

## I - 49

## 塑性化による剛性低下を考慮した曲線格子桁の崩壊解析

|               |      |      |
|---------------|------|------|
| 北海道大学大学院工学研究科 | 学生員  | 植木広行 |
| 北海道大学大学院工学研究科 | 正 員  | 平沢秀之 |
| 北海道大学大学院工学研究科 | フェロー | 林川俊郎 |
| 北海道大学大学院工学研究科 | フェロー | 佐藤浩一 |

## 1. はじめに

薄肉 I 形断面を有する曲線格子桁橋は、比較的多く見られる橋梁形式であるが、その構成要素である主桁・横桁の断面にはせん断力、曲げモーメント、ねじりモーメント、そりモーメントが同時に作用するため、応力の分布状態が複雑になり崩壊挙動を把握するのは難しい。このような曲線格子桁の崩壊挙動の研究としては、米沢<sup>1)</sup>による塑性ヒンジ法を用いた曲線格子桁の崩壊機構と崩壊荷重を求めた研究や、今井<sup>2)</sup>による断面極限状態における応力分布から I 形断面の降伏関数を誘導し、横構を有する曲線格子桁に適用した研究、林川<sup>3)</sup>による曲線格子桁の塑性崩壊荷重の算定と種々の降伏関数の比較検討を行った研究等がある。これらの研究は全塑性モーメントと塑性ヒンジの概念に基づく塑性ヒンジ法を用いている。この方法は塑性ヒンジが材軸上の1点に集中して起こるという仮定に従っているため簡便で扱いやすい反面、塑性域が部材内に徐々に広がって行くことが考慮されず、塑性ヒンジ発生まで部材の剛性が変化しないという欠点を有する。また塑性域の広がりを無視し、モーメントの再分配を行わないため、断面力が実際と異なる可能性も有する。

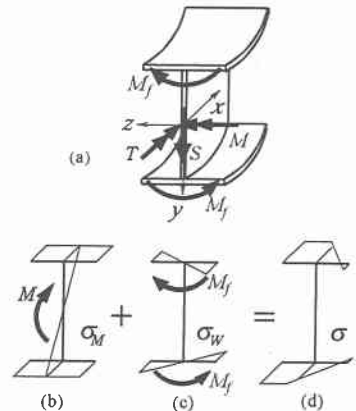
そこで本研究では、塑性ヒンジ法の簡便さを持ち、且つ塑性域の広がりを考慮できる手法を提示し、弾塑性崩壊挙動を調べるものである。手法としては、部材断面の応力分布の状態を種々仮定し、降伏関数の内側に弾塑性状態の領域を設け、応力分布と関連づける。塑性域の広がりに伴う材料非線形の影響は、断面の剛性の低下として考慮し、構造全体の計算は、主桁・横桁にそれぞれ曲線要素・直線要素の剛性方程式を適用し、変位法により行う。

## 2. 応力分布と塑性域の広がり

薄肉 I 形断面を有する曲線格子桁に鉛直荷重が作用すると、部材断面にはせん断力 $S$ 、曲げモーメント $M$ 、ねじりモーメント $T$ 、そりモーメント $W$ が生じる(図-1(a))。  $W$ に関しては以下の式が成立する。

$$W = hM_f \quad (1)$$

ここで、 $h$ 、 $M_f$ はそれぞれ上下フランジ板厚の中心間隔、フランジ面内の曲げモーメントを表す。また、図-1(b)は曲げモーメント $M$ により生じるフランジ、ウェブにおける垂直応力 $\sigma_M$ の分布を、図-1(c)はフランジ面内の曲げモーメント $M_f$ により生じるフランジ内のそり応力 $\sigma_W$ の分布を、図-1(d)は $\sigma_M$ と $\sigma_W$ を合成した垂直応力 $\sigma$ を表す。材料は降伏応力を $\sigma_y$ とする完全弾塑性体と仮定すると、断面内において常に $|\sigma| \leq \sigma_y$ でなければならない。この垂直応力 $\sigma$ は $\sigma_M$ 、 $\sigma_W$ の大小により分布状態が変化するが、モーメントの向きを図-1(a)の矢印の向きに固定し、更に $|\sigma| \leq \sigma_y$ の条件を考慮すると、応力分布は図-2の8通りに分類することができる。


図-1 垂直応力 $\sigma_M$ と $\sigma_W$ 

Collapse analysis of horizontally curved grillage girders considering decreased rigidity by plasticity

by Hiroyuki UEKI, Hideyuki HIRASAWA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO.

