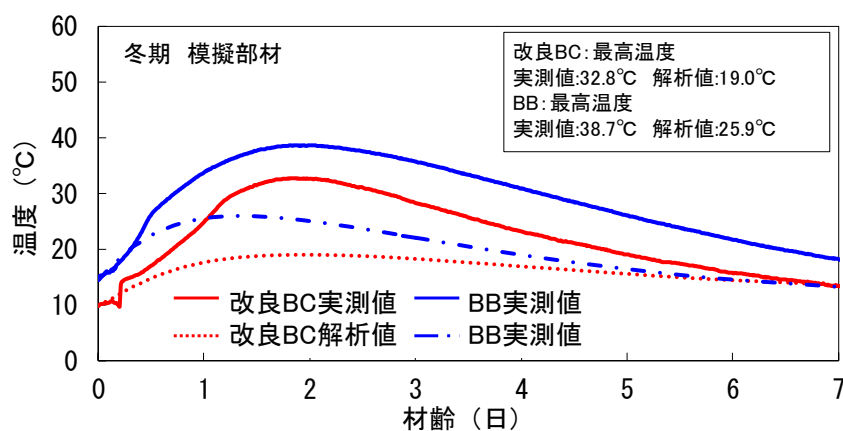


図-5.27 冬期における実測値と解析値の比較

実測値と解析値の最高温度の差は、改良 BC では 13.8℃、BB では 12.8℃であり、改良 BC および BB ともに夏期よりも実測値と解析値の差が大きくなる傾向であった。この理由として、環境温度が低い条件ではセメントおよび高炉スラグ微粉末の水和反応が遅く、長期にわたって水和反応が継続されたためと推察される。

#### 5.5.4 熱膨張係数

夏期および冬期における施工実験と第 3 章で示した室内試験より得られた熱膨張係数を図-5.28 に示す。夏期および冬期における施工実験より得られた熱膨張係数は、コンクリートの水和熱による温度ひずみに加え、自己収縮ひずみや SO<sub>3</sub> による膨張ひずみの影響を含む見掛けの熱膨張係数である。また、室内試験で得られた熱膨張係数は、前述のとおり 28 日間封緘養生を行った後に温度変化を与えて得られたものである。マスブロックによる試験と室内試験で得られた熱膨張係数を比較すると、マスブロックで得られた方が大きな値であった。改良 BC と BB を比較すると、夏期の施工実験の場合では、改良 BC の方が 1.00 μ/℃程度大きな値であったが、第 3 章で算出した温度変化を与えて求めた値は同程度であった。また、改良 BC における夏期と冬期の比較では同程度であった。

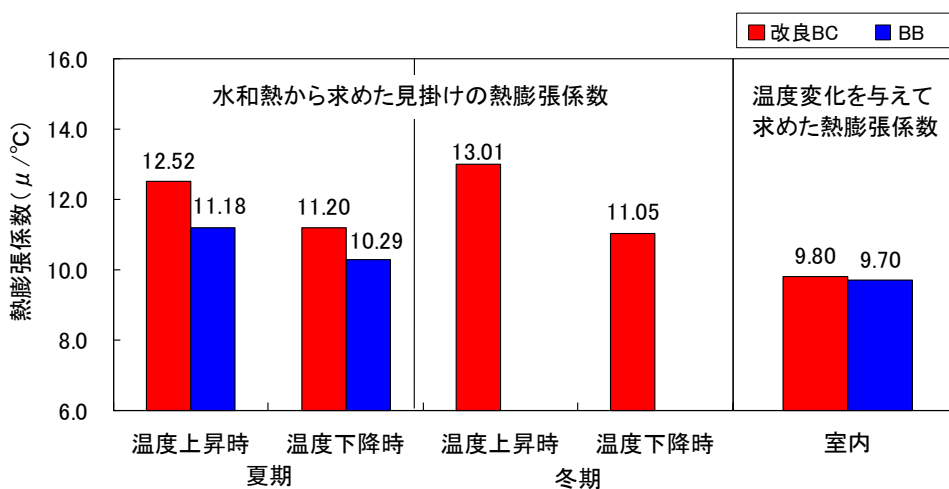


図-5.28 熱膨張係数の比較



この結果について、既往の論文 [5.11] に示す自己収縮試験の結果より、改良 BC に含まれる  $\text{SO}_3$  量が BB と比較して多いため、若材齢時に生成されるエトリンガイトが改良 BC の方が多いことに起因すると推察された。

#### 5.5.5 温度応力解析概要

前述の熱特性試験から得られた断熱温度上昇特性、熱膨張係数と圧縮強度を入力値とした。また、自己収縮および膨張ひずみの影響を考慮するため、今回対象とする配合と同じ配合で試験を行った既往の文献 [5.11] の自己収縮試験結果（改良 BC ; 材齢 28 日  $88.3 \mu$  , BB ; 材齢 28 日  $92.0 \mu$ ）を入力値とした。その他、解析に用いた入力値を表-5.7 に示す。解析モデルは、長さ 10000mm×幅 700mm×高さ 2000m の壁状構造物を対象とし、1/4 モデルとした。解析モデルを図-5.29 に示す。また、打設場所は都心部を想定し、打設時期は夏期（8 月打設）および冬期（1 月打設）の 2 水準とした。初期温度に関しては、打込み時の外気温とした。ただし、夏期の打込み温度は、温度規制を行うことを想定し  $25^{\circ}\text{C}$  の条件とした。

表-5.7 解析入力値

項目	コンクリート		地盤
初期温度	夏期：25.0℃	冬期：6.1℃	外気温
熱伝導率 (W/m℃)	2.85		3.45
比熱 (kJ/kg℃)	1.15		0.79
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2400		2650
表面熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> ℃)	上面：14 型枠面：8		14
熱伝導率 (W/m℃)	2.85		3.45
圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	実測値による		—
静弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E=6300 \times f_c^{0.45}$		50.0
引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t=0.13 \times f_c^{0.85}$		—
クリープ係数	示方書に準拠 [5.12]		—
外気温	気象庁データ：東京都月平均気温		

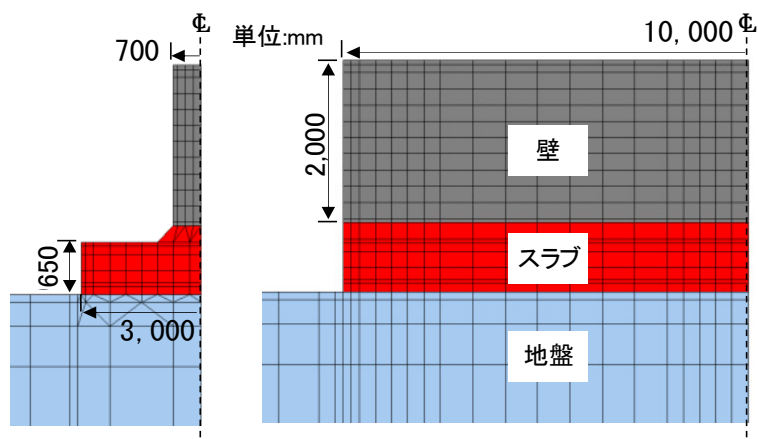


図-5.29 解析モデル

### 5.5.6 温度ひび割れに関する評価

ひび割れ指数の履歴図を図-5.30 および図-5.31 に示す。履歴図は壁部材の表面部および中心部を対象にひび割れ指数が最小となる要素について抽出した。解析結果より BB と改良 BC とで比較した場合、改良 BC を用いることで一定の温度ひび割れ低減効果が確認された。また、改良 BC 配合において、夏期の表面部のひび割れ指数はコンクリート打込み温度が 25℃の場合において、1.45 であり、ひび割れの発生をできる限り制限できる範囲であった。

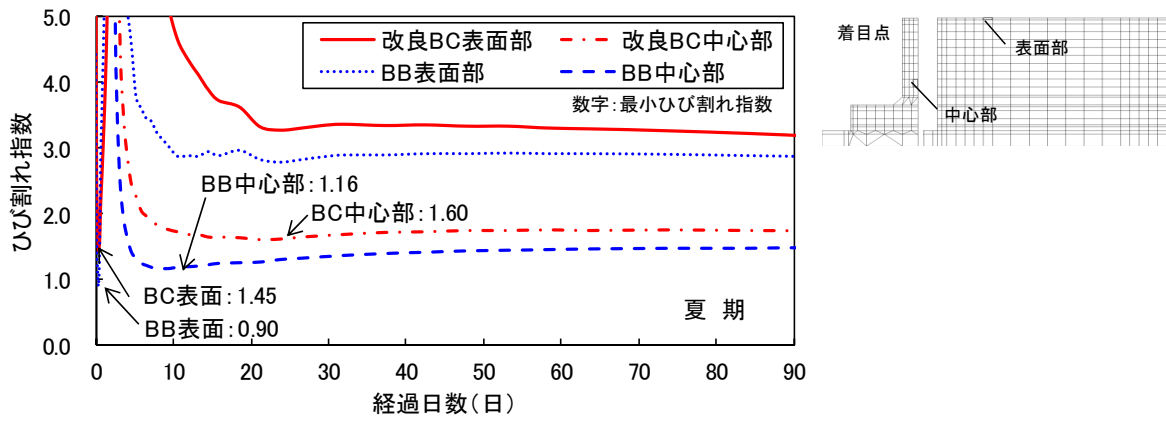


図-5.30 温度応力解析結果 (夏期)

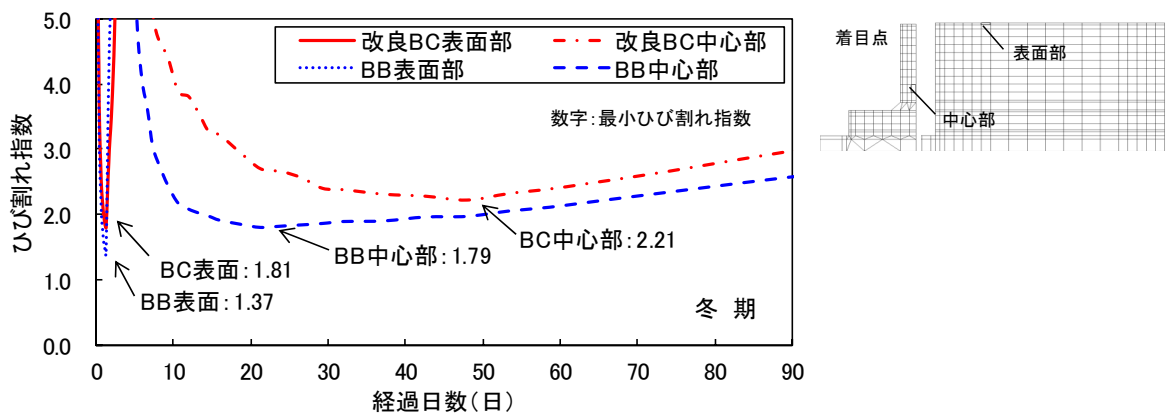


図-5.31 温度応力解析結果 (冬期)

## 5.6 まとめ

本章では、実大施工実験によるコンクリートの施工性ならびに各種物性の検証を行った。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・改良 BC と BB の比較において、同一のスランプであってもセメントの種類や配合の違いによって施工性能に違いが認められる。
- ・改良 BC 配合において単位量を変えず、混和剤の添加量のみでスランプを増大させた場合には材料分離することなく、振動締固めによる充填性が向上する。
- ・施工性能評価において、配合が照査図の境界線上に位置する場合には、セメントの種類や単位水量の影響が顕著となり、配合によって振動締固めによる充填性の容易さが異なると考えられる。したがって、打込みのスランプと単位セメント量に加え、これらについても考慮する必要がある。一方で、照査図の色の濃い部分に位置する場合には、改良 BC 配合においても十分な施工性能を有している。
- ・改良 BC 配合において、目標スランプを 8cm から 14cm まで大きくすることで、表層部の出来栄は良好で、十分な緻密性を有している。
- ・材齢 28 日時点の圧縮強度は、冬期について改良 BC 配合と BB 配合の強度は同程度であるのに対し、夏期については改良 BC 配合の強度が大きくなる傾向が認められた。
- ・改良 BC 配合の積算温度と圧縮強度の関係は良好な相関関係が得られることから、改良 BC 配合の強度は、積算温度より算出できるものと考えられる。
- ・改良 BC 配合の冬期配合と夏期配合の比較において、平均細孔径は冬期配合より夏期配合において小さくなる傾向が認められた。
- ・改良 BC の温度上昇特性は高炉スラグ微粉末を多量に用いていることから、打込み温度に対する温度依存性が高く、とくに冬期では、断熱温度上昇試験の結果と乖離が大きくなる。

- ・改良 BC の熱膨張係数は、SO<sub>3</sub> 量の含有量を高めているため、若材齢時に大きくなる傾向がある。水和反応が収束すると改良 BC の熱膨張係数は BB と同等となる。
- ・夏期および冬期を想定した温度応力解析により、改良 BC を用いることで BB と比較して、一定の温度ひび割れ低減効果を期待できる可能性がある。

