

# 再生骨材とごみ溶融スラグを利用した鉄筋コンクリート建築構造物の再生化技術の開発

## 高流動再生コンクリート梁部材の付着特性

師橋憲貴(日大生産工・専任講師), 櫻田智之(日大生産工・教授),  
小松 博(日大生産工・准教授), 三橋博巳(日大理工・教授)

1. はじめに 近年, 大量に需要が見込まれる一般のコンクリート用骨材へ再生骨材が普及するよう, 主に骨材の吸水率の大きさとH・M・Lの3等級に規格化した再生骨材のJISが制定されるに至った<sup>1),2),3)</sup>。3等級のうち, 吸水率が5%以下の再生骨材Mはコンクリート塊を破碎のみで製造した骨材であり, 付着するモルタル分や微粉末の影響で吸水率が高く, 乾燥収縮が大きいと乾燥収縮ひび割れが発生しやすい。そのため, JIS A 5022<sup>2)</sup>(再生骨材Mを用いたコンクリート)では, 乾燥収縮を受けにくい地中梁などの地下構造物への適用が提案されている。一方, 地下構造物は建物の高層化にともない大深度化, 大型化が進み, 鉄筋量が多くなり配筋が混んでくる傾向にある。このときコンクリートの密実な充填のためにはコンクリートの品質は高流動性が求められる<sup>4)</sup>。そこで本研究は再生骨材の用途拡大への取り組みとして, 再生コンクリートの高流動化に着目した。既往の研究において再生骨材を高流動コンクリートに適用した研究はみられるが<sup>5)</sup>, 高度処理を施し普通骨材と同様に扱うことができる再生骨材Hを用いた研究が主であり, 比較的簡易な手法で製造される再生骨材M, Lを適用した研究はみられない。

これらのことから, 本研究では中品質再生粗骨材(再生粗骨材 M)を用いた高流動コンクリート(以下, 高流動再生コンクリートと称す)梁部材の付着特性について検討を行う。また, 中品質再生粗骨材を用いる際の特徴として乾燥収縮ひび割れの発生が顕著となるが, 乾燥収縮ひび割れは構造物の耐久性に影響を及ぼすことが懸念される。そこで乾燥収縮ひび割れの抑制を目的として, 高流動再生コンクリートに乾燥収縮低減剤を添加した場合の付着特性についても検討を行った。

## 2. 実験概要

2.1 試験体詳細 表1に試験体種別を示す。本実験で用いた高流動再生コンクリートは, 再生粗骨材を普通粗骨材に対して置換する割合(以下, 置換率と称す)を50%としたFMシリーズ, さらに再生細骨材の有効利用を考え再生細骨材の置換率を50%としたFMMシリーズの2シリーズを作成した。各々のシリーズには, 乾燥収縮ひび割れの抑制を目指し, 乾燥収縮低減剤を添加する高流動再生コンクリートを計画した。

表1 試験体種別

試験体名	シリーズ 置換率	載荷時期
1) FM	FMシリーズ 砕石 50% 再生粗骨材 50% 天然砂 100% 再生細骨材 0%	5年
2) A-FM		
3) FM1K		1年
4) A-FM1K		
5) FMM	FMMシリーズ 砕石 50% 再生粗骨材 50% 天然砂 50% 再生細骨材 50%	5週
6) A-FMM		
7) FMM1K		1年
8) A-FMM1K		

重ね継手長さ $l_s=30d_b=570$ (mm)共通

A: 乾燥収縮低減剤を $10\text{kg/m}^3$ で添加

表2 再生コンクリートの調合

シリーズ	W/C (%)	単位質量( $\text{kg/m}^3$ )				
		水	セメント	細骨材		粗骨材
FMシリーズ	53.7	175	326	天然砂	砕石	中品質再生粗骨材
				891	456	410
FMMシリーズ	53.7	175	326	天然砂	再生砂	砕石
				442	390	456

表2に再生コンクリートの調合を、表3に再生骨材の品質を、また表4に使用材料の品質を示す。本研究では、JIS A 5022 に示される再生骨材を用いたコンクリートの呼び強度の上限値 36N/mm<sup>2</sup>を目標として、試し練りの結果を基に調合と混和剤添加量を決定した。混和剤については、適度な粘性を有し、流動性に優れ、かつ高い充填性が期待できるセルロース系増粘剤を用いた高流動コンクリートとした。また、セルロース系増粘剤との相性を考慮して、高性能AE減水剤にはポリカルボン酸系のものを用いた。さらに、コンクリート打設前に空気量の調整するためにAE剤と消泡剤を添加した。

