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

再生骨材とごみ溶融スラグを併用した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　近年、世界的に地球環境の悪化や天然資源の枯渇という問題が顕在化し、その一方で廃棄物の発生量は増大している。そのため、地球環境を保全するために「循環型社会」への転換という概念が定着しつつある。しかし、最終処分場の不足問題は深刻化し、約 16 年後には許容量を超えると予想されている[1)]。また、一般廃棄物の処理実績をみると、最終処分場の4分の3程度が焼却灰によって占められている。このような最終処分場の延命化と環境汚染防止などの社会問題を背景に一般廃棄物を再資源化する技術が模索され、一般廃棄物を高温処理して溶融固化したもの（以下、ごみ溶融スラグと称する）を製造する技術が開発され、2006 年 7 月に 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）[2)]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多くは最終処分場で処理されている。また、建築物の解体時に発生するコンクリート塊を破砕して製造される再生骨材は原骨材の周りに付着するモルタル分の影響により吸水率が高い。そのため路盤材など利用用途が限定されている。しかし、道路工事などの公共事業の減少により利用できなくなると考えられ、路盤材以外の用途拡大が必要である。

以上よりごみ溶融スラグとコンクリート塊から製造される再生骨材を併用して鉄筋コンクリート構造物に適用できれば、循環型社会の形成に向け大きく貢献できると思われる。

既往の研究[3)]では、付着割裂強度はごみ溶融スラグを天然砂に対して置換する割合（以下、置換率と称す）を 50%とした試験体は置換率を100%とした試験体と比較して増加する傾向が見られた。

本研究は更なる再生骨材の利用拡大を踏まえごみ溶融スラグの置換率を 50%に統一し再生骨材と併用したＲＣ梁部材のフレッシュ性状と付着性状を検討したものである。

表-1 試験体詳細

試験体名	シリーズ	粗骨材置換率	細骨材置換率	載荷時期
1) RMRNS	RMRNS	砕石 50% 再生粗骨材 50%	天然砂 25% 再生砂 25% スラグ 50%	材齢5週
2) RMRNS1K				1年経過後
3) RMRS	RMRS		天然砂 0% 再生砂 50% スラグ 50%	材齢5週
4) RMRS1K				1年経過後
5) RMNS[3)]	RMNS	砕石 50% 再生粗骨材 50%	天然砂 50% スラグ 50%	材齢5週
6) RMNS1K[3)]				1年経過後
7) RMS[3)]	RMS		天然砂 0% スラグ 100%	材齢5週
8) RMS1K[3)]				1年経過後
9) 00N[4)]	N	砕石 100%	天然砂 100%	材齢5週

重ね継手長さ $\ell_s=30d_b=570$(mm)共通
b×D＝300×300mm共通

2.実験概要　表-1 に試験体詳細を示す。本研究

で使用したコンクリートは、天然砂に対して再生砂を25%置換した(RMRNSシリーズ)と50%置換した(RMRSシリーズ)の2シリーズとした。2シリーズともに粗骨材は再生粗骨材の置換率を50%とした。また、本研究は細骨材に使用した骨材の種類(天然砂、ごみ溶融スラグ、再生砂)やごみ溶融スラグの置換率の違いが付着性状に及ぼす影響を検討するため既往の RMNS シリーズ、RMS シリーズおよび N シリーズの実験結果と比較検討を行った[3)、4)]。

2.1 骨材の品質　**表-2** に使用した骨材の性質を示す。**写真-1** に本研究で使用した骨材形状を示す。再生粗骨材はコンクリート塊をジョークラッシャーで破砕して製造された中品質程度の再生粗骨材であり、細骨材として使用したごみ溶融スラグは習志野市芝園清掃工場に建設されたガス化・高温溶融一体型直接溶融炉で製造されたもので、粒度調整(磨砕、篩い分け)および磁気選別されたものである。このごみ溶融スラグは JIS A 5031[2)]の基準値である絶乾密度 2.5g/cm^{3}以上、実積率 53%以上、吸水率 3%以下を満たしていた。また有害物質は溶出試験の基準値[5)]を全て満足している。

