

報告 石灰石骨材の微粒分量が汎用強度コンクリートの物性に及ぼす影響

多田 克彦*1・吉本 稔*2・林 建佑*3・河野 広隆*4

要旨: 石灰石骨材は、硬度が比較的低く、長距離輸送中の積み込みに伴い微粒分量が増加しやすい傾向にある。そこで、その特性がコンクリートに与える影響を把握するために、石灰石粗骨材の微粒分量を変化させ、コンクリートのフレッシュ性状、強度性状および耐久性状に及ぼす検討を行った。その結果、微粒分量が増加した場合、ブリーディングの抑制に効果があること、圧縮強度が増加すること、乾燥収縮抵抗性、凍結融解抵抗性および中性化抵抗性に与える影響はほとんどないことが分かった。

キーワード: 石灰石骨材、微粒分量、ブリーディング、圧縮強度、乾燥収縮、凍結融解、中性化

1. はじめに

石灰石骨材は、硬度が比較的低く、主な輸送手段が海上での長距離輸送であることから、輸送経路における積み替え作業中の落下により微粒分量が増加しやすい傾向にある¹⁾。輸送経路が異なると同じ製品であったとしても微粒分量は異なることになり、その特性がコンクリートに与える影響を把握しておくことは重要である。そこで、本研究では水セメント比 50%の汎用強度のコンクリートを対象に、石灰石粗骨材の微粒分量を 1%、JIS A 5005 規格値上限の 5%および JIS A 5005 規格値を超える 15%までの範囲で変化させ、石灰石粗骨材の微粒分量がコンクリートのフレッシュ性状、強度性状および耐久性状に及ぼす検討を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に示す。石灰石粗骨材の産地は、コンクリート用粗骨材としての出荷量の実績を考慮して、北海道地区、四国地区および九州地区から各 1 産地を選定し、計 3 種類とした。細骨材は、山砂単体、山砂と石灰石砕砂の混合砂の 2 種類とした。使用した骨材の物理的性質を表-2 に示す。

石灰石粗骨材の微粒分は、G1~G3 の種類ごとに粗骨材をディスクミルで粉碎し、網ふるい 75 μm を通過するものを使用した。粗骨材の微粒分量の調整は、まず粗骨材を水洗いしもともと含まれる微粒分を除去したのち、所定の微粒分量となるよう、粗骨材の表乾調整時に、あらかじめ乾燥させて作製した微粒分をかき混ぜながら添加した。

コンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートの配合は、W/C=50%、粗骨材絶対容積は微粒分量によらず

380 L/m³ で一定とし、微粒分量による影響を明確に把握するため、混和剤量は一定とした。

表-1 使用材料

使用材料	内容
セメント(C)	普通ポルトランドセメント
粗骨材(G)	G1: 石灰石砕石 2005(北海道地区) G2: 石灰石砕石 2005(四国地区) G3: 石灰石砕石 2005(九州地区)
細骨材(S)	S1: 山砂単体 S2: 石灰石砕砂+山砂(比率 5:5)
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
空気量調整剤	ポリアルキレングリコール系

表-2 骨材の物理的性質

種類	記号	岩石	絶対乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
粗骨材	G1	石灰石	2.68	0.54	60.6	6.66	0.5
	G2		2.69	0.27	62.8	6.59	0.2
	G3		2.69	0.38	61.7	6.66	0.6
細骨材	S1	山砂	2.61	1.10	67.4	2.75	0.1
	S2	石灰石	2.62	1.22	66.8	3.44	5.9
		山砂	2.53	2.20	—	2.21	1.4

表-3 配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	G 絶対容積 (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	50	380	170	340	784	1026

2.2 試験水準

石灰石粗骨材の微粒分量は、G1~G3 の各粗骨材につき 1%、5%および 8%を設定し、それぞれ S1 もしくは S2 を組み合わせた 18 水準に加えて、粗骨材の微粒分量 15%の G1 と S2 を組み合わせた 1 水準の計 19 水準とした。

