

論文 普通細骨材を溶融スラグで置換し5年間屋外に暴露した再生骨材コンクリート梁部材の付着割裂強度

師橋 憲貴*1

要旨：本論文は、1700～1800℃の高温溶融帯で溶融処理された一般廃棄物から排出される溶融スラグの利用について検討を行ったものである。溶融スラグは、再生骨材コンクリートの乾燥収縮率の抑制を目的として天然細骨材を溶融スラグで置換する方法で利用した。再生骨材コンクリートを打設後、屋外に暴露した梁部材は材齢5年まで保存し構造実験を行った。結果として、5年間屋外に暴露し溶融スラグを用いた再生骨材コンクリート梁部材の付着割裂強度は、置換率を変化させた差異は認められず1年実験時および2年実験時に比較して高い値を示すことが明らかとなった。

キーワード：溶融スラグ、再生骨材コンクリート、付着割裂強度、屋外暴露、乾燥収縮ひび割れ

1. はじめに

本研究は、1700～1800℃の高温溶融帯で溶融処理された一般廃棄物から排出される溶融スラグの利用について検討を行ったものである¹⁾。溶融スラグは、再生骨材とともに併用し、再生骨材コンクリートの細骨材における普通細骨材(天然砂)を溶融スラグで置換して利用した。再生骨材は鉄筋コンクリート構造物の解体の際に産業廃棄物として排出されるコンクリート塊を再資源化したものである。再生骨材はJIS化されたものの、比較的製造が容易な中品質再生骨材以下の品質においては、再生骨材の吸水率が高いため再生骨材コンクリートの乾燥収縮が大きくなる傾向がある^{2),3),4),5)}。そのため、再生骨材コンクリートは一般には普及していないのが現状である。

そこで本研究は再生骨材コンクリートの乾燥収縮を抑制するため、吸水率の小さい溶融スラグを再生骨材コンクリートの細骨材として利用したものである。普通細骨材と溶融スラグの併用による付着性状への影響を検討するため、普通細骨材を溶融スラグで置換する割合は4シリーズに設定した。溶融スラグを用いた再生骨材コンクリート梁部材の耐久性を把握する観点から、本研究はコンクリート打設後から梁部材を屋外に暴露し、材齢5年目に梁部材を載荷して、溶融スラグを用いた再生骨材コンクリート梁部材の付着性状について検討を行った。なお、養生条件の違いによる差異を比較するため、屋内に材齢5週、材齢1年および材齢2年まで保存した梁部材の付着割裂強度との比較を行い^{6),7)}、屋外に暴露して風雨や直射日光を受けた状態の下で発生した乾燥収縮ひび割れが付着割裂強度に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

表-1に試験体種別を、また表-2に再生骨材コンクリートの調合表を示す。本研究では付着性状を知るため

の基礎的研究として、コンクリートの粗骨材は普通粗骨材(碎石)を中品質再生粗骨材で50%置換した。細骨材は普通細骨材(天然砂)を溶融スラグで置換する割合(以下、置換率という)を25%、50%、75%、100%と変化させ、

表-1 試験体種別

試験体名	シリーズ 置換率	載荷時期
1) RM0S	RM0Sシリーズ： 中品質再生粗骨材50%・ 碎石50% 溶融スラグ0%・ 天然砂100%	材齢5週
2) RM0S1K		1年 保存後
3) RM0S2K		2年 保存後
4) RM25S	RM25Sシリーズ： 中品質再生粗骨材50%・ 碎石50% 溶融スラグ25%・ 天然砂75%	材齢5週
5) RM25S1K		1年 保存後
6) RM25S2K		2年 保存後
7) RM25S5E		5年 暴露後
8) RM50S	RM50Sシリーズ： 中品質再生粗骨材50%・ 碎石50% 溶融スラグ50%・ 天然砂50%	材齢5週
9) RM50S1K		1年 保存後
10) RM50S2K		2年 保存後
11) RM50S5E		5年 暴露後
12) RM75S	RM75Sシリーズ： 中品質再生粗骨材50%・ 碎石50% 溶融スラグ75%・ 天然砂25%	材齢5週
13) RM75S1K		1年 保存後
14) RM75S2K		2年 保存後
15) RM75S5E		5年 暴露後
16) RM100S	RM100Sシリーズ： 中品質再生粗骨材50%・ 碎石50% 溶融スラグ100%・ 天然砂0%	材齢5週
17) RM100S1K		1年 保存後
18) RM100S2K		2年 保存後
19) RM100S5E		5年 暴露後

