

論文 再生骨材コンクリートを用いた RC 部材のせん断性状に関する実験研究

若林和義^{*1}・林静雄^{*2}・篠原保二^{*3}・香取慶一^{*4}

要旨：本研究は再生骨材コンクリートを RC 構造部材に用いるための一資料を得ることを目的とし、RC 部材の曲げせん断実験を行った。骨材種類（再生・普通・人工軽量）とせん断補強筋量を変動要因とし、各々の耐力・履歴特性・破壊性状・ひび割れ性状を比較した。その結果、再生骨材コンクリートの RC 部材は普通コンクリートの RC 部材とほぼ同等の性能が得られた。

キーワード：再生骨材, 再生コンクリート, RC 部材, せん断破壊, せん断ひびわれ

1. はじめに

近年、解体コンクリート発生量の増加・廃棄物処分場の受入容量の不足・天然骨材資源の枯渇により、解体コンクリートから製造する再生骨材を積極的に利用する動きが高まっている。

特に加熱・摩砕などの高度処理を施し、原モルタルを殆ど取り除いた天然骨材並みの高品質のものは再生骨材 H として JIS も制定され、コンクリート用骨材として実用化され始めている。しかし、高品質のものは製造のコスト・エネルギーが高く、骨材抽出後の廃棄物（微粉）量が多いことが問題である。よって原モルタルをある程度含む再生骨材の構造用コンクリートへの利用が期待される。そのためには再生コンクリートを用いた RC（鉄筋コンクリート）部材の構造性能を把握することが必要である。

そこで、本研究ではコンクリートの粗骨材とせん断補強筋量を変動要因とした RC 部材のせん断実験を行い、各々の耐力・履歴特性・破壊性状・ひび割れ性状を比較した。

また、本研究では骨材製作から部材実験まで一貫して行い、骨材やコンクリートの特性についてもふれた。

2. コンクリートの概要

2. 1 使用骨材の概要

本研究で使用する再生骨材は 2005 年に実験で用いた RC 梁試験体の解体コンクリート（碎石使用）である。材齢 5~6 週で載荷した後、ハンドブレーカーで大まかに砕いた。そして骨材径が 20-10mm : 10-5mm = 7 : 3（質量比）になるよう更に細かく砕き、粒度調整を行った。

表-1 に採取した再生骨材 RG60,43,35（数字は原コンクリートの水セメント比）の 3 種類と、併せて普通骨材 NG（青梅産碎石）、人工軽量骨材 LG の骨材試験結果を示す。何れの再生骨材も原モルタルを多く含んでおり、密度が小さく吸水率は高かった。また、形状がいびつなため実積率は低い値を示した。400KN 破碎値では原コンクリート強度に関わらず RG3 種類は LG に近い値を示し、NG に比べ強度が低いことがわかる。

表-1 骨材の品質

記号	絶対密度	吸水率	単位容積	実積率	粗粒率	原コンクリート	400KN破碎値
	g/cm ³	%	質量 kg/L	%		強度 N/mm ²	%
RG60	2.19	6.43	1.28	54.72	6.7	32.5	30.88
RG43	2.24	6.31	1.28	53.69	6.7	55.8	29.60
RG35	2.24	5.05	1.34	54.59	6.7	78.2	29.11
NG	2.62	0.76	1.57	59.66	6.6	-	15.94
LG	1.29	26	0.78	47.85	6.5	-	36.59
JIS	2.5以上	3.0以下		55以上			

*1 東京工業大学 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻（現：建材試験センター）（正会員）

*2 東京工業大学 セキュアマテリアル研究センター 教授 工博（正会員）

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 助教授 工博（正会員）

*4 東洋大学 工学部建築学科 助教授 工博（正会員）

2. 2 調査

表-1の粗骨材を使ったコンクリートの基本調査を表-2に示す。水セメント比(w/c)は普通強度コンクリートの範囲で高めの強度を狙い40%とした。これはw/cが高いと粗骨材の影響が材料特性に出にくいいためである。目標スランプ 21cm・空気量 4.5%とした。粗骨材以外の材料は、普通ポルトランドセメント、大井川産陸砂、高性能 AE 減水剤、空気量調整剤を用いた。