## 【参考文献】

- [5.1] 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針，2016
- [5.2] 鷹野 明，星 秀明，栗原通了：高炉スラグ微粉末コンクリートのスランプ低下傾向について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [5.3] 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），p.4，2007
- [5.4] R.J.Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Material and Structures*, 25 pp.358-365, 1992.11
- [5.5] 早川健司，加藤佳孝：構造体かぶりコンクリートの品質に及ぼす施工条件の影響，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，V-220，pp.437-438，2009.9
- [5.6] 森山容州，沼田晋一，木島 徹，小林明夫：高炉スラグ微粉末コンクリートの配合及び強度発現性について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [5.7] 米倉重州夫，田中敏嗣：高炉スラグ微粉末の使用がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [5.8] 郭 度連，國府勝郎，李 昌洙，李 奎東：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの内部組織の形成に及ぼす置換率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，

No.1, pp.783-788, 2004

- [5.9] 河野俊一, 氏家 勲 : セメント硬化体の細孔径の透気性による評価に関する研究,  
コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.745-750, 1998
- [5.10] 太平洋セメント(株) : セメント総合技術資料, p.37
- [5.11] 室野井敏之, 坂井吾郎, 井上和政, 齋藤和秀 : 高炉スラグ高含有セメントを用  
いた土木用コンクリートの基礎物性に関する実験的検討, コンクリート工学年  
次論文集, Vol.35, pp.193-198, 2013.7
- [5.12] 土木学会 : 2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編], p.334, 2018



## 第 6 章

# 実施工による施工性ならびに温度ひび割れの抑制効果の検証





## 第 6 章 実施工による施工性ならびに温度ひび割れの抑制効果の検証

### 6.1 はじめに

本章では、沿岸部に位置するバースクレーン基礎の補強部の増厚コンクリートに、改良型の高炉セメント C 種（以降，改良 BC）と高炉セメント B 種（以降，BB）を用いたコンクリートを使用し、フレッシュコンクリートの性状および硬化物性を比較した結果について述べる。なお，本構造物は，改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートを土木用構造物として初めて適用した事例となる。

### 6.2 改良型の高炉セメント C 種の適用に至った経緯

改良 BC を用いたコンクリートを，図-6.1 に示す補強増打部へ  $140\text{m}^3$  分を適用した。補強増打部は，断面幅 480mm，高さ 1500mm，全長 140m の工場内にあるバースクレーン

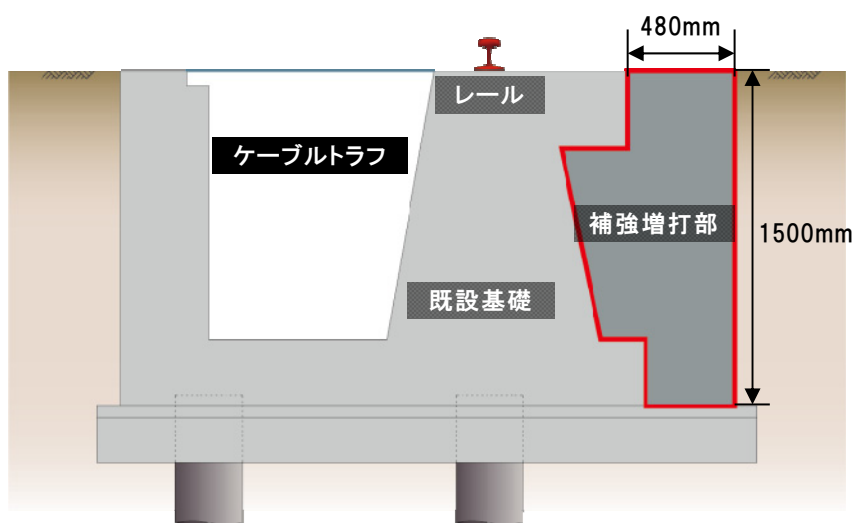
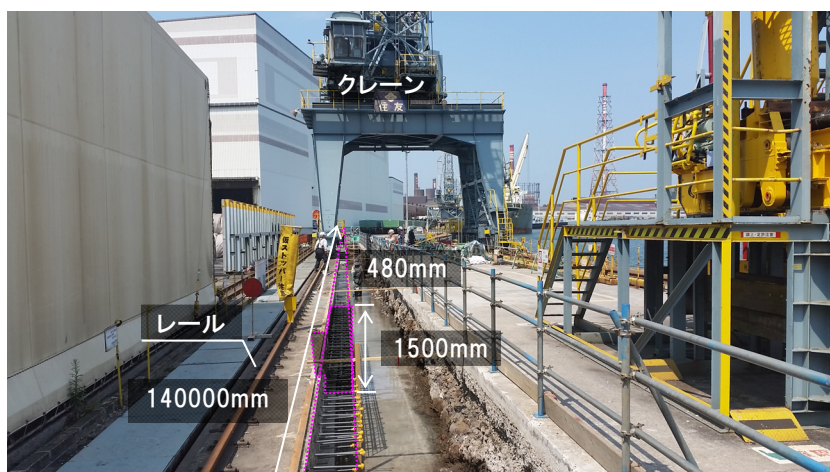


図-6.1 補強増打部（断面図）



写真－6.1 現場状況

基礎の補強を目的としたもので、バースクレーン自体が現場の岸壁に位置することから、高い遮塩性が求められており、高い遮塩性と環境負荷低減という両方の利点を生かせる改良 BC を採用することとなった。現場状況を写真－6.1 に示す。

改良 BC を用いたコンクリートは、既往の研究 [6.1] において、海洋構造物で最も汎用的に用いられる BB と比較しても塩化物イオンの実効拡散係数が  $1/4$  以下となり、高い遮塩性を有していることが確認されている。

## 6.3 室内試験による配合選定

### 6.3.1 実験概要

実施工に先立ち、室内での試し練りにおいて改良 BC および BB を用いたコンクリートの配合を選定した。今回使用した改良 BC と BB それぞれのセメントの化学成分を、表-6.1 に示す。改良 BC については、前述したように結合材中の SO<sub>3</sub> 量を増やすことで、初期強度および収縮特性を改善することができる。今回使用した改良 BC は SO<sub>3</sub> 量を 3.47% とし、無水セッコウで調整した。使用材料を表-6.2 に示す。なお、混和剤に関して、BB は汎用の AE 減水剤 Ad2 を用いたが、改良 BC については、改良 BC 専用の AE 減水剤 Ad1 を使用した。改良 BC と Ad1 以外は、実際に製造するレディーミクストコンクリート工場

表-6.1 セメントの化学成分

品質		改良 BC	BB
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.96	3.04
比表面積	cm <sup>2</sup> /g	3990	3830
化学成分	MgO	3.87	3.13
	SO <sub>3</sub>	3.47	2.06
	igloss	0.94	1.78
	Cl <sup>-</sup> 量	—	0.009

表-6.2 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	水道水
セメント	改良 BC	改良型の高炉セメント C 種，密度:2.96g/cm <sup>3</sup>
	BB	高炉セメント B 種，密度:3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	海砂:北九州市白島産，密度:2.60g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率:2.00，混合砂（海砂:長間北，砕砂:柄杓田），密度:2.61g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率:3.35
粗骨材	G	砕石:門司区柄杓田産，2005，密度:2.70g/cm <sup>3</sup> ，実積率:58.0%
混和剤*	Ad1	高炉セメント C 種専用 AE 減水剤 標準形（主成分:変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン系化合物の複合体）
	Ad2	AE 減水剤 標準形（主成分:リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物）

\*所定の空気量を満足するように、別途、空気量調整剤を使用した。

表-6.3 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	空気量 ※ (%)	スランプ ※ (cm)	単位量 (kg/cm <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	Ad1 C×%	Ad2 C×%
BC-53	53	47.2	4.5	12	161	304	851	986	0.8	—
BB-58	58	47.4	4.5	12	166	287	858	986	—	1.0

\* スランプおよび空気量の値は現着時点のもので、練上がり時の目標値は 15cm および 5.0% とする。

が保有する材料を用いた。

コンクリートの配合を表-6.3に示す。「BC-53」はセメントに改良 BC を用いた水セメント比 W/C=53%の配合を示している。BB-58 は工場が保有する JIS 認証のものであり、補強増打部の設計基準強度を満足する配合である。第 3 章で示したように、BB と改良 BC を用いたコンクリートの耐久性のうち中性化に関して同等の性能を満足するために水セメント比を 5%程度低減させることを提案しており、それに倣って BB の 58%に対し、改良 BC の水セメント比を 53%とした。また、高炉スラグ微粉末が高含有となることで、流動性が増すことが既往の研究 [6.2] により明らかになっていることから、単位水量を BB の  $166\text{kg/m}^3$  から改良 BC の  $161\text{kg/m}^3$  の  $5\text{kg/m}^3$  減じた。試し練り時に所定のスランプおよび空気量を満足するように、混和剤の添加量を適宜調整した。

室内試し練りでの実験項目は、JIS A 1101 のスランプ試験、JIS A 1128 の圧力方法によるフレッシュコンクリートの空気量試験および JIS A 1108 のコンクリートの圧縮強度試験とした。また、練上がり時のコンクリート温度についても測定した。スランプは、運搬によるスランプロスを考慮して、練上がり時の目標スランプを 15cm とし、目標空気量は 5.0%とした。圧縮強度試験の供試体は 20°C 標準水中養生とし、材齢 3 日、7 日、28 日および 91 日で試験を行った。練混ぜ方法は、容量 60L の強制二軸式ミキサを用い、練混ぜ時間は全材料投入後 90 秒とした。1 バッチあたりの練混ぜ量は 40L とした。

### 6.3.2 実験結果

スランプおよびフレッシュコンクリートの空気量の試験結果を表-6.4に示す。練上がり後のスランプおよび空気量は、混和剤を調整することで所定の値を満足した。スランプ試験後（写真-6.2）にタンピングを実施した後の先端の分離状況を写真-6.3に示す。改良 BC-53 は BB-58 と同様に、タンピングによって先端にて材料分離等は生じず、良好な材料分離抵抗性を有していることが確認された。

表-6.4 フレッシュコンクリートの性状

配合	練上がり温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)
改良 BC-53	23	14.0	4.8
BB-58	24	14.5	5.0



(i) 改良 BC-53 (SL=14.0cm)



(ii) BB-58 (SL=14.5cm)

写真-6.2 スランプ試験後の状態



(i) 改良 BC-53



(ii) BB-58

写真-6.3 タンピング後の先端の分離状況

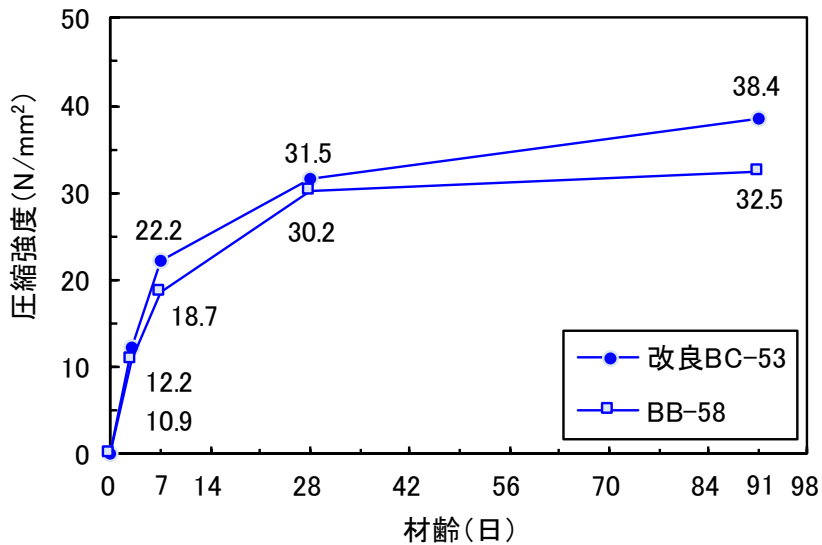


図-6.2 圧縮強度の比較

改良 BC-53 と BB-58 の圧縮強度の比較を図-6.2 に示す。改良 BC-53 は BB-58 と比較してセメント中の SO<sub>3</sub> 量を増やしたこと、水セメント比を 5%低減させたことで初期強度の

改善が図られており、材齢 3 日において改良 BC-53 の  $12.2\text{N/mm}^2$  に対して、BB-58 では  $10.9\text{N/mm}^2$  と改良 BC-53 の初期強度が高くなる結果であった。長期材齢においても改良 BC-53 の強度増進が確認され、材齢 91 日時点で改良 BC-53 の  $38.4\text{N/mm}^2$  に対し、BB-58 は  $32.5\text{N/mm}^2$  で改良 BC-53 の強度が高くなる結果であった。

以上の結果より、改良 BC-53 はフレッシュコンクリートの性状および強度特性は、BB-58 と同等以上となることが確認されたことから、実構造物へ適用することとした。

#### 6.4 実機ミキサによる練混ぜおよび実施工

前述の室内試験により選定した改良 BC-53 の配合を用いて、実機ミキサによる練混ぜおよび補強増打部の施工を行った。実機ミキサは 2.75m<sup>3</sup> 練りの強制二軸ミキサにて 1 バッチあたりの練混ぜ量を 2m<sup>3</sup> とし、練混ぜ時間を 30 秒とした。アジテータ車の積載量を 2 バッチ分の 4.0m<sup>3</sup> として、練上がり直後および現場到着時点でのフレッシュコンクリートの性状を把握した。

