

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

中品質再生粗骨材とごみ溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁部材の構造特性

櫻田智之(日大生産工・教授), 師橋憲貴(日大生産工・専任講師)
 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・工場長代理)

1. はじめに 近年、資源循環型社会への関心が高まり、リサイクルの推進が図られている。しかし最終処分場の不足問題は深刻化し、新しい最終処分場の確保も困難な状況にある。このような社会的状況を背景に一般廃棄物を高温処理して溶融し、冷却固化することで減量・無害化する技術が開発された。この技術により産出した溶融固化物(以下、ごみ溶融スラグと称する)は道路用骨材やコンクリート用骨材としての利用が期待され、2006年に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)¹⁾が制定された。しかし、ごみ溶融スラグの生産量増加が予測される中で、ごみ溶融スラグの利用用途は少なく大半は最終処分場で処理されている。今後のごみ溶融スラグの普及促進に向けて、ごみ溶融スラグをコンクリート用骨材として利用し、鉄筋コンクリート構造物へ適用することは大変重要なことと考える。

一方、建築物の解体時に発生するコンクリート塊は2000年に制定された「建設工事に係る資材の再資源化に関する法律」を基盤とし、コンクリート塊を破碎して製造される再生骨材の有効利用を図るためのJISが規格された^{2)~4)}。しかし、JISの制定後においても大半が道路用骨材として消費されコンクリート用骨材としての利用は僅かである。

これらのことを背景に、本研究ではごみ溶融スラグと再生粗骨材を併用し鉄筋コンクリート構造物に適用する可能性を検討することを目的とした。このように再生骨材とごみ溶融スラグの再生化技術が実用できれば循環型社会の形成に大きく貢献できると考える。本研究は再生化技術の基礎として、再生粗骨材とごみ溶融スラグを併用した鉄筋コンクリート梁部材の構造特性を検討したものである。

2. 実験概要 表1に試験体種別を示す。再生粗骨材とごみ溶融スラグを併用したコンクリートの基本的な性状を把握するため、コンクリートの種類はごみ溶融スラグを細骨材に50%置換したRMNSシリーズと100%置換したRMSシリーズの2シリーズとした。なお、粗骨材は再生粗骨材を50%置換している。

表1 試験体種別

試験体名	シリーズ 置換率	載荷時期 (材齢)
1) RMNS	RMNSシリーズ 再生粗骨材(50%) 砕石(50%) ごみ溶融スラグ(50%) 天然砂(50%)	5週
2) RMNS1K		1年
3) RMNS5E		5年 ^{*1}
4) RMS	RMSシリーズ 再生粗骨材(50%) 砕石(50%) ごみ溶融スラグ(100%)	5週
5) RMS1K		1年
6) RMS5E		5年 ^{*1}
7) RM ⁶⁾	RMシリーズ 再生粗骨材(50%) 砕石(50%) 天然砂(100%)	5週
8) RM1K ⁶⁾		1年
9) RMM ⁶⁾	RMMシリーズ 再生粗骨材(50%) 普通粗骨材(50%) 再生砂(50%) 天然砂(50%)	5週
10) RMM1K ⁶⁾		1年

*1:曝露試験
 重ね継手長さ $l_s=30db=570(\text{mm})$ 共通

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)					
		水	セメント	細骨材		粗骨材	
RMNS	72.5	184	254	天然砂	ごみ溶融スラグ	砕石	再生粗骨材
				448			
RMS	69.4	184	265	ごみ溶融スラグ		砕石	再生粗骨材
				968			

表3 再生骨材の品質

シリーズ		絶乾密度 (g/cm ³)	実積率 (%)	吸水率 (%)
RMNS RMS	再生粗骨材	2.33	61.8	5.40
	砕石	2.72	63.8	0.77
	ごみ熔融スラグ	2.82	61.3	0.38
	天然砂	2.54	66.2	2.05
RM ⁽⁶⁾ RMM ⁽⁶⁾	再生粗骨材	2.37	62.5	4.58
	砕石	2.70	61.5	0.60
	再生砂	2.08	72.0	9.53
	天然砂	2.54	66.7	1.96