- ①：全断面弾性状態。
- ②：フランジ左右縁で $\sigma$ の符号が等しく、左縁が降伏している。
- ③：フランジ左右縁で $\sigma$ の符号が異なり、左縁が降伏している。
- ④：フランジ左右縁で $\sigma$ の符号が異なり、両縁が降伏している。
- ⑤：②の状態で且つ、フランジ中央においても降伏している。
- ⑥：③の状態で且つ、フランジ中央においても降伏している。
- ⑦：④の状態で且つ、フランジ中央においても降伏している。
- ⑧：全断面塑性状態。

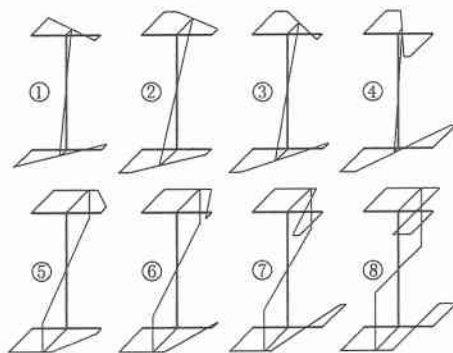


図-2 応力分布の分類

以上の分類は塑性域の広がりを出すパラメータを用いて示すことができる。今、図-3(a)の斜線部のように塑性域が存在するものとし、ある断面の応力分布が図-3(b)の状態であると仮定する。図-3(b)中の $\delta$ 、 $\eta$ はフランジ中央から幅方向の長さに関するパラメータで、それぞれ $\sigma = \sigma_y$ 、 $\sigma = 0$ となる位置を表す。一例として図-3(b)分布は図-2⑦に相当し、 $\delta$ 、 $\eta$ 、 $\lambda$ は、

$$0 \leq \delta \leq \frac{1}{2}, \quad \delta \leq \eta \leq \frac{1}{4} + \frac{\delta}{2}, \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (2a, b, c)$$

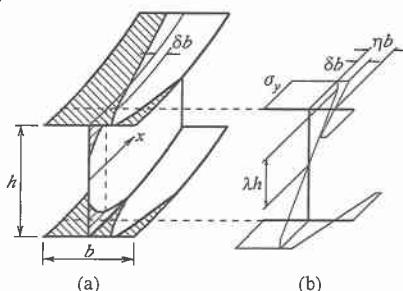


図-3 パラメータ $\delta$ 、 $\eta$ 、 $\lambda$

の条件を満たす領域となる。他の応力分布も同様に $\delta$ 、 $\eta$ 、 $\lambda$ で表すことができる。

### 3. 塑性域の広がりを考慮した解析

#### 3.1 相関曲線

本研究では相関曲線の内側に弾塑性状態の領域を新たに設け、降伏関数のみで塑性化の現象を表す塑性ヒンジ法の欠点を除去しようと試みるものである。一般に相関曲線は断面力を全塑性モーメント等で除して無次元化した変数を用い、この変数を座標軸とする平面内又は空間内に曲線又は曲面として表わされる。断面力の中で純ねじりモーメントは開断面の場合、崩壊挙動に与える影響が小さいと考えられるので省略し、垂直応力 $\sigma_M$ 、 $\sigma_W$ から得られる曲げモーメント $M$ とそりモーメント $W$ の2変数を使用するものとする。

