

# 耐震性新鋼材を主筋とする鉄筋コンクリート部材の 耐震性能に関する実験的研究

上地 清志\* 寺井 雅和\*\* 南 宏一\*\*

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

Kiyoshi KAMIJI\*, Masakazu TERAII\*\* and Koichi MINAMI\*\*

## ABSTRACT

Authors have developed the earthquake-resistant steel bars to make the seismic energy effectively absorbed. This paper presents the experimented on reinforced concrete bending member which built in the bar with an earthquake-resistant steel as parallel main reinforcement or diagonal main reinforcement, and the seismic performance was examined. As a result, it was shown to contribute to the improvement of the seismic performance the equivalent viscous damping constant grows as the displacement amplitude increases compared with the case to use the ordinary steel when an earthquake-resistant steel is used for main reinforcement.

キーワード：鉄筋コンクリート，耐震性新鋼材，X形配筋，曲げ変形状，エネルギー吸収

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Earthquake-Resistant Steel Bar, Diagonally Reinforcement, Flexural Behavior, Energy Dissipation

## 1. はじめに

筆者らは、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して、「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、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を用いた場合に比して、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<sup>1),2)</sup>。

この新鋼材による棒鋼を平行主筋あるいはX形主筋として用いた場合、RC 部材がどのような曲げ破壊性状を示すのかを検証するために、部材断面 150mm×200mm の小型試験体を用いて基礎的な実験を

実施してきた<sup>3),4),5)</sup>。本論ではこれまでの研究に引き続きより実構造物に近い中型試験体(断面寸法 300mm×300mm)を用いて実験研究を計画し、その破壊性状を考察し、耐震性新鋼材による棒鋼を主筋に適用する是非について検討する<sup>6),7),8)</sup>。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体計画

本実験では、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ために、力学的性状が異なる主筋の鋼種として普通鋼材(以下 SD 鋼という)と耐震性新鋼材(以下 FLS 鋼という)の 2 種類の鋼材を用いてその性状の違いを比較する。この 2 種類の機械的性質を表-1 および図-1 に示す。図-2 に繰り返しに対する FLS 鋼の応力度ひずみ度関係を調べ

\*大学院工学研究科建築学専攻 \*\*工学部建築・建設学科

るために行ったせん断応力度とせん断ひずみ度関係を参考のために示した。FLS 鋼の降伏点は  $100\text{N/mm}^2$  程度と低降伏点鋼 LY100 なみに低いが、引張強さは  $400\text{N/mm}^2$  程度あり、また破断時の伸びは 30%以上の性能を有する。

## 2.2 試験体の形状と寸法

表-2 に試験体緒元を、図-3 に試験体の形状および断面構成をそれぞれ示す。本実験は、X 形配筋試験体 6 体(以下、XB シリーズ)、平行配筋試験体 4 体(以下、PB シリーズ)の計 10 体を計画した。実験変数は XB シリーズにおいては X 形主筋として用いる鋼種、X 形主筋比および、部材長さである。PB シリーズでは、主筋の鋼種および軸力比である。XB シリーズでは部材長さ 600mm、900mm とし、せん断補強筋は SD295A D10 を 100mm 間隔 ( $p_w=0.48\%$ ) で配筋している。主筋は全体で 10 本とし、四隅の主筋は SD295A D16 を配筋し、残りの主筋 6 本を SD295A D16 および FLS $\phi 16$  を X 形主筋 4 本または 6 本として配筋している。PB シリーズでは部材長さ 900mm とし、せん断補強筋は SD295A D10 を 75mm 間隔 ( $p_w=0.63\%$ ) で配筋している。主筋は対称断面として、SD295A D16 および FLS $\phi 16$  の鉄筋を 10 本配筋している。また、全ての試験体のせん断補強筋形状は溶接閉鎖とし、主筋は抜き出しを防止するために、スタブ内に十分な定着長さを確保し、180°フックをつけて定着させている。共通因子としては、断面寸法  $b \times D$  を  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$  ( $b$ : 断面幅,  $D$ : 断面せい)、コンクリート設計基準強度  $F_c$  は  $30\text{N/mm}^2$ 、せん断補強筋設計基準強度  $\sigma_{wy}$  は  $295\text{N/mm}^2$  とした。なお、表-2 における X 形主筋比として  $\beta_a$ ,  $\beta_y$ ,  $\beta_u$  を定義しているが、 $\beta_a$  は、鋼材の断面積によるもの、 $\beta_y$  は鋼材の降伏引張力にもとづくもの、 $\beta_u$  は鋼材の終局耐力にもとづいて決めたものである。

表-1 鋼材の機械的性質

		形状	寸法 mm	降伏 応力度 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	のび %
あばら筋	SD295A	異形	D10	328	508	17
主筋	SD295A	異形	D16	340	520	18
	FLS	丸鋼	$\phi 16$	120*	465	51

