

斜材を含む架構の弾塑性解析

水畑 耕治

ELASTO-PLASTIC ANALYSIS OF FRAMED STRUCTURES WITH DIAGONAL BRACINGS.

by Koji MIZUHATA

Synopsis

In the dynamic analysis of a tall building structure, it is generally idealized by a spring-mass system of many-degrees of freedom. In this paper, the restoring force characteristics in the elasto-plastic region of the tall building which has diagonal bracings have been investigated. The simple models used are considered to be taken out of the lower part of the tall building and the large vertical loads are applied on it. The bracings are assumed to have comparatively large cross-sections. As the results, the horizontal load-displacement curves shown in Figs. 13 and 15 have been obtained and will be used in the future dynamic analysis.

1. 序

高層建築物の耐震設計のさいに、その高層建築物を多自由度のバネ質点系に抽象して動的解析がよく行なわれるが、現段階においては経験あるいは基礎資料の不足から、その上部構造のみについても質量分布や弾塑性復元力特性等の構造物モデルの抽象化に多くの問題点を内蔵している。上部構造に関しては、こんご、斜材や耐震壁等の耐震要素の効果、自重や積載荷重を含めた垂直荷重の影響、ある層の復元力特性への他層の影響、立体架構としての振れや面外座屈の問題等が動力学的研究されるべきであろうと思われる。超高層建築においては、その軽量化のために荷重はすべて骨組に負担させて壁はカーテルウォール程度として設計される傾向にあるが、がんらい、斜材や耐震壁は耐震部材としてその効果が認められているのであるから、これらを十分に考慮した動的解析についても検討を加えておかねばならない。また、軸方向力によって断面の塑性曲げモーメントが低下することは衆知のことであるが、とくに高層建築においてはその下層において大きな垂直荷重がかかっていることが考えられるから、これも考慮して動的解析が行なわれなければならないのは当然である。また通常の動的解析においては、構造物は剪断振動を行なうものとしてある層の復元力はその隣接層の変位のみによって決定されると仮定されているが、ラーメンの解析によっても明らかなるようにある層の剪断力は遠隔の層の変位にも関係している。そこで本研究においては、斜材の入った高層建築物からその下部の1層または3層をとり出し、軸方向力も考慮して、その弾塑性域での復元力特性を調べようと試みた。

斜材の耐震効果はつぎの項目に左右されると考えられる。

- (1) 構造物全体からみた斜材の配置
- (2) 1層1スパン内での斜材構成
- (3) 斜材断面寸法のラーメン材断面寸法に対する比
- (4) 斜材断面形

(5) 垂直荷重の有無

本研究にとり扱う場合は各節において詳細に述べられるが、全節を通じて、**Fig. 2** に示される斜材構成の層が重なっているものとする。

解析にあたってはつぎの仮定を設ける。

(1) 斜材の座屈特性および引張特性はそれぞれ **Fig. 1** (a), (b) に示すようなものとする。

(2) ラーメン材の曲げモーメント-曲率関係も **Fig. 1** (a) のようなものとし、塑性ヒンジ発生後、塑性ヒンジ以外の場所では部材は弾性的であると仮定する。

(3) 斜材とラーメン材との接合部はピンと仮定する。

(4) ここに取扱う斜材の寸法で斜材の効果を云々する範囲では、軸方向力の偏心による影響は小さいので、軸方向力の影響は塑性モーメントの軸方向力による低下のみとする。

(5) 梁の軸方向力は水平力のかかり方に関係するが、今回はこの影響を考慮しなかった。例えば、水平力を両柱頭に半分ずつかけた場合には、梁の軸方向力を考慮しても結果は変らなかった。しかし、これは当然柱梁の断面寸法比にも関係する。

(6) 軸方向力による歪は無視する。

今回は斜材断面寸法は変化させないが、斜材断面の大小によって斜材が先に座屈あるいは降伏したり、ラーメンが先に降伏したりして復元力特性が変わることが考えられる。斜材の

大小の影響についてはまた後日発表されるであろう。本研究では初段階として火力発電所の筋違にみられるようなかなり大きな断面の筋違を含む架構を取り扱う。斜材を入れる目的は単に構造物の初期剛性を高めることだけでなく、大変形までたどることのできる復元力特性を動力的にも有利に各層に与えること、さらには、斜材とラーメンが崩壊前まで一体となって地震に抵抗するように設計することで行なければならない。

第2節においては、ある火力発電所構造物の斜材の効果に関する研究のために行なわれた実験模型について解析し、実験結果と比較した。

第3節においては、地上25階の高層建築物から第2階をとり出し、それに適当な斜材を加えて、その垂直荷重のもとにおける水平力に対する復元力特性を調べようと試みた。

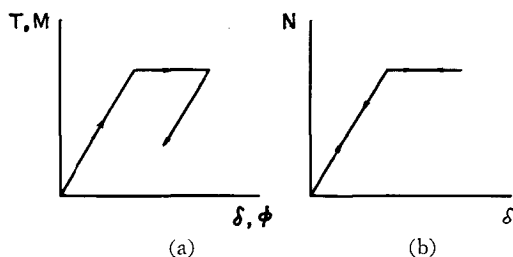


Fig. 1 (a): Tensile force (moment) vs. elongation (curvature) relationship.

(b): Compressive force vs. axial displacement relationship.

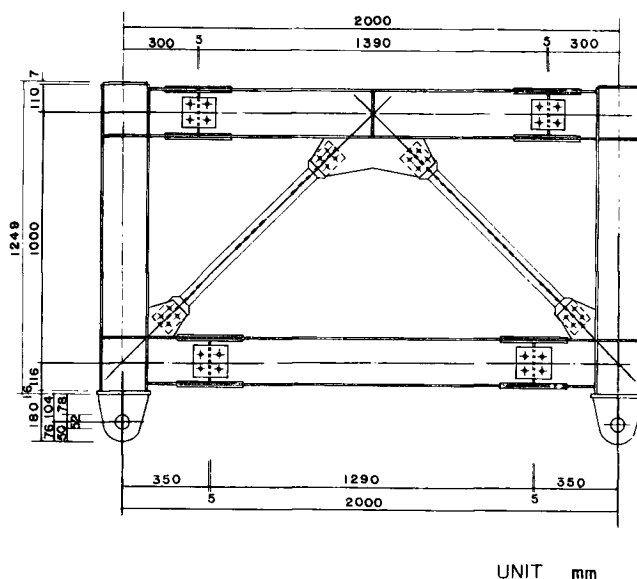


Fig. 2: Rigid frame with the diagonal bracings used in the experiment.

また、第4節においては、第3節と同じ25階の高層建築物から第2, 3, 4階の3層をとり出し、第3節と同じ荷重および斜材に対して中間の第3階の復元力特性が他層の影響を如何に受けるかを調べた。これは、また、数層を1つの質点と1つのバネにまとめて取り扱っている現在の動的解析に現実的な基礎資料を与えるものとなろう。また逆に、動的解析の結果から得られた資料を基礎にして外力の組合せ等を静的に与えることもできる。このように種々の解析の進歩の各段階においてえられるおのおのの結果に基づいて修正された解析を次段階において行なうという方法をとるのが望まれる。

2. 斜材を含む1層1スパン架構の弾塑性解析と実験

2.1. 模型概要

この模型は **Fig. 2** に示されている。これは火力発電所にみられる架構のやや上層部から斜材と共に選り出された1区画を約 $\frac{1}{4}$ に縮めたものである。図からわかるようにやや大きい断面の斜材が用いられているのが特徴である。縮尺 $\frac{1}{4}$ は実物の形体で小さくし得る限界としてとられた。模型の諸元は **Table 1** のごとくである。

Table 1: Dimensions of the model shown in Fig. 2.

