

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

再生コンクリートの細骨材をごみ溶融スラグと再生細骨材で置換した RC梁部材の付着性状

櫻田 智之(日大生産工・教授), 師橋 憲貴(日大生産工・准教授)

村山 陽一(習志野市役所 環境部)

細野 知之(東京建設廃材処理協同組合 葛西再生コンクリート工場)

1. はじめに 平成 20 年度建設副産物実態調査結果によるとコンクリート塊の排出量は約 3,130 万トン、その再資源化量は 3,043 万トンで 97.3% が再資源化されており再資源化率はかなり高い¹⁾。再資源化されたコンクリート塊のほとんどは路盤材などの再生碎石であり、今後、公共事業による道路整備の減少に伴いコンクリート塊の路盤材としての需要の減少が懸念される。このような背景の基、コンクリート塊のコンクリート用骨材としての再利用の普及を目指して、近年、再生骨材の JIS が制定された^{2),3),4)}。一方、再生骨材の JIS と同時期に一般廃棄物に由来する溶融スラグ骨材の JIS も制定された^{5), 6)}。一般廃棄物であるごみの溶融方式はいくつかあるが、コークスベット式高温ガス化溶融炉で製造されるごみ溶融スラグは、概ね 1700~1800°C の溶融状態から急激に水冷され表面がガラス質となり親水性が低く吸水率が大変小さい。そこで本研究はこの方式で製造されたごみ溶融スラグの吸水率の小ささに着目し、吸水率が大きい再生細骨材を用いた再生コンクリートと吸水率が小さいごみ溶融スラグを併用し、吸水率の大きさに影響を受ける再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れの抑制にねらいを定めた。本研究は再生コンクリートの細骨材について、天然細骨材をごみ溶融スラグと再生細骨材で置換した鉄筋コンクリート梁部材の付着性状にごみ溶融スラグと再生細骨材の両骨材の併用がどのような影響を及ぼすのかについて検討を行ったものである。

2. 再生コンクリートの材料的特性 表 1 に試験体種別を、表 2 に再生コンクリートの調合を示す。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細骨材のごみ溶融スラグの置換率を変化させた 4 シリーズである。本研究で用いた再生コンクリートの調合は、フレッシュ性状ではスランプ 18 ± 2.5 cm、空気量 4.5 ± 1.5 % を目標とし、コンクリートの硬化後 28 日において圧縮強度が $21 N/mm^2$ 程度になるよう複数回の試し練りによって調合を決定した。50S25NR, 50SR は試し練りで水セメント比を 50%, 60%, 70% に変化させた調合設計を行い、所定のフレッシュ性状および圧縮強度が得られるよう単位水量、水セメント比を決定した。またごみ溶融スラグの利用による材料分離の防止を考慮して表 3 に示すように混和剤を添加した。25SR50N, 25SN50R は先行して打設した 50S25NR, 50SR のフレッシュ性状および圧縮強度が良好であったため、同様の水セメント比とした。コ

表 1 試験体種別

試験体名	粗骨材置換率	細骨材置換率	載荷時期
25SR50N	碎石 50%	天然砂 50%	材齢 5 週
		再生細骨材 25% スラグ 25%	
25SN50R	再生粗骨材 50%	天然砂 25%	材齢 5 週
		再生細骨材 50% スラグ 25%	
50S25NR	碎石 50%	天然砂 25% 再生細骨材 25% スラグ 50%	材齢 5 週
		天然砂 0% 再生細骨材 50% スラグ 50%	
N	碎石 100%	天然砂 100%	材齢 5 週

表2 再生コンクリートの調合

シリーズ	W/C (%)	単位質量(kg/m ³)						
		W	C	細骨材			粗骨材	
25SR50N	59.6	184	309	天然砂	再生 細骨材	スラグ	碎石	再生 粗骨材
				430	188	235	466	420
25SN50R	57.5	184	320	天然砂	再生 細骨材	スラグ	碎石	再生 粗骨材
				213	373	232	466	420
50S25NR	59.6	184	309	天然砂	再生 細骨材	スラグ	碎石	再生 粗骨材
				212	186	464	473	425
50SR	57.5	184	320	再生 細骨材		スラグ	碎石	再生 粗骨材
				368		459	473	425

