

論文 側面被り厚さを変化させた再生骨材コンクリート梁部材の付着特性

師橋 憲貴^{*1}・桜田 智之^{*2}・池田 貴弘^{*3}・鈴木 由香里^{*3}

要旨：本研究は再生骨材コンクリート(以降, 再生コンクリートと称する)を用いた梁部材の付着特性に及ぼす側面被り厚さの影響を普通コンクリートと比較して検討したものである。本研究で利用した再生コンクリートは粗骨材のみに再生骨材を用いたコンクリートで, 乾燥収縮ひび割れがまだ発生していない5週と乾燥収縮ひび割れが発生した1年で梁部材の実験を行った。結果として, 普通コンクリートと再生コンクリートともに付着割裂強度は側面被り厚さが小さくなるにつれて減少した。また本実験で用いた再生コンクリートの1年実験の付着割裂強度は5週実験と比較して同等となり, 乾燥収縮ひび割れの影響は僅かであった。

キーワード：再生コンクリート, 側面被り厚さ, 乾燥収縮ひび割れ, 付着割裂強度

1. はじめに

近年, コンクリート塊を破砕した再生骨材を構造用コンクリートの骨材に利用することを目的とした研究が, 材料学的研究だけではなく構造学的研究にもみられるようになってきている¹⁾。その成果により日本コンクリート工学協会の「廃棄物のコンクリート材料への再資源化研究委員会報告書(2003年6月)」(以降, 委員会報告書と称する)には, 再生骨材を用いた構造用コンクリートのガイドラインの考え方が提示されるに至っている²⁾。再生骨材コンクリート(以降, 再生コンクリートと称する)に付着モルタルの多い再生骨材を利用した場合には, 再生骨材の吸水率が大きいことから乾燥収縮ひび割れが発生しやすい。乾燥収縮ひび割れが部材の構造耐力に及ぼす影響を把握することは再生骨材を再生コンクリートとして鉄筋コンクリート部材に適用する上で重要なことと考える。再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れは養生期間の終了以降, コンクリートが乾燥することにより収縮が生じ, 部材ではコンクリートが鉄筋に拘束されるため部材の表面にひび割れが発生するものと考えられる。この乾燥収縮は部材の断面が小さくまた

は薄いほど生じやすい。そこで, 本研究ではコンクリート打設時に同一のコンクリートを用いて作製した側面被り厚さの異なる梁部材を, 乾燥収縮ひび割れがまだ発生していない5週(5週実験)と, 実験室内に1年間保存し乾燥収縮ひび割れが十分に発生した1年(1年実験)で付着実験を行い, 付着特性の比較を行った。

2. 実験の概要

図-1に試験体形状を, また図-2に試験体

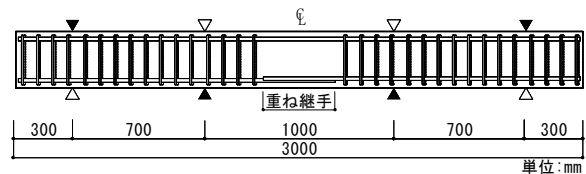


図-1 試験体形状

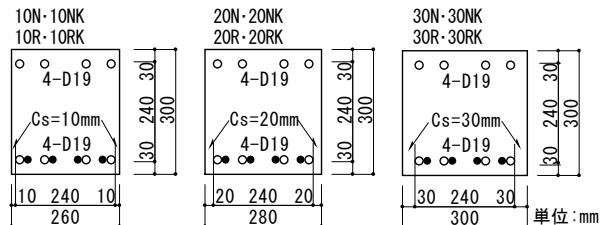


図-2 試験体断面

*1 日本大学 生産工学部建築工学科助手 博士(工博) (正会員)

*2 日本大学 生産工学部建築工学科教授 博士(工博) (正会員)

*3 日本大学大学院 生産工学研究科 博士前期課程 建築工学専攻

表－1 試験体詳細

タイプ	試験体名		加力時期	置換率	純曲げ	側面被り	
					区間梁幅	厚さ	
				b		Cs	
				(mm)		(mm)	
Nタイプ	1)	10N	5週時	再生粗骨材 0%	260	10	
	2)	20N			280	20	
	3)	30N			300	30	
NKタイプ	4)	10NK	1年後	再生細骨材 0%	260	10	
	5)	20NK			280	20	
	6)	30NK			300	30	
Rタイプ	7)	10R	5週時	再生粗骨材 100%	260	10	
	8)	20R			280	20	
	9)	30R			300	30	
RKタイプ	10)	10RK	1年後	再生細骨材 0%	260	10	
	11)	20RK			280	20	
	12)	30RK			300	30	

