

水平力をうける鋼構造ラーメンの耐力

東京大学 加藤 勉 ○秋山 宏 西村 祥一

§1 序

鋼構造ラーメンの耐力を求める為の解析に於ては鋼梁柱の応力-歪関係が基礎となる。elastic plastic は応力-歪関係を用いると、ラーメンの降伏後の挙動を充分に説明することかできず、Horne は rigid-plastic-rigid な応力-歪関係を用いて歪硬化を解析に導入し、骨組の非弾性挙動を説明した⁽¹⁾。歪硬化は骨組の崩壊荷重のみならず、変形能力、韌性にも大きな影響を及ぼす。特に、構造物の耐震性は、塑性変形能力が大きくなれば増大すると考えられるので歪硬化の的確な評価が必要となる。

骨組の安定性に及ぼす歪硬化の影響に關しては坂本の研究がある^{(2),(5)}。山田、五十嵐は歪硬化を考慮した bilinear な応力-歪関係を用いて骨組の弾塑性変形性状を求めている^{(3),(4)}。

筆者は、素材の圧縮試験により得られた応力-歪関係に基づく解析法を示し、繰り返し荷重下の部材及び骨組の崩壊に至る迄の荷重変形曲線の pattern を一方向荷重下の荷重変形曲線との関連に於いて求め、歪硬化が骨組の耐震性に及ぼす影響を求めた。^{(6),(7),(8),(9),(10),(11)}

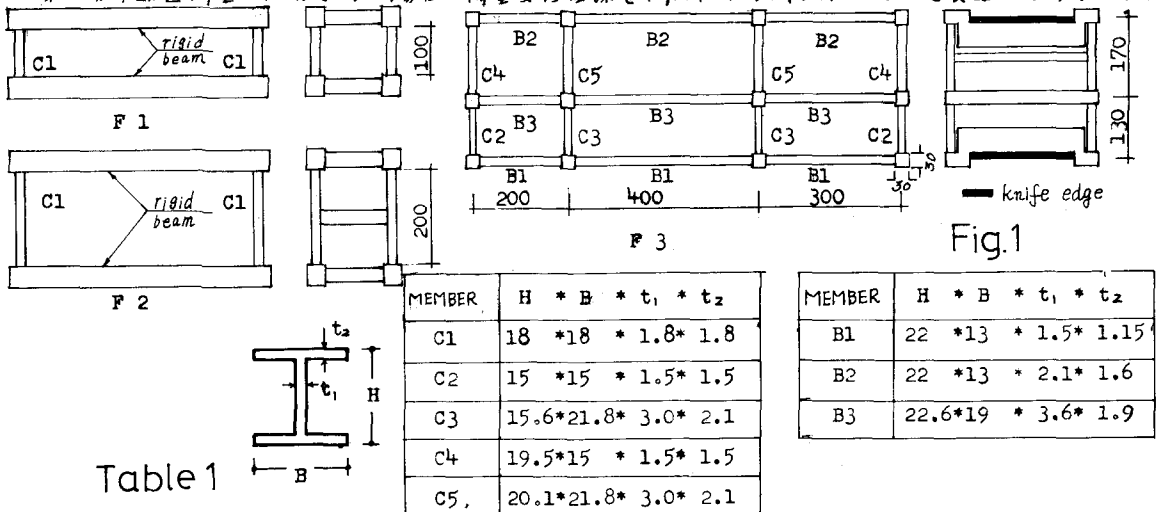
本論文は繰り返し水平力をうけるラーメンの崩壊に至る迄の荷重変形曲線も求めることを目的としている。以下では骨組の崩壊が部材の局部崩壊により起る場合のみを扱う。先づ、繰り返し荷重下の荷重変形曲線と一方向荷重下の荷重変形曲線との関連性を実験及び数値解析によって確かめ、次に、水平力をうけるラーメンの崩壊に至る迄の挙動を求める方法について考察する。

§2 繰り返し荷重下の骨組の荷重変形曲線 (実験結果及び数値解析例)

一方向荷重下の荷重変形曲線と繰り返し荷重下の荷重変形曲線との相関性を調べ、筆者が既に求めた相関の pattern が成立するか否かを検討する。

2-1. 梁上に分布荷重が加わらない場合.

