

# 論文 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

今本 啓一\*1 本田 義博\*2

**要旨:** 再生コンクリートの各種調合要因が乾燥収縮量、圧縮クリープに及ぼす影響を調べる実験、並びに JIS 原案による乾燥収縮ひび割れ試験を実施し、再生コンクリートのひび割れ抵抗性を評価した。実験の結果、再生コンクリートは普通コンクリートに比べ乾燥収縮は大きくなるが、ヤング係数が小さく、クリープが大きくなるため、ひび割れ抵抗性は普通コンクリートと比較して必ずしも低くないことを確認した。

**キーワード:** 再生粗骨材, クリープ, 乾燥収縮, ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリートにひび割れを生じさせる材料力学的な応力は、コンクリートの収縮量、ヤング係数及びクリープ性状、並びに対象部材の相互の変位差(拘束条件)によって決まる。再生骨材を使用したコンクリート(以下、再生コンクリート)の性質として、乾燥収縮量が普通骨材を使用したコンクリート(以下、普通コンクリート)に比べて大きくなることが報告されている [1]。また、ヤング係数に関しては普通コンクリートに比べて一般に小さいことが報告されている [1] [2]。しかし、クリープ特性に関する報告は非常に少ない。再生コンクリートのひび割れ抵抗性を評価する上で、材料特性としてクリープ性状を明らかにしておく必要がある。本研究はこの観点に基づき、以下の実験及び解析の結果について報告するものである。

①再生コンクリートの調合要因が、クリープ・乾燥収縮に及ぼす影響の検討(測定期間 1 年)

②上記①の実験結果をふまえ、その中の代表的な調合による乾燥収縮ひび割れ試験

なお、再生粗骨材は製造技術の向上に伴い、吸水率 3%程度以下の良好な品質のものが製造可能となっており、乾燥収縮の改善効果が報告されている [1] が、このような再生粗骨材の収率は低く、逆に現段階では再利用が困難な細骨材等が増加している [3]。そこで本研究では、製造段階で一時処理のみを行った再生粗骨材を対象として実験を行った。

## 2. 実験材料

使用材料(粗骨材以外)を表 1、原コンクリートの使用材料、調合及び性質を表 2、3 に示す。

表 1 使用材料(粗骨材以外)

材料	諸性質
セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.16
細骨材	山砂比重 2.59 吸水率 2.00%
水	水道水
AE 減水剤	リガニソルホ酸ポリアル複合体
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
空気量調整剤	アルキルアルシホ化合物系
混和材	フライアッシュ 比重 2.2
不純物	1cm 各木片 比重 0.42

表 2 原コンクリートの使用材料

材料	種類または産地	比重
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
	早強ポルトランドセメント	3.14
水	地下水	
陸砂	茨城県鹿島郡神栖産	2.61
砕砂	栃木県安蘇郡葛生産	2.67
碎石	栃木県安蘇郡葛生産 2005	2.77
陸砂利	茨城県鬼怒川右岸産 25mm	2.61
混和剤	AE 減水剤、高性能 AE 減水剤	

\*1 東急建設(株) 技術研究所 建築材料研究室 研究員 工修(正会員)

\*2 同上 室長 工修

表3 原コンクリートの調合及び性質

	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	試験材齢 (日)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤				
再生 A	34.0	38.4	160	471	677	1144	6.12	9.5	2.1	63.4	24
再生 B	74.5	49.8	176	237	925	950	3.89	18.5	5.0	21.8	39

但し、再生 A：早強ポルトランドセメント+高性能 AE 減水剤+細骨材(陸砂 402+砕砂 275)+粗骨材(碎石のみ)  
 再生 B：普通ポルトランドセメント+AE 減水剤+細骨材(陸砂 551+砕砂 374)+粗骨材(碎石 489+陸砂利 461)

表3に示す品質のコンクリートを、バクラーで前処理(30cm以下に破碎)した後、破碎機に投入し、表4に示す品質の再生粗骨材をそれぞれ得た。

表4 粗骨材の品質(普通骨材：石灰岩碎石)

