

鋼ラーメン構造の設計における $P-\Delta$ 法と有効座屈長法の限界強度評価

ESTIMATION OF THE ULTIMATE STRENGTH OF STEEL FRAMES
BY $P-\Delta$ METHOD AND EFFECTIVE LENGTH METHOD

野上邦栄*・上田浩章**・山本一之***

By Kuniei NOGAMI, Hiroaki UEDA and Kazuyuki YAMAMOTO

In the present study, the stress and the stability limit curves for the ultimate strength of the steel frame is numerically analyzed using the effective length method and the $P-\Delta$ method. With the simple frames, the effectiveness of the present methods was confirmed by comparing the results obtained by the reference (13). Also, with the towers of actual scale, HSBA(finite displacement theory) of the effective length method produced highly accurate loading capacity values in the region where the axial compressive force was dominant. The $P-\Delta$ method produces results which closely follow the exact solution curves obtained by the elastic-plastic finite displacement analysis compared with the results obtained by the effective length method.

1. はじめに

現在、許容応力度設計法を採用している道路橋示方書¹⁾(以後、道示と呼ぶ)および国鉄建造物設計標準²⁾(以後、鉄道標準と呼ぶ)等において、吊形式橋梁の塔を含む鋼ラーメン構造の安定性は、弾性座屈理論に基づく有効座屈長を用いた照査法により確保している。しかし、実際のラーメン構造の全体座屈は弾塑性座屈領域にある場合が多く、本州四国連絡橋公団の吊橋主塔設計要領・同解説³⁾(以後、本四規程と呼ぶ)では、塔柱の耐荷力を、柱の基準耐荷力曲線を準用して非弾性領域を考慮した有効接線弾性係数法(以後、 E_f 法と呼ぶ)により決定した有効座屈長を用いて照査している。

一方、このような有効座屈長の概念を用いた設計法(以後、有効座屈長法と呼ぶ)に対して最近、欧州を中心に主に建築構造を対象にして、有効座屈長を用いずに鉛直荷重と水平変位により生じる付加曲げモーメントを等価な水平剪断力に置き換えて照査を行う $P-\Delta$ 法⁴⁾⁻⁷⁾や、より一般的鋼骨組構造を対象にして弾性有限変位解析により構造全体系の安全性を照査する設計法^{8),9)}が提案されている。しかし、これらの設計法は、わが国において実績がなく、まだ十分な信頼性をもって受入られる状況にはない。

本研究では、横拘束のない骨組構造物として、実橋レベルのラーメン形式主塔を含む鋼ラーメン構造物を探り上げ、現在骨組構造物の座屈設計法として規程に導入されている有効座屈長法と、変形の影響を考慮した $P-\Delta$ 法について、応力度および安定照査式の限界としての耐荷力を数値計算により評価し、両設計法の特徴および有用性を明らかにしている^{10),11)}。

* 工博 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-03 八王子市南大沢 1-1)

** 工修 八千代エンジニアリング(株) (〒153 目黒区中目黒 1-10-21)

*** 工博 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒108 港区芝浦 3-9-14)

2. 座屈設計法

骨組構造の節点が剛接合であるようなラーメン構造においては、全体構造系に加わる荷重と、それによる変形の影響を受け、その構成部材には軸力のほか曲げモーメントさらには剪断力が作用する。その隣接する部材は、当面の部材の部材端に荷重を伝えるだけでなく、支持条件としてのバネ作用を持つことになる。また、横拘束のない構造の耐荷力の場合、軸圧縮力の作用のもとでは、構造物の水平方向の変形により生じる付加的な曲げモーメントの影響である $P-\Delta$ 効果および柱の剛性低下による付加曲げモーメントの影響である $P-\delta$ 効果の両方を考慮する必要がある。

現在、このようなラーメン構造物の実用的な座屈設計法として規程に導入されている方法には、有効座屈長法と $P-\Delta$ 法がある。

(1) 有効座屈長法

この設計は、構造解析に微小変位理論による設計解析を利用し、重ね合わせの原理により設計断面力を求める。そして、初期たわみ、残留応力、荷重の偏心、および局部座屈の影響を有効座屈長を有する両端ピンの柱として評価した設計断面耐力と設計断面力とを安全率を考慮して比較することによって部材断面の安全性を照査する方法であり、応力度、安定照査を要求している。

この考え方は、構造物全体の安全性の確保は、個々の部材の安全を確保することにより可能であるという基本的設計思想に立っていることになる。いま、この設計法の一般的な設計手順は、

