

耐震性新鋼材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研究

寺井雅和*, 上地清志**, 南 宏一*

Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Members
with Earthquake-Resistant Steel Bars

Masakazu TERAJ*, Kiyoshi KAMIJI** and Koichi MINAMI*

ABSTRACT

Center for High-Tech Research, Fukuyama University (High-Tech Research Center for Structural and Material Developments) was established in 1999 by the grant from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan. It was researched with the improvements in seismic performance of structures, especially for materials and structures. In 2004, the continuing project proposal of the center was accepted by the Ministry. A group of faculty member of the department of Civil Engineering, Architecture and Mechanical Engineering is now studying on a common theme "Research Project on Improvements in Seismic Performance of Structures" from various aspect of research.

キーワード：鉄筋コンクリート梁，鉄筋コンクリート柱，耐震性新鋼材，曲げ変形性状

Keywords : Reinforce Concrete Beam, Reinforced Concrete Column, Earthquake-Resistant Steel Bar, Flexural Behavior

1 はじめに

平成 11 年 4 月，先端的な学術研究基盤を強化して，大学の教育研究を推進し，地域の研究機関，産業界との共同研究を通じて地域の新産業の創出，技術振興に資することを目的に，文部科学省の事業援助によって，ハイテク・リサーチ・センターが福山大学キャンパス内に設立された（写真 1）。福山大学ハイテク・リサーチ・センターは建築・土木構造物，基礎地盤の耐震性能向上とその性能評価法，耐震性新機能材料の開発に関するプロジェクトを組み，センタースタッフの密接な協力のもとに耐震性構造システムの開発と性能設計法の推進に向けて積極的に取り組んでいる。

平成 11 年度から平成 15 年度の 5 年間にわたる福山大学ハイテク・リサーチ・センターにおける「構造物の耐震性能向上に関する研究」は，3 つの研究課題を

中心にして進めてきた。すなわち，(1)構造物の耐震性能向上に関する研究，(2)地盤の耐震性向上と建設発生土のリサイクルに関する研究，(3)高延性材料の開発とその評価，である。この開発研究の意図したものは，土木，建築系の構造工学，地盤工学，耐震工学，機械系の材料工学の学問分野を横断的に融合して建築，土木両分野の構造物の地震被害を効果的に軽減できる構造システムを開発することにあつた。そのため，構造物の地震時の挙動を制御できるデバイスを，鋼材を用いて開発することに主眼をおいて，構造物の地震時の挙動を効果的かつ有効的に制御できるための鋼材としてどのような力学的特性を付与したものが必要であるのかの視点に立って，金属材料の立場から耐震性新鋼材の開発から研究開発を行った。

さらに平成 16 年度からは，引き続き，同様のプロ

*建築学科 **建築学科大学院生

※本稿は，第 7 回日中建築技術者交流会（平成 18 年 10 月 23 日～25 日に中国重慶大学を会場に開催）で発表した原稿をもとに若干の追記・レイアウトしなおしたものである。

プロジェクト「構造物の耐震性能向上に関する研究」を次の3研究課題にもとづいて継続的に推進している。すなわち、(1)高延性、耐熱機能材料の創成と評価、(2)耐震性新構造システムの開発、(3)既存構造物の耐震補強技術の開発、である。研究課題(3)は、新規の研究課題であり、新しく建設される建築および土木構造物に適用する制御システムを既存建築物および土木構造物の耐震補強技術として活用して、新たな既存構造物の耐震補強技術の開発にも応用しようというものである。この既存構造物の耐震補強技術の開発は中国・四国の地域はもとより、全国的にも展開できる応用性を持たせることを意図するもので、建設産業への活性化への支援を意図するものである。

2 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。そのため、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。構造物の中に局部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 系極低碳素鋼(LY100など)が既に利用されている。しかし、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⁾。

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。また、試験片による鋼材の応力-ひずみ関係を図1に、FLSの1軸繰返し履歴特性を図2にそれぞれ示す。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。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



写真1 福山大学ハイテク・リサーチ・センター
当センターの実験設備を利用してみませんか？

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。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部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^{2),3)}。