表 3 混和剤添加量

再生 コンクリート のシリーズ	高性能 AE減水剤 (C×%)	AE減水剤 (C×%)	材料分離 低減剤 (kg/m ³)
25SR50N	1.1	0.007	0.3
25SN50R	0.925	0.009	0.3
50S25NR	1.083	—	0.3
50SR	1.094	—	0.3

表4 フレッシュ性状

再生 コンクリート のシリーズ	スランプ (cm)	フロー (cm × cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
25SR50N	19.5	—	4.1	28.0
25SN50R	16.0	—	3.3	29.0
50S25NR	20.5	35.2 × 36.4	5.6	27.0
50SR	20.0	35.3 × 35.1	4.8	28.0

表5 再生コンクリートの性質

試験体名	単位容積重量 γ (kN/m ³)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	ヤング係数 E ($\times 10^4$ N/mm ²)	割裂強度 σ_T (N/mm ²)
25SR50N	21.93	25.8	2.16	2.10
25SN50R	21.98	26.0	2.16	2.36
50S25NR	21.32	22.1	1.98	1.84
50SR	21.45	25.3	1.99	2.12
N	22.59	28.8	2.28	2.75

ンクリート打設時のフレッシュ性状を表4に示す。表5に再生コンクリートの性質を示す。50S25NRの圧縮強度は他の3シリーズと比較して低い値となつた。これは空気量が他のシリーズと比較し、1.6%～2.5%高かったことが要因と考える。また、ごみ溶融スラグを25%置換したシリーズと50%置換したシリ

表 6 再生骨材の品質

シリーズ	骨材	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	実積率 (%)	吸水率 (%)
25SR50N 25SN50R	碎石	2.70	2.73	60.6	1.28
	再生粗骨材	2.33	2.45	62.5	5.07
	天然砂	2.53	2.58	68.0	2.15
	再生細骨材	1.99	2.23	72.4	11.99
	ごみ溶融スラグ	2.82	2.83	61.3	0.38
50S25NR 50SR	碎石	2.69	2.71	61.3	0.84
	再生粗骨材	2.36	2.47	61.0	4.90
	天然砂	2.53	2.58	68.0	2.15
	再生細骨材	2.02	2.24	74.6	10.79
	ごみ溶融スラグ	2.82	2.83	61.3	0.38

ーズを比較すると、ごみ溶融スラグを50%置換したシリーズは空気量が高くなり、圧縮強度が低下する傾向を示した。これはごみ溶融スラグの粒子が角張っており、エントラップエアを多く含んだためと考える。梁部材のコンクリート強度をコンクリートの水分の乾燥が少ない現場封かん養生の供試体で推定することは難しいとも考えるが、本研究では研究の基礎的段階としてコンクリート強度の基本となる円柱供試体のコンクリート強度を用いて以降の付着耐力の検討を行った。ひずみゲージにより測定した $1/3 \sigma_B$ 時のヤング係数はごみ溶融スラグと再生細骨材を併用した試験体は普通コンクリートであるNと比較して低くなる傾向を示し、ごみ溶融スラグと再生細骨材の併用による影響が認められ、ごみ溶融スラグの置換率の高い方がヤング係数は低い傾向を示した。ヤング係数を求める際に日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(以下、RC規準という)¹⁰に示されている圧縮強度および単位容積重量を変数とする算定式を用いる場合、再生コンクリートのヤング係数は再生骨材に付着するモルタルの影響により表乾比重が低くなるため普通コンクリートを対象とするヤング係数より小さい値となるものと考える。表6に再生骨材の品質を示す。本研究では吸水率が極めて低いごみ溶融スラグ(0.38%)と吸水率が高い再生細骨材(10.79%と11.99%)との特徴を活かしコンクリートにおける細骨材の代替材料としての効果を期待した。