補強増打部は全長 140m であり、クレーンを稼働させた状態で施工せざるを得ない状況であったことから、施工エリアを南側と北側の 70m の 2 つに分割して、5 月下旬（標準期）と 7 月下旬から 8 月上旬（夏期）にかけて施工を行った。また、70m のうち、1BL のスパン長 10m として、南側 1,3,5,7BL（北側 8,10,12,14BL）および南側 2,4,6BL（北側 9,11,13BL）と 2 回に分けてコンクリートの打込みを行った。施工順序およびコンクリートの打込みの工程を図-6.3 に示す。打込みには 8t 級のスクイズ式ポンプ（ブーム長 18m, 最大吐出量 50m<sup>3</sup>/h）を用いた。

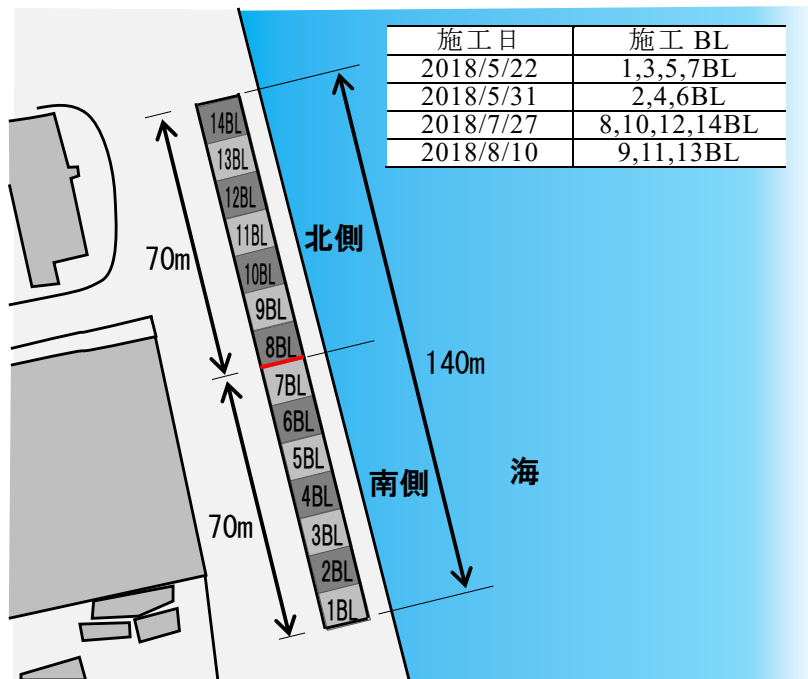


図-6.3 施工順序（平面図）およびコンクリートの打込み工程



#### 6.4.1 南側（標準期）の施工実績

標準期では外気温が 21℃から 25℃の範囲であったため、AE 減水剤は室内試験と同様に標準形を使用した。練上がり時および現着時のスランプおよび空気量の結果を、表-6.5 に示す。表中に示す番号 No.1 から No.6 は 4.0m<sup>3</sup> 積みのアジテータ車 1 台ごとを示している。レディーミクストコンクリート工場から現場までの運搬時間は 30 分から 40 分程度で、現着時点でスランプが 12±2.5cm、空気量が 4.5±1.5% の範囲であることを現着時の受入れ検査にて確認した。No.3 のスランプ試験後の状態を写真-6.4 に示す。受入れ時のスランプの状態を目視にて確認したところ、No.1 から No.6 の全てにおいて、フレッシュコンクリートの性状は良好であり、スランプ試験後のタンピングによっても材料分離や先端にて水が分離している状況等は確認されなかった。以上より、実機ミキサにおいても良好なフレッシュ性状を有していることが確認された。

次に、練上がりから現着時までのスランプおよび空気量の変化を図-6.4 および図-6.5 に示す。No.3 のみのスランプロスが 0.5cm で最も小さい値であったが、その他については

表-6.5 フレッシュコンクリートの性状

アジテータ車 番号	コンクリート 温度 (℃)	スランプ (cm)		空気量 (%)	
		練上がり時	現着時	練上がり時	現着時
No.1	24	14.5	10.5	5.4	4.3
No.2	23	17.5	14.5	5.3	4.1
No.3	24	15.0	14.5	5.7	4.0
No.4	26	14.5	11.5	4.4	3.7
No.5	26	15.0	12.5	5.7	4.4
No.6	26	16.0	13.0	5.0	3.8



SL=11.5cm



タンピング後の状態

写真-6.4 No.3 のスランプ試験後の状態

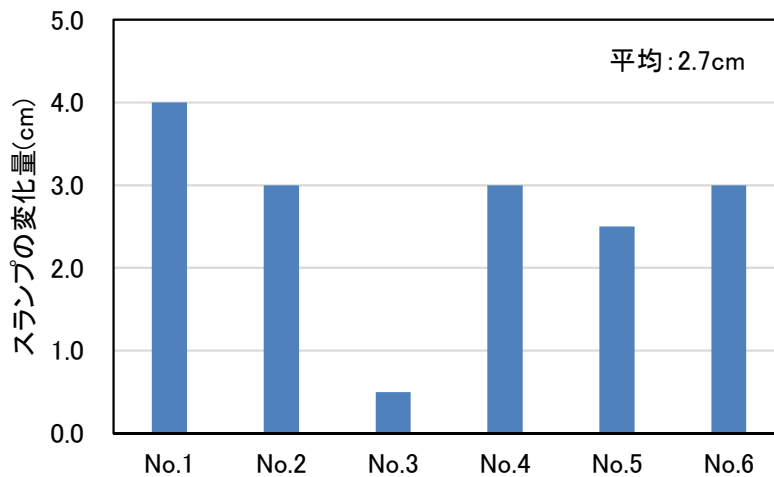


図-6.4 練上がりから現着時のスランプの変化

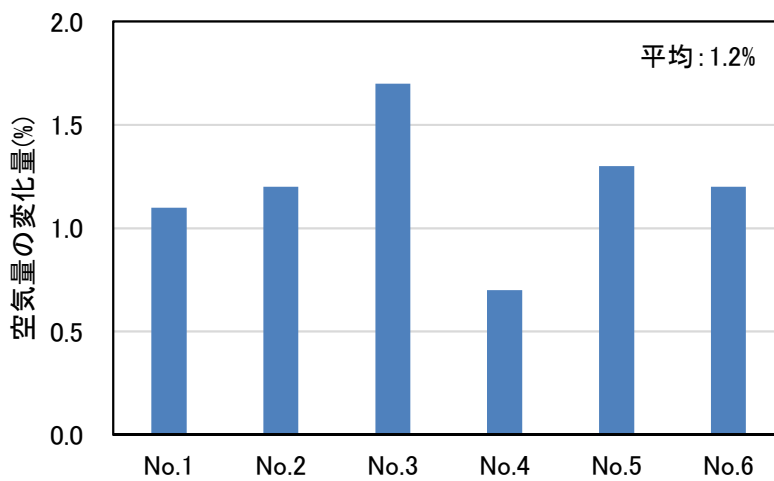


図-6.5 練上がりから現着時の空気量の変化

2.5cm から 4cm 程度低下し、平均で 2.7cm であった。空気量については、ばらつきは少なく平均で 1.2% の低下が確認された。以上より、今回実施した試験の結果のみではあるが、改良 BC および改良 BC 専用の標準形の AE 減水剤を用い、スランプ 12cm 程度のコンクリートで運搬時間が 30 分程度の場合、スランプで 2.5cm 程度、空気量で 1.0% 程度のロスを見込み、練上がり時のスランプおよび空気量を設定することで適切な品質管理を行えることが確認された。

上記、品質管理試験を行った後に、補強増打部への打込みを行った。1 層あたりの打込み高さを 50cm とし、計 3 層 (150cm) の層打ちとした。打込みの状況を写真-6.5 に示す。



写真-6.5 コンクリートの打込み状況

No.1 については筒先から排出した試料を採取し、スランプおよび空気量の測定を行った。現着時のスランプは表-6.5に示したように、スランプ 10.5cm、空気量 4.3%に対し、筒先から排出した試料については、スランプ 9.5cm、空気量 3.9%と同程度の結果が得られ、圧送によって材料分離等が生じることなく、良好なフレッシュ性状を有していることが確認された。また、締固めに関して、高周波バイブレータによって締め固めた際も、目視確認のみで定性的ではあるが、材料分離等は認められなかった。打込み後の天端の仕上げ面ではブリーディング水は確認されず、凝結時間が遅くなるなどはなく、木ごてによる均し作業の施工性は一般のコンクリートと同様であった。

#### 6.4.2 北側（夏期）の施工実績

夏期となる北側の施工では、改良 BC 専用の AE 減水剤を標準形から遅延形に変更した。12, 14BL については、BB を用いたコンクリートにて施工を行い、改良 BC のフレッシュコンクリートの性状と比較した。なお、BB の配合についても室内試験時と同様の BB-58 を用いており、AE 減水剤のみ標準形から遅延形へ変更した。

表-6.6 夏期におけるフレッシュ性状の結果

アジテータ車 番号	コンクリート 温度 (°C)	スランプ (cm)		空気量 (%)	
		練上がり時	現着時	練上がり時	現着時
BC-No.1	31	18.0	14.5	6.5	5.5
BC-No.2	34	14.5	14.0	4.9	4.9
BC-No.3	30	17.0	15.0*	6.1	5.5
BC-No.4	34	15.0	14.0	6.2	5.8
BB-No.1	35	15.0	13.0	5.8	5.7
BB-No.2	35	14.0	13.5	5.7	5.6

※規格値の上限 14.5cm 以上であったが、材料分離等がなく、品質に問題がないことを確認した。

夏期におけるフレッシュ性状の結果を表-6.6 に、練上がりから現着時までのスランプおよび空気量の変化を図-6.6 および図-6.7 に示す。改良 BC のスランプの変化量はばらつきがあるものの、平均で 1.8cm であった。BB については、データ数が 2 回のみの結果ではあるが、平均で 1.2cm と改良 BC よりも小さい値であった。空気量については、改良 BC の 1.2% に対して、BB は 0.1% であった。以上の結果より、外気温が 30°C を超える夏期の施工においても、改良 BC 専用の遅延形の AE 減水剤を用いることで、スランプロスが 2.0cm 程度に抑えることができ、空気量で 1.0% 程度のロスを見込むことで適切な品質管理を行えることが確認された。

現場の打込み状況では、筒先から排出されたフレッシュコンクリートの性状は標準期と同様に良好で、締固めや仕上げといった施工性についても問題はなかった。今回の施工では、外気温が 30°C を超える環境で施工したことから、過度なブリーディング水やコンクリートの凝結遅延等の問題は認められなかったが、改良 BC のような混和材が高含有となるセメントを用いた場合、冬期の低温での施工時に過度なブリーディングが生じる可能性があるため、事前に実験等で確認するなどの対応が必要になるものと考えられる。

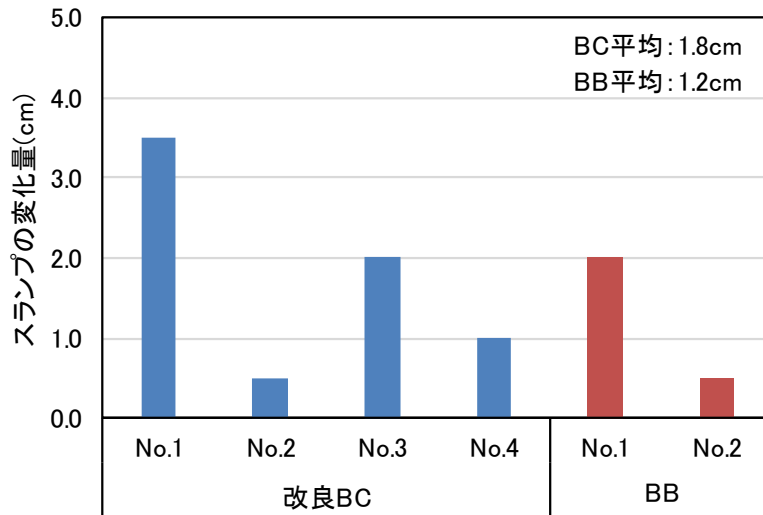


図-6.6 練上がりから現着時のスランプの変化

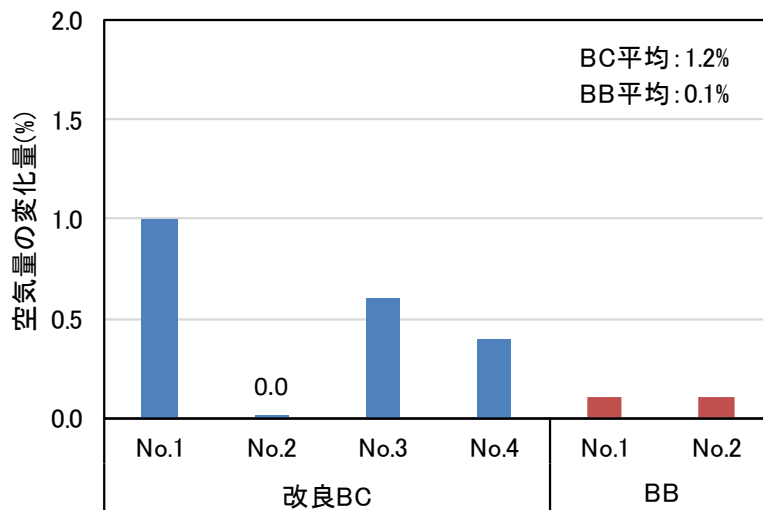


図-6.7 練上がりから現着時の空気量の変化

改良 BC と BB について、10BL および 12BL の 5m のスパン中央部で、図-6.8 に示す断面中心部の温度と、図-6.9 に示す内部のひずみを測定した。なお、ひずみは BL の延長方向 (10m) を測定した値である。内部温度は改良 BC、BB とともに、打込み後 1 日程度でピークを迎え、その後 7 日で 33℃程度まで温度が収束している。BC は 0.5 日程度まで 33℃付近で停滞しているが、この理由として、凝結が始まるまでの時間が BB と比較して遅くなる [6.3] ことが考えられた。その後、52℃でピークとなり、BB の 55℃と比較して 3℃程度低くなった。

