

IV-3 再生骨材・未利用骨材の有効利用技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 13 ～平 17

担当チーム：技術推進本部（構造物マネジメント技術）

研究担当者：渡辺博志、片平博

【要旨】

本研究は、再生骨材と未利用骨材をコンクリート用骨材として有効利用するための要素技術の開発と品質評価基準の提案を目指すものである。再生骨材コンクリートの課題の一つとして凍結融解抵抗性の確保があげられる。このため、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性に影響を与える要因とその改善手法について検討を行った。また、再生骨材の凍結融解抵抗性を精度良く評価する手法が確立すれば、凍結融解抵抗性に優れた再生骨材のみを選別することが可能となり、再生骨材コンクリートの普及に貢献できる。この観点から、簡易な再生骨材の凍結融解試験法について検討を行った。未利用骨材については、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材を使用した場合のコンクリートの硬化後の性状を調査し、有効利用の可能性を検討した。

キーワード：再生骨材、凍結融解抵抗性、試験法、冷凍庫、低品質骨材

1. はじめに

現在、公共工事で発生する解体コンクリートの90%以上は道路の路盤材である再生クラッシャーランとして再利用されている。しかしながら、道路建設の今後の見通しや、需要と供給の地域的なバランスを考えると、将来にわたって高い再利用率を維持するには、コンクリート解体材の利用用途の拡大を図ることが重要である。

特に、コンクリート解体材を再びコンクリート用骨材（再生骨材）として利用しようとする考えはリサイクルの基本であり、以前から数多くの研究が行われてきている。

コンクリート解体材から原骨材だけを取り出せば良質な骨材資源となる。現にそのような再生骨材製造装置も開発されているが、多大なエネルギーとコストが必要である。また、解体コンクリートの容積の半分以上が再利用困難な微粉となり、再生骨材として利用可能な歩留まりは必ずしも高くない。

現在、再生クラッシャーランとして一般的に製造されている再生骨材は、図-1に示すように原骨材にモルタルが付着した状態（あるいはモルタル単独の塊）であり、このような状態でコンクリート用骨材として再利用できればロスも少なく合理的である。

しかしながら、このような再生骨材をコンクリートに使用した場合には、とりわけ凍結融解抵抗性が低下する可能性がある¹⁾。

そこで本研究では、再生骨材の凍結融解抵抗性に影響を与える因子とその改善手法について検討を行い、次いで、再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価することの可能な試験法について検討を行ったものである²⁾。

未利用骨材については、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材を使用した場合のコンクリートの硬化後の性状を調査し、有効利用の可能性と、現在の骨材試験法の問題点について整理を行った。

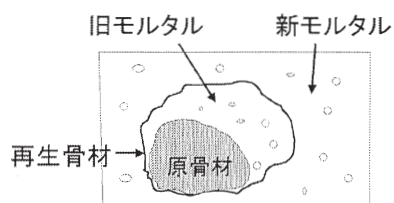


図-1 再生コンクリートの概念図

2. 原コンクリートと再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性の比較

2.1 検討の概要

図-1に示すように、旧モルタルが付着した状態の再生骨材を使用する場合には、旧モルタルの

品質、すなわち、原コンクリートの配合の影響が大きいと考えられる。そこで様々な配合で製造した原コンクリートと、その原コンクリートを破碎して製造した再生骨材を粗骨材とした再生骨材コンクリートとの品質を比較することで、原コンクリートの配合が、再生骨材コンクリートの品質にどのような影響を及ぼすかを調査した³⁾。

2.2 実験方法

粗骨材の種類として碎石と川砂利の2水準、水セメント比(W/C)を55,70,85%の3水準、空気量を5%(AE)と2.5%以下(NonAE)の2水準とし、13配合の原コンクリートを練混ぜた。練混ぜた原コンクリートの一部で凍結融解試験用供試体を作製した。残りの原コンクリートは平板上に打設し、翌日に粗割りした後に材齢28日まで水中養生を行った。