本研究では相関曲線の誘導を図-2の応力分布に対して行う。今、全塑性曲げモーメント、全塑性そりモーメントをそれぞれ $M_0$ 、 $W_0$ とすると、 $m$ 、 $w$ は、

$$m = \frac{M}{M_0}, \quad w = \frac{W}{W_0} \quad (3a, b)$$

図-2⑧の $m$ 、 $w$ を断面内の応力で積分し、 $\eta$ を用いて表すと、

$$m = \frac{1}{M_0} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_M y dA = \frac{8\eta + \alpha}{4 + \alpha}$$

$$w = \frac{1}{W_0} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sigma_W z dA_f = 1 - 4\eta^2 \quad (4a, b)$$

となる。 $(A = \text{断面積}, A_f = \text{フランジの断面積}, \alpha = \text{ウェブとフランジの断面積の比})$  式(4)から $\eta$ を消去すると、

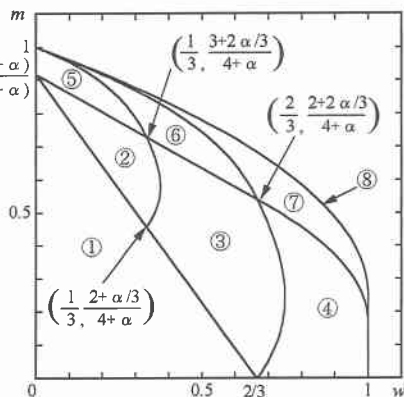


図-4 相関曲線

$$w = 1 - \frac{1}{16} \{ (4 + \alpha)m - \alpha \}^2 \quad \left( \frac{\alpha}{4 + \alpha} \leq m \leq 1 \right)$$

$$w = 1 \quad (0 \leq m \leq \frac{\alpha}{4 + \alpha}) \quad (5a, b)$$

が得られる。図-2②～⑦についても同様な方法で $m$ 、 $w$ を $\delta$ 、 $\eta$ を含んだ式で求めると以下ようになる。

$$\textcircled{2}, \textcircled{3} : m = \frac{4}{4 + \alpha} \left[ \left\{ 1 - \frac{(1/2 - \delta)^2}{2(\eta - \delta)} \right\} + \frac{\alpha\eta}{6(\eta - \delta)} \right] \quad w = \frac{2(1/2 - \delta)^2}{3(\eta - \delta)} (1 + \delta) \quad (6a, b)$$

$$\textcircled{4} : m = \frac{4\eta}{4 + \alpha} \left\{ 2 + \frac{\alpha}{6(\eta - \delta)} \right\} \quad w = 1 - \frac{4}{3}\delta^2 + \frac{8}{3}\delta\eta - \frac{16}{3}\eta^2 \quad (7a, b)$$

$$\textcircled{5}, \textcircled{6} : m = \frac{4}{4 + \alpha} \left[ \left\{ 1 - \frac{(1/2 - \delta)^2}{2(\eta - \delta)} \right\} + \alpha \left( \frac{1}{4} - \frac{\lambda^2}{3} \right) \right] \quad w = \frac{2(1/2 - \delta)^2}{3(\eta - \delta)} (1 + \delta) \quad (8a, b)$$

$$\textcircled{7} : m = \frac{4}{4 + \alpha} \left\{ 2\eta + \alpha \left( \frac{1}{4} - \frac{\lambda^2}{3} \right) \right\} \quad w = 1 - \frac{4}{3}\delta^2 + \frac{8}{3}\delta\eta - \frac{16}{3}\eta^2 \quad (9a, b)$$

式(6)～(9)は $\delta$ 、 $\eta$ を媒介変数とする $m$ 、 $w$ の関数である。以上の式から $m$ – $w$ 相関曲線を描くと、図-4のようになる。図-4の①～⑧の領域は図-2の①～⑧の応力分布と対応している。①は全断面弾性、②～⑦は弾塑性状態の領域である。各領域の境界は、式(6)～(9)に $\delta$ 、 $\eta$ に関する条件を代入することで得られる。

