

薄肉鋼桁の連成強度に関する一簡易解析法

琉球大学 学生員○藤田 亮

琉球大学 正 員 有住康則

琉球大学 正 員 矢吹哲哉

1. まえがき 鋼板要素の組み合わせによって作られる鋼桁の耐荷力に及ぼす影響要因は初期不整、残留ひずみ、断面構成鋼板要素の幅厚比および桁全体の細長比等であるが、特に局部座屈の影響を厳密に評価することは非常に手数がかかる。局部座屈の影響を考慮する手法として、これまでに様々な近似解法が提案されてきた¹⁾。これらの近似解法の中で近年特に注目されているものの一つに、縁応力を受ける断面構成鋼板要素の平均応力-平均ひずみに関する弾塑性有限変位解析結果に基づき局部座屈挙動を取り込んだ構成式を導出し、これを適用して、耐荷力解析を行う手法がある²⁾。しかし、既発表のものは、応力勾配の評価が明確でなく、実験による裏付けも十分になされていない。そこで、本研究においては、初期たわみと残留応力を有する鋼板要素に面内圧縮力と曲げが作用した場合の弾塑性有限変位解析の結果に基づき、断面構成鋼板要素の局部座屈を考慮した構成式(修正応力-ひずみ曲線)を導出し、これを用いて桁の耐荷力解析を行い、模型実験の結果との比較を行った。

2. 解析法及び解析モデル 本研究では、材料非線形挙動を引張領域においては塑性化で、圧縮領域においては構成鋼板の局部座屈で評価し、さらに、そり変形を考慮して有限変位解析を行った。支配方程式はUpdated Lagrangian 法による増分理論に基づいて定式化した。材料は、Von Mises の降伏条件式および Plandt-Reuss の塑性流れ理論に従うものとした。せん断ひずみは、St. Venant のねじりによるもののみを考え、曲げによるせん断ひずみは無視した。数値解析においては、荷重増分法を併用した Newton-Raphson 法による逐次収れん計算を行った。解析では、桁を材軸方向に24要素に分割した。各要素について更に材軸方向に4分割し、断面を36分割して、数値積分を行うことによって各要素の接線剛性マトリックスを数値的に導出した。

3. 局部座屈の影響を考慮した構成式 種々の縁応力を受けるSS-400材断面構成鋼板の終局状態に至るまでの応力-ひずみ関係を検討した結果の一例を図-1に示す。これらの解析結果に基づいて、局部座屈の影響を考慮した構成式を図-2に示すように、座屈発生前は線形とし、局部座屈発生後は剛性を低減させることにより後座屈強度を評価し、最大圧縮強度に達した後は負の勾配によって応力を低減させて定義した。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \varepsilon \leq -\varepsilon_k & ; E_T = E \\ -\varepsilon_k \leq \varepsilon \leq -2\varepsilon_Y & ; E_T = \alpha_h E \quad \alpha_h = \frac{\sigma_Y}{2\sigma_Y - \sigma_{\max} + \sigma_{rc}} \\ -2\varepsilon_Y \leq \varepsilon & ; E_T = \alpha_s E \quad \alpha_s = -0.04 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_Y} &= \left(\frac{R_{cr,c}}{R_{eq}} \right)^{0.6} & R_{cr,c} &= 0.401 - 1.30 \frac{a}{r} \\ R_{eq} &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \left(\frac{b}{t_{eq}} \right)} & t_{eq} &= f_o \cdot t \\ f_o &= 1 + 0.406\phi + 0.703\phi^2 & \phi &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \end{aligned} \right\} (2.a)$$

ただし $0.2 \leq R \leq 0.6$ で $\phi = 0$ の場合は、

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_Y} = 2.5(\bar{\sigma}_{0.6} - 1.0)R - 0.5\bar{\sigma}_{0.6} + 1.5, \quad \bar{\sigma}_{0.6} = \left(\frac{R_{cr,c}}{0.6} \right)^{0.6} \quad (2.b)$$

式(2)は種々の縁応力を受ける断面構成鋼板要素の実用強度算定式である³⁾。曲板要素における曲率の影響は限界幅厚比パラメーター $R_{cr,c}$ で考慮され、応力勾配 ϕ の影響は幅厚比補正係数 f_o で考慮されている。図-1には式(1)および式(2)で定義される修正応力-ひずみ関係と断面構成鋼板要素の弾塑性有限変位解析結果の比較も示されている。

4. 実験の概要 本研究において提案する解析法の妥当性を確認するために、高い桁高を有する箱桁の模型実験を行った。実験に用いた桁のうち、Model M-3は中間ダイヤフラムを等間隔に3個、