水中養生後にジョークラッシャーで20mm以下に破碎し、20-5mmの範囲を再生粗骨材とした。

13種類の再生粗骨材を用いて、W/C55%、s/a46%、空気量4.5%、単位水量(W)160kg/m³での条件で再生骨材コンクリートを製造し、凍結融解試験用供試体を作製した。

原コンクリートと再生骨材コンクリートの供試体について凍結融解試験(JIS A 1148 A法)を実施し、凍結融解抵抗性を比較した。

2.3 実験結果

凍結融解試験の結果から得られる耐久性指数に

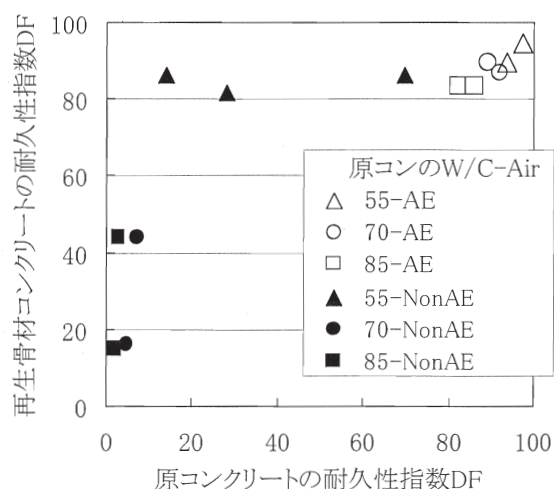


図-2 原コンクリートと再生骨材コンクリートの耐久性指数の比較

ついて、原コンクリートと再生骨材コンクリートの値を比較した結果を図-2に示す。これより以下の傾向が認められた。

(1) 原コンクリートがAEであれば、原コンクリート、再生骨材コンクリートともに耐久性指数は高い値を示した。

(2) NonAEの原コンクリートの耐久性指数は低い値を示した。

(3) 原コンクリートがNonAEの場合の再生骨材コンクリートの耐久性指数は原コンクリートのW/Cによって異なり、W/C55%では高く、W/C70および85%では低い値を示した。

以上のように、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は原コンクリート中の空気量の影響を強く受け、また、W/Cの影響もやや受けることが分かった。

3. 再生骨材の製造方法による凍結融解抵抗性改善の検討

3.1 検討の概要

再生骨材の製造方法について、比較的簡易な製造方法による再生骨材の品質改善効果について検討を行った。

3.2 実験方法

W/C58%、空気量1.5%(NonAE)の条件と、W/C77%、空気量5%(AE)の条件で2種類のレディーミクストコンクリート各1m³を練混ぜ、厚さ10cm程度の平板状に打設した。硬化後に粗割りし、材齢28日まで水中養生した。その後、図-3に示す3種類の方法によって原コンクリート塊を20mm以下に破碎し、5-20mmの範囲を再生粗骨材、5mm以下(一部の材料では2.5mm以下)を再生細骨材とした。各破碎装置の特徴を以下に述べる。

(1) ジョークラッシャー(J)：最も簡易な破碎装置である。圧裂破碎のため粒子形状が悪い。

(2) 回転式破碎机(T)：鋼製円筒内部に鋼製チェーンが高速で回転している。投入されたコンクリート塊はチェーンの打撃で破碎され、円筒の内縁に沿って高速で回転しながら流下する。この摩耗作用によって再生骨材表面の品質が改善される可能性がある。