\*: 0.2%耐力

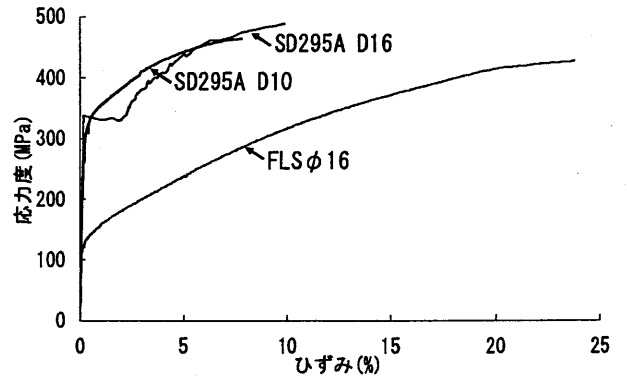


図-1 単調載荷による鋼材の  $\sigma - \epsilon$  関係の比較

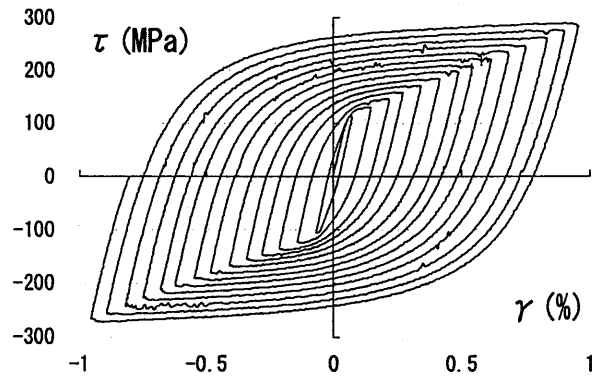


図-2 繰り返し載荷による FLS の  $\tau - \gamma$  関係

表-2 試験体緒元

試験体名	断面形状 (mm)	部材長さ 比 (H/D)	内法スパン (mm)	平行主筋		X形主筋		軸力比 n	帯筋間隔 (mm)	$p_w$ (%)	X形主筋比*		
				SD295A	FLS	SD295A	FLS				$\beta_a$	$\beta_y$	$\beta_u$
XBシリーズ	300×300	2	600	4P-16	-	-	6DF-16	0	D10@100	0.48	0.60	0.35	0.58
				4P-16	-	6DS-16	-					0.60	0.60
	300×300	3	900	6P-16	-	-	4DF-16				0.40	0.19	0.38
				6P-16	-	4DS-16	-					0.40	0.40
				4P-16	-	-	6DF-16				0.60	0.35	0.58
				4P-16	-	6DS-16	-					0.60	0.60
PBシリーズ	300×300	3	900	-	10P-16	-	-	0	D10@75	0.63	-	-	-
				10P-16	-		-	0					
				-	10P-16		-	0.3					
				10P-16	-		-	0.3					

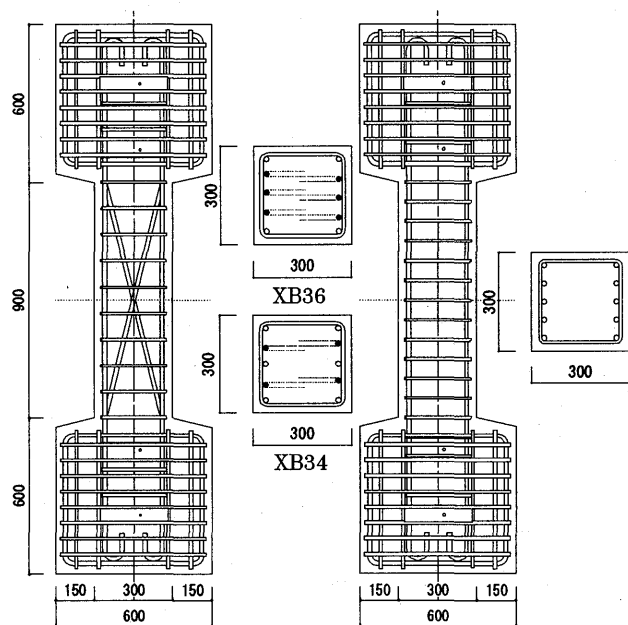
$$\beta_a = \frac{a_i \cos \theta}{p_a i + a_i \cos \theta}, \quad \beta_y = \frac{a_i \sigma_y \cos \theta}{p_a i \sigma_y + a_i \sigma_y \cos \theta}, \quad \beta_u = \frac{a_i \sigma_u \cos \theta}{p_a i \sigma_u + a_i \sigma_u \cos \theta}$$

\*: 引張側 X 形主筋量と全引張側主筋量との比  
 $a_i$ : X 形および平行主筋断面積  
 $\sigma_y$ : X 形および平行主筋の降伏応力度  
 $\sigma_u$ : X 形および平行主筋の引張強さ  
 $\theta$ : X 形主筋の材軸とのなす角度

### 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 以下の岡山県柚ノ木産の砕石を、細骨材には、5mm 以下の大分県上青江産の石灰砕砂と最大粒径 5mm 以下の岡山県柚ノ木産の砕砂を使用した。コンクリートの調合設計は、水セメント比 54%，スランプは 18cm とした。試験体の製作においては、全て鋼製型枠を使用し、コンクリートの打設は、全試験体ともたて打ちで行った。コンクリート強度は打設後 7 日、28 日、実験前、実験中間、実験終了時の  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  のシリンダー圧縮強度試験を行い、強度が安定した 28 日、実験前、実験中間、実験終了の平均から求めた。その結果、設計基準強度  $30\text{N/mm}^2$  の  $\sigma_B$  は XB シリーズでは  $35.9\text{N/mm}^2$ ，PB シリーズでは  $33.3\text{N/mm}^2$  となった。実験は材齢，XB シリーズの実験は材齢 35 日目から 56 日目，PB シリーズは 38 日目から 48 日目の間でそれぞれ実験を行った。

主筋は、SD295A D16 および FLS $\phi 16$ ，せん断補強筋は SD295A D10 を用いた。その材料試験結果を表-1 に示す。



(a)XB シリーズの例 (b)PB シリーズ

図-3 試験体形状および断面形状(単位:mm)

