

論文 再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性

中川隆夫^{*1}・大野義照^{*2}・林田都芳^{*3}・山崎順二^{*4}

要旨: 細・粗骨材とも再生骨材を用いたコンクリート、粗骨材のみ再生骨材を用いたコンクリートおよび比較のため細・粗骨材とも天然骨材を用いたコンクリートについて、2種類の水セメント比(45%と65%)のもとで、JIS原案の一軸拘束ひび割れ試験を行い、ひび割れ発生時期、ひび割れ幅などの乾燥収縮ひび割れ特性を調べた。その結果、水セメント比が65%の場合、ひび割れ発生時期および最終(材齢60日)ひび割れ幅とともに、粗骨材のみ再生骨材を用いたコンクリートは天然骨材コンクリートと同程度であり、細・粗骨材とも再生骨材を用いたコンクリートはひび割れの発生が早く、最終ひび割れ幅も大きくなつた。

キーワード: 再生骨材、乾燥収縮、一軸拘束ひび割れ試験、調合、ひび割れ幅

1. まえがき

地球環境問題が深刻化している現在、廃棄物のリサイクルは、枯渇する資源の有効利用と省エネルギーのほかに、廃棄物の処分による環境破壊の防止の観点からも重要となっている。建設副産物についても解体コンクリート塊に関する再生利用の促進が期待されているが、これまで路盤材や埋め戻し材として再利用されることがほとんどである。平成9年版の建築工事共通仕様書に無筋コンクリートへの再生骨材の使用が認められた。今後はさらに再生骨材を使用した構造用コンクリートへの利用が期待される¹⁾。その再生コンクリートの課題の一つは乾燥収縮が大きいこと²⁾で、その乾燥収縮ひび割れ抵抗性が懸念される。しかし、ひび割れ抵抗性をひび割れ試験によって直接調べた報告は少ない^{3), 4)}。

本報告では、再生細・粗骨材を用いた再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性について、基本的な材料の組み合わせである、細・粗骨材とも再生骨材を用いたコンクリート、粗骨材のみ再生骨材を用いたコンクリートおよび比較のため細・粗骨材とも天然骨材を用いたコンクリートについて

て、水セメント比を45%と65%に変化させた6種類のコンクリートについて、JIS原案の一軸拘束ひび割れ試験を実施し、再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類と調合

拘束ひび割れ試験体の形状を図-1に、その種類とコンクリートの調合を表-1に示す。w/cは45%と65%の2水準で、単位水量は175kg/m³と一定である。細・粗骨材の組み合わせは、両骨材とも再生骨材を用いたR-100、粗骨材のみ再生骨材を用いたR-50、および比較のため両骨材とも普通骨材を用いたR-0の3水準で、コンクリートの種類は

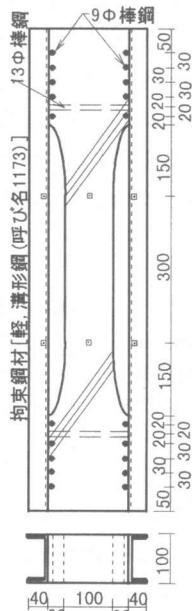


図-1 試験体の形状

*1 大阪大学技官 大学院工学研究科建築工学専攻

(正会員)

*2 大阪大学教授 大学院工学研究科建築工学専攻

工博 (正会員)

*3 大阪大学院生 大学院工学研究科建築工学専攻

(正会員)

*4 棚浅沼組 技術研究所 研究員

(正会員)

表-1 コンクリートの調合

試験体 記号	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			質量 (kg/m ³)			骨材種	
				C	S	G	C	S	G	S	G
65R-0	65	47.0	175					957	普	普	
65R-50				86	326	368	270	834	普	再	
65R-100								773	再	再	
45R-0	45	43.1	123					942	普	再	
45R-50				123	283	374	389	724	普	再	
45R-100								671	再	再	

W: 単位水量, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材

普: 普通骨材, 再: 再生骨材

計 6 である。拘束ひび割れ試験体は各種類 3 体製作した。乾燥収縮およびクリープ試験体は 100mm × 100mm × 500mm の角柱体を各 2 体製作した。圧縮・引張強度試験体には φ 100 mm × 200mm の円柱供試体を用いた。