(3) ロッドミル(R)：製砂設備であるロッドミルを利用し、ロッドよりも細い鉄筋を使用すること

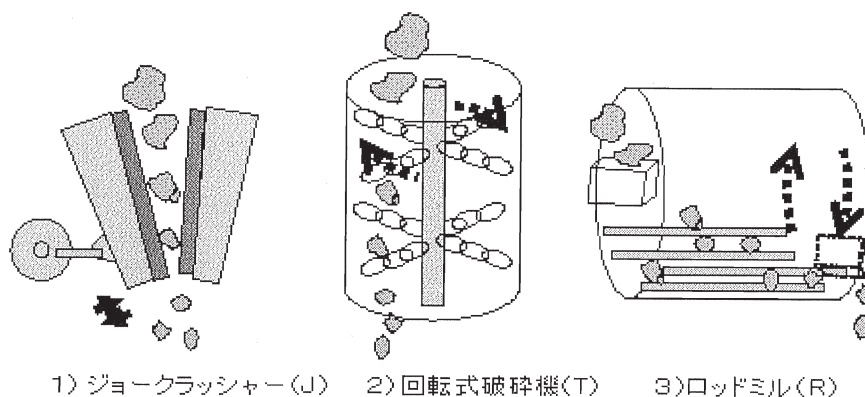


図-3 再生骨材の製造方法

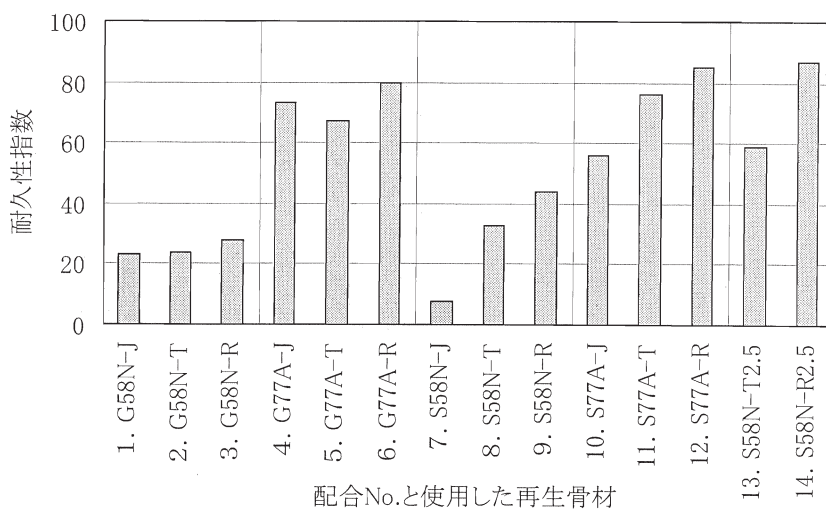


図-4 製造方法に工夫による耐久性指数の比較

で破碎エネルギーを調整する。鉄筋による擦り揉み作用によって再生骨材表面の品質が改善する可能性がある。湿式であり、濁水処理を必要とする。

上記の各手法によって製造した再生粗骨材と再生細骨材の比率は、ジョークラッシャーで約7：3、回転式破碎機とロッドミルでは約5：5であった。

製造した再生骨材は粗骨材が6種類、細骨材が8種類(5-0mmが6種類、2.5-0mmが2種類)であり、この14種類の再生骨材をそれぞれ単独に使用してW/C=55%、Air=4.5%、W=160~170kg/m³の条件で14配合の再生骨材コンクリート練混ぜ、凍結融解試験用供試体を作製した。

材齢28日まで水中養生を行った後に凍結融解試験(JIS A 1148 A法)を実施した。

3.3 実験結果

凍結融解試験結果を図-5に示す。

再生骨材の名称は「粗・細骨材の別(G,S)、原コンクリート配合-破碎方法」であり、2.5-0mmの再生細骨材については名称の最後に2.5を記した。

再生粗骨材を用いた配合1~6では破碎方法による差は認められず、今回実施した程度の簡易な製造方法で再生粗骨材の凍結融解抵抗性を改善することは困難であることが分かった。

一方、再生細骨材を用いた配合7~12では、J,T,Rの順に耐久性指数がやや向上する傾向が認められた。この理由としては、再生細骨材中に含まれる旧ペーストの割合がJ,T,Rの順に減少することの効果と考えられる。また、細骨材の粒度が5-0mmの配合8,9に比較して2.5-0mmの配合13,14

