

# 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

上地 清志\* 寺井 雅和\*\* 南 宏一\*\*

Experimental Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Beams  
Using Earthquake-Resistant Steel Bars

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

## ABSTRACT

This paper presents the experimental work on seismic performance of diagonally reinforced concrete members with earthquake-resistant steel bars that was developed with Center for High-Tech Research Fukuyama University. Eight specimens were prepared and tested. The test parameters were shear-span ratio and main reinforcement ration  $\beta$ . It was confirmed that the energy dissipation of tested members using the earthquake-resistant steel bars increased greatly, regardless of shear span ratio.

キーワード：鉄筋コンクリート，耐震性新鋼材，X形配筋，曲げ変形性状，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

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。X形配筋というのは、これまでの平行主筋の半数程度を折り曲げて交差させたものであり、その形状が「X」になることから、わが国ではこの配筋法を「X形配筋」と呼んでいる。もともとこの配筋法は、ニュージーランドのポーレー博士によって考案され、わが国においては若林・南らが独自の实用設計式を提案して発展してきたものである<sup>[1]~[4]</sup>。X形配筋の特色は、これまでのRC部材と同じ材料を使用しながら、SRC部材に近い優れた耐震性能を部材に与えることができる点にある。また、X形配筋から想像がつくのは鉄骨造でのブレース材と同じ形状であるということである。つまり、X形配筋とはRC部材の中のブレースを内蔵したものであり、そのために部材のせん断

耐力が増大し、せん断破壊を生じにくくするともいえる。

このように、X形配筋では主筋がせん断補強筋を兼ねることになる。つまり、主筋を曲げモーメントとせん断力の両方に効かせることのできる点がX形配筋の大きな特長である。その結果、平行配筋では、せん断設計が苦しかった部材をX形配筋とすることで無理なく設計でき、せん断補強筋量も減らせることになる。

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。

\*大学院工学研究科建築学専攻 \*\*工学部建築学科

## 2. 実験

### 2.1 材料特性

本研究で使用する鋼材は普通鋼，新鋼材の2種類(以下，SD，FLSと表記する)である。この2種類の機械的性質を図-1および表-1に示す。FLSは福山大学で開発された鋼材で，降伏点は $100\text{N/mm}^2$ 程度と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%以上といった性能をもち，地震のゆれによって構造物に発生する初期段階のひずみの大きさ程度では，低降伏点による繰り返し履歴性状を発現させ，ひずみが大きくなる段階では，ひずみ硬化の度合いにより材料の繰り返しひずみ硬化範囲を一様に広げ，エネルギー吸収を大きくする。さらにひずみが大きくなると，高張力鋼なみの強度を発揮し，変形性能を確保し構造物としての極端な強度の劣化を防止し構造物の倒壊を避けるようにするものである。<sup>[5]</sup>

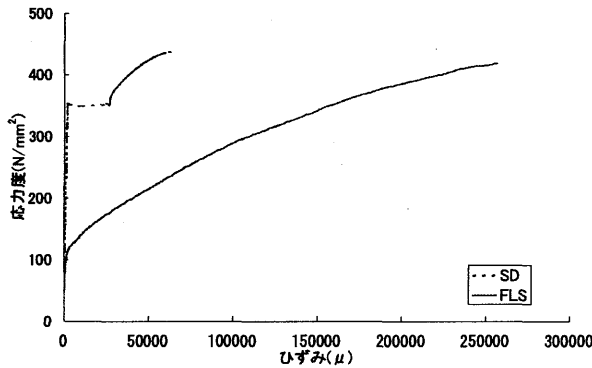


図-1 鋼材の応力ひずみ関係

表-1 鋼材の機械的性質

材質	形状	寸法 mm	降伏応力度 $\text{N/mm}^2$	引張強さ $\text{N/mm}^2$	のび %
SD295A <sup>*1</sup>	異形	D6	486 <sup>*2</sup>	539	12
SD295A <sup>*1</sup>	異形	D10	355	505	20
SD295A <sup>*1</sup>	異形	D13	352	503	20
FLS <sup>*1</sup>	丸鋼	Φ13	114 <sup>*2</sup>	435	56

