

高層ラーメンの復元力特性に関する実験的研究（その1）

若 林 実・室 田 達 郎

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE RESTORING-FORCE CHARACTERISTICS OF TALL FRAMES

by *Minoru WAKABAYASHI and Tatsuo MUROTA*

Synopsis

A series of fifteen model tests were carried to investigate the effects of the vertical load of columns on the restoring-force characteristics of frames under horizontal load. The models are cut out by machines from mild steel plate of 60mm thickness. Three- and five-storey single-bay models were tested as plane frames. Brief comments are made on the significance of the results, which are compared with the slope-deflection theory with consideration of the axial forces in columns.

1. 序 論

高層建築の耐震設計に際しては、これを数質点のせん断型振動系に置換して、電子計算機による動的解析が行なわれることが普通である。この動的解析においては、建物に水平力が作用する時の建物の復元力と変形との関係、すなわち復元力特性が重要な意味をもち、実際に近いものを仮定することが必要である。ラーメン構造の場合の復元力特性の仮定としては、理想弾塑性型、bi-linear型および完全弾性型が代表的なものであるが、前述の動的解析では、塑性範囲をも取扱うことが多いため、通常前二者を用いるのが普通である。しかしながら、高層のラーメンの場合には、その下層部分の柱にかかる鉛直力が相当大きく、この鉛直力が建物の復元力特性に及ぼす影響は無視できなくなる。すなわち、鉛直力を考慮する場合、ラーメントにかかる水平力と変形との関係を見ると、ある変形量において水平力は最大値をとり、以後、荷重-変形曲線は負の勾配をもち、ラーメンは不安定となる。このような復元力特性は、動的解析を進める上に、きわめて不都合であり、これを避けるためには変形量を制限しなければならない。本研究の目的は、この鉛直力を考慮したラーメンの復元力特性を実験的に求めることであるが、本稿はその第1段階として、1スパンで3層と5層の、矩形断面部材を使った鋼製小型模型ラーメンを用いてこれを実験的に求め、座屈撓角法による近似解と比較したものである。実際のラーメンでは、下層に行くにしたがって鉛直力は増大し、また水平力も各層に分布して作用する。したがって梁柱の断面も下層になるほど大きくなっていく。しかしながら、ここでは荷重は単に最上層のみに作用し、梁柱の断面は各層で一定という最も簡単な場合について実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状・寸法

Fig. 1は、試験体の形状および寸法を示しており、いずれも厚さ60mmの鋼板で機械によって所定の形に切り抜いたものである。試験体の階高およびスパンは、いずれも15cm、柱梁の断面は矩形で、ラーメン

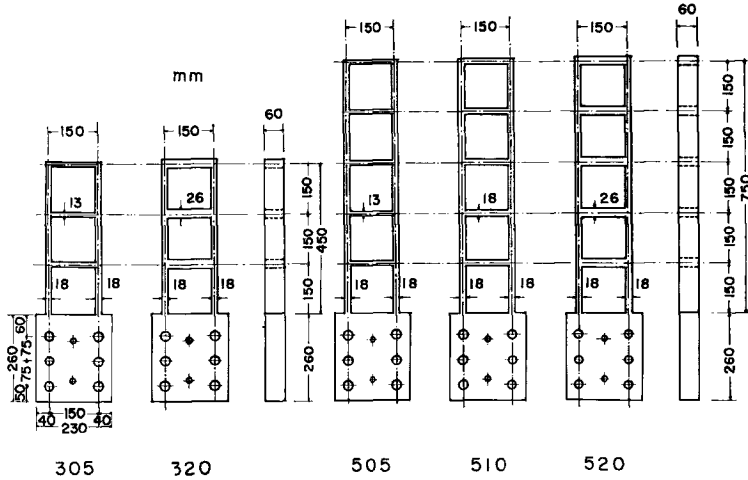


Fig. 1 Test Frames.

