

防衛大学校 正員 石川信隆 防衛大学校 正員 香月 智
 防衛大学校 学員 星川辰雄 土木研究所 正員 水山高久

1. 緒言 近年、鋼製スリットダムが数多く使用されるようになってきたが、土石流中に含まれる巨礫がスリットダムに衝突することによって局部的にせん断破壊した例が過去にあった。本研究は、その破壊原因を理論的に究明するため、はりの局部変形とせん断変形を同時に考慮した鋼管片持ばりの衝撃応答解析法を確立し、片持ばりの固定端近傍に衝撃荷重を受ける場合の応答を数値計算して実験結果と比較したものである。

2. 基本式 (1)運動方程式 まず図-1(a)に示す片持ばりを図-1(b)のようにいくつかの要素に分割し、その要素モデルは図-1(c)のように両端に曲げ、せん断、軸力の塑性バネをもち、はり要素自身は曲げ、せん断、軸力の弾性変形をするものとし、また荷重点には図-1(b)のように局部バネをつけ、局部変形量（めり込み量）を算定可能とした。このような要素モデルを用いた片持ばりの運動方程式は次式で表わされる。

$$m\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = P \quad (1)$$

ただし、 m ：質量マトリックス、 D ：減衰係数マトリックス、 K ：構造全体の剛性マトリックス、 P ：外力ベクトル、 u ：節点変位ベクトル。

(2)剛性マトリックスの誘導 はりの純せん断変形を算出可能な剛性マトリックスは以下のように誘導される。まず弾塑性解析に必要なかつ十分な条件式は次式ようになる。

$$\textcircled{1} \text{ つり合い条件: } \begin{bmatrix} c_A^T \\ c_S^T \end{bmatrix} Q = \begin{bmatrix} F_A \\ F_S \end{bmatrix} \quad (2)$$

②変形適合条件式：

$$\begin{bmatrix} c_A & c_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_S \end{bmatrix} = q = q^e + q^p \quad (3)$$

ただし、 $q^e = k^{-1}Q$ （弾性内変形）、

$$q^p = N\lambda \quad (\text{塑性内変形})$$

$$\textcircled{3} \text{ 降伏条件式: } \phi = N^T Q - R \leq 0 \quad (4)$$

$$\textcircled{4} \text{ 塑性変形発生条件: } \phi^T \lambda = 0 \quad (5)$$

ただし、 F_A ＝内力 Q （曲げ、せん断、軸力）とつ

り合う外力ベクトル； F_S ＝仮想変位 u_S に対応する外力ベクトル； N ＝降伏条件式に対する外向き単位法線マトリックス； c_A ＝外変位 u_A と内変形 q を適合させるマトリックス； c_S ＝外変位 u_S と内変形 q を適合させるマトリックス； u_A ＝曲げと軸力とせん断変形によって生じる節点変位ベクトル； u_S ＝せん断変形のみによって生じる仮定の節点変位ベクトル； k ＝要素の弾性集合剛性マトリックス；以上の式(2)～(5)を用いると、剛性マトリックスがそれぞれ次のように誘導される。

$$(a) \text{ 弾性時: } K_e = [c_A^T k c_A] - [c_A^T k c_S] [c_S^T k c_S]^{-1} [c_S^T k c_A] \quad (6)$$

$$(b) \text{ 弾塑性時: } K_p = [c_A^T k c_A] - [c_A^T k c_S \quad c_A^T k N] G^{-1} \begin{bmatrix} c_S^T k c_A \\ N^T k c_A \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{ただし、} G = \begin{bmatrix} c_S^T k c_S & c_S^T k N \\ N^T k c_S & N^T k N \end{bmatrix}$$

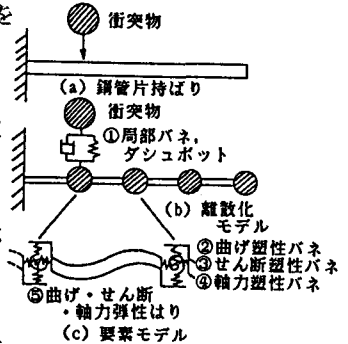


図-1 構造のモデル化

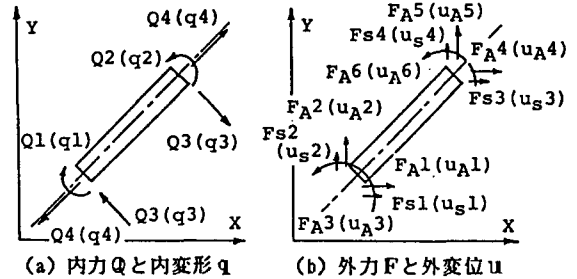


図-2 要素の断面力と変位の関係

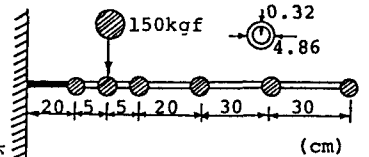


図-3 解析モデル

またここでの ϕ は式(4),(5)において $\phi = 0$ となる降伏条件式

に対応する N ベクトルだけを抽出したものである。

3. 衝撃応答解析法 衝撃応答解析の手法は、①重錘に衝突速度 V_0 を与えて解析を開始する。②時刻 t における衝突点のはりの変位 u_i 、速度 $\dot{u}_i$ および重錘の変位 u_m 、速度 $\dot{u}_m$ から次式を用いて衝撃荷重 P_t を求める。

