

実験データより見た補剛板の圧縮耐荷力について

Ultimate compressive strength of stiffened plate from test results

吉 浪 康 行* 大 村 裕**

By Yasuyuki YOSHINAMI, Hiroshi OHMURA

Ultimate compressive strength of stiffened plate was investigated statistically from test results in Japan. From 44 test results having stiffeners of optimum rigidity, mean ultimate strength curve was obtained and proposed the mean minus standard deviation curve as the basic ultimate strength. By multiple regression analysis of 96 test results, influence of R_r and R_f on the ultimate strength was investigated and clarified that minimum rigidity of stiffener in linear buckling theory gave optimum in the case of ultimate strength.

1. まえがき

圧縮力を受ける補剛板の耐荷力に関しては、1970年代を中心に世界各国で集中的に研究がおこなわれており、またその成果をもとに関連示方書の改訂もおこなわれてきた。これらの動きの中で最も注目に値するのはイギリスのBS5400, Steel, concrete and composite bridge¹⁾であり、従来のBS 153に比べかなり斬新な設計思想が採用されている。しかしながら設計示方書としては複雑であり、また製作に関してもかなりきびしい条件を課している。他方西ドイツにおいても、1973年の安全率に関する暫定規定を含めてDIN4114の改訂作業が進められているようであり、その一部としてDAST-Richtline 012²⁾が発行されている。我国においても、建設省で実施された箱形短柱の実験結果をもとに、現行の道路橋示方書³⁾が制定されている。

補剛板は板(deck plate)と補剛材(stiffener)を組み合わせた力学的に極めて合理的な構造形式であるが、溶接による残留応力や初期たわみが不可避のものであり、これらの初期不整が圧縮耐荷力に重大な影響を及ぼしている。したがって補剛板の圧縮耐荷力に関しては、初期不整の評価も含めて実験的研究の占めるウェイトは大きく、橋梁の分野だけでも既に世界中で400体をこえる実験がおこなわれている。1982年までの実験的研究の概要については既に文献(4)で述べられているとおりであり、その後特に目立った動き^{5) 6)}は少ないようである。これらの実験のほとんどは実橋との直接的な対応を意図しておこなわれたものであり、断面諸量はもちろん制作方法についてもできる限り実橋に近いものを採用している。したがって、耐荷力に重要な影響を及ぼす初期不整に関してもある程度実橋に近いものが含まれているものと解釈され、この点に

* 復 建 調 査 設 計 課 (〒730 広島市東区光町2丁目)

** 工 博 広島大学工学部第四類 (〒724 東広島市西条町大字下見)

においても実験結果の持つ意義は非常に大きいものと思われる。

他方、理論的研究もさかんにおこなわれており、有限要素法の材料的・幾何学的非線形問題として解析する方法⁷⁾の他に、各種のモデル化のもとでの耐荷力の算出方法が多数提案されている。これらのモデル化解析は、一時期「研究者の数に相当する提案式がある」とまで言われたが、弾性又は弾塑性の座屈理論にもとづく方法・柱モデルに置換する方法及び直交異方性板の有限変位理論にもとづく方法の三グループに大別されるようである⁸⁾。しかしながら、補剛板の耐荷力に関しては、非線形挙動の解析・モデル化に加えて初期不整の定量的評価という問題点も含んでおり、これらの理論的研究に対してある種の統一的理解が出されるまでには至っていないものと思われる。

ところで、前述の実験的研究の延長として、実験結果の統計的処理を通して耐荷力性状を明らかにしようとする動きもある。福本らは鋼構造部材の耐荷力に関するデータバンクを作成し、これをもとに鋼柱及び鋼板の耐荷力を統計的に論じている^{9) 10)}。補剛板に関するこの種の研究としては、建設省¹¹⁾及び渡辺¹²⁾らの研究がある。建設省においては、1973年から3年間にわたりおこなった43体の実験結果に対して回帰分析をおこなっている。また渡辺らは、我国の各研究機関で実施された約120体の実験結果のうち、補剛材剛比が道路橋示方書の最小剛比の0.6~2.0倍のものを選び出し、最小二乗近似により基準耐荷力を求めている。しかしながら、これらの研究においては対象データが限定されており、また局部座屈と全体座屈を表すパラメーター間の相互関係は明らかにされていない。

このような中で、本報告は現在までに我国で実施された約200体の補剛板の実験結果を整理し、その統計的処理を通して耐荷力性状を明らかにしようとするものであり、最小剛比の補剛材を有する場合の基準耐荷力の他に座屈パラメーター間の相互関係についても重回帰分析による結果をもとに考察を加えるものである。

