

H形鋼を用いた長方形ラーメンの弾塑性安定に 関する実験的研究 (その2)

若林 実, 野中泰二郎, 松井千秋

AN EXPERIMENTAL STUDY OF ELASTO-PLASTIC STABILITY OF STEEL FRAMES WITH WIDE-FLANGE SECTIONS UNDER VERTICAL AND HORIZONTAL LOADING (PART 2)

By *Minoru WAKABAYASHI, Taijiro NONAKA and Chiaki MATSUI*

Abstract

An experimental study is made of the behavior of a single-bay two-story end-fixed frames subjected to vertical and horizontal loads, using mild steel wide-flange sections. The beam length and column height are equal and they are 100cm. The ratio of the column height to the radius of gyration is about 24 and the moment of inertia of the beam is equal to or 0.45 times that of the column. Vertical loads are applied symmetrically to the tops of the columns, being kept constant at about 18% or 35% of the yield load of a column. The maximum horizontal load, applied at the tops of a frame, is found to be nearly 10~15% larger than that predicted by the elastic-perfectly plastic theory which takes account of the axial forces of the columns.

1. 序

近年、我が国においては、構造物の耐震設計理論の発展、および新建材の開発等に伴い、高層建築の建設が可能となっている。しかしながら、高層骨組が地震力、風圧力等の横力を受けるときの性状が完全に把握されているわけではなく、この合理的かつ安全な設計を行うためには、特に高層建築の耐震性に関する充分なる実験資料の必要性が痛感されている。

従来の低層の構造物(3~10層程度)と比較して、高層建築の大きな特徴は、①層数の増加に伴い、柱の軸力が大きくなること、②建物の耐震性を確保する意味から、自重が小さく、かつ靱性に富んだ骨組とするために、構造材には主として、鋼材、特に高張力鋼材が使用されること、の2点であると考えられる。したがって、部材断面は他の構造(鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造)のものに比べ、小さくなり、構造部材は細長いものとなる。高軸力を受けるこのような部材から成る骨組に、静的な横力が作用すると、柱に存在する軸力と骨組の水平変位によって、転倒モーメントが働き、ある変位に達すると、骨組は不安定な状態となり、崩壊にいたる。また、このような骨組に地動のような動的な横力が作用する場合も、骨組の振動振幅は発散し不安定となることが知られている。

このような骨組全体の不安定現象は特に高層建築の耐震設計においては考慮されねばならない。この問題に関して、すでに、長方形断面を用いた小型鉄骨門形ラーメン、H形断面を用いた中型鉄骨門形ラーメンの柱頭に一定鉛直荷重と、柱、はり接合部に静的単調水平荷重を加える実験を行なって、その性状を調べ発表した^{1), 2)}。1), 2)では、高層骨組の下層部分においては、特に軸力が大きく、骨組全体の性状におよぼす影

響は大きいと考え、高層骨組の代表的な構造部分として、最も簡単な門形ラーメンを実験モデルとして選んだものである。しかし高層建築の外柱では、建物の自重に相当する鉛直荷重に、水平力によって生じるはりのせん断力が付加し、柱の軸力は各層で変化する。この変化は、骨組が高層になるほど大きくなり、骨組の変形状態に影響を及ぼすと考えられる。

ここでは、高層骨組に横力が作用するときの性状、特に水平耐力と変形能力、および上述の軸力変化による影響を調べるため、実験モデルを、より実際の鉄骨高層建築の条件に近いものとして、H形断面を用いた中型鉄骨2層1スパンラーメンを選び、これに、一定鉛直荷重と静的単調水平荷重を加える実験を行なったものについて報告する。

2. 実験計画

2.1. 試験体

試験体はSS41のH形鋼を用いて製作した全溶接構造の柱脚固定2層1スパン立体ラーメンである。実験に用いた試験体は合計4個で、柱断面には各試験体とも、 $H-100 \times 100 \times 6 \times 8$ を用い、はり断面には、 $H-100 \times 50 \times 5 \times 7$ (試験体番号, No.1, 2), $H-100 \times 100 \times 6 \times 8$ (No.3, 4) の2種類を用いた。各試験体の階高およびスパンは共に100cmであり、はりの剛比ならびに、柱に対するはりの断面係数の比は、No.1, 2ではほぼ0.45, No.3, 4では1.00である。階高 h と柱断面の面内曲げ変形に対する主軸に関する回転半径 i との比、 h/i は、ほぼ24で実際の骨組に近い数値を選んでいる。試験体は前報²⁾の門形ラーメンのモデルと同様、横座屈、面外座屈を避けるため、2個の同一な平面ラーメンをH形鋼を用いて、柱、はり接合部、および柱、はり部材中央部において溶接接合を行なっている。また、はり端部、柱脚部においては、フランジに厚さ6mmのカバープレート、接合部パネルには厚さ12mmのスチフナーをそれぞれ溶接し、骨組全体の崩壊に先立つ接合部の破壊を防止している。なおこの試験体に用いられた形鋼の圧延、および溶接により生じた残留応力を除去するための熱処理は行っていない。Fig. 1に試験体の形状、寸法を、Table 1に部材断面の実測寸法、および断面性能を示す。

