

**委員会報告**  
**COMMITTEE**  
**REPORT**

## 【委員会報告】

## 鋼構造物の終局強度と設計

## ULTIMATE STRENGTH AND DESIGN OF STEEL STRUCTURES

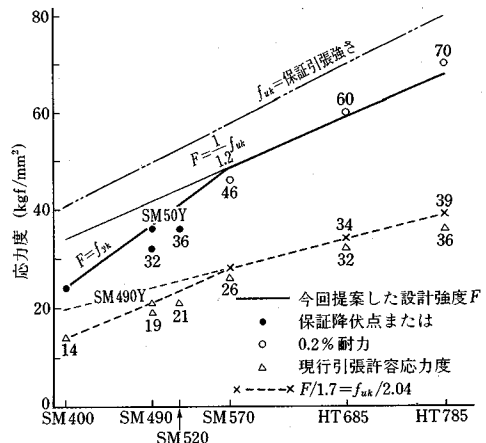
土木学会鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会  
 Subcommittee on Ultimate Strength of Steel Structures

## 1. まえがき

荷重の作用を構造物に生じる応力で表現し、その強度も応力で表して安全率で除し許容応力という形にして作用応力と比較することにより強度設計を行う、許容応力度設計法が従来の構造強度設計法の主流を占めてきた。この設計法では、荷重作用と強度を離すものは安全率というたった一つのパラメータであり、荷重や強度の持つばらつきの違いを表すことは困難であった。またあまりにも応力というものが表面に出過ぎていたため外力に抵抗する内部の力ということより、弾性応力の分布といった点が強調され、強度に関係しないような2次の応力を誤って評価するといった欠陥が目立つようになった。

これに対し、荷重作用に対する構造物の限界状態、例えば終局強度限界、疲労限界とか使用限界といった限界状態を明確にし、荷重の限界、その作用評価の限界、抵抗能力の限界等を定め、それらを比較することにより設計を行う限界設計法<sup>1)</sup>がより合理的な設計ができる可能性を持っているため、世界の設計法の主流となり既にEUROCODEやAASHTOのSpecificationはこれに準拠している。限界状態設計法の完成には、それぞれの量の平均値と確率量より限界を定めるという作業と共に、それぞれの持つ性質を明らかにする必要があり、これまで膨大な量の研究が成され、その結果が蓄積されているし、なお進行中である。

この現状を踏まえ、鋼構造委員会の中に終局強度研究小委員会(倉西小委員長)を昭和63年に設けて基礎資料の調査・収集を行ってきた。小委員会は、材料および細部構造分科会(倉西主査)、部材強度分科会(福本主査)および終局強度設計分科会(西野主査)の三分科会より構成され、それぞれ独立に研究活動を行ってきた。その結果の一応のまとまりを得たので、ここに鋼構造シリーズ6として「鋼構造物の終局強度と設計」が出版された。本書は第1編材料強度、第2編部材強度、第3編終局強度設計、第4編細部構造と付録資料編よりなっている。



図一 設計強度と現行許容応力度の比較

## 2. 材料強度

ここで鋼材強度の特性値として提案されている主な点は、次の通りである。

1) JIS規格に適合するものは、降伏強度 $f_{yk}$ および引張強度 $f_{uk}$ をJIS規格値の下限值としてよい。また、設計に用いる鋼材の断面積は、一般に公称断面としてよい。

2) 降伏強度の特性値の特定が困難である鋼材については、引張強度 $f_{uk}$ をもとにそれぞれの降伏強度を定めても良い。

ここで提案された特性値を図一に示す。

## 3. 部材強度

## (1) 部材と構成板要素の強度

我国において、鋼部材および構成板要素の強度について個々に蓄積されてきた研究成果を、次のような考え方を導入することによって統一的に整理した。

表一 限度幅厚比パラメータ

板要素	作用	塑性限界幅厚比 パラメータ $R^P$	降伏限界幅厚比 パラメータ $R^0$
周辺支持板	純圧縮	0.5	0.63
	曲げ圧縮	$0.5+0.025\phi$	$\frac{0.63+0.526\phi}{1+0.445\phi}$
	純曲げ	0.55	0.88
自由突出板	純圧縮	0.5	0.61

1) SGST フォーマット<sup>6)</sup>に基づいて、座屈強度、材料強度などの変動を考慮するための抵抗係数を用いて部材および構成板要素の抵抗の下限値を算出できるようにした。