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 CS チーム 主任研究員 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 CS チーム チームリーダー 工修 (正会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 セメント技術チーム 修士 (理工学) (正会員)

*4 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

2.3 試験項目および試験方法

(1) フレッシュ性状

スランブは JIS A 1101 に、空気量は JIS A 1128 に、ブリーディング量は JIS A 1123 に、凝結時間は JIS A 1147 にそれぞれ準拠して行った。

(2) 強度性状

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠して行った。

(3) 耐久性

耐久性として、乾燥収縮試験は JIS A 1129-2 に、凍結融解試験は JIS A 1148 の A 法に、中性化試験は JIS A 1153 に準拠して行った。耐久性試験は、石灰石粗骨材の微粒分量が 8% および 15% の水準でのみ実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

(1) スランブ、空気量

スランブ試験の結果を図-1 に示す。全ての水準で、石灰石粗骨材の微粒分量の増加に伴い、スランブ値が若干減少する傾向であった。また、細骨材 S2 を用いた場合、S1 と比較してスランブ値が小さくなった。ここで、細骨材の微粒分に着目すると、表-2 に示したように、S2 の微粒分量が多いことが分かる。図-2 に細骨材の微

粒分量を含んだ単位容積あたりの微粒分量とスランブ値の関係を示す。図より、コンクリート中の微粒分量が $100\text{kg}/\text{m}^3$ 増加するに従って、スランブ値は 5cm 減少することが分かる。既往の文献によれば、スランブにおよぼす微粒分の影響としては、表面積の増大や細粒化にともなう凝集作用により拘束水が増大すること、骨材から溶出する各種イオンあるいは粘土鉱物により化学混和剤の吸着量に影響を及ぼすことなどが指摘されている²⁾。しかし、本検討で用いた骨材は、石灰石骨材であり、粘土鉱物などを含んでおらず、主成分も CaCO_3 であるため、溶出イオンの影響も小さいものと考えられる。以上のことより、本実験におけるスランブの低下は微粒分量増加による表面積の増大が影響しているものと考えた。なお、微粒分量が増加すると粒形判定実積率が向上することが指摘されており³⁾、実際は粒形判定実積率を一定とした本実験結果よりもスランブが出やすい傾向にあると思われる。

空気量試験の結果を図-3 に示す。既往の研究では、増加した微粒分に AE 剤が吸着されることで、空気量が減少するとされている⁴⁾。しかし、本検討においては、微粒分量や骨材種類の影響による空気量の変動には、明確な傾向は認められなかった。一方、空気量とスランブの関係を図-4 に示す。図から、1 点 (図中黒点：

