

論文 混合骨材コンクリートの耐凍害性

猪口泰彦*1・佐伯竜彦*2・石橋尚樹*3・長瀧重義*4

要旨: 本研究では、コンクリートは粗骨材を1個含むコンクリート要素の集合体であると考へた。このコンクリート要素の力学的性状を測定し、それらの組み合わせで耐凍害性を評価することを試みた。このようなメソレベルでのモデル化により、様々な品質の骨材が混在する混合骨材コンクリートの耐凍害性の評価の可能性について検討した。

キーワード: 混合骨材, コンクリート要素, 耐凍害性

1. はじめに

近年、骨材資源の枯渇により良質な天然骨材のみを使用することは困難なこととなってきている。一方で、スラグ骨材のように、コンクリート用骨材として有効に利用することが求められているものもあり、これらの骨材を混合して使用する状況が起こりうる。また、再生骨材も、個々の粒子毎にモルタルの付着量は異なり、異種骨材の混合されたものと捉えることができる。

このような背景から、本研究では、複数の粗骨材の混在する混合骨材コンクリートを製造し、その耐凍害性について検討した。

2. 混合骨材コンクリートのモデル化

本研究でのモデルは、メソスコープ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である。

一般に、コンクリートは粗骨材と母材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¹⁾(図-1)。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。

いま、粗骨材1個のみを含むコンクリート要素を考へる。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(図-2)。

ただし、前提として、モルタルマトリクスはマクロに均質であるものとする。本研究では、異種粗骨材の混在するコンクリートを扱っており、その性質の差と比較し、モルタルの性質の差は非常に小さいからである。この前提により、コンクリート要素どうしの境界で連続性を保つことが可能となる。

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受けたもの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るのである。

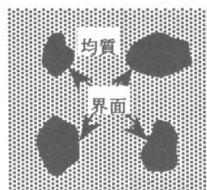


図-1 二相複合材料

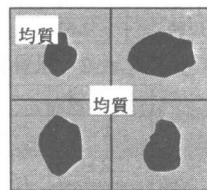


図-2 コンクリート要素の集合体

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 環境システム科学専攻 (正会員)
 *2 新潟大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)
 *3 新潟大学 工学部建設学科
 *4 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

3. 実験概要

3.1 使用材料および配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。

細骨材に川砂を用い、粗骨材には表-1に示す碎石、再生粗骨材、電気炉酸化除冷スラグ粗骨材を用いた。以後、表中の記号で記す。粗骨材を混合するに当たり、混合比は容積比とした。混合の組み合わせを表-2に示す。

凍結融解試験に用いたコンクリートは、水セメント比を55%とし、目標スランプを8cm、目標空気量を4%とした。空気量の実測値は凍結融解試験結果の図中に示す。供試体は10×10×40cmの角柱供試体とした。

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。

表-1 使用骨材の物理的性質

記号	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)	原コンクリート強度 (MPa)
N	碎石	2.64	0.84	4.7	
R1	再生	2.46	5.0	25.6	
R2	骨材	2.43	5.1	36.5	
S	スラグ	3.84	0.76	0.80	
	川砂	2.63	2.63	9.4	

表-2 粗骨材の組み合わせ

粗骨材	混合比	各骨材単独
R1+N	25:75	
R2+S	50:50	
N+S-V*	75:25	
R1+R2	50:50	

*増粘剤を使用

3.2 試験方法

材齢28日より、ASTM C 666 Aに準じ、水中凍結水中融解試験を行った。

小型供試体では、圧縮荷荷を行い、ロゼットゲージにより得られた各ひずみを用いて静弾性

係数、ポアソン比及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試験機具との摩擦をなくし、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、同一の粗骨材でも1個ずつが完全に同じものではないと考え、無作為に抽出した100個について密度及び吸水率を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 混合骨材コンクリートの力学性状

各配合におけるコンクリートの使用粗骨材の密度を容積比で重み付けした平均密度と圧縮強度及び静弾性係数との関係を図-3に示す。

特に静弾性係数において、密度の大きな粗骨材を多く使用するほど大きな値が得られることが確認された。圧縮強度においても大まかにはこの傾向にあることが分かる。

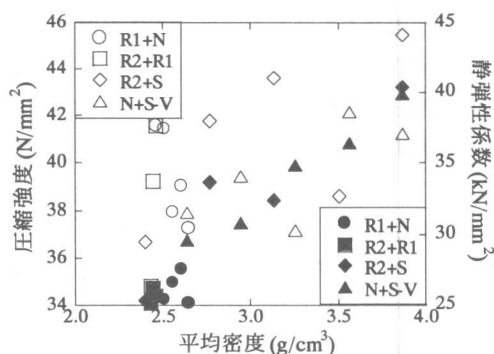


図-3 平均密度と力学的性状の関係

4.2 混合骨材コンクリートの耐凍害性

4.2.1 粗骨材を単独で用いた場合

各種粗骨材を単独で用いた場合の相対動弾性係数の経時変化を図-4に示す。

再生骨材は、本研究で用いたものに限れば、碎石と大差はなく、原コンクリートの違いの影響は見られなかった。また、300サイクルにおいて相対動弾性係数が60%以上であり、一応の耐凍害性を有していることが確認された。