表-2 調査計画

水セメント比	細骨材率	絶対容積(l/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
w/c	s/a				
40	42	175	138	269	372

2. 3 強度試験結果および検討

標準水中養生材齢4週で強度試験を行った。

図-1に圧縮強度(σ_B)とヤング係数(E)を示す。(図のRG60-30%は粗骨材容積の30%がRG60, 70%がNGの混合コンクリートである)原コンクリート強度が高いRG35, RG43を用いたものは普通コンクリートよりも σ_B が高くなった。しかし、Eは原コンクリート強度が高くなっても普通コンクリートほどは上がらなかった。

図-2に σ_B と割裂引張強度(σ_t)の関係を示す。何れの再生コンクリートも σ_t が σ_B の1/20程度と普通コンクリートに比べ小さい傾向が出た。引張試験体の割裂面を観察すると、再生コンクリートでは骨材自体が破断している部分が多かった。軽量コンクリートは骨材全てが破断しており、より平滑な面であった。普通コンクリートは粗骨材とモルタルの界面で付着破断しているものも多く、凹凸のある割裂面であった。この点で普通骨材との混合は引張強度低下の低減に効果的であったと思われる。

この割裂面の粗さの違いが、RC部材のせん断ひび割れ面にも反映してくると考えられる。

RC部材実験では、汎用な普通強度の原コンクリートからなるRG60を用いた再生コンクリートと、比較用のNG・LGを用いた普通・軽量コンクリート、の計3種類に絞ることとした。

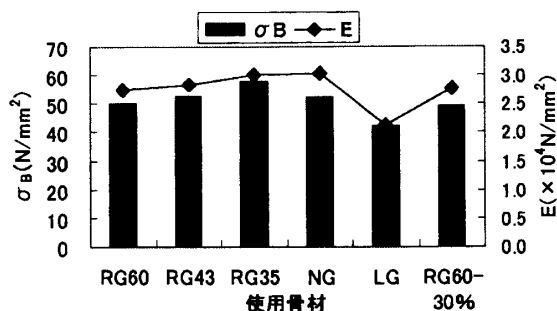


図-1 圧縮強度(σ_B)とヤング係数(E)

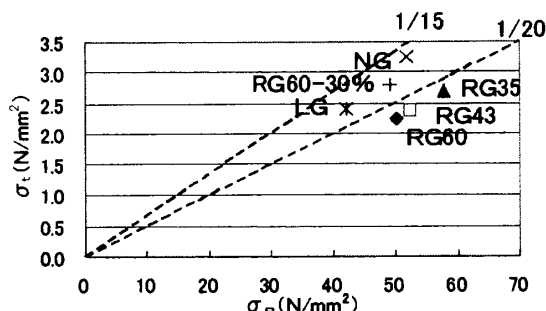


図-2 圧縮強度(σ_B)と割裂引張強度(σ_t)

3. RC部材試験体の概要

表-3に使用鉄筋の材料特性、表-4に試験体諸元一覧、図-3に試験体図の例を示す。試験体は全9体で、形状は200×250×610mm、せん断スパン比1.22とする。全てせん断破壊先行型とし、主筋はD16の高強度鉄筋を用いた。せん断補強筋間隔は75mmで一定とした。コンクリート調合は表-2と同じである。変動要因は、前述の粗骨材と、せん断補強筋量($p_{ww}\sigma_y$)である。 $p_{ww}\sigma_y$ は日本建築学会・靱性保証型設計指針¹⁾の破壊形式を考慮した3つのせん断終局強度式(鉄筋で決まる1式, コンクリートで決まる3式, どちらかできまる2式)でせん断強度が決まるように3TYPE(1.56, 3.87, 8.85)定めた。また、付着破壊先行を防ぐため、割裂防止筋(D6)をせん断補強筋間に4つずつ入れた。

表-3 鉄筋の材料特性

鉄筋径	引張強度	降伏強度	降伏歪	ヤング係数
	N/mm ²	N/mm ²	μ	$\times 10^4$ N/mm ²
φ3.5	635	608	2666	2.08
φ6	590	513	2318	2.14
D6	1069	1048	4798	2.23
D16	1149	1026	5953	1.70

