

混合骨材コンクリートの諸特性と その推定手法に関する検討

佐伯竜彦¹・猪口泰彦²・新野康博³・長瀧重義⁴

¹正会員 博士(工) 新潟大学助教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050)

E-mail:saeki@eng.niigata-u.ac.jp

²修士(工) 大成建設株式会社 (〒260-0028 千葉市中央区新町 1000)

³修士(工) 山形県庁 (〒990-2492 山形市鉄砲町 2-19-68)

⁴フェロー会員 工博 愛知工業大学教授 総合技術研究所 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

本研究は、骨材資源の有効利用を目的とし、密度が小さく吸水率が大きいため、現在JIS等では使用が許されていない低品質骨材や再生骨材と電気炉酸化スラグや銅スラグを混合した場合のコンクリート用骨材としての適用性について基礎的な検討を行った。混合骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状、強度特性および耐久性を検討した結果、スラグ骨材および低品質骨材の両者の混合比率によってはコンクリート用骨材として十分な品質を持つことが確認された。さらに、混合骨材コンクリートの諸特性を骨材の品質から推定する手法について基礎的な検討を行い、定性的にはあるがそれが可能であることを確認した。

Key Words : *mixed aggregate concrete, compressive strength, drying shrinkage freezing and thawing, RBSM*

1. まえがき

コンクリート用骨材は、その使用量が膨大であり、環境保全の立場からの採取規制と資源の枯渇から、安定供給にかけりが見え始めている。したがって、低品質の骨材を用いざるを得なくなることで、単一の骨材のみを使用したコンクリートの製造が困難となることが予想される。また、コンクリート構造物の解体時に発生したコンクリート塊も再生骨材として利用することが求められているが、再生骨材は一般に密度が小さく、JISに規定されている絶対密度 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上であるものは希である。

一方、電気製鋼の副産物である電気炉酸化スラグは、現在、路盤材や整地材として用いられているが、コンクリート用骨材としても用いることが可能であるとされ、密度も大きく良質なものとなり得る。銅スラグは、銅精錬における副産物であり、これまで主としてセメント材料、プラスチック材、埋め立て材等に利用されてきたが、コンクリート用骨材としても十分な品質を持つことが確認

され、平成9年8月にJIS (JIS A 5011-3) が制定され、土木学会および建築学会においても施工指針が制定されている。

骨材の密度および吸水率はコンクリートの強度や耐久性に影響を及ぼすため、コンクリート用骨材として用いることのできるものとして、絶対密度 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上および吸水率3.5%以下(細骨材)あるいは3.0%以下(粗骨材)との規定が、JIS A 5308の付属書1に設けられている。また、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾や建築学会JASS5²⁾もこの規定に従っている。これらの規格・規準類では、粒度および塩化物量については混合後に規定に適合すれば良いとされているが、それ以外の品質項目については、それが許されておらず、混合前の個々の骨材が規定に適合する必要があるとしている。しかしながら、密度や吸水率等においても混合後の品質が規定を満たすことにより使用できるようになれば、現在使用できない低品質骨材を有効利用できることとなり、さらにスラグ骨材等の需要も増すと考えられる。

表-1 細骨材の物理的性質

記号	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失質量 (%)	原コンクリート強度 (N/cm ²)
VS	2.56	2.63	2.63	4.7	—
ACS	3.81	3.84	0.76	1.0	—
CUS	3.56	3.58	0.52	0.4	—
RS	2.09	2.30	9.86	4.4	25.5
DS1	2.22	2.40	7.90	7.0	—
DS2	2.36	2.48	4.89	3.1	—

表-2 粗骨材の物理的性質

記号	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失質量 (%)	原コンクリート強度 (N/cm ²)
VC	2.62	2.64	0.84	9.4	—
ACG	3.84	3.84	0.65	0.8	—
RG1	2.28	2.40	5.42	36.5	25.5
RG2	2.34	2.45	4.64	25.6	41.7
WG	2.56	2.63	2.84	23.8	—

以上の背景から、低密度・高吸水率で単独では利用できない骨材に電気炉酸化スラグあるいは銅スラグといった高密度な骨材を混合したコンクリートを製造し、その諸特性について実験的な検討を加えた。さらに、混合骨材コンクリートの諸特性の推定方法についての基礎的な検討も行った。

2. 混合骨材コンクリートの諸特性

本研究では、混合骨材コンクリートの諸特性として、コンクリートのフレッシュ性状、強度特性、乾燥収縮特性および耐凍害性について検討を行った。

(1) 実験概要

a) 使用材料

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメントである。また、混和剤としてリグニンスルホン酸化合物を主成分とする AE 減水剤およびアルキルアリルスルホン酸化合物系の AE 助剤を用いた。

細骨材は、電気炉徐冷酸化スラグ細骨材 (ACS)、銅スラグ細骨材 (CUS)、再生細骨材 (RS) および二種類の低密度ダム堆砂 (DS1, DS2) を使用した。また比較のために、JIS の規定を満たす川砂 (VS) も用いた。各細骨材の物理的性質を表-1 に示す。

粗骨材には、電気炉徐冷酸化スラグ粗骨材 (ACG)、二種類の再生粗骨材 (RG1, RG2)、骨材採取現場表層の風化岩 (WG) を使用した。比較のために JIS の規定を満

表-3 細骨材の混合率

組合せ	混合率
VS+RS	100:0, 50:50, 0:100
ACS+RS	100:0, 75:25, 50:50, 25:75 12.5:87.5, 0:100
CUS+RS	100:0, 50:50, 0:100
CUS+DS1	100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100
CUS+DS2	100:0, 50:50, 0:100

表-4 粗骨材の混合率

組合せ	混合率
VC+RG2	100:0, 75:25, 50:50, 25:75 12.5:87.5, 0:100
RG1+RG2	100:0, 50:50, 0:100
ACG+RG1	100:0, 75:25, 50:50, 25:75 12.5:87.5, 0:100
ACG+WG	100:0, 75:25, 50:50, 25:75 12.5:87.5, 0:100

たす碎石 (VC) も用いた。各粗骨材の物理的性質を表-2 に示す。なお、以後は骨材の種類については、括弧内の記号で表記することとする。

b) 配合

骨材の混合は、細骨材を混合する場合には粗骨材の全量を VC とし、粗骨材を混合する場合は細骨材の全量を VS とした。また、混合比は容積比とし、両者の混合比率が変化しても混合骨材の粒度が一定となるように、全ての骨材をふるい分けし、同じ粒度分布に調整した。細骨材の F.M は 3.16、粗骨材の F.M は 6.68 である。混合の組合わせを表-3 および表-4 に示す。なお練り混ぜに際して、骨材は全て表乾状態に調整して用いた。

コンクリートの配合は、水セメント比 55%、目標空気量 $4 \pm 0.5\%$ 、目標スランブを 8 ± 1 cm とした。

c) 試験方法

本研究の供試体の初期養生条件は、全て 20℃水中養生で、養生期間は原則として材齢 28 日までとした。初期養生終了後に各種試験を行った。以下に、その概要を示す。

① プリーディング試験

プリーディング試験は、JIS A 1123 に準じて行い、プリーディング終了時までの累積量、即ち、最終プリーディング量を測定した。

② 圧縮強度試験

材齢 28 日において、JIS A 1108 に従って圧縮強度を測定した。ただし、CUS と DS を混合したものについては材齢 3 日、7 日および 91 日についても測定を行った。併せて、静弾性係数も測定した。

③ 乾燥収縮試験

初期養生終了後、供試体を温度 20℃、相対湿度 60% の環境下に暴露した。供試体は $10 \times 10 \times 40$ cm であり、

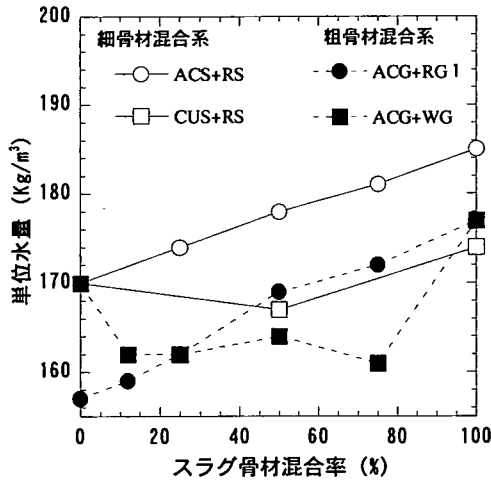


図-1 スラグ骨材混合率と単位水量の関係

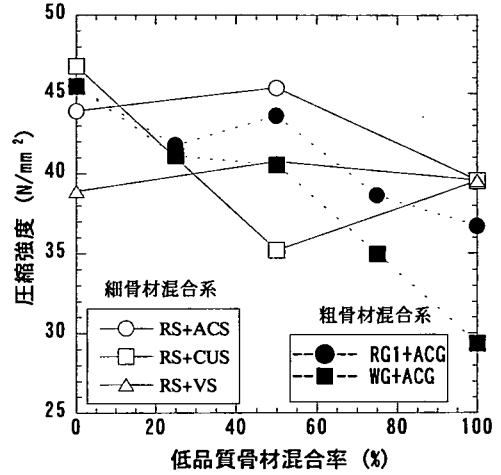


図-3 低品質骨材 (RS, RG1, WG) 混合率と圧縮強度の関係

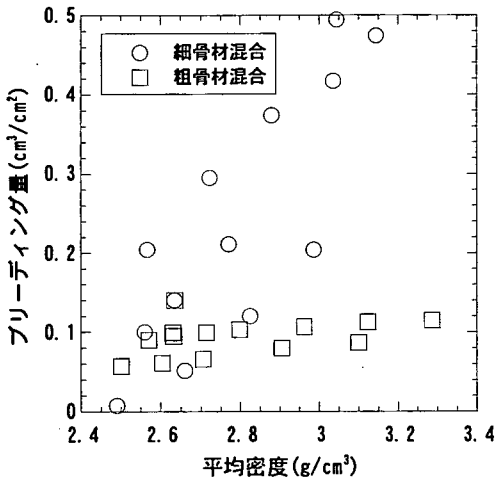


図-2 骨材の平均密度とブリーディング量の関係

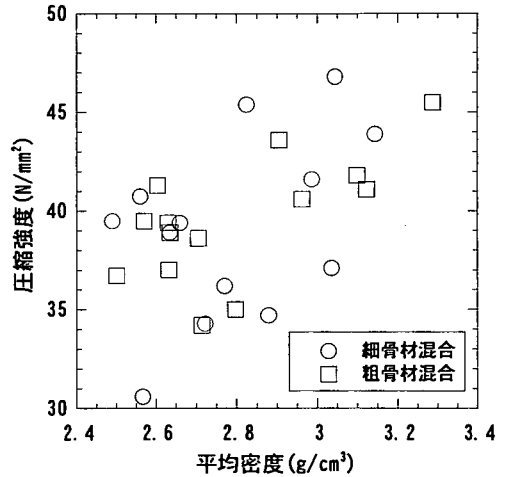


図-4 骨材の平均密度と圧縮強度の関係

コンタクトチップを相対する両側面に接着し、乾燥開始から8週間後まで経時的に供試体重量と長さ変化を測定した。

④凍結融解試験

供試体は 10×10×40cm であり、ASTM C 666 に準じて水中凍結水中融解試験を行った。30 サイクル毎に一次共鳴振動数を測定し、相対動弾性係数を算出した。

