

◆特集：土木分野におけるリサイクル技術◆

コンクリート用再生骨材の現状と品質評価試験法の検討

片平 博* 渡辺博志**

1. はじめに

コンクリートは強度、耐久性に優れ、いかなる形状にも築造が可能である。しかも安価であることから、近代建設事業に不可欠な材料であり、我国では年間約1億2千万 m^3 という膨大な量が施工されている。

一方、年間約3~4千万トンのコンクリート構造物が解体されている。現在、その9割以上が舗装の路盤材として再利用されているが、今後、道路用路盤材としての需要量が高い水準では望めないことや、コンクリート解体材の増加が見込まれることから、新たな再利用用途の開発が重要である。

コンクリート解体材を再びコンクリート用骨材として再利用するという考えはリサイクルの基本であり、かねてから多くの研究や施策が行われてきた。さらに近年になって再生骨材の品質をH, M, Lの3ランクに分けて、それらを有効利用するためのJIS化が進められている。しかしながら、JIS化されてもなお、再生骨材普及には多くの課題が残されている。

ここでは、再生骨材普及に向けたこれまでの経緯とJIS化の概要について紹介し、今後の課題と、その克服に向けた土木研究所での取り組みについて紹介する。

2. コンクリート解体材有効利用の経緯

コンクリート解体材はその発生量が膨大であり、廃棄物処分場の逼迫と相まって不法投棄が増加し、

深刻な社会問題となった。このため、コンクリート副産物の再利用に関する研究は30年以上前から始まっている。最初は建築分野で検討が始まり、1977年にはコンクリート用再生骨材の規格について日本建築業協会案¹⁾が出されている。その後も、土木研究所が直接関連した大型プロジェクトだけでも、建設省総合技術開発プロジェクトの「建設事業への廃棄物利用技術の開発」(1981~1985)^{2),3)}と「建設副産物の発生抑制・再利用技術の開発(副産物総プロ)」(1992~1996)⁴⁾がある。その他にもいくつもの大小のプロジェクトや研究・技術開発がなされている。

建設省は1994年、副産物総プロの成果として「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準(案)」(以下、暫定基準案という)を通達した。この暫定基準(案)の中では、コンクリート解体材を(1)コンクリート用再生骨材、(2)路盤材、(3)埋め戻し材・裏込め材、として使用する場合の基準案が示されている。

コンクリート用再生骨材については表-1に示す品質基準が示され、鉄筋コンクリート用に使用できる再生骨材は再生粗骨材I種のみに限定されている。再生骨材は図-1に示すように原骨材とそれに付着したモルタル塊(旧モルタル)で構成される。再生粗骨材I種の基準を満足するためにはモルタル塊の大半をそぎ落として原骨材を取り出す必要があるが、それには多大なコストと手間が必要であり、また大量の微粉が発生し、その処理が課題となった。

これに対してコンクリート解体材を路盤材に使用する場合は基準は緩く、解体材を

表-1 コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準(案)
コンクリート用再生骨材

項目	再生粗骨材				再生細骨材	
	I種	II種		III種	I種	II種
吸水率(%)	3以下	3以下	5以下	7以下	5以下	10以下
安定性損失質量(%)	12以下	40以下 12以下 (40以下)注)		—	10以下	—
対象コンクリート	鉄筋コンクリート	無筋コンクリート		捨てコンクリート	無筋コンクリート	捨てコンクリート

注) 凍結融解耐久性を考慮しない場合

The Current Situation and Study of Quality Evaluation Test Method on Recycled Aggregate.

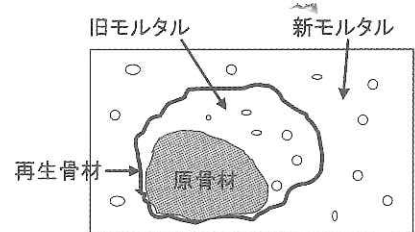


図-1 再生骨材コンクリート

ジョークラッシャー等で破碎し、ある程度の粒度調整をするだけで容易に基準を満足できる。

さらに、建設省が「路盤材には再生材を使用する」方策を打ち出したことから、路盤材への再利用が加速した。建設省の調査ではコンクリート解体材のリサイクル率は90年には48%であったが95年に64%、2000年に96%、2004年には97%に達しており、そのほとんどが路盤材である。

しかしながら、解体材の発生量と路盤材としての需要量とのバランスが今後とも維持される保障はなく、利用用途の拡大が重要課題となっている。

3. 再生骨材のJIS化について

3.1 JIS化の概要

2000年には日本工業規格から「テクニカル・レポート (TR) A 0006 再生骨材コンクリート」が制定された。このTRはなるべく手間をかけずに製造した(路盤材より多少品質の良い)低品質の再生骨材を有効に利用しようとするものである。得られるコンクリートの品質も低水準なことから使用範囲は限定されるが、品質管理等を合理化してコストを下げ、有効利用を促進しようとするものである。

