

6. 高品質の再生骨材を用いた再生コンクリートの特性に関する研究 (その1. 再生粗骨材コンクリートの強度および耐久性)

山崎 順二
立松 和彦

要 旨

本研究の目的は、再生コンクリートを構造体コンクリートとして使用できるように、再生コンクリートの種々の特性を明らかにすることである。その第1段階として、高品質の再生粗骨材を用いた再生コンクリートの強度および耐久性について実験を行った。その結果、高品質の再生粗骨材を用いたコンクリートは、凍結融解抵抗性については粗骨材の吸水率などの影響によって、天然骨材を用いた一般コンクリートよりも抵抗性がやや劣るが、圧縮強度、弾性係数および乾燥収縮については、一般コンクリートと同等もしくはそれ以上の性能を有することが明らかとなった。

キーワード

再生粗骨材／圧縮強度／弾性係数／凍結融解抵抗性／乾燥収縮／中性化抵抗性／
加圧ブリーディング

目 次

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果および考察
4. ま と め

6. STUDIES ON THE PROPERTIES OF RECYCLED CONCRETE USING HIGH QUALITY RECYCLED AGGREGATE (Part 1. The Strength and Durability of Recycled Coarse Aggregate Concrete)

Junji Yamasaki
Kazuhiko Tatematsu

Abstract

This study is aimed at identifying various properties of recycled aggregate concrete in an attempt to use it as structural concrete. In the first phase, experiments were carried out for the strength and durability of recycled concrete using high quality recycled coarse aggregate.

As a result, it was found that the recycled concrete using high quality recycled coarse aggregate had performance equal to or higher than ordinary concrete using natural aggregate in terms of compressive strength, modulus of elasticity and drying shrinkage while its resistance to freezing and thawing was slightly lower than ordinary concrete due to the influence of absorption of coarse aggregate.

1 はじめに

コンクリートに用いられる骨材資源の枯渇が従来から問題となっているが、最近では、それに加えて骨材採取による環境破壊も問題視されてきている。日本の骨材資源は、粗骨材については川砂利から碎石へ、細骨材については川砂から海砂、砕砂へ、将来的には中国砂などの輸入が予測されるなど、骨材の確保がかなり困難になってきている。こうした状況を鑑み、容積の約70%を骨材で占めるコンクリートを破碎して骨材の再生化を図ることは、省資源・環境保護の観点から有用と言える。

1991年、資源の有効利用を推進するためにリサイクル法が施行され、その後建設省では、1992年に「リサイクルプラン21」¹⁾を策定し、西暦2000年までに建設廃棄物の処分量を半減しようという目標を掲げた。この計画では、解体されたコンクリート塊の再利用率を2000年までに90%（平成2年の実績は48%）にすることをめざしている。この目標を実現するために建設省では、コンクリート副産物の再生利用の促進策として、1994年に「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)」¹⁾をとりまとめている。

再生骨材および再生コンクリートに関する研究は、これまで総プロをはじめとして各方面でなされているが、概して、再生コンクリートの各種性能は再生骨材の品質、なかでも吸水率に左右されるところが大きいようである。骨材に付着したモルタル分や木片・プラスチック片などの不純物を除去する技術が向上すれば再生骨材の品質は向上することになるが、解体材の破碎処理の方法・回数・生産性などの制約もあり限界がある。従って現在では、再生骨材の吸水率が粗骨材で5%前後、細骨材で10%強程度の品質のものが中心となっており、高品質のものが供給されにくい（生産工場が限定される）状況にある。建設省の暫定品質基準(案)では、比較的低品質の再生骨材をどのように限定して使用するかが主眼となっている。しかし、吸水率の低い、すなわち高品質の再生骨材が得られればその用途も拡大し、構造体コンクリートに適用することが可能になると考えられるが、この方面に関する研究はほとんどみられない。

