

1. 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2. 再生細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

前報その1では、吸水率が3%以下の高品質の再生粗骨材を用いた再生コンクリートの強度と耐久性を明らかにした。本報はその2として、吸水率が7%程度の再生細骨材と、その1で使用した吸水率3%以下の高品質の再生粗骨材を用いたコンクリートについて、その強度と耐久性について検討を加えたものである。その結果、耐凍害性については、再生骨材を用いたコンクリートは、それらの吸水率などの影響によって、天然骨材を用いた普通コンクリートよりもやや劣るが、圧縮強度および弾性係数については一般に使用されている普通コンクリートとほぼ同等の性能を有することを明らかにすることができた。また再生骨材コンクリートの乾燥収縮率は、一般コンクリートよりも約24%低減することができた。

キーワード

再生細骨材／再生粗骨材／圧縮強度／弾性係数／凍結融解抵抗性／乾燥収縮率

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

1. STUDIES ON PROPERTIES OF RECYCLED CONCRETE USING HIGH QUALITY RECYCLED AGGREGATE (Part 2. The Strength and Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete)

Junji Yamasaki
Kazuhiko Tatematsu

Abstract

This paper was described about the strength and the durability of recycled aggregate concrete. To evaluate about the application to the structural concrete of recycled aggregate concrete, this experiment selected the high quality recycled aggregate that percentage of water absorption recycled coarse aggregate with equal to or less than 3 %, and recycled fine aggregate with about 7 % of water absorption. The experimental results were showed that both recycled coarse aggregate concrete and recycled fine aggregate concrete had performance which was equal to ordinary concrete approximately about the compressive strength, the modulus of elasticity and the drying shrinkage, in case of the concrete which used high quality recycled aggregate. However, the freezing and thawing resistance of recycled aggregate concrete became lower than the ordinary concrete which used natural aggregate because the percentage of water absorption of the recycled fine and coarse aggregate was higher than that one of the natural aggregate.

1. はじめに

我が国では、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、さらに骨材採取によって生じる環境破壊も社会問題化されるようになってきている。日本の骨材のうち、粗骨材については川砂利から碎石へと、細骨材については川砂から海砂、砕砂へと変化してきており、将来的には中国砂などの輸入が予測されるなど、良質な骨材を確保するのがかなり困難になってきている。こうした状況に鑑み、解体建物から発生するコンクリートを破砕して骨材の再生化を図ることは、省資源・環境保護を図る上で非常に有用なことは言うまでもない。

現在、解体コンクリートから得られる再生骨材は、吸水率が粗骨材で5%前後、細骨材で10%強程度の品質を有するものが中心となっており、中でも吸水率の低い再生骨材は、生産工場が限定されているために供給されにくい状況にある。しかし、吸水率の低い高品質な再生骨材が供給されれば、その用途は拡大されるといっても過言ではない。

そこで本研究は、高品質の再生粗骨材と再生細骨材を用いたコンクリートについて、その物理的性質と耐久性を把握することで、構造物コンクリートへの適用の可能性を見いだそうとするものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験に用いる再生コンクリートの種類として、細骨材、粗骨材とも再生骨材を用いた再生細骨材コンクリート（S-10）、粗骨材のみ再生骨材を用いた再生粗骨材コンクリート（G-10）および比較用としての天然の細骨材と粗骨材を用いた天然骨材コンクリート（G-0）の計3種類とした。実験要因として、天然骨材コンクリートの呼び強度を24・30・36・40の4水準を設定した。再生粗骨材コンクリートと再生細骨材コンクリートについては、天然骨材コンクリートの4水準の呼び強度に対応する水セメント比を設定した。これら計12種類のコンクリートの、フレッシュ性状、圧縮強度、弾性係数、凍結融解抵抗性および乾燥収縮性状についてそれぞれ評価を行った。

2.2 使用材料および再生骨材の製造方法

本実験に使用した材料を表-1に示す。再生骨材は、材齢38年を経過した建物を解体して再生した原粗骨材

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て8mmふるいを通過した後、8mm以上の試料に湿式の比重選別という特殊な処理過程を経て再生粗骨材とモルタル粒子に分けられ、8mm以下のものは5～8mmの部分と5mm以下の再生細骨材に分けられる²⁾。このような処理をされた再生粗骨材の比重は2.60、吸水率は2.4%程度であり、建設省の暫定品質基準（案）³⁾の1種に相当する高品質の再生粗骨材である。一方、再生細骨材は、吸水率が7.1%程度の品質基準（案）の2種に相当する骨材である。これら粗骨材、細骨材の品質試験結果を表-2に示す。

