

論文 再生粗骨材とごみ溶融スラグ細骨材を用いたRC柱部材の曲げせん断実験に関する研究

西浦 範昭*¹・崔 正龍*²・北辻 政文*³・田中 礼治*⁴

要旨：コンクリート塊から造られる再生骨材も，都市ごみなどを高温処理して造られる都市ごみ溶融スラグ（以下，ごみ溶融スラグ）も，廃棄物起源の再生処理材料であり，これら両者を混用して同時に鉄筋コンクリート構造に利用可能であれば，適用範囲の拡大にともない廃棄物の最終処分量の減量化等に対し，大いに貢献できるはずである。そこで本報では，粗骨材に吸水率の大きな低品質再生粗骨材を用い，細骨材に吸水率の小さなごみ溶融スラグ細骨材を用いた骨材混用コンクリートを使用して，RC柱部材の曲げせん断実験を行った。再生骨材とごみ溶融スラグの混用使用の可能性について検討している。

キーワード：再生粗骨材，ごみ溶融スラグ細骨材，RC柱部材，曲げせん断実験

1. 目的

近年，コンクリート塊からリサイクルした再生骨材はもとより，都市ごみ（ここでは，主に家庭ごみ）などを高温溶融固化処理を行うことによって得られる，ごみ溶融スラグ骨材などの再利用技術の研究・開発が多数行われており，それらリサイクル材料の有効利用法が社会的に大きく期待されている。この様な背景のもと，本研究は，再生骨材を使用した再生コンクリートや，ごみ溶融スラグ骨材を使用したごみ溶融スラグコンクリートが，鉄筋コンクリート構造の上部構造に利用可能であれば，日本国内の廃棄物最終処分量の抑制，減量化，および循環型社会構築の形成にも大きく貢献するものと考え，それらコンクリート利用の可能性を究明することを目的としている。筆者らは，この様なリサイクル材料を用いたコンクリートを上部構造へ利用する検討として，例えば文献1)2)3)を報告している。文献1)では，低品質な再生コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造はり部材の耐震性能を究明し，文献2)では，例えば利用方法

の一例として，ハーフPCa部材に利用する可能性を究明し，低品質な再生コンクリートを上部構造へ利用する可能性を報告した。また，文献3)では，ごみ溶融スラグコンクリートを鉄筋コンクリート造はり部材に用いて，同様にごみ溶融スラグコンクリートを上部構造へ利用する可能性を報告した。そこで，再生骨材もごみ溶融スラグも廃棄物起源の再生処理材料であり，これら両者を混用して同時に鉄筋コンクリート構造に利用可能であれば，適用範囲の拡大にともない廃棄物の最終処分量の減量化に対し，さらなる貢献ができるはずである。本報では，粗骨材に低品質な再生粗骨材（吸水率大）を用い，細骨材にはごみ溶融スラグ細骨材（吸水率小）を用いて，廃棄物からリサイクルした骨材を混用したコンクリートをRC柱部材に使用して曲げせん断実験を行った。柱軸応力度は0.2~0.6の広範囲での実験を行い，普通コンクリートを用いたものと比較検討することにより，その耐震性能を把握するものとした。再生骨材と溶融スラグの混用使用の可能性について構造力学的

*1 西松建設(株) 技術研究所技術研究部建築技術研究課 博(工学)(正会員)

*2 東北工業大学 工学部建築学科 修(工学)(正会員)

*3 宮城県農業短期大学 農業土木科 博(農学)(正会員)

*4 東北工業大学 工学部建築学科 工博(正会員)

に検討することを目的としている。

2. 試験体概要

2.1 試験体種別

試験体種別を表 - 1に示した。試験体は全部で6体である。再生粗骨材とごみ溶融スラグ細骨材を混用した骨材混用コンクリート試験体(RSシリーズ)3体と、天然粗骨材と天然細骨材を用いた普通コンクリート試験体(NNシリーズ)の3体と、使用コンクリートの違いによって2シリーズに大別されている。NNシリーズは比較用である。各シリーズとも軸方向応力度(以下、軸応力度)を $\sigma = 0.2F_c, 0.4F_c, 0.6F_c$ の3種に変化させている。