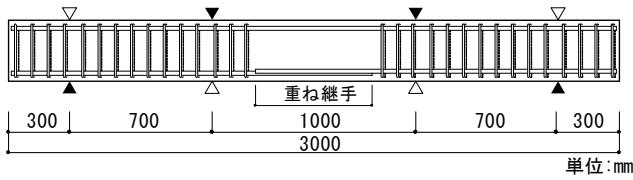


図1 試験体形状

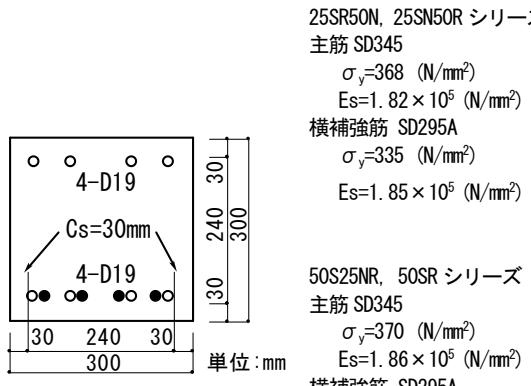


図2 試験体断面

3. 実験の概要 図1に試験体形状を、また図2に試験体断面を示す。試験体は単純梁形式で、重ね継手は純曲げ区間の下端に設け、重ね継手長さは $30d_b$ (d_b は主筋の公称直径)とし、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。側面と底面の主筋表面からのかぶり厚さは30mmで、曲げ降伏前にサイドスプリット型の付着割裂破壊が先行するよう配筋した。重ね継手部には主筋と再生コンクリート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。

4. 実験結果 表7に実験結果一覧を示す。載荷は2点集中による正負繰返し載荷を行った。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 梁部材の設計においては、部材の曲げあるいはせん断耐力等を確保すると同時に、耐久性および使用性を考えると曲げを受ける部材では曲げ引張部に発生する曲げひび割れ幅の大きさ等ひび割れ性状に配慮する必要がある。そこで再生コンクリートの細骨材をごみ溶融スラグと再生細骨材で置換したことで、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8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に発生するものがあった。曲げひび割れ本数はごみ溶融スラグおよび再生細骨材を用いたことによる影響は見られず普通コンクリートと同等であった。図3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)図のごみ溶融スラグの置換率を25%とし再生細骨材の置換率を変化させた場合、またb)図のごみ溶融スラグの置換率を50%とし再生細骨材の置換率を25%から50%に変化させた影響は認められなかった。全ての試験体中の W_{max} は0.20mmでRC規準⁷⁾のひび割れ制限目標値の0.25mm以内であり制限値を超えるものはなかった。

4.2 最終破壊形状 図4に最終破壊形状を示す。梁の上端に示した点線によるひび割れは負載荷時の曲

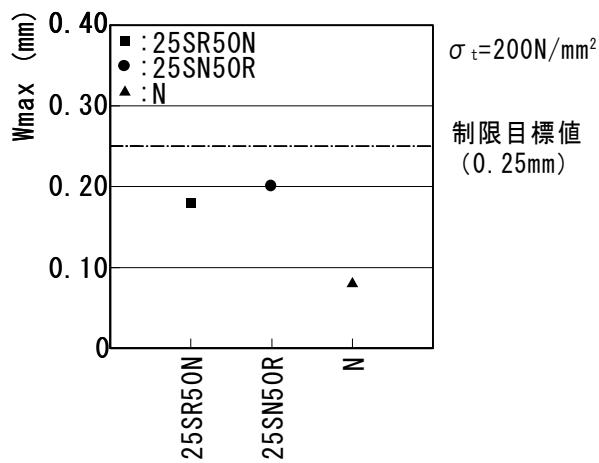
表7 実験結果一覧

試験体名	最大荷重 P_{max} (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u \ exp.}$ (N/mm ²)	破壊形式
25SR50N	259.0	2.91	付着割裂 破壊
25SN50R	275.0	3.09	
50S25NR	241.5	2.71	
50SR	251.0	2.82	
N	268.0	3.01	