梁に分布鉛直荷重が加わらない場合の荷重変形曲線を Fig.1 に示す試験体を用いて実験により求めた。



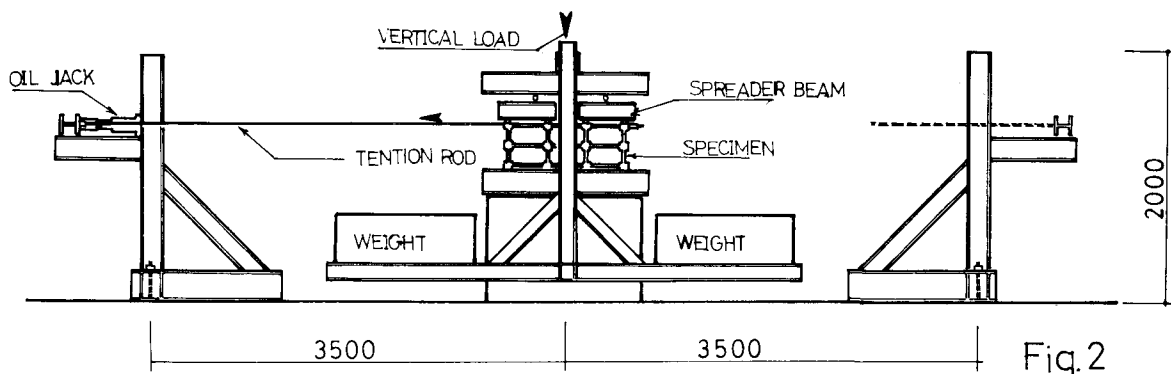


Fig. 2

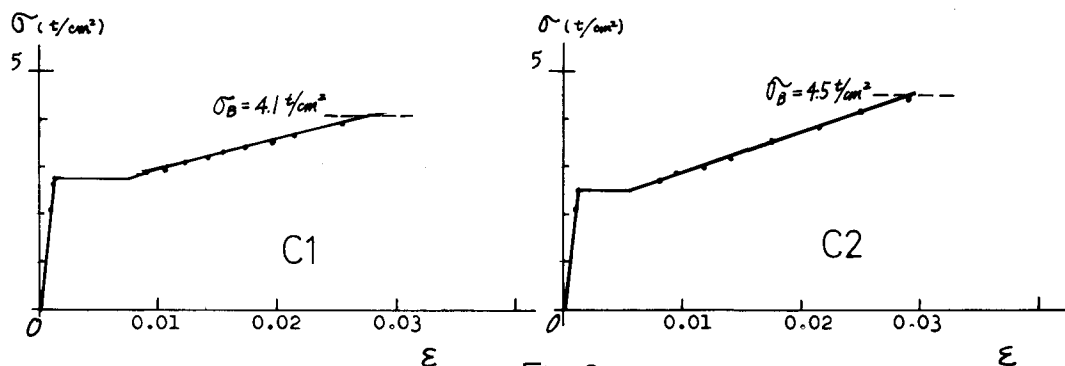


Fig. 3

試験体の寸法の詳細は Table 1 に示されている。各試験体は平行に配置された 2 面のフレームからなり、同一の鋼板から削り出して製作した部材を溶接接合したもので、成形後焼鈍工されている。試験装置の概略が Fig. 2 に示されている。一定の鉛直荷重を各柱上部に配力梁を介して加えられ、水平力も骨組上部に加えられる。各試験体は 2 体ずつからなり、水平力に因りて繰り返しか力実験と一方向加力実験とが行われた。各試験体の柱部材の圧縮試験結果が Fig. 3 に示されている。圧縮素材試験片の長さはフランジ巾の 3 倍とし平押し条件で加圧した。圧縮応力度の最大値 σ_B はフランジの局部崩壊による荷重の最大値を試験片の断面積で除いた値である。各試験体の実験結果が Fig. 4 に示されている。各試験体共に、崩壊は柱部材の局部崩壊が原因となっている。崩壊に到る迄各部材はフレーム面内の変形のみを生じた。これは、平行に配置されたフレームの間にあらかじめ設けた横座金止めが有効に作用したためである。各試験体の一方向加力実験の結果は Fig. 4 の各国の第 1 象限に矢線に示されており、これに対応する理論値が一実線線で示されている。F1, F2 では柱部材のみの変形を求め

