

論文 再生骨材を混合使用したRC部材の力学的特性に関する研究

高見 新一*1・下司 靖明*2・西林 新蔵*3

要旨:再生骨材を混合使用したコンクリートのRCはりについて対称2点載荷試験を実施し、力学的特性および破壊性状について検討を行った。コンクリートの圧縮強度は2水準とし、RCはりの載荷条件は曲げ破壊型とせん断破壊型とした。その結果、RCはりの破壊は想定通りの破壊状況となり、再生コンクリートと普通コンクリートの違いはほとんど認められなかった。また、再生骨材の混合割合が多くなると圧縮強度の減少によって曲げ耐力はわずかに低下すること、再生細骨材の混合使用は曲げ破壊におけるせん断耐力の低下に影響を与えることなどが認められた。

キーワード:再生骨材, 再生コンクリート, 圧縮強度, RCはり, 曲げ破壊, せん断破壊

1. はじめに

コンクリート構造物の解体時に発生するコンクリート塊を原料に製造される再生骨材は、将来にわたり有望なリサイクル型のコンクリート用骨材と考えられている。しかし、再生骨材の品質は再生骨材の製造方法に大きく影響される。このため、再生骨材の品質基準や再生骨材を用いたコンクリートの用途について、JCIの標準化情報(テクニカルレポート)TR A 0006「再生骨材を用いたコンクリート」(2002年12月20日公開)、日本建築学会・材料施工委員会鉄筋コンクリート工事運営委員会では、「建築工事標準仕様書 鉄筋コンクリート工事」(JASS 5)の改定(改訂版は2003年2月刊行予定)、JCI廃棄物のコンクリート材料への再資源化研究委員会の中に設置された「再生コンクリートWG」等において検討され、整備されつつある。

これら、TR原案およびJASS 5改定の内容は、おおむね現状の研究内容、再生骨材製造技術、再生骨材の品質、再生骨材を使用した再生コンクリートの品質を網羅した内容となっているが、TR原案による再生コンクリートの用途は「高い強度や高い耐久性を要求されない部材

や部位」として鉄筋コンクリート構造物への適用性についての規定はない。また、JASS 5改定では「再生骨材を構造用コンクリートの骨材として規定され、再生骨材は設計基準強度(f_c) $36\text{N}/\text{mm}^2$ まで適用するとしている。このように、再生骨材の品質や再生コンクリートの用途については両者で若干の相違がある。また一方では、現行のレディーミクストコンクリート規格(JIS A 5308)付属書1「コンクリート用骨材」として普通に使用することへの対応については、プラントの設備、品質管理、コストの現況からかなり難しいと考えられる¹⁾²⁾など、解決すべき多くの問題点が残されたままである。

しかし今後、環境への負荷を低減した建設分野における新しいシステムを構築するという重大な課題に対応し、コンクリート塊のリサイクルを推進するためには、再生骨材をRC構造部材として積極的に使用することが必要不可欠となるのである。

本研究は、再生骨材の需要の増加とRCへの適用を図るため、普通骨材に再生骨材を混合使用したコンクリートのRCはりの載荷試験を行い、破壊性状から曲げ特性、せん断特性におよぼす力学的な影響について検討を行い、再生コ

*1 大阪産業大学助手 工学部土木工学科 (正会員)

*2 大阪産業大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 大阪産業大学教授 工博 (正会員)

ンクリートのRCはりへの適用性について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリートの示方配合

使用材料とその物性を表-1に、コンクリートの示方配合表を表-2に示す。

配合は目標強度 30, 45N/mm² の2水準, 目標スランプは 14.0±1.5cm, 目標空気量は 5±1.5%とした。また, 普通粗骨材(砕石)に対して再生粗骨材を 50, 100%, 普通細骨材(川砂)に対して再生細骨材を 50, 100%, それぞれ体積置換した14種類の配合設計とした。コンクリート用化学混和剤はポリカルボン酸系AE減水剤を用い, 使用量はC×0.3%と一定とした。実験に用いた再生粗骨材は, 原コンクリートに天然骨材(川砂利, 川砂)が使用されたもので, 異物を取除き破碎をした後に, 湿式磨鋳機と比重選別機でモルタル分を除去処理したものである。また, 再生細骨材は製造された再生粗骨材を破碎し粒度調整を行ったものである。これらの再生粗骨材, 再生細骨材は国土交通省(旧:建設省)の「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準(案)」の2種に分類されるものである。使用に際して, 再生粗骨材は

