

縦・横補剛板の耐荷力評価と最適設計の試み

AN EVALUATION METHOD OF ULTIMATE STRENGTH OF ORTHOGONALLY STIFFENED PLATES AND THE POSSIBILITY OF OPTIMUM DESIGN

依田 照彦* 桑野 忠生**

by Teruhiko YODA and Tadao KUWANO

The purpose of this paper is to present a design method of evaluating ultimate strength of orthogonally stiffened plates under uniaxial compression, and to make an attempt to investigate the possibility of optimum design of orthogonally stiffened plates.

As a result, an alternative design method for orthogonally stiffened plates is demonstrated by using transverse stiffeners with lower rigidity than conventional required rigidity. It is shown that, within the limit of design code provided by Japanese Specifications for Highway Bridges, optimum design is possible only for the case of orthogonally stiffened plates with many longitudinal stiffeners.

1. はじめに

幅の広い鋼箱桁圧縮フランジに見られる縦・横補剛板を現行の道路橋示方書¹⁾(以下道示と略す)に従って設計すると補剛板の縦横比(アスペクト比)が小さい場合、横補剛材の寸法が大きくなり過ぎることが指摘されている。²⁾ これは道示の補剛板に関する規定では横補剛材の位置で座屈変形モードが節となることを期待している為であり、検討課題の一つと考えられる。たとえば、横補剛材の剛度の低減を計るために、横補剛材位置で節とならないように横補剛材を配した補剛板の耐荷力を算定することは、道示の設計自由度を増加させる試みとして有益であるばかりでなく、問題解決の一助となるであろう。

縦・横補剛板に関する従来の研究としては文献2)~4)等が挙げられるが、それらは非弾性域の板剛性を低減させる手法および等価な圧縮柱に置き換える柱モデルを用いた手法に大別できる。本文では、新たに板モデルを用いた耐荷力推定法について検討するため、まず縦・横補剛板の直交異方性板理論を用いて求められた弾性座屈応力をもとに、横補剛材剛度に注目して座屈モードの明示および弾性座屈応力を整理して示した。さらに、得られた座屈モードに関する知見をもとに、縦・横補剛板の耐荷力をAISCの規定に見られる連成座屈強度推定法を応用して求める手法について言及した。そして、縦・横補剛板のアスペクト比あたりの補剛材重量を目的関数とした最適化問題を2つのケースについて検討し、考察を加えた。その結果、

* 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科 (160 東京都新宿区大久保3-4-1)

** 早稲田大学大学院理工学研究科 建設工学専攻 (160 東京都新宿区大久保3-4-1)

道示に従って縦・横補剛板の設計をする場合、最適設計が可能となるのは縦補剛材の本数が比較的多いときのみであることが分った。

なお、本研究では対象とする縦・横補剛板は周辺単純支持かつ柱としての全体座屈が問題とならないものとし、縦補剛材は長方形断面、片側等間隔配置、横補剛材はT形断面、片側等間隔配置とする。

2. 縦・横補剛板の座屈モードと弾性座屈応力

図1に示すような縦・横補剛板の弾性座屈応力は直交異方性板理論に従えば、次式で示される。³⁾ (図2参照)

$$\alpha_{t-1}^m < \alpha < \alpha_t^m \quad (\text{ただし、} 1 \leq m \leq nr, \quad \alpha_t = 0) \text{ の範囲で、} \quad \dots\dots\dots (1.a)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{b^2 h c} \left\{ \sqrt{\frac{D_x}{D_y}} \left(\frac{m}{a} \right)^2 + \frac{2(D_1 + 2 D_{xy})}{\sqrt{D_x D_y}} + \sqrt{\frac{D_y}{D_x}} \left(\frac{a}{m} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (1.b)$$

式(1)を安全側に近似すると次式が得られる。

$$\alpha_0^m < \alpha < \alpha_0^{m+1} \quad (\text{ただし、} 1 \leq m \leq nr) \text{ の範囲で、} \quad \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\sigma_{cr}^* = \frac{\pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{b^2 h c} \left\{ \sqrt{\frac{D_y + (2m-1)D}{2 D_y}} + \frac{2(D_1 + 2 D_{xy})}{\sqrt{D_x D_y}} + \sqrt{\frac{2 D_y}{D_y + (2m-1)D}} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.b)$$

$$\text{ただし、} \quad \alpha_t^m = \sqrt{m^2(m+1)^2 D_x / D_y} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_0^m = \sqrt[4]{2 D_x / \{D_y + (2m-1)D\}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。ここに、

