

繰返し水平荷重を受ける長方形ラーメンの性状

若 林 実・辻 文 三

THE BEHAVIOR OF FRAMES UNDER REPEATED HORIZONTAL LOADING

By Minoru WAKABAYASHI and Bunzo TSUJI

Synopsis

To investigate the elasto-plastic characteristics of frames under repeated horizontal loading, the experiment of portal frames was made, and their strength, stiffness, restoring force characteristic and damping are discussed. Test results indicate that the behavior of compression bracing is in elastic range that of centrally loaded column and in elasto-plastic range that of eccentrically loaded column. The stiffness deterioration of braced frames under repeated horizontal loading is fairly large, and its amount coincide with theoretical result. Energy absorption by bracing is very large even under small deflection.

1. 序 論

骨組が地震力を受けて安全であるか否かは色々な要因が関係している。ここでは強度、剛性、変形状、減衰性状等を調べるために矩形断面をもつ鉄骨骨組の小型模形に対して単調および交番繰返し加力を行ないその結果を検討した。強度は骨組の終局状態における耐力を示すものであり、剛性は骨組の振動に対する固有周期を決定するものとして重要である。特に鉄骨骨組が繰返し加力を受けるとき Baushinger 効果により剛性が低下することが知られている。さらにブレースを有する骨組では圧縮側ブレースの座屈変形に伴う剛性の減少がかなり大きくなるものと思われる。変形状は一般に非常に複雑な形を示すが analog computer, digital computer 等により振動解析をする場合には簡単な形に置換できなければならない。また骨組に減衰性が存在することは地震力に対する骨組の抵抗性を増大させ、変形を制限するものとして重要である。特に鉄骨骨組では材料の塑性変形、リベット接合ボルト接合等ランプされた接合部における摩擦すべり等によるエネルギー吸収が大きなものである。ここでは塑性変形によるエネルギー吸収の場合を扱う。

2. 実 験 方 法

2.1) 試 験 体

試験体は Fig. 1 に示すような厚さ 12 mm の鉄板から熱をできるだけ加えないようにして切抜いた矩形断面を有する 4 種類の鉄骨骨組で単調加工用および繰返し加力用の 2 個計 8 個を準備した。P 型は柱脚固定の門型フレームおよびブレース付門型フレーム、S 型は上下固定柱およびブレース付上下固定柱である。なお横座屈を防ぐために各節点を 10 mm×10 mm の Bar で溶接し 2 面の骨組とした。

2.2) 載 荷 装 置

載荷はアムスラー型万能試験機により P 型試験体には曲げ変形を S 型試験体には剪断変形を与えるように行なった。繰返し加力は各半 cycle 毎に試験体の上下を逆にして同様の過程を繰返した。装置の概要は Fig. 1 および Photo. 1, 2 に示す。

2.3) 測定装置

柱頭の柱脚に対する水平変位は柱脚剛体部分に取り付けたダイヤルゲージにより測定し歪の分布は柱、梁およびブレース表面に貼付けたワイヤーストレインゲージによって読み取った。(Fig. 1 参照)

3. 実験結果とその検討

3.1) 荷重-変形曲線

(単調加力の場合)

単調加力の場合に対する荷重-変形曲線は Fig. 2 に示す。実線は実験値を示し点線は計算値を示す。

(a) ブレースのない骨組の場合

計算値は塑性ヒンジの形成された点以外は弾性変形するものと仮定して求めた値で、耐力は simple plastic 理論¹⁾によっている。A点で柱脚の最外縁応力が降伏応力に達し、B点で柱脚に塑性ヒンジが形成され、C点で梁端に塑性ヒンジが形成され骨組は崩壊する。初期勾配が計算値と異なるのは残留応力の影響によるものと思われる。また弾塑性範囲における変形は断面が矩形断面, shape factor 1.5 で実際の鉄骨断面と異なるために弾性変形と仮定すると少し計算値は小さい値を与える。simple plastic 理論による耐力は変形が急速に増大し始める荷重を与えるが、変形の増大と共に骨組はさらに10~15%以上の荷重の増大に耐えている。