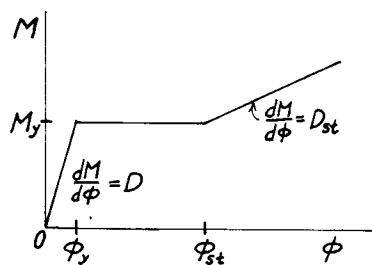


Fig. 5

れば良く、荷重と変形との関係は次式で与えられる。⁽⁸⁾

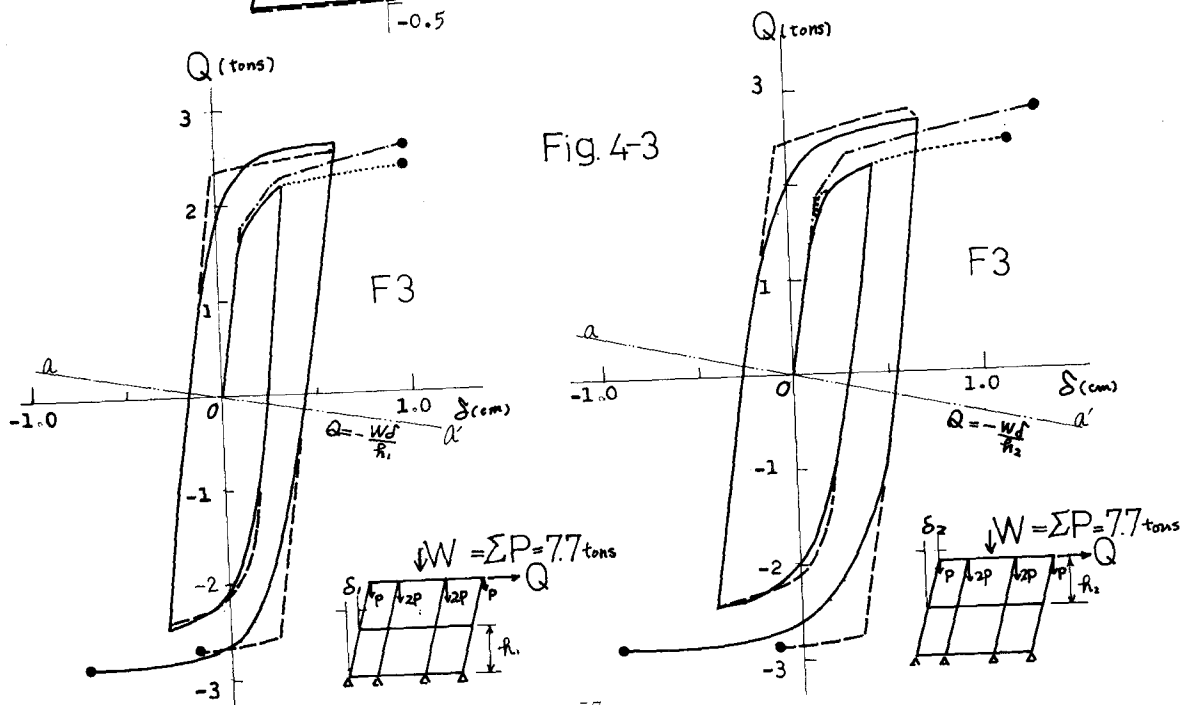
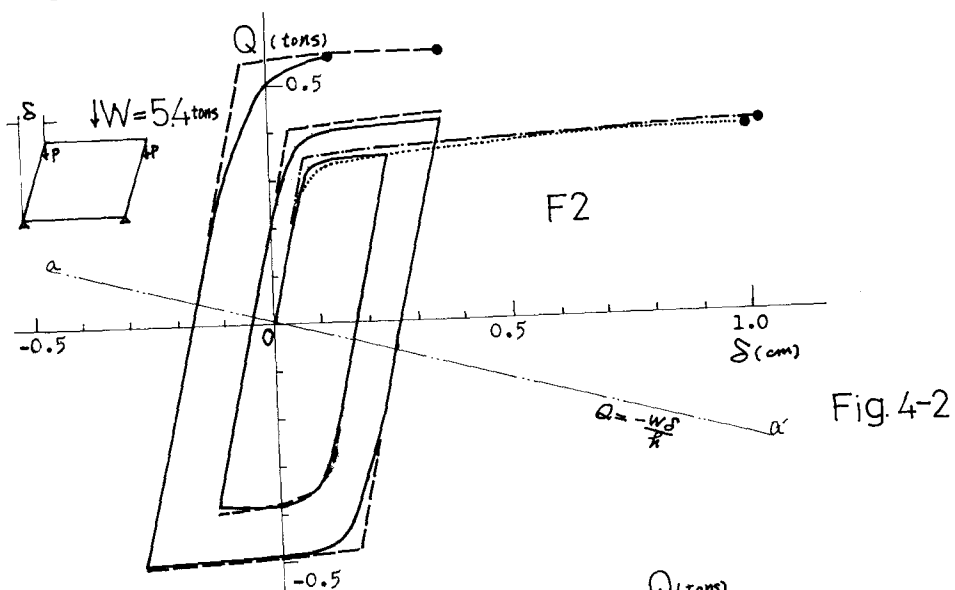
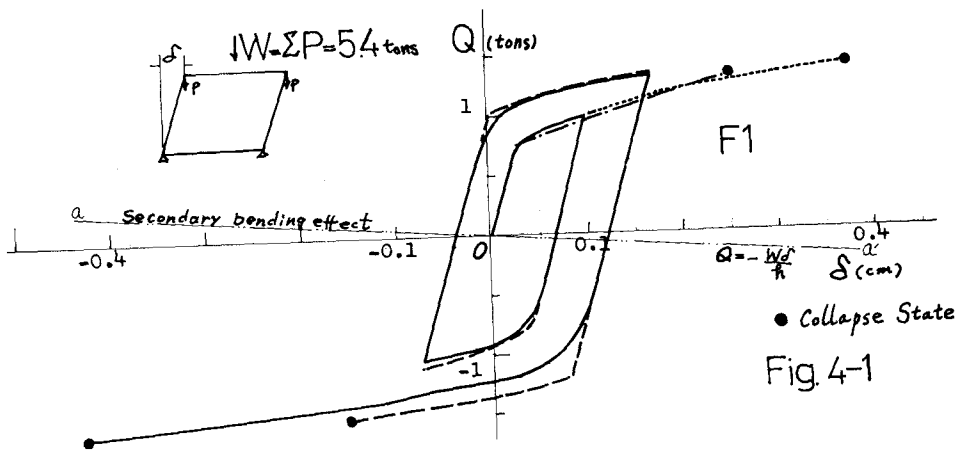
$$S = \left(\frac{\alpha - 1}{2} \cdot \frac{D}{D_{st}} + \beta \right) \left(\frac{\alpha^2 - 1}{2\alpha^2} \right) \frac{h^2}{2} \phi_y \quad (1)$$

