

論文 再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案

片平 博*1・渡辺博志*2

要旨：再生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。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。方法としては、再生骨材の試料を冷凍庫と水槽に交互に入れることで試料に凍結融解作用を与え、所定の繰り返し回数後に試料の劣化状態を測定するものであり、再生コンクリートの凍結融解試験結果とも良い対応を示した。

キーワード：再生骨材, 凍結融解抵抗性, 試験法

1. はじめに

現在、解体コンクリートの大半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、今後は、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れ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（加熱すりもみ法など）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約半分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**に示すように原粗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の低下が懸念される。これまでの研究¹⁾によれば、再生骨材の吸水率が大きいものほど凍結融解抵抗性は低下する傾向にあるが、吸水率が大きくても凍結融解抵抗性の高いものも存在し、凍結融解抵抗性を適切に評価する新たな指標（試験法）が必要である。

そこで本研究では、再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価可能な試験法について検討を行ったものである。

手順としては、(1)品質の異なる数種類の再生骨材を用いた再生コンクリートの凍結融解試験を実施した。(2)次に、一般的に骨材の凍結融解抵抗性を評価する指標として用いられる硫酸ナトリウムによる安定性試験（JIS A 1122,

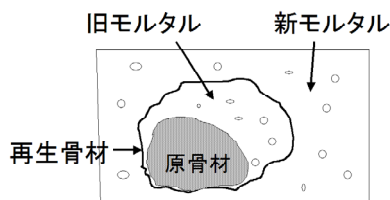


図-1 再生コンクリートの概念図

*1 土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員（正会員）

*2 土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員（正会員）

以下、安定性試験という)結果と再生コンクリートの凍結融解試験結果との対応を検討したところ、対応しないことが明らかとなった。(3)このため、新たに骨材の凍結融解抵抗性試験法(以下、新試験法という)を検討し、再生コンクリートの凍結融解抵抗性との対応について検討を行ったものである。

2. 再生コンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験

2.1 再生骨材, 再生コンクリートの製造

再生骨材は表-1に示す10種類の粗骨材とした。Aシリーズは原コンクリートがAEコンクリート, Nシリーズは原コンクリートがNon

表-1 再生粗骨材の性状

再生骨材の種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失質量 (%)	
Aシリーズ	川55A	2.45	4.19	33
	55A	2.45	4.33	33
	70A	2.42	5.04	44
	85A	2.43	5.09	46
Nシリーズ	川55N	2.47	4.14	41
	55N	2.48	4.34	48
	70N	2.42	5.04	44
	85N	2.43	5.09	46
RCシリーズ	RC-X	2.45	4.07	17
	RC-Y	2.38	5.84	31

AEコンクリートの再生骨材であり、それぞれ、表-2に示す配合で原コンクリートを製造した。原コンクリートのW/Cを55,70,85%と比較的高い水準としたのは、55%以下では再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性が大半のケースで良好となってしまい、比較検討の対象とならないこと、また、古い実構造物ではその程度のW/Cも存在し得ると考えたためである。

原コンクリートは28日間養生後にジョークラッシャーで20mm以下に破砕して再生骨材とした。

骨材名の数値は原コンクリートのW/Cを示す。また、「川」と記しているのは原骨材が川砂利のものであり、その他は碎石である。

原コンクリートの製造に使用した材料は表-3に示すとおりである。RCシリーズは市販の再生クラッシャーラン2種類であり、原コンクリートの性状は不明である。

表-1に示す10種類の再生粗骨材を用いて表-4に示す条件で再生コンクリートを製造した。再生コンクリートのW/Cは骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験で一般的に用いられる55%とし、新たに練混ぜられるモルタル中に