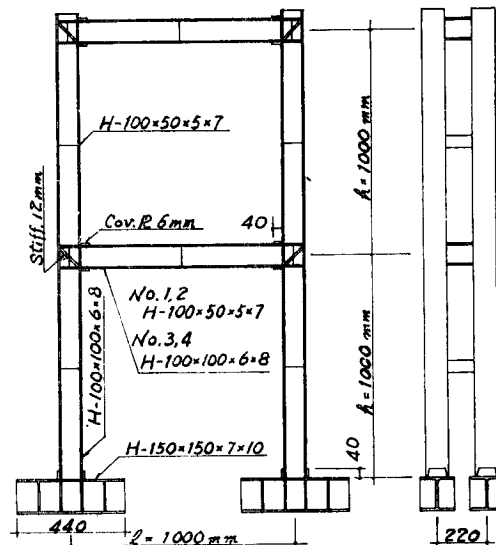


Fig. 1 Test Specimen

Table 1 Dimensions of test specimens

| | | Nominal size | No. 1 | No. 2 | Nominal size | No. 3 | No. 4 |
|-------------------------------------|---------------------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| Column height | $h(\text{cm})$ | 100.00 | 99.87 | 99.86 | 100.00 | 100.30 | 99.87 |
| Beam length | $l \text{ ''}$ | 100.00 | 98.75 | 99.64 | 100.00 | 99.63 | 99.75 |
| Width of flange | $b_o \text{ ''}$ | 10.000 | 10.026 | 9.987 | 10.000 | 10.021 | 9.981 |
| Depth of section | $D_o \text{ ''}$ | 10.000 | 10.103 | 10.133 | 10.000 | 10.098 | 10.114 |
| Thickness of flange | $t_{fc} \text{ ''}$ | 0.800 | 0.779 | 0.812 | 0.800 | 0.803 | 0.812 |
| Thickness of web | $t_{wc} \text{ ''}$ | 0.600 | 0.584 | 0.592 | 0.600 | 0.593 | 0.609 |
| | $b_R \text{ ''}$ | 5.000 | 5.001 | 5.002 | 10.000 | 9.990 | 10.020 |
| | $D_R \text{ ''}$ | 10.000 | 10.140 | 10.133 | 10.000 | 10.120 | 10.128 |
| | $t_{fR} \text{ ''}$ | 0.700 | 0.645 | 0.646 | 0.800 | 0.814 | 0.807 |
| | $t_{wR} \text{ ''}$ | 0.500 | 0.420 | 0.419 | 0.600 | 0.591 | 0.597 |
| Area of sections | $A_o(\text{cm}^2)$ | 21.90 | 20.99 | 21.26 | 21.90 | 21.13 | 21.38 |
| | $A_R \text{ ''}$ | 11.85 | 10.17 | 10.07 | 21.90 | 21.28 | 21.32 |
| Moment of inertia | $I_o(\text{cm}^4)$ | 383. | 377.52 | 382.76 | 383. | 378.74 | 382.59 |
| | $I_R \text{ ''}$ | 163. | 169.90 | 169.80 | 383. | 383.58 | 382.75 |
| Section modulus | $Z_o(\text{cm}^3)$ | 76.5 | 74.727 | 75.539 | 76.5 | 75.013 | 75.656 |
| | $Z_R \text{ ''}$ | 37.5 | 33.511 | 33.511 | 76.5 | 75.806 | 75.583 |
| I_o/h | | 3.83 | 3.780 | 3.833 | 3.83 | 3.776 | 3.831 |
| I_R/l | | 1.63 | 1.703 | 1.704 | 3.83 | 3.850 | 3.837 |
| $k = I_R \times h / (I_o \times l)$ | | 0.477 | 0.451 | 0.445 | 1.000 | 1.020 | 1.002 |

Subscripts C : Column
B : Beam

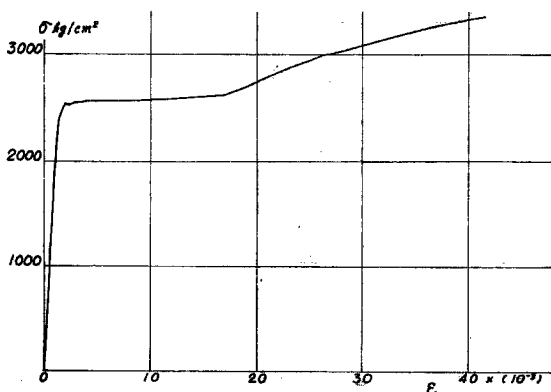


Fig. 2 Stress-Strain Curve

2. 2. 試験体材料の性質

試験体製作に用いたH形鋼(定尺, 6 m)のフランジより, 鋼材1本当たり, 各2個の引張り試験片を製作し, 30トン万能試験機により引張試験を行なった。各試験体使用鋼材についてまとめた結果を Table 2 に示す。試験より得られた典型的な応力-ひずみ曲線(No.1, 柱材に対応)を Fig. 2 に示す。

Table 2 Mechanical properties

| | | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Yield point (t/cm ²) | column | 2.64 | 2.67 | 2.73 | 2.73 |
| | beam | 3.04 | 3.08 | 2.63 | 2.73 |
| Tensile strength (t/cm ²) | column | 4.22 | 4.21 | 4.31 | 4.26 |
| | beam | 4.27 | 4.40 | 4.23 | 4.26 |
| Elongation (%) | column | 28.33 | 28.95 | 28.28 | 28.33 |
| | beam | 20.10 | 20.10 | 28.43 | 28.60 |
| Full plastic moment (t·cm) | column | 224.53 | 230.38 | 233.63 | 235.86 |
| | beam | 118.13 | 119.52 | 227.05 | 235.20 |

2. 3 測 定 法

試験体の1層, 2層柱, はり接合部の中央点の水平変位をダイヤルゲージ(最小目盛 0.01mm)により測定した。また柱, はり接合部中心点より, はり部材は 15cm, 柱部材は 10cm の個所のフランジのひずみをストレインゲージにより測定した。鉛直荷重は能力 100トン長柱試験機により与え, その荷重は試験機の計測装置により測定し, 水平荷重は能力50トン油圧ジャッキにより与え, その荷重は, 50トン用ロードセルにより測定した。

2. 4 加力装置および加力方法

実験は前報²⁾と同じ加力装置(Photo. 1, 2)を用い, 同じ加力方法によって行なった。その概略について記す。試験体および水平加力用フレームを曲げ試験用ビームに 22φ のハイテンションボルト, 各16本