	記号	単位	柱	梁	斜材
断面寸法		mm	$I-189 \times 160$ $\times 6/7.08$	$I-194 \times 150$ $\times 6/7.08$	$I-56.5 \times 50$ $\times 3.135/3.135$
断面積	A	cm^2	33.15	33.39	4.71
断面2次モーメント	I	cm^4	21 43($X-X$)	21 51($X-X$)	6.54($Y-Y$)
弾性断面係数	Z_e	cm^3	226.8	221.8	—
回転半径	i	cm	8.04	—	1.192
材長		cm	100	200	100
剛度	K	cm^3	21.43	10.75 ($=K_0$)	0.462
剛比	k		2.042 \approx 2	1.000	0.0043
坐屈係数	ω		1	—	—
降伏応力度	σ_v	t/cm^2	3	3	3
塑性断面係数	Z_p	cm^3	251.93	247.01	—
許容引張力		t	—	—	14.13
許容圧縮力		t	—	—	13.55

ヤング率 E は斜材ラーメン材共 $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ とする。斜材のラーメン材に対する諸元比は

$$\text{断面積について } \frac{A_B}{A_R} = \frac{4.71}{33.15} = 0.142$$

$$\text{断面2次モーメントについて } \frac{I_B}{I_R} = \frac{6.54}{2143} = 0.00305$$

となる。以下斜材及びラーメン材に対してそれぞれ添字 B 及び R を使用する。

2.2. 実験概要

この模型実験は現在なお続行中のものであるが、本論文では **Table 1** の諸元で斜材を含まないラーメンと斜材を含むラーメンについての実験のみを述べる。垂直荷重としてはその階の分布荷重および上層からの垂直荷重を3つの集中荷重に代表させて加えた。その大きさは模型のスケールとジャッキの能力から決められた。中央と両端の垂直荷重の割合は上階と下階で異なる。

(1) 斜材を含まないラーメンについて

(a) 計 測

模型の計測はストレインゲージ、リングゲージ及びダイヤルゲージの3種類で行なった。それらの計測点は **Fig. 3** に示されている。

(b) 载荷方法

荷重は垂直荷重と水平荷重をかけた。荷重装置は垂直荷重は 10 ton, 水平荷重は 30 ton の油圧ジャッキを使用した。荷重位置は **Fig. 4** に示されている。荷重段階は垂直荷重 P_V は一定荷重 3 ton のみ, 水平荷重 P_H は $0 \rightarrow 3^t \rightarrow 5^t \rightarrow 7^t \rightarrow 9^t \rightarrow 10^t \rightarrow 0$ とする。

(c) 結 果

水平荷重一撓み線図を **Fig. 13** に示す。その他の結果は後日にまとめて発表される。

(2) 斜材を含むラーメンについて

(a) 計 測

模型の計測は上と同じ3種類のゲージで行ない、それらの計測点は **Fig. 3** に示される。

(b) 载荷方法

荷重は垂直荷重と水平荷重で、荷重装置、荷重位置共斜材無しの場合と同様である。荷重段階は垂直荷重 P_V は一定荷重 6 ton のみ, 水平荷重 P_H は $0 \rightarrow 2^t \rightarrow 6^t \rightarrow 10^t \rightarrow 12^t \rightarrow 14^t \rightarrow 16^t \rightarrow 18^t \rightarrow 20^t \rightarrow 22^t \rightarrow 0$ とする。

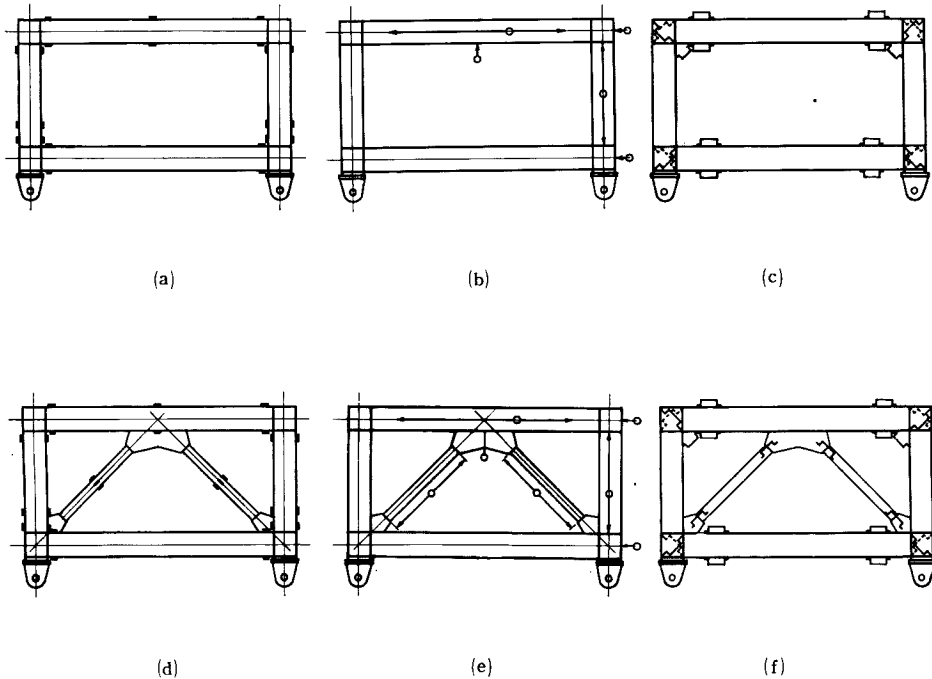


Fig. 3: Locations of the gauges.

(a) Strain gauges on the rigid frame without the bracing. (b) Dial gauges on the rigid frame without the bracing. (c) Ring gauges on the rigid frame without the bracing. (d) Strain gauges on the rigid frame with the bracings. (e) Dial gauges on the rigid frame with the bracings. (f) Ring gauges on the rigid frame with the bracings.

(c) 結果

水平荷重一撓み線図を Fig. 13 に示す。

2. 3. 弾塑性解析

弾塑性解析はつぎの3つの場合について行なった。

- (1) 斜材を含むラーメンに Fig. 4 の垂直及び水平荷重が加わった場合
 - (2) 斜材を含むラーメンに Fig. 4 の水平荷重のみが加わった場合
 - (3) 斜材を含まないラーメンに Fig. 4 の垂直及び水平荷重が加わった場合
- 仮定については序にまとめて示した。上の各場合について、以下に計算結果を示す。

2. 3. 1. 垂直水平両荷重をうける斜材付ラーメン

崩壊に至るまで数段階に分けて考えられる。

- (a) 圧縮引張両斜材及びラーメン材すべてに損傷のない領域

ラーメンの垂直荷重分担力を P_{VR} とすれば、ラーメンのモーメント分布は Fig. 5 のようになる。また荷重 P_{VR} 直下 E 点の垂直変位を δ_{VR} とすれば、下向きを正として、

$$\delta_{VR} = \frac{P_{VR}h^3}{14EI_R} \quad (1)$$

ただし、 h は柱材の長さである。なお、このとき柱材 AB 及び CD に働く圧縮力をそれぞれ N_{AB} 、 N_{CD} とすれば

$$N_{AB} = N_{CD} = P_{VR} + \frac{1}{2}P_{VR} = 1.5P_{VR} \quad (2)$$

以後圧縮力を正とする。

つぎに、斜材の鉛直荷重分担力を P_{VB} 、これによって生ずる斜材 AE 及び DE の圧縮力をそれぞれ N_{AE} 、 N_{DE} 、 E 点の変位を δ_{VB} とすれば、

$$N_{AE} = N_{DE} = \frac{P_{VB}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$\delta_{VB} = \frac{\sqrt{2}P_{VB}h}{EA_B} \quad (4)$$

$\delta_{VR} = \delta_{VB}$ から

$$\frac{P_{VB}}{P_{VR}} = \frac{EA_B h^2}{14\sqrt{2}I_R} \quad (5)$$

したがって、垂直荷重に対する分担係数は

$$\text{斜材について } \frac{P_{VB}}{P_V} = \frac{EA_B h^2}{14\sqrt{2}I_R + EA_B h^2} = 0.525 \quad (6)$$

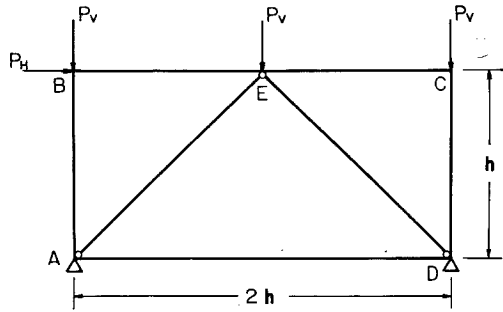


Fig. 4: Loads applied on the model in Fig. 2.

