II-168　長径間ゲートの自励振動に関する一考察

日立造船(株)陸機設計所　正員　井口理一郎
日立造船(株)技術研究所　正員　巻幡　敏秋

1. まえがき

この研究は長径間ゲートの振動現象の一つで、最近注目され始めた微小開度時の自励振動について基礎式を誘導し、上下流水位およびゲート開度の変化による自励振動の発生領域に関する一考察を試みたものである。

2. 理論解析

2.1 座標系

図1に示すようにゲート下端を座標系の原点とし垂直上方を Z, 水平を X とする。上流側,下流側の水位を各々 H_a, H_b とし,ゲート下端部の流速を $\bar{U}_0$, ゲートの開きを Z_0, ゲート底面と河床との間隙の上流側および下流側を各々 Z_m, Z_n その点の圧力を P_{t0}, P_m, P_n, 流速を $U_{t0} \simeq U_0, U_m, U_n$, またゲート下流端での主流厚を βZ_n, 逆流流速を $U_r = \bar{\gamma} U_n$, 水の密度を ρ とする。

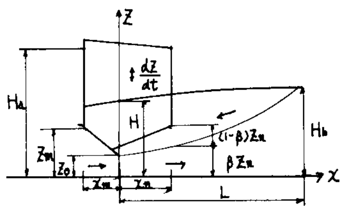


図.1 座標系

2.2 基礎式

流れ場の条件は $H_b \geq Z_n$ であって、ゲート開きは微小開度($Z_n \gg Z_0$)を考える。

1) $+0\sim n$ 間について連続の条件から $Z_0 = \bar{Z}_0 + z$, $U_0 = \bar{U}_0 + u_0$, $Z_n = \bar{Z}_n + z_n$, $U_n = \bar{U}_n + u_n$, $\frac{dz}{dt}$ = ゲートの振動速度とすれば、

$$(\bar{Z}_0 + z_0)(\bar{U}_0 + u_0) - x_n \frac{dz}{dt} - \beta(\bar{Z}_n + z_n)(\bar{U}_n + u_n) + (1-\beta)(\bar{Z}_n + z_n)\,\bar{\gamma}(\bar{U}_n + u_n) = 0 \quad \text{——(1)}$$

式(1)で初期条件として, $z=0$ のとき $\frac{dz}{dt}=0$ と考え $u_0 \simeq u_n$, $\bar{Z}_n \gg \bar{Z}_0$ が仮定できるとすれば、

$$u_n = \frac{1}{[\{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\} - \bar{Z}_0/\bar{Z}_n]} \left\{ \frac{\bar{Q}}{\bar{Z}_0}\left[1 - \{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\}\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_n}\right]\frac{z}{\bar{Z}_n} - \frac{x_n}{\bar{Z}_n}\cdot\frac{dz}{dt} \right\} \quad \text{——(2)}$$

2) $-0\sim m$ 間について連続の条件から U_n の場合と同様にして $u_m = \frac{\bar{Z}_m}{\bar{Z}_m - \bar{Z}_0}\left\{\frac{\bar{Q}}{\bar{Z}_0}\left(1 - \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_m}\right)\frac{z}{\bar{Z}_m} + \frac{x_m}{\bar{Z}_m}\cdot\frac{dz}{dt}\right\}$ ——(3)

3) 式(2),(3)で変動流速が求められたので以下の方法によって起振力を推定してみる。

$+0\sim n$ 間: $\rho\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\rho}{2}(\bar{U}_0 + u_0)^2 + P_{t0} = \text{const}$ —(4a), $\rho\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\rho}{2}(\bar{U}_n + u_n)^2 + P_n = \text{const}$ —(4b)

式(4)で $\rho\frac{\partial\phi}{\partial t}$ は付加質量となるものであるが, ここでは流速場のみに注目し次のような大きな近似を用いる。

$P_{t0} \simeq -\frac{\rho}{2}(\bar{U}_0^2 + 2\bar{U}_0 u_0) = \bar{P}_{t0} + P_{t0}(t)$ —(5a), $P_n \simeq -\frac{\rho}{2}(\bar{U}_n^2 + 2\bar{U}_n u_n) = \bar{P}_n + P_n(t)$ —(5b)　式(5)に式(2),(3)を代入し $P_{t0}(t)$ および $P_n(t)$ から線型法($=\frac{x_n}{2}\{P_{t0}(t) + P_n(t)\}$)を用い, 修正係数 α_{on} を導入すれば $+0\sim n$ 間での起振力 $F_{t0,n}(t)$ は次のように与えられる。ここに ℓ はゲートスパンを示す。

$$F_{t0,n}(t) = -\frac{\alpha_{on}\rho x_n \ell}{2}\left(\frac{\bar{Q}}{\bar{Z}_0}\right)^2\left(1 + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_n}\right)\frac{1}{[\{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\} - \bar{Z}_0/\bar{Z}_n]}\left\{\left[1 - \{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\}\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_n}\right]\frac{z}{\bar{Z}_n} - \frac{x_n}{\bar{Z}_n}\cdot\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Q}}\frac{dz}{dt}\right\} \quad \text{——(6)}$$

