

論文 高品質再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐凍害性

山崎順二^{*1}・立松和彦^{*2}

要旨: 本研究は、再生骨材コンクリートの構造体コンクリートとしての利用可能性を評価するために、再生粗骨材の吸水率が3%以下、再生細骨材の吸水率が7%程度の、高品質の再生粗骨材を用いたコンクリートの強度および耐凍害性について検討したものである。その結果、高品質の再生骨材を用いたコンクリートは、耐凍害性については、再生細骨材や粗骨材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、再生細骨材コンクリートおよび再生粗骨材コンクリートとも、普通コンクリートとほぼ同等の性能を有することが明らかとなった。

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

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、碎砂へ、将来的には中国砂などの輸入が予測されており、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いえる。

現在一般的に供給されている再生骨材は、吸水率が粗骨材で5%前後、細骨材で10%強程度の品質のものが中心となっており、吸水率の低い再生骨材は、生産工場が限定されるために供給されにくい状況にある。しかし、低吸水率の、すなわち高品質の再生骨材が得られれば、その用途は拡大されると考えられる。

そこで本研究は、高品質の再生骨材を用いたコンクリートの特性を把握することによって、構造体コンクリートへの適用の可能性を見いだすことを目的とする。本論文は、高品質の再生

骨材を用いたコンクリートの力学的性質および耐凍害性について述べたものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

コンクリートの種類は、細・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とした再生粗骨材コンクリート(G-10)、比較用として天然の細骨材および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、まず天然骨材コンクリートの呼び強度を24・30・36・40と4水準設定し、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は、天然骨材コンクリートと同じ水セメント比とした。これら計12種類のコンクリートについて、フレッシュ性状、圧縮強度、弾性係数および凍結融解抵抗性を評価した。

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、インバ

*1 (株) 浅沼組 技術研究所建築構造研究室 研究員 工修(正会員)

*2 (株) 浅沼組 技術研究所建築構造研究室 主任(正会員)

クトクラッシャー、ロッドミル改造機で処理された後、8mm以上の試料に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られ、8mm以下は5~8mmの部分と5mm以下の再生細骨材に分けられたものである¹⁾。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)²⁾の1種に相当する、高品質の再生粗骨材である。同様に再生細骨材については、吸水率が7.1%程度であり、2種に相当するものである。本実験に使用した骨材の品質試験結果を表-2に示す。

2.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-3に示す。天然骨材(碎石)を用いたコンクリートの調合は、大阪兵庫地区で一般的に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。既往の研究結果³⁾によると、再生粗骨材コンクリートは、天然粗骨材を使用したコンクリートに対して、単位粗骨材かさ容積を0.04m³/m³程度増加させることができる。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行った。実積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合の調整を、合理的に行

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% 碎砂(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	碎砂	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
実積率(%)	—	—	—	57.8	64.2
洗い(%)	1.26(合成後)		1.38	0.51	0.65
粗粒率FM.	2.72	2.82	3.08	6.63	6.38
	25	—	—	100	100
ふるい	20	—	—	95	98
	15	—	—	66	93
	10	100	—	40	55
分け通	5	99	100	2	7
過率	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合表

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	碎砂	碎石	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
再生	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
	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

えるようにするためである。また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・碎砂）を、再生細骨材に全量置換することによって調合した。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。

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4)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、凍結融解試験とした。凍結融解試験は水中凍結水中融解法⁵⁾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

試験結果を表-4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、もつ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つた。この原因是、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合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

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

供試体 記号	スランプ cm	スランプ フロ- 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
55S-10	18.5	30×28	6.0	23.0	2.23
47S-10	19.0	31×30	5.7	23.0	2.24
40S-10	17.5	29×27	5.4	23.0	2.26
35S-10	17.5	26×25	5.2	24.0	2.27

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合を基にして、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-1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4)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るといえる。

3.3 硬化コンクリートの物性

(1) 表乾密度

図-2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の吸水率を評価するため、それぞれの骨材の容積と吸水率から計算される、骨材