置換率：普通骨材を再生骨材あるいは溶融スラグで置換する割合

*1 日本大学生産工学部建築工学科 教授 博士(工学)(正会員)

熔融スラグの置換率の変化が熔融スラグを用いた再生骨材コンクリート梁部材の付着割裂強度にどのような影響を及ぼすのか検討を行った。また、経年にともなう付着割裂強度の差異を検討するため、屋外に暴露してから5年間経過する途中における実験棟内に保存した梁部材の5週時、1年時および2年時の結果との比較を行った。本研究で用いた熔融スラグは千葉県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により製造されたもので吸水率は0.96%および0.38%となっており、表-3に示す普通細骨材(天然砂)の吸水率に比較して小さい。付着割裂強度の検討にあたっては、熔融スラグを利用していない梁部材(RM0S シリーズ)を実験棟内に保存した2年時までの結果とも比較した。

図-1 に試験体断面を、また図-2 に試験体形状を示す。試験体は純曲げ区間の下端に長さ30db(db:主筋の公称直径)の重ね継手を設け付着性状を検討する梁形式とした。主筋は上端と下端ともに4-D19(SD345)を配筋し、主筋から側面および底面までのかぶり厚さは30mmとしてサイドスプリット型の付着割裂破壊を想定して付着割裂強度の検討を行った。鉄筋の材料特性は表-4に示すように主筋および横補強筋ともに普通強度の鉄筋(主筋SD345、横補強筋SD295A)を使用した。

3. 再生骨材コンクリートの圧縮強度

表-5 に再生骨材コンクリートの力学特性を、また図-3 に材齢が5年経過するまでの再生骨材コンクリートの圧縮強度の推移を示す。圧縮強度の測定は封かん養生(厚地のビニールを用いて密閉)とした円柱供試体(以下、テストピースという)を用いて行った。圧縮強度の推移についてみるとばらつきがあるものの5週実験時以降1年実験時および2年実験時までは圧縮強度の上昇が認められたが、5年実験時は2年実験時と比較して圧縮強度の低下が認められた。これは、材齢の経過に際し封かん養生としたテストピースの水分逸散による乾燥収縮にともない強度が低下したものと考える。

4. 乾燥収縮率および乾燥収縮ひび割れ

図-4 に乾燥収縮率の推移を示す。乾燥収縮率の測定はJIS A 1129 コンクリートの長さ変化試験方法で用いられる100mm×100mm×400mmの長さ変化角柱供試体を恒温恒湿室(室温20℃±2℃、湿度60%±5%)に保存して行った⁸⁾。乾燥収縮率の推移は5週実験時、26週および52週(1年実験時)に掛けて収縮率の増加が認められるが、1年実験時以降5年実験時に至るまでは乾燥収縮率は横ばいとなり、乾燥収縮率の増加は僅かであった。普通細骨材(天然砂)を熔融スラグで25%置換したRM25S(○印)は5年実験時に1000×10⁻⁶を上回る値となった。一方、普通

表-2 再生骨材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	
				天然砂	熔融スラグ	碎石	再生
RM0S	65.0	180	277	816	—	503	455
RM25S	65.0	184	283	653	238	473	424
RM50S	72.5	184	254	448	490	473	424
RM75S	65.0	184	283	218	713	473	424
RM100S	69.4	184	265	—	968	473	424

呼び強度：18N/mm²，粗骨材の最大寸法：20mm，
指定スランプ：18cm

表-3 使用した骨材の品質

シリーズ		絶乾密度 (g/cm ³)	実績率 (%)	吸水率 (%)
RM0S	碎石	2.70	61.5	0.60
	再生粗骨材	2.37	62.5	4.58
	天然砂	2.54	66.7	1.96
RM25S RM75S	碎石	2.70	60.9	0.74
	再生粗骨材	2.36	61.7	4.58
	天然砂	2.54	68.3	1.85
RM50S RM100S	熔融スラグ	2.79	61.3	0.96
	碎石	2.72	63.8	0.77
	再生粗骨材	2.33	61.8	5.40
	天然砂	2.51	66.2	2.05
	熔融スラグ	2.82	61.3	0.38

