

(2) 浸透水の抑制と排水対策

浸透水の抑制と排水対策は、河川水などの浸入水は函体周辺の変状部を疎通して川裏の堤防法尻や水路に浸出することに対処し、表面部の浸透抑制および浸透水の安全排水により、パイピングや法面すべりなどを抑止する方式である。なお現状では、川表側の遮水護岸などの整備はほぼ終了しているが、川裏側の安全排水施設などの設置事例は少ない。

図-7.2.3 は、樋門の川表側における浸透抑止と川裏側の安全排水施設のモデルを示し、川表、川裏共に護岸又はフトン籠などにより地盤や法面の安定を図る。それらの下面は、川表の堤防法面には遮水シート、川表の水路、川裏の堤防法面と水路には浸透水や地下水を考慮して吸出し防止材を布設する。図-7.2.4 は、樋門周辺堤防でサンドマットを敷設した場合の排水対策である。この方式は、地盤沈下や堤防沈下によるサンドマットの埋没や損壊などに配慮し、吸出し防止材の布設および堤脚ドレーン深度を 1.0m 程度確保して排水機能を確保するものであり、地震時は液状化の抑止効果が期待できる。

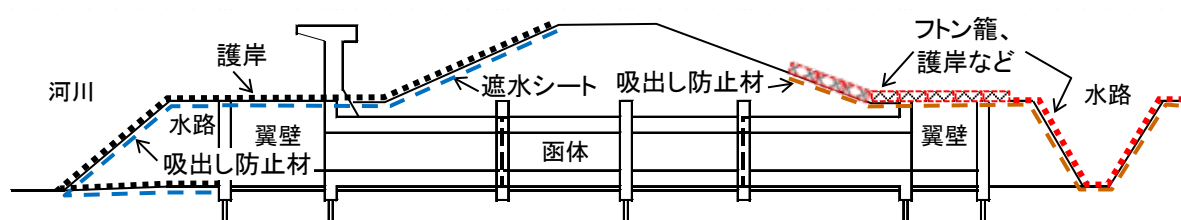


図-7.2.3 樋門周辺の浸透抑止と排水対策

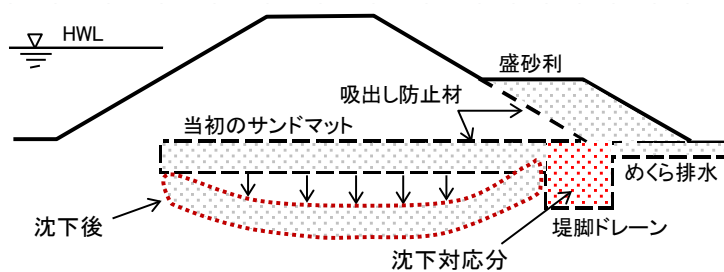


図-7.2.4 サンドマットの排水対策

(3) 遮水壁による対策^{4), 6), 8), 9), 20)-26)}

樋門周辺堤防の決壊防止には、浸透→漏水→パイピング→土砂流失→決壊の連鎖を断ち切る必要がある。その基本は変状発現範囲の遮水化により、ゆるみや空洞などからの疎通水に起因する堤防災害を防止する必要がある。しかし現行の遮水壁は、図-7.2.5のように函体側方から上方に亘る変状の発現範囲以下の防御構造^{22), 23)}であり、洪水水位が堤内地盤高以上になった場合は浸透水を阻止することはできない。

図-7.2.6 は変状の発現範囲をカバーし、函体周辺の浸透水を遮断して堤防決壊を抑止する新しい遮水壁のモデルであり、遮水矢板は構造的な安定性を考慮してコンクリート壁から 2.0m 高とし、それ以上は護岸や土質改良などにより遮水機能を強化する。この方式は簡便で信頼性や経済性に優れ、周辺環境への影響が少ないなどの利点がある。また既設樋

門に適用する場合は、開削工事の影響、地盤沈下の動向、残留沈下量などに関する安全性について検討する。新設樋門では施工後に樋門と堤防の不等沈下が発生するが、何れの場合も施工時の沈下や施工後のネガティブフリクションなどにより、樋門と遮水矢板が分離することのないよう、接続部には可撓継手を用いて安全性を確保する必要がある。