2. 補剛板の実験データ

橋梁部材を対象に我国で実施された補剛板の実験総数は約200体であり、これらのほとんどはヨーロッパを中心とした橋梁事故の後、即ち1970年代におこなわれたものである。これらを試験場所(研究者)・供試体形状・試験方法別に分類・整理すると表-1に示すごとくである。試験体の数としては建設省でおこなわれた短柱実験のものが57体(43体)と最も多く、ついで名古屋大学で実施された周辺単純支持補剛板パネルの27体である。また試験方法別にみると、箱形短柱実験の101体に対して補剛板パネル実験が88体であり、箱桁の圧縮フランジとしての実験は9体と非常に少ない。

Reference	Test method	Number of specimens	Stiffened plate panel				R, r ≐ R, r			
			Σ	n=1	n=2	n≥3	Σ	n=1	n=2	n≥3
16, 17, 18	column	43	31	2	27	2	19	1	18	
19, 20	column	14	6		1	5	4			4
21	panel	20	7		7		3		3	
22	panel	27	25			25	6			6
5, 23	column	16	7	3	2	2	7	3	2	2
24, 25, 26	panel	26	14		5	9	3			3
27	column	25	17	14	3		9	6	3	
28, 29, 30 31, 32	column, panel box girder	27	9	1	2	6	4	1	1	3
Σ		198	116	20	47 96	49	55	11	27 44	17

Table-1 Test specimens for stiffened plate in Japan

- これらの実験データを同一条件下のものとして整理するために、下記の条件に該当するものを削除する。
- (a)境界条件として周辺単純支持を満足しないもの —— 特に载荷辺が固定状態に近いと思われるもの。
 - (b)板と補剛材の降伏応力が大きく異なるもの —— ハイブリッド構造のもの又は同材質でもその降伏応力が20%以上異なるもの。
 - (c)補剛板の座屈パラメーター R の大きいもの —— 道路橋示方書でその使用が認められていない $R > 1.5$ のもの。
 - (d)横方向補剛材を有していてそれが実験結果に影響を与えていると思われるもの —— 横方向補剛材の剛比が道路橋示方書の必要剛比の2倍未満のものとした。

さらに縦方向補剛材が1本のものについては、多数の縦方向補剛材を有する場合とは異なった耐荷力性状を示すものと思われる^{13) 14)}、また後述の R_f を表現する際に使用される直交異方性板理論の適用性にも問題が残るため、本報告の解析対象から除外するものとする。

この結果得られる96体（表-1参照）の実験結果は、縦方向補剛材のみを有し周辺単純支持された補剛板（＝横方向補剛材により仕切られた補剛板の1パネル）の実験結果として評価される。

3. パラメーターの選定

補剛板の圧縮耐荷力に影響を及ぼす主要なパラメーターとしては一般に下記のものと考えられる。（図-1参照）

- | | | |
|-------------------|-------|--|
| (a) 補剛板の幅厚比 | ————— | b/t or $b/t \cdot \sqrt{\sigma_y/E}$ |
| (b) " 縦横比 | ————— | $\alpha = a/b$ |
| (c) 補剛材間板パネルの数 | ————— | n |
| (d) 補剛材の板に対する曲げ剛比 | ————— | $r = I_s / \frac{bt^3}{12(1-\nu^2)}$ |
| (e) " 断面積比 | ————— | $\delta = A_s / bt$ |

および

- | | | |
|------------------|-------|----------------|
| (f) 補剛板に含まれる初期不整 | ————— | 残留応力、初期たわみ、etc |
|------------------|-------|----------------|

ここに t, σ_y, E は補剛板の板厚、降伏応力、ヤング係数を示し、 I_s, A_s は補剛材の断面2次モーメント、断面積を示すものである。

統計学的にはこれらのパラメーターを説明変量とした多変量解析をおこなうべきであるが、補剛板の耐荷力はこれらの説明変量の相互関係に強く依存しているため、これを線形の多項式で表現することは適切でないと思われる。さらにこれらの説明変量には強い相関性を持っているものもあり、前述の(a)～(e)のパラメーターを各々独立の説明変量として取り扱う場合には

「重共線性」という統計処理上の問題点も存在する。

したがって本報告では、これらのパラメーター（説明変量）の組み合わせとして従来から用いられてきた線形座屈理論による無次元パラメーター R_r, R_f を説明変量として採用し、実験データの整理・解析をおこなうものとする。この座屈パラメーター R は式(2)に示すごとく上記の(a)～(f)のパラメーターのうち初期不整を除くすべてのパラメーターを内包するものであり、厳密には線形座屈に対して用いられるべきものであるが、数値計算によって耐荷力を十分表現し得るパラメーターであることも確認されている^{13) 15)}。

