

高圧ローラーゲートの戸溝と放流水脈に関する研究

ANALYSIS ON ROLLER-BOX OF HIGH PRESSURE GATE AND
DISPERSED OUT-FLOW

荻原国宏*・菅原一昌**・松山孝弘***・一柳直樹****

By Kunihiro OGIHARA, Kazumasa SUGAWARA, Takahiro MATSUYAMA
and Naoki ICHIYANAGI

1. はじめに

高圧放流管に設置されるゲートは、その設置場所およびゲートの機能より、そのタイプが決定されている。特に放流管によって流量の調節をする場合には、そのゲートの中開度における特性（ダウンプル、振動等）をとらえておくことが必須の条件である。

流量係数については、全開時の条件が満足されていれば、中間における係数の値は、その間が特に急変するようない限りあまり問題にする必要がない。流量係数の若干の相違は、ゲートの開度の若干の調整によって追従することができるからである。

このような観点に立ってローラーゲートを見直してみると、ゲート前面にスキンプレートを配し、リップ部分まで平面にした最も単純なローラーゲート（図-1(a)）は、前面に 45° リップを付したゲートおよび曲面を採用したゲート（図-1(b)）に比して流量係数においては若干の劣る点があるが、ダウンプルおよび振動においてより優れた点があることがわかっている。

ただ、ジェットフローゲートを含めて、ローラーゲートのタイプのゲートでは戸溝の存在は無視することができない。この戸溝に、ゲート中間開度において高速水流

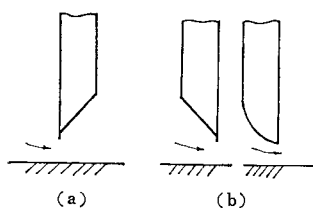


図-1 リップ形状

が流れ込みコンクリート壁面の損傷等を起こしていることも、またよく知られている。この現象は、高圧水がゲート部において圧力の開放が急

激に行われるために、放流水脈の拡散が下流水面の方向ばかりでなく、側方まで行われるためである。

そこで、この側方拡散を最小にして、戸溝部に高速水流の入りにくいローラーゲートの開発が行われ、実用化の目途がついている。この論文は、その開発過程において行われた実験研究について理論的な考察を加えてまとめたものである。著者らは、この新しいタイプのローラーゲートを N.D.F. (Non Dispersed Flow) ローラーゲートとよんでいる。

2. 放流水脈についての実験

まず放流水脈の特性を把握するために各種の実験をしたので、その結果についてとりまとめて、現象をまず理解しておこう。

(1) 放流水脈の拡散

まずゲートから放流される水脈の水平横方向への拡散の大小が戸溝に流入する量を支配することは、すぐわかるが、その程度が何によって支配されているか、また実際の拡散角はどの程度になっているか不明であったので実験をした。

この現象を支配しているファクターとして、上流側の水頭 (HEAD)、開度 (GATE OPENING)、ゲートリップ面より水路開放端までの距離：助走長 (LENGTH)、開放端における水路床の段差 (DROP)、水路の勾配 (SLOPE)、水路の幅 (WIDTH)、水路の高さ (D) 等を取り上げて、拡散角（図-8 の θ ）の測定を実施した。

これらのファクターのうち WIDTH については、戸溝までの距離 (LENGTH) が他の長さに対して小さいため、ごく局所的にしか影響をもたないと考えてよく、無視できることが実験中に判明したので途中から落とす。