本研究ではこのような背景をもとに、再生コンクリートを構造体コンクリートに適用するために、その特性を明らかにすることを最終目的とした。本稿はその第

1段階として、高品質の再生粗骨材を用いて再生粗骨材コンクリートを製造した場合の強度および耐久性を確認するために行った実験結果について述べる。

2 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験は、粗骨材として高品質の再生骨材を使用したコンクリートを、天然の粗骨材（碎石）を用いた普通コンクリートと比較することによってその品質を評価した。コンクリートの強度レベルについては、それぞれ、呼び強度を24・30・36・40の4水準設定した。これら計8種類のコンクリートについて、フレッシュ性状、硬化物性および耐久性を評価し、再生粗骨材コンクリートの特性について検討を行った。

2.2 使用材料および再生粗骨材の製造方法

使用した材料を表－1に示す。今回使用した再生粗骨材は、材齢38年を経過した建物の解体材から採取した、原粗骨材が天然砂利のものである。

この再生骨材は、ジョークラッシャー、インパクトクラッシャー、ロッドミル改造機で処理された後、8mm以上の試料を湿式の比重選別という処理過程を加えて、再生粗骨材とモルタル粒子に分けたものである²⁾。このような処理を施された再生粗骨材は、比重2.60、吸水率2.4%程度であり、建設省の暫定品質基準(案)¹⁾の1種に相当する、高品質の再生粗骨材である。本実験に使用した骨材の品質試験結果を表－2に、建設省の暫定品質基準(案)を表－3に示す。

2.3 コンクリートの調合

天然骨材（碎石）を用いたコンクリートの調合は、大阪兵庫地区で通常使用されている普通コンクリートの調合に基づいて定めた。

一方、再生粗骨材を使用したコンクリートの調合は、既往の研究²⁾によると、天然骨材を使用した普通コンクリートに対して単位粗骨材かさ容積を0.04 m³/m³程度増加させることができるようである。しかし本実験においては、単位粗骨材かさ容積を補正する方法では

表－1 実験に使用した材料

セメント	普通ポルトランドセメント（住友大阪製）
細骨材	山砂（城陽産）、混合比70% 砕砂（高槻産）、混合比30%
粗骨材	碎石（高槻産） 再生粗骨材（原骨材は山砂利、京星製）
混和材	高性能AE減水剤（エヌエムビー製）AE助剤

なく、単位粗骨材かさ容積は普通コンクリートと等しくし、粗骨材の実績率からそれぞれの単位粗骨材量を求めた。この方法を採用したのは、次に示す単位水量の調整まで含めて、再生粗骨材コンクリートの調合を合理的に調整できるようにするためである。今回の実験で用いた再生粗骨材の実績率は、碎石の実績率に比べて6%程度大きな値であった。

単位水量については、一般的には下式に示すように、粗骨材の実績率を用いて単位水量を補正する方法がある³⁾。本実験においても、普通コンクリートの単位水量を、再生粗骨材の実績率を用いて補正することにより、再生粗骨材コンクリートの単位水量を決定した。これらの方法を用いて決定したコンクリートの調合を表-4に示す。

単位水量の増加率 (%)

$$= \{(1 - \Delta_R) v_R / (1000 - v_R)\} \times 100$$

ここに Δ_R : 普通コンクリートに用いた碎石の実績率に対する再生粗骨材の実績率の比

v_R : 普通コンクリートの調合での粗骨材の絶対容積 (ℓ/m^3)

高性能A E減水剤および助剤の添加量は、まず、普通コンクリートのフレッシュコンクリートのスランプが $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ になるように試験練りを行い調整した。再生粗骨材コンクリートについては、粗骨材の違いによるフレッシュ性状の変化や、調合決定法の正誤を確認するために、普通コンクリートの場合と同じ添加量とした。

表-2 骨材の品質試験結果

試験項目	細 骨 材		粗 骨 材	
	山 砂	砕 砂	砕 石	再 生
表 乾 比 重	2.56	2.66	2.69	2.60
絶 乾 比 重	2.51	2.62	2.67	2.54
吸水率(%)	1.88	1.84	0.63	2.43
実績率(%)	—	54.5	58.0	64.2
粗 粒 率	2.79	2.80	6.77	6.38
ふ る い 分 け 通 過 率 (%)	25	—	—	100.0
	20	—	—	93.6
	15	—	—	84.9
	10	100.0	100.0	41.9
	5	99.8	100.0	4.5
	2.5	84.9	94.3	0.5
	1.2	70.9	69.1	0.0
	0.6	42.4	33.6	—
	0.3	17.8	17.8	—
	0.15	5.0	5.3	—
	以下	0.0	0.0	—

