

ゲートの振動と流体力の分布特性

Distributions of Hydraulic Forces Acted on the Gate Bottom in Vibration

(株)新日本技術コンサルタント 高村 清 Kiyoshi TAKAMURA
 長崎大学工学部 富樫 宏由 Hiroyoshi TOGASHI
 長崎大学工学部 平山 康志 Yasushi HIRAYAMA
 長崎大学工学部 丸野 敏輝 Toshiki MARUNO

The distributions of hydraulic pressure acted on the gate bottom in vibration were measured and the damping coefficients of hydrodynamic forces were analysed for three types of gates. The study involves forced oscillation tests and it is concluded that the flat bottom has two kinds of modes of negative damping caused by vortex in the lower range of reduced velocity (V_r) and by separated stream line in the higher range of V_r . The beveled edge ($\alpha = +15^\circ$) has the negative damping only in the higher range of V_r and another one ($\alpha = -15^\circ$) has none. Hydraulic discussions for these results were given.

Keywords : gate vibration, negative damping, hydraulic force, vortex, separated stream line

1. 結 言

下端放流式ゲートは、放流時に流水より複雑な流体力を受け、ゲートの弾性系と連成して振動を生じることがあり、流水振動として研究されてきた。筆者らは、先に、静止させた下端放流式ゲートに作用する流体力を、ゲート底面に取付けた圧力センサーにより、種々の実験条件において測定し、その結果を報告した¹⁾。

振動ゲートに作用する流体力については、既に加振法による実験結果が報告されているが²⁾、本研究では、圧力センサーをゲート底面に密に配置することにより、特にゲート底面における流体力の分布に着目して測定し、ゲート振動のメカニズムを考察すると共に、負減衰力を定量化する。併せて、ゲート底面角(α)の3種(-15° , 0° , $+15^\circ$)について系統的な比較実験を行ない、 α がゲート振動性状に与える影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 実験装置・器具及び模型

回流水路、流体力測定装置は、先の実験と同じものを使用した。回流水路の接近流には、大きな乱れがないことを事前に確認した。回流式開水路は $B\ 0.8 \times H\ 0.8 \times L\ 15.0$ (m) であり、その略中央部に置いた導流壁に設置したゲートモデル下端形状及び圧力センサーの配置を図-1に示す。図中でゲートモデルの中の圧力センサー上部の数字は測定番号を表わす。モデルの縮尺は実物の $1/30$ 程度である。圧力センサー(抵抗線式)と動ひずみ増幅器はそれぞれ5セット使用した。ゲートモデルは上部と下端部に分割され、上部は固定したまま、下端部のみを加振することにより、加振機の容量を小さくした。加振時にゲートの横振れを防ぎ、正確に上下運動をするように、加振機にはリニアガイドを使用した。

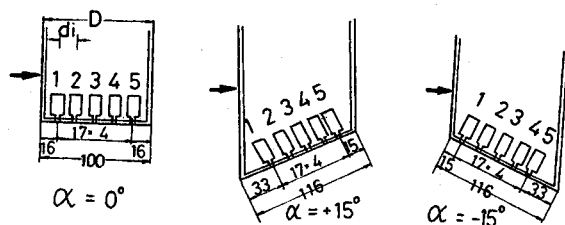


図-1. ゲート下端形状と圧力センサーの配置図
(矢印は流水方向)

加振機性能 : 全振幅 ; $0 \sim 10$ mm, 周波数 ; $0 \sim 10$ Hz, ゲート開度調節範囲 ; $0 \sim 10$ cm
 機器仕様 : 駆動用モーター ; 1800 r.p.m., 750W, 無段変速機出力軸回転数 ; $0 \sim 600$ r.p.m.

2. 2 実験条件

ゲート開度 (s) ; 5 cm (ゲート厚中心) , 加振片振幅 (a) ; 0.5 ~ 5 mm ,

加振周波数 (f) ; 2 ~ 8 Hz, 上下流水位差 (ΔH) ; 5 ~ 40 cm (潜り流出)