2.2 調合　**表-3(a)**、**(b)**に調合表を示す。本実験で用いたコンクリートの調合はスランプ 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5%を目標とし、試し練りで水セメント比を 60%、65%、70%に変化させた調合設計を行い、材齢 4 週時に 21N/mm^{2}の圧縮強度が得られるよう水セメント比を決定した。単位水量は既往の調合[3)]を参考に 184kg/m^{3}とした。

2.3 試験体形状　**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とし、付着性状を検討するため純曲げ区間の下端に長さ 30db(570mm)の重ね継手を設けた。主筋は上端、下端とも 4-D19(SD345)を使用し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。

骨材形状(ごみ溶融スラグ)

骨材形状(天然砂)

骨材形状(再生砂)

写真-1 本研究で使用した骨材形状

表-2 骨材の性質

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 (%)
RMRNS RMRS	砕石	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
	再生砂	2.02	2.24	74.6	10.79
	ごみ溶融スラグ	2.82	2.83	61.3	0.38
RMNS[3)] RMS[3)]	砕石	2.72	2.74	63.8	0.77
	再生粗骨材	2.33	2.46	61.8	5.40
	天然砂	2.54	2.59	66.2	2.05
	ごみ溶融スラグ	2.82	2.83	61.3	0.38

表-3(a)調合表(骨材)

シリーズ	W/C (%)	単位質量(kg/m³)						
		W	C	細骨材			粗骨材	
RMRNS	59.6	184	309	天然砂	再生砂	ごみ溶融スラグ	砕石	再生粗骨
				212	186	464	473	425
RMRS	57.5	184	320	再生砂		ごみ溶融スラグ	砕石	再生粗骨
				368		459	473	425

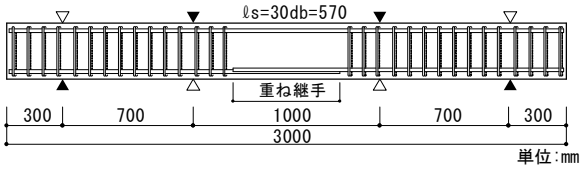
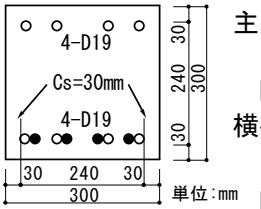


図-1 試験体形状



主筋 SD345
σ_y=369.8 (N/mm²)
Es=1.86×10⁵ (N/mm²)
横補強筋
σ_y=362.7 (N/mm²)
Es=1.88×10⁵ (N/mm²)

図-2 試験体断面

3.フレッシュ性状　表-4 にフレッシュ性状の試験結果を示す。**写真-2** に打設時のフレッシュ性状を示す。試し煉りにおいて再生砂の置換率を 25%とした RMRNS シリーズと 50%とした RMRS シリーズは材料分離が認められた。そのため、材料分離低減剤(SFCA)をアジテータ車に 0.3kg/m³ 添加し [6]、高速撹拌させ均一にした。材料分離低減剤(SFCA)添加後のフレッシュ性状は、スランプ値、フロー値ともに改善され材料分離は認められずＲＣ梁部材に打設するコンクリートのフレッシュ性状の品質を確保した。

4.ヤング係数　ヤング係数は式(1)により求めた。

$$E=33500\times k_1\times k_2\times\left(\frac{\gamma}{24}\right)^2\times\left(\frac{F_c}{60}\right)^{1/3}\quad(\mathrm{N/mm^2})\ (1)$$

ここで、γ:コンクリートの気乾単位容積重量

F_c:コンクリートの圧縮強度 σ_B の値

k_1=1.00

k_1=1.00

表-3(b)調合表(混和剤)

シリーズ	高性能AE減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)	消泡剤 (AE剤×%)	分離低減剤 (kg/m³)
RMRNS	1.083	-	-	SFCA
				0.3
RMRS	1.094	-	-	SFCA
				0.3

表-4 フレッシュ性状の試験結果

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(℃)
RMRNS	20.5	35.2×36.4	5.6	27.0
RMRS	20.0	35.3×35.1	4.8	28.0

フレッシュ性状(RMRNS)

フレッシュ性状(RMRS)