置換率：再生骨材を天然骨材に置換する割合

断面を示す。試験体は単純梁形式で、重ね継手を純曲げ区間の下端に設け、重ね継手による梁部材の付着特性を検討する試験体とした。主筋は上端・下端とも 4-D19(SD345)とし、梁断面に対して水平に重ね継手した。被り厚さは純曲げ区間の側面について主筋表面からの被り厚さ Cs を 10mm(0.5db, db は主筋の公称直径), 20mm (1.1db), 30mm(1.6db)と変化させた。せん断区間はせん断耐力を高めるため梁断面の幅は 300mm と共通にした。底面の被り厚さは 30mm とした。重ね継手の破壊形式は主筋のあき間隔を変化させずにサイドスプリット型の付着割裂破壊を対象とした。重ね継手長さは 30db と一定にした。重ね継手区間には主筋とコンクリートとの基本的な付着特性を把握するため横補強筋は配筋していない。

表－2 コンクリートの調合

タイプ	W/C (%)	単位質量(kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
N・NK	62.0	182	294	818	962
R・RK	58.0	183	316	814	867

呼び強度：21N/mm², 粗骨材の最大寸法：20mm, 指定スランブ：18cm

表－3 骨材の品質

タイプ		吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	洗い損失量 (%)
N・NK	天然砂利	0.78	2.62	-
	天然砂	1.41	2.55	-
R・RK	再生粗骨材	4.76	2.32	0.62
	天然砂	1.80	2.55	-

3. 再生コンクリートの材料的特性

表－1 に試験体一覧を示す。本研究で用いた再生コンクリートは再生コンクリート工場で製造されたレディーミクストコンクリートで粗骨材のみに再生骨材を用いた。実験は粗骨材と細骨材のすべてに天然骨材を用いた普通コンクリートの N・NK タイプと、再生コンクリートを用いた R・RK タイプの 2 タイプについて行った。N タイプと R タイプはコンクリートを打設後 5 週で載荷し、NK タイプと RK タイプは 1 年経過した時点で載荷した。表－2 にコンクリートの調合を、表－3 に使用した骨材の品質を示す。本研究で用いた再生骨材は再生コンクリート工場においてコンクリート塊をジョークラッシャーで破碎し製造されたものである。委員会報告書²⁾によると、本研究で用いた再生粗骨材の品質は RG2(吸水率についてみると 5.0%以下のもの)に該当している。また粗骨材と細骨材の組合せは、粗骨材に吸水率 5%以下の再生粗骨材を、細骨材に普通細骨材を用いた構造用再生コンクリートであり、使用区分の B 種(凍結融解作用に対処策を施し上部構造に使用する構造用再生コンクリート)に該当している。なお、コンクリートは梁の上端から打設し、N タイプと NK タイプ、そして R タイプと RK タイプは同じアジテータトラックを用いて同時に試験体を作製した。

表－4 にコンクリートの性質を示す。また図－3 および図－4 に N・NK タイプと R・RK タイプのヤング係数と圧縮強度の推移を示す。ヤング係数と圧縮強度は現場封かん養生とした円柱供試体を用いて測定を行った。5 週実験時のコンクリート強度は N タイプで $\sigma_B = 27.2\text{N/mm}^2$,

表－4 コンクリートの性質

タイプ		圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	ヤング係数 E (測定値) ($\times 10^4\text{N/mm}^2$)	割裂強度 (N/mm ²)
N	5週実験時	27.2	2.23	2.77
NK	1年経過実験時	38.2	2.74	2.67
R	5週実験時	22.4	1.32	1.41
RK	1年経過実験時	31.7	1.88	2.00

打設時スランブ計測値：19.0cm(Nタイプ), 19.5cm(Rタイプ)

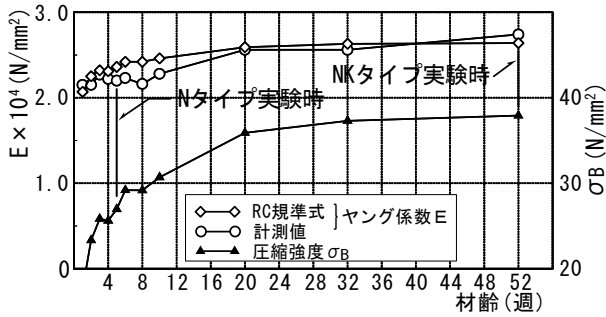


図-3 ヤング係数と圧縮強度の推移
(N・NK タイプ)