$$Q = \frac{8M_f}{h} - \frac{W\delta}{h} \quad (2)$$

ここで M_f = 柱端部の曲げモーメント, S = 水平変形

Q = 水平力, h = 柱の長さ, $\beta = \frac{\phi_{st}}{\phi_y}$, $D = \frac{M_y}{\phi_y}$

$\alpha = \frac{M_f}{M_y}$, D_{st}, ϕ_y = Fig. 5 中の値, W = 鉛直荷重



F3については単位ラ－メンの考へ方に基づき、変形が求められた。⁽¹⁰⁾ 詳細は他稿にゆずる。

各試験体の一方向荷重下の荷重変形曲線がわかれば繰り返し荷重下の変形曲線を予測することのできることを既に示した。⁽¹¹⁾ 2つの曲線の相関関係は Fig. 6 に示す様な図式で表わることのできる。

尚、Fig. 6 では弾性変形を無視している。

Fig. 6 の OABDF は一方向荷重下の荷重変形曲線である。

鉛直荷重と変形とによる付加曲げモーメントの効果を表わす $\alpha-\alpha'$ 線で分けられる2つの領域では荷重変形曲線の形が相互に影響を及ぼさなければ、 $\alpha-\alpha'$ 線の片側での繰り返し荷重下の変形曲線の形は一方向荷重下の変形曲線の形と同一になり、Fig. 6 中の実線の様に求められる。

この様な作図法により Fig. 4 各図の一方向荷重下の実験値から繰り返し荷重下の荷重変形曲線を求めた結果が同図中に破線で示されている。実験値と予測値とはほぼ一致していることがわかる。

2-2. 梁上に分布荷重が加わる場合.

