

# 台形ラチス鋼を用いた SRC 柱の曲げせん断性状に関する実験的研究(その1)

— 実験報告 —

岡田 宏 武田 寿一  
木村 耕三

## Experimental Study on Behavior under Bending and Shear Force of Steel Reinforced Columns Using Trapezoidal Lattice Steel (Part 1)

—Results of Experiments—

Hiroshi Okada Toshikazu Takeda  
Kohzoh Kimura

### Abstract

This paper describes an experimental study on steel reinforced concrete columns using steel members with cross sections consisting of trapezoidal lattice steel (tentative name: LA-2). To observe elasto-plastic behavior, limit of strength, and contribution to prevention of shear bond fracture of composite reinforced concrete and steel columns, two types (shear-yielding type and bending-yielding type) of specimens are tested under constant axial force and cyclic combined stresses of bending and shear. As a result, the trapezoidal lattice steel members show good performance, not causing local buckling or tearing at welded joints, within a 0.03 radian range of relative displacement, and demonstrate the effect of preventing shear bond fracture in concrete. The hysteresis loops of specimens are of stable spindle form.

### 概 要

本研究は SRC 構造の改良, 経済性の向上を目的とする研究の一端として, 台形ラチス鋼 (ウェブに台形状のラチスをもつ一種の異型ハニカム鋼: 仮称 LA-2) を用いた十字型断面鋼を作り, これを SRC 柱に使用した場合の, 実用性の検討に関するものであり, 台形ラチス鋼の弾塑性挙動, 耐力およびせん断付着破壊の防止効果の確認を意図している。供試体としては, せん断降伏型, 曲げ降伏型の2種, 計5体を製作して, 一定軸力と繰返し曲げ, せん断力を加える実験を行なった。

結果として, 台形ラチス鋼は, 柱部材角  $R = \pm 0.03 \text{rad}$  の変形範囲では座屈や溶接部の破断を起さず, かつコンクリート部分のせん断付着破壊の防止効果を示した。また全体の履歴性状は, エネルギー吸収の大きい, ほうすい型を示した。

### 1. 序

現在使用されている鉄骨鉄筋コンクリート (以下, SRC と略記) 構造計算規準<sup>1)</sup>の中での, 旧規準との著しい相違点は, 鉄骨とコンクリートの付着を認めないことと, コンクリート部分に関するせん断付着耐力の検討を要することである。しかし, これらの新しい規定の背景としての, SRC 柱の曲げせん断実験<sup>2)</sup>の多くは, 一方向鉄骨を用いた場合のものであり, 現実に多用されている十字型鉄骨を用いた SRC 柱の場合にそのまま適用することについては, 疑問がある上, 未知の要素も多いと思

われる。そこで, これらの疑問点を解明しながら鉄骨とコンクリートの一体化と, せん断付着耐力・性状の向上をはかり, 同時に経済性に豊む SRC 柱の可能性の追求を意図し, そのための一手法として, ウェブに開口部をもつ台形ラチス鋼 (仮称: LA-2) を選定し, これを十字型断面鋼とし