周知のごとく線形座屈理論によると、補剛板の座屈形状は補剛材間板パネルの局部座屈（ r モード）と補剛板全体の全体座屈（ f モード）とに分類され、その座屈耐荷力は R_r, R_f なるパラメーターを介して

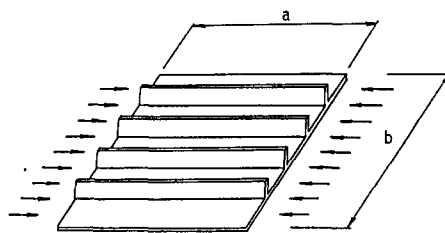


Fig - I Compressed stiffened plate panel

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1/R^2 \quad (1)$$

(ここにRは R_r 、 R_f のうち大きい方の値)

で表される。ここに

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \sigma_y / \sigma_{cr,r} = \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_r}} \quad (\text{通常 } k_r = 4n^2) \\ R_f &= \sigma_y / \sigma_{cr,f} = \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_f}} \quad k_f = \frac{(1+\alpha^2)^2 + nr}{\alpha^2(1+n\delta)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

であり、 $\sigma_{cr,r} \cdot k_r$ は補剛材間板パネルの座屈応力とその座屈係数を、また $\sigma_{cr,f} \cdot k_f$ は補剛板全体の座屈応力とその座屈係数を表すものである。

この座屈パラメーター Rを用いて、前述の96体の実験供試体の断面諸量に関する整理・分類をおこなうと図-2に示すごとくである。R=0.5~0.9の供試体が多いのは、旧示方書において $R \leq 0.7$ の補剛板の使用を義務づけておりこの時の耐荷力の評価を主目的に実験がおこなわれたためと思われる。なお R_r 、 R_f の平均値はそれぞれ $\bar{R}_r=0.69$ 、 $\bar{R}_f=0.71$ であり、これら2変数間の相関係数は $\rho=0.66$ である。

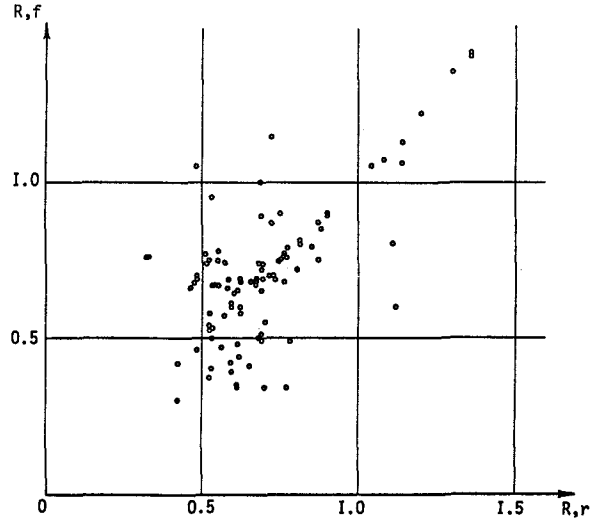


Fig - 2 Relations of R_r and R_f in test specimens

4. 必要剛比の補剛材を有する補剛板の耐荷力

線形座屈理論によれば、補剛板の最速断面は局部座屈と全体座屈とが同時におこるような断面と考えられ、これを前述の座屈パラメーターで表現すると $R_f=R_r$ なる補剛板に相当する。現行の道路橋示方書においても基本的にはこの考え方を採用しており、 $R_f=R_r$ なる補剛材の断面(板に対する補剛材の剛度比)を「必要剛比: r_0 。」と称し、この必要剛比以上の補剛材の使用が義務づけられている。前述の96体の実験供試体のうち、 $R_f=R_r$ に相当する補剛板は44体であり(表-1参照)、本章においてはこの44体の実験結果に対して解析・考察をおこなうものとする。なお、ここでは $R_f=R_r$ の判定基準として $|R_f - R_r| \leq 0.5$ を採用した。