表 - 1 試験体種別

シリーズ名	試験体名	使用骨材	コンクリート強度 (N/mm ²)	軸力比 σ
RSシリーズ	RS - 0.2	再生粗骨材	36.1	0.2 F_c
	RS - 0.4	溶融スラグ細骨材		0.4 F_c
	RS - 0.6	(混用コンクリート)		0.6 F_c
NNシリーズ	NN - 0.2	天然粗骨材	32.8	0.2 F_c
	NN - 0.4	天然細骨材		0.4 F_c
	NN - 0.6	(普通コンクリート)		0.6 F_c
備考				
主筋:3-D13(SD345), $p_t=0.64\%$				
せん断補強筋:3-D-10@50(SD295), $p_w=1.89\%$				
柱せい: D=25cm はり幅: B=25cm 試験区間 l=100cm (a/D=2.0)				

2.2 試験体の形状、寸法、および配筋

試験体の形状、寸法、および配筋は全試験体とも共通である。試験体は、一体打ちの鉄筋コンクリート造柱部材であり、形状、寸法、および断面配筋の詳細を図 - 1に示した。柱せい $D=250\text{mm}$ 、柱幅 $B=250\text{mm}$ 、試験体全長 $L=2200\text{mm}$ 、試験区間 $l=1000\text{mm}$ でせん断スパン比 (a/D) は2.0である。断面配筋の詳細として、使用した鉄筋は全試験体共通で主筋はSD345の3-D13 ($p_t=0.64\%$) であり、せん断補強筋はSD295の3-D10@50 ($p_w=1.89\%$) の配筋とした。帯筋比を通常より大きくした理由は、せん断および付着破壊を防ぐと共に、主筋の座屈長さを短くして主筋の座屈による曲げ破壊を極力防止し、で

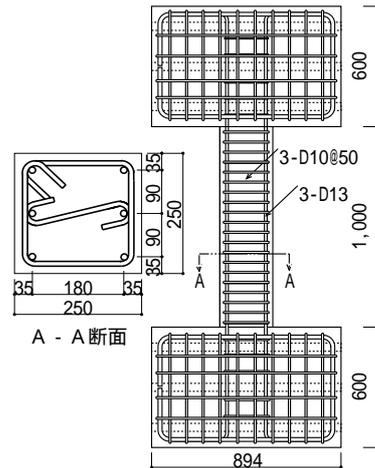


図 - 1 試験体の形状、寸法、および断面配筋の詳細

きるだけコンクリートの圧壊による破壊性状が見られるように考慮したためであり、当研究室の既存試験体の実績からコンクリートの早期剥離を誘発しない範囲に留めた。

3. 使用材料

3.1 再生粗骨材およびごみ溶融スラグ細骨材

再生粗骨材は、実験室で製造した普通コンクリート ($f_c=29.8\text{N/mm}^2$) をジョークラッシャーを用い破碎し製造した。ごみ溶融スラグ細骨材は、岩手県釜石市清掃工場のコークスベット式高温ガス化溶融炉でゴミを直接溶融し、水砕により製造したものである。ごみ溶融スラグ細骨材の表面には光沢があり、黒色のガラス質である。ごみ溶融スラグ細骨材の化学組成試験並びにごみ溶融スラグからの重金属の溶出試験を行った。ごみ溶融スラグの化学組成を表 - 2に、重金属の溶出試験結果一覧を表 - 3に示した。表 - 2, 3よりごみ溶融スラグは、 SiO_2 、 CaO および Al_2O_3 が多く、その他の成分は微量である。ごみ溶融スラグ細骨材の溶出量の安全性に関する基準値は現在規定されていないため、ここでは、土壤環境基準⁴⁾ (重金属の溶出基準) と比較をしたが、ごみ溶融スラグからの重金属の溶出は土壤基準以下であることを確認した。使用した再生粗骨材とごみ溶融スラグ細骨材の材料試験の結果を表 - 4に示した。使用した再生粗