上記の如く、小開度、小振幅の条件で実験を行った。

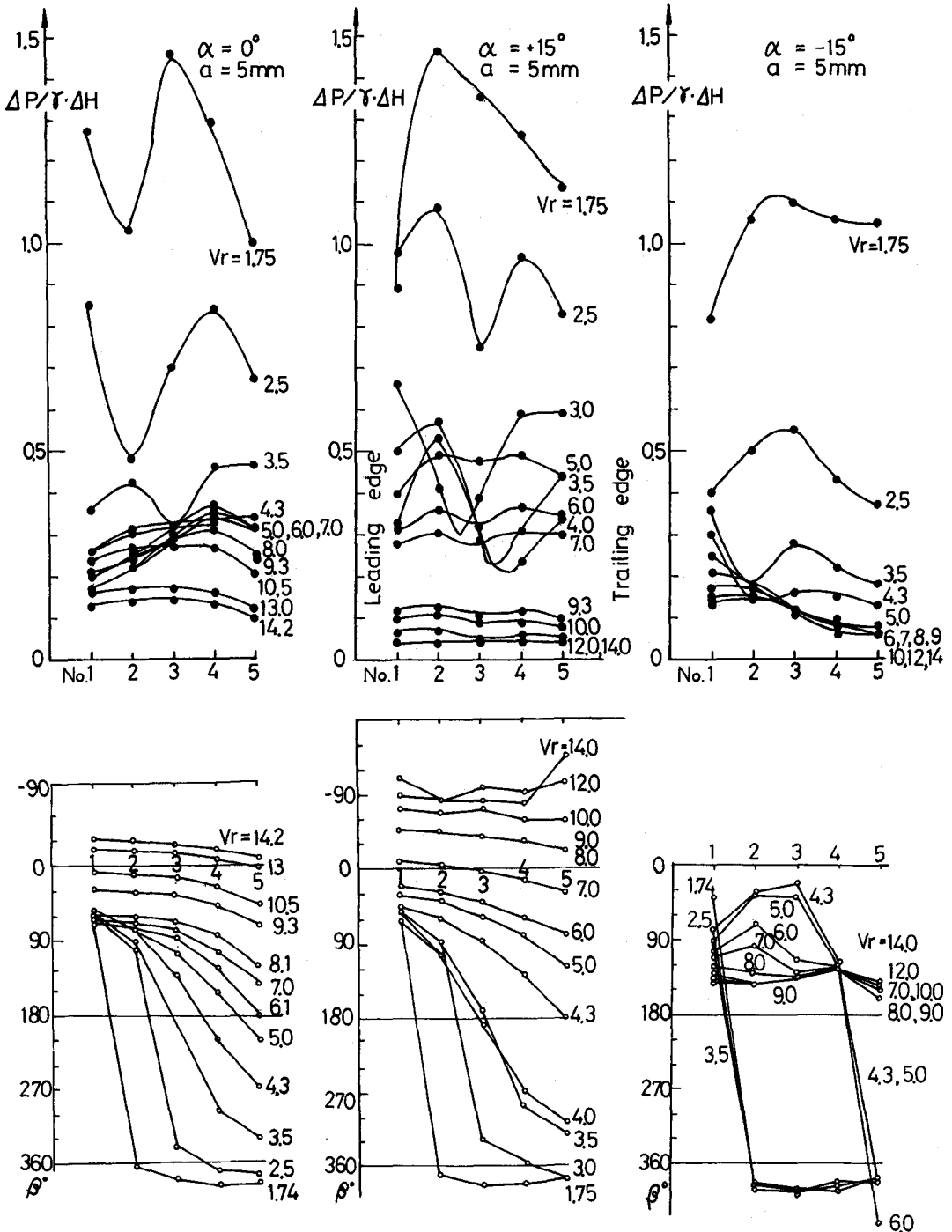


図-2. $\Delta P / \gamma \Delta H$ と β のゲート底面における分布 (横軸は測点番号)

2. 3 データ処理

パソコンを使用して、データを収録し解析した。データの取り込み時間は 25.6 s、サンプリング周波数は 80 Hz とした。2ヶのデータ間の位相差は、そのクロススペクトルから求めた。

3. 実験値とその解析

流れの中では、物体は静止していても常に非定常な流体力を受けているが、特に物体が振動しているときに受ける流体力を（狭義の）非定常流体力と定義する。

非定常流体力理論³⁾によると、流体減衰係数 c' は次式により求められる。

$$c' = \bar{c} \cdot \gamma \cdot \Delta H$$

ここに、 $\bar{c}$: 積分減衰係数 = $\Sigma \{ (a/D) \cdot \omega \cdot \Delta H \}^{-1} \{ (\Delta P_i / \gamma) \sin \beta_i \} d_i / D$

