

# デフレクターによる流れの変向機構について\*

正員 岩崎 敏 夫\*\*

**要旨** デフレクターをダムの水叩き上に設けて下流に対し好ましい方向にジェットをとばすための設計理論について考究し、実験と比較して満足すべき結果をえた。

## 1. 緒言

ダムの水叩き上では跳水を起こさせて越流水のエネルギーを減殺するのが原則であるが、急勾配の河川に築造されるダムでは、跳水後の水位が下流の固有水位に比してきわめて高く、副ダムも経済上設けられない場合がある。ことにアーチダムより自由越流させる場合には流線はアーチ中心に集中するために、跳水も不規則な形状を呈して攪乱を助長させる。このような場合には、水叩き上にデフレクターを設けてジェットを飛ばし、その落下点をダムより遠ざげることが行なわれているが、その際ジェットを的方向を下流に対し好ましい方向に変えることが、しばしば必要となる。本論文は、そのような場合にデフレクターを設計するための法則を与えようとするもので、まず、デフレクターによる流れの変向機構について考察し、次に実験によって検証を行なつたが、その結果は十分満足のゆくものであることがわかつた。

## 2. デフレクターによる流れの変向機構

図-1 のように水平面 P 上を流走してきた水が、この水平面と傾斜角  $\beta$  で交わる平面 Q に、両平面の交線 AA' と入射角  $\alpha$  で衝突したときに、斜面 Q によつてまげられる流れの方向をもとめよう。

いま、流入流線 BO, 流出流線 OC の流速を  $q_1, q_2$  の AA' に垂直な P 面内の成分を  $u_1, AA'$  方向の成分を  $v_1, q_2$  の AA' に垂直な Q 面内の成分を  $u_2, AA'$  方向の成分を  $v_2$  とし、流れを AA' 方向の流れと、これに垂直な平面 R 内の流れに分解して考がえる。

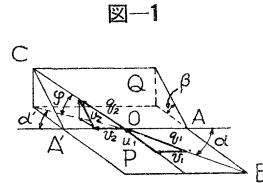


図-1

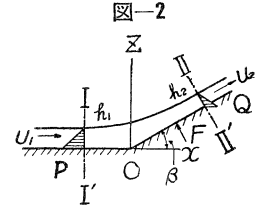


図-2

まず平面 R 内で図-2 のように O を通つて P 面に垂直に z 軸を、また P 面にそつて x 軸をとる。このとき、斜面 Q にはたらく反力 F がこの面に垂直にはたらくと仮定すると、x, z 方向の運動量方程式および連続方程式は、

$$\frac{w}{2}h_1^2 - \frac{w}{2}(h_2 \cos \beta)^2 \cos \beta - F \sin \beta = -\frac{w}{g}(u_2^2 h_2 \cos \beta - u_1^2 h_1) \dots \dots \dots (1)$$

$$F \cos \beta - \frac{w}{2}(h_2 \cos \beta)^2 \sin \beta = \frac{w}{g}u_2^2 h_2 \sin \beta \dots \dots \dots (2)$$

$$u_1 h_1 = u_2 h_2 \dots \dots \dots (3)$$

ここで  $h_1, h_2$  は断面 I, II での平面 P, Q にそれぞれ垂直な方向の水深、 $w$  は水の単位重量である。

ダムのエプロン上での静水圧の項は運動量の項にくらべると無視できるから、(1), (2) より

$$-F \sin \beta = \frac{w}{g}(u_2^2 h_2 \cos \beta - u_1^2 h_1) \dots \dots \dots (1')$$

$$F \cos \beta = \frac{w}{g}u_2^2 h_2 \sin \beta \dots \dots \dots (2')$$

(1)', (2)' より F を消去して (3) を参照すると

$$u_2 = u_1 \cos \beta \dots \dots \dots (4)$$

つきに AA' 方向には抵抗が働かないものとする、

$$v_2 = v_1 \dots \dots \dots (5)$$

$\alpha'$  を  $q_2$  の P 面上の分速度の方向と AA' のなす角とし、これを放射角とよぶことにする。図-1 を参照して (4), (5) の関係を用いると、

$$\tan \alpha' = \frac{u_2}{v_2} \cos \beta = \frac{u_1}{v_1} \cos^2 \beta = \tan \alpha \cdot \cos^2 \beta \dots \dots \dots (6)$$

