

北海道大学工学部 正会員 渡辺 昇
同 上 正会員 林川 俊郎
日本鋼管(株) 正会員 岡田 泰三

1. まえがき

従来おこなわれてきた曲線橋の弾塑性解析では、断面の降伏は曲げとねじりのみを考慮し、曲げねじりの影響は小さいものとして無視したものが多い。しかし、I 桁断面のような薄肉開き断面を有する曲線橋では曲げねじりの影響は大きく、降伏条件式中にその影響を考慮しなくてはならない。そこで、本報告では、変位法(薄肉曲線桁の剛性マトリックス法¹⁾)と塑性ヒンジ理論²⁾を併用して、曲げねじりを考慮した曲線格子桁橋の弾塑性解析を以下に示す4つの降伏条件式について行ない、実験結果と比較を行なった。なお、本報告で用いた解析法は、漸増節点集中荷重を受ける曲線格子桁の終局荷重が自動的に算定され、塑性崩壊機構が形成されるまでの全過程を追跡できるものである。

2. 降伏条件式

以下に示す4つの降伏条件式について検討する。

$$\text{Mode 1 : } m^2 + t^2 = 1$$

$$\text{Mode 2 : } \begin{cases} m_b^2 + |w| = 1 \\ m_w^2 + |w| = 1 \end{cases}$$

$$\text{Mode 3 : } m^2 + t^2 + |w| = 1$$

$$\text{Mode 4 : } m^2 + t^2 + w^2 = 1$$

ここで、 $m=M/M_p$, $t=Ts/T_{sp}$, $w=M_w/M_{wp}$, M は曲げモーメント, T_s はSt.Venantの純ねじりモーメント, M_w は曲げねじりモーメント, である。添字 p は全断面塑性状態における断面力を意味している。また、 $m_b=(M-M_{p2})/M_{p1}$, $m_w=M/M_{p1}$, M_{p1} , M_{p2} はそれぞれ薄肉I形断面の上下フランジ部とウェブ部の全塑性曲げモーメントである。(図-1参照) Mode 1は断面形状に関係なく、曲げとねじりを受けた場合の降伏相関曲線の下界値を与えることから、曲線桁の弾塑性解析には数多く用いられている。Mode 2は薄肉I形断面における曲げ応力度 σ_y とそり応力度 σ_w とが複合した場合について、Kollbrunner³⁾が提案した降伏条件式の一つである。Mode 3,4はセン断ひずみエネルギー説の合成応力度の考え方に従い提案する近似式である。

3. 数値計算結果および実験結果

図-2に示すような3本主桁、3本横桁で構成された曲線格子桁を表-1、表-2で示す諸元で3種類製作し、降伏条件式の相違による数値計算結果と実験結果の比較を行なった。なお、本報告ではType Aのみを掲載し、Type B, Cについては発表時に示す。

図-3はType Aの曲線格子桁に集中荷重 P が b 点に作用した場合の c 点の鉛直たわみ δ と荷重 P との関係を示したものである。図中の●印の数字は塑性ヒンジの発生順序を表わし、○印は室内模型実験による $P-\delta$ の測定値である。図-4はType Aの曲線格子桁の塑性崩壊機構と各降伏条件式の相関曲線および相関曲面における塑性ヒンジの発達状況を示している。Mode 1の降伏条件式に

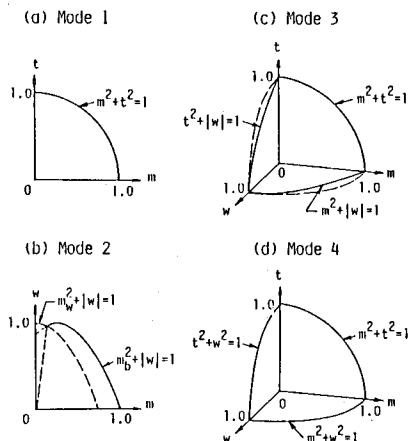


図-1 降伏条件式の相関図

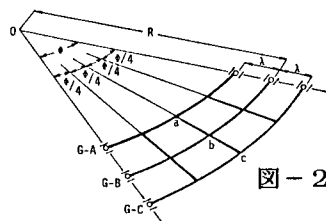


図-2

表-1 形状寸法

Geometry of specimen	Type A	Type B	Type C
Radius of curvature : R	3.3 m	10.0 m	18.5 m
Spacing of main girders: λ	0.3 m	0.3 m	0.3 m
Central angle : ϕ	40.0°	13.0°	7.0°

表-2 断面諸元

Input data	Curved main girder	Transverse beam
Bending stiffness : EJ_y	$3.7536 \times 10^{-1} \text{ tm}^2$	$3.7536 \times 10^{-1} \text{ tm}^2$
Torsional stiffness: GJ_t	$1.1756 \times 10^{-1} \text{ tm}^2$	$1.1756 \times 10^{-1} \text{ tm}^2$
Warping stiffness : EJ_w	$6.3856 \times 10^{-3} \text{ tm}^4$	$6.3856 \times 10^{-3} \text{ tm}^4$
Fully plastic bending moment : M_{yp}	$1.5969 \times 10^0 \text{ tm}$	$1.5969 \times 10^0 \text{ tm}$
Fully plastic torsional moment : T_{sp}	$7.3448 \times 10^{-2} \text{ tm}$	$7.3448 \times 10^{-2} \text{ tm}$
Fully plastic warping moment : M_{wp}	$1.4796 \times 10^{-2} \text{ tm}^2$	$1.4796 \times 10^{-2} \text{ tm}^2$