表1 鋼材の組成成分

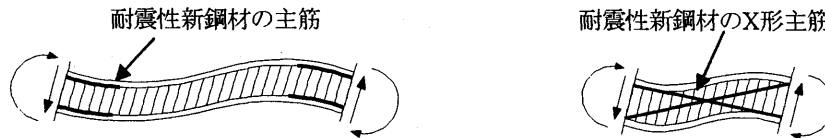
成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SD295A	-	-	-	0.05以下	0.05以下	-	-
SUS304	0.05	0.24	1.69	0.033	0.027	8.06	18.69
FLS	0.01	0.33	0.31	0.01	0.003	15.84	14.19

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	φ13	114*	465	56	81
あばら筋	SD295A	異形	D6	407*	539	12	-

*: 0.2%耐力



(a)長スパンばりのはり端部に用いる塑性ヒンジデバイス (b)短スパンばりのX形配筋の曲げせん断塑性ヒンジデバイス
 図3 鉄筋コンクリートはり部材に用いる塑性ヒンジデバイスの例

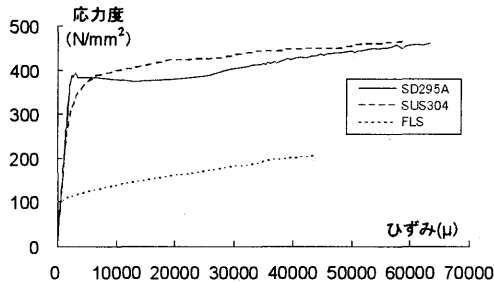


図1 鋼材の応力ひずみ関係の比較

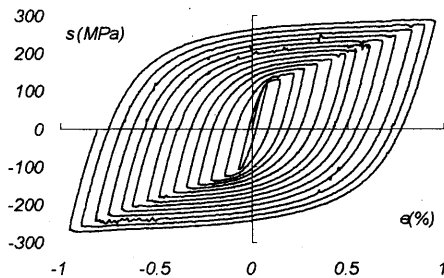


図2 耐震性新鋼材 (FLS) の履歴性状

3 耐震性新鋼材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研究

鉄筋コンクリート（以下、RC）部材に形成される塑性ヒンジによって、地震エネルギーを消費させることによって、RC 構造の耐震安全性を確保しようとする考え方は、すでに一つの確立された耐震理論として定着している。しかしながら、その場合の塑性ヒンジの形成に関与する主筋の力学的性能は、いわゆる完全弾塑性形の復元力特性で表わされるもので、降伏後の主筋の伸び剛性はきわめて零に近い状態になり、地震エネルギーの消費に対しては、極めて大きい塑性変形を許容するものになる。したがって、このような設計法では、構造物に過大な塑性変形を与える事になり、建築物の性能設計という観点から考えると、必ずしも満足する結果を与えるものにならない。

RC 部材の主鉄筋に耐震性新鋼材を用いて、地震エネルギーを効果的に吸収する塑性ヒンジデバイス開発する。RC 柱部材と組み合わせることにより、耐震性に優れたRC 架構骨組を開発する（図3）。さらに、地震国であるわが国に適した合理的配筋法として提案されたのがX形配筋である。本研究では、一般鋼材とは

異なる材料特性を有する鋼材をX形配筋の主筋として用いた場合、RC 部材がどのような性状を示すのかについても検討する。

4 RC 部材の非線形解析

RC 部材の弾塑性曲げ変形挙動（RC 部材の曲げ降伏による塑性ヒンジにおける抵抗曲げモーメント、塑性ヒンジの回転能力、地震エネルギーの消費能力など）に対して鋼材の α , β , γ のそれぞれの基本特性がどのような関わりを持つのかを、基礎的な視点に立って簡単な数値解析により、理論的に検討した。さらに、耐震性新鋼材の力学的特性を規定する α , β , γ にもとづいた鋼材の履歴則を定式化し、繰返し载荷に対する塑性ヒンジデバイスの回転能力および塑性エネルギー消費能力に関する解析結果との比較検討を行った。

4.1 材料モデル

鉄筋の σ - ϵ 関係をモデル化するにあたって、様々な特性を持つ鋼材を想定して、本解析では、 α, β, γ の3つの係数で形状を変化させたトリリニアモデルを用いる。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が、本解析では計算を簡単にする事と、おおよその構造特性を評価することが目的なので、図4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5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。

