

13 透過型鋼製砂防ダムの耐衝撃設計法に関する一考察

防衛大学校 ○星川 辰雄

同 上 石川 信隆

(財)砂防・地すべり技術センター 阿部 宗平

京都大学 水山 高久

1. 緒言 本研究は、土石流中の巨礫の衝突による透過型鋼製砂防ダムの耐衝撃設計法を確立するため、まず局部変形の影響を考慮した3次元弾塑性衝撃応答解析法を開発し、次に、破壊基準を部材の塑性回転容量によって規定するものとして、B型スリットダムの安全性照査を行ったものである。

2. 3次元弾塑性衝撃応答解析

2.1 解析モデル 図-1に示すように、各部材要素には2軸曲げ、軸力およびねじりモーメントが作用するものとする。また衝突点には、図-2のように局部ばねおよびダッシュポットを用いて、局部変形を考慮した衝撃力を次式により算定することとする。

$y_w \geq y_A$ の場合

$$P = P_L + C_w(\dot{y}_w - \dot{y}_A)$$

$y_w < y_A$ の場合

$$P = 0$$

ここに、 C_w ：局部減衰係数、 y_w ：重錘変位、 y_A ：はり変位。また、 P_L は局部変形により生ずる局部ばね力で、次式で表される¹⁾。

$$P_L = \frac{1}{4} K \sigma_y t^2 \left(\frac{\delta_d}{D} \right)^{0.8} \quad (2)$$

ただし、 K ：定数(=185)、 σ_y ：降伏応力、 D ：鋼管径、 t ：肉厚、 $\delta_d = y_w - y_A$ ：局部変形量。

2.2 運動方程式 本解析においては、次の運動方程式を用いるが、その中味は3次元マトリクス解析と同じである。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (3)$$

ただし、 M ：質量マトリクス、 C ：減衰マトリクス、 K ：剛性マトリクス、 P ：外力マトリクス、 $\ddot{u}$, $\dot{u}$, u ：各節点の加速度、速度、変位ベクトル。

2.3 降伏条件式 本法における降伏条件式は、次のように2軸曲げ、軸力およびねじりモーメントを考慮する。

$$\left(\frac{N}{N_p} \right)^2 + \left(\frac{T}{T_p} \right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{px}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{py}} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

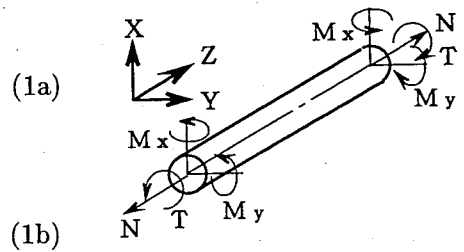


図-1 解析モデル

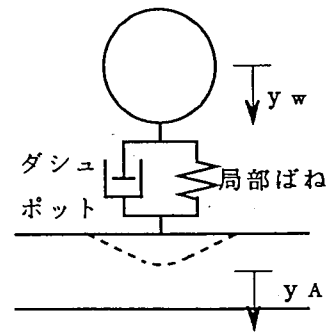


図-2 衝突点モデル

なお、局部変形の影響は、その点の強軸方向の終局曲げモーメントのみを低下することにより考慮することとした。

2. 4 ひずみ速度効果の導入 衝突速度が速くなるとひずみ速度効果により鋼材の見かけ上の降伏点応力が上昇する。ここでは、鋼材の動的降伏点応力 $\sigma_{y,d}$ を次式で算出するものとした。

$$\sigma_{y,d}/\sigma_{y,s} = 1.202 + 0.04 \log \dot{\epsilon} \quad (5)$$

ただし、 $\dot{\epsilon}$ ：応答ひずみ速度、 $\sigma_{y,s}$ ：静的降伏点応力。

ここで、応答ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は次のように求められる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{D}{2} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

