

ローラーゲートの小開度で発生する 自励振動の発生範囲

Unstable conditions on self-excited oscillation of roller gate under
the submerged flow condition

荻原 国宏
上田 幸彦

By Kunihiro OGIHARA
Sachihiko Ueda

Theoretical analysis on the self-excited oscillation of roller gate under small gate opening and submerged conditions has been done and some results has reported by JSCE Journal 1989,5. But that result shows only fundamental part of theoretical analysis, therefore it is difficult to assume and to find the actual field conditions in which self-excited oscillation arises. So in this paper the parameters of the unstable condition in the theoretical analysis are re-arranged and the results are summarized again for easily understanding.

はじめに

ゲート（水門）の振動についてはその形状、設置状況、利用形態などで多種多様であって画一的に扱えない。それだけに流れの状況も変わりゲートの操作系との間で形成する振動系も変わっている状況で振動現象をどの様に捕らえ振動原因の把握をするかは興味があると共に難しいところである。

発生する振動が強制振動のタイプもあるし、振動が発生すると流れよりエネルギーを吸収し振動が大きくなる自励振動もある。自励振動としてはフラップゲートの振動についてナップとの関連で理論解析をし²⁾、また越流とアンダーフローを許す場合のゲートについては遅れ時間系の理論解析モデルを扱って来た³⁾。ここにまとめたものは自励振動のタイプでありローラーゲート、スライドゲートの微小開度で下流側が潜り流出の状態で発生する振動である。

この種の振動現象はかなり多くの研究者によって実験及び理論解析がなされているが十分に現象を説明するまでに至っていない。特に振動の振幅が自励振動の発生に関与している点についての説明がしきれていない。^{4)～15)}

これについては先に理論解析の部分をもとめて発表した¹⁶⁾がパラメーターが複雑にからみあっており十分に理解出来るようになっていなかった。そこでこの機会に自励振動の発生条件をより明確にしておくことにした。

工博 東洋大学教授 工学部土木工学科 (〒350 埼玉県川越市鯨井中野台2100)

工博 水門鉄構設計部 石川播磨重工業(株) (〒135 東京都江東区毛利1-19-10)

流れの状況は図-1に示すように鉛直方向に一自由度をもつ振動系を形成するローラーゲートの回りの流れであり。下端部のゲート形状、流速、ゲート支持系の固有振動特性がからみあった場合の自励振動である。ゲートの形状は図-2のごとく、a,b-Type の二つであり、後者には下流面リップの切り上げ角度 10,20,30 度の3種類がある。 H_1 , H_2 は上流水深及び下流水深であり、 a, a_0 はゲート開度及び下流面リップの切り上げ高さである。ゲートを自由支持した状態でインパルスの力をゲートに与えると、空气中及び水中では減衰振動が記録される。しかし流水中では減衰振動となる場合と発散振動となる場合が発生する。

図-1 実験装置(Experimental Apparatus)

