論文　都市ごみ溶融スラグを骨材として用いた鉄筋コンクリート柱の曲げせん断実験研究

崔　正龍*1・大芳賀義喜*2・北辻政文*3・田中礼治*4

要旨：都市ごみ溶融スラグを鉄筋コンクリート構造に利用できれば，一般廃棄物の再利用ができ，廃棄物の最終処分量の減量化に大きく貢献できる。そこで，本報では都市ごみ溶融スラグが鉄筋コンクリート柱部材に利用し得る可能性について構造性能の面から実験的に究明することを目的としている。

キーワード：都市ごみ溶融スラグ，鉄筋コンクリート柱，曲げせん断実験

1.　はじめに

都市ごみなどの一般廃棄物は現在その大半が最終処分されており，再利用の比率は決して高くない。最近，都市ごみを高温処理して溶融固化する技術が開発されており，それらから得られる都市ごみ溶融スラグ(以下，溶融スラグ)の利用拡大が社会的な課題となっている。もし，溶融スラグが鉄筋コンクリート構造に利用できれば，一般廃棄物の最終処分量の減量化に大いに貢献できるはずである。このようなことから，筆者らは文献 1)で，溶融スラグが鉄筋コンクリートはり部材において構造的に十分利用可能であることを実験的に検証し報告した。しかし，溶融スラグを鉄筋コンクリート構造で利用するとなれば，当然，柱部材における利用の可能性についても検討が必要となる。

そこで，本報では柱部材の曲げせん断実験を行い，柱部材での溶融スラグの利用の可能性について実験的に検証することを目的としている。

本報の実験では細骨材および粗骨材の全骨材に溶融スラグを用いている。その理由は，全骨材に溶融スラグを用いたコンクリートが柱部材で構造的に利用可能であることが検証されれば，溶融スラグを普通骨材と混合して利用することの可能性も同時に推測し得るものと考えられるためである。

本報では普通コンクリート試験体についても比較用に実験を行っている。実験の結果，溶融スラグを用いた柱部材の構造的挙動は普通コンクリートのそれとよく近似しており，溶融スラグは十分構造的に柱部材に利用可能であることが分かったので報告する次第である。

2.　実験概要

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。細骨材，粗骨材とも溶融スラグ骨材を用いた溶融スラグコンクリート(以下，SS シリーズ)3 体と，比較用として普通コンクリート(以下，NN シリーズ)の 3 体である。

変動因子は軸方向応力度(以下，軸応力度) σ_o=0.2Fc，0.4Fc，0.6Fc の 3 種である。

表-1　試験体種別

シリーズ名	コンクリート種別	試験体名	使用材料	実験時コンクリート強度 Fc (N/mm²)	軸応力度 σ_o
ＳＳシリーズ	溶融スラグコンクリート	ＳＳ－０．２	溶融スラグ粗骨材 溶融スラグ細骨材	４１．４	０．２Ｆｃ
		ＳＳ－０．４			０．４Ｆｃ
		ＳＳ－０．６			０．６Ｆｃ
ＮＮシリーズ	普通コンクリート	ＮＮ－０．２	天然粗骨材 天然細骨材	３２．８	０．２Ｆｃ
		ＮＮ－０．４			０．４Ｆｃ
		ＮＮ－０．６			０．６Ｆｃ

*1 東北工業大学大学院　工学研究科建築学専攻　（正会員）
*2 東北工業大学　工学部建築学科助手　（正会員）
*3 宮城県農業短期大学　農業土木科助教授　博(農学)　（正会員）
*4 東北工業大学　工学部建築学科教授　工博　（正会員）

2.2　試験体の形状，寸法，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。試験体の形状，寸法および配筋を図-1 に示した。柱せい D=250mm，柱幅 B=250mm，試験区間長さ L=1000mm，せん断スパン比(a/D=2.0)である。主筋は 3-D13(Pt=0.64%)，帯筋は 3-D10@50(Pw=1.8%)である。

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同時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えたためである。

