論文　再生骨材を用いたコンクリートの構造性能に関する実験的研究

川口　昌也*1・小山　明男*2・菊池　雅史*3・林　静雄*4

要旨：モルタル分を除去していない再生骨材を用いた再生コンクリートについて，同圧縮強度時の引張強度，ヤング係数，圧縮軟化特性に原コンクリートが及ぼす影響について検討を行った。この結果，圧縮強度は同程度であっても，原コンクリート強度の低下に伴い再生コンクリートの各種構造性能は低下することを確認するとともに，骨材置換率による再生コンクリートの品質管理の有効性を示唆した。また，柱部材実験を行い上記の構造性能の差異が部材の構造性能に及ぼす影響を検討し，普通コンクリートに比し再生コンクリートを用いた場合では，最大耐力後において繰り返しによる耐力低下の大きいことを確認した。

キーワード：再生骨材，置換率，強度特性，ヤング係数，圧縮軟化，靭性能

1.　はじめに

コンクリート塊は建設廃棄物の中で最も発生量が多く，増大する建築解体廃棄物に対応するには，建築構造部材など，路盤材以外への利用用途の拡大が望まれる。筆者らは資源の有効利用および環境保全の観点から，モルタル分を除去していない再生骨材および再生コンクリートの構造部材適用に向けた実験研究を継続している[1) 2)]。本研究ではシリーズ１として，同程度の圧縮強度とした普通および再生コンクリートにおける圧縮軟化特性，引張強度，ヤング係数に再生骨材の品質が及ぼす影響を明らかにする。また，シリーズ２として，曲げ破壊型柱部材の正負交番繰返し載荷実験を行い，シリーズ１で明らかにした普通および再生コンクリートの構造性能の差異が柱部材の靭性能に及ぼす影響について検討する。

2.　シリーズ１実験概要

2.1　使用材料

セメントには，普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を用いた。使用した骨材種類および主要物性を**表－1** に示す。混和剤として，高縮合トリアジン系高性能減水剤，リグニンスルホン酸系ＡＥ減水剤，水溶性セルロースエーテル系分離低減剤を使用した。

2.2　本検討に用いた再生骨材

表－1 中に示した再生骨材について，水セメント比を 30，40，50，60%の４水準に設定した原コンクリートを材齢４週時に，オープンセットを 5㎜ に調整したジョークラッシャーで破砕したのち，直ちに 5，20㎜ ふるいでふるい分け，20㎜ ふるいにとどまるものを再生粗骨材とし，通過するものを再生細骨材とした。作成された

表－1　本研究に用いた骨材種類および主要物性

区分		記号	原コンクリートの性質			骨材物性	
			原骨材	W/C (%)	4週圧縮強度 (N/mm²)	吸水率 (wt/%)	絶乾比重
再生骨材	粗骨材	R30	N および n	30	69.4	4.8	2.42
		R40		40	52.1	4.9	2.39
		R50		50	42.3	5.1	2.37
		R60		60	28.6	5.9	2.33
	細骨材	r30	N および n	30	69.4	8.0	2.38
		r40		40	52.1	8.2	2.35
		r50		50	42.3	8.5	2.34
		r60		60	28.6	9.1	2.32
			特徴				
普通骨材	粗骨材	N	硬質砂岩砕石			1.0	2.61
	細骨材	n	陸砂			2.0	2.66

*1 森トラスト株式会社　工修　(正会員)
*2 明治大学　専任講師　理工学部建築学科　工博　(正会員)
*3 明治大学　教授　理工学部建築学科　工博　(正会員)
*4 東京工業大学　教授　建築物理研究センター　工博　(正会員)

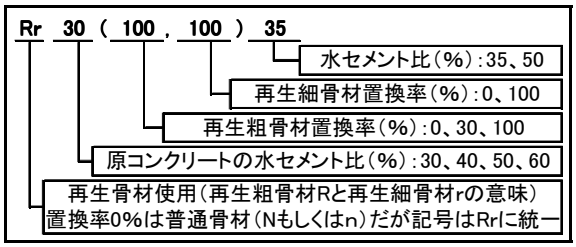
再生骨材は報告されている[1]ように，原コンクリートの水セメント比の増加に伴う比重の低下，吸水率の増加傾向が見られた。