- 1) 骨組部材の断面を仮定する。
- 2) その仮定断面における設計荷重を設定する。
- 3) 与えられた設計荷重に対して構造解析 (微小変位理論) により設計断面力 S を算出する。
- 4) 構造部分系としての有効座屈長 ℓ_e の評価を行う。
- 5) この有効座屈長を用いて設計断面耐力 R を算出する。
- 6) 次式の安全性照査式を満足するように設計する。

$$\nu \frac{S}{R(\ell_e/r, N_y, M_y, M_p)} \leq 1 \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに、 ν は安全率、 N_y, M_y, M_p は降伏軸力、降伏モーメント、全塑性モーメント、 r は断面 2 次半径を意味する。

ここで、この有効座屈長法を採用している代表的な規程類として $AISC/PSD^{12)}$ 、道示 ($JSHB$)、鉄道標準 (JR) および本四規程 ($HSBA$) を取り上げ、その特徴をまとめると表-1 のようになる。なお、ここでは、(1) 局部座屈、および横ねじれ座屈は生じない。(2) 接合部は剛結である。(3) 安全率については考慮しない。などの仮定が成り立つものとしている。

$AISC/PSD$ における断面力の算出法は、微小変位理論による弾性 1 次解析である。有効座屈長は図表から読み取る方法により決定し、その値は表中の照査式における第 1 項の限界軸力 N_u および第 2 項の $(1 - N/N_e)$ のオイラー軸力 N_e を算出するために用いられる。また、付加曲げモーメントの影響である $P-\Delta$ 効果は、モーメント換算係数を $C_m = 0.85$ の一定値を採用することにより、 $P-\delta$ 効果は $(1 - N/N_e)$ に考慮されている。なお、この規程は塑性設計法であるため、限界曲げモーメントとして全塑性モーメント M_p を採用している。

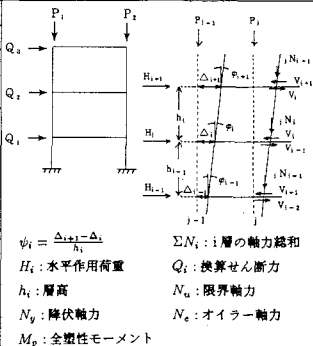
道示の断面力の計算方法および照査式は、 $AISC/PSD$ と同等であるが、照査式の第 2 項における M_p に対して降伏モーメント M_y を用いている。また、付加曲げモーメントの影響については、 C_m に $Austin$ 式を用いていることから $P-\Delta$ 効果は考慮されていない。有効座屈長は、基本構造に対してのみ陽な形で表に与えられている。

鉄道標準は道示とほぼ同じであるが、照査式における付加曲げモーメントに関する項が省略されており、 $P-\Delta$ 効果および $P-\delta$ 効果が考慮されていない。有効座屈長は、 DIN および本四規程を参考にした図表から算出している。

表-1 有効座屈長法

構造解析	AISC/PD	JSHB	JR	HSBA	
	微小変位理論	微小変位理論	微小変位理論	微小変位理論	有限変位理論
強度照査式	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{(1 - N/N_e) M_p} \leq 1$ $\frac{M}{M_p} = 1.18 \left(1 - \frac{N}{N_y} \right) \leq 1$ $C_m = 0.85$	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{(1 - N/N_e) M_y} \leq 1$ $\frac{M}{M_y} \leq 1$ $C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{M_y} \leq 1$ $\frac{M}{M_y} \leq 1$ $C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{(1 - N/N_e) M_y} \leq 1$ $\frac{M}{M_y} \leq 1$ $C_m = 0.85$	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{(1 - N/N_e) M_y} \leq 1$ $\frac{M}{M_y} \leq 1$ $C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$
有効座屈長	N_u, N_e : ノモグラフ	N_u, N_e : 表値	N_u, N_e : ノモグラフ, 表値	N_u, N_e : ノモグラフ	N_u : E_f 法 N_e : 部材長
$P-\delta$ 効果	$\frac{C_m}{1 - N/N_e}$	$\frac{1}{1 - N/N_e}$		$\frac{C_m}{1 - N/N_e}$	$\frac{1}{1 - N/N_e}$
$P-\Delta$ 効果					構造解析 (有限変位理論)
N_u : 限界軸力 N_y : 降伏軸力 N_e : オイラー軸力 M_p : 全塑性モーメント M_1, M_2 : 材端モーメント β : 有効座屈長係数					