表3 再生骨材の品質

シリーズ	骨材	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	実積率 (%)	吸水率 (%)
FM FMM	砕石	2.72	63.8	0.77
	再生粗骨材	2.33	61.8	5.40
	天然砂	2.54	66.2	2.05
	再生砂	2.05	70.8	10.86

表4 使用材料の品質

材料	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	田倉産山砂	絶乾密度2.54g/cm <sup>3</sup> 吸水率2.05% 実積率66.2%
	再生細骨材	絶乾密度2.05g/cm <sup>3</sup> 吸水率10.86% 実積率70.8%
粗骨材	佐野産砕石	絶乾密度2.72g/cm <sup>3</sup> 吸水率0.77% 実積率63.8% 最大寸法20mm
	再生粗骨材	絶乾密度2.33g/cm <sup>3</sup> 吸水率5.40% 実積率61.8% 最大寸法20mm
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	増粘剤	セルロース系
	AE剤	ロジン系界面活性剤
	消泡剤	ポリオキシアルキレンアルキルエーテル系
	乾燥収縮低減剤	グリコールエーテル系

表5 混和剤の添加量

試験体名	高性能AE減水剤 (C×%)	AE剤 (%)	消泡剤 (%/AE剤)	増粘材 (kg/m <sup>3</sup> )	乾燥収縮低減剤 (kg/m <sup>3</sup> )
FM	2.55	-	0.04	0.3	-
A-FM	2.55	-	0.04	0.3	10
FMM	2.80	0.042	0.04	0.3	-
A-FMM	2.80	0.342	0.04	0.3	10

表6 打設時の再生コンクリートの性状

試験体名	スランブ (cm)	フロー (cm)	空気量 (%)
FM	-	52.0×51.0	5.6
A-FM	-	43.0×43.5	1.4
FMM	-	46.5×40.5	3.9
A-FMM	19.0	34.5×32.0	0.9



写真1 打設時のフロー試験 (FM)

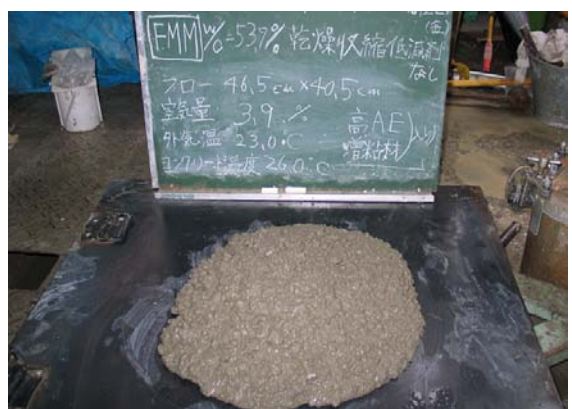


写真2 打設時のフロー試験 (FMM)

2.2 混和剤添加量とフレッシュ性状 表5に混和剤の添加量を、また表6に打設時のフレッシュコンクリートの性状を示す。再生粗骨材の置換率を50%としたFM、さらに再生細骨材の置換率も50%としたFMMのフロー値を比較すると、FMMのフロー値(46.5×40.5cm)はFMのフロー値(52.0×51.0cm)に比較して小さく、再生細骨材を用いると流動性が低下する傾向が認められた(写真1および写真2)。この傾向は既往の研究でも見られ、再生細骨材に含まれる水和セメント分に高性能AE減水剤が吸着されるためであると考え<sup>6)</sup>。

2.3 試験体形状 図1に試験体形状を、また図2に試験体断面を示す。試験体は付着割れ強度を検討するため純曲げ区間の下端に長さ30db(db:公称径)の重ね継手を設けた単純梁形式とした。

