

防衛大学校 ○石川信隆 神戸製鋼所 葛西俊一郎  
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 現在、中空鋼管を用いた鋼製透過型砂防ダムには、格子形鋼製砂防ダムや鋼製スリットダムB型などがあり、これらは立体構造物で、礫による衝突を受けると、その動的現象を解明するためには、3次元弾塑性衝撃応答解析<sup>1),2)</sup>によらなければならない。本研究は、計算の簡便性を考慮して既往の固定梁として解析する方法<sup>3)</sup>を踏襲して、中空鋼管を用いた鋼製透過型砂防ダムの簡易設計法を提案するものである。特に、ここでは、以下の3点が従来の方法<sup>3)</sup>と異なる点である。

(1) 中空鋼管断面のへこみ変形に対する式において、鋼管断面のへこみ変形の形状を半月形<sup>3),4)</sup>から楕円形<sup>5)</sup>へ変更し、さらに礫の径や動的降伏応力度を考慮できるように修正した<sup>5)</sup>。

(2) 鋼管部材の許容塑性変形は、従来加藤ら<sup>6)</sup>の論文を参考に弾性限界変形の20倍としているが、ここでは、鋼管部材に局部座屈が発生するときの塑性回転角とし、これを実験により動的塑性回転容量の式<sup>7)</sup>として提案した。

(3) 礫の衝突は、動的現象で一般にひずみ速度効果により見かけ上降伏応力度が上昇するので、この影響を考慮できるようにした。

2. 固定梁解析によるエネルギー簡易設計法

2.1 鋼管断面のへこみ変形による吸収エネルギー( $E_d$ ) まず鋼管断面のへこみ変形に対する荷重 $P_1$ は、次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$P_1 = \frac{1}{4} K \cdot \sigma_{y,d} \cdot t^2 \left(\frac{\delta_d}{D}\right)^{0.8} \quad (1)$$
 ここで、 $\sigma_{y,d}$  : 鋼管材料の動的降伏応力度で、通常 $\sigma_{y,d} = (1.0 \sim 1.2)\sigma_y$ であるが、ここでは安全側の値をとり、 $\sigma_{y,d} = 1.0\sigma_y$ を用いる。 $\sigma_y$  : 静的降伏応力度、 $t$  : 鋼管肉厚、 $D$  : 鋼管外径、 $\delta_d$  : へこみ変形、 $K$  : 礫と鋼管との衝突接触による係数で、次式により求められる<sup>5)</sup>。

$$K = 161 \left(\frac{D_0}{D}\right)^{0.11} \quad (2)$$
 ただし、 $D_0$  : 礫の直径

次に、へこみ変形が終了すると、梁の塑性変形に移行するが、そのときの崩壊荷重 $P_c$ は、両端固定梁の中央に荷重が作用するものとする、図-1のように固定梁に崩壊メカニズムが形成され、次式で与えられる。

$$P_c = \frac{4}{L} (M_{PA} + M_{PC}) \quad (3)$$
 ここで、 $M_{PA}$  : 固定端Aの塑性曲げモーメント、 $M_{PC}$  : 中央点Cの塑性曲げモーメント、 $L$  : スパン長 また $M_{PA}$ 、 $M_{PC}$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$M_{PA} = D^2 \cdot \sigma_y \cdot d \cdot t \quad (4a) \quad M_{PC} = \frac{4}{3} \sigma_{y,d} \left\{ a \cdot b^2 - (a-t)(b-t)^2 \right\} \quad (4b)$$

ただし、 $a$ 、 $b$  : 図-2のように楕円形の長径と短径で、それぞれ次式を用いて求められる。

$$4a \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 x} dx = \pi D \quad (5a) \quad b = \frac{D - \delta_d}{2} \quad (5b)$$

ただし、 $\alpha^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (5c) \quad \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 x} dx = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{1}{4}\alpha^2 - \frac{3}{64}\alpha^4 - \frac{15}{768}\alpha^6 \right) \quad (5d)$

式(1)で表される荷重へこみ変形関係は、式(3)の崩壊荷重に達するまで進行するが、それ以降はへこみ変形が進行せず、固定梁としての塑性変形すなわちメカニズムとしての変形が進行する。したがって、へこみ変形が終了するときの最大へこみ変形 $\delta_{d,max}$ は、式(1)の $P_1$ と式(3)の $P_c$ を等しいとおいて求められる。実際の計算では、まず $\delta_d$ と $a$ を仮定して、式(6a)より $a$ を、また $P_1 = P_c$ より式(6b)の $\delta_{d,max}$ を求め、これらの値が収束するまで繰り返すことになる。

$$a = D/2 \left( 1 - \frac{1}{4}\alpha^2 - \frac{3}{64}\alpha^4 - \frac{15}{768}\alpha^6 \right) \quad (6a) \quad \delta_{d,max} = D \left[ \frac{16}{L \cdot K \cdot t^2} \left( D^2 t + \frac{4}{3} \left\{ ab^2 - (a-t)(b-t)^2 \right\} \right) \right]^{1.25} \quad (6b)$$