2. 2 使用材料

表-2 に使用した骨材の品質を示す。セメントは、普通ボルトランドセメントを使用した。普通骨材は碎石、碎砂を使用した。再生骨材は関西の再生骨材プラントで製造されたもので、粗骨材は吸水率 2.40% で、建設省の暫定品質基準（案）の 1 種に、細骨材は吸水率 7.40% で、2 種相当の品質を有する骨材である。混和剤はポリカルボン酸系の高性能 A-E 減水剤を使用した。

表-2 骨材の品質

	再生粗骨材	再生細骨材	碎石	碎砂
表乾比重	2.56	2.37	2.60	2.56
絶乾比重	2.50	2.20	2.58	2.51
吸水率(%)	2.40	7.40	1.07	2.25
洗い損失量(%)	0.61	1.40	0.47	6.50
実積率(%)	64.0		60.3	
粗粒率	6.69	3.16	6.54	2.93

2. 3 試験方法、測定方法および測定項目

試験は 20 ± 1 °C, R.H. 60 ± 5% の恒温・恒湿室で実施した。拘束ひび割れ試験体の製作および試験は「JIS 原案のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)⁵⁾」に準拠して行った。各試験体ともコンクリート打設後、型枠のまま湿潤状態で養生し、材齢 7 日に型枠を脱型し、乾燥を開始した。また、圧縮および引張強度試験用供試体も拘束ひ

び割れ試験体と同様の養生条件下で保存した。

拘束ひび割れ試験体の拘束鋼材のひずみは、拘束鋼材の中央部 300mm 間で、かつ重心位置を通る 4 側面について、事前に貼付しておいたコンタクトポイントをコンタクトストレインゲージ (C.S.G) で測定するとともに拘束板の中央ウェブ位置に貼付した箇ひずみゲージ (F.S.G) でも測定した。コンクリートの拘束収縮ひずみは試験体のコンクリート打設面と底面(以下、上・下面と呼ぶ)の直線部中央 300mm 間を C.S.G で測定した。ひび割れ幅の測定は、コンクリートの拘束収縮ひずみと同様に上・下面の直線部中央 300mm とその両外側 100mm の計 500mm 間において 100mm 間隔にコンタクトポイントを貼付し、C.S.G で測定した。

クリープ試験は材齢 14 日に 2 体一組で持続応力 (6 N/mm²) を載荷した。乾燥収縮およびクリープひずみは角柱試験体の 4 側面において検長 300mm の C.S.G で測定した。

圧縮試験は材齢 7, 14, 28 日に、また引張試験は材齢 7, 14, 21, 28 日にそれぞれ実施した。

3. 試験結果および考察

3. 1 コンクリート強度・ヤング係数、乾燥収縮ひずみ、クリープ係数

(1) コンクリート強度・ヤング係数

コンクリート強度・ヤング係数の試験結果を図-2 に示す。圧縮強度は w/c=45%, 65% のいずれの場合も試験体 R-0, R-50, R-100 の順に強度が低下しているが、w/c=65% の場合、R-0 と R-50 との差は小さい。w/c=45% の場合、再生細・粗骨材を使用した R-100 は、w/c=65% の普通骨材を用いた R-0 と同程度の強度しか発現していない。

割裂引張強度はバラツキが大きいが、w/c=65% の R-100 の値が他よりかなり小さい。

圧縮強度の 1/3 の応力度における割線から求めたヤング係数は、w/c=45% と 65% を比べると、再生細・粗骨材を使用した w/c=45% の R-100 を除き、w/c の小さい 45% の方が 65% に比べ大きくなっている。同じ w/c の場合は、圧縮強度と同様 R