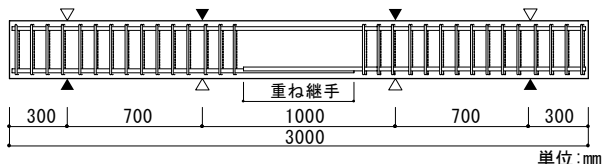


図1 試験体形状

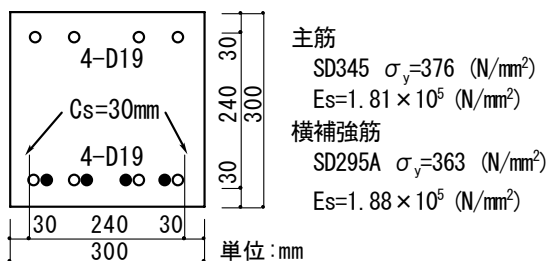


図2 試験体断面

3. 乾燥収縮率 本項以降は、再生コンクリートを高流動化したことによる影響を把握するため、再生骨材の置換率が同一で高流動化していない既往の再生コンクリート(RM, RMM)と比較検討を行う<sup>7)</sup>。図3は各試験体の鉄筋コンクリート梁の打設時に用いたコンクリートで作製した長さ変化試験体の乾燥収縮率の推移を示したものである。材齢56週時の乾燥収縮率は、再生粗骨材の置換率を50%としたFMは約800×10<sup>-6</sup>、さらに再生細骨材の置換率も50%としたFMMは約940×10<sup>-6</sup>となった。これは、FMMに吸水率の高い再生細骨材を用いたことが要因と考えられる。ま

た、乾燥収縮低減剤の効果によりA-FMは約160×10<sup>-6</sup>、A-FMMでは約180×10<sup>-6</sup>程、乾燥収縮率が低減し改善が認められた。このことより、高流動再生コンクリートに乾燥収縮低減剤を添加した場合において、乾燥収縮率が低減される効果が確認できた。さらに、FMと再生骨材の置換率が同一であるRMの乾燥収縮率は約980×10<sup>-6</sup>、FMMと再生骨材の置換率が同一であるRMMは約1120×10<sup>-6</sup>となり、再生コンクリートを高流動化することで乾燥収縮率が低減される良好な傾向が認められた。

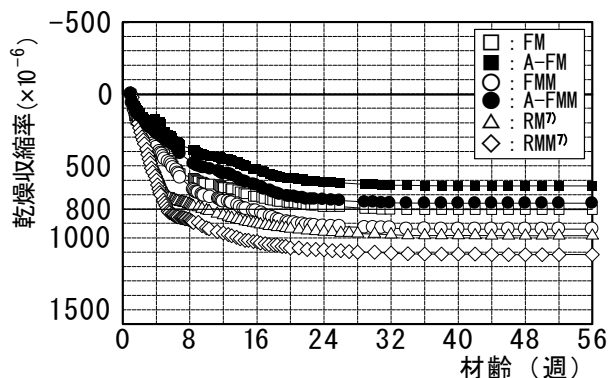


図3 乾燥収縮率の推移

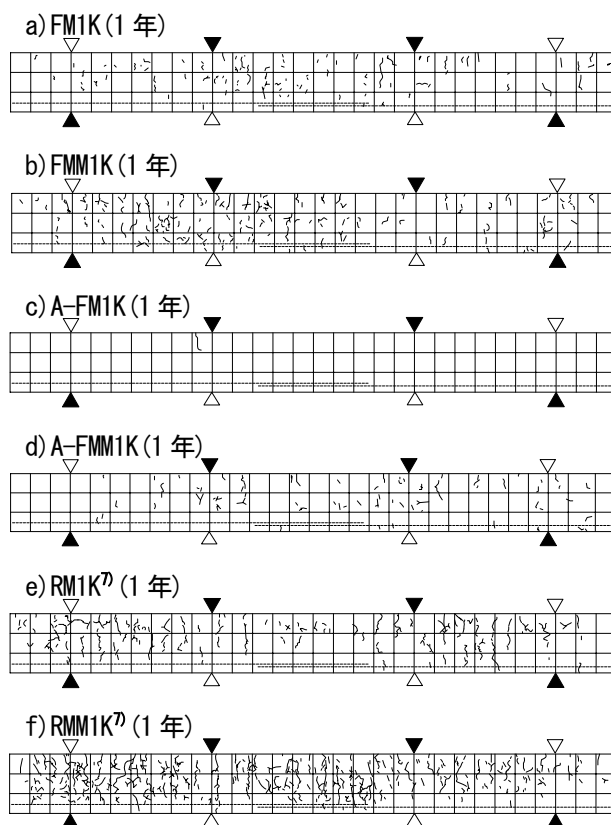


図4 1年経過時の乾燥収縮ひび割れ(側面)

4. 乾燥収縮ひび割れ性状 図4に材齢1年経過時の乾燥収縮ひび割れを示す。図4 a)のFM1Kの乾燥収縮ひび割れの発生状況は、図4 b)のFMM1Kに比べて減少し、図4 e)のRM1Kの乾燥収縮ひび割れの発生状況と比較しても、乾燥収縮ひび割れの減少が認められた。次に、乾燥収縮低減剤を添加した図4 c), d)のA-FM1K, A-FMM1Kの乾燥収縮ひび割れの発生状況は、添加していないFM1K, FMM1Kに比べて大幅に抑制されることが確認できた。このことより、図3に示した乾燥収縮率の低減と同様に、乾燥収縮ひび割れの発生状況においても乾燥収縮低減剤の効果が確認できた。