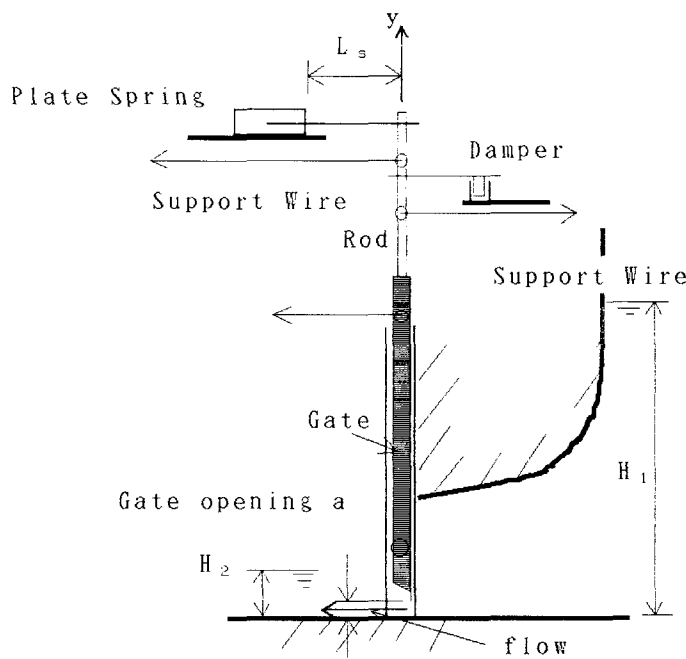
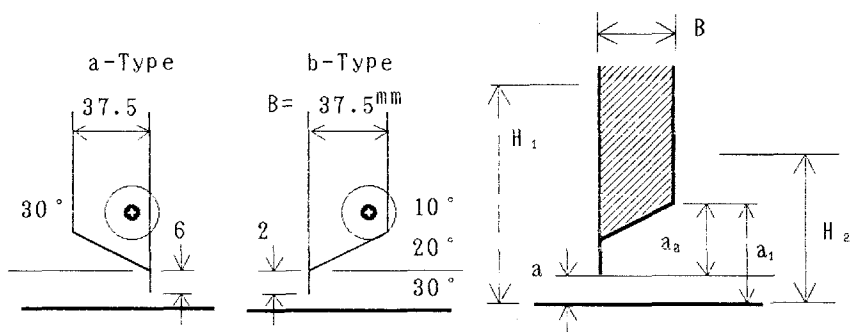


図-2 水位と開度の関係図



そのときの記録の一例が図-3に示したものであり、初期に与えたインパルスによる変位が小さい場合には減衰振動になり、大きい場合には発散振動になっているのが解る。このようにこの現象は初期に持っているゲート運動の大きさが支配的な要因を持っていることが判る。従って現象は振動系自体は線形であっても振動外力は非線形になっている可能性がある。

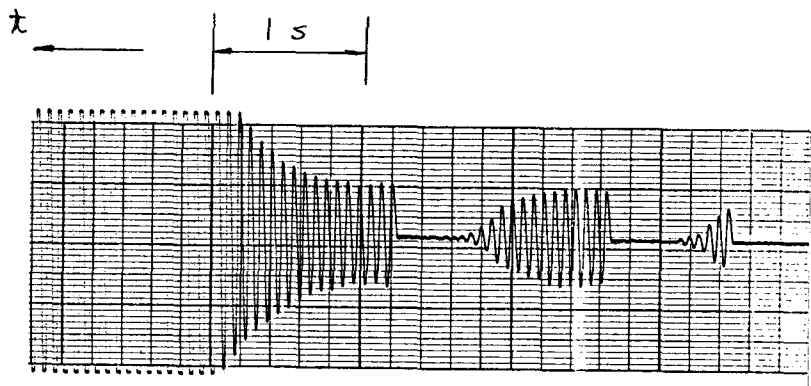


図-3 振動記録、減衰振動と発散振動

これをもとに開度と下流水深の関係で振動の発生領域を示したのが図-4である。黒い印で示した点が自励振動の発生したケースである。左側の曲線は跳水の発生条件でありこの曲線より右が潜り流出になっている領域である。