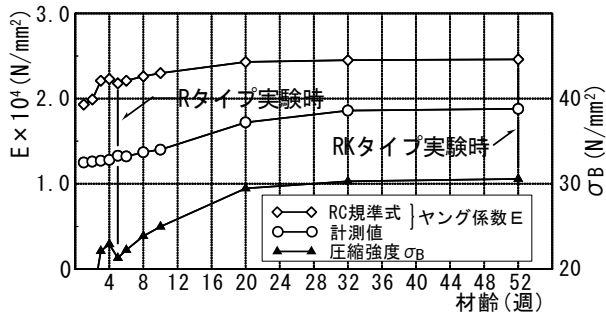


図-4 ヤング係数と圧縮強度の推移
(R・RK タイプ)

R タイプで $\sigma_B = 22.4 \text{ N/mm}^2$ であり、1年経過実験時ではNKタイプで $\sigma_B = 38.2 \text{ N/mm}^2$ 、RKタイプで $\sigma_B = 31.7 \text{ N/mm}^2$ となり、両タイプとも1年間で40%ほど圧縮強度が増加した。ひずみゲージにより測定した $1/3 \sigma_B$ 時のヤング係数は、普通コンクリートを用いたN・NKタイプでは日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応力度設計法一」(以降、RC規準と称する)に示されている圧縮強度を用いて求める計算値と良く合っていた(図-3の○印)が、再生コンクリートを用いたR・RKタイプでは再生骨材に付着するモルタルの影響により計算値と比較して小さい値となった(図-4の○印)。

4. 乾燥収縮ひび割れの性状

図-5に再生コンクリートを使用した被り厚さ $C_s = 10 \text{ mm}$ の10RKについて乾燥収縮ひび割れの進展状況を例示する。再生コンクリートを使用したRKタイプは材令8週(図-5 a)で打設面側から乾燥収縮ひび割れが発生した。被り

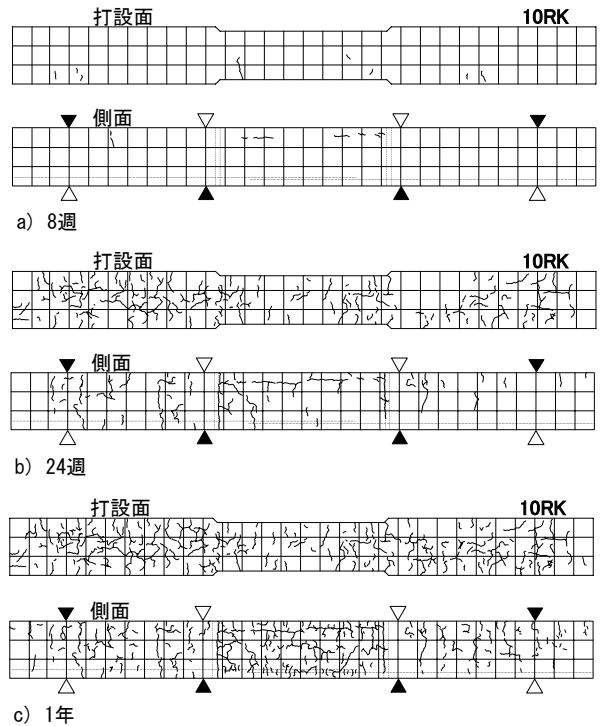


図-5 乾燥収縮ひび割れの進展状況の例示
(10RK 打設面・側面)

厚さが10mmの試験体は被り厚さが20mmと30mmの試験体ではあまりみられない上端筋に沿ったひび割れが側面に発生した。材令が24週(約6ヶ月)になると微細な乾燥収縮ひび割れが試験体全面に多数発生した(図-5 b))。さらに6ヶ月以降1年経過時の期間では打設面の乾燥収縮ひび割れの増加は比較的少なかったが、側面では乾燥収縮ひび割れの増加が著しかった。普通コンクリートを使用したNKタイプでは被り厚さ $C_s = 10 \text{ mm}$ および 20 mm とした10NKと20NKのコンクリート打設面と側面の上端筋付近に乾燥収縮ひび割れが数本みられた程度であった。 $C_s = 30 \text{ mm}$ とした30NKは1年経過した時点で乾燥収縮ひび割れは発生しなかった。