表 - 2 ごみ溶融スラグの化学組成

溶融スラグ	lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
細骨材	-0.51	37.11	16.26	3.08	34.83	2.03
	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
	3.63	0.37	1.11	0.27	0.47	0.024

表 - 3 重金属の溶出試験結果一覧

軽量物質	単位	細骨材	土壌環境基準
水銀	mg/l	< 0.0005	0.0005
カドミウム		< 0.0030	0.01
鉛		< 0.001	0.01
ヒ素		< 0.001	0.01
6価クロム		< 0.005	0.05
セレン		< 0.002	0.01

表 - 4 使用骨材の材料試験結果

項目	再生粗骨材	溶融スラグ細骨材
表乾密度(g/cm ³)	2.37	2.75
絶乾密度(g/cm ³)	2.22	2.74
吸水率(%)	6.65	0.69

表 - 5 再生骨材暫定品質基準(案)

項目	再生粗骨材		
	1種	2種	3種
吸水率(%)	3以下	3を超え5以下	5を超え7以下
洗い損失量(%)	1.5以下		

骨材の物性は、表乾密度2.37、絶乾密度2.22、吸水率6.65%であった。「再生骨材の暫定品質基準(案)」⁵⁾に示されている再生粗骨材の品質基準を表-5に示すが、使用した再生粗骨材は3種相当の低品質なものである。また、使用したごみ溶融スラグ細骨材は、表乾密度2.75、絶乾密度2.74、吸水率0.69%と吸水率の小さな性質のものであった。なお、粗骨材と細骨材の粒度分布は、標準粒度の上限値と下限値の平均になるように粒度調整を行い使用した。

3.2 骨材混用コンクリートおよび普通コンクリート

本実験では、骨材混用コンクリートと比較用の普通コンクリートとが同一強度になるように、骨材混用コンクリートの調合決定に際し、多数回試し練りを行い調合を決定した。骨材混用コンクリートの調合表を表-6に示す。普通コンクリートは通常のレディーミクスト用いた。骨

表 - 6 骨材混用コンクリートの調合表

W/C (%)	スラング (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	ad
55	18	4.5	44	180	330	800	950	99

表 - 7 使用コンクリートの性質

コンクリート種別	実験時圧縮強度 σ _s (N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ ε _s (%)	ヤング係数 E _c (N/mm ²)
再生+溶融スラグ	36.1	0.25	2.60 × 10 ⁴
普通	32.8	0.15	3.92 × 10 ⁴

材混用コンクリートと普通コンクリートの性質を表-7に示した。圧縮試験用のテストシリンダーは現場封緘養生として、それより実験時の圧縮強度は、骨材混用コンクリートで36.1 N/mm²であり、普通コンクリートは32.8 N/mm²であり、1割程骨材混用コンクリートの方が圧縮強度が大きかったが、圧縮強度時ひずみ並びにヤング係数は大きく異なり、低品質の再生粗骨材の使用が影響したものと考えられる。

3.3 鉄筋

使用鉄筋の機械的性質を表-8に示した。主筋は全試験体ともSD345のD13を、せん断補強筋は全試験体ともにSD2965のD10を用いた。主筋のD13の降伏耐力は σ_y=371 N/mm²であった。主筋は明確な降伏点を有するものであった。せん断補強筋D10の降伏耐力は σ_y=355 N/mm²であった。せん断補強筋のD10は明確な降伏点を持たないものであった。