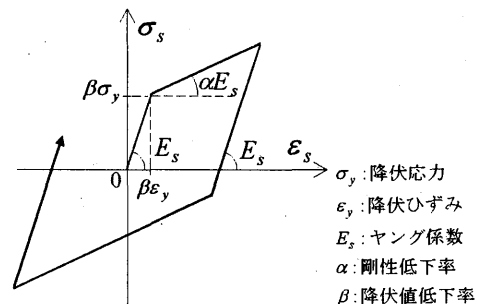


図4 鉄筋の履歴モデル

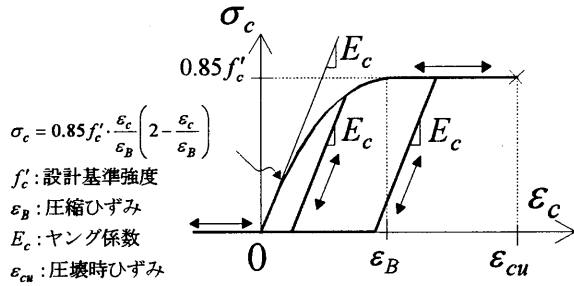


図5 コンクリートの履歴モデル

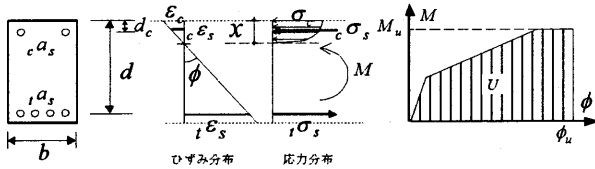


図6 RCばりの応力度とひずみ度の分布

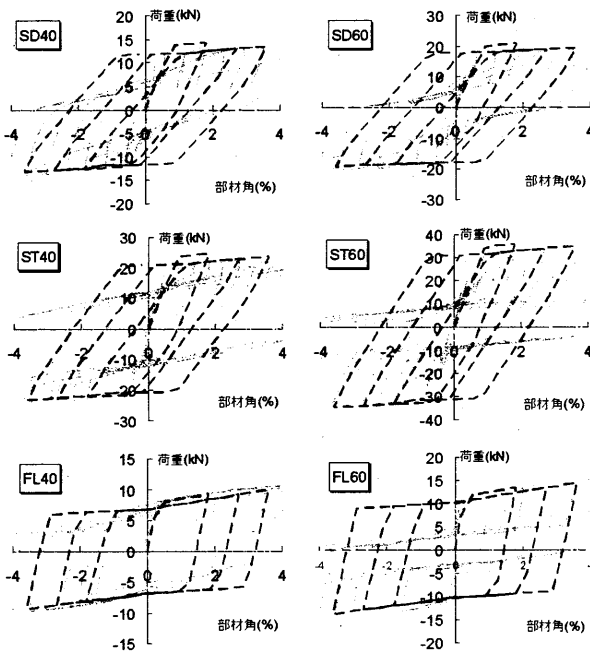


図7 実験結果と解析の比較
(実線：実験値，点線：計算値)

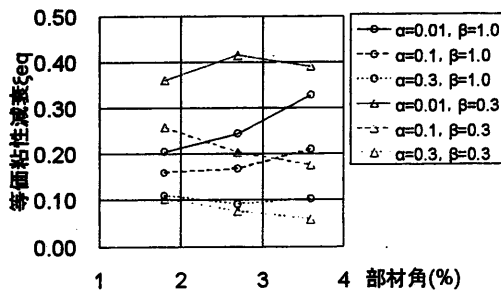


図8 履歴減衰の推移

4.2 RC はり部材の解析

RC 部材の単調載荷時の曲げ変形性能に及ぼす主筋の α, β, γ の諸数値の影響を検討するため、RC 複筋ばりの主筋比、複筋比、鋼材係数、コンクリートの圧縮ひずみ値を従変数として、 α, β, γ を主変数とするパラメトリック解析を行った。図6に示すようなRC複筋はり部材の断面に対して平面保持の仮定を適用することで、曲げモーメント-曲率(以下、 $M-\phi$)関係を計算する。中立軸を求める非線形求解法には、ニュートン・ラプソン法を利用して収束計算を行った。なお、ここで想定しているRC部材は、過去に筆者らの研究室で行われた実験^{4)~7)}に対応させるため、断面寸法は150mm×200mmである。

4.3 解析結果

図7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、バウジッ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試験体の曲げ特性を概ね評価できると判断した。

次に、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。計算結果から、応答履歴の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8である。B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。