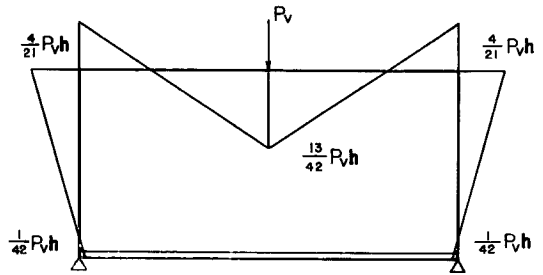


Fig. 5: Moment diagram for the rigid frame without the bracing due to the vertical load.

$$\text{ラーメンについて } \frac{P_{VR}}{P_V} = \frac{14\sqrt{2}I_R}{14\sqrt{2}I_R + A_B h^2} = 0.475 \quad (7)$$

となる。

つぎに、ラーメンの水平荷重分担力を P_{HR} とすれば、ラーメンのモーメント分布は **Fig. 6** のようになる。このとき、柱 AB 及び CD に働く軸方向力は

$$N_{AB} = -\frac{P_{HR}}{4}, \quad N_{CD} = \frac{P_{HR}}{4} \quad (8)$$

また、 B 点の水平変位を δ_{HR} とすれば

$$\delta_{HR} = \frac{P_{HR} h^2}{16EK_0} \quad (9)$$

となる。ここに K_0 は標準剛度で

$$K_0 = \frac{I_R}{h} = 10.75$$

である。

つぎに、斜材の水平分担力を P_{HB} とし、これによって生ずる水平変位を δ_{HB} とすれば

$$\delta_{HB} = \frac{\sqrt{2} P_{HB} h}{EA_B} \quad (10)$$

このとき、斜材の軸方向力は

$$N_{AB} = -\frac{P_{HB}}{\sqrt{2}}, \quad N_{DE} = \frac{P_{HB}}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

$\delta_{HR} = \delta_{HB}$ から

$$\frac{P_{HB}}{P_{HR}} = \frac{A_B h}{16\sqrt{2}K_0} = \frac{A_B h^2}{16\sqrt{2}I_R} \quad (12)$$

したがって水平荷重に対する分担係数は

$$\text{斜材について } \frac{P_{HB}}{P_H} = \frac{A_B h^2}{16\sqrt{2}I_R + A_B h^2} = 0.656 \quad (13)$$

$$\text{ラーメンについて } \frac{P_{HR}}{P_H} = \frac{16\sqrt{2}I_R}{16\sqrt{2}I_R + A_B h^2} = 0.344 \quad (14)$$

したがって、垂直荷重と水平荷重とが同時にかかっているとき、圧縮斜材 DE の圧縮力は(3), (6), (11)及び(13)から

$$\frac{P_{VB}}{\sqrt{2}} + \frac{P_{HB}}{\sqrt{2}} = \frac{0.525}{\sqrt{2}} P_V + \frac{0.656}{\sqrt{2}} P_H = 0.371 P_V + 0.464 P_H \quad (15)$$

であり、斜材の座屈荷重を N_k とすれば

$$N_k = \frac{\pi^2 EI_B}{l_k^2} = 13.55 t \quad (16)$$

(l_k = 座屈長さ = 100cm)

であるから、 $P_V = 6 \text{ ton}$ の時、斜材に座屈をおこさせる水平荷重を P_{HK} とすれば

$$0.371 P_V + 0.464 P_{HK} = 13.55 t \quad (17)$$

によって $P_{HK} = 24.3 t$ となる。

このときの水平変位は(9)と(14)から

$$\delta_{HR} = \frac{0.344 P_H h^2}{16EK_0} = 0.218 \text{ cm}$$

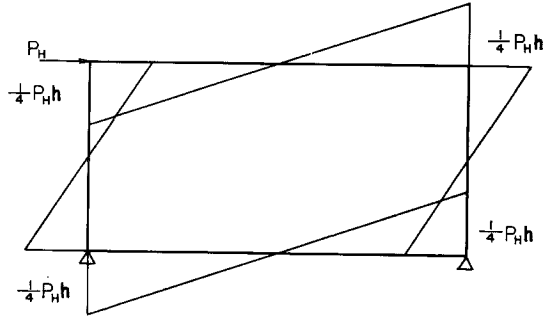


Fig. 6: Moment diagram for the rigid frame without the bracing due to the horizontal load.

このとき、架構の他の部分に損傷はない。

(b) 圧縮斜材座屈後の挙動

圧縮斜材が座屈した後さらに加えられる水平荷重を ΔP_H とすれば、そのとき、斜材およびラーメンに働く力関係は **Fig. 7** のようになる。図中(b)は既知であるから、(a)を解くためには(c)を解けばよい。(c)は(d)と(e)に、さらにはE点の力の釣合から(f)と(g)に分解できる。ここに ΔP_{HR} および ΔP_{HB} はそれぞれ ΔP_H のラーメンおよび斜材の分担部分である。以下において圧縮斜材座屈後引張斜材が降伏するときの追加水平荷重 ΔP_{HY} を求める。

Fig. 7 において引張斜材には (3)、(6)、(11)および(13)から

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{P_{VB}}{\sqrt{2}} - \frac{P_{HB}}{\sqrt{2}}\right) \\ & = 0.464P_{HK} - 0.371P_V = 9.11t \end{aligned}$$

なる引張力が働いており、降伏引張力は $\sigma_y A_B = 14.13t$ であるから、降伏までに追加できる引張力は

$14.13 - 9.11 = 5.02t$ である。したがって **Fig. 7** (g) から

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \Delta P_{HB} &= 5.02 \\ \therefore \Delta P_{HB} &= 3.55t \end{aligned}$$

つぎに、E点における変形適合を考えると **Fig. 7** (f)、(g) の力によって生ずる変形は、

$$\left. \begin{aligned} \text{ラーメンの垂直変位: } \Delta \delta_{VR} &= \frac{\Delta P_{HB} h^3}{14EI_R} \\ \text{ラーメンの水平変位: } \Delta \delta_{HR} &= \frac{\Delta P_{HR} h^2}{16EK_0} \\ \text{引張斜材の伸び: } \Delta \delta_{HB} &= \frac{2\Delta P_{HB}}{EA_B} \end{aligned} \right\} (18)$$

であり、**Fig. 7** (h) によって

$$\Delta \delta_{HR} - \sqrt{2} \Delta \delta_{HB} = \Delta \delta_{VR} \tag{19}$$

であるから、(18)と(19)から

$$\begin{aligned} \Delta P_{HR} &= 5.71t \\ \therefore \Delta P_{HY} &= \Delta P_{HB} + \Delta P_{HR} = 9.26t \end{aligned}$$

このとき、追加の水平変位は(18)の第2式から

$$\Delta \delta_{HR} = 0.149 \text{ cm}$$

したがって、引張斜材が降伏するまでの合計の水平荷重 P_{HY} 及び水平変位 δ_{HY} はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} P_{HY} &= P_{HK} + \Delta P_{HY} = 33.56t \\ \delta_{HY} &= \delta_{HK} + \Delta \delta_{HY} = 0.367 \text{ cm} \end{aligned}$$

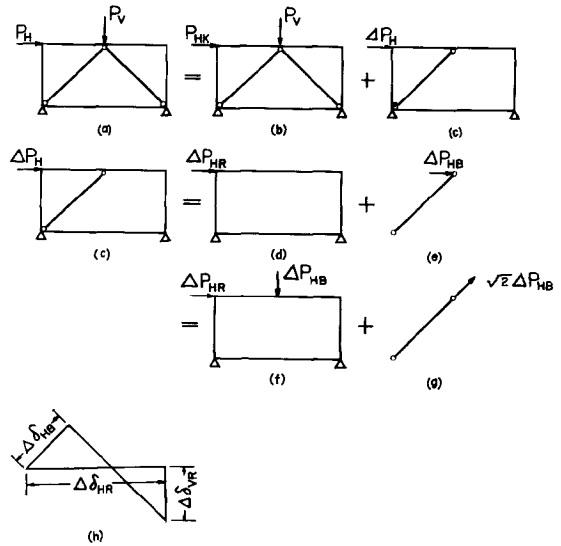


Fig. 7: Force relationships ((a)~(g)) and compatibility of the displacements at E((h)) after buckling of the compressive bracing before yield of the tensile bracing of the model in **Fig. 2**.