(2) 混合骨材コンクリートのフレッシュ性状

a) 単位水量

図-1 に、スラグ骨材の混合率と同一のスランブ (8cm) を得るための単位水量の関係を示す。図より、スラグの混合率が増加するほど単位水量が増加する傾向

にあることがわかる。ただし、増加の程度は骨材の組合せによって異なり、スラグ骨材の混合率に比例する場合 (ACS+RS, ACG+RG1) もあるが、スラグ混合率の影響がそれほど顕著でない場合 (CUS+RS, ACG+WG) もある。この原因については不明であり、今後の課題としたい。なお、本研究で用いた骨材のみで全ての混合骨材コンクリートの単位水量について普遍的な知見が得られるわけではないが、骨材の組合せがフレッシュ性状に影響を及ぼす可能性があると思われる。

b) ブリーディング

骨材を単独で用いた場合は、骨材の密度が大きいほどブリーディング量は増大した。そのため、混合骨材とした場合も、密度の大きな骨材の混合率が増加するにしたが

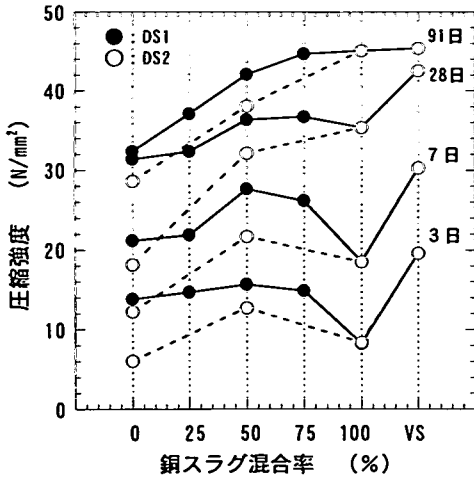


図-5 銅スラグ混合率と圧縮強度の関係

ってブリーディングが増大する傾向が見られた。図-2に、混合骨材の平均密度と混合骨材コンクリートのブリーディング量を示す。なお、平均密度は骨材の混合比率を重みにした重み付き平均値である。図より、平均密度が大きいほどブリーディング量も大きくなっている。特に、細骨材の密度がブリーディングに及ぼす影響が顕著であった。また、両者の関係はばらつきはあるものの、混合する骨材の種類が異なってもおおよそ直線関係にあることがわかった。なお、図-1よりわかる通り、ACGを用いたコンクリートはその混合率が増加するほど単位水量が増加している。このことから、単位水量の増加がブリーディングの増加につながっていることも考えられるが、CUSのように混合率の増加が単位水量の増加に必ずしも結びつかない例もある。全てのデータを併せても図-2のような傾向が得られていることから、骨材の平均密度はブリーディング量に大きく影響していると考えられる。

(3) 混合骨材コンクリートの強度特性

a) 圧縮強度

材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度を、図-3に示す。骨材を単独で使用した場合、骨材の密度と圧縮強度には単純な相関は見られないが、密度が 3g/cm^3 以上のものは $2\sim 3\text{g/cm}^3$ の範囲にあるものより強度が高くなる傾向が見られた。

骨材を混合したことの影響を見ると、粗骨材混合系では単独で用いた場合に強度の大きなものの混合率に比例して圧縮強度が大きくなる傾向にあることが読み取れる。細骨材混合系では、明確な傾向が見られなかった。

図-4に、各配合における使用骨材の平均密度と圧縮

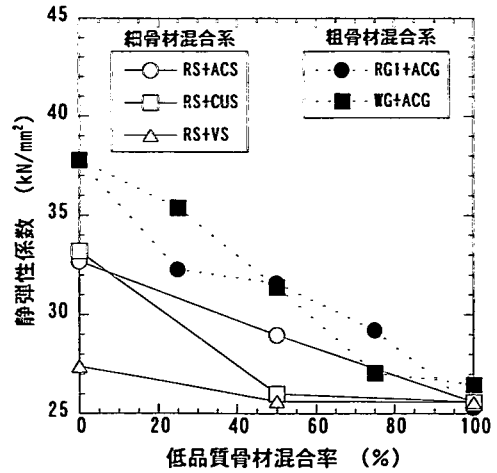


図-6 低品質骨材混合率と静弾性係数の関係

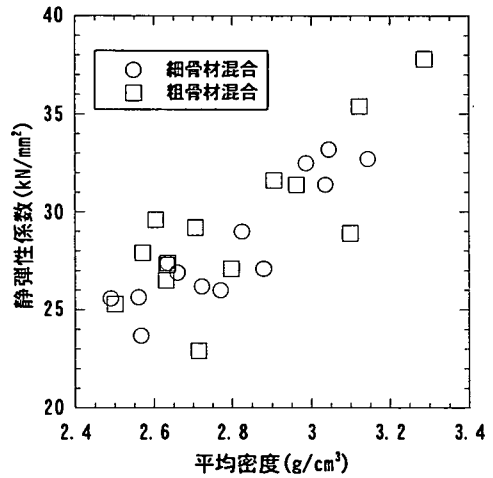
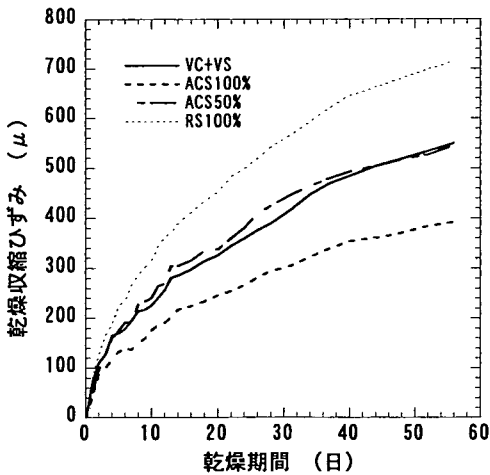


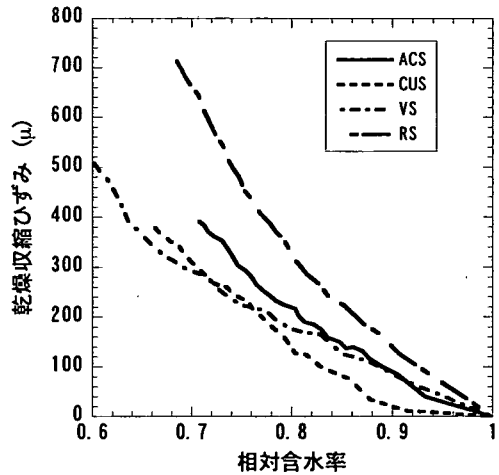
図-7 骨材の平均密度と静弾性係数の関係

強度の関係を示す。図より、混合率での整理と同様にばらつきはあるものの、平均密度の増加とともに圧縮強度が大きくなる傾向が見られる。

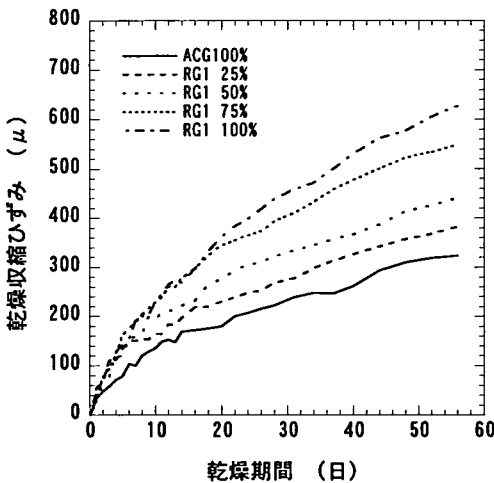
図-5に、DSとCUSを混合した場合のCUS混合比率と圧縮強度の関係を示す。DSのみを用いたコンクリートは、短期的にも長期的にも強度が低く、コンクリート用細骨材として適していないことが確認できる。一方、銅スラグのみを用いたコンクリートは、既往の研究においても指摘されている通り³⁾、材齢初期において強度が低く、長期的には高強度となる傾向が見られた。混合細骨材コンクリートは、混合率に応じて銅スラグおよび低品質砂の特徴が現れている。即ち、銅スラグ混合率が高いものは、初期強度が低く、長期強度が高くなっており、低品質砂の混合率が高いものは、初期および長期材齢とも強



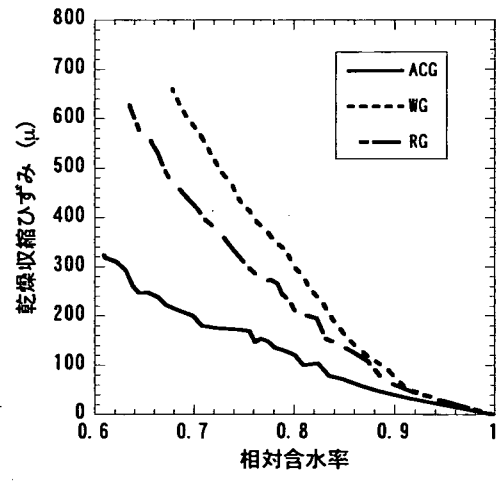
(a) ACS+RS



(a) 細骨材単独使用



(b) ACG+RG



(b) 粗骨材単独使用

図-8 混合骨材コンクリートの乾燥収縮量の経時変化

図-9 相対含水率と乾燥収縮ひずみの関係

度が低い。また、混合比率50%において初期強度が最大となり、長期的にも高い強度を示した。このように、強度発現性が重要となる場合は、個々の骨材の強度発現特性を把握して使用骨材と混合比率を選定する必要がある。

b) 静弾性係数

混合骨材コンクリートの静弾性係数を図-6に示す。圧縮強度の場合と同様に、密度の大きな骨材の混合比率が高いほど大きくなる傾向が得られている。

図-7に、平均密度と静弾性係数の関係を示す。図より両者は比例関係にあり、平均密度が大きいかほど静弾性係数も大きい。圧縮強度と平均密度の場合より相関性が高く、使用骨材の種類によらず、平均密度により静弾性係数の評価が可能である。