$$D_x = D + E I_s / b s, \quad D_y = D + E I_r / a r,$$

$$D_1 = \nu D, \quad 2 D_{xy} = (1 - \nu) D,$$

$$h c = h + A s / b s, \quad b s = b / (n s + 1),$$

$$a r = a / (n r + 1), \quad A s : \text{縦補剛材 1 本}$$

$$\text{の断面積、} n s : \text{縦補剛材本数、} n r : \text{横}$$

$$\text{補剛材本数、} \alpha = a / b, \quad h : \text{主板厚、}$$

$$D : \text{主板剛性、} E I_s : \text{縦補剛材剛度、}$$

$$E I_r : \text{横補剛材剛度、} \nu : \text{ポアソン比、}$$

$$m : \text{座屈モードの縦方向半波長数である。}$$

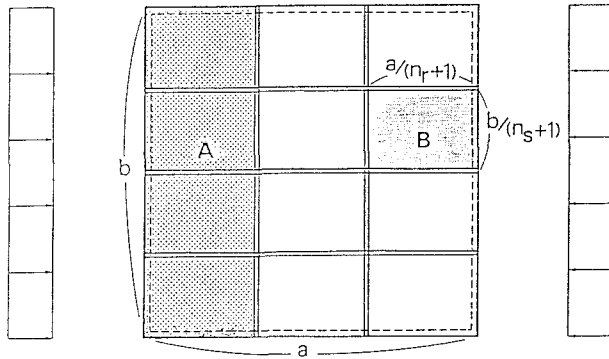


図1. 圧縮力を受ける縦・横補剛板

以上の関係式にそれぞれ縦補剛材の剛

比 γ_s 、横補剛材の剛比 γ_r を導入して式

$$\sqrt[4]{(m-1)^2 m^2 (1 + \gamma_s) / (1 + \gamma_r / \alpha r)} \leq \alpha \leq \sqrt[4]{m^2 (m+1)^2 (1 + \gamma_s) / (1 + \gamma_r / \alpha r)} \text{ の範囲で、} \quad \dots\dots\dots (5.a,b)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 k_{Fm} \quad \dots\dots\dots (5.a,b)$$

または、

$$m \sqrt[4]{(1 + \gamma_s) / (m + \gamma_r / 2 \alpha r)} \leq \alpha \leq (m+1) \sqrt[4]{(1 + \gamma_s) / (m+1 + \gamma_r / 2 \alpha r)} \text{ の範囲で、}$$

$$\sigma_{cr}^* = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 k_{Fm}^* \quad \dots\dots\dots (6.a,b)$$

ただし、 k_{Fm} 、 k_{Fm}^* は次に示す値である。

$$k_{Fm} = \frac{1}{1 + \delta_s} \left[(1 + \gamma_s) \left(\frac{m}{a} \right)^2 + 2 + \left\{ 1 + \gamma_r \frac{(nr+1)}{a} \right\} \left(\frac{a}{m} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$k_{Fm}^* = \frac{1}{1+\delta_s} \left[\sqrt{\frac{\{2m+\gamma_r/\alpha_r\}(1+\gamma_s)}{2}} + \sqrt{\frac{2(1+\gamma_s)}{2m+\gamma_r/\alpha_r}} (1+\gamma_r/\alpha_r)+2 \right] \dots\dots(8)$$

ここに、 $\delta_s = As/bsh$ 、 $\alpha_r = \alpha/(nr+1)$

$\gamma_s = Els/bSD$ 、 $\gamma_r = EIr/bD$ である。

いま、この縦・横補剛板の座屈モードを考える。まず、横補剛材間パネル（図1の斜線部Aで示し、以下部分パネルと略す）のアスペクト比 α_r の大きさによって、 α_r が大きい時、部分パネルが半波以上の座屈モードで局部座屈を起し終局状態となる場合と、 α_r が小さな時、縦・横補剛板の全体座屈によって終局状態となる場合の2つに分けることができる。さらに、全体座屈を起す場合には、 nr と α が既知とすれば、横補剛材の剛度によって全体座屈の座屈モードが決定されることになる。