ただし、 ϕ ：曲率で、時間増分 Δt 間における図-3 (a) の i 端における曲率増分 $d\phi/dt$ は、次のように求められる。

$$\frac{d\phi}{dt} = (4\Delta q_i - 2\Delta q_j)/\ell \quad (7a)$$

ここで、 $\Delta q_i, \Delta q_j$ ：時間増分 Δt 間における部材 i 端および j 端の内変形量 (回転角) の増分で、図-3 を参照して次式で算定される。

$$q_i = -\Delta u_3 + (-\Delta u_2 + \Delta u_5)/\ell \quad (7b)$$

$$q_j = \Delta u_6 + (\Delta u_2 - \Delta u_5)/\ell \quad (7c)$$

ただし、 u_i ：外変形量。

3. 破壊基準と安全性照査 鋼管構造物が曲げ変形を受ける場合を対象として、著者ら²⁾は、鋼管片持りに対する高速载荷実験を行い、鋼管に発生するひずみ速度が $\dot{\epsilon} = 10^{0.5}/\text{sec}$ 程度において、局部座屈が形成される時点のはりの限界塑性回転容量を実験的に次式のように求めた。

$$\theta_{pd} = 1.355/(D/t) \quad (8)$$

ここで、 $\dot{\epsilon} = 10^{0.5}/\text{sec}$ 程度のひずみ速度とは、衝突物の速度が数 m ~ 10 数 m/sec に相当する。よって、安全性照査は、最大応答塑性回転角 $\theta_{p,max}$ と限界塑性回転容量 $\theta_{p,d}$ との大小によって以下の式で行われる。

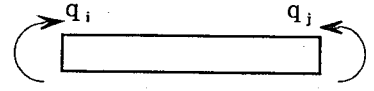
$$\theta_{p,max} \leq \theta_{p,d} \quad (9)$$

上式が満足されれば安全である。

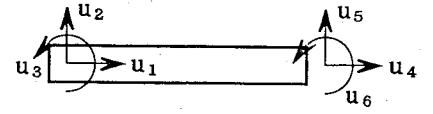
4. 計算例

いま、図-4 (a) のような B 型スリットダムを、図-4 (b) のようにモデル化して、衝撃応答解析を行った。なお、モデルの節点座標は表-1 に、部材諸元は表-2 の通りである。

4. 1 安全性照査例 1 いま一例として、A 点に直径 2 m、重量約 10 tonf の巨礫が、速度 10 m/sec で衝突した場合の破壊過程を図-5 に示す。図中の●印および数字は、塑性ヒンジ発生位置および順番を示す。図より、本解析において逐次部材が降伏していく過程が認められるが、まだ完全に崩壊してはいない。なお、 δ_L は局部変位、 δ_B ははり変位を意味し、 t は衝突直後からの各時刻を示す。また本解析で求



(a) 内変形量の定義

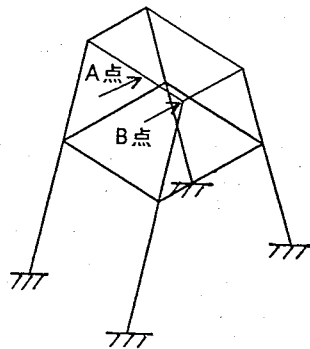


(b) 外変形量の定義

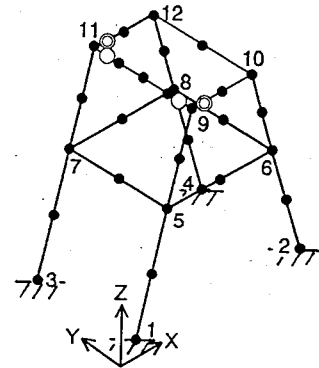
図-3 変形量の定義

められた最大塑性回転角は $\theta_{p,max} = 0.0115\text{rad}$ で、これは図-4 (b) の◎印の位置、つまり図-5 (c) の2番目の塑性ヒンジの位置の最大塑性回転角である。

一方、限界塑性回転容量は、 $\theta_{p,d} = 1.355/(609.2/12) = 0.0267\text{rad}$ であり、よって、安全性照査は $\theta_{p,max} < \theta_{p,d}$ となり、安全であることが認められる。



