

高層ラーメンの復元力特性に関する実験的研究

(その 2)

若 林 実・森 野 捷 輔

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF TALL FRAMES

(PART II)

By *Minoru WAKABAYASHI* and *Shosuke MORINO*

Abstract

In a case of a multi-storey frame, columns of lower storeys are subjected to large vertical loads. When we consider the behavior of the multi-storey frame under horizontal loads, we cannot neglect the effect of these vertical loads. In order to investigate this effect on the restoring force characteristics of frames, a series of twelve tests are performed using the model frames which are cut out from mild steel plate of 60mm thickness. The experimental results are compared with the results reported in an earlier paper.

1. 序 論

高層建築物の耐震設計に関しては、建築物を数質点のせん断型振動モデルに置換して、動的解析が行なわれるのが普通である。この場合、建築物に水平力が作用したときの建築物の復元力特性が重要であり、したがって、いかに実際に近い復元力特性を仮定するかという問題が生ずる。従来、塑性範囲をも考慮したラーメン構造の動的解析には、理想弾塑性型、または bi-linear 型の復元力特性を仮定するのが普通であった。しかし、高層建築物のとくに下層の柱は大きな鉛直力をうけていて、この鉛直力が復元力特性に及ぼす影響は無視できなくなる。すなわち鉛直力がある場合、ラーメンの水平力と変位の関係をみると、水平力は最大値に達した後下降して、ラーメンは不安定になるという特色がある。このような負の勾配を有する復元力特性は、動的解析を行なう上に不都合であるため、変形を制限する必要がある。近年 Lehigh 大学などでは、複雑な構造物を最も簡単な曲げと軸力をうける beam-column のあつまりと考えると、全体の復元力特性を推定する方法が研究されているが、本研究は、一定の鉛直力をうけるラーメンに単調載荷される水平力と水平変位の関係を実験的に求め、架構の水平剛性や水平耐力、変形能力など復元力特性に及ぼす鉛直力の影響を調べる目的で行なわれたものである。

この実験研究は、降伏点の異なる 2 種類の鋼材から機械によって切り抜いた、2 組の 3 層小型模型ラーメンの試験体 12 個にそれぞれ所定の鉛直力を加えた後、水平力を単調に加えて、その復元力特性を調べたものである。なお昨年と同様の実験を行ない、結果を報告したが、今年はラーメンの形状、材料の降伏点などを変えた試験体を用いて実験を行ない、昨年の結果と若干の比較検討を行なった。

2. 実験概要

2.1. 試験体

試験体はそれぞれ 3 個からなる 4 シリーズから成り立っており、それぞれ A305, A320, B305, B320

シリーズと呼ぶことにする。Aシリーズは材料の降伏点 $\sigma_y=1698\text{kg/cm}^2$ ，Bシリーズは $\sigma_y=2174\text{kg/cm}^2$ と材料がちがうだけでそれぞれ6個の試験体の形状，寸法は，まったく同一である。

試験体の形状および寸法は Fig. 1, Table 1 に示されている。12個の試験体はいずれも 60 mm 厚の鋼板から機械で切り抜いたものである。部材断面は柱，はりとも長方形で，柱断面は12個とも同じの $10\text{mm} \times 60\text{mm}$ である。はり断面は2種類で 305タイプでは $7\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，320タイプでは $14\text{mm} \times 60\text{mm}$ である。これらのはり断面は，はり，柱の断面係数の比 Z_R/Z_O の値がそれぞれ約 0.5, 2.0 となるように選んである。

各タイプ3個の試験体はそれぞれ最上層柱頭に，柱の降伏荷重 P_r (=柱断面積 $\times$ 材の降伏点 σ_y) の約0，

Table 1 Experimental Results

Specimen	Series			A 3 0 5			A 3 2 0			B 3 0 5			B 3 2 0		
	Number			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Number of Storey				3			3			3			3		
Beam Depth $d(\text{mm})$				7			14			7			14		
Section Modulus Ratio Z_R/Z_O				0.49			1.96			0.49			1.96		
Slenderness Ratio				106.7			56.7			106.7			56.7		
Vertical Load $P(t)$				0	2.04	4.08	0	2.04	4.08	0	2.61	5.22	0	2.61	5.22
Elastic Buckling Load $P_{er}(t)$				10.93			38.63			10.93			38.63		
P/P_r				0	0.200	0.400	0	0.200	0.400	0	0.200	0.400	0	0.200	0.400
P/P_{er}				0	0.187	0.373	0	0.053	0.106	0	0.239	0.479	0	0.068	0.135
Ultimate Horizontal Load	Theoretical $H_T(t)$			0.292	0.199	0.143	0.712	0.628	0.513	0.373	0.235	0.146	0.912	0.798	0.630
	Experimental $H_{max}(t)$				0.277	0.194		0.755	0.615		0.265	0.185		0.874	0.671
Rigid-Plastic Collapse Load $H_P(t)$	H_{max}/H_T			0.292	0.287	0.273	0.712	0.684	0.598	0.373	0.367	0.350	0.912	0.876	0.766
	H_{max}/H_P				1.39	1.36		1.20	1.20		1.13	1.27		1.10	1.07
Ductility Factor					0.97	0.71		1.10	1.03		0.72	0.53		1.00	0.88
	Theoretical				2.14	1.93		1.92	1.90		2.15	1.98		1.93	1.88
	Experimental				4.33	2.39		5.87	2.64		3.02	2.04		2.57	2.39

