

# 繰返し水平荷重を受けるラーメンの性状

若 林 実・辻 文 三

## EXPERIMENTAL STUDIES ON THE FRAMES UNDER HORIZONTAL LOADING

By *Minoru WAKABAYASHI* and *Bunzo TSUJI*

### Abstract

Experiments are conducted to determine the general behavior of steel frames under horizontal loading. One-span two-storied frames with and without bracings are tested by the application of repeated horizontal loads. The influence of the compression bracing with a relatively large cross section on the restoring force characteristics of the whole frame, the relation between displacement amplitude and stiffness deterioration of the frame and the rate of energy absorption due to plastic deformation are discussed.

### 1. 序

我国における高層架構の設計は従来主として鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造形式によって行なわれており、地震力、風力等の水平力に対する抵抗はラーメン架構のほか、耐震壁によっていた。近年さらに高層の架構が計画、設計され始めているが、これらの構造物はその軽量さ、靱性に優れていることから鉄骨構造形式をとることが一般的である。鉄骨構造においては、鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート構造における耐震壁に対応するものとして、鉄骨筋かいが考えられる。構造物の耐震、耐風設計において、水平荷重を受ける構造物がどのような過程でその耐力に達し、耐力に達した後どのような挙動を示して崩壊するかを明確にしておくことは重要である。ラーメン構造に対する復元力特性の研究は若干行なわれているが、筋かいをもつラーメンの挙動に関する研究はほとんど行なわれていない。

一般に鋼構造物は溶接接合により組立てられているかぎり、softening-type の単調に増大する荷重—変位曲線を示す。しかし、トラス構造物、筋かい付ラーメン等軸方向圧縮力が卓越して作用する部材を含む構造物では座屈により不安定な釣合状態を示す。又鉄骨骨組が繰返し荷重を受けると Baushinger 効果を示すが、筋かい付骨組では筋かいが交互に圧縮力と引張力を受ける結果、座屈変形により剛性も低下するものと考えられる。このような骨組の復元力特性を明確にするためには、単調加力時の性状だけでなく、繰返し加力時の性状をも調べる必要がある。この論文では筋かいのないラーメンおよび筋かい付ラーメンに繰返し水平荷重を加える実験を行い、崩壊モード、荷重—変位曲線の性状、履歴による減衰性状について検討を行なった。

### 2. 実験概要

#### 2.1. 試験体

試験体は Fig. 1 に示すように柱脚固定の 2 層 1 スパンラーメン、K トラス型筋かい付ラーメン、X 型筋かい付ラーメンの 3 種類であり、スパン、階高はすべて 1 m である。材料は一般構造用鋼材 S S 41 を用い、柱、はり断面はそれぞれロール H 形鋼 H-100×100×6×8、H-100×50×5×7 であり、筋かい断面は

厚さ 4 mm のプレートを溶接して組み立てた  $H-40 \times 30 \times 4 \times 4$  である。面内変形のみを起こさせるために試験体は同一の骨組 2 個を各接合部、スパンおよび階高の中央点で H 形鋼を介して溶接接合した。接合部はすべて溶接接合し、ラーメンの接合部パネルには厚さ 12 mm のスチフナープレートを、ラーメンと筋かいの接合部には厚さ 6 mm のガセットプレートをそう入している。はり端部、柱脚部はフランジ外面を厚さ 6 mm のカバープレートで補強してある。

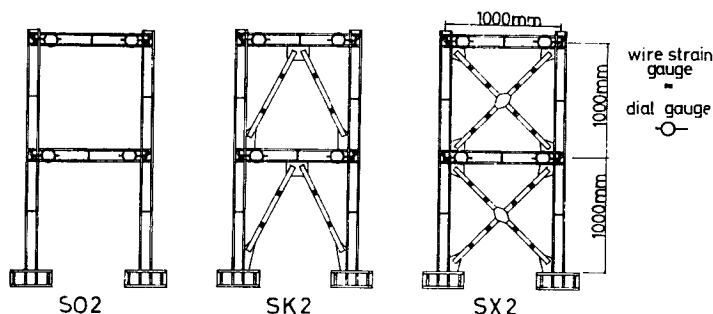


Fig. 1 Test Specimens.