左側の限界はこの跳水条件で求められるが、右側の限界（ H_2 の値の大きい部分）を示す部分が判らないのでこの理論解析で求めようとするものである。

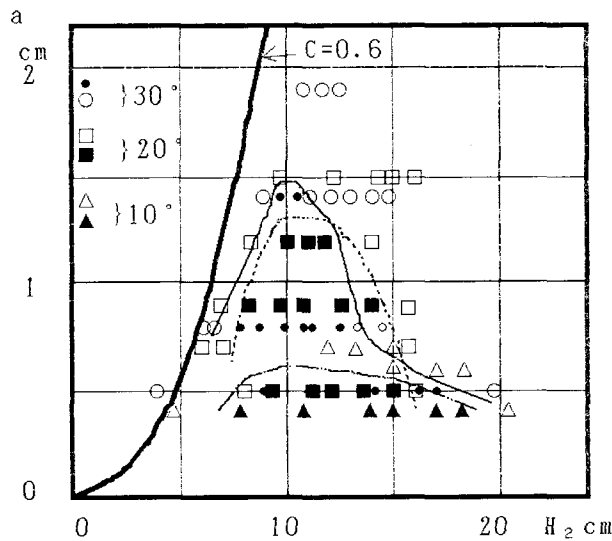


図-4 自励振動の発生領域

(1) 理論式の展開

理論式の展開及びその解法の詳細に付いては先の論文に詳しいので、ここではその概要のみを示しておく。先に述べたように方程式でこの現象を表す場合には、運動の初期の状態が自励振動の発生に大きく寄与していることが判っているので、この点を考慮して式を導く必要がある。まず自励振動の基礎式は

$$M\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right) + R\left(\frac{dy}{dt}\right) + ky = F(t, y, \frac{d^2y}{dt^2}, \frac{dy}{dt}) \quad (1)$$

である。右辺の $F(\quad)$ の項が振動外力の項であり、この項に運動を表す y に関する式が含まれる必要がある。ここに M はゲートの付加質量を含めた質量であり、 R は減衰係数、 k はゲート支持系のバネ常数である。前2者についての値は水中での自由振動の結果より求める。

$F(\quad)$ で示される振動外力項のモデル化がこの現象をよく捕らえた式となっているかによって、現象の説明を明確に出来るかの分かれ目となる。ゲートが運動したときの流れの変化が振動の外力としてどのように関わるかを式として書ければ良い。

そこでここではゲートが (dy/dt) の速度で y 上がったとし、このときゲート下面での流れに変化が生じ流量の変化が生ずる事に注目し、その流量変化による質量の変化とゲートの運動によって運動量の変化が発生し、これが振動外力としてゲートに作用すると考える。

このような考えに基づいて導かれたのが次の自励振動に関する基礎方程式である。

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + 2\gamma_0\left(\frac{dz}{dt}\right) + \omega_0^2 z = \lambda \left[z\left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1}\right)a - \beta\left(\frac{dz}{dt}\right) \right] \left(\frac{dz}{dt}\right) \quad (2)$$

ここに各パラメーターは次のように表せる。この式は下記のように無次元化されて表示されている。

$$z = \left(\frac{y}{a}\right), \quad t = \frac{tV_0}{B}, \quad V_0 = \frac{Q_0}{aL} \quad (3)$$

ここに a はゲート開度、 B 、 L はそれぞれゲートの扉厚さ及び幅を示し、 Q_0 、 V_0 は流量及び部の平均流速を表している。(2)式の各パラメーターは次のようになっており、これらはまた(5)式の一般的な振動のパラメーターで表すことが出来る。

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\omega_n B}{V_0}\right)^2, \quad 2\gamma_0 = \frac{2\gamma B}{V_0}, \quad h = \frac{\gamma_0}{\omega_0} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\rho BaL}{M}, \quad \omega_n^2 = \frac{k}{M}, \quad 2\gamma = \frac{R}{M}, \quad h = \frac{\gamma}{\omega_n} \quad (5)$$

ここに α はゲート下流端での流速分布が一様でない部分を補正する係数である。ここに β はゲートの動きによる排除質量の内この運動に及ぼす量を示す補正係数である。

(2) 不安定条件

この無次元化した方程式(3)より振動の不安定条件を求めることにする。(2)式の左辺の第2項の減衰項を右辺に移して、 z が1周期の運動をするあいだに、外力の仕事でエネルギーが振動系に供給されるか否かで、安定問題を考慮することにする。すなわち z の一周期での仕事を運動方向と力の作用方向を考慮して積分することにより次のような式が求められる。仕事は

$$W = \left\{ -2\gamma_0\left(\frac{dz}{dt}\right) + \lambda \left[z\left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1}\right)a - \beta\left(\frac{dz}{dt}\right) \right] \left(\frac{dz}{dt}\right) \right\} \left(\frac{dz}{dt}\right) dt \quad (6)$$