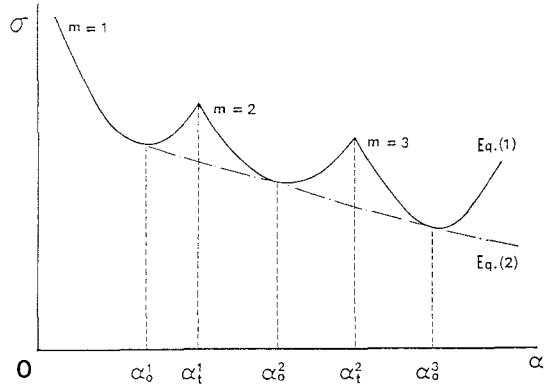


図2. 弾性座屈応力とアスペクト比の関係

部分パネルが局部座屈を起す場合は、式(1)において $m=1$ 、 $D_y=D$ 、 $\alpha=\alpha_r$ と置き換えれば良いので、³⁾

$$\alpha_r \leq \sqrt[4]{D_x/D} = \sqrt[4]{1+\gamma_s} \text{ の範囲では、} \dots\dots\dots(9.a)$$

$$\sigma_{cr} = -\frac{\pi^2 D}{b^2 h c} \left\{ \frac{D_x}{\alpha_r^2} + 2(D_1 + 2D_{xy}) + D\alpha_r^2 \right\}$$

$$= \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \frac{1}{1+\delta_s} \left\{ \frac{(1+\gamma_s)}{\alpha_r^2} + 2 + \alpha_r^2 \right\} \dots\dots\dots(9.b)$$

が得られる。また、

$$\alpha_r \geq \sqrt[4]{1+\gamma_s} \text{ の範囲では、安全側をみて、} \dots\dots\dots(10.a)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{6(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \frac{1}{1+\delta_s} \left\{ 1 + \sqrt{1+\gamma_s} \right\} \dots\dots\dots(10.b)$$

とかける。¹⁾

従って、式(9.b)の局部座屈強度が式(5.b)の nr 半波における全体座屈強度より小さくなる条件下で不等式をたてると、式(11)が得られる。

$$\gamma_r \geq \frac{2nr+1}{(nr+1)^2} \left\{ \frac{nr^2}{(nr+1)^2} \frac{1+\gamma_s}{\alpha_r^3} - \alpha_r \right\} \dots\dots\dots(11)$$

道示では式(11)にたいして次式のような近似式が与えられている。

$$\gamma_r \geq (1+\gamma_s) / 4\alpha_r^3 \dots\dots\dots(12)$$

式(11)の右辺第1項の係数を nr について整理すると表1が得られる。表1を参照すれば、式(12)は安全側の良い近似式となっていることがわかる。

一方、縦・横補剛板が全体座屈を起こす場合は、式(1.a)、(3)を参考にして、 γ_r の大小によって次のように縦方向座屈モードが決められる。

表1. 式(11)の係数の値

nr	$\frac{(2nr+1)nr^2}{(nr+1)^4}$
1	1/5 . 33
2	1/4 . 05
3	1/4 . 06
4	1/4 . 36
5	1/4 . 71

$$\gamma_r \leq \frac{4(1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \quad \dots\dots 1 \text{ 半波長} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{4(1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \leq \gamma_r \leq \frac{36(1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \quad \dots\dots 2 \text{ 半波長} \quad \dots\dots\dots(14)$$

同様に、

$$\frac{(nr-1)^2 nr^2 (1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \leq \gamma_r \leq \frac{nr^2 (nr+1)^2 (1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \quad \dots\dots nr \text{ 半波長} \quad \dots\dots(15)$$

ただし、式中 γ_r の左右辺の値が正の時のみ式(13)、(14)、(15)は成立するものとする。

ここで、式(11)の右辺を式(15)の γ_r に代入して不等式を吟味すると、式(9.a)の条件下で必ず式(15)が成立することが確かめられる。それ故、式(15)は次式のように書き換えることができる。

$$\frac{(nr-1)^2 nr^2 (1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \leq \gamma_r \leq \frac{2nr+1}{(nr+1)^2} \left\{ \frac{nr^2}{(nr+1)^2} \frac{1+\gamma_s}{\alpha r^3} - \alpha_r \right\} \quad \dots\dots nr \text{ 半波長} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\gamma_r \geq \frac{2nr+1}{(nr+1)^2} \left\{ \frac{nr^2}{(nr+1)^2} \frac{1+\gamma_s}{\alpha r^3} - \alpha_r \right\} \quad \dots\dots nr+1 \text{ 半波長} \quad \dots\dots\dots(17)$$

以上の縦・横補剛板の座屈モード及び座屈応力に関する考察をまとめると次のようになる。すなわち、弾性座屈応力は一般に、

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 k_F \quad \dots\dots\dots(18)$$