Table. 1

試験体名 シリーズ	層 番号	層 数	梁 文 (mm)	断面係 数比 Z_B/Z_C	柱の細 長比	鉛直 荷重 $P(t)$	弾性座 屈荷重 $P_{cr}(t)$	P/P_Y	P/P_{cr}	最大水平荷重		剛塑性 崩壊荷 重 $H_P(t)$	H/H_T	H/H_P	靱性率 μ
										計算値 $H_T(t)$	実験値 $H(t)$				
305	1					0	柱1本 0	0	0	1.66		1.66			
	2	3	13	0.522	36.3	6.4	68.0	0.198	0.094	1.32	1.69	1.64	1.28	1.03	5.7
	3					12.8		0.395	0.188	1.12	1.50	1.56	1.34	0.96	4.0
320	1					0		0	0	3.89		3.89			
	2	3	26	2.086	29.6	6.4	194.6	0.198	0.033	3.61	4.22	3.74	1.17	1.13	
	3					12.8		0.395	0.066	3.07	3.56	3.28	1.16	1.09	9.2
505	1					0		0	0	1.40		1.40			
	2	5	13	0.522	38.7	6.4	54.1	0.198	0.118	1.04	1.37	1.39	1.32	0.99	6.0
	3					12.8		0.395	0.237	0.84	1.14	1.34	1.36	0.85	4.1
510	1					0		0	0	2.33		2.33			
	2	5	18	1.000	31.5	6.4	108.7	0.198	0.059	2.04	2.62	2.32	1.29	1.13	
	3					12.8		0.395	0.118	1.78	2.13	2.27	1.19	0.94	5.0
520	1					0		0	0	3.89		3.89			
	2	5	26	2.086	29.6	6.4	183.5	0.198	0.035	3.61	3.74	3.74	1.03	1.00	
	3					12.8		0.395	0.070	3.07	2.97	3.28	0.97	0.91	5.9

柱の細長比は非弾性座屈荷重に対応するもの。 $P_Y=31.8t$ 。

の非弾性座屈荷重に対応する柱の細長比は、28.6 ないし 38.7である (Table. 1 参照)。試験体は全部で15個あり、層数および柱の断面係数 Z_C に対する梁の断面係数 Z_B の比 Z_B/Z_C の値によって5つのシリーズに分けられている。すなわち、3層の場合は、 $Z_B/Z_C=0.5, 2.0$ 、5層の場合は、 $Z_B/Z_C=0.5, 1.0, 2.0$ の5シリーズで、それぞれ 305, 320, 505, 510, 520 シリーズと呼ぶ。各シリーズ毎に試験体は3個づつあって、それぞれ柱の降伏荷重 P_Y の0%, 20%, 40%の3種類の鉛直荷重を最上層柱頭にうける。

2.2 材料の性質

試験体製作に用いた鋼板は、S S41 相当品であり、その応力-歪曲線は、Fig. 2 に示す通りである。降伏応力度は、 $\sigma_Y=2,940\text{kg/cm}^2$ 、強度は、 $\sigma_B=4,910\text{kg/cm}^2$ 、伸び率30%である。この材料は、歪度約10%で歪硬化が始まり、通常の規格品に比較して歪硬化の開始がやや早い。なお、この鋼板は残留応力の影響を除くため、約 600°C で4時間の焼鈍を行なった。

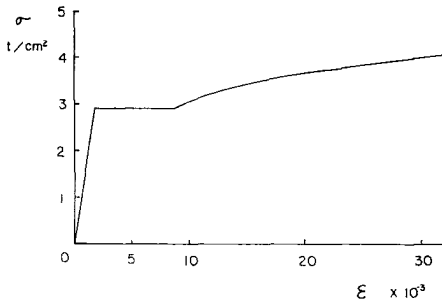


Fig. 2 Stress-strain Curve of the Material.

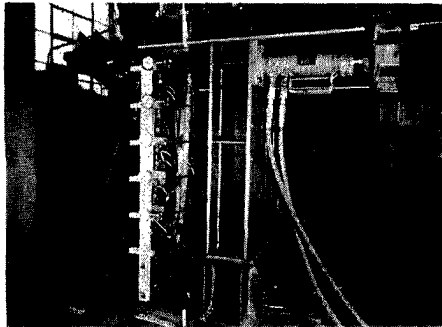


Photo. 1

2.3 実験装置

Fig. 3 は、実験装置の概要、Photo. 1 は、その写真である。試験体は、L字型フレームに高張力ボルトで固定され、50 t 油圧式圧縮試験機によって最上層柱頭に鉛直荷重を加え、さらに、L字型フレームに取付けられた10 t 油圧ジャッキによって水平力を加えた。試験体の水平移動は、L字型フレームと圧縮試験機ベッドとの間に挿入されたローラー・ベアリングの位置でおこる。