$-0\sim m$ 間: 式(6)と同様に $F_{0,m}(t)$ は次のようになる。 $F_{0,m}(t) = -\frac{\alpha_{om}\rho x_m \ell}{2}\left(\frac{\bar{Q}}{\bar{Z}_0}\right)^2\frac{\bar{Z}_m + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_m - \bar{Z}_0}\left\{\left(1 - \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_m}\right)\frac{z}{\bar{Z}_m} + \frac{x_m}{\bar{Q}}\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_m}\cdot\frac{dz}{dt}\right\}$ ——(7)

式(6),(7)から全体に作用する起振力 $F_z(t)$ は各々の和として次のように z, $\frac{dz}{dt}$ の関数として表わされる。

$$\left.\begin{aligned} &F_z(t) = D\left(A\cdot z - B\cdot\frac{dz}{dt}\right),\ ここに\quad A = \frac{\bar{Z}_n/\bar{Z}_0 - \{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\}}{\{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\} - \bar{Z}_0/\bar{Z}_n}\left\{\left(\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_n}\right) + \left(\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_n}\right)^2\right\} + \left(\frac{\alpha_{om}}{\alpha_{on}}\right)\left(\frac{x_m}{x_n}\right)\left(1 + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_m}\right)\left(\frac{\bar{Z}_n}{\bar{Z}_m}\right) \\ &B = \left\{\left(1 + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_n}\right)\frac{1}{\{\beta-(1-\beta)\bar{\gamma}\} - \bar{Z}_0/\bar{Z}_n} - \left(\frac{\alpha_{om}}{\alpha_{on}}\right)\left(\frac{x_m}{x_n}\right)^2\left(\frac{\bar{Z}_n}{\bar{Z}_m}\right)\left(\frac{\bar{Z}_m + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_m - \bar{Z}_0}\right)\right\}\frac{x_n}{\bar{Q}}\cdot\bar{Z}_0,\quad D = -\frac{\alpha_{on}\rho\cdot x_n\cdot\ell}{2\bar{Z}_n}\left(\frac{\bar{Q}}{\bar{Z}_0}\right)^2 \end{aligned}\right\} \text{—(8)}$$

4) 振動応答: 対象と考える変動圧力は主にゲートの上下方向とし水平振動は無視出来るものとする。振動方程式に式(8)を代入し整理すると次のようになる。 $(M_{sv} + M_{wv})\frac{d^2z}{dt^2} + (R_{wv} + DB)\frac{dz}{dt} + \left(\frac{n A_R E_R}{\ell_R} - AD\right)z = 0$ —(9)

ここに, z: ゲートの垂直方向の振動振幅, M_{sv}: ゲート質量, M_{wv}: 垂直振動時の付加質量, R_{wv}: 水中での垂直振動時の減衰, n, A_R, E_R, ℓ_R は各々ワイヤロープの本数、断面積、ヤング率, 長さを示す。式(9)より長径間ゲートの自励振動発生条件は次のようになる。　$I = \beta - (1-\beta)\bar{\gamma} - \bar{Z}_0/\bar{Z}_n > 0$ —(10)

3 流れ場を規定するパラメータ

本理論で自励振動を起こす流れ場の条件はゲート底板が完全に水没(以下完全没水という)しており,かつゲー

ト下端からの放流によって水面近くに逆流領域が発生していると仮定している。流れ場を規定するパラメータとしてゲート下流端での主流厚を示すパラメータβと逆流流速を示すパラメータγについて以下推定する。

1) スライド板下端から放流される場合の主流厚y_0は椿古屋，名合[1]らによって次のように示されている。$y_0/z_0 = 0.131\, x/z_0 + 0.61$ ——(11)（椿古屋），$(y_0 - z_0)/(H_b - z_0) = 0.09\, x/(H_b - z_0)$ ——(12)（名合）ゲート底板を有する場合のy_0として，$y_0 = \alpha x + \eta z_0$ —(13)とおくとβは次のように表わせる。$\beta = y_0/z_n = (\alpha x + \eta z_0)/z_n$ ——(14)