2) 板要素の幅厚比の限界値を導入して、断面強度として塑性強度、降伏強度および局部座屈強度とする断面区分の考え方を明示した。

3) 部材座屈の基本強度について、区分可能なものについては複数曲線を採用した。

4) 局部座屈強度に支配される断面強度は、断面を構成する個々の板要素の局部座屈強度に関係する有効断面として評価するものとした。

5) 部材および板要素の連成座屈強度は有効断面積係数  $Q$  を用いた  $Q$ -factor 法によって算定することとした。

6) 2軸応力状態の板要素および補剛板の強度式を取り入れた。

以下、断面区分、部材の強度、および板要素の基本強度について簡単に述べる。

a) 断面区分

鋼断面を構成する基本的な板要素として周辺支持板および自由突出板を考える。前述のように断面強度の区分は、塑性強度断面、降伏強度断面および局部座屈強度断面とし、それらの判別は構成板要素の幅厚比パラメータ

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}} \sqrt{\frac{F}{E}} \frac{b}{t} \quad (1)$$

の限界値(以下では限界幅厚比パラメータと称する)による。そして塑性強度断面と降伏強度断面の境界を塑性限界幅厚比パラメータ、降伏強度断面と座屈強度断面の境界を降伏限界幅厚比パラメータと称し、これらの限界値を周辺支持板と自由突出板について表一に掲げる数値、あるいは式で表現した。

b) 部材の強度

部材の強度設計については、部材の安定と断面強度についての照査が行われる。単一断面力を受ける部材の基本強度は表二のように表現した。このうち、中心軸圧縮強度は、 $Q$ -factor 法を用いて局部座屈との連成効果を含めた表記法を採用している。従って、部材の細長比

表二 部材の基本強度式

部材	部材強度式
引張部材	$P_{tu} = \phi_t A_n F$
圧縮部材	$P_{cu} = \begin{cases} \phi_c A_g Q_c F & \lambda \leq \lambda_0 \\ \frac{\phi_c A_g Q_c F}{2\lambda^2} [\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda^2}] & \lambda > \lambda_0 \end{cases}$
	$\beta = 1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2$
曲げ部材	$M_{buz} = \begin{cases} \phi_b M_n & \lambda_b \leq \lambda_{b0} \\ \frac{\phi_b M_n}{2\lambda_b^2} [\beta_b - \sqrt{\beta_b^2 - 4\lambda_b^2}] & \lambda_b > \lambda_{b0} \end{cases}$
	$\beta_b = 1 + \alpha_b(\lambda_b - \lambda_{b0}) + \lambda_b$

表三 板要素の基本強度

板要素	作用	$R_f$	n
周辺支持板	純圧縮	0.7	0.86
	純曲げ	1.0	0.72
	純せん断	0.6	0.32
自由突出板	純圧縮	0.7	0.64

パラメータは有効断面積比  $Q_c$  を用いて、

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Q_c F}{E}} \frac{l}{r} \quad (2)$$

となる。

強度式は、グループ 1, 2, 3 に区分し、初期不整係数  $\alpha$  はそれぞれ 0.089, 0.244, 0.432, 限界細長比パラメータは  $\lambda_0 = 0.2$ , 抵抗係数は、グループ 1 は  $\phi_c = 0.88$ , グループ 2, 3 は  $\phi = 0.85$  とした。

c) 板要素の基本強度

単一荷重を受ける構成板要素の基本強度は、その幅厚比パラメータ  $R$  を用いて次式で与える。

$$\sigma_{ul} = \begin{cases} \phi_{p0} F & R \leq R_0 \\ \left(\frac{R_f}{R}\right)^n \phi_p F & R_0 < R \end{cases} \quad (3)$$

抵抗係数  $\phi_{p0}$  は 0.92。抵抗係数  $\phi_p$  は、作用荷重の種類により値が異なるが、実験データと数値計算結果を用いてキャリブレーションができた圧縮板の場合に最小値となることから、その値 0.84 を採用した。 $R_f$  と  $n$  は表三に示すように作用荷重の種類により変化する。

(2) 曲線桁の曲げ耐荷力

曲線桁の耐荷力評価式は、現在のところ確立されたものがなく、限界状態設計法の確立に向け早急に準備すべき問題の一つである。

曲線および直線プレートガーダーの曲げ強度は、断面強度、すなわち断面を構成するフランジとウェブパネルの局部座屈強度によって決定される強度(断面強度)と、桁の細長さによって決まる横ねじれ座屈強度(部材強度)に区分される。桁の曲げ強度は断面強度に桁の細長さに