	2005 製造収率 (%)	絶乾比重 (kg/l)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
普通骨材		2.70	0.7	1.67	61.7
再生 A	39	2.45	6.0	1.43	58.3
再生 B	46	2.37	6.4	1.42	60.0
規格値*1	—	2.5 以上	3.0 以下	—	55 以上
	すり減り減量 (%)	安定性損失量 (%)	40t 破碎値 (%)	酸化カルシウム量 (%) <sup>*2</sup>	不要残分量 (%) <sup>*3</sup>
普通骨材	22.2	0.7	20.6	—	—
再生 A	25.0	40.7	24.8	16.7	63.8
再生 B	31.0	43.2	26.2	11.8	73.2
規格値*1	40 以下	12 以下	45 以下	—	—

\*1 JIS A 5005, 但し 40t 破碎値は BS.812 による。

\*2 酸化カルシウム量：骨材を 105℃で乾燥させて粉砕し、それぞれ 0.105mm ふるいを通過する細かさに調整したものを試料とし、塩酸溶液を加えてセメントを質を分解濾過し、濾液中の酸化カルシウム量を EDTA を用いた、キレート滴定法より求めた。骨材に付着したセメント量の多少を示すパラメーターと考える。

\*3 不要残分量：上記試験の残分を、電気炉で 1000℃で 30 分間強熱・冷却し、質量を測定して求めた。

### 3. 実験方法

#### 3.1 再生コンクリートの調合要因が、クリープ・乾燥収縮に及ぼす影響の検討

コンクリートの調合要因が、クリープ・乾燥収縮等の物性に及ぼす影響は大きく且つ多様である。そこで本研究では、実験計画法 L27 に基づく分散分析の手法を適用し、その影響を統計的に検討することとした。この中で、再生コンクリートの乾燥収縮及びクリープを低減することを意図し、高性能 AE 減水剤及び混和材(フライアッシュ)の効果も検討した。コンクリートの調合要因と水準及び線点図を表5及び図1に示す。表5の組み合わせにおける、高性能 AE 減水剤の使用分類を表6に示す。また試験の概要を表7に示す。

表5 コンクリートの調合要因と水準

記号	要因	水準 1	水準 2	水準 3
①	単位水量 W	165(kg/m <sup>3</sup> )	175(kg/m <sup>3</sup> )	185(kg/m <sup>3</sup> )
②	混和材置換率 Ad	0%	10%	20%
③	粗骨材種類	普通骨材	再生 A	再生 B
④	水結合材比 W/B	45%	55%	65%
⑤	不純物混入率	0%	2%	4%*

\*:文献4)に示される許容値上限(粗骨材に対する体積混入率(%))

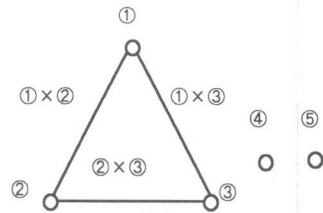


図1 線点図

表6 高性能 AE 減水剤の使用分類

W/B	W	165	175	185	
45	SP	(172)	SP	N	
55	SP	(169)	SP	(179)	N
65	SP		N	N	

SP:高性能 AE 減水剤      N:AE 減水剤

( )の数值は日本建築学会「コンクリートの調合設計指針・同解説」に示される高性能 AE 減水剤を用いた場合の単位水量の参考値

表 7 試験概要

混練方法	50(l)パン型強制練りミキサ: 空練(セメント+混和材+細骨材)30秒→水+混和剤90秒→粗骨材90秒
目標性状	目標スランプは 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5%、練り上がり温度 20°C
供試体及び養生	φ 10×20cm、材齢 28 日標準養生後 20±2.0°C、60±5.0%R.H の恒温・恒湿室にて試験
試験方法	コンタクトゲージによる測定。クリープ・載荷圧縮応力は材齢 28 日標準養生強度の約 30%
その他	測定期間 1 年、測定値はいずれも供試体 2 個の平均値

3.2 乾燥収縮ひび割れ試験

乾燥収縮ひび割れ試験は、JIS 原案に準じた(鋼材断面積比 8%)。材料は表 1,4 に示したのを用い、再生粗骨材として表 4 中に示す再生 A、混和剤として表 1 に示す AE 減水剤及び空気量調整剤を使用した。試験の概要を表 8 に、コンクリートの調合及び性質を表 9 に示す。