表-2 $P-\Delta$ 法

構造解析	SSRC	修正 SSRC	ECCS	
	微小変位理論	微小変位理論	微小変位理論	
$P-\Delta$ 効果	$V_i = (\Sigma N_i) \psi_i$ $Q_i = H_i + (V_{i-1} - V_i)$	$V_i = \frac{(\Sigma N_i) \psi_i}{1 - (\Sigma N_i) \psi_i / \Sigma V_i}$ $Q_i = H_i + (V_{i-1} - V_i)$	$V_i = H_i + (\Sigma N_i)(\psi_i^2 + 1.2 \psi_i)$ $Q_i = (V_{i-1} - V_i)$	$\psi_i = \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{h_i}$ ΣN_i : i 層の軸力総和 H_i : 水平作用荷重 Q_i : 換算せん断力 h_i : 層高 N_u : 限界軸力 N_y : 降伏軸力 N_e : オイラー軸力 M_p : 全塑性モーメント
初期不変	考慮していない	考慮していない	i 層の部材回転角: $\psi_i^0 = \frac{1}{200} \gamma_{1i} \cdot \gamma_{2i}$ $\gamma_{1i} = \sqrt{5/h_i}$, $h_i \geq 5m$ $\gamma_{2i} = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1/n_i})$ $1.2 \psi_i$: 柱の剛性低下を考慮する係数	
強度照査式	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{(1 - N/N_e) M_p} \leq 1$ $\frac{M}{M_p} = 1.18 \left(1 - \frac{N}{N_y} \right) \leq 1$ $C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$	$\frac{N}{N_u} + \frac{C_m M}{M_p} \leq 1$ $\frac{M}{M_p} = 1.18 \left(1 - \frac{N}{N_y} \right) \leq 1$ $C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$	$\frac{M}{M_p} = 1.1 \left(1 - \frac{N}{N_y} \right) \leq 1$	

本四規程では、主塔の構造および作用荷重のレベルにより、構造解析には有限変位理論と微小変位理論を基礎にした2つの方法が規定されている。設計断面力を微小変位解析により求める場合は道示と同形であるが、モーメント換算係数をAustin式に代わり、 $C_m = 0.85$ の一定値を用いることにより $P-\Delta$ 効果を考慮している。また、設計断面力を有限変位解析により求める場合には、 N_u に用いる有効座屈長が E_f 法により決定され、 N_e に用いる有効座屈長係数 β は単位量としている。また、 C_m にはAustin式を用いている。

(2) $P-\Delta$ 法

一方、 $P-\Delta$ 法は設計技術者に非線形解析を委ねる煩雑さを避けるため、 $P-\delta$ 効果と $P-\Delta$ 効果を含めた非線形性の影響を等価横荷重の形で直接構造解析側に導入し、微小変位解析により得られる設計断面力と有効座屈長を用いない設計断面耐力の比較により、構造全体系の安全性を保証する方法である。

この代表的な規程および提案式として、SSRC法、修正SSRC法、およびECCS法を採用上げ、これらの特徴をまとめると表-2のようになる。いま、SSRC法にしたがった設計の手順を示すと次のようになる。

- 1) 骨組部材の断面を仮定する。
- 2) その仮定断面における設計荷重 (鉛直荷重 P と水平荷重 H) を設定する。
- 3) 弾性1次解析により層 i の設計断面力 $S(N_i, M_i)$ および変位 Δ_i を求める。
- 4) 各層における全柱の軸力の総和を求める。
- 5) 得られた各層の水平変位 Δ_i により層剪断力 V_i を次式により求める。

$$V_i = \frac{\Sigma N_i}{h_i} (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \dots \dots \dots (2)$$

6) 全水平荷重 Q_i を次式により求める。

$$Q_i = H_i + (V_{i-1} - V_i) \dots\dots\dots (3)$$

7) 鉛直荷重と全水平荷重の組み合わせ荷重のもとで微小変位解析により水平変位を求め、前回の水平変位との比較から、所要の許容誤差以内に収束するまで 5) に戻り繰り返す。

8) 得られた設計断面力 S が次式の強度照査式を満足するよう設計する。

$$\nu \frac{S}{R(M_p, N_y)} \leq 1 \dots\dots\dots (4)$$

なお、表中の具体的な照査式では通常のはり一柱の線形相関式が用いられているが、そこでの限界軸力 N_u 、オイラー軸力 N_e を算出するのに用いる有効座屈長係数 β は単位量、つまり部材長である。またモーメント換算係数は、 $C_m = \text{Austin}$ 式を用いている。

一方、修正 $SSRC$ 法は、 $SSRC$ 法に対して繰り返し計算を必要としないように層剪断力を修正した方法である。その手順は、5) の段階で弾性 1 次解析で得た変位と $h/500$ の大きい方の値を水平変位 Δ_i として用い、層剪断力 V_i を

$$V_i = \frac{\Sigma N_i}{h_i} \cdot \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{1 - \Sigma N_i(\Delta_{i+1} - \Delta_i)/\Sigma V_i h_i} \dots\dots\dots (5)$$