5. 実験結果 表7に実験結果一覧を示す。FM, A-FMM以外の試験体は付着割裂破壊が発生する前に曲げ降伏が先行し、その後サイドスプリット型の付着割裂破壊が発生し耐力が低下した。これらの破壊形式は、コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B$ が $36\text{N/mm}^2$ を超え付着耐力が曲げ耐力を上回ったためであると考えられる。写真3～写真6に最終破壊形状を示す。FMは重ね継手区間に付着ひび割れが急激に進展するサイドスプリット型の付着割裂破壊で想定していた破壊形式となった。一方FMMは曲げ降伏が認められたが、その後間

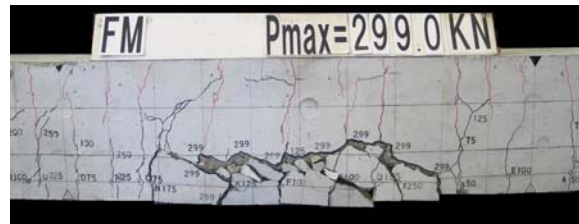


写真3 最終破壊形状 (FM・側面)

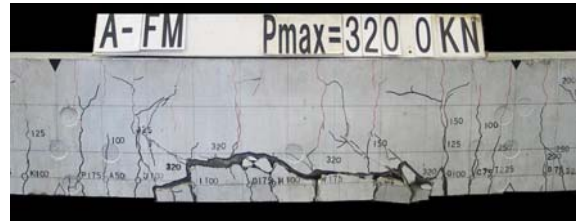


写真4 最終破壊形状 (A-FM・側面)



写真5 最終破壊形状 (FMM・側面)

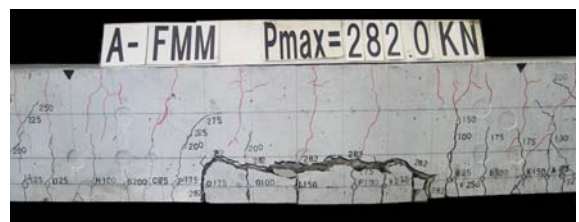


写真6 最終破壊形状 (A-FMM・側面)

表7 実験結果一覧

試験体名	コンクリート強度 $\sigma_B$ ( $\text{N/mm}^2$ )	最大曲げひび割れ幅 $W_{max}$ (mm)	最大荷重 $P_{max}$ (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u \text{ exp.}}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	破壊形式
1) FM	35.5	0.14	299.0	3.36	S
2) A-FM	42.7	0.10	320.0	(3.59) <sup>*1</sup>	FS
3) FM1K	44.8	0.18	315.5	(3.54) <sup>*2</sup>	FS
4) A-FM1K	53.5	0.14	318.0	(3.57) <sup>*3</sup>	FS
5) FMM	36.0	0.15	299.0	(3.36) <sup>*4</sup>	FS
6) A-FMM	37.0	0.12	282.0	3.17	S
7) FMM1K	45.6	0.16	325.0	(3.65) <sup>*5</sup>	FS
8) A-FMM1K	46.6	0.10	297.0	(3.33) <sup>*6</sup>	FS

$\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度

最大曲げひび割れ幅 $W_{max}$ は $\sigma_t=200\text{N/mm}^2$ ( $P=150\text{kN}$ )時

S: 付着割裂破壊

FS: 曲げ降伏後の付着割裂破壊

\*1 A-FM: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時  $P=320.0$ (kN),  $\delta=19.22$ (mm)

\*2 FM1K: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時  $P=315.5$ (kN),  $\delta=17.12$ (mm)

\*3 A-FM1K: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時  $P=318.0$ (kN),  $\delta=32.54$ (mm)

\*4 FMM: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時  $P=299.0$ (kN),  $\delta=11.09$ (mm)

\*5 FMM1K: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時  $P=325.0$ (kN),  $\delta=31.74$ (mm)

\*6 A-FMM1K: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時  $P=297.0$ (kN),  $\delta=11.60$ (mm)