水平力の大きさは、ロード・セルにより、また試験体各層の水平変位は、試験体下部より立てた木製ビームにダイヤル・ゲージを付けて測定した。梁柱端部には、Wire Strain Gage を貼り付けて歪度も測定した。

2.4 実験方法

まず圧縮試験機によって鉛直荷重を所定の値まで加え、以後常に一定に保つ。鉛直荷重が所定の値に

達した後に、油圧ジャッキによって水平力を加え、徐々に増加して、水平力と変位を測定する。

3. 座屈撓角法による水平力および水平変位の計算

一定の鉛直荷重を受けるラーメンに水平力が加わる場合の水平力と水平変位の関係の近似解は、いくつかの仮定をもうければ、座屈撓角法によって比較的容易に求めることができる。以下に、これをFig. 4 (a) の場合を例にとって簡単に説明する。ただし、鉛直荷重 P は一定とする。

Fig. 4 (a) の1スパン3層ラーメンを Fig. 4 (b) の肘形ラーメンに置換して、これに座屈撓角法を適用する。この時次の仮定をする：

1. 材料の応力-歪曲線は完全弾塑性。
2. 部材の曲げモーメントと曲率の関係は完全弾塑性。
3. 梁のせん断力による柱の軸力の増減を無視し、柱の軸力は上層から下層まで一定値 P とする。

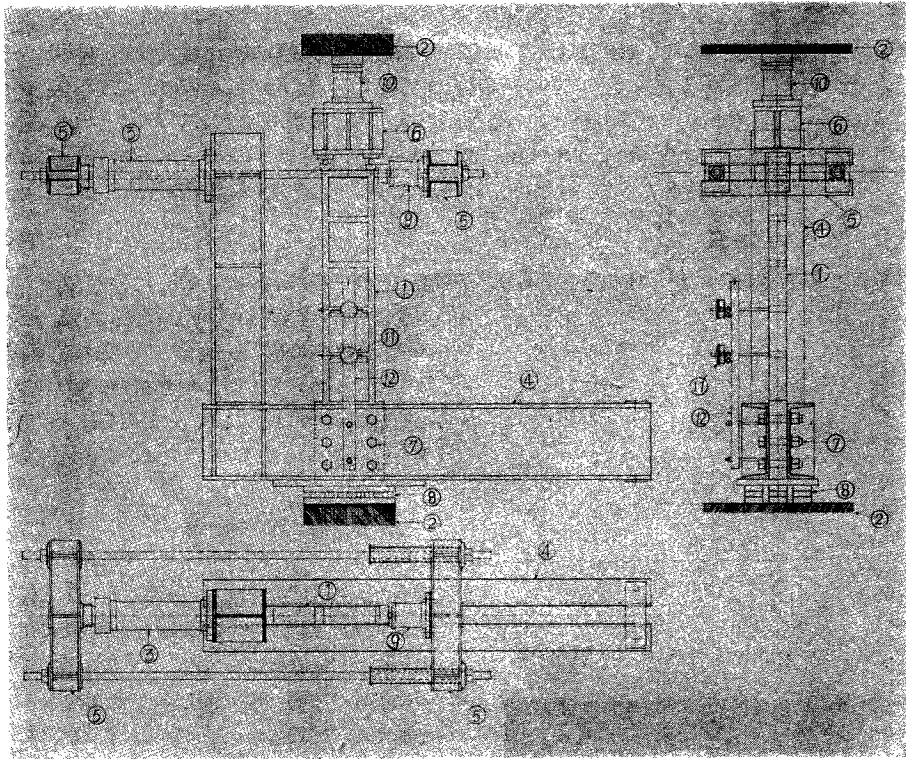


Fig. 3 Loading System : ①Test Frame, ②Testing Machine, ③Oil Juck, ④Loading Frame, ⑤Roller Bearing, ⑨, ⑩Load Cell, ⑪Dial Gage.