等価吸水率⁶⁾を用いた。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水セメント比が大きいほど、表乾密度が低下した。

(2) 圧縮強度発現性

図-3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-4に、G-0, G-10およびS-10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。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性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-5に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中に、RC規準⁷⁾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-6に動弾性係数

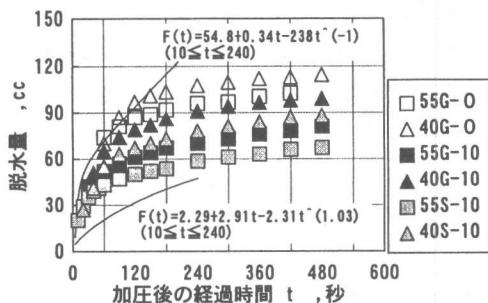


図-1 加圧ブリーディング試験結果

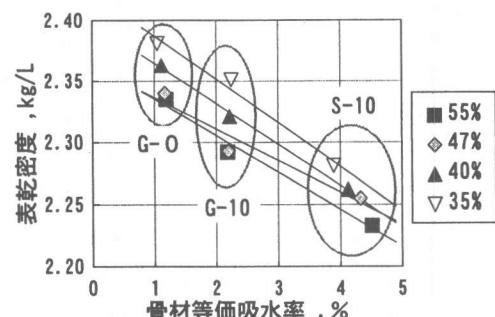


図-2 表乾密度と骨材等価吸水率

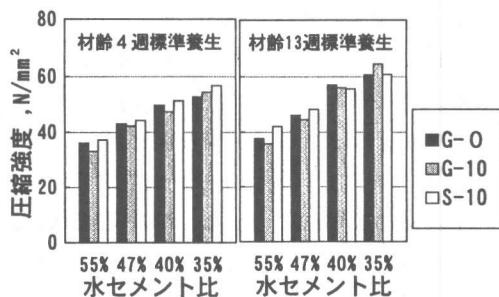


図-3 コンクリートの圧縮強度発現性

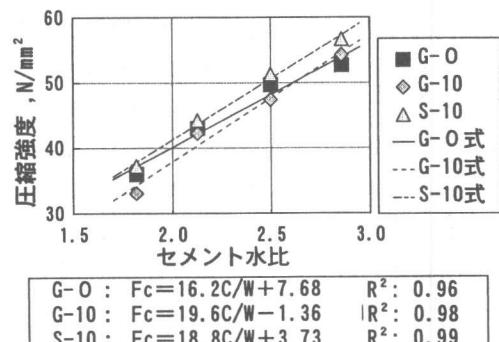


図-4 セメント水比と圧縮強度の関係

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-5の場合よりも顕著であった。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-7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、静弾性係数 E_c / 動弾性係数 $E_d \approx 0.8$ と、ほぼ一定の関係があった。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-8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-9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く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