表-4 鉄筋の材料特性

シリーズ	使用箇所	使用鉄筋	σ_y (N/mm ²)	ϵ_y (%)	σ_{max} (N/mm ²)	E (×10 ⁵ N/mm ²)
RM0S	主筋	D19 (SD345)	376	0.21	556	1.81
	横補強筋	D10 (SD295A)	363	0.19	514	1.88
RM25S RM75S	主筋	D19 (SD345)	370	0.20	539	1.86
	横補強筋	D10 (SD295A)	363	0.19	491	1.88
RM50S RM100S	主筋	D19 (SD345)	376	0.21	556	1.81
	横補強筋	D10 (SD295A)	363	0.19	514	1.88

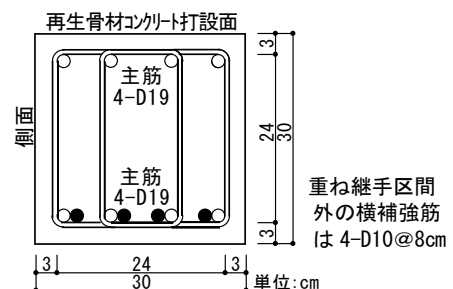


図-1 試験体断面

細骨材(天然砂)を熔融スラグで 100%置換した RM100S (△印)は 5 年実験時で 600×10^{-6} を上回る程度で、熔融スラグの置換率が大きい場合には乾燥収縮率が小さい値を示した。

図-5 a)～c)に屋外に暴露した梁部材(RM75S5E)の側面南側における乾燥収縮ひび割れの発生状況を 2 年, 3 年および 5 年経過時について例示する。屋外に曝露した梁部材は、材齢 1 年から材齢 2 年の間で乾燥収縮ひび割れが発生し始め、材齢 2 年から材齢 3 年の間で乾燥収縮ひび割れの発生が顕著となった。材齢 3 年以降材齢 5 年までは乾燥収縮ひび割れの増加はさほど認められなかった。また、屋外に暴露した材齢 5 年時における各梁部材の乾燥収縮ひび割れ発生状況を比較すると、熔融スラグの置換率に拠らず、何れの梁部材においても微細な乾燥収縮ひび割れの発生が多数認められた。これは、屋外に暴露した梁部材は風雨や直射日光等による乾湿の繰り返し作用を受けたためと考える。材齢 5 年時において梁部材表面のコンクリートの剥離(ポップアウト)および中性化による鉄筋の錆にともなう錆汁の発生は一切認められなかった。

5. 実験結果

表-6 に実験結果一覧を示す。各梁部材の破壊形式は 5 週実験時は曲げ降伏以前の付着割裂破壊、5 年実験時は曲げ降伏が先行する曲げ降伏後の付着割裂破壊となった。1 年実験時および 2 年実験時は梁部材により曲げ降伏前の付着割裂破壊および曲げ降伏後の付着割裂破壊が混在する結果となった。

5.1 長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅

図-6 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。主筋長期許容応力度は日本建築学会 鉄筋コンクリート構造計算規準(以下、RC 規準⁹⁾という)に示される梁の降伏曲げモーメントの算定に使用する略算式により計算した主筋の平均応力度 $\sigma_t=200\text{N/mm}^2$ 時(正載