この式は放射角をもとめる基本式であつて、幾何学的な関係を考慮すると、入射流線 BO と放射流線 OC とは、デフレクター面 Q に対し垂直な平面内にあることが、(6) より導びかれる。

\* 昭.30.5.29, 第 11 回土木学会年次学術講演会にて一部発表 \*\*東北大学助教授, 工学部土木教室

また  $\alpha - \alpha' = \theta$  を変向角とよぶことにすると、

$$\tan \theta = \tan(\alpha - \alpha') = \frac{\sin^2 \beta \cdot \tan \alpha}{1 + \cos^2 \beta \cdot \tan^2 \alpha} \dots \dots \dots (7)$$

また放射流線 OC と P 面とのなす角  $\varphi$  はジェットの出射角であつて、

$$\tan \varphi = \frac{u_2 \sin \beta}{\sqrt{v_2^2 + u_2^2 \cos^2 \beta}} = \tan \beta \cdot \sin \alpha' \dots \dots \dots (8)$$

さらにジェットの变向によつてデフレクターに加わる力  $F$  は、(1)', (3)'(4) より

$$F = \frac{w}{g} u_1^2 h_1 \sin \beta \dots \dots \dots (9)$$

3. 入射角  $\alpha$  の選定

(9) によれば、 $F$  は  $\beta$  が小さいほど小さいから、デフレクターの安定からすれば傾斜角はできるだけ小さいのがぞましい。この条件をみたすような  $\alpha$  について考がえよう。

図-3 は式 (7) によつて計算した  $\beta$  を副変数とする  $\theta$  と  $\alpha$  の関係をしめすグラフであつて、これによると、 $\beta = 20^\circ \sim 50^\circ$  という實際上デフレクター角度としてかんがえられる  $\beta$  の範囲では、 $\alpha$  が  $50^\circ \sim 60^\circ$  の範囲で  $\theta$  はほとんどかわらず、かつ最大値に近い。逆にいえば、ある流線の変向角  $\theta$  を実現させる最小の傾斜角  $\beta$  が  $\alpha$  のこの範囲で与えられるわけであつて、その場合の  $\theta$  と  $\beta$  の関係は図-4 に示すように、 $\alpha$  によつてほとんどかわらないほぼ一定の曲線を示すのである。

図-3  $\alpha$  と  $\theta$  の関係

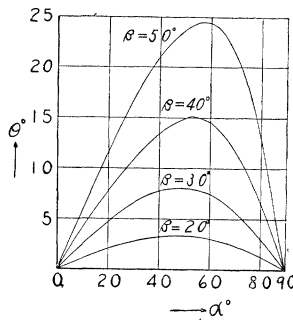
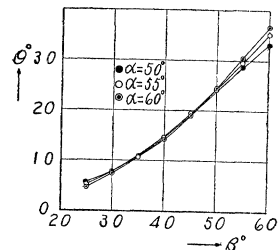


図-4  $\beta$  と  $\theta$  の関係



つきに  $\alpha$  の選定について経済的な条件を考がえると、 $\alpha$  が大きいほど交線 AA' (図-1) は下流の方向へのびの長さが短くなるから、デフレクターの長さ、ひいてはエプロンの長さを短くすることができる。この意味よりすれば、 $\alpha = 60^\circ$  がもつともぞましいことになる。

4. ジェットの軌道

デフレクターより放出されるジェットの軌道は図-5 のように放水点を原点とし、O を通る水平下流方向および垂直下方々向を  $x, y$  軸にとると、自由放物体の式

$$y = \frac{1}{2} g \left( \frac{x}{v \cos \varphi} \right)^2 - x \tan \varphi \dots \dots \dots (10)$$

と考えられる。こゝに  $v$  は放射速度であつて、放射点におけるジェットの全ヘッドを  $E$  とすると、位置ヘッドを速度ヘッドに比して無視できるものと見なして、 $v = \sqrt{2gE}$  であたえることができる。これを (10) に入れて、 $\xi = x/E$ 、 $\eta = y/E$  とかくと

$$\xi^2 - 4 \sin \varphi \cos \varphi \cdot \xi - 4 \cos^2 \varphi \cdot \eta = 0 \dots \dots \dots (11)$$