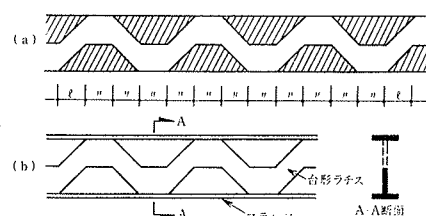
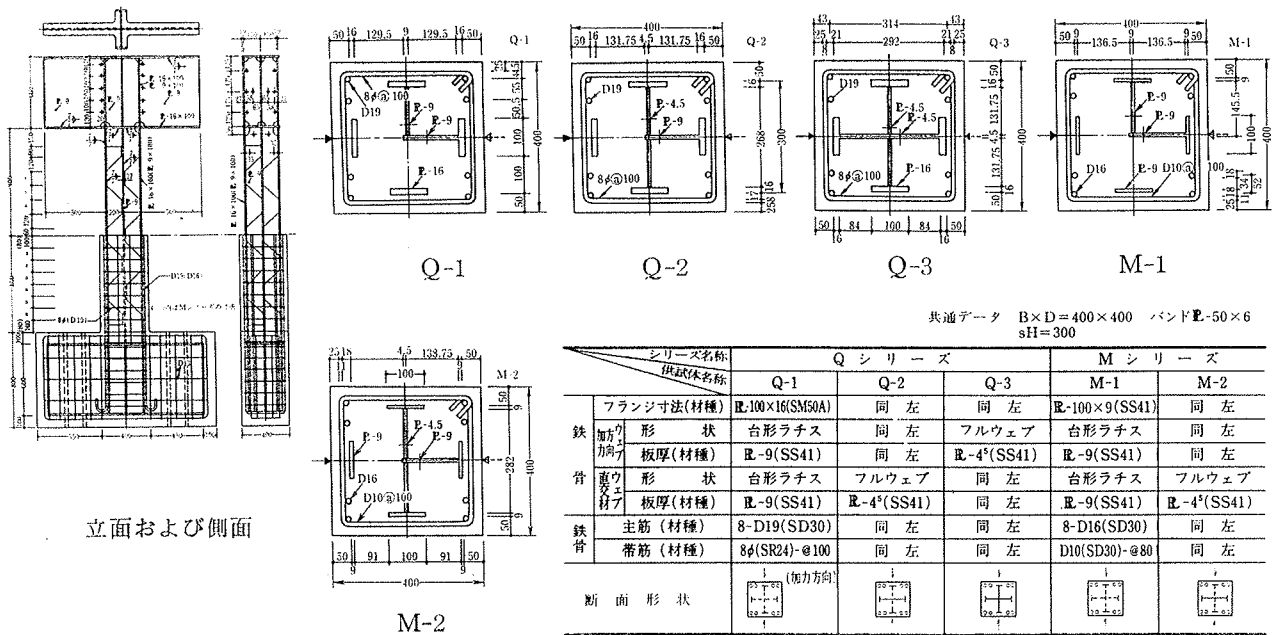


図-1 台形ラチス鋼(LA-2)の製作方法概略



立面および側面

図-2 供試体の形状寸法

シリーズ名称 供試体名称	Q シリーズ			M シリーズ	
	Q-1	Q-2	Q-3	M-1	M-2
フランジ寸法(材種)	R-100x16(SM50A)	同左	同左	R-100x9(SS41)	同左
加力方向	台形ラチス	同左	フルウェブ	台形ラチス	同左
板厚(材種)	R-9(SS41)	同左	R-4 <sup>5</sup> (SS41)	R-9(SS41)	同左
ウェブ形状	台形ラチス	フルウェブ	同左	台形ラチス	フルウェブ
板厚(材種)	R-9(SS41)	R-4 <sup>5</sup> (SS41)	同左	R-9(SS41)	R-4 <sup>5</sup> (SS41)
鉄骨主筋(材種)	8-D19(SD30)	同左	同左	8-D16(SD30)	同左
鉄骨帯筋(材種)	8φ(SR24)-@100	同左	同左	D10(SD30)-@80	同左
断面形状					

表-1 供試体の断面構成

鉄骨			鉄筋			コンクリート		
	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (t/cm <sup>2</sup> )		$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (t/cm <sup>2</sup> )	$F_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
R-4.5(L)	2.77	4.91	8φ	3.87	4.78	Q-1	334.6	20.8
R-4.5(C)	2.77	4.88	D10	3.17	4.63	Q-2	293.0	21.3
R-6(L)	3.23	5.01	D16	3.72	5.82	Q-3	352.4	24.0
R-9(L)	3.02	4.63	D19	3.92	5.86	M-1	342.6	25.8
R-9(C)	3.03	4.61				M-2	346.7	26.6
R-16(L)	3.77	5.22						