スラグ骨材を用いた場合、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、スラグ骨材の密度が大きいことによる、ブリーディングの影響であると考えられる。再生骨材R2とスラグ骨材を混合した場合のブリーディング量を図-5に示す。

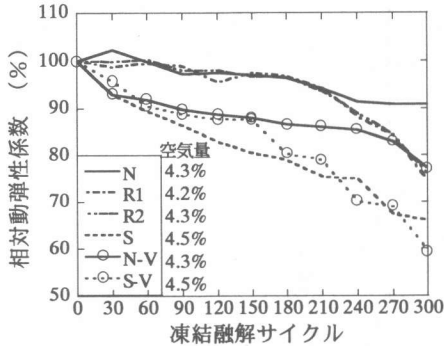


図-4 単独で使用した場合の耐凍害性

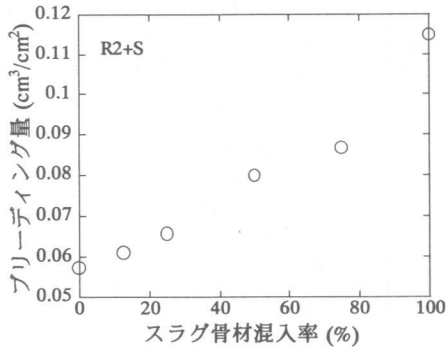


図-5 スラグ混入率とブリーディング量

そこで、粗骨材の偏在とブリーディングを抑制するために碎石とスラグ骨材を使用したものに対して増粘剤を添加した(図-4中、N-V、S-V)。いずれの混合率においてもブリーディングは見られず、増粘剤は有効に作用した。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に有効な微細な気泡が連行されなくなったためである²⁾。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、母材モルタル自体の品質が低下したといえる。

4.2.2 粗骨材を混合して用いた場合

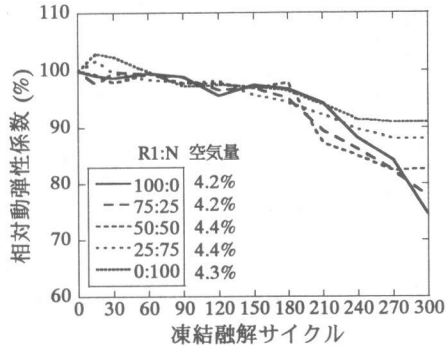


図-6(a) 混合して用いた場合の耐凍害性
(碎石と再生骨材を混合)

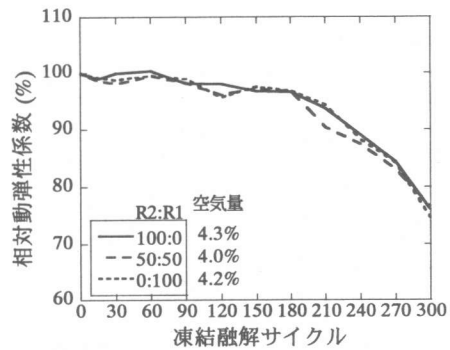


図-6(b) 混合して用いた場合の耐凍害性
(異なる再生骨材を混合)

粗骨材を混合して使用した場合の相対動弾性係数の経時変化を図-6に示す。再生骨材と碎石の混合および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-6(a),(b))。スラグ骨材と再生骨材を混合したものの中では、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-6(c))。再生骨材はブリーディングが少なく、母材モルタルとの相性も良い反面、骨材自体は脆弱である。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、母材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、混合した場合に耐凍害性が最も低くなったものと考えられる。

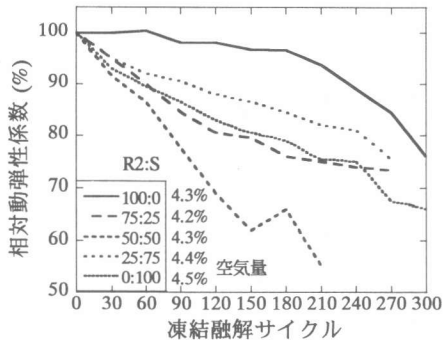


図-6(c) 混合して用いた場合の耐凍害性 (スラグ骨材を混合)

