

高層建築の復元力特性

若 林 実

RESTORING-FORCE CHARACTERISTICS OF TALL BUILDINGS

By *Minoru WAKABAYASHI*

Synopsis

With the objective of being applied in an earthquake response analysis, the author discusses the relation between the horizontal restoring force and the displacement for rectangular portal frames which are subjected to large vertical loads. The instability effect of dead loads in a tall building is emphasized. A brief review, on the past work made in the domestic and foreign countries, is followed by an introduction of experimental studies performed by the author and this collaborators. The experiment covers portal frames of single span, one, two, three, and five stories, with and without bracings, and with rectangular and wide flange sections. It also includes cruciform frames which are typical of an inner portion in a large frame with many bays and stories. The final discussion is made on the points that remain to be clarified in the future investigation.

1. ま え が き

復元力特性とは骨組が地震力・風力などを受けたときの層せん断力と層間水平たわみとの関係をいう。低層の建物では復元力特性は比較的簡単な方法で求まり、また最大層せん断力あるいは最大水平荷重はいわゆる単純塑性解析によって求めることができる。しかし高層建築の下層部では鉛直荷重により柱は大きな軸圧を受け、軸圧による二次応力によって柱に不安定現象が生ずる。したがって復元力特性を正確に求めるのはかなり難しく、この問題に関する研究が始められてからなお日が浅いため、厳密解は未だ求められていないといっても過言でない。

わが国では超高層建築の出現に伴い、その耐震設計に関連して研究が始められた。すなわち通常の動的設計においては Fig. 1 のように骨組をこれと同じ水平剛性をもつ質点系に置換し、この系に対して地震動を

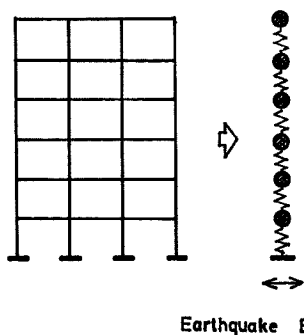


Fig. 1 Replacement of a Frame by a Simple Model

与えたときの解析を電子計算機あるいは等価回路を用いて解析する。解析を非弾性域までについて行なう場合、Fig. 2 (a)のように Elastic-Plastic とするか、(b)のように Positive Bilinear とするか、(c)のように Negative Bilinear とするかによって動的解析の結果はかなり異なる。

いうまでもなく (b) が最も応答値が小さく、(c) が最も大きくなる。実用設計では (b) の形式をとっている場合が多い。すなわち短期の許容応力まで直線とし、以後勾配を変えて解析される場合が多い。このような解析では弾性限度を余り大きくこえないような場合についてのみ考えているので、上述の仮定がほぼ妥当であるが、もっと大きい地震力を想定し、骨組に大きな塑性変形を許す場合には、むしろ (c) に近い復元力特性を仮定すべきである。Fig. 3 は門形骨組の水平力と水平たわみとの関係であるが、柱頭に加わる鉛直荷重が大きくなるに従って大変形後の勾配が負となる。材料にひずみ硬化がなく、応力ひずみ関係が理想弾塑性であるならば、鉛直荷重が少しでもあれば Negative Bilinear になるが、実際には材料にひずみ硬化があるので、鉛直荷重がある程度大きくなると負の勾配はあらわれない (Fig. 3)。

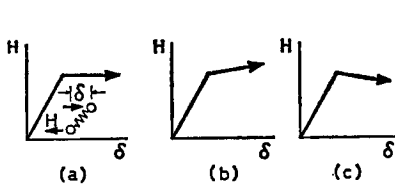


Fig. 2 Example of Restoring Force Characteristics

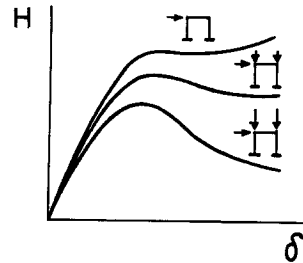


Fig. 3 Typical Restoring Force Characteristics

欧米ではこの問題は塑性設計の高層建築への拡張のために取扱われてきた。すなわち従来この種の問題が不明のため、塑性設計は2層以下の低層骨組にのみ許されてきたが、これを高層骨組にまで拡張するために、約10年程前から米国、英国、ドイツなどで研究が行なわれてきた。

水平力に対する抵抗力を増すために鉄骨の筋違を用いることが多い。このような場合筋違が圧縮力に抵抗できないような細いものであるか、あるいは座屈が問題とならないくらい太短いものであれば、水平力に対する骨組の性状は比較的簡単であるが、一般には圧縮筋違が座屈するので性状は複雑である。すなわち圧縮筋違が座屈を生ずると、その抵抗力が急激に低下するので、骨組全体としての抵抗力についても同じ性状があらわれる。さらに大きな繰返し荷重を受けた場合、筋違には圧縮による座屈と降伏点をこえた引張りとは交互に繰返される。ここではこのような筋違付き骨組の復元力特性についても述べることにする。

次節で復元力特性に関する内外における研究の現状について述べ、3節ならびに4節において、筆者らの行なってきた一連の研究について述べる。

2. 内外における研究の現状

2.1 理論的研究

骨組の非弾性域における安定問題に関する理論的研究として R. H. Wood¹⁾ の論文がある。これは1スパン4層の骨組のはりに鉛直荷重をうけ、さらにはりの位置に水平力を受ける場合の弾塑性性状を調べたものであり、早期の論文であるにもかかわらず、塑性域の拡がりを考慮したほぼ完全に近い解を求めたものであるが、解法の詳細について述べられていない。

骨組の各部材に対して釣合の微分方程式をたて、部材に発生する塑性域の拡がりをも考えて、境界条件ならびに適合条件を満足するような解を求めようとする、一般には計算が非常に複雑となり、上記の Wood の論文のほかは1スパン1層、2層の骨組が解かれているにすぎない。F. Moses²⁾, J. Oxford³⁾, 黒羽啓明⁴⁾,

J.A. Yura と T.V. Galambos⁵⁾ などがこのような解法を用いている。

実際の部材ではモーメントと曲率の関係は断面の縁での降伏開始より完全塑性モーメントに到るまで曲線を描くが〔Fig. 4 (a)〕, これを完全塑性モーメントに到るまで弾性を保ち, 以後完全塑性であるとすれば〔Fig. 4 (b)〕解析が非常に簡単になる。すなわちこのような仮定に従えば, 降伏ヒンジ以外の部分はすべて弾性を保つから, 軸力によるモーメントを考慮した2次理論, すなわちたとえば座屈たわみ角法を用いて解くことができる。M.R. Horne⁶⁾, A. Jennings と K. Majid⁷⁾ U. Vogel⁸⁾ その他多くがこの方法を用いており, 筆者もこの方法をしばしば用いている。

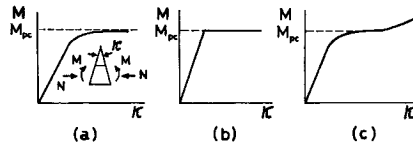


Fig. 4 Moment Curvature Relation

解析法として, もう一つの方法は, 弾性域における骨組の解法, たとえばたわみ角法の基本式を, 材が非弾性域に入る場合の剛性低下という形で修正するもので坂本順⁹⁾が用いている。

鋼材にはひずみ硬化現象があるから, 曲げモーメント曲率関係は Fig. 4 (c) のようになるので, これを考慮しないと大変形後の復元力特性は正しく求めることができない。前述の坂本順の論文ではじめてひずみ硬化を考慮しており, 筆者も後述するような方法でひずみ硬化を考慮した解析を行っている。

以上は筋違のない骨組についてであるが, 筋違のある骨組で, しかも筋違の座屈を考慮した解析は非常に少ない。

2.2 実験的研究

骨組の塑性解析に関係して行われた実験的研究はかなりあるが, 大きい鉛直荷重を与えて不安定現象を起させるような実験的研究はきわめて少ない。

次節に詳述するような筆者らの一連の実験的研究があるほか, 牧野稔¹⁰⁾の小型模型による実験, 五十嵐定義¹¹⁾による H 形鋼を用いた実験, L. W. Lu ほか¹²⁾ Lehigh 大学グループの実大実験がある。

この種の実験方法として最も問題となるのは, 鉛直荷重をどのようにして与えるかということ, どのようにして構面外の変形を拘束するかということである。鉛直荷重は重錘によって与えるのも一方法であるが, 柱の降伏荷重の数十パーセントにも及ぶ鉛直荷重をこのような方法で与えられるのは極めて小型の模型実験に限られる。したがって油圧ジャッキの類を使用することになるが, 骨組が変形しても鉛直荷重が正確に鉛直方向を向いている必要があり, このために種々の考案がなされている。また骨組の構面内の変形を拘束せずに横座屈など構面外の変形をおさえる方法についてもいろいろの考案がなされている。