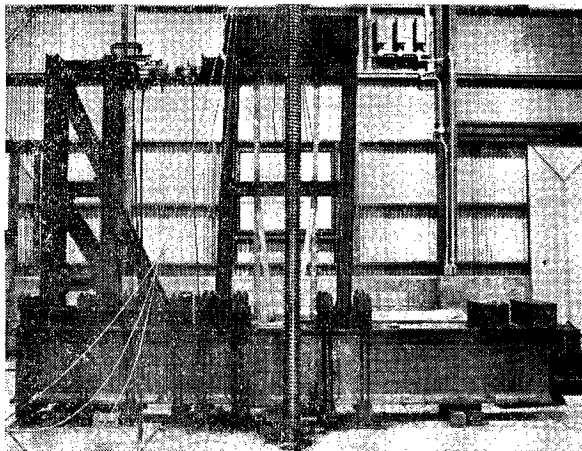


Photo. 1 Experimental apparatus

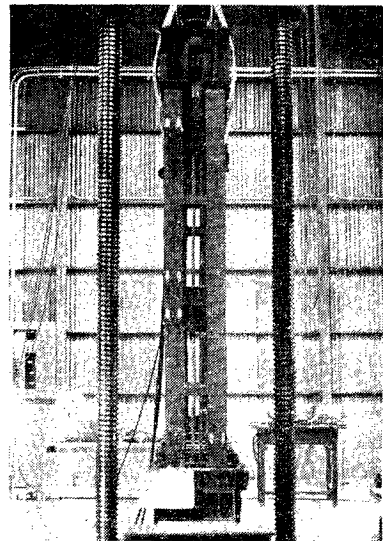


Photo. 2 Experimental apparatus

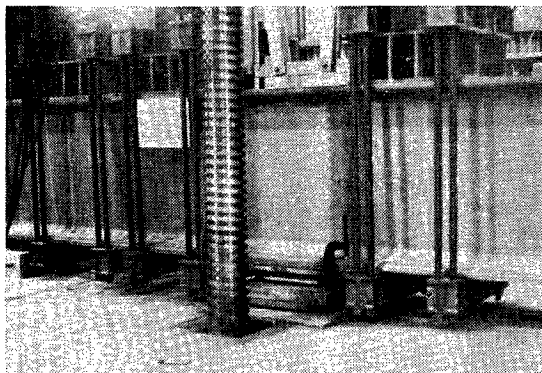


Photo. 3 Fixing of column end



Photo. 4 Vertical loading system

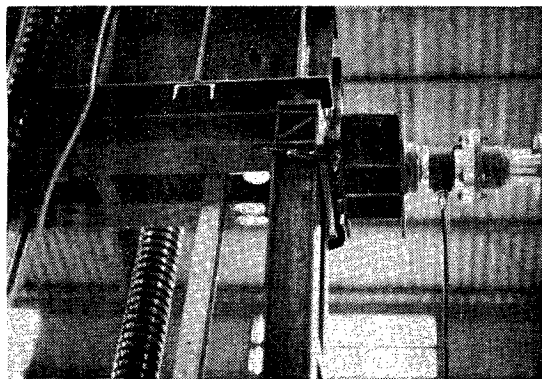


Photo. 5 Horizontal loading system

を用いて固定した (Photo. 3)。鉛直荷重は能力100トン長柱試験機により、試験体第2層の4本の柱の各柱頭へ、単純はり形式 (Photo. 4) により4等分して加えた。水平力は水平加力用フレームに固定した能力50トン油圧ジャッキより第2層の2個所の柱、はり接合部へ、2等分して加えた (Photo. 5)。この実験では試験体柱頭は試験機により移動が拘束されているため、試験体は水平荷重に対応して曲げ試験用ビームと100トン長柱試験機ベットとの間に挿入されたローラーによって、曲げ試験用ビームと共に柱脚部において水平移動を行なう (Photo. 6)。試験体の各柱頭に加えた鉛直荷重 P は、柱の降伏荷重 P_Y を基準として、No. 1, 3では、ほぼ $P=0.18P_Y$ 、No. 2, 4では、ほぼ $P=0.35P_Y$ とした。

2.5 実験経過

実験は、最初各試験体所定の鉛直荷重を柱頭に加え、一定に保持したまま、水平力を単調に増加させ、各水平力の荷重段階で水平変位および部材断面のひずみを測定した。水平加力に対し、試験体の変形は面内のみで進行し、面外への変形は認められなかった。また、水平加力の最終段階にいたるまで、局部的な不都合な変形、および破壊も認められなかった。試験体の崩壊形は、No. 1, 2では第1, 2層はり端部、および柱脚部に変形が集中したものであり、No. 3, 4では第1層柱脚、第2層柱頭、第1層はり端部に変形が集中していた。その変形状態を観察すると、はり材ではカバプレート端部で急激に折れ曲り、柱材柱脚部では、カバプレート端部より柱材の材長中央部に向ってゆるやかに湾曲し、柱頭部では接合部端部で柱脚部における変形より比較的急に折れ曲っていた。鉛直荷重の差による、変形状態の差は顕著ではなかった。試験体の変形状態を Photo. 7に示す。

3. 理論式

柱頭に一定鉛直荷重を受ける2層1スパンラーメンに水平力が加わるときの水平力—水平変位の関係を、ラーメンの最大モーメントを受ける個所から順次塑性モーメントに達し、塑性ヒンジが形成され、崩壊機構