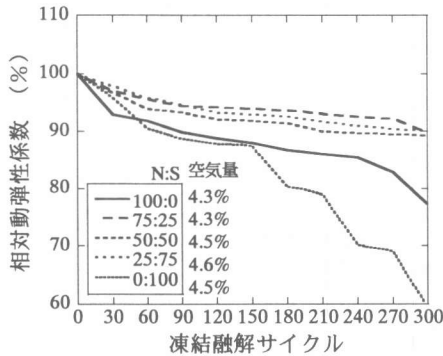


図-6(d) 混合して用いた場合の耐凍害性 (増粘剤を添加)

本研究では再生骨材と碎石では耐凍害性に大きな違いが見られなかったため、基準とした碎石にスラグ骨材を混合したのもも配合R2+Sと同様であると考え、これに対して増粘剤を添加することでブリーディングを抑制したコンクリートを製造した。いずれの混合率においても耐久性指数は90程度である(図-6(d))。増粘剤の使用が耐凍害性の向上に寄与している。ただし、スラグ骨材、碎石ともに、単独で用いた場合は良好な結果が得られなかった。

密度の極端に異なる粗骨材を混合して使用する場合は、本研究で増粘剤を用いたように、材

料分離やブリーディングを抑制することで耐久性の確保が可能となり得ることが確認された。

5. コンクリート要素を用いたシミュレーション

5.1 コンクリート要素の測定結果

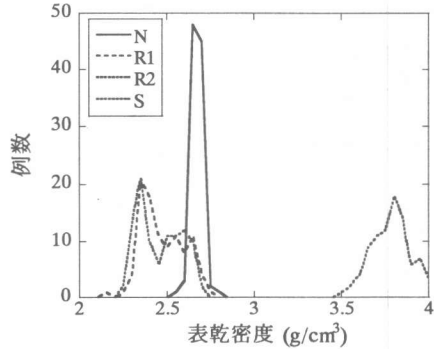


図-7 粗骨材の密度の分布

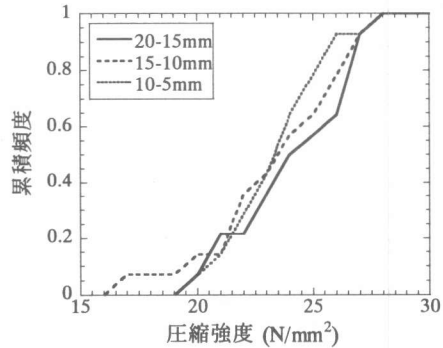


図-8(a) 圧縮強度の分布(R2)

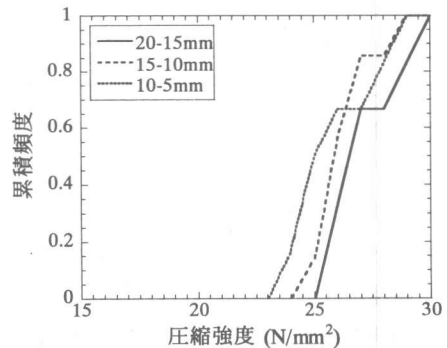


図-8(b) 圧縮強度の分布(S)

粗骨材の密度の分布を図-7に示す。碎石の密度は狭い範囲に分布しているのに対し、再生骨材は原骨材と付着モルタルという密度の大きく

異なる2種類のものの混合物であるため、その密度は広範囲に分布している。

小型供試体の圧縮強度の分布の一例を図-8に示す。なお、静弾性係数、ポアソン比、内部摩擦角もそれぞれ独自の分布を示した。小型供試体の圧縮強度の分布は粒径毎に異なり、また、粗骨材毎にも異なっている。同一種類の粗骨材が粒径以外完全に同じであれば、この分布は粒度分布の影響を強く受けるはずであるが、実際には粗骨材粒子1個毎にその形状はもちろん物理的性質も異なっているため、このような分布形となったものと考えられる。

5.2 シミュレーション

二次元RBSM^{3, 4)}を用いて凍結融解現象をシミュレートした。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。本研究では、RBSMにおける剛体要素は小要素であり、連結バネは鉛直方向・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バネであり、他方は大要素を連結するバネである(図-9)。

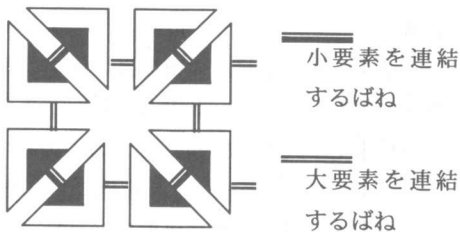


図-9 ばね設定の概念図

小要素を連結するばねは小型供試体による実験より得られた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し、凍害において骨材クラックまたはボンドクラックに相当する。大要素を連結するばねは母材モルタルの材料定数に支配され、このバネが切断されることは母材モルタル中にクラックが発生したことを