3. 筋違のない骨組の復元力特性

3.1 長方形断面をもつ門形ラーメンの実験

超高層建築の下層部の柱を含んだ単純な骨組として門形ラーメンを選び, 先ず手始めとして小型の模型実験を行った¹³⁾¹⁴⁾。試験体は Fig. 5 のように厚さ 10 mm の鋼板から切り出した門形ラーメン 2 個を丸鋼によって平行につないで一体としたものである。したがって柱もはりも断面は長方形である。同じ骨組を 2 個つないでいるのは構面外の変形が起らないようにするためである。このような試験体 24 個を用いて, 鉛直荷重 P を一定に保ちつつ水平力 H を漸増して崩解に到らしめた。Fig. 6, Photo. 1 は実験装置を示す。試験体を L 字形のわくに取りつけ, これを試験機のベットのの上に置き, 水平力 H は試験機によって加えられる。鉛直荷重 P は 2 個のオイルジャッキから 2 本の長いボルトを介して加力ばりに伝わって各柱頭に加えられ

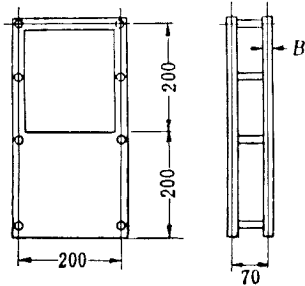


Fig. 5 Test Frame (a Unit: mm)

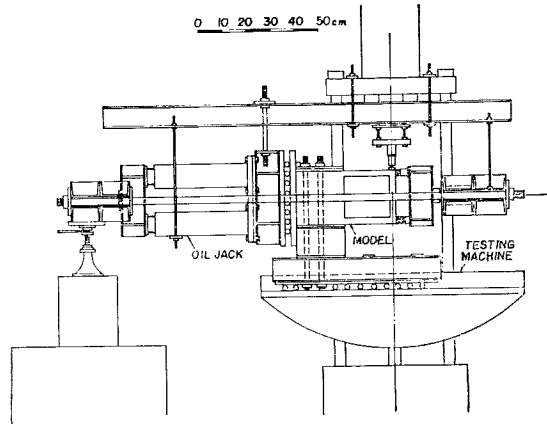


Fig. 6 Loading Arrangement

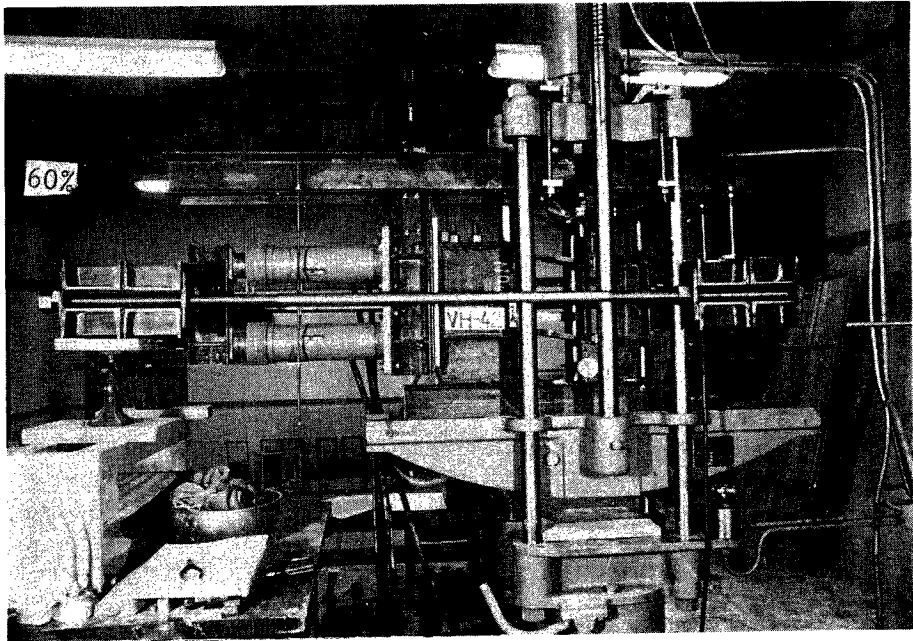


Photo. 1 Loading Arrangement

る。試験体とジャッキとの間にあるローラーによって鉛直荷重は常に鉛直方向を保つようになっている。この種のローラーは後述の実験においてもしばしば使用されるが、その摩擦係数は0.001~0.004程度である。Photo. 2は試験後の供試体で、Fig. 7は24個の試験体の中の4個について水平力と柱頭の水平変位との関係を示したものである。図に示されるように鉛直荷重のない場合には荷重たわみ曲線は降伏以後上昇を続けるが、鉛直荷重が柱の降伏軸力の20%以上では下降して、いわゆる不安定現象を呈することがわかる。図中折線で示したのは理論曲線で、Fig. 8の(b)図のような肘形ラーメンに置換して求めたものであり、2.1項で述べたような理想弾塑性のモーメント曲率関係(Fig. 4(b))を仮定して求めたものである。そ

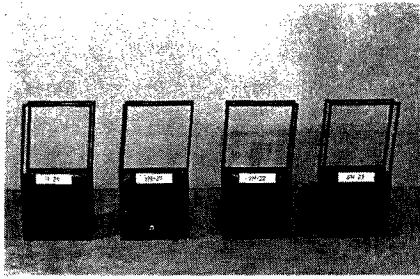


Photo. 2 Specimen after Test

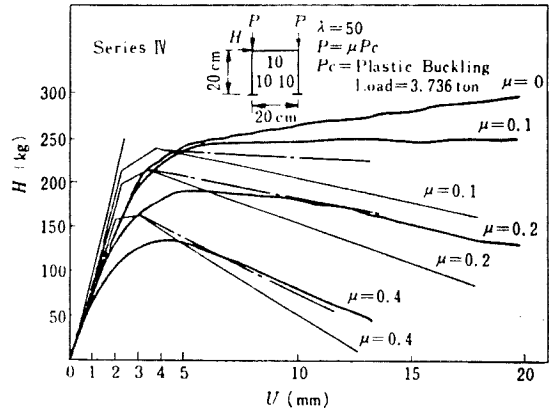


Fig. 7 Load-deflection Curves

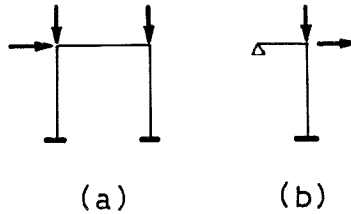


Fig. 8

の仮定から曲線が実験曲線より急激に曲がり、また、ひずみ硬化を考慮していないために、たわみが大きくなった範囲で傾斜が実験曲線と異ってくる。図中の鎖線はメカニズム曲線をひずみ硬化の影響を考慮して傾斜を変えてひいたものである。実際の形鋼を用いた骨組では、局部座屈が発生するのでひずみ硬化で勾配が変ることをあまり期待するわけにはいかない。

3.2 長方形断面をもつ多層ラーメンの実験

骨組が重層となると柱の軸力が大きくなるばかりでなく、崩壊機構も複雑となるので、これらを調べるた

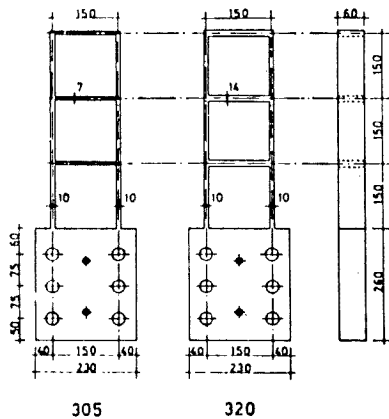


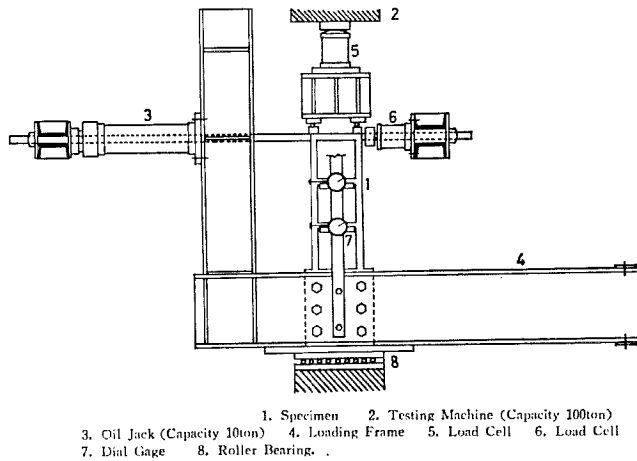
Fig. 9 Test Frames (a Unit: mm)

めに3層および5層骨組の実験を行なった¹⁵⁾。

供試体は溶接による熱応力の影響などを避けるために、一枚の厚板から切り出して製作した (Fig. 9)。骨組が構面外に座屈をしないようにするために、部材の幅を充分広くしてある。