\*1: 本学実験室による材料試験値

\*2: 0.2%耐力

### 2.2 実験計画

本実験のパラメーターはX形主筋として用いる鋼材の力学的性状が異なる鋼材で，SD材，本センターで開発されたFLSの2種類の鋼材を使ってその性状の違いを比較する。コンクリート設計基準強度は $F_c=30\text{N/mm}^2$ とする。

試験体は表-2に試験体諸元を示し，図-3に試験体の断面構成を示すように，平行主筋(従来配筋)4本に設定し，X形主筋が1組，2組の2タイプを設定した。配筋状況および寸法を図-4に示す，断面寸法 $150\times 200\text{mm}$ ，長さ $300\text{mm}$ ， $400\text{mm}$ の片持り部材形式とし，帯筋にはD6を $50\text{mm}$ 間隔で配筋している。また主筋は抜けだ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， $90^\circ$ 折り曲げて定着させている。せん断補強筋は図-3に示すように，閉鎖形に加工し，端部は，片方を $135^\circ$ に折り曲げ，もう片方は $90^\circ$ に折り曲げ十分な定着長さを確保し，平行主筋に結束線により取り付けている。

### 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 $15\text{mm}$ 以下の岡山県柚ノ木産の砕石を，細骨材には， $5\text{mm}$ 以下の佐賀県小川島産の海砂と最大粒径 $5\text{mm}$ 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49%，スランブは $18\text{cm}$ とした。試験体の製作において型枠は木製型枠を使用し，打設は，たて打ちで行った。表-3および図-2にコンクリート強度の材齢による推移を示す。

表-3 コンクリート強度の推移

コンクリート設計強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	発生強度推移 ( $\text{N/mm}^2$ )					
	28日	54日	72日	77日	平均	
30	圧縮強度	31.2	35.2	37.1	36.5	35.0
	割裂強度	2.2	2.6	2.8	2.4	2.5

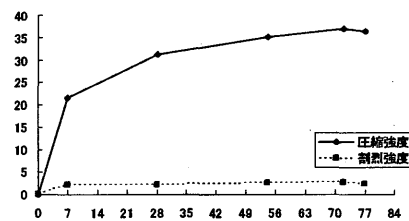
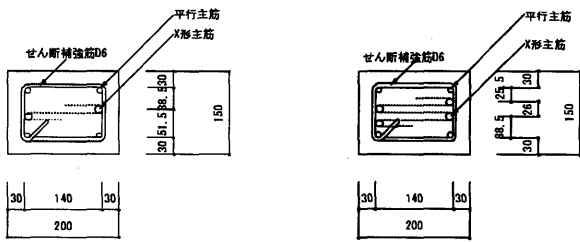


図-2 コンクリートの材齢による推移

表-2 試験体諸元

試験体番号	試験体寸法 $D\times B\times L$ (mm)	部材長さ比 ( $2L/B$ )	平行主筋			X形主筋			Pw (%)	X形主筋比 $\beta$	X形主筋比 $\beta_y$	X形主筋比 $\beta_u$	pMy ( $\text{kN}\cdot\text{mm}$ )	dMy ( $\text{kN}\cdot\text{mm}$ )	My ( $\text{kN}\cdot\text{mm}$ )	Ofu ( $\text{kN}$ )	pOu ( $\text{kN}$ )	dOu ( $\text{kN}$ )	Osu ( $\text{kN}$ )	Osu/Ofu								
			SD295A	SD295A	FLS	SD295A	SD295A	FLS																				
A35F	150×200	3	2P-10	2P-10	1DF-13	0.84	0.5	0.2	0.4	7857.7	2067.2	9924.9	33.1	139.2	6.9	146.1	4.41											
A35S			2P-10	1DS-13	0.5													0.4	7857.7	6080.4	13938.2	46.5	139.2	20.3	159.5	3.43		
A36F			2P-10	2DF-13	0.6													0.4	7857.7	4134.3	11992.0	40.0	139.2	13.8	153.0	3.83		
A36S			2P-10	2DS-13	0.6													0.6	7857.7	12160.9	20018.6	66.7	139.2	40.5	179.8	2.70		
A45F		4	3	2P-10	2P-10		1DF-13	0.84	0.5	0.2	0.4	7857.7	2090.9	9948.6	24.9	126.4	5.2	131.7	5.29									
A45S				2P-10	1DS-13		0.5													0.4	7857.7	6150.3	14008.0	35.0	126.4	15.4	141.8	4.05
A46F				2P-10	2DF-13		0.6													0.4	7857.7	7857.7	12039.5	30.1	126.4	10.5	136.9	4.55
A46S				2P-10	2DS-13		0.6													0.6	7857.7	12300.6	20158.3	50.4	126.4	30.8	157.2	3.12