(4) 混合骨材コンクリートの乾燥収縮特性

乾燥収縮ひずみの経時変化の一例を図-8に示す。骨材を単独で用いた場合、再生骨材を用いたものは、細骨材(RS100%)、粗骨材(RG100%)ともに大きな収縮量を示した。再生骨材を使用した場合、乾燥収縮ひずみが大きくなることは、多くの研究で報告されていることである⁴⁾。本研究においても再生骨材を混合することにより乾燥収縮ひずみは増大している。これは、附着しているモルタルあるいはセメントペーストの弾性係数が小さいことの影響であると考えられる。なお乾燥収縮量には、再生骨材を用いたことによる単位水量の変化や骨材の吸水率が大きいことによる逸散水分量の増加が影響している可能性がある。そこで、相対含水率と収縮量の関係に

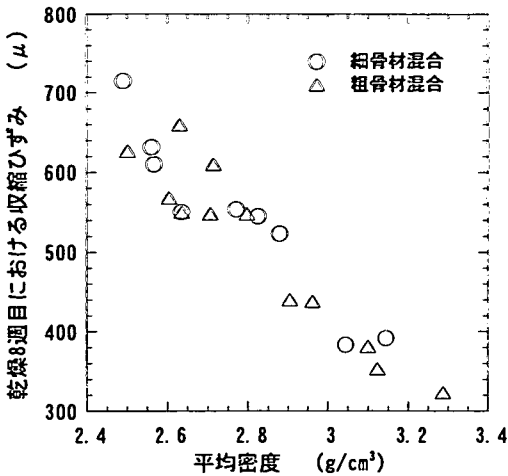


図-10 平均密度と乾燥収縮の関係

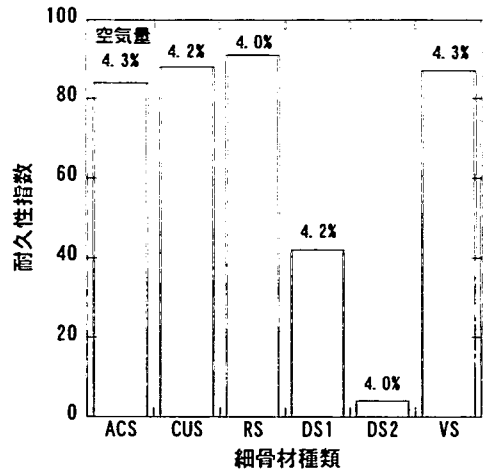
ついて検討した。相対含水率とは、飽水状態のコンクリートの自由水量に対するある時点の自由水量の比率であり、飽水状態での値が 1.0 となるものである。結果を図-9 に示す。図より、同一の含水率においても再生骨材の乾燥収縮量は大きく、逸散水分量が同じでも収縮量が異なることが確認された。

また図には示していないが、ダム堆砂 (DS1 および DS2) も大きな収縮を示した。逆に、スラグ骨材を用いたもの (ACS100%, CUS100%, ACG100%) は川砂と碎石を用いたものよりも収縮量が少なく、乾燥収縮に関してきわめて良質な骨材であることが確認された。

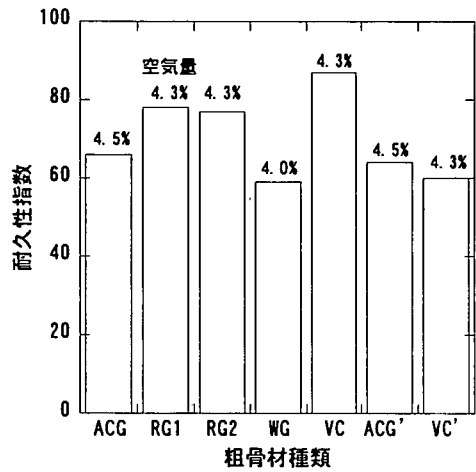
細骨材を混合骨材とした場合、RS 混合率に比例して収縮量が増加している。また、粗骨材を混合骨材とした場合も細骨材の場合と同様に、低品質骨材の混合率が大きいほど収縮量が大きくなっている。

細骨材と粗骨材の影響を比べると、細骨材に低品質骨材を用いた方が収縮が大きくなっている。コンクリートは一般にその約6割がモルタルマトリックスによって占められている。また、モルタルは粗骨材よりも弾性係数が小さい。そのため、乾燥収縮に対して支配的なのはモルタル部分であり、粗骨材を混合することの影響は細骨材を混合することの影響よりも小さいと考えられる。このことは、乾燥収縮に対しては粗骨材よりも細骨材の方が大きく影響するという既往の研究と一致している⁵⁾。

図-10は、平均密度と試験8週目における乾燥収縮量との関係を示したものである。図より、乾燥収縮ひずみは平均密度と負の相関関係にある。また、細骨材混合系と粗骨材混合系を比較しても相違は見られない。したがって、配合の段階で骨材の密度からある程度乾燥収縮量の予測を行うことも可能であると考えられる。



(a) 細骨材



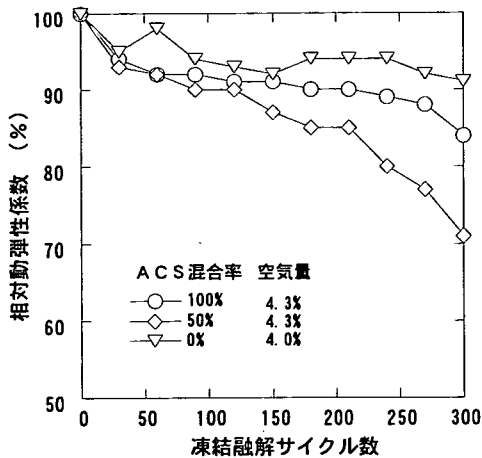
(b) 粗骨材

図-11 骨材を単独で用いた場合の耐久性指数

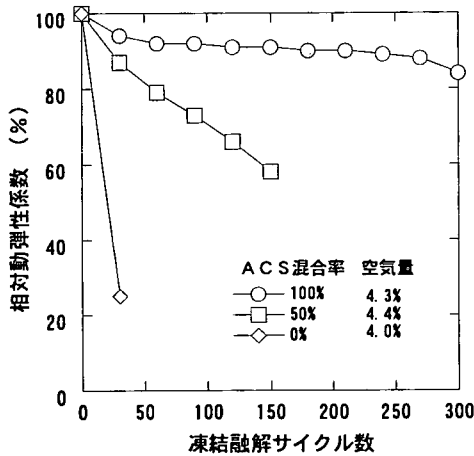
(5) 混合骨材コンクリートの耐凍害性

各種骨材を単独で用いた場合の凍結融解試験により得られた耐久性指数を図-11 に示す。図より、細骨材ではダム堆砂 (DS2) の耐凍害性が著しく劣っている。また、粗骨材では、耐久性指数が 60%以上であり一応の耐凍害性を有しているが、風化岩 (WG) と酸化スラグ (ACG) を用いたものが他の骨材より劣る結果となった。再生骨材は、本研究で用いたものに限れば碎石 (VC)、川砂 (VS) と大差はなく、原コンクリートの影響も見られなかった⁶⁾。

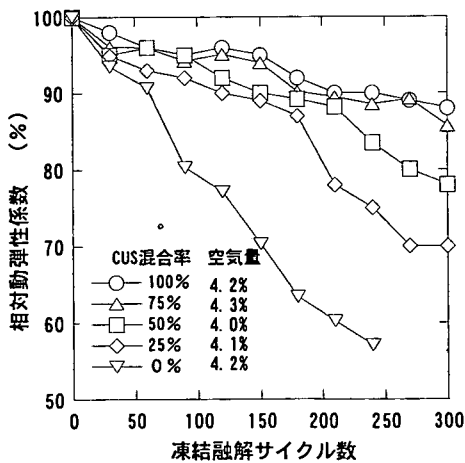
酸化スラグ粗骨材を用いた場合、力学的性質は優れているにもかかわらず、耐凍害性は他の粗骨材を用いた場合よりも劣る結果が得られた。これは、密度が大きいこ



(a) ACS+RS



(b) ACS+DS2



(c) CUS+DS1

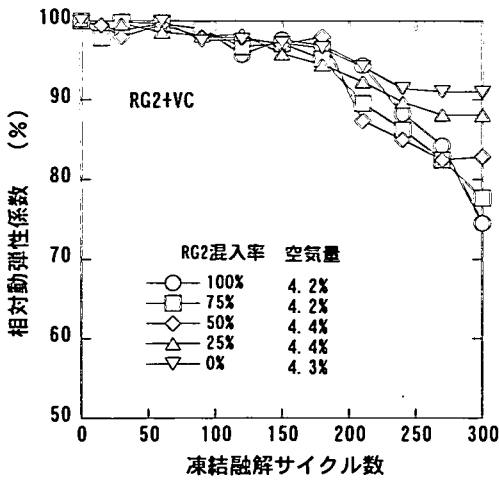
図-12 混合細骨材コンクリートの耐凍害性

とによる、ブリーディングの影響であると考えられる。

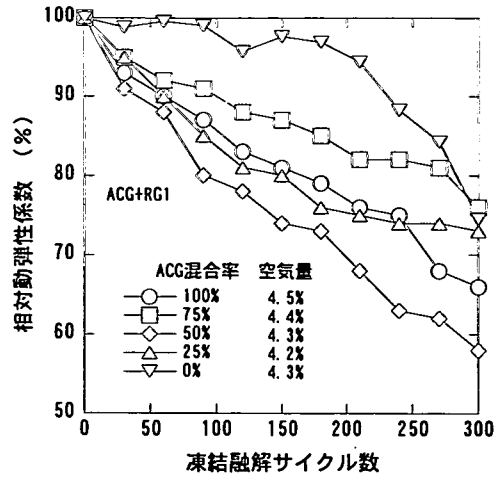
そこで、ブリーディングを抑制するためにセルロース系の増粘剤を添加した実験も行った(図-11のACGおよびVC)。碎石を使用したものは増粘剤を添加しない場合よりも耐凍害性が低下した。これは、増粘剤の添加により耐凍害性の向上に有効な微細な気泡が連行されなくなったためである⁷⁾。スラグ骨材を用いたものは、増粘剤の有無に関わらず同様の結果を示した。このことから、増粘剤の添加による耐凍害性の低下と、ブリーディングを抑制することによる耐凍害性の向上は同程度であったと考えられる。すなわち、増粘剤の添加によりブリーディングの影響は抑制することができたものの、モルタル自体の品質が低下したと考えられる。したがって、気泡組織に影響を及ぼさないタイプの増粘剤の使用、粉体(結合材や骨材の微粒分など)の増加により、凍害の抑制に有効な気泡組織を確保し、ブリーディングを低減することによって耐凍害性を向上させることは可能であると思われる。