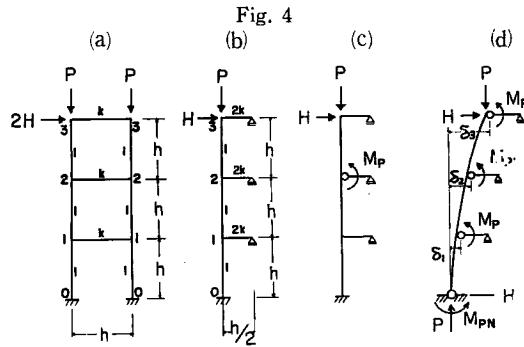


Fig. 4

3.1 弾性範囲 (塑性ヒンジができるまで)

(Fig. 4 (b))

座屈撓角法を用いて各部材の材端モーメントをあらわすと次のようになる :

$$\begin{aligned}
 M_{01} &= 2EK_0(\beta\theta_1 - \gamma R_1) \\
 M_{10} &= 2EK_0(\alpha\theta_1 - \gamma R_1) \\
 M_{11} &= 2EK_0 \cdot 3k\theta_1 \\
 M_{12} &= 2EK_0(\alpha\theta_1 + \beta\theta_2 - \gamma R_2) \\
 M_{21} &= 2EK_0(\alpha\theta_2 + \beta\theta_1 - \gamma R_2) \dots\dots\dots (1) \\
 M_{22} &= 2EK_0 \cdot 3k\theta_2 \\
 M_{23} &= 2EK_0(\alpha\theta_2 + \beta\theta_3 - \gamma R_3) \\
 M_{32} &= 2EK_0(\alpha\theta_3 + \beta\theta_2 - \gamma R_3) \\
 M_{33} &= 2EK_0 \cdot 3k\theta_3
 \end{aligned}$$

柱のせん断力は次のようになる：

$$\begin{aligned}
 Q_{01} &= Q_{10} = -\frac{2EK_0}{h}(\gamma\theta_1 - \delta R_1) \\
 Q_{12} &= Q_{21} = -\frac{2EK_0}{h}(\gamma\theta_1 + \gamma\theta_2 - \delta R_2) \quad \dots\dots\dots(2) \\
 Q_{23} &= Q_{32} = -\frac{2EK_0}{h}(\gamma\theta_2 + \gamma\theta_3 - \delta R_3)
 \end{aligned}$$

(1), (2) 式において

$$\begin{aligned}
 EK_0 &= \text{柱の曲げ剛度} \\
 k &= \text{柱に対する梁の剛比} \\
 \theta_i &= \text{節点 } i \text{ の回転角} \\
 R_i &= i \text{ 層の柱の回転角} \\
 \alpha &= \frac{1}{2} \cdot \frac{Z \sin Z - Z^2 \cos Z}{2(1 - \cos Z) - Z \sin Z} \\
 \beta &= \frac{1}{2} \cdot \frac{Z^2 - Z \sin Z}{2(1 - \cos Z) - Z \sin Z} \\
 \gamma &= \alpha + \beta \quad \dots\dots\dots(3) \\
 \delta &= 2\gamma - \frac{Z^2}{2} \\
 Z &= \sqrt{\frac{Ph}{EK_0}}
 \end{aligned}$$

(1), (2) 式を用いて節点方程式および層方程式をたてると次の6元1次連立方程式が得られる：

$$\begin{pmatrix} 2\alpha+3k & \beta & 0 & -\gamma & -\gamma & 0 \\ \beta & 2\alpha+3k & \beta & 0 & -\gamma & -\gamma \\ 0 & \beta & \alpha+3k & 0 & 0 & -\gamma \\ -\gamma & 0 & 0 & \delta & 0 & 0 \\ -\gamma & -\gamma & 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & -\gamma & -\gamma & 0 & 0 & \delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ hH/2EK_0 \\ hH/2EK_0 \\ hH/2EK_0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(4) 式の右辺の $hH/2EK_0$ に単位数を置いて (4) を解き、材端モーメント、水平力および水平変位を求め、求まった材端モーメントのうち、梁の材端モーメントのうちの絶対最大値または、柱の材端モーメントのうちの絶対最大値のいずれかが最初の塑性ヒンジになる。したがって上に求めた材端モーメント、水平力および水平変位をある係数倍すれば第1の塑性ヒンジができるときの水平力と変位の関係がわかる。