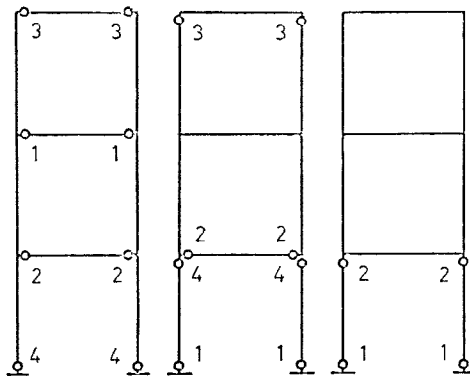
Fig. 10 に示すように供試体をL字形の枠に取付け、これを試験機のベッドの上に置き、試験機によって最上層の柱頭に鉛直荷重を与える。次にオイルジャッキによって最上層の柱頭に水平力を加えて崩壊に到らしめた。供試体の変形とともにL字形の枠とベッドとの間にあるローラーによって枠は自由に水平に移動し、鉛直荷重は常に鉛直を保つことができる。

多層骨組であり、はりと柱の断面の相違、柱に加わる軸力の大小などによって崩壊の機構は Fig. 11 に示すように種々のものがある。Photo. 3 は実験後の試験体の例を示すが、崩壊の機構について実験と理論とはよく一致した。



1. Specimen 2. Testing Machine (Capacity 100ton)
3. Oil Jack (Capacity 10ton) 4. Loading Frame 5. Load Cell 6. Load Cell
7. Dial Gage 8. Roller Bearing .

Fig. 10 Loading Arrangement



0500 2000 2020
0520 2040
0540

Fig. 11 Location and Order of the Plastic Hinge Formation

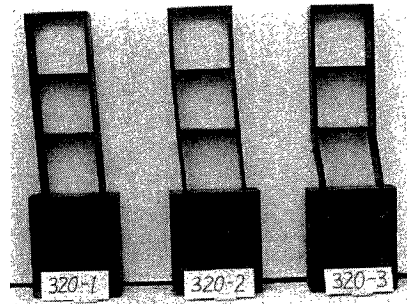


Photo. 3 Specimens after Test

解析においては第1に前節と全く同様に骨組の半分をとり、完全弾塑性の曲げモーメント曲率関係をもちいた解析を行った。すなわち座屈たわみ角法を用いて水平力と水平変位の関係を求めていき、応力が塑性モーメントに達する箇所ができれば、その位置をヒンジに置換した骨組を解析する。このように順次求めてゆき崩壊に到るまでの荷重たわみ曲線を求めたものが、Fig. 12 に破線で示してある。ひずみ硬化を考慮していないので降伏以後実線の実験曲線よりかなり低下がはげしい。第2の解析では曲げモーメント曲率関係を完全弾塑性とせず、降伏ヒンジ発生後の降伏域を Fig. 13 のように考え、この塑性域の中での材軸に平行な繊維の応力ひずみ関係はひずみ硬化弾性係数 E_n をもつものとして、ヒンジの回転角とモーメントとの関係を求め、これによって骨組の荷重とたわみの関係を求めた。この結果は Fig. 12 の鎖線が示すように実験曲線とよく一致する。

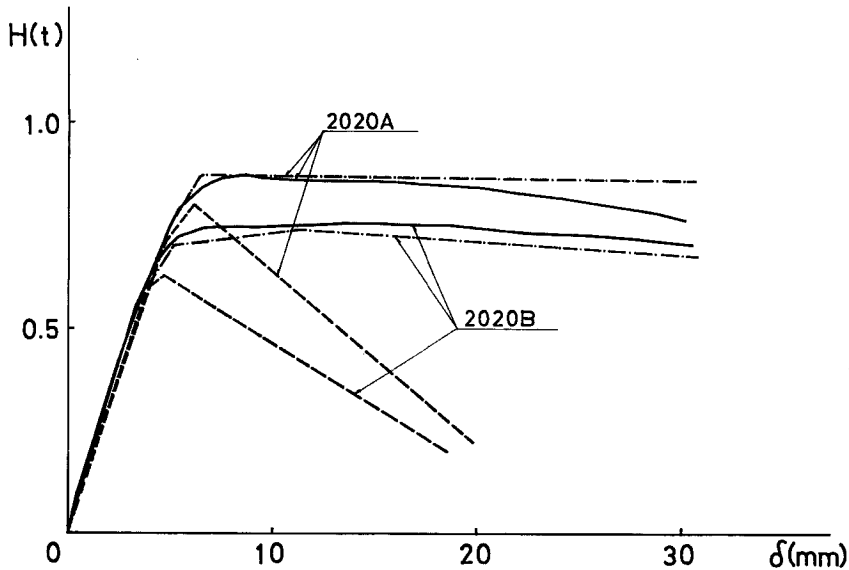


Fig. 12 Load-deflection Curves

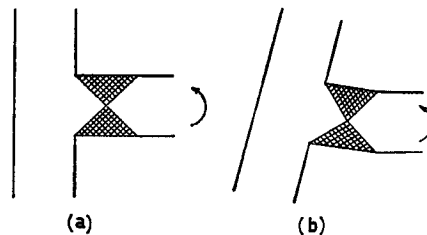


Fig. 13 Yield Hinge

3.3 H形断面をもつ1層ならびに2層ラーメンの実験

上述のような長方形断面をもつ部材からなる小型の試験体による実験でも、実際の架構の性状を見ることができ、H形鋼などを用いた実際の構造物と異なった性状を示す点もある。すなわち長方形断面とH形断面では曲げモーメントと曲率との関係が異なるし、接合部の変形状も異なる。またH形鋼では局部座屈も起り、さらに残留応力なども存在する。

このような理由で実際の構造物に用いられるようなH形断面をもつ供試体を試験することもまた必要である。そこでH形鋼を用いた実物の1/3程度の試験体で実験を行った¹⁶⁾¹⁷⁾。Fig. 14 は1層および2層の試験体で、構面外の変形を防ぐために2個の同形の骨組をH形鋼のつなぎ材で溶接接合してある。加力方法は

