

論文 高延性材料を主筋とする鉄筋コンクリート部材の耐震性向上に関する一考察

寺井雅和*1・南 宏一*2

要旨：大地震に対する建築構造物の耐震性能向上を図る目的で、地震エネルギーが効果的に吸収、散逸される先端材料の高延性鋼材を組み込んだ新構造システムを考察して、構造物の被害を最小限に抑え、その機能性を確保する先端的な耐震設計法を開発する。本研究では、耐震性新鋼材を主筋として組み込んだRC曲げ部材の実験を行い、その耐震性能を評価するとともに、簡単な断面解析を行い、実験結果との比較・検討も行った。その結果、耐震性新鋼材を主筋に用いると、鉄筋コンクリート部材の曲げ塑性ヒンジにおいて、等価粘性減衰が大きく、耐力劣化がない紡錘型の履歴性状が示された。

キーワード：鉄筋コンクリート、曲げ耐力、耐震性新鋼材、ステンレス、等価粘性減衰

1. はじめに

筆者らが所属する福山大学ハイテク・リサーチ・センター構造・材料開発研究センターでは、新しい耐震性新鋼材の開発とその構造物への応用を主テーマに、土木・建築・機械系材料の三分野にわたって「大型構造物の耐震性向上」に関する開発研究を行ってきた。この研究プロジェクトの一環として、筆者らは、地震による被害軽減を合理的に図る構造システムを創出するため、地震エネルギーを効果的に吸収、散逸させる耐震性新鋼材(15Ni-15Cr鋼)を開発し、それを組み込んだ塑性デバイスが従来の鋼材より地震エネルギーを効果的に吸収することを確認してきた^{1)~4)}。

本研究では、この新鋼材をRC部材の一部に組み込んだ構造システムによる耐震技術の高度化を検証することを目的とする。本論では、RC部材の主筋として使われている鋼材の力学的性状が、RC部材の塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのような関わりを持つのかを検証するために、基礎的なRC部材の曲げ変形性能載荷実験を実施した結果をまとめたものである。さらに簡単な断面解析も行い、数値解析的にも検証した。

2. 実験計画

2.1 耐震性新鋼材の開発

SS鋼材など、一般の構造物に使用されている鋼材は、結晶構造が体心立方格子[Body Centered Cubic Lattice: BCC]を有するフェライト(α)系鋼材である。この鋼材は、適度な強度と加工性を有しているため、きわめて有用なものであるが、延性と脆性の両性をもっているため、脆性破壊を起こすことを考慮に入れて使用しなければならない。一方、面心立方格子[Face Centered Cubic Lattice: FCC]を有するオーステナイト(γ)系鋼は、本質的に延性であり、脆性は起こりにくいため、構造物のデバイス材のような過酷な条件で使用するのに適した材料であると言える。

構造物の中に局所的に組み込まれる軟質なデバイス材には、軟鋼(SS400など)より炭素含有量を低目とした低耐力型のBCCの α 系極低炭素鋼(LY100など)が既に利用されている。しかし、前記の通りこのデバイスには高靱性・高延性のFCCのオーステナイト(γ)系鋼が適している。当センターでは、 γ 系15Ni-15Cr鋼(耐震性新鋼材、以下FLS; Fukuyama Low-Yield Steel)を開発した(特許：平 11-345188(吉村博文ほか))。

*1 福山大学 工学部建築学科講師 博(工) (正会員)

*2 福山大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

この材料の組成成分を表-1に、機械的性質を表-2に、それぞれ本研究で比較の対象とした一般鋼 SD295A とステンレス鋼 SUS304 と対比して示す。SD 鋼材に比べると Ni と Cr を多く含む点がステンレス鋼や FLS の特徴であるが、ステンレス鋼の耐力は SD 鋼とほとんど変わらないのに対して、FLS はニッケル 15%、クロム 15%に調整することで、ステンレス鋼よりも低耐力を実現している点が特徴である。