表-1 使用材料

練混ぜ水	水道水
普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³
	粉末度 3,400 cm ² /g
普通粗骨材 (NG)	最大寸法 20mm
	密度 2.69g/cm ³
	吸水率 0.81%
	粗粒率 7.04
普通細骨材 (NS)	密度 2.55g/cm ³
	吸水率 1.89%
	粗粒率 2.86
再生粗骨材 (RG)	最大寸法 20mm
	密度 2.53g/cm ³
	吸水率 3.18%
	粗粒率 6.77
再生細骨材 (RS)	モルタル付着率 30%
	密度 2.41g/cm ³
	吸水率 5.50%
混和剤 (W. R. A)	粗粒率 3.23
	ポリカルボン酸系 AE減水剤 I種

24時間水に浸漬した後に表面を布で拭いて, また, 再生細骨材はフローコーンによる試験に基づき表面乾燥飽水状態として使用した。

2.2 鉄筋

RCはりの主鉄筋は D16(SD295A), スターラップと組立て鉄筋はφ9mmの丸棒鋼を使用した。

表-2 コンクリートの示方配合表

配合記号※	G _{max} (mm)	SL (cm)	W/C (%)	air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
						W	C	NS	RS	NG	RG	W.R.A		
N30-0-0	20	14.0	65	5.0	44	171	263	775	0	1054	0	0.789		
N30-50-0										527	498			
N30-100-0										0	955			
N30-0-50										388	359		1054	0
N30-0-100										0	711			
N30-50-50										388	359		527	498
N30-100-100										0	717		0	955
N45-0-0	20	14.0	40	5.0	42	186	351	706	0	1010	0	1.053		
N45-50-0										505	477			
N45-100-0										0	953			
N45-0-50										353	327		1010	0
N45-0-100										0	654			
N45-50-50										353	327		505	477
N45-100-100										0	654		0	953

※ N目標強度-再生粗骨材置換率-再生細骨材置換率

NS:普通細骨材, RS:再生細骨材, NG:普通粗骨材, RG:再生粗骨材

2.3 実験内容

(1) フレッシュコンクリート

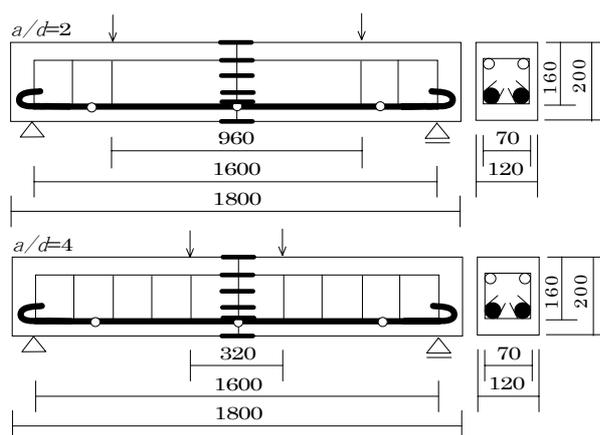
フレッシュコンクリートの試験は、スランプ試験(JIS A 1101)および空気量試験(JIS A 1128)を行った。

(2) 硬化コンクリート

硬化コンクリートの力学試験は、圧縮強度試験(JIS A 1108)、引張強度試験(JIS A 1113)、静弾性係数試験(JSCE-G502)を行った。

(3) RCはりの載荷試験

RCはりの寸法と鉄筋の配筋を図-1に示す。鉄筋の配筋は、せん断スパン長($a=320, 640\text{mm}$)と有効高さ($d=160\text{mm}$)との比(a/d)を変化させ、せん断破壊形式($a/d=2$)と曲げ破壊形式($a/d=4$)の2種類とした。スターラップの配筋間隔はRCはりの有効高さ(d)とした。



