

I-92

横構を考慮した曲線格子桁の崩壊解析と塑性域の広がりについて

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

曲線格子桁橋はねじり剛性の小さい複数本の主桁を横桁あるいは対傾構で相互に連結し、構造全体のねじり剛性を高めた橋梁形式である。この形式の橋梁には通常横構が設けられており、設計における横構部材力は、格子解析により得られる主桁断面力を用いることによって近似的に計算することができる¹⁾。すなわち主桁と横桁のみから成る構造系で解析し、主桁に生じる部材力を一旦求め、この部材力によって生じるフランジ法線方向の水平力を横桁が負担するという考え方で横構部材力を算定している。しかし厳密には曲線格子桁を構成する全ての部材を解析モデルに含め、これら部材間の力学的相互作用を同時に考慮することが望ましい。

横構を考慮しない曲線格子桁を扱った研究には、塑性ヒンジ法に基づく手法で崩壊機構や崩壊荷重を求めた研究^{2),3)}、塑性ヒンジ法を改良し、塑性域の広がりを考慮した研究⁴⁾等がある。横構を考慮した研究には、今井ら⁵⁾による一連の実験的、理論的研究があり、極限状態におけるI形断面部材の降伏関数の誘導や、崩壊特性を明らかにしているが、基本的には塑性ヒンジ法に基づくものであり、塑性ヒンジ発生以前の弾塑性状態は考慮されていない。

そこで本研究では、弾性限界を越えて部分的に塑性域が存在する部材を扱うことのできる解析方法⁶⁾を発展させ、横構を有する曲線格子桁に適用し、横構が曲線格子桁の崩壊荷重や崩壊機構に及ぼす影響を検討した。解析に当たっては、部分的に塑性域が存在する部材の応力分布と、この部材断面に生じる断面力(ここでは曲げモーメントとそりモーメント)が関連づけられた相関曲線を用いている。この相関曲線を用いることにより、曲線格子桁構造が弾性範囲内から、弾塑性状態を経て、塑性崩壊に至るまでの全過程を追跡することができる。

2. 解析に用いる仮定

解析に先立ち、以下のような仮定を設けた。

- (1) 材料は完全弾塑性体とする。即ち材料が降伏応力 σ_y に達する前の弾性係数を E 、降伏した後の弾性係数を0とするバイリニア型の応力-ひずみ曲線を用いる。
- (2) 降伏は曲げモーメントとそりモーメントによってのみ生じるものとし、せん断力及びねじりモーメントによる影響は小さいものとして無視する。
- (3) 荷重は全て節点に働く集中荷重とし、中間荷重は作用しないものとする。また荷重は一定の割合で増加する比例漸増荷重とする。
- (4) 主桁、横桁の剛性は弾性の範囲内にあるときは全断面有効とする。断面の一部が降伏したときは降伏した部分の剛性が増分荷重に対して無いものとし、弾性の部分の剛性のみ考慮できるものとする。
- (5) 横構については、上下横構がそれぞれ軸力のみを伝達するものとし、上下合わせて曲げを伝達する仮想的な曲げ部材として扱う。
- (6) 主桁、横桁の断面は2軸対称の薄肉I形断面とする。

Collapse analysis and spread of plasticity of curved grillage girder considering lateral bracings
 by Hideyuki HIRASAWA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO.

3. 塑性域の広がりを考慮した相関曲線

曲線格子桁に鉛直方向の集中荷重が作用するとき、主桁、横桁の断面には一般にせん断力 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 の4つの断面力が発生する。仮定(2)より S と T を無視すると、断面内に生じる応力は垂直応力のみで、 M による曲げ応力 σ_M と W によるそり応力 σ_W が発生する。これら2つの応力が合成された垂直応力 $\sigma (= \sigma_M + \sigma_W)$ が、実際の断面に生じ、この σ は σ_M と σ_W の大きさによっていろいろな分布状態を呈する。ここで M と W の向きを正に固定し、更に仮定(1)より $|\sigma| \leq \sigma_y$ の条件を加えると、 σ の分布形状は結局図-1内に表された8通りに分類することが可能である⁴⁾。

これらの応力分布は、その断面に作用している曲げモーメントとそりモーメントの値に関連づけられており、①～⑧の領域にそれぞれ対応している。①は全断面弾性の領域、②～⑦は断面内の一部が降伏している領域、⑧は全断面塑性の曲線を表している。②～⑦の領域の分類は以下の通りである。

- ②：フランジの左右縁での σ の符号が等しく、且つ左縁が降伏している。
- ③：フランジの左右縁での σ の符号が異なり、且つ左縁が降伏している。
- ④：フランジの左右縁での σ の符号が異なり、且つ両縁が降伏している。
- ⑤：②でフランジ中央部においても降伏している。
- ⑥：③でフランジ中央部においても降伏している。
- ⑦：④でフランジ中央部においても降伏している。

