

# 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を用いたハーフ PCa 梁部材の付着割裂強度

師橋憲貴(日本生産工・准教授), 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** 従来、再生骨材は主に道路や駐車場の路盤材に使用されてきた。しかし近年、道路整備事業の受注が鈍化してきたことから、再生骨材の新たな有効利用として、コンクリートへの再利用化が求められている。現在再生骨材を用いたコンクリート(再生コンクリート)は JIS にて H, M, L の 3 等級に規格化<sup>1)2)3)</sup>されている。吸水率が約 5%以下の再生骨材 M を用いた再生コンクリートは構造部材への適用を許容しているが、吸水率が高いため乾燥収縮に不安がある。そのため乾燥収縮の影響を受けにくい、杭、耐圧版、基礎梁、鋼管充填コンクリートなど乾燥しにくい環境下への適用が JIS A 5022 にて推奨されている。<sup>2)</sup>一方、近年建築物の高層化が著しいことや、少子高齢化に伴う労働力の減少・高齢化を受け建設工事の円滑化、生産性の向上が求められている。そこで、筆者らは再生コンクリートをハーフプレキャスト(以下ハーフ PCa)の後打ちコンクリートに使用することで JIS A 5022 で推奨されている外気に触れない乾燥しにくい環境下での再生コンクリートの利用が可能と考えるとともに、工場生産が可能なハーフ PCa を用いることで建設工事円滑化、生産性の向上を目的とし、本研究に着手した。本報では高流動再生コンクリートを用いたハーフ PCa 梁部材の付着割裂強度として、コンクリート打設後 20 週経過時の乾燥収縮性状と 5 週経過時の付着性状についての検討を行い、後打ちコンクリートと同一置換率で既往のハーフ PCa 化していない試験体 FM、FMM<sup>4)</sup> および

**表-1 試験体詳細**

試験体名	シリーズ 骨材置換率	外郭部 コンク リート	載荷時期
1) FMPC	FMPCシリーズ 再生粗骨材 (50%) 砕石(50%) 天然砂(100%)	超高強度 繊維補強 コンク リート	5週経過時
2) FMPC1K			1年経過時
3) FMMPC	FMMPCシリーズ 再生粗骨材 (50%) 砕石(50%) 天然砂(50%) 再生砂(50%)		5週経過時
4) FMMPC1K			1年経過時
5) FM <sup>4)</sup>	FMシリーズ 再生粗骨材 (50%) 砕石(50%) 天然砂(100%)	無し	5週経過時
6) FM1K <sup>4)</sup>			1年経過時
7) FMM <sup>4)</sup>	FMMシリーズ 再生粗骨材 (50%) 砕石(50%) 天然砂(50%) 再生砂(50%)		5週経過時
8) FMM1K <sup>4)</sup>			1年経過時
9) 00N <sup>5)</sup>	00Nシリーズ 砕石(100%) 天然砂(100%)		5週経過時
10) 00NK <sup>5)</sup>			1年経過時

**表-2 調合表**

シリーズ	W/C (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )					
		水	セメント	粗骨材		細骨材	
				再生 粗骨材	砕石	再生砂	天然砂
FMPC	53.7	175	326	410	456	0	888
FMMPC	53.7	175	326	410	456	392	444

**表-3 混和剤添加量**

試験体名	高性能AE 減水剤	AE剤	増粘剤
	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )
FMPC	2.33	0.010	0.25
FMMPC	2.19	0.065	0.30

普通コンクリートの 00N<sup>5)</sup> との比較を行った。

## 2. 実験概要

**2.1 使用材料** 表-1 に試験体詳細を示す。本研究で使用した後打ちコンクリートは、再生骨材 M を普通粗骨材に対して置換率を 50%とした FMPC シリーズ、さらに再生砂の置換率も 50%とした FMMPCC シリーズの 2 シリーズとした。また、外郭部に使用したコンクリートは超高強度繊維補強コンクリート(以下 UFC)を使用した。