### 3.2 部材要素の剛性方程式

本研究では複数の主桁及び横桁の骨組部材から成る格子桁構造を扱うため、曲線要素と直線要素を併用した剛性マトリックス法により解析を行う。図-5(a)のような2軸対称I形断面を有する曲線桁を考え、部材軸方向に剛性が変化していると仮定する。 $n$ 個に分割された1つの要素内 $\textcircled{k}$ では剛性を一定とし、両端部 $k$ 、 $k+1$ ではせん断力 $S$ 、曲げモーメント $M$ 、ねじりモーメント $T$ 、そりモーメント $W$ が作用する(図-5(b))。この $\textcircled{k}$ の節点間に中間荷重が存在しない場合、せん断中心軸の変形で表した弾性方程式は次のようになる。

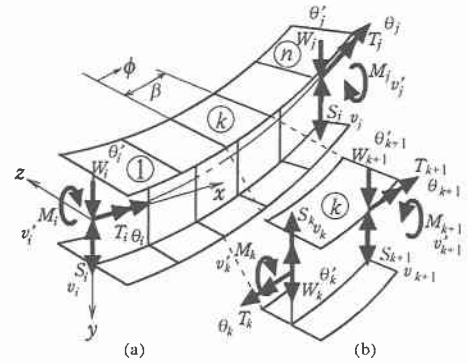


図-5 曲線部材要素

$$\begin{aligned} (EI + \frac{EC_W}{R_S^2}) \frac{d^4 v}{d\phi^4} - GJ_T \frac{d^2 v}{d\phi^2} - \frac{EC_W}{R_S^2} \frac{d^4 R_S \theta}{d\phi^4} + (GJ_T + EI) \frac{d^2 R_S \theta}{d\phi^2} = 0 \\ - \frac{EC_W}{R_S^2} \frac{d^4 v}{d\phi^4} + (GJ_T + EI) \frac{d^2 v}{d\phi^2} + \frac{EC_W}{R_S^2} \frac{d^4 R_S \theta}{d\phi^4} - GJ_T \frac{d^2 R_S \theta}{d\phi^2} + EIR_S \theta = 0 \end{aligned} \quad (10a, b)$$

ここで  $v$ 、 $\theta$  はそれぞれ垂直変位、ねじり角、 $EI$ 、 $GJ_T$ 、 $EC_W$  は要素 $\textcircled{k}$ の曲げ剛性、ねじり剛性、そりねじり剛性、 $R_S$  は曲率半径である。式(10)の連立微分方程式から $v$ を消去して変形すると、 $\theta$ に関する同次方程式と、 $v$ に関する微分方程式が得られる。これらより $\theta$ 、 $v$ に関する一般解を求めると次式のように表される。

$$\theta = C_1 \sinh \mu\phi + C_2 \cosh \mu\phi + C_3 \cos \phi + C_4 \phi \cos \phi + C_5 \sin \phi + C_6 \phi \sin \phi$$

$$v = -R_S \left\{ \frac{C_1}{\mu^2} \sinh \mu\phi + \frac{C_2}{\mu^2} \cosh \mu\phi - C_3 \cos \phi - C_4 (\phi \cos \phi - \zeta \sin \phi) - C_5 \sin \phi - C_6 (\phi \sin \phi + \zeta \cos \phi) \right\} + C_7 \phi + C_8 \quad (11a, b)$$

ここで  $\zeta = \frac{2\mu^2 \gamma}{1 + \mu^2 + \mu^2 \gamma}$  であり、 $C_1 \sim C_8$  は積分定数である。