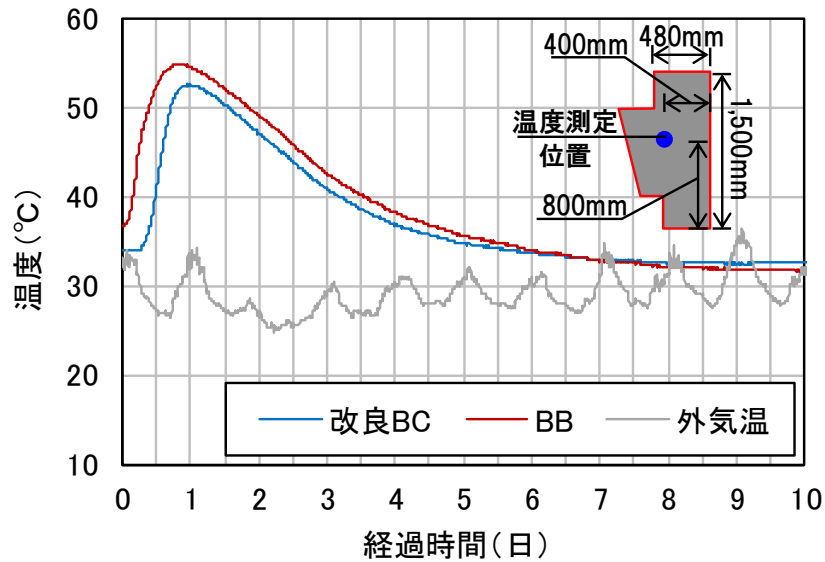


図-6.8 コンクリートの内部温度比較

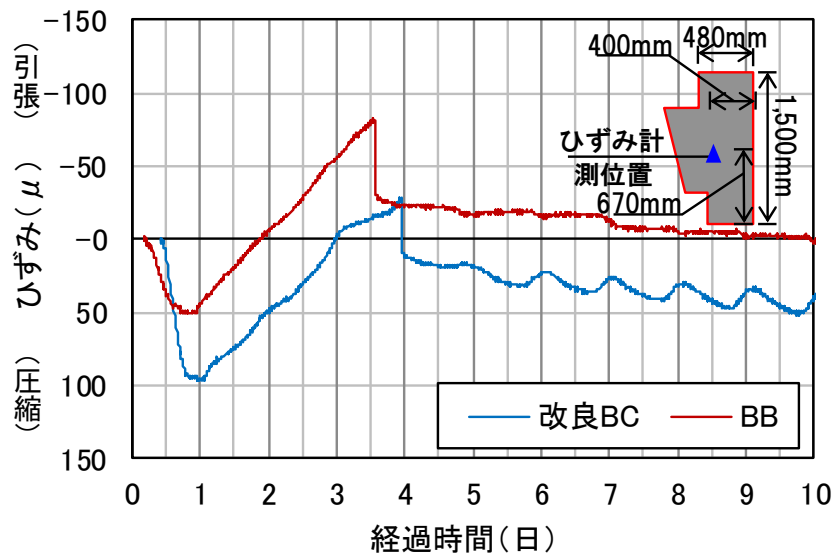


図-6.9 コンクリートの内部のひずみの比較

内部のひずみは改良 BC、BB とともに、内部の温度がピークとなる 1 日程度までは圧縮側のひずみが増加し、その後、温度降下に伴って引張側へひずみが推移している。圧縮ひずみについて、改良 BC の方が BB と比較して導入されるまでの時間が遅くなる理由は、前述したように、凝結時間が BB に比べて改良 BC の方が遅くなることが考えられた。また、圧縮ひずみの最大値が BB の  $50\mu$  に対し、改良 BC が  $100\mu$  と大きくなっている理由として、改良 BC の  $SO_3$  量が BB と比較して多く、エトリンガイトの生成により初期材齢にお

いて膨張ひずみが生じたものと考えられる。改良 BC のひずみは、引張側に移行した後、 $25\mu$  付近で圧縮側へ戻り、変動を繰り返す挙動を示した。この理由としてひび割れが発生したことで応力伝達がされず、ひずみがこのような挙動を示していることが考えられたが、後述のとおり、打込み後 7 日時点の目視確認においてひび割れは確認されていないことから、改良 BC のひずみの値については、引き続き検討が必要である。

以上の結果より、改良 BC の発熱特性は BB よりも低くなることと、改良 BC の圧縮ひずみが BB よりも大きくなることで、改良 BC の引張ひずみ自体を小さくできることから、マスコンの温度ひび割れ対策としても改良 BC が有効である可能性が示唆される結果であった。後述する温度応力解析によってこれらの効果について検証を行う。

#### 6.4.3 強度特性

標準期、夏期施工時にそれぞれ 2 回、計 4 回の施工で現場にて供試体を作製し、標準水中養生の条件で材齢 2 日ないしは 3 日、7 日、28 日および 91 日での圧縮強度の結果を図 6.10 に示す。概ね室内試験と同程度の強度発現性を有しており、標準期および夏期の採取時期の違いによる強度発現性の違いは認められなかった。

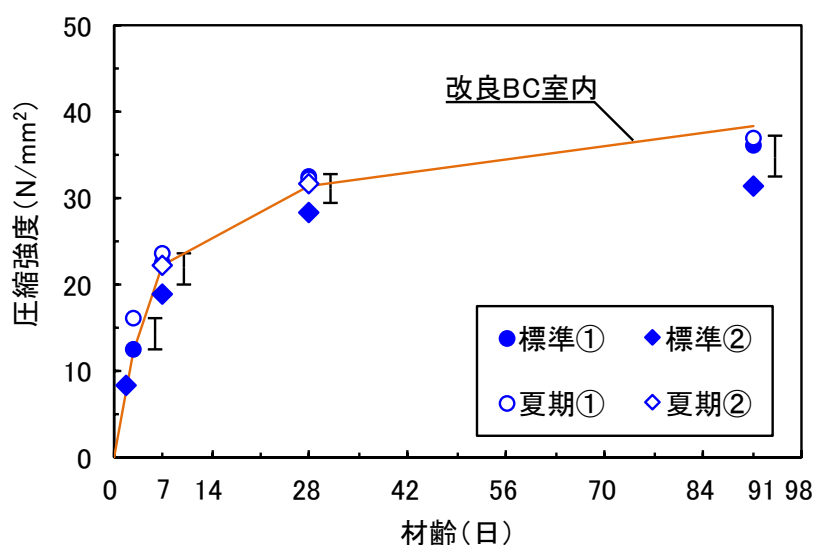


図-6.10 室内試験時と実施工時の圧縮強度の比較

## 6.5 温度ひび割れの評価

実施工で計測したデータを基に，三次元 FEM 解析により図-6.8 で求めた中心温度をフィッティングさせ，断熱温度上昇式を改良 BC，BB について求め，その値から図-6.9 に示す内部のひずみの値との整合を取り，温度ひび割れの評価を行った。

### 6.5.1 断熱温度上昇式の算出

解析モデルを図-6.11 に示す。1BL L=10m の 1/2 モデル (L=5m) として，拘束条件は図-6.12 に示すとおりである。断熱温度上昇式は，以下の式 (6.1) に従い算出した。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t^s)\} \quad (6.1)$$

ここで， $Q(t)$  は材齢  $t$  日における断熱温度上昇量 (°C)， $Q_{\infty}$  は終局断熱温度上昇量， $\gamma$ ， $s$  は温度上昇速度に関する定数である。その他解析に必要な定数は全て，土木学会 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編] [6.4] に従うこととした。

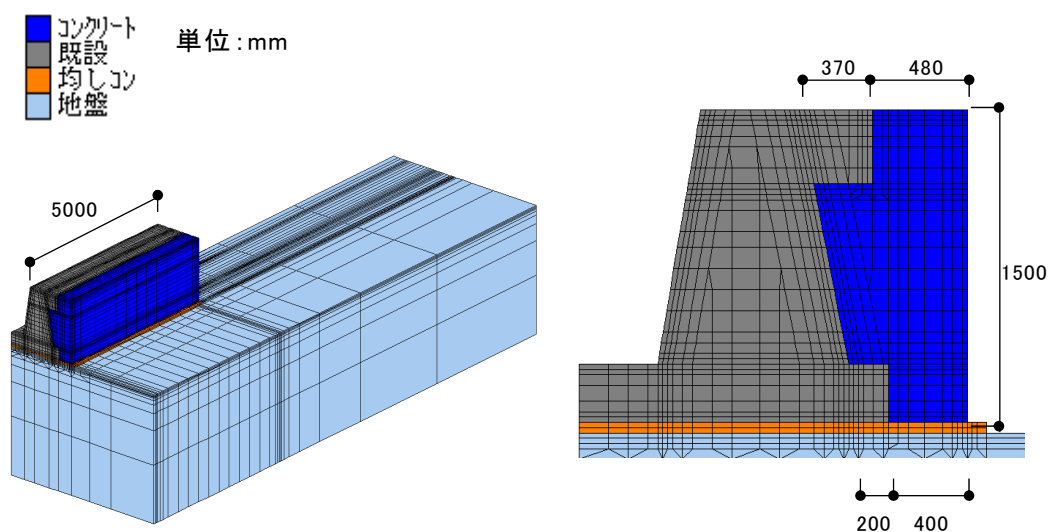


図-6.11 解析モデル



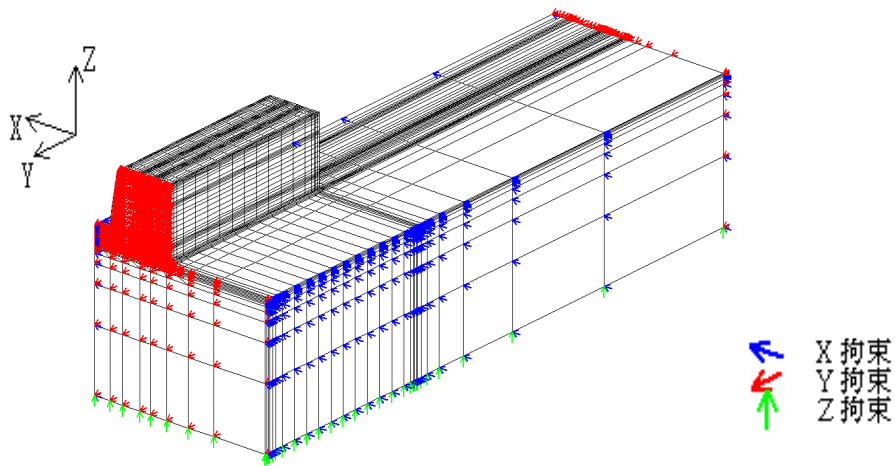
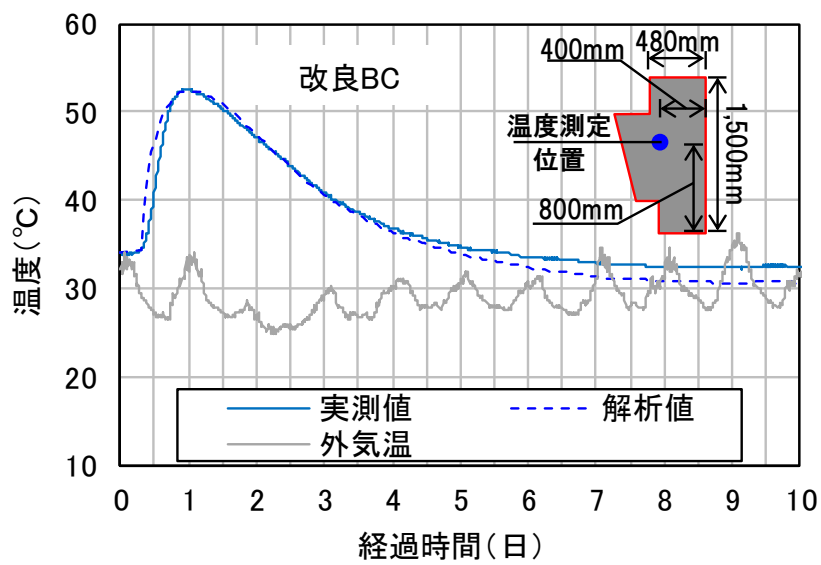
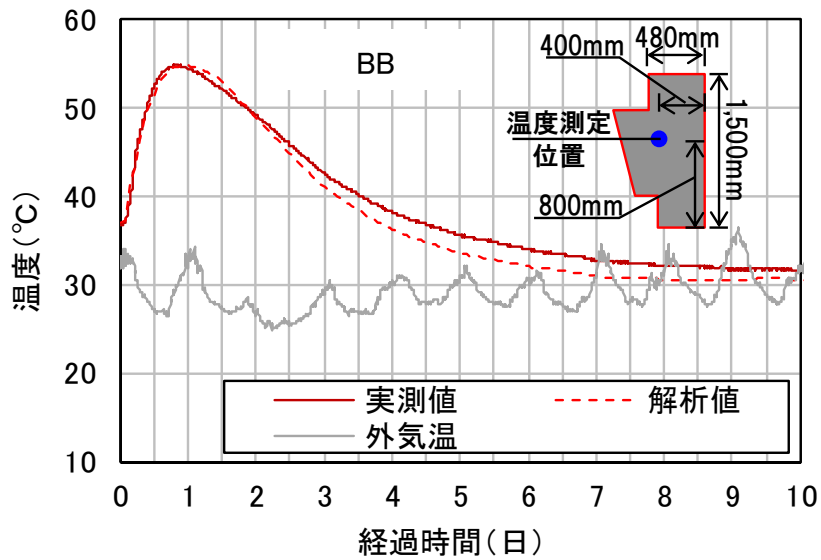


