

I-477 鋼管の局部変形による断面変化を考慮した 鋼管はりの衝撃応答解析

防衛大学校 土木工学科 正員 ○星川 辰雄 学生員 伊藤 一雄 正員 石川 信隆

1. 緒言 近年、砂防施設として、屈撓性、施工性等の多くの利点を有する鋼製砂防ダムが数多く建設されてきた。本構造の一形態である格子型鋼製砂防ダムは、部材として中空鋼管を用いているが、巨礫が衝突した際の部材の局部破壊は構造全体としての耐荷力の低下に大きな影響を与えるものと考えられる¹⁾。著者らは先に、鋼管部材の局部変形の影響について検討を行ってきた²⁾が、解析において鋼管はり自体の断面変形の影響を考慮していなかった。そこで本報告では、重錘と鋼管の衝突現象を塑性スライダとダッシュポットを用いてモデル化し、局部めり込みによる断面変化の影響を考慮した衝撃応答解析手法を提案し、その計算結果を実験値と比較することにより、本解析法の妥当性について検討を行ったものである。

2. 解析方法 (1)運動方程式 図-1(a)に示す重錘と鋼管はりの衝突現象を、図-1(b)のようにいくつかの要素に分割し、曲げバネを用いて連結する。衝突点には塑性スライダと局部ダッシュポットをつけ、局部変位を考慮した衝突荷重の算定を可能とした。各節点における運動方程式は、例えば、図-1の場合(6分割)次のようになる。

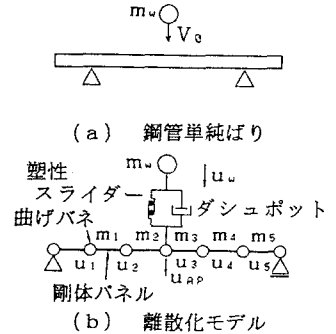


図-1 衝突現象のモデル化

$$\begin{pmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & m_3 & & \\ & & & m_4 & \\ 0 & & & & m_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{u}_4 \\ \ddot{u}_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_1 & & & & \\ & D_2 & & & \\ & & D_3 & & \\ & & & D_4 & \\ 0 & & & & D_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \\ \dot{u}_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 & & & & \\ & k_2 & & & \\ & & k_3 & & \\ & & & k_4 & \\ 0 & & & & k_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$m_w \ddot{u}_w + P = m_w g \quad (2)$$

ただし、 m_w : 重錘の質量、 P : 衝突荷重、 u_i 、 \dot{u}_i 、 \ddot{u}_i : i 質点の変位、速度および加速度、 \ddot{u}_w : 重錘の加速度で、 m_w は $m_w = W/g$ (W : 重錘重量、 g : 重力加速度) により算出される。また、はりの i 要素の質量マトリクス m_i 、剛性マトリクス k_i および減衰マトリクス D_i は次のようになる。なお、質量マトリクスは各要素の集中質量に換算し、また降伏条件は曲げのみを考慮した。

$$m_i = \frac{\rho A}{6} \begin{pmatrix} 2 \ell_{i-1} & \ell_{i-1} & 0 \\ \ell_i & 2(\ell_{i-1} + \ell_i) & \ell_i \\ 0 & \ell_i & 2 \ell_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$k_i = \frac{EI}{1/2(\ell_{i-1} + \ell_i)} \begin{pmatrix} \frac{1}{\ell_{i-1}^2} & -\frac{1}{\ell_{i-1}}(\frac{1}{\ell_{i-1}} + \frac{1}{\ell_i}) & \frac{1}{\ell_{i-1} \cdot \ell_i} \\ -\frac{1}{\ell_{i-1}}(\frac{1}{\ell_{i-1}} + \frac{1}{\ell_i}) & (\frac{1}{\ell_{i-1}} + \frac{1}{\ell_i})^2 & \frac{1}{\ell_i}(\frac{1}{\ell_{i-1}} + \frac{1}{\ell_i}) \\ \frac{1}{\ell_{i-1} \cdot \ell_i} & \frac{1}{\ell_i}(\frac{1}{\ell_{i-1}} + \frac{1}{\ell_i}) & \frac{1}{\ell_i^2} \end{pmatrix} \quad (4a)$$

$$k_i = 0 \quad (\text{塑性時}) \quad (4b) \quad D_i = \alpha m_i + \beta k_i \quad (5) \quad (\text{弾性時})$$

ここに、 ρ : 単位体積重量、 A : 鋼管の断面積、 ℓ_i : i 要素長、 E : 弾性係数、 I : 断面2次モーメント
なお、計算では $\alpha = 0$ 、 $\beta = 2h \sqrt{m/k}$ の値を用いた。

(2)局部変形による断面変化を考慮した $M \sim \phi$ 関係 衝突後の鋼管はりは、衝突点において局部めり込みが発生し、その形状は概ね楕円形となっている。そこで、図-2に示すように断面が円から逐次楕円へと変形していくと仮定して解析を行った。局部めり込み量 δ が発生した際の断面2次モーメント I および降伏モーメント M_y は次式で与えられる³⁾。

$$I = \pi ((D - \delta)^3 \cdot B - (D - \delta - 2t)^3 \cdot (B - 2t)) / 64 \quad (6)$$