と表わせる。ただし、

(i) $\alpha_r \leq \sqrt{1+\gamma_s}$ の場合。

a) $1 \leq m \leq nr-1$ かつ、

$$\frac{(m-1)^2 m^2 (1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \leq \gamma_r \leq \frac{m^2 (m+1)^2 (1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \quad \text{のとき、}$$

または、

$m=nr$ かつ、

$$\frac{(nr-1)^2 nr^2 (1+\gamma_s)}{(nr+1)^4 \alpha r^3} - \alpha_r \leq \gamma_r \leq \frac{2nr+1}{(nr+1)^2} \left\{ \frac{nr^2}{(nr+1)^2} \frac{1+\gamma_s}{\alpha r^3} - \alpha_r \right\} \quad \text{のときは、}$$

$$k_F = \frac{1}{1+\delta_s} \left[(1+\gamma_s) \left(\frac{m}{\alpha} \right)^2 + 2 + \left\{ 1 + \gamma_r \frac{(nr+1)}{\alpha} \right\} \left(\frac{\alpha}{m} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$b) \quad \gamma_r \geq \frac{2nr+1}{(nr+1)^2} \left\{ \frac{nr^2}{(nr+1)^2} \frac{1+\gamma_s}{\alpha r^3} - \alpha_r \right\} \quad \text{のときは、}$$

$$k_F = \frac{1}{1+\delta_s} \left\{ \frac{(1+\gamma_s)}{\alpha r^2} + 2 + \alpha r^2 \right\} \quad \dots\dots\dots(20)$$

(ii) $\alpha_r \geq \sqrt{1+\gamma_s}$ の場合。

$$k_F = \frac{1}{1+\delta_s} \left\{ 1 + \sqrt{1+\gamma_s} \right\} \quad \dots\dots\dots(21)$$

である。

以上の関係を図示すると図3のようになる。

付言するならば、縦・横補剛板の座屈モードを決定する今までの議論では、横補剛材剛比 γ_r をパラメータとしたが、 γ_r の替りに α もしくは α_r をパラメータとしても同様の議論が可能である。

3. 縦・横補剛板の耐荷力算定法

縦・横補剛板の座屈モードと対応する座屈応力が明らかになったので、ここでは、補剛材の縦横剛比を実状に合わせて変化させることのできる補剛板の耐荷力を簡易に推定する方法を考察する。

縦・横補剛板の終局状態に於ては縦補剛材並びに横補剛材で囲まれる、図1の斜線

部Bで示されるパネル（以下単一パネルと略す）の局部座屈と、前章でみてきたとうりのモードで補剛板が座屈する全体座屈の両者の連成効果を評価する必要がある。そこで、縦補剛材の剛度が道示に示された必要剛比 γ_{req} 以上となるように設計された縦・横補剛板の耐荷力算定に際し、次の三つの仮定を設けるものとする。

(I) 単一パネルの局部座屈では縦補剛材のねじり剛性を無視し、横に隣合う単一パネル間のモーメントの伝達を行なわれないものとする。⁵⁾ すなわち、単一パネルを周辺単純支持の幅 $b/(ns+1)$ 、長さ $a/(nr+1)$ の圧縮板として扱う。

(II) 縦・横補剛板の全体座屈では全体座屈モードの座屈係数 kF を用いて、その耐荷力を周辺単純支持圧縮板の基準耐荷力の $kF/4$ 倍と仮定する。（ただし、式(19)の kF は式中の m について $m=1$ から nr まで変化させた時の最小値を指すものとする。）

(III) 周辺単純支持圧縮板の基準耐荷力曲線は三上の式⁶⁾を修正（等価幅厚比 R を RR とする）して用いる。すなわち、 σ_{max} を断面の平均応力として、

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_y} = 1.0 \quad (RR \leq 0.526)$$

$$= -\frac{1}{\beta^{0.7}} \quad (0.526 < RR)$$

$$\text{ここに、} \beta = \frac{b}{nh} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} = 1.9RR \quad \dots\dots\dots (22.a \sim c)$$

であり、 $n = ns + 1$ 、 $kR = 4n^2$ かつ、

$$RR = \frac{b}{nh} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{E\pi^2kR}} \quad \text{とする。}$$

三上の式を用いた理由は、 RR の小さな領域で難点があるものの、平均的な残留応力、初期たわみを考慮した弾塑性有限変位理論に基づく解析値と良く一致しており、かつ式の表示が簡易であることによる。