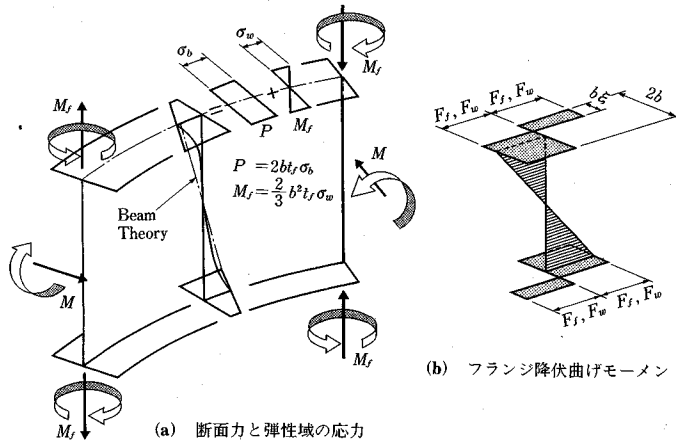


図-2 曲線桁の応力とフランジ降伏モーメント

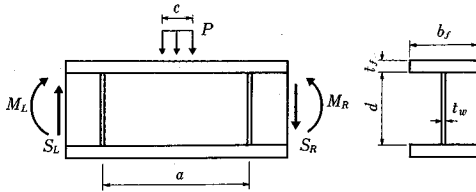


図-3 局所荷重を受ける桁の諸寸法および断面力

より決定される低減係数を乗じて求められる、とするのが設計上都合がよい。ここでは、この考え方にしたがって、三上らの提案式<sup>2)</sup>に準拠して、曲げを受ける曲線および直線プレートガーダーの断面強度評価式を示した。

曲線桁の特徴は、(1) 曲げとねじれが連成し、フランジに反り応力が発生すること (2) 曲率に起因してウェブは面外へたわみ、曲げ応力 (曲げにともなうウェブ面内の軸応力) が直線分布とならず、曲げ応力の欠損がおこることと言える (図-2 参照)。提案した曲げ強度評価式は、これらの特徴を踏まえ、かつ直線桁との整合性を考慮したものである。

### (3) 局所荷重を受ける桁の極限強度

局所荷重を受ける桁の腹板の座屈強度および桁の耐力に関しては、国の内外で種々の研究がなされてきたにもかかわらず、わが国では明確に基準化されたものがなかったが、今回、これらの強度に関して指針を設けるに至った。局所荷重が作用する桁では、極限強度に対する安全性を以下の手順で照査するものとする。

1) 桁の荷重状態は図-3に示すように局所荷重  $P$  の他に曲げモーメント  $M$  およびせん断力  $S$  が作用している状態とする。

2) 桁の局所荷重に対する極限強度  $P_u$  は式 (4) で計算する。

$$P_u = \phi_{pu} (25\% F_w + 4t_w t_f F_f) \left(1 + \frac{c_1}{2d}\right) \quad (4)$$

ここに  $\phi_{pu} = 0.77$ 、 $F_w$  : 腹板の設計強度<sup>3)</sup>、 $F_f$  : 上フランジの設計強度<sup>3)</sup>、 $t_w$  : 腹板の板厚、 $t_f$  : 上フランジの板厚、 $d$  : 腹板の高さ、 $c_1$  : 腹板上縁の局所荷重作用幅 ( $c_1 = c + 2t_f$ )。

3) 組合せ荷重での極限強度に対する安全性の照査式局所荷重の他に曲げモーメントおよびせん断力を作用する場合の桁の極限強度に対する安全性は式 (5) で照査するものとする。

$$\nu \left\{ \left(\frac{P}{P_u}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_u}\right)^4 + \left(\frac{S}{S_u}\right)^4 \right\} \leq 1.0 \quad (5)$$

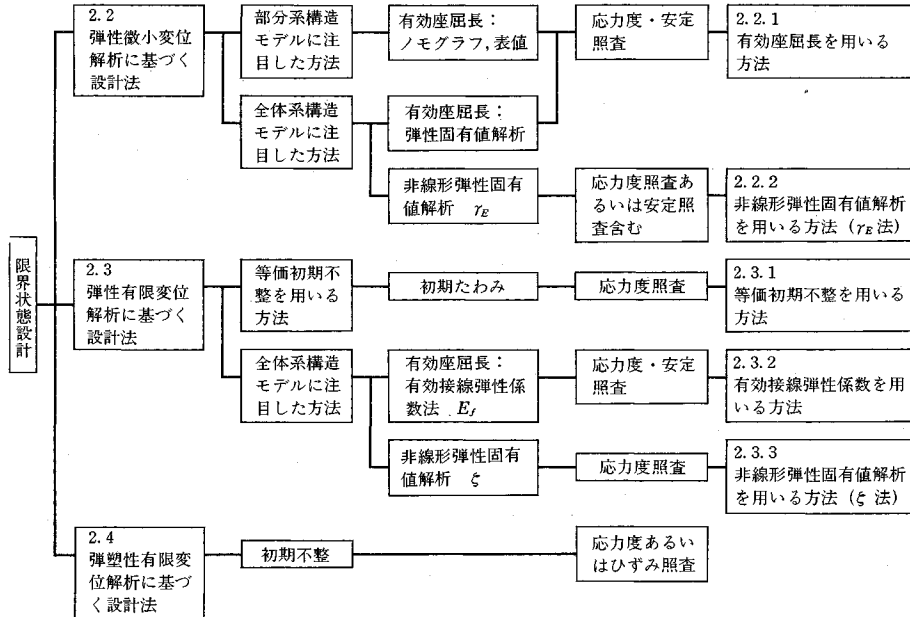
ここに、 $\nu$  : 対象構造物の重要性に依存する安全率、 $P_u$ 、 $M_u$ 、 $S_u$  : 局所荷重、曲げモーメントおよびせん断力の荷重が単独に作用する時の桁の極限強度、 $P$ 、 $M$ 、 $S$  : 桁に作用する局所荷重、曲げモーメントおよびせん断力。なお、 $M$  および  $S$  の値は局所荷重の載荷幅の中央にあたる断面での値を用いるものとする。