ここに， $\beta$ =断面積比にもとづく主筋比， $\beta_y$ =降伏耐力にもとづく主筋比， $\beta_u$ =終局耐力にもとづく主筋比



(a) X形主筋1組 (b) X形主筋2組  
図-3 XRC部材の断面(単位:mm)

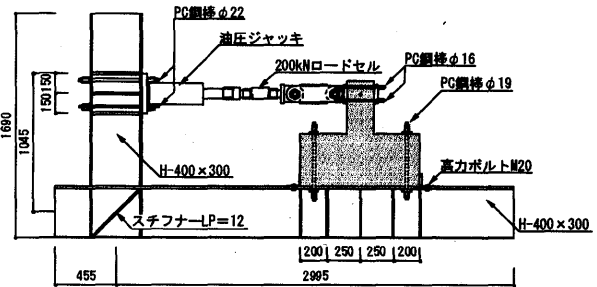
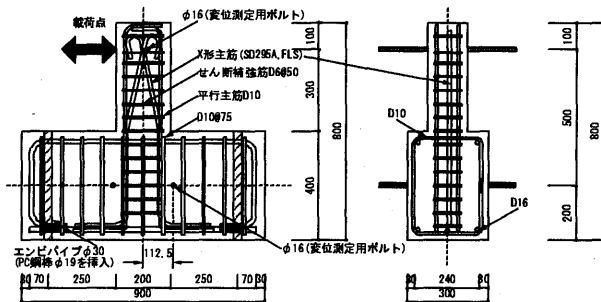
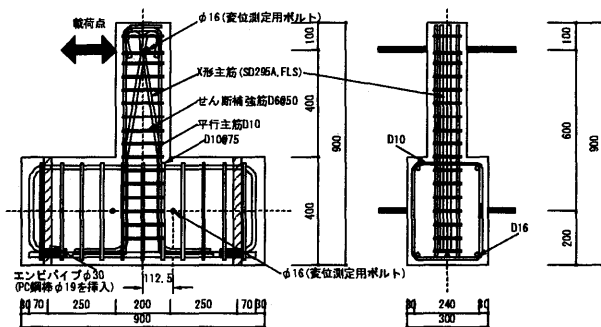


図-5 試験装置概要 (単位:mm)



(i) 部材長さ300mm



(ii) 部材長さ400mm

図-4 試験体の寸法および配筋状況(単位:mm)

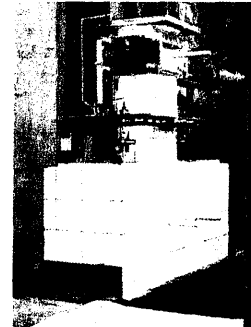


写真-1 実験風景

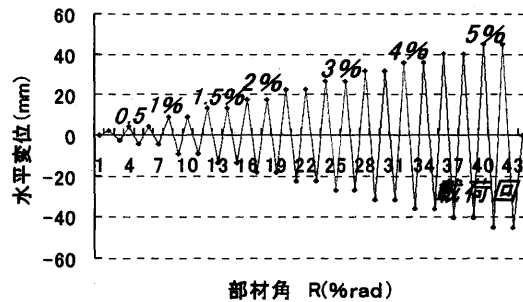


図-6 載荷則

## 2.4 実験方法

荷重装置の概略を図-5に示す。L形鋼製フレームにPC鋼棒で試験体および20tジャッキを固定し、20t用ロードセルと用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。実験風景を写真-1に示す。試験体頭部での変位制御により、図-6に示すような載荷則を適用する。