よって、最大へこみ変形 $\delta_{d,max}$ が求まれば、鋼管のへこみ変形による吸収エネルギー $E_d$ が次式のように算定される。

$$E_d = \frac{1}{4} K \sigma_{y,d} t^2 \frac{\delta_{d,max}^{1.8}}{1.8 D^{0.8}} \quad (7)$$

2.2 最大塑性回転角( $\theta_{p,max}$ ) 梁の塑性変形 $\delta_{p,max}$ は、礫の運動エネルギー $E_R (= \frac{1}{2} mV^2 ; m, V$  : 礫の質量と速度)が最大へこみ変形による吸収エネルギー $E_d$ を越えたとき、すなわち、へこみ変形のみで $E_R$ を吸収しきれなくなったときに生ずる。つまり、 $E_d$ を越えた残りのエネルギー( $E_R - E_d$ )を部材の塑性変形 $\delta_{p,max}$ によるエネルギー( $\delta_{p,max} \times P_c$ )が吸収するとして $\delta_{p,max}$ が次式のように求められる。

$$\delta_{p,max} = (E_R - E_d) / P_c \quad (8a)$$

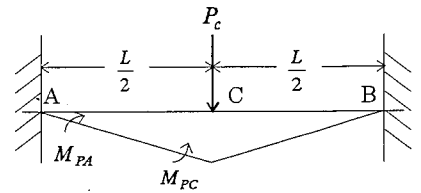


図-1 固定梁の崩壊メカニズム

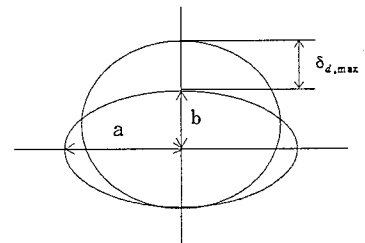


図-2 へこみ変形と楕円形

よって、鋼管固定梁の最大塑性回転角 $\theta_{p,max}$ は、崩壊メカニズムにおける幾何学的条件から次式で算定される。

$$\theta_{p,max} = 2\delta_p / L \quad (8b)$$

2. 3 許容塑性回転角 ( $\theta_{pa}$ ) 片持梁の高速載荷実験により、鋼管に局部座屈が発生するときを部材の終局限界として、許容塑性回転角 $\theta_{pa}$ を次式より求めるものとした<sup>7)</sup>。

$$\theta_{pa} = 1.355 / (D/t) \quad (9a)$$

よって、許容塑性変形 $\delta_{pa}$ は次式で与えられる。

$$\delta_{pa} = \theta_{pa} (L/2) \quad (9b)$$

2. 4 安全性照査式 式(8)の $\theta_{p,max}$ (または $\delta_{p,max}$ )が式(9)の $\theta_{pa}$ (または $\delta_{pa}$ )を越えないとき、部材は安全であるとする。すなわち、 $\theta_{p,max} \leq \theta_{pa}$  (10a) または  $\delta_{p,max} \leq \delta_{pa}$  (10b)

3. 計算例 ここでは、鋼製砂防構造物設計便覧 (p.110) の計算例1と同じ条件で白水谷第2号砂防ダムの安全性照査を行う。

(1)計算条件

a. 衝突する岩石の質量 $m$ は、岩石の直径2mを球とし、その単位体積当たりの重量を $2.4\text{tf}/\text{m}^3$ とすると、 $m=1.026\text{tf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$

b. 衝突する岩石の運動エネルギー $E_R$ は、 $V=7.5\text{m/s}$ とすると $E_R = \frac{1}{2}mV^2 = 28.9\text{tf}\cdot\text{m}$ 。

c. 衝撃を受ける鋼管部材は、両端固定とし、外径 $D=508\text{mm}$ 、肉厚 $t=16\text{mm}$ 、静的降伏応力度 $\sigma_y = 32\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、長さ $L=4\text{m}$ 、動的降伏応力度 $\sigma_{y,d} = 1.0\sigma_y$ とする。

(2)安全性照査 式(6a)、式(6b)より楕円形の長径 $a$ と最大へこみ変形 $\delta_{d,max}$ を求めると、 $a=339\text{mm}$ 、 $\delta_{d,max}=229\text{mm}$ 。式(7)