式(11)の積分定数を図-5(b)の節点 $k$ に関する境界条件を用いて表すと次式のようになる。

$$\{C\}=[A]\{y_k\} \quad (12)$$

$$[A]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{R\mu}{1+\mu^2} & \frac{R^2}{GJ_T} \frac{\mu}{(1+\mu^2)^2} & 0 & \frac{R}{GJ_T} \frac{\mu^3}{(1+\mu^2)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R}{EI} \frac{\zeta}{\zeta-2} \frac{1}{(1+\mu^2)} & 0 & \frac{R^2}{EC_W} \frac{1}{1+\mu^2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{R}{EI} \frac{\zeta}{\zeta-2} \frac{1}{(1+\mu^2)} & 0 & \frac{R^2}{EC_W} \frac{1}{1+\mu^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R^2}{GJ_T} \frac{\mu^2}{\zeta(1+\mu^2)} & 0 & \frac{R}{GJ_T} \frac{\mu^2}{\zeta(1+\mu^2)} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{R}{1+\mu^2} - \frac{R^2}{GJ_T} \frac{\mu^2}{1+\mu^2} \left( \frac{1}{1+\mu^2} + \frac{1}{\zeta} \right) & 0 & \frac{R}{GJ_T} \frac{\mu^2}{1+\mu^2} \left( \frac{\mu^2}{1+\mu^2} \frac{1}{\zeta} \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R}{EI} \frac{1}{\zeta-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R^3}{GJ_T} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -R & 0 & 0 & \frac{R^2}{EI} \frac{\zeta}{\zeta-2} \left( 1 + \frac{1}{\mu^2} \right) & 0 & \frac{R^3}{EC_W} \frac{1}{\mu^2} \end{bmatrix}, \{y_k\}=\begin{bmatrix} v_k \\ v'_k \\ \theta_k \\ \theta'_k \\ S_k \\ M_k \\ T_k \\ W_k \end{bmatrix}, \{C\}=\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} \quad (13a,b,c)$$

ここで  $v_k$ 、 $v'_k$ 、 $\theta_k$ 、 $\theta'_k$  はそれぞれ節点 $k$ におけるたわみ、たわみ角、ねじり角、ねじり率である。

式(11)に  $\phi=\beta$  を代入して節点  $k+1$  の変位を求め、断面力を算出して積分定数 $\{C\}$ との関係式を求めると、

$$\{y_{k+1}\}=[B]\{C\} \quad (14)$$

$$[B]=\begin{bmatrix} -\frac{R}{\mu^2} sh & -\frac{R}{\mu^2} ch & R \cos \beta & R(\beta \cos \beta - \zeta \sin \beta) & R \sin \beta & R(\beta \sin \beta - \zeta \cos \beta) & \beta & 1 \\ -\frac{1}{\mu} ch & -\frac{1}{\mu} sh & -\sin \beta & \cos \beta - \beta \sin \beta - \zeta \cos \beta & \cos \beta & \sin \beta + \beta \cos \beta - \zeta \sin \beta & \frac{1}{R} & 0 \\ \frac{sh}{\mu} & \frac{ch}{\mu} & \cos \beta & \beta \cos \beta & \sin \beta & \beta \sin \beta & 0 & 0 \\ \frac{1}{R} \left( \mu + \frac{1}{\mu} \right) ch & \frac{1}{R} \left( \mu + \frac{1}{\mu} \right) sh & 0 & \frac{\zeta}{R} \cos \beta & 0 & \frac{\zeta}{R} \sin \beta & -\frac{1}{R^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ_T}{R^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{EI}{R} (\zeta - 2) \sin \beta & 0 & \frac{EI}{R} (\zeta - 2) \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ_T}{R} \zeta \left( 1 + \frac{1}{\mu^2} \right) \cos \beta & 0 & \frac{GJ_T}{R} \zeta \left( 1 + \frac{1}{\mu^2} \right) \sin \beta & -\frac{GJ_T}{R^2} & 0 \\ -\frac{EC_W}{R^2} (1+\mu^2) sh & -\frac{EC_W}{R^2} (1+\mu^2) ch & 0 & \frac{EC_W}{R^2} \zeta \sin \beta & 0 & -\frac{EC_W}{R^2} \zeta \cos \beta & 0 & 0 \end{bmatrix}, \{y_{k+1}\}=\begin{bmatrix} v_{k+1} \\ v'_{k+1} \\ \theta_{k+1} \\ \theta'_{k+1} \\ S_{k+1} \\ M_{k+1} \\ T_{k+1} \\ W_{k+1} \end{bmatrix} \quad (15a,b)$$