2.3　使用材料

a)　溶融スラグ骨材

本実験で使用した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ごみを直接溶融し，水砕により製造したものである。溶融スラグ細骨材の表面は光沢があり，黒色のガラス質である。

溶融スラグ粗骨材は栃木県小山市清掃工場のコークスベット式高温溶融炉でごみを直接溶融後，気中で徐冷し製造したものである。溶融スラグ粗骨材の色調は黒灰色で玄武岩系の砕石と類似している。形状は 100～800mm の大きな塊であるため，破砕して使用骨材とした。

溶融スラグ粗骨材は図-2 に示すように JIS A 5308 の粒度曲線の上限通過率と下限通過率の範囲内に入るように粒度調整を行った。

現在，溶融スラグをコンクリートの骨材として使用する規定あるいは規格などはない。そこで，本報では溶融スラグを骨材として使用するに当たって検討が必要と考えられる化学組成，有害物質の溶出性および骨材の性質，アルカリ・シリカ反応，コンクリートの膨張性に関して試験を行った。

溶融スラグの化学組成分析の結果を表-2 に示した。表-2 から分かるように溶融スラグは SiO_2，CaO および Al_2O_3 が多く，その合計は約 90%となる。その他の成分は微量である。溶融スラグの有害物質の溶出試験結果を表-3 に示した。溶出試験は，環境庁告示 46 号による溶出試験によった。溶融スラグ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，ここでは土壌環境基準 [2)]（重金属類の溶出基準）との比較をした。表-3 より溶融スラグからの重金属の溶出は土壌基準値以下であることが分かる。

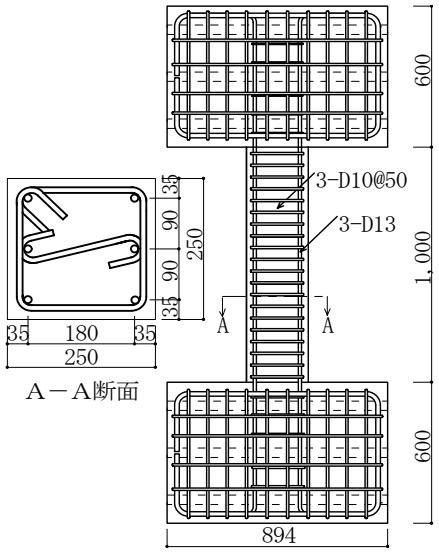


図-1　試験体の形状，寸法，および配筋

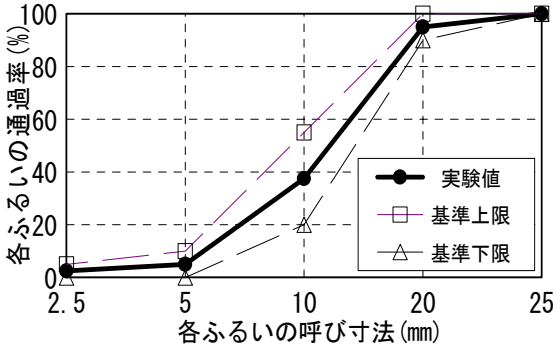


図-2　溶融スラグ粗骨材の粒度分布曲線

表-2　溶融スラグの化学組成

溶融ｽﾗｸﾞ	Ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
粗骨材	-0.58	32.47	18.83	3.72	35.10	3.35
細骨材	-0.51	37.11	16.26	3.08	34.83	2.03

溶融ｽﾗｸﾞ	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	Cl
粗骨材	1.44	0.20	1.57	2.23	0.21	1.10
細骨材	3.63	0.37	1.11	0.27	0.47	0.024

表-3　溶融スラグからの重金属の溶出試験結果

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

表-4 に溶融スラグ骨材の JIS 規格による材料試験結果を示した。以上の各種試験結果より溶融スラグはコンクリートの性質に影響を与えないことが認められ，本研究で用いる溶融スラグは骨材として利用可能であると判断した。