図-6.12 拘束条件



(i) 改良 BC



(ii) BB

図-6.13 内部温度の解析値と実測値の比較

表-6.7 断熱温度上昇特性の比較

	$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t^s)\}$		
	$Q_{\infty}$	$\gamma$	$s$
改良 BC	47.7	0.80	0.78
BB	49.7	0.78	1.00

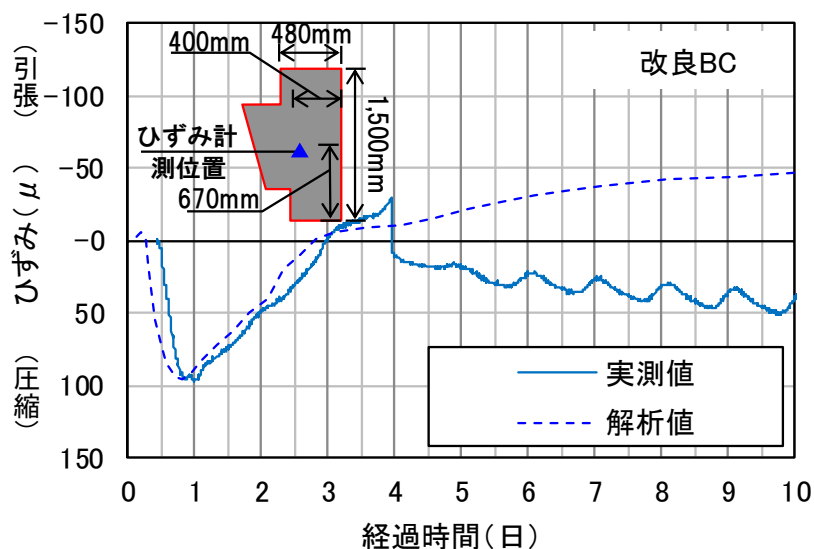
温度解析結果を以下の図-6.13に示す。改良 BC, BB ともに解析値と実測値が精度良く合致していることが分かる。この解析結果より求めた断熱温度上昇式を表-6.7に示す。実測結果と同様, 終局断熱温度上昇量においても, BB の 49.7°C に対して改良 BC では 47.7°C となり, 2°C 低い値となった。また, 断熱温度上昇速度を表す  $\gamma, s$  については, 改良 BC の方が小さくなる結果であった。

### 6.5.2 ひずみの比較およびひび割れ指数による温度ひび割れの評価

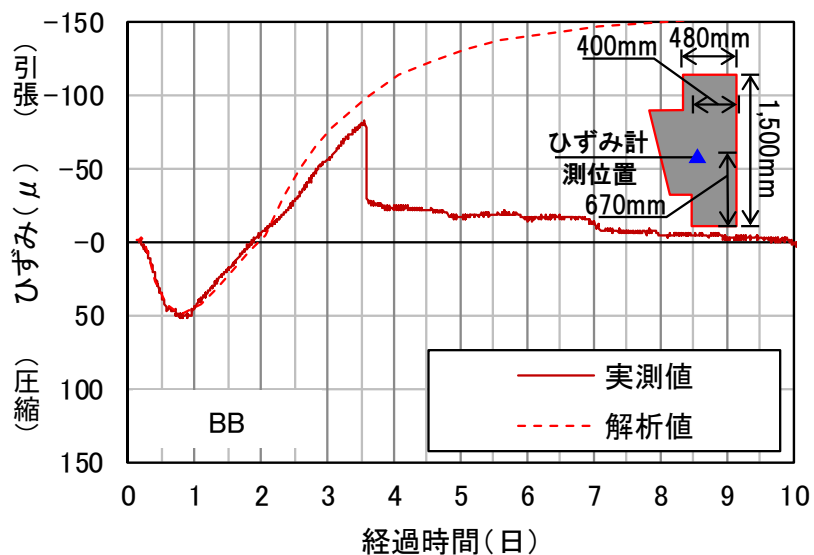
次に, 6.5.1 で算出した断熱温度上昇式と, 以下の表-6.8 に示す解析条件より, 計測したひずみの値について解析値との比較を図-6.14に示す。膨張ひずみにおいては, 実測値と解析値がフィッティングするように導入した。この膨張ひずみは, 改良 BC 中に含まれる SO<sub>3</sub> 量を考慮して導入したものである。

表-6.8 解析入力値

項目	改良 BC	BB
初期温度	実測値と同様	実測値と同様
熱伝導率 (W/m°C)	2.70	2.70
比熱 (kJ/kg°C)	1.15	1.15
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2302	2297
表面熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> °C)	上面: 14, 型枠面: 8	上面: 14, 型枠面: 8
圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	実測値と同様	実測値と同様
静弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$E = 6300 \times f_c^{0.45}$	50.0
引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t = 0.13 \times f_c^{0.85}$	—
クリープ係数	示方書設計編に準拠	—
膨張ひずみ	—	実測にフィッティングするように導入
外気温	実測値	



( i ) 改良 BC



( ii ) BB

図-6.14 ひずみの解析値と実測値の比較

実測値では、ひずみの挙動について前述したように、改良 BC および BB とともに 3.5~4 日程度において変化点が生じていることから、解析では 0 日~3 日程度のひずみの挙動をフィッティングさせることとした。解析結果と実測値の初期のひずみは精度良く合致していることが分かる。また、改良 BC では、SO<sub>3</sub> の効果として初期に 100 μ 程度の膨張ひずみを解析では導入したが、それについても実測値と合致しており、今回の実施工では、初期に 100 μ 程度の膨張ひずみが導入されたものと考えられる。

このひずみの解析結果をもとに、ひび割れが入らないことを前提として算出したひび割れ指数の履歴を図-6.15に示す。解析結果によると、引張応力が引張強度を上回る日数、つまり、ひび割れ指数が1.0以下となるまでの日数は、改良BCおよびBBともに2日程度であったことから、ひずみの変化点が生じるまでの日数と相違ないことが分かる。よって、前述したように表層部にはひび割れの発生は認められなかったものの、躯体の内部ではひずみ履歴からも分かるように、ひび割れが発生した可能性は否定できない。ひび割れが発生した理由として、今回施工した箇所は、1BLのスパン長が $L=10.0\text{m}$ と長く、既設コンクリートに増打ちするという非常に厳しい拘束条件であったことから、ひび割れが発生する可能性が十分に高かったと考えられる。一方で、今回のケースでは、最小ひび割れ指数がBBの0.56に対して改良BCは0.64であったことから、1.14倍程度と若干ではあるがひび割れ発生リスクは低減できたものと考えられる。この理由として、主に、前述のセッコウによる初期の膨張によって改善されたものと考えられる。いずれにしても、改良BCを用いたコンクリートのひび割れ発生リスクについては、引き続き検討が必要であると考えられる。

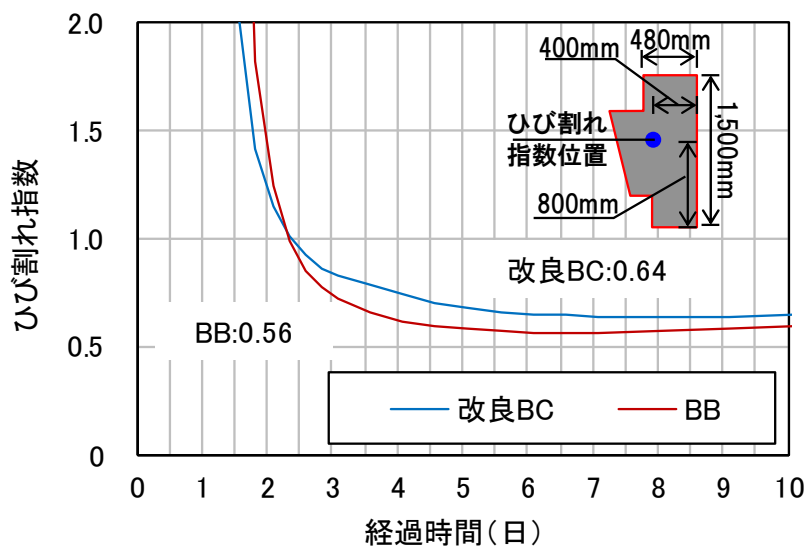


図-6.15 改良BCとBBのひび割れ指数の比較

## 6.6 まとめ

脱枠後の出来栄えの状況を写真-6.6 に示す。初期欠陥やひび割れ等は確認されず，出来栄えは良好であった。本章で得られた結果を以下に示す。

- ・改良 BC を用いたコンクリートは  $\text{SO}_3$  量を多くしたこと，BB よりも水セメント比を 5% 低減したことで，初期および長期強度ともに BB よりも高くなる。
- ・標準期，夏期の施工において，改良 BC 専用の AE 減水剤（標準形および遅延形）を用いることで，スランプロスを抑制することができ，打込み，仕上げといった施工性についても良好である。
- ・夏期の施工において，改良 BC を用いたコンクリートは BB のそれと比較して，マスコンの温度ひび割れ対策としても有効となる可能性がある。ただし，ひび割れの発生のリスクがある場合には，事前に温度応力解析によって確認する必要がある。



写真-6.6 脱枠後の出来栄え

## 【参考文献】

- [6.1] 佐川康貴，渡辺総太，井出貴仁：高炉スラグ微粉末を高置換率で用いたコンクリートの塩化物イオン拡散係数と ASR 抑制効果に関する研究，第 5 回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム論文集，2017.12
- [6.2] 鷹野 明，星 秀明，栗原通了：高炉スラグ微粉末コンクリートのスランプ低下傾向について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [6.3] 森山容州，沼田晉一，木島 徹，小林明夫：高炉スラグ微粉末コンクリートの配合及び強度発現性について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，1987.3
- [6.4] 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.325-336，2018



## 第7章

# 環境影響評価について





## 第7章 環境影響評価について

### 7.1 環境影響評価に関する基本的な考え方

主要な建設材料であるコンクリートは、多量の資源を消費するとともに、コンクリート構造物の建設により環境に様々な影響を及ぼす。一方、セメント原料や混和材として他の産業分野の副産物や廃棄物を多量に使用し、最終処分場の延命化に寄与している。よって、原材料の製造段階、コンクリート構造物の計画、設計、製造、施工、ならびに維持管理の各段階における環境性に配慮することは社会的に非常に重要である。2017年制定コンクリート標準示方書では環境性を要求性能の一つとして位置付けており、地球環境、地域環境、作業環境等に対する適合性、景観等の社会環境に対する適合性について配慮する必要があるとしているものの、安全性や耐久性のように具体的な性能照査の枠組みは示されていない。しかし、昨今では環境側面に関連する法規類や参考となる情報が充実してきていることから、簡便な方法であっても環境性について検討することは意義深い。

環境性として検討すべき項目は多岐にわたるが、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントの使用量が削減され、CO<sub>2</sub>排出量や資源・エネルギー使用量を削減できる上に、鉄鋼産業から排出される副産物を大量に消費できるなどの利点がある。例えば、高炉セメントB種を用いた場合、セメント1tあたりのCO<sub>2</sub>排出量は約40%削減されることが知られているが、高炉スラグ微粉末を混和材としてそれよりも高い置換率で結合材に用いた場合では、さらに削減率は高くなる。

環境負荷低減効果を示すためには、対策の前後（例えば、高炉スラグ微粉末を用いる場合と用いない場合）における条件を定量的に比較、評価することが望ましいが、概略値や簡便な方法を用いて評価を行わなければならない場合もある。いずれの場合においても、