### (4) 骨組構造物の座屈設計法<sup>2)</sup>

骨組構造物の座屈設計法は、従来の有効座屈長法と、最近検討されている弾性 2 次解析法に分けることができる。有効座屈長法とは骨組を単一部材に換算し、実験・解析の両面で検証されている単一部材 (はり一柱) の強度式に当てはめて、その強度を求める方法である。一方、弾性 2 次解析法では、残留応力を含めて初期不整の影響を等価初期たわみに換算するので、有効座屈長および部材強度式は不要となり、断面強度式のみ必要となる。ここでは、有効座屈長法の問題点を述べ、次に弾性 2 次解析法を概説する。

注1) 第4章の内容と一部重複することになるが、部材強度分科会においても、骨組の座屈設計について研究活動が行われており、より議論を高めるため、ここにその成果を掲載する。

表一4 終局強度設計法の分類



a) 有効座屈長算定における問題点

有効座屈長を一般的に求める方法として固有値解析による方法(文献3では全体構造法と呼んでいる)がある。この方法は、コンピュータの利用が前提となり計算が煩雑になる代わりに、任意の骨組に適用できる。この方法は合理的なように思えるが、色々な疑問が生じ、その適用法および結果の解釈をめぐって混乱が見受けられる<sup>4)</sup>。第1に、軸圧縮力が小さい部材の有効座屈長が非常に大きくなり現実的ではなくなることである。第2に、固有値解析から求められる座屈モードと荷重を単調に増大させて弾塑性有限変位解析を行ったときの崩壊モードが、非常に異なる場合があるということである。最近、この疑問に対して、固有値解析において、高次の固有値を用いる方法、付加軸力を導入する方法、接線弾性係数を導入する方法(等価接線係数法、 $\xi$ 法)などが提案されている。しかし、これらの方法の物理的な意味の解釈をめぐって議論が生じている<sup>4)</sup>

b) 弾性2次解析法

弾性2次解析法は、 $P-\Delta$ 法とマトリックス法に分けることができる<sup>3)</sup>。これらの方法では、幾何学的非線形、いわゆる $P-\Delta$ 効果(部材が変位することによって生じる軸力×変位で表される付加的なモーメント)を構造解析の中で評価するので、部材安定照査式が不要になり、断面強度の照査のみが必要となる。したがって、照査において有効座屈長が必要なくなる。

$P-\Delta$ 法は、側方拘束のない長方形ラーメンに対して適用可能である。一方、マトリックス法は、適用可能な

構造物の形状に制限はないが、初期不整の影響を考慮するために、等価初期たわみを導入しなければならない。このように、任意の骨組構造物に対して等価初期たわみを導入して、マトリックス法を用いて解析し安全照査を行うという概念は長谷川・西野<sup>5)</sup>によって提案されたものである。しかし、等価初期たわみのモードと大きさをどのように決めるかという問題は明らかにされてこなかったが、この手法を実設計に適用するためには、システムチックな決定法が必要とされる。

弾性2次解析法の問題点としては、まず等価初期たわみの設定が煩雑であることが挙げられる。しかし、これは先に紹介したシステムチックな方法を、プログラムにより自動化すれば解決できると思われる。他の問題点としては、原理的に影響線を用いた重ね合わせができず、多くのケースを照査しなければならない実務設計では、計算が非常に煩雑になることである。これに対して、影響線解析を近似する方法などが必要になるとと思われる。

