

# 鉄筋コンクリート部材の耐震性向上を目的 とした耐震性新鋼材の開発

寺井雅和\*, 上地清志\*\*, 南 宏一\*

## DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE-RESISTANT STEEL BAR FOR SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

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, Ministry accepted the continuing project proposal of the center. 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，終局耐力，耐震性新鋼材，エネルギー吸収能力

**Keywords：**Reinforced Concrete, Ultimate Strength, Earthquake-Resistant Steel, Energy Absorption Capacity

#### 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。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において，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が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

\*建築・建設学科 \*\*工学研究科 大学院生

統的に推進している。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)既存建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、新たな既存建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。この既存建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。

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>。本論では、この新鋼材の特徴や特性を紹介するとともに、これを鉄筋コンクリート構造部材内の棒鋼として組み込んだときに、どのような耐震性能を示すのか、小型から中型程度の試験体を製作して、実験的に検討した。そして、その破壊性状を確認し、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した。

## 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 ( $\alpha$ ) 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 ( $\gamma$ ) 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) より炭素含有量を少なくした低耐力型の BCC の  $\alpha$  系極低炭素鋼 (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 ( $\gamma$ ) 系鋼が適している。当センターでは、 $\gamma$  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))<sup>1)</sup>。

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、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。FLS は、低耐力で高延性を示しており、かつ FCC の  $\gamma$  系であることから、デバイス材料としての期待は大きい。 $\gamma$  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<sup>3), 4)</sup>。

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	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
	SD295A	異形 D16	340	520	18
主筋	FLS	丸鋼 Φ16	120*	465	51

\*: 0.2%耐力

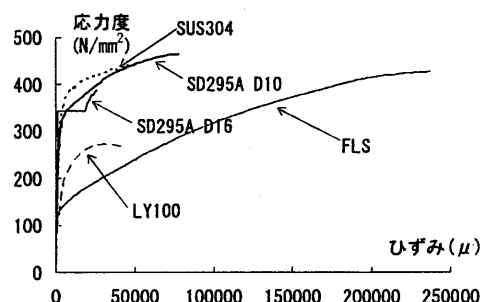
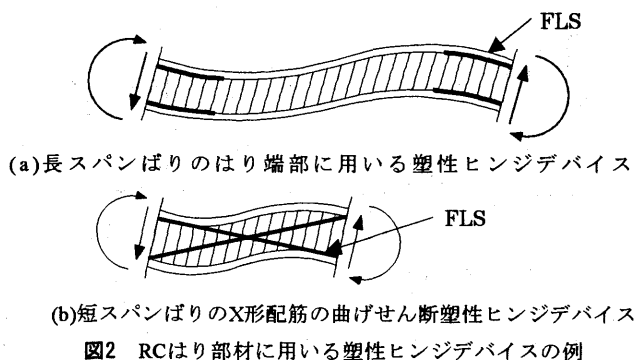


図 1 鋼材の  $\sigma$ - $\epsilon$  関係の比較

## 3. 耐震性新鋼材のコンクリート構造物への活用

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、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すると、必ずしも満足する結果を与えるものにならない。

ここでは、FLS をコンクリート部材に適用するにあたり、どのような方法があるか、幾つかの適用事例および、今後計画している適用可能性についての事例を紹介する。一つは、RC 部材の主鉄筋に FLS を用いた場合に、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の事例である。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 2)。もう一つは、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。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実験的に検討を進めているので簡単な紹介をする。さらに、X 形配筋された RC 部材を、耐震補強構法における外付け補強デバイス材として活用する事例について紹介する。



### 3.1 小型試験体による実験例<sup>5) ~7)</sup>

FLS 棒鋼を主筋として組み込んだ RC 片持ちり形式の小型試験体 (断面寸法 150mm×200mm) を用いて、主筋の力学的性状が RC ばりの塑性曲げ変性状に対してどのような影響を持つのかを実験的に検討した。配筋タイプとして、図 2 にも示したような平行配筋の主筋に FLS を用いたものと、X 形配筋の主筋に用いた 2 種類の実験を行い、その他のパラメータには、主筋比、せん断補強筋比、せん断スパン比、軸力比、コンクリート強度などを設定し、30 体の試験体による組織的な実験研究を実施した。なお、本論ではそれらのうち 4 体の実験結果のみ紹介する。図 3 に試験体の形状および寸法を示す。

各試験体の荷重-部材角関係を図 4, 5 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  $\delta$  を部材長さ  $l$  で除した部材角で表す。はじめに、平行配筋の場合、SD 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% 耐力が極めて低いため、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。次に、X 形配筋で主筋に FLS を用いた場合も、FLS を主筋に使用した場合も、履歴性状には大きな違いは見られず、いずれも曲げ破壊の様相を呈した。SD 鋼を主筋に用いた試験体では、部材角 5%rad. 程度で、X 形主筋に沿った付着剥離ひび割れが卓越し耐力を失った。

次に、平行配筋の例であるが、載荷履歴によって消費されたエネルギー (履歴減衰) の比較を図 6 に示す。主筋に FLS を用いた試験体では、エネルギー主筋に使用 FLS を主筋に使用より大きく推移していることが確認された。