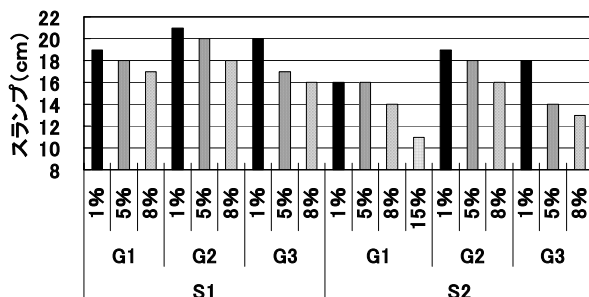


図-1 スランブ試験結果

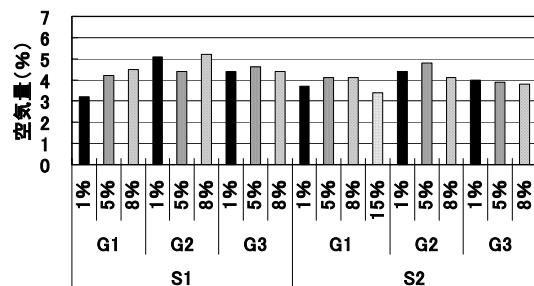


図-3 空気量試験結果

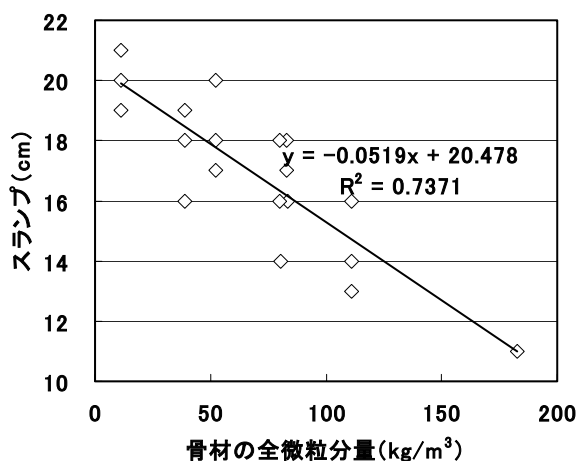


図-2 骨材の全微粒分量とスランブの関係

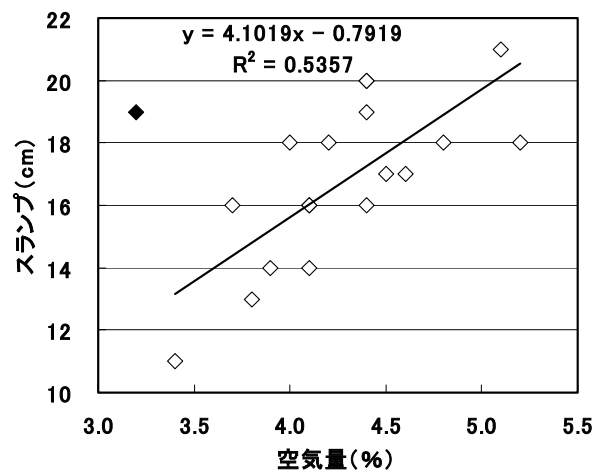


図-4 空気量とスランブの関係

配合 G1-1-S1) を除いて、空気量の増加に伴いスランプが大きくなる傾向が認められた。またその変動幅は、空気量が1%増加するに従い、スランプは4cm程度増加することが分かった。この関係を用いて、空気量を4.5%で一定と考えた場合の補正スランプ値と微粒分量との関係を図-5に示す(ここでは、上記のG1-1-S1を除いている)。図より、空気量を一定にした場合のスランプ値は、コンクリート中の微粒分量が100kg/m³増加するに従って、3cm減少することが分かる。