表-4　溶融スラグ骨材の性質

項　目		試験方法	細骨材	粗骨材
表乾比重		JIS A 1109	2.75	2.83
絶乾比重		JIS A 1109	2.74	2.80
吸水率(%)		JIS A 1109	0.69	1.01
単位容積重量(kg/ l)		JIS A 1104	1.67	1.75
実績率(%)		JIS A 1104	51.26	59.5
比重1.95の液体に浮く粒子(%)		JIS A 5308 付属書2	0.3	―
有機不純物(%)		JIS A 1105	淡い	―
安定性(%)		JIS A 1137	0.4	0.8
微粒分量 (%)		JIS A 1137	2.2	0.10
塩化物(%)		JIS A 1103	0.001	―
すりへり減量 (%)		JIS A 1121	―	31.0
アルカリ・シリカ反応	化学法 (mmol/ l)	JIS A 5308 付属書7	Rc=25 Sc=3	無害
	ﾓﾙﾀﾙﾊﾞｰ法 膨張率(%)	JIS A 5308 付属書8	0.03	無害

b)　SS コンクリート

細骨材および粗骨材に溶融スラグを用いたコンクリートの調合についてはいまだ規格化された調合方法が提案されていない。そこで，本実験では粒度分布調整を行った溶融スラグ細骨材と粗骨材を水洗い後，多数回の試し練りを行い，比較用の普通コンクリートの強度と同等の強度が得られるよう調整を行い最終的に調合を決定した。試し練りテストシリンダーは標準養生とした。SS コンクリートの調合を表-5 に示した。

セメントは早強ポルトラントセメント(K28= 66.2N/mm2，比重：3.14），混和剤は高性能 AE 減水剤（標準形 ポリカルボン酸化合物)を使用した。混和材としてフライアッシュを使用した。

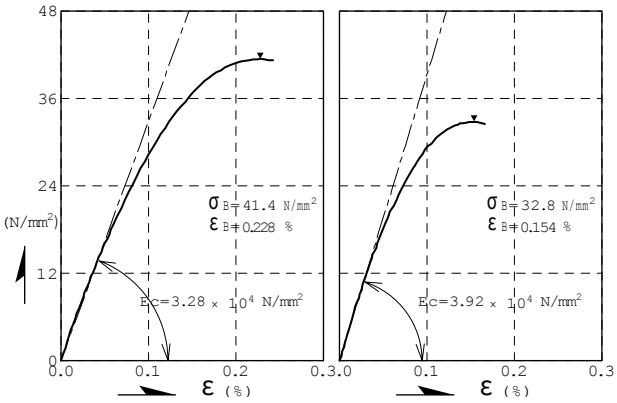
使用コンクリートの機械的性質を表-6 に示した。また，コンクリートのσ－ε曲線を図-3 に示した。実験時テストシリンダーは試験体に合わせ気中養生とした。SS コンクリートの調合強度は普通コンクリート強度とほぼ同等の約 31N/mm²を目標としたが，表-6 から分かるように実験時の SS コンクリート強度は 41.4N/mm² と普通コンクリートよりも相当に高い値を示した。この原因については今回の実験では明確にはできなかった。

表-5　SS コンクリートの調合

W/C (%)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	Air (%)	s/a (%)	単 位 質 量(kg/m³)				
				W	C	S	G	ad
55	18	4.5	49	185	340	890	950	136

表-6　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 σB(N/mm²)	圧縮強度時ひずみ εB(%)	ヤング係数 Ec(N/mm²)
溶融スラグ	41.4	0.228	3.28×10^4
普通	32.8	0.154	3.92×10^4

