Japan Concrete Institute

論文　再生粗骨材および再生PET繊維を用いたエコセメントコンクリートはりのせん断特性

野間　康隆[*1]・河野　克哉[*2]・二羽　淳一郎[*3]

要旨：エコセメントおよび再生粗骨材をはり部材に適用する目的で，コンクリートの破壊力学特性ならびにRCはりのせん断特性を検討した。その結果，RCはりのせん断耐力は普通コンクリートの場合に比べて，エコセメントを用いたRCはりではやや低下するものの同程度，エコセメントと再生粗骨材を組み合わせて用いたRCはりでは再生粗骨材の品質によって約2～3割ほど低下することがわかった。ただし，再生PET繊維を1%混入することで，これらリサイクルコンクリートの破壊力学特性を改善でき，RCはりのせん断耐力は普通コンクリートと同等もしくは同等以上になった。

キーワード：エコセメント，再生粗骨材，再生PET繊維，破壊力学特性，せん断特性

1. はじめに

近年，環境負荷を低減する目的で，廃棄物の削減やリサイクルの推進が社会的要請となっている。建設材料の分野においても，様々なリサイクル材料を適用したコンクリートの研究開発が行なわれるようになっている。最近では，都市ゴミ焼却灰などを原料にしたエコセメントや，コンクリート廃材を再利用した再生骨材の高品質化技術なども開発されており，本研究では，このようなエコセメントや高品質再生粗骨材に着目した。

エコセメントはセメント中の塩化物イオン含有量が普通セメントに比較して多いことから，鉄筋コンクリート構造への適用は敬遠される傾向にある。しかし，セメントの水和による塩化物イオンの固定化により，鉄筋腐食に直接関与しないことが明らかになっている[1)]。また，再生骨材はこれまで路盤材などが主な用途であったが，用途拡大にはコンクリート材料としての利用が望まれている。

このような背景のもと，本研究では，エコセメントを単独で，あるいはエコセメントと再生粗骨材を組み合わせる形で使用し，リサイクル材料のコンクリート構造に対する適用性を検討した。特にはり部材への利用を目的として，コンクリート要素における破壊力学特性，ならびにRCはりにおけるせん断特性について検討した。セメントの種類ならびに再生粗骨材の品質がコンクリートの構造性能に与える影響を評価するとともに，これらのリサイクルコンクリートの破壊性状を改善する目的で，使用済みPETボトルを原料にした再生PET短繊維による補強効果についてもあわせて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を**表－1**に示す。セメントにはエコセメント(以下，EC)と普通セメント(以下，NC)を用い，粗骨材には普通砕石(以下，CS)，高品質な再生粗骨材(以下，RH)，および低品質な再生粗骨材(以下，RL)を使用した。RLは，実際に供用されていた構造物の取壊しの際に排出されたコンクリート廃材をクラッシャーで破砕して粗骨材部を取り出したもので，**表－1**に示すように約40%のモルタルが付着している。一方，RHは，最近開発されたスクリュー磨砕装置によってRLの表面に付

*1 東京工業大学　大学院理工学研究科土木工学専攻　(正会員)
*2 太平洋セメント株式会社　中央研究所　修(工)　(正会員)
*3 東京工業大学　大学院理工学研究科土木工学専攻　教授　工博　(正会員)

NII-Electronic Library Service

表－１　使用材料

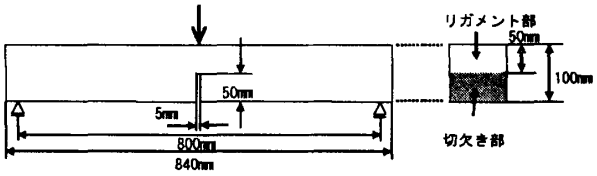
使用材料		記号	物性または成分
セメント (以下，C)	普通セメント	NC	密度 3.16g/cm^3，比表面積 3300cm^2/g
	エコセメント	EC	密度 3.17g/cm^3，比表面積 4260cm^2/g
細骨材 (以下，S)	小櫃産陸砂	S	表乾密度 2.60kg/ℓ，吸水率 1.57%
粗骨材 (以下，G)	青梅産砕石	CS	表乾密度 2.64kg/ℓ，吸水率 0.63%，最大寸法 20mm 付着モルタル率 0%，40t 破砕値 11.6%
	高品質再生粗骨材	RH	表乾密度 2.57kg/ℓ，吸水率 2.31%，最大寸法 20mm 付着モルタル率 20.4%，40t 破砕値 12.9%
	低品質再生粗骨材	RL	表乾密度 2.38kg/ℓ，吸水率 7.97%，最大寸法 20mm 付着モルタル率 41.7%，40t 破砕値 24.1%
繊維	再生 PET 繊維	P	直線型，繊維長 30mm，密度 1.37kg/ℓ，アスペクト比 41.7，断面積 0.41mm^2，引張強度 460MPa，弾性係数 5.8GPa
混和剤	AE 減水剤	WRA	リグニンスルホン酸系，密度 1.06g/cm^3
	AE 剤	AE	アルキルエーテル系，密度 1.025g/cm^3