3. 2 第2の塑性ヒンジができるまで (Fig. 4 (c))

第1の塑性ヒンジが節点2の梁端部に発生したものとすると材端モーメント M_{22} は、梁断面の全塑性モーメントを M_P とすると $-M_P$ となる。その結果次の連立方程式を得る：

$$\begin{pmatrix} 2\alpha+3k & \beta & 0 & -\gamma & -\gamma & 0 \\ \beta & 2\alpha & \beta & 0 & -\gamma & -\gamma \\ 0 & \beta & \alpha+3k & 0 & 0 & -\gamma \\ -\gamma & 0 & 0 & \delta & 0 & 0 \\ -\gamma & -\gamma & 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & -\gamma & -\gamma & 0 & 0 & \delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ M_P/2EK_0 \\ 0 \\ hH/2EK_0 \\ hH/2EK_0 \\ hH/2EK_0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(5)$$

連立方程式(5)は右辺の $M_P/2EK_0 = 0$ として解き、求められた材端モーメント、水平変位、水平力がある定数倍し、3.1で求めた第1の塑性ヒンジができた時の対応する値にそれぞれ加え合わせることで第2の塑性ヒンジが発生する時の水平力と水平変位の関係を得ることができる。ただし、連立方程式(5)を解く際 $hH/2EK_0 = 1$ とすることは、3.1と同様である。

以下同様にして第3、第4と塑性ヒンジの発生を追跡することができる。

3.3 Mechanism に達した場合 (Fig. 4(d))

塑性ヒンジが増加して Fig. 4(d)のような崩壊機構 (mechanism) に達したものとすると、次の連立方程式が得られる：

$$\begin{aligned} \xi\theta_1 - \xi R_1 &= -\frac{hH}{2EK_0} - PhR_1 + \frac{M_{PN}}{2EK_0} \\ \xi\theta_2 - \xi R_3 &= -\frac{hH}{2EK_0} - PhR_3 + \frac{M_P}{2EK_0} \\ \gamma\theta_1 - \gamma\theta_2 - \delta R_2 &= -\frac{hH}{2EK_0} \dots\dots\dots(6) \\ \beta\theta_1 + (\alpha + \xi)\theta_2 - \gamma R_2 - \xi R_3 &= -\frac{M_P}{2EK_0} \\ (\alpha + \xi)\theta_1 + \beta\theta_2 - \xi R_1 - \gamma R_2 &= -\frac{M_P}{2EK_0} \end{aligned}$$

ここで

M_{PN} = 軸力を考慮した柱の塑性モーメント

$$\xi = \frac{\alpha^2 - \beta^2}{\alpha}$$

である。連立方程式(b)を解くと各層の mechanism curve が得られる：

$$\begin{aligned} P\delta_3 + 3hH &= 3M_P + M_{PN} \\ P\delta_2 + 2hH &= A_2M_P + B_2M_{PN} \dots\dots\dots(7) \\ P\delta_1 + hH &= A_1M_P + B_1M_{PN} \end{aligned}$$

ここで、 A_1, A_2, B_1, B_2 は、 Z の関数である。

4. 実験結果

4.1 変形モード

Photo. 2 は、各シリーズの崩壊後の変形状態を比較したものである。各シリーズ共3個の試験体が写っているが、それぞれ左から鉛直力がない場合、鉛直力が柱の降伏荷重 P_Y の20%の場合および鉛直力が P_Y の40%の場合に対応している。

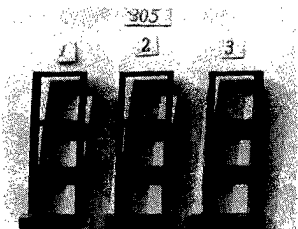


Photo. 2 (a)