と修正するとともに、8) の強度照査式(具体的な式は、表中を参照)において、 $1 - N/N_e$ の付加曲げモーメント項は省略している。なお、 N_u に用いる有効座屈長係数 β は単位量である。

$ECCS$ 法は、 $SSRC$ 法と同形であるが、初期回転角 ψ^0 および軸圧縮力による柱の剛性低下を考慮するために回転角 ψ を 1.2 倍している。その手順は、 $SSRC$ 法の手順と 1)~4) の段階までは同じであり、5) 段階以降を以下のように修正すれば良い。

5) 得られた各層の部材回転角 ψ より i 層の層剪断力を次式により求める。

$$V_i = H_i + \Sigma N_i(\psi_i^0 + 1.2\psi_i) \dots\dots\dots (6)$$

6) 全水平荷重 Q_i を次式により求める。

$$Q_i = V_{i-1} - V_i \dots\dots\dots (7)$$

7) 鉛直荷重と全水平荷重の組み合わせ荷重のもとで、弾性 1 次解析により各層の部材回転角を求め、これを前回の部材回転角と比較し、収束していない場合 5) へ戻り繰り返し計算を行う。

8) 得られた設計断面力 $S(N, M)$ が強度照査式を満足するように設計する。

このように、(1) の有効座屈長法と異なり有効座屈長の概念を必要とせず、軸力が大きく有限変位の影響が無視できない構造の場合、厳密な有限変位解析を行わなくても容易に変位および断面力を求めることが可能であり、変断面構造に対しても適用が容易である。

3. 数値計算例

2. において、鋼ラーメン構造の設計法に採用されている有効座屈長法および $P-\Delta$ 法についてその内容を説明した。ここでは、両設計法の限界強度評価の傾向を明らかにするため、簡単なラーメン構造を取り上げて、(1) の算出法にしたがった限界強度曲線を求め、現在最も厳密とされる弾塑性有限変位解析による解曲線との比較を行う。さらに、実橋レベルのラーメン形式塔を用いて同様の限界強度評価を行い、その妥当性について比較・検討している。

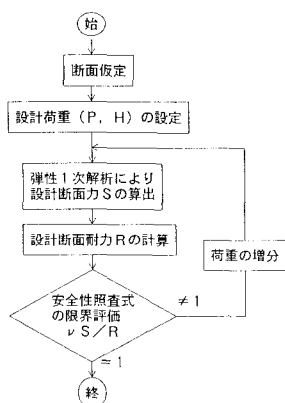


図-1 限界強度曲線の算出法

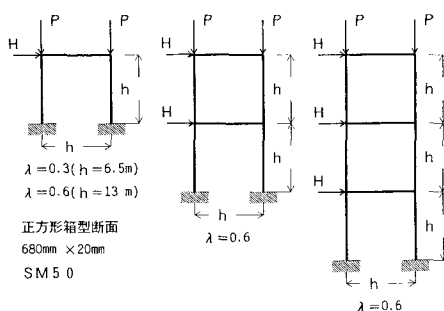


図-2 簡単なラーメン構造モデル

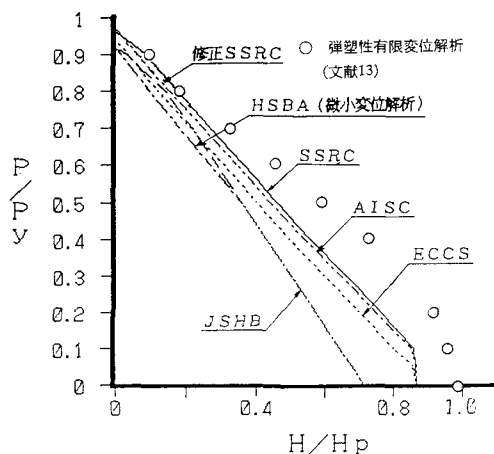


図-3 1層ラーメン構造 ($\lambda = 0.3$)

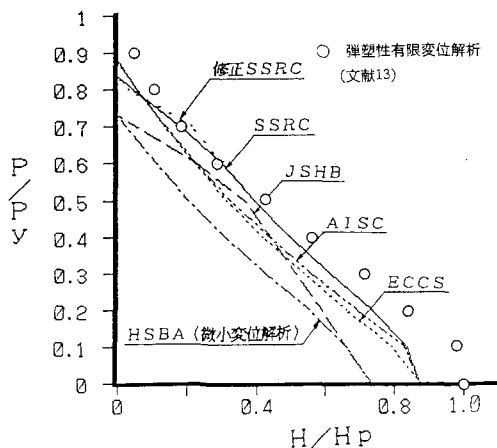


図-4 1層ラーメン構造 ($\lambda = 0.6$)

