

高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響に関する基礎的研究

鶴田, 浩章

<https://doi.org/10.11501/3180555>

出版情報：九州大学, 2000, 博士（工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：



高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす
粗骨材品質の影響に関する基礎的研究

2000 年 12 月

鶴 田 浩 章

高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす

①

高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす
粗骨材品質の影響に関する基礎的研究

2000 年 12 月

鶴 田 浩 章

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の概要	2
1.2.1 研究の位置づけ及び目的	2
1.2.2 本文の構成	3
参考文献	4

第2章 既往の研究

2.1 序説	5
2.2 粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係について	5
2.2.1 粗骨材物性値の分布について	5
2.2.2 粗骨材物性値相互の関係について	6
2.3 コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響について	7
2.3.1 粗骨材の比重及び吸水率－コンクリートの圧縮強度	8
2.3.2 粗骨材母岩圧縮強度－コンクリートの圧縮強度	8
2.3.3 すりへり減量－コンクリートの圧縮強度	8
2.3.4 400kN 破砕値－コンクリートの圧縮強度	9
2.3.5 コンクリートの静弾性係数への影響について	9
2.4 コンクリートの自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみに 及ぼす粗骨材品質の影響について	9
2.4.1 自己収縮ひずみへの影響	9
2.4.2 乾燥収縮ひずみへの影響	11
2.5 コンクリートのクリープ性状への粗骨材品質の影響について	12
2.6 まとめ	12
2.6.1 既往の研究より得られている知見	12
2.6.2 残されている課題	13
参考文献	14

第3章 粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係

3.1 序説	16
3.1.1 本章の概要	17
3.2 検討の対象とした粗骨材の物性値	17
3.3 物性値の測定結果及び物性値の分布について	20
3.3.1 各物性値の代表値及び散分度	20
3.3.2 各物性値の分布特性	22
3.4 粗骨材物性値相互の関係	25
3.5 まとめ	30
参考文献	30

第4章 高強度コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響

4.1 序説	32
4.1.1 本章の概要	33
4.2 圧縮強度への粗骨材品質の影響についての検討	33
4.2.1 使用材料	33
4.2.2 コンクリートの配合及び供試体作製方法	34
4.2.3 圧縮強度試験方法	36
4.2.4 実験結果及び考察	36
4.3 セメント水比、あるいは結合材水比と圧縮強度との関係への粗骨材品質の影響	48
4.3.1 使用材料	48
4.3.2 コンクリートの配合及び供試体作製方法	48
4.3.3 圧縮強度試験方法	49
4.3.4 実験結果及び考察	50
4.4 高強度コンクリートの静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響	55
4.4.1 使用材料	55
4.4.2 コンクリートの配合及び供試体作製	56
4.4.3 静弾性係数の測定方法	56
4.4.4 実験結果及び考察	57
4.5 まとめ	65
参考文献	66

第5章 高強度コンクリートの自由収縮ひずみに及ぼす粗骨材品質の影響

5.1 序説	68
5.1.1 本章の概要	68
5.2 自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみの定義	69
5.3 高強度コンクリートの自己収縮ひずみへの粗骨材品質の影響	70
5.3.1 使用材料	70
5.3.2 コンクリートの配合及び供試体作製	71
5.3.3 供試体の養生方法及び自己収縮ひずみの測定方法	72
5.3.4 水結合材比の変化にともなうコンクリートの自己収縮ひずみの変化	74
5.3.5 高強度コンクリートの自己収縮ひずみへの粗骨材品質の影響	76
5.3.6 自己収縮ひずみ予測式による算定値と実測値の比較検討	82
5.4 高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす粗骨材品質の影響	86
5.4.1 使用材料	86
5.4.2 コンクリートの配合及び供試体作製	86
5.4.3 供試体の養生方法及び乾燥収縮ひずみの測定方法	87
5.4.4 水結合材比の変化にともなうコンクリートの乾燥収縮ひずみの変化	88
5.4.5 高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみへの粗骨材品質の影響	90
5.4.6 乾燥収縮ひずみ予測式による算定値と実測値の比較検討	95

5.5 高強度コンクリートの全収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合	98
5.5.1 水結合材比の変化にともなう自己収縮ひずみの割合の変化	98
5.5.2 全収縮ひずみ中に占める自己収縮ひずみの割合に対する粗骨材品質の影響	98
5.6 まとめ	100
参考文献	101

第6章 高強度コンクリートのクリープ性状への粗骨材品質の影響

6.1 序説	102
6.1.1 本章の概要	103
6.2 実験概要	104
6.2.1 使用材料	104
6.2.2 コンクリートの配合及び供試体作製	105
6.2.3 供試体の養生方法及び持続応力導入方法	106
6.2.4 クリープひずみの測定及び算出方法	106
6.2.5 回復クリープの測定方法	109
6.3 実験結果及び考察	110
6.3.1 単位クリープの経時変化とクリープ予測式による算定値との比較検討	110
6.3.2 粗骨材物性値と単位クリープの関係	113
6.3.3 粗骨材物性値とクリープ係数の関係	117
6.3.4 粗骨材物性値とコンクリートの回復クリープの関係	120
6.4 まとめ	124
参考文献	125

第7章 高強度コンクリートの収縮応力に及ぼす粗骨材品質の影響

7.1 序説	127
7.1.1 本章の概要	127
7.2 実験概要	128
7.2.1 収縮応力の定義	128
7.2.2 使用材料	128
7.2.3 コンクリートの配合及び供試体作製	129
7.2.4 供試体の養生及び収縮応力の測定方法	130
7.3 実験結果及び考察	131
7.3.1 自己収縮応力の経時変化	132
7.3.2 乾燥収縮応力の経時変化	133
7.3.3 若材齢時のコンクリートの静弾性係数の影響	134
7.3.4 若材齢時のコンクリートのクリープの影響	137
7.4 まとめ	141
参考文献	142

第8章 総括

8.1 本研究のまとめ	143
8.2 本研究の問題点と今後の課題	150

謝辞

第1章

序論

1. 1 研究の背景

産業、経済の発展に伴い、数多くのコンクリート構造物が作られるようになり、骨材の需要も伸びていった。そのため、供給源の枯渇や環境保全問題により川砂利、川砂から陸砂利、陸砂、海砂、碎石、砕砂、人工骨材等様々な骨材が使用されてきた。最近では、様々な規制により碎石、砕砂中心の時代になりつつあり、さらに資源有効利用の必要性から産業副産物や再生骨材の使用率を向上させていかねばならない状況である。骨材はコンクリート容積の約70～73%を占めていて、その性質がコンクリートの諸性質、例えばワーカビリティ、強度、耐久性等に極めて大きな影響を及ぼし、「コンクリートを勉強(研究)するのなら、骨材の勉強(研究)をしなければならない。骨材を知らずして、セメントやコンクリートの研究はできない。」¹⁾とも言われるほど、重要なコンクリートの構成要素である。

したがって、昔から多くの研究者によって様々な研究が行われてきた。特に、川砂利や川砂の採取が難しくなるのに伴い、昭和30年代から碎石をコンクリート用骨材として活用する研究が行われ、昭和36年に碎石のJISが制定され、昭和55年に砕砂の規格が追加された。最近では、コンクリートの高性能化に伴い、高強度コンクリートや高流動コンクリートの必要性が高まり、粉体量を増やした低水セメント比のコンクリートの検討が盛んに行われるようになった²⁾。高強度領域では、マトリックスの強度が高くなるため、それと一体化する骨材の品質の影響は通常の水セメント比の場合と比較して極めて大きくなることが報告されている³⁾。また、高強度になることにより、50%の水セメント比の場合には問題視されていなかった自己収縮が非常に大きくなることが判り、特にマスコンクリートの分野では自己収縮によるひび割れの発生について注意が必要であることが指摘されている⁴⁾。

また、天然資源である碎石や砕砂にも限りがあり、将来の社会基盤整備を行なう上では、解体されたコンクリート塊から作られる再生骨材や産業副産物を有効に利用していくことが必要になる。そのためには、要求されるコンクリートの性能に対して必要以上に良品質の骨材を求めず、再生骨材でも十分であれば再生骨材を使用するという適材適所の考え方が浸透することが必要である。したがって、まず、要求されるコンクリートの性能を示す性能指標、例えば強度、変形等を何かを使って評価することが非常に重要になる。例えば、コンクリートのある性能指標に対して構成材料である骨材のある

品質指標が密接な関係があれば、コンクリートの性能指標とその品質指標との関係を明確にすることにより、性能を考慮して必要な品質を備えた骨材を選択することが可能になる。しかし、一言で骨材と言っても粗骨材、細骨材、碎石、砕砂、海砂、再生骨材等様々であり、粗骨材及び細骨材の種類の組み合わせによってもコンクリートの性状が大幅に変わってしまう。

そこで、本研究ではまず粗骨材として碎石に着目することにして、碎石と海砂を使用した高強度コンクリートに対して粗骨材を種々変化させることで、高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす影響について明確にすることを試みた。一般に、骨材の主な役割という⁵⁾、①力を受け持つ（支持する）作用、②防・耐火作用、③収縮を低減する作用、④増量作用、⑤その他の作用（コンクリートの性質を変化させる作用）が挙げられる。なかでも、③は骨材の混入によりペースト量が減り、かつ骨材がペーストの収縮を拘束することによるものであり、コンクリートの収縮ひずみへの影響に関連する。また、⑤は骨材の占める容積が 1 m^3 中約700～730 lと多く、骨材によってコンクリートの性質が大幅に変化することを意味しており、コンクリートの強度やクリープへの影響と関連する。そこで、碎石粗骨材を用いたコンクリートの力学的性質として圧縮強度、静弾性係数、自由収縮ひずみ及びクリープを取り上げ、粗骨材品質がそれらに及ぼす影響について明らかにし、性能照査型設計をにらんで粗骨材品質により高強度コンクリートの力学的性質を評価する手法について検討することにした。さらに実際の条件におけるコンクリート部材への影響について検討するために、コンクリートの複数の力学的性質を考慮しなければならない収縮応力試験にそれらの結果を応用して粗骨材品質のコンクリートへの影響について検証した。

1. 2 研究の概要

1.2.1 研究の位置づけ及び目的

本格的に、再生骨材や産業副産物をコンクリート用骨材として使用する体制作りが進められ、今後適材適所に骨材を使用していくことがますます重要になってくる。特に、現在主流の碎石粗骨材は、高品質のコンクリート部材を製造する骨材としては不可欠であり、低品質の骨材でも差し支えない用途に消費することは極力避けて行かねばならない。そこで、近い将来、骨材の使用用途分類が骨材の品質毎に行われることは間違いなく、それは性能照査型設計に基づき、これまでコンクリート用骨材として使用されなかった骨材も含めてコンクリートとなったときの性能がどうなるかを把握した上で行われる。したがって、骨材の品質とコンクリートの性能との関係を把握することは非常に重要である。

碎石が昭和36年にJIS化されるにあたり、昭和30年頃から碎石をコンクリート用骨材として活用する研究が行われ、最近まで高強度コンクリートに相応しい骨材を判定するための検討が種々行われてきた。しかし、個々の性状への影響を調べただけのものが多く、最近では骨材品質に着目した検討そのものが非常に少なくなってきた。そこで、本研究では、碎石粗骨材の品質に着目することによりコンクリートの種々の性状への粗骨材品質の影響という視点で統一的にとりまとめることを目指し、使用した粗骨材の品質からコンクリートの力学的性質を予測することが可能であるか、その手法について検討することを目的とした。ただし、粗骨材と細骨材の組み合わせによってもコンクリートの性

能が大きく変化することは明らかであり、その組み合わせについて全て検討することは非常に困難であるので、本研究では粗骨材品質をパラメータとするため細骨材は海砂を使用することに統一して行った。また、粗骨材品質を種々の要因がもたらす現象が間接的に表れる間接指標と考えて評価した。その結果と今後必要となる碎石以外の粗骨材、細骨材の品質が硬化コンクリートの力学的性質に及ぼす影響についての検討結果とを比較することにより、碎石の場合との違いや新たな材料の特徴的な点を把握することが容易となり、使用骨材の用途分類が可能になると考えられる。

以上のように、本研究は今後の骨材の使用方法にも大きく影響を及ぼすものであり、碎石粗骨材を使用したコンクリートの性能についての検討の基本部分の一角を占めるものであり、他の骨材を使用した場合に拡張していく上で、非常に有益な資料となると考えられる。

1.2.2 本文の構成

本文の構成を図-1.1に示す。本文は第1章から第8章までの8つの章より構成されており、各章の概要は以下に示すとおりである。

第1章において、本研究の背景及び目的、ならびに本文の構成を示す。

第2章において、粗骨材物性値の分布及び相互の関係やコンクリートの種々の力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響に関する既往の研究の整理結果を示す。それをもとに、これまでに明らかにされている知見及び明らかにされていない事項を示し本研究の意義を明確にする。

第3章において、粗骨材物性値について実測データと文献から得たデータを使用して、その分布を調べて各物性値の分布特性について述べる。また、物性値相互の関係についても調べ、各物性値の関連についてとりまとめる。

第4章において、コンクリートの基本的物性である圧縮強度及び静弾性係数と粗骨材物性値との関係を調べることで、粗骨材品質が及ぼす影響ならびに最も密接な関係にある粗骨材物性値について述べる。

第5章において、プレストレストコンクリートを対象としてコンクリートの自由収縮について使用した粗骨材物性値との関係を調べることで、高強度コンクリートの自己収縮及び乾燥収縮への粗骨材品質の影響について述べる。

第6章において、プレストレストコンクリートを対象として載荷状態で乾燥収縮とともに生じるコンクリートのクリープに着目し、粗骨材品質が及ぼす高強度コンクリートのクリープへの影響について述べる。

第7章において、鉄筋コンクリートを対象として、鉄筋比 7.9%の鉄筋拘束試験におけるコンクリートの収縮応力に着目し、これに及ぼす粗骨材品質の影響について検討し、鉄筋コンクリート部材に高強度コンクリートを用いる場合に粗骨材品質が及ぼす影響について述べる。

第8章において、本研究で得られた結論として高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響について総括するとともに、本研究の問題点及び今後の課題に言及する。

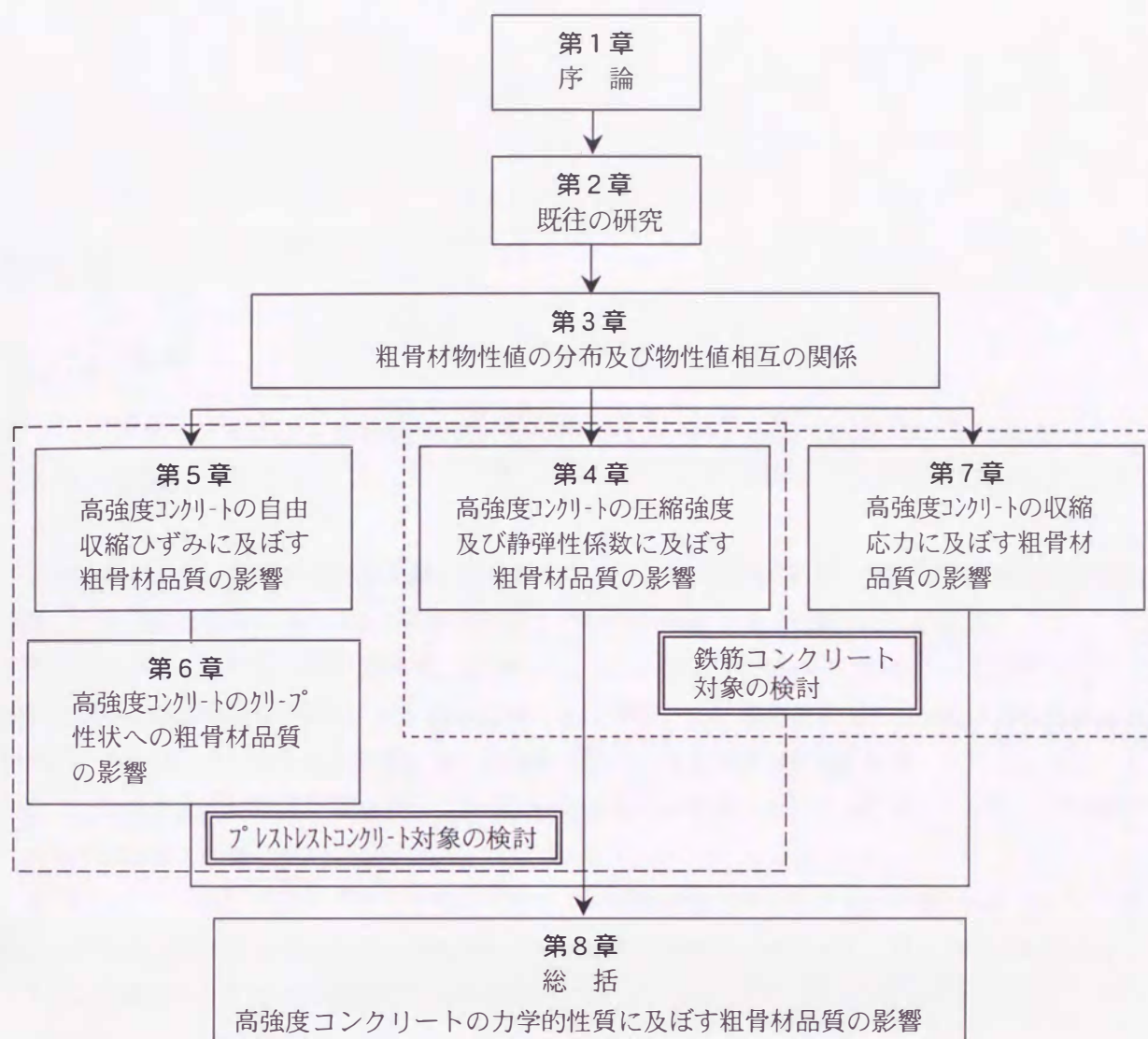


図-1.1 本文の構成

参考文献:

- 1) 上村克郎;総論 骨材のあり方、これでいいのか、セメント・コンクリート No.618、pp.2-5、1998.8
- 2) 河井 徹;混和剤によるコンクリートの高性能化、土木学会誌、Vol.83、January、1998.1
- 3) 森野圭二、山田典良、内藤幸雄;各種岩石骨材とセメントペーストとの付着性状、第2回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.93-96、1980.6
- 4) JCI 自己収縮研究委員会;自己収縮研究委員会報告書、pp.8-12、1996.11
- 5) 笠井芳夫;総論 骨材とは何か、これでいいのか、セメント・コンクリート No.618、pp.6-13、1998.8

第2章

既往の研究

2. 1 序説

本章においては、既往の研究を収集・整理することにより、粗骨材自身の物性値及び物性値相互の関係、ならびに高強度コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数、自己収縮及び乾燥収縮、クリープ性状に及ぼす影響について、特に粗骨材品質に着目して、これまでに明らかにされている知見及び明らかにされていない事項を明確にする。整理の項目としては、1) 粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係、2) コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響、3) コンクリートの自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみに及ぼす粗骨材品質の影響、4) コンクリートのクリープ性状への粗骨材品質の影響、を取り上げた。

本章の2. 2～2. 5において、上に挙げた5つの検討項目の整理結果をまとめ、最終項である2. 6においてこれまでの研究より明らかにされている知見及び明らかになっていない事項を総括するとともに、今後明らかにすべき課題について示す。

2. 2 粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係について

2.2.1 粗骨材物性値の分布について

粗骨材の物性値についてはコンクリート用骨材が天然骨材から碎石、砕砂に移行する時期に天然骨材との違いを明確にするために、広範囲に調査が行える研究機関や協会において調査され報告されている。その内容について以下に整理する。

西沢¹⁾は発電水力工事のコンクリートに用いるのに適した骨材を判定するために、昭和29年から5年間にわたり比重、吸水量、安定性、すりへりについて試験を行いヒストグラムを作成し考察している。なお、使用した粗骨材は54種類で、その構成は天然骨材と碎石がほぼ半々であった。その結果、比重は平均値2.65を中心として、ほぼ対称に分布していること、吸水量は小さい値の領域に偏る傾向があるが、広くなだらかに広がっていること、すりへり量にははっきりした分布の中心が認められないことを報告している。しかし、試料数が少ないため各物性値の分布の傾向が分かりにくく、日本の規格には規定されていないBS破碎値については取り扱っていない。また、土木研究所²⁾では、JIS A 5005 コンクリート用碎石に示された規格値に対する合否、ならびに製品の均一性を知り、さ

らに骨材選択のための資料を得ることを目的に碎石 29 種類と砂利 10 種類の試験を行い、比重、吸水量、安定性、すりへり減量、BS 破碎値、実積率及び空げき率についての度数分布を調べている。その結果、JIS の規格値からはずれた骨材の種類や粗骨材母岩の岩質による物性値の大小については報告しているが、物性値の分布状況については詳細に触れていない。さらに、飛坂ら³⁾はコンクリート用骨材の品質特性について多数の試料について行った検討が少ないことを指摘し、昭和 39 年から 15 年間にわたり、調査してきた粗骨材 799 種類（うち碎石は 557 種類）について比重、吸水率、単位容積重量、洗い損失、粘土塊、安定性、すりへり減量、軟石量、BS 破碎値等について報告している。結果は最大値、最小値、平均値、標準偏差で表されており、碎石と川砂利の比較及び各粗骨材母岩の岩質による物性値の大小については述べているが、分布の全体的な傾向については述べていない。

また、爾見ら⁴⁾は骨材の強さを評価する指標について検討するため、諸外国の規格のうちから英国規格「BS-812」を選び、国内の川砂利、碎石、軽量骨材などの破碎値を測定し検討を行っている。その結果、BS-812 に示されている 400kN(40tf) 破碎値と 10%細粒値の使い分け、つまり、BS では 400kN(40tf) 破碎値が 30 以上を示す材料については 10%細粒値で示すよう規定されていることに着目し、400kN(40tf) 破碎値と 10%細粒値の関係を調べ両者の関係式を示している。その関係式は次のように表されている。

$$10\% \text{細粒値} = \frac{418}{40\text{tf 破碎値}}$$

ここで、報告されている 400kN(40tf) 破碎値及び 10%細粒値の測定値と上記関係式を求めもとになった関係を図-2.1 に示す。

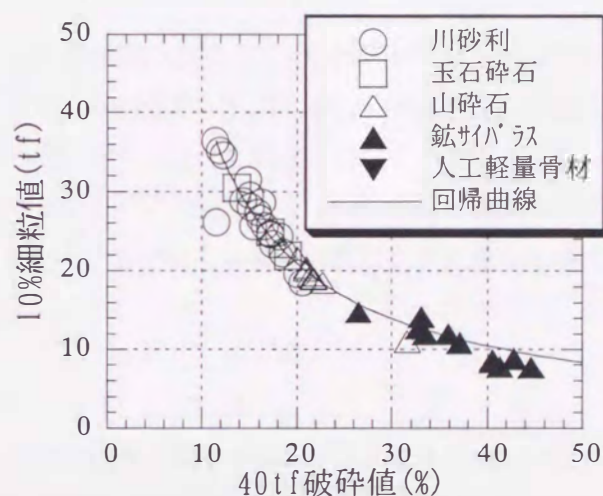


図-2.1 40tf 破碎値と 10%細粒値の関係⁴⁾

2.2.2 粗骨材物性値相互の関係について

(1) 比重－吸水率の関係

一般に吸水率の大きい骨材は密度が小さいと言われているように、比重と吸水率の関係は比較的明確にされている。西沢¹⁾は 5 年間に渡って行った砂利や碎石の骨材試験結果について取りまとめ、吸水量が対数的に増加すると比重は直線的に小さくなると報告している。また、土木研究所²⁾は碎石についての試験結果から、比重と吸水率、安定性、すりへり減量との関係は例外もあり解析的に示すことは難しいが、比重の大きい骨材は吸水量、安定性、すりへり減量とも比較的小さいことを報告している。さらに、飛坂ら³⁾やセメント協会コンクリート専門委員会⁵⁾によると、川砂利の場合と比較して碎石の場合には原石が一定であるので、比重と吸水率の相関は非常に高くなり、主成分分析の結果絶対比重と吸水率は粗骨材の組織の緻密さと粒形を包含する因子との相関が高いことが明らかになっている。