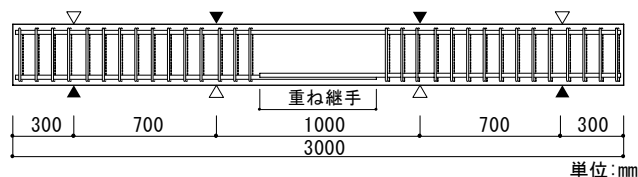


図1 試験体形状

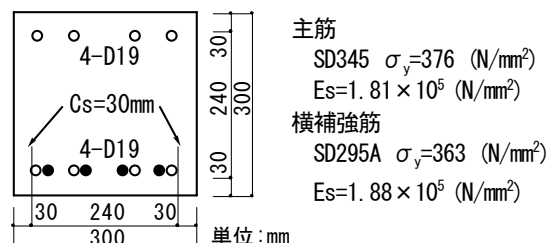


図2 試験体断面

表2に再生コンクリートの調合を示す。コンクリートの調合は材齢4週時に25N/mm²になるよう複数回の試し練りを行い決定した。表3に再生骨材の品質を示す。本実験で用いた再生粗骨材は、JIS A 5022³⁾に相当するものである。写真1に本実験で使用したごみ熔融スラグを示す。ごみ熔融スラグは習志野市芝園清掃工場のガス化高温熔融一体型直接熔融炉で製造されJIS A 5031¹⁾の基準値である絶乾密度2.5g/cm³以上、実積率53%以上、吸水率3%以下を全て満たしていた。



写真1 本実験で使用したごみ熔融スラグ

図1に試験体形状を、図2に試験体断面図を示す。試験体は付着割裂強度を検討するため純曲げ区間の下端に重ね継手(重ね長さ30db db:公称径)を設けた単純梁形式とした。基礎的な付着性状を把握することを目的として、重ね継手部に横補強筋は配筋しなかった。

3. ヤング係数 図3および図4にRMNSシリーズおよびRMSシリーズのヤング係数の推移を示す。両シリーズともヤング係数の実測値は、RC規準式⁵⁾に用いられる普通コンクリートの単位容積重量 $\gamma=23\text{kN/m}^3$ を用いた計算値に比べ若干低く、 γ に各供試体の平均実測値を用いた場合はヤング係数の実測値とほぼ

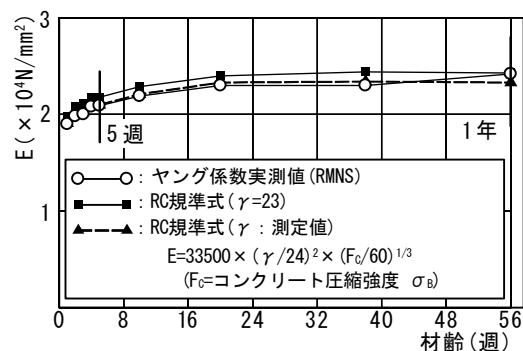


図3 ヤング係数の推移(RMNS シリーズ)

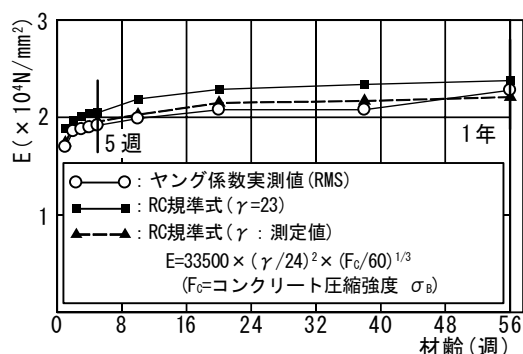


図4 ヤング係数の推移(RMS シリーズ)

一致した。これよりごみ溶融スラグを用いた場合においても圧縮強度からヤング係数を推定することが可能である。

4. 乾燥収縮性状 吸水率が高い再生骨材をコンクリートに用いると乾燥収縮率が高くなり乾燥収縮ひび割れが発生する。これを長期的に考えると耐久性の低下に繋がると懸念されるため乾燥収縮性状を把握することは重要である。以降は再生粗骨材とごみ溶融スラグを併用したコンクリートの乾燥収縮性状を把握するため、既往の研究^{6,7)}より再生粗骨材を50%置換したRM, さらに再生砂を50%置換したRMM, 普通コンクリートのNと比較検討を行う。

4.1 乾燥収縮率 各試験体の乾燥収縮率は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を用いて測定したものである⁸⁾。