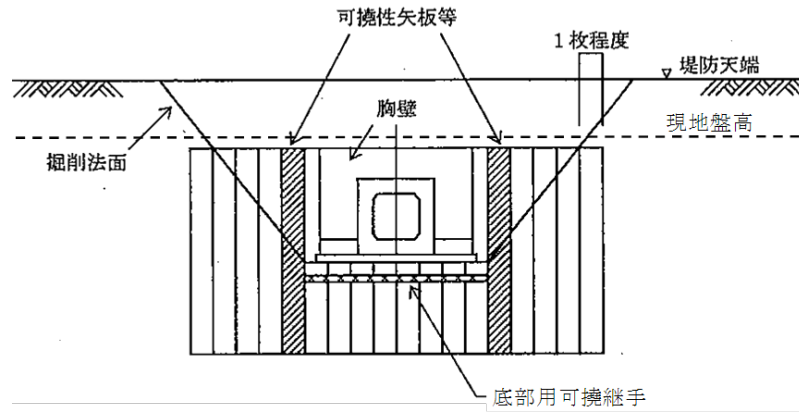


図-7.2.5 現行の遮水壁の構造²³⁾

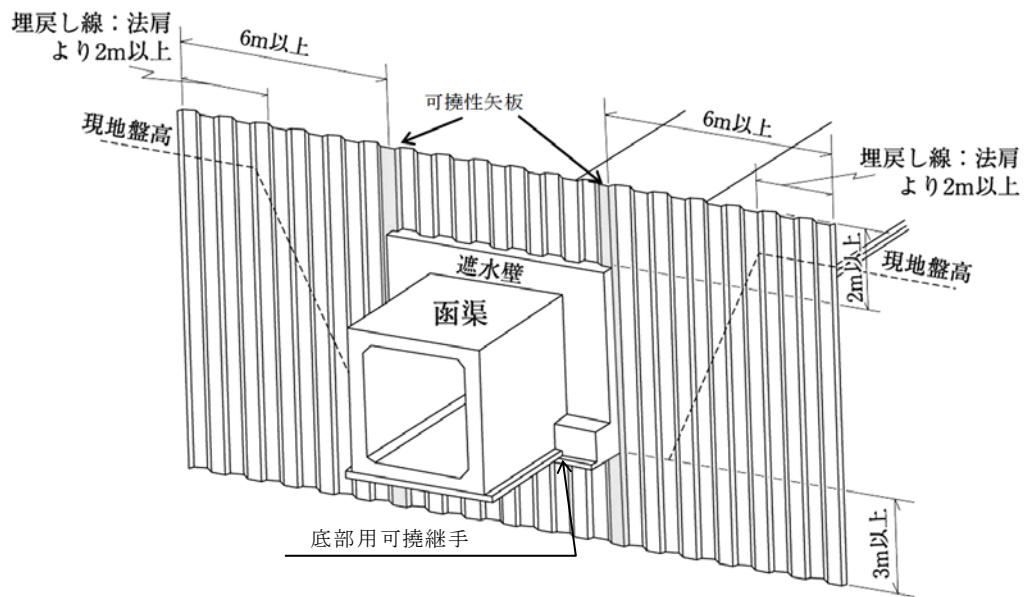


図-7.2.6 新しい遮水壁の構造

(4) 樋門の削減による対策

石狩川下流における土地利用の高度化は、泥炭性軟弱地盤の乾燥化と水利用を目的とする高密度の水路網整備により進展した。この開発に伴って堤防に多数の樋門が必要になり、第2章2.3で示した事例では、北村・岩見沢地区は流域面積 $A=179.0 \text{ km}^2$ 、堤防延長 $L=97.0 \text{ km}$ 、樋門 97 箇所、豊平川右岸地区は $A=58.1 \text{ km}^2$ 、 $L=67.1 \text{ km}$ 、55 箇所と多数の樋門が設置されている。また、設置間隔 100m 以下の事例や 3 樋門が連続的に設置されている箇所もある。このような状況は、堤防の安全性低下の一因になることから、樋門数を統合、撤去、水門化などの方法により削減した場合は安全性が向上することになる。

樋門撤去による削減事例では、1981年8月の小貝川洪水で決壊した高須樋管、1982年に漏水が生じた利根川下流丞鎌樋管などがある。

樋門の水門化は、樋門の統合による大型化、樋門数の削減、地盤沈下の影響軽減、堤防荷重の軽減などを目的とする方式である。図-7.2.7は水門化のイメージ図を示し、盛土部分の削減、地盤沈下の影響軽減のための構造物周囲の遮水矢板、浸透水抑止のための底版下の鋼管矢板と堤防接続部の遮水矢板などにより、遮水機能を強化して安全確保を図る方式である。利根川水系小貝川における4連樋門を水門化した伊丹水門の事例では、堤防荷重の軽減と共に、堰体を鋼管矢板で支持して漏水防止を図り、底版周囲は縁切り鋼矢板を用いて地盤沈下の影響を軽減している。

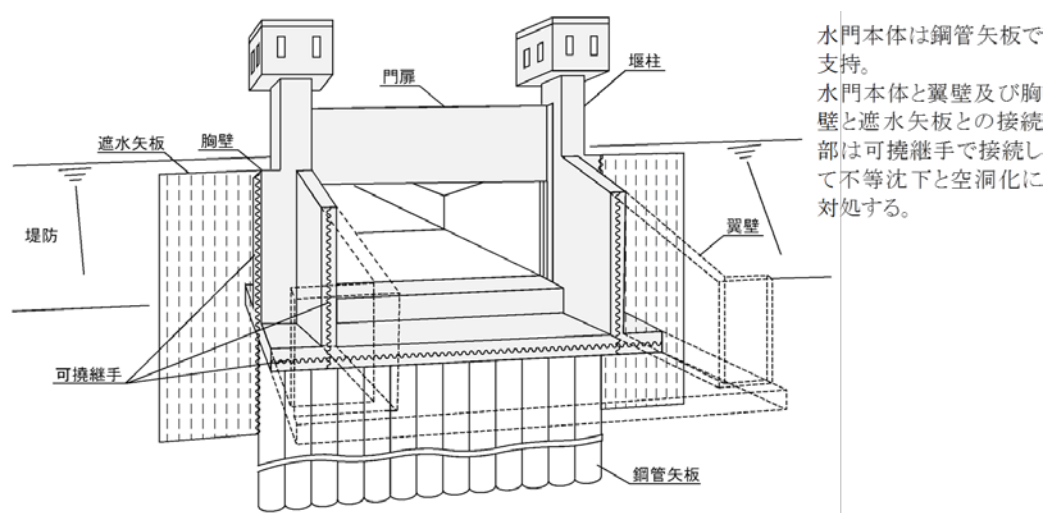


図-7.2.7 水門化のイメージ図

(5) 氾濫被害の軽減対策

氾濫被害の軽減対策は、樋門漏水および周辺堤防の損壊や決壊により氾濫被害が発生した場合に、以下に示した二線堤、周囲堤、まわり土手などの二次的な洪水防御施設により、氾濫面積の抑制や洪水流量の調節などを行う方式である。