拡散角の測定は、実験での放流水脈を水路直上方より

* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部

** 正会員 日本鋼管鋼構造営業部営業室次長

*** 日本鋼管鋼構造営業部技術室次長

**** 日本鋼管鋼構造営業部営業室係長

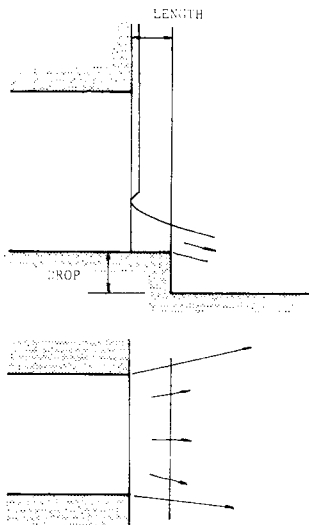


図-2 流況図

SLOPE	LENGTH	HEAD	DROP	OPEN	C.C.	HEAL	Y	HEAL
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	2	1	0	0	0	0	0	0
0	4	1	0	0	0	0	0	0
0	6	1	0	0	0	0	0	0
15	0	1	0	0	0	0	0	0
15	2	1	0	0	0	0	0	0
15	4	1	0	0	0	0	0	0
15	6	1	0	0	0	0	0	0

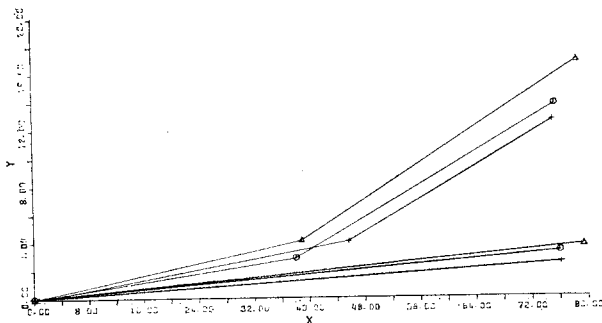


図-3 水脈の拡散図

(下の3本が主流, 上の3本が副流のものを示す.)

写真撮影をし、このプリント写真を使い、東洋大川越電算室の MELCOM-COSMO-700-III の デジタイザーを用いて読み取り、水路床上に設定した基準マーカの座標との関係より各拡散水脈の形状を取得した。また拡散水脈は高圧放流のため、ほとんどのケースが直線状であるので直線で近似した。この出力結果の一例が 図-3 である。

これは水路勾配 15°, 助走長 6 cm, 開度 80% (水路高さは 15 cm のものを使用した) の場合であり、HEAD = 1, 2, 3 m の各ケースを同一の図に書いてある。各ケース 2 本の直線があるが下側の角度の小さいものが主流であり、上の折線が副流であり、これは側面の水脈よりの飛沫および水路床に衝突した水の軌跡である。

上の方の数字は水脈の座標値および、拡散角 (RADIAN) を示している。

次に、このようにして取得したデータを、各パラメーターを使ってグラフに表わした。一目でわかるように 3 次元グラフを使うことにし、拡散角をラジアンで表わし、これを縦軸に、開度を横軸に、助走長と段差の組合せでグラフの奥より手前に向かって LENGTH = 0, 2, 4, 6 cm で各場合に DROP = 0.0, 2.5, 5.0 cm の順に並べて表わしたのが 図-4 の一連のグラフである。

これを見るとわかるごとく助走長 0 のケース、図中の一番奥のグラフで拡散角が最も大きくなっており、グラフの手前に行くに従って小さくなっていることがよくわかる。助走長 0 の場合で最も大きな拡散角は 40°~80° の角度を示している。

また助走のない場合には小開度ほど拡散角が大きいのに比して、助走のある場合には開度が 60% 以上になって拡散角が大きくなっていることがわかる。また段差がある場合にはいったん水路床に衝突してから拡散を始めるのに比して、段差がない場合には放水口の出口より拡散が開始される。