図5に乾燥収縮率の推移を示す。材齢56週時のごみ溶融スラグを用いた試験体(LRMNS, LRMS)の乾燥収縮率は普通コンクリート(LN)と同等であった。また, LRM, LRMMと比較すると乾燥収縮率が低減した。これは、ごみ溶融スラグの吸水率が0.38%であり他の骨材と比較して極めて低いいため乾燥収縮率が低減したものと考える。

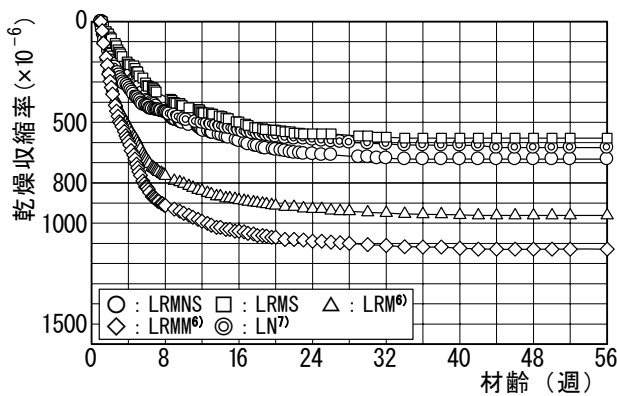


図5 乾燥収縮率の推移

4.2 乾燥収縮ひび割れ性状 図6に材齢1年経過時の乾燥収縮ひび割れを示す。図6 a)のRMNS1K, 図6 b)のRMS1Kは図6 c)のRM1K, 図6 d)のRMM1Kと比較して乾燥収縮ひび割れの発生が大幅に減少しており, 図6 e)の普通コンクリートである00NKと同等であった。この傾向は乾燥収縮率の推移と同様であ

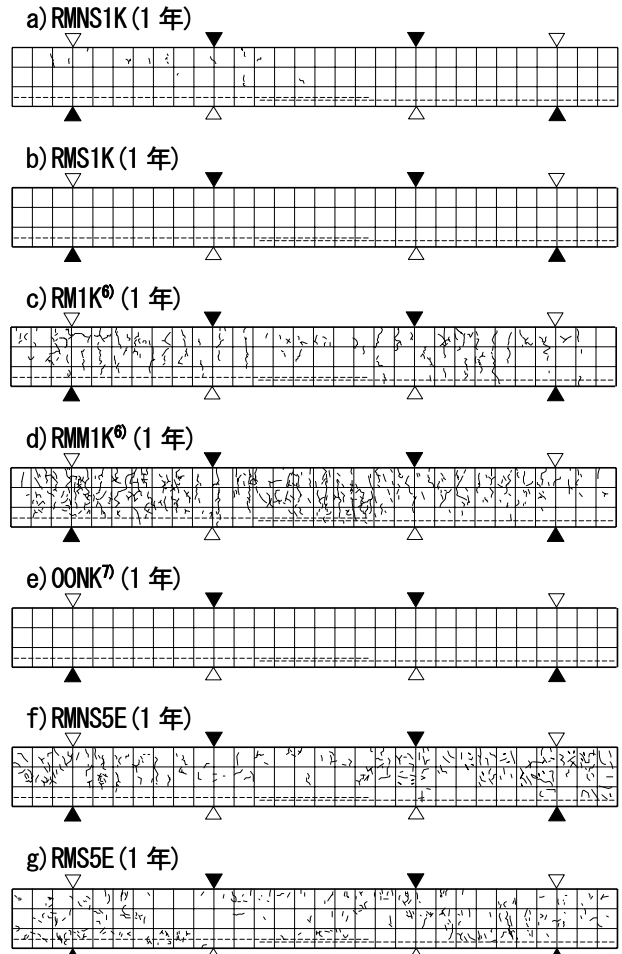


図6 1年経過時の乾燥収縮ひび割れ(側面)

