

論文 中品質の再生粗骨材を用いた再生コンクリート梁の強度と破壊性状に関する実験的研究

森脇 和己*1 ・ 大谷 恭弘*2

要旨: 中品質の再生粗骨材を用いて、骨材種類と付着モルタルの水セメント比及び試験体練り混ぜ時の水セメント比を実験パラメータとして再生コンクリート梁を作製し、中品質再生粗骨材が部材レベルでの強度、破壊性状に与える影響について調べることを目的として実験的研究を行った。その結果、砕石再生粗骨材を用いた梁では、せん断破壊性状に影響を与え、せん断耐力を低下させる可能性があることがわかった。

キーワード: 中品質再生粗骨材, RC梁, せん断, 耐力

1. はじめに

近年、地球温暖化問題・産業廃棄物の処理問題などの環境問題の観点から、建物の解体・処理において発生するコンクリート塊の再生処理・循環利用が重要視されている。しかし、再生処理を施された骨材に関して、そのほとんどは路盤材や埋め立てコンクリートに用いられているに過ぎず、一定以上の品質が求められるコンクリート構造物にはほとんど使用されていない。この原因の一つには、高品質の骨材を製造するのに多くのコスト・エネルギーを要することがあげられる。このような背景を受けコスト・エネルギー面で優れる中品質再生骨材の構造部材への適用が求められている。中品質再生骨材を構造部材に用いるに当たっては、まずそれらを用いた再生コンクリートの材料レベルでの性状を把握するとともに、部材に用いた場合の性能について検討する必要がある。入江等²⁾³⁾は、品質や性状が既知の種々の中品質再生粗骨材を準備し、それらを用いて、水セメント比のみをパラメータとして変化させた再生コンクリートにより、材料レベルでの試験を網羅的に実施し、それらの性状について報告している。そこで、本研究では入江等が準備したものと同一中品質再生粗骨材を用いて再生コンクリート梁を作製し、再生粗骨材の品質が部材レベルでの破壊性状・性能に与える影響を解明すること、中品質再生粗骨材を用いた部材が現行の設計式を満足するものかどうかを検討することを目的として実験的研究を行った。

2. 既往の研究

入江等の研究²⁾³⁾においては、比較的品質の低い再生粗骨材の比重や吸水率、およびその再生粗骨材の付着モルタルの品質の違いが、それらを用いた再生コンクリートの力学的特性、耐久性状に及ぼす影響、またその影響要因とその傾向を明らかにすることを目的として、各種性状実験を行い、実用化をふまえた中品質の再生粗骨材を用

いたコンクリートの調査設計への影響評価手法を提案している。以下では、その概要を紹介する。

2.1 再生粗骨材の準備

品質が明らかとなっている砕石と、川砂利を想定した山砂利の2種類を粗骨材に用い、3種類の水セメント比(60%, 50%, 40%)で打設・製造した6種類 of 原コンクリート塊から再生粗骨材は生成されており、打設後1.5年経過した原コンクリート塊を破碎し、再生処理を施して分級・分別したものである。当該研究では、再生処理を施した後、さらに約一年間屋外に安置した再生粗骨材が使用されている。

2.2 強度性状

当該研究では、準備した再生粗骨材をその比重及び吸水率により、JISに基づきH,M,Lクラスに分類し、特にMクラスの中から原コンクリート強度は異なるが、比重と吸水率の値が比較的近い数種類の再生粗骨材を選出して、再生コンクリートの材料試験を実施している。再生コンクリートの調合では、パラメータとして水セメント比(65%,55%,45%,35%)を変化させ、対象とした数種類の再生粗骨材に原骨材の場合も加えて、それらの網羅的な組み合わせで実験を行っている。再生コンクリートの調合は