各部材の実測による断面寸法を **Table 1** に、引張試験結果を **Table 2** に示す。但し、ロール H 形鋼についてはフランジ面から切り出した試験片による結果である。

Table 1 Cross Section.

| member  | $H$ (mm) | $B$ (mm) | $t_1$ (mm) | $t_2$ (mm) |
|---------|----------|----------|------------|------------|
| column  | 101.02   | 100.23   | 6.14       | 8.04       |
| beam    | 101.44   | 49.49    | 4.17       | 6.34       |
| bracing | 40.50    | 31.90    | 4.59       | 4.59       |

$H$  ; web height  $B$  ; flange width  $t_1$  ; web thickness  $t_2$  ; flange thickness

Table 2 Coupon Test Result.

| member                    | wedth | thickness | yield stress       | maximum stress     | elongation |
|---------------------------|-------|-----------|--------------------|--------------------|------------|
|                           | mm    | mm        | kg/mm <sup>2</sup> | kg/mm <sup>2</sup> | %          |
| column<br>(H-100×100×6×8) | 26.18 | 8.23      | 26.85              | 42.67              | 30.5       |
|                           | 26.45 | 8.08      | 25.03              | 41.55              |            |
|                           | 25.80 | 8.51      | 25.73              | 41.49              | 30.4       |
|                           | 25.93 | 8.12      | 24.47              | 40.50              | 27.8       |
|                           | 25.72 | 8.45      | 28.32              | 42.86              |            |
|                           | 25.70 | 8.00      | 27.22              | 42.87              | 29.9       |
|                           | 25.85 | 8.62      | 26.93              | 42.32              | 29.8       |
|                           | 26.08 | 8.11      | 25.99              | 41.91              | 29.6       |
| beam<br>(H-100×50×5×7)    | 14.97 | 6.41      | 31.07              | 44.41              |            |
|                           | 14.72 | 6.53      | 31.11              | 43.91              | 20.1       |
|                           | 15.14 | 6.43      | 29.93              | 44.08              |            |
|                           | 15.24 | 6.52      | 29.69              | 42.58              |            |
|                           | 15.19 | 6.34      | 31.26              | 43.62              |            |
|                           | 14.87 | 6.58      | 31.49              | 44.18              | 18.7       |
| bracing<br>(H-40×30×4×4)  | 21.51 | 4.39      | 27.55              | 45.56              | 21.2       |
|                           | 21.50 | 4.39      | 28.58              | 45.41              | 23.4       |
|                           | 21.52 | 4.58      | 28.73              | 44.78              |            |

## 2.2. 載荷方法および測定方法

載荷装置の概要を Fig. 2 および Photo. 1 に示す。2層柱頭部に水平加力を行なうため、試験体柱脚部

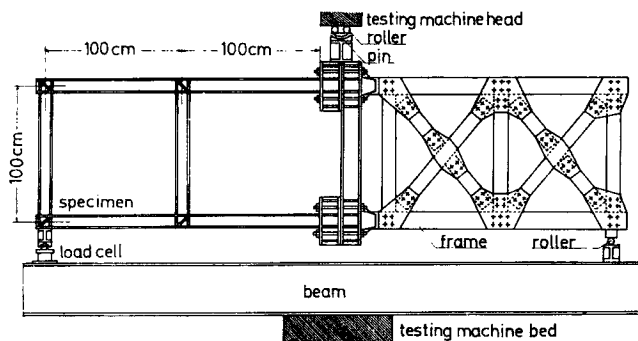


Fig. 2 Test Equipment.

と載荷用骨組を高張力ボルトにより結合して一つのはり形成する。荷重は長柱試験機により準静的に試験体柱脚部に加え、試験体に作用する水平力は2層柱頭部に置いたロードセルにより測定する。このような載荷方法をとるかぎり、変形の増大とともに荷重方向が変化するが、微小変形の範囲では問題はないと考えられる。繰返し載荷は各半サイクルの加力が終る度に、はり全体の上下を逆にすることにより加力方向を変化させて行ない、各サイクル毎に徐々に変形振巾を増大させて大変形に至らしめた。Fig. 1 に示すように各層の水平変位は接合部中央点でダイヤルゲージにより、又筋かいの歪をワイヤーストレインゲージにより測定した。

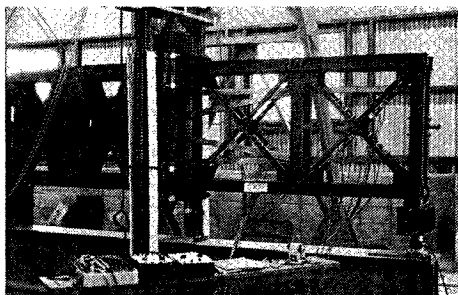


Photo. 1 General View of Equipment.