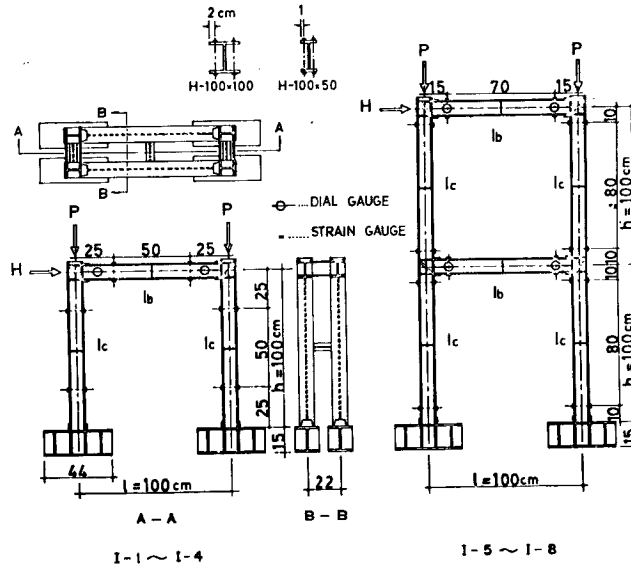


Fig. 14 Test Frames

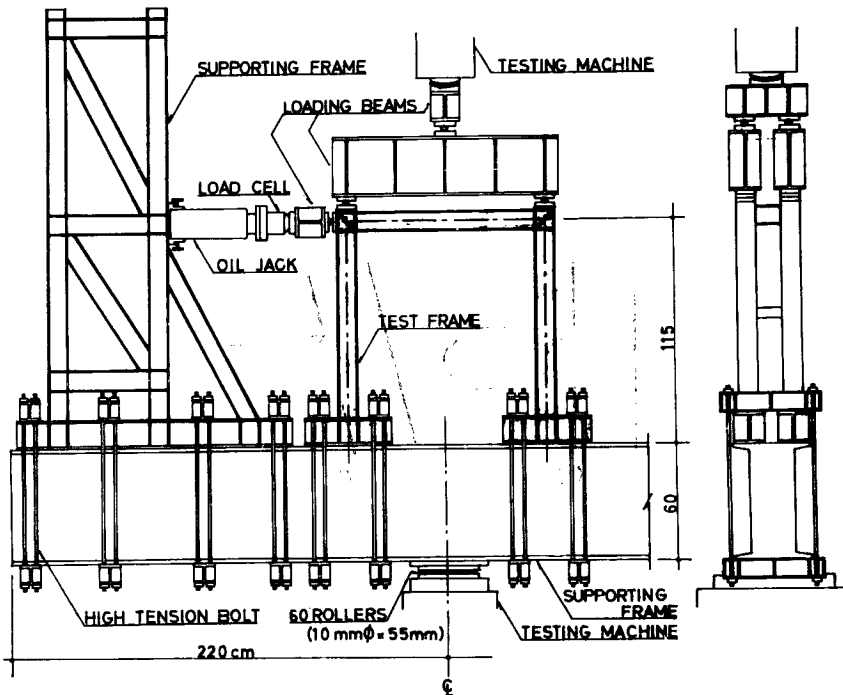


Fig. 15 Loading Arrangement

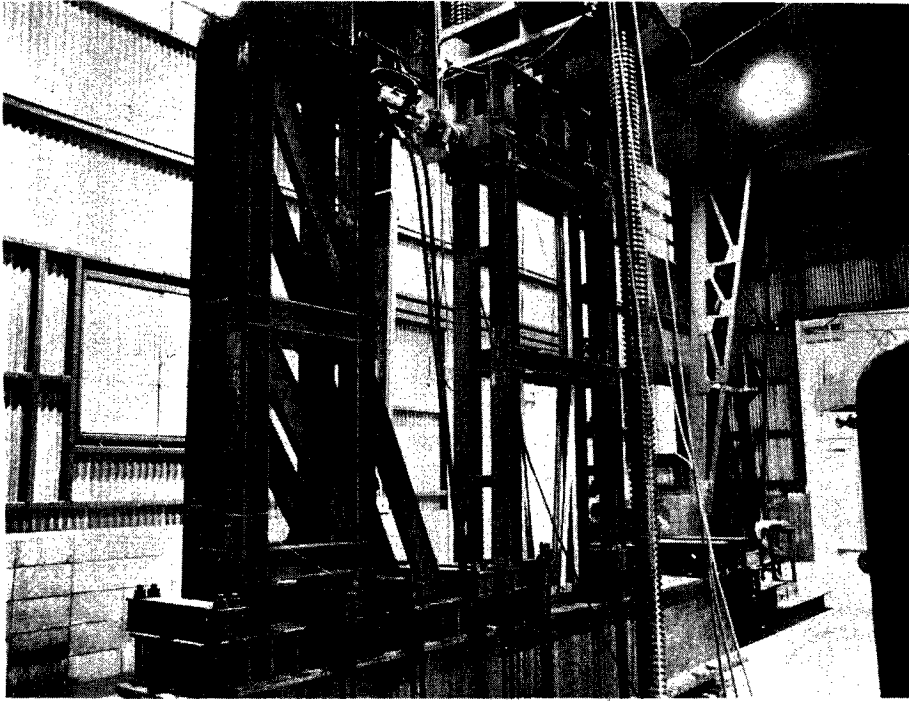


Photo. 4 Loading Arrangement

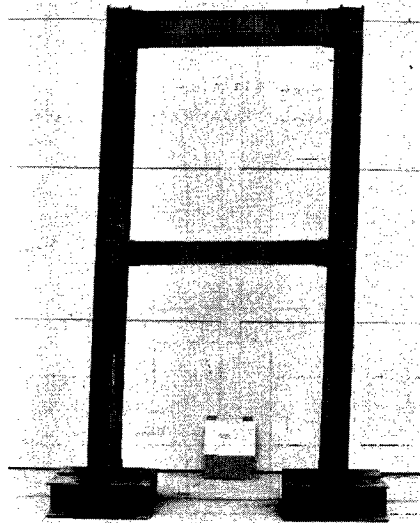


Photo. 5 Specimen after Test

Fig. 15, Photo. 4 に示すように、前項のものとはほぼ同じで、L字形の骨組に供試体を取付け、試験機により鉛直荷重を加え、オイルジャッキにより水平力を加えている。Photo. 5 は試験後の供試体の1例を示す。

解析は Fig. 16 に示すように門形ラーメンの半分をとったものについて行なっている。部材長と部材せ

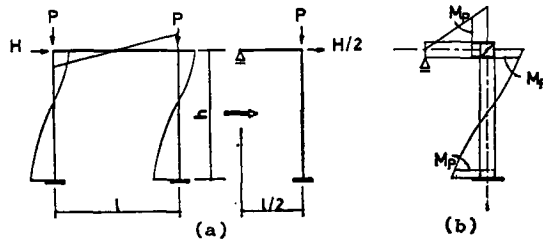


Fig. 16 Bending Moment Distribution

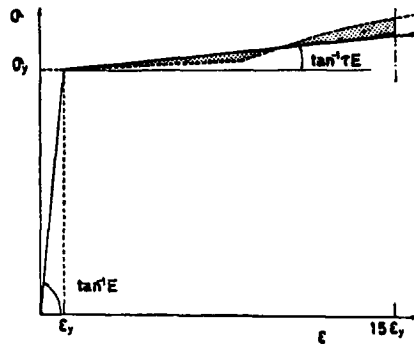


Fig. 17 Assumed Stress-Strain Relation

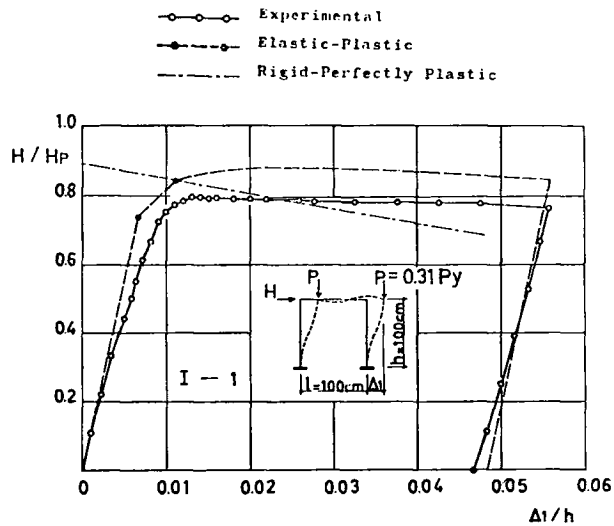


Fig. 18 Load-deflection Curves for One-Storeyed Frame

いとこの比が比較的小さいために材端の塑性ヒンジの位置の取り方で耐力がかなり変わってくるが、ここでは Fig. 16 (b) のように、材端のカバープレートにヒンジが発生するとし、それより仕口に近いところではモーメントは塑性モーメントより大きくなりうるとした。またひずみ硬化の影響を取り入れるために、最後のヒンジが発生して骨組がメカニズムになったときにその危険断面でひずみ硬化に入ると仮定した。Fig. 17 のように実際の応力ひずみ曲線を平均化した直線によって応力ひずみ関係を仮定し、これをもとにしてひずみ硬化に入ってからモーメントの増分と曲率の増分を求め、これによって荷重たわみ関係を求めた。Fig. 18, Fig. 19 に実験曲線と理論曲線の比較がしてあるが、両者はよく一致している。ただわずかに1層骨組では理論曲線が高く、2層骨組では低くなっているが理由はわからない。なお理論曲線のうち破線はH形鋼のせん断の影響を考えたものであり、これと実験曲線の立上り部分はよく一致しているが、実験曲線は理論曲線から早期にはなれる傾向がある。これはラーメンを固定するときの内部応力によって早期に降伏を起す部分があるのでではないかと考えている。試験体の残留応力の影響ではないかと考えて、焼鈍した試験体も実験してみたが全く変りはなかった。

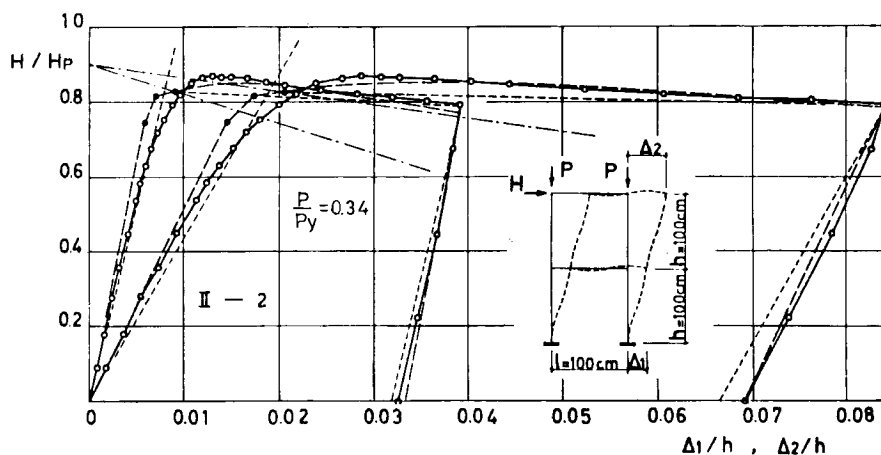


Fig. 19 Load-deflection Curves for Two-Storeyed Frame

試験体の柱の材長 h と強軸まわりの断面2次半径 i との比はいずれも24であり、Fig. 18, 19 の試験体でははりの剛比0.5、柱の軸力が降伏軸力の約30%であるが、この程度の寸法と軸力で降伏以後勾配がわずかに負となっていることがわかる。