このような傾向は水路勾配のいずれのケースについても同じであるが、水路勾配がつくほど、拡散角は小さくなる傾向を示している。

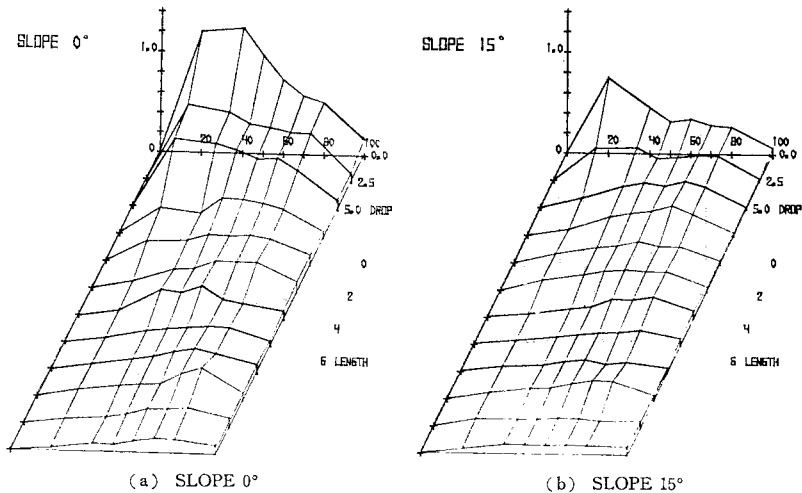


図-4 拡散角と実験条件との関係

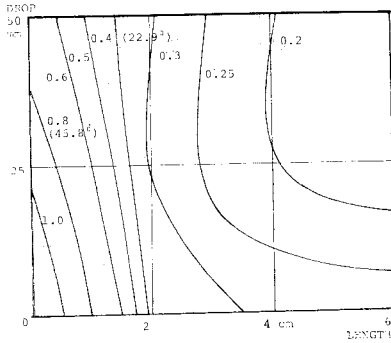


図-5 等拡散角図 (SLOPE 0°)

次に各ケースの開度 10~100% の間で最も拡散角の大きな値を拾い出し、DROPP (段差) と LENGTH (助走長) との関係でグラフに示したのが 図-5 のグラフであり、これは水平水路の場合である。

これらのグラフから、助走長の短い場合は段差の効果は比較的小さく、助走長を長めにした方が拡散角を小さくすることができる。しかし助走長をある程度つけた後では、段差をつけることが、さらに拡散角を小さくしていることがわかる。

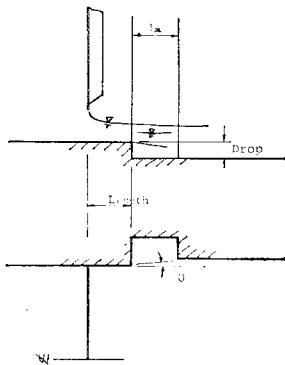


図-6 戸溝部の流れ

(2) 放流水脈と戸溝の開き

実際に戸溝を設置する場合を想定し、所定の助走長および段差をつけて、戸溝の開口幅を変えて、戸溝内に水の入る限界を測定した。

限界の状態をどのよ

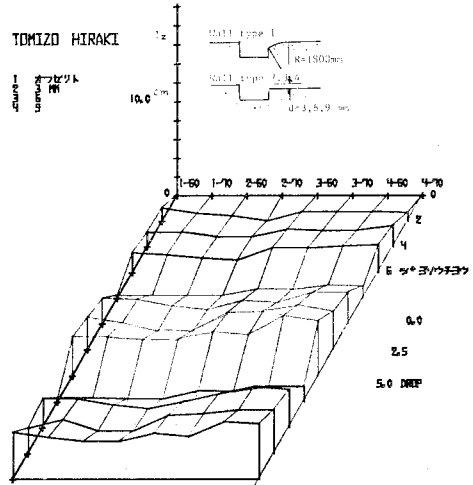


図-7 戸溝幅 L_2 と実験条件との関係

うに設定するかが問題であるが、ここでは戸溝内の水面が、戸溝下流部の水面に一致する状態での開口幅を限界と定め、この値を測定した (図-6)。

この場合の測定ケースであるが、最も戸溝内に水の入りやすい 60%, 70% の開度について測定を行い、下流水路の側壁が、戸溝内に水の入る状態を支配すると考えられるので、4種の側壁について実験を行った。すなわち、① オフセット：側壁が円弧 ($R=180\text{cm}$) になっているもの。② 側壁形状は直線とし、助走長部より 3mm 拡幅したもの。③ 直線壁で 6mm 拡幅したもの。④ 同じく 9mm 拡幅したものの4種である。