以上、三つの仮定とAISCの規定⁷⁾にみられる連成座屈強度推定法を用いると、縦・横補剛板の耐荷力は次式のように決定できる。

まず、

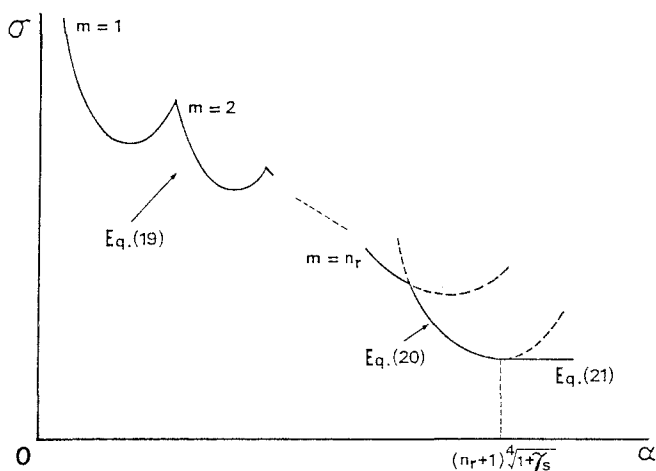


図3. 縦・横補剛板の座屈モードと弾性座屈応力との関係

$$\text{低減係数 : } Q = 1.0 \quad (RR \leq 0.526)$$

$$= \frac{1}{\beta^{0.7}} \quad (0.526 < RR) \quad \dots\dots\dots(23.a,b)$$

$$\text{を用いて、} \eta_c = 1.9 \sqrt{Q} R_F$$

とおき、

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_y} = Q \quad (\eta_c \leq 0.526 \sqrt{c})$$

$$= \frac{Q}{\eta_c^{0.7}} \quad (0.526 \sqrt{c} < \eta_c) \quad \dots\dots\dots(24.a \sim c)$$

ただし、

$$R_F = \frac{b}{nh} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{E\pi^2 kF}}, \quad c = \frac{kF}{kR} \quad \text{とする。}^{8) \sim 11)}$$

いま、縦・横補剛材を道示に示す必要剛比となるように設計し、 $\alpha=1$ 、 $ns=5$ 、 $nr=2$ 、 $RR=0.71$

および 1.0 、 $\sigma_y=2400\text{kg/cm}^2$ (235.4MPa)、かつ As を縦補剛材の幅厚比が突出制限幅厚比と等しくなるように定めた縦・横補剛板の耐荷力を試算し、文献2)の結果と比較したものを表2に示す。文献2)ではFEM解析を2種類のモデル化を通して行ない、更に柱モデルアプローチ(CA)による解析と、合計3種類の解析を行なっている。

表2. 解析値の比較

RR	FEM 1 ²⁾	FEM 2 ²⁾	CA ²⁾	This paper
0.71	0.75	0.72	0.64	0.71
1.00	0.62	0.55	0.48	0.48

($\times \sigma_{\max}/\sigma_y$)

本法による結果は、比較的安全側の値を与えていることが解る。

又、文献3)では本法と同様、弾性座屈応力を基礎とし、Bleichの非弾性剛度低減係数を用いた非弾性座屈

力の厳密解が明らかにされているので、本法との比較を行う。対象とする縦・横補剛板は、 α をパラメータとし、 $ns=15$ 、 $nr=3$ 、 $\gamma_s=100$ 、 $\gamma_r=50$ 、 $\delta_s=0.4$ 、 $b/h=40$ ($ns+1$) とする。ただし、ここでは γ_s 、 γ_r を一定としている為、 α の値によってはモデル化に際して単一パネルの境界条件が単純支持より弱くなる場合があり得る。従って、式(24)にならい、低減係数 Q の修正を行う。(γ_s が必要剛比を満たしている場合は修正不要) すなわち、

$$\text{低減係数 : } Q = 1 \quad (\xi e \leq 0.526 \sqrt{e})$$

$$= \frac{1}{\xi e^{0.7}} (0.526 \sqrt{e} < \xi e)$$

$$\text{ここに、} \xi e = 1.9 R_P = \frac{b}{nh} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{E\pi^2 kP}} \quad \dots\dots\dots(25.a \sim c)$$

$$\text{ただし、} e = \frac{kP}{kR}, \quad kP = \frac{(1+\alpha r^2)^2 + \gamma_s}{\alpha r^2(1+\delta_s)} \quad \text{とする。}$$