(1) 限界強度曲線の算出法

限界強度曲線を求める方法は、図-1にしたがって行えば良い。つまり、2.における各設計法の手順において、鉛直荷重 P と水平荷重 H の設計荷重に対して得られた設計断面力を応力度照査式および安定照査式に代入し、両照査式が1に達しない場合、水平荷重を増加させて繰り返し計算を行う。そしてどちらかの照査式が最初に1に等しくなった時、設計荷重の作用時における限界水平荷重となる。

(2) 層数および細長比の影響

まず、図-2に示すような鉛直荷重と水平荷重を受ける簡単な等断面ラーメン構造¹³⁾(1~3層構造、両端固定)について、有効座屈長法および $P-\Delta$ 法の両設計法による限界強度曲線を(1)の算出法にしたがって求め、文献13)により得られた解曲線との比較により本算出法の妥当性を明らかにするとともに、両設計法による限界強度評価の違いなどについて検討した。用いた部材断面は、はり、柱とも $680\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の正方形箱型断面であり、材質は $SM50$ 材とした。また、塔高 h は換算細長比 λ が $\lambda = 0.3, 0.6$ になるように選んでいる。

図-3および図-4は、1層ラーメン構造について計算した結果を示したものである。横軸は、水平荷重のみが作用するラーメン構造に対して単純塑性理論により得られる限界水平力 $H_p (= 4M_p/h)$ によって終局状態での水平荷重 H を無次元化している。また、縦軸は降伏荷重 P_y で無次元化した鉛直荷重を表している。

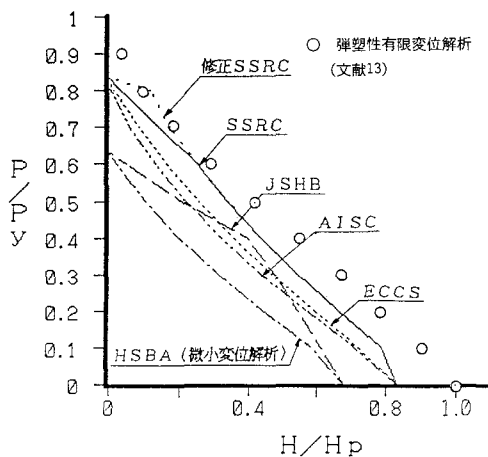


図-5 2層ラーメン構造

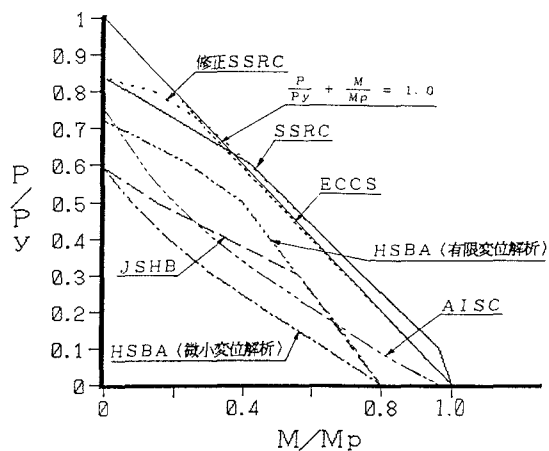


図-6 3層ラーメン構造

図-3から明らかなように、 $\lambda = 0.3$ のストックリーなラーメン構造の場合、応力度照査式に支配されたため、全ての解曲線はほぼ直線的になっている。一方、図-4のように $\lambda = 0.6$ とスレンダーな構造になると、 $P - \Delta$ 法と有効座屈長法との間には相違が現れ、有効座屈長法における $HSBA$ (微小変位理論)は他の結果に比して低めの、つまり安全側の曲線を示していることがわかる。これは、安定照査式に支配され、しかも $C_m = 0.85$ の一定値を用いているためである。また、両図から明らかなように $SSRC$ 法と修正 $SSRC$ 法の差は小さく、全体として弾塑性有限変位解析結果に漸近した良い耐荷力評価をしていることがわかる。

$\lambda = 0.6$ の2層ラーメン構造に対する計算結果を示したのが図-5である。なお、横軸の限界横荷重は $H_p = 2M_p/h$ である。 $P - \Delta$ 法は、全体として弾塑性有限変位解析による限界曲線に沿った、しかも安全側な解曲線を示している。また有効座屈長法の中では $AISC/PD$ の解曲線が $P - \Delta$ 法と同等の結果を示している。

なお、宇佐美らの結果¹³⁾には、鉛直荷重が支配する領域において弾塑性有限変位解析による厳密解を越えた危険側な評価を与える曲線が存在していたが、本計算結果では、すべての解曲線がこの限界強度曲線内に納まっている。しかし、全体としては良い一致を示しており、本計算結果の妥当性が確認できたと言える。