表 8 試験概要

混練方法及び目標性状	表 7 と同様
養生及び試験開始材齢	20±2.0°C、60±5.0%R.H の恒温恒湿室で材齢 7 日間湿布養生後、乾燥及び載荷開始
乾燥収縮供試体	端面をアルミ箔テープでシールした 10×10×40cm 試験体：埋込みゲージによる測定 クリープの乾燥収縮補正用には端面をシールした φ 10×20cm 供試体を用いた。
クリープ供試体	φ 10×20cm；載荷圧縮応力は材齢 7 日強度の約 30%；埋込みゲージによる測定
その他	測定値はいずれも供試体 2 個の平均値

表 9 コンクリートの調合及び性質

	計画調合			フレッシュ時		材齢 7 日		28 日標準養生		破断時	
	単位水量 (kg/m³)	W/C (%)	S/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	ヤング係数 10³N/mm²	圧縮強度 N/mm²	ヤング係数 10³N/mm²	ヤング係数 10³N/mm²	割裂強度 N/mm²	
普通コンクリート	175	55.0	48.0	20.5	6.0	26.8	27.2	29.0	28.1	2.34	
再生コンクリート	175	55.0	48.0	20.0	5.8	23.3	25.8	25.3	22.4	2.38	

4. 実験の結果と考察(測定 1 年後)

4.1 再生コンクリートの調合要因が、乾燥収縮・クリープに及ぼす影響の検討

乾燥収縮・クリープに及ぼす各調合要因の、残差の寄せ集めを行った分散分析結果を表 10 に示す。

表 10 分散分析結果

要因	乾燥収縮		質量変化率		クリープ	
	F	寄与率(%)	F	寄与率(%)	F	寄与率(%)
単位水量:W	4.5*	9.8	8.0**	7.2		
混和材:Ad					4.9*	7.0
粗骨材:G	27.3**	59.4	31.4**	28.5	15.3**	21.8
水結合材比			54.1**	49.2	25.0**	35.7
不純物	4.1*	9.0			4.3*	6.2
W×Ad					7.1**	10.2
W×G			7.7**	6.9		
Ad×G					6.5*	9.2

\*有意水準 5% で有意差有り。 \*\*有意水準 1% で有意差有り。

(1) 乾燥収縮に及ぼす調合要因の影響

乾燥収縮に関する因子の中で、表 10 に示すように粗骨材の種類のみが有意水準 1% で有意と判定され、乾燥収縮に及ぼす影響が最も高い結果となった(寄与率は全体の約 60% 程度を占めている)。図 2 に示すように再生粗骨材の使用により、乾燥収縮歪みは約 300×10<sup>-6</sup> 程度増加している。これは比較用の普通骨材の性質にも左右されるが、既往の研究と概ね近い結果となっている [1]。

