

論文 低降伏点鋼を X 形配筋した RC 部材による耐震性能評価に関する研究

寺井雅和*1・南 宏一*2

要旨：新しく開発した低降伏点強度、高延性の鋼材の特徴を活かすために、繰り返し作用する地震時荷重に対して、斜め方向主筋を有効に利かせる X 形配筋 RC 部材について検討した。部材長さが異なる X 形配筋 RC 部材の耐力特性と地震エネルギー消費能力について検証するために、モデル解析による検討を行い、この計算値と既往の実験値とを比較した。その結果、X 形配筋の解析モデルにより、地震時荷重に対するせん断抵抗機構を評価することができ、部材長さが小さい方が、X 形主筋によるせん断耐力およびエネルギー吸収が大きくなることが確認された。

キーワード：X形配筋，短柱，低降伏点鋼，耐震性能，エネルギー消費能力

1.はじめに

既存建物の耐震性能の向上を目的とした耐震改修促進法の施行に伴い、既存不適格建築物に対する耐震補強技術が求められている。耐震補強工法には様々な仕様が開発されているが、鉄筋コンクリート造構造物の場合、ブレースや耐震壁によるものが多い。これらの工法は、使い勝手や採光などの建物の機能を損なう事があるため、建物を使用しながら短期間で施工することができる外付け工法の提案が増えている。

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させる 15Ni-15Cr 鋼¹⁾ (以下、新鋼材)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²⁾⁻⁵⁾。この鋼材を建築および土木構造物に 응용して耐震性向上を図る目的で、既存 RC 造建築物の耐震補強構法への活用を検討している⁶⁾。適用方法の事例として、補強部材として新鋼材を主筋に用いた X 形配筋 RC 部材によるものを開発している。

本論では、新鋼材を X 形主筋として配筋した RC 部材の力学的性状が、部材長さの変化することで、RC 部材の耐力と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、モデル解析による検討を行い、RC 部材の載荷実験の結果と比較したものである。

2.モデル解析による検討

図-1 に材料試験による鋼材の応力-ひずみ関係を

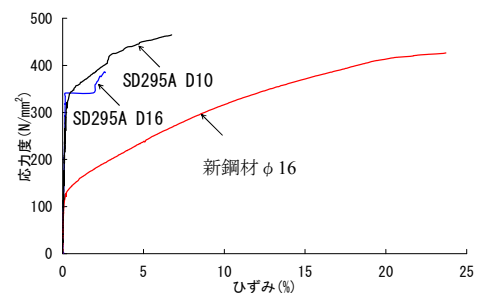


図-1 単調載荷による鋼材の $\sigma - \epsilon$ 関係の比較

示すが、新鋼材は低降伏点強度、高延性が特徴の鋼材である。本研究では、この鋼材を RC 部材の主筋に組み込むものであるが、新鋼材の高延性という特徴を活かすために、次のことを検討した。1) RC 部材の長さを短くすることで (短柱)、既存建築物の変形に対して補強部材がより大きく変形する。2) 繰り返し作用する地震時荷重に対して、斜め方向の補強を有効に活用するために、X 形配筋により主筋を有効に利かせる。

ここでは、新鋼材を X 形配筋したときの耐力特性と地震エネルギー消費能力を検証するために、X 形配筋をモデル化し、具体的な数値によりパラメトリック解析を行った。

2.1 X 形配筋部材のせん断抵抗機構

図-2 に X 形配筋部材のせん断抵抗機構のモデルを示す。ここでは、簡単のために軸方向力は零とする。このモデルに地震時応力を想定し、逆対象のせん断力 Q が作用する場合を考えると、 Q は X 形主筋の材軸とのなす角度 θ により次式で表される。

*1 福山大学 工学部建築・建設学科講師 博(工) (正会員)

*2 福山大学 工学部建築・建設学科教授 工博 (正会員)