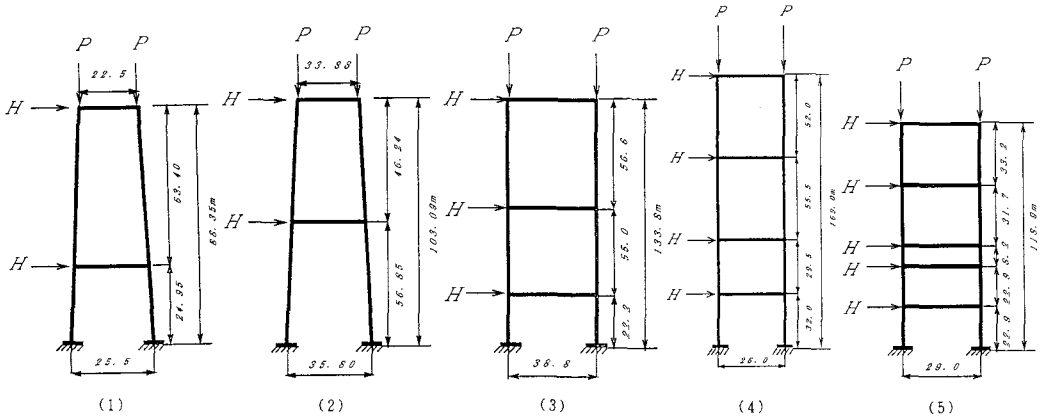
最後に、 $\lambda = 0.6$ の3層ラーメン構造に対する計算結果を示したのが図-6である。なお、ここでの横軸は全塑性モーメント M_p に対する限界水平荷重時における曲げモーメントの無次元量を探っている。このように曲げモーメントで整理した場合、 $P - \Delta$ 法は1層、2層ラーメンの解曲線と同等の傾向を示している。一方、有効座屈長法では、多層になるにしたがって曲げモーメントの影響が大きく表れるため、安定照査式における曲げの影響がより明確に表示されている。

(3) 塔の限界強度曲線

次に、実橋レベルの吊橋主塔を具体的対象として採り上げ、 $P - \Delta$ 法と有効座屈長法による限界強度曲線を探り、その特性を明らかにするとともに、厳密な弾塑性有限変位解析結果¹⁴⁾と比較することにより、両設計法の有効性について検討した。

今、数値計算に用いた2層～5層ラーメン形式主塔の断面諸元、荷重条件をまとめたのが表-3である。なお、塔柱は実際には変断面であるが、ここでは塔頂部と塔基部の平均断面を持つ等断面柱としている。これらのデータの基、(1)の算出法により限界強度曲線を計算した結果を示したのが図-7～図-11である。縦軸には降伏荷重に対する軸圧縮力の無次元量を、横軸には全塑性モーメントに対する限界水平荷重時における曲げモーメント

表-3 塔の断面諸元



構造形式		塔 柱	水 平 材					降伏 応力度 t/m ²	塔柱は等断面 塔柱と水平材は 同材質 水平材番号は 上部からの番号 A : 断面積 I : 断面 2 次 モーメント
			1	2	3	4	5		
(1) 2 層ラーメン	A m ²	0.519	0.298	0.429				36000	
	I m ⁴	1.010	1.046	1.145					
(2) 2 層ラーメン	A m ²	1.339	0.311	0.566				24000	
	I m ⁴	3.202	2.419	3.593					
(3) 3 層ラーメン	A m ²	1.777	0.786	0.693	0.693			46000	
	I m ⁴	7.751	6.635	4.550	4.550				
(4) 4 層ラーメン	A m ²	1.231	0.450	0.480	0.590	0.470		36000	
	I m ⁴	3.003	4.940	5.530	2.090	4.260			
(5) 5 層ラーメン	A m ²	1.570	0.532	0.566	0.514	0.514	0.566	36000	
	I m ⁴	4.352	1.418	1.608	0.936	0.936	1.608		

の無次元量を採っている。

まず、図-7 および図-8 は、2 層ラーメン構造の計算結果をまとめたものである。図-7 は、塔高が $h = 86.35m$ の場合であるが、 $P-\Delta$ 法と有効座屈長法の限界曲線は明確に 2 分され、有効座屈長法の各曲線は $P-\Delta$ 法の解曲線に比べてかなり安全側の値を示している。一方、図-8 は塔高が $h = 103.09m$ の場合であるが、 $P-\Delta$ 法と有効座屈長法による解曲線の差は小さく式 (8) に沿った結果を示している。これは、断面剛性が大きく、2 次効果の影響が少ないこと、応力度照査式に支配される領域が大きいためである。なお、ここでは弾塑性有限変位解析を行っていないため、線形限界曲線