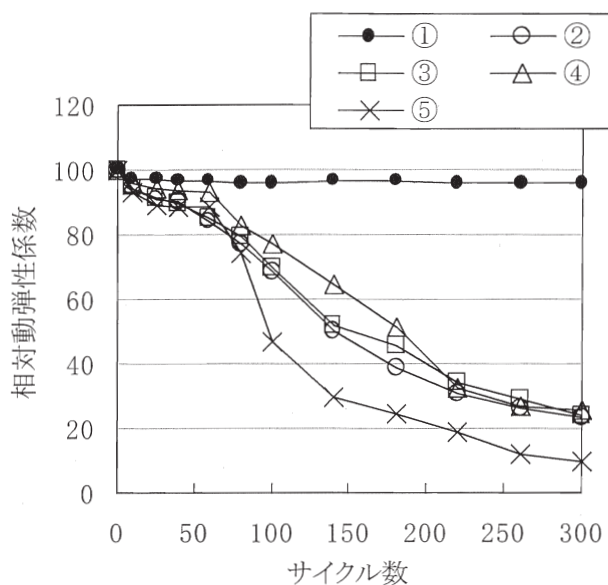


図-5 配合の工夫が凍結融解試験結果に与える影響

の耐久性指数がやや高くなった。これは新しいペーストによる包み込みによる効果が小さい粒子に対してほど有効なためと推察される。

以上のように、比較的簡易な製造方法による工夫では、再生細骨材の凍結融解抵抗性の改善効果はやや認められるものの、再生粗骨材の改善は困難な結果となった。

4. 再生骨材コンクリートの配合の工夫による凍結融解抵抗性改善の検討

4.1 検討の概要

実用的な範囲で再生骨材コンクリートの配合を工夫することで、凍結融解抵抗性を向上させることが可能かどうかについて検討を行った⁹⁾。

4.2 実験方法

再生骨材コンクリートに使用する骨材としては、粗骨材に再生骨材（市販の再生クラッシュラン）を使用し、細骨材には良質な川砂を使用した。

配合として以下の5配合を設定した。

配合①：普通骨材を使用した比較用配合であり、スランプ18cm、空気量4.5%、W/C55%とした。

配合②：粗骨材に再生骨材を使用し、その他の配合条件は配合①と同一とした。

配合③：配合②に対してW/C一定の条件で空気量を7.0%とした。

配合④：配合③に対して、単位セメント量を配合②と同等とすることでW/Cを50%まで下げた。

配合⑤：配合②に対してW/C一定の条件で単位水量を減少させ、スランプを8cmとした。

上記の5配合で再生骨材コンクリートを練混ぜ、凍結融解試験用供試体を製造し、28日の水中養生後に凍結融解試験(JIS A 1148 A法)を実施した。

4.3 実験結果

凍結融解試験結果から得られる相対動弾性係数の変化を図-5に示す。

比較用骨材を使用した配合①は300サイクル終了時点でも100%に近い値を示し、良好な結果であったが、配合①と同じ配合条件で粗骨材のみを再生骨材とした配合②は相対動弾性係数が大きく低下し、耐久性指数は24%となった。

配合②に対して空気量を増加させた配合③についても耐久性の改善は見られなかった。

配合③に対して水セメント比を下げた配合④でも耐久性の向上は認められなかった。

配合②に配合に対して単位水量を低下させた配合⑤では相対動弾性係数はさらに低下する結果となった。

以上の結果から、再生骨材コンクリートの練混ぜ時における配合上の工夫で、凍結融解抵抗性の改善を図るのは困難であることが分かった。

5. 再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案

5.1 検討の概要

上記までの検討の結果、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は原コンクリートの空気量やW/C、すなわち旧モルタルの品質に大きく依存すること、また、再生骨材の製造法や再生骨材コンクリートの配合を実用的な範囲で工夫しても、凍