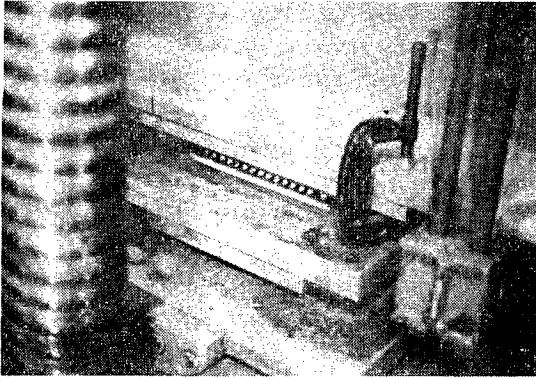


Photo. 6 Rollers

に到るとして、軸力を考慮した撓角法を用いて求める。計算仮定は

1. 部材の曲げモーメント-曲率関係は理想弾塑性とする。
2. 部材において塑性ヒンジの形成個所以外は弾性とする。
3. 塑性条件に対し、軸力と曲げのみを考慮し、せん断力の影響は無視する。
4. 骨組には、崩壊機構に達するまで、局部座屈、横座屈等の不安定現象は現れない。

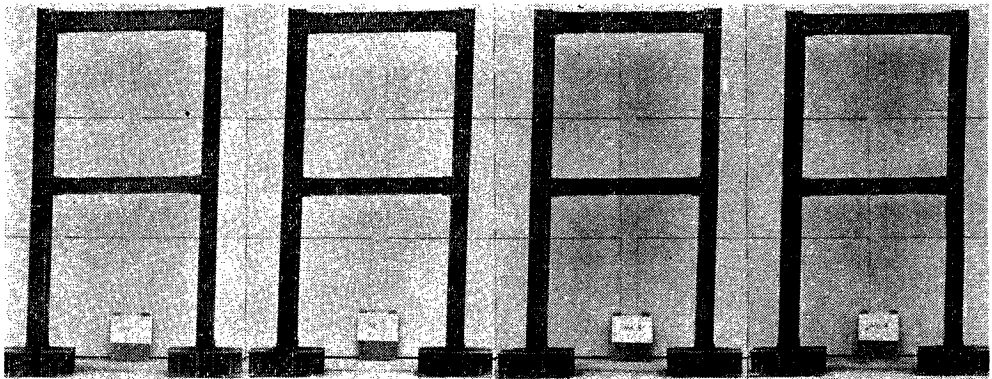


Photo. 7 Test specimens after test

3. 1. 基本式

Fig. 3 に示すような軸力と曲げモーメントを受けて変形し釣合状態にある一様な曲げ剛性 EI を有する部材の軸力を考慮した撓角法基本式は

EI : 曲げ剛性,

θ : 節点回転角,

M : 材端モーメント,

とすると,

l : 部材長,

R : 部材回転角,

Q : 材端せん断力

3. 1. a 両端剛節の場合

$$M_{AR} = \frac{2EI_{AR}}{l_{AB}} (\alpha\theta_A + \beta\theta_B - \gamma R_{AR})$$

$$M_{BA} = \frac{2EI_{AR}}{l_{AB}} (\alpha\theta_B + \beta\theta_A - \gamma R_{AR})$$

$$Q_{AB} = Q_{BA} = \frac{-2EI_{AR}}{l_{AB}^2} (\gamma\theta_A + \gamma\theta_B - \delta R_{AR})$$

.....(1)

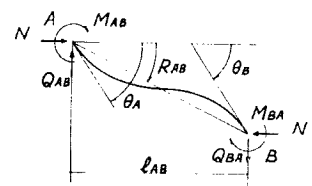


Fig. 3

3. 1. b A端剛節, B端ピンの場合

$$M_{AB} = \frac{2EI_{AB}}{l_{AB}} (\xi\theta_A - \xi R_{AB})$$

$$Q_{AB} = Q_{BA} = \frac{-2EI_{AB}}{l_{AB}^2} (\xi\theta_A - \eta R_{AB})$$

.....(2)

3. 1. c 荷重項（一端剛節，一節ピン部材のピン端に曲げモーメント M_{PN} が付加される）のある場合

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= \frac{2EI_{AB}}{l_{AB}}(\xi\theta_A - \xi R_{AB}) \pm \frac{\beta}{\alpha} M_{PN} \\ Q_{AB} = Q_{BA} &= \frac{-2EI_{AB}}{l_{AB}^2}(\xi\theta_A - \eta R_{AB}) \mp \left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right) \frac{M_{PN}}{l_{AB}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

なお(1)，(2)，(3)式中の各係数は次項で説明する。

3. 2. 基本式の係数

(1)，(2)，(3)式における係数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta', \xi, \eta$ は

$$z = l_{AB} \sqrt{\frac{N}{EI_{AB}}}$$

で定義される z で表わすと， N が圧縮力の場合，

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \cdot \frac{z \sin z - z^2 \cos z}{2(1 - \cos z) - z \sin z}, & \beta &= \frac{1}{2} \cdot \frac{z^2 - z \sin z}{2(1 - \cos z) - z \sin z} \\ \gamma &= \alpha + \beta, & \delta' &= 2\gamma - \frac{z^2}{2}, & \xi &= \frac{1}{2} \cdot \frac{z^2 \sin z}{\sin z - z \cos z} \\ \eta &= \xi - \frac{z^2}{2} \end{aligned}$$

3. 3. 釣合式

試験体に対応する Fig. 4 の骨組を計算の簡単化のため各層はり中央点にピンを仮定して，Fig. 5 の骨組に置換する。骨組が弾性状態から崩壊機構に達するまでの塑性ヒンジの形成順序は，柱，はりの断面係数，曲げ剛性の比，および軸力の大きさに関係する。ここでは，No.1, 2 の骨組に対応する場合についてのみ記す。