ΔP_i : 各測点での流体力片振幅の 2 乗平均値, β_i : ゲートの振動変位と流体力との位相差,

γ : 水の単位体積重量, a : 加振片振幅, ω : 加振角周波数 = $2\pi f$, D : ゲート厚,

d_i : 各圧力センサーの取付け間隔

以上により、弾性支持モデルを使用する複雑な実験の代りに、加振実験によって $\bar{c}$ を求め、更にゲート弾性系の構造正減衰係数と比較すれば、ゲート振動の安定性を評価できる。

3. 1 非定常流体力の変動成分の 2 乗平均値 (ΔP)

非定常流体力 $F(t)$ のパワースペクトルには、加振周波数 (f) の卓越したピークの他に、多くの小さな山があり、波形は正弦波から変形しているの、その振幅として変動成分の 2 乗平均値を使用した。

(1) $\Delta P / \gamma \Delta H$ のゲート底面における分布 (図-2) $\alpha = 0^\circ$ の場合 : 低流速域では $\beta = 180^\circ$ となる測点で $\Delta P / \gamma \Delta H$ が極小となる凹型分布となり、高流速域では後縁寄りで極大となる凸型分布となる。

$\alpha = +15^\circ$ の場合 : 低流速域では $\alpha = 0^\circ$ の場合に類似の凹型分布となるが、高流速域では、ゲート底面全域にわたり略一様な分布で、 $\Delta P / \gamma \Delta H$ の値も小さい。

$\alpha = -15^\circ$ の場合 : 低流速域ではこの場合も凹型分布で、高流速域では前縁寄りで極大となる凸型分布となる。 $\Delta P / \gamma \Delta H$ の値は $\alpha = +15^\circ$ の場合よりも若干大きい。

(2) $\Delta P / \gamma \Delta H \sim V_r$ の関係及び ΔP と振幅の関係

測点 1 における $\Delta P / \gamma \Delta H \sim V_r$ の関係を 図-3 に示す。 $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha = +15^\circ$ の場合は略類似しており、高流速域では $\Delta P / \gamma \Delta H$ は振巾に略比例し、 V_r に逆比例する。 $\alpha = -15^\circ$ の場合は、特に高流速域では前者と異なった型を示す。これは他の測点についても略同様である。

3. 2 ゲート変位と流体力との位相差 (β)

(1) β のゲート底面における分布 (図-2)

$\alpha = 0^\circ$ の場合 : 低流速域 ($V_r < 6$) では、後縁寄りに $\beta > 180^\circ$ となる領域が生じ、逆 S 字型分布となる。高流速域 ($V_r > 7$) では、 β は滑らかな翼型分布を示し、ゲート底

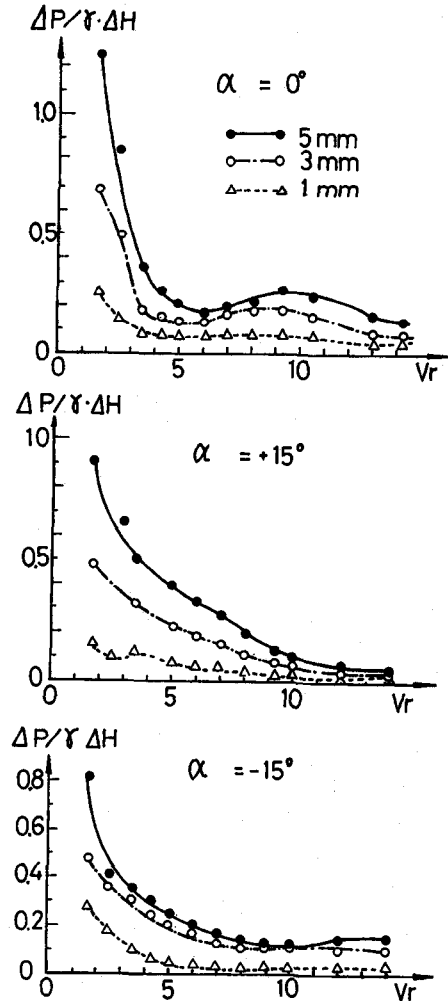


図-3. $\Delta P / \gamma \Delta H \sim V_r$ の関係
(測点 1 の場合)

面全域で $\beta < 180^\circ$ であり、 V_r の増加と共に β は減少し遂に負となる。

$\alpha = +15^\circ$ の場合： β は全体として $\alpha = 0^\circ$ の場合に類似した分布型となるが、 $V_r > 5$ で高流速域型（翼型）となる。