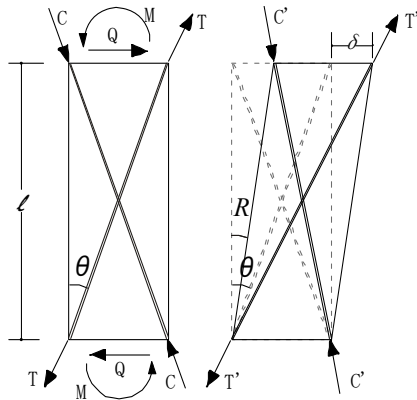


図-2 X形主筋によるせん断抵抗機構

$$Q = 2T \sin \theta = 2a_t \cdot \sigma \cdot \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 σ : X形主筋の応力度、 a_t : X形主筋の断面積

X形主筋の σ - ϵ 関係を、図-3のように仮定すると、(1)式の応力度 σ は、降伏する前と後で、それぞれ次式のように表される。

$$\sigma = E\epsilon (\epsilon \leq \epsilon_y) \quad (2-1)$$

$$\sigma = E'\epsilon + b (\epsilon_y < \epsilon) \quad (2-2)$$

ここに、 E : 主筋の初期剛性、 E' : 主筋の第2勾配剛性、 ϵ_y : 主筋の降伏時ひずみ、 b : 定数 (直線の y 切片)

部材に作用するせん断力 Q によってX形主筋は伸縮するが、このひずみ量 ϵ によって主筋の応力度 σ は一元的に求まる。 ϵ は、Crisfield⁷⁾による幾何学的非線形の簡単な平面トラス問題を図-2のX形主筋に適用することで、次式のように近似される。

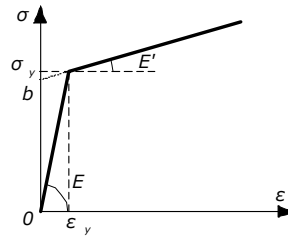


図-3 鉄筋の σ - ϵ 関係のモデル

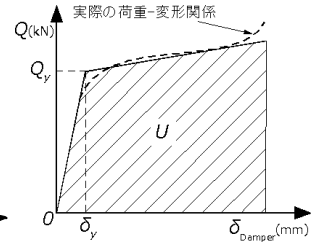


図-4 RC部材の荷重-変形関係のモデル

$$\epsilon = \frac{\Delta s}{s} = \frac{\sqrt{(B+\delta)^2 + l^2} - \sqrt{B^2 + l^2}}{\sqrt{B^2 + l^2}} \cong \left(\frac{B}{l}\right)\left(\frac{\delta}{l}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{l}\right)^2 \quad (3)$$

ここに、 Δs : 主筋ののび、 s : 変形前のX形主筋の長さ、 B : 部材幅 (=300mm)、 l : 部材長さ

次に、X形主筋で吸収されるエネルギー U は、図-4で示すように、荷重-変形関係の面積で求められる。X形主筋によるエネルギー吸収量は、X形主筋の材軸方向の力 T (kN)と、X形主筋の材軸方向の変(のび)量 s (mm)より計算する。なお、 s 値は式(3)より、 T 値は次式で計算する。

$$T = a_t \cdot E \cdot \epsilon (\epsilon < \epsilon_y) \quad (4-1)$$

$$T = a_t \{E' \cdot \epsilon^2 + (2\epsilon - \epsilon_y) \cdot b\} (\epsilon_y \leq \epsilon) \quad (4-2)$$