表 - 8 使用鉄筋の機械的性質

鉄筋種別	鉄筋径	降伏耐力	降伏点ひずみ	ヤング係数 E _s (N/mm ²)
		σ _y (N/mm ²)	ε _s (%)	
主筋	D13	371	0.187	1.98 × 10 ⁵
せん断補強筋	D10	355	0.177	2.01 × 10 ⁵

4. 加力および変位測定方法

加力装置を図-2に示した。加力は全試験体共通で建研式加力装置を用いた。載荷は、正負くり返し載荷として、一定の軸力をかけた状態で逆対象モーメントとなるようにオイルジャッキで水平力を加えた。最初の1サイクル目はR=±0.5/100rad.とし、R=±3.0/100rad.まではR=±0.5/100rad.ごとに、R=±3.0/100rad.

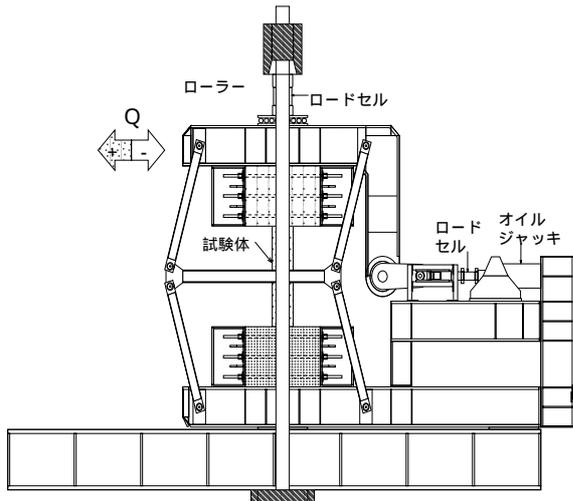


図 - 2 加力装置

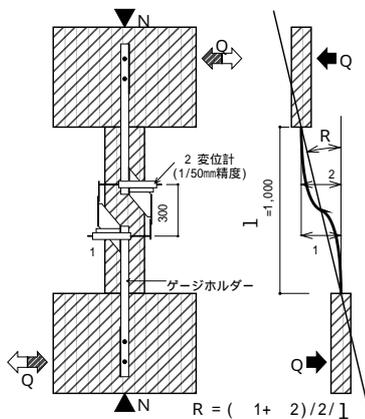


図 - 3 変形測定方法

超えてからは、 $R = \pm 1.0 / 100\text{rad.}$ ごとに載荷を繰り返した。変位測定方法を図 - 3に示した。変位の測定は、相関変位、部材軸方向変位について行った。また、主筋とあばら筋のひずみをワイヤーストレインゲージ(検長2mm)で測定した。

5. 実験結果および検討

5.1 最大荷重, 最大荷重時部材角

実験結果として各試験体の最大荷重, 最大荷重時部材角を表 - 9に示した。全試験体とも主筋の降伏が確認され, 破壊形式は曲げ破壊型であった。また, 表 - 9をもとにRSシリーズとNNシリーズの最大荷重を比較して示したのが図 - 4である。また, 図 - 5には最大荷重時部材角も比較して示した。図 - 4から分かるようにRSシリーズとNNシリーズの最大荷重は, 多少

のばらつきはあるが近似しており, 同程度の最大荷重を示すことが認められた。最大荷重時部材角についても, 図 - 5から分かるように, 両者の最大荷重時部材角は, ほぼ同程度の値を示すことが認められた。

5.2 破壊経過

ひび割れ状況の一例として, RS-0.2およびNN-0.2試験体の最終時ひび割れ状況を図 - 6に示した。破壊経過および破壊性状は, 各シリーズとも軸応力度が同一のものは良く類似していた。全試験体とも曲げ降伏破壊であり, 破壊経過は以下の通りである。軸応力度 $0.2F_c$ および $0.4F_c$ の試験体は, 材端に曲げひび割れが発生し, ひび割れの進展にともなって曲げせん断きれつに移行した。その後, 主筋が引張降伏して最大荷重に至った。変形の増大につれて荷重が