表-3 建設省による暫定品質基準 (案)

項目 種別	再生粗骨材				再生細骨材	
	1 種	2 種		3 種	1 種	2 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	12以下	40以下	12以下	—	10以下	—
		(40以下)*				

*凍結融解耐久性を考慮しない場合

表-4 コンクリートの種類および調合表

種 別	供試体記号	呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	粗 骨 材 かさ容積 (m^3/m^3)	単 位 重 量 (kg/ m^3)						
						水	セメント	山砂	砕砂	再 生 粗骨材	碎石	混和剤 (C×%)
普 通	55G-0	24	55.0	47.5	0.610	178	324	573	255	—	952	0.8
	47G-0	30	47.0	45.5	0.610	182	387	530	236	—	952	0.7
	40G-0	36	40.0	41.6	0.615	193	482	451	202	—	957	0.5
	35G-0	40	35.0	36.3	0.617	206	588	366	163	—	961	0.3
再 生	55G-10	24相当	55.0	43.5	0.610	168	305	538	239	1014	—	0.8
	47G-10	30相当	47.0	41.5	0.610	172	366	497	221	1014	—	0.7
	40G-10	36相当	40.0	37.4	0.615	182	455	422	186	1024	—	0.5
	35G-10	40相当	35.0	32.5	0.617	194	554	340	152	1027	—	0.3

2.4 コンクリートの製造および試験項目

コンクリートの製造は温度20℃・相対湿度60%の恒温恒湿室で行い、100ℓのパン型強制ミキサーを使用して40ℓを1バッチとして、材料を同時投入した後1分間練り混ぜた。

フレッシュコンクリートの試験項目は、スランブ、空気量および加圧ブリーディングとした。加圧ブリーディング試験については、コンクリートポンプ指針（日本建築学会）⁴¹に準じて行った。硬化コンクリートの試験項目は、表乾密度、圧縮強度、動弾性係数、静弾性係数、凍結融解試験、乾燥収縮試験および促進中性化試験とした。凍結融解試験は、水中凍結水中融解法⁵¹で300サイクルまで行い、促進中性化試験は高耐久性指針（日本建築学会）⁶¹に準じて20℃、60%RH、CO₂濃度5%で行った。その他は関連するJISに準じて試験を行った。

3 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5および図-1に示す。再生粗骨材コンクリートのフレッシュ性状は、同一水セメント比の普通コンクリートよりもやや粘性が高く、もったりとした状態であった。この傾向は低水セメント比になるほど顕著であり、水セメント比35%の場合には、普通コンクリートに比べてスランブおよびスランブフローの差が大きくなった。これは、再生粗骨材に付着している微粒分が影響しているためと考える。空気量は、再生粗骨材コンクリートの方が全体的に大きかった。この原因は、再生粗骨材コンクリートは普通コンクリートよりも粘性がやや高くなる傾向にあるため、連行された気泡が練り混ぜなどによって逸散しにくいこと、また再生粗骨材に付着している（除去されていない）モルタル分に保持されている空気泡の影響と考えられる。

上記のように、フレッシュ性状には若干の差は見られたが、両者とも4水準全ての調査においてフレッシュコンクリートの目標値を満足した。これによって、再生粗骨材コンクリートの調査は、普通コンクリートの調査を基準に、粗骨材の実績率による単位水量補正を行えば調整可能なことがわかった。

3.2 加圧ブリーディング試験結果

加圧ブリーディング試験の結果を図-2に示す。再生粗骨材コンクリートは同一水セメント比の普通コン

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

供試体 記号	スランブ cm	スランブ フロー cm×cm	空気量 %	コンクリート 温度 ℃	単位容 積質量 kg/ℓ
55G-0	17.5	35×31	4.8	22.0	2.30
47G-0	19.0	30×29	4.1	22.5	2.31
40G-0	20.0	33×33	3.5	25.0	2.34
35G-0	18.0	29×29	3.3	24.5	2.34
55G-10	18.0	32×28	5.6	22.0	2.25
47G-10	19.5	32×32	4.9	22.5	2.27
40G-10	19.5	33×29	4.0	25.0	2.29
35G-10	15.5	24×23	3.6	24.5	2.30