1) 二線堤による対策

二線堤は、堤防決壊による氾濫水を控えるの堤防や道路などを利用して抑止し、被害軽減を図る方式であり、近年は地方自治体との協働による道路嵩上げ・拡築などの方式で実施されている。

愛媛県大洲市の肱川^{27)、28)}の事例では、矢落川合流点部に市道嵩上げの二線堤を築造して遊水地とした結果、大洲地点の洪水位は、2004年8月洪水では1995年7月洪水より1.0m高くなったが浸水面積は40%減、浸水家屋は60%減の効果があったと報告している。

図-7.2.8は、石狩川下流における道路嵩上げによる二線堤の検討事例²⁹⁾であり、氾濫域は遊水地として利用する計画である。氾濫解析に基づく効果分析では、畑地面積の40%は浸水深50cm以下、20%は浸水しない効果があるとしている。

石狩川下流では、堤防と道路の併行区間が多く、二線堤盛土に河道掘削土が流用できるなど、樋門を対象にした小規模な二線堤整備などは、短期間で経済的に築造できる潜在的に有利な条件が備わっている。

遊水地や流量調節を行う大規模な計画では、地元調整から計画実現までに労力、費用、期間などに多くの課題を抱える。したがって樋門に適用する場合は、図-7.2.9に示したような周辺の道路嵩上げや小範囲の盛土による二線堤を築造し、水路構造物には逆流防止用の弁や門扉などの設置することにより、少費用で確実な氾濫抑止が期待できる。

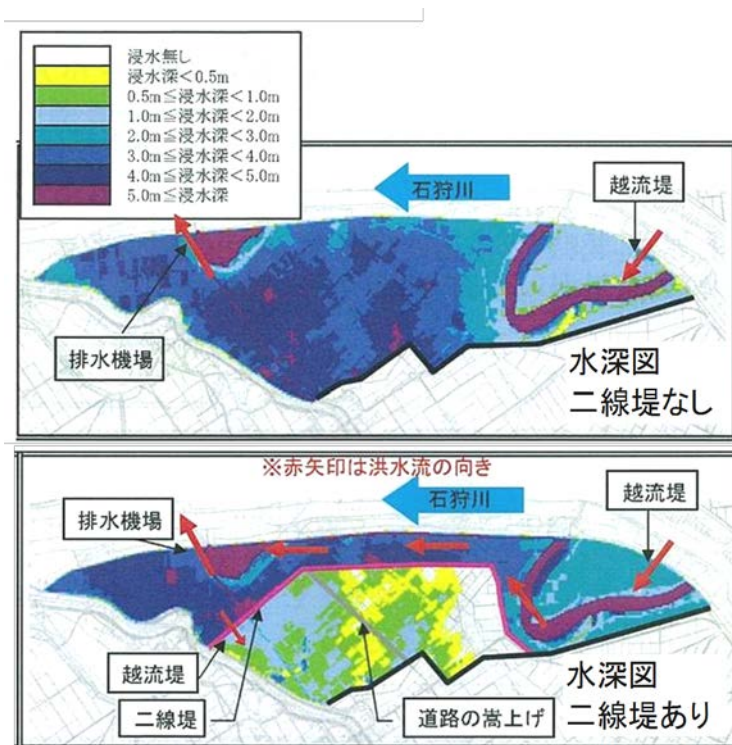


図-7.2.8 石狩川下流の二線堤モデル²⁷⁾

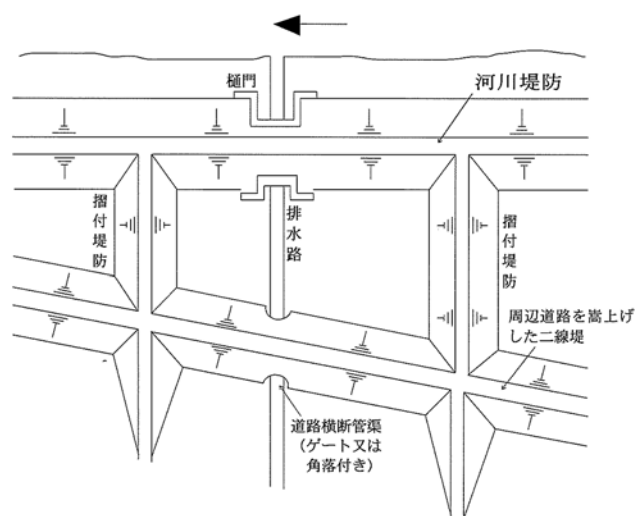


図-7.2.9 道路利用の二線堤モデル

河川堤防と併行する道路を嵩上げし、摺付堤防などで氾濫域を抑制する。

2) 周囲堤による対策

周囲堤は、旧河道や隣接する湖沼などの周囲に、樋門周辺堤防が決壊した場合の氾濫抑止用の堤防を築造する方式である。

写真-7.2.3は図-7.2.8の上流側の旧河道³⁰⁾に、白破線で湛水面積1.7km²を有する周囲堤の想定位置を示したものであり、広大な水面から遊水地としての機能も期待できる。

この地区は1981年8月洪水では、旧幌向川を挟んで下流側が石狩川の越水により、上流側は内水により浸水したことから、周囲堤により氾濫被害の軽減効果が期待できる。



旧河道沿いに周囲堤を築造することにより、樋門箇所の決壊氾濫や内水氾濫被害が軽減化できる。

写真-7.2.3 旧河道の周囲堤のイメージ³⁰⁾

写真-7.2.4は、石狩川の旧河道に周囲堤を築造した砂川遊水地³¹⁾の事例であり、洪水調節容量は1,050万m³で平時は河川公園などに活用されている。この遊水地は、特に樋門や水門の周辺堤防の安全確保を目的に築造されたものではないが、本川の洪水外力を直接的に受けることがないため実質的な安全性は向上している。