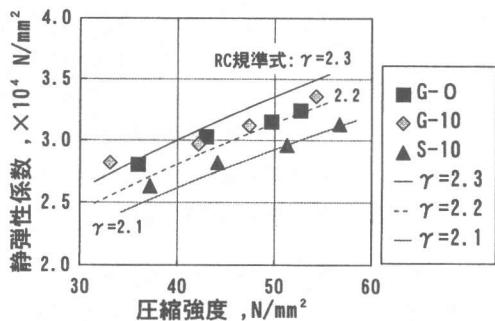


図-5 静弾性係数と圧縮強度の関係

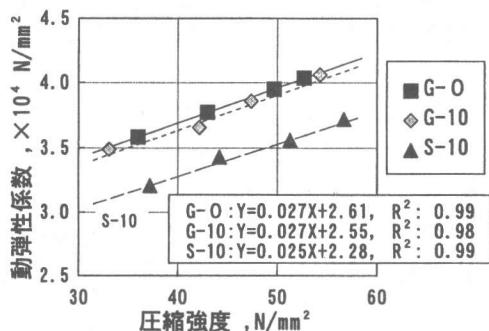


図-6 動弾性係数と圧縮強度の関係

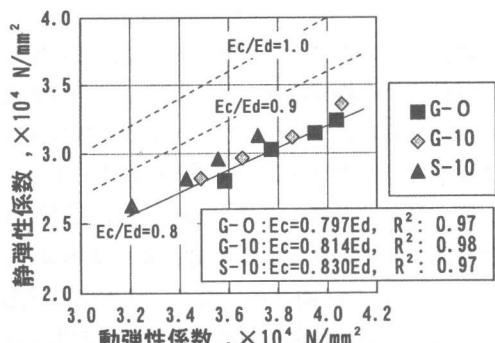


図-7 静弾性係数と動弾性係数の関係

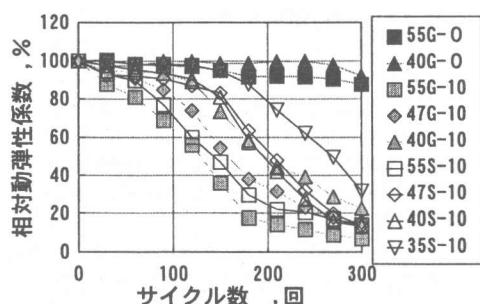


図-8 凍結融解試験結果

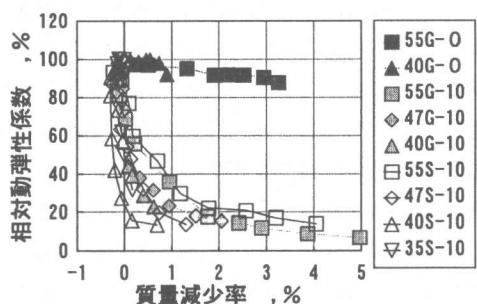


図-9 相対動弾性係数と質量減少率の関係

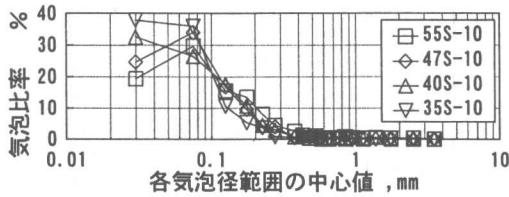


図-10 気泡分布測定結果

表-5 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

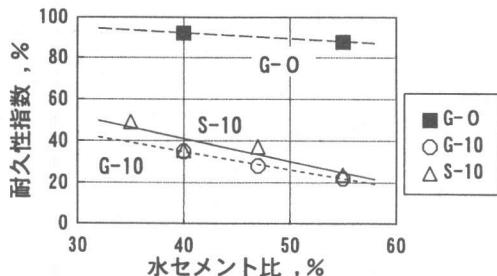


図-11 耐久性指数と水セメント比の関係

材によってコンクリート中に持ち込まれた水分の凍結による膨張圧を、キャビ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。

図-10および表-5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つた。図-11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、要求する耐凍害性を満足しなかつたが、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つたために、G-10よりも耐凍害性の改善効果が大きかつた。これより再生骨材コンクリートの耐凍害性は、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。

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凍害性について実験を行つた結果、以下のことが確認できた。

- 再生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、粗骨材の実積率による単位水量補正によって調整可能であった。
 - 再生骨材コンクリートは、加压による脱水速度が遅く、全脱水量も少なくなるため、ポンプ圧送性が良好と判断できた。
 - 再生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については同程度であった。
 - 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。
 - 再生骨材コンクリートの耐凍害性は、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、水セメント比の低減や適切な空気量の確保によって改善できる。
- 以上、高品質の再生骨材を用いたコンクリートは、現時点では地域的な限定（凍結融解作用を受けない地域）を加えることによって、構造体コンクリートとして十分に適用可能といえる。

[参考文献]

- 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
- (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」
- 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, pp.857-858, 1995
- 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
- 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
- 新井他：「再生細骨材コンクリートの強度および変形性状」, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1081-1086, 1997
- 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