表-2 原コンクリートの配合と性状

再生骨材の種類	原コンクリートの配合								原コンクリートの性状				
	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	目標Air (%)	単位量 (kg/m ³)				粗骨材の種類	スランプ (cm)	実測Air (%)	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	
					W	C	S	G					
Aシリーズ	川55A	20	55	44	4.5	145	264	834	1061	砂利	7.0	4.9	38.6
	55A	20	55	46	4.5	160	291	843	1012	碎石	10.5	5.6	43.3
	70A	20	70	48	4.5	160	229	906	1004	碎石	8.0	5.6	29.2
	85A	20	85	50	4.5	163	192	953	978	碎石	5.0	4.9	22.2
Nシリーズ	川55N	20	55	46	2.0	149	271	855	1088	砂利	3.5	2.1	42.6
	55N	20	55	46	2.0	164	299	865	1038	碎石	3.0	1.8	50.9
	70N	20	70	48	2.0	164	235	930	1030	碎石	5.7	1.2	33.6
	85N	20	85	50	2.0	167	197	978	1003	碎石	2.6	1.7	23.0

表-3 コンクリートの使用材料

セメント	原コンクリート用 早強ポルトランドセメント 再生コンクリート用 普通ポルトランドセメント
水	水道水
細骨材	川砂 密度2.61g/cm ³ , 吸水率1.05%
粗骨材	碎石(砂岩) 密度2.67g/cm ³ , 吸水率0.61% 川砂利(原コンクリートのみを使用) 密度2.61g/cm ³ , 吸水率1.05%

表-4 再生コンクリートの配合と性状

再生骨材の種類	再生コンクリートの配合	再生コンクリートの性状			
		スランプ (cm)	実測Air (%)	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	
Aシリーズ	川55A	Gmax:20mm	11.1	5.1	34
	55A	W/C:55%	10	4.3	35.9
	70A	s/a:46%	6.6	3.9	34.3
	85A	目標Air:4.5%	10.4	3.6	36.2
Nシリーズ	川55N	単位量(kg/m ³) W=160 C=291 S=844 G=902~941	9.9	4.5	35
	55N		9.4	4.3	37.6
	70N		9.6	3.4	41.7
	85N		10.2	3.7	31.7
RCシリーズ	RC-X		8.6	4.9	37.4
	RC-Y		3.4	4.8	39.8

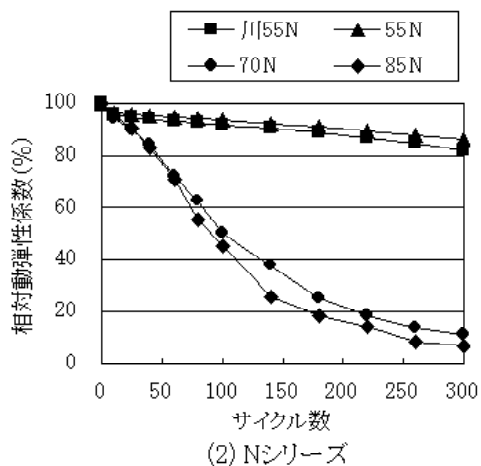
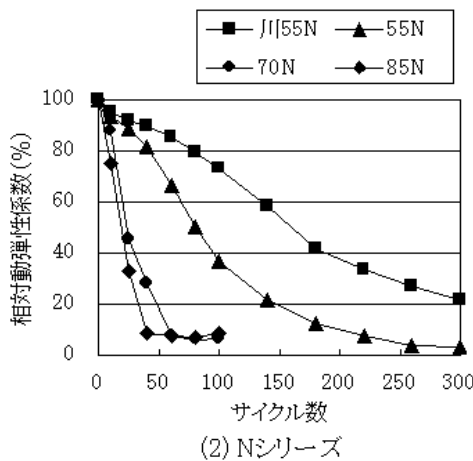
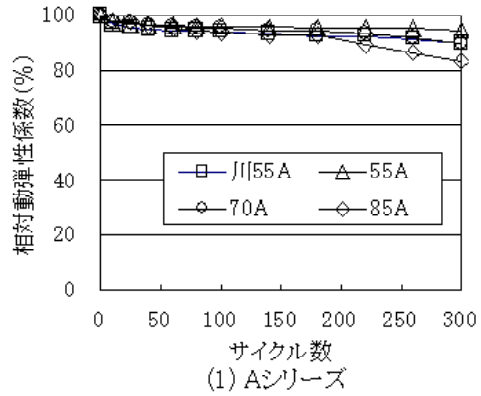
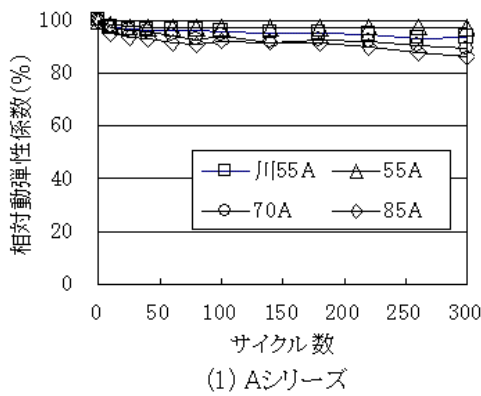