2.3 コンクリートの調査

コンクリートの種類と調査表を表-3に示す。天然骨材（碎石）を用いたコンクリートの調査は、大阪兵庫地区で一般的に使用されている普通コンクリートの調査に基づいて定めた。既往の研究結果によると、再生粗骨材コンクリートは、天然粗骨材を用いたコンクリートに対して、単位粗骨材かさ容積を0.04m³/m³程

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
細骨材	山砂（城陽産）、混合比70% 砕砂（高槻産）、混合比30% 再生細骨材（原粗骨材は砂利）
粗骨材	碎石（高槻産） 再生粗骨材（原粗骨材は砂利）
混和剤	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）

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	再生	碎石	再生
表乾比重	2.56	2.62	2.43	2.68	2.60
絶乾比重	2.51	2.57	2.27	2.66	2.54
吸水率(%)	1.88	1.84	7.11	0.58	2.43
実績率(%)	—	—	—	57.8	64.2
洗い(%)	1.26（合成後）		1.38	0.51	0.65
粗粒率F.M.	2.72	2.82	3.08	6.63	6.38
ふる分け通過率(%)	25	—	—	100	100
	20	—	—	95	98
	15	—	—	66	93
	10	100	—	40	55
	5	99	100	2	7
	2.5	90	91	0	2
	1.2	71	61	—	0
	0.6	46	40	—	—
	0.3	18	20	—	—
	0.15	4	6	—	—
	以下	0	0	—	—

表－3 コンクリートの種類および調査表

種 別	供試体 記 号	呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単 位 重 量 (kg/m ³)							
					水	セメント	天 然			再 生		混和剤 (C×%)
							山 砂	砕 砂	砕 石	細骨材	粗骨材	
普 通	55G-0	24	55.0	47.5	178	324	573	255	952	—	—	0.8
	47G-0	30	47.0	45.5	182	387	530	236	952	—	—	0.7
	40G-0	36	40.0	41.6	193	482	451	202	957	—	—	0.5
	35G-0	40	35.0	36.3	206	588	366	163	961	—	—	0.3
再	55G-10	24相当	55.0	43.5	168	305	538	239	—	—	1014	0.8
	47G-10	30相当	47.0	41.5	172	366	497	221	—	—	1014	0.7
	40G-10	36相当	40.0	37.4	182	455	422	186	—	—	1024	0.5
	35G-10	40相当	35.0	32.5	194	554	340	152	—	—	1027	0.3
生	55S-10	24相当	55.0	44.6	168	305	—	—	—	736	980	0.8
	47S-10	30相当	47.0	40.6	172	366	—	—	—	649	1014	0.8
	40S-10	36相当	40.0	36.3	182	455	—	—	—	547	1024	0.7
	35S-10	40相当	35.0	31.3	194	554	—	—	—	437	1027	0.9

度増加させることができるとしている⁴⁾。しかし本実験では、単位粗骨材かさ容積は普通コンクリートのかさ容積と等しくし、再生粗骨材の実積率から単位粗骨材量を求めた。単位水量については、普通コンクリートの単位水量を基準として、再生粗骨材の実積率による補正を下記(1)式を用いて行った。

$$\Delta W = \{(1 - \Delta g)vg / (1000 - vg)\} \times 100 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、

ΔW : 単位水量の増加率, %

Δg : 普通コンクリートに用いた砕石の実績率に対する再生粗骨材の実績率の比

vg : 普通コンクリートの調査での粗骨材の絶対容積, L/m³

実績率のみを用いた方法を採用したのは、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査の調整を合理的に行えるようにするためである。再生細骨材コンクリートについては、計画空気量を1%増大し、再生粗骨材コンクリートの天然細骨材(山砂・砕砂)を、再生細骨材に全量置換することによって調査した。なお55S-10についてのみ、試験練り時に粗骨材が目立ったため、細骨材率をさらに2%大きくした。

