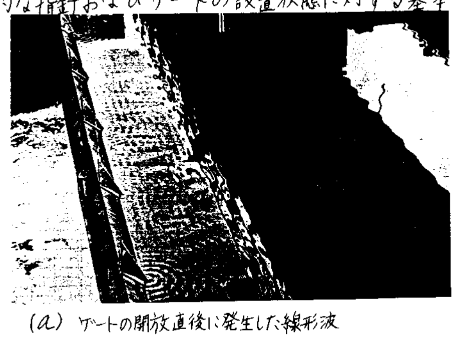
II-169　長経間ゲートの流体関連振動

大阪電気通信大学　正員　石井徳章　　　大阪大学　今市憲作

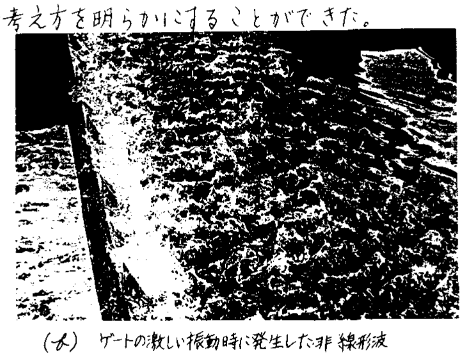
1. 緒言

比較的幅の広い河川において流れをせき止めるために使用されるゲートは、一般にスパンの長さがゲートの高さに比べてはるかに大きい。そのため、ゲートは河川の上、下流方向やゲートの長手軸回わりが比較的柔らかい構造である。このような長経間ゲートが貯水池内の流れと関連して河川の上、下流方向の横振動やゲートの長手軸回わりの捩り振動を引起こし、大きな問題となった事例は少なくない。図1は、スイスのSchinznachに設けられた幅22.5m，高さ3mの長経間ゲートが引起こした流体関連振動[1]を示す。ゲートが小開度放水（ゲートの両サイドの開度25mm，中心部の開度8mm）を開始した直後にゲートの微小な振動によってバックウォータ部には（a）図に示すような線形波が発生し、その後ゲートの振動は徐々に大きくなり、大振幅の振動によって（b）図に示すような激しい非線形波が発生している。Schinznachに設けられたゲートの大きな特長の一つは、ゲートが水平な河床に対して直立しておらず、直立状態から約30°下流方向に傾けられていることである。このようなゲートの設置状態では、ゲートが何らかの原因で振動を開始すると、それに応じて放水口開度が変化する。放水口開度が変化すると当然それに応じて放水流量が変化し、貯水池の水面には波が発生し、それに応じてゲートに働く水圧に変化が生じる。この水圧の変化がゲートの振動をさらに助長するように働くのか、あるいは、減衰させるように働くかがゲートの動的安定性を判定する重要な問題点となる。

本論文では、上の問題を理論的に明らかにするために、ゲートが単純に河川の上、下流方向に一次のモードで微小な横振動を行うと仮定し、その振動に応じた放水流量の変化によって引起こされる水圧の変動をテンターゲートの自励振動問題を明らかにしたのと同じ手法[2~11]、すなわち、分散性の波動問題に対してロード・レーレーの考え出したポテンシャル理論[12]を用いて導き、さらにその水圧の変動がゲートの振動に供給するエネルギー量を算出した。その結果、長経間ゲートの動的安定性を決定する主要パラメータ、動的に安定なゲートを設計するための基本的な指針およびゲートの設置状態に対する基本的な考え方を明らかにすることができた。



(a) ゲートの開放直後に発生した線形波



(b) ゲートの激しい振動時に発生した非線形波

図1　Schinznachに設けられた長経間ゲートの流体関連振動

2. 横振動モデルと貯水池内の流れ場

長経間ゲートが、図2に示すように、単純に一次のモードで深さ方向に一様な微小振幅$x_0(y)$，振動数ωの横振動：　$x(y;t)=x_0(y)\cdot\cos\omega t$ -----(2-1)　を行うと仮定する。ここで、$x-y$平面が河川の静止水面を、x軸が河川の上流方向を、z軸が河川の深さを表わすものとする。