単位：(mm)

図-1 RCはりの寸法と鉄筋の配筋

図-2に、載荷試験装置(アムスラー耐圧試験機)と測定装置の配置を示す。荷重の載荷方法は、RCはりのスパン側面を目視による観察で、微細な初期のひび割れが確認されるまでは1.96kN(0.2t)間隔で載荷を行い、ひび割れの発生以後は4.90kN(0.5t)間隔でRCはりが破壊するまで載荷を行った。測定は、各荷重段階でのRCはりスパン中央の主鉄筋ひずみ、圧縮縁、引張縁、鉄筋位置のコンクリートひずみを電気抵抗線ひずみゲージで測定を行い、RCはりの

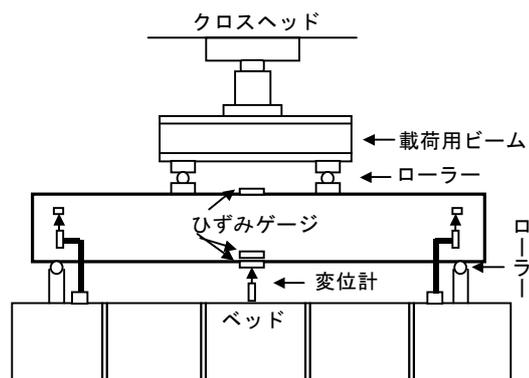


図-2 載荷試験装置と測定装置の配置

スパン中央のたわみは電気抵抗線式変位計を用いて測定した。また、各荷重段階で発生したRCはり側面のひび割れは鉛筆でトレースして、その横に荷重を記入して、ひび割れの発生本数と進行方向について検討した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

スランプは全ての配合で目標スランプの範囲内となり、骨材の種類(普通、再生)と置換率がスランプにおよぼす影響は小さいことが認められた。また、空気量は、目標強度 $30/\text{mm}^2$ (以下、N30)は目標値の範囲であったのに対して、目標強度 $N45/\text{mm}^2$ (以下、N45)では再生骨材の混合割合が大きくなるとともに空気量はやや小さい値となった。

3.2 硬化コンクリート

表-3にコンクリートの力学試験結果を示す。再生骨材を普通骨材に全量置換すると、圧縮強度は普通コンクリートに比べてN30では20%、N45では29%程度減少することから、配合強度の高いものほど再生骨材の混合使用による圧縮強度の減少割合は大きくなることが認められた。また、引張強度も同様の傾向を示した。

静弾性係数は、再生骨材の置換による減少が著しく、とくに全量置換した配合では普通コンクリートの60%程度の値となる。

表-3 力学試験の結果

配合記号	f_c	f_t	E_s
N30-0-0	29.2 (1.00)	2.62	34.6
N30-50-0	28.2 (0.97)	2.48	29.3
N30-100-0	24.5 (0.84)	2.36	24.7
N30-0-50	26.3 (0.90)	2.68	25.2
N30-0-100	24.9 (0.85)	2.42	24.7
N30-50-50	26.1 (0.89)	2.46	27.3
N30-100-100	23.3 (0.80)	2.19	21.5
N45-0-0	45.7 (1.00)	3.98	38.1
N45-50-0	42.8 (0.94)	3.60	33.9
N45-100-0	39.7 (0.87)	3.21	32.2
N45-0-50	39.5 (0.86)	2.80	31.4
N45-0-100	36.2 (0.79)	2.91	27.1
N45-50-50	35.3 (0.77)	2.55	28.1
N45-100-100	32.5 (0.71)	2.78	23.8

f_c : 圧縮強度 (N/mm²) () 内は強度比

f_t : 引張強度 (N/mm²)

E_s : 静弾性係数(×10³ N/mm²)

これら、普通骨材に再生骨材を置換したコンクリートの硬化性状は、置換率が高くなるに伴って強度、静弾性係数などの値が減少し、この傾向は再生粗骨材よりも、再生細骨材の混合使用の場合に顕著になることが認められた。