図-12に混合細骨材コンクリートの凍結融解試験結果を示す。図より、酸化スラグと再生骨材の混合では、双方とも単独で用いた場合には耐凍害性が高いものの、両者を混合した場合に最も耐凍害性が劣る結果となった。単独で用いた場合に耐凍害性が低かったDSでは、スラグ骨材(ACS, CUSともに)の混合により、耐凍害性が大きく向上している。特にCUSとDS1の組合せでは、CUSの混合率が増加するほど相対動弾性係数が大きくなっており、低品質細骨材の耐凍害性の改善にはスラグ細骨材の混合が効果的であると考えられる。スラグ骨材の使用はブリーディングを増加させそれが耐凍害性に悪影響を及ぼすことが懸念されたが、本研究の範囲ではスラグ混合率を大きくすることによるブリーディング量の増加は、耐凍害性に悪影響を及ぼさない結果となった。粗骨材と異なり細骨材でブリーディングの影響が顕著でなかった理由については、本研究の結果からのみでは断言できないが、ブリーディングによる欠陥の大きさが関係していると考えられる。粗骨材下面に生じるブリーディングによる水膜あるいは高水セメント比の領域は、細骨材下面に生じるものより大きいと考えられ、これに対して細骨材の場合は、小さな欠陥が比較的均一に分散して存在していたことが考えられる。

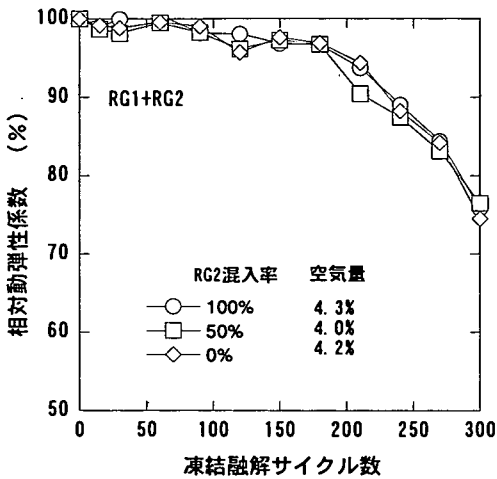
図-13は、粗骨材を混合した場合の凍結融解試験結果を示したものである。再生骨材と碎石の混合では再生骨材単独の耐凍害性が碎石より若干低いため、再生骨材の混合率の増加に伴って僅かずつ相対動弾性係数が低下する傾向が見られた。また再生骨材どうしの混合では、個々の粗骨材を単独で用いた耐凍害性に大きな違いがなかったこともあり、混合の影響は見られなかった(図-



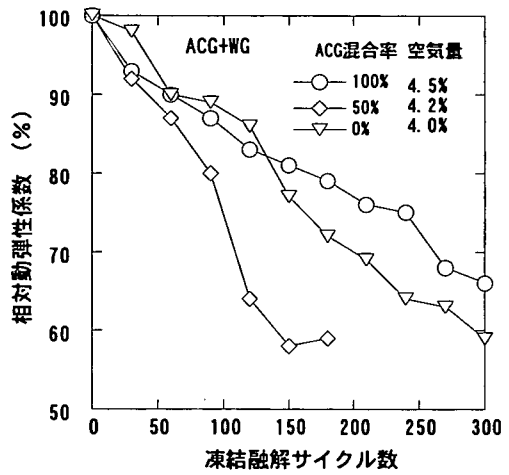
(a) RG2+VC



(c) ACG+RG1



(b) RG1+RG2



(d) ACG+RG

図-13 混合粗骨材コンクリートの耐凍害性

13(a), (b) . スラグ骨材と再生骨材または風化岩を混合したものは、混合比率を 1:1 にしたものが最も耐凍害性に劣るという結果が得られた (図-13(c), (d)) . これは、細骨材の混合でも見られた現象である (図-12(a)) . 再生骨材はブリーディングが少なく、モルタルとの付着性が良い反面、骨材自体は脆弱である。風化岩も骨材自体は脆弱であると考えられる。一方でスラグ骨材は、骨材自体は強固であってもブリーディングを生じ易く、モルタルとの界面が弱点となる。このような両者の特性の複合作用で、混合率 50% の場合に耐凍害性が最も低下したものと考えられる。

図-14 に、骨材の平均密度と耐久性指数の関係を示す。

図より、静弾性係数や乾燥収縮と異なり、平均密度と耐凍害性には相関性が見られない。そこで、骨材の耐凍害性を表すより直接的な指標として安定性損失質量があるが、これを各骨材の容積比で平均した平均安定性損失質量を用いて耐凍害性の評価を試みた。結果を図-15 に示す。図より、平均密度の場合と同様、両者の間に相関は見られなかった。このことから、耐凍害性の場合には混合骨材の平均的性質によって評価を行うことは困難であると考えられる。

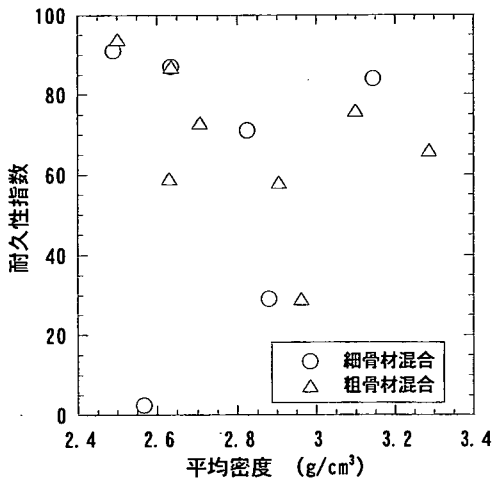


図-14 平均密度と耐久性指数の関係

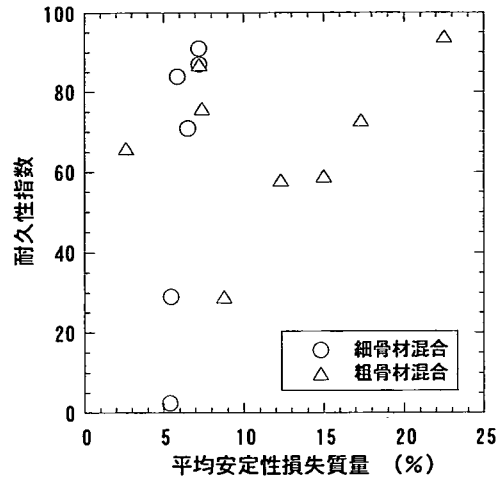


図-15 平均安定性損失質量と耐久性指数の関係

3. 混合粗骨材コンクリートの諸特性推定方法の検討

(1) はじめに

2章の検討により、混合骨材コンクリートの諸特性は、使用する骨材の品質と混合率によって変化することが明らかとなった。今後、様々な品質の骨材を様々な混合率で使用することが考えられるが、この場合、使用骨材の品質から混合骨材コンクリートの諸特性を評価することが可能であれば、事前の検討作業を大幅に省力化でき、混合骨材の利用も拡大すると考えられる。そこでここでは、混合骨材コンクリート、特に粗骨材を混合して用いた場合のコンクリートの諸特性を推定する方法について検討した。

混合骨材コンクリートの諸特性のうち、静弾性係数や乾燥収縮特性のようなコンクリートが一体となって変形に抵抗する性質の場合には、図-7および図-10に示される通り、用いている骨材の平均的品質である平均密度での評価が有効であると考えられる。これに対して強度特性や耐凍害性の場合には、少数でも劣悪な骨材があればそこが破壊の基点になってコンクリート全体の挙動が決まる可能性がある。したがって、このような性質を検討するためには、骨材の平均的品質では不十分であると考えられる。

図-16は、路盤材用に製造された再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。用いた再生骨材の原コンクリートは不明であり、種々のコンクリートからの再生骨材が混在していると推定される。また、同一コンクリートから製造された再生骨材であっても、骨材粒子1個ずつについて見れば骨材に付着

するモルタル量は当然異なっていると考えられ、再生骨材を一種の混合骨材と位置付けることもできる。この図は、同一配合で同一バッチから作製したコンクリート供試体の試験結果を示しているが、供試体によって大きな差があることがわかる。図-17は、ここで用いた再生骨材の粒子1個毎の密度および吸水率を示したものである。図より、少数ではあるが密度が 2.0g/cm^3 以下で吸水率が20~30%程度の粒子が存在することがわかる。凍結融解試験では、このような低品質の骨材粒子が含まれていた供試体において劣化が生じたものと考えられる。ここで用いた再生骨材の密度および吸水率（試料2kgで測定）は、それぞれ 2.28g/cm^3 および7.64%であり、2章で用いた再生骨材より若干低品質ではあるが大きな差は無い。このことから、骨材粒子の性質が広範囲にわたると考えられる混合骨材の場合には、骨材の集団としての性質（例えば、平均値）だけでなく、品質の分布も考慮する必要があると考えられる。