3.実験概要

ここでは、過去に行われたX形配筋されたRC部材の実験概要および実験結果を示す。

3.1 実験計画

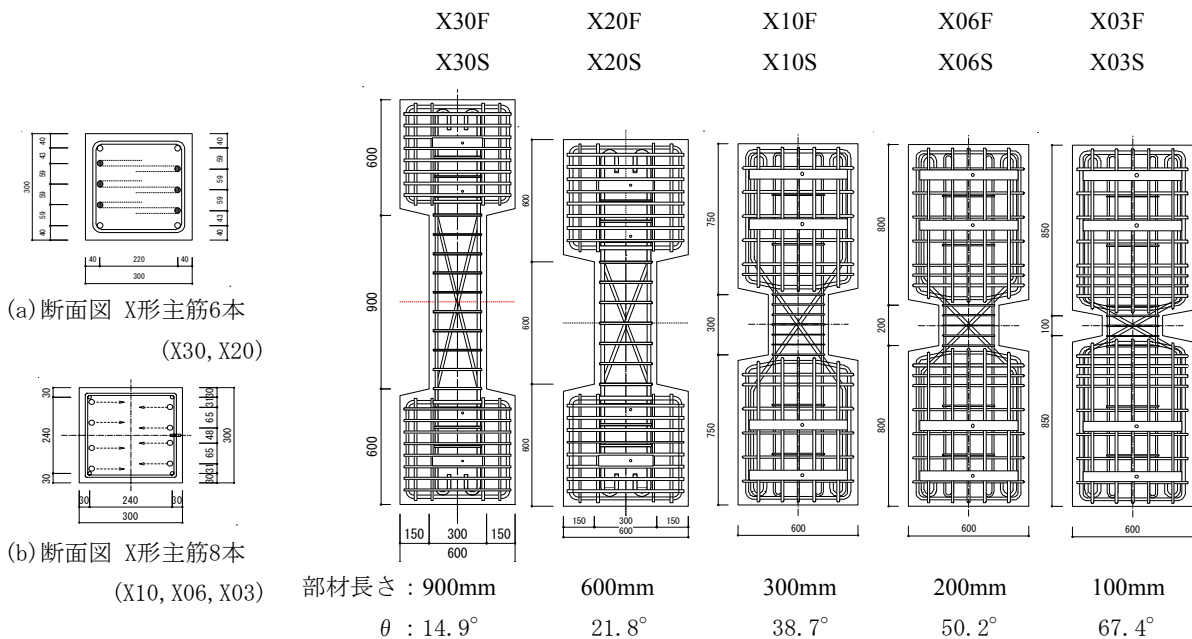


図-5 試験体形状および配筋詳細 (単位: mm)

表-1 試験体諸元

Specimens	Concrete Strength	Dimensions		Share Span Ratio	Applied Axial Compression Ratio	Reinforcement			
		Section	Height			Parallel	Diagonal	Shear $p_w(\%)$	
	$F_c(N/mm^2)$	$B \times D(mm^2)$	$h(mm)$	h/D					
X30F	35.9	300×300	900	3	0	2-D16	3- $\phi 16$	D10@100	0.48
X30S			600	2			3-D16		
X20F							3- $\phi 16$		
X20S			3-D16						
X10F	39.2	300×300	300	1		2-D10	4- $\phi 16$	D6@50	0.42
X10S			200	0.66			4-D16		
X06F							4- $\phi 16$		
X06S			4-D16						
X03F			100	0.33	4- $\phi 16$				
X03S					4-D16				

表-1 に試験体諸元を、図-5 に試験体形状および断面構成をそれぞれ示す。この実験のパラメータは、部材長さ (900, 600, 300, 200, 100mm) と主筋の鋼材種類 (SD 鋼と新鋼材) であり、X 形配筋 RC 試験体を合計 10 体計画した。主筋は対称断面として、片側に 16mm が 5 本相当配筋しているが、製作時期により配筋方法が 2 パターンある。部材長さ 900mm と 600mm は、X 形主筋として 16mm 鉄筋を片側 3 本、残りの 2 本は D16 を部材軸に沿った並行主筋とした。その他の試験体は、X 形主筋として 16mm 鉄筋を片側 4 本、残りは D10 を 2 本並行主筋としている。せん断補強筋も、部材長さ 900mm と 600mm は、100mm 間隔 ($p_w=0.48\%$) で配筋し、その他は 50mm 間隔 ($p_w=0.42\%$) とした。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 $300mm \times 300mm$ (B : 断面幅, D : 断面せい)、コンクリート設計基準強度 F_c は $30N/mm^2$ 、せん断補強筋規格降伏点強度 σ_{wy} は $295N/mm^2$ とした。使用した鋼材の材料試験結果を表-2 に示す。