### 3.2 中型試験体による実験例<sup>8)</sup>

X 形配筋試験体 4 体 (以下、XB シリーズ)、平行配筋試験体 6 体 (以下、PB シリーズ) の計 10 体を計画した。図 7 に試験体の形状および断面構成を示す。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。共通因子としては、断面寸法 (300mm×300mm)、コンクリート設計基準強度

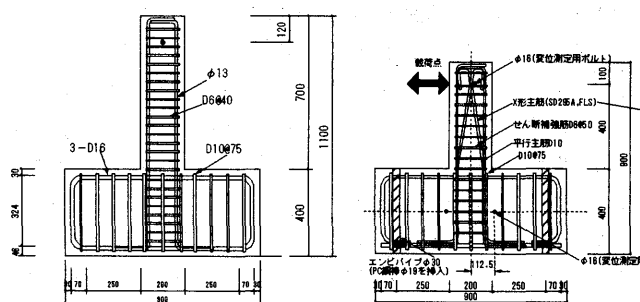


図3 片持ち梁試験体の配筋状況および寸法 (単位: mm)

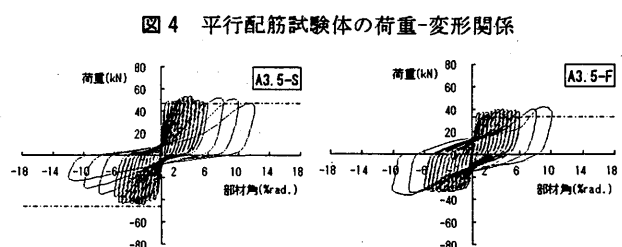
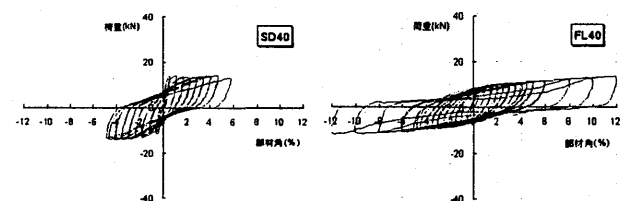


図5 X 形配筋試験体の荷重-変形関係

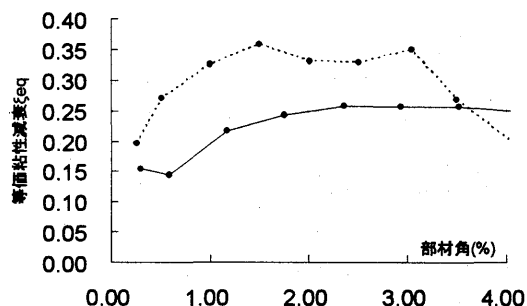


図6 履歴減衰の推移 (平行配筋試験体)

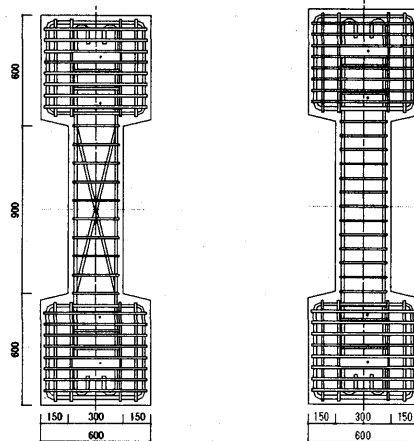


図7 中型試験体形状・寸法および断面図 (単位: mm)

$F_c$  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。

各試験体の履歴曲線を比較するために、図8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 ( $\sqrt{\sigma_b}$ ) で除して、無次元化した値を用いている ( $Q' = Q / (a_t \cdot \sqrt{\sigma_b})$ )。XBシリーズでは、SD鋼とFLS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、SD295Aを主筋に用いたPB30Sは、主筋の降伏とともに耐力が2%rad程度で荷重が徐々に下がり始めるが、FLS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の試験体ではSD鋼とFLSでは大きな差は見られなかった (PB33FとPB33S)。

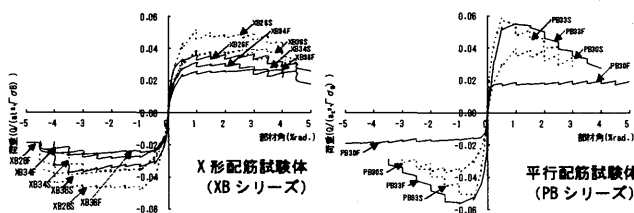
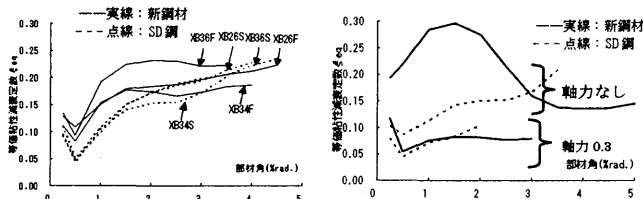


