

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に関する研究グループ

UFC型枠に高流動再生コンクリートを中込めしたハーフPCa梁部材の付着性状

師橋 憲貴(日大生産工・准教授), 櫻田 智之(日大生産工・教授)

小松 博(日大生産工・教授), 三橋 博巳(日大理工・教授)

1. はじめに コンクリート構造物の解体によって発生するコンクリート塊を破碎・摩砕処理して製造した再生骨材のJISが2005年から2007年にかけて制定された^{1),2),3)}。これを受けて、日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009では新たに再生骨材コンクリートの節を設け使用条件を明確化した⁴⁾。JISは再生骨材の品質を3等級に区分しているが、吸水率が5%以下の中品質な再生骨材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、乾燥収縮が大きいため乾燥収縮ひび割れが発生しやすい。そのため、JASS 5では、高品質な再生骨材Hに対して中品質な再生骨材Mを用いたコンクリートは設計基準強度の上限を低くするなど慎重な扱いをしている。また再生骨材Mを用いたコンクリート(以下、再生コンクリートという)の用途として、JISでは乾燥収縮および凍結融解の影響を受けにくい部材を想定している。そこで本研究は乾燥収縮を受けにくい部材への再生コンクリートの適用方法について着目した。それは、再生コンクリートをハーフPCa梁部材の中込めコンクリートとして用い、直接外気に触れさせない方法を探ることである。一方、ハーフPCa梁部材は外殻の型枠が中込めコンクリートを打設後、部材の一部として兼ねるので、外殻内に配筋を行わない場合には後打ち部の配筋が混んできてくることが予想される。そこで、本研究は再生コンクリートを高流動化し、中込めコンクリートの確実な充填が行えるよう配慮した。また、外殻部の型枠については、断面が極力コンパクトに納まるよう近年開発されたUFC型枠(超高強度繊維補強コンクリート型枠: Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Form)を使用した。本研究は

UFC型枠を使用した高流動再生コンクリート梁部材(以下、UFC型枠試験体と称す)の付着性状をUFC型枠を使用せずに一体打ちとした既往の試験体⁵⁾(以下、一体打ち試験体と称す)と比較検討を行ったものである。

2. 実験概要 表1に試験体種別を示す。各試験体とも粗骨材は再生粗骨材と普通粗骨材を50%ずつ用いた。細骨材は普通細骨材を100%とした試験体と、再生細骨材と普通細骨材を50%ずつ使用した試験体を作成した。UFC型枠試験体の変形性状を把握するためFMPC, FMMPCについては、付着割裂破壊に対して曲げ降伏が先行するよう普通強度鉄筋SD345を使用した。また、UFC型枠試験体の重ね継手の付着割裂強度を調べるため、呼び強度を60N/mm²としたHFMP, HFMMは高強度鉄筋SD685を使用した。

表2に再生骨材の品質を示す。再生粗骨材の吸水

表1 試験体種別

シリーズ	試験体名	骨材置換率	主筋
UFC型枠試験体	1) FMPC	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(0%)	SD345
	2) FMMPC	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(50%)	
	3) HFMP	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(0%)	SD685
	4) HFMM	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(50%)	
一体打ち試験体	5) FM ⁵⁾	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(0%)	SD345
	6) FMM ⁵⁾	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(50%)	
	7) HFM	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(0%)	SD685
	8) HFMM	再生粗骨材(50%) 再生細骨材(50%)	

骨材置換率：普通骨材を再生骨材で置換した割合

率は 5.07%~5.71%の再生粗骨材であり、吸水率を JIS と比較すると、5%を超えるため低品質の範囲であったが、絶乾密度と実積率がともに基準値を満たしていることから概ね中品質程度に分類されると考える²⁾。

表 3 に再生コンクリートの調合を、また表 4 にフレッシュ性状を示す。本研究で用いた高流動再生コンクリートの調合は、スランプフロー60±10cm、空気量 4.5 ± 1.5%を目標とした。呼び強度は FMPC, FMMPC, FM, FMM については36N/mm²とし、HFMP, HFMMPC, HFM, HFMM については 60N/mm²として複数回の試し練りを基に調合を決定した。