(a) B型スリットダム



(b) モデル化

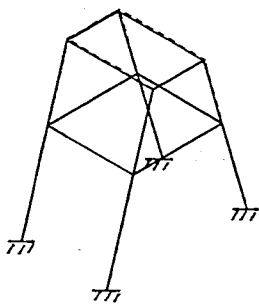
図-4 B型スリットダムのモデル化

表-1 節点座標

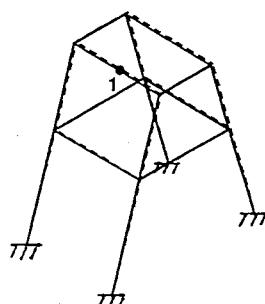
	X	Y	Z
1	0.0	0.0	0.0
2	657.4	0.0	0.0
3	0.0	400.0	0.0
4	657.4	400.0	0.0
5	120.0	0.0	400.0
6	537.4	0.0	400.0
7	120.0	400.0	400.0
8	537.4	400.0	400.0
9	210.0	0.0	700.0
10	447.4	0.0	700.0
11	210.0	400.0	700.0
12	447.4	400.0	700.0

表-2 部材諸元

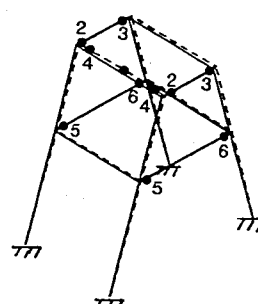
	鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	部材長 (cm)
1-5	609.6	22	417.6
3-7	"	"	"
5-9	"	"	313.2
7-11	"	"	"
5-7	"	"	400.0
9-11	"	"	"
2-6	"	16	417.6
4-8	"	"	"
6-10	"	"	313.2
8-12	"	"	"
6-8	"	"	400.0
10-12	"	"	"
5-6	"	"	417.4
7-8	"	"	"
9-10	"	12	237.4
11-12	"	"	"



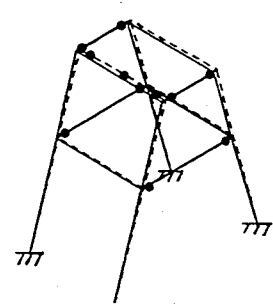
(a) $t = 10 \text{ msec}$
 $\delta_T = 9.6 \text{ cm}$
 $\delta_L = 8.7 \text{ cm}$
 $\delta_B = 0.9 \text{ cm}$
 $\theta_{p,max} = 0 \text{ rad}$



(b) $t = 20 \text{ msec}$
 $\delta_T = 17.3 \text{ cm}$
 $\delta_L = 15.2 \text{ cm}$
 $\delta_B = 2.1 \text{ cm}$
 $\theta_{p,max} = 0 \text{ rad}$

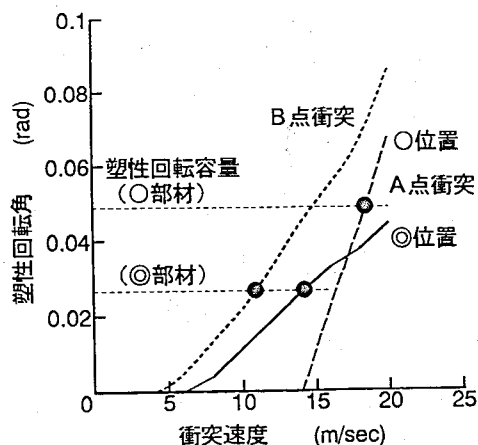


(c) $t = 30 \text{ msec}$
 $\delta_T = 22.2 \text{ cm}$
 $\delta_L = 17.6 \text{ cm}$
 $\delta_B = 4.6 \text{ cm}$
 $\theta_{p,max} = 0.007 \text{ rad}$

