

琉球大学 正 員 有住 康則
琉球大学 正 員 矢吹 哲哉
琉球大学 学生員 藤田 亮

1. まえがき 薄肉鋼桁部材の強度は、初期不整、部材を構成する鋼板要素の幅厚比及び桁の細長比パラメーターの大きさによって主に定まり、崩壊様式には断面の塑性化、構成鋼板要素の局部座屈、桁の全体座屈（横倒れ座屈）及びそれらの連成座屈モードがある。解析においてそれらの終局挙動を厳密に評価することは非常に手数がかかる。そこで、鋼構造部材の終局挙動を構成鋼板の局部座屈の影響を考慮して求める方策として、種々の近似解法が提案されている¹⁾。これらの近似解法の中で最近注目されている高精度解法として、純圧縮力が作用する構成鋼板要素の平均応力-平均ひずみ曲線を弾塑性有限変位解析であらかじめ求め、それを構成鋼板要素の応力-ひずみ曲線と見なし、これを用いて極限強度解析を行うことにより、構成鋼板の局部座屈の影響を評価する方法がある。しかし、従来の近似解法では、応力勾配を有する構成鋼板（腹板等）の取扱いが明確でなく、また、曲率を有する構成鋼板の構成式が与えられていないなど十分に検討されていないのが現状である。そこで本研究では、初期たわみ及び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結果に基づいて、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、これを用いて鋼桁部材の極限強度解析を行い、一例として鋼曲線箱桁の静的耐力実験結果との比較検討を行った。

2. 解析法 本研究では、鋼桁部材を梁要素でモデル化し、材料非線形挙動（引張領域）、構成鋼板の局部座屈挙動（圧縮領域）及び幾何学的非線形挙動を考慮し、更にずり変形の影響²⁾も考慮して弾塑性有限変位解析を行った。解析では、更新ラグランジュ法による増分理論に基づいて定式化を行い、材料は等方硬化弾塑性体とし、Von Misesの降伏条件及びPrandtl-Reussの塑性流れ理論に従うものとした。なお、数値解析では、荷重増分法を用い、Newton-Raphson法による逐次収斂計算を行い、解が十分に収束していることを確認した。なお、解析では比較のため構成鋼板要素の局部座屈の影響を考慮した解析法の他に、構成則として材料試験で得られた応力-ひずみ関係のみを用いる解析法についても計算を行った。

3. 局部座屈の影響を考慮した構成鋼板の構成式 本研究では、局部座屈の影響を考慮したSS400材構成鋼板の修正応力-ひずみ曲線を、種々の縁応力を受ける構成鋼板の弾塑性有限変位解析結果³⁾に基づいて、図-1に示すように、局部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完全無剛性型として定義した。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} 0 &\geq \varepsilon > -\varepsilon_k & ; E_T &= E, \\ -\varepsilon_k &> \varepsilon \geq -2\varepsilon_Y & ; E_T &= \alpha_h E, \alpha_h = \sigma_Y / (2\sigma_Y - \sigma_{\max} + \sigma_{rc}), \\ -2\varepsilon_Y &> \varepsilon & ; E_T &= \alpha_s E, \alpha_s = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} / \sigma_Y &= (R_{cr,c} / R_{eq})^{0.6}, R_{cr,c} = 0.401 - 1.3(a/r) \\ R_{eq} &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \frac{b}{t_{eq}}, t_{eq} = f_0 t \\ f_0 &= 1 + 0.406\phi + 0.703\phi^2, \phi = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

なお、純圧縮が作用する場合で、 $0.2 \leq R < 0.6$ ならば；

$$\sigma_{\max} / \sigma_Y = 2.5(\bar{\sigma}_{0.6} - 1)R_{eq} - 0.5\bar{\sigma}_{0.6} + 1.5; \bar{\sigma}_{0.6} = (R_{cr,c} / 0.6)^{0.6} \dots\dots\dots (3)$$

なお、式(2)及び式(3)は種々の縁応力を受ける構成鋼板要素の実用強度算定式であり、曲板要素において曲率の影響は限界幅厚比パラメーター $R_{cr,c}$ で、応力勾配 ϕ の影響は幅厚比補正係数 f_0 で考慮されて

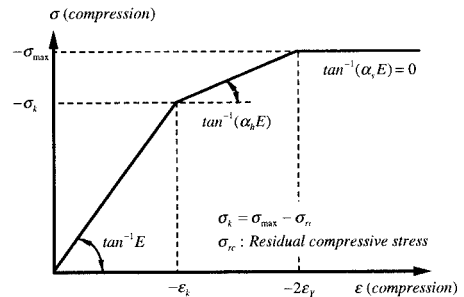


図-1 修正応力-ひずみ曲線

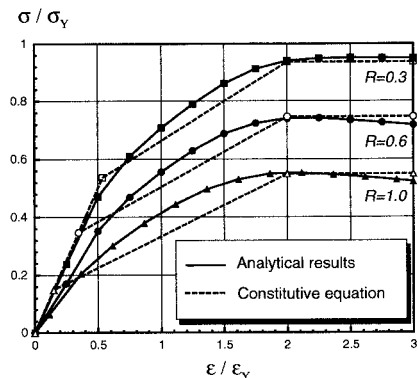


図-2 構成式と解析結果との比較

表-1 断面諸量

Radius	Central Angle	Area of Cross Section	Moment of Inertia	St. Venant's Torsional Constant	Distortional Warping Constant
$R \text{ (m)}$	$\alpha \text{ (deg.)}$	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$I \text{ (cm}^4\text{)}$	$J \text{ (cm}^4\text{)}$	$I_{dw} \text{ (cm}^6\text{)}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
12	30	0.141×10^3	0.121×10^6	0.325×10^5	0.907×10^7