一般に、コンクリートは粗骨材とモルタルから成る二相複合材料であるとみなされている⁹⁾。しかし、このようなモデルで粗骨材とモルタルの界面の状態を的確に表現し、コンクリート全体を評価することは困難である。そこで、粗骨材1個のみを含むコンクリート（以後、コンクリート要素とする）を考える。コンクリート要素内部は均質であるものとし、これらが集合すると、全体のコンクリートが形成される。この概念を示したものが、図-18である。このようなモデルに基づくと、コンクリート要素の挙動を追うことで粗骨材とモルタルの界面の影響を表現することが可能となり、これによってコンクリート全体を評価することも可能となる。すなわち、粗骨材とモルタルの界面を評価したと等価な情報が得られ

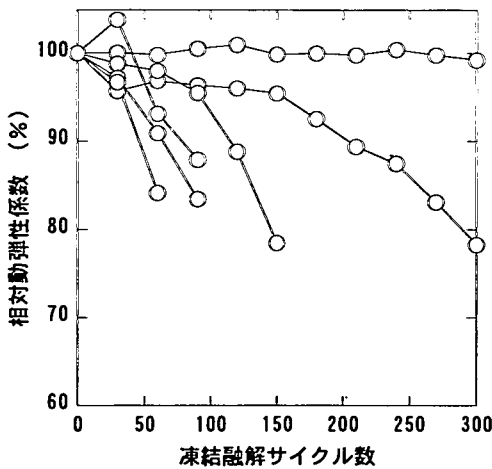


図-16 路盤材用再生粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性

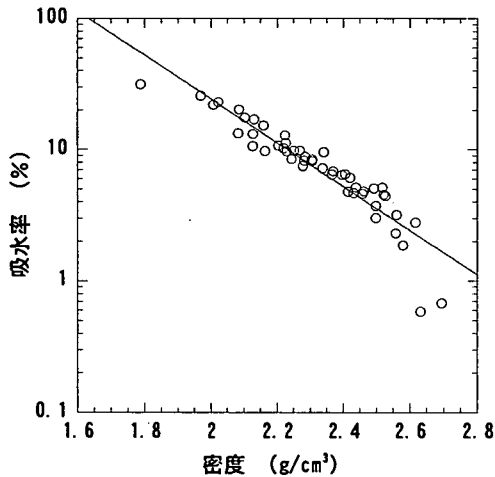


図-17 路盤材用再生骨材の密度と吸水率

るのである。したがってこのモデルは、メソレベルでコンクリートを均質化し、特に粗骨材周辺部において実現象と力学的に等価な評価を行うためのものと位置付けることができる。ここでは、この考え方に基づいた混合粗骨材コンクリートの圧縮強度推定方法について説明する。推定の対象を圧縮強度としたのは、圧縮強度がコンクリートの基本特性であり、強度から他の品質をある程度推定できるためである。図-16 に示されるように、耐凍害性は骨材品質の分布の影響を顕著に受けるが、凍結融解メカニズムが複雑であることからモデル化が困難であり、今回は検討対象としなかった。

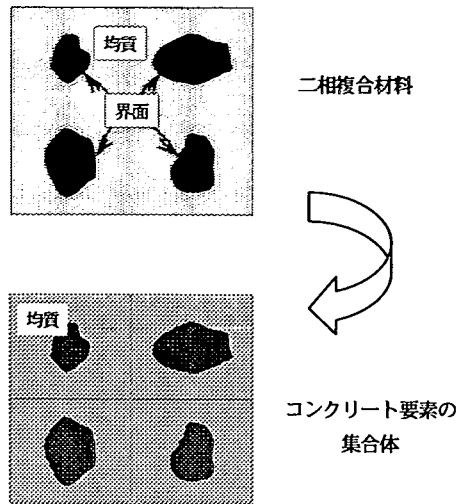


図-18 コンクリート要素の概念

表-5 再生粗骨材の物理的性質

記号	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失質量 (%)	原コンクリート強度 (N/mm ²)
RG3	2.31	2.42	4.88	29.7	60.1
RG4	2.43	2.51	3.14	8.1	60.1
RG5	2.23	2.37	6.27	49.1	25.5
RG6	2.39	2.48	3.76	22.5	25.5

(2) 実験概要

a) 使用材料

用いたセメントは、普通ポルトランドセメントである。また細骨材には、川砂 (VS) を用いた。

粗骨材には、酸化スラグ粗骨材 (ACG)、6種類の再生粗骨材 (RG1~RG6)、風化岩 (WG)、碎石 (VC) を用いた。各粗骨材は、2章と同様のものである。3章のみで用いる RG3~RG6 の性質については、表-5 に示す。なお、RG3 と RG4、RG5 と RG6 はそれぞれ同じ原コンクリートから製造した再生粗骨材であるが、破碎処理の程度に違いによってモルタル付着量が異なっており、そのため各物理的性質に違いがある。

b) 供試体

コンクリート要素の力学的性状を測定するために、1辺 35mm の立方体供試体を作製した。この小型供試体のモルタルの配合は、水セメント比を 55%、S/C を 2.8 とした。型枠の 2/3 までモルタルを充填し、20 秒間テーブルパイププレートで締固めた後、中央部に粗骨材を 1 個静置し、20 秒間かけてテーブルパイププレートで締固めながら残りのモルタルを打設した。また、粗骨材を含ま

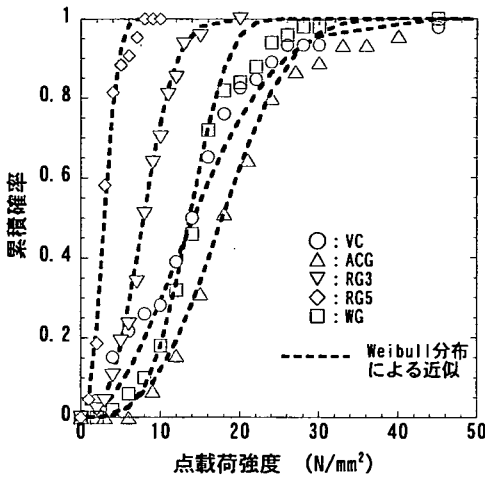


図-19 粗骨材の点载荷強度の分布

ないモルタルのみの小型供試体（以後、モルタル要素とする）も作製した。なお、WG については小型供試体は作製しなかった。

c) 試験方法

粗骨材の性質については、同一種類の粗骨材でも1個ずつが完全に同じものではないので、無作為に抽出した100個について密度および吸水率を測定した。さらに、粗骨材の強さを表す指標として点载荷強度の測定を行った。点载荷試験は、粗骨材試料を2点で挟み、载荷することによって試料を破断させるもので、点载荷強度は次式によって表される¹⁰⁾。測定は、各粗骨材につき50個とした。

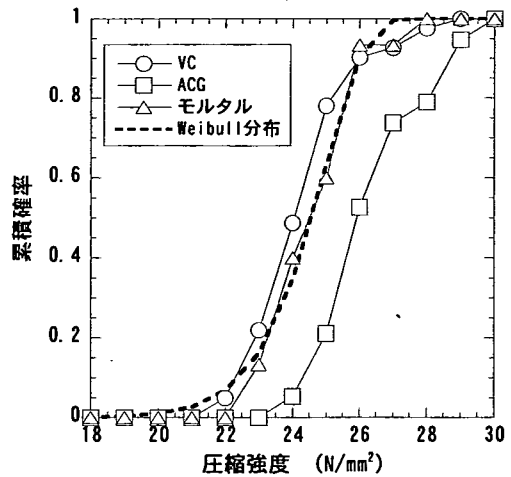
$$F_t = 0.9 \times \frac{F_0}{d^2}$$

ここに、 F_t : 点载荷強度 (N/mm²)

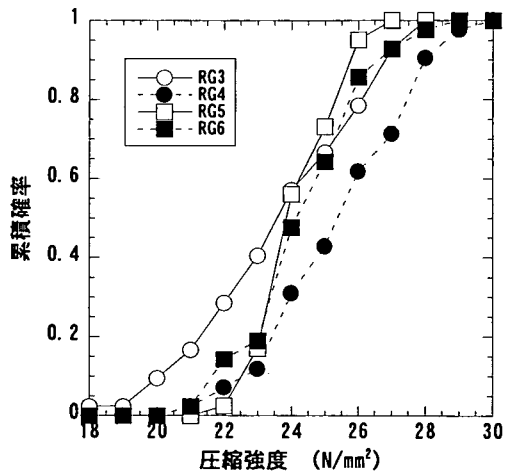
F_0 : 破壊荷重 (N)

d : 破壊時の载荷点間の距離 (mm)

小型供試体については、打設後20℃で水中養生を行い、材齢28日において試験を行った。供試体には両側面にロゼットゲージを貼り付け、圧縮载荷を行って圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および内部摩擦角を測定した。供試体上部及び下部にテフロンシートを挿入することで载荷装置との摩擦をなくし、全体系から粗骨材近傍のみを取り出した粗骨材を1個のみ含むコンクリート要素を再現した。これを各粗骨材について42個の供試体で行った。なお、供試体に埋め込む各粗骨材の粒度分布がふるい分け曲線に一致するように、骨材粒を選定した。



(a)



(b)

図-20 小型供試体の圧縮強度の分布

(3) 粗骨材およびコンクリート要素の性質

a) 粗骨材の点载荷強度

各粗骨材の点载荷強度の分布を図-19に示す。碎石とスラグ骨材の点载荷強度は、広範囲に分布しているのが分かる。また、碎石と比較してスラグ骨材は高い強度範囲に、再生骨材は低い範囲に分布している。さらに再生骨材の点载荷強度は、原コンクリート強度によって異なり、原コンクリート強度が高いものは高い範囲に、原コンクリート強度が低いものは低い範囲に分布する結果となっている。ここで、全ての粗骨材の点载荷強度の分布は、図に示すように Weibull 分布によって近似することが可能であった。