式(23)～(25)を用いて計算を行った結果を文献3)の結果とともに図示すると図4が得られる。

図4では、本法による解が、文献3)の結果よりすべてのアスペクト比について安全側の結果を与えている事が分る。なお、 $\alpha \leq 1.0$ では、縦補剛材の剛比は道示の γ_{req} 以上であり、 $\alpha \geq 1.0$ では道示の規定を満たしていない。

以上、表2 および図4より、本法は縦・横補剛板の耐荷力を簡易に比較的精度良く推定する手法として

妥当なものと考えられる。また、補剛材の縦横剛比が任意である場合に対しても、縦・横補剛板の耐荷力を推定することができる。

4. 縦・横補剛板の最適設計

従来より、道示の必要剛比を満たす様設計された縦・横補剛板の横補剛材はその剛比が大きいためにT形断面としなければならず、設計によっては非常に大きなものとなるきらいがあった。この問題点は部分パネルのアスペクト比の大きな設計を行うことによって解消されるが、結果として縦補剛材を大きな断面としなければならなくなるので、必ずしも経済的な設計にはならないと思われる。そこで、次のような条件の下に、縦・横補剛板の最適化を考える。

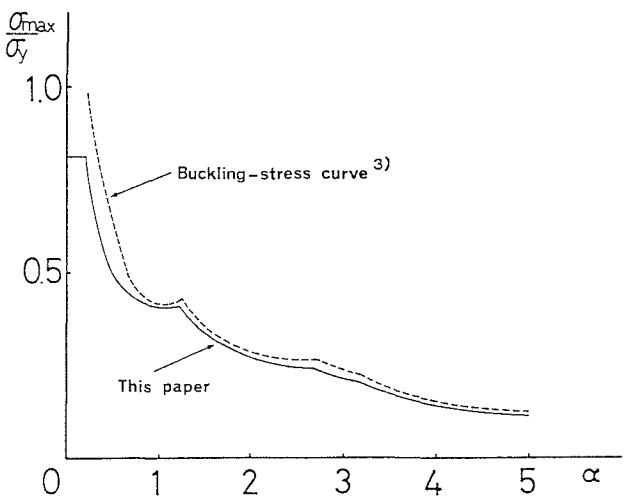


図4. 耐荷力曲線の比較

(1) 補剛材の必要剛比を満たす縦・横補剛板

道示の剛比規定にもとづいて設計された縦横補剛材を持つ補剛板の最適化問題は次のように定義される。¹²⁾

目的関数：単位アスペクト比当りの縦横補剛材重量 (M_1) → 最小

制約条件：縦横補剛材剛比は道示の規定を満足する。

設計変数： α_r

ただし、横補剛材重量の算出にあたっては連続補剛板への適用を考え、ダイヤフラムの配置も考慮して、横補剛材1本の重量を $(n_r + 1/2)$ 倍して求めている。また、縦補剛材は突出幅厚比制限の限界値で設計し、横補剛材は図5を参照して、 $I_A : I_B = 7 : 13$ の断面二次モーメント比になるように統一した。

この最適化問題を解いた結果を、図6、7に示す。図6、7は最適な部分パネルのアスペクト比 α_r および、単一パネルのアスペクト比 $(n_s + 1) \alpha_r$ と n_s および