4. 終局強度設計

(1) 概説

構造物の規模や形式が多様化した現在、従来の微小変位解析にもとづく断面設計に対して、このままでよいのか、どのように修正すべきか、より合理的な設計法はないか、あるとすればどのような形になるのか、など様々な疑問が投げかけられている。ここでは、これらの疑問点を解決することを目的に、設計基準類が許容応力度設

計法から限界状態設計法に移行することにも配慮し、座屈を中心とした終局強度設計法の現状を整理した上で、桁構造、トラス構造、ラーメン構造、アーチ構造、吊橋構造などの鋼構造物のより合理的な終局強度設計法の確立を目標にまとめている。したがって、実際的な設計法のみならず、今後設計法として利用される可能性のある設計法についても考察を加えている<sup>3)</sup>。

## (2) 骨組構造物の終局強度設計

設計法を分類するにあたっては、表—4 のように荷重効果を求める構造解析のレベルに応じて、弾性微小変位解析に基づく設計法、弾性有限変位解析に基づく設計法、弾塑性有限変位解析に基づく設計法の三つに分類することとした。

### a) 弾性微小変位解析に基づく設計法

#### i) 有効座屈長を用いる方法

弾性微小変位解析に基づく設計法は、設計荷重の組み合わせを考慮した上で、材料の応力-ひずみ関係を線形と仮定し、骨組構造物の形状変化による効果を無視する線形解析を利用し、重ね合わせの原理を用いて荷重効果を求め、初期たわみ、残留応力、荷重の偏心、局部座屈等の影響を考慮した強度との比較により部材断面の安全性を照査するものである。これは、個々の部材の安全性を確保すれば、構造物全体の安全性が確保できるとの設計思想が基本にある<sup>7),8)</sup>。必要とされる照査は、応力度及び安定の照査である。

通常、この設計法では有効座屈長という概念が導入される。いったん着目する部材の有効座屈長が決まると、以後の設計において、その値は荷重の載荷状態によって変化しなくなるので、場合によっては不経済な設計となり得る。具体的な照査法は、以下の通りである。

- ① 各部材断面を仮定する。
- ② 設計荷重を設定する。
- ③ 弾性微小変位解析により各部材の断面力及び応力度を算定する。
- ④ 有効座屈長の評価を行う。
- ⑤ この有効座屈長により、許容応力度を算出する。
- ⑥ 作用応力度が安全性照査式を満足するように設計する。

強度を評価する上で重要となる④段階の有効座屈長は、部分構造モデルに対しては、近似式、ノモグラフ<sup>9),10)</sup>、表<sup>7),8)</sup>などを用いて決定される。全体構造モデルに対しては、着目する部材に最も不利になるような荷重状態に対して、次式の全体構造物の弾性固有値解析

$$\det|\mathbf{K}_E + \kappa \mathbf{K}_G(N_i)| = 0 \quad (6)$$

から固有値  $\kappa$  を求め、座屈荷重  $N_{crit} = \kappa N_i$  を計算して、各部材の有効座屈長を次式により求める。

$$l_{ei} = \pi \sqrt{\frac{EI_i}{-N_{crit}}} \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{K}_E$  は剛性マトリックス、 $\mathbf{K}_G(N_i)$  は③より得られる各部材の軸力  $N_i$  (引張を正) から作成される幾何剛性マトリックスである。

全体構造モデルの場合は、計算機の利用が前提となり、ノモグラフを使用する方法に比べ計算が煩雑になるものの、任意形状の骨組構造が特定の荷重を受ける場合の有効座屈長が計算でき、また、変断面部材の場合も一様断面の場合とほぼ同様の考え方で計算できる点に特徴がある。実務設計のレベルでは、考えている部材に最も不利になる載荷状態を見出すために、膨大な数の固有値解析が必要となることや、変断面部材の場合各断面ごとに有効座屈長が異なるため、有効座屈長の取扱いが煩雑になる恨みが残る。

#### ii) 非線形弾性固有値解析を用いる方法 ( $\gamma_E$ 法)

この設計法は、従来行われてきた座屈設計法と異なり、新しい終局強度設計法である。一般に終局限界時の座屈応力度は弾性座屈応力度に比べて低い。これは、断面の一部が降伏して有効断面積が減少し、そのため曲げ剛性が低下することによって考えられる。これを断面2次モーメントの低下でなく弾性係数の低下(応力度に依存する)とみなして、この有効弾性係数を用いて固有値計算を行うことから、この方法を非線形弾性固有値解析を用いる方法と称した。

荷重効果を求める構造解析には、弾性微小変位理論に基づく線形解析を用い、重ね合わせの原理により断面力を算定し、終局強度である耐荷力を作用応力度に対する見かけの弾性係数を用いた非線形弾性固有値解析から求め、はり-柱の相関強度式を用いて部材の安全性を照査する方法である。具体的な照査法は、i) の④以降の手順が以下ようになる。