$\alpha = -15^\circ$ の場合：全体として $\alpha = 0^\circ$ の場合に類似した分布型であるが、低流速域から高流速域への変化が急激で、高流速域において β_i は V_r に関係なく一定となる（収束する）特徴を示す。

(2) $\beta_i \sim V_r$ の関係 (図-4)

$\alpha = 0^\circ$ の場合：各測点毎に、 $\beta_i \sim V_r$ の関係を示す。

$\beta_i = 0^\circ$ ， $\beta_i = 180^\circ$ となる V_r 値は、測点 $i = 1, 2, 3, \dots$ の順序で大となる。また、 β_i は V_r が増加すると減少し、更にその変化率 $d\beta_i/dV_r$ も小となる。

$\alpha = +15^\circ$ の場合： $\alpha = 0^\circ$ の場合と略類似の曲線となるが、全体的に β_i は V_r 軸の左側へ移動する。

$\alpha = -15^\circ$ の場合： $\alpha = 0^\circ$ 及び $\alpha = +15^\circ$ の場合とは相違して、低・高流速域で β_i は V_r にあまり関係なく一定値に近く、 $4 < V_r < 6$ で β_i が急変する。これは前記した β の分布型が急変する V_r の範囲と一致している。

3. 3 積分減衰係数 ($\bar{c}$) (図-5)

$\alpha = 0^\circ$ の場合：低流速域 ($V_r \approx 3.5$) と高流速域 ($V_r \approx 11.0$) の2カ所で負減衰となる。振幅が増すと減衰係数は小となる。高流速域では $\bar{c} \approx -0.1$ である。

$\alpha = +15^\circ$ の場合：低流速域では、 $\bar{c} > 0$ となる。

$\alpha = -15^\circ$ の場合： $V_r \approx 8$ で $\bar{c}$ は極小となるが、 V_r の全領域で $\bar{c} > 0$ となる。

4. 負減衰性の考察

4. 1 低・高流速域での ΔP と β の分布型の相違

$\Delta P/\gamma \Delta H$ と β のゲート底面における分布状況は、低流速域と高流速域では様相を異にする。平底ゲート ($\alpha = 0^\circ$) で、振幅 $a = 5 \text{ mm}$ の場合を図-6 に示す ($a = 1, 3 \text{ mm}$ の場合も略同様)。まず β について述べると、低流速域では、ゲート底面後縁寄り $\beta > 180^\circ$ となる領域が生じ、 $\beta = 180^\circ$ となる位置 (X点) は、 V_r の増加と共に次第に下流側へ移動し、 $V_r = 7.0$ で後縁に到達する。高流速域では、常に $\beta < 180^\circ$ で、 V_r の増加と共に β は次第に減少し、遂にゲート前縁から $\beta < 0^\circ$ となる。従って、低流速域での負減衰性は、ゲート後縁部で $\sin \beta < 0$ となるために生じ、高流速域での負減衰性は、逆に前縁部で $\sin \beta < 0$ となる結果として生じるものである。