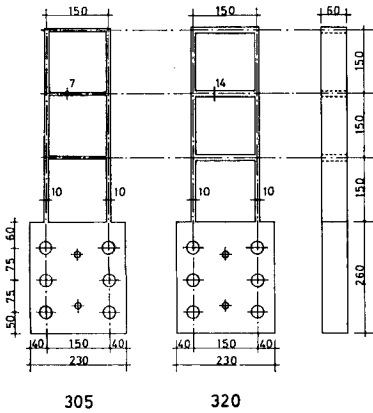


Fig. 1 Specimens (a Unit : mm)

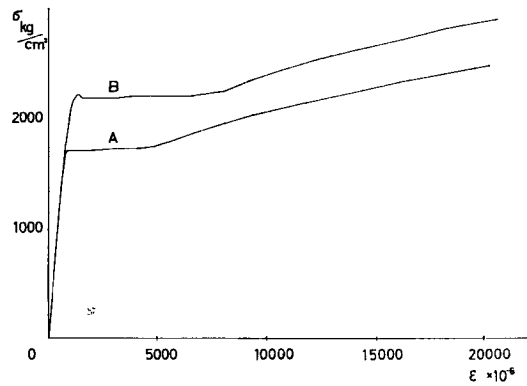


Fig. 2 Stress-Strain Curves of the Material.

20, 40%の鉛直力をうけている。

次に材料の鋼板の性質であるが、A, B両シリーズの引張試験結果の一例が **Fig. 2** に示されている。前述したように、Aシリーズでは $\sigma_y = 1698 \text{ kg/cm}^2$ 、Bシリーズで $\sigma_y = 2174 \text{ kg/cm}^2$ と、昨年報告したS S 41相当品 ($\sigma_y = 2940 \text{ kg/cm}^2$) にくらべて降伏点はかなり低い値である。両シリーズとも通常規格品と比較して、踊り場は短かく、歪硬化の始まりが早い。また両シリーズとも、材料の鋼板は残留応力を除くために、 650°C で3時間の焼鈍が行なっている。

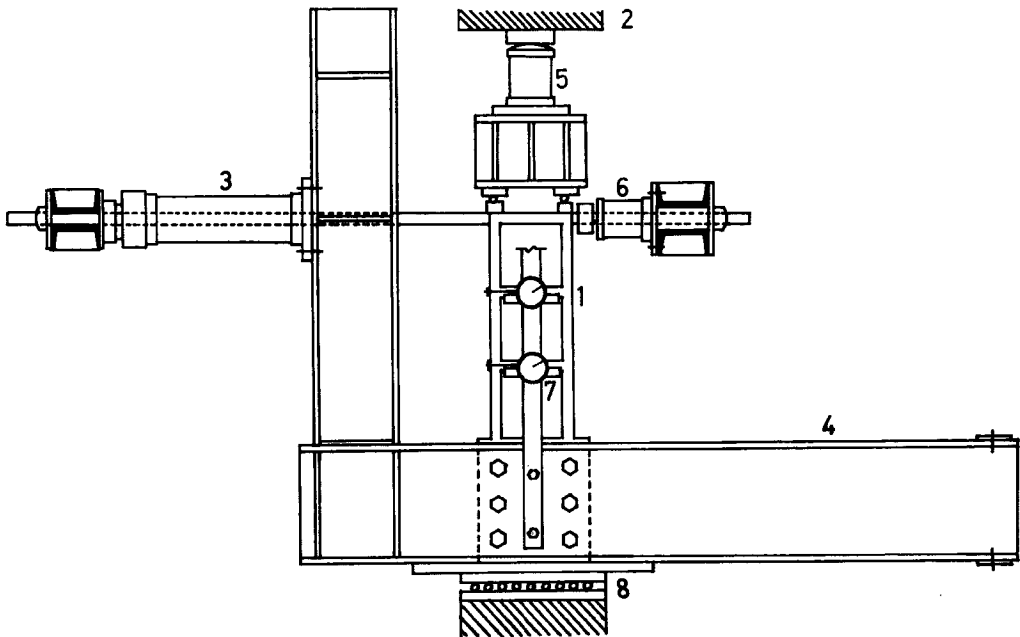


Fig. 3 Experimental Apparatus. 1. Specimen 2. Testing Machine (Capacity 100ton)
3. Oil Jack (Capacity 10ton) 4. Loading Frame 5. Load Cell 6. Load Cell
7. Dial Gage 8. Roller Bearing.