石狩川下流の旧河道は31箇所存在³²⁾し、貯水池や公園などに使用されている地区や小堤防が残存している箇所もあり、周囲堤は堤防の安全性向上、内水対策、河道掘削土処理、環境利用など多面的な効果が期待できる方式である。



砂川遊水地は、旧河道沿いに周囲堤を築造し、遊水地、ポート場、公園などに利用している。

写真-7.2.4 砂川遊水地の周囲堤³¹⁾

3) まわり土手による対策

まわり土手は、樋門の川裏周辺を取り囲むようにまわり（メガネ）土手を築造するものであり、**図-7.2.10** は信濃川で江戸時代に設置された本堤や樋門箇所の補強を目的とするまわり土手の事例^{4),6)}である。樋門周辺堤防が決壊した場合は、まわり土手で氾濫水を抑止して被害の拡大抑止を図る方式である。

この方式は、小規模施設で水路構造物に逆流防止用の弁や門扉などを設置することにより被害軽減が図れるため、経済的に優れ、用地確保の難しい箇所や中小河川などへの適用に有利である。

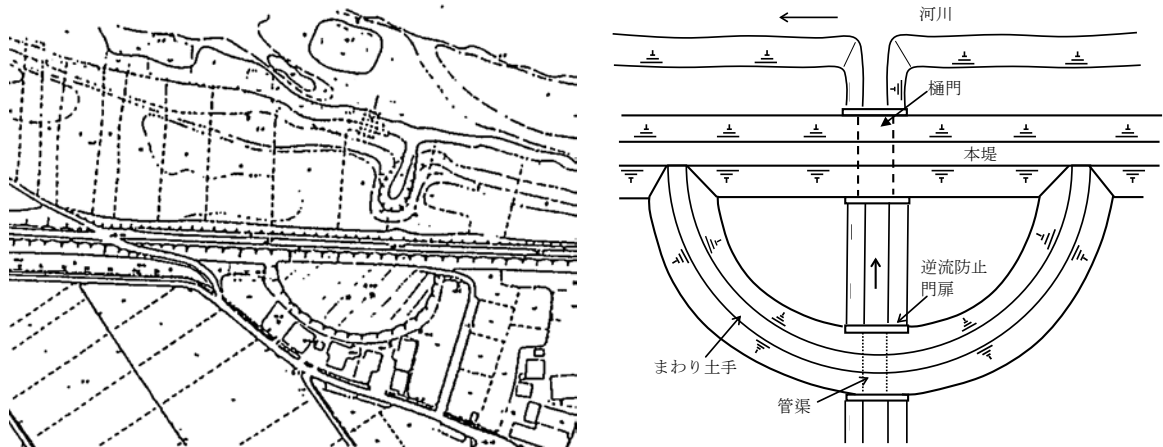


図-7.2.10 まわり土手の事例

写真-7.2.5 は、樋門漏水で決壊した島松川南の里樋門における周辺堤防決壊後の氾濫状況³⁰⁾である。この樋門は河川合流部に設置され、周辺堤防の決壊により後背地区 304ha が浸水した事例である。このような河川地形では、点線で示す付近にまわり土手などの小規模施設を築造することにより、恒久的に氾濫被害が軽減できる。



写真-7.2.5 合流点部のまわり土手のイメージ³⁰⁾

(6) モニタリングによる対策

モニタリングによる対策は、樋門に関わる変状や挙動を点検・監視して安全性評価を行い、適時に必要な対策を立案するソフト面の方式である。

泥炭性軟弱地盤における地盤沈下は、その沈下動態が平衡状態になるまで10～30年の歳月を要する。また、周辺地域で開発が行われた場合は再び動態が変化するため、長期的に樋門と周辺堤防の挙動を監視し、定期的に安全性を評価する必要がある。

モニタリングに関わる調査は、平時、洪水時、地震時と広くデータ収集ができるように配慮し、変状の実態把握は外観観察、計測、検査杖、打音、調査孔調査など、計器観測は沈下、変位、土圧、地中変位、函体変位など、浸透水の動向は地下水位、間隙水圧、地下水流向・流速などを測定する。実際の調査方法は第4～5章を参考に計画し、観測データに基づき各樋門毎の挙動と危険性を予測して効果的な対策を実行する。その留意点は、ゆるみや空洞などが発現しやすい部分は、杭基礎樋門および柔構造樋門共に、函体の上面隅角部と下面周辺で函体から0～50cmの範囲であることを踏まえ、変状探査や沈下観測では函体から10cm間隔で3点、それ以降は20～100cm間隔で測線を設定し、弱点となる変状部の実態を確実に把握する必要がある。

洪水防御地区の安全性評価は、従前の河川別評価から、堤防で囲まれた洪水防御地区を1単位し、その地区の堤防と各樋門の安全性を考慮することにより、各々の地区における弱点の実態、安全確保の方向付け、対策優先度などの評価の信頼性が高まる。

泥炭性軟弱地盤上にある樋門周辺堤防では、水管橋式オーバーサイフォン以外は全て地盤沈下の影響を受けるため、60余の洪水防御地区の堤防、樋門構造および変状の実態を考慮したモニタリングにより、変状と危険性の管理が可能になり適切な補修の方向性が定まって恒久的な安全性が保障されることになる。