$$\frac{P}{P_y} + \frac{M}{M_p} \leq 1 \dots\dots\dots (8)$$

を載せている。さらに、両図に共通な傾向として、修正 SSRC 法が最も高い解曲線を示している。

塔高 $h = 133.8m$ の 3 層ラーメン構造の限界曲線を示した図-9 において、弾塑性有限変位解析による限界曲線に対して $P-\Delta$ 法による解曲線は、有効座屈長法のそれに比べてより近い精度の良い耐荷力を表している。有効座屈長法の中では HSBA (有限変位理論) が最も精度の良い耐荷力評価を行っているが、まだ曲げモーメントの卓越する領域において余裕がある。また、 $P-\Delta$ 法では ECCS が SSRC よりも曲げモーメントの影響の大きい

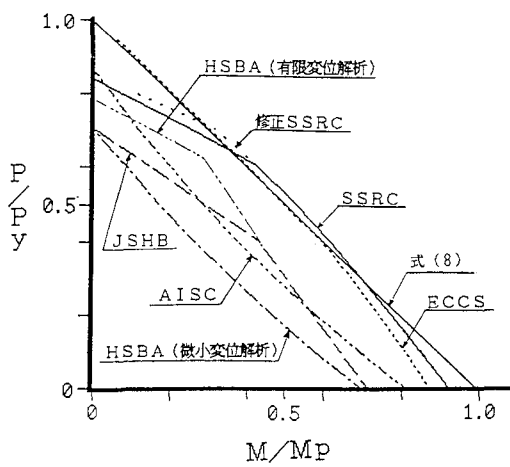


図-7 2層ラーメン構造 ($h = 86.35m$)

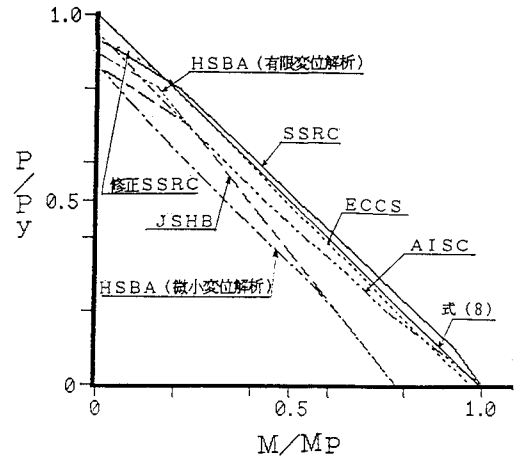


図-8 2層ラーメン構造 ($h = 103.09m$)

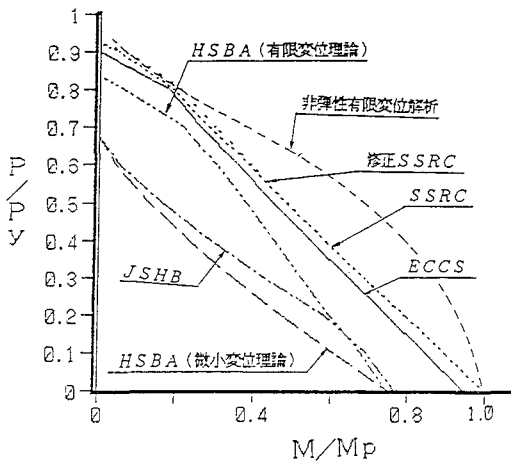


図-9 3層ラーメン構造

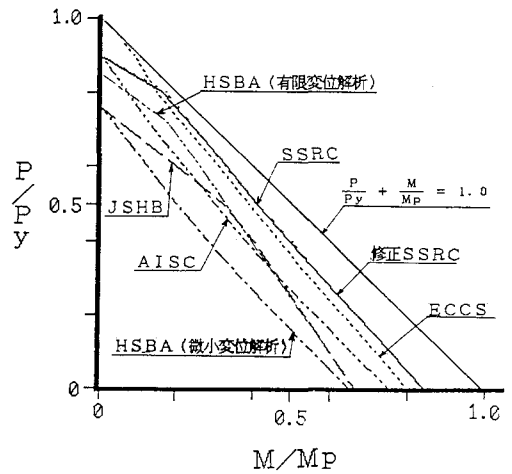


図-10 4層ラーメン構造

領域において低い曲線を示していることがわかる。これは、*ECCS*は初期不整の影響を考慮しているためである。

図-10は、塔高 $h = 169m$ の4層ラーメン構造の限界強度曲線を示している。図から明らかなように、2層、3層の場合に比べて得られた解曲線はかなり直線的になっており、両設計法の相違は小さい。これは耐荷力が応力度照査式により限界に達している領域が軸力の卓越する領域まで広がっているためであり、その中ではこれまでの結果と同様に*HSBA*(微小変位理論)がもっとも低めの曲線となった。