2.3　試料コンクリート種類

表－2 に試料コンクリート種類を，**図－1** に記号説明を示す。本研究ではそれぞれ 4 種類の再生粗・細骨材を作成したが、組み合わせは同じ原コンクリートから作成した粗骨材と細骨材の組み合わせ１種類とした。

表－2　試料コンクリートの種類

区分	記　　号	使用骨材の記号		再生骨材置換率（%）		W/C (%)
		粗骨材	細材	粗骨材	細骨材	
普通	Nn30～Nn60	N	n	—	—	30,35,40,50,60
再生	Rr30(100,100)35	R30	r30	100	100	35
	Rr30(100,100)50	R30	r30	100	100	50
	Rr40(100,100)35	R40	r40	100	100	35
	Rr50(100,100)35	R50	r50	100	100	35
	Rr60(30,0)35	R60およびN	n	30	0	35
	Rr60(100,0)35	R60	n	100	0	35
	Rr60(0,100)35	N	r60	0	100	35
	Rr60(100,100)35	R60	r60	100	100	35
	Rr60(100,100)50	R60	r60	100	100	50



図－1　再生コンクリート記号説明

2.4　試験項目および試験方法

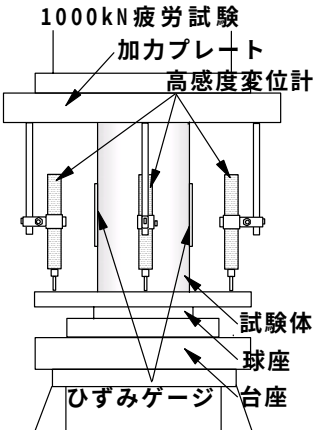
試験項目および試験方法を**表－3** に示す。試験体の養生方法は打設 24 時間後に脱型，その後全材齢水中養生とした。

表－3　試験項目および試験方法

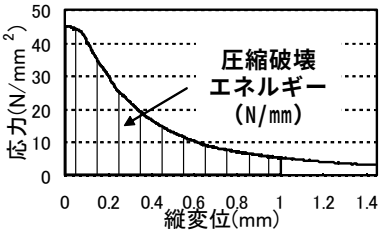
試験項目	試験方法
単位容積質量	—
圧縮強度	JIS A 1108
ヤング係数	コンプレッソメータ
割裂引張強度	JIS A 1113
圧縮軟化特性	2.5に記述

2.5　圧縮軟化特性の評価方法

圧縮試験体は，100Φ×200mm の円柱試験体とし，圧縮強度が 26～30N/mm² および 41～45N/mm² 時に試験を行うよう，水セメント比および材齢（5～28 日）によって管理した。載荷は 1000ｋN の疲労試験機を用い，フィードバック信号により変位制御で行った。**図－2** に測定方法を示す。圧縮軟化特性の評価方法については，実験より測定された圧縮応力度－最大耐力後の塑性変形関係について，1mm まで変形した時点までの曲線で囲まれる面積（**図－3** の網掛け部分），すなわちピーク後の下り勾配を圧縮破壊エネルギーとして評価した。なお，圧縮破壊エネルギーは各試料コンクリートとも試験体 6 体の平均値で評価した。



図－2　軟化測定方法

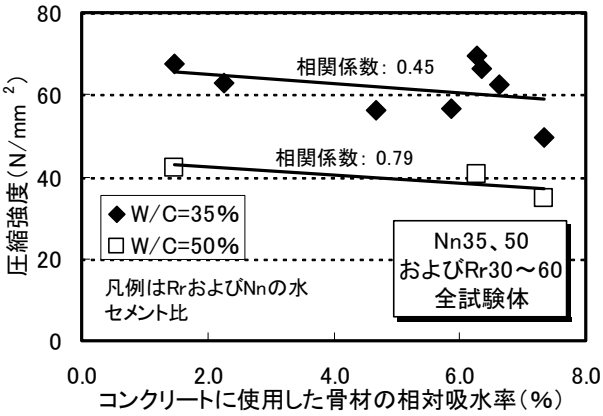


図－3　圧縮軟化特性評価方法

3.　シリーズ 1 実験結果

3.1　再生コンクリートの 4 週圧縮強度と原コンクリートの品質の関係

硬化した再生コンクリートの性質は再生骨材の品質すなわち原コンクリートの影響を受けるが，相対吸水率等を性能判定の指標とすることにより再生骨材および再生コンクリート



図－4　再生コンクリートに用いた骨材の相対吸水率と圧縮強度の関係

の品質評価は可能である[1) 2)]。ここで相対吸水率は使用する骨材それぞれの吸水率とその絶対容積の積の和を，使用した全骨材の絶対容積の和で除して求める。本研究においても**図－4**に示すように上記の傾向が確認された。しかしながら，こうした指標によって同程度の圧縮強度の再生コンクリートを作成した場合においても，その他の強度特性に再生骨材が及ぼす影響を評価することは困難である。そこで以下に検討を行う。