高性能AE減水剤および助剤の添加量は、G-0のスランプが18±2.5cm、空気量が4.5±1.5%になるように試験練りを行い調整した。再生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査調整法の可否を確認するために、同一水セメント比のG-0の場合と同じ添加量とした。

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、容量100Lのパン型強制ミキサーを使用して練混ぜた。フレッシュコンクリートの試験項目は、スランプ、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は、文献5)の付5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、凍結融解試験および長さ変化試験とした。凍結融解試験は水中凍結水中融解法⁶⁾で300サイクルまで行った。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

試験結果を図-1に示す。再生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天然骨材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、G-10およびS-10においては、G-0よりもスランプフローが小さくなる傾向にあった。空気量については、G-10およびS-10の方がやや大きくなった。この原因は、再生細骨材中の微細なモルタル粒子や、再生粗骨材に付着した(除去されていない)モルタル分に空気泡が保持されるため、もしくはそこから発生した微粉などの影響によってマトリックスの粘性がやや増大し、空気泡が逸散しにくいためと考えられる。

本実験においては、再生粗骨材の実積率による調査の調整のみ行ったが、G-0、G-10およびS-10とも、フレッシュコンクリートの性状に大きな差異はな

かった。この結果から、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、粗骨材の実積率による単位水量補正を行うことによって調整が可能といえる。再生細骨材コンクリートについても、再生粗骨材コンクリートの調査を基にして、混和剤添加量を微調整することによって対応できる。

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。G-0、G-10、S-10の順に、同じ水セメント比のG-0よりも脱水速度が遅くなり、全脱水量も少なくなった。これはG-10およびS-10の単位水量がG-0よりも少ないことが主原因であるが、再生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の良さも影響していると考えられる。本実験の結果を文献5)に基づいて判断すると、再生粗骨材コンクリートおよび再生細骨材コンクリートのポンプ圧送性は、水セメント比55%~40%の範囲において良好であ

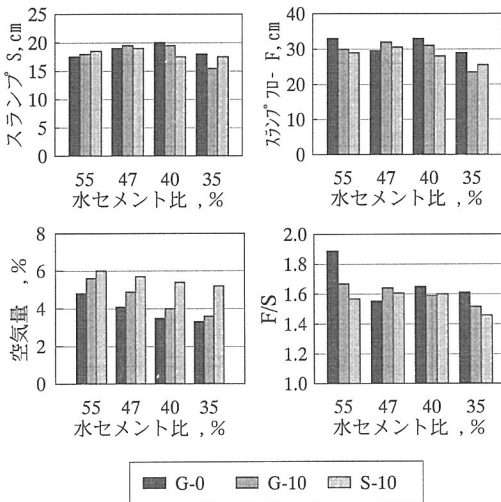


図-1 フレッシュコンクリートの試験結果

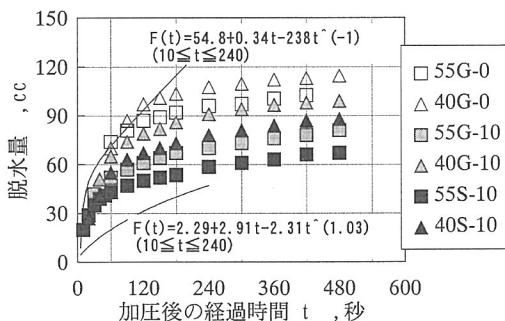


図-2 加圧時間と脱水量の関係

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、圧縮強度試験用供試体から求めたコンクリートの表乾密度と骨材等価吸水率の関係を示す。細骨材および粗骨材が異なるコンクリートの骨材吸水率を評価するために、それぞれの骨材の容積と吸水率から、骨材の絶対容積で重みづけをした、下記(2)式によって計算される骨材等価吸水率を用いた。この骨材等価吸水率は、菊池らが提案する骨材の相対品質値⁷⁾と同じものである。

$$Q = \{Q_s \cdot S_v + Q_g \cdot G_v\} / (S_v + G_v) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- Q : 骨材等価吸水率, %
- Q_s : 細骨材の吸水率, %
- Q_g : 粗骨材の吸水率, %
- S_v : 細骨材の絶対容積, L/m^3
- G_v : 粗骨材の絶対容積, L/m^3