5 実験的研究

FLS 棒鋼を主筋とした RC の片持ばりの形式の小型試験体 (断面 150mm×200mm) を用いて繰返し載荷を行い、RC ばりの塑性曲げ変性状が FLS においてどのような影響を持つのかを検討した。特に FLS のもつ特性である鋼材の低降伏後の耐力の上昇が塑性ヒンジの回転能力および塑性エネルギー消費能力の増加に寄与し、塑性ヒンジデバイスとしての機能を有することを明らかにした。さらに、この小型試験体を用いて RC 部材における塑性ヒンジデバイスとしての力学的機能の定量化を図るために、主筋比、せん断補筋比、せん断スパン比、軸力比、コンクリート強度を実験変数として、20 体の試験体による組織的な実験研究を実施した。

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耐震性新鋼材の 3 種類の鋼材を使ってその性状の違いを比較する。試験体の断面構成は、図 10 に示すように、断面寸法 150×200mm とし、主筋本数が 2 本、4 本、6 本の 3 タイプを設定した。その他の主な実験変数としては、載荷方法、部材長さ、軸力比、引張主筋比として実験内容を計画した。実験変数と断面構成の組み合わせは、表 3 に示すが、試験体の名称によって、その組み合わせが表示できるようにした。なお、試験時期によって、試験体のコンクリート強度が少しずつ異なっているため、実験時の値は、この値と多少異なっている。

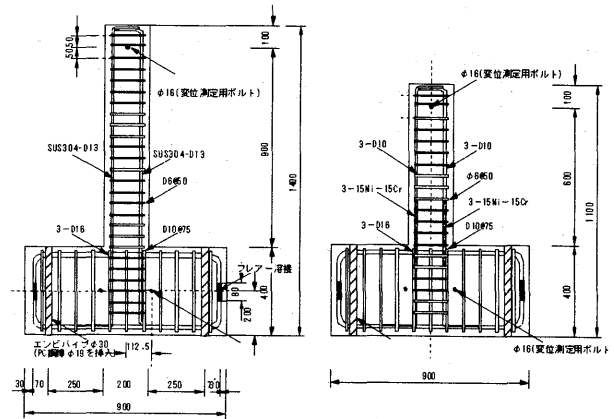
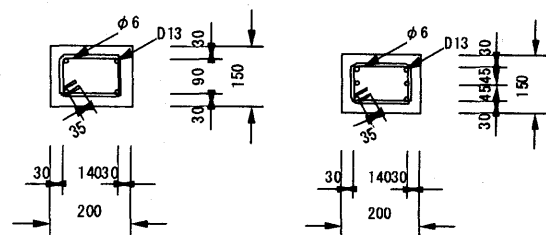


図 9 試験体配筋状況および寸法



(a) 主筋本数 4 本 (b) 主筋本数 6 本

図 10 RC 部材の断面 (単位 ; mm)

5.1 試験体の製作

試験体は、表 3 に試験体諸元を示し、図 9 に配筋状況および寸法を示すように、断面寸法 150×200mm、長さ 600mm または 900mm の片持部材形式とし、帯筋には D6 を 50mm、または 40mm 間隔で配筋している。本実験に使用した主鉄筋には、φ10 の FLS と D10 の一般鋼 (SD295)、D13 の一般鋼 (SD295)、D13 のステンレス鋼 (SUS304) の 4 種類であるが、交番繰返し載荷とするために、対象断面として、4 本、6 本の鉄筋を配