(2) すりへり減量－吸水率

西沢¹⁾や土木研究所²⁾は吸水率の大きい骨材は多孔質であるため、すりへり減量が大きくなることを報告している。

(3) 吸水率－安定性

土木研究所²⁾は吸水率が大きくなると安定性試験の損失重量も比較的大きくなることを報告しているが、飛坂ら³⁾は碎石の場合には碎石中に残っているひび割れ量により相関が小さくなっているものが多いと報告している。

(4) 破砕値－粗骨材強度

迫田⁶⁾は粗骨材粒子 100 個を骨材の長径に対して垂直に載荷し、破壊荷重を断面積で除して求めた粗骨材強度と BS-812 に規定されている破砕値との間には、粗骨材強度が大きいと破砕値が小さくなる傾向を明らかにした。

(5) 破砕値－すりへり減量

セメント協会コンクリート委員会⁵⁾⁷⁾によると、粗骨材の破砕強さ (400kN 破砕率) は粗骨材のすりへり減量 (粒度 20-5mm) に対して 1 % の有意水準で正の相関があり、粗骨材品質特性値の主成分分析の結果、破砕値もすりへり減量も粗骨材の強度を表す因子と強い相関があることが報告されている。また、土木研究所²⁾は両者にはある程度のばらつきがあるが比例関係で、400kN 破砕値が大きくなると、すりへり減量も増加すると報告しており、飛坂ら³⁾はそれらの相関係数は 0.9 を超える値であったと報告し、以下のような回帰式を示した。

$$y = 0.78x + 1.59$$

ここで、 y : 400kN 破砕値、 x : すりへり減量を示す。

400kN 破砕値は 10-15mm の粒度の骨材を鋼製容器に詰め込み、載荷することにより骨材を破砕して求めた値であるが、柿崎ら⁸⁾によると実積率と 400kN 破砕値の間には、相関関係は認められなかったと報告されている。

(6) 粗骨材の 400kN 破砕値と母岩の圧縮強度の関係

Kaplan⁹⁾は 13 種類の異なる砂利及び碎石を用いて、粗骨材の 400kN 破砕値と骨材強度の関係について検討を行っている。骨材強度は粗骨材母岩から直径 1 インチの円柱供試体を抜き出し、圧縮強度、曲げ強度及び引張強度を求めている。その結果、400kN 破砕値と母岩の圧縮強度、曲げ強度及び引張強度との間に高い相関が認められたことを報告している。

2. 3 コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響について

コンクリートの強度と骨材の関係、すなわち骨材による補強効果については 2 つの説がある。小坂ら¹⁰⁾は骨材強度が母材モルタル強度より強くても、弱くても、コンクリート強度はモルタル強度より低下するので、骨材による補強効果はないと述べ、その理由に骨材強度がモルタル強度より大きい場合に骨材周辺のモルタル部に生じる応力集中を挙げている。一方、Kaplan⁹⁾は粗骨材の機械的かみ

合わせによる補強効果が存在すると述べており、有力な説となっている。このように、強度と骨材の関係を論じるには、対象が曲げ強度なのか圧縮強度なのか、材料強度の大小、骨材の品質等の条件に分けて考慮することが必要とされている。そこで、ここでは粗骨材品質とコンクリートの圧縮強度の関係についてのこれまでの知見について整理する。

2.3.1 粗骨材の比重及び吸水率－コンクリートの圧縮強度

セメント協会コンクリート専門委員会⁷⁾は、通常の水セメント比 50%、あるいは 60% 程度ではコンクリートの圧縮強度への比重及び吸水率の影響は大きく、飛坂ら¹¹⁾は吸水率と高強度コンクリートの圧縮強度には吸水率が小さくなるにつれて高圧縮強度が得られる傾向が認められると報告している。一方、迫田⁸⁾は水セメント比 30%、50%、70% の場合について 8 種類の粗骨材を使用して比重、吸水率が圧縮強度に及ぼす影響について調べたが、一定の関係はみられなかったと報告しており、國府ら¹²⁾も高強度コンクリートにおいて吸水率が大きくなると圧縮強度も小さくなる傾向を示すが、吸水率が同じ場合でも圧縮強度にはかなり差が認められていると報告している。このように、高強度コンクリート用骨材として適当かどうかの判定は比重、吸水率だけでは難しいとされている。

2.3.2 粗骨材母岩圧縮強度－コンクリートの圧縮強度

迫田⁸⁾は母岩の圧縮強度とその母岩から得られた碎石を使用したコンクリートの圧縮強度を調べて、母岩強度が大きくなると圧縮強度も大きくなり、水セメント比が大きい場合には強度差は小さいが、水セメント比が小さい場合には強度差がかなり大きくなると報告している。また、柿崎ら⁸⁾はモルタル強度と母岩強度の大小関係によりコンクリート強度が骨材の母岩圧縮強度を上回るかが決まると報告している。つまり、モルタルの圧縮強度が母岩圧縮強度とほぼ同じか、やや大きい強度で釣り合っている場合にはコンクリートの圧縮強度は母岩の平均圧縮強度にほぼ等しくなるが、モルタルの圧縮強度が母岩圧縮強度より小さい場合には粗骨材とモルタルの付着強度との影響などからコンクリートの圧縮強度は母岩の平均圧縮強度より小さくなると言っている。また、岡島¹³⁾は骨材と母材の弾性係数の比が 1 より大であるか、小であるかで骨材による補強効果が異なると報告している。さらに、小坂ら¹⁰⁾は骨材強度が母材モルタル強度より大きかろうと、小さかろうとコンクリート強度はモルタル強度より低下することを示し、その原因を次のように説明している。まず、骨材強度が母材モルタル強度より小さい場合は、骨材に圧壊が生じコンクリートが破壊するので、骨材強度が大きいほどコンクリート強度も大きくなる。一方、骨材強度が母材モルタル強度より大きい場合は、骨材周辺の母材モルタル部に生じる応力集中により、この部分に局部的圧壊を生じコンクリートが破壊する。その応力集中の程度は骨材強度と母材モルタル強度の比、あるいは骨材の弾性係数と母材モルタルの弾性係数の比が大きいほど著しくなる。したがって、骨材強度が大きくなると、かえってコンクリート強度は小さくなる。

2.3.3 すりへり減量－コンクリートの圧縮強度

セメント協会コンクリート専門委員会⁷⁾は高強度コンクリートにおいては、すりへり減量がコンク

リート強度に影響が大きいと報告しているが、土木研究所²⁾は曲げ強度においてはすりへり減量が大
きいと高強度は得難いが、圧縮強度においては明瞭な関係は認められないと報告している。さらに、
國府ら¹²⁾もすりへり減量と高強度コンクリートの圧縮強度の間には顕著な傾向は認められないと報
告しており、その原因としてはすりへり減量は骨材自身の強度の他に粒形の影響が大きく、粒形の悪
い骨材はすりへり減量が大きくなるが、セメントペースト界面との付着が良いため、コンクリートと
したときの圧縮強度が大きくなることによることを挙げている。

2.3.4 400kN 破砕値－コンクリートの圧縮強度

飛坂¹¹⁾、國府ら¹²⁾、柿崎ら⁸⁾によると、400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度には一定条件の下
では破砕値が小さい場合にコンクリートの圧縮強度が大きくなり、比重や吸水率よりも良い相関が認
められ、特に超高強度領域では破砕値の影響が大きいことが報告されているが、飛坂¹¹⁾は高強度コ
ンクリート用骨材としての確かかどうかの判定は吸水率や破砕値だけでは不可能であると述べている。

2.3.5 コンクリートの静弾性係数への影響について

当初コンクリートの弾性係数の表示式としては、単にコンクリートの圧縮強度のみの関数としたも
のがほとんどであったが、人工軽量骨材コンクリートの弾性係数が普通コンクリートのそれより小さ
いことに着目した Pauw¹⁴⁾によりコンクリート重量をパラメーターとして含む弾性係数表示式が提案
された。この表示式は簡明であり、多くの規準で用いられていた。しかし、コンクリートの弾性係数
に直接関係すると考えられる骨材や母材モルタルの品種・品質及びこれらの複合状態などの諸因子が
コンクリートにどのようにかかわっているかなどを理解するために、複合体モデルによる検討が盛ん
に行われるようになった。これはコンクリートを所定の容積の骨材と母材からなる二相複合材料と考
えて、弾性係数を推定するものであり、多くの式が提案されている¹⁵⁾。一般には、コンクリートの
弾性係数に最も大きな影響を及ぼす骨材の物性値として静弾性係数が用いられる場合が多く、粗骨材
種類及び粗骨材品質とコンクリートの静弾性係数との関係については、骨材の岩種による影響が大き
く¹¹⁾、特に細骨材よりも影響は大きい⁶⁾ことが報告されているが、迫田⁶⁾や飛坂¹¹⁾はそれらが及ぼ
す明確な影響については不明であると述べている。

2. 4 コンクリートの自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみに及ぼす粗骨材品質の 影響について

2.4.1 自己収縮ひずみへの影響

自己収縮(Autogenous shrinkage)とは、セメントの水和により凝結始発以後に巨視的に生じる体積減
少であり、物質の浸入や逸散、温度変化、外力や外部拘束に起因する体積変化は含まれない。水和収
縮と異なる点は、水和収縮が実質部分の体積減少であるのに対して、自己収縮は硬化体中の気相の体
積を含む見かけの体積減少である点である。American Concrete Institute (ACI)では、“change in

volume produced hydration of cement, exclusive of effects of applied load and change in either thermal condition or moisture content”と定義されている¹⁷⁾。

自己収縮は一般のコンクリートでは乾燥収縮と比較して1桁程度小さいため、従来のひび割れの検討や設計において考慮されることはなかった。しかし、水結合材比の小さく、単位結合材量が多い高強度コンクリートや高流動コンクリートの適用事例が多くなるにつれて、自己収縮が大きくなることの報告が増えてきた。それにともない自己収縮の原因、メカニズム、影響を及ぼす要因についての検討が盛んに行われるようになり、日本コンクリート工学協会の自己収縮研究委員会においてそれらに対すとりまとめが行われた。その中で、自己収縮の低減方法についてもまとめられており²⁰⁾、使用材料からのアプローチとしてセメント、混和材、混和剤による方法が挙げられているが、骨材の種類が自己収縮に及ぼす影響については全く触れられていない。

しかし、田澤ら²¹⁾は自己収縮はセメントペースト部分で生じるので、骨材を混入することにより自己収縮は減少すると考え、自己収縮に及ぼす骨材混入の影響について検討を行っている。その検討は骨材の効果について複合則を用いて検討するために、コンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料と考え、直列モデル、並列モデル及びコンクリートの乾燥収縮に関して提案されている Hobbs²²⁾の式を用いて予測値を算出し実験値と比較を行うことで、Hobbs 式による予測値が実験値と概ね一致することを報告している。また、骨材の混入により自己収縮は低減し、その効果はセメントペースト量の減少及び骨材の弾性変形に伴う拘束効果により説明できる²³⁾と述べている。さらに、宮澤ら²⁴⁾は Hobbs モデルと自己収縮の推定値の上限値を与える直列モデルを用いることによってコンクリートの自己収縮ひずみを算出し、セメントの鉱物組成及び骨材含有量を基にコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を推定できるものとしているが、その中で今後データの蓄積と水セメント比、骨材の種類及び供試体寸法の影響等についても検討が必要であると述べている。

このように、二相モデルによる検討においては骨材の体積濃度及び静弾性係数を考慮することで骨材の影響について明らかにしているが、骨材の種類が自己収縮に及ぼす影響、特にどのような骨材品質が指標となるのかという点については、未だ明らかにされていない。

次に、自己収縮ひずみの予測式について述べる。自己収縮ひずみの予測手法に関してはまだ確立されておらず、様々なデータから自己収縮ひずみの経時変化を推定できる手法の確立が望まれている。これまでに、いくつかの自己収縮ひずみ予測式が提案されており、骨材混入率を考慮したものもあるが、骨材品質等による考慮をとり入れたものはなく、骨材品質による予測値のばらつきまでは明確にされていない。

2.4.2 乾燥収縮ひずみへの影響

乾燥収縮(Drying shrinkage)とは、セメントコンクリートの乾燥による長さあるいは体積の減少のことである¹⁸⁾。これまでに多くの検討がなされており、主な要因としては内的にはコンクリートの単位セメント量、単位水量、水セメント比、骨材（種類及び単位量）及び部材の大きさ（厚さ）、外的には相対湿度、乾燥期間などが挙げられている¹⁹⁾。また、コンクリートが乾燥を受ける場合、水分の逸散により乾燥収縮を生じ、硬化過程の水和熱による温度変化に伴う体積変化も生じる。しかし、このような状況においても自己収縮は生じるので、これまで測定されたきた乾燥収縮ひずみや温度ひずみには、自己収縮ひずみも含まれることになる。

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、セメントペーストの乾燥収縮によって発生するが、その大きさ及び要因は相当に異なると言われている。特に、セメントペースト量、水セメント比及び単位水量の影響の他に、骨材の効果が大きく、それには体積を占めることによる効果（量）と、骨材が応力を受け持つ効果（剛性）とがある¹⁹⁾と言われている。骨材の性質の中でも特に弾性係数、圧縮性が収縮に影響を及ぼし、弾性係数が大きい骨材を使用すると、コンクリートの乾燥収縮が小さくなる²⁵⁾と言われている。また、骨材の表面組織なども骨材とセメントペーストとの強固な付着を確保する上で重要であり、骨材の吸水性が大きくなると、コンクリートの収縮も大きくなるという明確な相関があると報告されている²⁵⁾。

Hobbs²²⁾はコンクリートの収縮に対する骨材の拘束の影響について検討を行い、普通の骨材を用いたコンクリートの収縮は基本的にペーストの収縮、骨材の収縮、骨材の体積含有率によると報告し、収縮率を次式で略算できると述べている。

$$S_c = \frac{S_p(1-V_a)}{1+V_p}$$

ここに、 S_c はコンクリートの体積収縮率、 S_p はペーストの体積収縮率、 V_a は骨材の体積含有率、 V_p はペーストの体積含有率を示す。

また、後藤ら²⁶⁾は弾性係数の増大に伴い収縮が低減する傾向はこの拘束の役割を如実に示しているが、普通、軽量両コンクリートを包括した統一の傾向が見られず、この拘束効果だけでは全てを説明することができないと述べている。また、骨材の特性からコンクリートの収縮が推定可能かという点については骨材の単一の物性に着目する限り悲観的にならざるを得ないと述べている。彼らはコンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響として、骨材自体の長さ変化が重要であると述べ、収縮の複合式を利用してコンクリートの収縮には骨材の容積含有率や弾性係数の他に骨材自体の長さ変化も関連することを確認し、骨材がコンクリートの収縮に及ぼす役割はそれほど単純でないと報告している。

2. 5 コンクリートのクリープ性状への粗骨材品質の影響について

コンクリートのクリープ性状への骨材品質の影響としては、一般に骨材の弾性係数が大きくなれば、コンクリートのクリープは小さくなると言われており、骨材がセメントペーストのクリープを阻止する程度いかによるとされている²⁷⁾。また、骨材の鉱物成分、粒形、表面組織と空孔の構造も影響を及ぼし、特にセメントペーストの粘性流動には骨材の表面組織によるボンドの抵抗の大小が問題となると言われている²⁸⁾。

阪田ら²⁹⁾はコンクリートのクリープの予測式の検討において、骨材の質的な因子、例えば比重や吸水率などはクリープに影響することが予想されるが、適当なデータがなく考慮できなかったため今後の課題であると報告している。このように、コンクリートのクリープに対する粗骨材品質の影響については検討事例が少ない。高強度コンクリートのクリープは普通強度コンクリートの場合と比較して、かなり小さく、その影響もわずかではあるだろうが、骨材も多様化していく将来においてはそれらの影響を明確にしていくことは重要な課題であると考えられる。

2. 6 まとめ

2.6.1 既往の研究より得られている知見

(1) 粗骨材物性値の分布

比重の分布は平均値を中心としてほぼ対称であり、吸水率は値が小さい領域に偏る傾向があるが、広くなだらかに広がる分布をもつこと、すりへり減量にははっきりとした中心的傾向と偏りが認められないことが明らかになっている。ただし、数多くのデータを用いて物性値の分布について分析したものはない。

(2) 粗骨材物性値間相互の関係

比重と吸水率、すりへり減量と吸水率、吸水率と安定性、400kN 破砕値と粗骨材強度及びすりへり減量の間には、高い相関が認められるが、400kN 破砕値と実積率の間には相関が認められない。

(3) コンクリートの圧縮強度への影響

コンクリートの圧縮強度と粗骨材母岩圧縮強度、400kN 破砕値との間には一定の傾向が認められているが、400kN 破砕値だけでは高強度コンクリート用骨材としての適否を判定することは不可能であると言われている。また、粗骨材の比重及び吸水率、すりへり減量とコンクリートの圧縮強度については、影響は大きく一定の傾向が認められるという報告と明瞭な傾向は認められないという報告がある。

(4) コンクリートの静弾性係数への影響

コンクリートの弾性係数に最も大きな影響を及ぼす骨材の物性値として静弾性係数が用いられる場合が多く、粗骨材種類及び粗骨材品質とコンクリートの静弾性係数との関係については骨材の岩種による影響が大きいことが報告されているが、それらの明確な影響については不明である。

(5) コンクリートの収縮ひずみへの影響

コンクリートの自己収縮ひずみについては、コンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料と考え、直列モデル、並列モデル及びコンクリートの乾燥収縮に関して提案されている Hobbs の式を用いて予測値を算出し実験値と比較を行うことで、Hobbs 式による予測値が実験値と概ね一致する。また、骨材の混入により自己収縮は低減し、その効果はセメントペースト量の減少及び骨材の弾性変形に伴う拘束効果により説明できる。ただし、骨材品質等によるばらつきについては明確にされていない。

コンクリートの乾燥収縮ひずみには、骨材の弾性係数、吸水性、体積含有率及び骨材自体の長さ変化が影響する。しかし、骨材がコンクリートの収縮に及ぼす役割は単純ではなく、骨材の単一の物性で推定可能とはなり難い。

(6) コンクリートのクリープへの影響

コンクリートのクリープへの骨材の影響については、骨材の弾性係数が重要視されている。また、骨材の表面組織のセメントペーストの粘性流動への影響もある。しかし、比重や吸水率をはじめとした骨材の質的な因子は、データが少なく予測式でも考慮されていない。

2.6.2 残されている課題

(1) 粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係

粗骨材物性値の分布については、多数の試料について調査し全体的な物性値の分布について言及したものはない。また、骨材の強さの指標と言われているすりへり減量と比較して、試験のための手間や時間が少なくすむと言われている 400kN 破砕値も含めて骨材試験を行った例はあまり多くないが、コンクリート性能の評価指標としての可能性を探るためにも破砕値も含めて検討を行う必要がある。

次に、粗骨材物性値相互の関係については一般に骨材の強さの指標であると言われている 400kN 破砕値と粗骨材母岩の静弾性係数との関係については、報告がなく明確にされていない。

(2) コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数への影響

粗骨材の比重及び吸水率、すりへり減量とコンクリートの圧縮強度の関係については2つの説があり、どちらが正しいか明確にされていない。400kN 破砕値が及ぼす影響については、一定の条件下では明確な傾向が認められており、高強度コンクリート用骨材としての適否の判定は不可能と考えられているが、圧縮強度の評価に適用可能であるかどうかについては未だ検討されていない。コンクリートの静弾性係数への影響については、粗骨材物性値との関係を明確にするには至っていない。

(3) コンクリートの収縮ひずみへの影響

コンクリートの収縮ひずみへの骨材の影響に対しては、二相モデルを用いて骨材の体積濃度及び静弾性係数を考慮することで骨材の影響について明らかにしているが、骨材の種類が自己収縮に及ぼす影響、特にどのような骨材品質が影響要因となるのかという点については、未だ明らかにされていない。

(4) コンクリートのクリープへの影響

比重や吸水率などの骨材の質的な因子によるクリープへの影響については、蓄積されたデータが少

なく、種々の骨材を用いた検討が必要とされている。特に、高強度コンクリートのクリープは普通強度コンクリートと比較して、クリープ自体の大きさは小さいが、骨材の影響が顕著になることが予想されるので、骨材の影響は重要な課題である。

参考文献:

- 1) 西沢紀昭; コンクリート用骨材の比重、吸水量、安定性、すりへりの各試験結果間相互の関係、電力中央研究所技術研究所所報、第9巻第1,2号、pp.18-31、1959.6
- 2) 土木研究所; 河川砂利以外の骨材を使用した場合のコンクリートの研究、第20回建設省技術研究発表会、pp.45-70、1966.11
- 3) 飛坂基夫、沼沢秀夫; 1600種類の試料からみたコンクリート用骨材の品質特性、セメント・コンクリート、No.386、pp.10-17、1979.4
- 4) 爾見軍治、嶋谷宏文; コンクリート用骨材の破碎値とコンクリートの強度、第20回セメント技術年報、pp.292-297
- 5) コンクリート専門委員会報告、F-21 (碎石を軟練りコンクリートの配合および強度に関する報告)、(社)セメント協会、1969.9
- 6) 迫田恵三; 骨材の品質がコンクリートの性質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、第8巻、pp.233-236、1986.6
- 7) セメント協会コンクリート専門委員会; 粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響、セメント・コンクリート、No.395、pp.45-53、1980.1
- 8) 柿崎正義、枝広英俊; 粗骨材の品質が超高強度コンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学論文集、第4巻第2号、pp.9-21、1993.7
- 9) M.F. Kaplan; Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates, Journal of ACI, No.55, pp.1193-1209, May 1959
- 10) 小坂義夫、谷川泰雄; 複合材料としてのコンクリートの力学性質、材料、第24巻、第260号、pp.12-23、1975.5
- 11) 飛坂基夫; 高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響、セメント・コンクリート No.394、pp.30-33、1979.12
- 12) 國府勝郎、飛坂基夫; 高強度コンクリートと骨材、コンクリート工学、Vol.28, No.2, pp.14-22, 1990.2
- 13) 岡島達雄; 圧縮荷重を受ける無筋コンクリートの内部応力について—混合複合材としてのコンクリート—、コンクリート・ジャーナル、Vol.8, No.1、pp.2-10、1970
- 14) Pauw, A.; Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density, Journal of ACI, No.57-32, pp.679-687, 1960
- 15) 弾性と塑性、コンクリートハンドブック、朝倉書店、pp.439-475、1981.11
- 16) 日本コンクリート工学協会; 自己収縮研究委員会報告書、1996.11
- 17) American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1991

- 18) 笠井芳夫編；コンクリート総覧、技術書院、p. 473、1998
- 19) 日本コンクリート工学協会；コンクリート便覧 [第二版]、技報堂出版、p. 262、1996
- 20) 日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会；自己収縮研究委員会報告書、pp. 72-76、1996. 11
- 21) 田澤栄一、宮澤伸吾；セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響、土木学会論文集 No. 502/V-25、pp. 43-52、1994. 11
- 22) Hobbs, D.W.; Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.445-450, 1974.9
- 23) 田澤栄一、宮澤伸吾、佐藤 剛、小西謙二郎；コンクリートの自己収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp. 561-566、1992. 6
- 24) 宮澤伸吾、田澤栄一；セメント系材料の自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 1, pp. 699-704、1996. 6
- 25) 岡田 清、六車 熙；改訂新版 コンクリート工学ハンドブック、p. 478、1981
- 26) 後藤幸正、藤原忠司；コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響、土木学会論文報告集、第 286 号、pp. 125-137、1979. 6
- 27) 岡田 清、六車 熙；改訂新版 コンクリート工学ハンドブック、p. 486、1981
- 28) 岡田 清；コンクリートの弾性とクリープ、最新コンクリート技術選書 1、山海堂、p. 130
- 29) 阪田憲次、池田 清；コンクリートのクリープの予測に関する研究、土木学会論文報告集、第 340 号、pp. 185-191、1983. 12