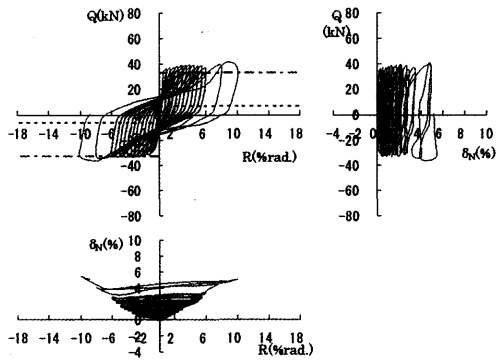
本実験では、全ての試験体で正負に繰り返しせん断力を載荷し変位制御により正負漸増載荷で実験を行った。水平ジャッキが縮む方向から載荷し、部材角 $R$ (柱頭変位÷部材長さ×100)±0.25%rad.で正負繰り返し載荷を1回行った後、0.5%rad.から5.5%rad.まで0.5%rad.ごとの正負繰り返し載荷を2回ずつ繰り返し、6.0%rad.から2.0%rad.ごとの載荷を1サイクルずつ行い最大耐力の70%に耐力が低下した時点で実験を終了した。

## 3. 実験結果

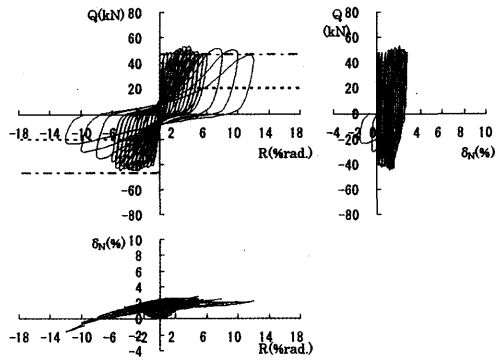
### 3.1 履歴性状

各試験体の荷重-部材角関係、および軸方向変形を図-7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、横軸は部材端水平変位量 $\delta$ を部材長さ $l$ で除した部材角(%)で表す。軸方向変形も、軸方向の変形量を部材長さ $l$ で除して表す。

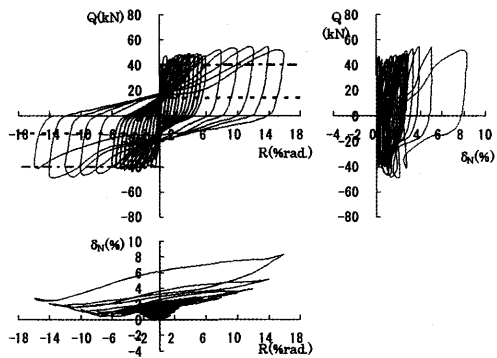
SD鋼をX形主筋に用いた試験体では初期曲げひび割れが発生後、主筋の降伏とともに、部材端部に塑性ヒンジが形成された。その後、耐力を保ちながら変形を続け、A35S、A36Sの試験体では主筋が座屈し、せん断破壊の様相を呈した。一方、FLSを主筋に用いた試験体では、主筋の降伏応力度が低いので、早期に塑性のびが始まり部材端部に塑性ヒンジが形成され、すべての試験体で曲げ破壊の様相を呈した。