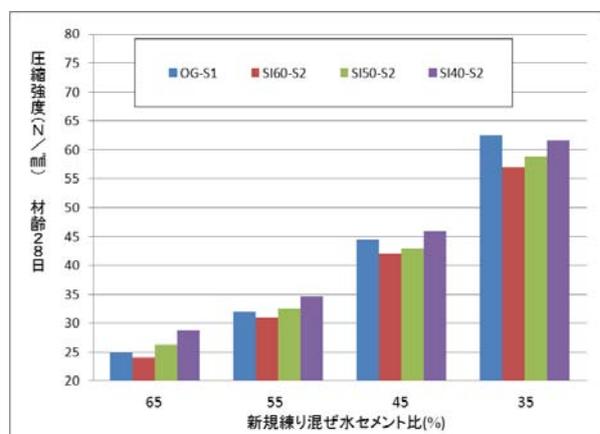


図-1 圧縮強度-練り混ぜ W/C (砕石)

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授(正会員)

全て単位水量 175kg/m³で同一として、セメント量で w/c を調整し、粗骨材体積が同一となる様に決定した。尚、以下では付着モルタル（原コンクリート）の水セメント比を「付着モルタル水セメント比(W/C)」, 新規に作製した再生コンクリートの練り混ぜ水セメント比を「練り混ぜ水セメント比(W/C)」と呼ぶ。図-1は横軸に新規練り混ぜコンクリートの水セメント比、縦軸に材齢 28 日において実施した碎石再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度を示す。ここで SI(YA)○○-S□とは、碎石（山砂利）を用いて水セメント比○○の原コンクリートから製造された、処理回数□回の再生粗骨材である。図-1より同一練り混ぜ水セメント比ならば、付着モルタル水セメント比が小さいほど強度が高い傾向がみられる。しかし、練り混ぜ水セメント比の方が付着モルタル水セメント比の違いによる差異よりも支配的であると結論付けられている。

3. 再生コンクリート梁の載荷実験

本研究では再生粗骨材を用いた再生コンクリート部材の破壊性状と性能を確認するため、梁の曲げ・せん断実験を行った。骨材種類と付着モルタルの水セメント比及び練り混ぜの水セメント比を実験パラメータとして変化させている。それ以外は同条件とするため、断面形状及び配筋の同じ梁試験体を用意し、同一載荷条件のもとで実験を行った。

3.1 使用再生粗骨材

使用した再生粗骨材は、前述の入江等²⁾³⁾が生成・準備したものである。再生処理を施した後、2年から3.5年屋外に安置したものを使用した。それらの絶対密度、吸水率、モルタル付着率、原コンクリート強度を表-1、JIS規格における各品質区分を図-2に示す。原コンクリート強度は製造後1.5年経過したシリンダ圧縮強度である。尚、調合に使用した再生粗骨材は表乾状態のものを用意した。

3.2 梁試験体コンクリートの調合と強度

表-1の再生粗骨材を用いて、碎石再生粗骨材を用いた試験体を6体、山砂利再生粗骨材の試験体を6体製作

した。碎石に関しては、比較のため原コンクリートに使用した天然原骨材を用いた試験体も用意した。表-2に各コンクリートの調合の一覧を示す。試験体名称の末の数字は練り混ぜ水セメント比を示している。これらの調合は、前述の入江等の研究において、再生コンクリート試験体を製作する際に用いた調合と基本的に同じである。また、調合時の目標スランプ値、空気量はそれぞれ18cm,4%とした。練り混ぜには傾胴形重力式ミキサーを使用した。ミキサーの容量により梁試験体を複数回にわけて打設し、それぞれのバッチで圧縮・引張・破壊エネルギー試験を行い、バッチ間での差異がないことを確認した。尚、打設時のスランプ値及び空気量は全試験体を通して7~20cm,2.5~7%であった。試験体打設後の養生は屋内空調管理の下(20℃±5℃)で行った。各試験体に用いたコン

表 1. 使用粗骨材とその物性

骨材名称	骨材品質	絶対密度	吸水率	モルタル付着率	原コンクリート強度
		g/cm ³	%	%	N/mm ²
SI00	天然	2.6	0.92	-	-
SI60-S1	M	2.41	3.94	32.4	46.2
SI40-S1	M	2.36	3.94	32.1	62
SI50-S1	M	2.37	3.86	31.6	50.6
YA60-S2	M	2.48	2.22	22.1	32.7
YA50-S3	H	2.51	1.73	17.1	38.9
YA50-S1	L	2.29	4.77	42	38.9
YA40-S2	M	2.36	3.73	31.1	50.5