※降伏強度は0.2%オフセット法で定めた

表-4 試験体諸元

TYPE	試験体名	主筋		せん断補強筋			コンクリート						
		配筋	P_t %	σ_y N/mm ²	配筋	P_w %	$w\sigma_y$ N/mm ²	$P_w \cdot w\sigma_y$ N/mm ²	種類	σ_B N/mm ²			
1	R1	6-D16	1.19	1026	$\phi 3.5@75$	0.26	608	1.56	再生	50			
	N1								普通	50			
	L1								軽量	51			
2	R2				6-D16	1.19	1026	$\phi 6@75$	0.75	513	3.87	再生	55
	N2											普通	51
	L2											軽量	54
3	R3	6-D16	1.19	1026				D6@75	0.84	1048	8.85	再生	50
	N3											普通	46
	L3											軽量	50

P_t :引張鉄筋比、 σ_y :降伏強度、 P_w :せん断補強筋比、 $w\sigma_y$:降伏強度、 σ_B :圧縮強度

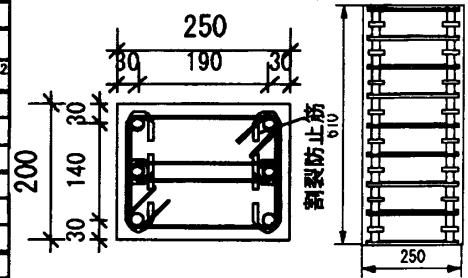


図-3 試験体図

4. 実験方法

4.1 加力方法

加力装置図を図-4に示す。試験体のコンクリートスタブ左右に鉄骨ボックスを取り付けスタブとした。加力に変位制御による逆対称正負交番繰返し载荷で行った。加力スケジュールは、部材角 $\pm 1/400$ で正負交番载荷1回、その後は、 $\pm 1/200$, $\pm 1/100$, $\pm 1/50$, $\pm 1/67$, $\pm 1/50$ で2回繰返ししていき、 $+1/33$ で押し切りとした。本実験では軸力は導入していない。尚、载荷は材齢4~5週で行い、材齢1週までは散水養生した。

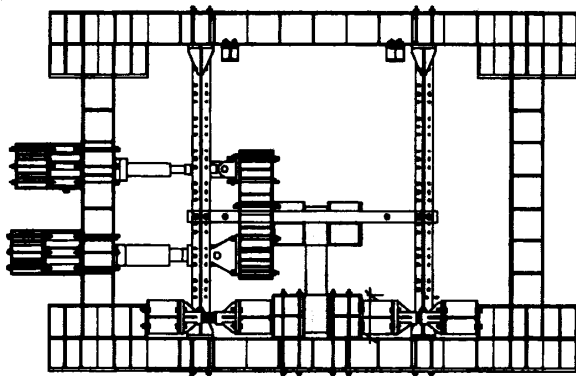


図-4 加力装置図

4.2 ひび割れ幅測定方法

マイクロスコープを用いて部材角 $1/200$ から $1/67$ までせん断ひび割れ幅の計測を行った。計測箇所は試験体表面に引いた左右対称の 50mm ピッチの縦線とせん断ひび割れとの交点とした。図-5のようにひび割れ面に対して直交方向の接点移動距離をひび割れ幅 w とし、水平方向の移動距離をせん断ずれ δ とした。

5. 実験結果および検討

5.1 変形性状および破壊性状

図-6に荷重-部材角関係を、図-7に最終状況のひび割れ図を示す。

TYPE1の試験体では、 $1/400\text{rad}$ をすぎたあたりでせん断ひび割れが端部に入り始め、 $1/100\text{rad}$ で試験体中心部から上部に向かって入ったせん断ひび割れが、大きく開いていき、最期はせん断引張破壊を起こした。いずれの試験体も鉄筋の切れる音がした。N1とL1が $1/100\text{rad}$ で最大耐力を迎えたのに対し、R1は $1/67\text{rad}$ で最大耐力を迎え最大荷重も大きくなった。

TYPE2の試験体でも同様に $1/100\text{rad}$ で中心部から上部に向かって入ったせん断ひび割れが開いていったが、最期はその近傍でコンクリートが圧縮破壊した。また、N2、R2ではせん断補強筋も降伏していた。すべて $1/67\text{rad}$ で最大耐力をむかえているが、N2は $1/50\text{rad}$ でも、 $1/67\text{rad}$ からの耐力低下は小さかった。