もなく付着割裂破壊が発生したため、最終破壊形状はFMと同様であった。

5.1 変位性状 図5および図6に各シリーズの荷重-変位曲線を例示する。変位は支点と梁中央の相対変位を測定した。加力の履歴は主筋の引張応力度と曲げひび割れ幅の関係を検討するため、日本建築学会 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 許容応力度設計法一に示される梁の曲げ強度略算式により計算した主筋の応力度( $\sigma_t$ )を100, 200, 300 $\text{N/mm}^2$ と100 $\text{N/mm}^2$ 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。図5および図6は1年経過時の試験体について、各シリーズで乾燥収縮低減剤の添加の有無を比較したものである。初期剛性は負方向の加力時で乾燥収縮低減剤を添加した試験体の

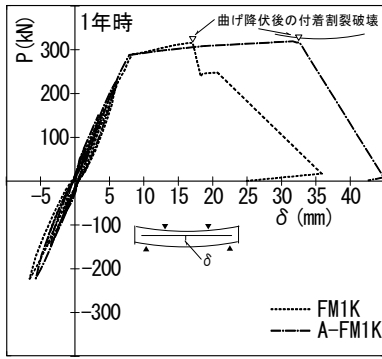


図5 荷重—たわみ曲線 (FM シリーズ・1 年時)

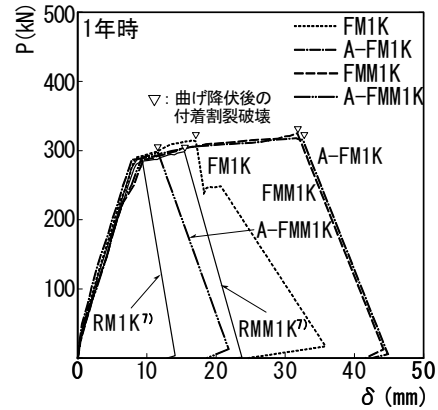


図8 荷重—たわみ曲線 (包絡線・1 年時)

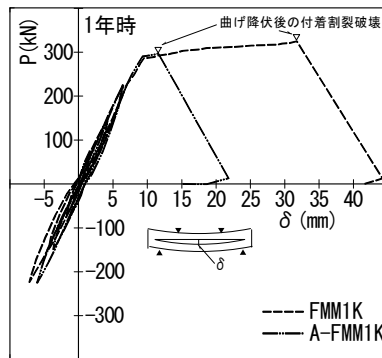


図6 荷重—たわみ曲線 (FMM シリーズ・1 年時)

方が若干剛性が高くなったが、正方向の加力時では剛性の差異は認められなかった。

図7および図8に各試験体の荷重—変位曲線(正方向の包絡線)を示す。5週時, 1年経過実験時ともに, 再生粗骨材の置換率を50%としたFM, さらに再生細骨材の置換率も50%としたFMMの初期剛性は同等であり, 乾燥収縮低減剤を添加した場合においても既往の高流動化していない再生コンクリートと同様の傾向を示した。

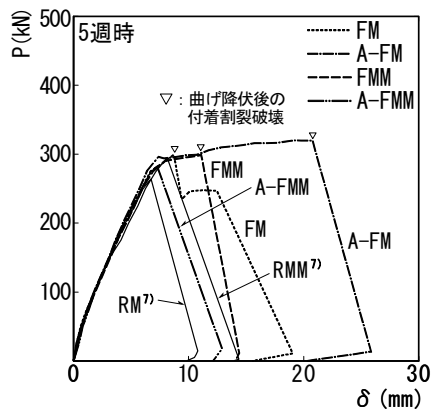


図7 荷重—たわみ曲線 (包絡線・5 週時)

5.2 付着割裂強度の評価 図9および図10に各試験体の付着割裂強度を示す。付着割裂強度は式(1)により求めた。

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

ここで  $M_u$  : 最大曲げモーメント ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ )

$j$  :  $(7/8)d$  ( $d$  : 梁有効せい 260.5mm)

$\phi$  : 鉄筋周長 (4-D19 240mm)

$l_s$  : 重ね継手長さ ( $30d_s$ , 570mm)