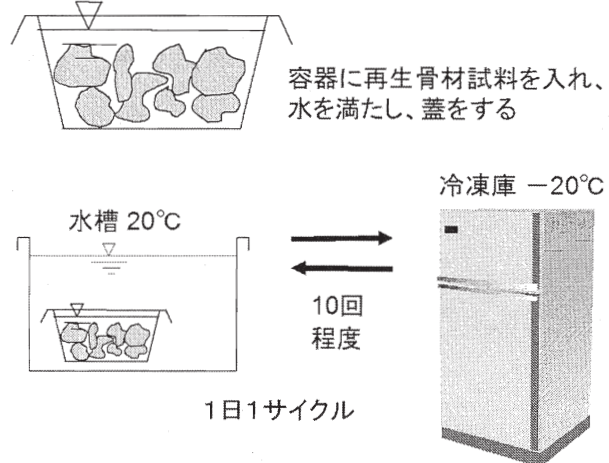


図-6 簡易凍結融解試験法のイメージ

結融解抵抗性を改善するのは困難であることが分かった。

このため、再生骨材の凍結融解抵抗性を比較的簡易に評価する試験法について検討を行った⁹⁾。

試験法の概要としては、特殊な試験装置を用いずに再生骨材に凍結融解作用を与える試験法として、図-6に示すように冷凍庫と水槽を用いることとして検討を行った。この結果、以下の試験法を提案するに至った。

5.2 再生骨材の簡易凍結融解試験法(案)

5.2.1 適用

この方法は、容器に再生骨材試料と水を入れ、その容器ごと冷凍庫と水槽に交互に入れることで凍結融解作用を与え、再生骨材の粒度の変化から再生骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験法に適用する。

5.2.2 試験の対象となる再生骨材の種類

本試験法は、粒度範囲が5～20mmの再生粗骨材を対象とすることを基本とする。

20mmを超える再生粗骨材を対象とする場合は、本試験法による評価が可能であるかどうかを事前に確認したうえで適用することができる。

5.3 試験に用いる機器

5.3.1 容器

容積1,000cc程度のプラスチック容器で蓋を有するもの。かつ、試験条件に対して破損しない容器であること。

5.3.2 冷凍庫

試料を-18℃以下に冷凍することが可能な冷凍庫

冷凍庫の冷却能力は冷凍庫の機種によって異なるために、使用する冷凍庫で一度に試験可能な試料量を事前に確認しなければならない。

5.3.3 水槽

水温が20℃程度のお水

5.3.4 ふるい

JIS Z 8801に規定する呼び寸法が4.75mm, 9.5mm, 19mmの網ふるい

5.3.5 はかり

秤量2kg以上、感量0.1g以下のはかり

5.4 試験手順

(1)事前に試験の対象とする再生粗骨材の粒度分布をふるい分けにより測定する。また、5mm以下の

粒子がある場合はそれを排除する。

(2)再生骨材試料を表乾状態とし、粒度分布が概ね(1)と一致する条件で容器に入れる。このとき、容器の容量に対して再生骨材試料の量ができるだけ多くなるように試料の量を設定し、各粒度の質量を0.1g単位で測定する。

(3)容器に水を満たし、蓋をする。

(4)容器を冷凍庫に入れ、中の水と試料が完全に凍結するまで冷凍する。凍結時間は16時間程度を標準とする。

(5)容器を冷凍庫から取り出し、水槽に沈め、中の氷が完全に融解するまで水中におく。融解時間は8時間程度を標準とする。

(6)1日1サイクルで(4)と(5)を交互に繰り返す。休日等で試験ができない日は凍結したままの条件として良い。

(7)10サイクルを終了した後に容器から再生骨材試料を取り出し、表乾に近い状態として、ふるい分けにより粒度分布を測定する。

5.5 計算

試験前後の粒度分布から粗粒率(FM)を計算する。ただし、5mm以下の粒子は全て2.5mmのフルイ上に止まると仮定してFMを計算する。この値をFM(5)と表記する。