表 3 試験体諸元

試験体番号	断面特性 (mm)				材料特性 (N/mm ²)				軸応力度 N ₀ /bDσ _B	載荷方法	実験年度
	断面寸法 B×D	部材長さ L	主筋	p _t (%)	帯筋 間隔	p _w (%)	コンクリ ート強度	降伏強度			
SD2M-600-00	150×200	600	2-D10	0.31	D6@50	0.85	24.1	364	0.0	単調載荷	H14年度
FL2M-600-00	150×200	600	2-φ10	0.28	D6@50	0.85	24.1	300			
SD2C-600-00	150×200	600	4-D10	0.56	D6@50	0.85	24.1	364			
FL2C-600-00	150×200	600	4-φ10	0.61	D6@50	0.85	24.1	300			
SD3C-600-00	150×200	600	6-D10	0.84	D6@50	0.85	24.1	364			
FL3C-600-00	150×200	600	6-φ10	0.92	D6@50	0.85	24.1	300			
ST2C-600-00	150×200	600	4-D13	1.00	D6@40	1.07	29.4	363	0.1	繰返し 載荷	H15年度
ST3C-600-00	150×200	600	6-D13	1.49	D6@40	1.07	29.4	363			
ST2C-900-00	150×200	900	4-D13	1.00	D6@50	0.85	29.4	363			
ST3C-900-00	150×200	900	6-D13	1.49	D6@50	0.85	29.4	363			
SD2C-600-01	150×200	600	4-D13	1.00	D6@40	1.07	32.9	364			
SD3C-600-01	150×200	600	6-D13	1.49	D6@40	1.07	32.9	364			
ST2C-600-01	150×200	600	4-D13	1.00	D6@40	1.07	32.9	363	0.3		H16年度
ST3C-600-01	150×200	600	6-D13	1.49	D6@40	1.07	32.9	363			
SD3C-600-03	150×200	600	4-D13	1.00	D6@40	1.07	41.2	364			
SD3C-600-03	150×200	600	6-D13	1.49	D6@40	1.07	41.2	364			
ST2C-600-03	150×200	600	4-D13	1.00	D6@40	1.07	41.2	363			
ST3C-600-03	150×200	600	6-D13	1.49	D6@40	1.07	41.2	363			

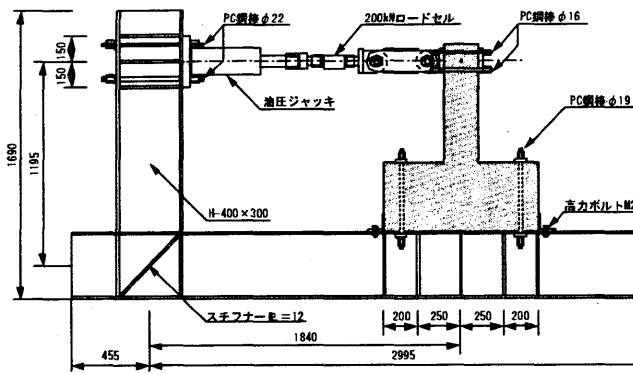


図11 試験装置概要（軸力なし）

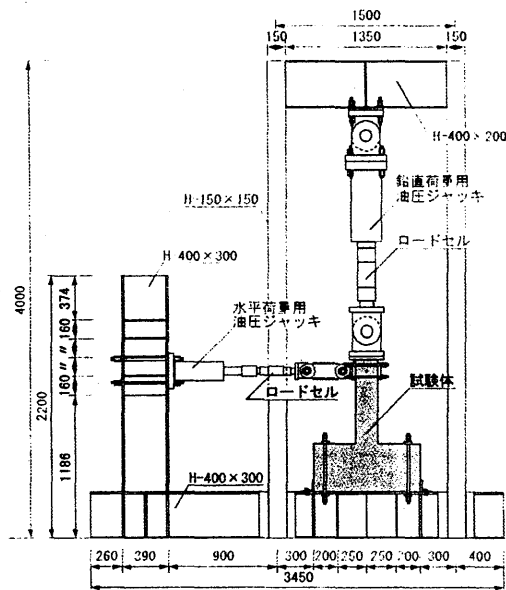


図12 試験装置概要（軸力あり）

筋している。せん断補強筋には、6mmのSD295を使用し、40mmと50mm間隔に配置している。せん断補強筋は、図10に示すように、閉鎖形に加工し、端部は、135°に折り曲げて、主鉄筋に結束線により取り付けてい

る。

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以下砕石を、細骨材には、最大粒径5mmの海砂と5mm以下の砕砂を使用した。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。試験体の制作においては、全て木製型枠を使用し、コンクリートの打設は、全試験体ともたて打ちで行った。

5.2 実験装置

荷重装置の概略を図11, 12に示す。軸力を導入しない場合には、図11のようなL形鋼製フレームにPC鋼棒で試験体および50トンのジャッキを固定し、50トンのロードセルと治具を介して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。軸力を導入する場合は、図12のように、これに立体フレームを取付け、鉛直用100トンの油圧ジャッキを設置した。