7.3 第7章のまとめ

石狩川下流河川整備計画（2007.9）における堤防整備では、樋門等の構造物は改築・継ぎ足しおよび構造物周辺の護岸等の補強を行う。また、堤防の内部構造が不明確な場合もあるから調査・点検を行い、必要に応じて強化対策を行うと述べ、具体的な対策方式についての言及はない。この計画なども考慮し、本章では連続堤防の弱点解消に優先的に取り組むべき課題として樋門周辺堤防を取り上げた。その安全対策の基本として、始めに変状の進行形態と発現範囲を示した。対策方式は変状の実態、対策の目的と範囲および社会環境を考慮し、決壊防止や被害軽減に恒久的な効果と実現性が期待でき、地域に受け入れられやすい方式について提言し、その知見を以下に整理した。

- (1) 樋門周辺堤防の変状が決壊に進行する基本的なモデルは、盛土完了時、開削調査時、洪水位上昇時、堤防の損壊進行時、堤防の決壊後の5段階で図示した。
- (2) 函体横断方向の変状発現モデルを示し、その発現範囲は、函体左右4.0m程度、上方は天端まで、下面の下層は2.0m程度であることを明らかにした。
- (3) 安全対策の目的は、不等沈下対策、浸透水の抑制と安全排水、変状部への浸透水の遮断、

決壊防止と被害軽減、ソフト面からのモニタリングを提示した。

- (4)安全対策は、変状の進行形態、発現範囲および恒久的な効果や実現性を考慮した考え方を示し、①不等沈下の軽減（地盤改良、オーバーサイフォン）、②浸透水の抑制と排水、③遮水壁による対策、④樋門の削減（統合、撤去、水門化）、⑤氾濫被害の軽減（二線堤、周囲堤、まわり土手）、⑥ソフト面からのモニタリングによる対策について提言した。

参考・引用文献

- 1)瀬川明久、小林信行、渡辺和好：河川構造物と不同沈下対策、第29回北海道開発局技術研究発表会、D・32、p826～834、1985
- 2)瀬川明久、渡辺和好：構造物周辺の不同沈下の実測と解析、土木学会第41回年次学術講演会、1986
- 3)瀬川明久、小林信行、渡辺和好：軟弱地盤における構造物周辺の安定化対策—沈下管理と漏水対策技術—、土木学会第42回年次学術講演会ポスターセッション、p2～3、1987
- 4)瀬川明久：河川堤防の漏水対策技術（第1～3版）、（財）北海道河川防災研究センター、2003～2004
- 5)瀬川明久、港高学、吉川勝秀二樋門周辺の沈下と変状の経時的挙動について：地下水地盤環境に関するシンポジウム2006—水辺と堤防と地下水—発表論文集、p53～60、2006
- 6)瀬川明久、港高学、掛村拓史、吉川勝秀：低湿地堤防の樋門に関わる災害と恒久的安全対策に関する一考察、土木学会第61回年次学術講演会、2-014、p25～26、2006
- 7)瀬川明久、港高学、吉川勝秀：樋門の周辺堤防の変状に関する実証的考察、土木学会、安全問題研究論文集（Vol. 2）、p119～124、2007
- 8)瀬川明久、間平祐樹：石狩川下流における樋門周辺堤防の安全確保のあり方について、水利科学、No. 329、p91～134、2013
- 9)瀬川明久、渡辺和好、熊谷守晃、森康夫：漏水対策工設計施工指針（案）、p126～132、北海道開発局漏水対策工設計施工指針（案）編集委員会、1984
- 10)瀬川明久、小林伸行、渡辺和好、福田義明：樋門・樋管周辺のグラウチングのてびき、北海道開発局土木試験所河川研究室、1986
- 11)国土開発技術センター：軟弱地盤上における基礎処理試験施工報告書、1994
- 12)国土開発技術研究センター：柔構造樋門設計の手引き、1998
- 13)瀬川明久、高橋繁樹、荻原清：（報文）河川構造物周辺の漏水について、北海道開発局土木試験所月報、NO.361、p2～9、JUNE1983
- 14)瀬川明久、高橋繁樹、荻原清：漏水対策に関する調査研究（総括編）、河川に関する調査・試験・研究報告書、北海道開発局土木試験所河川研究室、1983
- 15)瀬川明久、小林信行、渡辺和好、福田義昭：河川構造物漏水調査のてびき、北海道開発局土木試験所河川研究室、1986
- 16)吉川勝秀、長瀬迫夫・白井勝二・瀬川明久・福成孝三：河川堤防学・新しい河川工学、P168～190、

2008

- 17) 瀬川明久、渡辺和好：河川構造物漏水の実態と今後の対策について、第 28 回北海道開発局技術研究発表会、D・19、p618~628、1984
- 18) 瀬川明久、渡辺和好：軟弱地盤における構造物周辺の安定化対策について、土木学会第 40 回年次学術講演会、VI-4、p7~8、1985
- 19) 中島秀雄：図説河川堤防、p201~216、2003
- 20) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準（案）設計編、第 1 章、1977
- 21) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準（案）同解説、調査編、p411、2004
- 22) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準（案）設計編〔1〕、p 95~103、1997
- 23) 北海道開発局建設部河川工事課：河川工事設計施工要領、2-6-44、2009
- 24) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き、p118~150、2002
- 25) 国土交通省河川局治水課：樋門補強マニュアル（案）—既設樋門の補修・補強、継足し—、p19~50、2001
- 26) 末次忠司：現場技術者のための河川構造物維持管理の実際、p81~111、2005
- 27) 大洲市広報おおず：災害に強いまちづくり防災・危機管理シリーズ NO.2、2005
- 28) 国土交通省四国地方整備局：平成 16 年台風災害を振り返って—四国地方整備局の取り組みと今後の対応—、2005
- 29) 北海道開発局石狩川開発建設部：気候変動により増大する自然災害リスクへの適応策に関する検討調査、2009
- 30) 北海道開発局石狩川開発建設部：昭和 56 年 8 月洪水写真、1981
- 31) 北海道開発局石狩川開発建設部：滝川河川事務所史-1974~2001—、p164~177、2001
- 32) 国土交通省北海道開発局：石狩川下流河川整備計画、p39、p53、p57~58、2007