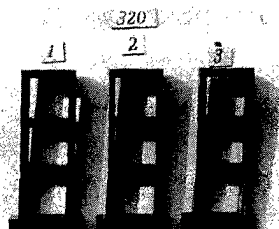
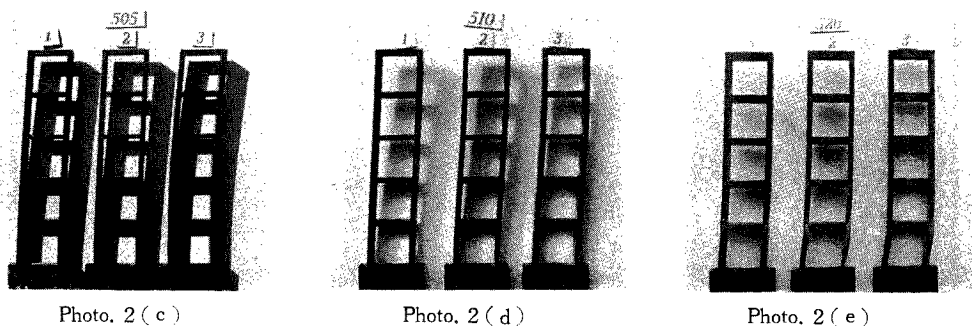


Photo. 2 (b)



梁の断面係数が柱のその半分の 305 および 505 シリーズは、ラーメン全体として曲げ型の変形モードを示しており、梁端および最下層柱脚に塑性ヒンジが発生している。梁の断面係数が柱のその 2 倍である 320 および 520 シリーズは、せん断型の変形モードを示しており、最下層の柱の上下端に塑性ヒンジが発生している。また鉛直力が増大するにつれて最下層の柱、特に曲げ圧縮側の柱の変形が著しい。梁柱同断面の 510 シリーズは、下層は曲げ型、上層はせん断型の変形モードを示している。

4.2 水平力—変位曲線

Fig. 5 は、各シリーズ毎に 3 個の試験体の最上層の水平変位と水平力との関係と比較したもので、実線が実験値、破線が座屈撓角法による計算値である。Fig. 5 によると、弾性範囲の曲線。立上りの勾配は、実験値、計算値共に、鉛直力が増大するにつれてゆるやかになっており、鉛直力の増大につれて柱の水平剛性が低下することがわかる。一般に弾性範囲では、実験値と計算値はよく一致している。弾性から塑性に移る範囲では、一般に計算値の方が実験値より高くなっており、計算値は危険側となっている。これは、計算値では、部材を完全弾塑性と仮定しているからであろうと思われる。塑性範囲では、実験値は、鉛直力の加わっていない試験体の場合は、変形の増大と共に水平力は増加しつづける。これは、材料の歪硬化の影響であろうと思われる。鉛直力が柱の降伏荷重の 20% の場合は、比較的柱に対して梁の断面の大きい 320, 510, 520 シリーズは、変形の増大と共に水平力がやや上昇しつづけているが、梁断面の小さい 305, 505 シリーズでは、水平力は、ある変形量で最大値に達し、さらに変形が増大するとゆるやかに下降している。鉛直力が柱の降伏荷重の 40% の場合は、すべての試験体が、ある限度以上に変形が進むと水平力は下降している。この場合水平力が最大値に達する時の変形量は、鉛直が柱の降伏荷重の 20% の場合のそれより小さくなっている。また塑性範囲で実験値と計算値を比較すると、計算値の方が実験値よりも安全側にあり、その差はかなり大きい。この理由として、計算値では、材料の歪硬化を考慮していないこと、塑性域の材軸方向に沿った広がりを考えていないこと、塑性ヒンジが節点に生ずると仮定していること等があげられよう。

4.3 水平耐力

座屈撓角法によって計算される水平耐力 H_T と実験で求めた水平耐力 H とを比較すると、Table. 1 に示したように H/H_T は、0.97~1.36 で計算値の方が一般にかなり低い。これは、4.2 で述べた塑性範囲で計算値が実験値より低い理由と同じ理由によるものであろう。

鉛直荷重による柱の塑性モーメントの低下を考慮した剛塑性崩壊荷重 H_P と実験値とを比較すると、Table. 1 に示したように、 H/H_P は、0.85~1.13 であり、危険側の場合もあるが比較的両者はよく一致する。

ラーメンの弾性座屈荷重 P_{cr} に対する鉛直荷重 P の比 P/P_{cr} と H/H_P の関係を調べると、Fig. 6 のように実験値は $P/P_{cr} + H/H_P = 1$ の直線 (Merchant によって提案された Rankine 型の経験式) と安全側の

