

北海道における自動開閉樋門の取組について

樽林 基弘¹

¹北海道 建設部 土木局 河川課 (〒060-8588 札幌市中央区北3条西6丁目)

北海道では、操作員の高齢化や後継者不足等で出水時の迅速・確実な樋門の操作が課題となっており、模型実験により人的操作が不要な「自動開閉樋門」の検討を進めている。

本報告では、排水溝に発生する循環流とゲートの振動に伴う漏水が原因でゲートが開扉する課題を水密ゴムと排水溝の側壁勾配の変更により解消した実験結果について紹介する。

キーワード：自動開閉樋門、模型実験、循環流、水密ゴム、排水溝

1. はじめに

樋門とは、堤防に暗渠を敷設し、一般に堤内地の水を河川に排水する目的で設置される工作物で洪水時、外水の逆流防止や内水を排除するために、操作員が堤内外の水位を確認しながらゲートの開閉操作を行う。樋門のゲートには、計画高水位以下の水位における流水の作用に対して安全な構造であること、確実に開閉ができて十分な水密性を有し、流水に著しい支障を与える恐れのない構造であることが求められる^①。

一方、東日本大震災では、施設の操作に向かった多くの水防団員が津波に流され、尊い人命を失ったことから、津波警報が発令された場合は、操作員の安全確保を最優先するよう2011年12月に水防法が改正された。

また、北海道では約5,100基の樋門を管理しており、今後、本格的な更新時期を迎えることに加え、操作員の高齢化や後継者不足等で出水時の迅速・確実な樋門の操作が課題となっている。

北海道で検討を進めている樋門は、微少な内外水位差であっても確実に開閉する「自動開閉樋門」を目標に、優れた開閉反応が期待できる自由振動タイプのゲートを用いて検討を進めている。自由振動タイプのゲートは、ゲート固有の振動周期と同調する周期の外部振動を受けた場合、ゲートが振動したり、振幅が次第に増大する性質を有している。「自動開閉樋門」の確実な開閉を確認するために行っている模型実験結果について報告する。

2. 実験概要

模型実験は、1/2縮尺で実施した。樋門の径は北海道で管理している代表径であるφ1.0mを採用した。以下、実験結果の概要を示すが、数値は全て模型の実寸(1/2縮尺)である。実験水路は延長25.2m、水路幅1.0m、水路高1.6mで水位を計測できるよう側面にはア

クリル板を用いて、水路下流端のゲート操作で水面勾配の調節が可能となっている。排水溝を設けるため底板から0.5m~0.75m上方の位置に水路底面を底上げし、水路の上流端から17.4mの位置に水路方向と直角に奥行1.0m×幅0.7m×深さ0.75mの排水溝を設置した。また、ゲートは上部にウエイトを有する固有振動周期5.42秒の0.5m×0.5mの自由振動タイプのゲートを用いた^②。ゲートの背面には漏水量を計測するため、奥行0.5m×幅0.5m×深さ1.6mの内水槽を設置した。実験水路の断面図を図-1、実験水路と排水溝の全景を写真-1に示す。

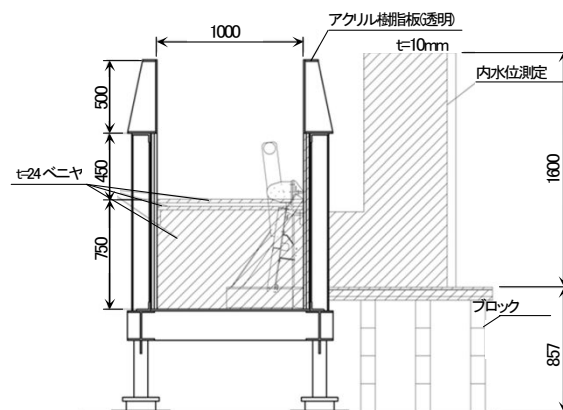


図-1 模型実験水路及び排水溝断面図



写真-1 実験水路と排水溝の全景

3. ゲート開閉実験

ゲート開閉実験は、外水位 1.385m、流速 2.05m/s、初期内水位を表-1 の条件で 8 ケース実施した。なお、ケース 7.8 については、ゲート上部のウエイトに流木が絡まったことを想定して、初期内水位 0.92m でウエイトアームの中間に 82mm×82mm×1000mm の木材を、ケース 7 は下流側、ケース 8 は上流側に針金で固定して行った。