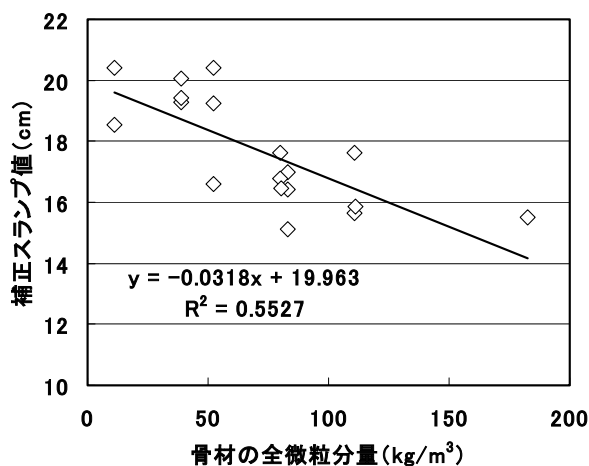


図-5 骨材の全微粒分量と補正スランプの関係

(2) ブリーディング, 凝結

ブリーディング試験の結果を図-6に示す。図中、棒グラフはブリーディング量を、記号はブリーディングの生じる経過時間を示している。図より、細骨材や粗骨材の種類に関わらず微粒分量が増加するに従って、ブリーディング量を抑制し、経過時間も短縮する傾向が認められた。その低下率を見ると、微粒分量1%の場合のブリーディング量を100%とした場合、微粒分量5%のものでは最大で37%、微粒分量8%のものでは最大で62%、微粒分量15%の場合は67%であった。また、細骨材種類で分類すると、S1よりS2を用いた場合にブリーディング量が少ない傾向が認められた。そこで、スランプの場合と同様に、細骨材の微粒分量を含む骨材の微粒分量とブリーディング量との関係を図-7に整理する。すなわち、砂岩、安山岩および石灰岩の碎石粉を、最大で細骨材に対して60kg/m³程度置換して検討を行い、この範囲において骨材の微粒分量の増加がブリーディングの低減に効果的であることを示している(例えば⁵⁾)。本検討では最大で、微粒分量182kg/m³までの範囲で同様の傾向が認められた。

凝結試験の結果を図-8に示す。図中で黒塗りの記号は始発時間を、白抜きの記号は終結時間を示している。凝結の始発から終結までの時間は、1.9hrから2.6hrの間

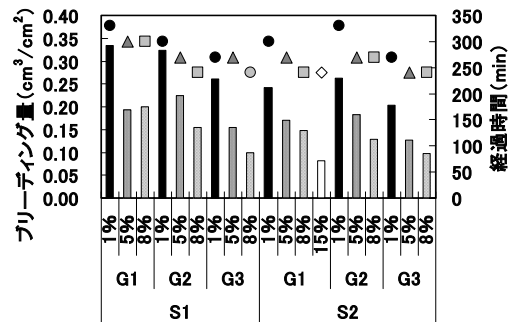


図-6 ブリーディング量ならびに経過時間

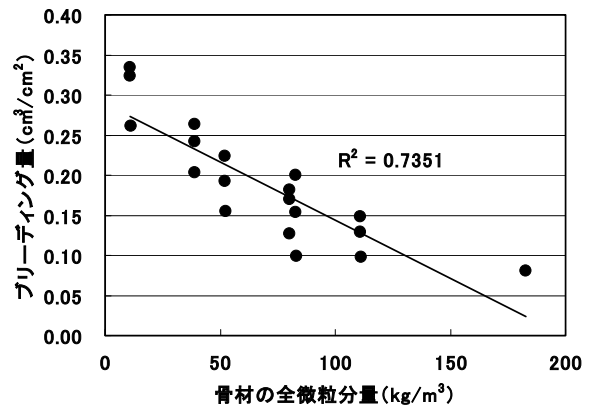


図-7 骨材の全微粒分量とブリーディング量

で細骨材・粗骨材種類および微粒分量の違いによる明確な差は認められなかった。凝結時間は、微粒分量の増加に伴い早くなる結果となった。図-9に微粒分量と凝結時間の関係を示す。これによると、微粒分量が100kg/m³増加するに従って、凝結時間は始発、終結ともに60min程度短縮することが分かる。一般に、凝結時間に影響を及ぼす要因としてモンモリロナイト族の鉱物、有機不純物および塩化物イオンの存在が挙げられている²⁾ものの、本検討で用いた骨材の微粒分にこれらの物質は含まれていない。本検討において、微粒分量の増加に伴って凝結時間が短くなったのは、微粉末がセメント粒子のフロックの中に入り込み、セメント粒子を引き離すことでセメントが水和しやすい状態となったものと考えられた²⁾。