3.3 RCはりの載荷試験

(1) たわみ

図-3 にRCはりの終局時におけるたわみの測定値と計算値との関係を示す。たわみの実側値は計算値に対して±10%の範囲にほぼ収まり相関も良い。しかし、N30($a/d=4$)の再生粗骨材を100%使用したものの、N30($a/d=2, 4$)の再生骨材(細, 粗)を100%使用したものは計算値のたわみ±10%よりも大きな値となった。また、再生骨材を全量置換したN45($a/d=4$)は計算値に対して±10%の範囲に入っているが、他のたわみ(5~6mm)に比べてやや小さい値(約4mm)を示した。

(2) 曲げ剛性

図-4 にコンクリートの種類と曲げ剛性との関係を示す。

曲げ剛性 ($E_c I_i$) は式(1)³⁾で求めた。

$$E_c I_i = (L^2/16 - a^2/12) Pa / \delta \quad (1)$$

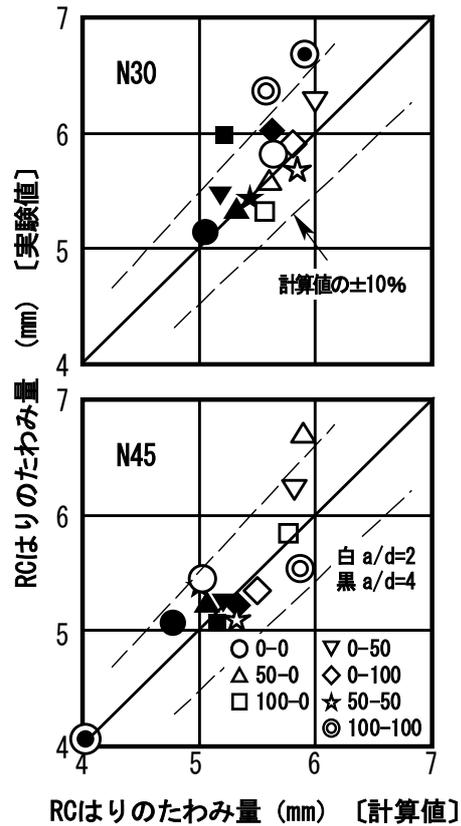


図-3 RCはりのたわみ(終局時)

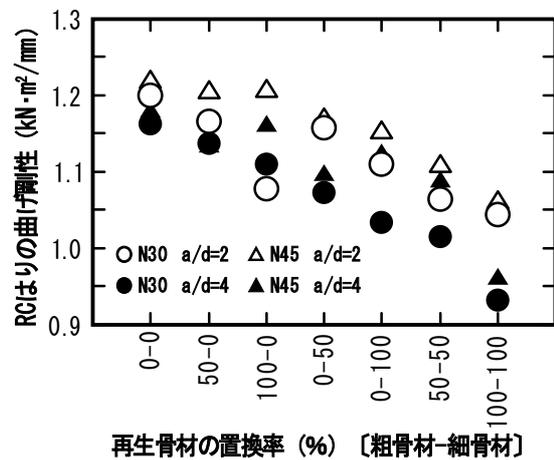


図-4 コンクリートの種類と曲げ剛性

ここで、 $E_c I_i$: 曲げ剛性

L : RCはりのスパン長さ

a : せん断スパン長 P : 荷重

δ : RCはりのたわみ(実験値)

なお、曲げ剛性の計算に用いたたわみ(δ)は、RCはりの載荷試験で主鉄筋が降伏する直前の

計測値を用いた。

荷条件 $a/d=2$ では、N30 と N45 との差はほとんど認められない。再生骨材の混合割合、とくに再生細骨材が多くなるほど、RC はりの曲げ剛性は減少することがわかる。

荷条件 $a/d=4$ では、再生骨材の混合割合が多くなるほど、荷条件 $a/d=2$ よりも曲げ剛性は減少する。とくに、全量再生骨材を使用したものは急激な曲げ剛性の低下が見られる。