(1) $R_f=R_r$ なる補剛板の耐荷力曲線

$R_f=R_r$ なる44体の補剛板の実験結果について、最小二乗法を適用して回帰分析をおこなうと、下記の平均値曲線及び標準偏差が得られる。(図-3参照)

$$\text{平均値曲線} \quad P_u/P_y = 0.10R_r^2 - 0.72R_r + 1.32 \quad (3)$$

$$\text{標準偏差} \quad S = 0.060$$

回帰曲線の決定に際しては種々の曲線を仮定して比較検討をおこなったが、指数関数では R_r の大きい範囲で実験データを十分にカバーできず、また三次関数では二次関数との比較においてほとんど有意性が認められなかった。図-3に示すごとく、平均値曲線(3)から標準偏差を差し引いた(M-S)曲線は実験結果

のほぼ下限値をおさえているようであり、この (M-S) 曲線を実験結果よりの耐荷力曲線として評価する。

(M-S) 曲線

$$P_u/P_y =$$

$$0.10R_r^2 - 0.72R_r + 1.26 \quad \text{--- (4)}$$

なお、式(3)により得られた耐荷力の平均値曲線は、対象データが多少異なるものの、文献(2)で示されている平均値式

$$\sigma_u/\sigma_y = -0.54R_r + 1.24$$

と非常によく一致している。

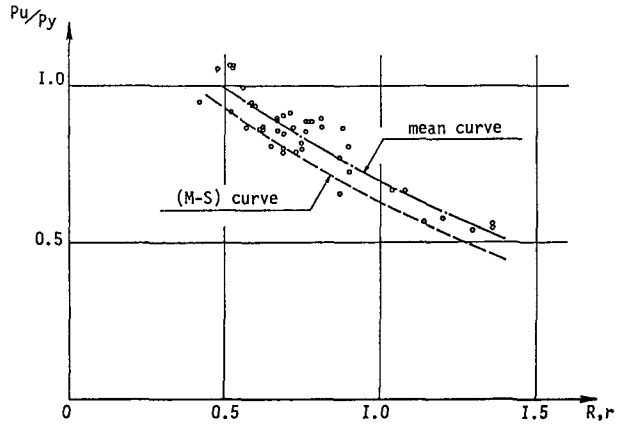


Fig - 3 Test results of stiffened compressive plate
(in the case of $R, r = R, f$)

(2) 無補剛板の実験結果との比較

圧縮力を受ける補剛板の耐荷力に関しては、補剛材間板パネルの局部座屈による耐荷力の減少が支配的要因であるという従来からの考え方の他に、局部座屈と全体座屈との連成効果としてとらえるべきであるという意見もある¹⁴⁾。図-4は無補剛板の実験結果よりの耐荷力の平均値曲線¹⁰⁾

$$P_u/P_y = 1.133/R - 0.384/R^2 + 0.0468/R^3 \quad \text{--- (5)}$$

(残留応力を有しない 172体の実験結果より)

$$P_u/P_y = 0.968/R - 0.286/R^2 + 0.00338/R^3 \quad \text{--- (6)}$$

(残留応力を有する 383体の実験結果より)

と、前述の $R_r \approx R_r$ なる補剛板の実験結果よりの耐荷力の平均値曲線 (式3) を比較したものである。補剛板の平均耐荷力 (式3) は残留応力を有する無補剛板の平均耐荷力 (式6) のほぼ95~97%であり、両者は R_r の広い範囲にわたり比較的良好一致している。

補剛板の補剛材間板パネルと残留応力を有する無補剛板とは基本的には同一のものと考えられ、また R_r の広い範囲にわたり両耐荷力がよく一致しているという図-4の結果を考え合わせると、必要剛比の補剛材を有する補剛板の場合その耐荷力は基本的には補剛材間板パネルの局部座屈によりほぼ決定されているものと解釈される。したがって実験結果のみから判断する限り、必要剛比の補剛材を有する補剛板においては文献(4)で述べられているような全体座屈との連成効果による耐荷力の低下は非常に少ないものと思われる。