**2.2 調合条件** 表-2 に調合表を、表-3 に混和剤添加量を示す。本研究では JIS A 5022<sup>2)</sup>で示されている再生骨材 M を用いたコンクリートの呼び強度の上限値である 36N/mm<sup>2</sup>を目標に、試し練りの結果を基に調合を決定した。また、混和剤についても試し練りの結果を元に添加量を決定した。また、混和剤は増粘剤にセルロース系増粘剤を、高性能 AE 減水剤にポリカルボン酸系の物を添加した。また、コンクリート打設前に空気量の調整のため AE 剤を添加した。

**2.3 フレッシュ性状** 表-4 に骨材品質を、表-5 にフレッシュ性状を示す。写真1 に打設時のフロー試験 (FMPC) を、写真-2 に打設時のフロー試験 (FMMPCC) を示す。後打ちコンクリートに再生粗骨材の置換率を 50%とした FMPC と、さらに再生砂の置換率も 50%とした FMMPCC のフロー値を比較すると FMMPCC のフロー値は若干低くなった。この傾向は既往の研究でも見られ、再生砂の形状と吸水率が影響したものと考えられる<sup>4)6)</sup>。

**2.4 外郭部** 図-1 に試験体断面、図-2 に付着層断面を、図-3 に付着層表面図を示す。表-6 に UFC 強度を示す。ハーフ PCa の外郭部には UFC を使用し、厚さ 18mm の U 字型ハーフ PCa とした。UFC の使用材料は、プレミックス、水、減水剤さらに鋼繊維材を使用した。鋼繊維材は直径 0.1~0.2mm、長さ約 15mm で 1m<sup>3</sup>あたり 157kg 配合した<sup>5)</sup>。UFC の圧縮強度は 215N/mm<sup>2</sup>である。後打ちコンクリートとの付着面には、直径 10mm、深さ 3.6mm の円形凹を設けた。

表-4 骨材品質

シリーズ	使用骨材	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	実積率 (%)
FMPC FMMPCC	砕石	0.72	2.74	61.5
	再生粗骨材	5.36	2.46	61.6
	天然砂	2.27	2.58	67.5
	再生砂	12.03	2.24	60.9

表-5 フレッシュ性状

試験体名	スランプ (cm)	フロー (cm)	空気量 (%)
FMPC	-	61.5×59.5	3.2
FMMPCC	-	58.0×57.0	3.0

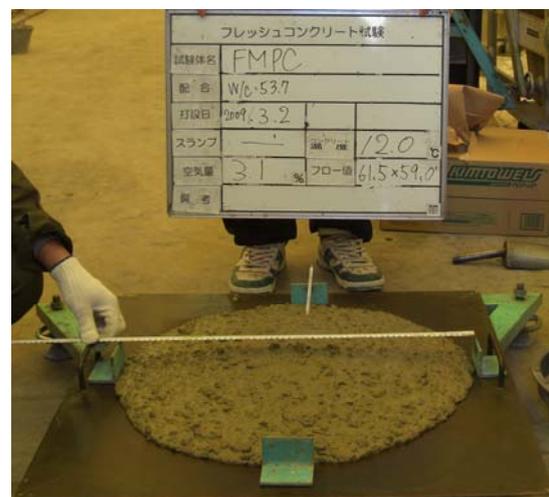


写真-1 打設時のフロー試験 (FMPC)



写真-1 打設時のフロー試験 (FMMPCC)