2) 逆流流速の推定については次のように仮定する。①運動量は保存される。②速度分布は河床からz_0までは一定とし，z_0からy_0，y_0からゲート底板までは各々直線変化する。③ゲート下流端での圧力は下流水深で近似する。④主流流速の流下方向低減を$\bar{U}_x \doteqdot \bar{U}_0 \frac{L-x}{L-4z_0}$（跳水長さ $L=4.5H_b$）とする。運動量保存の条件より次式を得る。

$$\bar{\gamma}^2 = \left(\frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_0}\right)^2 = \frac{2}{(1-\beta) z_n}\left(\frac{\beta z_n}{z_0+\beta z_n}\right)^2 \left[\left(\frac{L-4z_0}{L-x}\right)^2 \left\{\frac{H_b^2 - H'^2}{4 C_v^2 (H_a - H_b)} - C_v z_0\right\} + \frac{1}{3}(\beta z_n + 2 z_0)\right] \quad \text{—— (15)}$$

3) 振動判定のパラメータ：F_r　式(15)からはn点での主流と逆流の流速比が得られるが起振力を誘起する流れの速さは表わし得ない。そこで主流の流速を含む判定パラメータを代表長,代表速度を各々ゲート底板の形状を示すz_n，流出流速$\bar{U}_0 = C_v\sqrt{2g(H_a-H_b)}$として次のようにとる。$F_r = C_v\sqrt{2g(H_a-H_b)/z_n g} = C_v\sqrt{2(H_a-H_b)/z_n}$ —(16)　次に式(14)中のα,ηの値を推定するのに論文2による実験データ（図2）を採用する。図3において振動限界を示す判定曲線と水位条件および開きから決まる$\bar{\gamma}$(F_r=1.87)の交点が実験データの自励振動発生領域の最大開きに一致するようにα,ηを決める。この場合$\bar{\gamma}$（F_r=1.87および完全没水）と判定曲線$\bar{\gamma}$に囲まれた斜線部が自励振動発生領域となり，α，ηは各々0.177, 0.696となる。図4はα,ηにこの値を適用した場合の開きに対するゲート下流端でのy_0の高さである。開きが増すに従って式(12)は増加し開き95cmで式(11)とほぼ平行な本式を越えている。開きが増すに従ってポテンシャルコアが発達しゲート底板の影響が少なくなると推定されることからα=0.177 η=0.696で与えられる関係はほぼ妥当なものと思われる。開度と下流水深の変化による自励振動領域について論文2の実験値を本理論値とともに図5に示す。

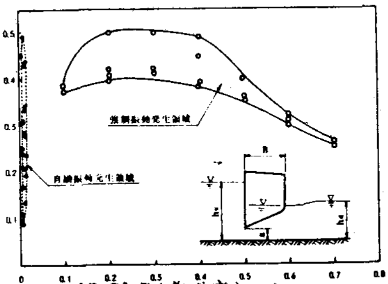


図-2 自励振動発生領域（論文2より）

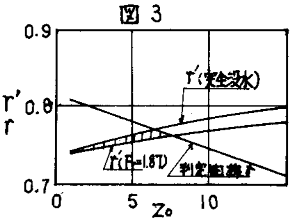
図 3


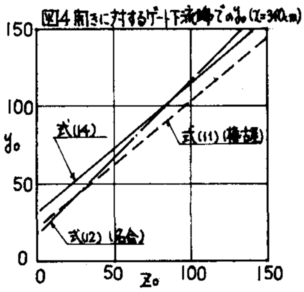
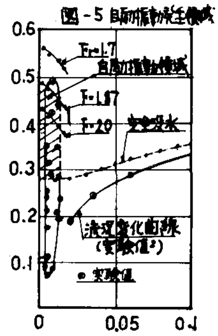
図4 開きに対するゲート下流端でのy_0 (x=340cm)


図-5 自励振動発生領域


4 まとめ

以上の考察から次のことが言える。

①ゲート底板がある場合の主流厚は$y_0 = 0.177x + 0.696 z_0$で推定できる。

②振動判定パラメータF_rの最小値はほぼ1.8 にとればよい。

③ ①②とともに長径間ゲートの自励振動発生領域は式(10)(15)(16)から略々推定できる。しかし実験値では完全没水推定曲線以下でも自励領域があり本理論と異なった現象のもとによるものと考えられる。今後これらの事柄も含めさらに実験的・理論的検討が必要と思われる。

参考文献

1 名合宏之　水平開水路に設置された鉛直刃形水門からのもぐり流出の水理特性　広島大学研究報告書 1974

2 上田幸彦　荻原国宏　長径間ゲートの振動特性に関する研究　土木学会論文集 279号 1978. 11