表-1 にゲート開閉実験の結果を示す。ケース 1 の内外水位差=0.105m では平均漏水量が 375cm³/s で実験開始から 1 分 10 秒でゲートが開扉に至った。ケース 2 の内外水位差=0.202m では平均漏水量が 126cm³/s で 6 分 41 秒。ケース 3 の内外水位差=0.205m では平均漏水量が 57cm³/s で 15 分。ケース 4 の内外水位差=0.257m では平均漏水量が 24cm³/s、45 分でゲートが開扉した。これらのケースは、いずれも、漏水で内水位が徐々に上昇し、ゲートが開扉した。内外水位差=0.285m、0.335m のケース 5.6 では、60 分間の通水で開扉することはなかった。

表-1 ゲート開閉実験の結果

実験ケース	流木	初期条件				開閉時間	平均漏水量 (cm ³ /s)
		外水位	内水位	水位差(m)	流速(m/s)		
1	無	1.385	1.28	0.105	2.05	1分10秒	375
2	無	1.385	1.183	0.202	2.05	6分41秒	126
3	無	1.385	1.18	0.205	2.05	15分	57
4	無	1.385	1.128	0.257	2.05	45分	24
5	無	1.385	1.1	0.285	2.05	60分経過後も閉扉	-
6	無	1.385	1.05	0.335	2.05	60分経過後も閉扉	-
7	有	1.385	0.92	0.465	2.05	46分40秒	
8	有	1.385	0.92	0.465	2.05	40分50秒	

また、流木が絡まったことを想定したケース 7.8 では、他のケースより内外水位差(0.465m)を大きく設定して実験を行ったものの、流木が振動を助長する様子が確認され、下流側に流木を固定したケース 7 では 46 分 40 秒、上流側に固定したケース 8 では 40 分 50 秒でゲートが開扉した。

ゲート開閉実験の結果、内外水位差が約 0.25m 程度より小さいとゲートは開扉し、内外水位差が小さくなるほど、ゲートの開扉に要する時間は短く、内外水位差約 0.1m 程度では約 1 分で開扉する結果となった(写真-2)。

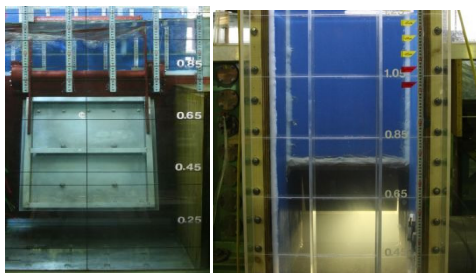


写真-2 ゲート開扉状況

流木等の夾雑物は、ゲートの開閉を直接的に妨げるだけでなく、ウエイトアーム等に絡まった場合には、開扉を

助長することから、流木などが直接ゲートに触れることがないように、カバーなどの工夫が必要と考えられる。

4. 排水溝流況把握実験

排水溝流況把握実験は、ゲートが開扉した原因を把握する目的で、内外水位を等しく開扉した状態で最大水位 1.385m、流速 2.05m/s と 1.00m/s。ウエイトの中心に水面が位置する水位 1.098m、流速 1.439m/s と 1.00m/s。ウエイトが水面から完全に出る水位 1.020m、流速 1.263m/s と 1.00m/s の 6 ケースと外水位 1.385m、内水位 1.020m に設定し、閉扉した状態で流速 2.05m/s と 1.00m/s とした計 8 ケースの実験を実施した。

排水溝内の流向・流速の測定は、X 方向に 5 測線、Y 方向に 7 測線、Z 方向に 8 測線を設定して、アームへの水あたり、排水溝の上流面、扉体周辺の外水について、各測線が交差する地点で三次元流速計を用いて測定し、外力の評価を行うとともに、流れの周期変動についてはスペクトル図を作成し、解析を行った(図-2)。