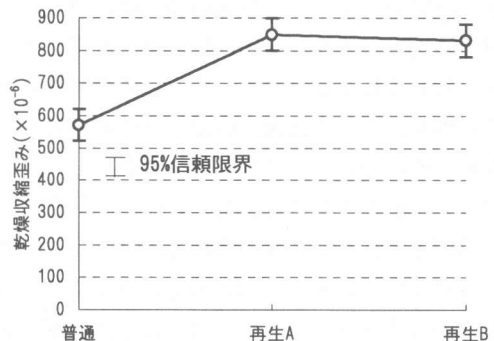


図2 粗骨材と乾燥収縮の関係

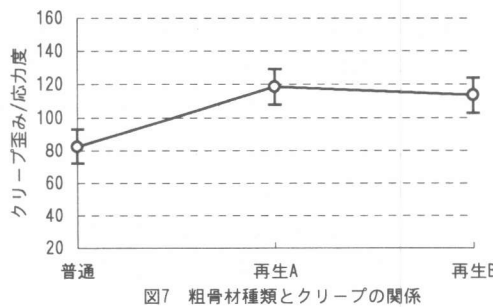
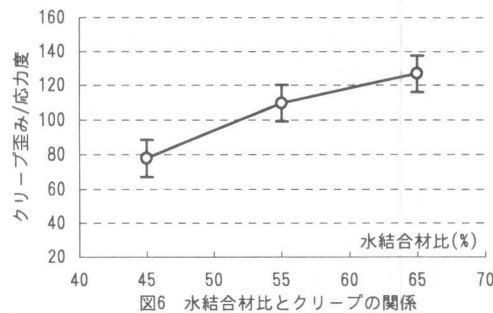
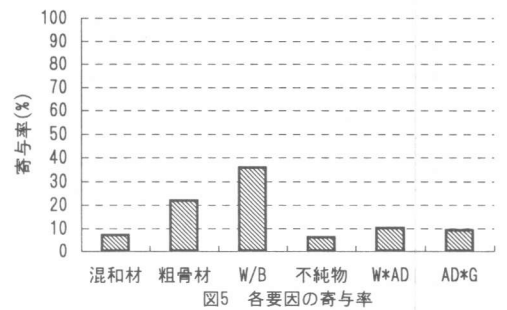
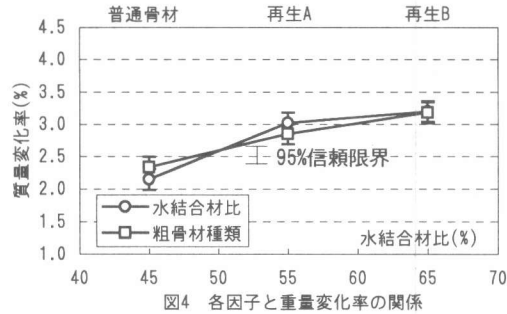
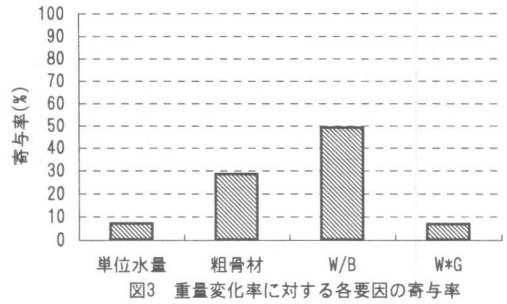
(2)質量変化率に及ぼす調合要因の影響

本実験で対象とした因子の中で、表 10 に示すように、単位水量、粗骨材種類、水結合材比(以下、W/B)及び単位水量と混和材の交互作用が有意水準 1%で有意と判定された。寄与率で見ると図 3 に示すように水結合材比が約 50%で最も高く、次いで粗骨材種類の約 30%となっており、粗骨材種類が質量変化率の最大要因となっていない点を前述の乾燥収縮分析結果と併せて考慮すると、再生コンクリートの乾燥収縮は、粗骨材に付着しているモルタル(ペースト)分の吸水率特性よりも、その力学特性(変形性)に依存していることが考えられ、既往の報告における見解 [3] を裏付ける結果となっている。各因子と質量変化率の関係を図 4 に示す。水結合材比が 45~65%に増加するに伴い、質量変化率は約 1%程度増加し、再生粗骨材の使用により約 0.5~0.8%程度増加する。

(3)クリープ(単位応力度あたりのクリープ歪:  
 $\times 10^{-6}/N/mm^2$ )に及ぼす調合要因の影響

本実験で対象とした因子の中で、表 10 に示すように、混和材及び不純物が有意水準 5%で有意差有り、粗骨材、W/B 及び単位水量と混和材の交互作用がそれぞれ有意水準 1%で有意差有りとして判定された。寄与率で見ると、図 5 に示すように水結合材比が最も高く約 35%、次いで粗骨材の約 20%となっている。圧縮強度に直接的な影響を及ぼす水結合材比がクリープ特性に最も大きな影響を及ぼす点で普通コンクリートと共通の性質を有するが、乾燥収縮同様、再生粗骨材の使用も、クリープ特性に大きく影響している。但しこれが乾燥クリープとしての特性によるものか、もしくは再生骨材の力学的性質に依存するものなのかについては、基礎クリープの検討を含めて考慮する必要があると考える。

各因子とクリープの関係を図 6~9 に示す。水結合材比が 45~65%に増加することにより、単位応力度あたりのクリープ歪みはほぼ線形に約  $48 \times 10^{-6}$  増加し(図 6)、再生骨材の使用により約



24~30×10<sup>-6</sup> 増加した(図 7)。再生粗骨材の種類による差は小さい。混和材(フライアッシュ)の置換によってもクリープは小さくなる傾向にあり、フライアッシュの置換により約 20×10<sup>-6</sup> 低下した(図 8)。不純物が混入した場合、クリープは若干大きくなるようであるが、混入率との関係は明確ではなかった(図 9)。再生コンクリートのクリープの低減を目的とするならば、高性能 AE 減水剤の使用による低水結合材比、もしくは混和材の使用は比較的效果があると考えられる。