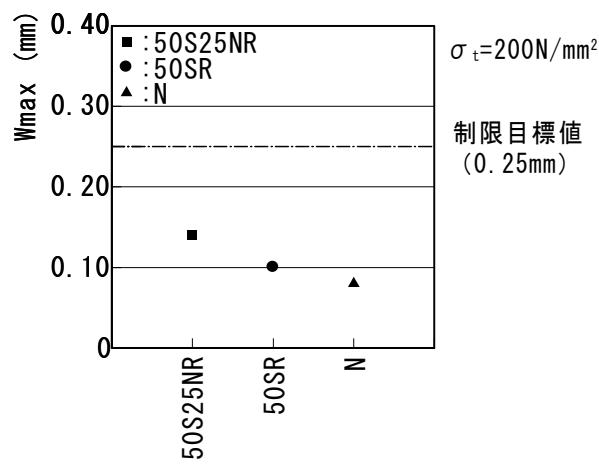
表8 主筋長期許容応力度時の曲げひび割れ

試験体名	ひび割れ ($\sigma_t=200 \text{ N/mm}^2$ 時)		
	n (本)	W_{max} (mm)	W_o (mm)
25SR50N	8	0.18	0.075
25SN50R	8	0.20	0.083
50S25NR	7	0.14	0.071
50SR	8	0.10	0.057
N	8	0.08	0.058

n: ひび割れ本数, W_{max} : 最大曲げひび割れ幅
 W_o : 平均ひび割れ幅



a) 25SR50N・25SN50R シリーズ



b) 50S25NR・50SR シリーズ

図3 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅

げひび割れである。曲げひび割れは梁部材の引張縁から発生し、荷重の上昇とともに圧縮側に進展した。ごみ溶融スラグと再生細骨材を併用した a) 図～d) 図の 4 体は最終破壊形状に差は認められず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であり、e) 図の普通コンクリートを用いた試験体と同様の破壊形状となった。

4.3 荷重-たわみ関係 図5に荷重-たわみ曲線を示す。図6は図5の荷重-たわみ曲線の正載荷時の包絡線を示したものである。図5および図6の a) 図は25SR50Nと25SN50Rの比較であるが、主筋長期許容応力度時($\sigma_t=200\text{N/mm}^2$, $P=150\text{kN}$)の曲げ剛性を初期剛性として検討すると、再生細骨材の置換率を25%から50%へ変化させても初期剛性は同等であり、再生細骨材の使用量の増加に伴う影響は見られず、

普通コンクリートとも同程度であった。この傾向は図5および図6の b) 図の50S25NRと50SRにおいて

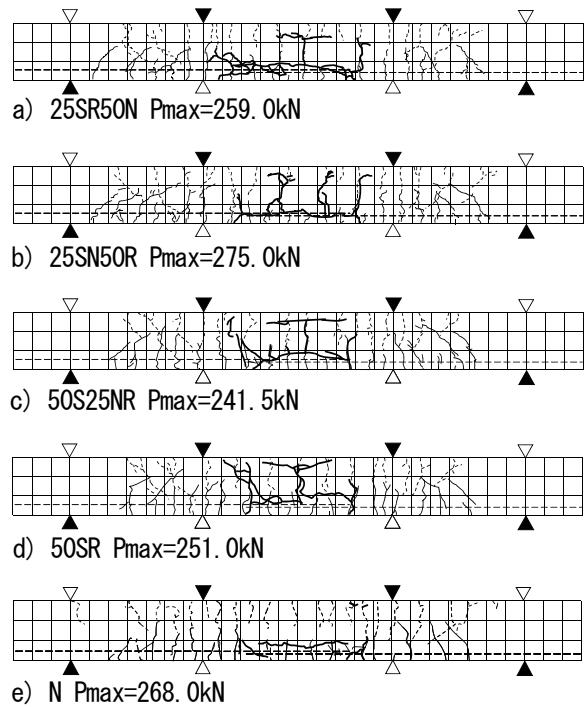
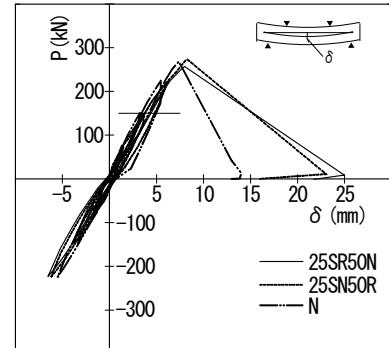
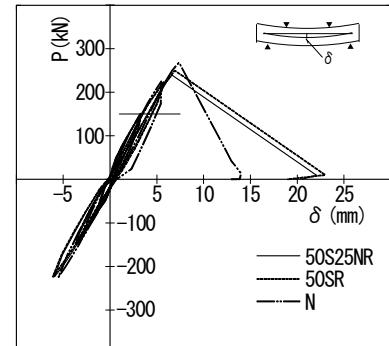