図-3より、コンクリートの表乾密度は、いずれの水セメント比においてもG-0が最も大きく、G-10、S-10の順に減少した。表乾密度と骨材等価吸水率には負の相関があり、骨材等価吸水率が大きくかつ水セ

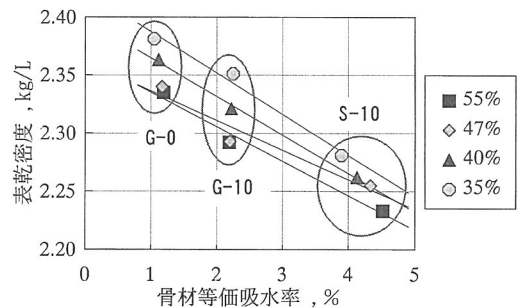


図-3 表乾密度と骨材等価吸水率

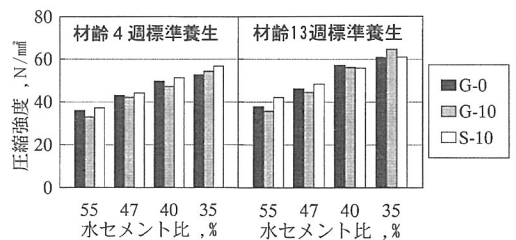


図-4 圧縮強度発現性

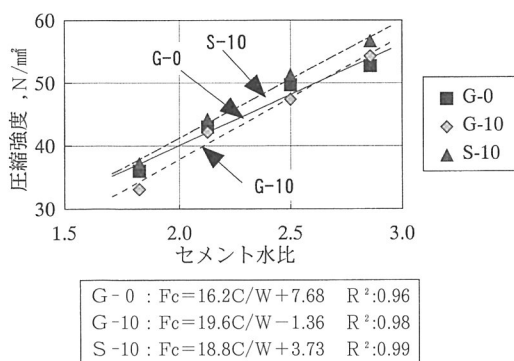
メント比が大きいくほど、表乾密度が低下した。

(2) 圧縮強度発現性

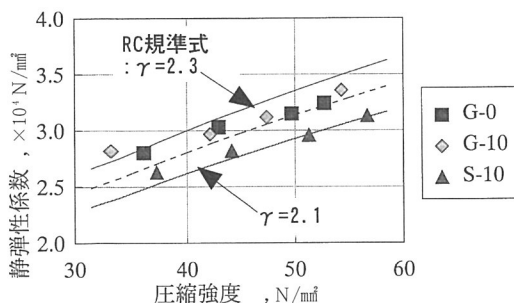
図－4 にコンクリートの圧縮強度発現性を示す。G－10の圧縮強度は、材齢13週において55G－10および47G－10はやや低くなるが、その他はG－0とほぼ同等であった。またS－10については、今回の実験結果からは、G－0と同等かもしくはそれ以上の強度発現性を示した。これより高品質の再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度発現性は、天然骨材コンクリートとほぼ同等であるといえる。