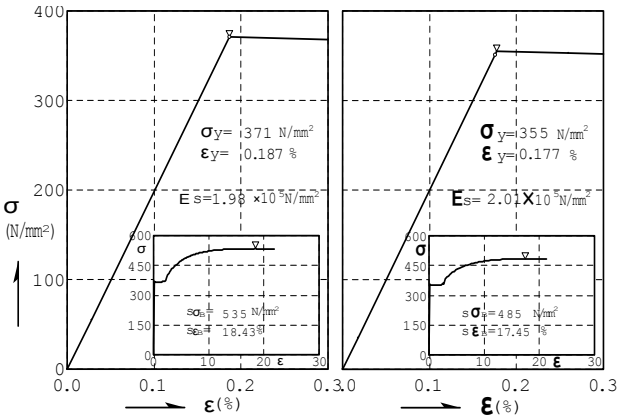


SS コンクリート　　普通コンクリート

図-3　コンクリートのσ－ε曲線

表-7　鉄筋の機械的性質

鉄筋種別	鉄筋径	降伏点 σy(N/mm²)	降伏点ひずみ εy(%)	引張強さ σtu(N/mm²)	ヤング係数 Es(N/mm²)
主筋	D13	371	0.187	535	1.98×10^5
帯筋	D10	355	0.177	485	2.01×10^5



主筋（D13）　　帯筋(D10)

図-4　鉄筋のσ－ε曲線

c)　普通コンクリート

普通コンクリートは一般の JIS 工場で製造したレディミクストコンクリートである。普通コンクリートの機械的性質を表-6 に示した。またσ－ε曲線を図-3 に示した。ヤング係数が通常のコンクリートに比べ高い値を示しているのは比重の大きい緻密な骨材を使用したことによるものと考えられる。

d)　使用鉄筋

使用した鉄筋の機械的性質を表-7 に示した。鉄筋のσ－ε曲線を図-4 に示した。使用鉄筋は全試験体とも共通で，主筋は D13(SD345)，帯筋は D10(SD295)を使用した。主筋，帯筋とも明確な降伏点を有する鉄筋である。

2.4　加力および変位測定方法

加力装置は図-5 に示す建研式加力装置である。加力は全試験体共通であり，載荷は一定の軸力をかけた状態で，正負繰り返し加力を変位制御で行った。各試験体とも R=4/100rad まで加力を行ったが，主筋が座屈した軸応力度 0.6Fc の試験体は，R=3/100rad で終了した。図-6 に変位測定方法を示す。層間変位をひずみ式変位計で，主筋および帯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。

3.　実験結果および検討

3.1　破壊経過

各試験体の最終ひび割れ状況を図-7(SS シリーズ)，および図-8(NN シリーズ)に示した。破壊経過および破壊性状は，両シリーズの場合とも軸応力度が同一のものはよく類似していたので，以下には軸応力度別に破壊経過を示す。

1)軸応力度 0.2Fc の試験体は材端に曲げきれつが発生し，きれつの進展につれて曲げせん断きれつに移行した。主筋が引張降伏し，最大荷重に至った。その後変形の増大につれ荷重が徐々に低下し，両材端にコンクリートの圧壊による剥落が発生した。部材角 R=4/100rad まで靭性のある性状を示した。圧縮主筋の座屈は見られなかった。

2)軸応力度 0.4Fc の試験体は材端に曲げきれつが発生し，きれつが曲げせん断きれつに移行しながら主筋が引張降伏し，最大荷重に至った。その後も荷重はさほど低下せず，変形の増大につれ両材端にかぶりコンクリートの剥落が見られた。実験終了まで主筋の座屈は見られなかった。

3)軸方向応力度 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た。かぶりコンクリートの剥落が顕著になり，主筋の座屈により荷重が急激に低下した。