さらに再生骨材の品質をH, M, Lの3段階に区分してJIS化が進められている。既にHは平成17年3月に、Lは18年3月にJIS化され、Mも18年度中を目途に作業が進められている。

再生骨材H, M, Lの製品規格の概要を表-2および以下に述べる。

3.1.1 再生骨材H (JIS A 5021)

吸水率の基準を天然の骨材と同一水準(粗骨材:3%、細骨材:3.5%以下)とすることで、天然の骨材と同様にコンクリートに使用することができる。すなわち、骨材に付着したモルタルを極力そぎ落とし、原骨材とほとんど同じ状態とした再生骨材である。

表-2 再生骨材のJIS規格の概要

	再生骨材H	再生骨材M	再生骨材L
規格	JIS A 5021	未定	JIS A 5023
適用範囲	JIS A 5308 準拠予定*	地中構造物など	捨てコンリート など
呼び強度の上限	JIS A 5308 準拠予定	36	標準品 18 仕様発注品 24
粗骨材の吸水率	3%以下	5%以下	7%以下
細骨材の吸水率	3.5%以下	7%以下	13%以下

*現時点ではまだJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に反映されていない

3.1.2 再生骨材コンクリートM

HとMの中間的な性能であり、乾燥収縮や凍結融解の影響を受けない地中構造物を対象に、呼び強度も36N/mm²まで認める方向で検討されている。再生骨材としてではなく、再生骨材コンクリートの規格としてJIS化される予定である。

3.1.3 再生骨材コンクリートL (JIS A 5023)

構造用コンクリートとしては使用せず、捨てコンクリート(以下、捨てコンという)等に限定した再生骨材コンクリートの規格である。使用範囲を限定することで安全性を確保する一方、簡便な処理でリサイクルを促進するねらいがある。

3.2 JIS化で残された課題

粗骨材の規格についてみると表-2のH, M, Lの規格と12年前に出された表-1の暫定基準(案)の規格は類似した内容となっている。用途範囲についてもI種とH、III種とLはほぼ同じである。II種だけは無筋構造であったのに対してMは地中構造物となった。これは、その間の研究の成果によって再生骨材コンクリートが普通コンクリートに比較して乾燥収縮と耐凍害性に劣るケースがあるものの、その他の性能については概ね同等であることが明らかとなってきたためである。ただし、アルカリ骨材反応については付着モルタル中の残存アルカリの影響が明らかでなく、かなり安全側の対策がとられる見込みである。

再生骨材のJIS化は、再生骨材のランクを3段階に分け、各ランクごとに使用可能な範囲を明示したものとイえる。再生骨材Hの製造には多大なコストが必要なことから限定的な使用となる。MまたはLの品質では地中構造物が捨てコンにしか使えないので、レディーミクストコンクリートに占めるシェアは限られたものとなる。多くのレディーミクストコンクリート工場では捨てコンから強度の高いコンクリートまでを同じ骨材で製造する。シェアの少ないコンクリートのために新たに再生骨材をストックできる工場は少ない。さらに普通骨材使用コンクリートよりも厳しいアルカリ骨材反応対策が必要となる。

一般土木工事に多く使用される呼び強度24程度のコンクリートが再生骨材で製造可能になれば再生骨材のシェアも大幅に拡大すると思われるが、そのためには凍結融解、乾燥収縮、アルカリ骨材反応等に対する今後の研究開発が必要となる。このような背景から土木研究所では、比較的簡易な製造方法によって製造された再生骨材を用いたコ

ンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究⁵⁾を行っており、その概要を以下に紹介する。

3. 土木研究所での取り組み

3.1 原コンクリートの品質が耐凍害性に与える影響の検討

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、すなわち再生骨材の製造原料である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した。

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

表-3 再生粗骨材の品質試験結果

原コンクリートの配合	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)
砕55A	2.35	4.33	39.8
砕70A	2.31	5.04	43.5
砕85A	2.31	5.09	46.0
砕55N	2.38	4.33	54.7
砕70N	2.36	4.64	41.4
砕85N	2.36	4.66	47.9
川55A	2.36	4.19	37.7
川70A	2.34	4.45	34.4
川85A	2.33	4.61	39.8
川55N-1	2.38	4.14	47.4
川55N-2	2.36	4.29	38.6
川70N	2.37	4.28	49.1
川85N	2.36	4.29	49.4