- ④ 断面力より求める作用応力度に対して、見かけの弾性係数比  $\gamma_{Ei} (= E_{fi}/E)$  を導入し有効接線弾性係数  $E_{fi}$  を算出する。
- ⑤ 有効接線弾性係数  $E_{fi}$  を用いて非線形弾性固有値解析を行う。
- ⑥ 固有値解析により求まる座屈荷重を安全率倍した断面耐力と設計断面力とに、はり-柱の強度相関式を適用して部材の安全性の照査を行う。

この方法は、有効座屈長を陽な形で導入していない点に特徴があり、断面耐力の求め方に従来の設計基準と差異がある。

### b) 弾性有限変位解析に基づく設計法

#### i) 等価初期不整を用いる方法

この設計法は、いわゆるはり-柱理論を基礎におき、残留応力・初期たわみ等の初期不整を等価な初期たわみに置き換えて、構造物の形状変化による効果を軸圧縮力

がもたらす曲げモーメントの増加 ( $P-\Delta$  効果) として捉え、弾性有限変位解析を行って骨組構造物の安全性を照査する方法である<sup>5)</sup>。

この方法は、一般の骨組構造物に適用でき、用いる繰り返し計算の方法に応じて増分法と割線係数法とに分けられる。具体的には、i) の③以降が以下ようになる。

③ 初期断面力を求める (通常の場合、弾性微小変位解析でよい)。

④ 部材の等価初期たわみの大きさ及び形状を決め、それをもとに構造物の初期形状を決定し、節点座標値を算定する。

⑤ 増分法の場合には、下記の増分方程式を解くことにより、増分変位を求め、その結果をもとに接線剛性マトリックス  $\mathbf{K}_T(N_i)$  の軸力を修正し、照査すべき荷重まで増分を繰り返す。

$$\mathbf{K}_T(N_i)\Delta u = \Delta P \quad (8)$$

割線係数法の場合には、下記の剛性方程式を用いて断面力を求める。

$$[\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G(N_i)]u = P \quad (9)$$

⑥ 得られた断面力が断面の強度照査式を満足するように設計する。

現在までの所、この設計法は、断面設計が行われた後に改めて終局強度を照査する場合に使用されている。

ii) 有効接線弾性係数を用いる方法 ( $E_T$  法)

この設計法は、骨組部材が終局状態に達する時には、部材は弾性状態になく非弾性状態にあるものとして、固有値解析の中で非弾性の効果を考慮しようとするものである。この方法は、初期たわみ及び残留応力の影響を考慮した道路橋示方書の基準耐荷力曲線に見合った全体座屈強度を求めるために、全体座屈する状態における見かけの弾性係数の低下を考え、有効接線弾性係数を導入し、非線形弾性固有値計算を行い、有効座屈長を算出する方法である。現在では、本州四国連絡橋公団の設計基準として、吊橋主塔の設計に用いられている考え方である<sup>11)</sup>。具体的には、i) の照査法において③以降が以下になる。

③ 弾性有限変位解析により部材の軸力  $N_i$  等の断面力を算定する。

④ 構造物を完全弾性体として固有値解析を行い、座屈荷重  $N_{cri}$  を求める。

⑤ 座屈荷重  $N_{cri}$  を用いて、有効座屈長  $l_{ei}$  を求める。

$$l_{ei} = \pi \sqrt{\frac{E_{Ti} I_i}{-N_{cri}}} \quad (10)$$

⑥ 細長比  $l_{ei}/r_i$  を用いて、基準耐荷力曲線より  $\sigma_{ni}$  を求める。

⑦ 次式を用いて  $E_{Ti}$  を修正する。

$$E'_{Ti} = \frac{\sigma_{ni}}{-N_{cri}/A_i} \quad (A_i: \text{断面積}) \quad (11)$$

⑧ この  $E'_{Ti}$  を用いて、固有値解析を行い、座屈荷重  $N'_{cri}$  を求め、収束するまで⑤から⑦までの手順を繰り返す。

⑨  $E_{Ti}$  が変化しなくなるときの有効接線弾性係数  $E_{Ti}$  を用いて、有効座屈長を計算する。

⑩ はり-柱の相関強度式を用いて安定の照査を行う。

iii) 非線形弾性固有値解析を用いる方法 (ζ法)