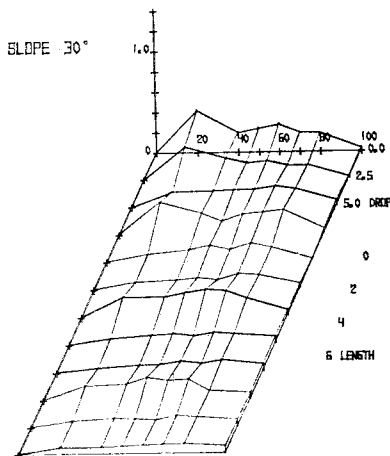
結果は 図-7 に示すように縦軸に戸溝の限界開口幅をとり、横軸に側壁タイプと開度を 1-60, 1-70 のように示し、グラフの奥より段差 0, 2.5, 5.0 cm の各ケースについて助走長 0, 2, 4, 6 cm の各ケースのグラフを3次元で示した。

このグラフで限界の開口幅 B の大きい場合ほど、戸溝内に水が入りにくいことを示しており、戸溝内の水流の乱れに対してより効果的であることを示している。

このようにしてグラフをみると、助走長を大きく、段差を大きくすることは、より効果的であることを示している。そのうち、助走長を大きくすることがより効果的であることがわかる。側壁の形状による相違は、9mm の拡幅の場合が他のケースに比較して若干大きめの値を示しているが、この程度であるとどのタイプでもよいと判定してもよいと考えられる。

(3) 放流水脈の拡散角と限界戸溝幅

戸溝の中に高速放流水が入るか否かは、拡散水脈の拡散角が大きいほど、入りやすいことが想定されるので、前記の2つの実験結果は何らかの形で相互に関連づけることが可能であると考えられる。そこで拡散角 θ の実



(c) SLOPE 30°

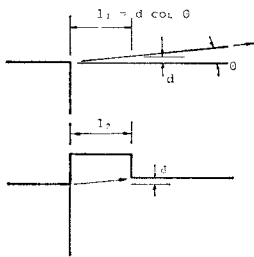


図-8 戸溝幅 l_2 と拡散角より決まる幅 l_1

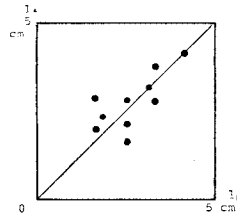


図-9 戸溝内に水の入らない戸溝幅 l_2 と拡散角より求めた幅 l_1 との関係

測値より放流水の浸入限界を(図-8)

$$l_1 = d \cdot \cot \theta \dots \dots \dots (1)$$

で求めた結果と、実験で求めた戸溝の限界幅 l_2 の関係をプロットしてみた。結果は図-9であるが、非常に高い相関を示している。そこで l_2/l_1 の比を段差ごとにとりまとめたところ、

段差 0 の場合	$l_2/l_1 = 1.0 \sim 1.7$
" 2.5 " "	" = 2.0 ~ 2.7
" 5.0 " "	" = 2.2 ~ 3.2

のごとくになっており、段差をつけるほど、拡散角で求めた限界浸入長より、より大きな戸溝幅を設定できることがわかった。このようにして戸溝幅は、放流水脈の拡散角がわかれば、上記の値を参考にして決定できることがわかる。

次に拡散角をどのようにして、あらかじめ想定できるかについて考えてみる。

3. 拡散角の測定法

放流水脈の拡散角がどのようにして決まるのかはよくわからない。しかし少なくとも放流される直前までは相当な高ヘッドであった流れが、ゲート部直後で一挙に大気圧まで開放されるために起こる現象であるということはわかる。またこの放流部の

水面形をみると、かなりの曲率をもった流れになっており、その曲率の大きいほど、拡散の程度も大きいことがわかっている。このようなことを確認するために助走部の側面の圧力および、水面形の測定をしてみた。

水面形の測定は先の拡散水脈の場合と同じく、基本マーカーを入れた写真により、デジタイザーによって座標値を得た。結果の一部を図-10に示してある。これらのグラフをみるとわかるごとく、いずれの場合 HEAD に関係ないことがわかる。また水面の変化は出口ほど大きく、下流に行くに従い小さくなっていく。