第3章

粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係

3. 1 序説

砕石や再生骨材、産業廃棄物から製造した骨材などの種々の骨材を有効に利用していかねばならない時代を迎えて、要求されるコンクリートの性能に対して過剰な品質の骨材を使用するのではなく、適材適所に骨材を利用することが非常に重要となる。そこで、使用する材料からそれを用いて作られるコンクリートの力学的性質をある程度予測できれば、効率的に材料選定ができることになる。

特に、コンクリート中で多くの体積を占める粗骨材はコンクリートの種々の力学的性質に影響を及ぼすと言われており、これまでの普通強度コンクリートにおいては骨材の影響が少なかった性状に対しても、高強度コンクリートにおいては骨材の影響が大きくなることが十分考えられ、これらを明確にすることは非常に意義のあることである。また、求められるコンクリートの性能に対して適当な骨材を選定する際には、粗骨材が品質によりいくつかのランクに分けられていれば非常に便利である。例えば、ある性能を要求されているコンクリートを作る必要がある場合の材料選定において、その性能を満たすのはこのランクの骨材であるということが判っていれば、そのランクに該当する骨材を探せばよいことになる。このように、求められるコンクリートに適する粗骨材を効率よく選定するには、硬化コンクリートの力学的性質ごとにそれらを最も適正に評価できる指標が必要であり、粗骨材の物性値に着目すると、それらの分布特性及び硬化コンクリートの力学的性質への影響度を把握した上でその物性値をランク分けすることが必要になる。

そこで、本章ではまず砕石粗骨材の物性値に着目して、粗骨材物性値の分布特性及び粗骨材物性値相互の関係について明確にすることを試みた。そのために、実際に物性試験を行ったデータに加えて文献から物性試験データを収集し多くのデータを用いて分析することにした。さらに、硬化コンクリートの力学的性質への影響に関する各物性値の関わり合いについて調べるために各粗骨材物性値相互の関係についても調べることにした。検討にあたっては骨材の有効利用を念頭に置き、一般のコンクリート骨材用砕石に JIS A 5005 コンクリート用砕石の規定を満足しない砕石、再生骨材、軽量骨材を含めて、物性値の分布特性及び物性値相互の関係について調べた。その結果を硬化コンクリートの力学的性質を評価する指標として最適な粗骨材物性値を選定するための基礎資料とすることにして検討を行った。

3.1.1 本章の概要

本章では、粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係を調べるために、実際に骨材試験を行なった結果と文献より抽出した粗骨材の物性値とを統計的に処理して考察を行なった。対象とした粗骨材は碎石と再生骨材とし、規格外の碎石も対象とした。

着目した粗骨材の物性値は、表乾比重、吸水率、単位容積質量、実積率、すりへり減量、400kN 破砕値、粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数であり、すりへり減量や 400kN 破砕値のデータが少ないので、それらが示されている文献を中心に抽出を行なった。統計処理にあたっては、データ数、最大・最小値、平均値、分散、標準偏差、変動係数を求め、さらに各物性値の度数分布を調べた。さらに、物性値相互の関係を図示することで相互関係の傾向をつかむことにした。

その結果、最もばらつきが大きい物性値は吸水率であり、物性値の分布は吸水率とすりへり減量がやや値の小さい領域へ偏った分布を示したが、他の物性値は平均値を中心に左右対称な分布であった。また、分布より 400kN 破砕値は碎石と再生骨材の違いがあまり大きく反映されない指標であることが判った。物性値相互の関係については、表乾比重と吸水率、すりへり減量と 400kN 破砕値、単位容積質量と表乾比重及び吸水率の間に密接な関係が見られることが確認できた。

3. 2 検討の対象とした粗骨材の物性値

本検討では、まず九州北部地区で入手できる碎石に対して物性値を測定して、それらに加えて過去に調査が行われ物性試験の結果が報告されている文献から粗骨材の物性値データを収集して粗骨材物性値の分布及び物性値相互の関係を明らかにすることを試みた。

まず、九州北部地区の碎石に対しては JIS A 5005 コンクリート用碎石に規定されている物理的性質のうち、コンクリートの耐久性に関連する項目以外の比重、吸水率、実積率、すりへり減量を測定し、さらにすりへり減量と同様に粗骨材の強さを表す指標であると言われ、British Standard BS 812 に規定されている 400kN 破砕値と粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数も測定した。ただし、実積率は粗骨材の粒形を調べるために有効な粒形判定実積率を測定した。比重、吸水率、粒形判定実積率及びすりへり減量は JIS A 1110、JIS A 1104 及び JIS A 1121 に従い測定を行い、比重は表乾比重とした。粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数の測定は、まず粗骨材を入手する際にその粗骨材を破砕する前のグリを 2, 3 個入手し、それらからコアカッターで $\phi 25\text{mm}$ のコアを抜き出し、コンクリートカッターで切断し端面を整形して作製した $\phi 25 \times 50\text{mm}$ の円柱供試体を数本使用して行った。それらにひずみゲージ (測長 20mm) を貼付し、圧縮試験を行うことで圧縮強度と静弾性係数を測定した。なお、静弾性係数の算出はコンクリートの静弾性係数の算出方法¹⁾と同様にして行った。圧縮試験の状況を写真-3.1 に示す。

また、400kN 破砕値は BS 812 Testing aggregates Part 110. Methods for determination of aggregate crushing value(ACV)²⁾を参照して測定した。その概略を以下に示す。105 \pm 5℃の温度で4時間程度熱することにより乾燥させた粗骨材 (10~14mm) を体積計量容器に突き棒で突きながら詰め込み、その体積一定の試料を鋼製円柱容器に3層に分けて25回突きながら詰め込み、プランジャーをセットして圧縮

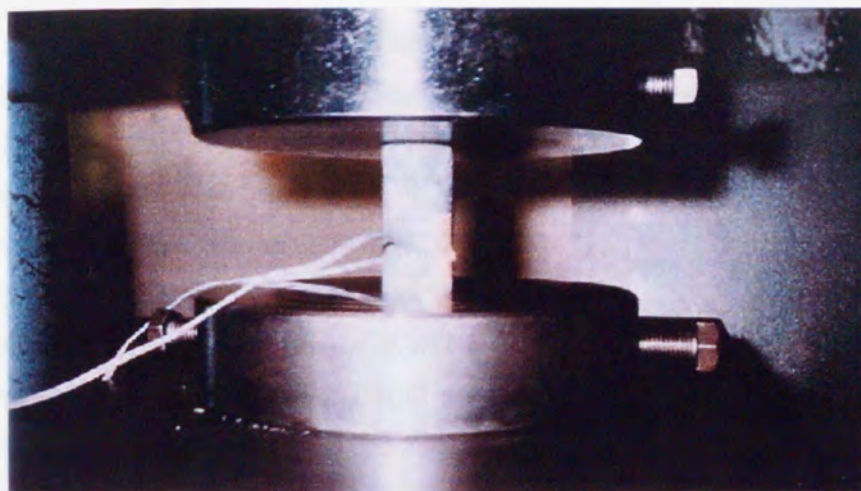


写真-3.1 粗骨材母岩から採取した円柱供試体の圧縮試験状況

荷重を載荷して測定を行う。荷重は400kNを10分±30秒間で載荷し、除荷後破砕した試料を取り出し、2.36mmふるいでふるってそれを通過した質量の試料全質量に対する割合を小数第1位までの百分率で表し、2回の測定結果の平均値を最も近い整数値まで計算する。それぞれの結果が平均値の0.07倍以上異なっていなければ、その平均値を骨材の破砕値とする。

次に、文献からの粗骨材物性値データの収集については、比重や吸水率を報告している例は数多くあるが、400kN破砕値やすりへり減量までも報告している例はそれほど多くないため、400kN破砕値とすりへり減量の両方、もしくはどちらか一方を報告している例についてセメント、コンクリート関係の論文集を中心にデータの収集を行い、116個の粗骨材のデータ^{3)~11)}が得られた。なお、文献より収集した物性値は、比重、吸水率、単位容積質量、実積率、すりへり減量、400kN破砕値、粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数である。それらのデータの中には「JIS A 5005 コンクリート用砕石及び砕砂」に規定されている「品質」の中の物理的性質の規定を少なくとも一つは満たさない粗骨材の物性値データも含まれている。その物理的性質の規定については表-3.1に示す。

表-3.1 物理的性質

試験項目	砕石
絶乾比重	2.5以上
吸水率 %	3.0以下
安定性 %	12以下
すりへり減量 %	40以下
洗い試験で失われる量 %	1.0以下

400kN破砕値が英国規格であることは先に述べたが、英国でのコンクリート用骨材の規定について以下に述べておく。British Standard では BS 882:1992¹²⁾にコンクリート用骨材に関する規定が定められている。その中でコンクリート用骨材の品質の必要条件として、(1)Flakiness index (剥離しやすさの指

標)、(2)Shell content (貝殻の混入量)、(3)Mechanical Properties (物理的性質)、(4)Acid soluble sulphate content (酸可溶性硫酸塩量) の4つが挙げられている。(3)物理的性質では一般のコンクリート用骨材としては10%細粒値(10% fines value)が50kN以上であること、あるいはBS 812:Part 112に規定されている衝撃値(Aggregate impact value)が45%以下であることが必要と定められている。したがって、400kN 破砕値にはコンクリート用骨材としての規定が定められていないことになる。しかし、あえて既往の研究で示した爾見らの報告を基に10%細粒値の規定を400kN 破砕値に当てはめて

400kN 破砕値の規定がどの程度になるのか考えてみた。爾見らの実験結果¹³⁾をSI単位に統一し回帰曲線を求めたのが図-3.1である。図中の網掛け部はBS 882の骨材品質の必要条件から10%細粒値の規格値を横軸に、衝撃値の規格値を縦軸に取って、品質規定を満たす範囲を示したものである。ここで、衝撃値は400kN 破砕値とほぼ同等の値を示すものと仮定して記述した。また、400kN 破砕値と10%細粒値の間の回帰式は

$$400\text{kN破砕値} = 2118.5 \times (10\% \text{細粒値})^{-0.88}$$

となり、この回帰式から考えると400kN 破砕値の規格値は70%以下となるが、それはあまりにも過大すぎる。400kN 破砕値が30%を超えるあたりから回帰曲線との誤差が大きくなっていることや400kN 破砕値が25~30%となる場合、弱い骨材の強度のばらつきに対して試験の感度が悪くなること¹⁴⁾から判断すると、400kN 破砕値の規格は衝撃値と同等の45%程度が妥当ではないかと考えられる。さらに、Kaplan¹⁵⁾の報告を基に400kN 破砕値と衝撃値の関係を図示したのが図-3.2である。BS 882に規定されている衝撃値の規格値から400kN 破砕値の規格値を推定すると、図のように36~44程度となった。衝撃値は円柱容器に入った骨材に標準ハンマーを自重で15回落下させて2.36mmふるいを通過した質量の全体質量に対する百分率であり、衝撃が加えられる点から400kN 破砕値と同程度もしくは若干大きいことが予想される。以上のことを総合すると、400kN 破砕値の規格値は40%程度であると考えられるので、以下400kN 破砕値の規格値を40%と考え検討を進める。

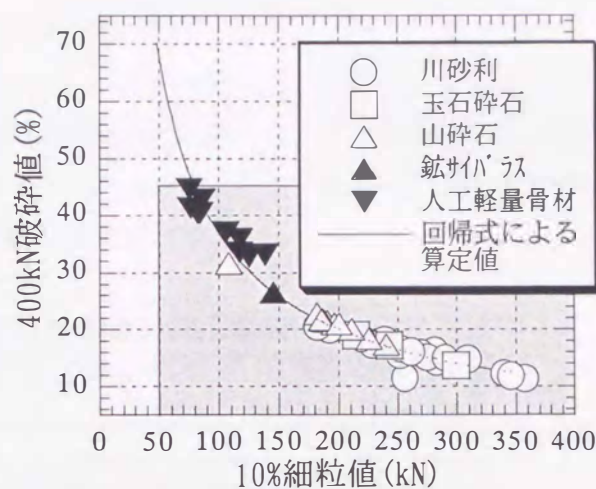


図-3.1 10%細粒値と400kN 破砕値の関係

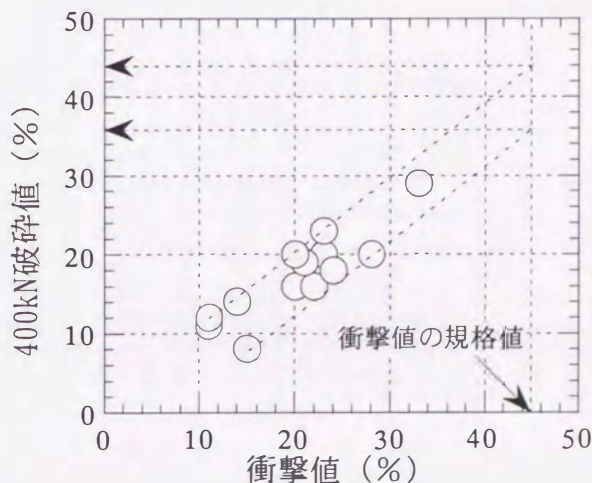


図-3.2 400kN 破砕値と衝撃値との関係

3. 3 物性値の測定結果及び物性値の分布について

3.3.1 各物性値の代表値及び散分度

まず、九州北部地区の碎石に対して行った物性試験の結果を表-3.2 に、すりへり減量や 400kN 破碎値までも測定した結果が明記してある文献^{17)~22)}より得られた再生骨材の物性値データと表-3.2 中の軽量骨材を表-3.3 に示す。使用した粗骨材は最大寸法 20mm の骨材である。

表-3.2 九州北部地区の碎石粗骨材の物性試験結果

記号	骨材岩種	比重	吸水率 (%)	すりへり減量 (%)	破碎値 (%)	粒形判定実積率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
A	角閃岩1	2.93	0.99		14	58.1		
B	緑色片岩	2.94	0.64		18	58.9		
C	安山岩1	2.82	0.62		9	57.5		
D	輝緑角閃岩	3.04	0.40		10	57.8		
E	硬質砂岩1	2.89	0.79		11	53.8		
F	玄武岩1	2.80	0.89		9	58.5		
G	安山岩2	2.71	0.76	11.8	13	57.8	240	62.1
H	結晶片岩1	2.80	0.62	17.6	19	55.4		
I	閃緑岩1	2.73	0.61	12.8	15	57.5		
J	ひん岩1	2.78	0.46	11.4	12	56.8		
K	硬質砂岩2	2.73	0.46	12.0	14	56.5	202	80.5
L	硬質砂岩4	2.73	0.36	10.2	13	61.1		
M	石英斑岩	2.72	0.50	11.6	14	58.2	247	72.6
N	硬質砂岩5	2.69	0.78	13.0	17	58.5	225	56.0
O	安山岩3	2.73	0.72	10.0	9	57.1	153	69.6
P	結晶片岩2	2.81	0.52	15.7	13	59.4	201	72.5
Q	角閃岩2	2.73	1.00	21.6	17	59.0		
R	軽量骨材	1.46	12.6	36.5	36	55.0		
S	結晶片岩3	2.84	0.72	14.9	19	58.1	289	72.6
T	閃緑岩2	2.74	0.74	14.0	16	59.8	80	57.2
U	ひん岩2	2.79	0.38	10.5	12	56.5	156	73.8
V	玄武岩2	2.88	0.46	11.4	12	56.9		
W	硬質砂岩6	2.73	0.35	12.4	12	56.8		
X	玉碎石	2.62	2.17	16.7	18	60.4		

表-3.3 再生粗骨材及び軽量骨材の物性値データ

記号	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	すりへり減量 (%)	400kN 破碎値 (%)
a	2.46	5.94	1.36	59.1	26.9	23.1
b	2.49	4.25	1.40	58.6	18.1	16.0
c	2.50	4.10	1.41	58.8	18.3	16.4
d	2.43	4.60	1.36	57.3	26.2	23.0
e	2.46	5.50	1.35	58.0	37.0	27
f	2.48	4.80	1.42	60.1	26.4	23
g	2.39	7.39	—	—	32.0	22.8
h	2.48	4.44	1.39	—	24.7	18.8
i	2.54	4.64	1.43	59.0	31.1	21.0
j	1.46	12.6	—	55.0	36.5	36.0

a～i まだが再生骨材であり、j が膨張頁岩を原料とした軽量骨材である。なお、JIS A 1121 では構

造用軽量骨材にはすりへり減量試験は適用されないと規定されており、British Standard では破碎値が 30 以上の骨材には 10%細粒値の方法が適用される²⁾と規定されており、軽量骨材が該当することになるが、他の骨材との比較のためにすりへり減量も 400kN 破碎値も測定して表中に示した。

(1) 碎石粗骨材の場合

まず、表-3.2 のデータと文献から収集したデータについて、各物性値ごとにデータ数や最大値、最小値、平均値等の代表値、分散、標準偏差、変動係数等の散分度について表-3.4(a)、(b)に示す。

なお、表-3.1 の物理的性質の規定を満たす範囲内の粗骨材に限定した場合を表-3.4(a)に、規定を満たさない粗骨材も含めた全碎石骨材の場合を表-3.4(b)に示す。ただし、表乾比重については JIS A 5005 の物理的性質の規格が絶乾比重で定められているので、絶乾比重の規格値を表乾比重に当てはめた。また、単位容積質量、母岩の圧縮強度及び静弾性係数については規格値がないので、規格値による分類は行わなかった。

表-3.4(a) 検討したデータの代表値及び散分度（規格を満たす骨材）

	表乾 比重	吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実積率 (%)	すりへり 減量(%)	400kN 破碎値 (%)	母岩圧縮 強度 (N/mm ²)	母岩静弾 性係数 (kN/mm ²)
データ数	112	109	90	107	95	95	51	15
最大値	3.04	3.00	1.82	67.7	35.5	27.8	289	80.5
最小値	2.55	0.20	1.33	53.8	7.1	9	34.5	38.8
平均値	2.71	0.95	1.59	58.8	15.7	16.1	162.3	66.1
分散	0.01	0.32	0.01	4.84	22.4	18.3	3909	106.8
標準偏差	0.10	0.56	0.10	2.20	4.73	4.28	62.5	10.3
変動係数	0.04	0.59	0.06	0.04	0.3	0.27	0.38	0.16

表-3.4(b) 検討したデータの代表値及び散分度
(規格を満たさない骨材も含めた全碎石骨材)

	表乾 比重	吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実積率 (%)	すりへり 減量(%)	400kN 破碎値 (%)	母岩圧縮 強度 (N/mm ²)	母岩静弾 性係数 (kN/mm ²)
データ数	116	116	90	107	98	95	51	15
最大値	3.04	7.08	1.82	67.7	52.6	27.8	289	80.5
最小値	2.37	0.20	1.33	53.8	7.1	9	34.5	38.8
平均値	2.70	1.15	1.59	58.8	16.7	16.1	162.3	66.1
分散	0.01	1.09	0.01	4.84	54.0	18.3	3909	106.8
標準偏差	0.10	1.04	0.10	2.20	7.35	4.28	62.5	10.3
変動係数	0.04	0.90	0.06	0.04	0.44	0.27	0.38	0.16

コンクリート用碎石の物理的性質の規格を満たす範囲の骨材に注目すると、他の物性値と比較して変動係数が非常に小さい表乾比重、単位容積質量、実積率が相対的にばらつきが少ない分布であることがわかる。次に、規格を満たさない骨材も含めた全碎石骨材で考えると、変動係数の傾向は変化していないが、規格外の骨材を含めることで変動係数の増加が著しくなっているのが吸水率である。このことから規格外の骨材は吸水率が規格を満たしておらず、最大値が大きくなっていることから極端に吸水率が大きいものが多いことがわかる。

(2) 再生骨材も含めた場合

表-3.3 のデータを前述の碎石のデータに加えて、各物性値ごとにデータの最大値、最小値、平均値等の代表値、分散、標準偏差、変動係数等の散分度について表-3.5 に示す。ただし、再生骨材及び軽量骨材の母岩圧縮強度及び静弾性係数については測定できないため、表-3.4(a) と同じ数値を示している。

表-3.5 検討したデータの代表値及び散分度（碎石＋再生骨材＋軽量骨材の場合）

	表乾 比重	吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実積率 (%)	すりへり 減量(%)	400kN破 砕値(%)	母岩圧縮 強度 (N/mm ²)	母岩静弾 性係数 (N/mm ²)
データ数	126	126	98	115	108	105	51	15
最大値	3.04	12.60	1.82	67.7	52.6	36	289	80.5
最小値	1.46	0.20	1.33	53.8	7.1	9	34.5	38.8
平均値	2.67	1.52	1.57	58.8	17.7	16.7	162.3	66.1
分散	0.03	3.07	0.01	4.67	62.7	23.2	3909	106.8
標準偏差	0.17	1.75	0.10	2.16	7.92	4.82	62.5	10.3
変動係数	0.06	1.15	0.06	0.04	0.45	0.29	0.38	0.16

ここで、各物性値の変動係数がどのように変化したかを把握するために、規格を満たす骨材（表-3.4(a)）、規格を満たさない骨材も含めた全碎石骨材（表-3.4(b)）及び再生骨材・軽量骨材も含めた全骨材（表-3.5）の場合の各物性値毎の変動係数の変化を図-3.3 に示す。なお、粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数については再生骨材や軽量骨材に対して測定することができないので、図-3.3 中にも示していない。

図-3.3 より、他の物性値と比較して吸水率のばらつきが大きいことが判る。すりへり減量は規格外の碎石や再生骨材を含めた場合にばらつきが大きくなっているが、吸水率と比較すると半分以下である。その他の物性値は規格外や再生骨材を含めても値のばらつきに著しい増加は見られない。よって、規格外の碎石や再生骨材は吸水率が高いことが特徴であり、また、注意点でもあること²³⁾が確認できる。

以上のことから、第4章以降においては、吸水率、すりへり減量、400kN 破砕値が重要な因子になると考えて検討を進めた。

3.3.2 各物性値の分布特性

碎石粗骨材の各物性値の分布特性について度数分布を用いて検討した結果を図-3.4 に示す。度数分布を調べるにあたり、カテゴリーの幅は各物性値データの分布範囲の中で表-3.1 の品質規格値を満足

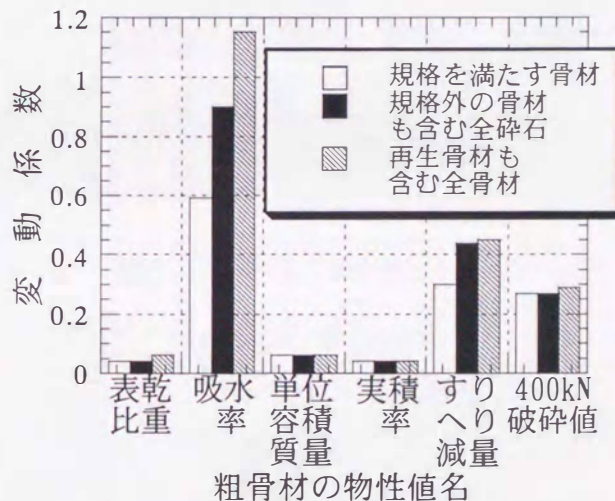


図-3.3 各物性値の変動係数の変化

する範囲を10クラス程度に分けるよう¹⁶⁾に設定し、全ての物性値において約13程度のカテゴリーとなるようにした。ただし、粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数については多くのデータを得ることができなかつたため、データ数に合わせてカテゴリー数を少なくした。黒い棒グラフは碎石のみの場合の度数分布であり、その上に積み重なっている白い棒グラフは再生骨材や軽量骨材を加えることにより増加した度数を示している。なお、図中の網掛け部はJIS A 5005の物理的性質の規格を満たさない範囲を示す。また、図中の度数を表す棒グラフの上方に記入されている“+”や“*”は表-3.4(a)と表-3.5に示される各物性値の平均値がその区間に存在するということを示すものである。“+”は粗骨材品質の物理的性質の規格を満足する骨材のみを対象とした場合の平均値を示し、“*”は再生骨材を含む全骨材を対象とした場合の平均値を示している。ただし、骨材の物理的性質の規格がない単位容積質量、実積率、400kN 破砕値、母岩の圧縮強度及び静弾性係数は“*”のみを表示した。