となる。ただし、 $ch=\cosh \mu \beta$ 、 $sh=\sinh \mu \beta$ とおいた。式(14)に式(12)を代入すると次式となる。

$$\{y_{k+1}\}=[D_k]\{y_k\} \quad (16)$$

但し、 $[D_k]=[B][A]$ である。式(16)は④に関する方程式であるが、①～③についても成立するのでこれらを組み合わせると図-5(a)の左端  $i$  と右端  $j$  に関して次式が成り立つ。

$$\{y_j\}=[D_n][D_{n-1}] \cdots [D_2][D_1]\{y_i\}=[D]\{y_i\} \quad (17)$$

次に $\{y_i\}$ 、 $\{y_j\}$ の要素を節点力と節点変位に分離して並べ替え、 $\{X\}$ 、 $\{u\}$ とおくと次式のように変形できる。

$$\{X\}=[K]\{u\}, \{X\}=\{S_i, M_i, T_i, W_i, S_j, M_j, T_j, W_j\}^T, \{u\}=\{v_i, v'_i, \theta_i, \theta'_i, v_j, v'_j, \theta_j, \theta'_j\}^T \quad (18a,b,c)$$

また、 $[K]$ は $[D]$ を $\{X\}$ 、 $\{u\}$ に対応させて並べ替えを行い、符号を図-5(a)の矢印の向きを正として修正した。

#### 4. 数値計算例

数値計算に用いる曲線格子桁モデルは、図-6に示す主桁3本、横桁3本から成る骨組構造とし、その形状寸法は中心角  $\Phi=7.0^\circ$ 、曲率半径  $R=18.5\text{m}$ とした。荷重は1点集中荷重とし、荷重位置は内桁中央点及び外桁中央点の2通りとした。また、支点における境界条件はたわみ及びねじり角を拘束とし、たわみ角及びそりを自由とした。主桁と横桁はH形鋼(100×50×5×7)を用い、表-1のような断面諸元となっている。以下に本解析法による塑性域の広がりを考慮した計算結果と塑性ヒンジ法による計算結果を示し、考察を述べる。

#### 4.1 荷重変位関係

図-7、8は曲線格子桁の荷重変位関係を表したものである。変位は内桁、中桁、外桁のそれぞれの中央点における鉛直変位である。実線は本解析法による計算結果であり、●、▲、△印は塑性ヒンジ法による結果で、塑性ヒンジが発生した時点でプロットしたものである。

本解析法と塑性ヒンジ法との結果を比較すると内桁載荷と外桁載荷のどちらも塑性域の広がりによる剛性低下の影響が現れ、同じ荷重に対して塑性ヒンジ法によって得られる変位よりも大きい値が得られている。最終的な崩壊荷重は、内桁載荷の場合は塑性ヒンジ法では4.90tf、本解析法では4.77tfとなった。外桁載荷の場合は塑性ヒンジ法では4.57tf、本解析法では4.62tfという計算結果が得られ、両解析法ではそれほど大きな差は見られなかった。

#### 4.2 塑性域の広がりと塑性ヒンジ

図-9、10は、本解析法による曲線格子桁崩壊時の塑性域の広がりを示した図である。図中の番号は断面が全塑性になった部分の順序を表している。内桁載荷では最初に載荷点で、続いて中桁中央で断面が全塑性となっている。3段階目では外桁と連結する横桁の2箇所と同時に全塑性となる。続いて横桁(4th)、中桁(5th)、最後に外桁中央(6th)が全塑性状態となり曲線格子桁は崩壊する。外桁載荷では、外桁から全塑性化し最後に内桁が全塑性になっている。図-11、12は塑性ヒンジ法による塑性ヒンジ発生位置と発生順序を示した図である。塑性域の広がりを考慮した計算結果とそれぞれ比較すると、外桁載荷では全て同じ位置に塑性ヒンジが発生しているが、内桁載荷では4番目だけが全塑性断面の位置と発生箇所が異なっている。これは本研究では塑性域の広がりを考慮しているため曲げモーメントやそりモーメント等の各部材への伝達に変化し、塑性ヒンジ法の計算結果と異なる状況になったからであると思われる。