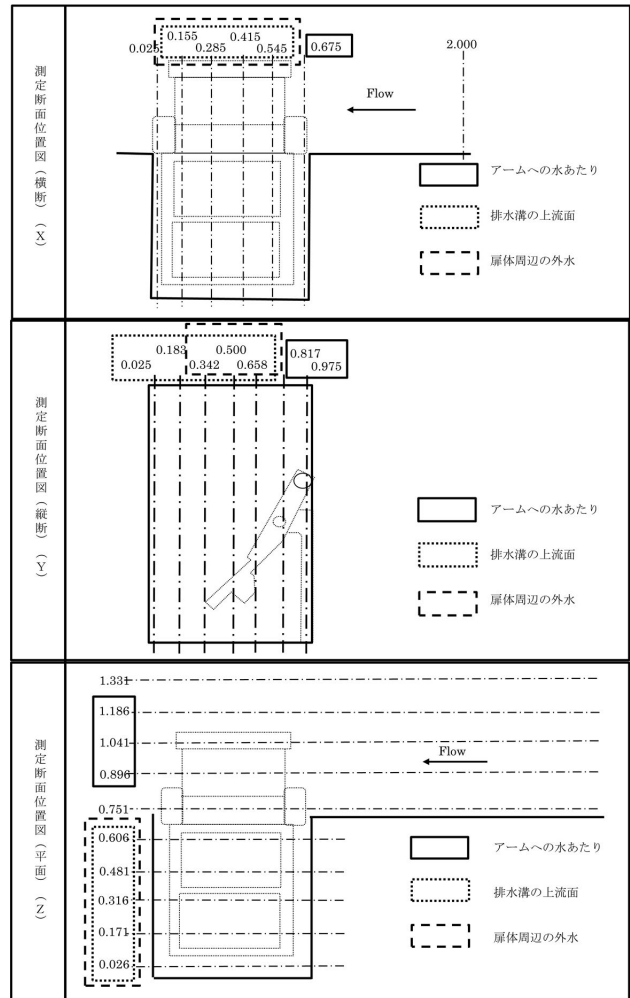


図-2 排水溝内の流向・流速測定位置

写真-3 に外水位 1.385m 流速 2.05m のタフトを用いた排水溝内の流況を示す。タフトの向きから、排水溝内の

上部では上流から下流側に向かう(+)流れが、下部では下流から上流に向かう(-)流れが確認された。また、排水溝下流側では上部から下部に向かう(+)流れが、排水溝の上流側では下部から上部に向かう(-)の流れが確認



写真-3 タフトを用いた排水溝内の流況

された。このように排水溝内では、流速に違いは見られるものの、全てのケースで循環流の発生が確認された。

図-3に代表例として測定時間 45sec、測定間隔 0.5sec、90回の測定より作成した水位 1.385m、流速 2.05m/s、測定位置 (X, Y, Z) = (0.545m, 0.817m, 1.186m) のスペクトル図と、水位 1.385m、流速 1.00m/s、測定位置 (X, Y, Z) = (0.415m, 0.975m, 1.041m) のスペクトル図を示す。流速 2.05m/s では、5秒、10秒、15秒前後、1.0m/s では5秒、15秒前後にスペクトルのピークが確認された。この傾向は水位や流量、計測位置と関係なく測定箇所全体で見られ、5秒、10秒、15秒前後の周期に卓越したスペクトル密度が認められた(図-3)。

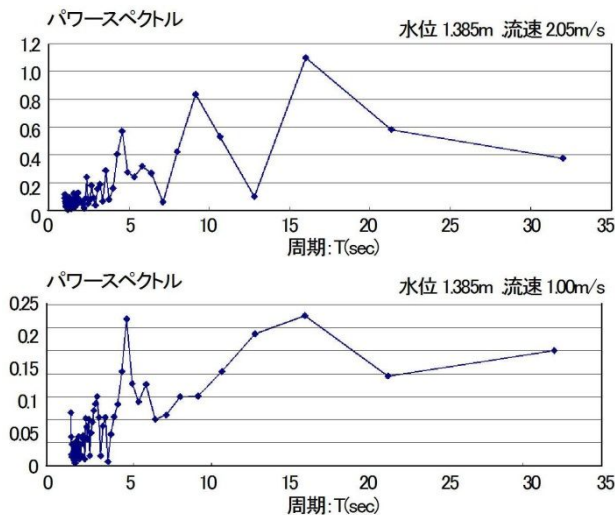


図-3 流速 2.05m/s と 1.00m/s スペクトル図

注目すべきは、5秒、10秒、15秒で見られる卓越したスペクトル密度の発生周期5秒とゲートの固有振動周期 5.46秒²⁾がほぼ一致した点である。ゲート開閉実験で確

認された漏水の発生に伴う内水位の上昇でゲートが開扉した原因は、排水溝内で発生する循環流と循環流に伴う振動の周期が、ゲートの固有振動周期と合致したことで、漏水が生じ開扉に至ったものと考えられる。