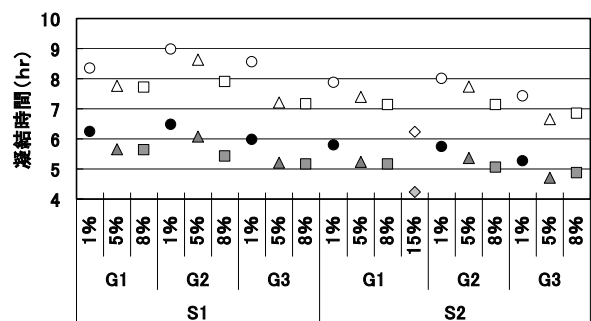


図-8 凝結時間試験結果

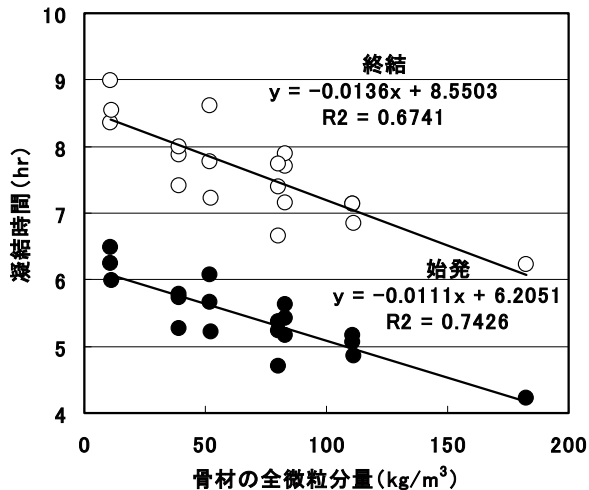


図-9 骨材の全微粒分量と凝結時間

3.2 硬化性状

(1) 圧縮強度

圧縮強度の結果を図-10に示す。細骨材 S1 と粗骨材 G1 の組合せを除いた全ての水準で、微粒分量の増加に伴い圧縮強度が増加する傾向を示した。また、これは微粒分量を15%まで増加した水準で顕著であった。細骨材の種類に着目すると、石灰石砕砂と山砂の混合砂である S2 を用いたコンクリートの方が、山砂単体の S1 を用いたものと比較して圧縮強度が高くなる傾向にあった。この一因として、細骨材の微粒分量が考えられた。図-11に微粒分量と圧縮強度の関係を示す。ここでは、微粒分量を①粗骨材の微粒分量、②石灰石の微粒分量（①に石灰石砕砂の微粒分量を加算）、③骨材の微粒分量（②に山砂の微粒分量を加算）に分けて考えた。この結果より、微粒分量と圧縮強度に相関関係があることが分かる。そこで、図-11のy軸を拡大し、材齢別に微粒分量と圧縮強度の関係を図-12 および図-13 に示す。図の凡例の横にそれぞれの相関係数を示す。図によれば、③骨材の微粒分量を用いた場合に、最も高い相関係数が得られており、粗骨材ならびに細骨材の微粒分量が増加するに従って、コンクリートの圧縮強度が増加することが分かった。また、②と③の比較により、山砂の微粒分も石灰石の微粒分と同様に強度増進に効果的であることが分かる。石灰石微粉末をセメント用混和材として用いた場合の強度増進メカニズムは、エーライトの初期水和を促進させることとされているが⁶⁾、石灰石以外の碎石粉添加による強度増進は、辻らや木村らの報告にも示されており、そのメカニズムは微粉末効果であるとされている^{5,7)}。材齢7日と91日の結果を比較すると、7日の圧縮強度の方が微粒分量との相関が高いことが分かる。このことは、微粉末効果によるコンクリートの強度増進が、初期において大きいことを示している。

