

防衛大学校 学生員 ○星川辰雄 学生員 松浦幹佳 正員 石川信隆

1. 緒言 近年、砂防ダムの分野において、鋼製アーチ式砂防構造物も検討されており、昨年著者ら<sup>1)</sup>は钢管円弧アーチの衝撃応答実験を行い、その2質点系モデルによる衝撃応答解析も行った。本研究は、さらに終局限界を考慮した钢管円弧アーチの衝撃応答解析法を開発することを試みたもので、まずひずみ速度効果を考慮した多質点系モデルによる動的弾塑性応答解析プログラムを開発し、これを用いて衝撃破壊に至るアーチの変形性状や限界衝撃吸収エネルギーを算定し、さらに衝撃破壊実験結果と比較するものである。

2. 解析方法 (1) 解析モデル：図-1(a)に示す钢管円弧アーチをまず図-1(b)に示すように集中質量と任意長の剛体で質量をもたないパネルに分割した。次に剛体パネルは分割点で曲げモーメントばねおよび軸力ばねで接続し、質量は分割点に隣接するパネルの1/2ずつを集中させるものとした。また、衝撃荷重は当初衝突点に初速度を与えることにより作用させ、以後局部ばねにより算定するものとした。 (2) 基本式：本モデルにおける基本式は、分割点*i*に図-2に示すようなつり合い条件を適用して次式のように表される。

$$m_i \ddot{x}_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{\ell_i} \sin \phi_i - \frac{M_i - M_{i-1}}{\ell_{i-1}} \sin \phi_{i-1} - N_i \cos \phi_i + N_{i-1} \cos \phi_{i-1} + P_x \quad (1a)$$

$$m_i \ddot{y}_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{\ell_i} \cos \phi_i - \frac{M_i - M_{i-1}}{\ell_{i-1}} \cos \phi_{i-1} + N_i \sin \phi_i - N_{i-1} \sin \phi_{i-1} + P_y \quad (1b)$$

ここに、 $m_i$ 、 $x_i$ 、 $y_i$ 、 $M_i$ 、 $N_i$ はそれぞれ分割点の質量、全体座標系における水平変位、垂直変位、曲げモーメントおよび軸力で、 $\phi_i$ はパネルの全体座標系での角度、 $\ell_i$ はパネル長、 $P_x$ 、 $P_y$ は水平および垂直方向の作用外力(衝撃力)である。また $M_i$ および $N_i$ は次式によって求められる。

$$M_i = \frac{2EI}{\ell_{i-1} + \ell_i} ((\phi_i - \phi_{i,t=0}) - (\phi_{i-1} - \phi_{i-1,t=0})) \quad (2)$$

$$N_i = EA \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} - \ell_i}{\ell_i} \quad (3)$$

さらに塑性変形は、図-3の钢管の曲げ～軸力降伏曲線を用い、塑性流れ則によって算定した。一方、衝撃力 $P$ は局部ばねとダッシュボットにより次式のように算定される。

$$P = k_w (y_{wp} - y_w) + C_w (\dot{y}_{wp} - \dot{y}_w) \quad (4)$$

ただし、 $C_w$ ＝局部ばねの減衰定数、 $K_w$ ＝局部ばねのばね定数、 $Y_{wp}$ ＝衝突点の垂直変位、 $Y_w$ ＝局部ばねの変位。ここで、 $k_w$ は静的局部めり込み実験の勾配より求め、 $C_w$ はアーチの衝撃応答実験から求めた減衰係数( $h = 0.085$ )を臨界減衰定数 $C_{cr}$ ( $= 2 \sqrt{m_w k_w}$ )に乘じた( $C_w = C_{cr} \cdot h$ )。式(1)の解法に当たっては、ニューマークのβ法を用いて数値計算を行った。

(3) ひずみ速度効果：ひずみ速度効果とは、衝撃速度の増大に伴い被衝

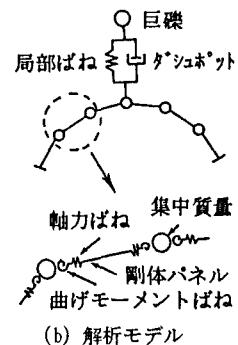
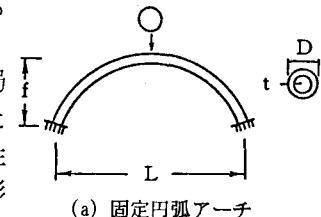


図-1 衝突現象のモデル化

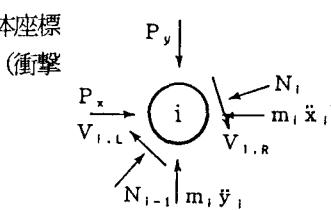
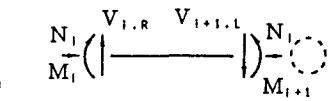


図-2 つり合い条件

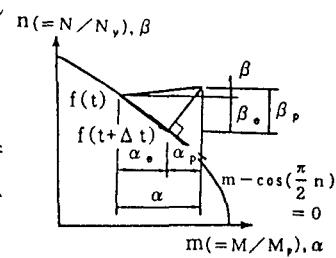


図-3 降伏曲線

突材料が見かけ上強度を増加するもので、ここではひずみ速度効果による鋼材の降伏点応力の上昇として、次式<sup>3)</sup>によって考慮することとした。

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_y} = 10 \cdot 0.152 \log \dot{\varepsilon} - 0.425 + 0.935 \quad (5)$$