5. 実験結果

表-5に実験結果一覧を示す。荷重は2点集中による正負繰返し荷重を行った。加力の履歴は、梁の曲げ強度略算式により計算した主筋の応力度 σ_t を 100 N/mm^2 ずつ増加させ、それぞれの応力度で各1回正負繰返しを行った。表中の

表-5 実験結果一覧

試験体名		最大荷重 Pmax (kN)	付着割裂強度 $\tau u \text{ exp.}$ (N/mm ²)	破壊形式
1)	10N	223.2	2.51	付着割裂 破壊
2)	20N	256.5	2.88	
3)	30N	282.4	3.17	
4)	10NK	244.0	2.74	
5)	20NK	242.5	2.72	
6)	30NK	285.5	3.20	
7)	10R	185.5	2.08	
8)	20R	216.5	2.43	
9)	30R	224.6	2.52	
10)	10RK	175.0	1.96	
11)	20RK	222.8	2.50	
12)	30RK	241.3	2.71	

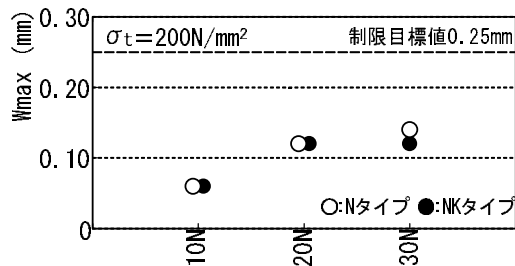


図-6 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅(N・NKタイプ)

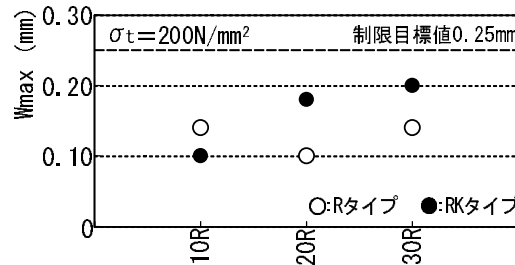


図-7 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅(R・RKタイプ)

最大荷重 Pmax は正荷荷時における付着割裂破壊時の荷重である。

5.1 主筋長期許容応力度時の曲げひび割れ

図-6および図-7は主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅Wmaxを示したものである。ひび割れ幅はマイクロスコップ(最小目盛り0.02mm)を用いて、正荷荷時の純曲げ区間で測定した。Wmaxは普通コンクリートを使用したN・NKタイプは0.06~0.14mm、再生コンクリートを使用したR・RKタイプは0.10~0.20mmとなり、再生コンクリートを使用した場合には若干のば

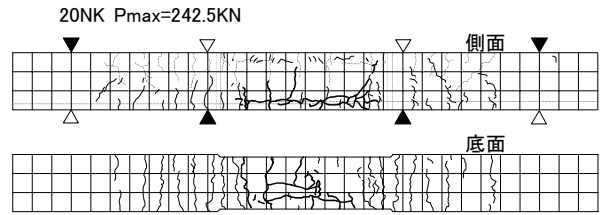


図-8 最終破壊形状の例示
(20NK 側面・底面)

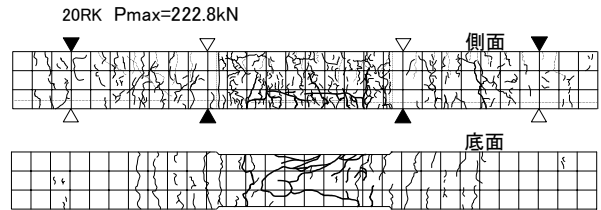


図-9 最終破壊形状の例示
(20RK 側面・底面)

らつきがあった。普通コンクリートを使用したN・NKタイプは5週と1年経過時でWmaxに差異が認められなかった。一方、再生コンクリートを使用したR・RKタイプでは5週で荷荷したRタイプに比べ、1年経過時で荷荷したRKタイプは荷荷前に乾燥収縮ひび割れが発生していたことによりWmaxが大きくなる傾向があった。図中にはRC規準の制限目標値(0.25mm)を示したが、Wmaxは再生コンクリートを使用して1年経過時で荷荷したRKタイプにおいても制限目標値以内となっていた。