3.4 H形断面をもつ十字形骨組の実験

多スパン高層ラーメンの下層部を代表する柱とはりを含んだ単純な骨組として十字形骨組を選んで実験を行なった¹⁸⁾¹⁹⁾。このような形であれば、はりからのせん断力によって柱の軸力が変化せず、また境界条件、適合条件も極めて単純であるから比較的厳密な解法を適用することができる利点がある。

Fig. 20 は供試体の形状を示す。Fig. 21, Photo. 6 に示すように、コの字形の骨組を反力棒とし、オイルジャッキを用いて、柱頭に鉛直荷重を、また柱脚に水平力を加えた。柱頭はピン支持、柱脚はピンおよびローラー支点となっている。はり端部はピンおよびローラー支持とし、実験中ははり端部と柱はり接合部の中心とが直線上にあるようにはり端部の高さを調整した。

この解析では Fig. 22 に示すように応力ひずみ関係を tri-linear にとり、これからモーメント曲率関係を求めると同図の実線のようになるので、これをさらに破線のように tri-linear に置換して骨組の荷重たわみの関係を求めている。Fig. 23 にこのような解析による結果と実験結果との数例が示してあるが、両

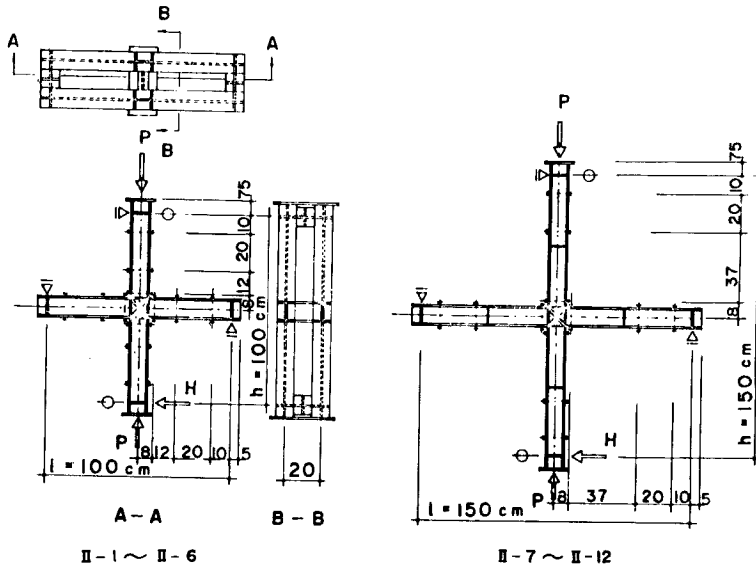


Fig. 20 Test Frames

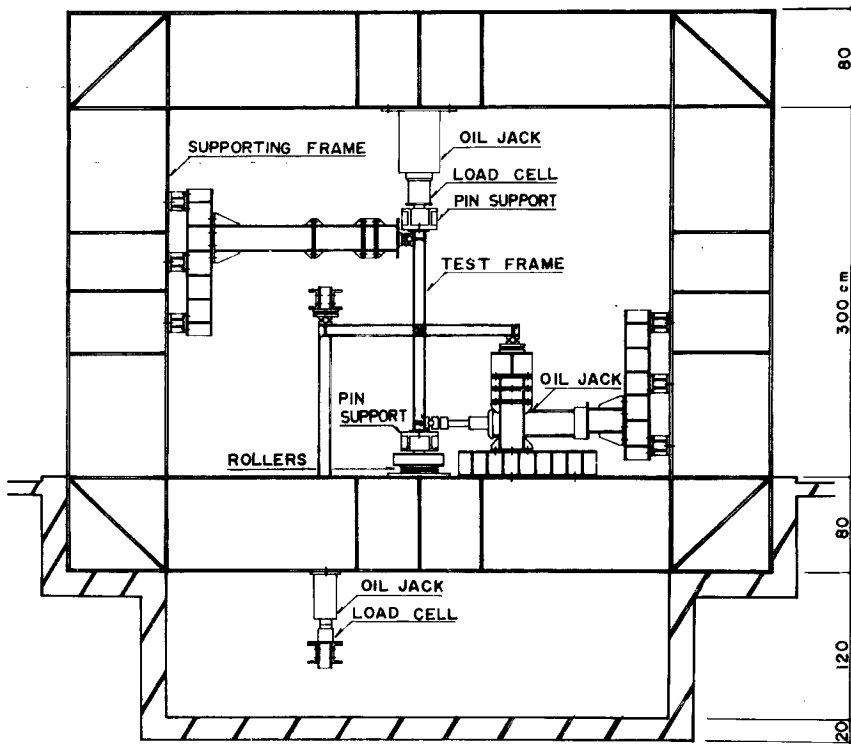


Fig. 21 Loading Arrangement

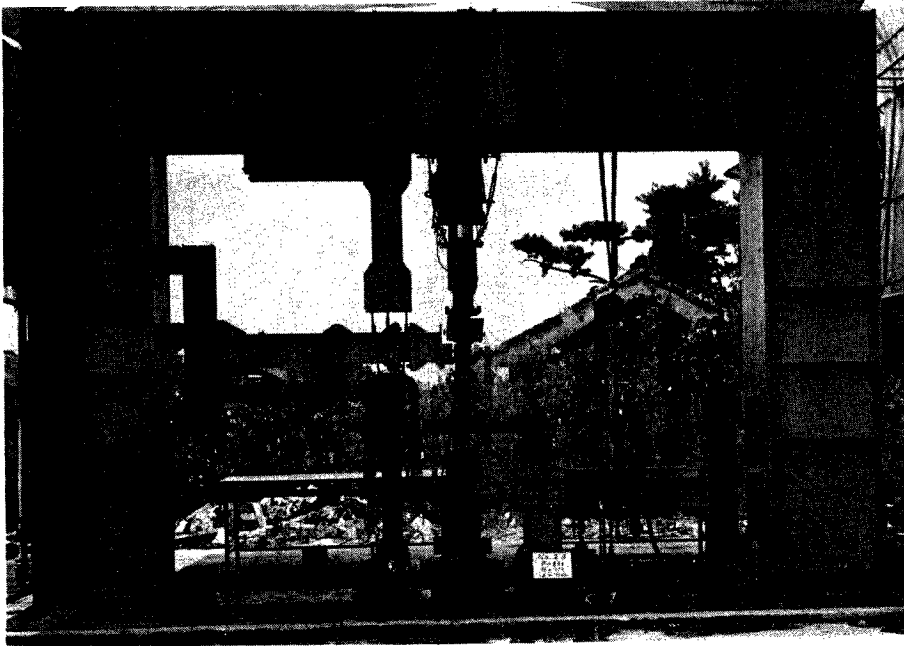


Photo. 6 Loading Arrangement

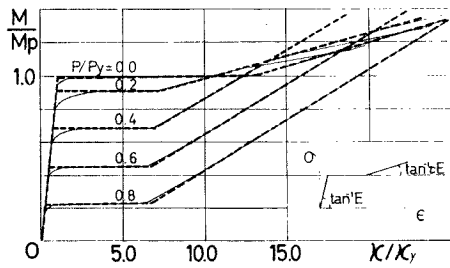


Fig. 22 Moment-Curvature Relation

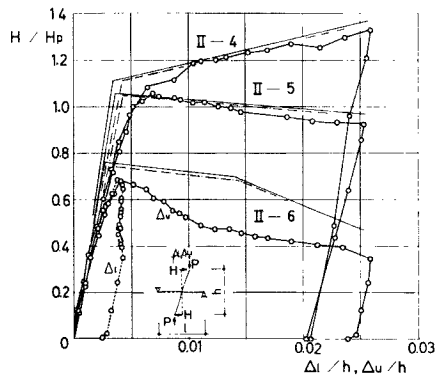


Fig. 23 Load-deflection Curves

者はよく一致している。なお十字形の試験体では柱が上下に分かれているため、鉛直力が大きく、しかも柱の細長比が大きく不安定現象が大きくあらわれるような場合に、上または下の柱が不安定になって変形が進み、他の変形もどる現象が見られた (Fig. 23 のⅡ-6 参照)。

3.5 H形断面をもつ肘形骨組の実験

十字形骨組をさらに単純化すると Fig. 24 のような肘形骨組となる。これを用いて鉛直荷重と繰返し水平力を受ける骨組の性状を調べた²⁰⁾。この場合も2個の骨組をH形鋼で接合して面外変形を起さないように