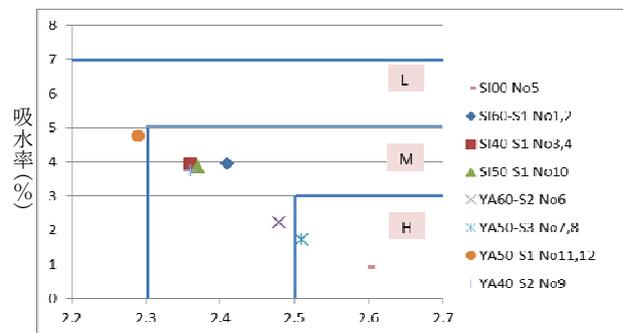


図 2. 使用粗骨材の品質区分

表-2 試験体コンクリートの調合及び機械的性質(材齢 28 日)

試験体名称	使用粗骨材	練り混ぜw/c	水	セメント	粗骨材	細骨材	スランプ	空気量	圧縮強度	引張強度	ヤング係数	Gf
			kg/m ³									
No1:SI60-S1-65	SI60-S1	65	175	269	900	870	18	4	35.0	2.8	2.91	0.141
No2:SI60-S1-55		55	175	318	900	830	18	4	41.5	2.9	2.9	0.150
No3:SI40-S1-65	SI40-S1	65	175	269	882	870	18	4	28.4	2.7	2.77	0.148
No4:SI40-S1-55		55	175	318	882	830	18	4	42.3	3.1	2.97	0.162
No5:SI00-65	SI00 (天然)	65	175	269	943	870	18	4	31.8	3.0	3.13	0.289
No6:YA60-S2-55	YA60-S2	55	175	318	893	853	18	4	27.2	2.1	2.37	0.135
No7:YA50-S3-55	YA50-S3	55	175	318	897	853	18	4	31.8	2.6	2.5	0.146
No8:YA50-S3-65		65	175	269	897	893	18	4	27.1	2.4	2.65	0.141
No9:YA40-S2-65	YA40-S2	65	175	269	864	909	18	4	24.0	2.3	2.53	0.147
No10:SI50-S1-45	SI50-S1	45	175	389	871	764	18	4	47.0	3.0	2.95	0.168
No11:YA50-S1-45	YA50-S1	45	175	389	857	767	18	4	43.2	2.9	2.73	0.150
No12:YA50-S1-55		55	175	318	857	825	18	4	32.1	2.6	2.56	0.145

クリートの材齢 28 日の機械的性質を表-2 内に示す。表-2 の破壊エネルギー試験結果 (Gf) は JCI-S-001-2003¹⁾(切欠きはりを有いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法) に則り行った。同一練り混ぜ w/c に対して圧縮強度にばらつきがみられるが、No1~5, 10~12 は夏季に、No6~9 は冬季に打設・実験した影響が考えられる。付着モルタル w/c, 練り混ぜ w/c と圧縮強度との関係を図-3 に示す。いずれのコンクリートからも材料強度については付着モルタル w/c よりも練り混ぜ w/c が支配的であることが分かり、既往の研究²⁾³⁾(2.2) と整合している。破壊エネルギーからは同種再生粗骨材中ならば、付着モルタル w/c が小さいほど、また練り混ぜ w/c が小さいほど高い傾向がみられる。また、Gf 値は碎石再生粗骨材を用いた試験体の方が高くなった。

3.3 梁試験体と載荷方法

作製した梁試験体の形状、寸法、配筋を図-4 に、載荷方法を図-5 に示す。せん断破壊性状に及ぼす付着モルタルの影響を検討するため、梁試験体はせん断スパン比 1.35 とし、せん断スパン内にせん断補強筋を入れず、設計せん断耐力が曲げ耐力を下回るよう設計したものである。せん断スパン内に 3 軸ひずみゲージを貼付し、せん断ひずみ、ひび割れ発生、進展をモニターしながら最大荷重に至るまで載荷を行った。