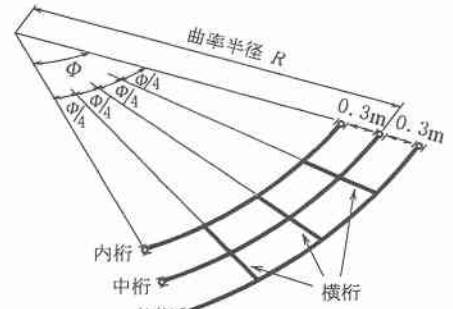


図-6 曲線格子桁橋モデル

表-1 曲線格子桁の断面諸元

|       |                                        |
|-------|----------------------------------------|
| $I$   | $0.190539 \times 10^8 \text{ cm}^4$    |
| $J_T$ | $0.145130 \times 10^4 \text{ cm}^4$    |
| $C_w$ | $0.324141 \times 10^3 \text{ cm}^6$    |
| $M_0$ | $0.159690 \times 10^6 \text{ kgfcm}$   |
| $W_0$ | $0.147960 \times 10^6 \text{ kgfcm}^2$ |

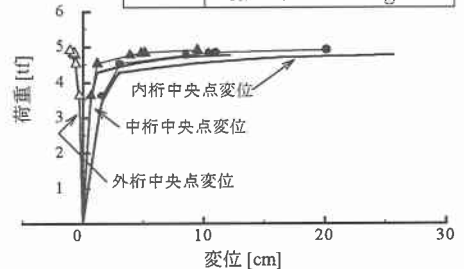


図-7 荷重変位関係 (内桁載荷)

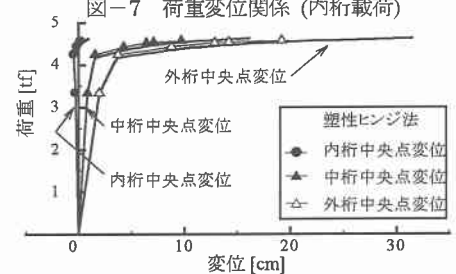


図-8 荷重変位関係 (外桁載荷)

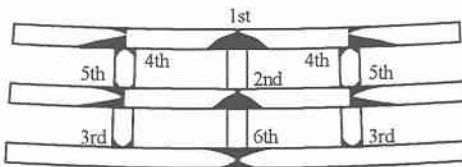


図-9 塑性域の広がり(内桁載荷)

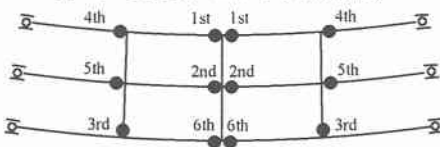


図-11 塑性ヒンジ発生位置(内桁載荷)

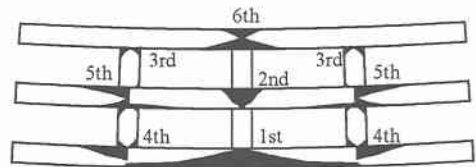


図-10 塑性域の広がり(外桁載荷)

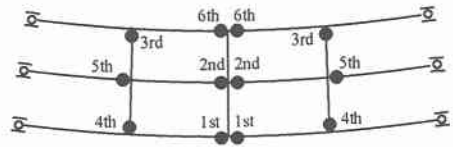


図-12 塑性ヒンジ発生位置(外桁載荷)

### 4.3 相関曲線

図-13、14はそれぞれ内桁載荷、外桁載荷において全塑性化する断面の( $w$ ,  $m$ )を相関曲線上にプロットしたものである。今、図-13の●印(1st)に着目すると、0からスタートした後、①と②の領域の境界線上に達し初期降伏となる。その後、 $w$ ,  $m$ が増加しながら②、⑤、⑥の領域を経て、やがて⑧上に達して全塑性状態となることが分かる。ここで●が初期降伏した段階では、他の2nd~6thの断面箇所では①の領域内にあり、まだ弾性範囲内である。図-13の●、△印は図-9よりそれぞれ内桁、中桁の中央点であるが、これらは曲げモーメントが大きな割合を占めていることが分かる。また、■、▽印は初め曲げモーメントと