荷重装置は、建研式曲げせん断荷重装置を用いて行った。荷重履歴は、部材角 $R = \pm 0.5\%rad$ を 2 回繰り返した後、 $0.5\%rad$ ずつ変位を増幅させる正負繰り返し荷重を各 2 回ずつ行い、その変位振幅における履歴曲線の定常性を調べた。

3.3 実験結果

(1) 耐力の推移 (包絡線)

各試験体の履歴応答を比較するために、図-6, 7 に、各部材角における第一サイクルの包絡線を示す。X 形主筋に SD 鋼材を用いた試験体では、主筋の降伏後部材角 $2.5\%rad$ まで耐力は一定となり、安定していることがわかる。一方、新鋼材を用いた試験体では、部材長さ 300mm の試験体で降伏後の緩やかな耐力増加が見られるが、その他は SD 鋼の場合と同様にフラット

表-2 鋼材の材料特性

Reinforcement	Material	Diameter	σ_y	σ_u	Failure strain
		mm	N/mm^2	N/mm^2	%
hoop	SD295A	D6	470	559	17
Main bar	SD295A	D10	337	437	18
	FLS	$\phi 16$	120*	465	51

* 0.2% offset yield stress

な推移を示している。部材長さ 100mm の試験体は最大耐力後、徐々に荷重が低下してくるが、これは X 形主筋が大きく座屈したためである。

SD 鋼、新鋼材ともに、部材長さが短くなるほど、RC 部材の初期剛性が大きくなり、最大耐力が大きくなっている。このことは、X 形配筋された RC 部材の耐力 Q は、式(1)より $\sin \theta$ に比例すると表現されていることから確認でき、後述のモデル解析結果 (図-11, 12) でもそのことが示される。

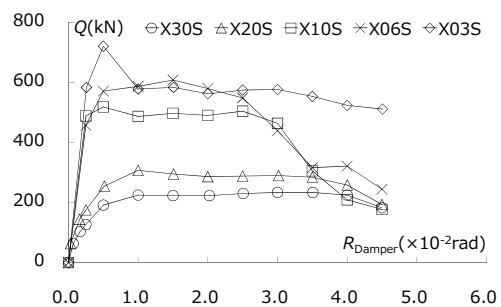


図-6 荷重-部材角関係 (SD 鋼)

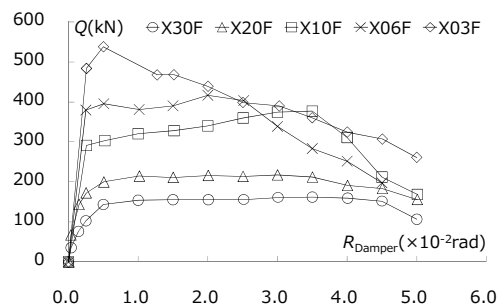


図-7 荷重-部材角関係 (新鋼材)

(2) 履歴減衰の推移

図-8, 9 は、部材角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、履歴曲線から等価粘性減衰を計算した。試験体は部材長さが異なるため、耐震補強部材として既存建物に取り付けた場合、建物の層間変形角と部材の変形角は異なっている。これを統一的な基準で比較するために、図-8, 9 の横軸は、後述する式(5)により、建物の部材角 (R_{Frame}) に変換してプロットしている。

履歴減衰で部材のエネルギー消費をみると、部材長さ 300mm の場合 (□の線) が、最も高い値で推移している。部材長さが 900mm, 600mm と長くなると、X 形主筋が顕著に機能しない。逆に 200mm, 100mm と短すぎると主筋が座屈し、試験体が材軸方向に伸び上がったたり、面外に変形したりするので、耐震補強部材に利用するためには、工夫が必要であることが実験により確認できた。