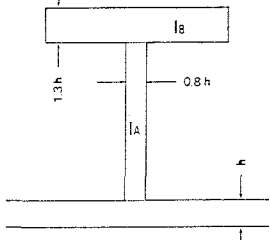


図5. 横補剛材の断面寸法

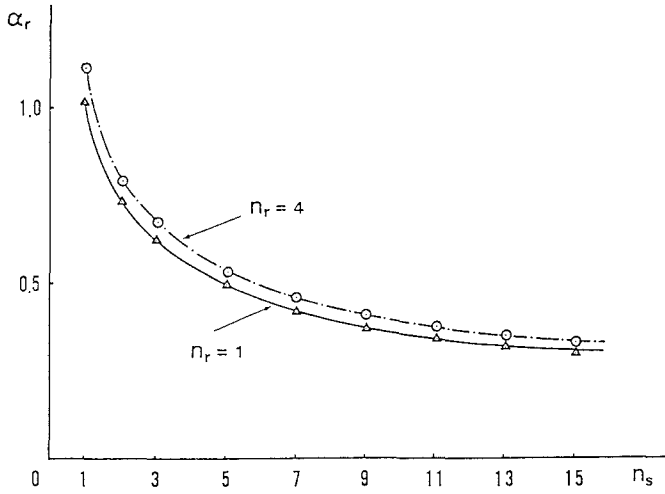


図6. 最適な α_r - n_s 関係

n_r の関係を示したものである。より厳密に述べるならば、最適な α_r もしくは $(n_s+1)\alpha_r$ (n_s+1) α_r は問題の設定の通り、 n_s だけでなく、RR、補剛材断面、鋼種等のパラメータの影響を受けるものと思われるが、最適値近傍の目的関数の変動量が僅少である事及び n_s 、 n_r に比べ他のパラメータの影響は比較的小さいので、ここでは α_r 、 $(n_s+1)\alpha_r$ に注目した。図6、7を参照すれば、吊橋主塔断面もしくは箱桁上フランジ等、アスペクト比がかなり大きくなる連続縦・横補剛板においては合理的な設計が可能になる。

すなわち、従来の様にダイヤフラム間隔から横補剛材間隔を決定するのではなく、最適設計された連続補剛板の横補剛材の一部をダイヤフラムに置き換えることにすれば、最適性はくずれないと考えられる。最適化の一例として、 $n_s=10$ 、 $n_r=1$ のケースを計算した表3を参照すれば、 $\alpha_r=0.35$ と $\alpha_r=0.54$ の設計例について後者は前者に比し単位アスペクト比当り11%の重量増となっている。

又、同一アスペクト比、同一幅厚比の主板に対しては、 $n_r=1$ のときのM1の最小値が $n_r=4$ のときのM1の最小値に比べて必ず下回るので、アスペクト比の大きい連続縦・横補剛板を設計する場合には、 $n_r=1$ の曲線に従って設計を行う方がより経済的となる。

なお、道示にある面積比の規定、 $\delta_s n_s \geq 0.1$ は考慮しないものとした。この面積比に関する規定は、一般に $n_s=1 \sim 3$ の時の設計で制約条件となるが、この規定を考慮するとM1が最小値を持たなくなるので、最適解は存在しなくなる。すなわち、道示に従う場合、縦・横補剛板における最適設計は縦補剛材本数の比較的多い場合においてのみ可能であるとの結論が得られた。

(2) 横補剛材の剛比を必要剛比以下として設計した場合の縦・横補剛板

前節では、横補剛材位置で必ず節となるような設計法による縦・横補剛板の最適化を試みたが、横補剛材剛度を減らし、縦補剛材の剛度を逆に増加させて補剛板全体として必要な耐荷力を確保するという試みが提案されている。²⁾この設計法では

横補剛材位置で必ずしも節とならないが、前章での考察に従い、弾性座屈係数 k_F を求めることにより耐荷力の推定が可能であり、最適化問題となる。縦補剛材剛比を道示の必要剛比 γ_{req} の2倍として横補剛材の剛比を低減し、補剛板全体として前節の設計法と等しい耐荷力が得られる様にした縦・横補剛板の最適化問題は次の様に定

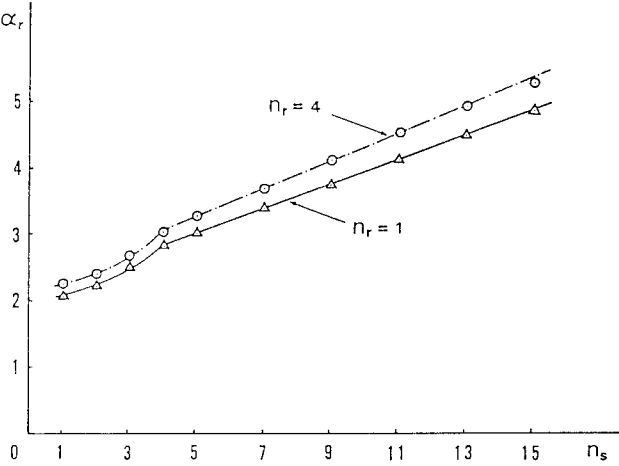


図7. 最適な $(n_s+1)\alpha_r$ - n_s 関係

表3. 部分パネルのアスペクト比と補剛材重量との関係

α_r	M1 (%)	M2
0.26	6.08 (109)	5.13
0.35	5.58 (100)	5.59
0.54	6.17 (111)	7.73

($\times 10^2$ kg)