2.2. 実験装置および方法

実験装置は Fig. 3 に示されているようなもので、これは昨年報告したものと同一である。まず試験体は6本のハイテンション・ボルトによってL字型フレームに固定された後、ローラー・ベアリングを介して100t油圧式長柱試験機のベッド上に置かれる。100t油圧式長柱試験機によって所定の鉛直力が、試験体最上層柱頭に載荷され、これは実験が終了するまで一定に保たれる。次にL字型フレームにとりつけられた10t油圧式ジャッキによって水平力が、最上層はり位置にロード・セルを介して載荷される。漸増する水平力の各段階で、試験体柱脚部に2本のボルトで支えられた木製ビームにとりつけられた3個のダイヤル・ゲージによって、各層はり位置の水平変位が、また各部材端部に貼付された36枚のワイヤー・ストレイン・ゲージによって歪度が測定されている。なお、試験体の水平移動は試験体と長柱試験機のベッドとの間にそう入されたローラー・ベアリングによって行われている。

3. 解 析

実験値と比較するために、いくつかの仮定を設けた上で、部材にはたらく軸力の影響を考慮した撓角法を用いて、水平力と水平変位の関係を求めた。Fig. 7, Fig. 8 は水平力—水平変位曲線であって、図中実線は実験値、破線が撓角法による近似解である。撓角法の適用にあたって、次の仮定を設けている。

仮定1 曲げモーメントと曲率の関係は理想弾塑性とする。

2 はりのせん断力による柱の軸力の変化を無視して、柱の軸力は上層から下層まで一定値 P であるとする。

3 部材の材端モーメントが M_{Po} あるいは M_{PN} に達したときに、塑性ヒンジができるが、その位置は接合部端部とする。

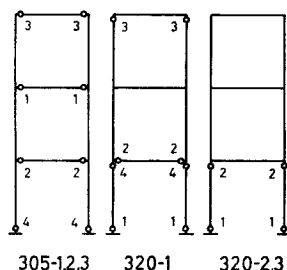
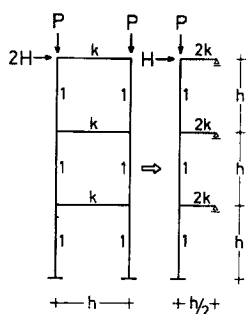


Fig. 4 Simplification of Analysis. Fig. 5 Location and Order of the Plastic Hinge Formation.

計算の方法は昨年と同様なので簡単に概要をのべる。

まず実験に用いたラーメンを Fig. 4 のような簡単な架構に置き換えて考える。節点回転角を θ 、柱の部材回転角を R として、弾性範囲について軸力を考慮した撓角法によって、節点方程式、層方程式をたてると6個の θ , R を未知数とする6元連立1次方程式が得られる。これをとくとラーメン各部の曲げモーメントは水平力 H に係数をかけた形で得られる。この中で絶対値が最大の曲げモーメントを M_{Po} (部材の全塑性モーメント)、あるいは M_{PN} (軸力によって低減された全塑性モーメント) に等置すると、第1の塑性ヒンジができたときの水平力と水平変位とが求まる。次の段階では、塑性ヒンジのできた所をピンに置き換えたラーメンについて、上と同様の計算を行ない、得られた水平力と水平変位とを第1段階のそれと加えあわせれば、第2の塑性ヒンジのできたときの水平力と水平変位とが求まる。この操作を繰り返して崩壊機構に達するまで続ける。なおこの場合、方程式は試験体の柱、はりの心々距離をもつ線材で構成された架構につ

いてたてられている。したがって仮定3によって、線材の接点からはりまたは柱のせいの $\frac{1}{2}$ の距離だけ離れた所に塑性ヒンジができるものとしている。

Fig. 5 は以上の方法で求めた塑性ヒンジの位置と順番である。これで見ると、はりの弱い305タイプでは鉛直力のあるなしにかかわらず、同じ型を示しているが、はりの強い320タイプでは鉛直力がない320-1だけが他の2個とは異なっている。これらの崩壊機構はA, B両シリーズともまったく同様で、実験後の観察ともよく一致している。

4. 実験結果

序論で述べたように、この報告は昨年発表した同題名の報告に引き続いて行なわれた実験にもとづいている。実験結果に入る前に試験体の形状・寸法、材料の性質などについて、その相違をのべておく。前述したように今年行なわれた実験は、それぞれ6個の試験体からなるA, Bシリーズで昨年のそれはCシリーズと呼ぶことにする。