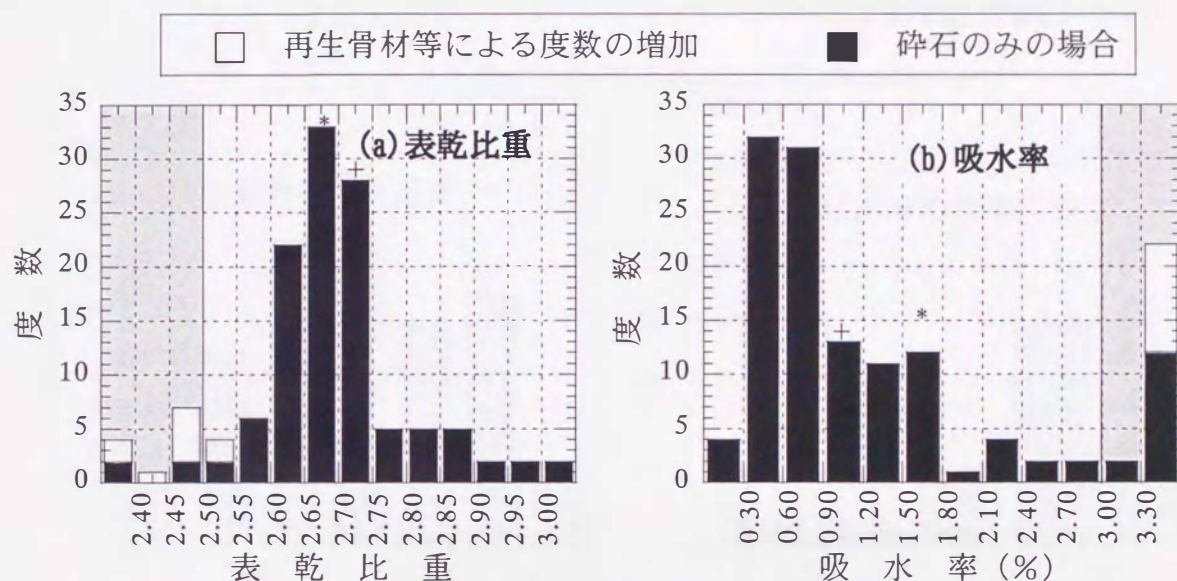


図-3.4 再生骨材も含めた全粗骨材の物性値の度数分布

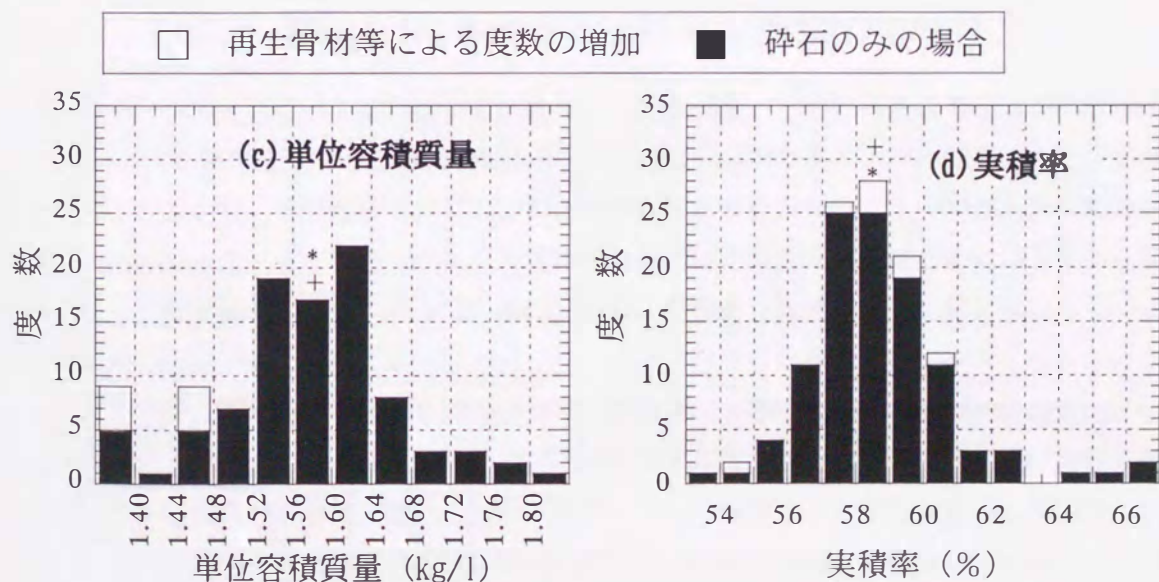


図-3.4 再生骨材も含めた全粗骨材の物性値の度数分布

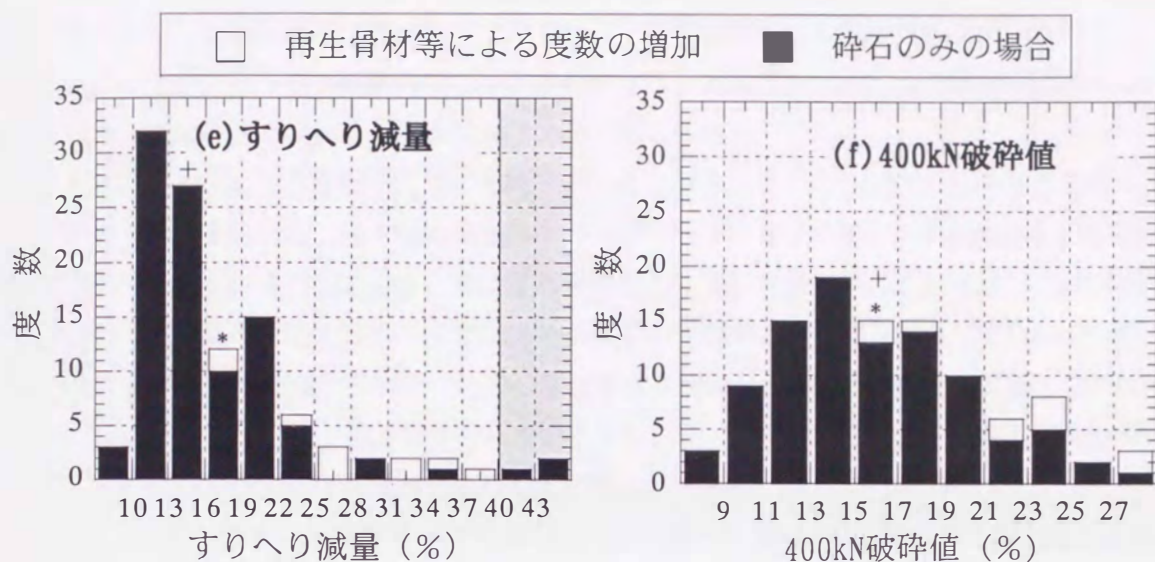


図-3.4 再生骨材を含めた全粗骨材の物性値の度数分布

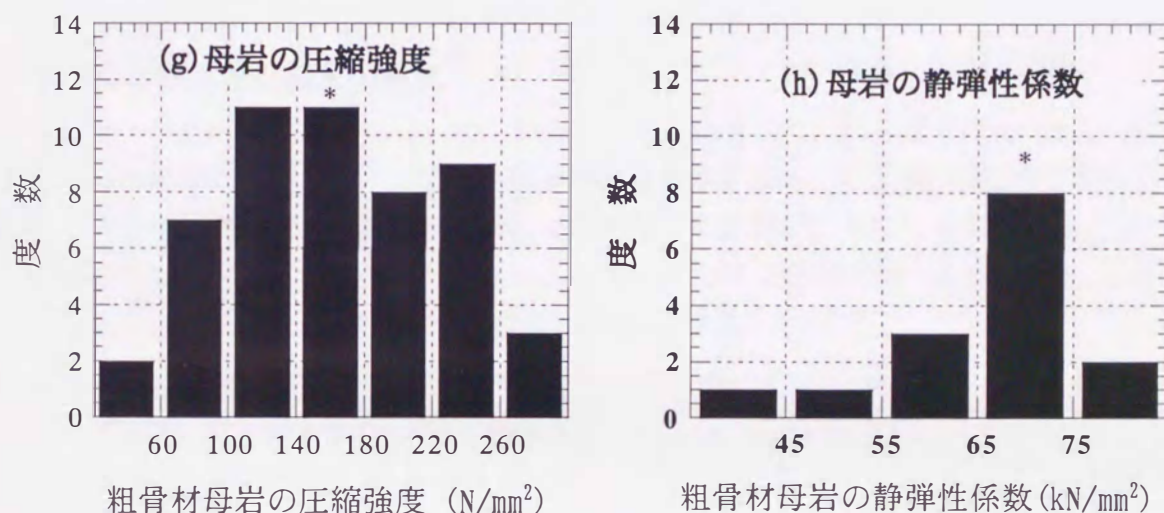


図-3.4 再生骨材を含めた全粗骨材の物性値の度数分布

まず、碎石のみの場合について考察する。表-3.4 で変動係数が小さかった表乾比重、単位容積質量、実積率は図-3.4 で分布を見てみると、平均値あたりの度数が非常に高く、平均値を中心としてほぼ対称な分布を示している。したがって、これらの物性値はばらつきが少なく、平均値あたりに集中する傾向が見られる。一方、吸水率とすりへり減量の度数分布は平均値を中心に対象になっておらず、最も度数の高い区間が分布の左側に偏っている。つまり、最頻値が物性値の平均値より小さく、全体に対して物性値が小さい値に集中する傾向が見られ、規格値付近の分布は極端に少なくなっている。それに対して、400kN 破砕値は平均値を中心としてほぼ対象に分布しており、他の物性値と比較してそれぞれの区間の度数が少なく平均値あたりに分布が集中することなく、なだらかに広がる分布を示している。つまり、物性値が特定の値近くに偏る確率が低く、幅の広い分布となることがわかる。このことは、骨材を選択する際に物性値が狭い範囲に集中する確率が低いことを示している。粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数については、母数が少ないので分布の傾向をとらえることは難しいが、本

検討の範囲において圧縮強度は幅の広い分布であり、静弾性係数は比較的値が集中する傾向にあることがわかる。ただ、どちらも試験用のコアを母岩から抜き出し成形することに多大の手間を要することが実施例及び報告事例が少ない原因ではないかと考えられる。

次に再生骨材を含めた全骨材を対象に考察する。碎石のみのデータに再生骨材や軽量骨材のデータが加わることで、表乾比重、吸水率の規格外のカテゴリの度数が増加し、単位容積質量は最も小さいカテゴリの度数が増加している。特に吸水率の場合の増加が著しい。これに対して実積率やすりへり減量、400kN 破砕値はそれらの分布傾向を変えずに度数が適度にばらついて増加している。なかでも 400kN 破砕値は多くのカテゴリに少しずつ度数が増加しており、規格値を 40% とすれば今回集めたデータの範囲では 400kN 破砕値の規格を満たさない骨材はないことから、碎石と再生骨材の違いはあまり大きく反映されない指標であることが判る。

以上のことから、粗骨材品質の違いが大きく現れる指標としては、そのばらつきの程度から吸水率、すりへり減量、400kN 破砕値が挙げられる。また、再生骨材の品質の影響を反映しやすい指標としては、吸水率、表乾比重、すりへり減量が挙げられる。

3. 4 粗骨材物性値相互の関係

次に、粗骨材の物性値がお互いにどのような関係にあるのかという点について調べるために 3. 3 で使用した碎石、軽量骨材及び再生骨材のデータに対して物性値相互の関係を求めてみた。この検討により物性値間の相関関係が明らかとなり、コンクリートの要求性能を照査する際に必要となる照査指標と関連の深い粗骨材物性値を選択する際の基礎資料とすることにした。

(1) 表乾比重と吸水率の関係

図-3.5 は粗骨材の表乾比重と吸水率の関係を示している。図中の網掛け部は JIS A 5005 コンクリート用碎石及び砕砂の物理的性質の規定を満たす範囲を示している。第 2 章 既往の研究で示したように表乾比重と吸水率の間には表乾比重が増加すると、吸水率は対数的に減少することが判る。さらに、この関係は再生骨材についても同様であり、碎石の場合と重なるような分布となっていることが判る。しかし、今回使用した軽量骨材は碎石や再生骨材とは分布領域が異なっている。これは軽量骨材の物性が比重及び吸水率の面では碎石や再生骨材とは大きく異なるという特性を表していると考えられる。ただし、今回はわずか 1 種類しか使用していないので、その範囲での知見である。

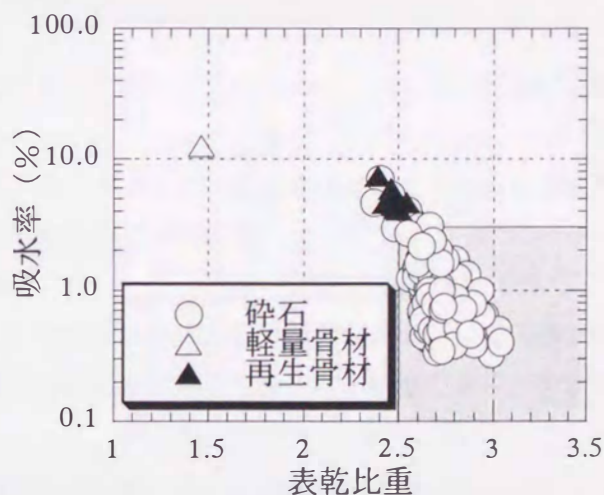


図-3.5 粗骨材の表乾比重と吸水率の関係

(2) 400kN 破砕値とすりへり減量の関係

図-3.6 は 400kN 破砕値とすりへり減量の関係を示したものであり、図中の網掛け部は碎石の物理的性質の規格を満たす範囲を示している。

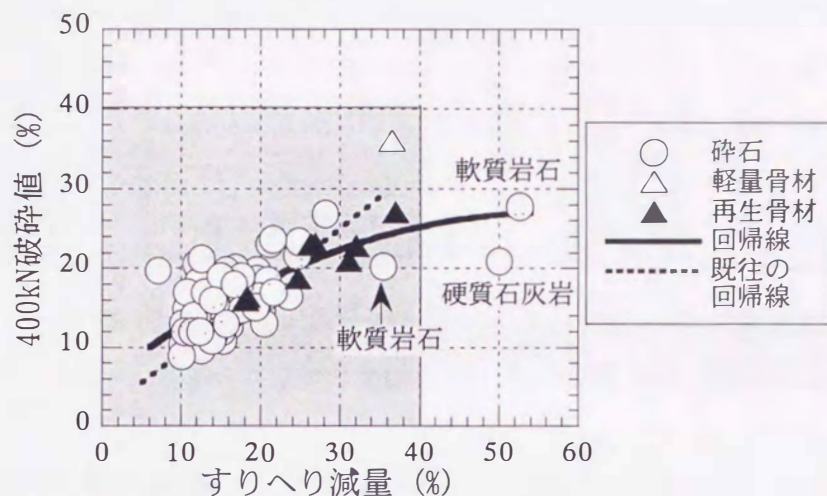


図-3.6 400kN 破砕値とすりへり減量との関係

図より碎石、再生骨材のどちらもすりへり減量が大きくなると破砕値も大きくなる同傾向の分布を示していることが判る。また、両者の値が 25% を超える領域では 400kN 破砕値に対してすりへり減量が若干大きくなる傾向にあり、これは図-3.4 (e) 及び (f) に示されるすりへり減量と 400kN 破砕値の分布からも確認できる。したがって、規格外の軟質岩石も含めた碎石と再生骨材について回帰線を求めてみると、図中の実線のようになり次の式で表されることが判った。

$$ACV = 5.7093 + 0.7557x - 0.0067168x^2$$

ここで、 ACV : 400kN 破砕値、 x : すりへり減量を示す。図中に示した破線は飛坂らの既往の回帰式による回帰直線を示している。規格を満たす範囲内の骨材について見ると、今回の結果はこの回帰直線とほぼ同じ傾向を示していることが確認できる。以上のように、規格外の骨材をも含めると若干両者の関係は変化するが、両者には比較的明確な関係があることが判る。

(3) すりへり減量及び 400kN 破砕値と吸水率の関係

図-3.7 はすりへり減量と吸水率の関係を、図-3.8 は 400kN 破砕値と吸水率の関係を示している。図中の網掛け部はすりへり減量、400kN 破砕値及び吸水率の品質規格値を満足する範囲を示す。吸水率の大きい骨材は多孔質であり、すりへり減量が大きくなる。既往の研究⁶⁾²⁴⁾と同様に、図-3.7 でも吸水率が大きくなると、すりへり減量も大きくなる傾向を示している。その傾向は碎石よりも再生骨材において著しい。これは、再生骨材の周りに付着しているモルタル分の影響によるところが大きく、吸水率とすりへり減量に相関が見られたものと考えられる。また、図-3.6 から判るように、すりへり減量と 400kN 破砕値に相関があるので、吸水率と 400kN 破砕値 (図-3.8) にもすりへり減量の場合と同様の傾向が見られるが、図-3.7 と比較すると明確ではない。

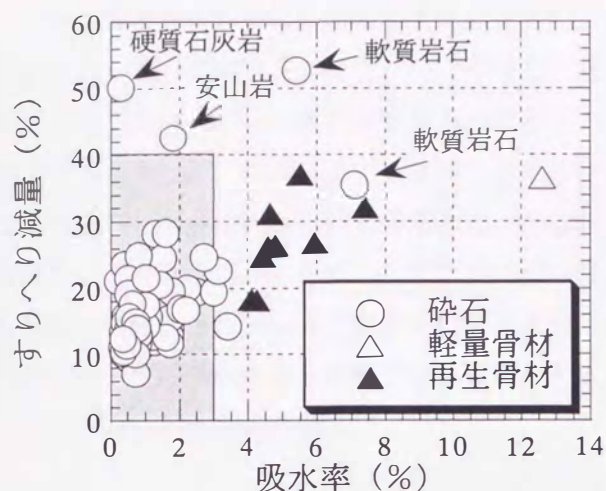


図-3.7 すりへり減量と吸水率の関係

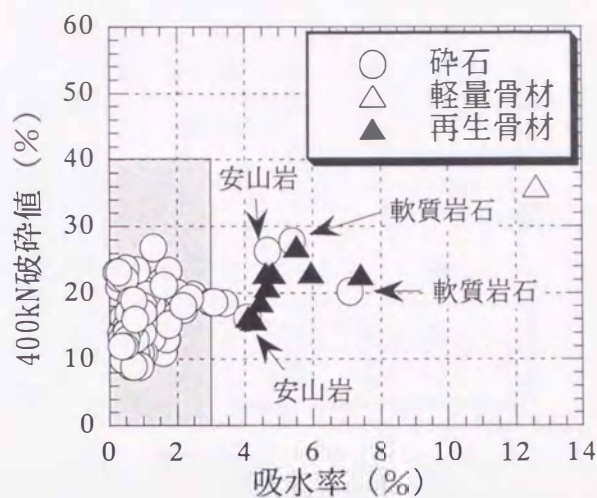


図-3.8 400kN 破砕値と吸水率の関係

(4) 400kN 破砕値と比重の関係

図-3.9 は 400kN 破砕値と表乾比重の関係を示したものである。網掛け部は 400kN 破砕値と表乾比重の品質規格値を満足する範囲を示す。表乾比重と 400kN 破砕値には、表乾比重が小さくなると 400kN 破砕値が大きくなる傾向が見られた。砕石及び再生骨材の分布の延長線に近い領域に軽量骨材のプロットも存在しており、表乾比重が小さい骨材は弱いという傾向が軽量骨材にも当てはまっている。

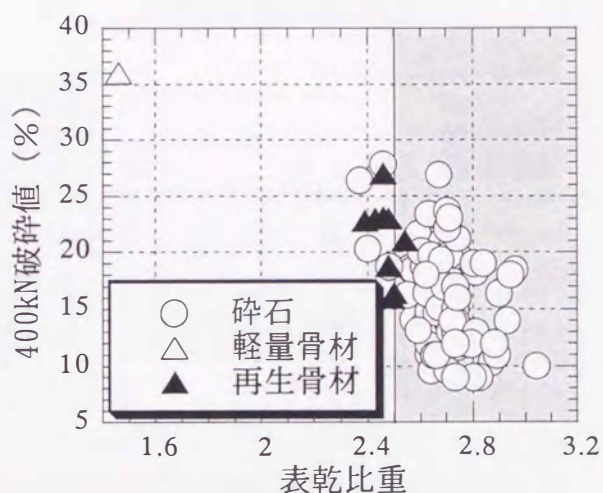


図-3.9 表乾比重と 400kN 破砕値の関係

(5) 粗骨材母岩の圧縮強度と 400kN 破砕値の関係

図-3.10 は、粗骨材母岩の圧縮強度と粗骨材の 400kN 破砕値の関係について、実際に圧縮試験を行って得た測定値と文献から得たデータ、Kaplan が行った試験のデータ⁵⁾をプロットして得たものである。なお、測定値と Kaplan のデータは $\phi 25\text{mm}$ の円柱供試体で測定した値である。Kaplan によると、母岩の圧縮強度と 400kN 破砕値との相関係数は 0.84 であり、母岩の圧縮強度が小さくなると、破砕値が大きくなる傾向にある。文献からのデータからはわずかに同じような傾向が読み取れるが、測定値を加えるとばらつきが大きくなっている。

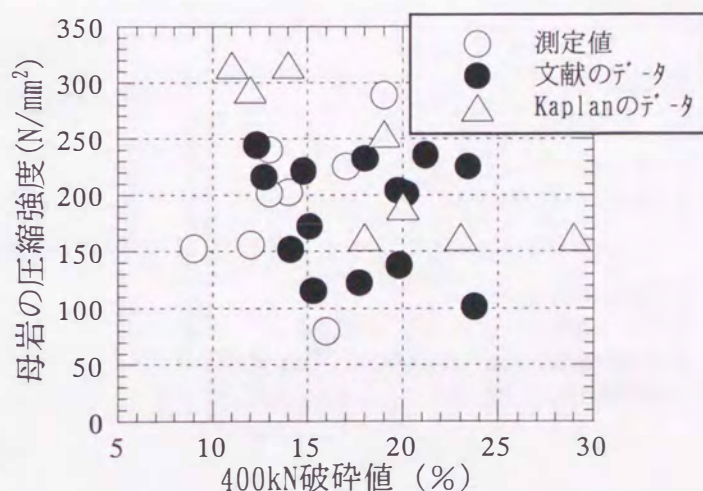


図-3.10 粗骨材母岩の圧縮強度と粗骨材の 400kN 破砕値の関係

これは、岩種や母岩からの円柱供試体の抜き出し位置によっても圧縮強度の変化が大きくなることによるところが大きい。供試体数が多いほどその精度は高くなるが、岩種によっては円柱供試体を抜き出すことが非常に難しいものもあり、その影響もあると考えられる。しかし、母岩の圧縮強度も400kN 破砕値も骨材の強さを示す指標であり、両者には一定の傾向が見られそうであるが、データ数が少ないため明瞭な傾向があるとはいいがたい。