$$P_t = k_m(u_m - u_i) + C_m(\dot{u}_m - \dot{u}_i) \quad (8)$$

ただし、 k_m =局部バネ係数、 C_m =局部減衰係数。③ P_t を用いて、重錘の $t + \Delta t$ の運動解を求める。④ P_t を用いて、はりの $t + \Delta t$ の運動解をWilsonの θ 法を用いて求める。⑤計算終了条件($t = t_E$; 指定した終了時間)に達するまでくり返す。

4. 数値計算例 著者らが行った固定端近傍に衝撃荷重を受ける鋼管片持ばりの実験¹⁾、すなわち図-3のような $\phi = 4.86\text{cm}$ 長さ110cmの鋼管の固定端から25cmのところに重錘150kgfが衝突する場合について本法を用いて解析を行なった。なお、局部バネ定数は鋼管の静的局部めり込み実験を行なうことにより図-4のようなモデル(Idealized 1)を採用した。

(1)荷重および変位～時間関係 図-5に得られた荷重～時間関係を実験値と比較図示する。これより、計算値は実験値の細かい振動応答を除いて、全体的にはほぼ実験値をシミュレートしているものと思われる。

図-6に重錘の変位～時間曲線を示す。これより、計算値は実験値より大きめの値を示すが、全体的傾向としてはほぼ一致している。ところで、計算値でははり自体の変位と重錘の変位の差(A-B)が非常に大きく現われているが、これは図-4に示す局部変形量を示している。事実、実験においてはこの局部変形が非常に大きく、衝突速度が8m/sに達するとほぼ切れる寸前までこの変形量が達しており、本解析が定性的によくその現象を表わしているものと思われる。

(2)衝撃吸収エネルギー 図-7は衝撃吸収エネルギーと衝突速度との関係を示したもので、実線は局部変形が管径と同じ4.8cmに達した時を管の応答の限界値とみなしてそれまでに吸収されるエネルギーを算定したものである。 $V_0 = 6.0\text{m/s}$ までは限界値に変位が達しないため吸収エネルギーは重錘の運動エネルギーと完全に一致するが、 $V_0 = 8.0\text{m/s}$ ではこの限界値に変位が越えるため、その吸収エネルギーは運動エネルギーより小さくなる。よって、 $V_0 = 6.0\text{m/s}$ と 8.0m/s の間に限界衝撃吸収エネルギーが存在することが分る。またこの限界エネルギー線に至る全体的傾向は実験値とほぼ一致しているが、実験では限界が $V_0 = 8.0\text{m/s}$ と 10.0m/s の間に存在することが分る。さらに、図-4における静的局部変形実験より得られる吸収エネルギー(図-8の点線)は本解析による限界吸収エネルギーとほぼ一致しており、固定端近傍に荷重が載荷する場合は静的局部めり込み実験により限界衝撃吸収エネルギーを推定することができる。

参考文献 1) 香月, 星川, 石川, 水山: 鋼管はりのせん断衝撃実験について, 平成元年度砂防学会研究発表会概要集, 1989年5月。

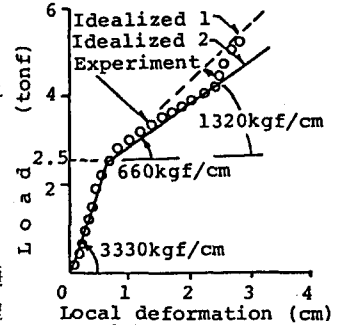


図-4 静的局部めり込み実験

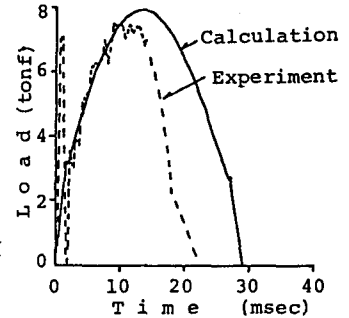


図-5 荷重～時間関係

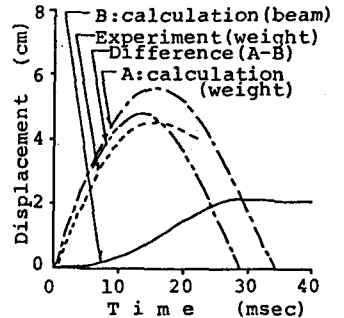


図-6 変位～時間関係

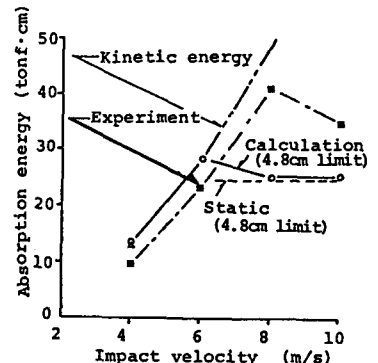


図-7 吸収エネルギー～衝突速度関係