原単位（インベントリデータ）などの基礎的情報は、公的機関などから公表される信頼性の高い情報を用いて検討する必要がある。

コンクリート構造物の環境性に関する基本的な考え方については、2012年制定コンクリート標準示方書〔基本原則編〕5章「コンクリート構造物の環境性」および改訂資料に基本的な考え方が述べられている。また、具体的な検討にあたっては、コンクリートライブラリー125「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」や、コンクリート技術シリーズ96「環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会報告書」、コンクリートライブラリー134「コンクリート構造物の補修・解体・再利用におけるCO<sub>2</sub>削減を目指して」などを参考にすることができる。さらに、2017年3月にはJIS Q 13315-1「コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメントー第1部：一般原則」およびJIS Q 13315-2「コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメントー第2部：システム境界及びインベントリデータ」が規格化されているので利用することが望ましい。環境性に関する関連資料一覧を表-7.1に示す。

表-7.1 環境性に関する関連資料

資料名	発刊年	備考
コンクリート標準示方書〔基本原則編〕5章「コンクリート構造物の環境性」および改訂資料	2012年	土木学会
コンクリートライブラリー125「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」	2005年	土木学会
コンクリート技術シリーズ96「環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会報告書」	2011年	土木学会
コンクリートライブラリー134「コンクリート構造物の補修・解体・再利用におけるCO <sub>2</sub> 削減を目指して」	2012年	土木学会
JIS Q 13315-1「コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメントー第1部：一般原則」	2017年	—
JIS Q 13315-2「コンクリート及びコンクリート構造物に関する環境マネジメントー第2部：システム境界及びインベントリデータ」	2017年	—

## 7.2 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのCO<sub>2</sub>削減量

セメント製造時におけるCO<sub>2</sub>の排出は、焼成工程において以下の式(7.1)に示す、石灰石(CaCO<sub>3</sub>)の熱分解や焼成の際の燃料の燃焼に起因している。



高炉セメントB種、改良型の高炉セメントC種および普通ポルトランドセメントのセメント1t当たりのCO<sub>2</sub>排出量の計算例[7.1]を表-7.2に示す。高炉スラグ微粉末をセメントの一部として置換することで、セメント製造時の石灰石・エネルギーの消費が少なくなるため、石灰石の熱分解や燃料の燃焼に起因するCO<sub>2</sub>の排出量を削減することができる。普通ポルトランドセメントに対し、高炉セメントB種では330kg/tのCO<sub>2</sub>を削減することができ、改良型の高炉セメントC種では500kg/t程度で、高炉セメントB種と比較しても1.5倍程度の削減が見込まれる。高炉セメント(B種)の2017年度の生産高が1082万tであったことから、以下の式(7.2)のとおり、普通ポルトランドセメントに対して360万tのCO<sub>2</sub>の削減が見込まれる。

$$\blacktriangle 330\text{kg/t} \times 1082\text{万t (2017年度高炉セメント生産高)} \div \blacktriangle 360\text{万t} \quad (7.2)$$

表-7.2 セメント1t当たりのCO<sub>2</sub>排出量の一例

CO <sub>2</sub> 排出源	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/t)			CO <sub>2</sub> 削減量 (kg/t)		
	①普通ポルトランドセメント	②高炉セメントB種	③改良型の高炉セメントC種	高炉B 普通ポルト比 ①-②	改良高炉C 普通ポルト比 ①-③ 高炉B比 ②-③	
石灰石起源	479.8	268.7	167.9	211.1	311.9	100.8
化石エネルギー起源	288.3	168.7	100.9	119.6	187.4	67.8
計	768.1	437.4	268.8	330.7	499.3	168.6

(セメント協会 HP 2018年2月 LCI データをもとに作成)

### 7.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの環境負荷低減率の算定

#### 7.3.1 改良型の高炉セメント C 種のエネルギー原単位の試算

高炉スラグ微粉末粉碎時およびセメントの混合等にかかるエネルギー原単位を表-7.3に示す。表中の値は、セメントメーカーが保有する実績値としている。併せて、普通ポルトランドセメントの製造エネルギーを示す。セメント製造時のエネルギーについては、セメント協会資料 [7.2] により開示されたデータである。

高炉セメント B 種および改良型の高炉セメント C 種のエネルギー原単位を、以下の表-7.4に示す。なお、高炉セメント B 種は高炉スラグ微粉末の分量が 42%とし、改良型の高炉セメント C 種は分量が 65%として算出した結果である。改良型の高炉セメント C 種では、普通ポルトランドセメントに比べ環境負荷低減率（省エネ率）で 56%、高炉セメント B 種と比較しても 33%の環境負荷低減効果が認められる。

表-7.3 製造過程におけるエネルギー原単位

項目	エネルギー原単位 (MJ/t)	備考
①高炉スラグの粉碎エネルギー	240	セメントメーカー実績
②高炉スラグ微粉末の混合エネルギー	147	セメントメーカー実績
③普通ポルトランドセメントの製造エネルギー	3480	セメント協会資料

表-7.4 高炉スラグ製造時および混合時のエネルギー原単位

項目	エネルギー原単位 (MJ/t)	省エネルギー量 (MJ/t)		備考
		普通ポルト比	高炉 B 比	
普通ポルトランドセメント	3480	—	—	—
高炉セメント B 種	2266	1214 (省エネ率 35%)	—	③×0.58+①×0.42+②
改良型の高炉セメント C 種	1521	1959 (省エネ率 56%)	745 (省エネ率 33%)	③×0.35+①×0.65+②

### 7.3.2 改良型の高炉セメント C 種の市場規模の試算および環境負荷低減効果

改良型の高炉セメント C 種を大手・準大手ゼネコンで使用することを想定した際の市場規模を試算したものを以下の表-7.5 に示す。この推定では、大手ゼネコン 5 社と準大手 10 社が改良型の高炉セメント C 種の技術を取り入れ、それぞれの手持ちの現場に適用することを想定している。その他の条件については、表中に示すとおりである。土木分野においては、17 万 t 程度の適用が見込まれる。

今後、大手・準大手ゼネコンで適用実績を積み、技術が成熟していくことで汎用的なセメントとして使用されていくものと予想される。改良型の高炉セメント C 種の将来的な市場規模を表-7.6 に示す。将来的にはコンクリート全体として 100 万 t 程度の使用が見込まれる。

表-7.5 大手・準大手ゼネコンでの市場規模

指 標	数 値	根 拠
①土木分野（大手）でのコンクリート使用量	57 万 m <sup>3</sup>	2009 年大手ゼネコン実績
②大手 5 社・準大手 10 社の年間セメント使用量（土木）	140 万 t	①×(0.8×5+0.3×10)×0.35t/m <sup>3</sup> （平均セメント量）
⑤改良型の高炉セメント C 種の適用予想量（土木）	17 万 t	②×0.4（適用可能部材率，マスコン，海洋コン等）×0.3（適用率）

表-7.6 改良型の高炉セメント C 種の将来的な市場規模

指 標	数 値	根 拠
①全国のコンクリート生産量	1 億 847 万 m <sup>3</sup>	2005～2009 年実績の平均値（全生工業組合連合会公表データより）
②土木用コンクリートの使用量	2169 万 m <sup>3</sup>	①×0.2（土木，建築のうち，土木での割合）
③改良型の高炉セメント C 種の適用予想量（土木）	91 万 t	②×0.4（適用可能部材率，マスコン，海洋コン等）×0.3（適用率）×0.35t/m <sup>3</sup> （平均セメント量）

### 7.3.3 CO<sub>2</sub>削減効果および環境負荷低減効果

7.2 および 7.3 (1), (2) で示した CO<sub>2</sub>削減量およびエネルギー原単位, 将来的な市場規模から算定した環境負荷低減効果について表-7.7 に示す。表中では, 大手・準大手ゼネコンにおいて積極的に利用・展開を図る技術展開期と, 改良型の高炉セメント C 種が汎用的なセメントとして全国の生コン工場で利用できるようになることを想定した, 技術成熟期に分けて表記した。表-7.5 に示した市場規模のうち, 改良型の高炉セメント C 種は普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を 3:1 の割合で使用されることを前提として算出した。この比率は現在における普通ポルトランドセメントと高炉セメントの市場比率をベースとしている。

以下の算定式において, 改良の高炉セメント C 種の土木用コンクリートの適用に関して, 技術展開期では CO<sub>2</sub>の削減量で 7.3 万 t, 環境負荷低減効果としては原油ベースで 0.73 万 kL/年の効果が見込まれる。将来的には, 汎用セメントとして全国の生コン工場で利用できることを想定すると, CO<sub>2</sub>の削減量で 35 万 t, 原油ベースで 3.7 万 kL/年の環境負荷低減効果が見込まれる。

表-7.7 CO<sub>2</sub>削減量および環境負荷低減効果

指 標	技術展開期		技術成熟期	
	普通ポルト比	高炉 B 比	普通ポルト比	高炉 B 比
①改良型の高炉セメント C 種の CO <sub>2</sub> 削減量	499kg/t	169kg/t	499kg/t	169kg/t
②改良型の高炉セメント C 種の環境負荷低減効果量	1959MJ/t	745MJ/t	1959MJ/t	745MJ/t
③市場規模 (普通ポルト:高炉 B=3:1)	13 万 t	4 万 t	60 万 t	31 万 t
④CO <sub>2</sub> 削減量	6.5 万 t	0.7 万 t	30 万 t	5 万 t
	計 7.2 万 t		計 35 万 t	
⑤環境負荷低減効果	25 万 GJ	3 万 GJ	118 万 GJ	23 万 GJ
	計 28 万 GJ		計 141 万 GJ	
	0.73 万 kL/年 <sup>※</sup>		3.7 万 kL/年 <sup>※</sup>	

※原油 1L=38.2MJ

### 7.3.4 高炉スラグ微粉末の市場規模および供給体制

国内および輸出におけるセメント用の高炉スラグ微粉末の販売量の推移を表-7.8 に示す。2017年度実績で、国内および輸出の合計で1778万t程度である。表-7.6で示した改良型の高炉セメントC種としてのセメントの市場規模は、土木分野で91万tであり、建築分野と併せても400万t程度と見込まれる。よって供給量としては十分に賄えるものと考えられる。

国内の高炉スラグ微粉末の製造事業所を図-7.1に、各社が保有する高炉スラグ微粉末の製品一覧を表-7.9に示す。製造事業所は太平洋ベルト工業地帯に集中しており、供給先は南北海道、首都圏、関西、中国、北部九州と地域が限定されることが分かる。今後、普及・展開するにあたって、全国全ての地域に改良型の高炉セメントC種を適用するのではなく、例えば、北陸エリアではフライアッシュを用いるなど、それぞれの地域の特性を活かした材料（混和材料）を選定し、効率的な供給体制を構築していかなければならないと考える。今後、低炭素社会の実現に向け、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の副産物についてもコンクリート用骨材同様に、地産地消を意識した利用拡大への取組みが必要である。

表-7.8 セメント用高炉スラグ微粉末の販売量（国内、輸出）の推移 [7.3]

	2010 年度	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	対前 年度 増減 数量	対前 年度 増減 率%
国内 (構成 比%)	7486 (47.7)	8215 (48.3)	8330 (45.7)	8954 (48.0)	8101 (44.3)	7474 (42.0)	7541 (43.0)	7514 (42.2)	▲27	▲0.4
輸出 (構成 比%)	8202 (52.3)	8780 (51.7)	9888 (54.3)	9686 (52.0)	10186 (55.7)	10336 (58.0)	9982 (57.0)	10273 (57.8)	291	2.9
合計 (構成 比%)	15689 (100.0)	16994 (100.0)	18217 (100.0)	18640 (100.0)	18288 (100.0)	17810 (100.0)	17523 (100.0)	17786 (100.0)	263	1.5

(単位：千t)



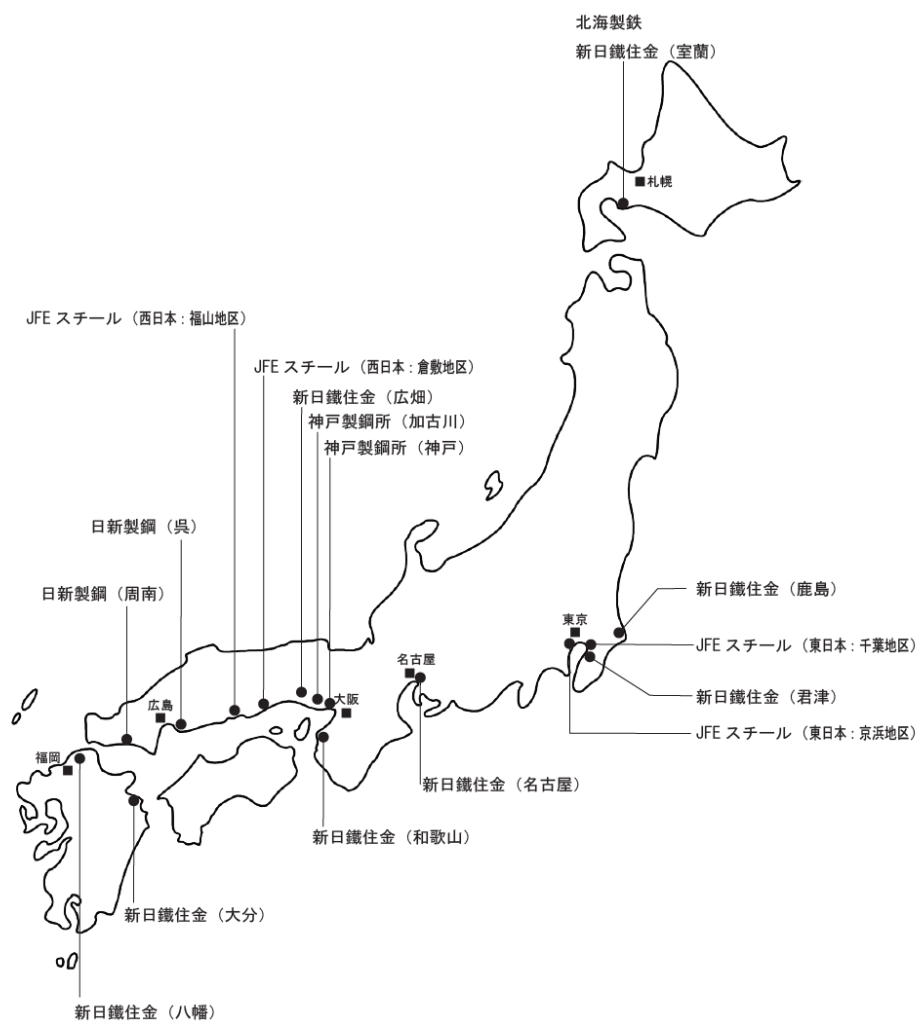


図-7.1 高炉スラグ微粉末の製造事業所 [7.3]