(6) 粗骨材母岩の静弾性係数と400kN 破砕値の関係

図-3.11 は粗骨材母岩の静弾性係数と400kN 破砕値の関係を示したものである。図中には実際に圧縮試験を行って得た測定値と文献から得たデータをプロットしている。一般に、母岩の静弾性係数はコンクリートの収縮を骨材が拘束する際の影響要因として挙げられており、骨材の変形によって拘束度が異なると言われている。このように、母岩の静弾性係数と粗骨材の400kN 破砕値の間に400kN 破砕値が小さいほど、静弾性係数がわずかに大きくなるという傾向が見られるが、データ数が少ないため明確な傾向があるとはいいがたい。

(7) 400kN 破砕値と実積率の関係

図-3.12 は粗骨材の400kN 破砕値と実積率の関係である。400kN 破砕値は一定体積の円柱容器に骨材を突き棒で突き固めて詰め込み、試験を行うので骨材の実積率により破砕値に影響が出ることが考えられるが、図から実積率と400kN 破砕値の間には明確な傾向は見られない。したがって、400kN 破砕値の試験方法は骨材の詰まり具合の影響が少ない方法であるといえる。

(8) 単位容積質量と表乾比重、吸水率の関係

粗骨材の単位容積質量と表乾比重、吸水率の間に図-3.13 及び 14 にみられるように、表乾比

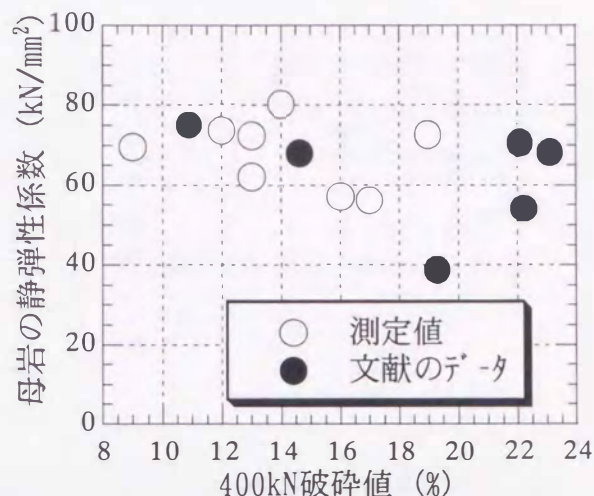


図-3.11 粗骨材母岩の静弾性係数と粗骨材の400kN 破砕値の関係

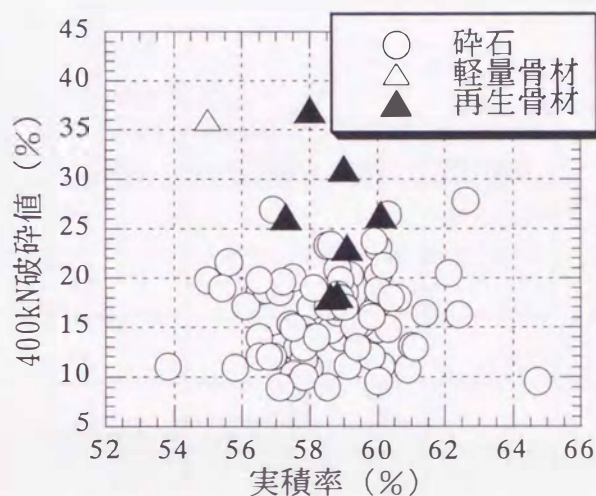


図-3.12 粗骨材の400kN 破砕値と実積率の関係

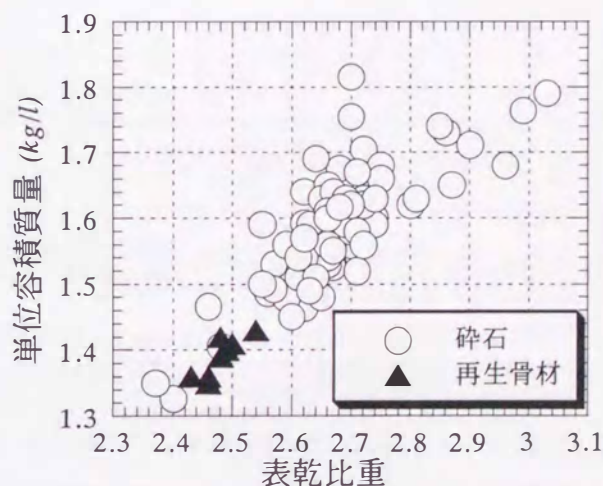


図-3.13 粗骨材の表乾比重と単位容積質量の関係

重が大きくなるほど、または吸水率が小さくなるほど単位容積質量が大きくなる傾向が見られた。これは粗骨材の吸水率が小さいということが骨材組織が密実であることを示すため、表乾比重は大きくなる。一方、単位容積質量はばらつきが少ない分布を示すので、このような傾向を示すことになる。これらは前述の表乾比重と吸水率との関係からも確認できる。また、再生骨材のプロットはいずれも碎石の中でも低品質といわれる骨材に近い位置に存在する傾向であった。

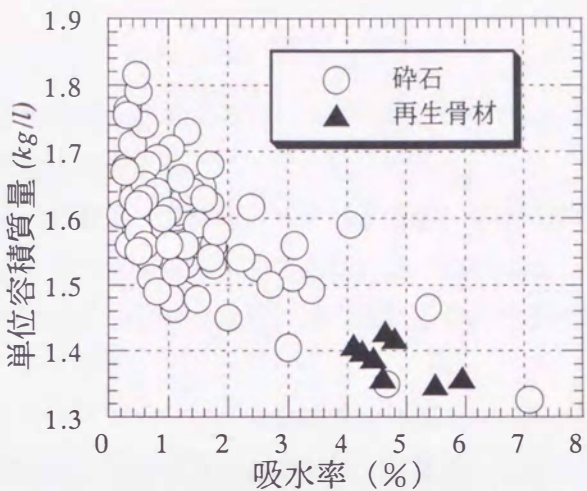


図-3.14 粗骨材の吸水率と単位容積質量の関係

以上のことをまとめて、表-3.6 に示し粗骨材物性値相互の関係について得られた知見を整理することにする。

表-3.6 粗骨材物性値相互の関係一覧

物性値	表乾比重	吸水率	単位容積質量	実積率	すりへり減量	400kN 破砕値	母岩圧縮 強度	母岩静弾 性係数
表乾比重	*							
吸水率	◎	*						
単位容積質量	◎	◎	*					
実積率	×	×	×	*				
すりへり減量	○	△	△	×	*			
400kN破砕値	○	△	×	×	◎	*		
母岩圧縮強度	×	○	×	×	×	△	*	
母岩静弾性係数	×	×	×	×	×	△	×	*

ここで、◎；物性値間に高い相関が認められる
 ○；相関は高くないが、物性値間にやや傾向が見られる
 △；限られた範囲でやや傾向が見られる
 ×；物性値間に明瞭な傾向は見られない
 を示している。

本章では、碎石のデータに加えて再生骨材のデータもプロットしたが、試料数が少ないためごく限られた範囲での分布特性ということになった。したがって、表-3.6 は碎石を中心とした関係について示したものである。

3. 5 まとめ

本章では碎石粗骨材だけでなく、軽量粗骨材や再生粗骨材も含めてそれらの物性値について分布特性及び物性値相互の関係について考察した。得られた知見をまとめれば、次の通りである。

- (1) 粗骨材の物性値の中で、表乾比重、吸水率、単位容積質量、実積率、すりへり減量、400kN 破碎値、母岩の圧縮強度及び静弾性係数を選び、文献から得たデータも含めて各物性値の分布特性について調べた結果、表乾比重、単位容積質量、実積率はばらつきが少なく、平均値あたりに集中する傾向があることが判った。
- (2) 吸水率とすりへり減量は、平均値を中心に対象に分布しておらず、最頻値が平均値より小さい領域に存在した。それに対し、400kN 破碎値は平均値に対して対象な分布であり、分布もある値に集中することなくなだらかに広がる分布を持つことが判った。
- (3) JIS A 5005 を満たさない規格外の碎石や再生骨材も含めて各物性値の分布について調べた結果、他の物性値と比較して吸水率のばらつきが極端に大きくなることが判った。また、400kN 破碎値は碎石と再生骨材の違いがあまり大きく反映されない指標であることが判った。
- (4) 碎石と再生骨材について物性値相互の関係を調べた結果、表乾比重と吸水率、すりへり減量と400kN 破碎値、単位容積質量と表乾比重及び吸水率の間に高い相関が認められた。また、すりへり減量及び400kN 破碎値と表乾比重、吸水率と粗骨材母岩の圧縮強度との間には相関は高くないが、わずかに一定の傾向が認められた。400kN 破碎値と粗骨材母岩の圧縮強度及び静弾性係数、すりへり減量と吸水率、400kN 破碎値と吸水率の間には限られた範囲でやや傾向が見られる程度で、他の物性値相互には一定の傾向は認められなかった。

参考文献：

- 1) 土木学会、コンクリートの静弾性係数試験方法（案）(JSCE-G 502-1988)、コンクリート標準示方書 [規準編]、pp.443-445、1996.3
- 2) British Standards Institution, Testing aggregates Part 110. Methods for determination of aggregate crushing value(ACV),BS 812:Part 110,1990
- 3) 柿崎正義、枝広英俊；粗骨材の品質が超高強度コンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学論文集、第4巻第2号、pp.9-21、1993.7
- 4) 真野孝次、阿部道彦、梶田佳寛；高強度コンクリート用骨材の品質判定規準に関する研究（その1：コンクリートの圧縮強度による品質判定）、日本建築学会学術講演梗概集（九州）、pp.167-168、1989年10月
- 5) 飛坂基夫；高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響、セメント・コンクリート No.394、pp.30-33、1979.12
- 6) 土木研究所；河川砂利以外の骨材を使用した場合のコンクリートの研究、第20回建設省技術研究発表会、pp.45-70、1966.11
- 7) 迫田恵三；骨材の品質がコンクリートの性質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、

- 第8巻、pp.233-236、1986.6
- 8) セメント協会コンクリート専門委員会；粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響、セメント・コンクリート、No.395、pp.45-53、1980.1
 - 9) セメント協会コンクリート専門委員会；砕石を用いた舗装用コンクリートの圧縮強度と曲げ強度について一般土木用コンクリートの圧縮強度を含む一、セメント・コンクリート No.264、pp.2-9、1969.2
 - 10) セメント協会コンクリート専門委員会；コンクリート専門委員会報告、第23回セメント技術年報、pp.206-208、1969.5
 - 11) 柳井修司、大野俊夫、瀬戸謙一郎、アグス・サントーサ・スジョノ；高強度コンクリートの粗骨材の品質判定法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1、pp.255-260、1996.6
 - 12) British Standards Institution, Specification for Aggregates from natural sources for concrete, BS 882, 1992
 - 13) 爾見軍治、嶋谷宏文；コンクリート用骨材の破碎値とコンクリートの強度、第20回セメント技術年報、pp.292-297、1966.5
 - 14) A. M. Neville and J. J. Brooks, Concrete Technology UPDATED, p.48, 1994
 - 15) M. F. Kaplan, Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates, Journal of the American Concrete Institute, No.55, pp.1193-1208, May 1959
 - 16) 近藤泰夫、江崎一博；新編土木工学講座1 土木応用数学、p.207、コロナ社、1994.1
 - 17) 鯉江利夫、吉兼 亨、中島佳郎、木村隆之；再生骨材の簡易コンクリートへの適用性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1、pp.1099-1104、1997.6
 - 18) 田中順、福手勤、伊藤正憲、早川健司；海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.2、pp.1087-1092、1998.6
 - 19) 板谷英克、小玉克巳、栗原哲彦；PC枕木廃材を再生骨材として利用するための基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.1、pp.157-162、1999.7
 - 20) 久保野敦；再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性、九州大学工学部卒業論文、p.8、2000.3
 - 21) 笠井芳夫、阿部道彦、柳 啓；再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集 No.50、pp.802-807、1996.5
 - 22) 大久保斉；コンクリート廃材の有効利用システムに関する基礎的研究、九州大学大学院工学研究科修士論文、p.43、1998.3
 - 23) 河野広隆；特集／これからの骨材はどうなるのか 再生骨材、セメント・コンクリート No.618、pp.64-69、1998.8
 - 24) 西沢紀昭；コンクリート用骨材の比重、吸水量、安定性、すりへりの各試験結果間相互の関係、電力中央研究所技術研究所所報、第9巻第1,2号、pp.18-31、1959.6

第4章

高強度コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響

4. 1 序説

廃棄物をできるだけ排出しないようにしながら、限りある資源を有効に使っていかねばならない時代になり、材料を適材適所に循環使用していくシステムが望まれている今、材料の物性とそれを使用して製造される構造物の性能の関係を十分に把握することが非常に重要なことである。コンクリートの強度に関して言えば、要求されるコンクリートの強度レベルを発現させることが可能な材料であれば、再生骨材でも JIS の規格値を満足しない砕石であっても使用できるようなシステムが不可欠である。そのためには、どのような材料を使えばどの程度の強度発現が可能であるかを把握できれば材料選定が非常に効率的に進むことになる。そこで、コンクリート中の大半を占める骨材に着目すると、骨材の品質が高強度コンクリートの物性に大きな影響を及ぼすこと¹⁾はよく知られているが、骨材のどの品質がコンクリートの物性に影響を及ぼすかについては明らかにされていない。また、高強度コンクリート用骨材の選定についても種々の検討が進められている²⁾が、その方法は確立されていない。

第3章では、高強度コンクリートの種々の力学的性質に粗骨材品質が及ぼす影響について検討を行う際に必要となる粗骨材の物性値に関する基礎データを得るために、粗骨材の物性値の分布特性や物性値相互の関係を明らかにすることを試みた。それらをもとに、本章以降では粗骨材品質が及ぼす高強度コンクリートの各種力学的性質への影響を明確にするための検討を行なっていく。その際には、鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートの両方を対象として、それぞれに対して粗骨材品質がどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目指して検討を行った。

本章では鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートを対象として、コンクリートの基礎的物性である圧縮強度及び応力-ひずみ関係から得られる静弾性係数に着目した。圧縮強度については静的な軸圧縮荷重下において、粗骨材がコンクリートの強度発現にどのような影響を及ぼすのかという点について明らかにするために、特に粗骨材品質の面から高強度及び高流動コンクリートの圧縮強度への影響について検討を行った。さらに、コンクリートの静弾性係数は本章以降のコンクリートの変形について検討する場合に重要な情報であり、コンクリートの静弾性係数と粗骨材物性値との関係を調べることで、コンクリートの静弾性係数への粗骨材物性値の影響を明確にし、コンクリートの変

形に対する考察のための基礎資料を得ることを目指した。

4.1.1 本章の概要

コンクリートの圧縮強度も静弾性係数も、荷重が作用した状態での性状であり、骨材はひび割れや変形と大きく関わっている。特にコンクリートの圧縮強度については、第2章に示したようにモルタルの強度と粗骨材母岩の強度のバランスや応力集中により圧縮強度が変化するとされており、粗骨材物性値とコンクリートの圧縮強度については明確に説明できていない。それに、粗骨材母岩の圧縮強度を測定するには、多大な手間と時間が必要である。そこで、他の粗骨材物性値で大まかにコンクリートの圧縮強度を評価できれば、材料選択が効率的に行なえると考えて、まずコンクリートの圧縮強度と使用した粗骨材の物性値の関係について調べることで、粗骨材物性値の中にコンクリートの圧縮強度を大まかに評価する指標となりうるものがないかどうか検討することにした。また、コンクリートの静弾性係数についても、第2章に示したようにコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示した式やコンクリートを骨材と母材からなる二相複合材料と考える推定式が提案されている。しかし、粗骨材の物性値との関係は明確になっていない。また、コンクリートを二相材料と考える場合にも、粗骨材母岩の静弾性係数を測定する必要がある、圧縮強度と同様の手間がかかる。そこで、粗骨材がコンクリートの弾性領域における変形に与える影響と粗骨材物性値とを関連付けることが可能であるかを調べるために、コンクリートの静弾性係数と使用した粗骨材の物性値との関係を調べることにした。なお、本検討においては粗骨材品質の影響が大きくなると言われている高強度コンクリートを中心に検討を行なった。

圧縮強度については、異なる19種類の粗骨材を使用し、モルタルの配合、単位粗骨材容積、細骨材種類を一定として、円柱供試体を作製し圧縮強度試験を行なった。静弾性係数については、異なる15種類の粗骨材を使用し、圧縮強度の場合と同条件で円柱供試体を作製して静弾性係数の測定を行なった。その結果、高強度コンクリートの圧縮強度に最も影響が大きい粗骨材物性値は400kN 破砕値であり、高強度領域になるほど、その影響が大きくなることが明確になった。さらに、高強度コンクリートの静弾性係数については、すりへり減量が最も高い相関を示すことがわかった。

4.2 圧縮強度への粗骨材品質の影響についての検討

本検討においては、混和材として高炉スラグ微粉末を使用しない高強度コンクリートと高炉スラグ微粉末をセメント質量に対して50%置換使用した高流動コンクリートの2種類のコンクリートを取り上げ実験を行った。

4.2.1 使用材料

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ ）、細骨材は海砂1（比重 2.59、粗粒率 2.72）及び海砂2（比重 2.56、粗粒率 2.74）、粗骨材は表-4.1 に示す14種類

(G.max=20mm)を使用した。なお、減水剤は減水剤1（トリアジン系高性能減水剤）及び減水剤2（ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤）を使用した。

表-4.1 使用した粗骨材の物性値一覧

記号	骨材岩種	比重	吸水率 (%)	すりへり 減量 (%)	400kN破砕値 (%)	粒形判定 実積率 (%)	母岩 圧縮強度 (N/mm ²)	母岩静弾 性係数 (kN/mm ²)
A	角閃岩	2.93	0.99	—	14	58.1	—	—
B	緑色片岩	2.94	0.64	—	18	58.9	—	—
C	安山岩	2.82	0.62	—	9	57.5	—	—
D	輝緑角閃岩	3.04	0.40	—	10	57.8	—	—
E	硬質砂岩	2.89	0.79	—	11	53.8	—	—
F	玄武岩	2.80	0.89	—	9	58.5	—	—
G	安山岩	2.71	0.76	11.8	13	57.8	240	62.1
H	結晶片岩	2.80	0.62	17.6	19	55.4	—	—
I	閃緑岩	2.73	0.61	12.8	15	57.5	—	—
J	ひん岩	2.78	0.46	11.4	12	56.8	—	—
K	硬質砂岩	2.73	0.46	12.0	14	56.5	202	80.5
L	硬質砂岩	2.73	0.36	10.2	13	61.1	—	—
M	石英斑岩	2.72	0.50	11.6	14	58.2	247	72.6
N	硬質砂岩	2.69	0.78	13.0	17	58.5	225	56.0

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3,300cm²/g）、細骨材は海砂（比重 2.58、粗粒率 3.08）、粗骨材は表-4.2 に示す 4 種類(G.max=20mm)を使用した。なお、混和材として高炉スラグ微粉末（比重 2.90、比表面積 6,070cm²/g）をセメント質量に対して置換率 50%で使用し、減水剤は減水剤1（ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤）及び減水剤2（リグニンスルホン酸系AE減水剤）を使用した。使用量は減水剤1が結合材質量の1%、減水剤2が 250ml/C=100kg とした。

表-4.2 使用した粗骨材の物性値一覧

記号	骨材岩種	比重	吸水率 (%)	すりへり 減量 (%)	破砕値 (%)	粒形判定 実積率 (%)	母岩 圧縮強度 (N/mm ²)	母岩静弾 性係数 (kN/mm ²)
O	安山岩	2.73	0.72	10.0	9	57.1	153	69.6
P	結晶片岩	2.81	0.52	15.7	13	59.4	201	72.5
Q	角閃岩	2.73	1.00	21.6	17	59.0	—	—
R	軽量骨材	1.46	12.6	36.5	36	55.0	—	—

4.2.2 コンクリートの配合及び供試体作製方法

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

普通強度コンクリートとの比較のため、W/C=45.7、33.3、27.3、28.0%の4種類の配合で供試体を作製した。その配合例及び使用した骨材について表-4.3 に示す。

表-4.3 コンクリートの配合及び使用骨材

	使用 細骨材	使用 粗骨材	W/C (%)	s/a (%)	Vg (l/m^3)	単位量 (kg/m^3)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
a	海砂 1	表-4.1 のA~F	45.7	42.0	412	160	350	772	1207	10.5 <i>l</i>
b			33.3	39.0	421	150	450	697	1234	13.5 <i>l</i>
c			27.3	33.0	440	150	550	562	1289	16.5 <i>l</i>
d	海砂 2	G~N	28.0	38.0	384	160	571	602	1040	8.56 <i>kg</i>

Vg: 単位粗骨材容積

各配合とも粗骨材種類による違いを明確にするため、粗骨材以外の単位量は一定としモルタルの配合を各配合で一定とした。表中の粗骨材の単位量は配合 a~c では表-4.1 中の角閃岩 (A) を使用した場合を、配合 d では安山岩 (G) を使用した場合の値である。また、目標空気量は配合 a~c では 2 %、配合 d では 4 % とした。なお、混和剤は、配合 a~d では減水剤 1 を、配合 d では減水剤 2 を使用した。

コンクリートの練混ぜは、配合 a~d では可傾式ミキサを使用し、配合 d では強制練りミキサを使用し 3 分間行った。練り上がり後、スランプ、空気量を測定し型枠内に打設し突き棒で締め固めた。圧縮強度測定用供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱とし各配合各粗骨材種類毎に 3 体ずつ作製し、モルタルの圧縮強度測定用は $\phi 5 \times 10$ cm の円柱供試体として各配合毎に 3 体ずつ作製した。脱型までは湿潤養生とし、材齢 1 日で脱型した後は圧縮試験材齢まで水温 20℃ の水中養生を行った。なお、供試体端面を平滑にするために、配合 a~c では供試体脱型前に超早強セメントを用いてキャッピングを行い、配合 d では試験直前に研磨機により研磨仕上げを行った。

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

普通強度コンクリートとの比較のため、W/B=28、50 % の 2 種類の配合で供試体を作製した。その配合例及び使用した骨材について表-4.4 に示す。

表-4.4 コンクリートの配合及び使用骨材

	使用 粗骨材	W/B (%)	s/a (%)	Vg (l/m^3)	単位量 (kg/m^3)					
					水	セメント	スラグ	細骨材	粗骨材	混和剤
e	表-4.2	28.0	45.8	330	170	304	304	720	900	6.08 <i>kg</i>
f	の 0~R	50.0	50.6		170	170	170	871	900	850 <i>ml</i>

Vg: 単位粗骨材容積、スラグ: 高炉スラグ微粉末

各配合とも粗骨材種類による違いを明確にするため、粗骨材以外の単位量は一定としモルタルの配合を各配合で一定とした。表中の粗骨材の単位量は表-4.2 中の角閃岩 (Q) を使用した場合の値である。また、目標空気量は配合 e では 2 %、配合 f では 5 % とした。なお、混和剤は、配合 e では減水剤 1 を、配合 d では減水剤 2 を使用した。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを使用し 3 分間行った。練り上がり後、スランプフローもしくはスランプ、空気量を測定し円柱供試体用型枠内へ打設し突き棒で締め固めた。圧縮強度測定用供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱とし各配合各粗骨材種類毎に 3 体ずつ作製し、モルタルの圧縮強度測定用供試体は $\phi 5 \times 10$ cm の円柱とし各配合毎に 3 体ずつ作製した。脱型までは湿潤養生とし、材齢 1 日で脱型した後は圧縮試験材齢まで水温 20℃ の水中養生を行った。なお、供試体端面を平滑にする