### 2.4 実験方法

図-4に載荷装置を示す。載荷装置は福山大学構造実験棟に設置された建研式載荷装置を用いて行った。載荷方法は、試験体の部材上部および部材下部をそれぞれ水平支持Lフレームと載荷フレームに固定し、載荷フレームに固定した鉛直載荷圧縮能力4MNジャッキにより一定軸力を部材上部に負荷する。さらに、部材長さ

1/2の位置で載荷フレームに固定した水平載荷圧縮能力正負2MNジャッキで水平支持フレームを負荷することによって、部材に逆対称曲げせん断力を加えた。また、載荷フレーム上部に設けた水平保持装置により水平支持フレームの回転を制御している。載荷履歴は、部材角 $R=\pm 0.005\text{rad}$ を2回繰り返した後、0.005radずつ変位を増幅させる正負繰り返し載荷を各2回ずつ行い、その変位振幅における履歴ループの定常性を調べた。軸方向変位および水平方向変位は試験体上下端の測定用ボルトに治具を介し変位計を取付けて測定した。主筋およびせん断補強筋のひずみは、単軸ひずみゲージによって測定した。

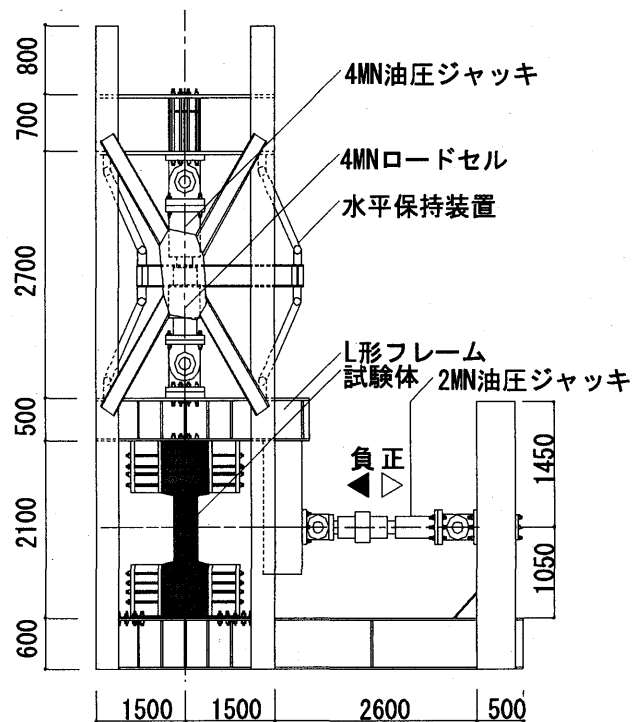


図-4 実験装置(単位:mm)

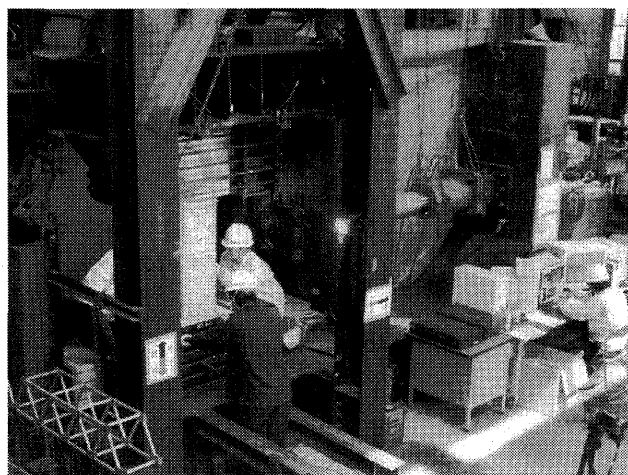


写真-1 実験風景

### 3. 実験結果とその検討

#### 3.1 破壊性状

図-5 に最大耐力時の破壊状況を示し、表-3 にひび割れ発生時の荷重と変位部材角を示す。曲げひび割れは部材側面の脚部に発生したひび割れを示し、せん断ひび割れは部材中央部と部材端部とで分けて示している。

XB シリーズでは、全試験体共通したひび割れ性状に曲げひび割れ、端部斜めひび割れ、中央斜めひび割れの順に発生し、主筋の降伏とともに、両端の主筋に沿って付着割裂破壊ひび割れが発生した。その後、耐力を保ちながら変形は増大し、最終的にかぶりコンクリートの剥離により終局状態に至った。FLS 鋼を主筋に用いた XB26F 試験体では、主筋が座屈し、せん断破壊の様相を呈した。X 形主筋に SD 鋼および FLS 鋼を用いた XB36F, XB36S 試験体では大きな違いは見られなかった。

PB シリーズでは、全試験体共通して曲げひび割れ、端部斜めひび割れ、中央斜めひび割れの順に発生した。軸力比=0 の試験体で SD 鋼を用いた PB30S は、曲げひび割れ、中央斜めひび割れの順に発生し、その後、両端の主筋に沿って細かい付着割裂破壊ひび割れが徐々に多く発生し、圧壊、剥離もあまり見られず終局状態に至った。一方、FLS 鋼を用いた PB30F では、主筋の降伏応力度が極めて低いので、早期に塑性延びが生じるが、丸鋼のため付着割裂破壊はあまり見られなかった。曲げひび割れの発生後は、試験体中央部にはひび

割れが発生せず、端部に細かいひび割れが徐々に発生し、塑性ヒンジが形成され、その後耐力を保ちながら変形が増大した。軸力比 0.3 で、SD 鋼を用いた PB33S 試験体は圧壊、剥離はあまり見られず、付着割裂破壊により耐力が低下し、終局に至った。また、FLS 鋼を用いた PB33F 試験体では、曲げひび割れ後は中央斜めひび割れが発生し、主筋に沿った付着ひび割れはあまり発生せず、端部コンクリート圧壊により耐力が低下した。