5.2 最終破壊形状

図-8および図-9は被り厚さが20mmの試験体を例に1年経過後に荷荷した試験体の最終破壊形状を示したものである。乾燥収縮ひび割れがほとんど発生していない普通コンクリートを使用した図-8の20NKは荷荷による曲げひび割れや付着ひび割れが新規に発生した。一方、再生コンクリートを使用した図-9の20RKは荷荷により新規に発生したひび割れの他に荷荷前に発生していた微細な乾燥収縮ひび割れが順次つながりその幅も広がって行く様子が観察された。被り厚さの変化によらず最終破壊形状は想定どおり重ね継手区間に付着ひび割れが進展

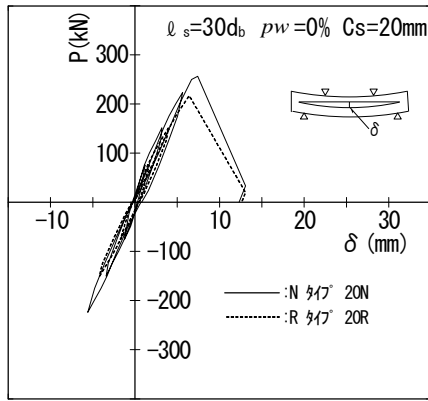


図-10 荷重-たわみ曲線の例示
(N・R タイプ 5週実験)

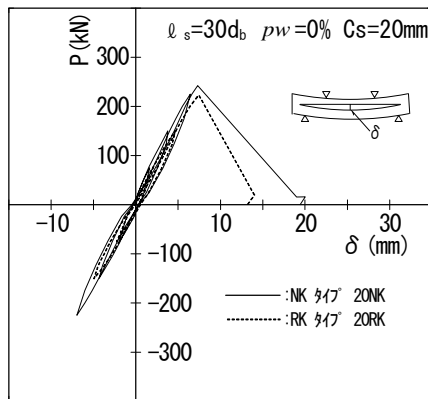


図-11 荷重-たわみ曲線の例示
(NK・RK タイプ 1年実験)

するサイドスプリット型であった。普通コンクリートの20NKおよび再生コンクリートの20RKはともに底面の純曲げ区間にも主筋に沿った付着ひび割れが観察された。

5.3 荷重-たわみ関係

図-10 および図-11 に5週実験と1年実験の荷重-たわみ曲線を被り厚さが20mmの試験体を例に示す。変位は支点と梁中央の相対変位を測定した。表-5の実験結果一覧に示したように最大荷重 P_{max} は各タイプとも被り厚さが大きくなるほど上昇する傾向が認められた。図-10 と図-11 の荷重-たわみ曲線から再生コンクリートを用いた R・RK タイプは普通コンクリートを用いた N・NK タイプに比べ剛性は僅かに低くなった。また R・RK タイプはコンクリート強度が N・NK タイプに比べ低い値であったた

め最大荷重も低下した。

5.4 付着割裂強度

ここでは再生コンクリートと鉄筋との付着特性を把握する上で特に重要と思われる付着破壊時の付着割裂強度について検討を行う。付着割裂強度の実験値は式(1)により求め平均付着応力度で評価した。

$$\tau_{u \text{ exp.}} = \frac{M_u}{j \cdot \phi \cdot l_s} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

ここで M_u :最大曲げモーメント(N・mm)
 j :7/8d (d:梁有効せい 260.5mm)
 ϕ :鉄筋の周長(4-D19 240mm)
 l_s :重ね継手長さ(30db 570mm)

付着破壊の破壊形式は梁内の主筋の配置により異なることから、付着割裂強度も主筋の配置に伴い変化することが指摘されている³⁾。本研究では主筋のあき間隔は変えずに被り厚さのみを変化させているので被り厚さにより付着割裂強度の比較を行った。図-12 に5週実験の付着割裂強度と被り厚さの関係を示す。普通コンクリートのNタイプと再生コンクリートのRタイプともに付着割裂強度は側面被り厚さが小さくなるにつれて減少した。このことは被り厚さが小さい場合には隅主筋を拘束するコンクリートの付着が早期に劣化するためと考える。図-13 に1年経過後に載荷したNKタイプとRKタイプの付着割裂強度と被り厚さの関係を示す。5週実験と同様に付着割裂強度は側面被り厚さが小さくなるにつれて減少した。図-12 の5週実験では、Nタイプのコンクリート強度がRタイプに比べ高いため、NタイプはRタイプに対し付着割裂強度が平均で約19%増加した。図-13 の1年実験では再生コンクリートを用いたRKタイプであっても図-12 の5週実験と同等の付着割裂強度が得られた。また図-13 のNKタイプはRKタイプに対し付着割裂強度が5週実験とほぼ近い約21%増加していることから、再生コンクリートを用いた梁部材に発生した乾燥収縮ひ