ために、試験直前に研磨機により研磨仕上げを行った。

4.2.3 圧縮強度試験方法

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

圧縮強度試験は材齢3, 7, 28日にて JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法にしたがって耐圧試験機を使用して行い、圧縮強度を測定した。

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

圧縮強度試験は材齢7, 28日にて JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法にしたがって耐圧試験機を使用して圧縮強度の測定を行った。写真-4.1は、圧縮強度試験の状況を示している。

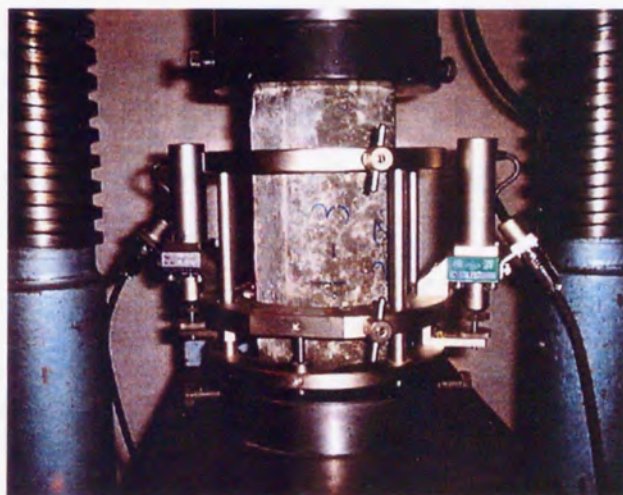


写真-4.1 圧縮強度試験の状況

4.2.4 実験結果及び考察

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

まず、コンクリートのフレッシュ性状について表-4.5に示す。

表-4.5 コンクリートのスランプ及び空気量

配合	W/C (%)	使用粗骨材	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	配合	W/C (%)	使用粗骨材	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)
a	45.7	角閃岩	7.5	1.5	c	27.3	角閃岩	5.0	1.9
		緑色片岩	6.3	1.8			緑色片岩	4.5	2.2
		安山岩	8.0	1.1			安山岩	4.5	1.8
		輝緑角閃岩	5.7	1.5			輝緑角閃岩	7.8	1.9
		硬質砂岩	4.3	1.8			硬質砂岩	4.6	1.7
		玄武岩	5.5	1.5			玄武岩	5.5	1.9
b	33.3	角閃岩	8.5	0.9	d	28.0	安山岩	3.5	2.3
		緑色片岩	9.5	2.2			結晶片岩	7.0	1.9
		安山岩	7.2	1.9			閃緑岩	14.0	1.7
		輝緑角閃岩	8.0	1.9			ひん岩	22.5	0.6
		硬質砂岩	4.8	1.0			硬質砂岩	14.1	1.8
		玄武岩	6.6	1.1			硬質砂岩	20.0	0.9
							石英斑岩	21.7	0.7
							硬質砂岩	22.3	0.5

以下、粗骨材物性値とコンクリートの圧縮強度の関係について物性値毎に考察していく。ただし、プロットは供試体3本の平均値である。

(i) 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度

図-4.1a～d は配合 a～d について使用した粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度の関係を示したものである。既往の研究に示したように粗骨材の比重は圧縮強度に対して大きく影響する³⁾が、比重と圧縮強度の間に一定の関係は認められない⁴⁾と報告されている。本検討においても粗骨材の表乾比重の増加にともない、コンクリートの圧縮強度が減少する状況と増加する状況が混在しており、明確な傾向は認められない。

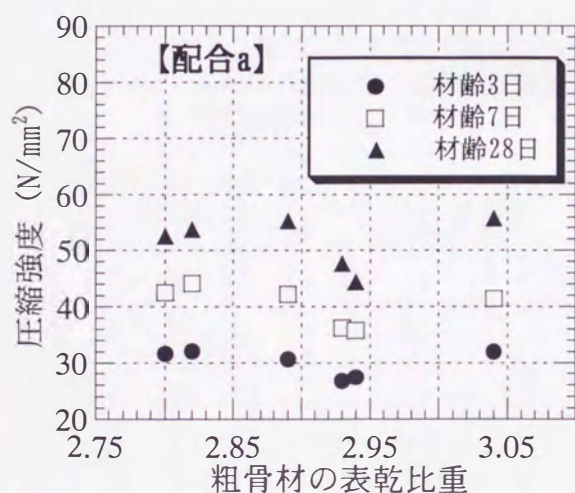


図-4.1a 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度の関係

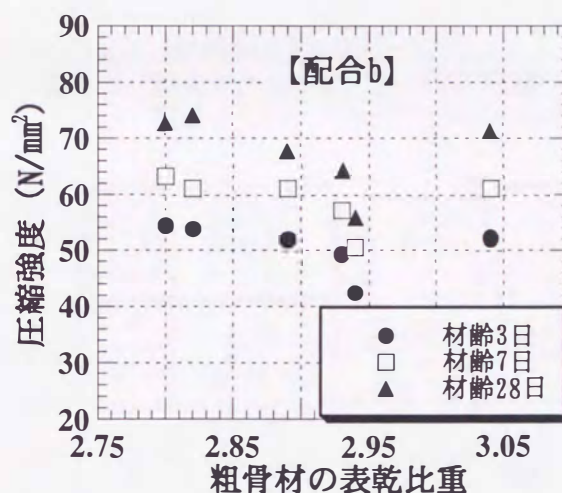


図-4.1b 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度の関係

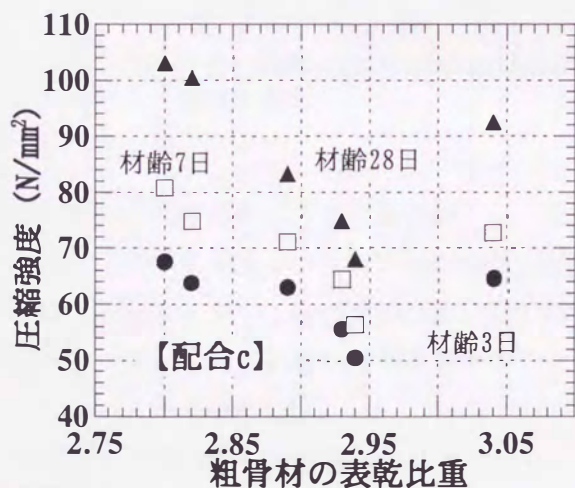


図-4.1c 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度の関係

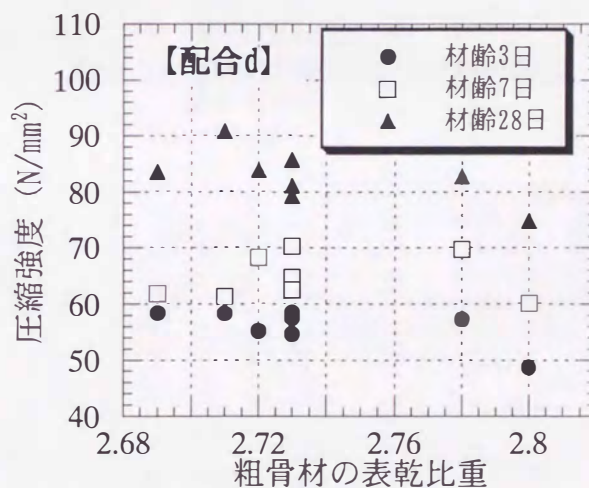


図-4.1d 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度の関係

(ii) 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度

図-4.2a～d は配合 a～d について、使用した粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係を示したものである。既往の研究では、吸水率が及ぼすコンクリートの圧縮強度への影響は大きく³⁾、吸

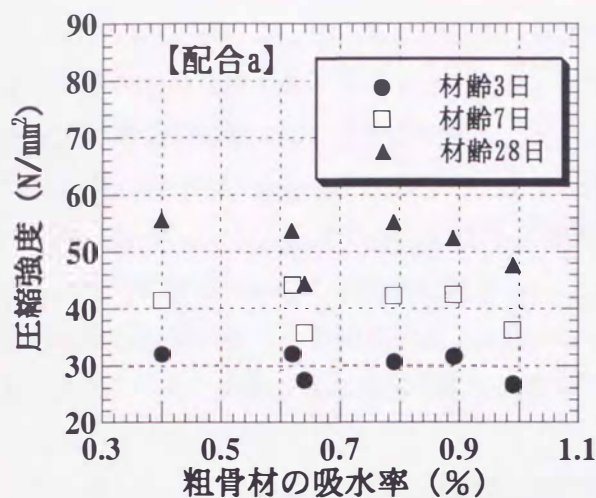


図-4. 2a 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係

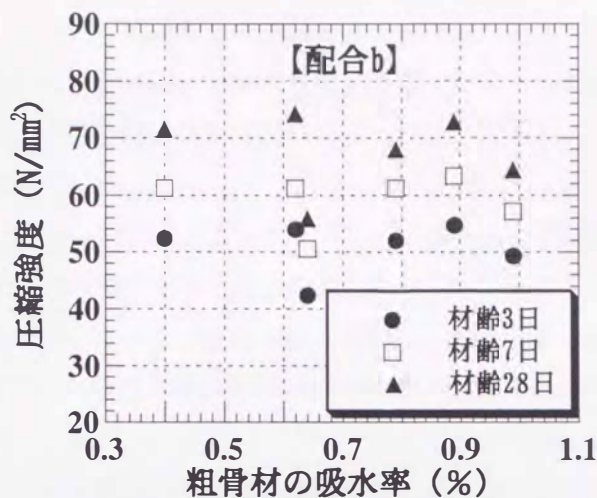


図-4. 2b 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係

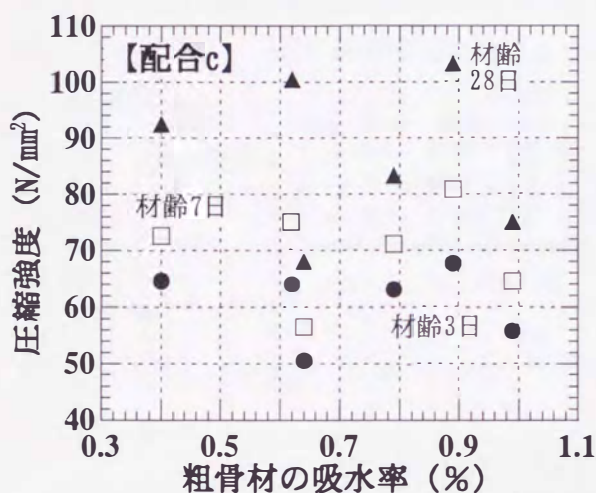


図-4. 2c 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係

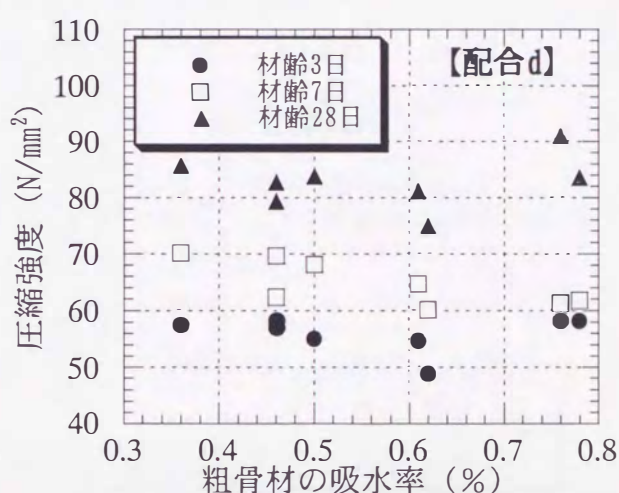


図-4. 2d 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係

水率とコンクリートの圧縮強度との間には一定の傾向が認められる⁵⁾という報告と、一定の関係は認められなかった⁴⁾⁶⁾という報告がある。本検討においては必ずしも粗骨材の吸水率が大きいことが圧縮強度が低下することに結びつくとは言えない。

(iii)粗骨材のすりへり減量とコンクリートの圧縮強度

図-4.3は、使用した粗骨材のすりへり減量と配合dを用いて作製したコンクリートの圧縮強度の関係を示している。なお、配合a～cについては粗骨材のすりへり減量の値が得ら

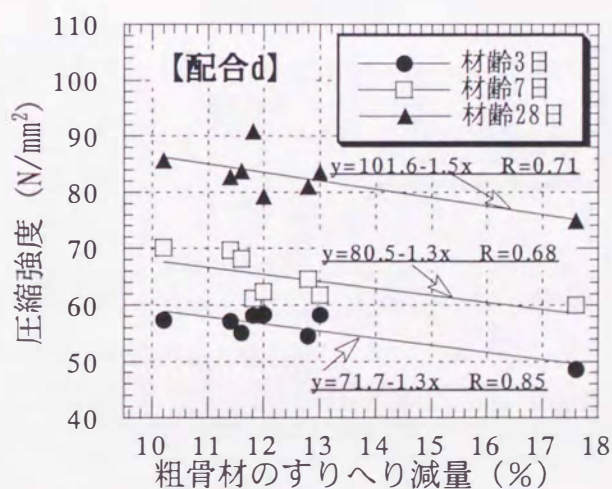


図-4.3 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの圧縮強度

れていないため示すことができなかった。図より、傾向としてはすりへり減量が大きくなると、コンクリートの圧縮強度も低下するようである。図中に示した直線は、すりへり減量とコンクリートの圧縮強度の関係を線形回帰したものであり、その回帰式及び相関係数Rは図中に示すとおりである。

(iv) 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度

図-4.4a～d は、使用した粗骨材の 400kN 破砕値と配合 a～d 毎のコンクリートの圧縮強度との関係を示したものである。他の物性値と比較して、400kN 破砕値が小さくなるのにもなってコンクリートの圧縮強度も大きくなる傾向が明確に認められる。図中に示した直線は両者の関係を線形回帰したものであり、その回帰式及び相関係数Rは図中に示すとおりである。図-4.4a～c は同一の骨材を使用しているが、配合 a～c になるにつれて、すなわちW/Cが小さくなるにつれて、図中の回帰直線の傾きが大きくなっていることから、高強度領域になるにしたがってその傾向が顕著になることが判る。さらに、図-4.4c の配合 c では、400kN 破砕値が 10%以下の領域において、材齢 28 日強度が著しく増加しているとより超高強度領域になるほど、粗骨材の 400kN 破砕値の影響が大きくなっていることが判る。このように、400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の間の相関係数は高く他の物性値と比較

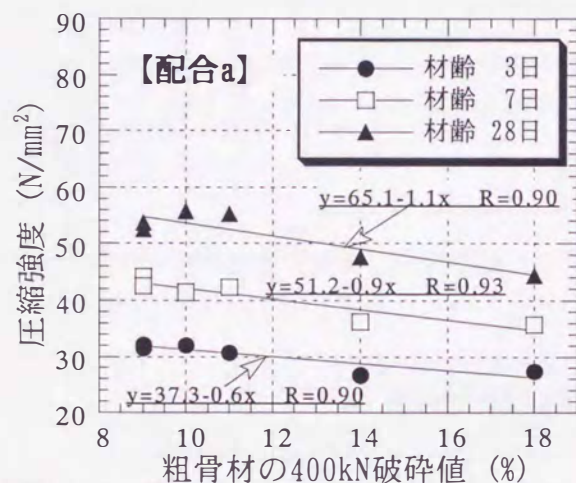


図-4.4a 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

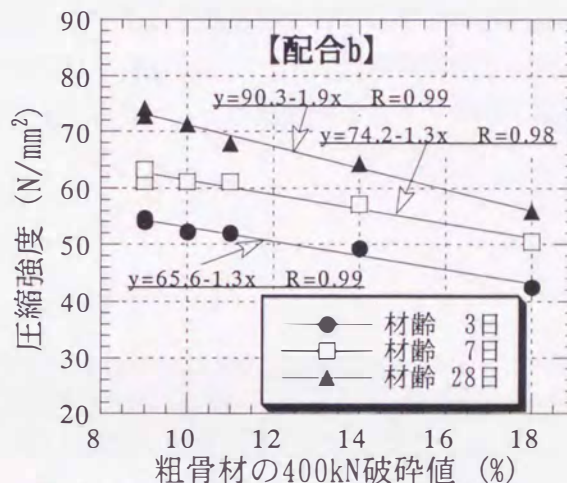


図-4.4b 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

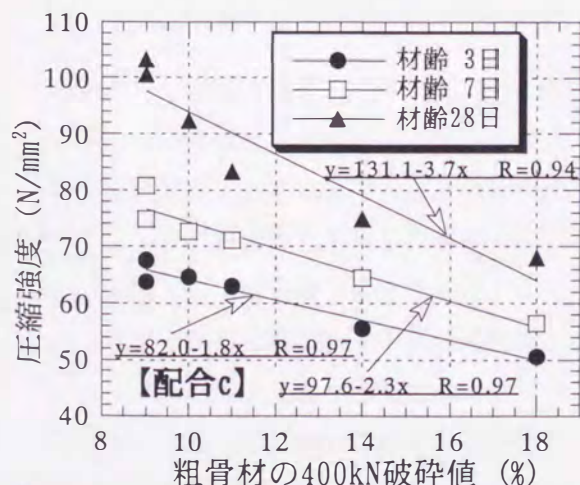


図-4.4c 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

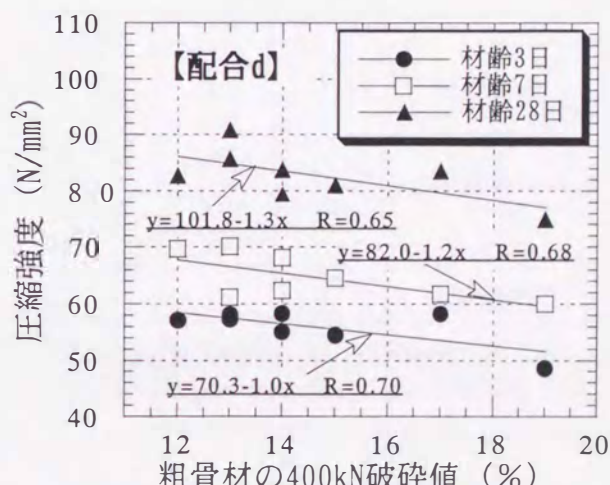


図-4.4d 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

して著しく明瞭な関係が見られ、超高強度領域においては骨材の影響が著しく大きくなる現象が確認できた。

図-4.5 に配合 d における粗骨材の 400kN 破砕値とモルタルの圧縮強度に対するコンクリートの圧縮強度の比の関係を示す。なお、図中の直線は両者の関係を線形回帰したものであり、その回帰式及び相関係数は図中に示すとおりである。ここで、モルタル強度とは配合 d のうち、粗骨材以外の材料を使用してコンクリートとは別に作製したモルタルの圧縮強度である。それぞれの骨材を使用した場合において、モルタル強度は一定として、圧縮強度比を求めているので、プロットの傾向は図-4.4d と等しい。モルタルの圧縮強度の平均値は材齢 7 日で 82.3N/mm²、28 日で 93.2N/mm² であり、本検討はすべての粗骨材の母岩圧縮強度がモルタル強度より大きいという場合に該当し、図中の圧縮強度比=1 がコンクリートの圧縮強度がモルタル強度と等しい状態を示すので、既往の研究に示されるようにコンクリート強度はモルタル強度と比較して低くなっていることがわかる。

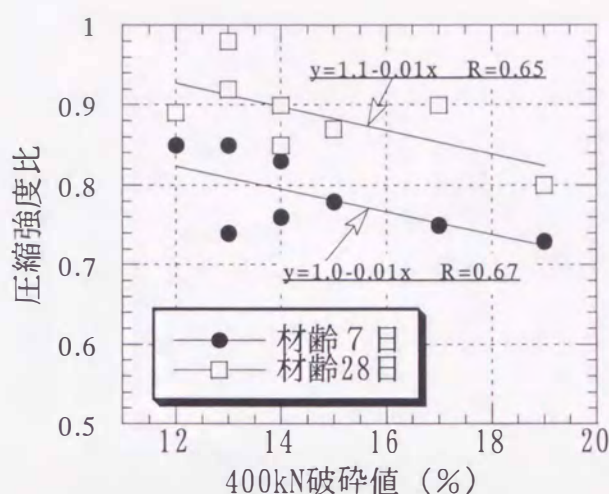


図-4.5 粗骨材の 400kN 破砕値と圧縮強度比の関係

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

まず、コンクリートのフレッシュ性状について表-4.6 に示す。

表-4.6 使用したコンクリートのスランプ 70-またはスランプ 及び空気量

配合	W/B (%)	使用粗骨材	スランプ 70- (mm)	空気量 (%)	配合	W/B (%)	使用粗骨材	スランプ (cm)	空気量 (%)
e	28	安山岩	665	2.0	f	50	安山岩	9.0	2.0
		結晶片岩	555	1.8			結晶片岩	8.5	3.2
		角閃岩	700	2.3			角閃岩	7.0	2.5
		軽量骨材	830	1.9			軽量骨材	14.0	3.1

(i) 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度

図-4.6 は、粗骨材の表乾比重とそれを使用して作製したコンクリートの圧縮強度との関係について配合 e 及び f をまとめて示したものである。図から判るように、軽量骨材の表乾比重が碎石骨材の半分程度であるためプロットが極端に離れてしまいが、表乾比重が大きくなるとコンクリートの圧縮強度も大きくなる傾向にあることが判る。しかし、軽量骨材と碎石を同一の図上で比較すると、表乾比重の差が大きいために碎石間での傾向が判

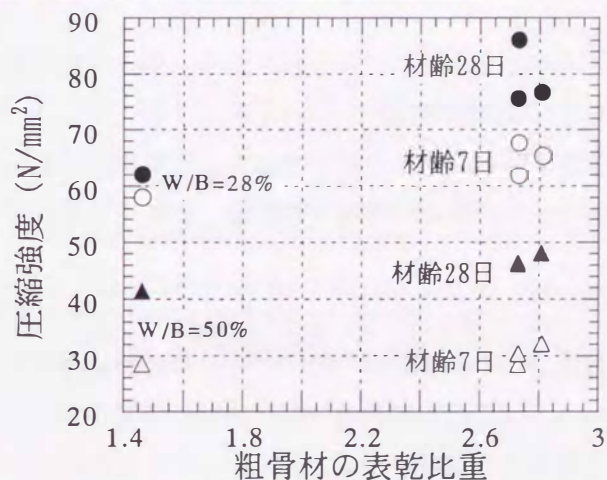


図-4.6 粗骨材の表乾比重とコンクリートの圧縮強度の関係

りづらくなっている。また、 W/B が小さくなるほど、すなわち高強度になるほど、図中の折れ線の傾きは若干大きくなっており、高強度領域での粗骨材の影響が著しくなっていることが認められる。

(ii) 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度

図-4.7 は粗骨材の吸水率とそれらを使用して作製したコンクリートの圧縮強度について配合 e と f をまとめて図示したものである。吸水率が大きいことが軽量骨材の特徴でもあるため、先に示した表乾比重とコンクリートの圧縮強度との関係と同様に、碎石と同じ図上に表すと、極端にプロットが離れてしまい、碎石間の関係が判りづらくなる。しかし、傾向としては吸水率が大きくなるとコンクリートの圧縮強度が低くなるようである。

(iii) 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの圧縮強度

図-4.8 は粗骨材のすりへり減量とそれらを使用して作製したコンクリートの圧縮強度について配合 e と f をまとめて図示したものである。図中の直線は両者の関係を線形回帰したものであり、その回帰式及び相関係数は図中に示すとおりである。図のように、 $W/B=50\%$ の材齢 7 日を除くと粗骨材のすりへり減量が小さいほど、それらを使用したコンクリートの圧縮強度は大きくなっており、相関係数も高い。すりへり減量は軽量骨材と碎石とで大きさに極端に差があるわけではなく、図-4.6 及び図-4.7 のようにプロットが碎石の場合

