

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

寺井雅和* 南 宏一*

Influence on Flexural Behavior of RC Members by the Properties of Main Bars

Masakazu TERAJ* and Koichi MINAMI*

ABSTRACT

The influence which a few coefficients determine a mechanical performance of main bars do to earthquake energy consumption in formation of the plastic hinge of RC members was considered. This paper presents the experimental work on flexural behavior of Reinforce Concrete members with earthquake-resistant steel bars that was developed with Center for High-Tech Research Fukuyama University. Supposing the stress and the strain of RC beam with single and double reinforcement in the analysis, the P- δ relations were calculated with changing several parameters of materials.

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

筆者らが所属する福山大学ハイテク・リサーチ・センター構造・材料開発研究センターは，文部科学省の事業援助によって，平成10年度に設置され，新しい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，土木・建築・機械系材料の三分野にわたって「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，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，散逸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より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。この鋼材を用いた耐震構造システムの開発は次のような段階を経ている。1)大きな地震動に対して構造物の被害を限定的なものにとどめ，構造物としての機能の回復が速やかに

行えるように，低降伏点鋼と普通構造用鋼材の良さを具備する高性能鋼材の材料開発を行う。2)この新鋼材を鉄筋コンクリート構造や鋼構造の一部に組み込んだ塑性デバイスを構造システムに導入し，耐震技術の高度化を図る。

鉄筋コンクリート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，鉄筋コンクリート（以下，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，

*建築学科

必ずしも満足する結果を与えるものにならない。

本研究では、RC 部材の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。

2. 実験

2. 1 実験計画

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 (FLS; Fukuyama Low-Yield Steel) の 3 種類の鋼材を使ってその性状の違いを比較する。鋼材の材料性状の違いは、2. 3 で詳述する。試験体の断面構成は、図-1 に示すように、断面寸法 $150 \times 200 \text{mm}$ 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。

載荷方法は、単調片押し載荷と、正負漸増繰り返し載荷の 2 種類の違いを比較する。本研究の一連の試験体では、RC 部材は曲げ破壊するものとして設計しているので、曲げ耐力では主筋に用いられる鋼材の力学性状が直接的に部材応答に影響することとなる。これまでに行われた FLS の開発において、単調引っ張り性状と繰り返しを受けるものとは、その力学的性状が異なることが確認されている。この影響が RC 部材へ及ぼす影響を確認するために、2 種類の載荷方法を計画した。

部材長さについては、初期に行われた実験では、曲げ耐力後すぐにせん断破壊する試験体があった。これは、せん断補強筋の間隔を当初 50mm ピッチとしていたことと、さらに断面寸法に比べ部材長さが短く、せん断スパン比が小さく、せん断破壊を起こしやすかったためであった。より、曲げ破壊が卓越するように、部材長さを長くして、せん断破壊を起こりづらくする必要があり、部材長さ 900mm の試験体を計画した。

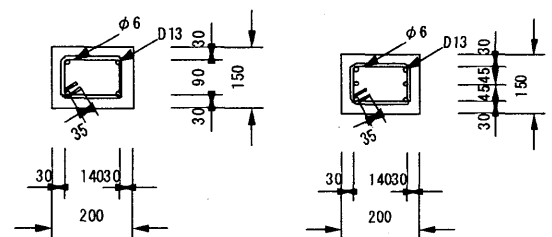
引張主筋比については、片押し単調載荷の場合には単筋とし、複筋の場合は、正負交番繰り返し載荷の RC 柱部材の実験との比較ができるよう、上端筋と下端筋は同じ主筋量とした。また、曲げを受ける部材の破壊は、引張主筋量と密接な関係がある。引張主筋は、表-1 に示すように、 $\phi 10$ の FLS、D10 または D13 の一般鋼材とステンレス鋼を 2、4、6 本のいずれかの組み合わせで計画した。主筋量により、部材の破壊性状が変化するが、その境界値となるのが釣合い鉄筋比 p_b であ

る。本実験で対象としている部材断面 ($150 \text{mm} \times 200 \text{mm}$) と、材料性状から計算すると、釣合い鉄筋比 p_b は約 3.3% となる。単調載荷の 2 体については、 $p_t = 0.28 \sim 0.31\%$ となり、日本建築学会の RC 計算規準で規定する最小鉄筋比 (0.4%) 以下となるが、その他の試験体では、 $p_t = 0.56 \sim 1.49\%$ となり、釣合い鉄筋比より小さいため、引張側主筋が圧縮側コンクリートより先に降伏する設計となっている。

