

変形を考慮したアーチ橋の弾塑性立体解析

大阪大学工学部 正会員 前田 幸雄
 大阪大学工学部 正会員 林 正
 大阪大学大学院 学生員 森川 寿義

1. まえがき アーチ橋の塑性崩壊荷重については多くの研究が行われているが、面外荷重による弾塑性挙動については、まだ十分明らかにされていない。そこで、本報告では、幾何学的非線形性と材料非線形性を同時に考慮した立体のマトリックス変位法を用いて、2本のリブを有するアーチ橋の弾塑性挙動について解析を行った。

2. 基礎式 (1) 解析假定: 本解析では次の假定を用いた。1) 部材は2軸対称等断面とし、断面形状は不変である。2) 構造物の変形は大きい。部材の接線回転角と両端の相対ねじり角は小さい。3) 曲げによる剪断変形は無視する。4) ねじり率は、部材内部で一定とし、そりは考慮しない。5) 材料は理想弾塑性材料としひずみ硬化は考慮しない。6) 降伏条件には、ミーゼスの降伏条件を用い、塑性域における応力-ひずみ増分関係はPrandtl-Reussの假定に従う。7) 塑性崩壊以前に局部座屈は生じないものとする。

(2) 平衡方程式: 増分形の仮想仕事の原理より、 $n(n+1)$ 段階における平衡方程式は

$$\Delta F + \left(\int_V B^T D^e B dV + \int_V G^T D^m G dV \right) \Delta U \quad (1)$$

となる。この式における積分計算は弾塑性域にわたるため、図-1に示すように一要素内をさらに細分割する断面分割法を用いる。この時、塑性化している細分割要素に対しては、 $D = D_p$ (塑性応力-ひずみマトリックス) を用い、また総応力 σ^m は細分割要素内で直線分布と假定している。次に式(1)を回転行列を用いて剛体変位・影響を除いた立体の座標変換行列¹⁾により基準系に直し、構造物全体に組立てると

$$\Delta F + \Delta R = (K + K_G) \Delta U \quad (2) \quad \text{図-1}$$

の平衡方程式が得られる。

3. 数値解析法 (1) 荷重増分量 ΔF の降伏域の決定: 一回の荷重増分により複数個の細分割要素の降伏を許すものとして、ミーゼスの降伏条件に許容範囲 ε_p をとり、荷重増分量を次の如く決定する。仮想荷重増分 ΔF により弾性の細分割要素の平均応力増分 $\Delta \sigma_i, \Delta \tau_i$ が得られると、

$$(\sigma_i^m + \Delta \sigma_i)^2 + 3(\tau_i + \Delta \tau_i)^2 = \sigma_y^2 (1 + \varepsilon_p)^2 \quad \sigma_y, \text{降伏応力} \quad (3)$$

により、各 i を求め、最小値 f_{min} により真の荷重増分量 $f_{min} \Delta F$ を求める。この $f_{min} \Delta F$ を新たな荷重増分として計算をやり直した時、細分割要素の相当応力の降伏範囲内に含まれているならば降伏と判定する。このように細分割要素に対して弾・塑性の判定を行なうため、塑性域の拡大が逐次追跡できることになる。

(2) 除荷: 細分割要素の塑性仕事増分が負になった時、除荷の発生とみられ、その要素の応力-ひずみマトリックスを弾性にもとし、計算を繰り返す。

(3) 崩壊: 接線剛性行列の行列式の値が $|K + K_G| \leq 0$ になった時、崩壊と判定するが行列式が負になる前に、一新面の細分割要素がすべて塑性化した場合には、大きな変形を生じるため、この時も崩壊と判定する。

4. 計算例 数値計算は荷重増分法を用いて行った。

(1)構造形式: 図-2に示す薄肉断面よりなる桁橋固定アーチを対象とし、その断面諸量を表-1に示す。断面は40分割とした。

(2)荷重条件: 等分布死荷重(w)を先行載荷し、等分布活荷重として(i)面内全載 (ii)面内半載(P) (iii)面外全載(q)の3ケースと塑性崩壊が生じるまで漸増載荷した。

(3)降伏応力, 残留応力: 降伏応力としては $\sigma_y=2400\text{kg/cm}^2$, 4600kg/cm^2 の2ケースとし、図-3に仮定した残留応力分布を示す。