と極端に離れてしまうことがなく、碎石の場合と軽量骨材の場合を同じ図上にプロットしてそれらの関係について検討することが可能である。また、図中の $W/B=28\%$ と 50% とを比較すると、すりへり減量の値の変化に対するコンクリートの圧縮強度の変化の割合、すなわち図中の折れ線の傾きが $W/B=28\%$ のほうが大きくなっていることから、高強度になるほど粗骨材の影響が大きいことが判る。

(iv) 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度

図-4.9 は粗骨材の 400kN 破砕値とそれらを使用して作製したコンクリートの圧縮強度について配合 e と f をまとめて図示したものである。図中の直線は両者の関係を線形回帰したものであり、その回帰式及び相関係数は図中に示すとおりである。図からわかるように、 $W/B=50\%$ の材齢 7 日を除くと相関係数もかなり高く、両者の相関性の高さが確認できる。傾向は図-4.8 の場合とかなり似ている。



図-4.7 粗骨材の吸水率とコンクリートの圧縮強度

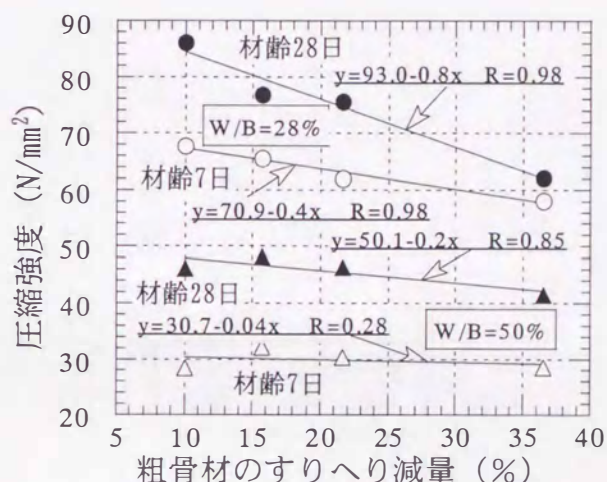


図-4.8 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの圧縮強度

これは、この検討で使用した砕石 3 種類と軽量骨材の物性値のなかでもすりへり減量と 400kN 破砕値がかなり高い正の相関を示したことによるものである。したがって、すりへり減量の場合と同様に、砕石の場合と軽量骨材の場合を同時に図示しても全く違和感がない。図から判るように、400kN 破砕値が小さい場合ほどコンクリートの圧縮強度は大きくなっており、特に $W/B=28\%$ の材齢 28 日では 400kN 破砕値が 9 % の場合にコンクリートの圧縮強度が著しく大きくなっている。このように、高強度領域になるほど粗骨材の影響が著しいことがよく判る。

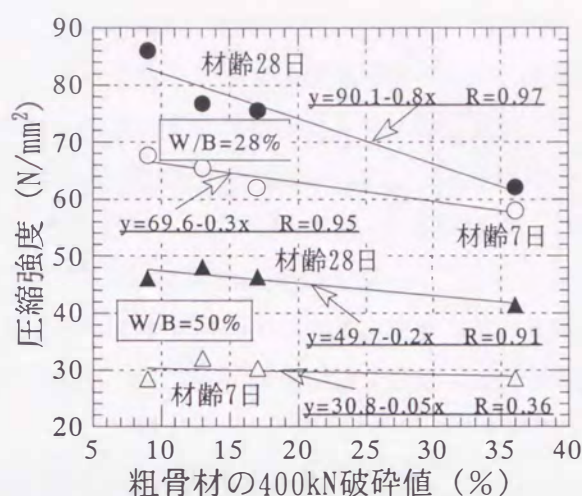


図-4.9 粗骨材の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

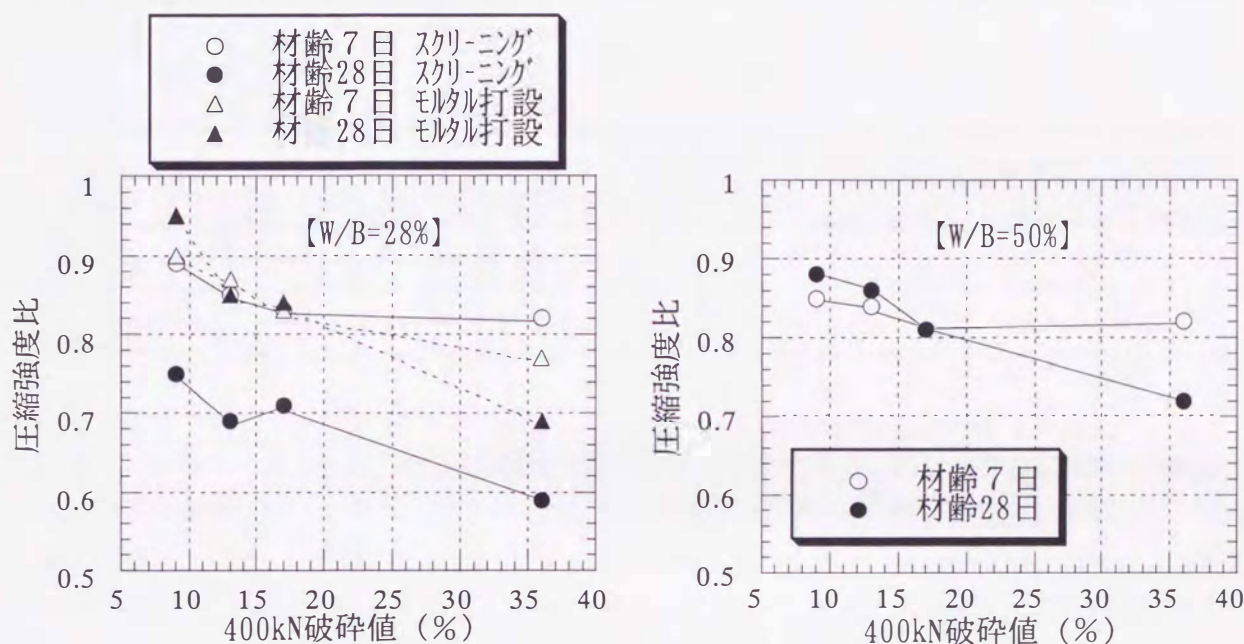


図-4.10 粗骨材の 400kN 破砕値と圧縮強度比（モルタルの圧縮強度に対するコンクリートの圧縮強度）の関係

図-4.10 はコンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響について詳細に検討するために、モルタルの圧縮強度に対するコンクリートの圧縮強度を圧縮強度比として粗骨材の 400kN 破砕値との関係を配合別に表したものである。なお、ここで使用したモルタル強度は図の凡例中に示すようにウェットスクリーニングして作製した供試体から測定した強度とコンクリートとは別にモルタルを打設して作製した供試体から測定した強度の 2 種類を使用した。前者は、粗骨材種類毎の圧縮強度測定用コンクリートの打設時に、練りあがったコンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングすることで得られたモルタルを $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体用型枠に詰め、コンクリート供試体と同様の養生条件で所定の材齢まで養生し、圧縮試験を行うことで得た強度である。一方、後者はコンクリートとは別にモルタルのみを練り混ぜ、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体用型枠に詰め、コンクリート供試体と同様の養生条

件で所定の材齢まで養生し、圧縮試験を行うことで得た強度である。W/B=50%については2種類のモルタル強度がほぼ等しかったため、ウェットスクリーニングして得たモルタル強度を使って求めた圧縮強度比のみを示したが、W/B=28%についてはウェットスクリーニングしたモルタルの圧縮強度がモルタルのみを作製した場合（通常のモルタル）と比較して20N/mm²程度高い強度を示したため、2種類のモルタル強度を使用して求めた圧縮強度比を示した。それぞれのモルタル強度については表-4.7に示すとおりである。表中（ ）内に示す値は、スクリーニング供試体の平均圧縮強度に対するモルタル供試体の圧縮強度の比を示す。表からわかるように、W/B=50%ではスクリーニングモルタルと通常のモルタルの圧縮強度はほぼ等しいが、W/B=28%の場合、特に28日強度ではスクリーニングモルタルの圧縮強度が高くなる傾向にある。

表-4.7 スクリーニングモルタルと通常のモルタルの圧縮強度の違い

W / B = 2 8 %								
使用 粗骨材	ウェットスクリーニングした場合 (φ 5cm)				モルタルのみを作製した場合 (φ 10cm)			
	7日強度	平均強度	28日強度	平均強度	7日強度	平均強度	28日強度	平均強度
安山岩	76.4	75.4	115.2	109.8	74.6	75.0 (0.99)	89.8	90.2 (0.82)
結晶片岩	76.7		111.1		75.2		89.6	
角閃岩	77.7		106.9		75.2		91.1	
軽量骨材	70.9		106.0					
W / B = 5 0 %								
使用 粗骨材	ウェットスクリーニングした場合 (φ 5cm)				モルタルのみを作製した場合 (φ 10cm)			
	7日強度	平均強度	28日強度	平均強度	7日強度	平均強度	28日強度	平均強度
安山岩	33.5	36.0	52.7	55.9	37.7	37.5 (1.04)	58.3	57.2 (1.02)
結晶片岩	38.0		56.1		37.6		58.1	
角閃岩	37.5		57.2		37.1		55.4	
軽量骨材	35.1		57.6					
(単位 : N/mm ²)								

(単位 ; N/mm²)

表-4.7 ではモルタルのみを作製した場合には、コンクリートの場合に近い条件での試験を想定して、φ10cmの供試体を使用した。一般にモルタルの強度測定にはφ5cmの供試体を使用するので、ウェットスクリーニングした場合にはφ5cmの供試体を使用した。そこで、供試体寸法の違いによる影響について確認するために行なった試験の結果を表-4.8に示す。これは、今回の実験とは異なるコンク

表-4.8 供試体寸法の違いによるモルタルの圧縮強度の違い

φ5cmの供試体の場合（単位； N/mm ² ）							
ウェットスクリーニングした場合				モルタルのみを作製した場合			
7日強度	平均強度	28日強度	平均強度	7日強度	平均強度	28日強度	平均強度
77.0	78.3	111.6	111.4	77.7	〔0.95〕 74.0	107.5	〔0.97〕 107.7
80.9		112.1		72.3		109.1	
77.0		110.5		72.1		106.5	
φ10cmの供試体の場合（単位； N/mm ² ）							
ウェットスクリーニングした場合				モルタルのみを作製した場合			
7日強度	平均強度	28日強度	平均強度	7日強度	平均強度	28日強度	平均強度
78.5	77.2 (0.99)	102.2	104.0 (0.93)	71.2	〔0.92〕 (0.97)	102.9	〔0.93〕 (0.96)
77.2		103.2		73.5		101.9	
76.0		106.5		71.5		105.6	

() 内 ; φ5との強度比、 [] 内 ; φ5ウェットスクリーニングの場合との強度比

リートの配合であるが、 $W/B=28\%$ で高炉スラグ微粉末をセメントに対する置換率 50% で使用したモルタルの強度である。

表-4.8 中に示した強度比を見ると、 $\phi 5\text{cm}$ と $\phi 10\text{cm}$ の供試体寸法の違いによる強度の違いは供試体の作製方法によらず 5% 前後であり、28 日強度の方がその差が大きい。また、供試体の作製方法による強度の違いは、ウェットスクリーニングを行なった場合がモルタルのみの場合と比較して強度が大きく出ており、 $\phi 10\text{cm}$ のモルタルのみの場合の強度は $\phi 5\text{cm}$ の場合のウェットスクリーニングの場合の強度と比較して 8% 程度低下することがわかる。このようにウェットスクリーニングを行った場合とモルタルのみを作製した場合とで強度に差が生じるのは、竹村ら⁷⁾によって「コンクリートをウェットスクリーニングすることによって粗骨材の一部が取り除かれるため単位セメント量を増した結果となり強度が増加する。その増加はスランプが大きい配合ほど大きい。」と説明されている。 $W/B=50\%$ の場合には両者の差はかなり小さいが、 $W/B=28\%$ の場合の 28 日強度では両者の差が大きいのは高流動コンクリートと普通コンクリートの違いによるものと考えられる。

また、図-4.5 及び図-4.10 の圧縮強度比はどちらも 0.8~0.9 程度であり、モルタル強度と比較してコンクリート強度が低下する度合いは高強度コンクリートの場合も高流動コンクリートの場合もほぼ等しいことがわかる。さらに、粗骨材の 400kN 破砕値が小さい場合ほど、コンクリートの圧縮強度が大きくなるという傾向は圧縮強度比で考えても変わらず、400kN 破砕値がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響が大きいこと及び高強度領域ほど粗骨材の影響が大きいことがよく判る。また、図-4.10 より軽量骨材を使用した場合はモルタル強度より骨材強度の方が小さいために、コンクリートの圧縮強度をモルタル強度と比較して示すと碎石の場合よりも強度低下が著しいことが判る。

以上、本項の総括として、粗骨材物性値とコンクリートの圧縮強度の関係について、回帰式と相関係数をまとめて表-4.9 及び表-4.10 に示す。表-4.9 中の σ_r は圧縮強度比を示す。

表-4.9 物性値とコンクリートの圧縮強度または圧縮強度比との回帰式と相関係数(スラグ未使用)

指標となる物性値(x)	配合	材齢 3 日		材齢 7 日		材齢 28 日	
		回帰式	相関係数	回帰式	相関係数	回帰式	相関係数
すりへり減量	d	$\sigma=71.7-1.3x$	0.85*	$\sigma=80.5-1.3x$	0.68	$\sigma=101.6-1.5x$	0.71*
400kN 破砕値	a	$\sigma=37.3-0.6x$	0.90*	$\sigma=51.2-0.9x$	0.93*	$\sigma=65.1-1.1x$	0.90*
	b	$\sigma=65.6-1.3x$	0.99*	$\sigma=74.2-1.3x$	0.98*	$\sigma=90.3-1.9x$	0.99*
	c	$\sigma=82.0-1.8x$	0.97*	$\sigma=97.6-2.3x$	0.97*	$\sigma=131.1-3.7x$	0.94*
	d	$\sigma=70.3-0.99x$	0.70	$\sigma=82.0-1.2x$	0.68	$\sigma=101.8-1.3x$	0.65
	d	—	—	$\sigma_r=1.0-0.01x$	0.67	$\sigma_r=1.1-0.01x$	0.65

表-4.10 物性値とコンクリートの圧縮強度との回帰式と相関係数(スラグ使用)

指標となる物性値(x)	W/B (%)	材齢 7 日		材齢 28 日	
		回帰式	相関係数	回帰式	相関係数
すりへり減量	28	$\sigma=70.9-0.4x$	0.98*	$\sigma=93.0-0.8x$	0.98*
	50	$\sigma=30.7-0.04x$	0.28	$\sigma=50.1-0.2x$	0.85
400kN 破砕値	28	$\sigma=69.6-0.3x$	0.95*	$\sigma=90.1-0.8x$	0.97*
	50	$\sigma=30.8-0.05x$	0.36	$\sigma=49.7-0.2x$	0.91*

上記表のように求めた回帰式の相関係数から相関の有無を判断するために相関係数の有意性の検定を行った。これには数値表の r 表を用い、求めた相関係数と r 表から求められる $r(\phi, \alpha)$ とを比較し、 $|r|$ の方が大きければ、“相関がある”と判断した⁸⁾。ただし、自由度(ϕ)は対になっているデータの組数を n とすると $\phi = n - 2$ とし、有意水準 α は 0.05 とした。その結果、有意水準 0.05 で有意、つまり相関がないとはいえないと判断されたものを、表中の相関係数の数値に “*” 記号を添えて示した。

表-4.9 に示される高炉スラグ微粉末を使用しない高強度コンクリートでは、配合 d に相関がないケースが見られるが、他のケースでは“有意水準 0.05 で相関がないとは言えない”状態であり、破碎値とコンクリートの圧縮強度との密接な関係が認められる。また、表-4.10 に示される高炉スラグ微粉末を使用する高流動コンクリートでは、比較として用いた $W/B=50\%$ の場合に“相関はない”ケースが目立つのに対して、 $W/B=28\%$ では“有意水準 0.05 で相関がないとは言えない”状態であり高い相関を示している。このことから、特に高強度領域においては、すりへり減量及び破碎値がコンクリートの圧縮強度と密接な関係にあることが認められる。

以上のように、粗骨材の 400kN 破碎値やすりへり減量はコンクリートの圧縮強度と相関性の高い直線的な関係にあり、それを利用して粗骨材種類とコンクリート強度の関係を論じる際には他の物性値を用いる場合よりもその関係を容易に把握することができる。それは、高強度コンクリートであっても、高流動コンクリートであっても同様であった。また、コンクリートの圧縮強度をモルタル強度に対する圧縮強度比で表すことで高強度領域ほど粗骨材の影響が大きいことが明確となった。

ここで、なぜコンクリートの圧縮強度に対して 400kN 破碎値の影響が大きくなるかという点について考察する。一般に、400kN 破碎値は粗骨材の強さを示す指標といわれるが、母岩の圧縮強度との相関は明確ではない。400kN 破碎値を求める試験方法から考えて、これは粒子の集合体としての強さを示しているのではないかと考えられる。すなわち、試験時の粗骨材の詰め込みとコンクリート中への粗骨材の詰め込み状態が似たような状況であることから、圧縮強度との相関が高くなったのではないかと考えられる。また、すりへり減量は同じく粗骨材の強さを表わすと言われるが、骨材表面の強固さを示す指標であると考えられる。したがって、モルタルとの付着性に影響し、モルタルと粗骨材間のボンドクラックの発生に影響することで、圧縮強度との相関が高くなるのではないかと考えられる。

図-4.11~4.14 は、本試験結果におけるコンクリートの圧縮強度のばらつき範囲を示したものである。太い実線が求めた回帰式から得られ

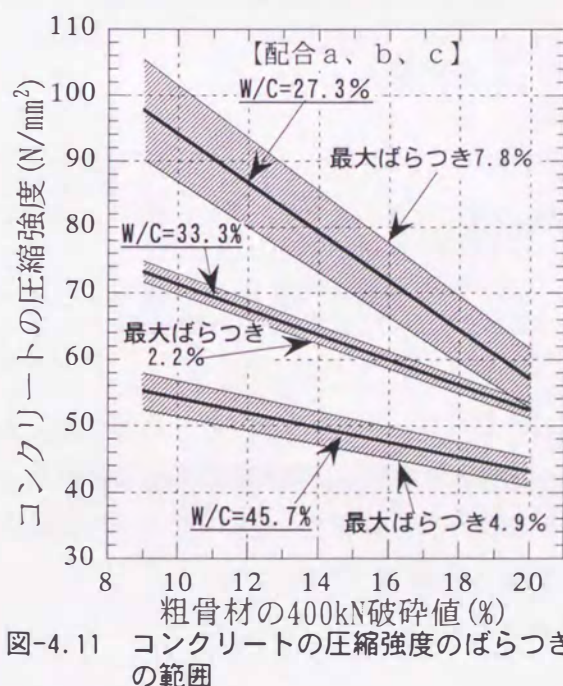


図-4.11 コンクリートの圧縮強度のばらつきの範囲

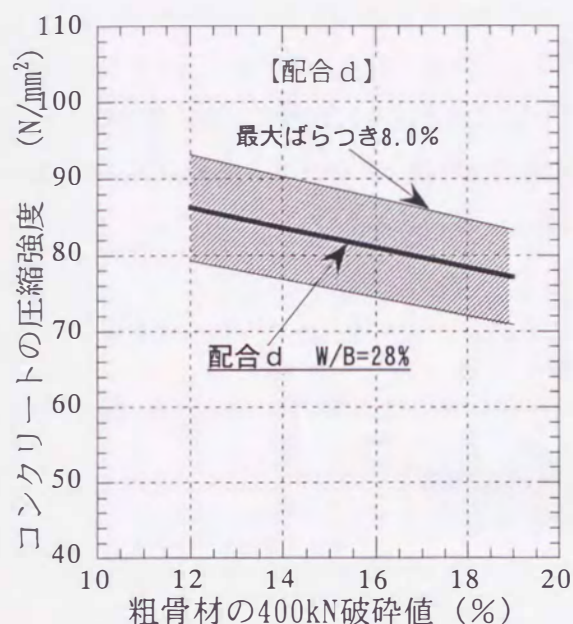


図-4.12 コンクリートの圧縮強度のばらつきの範囲

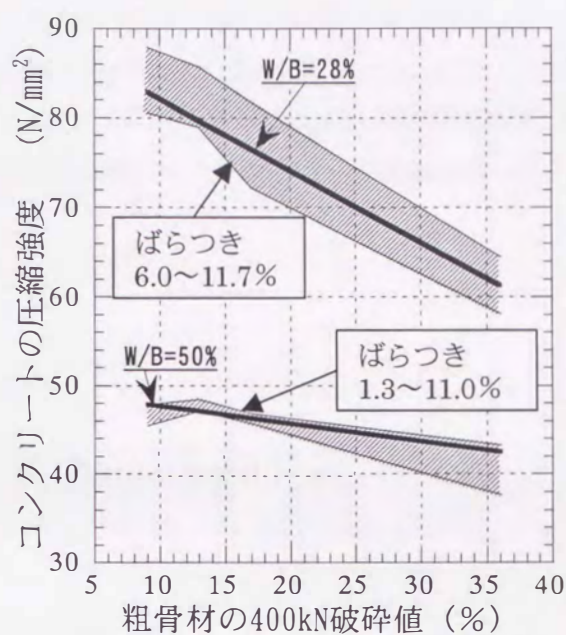


図-4.13 コンクリートの圧縮強度のばらつきの範囲(スグ混和)

た値であり、その値に対して測定値がどの程度ばらついたかを示したもので、図-4.11 及び 4.12 はばらつきの最大値を斜線囲みで示し、図-4.13 は強度のばらつきを各粗骨材ごとに斜線囲みで示したものである。これらの図より、高強度領域では、強度がばらつきやすいことがわかる。また、軽量骨材を用いた場合(図-4.13 の破砕値 36)がばらつきが最も大きいことから粗骨材の影響がコンクリートの圧縮強度に対して大きいことがうかがえる。

最後に、本節の検討のまとめとして図-4.14 にコンクリートの圧縮強度に関して、ある強度を満たすことが可能である粗骨材を選定する一例を示す。図中に示す①のように、コン

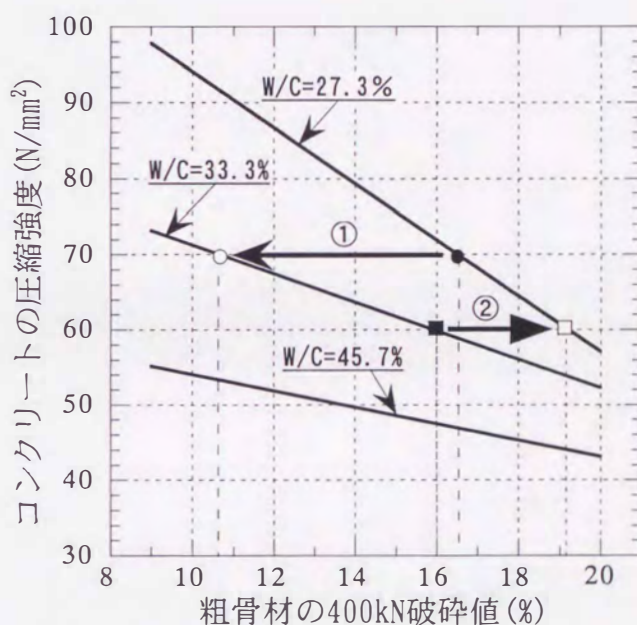


図-4.14 コンクリートの圧縮強度に対する粗骨材の選定手法についての概念図

クリートの圧縮強度として 70N/mm^2 を必要とする場合、破砕値が 16~17% の粗骨材を使用すれば水セメント比は 27.3% 程度必要であるが、破砕値が 10~11 程度の高品質な粗骨材を使用すれば水セメント比は 33.3% 程度まで大きくできる。通常、粗骨材の価格は破砕値が変化してもほとんど同等であるので、セメント量が減らせる分だけ後者の方が経済的になる。また、②は圧縮強度 60N/mm^2 程度を必要とする場合に、破砕値 16 程度の粗骨材を使用して水セメント比 33.3% でコンクリートを作製しよ