L: 圧延方向 C: 直交方向

表-2 使用材料の機械的性質

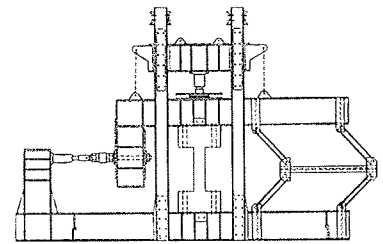


図-3 載荷装置

て組み立てたものを、SRC 柱供試体に使用し、一定軸力と繰返し曲げせん断力を加える実験を行ない、併せて、台形ラチス鋼自体の弾塑性挙動および耐力レベルを調べることにした。台形ラチス鋼の製作方法は、鋼板を波型に切断し、これをウェブとしてフランジ鋼板と溶接の上、成型する(図-1 参照)。

## 2. 供試体

供試体の形状寸法は図-2、表-1 に示すように実用の1/2モデルを想定し、柱断面を40 cm 角、せん断スパン(h/2D)を2.0として供試体の概略の寸法を決めた。

供試体は、設計上でせん断降伏耐力が曲げ降伏耐力より低いもの(せん断降伏先行型、Q シリーズ)3 体と、曲げ降伏耐力がせん断降伏耐力より低いもの(曲げ降伏先行型、M シリーズ)2 体の計5 体である。さらに各シリーズの供試体における違いは、鉄骨ウェブの形状にあり、Q-3 のウェブが両方向ともフルウェブであるほかは全て加力方向のウェブは台形ラチスである。Q-1、M-1 は直交方向のウェブも台形ラチスで、Q-2、M-2 は直交

方向のウェブはフルウェブとし、この両者から直交方向のウェブの形状によるせん断付着破壊の性状を比較し、さらに Q-2 と Q-3 から加力方向鉄骨の違いによる性状の違いの把握を目的とした。

表-2 に使用材料の機械的性質を示す。コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用い、設計強度  $F_c$  を  $210 \text{ kg/cm}^2$ 、スランプ 18 cm、空気量 4%、水セメント比 51% で設計した。

## 3. 実験方法

実験は図-3 に示す建研式短柱載荷装置を用い、一定軸力のもとでの水平繰返し載荷実験とした。水平変形は、柱中央部より上下の変形をそれぞれマグネスケールを用

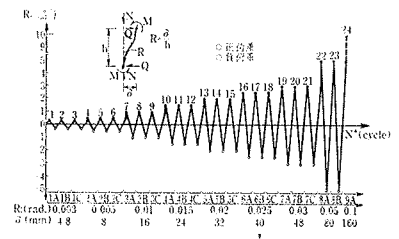


図-4 載荷方式

いて測定し、両者の和を水平変形量  $\delta$  として、部材角  $R = \delta/h$  を求めた。載荷方式は図-4 に示す方式であり、最終  $R = 0.1 \text{ rad.}$  まで載荷した。ひずみ測定には主として単軸のひずみゲージを使用し、台形ラチス鋼の溶接部付近に関してはロゼットゲージを使用した。なお柱軸力は、累加降伏軸力の20%を定軸力として油圧式ジャッキにより加え、水平荷重の各荷重ステップで微調整を行なった。

#### 4. 実験結果

##### 4.1. 実験経過

図-5 に各供試体の部材角  $R$  が  $0.003 \text{ rad.}$ ,  $0.01 \text{ rad.}$ ,  $0.02 \text{ rad.}$ ,  $0.03 \text{ rad.}$  の時のひびわれ発生状況を示す。

Q, M両シリーズを通して直交方向の鉄骨ウェブが台形ラチスの場合、せん断初ひびわれ(斜張力ないし、せん断付着)は部材角  $R = 0.005 \text{ rad.}$  で発生し、直交方向鉄骨がフルウェブの場合、部材角  $R = 0.003 \text{ rad.}$  で発生した。Q-1 では荷重の増加と共に斜めひびわれが成長し、隅角部主筋に沿った付着割裂が生じ、このひびわれの進展とともに耐力が低下した。Q-2, Q-3 では、直交方向鉄骨フランジのかぶり部分でのひびわれが大きく成長し、さらに隅角部主筋に沿った付着割裂も生じて耐力が低下した。M-1 は、直交方向鉄骨フランジのかぶり部分にひびわれが生じるが、そのひびわれはあまり進展せず、材端部に曲げひびわ