3.2　ヤング係数に及ぼす骨材の影響

図－5 に圧縮強度の実験値から New RC 式を用いて算出したヤング係数とヤング係数の実験値の関係を示す。これによると，再生コンクリートでは，普通コンクリートに比し，同程度の圧縮強度であってもヤング係数の実験値が小さいことが確認できる。

3.3　引張強度に及ぼす骨材の影響

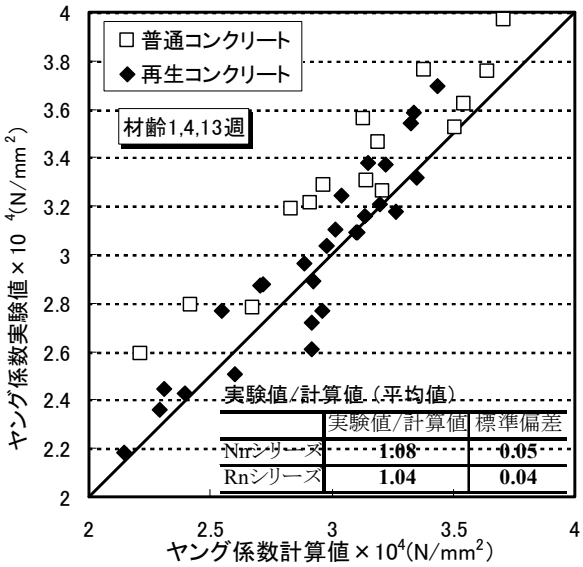
図－6 に圧縮強度の実験値から ACI による関係式を用いて算出した引張強度の計算値と実験値の関係を示す。これによると，再生コンクリートでは普通コンクリートに比し，同程度の圧縮強度であっても引張強度の実験値が小さいことが確認できる。しかしながら，原コンクリートの W/C=30%の場合，骨材置換率を低くした場合では普通コンクリートと同等の性能を期待できるといえる。

3.4　応力－ひずみ関係に及ぼす骨材の影響

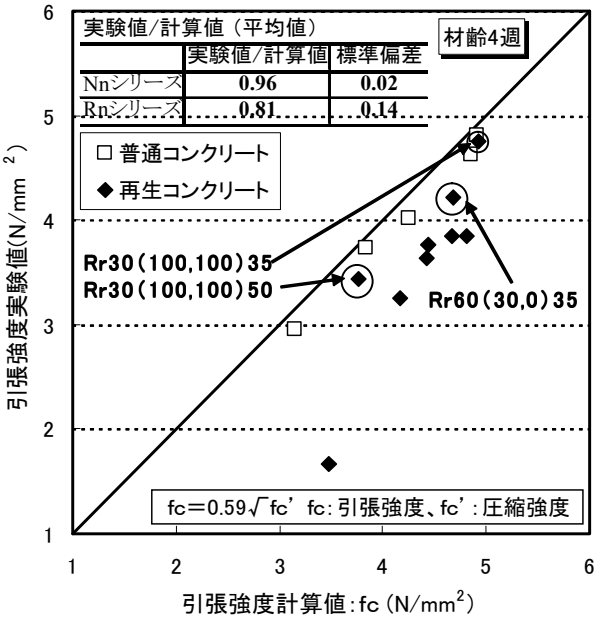
図－7 に応力－ひずみ関係の測定結果の一例を，**図－8** に圧縮強度と最大応力時のひずみの関係に軽量コンクリートの測定値を併せて示す。これによると再生コンクリートでは，最大応力時のひずみが大きく，軽量コンクリートに近い性状を示すことが確認できるとともに，軟化域での耐力低下が普通コンクリートのそれに比べ，著しいことが確認できる。