この設計法は、有効座屈長の概念を用いない新しい考え方の終局強度設計法である。荷重効果は、弾性有限変位解析を用いて求める。設計断面力を係数倍した荷重に対して計算した応力度に対応する見かけの弾性係数比  $\zeta_i (= E_{Ti}/E)$  を導入し、 $\zeta_i$  を用いて固有値解析から設計断面耐力を求める。得られた設計断面耐力と設計断面力との比較によって部材の安全性を照査する。

具体的な照査法は以下の通りである。

① 各部材断面を仮定する。

② 設計荷重を設定し、設計荷重を荷重係数倍した荷重を照査荷重とする。

③ 照査荷重を用いて弾性有限変位解析により設計断面力を求める。

④ 得られる応力度に対する見かけの弾性係数  $\zeta_i$  を導入し、有効接線弾性係数  $E_{Ti}$  を算出する。

⑤ 有効接線弾性係数  $E_{Ti}$  を用いて非線形弾性固有値解析を行う。

⑥ 固有値解析により求まる設計断面耐力と弾性有限変位解析により求まった設計断面力とを比較することによって部材の安全性の照査を行う。

### c) 弾塑性有限変位解析に基づく設計法

圧縮部材を含む骨組部材の終局状態は、厳密に言えば、構造物の初期不整を正確に評価し幾何学的非線形性や材料的非線形性などあらゆる非線形性を考慮した弾塑性有限変位解析によって知ることができるものである。通常、実務設計においてこのような非線形解析をすることは、現時点では非現実的であるとはいうものの、設計された構造物の終局限界状態に対する安全性を照査する目的で弾塑性有限変位解析を利用することには大きな意味がある。

たとえば、たわみの有限性が問題となり、かつ、局部座屈の発生しない比較的厚肉断面を持つ部材、あるいは Shape Factor の大きい断面を持つ部材に対して、応力の再分配が期待できる骨組部材からなる鋼構造物では、構造物の一部が降伏してから、部材断面の全塑性、部材の柱としての座屈、および構造物全体の不安定現象などによって、構造物が終局状態に達するまでかなりの荷重に抵抗できるものと考えられる。このような構造では、弾性有限変位解析を用いて終局限界状態を決定するよりも、弾塑性有限変位解析を用いて終局限界状態を判定する方が合理的である。

もちろん計算費用がかさむので、計算に用いる荷重ケースの数は限られるが、吊橋や斜張橋の主塔、さらにラーメン橋脚を設計するような場合には、最も厳しい荷重ケースについて弾塑性有限変位解析を用いることができる。最近では、設計された構造物の終局限界状態に対する安全性を評価する意味合いで使用されることが多い。

解析モデルの設定方法と耐荷力に影響を及ぼす初期たわみや残留応力の設定方法、さらに、終局限界状態の定義および照査方法などについては、今後の発展に期待するところ大であるが、安全性に対する考え方がまとまれば、より使いやすくなるものと思われる。

### (3) 解析法の適用に関する課題

(2)の終局強度設計法の実用化に当たって、設計実務者を対象にハード・ソフトの両面からアンケート調査を実施した。各種設計法における解析上、および、実務上の問題点に関する回答内容を基に、全設計法に共通の課題についてまとめると以下ようになる。なお、アンケート結果および問題点と課題の詳細については、文献3)を参照されたい。

① 各解析法で終局強度を求めた場合の精度(誤差の平均値とそのバラツキ具合)を明確にしておく必要がある。

② 構造物の対象とする終局限界状態と適用すべき解析法の対応についても検討しておく必要がある。

③ 構造物の形式や規模、および、重要性などを配慮して、各々の終局強度設計法の適用すべき対象範囲を具体的に規定することが急務の課題である。

④ 各終局強度設計法を定着させるためには、代表的な構造形式別にそれらを適用した結果を整理した事例集や、各形式特有の問題点とその対処法を網羅した資料集などの編纂が不可欠である。

今後、これらの課題に対して十分な対処が施されることによって、各種設計法が、終局強度設計法として実務設計の世界で定着していくことが期待される。

### (4) その他

以上、終局強度設計に関する新しい研究成果を中心にとりまとめたが、終局強度設計分科会では他に「鋼構造物のダクティリティを考慮した設計」、「最適設計を考慮した設計法」、「接合部の挙動を考慮した設計」、「 $P-\Delta$ 法によるラーメン構造物の設計」、「合成構造の設計」などの新しい設計法の提案や、終局強度設計における「有限変位解析と設計」についても言及しているが、紙面の都合で省略する。詳しくは文献3)を参考にしてください。

## 5. 細部構造

ここで取り扱われているのは、1. 継手、2. 格点構造、3. ラーメン隅角部、4. 支点上補剛材、ダイヤフラム、および中間ダイヤフラム・対傾構、5. 吊橋のケーブル構造である。これらは、わが国では終局強度の表舞台に今までは余り登場して来なかったが、それを支える重要な部分である。しかし、ここでは紙面の都合上紹介は省略する。