(1) 形状・寸法

形状・寸法に関して、A, B両シリーズの間には何ら差異はない。A, B, Cシリーズを比較してみると、いずれも階高、スパンとも150mm（心々距離）、柱、はり巾は60mmで同じである。また、柱の断面係数に対するはりの断面係数の比 Z_R/Z_C の値もほぼ同一である。しかし、A, BシリーズではCシリーズに比べて柱、はりのせいは約55%に減少している。したがってラーメンの弾性座屈荷重に対する柱の細長比は、305タイプで1.9倍、320タイプで1.7倍と大きくなっている。

(2) 材料の性質

Table 2 には、A, B, Cシリーズの材料の引張試験から得られた降伏点 σ_y 、引張強さ σ_B 、伸び率、歪硬化のはじまるときの歪度 ε_{SH} などを載せてある。ヤング係数はほぼ $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ で同一である。またどの材料も残留応力を除くために焼鈍が行なっている。なお載荷される鉛直力のそれぞれの柱の降伏荷重 P_F に対する比率は0, 20, 40%の3種類で各シリーズとも同様であるが、鉛直力の絶対値は異なっている。

Table 2 Properties of the Material

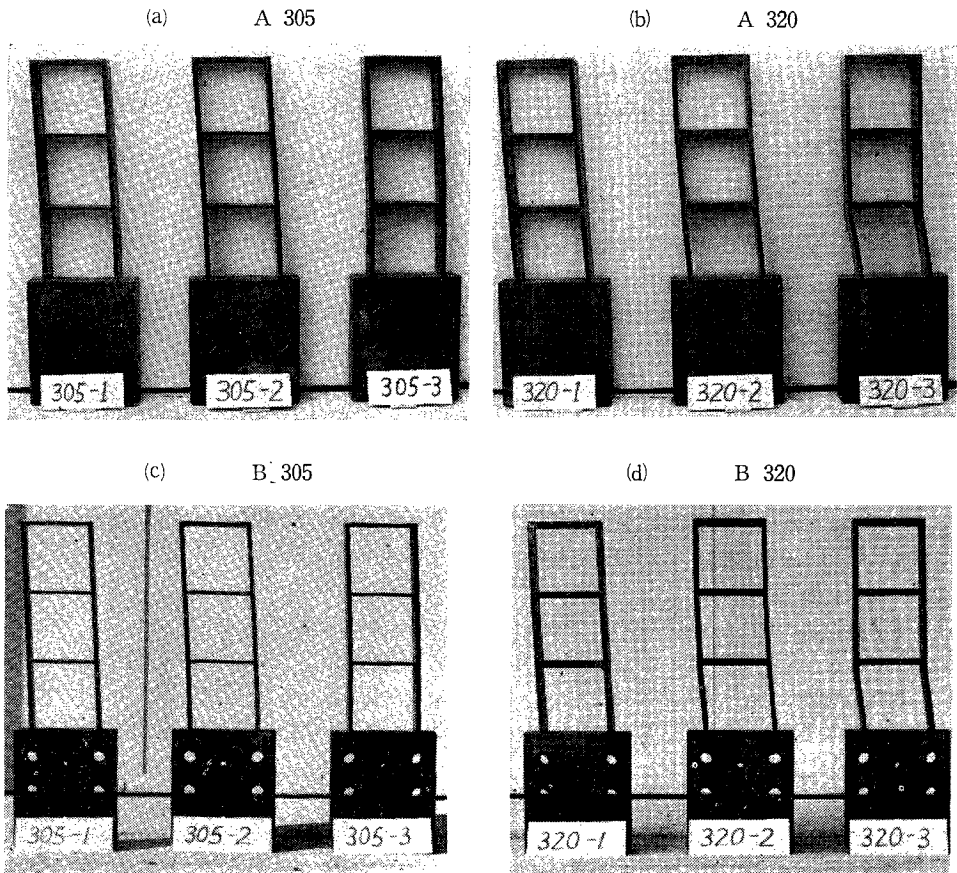
	Series A	Series B	Series C
$\sigma_y \text{ kg/cm}^2$	1698	2174	2940
$\sigma_B \text{ kg/cm}^2$	3910	4425	4909
$\varepsilon_{SH} \times 10^{-6}$	4977	5263	8821
Elongation (%)	38.3	35.3	30.5

4.1. 変形モード

Photo. 1 (a)~(d) は各試験体の実験後の変形状態を比較したものである。各シリーズとも3個の試験体が並べてあるが、それぞれ左から鉛直力がない場合、柱の降伏荷重 P_F の20%, 40%の場合に対応している。

はりの弱い305タイプでは各層はりの両端部と最下層柱脚部の変形が著しいラーメン全体としての曲げ型のモードで、柱は下層から上層まで一様に曲った状態で変形する。最も極端な場合がA 305-3で水平力がPeakに達した後、耐力の $\frac{1}{2}$ 程度まで下降したところから、第1層はり位置の変形が戻りはじめるという現象がみられた。B 305-3でも、ほぼこれに近い現象がみられたがCシリーズではみられなかった。305タイプの場合、Cシリーズに比べてA, Bシリーズははりの拘束力も弱く、細長比もかなり大きくなる

Photo. 1 Specimens after Test.