(b) ブレースを有する骨組^{2,3)}の場合

試験体は骨組とブレースは一体に製作され剛接されている。しかし弾性範囲における変形状は門型フレームに撓角法、ブレースに座屈撓角法³⁾を用いて解いた場合と、門型フ

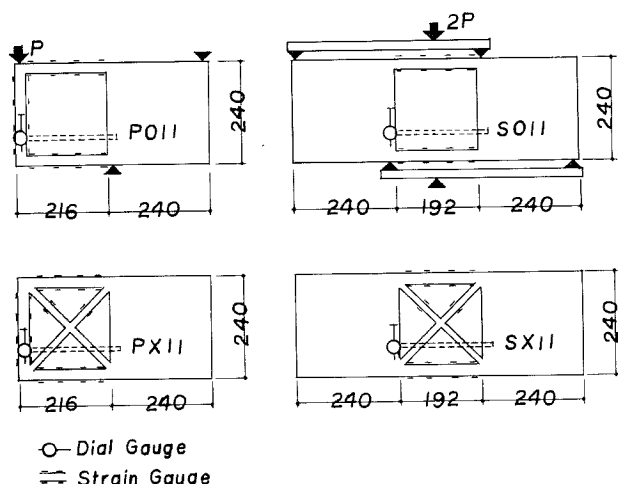


Fig. 1. Test Frames and Loading System.

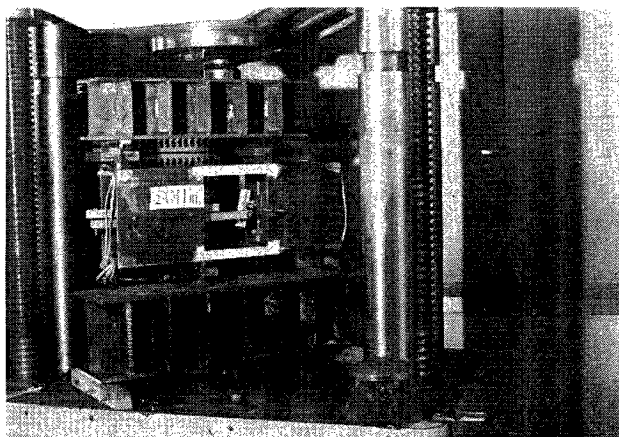


Photo. 1. Loading System P-type

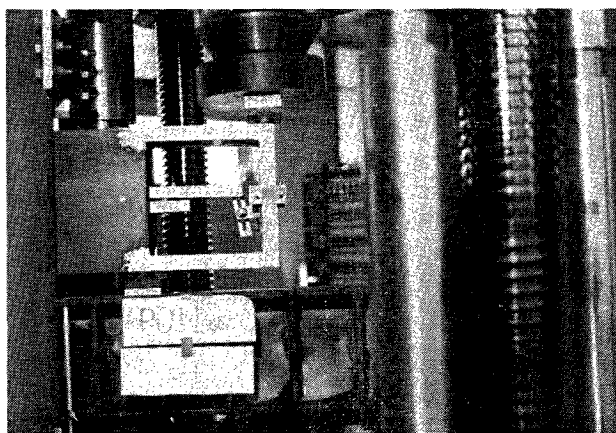


Photo. 2. Loading System S-type.

レームとブレースはピン接合であると仮定して解いた場合はほとんど差がないため、ここでは簡単のためブレースと骨組はピン接合と仮定して計算を進める。A点は圧縮ブレースと引張ブレースの交点が降伏するときで、降伏条件に von Mises の条件⁵⁾を用いると Fig. 3 のような応力分布の場合には

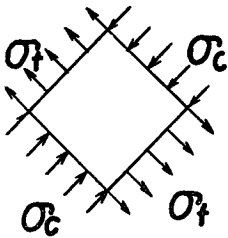


Fig. 3

$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \\
 &= \sqrt{\sigma_\tau^2 + \sigma_c^2 - \sigma_\tau \sigma_c} \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

ここで $\sigma_\tau = -\sigma_c$ であるから

$$\sigma_y = \sqrt{3} \sigma_\tau = \sqrt{3} \sigma_c \dots \dots (2)$$

たゞし σ_y : 降伏応力, σ_τ, σ_c : 引張および圧縮ブレース応力

ブレースは線材と仮定すれば圧縮ブレースと引張ブレースの交点は歪硬化によりさらに荷重を伝達できる。従ってブレースは伸び剛性を変化することなしにさらに剪断力を受け持つ。圧縮側ブレースを中心圧縮性と考えて座屈モードを Fig. 4 のようにブレースの長さ l を半波長とする

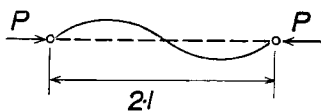


Fig. 4. Buckling Mode.