軸方向力を作用させる試験体については、まず、軸方向力を所定の値まで負荷させた後、一定軸方向力を保持しながら、試験体柱頭部での変位制御により、水平変位 $\delta=1.5\text{mm}$ （部材端相対回転角 $R=0.25\%$ ）で正負繰り返し荷重を1回行った後、 $\delta=3.0\text{mm}$ （ $R=0.5\%$ ）から $\delta=30\text{mm}$ （ $R=5.0\%$ ）まで3.0mmずつ漸増荷重を繰り返したが、履歴過程において、軸方向力が変化する場合には、随時、油圧ジャッキを作動させ、軸方向力を補正した。

5.3 実験結果とその検討

実験結果については、表3に示す18体の試験体のうち、6体について検討を行った。

5.3.1 履歴曲線と破壊性状

各試験体の荷重一部材角関係、および軸方向変形の履歴推移を図13に示す。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。なお、FL試験体については、単調荷重の実験も行ったので、それぞれ同じ配筋のものを重ねて描いている。

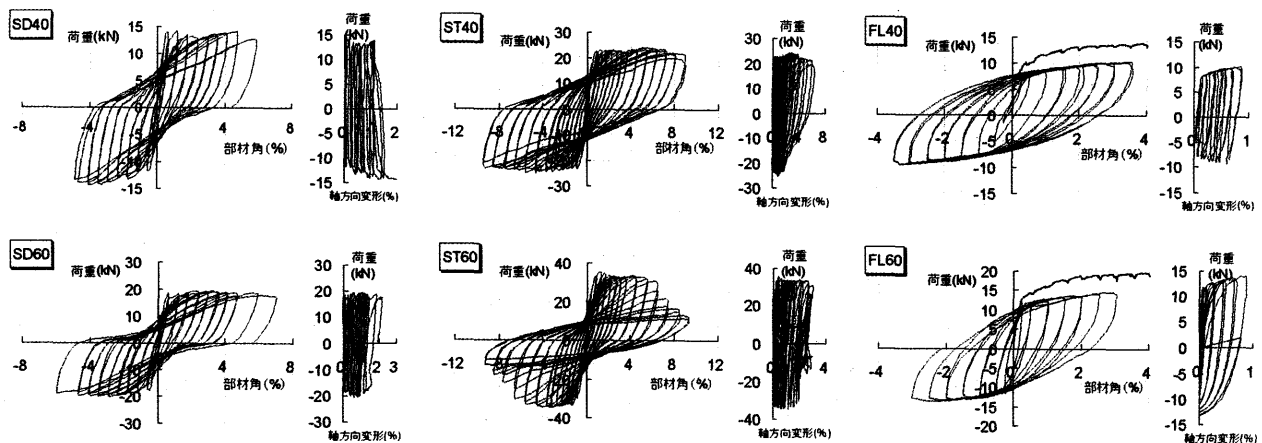


図13 荷重一部材角関係および軸方向変形

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

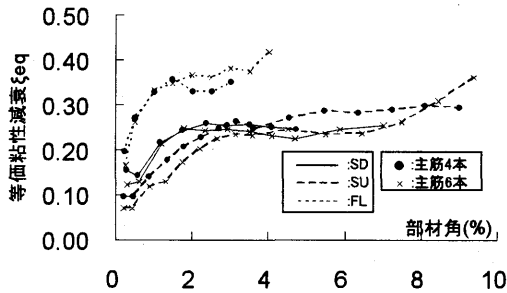


図14 履歴減衰の推移

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。FL 試験体において，単調荷重の場合，繰り返し荷重の包絡線より，荷重応答が 2~3 割高めに推移している。これは，先述の通り，繰り返し荷重の場合，圧縮側となるコンクリートが寄与しておらず，鉄筋の押し引きのみで曲げ抵抗していたのに対し，単調荷重の場合，圧縮側コンクリートが作用していたため，抵抗機構に違いがあると考えられる。

5.3.2 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/計算値の値は，0.87~1.02 となり，正荷側，負荷側ともに，およそ実験結果はほぼ計算結果と同じになった。