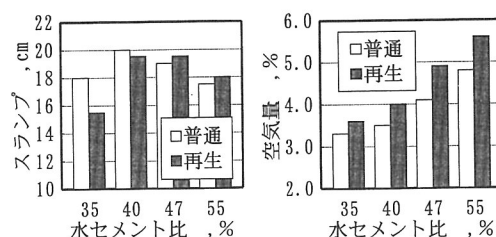


図-1 フレッシュコンクリートの試験結果

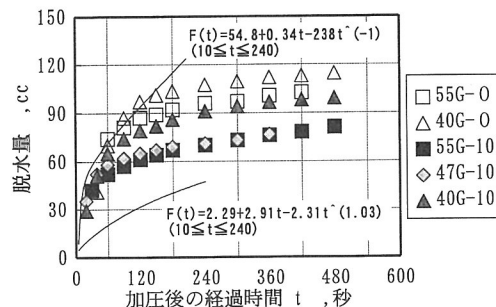


図-2 加圧ブリーディング試験結果

クリートよりも脱水速度が遅く、全脱水量も少なかった。これは再生粗骨材の単位水量が普通コンクリートよりも少ないことが主原因であるが、再生粗骨材コンクリートが適度な粘性を有することや、コンクリートの保水性が良いことなども影響していると考えられる。この結果をポンプ指針⁴¹から判断して、再生粗骨材コンクリートのポンプ圧送性は、水セメント比が55～40%の範囲において、極めて良好であるといえる。

3.3 硬化コンクリートの物性

(1) 表乾密度

図-3にコンクリートの表乾密度を示す。再生粗骨材コンクリートの表乾密度は、普通コンクリートよりも $0.02\text{kg}/\ell \sim 0.06\text{kg}/\ell$ 程度小さな値を示した。再生粗骨材自体の比重が、骨材表面の付着モルタル分やモルタル粒子などの影響によって天然碎石の比重よりも小さくなるために、再生粗骨材コンクリートの表乾密度も小さくなると考えられる。

(2) 力学的性質

1) 圧縮強度・引張強度

図-4にコンクリートの圧縮強度発現性を示す。水セメント比55%~40%の再生粗骨材コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートに対して、材齢4週において水セメント比55%で91.9%、47%で98.1%、40%で95.4%であり、各材齢においてもわずかに低めの値を示した。これに対して水セメント比35%のものについては、いずれの材齢においても普通コンクリートよりも圧縮強度が大きくなり、材齢4週において普通コンクリートの103%となった。強度発現性(強度増進)については、両者とも良好であった。

図-5に材齢4週における圧縮強度と引張強度の関係を示す。圧縮強度に対する引張強度の割合は、水セメント比55%~40%については、再生粗骨材とマトリックスの付着力が碎石よりも小さいために、わずかではあるが再生粗骨材コンクリートの方が低くなった。しかし水セメント比35%のもののみ、再生粗骨材コンクリートの方が大きくなった。

2) 静弾性係数・動弾性係数

図-6に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。再生粗骨材コンクリートの静弾性係数と圧縮強度との間には良好な相関関係が認められた。また図中に、RC規準におけるコンクリートのヤング係数評価式を用いて、密度を2.3および2.2とした場合の値を示した。再生粗骨材コンクリートの静弾性係数は、評価式から求めた値との間に良好な関係が認められるため、上述したヤング係数評価式を用いて静弾性係数を推定することが可能であるといえる。

図-7に、静弾性係数と動弾性係数の関係を示す。両者の関係は、ほぼ比例関係にあり、静弾性係数/動弾性係数 ≈ 0.8 ではば一定であった。

水セメント比35%の再生粗骨材コンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数などの力学的性質が向