以上より、再生粗骨材(本研究では吸水率約 6%)を使用したコンクリートの乾燥収縮は大きくなり、クリープ(単位応力度あたりのクリープ歪み)についても同様に大きくなる傾向にある。またこの種のコンクリートのヤング係数は普通コンクリートよりも小さいことが報告されている(本コンクリートを対象とした既報 [2] では、再生粗骨材の使用により、約 18%程度ヤング係数は低下する)。したがってこの種のコンクリートを梁及びスラブなどに用いた場合、撓み等に対する懸念が残るものの、ひび割れに対する抵抗性は、普通コンクリートと比較して必ずしも劣らないことが考えられる。

#### 4.2 乾燥収縮ひび割れ試験

乾燥収縮、クリープ歪みの変化を図 10,11 に示す。クリープ歪みについては、測定途中で試験機に不整が生じたため、測定できた期間のデータを基に ACI209Code [5] を参考にそれまでの実験値に一致するよう近似して検討することとした。ヤング係数は表中の材齢 7 日、破断時のヤング係数を基に下式で求めた。

普通コンクリート:  $E_c = 26.76 + 0.52 \log M (10^3 \text{N/mm}^2)$

再生コンクリート:  $E_c = 22.36 + 0.37 \log M (10^3 \text{N/mm}^2)$

$E_c$ : ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>) M: 積算温度(°C・日)

乾燥収縮は前述の実験結果と同様、再生コンクリートが普通コンクリートより大きくなっており(材齢 10 日で約 25%)、ヤング係数についても既往の研究と同様小さくなっている(材齢 28 日標準養生で約 18%)。クリープ歪みは、乾燥開始後 10 日で、再生コンクリート 318×10<sup>-6</sup>、普通コンクリート 221×10<sup>-6</sup> となり、再生コンクリートが約 44%大きい。

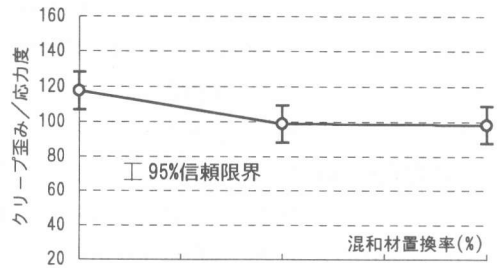


図8 混和材置換率とクリープの関係

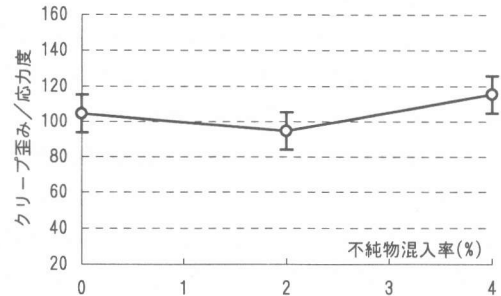


図9 不純物混入率とクリープの関係

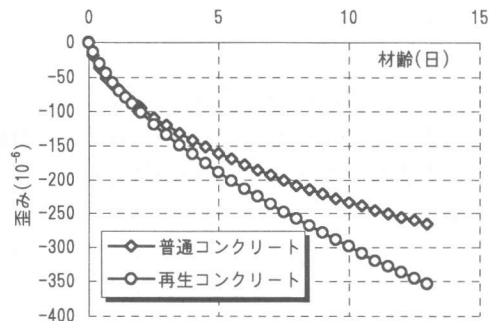


図10 コンクリートの自由収縮歪み

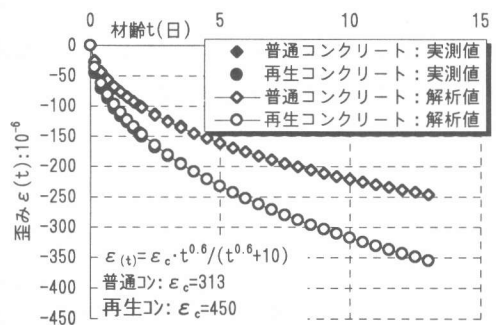
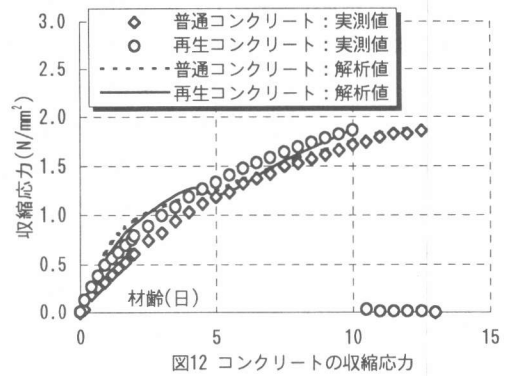