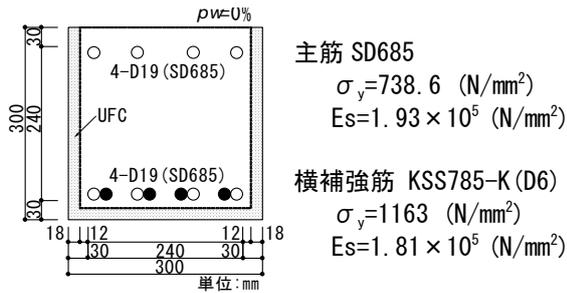


図-1 試験体断面



図-2 付着層断面<sup>7)</sup>

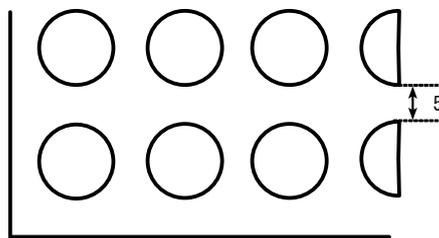


図-3 付着層表面<sup>7)</sup>

表-6 UFC 強度

	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )
圧縮強度	215
割裂強度	23.2

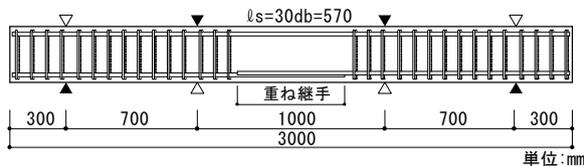


図-4 試験体形状

**5 試験体形状** 図-4 に試験体形状を示す。試験体は付着性状を検討するため下端に重ね継手を設けた単純梁形式で、重ね継手長さは30db (db: 主筋の公称直径) とし、重ね継手区間の横補強筋比は  $pw=0.0\%$  とした。主筋は上端と下端ともに 4-D19 を使用し、主筋から側面および底面までのかぶり厚さは U 字型ハーフ PCa 部を含み 30mm とし、サイドスプリット型の付着割裂破壊を想定した。

### 3. 乾燥収縮性状

**3.1 乾燥収縮率** 図-5 に長さ変化試験体の乾燥収縮率を示す。後打ちコンクリートの再生粗骨

材の置換率を 50% とした FMPC シリーズと再生砂の置換率も 50% とした FMMPC シリーズの乾燥収縮率は既往の同置換率の試験体 FM、FMM シリーズと概ね同様の傾向を示した。UFC の乾燥収縮率は  $100 \times 10^{-6}$  とほとんど乾燥収縮が見られなかった。

**3.2 乾燥収縮ひび割れ** 図-6 に 20 週時の梁試験体の乾燥収縮ひび割れ(上面)を、図-7 に 20 週時の梁試験体の乾燥収縮(側面)を示す。後打ちコンクリートの再生細骨材置換率を 50% とした FMPC とさらに再生砂の置換率 50% とした FMMPC はハーフ PCa 化していない同置換率の試験体に比べ目視で確認できる乾燥収縮ひび割れは減少した。これは、図-5 で示した UFC 外郭部の乾燥収縮率の低さが高流動再生コンクリートを用いたハーフ PCa 梁の乾燥収縮に有効であったと考える。

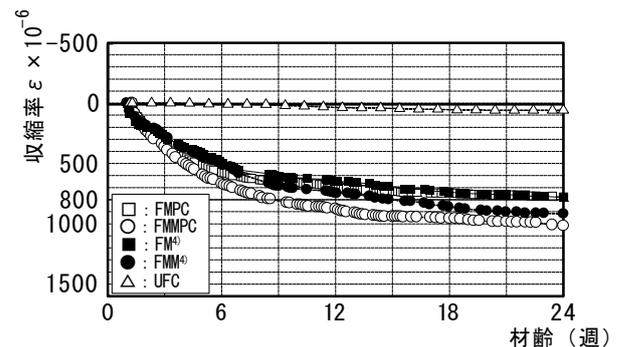
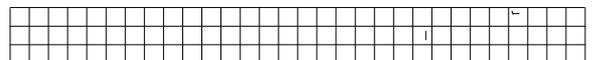


図-5 長さ変化試験体の乾燥収縮率

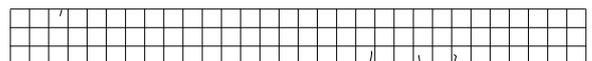
a) FMPC1K



b) FMMPC1K



c) FM1K<sup>4)</sup>



d) FMM1K<sup>4)</sup>

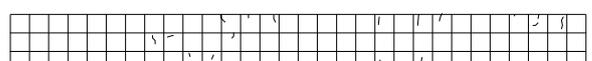


図-6 乾燥収縮ひび割れの発生状況

(20 週経過時 上面)