図-2 原コンクリートの凍結融解試験結果

AE を混入した AE コンクリート(空気量 4.5%)に統一した。再生コンクリートに用いた粗骨材以外の材料は表-3に示すとおりである。

2.2 凍結融解試験方法

表-2に示す原コンクリートについては 10 × 10 × 40cm の角柱試験体を各 1 本ずつ、表-3に示す再生コンクリートについては 10 × 10 × 40cm の角柱試験体を各 3 本ずつ製造し、凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法)を実施した。凍結融解試験開始までの養生期間は再生コンクリート製造後 28 日間としたため、原コンクリートの養生期間は 70 日程度となった。

2.3 凍結融解試験結果

原コンクリートの凍結融解試験結果を図-2に、再生コンクリートの凍結融解試験結果を図-3に示す。

図-2に示す原コンクリートの凍結融解試験結果では、A シリーズでは全てのケースで動弾性係数の低下は認められず、これに対して N

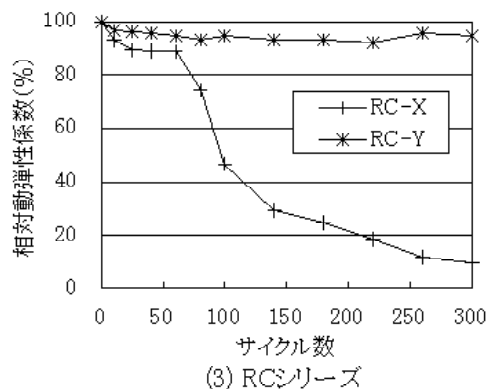


図-3 再生コンクリートの凍結融解試験結果

シリーズでは W/C が高いものほど動弾性係数が低下する傾向を示した。

図-3に示す再生コンクリートの凍結融解試験結果についても、原コンクリートと同様に A シリーズでは全てのケースで動弾性係数の低下は認められず、N シリーズでは原コンクリートの W/C が高いものほど動弾性係数が低下する傾向を示した。ただし、動弾性係数の低下傾向は原コンクリートに比較して緩やかであり、川 55N と 55N のケースでは耐久性指数が 60%以上となった。

以上の結果から、再生コンクリートの凍結融解抵抗性は、(1)原コンクリートが AE コンクリートであれば高い耐久性が得られる、(2)原コンクリートが NonAE コンクリートでかつ W/C が高い場合に再生コンクリートの凍結融解抵抗性が低下する傾向にある、と考えられる。

なお、RC シリーズの再生コンクリートの凍結融解試験結果では、骨材の基本物性としては表-1に示すように RC-X のほうが良好であるにも拘わらず、凍結融解抵抗性は RC-Y のほうが良好であった。

3. 安定性試験の妥当性の検討

試験に用いた 10 種類の再生骨材に対して安定性試験を行った結果を図-4に示す。安定性損失質量は RC-X が 18 %とやや低い値を示したものの、他の再生骨材では全て 30 ~ 50 %の範囲にあり、原コンクリートの配合による違いは明確でなかった。