FLS は、低耐力で高延性を示しており、かつ FCC の γ 系であることから、デバイス材料としての期待は大きい。 γ 系 15Ni-15Cr 鋼は、板材として鋼構造物の中に局所的に組み込まれたデバイス材としては、これまでいくつかの研究が行われ、その実用性が評価され始めている⁴⁾。

2.2 実験計画

本実験は、主筋に用いられる鋼材の力学的性状が、RC 部材の曲げ性状に及ぼす影響を確認することが目的であるが、力学的性状が異なる主筋の鋼材種類として、一般鋼材、ステンレス鋼、そして本センターで開発された FLS の 3 種類の鋼材を使ってその性状の違いを比較する。3 種類の棒鋼の引張試験結果を図-1に、図-2に FLS の繰り返し性状を示す。SD295A 鋼は、明瞭な降伏棚が形成される。SUS304 鋼は明瞭な降伏棚はないものの、0.2%耐力は、ほぼ SD 鋼と同じであり、耐力後も緩やかに強度が上昇する。FLS は、前述の通り、極めて低い耐力を示し、耐力後はステンレス鋼より大きな剛性をもって強度上昇していることが確認できる。

試験体の断面構成は、図-3に示すように、断面寸法 150×200mm、長さ 600mm の片持はり部材形式とし、主筋本数が 4 本、6 本の 2 タイプを設定し、正負繰返し载荷を行うため、鉄筋は断面内に対象に配筋した。試験部分のせん断補強筋には 6mm の SD295 を 50mm、または 40mm 間隔で配筋している。

また、表-3の試験体諸元に示すように、主筋には $\phi 13$ の FLS, D10 の一般鋼材, D13 の

ステンレス鋼を使用したため、引張主筋比が異なっているが、全ての試験体で引張側主筋が圧縮側コンクリートより先に降伏するように設計している。

表-1 鋼材の組成成分

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SD295A	-	-	-	0.05以下	0.05以下	-	-
SUS304	0.05	0.24	1.69	0.033	0.027	8.06	18.69
FLS	0.01	0.33	0.31	0.01	0.003	15.84	14.19

単位: %

表-2 鋼材の機械的性質

	形状	寸法 mm	耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	のびしぼり	
					%	%
主筋	SD295A	異形 D10	364	531	23	-
	SUS304	異形 D13	363*	601	56	73
	FLS	丸鋼 $\phi 13$	114*	465	56	81
あばら筋	SD295A	異形 D6	407*	539	12	-

*:0.2%耐力

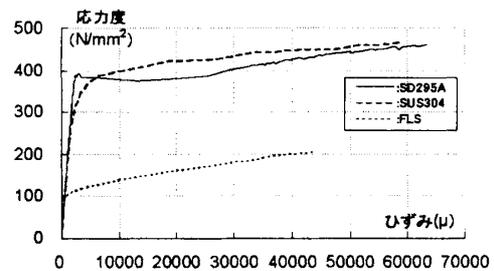


図-1 鋼材の応力ひずみ関係の比較

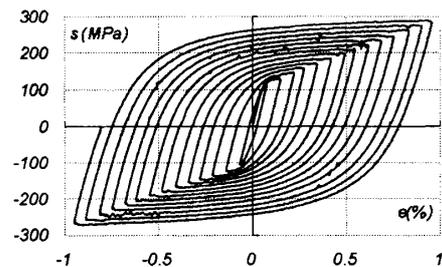


図-2 耐震性新鋼材(FLS)の履歴性状

表-3 試験体緒元

試験体番号	試験体寸法 D×B×L (mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	鉄筋						
			主筋	ρ_s (%)	降伏強度 (N/mm ²)	巻筋 間隔 (mm)	ρ_w (%)		
SD40	150 × 200 × 600	24.1	4-D10	0.56	364	D6@50	0.85		
SD60			6-D10	0.84					
ST40		29.4	4-D13	1.00	363	D6@40	1.07		
ST60			6-D13	1.49					
FL40		39.1	4- $\phi 13$	1.04	114				
FL60			6- $\phi 13$	1.56					