れが集中し、ここにヒンジができて耐力が決まった。M-2 では初めのうちは M-1 と同じ様にひびわれが生じるが、直交方向鉄骨フランジのかぶり位置でのひびわれは、M-1 と異なり、荷重の増加とともにひろがっている。最大耐力は M-1 と同様に両端部にヒンジができて決まっている。

##### 4.2. 最終破壊状況

各供試体の最終破壊時(部材角  $0.1 \text{ rad.}$  終了時)の外観の状況は写真-1 に示す通りである。M-1 以外では表面のコンクリートはほとんどはく落し、M-1 は柱頭柱脚部のコンクリートだけが圧壊している。

コンクリート内部の状態をみると、Qシリーズでは、供試体中央部分のバンドプレートがフランジとの溶接部で破断したものがかなりあるほか、せん断補強筋のわん曲、フックのゆるみを生じていた。コンクリートと鉄骨とは、Q-3 以外は加力方向フランジの内側で肌別れを起していた。また台形ラチスは、供試体中央部分で、フランジとの溶接部の破断を起していた。Mシリーズでは、主筋および鉄骨フランジが、柱頭、柱脚部で座屈し、近

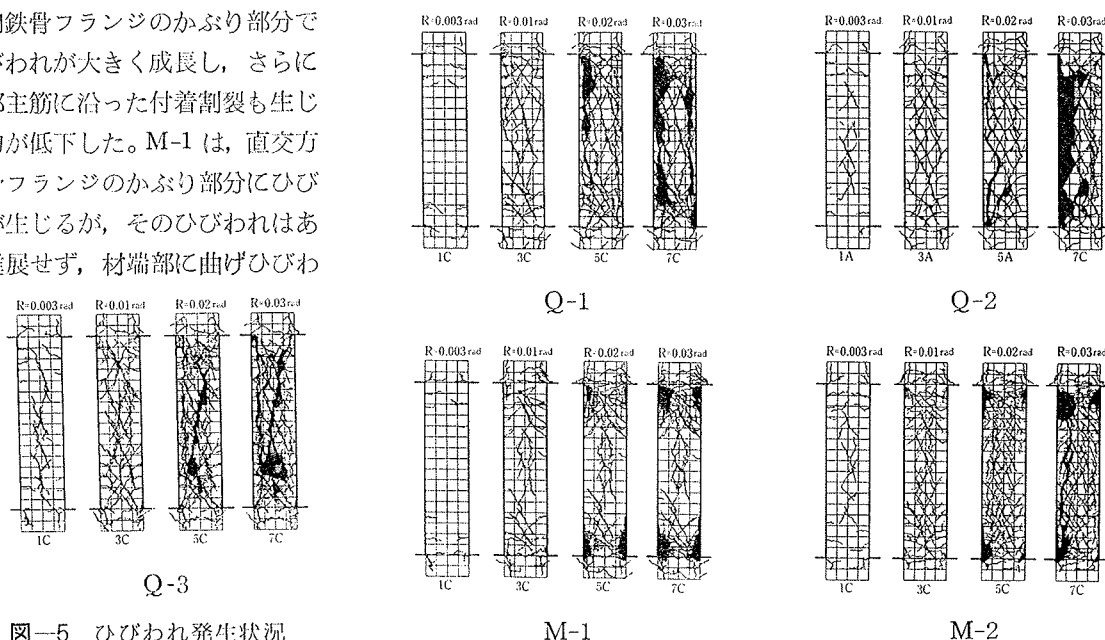


図-5 ひびわれ発生状況

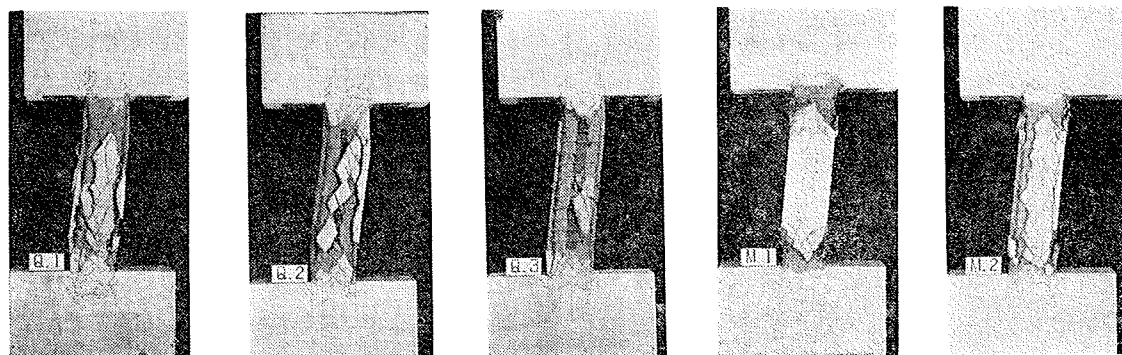


写真-1 最終破壊状況

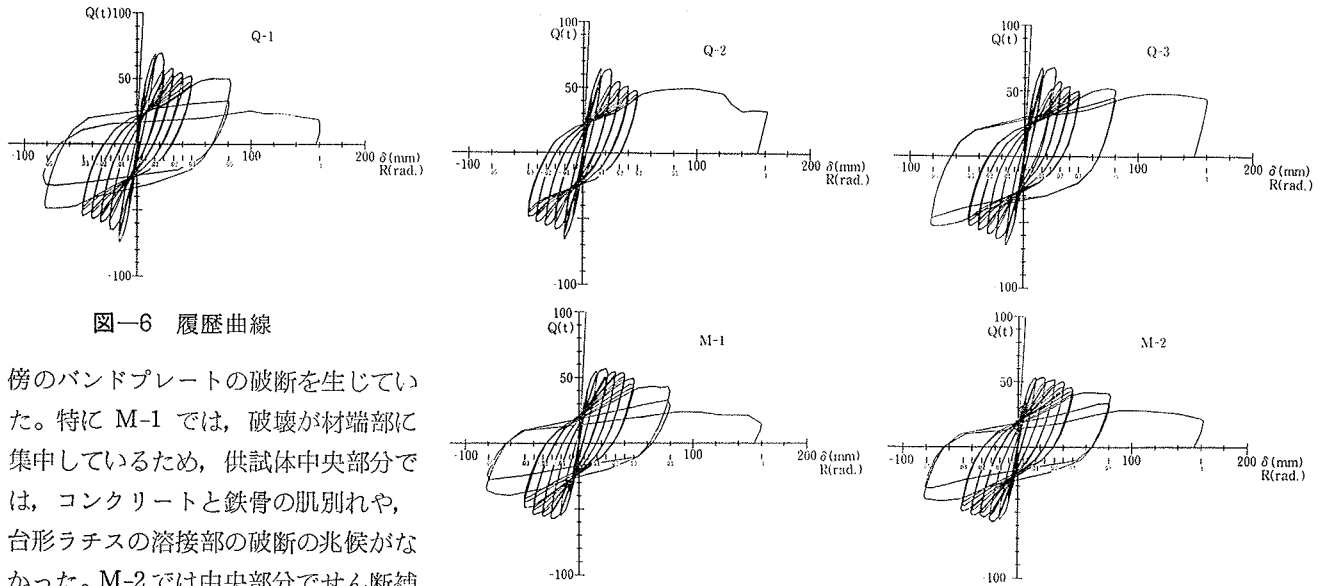


図-6 履歴曲線

傍のバンドプレートの破断を生じていた。特に M-1 では、破壊が材端部に集中しているため、供試体中央部分では、コンクリートと鉄骨の肌別れや、台形ラチスの溶接部の破断の兆候がなかった。M-2 では中央部分でせん断筋強筋が若干わん曲していた。