第 8 章 結論

本論文は、石狩川下流における泥炭性軟弱地盤上にある樋門周辺堤防の決壊防止と被害軽減を目的に、地域社会における堤防の役割と安全性を考察すると共に、連続堤防の中で樋門周辺堤防が弱点となる現象の解明を行った。安全対策は地域社会と調和しやすく、実現性と恒久的な効果が期待できる決壊防止や被害軽減のあり方について提言を行った。

以下に、第 1 章から第 7 章までの検討に基づく知見を整理して結論とした。

第 1 章では、研究の背景と目的および本研究の意義を述べた。

連続堤防整備後の堤防災害の特徴は、越水がない状況で樋門周辺堤防において法面すべりや決壊などが頻発したことである。この災害は、地盤沈下に伴い発現する函体周辺のゆるみや空洞などからの漏水に起因しており、堤防を安全基盤とする地域社会の安全確保のため、樋門周辺堤防の決壊防止や被害軽減対策が不可欠であると述べて緒言とした。

第 2 章では、地形・地質、地盤沈下、氾濫原開発、洪水災害、堤防整備、洪水防御地区の実態などを整理し、連続堤防、樋門周辺堤防および地域社会の安全性について検証した。

(1) 石狩川下流の氾濫原は、泥炭 ($q_c=0.05\sim 0.4\text{MN}/\text{m}^2$ 、 $w=200\sim 1,500\%$ 、 $c_c=3\sim 11$) を共在する層厚 10~50m の泥炭性軟弱地盤が 70% 以上を占め、非常に脆弱な地質の地盤沈下地帯であることから、樋門と堤防の接続部では不等沈下に伴うゆるみや空洞などの変状が発現し、その変状が連続堤防の弱点になっていることを明らかにした。

(2) 石狩川治水計画は 1910 年に開発後追い型で策定され、1953 年には無堤部解消を目標に掲げ、1970 年頃に連続堤防が整備された。それから間もない 1975 年と 1981 年洪水による堤防災害では、従前の無堤部の氾濫や弱小堤の越水から堤防沈下部の越水、堤防や樋門の漏水などに起因する決壊や法面すべりなどが頻発したため、その災害傾向の変化を考慮した安全対策が必要になった。

(3) 代表的な農村部と都市部の洪水防御地区の実態分析の結果、地形は下流閉鎖型、外周堤防高 3.0~7.0m、浸水深 2.0~7.0m、1981 年 8 月洪水では各地区の 20~90% が浸水している。この 2 地区のグラウト工による空洞化対策は、直轄樋門 135 箇所の内、61 箇所で行われ、両地区共に地盤沈下が著しく氾濫被害が広がりやすい形態であり、地域社会の安全確保には、樋門周辺堤防の変状の実態を解明し、その結果に基づく安全対策が必要になった。

第 3 章では、堤防整備の歴史の中で発生した洪水と被害の関係を分析した。

(1) 洪水災害は開拓草創期から頻発し、氾濫面積は連続堤防整備前まで 5~15 万 ha であったが、整備後は 3~6 万 ha と減少傾向を示して堤防整備の効果が認められた。

(2) 最高洪水位は流域開発と堤防整備の進捗に伴い上昇し、連続堤防整備後は無堤部があった時代には見られなかった越水、堤防や樋門の漏水、法面すべりなどの堤防災害が発生するようになり、越水による決壊では 1975 年 4 件が 1981 年 10 件と大幅に増えた。

(3) 1981 年 8 月洪水では、越水がない状況で堤防と樋門周辺の決壊が 2 件発生した。水防対策は 169 件中、樋門周辺で 42 件 (25%) 行われ、連続堤防の安全確保には樋門周辺堤

防の変状の危険性を恒久的に解消できる安全対策が必要になった。

(4) 樋門周辺堤防の災害要因は、洪水水位上昇による外力増大、不等沈下の進行に伴う変状拡大などであり、今後の洪水では樋門周辺堤防の変状部に洪水外力が集中して決壊の危険性が高まるものと予測される。したがって、地域社会の安全確保には、樋門周辺堤防の決壊防止や被害軽減対策のあり方を検討する必要がある。

第4章では、樋門に関わる変状の調査方法および函体周辺のゆるみや空洞の捕捉と判定の方法を提案し、その検証結果と実施例を示した。

(1) 樋門周辺の変状調査は、樋門構造、変状の発現位置と範囲、被覆物などによる形態変化などを考慮した段階的な流れ、留意事項、変状形態モデル図などを示し、変状同士の関連性などに配慮した調査方法を提案すると共に実施例を示した。

(2) 堤防表面から函体周辺の変状部を確実に捕捉するため、調査ポイントを函体側面から0.1m×3点=0.3m、0.5m点、1.0m点からは1.0~2.0mと設定する方法を提案した。

(3) 変状調査やコーン貫入試験などにに基づき、ゆるみは $qc \leq 5.0 \text{ kg f/cm}^2$ ($\approx 0.50 \text{ MN/m}^2$)、空洞は $qc \leq 1.0 \text{ kg f/cm}^2$ ($\approx 0.10 \text{ MN/m}^2$) とする実用的な判定値を提案した。