試験体番号の表記 SD40 軸応力度:0 軸力なし
 SD:一般鋼(SD295A) 4:主筋本数4本
 ST:ステンレス鋼(SUS304) 6:主筋本数6本
 FL:耐震性新鋼材(FLS)

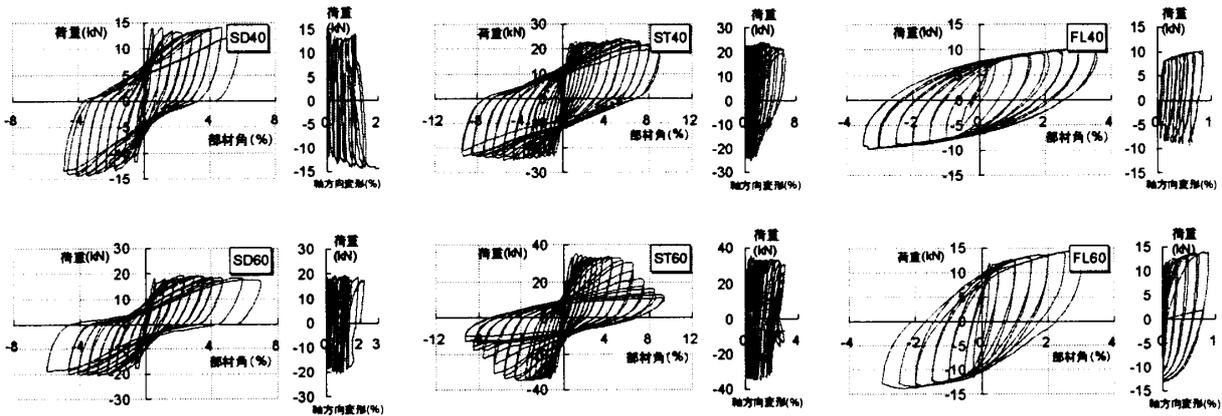


図-4 荷重-部材角関係および軸方向変形

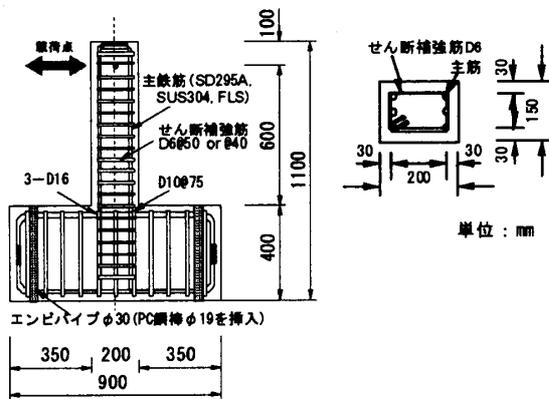


図-3 試験体の寸法および配筋状況

2.3 試験体の材料と製作

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大粒径 15mm 以下の砕石を、細骨材には最大粒径 5mm の海砂と最大粒径 5mm 以下の砕砂の混合砂を使用した。コンクリートの調合設計は、全試験体共通とし、水セメント比 54%、スランプは 18cm とした。ただし、試験体実験時材齢が異なるため、表-3 に示すように、コンクリート強度は異なっている。

主筋に用いた 3 種類の鋼材（一般鋼，ステンレス鋼，FLS）およびせん断補強筋に使用した異形棒鋼は、その材料特性値を、表-2 に示した。ステンレス鋼は、表面にクロムと酸素からなる透明で強固な不動態膜を形成し、それ以上の酸化を防止することにより耐食性を保つ金属である。機械的性質では、ヤング係数が若干であるが炭素鋼より小さい。この