5. 水密ゴム及び排水溝形状の改良実験

改良実験は、最大外水位 1.410m、実験開始内水位 1.280m、流速 2.05m/s の条件で実施した。樋門ゲートに必要な確実な開閉と十分な水密性を確保¹⁾するため、戸当りと水密ゴムが密着するように、ゲート戸当り部の水密ゴムを硬いゴム(デュロメータ硬さ 50~60)から柔らかいゴム(デュロメータ硬さ 40~50)に変更した。更に、排水溝内の循環流を弱めるため、柔らかい水密ゴムを用いて、排水溝の側壁勾配を 0.5割(水平からの傾斜角 63.4°)と 1割(水平からの傾斜角 45°)に変更して行った。

図-4にゲート戸当り部の水密ゴム・排水溝勾配の違いと内水位の変化を示す。水密ゴムに硬いゴムを用いて、排水溝を直立壁とした場合は7分07秒で開扉した

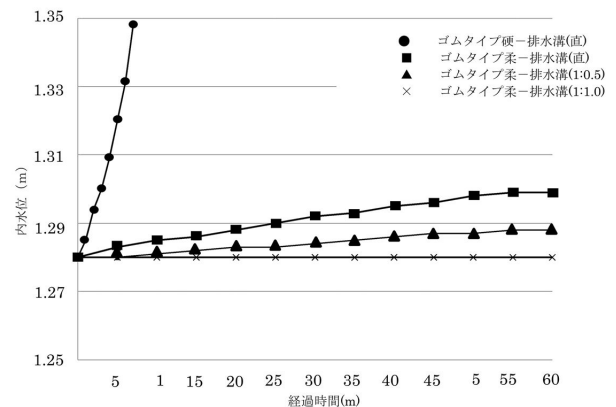


図-4 水密ゴム・排水溝勾配の違いと内水位の変化

が、水密ゴムを柔らかいものに変更した場合には、全てのケースで60分間の通水で開扉することはなかった。

また、内水位の上昇については、直立壁の場合は1時間の通水で19mm、0.5割勾配の場合は8mm、1割勾配については、内水位の上昇は全く見られず漏水量は0mmとなった。水密ゴムを硬いゴムから柔らかいゴムに変更したことで、飛躍的に漏水量が低減されたことは、漏水の原因がゲートの振動であることを示唆している。

表-2に排水溝側壁勾配0割(直立壁)の代表例として測線 X=0.675mにおける流向・流速分布を示し、図-5に排水溝側壁勾配0割の排水溝をよぎる流れのパターンを示す。排水溝側壁勾配0割の流向分布は、排水溝の下部で下流から上流に向かう(-)流れ、上部で上流から下流に向かう(+)流れが確認された。高水敷を流れる速い流れが、排水溝にさしかかったところで流れが剥離し、排水溝内の中央部に1つの剥離渦が発生していることがわかる。

表-2 排水溝側壁勾配0割の流向・流速分布

		(m/s)						
Y(m)\Z(m)		0.025	0.183	0.342	0.500	0.658	0.817	0.975
1.476							2.046	1.821
1.331								
1.186	1.974	2.153	2.238	2.196	2.076	1.996	1.808	
1.041	2.074	2.174	2.217	2.333	1.955	1.786	1.753	
0.896	1.906	1.997	2.096	2.290	2.065	1.451	1.442	
0.751	0.867	1.127	1.271	1.910	1.486	0.871		
0.606	0.114	0.115	0.113	0.089	0.107			
0.461	0.047	0.063	0.050	0.060	0.044			
0.316	-0.023	0.036	-0.004	-0.005	-0.030			
0.171	-0.181	-0.067	-0.126	-0.176	0.127			
0.026	-0.212	-0.268	-0.042	-0.126	0.184			