が、ジェットの無次元軌道をあたえる。

つきにデフレクターの変向作用によつてヘッドは どれほど減少するかについて考えよう。エプロン上の水深はきわめてうすく、したがつて、ヘッドはほとんど速度ヘッドによつて表わされるとすると、デフレクターに入射する流線のヘッド  $E_0$  は、

$$E_0 = \frac{q_1^2}{2g} = \frac{u_1^2 + v_1^2}{2g} \dots \dots \dots (12)$$

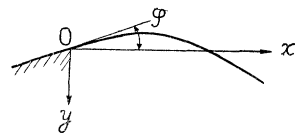
また、デフレクター面上では  $E = q_2^2 / 2g = (u_2^2 + v_2^2) / 2g$  であるが、(4), (5) を用いると、

$$E = \frac{u_1^2 \cos^2 \beta + v_1^2}{2g} \dots \dots \dots (13)$$

また、 $u_1 = q_1 \sin \alpha$ 、 $v_1 = q_1 \cos \alpha$  であるから、(12), (13) より、

$$\frac{E}{E_0} = \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta + \cos^2 \alpha \dots \dots \dots (14)$$

図-5



5. 実験

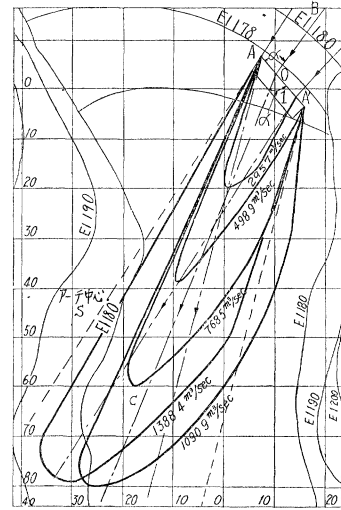
本研究は東北大学工学部土木教室において実施された鳴子アーチダムの水理模型実験がその機縁となつたものである。そこで鳴子ダムの模型(縮尺 1/100)のエプロン上にデフレクターの模型を設置して実験を行つた<sup>1)</sup>。

(イ) クサビ形デフレクター 図-6 はエプロンの上にクサビ形のデフレクターを設置したときのジェットの飛散範囲の計算結果と実測結果の比較の一例である。まず AA' 上の代表点 O において流入流線 BO がアーチ中心 S にむかうことから、その方向はあたえられる。つぎに放射方向 OC はのぞましい方向にあてておく。AOA' の方

表-1 クサビ形デフレクター(図-6)の諸計算値  $\beta = 48^{\circ}30'$

	A	O	A'
$\alpha$	71°18'	77°30'	81°42'
$\alpha'$	53°39'	63°12'	71°37'
$\theta$	17°19'	14°18'	10°05'

図-6 ジェットの飛散範囲クサビデフレクター No.1



向を任意に定めると、 $\alpha, \alpha'$  が定まるから、(6) より  $\beta$  を求めることができる。たゞし、AA' に衝突する流線の入射角  $\alpha$  はアーチダムの場合には衝突点ごとにそれぞれ異なるから、したがつて放射角  $\alpha'$  もことなる。表-1 にこのデフレクターの中心 O、両端 A, A' における  $\alpha, \alpha', \theta$  を示した。図-6 に一点鎖線で示したのは計算したジェットの方向である。

これに対し5種の流量に対するジェットの飛散範囲は実線で示される。この場合、一点鎖線が示すように、ジェットは互いに衝突し横方向の圧力をうけるから、かなり分散するが、その方向はおおむね所期の方向にむかつている。またその範囲は屈折点の両端の放射ジェットの方向をとりかえてかいた破線の中に入る。

つぎにジェットの最高軌道を実測し、表-1の点Oの諸量を用いて(11)式と比較した。この場合、実測値中の放水点より最も遠い3点をえらび、その点の(x,y)をまずもとめ、次にEを試的にかえてその点の無次元座標( $\xi, \eta$ )が(11)式を満足するように定める。Eが定まると(11)式よりえられる他の諸点の( $\xi, \eta$ )よりおのおのx,yがもとまる。図-7はジェットの軌道の実測点と計算曲線との比較であるが、計算式はきわめてよく実測値をあらわしていることがわかる。