表 2 再生骨材の品質

試験体名	骨材	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	実積率 (%)
1) FMPC	再生粗骨材	5.36	2.46	61.6
2) FMMPC	再生粗骨材	5.36	2.46	61.6
	再生細骨材	12.03	2.24	60.9
3) HFMP	再生粗骨材	5.07	2.33	62.5
4) HFMMPC	再生粗骨材	5.07	2.33	62.5
	再生細骨材	11.99	2.52	64.7
5) FM ⁵⁾	再生粗骨材	5.71	2.33	61.8
6) FMM ⁵⁾	再生粗骨材	5.71	2.33	61.8
	再生細骨材	11.63	2.05	70.8
7) HFM	再生粗骨材	5.65	2.36	61.7
8) HFMM	再生粗骨材	5.65	2.36	61.7
	再生細骨材	12.21	2.04	72.3

表 3 再生コンクリートの調合

試験体名	W/C (%)	単位質量 (kg/m ³)					
		水	セメント	粗骨材		細骨材	
				再生粗骨材	普通粗骨材	再生細骨材	普通細骨材
1) FMPC	53.7	175	326	410	456	0	888
2) FMMPC	53.7	175	326	410	456	392	444
3) HFMP	31.3	170	543	405	449	0	736
4) HFMMPC	33.8	170	503	405	449	337	384
5) FM ⁵⁾	53.7	175	326	410	456	0	891
6) FMM ⁵⁾	53.7	175	326	410	456	390	442
7) HFM	40.0	170	425	410	456	0	820
8) HFMM	40.0	170	425	410	456	361	410

表 4 フレッシュ性状

試験体名	スランプフロー (cm)	空気量 (%)
1) FMPC	61.5×59.5	3.2
2) FMMPC	58.0×57.0	3.0
3) HFMP	53.2×51.8	3.0
4) HFMMPC	54.9×54.3	4.7
5) FM ⁵⁾	52.0×51.0	5.6
6) FMM ⁵⁾	46.5×40.4	3.9
7) HFM	58.0×55.0	5.2
8) HFMM	57.0×59.0	3.2

表 5 混和剤添加量

試験体名	高性能AE減水剤 (C/%)	AE剤 (%)	消泡剤 (%/AE剤)	増粘剤 (kg/m ³)
1) FMPC	2.33	0.010	-	0.25
2) FMMPC	2.19	0.065	-	0.30
3) HFMP	1.66	0.008	-	-
4) HFMMPC	1.65	0.008	-	-
5) FM ⁵⁾	2.55	-	0.040	0.30
6) FMM ⁵⁾	2.80	0.042	0.040	0.30
7) HFM	1.55	0.004	-	-
8) HFMM	1.80	0.007	-	-

表 5 に混和剤添加量を示す。混和剤は適度な粘性と優れた流動性が期待できるセルローズ系増粘剤を採用した。またセルローズ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。AE 剤と消泡剤については、コンクリート打設前に空気量を調整するために添加した。

表 6 に現場封かん養生とした円柱供試体による 5 週実験時の再生コンクリートの性質を示す。ヤング係数は一般的にほぼ比例した値が得られるという圧縮強度の 1/3 の応力度の点を採用するセカンドモジュラス法により求めた。なお、ひずみの測定には、JISA 1132「コンクリート強度試験用試験体の作り方」に準じて作成したテストピースの側面に 4 本のひずみゲージを貼付して行い、その平均ひずみ

表6 再生コンクリートの性質

シリーズ	試験体名	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
		σ_B (N/mm ²)	E ($\times 10^4$ N/mm ²)	σ_T (N/mm ²)
UFC型枠試験体	1) FMPC	41.2	2.57	2.92
	2) FMMP	33.4	2.20	2.24
	3) HFMP	62.1	3.13	3.40
	4) HFMP	50.2	2.62	2.89
一体打ち試験体	5) FM ⁵⁾	35.5	2.36	2.52
	6) FM ⁵⁾	35.8	2.35	2.30
	7) HFM	50.4	2.72	3.12
	8) HFMM	56.6	2.88	3.70