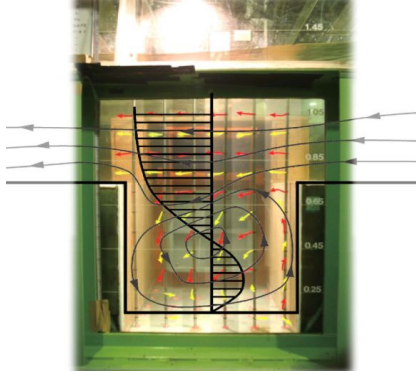


図-5 排水溝側壁勾配0割の流れのパターン

表-3 排水溝側壁勾配1割の流向・流速分布

		(m/s)						
Y(m)\Z(m)		0.025	0.183	0.342	0.500	0.658	0.817	0.975
1.476								
1.331	1.776	2.020	2.058	2.049	2.000	1.859	1.607	
1.186	1.728	1.950	1.972	2.012	1.941	1.855	1.645	
1.041	1.709	1.899	1.968	2.020	1.805	1.632	1.582	
0.896	1.666	1.829	1.925	2.035	1.852	1.386	1.291	
0.751	1.333	1.149	1.302	1.490	1.737	0.943		
0.606	0.213	-0.161	0.079	0.278	0.502			
0.461	-0.322	-0.334	-0.256	-0.205	-0.003			
0.316	-0.169	-0.083	-0.025	-0.057	-0.074			
0.171	-0.101	0.088	0.108	0.114	0.061			
0.026	-0.135	0.013	0.056	0.060	0.053			

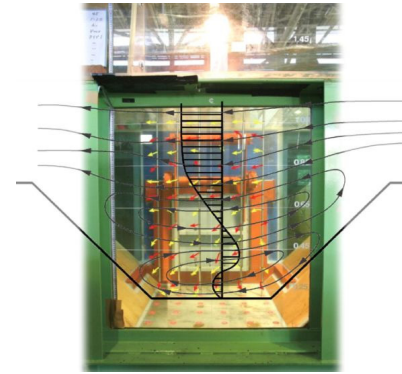


図-6 排水溝側壁勾配1割の流れのパターン

表-3 に排水溝側壁勾配1割の代表例として測線

X=0.675mにおける流向・流速分布を示し、図-6に排水溝側壁勾配1割の排水溝の中央部をよぎる流れのパターンを示す。排水溝側壁勾配1割のケースでは、排水溝の下部で上流から下流に向かう(+)流れが、中間は下流から上流に向かう(-)流れ、上部では上流から下流に向かう(+)流れが確認された。排水溝側壁勾配1割の場合も流れの剥離が発生し、排水溝内に渦が発生するものの、図-6に示すように、上部と下部に二つの剥離渦が発生している。このパターンは横断方向全体に現れているわけではなく、樋門の外側では中央部に一つ渦が発生しているほか、樋門側では渦のない順流状態になっていた。

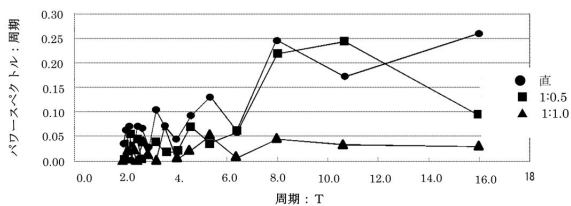


図-7 排水溝毎のパワースペクトルの比較

図-7 に排水溝勾配毎のスペクトル比較図(X, Y, Z)=(0.545m, 0.817m, 1.186m)を示す。排水溝側壁勾配1割のパワースペクトルは、側壁勾配0割、側壁勾配0.5割と比べて小さく、5秒及びその倍数の周期のパワースペクトルも同様で、周期もずれている。このことから、側壁勾配1割の実験において漏水量がゼロとなった要因は、剥離渦がなくなったためではなく、剥離渦のパターンが変化し卓越する周期がゲートの固有振動周期からずれる

ためと考えられる。

6. まとめ

ゲート上部にウエイトを有する自由振動タイプの優れたゲート開閉反応は保持した上で、ゲートの水密ゴムを柔らかいものに変更することでゲートの開扉を防止するとともに、ゲートの振動を吸収し漏水速度を低減する大きな効果が確認された。また、排水溝の形状を正方形から台形に変更することで、中央1つの剥離渦が上下段2つの剥離渦に変化し、排水溝内の流れの周期がゲートの固有振動周期と一致しない結果となった。特に、水密ゴムの柔軟化と排水溝の側壁勾配を1割としたケースでは漏水量が0m³/sの結果を得た。

今後は、「自動開閉樋門」の施工に向けて、設計要領を策定するとともに、設置後のフォロー調査により、構造の改良を行うなど柔軟に対応して行きたい。

謝辞：報告を取りまとめるにあたり、第三者社会基盤技術評価支援機構・北海道(HITEST)の自動開閉樋門の開閉検証と技術基準に関する第三者評価支援委員会の長谷川和義委員長を始め、委員の皆様にご助言いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本河川協会：解説・河川管理施設等構造令 P247, 2000
- 2) 堀江秀亮・長谷川和義：自動開閉式ゲートの振動挙動に関する解析と模型実験, 土木学会北海道支部論文集, 第65号, 2008