表-2に上の計算で試的にさだめたEと、エプロン面を基準としたダムの上流水位までの高さ、すなわちダムの越流水脈のヘッド  $E_0'$  およびダムの越流水頭  $H_0$  と設計水頭  $H_d$  の比を示した。図-8は  $E/E_0'$  と  $H_0/H_d$  の関係

図-7 ジェットの軌道 クサビ形デフレクター No. 1

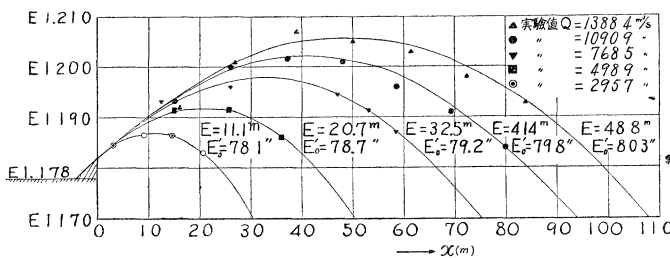
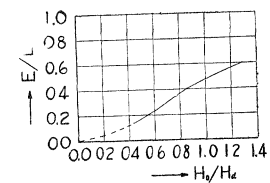


図-8  $E/E_0'$  と  $H_0/H_d$  の関係



関係をしめすグラフである。

他方(14)式で計算すると  $E/E_0 = 0.581$  となる。ダム上を流下するさいに多少のエネルギー損失があることを考えると、 $1.0 H_d \sim 1.2 H_d$  の附近では計算値と図-8の値は大体等しくなることから、この附近で実物と模型の間には相似関係が成立つていと思われ。ヘッドが小さい間は  $E/E_0'$  の値が小さくなることから、クレストよりエプロンまでの摩擦損失が実物にくらべると模型においてかなり大きい量に達して相似関係

表-2

Q(m <sup>3</sup> /sec)	295.7	498.9	768.9	1090.9	1388.4
$H_0/H_d$	0.431	0.646	0.860	1.077	1.291
E(m)	11.0	20.7	32.5	41.4	48.8
$E_0'$ (m)	78.1	78.7	79.2	79.8	80.3
$E/E_0'$	0.142	0.264	0.411	0.520	0.606

が成り立たないのではないと思われる。このことよりすれば、実物でのジェットの流れの飛散範囲は流量が小さい場合には図-6に示された範囲よりもかなり遠くにおよぶのではないかと推定される。

(ロ) 曲面デフレクター クサビ形デフレクターでえられた 上述の結果を用いて そのままアーチダムのデフレクターにクサビ形デフレクターを採用することは実用的でない。それはアーチダムでは、エプロンの全面にわたって流線を変向させる必要があり、したがって互いに接続しない数箇のクサビ形デフレクターを採用することになるのであつて、その結果はデフレクターの端面において、空洞現象を生じるおそれが多分にあるからである。これを防ぐためにデフレクターを単体構造物とする場合には、流線ごとに異なる変向角に対して変向線(図-1のAA')を曲線に、またその傾斜角を変向点ごとに変えて、デフレクター面を曲面にすることが必要となる。このような曲面デフレクターにおいても 所期の結果がえられるかについて 次ぎに実験を行なつた。アーチダムの場合は流入流線は円の半径方向にむかうから、これに対し常に入射角を一定ならしめるような曲線は等角螺旋線である。図-9のようにアーチ中心を原点とする極座標  $(r, \theta_s)$  を用いるとその式は、

$$r = r_0 e^{\theta_s \cot \alpha} \dots \dots \dots (15)$$

で、 $r_0$  は  $\theta_s = 0$  の  $r$  の値である。

3節の考察の結果  $\alpha = 60^\circ$  とするのがもつとも合理的である。 $r_0$  は、平面図より適当にさだめる。

また右岸寄りの附近では流線を変向させる必要がなければ、図-10 にしめすように、アーチ中心と 最右岸とを結ぶ方向に 長軸を持つ楕円を用いてもよい。このときは楕円の式(記号は 図-10 参照)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \dots \dots \dots (16)$$