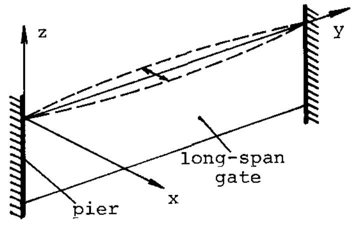


図2　長経間ゲートの横振動モデル

ゲートの振動による放水口開度の変化は、Schinznachのゲートのようにゲートが下流方向に転倒している場合だけに限らず、一般にはゲート

と河床面とが直交していない場合に起こる。そこで、本論文では流れ場の解析を容易にするために、図3に示すように、ゲートが鉛直に設置され、それに対して河床面が傾いているものとする。河床面の鉛直線からの反時計方向の傾き角をΘ_0と表わす。さらに、流れ場の解析を容易にするために、河川の水深は放水口の水深d_0に比べて十分に大きく、河川の上流は無限に広がるものとする。

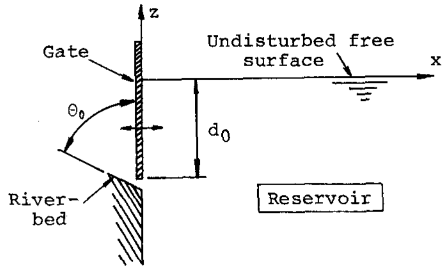


図3 貯水池内の流れ場のモデル

3. ゲートに働く水圧の変動　ゲートに働く水圧の変動成分$P(x,z;t)|_{x=0}$は、ポテンシャル理論[2~12]を用いて解析するとゲートの横振動が直接流れ場を乱すために生じる流体圧力$P^{(b)}(0,z;t)$と横振動に伴う放水流量の変化によって生じる流体圧力$P^{(g)}(0,z;t)$との重ね合わせの形：　$P(0,z;t)=P^{(b)}(0,z;t)+P^{(g)}(0,z;t)$ ---(3-1) で求められる。Pを横振動の振幅$x_0(y)$に相当する水頭$\gamma x_0(y)$で無次元化：　$P'=P/\gamma x_0(y)$ ---(3-2) すると、式(3-1)は　$P'=P'^{(b)}+k_p' P'^{(g)}$ ---(3-3) となる。ここで、k_p'はゲートと河床面との位置関係を表わすパラメータであり、次式：　$k_p'=\sqrt{2}C_f\cdot\cos\Theta_0$ ---(3-4) で定義される。ここで、C_fは放水口における流量係数である。

放水口開度が放水口d_0に比べて十分に小さい場合には、流体圧力$P'^{(b)}(0,z';t')$と$P'^{(g)}(0,z';t')$はそれぞれ次式で与えられる：　$P'^{(b)}(0,z';t')=-2e^{F_0^2z'}(1-e^{-F_0^2})\sin F_0t'+\frac{2}{\pi}F_0^2\Big\{\int_0^\infty\frac{\sin z's'(1-\cos s')}{s'^2}ds'+F_0^2\int_0^\infty\frac{\cos z's'-\cos(z'-1)s'}{s'(s'^2+F_0^4)}ds'-\int_0^\infty\frac{\sin z's'-\sin(z'-1)s'}{s'^2+F_0^4}ds'\Big\}\cos F_0t'$ ---(3-5)　$P'^{(g)}(0,z';t')=\frac{1}{2}F_0\Big\{\int_0^\infty\frac{1}{s'}\{\cos(1+z')s'-\cos(1-z')s'\}ds'+2\int\frac{s'\cos(1-z')s'-F_0^2\sin(1-z')s'}{s'+F_0^4}ds'\Big\}\sin F_0t'-\pi F_0e^{-(1-z')F_0^2}\cos F_0t'$ ---(3-6)　ここで、無次元変数x', z'は放水口水深d_0を基準にしてx, zを無次元化したもの：　$x'=x/d_0,\ z'=z/d_0$ ---(3-7)　であり、無次元化時間t'は　$t'=\sqrt{g/d_0}\cdot t$ ---(3-8)　で定義され、流れ場の状態を規定する修正フルード数F_0は　$F_0=\sqrt{d_0/g}\cdot\omega$　で定義される。

