

建設省土木研究所 ○正員 田村正秀 正員 川口信孝

主旨

重力ダムにおける減勢工としては、垂直なエンドシルを用いた跳水式減勢工が多く採用されている。エンドシル高について従来より多くの人によって研究され、算定式が提案されているが、それらの式の構成および仮定が様々で画一的に評価することは困難である。本文は、それらの式の特徴を明らかにし、当所で実施したダムの水理模型実験結果とを比較検証したものである。

1. エンドシル高の算定式

エンドシル高の算定には、大別して二つの考え方がおこなわれてきた。Ⅰ、減勢池の長さを跳水長（ $l_j = \delta l_2$ とする）より相当短かくして、エンドシルに作用する動水圧を考え、解析は運動量によっておこなわれる。Ⅱ、減勢池の長さを跳水長の δ の % 程度以上にとって、エンドシルは跳水下流水深を確保する考えで、エンドシルの越流水深を問題にしたもので、解析はエネルギーによっておこなわれる。

エンドシル高の代表的な算定式を挙げると、つぎのとおりである。

(1). Doeringsfeld & Barker の式¹⁾

$$\frac{(\sqrt{1+\delta F^2} - 1 - \delta \frac{d}{l_1})^3}{(\sqrt{1+\delta F^2} - 1 + \delta \frac{d}{l_1})} = \frac{64 F^2}{3(\sqrt{1+\delta F^2} - 1)} \quad \text{----- (1)}$$

i). 断面Ⅰ、ⅡおよびⅢについて運動量が連続している。

ii). Doeringsfeld が実験から求めた δ および l_1 の関係は、 $l_2 - d = 2l_2$ である。

iii). エンドシルが応頂べきであって、 l_2 に対応する水圧を受け持つことに適用可能である。

(2). Forster & Skrinde の式²⁾

$$\frac{d}{l_1} = \frac{\sqrt{1+\delta F^2} - 1}{2} - \sqrt{\delta F^2 - \frac{1}{2}(\sqrt{1+\delta F^2} + 1)} \quad \text{----- (2)}$$

i). 断面Ⅰ、ⅡおよびⅢについて運動量が連続している。

ii). 断面Ⅲにおける水深 h_3 は、限界水深となる。

(3). 土研式 (Ⅰ) (村)³⁾

$$\frac{d}{l_1} = \frac{\left(\frac{l_2}{l_1}\right)\left(\frac{C_0 F^2}{K^2} + 2K\right) + \sqrt{\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2\left(\frac{C_0 F^2}{K^2} + 2K\right)^2 + 4\left(\frac{l_2}{l_1}\right)\left\{\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^3 - (2F^2 + 1)\left(\frac{l_2}{l_1}\right) + 2F^2\right\}}}{2\left(\frac{l_2}{l_1}\right)} \quad \text{---- (3)}$$

i). 断面Ⅰ、ⅡおよびⅢについて運動量が連続している。

ii). 抗力係数 C_0 を導入し、また、シル付近の流速 v を $v = v_1/K$ (K は定数) とした。

以上のべた (1), (2) および (3) 式は、さきにのべた分類のⅠに属するものである。

(4). 岩崎の式⁴⁾

$$\frac{d}{h_1} = \frac{(1+2F^2) \sqrt{1+8F^2} - 5F^2 - 1}{1+4F^2 - \sqrt{1+8F^2}} - \frac{F}{2} F^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (4)}$$

- i). 断面Ⅰ-Ⅱについて運動量が連続している。
 ii). 断面Ⅱ-Ⅲにおいて、エネルギーは連続している。(断面Ⅲは刃形セシの上流端)
 iii). 断面Ⅲにおいて、限界水深となる。
 (5) 土研式(Ⅱ)(Ⅲ)村, 藤本也⁽⁶⁾

$$\frac{d}{h_1} = \frac{(1+2F^2) \sqrt{1+8F^2} - 5F^2 - 1}{1+4F^2 - \sqrt{1+8F^2}} - \left(\frac{F^2}{2K^2} \right)^{\frac{1}{6}} \quad \text{----- (5)}$$

- i). 断面Ⅰ-Ⅱについて運動量が連続している。
 ii). 広頂セシの流量公式⁽⁴⁾⁽⁶⁾ $q = K \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}}$ ここに、 $H_0 = \frac{1}{2} \sqrt{2g} + h_2 - d$ とした。
 iii). 本間⁽⁶⁾および鍋岡⁽⁷⁾の広頂セシの越流係数Kに関する研究によってえられたKを用いた。
 ここにのべた(4)および(5)式は、上記の分類のⅡに属するものである。