実験変数と断面構成の組み合わせは、表-1 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。(例えば SD2M-600-01) すなわち、1, 2 番目のアルファベット記号 (SD, FL, ST) は、主筋に用いられている鋼材種類を表し、SD は一般鋼材の SD295 を、FL は当センターで開発された耐震性新鋼材 FLS を、ST はステンレス鋼を示す。3 番目の数字 (2, 4, 6) は、引っ張り主筋の本数を表している。FLS は $\phi 10$ であり、SD 鋼とステンレス鋼は異形棒鋼の D10 や D13 であるため、断面積に対する引張主筋比は異なっている。4 番目のアルファベット記号 (M, C) は、載荷方法であり、M は単調載荷 (Monotonic)、C は繰り返し載荷 (Cyclic) を表している。2 項目の数字 (600, 900) は、図-2 に示すように、部材長さをとって、 600mm と 900mm を表している。3 項目の数字 (00, 01, 03) は、軸力比を示し、00, 01, 03 は、それぞれ、軸力比 0.0, 0.1, 0.3 を示している。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ので、実験時の値は、この値と多少異なっている。

2. 2 試験体の形状と寸法

試験体は、表-2 に試験体諸元を示し、図-2 に配筋状況および寸法を示すように、断面寸法 $150 \times 200 \text{mm}$ 、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、 $\phi 10$ 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、 $\phi 10$ の FLS は制作本数が少なかったため、D10 の途中で梁端部分のみ溶接した。また、単調載荷の場合の圧縮側鉄筋は $\phi 6$ の組み立て筋を入れている。その他の試験体については、交番繰り返し載荷とするために、対象断面として、4 本、6 本の鉄筋を配筋



(a) 主筋本数 4 本 (b) 主筋本数 6 本
図-1 RC 部材の断面 (単位 ; mm)

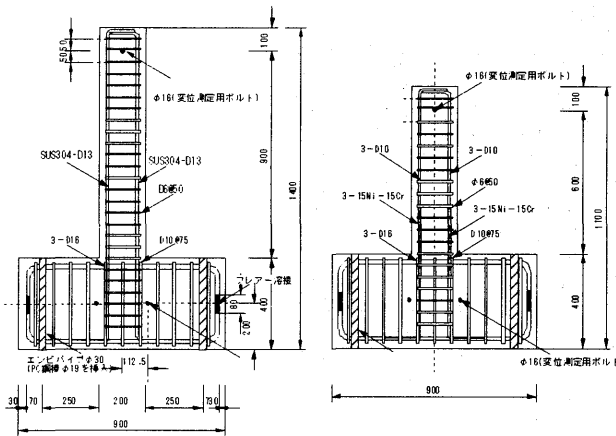


図-2 試験体配筋状況および寸法

している。また、主鉄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° 折り曲げて定着させている。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。試験シリーズの当初は、せん断補強筋間隔を50mmピッチとし、せん断補強筋比 $rP_w = rA_w/B \cdot rS$ (rA_w :せん断補強筋の断面積、 B :柱はば、 rS :せん断補強筋間隔) を、0.85%とした。しかし、曲げ耐力後にせん断ひび割れが部材端付近に発生したため、より曲げ破壊が卓越するように、せん断補強筋間隔を40mmピッチ ($rP_w=1.07\%$) とした。また、せん断補強筋は、図-1 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られている。