#### 3.2 履歴曲線

各試験体の荷重-部材角関係、および平均軸方向伸び変位関係を図-6 に示す。縦軸は、荷重(kN)、横軸は部材端水平変位量  $\delta$  を部材長さ 1 で除した部材角  $R(\times 10^{-2} \text{rad})$  を表す。破線は後述の終局曲げ耐力の計算値を示す。赤い実線は X 形部材の負担分を示す。平均軸方向伸びひずみ量(縮みを負とする)の関係では縦軸を荷重(kN)、横軸に軸方向の伸びひずみ量を部材長さ 1 で除した平均軸方向ひずみ度( $\epsilon_N$ )さらに縦軸に平均軸方向ひずみ度( $\epsilon_N$ )、横軸に部材角  $R(\times 10^{-2} \text{rad})$  をそれぞれ示す。XB シリーズでは 0.03rad まで耐力低下のない安定したループを示し、軸方向ひずみは、XB36F と XB36S 以外は、主筋が FLS 鋼、SD 鋼に関わらずほぼ同じひずみを示している。PB シリーズでは PB33F は PB33S と比べて履歴曲線は安定したエネルギー吸収の大きい履歴を示している。なお、全ての試験体で耐力が最大耐力の 70% になった時点で実験を終了した。

表-3 ひび割れ荷重

試験体名		曲げひび割れ		端部斜めひび割れ		中央部斜めひび割れ	
		荷重 (kN)	部材角 ( $\times 10^{-2} \text{rad}$ )	荷重 (kN)	部材角 ( $\times 10^{-2} \text{rad}$ )	荷重 (kN)	部材角 ( $\times 10^{-2} \text{rad}$ )
XB26F	正	107	0.08	172	0.25	192	0.41
	負	-150	-0.25	-155	-0.23	-168	-0.33
XB26S	正	119	0.10	177	0.25	177	0.25
	負	-125	-0.15	-155	-0.25	-155	-0.25
XB34F	正	65	0.08	125	0.25	124	0.25
	負	-68	-0.09	-133	-0.38	-147	-0.50
XB34S	正	67	0.07	152	0.33	182	0.50
	負	-68	-0.08	-105	-0.19	-172	-0.50
XB36F	正	103	0.25	122	0.32	136	0.50
	負	-108	-0.17	-120	-0.25	-157	-3.00
XB36S	正	77	0.10	130	0.25	226	3.90
	負	-73	-0.10	-163	-0.41	-172	-0.50
PB30F	正	78	0.07	101	0.14	-	-
	負	-90	-0.25	-94	-0.50	-	-
PB30S	正	96	0.20	104	0.22	145	0.37
	負	-87	-0.09	-127	-0.25	-150	-0.36
PB33F	正	161	0.20	328	0.84	323	1.00
	負	-263	-0.25	-338	-0.83	-338	-0.83
PB33S	正	152	0.10	309	0.37	314	0.96
	負	-218	-0.25	-316	-0.50	-	-