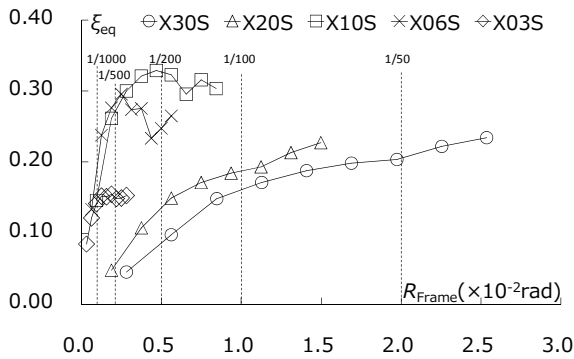


図-8 履歴減衰の推移 (SD 鋼)

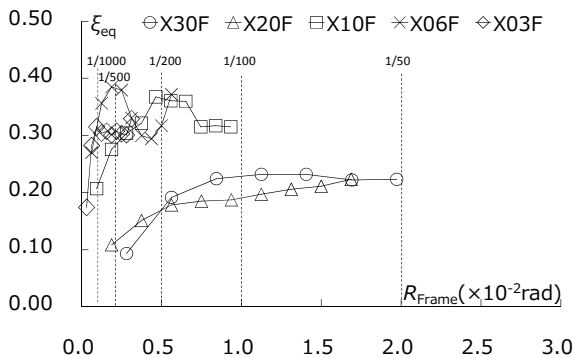


図-9 履歴減衰の推移 (新鋼材)

4. 解析結果の検討

3 章の実験結果との比較のために、2 章で導いた式に対して、具体的な材料値を用いて、 Q と U が θ によってどのように変化するか計算した。

4.1 モデルによる数値計算

X 形配筋に用いる鋼材は、新鋼材と一般鋼 (SD295)

による。鋼材は、図-10 のようにバイリニアモデルを仮定する。降伏後の第 2 勾配 E' は、SD 鋼ではフラットとし、新鋼材は材料試験結果から $E' = E/200$ を与えた。その他の材料特性は、既往の実験結果で得られた表-3 に示す値を与えた。

数値結果を評価するにあたって、X 形配筋された RC 部材を外付け工法による耐震補強部材として利用することを想定して、変形量の推移は建物の層間変形角 R_{Frame} で表現した。すなわち、耐震補強部材の実験は、部材せいが異なるため、同一部材角であってもスタブの水平移動量 (=層間変位量 δ) が異なっている。これを、統一的に評価するために、式(3)の変形角 R_{Damper} を、次式(5)により層間変形角 R_{Frame} で表現する。

$$R_{Damper} = \frac{\delta}{l} = \tan \theta \cdot R_{Frame} \frac{H}{D} \quad (5)$$

ここに、 R_{Damper} : X 形配筋された RC 部材の変形角、 δ : 層間変形量、 l : 部材長、 H : 階高、 D : 断面せい

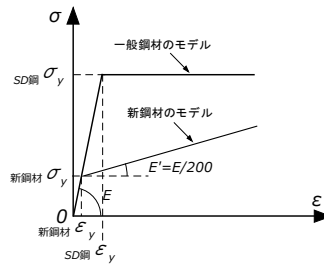


図-10 解析に用いる鋼材のモデル化

表-3 モデル計算に用いた鋼材の諸数値

	鉄筋の断面積	ヤング係数	降伏応力度	降伏応力時ひずみ	降伏後の勾配
	$a_t(\text{mm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$\epsilon_y(-)$	$E'(\text{N/mm}^2)$
SD鋼	0.402	200000	300	0.0015	20
新鋼材	0.402	200000	120	0.0006	1000