表-1 試験体諸元

試験体番号	鉄筋			軸応力度 $N_0/bD\sigma_c$	載荷方法	実験年度	備考
	主筋	帯筋 間隔 (mm)	$\rho_w(\%)$				
SD2M-600-00	2-D10	D6@50	0.85	0.0	単調載荷	H14年度	打設: H15.2.12 実験: H15.3.12 -3.18
FL2M-600-00	2-φ10	D6@50	0.85				
SD2C-600-00	4-D10	D6@50	0.85				
FL2C-600-00	4-φ10	D6@50	0.85				
SD3C-600-00	6-D10	D6@50	0.85				
FL3C-600-00	6-φ10	D6@50	0.85				
ST2C-600-00	4-D13	D6@40	1.07				
ST3C-600-00	6-D13	D6@40	1.07				
ST2C-900-00	4-D13	D6@50	0.85				
ST3C-900-00	6-D13	D6@50	0.85				
SD2C-600-01	4-D13	D6@40	1.07	0.1	繰り返し 載荷	H15年度	打設: H15.12.9 実験: H16.1.20 -2.6
SD3C-600-01	6-D13	D6@40	1.07				
ST2C-600-01	4-D13	D6@40	1.07				
ST3C-600-01	6-D13	D6@40	1.07				
SD3C-600-03	4-D13	D6@40	1.07				
SD3C-600-03	6-D13	D6@40	1.07	0.3	H16年度	打設: H16.3.30 実験: H16.10.29 -11.19	
ST2C-600-03	4-D13	D6@40	1.07				
ST3C-600-03	6-D13	D6@40	1.07				
ST3C-600-03	6-D13	D6@40	1.07				

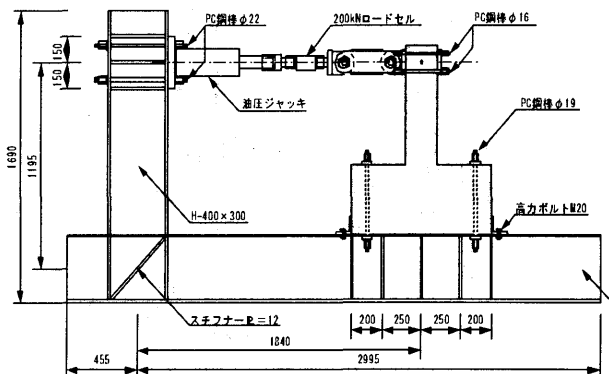


図-3 試験装置概要 (軸力なし) (単位; mm)

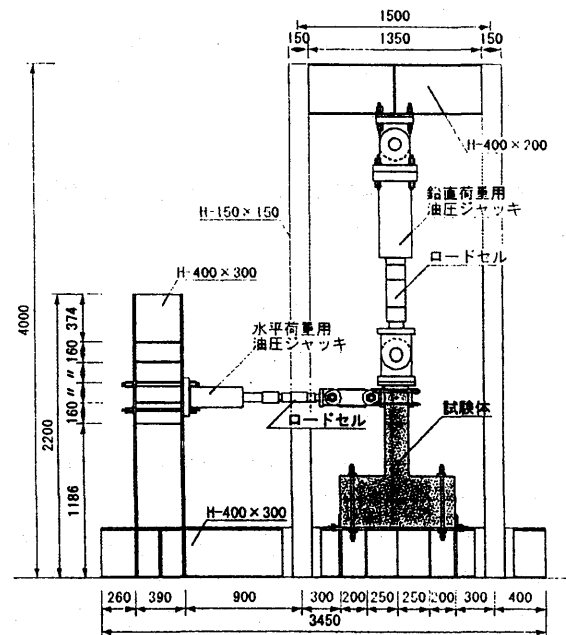


図-4 試験装置概要 (軸力あり) (単位; mm)