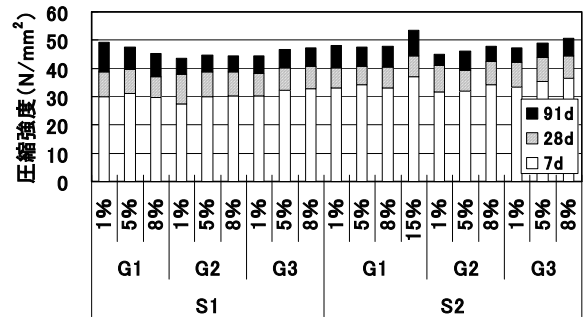


図-10 圧縮強度

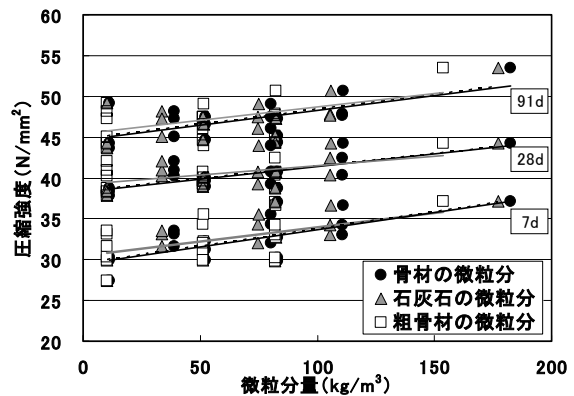


図-11 微粒分量と圧縮強度の関係

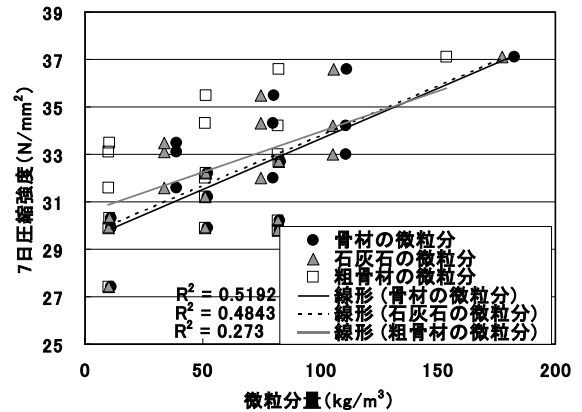


図-12 微粒分量と圧縮強度（7日）の関係

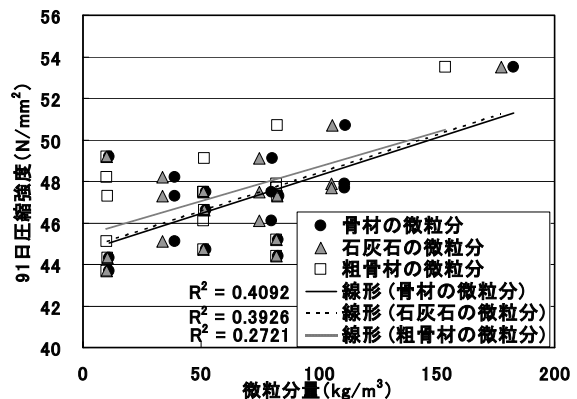


図-13 微粒分量と圧縮強度（91日）の関係

(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-14に示す。図中には土木学会⁸⁾ならびに建築学会⁹⁾における圧縮強度と静弾性係数の関係式を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は圧縮強度の傾向とは異なり、粗骨材、細骨材の種類によって、明確な違いは認められなかった。図より、土木学会の関係式と比較した場合は、全ての水準で高い静弾性係数を示した。石灰石骨材を用いたコンクリートは、骨材自体の静弾性係数が高いため、他の骨材を用いた場合より静弾性係数が高くなることが知られている¹⁰⁾。一方、建築学会の関係式と比較すると、若干ではあるが静弾性係数が低い値を示した。ここで用いた建築学会の関係式は、石灰石骨材を用いた場合の係数 $k_1=1.2$ を乗じたものであるが、これと比較すると静弾性係数が低くなる傾向を示した。また、それは微粒分量の多い水準で顕著であった。この原因としては、微粒分量が増加することにより、変形に対する拘束力の高い石灰石骨材が減少していることが考えられた。ただし、全ての水準で、建築学会で許容されている80%範囲内の値であった。