この安定性損失質量と図-3から得られる再

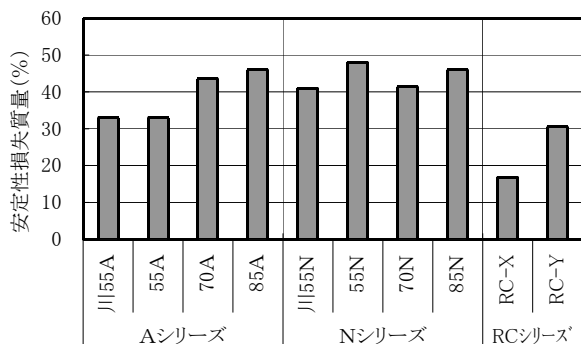


図-4 安定性試験結果

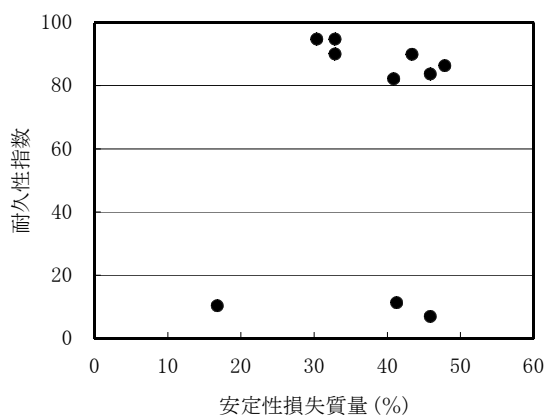


図-5 安定性試験結果と耐久性指数の関係

生コンクリートの耐久性指数の関係は図-5に示すとおりで、明確な関係は得られなかった。

この結果より、安定性試験で再生骨材の凍結融解抵抗性を把握することは困難と考えられる。

4. 新試験法の検討

4.1 基本的な考え

以下の考えに基づいて、新試験法の検討を行った。

(1) 試料に対して凍結融解作用を与える試験とする。

(2) 図-2と図-3の比較より、原コンクリートは再生コンクリートよりも少ないサイクル数で劣化しており、再生骨材に対しても比較的少ない凍結融解サイクルで劣化が生じる可能性がある。

(3) 新試験法にかかる手間と期間は安定性試験と同程度とする。

(4) 特殊な試験装置を必要とせず、レディーミクストコンクリート工場の試験室で容易に準備できる程度の設備で試験が可能なものとする。

4.2 新試験法の提案

上記の基本的な考えに基づき、以下の試験法を提案した。

4.2.1 使用機器

(1) 水槽

水温が 20 °C程度水槽。コンクリート用の養生水槽が使用できる。

(2) 冷凍庫

最低温度が- 20 °C以下に下がるもの。冷凍食品の冷凍保存温度が- 18 °C以下であることから、一般の家庭用冷凍冷蔵庫が使用できる。冷却能力のランクにはスリースターとフォースターがある。フォースターが優れており、フォースターを推奨する。

(3) 容器

再生骨材を 700 ~ 1000g 程度入れることが可能で、蓋をかぶせることで中の再生骨材や水が流出しない構造のもの。家庭等で使用する食

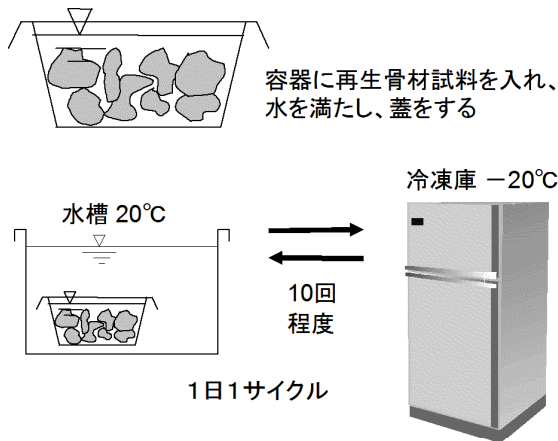


図-6 新試験法のイメージ

品用プラスチック容器が使用できる。

4.2.2 試験方法 (図-6 参照)