荷時の荷重 $P=150\text{kN}$)とした。梁の降伏曲げモーメントの算定に使用する略算式を式 (1) に示す。

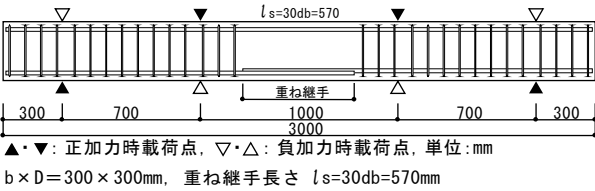


図-2 試験体形状

表-5 再生骨材コンクリートの力学特性

試験体名	載荷時期	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)
1) RM0S	材齢5週	27.5	2.26	1.68
2) RM0S1K	1年保存後	32.3	2.31	2.37
3) RM0S2K	2年保存後	35.8	2.39	2.67
4) RM25S	材齢5週	27.2	2.18	2.12
5) RM25S1K	1年保存後	35.5	2.41	3.00
6) RM25S2K	2年保存後	35.8	2.41	2.41
7) RM25S5E	5年暴露後	32.3	2.35	2.35
8) RM50S	材齢5週	21.3	2.09	1.85
9) RM50S1K	1年保存後	29.5	2.42	2.54
10) RM50S2K	2年保存後	33.0	2.44	2.98
11) RM50S5E	5年暴露後	27.3	2.18	2.17
12) RM75S	材齢5週	24.4	2.18	2.38
13) RM75S1K	1年保存後	35.0	2.39	2.68
14) RM75S2K	2年保存後	34.1	2.36	2.40
15) RM75S5E	5年暴露後	31.8	2.55	2.55
16) RM100S	材齢5週	17.7	1.92	1.40
17) RM100S1K	1年保存後	27.9	2.28	2.10
18) RM100S2K	2年保存後	29.5	2.29	2.71
19) RM100S5E	5年暴露後	25.5	1.92	1.54

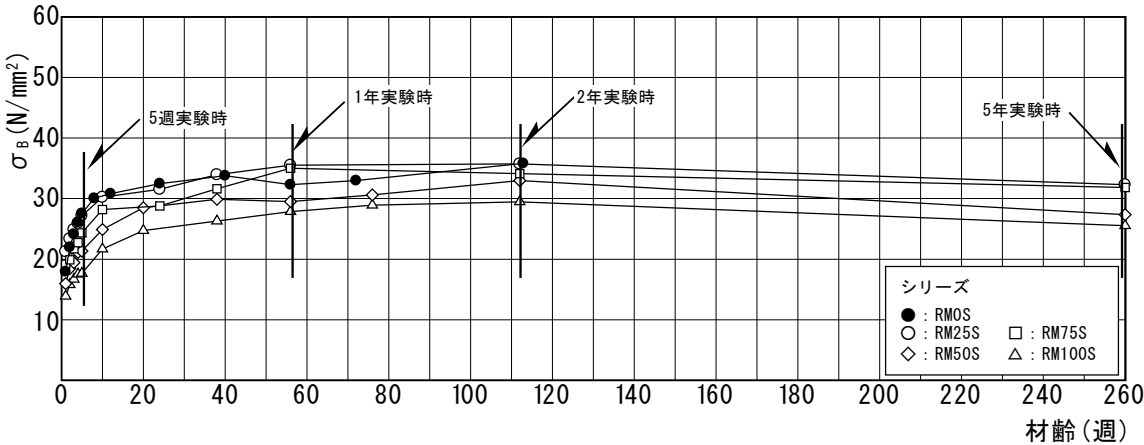


図-3 再生骨材コンクリートの圧縮強度の推移

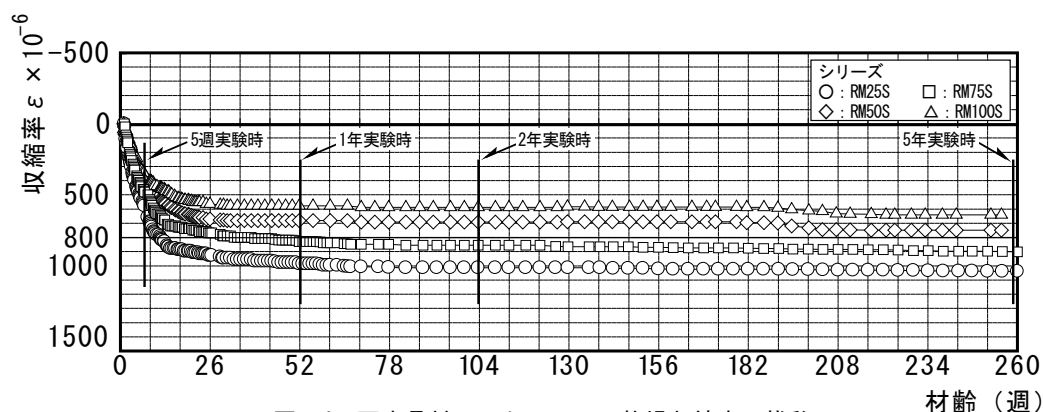


図-4 再生骨材コンクリートの乾燥収縮率の推移

$$M = at \cdot \sigma_t \cdot j \quad (N \cdot mm) \quad (1)$$

ここで M : 曲げモーメント at : 主筋の断面積 (mm^2)

σ_t : 主筋の平均応力度 (N/mm^2)

j : 応力中心間距離 ($(7/8)d$, d : 梁有効せい (mm))