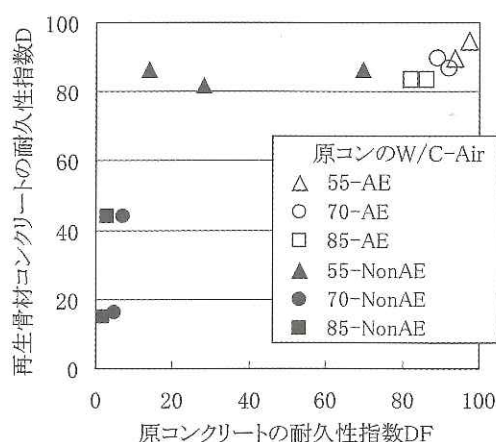


図-2 原コンクリートと再生骨材コンクリートの耐久性指数の比較

とし、13配合の原コンクリートを練混ぜた。練混ぜたコンクリートの一部で凍結融解試験用供試体を作製し、残りは原コンクリートとして平板状に打設した。材齢28日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。

再生粗骨材の品質試験結果を表-3に示すが、原コンクリートの配合が違うにも関わらず再生骨材の品質試験結果に有意な差は認められず、現状の骨材試験から再生骨材の品質を適切に評価することは困難と考えられる。

これらの再生粗骨材を用いて、W/C55%、s/a46%、空気量4.5%、単位水量160kg/m³の条件で再生骨材コンクリートを製造した。

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。

凍結融解試験の結果から得られる耐久性指数について、原コンクリートと再生骨材コンクリートの値を比較すると図-2のようになる。これより、(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。

3.2 再生骨材の製造方法による凍結融解抵抗性改善の検討

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

W/C58%、空気量1.5% (Non AE) 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、これを原コンクリートとした。材齢28日経過後に、以下の3種類の方法 (本誌グラビア参照) によって20mm以下に破碎し、5~20mmの範囲を再生粗骨材、5mm以下を再生細骨材とした。

(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。

表-4 再生骨材の品質試験結果

種類	再生粗骨材			再生細骨材			
	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)
G58N-J	2.35	5.58	52.7	S58N-J	2.09	10.36	32.8
G58N-T	2.36	5.40	39.0	S58N-T	2.17	8.43	22.9
G58N-R	2.36	5.35	40.1	S58N-R	2.23	7.03	24.3
G77A-J	2.31	5.65	55.0	S77A-J	2.10	9.25	9.7
G77A-T	2.36	5.07	40.8	S77A-T	2.13	8.71	17.4
G77A-R	2.37	4.94	42.3	S77A-R	2.21	7.04	19.8

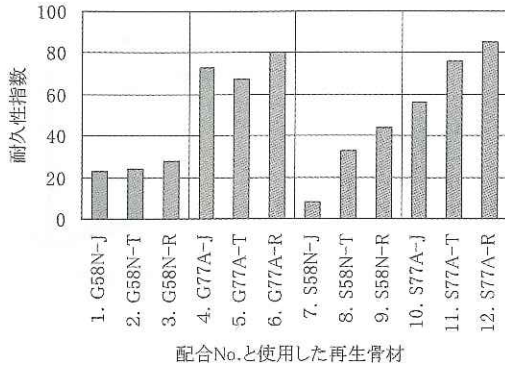


図-3 製造方法の工夫による耐久性指数の比較

- (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。この摩擦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。

製造した再生骨材の品質試験結果を表-4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」である。密度、吸水率はJ,T,Rの順に僅かながら向上する傾向を示しており、付着モルタル量の低減が伺える。これらの再生骨材を単独に使用してW/C = 55%、Air = 4.5%、W = 160~170kg/m³の条件で再生骨材コンクリート練混ぜ、凍結融解試験 (JIS A 1148 A法) を実施した。この結果を図-3に示す。

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

ことは困難な結果となった。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僅かながら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。

3.3 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

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、凍結融解抵抗性の改善が可能か否かについて検討を行った。

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、スランブ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、スランブを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 (JIS A 1148 A法) を実施した。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-4に示す。

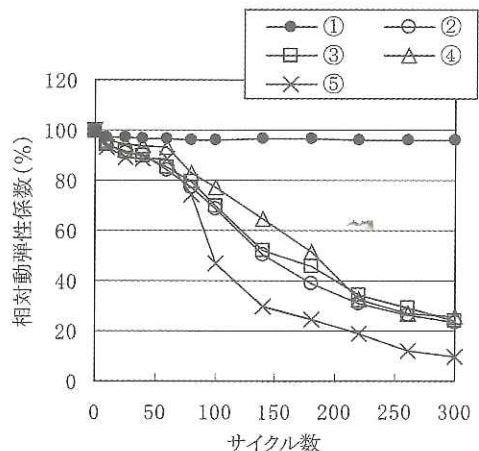


図-4 配合の工夫が凍結融解試験結果に与える影響

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に対して配合を工夫した配合③④⑤についても耐久性の改善は見られなかった。