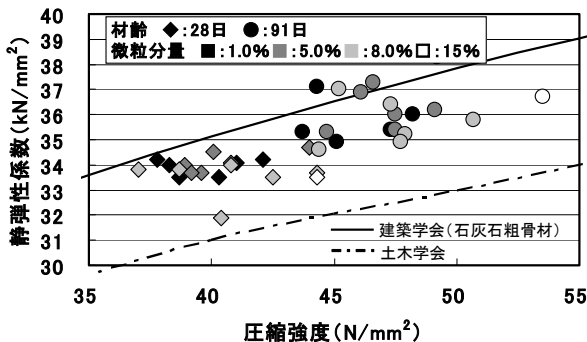


図-14 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.3 耐久性状

(1) 乾燥収縮

乾燥収縮試験の結果を図-15に示す。この結果より、全ての水準で乾燥材齢182日における乾燥収縮ひずみは $400\sim 500 \times 10^{-6}$ 程度であり、骨材の微粒分量を8%、15%まで増加させた場合であっても、一般に報告されている石灰石骨材を用いたコンクリートと同等に乾燥収縮ひずみが小さい¹¹⁾ことが分かった。微粒分量の違いに着目すると、微粒分量が8%から15%に増加した場合でも、乾燥収縮ひずみはほぼ同等であった。一般に、石灰石微粉末をセメントに対して外割り置換した場合、つまり骨材の一部を石灰石の微粒分に置換した場合は、コンクリートの乾燥収縮は変化しない、もしくは低減するとされている¹²⁾が、本検討においても同様の傾向であった。

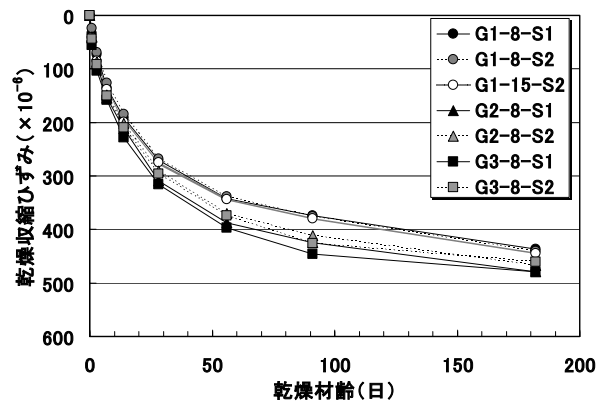


図-15 乾燥収縮ひずみ

(2) 凍結融解

凍結融解試験(A法)の結果を図-16に示す。図に示すように、微粒分量が8%以上の石灰石骨材を使用したコンクリートの凍結融解300サイクルにおける相対動弾性係数は、最低でも78%を有しており、一般環境下での使用は問題ないことが分かる。しかし、土木学会のコンクリート標準示方書では水で飽和されるなど厳しい環境下に限って、建築学会のJASS5では、凍結融解作用を受けるコンクリートに対しては、300サイクルにおける相対動弾性係数が85%以上必要であるとしており、本検討における一部の配合では注意する必要がある。微粒分の影響に着目すると、粗骨材G1と細骨材S2の水準で、微粒分量8%の相対動弾性係数が92であるのに対して、15%は91であり、微粒分増加の影響はほとんどないものと考えられた。

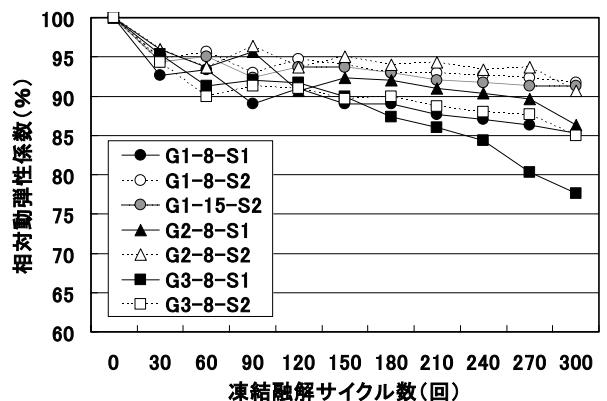
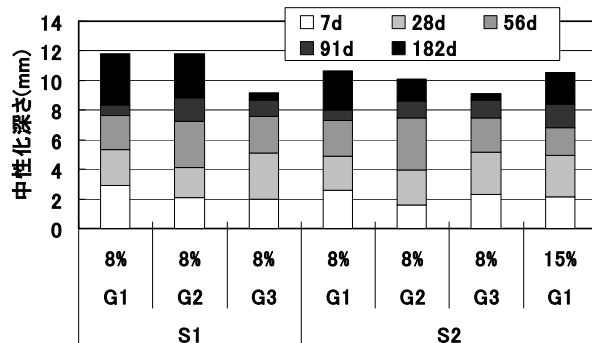