ひび割れ幅の測定は純曲げ区間の主筋重心線上をマイクロスコップを用いて行った。 W_{max} はRC規準6条許容応力度の解説に示される鉄筋の長期許容応力度時の制限目標値の上限である0.25mm(建物外面)を下回った。また、屋内に保存した2年経過時の梁部材では、RM0S, RM25S, RM75Sシリーズの W_{max} に若干の上昇が見られた。屋外に暴露した5年経過時の梁部材では、RM50S, RM75S, RM100Sシリーズの W_{max} に若干の上昇が見られた。これらのことから総じて材齢が経過した後には構造実験を行った梁部材は、載荷前に発生した乾燥収縮ひび割れの影響により主筋長期許容応力度時の W_{max} が増加する傾向があるものと考えられる。

5.2 最終破壊形状

写真-1 a)~d)はRM75Sシリーズの5週、1年、2年および5年経過時の梁部材全長の最終破壊形状を示したものである。また、写真-2はRM75S5Eの5年経過時の純曲げ区間の最終破壊形状を示したものである。梁の上端から発生したひび割れは負載荷時の曲げひび割れを表したものである。正載荷時のひび割れは、純曲げ区間に初期曲げひび割れが発生した。その後、純曲げ区間外に曲げせん断ひび割れが発生した。写真-2の純曲げ区間の最終破壊形状に示すように、最終破壊は最大荷重時に急激に梁部材の軸方向に沿った水平なひび割れが重ね継手区間の長さに渡り発生するサイドスプリット型の付着割裂破壊となった。屋外に暴露し5年経過時に載荷した梁部材の最終破壊形状は屋内に保存した5週、1年および2年経過時までの梁部材と比較して差異は認められなかった。

5.3 変位性状

図-7に荷重-変位曲線をRM75Sシリーズを例に示し

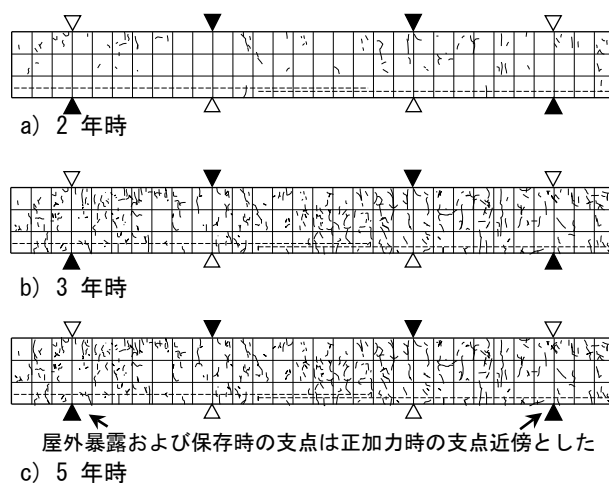


図-5 乾燥収縮ひび割れの発生状況 (RM75S5E)

表-6 実験結果一覧

試験体名	コンクリート強度 σ_B (N/mm^2)	最大荷重 P_{max} (kN)	付着割裂強度 $\tau_{u, exp.}$ (N/mm^2)	破壊形式
1) RM0S	27.5	264.0	2.96	S
2) RM0S1K	32.3	289.2	3.26	
3) RM0S2K	35.8	267.0	3.00	
4) RM25S	27.2	278.0	3.12	S
5) RM25S1K	35.5	260.0	2.92	
6) RM25S2K	35.8	293.5	(3.29)	FS
7) RM25S5E	32.3	290.0	(3.26)	
8) RM50S	21.3	296.8	3.33	S
9) RM50S1K	29.5	291.0	(3.27)	FS
10) RM50S2K	33.0	286.0	3.21	S
11) RM50S5E	30.8	298.5	(3.35)	FS
12) RM75S	24.4	223.0	2.50	S
13) RM75S1K	35.0	225.5	2.53	
14) RM75S2K	34.1	255.0	2.86	
15) RM75S5E	31.8	300.2	(3.37)	FS
16) RM100S	17.7	199.2	2.24	S
17) RM100S1K	27.9	235.5	2.64	
18) RM100S2K	29.5	250.5	2.81	
19) RM100S5E	29.1	315.5	(3.54)	FS

