

I-501 ひずみ速度効果を考慮したコンクリート充填鋼管はりの衝撃破壊解析

防衛大学校 学生員○小林直行 学生員 伊藤一雄 正員 石川信隆

1. 緒言

近年、砂防構造物の一つとして土石流の先端部にある巨礫をスクリーニングするために、オープン式の砂防ダムが数多く建設されるようになってきた。このオープン式砂防ダムのうち、鋼管の中にコンクリートを充填したA型スリットダムが土石流により破壊してしまうという被災例が過去にあった。本研究は、この原因を追求するため、コンクリート充填鋼管はりの衝撃破壊実験¹⁾に引続き鋼管の破壊までシミュレートできるように、ひずみ速度効果と局部ばねを導入したうえで、曲げとせん断を考慮した離散化モデルを用いたコンクリート充填鋼管はりの衝撃応答解析法を開発したものである。なお、本研究では以下の仮定を用いる。(1)曲げMとせん断力Sによる挙動を考慮し、M+S降伏条件は、図-1のような円とする。

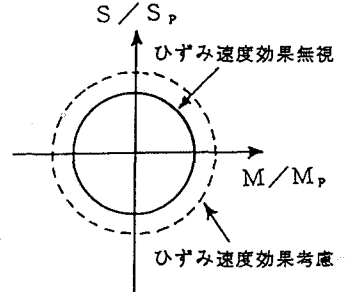


図-1 M+S降伏条件

(2)ひずみ速度効果は、図-2のような曲げモーメント～曲率関係²⁾および、図-1のようにM+S降伏条件を点線のように考慮する。(3)破壊は鋼管はりの応答曲率 ϕ が図-2の終局曲率 ϕ_u に達したときとする。

2. 離散化モデルによる基本式

(1)動的つり合い条件 重錘の衝突を中央点に受ける単純支持されたコンクリート充填はりを図-3に示すような分割された離散化モデル³⁾によって表すものとする、このモデルに対する運動方程式は以下のようになる。 $M_m \ddot{u}_m + K_m u_m = P_m$ ($m=1, 2, \dots, M$) (1)

$$\text{ただし, } M_m = \frac{\rho A}{6g} \begin{bmatrix} 2\lambda_{i-1} & \lambda_{i-1} & 0 & 0 \\ \lambda_{i-1} & 2\lambda_{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\lambda_i & \lambda_i \\ 0 & 0 & \lambda_i & 2\lambda_i \end{bmatrix},$$

$$K_m = B_m^T D_m B_m,$$

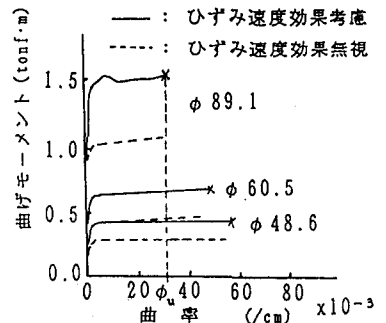


図-2 曲げモーメント～曲率関係

$$B_m^T = \begin{bmatrix} 1/\lambda_{i-1} & -1/\lambda_{i-1} & 1/\lambda_i & 1/\lambda_i \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_m = \begin{Bmatrix} D_{m1}^{*}(\text{弾性時}) \\ D_{m1}^{*}(\text{塑性時}) \end{Bmatrix}, \quad D_m = \begin{bmatrix} K_{mi} & 0 \\ 0 & K_{si} \end{bmatrix},$$

$$D_m^P = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}, \quad K_{mi} = \frac{2EI}{(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}, \quad K_{si} = \frac{2GA}{(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}$$

$$K_{11} = K_{m1} - (M_1^2 K_{m1}^2 / M_p^4) / (M_1^2 K_{m1} / M_p^4 + S_1^2 K_{s1} / S_p^4),$$

$$K_{12} = -(M_1 S_1 K_{m1} K_{s1} / M_p^2 \cdot S_p^2) / (M_1^2 K_{m1} / M_p^4 + S_1^2 K_{s1} / S_p^4),$$

$$K_{22} = K_{s1} - (S_1^2 K_{s1}^2 / S_p^4) / (M_1^2 K_{m1} / M_p^4 + S_1^2 K_{s1} / S_p^4),$$

$$K_{21} = K_{12}, \quad u_m^T = [u_{i-1}^R \quad u_i^L \quad u_i^R \quad u_{i+1}^L], \quad P_m: \text{外力ベクトル,}$$

ρ : はりの単位体積重量, A : 鋼管の断面積, g : 重力加速度,

M_p : 鋼管の塑性曲げモーメント, $S_p (=M_p/\sqrt{3})$: 鋼管の塑性せん断力

(2)変形適合条件 外変形 $u_{i-1}^R, u_i^L, u_i^R, u_{i+1}^L$ と内変形 α_i (ばね回転角), β_i (せん断変位) との幾何学的関係は、図-4を参照して次式のように表される。

$$\alpha_i = \theta_i - \theta_{i-1} = \frac{1}{\lambda_{i-1}} u_{i-1}^R - \frac{1}{\lambda_{i-1}} u_i^L - \frac{1}{\lambda_i} u_i^R + \frac{1}{\lambda_i} u_{i+1}^L \quad (2a)$$

$$\beta_i = u_i^R - u_i^L \quad (2b) \quad \text{さらに、曲率 } \phi_i \text{ と } \alpha_i \text{ との関係およびせん断力 } X_i$$