なお、図中の記号 m , w はそれぞれ M , W を全塑性曲げモーメント、全塑性そりモーメントで除し、無次元化したものである。また α は断面の寸法により決まる定数で、次式で表される。

$$\alpha = \frac{t_w h}{t_f b} \quad (1)$$

ここで、 h , t_w はそれぞれ腹板の高さ、腹板厚であり、 b , t_f はそれぞれフランジ幅、フランジ厚である。

4. 横構のモデル化

図-2に示すように、断面積 A_u , A_l を有する上横構、下横構が主桁にピン結合されていると仮定する。それぞれの横構は軸力しか受け持たず、主桁の鉛直変位や両主桁の同一方向への同じ回転には、断面力は生じない。しかし両主桁が異なる回転角を生じた場合には、各横構には正負の軸力が生じ、上下横構全体としては曲げ部材のように作用する。そこで上下横構をまとめて1本の単純曲げを受けるはりとして仮定し、このはりの両端に働く曲げモーメントと変位の関係を導く⁶⁾。

横構の両端 i , j に回転角 θ_i , θ_j (主桁におけるたわみ角とねじり角の横構軸方向成分)が生じたとき、両主桁の相対回転角 θ は次式となる。

$$\theta = \theta_j - \theta_i \quad (2)$$

横構の部材長を l 、曲げ変形における曲率半径を ρ とおくと、次式の関係が成り立つ。

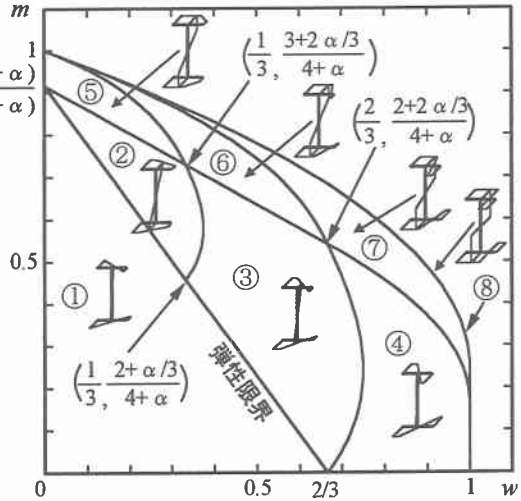


図-1 相関曲線と応力分布

ここで曲げモーメント M を受けるはりの M と曲率の関係式は、

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{M}{EI} \quad (4)$$

であるから、式(3)、(4)より

$$M_{i=j} = \frac{EI_r}{l} (\theta_{ir} - \theta_{jr}) \quad (5)$$

または,

$$\begin{Bmatrix} M_i \\ M_j \end{Bmatrix} = \frac{EI_r}{l_r} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{ir} \\ \theta_{jr} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

を得ることができる。ここで、 I_x は主桁のせん断中心に関する横構の断面2次モーメントであり、次式で表される。

$$I_r = A_v h_v^2 + A_l h_l^2 \quad (7)$$

この式(6)を横構の要素剛性方程式として用いることにより、横構を含めた構造全体の解析を行うことができる。

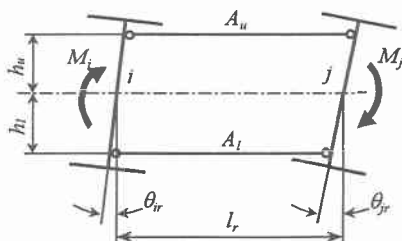


図-2 横構のモデル化

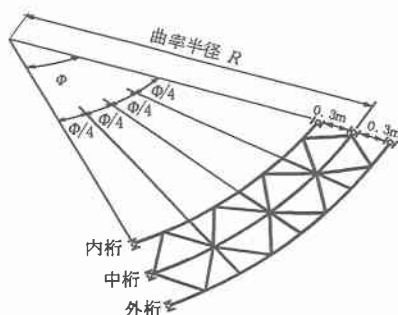


図-3 解析モデル

表一1 断面諸元等

	主桁・横桁	横構
断面2次モーメント [cm ⁴]	190.539	28.7
純ねじり定数 [cm ⁴]	1.45130	0.0
そりねじり定数 [cm ⁶]	324.141	0.0
全塑性曲げモーメント [kgfcm]	159690	20699.1
全塑性そりモーメント [kgfcm]	147960	0.0

5. 数值计算例

本解析手法を用いて図-3に示すような曲線格子桁の塑性崩壊荷重、及び崩壊時の塑性域の広がり求めた。解析モデルは中心角 $\phi = 7.0^\circ$ 、曲率半径 $R = 18.5[\text{m}]$ とし、荷重は支間中央外桁上に集中荷重を載荷させた。断面諸元等は表-1の通りである。以下に横構を有する場合と横構が無い場合の解析結果を比較しながら考察を行う。