図8 包絡線の比較



(a)XBシリーズ

(b)PBシリーズ

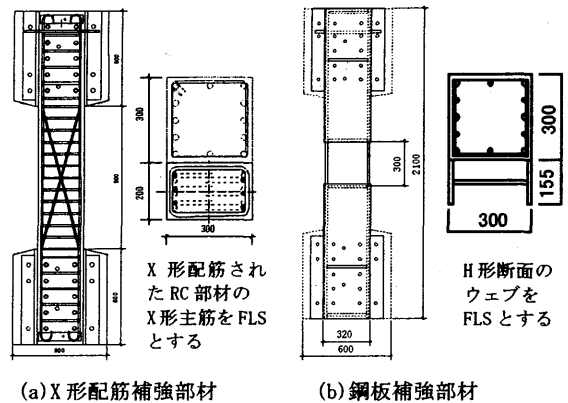
図9 等価粘性減衰定数の推移

次に、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、等価粘性減衰定数を計算する (図9)。XBシリーズでは、主筋にFLSを用いた試験体 (実線) では、SD鋼を用いた試験体 (点線) に比べ大きめに推移しており、エネルギー吸収能力が高いことが確認できる。PBシリーズでも、軸力が高くなると (0.3) 大きな違いは見られないが、軸力がない場合に、極めて大きく推移しており高いエネルギー吸収が期待できることが確認できた。

### 3.3 耐震補強部材としての適用例

FLSを建築および土木構造物に応用して、耐震性向上を図る研究を継続的に行ってきており、その研究結果をさらに発展させて既存RC造建築物の耐震補強構法を開発する。構法の一つとして、既存RC造骨組の外部に、外付けフレームを併設して、それによって既存建物の耐震性能の不足分を補っているものがある<sup>9)</sup>。既存建物の復元力特性が、極めて脆性的な性状を示すものに対して、補強された建物の復元力特性を、どの程度靱性的な性状を確保すれば良いのかが、重要なキーポイントになる。

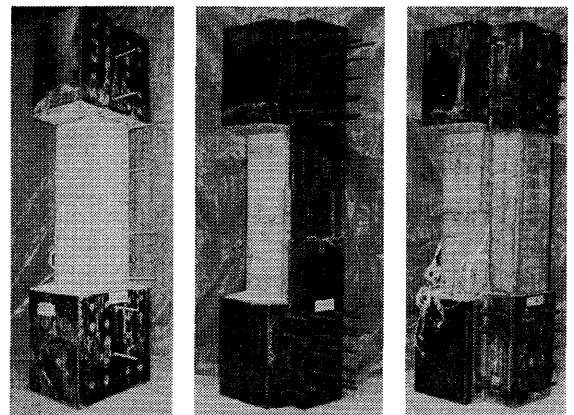
補強部材として、FLSを主筋に用いたX形配筋RC部材によるものと、新鋼材の板を直接エネルギー吸収デバイスにした補強部材の2つを提案する。図10に試験体形状および断面寸法を示す。X形配筋されたRC部材の端部を鋼管で補強し、その補強部分を柱材の定



(a)X形配筋補強部材

(b)鋼板補強部材

図10 試験体形状および断面寸法 (単位: mm)



(a)既存RC柱

(b)鋼板補強部材

(c)X形配筋補強部材

写真1 外付けフレーム構法による耐震補強方法の提案

着部と片側16本のPC鋼棒で圧着する。板材による補強部材は、鉄骨を使用することにより施工性や経済性の向上をねらったもので、ウェブにFLS鋼板を用いたH形鋼を塑性デバイスとして使用する。補強部材の柱中央部 ( $h/3=300\text{mm}$ ) に、ウェブをFLSの6mm厚鋼板、フランジをSS400材 (PL-12) としたハイブリッドH形鋼を組み込む。写真1に、補強部材を既存RC柱に取付けた状態を示す。

先の実験でも確認したように、FLSを組み込んだRC部材は大変大きな地震エネルギー消費能力を示しており、これを補強部材として活用することが期待される。FLSを耐震補強構法に適用した場合の実験詳細については、別報で報告することとする。

### 4. おわりに

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; FLS) 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する。

本論では、この新鋼材の特徴や特性を紹介するとともに、これを鉄筋コンクリート部材に棒鋼として組み込まれたときに、どのような耐震性能を示すのか、小型から中型のはり (柱) 型試験体を製作して実験的に検討した。その結果、以下のことが確認できた。

- X形主筋にFLSを用いることにより、部材変形能力が大きくなる。
- 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す。

- FLS を組み込んだ RC 部材は大きな地震エネルギー消費能力を示す。

さらに、FLS の具体的な適用事例として、外付けフレームによる耐震補強部材として、FLS を活用することを検討している。

## 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。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、合場乗万君、藤川真史君には、試験体の製作、実験実施からデータ整理などで多大なる協力をいただいた。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 4 名:低降伏点鋼の繰返しせん断特性, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-208, pp.415-416, 2004.9
- 3) 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
- 4) 上野谷実ほか 4 名: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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアルー枠付き鉄骨ブレースによる補強ー」, 財)日本建築防災協会, 2003