表-2 材料試験結果

Plate Components	Thickness $t \text{ (mm)}$		Yield Stress $F_y \text{ (MPa)}$		Tensile Strength $F_u \text{ (MPa)}$	
	M-3 (2)	M-5 (3)	M-3 (4)	M-5 (5)	M-3 (6)	M-5 (7)
Flange	9.1	9.0	349	290	460	422
Web & Diaphragm	6.1	6.1	332	335	467	448

いる³⁾。図-2に式(1)、式(2)及び式(3)で定義した修正応力-ひずみ曲線と構成鋼曲板要素 ($a/r=0.025$) の弾塑性有限変位解析結果との比較を示す。図から明らかなように、本構成則は構成鋼板要素の局部座屈の影響を良く表現している。

4.実験概要 本研究で提案した解析法の妥当性を確認するために、高い桁高を有する鋼曲線箱桁2体(MODEL M-3, M-5)について静的耐荷力実験を行い、解析結果との比較を行った。実験に用いた供試体は、曲率半径12m、中心角30°であり、供試体の断面形状及び諸量を図-3及び表-1に示す。なお、MODEL M-3桁は中間ダイアフラムを3枚、M-5桁は5枚それぞれ等間隔に配置した。荷重は一点集中荷重としてスパン中央に載荷した。表-2に材料試験の結果（平均値）を示す。

5.解析結果 荷重-変位曲線について、解析で得られた結果と実験結果との比較をMODEL M-3桁について図-4に、MODEL M-5桁について図-5にそれぞれ示す。なお、図中には本提案解析法による結果(Proposed)の他に、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(Referred)も示した。これらの図において、縦軸は作用荷重を降伏荷重 P_y で無次元化して示しており、横軸はたわみをスパン長 L で無次元化して示してある。なお、降伏荷重がMODEL M-3桁とM-5桁で異なっているが、これは表-2に示したようにフランジを構成している鋼板の降伏応力度がMODEL M-3桁とM-5桁で異なっていることに起因している。実験で得られた最大荷重は、MODEL M-3桁が $P_{max}=0.97P_y$ 、M-5桁が $P_{max}=1.11P_y$ であり、中間ダイアフラムの配置が少ない場合には断面変形の影響で耐荷力が低下している。また、実験結果では、初期荷重段階から非線形挙動を示しているが、これはウェブの面外変形による影響と考えられる。

本提案解析結果では、MODEL M-3桁の終局荷重は $P_{max}=1.02P_y$ 、MODEL M-5桁が $P_{max}=1.10P_y$ と評価しており、終局強度について本提案解析法による結果と実験結果を比較すると、その差はMODEL M-3桁で5%、MODEL M-5桁で1%である。従って、本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及び桁の変形挙動評価に対して十分な精度を有していると思われる。

6.結論 本研究では、構成鋼板要素の局部座屈の影響を考慮した構成式を導出し、それを用いて鋼桁の耐荷力解析を行った。ここで提案した構成式を用いることによって、部材を構成している鋼板要素の局部座屈と全体座屈が連成する挙動も部材（梁要素）の耐荷力解析のみで評価することが可能である。

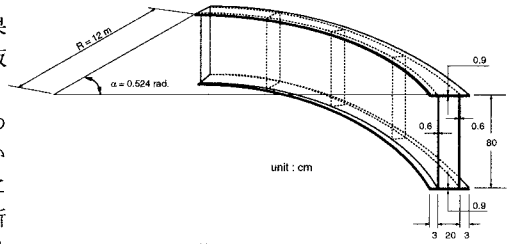


図-3 供試体の断面形状及び諸元

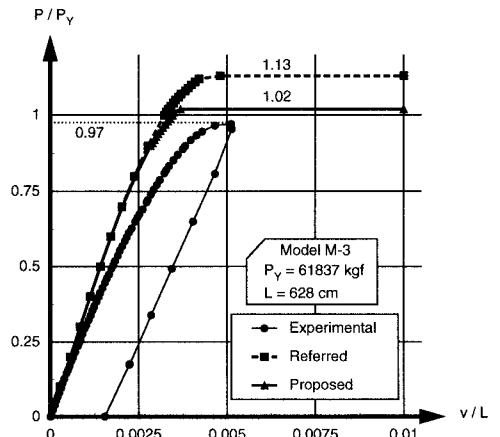


図-4 荷重-変位曲線(MODEL M-3)

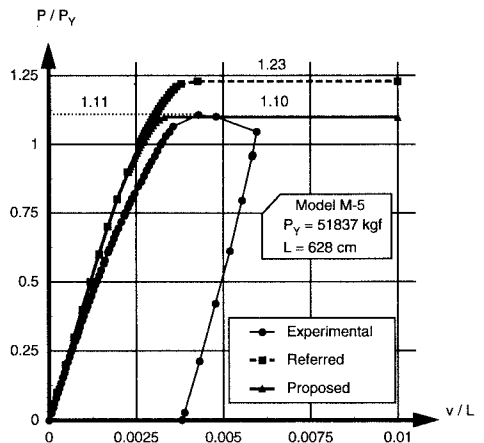


図-5 荷重-変位曲線(MODEL M-5)

参考文献 1) 宇佐美, 福本: 鋼圧縮部材の連成座屈強度試験, 土木学会論文報告集, No.326, 1982. 2) 有住, 矢吹: 曲線箱桁のずり挙動と強度に関する一考察, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, I-293, 1990. 3) Yabuki, T., Arizumi, Y. and Yashiro, S.: Ultimate strength and its practical evaluation of cylindrical steel shell panels under various compressions, Proc. JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., No.489, 1994.