(3) 中立軸

図-5 に、コンクリートの種類と RC はりの初期ひび割れ発生後の中立軸の位置との関係を示す。再生骨材の混合割合が多くなると中立軸の位置は下がり、RC はりの圧縮縁からの距離が増大する。とくに、N30-100-100 ($a/d=2, 4$)、N45-100-100 ($a/d=2, 4$) の、再生骨材を全量置換したものは計算値よりも中立軸の位置が下がることが認められた。これらのコンクリートは静弾性係数 (表-3 参照) が小さいため、弾性係数比 ($n=Es/Ec$) が大きくなり中立軸比も大きくなったもので、中立軸の位置はコンクリートの静弾性係数に大きく影響されることがわかった。

(4) 主鉄筋のひずみとひび割れ

主鉄筋のひずみとひび割れ本数との関係を図-6 に示す。荷条件 ($a/d=2$) では、主鉄筋のひずみが小さい段階からひび割れが多く発生し、N45 のように強度が大きくなるとこの傾向は顕著になる。また、再生細骨材の置換率が大きいとひび割れの発生本数は増加する傾向にある。再生粗骨材を 100% 置換するとひび割れの発生本数は主鉄筋ひずみが $400\sim 600\mu$ 付近から急激に増加する。

荷条件 ($a/d=4$) でのひび割れ発生本数は、主鉄筋のひずみの増大にほぼ比例して増加する。N45 では初期の段階からひび割れが発生するが、N30 では主鉄筋のひずみが $400\sim 600\mu$ 付近からひび割れが発生する。また、N45 で再生細骨材を 100% 置換したものは初期の段階よりひび割れが発生し、発生本数も多いことが認められた。

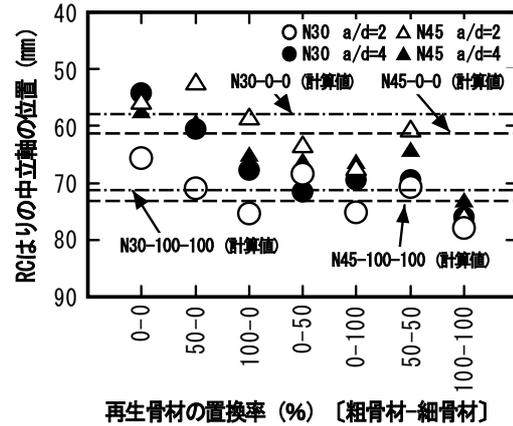


図-5 コンクリートの種類と中立軸の位置

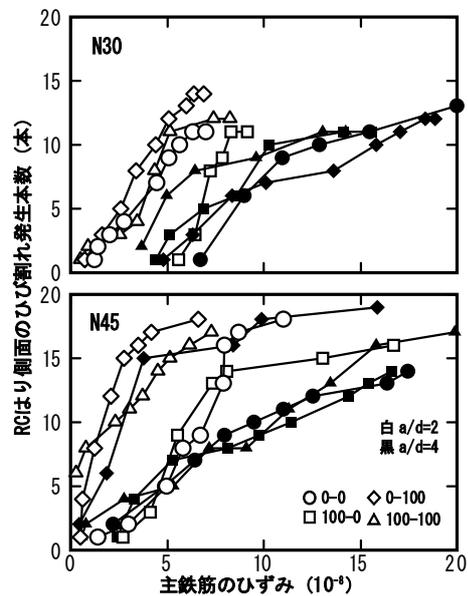


図-6 主鉄筋のひずみとひび割れ本数

(5) 終局曲げモーメント

図-7 に終局曲げモーメントの実験値と計算値を示す。計算の終局曲げモーメント (M_u) は式(2)³⁾で求めた。

$$M_u = A_s f_y (d - A_s f_y / 2 \times 0.85 f'_c b) \quad (2)$$

ここで、 f_y : 鉄筋の降伏強度 (実測値)

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (実測値)

荷条件 $a/d=2$ では、実験値と計算値が良く一致している。しかし、終局曲げモーメントが計算値よりも小さいものは、再生細骨材を混合使用した RC はりである。従って、再生細骨材を混合使用する場合は、せん断力に対する抵抗