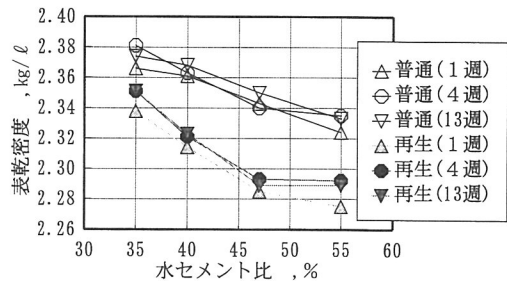


図-3 コンクリートの表乾密度

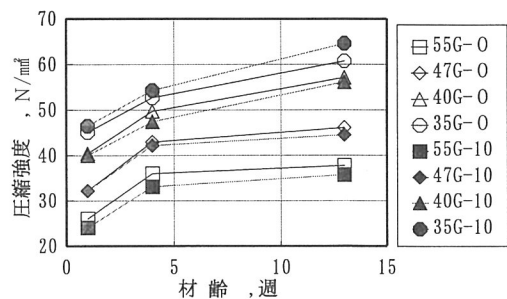


図-4 コンクリートの強度発現性

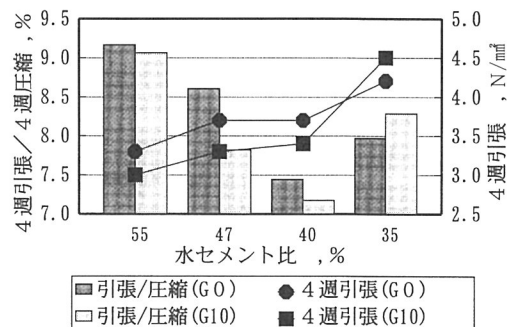


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

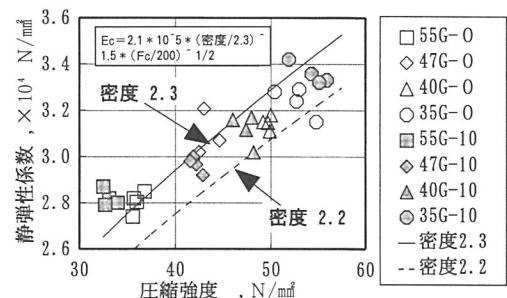


図-6 静弾性係数と圧縮強度の関係

上した原因は、低水セメント比での練り混ぜでは、コンクリートの粘性が高くなるために混練中に骨材に作用するせん断力が高水セメント比の場合よりも大きくなり、そのせん断力によって再生粗骨材に付着したモルタルの一部が剥がされ、再生粗骨材とセメントマトリックスとの付着力が改善されたためと考える。

3) 圧縮強度と水セメント比

図-8に、普通コンクリートおよび再生粗骨材コンクリートの材齢4週における圧縮強度とセメント水比の関係を示す。セメント水比と材齢4週における圧縮強度との間には、普通コンクリートにおいて相関係数0.96、再生粗骨材コンクリートにおいて0.98と、良好な相関関係が得られた。図中に回帰式を示す。セメント水比が2.6以下になると、再生粗骨材コンクリートの圧縮強度が普通コンクリートよりもやや低くなった。このことから、水セメント比が38%以上の場合に、再生粗骨材コンクリートで普通コンクリートと同等の圧縮強度を得るためには、再生粗骨材コンクリートの水セメント比を普通コンクリートよりも4.5~5.0%程度低く設定することが必要と考える。

3.4 凍結融解抵抗性

図-9に凍結融解試験結果を、図-10に相対動弾性係数と質量減少率の関係を示す。再生粗骨材コンクリートは、水セメント比55%については120サイクル、47%については150サイクル、40%については180サイクルで相対動弾性係数が60%以下となった。質量減少率は水セメント比55%の供試体が最も大きく、水セメント比が小さくなるほどマトリックス強度が大きくなるためスケーリングも少なくなった。しかし水セメント比40%の再生粗骨材コンクリートは、質量減少率が小さく供試体表面のスケーリングも少ないにも関わらず、相対動弾性係数が低下した。これは、空隙水の凍結による膨張圧によりコンクリート内部にマイクロクラックが発生したためと考える。