表－２　示方配合およびフレッシュ性状

供試体名	C の種類	G の種類	W/C (%)	短繊維の体積混入率 (Vol.%)	単位水量(kg/m^3)				WRA (C×%)	AE (C×%)	フレッシュ性状	
					W	C	S	G			スランプ (cm)	空気量 (%)
NC-CS-P0	NC	CS	50	—	170	340	851	924	0.30	0.005	19.0	5.0
EC-CS-P0	EC						852		0.30		21.0	5.2
EC-RH-P0		RH						900	0.30		21.0	4.5
EC-RL-P0		RL						833	0.45		18.0	4.1
EC-RH-P1		RH		1.0				900	0.30		21.0	4.6
EC-RL-P1		RL		1.0				833	0.50		16.0	4.8

表－３　実験ケース

実験ケース	影響要因	比較する配合
ケース 1	セメントおよび骨材	NC-CS-P0，EC-CS-P0，EC-RH-P0，EC-RL-P0，
ケース 2	短繊維補強効果	NC-CS-P0，EC-RH-P0，EC-RH-P1，EC-RL-P0，EC-RL-P1



図－１　切欠きはり３点曲げ試験供試体

着したモルタルを除去し，**表－１**に示すように吸水率ならびに強度(破砕値)を改善した骨材である。補強用の短繊維には再生 PET 繊維(以下，P)を使用した。また，混和剤には，AE 減水剤および AE 剤を使用した。

2.2 配合

配合条件およびフレッシュ性状を**表－２**に示す。すべての配合において単位水量を 170kg/m^3，粗骨材の絶対容積を 350ℓ /m^3，W/C を 50%で一定とし，スランプおよび空気量は，それぞれ 18±3cm，4.5±1.5%となるように混和剤の添加量にて調整した。

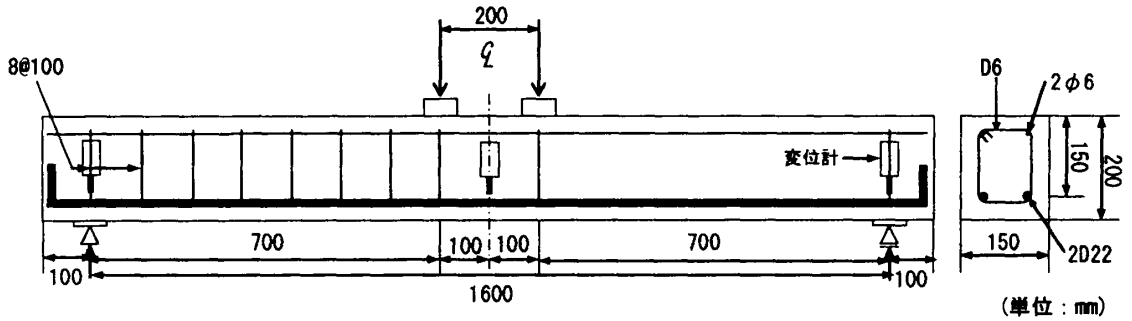
2.3 実験ケース

実験は，**表－３**に示すように，検討する影響要因として，セメント種類ならびに粗骨材種類の影響(ケース 1)と短繊維による補強の影響(ケース 2)の 2 通りに分けて実施した。各影響要因を検討するために用いたコンクリート配合は表中に示したとおりである。なお，実験は，それぞれの影響要因についてコンクリート要素ならびに RC はり部材で検討しており，コンクリートの破壊力学特性を評価するために切欠きはりの 3 点曲げ試験を，また，はり部材のせん断特性を評価するために RC はりの載荷試験を実施した。