表 - 9 実験結果一覧

シリーズ名	試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時部材角 (1/100rad.)
RSシリーズ	RS - 0.2	1 6 4.9	1.4 5
	RS - 0.4	2 3 6.9	0.9 7
	RS - 0.6	2 5 8.6	0.7 7
NNシリーズ	NN - 0.2	1 5 0.0	1.4 8
	NN - 0.4	2 0 9.9	0.9 3
	NN - 0.6	2 2 8.5	0.7 4

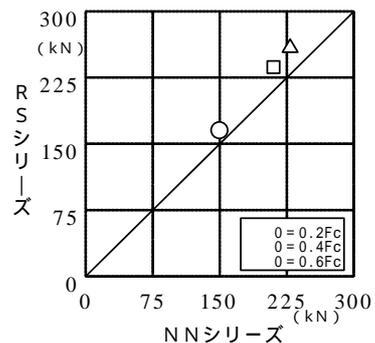


図 - 4 最大荷重の比較

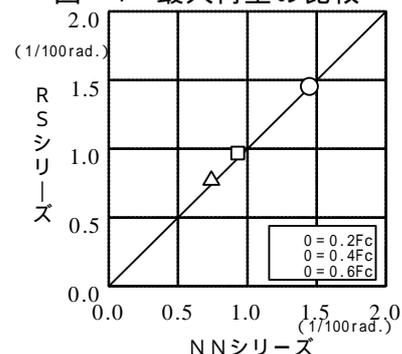


図 - 5 最大荷重時部材角

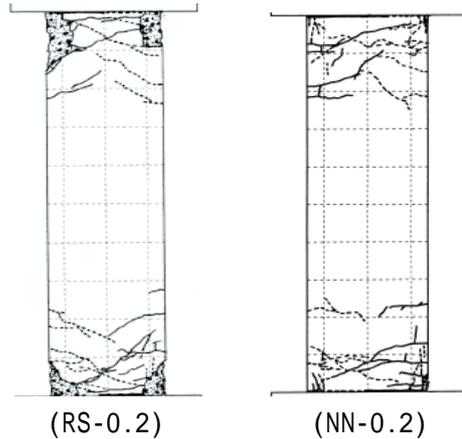


図 - 6 最終時のひび割れ状況の一例

徐々に低下し、両材端位置にコンクリートの圧壊による剥離、剥落が発生した。靱性に富んだ性状を示した。圧縮主筋の座屈は見られなかった。また、0.6Fc試験体は、主筋が圧縮降伏し、その後コンクリートの圧壊が著しく進展し、主筋の座屈により荷重が急激に低下した。

5.3 Q - R 曲線

全試験体の Q - R 曲線を図 - 7 に示す。Q は試験体区間の作用せん断力であり、R は図 - 3 の 1 と 2 の平均値を試験体区間の長さで除して、試験区間以外を剛域と仮定して求めた試験区間の部材角である。Q - R 曲線の傾向は、

各シリーズとも軸応力度が同一のものは良く類似していた。軸応力度0.2Fcの試験体は、両シリーズとも、逆S型の履歴性状を示した。0.4Fcの試験体も、逆S型の履歴性状ではあるが、0.2Fc試験体よりは顕著ではなかった。0.2、0.4Fc試験体とも、 $R=4/100\text{rad}$ の部材角まで靱性のある性状を示した。軸応力度0.6Fcの試験体は、両シリーズとも紡錘型の履歴性状を示した。部材角 $R=3/100\text{rad}$ 程度で荷重が脆性的に低下した。

5.4 等価粘性減衰定数

等価粘性減衰定数の定義を図 - 8 に示した。式(1)を用い、RSシリーズとNNシリーズの等価粘性減衰定数 (heq) を求め図 - 9 に比較して示した。等価粘性減衰定数の傾向は、各シリーズとも軸応力度が同一のものは良く類似していた。若干RSシリーズの方が小さい値を示すのは、コンクリート強度の差により、実際の作用軸力が大きいことの影響と考えられる。