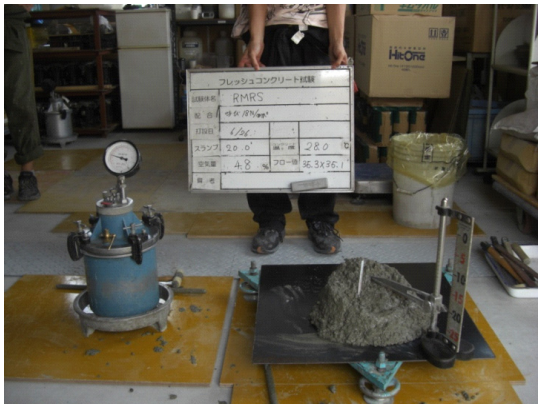


写真-2 打設時のフレッシュ性状

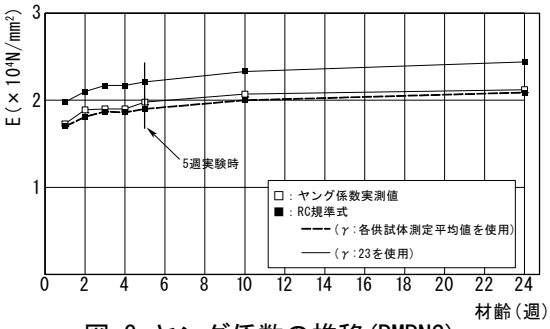


図-3 ヤング係数の推移(RMRNS)

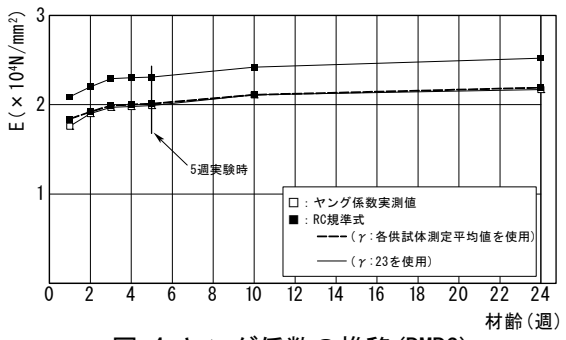


図-4 ヤング係数の推移(RMRS)

図-3 および**図-4** に RMRNS シリーズおよび RMRS 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[7]に用いられる普通コンクリートの単位容積重量 γ=23kN/m^3 を用いた計算値に比べ若干低下した。これは骨材として再生骨材を使用しており、再生骨材にはモルタル分や微粉末が付着しているため、普通コンクリートの骨材と比較し、再生骨材の表乾比重が低くなったためと考えられる。しかし、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同程度となった。

5. 実験結果

5.1 最終破壊形状　**表-5** に材齢 5 週時の実験結果一覧を、**写真-3** に最終破壊形状を示す。最終破壊形状はごみ溶融スラグを用いたことによる材料分離で懸念されたジャンカなどの影響は見られず、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の付着割裂破壊で想定した破壊形式となった。また、細骨材にごみ溶融スラグと再生砂を用いた影響は見られなかった。

5.2 変位性状　**図-3** に各試験体の荷重-変位曲線、**図-4** に包絡線を示す。加力は 2 点集中加力で正負繰返し載荷とし、荷重の制御は主筋の応力度が σ_t=100N/mm^2 ずつ増加するよう行った。また、変位は中央変位 δ を示した。

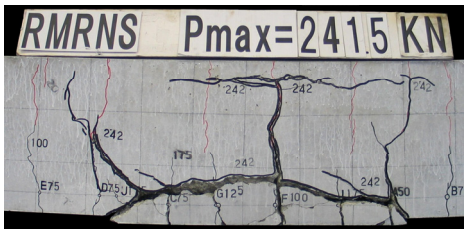
RMRNS、RMRS の正負加力時の履歴に大きな差は認められず、再生砂の置換率による変化は認められなかった。また、正加力時の初期剛性に

表-5 実験結果一覧(材齢 5 週時)

試験体名	コンクリート強度 σ_B (N/mm^2)	最大曲げひび割れ幅 Wmax (mm)	最大荷重 Pmax (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u\ exp.}$ (N/mm^2)
1) RMRNS	22.1	0.14	241.5	2.71
3) RMRS	25.3	0.10	251.0	2.82
5) RMNS[3]	22.7	0.14	296.8	3.33
7) RMS[3]	19.2	0.12	199.2	2.24
9) OON[4]	28.8	0.08	268.0	3.01

