

## 博士論文 要旨

石狩川下流の氾濫原（ $A=1,450 \text{ km}^2$ ）は、泥炭性軟弱地盤が 70%以上を占め直接的な土地利用には不適であったが明治以降の開発と治水対策により、現在は土地利用面積  $1,280 \text{ km}^2$ 、人口 100 万人を擁し、2008 年の農業生産は米 36.9 万 t、小麦 14.8 万 t など産出額 1,582 億円、製造品出荷額は 4,938 億円に達する我が国有数の産業経済圏に発展した。

この地域を洪水から守る堤防は 1970 年頃に連続し、1980 年代までに堤防 950 km、樋門 550 箇所などが整備された結果、高さ 3.0~7.0m の堤防で囲まれ、氾濫水深は 2.0~7.0m に達する 60 余の洪水防御地区が創出された。一方、堤防の安全性は、地盤沈下に伴う「堤防沈下」に加え、樋門と堤防の接続部での不等沈下に伴い発現する「ゆるみ」や「空洞」などの変状に起因して徐々に低下している。特に連続堤防整備後は、樋門箇所の変状に関わる堤防災害が頻発し、1981 年 8 月洪水では二次支川島松川南の里樋門の決壊など、42 件の災害が発生したため樋門箇所の変状対策が必要になったことが判った。しかし、変状の実態や決壊に至る進行形態は不明確であったため、表面上の変状形態や土質試験結果などを勘案した空洞化対策として、グラウト工を 1990 年代から 2005 年の間に 167 樋門で 213 回行ったが、その効果の長期的な維持は難しく、地盤改良と柔構造の組み合わせによる対策では函体側面部から天端に亘る変状は抑止できないため、樋門箇所は未だ連続堤防の弱点になっている。

近年の堤防一般部では断面拡大などの強化対策が行われ、その進捗状況を考慮した場合、今後の洪水では樋門周辺堤防の変状部に水理的外力が集中して決壊などの災害が頻発すると予測されることから、早期に樋門箇所の恒久的な安全化を図る必要があると考えられる。

本論文では、石狩川下流における樋門周辺堤防の恒久的な安全確保を目的に、第 1 に氾濫原開発、洪水災害、堤防整備に関わる歴史的な動向、洪水防御地区の実態などについて検討し、決壊防止や被害軽減対策の必要性を述べた。第 2 に樋門周辺堤防の変状把握に関わる具体的な調査方法を提案し、その方法を用いて杭基礎と柔構造の樋門、地震時および洪水時の変状の形態と危険性を実証的に解明した。その成果を基に、段差状の沈下形状および堤防が流失した場合の決壊原因の推定方法を提示した。第 3 に変状が決壊に至る進行形態と発現範囲を推察し、その結果を考慮した恒久的な決壊防止や被害軽減対策のあり方を提示した。

以下に、第 1 章から 7 章までの検討に基づく成果の要旨を述べる。

第 1 章では、研究の背景と目的、既往研究との関連および本研究の意義について述べ、本研究の社会的な必要性を示した。

第 2 章では、地形・地質と不等沈下の発生要因、氾濫原開発、洪水災害、堤防整備の経過および洪水防御地区の実態を整理し、樋門周辺堤防の安全性と問題点を検証した上で、治水事業の動向分析などを含めて堤防の歴史的な安全性と問題点について検討した。

本流域の堤防整備は、1871 年から一次支川豊平川で札幌本府防御を目的に行われ、石狩川は 1918 年から生振捷水路の左右岸堤防に着手した。その後は、本支川の整備範囲拡大に伴い堤防計画延長は増加している。戦後の 1953 年には、石狩川下流改修全体計画が策定されて無堤部解消が目標になったが、実際の堤防整備は地盤特性や財政難などにより遅延し、着手から 60 年を経た 1970 年頃に計画高水位と同高の連続堤防が整備され、堤防に囲まれた 60 余の洪水防御地区が創出された。この氾濫原開発や堤防整備の進展に伴い、泥炭性軟弱地盤では乾燥化と地盤沈下が進行し、その影響により堤防一般部は長期的に沈下し、樋門周辺堤防で

は不等沈下に伴う変状が発現して安全確保上の問題になっている。このような課題を抱えながらも、1985年頃には堤防 950 km、樋門 550 箇所などが整備された。その結果、洪水被害の主要因は無堤部の氾濫から堤防決壊や内水氾濫に変化し、洪水被害の規模は氾濫原開発や洪水災害の動向分析などから、全ての時代で開発進展と共に増大したことが明らかになった。

堤防整備の効果は、治水計画は地域開発の後追い型で策定された背景から、連続堤防整備後まで部分的な効果発揮に止まり、整備後の 1975 年と 1981 年には 2 度に亘り既往最大洪水流量を上回る大洪水が発生して激甚災害対策特別緊急事業が実施された。その後は、堤防強化や河道拡幅などの改修効果もあって、堤防を越えるような洪水は発生していない。