4. 実験結果

梁の載荷試験結果を表-3 に示す。表中の予想せん断耐力とは以下に示す大野・荒川式を用いて算出したものである。(式(1))

$$Q_{u \min} = \left\{ \frac{0.092 k_u k_p (180 + \sigma_b)}{\frac{M}{Qd} + 1.7} + 2.7 \sqrt{p_w \sigma_y} \right\} \cdot b j \quad (\text{kgf}) \quad (1)$$

$Q_{u \min}$: せん断ひび割れ発生せん断破壊時の下限せん断力

k_u : 断面寸法による補正係数

k_p : 引張鉄筋比 p_t による補正係数 $k_p = 0.82 p_t^{0.23}$

σ_b : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm^2)

それぞれの荷重-変位関係を図-6, 7 に、耐力-圧縮強度関係を図-8, 9 に示す。尚、図-8, 9 中の実線は設計式によるせん断耐力を示す。碎石再生骨材を用いた梁載荷実験では、6 体の試験体中 4 体がせん断破壊で最大耐力を向かえたが、山砂利再生骨材を用いたものでは、6 体中 1 体のみがせん断破壊を生じた以外全て曲げ破壊で最大耐力を向かえた。しかし、いずれの試験体においても計算せん断耐力を下回るものではなく、現行のせん断耐力評価式は、骨材の種類によらず中品質レベル以上の再生粗骨材を用いた

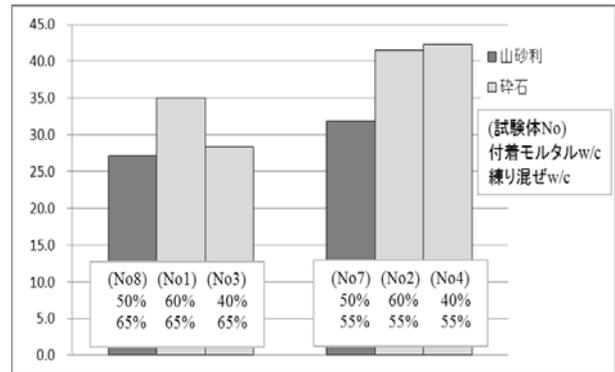
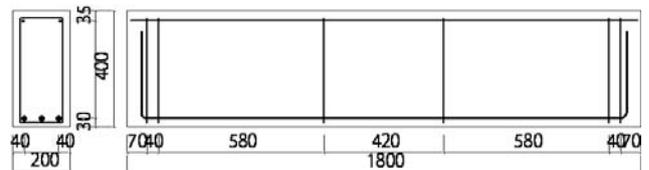


図-3 付着 w/c 及び練り混ぜ w/c が圧縮強度に及ぼす影響



引張鉄筋: D19 (SD345) × 3本
 圧縮鉄筋: D12 (SD295) × 2本
 フープ筋: D12 (SD295)

図-4 梁形状及び寸法, 配筋

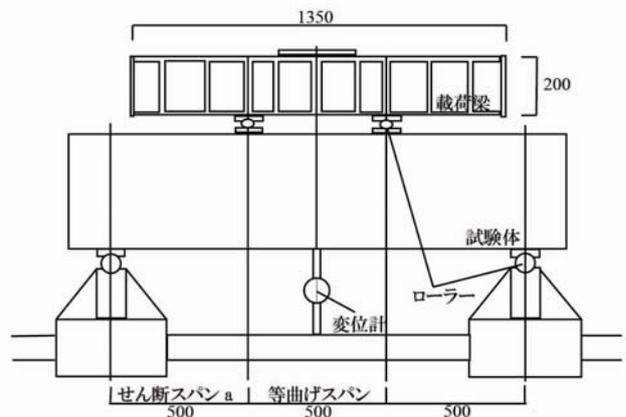


図-5 載荷装置

表-3 梁試験結果

No	破壊モード	最大耐力	予想せん断耐力	圧縮強度	原コンクリート強度
		kN	kN	N/mm ²	N/mm ²
No1	曲げ圧壊	536	265	35.0	46.2
No2	せん断破壊	346	297	41.5	46.2
No3	曲げ圧壊→せん断破壊	591	232	28.4	62
No4	せん断破壊	514	301	42.3	62
No5	曲げ圧壊	573	249	31.8	-
No6	曲げ圧壊	548	225	27.2	32.7
No7	曲げ圧壊	584	249	31.8	38.9
No8	曲げ圧壊	582	223	27.1	38.9
No9	せん断破壊	555	201	24.0	50.5
No10	せん断破壊	445	325	47.0	50.6
No11	曲げ圧壊	556	306	43.2	38.9
No12	曲げ圧壊	526	250	32.1	38.9