表-2 断面特性および材料特性

試験体番号	断面特性 (mm)						材料特性 (N/mm ²)	
	断面寸法 B×D	部材長さ L	主筋	ρ_t (%)	帯筋 間隔	ρ_w (%)	コンクリ ート強度	降伏強度
SD2M-600-00	150×200	600	2-D 10	0.31	D6@50	0.85	24.1	364
FL2M-600-00	150×200	600	2-φ 10	0.28	D6@50	0.85	24.1	300
SD2C-600-00	150×200	600	4-D 10	0.56	D6@50	0.85	24.1	364
FL2C-600-00	150×200	600	4-φ 10	0.61	D6@50	0.85	24.1	300
SD3C-600-00	150×200	600	6-D 10	0.84	D6@50	0.85	24.1	364
FL3C-600-00	150×200	600	6-φ 10	0.92	D6@50	0.85	24.1	300
ST2C-600-00	150×200	600	4-D 13	1.00	D6@40	1.07	29.4	363
ST3C-600-00	150×200	600	6-D 13	1.49	D6@40	1.07	29.4	363
ST2C-900-00	150×200	900	4-D 13	1.00	D6@50	0.85	29.4	363
ST3C-900-00	150×200	900	6-D 13	1.49	D6@50	0.85	29.4	363
SD2C-600-01	150×200	600	4-D 13	1.00	D6@40	1.07	32.9	364
SD3C-600-01	150×200	600	6-D 13	1.49	D6@40	1.07	32.9	364
ST2C-600-01	150×200	600	4-D 13	1.00	D6@40	1.07	32.9	363
ST3C-600-01	150×200	600	6-D 13	1.49	D6@40	1.07	32.9	363
SD3C-600-03	150×200	600	4-D 13	1.00	D6@40	1.07	41.2	364
SD3C-600-03	150×200	600	6-D 13	1.49	D6@40	1.07	41.2	364
ST2C-600-03	150×200	600	4-D 13	1.00	D6@40	1.07	41.2	363
ST3C-600-03	150×200	600	6-D 13	1.49	D6@40	1.07	41.2	363

2. 3 試験体の材料と制作

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 以下の笠岡市茂平産の砕石を、細骨材には、最大粒径 5mm の佐賀県小川島産の海砂と最大粒径 5mm 以下の笠岡市茂平産の砕砂を使用した。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。実験時の各試験体の材令は、短いもので 1ヶ月、長いものでは 8ヶ月のものがああり、各試験体の実験時の 10cm×20cm のシリンダー圧縮強度、および割裂強度は、表-2 に示すように、かなり差が大きくなっている。また、主筋に用いた 3種類の鋼材（一般鋼、FLS、ステンレス鋼）およびせん断補強筋に使用した異形棒鋼は、その値を、表-2 に示す。FLS は、福山大学ハイテク・リサーチ・センターの機械系材料分野で開発されたもので¹⁾、従来の鋼材とは異なり、低降伏点で高延性を示す。これまで行われたいくつかの研究で、この鋼材の実用性が評価され始めている²⁾。また、ステンレス鋼は、表面にクロムと酸素からなる透明で強固な不動態膜を形成し、それ以上の酸化を防止することにより耐食性を保つ金属である³⁾。機械的性質では、弾性率が若干であるが炭素鋼より小さい。この実験で用いた SUS304 は、ひずみ硬化による応力上昇が大きく引張強さが高い特性を持つ。

2. 4 実験装置

載荷装置の概略を図-3、-4 に示す。軸力を導入しない場合には、図-3 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 ジャッキを固定し、50 トン用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-4 のように、これに立体フレ

ームを取り付け、鉛直用 100 トン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 $R=0.25\%$) で正負繰り返し載荷を 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 ずつ漸増載荷を繰り返したが、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。

軸力用油圧ジャッキの両端はピンとなっているので、水平載荷にともなって図-5 のように傾くため P- Δ 効果を考慮する必要がある。水平荷重に軸力ジャッキによるモーメント力が付加されることになるので、これを追加補正するために次のような計算を行う。