3.4 再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案

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、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ことの可能な試験法について検討を行った。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冷凍庫と水槽を用いる方法(図-5)を

検討した。この結果、表-5に示す試験法を提案するに至った。

この試験法を適用した試験結果を次に述べる。原コンクリートのW/Cや空気量、さらには破

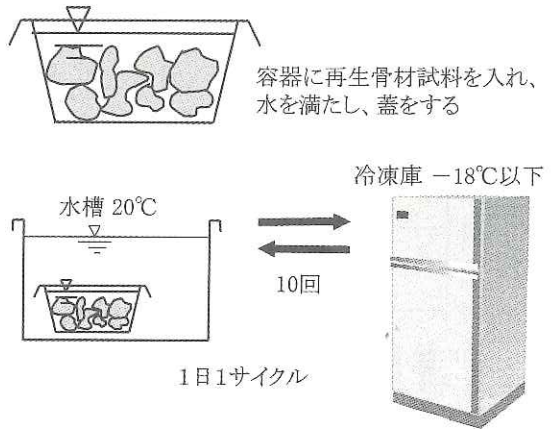


図-5 再生骨材の簡易凍結融解試験法

表-5 再生骨材の簡易凍結融解試験法(案)

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、試料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。
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。
3. 試験に用いる機器
 - (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。
 - (2) 冷凍庫 試料を-18℃以下に冷凍することが可能な冷凍庫とする。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する。
 - (3) 水槽 水温が20℃程度の水槽。
 - (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) はかり 秤量2kg以上、感量0.1g以下のはかり。
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-18℃以下となるまで冷凍する。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. 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以下の粒子は全ての2.5mm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。

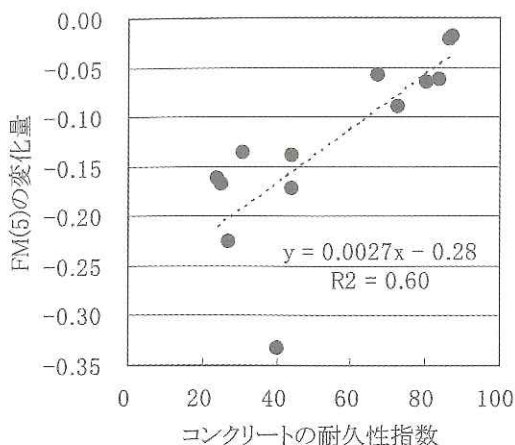


図-6 耐久性指数とFM(5)の比較

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表-5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。

一方、13種類の再生粗骨材を用いてW/C = 55%、Air = 4.5%、W = 160kg/m³の条件で13配合の再生骨材コンクリートを練混ぜ、凍結融解試験 (JIS A 1148 A法) を実施し、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-6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し、良い対応を示した。

4. まとめ

- (1) 再生骨材のJIS化が進められている。この内容は再生骨材の品質をH,M,Lの3段階に分け、それぞれの品質ごとに使用範囲を整理したものである。Hは高品質で普通骨材と同様に使用できるがコストがかかる。MとLは地中構造物と捨てコン等にしか使用できず、シェアが少ない。このため、再生骨材の普及のためには更なる技術開発が必要であり、土木研究所では特に凍結融解抵抗性について検討を行っている。
- (2) 原コンクリートの品質が再生骨材コンクリートの品質に与える影響を実験により検証した。この結果、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。
- (3) 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砕機やロッ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。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のは困難であることが分かった。

- (4) 再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価する試験法 (表-5) を提案した。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。

以上のように、現在、制定作業が進められている再生骨材のJIS化の現状と課題を整理し、課題の一つである凍結融解抵抗性の評価手法を提案した。この他にもアルカリ骨材反応対策や乾燥収縮等の課題もあり、再生骨材の普及に向け今後の研究が重要である。

参考文献

- 1) 例えば、笠井：再生骨材の使用基準、セメントコンクリート、No.415, 1981.9
- 2) 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会土木構造物分科会：廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書、(財)国土開発技術研究センター、1983
- 3) 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会土木構造物分科会：建設事業への廃棄物利用技術の開発に関する調査報告書、(財)国土開発技術研究センター、1984～1986
- 4) 河野広隆ほか：「コンクリート副産物の高度処理・利用技術の開発に関する共同研究報告書-コンクリート副産物の土木事業における利用ガイドブック」、土木研究所共同研究報告書、第166号、1997.3
- 5) 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

片平 博*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進
本部構造物マネジメント
技術チーム主任研究員
Hiroshi KATAHIRA

渡辺博志**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推
進本部構造物マネジメント
技術チーム主席研究員
Hiroshi WATANABE