梁上に分布荷重がある場合の荷重変形曲線を数値計算で求めた。例題として Fig. 7 に示す2つのラ－メンをとりあげる。ラ－メン各部材の断面形及び素材の特性が Table 2 に示されている。各部材の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係は Fig. 8 の様に数値計算によって得られるが、これを図中に示す様な破線で近似して解析に用いた。各部材は長さ方向に50等分され、微小な荷重増分に対して部材の微小片の剛性は一定値であるとして荷重の微小増分に対する変形の増分が求められる。この変形増分を数値積分することにより変形を求めた。結果が Fig. 9 に示されている。Fig. 4 と同様で第1象限には一方向下の荷重変形曲線が実線で示されている。また、一方向荷重下の荷重変形曲線から Fig. 6 に示される Pattern にならって作図により求めた繰り返し荷重下の荷重変形曲線が Fig. 9 中に破線で

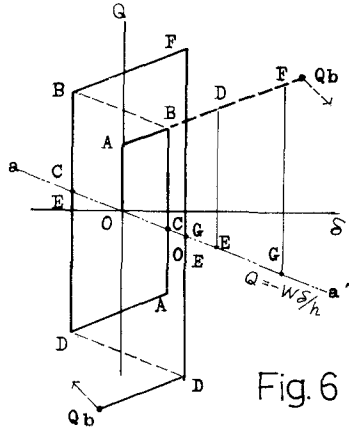


Fig. 6

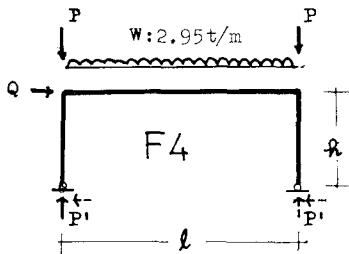
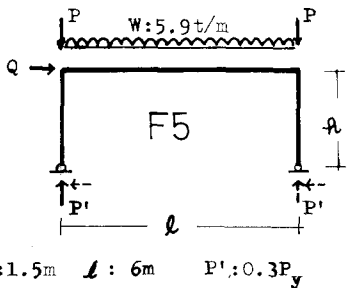


Fig. 7



	H * B * t ₁ * t ₂	
Column	300*300* 10* 15	
Beam	500*200* 10* 16	
Yield Point	2.4 t/cm ²	
Maximum Stress	4.2 t/cm ²	
Young's Modulus	2100 t/cm ²	
Strain-hardening Strain	0.0114	
Strain-hardening Modulus	72 t/cm ²	