5.1 荷重変位関係

図-4は支間中央における内桁、中桁及び外桁の荷重変位曲線を表したものである。横構を考慮した場合は、弾性域での構造全体系の剛性が高められていることが示されており、また終局荷重も大幅に増大していることが分かる。しかしながら、終局時の変位については内桁、中桁、外桁共に横構の有無による変化は小さいと言える。表-2は断面が塑性化するステップ(1st, 2nd, ..., 6th(終局時))毎の荷重と横構を考慮する場合としない場合の比率を表したものである。各断面の保有する全塑性モーメントは同じであるが、横構の効果により同一の荷重が載荷されているときの断面力が低減し、全塑性化が遅れ、1st~6thの全ての段階における荷重は4割以上増加している。

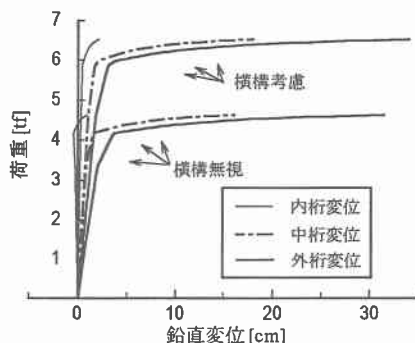
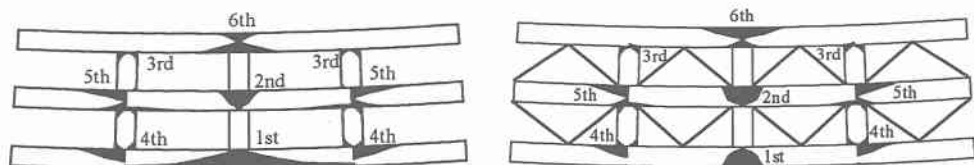


圖-4 荷重變位曲線

表-2 全塑性時の荷重と横構の効果

段階	荷重[kgf]		比率
	横構無し	横構有り	
1st	3110	4390	1.41
2nd	3930	5620	1.43
3rd	4130	5970	1.45
4th	4250	6090	1.43
5th	4320	6230	1.44
6th	4360	6240	1.43



(a) 横構が無い場合

(b) 横構を考慮する場合

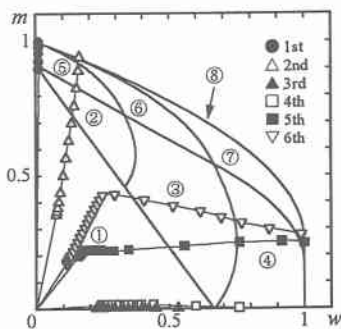
図-5 塑性域の広がり

5.2 塑性域の広がり

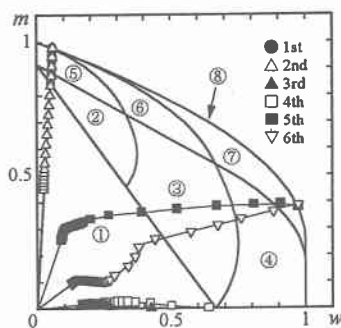
図-5は終局時の塑性域の広がりを表したものである。1st～6thは表-2と対応しており、断面が全塑性化した順番を表している。全塑性化する断面は、順番、位置共に横構の有無に関わらず変化していないが、塑性域の広がり方には変化が見られる。特に外桁の支間中央付近では、横構を設けることにより塑性領域がかなり減少していることが分かる。

5.3 相関曲線

図-6は各断面が全塑性化するまで作用する曲げモーメントとそりモーメントの関係を相関曲線上にプロットしたものである。内桁の▽(6th)について見ると、塑性域進展の過程で横構の有無による影響が現れている。横構の無い場合は、内桁(▽)では当初 m と w が同時に増加するが、他の部材の塑性化が進むにつれ、 m の割合が減少し、 w の割合が増大する。一方横構を有する場合は、他の部材の塑性化が進行しても横構によって m が伝達されるため、 m の割合は増大していると考えることができる。その他の部材についてみると、横構の影響に関係なく、横桁は w が支配的であり、主桁は外桁及び中桁の支間中央では m が支配的であること、その他の部材は m と w が連成して塑性化していることが示されている。



(a) 横構が無い場合



(b) 横構を考慮する場合

図-6 相関曲線

6. おわりに

横構を仮想的な曲げ部材として扱い、曲線格子桁構造全体系に含めた解析を行った。また、断面力 m 、 w から塑性域の広がりを考慮できる相関曲線を用いることで、詳細なFEM解析を行うことなく、断面力レベルでの塑性崩壊解析が可能となった。横構を考慮して解析を行った結果、横構が無い場合と比較して、大幅に終局荷重が増大することが示された。また塑性域の広がりも特に載荷点付近で減少させることが可能となった。これらの解析結果より、横構は曲線格子桁構造の塑性耐荷力を向上させるのに有効であることが確かめられた。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1980。
- 2) 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。
- 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。
- 4) 平沢秀之，林川俊郎，佐藤浩一，植木広行：塑性域の広がりを考慮した曲線格子桁の崩壊解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1219-1228，1998。
- 5) 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。
- 6) 尾下里治：横構を有する並列I桁曲線橋の解析，土木学会論文集，第324号，pp.9-20，1982。