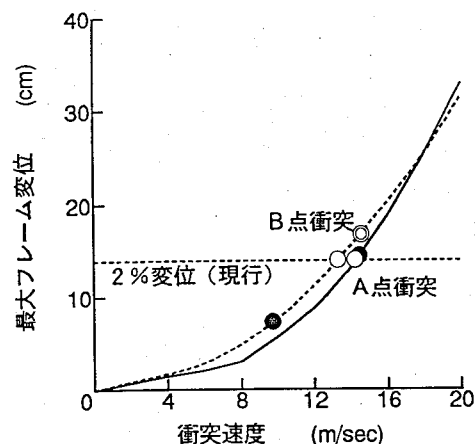


(d) $t = 40 \text{ msec (応答終了)}$
 $\delta_T = 23.8 \text{ cm}$
 $\delta_L = 18.2 \text{ cm}$
 $\delta_B = 5.6 \text{ cm}$
 $\theta_{p,max} = 0.0115 \text{ rad}$

図-5 破壊過程 ($W = 10 \text{ tonf}$, $V = 10 \text{ m/sec}$)



図－6 塑性回転角～衝突速度関係
(安全性照査)



図－7 最大フレーム変位
～衝突速度関係
(現行設計法との比較)

4. 2 安全性照査例2 次に、A点およびB点に、それぞれ直径2 m、重量約10tonfの巨礫が、速度4 m/sec、8 m/sec、12 m/sec、16 m/sec、20 m/secで衝突した場合の構造物に生ずる最大塑性回転角を図－6のように求めた。図－6より、衝突速度が遅い4～6 m/secの場合は、塑性回転角は発生しない。これは局部変形のみで巨礫の運動エネルギーを吸収することを意味する。しかし、衝突速度の増大にともない塑性回転角も大きくなっている。また、A点载荷の場合は17 m/sec以下では図－4 (b)の◎印位置で最大塑性回転角が発生するが、17 m/sec以上では○印位置で最大塑性回転角が発生するようになる。なお、B点载荷の場合は衝突速度に拘わらず、载荷点側の◎印位置で最大塑性回転角が発生する。

次に、図－6中の点線は限界塑性回転容量を示したもので、この点線以上になると構造物は破壊することを意味している。A点载荷の場合は衝突速度が速い場合に最大塑性回転角の発生位置が変化する(◎印から○印へ)が、◎印の部材の方が限界塑性回転容量が小さいため、○印位置よりも先に限界値に達するようになる。塑性回転角がこの限界塑性回転角に達すると構造物は破壊に至るため、B点载荷の場合は約10 m/sec、A点载荷の場合は約14 m/secで破壊することになる。

さて、ここで現行設計法の設計基準との比較を行う。B型スリットダムでは、現在試行的に、許容変形量をフレーム高さの2%として破壊基準を定めている。図－7に最大フレーム変位～衝突速度関係を示す。図中の○印は現行設計法における破壊限界を示し、●印は本法における破壊限界を示す。図－7より、A点载荷の場合は耐えうる衝突速度はほぼ等しい(約14 m/sec)が、B点载荷の場合は小さな衝突速度(約10 m/sec)までしか耐えられないことがわかる。しかしながら、最大塑性回転角の発生部材である鋼管径609.6 mm、肉厚12 mmを肉厚22 mmに変換すれば、B点载荷の場合においても約2.4% (図－7の◎印)まで許容変位量を増大させることができる。

5. 結論 本研究では、局部変形を考慮したB型スリットダムの衝撃応答解析法を開発するとともに、安全性照査のための1つの指針としての塑性回転容量によるチェックを行う方法について示した。今後は、構造形態および使用する部材の寸法等について検討し、また耐衝撃性の優れた構造物の形状についても検討していく予定である。

参考文献 1) 星川他：局部変形を考慮した鋼管固定はりの終局限界に関する一考察、平成6年度砂防学会研究発表会概要集、pp.215～218、平成6年 2) 石川他：鋼管片持はりの塑性回転容量について、平成6年度砂防学会研究発表会概要集、pp.207～210、平成6年