(3) セメント水比と圧縮強度の関係

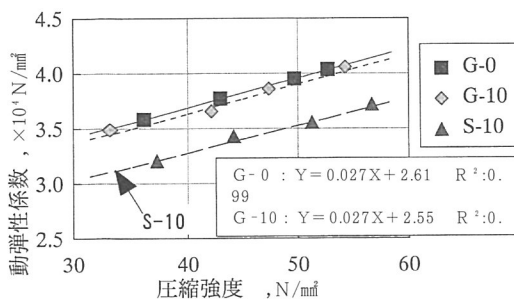
図－5 に、G－0、G－10およびS－10の、材齢4



図－5 圧縮強度とセメント水比の関係



図－6 静弾性係数と圧縮強度の関係

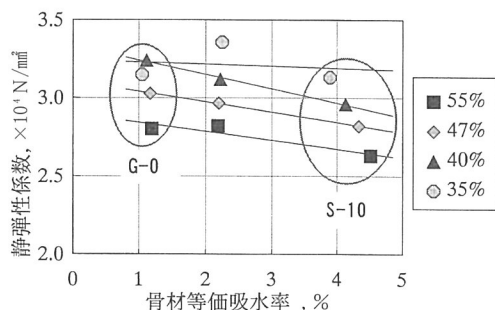


図－7 動弾性係数と圧縮強度の関係

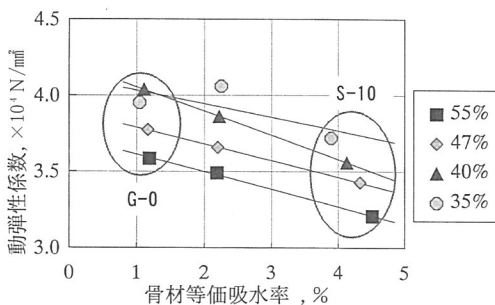
週における圧縮強度とセメント水比の関係を示す。また図の下にそれらの回帰式を示す。回帰分析の結果、セメント水比と材齢4週における圧縮強度との間には、G－0では相関係数0.96、G－10では0.98、S－10では0.99と、全てにおいて高い相関が得られた。また回帰式の傾きは、水セメント比35%のものを除けば、G－0、G－10、S－10ともほぼ等しくなる。これより、高品質の再生骨材を用いたコンクリートは、水セメント比を若干（今回の実験結果からは5%程度）低減することによって、普通コンクリートと同等以上の圧縮強度を確保できる。このことは、再生骨材コンクリートの中酸化抵抗性や耐久性の改善にも有効な手段である。

(4) 静弾性係数および動弾性係数

図－6 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中に、RC規準⁸⁾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・2.2・2.1とした場合の値を示した。G－0およびG－10に対して、S－10の静弾性係数がやや低下しており、ヤング係数評価式における密度2.1～2.2の間に散布した。図－7に動弾性係数と圧縮強度の関係を示す。静弾性係数と同じ傾向であり、S－10の動弾性係数の低下は図－6の場合より



図－8 静弾性係数と骨材等価吸水率



図－9 動弾性係数と骨材等価吸水率

も顕著であった。図-8および図-9に、静弾性係数および動弾性係数と骨材等価吸水率の関係を示す。骨材等価吸水率の増大に伴って弾性係数が低下する傾向にあったが、骨材等価吸水率が弾性係数に及ぼす影響は、静弾性係数よりも動弾性係数の方が大きくなった。

これより、共振振動数から非破壊的に求めた動弾性係数を用いる方が、圧縮強度試験時に測定した静弾性係数よりも、コンクリートの表乾密度や骨材等価吸水率などの細かい物性変化を的確に把握できる。

(5) 静弾性係数評価に関する考察

図-10に、静弾性係数と動弾性係数の関係を示す。図中にそれぞれのコンクリートの回帰式を記した。両者には高い相関が認められ、G-0、G-10およびS-10に関わらず、以下に示すほぼ一定の関係があった。

$$\text{静弾性係数} E_c / \text{動弾性係数} E_d \approx 0.8$$

骨材性状などが微妙に異なる再生骨材コンクリートの静弾性係数は、動弾性係数から上記の関係式を用いて非破壊的に推定することによっても、ほぼ正確に評価することが可能といえる。

3.4 凍結融解抵抗性

図-11に凍結融解試験結果を示す。G-10では、55G-10が110サイクル、40G-10が175サイクル、S-10では40S-10が178サイクル、35S-10が240サイクル終了後に相対動弾性係数が60%となった。図-12に相対動弾性係数と質量減少率の関係を示す。55G-0は質量減少率が大きいても相対動弾性係数は低下しないのに対して、40G-10、40S-10においては、質量減少率が小さいにも関わらず相対動弾性係数が低下した。この原因は、低水セメント比ではセメントマトリックスが緻密であり、再生骨材によってコンクリート中