4.2 X 形配筋による RC 部材の耐力 Q

式(1)と(2)で、 θ を 0° から 90° まで連続的に変化させ、 θ に対応する耐力値 Q を計算した。 R_{Frame} を 1/2000, 1/1000, 1/500, 1/200, 1/100 と変化させ、各変形レベルで発揮される耐力値を 5 本の線で描いている。X 形主筋に SD 鋼を用いた場合の計算結果を図-11 に、新鋼材を用いた場合を図-12 に示す。横軸の X 形主筋の材軸とのなす角度 θ の変化は、RC 部材の高さを表しており、 $\theta=0^\circ$ は X 形主筋がない場合であり、 $\theta=90^\circ$ は主筋がせん断補強筋のように配筋される状態を計算していることになる。図中には、部材幅 300mm で、部材高さ 900, 600, 300, 200, 100mm に相当する θ を点線で示してある。曲線の下に凸な部分は、主筋が弾性範囲にあり、上に凸な部分は、降伏域にあることを表している。

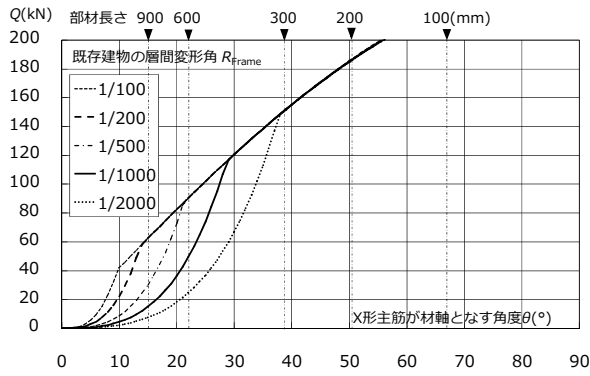


図-11 θ に対応する耐力の変化 (SD 鋼解析)

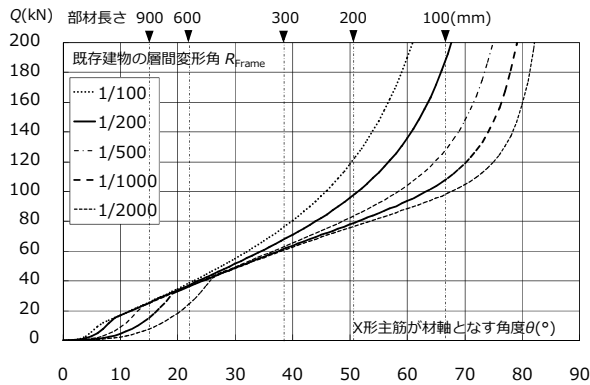


図-12 θ に対応する耐力の変化 (新鋼材解析)

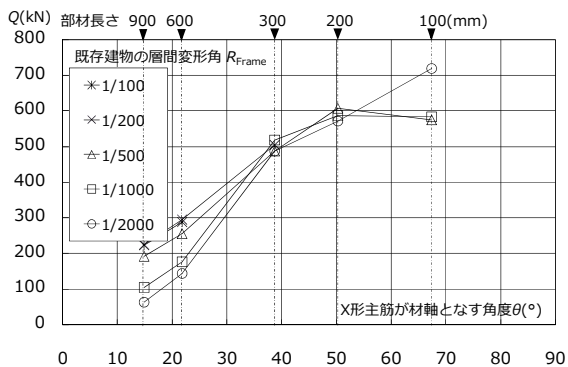


図-13 θ に対応する耐力の変化 (SD 鋼実験)

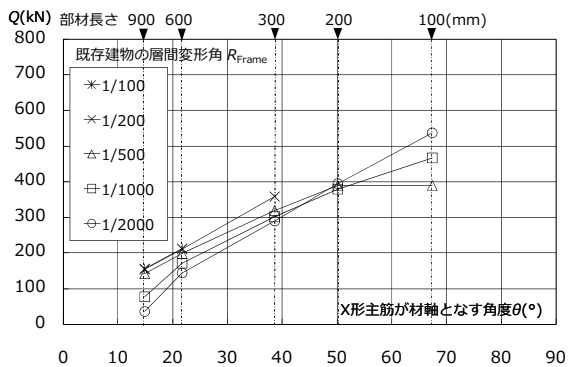


図-14 θ に対応する耐力の変化 (新鋼材解析)