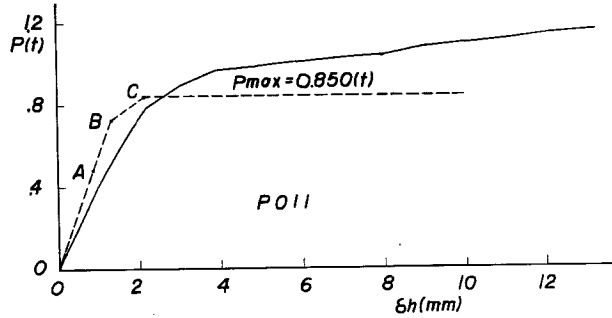


Fig. 2 (a)

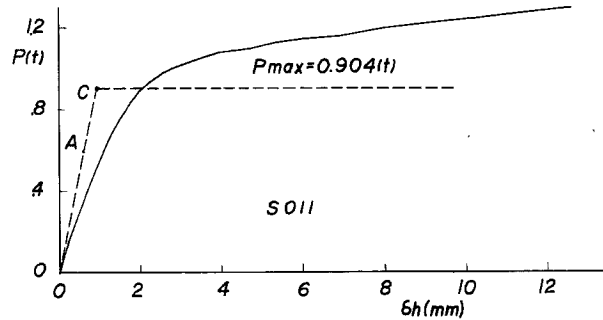


Fig. 2 (b)

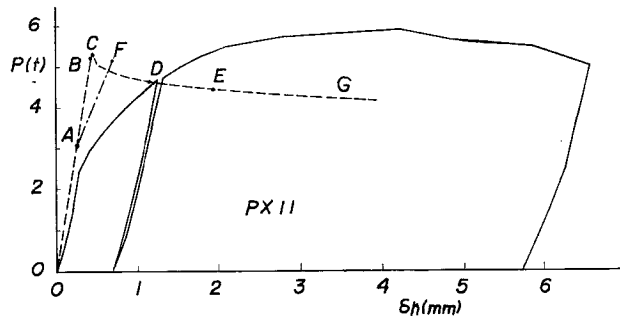


Fig. 2 (c)

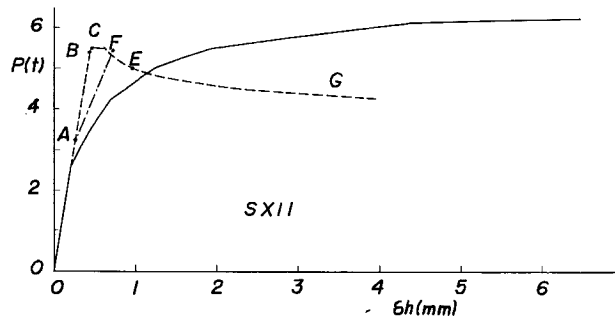


Fig. 2 (d)

Fig. 2. Load-Deflection curve

正弦曲線と仮定すれば Tangent-modulus 理論より

$$\sigma_{cr} = \frac{\tau \pi^2 E}{\lambda^2} \dots\dots\dots (3)$$

または DIN より

$$\tau = 1 - \left(\frac{\sigma_{cr} - \sigma_p}{\sigma_y - \sigma_p} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_p = 0.8 \sigma_y \dots\dots\dots (5)$$

ここに E : ヤング係数 λ : 細長比である。

圧縮側ブレースの座屈後の挙動は **Fig. 5** に示す最大変形の点に塑性ヒンジが形成される崩壊機構を考える。撓み曲線を正弦曲線と仮定すれば塑性ヒンジの条件より

$$M_{pn} = M_{p0} \left[1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで $M_{p0} = \frac{b \cdot h^2}{4} \sigma_y$, $P_y = b \cdot h \cdot \sigma_y$

b : 断面中 h : 断面高さ

釣合条件より

$$P \cdot y_m = M_{pn} \dots\dots\dots (7)$$

(6) (7) 式より

$$P \cdot y_m = M_{p0} \left[1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (8)$$

またたわみ y と軸方向変形 dl との関係は **Fig. 6** より

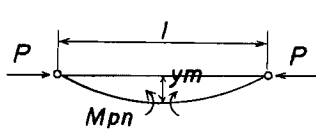


Fig. 5

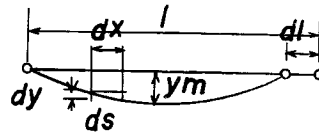


Fig. 6

$$y = y_m \sin \frac{\pi x}{l} \dots\dots\dots (9)$$

$$dl = \int_0^l ds - dx = \int_0^l \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \dots\dots\dots (10)$$

$$\therefore dl = \frac{1}{4} \cdot \frac{(\pi \cdot y_m)^2}{l} \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 7 より骨組の水平変形 dh とブレースのたわみ y_m との関係は

$$dh \cdot \cos \theta = 2 \cdot dl$$

$$\therefore dh = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{(\pi \cdot y_m)^2}{l} \dots\dots\dots (12)$$