4.3. 履歴曲線

図-6 に実験によって得られた各供試体の履歴曲線を示す。

Q シリーズの履歴曲線は、部材角  $R = \pm 0.01 \text{ rad.}$  までは剛性低下が少ないが、 $R = +0.015 \text{ rad.}$  に至る過程で変形が急増し、この変位での繰り返し载荷時の耐力がかなり低下する傾向を示す。この時点では、供試体表面の斜めひびわれ、曲げひびわれの増大と、これに伴う隅角部主筋に沿う付着割裂の急成長がみられる。さらに変形を増

大させて  $R = \pm 0.03 \text{ rad.}$  に至るまでは、最大耐力よりやや低い耐力レベルから、徐々に耐力が低下してゆく傾向がみられるが全般的に、エネルギー吸収の大きい、比較的良好な挙動を保持するといえる。次いで  $R = \pm 0.05 \text{ rad.}$  での繰り返し载荷を行なった時点で、Q-1 は大幅に耐力低下をきたすが、この時点で台形ラチスのフランジとの溶接部の破断が生じたと考えられる。これに対して Q-3 は最終载荷  $R = +0.1 \text{ rad.}$  まで耐力が殆んど低下していない。Q-2 は  $R = \pm 0.05 \text{ rad.}$  での繰り返し载荷を略しているので同列には論じられないが、 $R = +0.085 \text{ rad.}$  あたりで台形ラチスのフランジとの溶接部が破断したものとみられる。なお最大耐力は  $R = \pm 0.01 \sim +0.015 \text{ rad.}$  で得られた。

M シリーズの履歴に関しては、最大耐力に到達するのは、部材角  $R = \pm 0.015 \text{ rad.}$  の時であり、この時点に至るまでの挙動は、Q シリーズと殆んど変わらない。しかし最大耐力時の繰り返し载荷での耐力低下が少ないこと、最大耐力以後の履歴において、耐力低下が徐々に進むこ

	(t) 柱軸力	曲げひびわれ 荷重 $Q_c(t)$		せん断ひびわれ 荷重 $Q_{cr}(t)$		曲げ降伏終局 <sup>*1</sup> 荷重計算値 (t)		せん断耐力計算値 (t)				実験時最大荷重 (t) $EXP Q_{MAX}$ (サイクル)
		計算値 <sup>*6</sup>	実験値	計算値 <sup>*7</sup>	実験値	$M_{DYN}$	$M_{DYN}$	$sQ_A^{*2}$	$sQ_A^{*3}$	$sQ_A^{*4}$	$Q_A^{*5}$	
Q-1	149	19.8	+16.0 -14.6	35.4	+46.0 -50.0	65.3	68.6	10.3	33.9	58.1	44.2	+70.0(4A <sup>+</sup> ) -74.5(3A <sup>-</sup> )
Q-2	145	19.0	+10.1 -12.0	33.9	+30.0 -32.0	63.4	65.8	10.3	32.3	35.0	42.6	+65.1(3A <sup>+</sup> ) -65.8(3A <sup>-</sup> )
Q-3	165	21.2	+12.0 -12.1	34.2	+34.0 -32.1	65.6	68.0	18.5	35.6	33.0	51.5	+68.0(3A <sup>+</sup> ) -68.0(3A <sup>-</sup> )
M-1	122	16.5	+ 8.5 - 9.6	30.2	+40.0 -38.0	46.3	51.0	10.9	34.6	66.5	45.5	+57.0(4A <sup>+</sup> ) -57.5(4A <sup>-</sup> )
M-2	130	17.2	+12.0 -10.0	30.9	+31.7 -30.0	47.3	51.5	10.9	35.3	44.6	46.2	+52.4(4A <sup>+</sup> ) -57.6(4A <sup>-</sup> )