5.3.3 エネルギー吸収

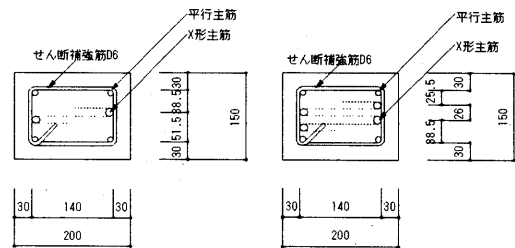
荷重履歴によって消費されたエネルギー(履歴減衰)の比較を行う。膨らんだループによって描かれた履歴曲線において，このループの面積に相当するエネルギーが1サイクルで消費される。変位レベルの増加に伴

表5 試験体緒元

試験体番号	試験体寸法 D×B×L (mm)	部材長さ比 (2L/B)	部材長さ (mm)	X形主筋比 β	X形主筋	
					平行主筋	FLS
A3.5-F	150× 200× 300	3	300	0.5	SD295A	FLS
A3.5-S					2P-10	1DS-13
A3.6-F				2P-10	2DS-13	
A4.5-F	150× 200× 400	4	400	0.5	SD295A	FLS
A4.5-S					2P-10	1DS-13
A4.6-F				2P-10	2DS-13	
A4.6-S				0.6	2P-10	2DS-13

β : X形主筋量と全主筋量の比

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14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を用いた試験体では， ϵ_{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。



(a) X形主筋2本 (b) X形主筋4本
図15 断面寸法

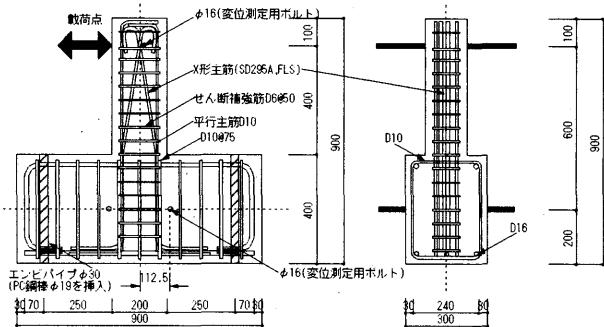


図16 試験体配筋状況および寸法
(部材長さ400mmの場合)

6 X形配筋

6.1 実験計画

試験体緒元を表5に示す。本実験のパラメーターはX形主筋として用いる鋼材の種類，X形主筋の本数である。図15，16に試験体形状および断面形状を示す。断面寸法150×200mm，長さ300mmと400mmの片持はり部材形式とし，帯筋D6を50mm間隔($P_w=0.84\%$)

で配筋している。試験体は、コンクリート設計基準強度 30N/mm^2 と $\text{FLS}\Phi 13$, SD295A D13 を X 形主筋に用いて 8 体を計画し、X 形主筋に普通鋼を用いた場合と FLS を用いた場合を比較した。

6.2 実験結果

曲げ耐力の計算値は終局曲げ強度の略算式より求めた。実験値/計算値の値は、負側では $0.94\sim 1.22$, 正側では $1.08\sim 1.37$ となり、負側だけを見るとほぼ計算結果と同じになった。

図 17, 18 に、8 体の試験体の履歴減衰の推移を示す。X 形主筋に FLS を用いた試験体では、部材長さにかかわらずエネルギー吸収が大きく推移していることから、せん断塑性ヒンジデバイスへの応用が期待できることが確認された。

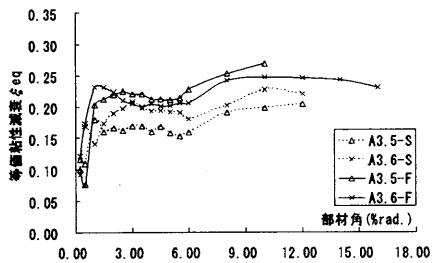


図 17 履歴減衰の推移 (部材長さ 300mm)

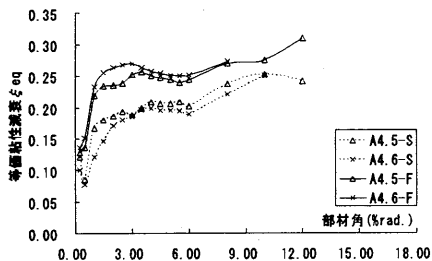


図 18 履歴減衰の推移 (部材長さ 400mm)

7 まとめ

主筋として使われている鋼材の力学的性能を規定する諸数値が、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、さらに適正に塑性変形を制御するためには、鋼材の諸数値としてどのような値を与えればよいのかを、 α, β, γ についてパラメトリックな解析を行い、さらに α, β, γ がもつ意味を調べるために重回帰分析を行った。