5.5 最大荷重の実験値と計算値の比較

RSシリーズの最大荷重と普通コンクリートを対象にした柱部材の既往の曲げ終局強度⁶⁾(2)(3)式を用いて計算値を求め、比較したものを図 - 10 に示す。図から分かるように骨材混用

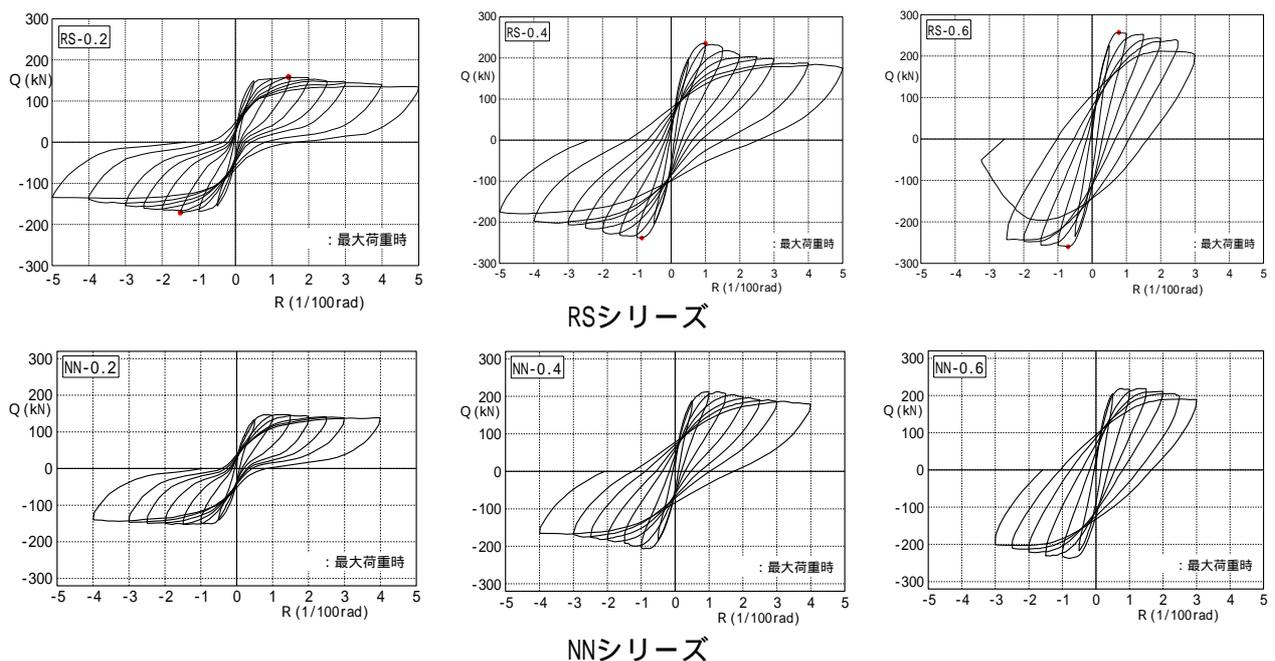


図 - 7 Q - R 曲線

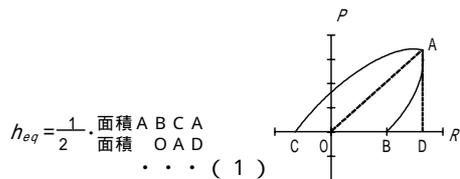


図 - 8 等価粘性減衰定数の定義

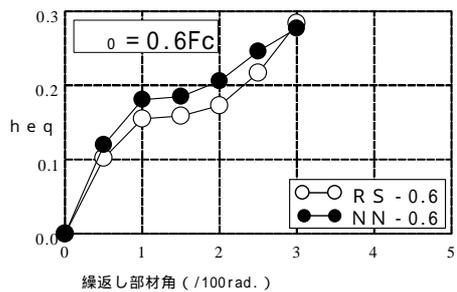
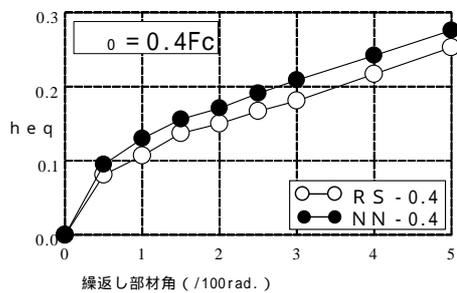
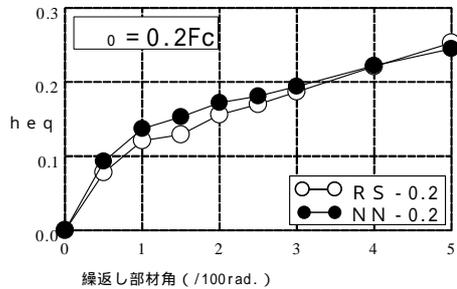


図 - 9 等価粘性減衰定数の比較

コンクリートを用いた柱部材の曲げ終局強度を安全側に評価できることが認められた。

6. まとめ

廃棄物からリサイクルした骨材を混用した、骨材混用コンクリートをRC柱部材に使用して曲げせん断実験を行った結果、本実験の範囲で次のことが認められた。

- (1) 混用コンクリートを用いたRC柱部材の最大荷重および最大荷重時部材角は、普通コンクリートを用いた柱部材と同等の値を示した。
- (2) 混用コンクリートを用いたRC柱部材の破壊経過、Q - R 曲線、および等価粘性減衰定数は、普通コンクリートを用いた柱部材と同様

$$\text{Mu} = 0.8at \cdot y \cdot D + 0.5N \cdot D \frac{N}{bDFc} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Mu} = (0.8 \cdot y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot Fc \frac{N_{\text{max}} - N}{N_{\text{max}} - 0.4b \cdot D \cdot Fc} \dots\dots\dots (3)$$