ために、鉛直力が大きく影響するので、ある程度まで変位が進むと、逆方向にはらみ出して来たものと思われる。

はりの強い 320タイプでは最下層柱の両端部の変形が著しいせん断型のモードを示している。鉛直力が小さいと、この特色ははっきりしないが、鉛直力が最大である 320-3 では最下層の柱が変形のほとんどをうけて、第2、第3層はまっすぐ立っているように見える。

これらの特色は Fig. 6 の方にもはっきりあらわれている。Fig. 6 のグラフの縦軸は試験体の各はり位置を示している。横軸は水平変位である。このグラフは水平力が Peak に達した後、下降して0になるまでの各層はり位置の変位の進みぐあいを水平力をパラメーターにしてプロットしたものである。これで見ると、305タイプでは耐力後、最下層はり位置の変位はほとんど進行せず、Aシリーズでは戻りが見られる。320タイプでは耐力後の各層はり位置の変位の進みぐあいはほぼ同じになっている。いずれの場合も Photo. 1 の観察を裏づけていることがわかる。

以上述べた特色は、一般的に言って鉛直力が大きい程ははっきりしてくる。また対応する試験体を各シリーズについてくらべてみると、A、Bシリーズの方がCシリーズよりもその特色がはっきりしており、この傾向はまた鉛直力が增大するにつれていっそう明瞭になる。A、Bシリーズには、ほとんど差異は認められない。

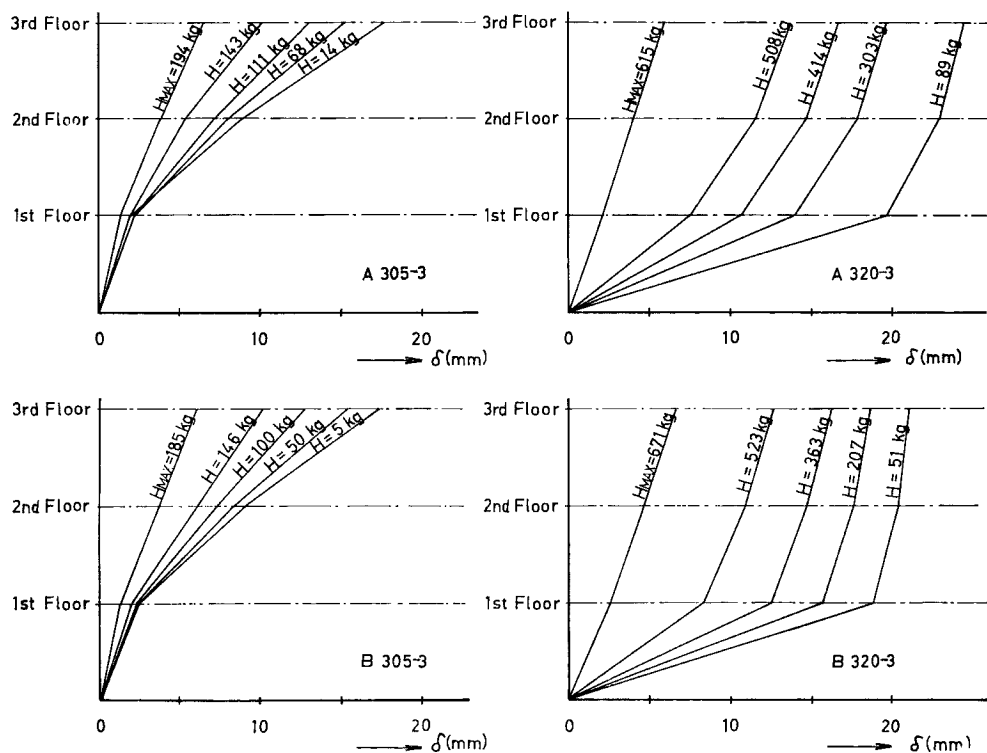


Fig. 6 Displacement Distribution.