3.5　圧縮軟化特性に及ぼす骨材の影響

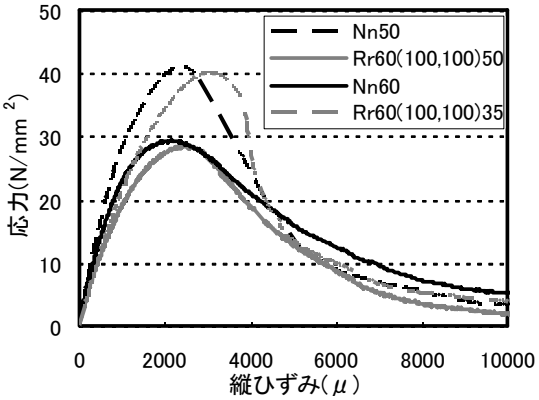
図－9 に同程度の圧縮強度時（一例として 41～45N/mm²）に測定した圧縮破壊エネルギーに骨材種類，骨材置換率が及ぼす影響を示す。



図－5　ヤング係数の計算値と実験値の関係



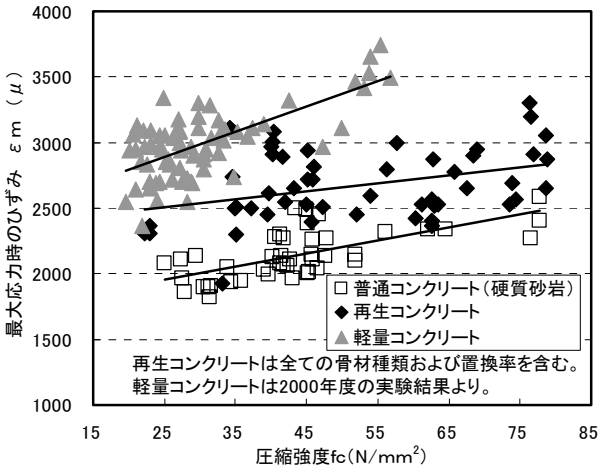
図－6　引張強度の計算値と実験値の関係



図－7　応力－ひずみ関係の一例

これによると全体として骨材置換率の増加に伴い，圧縮破壊エネルギーは低下するが，原コンクリート W/C=30%の場合では改善されるといえる。

以上のように同程度の圧縮強度であっても再生コンクリートでは，再生骨材の品質の低下および再生骨材置換率の増加に伴い各種構造性能（ヤング係数，引張強度，圧縮軟化特性）は低下することを確認した。