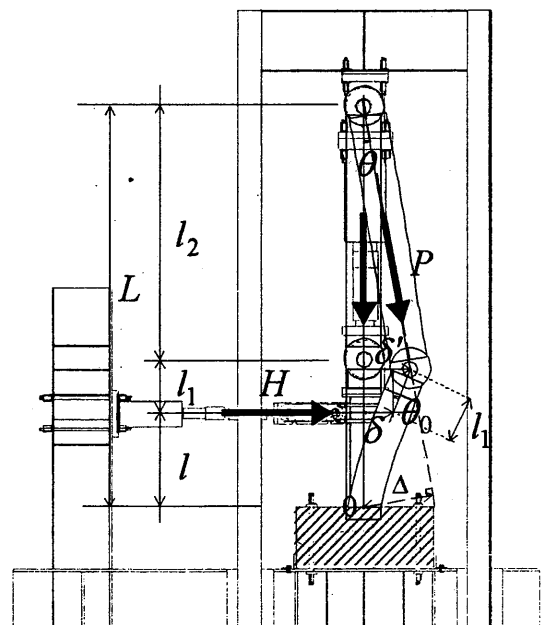


図-5 P- Δ 効果による水平力の補正

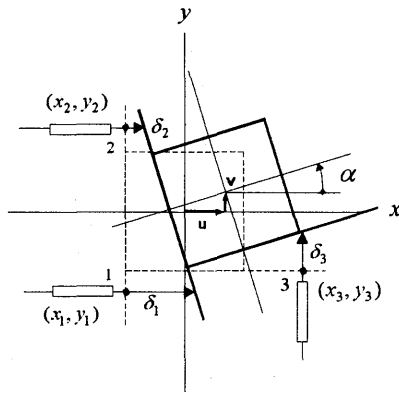


図-6 計測変位と部材の変形の関係

$$\Delta = L \sin \theta \approx L \cdot \theta \quad (1-1)$$

ここに、 $\theta = \delta' / l_2$ 、 $\delta' = \delta + \theta_0 \cdot l_1$

$$\therefore \Delta = L \cdot (\delta + \theta_0 \cdot l_1) / l_2 \quad (1-2)$$

$$M = H \cdot l + P \times \Delta \quad (2-1)$$

$$\therefore M / l = H + P \cdot L (\delta + \theta_0 \cdot l_1) / (l \cdot l_2) \quad (2-2)$$

試験体の変形やねじれにともない、計測位置が変化するの、複数の変位計により試験体柱頭部(重心位置)の変形量と回転角を求める。変形前の部材の断面重心を原点にとり、座標軸を図-6のようにとる。断面形は変形しないものとして、変形後の部材の断面重心の変位 u 、 v と回転角 α を、図の点 1、2、3 の位置に当てられた 3 本の変位計の変位量 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 で表現する。ここで、それぞれの変位は図に示した矢印の向きを正とすると、次式が成立する。

$$\delta_1 = x_1 (1 / \cos \alpha - 1) - (y_1 - v) \tan \alpha + u \quad (3-1)$$

$$\delta_2 = x_2 (1 / \cos \alpha - 1) - (y_2 - v) \tan \alpha + u \quad (3-2)$$

$$\delta_3 = (x_1 - u) \tan \alpha + y_3 (1 / \cos \alpha - 1) + v \quad (3-3)$$

ここで回転角 α が小さい場合には、 $\sin \alpha = \alpha$ 、 $\cos \alpha = 1$ 、 $\tan \alpha = \alpha$ とおくことができる($\alpha = 1^\circ$ のときの最大誤差は $(1 - \cos \alpha) / \cos \alpha = 1.52 \times 10^{-4}$ である)。したがって、これより、式(3)は

$$\alpha = (\delta_1 - \delta_2) / (y_2 - y_1) \quad (4-1)$$

$$v = (\delta_3 - x_3) \alpha + \delta_3 + y_2 \alpha^2 \quad (4-2)$$

$$u = \delta_1 + (y_1 - v) \alpha \quad (4-3)$$

となる。

2. 5 繰り返しせん断耐力の載荷方法

本実験では、2 体の試験体で片振り単調載荷、残りの全ての試験体で正負に繰り返しせん断力を裁荷し変位制御、および変位振幅漸増で、実験を行った。曲げ破壊を意図した全ての試験体では、水平ジャッキが伸びる方向から載荷し、部材端相対回転角 $R (= \delta / h)$ で最大 5.0% まで、 $R = 0.5\%$ の間隔で載荷した。軸力を導入した試験体では、軸力が保持できなくなった時点で、 $R = 5.0\%$ 前でも実験を終了した。なお、全試験体で、 $R = 0.5\%$ 以上の同一変位振幅で 2 回の繰り返しを行い、その変位振幅における履歴ループの定常性を調べた。また、繰り返し回数は $n/2$ の形で表現し、せん断力を

作用させる水平ジャッキが伸びる方向では、 n は奇数を、逆にこのジャッキが縮む方向では n は偶数を取るようにした。

3. 履歴曲線

試験体のうち、繰り返し載荷をして、部材長さが 600mm のもの 12 体について、荷重変形曲線を図-7(a) ~ (l) に示す。図-7 において、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 を表す。また、各試験体の最終破壊状況を、図-7 の図中に示す。

4. おわりに

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。

はじめに、実験概要および実験方法を示した。軸力用ジャッキによる $P - \Delta$ 効果の補正方法と、計測変位と部材変位の関係を述べた。これに基づき、試験体の荷重変形関係を示した。