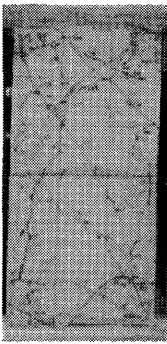
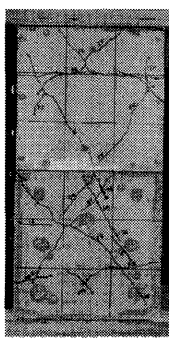
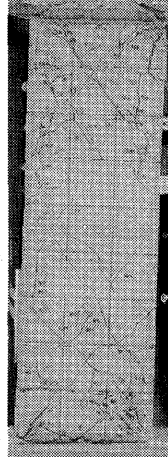
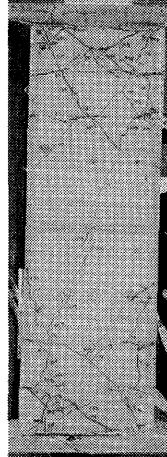
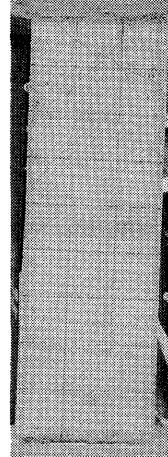
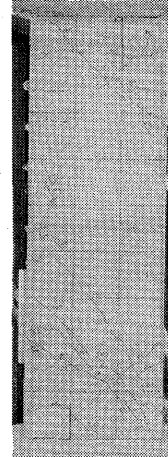
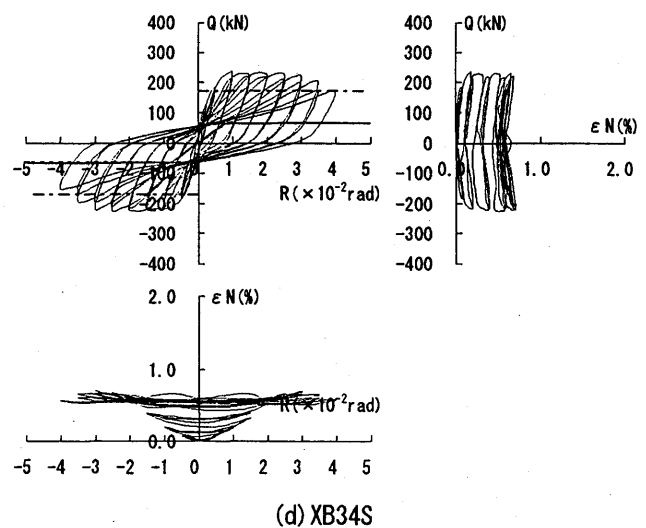
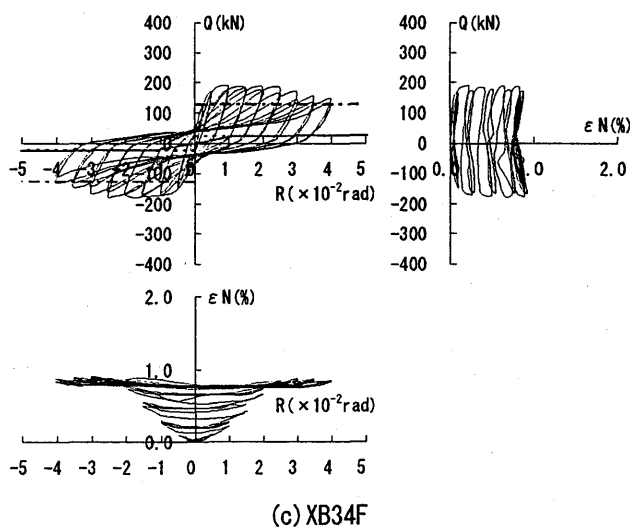
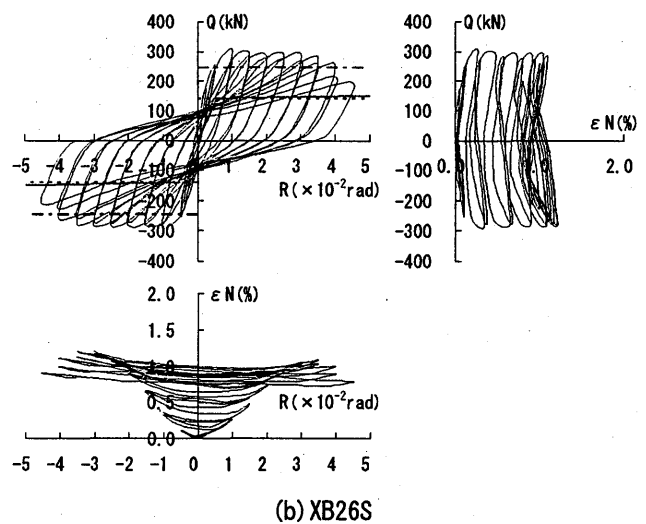
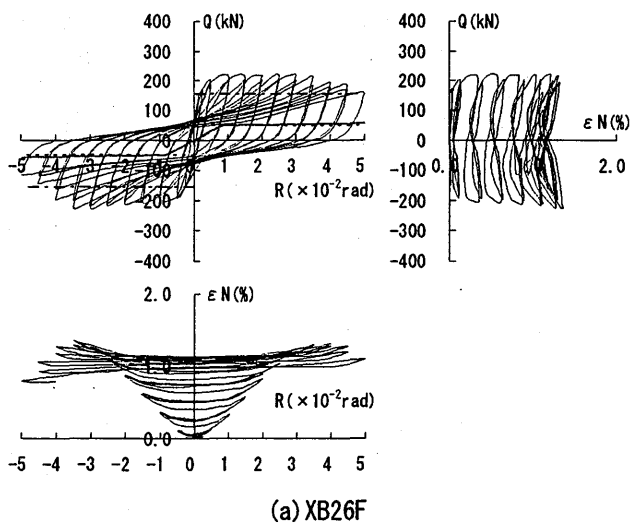