図-16 凍結融解

(3) 中性化

促進中性化試験の結果を図-17に示す。微粒分量による中性化深さの違いを見ると、微粒分量が8%と15%では中性化深さに差は認められなかった。一方、細骨材種

類や粗骨材種類による影響は明確であり、細骨材ではS2を用いた場合に、粗骨材ではG3を用いた場合に中性化抵抗性が高くなっていることが分かった。



図一17 中性化深さ

4. まとめ

本研究では、石灰石粗骨材の微粒分量を1%、5%、8%および15%としたコンクリートを用いて、石灰石骨材の微粒分量がコンクリートのフレッシュ性状ならびに硬化性状に及ぼす影響について検討した。また、微粒分量がJIS A 5005の規格値を超える値（8%ならびに15%）であった場合の耐久性を評価した。その結果、石灰石粗骨材の微粒分量が本研究での検討の範囲で変動しても、同じコンクリートとして扱って問題がないと考えられる。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 石灰石粗骨材の微粒分量の増加に伴い、スランプ値は若干低下する傾向を示した。しかし、その影響は微粒分量の増加にともなう空気量の変動による影響が大きく、混和剤を適切に使用することで、調整可能な範囲であると考えられた。また、実際は微粒分量の増加に伴い粒形判定実積率が増加することから、粒形判定実積率を一定とした本実験結果よりもスランプへの影響は小さくなるものと考えられる。
- (2) 石灰石粗骨材の微粒分量を増加させた場合、ブリーディングの抑制に効果的であり、凝結時間は若干早くなることが確認された。
- (3) 骨材の微粒分量の増加に伴い、コンクリートの圧縮強度が増加する傾向を示した。これは、微粉末効果の影響であると考えられた。一方、微粒分量が静弾性係数に与える影響は認められなかった。
- (4) 石灰石粗骨材の微粒分量を8%もしくは15%まで増加した場合でも、石灰石骨材を用いたコンクリート

の乾燥収縮ひずみは小さいことが確認された。また、凍結融解抵抗性や中性化抵抗性に関する影響はほとんど無いものと考えられた。

謝辞

本研究は、石灰石鉱業協会内に設置された「コンクリート骨材研究会」（委員長：京都大学河野広隆教授）における研究活動の一環として実施されました。研究を進めるにあたり多大なご協力を頂いた研究会各位に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) JIS A 5005 コンクリート用砕石及び砕砂，日本規格協会，2009.3
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，2007
- 3) 小島明ほか：石灰石砕石の磨砕により増加した微粒分がコンクリートの諸性状に及ぼす影響，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.497-498，2004
- 4) 鶴田昌宏ほか：細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.99-104，2004
- 5) 辻幸和ほか：砕石粉を用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状，コンクリート工学，Vol.42，No.8，pp.22-29，2004
- 6) (社)セメント協会：石灰石微粉末専門委員会報告書，2001
- 7) 木村守：砕砂の微粒分を多く含んだコンクリート性状について，<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h20giken/program/kadai/pdf/innovation/inno1-11.pdf>
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），2007
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS-5 鉄筋コンクリート工事，2009
- 10) 大塩明ほか：石灰石骨材を用いたコンクリートの基礎的諸物性，セメント技術年報，No.41，pp.106-109，1987
- 11) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，2010
- 12) (社)日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム・委員会報告書・論文集，1998