M1 : 道示に従って設計した時の単位アスペクト比当りの補剛材重量
M2 : 本節の制約条件に従って設計した時の単位アスペクト比当りの補剛材重量

義される。

目的関数：単位アスペクト比当りの縦横補剛材重量 (M_2) → 最小

制約条件： $\gamma_s = 2 \gamma_{req}$ 、 $kF = 4 n^2$ とし、他は道示に従う。

設計係数： α_r

ただし、補剛材断面については前節にならった。試算する縦・横補剛板の諸元を、 $n_s=10$ 、 $n_r=1$ 、 $b=460\text{cm}$ 、 $h=1\text{cm}$ 、 $\sigma_y=2400\text{ kg/cm}^2$ (235.4MPa)、 $RR=0.74$ とすると、最適化問題の解は $\alpha_r=0.25$ 、 $(n_s+1)\alpha_r=2.71$ 、 $M_2=5.11\times 10^2\text{ kg}$ となる。

一方、前節にならって、縦横補剛材を道示に従って設計した場合の解は、 $\alpha_r=0.37$ 、 $(n_s+1)\alpha_r=4.10$ 、 $M_1=5.56\times 10^2\text{ kg}$ であり、縦・横補剛板の耐荷力は一定でありながら、設計法によっては補剛材の重量を軽減(単位アスペクト比当り8.1%)しうる事が示された。

しかし、同一アスペクト比、同一幅厚比の主板を耐荷力一定の条件の下に補剛するために必要な縦横補剛材重量については、表3を参照すると、道示に従わない場合 (M_2) が、道示に従った場合 (M_1) に比べて、すべてのアスペクト比において必ずしも補剛材重量を軽減できる訳ではないので、常に経済的な設計になるとは限らない。したがって、このような設計法を実行に移す時には注意が必要であると思われる。

5. まとめ

本報告で得られた成果を整理すると以下のようになる。

- 1) 縦・横補剛材を有する補剛板に対して、直交異方性板理論による座屈応力を基にその座屈モードを明らかにした。
- 2) その際、横補剛材剛度に注目し、横補剛材剛度と縦方向座屈半波数の関係を明らかにした。
- 3) 縦・横補剛板の終局状態を、全体および局部座屈の連成座屈としてとらえ、モデル化を通じて、補剛材の縦横剛比が任意である場合にも適用可能な補剛板の耐荷力推定法を示した。
- 4) 道示に従って設計された連続縦・横補剛板における補剛材重量を最小にする最適化問題を解き、最適な補剛材配置について検討した。その結果、縦・横補剛板の最適設計は縦補剛材本数が多い場合に可能となることが分った。
- 5) 横補剛材位置で節とならない設計を許すならば、現行道示に従う設計に比べて経済的な設計が可能となる場合があることを具体的に示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1980年2月。
- 2) 中井・北田・田井戸・福岡：縦・横補剛材および縦桁を有する圧縮板の一設計法，構造工学論文集 Vol.31A, pp. 103~114, 1985年3月。
- 3) 三上・堂垣・米沢：連続補剛板の非弾性圧縮座屈，土木学会論文報告集，第298号，pp. 17~30, 1980年6月。
- 4) 小松・牛尾・北田・奈良：縦横に補剛された圧縮板の極限強度に関する実験的研究，土木学会論文報

告集, 第288号, pp. 13~27, 1979年8月.

5) 小堀・吉田: 鋼構造設計理論, 森北出版, 1977年.

6) 三上・堂垣・米沢: 補剛圧縮板実験の調査と強度簡易算定法の評価, 土木学会論文報告集, 第334号, pp. 181~184, 1983年6月.

7) AISC: Specification for the Design, Fabrication and Erection of Steel for Bridges, 8th ed, 1980年.

8) 宇佐美・福本・青木: 溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第308号, pp. 47~58, 1981年4月.

9) 宇佐美・福本: 鋼圧縮部材の連成座屈強度実験と有効幅理論による解析, 土木学会論文報告集, 第326号, pp. 41~50, 1982年10月.

10) 三上: 圧縮補剛フランジの設計法についての概説, 土木学会論文報告集, 第297号, pp. 123~128, 1980年5月.

11) 長谷川・宇佐美: 鋼板要素の座屈後における有効幅理論と設計への適用, 土木学会論文報告集, 第315号, pp. 157~160, 1981年11月.

12) 杉本: 無補剛平板よりなる圧縮柱の設計について, 構造工学論文集, Vol.31A, pp. 93~102, 1985年3月.

(1985年10月18日受付)