図－8　圧縮強度と最大応力時のひずみの関係

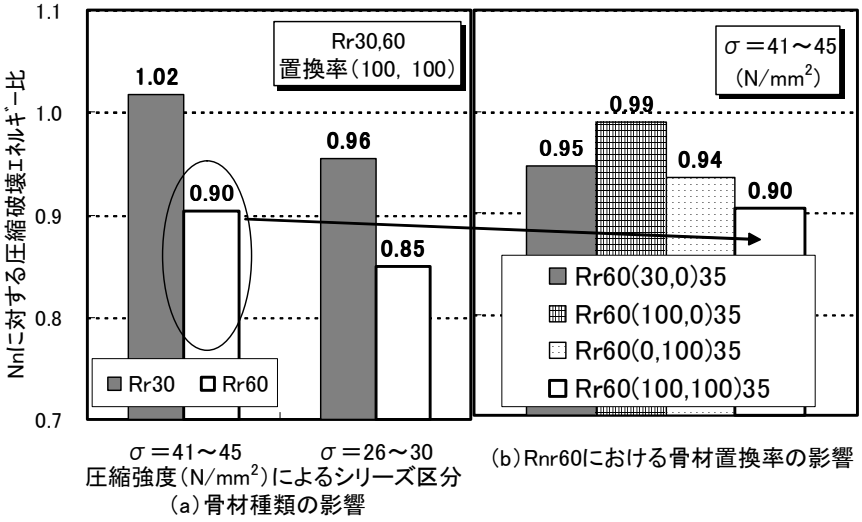
4.　シリーズ 2 実験概要

4.1　試験体

試験体形状および部材断面を**図－10** に，試験体諸元を**表－4** に示す。

4.2　使用材料

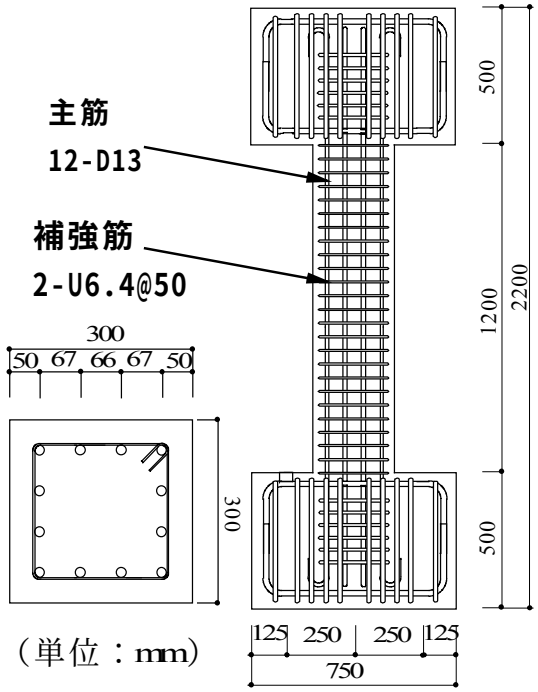
セメント，混和剤はシリーズ 1 と同様，骨材は普通コンクリートにＮおよびｎ，再生コンクリートでは市販の再生骨材を用い，粗・細骨材ともに 100%の置換率で使用した。**表－6** に示す部材で用いた再生骨材の性質から，シリーズ 1 の R60 およびｒ60 と同等以下の低品質な再生骨材であることがわかる。試験体名称および部材に用いた材料の特性を**表－5** に，応力－ひずみ特性測定結果の一例を**図－11** に示す。



図－9　圧縮破壊エネルギーに及ぼす骨材の影響

4.3　加力方法

図－12 に加力装置図を示す。載荷は建研式加力により行い，R=1/400 を 1 回，1/200，1/100，1/67，1/50，1/33，1/25 を各々2 回正負方向に繰り返し，軸力保持が不可能になった時点で載荷を終了した。



図－10　試験体形状および部材断面図

5．シリーズ 2 実験結果

最大耐力に関して計算値（e 関数法による断面曲げ解析による耐力計算値）／実験値は CNn で 1.16，CRr で 1.01 となり，再生コンクリー

表－4　試験体諸元

試験体名称	D [mm]	B [mm]	M/QD	主筋	せん断補強筋	Pwwσy [N/mm²]	σ_0/σ_B	calQsu1 [kN]	calQsu2 [kN]	calQbu [kN]
CNn	300	300	2.0	12-D13	U6.4@50	5.75	0.2	322	334	231
CRr								303	310	218

D：柱成　B：柱幅　M/QD：せん断スパン比　Pw：せん断補強筋比
wσy：補強筋降伏強度 σ0/σB：軸力比
CalQsu1：修正荒川式により求めたせん断終局強度
CalQsu2：靭性保証型設計指針より求めたせん断終局強度
CalQbu：ｅ関数法による曲げ解析により求めた最大曲げ耐力時のせん断力

表－6　再生骨材の主要物性

試験項目	再生粗骨材	再生細骨材
表乾密度(g/cm³)	2.54	2.45
絶乾密度(g/cm³)	2.41	2.15
24時間吸水率(wt/%)	5.26	14.10
洗い損失量(%)	0.95	5.15
400kN破砕値(%)	19.9	-

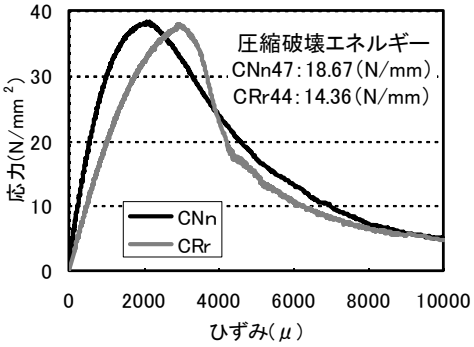
表－5　試験体名称および使用材料特性

(a) 試験体名称およびコンクリートの特性

試験体名称	種類	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 ×10⁴ (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	圧縮破壊エネルギー (N/mm)
CNn	普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	47	46.7	3.19	4.20	18.67
CRr	再生ｺﾝｸﾘｰﾄ	44	40.9	2.16	3.33	14.36