5-20mmの再生骨材を対象とした試験ではFM(5)は式(1)で求められる。

$$FM(5) = \frac{(M_{10} + M_5)}{100} + 5.0 \quad (1)$$

ここに、

M_{10} , M_5 : 10mm, 5mmフルイ上にとどまる試料の質量百分率(%)

試験開始前と試験終了後のFM(5)の変化量を求め、この値を凍結融解抵抗性の指標とする。

5.5 簡易凍結融解試験法の検証実験

原コンクリートのW/Cや空気量、更には破碎方法(J,T,R)を変えることで、合計で13種類の再生粗骨材を製造した。これらの再生粗骨材に対して5.4の簡易凍結融解試験を実施し、試験前後のFM(5)の変化量を求めた。この試験はひとつの再生粗骨材に対して3回実施した。

13種類の再生粗骨材を用い、W/C=55%、Air

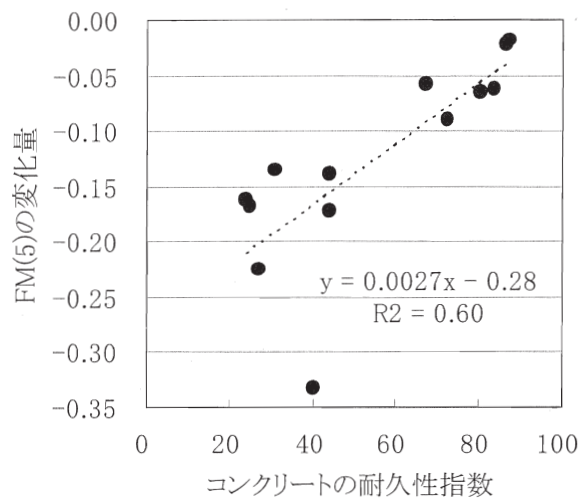


図-7 耐久性指数とFM(5)の比較

= 4.5 %、 $W=160\text{kg/m}^3$ の条件で 13 配合の再生骨材コンクリート練混ぜ、凍結融解試験用供試体を作製した。作製した供試体は材齢 28 日まで水中養生を行い、その後に凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法) を実施し、試験結果から耐久性指数を求めた。

耐久性指数と FM(5) の変化量との関係を図-7 に示す。耐久性指数の低いものほど FM(5) の変化量が大きくなる傾向を示す、比較的良い対応を示した。

FM(5) の変化量による再生骨材の凍結融解抵抗性の評価基準としては以下のように考える。

コンクリートの凍結融解試験では一般に耐久性指数が 60 % 以下のものは凍結融解抵抗性が低いと評価される。図-7 より、耐久性指数 60 % は FM(5) の変化量 10 % と概ね対応する結果となった。試験数量が十分でないことから、図-7 だけから評価基準を設定するには無理があるが、大凡の目安として 10 % 前後の値が指標になるものと考えられる。

6. 規格外骨材の有効利用の検討

6.1 検討の概要

現在の骨材の品質規格を満足しない規格外骨材の使用がコンクリートの性能に与える影響について実験的な検討を行った。低品質粗骨材に関しては昭和 54 ~ 56 年にも全国的な規模で実験検討⁶⁾が行われており、この結果も踏まえて有効利用に関する問題点を整理した。

表-1 低品質骨材の物性

記号	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	安定性 (%)
A	2.65	0.50	3.3
B	2.45	3.33	56.4
C	2.47	2.74	72.9
D	2.53	1.47	22.3
E	2.45	4.21	21.0
F	2.45	3.37	14.9
G	2.48	4.39	18.8

6.2 実験方法

全国から比較的品質の劣る骨材として 6 種類の骨材を収集した。この物理的性質を表-1 に示す。なお表-1 中の A は比較用の良好な骨材である。

表-1 に示す各骨材を単独使用して W/C55 %、s/a46 %、空気量 4.5 % の条件でコンクリートを練り混ぜた。細骨材には良質な骨材を使用した。練り混ぜた各コンクリートの供試体を用いて圧縮強度試験 (JIS A 1108) と凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法) を実施した。