再生 RC 梁のせん断耐力を安全側に評価するものであることが確認できた。しかしながら、図-8 に示すように天然の碎石及び碎石再生骨材を用いた梁試験体の最大耐力

とそれらの試験体コンクリートの圧縮強度との関係を見ると、負の相関関係を示す傾向がみられることがわかる。特に、No.2,10 では圧縮強度が他の試験体の圧縮強度と比べて相対的に高いにもかかわらず、梁の最大耐力がいずれも他の試験よりも明らかに劣った結果となっている。同一の砕石再生粗骨材(SI60-S1)を用いている No.1, No.2 を比較すると、それぞれの練り混ぜ w/c は 65%, 55% であり No.2 の方が圧縮強度が高いにもかかわらず、梁の最大耐力は No.2 の方が小さい値となっている。No.1, No.2 では、異なる点が練り混ぜ w/c のみのため、負の相関関係の要因は、再生骨材表面の付着モルタルとそれらを覆う新規に練り混ぜたモルタルとの相対的な関係にあることが予想される。一方で、山砂利再生粗骨材を用いた試験体では、砕石再生粗骨材を用いた試験体に見られたような負の相関関係は見られず、図-7 の荷重-変位関係に示すように、全ての試験体が鉄筋降伏した後、曲げ破壊に至っていることがわかる。

5. 負の相関関係に対する考察

以下では、砕石再生粗骨材を用いた場合に見られた負の相関関係について考察する。

5.1 強度による検討

図-10 に、付着モルタルの強度指標と新規練り混ぜモルタルの強度指標及び梁の最大耐力の関係を示す。ここで、付着モルタルの強度指標として、表-1 に示した原コンクリート強度(付着 F_c)を用い、新規練り混ぜモルタルの強度指標として、表-2 に示したコンクリート圧縮強度(練り混ぜ F_c)を用いた。新規練り混ぜコンクリートの強度には再生骨材の付着モルタルの影響も考えられるが、前述(2.2,3.2)のように、材料強度試験において、再生粗骨材を用いたコンクリートでは付着モルタル w/c よりも練り混ぜ w/c が支配的であることが確認できているため、再生粗骨材を用いたコンクリート強度に及ぼす付着モルタルの影響は小さいと考え、モルタル強度指標として、圧縮強度試験により得られた結果を用いて検討する。天然原骨材を用いた試験体 No.5 を除く、砕石再生粗骨材を用

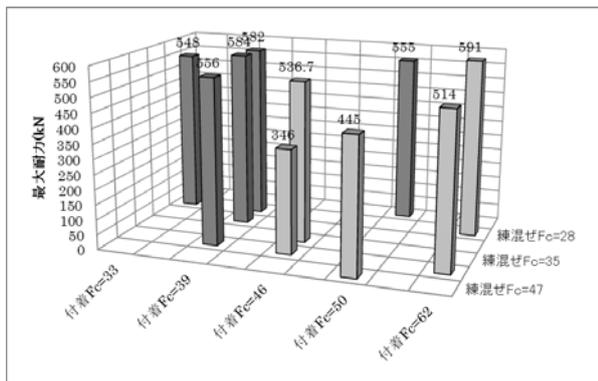


図-10 付着 F_c -耐力関係

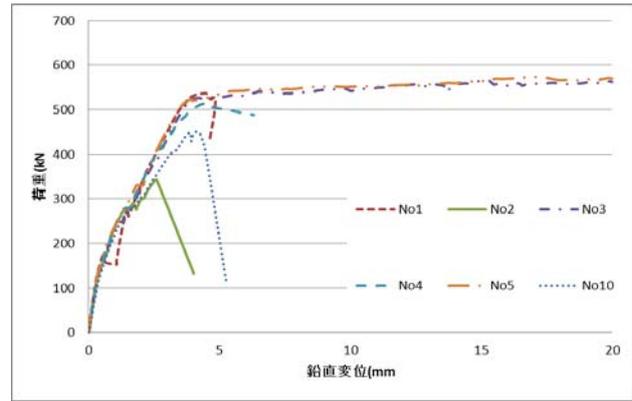


図-6 荷重-鉛直変位関係(砕石)