謝辞 本研究は、平成 11 年度～平成 15 年度私立大学学術研究高度化推進事業の援助のもとで行われました。また、本研究は、福山大学工学部における卒業研究の一環として行われた成果をまとめたものです。卒業生の多田将人君、一色信吾君、尾西龍介君に感謝いたします。さらに、本実験で使用したステンレス棒鋼は大同特殊鋼(株)川崎工場技術部より、各種資料を(社)ステンレス構造建築協会より提供していただきました。ここに、感謝の意を表します。

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り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] ステンレス建築構造設計基準作成委員会編: ステンレス建築構造設計基準・同解説[第 2 版], 技報堂出版, 2001

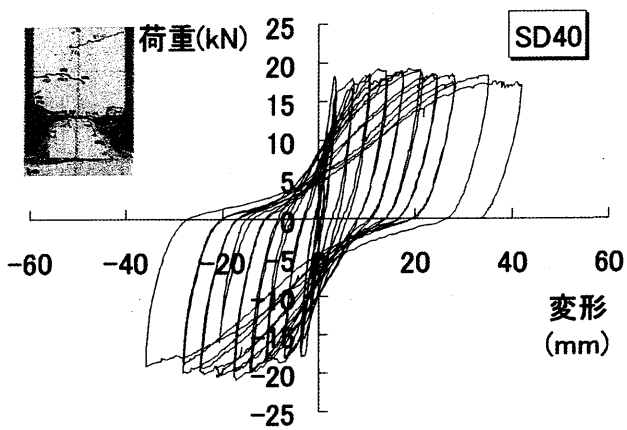


図-7(a) 荷重変形曲線 (SD2C-600-00)

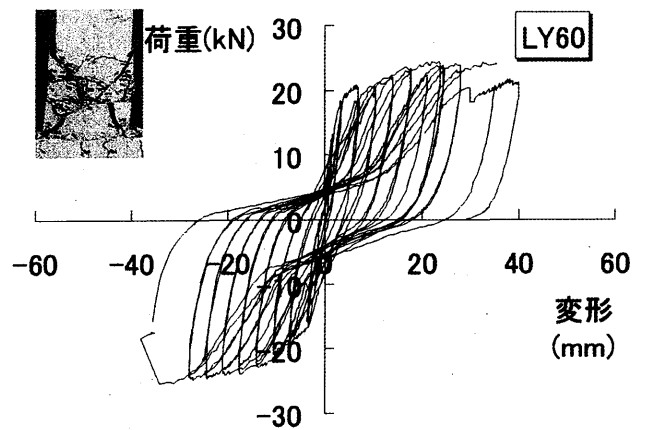


図-7(d) 荷重変形曲線 (FL3C-600-00)

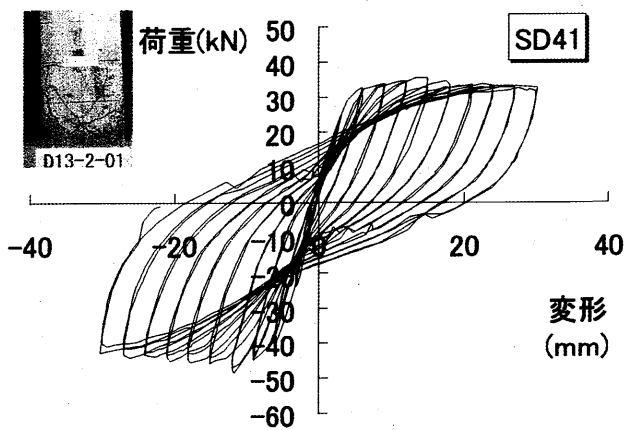


図-7(b) 荷重変形曲線 (SD2C-600-01)