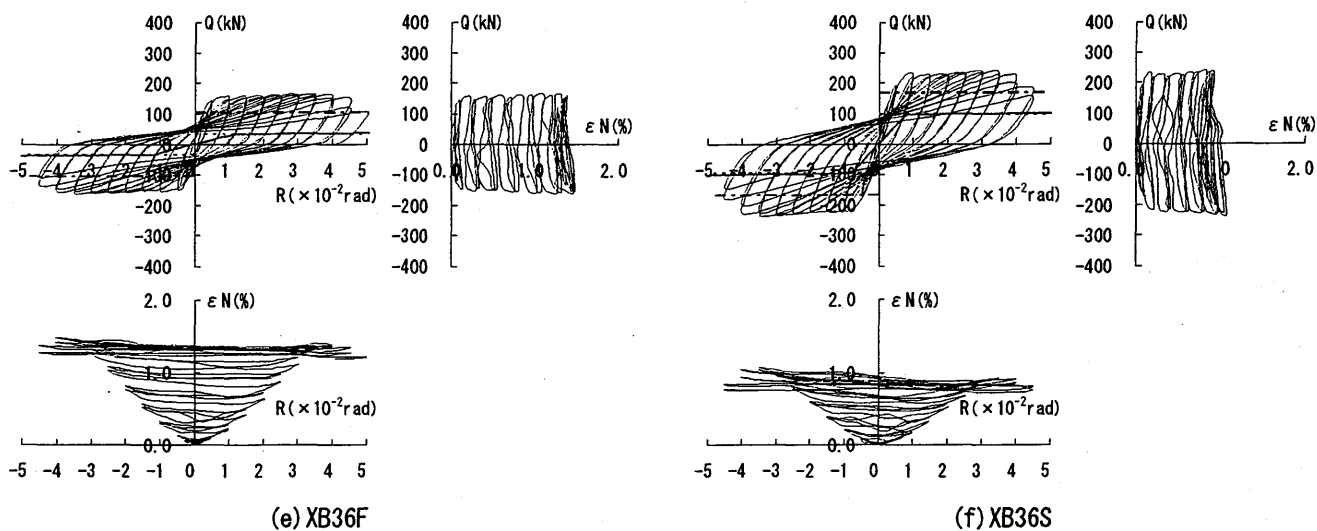
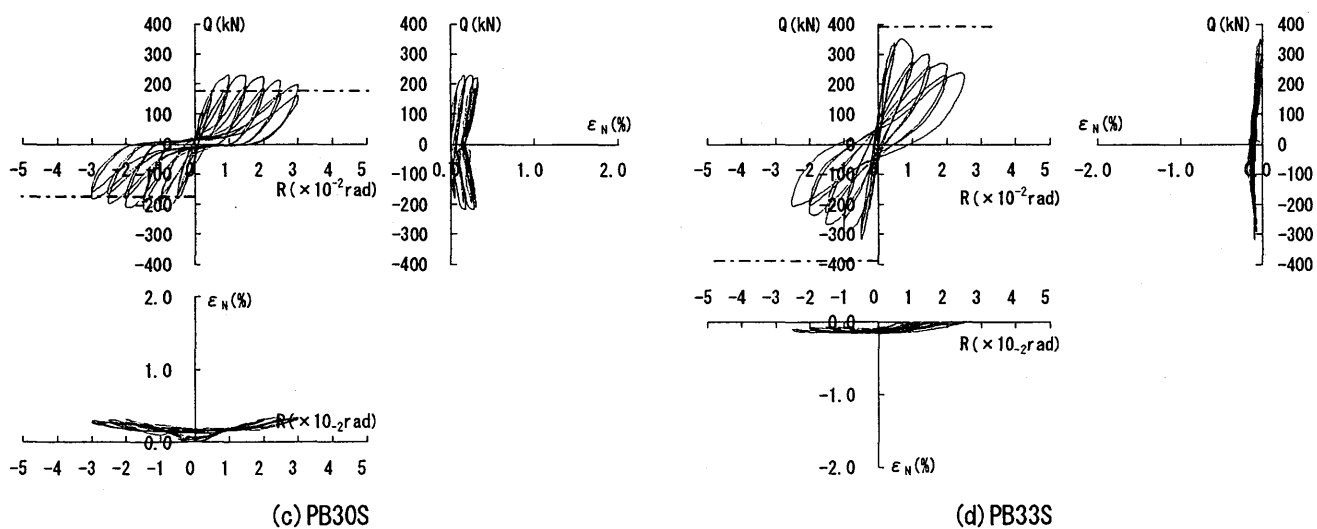
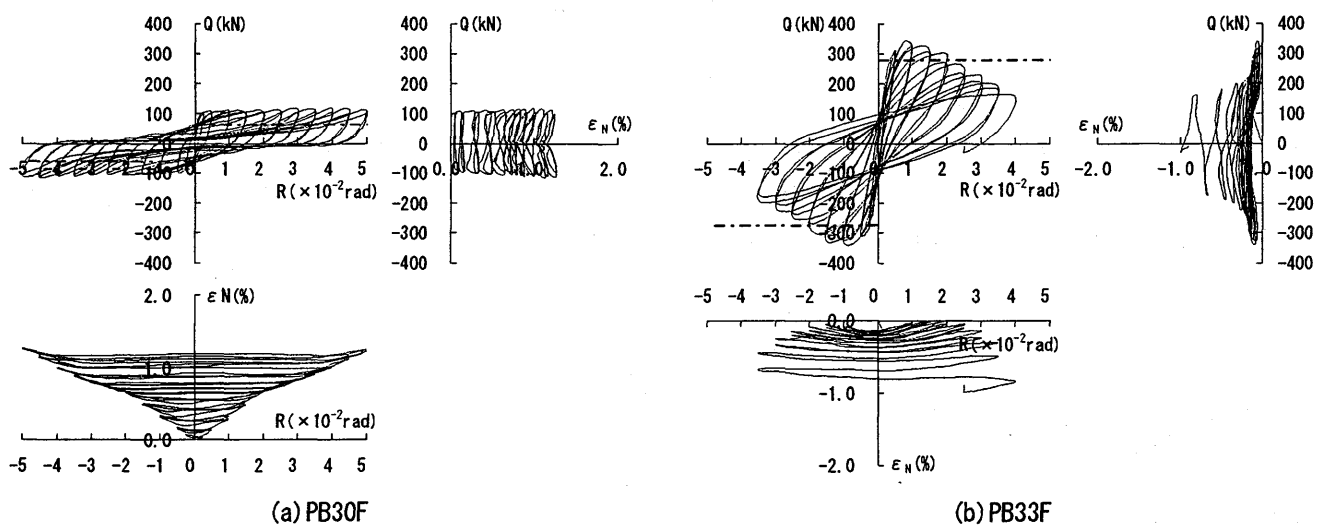
XB26F	XB26S	XB36F	XB36S	PB30F	PB30S
$R_u=3.0 \times 10^{-2}\text{rad}$	$R_u=1.0 \times 10^{-2}\text{rad}$	$R_u=3.5 \times 10^{-2}\text{rad}$	$R_u=3.0 \times 10^{-2}\text{rad}$	$R_u=4.0 \times 10^{-2}\text{rad}$	$R_u=1.5 \times 10^{-2}\text{rad}$
					