(b) 鉄筋

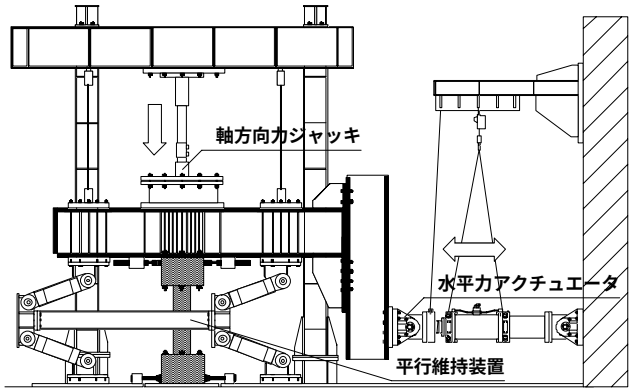
	降伏応力度 (N/mm²)	降伏歪 (μ)	最大応力度 (N/mm²)	ヤング係数 (×10⁴(N/mm²)
D13	343	1870	512	19.0
U6.4	1438	6977	1476	21.0



図－11　応力―ひずみ特性の一例

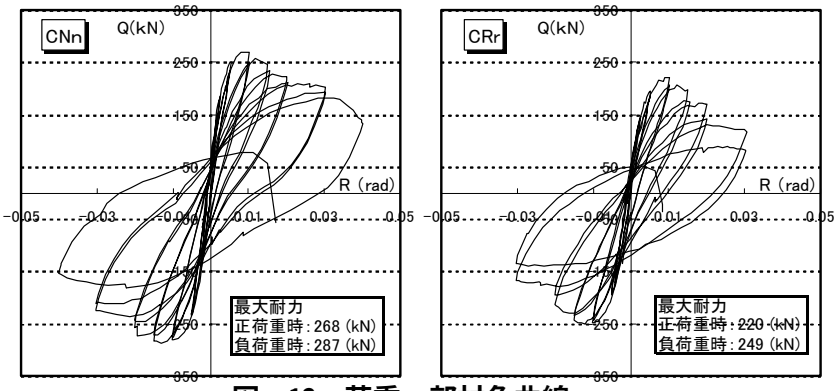
ト柱で若干小さくなるものの，ともに安全側の評価が可能であった。

図－13，15 に荷重－部材角曲線，**図－14** に正荷重時における，最大荷重に対する各サイクル最大変位時の荷重の比と部材角の関係を示す。これによると CRr では，特に最大耐力以降において繰り返しによる耐力低下が著しく，限界部材角 Ru（ただし P－δ効果を除去した上，Qmax の 80%低下時の R とした）は CNn が 0.018（rad）に対し，CRr は 0.016（rad）であった。また，**図－16** に R=±1/33 を 2 回終了時の破壊状況を示す。CRr では部材中央部においてせん断ひび割れが分散して発生する傾向が見られた。

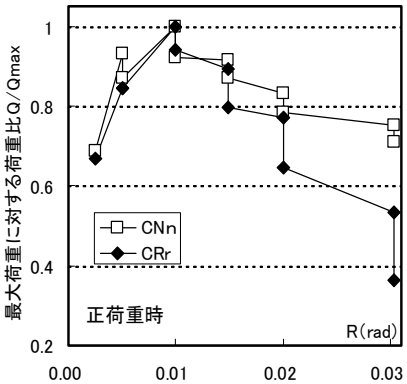


図－12　加力装置図

図－17 にせん断補強筋ひずみ分布，**図－18** に軸方向変位と部材角の関係を示す。CNn に比し CRr はヤング係数が小さいために，コア部分



図－13　荷重－部材角曲線



図－14　Q/Qmax－R 曲線

を拘束しているせん断補強筋への負担が大きいといえる。さらに圧縮破壊エネルギーが小さいことに起因し，圧縮側主筋への負担が大きいため，部材角 1/33 より軸方向の変位が増大し，急激な耐力低下を生じている。