2.4 コンクリートの破壊力学特性の試験方法

図－１に示す供試体を用いて RILEM の推奨する切欠きはりの 3 点曲げ試験[2]を実施し，破壊エネルギーG_F(N/m)を，次式を用いて算出した。

NII-Electronic Library Service



図－２　RC はりのせん断特性の試験体

表－４　要素試験結果

供試体名	f_c' (MPa)	f_t (MPa)	G_F (N/m)
NC-CS-P0	30.2	2.05	116.4
EC-CS-P0	28.1	1.97	104.5
EC-RH-P0	29.7	1.94	95.0
EC-RL-P0	28.4	1.85	78.6
EC-RH-P1	28.4	2.16	1737.6
EC-RL-P1	27.3	2.10	1283.2

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{lig} \qquad (1)$$

ここで，W_0：荷重－たわみ曲線下の面積(m^2)，m：支点間の供試体質量(kg)，g：重力加速度(m/s^2)，δ_0：はり破断時のたわみ(m)，A_{lig}：リガメント部の面積(m^2)である。

同等の圧縮強度下でコンクリートの破壊力学特性ならびに RC はりのせん断特性を評価するため，材齢 14 日とした。供試体は，材齢 14 日まで水中養生を行い，試験に供した。この試験で得られた荷重－たわみ曲線を用い，供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ有限要素法を用いた多直線近似解析[3]により，引張軟化曲線を推定した。

2.5 RC はりのせん断特性の試験方法

図－２は，RC はりの概要を示したものであり，**表－２**に示した６配合を用いて全６体の RC はりを作製し，せん断試験を行なった。すべてのはりで，せん断スパン有効高さ比(a/d)を 4.7 とし，引張側の軸方向鉄筋比が 3.44%となるように異形鉄筋(D22, SD345)を 2 本配置した。また，せん断破壊を生じるスパンを限定するため，せん断補強筋(D6, SD295A)を 100mm 間隔で片側のみに，さらに，圧縮側には組立筋 2 本(D6, SD295A)を配置した。はり中央変位から両側の支点変位の平均値を差し引き，たわみを算出した。供試体は，試験に供する材齢 14 日まで湿潤養生を行った。

圧縮強度がせん断耐力に及ぼす影響は普通コンクリートと同様に，圧縮強度の 1/3 乗に比例すると仮定した。圧縮強度の影響を補正する目的で，せん断耐力の実験値 V_e (kN)を以下に示す普通コンクリートのせん断耐力推定式[4]で算出した計算値 V_c (kN)で除した値 R_v を用いた。

$$V_c = 0.2 f_c'^{1/3} p_w^{1/3} d^{-1/4} \left(0.75 + \frac{1.4d}{a}\right) b_w d \qquad (2)$$

ここで，f_c'：コンクリートの圧縮強度 (MPa)，p_w：引張鉄筋比(%)，d：有効高さ(m)，a：せん断スパン(m)，b_w：ウェブ幅(m)である。

3 試験結果および考察

3.1 コンクリートの破壊力学特性

表－４は各配合を用いたコンクリートの圧縮強度(以下，f_c')，割裂引張強度(以下，f_t)，および破壊エネルギー(以下，G_F)の測定結果を示したものである。

(1) セメントの種類および再生粗骨材の品質の影響(ケース 1)

いずれの配合においても f_c'ならびに f_t はほぼ同程度であった。NC-CS-P0 ならびに EC-CS-P0 の G_F を比較すると，EC を用いることでコンクリートの G_F は，やや小さくなるものの同程度であることがわかる。EC は NC を用いた場合にくらべて，長期材齢における強度発現性が小さいといわれている