第5章では、樋門周辺堤防の安全性評価の基本として、杭基礎樋門、柔構造樋門、地震時、洪水時に分類して変状の実態を詳細に検証し、その進行状況や危険性を考察した。

(1) 不等沈下は開削調査を行った全箇所を確認され、その沈下量は函体底面を100%とした場合、天端は70%、函体上面周辺は140%に達し、空洞は75%の樋門で発生しており、樋門周辺堤防では不等沈下対策が必要であることが判った。

(2) 杭基礎樋門の変状形態は、不等沈下、抜け上がり、ゆるみ、クラック、空洞、空隙など、底板下はゆるみや空洞が発現し、何れも連続性を有していた。函体から20cm程度の土層は剪断破壊され、締固め状態は著しく緩んで脆弱化し、浸透性や通水性が大きくなっており、洪水時には漏水やパイピングが容易に発生する状態が潜在していた。

(3) 柔構造樋門の変状は、函体沈下、堤防の不等沈下、不陸、抜け上がり、陥没、護岸損壊、護岸下の空洞、土層のゆるみや空隙などである。杭基礎樋門との比較では、底板下の空洞量は軽減したが、その他の安全性が特に向上したとは認められない。継手部では折れ角が集中して段差や損傷が発生した事例も多く、長期的な安全性に課題が残っていた。

(4) 地震時の変状は、函体周辺から堤防表面に亘る抜け上がり、クラック、法面すべり、法尻隆起、函体損壊などであり、地震規模により変状規模も変化する。また、地盤や堤防の内部に発現した砂脈などの液状化痕跡は、地震の繰り返しや洪水により拡大して水みちを形成することから、地震の影響が把握可能な調査方法を開発する必要がある。

(5) 洪水時の変状は、函体周辺の漏水、噴砂、パイピング、法面すべり、決壊と変状の進行に伴う形態変化が見られ、樋門漏水が顕在化した場合の抑止は難しいことが判った。

(6) 漏水、噴砂、パイピングなどによる水みちは、函体側面の剪断破壊された変状部を疎通し、その部分で軟弱化、ゆるみ、空洞化などが生じている。また、表面的には目立たない変状でも地中では漏水経路が形成され、大きな危険性が潜在していることが判った。

(7) 決壊はM樋門の事例を示し、その原因は堤防天端より低い洪水水位、函体は正常、泥炭性

軟弱地盤、付近の堤防に異常がないことなどから、不等沈下に伴って生じた空洞を水みちとするパイピングに起因して最終的に決壊に至ったものと推察した。

(8) 樋門周辺堤防の不等沈下の影響は、函体側面部や底面部に強く現れ、浸透性や通水性を高める変状を形成し、その変状が堤防の弱点になることを明らかにした。

第6章では、樋門周辺堤防と決壊箇所の現地調査に基づき、変状の形成原因および決壊原因を把握し、それらの数値解析による検証方法を提示した。

(1) 開削調査や動態観測などに基づき、不等沈下は函体から0.1m以内で盛土開始と同時に発生して発生部の土層を剪断破壊すること、不等沈下進行に伴い地中変位は函体から離れる方向に移動し、壁面土圧は低下することが観測され、この事象連鎖により函体周辺土層の締固状態が緩み、ゆるみや空洞などの変状が形成されることを明らかにした。

(2) 柔構造樋門の沈下観測では、地盤強化工法を採用した場合の空洞化の軽減効果は認められるが、函体側面部などの変状抑止は難しいため、浸透に対する安全性が特に向上したとは認められない。また、函体沈下による折れ角は継手部や接続部に集中することから、その安全対策が必要である。

(3) 不等沈下と変状の形成原因の解析では、有限要素法の no-tension 法で再現性を検討した後、joint element 法による沈下解析と no-tension 法に基づく剪断歪み解析により、沈下分布および最大剪断歪み分布を再現した。その結果、不等沈下による函体周辺土層の段差量や剪断破壊範囲が把握され、現地調査による変状の形態、発現範囲、形成原因などを補完する結果になり、この解析方法の有意性が示された。

(4) 決壊原因の解析では、決壊に関わる要因として浸潤線の作用、ヒービングによる浸透破壊、法面すべりの安定性に関わる検討を行った結果、安全であった。そこで残る原因の不等沈下について、地盤条件が同様な他樋門との比較結果などから、決壊した樋門で不等沈下が発生したと仮定し、再度、函体周辺土層のゆるみによる透水係数上昇を考慮したヒービングによる浸透破壊の検討を行った。その結果、空洞化に起因して決壊したとの結論が導かれ、この決壊に関わる要因を解析的に検証する方法の有意性が示された。

第7章では、樋門周辺堤防の安全確保の基本として、変状の進行形態、対策目的および対策範囲を示した上で、実現性、確実な効果および地域社会との調和に配慮した決壊防止や被害軽減対策について提言した。

(1) 樋門周辺堤防の変状が決壊に進行する基本的なモデルは、盛土完了時、開削調査時、洪水水位上昇時、堤防の損壊進行時、堤防の決壊後の5段階で図示した。また函体横断方向の変状発現モデルを示し、その範囲は函体左右4.0m程度、上方は天端まで、下面の下層は2.0m程度であることを明らかにした。

(2) 安全対策の目的は、不等沈下対策、浸透水の抑制と安全排水、変状部への浸透水の遮断、決壊防止と被害軽減およびモニタリングを提示した。

(3) 安全対策は、変状の進行形態、発現範囲および恒久的な効果や実現性を考慮した考え方を示し、①不等沈下の軽減（地盤改良、オーバーサイフォン）、②浸透水の抑制と排水、③遮水壁による対策、④樋門の削減（統合、撤去、水門化）、⑤氾濫被害の軽減（二線堤、