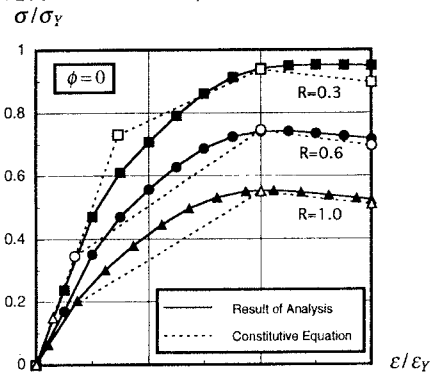


図-1 局部座屈を考慮した構成式と解析結果

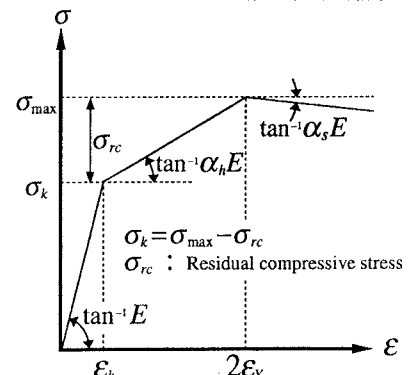


図-2 修正応力-ひずみ曲線

Model M-5は5個それぞれ設置した。また、この実験桁の端部については、支持部破壊が生じないように端ダイヤフラムを取りつけた。桁の全体図を図-3に示す。ウェブを構成する板の幅厚比 $b/t=133$ は道路橋示方書（鋼橋編）によって規定されている幅厚比制限の上限に近い値である。なお、ウェブには板挙動を明らかにするためにステイフナーは取り付けられていない。実験に用いた桁の断面および材料特性を表-1に示す。なお、初期不整については面内および面外の各々について測定を行った。一方、解析では実験桁で測定された残留応力を参考にして、自己釣合型として残留応力分布をモデル化した。

表-1 実験桁の諸元

	Width (cm)		Thickness (cm)		Yield stress (kgf/cm ²)		Residual stress (kgf/cm ²)
	flange	web	flange	web	flange	web	flange & web
M-3	20.0	78.18	0.91	0.61	355.5	338.9	2400
M-5	20.0	78.18	0.90	0.61	293.1	341.7	2000

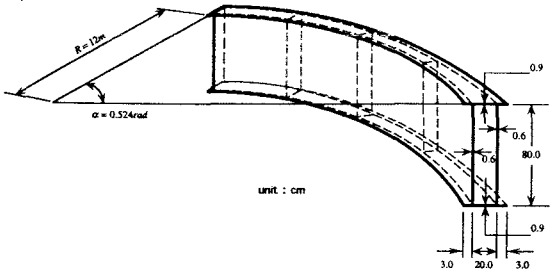


図-3 実験桁の諸元

5. 実験結果と解析結果の比較 載荷実験で得られた Model M-3, M-5の荷重-変位関係を図-4, 5に示す。これらの図について、縦座標は降伏モーメントを与える荷重で無次元化し、横座標は径間中央の鉛直方向変位を曲線桁の桁長で無次元化して示してある。Model M-3とM-5の降伏モーメントを与える荷重が異なっているが、これは表-1に示したように、フランジ板の降伏応力が異なっていることに起因する。図の変位量は2枚のウェブ直下で測定された変位の平均値である。図中には、本提案解析法による結果(PROPOSED)の外、比較のため材料非線形挙動として塑性化の影響のみを考慮した解析結果(REFERED)も示した。これらの図から明かなように、実験値では低い荷重段階より非線形挙動が表われている。このような低荷重段階から曲線桁に非線形挙動が表われる理由は、断面の一部に存在する圧縮領域が初期不整を有する柱と同様のP-Δ挙動を示すためであろう。

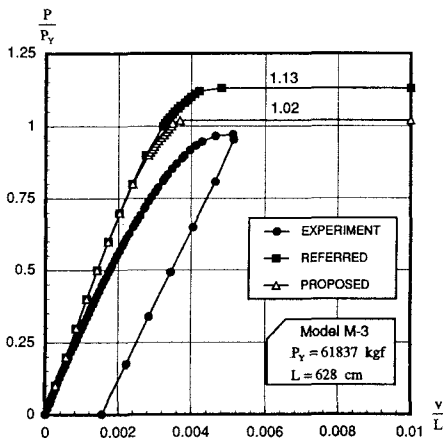


図-4 荷重-変位曲線 (Model M-3)

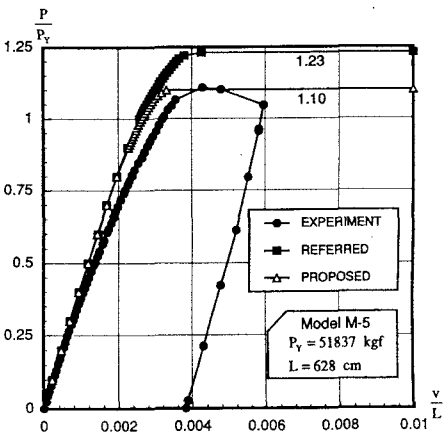


図-5 荷重-変位曲線 (Model M-5)

本提案解析結果では、Model M-3の耐荷力は $1.02P_y$ 、Model M-5のそれは $1.10P_y$ と評価している。これらと実験結果との偏差はModel M-3については5.0%、Model M-5については0.7%である。

6. 結論 本論文で提案する解析手法を用いて行った耐荷力解析結果と実験により得られた値の間には良好な一致が見られたと言えよう。従ってここで提案する解析手法は、構成鋼板の局部座屈の影響を考慮した桁の耐荷力の算定および桁の変形挙動評価に対しても十分な精度を有していることが確認されたものと思われる。

参考文献

- 1) 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, No.308, 1981.
- 2) Nandivaram E. Shanmugam, Sing-Ping Chiew and Seng-Lip Lee, F: Strength of Thin-Walled Square Steel Box Columns. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.133, No.4, April, 1987.
- 3) Yabuki T., Arizumi Y., and Yasiro S.: Ultimate Strength and its practical evaluation of cylindrical steel shell panels under various compressions, Proc. JSCE, Structural Eng., No.489, 1994.