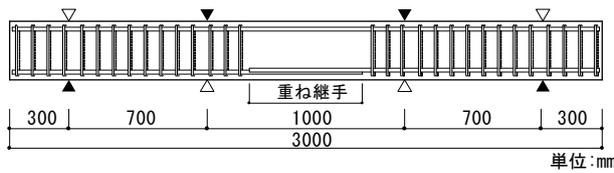
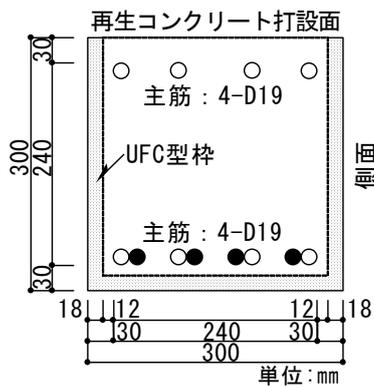
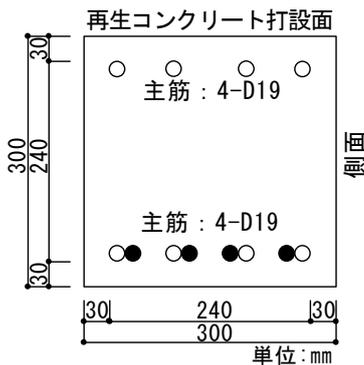


図1 試験体形状



a) UFC型枠試験体



b) 一体打ち試験体

図2 試験体断面

表7 UFC型枠の材料強度

材料強度	σ (N/mm ²)
圧縮強度	215
割裂強度	23.2

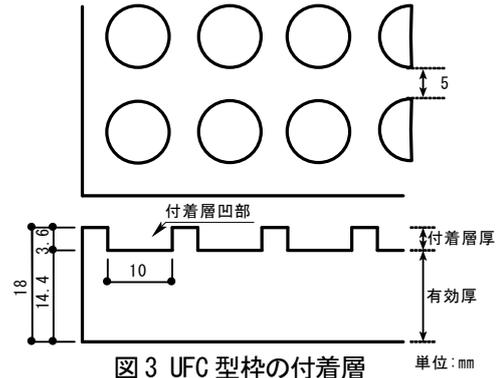


図3 UFC型枠の付着層

をゲージ率を考慮した上で測定した。

図1に試験体形状を、図2に試験体断面を示す。試験体は単純梁形式で、重ね継手は純曲げ区間の下端に設け、ハーフPCa 梁部材の付着特性を検討する試験体とした。UFC型枠は梁断面に対して側面および底面を覆う一体型の厚さ18mmで凹字断面とした。

3. UFC型枠の材料特性 表7にUFC型枠の材料強度を示す。UFC型枠の使用材料は、水(W)、UFC専用高性能減水剤(SP)、プレミックス材料(DPM)、UFC専用高繊維材(FM)となっている。プレミックス材料は、セメント、シリカフューム、石英質粉末を混合した紛体である⁶⁾。

図3にUFC型枠の付着層を示す。UFC型枠には型枠と再生コンクリートを一体化させるため型枠内部に直径約10mmの付着層凹部を設けた。

表8 実験結果一覧

試験体名	最大荷重 Pmax (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u, exp.}$ (N/mm ²)	破壊形式
1) FMPC	341.0	(3.83)*1	FS
2) FMMP	337.0	(3.78)*2	FS
3) HFMP	480.0	5.39	S
4) HFMP	475.5	5.34	S
5) FM ⁵⁾	299.0	3.36	S
6) FM ⁵⁾	299.0	(3.36)*3	FS
7) HFM	344.0	3.86	S
8) HFMM	375.0	4.21	S

S: 付着割裂破壊 FS: 曲げ降伏後の付着割裂破壊

*1 FMPC : 曲げ降伏後の付着割裂破壊時

P=341.0(kN), δ =22.77(mm)

*2 FMMP: 曲げ降伏後の付着割裂破壊時

P=337.0(kN), δ =39.85(mm)

*3 FMM : 曲げ降伏後の付着割裂破壊時

P=299.0(kN), δ =11.09(mm)