図4 最終破壊形状

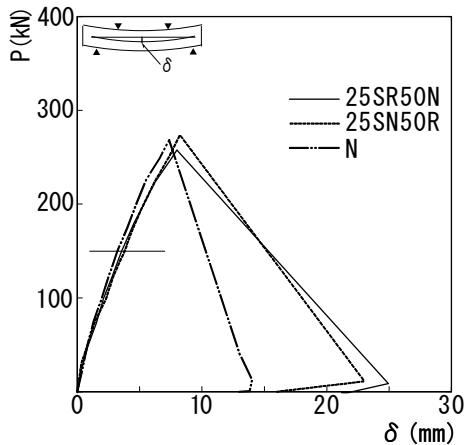


a) 25SR50N と 25SN50R の比較

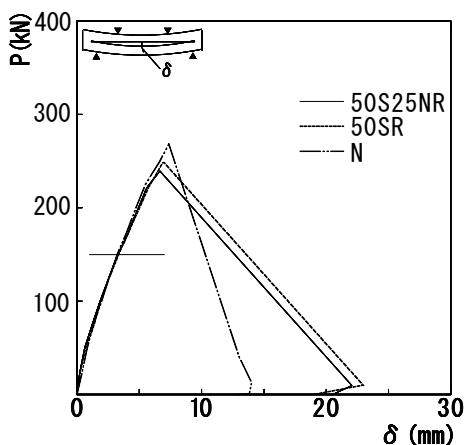


b) 50S25NR と 50SR の比較

図5 荷重-たわみ曲線



a) 25SR50N と 25SN50R の比較



b) 50S25NR と 50SR の比較

図 6 荷重ーたわみ曲線(包絡線)

も同様となった。

4.4 付着割裂強度 本研究では重ね継手の付着破壊時の付着割裂強度 $\tau_u \text{ exp.}$ を式(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

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 25SR50N と 25SN50R の比較である。再生細骨材の置換率を 25% から 50%へ変化させても付着割裂強度は同等であり、再生細骨材を増加させたことによる影響は認められなかった。図中には式(2)～(4)に示す付着割裂強度算定式⁸⁾による計算値 $\tau_u \text{ cal.}$ を \diamond 印で示した。

$$\tau_u \text{ cal.} = \tau_{co \text{ cal.}} + 0.7 \tau_{st \text{ cal.}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

$$\tau_{co \text{ cal.}} = \{0.12 + 0.07 b_{si} + 5.54 / (l_s / d_b)\} \sqrt{\sigma_b} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

$$b_{si} = \frac{b - \sum d_b}{\sum d_b} \quad (4)$$

ここで

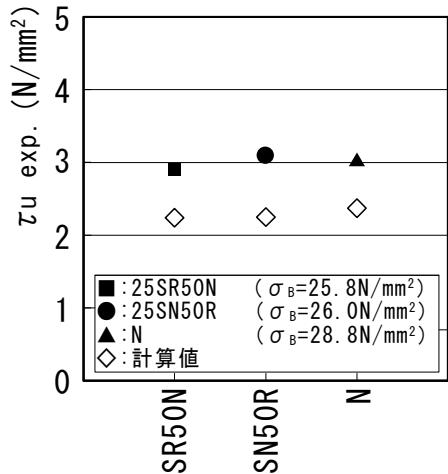
d_b : 主筋径 (mm) l_s : 重ね継手長さ (mm) b : 梁幅 (mm)

$\sum d_b$: 重ね継手の主筋の直径の総和 (mm)

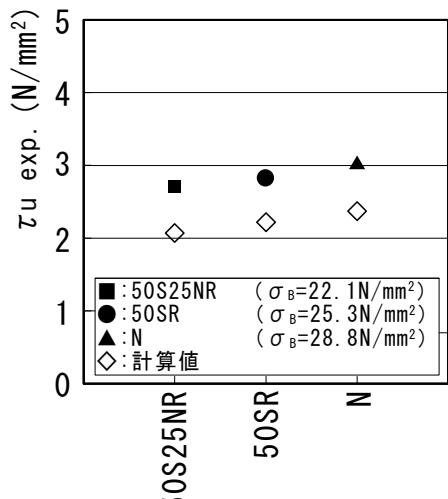
(重ね継手の主筋 1 組は 2 本と数える)