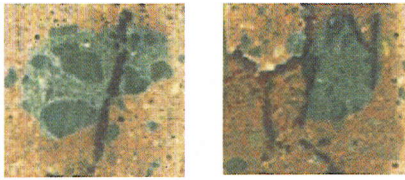


図-21 再生骨材を用いたコンクリート要素の破壊性状

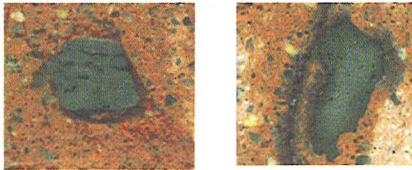


図-22 酸化スラグ骨材を用いたコンクリート要素の破壊性状

b) コンクリート要素の強度特性

図-20 は、コンクリート要素の圧縮強度の分布を示したものである。図より、粗骨材種類によって圧縮強度の分布が異なり、骨材自体の強度（点載荷強度）が高い骨材はコンクリート要素も高強度となる傾向が見られる。しかし、図-19 と比較してわかる通り、点載荷強度の分布ほど骨材種類の違いは明確でない。また、再生粗骨材を用いたコンクリート要素の強度分布は他の骨材と比べて範囲が広いことが特徴である。図には、粗骨材を含まない小型供試体であるモルタル要素の実験結果も併せて示したが、モルタルの圧縮強度分布は Weibull 分布で近似でき、砕石を用いたコンクリート要素とほぼ近い分布となった。

c) コンクリート要素の圧縮強度の推定

本章の目的は、コンクリート要素の集合体としてコンクリートの諸特性を評価することであるが、そのためにはコンクリート要素の強度特性を把握する必要がある。そこでここでは、骨材の特性からコンクリート要素の圧縮強度を推定する方法について検討した。粗骨材またはモルタルのいずれかが破壊するとコンクリート要素も破壊に至ると仮定すると、コンクリート要素の圧縮強度は式（1）で与えることができる。

$$f_c = \min[f_a, f_m] \quad (1)$$

ここに、 f_c : コンクリート要素の強度 (N/mm²)
 f_a : 粗骨材の強度 (N/mm²)
 f_m : モルタルの強度 (N/mm²)

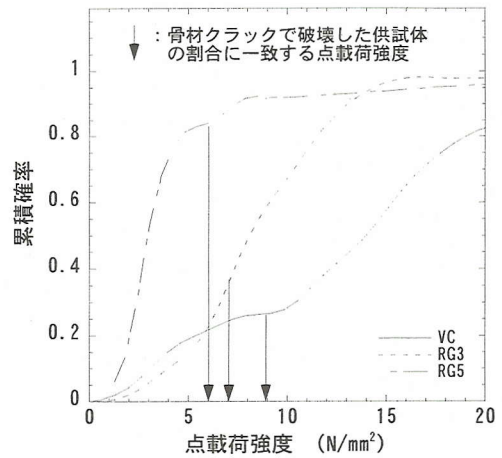


図-23 粗骨材の点載荷強度と破壊性状の関係

上式で、モルタルの強度はモルタル要素の強度と考えた。粗骨材強度としては点載荷強を測定しているが、粗骨材に直接荷重して求めた点載荷強度は、モルタル中に存在する粗骨材の強度とは異なるものと考えられる¹¹⁾。そこで、点載荷強度をモルタル中の粗骨材強度に変換する必要がある。本研究では、粗骨材の点載荷強度とモルタル中での強度の関係として、以下の関係を仮定した。

$$f_a = k \cdot f_{ap} + f_0 \quad (2)$$

ここに、 f_a : モルタル中の粗骨材強度 (N/mm²)
 f_{ap} : 粗骨材の点載荷強度 (N/mm²)
 k, f_0 : 実験定数

式（2）の傾き k については、以下のように考えた。式（1）では、コンクリート要素の強度は骨材とモルタルの低い方の強度に支配されると仮定したことから、コンクリート要素の破壊の状態から検討を加えた。図-21 および図-22 は、コンクリート要素の圧縮強度試験後の断面写真である。図-21 は再生骨材を用いたものであり、骨材としては低強度であるため、骨材クラックで破壊している供試体があることが確認できる。しかし、再生骨材を用いたコンクリート要素の全てが骨材クラックで破壊しているわけではなく、モルタルクラックで破壊した供試体も存在している。一方、図-22 は酸化スラグを用いた場合であるが、骨材自体の強度が高いため骨材クラックは確認されなかった。図-23 は、各粗骨材の点載荷強度の分布に骨材クラックで破壊した供試体の割合を用いて骨材クラックで破壊が生じる点載荷強度を加えたものである。図より、点載荷強度が6～9N/mm²程度の傾

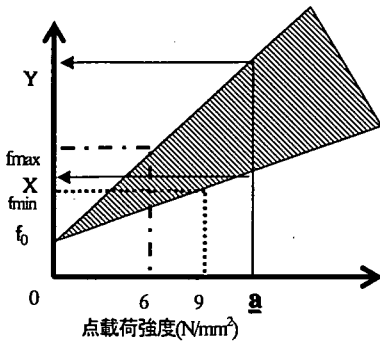


図-24 点載荷強度変換の概念図

域が骨材クラックによる破壊とモルタルクラックによる破壊の境界であり、両者の破壊形態が混在すると推定される。このことから本研究では、点載荷強度の6～9 N/mm²の粗骨材がモルタル要素の強度に相当するものとする。ただし、図-20 に示される通りモルタル要素の強度にも分布があるため、その最大値と最小値の間に粗骨材強度が分布すると仮定した。

この考え方を模式的に示したものが、図-24 である。即ち、粗骨材の点載荷強度がa (N/mm²)である場合、モルタル中における粗骨材強度はX～Y (N/mm²)の値をとることになり、具体的な値としては、その範囲内で一様乱数により決定することとした。

以上のことから、モルタル中の粗骨材強度 f_a を与える式 (2) は、式 (3) のように書き換えられる。

$$f_a = f_{ap} \{ (1-\alpha)k_0 + \alpha k_1 \} + f_0 \quad (3)$$

ここに、 $k_0 = \frac{f_{\min} - f_0}{9}$

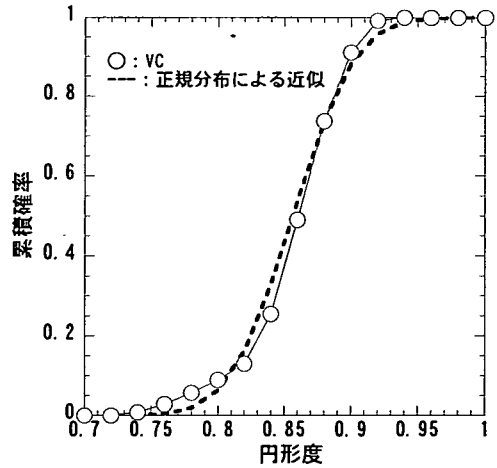
$$k_1 = \frac{f_{\max} - f_0}{6}$$

f_{\min} : モルタル要素の圧縮強度の最小値 (N/mm²)

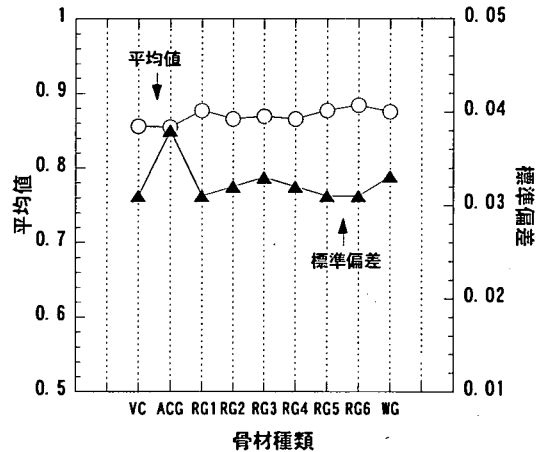
f_{\max} : モルタル要素の圧縮強度の最大値 (N/mm²)

α : 一様乱数

なお f_0 は、粗骨材の点載荷強度が0の場合でもコンクリート要素はある程度の強度を持つことを考慮したものである。本研究では、試行錯誤で実験値と最も一致する値を求めた結果、20N/mm²となった。この値は、骨材が強度を持たない場合のコンクリート要素の強度としては大きすぎると考えられるが、本研究では、他に f_0 を決定するための検討を行っていないことから、20N/mm²の値を採用することとした。モルタル要素の配合が1種類であり、20N/mm²以下の供試体がほとんどなかったこ



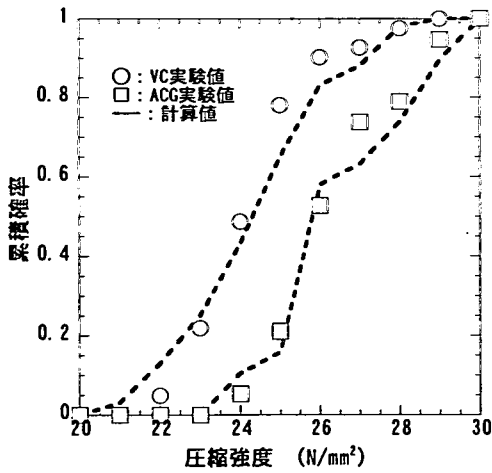
(a) VCの円形度の分布



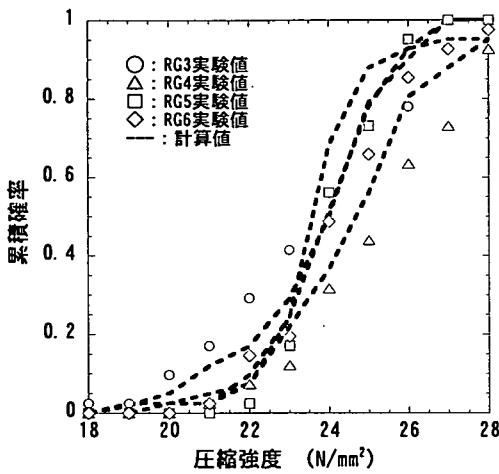
(b) 各粗骨材の円形度の平均値と標準偏差

図-25 粗骨材の円形度の分布

とも関係していると考えられ、他の水セメント比の場合についても実験が必要と思われる。詳細な検討は、モルタル中の粗骨材強度の値も含めて今後の課題としたい。コンクリート要素の強度に影響を及ぼす要因としては、骨材およびモルタルの強度の他に、骨材の位置や向き、形状などが考えられる。骨材の位置や向きについては、ランダムに決定されるものとして、その影響は式 (3) 中で乱数を用いることにより自動的に考慮されるものと考えた。一方、骨材形状の影響については、骨材の種類ごとに形状が異なる可能性があるため、粗骨材の粒子ごとの画像を取り込みその二次元投影から円形度を算出した。円形度とは、粒子と同一の投影面積を持つ真円の円周と粒子の周長との比によって定義され、粒子が真円の場合は1.0となる指標である。図-25に結果を示す。図