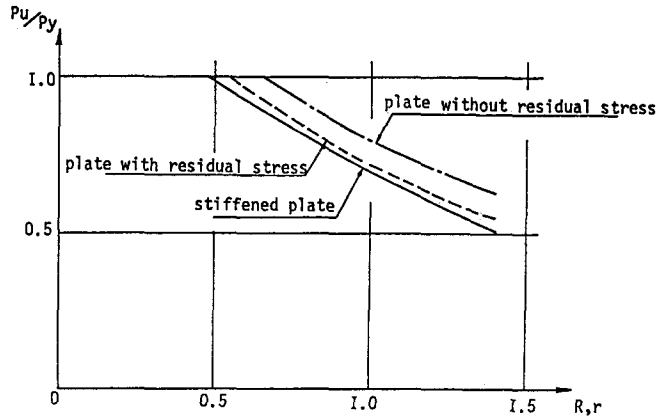


Fig - 4 Mean curve from test results

(3) 道路橋示方書の基準耐荷力曲線との比較

現行の道路橋示方書³⁾においては、建設省で実施された補剛箱形短柱の実験結果をもとに下記の基準耐荷力が定められている。

$$P_u/P_y = 1.0 \quad (R_r \leq 0.5, R_t \leq 0.5)$$

$$P_u/P_y = 1.5 - R_r \quad (0.5 \leq R_r \leq 1.0, R_t \leq R_r)$$

$$P_u/P_y = 0.5/R_r^2 \quad (1.0 < R_r, \quad \text{“} \quad \text{“})$$

この基準耐荷力曲線と前述の(M-S)曲線との比較を図-5に示す。道路橋示方書の基準耐荷力曲線は R_r の小さい領域($0.4 < R_r < 0.7$)で(M-S)曲線より危険側の評価を与えており、実験結果から判断する

限り $P_u/P_y = 1.0$ を確保する為

には少なくとも $R_r \leq 0.4$ とする

必要があるようである。なお、 R_r

の大きい領域で道路橋示方書の基

準耐荷力曲線が実験結果に対して

かなり安全側の値を定めているの

は、このような領域では面外変位

やそれにともなう剛度の低下が生

じやすいことを考慮している為で

ある³³⁾。図-5で一点鎖線で示

した曲線は、全体座屈と局部座屈

の連成効果の影響を考慮して提案

された耐荷力曲線¹⁴⁾であるが、

実験結果から得られた(M-S)

曲線に対してかなり安全側の評価

となっている。

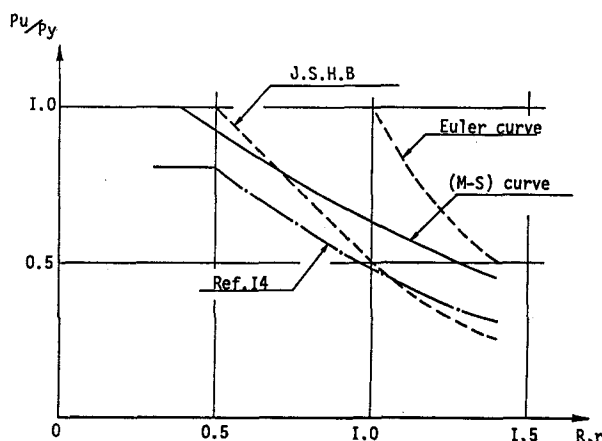


Fig - 5 Comparison of ultimate strength curve

5. 重回帰分析による補剛板の耐荷力

(1) R_r , R_t に関する重回帰式

2. で述べた96体の実験結果に対して、 R_r , R_t を説明変量とする重回帰分析をおこなう。重回帰式の中で最も簡単でかつ基本的なものは下記の線形重回帰式

$$P_u/P_y = \beta_0 + \beta_1 R_r + \beta_2 R_t$$

であるが、このような線形回帰式では補剛板の耐荷力を十分には表現し得ないと思われる。即ち上式では、例えば R_r を一定に保てば耐荷力(P_u/P_y)が R_t の一次関数として表現される如く、 R_r と R_t の大小関係により異なると思われる耐荷力性状が表現されておらず、従来から言われてきた補剛板の最小剛比(線形座屈理論では $R_r = R_t$)の概念を表現する余地がない。このような線形回帰式の欠点を補う観点から、説明変量 R_r , R_t の2次の多項式からなる回帰式を仮定し、非線形重回帰分析をおこなった。得られた結果は下記に示すとおりである。

$$P_u/P_y = -0.19R_r^2 - 0.12R_t^2 + 0.49R_r \cdot R_t - 0.48R_r - 0.36R_t + 1.36 \quad \text{--- (7)}$$

$$\text{標準偏差: } S = 0.069$$

この重回帰式の有意性³⁴⁾については、分散比が $F = 48.3$ で99%以上の有意水準を有しており、また重相関係数は $R = 0.84$ と実験結果をよく表現しているものと思われる。

参考までに、式(7)における $R_r=0.7$ の場合の耐力力曲線と $0.65 < R_r < 0.75$ の実験データとの比較を図-6に示す。

なお、式(7)において $R_r=R_f$ とすることにより得られる耐力力曲線は、前章において $R_r=R_f$ なる実験データより得られた耐力力曲線(式3)とよく一致している。