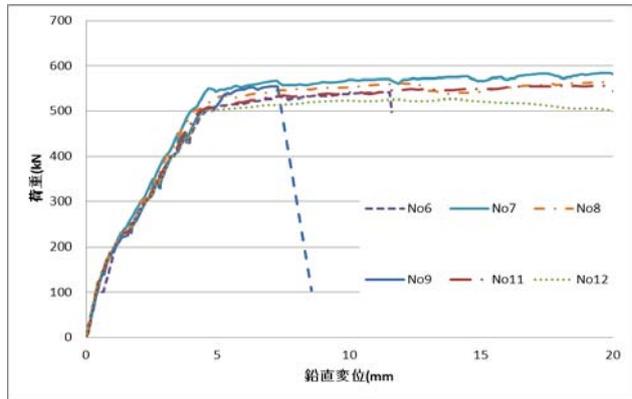


図-7 荷重-鉛直変位関係(山砂利)

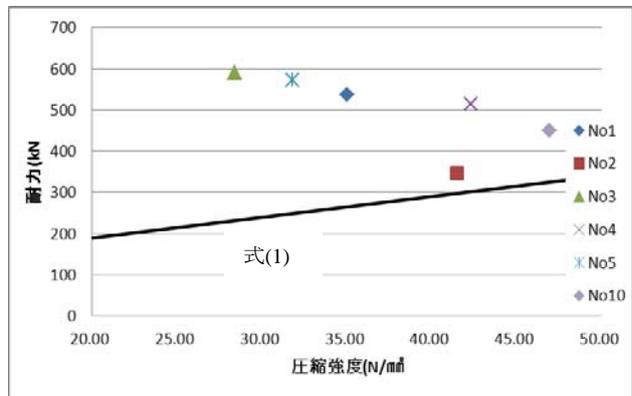


図-8 耐力-圧縮強度(砕石)

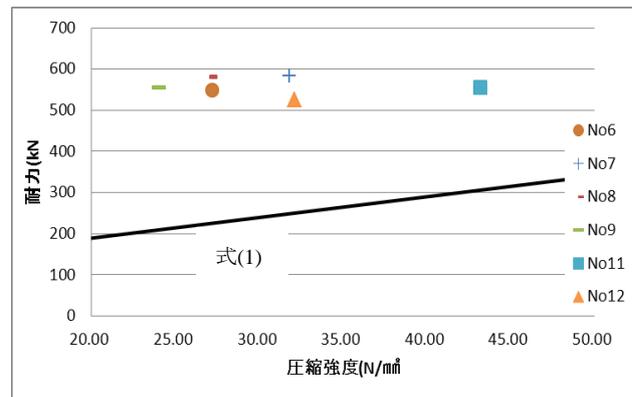


図-9 耐力-圧縮強度(山砂利)

いた試験体No1~4について薄い灰色、山砂利再生粗骨材を用いた試験体 No6~No9, No11, No12 について濃い灰色で統一し、相関平面上に梁の最大耐力を棒グラフで示す。碎石再生粗骨材を用いた試験体では、付着 Fc が小さくなるほど、練り混ぜ Fc が大きくなるほど、最大耐力が小さくなる傾向がみられる。言い換えると、練り混ぜ Fc が付着 Fc に近づいていくほど、耐力低下を起こす傾向がみられる。一方で、山砂利再生粗骨材を用いた試験体においては、全ての試験体において鉄筋降伏の後破壊しており、付着 Fc, 練り混ぜ Fc の強弱関係による耐力低下の傾向は見られなかった。