ただし、 $B = (D^2 - (D - 2t)^2 - 2t(D - \delta) + 4t^2) / 2t$

$$M_y = 2\sigma_y \cdot I / (D - \delta)$$

これより、局部めり込みによる断面変化を考慮した $M \sim \phi$ 関係は、図-2のようになる。

(3) 衝突荷重の算定 いま、図-3のような局部変形を考慮した場合の衝突荷重 P は、図-1(b)の塑性スライダーとダッシュポットを考慮して、次式により与えられる。

$$P = \frac{4}{\delta} \sigma_y \cdot Z + C_w (\dot{u}_w - \dot{u}_{AP}) \quad (u_w - u_{AP} > 0) \quad (7a)$$

$$P = 0 \quad (u_w - u_{AP} \leq 0) \quad (7b)$$

ただし、 σ_y : 鋼管の降伏応力、 Z : 局部変形を考慮した鋼管の断面係数で $Z = 2I / (D - \delta)$ 、 \dot{u}_w 、 \dot{u}_{AP} : 重錘および衝突点のはりの速度、 C_w : 減衰係数で、衝突実験と静的実験の荷重値の差から $C_w = (P_{dyn} - P_{sta}) / (\dot{u}_w - \dot{u}_{AP})$ により、各変位状態における C_w を離散的に求め、その平均値を用いた。ただし、 P_{dyn} 、 P_{sta} : 衝突実験および静的実験における荷重値。本解析においては、上述の基本式とニューマークの β 法を用いて数値計算を行った。

3. 数値計算例 中空鋼管はりに対する衝突実験⁴⁾、すなわち、 $\phi 89.1$ mm長さ60cmの鋼管の中央に重量150kgfの重錘が速度8.0m/sで衝突する場合について、本法を用いて計算を行った。図-4に得られた荷重～変位関係を実験結果と比較して図示する。図-4から、計算結果は軟化型の傾向を示し、若干荷重値は実験結果より小さな値を示すものの、実験結果をほぼよくシミュレートしていることが認められる。荷重がやや小さめの値を示すのは、本解析においてひずみ速度効果の影響を考慮していないためと考えられる。

図-5に、図-4の荷重～変位関係を逐次積分することにより得られる吸収エネルギー～変位関係を示す。図-5より、計算結果は吸収エネルギーを若干小さく評価してはいるものの、実験結果を比較的よくシミュレートしていることが認められる。さらにひずみ速度効果の影響を考慮すれば、中空鋼管はりの局部変形を考慮した吸収エネルギーを比較的精度よく算定できると考えられる。

参考文献 1) 砂防・地すべり技術センター: 鋼製砂防構造物設計便覧、昭和62年版 2) 斎藤英明、石川信隆、大野友則、水山高久: 鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第386号I-8、pp.321~328、1987年10月 3) 川井豊、石渡正夫、山野井節雄: 鋼管部材の耐力実験、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.9~14、1991.3 4) 伊藤一雄、石川信隆、川嶋幾夫、鈴木宏: 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.137A、pp.1581~1589、1991.3

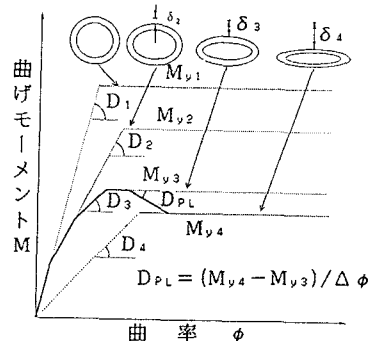


図-2 局部変形による断面変化を考慮した曲げモーメント $M \sim$ 曲率 ϕ 関係

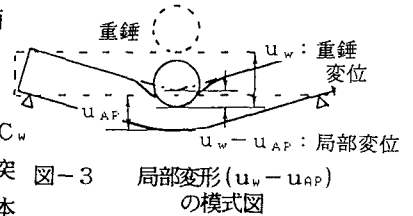


図-3 局部変形 $(u_w - u_{AP})$ の模式図

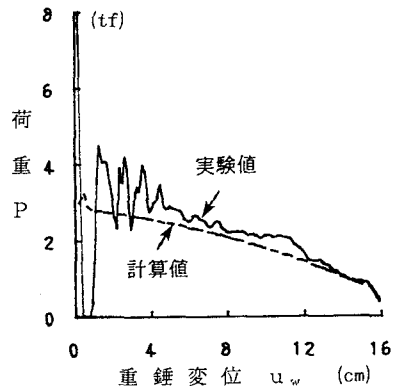


図-4 荷重～変位関係

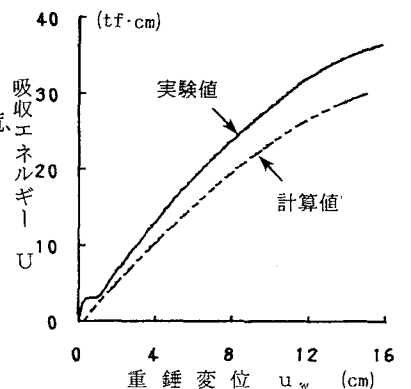


図-5 吸収エネルギー～変位関係