一方、樋門周辺堤防では変状の発現環境に特別な変化は生じていないため、連続堤防の弱点部として存在し、また決壊が発生した地区では 2.0~7.0m に達する浸水被害を受ける状況にも変化は生じていないことから、この変状に起因する堤防決壊を抑止して地域社会を守るため、早期に変状の実態を解明する必要があることを述べた。

第 3 章では、これまでの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。

洪水災害は、地域開発や堤防整備による流出形態変化の影響を受けることから、その実態について分析した結果、連続堤防整備後で洪水流量が同規模の場合は、浸水面積は減少傾向になったが洪水位は上昇している。この影響により、堤防災害は越水による決壊などに加え、越水が無い状況でも堤防漏水や樋門漏水に関わる決壊などが発生するようになった。

樋門箇所における水防活動は 1975 年 8 月洪水で 7 件、1981 年 8 月洪水では全体 169 件中、42 件で行われ、無堤部が多い時代には見られなかった漏水やパイピングに起因する堤防災害が頻発した。この実態を踏まえ、樋門周辺堤防の安全確保には、不等沈下や変状の実態および堤防災害の傾向変化を考慮した決壊防止や被害軽減対策が必要になったことを述べた。

第 4 章では、樋門周辺堤防の変状を的確に把握するための調査方法および変状の判定方法を提案し、その実施例を示した。樋門に関わる具体的な調査方法は、河川砂防技術基準（案）や地盤調査法などには示されていないため、1975 年および 1981 年の石狩川などにおける洪水調査を契機に、多様な変状形態を的確に把握するための調査技術を考案した。

変状調査は樋門、堤防および附属構造物の構造、変状の発現位置と形態などに配慮し、また土砂や草木などの被覆物により見落としや粗漏が生じやすいことを考慮して踏査から始め、堤防表面部、土層内と調査を進め、各段階で変状分析を行うフローを示し、その要点と留意事項を示した。現地における具体的な調査方法は、堤防や樋門などに関わる変状全体の発現形態として、堤防表面、堤防横断面および底板周辺に発現する変状形態モデルを示した上で、現地における変状の計測方法などを写真で示して解説し、そのデータの整理例を示した。

堤防表面から地中の函体側近の変状部を確実に捕捉するための調査ポイントは、不等沈下と変状の形態、発現部位などを考慮し、函体側面から 0.1m×3 点、それよりは 0.5m 点、1.0m 点、それ以上は 1.0~2.0m 間隔とする設定方法を提案した。また、変状部捕捉のための調査として土層観察、コーン貫入試験および土質試験などを実施し、「ゆるみ」は  $qc \leq 0.50 \text{MN/m}^2$ 、「空洞」は  $qc \leq 0.10 \text{MN/m}^2$  とする判定値を提案した。これらの調査方法は、「河川構造物漏水調査のてびき」や「河川堤防の漏水対策技術」などを発行し、関係機関や一般に配布して技術の汎用化に努めた。

第 5 章では、前章で提案した調査方法を用いて現地調査を行い、変状、不等沈下、土圧および地中変位の実態を把握した。なお変状の形態は、杭基礎樋門、柔構造樋門、地震時および洪水時に分類して検証し、その危険性を実証的に考察した。

樋門周辺堤防の不等沈下は調査樋門 20 箇所の 100%、空洞は 75%、函体の不等沈下は 95% で発生していた。変状の形態は、杭基礎および柔構造樋門では、不等沈下、抜け上がり、ゆるみ、クラック、空洞、空隙、陥没などであった。地震時もほぼ同様の形態を示すが、堤防や函体の損壊事例および堤防や地盤内に液状化の痕跡が見られる事例があった。洪水時は変状部の透水性が高いため、漏水やパイピングが容易に発生し、決壊などの堤防災害に発展しやすいことが判った。これらの結果から、函体側面部に発現する不等沈下は土層を剪断破壊し、著しく浸透性が高くなる変状を形成することが明らかになった。また、ゆるみや空洞の性状は、前章のコーン貫入試験による判定値での確に把握できることが判った。

第 6 章では、現地調査により樋門周辺堤防の変状の形成原因と決壊原因を把握し、そのデータに基づく考察を踏まえ、数値解析による検証方法を提示した。

変状の実態は、杭基礎は嶮淵川 R 樋門（1986.10～1990.1）の沈下、地中変位、土圧の動態観測により、柔構造は幌向川 Y 樋門（2003.2～8）および千歳川 Q 樋門（1999.9～2000.4）の沈下観測により、決壊の実態は島松川南の里樋門の現地調査（1981）により検証し、それらのデータに基づき原因考察を行った。なお、R 樋門と Q 樋門の沈下計は、段差状の沈下による計器損壊を防止するために開発したロッド型沈下計と層別沈下計を使用した。