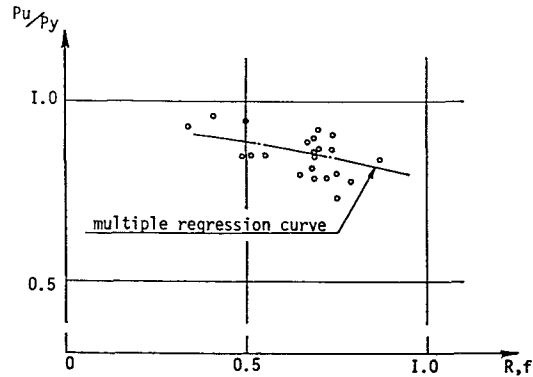


Fig - 6 Comparison of regression curve and test results ($R_r = 0.7$)

(2) 補剛板の耐力力に及ぼす R_r と R_f の影響度について

前節で求めた重回帰式をもとに、補剛板の耐力力に及ぼす R_r と R_f の影響について考察をおこなう。図-7は R_r と R_f をそれぞれパラメーターに、式(7)の耐力力曲線を示したものである。これからわかるとおり、 $R_r=0.5$ から $R_r=1.0$ への変動に対する耐力力の減少が20~30%であるのに対して、 $R_f=0.5$ から $R_f=1.0$ への変動に対する耐力力の減少は10~15%と少なく、補剛板の耐力力は R_r により強く影響されているようである。この影響度の大小は、下記に示す線形重回帰式を仮定した場合の標準重回帰分析の結果によりさらに具体的に説明される。

$$P_u/P_y =$$

$$-0.58R_r - 0.33R_f \quad \text{--- (8)}$$

即ち式(8)は、平均値=0、分散=1.0となるように標準化された P_u/P_y 、 R_r 、 R_f に対して重回帰分析をおこなったものであり、回帰係数の大小により直接的に R_r 、 R_f の影響度を評価することができる。

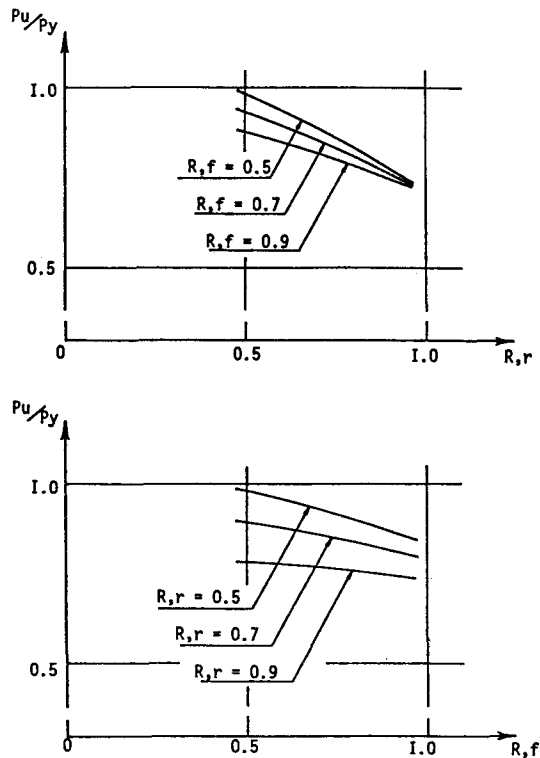


Fig - 7 Mean ultimate strength curve from multiple regression analysis

これらの結果より、補剛板の耐力力に関しては R_r が主要因子であり、 R_f はその50%程度の影響しか持っていないといえることができる。このように、補剛板の耐力力が全体座屈よりもむしろ補剛材間板パネルの局部座屈に大きく影響されるということは従来からも言われてきたことではあるが、国内の実験データを総合した解析結果より定量的にもこれを検証することができた。したがって、補剛板の耐力力を局部座屈と全体座屈の連成効果としてとらえる場合には、これらの点を十分考慮する必要があるものと思われる。