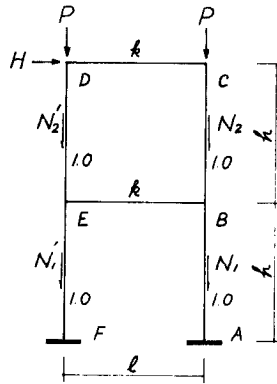


Fig. 4

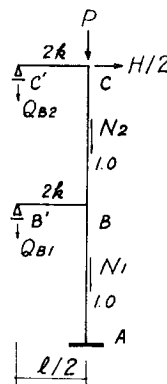


Fig. 5

3. 3. a 弾性状態から第1塑性ヒンジ形成まで

Fig. 5 を参照し，(1)式を用いて，節点BおよびCにおける曲げモーメントの釣合，および各層柱のせん断力と水平力との釣合から，4個の未知数， $\theta_B, \theta_C, R_1, R_2$ ，に対し，次の連立一次方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (\alpha_1 + \alpha_2 + 3k)\theta_B + \beta_2\theta_C - \gamma_1 R_1 - \gamma_2 R_2 &= 0 \\ \beta_2\theta_B + (\alpha_2 + 3k)\theta_C - \gamma_2 R_2 &= 0 \\ \gamma_1\theta_B - \delta_1' R_1 + \frac{H \cdot h}{4EK_0} &= 0 \\ \gamma_2\theta_B + \gamma_2\theta_C - \delta_2' R_2 + \frac{H \cdot h}{4EK_0} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

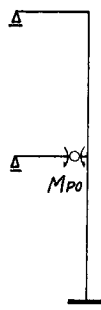


Fig. 6

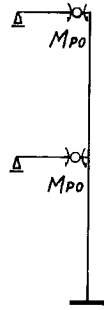


Fig. 7

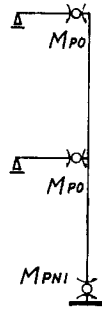


Fig. 8

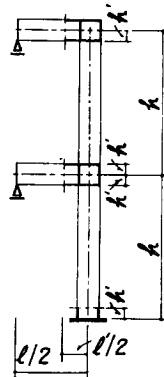


Fig. 9

3. 3. b 第2塑性ヒンジ形成まで

Fig. 6 を参照し, (1) 式を用いて, 3. 3. a と同様, 次の4個の釣合式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (\alpha_1 + \alpha_2)\theta_B + \beta_2\theta_0 - \gamma_1 R_1 - \gamma_2 R_2 &= \frac{-CM_{P0}}{2EK_0} \\ \beta_2\theta_B + (\alpha_2 + 3k)\theta_0 - \gamma_2 R_2 &= 0 \\ \gamma_1\theta_B - \delta_1' R_1 + \frac{H \cdot h}{4EK_0} &= 0 \\ \gamma_2\theta_B + \gamma_2\theta_0 - \delta_2' R_2 + \frac{H \cdot h}{4EK_0} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

3. 3. c 第3塑性ヒンジ形成(崩壊機構)まで

Fig. 7 を参照し, (1), (3) 式を用いて, 節点Bの曲げモーメントの釣合, 各層の柱のせん断力の釣合より3個の釣合式が得られる。さらに骨組が崩壊機構に達するために, Fig. 8 を参照して節点Aの塑性条件式が1個得られる。したがって, 未知数4個に対し, 次の連立一次方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (\alpha_1 + \xi_2)\theta_B - \gamma_1 R_1 - \xi_2 R_2 &= -\left(1 - \frac{\beta_2}{\alpha_2}\right) \frac{CM_{P0}}{2EK_0} \\ \gamma_1\theta_B - \delta_1' R_1 + \frac{H \cdot h}{4EK_0} &= 0 \\ \xi_2\theta_B - \gamma_2 R_2 + \frac{H \cdot h}{4EK_0} &= \left(1 + \frac{\beta_2}{\alpha_2}\right) \frac{CM_{P0}}{2EK_0} \\ (\beta_1 - \alpha_1 B)\theta_B - (\gamma_1 - \gamma_1 B)R_1 &= \frac{-AM_{PN1}}{2EK_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

なお, (5), (6) 式中の A, B, C は Fig. 9 を参照して, $A = \frac{h}{h-h}$, $B = \frac{h'}{h-h}$, $C = \frac{l}{l-l'}$ とし, (4), (5), (6) 式の未知数, およびその係数の添字 1, 2 はそれぞれ骨組の1層, 2層に関するものとする。また,

$$\frac{I_0}{h} = K_0, \quad \frac{I_B}{I_0} \times \frac{h}{l} = k,$$

M_{P0} : 部材断面の全塑性モーメント

M_{PN} : 軸力のある場合の部材断面の塑性モーメント を表わす。

3. 4. 解 法

3. 4. a 軸力一定 ($P=N_1=N_2$) の場合

① 鉛直荷重 P が既知とすると、 $P=N_1=N_2$ 、したがって $z_1=z_2=h\sqrt{\frac{P}{EI_0}}$ が定まり、その関数、 $\alpha_1=\alpha_2$ 、 $\beta_1=\beta_2$ 等も定まる。

② 連立方程式 (4)、(5) の各係数は既知となるので、これを解くと、未知数 θ_B 、 θ_C 、 R_1 、 R_2 は、 H を含む式で表わされ、したがって、骨組の各材端モーメントは、 H で表わされる。

③ 骨組の各材端モーメントの内、絶対値の最大モーメント M_{max} を受ける個所が、その断面の塑性モーメント M_{PN} に達するとして、塑性条件式、

$$M_{max} = M_{PN} = f(N, \sigma_y)$$

より H が決定される。したがって、各層の水平変位は、

$$\delta_1 = R_1 h, \quad \delta_2 = (R_1 + R_2) h$$

により決定される。なお、最終塑性ヒンジ形成時には、(6) 式を解いて、ただちに H, δ が求まる。

3. 4. b 軸力がはりのせん断によって変化する場合

[1] 第1塑性ヒンジの形成まで

① 1層、2層のはりのせん断力 Q_{B1} 、 Q_{B2} を仮定すると、Fig. 5 を参照して

$$Q_{B1} = \frac{-2M_{BB'}}{l} = -\frac{12}{l} EK_0 \cdot k \theta_B, \quad Q_{B2} = \frac{-2M_{CC'}}{l} = -\frac{12}{l} EK_0 \cdot k \theta_C$$

