

## 2. 治水安全度向上のための河川堤防の質的強化技術の開発

研究期間：平成18年度～22年度

プロジェクトリーダー：技術推進本部長 中村敏一

研究担当グループ：技術推進本部（物理探査技術担当）、材料地盤研究グループ（土質・振動）、  
材料地盤研究グループ（地質）、水工研究グループ（河川・ダム水理）

### 1. 研究の必要性

近年、気候変動に起因する集中豪雨の発生頻度の増大等により、計画規模を超える洪水や整備途上の河川において大規模な洪水が発生し、河川堤防の破堤に伴う被害が増加しており、堤防の質的強化による治水安全度の向上が急務となっている。このため、基礎地盤や内部構造の不確実性が大きい河川堤防の弱点を効率的かつ経済的に抽出・評価する手法や、浸透（堤体浸透・基盤漏水）および侵食に対する効果的な堤防強化対策など、河川堤防の質的強化技術の開発が強く望まれている。

### 2. 研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、全国で実施されている河川堤防概略・詳細点検のデータベースの分析、先端的な統合物理探査技術の実用化、地形・地質学的概査手法の高度化により、堤防弱点箇所抽出精度を向上させるとともに、抽出された堤防弱点箇所に対し、現場条件や被災形態に応じ、確実な効果が得られる経済的な対策選定手法を提案することを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 河川堤防の弱点箇所抽出・評価手法の高度化
- (2) 浸透に対する堤防強化対策の高度化
- (3) 侵食に対する堤防強化対策の提案

### 3. 個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- (1) 河川堤防の弱点箇所抽出・強化技術に関する研究（平成18～20年度）
- (2) 河川堤防の弱点箇所評価技術に関する研究（平成21～22年度）
- (3) 統合物理探査による河川堤防の内部構造探査技術の開発（平成18～20年度）
- (4) 堤防弱点箇所の内部物性構造詳細評価技術の開発（平成21～22年度）
- (5) 河川堤防の基礎地盤の透水特性調査手法に関する研究（平成19～22年度）
- (6) 樋門・樋管構造物周辺堤防の空洞対策選定手法に関する研究（平成18～20年度）
- (7) 河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発（平成18年度～22年度）

このうち、平成22年度は（2）、（4）、（5）、（7）の4課題を実施した。

### 4. 研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、過年度に終了した課題も含め、平成18～22年度に実施した研究により得られた成果を要約すると、以下のとおりである。

#### (1) 河川堤防の弱点箇所抽出・評価手法の高度化

##### 【河川堤防の弱点箇所抽出技術に関する研究】

- ・現在進められている堤防詳細点検によると、3割程度が浸透に対し必要な安全性を確保しないことが予想され

## 2. 治水安全度向上のための河川堤防の質的強化技術の開発

ており、そうした弱点箇所を効率的に把握し、強化する技術の確立が求められている。

- ・本研究では、河川堤防管理の高度化を実現するため、弱点箇所の抽出精度を向上させる手法について検討した。
- ・その結果、微地形判読や統合物理探査を活用した高精度な弱点箇所抽出手法を提案した。また、三次元浸透流解析の結果より、堤防縦断方向の浸透流は、旧河道等が存在する微地形などで局所動水勾配に影響を与えることなどが明らかになった。

### 【河川堤防の弱点箇所の評価技術に関する研究】

- ・河川堤防の土堤区間ならびに樋門周辺堤防について、浸透安全性評価技術を高度化することを目的に検討を実施した。

- ・砂質土堤防のすべり安定性に関する模型実験では、模型堤防の崩壊形態として、「内部侵食」「内部侵食とすべりの複合」「すべり」が観察された。細粒分含有率が高い堤体材料、緩い締固め度の堤防ほどすべりが発生しやすい傾向にあることを確認できた。すべりの発生条件について、円弧すべり計算で考察したところ、すべり面で発揮される土質定数に現行手法で用いられる非排水強度を用いると、変状形態や規模によらず粘着力  $c$  の見込み次第で安全性が決定されすべりの発生を必ずしも表現できないことが分かった。今後、土質定数の設定方法についてはさらなる検討が必要である。

- ・九州地方整備局管内の城原川、始良川において、堤防モニタリングを開始し、洪水時の堤体内水位の変化を捉えた。

- ・樋門周辺堤防の浸透模型実験を実施し、樋門下の空洞をグラウトで充填した場合であっても、樋門のような堤防横断構造物が存在することにより、堤体内水位が上昇する可能性があること等を明らかにした。

- ・円山川の樋門周辺堤防の陥没について現地調査を行い、樋門と周辺堤防との不同沈下で生じた函体下の空洞により堤体土砂が吸い出されたことが、陥没の主因として推察された。