6.3 圧縮強度試験結果

骨材吸水率とそれを用いたコンクリートの圧縮強度の関係を図-8 に示す。良質な骨材を使用した場合の圧縮強度は 36N/mm^2 であった。低品質骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は $29 \sim 37\text{N/mm}^2$ を示し、良質な骨材を使用した場合に比較して同程度かやや低下する結果となったが、極端に低い強度とはならなかった。

6.4 凍結融解試験結果

骨材吸水率とそれを用いたコンクリートの耐久性指数の関係を図-9 に示す。

低品質骨材を用いたことで耐久性指数が低くなったものは、粗骨材 D を用いたケースで 62、F を用いたケースで 28 であった。表-1 より粗骨材 D、F の物性をみると密度、吸水率、安定性損失質量ともに他の粗骨材と比較して劣るものではなかった。

6.5 今後の課題

上記の結果から、現在の骨材試験から得られる物性とコンクリートの耐久性指数とが合致しない結果となった。文献 6) の結果では吸水率と安定性損失質量の双方の値から適用基準を設定する案が示されているが、今回の実験でコンクリート耐

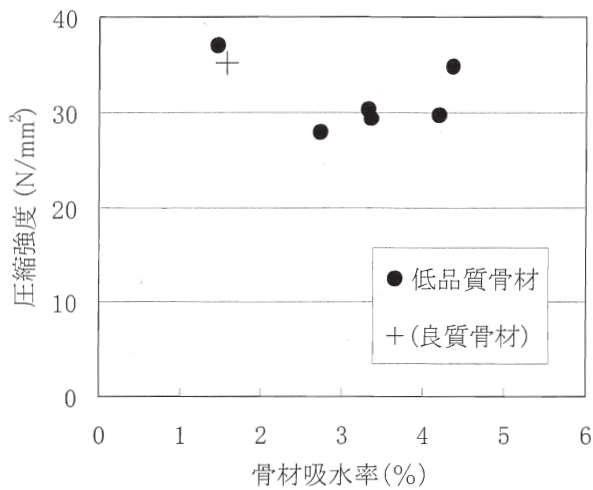


図-8 吸水率とコンクリート圧縮強度の関係

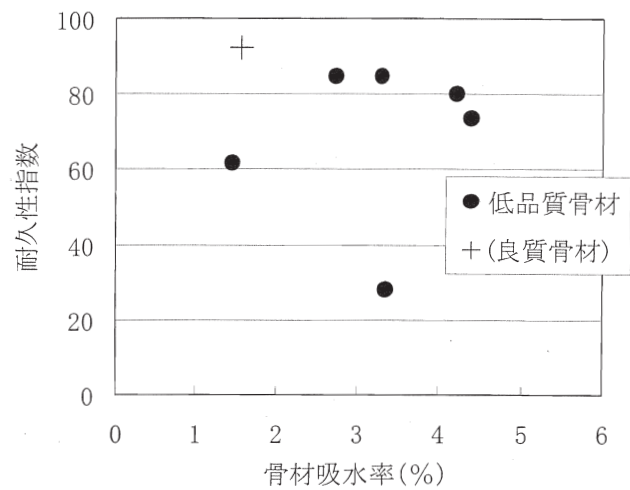


図-9 吸水率と耐久性指数の関係

久性指数が低く出た2種類の粗骨材は6)の基準案では使用可となってしまい、的確な基準の作成には更なる検討が必要と考えられる。

また、「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験」(JIS A 1122)から得られる安定性損失質量は骨材の耐凍害性を評価する指標として位置づけられている。しかしながら、今回の実験結果(H15-17)と6)の実験結果(S54-56)から安定性損失質量とコンクリートの耐久性指数との関係を見ると図-10のようになり、双方の間に良好な対応関係は見られなかった。このため、骨材の耐凍害性を評価するための新たな試験法の開発が必要と考えられる。