実験で用いた SUS304 は、ひずみ硬化による応力上昇が大きく引張強さが高い特性を持つ。

2.4 実験装置および载荷方法

実験は 200kN ジャッキにより片持ちばり形式の試験体の部材端部に曲げモーメントが負荷されるようにした。本実験では、全ての試験体で正負に繰り返しせん断力を载荷し変位制御、および変位振幅漸増で、実験を行った。曲げ破壊を意図した全ての試験体では、水平ジャッキが縮む方向から载荷し、部材端相対回転角 R で最大 5.0% まで、0.5% の間隔で载荷した。なお、全試験体で、 $R=0.5%$ 以上の同一変位振幅で 2 回の繰り返しを行い、その変位振幅における履歴ループの定常性を調べた。

3. 実験結果とその検討

3.1 履歴曲線と破壊性状

各試験体の荷重-部材角関係、および軸方向変形の履歴推移を図-4 に示すが、各々の軸は最大値でスケールを調整しているため、グラフを比較するときには注意を要する。縦軸は、試験体部材端部に作用するせん断力 Q を表し、横軸は、部材端移動量 δ を部材長さ l で除した部材角で表す。軸方向変形についても部材長さ l で除している。なお、FL 試験体では、部材角 3-4% 程度で、大きなひびわれが部材中央に発生し、構造特性が変わったので、曲げ応答性状として評価できる履歴応答のみを示してある。

SD 鋼，ステンレス鋼を主筋に用いた試験体

では危険断面位置に初期曲げひび割れが発生後、主筋の降伏とともに、部材端部に塑性ヒンジが形成された。その後、耐力を保ちながら変形を続け、曲げ破壊の様子を呈した。これに対し、FLSを主筋に用いた試験体では、主筋の0.2%耐力が極めて低いので、早期に塑性のびが始まる。また、丸鋼を使用しているため、RC梁試験部分内ほぼ全域にわたり主筋が伸び出しており、更に固定スタブ内からも鉄筋が抜け出すような格好となり、初期曲げひび割れが発生後は、圧縮側コンクリートが再接触することなく、主筋の押し引きのみで変形をしていた。

3.2 曲げ耐力

実験結果を整理したものを表-4に示す。曲げ耐力の計算値は、次の終局曲げ強度 M_u の略算式(1)より計算した。実験値と比較するために、曲げ耐力を式(2)により荷重に変換した。

$$Mu = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot D \tag{1}$$

$$Q_{exp} = Mu / L \tag{2}$$

ここに、 L は部材長さで、600mmとする。

実験値/計算値の値は、0.87~1.02となり、正載荷側、負載荷側ともに、およそ実験結果はほぼ計算結果と同じになった。

3.3 エネルギー吸収

載荷履歴によって消費されたエネルギー（履

歴減衰)の比較を行う。膨らんだループによって描かれた履歴曲線において、このループの面積に相当するエネルギーが1サイクルで消費される。変位レベルの増加に伴う、エネルギー消費の推移を各試験体で比較するために、履歴減衰を等価な粘性減衰として次のように計算する。図-5のような、履歴ループ等価減衰系において、バネ常数は線AOCで表されるものとする、等価粘性減衰は次の式で与える⁵⁾。

$$\xi_{eq} \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\text{ループABCDの面積}}{\Delta OAE + \Delta OCF} \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \tag{3}$$

図-6に、6体の試験体の履歴減衰の推移を示す。主筋にSD鋼材とステンレス鋼材を用いた試験体では、部材角の増加とともに、ほぼ同じように履歴減衰の推移を示し、エネルギー吸収が行われていることがわかる。一方、FLSを