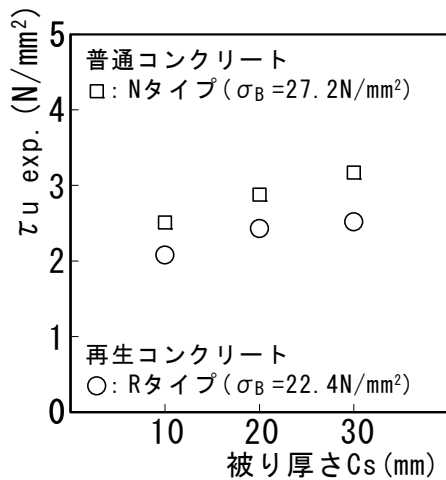


図-12 付着割裂強度と被り厚さの関係
(N・Rタイプ 5週実験)

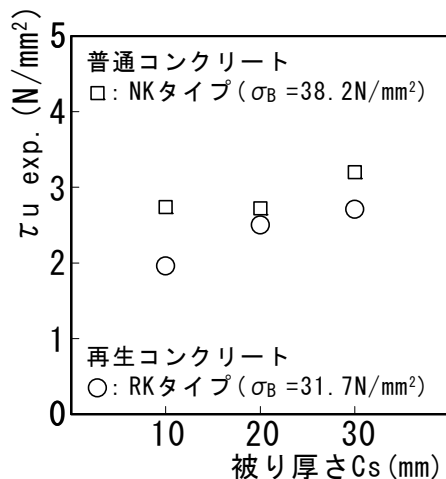


図-13 付着割裂強度と被り厚さの関係
(NK・RKタイプ 1年実験)

び割れの影響は僅かであったものとする。本実験では粗骨材にのみ再生骨材を利用した再生コンクリートを使用しており、この再生コンクリートの品質であれば普通コンクリートを使用した梁部材と比較した場合に、乾燥収縮ひび割れが付着割裂強度に及ぼす影響は側面被り厚さを変化させても僅かであったものとする。

6. 結論

再生コンクリートを用いた梁部材の付着特性について側面被り厚さの影響を普通コンクリートの場合と比較を行い検討した結果、本実験の範囲内で以下に示す知見が得られた。

(1)普通コンクリートの場合は打設後1年経

過して載荷した際の主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅は5週実験時と差異がなかったが、再生コンクリートの場合には1年経過後の最大曲げひび割れ幅が乾燥収縮ひび割れの影響により大きくなる傾向を示した。

(2)普通コンクリートと再生コンクリートともに、主筋のあき間隔を一定とした本実験の梁部材においては、側面被り厚さが小さくなるにつれて付着割裂強度は減少する傾向が認められた。

(3)本実験で用いた再生コンクリートでは1年実験の付着割裂強度は5週実験と比較してほぼ同等であり、乾燥収縮ひび割れの影響は僅かであった。

以上、粗骨材にのみ再生骨材を用いた再生コンクリート梁部材の付着特性は、乾燥収縮ひび割れの影響により普通コンクリートの場合に比較して曲げひび割れ幅が大きくなる傾向が確認されたが、付着割裂強度については乾燥収縮ひび割れの影響は僅かであった。今後はこれらの現象と再生コンクリートの乾燥収縮率との関わりや、細骨材にも再生骨材を利用したより低品質な再生コンクリートを用いた場合の付着特性について検討を行っていきたい。

謝辞

本研究に際し、東京建設廃材処理協同組合 葛西再生コンクリート工場よりコンクリートを提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中礼治, 鳩山順夫, 但木幸男, 西浦範昭, 大芳賀義喜:再生コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造に関する研究(その1 はり部材の曲げ, せん断, および付着破壊に関する実験), 日本建築学会構造系論文集,第 518 号,pp.79~86,1999年4月
- 2) 日本コンクリート工学協会:廃棄物のコンクリート材料への再資源化研究委員会報告書,2003年6月
- 3) 藤井 栄, 森田司郎:異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第1報 付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果-,日本建築学会論文報告集,第319号,pp.47~55,1982年9月