従って水平変形 dh と圧縮ブレースの軸力 P との関係は (8) (12) 式より

$$dh = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} l} \cdot \left(\frac{M_{pn}}{P} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^2 \right]^2 \dots\dots\dots (13)$$

ただし水平変位 dh はブレースの座屈荷重時の変形を基準にしたものである。(3) 式と (13) 式の間を **Fig. 8** に示す。座屈荷重 (A点) に達した後ブレースはメカニズム曲線に達するまで (B点) は一定の座

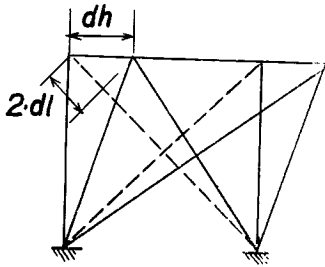


Fig. 7

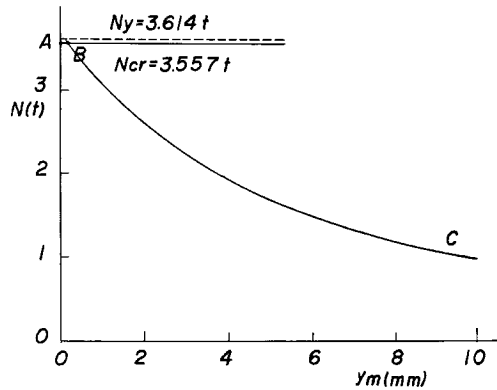


Fig. 8. Behavior of Compression Bracing

屈荷重を保持し変形のみが進行するものとする。

引張側ブレースは降伏荷重に達した後は一定の降伏荷重を保持し塑性変形のみが進行する。また骨組の軸力はブレースの降伏後ブレースの降伏荷重による軸力のみを考え柱、梁の剪断力による成分、圧縮ブレースの軸力変動に伴う成分は考えない。B点は圧縮側ブレースの座屈荷重時に対応しC点は引張側ブレースの降伏荷重時を示す。C点以後不安定な釣合を示しながら変形は進行しD点で柱脚に塑性ヒンジが形成されE点で骨組は崩壊機構となる。A点以後計算値と実験値は非常に異なる。この理由の1つはブレースを線材と仮定し交点における塑性変形を無視したためと思われる。交点における歪硬化が始まるまでの塑性変形は r_y を降伏剪断歪, r_{st} を歪硬化開始点の剪断歪とすれば $r_y = 1.79 \times 10^{-4} \text{ rad}$, $r_{st} = 32.1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ であるから一辺が b なる正方形が $b_1 \times b_2$ の長方形に変形したとすると

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= b\sqrt{1+\sin r} \approx b\left(1+\frac{r}{2}\right) \\ b_2 &= b\sqrt{1-\sin r} \approx b\left(1-\frac{r}{2}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

$$\therefore \Delta b = \frac{b \cdot r_{st}}{2} = 0.0192 \text{ cm} \dots\dots\dots (15)$$

$$\therefore dh = \sqrt{2} \Delta b = 0.0271 \text{ cm} \dots\dots\dots (16)$$

すなわち水平変位が $dh=0.0271 \text{ cm}$ さらに加わることになり A—B 線は A—F 線のようになる。上述のように圧縮側ブレースを中心圧縮柱と考えるとブレースの降伏後急速な圧縮側軸力の減少により骨組が不安定な釣合を示すようになる。実験値によるとA点を過ぎて剛性はかなり減少するが安定な釣合のまゝで相当の変形をする。これは弾塑性域におけるブレースの性状は曲げモーメントの影響で偏心圧縮となり中心圧縮とは全く異なるからであると思われる。従って荷重—変形曲線はA点以後剛性を減じ最終的にはE—G曲線に内接する曲線を示すと考えられ、安定な釣合のまゝで塑性率もかなり期待できるとと思われる。

3.2) 荷重—変形曲線(繰返し加力の場合)

繰返し加力の場合の荷重—変形曲線は Fig. 9 に示す。○印は単調加力の場合で各サイクルの最大変形の点はほゞ繰返し加力の曲線上にくる。loop は完結したものでなく各半 cycle 毎に変形振巾を増大させた。完結した loop は原点を中心に対称なものとする。