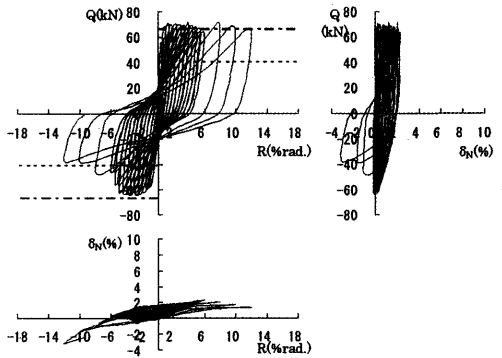
(a) A35F



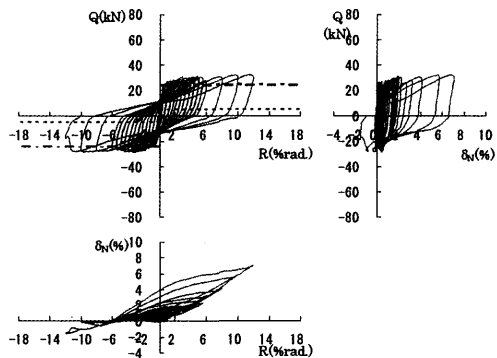
(b) A35S



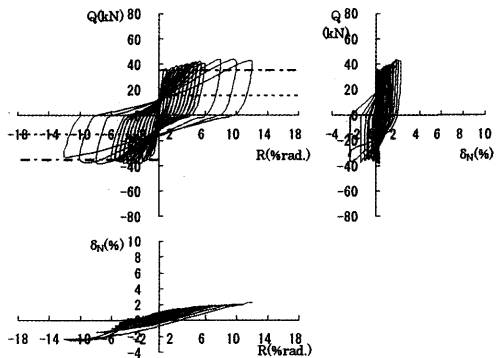
(c) A36F



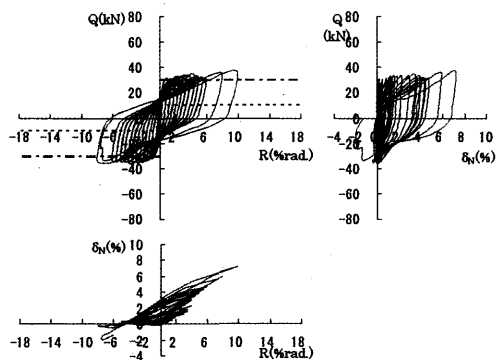
(d) A36S



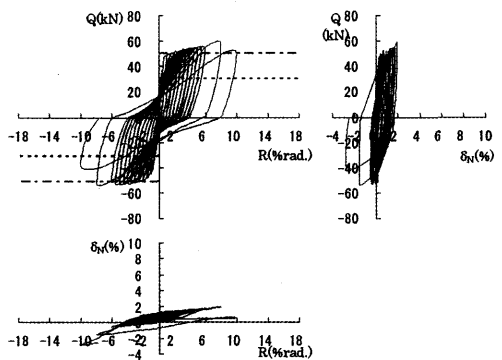
(e) A45F



(f) A45S



(g) A46F



(h) A46S

図-7 荷重-変形曲線(--- 終局曲げモーメント $Q_{fu}$ , ..... X形部材の降伏耐力 $Q_y$ )

### 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 $M_y$ の略算式より求めた。<sup>[6]</sup> 実験値と比較するために、曲げ耐力を式(4)により、せん断力に変換する。

$${}_p M_y = 0.9 \cdot {}_p a_t \cdot {}_p \sigma_y \cdot d \quad (1)$$

$${}_d M_y = {}_d a_t \cdot {}_d \sigma_y \cdot \cos\theta \cdot jt \quad (2)$$

$$M_y = {}_p M_y + {}_d M_y \quad (3)$$

$$Q_{fu} = M_y / (L/2) \quad (4)$$

ここに、Lは部材長さで、300mm、400mmとする。

実験値/計算値の値は、負側では、0.94~1.22、正側では、1.08~1.37となり、負側だけを見るとほぼ計算値と同じになった。なおX形配筋を有する試験体の終局せん断耐力 $Q_{su}$ は終局曲げ耐力 $Q_{fu}$ に比して耐力が大きいため本論ではその値を省略している。

表-4 曲げ耐力の比較

試験体名	計算値 Qcal (kN)	実験値Qexp (kN)		Qexp/Qcal	
		正	負	正	負
A35F	33.1	40.4	36.5	1.22	1.10
A35S	46.5	53.4	44.8	1.15	0.96
A36F	40.0	54.7	48.8	1.37	1.22
A36S	66.7	71.8	63.0	1.08	0.94
A45F	24.9	32.2	28.5	1.29	1.14
A45S	35.0	44.4	38.3	1.27	1.09
A46F	30.1	36.6	35.7	1.22	1.19
A46S	50.4	60.1	53.2	1.19	1.06

### 3.3 エネルギー吸収

载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、履歴減衰を等価粘性減衰として次のように計算する。図-8のような、履歴ループ等価減衰系において、バネ定数は線AOCで表されるものとする、等価粘性減衰は次の式(5)で与える。<sup>[7]</sup>

$$\xi_{wg} \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\text{ループ} ABCDA \text{の面積}}{\Delta OAE + \Delta OCF} \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (5)$$