より解析した崩壊荷重は他の3種類の降伏条件式と比較して一般的に大きい値を示している。これは、曲線格子桁の主桁および横桁に大きな曲げねじりモーメントが生じているにもかかわらず、降伏条件式にはこの影響を無視しているためである。従って、塑性崩壊機構も他の結果と異なった性状を示す。図-4より、Mode 1の降伏条件式による塑性ヒンジ 1,2は曲げモーメント M のみで、塑性ヒンジ 3は St.Venantの純ねじりモーメント T_s のみで全断面塑性状態に達していることがわかる。

Mode 3 の降伏条件式により求められた崩壊荷重は最も低い値となっており、Mode 2の降伏条件式にのる $P-\delta$ 曲線と非常によく似た計算結果を得ている。これは、曲げモーメント M による垂直応力度 σ_y および曲げねじりモーメント M_w による垂直応力度 σ_w にくらべて St.Venant の純ねじりモーメント T_s によるせん断応力度 τ_s が非常に小さいためであると考えられる。従って、Mode 2において $t=0$ とすれば Mode 2と Mode 3の降伏条件式の類似性が確かめられる。Mode 4の降伏条件式による $P-\delta$ 曲線は前述の場合と比較すると中間的な位置を占めている。Mode 3よりも Mode 4による崩壊荷重が大きな値をとるのは、図-1の相関曲面の差に起因する。すなわち、部材の弾性範囲を意味する相関曲面内部の空間的領域が Mode 3よりも Mode 4の方が大きいためである。

曲げねじりの影響を含んだ降伏条件式 Mode 2,3,4 による塑性崩壊機構について言及するならば、図-4において、主桁に生じる塑性ヒンジ 1,2は曲げモーメント M と曲げねじりモーメント M_w が達成した状態で塑性化し、横桁に生じる塑性ヒンジ 3,4はほとんど曲げねじりモーメント M_w のみで塑性化している。しかし、いずれの場合においても、St.Venant の純ねじりモーメント T_s (せん断応力度 τ_s) の影響は小さいことは非常に興味深い結果である。

4. あとがき

本研究は、薄肉 I 形断面の曲げねじりを考慮した曲線格子桁の弾塑性解析を、線形な変位法の剛性マトリックスを用い、曲げ、ねじり、および曲げねじりモーメントを組み合わせた降伏条件式を導入して行なったものである。

また、ここで用いた4つの降伏条件式の中では、Mode 4の球状降伏条件式が簡明であり、その数値計算結果は実験結果と比較的良く一致しているので、今後の曲線格子桁の耐荷力の研究に役立つであろう。

(参考文献)

- 1) 渡辺 昇, 稼農知徳, 藤井裕司: 曲げねじりをもった曲線桁橋の剛性マトリックス法による解法, 土木学会論文報告集 218号, 1973, p.1, 2) Hayashikawa, T. et al.: On the Limit Analysis of Grillage Girders, J. of Civil Engrg. Design, Vol.2(1980), No.4, p. 379, 3) Kollbrunner, C.F. and Hajdin, N.: Dünnwandige Stäbe, 1975, Springer-Verlag

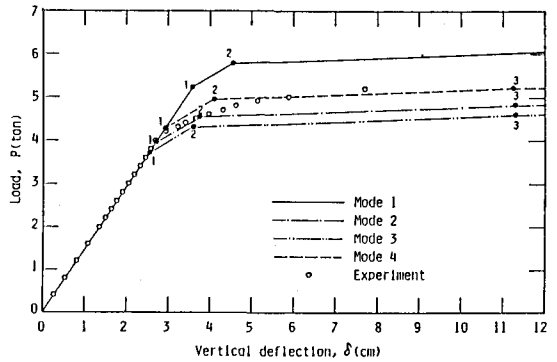


図-3 $P-\delta$ 曲線 (Type A)

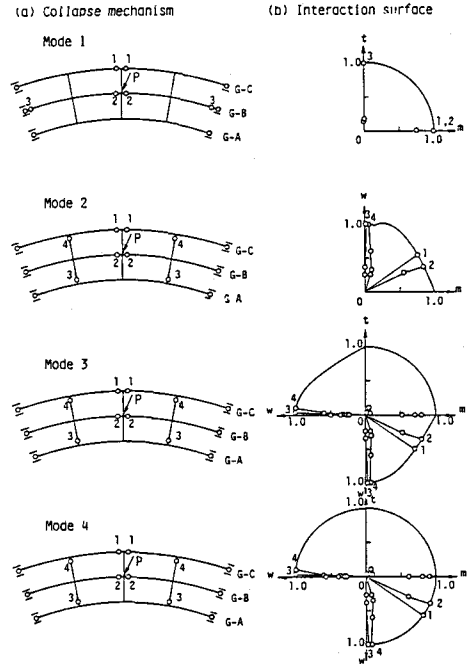


図-4 塑性崩壊機構と塑性ヒンジの発達過程 (Type A)