6. まとめ

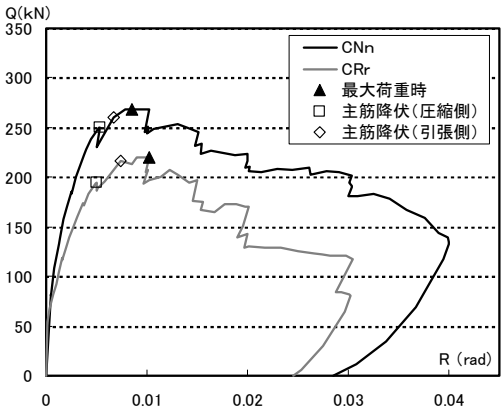
1）再生コンクリートは同程度の圧縮強度であっても，その時の圧縮軟化特性，引張強度，ヤング係数は使用した再生骨材の品質に影響を受ける。

2）普通コンクリートに比し再生コンクリートを用いた柱部材では，上記した構造性能の差異から，特に最大耐力後において繰り返しによる耐力低下の大きいことを確認した。

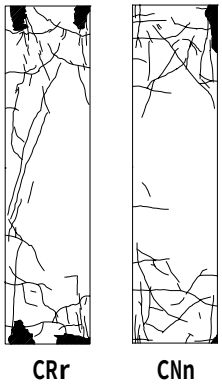
3）しかしながら，再生骨材の品質により骨材置換率に制限を設けることで上記の影響は低減可能であると推測される。

謝辞

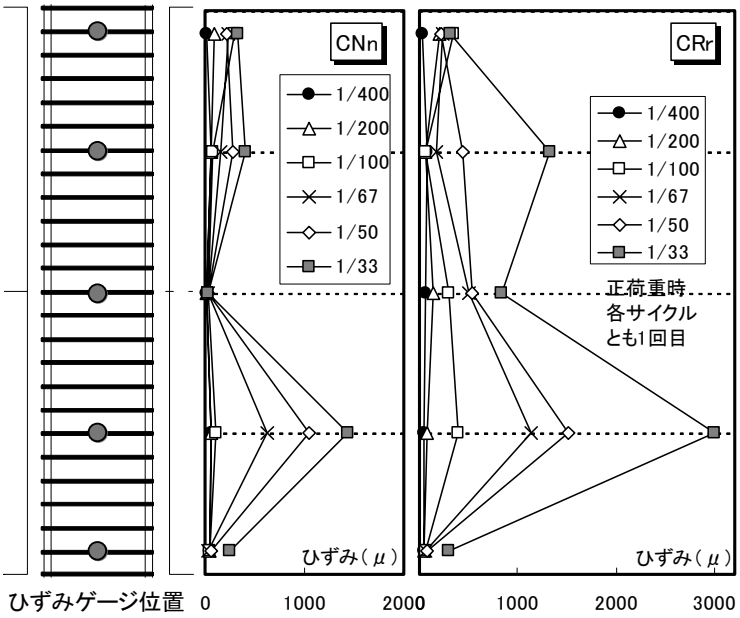
本研究は東京工業大学建築物理研究センター共同研究の一貫として行われたものです。本研究に際し多大なご協力を賜った高周波熱錬株式会社，竹石産業株式会社，株式会社エヌエムビーに深く感謝の意を表します。



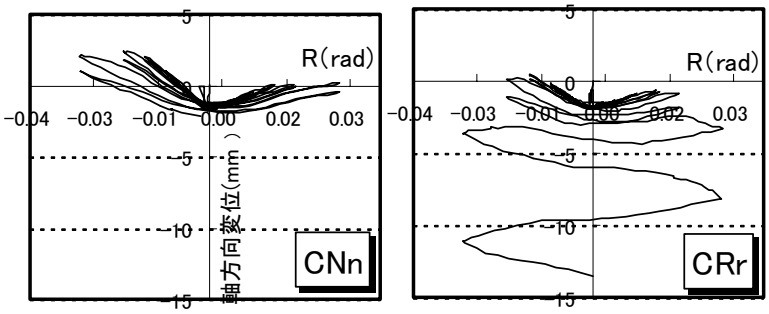
図－15　包絡線（正荷重時）



図－16　破壊状況
（R＝±1/33 終了時）



図－17　せん断補強筋ひずみ分布



図－18　軸方向変位－R 関係

参考文献

1）道正泰弘，菊池雅史，小山明男ほか：原コンクリートの性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，No.485，pp.1-10，1996.7

2）菊池雅史，道正泰弘，増田彰ほか：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，No.474，pp.11-20，1995.8

3）日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999