を用いると、入射角  $\alpha$  は、

$$\tan \alpha = \frac{a^2 \tan^2 \theta_e + b^2 \cot^2 \theta_e}{b^2 - a^2} \dots \dots \dots (17)$$

ただし、 $\theta_e$  は短軸よりかはかつた動径の中心角である。よつて、

$$\frac{a}{b} = \left\{ \frac{\tan \alpha - \cot^2 \theta_e}{\tan \alpha + \tan^2 \theta_e} \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (18)$$

$\alpha = 60^\circ$ 、また  $\theta_e$  として採用曲線間の 平均値を用いると、(18) にえられた  $a/b$  の値をもつ楕円は、ほぼ  $\alpha = 60^\circ$  を与えることになる。

実験に用いた楕円デフレクターは 図-11 に示すようなものであつて、(18) 式で  $\alpha = 60^\circ$ 、 $\theta_e = 63^\circ$  としてえた  $a/b = 0.513$  を基準として設計した。 $b = 56 \text{ m}$  に対して、 $a = 0.513 \times 56 = 28.7 \text{ m}$  となるから、簡単のために、 $a = 29 \text{ m}$  にえらんだのである。表-3 はこのデフレクターについて計算した結果である。

図-12 は計算と実測の結果の比較である。破線と ● 印は  $Q = 1090.9 \text{ m}^3/\text{sec}$  の場合の計算方向と予想到達点である。このように、 $\theta_s = 20^\circ$  以上では放射ジェットはほぼ平行になるようにしたのは、2節の条件にできるだけ近からしめようとしたものである。しかし、 $\theta_s = 0^\circ, 10^\circ$  では、できるだけ流線の変向角を大きくする必要があつたので、この附近では放射ジェットは互いに衝突する。放射ジェットの衝突は、空中飛散時のジェットのエネルギーを減殺して落下地点および下流に対し好ましいから、特にそのように設計されたダムもあるが<sup>2)</sup>、この設計の場合には、 $\theta_s = 20^\circ$  付近で、放射ジェットの お互いの衝突のために、飛末がかなり高くあがつた。写真-1, 2 は  $Q = 1090.9 \text{ m}^3/\text{sec}$  のときの流況である。デフレクターの模型の上に予想した放射ジェットの方向を白ペンキで書き込んであるが、写真-1 でわかるように実際のジェットの方向はほとんど一致している。たゞ (14) 式で  $E$  を  $E'$  で計算したから、 $E$  は過大にあらわれ従つて、到達点は実際よりもやゝ速くに推定したことになる。しかしながら、図-12 によると、ジェットの範囲は曲面デフレクターの場合にもかなりよく予想と一致しているといふことができよう。

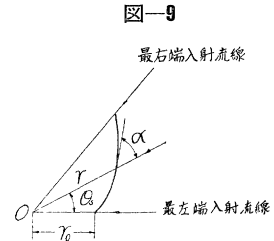


図-9

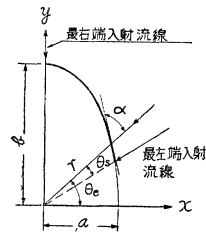


図-11 楕円デフレクター設計図(単位 m)

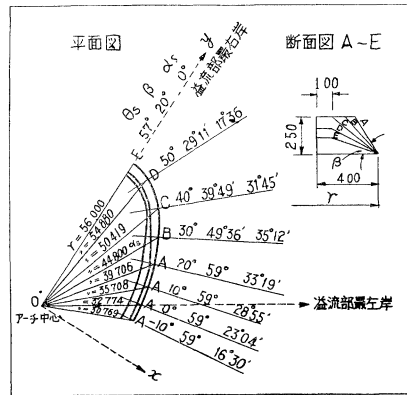


表-3 楕円デフレクターの諸計算値 (単位 m,  $E_0' = 79.75$  m)