5.2 No. 2 における現象の観察による検討

碎石再生粗骨材のうち、せん断破壊に至ったものの中で、同じ練り混ぜ Fc ながら、最大耐力の異なる試験体 No2(SI60-S1-55)と No4(SI40-S1-55)に着目する。図-11 に No2, No4 について各フェーズでの荷重との関係を示す。曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、斜めせん断ひび割れ発生までの荷重はどちらも等しいが、斜めせん断ひび割れの発生以降、No2 は No4 ほど耐力が上昇することなくせん断破壊に至っている。この現象について、いくつかの原因が考えられるが、その一つにインターロック作用の低下が考えられる。すなわち、再生粗骨材の付着モルタル強度と再生コンクリートの練り混ぜモルタル強度との関係により亀裂モードが異なり、破断面のインターロック作用の大きさに影響を与え、ひびわれ伝播の違いをもたらし、せん断耐力に影響を与えられる可能性などが考えられる。付着モルタル強度が練り混ぜモルタル強度と比較して十分に高いとき (No4)、亀裂は図-12-右のように、付着モルタル表面上を進行し、練り混ぜモルタル強度が付着モルタル強度と同等、または近づくにつれ (No2)、亀裂は図-12-左のように付着モルタル中あるいは粗骨材表面を進行していくと考えられる。この亀裂モードの違いにより破断面のインターロック作用の大きさが異なると考えた。

5.3 割裂引張試験後の破断面の観察

亀裂モードの推察の是非を確認するため、割裂引張試験後の断面を検討した。写真-1, 2 は No2, 4 それぞれの実寸の割裂引張断面であり、一部を黒枠内に拡大したものである。No2 では、亀裂が付着モルタル中あるいは粗骨材表面を進行しているため、断面上に粗骨材表面が表れているもの多く見られ、また付着モルタルがはがれ、表面上に残っていることも確認できた。No4 では、亀裂が付着モルタル表面を進行していくため、粗骨材表面が見えているものは少なく、断面上で付着モルタルが残存したままのものが多いと見られた。