## 6. あとがき

土木学会「鋼構造物設計指針」の改訂版の基礎資料を提供することを一つの目的として、本小委員会活動と鋼構造シリーズの一環として出版が行われた。内外における終局強度限界状態設計法の現状を見直し、さらに多くの提案や問題点をまとめることができた。しかし、より高度な限界終局状態設計法の完成には、なお

- 1) 各種の特に作用方向の異なる荷重の組み合わせ方、
- 2) 動的な要素を含む荷重、例えば風荷重や地震荷重の取扱い、
- 3) 柱・はりといった単純な構造のみならずより複雑な構造への適用、
- 4) 構造物の変形能力の評価、
- 5) リダンダンシーを有する構造物の設計法、
- 6) 他の限界状態(使用限界状態、および疲労限界状態)を考慮した構造物の形状決定法、
- 7) 最適設計法との関係、
- 8) 強度を支配する断面以外の部分の断面設計、
- 9) 高張力鋼の使用

等数多くの問題が残されていることが痛感される。

わが国の土木の分野では、まだ限界状態設計法は一般化されていないが、示方書等として定まるとそこで進歩が止まるという性質をこういっものは持っている。後発になったのを幸として世界で最も良い設計指針の基となることができることを関係者一同の願いである。

最後に、本小委員会の名簿を掲げる。(50音順、敬称略、○印幹事兼務)

鋼構造終局強度研究小委員会：倉西 茂(委員長)、青木徹彦、飯村 修、○岩熊哲夫、宇佐美勉、大田孝二、北田俊行、佐藤浩一、佐藤政勝、坂井藤一、崎元達郎、名取悦朗、中井 博、○中沢正利、波田凱夫、西野文雄、○野上邦米、福本啓士、藤原 稔、彦坂 照、前田研一、三上市蔵、三木千寿、森脇良一、山田健太郎、依田照彦、吉田 裕、渡辺英一

材料及び細部構造分科会：倉西 茂(主査)、飯村 修、○岩熊哲夫、越後 滋、大田孝二、大塚久哲、川谷充郎、



木村一也, 佐藤浩一, 佐藤政勝, 坂本良文, 田井戸米好, 奈良 敬, 中井 博, ○中沢正利, 長井正嗣, 波田凱夫, 増田陳紀, 酒造敏広, 森脇良一, 安波博道, 山田健太郎  
部材強度分科会: 福本嘔士 (主査), 青木徹彦, 伊藤義人, ○宇佐美勉, 大南亮一, 織田博孝, 川井 豊, 熊谷洋司, 桜井孝昌, 聖生守雄, 滝本哲四郎, 土屋匡寛, 当麻庄司, 奈良 敬, 西村宣男, 林 正, 藤井 堅, 前川幸次, 三上市蔵, 山尾敏孝

終局強度設計分科会: 西野文雄 (主査), 井浦雅司, 池田清宏, 岩熊哲夫, 薄木征三, 北田俊行, 久保全弘, 後藤芳顕, 酒井克己, 崎元達郎, 杉本博之, ○野上邦栄, 浜田純夫, 彦坂 熙, 前田研一, 盛川 勉, 安波博道, 柳本泰伴, 依田照彦, 渡辺英一

また, 土木学会事務局の黛巖氏には, 委員会の事務手続きなどいろいろとお世話になった。ここに, 記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会・構造工学委員会・鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会: 鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則, 土木学会論文集, 1992. 7.

- 2) 三上市蔵, 木村泰三, 山里靖: 設計のためのプレートガーダーの終局強度の算定法, 構造工学論文集, Vol. 35 A, 1989. 3.
- 3) 土木学会 (倉西茂編): 鋼構造物の終局強度と設計, 1994. 7.
- 4) 織田博孝, 宇佐美勉: 骨組構造物の座屈設計法の比較と評価, 構造工学論文集, Vol. 40 A, 1994. 3.
- 5) 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. 10.
- 6) 東海鋼構造グループ (代表: 福本嘔士): 鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用, 橋梁と基礎, 14-11, 14-12, 1980. 11, 1980. 12.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編, II 鋼橋編), 1990. 2.
- 8) 土木学会 (西野文雄編): 鋼構造物設計指針 Part A. Part B. 1987. 3.
- 9) 土木学会 (福本嘔士編): 座屈設計ガイドライン, 1987. 10.
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 鋼・合成構造物, 1992. 10.
- 11) 本州四国連絡橋公団: 吊橋主塔設計要領・同解説, 1989. 4.

(1994. 10. 20 受付)