$\tau_{u, exp.}$: 5.4節の式(2)による。
破壊形式のSは付着割裂破壊, FSは曲げ降伏後の付着割裂破壊を示す。

た。加力は2点集中による正負繰返し载荷を行った。加力の履歴はRC規準⁹⁾に示される梁の降伏曲げモーメントの算定を行う略算式により計算した主筋の平均応力度(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。RM75Sシリーズにおいては5週実験時、1年実験時および2年実験時が曲げ降伏前の付着割裂破壊となり、5年実験時は曲げ降伏後の付着割裂破壊となった。曲線が重なって解かり難いが、正加力時の曲げ剛性は、破線の5週実験時に比較して1年実験時、2年実験時および5年実験時の剛性が若干低くなる傾向が認められた。これは5週実験時以降では乾燥収縮ひび割れによるき裂の発生により剛性が低下したものと考える。

5.4 付着割裂強度の評価

図-8に各シリーズの付着割裂強度を示す。付着割裂強度 $\tau_{u\text{exp}}$ は式(2)による最大荷重時平均付着応力度であり、式(2)中の M_u は最大荷重を基に求めた最大曲げモーメントの実験値である。本研究では主筋に普通強度鉄筋SD345を使用したため、表-6に示したように曲げ降伏が先行し、破壊形式が曲げ降伏後の付着割裂破壊となった梁部材が含まれているが、それらの梁部材についても最大荷重を用いて $\tau_{u\text{exp}}$ を求め、図-8中には()を付して示した。

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

ここで M_u : 最大曲げモーメント (N・mm)

j : 応力中心間距離 ((7/8) d , d : 梁有効せい (mm))

ϕ : 鉄筋の周長 (mm) l_s : 重ね継手長さ (mm)

5年間屋外に暴露した梁部材(■印)の各シリーズにおける付着割裂強度は置換率を25%~100%に変化させた差異は認められず1年実験時および2年実験時に比較して高い値を示す傾向が認められた。藤井らの研究により付着割裂強度はコンクリートの割裂強度に依存し、また割裂強度はコンクリートの圧縮強度の平方根に比例することが知られている¹⁰⁾。図-3に示したように5年実験時のテストピースの圧縮強度は2年実験時と比較して低下が認められたが、梁部材の内部の構造体コンクリートの状態としては健全であり圧縮強度が低下することはないと推察される。さらに、屋外に暴露したことにより梁部材の表面には微細な亀裂が生ずることとなったが、この微細な亀裂が付着割裂強度に影響を与えることはほとんどなかったものとする。

一方、実験棟内に保存した2年実験時までの置換率75%, 100%のRM75S, RM100Sシリーズは、置換率0%, 25%, 50%のRM0S, RM25S, RM50Sシリーズに比較して

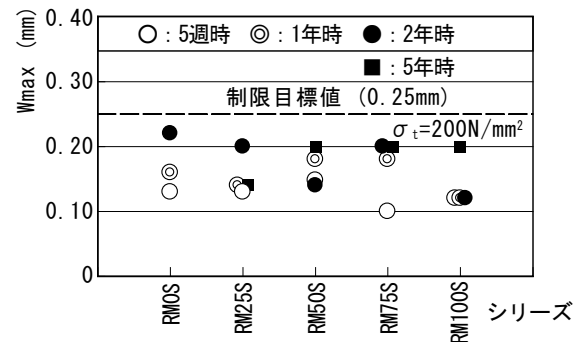


図-6 主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅



a) RM75S(5 週時) Pmax = 223.0 kN



b) RM75S1K(1 年時) Pmax = 225.5 kN



c) RM75S2K(2 年時) Pmax = 255.0 kN



d) RM75S5E(5 年時) Pmax = 300.2 kN

写真-1 最終破壊形状



写真-2 最終破壊形状 (RM75S5E(5 年時)・純曲げ区間)

付着割裂強度が低い値を示す傾向が認められた。表-5の割裂強度 σ_T に示したように、2年実験時のRM75S2KおよびRM100S2Kの割裂強度は2.40 N/mm²および2.71 N/mm²となっており必ずしも低い値ではないことから、溶融スラグの置換率を高く設定した場合は梁部材の付着割裂強度が不利となる傾向のあることが明らかとなった。