### 3. 実験結果

#### 3.1. 実験経過

繰返し加力は各半サイクル毎に変形振巾を増大させて行ない、骨組の一部が局部座屈又は横座屈を起こすまで変形させた。試験体SO2 では1層、2層のはり端部が降伏し、柱脚部が降伏して崩壊する。SK2 では1層、2層の圧縮側筋かいが座屈変形し、はり中央部、はり端部が降伏、柱脚部が降伏するが、変形が増大するとはり中央部は鉛直方向にも変位するため引張筋かいは完全には真直にならない。SX2 では筋かいが面外に座屈を起こしたため、骨組全体がねじれ、大変形に至るまでの載荷は行なっていない。実験後の試験体の状態を Photo. 2, Photo. 3 に示す。

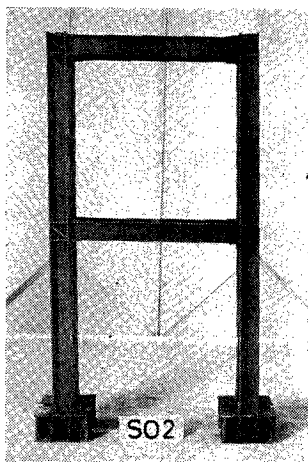


Photo. 2 Frame SO2 After Test.

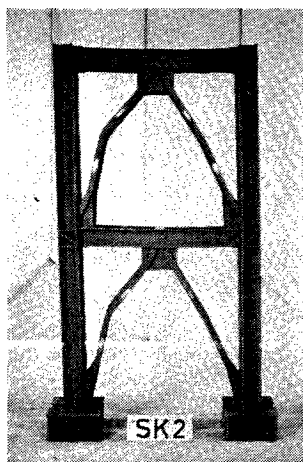


Photo. 3 Frame SK2 After Test.

#### 3.2. 荷重—変位曲線

各試験体の2層柱頭部の水平変位と水平力の関係を Fig. 3～Fig. 5 に示す。実線は繰返し加力実験値、点線は計算値を示す。筋かいのないSO2の場合には softening-type の曲線を示し、変形が増大するとともに徐々に耐力も上昇する紡錘形のループを示す。除荷時の勾配はほとんど初期剛性と変わらないが、変形振巾が増大すれば骨組全体の Baushinger 効果を示して降伏荷重は徐々に低下する。Kトラス型筋かいをもつSK2の場合、変形振巾の小さい範囲では圧縮側筋かいが座屈を起こすと一時不安定な釣合状態を示

す。変形振巾が増大するとこの不安定な釣合状態は少なくなり、ループの形は紡錘形に移行する。徐荷時における勾配は初期勾配に比して変形振巾の増大とともにいちじるしく減少し、骨組全体の Baushinger 効果も大きい。耐力は変形が増大しても変化せず、ほぼ一定の値を示している。X 型筋かいをもつ SX2 の場合、筋かいは面外に座屈を起こし、骨組全体がねじれたため、大変形にいたるまでの実験は行なっていない。この場合は圧縮側筋かいは座屈に伴う不安定な釣合状態は示さないが、変形の増大とともに徐荷時の勾配はやや低下する。

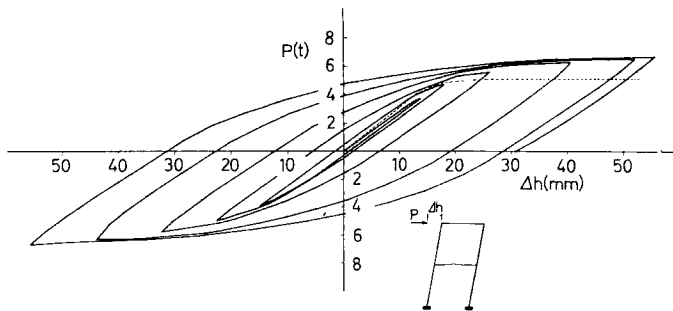


Fig. 3 Load-Displacement Curve. (SO2)