\*1 全断面RC換算(梅村式)、\*2 鉄骨部分のせん断降伏耐力、\*3 RC部分の終局せん断耐力(修正荒川式)  
 \*4 RC部分の最大せん断付着破壊耐力(若林・南式)<sup>2)</sup>、\*5  $Q_A^5 = sQ_A + \text{MIN}(sQ_A^1, sQ_A^2)$   
 \*6  $Q_c = (1.8 \cdot F_c \cdot Z_c + ND/6)/h/2$ 、\*7  $Q_{cr} = b_e j \left( \frac{\alpha k_c (500 + F_c)}{M/Q_c + 1.7} + 0.1 \times \frac{N}{A_c} \right)$ 、 $\alpha = 0.085$ ,  $k_c = 0.72$ 。  
 $b_e = b + (n-1)A_w/jk_w$

表-3 供試体の諸耐力・計算値と実験値

と、等についてQシリーズと相異なる特徴を示している。この原因については、Mシリーズが材端ヒンジ破壊型であり、しかも破壊が徐々に進行してゆくためとみられる。 $R = \pm 0.03 \text{ rad.}$  までの履歴性状は、安定した、良好なものであるが、 $R = \pm 0.05 \text{ rad.}$  の繰り返し载荷の時点でやはり耐力低下が伺われる。この時点で材端部の加力方向鉄骨フランジの座屈が進行したためとみられる。ただし、M-1 では直交方向鉄骨フランジも座屈しているのに対し、M-2 では柱全長にわたり隅角部主筋に沿う付着割裂が生じるなど、供試体中央部のコンクリート部分も破壊する傾向がみられた。

4.4. 耐力

表-3 に各供試体の諸耐力の計算値および実験値を示す。曲げひびわれ荷重は計算値より実験値が若干低い傾向が共通している。またせん断ひびわれ荷重は、直交鉄骨がフルウェブである Q-2, Q-3, M-2 において、計算値と実験値とが近似しているが、台形ラチスである Q-1, M-1 では実験値が大きくなっている。最大耐力に関し

ては、せん断耐力計算値がいずれも実験値より低く、むしろ曲げ終局耐力計算値が実状に近い。この点に関しては、台形ラチス鋼による十字型断面鋼と、これを内蔵するコンクリート部分の応力負担機構の見直しの上、再検討する予定である。

#### 4.5. ひずみ分布

柱脚部の台形ラチスに貼りつけたロゼットゲージより求めた、設計耐力および実験における最大耐力時の主ひずみ分布のうち Q-1, Q-2 および M-1 の3体に関し図-7に示す。

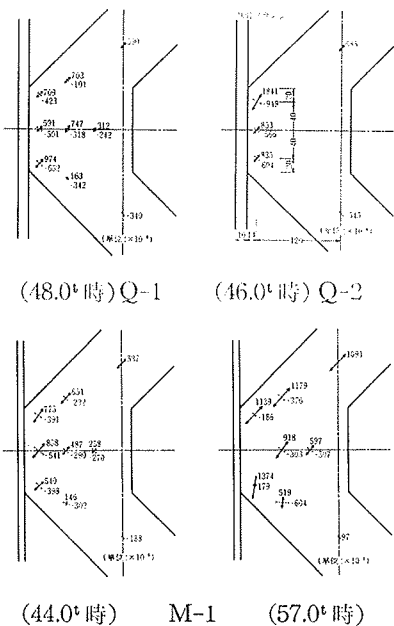


図-7 主ひずみ分布

せん断降伏先行型の最大荷重時には、台形ラチスの頂部は完全に降伏状態に入っており、さらにラチス中心付近迄降伏域が拡大している。曲げ降伏先行型(M-1)では降伏域が台形ラチスの頂部(フランジとの溶接部周辺)付近に限られている。各供試体ともラチス斜材の軸方向ひずみは荷重が大きくなるほど引張側斜材の軸方向ひずみは増大するが、圧縮側斜材のひずみはコンクリートの影響により増大しない。図-8には、Q-1, M-1 の下端部台形ラチス斜材軸方向ひずみと荷重との関係を示す。