$\sum d_b$: 重ね継手の外側での主筋の直径の総和 (mm)

(重ね継手の主筋 1 組は 1 本と数える)



a) 25SR50N と 25SN50R の比較



b) 50S25NR と 50SR の比較

図 7 付着割裂強度

σ_B :コンクリート強度(N/mm²)

$\tau_{st\ cal}$:横補強筋による付着割裂強度増分

(本研究では、重ね継手部に横補強筋を配筋していないので考慮していない)

付着強度比($\tau_{u\ exp.}/\tau_{u\ cal.}$)は平均値 $m=1.31$, その標準偏差 $SD=0.04$ であり安全側となった。b) 図は 50S25NR と 50SR の比較である。付着強度比($\tau_{u\ exp.}/\tau_{u\ cal.}$)は平均値 $m=1.31$, その標準偏差 $SD=0.04$ であり, a) 図のごみ溶融スラグの置換率 25%と一致した。しかし, ごみ溶融スラグを 50%置換した b) 図は, ごみ溶融スラグを 25%置換した a) 図に比べ付着割裂強度の値が低下した。これは, ごみ溶融スラグの骨材表面が平滑なガラス質なのでセメントペーストとの付着力が小さいためと考える⁹⁾。

5. 結論 再生コンクリートの細骨材をごみ溶融スラグと再生細骨材で置換した鉄筋コンクリート梁部材の付着性状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) 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅は, ごみ溶融スラグの置換率を 25%から 50%に変化させた影響は認められなかった。
- (2) 最終破壊形状は普通コンクリートを用いた試験体と同様であり, ごみ溶融スラグと再生細骨材を併用した影響は認められず, サイドスプリット型の付着割裂破壊となった。
- (3) 荷重一たわみ関係において主筋長期許容応力度時の初期剛性は再生細骨材の置換率を 25%から 50%として再生細骨材の使用量を増加させても差は認められなかった。
- (4) ごみ溶融スラグの置換率を 25%から 50%へ増加させると付着割裂強度の値は低下したが, 既往の付着割裂強度算定式の計算値と比較すると安全側の評価となった。

以上, 再生コンクリートの細骨材をごみ溶融スラグと再生細骨材で置換した鉄筋コンクリート梁部材の付着性状について検討した結果, 付着割裂強度はごみ溶融スラグの置換率が 25%程度であれば, 再生細骨材との併用であっても普通コンクリートと同程

度であり, 両者を併用した再生コンクリートの建築構造部材への適用の可能性を示すことができた。中品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートでは乾燥収縮が問題となるので現在長期材齢における乾燥収縮を観測中である。今後は長期材齢における乾燥収縮を考慮した付着性状について検討を行っていきたい。

謝辞

本研究に際し, 習志野市芝園清掃工場にごみ溶融スラグの使用を快諾していただきました。コンクリートの打設にあたって東京建設廃材処理協同組合葛西再生コンクリート工場および混和剤メーカーの F 社に大変お世話になりました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省:平成 20 年度 建設副産物実態調査結果, 平成 22 年 3 月 31 日報道発表資料
- 2) (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
- 3) (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
- 4) (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
- 5) (財)日本規格協会:JIS A 5031 一般廃棄物, 下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材, 2006. 7
- 6) (財)日本規格協会:JIS A 5032 一般廃棄物, 下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ骨材, 2006. 7
- 7) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, 2010 年
- 8) 師橋憲貴, 桜田智之:60MPa 級の高強度コンクリートを用いた重ね継手の付着割裂強度に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 11 卷第 1 号, pp. 9 ~18, 2000 年 1 月
- 9) 斎藤丈士, 菅田雅裕, 谷山教幸, 池永博威:ごみ溶融スラグの細骨材としての利用がコンクリートの調合および品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 81~86, 2004