4. 実験結果 表 8 に実験結果一覧を示す。表中の最大荷重 P_{max} は正載荷時における付着割裂破壊時の荷重である。

4.1 主筋長期許容応力度時の曲げひび割れ 梁部材では耐久性の面から曲げひび割れ幅の大きさなどひび割れ性状を配慮する必要がある。そこで UFC 型枠

表 9 主筋長期許容応力度時の曲げひび割れ

試験体名	ひび割れ ($\sigma_t=200N/mm^2$)		
	n (本)	W_{max} (mm)	W_o (mm)
1) FMPC	2	0.02	0.020
2) FMMP	5	0.04	0.022
3) HFMP	6	0.06	0.036
4) HFMP	6	0.04	0.023
5) FM ⁶⁾	8	0.14	0.061
6) FMM ⁶⁾	9	0.18	0.060
7) HFM	9	0.10	0.041
8) HFMM	4	0.11	0.075

n: ひび割れ本数

W_{max} : 最大曲げひび割れ幅

W_o : 平均曲げひび割れ幅

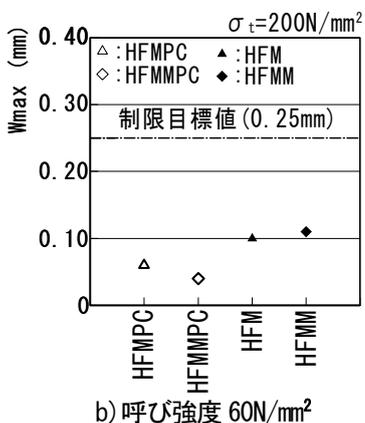
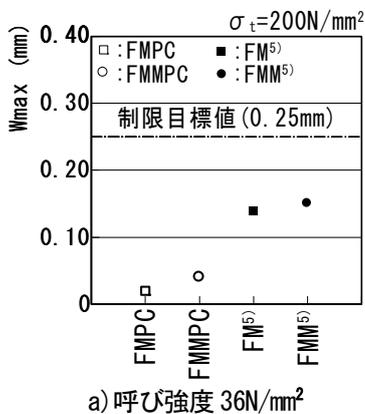


図 4 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅

を用いた高流動再生コンクリート梁部材で、主筋が長期許容応力度時に曲げひび割れの大きさに問題の生ずることがないか検討を行った。表 9 は試験体に載荷した際の主筋長期許容応力度時の曲げひび割れの測定結果を示したものである。曲げひび割れ幅の測定は正載荷時の純曲げ区間について行った。ひび割れ幅が最大となった曲げひび割れは、重ね継手の端部に発生する場合と純曲げ区間の重ね継手区間外に発生するものがあつた。高流動再生コンクリートの呼び強度が $36N/mm^2$ である UFC 型枠試験体 FMPC, FMMP は、一体打ち試験体 FM, FMM と比較して、ひび割れ本数が 4 本~6 本減少した。同様に、高流動再生コンクリートの呼び強度が $60N/mm^2$ である UFC 型枠試験体 HFMP は、一体打ち試験体 HFM と比較してひび割れ本数が 3 本減少した。図 4 は主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅 W_{max} を示したものである。a) 図の高流動再生コンクリートの呼び強度が $36N/mm^2$ である UFC 型枠試験体 FMPC, FMMP は、一体打ち試験体 FM, FMM と比較して、 W_{max} が $0.12mm \sim 0.14mm$ 小さくなった。同様に、b) 図の高流動再生コンクリートの呼び強度が $60N/mm^2$ である UFC 型枠試験体 HFMP, HFMP は、一体打ち試験体 HFM, HFMM と比較して W_{max} が $0.04mm \sim 0.07mm$ 小さくなった。以上の比較から、UFC 型枠に配合された鋼繊維材に曲げひび割れを抑制する効果があり、高流動再生コ

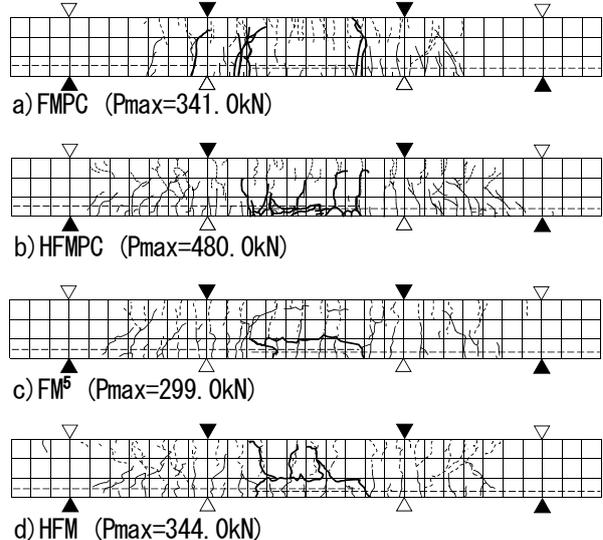
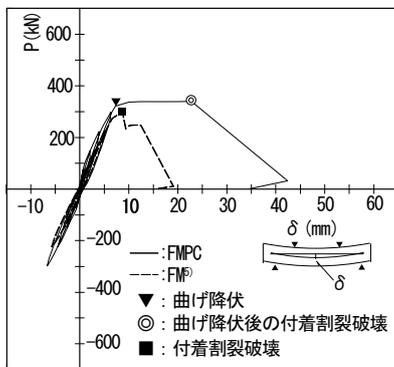