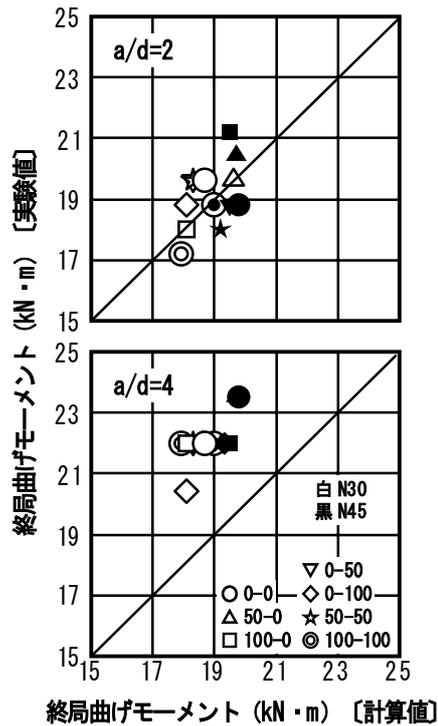


図-7 終局曲げモーメントの実験値と計算値

性を大きくするように対策（例えば、スターラップの増加）が必要と思われる。

荷条件 $a/d=4$ の終局耐力の実験値はすべて計算値を上まわっており、再生骨材の使用による耐力の低下はほとんどないものと判断される。

(6) 破壊形式

代表的なRCはりの破壊形式を図-8に示す。せん断破壊を想定 ($a/d=2$) したRCはりには、全てせん断による破壊形式となった。

曲げ破壊を想定 ($a/d=4$) したRCはりには、再生細骨材または再生粗骨材を全量使用した場合、再生骨材を全量使用した場合に、せん断による破壊や斜めひび割れが発生した。これは、再生骨材を混合使用するとコンクリートの圧縮強度が低下するのにもない、RCはりのせん断耐力が低下することを示している。

4. まとめ

本研究を以下のとおり要約する。

- (1) 再生骨材の混合によるスランプへの影響は小さいが、空気量はやや小さくなる。また、再生骨材の混合割合が多くなると圧縮強度、

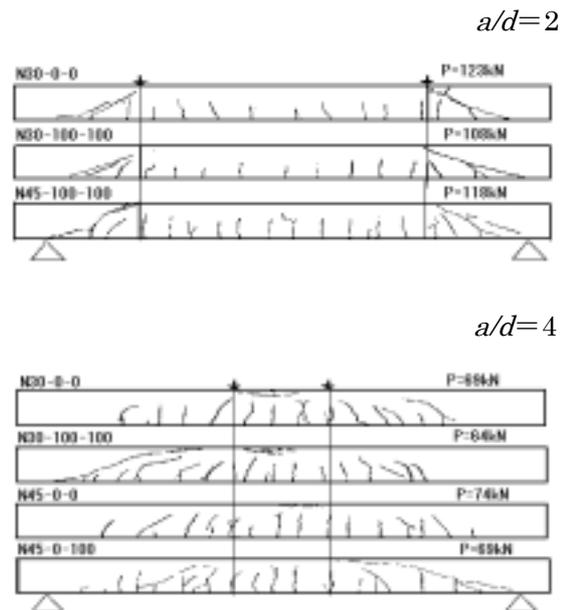


図-8 RCはりの破壊形式

引張強度、静弾性係数は減少する。

- (2) 再生骨材を全量使用したRCはりのたわみは計算値よりも大きくなり、曲げ剛性は減少する傾向がある。
- (3) ひび割れは、再生細骨材の混合が多くなると荷段階の初期から発生し、本数も多くなる。
- (4) せん断破壊を想定した全てのRCはりにはせん断破壊の形式となった。一方、曲げ破壊を想定した荷条件では、コンクリートの圧縮強度の低下により、せん断破壊や斜めひび割れの発生の傾向が大きくなる。

参考文献

- 1) コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会：リサイクル資材のコンクリートへの活用技術の標準化，コンクリート工学，vol. 39，No. 10，pp. 98～101，2001. 10
- 2) コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会：エコセメントの標準情報TRおよび再生骨材を用いたコンクリートのTRの概要，コンクリート工学，vol. 39，No. 11，pp. 53～59，2001. 11
- 3) 建設材料実験：(社)日本材料学会，pp. 197～218，2001