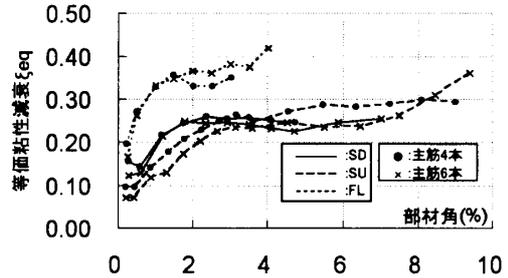


図-6 履歴減衰の推移

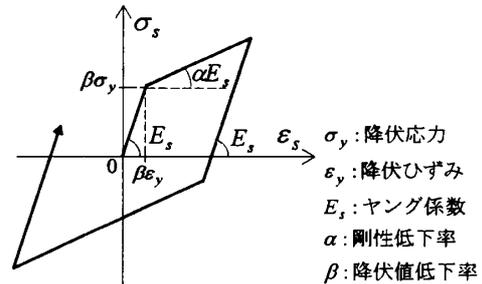


図-7 鉄筋の履歴モデル

表-4 曲げ耐力の比較

	計算値 Qcal	実験値 Qexp		Qexp/Qcal	
		正	負	正	負
SD40	13.27	13.49	11.59	1.02	0.87
SD60	19.86	17.59	17.39	0.89	0.88
ST40	23.51	22.30	23.40	0.95	1.00
ST60	35.27	33.00	33.00	0.94	0.94
FL40	7.70	7.23	7.77	0.94	1.01
FL60	11.57	11.80	11.67	1.02	1.01

単位:kN

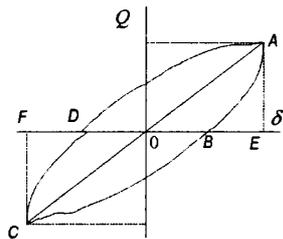


図-5 荷重-変形履歴ループ

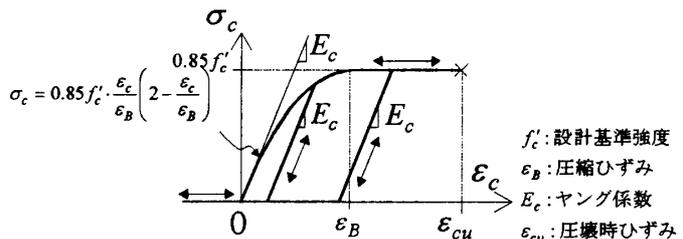


図-8 コンクリートの履歴モデル

用いた試験体では、 ξ_{eq} 値が大きく推移していることから、エネルギー消費性能は高いことがわかる。ただし、絶対的なループ面積は、FL試験体の方が小さいので、3種類の試験体を比較するときには注意が必要である。

4. RC 部材の断面解析法

4.1 RC はり部材の解析

主筋に用いられている鋼材の力学性状が、RC 部材の変形応答へ及ぼす影響を確認するために、簡単な断面解析法による計算を行い、実験結果と比較・検討する。

鋼材の履歴モデルは、多くの研究者により、様々な形状が提案されている。本論で検討している FLS の履歴性状は、図-2の通りであるが、本解析では、計算を簡単にとすることとおおよその構造特性を評価することが目的なので、図-7に示す簡単なトリリニアモデルを用いた。一方、コンクリートについては、図-8に示す非線形なモデルを用い、簡単のために引張応力は無視した。

解析は、RC 複筋はり部材断面に対して、平面保持の仮定に基づき、曲げモーメント-曲率関係を計算する。解析では、実験の材料諸元(表-3)をもとに、表-5の値を設定した。

4.2 実験値と計算値の比較

図-9に、6体の実験の荷重-部材角関係のうち、部材角4%までを拡大したものを示す。同図中には、計算値を太い点線で示している。ここで、計算値による部材角は、断面計算の曲率を部材長に沿って積分した値とする。せん断変形や鉄筋の付着・抜け出しによる影響は考慮していない。なお、計算は簡単のために3.7%までの3サイクルだけ行った。

鉄筋のモデル化において、バウジンガー効果が考慮されていないので、第2, 4象限部分の適応があまりよくないが、実験結果と計算結果は、全体の剛性変化、最大耐力など、よい一致を示していることがわかる。このことから、本解析手法で、この実験におけるRC試験体の曲