降伏点の違いから、弾性範囲内の領域が、低降伏強度の新鋼材の方が小さいことがわかる。しかし、部材

を短柱化 (θ 大) することによって、SD 鋼も小さな変形レベルで降伏域に入るため、大きなエネルギー消費を期待することができる。SD 鋼は、降伏後はフラットなモデルを仮定しているため、変形の増大に伴う耐力上昇は期待できないが、新鋼材は変形とともに耐力上昇があり、その程度は短柱である程大きいことが図-12 からわかる。

図-13, 14 には、解析結果の図-11, 12 に対応する実験結果を示している。実験は部材角で制御しているが、式(5)によって建物の層間変形角に変換し、図-11, 12 に対応する値を抽出した。実験による耐力は、RC 部分が含まれているため、解析値と定量的には比較できないが、下に凸の領域 (弾性域) が、新鋼材に比べて SD 鋼材は大きい傾向が実験値でも確認でき、おおよそモデル解析の結果は、実験結果の傾向を表現していることがわかる。

4.3 X 形配筋による RC 部材のエネルギー消費能力 U

式(4)で、 θ を 0° から 90° まで連続的に変化させて対応するエネルギー消費能力 U を計算した。X 形主筋に SD 鋼を用いた場合の計算結果を図-15 に、新鋼材を用いた場合を図-16 に示す。鋼材が異なっても傾向は変わらず、短柱ほど変形に伴う X 形主筋の利き方が大きくなるので、エネルギーの吸収量は大きくなっていることがわかる。

4.2 の耐力値同様、図-15, 16 に対応する実験値を抽出し、プロットしたのが図-17, 18 である。対応する変形角までデータが得られていない試験体があるため、特に層間変形角 $1/200$ 以降で描かれていない部分があるが、おおよそ解析結果と同様の傾向が示されていることがわかる。

以上、耐力 Q とエネルギー消費 U について、解析値と実験値を比較した。モデル解析は、X 形主筋のみのせん断抵抗機構を考えているが、実験による試験体では RC 部分があり、コンクリートのひび割れや鉄筋とコンクリートの付着によりエネルギー消費は大きく変化する。実験では、脆性的に耐力が低下し、大変形までのデータがない試験体があるが、おおよそ解析結果と実験結果は同じ傾向を示しており、X 形に配筋された RC 部材のせん断抵抗機構は、本論で検討したモデル解析で概ね評価することができることが確認できた。

5. おわりに

低降伏点強度、高延性の鋼材を建築および土木構造物に応用して耐震性向上を図る目的で、既存 RC 造建築物の耐震補強部材に関する開発研究を行っている。この鋼材を X 形に配筋した RC 部材に対して、部材長さが変化することによって、耐力特性および地震エ

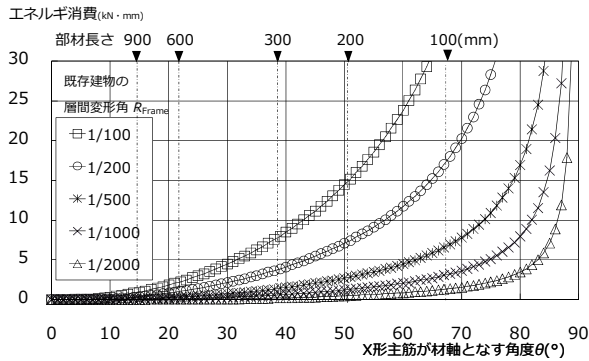


図-15 X形主筋のエネルギー消費 (SD鋼解析)