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

が，本研究のように早期の材齢では，エコセメントの使用が破壊エネルギーに与える影響は比較的小さいことがわかった。

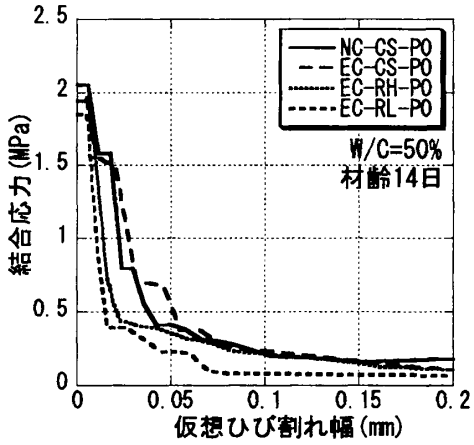
EC-RH-P0 ならびに EC-RL-P0 の G_F をそれぞれ EC-CS-P0 と比較すると，RH を用いた場合は 9%程度，RL を用いた場合は 25%程度の低下を生じた。また，EC-RH-P0 ならびに EC-RL-P0 の G_F をそれぞれ NC-CS-P0 と比較すると，RH を用いた場合は 18%程度，RL を用いた場合は 32%程度の低下を生じており，エコセメントと再生粗骨材を組み合わせて使用した場合には破壊エネルギーの低下割合が大きいことがわかった。

付着モルタルが多い RL を用いた場合は，マイクロクラックが進展しやすくなり，破壊が脆性的となって G_F が小さくなったものと推察される。一方，再生粗骨材の高品質化処理を行った RH を用いた場合には，G_F の低下割合が比較的小さく，再生粗骨材の高品質化によって，コンクリートの破壊エネルギーの低下防止にある程度寄与できることがわかった。

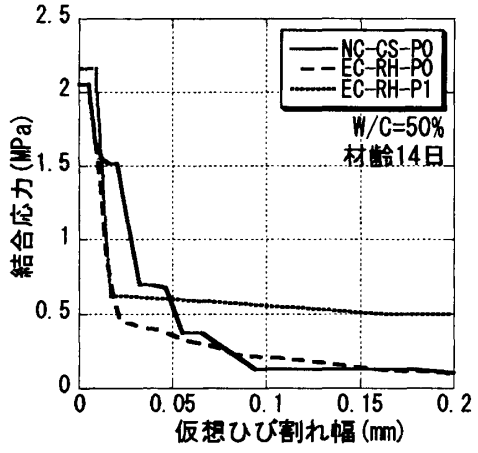
図－3 は各配合を用いたコンクリートの引張軟化曲線を示したものである。ここで NC-CS-P0 と EC-CS-P0 の引張軟化曲線を比較すると，第 1 勾配および第 2 勾配ともにほぼ同様であり，エコセメントを使用したことで引張軟化曲線の形状に大きな変化を生じていないことがわかる。一方，再生粗骨材を用いた EC-RH-P0 ならびに EC-RL-P0 では，引張軟化曲線の第 1 勾配が普通砕石を用いた EC-CS-P0 よりも急であり，結合応力の急激な低下が確認された。また，RH を用いた場合と RL を用いた場合を比較すると，第 1 勾配ならびに第 2 勾配とも RL を用いた場合の方が急であり，再生粗骨材の品質が低下すると，脆性的な破壊を生じやすいことがわかった。

(2) 再生 PET 繊維による補強効果(ケース 2)

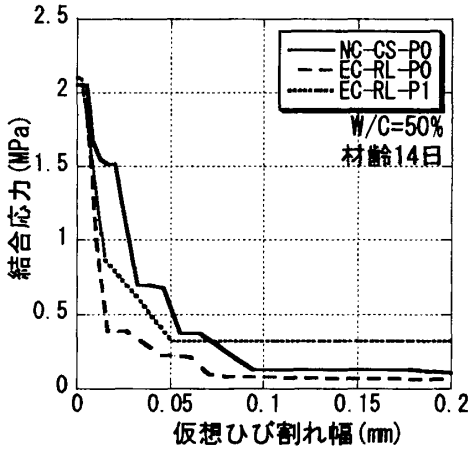
ケース 1 の検討で再生粗骨材を用いた場合は，普通砕石を用いた場合に比べて破壊エネルギーが低下することが明らかになった。**表－4** に示した EC-RH-P1 ならびに EC-RL-P1 の G_F を見ると，P を混入することで破壊エネルギーが大幅に向上している。いずれの品質の再生粗骨材においても，P と組み合わせて使用することでコンクリートの破壊性状を改善できることがわかった。また，P を混入



図－3　引張軟化曲線(ケース 1)