(a)



(b)

図-26 コンクリート要素の圧縮強度推定結果

(a)は碎石の円形度の分布を示したものであるが、正規分布による近似が可能である。他の骨材も同様に正規分布に従うことが確かめられたので、平均値と標準偏差をそれぞれ算出し比較したものが図(b)である。図より、本研究で用いた粗骨材では形状にほとんど差がないことから、今回は形状の影響は考慮しないこととした。しかし例えば、川砂利や人工軽量骨材などの形状の相当異なる骨材を用いる場合には、検討を要するものと考えられる。

以上の検討から、粗骨材の点荷強度とモルタル要素の強度を実験結果を回帰して得られた Weibull 分布を用いて乱数により決定し、式(1)および式(3)を用いてコンクリート要素の圧縮強度を推定した。結果を図-

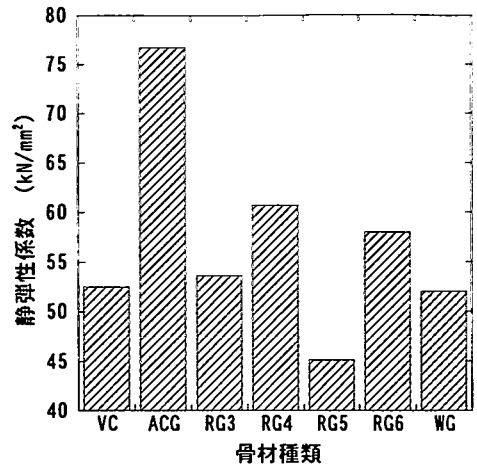


図-27 骨材の弾性係数

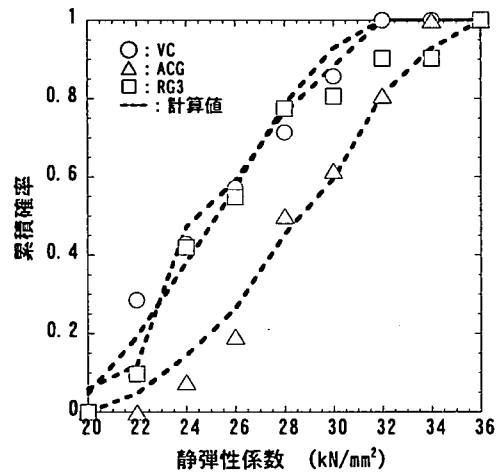
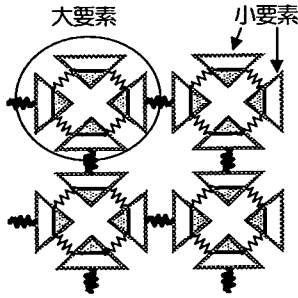


図-28 コンクリート要素の静弾性係数推定結果

26に示す。図より、計算値は実験値とほぼ一致していることが確認でき、骨材の点荷強度とモルタルの圧縮強度の分布特性が把握されていればコンクリート要素の圧縮強度分布を再現できることが確認された。

なお、コンクリート要素の破壊の原因となるのは、モルタルクラックおよび骨材クラックの他にモルタルと骨材間のボンドクラックが考えられる。しかし3(1)で述べたように本研究では、骨材とモルタルの界面性状を直接評価することなくコンクリートの諸特性をモデル化しようとしているため、ここではモルタルと粗骨材の強度からコンクリート要素の強度が決まるものと仮定した。ただし、界面の影響は間接的に式(2)の諸定数に反映されているものと考えられる。





-  モルタル要素の材料特性に支配されるばね
-  コンクリート要素の材料特性に支配されるばね

図-29 RBSM の要素とばねの設定の概念

d) コンクリート要素の静弾性係数の推定

コンクリート要素の静弾性係数もモルタルとその内部に含まれる粗骨材の性質の影響を受けるのは当然である。しかし、粗骨材の各粒子の静弾性係数を測定することは困難なので、同一種類の粗骨材では粒子毎に変化せず全て一定値をとるものと仮定した。

$$E_c = \frac{V_m \cdot E_m + (1 + V_a) \cdot E_a}{(1 + V_a) \cdot E_m + V_m \cdot E_a} E_m \quad (4)$$

ここに、 E_c : コンクリートの弾性係数

E_m : モルタルの弾性係数

E_a : 粗骨材の弾性係数

V_m : コンクリート中に占めるモルタル部分の容積率 (ただし、 $V_m + V_a = 1$)

V_a : コンクリート中に占める粗骨材の容積率

粗骨材の種類ごとの静弾性係数は、式(4)で示される Hansen のモデルを用いて¹⁰⁾、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のコンクリート供試体で測定した弾性係数から逆算した。得られた結果を図-27 に示す。なお、ここで用いたコンクリート供試体は、2章と同様の配合である。すなわち、水セメント比 55%、目標空気量 $4 \pm 0.5\%$ 、目標スランプを $8 \pm 1 \text{ cm}$ とした。

図-27 の結果をもとに、式(4)を再度用いてコンクリート要素の静弾性係数の推定を行った。具体的には、式(4)中で E_c をコンクリート要素の静弾性係数、 E_m をモルタル要素の静弾性係数とした。また、モルタル要素の弾性係数は供試体ごとに異なり、その分布は圧縮強度と同様に Weibull 分布に従うことから、乱数によりその分布を再現した。また、コンクリート要素中の粗骨材およびモルタルの容積率は、用いた粗骨材の粒度分布に

従ってランダムに与えた。これらの値を組み合わせ、弾性係数の分布を推定した結果を図-28 に示す。図より、計算値は実験値の分布をよく再現していることがわかる。本手法では強度の推定の場合と異なり、骨材粒子ごとに静弾性係数の値を変えていないが、粗骨材とモルタルでの静弾性係数の差が大きいため、骨材粒子の違いによる影響が相対的に小さくなり、推定結果に影響しなかったものと考えられる。

(4) 圧縮強度の推定

(3) の検討において、粗骨材およびモルタルの品質からコンクリート要素の力学特性を評価することが可能であることを示した。ここではその結果を利用して、剛体ばねモデル¹⁰⁾ (以下、RBSM)を用いたコンクリート供試体の圧縮強度の推定法について検討する。

RBSM とは、剛体と剛体をばねにより連結したモデルにより、全体の挙動を把握する手法である。各要素は剛体であり、変形しないものとし、それらを連結する法線方向、せん断方向の2本のばねにより、釣り合いを計算するものである。

剛体要素は、コンクリート要素であり、コンクリート要素がばねにより連結され、計算領域、すなわち全体のコンクリートが形成される。しかし、この仮定では粗骨材を1個のみ含む微少なコンクリートが破壊に至ることはない。剛体要素は変形・崩壊しないからである。そこで、本研究では以下のように剛体要素を設定した。

便宜上、1個のコンクリート要素を大要素、これを計算のために分割したものを小要素とする。RBSM における剛体要素は小要素であり、連結ばねは鉛直方向・せん断方向ともに大きく2種類に分類した。一方は、大要素内の小要素を連結するばねであり、他方は大要素を連結するばねである。図-29 に、本研究における要素およびばねの設定の概念図を示す。

小要素を連結するばねはコンクリート要素の材料定数に支配され、これが切断されることは粗骨材もしくはそのごく近傍でクラックが発生したことを意味する。大要素を連結するばねはモルタルの材料定数に支配され、このばねが切断されることはモルタル中にクラックが発生したことを意味する。

この2種類のばね定数および降伏判定には、小型供試体の材料特性の推定値を用いた。即ち、小要素を連結するばねには、そこに含まれる粗骨材を用いたコンクリート要素に関する推定値を用い、大要素を連結するばねにはモルタル要素に関する推定値を用いた。ただし計算においては、Coulomb の破壊条件を採用しており、材料定数としてせん断強度が必要となる。小型供試体によってせん断強度を測定することは困難であったため、実験条

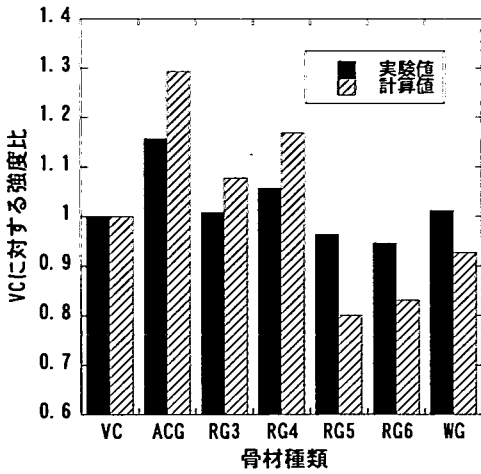


図-30 圧縮強度の推定結果 (粗骨材単独使用)

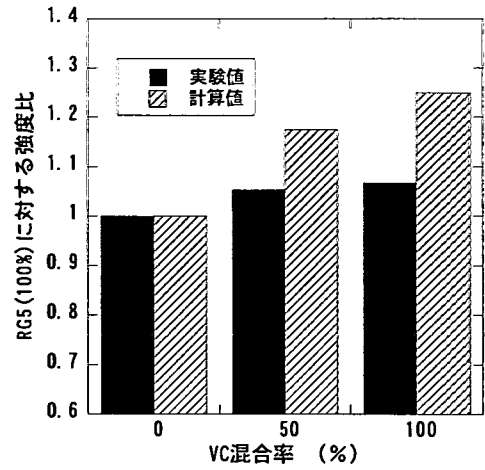


図-32 圧縮強度の推定結果 (RG5+VC)

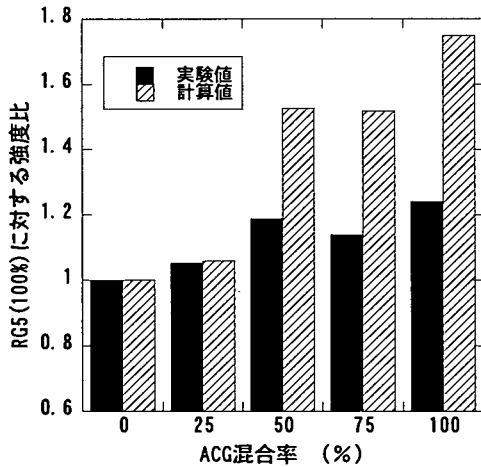


図-31 圧縮強度の推定結果 (RG5+ACG)