(3) 補剛材の最適剛比について

補剛板の耐荷力に及ぼす R_r と R_f の関係を実験結果よりさらに詳細に明らかにするため、式(7)において

$$R_f = \frac{1}{2} R_r, \frac{1}{\sqrt{2}} R_r, R_r, \sqrt{2} R_r$$

とした場合の耐荷力曲線を図-8に示す。

式(2)の関係より、これらの曲線は具体的には

$$k_f = 4 k_r, 2 k_r, k_r, \frac{1}{2} k_r$$

の場合を示すものであり、さらに近似的には

$$r = 4 r_0, 2 r_0, r_0, \frac{1}{2} r_0$$

の場合を示すものとも解釈される。ここに

r_0 は道路橋示方書において定められた補剛材の必要剛比である。

図-8からわかるとおり、 $R_f > R_r$ とすることによる耐荷力の減少は大きいものの、 $R_f < R_r$ とすることによる耐荷力の増加はさほど大きくない。即ち、必要剛比の補剛材を有する補剛板を基準に考える場合、その $\frac{1}{2}$ の剛比の補剛材を有する場合では耐荷力の減少は7~9%にも達するが、2倍の剛比の補剛材を有する場合では耐荷力の増加はわずか3~4%であり、必要剛比付近を境に耐荷力性状が異なるようである。これらの結果より、線形座屈理論による補剛材の必要剛比は、非線形挙動の耐荷力の問題に対しても依然重要な意味をもっているものと判断され、実験結果から見る限り道路橋示方書の必要剛比は最適剛比としてはば妥当な値を与えているようである。

なお、図-7における $R_f = 0.7 R_r$ ($r = 2 r_0$) の耐荷力曲線は、残留応力を有する無補剛板の耐荷力曲線(式(5)、図-4参照)とほぼ一致しており、これらの結果より補剛材間板パネルを周辺単純支持板と同一のものともみなす為には $r = 2 r_0$ 程度の剛比の補剛材が必要であるといえることができる。しかしながら、補剛材剛比を r_0 から $2 r_0$ へ増加させることによる耐荷力の増加は前述の如くわずか3~4%程度である。

5. 結論

我国の各研究機関で実施された約200体の補剛板の実験データを整理し、統計的处理を通してその耐荷力性状を明らかにした。得られた結論は以下に示す如くである。

1) 必要剛比の補剛材を有する補剛板の実験結果において、耐荷力の平均値曲線より標準偏差を差し引いて得られる(M-S)曲線は、実験結果の下限値をほぼおさえている。したがって、この(M-S)曲線は実験結果よりの基準耐荷力曲線として評価できる。

2) またこの場合の耐荷力の平均値曲線は、残留応力を有する無補剛板の場合の平均値曲線とよく一致しており、これをわずかに下回るものである。したがって必要剛比の補剛材を有する補剛板においては、補剛材間板パネルの局部座屈による耐荷力の減少が支配的要因と考えられ、全体座屈との連成効果による耐荷力の減少は非常に少ないものと思われる。

3) 現行道路橋示方書の基準耐荷力曲線は、本報告での提案曲線((M-S)曲線)に比べて R の小さい領域で危険サイドの評価を与えており、 $P_u/P_y = 1.0$ を確保する為には少なくとも $R < 0.4$ を確保する必要がある。

4) 補剛板の耐荷力を線形座屈理論のパラメーター R_r 、 R_f を用いて表現し、 R_r と R_f の影響力についてこれを明らかにした。従来から言われてきたとおり R_r が補剛板の耐荷力を決定する主要因子であり、

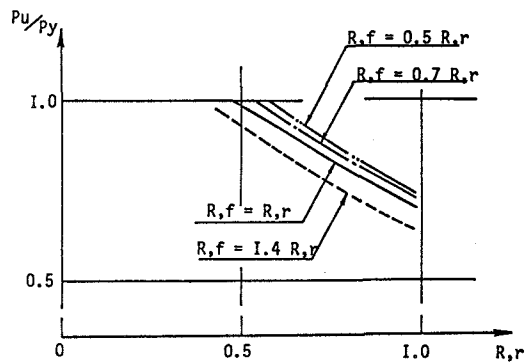


Fig - 8 Ultimate compressive strength of stiffened plate

R_r の影響力は R_r の50%程度である。

5) 補剛板の耐荷力は、補剛材を必要剛比以下とすることによって大きく減少するが、必要剛比以上としてもさほど大きく増加しない。したがって、線形座屈理論による補剛材の必要剛比は、非線形挙動の耐荷力の問題に対してもほぼ妥当な最適剛比の値を与えている。

6) 補剛材剛比を必要剛比の2倍程度とすることにより、補剛板の耐荷力曲線は残留応力を有する無補剛板の耐荷力曲線にほぼ一致する。しかしながら、この場合の耐荷力の増加はわずか3～4%である。