Table 2

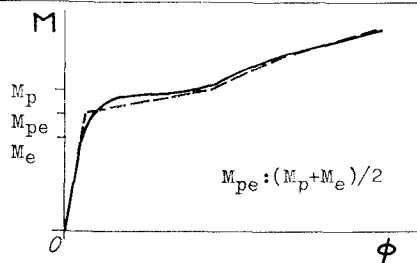


Fig. 8

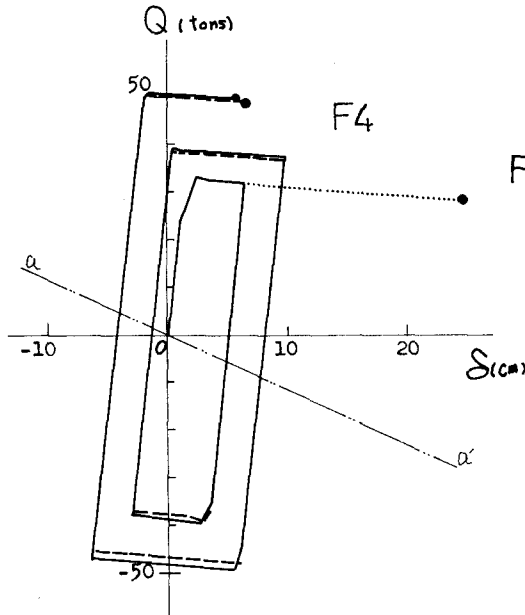
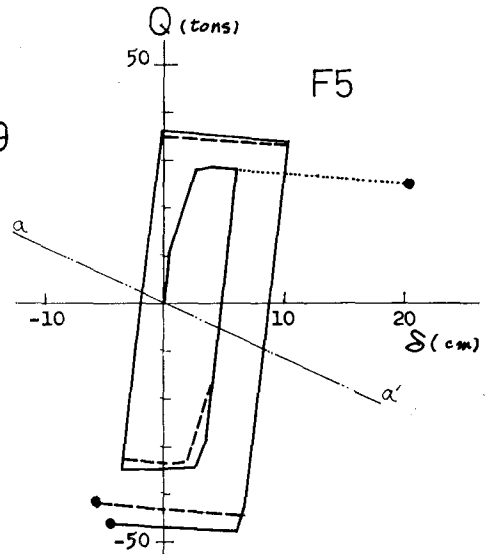


Fig. 9



示されている。この場合も、梁に分布荷重が加わらない場合と同様に計算値は予測値とは対応していることがわかる。Fig. 10 には同一フレームについて分布荷重が加わらない場合について解析した結果と Fig. 9 に示された曲線と比較されている。同図から骨組が降伏耐力に達した後の荷重変形曲線の形は分布荷重の有無に無関係であることがわかる。●印はフレームの崩壊状態を示すが、崩壊に到る迄の骨組の変形能力は分布荷重が大きくなると低下することわかる。

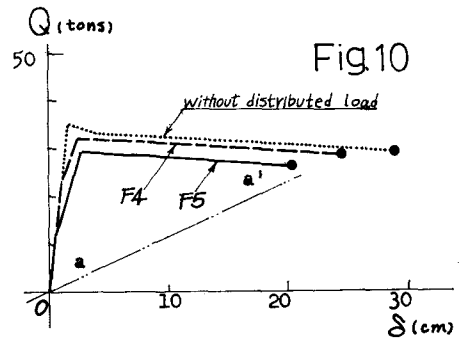
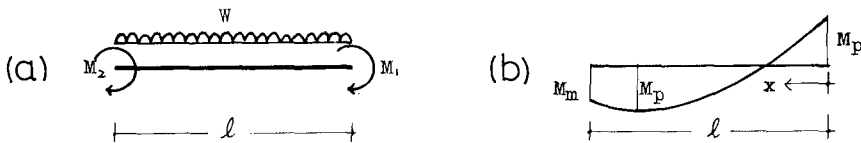


Fig. 10

§3 崩壊に到る迄の荷重変形曲線を求める方法。

前節で示した様に骨組の一方何荷重下の荷重変形曲線を求めれば繰り返し荷重下の荷重変形曲線は予測できる。一方何荷重下の荷重変形曲線は、梁に分布荷重が加わらない場合には単位ラメンの等価式を用いれば近似的に求めることができる。分布荷重が加わる場合と加わらない場合との相異は、降伏耐力の相異なる崩壊に到る迄の変形能力の相異である。従って、この2つの量を予測できれば骨組の崩壊に到る迄の挙動が予測できることになる。ここでは、変形能力についてはある程度の誤差は止むを得ないものとして梁に分布荷重が加わる場合の降伏耐力を予測する方法を考へる。梁に分布荷重が加わる場合には梁の中中部に plastic hinges 形成される場合があり、collapse mechanism が複雑になる。そこで梁中中の hinge を梁端部の hinge で置きかえることを試みる。



M_1, M_2 : stress caused by horizontal force

Fig. 11

Fig. 11 (a) に示す梁について考察する。水平力による応力がかかる梁端部Aに先づ hinge が形成される。2番目の hinge の位置を決定する。Fig. 11 (b) には2番目の hinge が形成された時の梁の曲げモーメントの分布状態が示されている。 $\frac{X}{l} = X$ とおけばX長の曲げモーメントは次の様に書かれる。

$$M_x = -M_p + (M_p + M_m)X + 4\eta M_p X - 4\eta M_p X^2 \quad (3)$$

$$\therefore \eta = \frac{M_m}{M_p} \quad \eta = \frac{w l^2}{8} / M_p, \quad M_p = \text{全塑性モーメント},$$