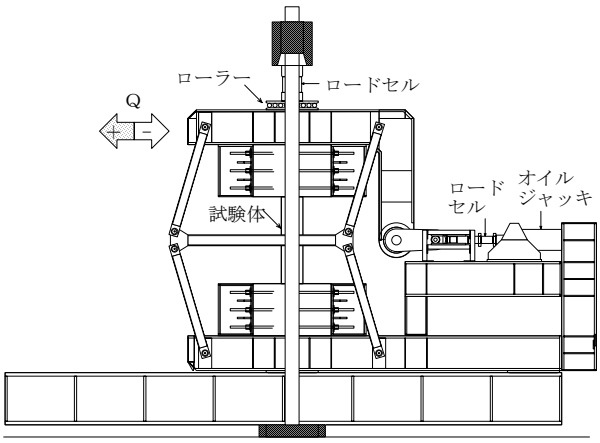


図-5　加力方法

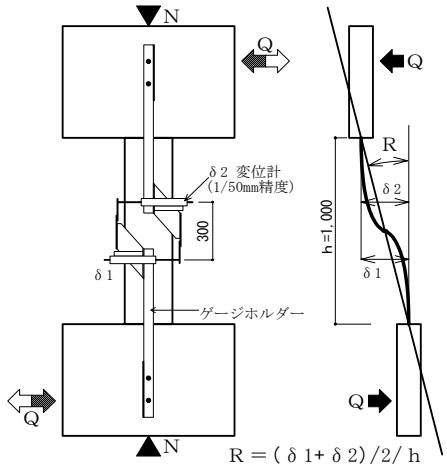


図-6　変位測定方法

3.2　荷重－変位曲線

a)　Q－R曲線

各試験体の荷重－変位曲線(以下，Q－R 曲線)を図-7 および図-8 に示した。図中の Q は試験区間の作用せん断力であり，R は試験区間の部材角である。

軸応力度 0.2Fc の試験体では，両シリーズの場合とも逆 S 型の履歴性状を示し，その履歴性状は類似している。また，両者とも R=4/100rad の変位まで靭性のある性状を示した。

軸応力度 0.4Fc の試験体では，SS シリーズの方が軸力が大きいため，NN シリーズに比べ多少スリップの大きい逆 S 型の履歴性状を示している。しかし，両者とも R=4/100rad までは靭性のある性状を示した。