さらに水路勾配による相違は、水平水路ほど水面の曲率の変化が大きく、勾配がつくに従って曲率の変化は小さくなっていく。

また、このときの側壁の圧力を図-11の15点について測定した。その結果、水面の変化している部分では、一様水深の場合と異なり、静水圧分布になっていないし、また流下方向に直線的に減少してゆくとは限らない。測定結果によると鉛直方向の圧力分布は直線分布とならずに曲線分布となっており、放水口に近いほど、水路底部に残圧があり一様な圧力分布をしている。これが下流に行くに従って静水圧分布となってくる。この傾向は水路勾配によって変化なく、水面形に強く影響を受けている。このような傾向を示す一例として図-12を示す。これは縦軸が上流のヘッドで割って無次元化した圧力、横軸は放水口よ

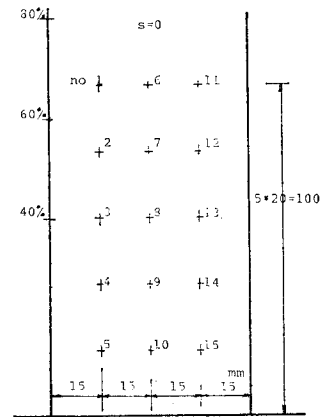


図-11 側壁部圧力測定点

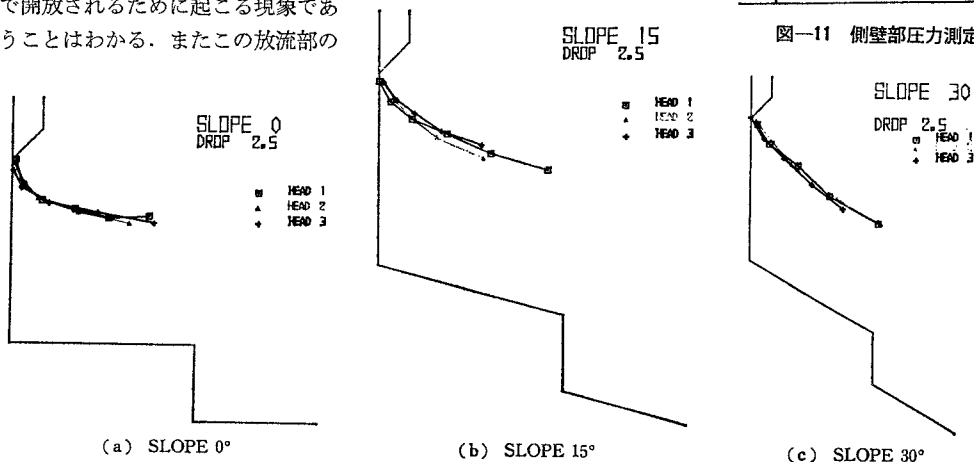
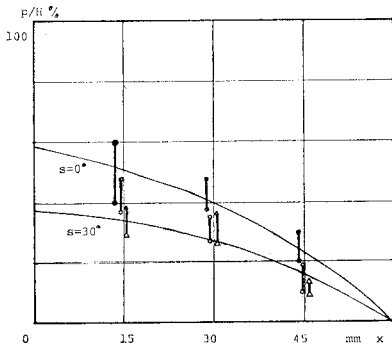
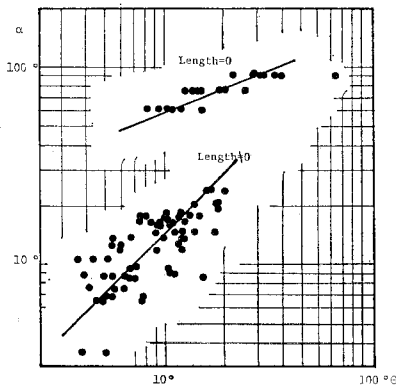


図-10 水面形



(黒印は SLOPE 0°, 白丸は SLOPE 15°,
△印は SLOPE 30°)