(a) RH



(b) RL

図－4　引張軟化曲線(ケース 2)

NII-Electronic Library Service

していない場合に比べて，Pを用いたEC-RH-P1とEC-RL-P1では，f_c'はほぼ同等であるが，f_tがやや増加した。また，**図－4 (a)**ならびに(b)は，品質の異なる再生骨材RHならびにRLを用いたエコセメントコンクリートにおいて，Pを0%あるいは1%混入した場合の引張軟化曲線をそれぞれ示したものである。なお，比較のため，普通コンクリートの引張軟化曲線をそれぞれの図に併記した。いずれの再生粗骨材を用いた場合でも，再生PET繊維の使用が引張軟化曲線の第1勾配に与える影響は小さいものの，第2勾配，すなわち折れ曲がり点以降にひび割れ面で伝達される応力が大きくなることが確認できた。

3.2 RCはりのせん断耐力

表－5は，各配合を用いたRCはりの載荷試験結果を示したものである。

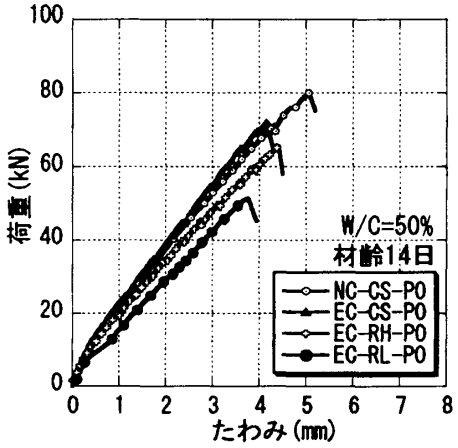
(1) セメントの種類および再生粗骨材の品質の影響(ケース1)

エコセメントを用いたEC-CS-P0において，せん断耐力の実験値V_e(kN)と普通コンクリートのせん断耐力推定式で算出した計算値V_c(kN)の比R_vを普通セメントを用いたNC-CS-P0と比較すると，エコセメントを用いた場合には9%程度の耐力低下を生じるものの同程度であることが明らかとなった。

さらにエコセメントと再生粗骨材を組み合わせた場合は，エコセメントと普通砕石を組み合わせて使用したEC-CS-P0に比べて，RHを用いたEC-RH-P0で約10%，RLを用いたEC-RL-P0で約30%の耐力低下を生じた。再生粗骨材の品質がRC部材の耐力に直接関与する結果となっている。再生粗骨材の品質がRCはり部材のせん断耐力に与える影響については既往の研究[5),6)]においても同様な傾向が得られており，再生粗骨材粒子の周囲に付着したモルタルを磨砕処理して高品質化することで，斜めひび割れ面における粗骨材の噛み合わせ効果が向上し，せん断に対するはりの耐荷性能を改善できることが明らかになった。なお，普通セメントと普通砕石を組み合わせたNC-CS-P0と比較すると，エコセメントと再生粗骨材を組み合わせた場合には，RHで18%，RLで35%ほど耐力が低下した。

表－5　部材試験結果

供試体名	f_c' (MPa)	f_t (MPa)	V_e (kN)	V_c (kN)	R_v
NC-CS-P0	31.0	2.23	80.1	72.0	1.11
EC-CS-P0	29.9	2.12	72.1	71.1	1.01
EC-RH-P0	30.4	2.07	65.5	71.5	0.92
EC-RL-P0	29.3	1.82	51.4	70.7	0.73
EC-RH-P1	29.2	2.13	85.5	70.6	1.21
EC-RL-P1	29.0	1.97	61.9	70.4	0.88



図－5　荷重－たわみ曲線(ケース1)

(2) 再生PET繊維による補強効果(ケース2)

エコセメントと再生粗骨材を組み合わせたEC-RH-P0ならびにEC-RL-P0のR_vに比べて，それぞれPを1%混入したEC-RH-P1ならびにEC-RL-P1のR_vは，RHの場合に32%，RLの場合に21%ほど増加することが確認できた。このようにPを使用することで，斜めひび割れ発生後も架橋した繊維によって応力を伝達できるようになるため，エコセメントと再生粗骨材を組み合わせた場合に生じるせん断耐力の低下を改善できることがわかった。