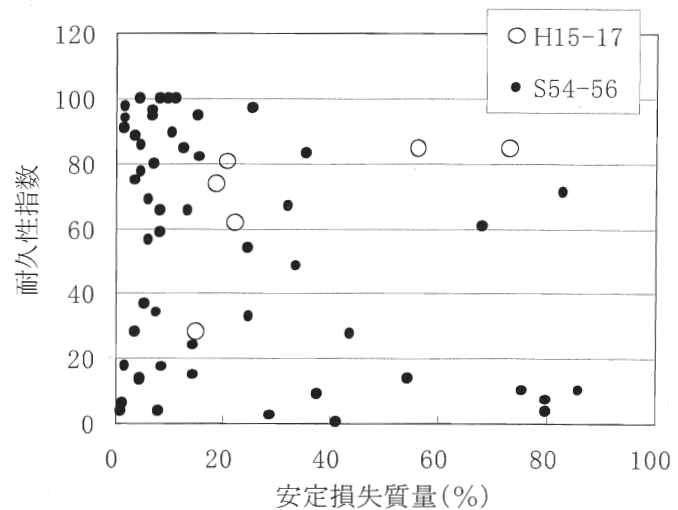


図-10 安定性損失質量と耐久性指数の関係

7. まとめ

(1) 粗骨材の種類(碎石、砂利)、水セメント比(5, 70, 85%)、空気量(有、無)を変化させた原コンクリートを製造し、それを破碎して再生粗骨材を製造した。この再生粗骨材を用いてW/C55%、空気量5%の条件で製造した再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を試験により求めた。この結果、再生骨材コンクリートの耐久性指数は、原コンクリートが空気量有の条件では高く、原コンクリートが空気量無の条件では原コンクリートのW/Cが高いものほど低下する傾向を示した。

(2) 再生骨材コンクリートの品質を改善する方法について検討した。再生骨材の製造方法として回転式破碎機やロードミルを用いる方法や、再生骨材コンクリートの配合を実用的な範囲で工夫する

方法(空気量2.5%増、W/C5%減など)について検討した。しかしながら、これらの方法で再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を改善することは困難であることが分かった。

(3) 再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価することのできる試験法を提案した。図-6に示すように再生骨材を容器に入れて水を満たして蓋をし、これを冷凍庫と水槽に交互に入れることで凍結融解作用を与える。1日1サイクルで10サイクルまで試験を行うこととし、試験前後の再生骨材の粒度(FM)の違いから凍結融解抵抗性を評価するものである。この試験結果と再生骨材コンクリートの

凍結融解試験結果とは良い対応を示した。

(4) 規格外骨材については、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材がコンクリートの強度や凍結融解耐久性に与える影響を調査した。この結果、強度への影響は小さいものの凍結融解抵抗性への影響は大きいことが分かった。

(5) 骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験法として安定性試験があるが、安定性試験の結果とコンクリートの凍結融解試験結果との間に良い対応関係は見られず、安定性試験に替わる新たな試験法の開発が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 片平博「再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響」セメント・コンクリート、No.654、pp.38-44、2001
- 2) 渡辺博志、片平博「再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性とその評価法に関する研究」土木研究所資料、No. 3996、2006.3
- 3) 片平博、渡辺博志「原コンクリートと再生骨材コンクリートの凍結融解耐久性の比較」土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.60、No.5、pp.773-774、2005.9
- 4) 片平博、河野広隆「再生骨材コンクリート中の空気量が耐久性に与える影響」土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.58、No.5、pp.405-406、2003.9
- 5) 片平博、渡辺博志「再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案」コンクリート工学年次論文集コンクリート工学年次論文集、Vol.27、pp.1351-1356、2005.6
- 6) 小林茂敏、河田博之、高橋正志、高橋弘人、石井良美「コンクリート用骨材に関する調査報告書(1) 物理的品質不良骨材に関する試験調査」土木研究所資料第 1838 号、昭和 57 年 6 月