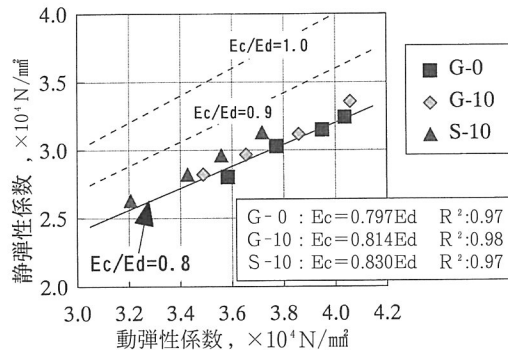


図-10 静弾性係数と動弾性係数の関係

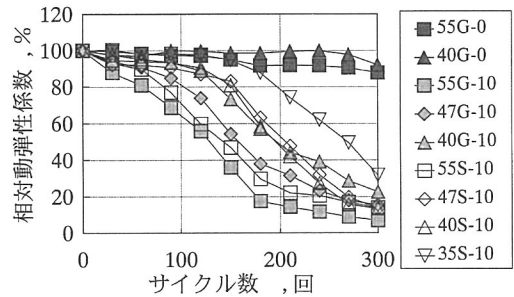


図-11 凍結融解試験結果 (300サイクル)

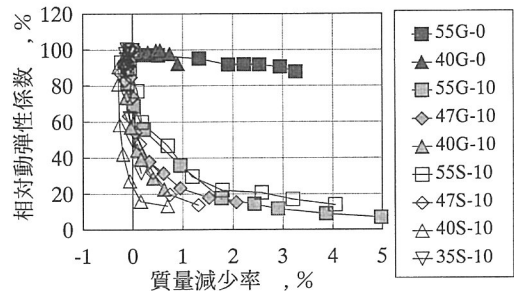


図-12 相対動弾性係数と質量減少率

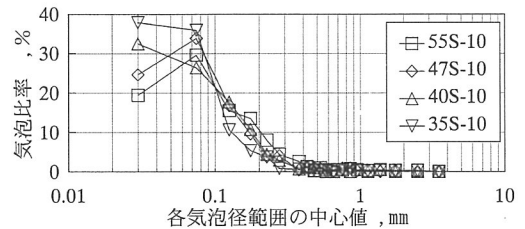


図-13 S-10の気泡分布測定結果

表-4 S-10の気泡間隔係数

供試体名	55S-10	47S-10	40S-10	35S-10
気泡間隔係数 mm	0.203	0.179	0.183	0.171
比表面積 mm ² /mm ³	25.35	29.94	34.48	37.59
硬化後空気量 %	4.2	4.2	3.3	3.6
耐久性指数 %	23.9	37.3	35.6	49.0