図11 コンクリートのクリープ歪み

再生コンクリートに生じる乾燥収縮応力は、図 12 示すように、乾燥開始後 10 日の時点で、普通コンクリートに生じる収縮応力より約 10% 大きい。一方、乾燥後 10 日のヤング係数とクリープ係数(载荷時弾性歪みに対するクリープ歪みの比)から求めた有効ヤング係数を用いて、それぞれ断面剛性比に基づく拘束度を計算で求めると、再生コンクリートで約 0.62、普通コンクリートで約 0.55 となり、再生コンクリートの拘束度が約 13% 高い。これは前述した同材齢で生



じている収縮応力の増加率(約 10%)にほぼ等しい。すなわち、発生する収縮応力が再生コンクリートの場合に高くなるのは、再生コンクリートのヤング係数が普通コンクリートよりも小さく、相対的な拘束度(コンクリートと拘束鋼材の断面剛性比\*)が再生コンクリートの場合に高くなるためである。したがって、同じヤング係数のコンクリートが打設される実構造物で、部材の拘束度が(例えば梁によって拘束を受ける壁の場合)梁と壁の断面剛性比によって決定されるならば、そこに発生する収縮応力は、普通コンクリートと大差ないことが推察される。

再生コンクリートは乾燥開始後約 10 日、普通コンクリートは約 13 日で破断したが、両者の破断時の収縮応力と破断時の  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  供試体の割裂強度の比はほぼ等しく、約 0.75 であった。同図には Step-by-step 法 [6] による応力解析結果も示してある。但し、鋼材とコンクリートの歪みが一致すると仮定し、圧縮クリープ係数によって解析を行っている。実測値と解析値は普通コンクリートだけでなく、再生コンクリートの場合においてもほぼ一致している。

\*断面剛性比:  $E_s \cdot A_s / (E_{ec} \cdot A_c + E_s \cdot A_s)$   $E_s$ : 鋼材のヤング係数、 $A_s$ : 鋼材断面積  
 $E_{ec}$ : コンクリートの有効ヤング係数、 $A_c$ : コンクリートの断面積

## 5. まとめ

吸水率 6% の再生粗骨材を用いた、再生コンクリートに関する各種実験の結果を以下にまとめる。

- ① 再生骨材の使用により、乾燥収縮、質量変化率以外にクリープも大きくなり、水結合材比等の要因と比較してもその影響は大きい。
- ② 再生コンクリートのクリープを低減することを目的とするならば、高性能 AE 減水剤を使用して水結合材比を低下させること、混和材(フライアッシュ)を使用することは有効である。
- ③ 同一単位水量・水結合材比の場合において、再生コンクリートの乾燥収縮量は、普通コンクリートに比べて大きい。拘束度が同等であるならば、生じる乾燥収縮応力は大差ないと考えられる。これは再生コンクリートのクリープが大きく、ヤング係数が小さいためである。
- ④ コンクリートの破断時の収縮応力と割裂強度の比は、普通コンクリートと再生コンクリートでは大差なく、約 0.75 であった。

## 参考文献

- [1] 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 No.2, pp65-70.1995
- [2] 今本啓一、本田義博：再生コンクリートの力学的性質に及ぼす調合要因の影響 日本建築学会学術講演梗概集 pp417-418.1996.9
- [3] 高橋泰一、阿部道彦：再生骨材のコンクリートへの適用の現状と将来 コンクリート工学 vol.33 pp21-28.1995.2
- [4] 建設省総合技術開発プロジェクト、「建設事業への廃棄物利用技術の開発報告書」、昭和 61 年 3 月
- [5] ACI COMMITTEE 209 prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structure.
- [6] 山本 浩嗣：PRC 部材の長期変形・ひび割れ幅に関する基礎的研究、宇都宮大学修士論文