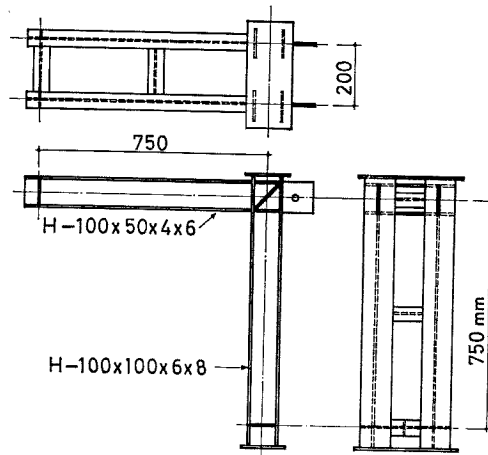


Fig. 24 Test Frame

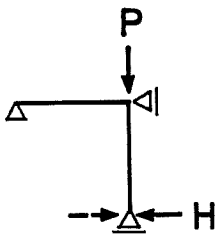


Fig. 25

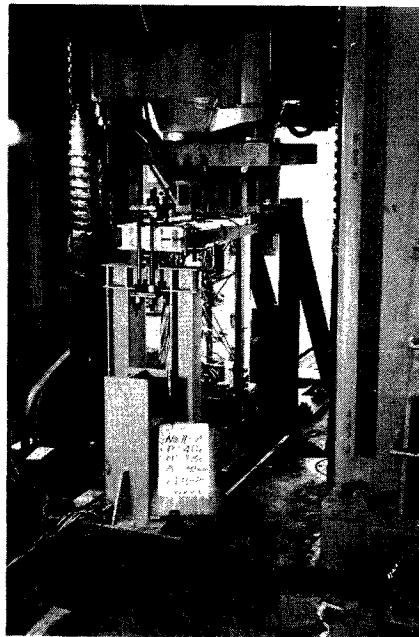


Photo. 7

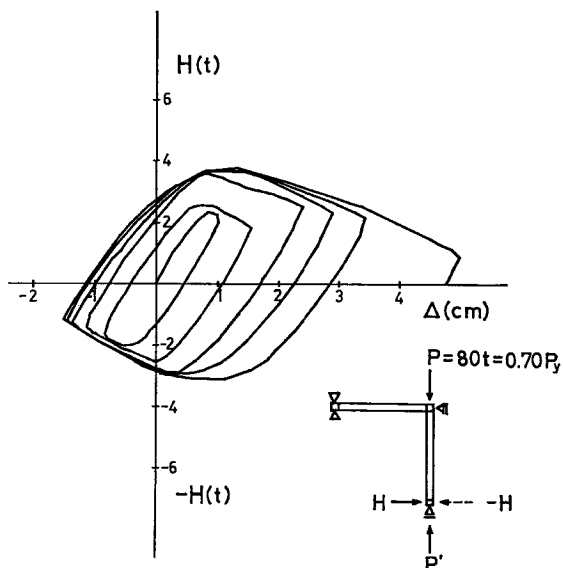


Fig. 26 Load-deflection Curve

してある。Fig. 25, Photo. 7 のように試験機で柱頭に鉛直荷重を加え、オイルジャッキによって柱脚部に繰返し水平力を与えている。Fig. 26 に柱の軸力が降伏軸力の70%の場合の荷重たわみ曲線を示す。

3.6 H形断面をもつ実大骨組の実験

3.3 ~ 3.5 項に述べたものは実物の1/3程度の模型であるが、次にほぼ実大に近い門形ラーメンの実験も

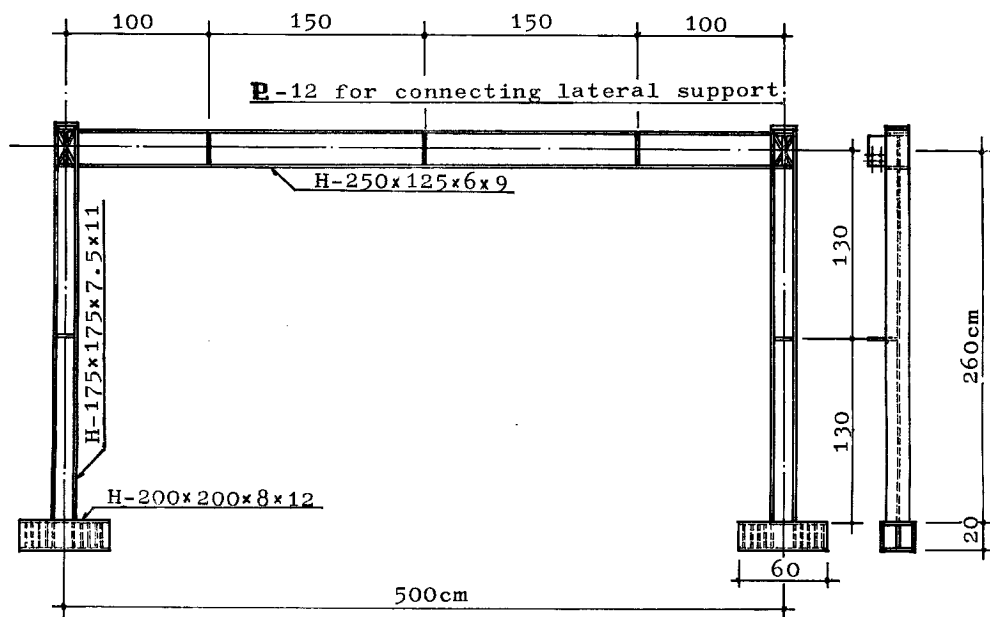


Fig. 27. Test Frame

行なった²¹⁾。Fig. 27 は試験体の形状を示す。スパン 500 cm, 階高 260 cm で、柱は H-175×175×7.5×11, はりは H-250×125×6×9 で両者の断面係数はほぼ等しい。柱の長さと同断面2次半径との比は 35 で、わが国における通常の高層建築の細長比よりやや大きい。加えた鉛直荷重は 0 のものと柱の降伏軸力の50%のものとの2種類である。

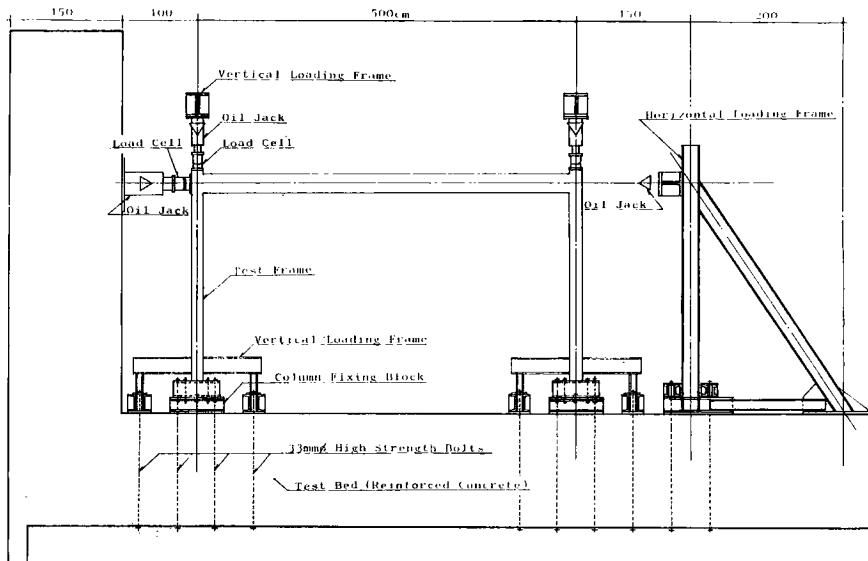


Fig. 28 Loading Arrangement

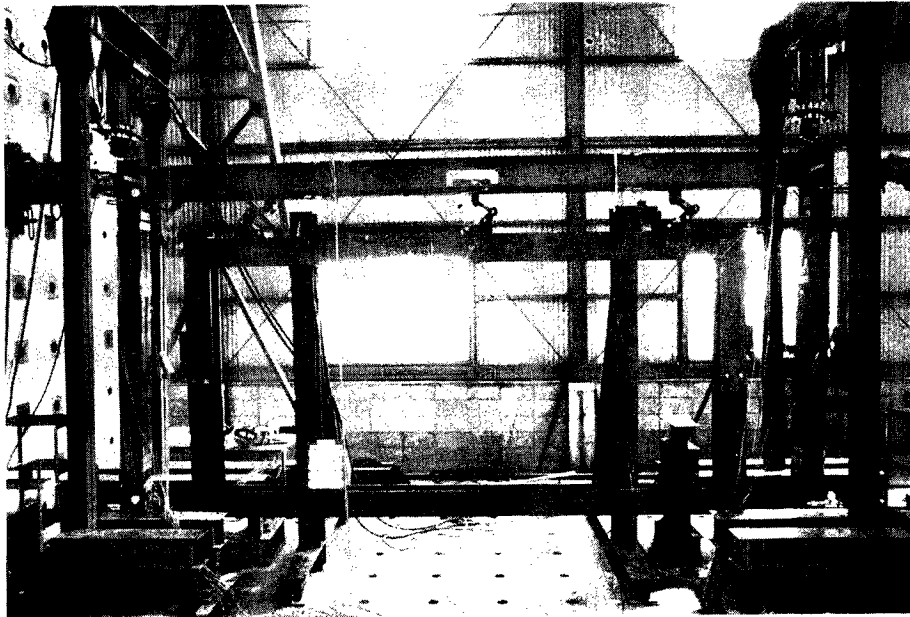


Photo. 8 Loading Arrangement

加力装置は Fig. 28 と Photo. 8 に示す。試験体の柱脚は構造物試験台に高力ボルトで固定され、水平力は試験台の壁あるいは鉄骨骨組で反力を取り、オイルジャッキで加えられた。鉛直荷重は門形の加力骨組で反力をとって、オイルジャッキで加えられた。この門形加力骨組の脚部はローラーを介して試験台によって反力をとるようになっており、このローラーによって門形加力骨組は自由に水平に移動できる。したがって鉛直荷重は常に鉛直方向を保持することができる。