参 考 文 献

- 1) British Standard Institution : BS5400, Steel, concrete and composite bridges, part 3. Code of practice for design of steel bridges, 1982
- 2) Deutscher Ausschub fur Stahlbau : DAST Richtlinie 012, Beulsicherheitsnachweise fur Platten, 1978.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・Ⅱ鋼橋編，1980.
- 4) 三上市蔵，堂垣正博，米沢 博：補剛圧縮板実験の調査と強度簡易推定法の評価，土木学会論文報告集，No.334, 1983.
- 5) 例えば，宇佐美勉，福本嘸土，青木徹彦，松川昭夫：補剛箱形断面偏心圧縮柱の強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.350/I-2，1984.
- 6) 例えば，伊藤鉦一：DAST指針 012の圧縮補剛板の計算法を確認するための一実験の紹介，橋梁と基礎，1984年9月.
- 7) 小松定夫，北田俊行：補剛された圧縮板の弾塑性有限変位挙動の一解析手法，土木学会論文報告集，No.296, 1980.
- 8) 三上市蔵：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，No.297, 1980.
- 9) 福本嘸土，伊藤義人：座屈実験データベースによる鋼柱の基準強度に関する実証的研究，土木学会論文報告集，No.335, 1983.
- 10) Fukumoto, Y. and Y. Ito : Basic compressive strength of steel plates from test data, Pro. JSCE, No.344/I-1, 1984.
- 11) 建設省土木研究所：補剛板の限界状態，土木研究所資料，第1779号，1982.
- 12) Watanabe, E., T. Usami and A. Hasegawa : Strength and design of steel stiffened plates —A literature review of Japanese contributions, Pro. US-Japan seminar on inelastic instability of steel structures and structural elements, Tokyo, May, 1981.
- 13) 中井 博，北田俊行，田井戸米好，福岡 悟：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, 1985.
- 14) 桑野忠生，依田照彦：局部座屈と全体座屈の連成効果を考慮した補剛板の耐荷力に関する一考察，土木学会論文報告集，No.368/I-5，1986.
- 15) 矢尾哲也：座屈・最終強度の無次元パラメーターについて，第122回船体構造委員会西部地区部会，1982.
- 16) 藤原 稔，原 道彦，雨宮栄一郎：補剛された板の圧縮耐荷力に関する実験的研究，土木学会第30回年次学術講演会，1975.
- 17) 金子忠男，井上敬一，雨宮栄一郎：補剛された板の圧縮耐荷力に関する実験的研究（第2報），土木学会第31回年次学術講演会，1976.
- 18) 金子忠男，金井道夫，雨宮栄一郎：補剛された板の圧縮耐荷力に関する実験的研究（第3報），土木学会第32回年次学術講演会，1977.
- 19) 金井道夫，佐伯彰一：補剛された板の限界状態—実物大供試体による実験的研究—，土木学会第34回年

次学術講演会, 1979.

- 20) 金井道夫: 補剛板の限界状態—大型供試体による確認実験—, 土木学会第35回年次学術講演会, 1980.
- 21) 阿部英彦, 阪本謙二, 寺田博昌: 補剛材付き板の座屈強度, 構造物設計資料, No.48, 1976.
- 22) Fukumoto, Y., T. Usami and Y. Okamoto: Ultimate compressive strength of stiffened plate, ASCE specialty conference on metal bridges, 1974, 11.
- 23) 宇佐美勉, 福本嘯土: 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, No.326, 1982.
- 24) 小松定夫, 吉川 紀, 牛尾正之: 80キロ鋼の補剛板の極限強度に関する実験, 土木学会論文報告集, No. 218, 1973.
- 25) 小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行: 補剛材を有する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, No.255, 1976.
- 26) 小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行, 奈良 敬: 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, No.288, 1979.
- 27) 長谷川彰夫, 長浜正孝, 西野文雄: 圧縮力を受ける補剛された板の座屈強度, 土木学会論文報告集, No. 236, 1975.
- 28) 伊藤文人, 田島二郎: 補剛材をもった高張力鋼板による溶接角型短柱の圧縮試験, 鉄道技術研究報告, No.313, 1962.
- 29) Yamada, Y., E. Watanabe and R. Ito: Compressive strength of plates with closed-sectional ribs, Pro. JSCE, No. 278, 1978.
- 30) Yamada, Y. and E. Watanabe: On the behaviour and ultimate strength of longitudinally stiffened flanges of steel box girders, Pro. JSCE, No. 252, 1976.
- 31) 前田幸雄, 日笠隆司: 補剛板の圧縮耐荷力について, 土木学会第32回年次学術講演会, 1977.
- 32) 木村 裕, 吉浪康行: 補剛圧縮板の耐荷力について, 土木学会第32回年次学術講演会, 1977.
- 33) 金井道夫, 大塚一喜: 補剛板の設計法, 土木技術資料, Vol.19, 1977.
- 34) 例えば, 川口至商: 数字ライブラリー32 多変量解析入門 I, 森北出版

(1986年10月17日 受付)