ちなみにこのときの分担係数は

$$\text{斜材について } \frac{\Delta P_{HB}}{\Delta P_{HY}} = \frac{3.55}{9.26} = 0.384$$

$$\text{ラーメンについて } \frac{\Delta P_{HR}}{\Delta P_{HY}} = \frac{5.71}{9.62} = 0.616$$

引張斜材降伏時までに、ラーメンには損傷は起こっていない。

(c) 引張斜材降伏後の挙動

引張斜材降伏後、一定垂直荷重 P_V のもとになお水平荷重を増加させていくとついにはラーメン部材の一部が降伏し始める。以下にラーメン部材降伏時の水平荷重 P_{HY} を計算する。

序の仮定にのべたように、

斜材は座屈や降伏の後には

Fig. 1 に示すような挙動をするから、この場合架構に働

いている力関係は **Fig. 8** (a)

のようになる。(a)は(b)、さら

には(c)のように置換することが

できるから、(a)を解くため

には(c)をとけばよい。(c)はラ

ーメンに垂直および水平荷重がかか

っているだけであるから、モーメント図 **Fig. 5, 6**

が適用できる。

このモーメント図と軸方向力を合わせ考

えることによって、降伏はまず右柱頭 (C点)

におこることがわかる。柱頭では、

$$\text{垂直荷重によるモーメント: } M_{CD} = -\frac{4}{21}P_V h = -\frac{4}{21} \times 6.4 \times 1 = -1.22 \text{ tm}$$

$$\text{水平荷重によるモーメント: } M_{CD} = -\frac{1}{4}P_H h = -\frac{(P'_{HY} - 19.6) \times 1}{4} = -(0.25P'_{HY} - 4.9) \text{ tm}$$

$$\text{モーメントの合計: } -(0.25P'_{HY} - 3.68) \text{ tm}$$

$$\text{垂直荷重による軸方向力: } N_{CD} = 6 + 3.2 = 9.2 t$$

$$\text{水平荷重による軸方向力: } N_{CD} = \frac{P_H}{4} = \frac{P'_{HY} - 19.6}{4} = (0.25P'_{HY} - 4.9) t$$

$$\text{軸方向力の合計: } (0.25P'_{HY} + 4.3) t$$

ただしモーメントは時計向を正とする。

したがって右柱頭に塑性ヒンジを生じたとき、

$$\sigma_y = \frac{\omega N_{CD}}{A} - \frac{M_{CD}}{Z_P} \tag{20}$$

から

$$3 = \frac{1 \times (0.25P'_{HY} + 4.3)}{33.15} + \frac{(0.25P'_{HY} - 3.68) \times 100}{249.8}$$

$$\therefore P'_{HY} = 40.6 t$$

このとき、

斜材の水平荷重分担力: $19.6 t$

ラーメンの水平荷重分担力: $21.0 t$

であり、柱頭の水平変位は(9)から

$$\delta'_{HY} = 0.575 \text{ cm}$$

(d) 右柱頭に塑性ヒンジ発生後の挙動

右柱頭に塑性ヒンジ発生後、一定垂直荷重 P_V のもとにさらに水平荷重を追加して行くと、他の柱頭

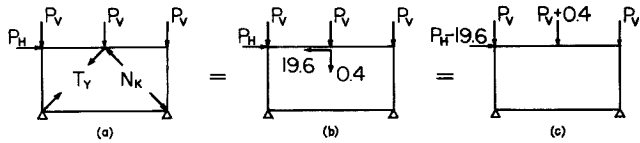


Fig. 8: Force relationships after yield of the tensile bracing before yield of the right column.

につぎつぎと塑性ヒンジを発生し、ついには4箇所のすべての柱頭に塑性ヒンジを生じて崩壊に至る。

右柱頭に塑性ヒンジ発生後、つぎの塑性ヒンジが発生するまでに追加できる水平荷重を $\Delta P'_{HY}$ とすると、この場合の力関係は Fig. 9 のようになる。このうち(b), (c)は既知であるから(d)のみについて解けばよい。(d)に対するモーメント分布は Fig. 10 に示されている。柱に働く軸方向力と Fig. 5, 6, 10 の曲げモーメント図を考察することによって、次の塑性ヒンジは右柱脚Dにおこることが予想できる。右柱脚Dでは

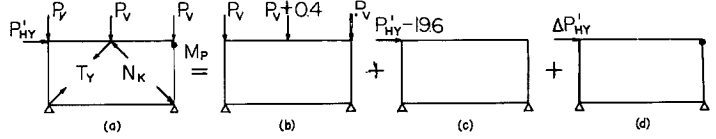


Fig. 9: Force relationships after the first plastic hinge has appeared on the right column.

$$\text{垂直荷重によるモーメント: } M_{DC} = -\frac{1}{42} P_V h = -\frac{1}{42} \times 6.4 \times 1 = -0.152 \text{ tm}$$

$$\text{旧水平荷重によるモーメント: } M_{DC} = -\frac{1}{4} P_H h = -\frac{1}{4} \times 21.0 \times 1 = -5.25 \text{ tm}$$

$$\text{追加水平荷重によるモーメント: } M_{DC} = -\frac{49}{143} \Delta P'_{HY} h = -0.343 \Delta P'_{HY} \text{ tm}$$

$$\text{モーメントの合計: } -(5.40 + 0.343 \Delta P'_{HY}) \text{ tm}$$

$$\text{垂重荷重による軸方向力: } N_{DC} = 6 + 3.2 = 9.2 \text{ t}$$

$$\text{旧水平荷重による軸方向力: } N_{DC} = \frac{P_H}{4} = \frac{1}{4} \times 21 = 5.25 \text{ t}$$

$$\text{追加水平荷重による軸方向力: } N_{DC} = \frac{M_{BG} + M_{CB}}{2h} = \frac{M_{BG}}{2h} = 0.14 \Delta P'_{HY} \text{ t}$$

$$\text{軸方向力の合計: } (14.45 + 0.14 \Delta P'_{HY}) \text{ t}$$

したがって右柱脚に塑性ヒンジを生じたとき、(20)から

$$3 = \frac{14.45 + 0.14 \Delta P'_{HY}}{33.15} + \frac{(5.40 + 0.343 \Delta P'_{HY}) \times 100}{249.8}$$

$$\therefore \Delta P'_{HY} = 2.95 \text{ t}$$

$\Delta P'_{HY}$ に対する柱頭の水平変位は

$$\Delta \delta'_{HY} = \frac{31 \Delta P'_{HY} h^2}{286 E K_0} = 0.142 \text{ cm}$$

したがって右柱脚に塑性ヒンジが発生するまでの合計の水平荷重 P'_{HY} および水平変位 δ'_{HY} はつぎのようになる。

$$P'_{HY} = P'_{HY} + \Delta P'_{HY} = 43.55 \text{ t}$$

$$\delta'_{HY} = \delta'_{HY} + \Delta \delta'_{HY} = 0.717 \text{ cm}$$

(e) 右柱脚に塑性ヒンジ発生後の挙動

右柱脚に塑性ヒンジ発生後、つぎの塑性ヒンジが発生するまでに追加できる水平荷重を $\Delta P'_{HY}$ とすると、この追加分に対する架構、荷重およびモーメント分布は Fig. 11 のよ

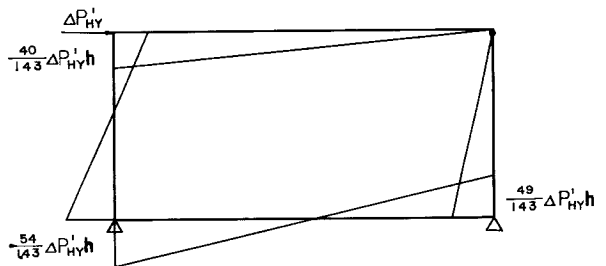


Fig. 10. Moment diagram for the rigid frame without the bracing due to the additional horizontal load after the first plastic hinge has appeared on the right column.