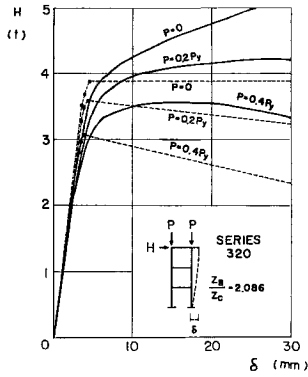


Fig. 5 (a)

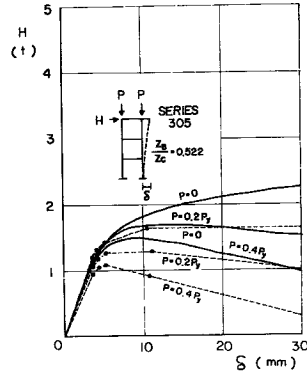


Fig. 5 (b)

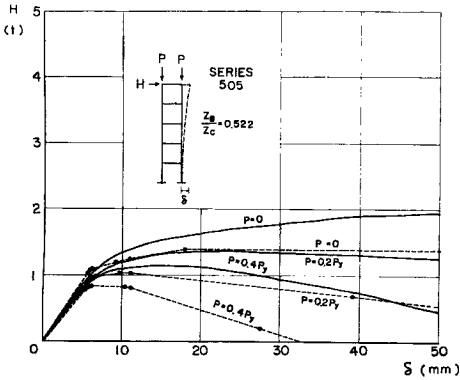


Fig. 5 (c)

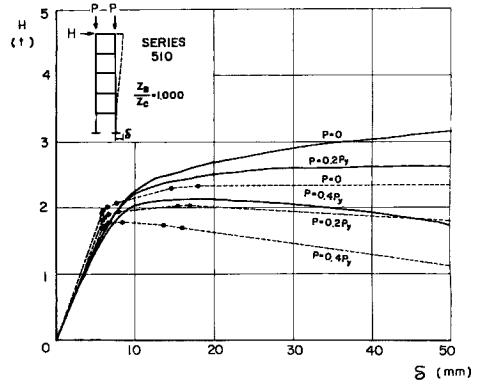


Fig. 5 (d)

誤差でよく一致している。ただし、この実験においては、 $P/P_{cr} < 0.237$ 、柱の上下端をピンと考えた場合のオイラー座屈荷重を P_E とすると $P/P_E = 0.024 \sim 0.048$ である。ただし、 $P_E = 268 \text{ t}$ である。

4. 4 靱 性 率

Table. 1 に各試験体最上層柱頭の靱性率を示してある。ここでいう靱性率とは、座屈撓角法によって計算される最初の塑性ヒンジが発生する時の水平変位の%に対する水平力が最大になる時の水平変位の比をいっており、305, 505, 510 シリーズの場合は、座屈撓角法による計算において first yield が生ずる時の水平変位に対する水平力が最大になる時の水平変位の比になる。**Table. 1** によると実験値は、一般に鉛直力の小さいほど、また梁の断面係数の大きいほど靱性率は大きくなっており、各試験体共、4 以上の靱性率を有している。

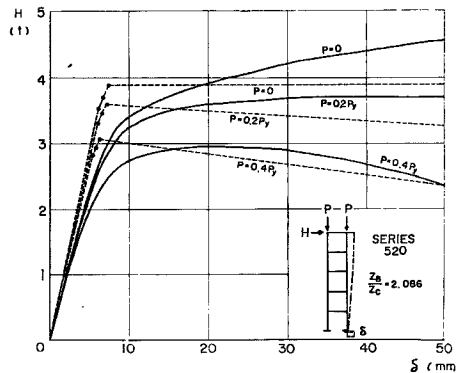


Fig. 5 (e)