であり、これを一周期について積分すると

$$\frac{W}{A_0^2} = \frac{4\rho A_0 a L B \omega_0^2}{3M} \left[\left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1}\right) \frac{a}{\omega_0} \cos^3(\phi) - \beta \sin(\phi) \{\sin^2 \phi - 3\} \right] - 2\gamma_0 \pi \omega_0 \quad (7)$$

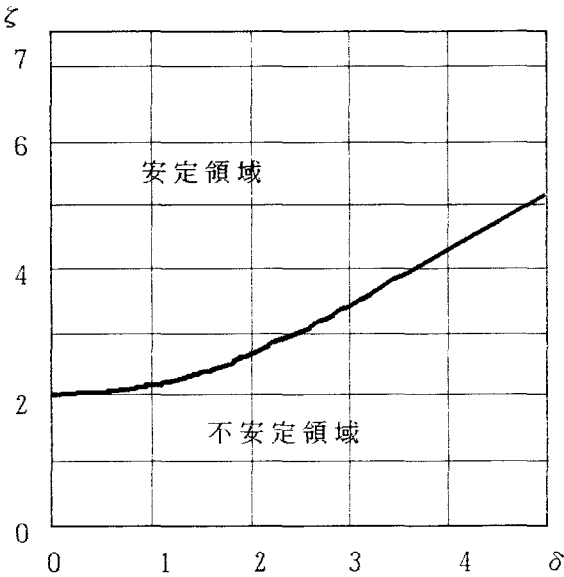
が得られる。この仕事プラスになる条件より次の不安定条件が求められる。

$$\left[\left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1} \right) \frac{a}{\omega_0} \cos^3(\phi) - \beta \sin(\phi) \{ \sin^2 \phi - 3 \} \right] \geq \frac{3Mh_0 \pi}{2\rho A_0 a L B} \quad (8)$$

但し ϕ は (6) 式の積分の時に境界点の条件より決まって来る値である。

$$\cot(\phi) = \cot(\omega_0 t_0) = \left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1} \right) \frac{a}{\omega_0 \beta} \quad (9)$$

図-5 理論解析による不安定領域



(8) 式の条件を (9) 式の関係を使って書き直すと次の条件が得られる。

$\delta \times 0.1$

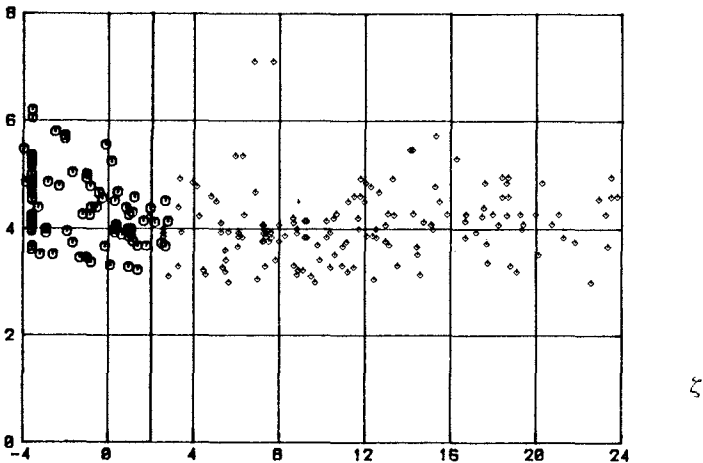


図-6 実験結果との相関 (東洋大学の実験)

$$\frac{2\delta(\delta^2 + 2)}{(\delta^2 + 1)^{3/2}} > \zeta \quad (10)$$

$$\delta = \left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1}\right) \frac{a}{\omega_0 \beta}, \zeta = \frac{3Mh\pi}{2\rho ALB\beta} \quad (11)$$