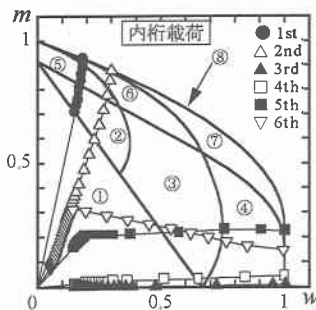


図-13 相関曲線(本解析法)

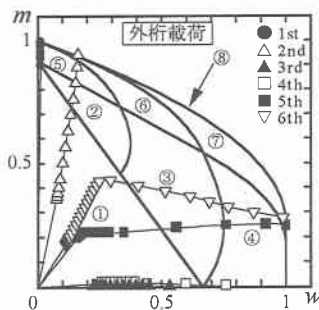


図-14 相関曲線(本解析法)

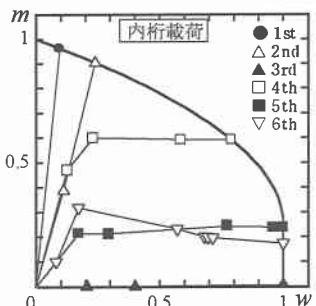


図-15 相関曲線(塑性ヒンジ法)

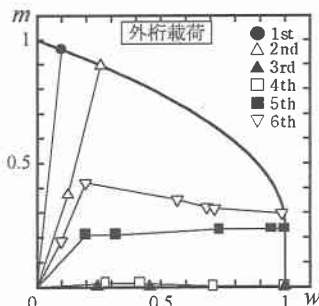


図-16 相関曲線(塑性ヒンジ法)

そりモーメントが同程度の割合であったが、途中からそりモーメントが支配的になっている。▲、□印はそりモーメントが支配的であると言える。特に▲、□印は横桁であるが、ほとんどそりモーメントのみで全塑性化していることが分かる。図-15、16は塑性ヒンジ法による計算結果であるため、降伏曲線の内側の領域は全て弾性域である。内桁載荷の相関曲線(図-13、15)を比較すると、同じ断面の位置に着目した場合、 $w$ ,  $m$ の割合は大体同じであると言える。外桁載荷の相関曲線(図-14、16)については、傾向として内桁載荷と同じであるが荷重点が外桁であるため、外桁の崩壊(図-14、16の●)は曲げモーメントが支配的で、内桁の崩壊(図-14、16の▽)はそりモーメントが支配的となっている。

### 5. おわりに

本研究では塑性域の広がりやを考慮した曲線格子桁の剛性方程式を誘導し、I形断面を有する曲線格子桁の塑性崩壊解析を行った。塑性域の広がりやパラメータ $\delta$ ,  $\eta$ ,  $\lambda$ を導入し、垂直応力 $\sigma_M$ ,  $\sigma_w$ から得られる曲げモーメント $M$ とそりモーメント $w$ の2変数を用いた降伏関数の内側に弾塑性領域を設けることにより考慮した。数値計算例としては、簡単な曲線格子桁モデルを設定し、本解析法と塑性ヒンジ法による計算を行い、比較検討した。その結果、相関曲線から各断面の全塑性化するまでの挙動を追跡することができた。また、荷重変位関係では本解析法による結果の方が変位は増大しており、断面の塑性化に伴う剛性の低下の影響が見られた。また、崩壊荷重、塑性ヒンジと全塑性断面の位置についてはあまり大きな違いは見られなかった。

今回は数値計算例として主桁と横桁のみで構成された曲線格子桁を扱ったが、今後の研究ではさらに横構を配置した曲線格子桁の塑性崩壊解析を行うことなどが考えられる。

### 参考文献

- 1) 米沢 博, 三上市蔵: 曲線格子桁の極限解析について, 土木学会論文集, No.132, pp.18-26, 1966.
- 2) 今井富士夫, 太田俊昭, 大塚久哲: 横構を有する並列曲線I桁橋の崩壊挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.32A, pp. 411-419, 1986.
- 3) 林川俊郎: 曲線格子桁の塑性崩壊荷重の計算法と実験, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1121-1134, 1993.