	$\theta_e$	33°	43°	53°	63°	73°	83°	90°	計 算 式
OBよりの角度	$\theta_s$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	57°	$\theta_e - 33^\circ$
デフレクター半径	$r$	32 774	35 708	39 706	44 800	50 419	54 880	56 000	$\frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta_e + b^2 \cos^2 \theta_e}}$
入 射 角	$\alpha$	66°56'	61°05'	56°41'	54°48'	58°15'	72°24'	90°	(17)
デフレクター角度	$\beta$	59°	59°	59°	49°36'	39°49'	29°11'	20°*	設計値
放 射 角	$\alpha'$	31°55'	25°39'	21°59'	30°46'	43°46'	67°24'	90°	(6)
変 向 角	$\theta$	35°01'	35°26'	34°42'	24°02'	14°29'	5°00'	0°	$\alpha - \alpha'$
ジェット放出角	$\varphi$	41°21'	35°46'	31°55'	31°00'	29°58'	27°17'	20°	(8)
	$E/E_0$	0 3781	0 4370	0.4869	0 6129	0 7035	0 7840	0 8830	(14)
放出点のヘッド	$E$	30 15	34 85	38 83	48 88	56 10	62 52	70 42	$E_0 = 79.75$ と仮定する**
EL 170 m の無次元値	$\eta_0$	0 2653	0 2296	0 2076	0 1637	0 1426	0 1280	0 1136	$\eta = \frac{EL.178 - EL.170}{E}$
$\eta_0$ の x 座標	$\xi_0$	2 249	2.175	2 082	2 005	1 949	1 848	1.545	(11)
EL. 170 m までの飛翔距離	$x_0$	67 8	75 8	80 8	98 0	109 3	115 5	108 8	$x_0 = \xi_0 \cdot E$
ジェットの最大高さ	$y_{max}$	13.1	11 9	10 9	13 0	14 0	13 1	8.2	$y_{max} = \sin^2 \varphi \cdot E$
同上のElevation	El. $y_{max}$	193.6	192 4	191 4	193.5	194 5	193.6	188 7	EL.178 + $y_{max}$

\*この値は不定であるから 20° とした。 \*\*EL.178 m は放水点の高さである。

図-12 ジェットの飛散範囲  
楕円デフレクター

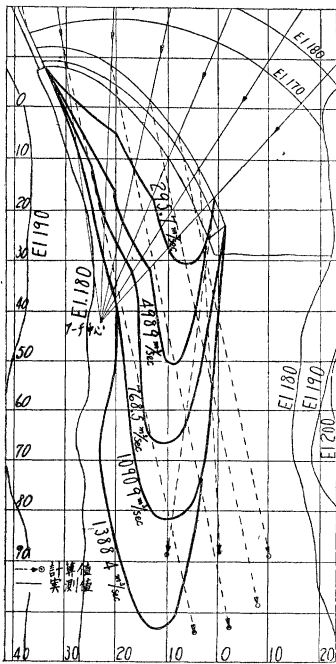
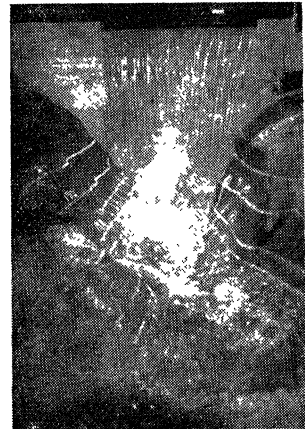


写真-1



写真-2



6. 結 語

最後にえられた楕円デフレクターは、空洞現象を起さず、安定上有利で、かつ流線を最も都合よく変向させ、しかもジェットの飛散高さをあまり高くしないで遠くへジェットを飛ばすことができる。本研究の結果は、ことにアーチダムの自由越流の余水吐きの場合の一つの困難を解決するのに有用であると思われる。

最後にこの研究を行うに当つて東京大学教授本間仁博士、東北大学鷺尾龍教授より終始御指導御鞭撻を賜つた。また、東北大学職員江間昭、学生伊藤文雄、照井雅敏の諸氏は実験、計算に多大の努力を払われた。また東北地建の諸氏、特に鳴子工事々務所長藤野博暁、所員井田至春、長井健の諸氏よりは研究に際して技術的経済的援助をうけた。ここに記してあつく感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) Toshio Iwasaki., "Studies on the Crest Curve of Arch Dam." The Technology Reports of the Tohoku University, Vol. XIX (1955) No.2.
- 2) 千秋信一: "上椎葉ダム余水吐水理模型試験報告書" 電研報告(土木 5310) (昭30.9.26)