この条件をグラフにしたのが図-5であり。実験との対応をとったのが図-6である。丸印は発散振動であり自励振動の生じたケースを、ひし形の点は減衰振動となったケースを示している。 $\zeta = 2$ 付近にある太い線は自励振動の発生する限界を示す理論解析による境界線である。

(3) 不安定条件に対する検討

1) 条件分け

式(10)で与えられる不安定条件、自励振動の発生条件をより分かりやすい形でまとめることにする。この式はふたつのパラメーター δ 、 ζ で与えられている。そこで δ の値の大きさによって場合分けを試みる。

A) $\delta < 1$

この場合には(10)式の中の δ は省略出来て

$$\zeta < 2 \quad (12)$$

B) $\delta > 3$

この場合には(10)式の中で数字の項が省略出来て

$$\zeta < \delta \quad (13)$$

C) $1 < \delta < 3$

この場合は上のふたつの中間の場合であるので

$$\delta = 2 + \varepsilon, \varepsilon = -1 \sim 1 \quad (14)$$

と置いて、(10)式中の δ を ε に線形展開を利用して書き直すと次の近似式が得られる。

$$\zeta < 2\sqrt{5}(15+4\varepsilon)/25 = 2.68 + 0.716\varepsilon \quad (15)$$

$\varepsilon = -1 \sim 1$ の変化をしたときの上の式の右辺の値の変化は1.96～3.39である。

2) 無次元流速

次に δ を無次元流速 Vr の関係を使って書き直すことにする。

$$\delta = \left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1}\right) \frac{a}{\omega_0 \beta} = \left(\frac{1}{a} - \frac{\alpha}{a_1}\right) \frac{aV_0}{\omega_n B \beta} = \left(1 - \frac{a\alpha}{a_1}\right) \frac{Vr}{2\pi \beta} \quad (16)$$

$$Vr = \frac{V_0}{f_n B}, \quad (17)$$

模型実験との対応から係数 α 、 β はそれぞれ1にとっても良いことが判ったので以降1として議論を進める。いま不安定になる条件から δ が求まった時に無次元流速 Vr の値を求める式は(16)式より求められる。

$$Vr = 2\pi \delta \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{a_1}\right)} \quad (18)$$

3) 減衰比

もう一つのパラメーター ζ より減衰比 h が求められる。(11)式より次の式が求められるが A が振動の振幅を表しているので、この部分を無次元振幅に若干書き直している。

$$h = \zeta \frac{2\rho A L B}{3\pi M} = \zeta \frac{2}{3\pi} \left(\frac{A}{a}\right) \left(\frac{\rho a L B}{M}\right) \quad (19)$$

この式の (A/a) はゲートの開き a をもとに表した無次元振幅であり、その次の項はゲートの開き以下にある水の体積とゲートの質量の比を表している。

不安定条件は (12)、(13)、(15) 式で判るようにある限界の $\zeta = \zeta_0$ の値以下の値を ζ が取っているときに生ずることになっている。従って (19) 式から限界の減衰比 h_c は ζ_0 に ζ_0 を代入することにより求められる。

この限界の減衰比以下が不安定条件となる。一般に減衰比 h が小さいほど振動しやすい訳であるので、不安定になる場合の限界の減衰比 h_c が大きいほど振動が発生しやすいことになる。限界の減衰比はパラメーター ζ の限界の値 ζ_0 が決まると (19) 式より次のように求められる。

$$h_c = \zeta_0 \frac{2}{3\pi} \left(\frac{A}{a}\right) \left(\frac{\rho a L B}{M}\right) \quad (20)$$

この式を見ると判るごとく無次元振幅 (A/a) が大きいほど、すなわちゲートの開きが小さい程、振幅が大きいほど h_c は大きくなる。またゲートの質量が軽いほど h_c は大きくなることが判り、実験結果を良く説明できる結果となっている。