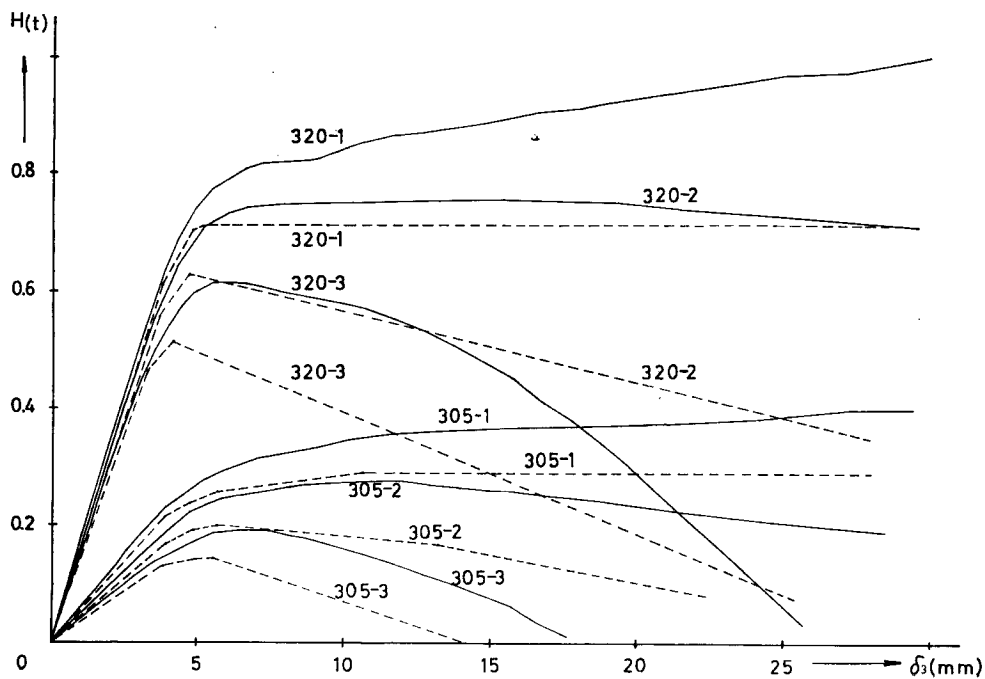


Fig. 7 Horizontal Load-Displacement Relation (Series A).

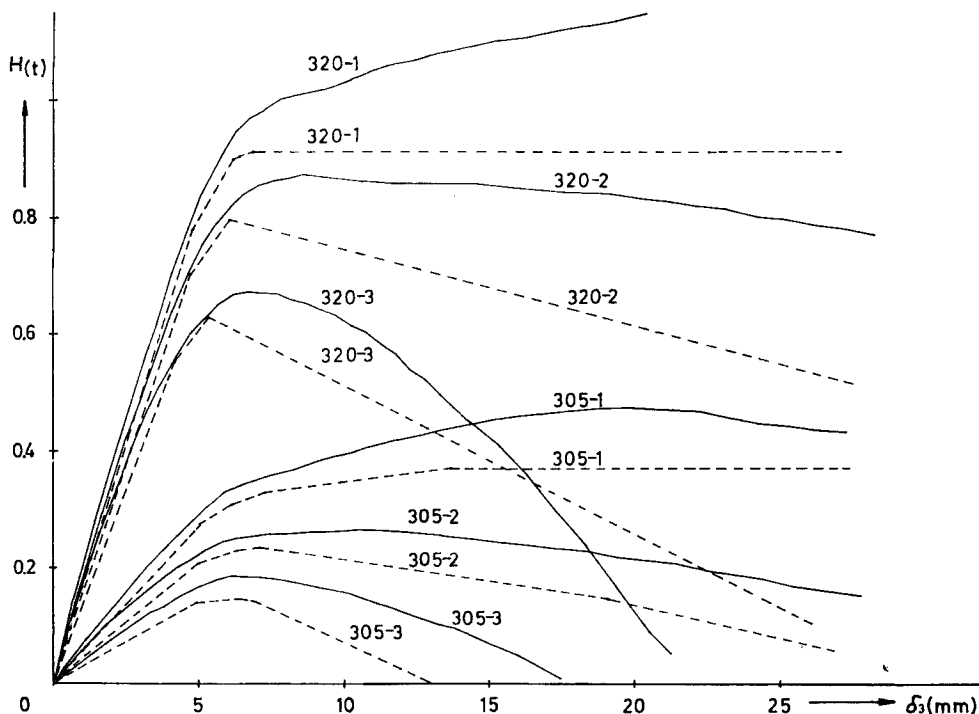


Fig. 8 Horizontal Load-Displacement Relation (Series B).