周囲堤、まわり土手)、⑥ソフト面からのモニタリングによる対策について提言した。

第8章は、結論である。

石狩川下流の泥炭性軟弱地盤を主体とする氾濫原は、現在では人口100万人を擁する社会が構築されている。この地域は、土地開発と治水事業の進展により高さ3.0~7.0mの堤防に守られた60余の洪水防御地区の集合体になった。その結果、洪水被害は堤防が決壊した地区に集中する形態が生まれ、各地区の洪水に対する安全性は地盤沈下に伴う堤防の安全確保上の問題として取り扱う必要が生じた。この中で、樋門周辺堤防の不等沈下に伴い発現する変状は容易に水みちを形成するため、その安全対策は最も重要な課題の1つと考えられるが、石狩川下流河川整備計画では改築・継ぎ足し、護岸等の補強および調査・点検を行い必要に応じて強化対策を行うと記し、具体的な対策方式についての言及はない。

本論文では、連続堤防の安全性を詳細に検証した結果、地盤沈下に伴い樋門周辺堤防で発現するゆるみや空洞などの変状は、容易に水みちを形成して弱点になることを明らかにした。この変状に起因すると考えられる堤防災害は、連続堤防整備後の1975年8月洪水以降から顕在化し、樋門周辺堤防における決壊防止対策や被害軽減対策が必要になった。

変状の実態把握では、不等沈下と変状の関連に配慮し、変状の捕捉と性状判定のための調査方法を提案した。その方法に基づき、杭基礎樋門、柔構造樋門、地震時、洪水時に分類して変状の実態を詳細に検証し、各々の形態を示した上で、変状は連続的に発現して浸透性が高く、決壊に直結しやすい危険性が潜在していることを明らかにした。

函体周辺の土層の変状は、その形態と危険性を示すと共に動態観測により、不等沈下の進行に伴い函体側面部の土層は剪断破壊され、地中変位は函体から離れ、壁面土圧は低下することを実証的に示し、この3者の相乗作用により土層が乱れて締固め状態を緩めることが変状の形成原因であることを明らかにした。この結果を踏まえ、樋門周辺堤防の変状予測と安全性評価を行う基本として、数値解析による変状の形成原因および決壊原因の推定方法を提示した。これらの成果に基づき、樋門周辺堤防が決壊に至る進行形態および変状の発現範囲を示した。また安全対策は、技術的に実現可能であり地域社会と調和しやすい施策として、不等沈下の軽減、浸透水の抑制と排水、遮水壁による対策、樋門の削減、氾濫被害の軽減、モニタリングの6方式について提言した。

以上により本研究は、樋門周辺堤防の恒久的な安全対策に関する技術的な体系化を図ると共に、この成果は全ての軟弱地盤における樋門周辺堤防の問題解決の参考となり、連続堤防と地域社会の安全確保に寄与できるものとする。

謝辞

本論文は、石狩川下流における 1981 年 8 月の洪水調査を契機に、現地調査を主体に堤防災害に関わる資料の収集と分析を行い、1984 年に漏水対策工設計施工指針、2003 年に河川堤防の漏水対策技術などを執筆・発刊し、それらを基礎に 2005 年 1 月から執筆し始めたものであります。その中で、泥炭性軟弱地盤上にある樋門周辺堤防に発現するゆるみや空洞などの変状は、堤防内に重大な弱点となる瑕疵を潜在させていることが明らかになり、この問題を解決しなければ氾濫原社会の安全は確保されることが判りました。以来 9 年余を掛け、ここに問題提起から安全対策までの一連の成果を取り纏めることができました。

この論文作成に当たり、中央大学理工学部教授山田正博士には堤防の安全対策に関わる技術全般から取り巻く社会的環境まで多大な御指導を仰ぐと共に、御懇切な御教示と温かい御激励を賜りました。ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

中央大学教授福岡捷二博士、同齋藤邦夫博士、同谷下雅義博士、同鎌倉稔成博士、埼玉大学教授田中規夫博士には、本論文の御審査を賜ると共に、取り纏めや発表に関わる御懇切な御教示と御激励を賜りました。ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

中央大学理工学部都市環境学科河川・水文研究室の寺井しおり技術員、研究員の方々には多大な御協力と御支援を賜り、ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

萩原建設工業株式会社の萩原一利代表取締役社長、社員の方々には多大な御協力と御支援を賜り、ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

アインコンサルタント株式会社の菅原幸洋代表取締役社長、社員の方々には多大な御協力と御支援を賜り、ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

株式会社エーティックの三室俊昭博士、港高学技師には資料収集、データ整理や解析計算などの御協力と御支援を賜り、ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

日本技術士会北海道本部水工部会の渡辺敏也部会長、部会員の方々には多大な御協力と御支援を賜り、ここに、衷心より謝意を表する次第であります。

この論文取り纏めのきっかけは、日本大学教授（故）吉川勝秀博士から御指導を頂きました。故人となられましたが、ここに、御冥福を御祈り申し上げると共に、衷心より謝意を表する次第であります。

筆者が勤務していた北海道開発局石狩川開発建設部（現：札幌開発建設部）、土木試験所（現：寒地土木研究所）には、本論文の作成に当たり貴重な資料を貸出し頂きました。ここに記して謝意を表します。

最後に、この長い歳月、観光旅行にも連れていかず、十分な家庭サービスもできませんでしたが、何時も協力と励ましを頂いた妻と子供たちに、心より感謝いたします。