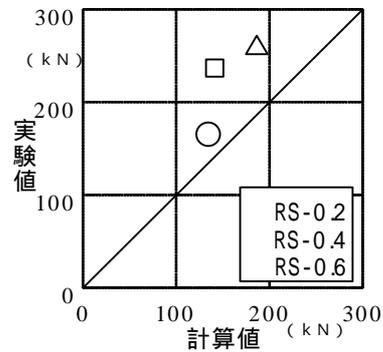


図 - 10 最大荷重と計算値の比較

な傾向を示した。

- (3) 混用コンクリートを用いたRC柱部材の曲げ終局強度は、既往の普通コンクリートを対象とした算定式を用いて、安全側に評価できることが認められた。

以上より、再生粗骨材とごみ溶融スラグ細骨材の混用使用に関し、上部構造へ利用していく為には更なるデータの蓄積が必要ではあるが、構造力学観点より利用できるひとつの方向性があることが確認された。

【参考文献】

- 1) 田中礼治, ほか: 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1 はり部材の曲げ, せん断, および付着破壊に関する実験), 日本建築学会構造系論文集, 第518号, pp79-86, 1999.4
- 2) 西浦範昭, ほか: 再生コンクリートを用いたハーフPCa はり部材に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集Vol.22, No.2, 2000, pp.1189~1194
- 3) 田中礼治, ほか: 再生コンクリート構造における都市ごみ溶融スラグの使用の可能性に関する実験研究, コンクリート工学論文集, 第13巻, 第2号, 2002年5月 pp109-116
- 4) 厚生省生活衛生局水道環境部: 一般廃棄物の溶融固化物の再利用に実施について(通達), pp1-3, 1998
- 5) (財)国土開発技術研究センター: 建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発報告書, 平成9年度
- 6) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990, pp713