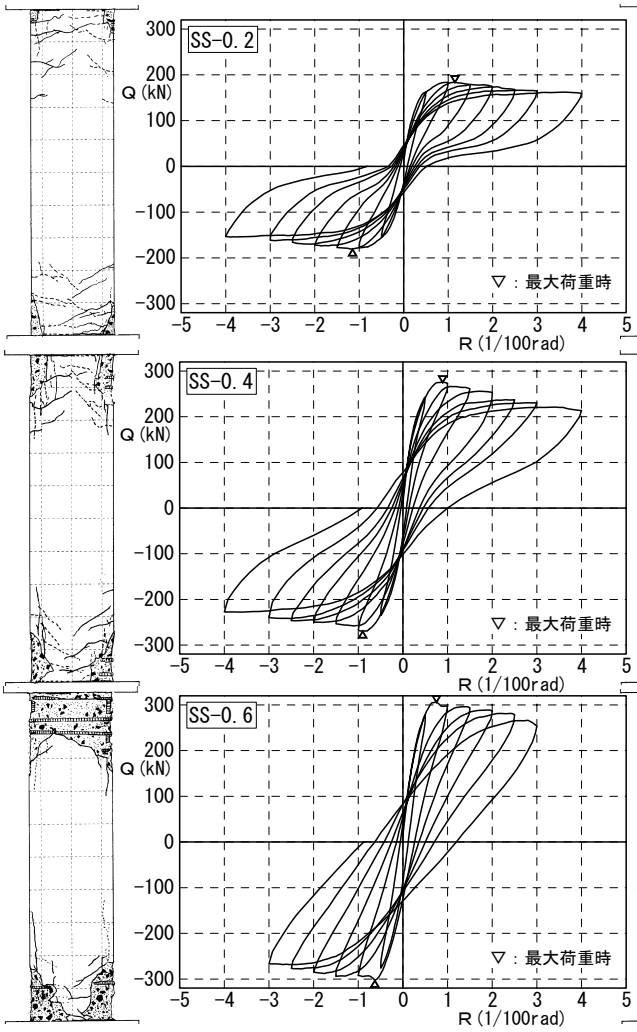


図-7　SS シリーズ試験体最終ひび割れ状況
および Q－R 曲線

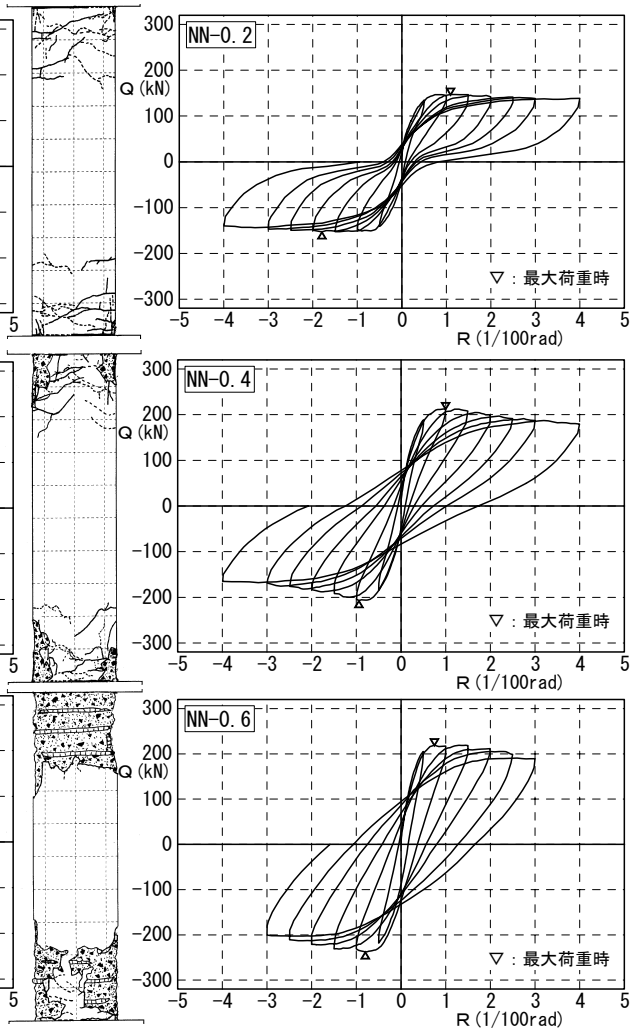


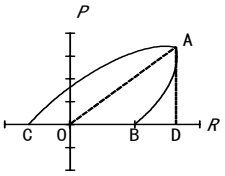
図-8　NN シリーズ最終ひび割れ状況
および Q－R 曲線

軸応力度 0.6Fc の試験体では，両シリーズとも紡錘型の履歴性状を示し，両者とも部材角 R =3/100rad で荷重が急激に低下している。

b)　等価粘性減衰定数

図-9 に，図-7，図-8 の履歴ループを式(1)を用いて求めた等価粘性減衰定数(heq)を示した。図-9 により，軸応力度 0.2Fc および 0.4Fc の試験体とも両シリーズの等価粘性減衰定数がよく近似している。これは 0.2Fc，0.4Fc の試験体はいずれも引張主筋降伏先行の試験体であり，履歴ループが主に引張鉄筋の消費エネルギーによって支配され，軸力およびコンクリートの影響

$$h_{eq}=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\text{面積ＡＢＣＡ}}{\text{面積△ＯＡＤ}} \quad \cdots \quad (1)$$



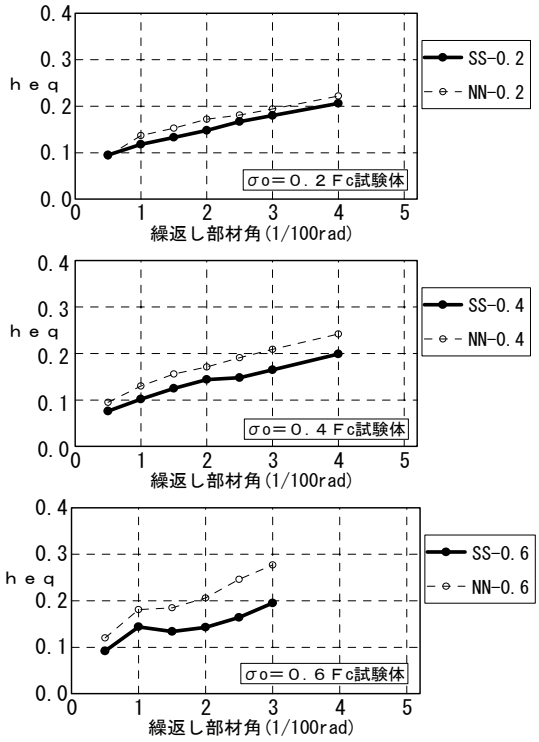


図-9　等価粘性減衰定数の比較

が小さいためである。

軸応力度 0.6Fc の試験体の等価粘性減衰定数は，SS シリーズ試験体の方が NN シリーズ試験体よりも大きい。これは実際の作用軸力が大きい SS シリーズ試験体が圧縮側のコンクリートおよび主筋の塑性化によるものである。