またこの実験では骨組が大型であるので、2個組合わせることをせず、その代りに特殊の座屈止めを考案して用いている。すなわちこの座屈止めによって試験体の構面内の変形は自由で、構面外には移動しないようになっている。

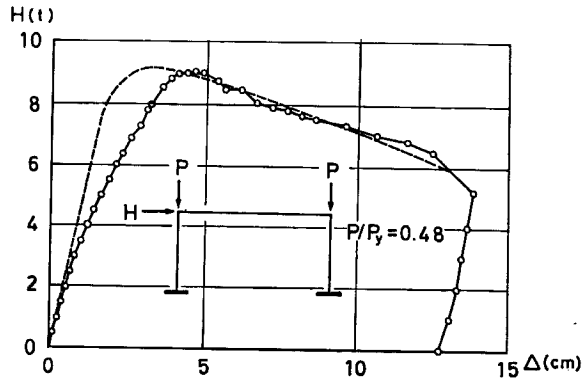


Fig. 29 Load-deflection Curves

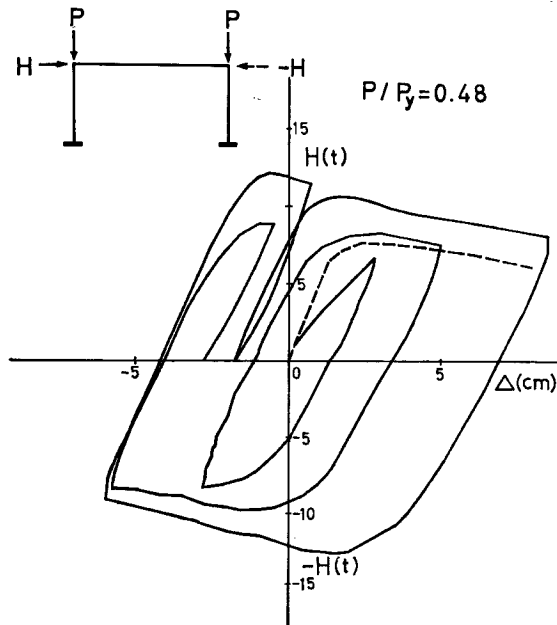


Fig. 30 Load-deflection Curves

Fig. 29 と Fig. 30 に柱の軸力が降伏軸力の約50%の場合の単調載荷ならびに繰返載荷における水平力と水平たわみとの関係を示す。理論曲線は3.3項で述べたのと同じ方法で求めたものである。Fig. 30 にみるように繰返し載荷の場合単調載荷より耐力が上昇する傾向があり、これは他の研究者によっても報告されている。単調載荷の場合は理論と実験とがほぼよく一致しているが、立上り部分で実験曲線が早期に傾くのは3.3項で述べたように試験体の柱脚を固定したときに生ずる内部応力のためであろうと思われる。

4. 筋違のある骨組の復元力特性

4.1 H形断面をもつ筋違付ラーメンの実験

筋違付きの骨組の水平力に対する性状を調べるため Fig. 31 に示すような骨組を用いて実験を行なった (Fig. 32 Photo. 922)23)24))。Fig. 33 には荷重たわみ曲線の1例が示されている。点線は単調加力、実線は繰返し加力の場合の実験値で、鎖線は単調加力の場合の理論値である。この理論曲線が示すように圧縮筋違の座屈とともに耐力は低下する。実験ではこれ程急激な傾向はみられなかった。

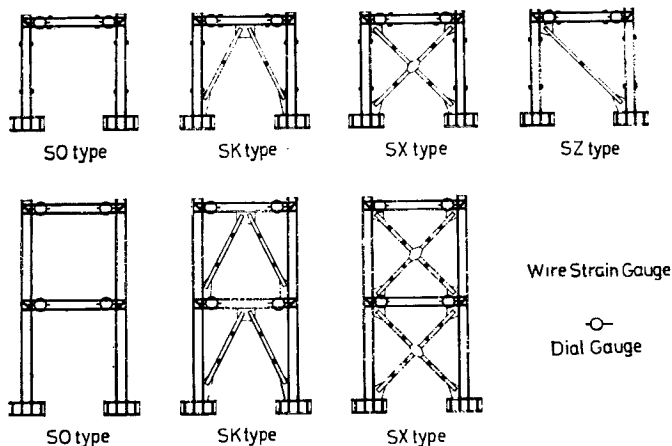


Fig. 31 Test Frames

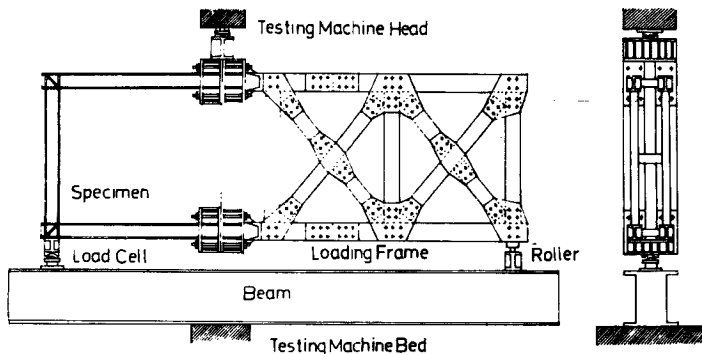


Fig. 32 Loading Arrangement

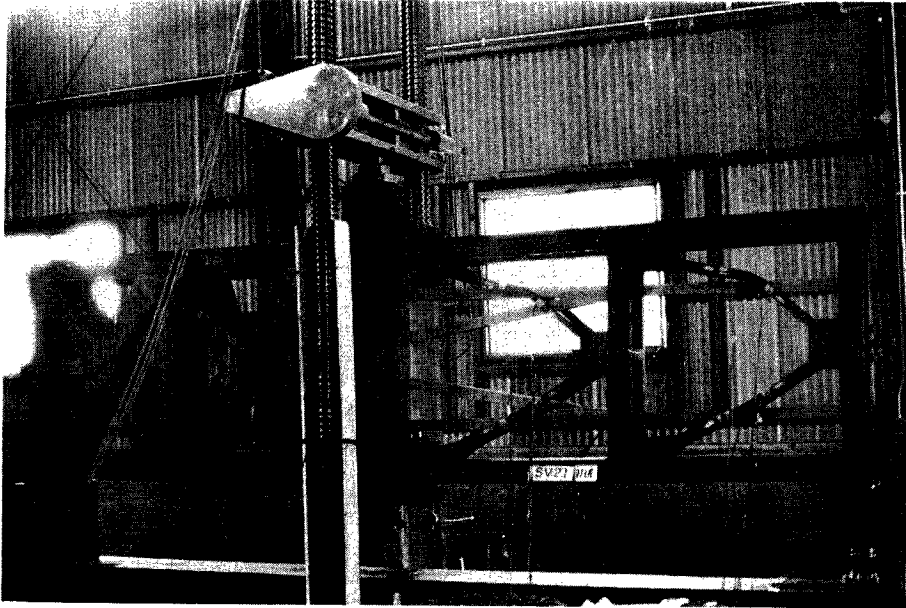


Photo. 9 Loading Arrangement

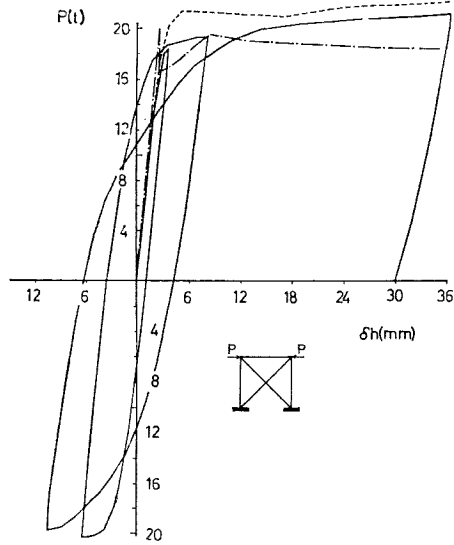


Fig. 33 Load-deflection Curve (SX1)