以上の式の記号は、図-1に示す位置における水深(h)、フルード数(F)およびインドシル高(d)である。

従来は(4)式が広く用いられていた。

2. 水理模型実験による検証

一般に、ダム減勢工の減勢池の長さおよびインドシルの形状については、水理模型実験をもとに決めることが多く、これまでに当所で実

験したダムは4のダム程度である。これらのダムの実験資料から、我々は跳汰式減勢工の状態をA, B, C, D(非常に良い, 良い, やや悪い, 悪い)に順位評価した。それらは、減勢池の水深の縦断形状、シル前面に作用する水圧および流況の3つの要素からなり立っており、その状態を概略示す図-2のとおりである。

そこで、実験資料からFと d/h_1 との関係を調べ、評価をおこなうと図-3のようになった。

ここに印した評価は、3つの要素を統合したものである。

また、同図に前項の算定式(Ⅰ), (Ⅱ), (Ⅲ)および(5)式の関係を示す。

この結果、順位AまたはBを与えるためには、土研式(Ⅲ)式で大体 $K = 0.4$ くらいになった。

つぎに、この具体的な例として、四国、大渡ダムの水理模型実験について考察を進める。

(1) 実験方法

実験は図-4に見られる、大渡ダムの縮尺1:50の水理模型によっておこなった。減勢池の長さとしては、そのⅡに属するインドシルを考えることにした。実験の手順としては、1. 3種の流量

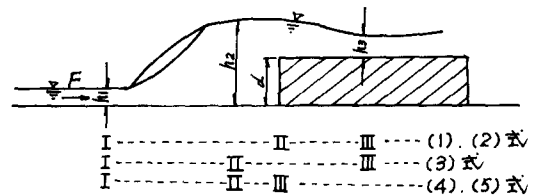


図 - 1

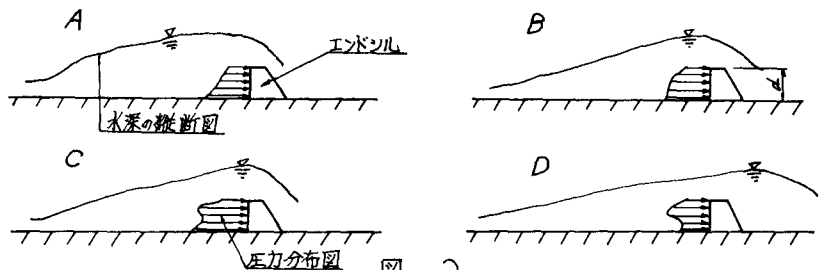


図 - 2

(2) 實驗結果

Figure 1 is a semi-logarithmic plot showing the relationship between the ratio of the maximum value of the sedimentation rate to the maximum value of the sedimentation rate (V/V_{max}) and the ratio of the maximum value of the sedimentation rate to the maximum value of the sedimentation rate (V/V_{max}). The y-axis is logarithmic, ranging from 2 to 18. The x-axis is linear, ranging from 0 to 15. Data points are categorized by sedimentation rate (A, B, C, D) and are plotted as open circles (A), solid circles (B), solid circles (C), and solid circles (D). Four regression lines are shown, labeled with their respective equations and R^2 values: 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$), 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$), 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$), 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$). A legend in the top left corner identifies the symbols for A, B, C, and D. A table in the bottom right corner provides the values of Q , A , and B for each category. A formula for calculating V/V_{max} is also provided.

Figure 1: Relationship between V/V_{max} and V/V_{max} (logarithmic scale).

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

- A
- B
- C
- D

Regression lines and equations:

- 1. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 2. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 3. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)
- 4. $V/V_{max} = 0.24$ ($R=0.94$)

Table of values:

Category	Q	A	B
○	3440%	7.0	8.2
●	3700	10.0	11.5
●	4260	11.5	13.0

Formula for V/V_{max} :

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Calculation:

$$V/V_{max} = \frac{Q}{V/V_{max}}$$

Legend:

7-3

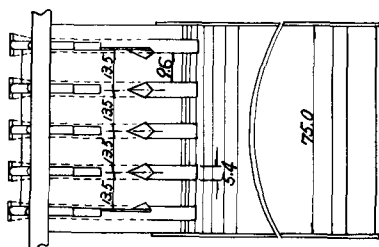
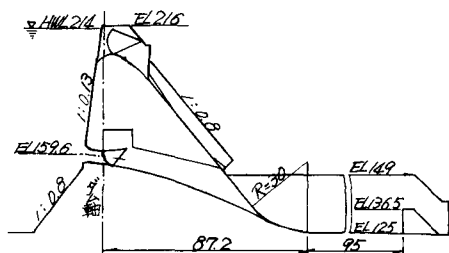