より θ_B 、 θ_C が定まる。

② また1層、2層の柱の軸力 $N_1 = P - Q_{B1} - Q_{B2}$ 、 $N_2 = P - Q_{B2}$ より、 z_1 、 z_2 の関数、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 等が定まり、(4) 式を解くと、未知数、 θ_B 、 θ_C 、 R_1 、 R_2 は、 H で表わされ、①より得られた θ_B 、 θ_C とそれぞれ等置して2個の H が決定される。2個の H の値が等しければ、①の Q_{B1} 、 Q_{B2} の仮定は正しい。これより、各材端モーメントが決定される。

③ 部材の最大材端モーメントが塑性条件式

$$M_{max} = M_{PN} = f(N, \sigma_y) \text{ を満足するまで①、②の過程を繰返し、} H, \delta_1, \delta_2 \text{ をみいだす。}$$

[2] 第2塑性ヒンジ形成まで、

① $Q_{B1} = \frac{-2M_{PO}}{l}$ は一定となるので、 Q_{B2} のみを仮定し、[1] の、①、②、③を行えばよい。

[3] 最終ヒンジ形成時

はりのせん断力は各層で一定となるので、 N_1 、 N_2 は決定され、これより(6) 式を解いて、ただちに H, δ_1, δ_2 は決定される。

3. 4. c 軸力が無い場合

この場合 $z=0$ となり

$$\alpha=2, \beta=1, \gamma=3, \delta'=6, \xi=1.5, \eta=1.5$$

となり通常の撓角法となる。解法は、3. 4. a の場合と同一となる。

以上の3つの場合の解法は(4)、(5)、(6) 式の塑性ヒンジの形成順序および崩壊形に対するものであるが、他の場合のものに対しても同様な手法で水平力および水平変位 H, δ を求めることができる。3つの解法によって、各試験体について塑性ヒンジ形成時の水平力と水平変位の関係を求めた。Table 3 に示す H_{V1} 、 H_{V2} 、 H_{V3} はそのうち最終塑性ヒンジ形成時の水平力を示し、それぞれ解法 3. 4. a、3. 4. b、3. 4. c、に従うものである。なお、表中 H_{VA} については、次節に述べる点Aに対応する水平力である。

4. 実験結果と考察

各試験体の荷重一変位曲線を Figs. 10, 11, 12, 13 に示す。図において実線は実験値を、点線は理論値を示している。理論値①、②は軸力を考慮した撓角法による荷重一変位の関係である。この場合、はり端部、

Table 3 Theoretical predictions and experimental results

| Conditions of Axial Force | Calculation Results | | | | | | | | | | Test Results | | | | | |
|---------------------------|---|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|-------|
| | Ultimate Horizontal Strength and Displacement | | | | | | | | | | H_F (ton) | $\frac{H_F}{H_U}$ | | | | |
| | $N_1 = N_2 = P = \text{Const.}$ | δ_1 (cm) | δ_2 (cm) | H_{U1} (ton) | H_{U2} (ton) | δ_1 (cm) | δ_2 (cm) | H_{U3} (ton) | δ_1 (cm) | δ_2 (cm) | | | $N_1 = N_2 = 0$ | $N_1^{(C)} = P(+)-Q_{R1}(-)+Q_{R2}$ | $N_2^{(C)} = P(+)-Q_{R2}$ | |
| h/i | 24 | 0.180 | 4.93 | 0.86 | 2.21 | 4.74 | 0.80 | 1.94 | 5.49 | 1.01 | 2.69 | 4.90 | 0.91 | 2.30 | 5.50 | 1.115 |
| No.1 | 24 | 0.352 | 4.45 | 1.25 | 2.39 | 4.13 | 1.08 | 2.23 | 5.59 | 1.02 | 2.71 | 4.51 | 0.77 | 1.81 | 5.00 | 1.123 |
| No.2 | 24 | 0.173 | 7.29 | 1.17 | 2.38 | 6.65 | 1.39 | 2.56 | 8.06 | 1.35 | 2.70 | 7.31 | 1.40 | 2.73 | 8.00 | 1.097 |
| No.3 | 24 | 0.342 | 6.53 | 0.93 | 1.87 | 5.80 | 1.12 | 2.01 | 8.26 | 1.35 | 2.68 | 6.52 | 1.06 | 2.16 | 7.40 | 1.133 |

と、先²⁾の場合と同様に、実験値は20~30%高くなる。この実験では2種類の大きさの鉛直荷重を与えたが、この軸力の差による、実験値と計算値との比には、差が認められず、先¹⁾の結果と異なっている。一般に軸力による柱断面の全塑性モーメントの低下は、はりのせん断力により左右の柱で異なるが、骨組全体としては平均されるので、計算値²⁾よりむしろ、軸力として一定鉛直荷重のみを考慮して計算すれば、よい近似が得られると考えられる。①と②の耐力の差は骨組の柱、はりの相対的な寸法に関係する。No.1, 2では1層, 2層のはり端部, 1層柱脚の順に、No.3, 4では、1層はり端部, 1層柱脚, 2層柱頭の順に塑性ヒンジが形成されて崩壊機構に達する。したがってNo.3, 4の方が耐力の差は大きい。耐力について①と実験値を比較すると、10~15%程度実験値が高い。この耐力の上昇は、部材端部のカバープレート、および、