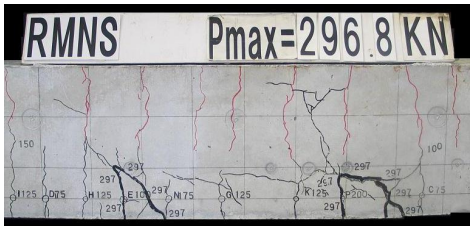
最大曲げひび割れ幅Wmaxは σ_t=200N/mm^2(P=150kN)時
破壊形式はすべて付着割裂破壊

RMRNS Pmax=241.5(kN)

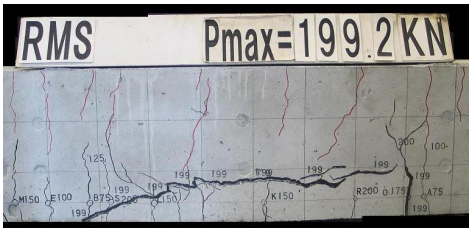


RMRS Pmax=251.0(kN)

RMNS Pmax=296.8(kN)



RMS Pmax=199.2(kN)



OON Pmax=268.0(kN)

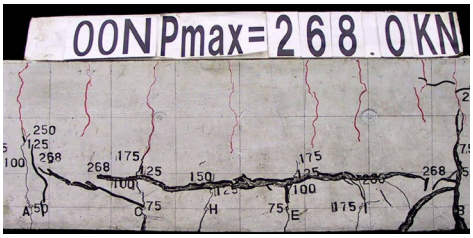


写真-3 最終破壊形状

差は認められず、最大荷重でも大きな差は見られなかった。再生砂の置換率 25%の RMRNS、置換率 50%の RMRS は既往のごみ溶融スラグの置換率 50%の RMNS、100%の RMS さらに普通コンクリートを使用した 00N と比較しても正加力時の初期剛性に差は認められなかった。

5.3 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[7]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溶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し、既往の試験体とも比較検討を行った。**図-5** に主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅 Wmax を示す。RMRNS、RMRS の Wmax は再生砂の置換率によらず 0.10mm～0.14mm で同等であり、RC 規準のひび割れ制限目標値の 0.25mm 以内となった。また、既往の試験体と比較しても長期許容応力度時の曲げひび割れ幅に差は認められなかった。

6. 付着割裂強度　付着割裂強度は式(2)により求めた。

$$\tau_{u\,exp.} = \frac{M_u}{j \cdot \phi \cdot \ell s} \quad (N/mm^2) \qquad (2)$$

ここで　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)

ϕ：鉄筋周長(4-D19 240mm)

ℓ s：重ね継手長さ(30db 570mm)

図-6 に付着割裂強度を示す。再生砂の置換率を 25%とした RMRNS、50%とした RMRS の付着割裂強度は、同等であり再生砂の置換率による違いは見られなかった。また、既往の普通コンクリートである 00N と同等であった。しかし、既往のごみ溶融スラグの置換率を 50%とした RMNS と比較すると付着割裂強度は低下した。これは、ごみ溶融スラグの粒子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

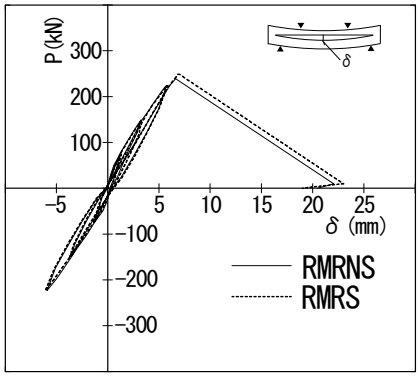


図-3　荷重-変位曲線

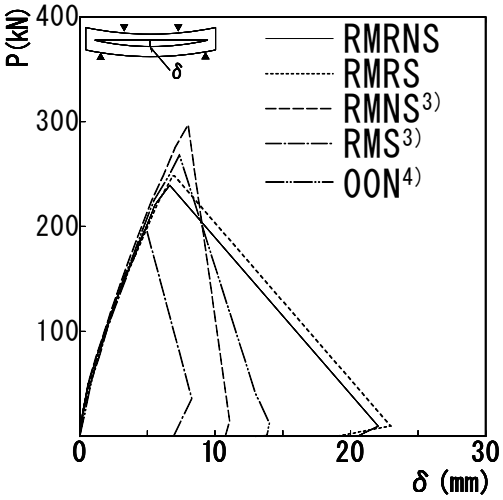


図-4　荷重-変位曲線(包絡線)