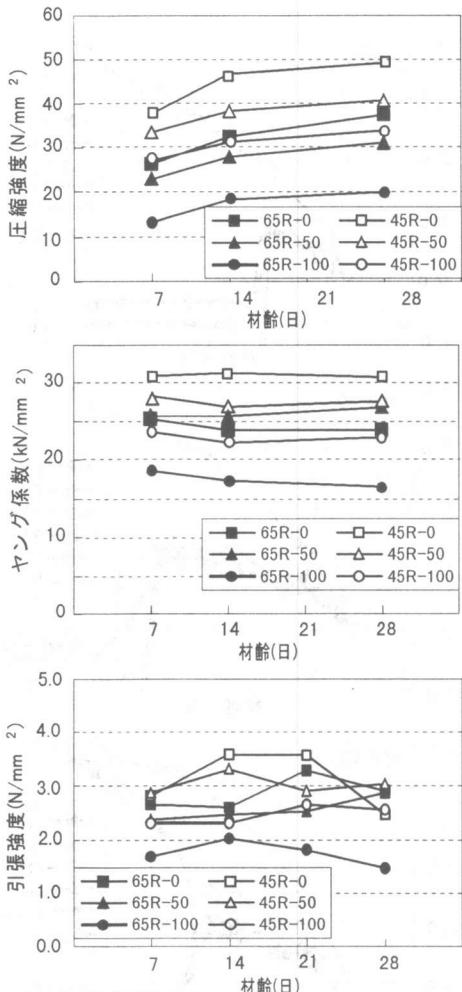


図-2 コンクリート強度およびヤング係数

-0, R-50, R-100 の順に小さくなる傾向が見られるが、65%のR-0はR-50より若干小さくなっている。

(2) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-3に示す。図中の破線は最小二乗法で求めた近似曲線である。同図中に近似式を示す。乾燥収縮はw/cの小さい45%の方が65%に比べ、全般に小さいが、骨材の組み合わせによっては逆の場合も見られ、w/c=45%R-0, w/c=45%R-50とw/c=65%R-0, またw/c=45%R-100とw/c=65%R-50はほぼ同じである。同じw/cの場合はR-0, R-50, R-100の順に乾燥収縮ひずみが大きく、再生骨材量が多い程乾燥収縮は大きくなっている。

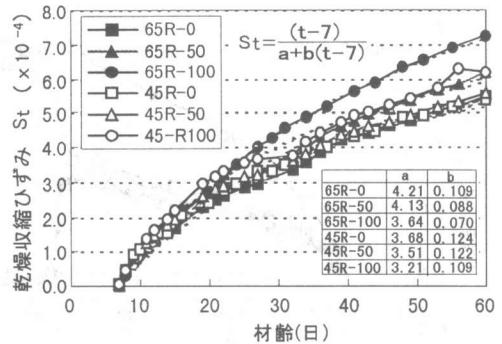


図-3 乾燥収縮ひずみ

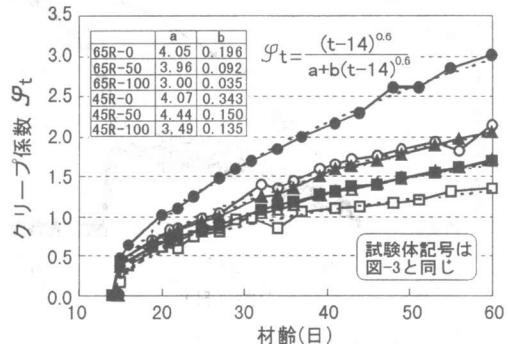


図-4 クリープ係数

(3) クリープ係数

クリープ係数の経時変化を図-4に示す。図中の破線は最小二乗法で求めた近似曲線である。クリープ係数は、程度に差はあるが、乾燥収縮ひずみとほぼ同様の傾向を示している。すなわち、同じ骨材の場合、w/cの小さい45%の方が65%に比べ小さく、w/c=45%R-100とw/c=65%R-50またはw/c=45%R-50とw/c=65%R-0はほぼ同じ挙動を示している。同じw/cの場合、R-0, R-50, R-100の順にクリープ係数も大きくなっている。

3. 2 拘束ひび割れ試験体のひずみ

図-5に拘束ひび割れ試験体におけるコンクリートのひずみ、拘束鋼材ひずみの測定結果の1例を示す。記号で示している値はC.G.Sによる測定ひずみ、太い網線で示しているのはF.S.Gで測定した拘束鋼材ひずみである。また×印で乾燥収縮ひずみを示している。コンクリートひずみは拘束鋼材ひずみ（両者ともC.G.Sによる測定値）とほぼ等しく、この種の試験で問題になるコンクリート試験体の拘束鋼材への固定度はほぼ完全で