(4)解析法: 解法の比較として(a)幾何学的非線形性のみ考慮しに解析 (b)材料非線形性のみ考慮しに解析 (c)両方の非線形性を同時に考慮しに解析 の3つの場合を行った。

5. 計算結果 図中 w_0 は限界死荷重強度²⁾であり、 N_p, M_p は降伏軸力, 全塑性モーメントである。図-4は荷重ケース(iii)の場合の荷重-変位(右端の面内たわみ)曲線である。図-5は荷重ケース(ii)の場合の荷重-変位(リブ間の面内たわみ)曲線を表わす。図中の塑性崩壊(印)は、以下側リブ固定端断面の細分割要素すべて塑性にした時点を示す。図-6は荷重ケース(iii), 解法(c), $\sigma_y=4600\text{kg/cm}^2$, 残留応力がない時のリブ固定端の塑性域の進展状況を示す。図-7, 8はこの時の、リブ間の面内モーメント(M_y), 軸力(N)の分布図である。

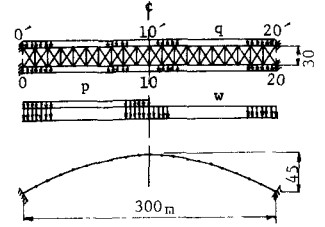


図-2 計算例

表-1 断面諸量

Arch	$A=0.47\text{ m}^2, J=1.44277\text{ m}^4$
Rib	$I_y=1.4638\text{ m}^4, I_z=0.52501\text{ m}^4$
Strut	$A=0.047\text{ m}^2, I_y=0.73\text{ m}^4$
Bracing	$A=0.094\text{ m}^2, A=0.047\text{ m}^2$

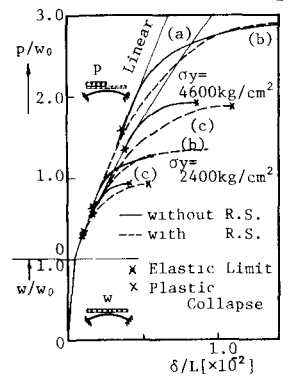
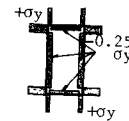


図-4 荷重-変位曲線

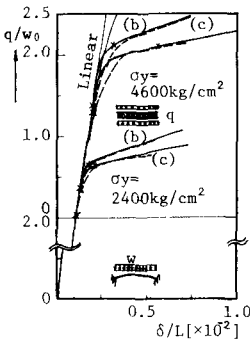


図-5 荷重変位曲線

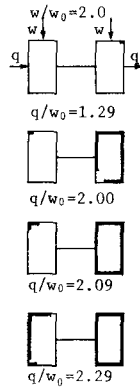


図-6 塑性域の進展

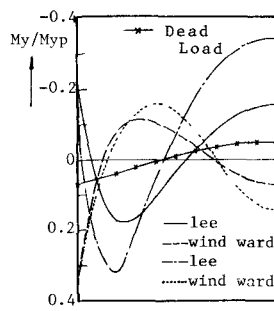


図-7 モーメント分布

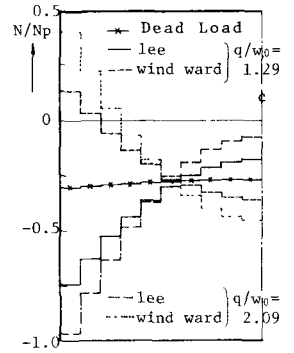


図-8 軸力分布

6. あとがき 以上の計算結果より対象としたアーチ橋に対して次のことがいえる。

(1)本方法により材料非線形と幾何学的非線形の両方を考慮した立体構造物の解析が統一に行われる。(2)塑性域の拡大を逐次追跡することができ。(3)本計算例のアーチ橋の場合変形の影響を考慮した弾塑性解析による塑性崩壊荷重は材料非線形性のみ考慮しに解析により得に値に比べ、かなり低くなる。(4)残留応力があるとき、変形には大きな影響を与えるが、曲率が卓越する荷重状態の場合には、崩壊荷重には影響が小さい。

1)前田 林 中村: 立体骨組構造物の大変形解析, 関西支部秋秋講習会概要, 昭和44年9月 2)道路橋示方書, II 11.5節