表-7.9 高炉スラグ微粉末専用工場を有する会社名と製品の種類 [7.3]

製造会社	主な製品	高炉スラグ 主要供給製鉄所
日鉄住金セメント(株)	4000, 6000, 8000	新日鐵住金(株) 室蘭
日鉄住金スラグ(株)	3000, 4000	〃 鹿島
エスメント関東(株)	3000, 4000	〃 君津
エスメント中部(株)	4000, 6000	〃 名古屋
和歌山高炉セメント(株)	4000	〃 和歌山
日鉄住金高炉セメント(株)	3000, 4000, 6000, 8000	〃 八幡
(株)デイ・シイ	3000, 4000, 6000, 8000	JFE スチール(株) 京浜
千葉リバーメント(株)	4000	〃 千葉
水島リバーメント(株)	4000	〃 倉敷
(株)神戸製鋼所	4000	(株)神戸製鋼所 加古川

## 7.4 高炉セメント利用拡大のための施策

### 7.4.1 国・地方公共団体・民間等の取組み

高炉セメントの使用は、前述したとおり CO<sub>2</sub> の削減や環境負荷低減効果があることから、国、地方公共団体、民間等の方針として高炉セメントの使用促進を図るための以下に示す施策が取られている。

#### (1) グリーン購入法における高炉セメントの特定調達品目としての指定

「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」（グリーン購入法）[7.4] で、公共工事の資材として、セメント製造時の CO<sub>2</sub> 排出量の少ない高炉セメントが、2001 年（平成 13 年）に特定調達品目に指定された結果、国および独立行政法人等の機関での高炉セメントの使用が増加した。また、最近では都道府県および政令指定都市などでも、特定調達品目に指定しており、その使用が増加傾向にある。

#### (2) 地球温暖化対策における混合セメントの使用促進

2005 年（平成 17 年）に策定された「京都議定書目標達成計画（2008 年～2012 年度）」には、温室効果ガス削減の施策に「混合セメントの利用拡大」が織り込まれた。この計画に続いて、パリ協定による日本の 2030 年度の温室効果ガス削減目標（2013 年度比▲26.0%）の温暖化対策計画には、「非エネルギー起源二酸化炭素」の削減施策として「混合セメントの利用拡大」[7.5] が織り込まれている。

#### 7.4.2 土木分野での取組み

高炉セメントは前述したとおり「グリーン購入法」による指定等で、公共土木工事での使用頻度が高い。発注する官公庁の共通仕様書・特記仕様書等ではコンクリートの工種ごとに、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種で区分しているが、その一般的な例を表-7.10 に示す。国等の直轄工事では、高炉セメント B 種が最も汎用的に用いられている。

高炉セメントを用いるコンクリートの土木における設計・施工に関しては、土木学会「2017年制定コンクリート標準示方書」に示されている。また、同学会では、2018年（平成30年）に「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」を改訂した。さらに、混合セメントの JIS に規定される混合材の分量を超える混和材置換率の配合が提案されていることを背景として、「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」を制定した。これらの刊行物では、高炉セメントの短所とされる中性化抵抗性について、実際の構造物における成果を生かす提案がされている。また、高炉セメントの使用が制限される冬期について、使用実績をもとに湿潤養生期間の見直しが行われている。

表-7.10 セメント種類別適用工種の例

セメント種類	コンクリートの要求性能	工種
高炉セメント B 種	<ul style="list-style-type: none"> <li>○無筋コンクリート</li> <li>○海水・潮風の影響を受ける鉄筋コンクリート等</li> <li>○部材断面の大きい鉄筋コンクリート</li> </ul>	均しコンクリート，側溝，管渠，重力式擁壁，重力式橋台，護岸の基礎，笠コンクリート，帯コンクリート，集水榭，法枠，消波根固ブロック，トンネルライニング，半重力式橋台および擁壁，RC擁壁，U型擁壁，暗渠，洞門，水門，樋門，樋管，橋脚，橋台，共通溝，地下道，函渠，ケーソン基礎の中詰，水中コンクリート，場所打ち杭，深礎杭，水叩，ダム，護岸，舗装，港湾工事一般
普通セメント	早期に強度を必要とし，部材断面の小さい鉄筋コンクリート	PC 樋管，ラーメン橋，スラブ橋，非合成床版，合成桁床版等
早強セメント	早期に高強度を必要とする鉄筋コンクリート	ケーソン基礎躯体コンクリート，PC 桁等

### 7.4.3 建築分野での取組み

高炉セメントがグリーン購入法の特定調達品目に指定されたことを受け、建築工事においてもエコマテリアルとして、杭、基礎、地中梁、地下躯体、耐圧版、連壁、CFTおよび均しコンクリートに使用されている。これらの部位は、一般に部材断面が大きいこと、コンクリートの養生期間が取り易いことおよび、かぶりが比較的大きいことから、高炉セメントの使用が適している。

資源の有効利用・エコマテリアル活用の面から、高炉セメント使用に対して加点する建築物環境総合評価システム（略称：CASBEE）を導入する自治体が増え、建築物の設計・施工において環境への配慮が求められることに鑑み、日本建築学会では、2008年（平成20年）に「鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針（案）・同解説」を制定し、2015年（平成27年）には「コンクリートの調合設計指針・同解説」が第3次改定され、コンクリートに要求される性能として環境配慮に関わる項目（省資源、省エネルギー、環境負荷低減、長寿命）が組み込まれた。そして2017年（平成29年）に「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説」を発刊した。同指針中には、環境負荷低減に関して規定がされており、その中で、①高炉スラグコンクリートを使用することで、構造体コンクリートの品質を確保しつつ、建築物の構築に関わる環境配慮に資すること、②基礎および杭（地下部）には高炉セメントC種およびC種相当を積極的に適用することや地上部への適用は計画時に初期強度や耐久性について十分に検討すること、③環境配慮性は表-7.11に示す「CO<sub>2</sub>削減等級」を用いて表し、CO<sub>2</sub>削減率の範囲により4つの水準によって定義することが述べられている。

表-7.11 高炉スラグコンクリートによる構造体コンクリートのCO<sub>2</sub>削減等級

区分	CO <sub>2</sub> 削減率	使用するセメントの種類 (コンクリートの比率 地上部分：地下部分 =8:2 の場合において)	
		地上部分	地下部分
等級0	0% ≤ CO <sub>2</sub> 削減率 ≤ 5%	普通ポルトランド セメント	普通ポルトランド セメント
			A種・A種相当
等級1	5% < CO <sub>2</sub> 削減率 ≤ 20%	普通ポルトランド セメント	B種・B種相当
			C種・C種相当
		A種・A種相当	A種・A種相当
等級2	20% < CO <sub>2</sub> 削減率 < 40%	A種・A種相当	B種・B種相当
			C種・C種相当
等級2	20% < CO <sub>2</sub> 削減率 < 40%	B種・B種相当	B種・B種相当
			B種・B種相当
等級3*	40% ≤ CO <sub>2</sub> 削減率	—	—

※「等級3」のセメントの種類は表記されていないが、地上部分に高炉セメントB種またはC種、かつ、地下部分に高炉セメントC種とした場合が相当する。

## 7.5 まとめ

本章では、環境影響評価に関する検討を行った。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・高炉セメント B 種では 330kg/t あたりの CO<sub>2</sub> の削減に対し、改良型の高炉セメント C 種では 500kg/t 程度で、高炉セメント B 種との比較においても 1.5 倍程度の CO<sub>2</sub> 削減効果が見込まれる。
- ・改良型の高炉セメント C 種の土木用コンクリートの適用に関して、将来的に汎用セメントとして全国の生コン工場で利用されると想定した場合、CO<sub>2</sub> の削減量で 35 万 t の環境負荷低減効果が見込まれる。

### 【参考文献】

- [7.1] 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（2019年版），p.8，2019
- [7.2] セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7，2018.2
- [7.3] 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成 29 年度実績），p.41，2018.7
- [7.4] 環境省：<https://www.env.go.jp/policy/hozen/green/g-law/>
- [7.5] 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査，pp.6-12，2017.3



# 第 8 章

## 結論





## 第 8 章 結論

### 8.1 本研究のまとめ

本研究では高炉セメント C 種を用いたコンクリートを実用化し、土木構造物へ適用するための検討を行った。具体的には、土木用のコンクリートの配合として最適なセメントの組成とするために、高炉スラグ微粉末の粉末度を  $4000\sim 4500\text{cm}^2/\text{g}$  とし、高炉スラグ微粉末が 65%程度、無水セッコウが 5%程度で結合材中の  $\text{SO}_3$  量を 3.5%程度となるように改良した。さらに、高炉セメント C 種専用の化学混和剤を用いることでフレッシュ性状の改善を図った。このように、「改良型の高炉セメント C 種」と「改良型の高炉セメント C 種専用の化学混和剤」を用いることで、単位水量が  $150\sim 160\text{kg}/\text{m}^3$  程度と比較的少なく、スランプが 12cm 程度の土木用のコンクリート配合においても、経時によるスランプロスが生じることなく良好なフレッシュ性状が確保できるとともに、水和熱を抑制し、初期強度および収縮特性を改善することができた。さらに、それらを用いたコンクリートの強度特性や耐久性といった各種物性についても明らかにした。

実構造物を見据えた実規模試験体による実大施工実験では、コンクリートの施工性ならびに実構造物よりコア供試体等を採取し、各種物性の検証を行った。さらに、実際に海洋構造物に適用し、フレッシュコンクリートの性状、施工性、硬化性状ならびに温度ひび割れ抑制効果に関する検証を行った。これらの得られた知見をもとに、環境影響評価に関する検証を行った。

第 2 章では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの既往の研究について整理した。その結果、これまでに、以下の点が明らかとなっている。

- ・フレッシュコンクリートの性質は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるに従い、所要のスランプを得るため

の単位水量が小さくなる。また、置換率の増加に伴って、凝結時間は遅くなる傾向にある。スランプの経時変化については、高炉スラグ微粉末を置換してもほとんど変わらない場合と、経時保持性が低下する場合がある。

- ・高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートの初期の温度上昇速度は、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴って遅くなることが認められるが、置換率が 55%以下で材齢 3 日以降では、普通ポルトランドセメントを用いた場合の温度上昇量よりも大きくなる傾向にある。
- ・圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従って小さくなる傾向にある。とくに材齢 3 日、7 日といった若材齢において顕著であるが、材齢の経過に伴い、置換率が 35%から 70%の範囲のコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の強度発現性を有する。また、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、水分の供給によって長期の強度増進に影響を及ぼす。
- ・収縮特性について、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに従って、乾燥初期の段階ではやや増加する傾向にあり、それ以降は次第に小さくなり、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同程度になる。自己収縮ひずみについても、一般的に、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントの場合と比較して、大きくなる傾向にある。
- ・中性化について高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントの場合と比較して、大きくなる傾向にあるが実構造物の中性化深さの調査結果では、普通ポルトランドセメントと高炉セメントとの中性化深さに大きな差が認められない結果も得られている。
- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、高い遮塩性および ASR の抑制効果が認められ、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、その効果も高くなる傾向にある。

- ・高炉セメント C 種相当の高炉スラグ高含有セメントに関して、セッコウの添加量を通常よりも多くすることで初期の水和反応を改善できる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が多くなると化学混和剤への吸着性能も異なり、高炉スラグ微粉末と相性の良い分子構造を持つ分散剤が存在する。
- ・土木用のコンクリートの配合としての最適なセメントの組成は、高炉スラグ微粉末の粉末度を  $4000\sim 4500\text{cm}^2/\text{g}$  とし、高炉スラグ微粉末が 65%程度、普通ポルトランドセメントが 30~35%、無水セッコウが 5%程度で結合材中の  $\text{SO}_3$  量を 3.5%程度とすることで、水和熱を抑制し、初期強度および収縮特性を改善することができる。
- ・高炉スラグ高含有セメントにセッコウを添加することで、初期強度および収縮特性が改善される。一方で、セッコウの添加量が増加するほど強度低下や火災時の爆裂等が生じることがあり、最適なセッコウ添加量が存在する。