配筋量と軸力比に絞って解析結果を整理・検討した結果、以下のことが確認できた。

1. 終局曲げ耐力を大きくし、塑性変形量を小さく抑えるためには α と β は大きい方がよい。
2. 一般的な配筋では、 α と β は大きい方がエネルギー消費量は大きくなる。

3. このたび計算に用いた材料の範囲では、 γ による部材性能の大きな違いはみられなかった。
4. 軸力が大きくなると、 α, β, γ 値による変化の影響がほとんどなくなる。

以上のまとめから、柱材の主筋に α, β, γ を意識した特殊な鋼材を用いても、部材性能には顕著な効果が現れないので、柱材には普通鋼材を用い、塑性化する材料に降伏後の剛性が高い鋼材を用いることで、ヒンジ部分で変形を抑え、かつエネルギー消費能力に優れているという観点で、効果的であると言える。

次に、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。一連の実験の結果、次のことが確認された。

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. X 形主筋に耐震性新鋼材を用いることにより部材変形能力が大きくなる。
3. FLS を鉄筋コンクリート部材の主筋に用いると、耐力の劣化が小さい紡錘型の履歴性状を示した。
4. FLS を用いた試験体の等価粘性減衰は SD 鋼材やステンレス鋼材と比して大きい。

以上の理論的、実験的な検証によって、初期降伏点を小さく早期に主筋を降伏させるが、その降伏後の剛性は初期剛性に対して、急激な剛性低下を生じないようにすることがエネルギー消費能力を大きくし、かつ、塑性変形を過大にあたえない条件となることが示された。すなわち、

1. 材料強度変数 α, β, γ において、それぞれの諸数値が大きくなると、RC 部材の終局時の抵抗曲げモーメントが大きくなるが、終局時の塑性回転量は小さくなる。
2. β を変数として地震時のエネルギー消費能力を検討すると、 β が 1.0 の場合は、エネルギー消費能力は高く、その上限値は α の値にもよるが、 $\beta=0.2\sim 0.4$ の場合にエネルギー消費能力は最大になる傾向があり、エネルギー消費能力の観点から β の値としては 0.4 程度が適正である。
3. RC 部材の塑性ヒンジとしての塑性回転量を小さくするためには、 α および β を大きくすることが必要になるが、エネルギー消費能力の観点からみれば、 α の値にもよるが、 β が小さいほどエネルギー消費能力は大きくなる。

当センターのプロジェクトでは、理論解析で得られ

た結果にもとづいて適正な α , β , γ の組合せをもつ耐震性鋼材に鋼棒（主筋）を製造することはできず、今後の課題として、提案する力学的性能を有する鋼棒の製造ができることが、本プロジェクトとしての重要なキーポイントになっているので、必要な材料強度変数を有する鋼棒の製造体制を整えることが必要である。なお、本課題で実施した RC 部材の曲げ載荷実験で用いられた試験体は、主筋径が 10mm 程度と細径であることに関連して、小型の模型になっているが、耐震性新鋼材を用いた RC 部材の力学的性能をより定量的に把握するためには、より実断面に近い寸法をもつ部材の実験が必要である。

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)によって行われた。本実験で使用したステンレス棒鋼と各種資料は大同特殊鋼(株)川崎工場技術部に提供いただいた。本学建築学科卒業生の多田将人君、一色信吾君、尾西龍介君、田中俊行君には、試験体の製作、実験の実施からデータ整理などで協力していただいた。ここに、記して深甚の謝意を表します。

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) 上野谷実ほか:テーパー補剛板を用いた箱形断面柱の繰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
- 3) 上野谷 実, 中村雅樹, 山本定弘, 山本幸司, 高橋拓也:低降伏点鋼を用いた箱形断面柱の繰返し弾塑性挙動に関する基礎的研究, 第 55 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, I-37, pp.73-74, 2003.5
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 寺井雅和, 南 宏一:耐震性新鋼材を主筋に用いた鉄筋コンクリート部材の曲げ変形性状, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 29 巻, pp.209-216, 2006.3
- 7) 寺井雅和, 南 宏一:ステンレス鋼(SUS304)を主筋に用いた RC 部材の曲げ変形性能に関する一実験, 建築学会 2004 年度大会(北海道)学術講演公害集 C-1, pp.233-234, 2004.9