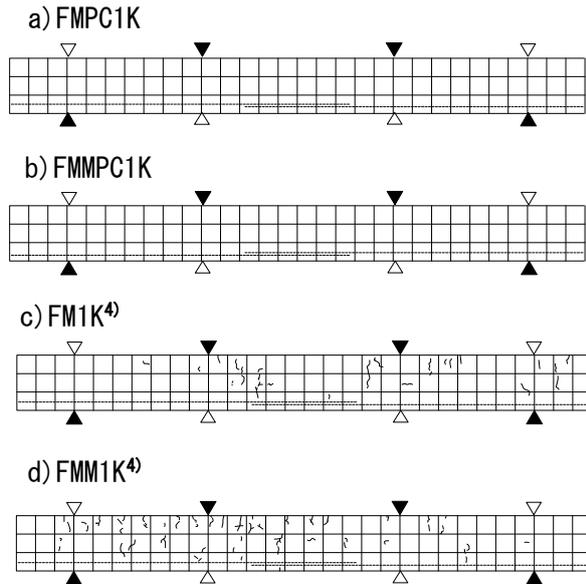


図-7 乾燥収縮ひび割れの発生状況  
(20週経過時 側面)

4. 実験結果 表-6 に実験結果一覧を示す。FMPC, FMMPC 共に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体力が低下した。これらの破壊形式は、ハーフ PCa 型枠に用いた UFC の圧縮強度  $\sigma_B$  が  $215\text{N/mm}^2$  と高い強度で側面を補強したため、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。

4.1 最終破壊形状 写真3~写真6に荷重した試験体の純曲げ区間の最終破壊形状を示す。写真7、写真8に最終破壊後の純曲げ区間の梁断面写真と、純曲げ区間外の梁切断写真を示す。本研究のハーフ PCa を用いた高流動再生コンクリート梁は、曲げ降伏が認められたが、その後もまもなく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が発生した。また、外殻部にハーフ PCa を使用したことで、従来のサイドスプリットのように鉄筋沿いにコンクリートかぶり全体が剥がれ落ちる事は無かった。これは、荷重試験後もハーフ PCa が純曲げ区間外では後打ちコンクリートとの付着を保ったためと考える。

表-6 実験結果一覧

試験体名	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	最大曲げひび割れ幅 Wmax (mm)	最大荷重 Pmax (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u\text{ exp}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊形式
1) FMPC	41.6	0.02	341.0	(3.83)* <sup>1</sup>	FS
3) FMMPC	33.4	0.04	337.0	(3.78)* <sup>2</sup>	FS
5) FM <sup>4)</sup>	35.5	0.14	299.0	3.36	S
7) FMM <sup>4)</sup>	36.0	0.18	299.0	(3.36)* <sup>3</sup>	FS
9) 00N <sup>5)</sup>	28.8	0.08	268.0	3.01	S

最大曲げひび割れ幅は  $\sigma_c = 200\text{N/mm}^2$  (P=150kN) 時  
 S: 付着割裂破壊 FS: 曲げ降伏後の付着割裂破壊  
 \*1 FMPCの曲げ降伏後の付着割裂破壊時 P=341.0(kN),  $\delta = 22.77$ (mm)  
 \*2 FMMPCは曲げ降伏後の付着割裂破壊時 P=299.0(kN),  $\delta = 60.55$ (mm)  
 \*3 FMMは曲げ降伏後の付着割裂破壊時 P=299.0(kN),  $\delta = 11.09$ (mm)

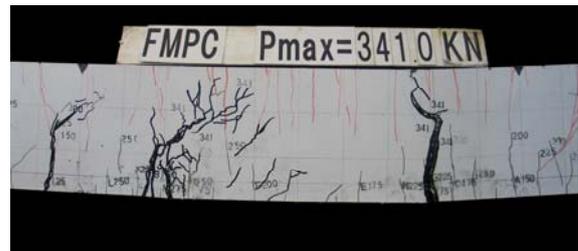


写真-3 最終破壊形状 (FMPC・側面)