初期剛性はどちらの補強筋量の試験体でもヤング係数を反映し、 $N > R > L$ の順になっていた。

TYPE3の試験体もTYPE2と同様の場所にせん断ひび割れがまず入ったが、一つのせん断ひび割れが大きく開いていくことはなく、特にL3はひび割れが細かく分散した。最期の押し切り時にTYPE2と同様にせん断ひび割れ近傍でコンクリートの圧縮破壊がおきた。また終局状態では主筋位置の中央部に付着ひび割れが入ったが、N3に比べR3、L3が目立った。せん断補強筋はどの試験体も降伏しなかった。

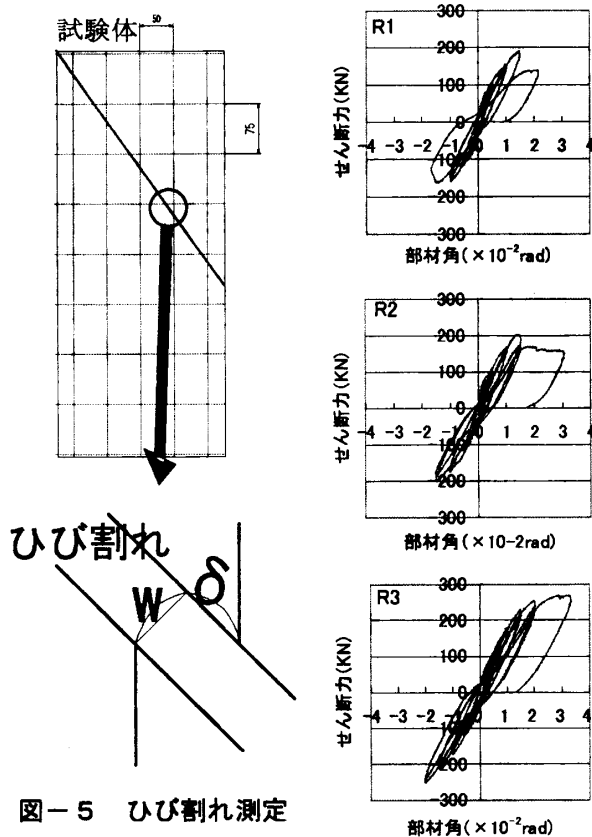


図-5 ひび割れ測定

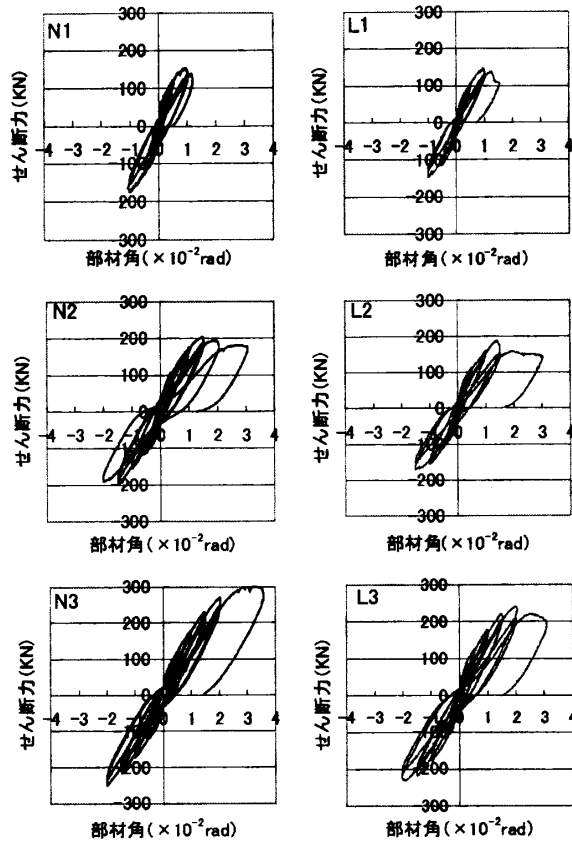


図-6 荷重一部材角関係

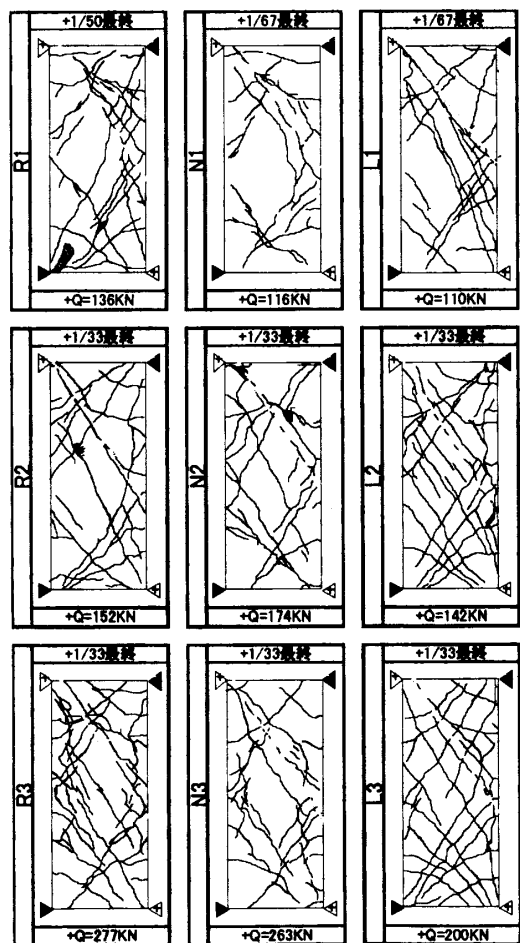


図-7 最終ひび割れ (—は破壊面)

5. 2 せん断ひび割れとずれの関係

図-8にせん断ひび割れ幅 w とせん断ずれ δ の関係について示す。図中の◇は正側、■は負側、直線は最小二乗法で計算した関係式である。(尚、0.1mm未満のひび割れは測定精度が高いとはいえないため除外した。)この関係式の傾きが大きいほどせん断すべりが大きいことになり、せん断ひび割れ面が滑らかでせん断力の伝達が少ないと考える。