$Q_{\max}=227.7\text{kN}$	$Q_{\max}=308.0\text{kN}$	$Q_{\max}=166.1\text{kN}$	$Q_{\max}=238.9\text{kN}$	$Q_{\max}=228.9\text{kN}$	$Q_{\max}=119.4\text{kN}$

図-5 最大耐力時の破壊状況





(i) XB シリーズ (X 形配筋部材)



(ii) PB シリーズ (平行配筋部材)

図 - 4 荷重-部材角  $R$ -平均軸方向伸びひずみ度  $\varepsilon_N$  関係

### 3.3 包絡線

各試験体の履歴曲線を比較するために、図-7に、各変位振幅における第一サイクルに対する包絡線を示している。各試験体によって、主筋の断面積やコンクリート強度が異なるため、縦軸の荷重は、引張主筋の断面積( $a_t$ )とコンクリート強度( $\sqrt{\sigma_B}$ )と鉄筋の降伏引張力( $\sqrt{\sigma_y}$ )で除して、無次元化した値を用いている( $Q' = Q / (a_t \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot \sqrt{\sigma_y})$ )。XBシリーズでSD鋼とFLS鋼では、ほぼ同様の骨格曲線を示しており、主筋の力学的性能が異なる違いはあまり見られない。一方、PBシリーズでは、PB30Sは、主筋の降伏とともに耐力が0.02rad程度で、荷重が徐々に下がり始めるが、FLS鋼を用いたPB30Fでは、極めて早期に降伏が始まり、その後も緩やかに耐力が上昇していくのが確認できる。しかしながら、軸力比0.3ではSD鋼とFLS鋼では大きな差は見られなかった。

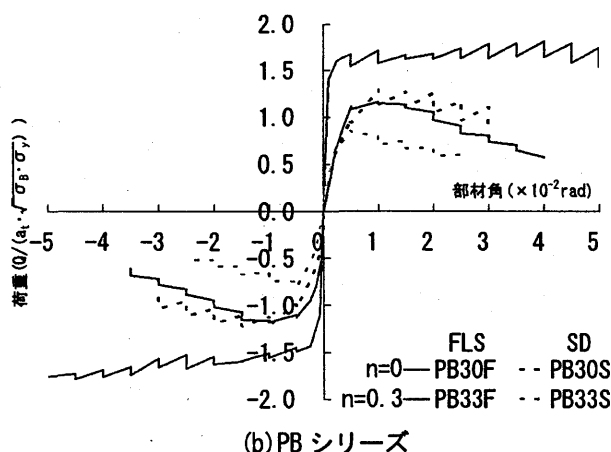
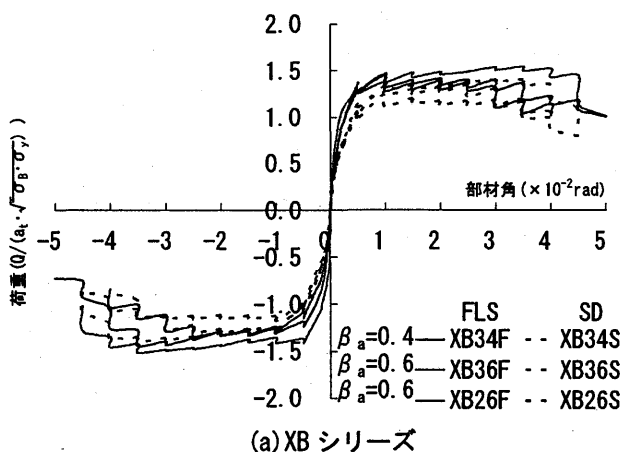


図-7 包絡線の比較

### 3.4 エネルギー吸収

変位振幅増加に伴う、エネルギー消費の推移を各試験体で比較するために、履歴減衰を等価粘性減衰定数として式(1)で計算する。

$$\xi_{wq} \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\text{ループ} ABCDA \text{の面積}}{\Delta OAE + \Delta OCF} \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

図-8(a), (b)に等価粘性減衰定数の推移を示す。XBシリーズの、XB26Fでは、0.005radから0.015radまではSD試験体に比して、若干高く推移しているが、それ以降はほぼ同じ履歴減衰を示している。また、SD鋼を用いた試験体XB26S、XB36Sでは部材長さに関わらずほぼ同様の履歴減衰の推移を示している。FLS鋼を用いた試験体で、X形主筋4本のXB34Fでは、

0.015rad付近までSD鋼に対して高く推移しているが、それ以降は、SD試験体とほぼ同じ減衰を示している。X形主筋6本のXB36Fでは、他の試験体に比して優れた履歴減衰を示し、0.015rad付近から一定のエネルギー吸収を示していることがわかる。

一方、PBシリーズでは、SD鋼を主筋に用いた試験体は軸力の有無に関わらずほぼ同じ履歴減衰の推移を示していることがわかる。しかし、FLS鋼を用いた試験体では、軸力零のPB30Fでは他の試験体に比してエネルギー吸収が極めて大きく推移している。また、軸力比0.3のPB33Fでは、部材角の増加とともにエネルギー消費が大きく推移している。