第 3 章では、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートのフレッシュ性状および発熱特性について検討した。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・分子設計を改良して合成したポリカルボン酸分散剤と流動保持剤を組み合わせた改良型の高炉セメント C 種専用の混和剤を用いることで、フレッシュ性状のうち流動保持性を改善できることが確認された。
- ・高炉セメント C 種専用の混和剤に関して、標準形、遅延形ともに良好なスランプ保持性を有しており、室内試験の静置した状態での経時 90 分においても大きくスランプロスすることなく、フレッシュコンクリートの性状は良好であった。
- ・改良型の高炉セメント C 種は、セメント中の  $\text{SO}_3$  量 3.5%程度まで高めているが、 $\text{SO}_3$  量がコンクリートのフレッシュ性状に与える影響は小さい。
- ・コンクリートのブリーディングに関して高炉セメント C 種専用の混和剤を用いることで、ブリーディング量が少なくなることが確認された。また、高炉セメント B 種との

比較においては、単位水量および水セメント（結合材）比の低減によって、ブリーディング量が少なくなる。

- ・加圧ブリーディング試験については、圧送の指標で用いられる標準曲線内に収まる結果であり、良好な圧送性を有する。
- ・改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの熱膨張係数は、高炉セメント B 種と同程度の  $10 \mu / ^\circ\text{C}$  程度である。
- ・改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性は、高炉セメント B 種と比較して  $10^\circ\text{C}$  程度低くなる。

第 4 章では、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの強度特性および耐久性に関する検討結果について示した。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・改良型の高炉セメント C 種では一般の高炉セメント C 種と比較して、1.20 倍程度の強度増進が認められる。
- ・静弾性係数、曲げ強度や引張強度は、圧縮強度と相関があり、改良型の高炉セメント C 種では一般の高炉セメント C 種と比較して、全ての値において大きくなる。
- ・高炉セメント B 種との比較において、改良型の高炉セメント C 種ではセメント中に含まれる  $\text{SO}_3$  量を一般的な 2.0% 程度から 3.5% 程度まで増やしたことに加え、高炉セメント B 種の配合の水セメント（結合材）比よりも 5% 低減したことによって、改良型の高炉セメント C 種の配合は、材齢初期においても高炉セメント B 種の配合と同程度の強度発現性を有する。
- ・高炉セメント B 種の配合の  $\text{W/C}=55\%$  と同等の中性化速度係数が得られる改良型の高炉セメント C 種の水セメント比は  $\text{W/C}=50\%$  程度である。
- ・水分浸透速度係数に関して、改良型の高炉セメント C 種を用いることで水和組織が緻密化し、普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種と比較して水分の浸透に対して高い抵抗性を有する。

- ・ 41 年間の暴露試験において、高炉スラグ微粉末を 70%置換した供試体では、目立った表層品質の低下はなく健全な状態であった。一方で、90%置換したものでは暴露上面、高硫酸塩スラグセメントの暴露上面および暴露上面側の角部において、表層部のペーストの剥離が散見される。
- ・ 41 年間の暴露試験では、全ての配合において材齢 91 日から 11 年にかけて圧縮強度が増加する。11 年から 41 年にかけては、著しい強度低下はなく健全である。
- ・ 材齢 41 年目の中性化深さと各結合材に占める普通ポルトランドセメントの割合の関係には相関があり、結合材中に占める普通ポルトランドセメントの量の割合の減少によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量の生成量が減少したことが、中性化の進行に対して支配的であったと推測される。
- ・ 材齢 41 年の高炉スラグ微粉末を 70%置換した高炉セメントを使用したコンクリートにおいて、水結合材比が 50%の場合では中性化深さは 10mm 以下であり、未中性化部に  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が残存する。

第 5 章では、実大施工実験によるコンクリートの施工性ならびに各種物性の検証を行った。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・ 改良型の高炉セメント C 種と高炉セメント B 種との比較において、同一のスランプであってもセメントの種類や配合の違いによって施工性能に違いが認められる。
- ・ 改良型の高炉セメント C 種の配合において単位量を変えず、混和剤の添加量のみでスランプを増大させた場合では、材料分離することなく、振動締固めによる充填性が向上する。
- ・ 施工性能評価において、配合が照査図の境界線上に位置する場合には、セメントの種類や単位水量の影響が顕著となり、配合によって振動締固めによる充填性の容易さが異なると考えられる。したがって、打込みのスランプと単位セメント量に加え、これ

らについても考慮する必要がある。一方で、照査図の色の濃い部分に位置する場合には、改良型の高炉セメント C 種の配合においても十分な施工性能を有している。

- ・改良型の高炉セメント C 種の配合において、目標スランプを 8cm から 14cm まで大きくすることで、表層部の出来栄は良好で、十分な緻密性を有している。
- ・材齢 28 日時点の圧縮強度は、冬期について改良型の高炉セメント C 種の配合と高炉セメント B 種の配合の強度は同程度であるのに対して、夏期については改良型の高炉セメント C 種の配合の強度が大きくなる傾向が認められる。
- ・改良型の高炉セメント C 種の配合の積算温度と圧縮強度の関係は良好な相関関係が得られることから、改良型の高炉セメント C 種の配合の強度は、積算温度より算出できるものと考えられる。
- ・改良型の高炉セメント C 種の配合の冬期配合と夏期配合の比較において、平均細孔径は冬期配合より夏期配合において小さくなる。
- ・改良型の高炉セメント C 種の温度上昇特性は高炉スラグ微粉末を多量に用いていることから、打込み温度に対する温度依存性が高く、とくに冬期では、断熱温度上昇試験の結果と乖離が大きくなる。
- ・改良型の高炉セメント C 種の配合の熱膨張係数は、 $\text{SO}_3$  量の含有量を高めているため、若材齢時に大きくなる傾向がある。水和反応が収束すると改良型の高炉セメント C 種の熱膨張係数は高炉セメント B 種と同等となる。
- ・夏期および冬期を想定した温度応力解析により、改良型の高炉セメント C 種を用いることで高炉セメント B 種と比較して、一定の温度ひび割れ低減効果を期待できる可能性がある。

第 6 章では、実施工による施工性ならびに温度ひび割れの抑制効果の検証を行い、その中で得られた結果を以下に示す。

- ・改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートは SO<sub>3</sub> 量を多くしたことと、高炉セメント B 種よりも水セメント比を 5% 低減したことで、初期および長期強度ともに高炉セメント B 種よりも高くなる。
- ・標準期、夏期の施工において、改良型の高炉セメント C 種専用の AE 減水剤（標準形および遅延形）を用いることで、スランプロスを抑制することができ、打込み、仕上げといった施工性についても良好である。
- ・夏期の施工において、改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートは高炉セメント B 種のそれと比較して、マスコンの温度ひび割れ対策としても有効となる可能性がある。ただし、ひび割れの発生のリスクがある場合には、事前に温度応力解析によって確認する必要がある。

第 7 章では、環境影響評価に関する検討を行った。その結果、これまでに、以下の点を明らかにした。

- ・高炉セメント B 種では 330kg/t あたりの CO<sub>2</sub> の削減に対し、改良型の高炉セメント C 種では 500kg/t 程度で、高炉セメント B 種と比較しても、1.5 倍程度の CO<sub>2</sub> 削減効果が見込まれる。
- ・改良型の高炉セメント C 種の土木用コンクリートの適用に関して、将来的に汎用セメントとして全国のレディーミクストコンクリート工場で利用されると想定した場合、CO<sub>2</sub> の削減量で 35 万 t の環境負荷低減効果が見込まれる。



## 8.2 今後の課題

今回の実験的検討および実施工を想定した施工実験，さらには，実施工において改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの実用化に向けて，ある程度の目途を立てることができた。一方で，今後，普及するためには以下に示す技術的課題と施策・仕様等の制度上の課題が考えられ，引き続き検討する必要がある。

### 8.2.1 技術的課題および必要となる取組み

- ・夏期の断熱温度上昇特性について，改良型の高炉セメント C 種では試験室での断熱温度上昇特性と実構造物で測定したデータに乖離がある。その理由として，高温時の高炉スラグ微粉末の潜在水硬性の活性化が考えられ，高炉スラグ微粉末の置換率が 60% を超えるような高炉セメント C 種の範疇ではとくに顕著となる。これら実態を技術資料等に反映させる必要がある。
- ・温度ひび割れ抵抗性に関して，第 6 章では高炉セメント B 種を用いたコンクリートと比較して優位性があることを示したが，実際には内部においてひび割れが発生している可能性も否定できない。つまり，改良型の高炉セメント C 種での温度応力解析では危険側で評価している可能性も考えられる。そのために，温度ひび割れ抵抗性に関するデータの取得と解析精度の向上を行わなければならない。
- ・改良型の高炉セメント C 種としての長期データが不足しており，中性化，高炉スラグ微粉末が高含有となった際のアブサンデン現象等に関する長期的なデータを今後，暴露試験等で継続的に取得する必要がある。

### 8.2.2 施策・仕様等の制度上の課題および必要となる取組み

- ・国の直轄工事や地方自治体発注の工事では過去の実績が重要となり，新規に開発した材料が扱づらい環境にある。その理由の一つとして，従来から仕様規定型で構造物が建

設されていることが考えられる。一方で、国外では性能規定型で構造物が建設されている例も多く存在する。日本国内においても性能規定型を導入するために、はじめに、材料およびそれを用いた構造物や部材性能を定量的に評価する技術、品質管理体制や検査手法の構築等が今後、必要になるものと考ええる。

- ・改良型の高炉セメント C 種を、高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントを別添で添加する場合、結合材中の  $\text{SO}_3$  量を 3.5%程度とするためには、JIS A 6206「高炉スラグ微粉末の品質規定」で定められている  $\text{SO}_3$  の上限値 4.0%を超える可能性がある。今後、JIS の改正も見据えて議論していく必要がある。
- ・建設業全般において、改良型の高炉セメント C 種のような  $\text{CO}_2$  削減に寄与する技術に対して、工事評点の加点、工事原価の削減等のインセンティブを、工事を請負う会社に与えるなどの施策に取り組まなければならない。



## 謝 辞

本論文は、エネルギー・CO<sub>2</sub>ミニマム（ECM）セメント・コンクリートシステムの研究開発の一環として、土木用のコンクリートに関する研究成果を取り纏めたものです。本論文を取り纏めるにあたり、終始、懇切丁寧なご指導を賜りました九州大学大学院工学研究院社会基盤部門・濱田秀則教授に対し、心よりお礼申し上げます。非常にご多忙の中、副査をお引き受け頂き、数多くのご指導、ご指摘、ご助言を下さいました、広島大学大学院工学研究科構造工学講座・河合研至教授、九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門・小山智幸准教授、九州大学大学院工学研究院社会基盤部門・佐川康貴准教授には心よりお礼申し上げます。佐川康貴准教授には、筆者が研究室の学生の頃から社会人になった今でも数多くのご指導、ご助言を頂きました。重ねてお礼申し上げます。

土木学会の2種委員会「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針改訂小委員会」では、委員長を務められた東京工業大学物質理工学院・坂井悦郎特任教授をはじめ、幹事長の芝浦工業大学工学部土木工学科・伊代田岳史教授、委員の先生方には、数多くのご指導、ご助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。また、本研究の根幹となるECMセメント・コンクリートの技術については、グローバル・マテリアルリサーチ(株)・米澤敏男博士（元 竹中工務店）、鯉淵清博士（元 (株)デイ・シイ）、日鉄高炉セメント(株)・檀康弘博士より、高炉スラグ微粉末の基礎からECMセメントのノウハウに至るまで丁寧なご指導を頂きました。心よりお礼申し上げます。また、ECMの研究に携われた先生方、多数の研究者の方にもご指導を頂きました。この場をお借りして心よりお礼申し上げます。

本研究テーマの主担当者として研究の場を設けて頂き、常に懇切丁寧なご指導を頂いた、鹿島建設土木管理本部土木技術部 執行役員 部長・坂田昇博士には心よりお礼申し上げます。また、鹿島技術研究所 主席・坂井吾郎博士、同所 土木構造グループ グループ長・林大介博士、同所 土木材料グループ グループ長・渡邊賢三博士には、研究指導をはじめ、様々な面から研究のしやすい環境を作って頂きました。心より感謝申し上げます。九州大学の先輩でもある同所 主席・閑田徹志博士には建築・土木分野の垣根を超え、ご助言・ご指導を頂きました。心よりお礼申し上げます。実験の遂行にあたり、同所 研究員 松本修治氏、室野井敏之氏、井上友氏（現 中部支店）、倉田和英氏には、多大なご協力を頂きました。この場をお借りしてお礼申し上げます。本研究成果を土木構造物として初適用のために尽力頂いた鹿島建設九州支店 山口峰夫所長には、心より感謝申し上げます。

最後に、社会人になっても学位取得に向け応援してくれた両親、仕事・研究を両立させるために陰ながら支えてくれた妻 みき子、休日出勤の際も寂しい顔を見せず我慢してくれた長女 奈津美、長男 広太郎に感謝し、謝辞と致します。

令和 元年 6月

橋本 学