- (1)安定性試験と同様に、再生粗骨材を 5-10mm, 10-15mm, 15-20mm 等の各群にふるい分けたものを試験試料とする。試料は表乾状態とし、容器に入れる分の質量を測定する。
- (2)この試料を容器に入れ、容器中に水を満たし、蓋をする。
- (3)試料を容器に入れたまま冷凍庫に入れ、中の水と試料が完全に凍結するまで冷凍する。冷凍庫に試料を入れると冷凍庫内の温度が上昇するが、試料が冷凍するに従って冷凍庫内の温度が低下していくので、設定温度に達しているか否かで試料の凍結状態が判断できる。冷凍庫に入れる試料量が多いと冷凍するのに長時間を要するので事前の確認が必要である。
- (4)完全に凍結した試料を冷凍庫から取り出し、容器のまま水槽(+20°C)に沈め、中の水と試料が完全に融解するまで水中におく。
- (5) (3)と(4)を交互に繰り返す(1日1サイクルを目安とする)。
- (6)所定の繰り返し回数(10回程度を目処とする)を終了した後に容器から水を排除し、再生骨材試料を取り出し、ウエス等で表面水をふき取っ

表-5 今回実施した新試験法の条件

使用機器	冷凍庫	容量200リットル、フォースター 最低温度-25°C
	水槽	養生水槽、水温20°C
	容器	直径12cm、高さ6cm、容量600cc プラスチック製
試験条件	冷凍時間	20時間
	融解時間	4時間
	サイクル数	10回
	試料量	粒度に関係なく一律に750g

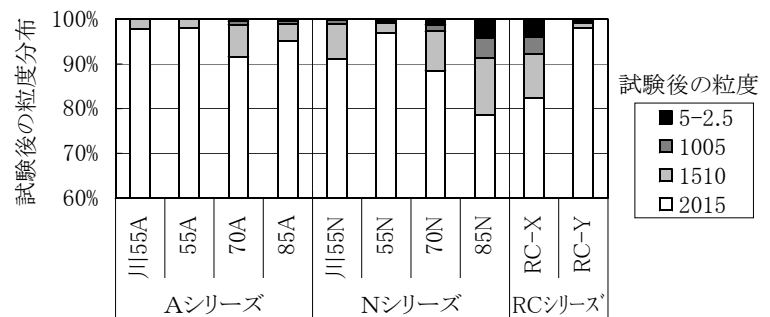
た後に、粒度分布を測定する。

(7)試験前後の粒度分布から各群の凍結融解損失質率 P_1 を式(1)より求める。

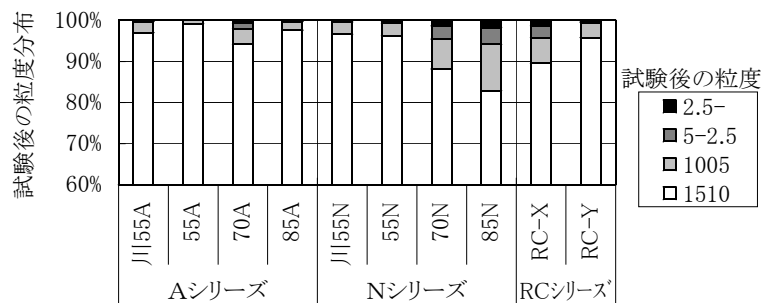
$$P_1 = \left(1 - \frac{m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 m_1 : 試験前の試料の質量(g)

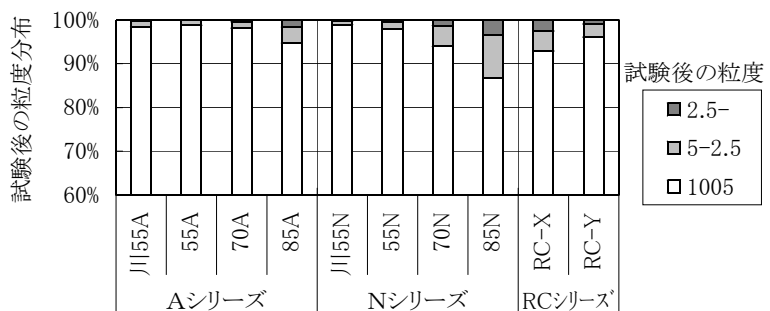
m_2 : 試験前に試料がとどまったふるいに残る試験後の試料の質量(g)