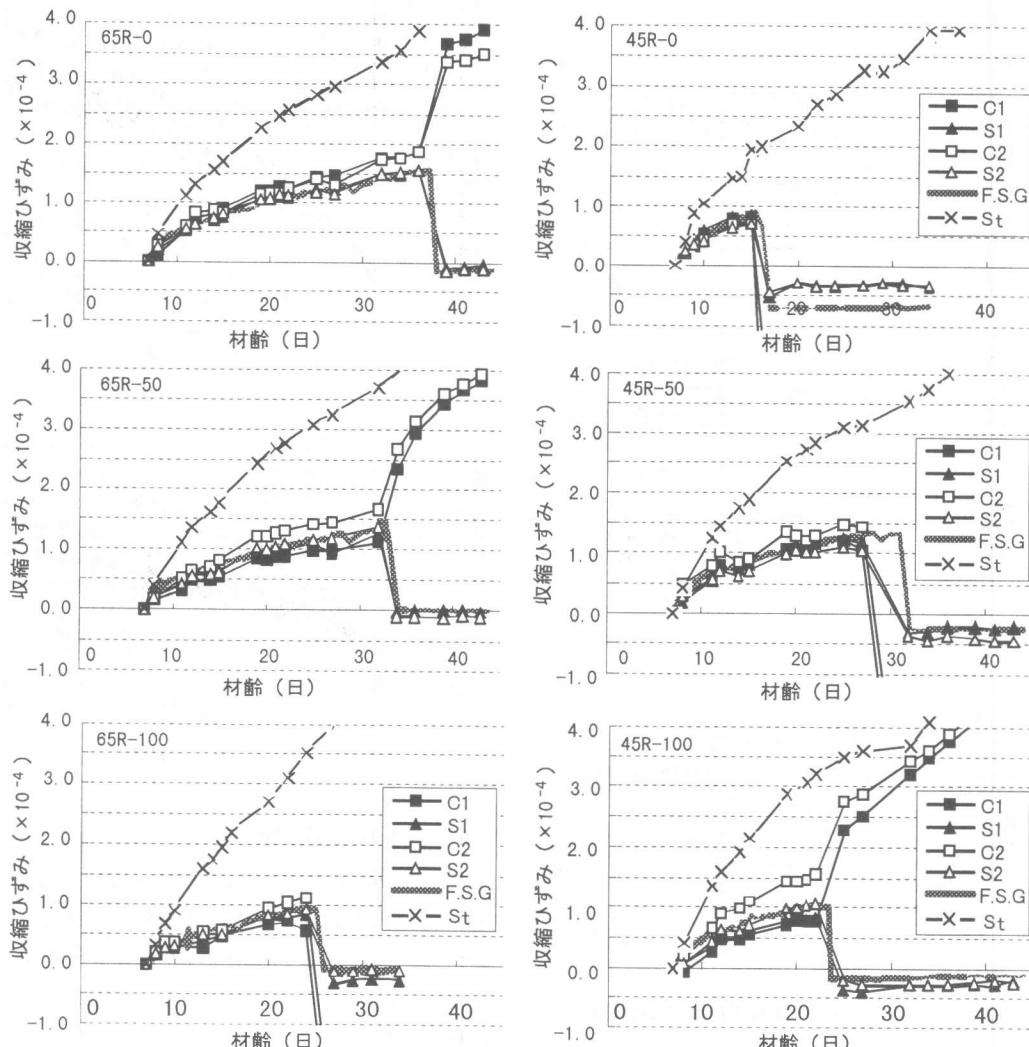


図-5 拘束試験体のひずみ

あることがわかる。ひび割れが発生すると鋼材のひずみは解放され、鋼材ひずみはほぼ零に戻っている。

3.3 ひび割れ発生状況と発生日

F.S.G で2時間毎に測定した拘束鋼材ひずみの変化から判定したひび割れ発生日を表-3に示す。ひび割れの発生位置は、試験体18体中10体では中央平行300mm区間内であった。前掲の図-5においてひび割れ発生時に、コンクリートひずみが負側(膨張)に急増している試験体では、ひび割れは中央平行区間に生じている。ひび割れは、まず乾燥収縮の大きい打込み面から生じ徐々に

進行し断面を貫通する場合もある⁶⁾が、本実験では全ての試験体において発生と同時に貫通した。

試験体R-0, R-50, R-100の同種3体の試験体のひび割れ発生日の平均は、w/c=65%では33, 31, 24日と再生骨材コンクリートの方がひび割れ発生が早くなっている。特に細・粗骨材とも再生骨材を用いたR-100が早い。その理由として、材齢24日前後では試験体R-0, R-50, R-100間で乾燥収縮量に大きな差異がなく、また収縮応力を緩和するクリープはR-100が大きいことからR-100の収縮応力はR-0やR-50より小さいが、割裂引張強度試験結果とひび割れ発時の応力か

らコンクリート引張強度が他より低いことによるものと考えられる。試験体R-0とR-50との間では乾燥収縮量、クリープ、強度性状に大きな差異がないことからひび割れ発生日の差異も小さい。

w/c=45%では試験体R-0、R-50、R-100のひび割れ発生日の平均はそれぞれ17、31、23日で、普通骨材を用いたものが特に早くなっているが、再生骨材を用いたコンクリートはw/c=65%の場合とほぼ同じである。普通骨材コンクリートがw/c=65%のR-0と比較してもひび割れ発生が早いのは、強度は高いものの、単位水量が同じことから乾燥収縮は同程度で、クリープは小さくヤング係数は大きいことから、収縮応力が大きくなつたことによるものと考えられ、コンクリートの高強度が必ずしもひび割れ制御に有利ではないことを示している⁷⁾。