TYPE1とTYPE3の試験体ではR、Lに比べてNの傾きが小さく、再生や軽量コンクリートにくらべ普通コンクリートのひび割れ面が粗いと思われる。

TYPE2の試験体ではR2のひび割れ面がN2やL2よりも粗く、N2とL2は同程度という異なる傾向がでた。

しかしながら、目視やこの関係式から再生コンクリートのひび割れ面は軽量コンクリートのひび割れ面ほど平滑ではないと考えられる。

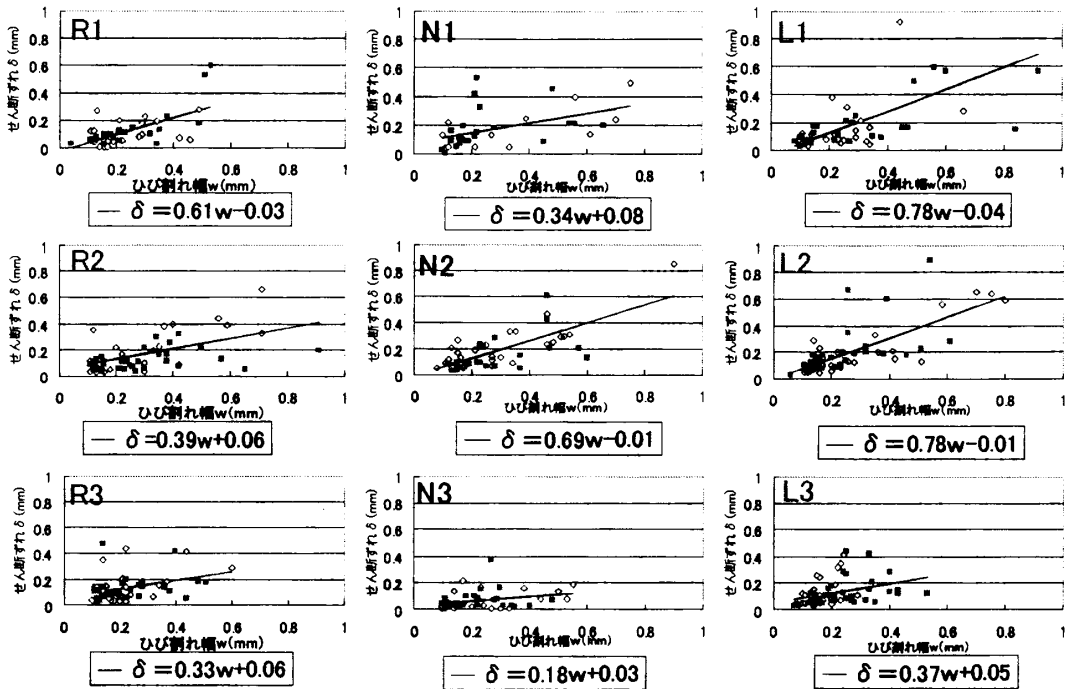


図-8 せん断ひびわれ幅 (w) とずれ (δ) の関係

5. 3 補強筋負担せん断力

卓越したせん断ひび割れを破壊面と定義し、図-7のひび割れ図に-で示した。破壊面を横切るせん断補強筋が部材のせん断力を負担すると仮定すると、補強筋負担分のせん断力 Q_H は、

$$Q_H = \epsilon \cdot E_s \cdot A_w \cdot n \quad (1)$$

(ϵ : 補強筋歪, E_s : 鉄筋のヤング係数, A_w : 一組のせん断補強筋の断面積, n : 破壊面を横切るせん断補強筋本数) で表せる。