曲げ型、せん断型を通じて、大きな変形の起っている箇所は Fig. 5 の理論的に求めた塑性ヒンジの発生位置とよく一致している。

4.2. 水平力—水平変位曲線

Fig. 7, Fig. 8 は水平力と最上層はり位置の水平変位 δ_s の関係を表わしたグラフである。図中実線は実験値、破線は 3 で示した撓角法による理論値である。破線の折れ曲る点は塑性ヒンジの形成を意味している。実験値と理論値とはかなり差があるが、これは理論値には、歪硬化を考慮していない事、部材は線材と仮定して剛域を考慮していない事、また塑性ヒンジは接合部端部に発生すると仮定しているが実際には塑性域のひろがりがあることなどによるものと思われる。

弾性範囲では実験値、理論値とも立ち上り勾配が鉛直力の増大とともにゆるやかになっており、鉛直力が増すにしたがって、ラーメンの水平剛性が低下することがわかる。また鉛直力の増加につれて、曲線が弾性勾配からはなれて曲りはじめる点も低下し、水平耐力も低くなる。

各シリーズを通じて鉛直力のない試験体は、変位の増大とともに水平力は上昇を続け、鉛直力が柱の降伏荷重の20%の試験体では水平力は最大値に達した後、横ばい状態を続けるか、またはやや下降する。はりの弱い 305 タイプではこの水平力の最大値は明瞭であるが、はりの強い 320 タイプではあまりはっきりしない。最大の鉛直力、すなわち柱の降伏荷重の40%をうけている試験体では水平力は最大値に達した後急激に低下する。この下降曲線の勾配はA, Bシリーズの方がCシリーズよりはるかに急である。鉛直力が大きくなってくると、試験体が細長いというA, Bシリーズの特色がはっきりと復元力特性にもあらわれてくるが、鉛直力のない 320—1 でもA, Bシリーズには、Cシリーズには見られなかった平たん部があらわれる。これも形状の相違によるものかと思われる。なお、Bシリーズ 305—1 は他の鉛直力のない場合とちがって、弾性勾配からはなれて曲りはじめる点も低く、また変位が大きくなってから水平力が低下するなど

のことからみて、実験に不備な点があったと考えられる。

鉛直力の影響は各シリーズの鉛直力最大の場合の復元力特性に明瞭にあらわれている。Fig. 9 には各シリーズ3 ($P=0.4P_T$) の水平力—水平変位曲線が無次元化してプロットしてある。両軸にあらわされている H_P は軸力による塑性モーメントの低下を考慮した剛塑性崩壊荷重、 δ_P は最初の塑性ヒンジが発生するときの最上層はり位置の水平変位である。これで見るとBシリーズが一番はっきりと不安定現象をあらわしており、Cシリーズではそれほど明瞭ではない。

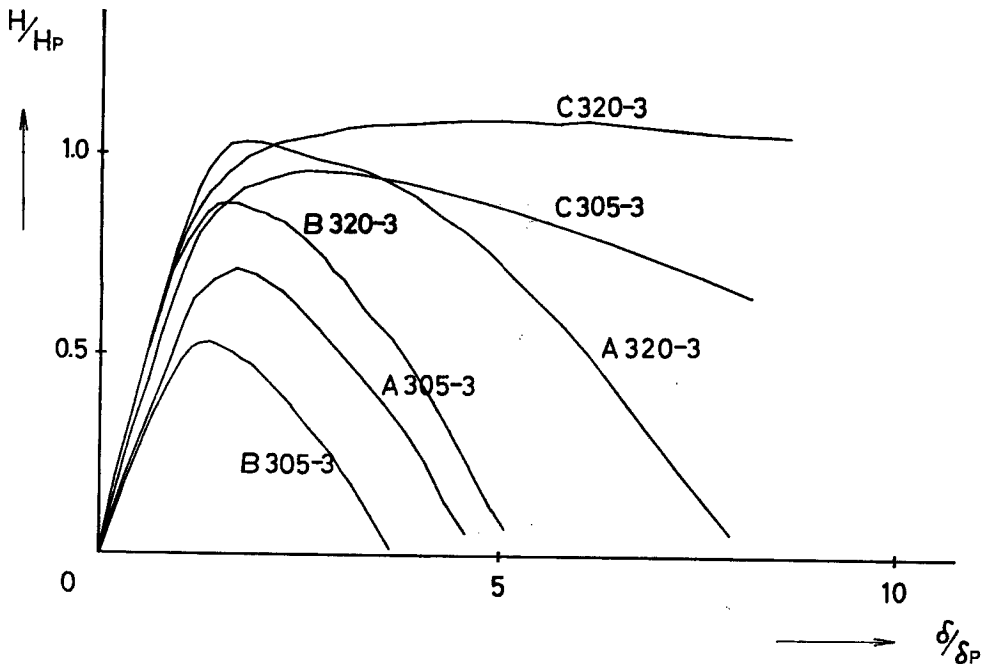


Fig. 9 Dimensionless Horizontal Load-Displacement Relation.