拘束鋼材のひずみ変化量から求めたひび割れ発生日の収縮応力も表-3に示す。割裂引張強度に対する比は0.44~1.1と大きく変動している。特に早くひび割れの生じたw/c=45%のR-0は0.44~0.50と小さく、ひび割れ発生が遅いw/c=45%R-50は0.94~1.1であった。

3.4 ひび割れ幅

検長100mmのコンタクトストレインゲージで測定したひび割れ幅の経時変化を図-6示す。ひび割れ幅はコンクリートの打込み面とその反対面で測定されているが、コンクリート打込み面の乾燥収縮が大きいので、全般にひび割れ幅も打込み面で大きくなっている。

表-3にはひび割れ発生時と材齢60日におけるひび割れ幅も、打ち込み面とその反対面での値の平均で示している。ひび割れ幅は、図-7に示すように発生時には拘束区間内の拘束鋼材の戻り変形とコンクリートの弾性回復変形の和として表れる（初期ひび割れ幅と呼ぶ）。その後はコンクリートの乾燥収縮変形とクリープ回復変形の和が初期ひび割れ幅に加算される（長期ひび割れ幅と呼ぶ）。したがって、同じコンクリートの試験体3体間で比較すると、ひび割れ発生が遅く

表-3 ひび割れ発生日・ひび割れ幅

	ひび割れ 発生材齢 (日)	収縮応力 (N/mm ²)	ひび割れ幅(mm)	
			発生時	材齢60日
65R-0	No.1	26.5	1.84	0.159 0.343
	2	34.1	2.29	0.177 0.336
	3	38.0	2.81	0.233 0.334
65R-50	No.1	34.1	2.25	0.185 0.337
	2	24.2	1.65	0.137 0.344
	3	34.1	2.11	0.169 0.280
65-R100	No.1	21.9	1.46	0.132 0.438
	2	25.8	1.65	0.169 0.401
	3	25.0	1.56	0.125 0.391
45R-0	No.1	16.8	1.47	0.135 0.361
	2	18.7	2.23	0.174 0.393
	3	16.0	2.26	0.147 0.376
45R-50	No.1	32.0	2.61	0.194 0.335
	2	28.2	2.32	0.175 0.332
	3	33.0	2.66	0.188 0.323
45R-100	No.1	23.5	1.96	0.175 0.364
	2	20.6	1.69	0.140 0.358
	3	19.8	1.86	0.144 0.369

なるほど初期ひび割れは大きくなり、その後のひび割れ幅の増加量は少ない。すなわち長期ひび割れ幅の差異は非回復のクリープ変形の差異によるもので、ひび割れ発生日が異なっても同種の試験体間では長期ひび割れの差は小さい。

W/C=65%の場合、再生粗骨材コンクリート(R-50)の材齢60日における長期ひび割れ幅の0.32mm(3体の平均値)に対して、再生細粗骨材コンクリート(R-100)の長期ひび割れ幅は0.41mmと28%程度大きい。両者の同時点における乾燥収縮は、それぞれ 6.19×10^{-4} と 7.24×10^{-4} で、その差 1.05×10^{-4} の17%に比べて、このようにひび割れ幅の差が大きい理由は、再生細粗骨材コンクリートはひび割れが早く生じたのでクリープ変形が小さかったことによるものと考えられる。

W/C=45%の場合、R-0はひび割れ発生が早かったためにクリープ変形が小さいので、乾燥収縮はR-50と同程度で、R-100より小さいにもかかわらず、長期ひび割れ幅はR-50よりは大きく、R-100と同程度になっている。