うとしたが、破碎値 19 程度の粗骨材しか入手できない場合の対策について示したものである。この場合、破碎値が 19 という若干品質が低下する粗骨材で所要の圧縮強度を満たすためには、水セメント比を 27.3%まで小さくすれば可能になることを示している。このように、粗骨材の 400kN 破碎値とコンクリートの圧縮強度の関係から、効率的な材料選定や配合設計が可能になることが明確となった。

4. 3 セメント水比、あるいは結合材水比と圧縮強度との関係への粗骨材品質の影響

本節においては、前節で検討した粗骨材品質とコンクリートの圧縮強度の関係を踏まえて、セメント水比、あるいは結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係が使用する粗骨材の品質によってどのような影響を受けるのかを明らかにすることを目的として、前節と同様に混和材を使用しない高強度コンクリート及び混和材として高炉スラグ微粉末を使用する高流動コンクリートについて、セメント水比あるいは結合材水比を変化させた場合の圧縮強度と粗骨材品質の関係について検討を行った。

4.3.1 使用材料

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.18g/cm^3 ）、細骨材は河口砂（比重 2.59、吸水率 1.43、粗粒率 2.72）、粗骨材は表-4.1 の角閃岩(A) ($G_{\max}=20\text{mm}$)を使用した。なお、減水剤はトリアジン系高性能減水剤を使用した。

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ ）、細骨材は海砂（比重 2.58、粗粒率 3.08）、粗骨材は表-4.11 に示す 5 種類 ($G_{\max}=20\text{mm}$)を使用した。なお、混和材として高炉スラグ微粉末（比重 2.90、比表面積 $6,070\text{cm}^2/\text{g}$ ）をセメント質量に対して置換率 50%で使用し、減水剤は減水剤 1（ポリカルボン酸エーテル系高性能 A E 減水剤）及び減水剤 2（リグニンスルホン酸系 A E 減水剤）を使用した。使用量は減水剤 1 が結合材質量の 1%、減水剤 2 が $250\text{ml}/\text{C}=100\text{kg}$ とした。

表-4.11 使用した粗骨材の物性値一覧

記号	骨材岩種	比重	吸水率 (%)	すりへり減量 (%)	400kN 破砕値 (%)	粒形判定実積率 (%)
O	安山岩	2.73	0.72	10.0	9	57.1
P	結晶片岩	2.81	0.52	15.7	13	59.4
Q	角閃岩	2.73	1.00	21.6	17	59.0
R	軽量骨材	1.46	12.6	36.5	36	55.0
W	硬質砂岩	2.73	0.35	12.4	12	56.8

4.3.2 コンクリートの配合及び供試体作製方法

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

セメント水比とコンクリートの圧縮強度の関係について検討するために、コンクリートの配合は表-4.12 に示すように、単位セメント量を $350, 450, 550\text{ kg/m}^3$ 、単位水量を 140 あるいは 145 kg/m^3 から 5 kg/m^3 ずつ 170 あるいは 165 kg/m^3 までそれぞれ変化させ、合計 17 種類とした。細骨材率は各セメント量に対して 44, 39, 33%と一定とし W/C の変化に対しては補正しないものとした。

表-4.12 コンクリートの配合

セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	混和剤量 (l)
350	145, 150, 155, 160, 165, 170	41.4~48.6	44.0	3.0
450	140, 145, 150, 155, 160, 165	31.1~36.7	39.0	
550	145, 150, 155, 160, 165	26.4~30.0	33.0	

コンクリートの練混ぜは可傾式ミキサで行い、減水剤も他の材料と同時に投入して3分間練混ぜた。供試体はφ10×20cmの円柱供試体として打設後すぐに養生室内で湿潤養生を始め、キャッピングは超早強セメントを用いて行い、材齢1日で脱型し、試験材齢まで水温20℃の水中養生を行った。

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

表-4.13に示すように単位水量及び単位粗骨材量を一定とし、水結合材比を23, 28, 33, 40, 50%と変化させた。W/B=28%及び50%については、表-4.11に示した5種類全ての粗骨材を使用した。W/B=23%及び40%については表-4.9中の角閃岩(Q)及び軽量骨材(R)の2種類を、W/B=33%については角閃岩(Q)、軽量骨材(R)及び硬質砂岩(W)の3種類を使用した。また、混和剤はW/B=23~40%に対してはポリカルボン酸系高性能AE減水剤を結合材質量の1%、W/B=50%に対してはリグニンスルホン酸系AE減水剤を結合材100kgあたり250mlの割合で使用した。なお、目標空気量はW/B=23~40%に対して2%、W/B=50%に対しては5%と設定した。

表-4.13 コンクリートの配合及び使用粗骨材

使用 粗骨材	W/B (%)	s/a (%)	Vg (l/m ³)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	スラグ	細骨材	粗骨材	混和剤
Q及びR	23.0	41.7	330	170	369	369	608	900	7.38 kg
0~R, W	28.0	45.8		170	304	304	720	900	6.08 kg
Q, R, W	33.0	48.4		170	258	258	797	900	5.16 kg
Q及びR	40.0	50.7		170	213	213	875	900	4.26 kg
0~R, W	50.0	50.6		170	170	170	872	900	850 ml

Vg: 単位粗骨材容積、スラグ: 高炉スラグ微粉末

コンクリートの練混ぜは二軸強制練りミキサで行い、骨材、結合材を投入後、水及び混和剤を投入して3分間練混ぜた。供試体はφ10×20cmの円柱供試体として打設後すぐに養生室内で湿潤養生を始め、材齢1日で脱型し試験材齢まで水温20℃の水中養生を行った。なお、供試体の載荷面は圧縮試験直前に端面研磨機を用いて平滑に仕上げた。

4.3.3 圧縮強度試験方法

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

圧縮強度試験は材齢3, 7, 28日にてJIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法にしたがって耐圧試験機を使用して行い、圧縮強度を測定した。

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

圧縮強度試験は材齢7, 28日にてJIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法にしたがって耐圧

試験機を使用して圧縮強度の測定を行った。なお、供試体は試験直前まで湿布で覆って乾燥させないようにした。

4.3.4 実験結果及び考察

(1) 高炉スラグ微粉末未使用の高強度コンクリート

表-4.14 には作製したコンクリートのスランプ及び空気量について示す。

表-4.14 作製したコンクリートのスランプ及び空気量

単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
350	145	41.4	44	2.4	2.4
	150	42.9		3.5	2.5
	155	44.3		3.3	2.2
	160	45.7		13.0	1.1
	165	47.1		13.0	1.6
	170	48.6		13.8	1.6
450	140	31.1	39	3.3	1.9
	145	32.2		8.2	1.7
	150	33.3		9.0	1.6
	155	34.4		13.2	1.3
	160	35.6		18.0	1.1
	165	36.7		22.6	0.9
550	145	26.4	33	2.8	1.7
	150	27.3		14.4	1.5
	155	28.2		17.7	1.2
	160	29.1		20.8	1.0
	165	30.0		22.0	0.7

図-4.15 は、セメント水比とコンクリートの圧縮強度の関係を示したものであり、図中の実線はプロットを直線近似したものである。図に示されるように、セメント水比が3近辺で近似直線の傾きが小さくなり折れる傾向が見られる。これは軽量骨材コンクリートに見られるような現象であり⁹⁾、骨材の影響により強度低下が生じたことを示すものである。

また、図中の近似式をまとめて示したのが表-4.15 である。表中の σ はコンクリートの圧縮強度を示し、 R は相関係数を示す。

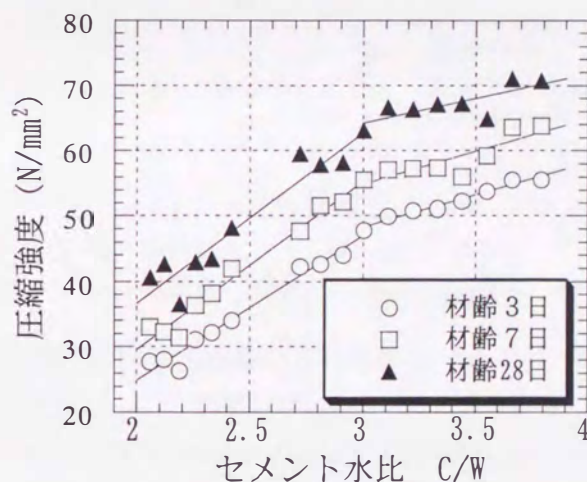


図-4.15 セメント水比とコンクリートの圧縮強度の関係

表-4.15 図-4.11 中の近似直線一覧

	$C/W < 3$		$C/W \geq 3$	
材齢3日	$\sigma = 22.3(C/W) - 19.7$	$R = 0.99$	$\sigma = 9.92(C/W) + 18.5$	$R = 0.98$
材齢7日	$\sigma = 25.9(C/W) - 22.2$	$R = 0.99$	$\sigma = 10.1(C/W) + 24.6$	$R = 0.85$
材齢28日	$\sigma = 26.1(C/W) - 15.6$	$R = 0.96$	$\sigma = 7.60(C/W) + 41.4$	$R = 0.78$

近似直線の傾きを見てみると、 $C/W < 3$ の領域では材齢が進むにつれて傾きがわずかであるが増加している。一方、 $C/W \geq 3$ の領域では材齢が進むにつれて傾きが減少する傾向にある。このことから前節で示した高強度領域になるほど粗骨材の影響が著しくなり強度低下が生じることが確認できる。

(2) 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリート

表-4.16 に作製した高流動コンクリートのスランプフロー、あるいはスランプ及び空気量について示す。

表-4.16 作製したコンクリートのスランプフロー、スランプ及び空気量

	W/B=23%		W/B=28%		W/B=33%		W/B=40%		W/B=50%	
	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
粗骨材										
安山岩	—	—	665	2.0	—	—	—	—	9.0	2.0
結晶片岩	—	—	555	1.8	—	—	—	—	8.5	3.2
角閃岩	465	1.6	700	2.3	640	1.2	415	2	7.0	2.5
軽量骨材	700	1.0	830	1.9	730	1.3	680	1.2	14.0	3.1
硬質砂岩	—	—	605	1.3	620	1.4	—	—	4.0	2.6

次に、図-4.16 は結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係を、粗骨材として角閃岩を使用した場合について示したものである。プロットは各 B/W ごとに 3 体ずつプロットし、その平均値を折れ線で結んで表示している。(1) の高強度コンクリートの場合と同様に、結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係は直線的に増加するのではなく、W/B が小さくなるほど圧縮強度が頭打ちになっていることが判る。これについては、後ほどモルタル強度との関係から検討を行う。

続いて図-4.17 は粗骨材として軽量骨材を使

用した場合の結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係について示したものである。図-4.16 の粗骨材が角閃岩の場合と比較して材齢 28 日強度の低下が著しいことが明らかである。特に、材齢 7 日の $B/W = 4.35$ ($W/B = 23\%$) の場合及び材齢 28 日の $B/W \geq 3$ ($W/B \leq 33\%$) の領域で圧縮強度が直線的に増加せず低下が著しい。それらは全てコンクリートの圧縮強度がほぼ 60N/mm^2 より大きいことが共通しており、モルタル強度と骨材の強度とが深くかかわっていることが考えられる。ここで、粗骨材として角閃岩を使用したコンクリートの圧縮強度と水結合材の関係を基にして結晶片岩、安山岩及び硬質砂岩を使用した場合の分布を図-4.18 より考えてみる。ここで、4 種類の粗骨材を破砕値が小さい順に並べると、安山岩、硬質砂岩、結晶片岩、角閃岩の順であり、実際に測定した破砕値の値はそれぞれ 9, 12,

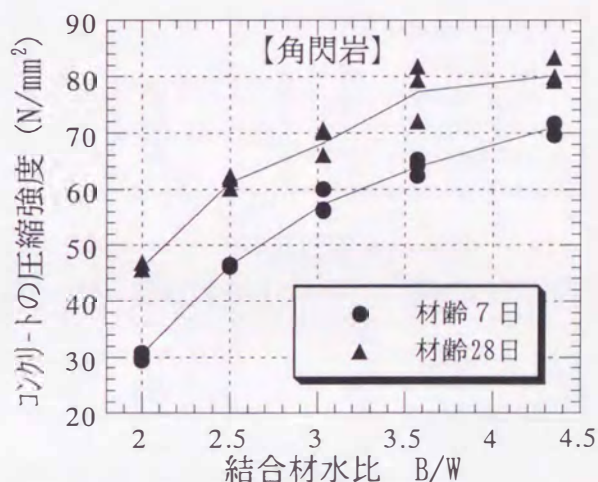


図-4.16 結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係（粗骨材：角閃岩の場合）

13, 17である。B/Wによってデータがないものがあるが、安山岩、硬質砂岩、結晶片岩のプロットはほぼ角閃岩の近似線の少し上に位置しており、角閃岩よりわずかに強度が大きいことを示している。これは、4.2節で示した粗骨材の破砕値が及ばずコンクリートの圧縮強度への影響と同様であり、破砕値が小さい粗骨材を使用した場合の方が圧縮強度が高くなるという傾向と一致している。

また、結合材水比と圧縮強度との関係もほぼ角閃岩の場合と同様であり、高強度領域において強度の頭打ち傾向を示している。

そこで、その傾向が粗骨材の影響であることを示すために、結合材水比とモルタルの圧縮強度の関係を示したものが図-4.19である。凡例に示す「モルタル打設」は圧縮強度測定用のコンクリートの配合の中から粗骨材以外の材料を計量し、モルタルを作製した場合の圧縮強度を示し、「スクリーニング」は圧縮強度測定用のコンクリートを作製する際に、呼び寸法 4.75mm のふるいを使用してコンクリートをウェットスクリーニングすることでモルタルを得て供試体を作製した場合の圧縮強度を示している。なお、圧縮強度測定用の供試体は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体とした。図中には両者の平均値も合わせてプロットしているが、それは図に示されるように「モルタル打設」と「スクリーニング」に若干の強度差が存在したからである。そこで、「スクリーニング」の場合の圧縮強度に対する「モルタル打設」の場合の圧縮強度の比をとると、材齢7日では0.92~1.16、材齢28日では0.93~1.07であった。4.2節では、材齢28日での比が1.22であったが、本節の実験では一概に「スクリーニング」の場合が高い強度を示すとは言い切れなかったため、各B/Wごとに両者の平均値を求め、図中にそれらを結ぶ線を書く

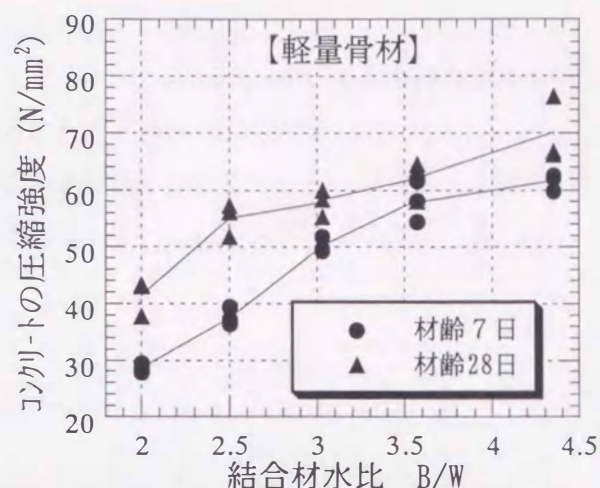


図-4.17 結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係 (粗骨材：軽量骨材の場合)

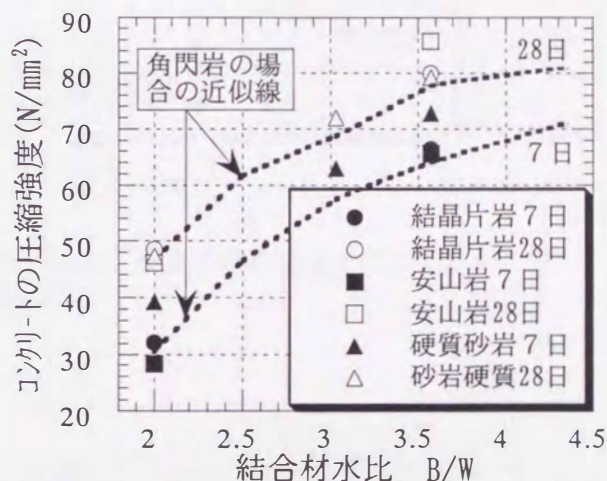


図-4.18 結合材水比とコンクリートの圧縮強度の関係 (砕石4種類の比較)

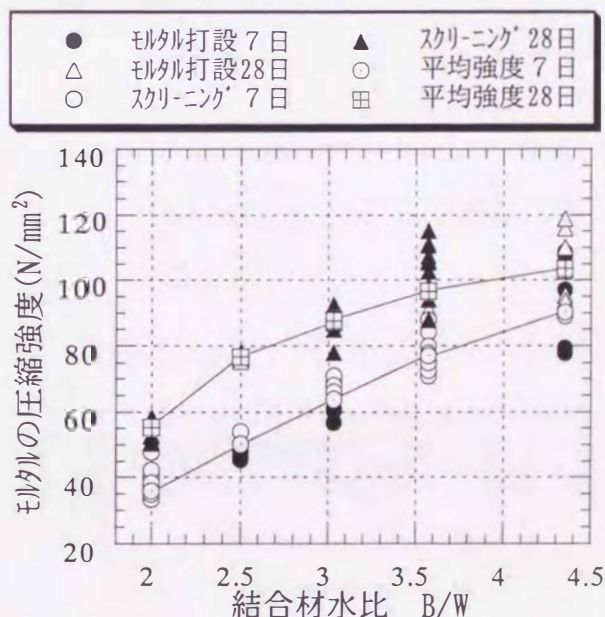


図-4.19 結合材水比とモルタルの圧縮強度の関係

き入れた。それによると、結合材水比とモルタルの圧縮強度は一般に言われているようにほぼ直線で分布する傾向であった。材齢 28 日の場合が若干頭打ちを示しているけれども、強度のばらつきや供試体数を考慮するとほぼ直線に分布していると考えて良さそうである。

そこで、モルタル強度に対するコンクリートの圧縮強度の比について示したのが、図-4.20 である。コンクリートの圧縮強度をそれぞれのモルタルの圧縮強度で除した値がプロットされている。

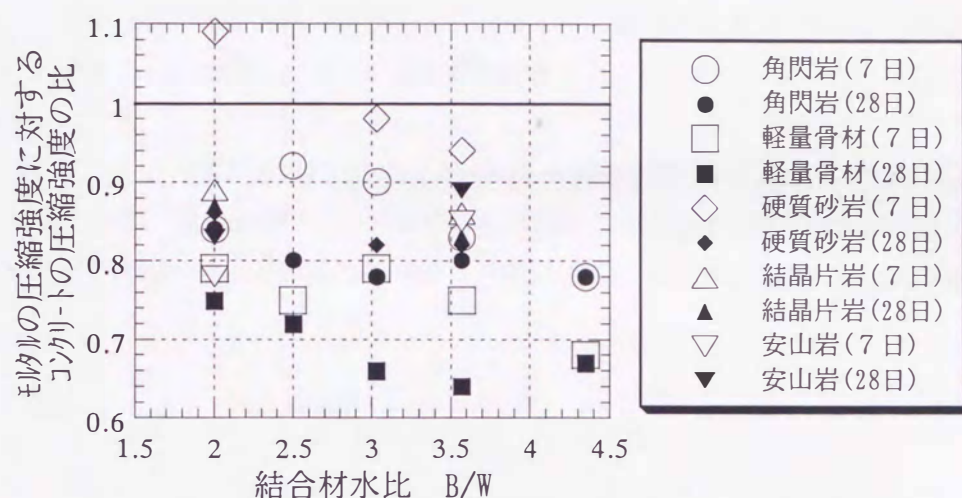


図-4.20 粗骨材種類毎の結合材水比とモルタルの圧縮強度に対するコンクリートの圧縮強度の比

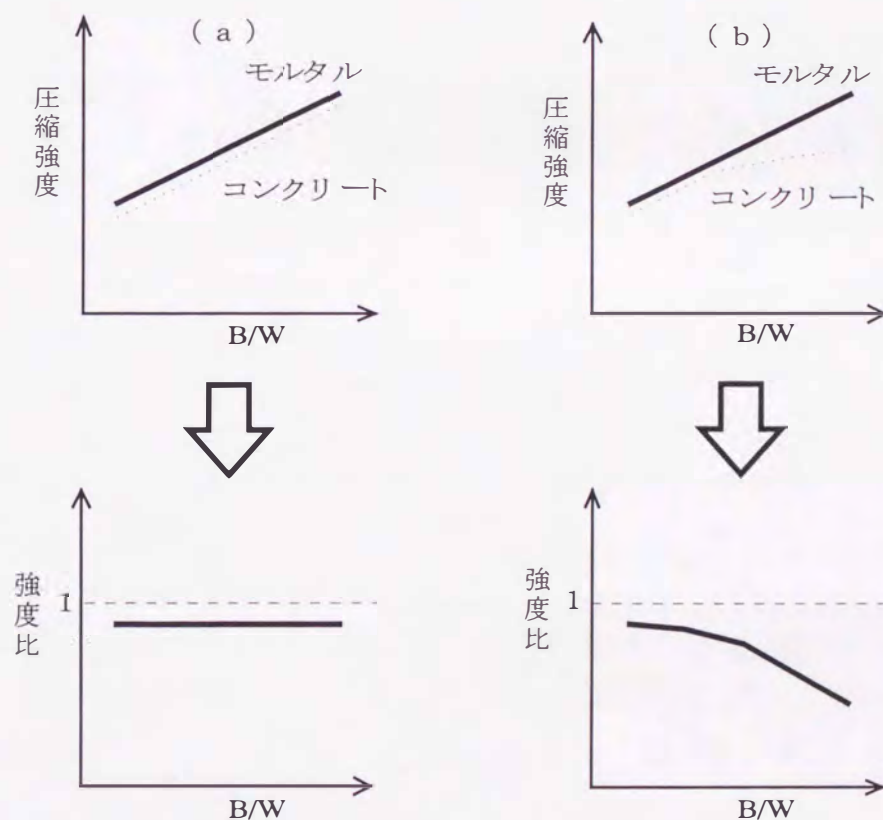


図-4.21 モルタルとコンクリートの圧縮強度と強度比との関係

図-4.21 は、図-4.20 の傾向を分かりやすく示すために、描いた概念図である。図-4.21 (a) はモルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度が結合材水比の増加に伴って大きくなっていき、しかも、モルタルとコンクリートの圧縮強度はほぼ等しい割合で増加している場合を示す。その場合には、モルタルの圧縮強度に対するコンクリートの圧縮強度の比は、ほぼ一定となり、図上ではX軸に平行に近い線で示されることになる。一方、図-4.21 (b) はモルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度が結合材水比の増加に伴って大きくなっていくが、結合材水比が大きくなるにつれてモルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度の差が大きくなっていく場合を示す。これは、モルタルに粗骨材が混入することにより、圧縮強度が低下する場合に該当する。

本実験においても、結合材水比が大きい領域において、モルタルの圧縮強度に対してコンクリートの圧縮強度が低下する現象が見られている。図-4.21 の概念を図-4.20 に当てはめてみると、プロットが右肩下がりか水平に近い傾向を示していることから、高強度領域ほど粗骨材が混入することによる圧縮強度の低下度が大きいということであり、粗骨材の影響が顕著に現れることが確認できる。