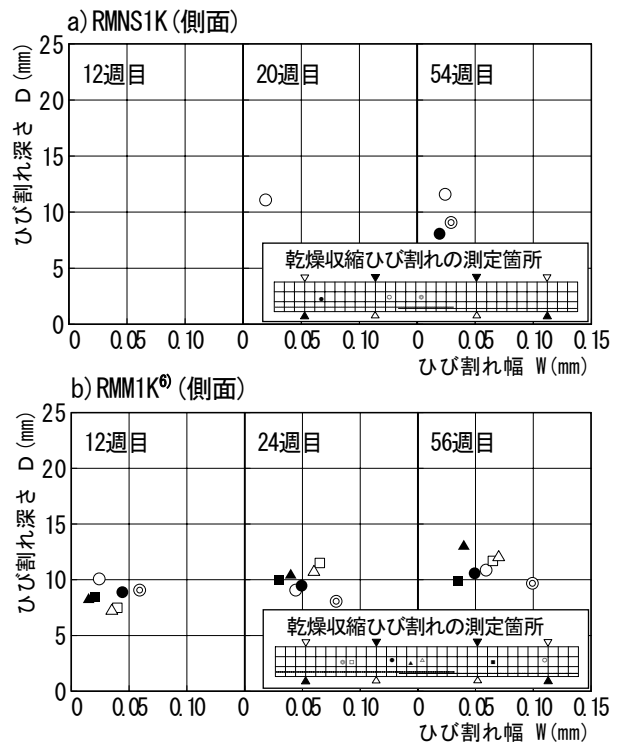


図7 乾燥収縮ひび割れの深さと幅の関係

り、ごみ溶融スラグの吸水率の低さが乾燥収縮ひび割れの発生の低減に影響しているものと考えられる。一方、実構造物を想定し曝露試験を継続中の RMNS5E (図 6 f), RMS5E (図 6 g)) は風雨、直射日光の影響により乾燥収縮ひび割れの発生が増加する傾向を示している。

4.3 乾燥収縮ひび割れの深さと幅 図-7 に材齢 12 週から材齢約 56 週までの乾燥収縮ひび割れの深さと幅の関係を示す。乾燥収縮ひび割れ深さは超音波測定器により、また乾燥収縮ひび割れ幅はマイクロスコープ(最小目盛り 0.02mm)により計測を行った。

a) 図より RMNS1K の乾燥収縮ひび割れの深さと幅は材齢の経過とともに大幅に増加することはなかった。なお、RMNS1K は材齢 6 週目に乾燥収縮ひび割れの発生を確認しているが、測定可能となるひび割れの発生した材齢 20 週目からの測定結果を示した。一方 b) 図の再生砂を 50%置換した既往の RMM1K はひび割れ深さ、幅とも材齢の経過に従い増加する傾向が認められた。ごみ溶融スラグを用いた試験体はごみ溶融スラグの吸水率が極めて低いため乾燥収縮率が低くなり、乾燥収縮ひび割れの発生が減少し、乾燥収縮ひび割れの深さと幅においても大幅な増加は認められなかった。

5. 実験結果 表 4 に実験結果一覧を示す。RMNS1K は曲げ降伏が先行しその後付着割裂破壊を生じたが、他の試験体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となった。

表 4 実験結果一覧

試験体	σ_B (N/mm^2)	Wmax (mm)	Pmax (kN)	$\tau_{u \text{ exp.}}$ (N/mm^2)	破壊形式
1) RMNS	22.7	0.14	296.8	3.33	S
2) RMNS1K	29.5	0.14	291.0	(3.27)*1	FS
4) RMS	19.2	0.12	199.2	2.24	S
5) RMS1K	27.9	0.12	235.5	2.64	S
7) RM ⁶⁾	27.5	0.13	264.0	2.96	S
8) RM1K ⁶⁾	32.3	0.16	289.2	3.25	S
9) RMM ⁶⁾	28.1	0.12	292.8	3.29	S
10) RMM1K ⁶⁾	32.9	0.20	298.6	(3.35)*2	FS

σ_B : コンクリート圧縮強度 Wmax: 最大曲げひび割れ幅
Pmax: 最大荷重 $\tau_{u \text{ exp.}}$: 付着割裂強度
S: 付着割裂破壊 FS: 曲げ降伏後の付着割裂破壊
*1 RMNS1K, *2 RMM1K は共に曲げ降伏後の付着割裂破壊
RMNS1K: P=291.0 (kN), δ =10.85 (mm) RMM1K: P=298.6 (kN), δ =15.43 (mm)