ただし、 $\dot{\varepsilon}$  = ひずみ速度、 $\sigma_y$  = 動的降伏点応力、 $\sigma_y$  = 静的降伏点応力。一方、応答ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は以下のように算定される。まずある断面で中立軸から距離 $z$ だけ離れた点のひずみ $\varepsilon$ は、平面保持の仮定から次のように表される。

$$\varepsilon = \phi \cdot z ; \quad d\varepsilon = z \cdot d\phi \quad (6)$$

ただし、 $\phi$  = 断面の曲率。よって、任意断面でのひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は次式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt = z \cdot d\phi / dt \quad (7)$$

ここで、式(7)で $z = D/2$  ( $D$  = 鋼管径) とおき、これを式(5)に代入して応力を算定し、さらにこれを降伏条件の中で $M_p = \sigma_y Z$ 、 $N_p = \sigma_y A$ として用いた。ここで、鋼管の曲げ～軸力の降伏関数は静的降伏条件式をそのまま用いたが、実際はひずみ速度効果により断面内部で応力変化が起こり、降伏条件式そのものも変化すると考えられるが、ここではその影響は無視した。

3. 計算結果と考察 図-4は、重量100kgfの重錐を衝突速度4m/sで衝突させた際の荷重～時間曲線および変位～時間曲線を実験結果と計算結果とを比較して図示したものである。図より、ひずみ速度効果を考慮することにより実験結果との差が小さくなり、概ね計算結果は実験結果をシミュレートしていることが認められる。また図-5は荷重～変位曲線を図示したもので、この図からもひずみ速度効果考慮の方が実験結果に近い。また終局限界である○印までの面積を限界吸収エネルギーと定義した。

4. 衝撃限界吸収エネルギー 著者ら<sup>3)</sup>の行った実験結果より、アーチの終局限界を5点塑性ヒンジ型の破壊形態に対応するものとして、固定端のアーチの角度が上向きから下向きに変化するという変曲点であることが分かった。よって、アーチの終局限界の判定条件として固定端Aのアーチの角度 $\theta_A$ が $\theta_A \leq 0$ となったときを採用した。重錐重量W=

100kgfおよび200kgfの場合の各衝突速度における限界吸収エネルギーを算定し、その結果を図-6に示す。図より計算結果は実験結果より若干小さな値を示すことが認められるが、比較的よくシミュレートしているものと思われる。

参考文献 1) 星川,袖山,石川,飯田:鋼管円弧アーチの衝撃実験に関する一考察,土木学会第16回関東支部技術研究発表会講演概要集,pp.30~31,平成元年3月 2) 高橋,塩冶,大野,石川

内田:ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析,構造工学論文集,Vol.32A,pp.669~682,1986年3月

3) 松浦,星川,石川,飯田:衝撃荷重を受ける鋼管円弧アーチの終局限界に関する実験について,土木学会第17回関東支部技術研究発表会,平成2年3月

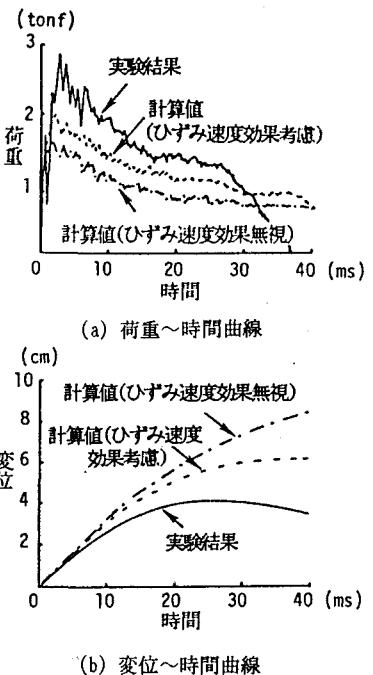


図-4 重錐重量100kgf,  
衝突速度4m/sの場合

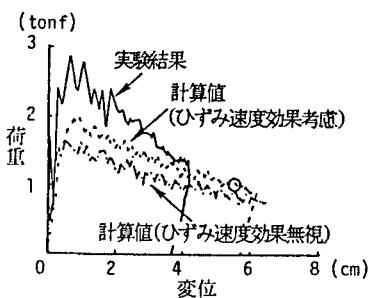


図-5 荷重～変位関係

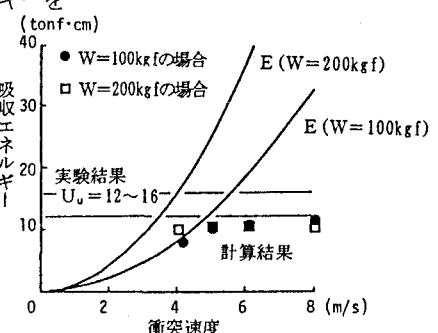


図-6 限界吸収エネルギー～衝突速度関係