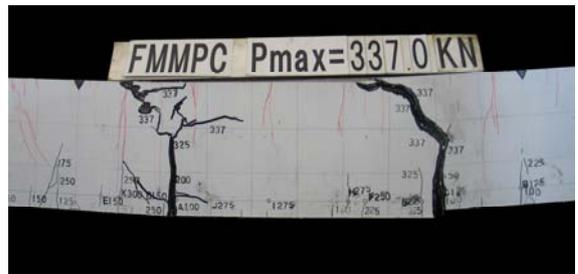


写真-4 最終破壊形状 (FMMPC・側面)

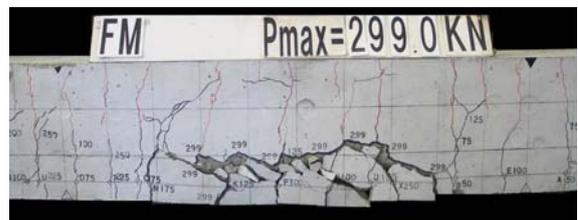


写真-5 最終破壊形状 (FMM・側面)



写真-6 最終破壊形状 (FMM・側面)



写真-7 梁切断写真  
(純曲げ区間)



写真-8 梁切断写真  
(純曲げ区間外)

4.2 変位性状 図-8 及び図-9 に荷重-変位曲線の包絡線を示す。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—に記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( $\sigma_s$ )を 100, 200, 300N/mm<sup>2</sup> 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。FMPC、FMMPC 共に曲げ降伏が認められ、その後付着割裂破壊により耐力が低下した。後打ちコンクリートの再生粗骨材の置換率を 50%とした FMPC と、再生砂の置換率も 50%とした FMMPC の初期剛性は、ハーフ PCa 化していない既往の同置換率の試験体(FM、FMM)、普通コンクリートの 00N と同様の傾向を示した。

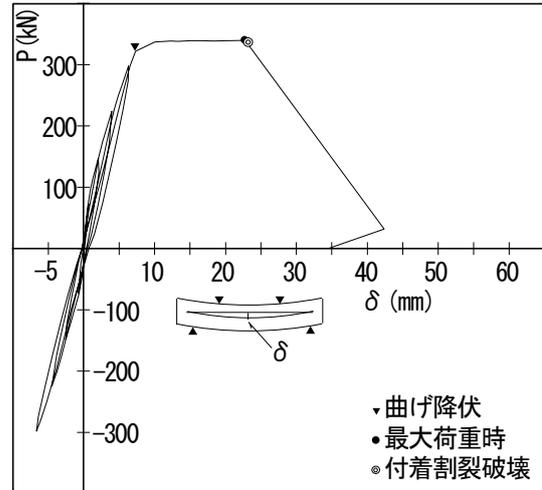


図-8 荷重-変位曲線 (FMPC)

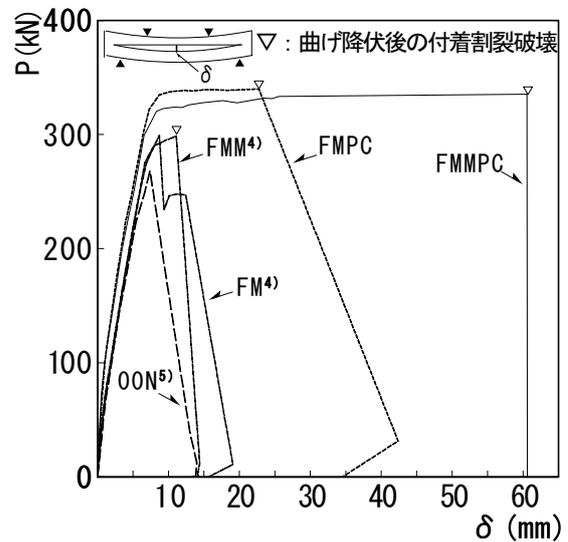


図-9 荷重-変位曲線 (包絡線)

4.3 付着割裂強度の検討 付着割裂強度は式(1)により求めた。

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

$M_u$ : 最大曲げモーメント (N・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 (30db 570mm)