うになる。柱に働く軸方向力と **Fig. 5, 6, 10, 11** の曲げモーメント図を考察することによって、つぎの塑性ヒンジは左柱脚 A に発生することが予想できる。左柱脚では、

$$\text{垂直荷重によるモーメント：} M_{AB} = \frac{1}{42} P_V h = \frac{1}{42} \times 6.4 \times 1 = 0.152 \text{ tm}$$

$$\text{旧水平荷重によるモーメント：} M_{AB} = -\frac{1}{4} P_H h - \frac{54}{143} \Delta P_{HY} h = -\frac{21}{4} - \frac{54 \times 2.95}{143} = -6.36 \text{ tm}$$

$$\text{追加水平荷重によるモーメント：} M_{AB} = -\frac{1}{2} \Delta P_{HY} h = -0.5 \Delta P_{HY} \text{ tm}$$

$$\text{モーメントの合計：} -(6.21 + 0.5 \Delta P_{HY}) \text{ tm}$$

$$\text{垂直荷重による軸方向力：} N_{AB} = 9.2 t$$

$$\text{旧水平荷重による軸方向力：} N_{AB} = -\frac{P_H}{4} - \frac{20}{143} \Delta P_{HY} = -\frac{21}{4} - \frac{20 \times 2.95}{143} = -5.66 t$$

$$\text{追加水平荷重による軸方向力：} N_{AB} = -\frac{M_{BC}}{2h} = -0.25 \Delta P_{HY} t$$

$$\text{軸方向力の合計：} (3.54 - 0.25 \Delta P_{HY}) t$$

この場合は引張による降伏も起り得るから圧縮と同時に引張も考えねばならない。左柱脚に塑性ヒンジを生じたとき、(20)から

$$3 = \pm \frac{3.54 - 0.25 \Delta P_{HY}}{33.15} + \frac{(6.21 + 0.5 \Delta P_{HY}) \times 100}{249.8}$$

$$\therefore \Delta P_{HY} = 2.12 t \text{ (圧縮) 或は } 3.00 t \text{ (引張)}$$

上式中一は引張に対するものであるが、圧縮に対する ΔP_{HY} の方が小さいのでこれをとる。 $\Delta P_{HY} = 2.12 t$ に対する柱頭の水平変位は

$$\Delta \delta_{HY} = \frac{0.21 \Delta P_{HY} h^2}{EK_0} = 0.196 \text{ cm}$$

したがって左柱脚に塑性ヒンジが発生するまでの合計の水平荷重 P_{HY} および水平変位 δ_{HY} はつぎのようになる。

$$P_{HY} = P_{HY} + \Delta P_{HY} = 45.67 t$$

$$\delta_{HY} = \delta_{HY} + \Delta \delta_{HY} = 0.913 \text{ cm}$$

(f) 左柱脚に塑性ヒンジ発生後の挙動
左柱脚に塑性ヒンジ発生後、つぎに左柱頭に最後の塑性ヒンジが発生するまでに追加できる水平荷重を ΔP_{HY} とすると、この追加分に対する架構、荷重およびモーメント分布は **Fig. 12** のようになる。**Fig. 5, 6, 10, 11, 12** を参照して、左柱頭では

垂直荷重によるモーメント：

$$M_{BA} = \frac{2}{24} P_V h = 1.22 \text{ tm}$$

旧水平荷重によるモーメント：

$$M_{BA} = -\frac{21}{4} - \frac{40 \times 2.95}{143}$$

$$-0.5 \times 2.12 = -7.13 \text{ tm}$$

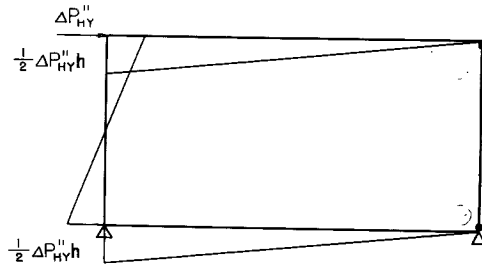


Fig. 11: Moment diagram for the rigid frame without the bracing due to the additional horizontal load after the second plastic hinge has appeared on the right column.

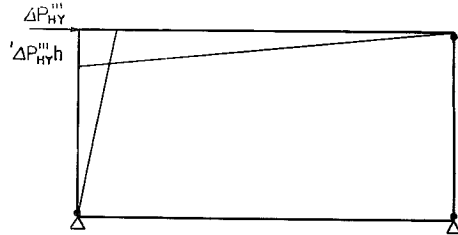


Fig. 12: Moment diagram for the rigid frame without the bracing due to the additional horizontal load after the third plastic hinge has appeared on the left column.

追加水平荷重によるモーメント： $M_{BA} = -\Delta P_{HY} h = -\Delta P_{HY} t m$

モーメントの合計： $-(5.91 + \Delta P_{HY}) t m$

垂直荷重による軸方向力： $N_{BA} = 9.2 t$

旧水平荷重による軸方向力： $N_{BA} = -\frac{21}{4} - \frac{20 \times 2.95}{143} - 0.25 \times 2.12 = -6.19 t$

追加水平荷重による軸方向力： $N_{BA} = -0.5 \Delta P_{HY} t$

軸方向力の合計： $(3.00 - 0.5 \Delta P_{HY}) t$

したがって左柱頭に塑性ヒンジが発生したとき、(20)から

$$3 = \pm \frac{3.00 - 0.5 \Delta P_{HY}}{33.15} + \frac{(5.91 + \Delta P_{HY}) \times 100}{249.8}$$

$\therefore \Delta P_{HY} = 1.43 t$ (圧縮), $1.76 t$ (引張)

前と同様小さい方の $\Delta P_{HY} = 1.43 t$ をとる。この ΔP_{HY} に対する柱頭の水平変位は

$$\Delta \delta_{HY} = \frac{\Delta P_{HY} h^2}{2EK_0} = 0.316 \text{ cm}$$

したがって左柱頭に塑性ヒンジが発生するとき、すなわち崩壊までの全水平荷重 P_{HF} および水平変位 δ_{HF} はつぎのようになる。

$$P_{HF} = P_{HY} + \Delta P_{HY} = 47.10 t$$

$$\delta_{HF} = \delta_{HY} + \Delta \delta_{HY} = 1.229 \text{ cm}$$

本節で得られた解析結果は **Fig. 13** に合せてプロットしてある。

本節の解析において、ある点で塑性ヒンジが生じてからさらに追加された水平荷重による前段階の塑性ヒンジでの軸方向力の増加は全軸方向力に比べて小さいので、これを無視した。

以上の解析においては斜材の引張および座屈特性が理想的に流れると仮定したが、実際には曲線の途中で斜材は切断あるいは圧潰してラーメンのみの場合に帰着することであろう。また、崩壊後さらに流れると軸力の影響によって **Fig. 13** の曲線は負の勾配をもつようになるであろうが、これについては後日発表される。前者に関しては2.3.2に、後者に関しては2.3.3にも当てはまる。

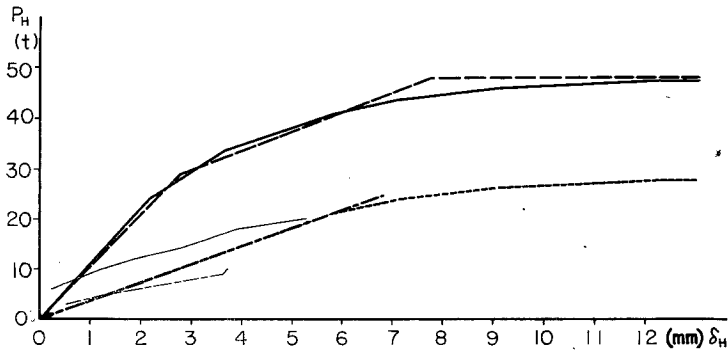


Fig. 13: Relationships between the horizontal load and the horizontal displacement at the top of the column for the model in Fig. 2. Solid line (thick) and experimental (thin) results for the rigid frame with the diagonal bracings due to the horizontal and the vertical loads of $P_V = 6$ tons. Block line: Analytical results for the rigid frame with the diagonal bracings due to the horizontal load only. Dotted line: Analytical results for the rigid frame without the bracing due to the horizontal and the vertical loads of $P_V = 6$ tons. Chain line: Analytical (thick) and experimental (thin) results for the rigid frame without the bracing due to the horizontal and the vertical loads of $P_V = 3$ tons.