3.3 最大荷重に関する実験値と計算値との比較

各試験体の最大荷重と普通コンクリート柱部材を対象とした既往の曲げ終局強度算定式(式(2)[3)]，式(3)[3)]から求めた計算値の比較を図-10 に示した。図-10 から，両シリーズの試験体とも実験値が計算値を上回っており，計算値が安全側の評価を与えていることが分かる。

軸応力度 0.6Fc 試験体では両シリーズとも実験値は計算値を大きく上回っており，式(3)は安全側で誤差が大きいことが分かる。

(N≦0.4*b*/D/Fc)

$$M_u = 0.8\,a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \frac{N}{bDF_c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

(N＞0.4*b*/D/Fc)

$$M_u = (0.8 \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c) \cdot \frac{N_{max} - N}{N_{max} - 0.4b \cdot D \cdot F_c} \cdots (3)$$

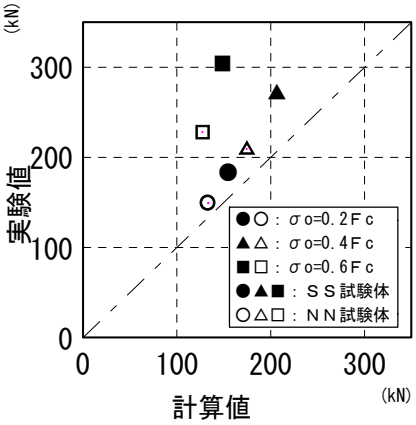


図-10 最大荷重の実験値と計算値の比較

4. まとめ

細骨材および粗骨材の全骨材に溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート柱部材について，軸応力度 0.2Fc～0.6Fc の範囲において曲げせん断実験を行い，その力学的性状を比べると同時に，普通コンクリートの試験体についても実験を行い，両者の比較検討を行った。その結果，本実験の範囲内において次のことが認められた。

1) 溶融スラグを用いた柱部材と普通コンクリート柱部材の性状を比べた結果，破壊経過は類似していた。また，Q－R 曲線に関しては 0.2Fc と 0.6Fc では両者とも逆Ｓ型および紡錘型と類似していた。しかし，0.4Fc においては溶融スラグを用いた柱部材の方が普通コンクリートのものよりも多少逆Ｓの傾向が強かったが，部材角Ｒ＝4/100rad までは両者とも荷重が急激に低下することのない履歴性状を示した。
2) 溶融スラグを用いた柱部材の最大曲げ強度は普通コンクリート柱部材を対象とした既往の終局曲げ強度式を用いて安全側で評価し得ることが認められ，既往の終局曲げ強度式は溶融スラグを用いた柱部材にも適用可能であることが分かった。但し，軸応力度 0.6Fc の場合などは計算値が実験値より相当に小さく求められるため，曲げ耐力時のせん断力を過小評価する場合があるので注意が必要である。
3) 溶融スラグを用いた柱部材の構造性能は，普通コンクリートのそれとよく近似した性能を有しており，溶融スラグを用いたコンクリートは耐震性能が要求される柱部材に十分利用可能であることが認められた。

謝辞

本研究に際し，㈱ポゾリス物産の川田稔氏，㈱TK 生コンの大場豊彦氏に技術提供を，㈱宇部三菱セメントよりセメント提供を，㈱秋山建材より溶融スラグのクラッシュなどの御協力を頂きました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

1)田中礼治，北辻政文，東海隼人，大芳賀義喜：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る研究，コンクリート工学論文集，第 13 巻，第 2 号，2002 年.5 月 pp109-116

2)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生利用の実施について(通達),pp1-3,1998

3) 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