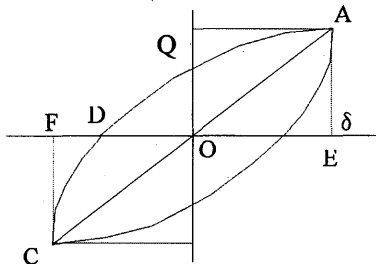


図-8 荷重-変形履歴ループ

図-9、-10に、8体の試験体の履歴減衰の推移を示す。X形主筋にSD鋼材を用いた試験体に比して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がわかる。

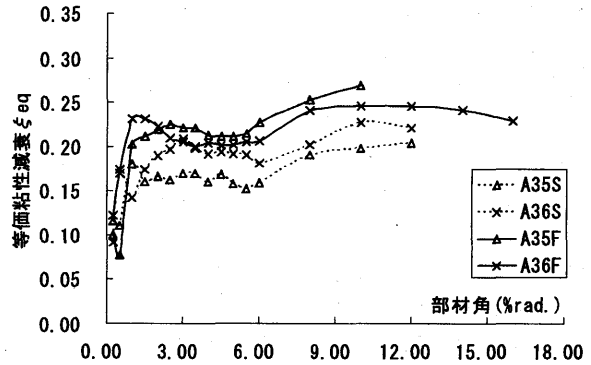


図-9 履歴減衰の推移(部材長さ300mm)

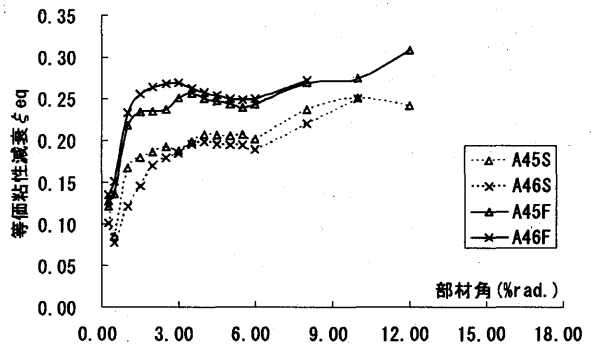


図-10 履歴減衰の推移(部材長さ400mm)

## 4. まとめ

FLSをX形配筋の主筋に用いた場合、どのような性状を示すのか明らかにするために8体の正負繰り返し実験を実施した。本論より得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) X形配筋梁の終局曲げ耐力は、式(3)で概ね推定できる。
- 2) X形配筋の主筋にFLSを用いた試験体の等価粘性減衰は、部材長さ300mmの場合はSD材を用いた試験体と比べて大きな違いは無いが部材長さ400mmの場合はSD材に比して全体的に2~3割程度高くエネルギー吸収が大きい。

今後は、部材断面が大きな試験体、軸力を導入した柱部材、より効果的な配筋などの検証をさらに続けていく予定である。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 南宏一：はじめての X 形配筋「空間設計の自由度を高めるために」，建築技術，1992
- [3] 南宏一，若林 實：X 形配筋柱のすべて，建築技術，pp.1-33，1986，11
- [4] 若林 實：耐震性をもつ X 字状配筋法，建築の技術施工，pp.33-42，1979，5
- [5] 吉村博文，井上博文，押目潔，中東潤，住友晃史：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 巻 pp.534-539，2005.5
- [6] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990，3
- [7] 若林 實：耐震建築の設計，彰国社，1988
- [8] 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
- [9] 小林淳：X 形配筋を用いた短スパン鉄筋コンクリート梁の降伏時耐力と変形に関する研究，東北大学学位請求論文，1995，3
- [10] 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
- [11] 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，pp273-276，2006.9
- [12] (社)日本建築士事務所協会連合会 X 形配筋部材の設計と施工，1990，8
- [13] (社)大阪府建築士会 青年部会構造・施工研究会「X 形配筋の構造設計」，1983.4
- [14] (社)大阪府建築士会 青年部会構造・施工研究会「X 形配筋の構造設計」Part II，1984.11

**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。