3.3 RCはりの荷重－たわみ曲線

(1) セメントおよび骨材の影響(ケース1)

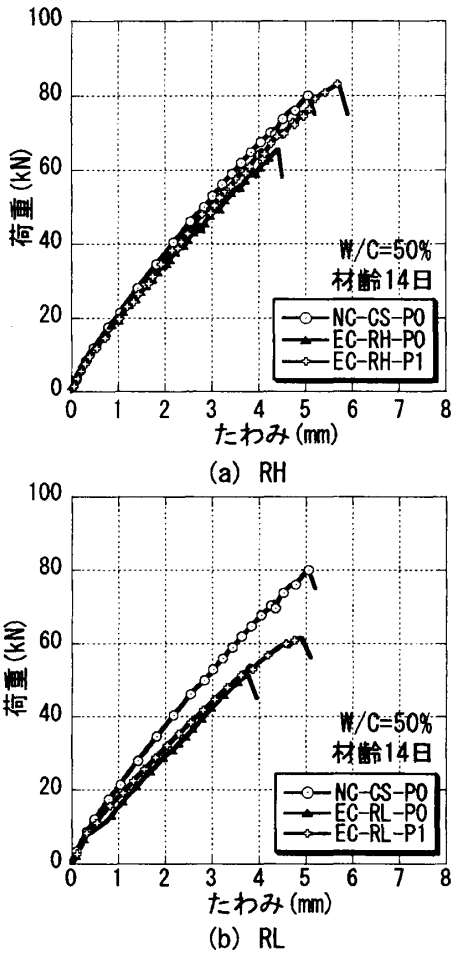
図－5は，エコセメントならびに再生粗骨材を用いたRCはりの載荷試験から得られた荷重－たわみ曲線を示したものである。エコセメントを用いたEC-CS-P0と普通セメントを用いたNC-CS-P0を比較すると，荷重－たわみ曲線の傾きはほぼ一致しており，セメント種類によるはりの剛性の違いはほとんど無いことがわかった。一方，再生粗骨材を使用したEC-RH-P0とEC-RL-P0では，荷重

NII-Electronic Library Service

ーたわみ曲線の傾きが緩やかになっており，再生粗骨材の品質が低下するほど，はりの剛性も低下する傾向となった。

(2) 再生 PET 繊維による補強効果(ケース 2)

図－6は，エコセメントと再生粗骨材を組み合わせた配合にPを1%混入したRCはりの荷重－たわみ曲線を示したものである。なお，比較のため，普通セメントと普通砕石を用いた RC はりの荷重－たわみ曲線も併記した。RH，RL のいずれの再生粗骨材を用いた場合も，繊維の混入によって，斜めひび割れ発生後も荷重を保持でき，最終的なたわみが増加していることがわかる。



図－6　荷重－たわみ曲線(ケース 2)

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1)エコセメントを用いたコンクリートの破壊エネルギーおよび RC はりのせん断耐力は，普通コンクリートの場合よりもやや低下するものの同程度である。

(2)エコセメントと再生粗骨材を組み合わせたコンクリートの破壊エネルギーおよび RC はりのせん断耐力は，普通コンクリートの場合よりも約2～3割低下する。

(3)エコセメントと再生粗骨材を組み合わせたコンクリートに再生PET繊維を1%混入することで破壊エネルギーが大幅に向上する。

(4)エコセメントと再生粗骨材を組み合わせたコンクリートに再生 PET 繊維を 1%混入することでせん断耐力は，普通コンクリートと同等もしくは同等以上になる。

謝辞

本研究を実施するに当り，株式会社プラスワン社から再生ポリエチレンテレフタレート繊維を提供頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

1) 平尾　宙ほか：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの硬化体における塩化物イオンの挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.22,No2, pp.13-18，2000.7

2) RILEM : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bent Tests on Notched Beams, Materials and Structures,Vol.18, No.93, pp.285-290,1983

3) 栗原哲彦ほか：多直線近似による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.119-129.1996.2

4) 二羽淳一郎ほか:せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8

5) 佐藤良一ほか：高品質再生粗骨材を用いた RC 部材の力学特性，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.430-437，1998.2

6) 佐藤良一ほか：低品質再生粗骨材を用いた RC 部材の力学特性，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.573-580，1999.2

NII-Electronic Library Service