(3)式から $\frac{dM_x}{dX} = 0$ の条件を用いれば曲げモーメントの極大値は次の様に生ずることがわかる。

$$X = \frac{1 + \eta + 4\eta}{8\eta} \quad (4)$$

$$\therefore \eta = \frac{M_m}{M_p}$$

$\eta = 1$ であれば2番目の hinge は梁端部に生ずる。 $\eta < 1$ であれば梁の中間部に2番目の hinge が生ずる。(4)式からこの条件は次の様に書ける。

$$\eta \leq 0.5 \quad (5)$$

$\eta > 0.5$ の場合の梁左端部の曲げモーメント M_m は(3), (4)式から次の様に求められる。

$$M_m = M_p \eta = (-4\eta - 1 + \sqrt{32\eta}) M_p \quad (6)$$

従って、 η の値が与えられれば梁左端部のヒンジモーメントを ηM_p とすることによって梁中内部の hinge が梁左端部の hinge に置きかえられることになる。

次に、鉛直荷重と水平変形とによる付加曲げモーメントによる降伏耐力の低下を知り、 η には骨組が弾性限界荷重を越えてから降伏耐力に達する迄の変形を求める必要がある。規模の小さな骨組ではこの変形は容易に求められるがスパンラーメンではこの変形を求めることがかなり困難である。そこで近似的にこの変形を求める方法を考える。付加曲げモーメントの効果 (P- Δ effect) を無視した場合のスパンラーメンの1層の変形が Fig. 12 の様なものであとする。図中で、弾性限界時の変形、荷重は容易に求められる。降伏耐力 F_y も容易に求められることができる。また collapse mechanism が形成された後 (B点以後) の変形曲線の形も単位ラーメンの等を用いければ求められる。従って、Fig. 12 中のA点からB点に到る迄の変形を求めることが課題となる。骨組の1層部分の水平方向の弾性時の剛性分布を S 、降伏耐力時の強度と弾性限界時の強度の差の分布を f とすれば骨組の1層の弾性時の剛性 S_e は降伏耐力と弾性限界荷重との差 F_0 は次の式で表わされる。

$$S_e = \int s dx \quad (7)$$

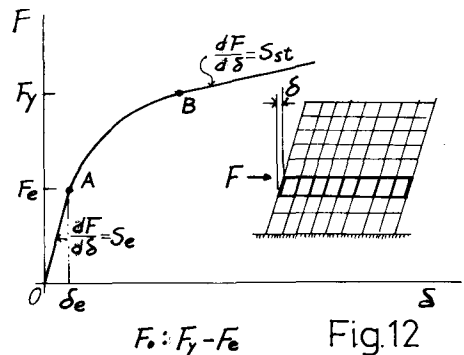
$$F_0 = \int f dx \quad (8)$$

ここで x = 水平方向の距離

S は x の関数である。ここで S_0 を一定値として座標を次の様に変換する。

$$S dx = S_0 dx' \quad (9)$$

座標 x' に關しては f は f' となるものとする。



$$F_0 = F_y - F_e$$

Fig. 12

更に強度分布 f' を大きい順にならべかえる。この様にして一層の強度分布及び剛性分布は Fig. 13 の様に表わせる。骨組の塑性化が水平方向に進展する場合に Fig. 13 の左端から右端に向けて塑性化する場合が最大変形を与えることは明らかである。ここで塑性化した部分の剛性 S_{st} も一定値であると仮定する。つまり Fig. 12 の S_{st} は次式で与えられるものとする。

$$S_{st} = X'_0 S_{st} \quad (10)$$

また、 f' の分布を Fig. 13 に破線で示される直線とする。

この直線の勾配を θ とすれば次式の関係が成り立たねばならない。

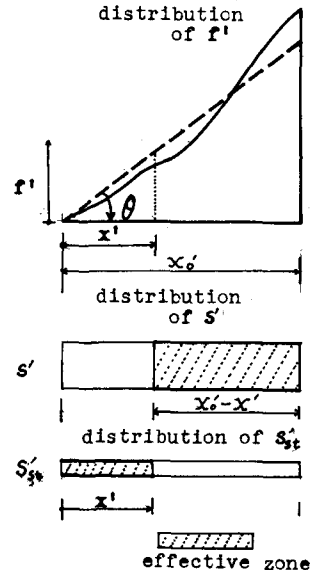
$$F_0 = \frac{(X'_0 \theta)}{2} = \int_0^{X'_0} f' dx' \quad (11)$$

