

(30) 鋼製アーチ式砂防ダムの最適耐衝撃設計法
に関する基礎的考察

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE OPTIMAL IMPACT RESISTANT DESIGN
OF STEEL ARCH TYPE SABO DAM

石川信隆・ 山本恭嗣・ 鈴木真次・ 飯田 毅

by Nobutaka ISHIKAWA, Kyoji YAMAMOTO, Shinji SUZUKI and Takeshi IIDA

The object of this study is to develop the optimal impact resistant design of the steel arch type Sabo dam. Firstly, the minimum weight allowable stress design is performed for a circular pipe arch under the sand pressure as the service load level. Secondly, the minimum weight energy design is formulated for the huge rock in the debris flow as the ultimate load level. Finally, the proposed optimal impact resistant design is performed by minimizing the arch weight while satisfying simultaneously both constraints of the allowable stress for the sand pressure and the energy criterion for the huge rock. It is found that this design method provides the useful data for the design of the steel arch type Sabo dam.

Key Words: steel arch, optimal impact resistant design, energy criterion

1. 緒言

近年、土石流中の巨礫を受け止めるために鋼製砂防ダムが数多く建設されている¹⁾が、鋼製アーチ式砂防ダムも現在検討されている²⁾。このアーチ式砂防ダムの設計に当たっては、通常の堆砂圧に対する使用荷重レベルの許容応力度設計に加えて、土石流中の巨礫に対する衝撃荷重（終局荷重）レベルにおけるエネルギー設計についても検討することが必要である。

本研究は、このような観点から、まず通常の堆砂圧に対する使用荷重レベルの許容応力度設計と、土石流中の巨礫に対する終局荷重時のエネルギー設計を行い、両者の特性を比較する。次に、上記2つの制約、つまり堆砂圧を対象とする使用荷重レベルの許容応力度制約と、土石流中の巨礫に対する終局荷重レベルのエネルギー制約を同時に考慮した最適耐衝撃設計法（いわゆる2段階設計法）の開発を試みる。最後に、数値計算によってその力学的特性を基礎的に検討するものである。

なお、本研究では次の仮定を用いた。(1) 鋼製アーチ式砂防ダムとして、鋼管固定円弧アーチ単体を対象

* 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 防衛大学校理工学研究科学生 (同 上)

*** 工博 住友金属工業(株)建設技術部開発企画室 (〒100 東京都千代田区大手町1-1-3)

とする。(2) 衝撃吸収エネルギーを静的弾塑性吸収エネルギーとみなすことができるものとする。

2. 設計法の意義と基本式

上記の仮定に基づき、各設計法の定義と基本式の定式化を行う。

(1) 使用荷重レベルの許容応力度設計（S設計とよぶ）

S設計とは、堆砂圧を対象とした使用荷重レベルにおける許容応力度制約のみを考慮したいわゆる最適弾性設計をいふ、図-1 (a) のようなアーチダム全体に作用する堆砂圧を、図-1 (b) のようにアーチ単体に等分布荷重 q が作用するものとして設計する。すなわち、その基本式は、表-1 のようにアーチの最大作用応力が許容応力度以内となる制約条件を満足するように、また鋼管径比 D/t と肉厚 t の側面制約を満足させて、アーチ単体の鋼管重量が最小となるように、未知数である鋼管径 D 、肉厚 t 、半中心角 θ を求めるものである。

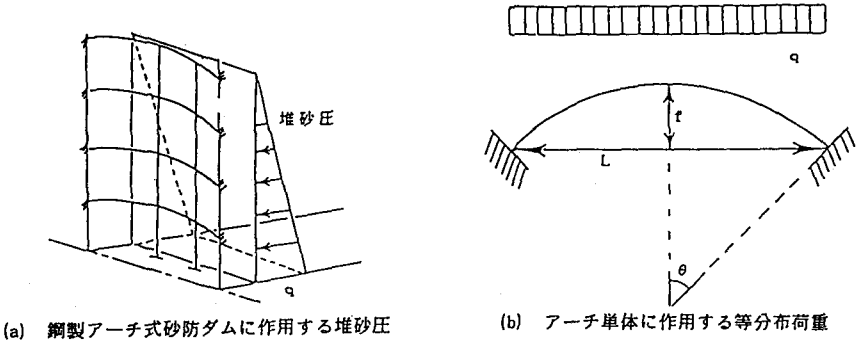


図-1 使用荷重レベルの許容応力度設計

表-1 S設計 (堆砂圧だけを考慮した最適設計) の基本式

未知数	D: 鋼管径	t: 肉厚	θ : 半中心角
目的関数	アーチ重量: $W \rightarrow \min$		
制約条件	$\sigma_{\max} \leq \sigma_a$ $(D/t)_l \leq D/t \leq (D/t)_u$ $t_l \leq t \leq t_u$		
	添字 L: 下限値 添字 u: 上限値		