台形ラチスの引張および圧縮斜材の軸方向ひずみから斜材の軸力を求め、その両斜材の鉛直方向成分の和を台形ラチスと鉄骨フランジが接している断面積で除して台形ラ

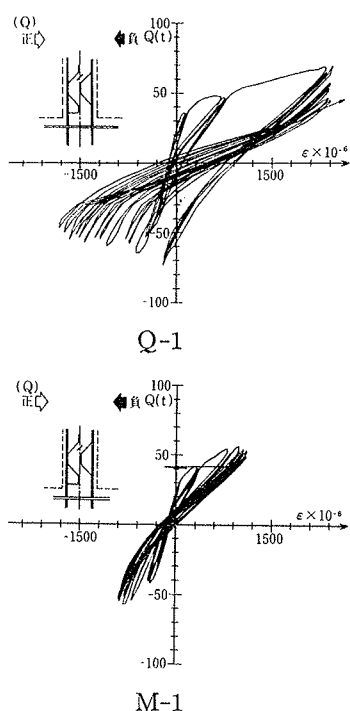


図-8 荷重-ひずみ曲線

チス頂部での平均せん断応力度を求めると、最大荷重時において、Q-1では $\tau=1.90 \text{ t/cm}^2$ 、M-1では $\tau=1.60 \text{ t/cm}^2$ となっている。なお素材試験による台形ラチス部分のせん断降伏応力度は $\tau_{sy}=1.75 \text{ t/cm}^2$ である。

#### 5. まとめ

当社で開発した台形ラチス鋼を用いた十字型断面鉄骨を内蔵する SRC 柱の一定軸力および繰返し曲げせん断力を加える実験を行ない、次のことが判った。

台形ラチス鋼を用いた SRC 柱は、曲げ降伏先行型(Qシリーズ)でも、耐力的に優れるばかりでなく、 $R=\pm 0.03 \text{ rad.}$ の変形の範囲で、エネルギー吸収の多い良好な履歴性状を示した。

台形ラチス鋼は、上記の変形の範囲内では、座屈や破断を起さず全体変形に追随したが、 $R=\pm 0.05 \text{ rad.}$ に至り、加力方向鉄骨フランジの座屈の進行や、フランジと台形ラチスの頂部との溶接部が破断して、柱全体の耐力低下を起している。

台形ラチス部分については、Qシリーズでは最大荷重時には降伏域がラチス頂部から柱中心部付近まで拡がり、Mシリーズでは、ラチス頂部のみ降伏していた。この傾向から、台形ラチス鋼はラチス頂部できまるせん断耐力以上の耐力を負担し得ることが判った。

コンクリート部分のひびわれ性状については、加力方向と直交する台形ラチス鋼の存在が、せん断付着ひびわれ、破壊を防ぐ傾向が示された。

最大耐力については、計算値が実験値を十分に説明していない為、今後さらに検討を進める予定である。

なお、本研究は、設計技術改善委員会 SRC 分科会の示唆、協力のもとに行なわれたものであって、東京本社建築本部設計管理部、木田幸夫部長、本店建築設計第三部、横井元昭次長、東京本社建築本部設計管理部、谷山隆典課長、同設計第三部、海老原武課長、同GT-2、赤崎暢一課長、同設計第三部、田村志郎職員、本店建築設計第三部、渋谷雄三職員、技術研究所構造研究室、吉岡研三主任研究員、高橋泰彦職員の各氏に対し、紙上を借り、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 2) 例えば、若林 実、南 宏一：一定軸力と確定的な繰返し曲げせん断力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する実験的研究、コンクリート工学, vol. 13, No. 3, (March 1975)