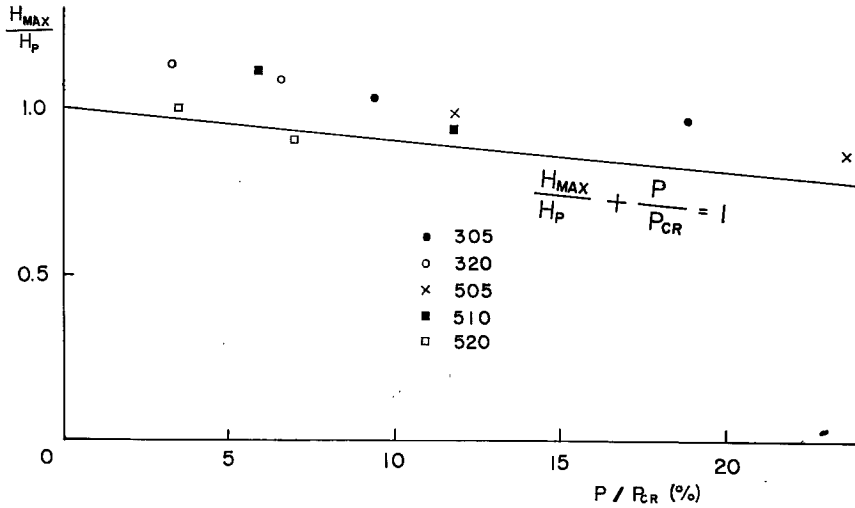


Fig. 6

4.5 歪測定結果

Fig. 7は、試験体の梁柱端部に貼った Wire Strain Gage のデータから計算した梁柱端部の塑性域の広がりを示したものである（ただし、梁柱の軸方向の塑性域の広がりは正確でない）。これらはいずれも水平

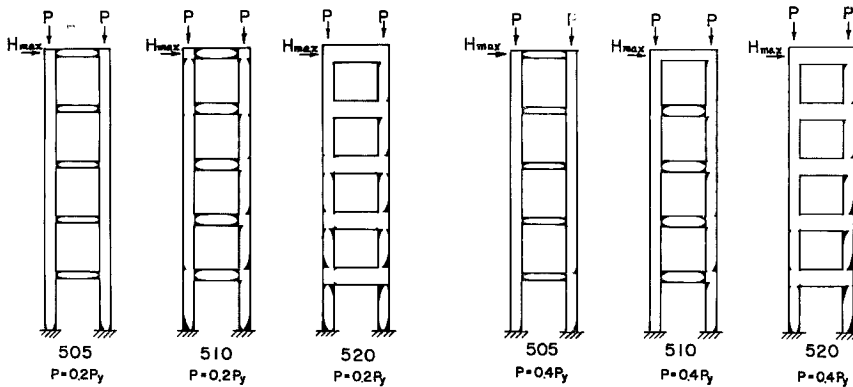


Fig. 7 (a)

Fig. 7 (b)

力が最大値に達した場合の図である。これによると、505シリーズでは、 $P=0.2P_Y$ の場合は、曲げ引張側の柱の最下端に塑性ヒンジが完成すれば崩壊機構に達する状態であるが、 $P=0.4P_Y$ の場合は、左右の柱の最下端のいずれにも塑性ヒンジは未完成である。510シリーズでは、 $P=0.2P_Y$ の場合は、完全に崩壊機構に達しているが、 $P=0.4P_Y$ の場合は、左右柱最下端および最上層梁端の塑性ヒンジが未完成で崩壊機構になっていない。520シリーズでは、 $P=0.2P_Y$ の場合は、最下層の柱頭および柱脚に塑性ヒンジが完成し崩壊機構になっているが、 $P=0.4P_Y$ の場合は、曲げ圧縮側の柱の塑性域はかなり広がっているが、曲げ引張側には、ほとんど塑性域がみられない。このように鉛直力が大きい程、崩壊機構に達する以前に水平力は最大値に達しやすく、この傾向は3層の場合より5層の場合の方が顕著である。

5. 結 論

この実験より次のことが結論できる。

- (1) 座屈撓角法による計算値は、弾性範囲では実験値とよく一致し、弾性から塑性に移行する範囲では、危険側、崩壊する課程ではかなり安全側の値をあたえ、耐力についてもかなり安全側の値を与える。
- (2) 鉛直力が増大するにつれて、ラーメンが崩壊機構に達する以前に、ラーメンは安定限界に達しやすい。この傾向は、3層の場合より5層の場合の方が著しい。
- (3) 耐力以後の水平力の低下は、鉛直力が大きいほど著しい。
- (4) 変形能力は、鉛直力の増大につれて減少し、梁の断面係数を増すと増大する。
- (5) 水平耐力は鉛直力の増大によって減少するが $H/H_p + P/P_{cr} = 1$ から推定できる。

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39年, pp. 127~139.