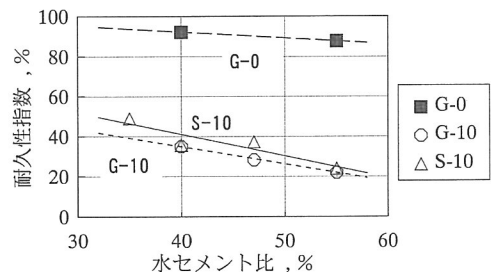


図-14 耐久性指数と水セメント比

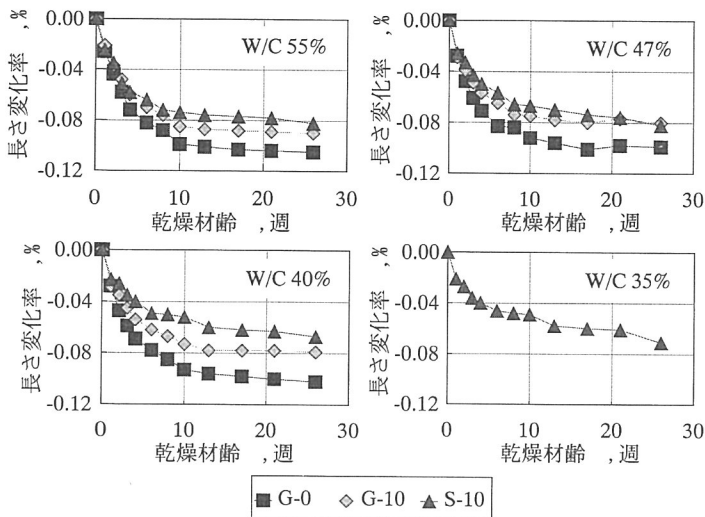


図-15 乾燥収縮率測定結果（乾燥材齢26週）

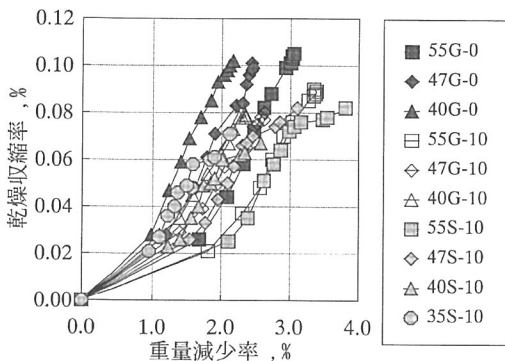


図-16 乾燥収縮率と重量減少率の関係

に持ち込まれた水分の凍結による膨張圧を、キャピラリー空隙を通じて緩和しきれず、コンクリートの内部にマイクロクラックが発生したためと考えられる。それ以外の原因として、再生骨材製造時に、ジョークラッシャーなどを用いた処理によって、骨材自体にクラックが発生していたためと推察される。

図-13および表-4に、S-10の気泡特性測定結果を示す。水セメント比が低くなるほど、0.10mm以下の気泡が多くなり、気泡間隔係数も小さくなった。図-14に耐久性指数と水セメント比の関係を示す。G-10およびS-10とも、要求する凍結融解抵抗性を満足しなかったが、水セメント比を低減することによって耐久性指数が向上した。S-10については、低水セメント比とすることによって骨材等価吸水率が低下し、気泡

間隔係数も小さくなったために、G-10よりも凍結融解抵抗性の改善効果が大きかった。これより再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は、水セメント比や骨材等価吸水率の低減とともに、適切な空気量を確保して気泡間隔係数を低減することによって改善できる。

3.5 乾燥収縮率

乾燥材齢26週までの長さ変化率を図-15に示す。S-10の乾燥収縮率は、本実験の結果からは、同じ水セメント比のG-0よりも24%程度小さくなった。これは、天然の砕石と比較して再生粗骨材の実績率が約64%（比較用に用いた砕石は約58%）と大きいため、G-0と同じスランプを得るために必要と

なる単位水量が低減でき、かつ単位粗骨材量を大きく設定できたためである。図-16に乾燥収縮率と重量減少率の関係を示す。G-10およびS-10の重量減少率はG-0よりも大きい、同一水セメント比においてG-10とS-10には大きな差はないと言える。

これらから、高い実積率を有する高品質の再生粗骨材を用いて粗骨材かさ容積を大きくし、単位水量を小さく設定すれば、再生骨材コンクリートの乾燥収縮率を低減することができる。

4. まとめ

高品質の再生骨材を用いた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結果、以下のことが確認できた。

- 1) 再生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に、粗骨材の実績率による単位水量補正を行えば調整することが可能である。
- 2) 再生骨材コンクリートは、加圧による脱水速度が遅く、全脱水量も少なくなるため、ポンプによる圧送性は極めて良くなると判断できる。
- 3) 再生骨材コンクリートの表乾密度および弾性係数は、天然骨材コンクリートに比べてやや小さくなるが、コンクリートの圧縮強度発現性は同程度である。
- 4) 再生骨材コンクリートの静弾性係数は、共振振動数から求めた動弾性係数を用いることによって、非破壊的に正確に把握できる。
- 5) 再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は、再生

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したが、水セメント比を低減したり適切な空気泡を確保することで改善できる。

- 6) 再生細骨材コンクリートの乾燥収縮率は、普通コンクリートと比較して約24%低減することができた。

以上、高品質の再生骨材を用いて製造したコンクリートは、現時点では地域性(凍結融解作用を受けない地域)を限定すれば、構造体コンクリートとして十分適用が可能といえる。

今後、再生骨材コンクリートの収縮ひび割れ性状、骨材性能の評価手法および骨材性能を指標とするコンクリートの性能予測について検討を行う予定である。

[参考文献]

- 1) 山崎順二・立松和彦：「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）」、(株)浅沼組技術研究所報、pp.43-50、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) 財国土開発技術センター：「再生コンクリートの利用技術の開発 平成8年度報告書」
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Annual Book of ASTM Standards、
「ASTM C 666-84、Standard Test Method for RESISTANCE OF CONCRETE TO RAPID FREEZING AND THAWING (procedureA)」、pp.403-410、Vol.04.02
- 7) 菊池雅史他：「再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響」、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp.11-20、1995. 8
- 8) 日本建築学会：「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、丸善、1995