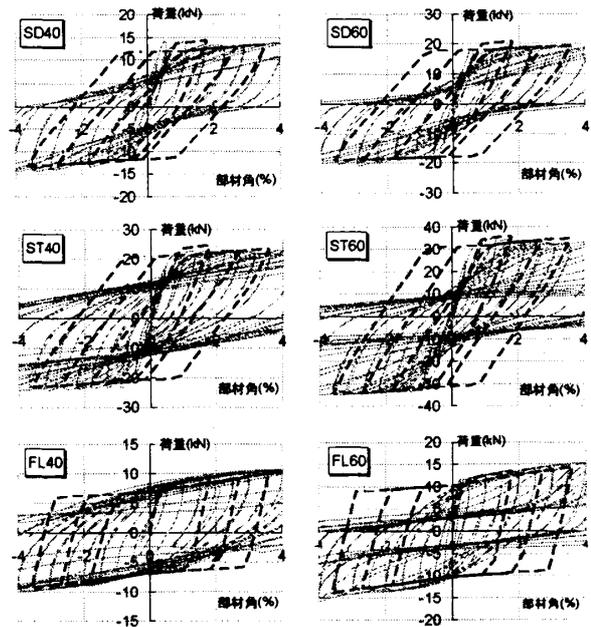


図-9 実験結果と解析の比較
(実線：実験値，点線：計算値)

表-5 計算を行った試験体の諸元

試験体番号	コンクリート		主筋	鉄筋			
	ヤング係数 E_c	強度 (N/mm^2) $0.85f_c$		ヤング係数 E_s	第二剛性 αE_s	降伏強度 (N/mm^2) $\beta \sigma_y$	降伏時ひずみ $\beta \sigma_y (\times 10^{-4})$
SD40	24700	24.1	4-D10 6-D10	210000	210	364	1730
SD60					2100	363	2000
ST40	26400	29.4	4-D13 6-D13	210000	2100	114	543
ST60							
FL40	29000	39.1	4- ϕ 13 6- ϕ 13	210000	2100	114	543
FL60							

記号は、図-7、-8に準じる $*3.35 \times 10^4 \times (F_c/60)^{1/3}$ による

表-6 パラメトリック解析に用いた材料諸元

コンクリート		主筋	鉄筋		
ヤング係数 E_c	強度 (N/mm^2) $0.85f_c$		ヤング係数 E_s	降伏強度 (N/mm^2) $\beta \sigma_y$	降伏時ひずみ $\beta \sigma_y$
24700	24.1	4-D10	2.1×10^5	$\beta=1.0$ 364 $\beta=0.3$ 114	0.00173 0.00054

げ特性を概ね評価できると判断した。

4.3 解析モデルによる構造特性評価

先に行った計算手法を用いて、鋼材の力学性状がRC部材性能に及ぼす影響について、パラメトリック解析を行う。変動因子として、主筋降伏後の第2剛性を αE_s (α は剛性低下率、 E_s は初期剛性)とすると、 $\alpha=0.01, 0.1, 0.3$ の3ケース、主筋の降伏値を $\beta \sigma_y$ (β は降伏値低下率、 σ_y は一般鋼材(SD鋼)の降伏値)とすると、 $\beta=1.0$ と0.3の2ケースを設定した。

ここでの計算では、断面形状をSD40試験体と同じく、150mm×200mmの断面内にD10が4

本配筋されたものとした。材料諸元は、表-6の値を用い、 α と β を変動させた6組の計算結果を図-10示す。 β 値に関わらず、 α が大きくなるにつれて、ループは瘦せて細長くなる傾向がある。

次に、これら6つの計算結果について、実験結果のときと同様にエネルギー吸収性能を検討してみる。3サイクルごとに等価粘性減衰 ξ_{eq} 値を求めて、部材角レベルに応じてプロットしたのが図-11である。 β にかかわらず、 α は小さい方が ξ_{eq} 値は高くなっていることがわかる。この中で、 $\alpha=0.01$ 、 $\beta=0.3$ の組み合わせが ξ_{eq} 値は最も大きくなっていることがわかる。すなわち、この組み合わせは、先に示したFLSの性能である低降伏、高ひずみ硬化を規定するものであり、簡単な計算手法によっても、実験結果と同じ傾向を再現できたことがわかる。