ここで、
鋼管重量 $W = ((D^2 - (D - 2t)^2) \pi / 4) \times 2R\theta$
モーメント $M = (qR^2 (ac - bd + a\theta (1 - \cos\theta) - b\theta (1 - \cos 2\theta))) / 4b\theta$
軸力 $N = -(qR (2b (1 - \cos 2\theta) + a \cos\theta)) / 4b$
断面係数 $Z = (D - (D - 2t)) \pi / 32$
断面積 $A = (D - (D - 2t)) \pi / 4$
応力 $\sigma_{\max} = |M/Z \pm N/A|$

ただし、
 $a = \theta \sin 2\theta - \theta \sin \theta - \theta \sin 3\theta / 3 + \cos \theta / 2 - \cos 3\theta / 2$
 $b = 1 - \theta^2 - \cos 2\theta - \theta \sin 2\theta / 2$
 $c = \theta - \sin \theta / 2$

q : 線荷重 (kg/cm) D : 鋼管径 (cm)
 R : 曲率半径 (cm) t : 肉厚 (cm)
 θ : 半中心角 (rad)

(2) 終局荷重レベルのエネルギー設計 (U設計とよぶ)

まず図-2 (a) のように、鋼製アーチ式砂防ダムに作用する土石流中の巨礫に対する衝突現象を、図-2 (b) のようにアーチ単体に作用する巨礫の衝突にモデル化する。これをエネルギー的に設計する方法については、すでに文献²⁾ で詳細に述べたので、ここでは基本式のみを記す。すなわち、表-2 は吸収エネルギー U_0 が巨礫の運動エネルギー E を上回るように、また終局変位 δu が許容変位 δa を越えないように、かつ D/t と t の側面制約を満足したうえで、アーチの鋼管重量が最小となるように、 D 、 t 、 θ を求めるものである。

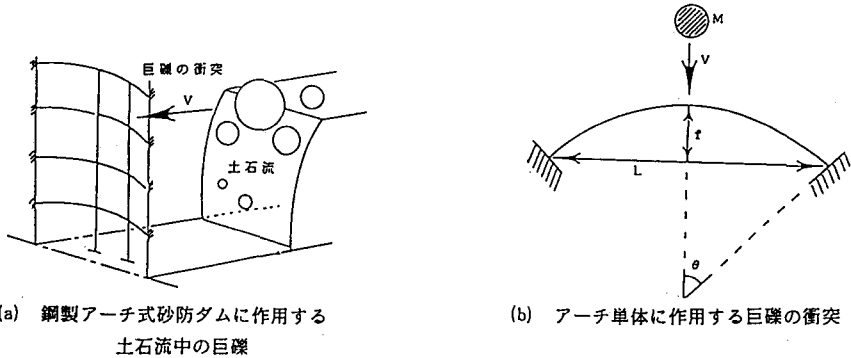


図-2 終局荷重レベルのエネルギー設計

表-2 U設計 (巨礫の衝撃だけを考慮した最適設計) の基本式

未知数	D : 鋼管径	t : 肉厚	θ : 半中心角
目的関数	アーチ重量: $W \rightarrow \min$		
制約条件	$E \leq U$ $\delta u \leq \delta a$ $(D/t)_L \leq D/t \leq (D/t)_u$ $t_L \leq t \leq t_u$		

ここで、
 鋼管重量 $W = ((D^2 - (D - 2t)^2) \pi / 4) \times 2R\theta$
 衝撃吸収エネルギー U_0 の算定 (図-3 (a) 参照)
 $U_0 = P_c \delta e / 2 + P_c (\delta u - \delta e)$
 衝突による運動エネルギー
 $E = MV^2 / 2$
 終局変位 δu の算定 (図-3 (b) 参照)
 $\delta u = f - \sqrt{2g^2(1 - \cos(\phi_1 - \Delta\phi)) - L^2/4}$
 許容変位 δa の算定
 $\delta a = f - \sqrt{2g^2 - L^2/4}$
 $d_1 = \sqrt{(L/2)^2 + f^2}$
 $d_2 = \sqrt{(L/2)^2 + (f - \delta u)^2}$