R 樋門の沈下観測では、不等沈下は盛土開始と同時に発生し、段差形状が卓越する函体から 0.1m 点付近の土層は剪断破壊されることが判った。また、最大沈下量が発生する函体上面周辺は、変状規模も大きくなることが示唆された。地中変位の動態は、函体直角方向（X 軸）における最大値（447 日）と最終日（1,161 日）の比較では、堤防表面-22→-9 mm、函体側面-4→-3 mm、函体下面-13→-4 mm となり、不等沈下の進行に伴い盛土は全体的に函体から離れる方向に変位した後、その半分程度の戻りが生じて静止状態になることが判った。土中（鉛直）土圧は、沈下に伴って増加した。壁面（水平）土圧は、盛土中は増加したが施工後は沈下に伴い 55～87% 低下した。これらの観測結果から、函体側面部に生じる不等沈下は土層を剪断破壊して大きく乱し、地中変位と壁面土圧は土層の締固め状態の低下や空隙の発現を助長する方向に働くなどの連鎖的な現象が、ゆるみや空洞などの変状を形成することが明らかになり、変状観察による形態を裏付ける結果になった。柔構造樋門の観測では、地盤強化工法により底面部の空洞化は軽減されたが、函体の側面や上面周辺の不等沈下は抑制されていない。函体沈下の影響は、一部の継手部や接続部への折れ角の集中や継手部の損傷として現れて長期的な安全確保に課題が残り、全体として変状の発現防止や浸透性の抑制に対する有意な効果は認められなかった。

不等沈下と変状形成に関する数値解析は、前述の観測データを基に有限要素法の no-tension 法による沈下解析および joint element 法に基づく剪断歪み解析を行い、沈下分布と最大剪断歪み分布を再現した。その結果、段差形状や土層の剪断破壊範囲が把握され、現地調査による変状の形成原因を補完する結果が得られた。この解析方法は観測データがない場合でも、土質定数を設定することにより、沈下分布などを推定できる方法の 1 つとして提示した。

決壊原因は現地調査による推定原因を考慮し、決壊に関与する要因として、浸潤線、ヒービング、法面すべりを取り上げて解析した結果、特に安全上の問題は認められなかった。

残る原因の不等沈下は解析に必要な土質資料がないため、地盤条件が同様な他樋門との比較検討を行い、その結果から決壊した樋門でも不等沈下が発生したと仮定した。そこで再度、函体周辺土層の不等沈下に伴う土層のゆるみを考慮したヒービングによる浸透破壊の解析を行った結果、不等沈下に伴い土層が緩み、透水係数が上昇して決壊したとの結論に至った。

この決壊要因に基づく解析方法は、堤防が流失して資料不足となった場合でも、現地調査結果を補完できる有意な結果を導ける方法の1つとして提示した。

第7章では、変状の進行形態、発現範囲、対策範囲および対策目的を示し、対策論は現況施設の潜在的機能を樋門箇所を活用した場合、地域社会と調和しやすく実現性に優れ、確実な効果が期待できる方式を選択し、その方式を新しい対策のあり方として提示した。

変状が決壊に進行する形態は、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、決壊後の5段階で図示した。函体横断方向の変状の形態は開削調査時のモデルを示し、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程度であることが判った。対策目的は、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。

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被害軽減（二線堤、周囲堤、まわり土手）、⑥モニタリングによる対策の6方式について提言した。

第8章では、本論文の結論を述べた。

石狩川下流の泥炭性軟弱地盤を主体とする氾濫原は、明治以降の開発と治水対策により、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り、100万人の人口を擁する社会が構築された結果、堤防が決壊した地区への被害集中化を招くことになった。

この地域の堤防の安全性は地盤沈下の程度で左右されるため、地盤沈下により変状が発現し、連続堤防の弱点となる樋門周辺堤防の安全化が最優先の課題になると考えられるが、石狩川下流河川整備計画では「改築、護岸等の補強、調査点検などに基づき必要に応じて強化対策を行う」と記し、具体的な対策についての言及はない。

本論文では、現地調査を基本に連続堤防の安全性を検証した結果、地盤沈下に伴い樋門周辺堤防で発現する「ゆるみ」や「空洞」などの変状が弱点になることを明らかにした。この変状に起因する堤防災害は、連続堤防整備後の1975年8月洪水から顕在化し、新たな堤防の決壊防止や被害軽減対策が必要になった。

変状を把握するための調査方法に関しては、樋門と堤防の構造、変状形態モデル、現地計測方法などを示した上で、調査フロー、要点、留意事項などを提案した。この方法を用いた現地調査では、函体周辺の変状は連続的に発現し、著しく透水性が高いため、直接的に堤防決壊を引き起こす危険性があることを明らかにした。動態観測では、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者の相乗作用が土層の締固め状態を乱して変状の形成原因になることを明らかにした。変状予測と安全性評価の基本となる数値解析は、有限要素法を用いた不等沈下分布の推定方法、決壊に關与する要因を抽出して検討する解析方法について提示した。

これらの成果から、樋門周辺堤防が決壊に至る進行形態と変状の発現範囲を示し、安全対策は実現性と地域社会との調和に配慮し、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。