骨組の弾性限界の変形を δ_e とすれば荷重 $F_e + F$ に対応する変形は次式から求められることになる。

$$\delta = \delta_e + \int_0^F \frac{dF}{S} \quad (12)$$

荷重 $F_e + F$ に対応する剛性は Fig. 13 に示す様に塑性化に伴って斜線部分の剛性が有効となるので次式の様に表わされる。

$$S = S_e \frac{X'_0 - X'}{X'_0} + S_{st} \frac{X'}{X'_0} \quad (13)$$



従って、A-B 間の荷重変形曲線は次式で与えられる。

$$\delta = \frac{2F_0}{S_e - S_{st}} \left\{ -\sqrt{\frac{F}{F_0}} - \frac{S_e}{S_e - S_{st}} \ln \left(1 - \frac{S_e - S_{st}}{S_e} \sqrt{\frac{F}{F_0}} \right) \right\} \quad (14)$$

P- Δ effect は近似的に次式で表わされる

$$\Delta F = -\frac{W\delta}{h} \quad \text{ここで } W = \text{鉛直荷重}, \quad h = \text{階高.}$$

従って、水平荷重 F' は次式の様に求められる。

$$F' = F - \frac{W\delta}{h} \quad (15)$$

以上で梁上に分布荷重をうける骨組の一層の層内変位と水平力との関係が得られたことになる。

§4 結論

骨組の一方向荷重下の荷重変形曲線からわかれば繰り返し荷重下の荷重変形曲線を近似的に求められることを実験結果及び数値解析例によつて示した。

骨組の荷重変形曲線を求めることは梁上の分布荷重、P- Δ effect 等を考慮すると非常に複雑になるが、梁中間部の hinge を梁端部の hinge に置き換え、また、骨組の水平方向の強度分布を仮定することにより降伏過程の變形が容易に求められることを示した。

参考文献

- (1) Horne, M.R., discussion of "The Stability of Tall Building," by R.H. Wood, Proceedings, Inst. of Civ. Engrs., London, Vol. 12, 1959.
- (2) 坂本 順, 宮村 篤典 "鋼構造骨組の弾塑性状態における変形と安定性に関する考察 第1報" 建築学会論文報告集 第110号 昭和40年4月.
- (3) 山田 祐, 坂東一己, 田所敏幸, 白川 潔 "車道におけるH形鋼柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究 (2)" 建築学会論文報告集 第127号 昭和41年9月.
- (4) 五十嵐定義, 多賀直恒, 小柳義雄 "鋼構造架構の荷重変形性状" 建築学会論文報告集 第140号 昭和42年10月.
- (5) 坂本 順, 宮村 篤典, 渡辺雅生 "鋼構造物における非硬化現象について" 建築学会論文報告集 第134号 昭和42年4月.
- (6) 仲 威雄, 加藤 勉, 秋山 宏, 内田直樹 "H形断面柱の耐力" 橋梁構造工学研究会表会論文集 "昭和40年11月.
- (7) 加藤 勉, 秋山 宏, 内田直樹 "鋼構造部材の耐力 (2の1)" 建築学会論文報告集 第119号 昭和41年1月.
- (8) 加藤 勉, 秋山 宏 "鋼構造部材の耐力 (2の2)" 建築学会論文報告集 第149号 昭和43年7月.
- (9) 加藤 勉, 秋山 宏 "鋼構造部材の耐力 (2の3)" 建築学会論文報告集 第150号 昭和43年9月8日.
- (10) 加藤 勉, 秋山 宏 "鋼構造部材の耐力 (2の4)" 建築学会論文報告集 第151号 昭和43年9月.
- (11) 加藤 勉, 秋山 宏 "鋼構造部材の耐力 (2の5)" 建築学会論文報告集 第152号 昭和43年10月.