ϕ_1 : 変形前の角度 (rad)
 $\Delta\phi$: 塑性ヒンジ回転角 ($\theta = \gamma / (D/t)$)
 δe : 弾性限界変位 (cm)
 P_c : 塑性崩壊荷重 (tf)
 γ : 限界回転量を定める係数
 E : 衝突エネルギー (tfm)
 U_0 : 衝撃吸収エネルギー (tfm)
 g : アーチ分割要素長 (cm)
 L : アーチ支間長 (cm)
 f : アーチライズ (cm)
 t : 肉厚 (cm)
 θ : 半中心角 (rad)

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left(\frac{2g^2 - d_1^2}{2g^2} \right)$$

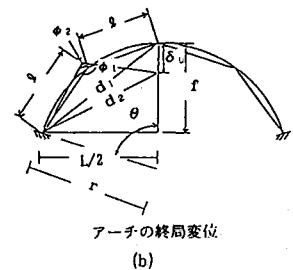
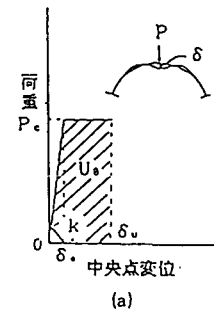


図-3

(3) 使用荷重レベルと終局荷重レベルの両方の制約を同時に考慮した最適設計 (S+U設計とよぶ)

図-4 (a) の堆砂圧を対象とした使用荷重レベルの応力制約と図-4 (b) の巨礫を対象とした終局荷重レベルのエネルギー制約の両方を同時に考慮した最適設計をい、本研究で提案する設計法である。すなわち、表-3の基本式は、許容応力制約、エネルギー制約、終局変形制約および D/t 、 t の側面制約を満足させて、アーチの重量を最小にするように、 D 、 t 、 θ を求めるものである。なお、各設計の解法に当たっては、ADSプログラム⁴⁾を用いた。

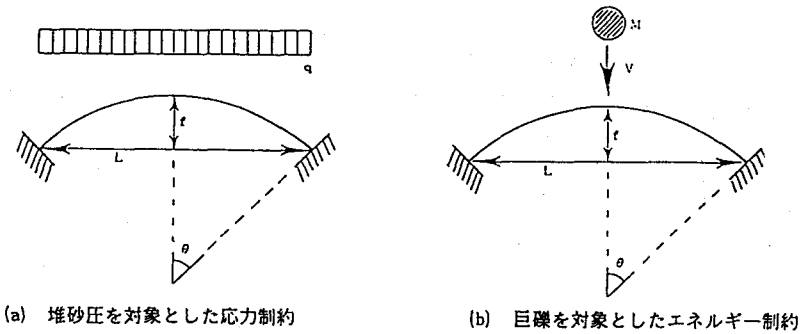


図-4 S+U設計における荷重形式

表-3 S+U設計 (堆砂圧と巨礫の衝撃力を考慮した最適設計) の基本式

未知数	D : 鋼管径 t : 肉厚 θ : 半中心角
目的関数	アーチ重量: $W \rightarrow \min$
制約条件	$\sigma_{\max} \leq \sigma_a$ $E \leq U$ $\delta u \leq \delta a$ $(D/t)_l \leq D/t \leq (D/t)_u$ $t_l \leq t \leq t_u$

ここで、

$$\begin{aligned}
 \text{鋼管重量} \quad W &= ((D^2 - (D-2t)^2) \pi / 4) \times 2R\theta \\
 \text{衝撃吸収エネルギー} \quad U_0 &= \frac{1}{2} P_c \delta u + P_c (\delta u - \delta e) \\
 \text{終局変位} \quad \delta u &= f - \sqrt{2g^2(1 - \cos(\phi' - \Delta\phi))} - L^2/4 \\
 \text{許容変位} \quad \delta a &= f - \sqrt{g^2 L^2 - L^2/4} \\
 \text{最大応力} \quad \sigma_{\max} &= |M/Z \pm N/A| \\
 \text{許容応力} \quad \sigma_a &= 1400 \text{ (kgf/cm)}
 \end{aligned}$$