(a) 剛性の低下

繰返し加力に伴う剛性の低下は残留応力 Baushinger 効果等によるものとして知られているが、ブレースのある骨組では圧縮側ブレースの座屈変形に伴う剛性の低下がこれに加わる。座屈変形による剛性の低下は次のように考える。元撓み曲線を正弦曲線を仮定し、引張力 dP により生ずるたわみの減少に伴う軸

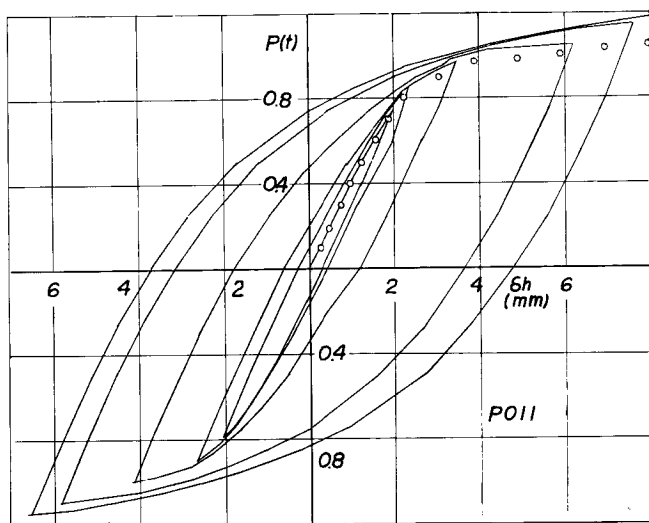


Fig. 9 (a)

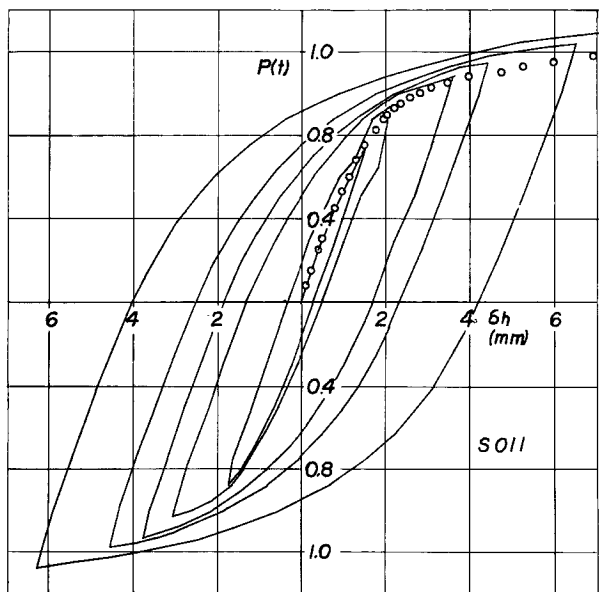


Fig. 9 (b)

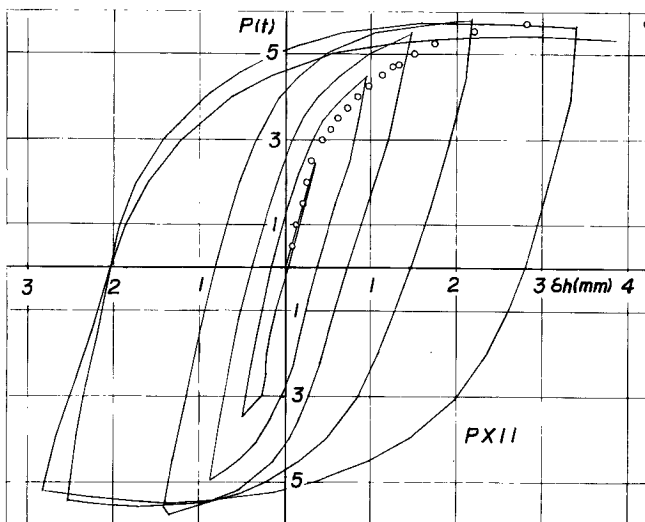


Fig. 9 (c)