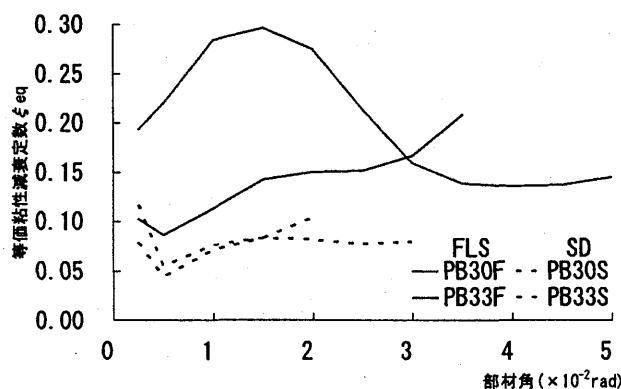
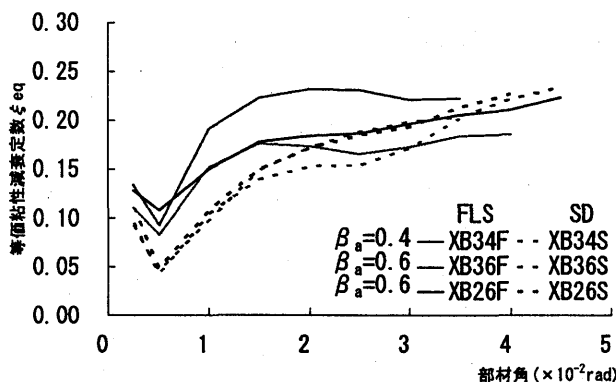


図-8 等価粘性減衰定数の推移

### 3.5 終局曲げ耐力

実験結果を表-4に示す。作用軸力が零のXBシリーズの終局曲げ耐力の計算値は、平行主筋およびX形主筋の終局曲げ耐力を(2)、(3)式によって算定し、部材の終局曲げ耐力は、それぞれの単純累加によって求めている。

$${}_pM_y = 0.9 {}_p a_i \cdot {}_p \sigma_y \cdot d \quad (2)$$

$${}_dM_y = {}_d a_i \cdot {}_d \sigma_y \cdot \cos \theta \cdot jt \quad (3)$$

$$M_y = {}_p M_y + {}_d M_y \quad (4)$$

$$Q_{\mu} = M_y / (L/2) \quad (5)$$

PBシリーズの終局曲げ耐力の計算値として、梁材については式(6)、柱材については式(7)の略算式より求めた。

$$M_U = 0.9 {}_p a_i \cdot {}_p \sigma_y \cdot d \quad (6)$$

$$M_U = 0.8 {}_p a_i \cdot {}_p \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D \left( 1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot \sigma_b} \right) \quad (7)$$

終局曲げ耐力の実験値/計算値の値は、XBシリーズでは、1.18~1.59となり、PBシリーズでは、0.81~1.90となりPB33S試験体以外は安全側に評価されている。PB33Sは付着割裂破壊により被りコンクリートが全体にわたり剥離したことにより耐力が低下したと思われる。なお、FLS鋼の降伏引張力は表-1の値を用いた。

表-4 終局曲げ耐力の計算値と実験値の比較

試験体名	計算値 Qcal (kN)	実験値Qexp (kN)		Qexp/Qcal	
		正	負	正	負
XB26F	155	222	228	1.43	1.47
XB26S	245	308	289	1.26	1.18
XB34F	129	191	179	1.49	1.39
XB34S	170	235	224	1.39	1.32
XB36F	105	166	162	1.59	1.55
XB36S	167	239	238	1.43	1.43
PB30F	63	119	115	1.90	1.84
PB30S	176	229	218	1.30	1.24
PB33F	277	340	339	1.23	1.22
PB33S	391	351	316	0.90	0.81

### 4. まとめ

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検証するために、中型RC部材の曲げ変形性能載荷実験を実施した。実験結果の検討では、曲げ耐力、荷重変形曲線の包絡線の比較、等価粘性減衰によるエネルギー吸収の評価を行った。

以上の検討の結果、次のことがわかった。

- 1) FLS鋼を用いたX形配筋部材の等価粘性減衰定数はX形主筋比にかかわらず、SD鋼に比して大きい値を示し、主筋にFLS鋼を用いることによって、履歴減衰の大きい部材とすることができる。
- 2) 平行配筋部材でFLS鋼を梁材および柱材に使用した場合、SD鋼の場合に比して等価粘性減衰定数は大きい値を示し、平行配筋部材の主筋をFLS鋼を用いることは耐震性の向上に対して有効である。

### 参考文献

- [1] 吉村博文ほか：耐震用Ni-Cr系オーステナイト鋼の開発，日本材料学会，第54期学術講演会講演論文集，pp.534-539，2005.5
- [2] 上野谷実ほか：テーバー補剛板を用いた箱型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] 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(その1~その2)，日本建築学会中国支部研究報告集，第29巻，pp.209-216，2006.3
- [4] 寺井雅和，南 宏一：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，コンクリート工学年次論文集，第28巻，第2号，pp.739-744，2006.6
- [5] 寺井雅和，上地清志，南 宏一：耐震性新鋼材を主筋とする鉄筋コンクリート梁の耐震性能に関する実験的研究(その1，その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集C-2，構造IV，pp.273-276，2006.9
- [6] 寺井雅和，上地清志，南 宏一：耐震性新鋼材を主筋とする中型鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する実験的研究(その1，その2)，日本建築学会中国支部研究報告集，pp.321-328，2007.3
- [7] 上地清志，寺井雅和，南 宏一：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能，コンクリート工学年次論文集，第29巻，第2号，pp.973-978，2007.7
- [8] 寺井雅和，上地清志，南宏一：耐震性新鋼材を主筋とする中型鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する実験的研究(その1，その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集C-2，構造IV，pp.239-242，2007.8
- [9] 南 宏一：X形配筋柱の弾塑性性状に関する基礎的研究，京都大学学位請求論文，1984，4

謝辞 本研究は、平成17-19年度文部科学省学術研究費補助金(基盤研究(B)・研究課題：17360279・研究代表：南宏一)の一部として行われたものである。ここに記して謝意を表します。