より、へこみ変形による吸収エネルギー $E_d$ は、 $E_d=25.8\text{tf}\cdot\text{m}$ 。さらに、へこみ変形終了時の崩壊荷重 $P_c (= P_1)$ は、式(3)または式

(1)より $P_c = P_1 = 203.3\text{tf}$ 。よって、最大塑性変形 $\delta_{p,max}$ および最大塑性回転角 $\theta_{p,max}$ は、それぞれ式(8a)および式(8b)を用いて表-1のようになり、一方、許容塑性回転角 $\theta_{pa}$ (または $\delta_{pa}$ )も、式(9)より表-1のような値となり、 $\theta_{p,max} \leq \theta_{pa}$  ( $\delta_{p,max} \leq \delta_{pa}$ )を満足する。

以上のチェックにより、直径2mの球状の岩石が速度7.5m/sで衝突した場合、へこみ変形 $\delta_{d,max} = 229\text{mm}$ 、部材変形 $\delta_{p,max} = 15\text{mm}$ を生じて岩石を補足する。

(3)現行設計法との相違

現行設計法と本設計法とを比較すると、表-1のようになる。これより以下の点が考察される。

①本設計法の最大へこみ変形 $\delta_d$ の方が大きく、したがって、へこみ変形による吸収エネルギー $E_d$ も大きい。

②本設計法の部材の最大塑性変形 $\delta_{p,max}$ 、すなわち最大塑性回転角 $\theta_{p,max}$ は現行設計法の値よりも小さい。これは、衝突エネルギーの多くがへこみ変形に吸収されたためである。

③本設計法の許容塑性変形 $\delta_{pa}$ (または許容塑性回転角 $\theta_{pa}$ )は、本計算例ではやや大きい。式(9)で表されるように径厚比 $D/t$ の値に応じて変化し、 $D/t$ が大きい場合は $\delta_{pa}$ (または $\theta_{pa}$ )は小さくなる。これに反し、現行設計法の $\delta_{pa}$ は、鋼管径 $D$ とスパン長 $L$ の関数で、肉厚 $t$ の影響がない。

なお、本設計法は、中空鋼管を用いた鋼製透過型砂防ダムの構造部材のうち、礫の衝突が予想される部材を1本選び、これを固定梁解析し安全性を照査するものである。しかし、砂防ダムの構造形態によっては複雑な形式をもつ場合があり、この場合には3次元弾塑性衝撃応答解析<sup>1)</sup>により安全性を照査することが望ましい。

#### 参考文献

- 1) 星川辰雄、石川信隆、彦坂熙、水山高久、安部宗平：鋼製透過型砂防構造物の弾塑性衝撃応答解析と耐衝撃設計法。土木学会論文集 No. 549/1-13, pp. 159~174, 1996. 10.
- 2) 星川辰雄：鋼製透過型砂防ダムの動的塑性回転容量に基づく耐衝撃設計法に関する研究。九州大学学位請求論文, 1995. 9.
- 3) (財)砂防・地すべり技術センター：鋼製砂防構造物設計便覧, P. 110, 平成5年版
- 4) Charles P. Ellinas and Alastair C. Walker; Damage on Tubular Bracing Member, IABSE Colloquium, Copenhagen, Vol. 42, 1983.
- 5) 星川辰雄、石川信隆、彦坂熙、安部宗平：局部変形とひずみ速度効果を考慮した鋼管固定梁の衝撃応答変位, 土木学会論文集 No. 513/1-13, pp. 101~115, 1995. 4.
- 6) 加藤勉、秋山宏、鈴木弘之：鋼管梁の曲げ耐力, 日本建築学会大会講演概要集, pp. 1019~1020, 1973. 10.
- 7) 星川辰雄、石川信隆、彦坂熙、安部宗平：鋼管はり部材の動的終局限界に関する一考察, 土木学会論文集 No. 525/1-13, pp. 134~152, 1995. 10.

表-1 現行設計法との比較

	現行設計法	本設計法
最大へこみ変形 $\delta_{d,max}$	162mm	229mm
へこみ変形による吸収エネルギー $E_d$	18.7tf·m	25.8tf·m
へこみ変形終了時の崩壊荷重 $P_c$	173.5tf	203.3tf
部材の最大塑性変形 $\delta_{p,max}$ (最大塑性回転角 $\theta_{p,max}$ )	59mm ( $29.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ )	15mm ( $7.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ )
許容塑性変形 $\delta_{pa}$ (許容塑性回転角 $\theta_{pa}$ )	80mm ( $40.0 \times 10^{-3}\text{rad}$ )	85mm ( $42.7 \times 10^{-3}\text{rad}$ )