柱脚部にはカバープレートが溶接されているため、部材の塑性条件は部材の節点ではなく、カバープレート端部で満足され、この個所に塑性ヒンジが形成されるとしている。しかし変形計算においては、部材断面の重心線の交点間を部材長とし、かつ部材断面は、カバープレートを無視して等断面としている。なお①, ②は2層1スパンラーメンにおいて、近似的に各層はりスパン中央点にヒンジを仮定した片側の柱を含む簡化したラーメンについて求めている。ここに①は柱の軸力を一定と仮定して求めた解法 3. 4. a に対応するものであり、②ははりのせん断力によって柱の軸力は増加するとの仮定に基づいた解法 3. 4. b に対応するものである。柱に鉛直荷重が作用する場合、1層, 2層のはりのせん断力の割合は、水平力の増加に従って変化し、計算はきわめて煩雑となるので、この場合、軸力の無い場合と同じ骨組に対するはりのせん断力の割合を用いて近似的に求めた。③は軸力の無い場合の、解法 3. 4. c に対応する計算値である。図中、点Aは骨組に最終塑性ヒンジが形成され、崩壊機構に達するときの水平力と変位の量を、はりのせん断力によって、各層および左右の柱の軸力変化を考慮して、Fig. 4 の骨組に対して求めたものである。このとき No.1, 2 では最終塑性ヒンジは1層左柱の柱脚Fに形成され、No.3, 4 は2層左柱の柱頭Dに形成されて崩壊機構となる。

実験より得られたひずみ分布より調べた部材の降伏順序と、計算より求めた塑性ヒンジの形成順序は、ほぼ一致している。

水平耐力について実験値と②とを比較する

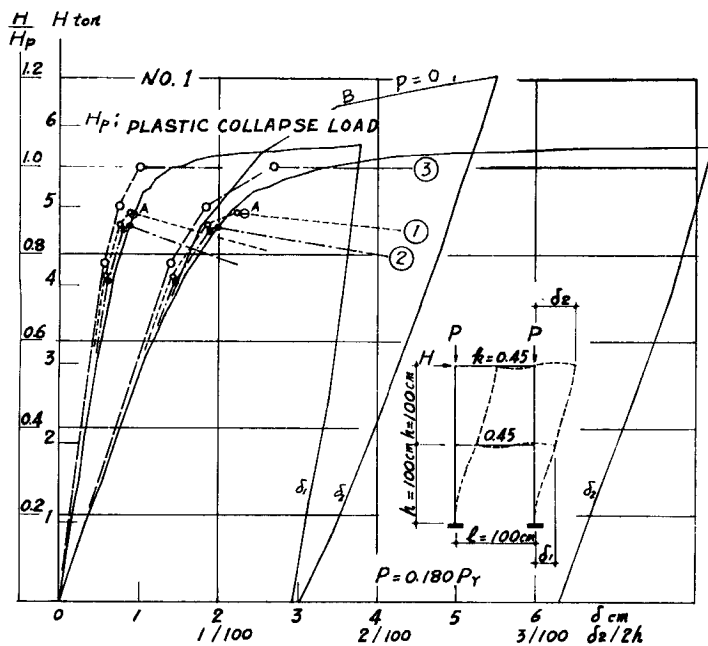


Fig. 10

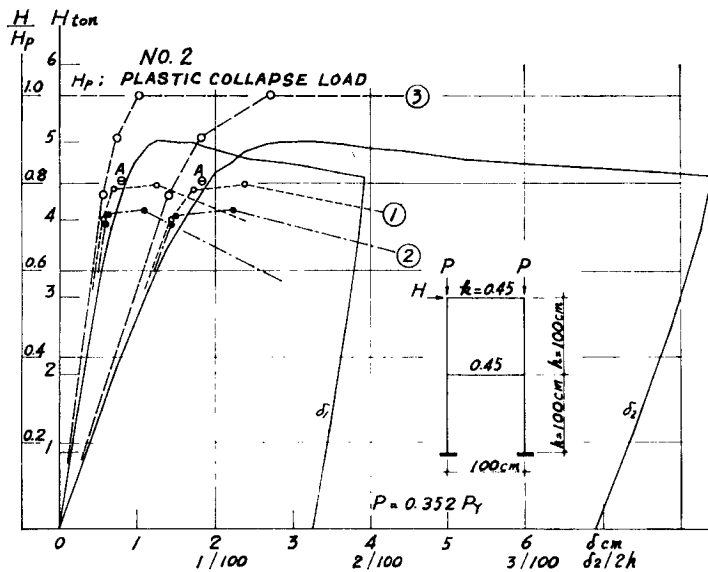


Fig. 11

ひずみ硬化の影響が主なるものと考えられる。Fig. 10 に示す実線Bは No.1, 2 と同じ試験体に対し、鉛直荷重の無い場合の他の実験より得られた実験値である。これと③とを比較すると、この影響を示していることが認められる。軸力一定とする計算仮定の妥当性を調べるため、点Aを求めたが、この結果では、この仮定による耐力とはほぼ一致をみた。変形量は、左右の柱で軸力が変化するため、軸力一定と仮定した場合のものとは異なっている。しかし①, ②, ③および点Aの変形計算では、塑性ヒンジ以外の部材は弾性とし、塑性域の材軸方向への拡がりを見逃しているが、実験値より、いずれも小さく安全側である。したがって、この実験における程度の鉛直荷重の範囲であれば、計算の簡単化のためには、はりのせん断力を無視して軸力一定と仮定しても、求めた耐力は、真の耐力に対してよい近似を与え、かつその時の変形量は、実験値に対しては安全側である。先²⁾の門型ラーメンと2層1スパンラーメンの変形状を比較すると、この程度の層数の差では、附加軸力が骨組の挙動におよぼす影響は顕著でない。しかし骨組が高層になれば、附加軸力は増大して下層階のみが崩壊し、全体の崩壊へ導かれるということも予想されるので、この問題は今後検討されねばならない。