図-12 圧力分布



(上の直線が助走のない場合)
(下の直線が助走のある場合)

図-13 水面勾配と拡散角の相関

りの距離を示している。

プロットした点は、その断面における最大値と最小値の間を線で結んで点の存在する範囲として示してある。この結果からわかるごとく、 $s=0^\circ$ の水平水路の場合が最も残圧が大きく、 $s=30^\circ$ の場合が最も少ない残圧となっている。また残圧の下流への減少は直線的でなく、かなり下流まで残圧があることがわかる。

この結果と先の水面形の結果を合わせて考えると、水路勾配がついているほど早めに水面形も水路床に平行になり、また残圧も早めに少なくなっていることがわかる。

以上の実験結果より放流水の拡散は水面の変化率（または曲率）、側壁の残圧に関連していると想定することができる。残圧と水面形との関係は上記の実験結果よりも、ある程度相関があると考えられるので、どちらかについて考えればよい。

理論解析との関係を考えて、水面形についての関連をとった方がより処理が簡便であるので、水面形と拡散角との相関について整理してみた。

水面形については曲率をとる代わりに戸溝設置点の水

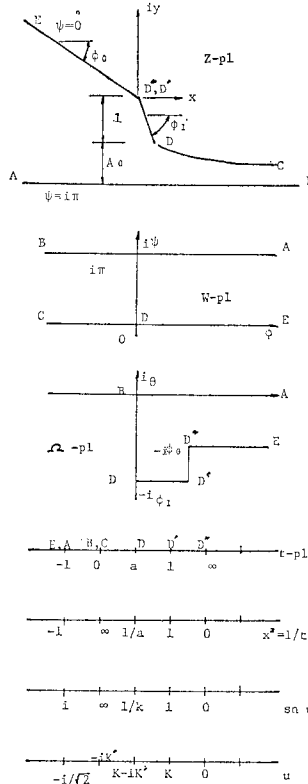


図-14 写像平面の関係

面勾配をとることにし、これを一つの指標とし、拡散角との関係をプロットしてみた。ただし、水路勾配がある場合には、水面勾配は水路床に対する角度として処理をしている。

したがって水平面に対する水面勾配ではなく、水路床に対する水面勾配として扱っている。結果は図-13のごとくなっている。横軸が拡散角であり、縦軸が水面勾配を角度で表示したものである。これを見るとわかるごとく助走長 LENGTH=0 の場合と助走長がある場合とは異なっていることがわかる。そこで、双方について実験式を求めておく。拡散角を θ 、水面勾配を α とするとき

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 4.02 \cdot \alpha^{5/2} \times 10^{-4} && (\text{LENGTH}=0) \\ \theta &= 4.29 \cdot \alpha^{5/4} \times 10^{-1} && (\text{LENGTH} \neq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となり、 θ 、 α も度で与えられている。

したがって、この実験式を使うことにより、水面形の水面勾配より拡散角を推定することが可能となる。

4. 水面形の理論解析

このようなゲートよりの流出については等角写像による手法がよく使われている。ここでも同じ手法によって求めることにする。図-14 のような複素平面間の写像関係を与える関係式は次のごとくなる。

$$W = \log \left[\frac{t}{a} \cdot \frac{a+1}{t+1} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\Omega = A \log \frac{\theta_1 \left[\frac{u-a}{2K} \right]}{\theta_2 \left[\frac{u+a}{2K} \right]} + Bu + c \dots\dots\dots (4)$$

$$A = \frac{\phi_0}{\pi} = \frac{1}{n}, \quad B = i \frac{(\phi_0 - \phi_1)}{K} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} c &= -i\phi_0 - \log(1/q_0) \\ &= -i\phi_0 \left[\frac{a}{K} + i \right] - (\phi_0 - \phi_1) \frac{K'}{K} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\bar{X}^2 = \frac{1}{t} = sn^2 u \dots\dots\dots (7)$$

$$a = k^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\Omega = \log \left(\frac{dz}{dW} \right) = \log \left(\frac{1}{q} \right) + i\theta \dots\dots\dots (9)$$

$$W = i\psi + \phi \dots\dots\dots(10)$$

$$z = x + iy \dots\dots\dots(11)$$

高圧ゲートの場合 $\phi_0 = 0$ であるので、式(4)は簡単になり

$$\Omega = \log \frac{\exp\left[-\frac{\phi_1}{\pi} \cdot \frac{u}{K} \cdot i\pi\right]}{q_0} \dots\dots\dots(12)$$