またコンクリート負担せん断力は全せん断力 Q から Q_H をひいたものである。

図-9に各試験体の正側包絡線にあわせて Q_H , Q_C を示す。破壊面は実際には経時変化するが、ここでは図をわかりやすくするため最終状況の破壊面を最初から固定している。

TYPE1の試験体では最大耐力に至っても補強筋が全せん断力の 1/3 程度しか負担していない。対して、TYPE2とTYPE3の試験体ではコンクリートが圧壊するため最終的に補強筋がせん断力の大半を負担している。

再生・普通・軽量の骨材による特徴的な違いは、みられなかった。

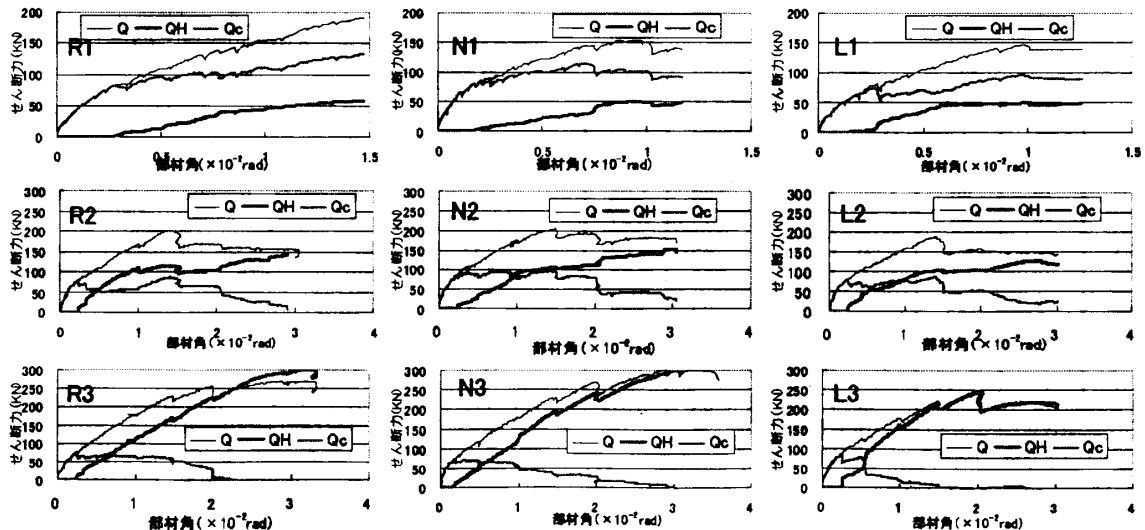


図-9 補強筋負担せん断力

6. 実験値と計算値の比較

建築系の既往の研究^{4), 5)}などでは、再生コンクリートのRC部材は普通コンクリートRC部材対象の式では評価できないという報告は少ない。これらの研究で検討されたコンクリート強度は骨材強度の影響がでにくい20~30N/mm²の範囲が多い。表-5に本研究における実験値と日本建築学会靱性保証型設計指針による計算値の比較を示す。