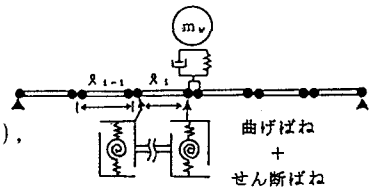


図-3 離散化モデル

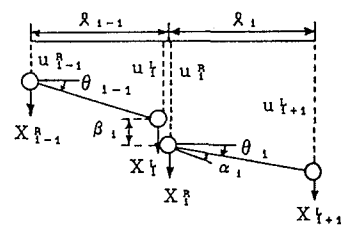


図-4 変形適合条件

断ひずみ γ_i とせん断変位 β_i との関係は、それぞれ次式となる。

$$\phi_1 = 2\alpha_1 / (\lambda_{i-1} + \lambda_i) \quad (3a) \quad \gamma_1 = \beta_1 / \lambda_i \quad (3b)$$

(3) 衝撃力 図-3のように局部ばねと局部ダッシュポットを導入することにより、衝撃力 P が次式によって算定される。

$$(u_w - u_i) \geq 0 \text{ の場合 } P = K_w(u_w - u_{AP}) + C_w(\dot{u}_w - \dot{u}_{AP}) \quad (4a)$$

$$(u_w - u_1) < 0 \text{ の場合 } P = 0 \quad (4b)$$

ただし, $u_w, \dot{u}_w$: 重錘の変位および速度,

 $u_{ap}, \dot{u}_{ap}$: 衝突点におけるはりの変位および速度, K_w, C_w : 局部ばね係数および局部減衰係数.

3. 衝擊破壞解析法

以上の諸式を用いた衝撃破壊解析の手順は、図-5の計算フローチャートにしたがって行われ、応答曲率 ϕ_u が鋼管の引張り破断ひずみ ε_u に対応する曲率 $\phi_u (= \varepsilon_u / (D/2))$ に達したときをもって破壊とする。

4, 数值计算例

著者ら¹⁾の行った衝撃実験を解析対象とし、ここでは鋼管径 $D=89.1\text{mm}$ のコンクリート充填鋼管はり (スパン 60.0cm) に、 $W=150\text{Kg}$ の重錘が $V=8\text{m/s}$ で衝突する場合の解析を行った。

(1) 荷重～変位関係 図-6は衝突点における荷重～変位関係を示したもので、ひずみ速度効果を考慮した方が実験結果と概ねよく一致していることが認められる。

(2) 衝撃吸収エネルギー～変位関係 図-7は荷重～変位関係より面積を積分して得られる衝撃吸収エネルギー～変位関係を示したもので、やはりひずみ速度効果を考慮した方が実験値をよくシミュレートしていることがわかる。この図を用いると、ある一定の衝撃吸収エネルギーに対する応答変位が得られ、この応答変位がある許容変位以下であれば、変位制約条件が満足されることになる。

5. 結言

(1) ひずみ速度効果を導入した曲げとせん断による離散化モデルを用いることにより、実験の応答挙動をかなり良くシミュレートすることが認められた。

(2) 本解析法によって求められる衝撃限界吸収エネルギーは、実験結果と比較のよく一致することが認められた。

参考文献：

1)伊藤・石川・川嶋・鈴木：モルタル充填鋼管はりの衝撃
限界吸収エネルギーに関する実験的考察，構造工学論文集，
Vol.37A，1991年3月

2) 伊藤・高橋・大野・石川：コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界容量に関する一考察，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，1991年3月

3) T. Kawai & C. N. Chen : A Discrete Element Beam Bending Problems Including the Effects of Shear Deformation, 生産研究, 30巻5号, pp.165~168, 1978年5月

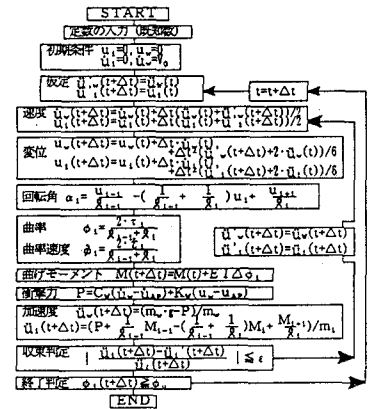


図-5 衝撃破壊解析のフローチャート

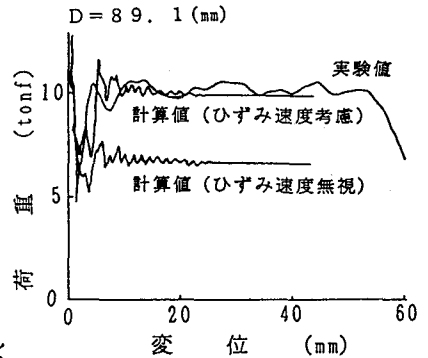


図-6 荷重～変位関係

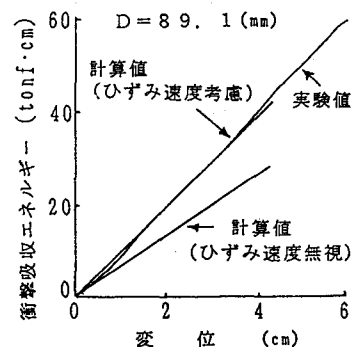


図-7 衝撃吸収エネルギー～変位関係