となり、式(9)より

$$\frac{dz}{dW} = \frac{\exp\left[-\frac{\phi_1}{\pi} \cdot \frac{u}{K} \cdot i\pi\right]}{q_0} \dots\dots\dots(13)$$

が得られ、また W と t の関係の式(3)を微分の形にすると、

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{t(t+1)} \dots\dots\dots(14)$$

が与えられる。 t と u は式(7)を通じて結合されているので、 t の代わりに u をパラメーターとして解を求めることにする。

次に水面形は 図-14 で DC 間で与えられるので u は

$$u = -iK' \sim -iK' + K$$

と変化していることが、同図の $u-pl$ からわかる。そこで

$$u = -iK' + K - u_2 \dots\dots\dots(15)$$

として、 $u_2 = 0 \sim K$ と変化させて水面形を求めることにする。これを式(7)に代入し整理すると

$$t = k^2 \frac{cn^2 u_2}{dn^2 u_2} \dots\dots\dots(16)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{t(t+1)} \dots\dots\dots(17)$$

$$dz = \left[\cos \phi_1 \left(1 - \frac{u_2}{K}\right) - i \sin \phi_1 \left(1 - \frac{u_2}{K}\right) \right] dW \dots\dots\dots(18)$$

が得られ、 u_2 を与えると式(16)より t , および dt が求まり、これを式(17)に代入し、 dW を求め、式(18)より dz を求めることによって水面形が求まる。

次に BC 間は 図-14 各面で同一点であるが、その差は $W-pl$ での $dW = d\phi + id\psi = i\pi$ の差となって現われている。