せん断ひび割れ強度はL1を除いて、実験値が計算値を上回った。材料実験では再生コンクリートの引張強度が低いことが確認され、普通コンクリートとの差はみられるが、評価は可能であると考えられる。

次にせん断終局強度であるが、TYPE1のせん断引張破壊をした試験体ではR1が計算値に近くなり、L1は8割程度となった。TYPE2の試験体は全て計算値の8割程度となり危険側の評価になってしまった。しかし、R2とN2との差はそれほどなかった。TYPE3の試験体ではN3のみが計算値を上回り、R3は下回った。

軽量コンクリートのRC部材は普通コンクリートを対象とした計算式においては8割程度の実験値を示し、適用できないのは本研究でも明らかである。本研究では普通コンクリートのRC部材でもN3以外危険側の評価となっているので、明確なことは言えないが、再生コンクリートでも同様な評価ができる可能性は高い。

表-5 計算値と実験値の比較

試験体名	cQ_{sc}	exQ_{sc}	exQ_{sc}/cQ_{sc}	cQ_{su}	exQ_{su}	exQ_{su}/cQ_{su}
	KN	KN		KN	KN	
R1	78	80	1.02	181	190	1.05
N1	78	82	1.05	181	176	0.97
L1	79	63	0.80	182	149	0.82
R2	82	94	1.15	263	203	0.77
N2	78	107	1.37	255	204	0.80
L2	81	94	1.16	261	188	0.72
R3	77	99	1.28	297	277	0.93
N3	74	119	1.60	285	301	1.06
L3	78	122	1.56	299	243	0.81

※ cQ_{sc} : AIJ靱性指針によるせん断ひび割れ強度計算値

※ cQ_{su} : AIJ靱性指針による終局せん断強度計算値

※ exQ_{sc} : せん断ひび割れ強度の実験値

※ exQ_{su} : せん断ひび割れ強度の実験値

しかし、TYPE2,3のようなコンクリートの圧壊で破壊が決まる場合において普通コンクリートに比べ実験値/計算値が低い傾向はあると考えられる。

7. まとめ

再生コンクリートを用いたRC部材のせん断実験において以下の知見を得た。

- (1) 履歴特性は普通コンクリートとよく類似しており、若干剛性が低い程度で、最大耐力までは繰り返しによる耐力低下も差がなかった。
- (2) 破壊性状はせん断引張破壊・圧縮破壊ともに普通コンクリートとあまり変わらず、軽量コンクリートほどひび割れが分散することはなかった。
- (3) せん断ひび割れ面は普通コンクリートに比べるとせん断ずれが大きくなる傾向があり、若干滑らかであると考えられる。
- (4) せん断ひび割れ荷重・せん断終局強度の算定は普通コンクリートの式で評価できる可能性は高いが、コンクリートの圧壊で決まる場合の終局強度について若干過大評価の傾向がある。

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あります。本研究を行うにあたり、多大な御協力を賜った(株)高周波熱練、(株)デイ・シイセメント、(株)ポゾリス物産、(株)日本メサライト工業、大成建設(株)、昭和産業(株)、東京理科大学工学部建築構造材料実験室に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説,1999
- 2) 齊藤・林他：超高強度コンクリートを使用したRC部材のせん断伝達メカニズムに関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、C-4、2006.9、pp403-408
- 3) 中村・林他：鉄筋コンクリート柱の損傷仮定におけるせん断ひび割れ挙動及び評価法に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、C-4、2005.9、pp121-124
- 4) 西浦・田中他：再生コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはり部材に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、vol.20、No.2、1998、pp1081-1086
- 5) 小山・鳥山他：再生骨材コンクリート柱部材の構造性能に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集、C-4、2002.8、pp.345-348
- 6) 川口・菊池・小山他：再生骨材コンクリートの構造性能に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、A-1、2003.9、pp.267-270
- 7) 清水・梅津他：再生骨材の品質判定試験方法に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、A-1、2003.9、pp.233-236