5.4 山砂利再生粗骨材の場合の検討

山砂利再生粗骨材を用いた試験体で碎石再生粗骨材を使

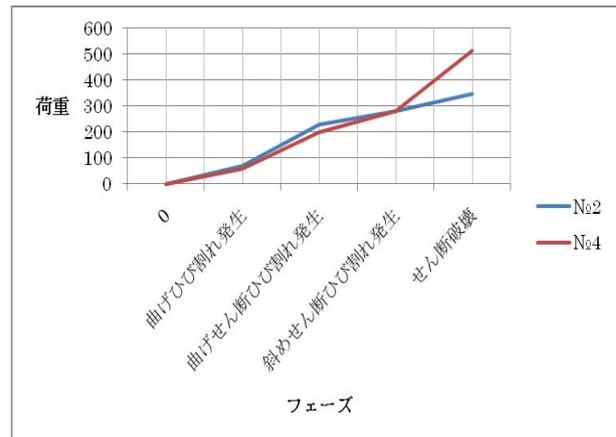


図-11 No.2, No.4 の各フェーズ毎の荷重との関係

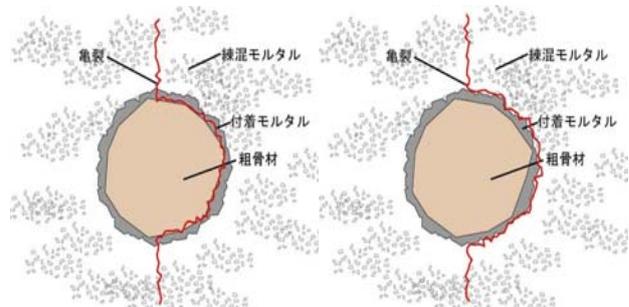


図-12 亀裂モード予測 左: No.2 右: No.4

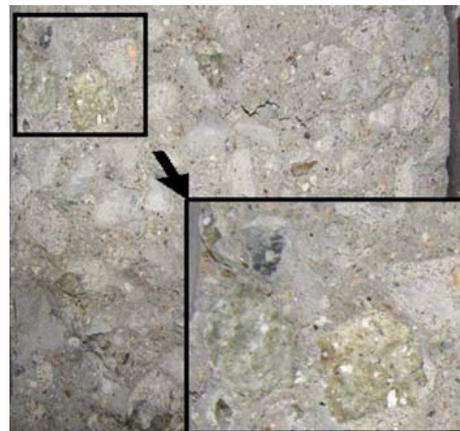


写真-1 割裂引張試験断面 No.2

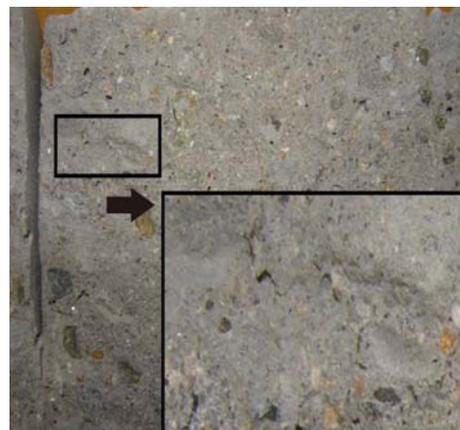


写真-2 割裂引張試験断面 No.4

った試験体と同様に耐力低下が起こらなかった理由はいくつか考えられるが、再生粗骨材の粒径の違いによる亀裂モードの違いが考えられる。写真-3, 4 に本研究で用いた碎石, 山砂利の原天然粗骨材及び再生処理後の粗骨材 (SI50-S2, YA40-S2) を示す。写真-3 より碎石においては再生処理後も骨材粒径がほぼ変わらないことが見て取れるが、写真-4 の山砂利においては、原コンクリート塊より破碎, 再生処理の過程で割れ, 粒径が著しく小さくなっていることが分かる。このことから、山砂利再生粗骨材では、骨材が割れることにより、付着モルタルが存在しない、天然骨材としての表面が現れることになる。この骨材表面の違いが、亀裂プロセスの違いに影響を与えている可能性が考えられる。(図-13)付着モルタルが存在しない天然骨材としての表面が現れることにより、亀裂の伝播が付着モルタルの存在しない天然骨材表面で食い止められ、せん断破壊を伴う耐力低下が引き起こされなかった可能性が考えられる。



写真-3 骨材粒径比較 (碎石)



写真-4 骨材粒径比較 (山砂利)

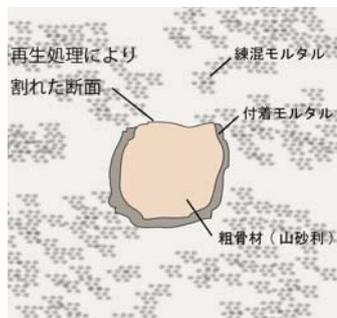


図. 13 亀裂モード予測 (山砂利)

6. まとめ

中品質再生粗骨材種類及び付着モルタルの水セメント比と、試験体練り混ぜ時の水セメント比が異なるコンクリートを用いた梁について、各種材料強度及び梁の強度、破壊性状について比較検証した。その結果以下のことが判った。

- (1) 中品質再生粗骨材を用いた再生コンクリート梁について、現状の設計での終局せん断耐力評価式に対する適応を確認した。
- (2) 中品質再生粗骨材の再生コンクリート梁への、せん断破壊に対する影響を調べたところ、碎石再生粗骨材においてはその影響を受け、せん断耐力が圧縮強度との関係において正の相関関係を描かず、せん断耐力を低下させる可能性がある。

以上の結果の通り、中品質碎石再生粗骨材は梁部材のせん断性状に影響を与え得ることがわかった。今後、その原因やメカニズムについて課題としたい。

【謝辞】

本研究の一部は、(財)日工記念事業団平成23年度研究助成により行った。また、実験実施に当たっては、神戸大学大学院修了生の神谷康介君、神戸大学卒業生の横山早苗君に協力を頂いた。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：JCI 基準「切欠きほりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 (JCI-S-001-2003)」,2003
- 2) 入江真吾, 他：付着モルタルの品質が再生骨材コンクリートに与える影響について、日本建築学会大会講演梗概集, 2009
- 3) 入江真吾:再生粗骨材コンクリートの特性と再生粗骨材の品質指標に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究科学学位論文, 2011