したがって式(18)において $u_2 = K$, $dW = i\pi$ とおくことによって

$$dz = dW = i\pi \dots\dots\dots(19)$$

が得られる。各ゲート開度での水面形を求めるには、楕円関数の母数を変化させて求めればよい。結果をグラフに示したのが 図-15 である。

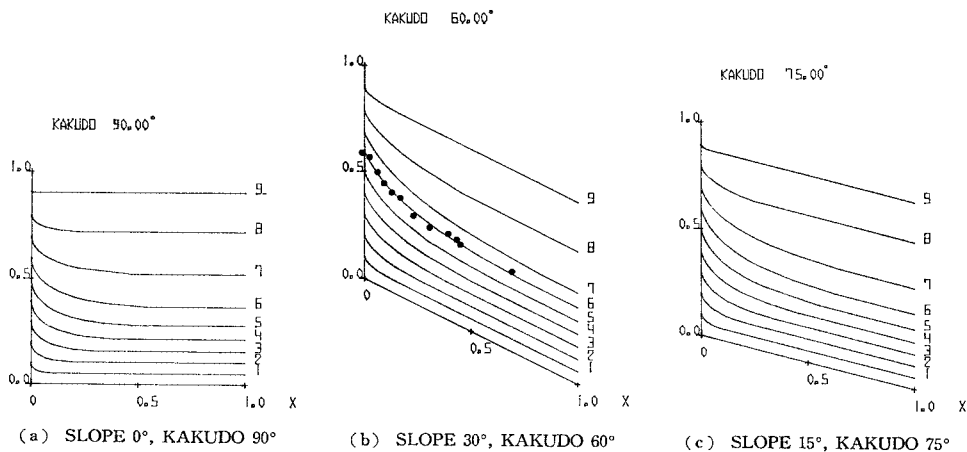


図-15 理論水面曲線

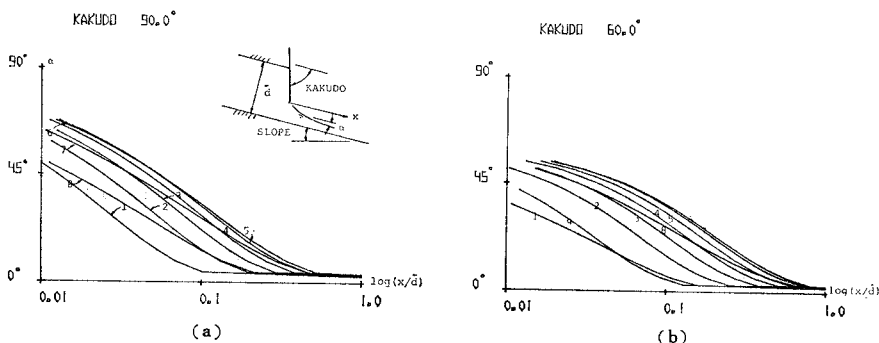


図-16 水面角とゲートよりの流下長との関係

また水面勾配と、無次元流下長（流下長/水路高さ：水路高さはゲート設置点の水路高さであり、流下長はゲート先端よりの流下距離をいう）との関係を示したのが図-16である。これによって流下長より水面勾配が求まり、先の式(2)および図-16によって拡散角を求めることができる。同図中の KAKUDO はゲートリップ面と水平面のなす角度であって、水路床の勾配 SLOPE との間には、両者の和が 90° の関係がある。

理論水面形と実験の結果のうち、 30° の水路勾配の場合について図-10(c)より、図-15の開度 60% のところに点として記入してある。これを見るとわかるごとくよい一致をみていることがわかる。他のケースの場合も図-10と図-15を比較すると、よい相関を示していることがわかる。

5. ま と め

ローラーゲートの戸溝の設計上、戸溝内に高速水流が流入しないような設計をすることが望ましい。この観点に立って開発された N.D.F. ローラーゲートの基本データを得るべく研究をし、成果をまとめることができた。

戸溝内に水の入るか否かは、助走長 (LENGTH)、段差 (DROP) のパラメーターによって決まる。特に助走長を実験をせずに推定する方法を見出すことが設計上の急務であった。

戸溝内に水の入らない助走長は水脈の拡散角 (θ) との直線相関で結合されることが図-9よりわかっている。

この点を考えると、拡散角を推定する方法が必要とな

るが、実験中よりの観測より側圧と水面形が強く支配していることがわかり、理論計算との関係が結びつけやすい水面形の水面勾配と拡散角との関係をつけることができた(図-13)。

以上の経過より、戸溝設計上の最適の助走長を次のようにして推定することができる。

(1) 水路勾配、開度、水路高さ等の水路設計条件より各開度の水面形と水面勾配を理論計算より求める。

(2) この中より戸溝設置点の水面勾配より拡散角を図-13または式(2)によって求めることができる。

(3) 放流水の戸溝内への浸入限界が式(1)によって求められ、戸溝の開口幅が決定できる。

(4) 水路床面の段差の設置の有無は、下流の設計条件によっても考慮されるべきであるが、エアレーションの効果を考えて、できれば設置する方向で進めればよい。

助走長の決定は(2)~(3)の間の作業を試行することによってなされる。

参 考 文 献

- 1) 荻原国宏：ゲートリップ付近の圧力分布についての理論解析，土木学会論文報告集，第 258 号，1977 年 2 月。
- 2) 荻原国宏・菅原一昌・松山孝弘・一柳直樹：ローラーゲートの新手法とその水理実験，水門鉄管，No. 127，1981-5。
- 3) 荻原国宏・松山孝弘・一柳直樹：ローラーゲートの戸みぞに関する研究，土木学会年次学術講演会，1981-10。
- 4) 荻原国宏・松山孝弘・一柳直樹：高圧ローラーゲートの拡散水脈に関する理論的研究，第 26 回水理講演会論文集，1982-2。

(1982.7.15・受付)