4.3. 水平耐力

軸力を考慮した撓角法によって求めた水平力の最大値 H_T と実験から得られた最大値 H_{max} を比較すると、Table 1 にあるように H_{max}/H_T の値は約1.07~1.39で理論耐力が実験値をかなり下まわるものもある。原因については 4.2. のべたが、この差ははりの弱い 305タイプの方がはりの強い 320タイプよりも大きい。またAシリーズの方がBシリーズよりも大きいと言える。つまり鉛直力の大きい程この差は縮まるように見えるが決定的ではない。

軸力による塑性モーメントの低下を考慮して求めた剛塑性崩壊荷重 H_P と実験値 H_{max} とを比較すると、 H_{max}/H_P の値は約 0.53~1.10 である。また弾性座屈荷重 P_{cr} に対する鉛直力 P の比 P/P_{cr} は 0.053~0.479 である。この H_{max}/H_P と P/P_{cr} とを座標軸にしてプロットしたものが Fig. 10 で図中の直線は Merchant の提案した Rankine 型の耐力式 $H_{max}/H_P + P/P_{cr} = 1$ であるがこれで見ると、B305-2 だけは下まわっているが約15%の安全側誤差内に実験値は入っている。

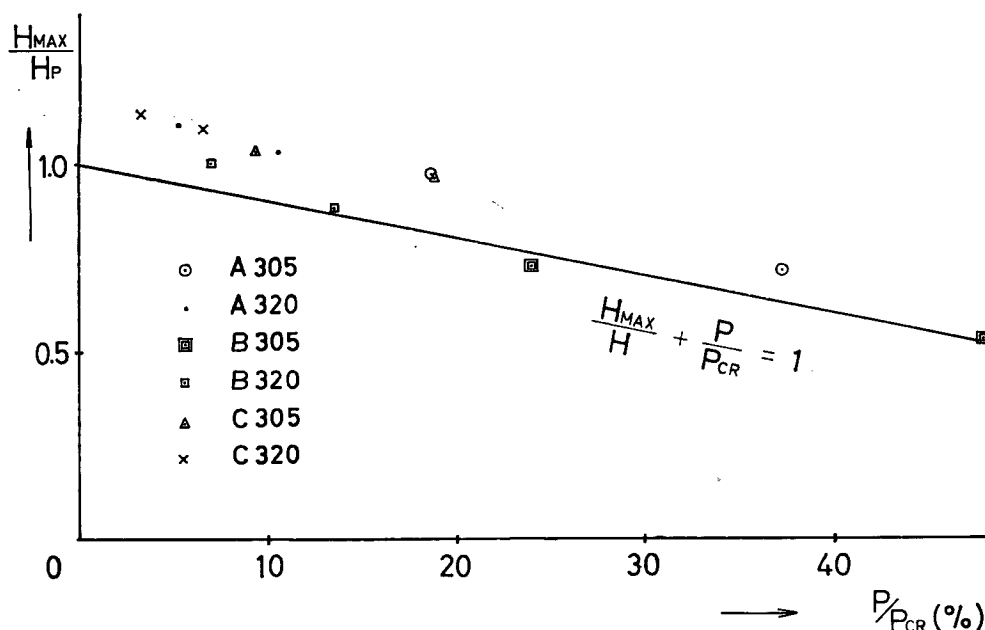


Fig. 10 Horizontal Load-Vertical Load Relation.

4.4. 靱 性 率

Table 1 に最上層はり位置の靱性率がのせてあるがこれは撓角法によって求められた最初の塑性ヒンジの発生したときの水平変位 δ_P の%を規準にしている。つまり理論による靱性率は、撓角法によって求めた水平力が最大値 H_T になったときの水平変位を $\frac{2}{3}\delta_P$ で割った値であり、実験から得られる靱性率は水平力が最大値 H_{max} になったときの水平変位を $\frac{2}{3}\delta_P$ で割った値である。

同じはりのタイプについてくらべると理論値、実験値とも鉛直力が増すにつれて靱性率は低下し、理論値と実験値の差もちまちまってくる。鉛直力と柱の降伏荷重の比率が同じ場合、はりの強い方が靱性率も高い。各シリーズの対応する試験体を比較するとCシリーズが一番高くBシリーズが一番低いといえる。

5. 結 論

1. 水平力—水平変位関係について理論値と実験値とをくらべると、剛域、塑性域のひろがり、歪硬化の影響などで、実験値の方がかなり高い値を示す。
2. 実験から得られる水平力—水平変位関係では、鉛直力が増加するほど水平耐力は低下し耐力後の下降も急激である。
3. 水平方向の靱性率は鉛直力が増加するにつれて減少し、柱に加わる鉛直力による応力度が等しい場合には、はりの強い程大きい。
4. 柱に加わる鉛直力による応力度が等しい場合、柱の細長比の大きいラーメンでは不安定現象が大きくあらわれる。
5. 変形モードは、曲げ型、せん断型ともに鉛直力が増加するにつれてその特色が明瞭になる。
6. 耐力に関する Rankine 型の経験式より実験値は15%程度高い値を示す。

参 考 文 献

- 1) 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), 京都大学防災研究所年報, 第9号, 昭和40年, pp.317—326