図-11は、5層ラーメン構造の限界強度曲線を示している。 $P-\Delta$ 法は、これまでの結果と同様に弾塑性有限変位解析による厳密解に漸近した結果を示している。一方、有効座屈長法では、*HSBA*の弾性有限変位解析による解曲線が $0.3P_y$ あたりから他の有効座屈長法とに差があらわれ、鉛直荷重が卓越する領域においてより厳密解に近い耐荷力評価をしていることがわかる。これは、有効座屈長の算出法に E_f 法を用いているため、より

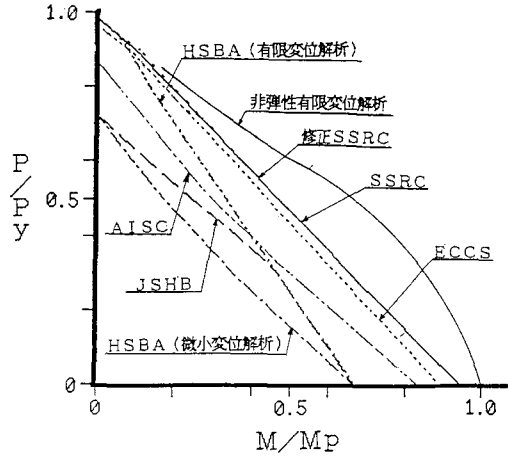


図-11 5層ラーメン構造

短めの有効座屈長を算出できたためである。

また、これらの結果から、 $AISC/PD$ と $HSBA$ (微小変位理論)の限界曲線そのもの値には差があるもの、同様な傾向を示している。これは、モーメント換算係数 $C_m=0.85$ の一定値を用いているためである。

4. まとめ

以上、鋼ラーメン構造物に対する有効座屈長法と $P-\Delta$ 法による限界強度評価の精度について検討した訳である。その結果、簡単なラーメン構造を用いて、各種設計法による限界強度曲線の有効性を文献13)との比較により確認するとともに、得られた解曲線の特徴を明らかにすることができた。

また、塔を対象に数値計算した結果において、有効座屈長法では $HSBA$ (有限変位理論)が軸圧縮力が支配的な領域において精度の高い耐荷力評価を行っている。全体的には $P-\Delta$ 法が有効座屈長法に比べて高めの解曲線となり、また修正 $SSRC$ 法と $SSRC$ 法はほぼ一致した解曲線を示しており、繰り返し計算の必要がない修正 $SSRC$ 法が有効である。また、 $ECCS$ 法の解曲線は修正 $SSRC$ 法のそれに比べて安全側の評価を示しているがその差は小さい。 $P-\Delta$ 法は、これまで建築構造における長方形のような特定の構造形状の設計に用いられてきたが、本報告から明らかなように吊形式橋梁の斜塔のような構造全体系の安全性照査にも適用可能である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990.2
- 2) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983
- 3) 本州四国連絡橋公団：吊橋主塔設計要領・同解説，1989.3
- 4) DIN 18800：Deutsche Norm Teil 1 and Teil 2，1988
- 5) T.V.Galambos：Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures，4th Ed. John Wiley & Sons，1988
- 6) U.Vogel：Recent ECCS-Developments for Simplified Second-Order Elastic and Elastic-Plastic Analysis of Sway Frames，Stability of Metal Structures，Final Report，Paris，1983.11
- 7) 中井博・酒造敏広・大垣賀津雄：鋼薄肉ラーメン構造物の限界強度の近似計算法，土木学会論文集，No.380，1987
- 8) 長谷川彰夫・西野文雄：線形化有限変位理論による構造物の設計法の提案，土木学会第44回年次学術講演会，1989
- 9) 西野文雄：土木学会鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会終局強度設計分科会成果報告書（案），1992.9
- 10) 野上邦栄・上田浩章・山本一之：鋼ラーメン構造物の安定照査に関する一考察，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，第15回，1991.7
- 11) 上田浩章：鋼ラーメン構造物の設計における $P-\Delta$ 法と有効座屈長法の耐荷力評価に関する研究，芝浦工業大学修士論文，1992.3

- 12) AISC : Specifications for the Design Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, AISC, 1978
- 13) 宇佐美勉・垣内辰雄・水野克彦：鋼ラーメン構造物の合理的設計式の一提案，土木学会論文集，No.404, 1989
- 14) 野上邦栄・安部大志：吊橋主塔の安定照査式に関する一考察，構造工学論文集， Vol.35A, 1989.3

(1992 年 9 月 21 日 受付)