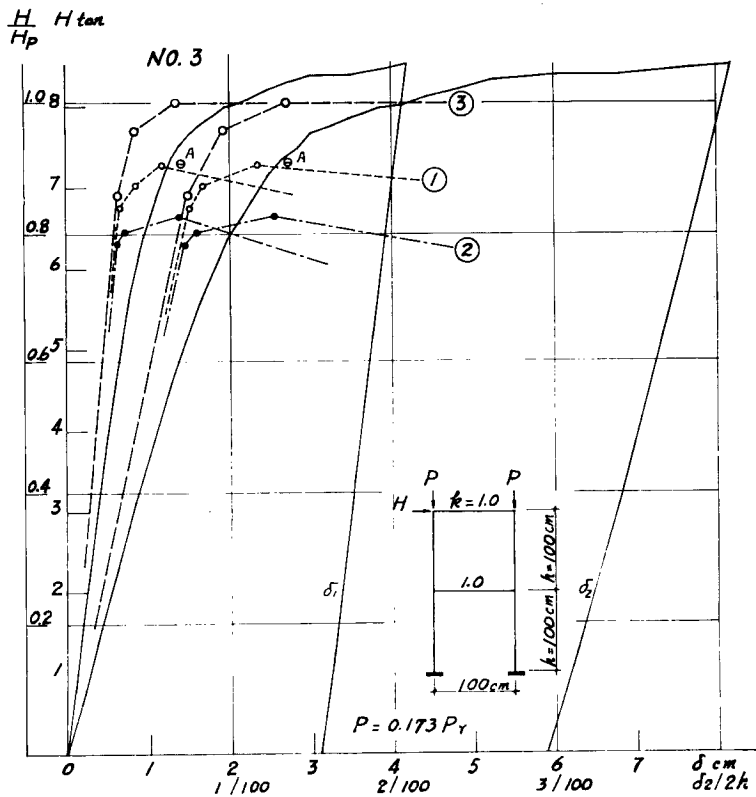


Fig. 12

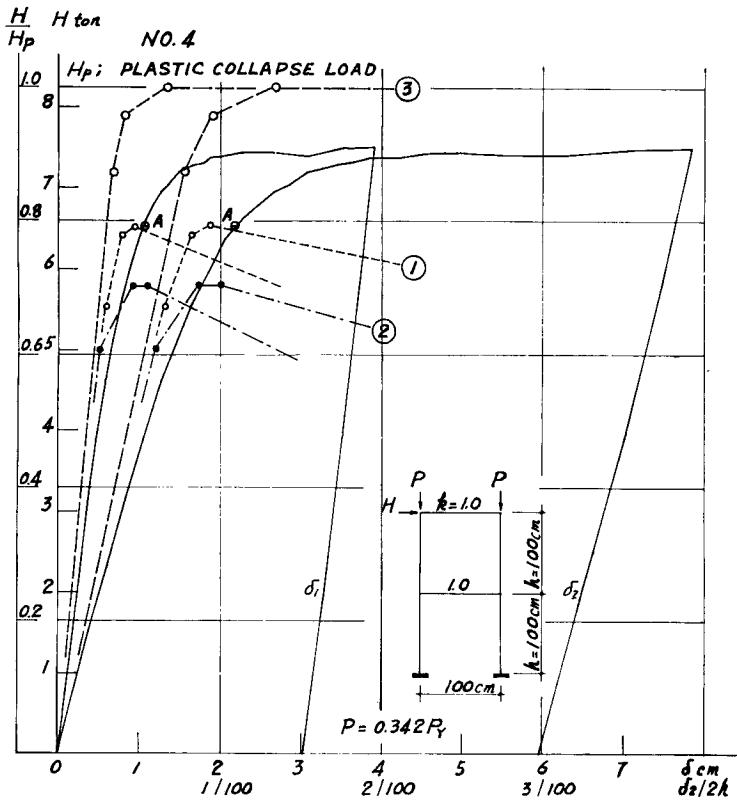


Fig. 13

5. 結 論

本実験では、横座屈、局部座屈、接合部パネルの変形等を充分防止して実験を行なったため、ひずみ硬化の影響によって実験曲線は、ひずみ硬化を考慮しない理論曲線を一般に上まわる。このことを考慮し、かつ本実験における程度の変形量 $\left(\frac{\delta_2}{h} = \frac{8}{100}\right)$ であることを前提とすれば、次の結論が得られる。

1. 階高 h と柱断面の回転半径 i との比が20程度で、柱に加わる鉛直荷重が0の場合、骨組の水平耐力は軸力0の場合の塑性崩壊荷重をかなり上まわり、鉛直荷重が $P=0.18P_r$ 程度でほぼ一致する。
2. h/i が20程度で、鉛直荷重が $P=0.18\sim 0.30P_r$ の範囲では、復元力の減少は認められず、骨組の水平耐力は本理論値（柱の軸力を一定とし、軸力による転倒モーメント、および軸力による塑性モーメントの低下を考慮したもの）より10~15%高くなる。
3. h/i が20程度で、鉛直荷重が $P=0.30P_r$ 以上の場合、安定限界が現われ、それ以後、復元力は減少する。特に柱部材に比べ、はり材の剛比および断面係数が小さい場合、この減少は大きくなる。このときの骨組の水平耐力は本理論値より10~15%高くなる。
4. 安定限界（復元力が減少を始めるとき）での各層の水平変形量と階高との比は、ほぼ1.5/100となる。

謝 辞

本報は建設用鋼材研究会の研究費による援助により行なったものであります。実験およびデータ整理、

計算には、京都大学大学院、三谷勲君をはじめ研究室の諸君に多大なる協力をいただきました。ここに甚深の謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 若林実, 松井千秋: 長方形ラーメンの弾塑性安定, 京都大学防災研究所年報, 第8号, 昭和40.3, 127~139頁
- 2) 若林実, 松井千秋: H形鋼を用いた長方形ラーメンの弾塑性安定に関する実験的研究(その1)』, 京都大学防災研究所年報, 第9号, 昭和41.3, 295~305頁