水セメント比W/C=65%と45%でひび割れ幅を比較すると、普通コンクリートでは乾燥収縮はほぼ同じであったが、上述のようにひび割れ発生が

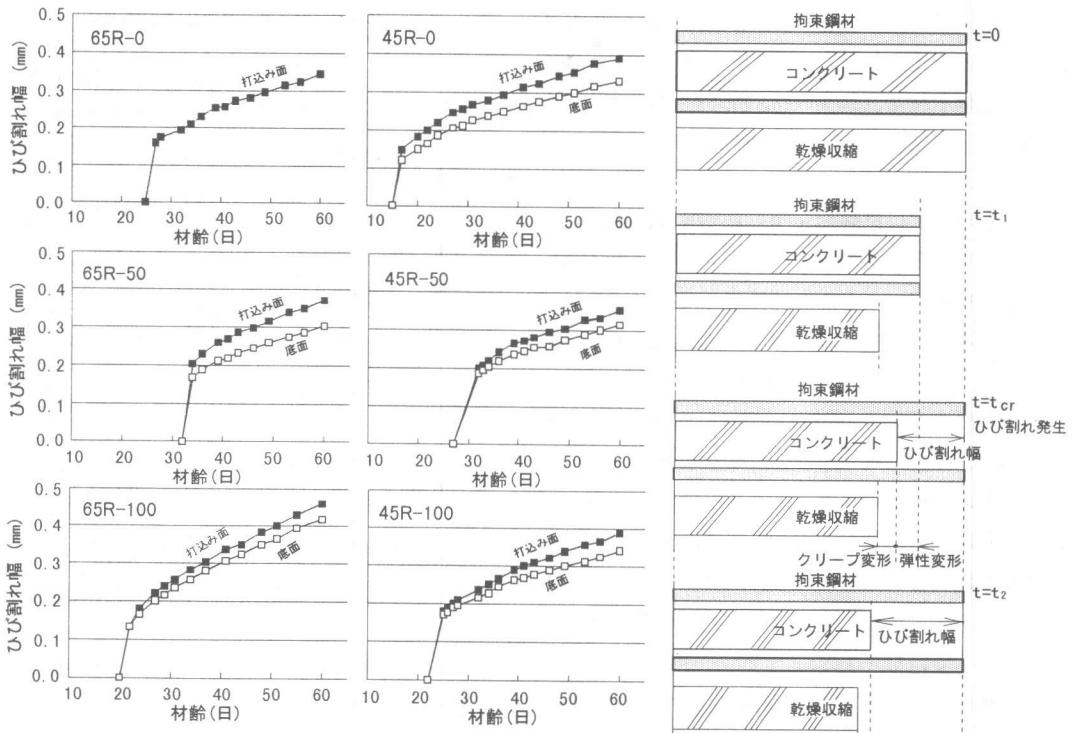


図-6 ひび割れ幅の経時変化

図-7 拘束ひび割れ試験体の
ひび割れ幅

W/C=45%の方が早かったために、長期ひび割れ幅は大きくなった。再生粗骨材コンクリートでは同程度、再生細粗骨材コンクリートでは W/C=45%の方が乾燥収縮が小さい分、ひび割れ幅も小さくなつた。

4.まとめ

以上の本実験結果をまとめると次のようになる。

1) 粗骨材のみに再生骨材を用いたコンクリートのひび割れ発生時期や最終（材齢 60 日）ひび割れ幅等のひび割れ性能は普通コンクリートと同程度であった。細・粗骨材とも再生骨材を用いたコンクリートのひび割れ性能は劣っている。

2) 単位水量が同じであれば、水セメント比はひび割れ抵抗性に及ぼす影響は小さい。

3) 水セメント比が小さいと強度は大きくなるが、ヤング係数も大きく、クリープは小さくなり、収縮応力が大きくなるのでひび割れ発生が早くなる場合もある。

謝辞

本研究の実施に際して、協力を得た本学建築工学専攻大学院生 柳 浩峻君、同研究生 劉 勇君に謝意を表します。

参考文献

- 「鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針(案)・同解説(付録、付.7 再生骨材コンクリート)」、日本建築学会、1998. 12
- 南波篤志、阿部道彦他：「再生コンクリートの品質改善に関する研究」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 2, pp. 65~70, 1995
- 今本啓一、本田義博：「再生コンクリートのクリープ・乾燥収縮特性に関する研究」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19, No. 1, pp. 1087~1092, 1997
- 加賀秀治、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13)」、日本建築学会大会梗概集(関東)、1997年9月
- コンクリート工学特集；「標準化を待つ試験方法」、コンクリート工学、Vol. 23, No. 3, pp. 50~51, 1985. 3
- 鈴木計夫、大野義照、中川隆夫、太田寛；「コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験」、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp. 25~28. 1981
- 鈴木計夫、大野義照、中川隆夫；「乾燥収縮ひびわれに及ぼす単位水量および乾燥開始材齢の影響」、日本建築学会大会梗概集、昭和 53 年 9 月 (北海道)