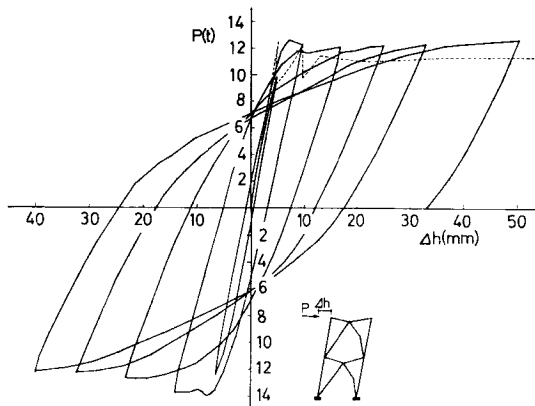


Fig. 4 Load-Displacement Curve. (SK2)

筋かい付ラーメンのように耐力、剛性が異なる構造要素から成りたち、さらに座屈現象を伴う圧縮部材を含む構造物では、繰返し加力を受けて座屈変形するほか、大きな残留応力を発生して複雑なループを示す。このような荷重—変位曲線のループを厳密に理論的に追求することは困難である。ここでは前報<sup>3)</sup>に示した方法で単調加力時の荷重—変位曲線を計算した。各サイクルの最大変位の点を結んだ曲線は近似的に単調加力時の荷重—変位曲線と考えられる。弾性領域では実験値は計算値とよく一致するが、筋かいは座屈に伴う不安定な釣合状態は計算値ほどいちじるしくなくなめらかな曲線を示す。変形が増大すれば、筋かいはないラーメンの場合も、筋かい付ラーメンの場合も実験値は歪硬化の影響、ガセットプレートによる部材の有効長さの減少により耐力は計算値よりも高い値を示す。

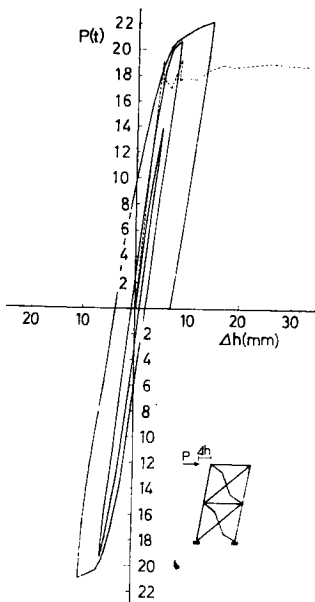


Fig. 5 Load-Displacement Curve. (SX2)

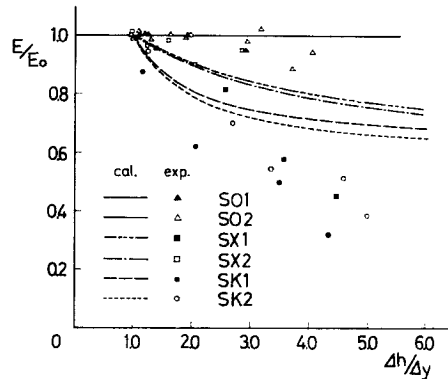


Fig. 6 Stiffness Deterioration Curve.

又繰返し加力実験の曲線からわかるように筋かいのないラーメンの場合には曲線の除荷時の勾配は、変形振巾が増大してもほとんど初期勾配と変化しないが、筋かい付ラーメンでは変形振巾の増大とともにいちじるしく低下している。これは筋かいの座屈変形に伴う元たわみにより、その伸び剛性が低下するためであると考えられる。これを前報<sup>9)</sup>に示すように元たわみ曲線の形を仮定することにより弾性的に計算し、荷重0の点における曲線の勾配即ち剛性の低下の割合と変形の関係を実験値と比較したものを Fig. 6 に示す。 $E$  は荷重0の点における勾配、 $E_0$  は初期勾配、 $\Delta h$  は変位、 $\Delta y$  は骨組に降伏が現われるときの変位である。筋かいのないラーメンでは変形が増大すればやや勾配は低下するがほとんど一定と考えてよい。筋かい付ラーメンでは変形の小さい範囲で計算値と実験値はほぼ一致するが、変形振巾が増大すれば実験値は小さい値を示す。これは変形が増大すれば引張筋かいにも残留変形が残ること、SK2 の場合にはよりの中央部が鉛直方向にも変位すること等によるものと考えられる。