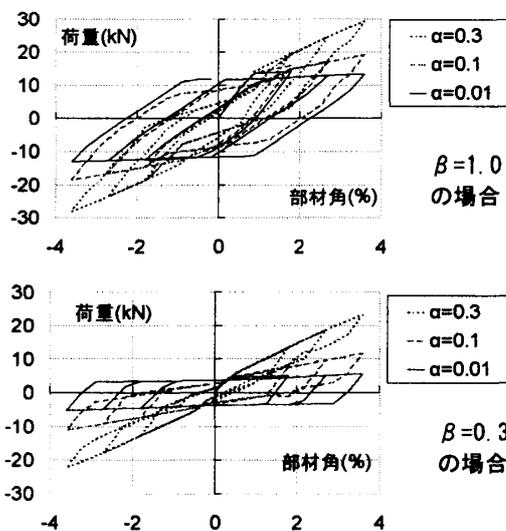


図-10 α 、 β によるパラメトリック解析結果

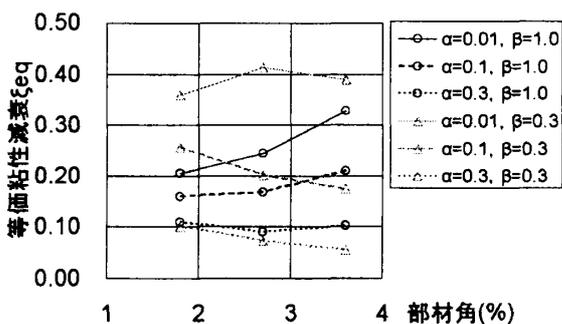


図-11 履歴減衰の推移

5. おわりに

主筋として使われている鋼材の力学的性能が、RC部材の塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのような関わりを持つのかを検証するために、基礎的なRC部材の曲げ変形性能載荷実験を実施した。鋼材の力学的性能の比較のために、主筋の鋼材種類は、一般鋼材、ステンレス鋼材、そして筆者らの研究グループで開発した耐震性新鋼材の3種類とした。

実験結果の検討、そして、簡単な断面解析法で実験値と計算値の比較を行った結果、次のことがわかった。

- 1) 曲げ耐力は、終局曲げ強度の略算式でほぼ推定できる。
- 2) 断面解析法による計算値は、実験結果とよい対応を示した。
- 3) FLSを鉄筋コンクリート部材の主筋に用いると、履歴減衰が大きく、耐力の劣化が小さい紡錘型の履歴性状を示した。

今後は、部材に軸力を導入した柱部材、断面寸法を大きくした中型試験体、より効果的な配筋方法などの検証を続け、FLSの実用的な利用方法を模索ことにしている。

謝辞

本研究は、平成11～15年度私立大学学術研究高度化推進事業(ハイテク・リサーチ・センター事業)の一環として行われたものである。また、本研究の一部は、平成17-19年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)・研究課題:17360279・研究代表者:南 宏一)によりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉村博文ほか:耐震性Ni-Cr系オーステナイト鋼の開発, 日本材料学会, 第52期学術講演会, pp.212-213, 2003.5
- 2) 寺井雅和, 南 宏一:鉄筋コンクリート部材の曲げ変形性能に及ぼす主筋の力学的性状の影響, 第一回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集, pp.149-154, 2004.5
- 3) 寺井雅和, 南 宏一:主筋の力学的性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ変形性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 第27巻, 第2号, pp.769-774, 2005.6
- 4) 上野谷実ほか:テーパ補剛板を用いた箱形断面柱の繰り返し性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.115-125, 2003.3
- 5) 若林 實:耐震建築の設計, 彰国社, 1988