4.2 H形断面をもつ実大筋違付ラーメンの実験

3.6項で述べたものと同形の実大骨組にH形断面をもつ筋違を取付けたものについて実験を行なった²⁵⁾。3.6項と同じく一定の鉛直荷重を与えておき、単調あるいは繰返し水平力を加えた。Photo. 10に加力装置が、Fig. 34に水平力水平たわみ曲線の1例が示されている。繰返し加力により筋違の座屈と引張りが繰

返され、繰返し加力による荷重たわみ曲線のループは摩擦型になることが認められる。

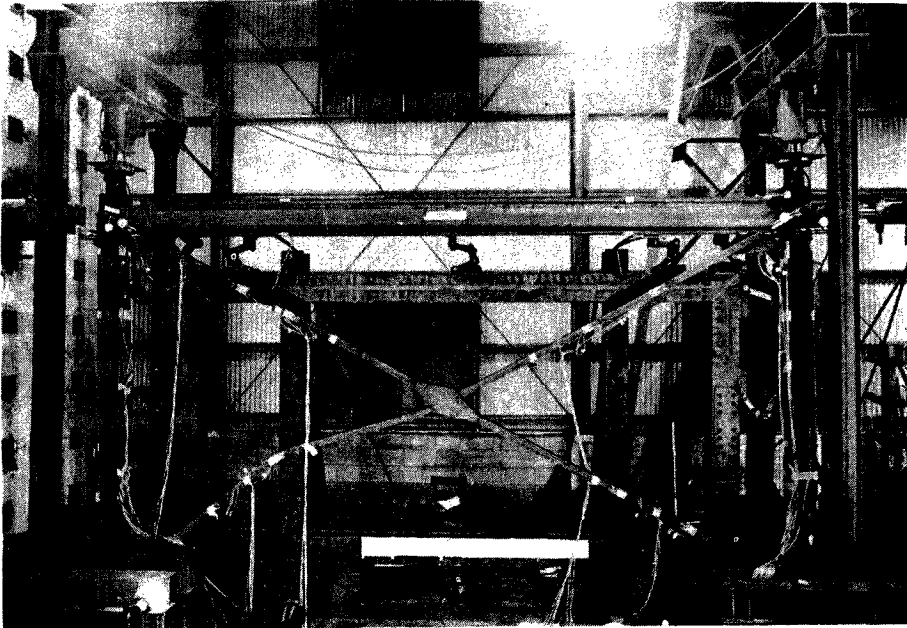


Photo. 10 Loading Arrangement

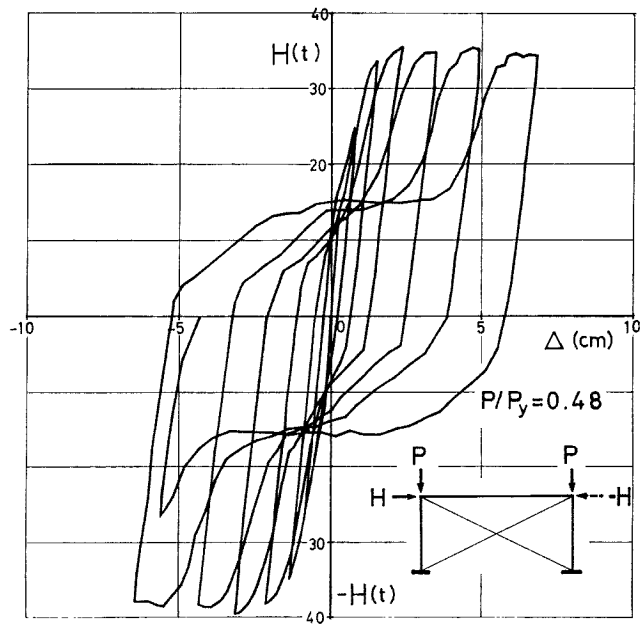


Fig. 34 Load-deflection Curve

5. 今後の研究すべき問題点

鉛直力と水平力とを受ける平面ラーメンに関しては理論的研究もかなり進められ、簡単な骨組ならばほぼ正解に近いものを求めることができるようになった。数十層にも及ぶ高層骨組を解く実用的解法が今後の研究課題となろう。実験資料についても内外の研究を合わせるとかなり整ってきたといえよう。

この方面に関する今後の重要な課題は立体ラーメンとしての挙動を調べることである。すなわち水平力が x y 両平面ラーメンの方向と一致しない場合の挙動や、一致していても柱あるいははりや横座屈による面外変形を伴うような場合についての弾塑性挙動については理論的あるいは実験的研究がほとんど無い。

筋違付きラーメンについては、筋違が座屈しない範囲の挙動については余り問題はないが、4節で取扱ったような筋違の座屈を伴う問題、特に繰返し荷重下における挙動についてはまだまだ研究資料が不足である。

参 考 文 献

- 1) R. H. Wood : The Stability of Tall Buildings Proc. of I. C. E. Vol. II, 1958, p. 69.
- 2) F. Moses : Inelastic Frame Buckling, Proc. of A. S. C. E., ST6. December 1964, p. 105.
- 3) J. Oxfort : Uber die Berechnung der Traglast eines Statische Unbestimmten Biegesteifen Stabwerkes aus Baustahl durch das Instabilwerden des Gleichgewichts, Der Stahlbau, Vol. 30, February, 1961, p. 45.
- 4) 黒羽啓明：ラーメンの弾塑性座屈の一解法，建築学会論文報告集号外，1965，p. 310.
- 5) J. A. Yura and T. V. Galambos : The Ultimate Strength of Single Story Frames, Fritz Eng. Lab. Report No. 273. 18 July 1964.
- 6) M. R. Horne : Elastic-plastic Failure Loads of plane Frames, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 274, 1963, p. 343.
- 7) A. Jennings and K. Majid : An Elastic-plastic Analysis by Computer for Framed Structures Loaded up to Collapse. Structurel Engineer No. 12. Vol. 43, 1965.
- 8) U. Vogel : Uber die Traglast Biegesteifer Stahlwerke. Der Stahlbau, 4/1963, S. 106.
- 9) 坂本 順，宮村篤典：鋼構造骨組の弾塑性域における変形と安定性に関する考察，日本建築学会論文報告集第110号，1965，p. 1，第113号，1965，p. 7，第116号，1965，p. 1.
- 10) 牧野 稔：水平力を受ける鉄骨ラーメンの変形状と終局耐力について，建築研究所報告 No. 46, October 1965.
- 11) S. Igarashi, et al: Plastic Behavior of Steel Frames under Cyclic Loadings. 日本建築学会論文報告集第130号，December 1966, p. 8.
- 12) p. Arnold. P. F. Adams. L. W. Lu: Experimental and Qualitital Behavior of a Hybrid Frame. Fritz Engineering Laboratory Report No. 297. 18 May 1966.
- 13) M. Wakabayashi : The Restoring Force Characteristics of Maltistorey Frames, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol. 14, Part 2. February 1965, p. 29.
- 14) 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，1965，p. 127.
- 15) 若林 実，室田達郎：高層ラーメンの復元力特性に関する実験的研究，(その1)，(その2)，京都大学院防災研究所年報，第9号，1965，p. 317 第10号，1967，p. 407.
- 16) 若林 実，野中泰二郎，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)，(その2)，京都大学防災研究所年報，第9号，1965，p. 295，第10号A，1967，p. 417.
- 17) M. Wakabayashi, T. Nonaka, C. Matsui : An Experimental Study on the Inelastic Behavior of Steel Frames Subjected to Vertical and Horizontal Loading. Bulletin of the Disaster Prevention

Research Institute. Kyoto University, Vol. 17, July 1967, p. 27.

- 18) 若林 実, 野中泰二郎, 松井千秋, 三谷 勲: H形鋼を用いた十字形集合材の弾塑性安定に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1968, p. 969.
- 19) 若林 実, 野中泰二郎, 松井千秋, 三谷 勲: H形鋼を用いた十字形集合材の弾塑性安定に関する実験および多線型解析, 京都大学防災研究所年報, 第12号, 1969,
- 20) 若林 実ほか: 未発表.
- 21) 若林 実ほか: 未発表.
- 22) 若林 実, 辻 文三: 繰返し水平荷重を受ける門型ラーメンの弾塑性性状, 京都大学防災研究所年報 第9号, 1966, p. 307.
- 23) 若林 実, 辻 文三: 繰返し水平荷重を受けるラーメンの性状, 京都大学防災研究所年報, 第10号A, 1967, p. 431.
- 24) M. Wakabayashi and B. Tsuji: Experimental Investigation on the Behavior of Frames with and without Bracing under Horizontal Loading, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 17, July 1967, p. 81.
- 25) 若林 実ほか: 未発表.