4. 供給エネルギー　ゲートに働く流体圧力がゲートの運動に供給する1周期当りのエネルギー量は、$E=\int_{スパン}dy\int_{-d_0}^{0}dz\int_{1\,cycle}P\,dx=\gamma d_0^2\int_{スパン}x_0(y)dy\cdot\int_{-1}^{0}dz'\int_{1\,cycle}P'dx'$ ---(4-1)。yに関する積分は横振動のモードによって決まるので、無次元化エネルギーE'を　$E'=E/\gamma d_0^2\int_{スパン}x_0(y)dy=\int_{-1}^{0}dz\int_{1\,cycle}P'dx'$ ---(4-2)　と定義する。図4は、上式の積分を行って無次元化エネルギーE'の特性を示したものである。横軸はゲートと河川敷の位置関係を表わすk_p'であり、パラメータは流れ場の状態を表わす修正フルード数F_0である。この図からk_p'が大きくかつF_0が大きい場合にはE'が正になることが知れる。E'が正になると、この供給されたエネルギーに相当する量だけゲートの振動振幅が大きくなり、この大きくなった振動がさらに大きなエネルギー供給を生み出すので、ゲートの横振動は自励振動を行うことになる。

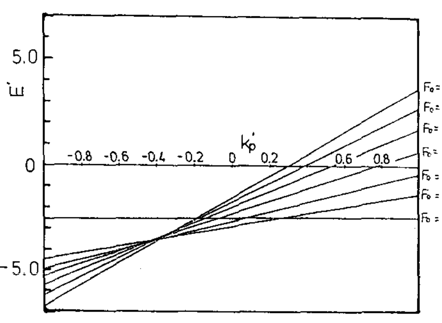


図4. 流体圧力がゲートの運動に供給する無次元化エネルギー

5. 結論　長経間ゲートの流体関連振動問題について理論的な解析を行った結果、次の結論が得られた。(1)動的安定性を決定する主要パラメータは、流れ場の状態を規定する修正フルード数F_0とゲートと河床面の位置関係を表わすk_p'である。(2)原理的には、横剛性が柔らかい構造のゲートを設計すべきである。その場合、横振動の自然振動数が低くなるため、F_0が小さくなり、ゲートは動的に安定になる。(3)ゲートの設置に際しては、$k_p'=0$すなわちゲートを河川敷に垂直になるように留意すれば自励振動は発生しないが、動的により安全なゲート設計を目指すならば、$k_p'<0$になるように、すなわちゲートが上流側に運動したとき放水流量が減少するようにゲートと河床面との位置関係を選ぶべきである。

文献 (1) K. Petrikat: Springer-verlag Berlin Heidelberg New York (1980), P.497 (2) 石井,今市：日本機械学会論文集 42-364 (1976) (3) 今市,石井：日本機械学会論文集 42-364 (1976) (4) N. Ishii & K. Imaichi: Bull. of the JSME, No.20-146 (1977) (5) K. Imaichi & N. Ishii: Bull. of the JSME No.20-146 (1977) (6) N. Ishii & K. Imaichi: Trans. of the ASME, Series I, Vol 99 No.4 (1977) (7) 今市,石井：日本機械学会講演論文集 788-1 (1978) (8) 今市,石井：水門鉄管 113 (1978) (9) 今井,石井：第30回応力講演論文集 (1980) (10) 今市,石井：日本機械学会論文集 794-1 (1979) (11) N. Ishii & K. Imaichi: Proc. of IUTAM/IAHR Symposium, Karlsruhe (1979) (12) Rayleigh, J.W.S.: Proc. of London Mathematical Society 16-69 (1883)