(1) 2015の試験結果



(2) 1510の試験結果



(3) 1005の試験結果

図-7 新試験法による各群の試験後の粒度分布

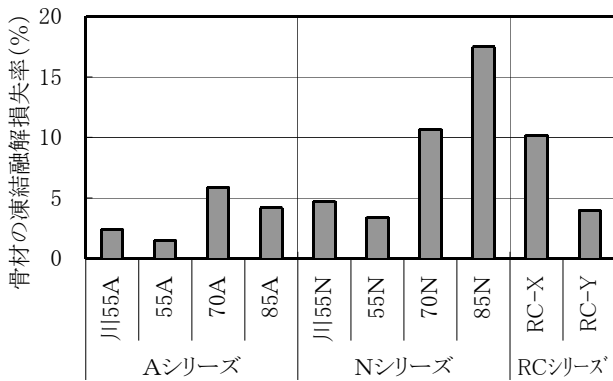


図-8 新試験法から得られる各粗骨材の損失率

骨材全体の損失率は、試験した骨材の各群における粒の質量百分率と、各群における損失率との積の総和で求める。

4.3 新試験法の妥当性

4.2.2 の方法に従い、表-5の条件で試験を行った。なお、試験後の粒度分布の測定については、試験前に用いたフルイでのみふるえば良いが、今回の試験では、はそれよりも小さなフルイでもふるって粒度分布を把握した。

各再生骨材の各群の試験後の粒度分布を図-7に示す。各群ともに試料の種類ごとの傾向は類似しており、損失率は粒子が大きいものほどやや大きくなる傾向を示した。

各再生骨材ごとの骨材全体の損失率を図-8に示す。これより、(1)Aシリーズの損失率は全体的に小さい、(2)Nシリーズでは原コンクリートのW/Cが大きくなるに従い損失率が多くなる、(3)RCシリーズではRC-Xの損失率が大きい結果となった。

この結果と図-3から得られる再生コンクリートの耐久性指数の関係は図-9に示すとおりで、良い対応を示した。試験数は少ないものの、本試験の範囲では、骨材の凍結融解損失率が10%を超えるものについては、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性が低い結果となった。

5. まとめ

今回の実験の範囲では以下の結果が得られた。

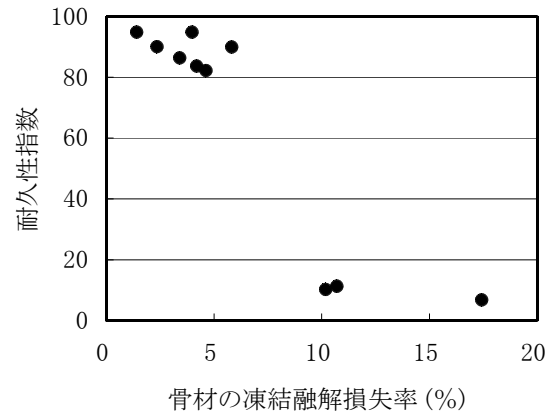


図-9 新試験法の結果と耐久性指数の関係

(1) 再生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とW/Cに大きく関係しており、原コンクリートがAEコンクリートであれば高く、NonAEコンクリートの場合には水セメント比が高いものほど低下する傾向を示した。

(2) 安定性試験の結果は、再生コンクリートの耐久性指数と対応しなかった。

(3) 今回提案した新試験法の結果は、再生コンクリートの耐久性指数と良い対応を示した。

6. おわりに

今回提案した試験法は、特殊な装置を必要とせず、簡易に行えることを特徴とした試験法であり、今回の実験の範囲では、再生骨材の凍結融解抵抗性を適切に評価することができた。

ただし、限られた範囲での実験結果であり、今後とも、試験方法の詳細（容器の大きさ、凍結速度等）について検討を進めるとともに、様々な再生骨材に対して試験を行うことで、試験の信頼性を高めていく必要がある。

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