图 - 4

フォに、1でのべた各式による計算結果とこの実験の結果を比較すると、図-3における□印のようになつた。この図にありて★印は図-5で内挿したエンドシル高である。また、必要最小限度のエンドシル高付近の流況の例として写真-ノおよびスに示した。これらの写真は図-3のMおよびNに対応している。写真-ノではガイドウォール沿いの水面に水平な部分が見られる。このことは、跳水が完全に行なわれていることを示している。順位でいえばBの状態である。ところが写真-スでは、エンドシルの直上流に盛りあがりがあるで水平な部分が見られない。これは、エンドシル高が不足し不完全な跳水が生じていることのあらわれである。順位でいえばCの状態である。

したがって、適切なシル高は M と N との間、つまり $0.5 \sim 10.0$ m の間にあることがわかる。この

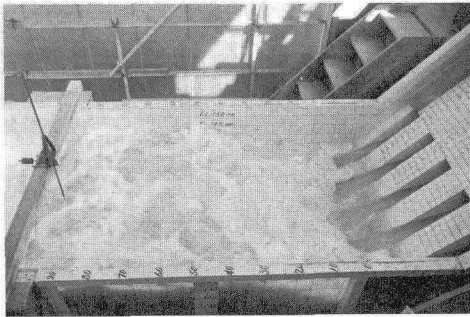
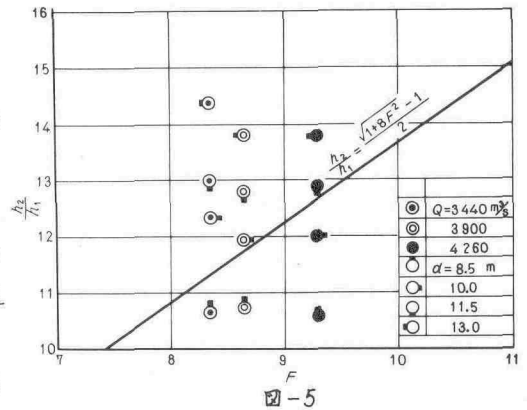
ことは、他の流量とシル高についても同様である。

以上のような考察から、適切なエンドシル高は、
土研の式では $K=0.4$ 程度の値と考えられる。

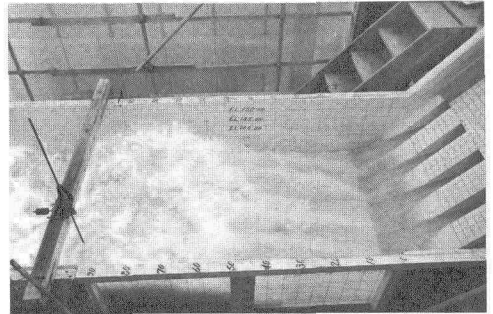
また、分類 I に属するものでは、この場合若干低めの
エンドシル高が算定されることとされる。

結 論

以上、エンドシル高の算定式と水理模型実験との
比較検証から、比較的均等な流れで、かつ減勢池が直
線である場合、適正なエンドシル高を示す（順位 B を
三つの要素すべて満足する）ためには、土研式 (II)
(4) 式) で $K=0.4$ 程度の値であると考える。



写真—1



写真—2

参 考 文 献

- 1) H. A. Doeringsfeld, C. L. Barker; Pressuremomentum theory applied to the broad crested weir: Trans. ASCE vol. 106, 1941
- 2) J. W. Forster, R. A. Skrinde; Control of the hydraulic jump by sills: Trans. ASCE, 1949
- 3) 村幸雄; 洪水調節用ダム放水設備の設計合理化に関する研究: 建設省土木研究所, 1954. 3
- 4) 名崎敏夫; 余水吐の減勢装置について: 技術者のための最近の水工学, 土木学会東北支部, 1961
- 5) 川村幸司, 藤本成, 山本邦一, 名津井愛一; 早明浦ダム水理模型実験報告: 土木研究所資料, 第261号, 建設省土木研究所, 1967. 3
- 6) 本間仁; 低溢流堰堤の流量係数: 土木学会誌, 26巻6号および7号, 1940
- 7) 鍋岡昭三; 低いダムの越流係数に関する研究: 電研月報, 第4巻2号, 1954