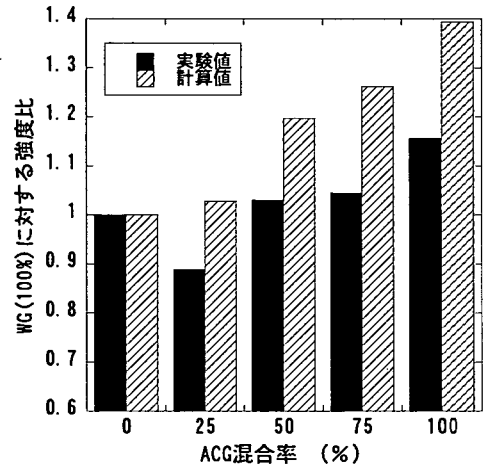


図-33 圧縮強度の推定結果 (WG+ACG)

件は異なるが、本研究では以下の式¹⁵⁾によって圧縮強度から計算したせん断強度をコンクリート要素のせん断強度とした。

$$\tau_{su}/\sigma_c = -0.0002\sigma_c + 0.24 \quad (5)$$

ここに、 τ_{su} :せん断強度 (N/mm²)
 σ_c :圧縮強度 (N/mm²)

計算領域は10×20cmを対象とし、1辺25mmの大要素に分割した。また大要素は、図-29にも示すように、対角線によって4つの小要素に分割した。

入力値として必要となるのは、圧縮強度、静弾性係数、

ポアソン比および内部摩擦角である。圧縮強度と静弾性係数は、(3)に示したように骨材とモルタルの品質より分布特性の推定が可能である。またポアソン比と内部摩擦角は、コンクリート要素の圧縮試験の際に併せて測定した。これらの値は他の性質と同様に分布を有していたが、骨材の種類や個々の粒子の性質との明確な相関が見られなかったことから、全てのコンクリート要素で一定値をとるものとした。具体的な値は実験結果の平均値とし、ポアソン比0.2、内部摩擦角45°である。

一つの大要素に配置される粗骨材は一樣乱数によりランダムに決定し、その種類と粒径が選ばれる確率は骨材の混合率および粒度分布に従うよう設定した。

以上のような方法で2章および3章において行った実

験を対象として、コンクリート供試体の圧縮強度を推定した。各粗骨材を単独で使用した場合の計算結果及び実験結果を図-30に、粗骨材を混合した場合の結果を図-31~33に示す。ここで、本研究で用いた手法は種々の仮定が設けられていること、三次元を二次元に置き換えていることから、計算結果の絶対値そのものには意味がない。したがって、単一の粗骨材使用の場合においては、計算結果および実験結果を全て碎石の値との比で表し、混合使用の場合においては混合率0%の値との比で表している。なお、計算結果は入力値を確率分布によって決定しているため、ある程度のばらつきが生じる。したがって本研究においては、各計算を50パターン行い、その平均値をもって計算値とした。

図-30より、骨材を単独で用いた場合には、計算値は実験値の定性的傾向を再現していることがわかる。しかし、ACGでは過大評価、原コンクリートが低強度の再生骨材の場合を過小評価している。

図-31は、再生骨材(RG5)と酸化スラグ骨材を混合した場合の推定結果であるが、酸化スラグ混合率が高くなるに従って強度が増加する傾向が再現できている。しかし、酸化スラグ混合率50%以上では、計算値が実験値を大きく上回る結果となっている。図-30にも示されているように、酸化スラグを用いた場合には強度を過大評価する傾向にある。この原因として、ブリーディングの影響が考えられる。酸化スラグは密度が大きいためブリーディングが増加するが、本研究で用いた小型供試体は一辺が3.5cmの立方体であるため、ブリーディングの影響が顕著に現れず、この結果を基にコンクリート要素の材料特性を決定しているために、計算にはブリーディングの影響がそれほど反映されなかったものと考えられる。したがって、密度が大きくブリーディングの影響を無視できない骨材では、ブリーディングの影響を取り入れるための今後の検討が必要である。なお、(3)d)における静弾性係数の評価では、ブリーディングの影響を考慮しなくても不都合は無かった(図-28)。これは、粗骨材粒子ごとに個別の弾性係数を設定せず、骨材種類ごとに一定値をとると仮定した、即ち粒子全体で平均化した値を用いたことが一因と考えられ、今後は詳細な検討が必要であると思われる。

しかしながら、図-32および図-33からも確認できるように、骨材種類および混合率の違いによる強度の順位については計算値は実験値に一致しており、骨材の組合せや混合率によらず、本手法は定性的に妥当であると考えられる。定量的評価に向けて計算方法に検討の余地はあるものの、本推定手法は配合設計にあたって骨材の組合せや混合率の事前検討には有効であるといえる。

4. 結論

本研究では、異なる骨材を混合して用いる混合骨材コンクリートの諸特性を明らかにするため、種々の骨材を用いて実験的検討を行った。また、骨材の品質から混合骨材コンクリートの諸特性を推定する方法についても基礎的な検討を加えた。

本研究の範囲で得られた結論を、以下に示す。

(1) 混合骨材コンクリートにおいて、同一スランプを得るための単位水量は、単独で用いた場合に単位水量が増加する骨材の混合率が高くなるほど増加する傾向がある。しかし増加の程度は、骨材の組合せによって異なる。

(2) 混合骨材コンクリートのブリーディング量は、密度の高い骨材の混合率が高くなるほど増加する。また、ブリーディング量は、骨材の平均密度(骨材の混合比率を重みとした重み付き平均値)で評価することが可能である。

(3) 骨材を単独で用いる場合は、密度の高い骨材を用いたコンクリートの圧縮強度が高い傾向にある。混合骨材コンクリートでも、高密度の骨材の混合率が高いほど高強度となる傾向が見られる。

(4) 骨材を単独で用いる場合は、密度の高い骨材を用いたコンクリートの静弾性係数が大きい傾向にある。混合骨材コンクリートでも、高密度の骨材の混合率が高いほど静弾性係数が大きくなる。さらに、静弾性係数は骨材の平均密度によって評価することが可能である。

(5) 混合骨材コンクリートの乾燥収縮は、高密度の骨材の混合率が高いほど小さくなる。また乾燥収縮量は、骨材の平均密度で評価することが可能である。

(6) 密度が低く吸水率の大きい細骨材を用いたコンクリートは、耐凍害性が著しく低い。しかし、スラグ骨材のような高密度の細骨材を混合すると、混合率の増加に従って耐凍害性が向上する。

(7) 低密度の粗骨材に高密度の粗骨材を混合して用いたコンクリート耐凍害性は、混合率の変化に対応した一定の傾向は見られず、骨材自体の品質とブリーディングの影響の複合作用を考慮する必要が示唆された。

(8) コンクリート要素(粗骨材を一個のみ含む小型コンクリート供試体)の圧縮強度や静弾性係数は分布を有し、骨材自体の品質の分布およびモルタル要素(粗骨材を含まない小型供試体)の品質の分布を組み合わせることによってその分布を再現することができる。

(9) 骨材およびモルタルの品質の分布からコンクリート要素の諸特性の分布を再現し、それを剛体ばねモデルの要素特性として用いることにより、混合骨材コンクリートの圧縮強度を定性的に評価することができる。

謝 辞：本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発」の一部として行ったものであることを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：平成 11 年版 コンクリート標準示方書 [施工編]，2001. 1.
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 5，1997. 1.
- 3) 仁木孟伯，長瀧重義，友沢史紀，梶原敏孝：銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp 399-404，1995. 6.
- 4) 例えば，岩崎孝：再生骨材の現状と将来，セメント・コンクリート，No. 609，pp 1-6，1997. 11.
- 5) 藤原忠司，帷子国茂：低品質の砂利を用いたコンクリートの諸特性，セメント技術年報，No. 40，pp 134-137，1986.
- 6) 長瀧重義，佐伯竜彦，飯田一彦：破碎材齢の異なる再生骨材を用いたコンクリートの諸特性，セメント・コンクリート論文集，No. 53，pp 528-534，1999.
- 7) 須藤裕司，鮎田耕一，佐原晴也，竹下浩之：増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1，pp 1003-1008，1992.
- 8) 猪口泰彦，長瀧重義，佐伯竜彦：再生骨材の性質が耐凍害性に及ぼす影響，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp 448-449，1998. 10.
- 9) 小坂義夫，谷川恭雄，太田福男：各種の骨材を用いたコンクリートの力学特性，セメント技術年報，No. 27，pp 238-242，1973.
- 10) 地盤工学会：岩の調査と試験，地盤工学会，1997.
- 11) 小坂義夫：人工軽量骨材コンクリートの力学的特徴について，日本建築学会論文報告集，No. 240，pp 21-29，1976.
- 12) Hansen, T. C. : Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, Journal of ACI, Vol. 162, No. 2, 1965.
- 13) 川井忠彦：離散化極限解析法概要，培風館，1991.
- 14) 川井忠彦，竹内則雄：離散化極限解析プログラミング，培風館，1990.
- 15) 加藤清志：コンクリートの面内せん断性と AE 特性に関する実験研究，セメント技術年報，No. 40，pp 277-280，1986.

(2001. 6. 22 受付)

STUDY ON CHARACTERISTICS OF MIXED AGGREGATE CONCRETE AND ESTIMATION METHOD OF ITS PROPERTIES

Tatsuhiko SAEKI, Yasuhiko INOBUCHI, Yasuhiro NIINO and Shigeyoshi NAGATAKI

The purpose of this study is to estimate the characteristics of the concrete using the aggregate by mixing, for the effective utilization of low quality aggregate. In this study, concretes using various low quality aggregates by mixing with high-quality aggregates, such as slag aggregate were tested. The type of aggregate and mixing rate were different each other. The specimens of such mixed aggregate concretes were produced, and fresh properties, strength characteristic, drying shrinkage and resistance of freezing and thawing were measured. In addition, the basic examination was carried out on the estimation method of characteristics of the mixed aggregate concrete from the quality of the aggregates.