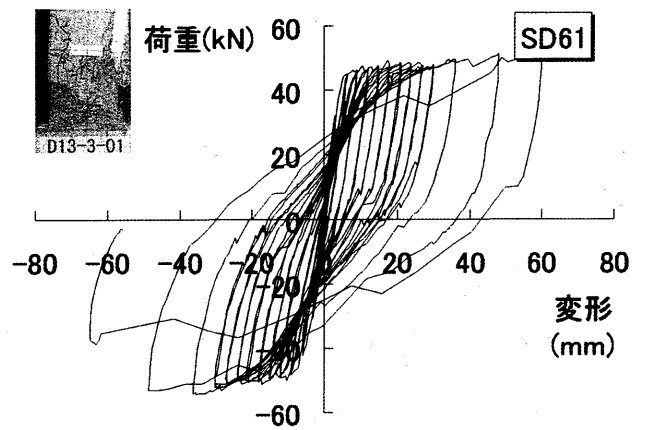


図-7(e) 荷重変形曲線 (SD3C-600-01)

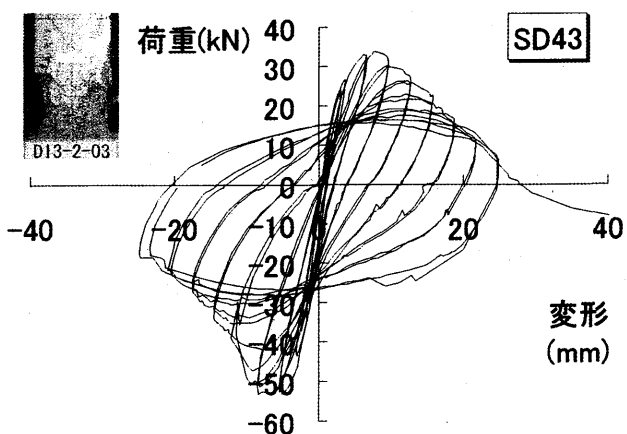


図-7(c) 荷重変形曲線 (SD2C-600-03)

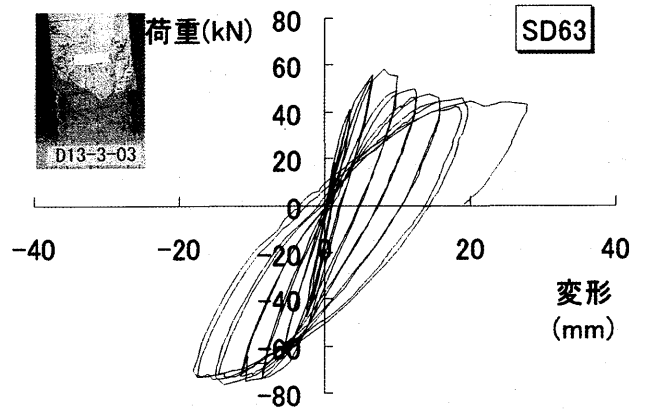


図-7(f) 荷重変形曲線 (SD3C-600-03)

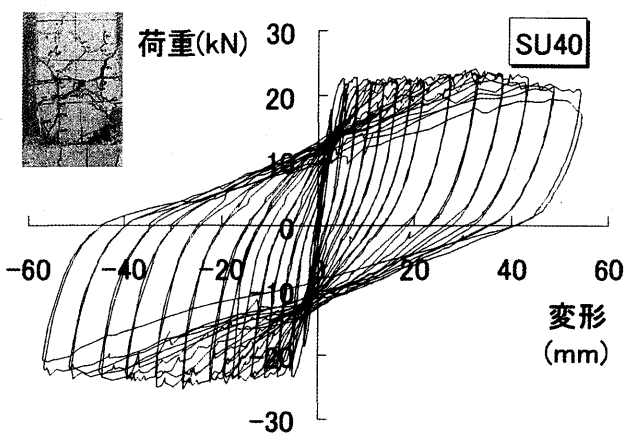


図-7(g) 荷重変形曲線 (ST2C-600-00)

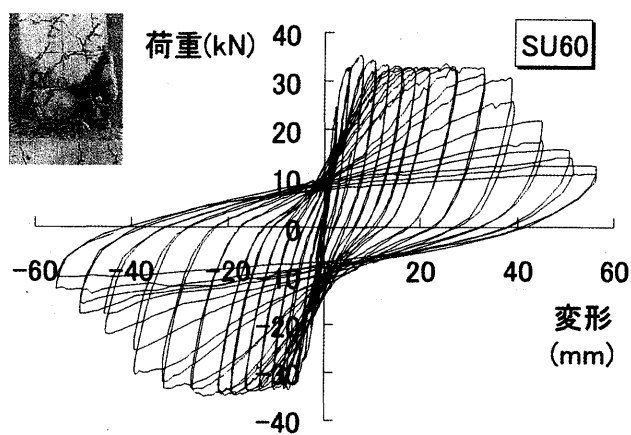


図-7(j) 荷重変形曲線 (ST3C-600-00)