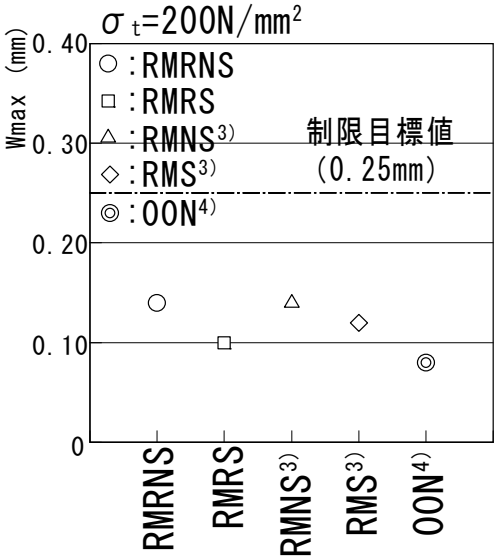


図-5 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅

いこと[8]、また再生砂を用いていることが付着割裂強度の低下に影響を及ぼしているものと推察される。

7. まとめ　ごみ溶融スラグと中品質再生骨材を用いた鉄筋コンクリート梁部材のフレッシュ性状と付着性状について検討を行った結果、本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

1) ごみ溶融スラグを再生砂に置換した場合、フレッシュ性状に材料分離が認められたが材料分離低減剤(SFCA)を添加することで改善することができた。
2) 細骨材の置換率の違いが初期剛性に及ぼす影響について違いは認められなかった。
3) 材齢5週時の付着割裂強度は、再生砂の置換率を25%とした場合、と置換率50%の場合で違いが見られず、普通コンクリートと同等である。

現在、材齢1年経過時に載荷する試験体および暴露試検体を保存している。今後はごみ溶融スラグの持つ骨材性質および再生砂の置換率の違いが付着性状に及ぼす影響について検討を行う必要があると考える。

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。葛西再生コンクリート工場には再生骨材を供与していただきました。また、株式会社フローリックの方々には試し練りや調合に関して多大なご協力をいただきました。

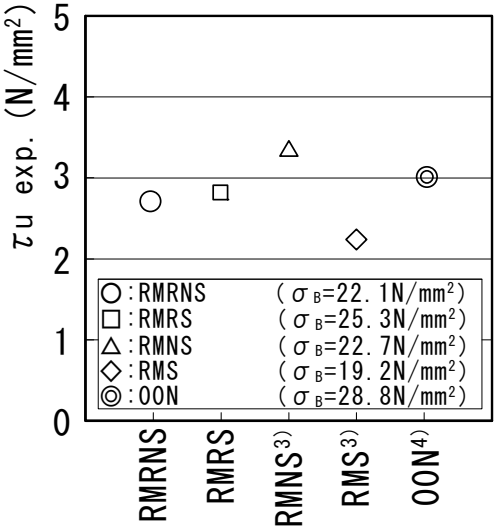


図-6 付着割裂強度

参考文献

1) 環境省報道発表資料: 一般廃棄物の排出及び処理状況等(平成 18 年度実績)について, 2008年11月
2) 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
3) 高橋幸裕，師橋憲貴，桜田智之：ごみ溶融スラグと中品質再生粗骨材を併用した RC 梁部材の基礎的研究―その1　フレッシュ性状と付着性状―日本大学生産工学部第 40 回学術講演会，2007年12月，pp.39-42
4) 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
5) 厚生省生活衛生局水道環境部長通知:一般廃棄物の溶融固化物の再利用の実施促進について，1998年3月
6) 田中礼治，北辻政文，東海隼人，大芳賀義喜：ごみ溶融スラグを細骨材にした再生コンクリートを用いたはり部材に関する実験研究(再生コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造に関する研究 ―その 4―)，日本建築学会構造系論文集，第 551 号，pp.103-109，2002年1月
7) 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
8) 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，pp.81-86，2004