全体的に、再生粗骨材コンクリートの凍結融解抵抗性が低くなった原因としては、再生粗骨材の吸水率が天然の粗骨材よりやや大きいためだと思われる。しかし、空気量を今回の実験よりも大きな値、すなわち5~7%程度確保することにより、改善できるのではないかと推測される。

3.5 乾燥収縮

図-11に乾燥収縮試験結果を、図-12に乾燥収縮率と質量減少率の関係を示す。再生粗骨材コンクリート

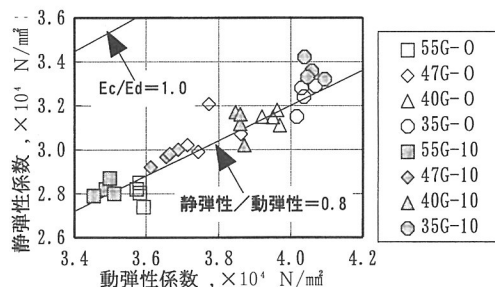


図-7 静弾性係数と動弾性係数の関係

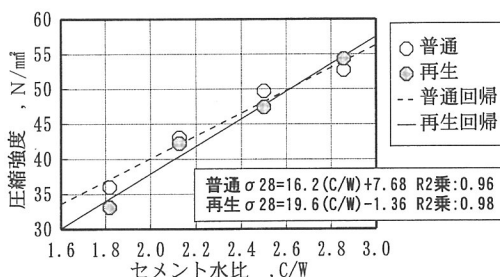


図-8 圧縮強度とセメント水比の関係

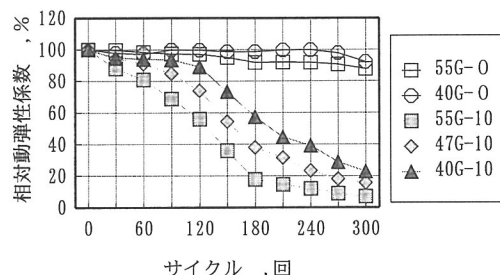


図-9 凍結融解試験結果

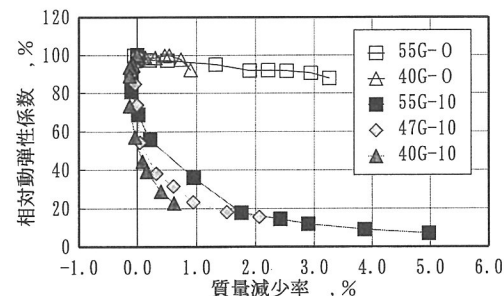


図-10 相対動弾性係数と質量減少率の関係

の乾燥収縮率は普通コンクリートよりも小さく、水セメント比47%および40%において0.08%程度であった。しかし質量減少率については普通コンクリートの方が小さくなった。再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率が普通コンクリートよりも小さくなった理由は、再生粗骨材の実績率が碎石の実績率よりも大きいために、普通コンクリートよりも単位水量を低減することができ、かつ単位粗骨材量が大きくなるためと考える。

これより、高度処理した良質の再生粗骨材を使用する場合は、(1)式に示す実績率の比を用いた単位水量補正による単位水量の低減や粗骨材量の増加、かつ低水セメント比化を図ることによって、再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率を低減することが可能である。

3.6 中性化抵抗性

図-13に、促進中性化試験結果を示す。再生粗骨材コンクリートの中性化抵抗性は、水セメント比が小さくなるほど向上し、同じ水セメント比の普通コンクリートとほぼ同等であった。このことから、再生粗骨材コンクリートの中性化抵抗性は、普通コンクリートと同程度であり、基本的には水セメント比に依存することが確認できた。

しかし、視点を変えて両者の圧縮強度を基準にして中性化抵抗性を考えると、3.3で述べたように、普通コンクリートと同等の圧縮強度を得るには再生粗骨材コンクリートの水セメント比を5%程度低くすることが必要である。そうすることで、結果的に、同じ強度であれば再生粗骨材コンクリートの方が普通コンクリートよりも高い中性化抵抗性を有することになる。