曲げ降伏した試験体については, 付着割裂破壊時の荷重を用いて付着割裂強度を算出し, ( ) を付けて表記した。5週実験, 1年経過実験ともに本実験の高流動再生コンクリートの付着割裂強度は, 既往の高流動化していない再生コンクリートより若干高い傾向を示した。これは, JIS A 5022 再生骨材Mを用いたコンクリートに示される呼び強度の上限値  $36\text{N/mm}^2$  を目標に, 高流動再生コンクリートの圧縮強度を設定したので, 本実験のコンクリートの圧縮強度が高くなったことによるものと考えられる。また, FMシリーズに乾燥収縮低減剤を添加した場合, 付着割裂強度は添加していない場合に比べ同等以上となることが認められた。FMMシリーズに乾燥収縮低減剤を添加すると付着割裂強度が若干低下する傾向が認められた。この傾向は, 高流動化していない既往の再生コンクリート (RM, RMM シリーズ) でも見られ, 再生細骨材と乾燥収縮低減剤を併用すると付着割裂強度が減少する傾向にあることが確認できた。

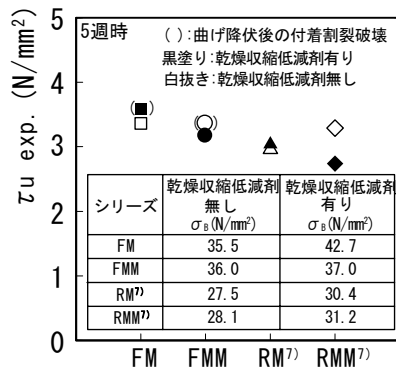


図9 付着割裂強度(5週時)

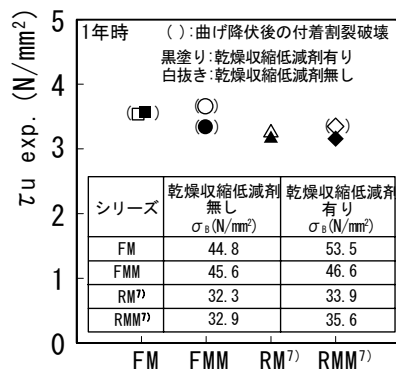


図10 付着割裂強度(1年時)

**6. 結論** 中品質再生粗骨材を用いた高流動再生コンクリート梁部材の付着特性について検討した結果、本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) 本研究で用いた高流動再生コンクリートでは、再生細骨材を用いるとフレッシュ性状における流動性の低下が認められた。
- 2) 乾燥収縮低減剤を添加した試験体の乾燥収縮ひび割れの発生状況は、乾燥収縮率の改善に起因すると考えられる乾燥収縮ひび割れの減少傾向が確認できた。
- 3) 細骨材に天然砂を100%使用し乾燥収縮低減剤を添加した場合は添加していない場合に比べ同等以上の付着割裂強度が得られることが確認できた。

以上、本研究で扱った高流動再生コンクリートは、高流動化していない再生コンクリートに比べ乾燥収縮性状、付着割裂強度において良好な結果が得られた。さらに、乾燥収縮低減剤を使用することで乾燥収縮率、乾燥収縮ひび割れの抑制効果が認められた。これにより、中品質再生粗骨材を用いた高流動再生

コンクリート梁部材の建築構造部材への適応の可能性が見出せたと考える。しかし、本研究のコンクリートの圧縮強度は普通強度領域の上限値となる $36\text{N/mm}^2$ であったので、高流動コンクリートでの一般的な強度領域である $40\text{N/mm}^2$ 、 $50\text{N/mm}^2$ クラスのコンクリート強度とした場合の付着特性について今後検討を行ってきたい。

## 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の細野知之氏には再生コンクリートの手配で御協力をいただきました。また、混和剤メーカーF社の方々には調合計画において貴重な御助言をいただきました。ここに記して深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本工業規格：JIS A 5021(コンクリート用再生骨材H)，2005年3月
- 2) 日本工業規格：JIS A 5022(再生骨材Mを用いたコンクリート)，2007年3月
- 3) 日本工業規格：JIS A 5023(再生骨材Lを用いたコンクリート)，2006年3月
- 4) 横井謙二，松岡康訓，横田和直，坂本淳：高強度・高流動地下連続壁コンクリートの構造体強度，土木学会第49回年次学術講演会，1995年9月，pp. 376-377
- 5) 星野実，嵩英雄，古賀康男，志村重顕，黒岩義仁，杉山成明：高流動コンクリートの諸性質に及ぼす粗骨材種類の影響—その1 調査およびフレッシュコンクリートの性状—，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，2002年8月，pp. 1045-1046
- 6) 嵩英雄，戸堀悦雄，永田泰江，細田高明，入田雅文：再生骨材を用いた流動化コンクリートの諸性質—その1 流動化効果—，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，1997年9月，pp. 247-248
- 7) 師橋憲貴，桜田智之：乾燥収縮の抑制を目的とした再生コンクリート梁の付着性状，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，2008年9月，pp. 1165-1166