4) 関係式のまとめ

以上の関係式を各パラメータについてまとめると次の表が出来上がる。 δ が 1、3 の値を取る点で領域を分けて、それぞれの領域で不安定になる ζ の値を示したのが上の 2 つの欄である。これを無次元流速と減衰比の関係で示したのが下の 2 つの欄である。

領域	A		B		C
δ		1		3	
ζ	<2		$<1.96 \sim 3.39$		$<\delta$
$Vr(1-a/a_1)$		2π		6π	
h_c	$<2\zeta_0$		$<(1.96 \sim 3.39)\zeta_0$		$<\delta\zeta_0$

表-1 不安定条件を示すパラメーターの整理

$$\zeta_0 = \frac{2}{3\pi} \left(\frac{A}{a}\right) \left(\frac{\rho a L B}{M}\right) \quad (21)$$

(4) 不安定条件の開度と下流水深の関係

不安定条件を決めるばパラメーターの整理が出来たので、実験データの整理に使用した開度と下流水深の関係でこの条件を確認してみよう。この振動の発生条件の一つはゲートからの流出が潜り流出であることである。このことはゲートの下端からの流出が射流であることを条件に跳水の発生条件から求めることが出来る。

$$\frac{H_2}{a} = \frac{1}{2} [\sqrt{8Fr^2 + 1} - 1], \quad Fr = \frac{V_0}{\sqrt{ga}}, \quad V_0 = C\sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad (22)$$

この式を書き直して開度と下流水深の关系到直すと次の式が得られる。

$$\left(\frac{H_2}{a_0}\right) \left[\left(\frac{H_2}{a_0}\right) + \left(\frac{a}{2a_0}\right)\right] = 2\left(\frac{a}{a_0}\right) \frac{V_0^2}{g} \quad (22')$$

この式は放物線である。次に無次元流速 V_r を含む δ の関係式より下流水深と開度の関係を求める。
 (16) 式より δ が判った時に開度と下流水深の関係は開度 a とゲートの下流部の切り上げ部分の高さ a_0 の関係を使うと

$$a_1 = a + a_0, (1 - a/a_1) = 1/(1 + a/a_0) \quad (23)$$

の関係が得らる。

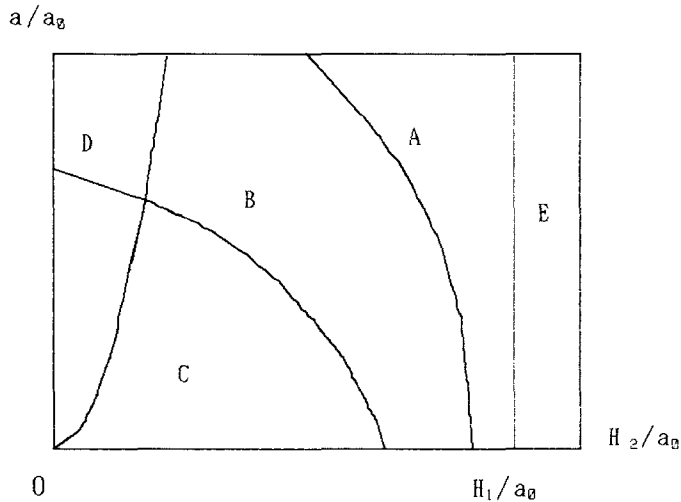
$$\delta \left(1 + \frac{a}{a_0}\right) = \frac{V_0}{2\pi f_n B} = \frac{C_d \sqrt{a_0} \sqrt{2g(H_1 - H_2)}/a_0}{2\pi f_n B} \quad (24)$$

ここで開度と下流水深の関係を明確に表した式に直すと (25) 式となる。

$$1 + \frac{a}{a_0} = C_d \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{a_0}}, \quad C_d = \frac{C_d \sqrt{a_0} \sqrt{2g}}{2\pi f_n B \delta} \quad (25)$$