2.3.2. 水平荷重のみをうける斜材付ラーメン

この場合も 2.3.1 においてのべたのと同様の崩壊過程をとるが、垂直荷重がないために 2.3.1 の場合よりも曲線 (Fig. 13) は上方に出てくる。しかし崩壊に近付くにつれて相対的に垂直荷重の影響が小さくなってその差が小さくなる。

この場合、座屈時の水平荷重は (17) で $P_V=0$ において $P_{HK}=29.1t$ とさまる。これに対する水平変位は (9) と (14) から $\delta_{HR}=0.277\text{ cm}$ となる。

座屈時の引張斜材には圧縮斜材の座屈荷重と同じ大きさの引張力 $13.55t$ がすでに働いており、降伏引張力 $14.13t$ には $14.13-13.55=0.58t$ の余裕しかないので、圧縮斜材座屈後ただちに引張斜材が降伏する。引張斜材降伏時は Fig. 7 (g) にて $\sqrt{2} \Delta P_{HB}=0.588t \quad \therefore \Delta P_{HB}=0.41t$ となる。この場合にも Fig. 7 (c), (d), (e), (f), (g) は適用でき、以下 2.3.1 と同様の計算によって、 $\Delta P_{HY}=1.07t$ 、 $\Delta \delta_{HK}=0.01135\text{ cm}$ をえ、したがって

$$P_{HY}=30.12t, \quad \delta_{HY}=0.288\text{ cm}$$

となる。

引張斜材降伏後も 2.3.1 の場合と同様の方法が適用できるが、この場合は E 点での引張力と圧縮力の垂直方向の不釣合力がわずかに $0.4t$ であって無視できるほど小さく、これを無視すれば、塑性ヒンジは 4 箇所ほとんど同時に発生し、そのときの水平荷重は 2.3.1 (c) とまったく同様にして $P'_{HY}=47.6t$ 、 $\delta'_{HY}=0.774\text{ cm}$ をえ、これが崩壊荷重 P_{HF} 及び変位 δ_{HF} となる。これらの結果は Fig. 13 に合せてプロットされている。

2.3.3. 垂直水平両荷重を受ける無斜材ラーメン

この場合は斜材の有無を除けば 2.3.1 とまったく同様であるから、2.3.1 の結果から斜材の分担する部分を差し引いたものがこの場合の結果となる。すなわち、Fig. 13 に示すように最初の塑性ヒンジ発生までは原点から直線的に進むが、塑性ヒンジ発生以後は 2.3.1 の曲線とほとんど平行になる。その間隔は斜材の水平荷重分担部分の $19.6t$ である。である。「ほとんど」というのは引張圧縮両斜材の垂直方向の力の不釣合 $0.4t$ がほとんど無視できるからである。この結果も Fig. 13 にプロットしてある。実験との比較のための $P_V=3t$ 場合の弾性域における計算結果もプロットしてある。

2. 4. 結果の検討

2.4.1. 解析結果の検討

Fig. 13 からつぎのようなことが推察される。

(1) 序に述べたような仮定のもとにこのような次元の架構では、斜材を入れたために初期剛性のみならず終局荷重が斜材の分担分だけ高められている。骨組とくに柱材を降伏させることは望ましくないから、柱材の降伏までに切断や圧潰をおこさないこの程度の斜材が適当であろう。

(2) 垂直荷重がこの程度の大きさすなわち、終局荷重の $6/47.1 \approx 1/8$ 位では崩壊後大変形を許さなければ垂直荷重の初期剛性および終局耐力への影響はあまりないといえる。

2.4.2. 実験結果と解析結果との比較

実験は繰り返し荷重の場合も含めて現在でも進行中であるから、復元力特性として興味のある $P-\delta$ 線図 Fig. 13 のみを取り出して比較する。ジャッキの容量から大荷重がとれず、解析での弾性域についてしか実験結果が得られなかったのも、弾塑性域にわたって議論することはできないが、Fig. 13 からつぎのことが推察される。

斜材の有無にかかわらず、実験結果は解析結果に比べて、変位がいちじるしく大である。実験模型では梁にリベット接手があり、斜材のとりつけもボルトであるために、接合部のガタの影響が大きいものと考えられる。本論文には掲載されないが、計測された接手のスリップのデータは、このことを示している。したがって、実験では斜材はあまりきいていなかったのではないかと考えられるが、無斜材ラーメンの実験結果と比較すれば解析の $1/3$ 程度きいているようである。

最初の目的では、斜材が大きくなってくると斜材とラーメンとの接合部もピンと仮定できず、弾性固定のような取り扱いをせねばならないかどうかを調べる予定であったが、荷重が小さいのとガタの影響が大きすぎて不成功であった。この接合部の取り扱いは大断面の斜材の破壊点近くでは特に重視されねばならないと考えられるが、これは近い将来の研究にまつ。また以上の解析では斜材と梁材との接合部においては破損をおこさないと仮定しているが、斜材の座屈や降伏以前に接合部のガゼットプレートが破損する場合は、これも考慮せねばならない。

3. 斜材を含む1層3スパン架構の弾塑性解析

3.1. モデルの概要

2節においては、火力発電所という特殊構造物から取り出され、実験をも考慮した理想化された模型について考察されたが、本節においては、高層建築物として一般的なモデルは地上25階の建築構造物から第2階を取り出し、これに実際の垂直荷重をかけ、さらに火力発電所の下層のかなり大断面の斜材を与えたものである。ただし階高とスパンの比や柱梁の剛比は整数比になるように少し修正された。このモデルは Fig. 14 に示されている。モデルの仕様は Table 2 のごとくである。

Table 2: Dimensions of the model shown in Fig. 14.

	記号	単位	内 柱	外 柱	梁	斜 材
断面寸法		mm	$h=800$ $t=19$	$h=800$ $t=16$	$2FPL-250 \times 12$ $WPL-900 \times 9$	$H-450 \times 250$ $\times 9 \times 12$
断面積	A	cm^2	594	500	201	98.34
断面2次モーメント	I	cm^4	6.043×10^5	5.139×10^5	3.109×10^5 (X-X)	3.128×10^3 (Y-Y)
弾性断面係数	Z_e	cm^3	1.511×10^4	1.285×10^4	6.56×10^3	—
塑性断面係数	Z_p	cm^3	1.75×10^4	1.475×10^4	7.367×10^3	—
材 長		cm	350	350	1050	631
剛 度	K	cm^3	1725	1468	$296.05 (=K_0)$	4.96
剛 比	k		6	5	1	0.0168
降伏応力度	σ_v	t/cm^2	3.3	3.3	3.3	3.3
ヤング係数	E	kg/cm^2	2.4×10^6	2.4×10^6	2.4×10^6	2.4×10^6

斜材のラーメン材に対する諸元比はつぎのようになる。

$$\text{断面積について } \frac{A_B}{A_G} = 0.489$$

$$\text{断面2次モーメントについて } \frac{I_B}{I_G} = 0.01$$

3.2. 弾塑性解析

解析の方法は、この場合も第2節の場合と同様であるが、崩壊に至る過程によってその解析の順序は異ってくる。結果からいうと、圧縮斜材がまず座屈することは前節と変りないが、その後引張斜材が降伏する前にラーメン材に塑性ヒンジが発生する。以下にその過程を説明する。

なお本節のモデルでは、それが高層建築物の下層から取り出されている関係上、垂直荷重は上層から柱を伝わって来るものがその層の分布荷重よりはるかに大なるため、中央集中荷重は省略された。

2.3.2 の場合と同様に、圧縮引張両斜材およびラーメン材すべてに損傷のない領域においては、ラーメンのみの水平変位と斜材の水平変位とを等しくおいて斜材およびラーメンの水平荷重分担率がつぎのように求まる。

$$\left. \begin{aligned} \text{斜材に対して } \frac{P_B}{P_H} &= \frac{0.01433 h A_B}{0.01433 h A_B + K_0} = 0.625 \\ \text{ラーメンに対して } \frac{P_R}{P_H} &= \frac{K_0}{0.01433 h A_B + K_0} = 0.375 \end{aligned} \right\} (21)$$