図 5 最終破壊形状

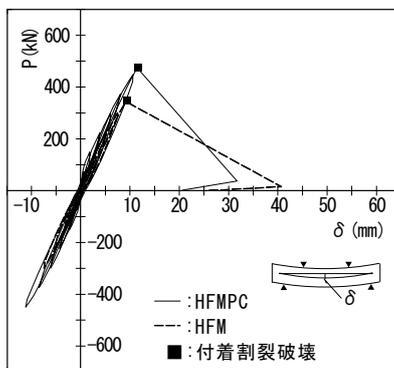
ンクリート梁部材の外殻部に UFC 型枠を用いたことが曲げひび割れ性状に有効であると評価できる。

4.2 最終破壊形状 図5は細骨材に普通細骨材を用いた FMPC, HFMP, FM, FMM を例に最終破壊形状を示したものである。a) 図の曲げ降伏が先行した UFC 型枠試験体 FMPC は、曲げ降伏後に変位が進み、純曲げ区間内の UFC 型枠と中込めの高流動再生コンクリートが肌別れを起こし、最終破壊時には重ね継手の付着割裂破壊となった。b) 図の付着割裂破壊が先行した UFC 試験体 HFMP は、c) 図、d) 図で示す一体打ち試験体 FM, HF と最終破壊形状は概ね同様であり、重ね継手端部から急激にひび割れが進行するサイドスプリット型の付着割裂破壊となった。

4.3 荷重—たわみ関係 図6に荷重—たわみ曲線を示す。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, 200, 300N/mm² と約 100N/mm² 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。a) 図は FMPC と FM の比較であるが、FMPC は UFC 型枠を使用したことにより、初期剛性が上昇し、最大荷重が約 10% 上昇した。b) 図



a) FMPC と FM の比較



b) HFMP と HF の比較

図6 荷重—たわみ曲線

は HFMP と HF の比較である。HFMP は UFC 型枠の使用により、初期剛性が上昇し、最大荷重が約 40% 上昇した。

4.4 付着割裂強度 ここでは付着特性を把握する上で特に重要と思われる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。なお、曲げ降伏が先行した試験体の付着割裂強度に関しては、曲げ降伏後の付着割裂破壊時の荷重を用いて算出した。

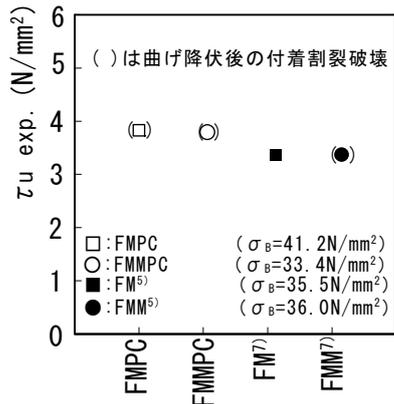
$$\tau_{u \text{ exp.}} = \frac{M_u}{j \cdot \phi \cdot l_s} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

ここで M_u : 最大曲げモーメント

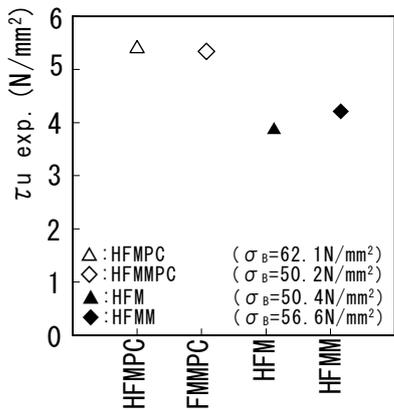
j : $((7/8)d$, d : 梁有効せい)