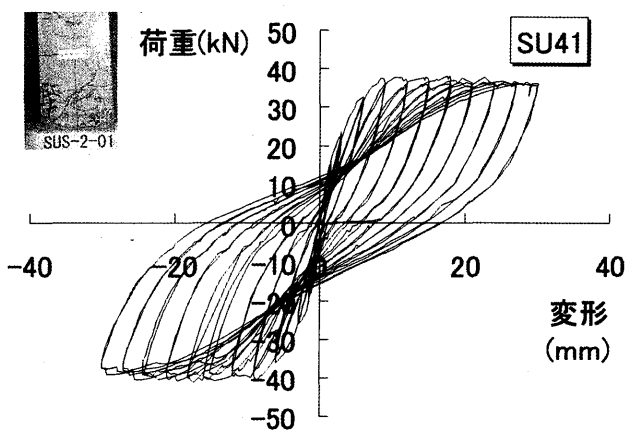


図-7(h) 荷重変形曲線 (ST2C-600-01)

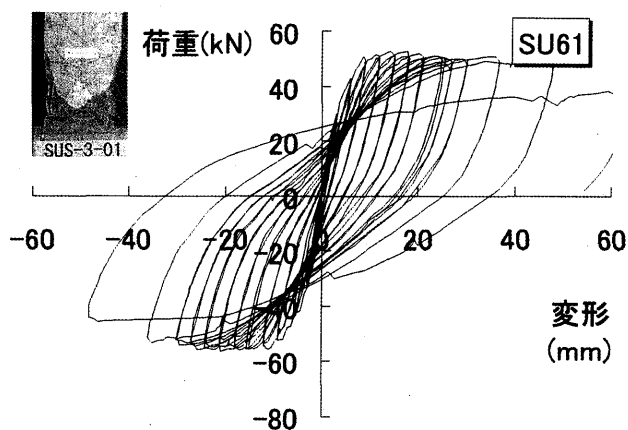


図-7(k) 荷重変形曲線 (ST3C-600-01)

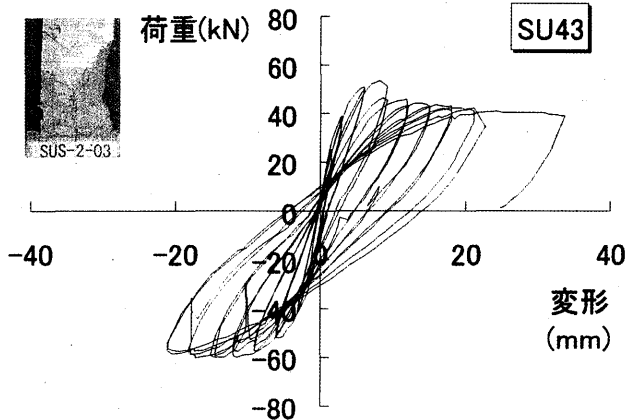


図-7(i) 荷重変形曲線 (ST2C-600-03)

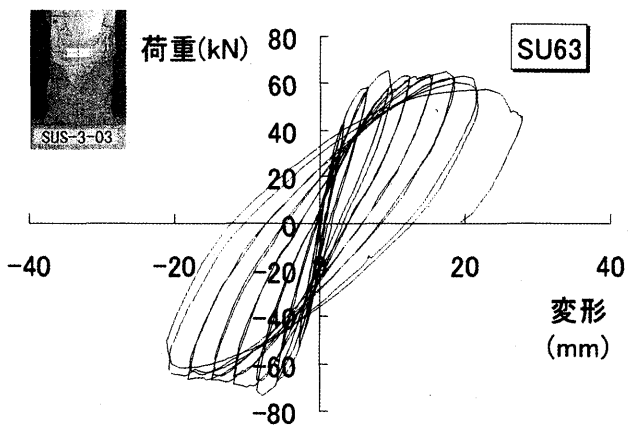


図-7(l) 荷重変形曲線 (ST3C-600-03)