図-10 に付着割裂強度を示す。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。本実験の高流動再生コンクリートを用いたハーフ PCa 梁 (FMPC、FMMPC) の付着割裂強度は

ハーフ PCa 化していない既往の高流動再生コンクリート梁 (FM、FMM) より若干高い傾向を示した。これは、UFC 製の U 字型外郭部の圧縮強度が  $215\text{N/mm}^2$  と高い強度で側面部を補強したためと考える。また、下端部での引張に関して非常に強い強度で補強されたことも付着割裂強度の上昇に影響したと考える。

**5. まとめ** 高流動再生コンクリートを用いたハーフ PCa 梁の基礎的研究として 20 週経過時の乾燥収縮性状と 5 週経過時の付着割裂強度の検討を行った結果、本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) 高流動再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れはハーフ PCa 化することで乾燥収縮率が同程度の後打ちコンクリートでも外郭部の乾燥収縮率に影響されたと考えられる乾燥収縮ひび割れの抑制が認められた。
- 2) 材齢 5 週経過実験時の高流動再生コンクリートを用いたハーフ PCa の付着割裂強度は、外郭部の補強に起因すると考えられる付着割裂強度上昇が認められた。

以上、本研究で扱った高流動再生コンクリートを用いたハーフ PCa 梁は外郭部の補強による乾燥収縮ひび割れの減少と付着割裂強度の上昇が認められた。しかし、今回付着割裂強度は曲げ降伏後の付着割裂破壊となってしまったので、今後は付着割裂先行を想定した研究に取り組む。また、打設後 1 年経過試験体での乾燥収縮性状と付着割裂強度について検討していく。

**謝辞** 本研究は文部科学省、平成 21 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」、S0803003、地域に根差した研究、「地域生活に安全・安心を与えるための建造物の高耐震化・再生化技術とヘルスマonitoring 技術の応用に関する研究」(研究代表者：土木工学科教授 木田哲量)の一貫として行われたものであり関係各位に感謝の意を表します。

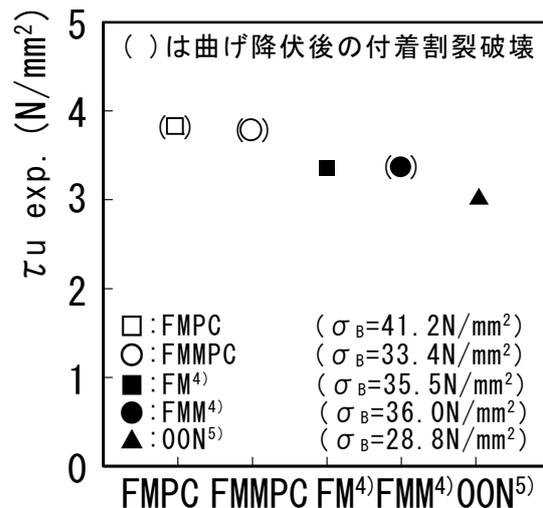


図-8 付着割裂強度

また、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。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) 野口泰寛、師橋憲貴、桜田智之：中品質再生粗骨材を用いた高流動コンクリートの構造特性に関する基礎的研究-その 2 1 年経過実験時の付着性状-、日本大学生産工学部第 41 回学術講演会、2007 年 12 月、pp. 29-32
- 5) 師橋憲貴、桜田智之：再生コンクリートを用いた梁部材の付着割裂強度-横補強筋の効果と乾燥収縮ひび割れ-、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2006 年 9 月、pp693-694
- 6) 西浦範昭、棚野博之、鹿毛忠継、濱崎仁、小山明男、杉本琢磨：中品質再生骨材を用いた再生骨材コンクリートの性能評価と活用に関する基礎的研究-その 1 研究概要とフレッシュ時の物性-、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2006 年 9 月、pp. 657-658
- 7) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書「超高強度繊維補強コンクリートを用いた高耐久性薄肉埋設型柱「ダクトアルホーム」」、平成 19 年 3 月