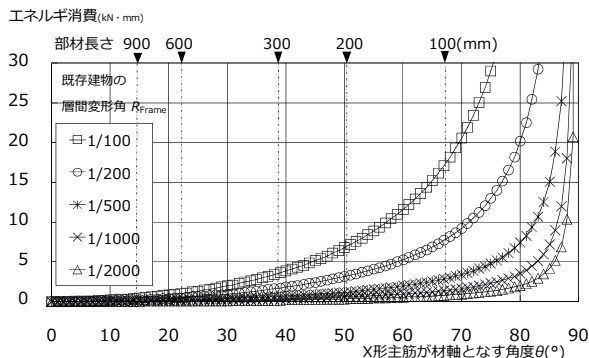


図-16 X形主筋のエネルギー消費 (新鋼材解析)

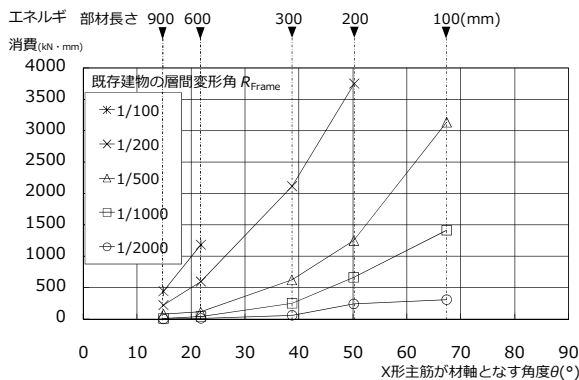


図-17 X形配筋試験体のエネルギー消費 (SD鋼実験)

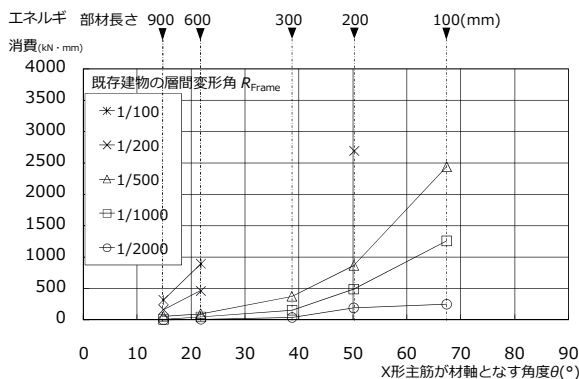


図-18 X形配筋試験体のエネルギー消費 (新鋼材実験)

エネルギー消費がどのように変化するかを検証するために、モデル解析による検討を行い、RC部材の実験結果と比較した。その結果、次のことが確認できた。

- 1) X形配筋のモデルにより、地震時荷重に対するせん断抵抗機構を評価することができる。
- 2) 部材長さが小さい方が、せん断耐力は大きくなり、X形主筋によるエネルギー吸収が大きくなる。
- 3) 実験結果から、部材長さ 300mm 程度がもっとも安定した履歴特性を示す。

謝辞

本研究は、平成 16～20 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。試験体の実験にあたり、福山大学修士の上地清志君(現徳島県庁)に多大な協力を得た。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) 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状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No2，pp.769-774，2005.6
- 3) 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，Vol.28，No2，pp.739-744，2006.6
- 4) 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，Vol.29，No3，pp.973-978，2007.7
- 5) Masakazu TERAJ and Koichi MINAMI : DEVELOPMENT OF SEISMIC PERFORMANCE FOR REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITH EARTHQUAKE-RESISTANT STEEL BAR, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (DVD-ROM), 2008.10
- 6) 寺井雅和，上地清志，南宏一：耐震性新鋼材を主筋に用いた鉄筋コンクリート構造の耐震性能に関する研究，日本建築学会技術報告集 第 27 巻 6 号 pp.60-70，2008.6
- 7) Crisfield, M. A. : Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Wiley, Chichester, England, Vol.1, pp.3-5, 1991