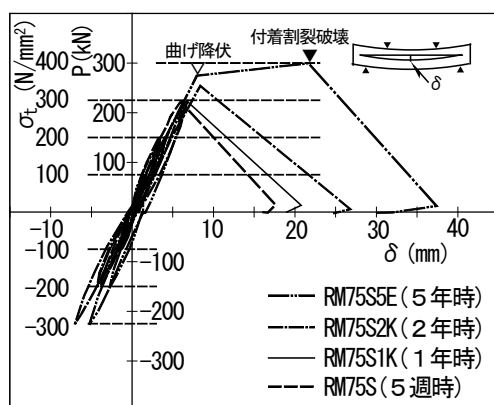


図-7 荷重-たわみ曲線

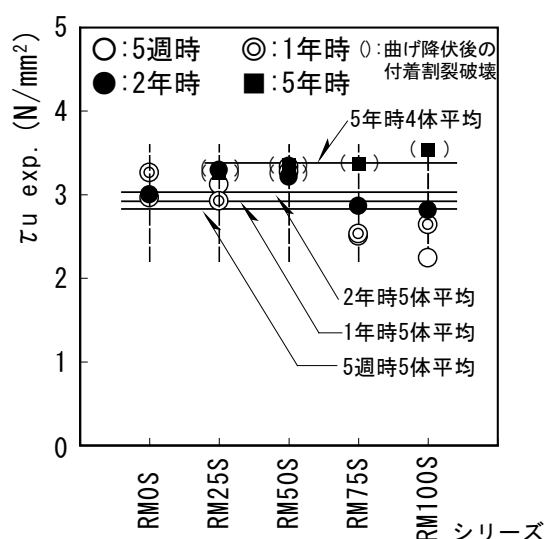


図-8 付着割裂強度

6. 結論

普通細骨材を溶融スラグで置換し5年間屋外に暴露した再生骨材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) 乾燥収縮率は1年実験時以降5年実験時に至るまで増加は僅かであり、置換率が大きい場合(100%)に乾燥収縮率は小さい値となった。
- 2) 屋外に暴露した材齢5年時における梁部材の乾燥収縮ひび割れの発生状況は、溶融スラグの置換率に拠らず微細な発生が多数認められた。
- 3) 最終破壊形状は屋外で暴露を行い5年経過時に載荷した梁部材および屋内に保存した梁部材ともにサイドスプリット型の付着割裂破壊となった。
- 4) 材齢が経過した後に構造実験を行った梁部材は、乾燥収縮ひび割れの影響により主筋長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅が増加する傾向が認められた。
- 5) 付着割裂強度は置換率を変化させた各シリーズにおいて、屋外に暴露した5年実験時は、屋内に保存した1年実験時および2年実験時に比較して高い値を示す傾向が認められた。

向が認められた。

以上、再生骨材コンクリートの乾燥収縮の抑制を目的として、溶融スラグを用い、材齢5年に至るまで乾燥収縮の測定および乾燥収縮ひび割れを観察し構造実験を行った。その結果、屋外に暴露した梁部材においては、屋内に保存した梁部材とは異なり微細な乾燥収縮ひび割れが多数発生したが、付着割裂破壊は屋内に保存した梁部材に比較して高い値を示す傾向が認められた。今後は、付着割裂強度式による計算値と実験値について比較検討を行って行きたいと考えている。

謝辞

本研究は日本大学生産工学研究所所管大型研究機器構造物試験機自動計測制御システムを用いて行った。習志野市芝園清掃工場には溶融スラグの使用を快諾していただいた。東京建設廃材処理協同組合 葛西再生コンクリート工場には再生骨材を供与していただき、混和剤メーカーF社の方々には調合に関して多大なるご協力をいただいた。ここに記して関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) (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，2010.7.20 改正
- 2) (財) 日本規格協会：JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H，2011.5.20 改正
- 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，2012.7.20 改正
- 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，2012.7.20 改正
- 5) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案），2014.10.20
- 6) 師橋憲貴，桜田智之，三橋博巳：高流動再生コンクリートを適用した梁部材の付着特性に関する実験的研究，構造工学論文集，No. 58B，pp. 1～8，2012.3
- 7) 金子皓樹，師橋憲貴，桜田智之：置換率の異なるごみ溶融スラグを適用した RC 梁部材の付着性状—2年経過後の付着割裂強度—，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp. 259～260，2011.8
- 8) (財) 日本規格協会：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—，2010.8.10 改正
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010 改定
- 10) 藤井栄，森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究—第2報 付着割裂強度算定式の提案—，日本建築学会論文報告集，No. 324，pp. 45～53，1983.2