5.1 長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅 鉄筋コンクリート造のひび割れ対策については、常時使用状態の構造的なひび割れ幅の目標値を定めひび割

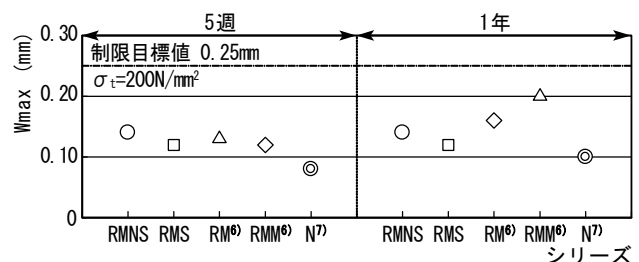
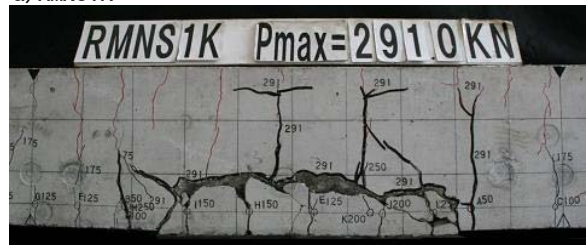


図 8 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅

a) RMNS1K



b) RMS1K



c) RM1K⁶⁾



d) RMM1K⁶⁾



写真 2 最終破壊形状

れを制限する考え方が示されている。構造的なひび割れについては、梁部材では引張側コンクリートの曲げひび割れ幅が制限目標値 0.25mmに収まるよう配慮し、RC規準⁵⁾に主筋長期許容応力度が定められている。ここでは再生骨材とごみ熔融スラグを併用することにより、鉄筋コンクリート梁部材の主筋長期許容応力度時の曲げひび割れ幅がどの程度となるのか検討を行った。図8に主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅 W_{max} を示す。5週時、1年時の W_{max} はごみ熔融スラグの置換率によらず 0.12mm~0.14mmで同等であった。また、5週時、1年時の全ての試験体の W_{max} はRC規準のひび割れ制限目標値の0.25mm以内となった。

5.2 最終破壊形状 写真2に1年時に荷重した試験体の純曲げ区間の最終破壊形状を例示する。最終破壊形状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た破壊形式となった。ごみ熔融スラグを使用した a) 図

RMNS1Kおよびb) 図RMS1Kとごみ熔融スラグを使用していないc) 図RM1Kおよびd) 図RMM1Kの破壊形状は類似しており最終破壊形状にごみ熔融スラグを置換した影響は認められなかった。また、荷重前に僅かに発生していた乾燥収縮ひび割れの影響も認められなかった。

5.3 変位性状 図9および図10に各試験体の荷重—たわみ曲線を示す。変位は梁の中央変位 δ を用い、正負繰返し荷重の正方向の包絡線を示した。5週時の図9では骨材の種類および置換率の差異によらず初期剛性は同等であった。しかし、1年時の図10ではごみ熔融スラグを置換した試験体(RMNS1K, RMS1K)は、普通コンクリートを使用した00NKと比較して初期剛性が若干低下した。これは、再生粗骨材に付着するモルタル分の影響によるものと考えられる。また、ごみ熔融スラグを置換した試験体はごみ熔融スラグを置換していない試験体(RM1K, RMM1K)と比較して初期剛性は同等であった。

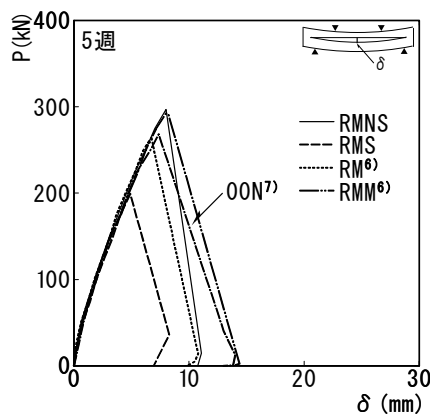


図9 荷重—たわみ曲線(包絡線・5週時)