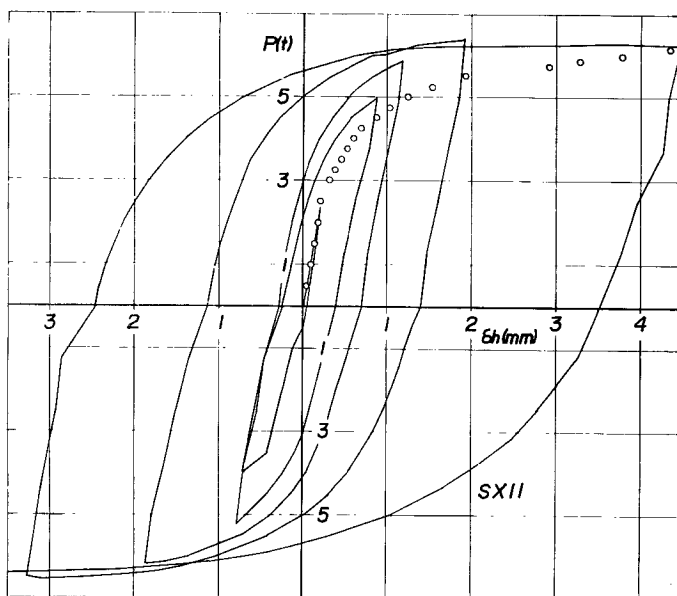


Fig. 9 (d)

Fig. 9. Load-Deflection curve.

方向の伸びを dl_1 とすると Fig. 10 より

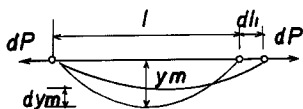


Fig. 10

$$dy = dy_m \sin \frac{\pi x}{l} \dots\dots\dots (17)$$

$$dy_m = \frac{2l \cdot dl_1}{\pi^2 \cdot y_m} \dots\dots\dots (18)$$

釣合式は

$$M = dP(y_m - dy_m) \dots\dots\dots (19)$$

曲げモーメントと曲率の関係より

$$\frac{M}{EI} = -\rho y'' \dots\dots\dots (20)$$

(18) (19) (20) 式より軸力 dP とたわみの減少による伸び dl_1 との関係は

$$\frac{dl_1}{dP} = \frac{l \cdot y_m^2}{2EI} = \frac{l}{D_1} \dots\dots\dots (21)$$

また軸力 dP による伸びを dl_2 とすれば

$$\frac{dl_2}{dP} = \frac{l}{E \cdot A} = \frac{l}{D_2} \dots\dots\dots (22)$$

ここで D_1 は曲げ変形に伴う伸び剛性, D_2 は軸力に対する伸び剛性である。従って元撓みによる伸び剛性の低下率 ν は

$$\nu = \frac{D_2}{D_1 + D_2} \dots\dots\dots (23)$$

で示される。実験値および計算値による剛性の変化を Fig. 11 に示す。ブレースのない骨組では塑性率 μ が 2~4 では ν 0.75~0.70 に減少しその後は徐々に減少する。ブレースのある骨組では塑性率 4~8 で急速に減少し ν 0.7~0.65 に達する。ブレースのある場合の塑性率 8 はブレースのない場合の塑性率 2 の水平変位に対応し、従って骨組だけの剛性の変化はの場合ほとんどない。実験値○印はかなりのばらつきがあるがほぼ計算値に近いことからブレースの座屈変形に伴う剛性の低下率は ν (23) 式で近似できるものと考えられる。

(b) 骨組の減衰性

骨組に減衰性が存在することにより地震力により与えられるエネルギーが吸収され、骨

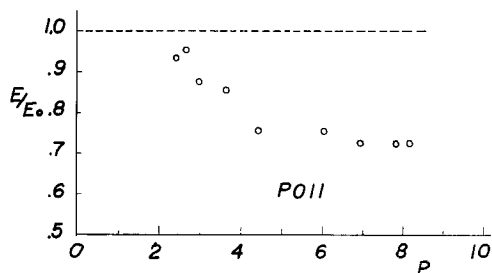


Fig. 11 (a)

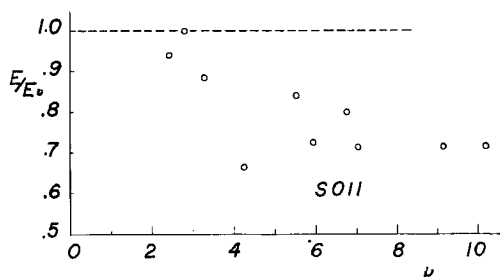


Fig. 11 (b)

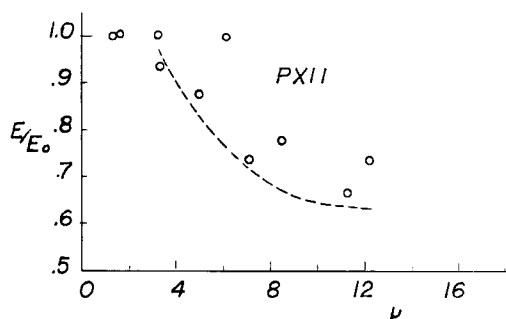


Fig. 11 (c)