(4) 包絡設計: S設計とU設計で得られた鋼管径 D 、肉厚 t 、半中心角 θ のうち、より大きな安全側の値を選び、これを包絡設計と名づける。

3. 数値計算例

(1) 計算例1: まず本法の妥当性を検証するため、インプットデータとして表-4の第1行に示す設計条件

を与えて、表-1、2、3の基本式を用いて計算を行うと、S設計、U設計、S+U設計および包絡設計の結果がそれぞれ表-4の第2行（または第3、4、5行）のように得られる。これより、

①S設計では、 D/t が大きい大口径の薄肉鋼管を要求し、U設計よりもアーチライズの高い傾向となる。しかし、当然ながらエネルギー制約（ $E \leq U_0$ ）を満足しないことが認められた（表-4第11行）。

②U設計では、 D/t を小さくして変形量を大きくし、エネルギーを吸収し易くさせるため、厚肉鋼管でアーチライズのやゝ低い傾向の設計（表-4第4行）となるが、応力制約を満足しないことが認められる（表-4第7行）。

③S+U設計では、 D/t がU設計に比しやゝ大きく、鋼管重量も増加する傾向となるが、すべての制約条件を満足する安全で経済的な設計であることを確認できた（表-4第5、7、9、11行）。

④包絡設計は、 D/t がS+U設計に比しやゝ大きくなり、すべての制約条件に対しやゝ余裕をもって安全性を満足しているが、経済性がS+U設計に比しやゝ劣ることが認められた（表-4第5行）。

(2) 計算例2：パラメトリックスタディ

図-5は、S設計において等分布荷重（堆砂圧） q を1tf/mから10tf/mまで

変化させた場合について、また、図-6、7は、U設計およびS+U設計において衝突速度 V を1m/sから10m/sまで変化させた場合（ $q=7.38\text{tf/m}$ と一定）について、それぞれ最適形状を求めたものである。これらの結果より、

①アーチの重量 W は等分布荷重 q および衝突速度 V の増大に伴い、S設計、U設計およびS+U設計のいずれも増大することが認められる。しかし、S+U設計による重量は常に包絡設計よりも約30%小さいことがわかる。

②径厚比 D/t は、S設計において常に上限値の100をとり、U設計においては下限値の30に近づく傾向となる。しかし、S+U設計ではその中間となり、衝突速度 $V=4.5\text{m/s}$ 付近から急激に小口径の厚肉鋼管へと変化する。

表-4 S設計、U設計、S+U設計、包絡設計の計算結果の比較

		S設計	U設計	S+U設計	包絡設計
1	荷重条件 (設計条件)	$q=7.38\text{tf/m}$ $L=17.14\text{m}$	$q=1.03\text{ts/m}$ $V=7.5\text{m/s}$ $L=17.4\text{m}$	$q=7.38\text{tf/m}$ $V=1.03\text{ts/m}$ $V=7.5\text{m/s}$	$L=17.4\text{m}$
2	鋼管径 D 肉厚 t 半中心角 θ	112.0cm 1.12cm 80.2	70.1cm 2.10cm 63.0	85.2cm 1.92cm 80.2	112.0cm 2.10cm 80.2
3	径厚比 D/t	100	33.3	44.5	53.2
4	アーチライズ 比 f/L	0.421	0.306	0.421	0.421
5	アーチ重量 W	7.56	7.58	9.738	14.08
6	許容応力	$\sigma_a = 1400\text{kg/cm}^2$			
7	最大応力	1400kg/cm^2	14400kg/cm^2	1400kg/cm^2	758kg/cm^2
8	許容変位	188cm			
9	終局変位	3.98cm	10.5cm	9.05cm	7.54cm
10	衝突エネルギー	$E = 28.9\text{tf}$			
11	衝撃吸収 エネルギー	10.8tfm < E	28.9tfm	28.9tfm	44.4tfm