意味し、凍害においてモルタルクラックに相当する。

この2種類のバネ定数および降伏判定には、小型供試体によって測定した材料定数を用いた。小要素を連結するバネには、そこに含まれる粗骨材を用いた小型供試体による実験より得られた値を用い、大要素を連結するバネにはモルタルのみで作製した供試体によって測定した値を用いた。ただし、RBSMにおいて、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、実験条件は異なるが、本研究では以下の式⁵⁾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。

$$\tau_{su}/\sigma_c = -2.0408 \times 10^{-3} \sigma_c + 0.240 \quad (1)$$

ここに、 τ_{su} :せん断強度、 σ_c :圧縮強度

計算は供試体中央断面の10×10cmを対象とし、一辺25mmの大要素で計算領域を分割した。

一つの要素に配置される粗骨材は一様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 P_1 は(2)式ようになる。ところが、同一粒径でもその材料定数の実験値は各々の分布を有しているため、その分布にしたがって大要素の材料定数を階級化し、決定した。最終的に大要素の材料定数は(3)式の P_2 の確率で決定される。

$$P_1 = M_r \times P_g \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 \times f_m \quad (3)$$

ここに、 M_r :粗骨材の混合率、

P_g :ある粒度区分における骨材量、

f_m :実験値の頻度

凍結融解現象は複雑であるため、本研究では以下のようにきわめて単純化した現象について検討した。圧縮強度よりも若干小さい20N/mm²で一定の圧力が供試体表面に相当する境界以外

の全ての箇所均一に発生し、開放されるのを1サイクルとし、その繰り返しで破壊される要素が生じ、全体が劣化して行くものとした。

劣化の評価は、各サイクル終了時の各個所に生じているひずみと応力により求めた弾性係数の平均値と、この初期値の平均値との比をもって行うこととした。

このような設定に基づいて計算した結果の一例を図-10に示す。定量的には必ずしも実験結果と合致してはいない。これは凍結融解のメカニズムが複雑であり、それに対して時間・空間ともに常に等しく一定の圧力が作用するという仮定は適切でなかった可能性がある。空気量やブリーディングについてはコンクリート要素の力学的性状に及ぼした影響のみしか考慮しておらず、また、二次元での計算では三次元である実現象を再現しきれなかった。さらに、スラグ骨材は初期から、再生骨材は試験期間終盤から凍害劣化を生じたことを定性的に表現できなかったことも今後の課題である。しかし、混合率の観点からは定性的に合致しており、コンクリート要素の集合体として全体のコンクリートを構成するという本研究のモデルは混合骨材コンクリートの特性を評価する上で基本的には有効であると思われる。

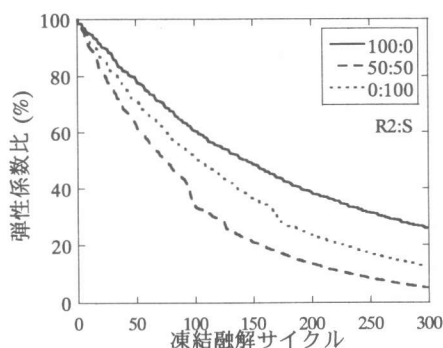


図-10 計算結果

6. まとめ

本研究では、異種粗骨材を混合し、コンクリート用骨材として使用することの適否についての基礎的知見を得るため、混合骨材コンクリ

ト供試体を作製し、その耐凍害性について検討した。また、混合骨材コンクリートについて、粗骨材を1個のみ含むコンクリート要素によるメソレベルでのモデル化を試みた。

本研究の範囲で得られた結論は以下の通りである。

(1) 混合骨材コンクリートの耐凍害性は、粗骨材を単独で用いた場合の結果が必ずしも反映されるわけではない。

(2) 密度の極端に異なる粗骨材を混合する場合、増粘剤を添加し、材料分離やブリーディングを抑制することは耐凍害性の向上に有効な手段となる。

(3) 凍害において、全体のコンクリートは、粗骨材を1個のみ含むコンクリート要素の集合体として構成されていると考えても定性的な評価は可能である。

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リサイクル方法の開発」(96R07601)の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 川合忠彦: 離散化極限解析法概論, 培風館, 1991.7
- 4) 川合忠彦, 竹内則雄: 離散化極限解析プログラミング, 培風館, 1990.6
- 5) 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