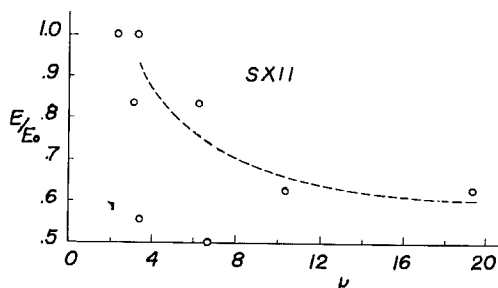


Fig. 11 (d)

Fig. 11. Stiffness Deterioration.

組の地震に対する抵抗力を増大させる。減衰性⁶⁻⁹⁾に関しては色々な表示法が行われてきたが減衰が小さい場合には系が粘性減衰を有するという仮定に基づいて等価粘性減衰定数で示されている。減衰が大きくまた粘性減衰と異なる場合には Specific Damping Capacity すなわち系の 1 cycle 当りのエネルギー損失量 ΔW と最大変形時における Potential Energy との比 ψ で示される。Fig. 13 に繰返し加力実験から求めた ψ の値と塑性率 μ との関係を示す。ブレースのない骨組では $\mu=2\sim6$ まではほぼ変形振巾に比例して 1.0 $\sim$ 1.2 に達しその後は徐々に増加する。ブレースのある骨組では変形の小さいところでもブレースによるエネルギー吸収が大きく塑性率 $\mu=2\sim3$ で急速に増大し 1.6 $\sim$ 1.8 に達しその後は徐々に増加する。P 型と S 型

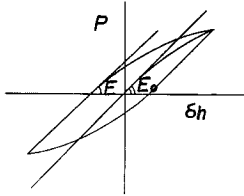


Fig. 12

ではその差は認められない。Fig. 14 には骨組を線型復元力と粘性減衰を有する系と仮定して等価粘性減衰定数比 he を求めた値を示す。

$$he = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W_L} \quad (24)$$

ここに W_L は線型復元力を有する系の最大変形時における Potential Energy である。

最後に実験終了後の試験体を示す。

(Photo. 3 $\sim$ 6)

4. 結 び

上に行なった実験は非常に小型の試験体で断面性状が矩形断面は実際に用いられる鉄骨断面と異なっていることおよび個数が各 1 個計 8 個と少ないため定量的には値のばらつき等があり意味が少ないが、一般的性状として次のような結果が認められた。

(1) 骨組の耐力は Simple Plastic 理論により変形の急速に増大し始める荷重が求められるが、水平力のみが作用する場合にはさらに変形の増大と共に 10 $\sim$ 20% 以上の荷重の増加が見られる。

(2) ブレースを有する骨組の弾性性状は骨組とブレースをピン接合と仮定し

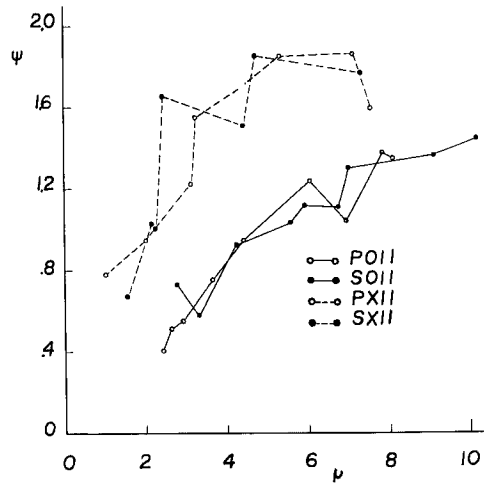


Fig. 13. Specific Damping Capacity.

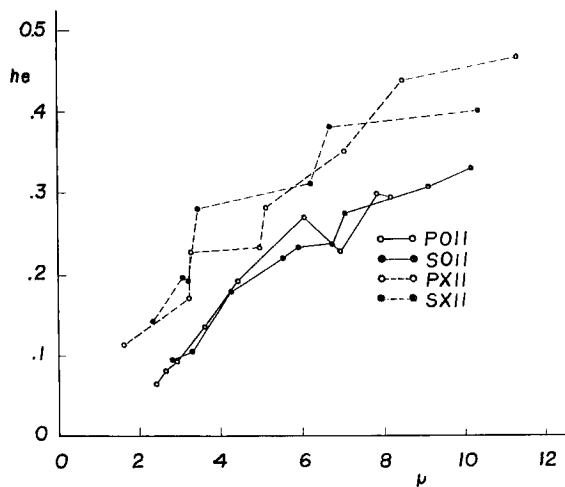


Fig. 14. Equivalent Viscous Damping Coefficient Ratio.