ϕ : 鉄筋の周長(mm) l_s : 重ね継手長さ(mm)

図7に付着割裂強度を示す。a) 図は呼び強度が 36N/mm² である UFC 型枠試験体と一体打ち試験体の比較である。UFC 型枠試験体 FMPC, HFMP と、FMPC, HFMP の中込めコンクリートと同一骨材置換率の一体打ち試験体, FM, FMM の付着割裂強度を比較すると、FMPC, HFMP の方が平均で約 10% 高くなった。b) 図は呼び強度が 60N/mm² である UFC 型枠試験体と一体打ち試験体の比較である。UFC 型枠試験体 HFMP, HFMP と、HFMP, HFMP の中込めコンクリートと同一置換率である一体打ち試験体 HFMP, HFMP の付着割裂強度を比較すると、HFMP, HFMP の方が平均で約 33% 高くなった。これは、高流動再生コンクリート梁部材の側面部を圧縮強度 $\sigma_c = 215\text{N/mm}^2$ と非常に高い強度の UFC 型枠で補強したことで UFC 型枠試験体の平均的なコンクリート強度が上昇し、付着割裂強度が高くなったものと考えられる。また重ね継手区間に鋼繊維材を使用した UFC 型枠を配置することで、付着割裂強度の増分を担ったと考えられる。これらのことより、UFC 型枠が外殻部の型枠としての役割のみならず構造材として部材耐力を分担していると考えられる。一方、再生細骨材の有無に関わらず、付着割裂強度が上昇したことから、UFC 型枠を用いた高流動再生コンクリート梁部材は、再生細骨材の有効利用の観点からみても有益であると評価できる。



a) 呼び強度 36N/mm²



b) 呼び強度 60N/mm²

図 7 UFC 型枠と一体打ち試験体の付着割裂強度

5. 結論 UFC 型枠に高流動再生コンクリートの中込

めしたハーフ PCa 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に示す知見が得られた。

- (1) UFC 型枠を高流動再生コンクリート梁に用いることで、一体打ちの高流動再生コンクリート梁と比較して、最大曲げひび割れ幅が小さくなった。
- (2) 曲げ降伏が先行した UFC 型枠試験体は、UFC 型枠と中込めコンクリートとの肌別れが認められた。一方、付着割裂破壊が先行した試験体は、UFC 型枠と中込めコンクリートとの一体化が保持され、一体打ち試験体と同様な破壊形状となった。
- (3) UFC 型枠試験体は、一体打ち試験体と比較して初期剛性が上昇した。
- (4) 一体打ち試験体と比較して UFC 型枠試験体は、付着割裂破壊が先行した試験体の付着割裂強度が約 33% 上昇した。

以上、UFC 型枠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を行った結果、一体打ち試験体と比較して、UFC 型枠試験体は曲げひび割れ幅が小さくなることや、付着割裂強度が上昇することが確認された。これらのことから、UFC 型枠を高流動再生コンクリートの外殻部に利用することは、高流動再生コンクリート梁の付着特性に有効であり、また UFC 型枠の部材耐力への寄与が推定される。本研究では、中品質再生粗骨材を使用したコンクリートの特徴である、乾燥収縮については扱っていない。今後は、乾燥収縮が UFC 型枠を用いた高流動再生コンクリート梁部材に与える影響について検討を行ってきたい。

謝辞

本研究に際し、再生コンクリートは東京建設廃材処理協同組合 葛西再生コンクリート工場に、調査設計および UFC 型枠は混和剤メーカー F 社およびセメントメーカー T 社にご協力をいただきました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) (財)日本規格協会：JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H，2005 年 3 月
- 2) (財)日本規格協会：JIS A 5022 再生骨材 M を用いたコンクリート，2007 年 3 月
- 3) (財)日本規格協会：JIS A 5023 再生骨材 L を用いたコンクリート，2006 年 3 月
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2009 年
- 5) 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再生コンクリート梁部材の基礎的研究 - その 1 フレッシュ性状と付着割裂強度 -，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，2008 年 7 月，pp. 1157~1158
- 6) 新見彩，阿部忠，木田哲量，田中敏嗣：UFC 埋設型枠を用いた RC 床版の実験耐荷力および疲労耐久性評価に関する研究，構造工学論文集, Vol. 55A, 2009 年 3 月，pp. 1488~1496