次に、 $\Delta P/\gamma \Delta H$ のゲート底面における分布は、低流速域では、

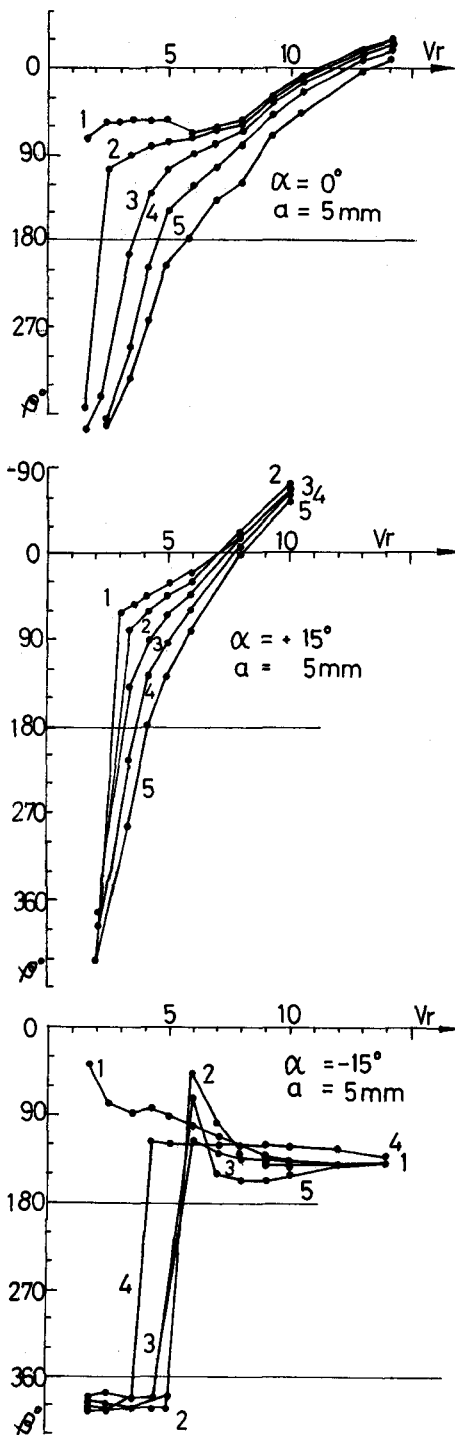


図-4. $\beta_i \sim V_r$ の関係

X点で極小となる凹型分布であり、高流速域では、ゲート底面中央部で極大となる凸型分布となる。X点が V_r の増加と共に次第に下流側へ移動することは ΔP が移動する結果であることを暗示する。3. 2 (2) で述べた測点の順序配列もこれと符号している。また、3. 2 (1) で述べたように β が逆S字型分布を示すのは、低流速域で、この移動速度が、X点で減速した後、後縁部で再び増速することを意味する。一方高流速域における β の翼型分布は、移動速度が後縁に向かって単調に減速することを意味している。

4. 2 低・高流速域での負減衰性の発生メカニズム

低流速域において、 ΔP がX点で極小となる事実について、Bhargava⁴⁾ は前縁剥離渦がX点でゲート底面に再付着する結果であると説明し、Hardwick⁵⁾ は流況観察の結果としてこれを確認している。

高流速域では、最早渦のゲート底面への再付着は生じない。高流速域での負減衰性は、単に剥離流線とゲート底面との相対運動(ゲートの振動変位による相対迎え角の変化)による。即ち、準定常的手法によると、相対迎え角と流体力の変化は共に振幅に比例し換算流速 V_r に逆比例するが、図-3によると、 $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha = +15^\circ$ の場合、 ΔP は高流速域で上記の関係を近似的に満足している。 $\alpha = -15^\circ$ では、この関係を満足せず、負減衰性を生じないことが予想され、事実 $\bar{c} > 0$ となる。

4. 3 ゲート底面角 (α) が負減衰性に与える影響

図-5 より、 $\alpha = 0^\circ$ の場合、低流速域及び高流速域の2カ所で、 $\bar{c} < 0$ となり、負減衰性が生じる。

$\alpha = +15^\circ$ の場合、高流速域でのみ、 $\bar{c} < 0$ となり、 $\alpha = -15^\circ$ の場合には、何れの流速域においても負減衰性が生じない。この理由は以下のように水理的に考察される。

(1) 低流速域

負減衰性(渦励振)

$\alpha = 0^\circ$ の場合 :