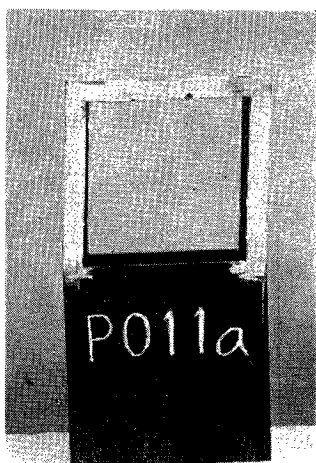


Photo. 3. Test Frame
PO-type.

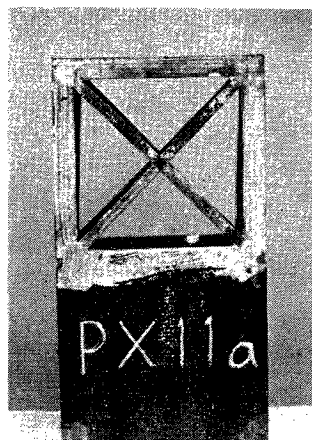


Photo. 4. Test Frame
PX-type.

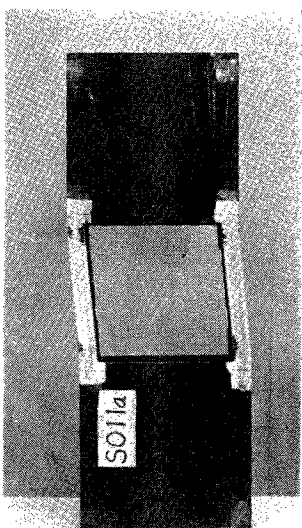


Photo. 5. Test Frame
SO-type.

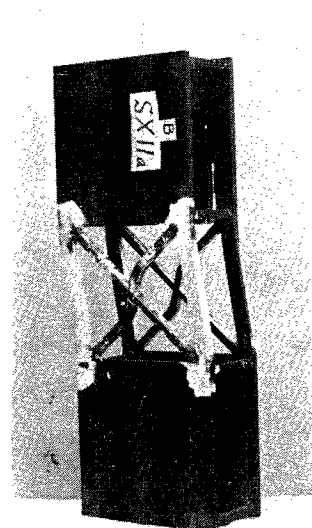


Photo. 6. Test Frame
SX-type.

でもあまり差異はないが、弾塑性範囲では曲げモーメントの作用により圧縮ブレースは偏心圧縮柱としての性状を示し急速な耐力の減少を示さず最終的にはメカニズム曲線に内接する変形状を示し、塑性率もかなり期待できる。

(3) ブレースの座屈変形に伴う剛性の低下はかなりいちじるしく塑性率8程度で初期剛性の0.65~0.7程度となる。

(4) ブレースによるエネルギー吸収は変形の小さいところでもかなり大きな値を示している。

参 考 文 献

- 1) J.F. Baker, M.R. Horne, J. Heyman : "The Steel Skeleton" Vol. II 1956年 p. 117-130.
- 2) 鬼武信夫：“筋違付鉄骨骨組の繰返し載荷実験” 日本建築学会近畿支部研究報告集 昭和39年2月 pp. 1-4, pp. 1-6.
- 3) 水畑耕治：“斜材を含む架構の弾塑性解析” 京大防災研究所報第7号 昭39年3月 pp. 116-133.
- 4) 建築学大系：“座屈論” 12巻 昭35年6月 pp. 299-324.
- 5) R. ヒル：“塑性学” 昭29年4月 pp. 12-22.
- 6) 谷口 忠：“建造物の振動減衰性に関する研究” 日本建築学会大会論文集 昭15年4月 pp. 339-346.
- 7) 金多 潔：“釘接合部の構造減衰ならびに剛性に関する研究” 京大防災研究所年報第3号 昭34年12月 pp. 111-12
- 8) L.S. Jacobsen : "Damping in Composite Structures" Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering. Vol. II 1960年 pp. 1029-1043.
- 9) 角田重喜：“鋼構造節点の履歴特性ならびに構造減衰性に関する実験的研究” 日本建築学会論文報告集 第75号 昭37年8月 pp. 19-24.