ただし、 h は階高、 K_0 は標準剛度である。このとき圧縮斜材内の圧縮力は力の釣合から

$$0.601 P_B = 0.601 \times 0.625 P_H = 0.376 P_H$$

であり、一方、圧縮斜材の座屈荷重は

$$\frac{\pi^2 EI_B}{l_k^2} = \frac{9.870 \times 2.4 \times 10^3 \times 3128}{631^2} = 186 \text{ t}$$

であるから、圧縮斜材座屈時、水平荷重 P_H は

$$0.376 P_H = 186$$

から

$$P_H = 496 \text{ t}$$

となる。このとき、斜材およびラーメンの分担荷重は(21)からそれぞれ

$$P_B = 310 \text{ t}, \quad P_R = 186 \text{ t},$$

ラーメンの柱頭の水平変位は

$$\delta_H = 0.60 \text{ cm}$$

となる。またこの荷重のもとではラーメン材に降伏は起こっていない。

つぎに、圧縮斜材座屈後

の架構の挙動を調べてみる。

引張斜材降伏時までに

追加できる水平荷重を

ΔP_H 、それに対応する水平

変位を $\Delta \delta_H$ とすれば、こ

の場合も 2.3.1 (b) と同様に

斜材およびラーメンに働く

力関係および変形の適合状

態は Fig. 7 に示すように

なり、この関係から、 $\Delta P_H = 366.2 \text{ t}$ 、 $\Delta \delta_H = 0.853 \text{ cm}$ が得られる。垂直荷重のないときはこの水平荷重で引張斜材がラーメン材より先に降伏するが、垂直荷重のあるときは、ラーメンの内柱の柱頭においてはすでに降伏点に達しておることがわかるから、引張斜材健全時に戻って、その状態でラーメン材降伏時までにかけることができる追加水平荷重を求めなおさねばならない。内柱頭降伏までにかけられる総水平荷重による内

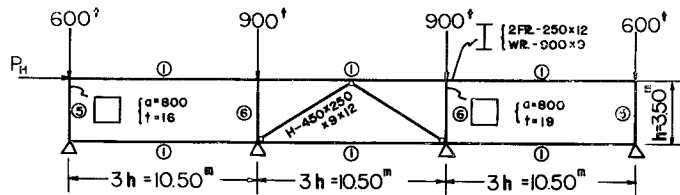
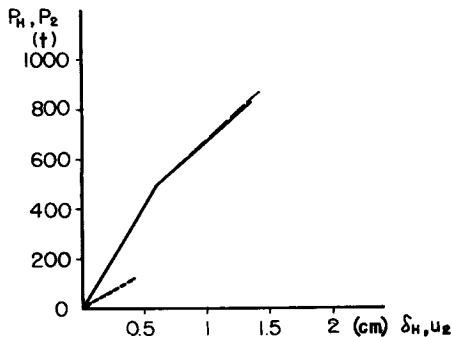


Fig. 14: One storied structure taken from the lower part of a tall building and the loads.



Fog. 15: Relationships between the horizontal load and the horizontal displacement at the top of the column for the structures in Figs. 14 and 15. Solid line: Analytical results for the structure in Fig.14 due to the horizontal and the vertical loads. (P_H vs. δ_H) Block line: Analytical results for the structure in Fig. 14 due to the horizontal load only. (P_H vs. δ_H) Dotted line: Analytical results for the structure in Fig. 15 due to the horizontal and the vertical loads (P_2 vs. u_2).

柱頭モーメントをその断面の塑性モーメントに等しくすることによって $\Delta P_H = 332 t$, $\Delta \delta_H = 0.771 \text{ cm}$ と求まる。内柱頭降伏後も崩壊過程は追跡できるが時間の制約から省略する。

以上の結果は Fig. 15 にプロットされている。

4. 斜材を含む3層3スパン架構の弾塑性解析

4.1. モデル概要

これまで行われてきた高層建築物の動的解析においては、計算機の容量や誤差の点から、数層を1自由度にとりまとめた、これにやゝ apriori ともいえる理想化された復元力特性を与えていた。また、耐震部材の効果や垂直荷重や他層間の連成効果の影響も定量的に評価されたとはいえない。そこで本節では、それらの影響の定量的な知見を得ることを目的として、3節で取り扱ったモデルを3層分だけ重ねてその弾塑性解析を試みた。このモデルは Fig. 16 に示されている。

水平荷重の与え方については、これまで行われた動的解析結果によれば、その最大応答時のモードが基本振動型に近いし、高次のモードが出たとしても部分的には逆三角型であることも考えられることから、等大の水平荷重が各層に同方向にかかるものとした。

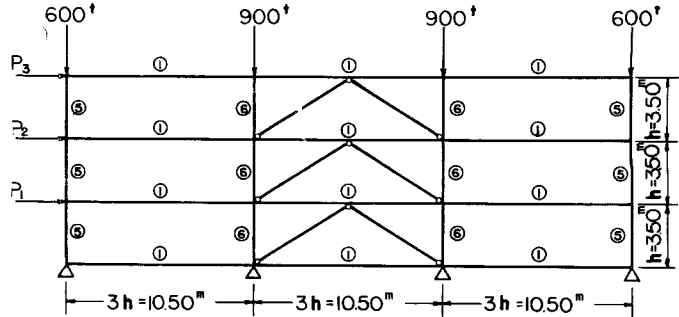


Fig. 16: Three storied structure taken from the lower part of a tall building.

4.2. 弾塑性解析

序にのべたように、垂直荷重はこの部材諸元で斜材効果を云々する範囲では、柱材の塑性モーメントの低下のみに影響するものと仮定すれば、柱断面を検定する場合以外は、水平荷重と垂直荷重は一応独立に考えることができる。

いま、記号をつぎのように定義する。

C_{ij} : 無斜材ラーメンにおいて、 j 層のみに単位変位を与えたときの i 層床の反力であり、 $C_{ij} = C_{ji}$ の関係がある。塑性ヒンジを有するラーメンにも適用する。

K_{ij} : 無斜材ラーメンにおいて、 j 層のみに単位変位を与えたときの i 層の剪断反力とすると、3層については C_{ij} と次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} C_{33} &= K_{33}, & C_{32} &= K_{32}, & C_{31} &= K_{32} \\ C_{23} &= K_{23} - K_{33}, & C_{22} &= K_{22} - K_{32}, & C_{21} &= K_{22} - K_{32} \\ C_{13} &= K_{13} - K_{23}, & C_{12} &= K_{12} - K_{22}, & C_{11} &= K_{12} - K_{22} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

K'_{ij} : 斜材のみについて、 j 層のみに単位変位を与えたときの i 層の剪断反力

P_i : 斜材を含むラーメンの i 層床にかかる水平荷重

P_{iR} : 無斜材ラーメンの i 層床にかかる水平荷重

P_{iB} : 斜材のみについて、 i 層床にかかる水平荷重

y_i : i 層の水平変位

u_i : i 層と $(i-1)$ 層との相対変位、したがって3層については

$$u_3 = y_3 - y_2, \quad u_2 = y_2 - y_1, \quad u_1 = y_1 \quad (23)$$

以上の記号を用いると、無斜材ラーメンについて

$$\left. \begin{aligned} P_{3R} &= C_{33}y_3 + C_{32}y_2 + C_{31}y_1 = C_{33}y_3 + C_{23}y_2 + C_{13}y_1 \\ P_{2R} &= C_{23}y_3 + C_{22}y_2 + C_{21}y_1 = C_{32}y_3 + C_{22}y_2 + C_{12}y_1 \\ P_{1R} &= C_{13}y_3 + C_{12}y_2 + C_{11}y_1 = C_{31}y_3 + C_{21}y_2 + C_{11}y_1 \end{aligned} \right\} (24)$$