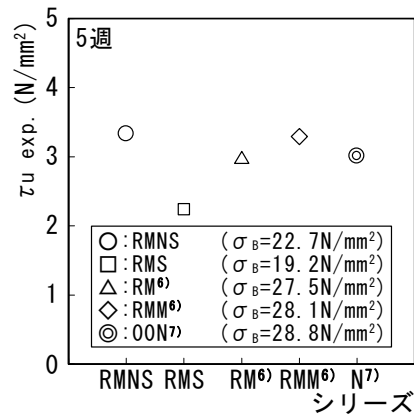


図11 付着割裂強度(5週時)

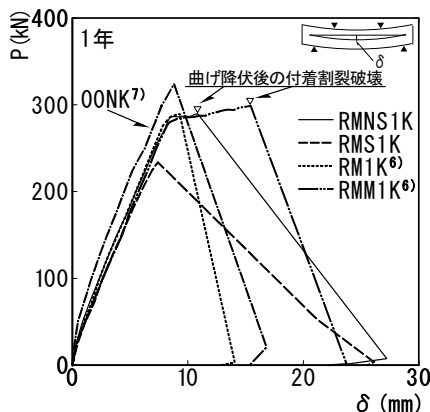


図10 荷重—たわみ曲線(包絡線・1年時)

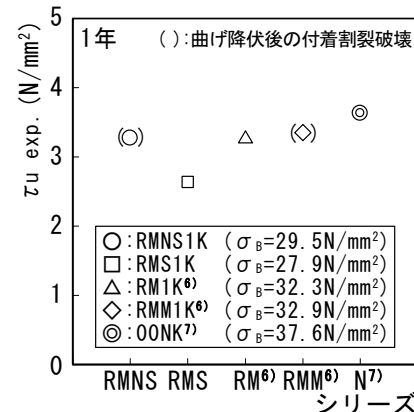


図12 付着割裂強度(1年時)

6. 付着割裂強度の評価 図 11 および図 12 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)
 ϕ : 鉄筋周長 (4-D19 240mm)
 l_s : 重ね継手長さ ($30d_b$, 570mm)

5週時の図 11 では、ごみ溶融スラグを 50%置換したRMNSと既往のRM, RMM, 00Nの付着割裂強度はほぼ同等であった。しかし、ごみ溶融スラグを 100%置換したRMSはRMNSと比較して約 33%の付着割裂強度の低下が認められた。これは、ごみ溶融スラグの骨材表面が平滑なガラス質でありセメントペーストとの付着強度が小さいことが付着割裂強度の低下に影響を及ぼしたと推察される⁹⁾。1年時の図 12において、RMNS1Kの付着割裂強度は既往のRM1K, RMM1K, 00NKと同程度であった。ごみ溶融スラグを 100%置換したRMS1Kの付着割裂強度はRMNS1Kと比較して5週時と同様に低下したが、コンクリート強度の増加によって低下率は約19%となり5週時(約33%)と比較して減少した。これらのことからごみ溶融スラグの置換率の差異が付着割裂強度の低下に影響を及ぼす可能性が認められた。

7. 結論 再生粗骨材とごみ溶融スラグを併用した鉄筋コンクリート梁部材の構造特性を検討した結果、本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) ごみ溶融スラグを置換したコンクリートの乾燥収縮ひび割れは、ごみ溶融スラグを置換していない場合と比較して減少する傾向を示した。
- 2) 5週、1年時ともにごみ溶融スラグを 100%置換すると 50%置換した場合と比べて骨材表面の平滑さが原因と考えられる付着割裂強度の低下が認められた。

以上、再生粗骨材とごみ溶融スラグを併用し鉄筋コンクリート梁部材に適用した結果、吸水率の高い再生粗骨材を構造用コンクリートに使用した場合に

問題となる乾燥収縮ひび割れの発生がごみ溶融スラグを細骨材に置換することで低減することが明らかとなった。また、ごみ溶融スラグを 50%置換した場合の付着割裂強度は普通コンクリートと同等であったことから、ごみ溶融スラグと再生粗骨材を併用し鉄筋コンクリート構造物に適用する可能性が示されたと考える。

謝辞

本研究に際し、混和剤メーカーF社の皆様には試し練りや調合に関して多大な御協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本工業規格：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年7月
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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―，1999
- 6) 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
- 7) 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，pp. 693-694
- 8) 日本工業規格：JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法―第2部：コンタクトゲージ方法)，2001年6月
- 9) 斉藤丈士，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, 2004, pp. 81-86