4 まとめ

高品質の再生粗骨材を用いたコンクリートの特性について実験を行った結果、以下のことが確認できた。

- 1) 再生粗骨材コンクリートの調合は、普通コンクリートの調合を基にして、粗骨材の実績率による単位水量補正を行えば調整が可能である。
- 2) 再生粗骨材コンクリートは、加圧による脱水速度が遅く、また全脱水量も少なくなるため、ポンプ圧送性が良好となる。
- 3) 再生粗骨材コンクリートの硬化物性は、表乾密度および弾性係数は普通コンクリートに比べてやや小さくなるが、コンクリートの強度発現性についてはほぼ同程度である。
- 4) 水セメント比が約40%以上において再生粗骨材コ

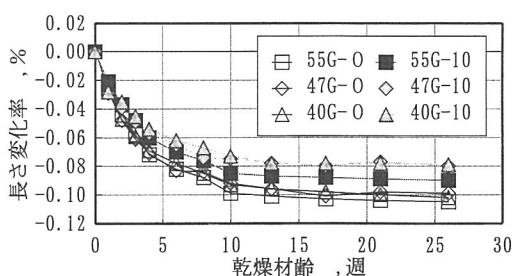


図-11 長さ変化試験結果

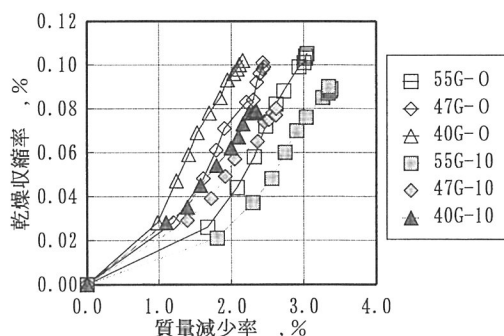


図-12 乾燥収縮率と質量減少率の関係

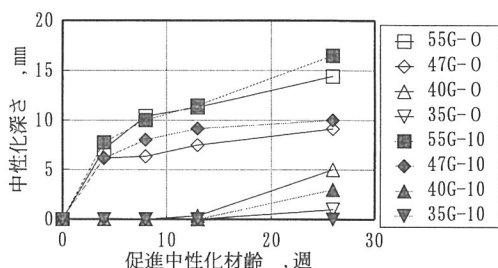


図-13 促進中性化試験結果

ンクリートを製造する場合は、基準となる普通コンクリートよりも水セメント比を最大約5%程度低く設定することによって、基準コンクリートと同等の圧縮強度を得ることができる。

- 5) 再生粗骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は、再生粗骨材の吸水率などの影響によって普通コンクリートよりも低下する。
- 6) 高実績率の再生粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率は、単位水量の低減や単位粗骨材量の増加によって、同じ水セメント比の普通コンクリートよ

りも小さくなる。

7) 再生粗骨材コンクリートの中性化抵抗性は、同じ水セメント比の普通コンクリートと同程度である。

以上より、高品質の再生粗骨材を使用した再生コンクリートの特性は、普通コンクリートとほぼ同程度であり、構造体コンクリートへの適用は十分に可能であるといえる。今後、再生細骨材コンクリートの特性についても検討を加え、骨材をすべて再生骨材とした本来の再生コンクリートの構造体への適用性を示したい。

[参考文献]

- 1) 友沢史紀・毛見虎雄:「環境調和型建築の設計と施工」,技術書院,pp117-130,1997
- 2) 阿部道彦:「比重選別による再生骨材の製造に関する検討」,第51回セメント技術大会講演要旨,pp.212-213,1997
- 3) 南波篤志・阿部道彦:「建築系副産物の発生抑制と再生利用に関する研究」その6,日本建築学会学術講演梗概集,pp857-858,1995
- 4) 日本建築学会:「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」付5,pp.237-239,1994
- 5) *Annual Book of ASTM Standards*,「ASTM C 666-84, Standard Test Method for RESISTANCE OF CONCRETE TO RAPID FREEZING AND THAWING (procedure A)」,pp.403-410, Vol.04.02
- 6) 日本建築学会:「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」付1,pp.179-184,1991