### 3.2. 等価粘性減衰定数比

構造物に減衰性が存在することは、地震力により与えられたエネルギーを消費し、変形を制限する意味で望ましいことである。鉄骨構造物はその塑性変形性能にすぐれることからエネルギー吸収能力も大きいと考えられる。構造物の履歴減衰性の表示法は種々あるが、ここでは塑性変形による吸収エネルギーを線型復元力と粘性減衰を有する一質点系の減衰エネルギーに等しいと考えて繰返し加力実験結果から求めた等価粘性減衰定数比  $\nu_{eq}$  と変形振巾の関係として Fig. 7 に示す。筋かいのないラーメンの場合には変形の小さいところで小さな値を示し、変形振巾の増大とともに  $\nu_{eq}$  の値は比例的に増大している。筋かいのあるラーメンの場合には変形の小さいところでも大きな  $\nu_{eq}$  の値を示し、変形振巾が増大しても徐々に増加する程度である。特に剛性低下のいちじるしい SK type では変形が増大するとほとんど一定の値を示す。又1層ラーメンの場合と比較すると、2層ラーメンの方がやや小さな値を示している。

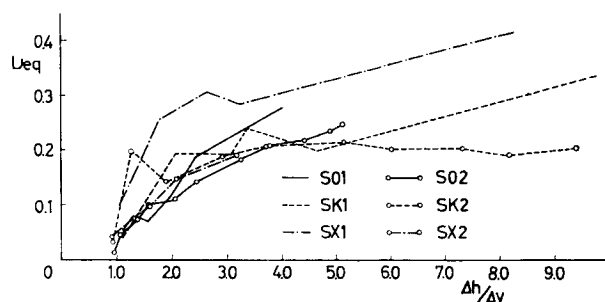


Fig. 7 Equivalent Viscous Damping Coefficient Ratio.

#### 4. 結 び

H形鋼を用いた2層1スパンラーメンおよび筋かい付ラーメンについて繰返し水平加力実験を行なった結果、次のことが認められた。

1. 筋かいのないラーメンの場合、荷重—変位曲線は softening-type の単調に増大する曲線を示し、ループの形は紡錘形である。
2. 筋かい付ラーメンの荷重—変位曲線は変形振巾の小さい範囲では圧縮筋かいの座屈と同時に不安定な釣合状態を示すループをもつが、変形振巾の増大とともに不安定な釣合状態はなくなり、ループは紡錘形に移行する。このとき除荷時の勾配は初期勾配に比して小さくなる。この傾向はKトラス型筋かいをもつラーメンの場合にいちじるしい。
3. 繰返し加力による履歴の吸収エネルギーを等価粘性減衰数比で示すと、筋かいのないラーメンでは変形振巾の増大とともに比例的に大きくなるが、筋かい付ラーメンの場合、変形の小さい範囲で大きな値を示し、変形が増大してもやや大きくなるか、ほとんど一定の値を示す。X型筋かいをもつラーメンはKトラス型筋かいをもつラーメンの場合より大きな値を示す。
4. 剛接筋かいが圧縮力を受ける場合、座屈後は材の両端部、中央部断面に塑性ヒンジを形成するモードで崩壊する。
5. Kトラス型の筋かい付ラーメンでは筋かいの座屈変形とともに、はりの中央部に鉛直荷重が作用するため、はりの剛性、耐力が充分に大きくないと引張り側筋かいは有効に作用しない。

#### 参 考 文 献

- 1) B.G. Neal, and D.M. Griffiths, "The Collapse of Rigidly-Jointed Singly Redundant Light Alloy Trusses," Structural Engr., December, 1963. pp.399—406.
- 2) M. Wakabayashi, "The Restoring Force characteristics of Multi-Story Frames," Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, vol.14, February, 1965, pp.29—47.
- 3) M. Wakabayashi, and B. Tsuji, "Experimental Studies on the Elasto-Plastic Behavior of Steel Portal Frames with Wide Flange Section under Repeated Horizontal Loading," Disaster Prevention Research Institute Annals, No.9, March, 1966, pp.307—316.