これに(22)を代入すれば

$$\left. \begin{aligned} P_{3R} &= K_{33}y_3 + (K_{21} - K_{33})y_2 + (K_{13} - K_{23})y_1 = K_{33}(y_3 - y_2) + K_{23}(y_2 - y_1) + K_{13}y_1 \\ P_{2R} &= K_{32}y_3 + (K_{22} - K_{32})y_2 + (K_{12} - K_{22})y_1 = K_{32}(y_3 - y_2) + K_{22}(y_2 - y_1) + K_{12}y_1 \\ P_{1R} &= K_{31}y_3 + (K_{21} - K_{31})y_2 + (K_{11} - K_{21})y_1 = K_{31}(y_3 - y_2) + K_{21}(y_2 - y_1) + K_{11}y_1 \end{aligned} \right\} (25)$$

これに(23)を代入すれば

$$\left. \begin{aligned} P_{3R} &= K_{33}u_3 + K_{23}u_2 + K_{13}u_1 \\ P_{2R} &= K_{32}u_3 + K_{22}u_2 + K_{12}u_1 \\ P_{1R} &= K_{31}u_3 + K_{21}u_2 + K_{11}u_1 \end{aligned} \right\} (26)$$

K_{ij} は **Fig. 16** の斜材を取り去ったラーメン解くことによってつぎのように得られた。単位は $\frac{EK_0}{h^2}$ である。

$$\left. \begin{aligned} K_{33} &= 78.32, & K_{32} &= -119.18, & K_{31} &= 49.6 \\ K_{23} &= -42.78, & K_{22} &= 150.94, & K_{21} &= -150.94 \\ K_{13} &= 7.12, & K_{12} &= -49.6, & K_{11} &= 119.18 \end{aligned} \right\} (27)$$

一方、斜材のみについて(26)と同様に

$$\left. \begin{aligned} P_{3B} &= K'_{33}u_3 + K'_{23}u_2 + K'_{13}u_1 \\ P_{2B} &= K'_{32}u_3 + K'_{22}u_2 + K'_{12}u_1 \\ P_{1B} &= K'_{31}u_3 + K'_{21}u_2 + K'_{11}u_1 \end{aligned} \right\} (28)$$

斜材はその層の相対変位のみに関係するから3節の結果が使用でき、弾性域では K'_{ij} の値はつぎのように与えられる。 $K \equiv 0.766 \frac{EAB}{h}$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} K'_{33} &= K'_{22} = K'_{11} = -K'_{32} = -K'_{21} = K. \\ K'_{23} &= K'_{13} = K'_{12} = K'_{31} = 0 \end{aligned} \right\} (29)$$

(29)を使って(28)はつぎようになる。

$$\left. \begin{aligned} P_{3B} &= Ku_3 \\ P_{2B} &= -Ku_3 + Ku_2 = K(u_2 - u_3) \\ P_{1B} &= -Ku_2 + Ku_1 = K(u_1 - u_2) \end{aligned} \right\} (30)$$

斜材を含むラーメンに対しては、(26)と(30)とを加えさせて

$$\left. \begin{aligned} P_3 &= (K_{33} + K)u_3 + K_{23}u_2 + K_{13}u_1 \\ P_2 &= (K_{32} - K)u_3 + (K_{22} - K)u_2 + K_{12}u_1 \\ P_1 &= K_{31}u_3 + (K_{21} - K)u_2 + (K_{11} + K)u_1 \end{aligned} \right\} (31)$$

これは弾性域に対して成立させた式であるが、斜材が座屈や降伏をおこせば、その状態に対応する Ku_i の値を3節からとり出して使用できる。また、ラーメンに塑性ヒンジができたときは、その状態に対する K_{ij} を使用すればよい。いま、 $P_3 = P_2 = P_1 \equiv P$ のときを考えると、この場合には1層の斜材が最初に座屈または降伏するが、得たいと願っているのはそのときの第2層の水平荷重に対する水平変位の関係である。

Fig. 16 のモデルについて K_{ij} , K'_{ij} を計算して(31)に代入すれば、等荷重 P に対して

$$\left. \begin{aligned} P &= 849u_3 - 217u_2 + 36.1u_1 \\ P &= -1057u_3 + 1217u_2 - 252u_1 \\ P &= 252u_3 - 1217u_2 + 1057u_1 \end{aligned} \right\} (32)$$

となる。(32)から u_3 , u_2 , u_1 を解くと

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= 1.853 \times 10^{-3} P t \\ u_2 &= 3.32 \times 10^{-3} P t \\ u_1 &= 4.36 \times 10^{-3} P t \end{aligned} \right\} (33)$$

となり、このとき斜材およびラーメンに働く荷重分担は(26)および(30)から

$$\left. \begin{aligned} P_{3B} &= 0.839 P, & P_{3R} &= 0.161 P \\ P_{2B} &= 0.664 P, & P_{2R} &= 0.336 P \\ P_{1B} &= 0.47 P, & P_{1R} &= 0.53 P \end{aligned} \right\} (34)$$

したがって1層の斜材には $2P + 0.47P = 2.47P$ がかかることになる。座屈時圧縮斜材については3節から $0.601 \times 2.47P = 186 t$

$$\therefore P = 125 t \quad (35)$$

となる。このとき(33)および(23)から

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= 0.232 \text{ cm}, & y_3 &= 1.192 \text{ cm} \\ u_2 &= 0.415 \text{ cm}, & y_2 &= 0.960 \text{ cm} \\ u_1 &= 0.545 \text{ cm}, & y_1 &= 0.545 \text{ cm} \end{aligned} \right\} (36)$$

となる。したがって座屈時の2層の特性図がプロットできる。このとき他の部材には損傷が生じていない。たとえば1層内柱頭では

$$\frac{M}{Z_p} + \frac{\omega N}{A} = \frac{6.6 \times 10^3}{1.75 \times 10^4} + \frac{900}{594} = 1.896 < 3.3 \quad (37)$$

である。

圧縮斜材座屈後、先に引張斜材が降伏するかラーメン材が降伏するか不明である。いま、引張斜材が先に降伏するものとすれば、降伏後は3節の結果から

$$\left. \begin{aligned} P_{3B} &= K u_3 \\ P_{2B} &= -K u_3 + K u_2 \\ P_{1B} &= -K u_2 + 411.7 \end{aligned} \right\} (38)$$

ラーメンは弾性のままだから、(38)に(26)を加え、 K_{ij} , K'_{ij} に実際の値を入れてやると、等荷重に対して

$$\left. \begin{aligned} P &= 849 u_3 - 217 u_2 + 36.1 u_1 \\ P &= -1057 u_3 + 1217 u_2 - 252 u_1 \\ P &= 252 u_3 - 1217 u_2 + 605 u_1 + 411.7 \end{aligned} \right\} (39)$$

となる。

以後は、(39)から u_i を解き、それらを(26)および(38)に代入して P_{iB} , P_{iR} を求め、つぎに P_{iR} をラーメンに加えてみて、部材が降伏するかないかを検定し、降伏していなければさらに P を増大して、塑性ヒンジの生ずる荷重を見出す、という方向をとればよい。完全な結果は後日発表されるであろう。

5. 結 語

本研究では時間的制約から特定の仮定のもとでの特定のモデルの解析しか行なえなかったが、今後の研究のための一つの基礎資料にはなりうると思う。今後の研究では、垂直水平荷重比や斜材ラーメン材断面比等をパラメーターとして整理された一般的な資料を作成すべきである。さらに、より現実的な仮定をとり入れて解析すべきである。たとえば、現在でも続行中である斜材と梁材の接合部の実験データを考慮に入れた解析を行なわねばならない。とくに破損直前では弾性域では無視されるような2次の影響がクローズアップされてきて結果に深刻な影響を与えることが多い。また本研究では静的な増加荷重に対する解析を行なったが、動的な繰返し荷重に対する解析も行なわれねばならない。剪断力の影響は小さいものとしたが、これも検討される必要がある。

このようにして得られた結果は建築物の耐震解析に取り入れられねばならない。

本研究ではかなり簡単な場合であるにもかかわらず計算に相当な労力を必要とした。こんご計算機を用いて労力を軽減することが望ましい。

謝 辞

最後に、常に研究上の御指導を戴く小堀鐸二教授ならびに有益なる助言を与えられた小堀研究室の諸賢に対し深甚の謝意を表す。また、実験の遂行および結果の整理をされた三菱造船株式会社広島造船所の方々に厚く御礼申し上げる。なお、計算や図面作成に大学院学生熊田秀男君に御協力戴いたことも感謝を以て附記する。