渦が周期的に発生、再付着、後流への放出を繰り返し、励振が強い。

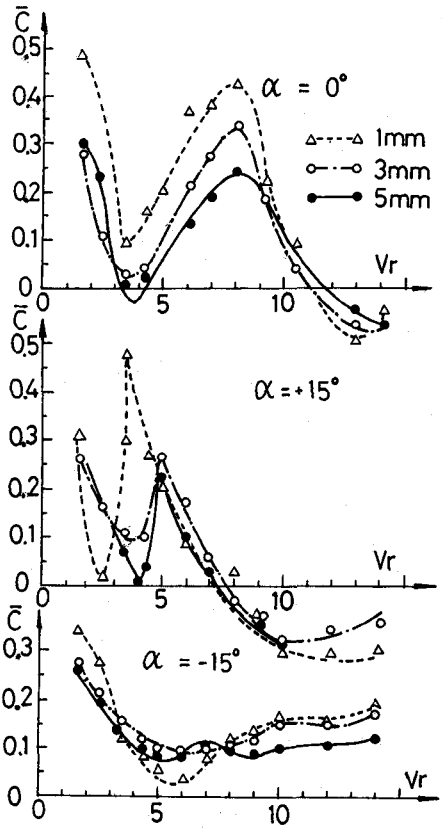


図-5. $\bar{c} \sim V_r$ の関係

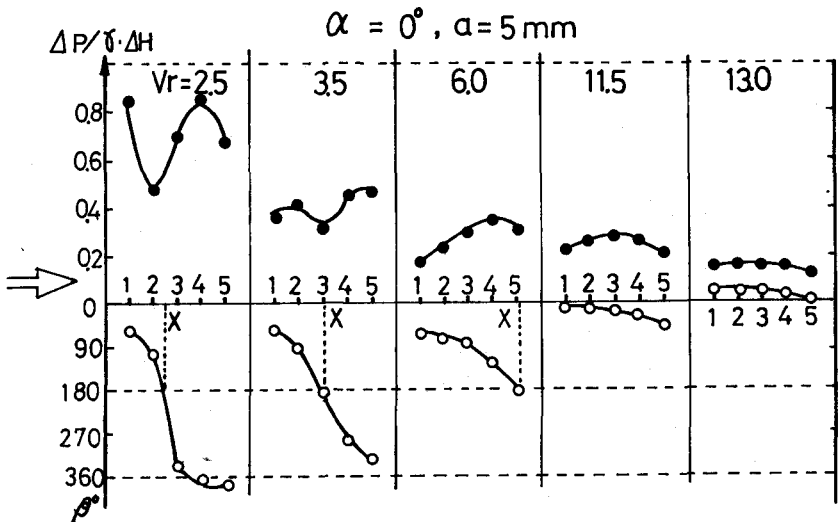


図-6. 代表的 V_r での $\Delta p / \gamma \Delta H$ と β のゲート底面における分布状況

$\alpha = +15^\circ$ の場合 : 下流上りの底面傾斜のために、渦がゲート底面に再付着する傾向が減少し、励振は弱くなる。

$\alpha = -15^\circ$ の場合 : スケールの小さい渦が定常的にゲート底面に再付着して、周期的励振が弱くなる。

(2) 高流速域負減衰性 (流線運動)

$\alpha = 0^\circ$ の場合 : ゲート前縁より剥離する流線が、ゲートの振動と同じ周期で変動し、自励現象を生じる。

$\alpha = +15^\circ$ の場合 : $\alpha = 0^\circ$ の場合と類似の自励現象を生じる。

$\alpha = -15^\circ$ の場合 : 流線は、ゲート前縁で完全剥離せず、定常的にゲート底面に付着し、励振を生じない。

5. 結 論

実験値の解析及びその考察の結果を以下に要約する。

(1) 下端放流ゲートの振動負減衰性には、基本となる2種のモードが存在する。即ち、低流速域での負減衰性はゲート底面での流れに生じる渦運動により、高流速域でのそれは剥離流線の運動によるものである。

(2) ゲート底面角 α は、これらの負減衰性に大きな影響を与える。即ち、平底ゲートの $\alpha = 0^\circ$ では2種の負減衰性が共に生じ、傾斜底の $\alpha = +15^\circ$ では高流速域でのみ生じ、 $\alpha = -15^\circ$ では何れも発現しない。

(3) これらの負減衰性の大きさは、 $\bar{c}_d \approx -0.1$ のオーダーである。実際のゲートでは構造減衰力 (正減衰) がこの値を相殺すれば、この種のゲートの振動は防止できる。

また、加振法によってゲート底面に作用する流体力の分布を詳細に調査することは、負減衰性の発生メカニズムを特定する有効な手段と考えられる。ただし、この実験は小開度、小振幅の範囲でのものであり、開度、振幅について更に広い範囲での実験が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 高村 清・富樫宏由・平山康志 : 下端放流ゲートに作用する流体力について ; 昭和 63 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 212 ~ 213, 1989.3.
- 2) 今村建二・大久保精二・金子 徹 : ゲートに作用する流体減衰力の研究 ; 第 32 回水理講演会論文集, 土木学会, pp. 565 ~ 570, 1988.2.
- 3) 岡内 功・伊藤 学・宮田利雄 共著 : 耐風構造 ; 丸善, 1977.
- 4) Bhargava, V.P. and S. Narasimhan : Pressure Fluctuations on Gates ; IAHR, Journal of Hydraulic Reserch, Vol.27, No.2, pp. 215 ~ 231, 1989.
- 5) Hardwick, J.D. : Flow-Induced Vibration of Vertical-Lift Gate ; Proceedings of ASCE, Journal of Hydraulics Division, Vol.100, No. HY5, pp. 631 ~ 644, 1974.