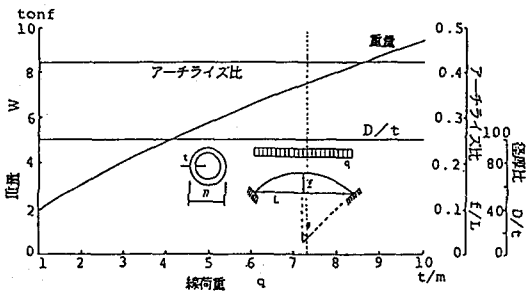


図-5 S設計の計算結果

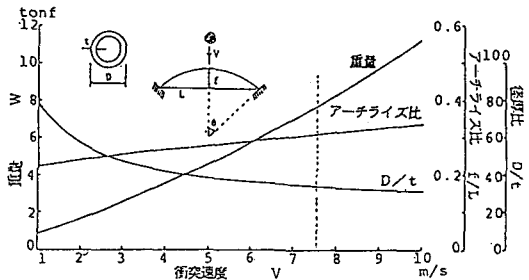


図-6 U設計の計算結果

③アーチライズ比 f/L は、S設計においては常に $f/L = 0.42$ と高いが、U設計においては衝突速度の増大に伴い増加する傾向があるものの、比較的低くおさえられていることが認められる。すなわち、S設計では、薄肉の大口径でアーチライズ比の高いアーチが有効であり、U設計では逆に厚肉でアーチライズ比の低いアーチが望ましい。一方のS+U設計によるアーチライズ比は、S設計より低く、U設計よりも高いことが認められる。

以上より、S+U設計の有効範囲は衝突速度 $V = 5 \sim 20 \text{ m/s}$ であるものと考えられる。

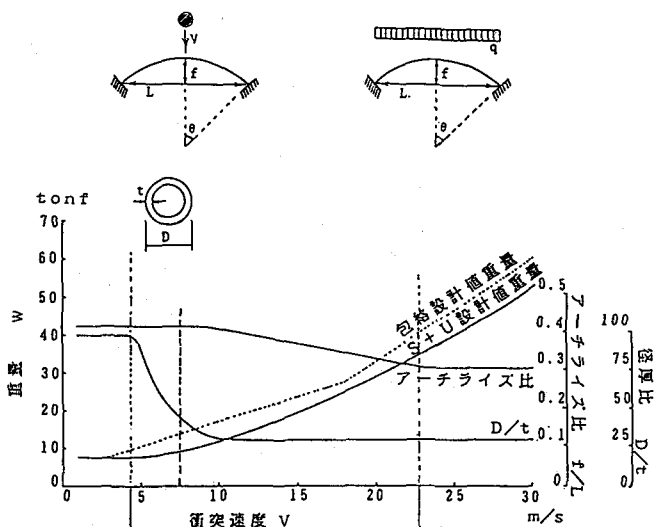


図-7 S+U設計の計算結果

4. 結言

本研究は、鋼管アーチに作用する堆砂圧を対象とした許容応力制約と巨礫の衝突を対象としたエネルギー制約を同時に考慮した最適耐衝撃設計 (S+U設計) を提示したもので、本研究の成果をまとめると次のようになる。

- (1) 使用荷重レベルのS設計では、大口径の薄肉鋼管でアーチライズの高い形状を要求するのに対し、終局荷重レベルのU設計では、小口径の厚肉鋼管でアーチライズの低い傾向となることが認められた。
- (2) S+U設計では、衝突速度の増大とともに D/t がやゝ小さくなるが、アーチ重量は他に比べ増大する傾向となる。さらに、S+U設計が有効に働く範囲 ($V = 5 \sim 20 \text{ m/s}$) が存在し、これは実際に土石流中の巨礫の衝突速度には合致しており、本法が有用であることがわかった。
- (3) S設計とU設計の安全側の値を採用する包絡設計に比し、S+U設計の方が約30%アーチ重量を軽減でき、しかも安全性についても十分満足することが認められた。

謝辞： 本研究における数値計算には、圓林栄喜氏の御援助を受け、また防大電子計算機室 HITAC M-680H を使用したことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧、1987年10月
- 2) 石川信隆、星川辰雄、香月 智、飯田 毅：衝撃荷重を受けるアーチの最適ライズ比に関する考察、システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.29~34、1989年11月
- 3) 土木学会：構造力学公式集、pp.237~272、昭和61年6月
- 4) Vanderplaats, G.N. and Sugimoto, H.: General Purpose Optimization Program for Engineering Design, Journal of Computers and Structure, pp.13~21, vol.24, No.1, 1986