この式はやはり放物線である。(22), (25) 式の関係を図に表したのが図-7である。
 不安定領域を表す部分は先の実験結果の場合と良い相関を示している。

図-7 理論による不安定領域、開度と下流水深の関係



この図の中の領域Dは自由流出の領域を表す。また領域Eは下流水深が上流水深より大きくなる場合で水が流れないか逆流する場合である。領域A, B, Cは先に δ によって分類した領域を模式的にあらわしたもので無次元流速と減衰比で決まる領域である。振動系の減衰比が小さいほどAの領域まで振動の範囲が広がり、大きいほどCの領域にとどまる事を示している。実験結果の図-4に良い相関を表していることが判る。

おわりに

ローラーゲートの自励振動の発生限界を示す条件を、先に行った理論解析の結果をより分かりやすいように整理したのがこの論文である。実験結果の傾向を説明できる次のことが明らかになった。

- a) 潜り流出の時に発生する。
- b) 開度が小さい時に発生している。

- c) 初期の振動振幅が大きいほど振動が発生しやすい。
- d) 流速が大きい程発生しやすい。
- e) 無次元流速の値が大きいほど振動が発生しやすい。
- f) ゲートの厚さが大きいほど、また固有振動数が小さい程振動が発生しやすい。
- g) ゲート下流面の切り上げの程度は、流れの剝離との関係があるが大きいほど振動が起こりやすくなる。

参考文献

- 1) 嶋祐之、荻原国宏「ゲートの振動」土木学会水理講演会、1963、2
- 2) 荻原国宏「フラップゲート及びナップの自励振動」土木学会論文報告集、VOL. 11-3、357、1985、5
- 3) 荻原国宏「開水路中のスルースゲートの振動に関する基礎的研究」、土木学会論文集、141号、1967、5
- 4) 荻原国宏、上田幸彦「ローラーゲートの自励振動についての解析」土木学会関東支部技術研究発表会、第13回、1985、3
- 5) 荻原国宏、上田幸彦「ローラーゲートの小開度における振動」土木学会第40回年次学術講演会、1985、9
- 6) 荻原国宏「ローラーゲートの小開度で発生する自励振動の理論的検討」土木学会第41回年次学術講演会、1986、11
- 7) 荻原国宏「ローラーゲートの自励振動発生条件」土木学会関東支部技術研究発表会、第14回、1986、4
- 9) Kunihiro ogihara and Sachihiko Ueda, "Self-excited oscillation of Roller gate under the small gate opening", 5th Congress of APD of IAHR, Seoul, Republic of Korea, 1986
- 10) Kunihiro ogihara and Sachihiko Ueda, "Self-excited oscillation of Roller gate under the small gate opening", International Conference on Flow Induced Vibrations, Bowness-on-Windermere, England, 12-14, May, 1987
- 11) K. Imamura "Experimental study on Hydraulic damping force on oscillating gates", International Conference on Flow Induced Vibrations, Bowness-on-Windermere, England, 12-14, May, 1987
- 12) Ngyuyen D. Thang and Eduard Naudascher, "Self-excited vibrations of vertical-lift gates", Jr. of Hydraulic Research, vol. 24, 1986, no. 5, IAHR
- 13) 日本鋼管「主放流ローラーゲートの研究報告書」1985、3、アイエヌエー新土木研究所
- 14) 日本鋼管「主放流ローラーゲートの研究報告書」1985、9、アイエヌエー新土木研究所
- 15) 巻幡敏秋「水門扉の振動に及ぼす微小開度の影響について」水門鉄管、No. 137
- 16) 荻原国宏「ローラーゲートの小開度で発生する自励振動についての理論解析」土木学会論文集、第405号/11-11、1989、5

(1989, 10, 2受付)

(1989, 12, 8査読掲載可)