### 【統合物理探査による河川堤防の内部構造探査技術の開発・堤防弱点箇所の内部物性構造詳細評価技術の開発】

- ・長大な管理区間延長を有する河川堤防の改修・維持管理を効率的に推進するには、要改良区間すなわち弱点箇所を効率的かつ高確度で把握することが可能な現地探査技術の開発実用化が求められていた。

- ・これまでの研究の結果、ランドストリーマー方式高精度表面波探査と牽引式比抵抗探査あるいはスリングラム法電磁探査を組み合わせた統合物理探査を適用することによって、堤防縦断方向に存在する数 10m 規模の異常部までを検出することが可能であることがわかってきた。

- ・この統合物理探査を加速的に普及展開することを目的として、関連する技術的情報を「手引き(案)」として取りまとめた。本手引き(案)には、河川堤防の特徴と被災の実態、河川堤防の安全性評価に適した統合物理探査の目的、統合物理探査の測定およびデータ処理手順、さらに地盤性状の異なる 5 河川での適用事例が記されている。

- ・次に、検出した弱点箇所の内部物性構造をより詳細に把握することが可能な調査計測技術の開発・現地適用実験を進めた。22 年度はその一環として、評価する地盤工学指標である透水性と剛性について、実データに基づいた解析検討を行なった。また堤防開削部において堤体部分の詳細比抵抗探査を実施し、開削前に実施した統合物理探査結果と比較検討した。

- ・物理探査手法を詳細構造調査に適用する場合、対象とする弱点箇所における物性異常の空間的な広がりや異常の程度について吟味し、適切な探査手法を選択するとともに測定条件についての検討を加えることが重要である。

- ・統合物理探査による評価対象である地盤の浸透性と強度について、既往データを収集し統計的な解析を加え検討した。その結果粒度特性から透水係数を推定する際に細粒分に対する補正項を加えることが有効であること、粒度特性をパラメータとして計測物性である比抵抗値および  $S$  波速度値の組み合わせから堤防および基礎地盤の透水性を推定することが可能であることが示された。

- ・また東日本大震災で被災した堤防に対する統合物理探査結果の再解析によって、同手法によって堤防の耐震強度分布をイメージし弱点部を抽出することが可能であることが示された。ただし普遍的な管理基準を設定するにはさらなる適用と検討が求められる。

- ・統合物理探査によって得られる堤防および基礎地盤の物性値のうち、比抵抗値は粒度特性に加えて含水状態の

## 2. 治水安全度向上のための河川堤防の質的強化技術の開発

影響を強く受ける。逆に季節変動や堤体内地下水存在状態の変動を比抵抗値の変化として捉えることが可能である。一般に細粒粘性土層は低比抵抗で変化率も小さい。これに対し粗粒砂礫層は含水状態によって比抵抗値が大きく変化する。したがって比抵抗値の季節変動あるいは経時変化を3次元的にモニタリングすることで、堤防の浸透安全性に影響する旧河道などのみずみちを的確に検出することが可能となりうる。

・今後は空間分解能および時間分解能を向上させる手段として、より高密度かつ高速でデータを取得可能な測定装置について検討する計画である。

### 【河川堤防の基礎地盤の透水特性調査手法に関する研究】

- ・地形区分と堤防被災履歴との関係について河川堤防概略点検結果表を用いて解析を行ったところ、一般に被災しやすい地形区分が明らかになった。河川ごとに地形区分と被災履歴との関係を調べることにより、概略点検結果の精度を向上させることができる。また地形区分と被災履歴との関係に基づき、基礎地盤漏水の安全性概略評価手法の開発を試みた。
- ・過去の地形情報を客観的に把握するツールとして、空中写真から自動化手法でデジタル標高モデル(DEM)を作成したところ、地形分類作業に有効であることが分かった。
- ・地盤漏水対策に必要な3次元地盤構造の推定のために、堆積構造との関連性に着目した新たな地形分類を試行した。また荒川中流域において地形区分と堆積構造とを考慮した自然堤防周辺の地質構造の推定を試み、それが堤防被災原因の推定に有効であることを示した。
- ・堤防の存在が基礎地盤漏水に与える影響を把握するため、2次元浸透流解析を実施した結果、堤体規模、堤体及び基礎地盤の土質、基礎地盤表層の粘性土の有無の組み合わせにより相対的な危険度が異なることが分かった。この結果は堤防概略点検の評価指標あるいは一連区間における照査断面の選定に利用可能と考えられる。
- ・一般に解析的手法で判定される地盤のパイピング抵抗性評価について、新たに原位置パイピング特性の調査手法を考案し、室内実験によるパイピング評価指標の検討、製作した地盤注水試験機を用いて原位置パイピング実験を行った結果、原位置試験によって地盤のパイピング特性の評価ができる可能性を示した。

### (2) 浸透に対する堤防強化対策の高度化

#### 【河川堤防の浸透対策選定手法に関する研究（河川堤防の弱点箇所強化技術に関する研究）】

- ・堤防強化工法の設計は、浸透安全性の照査と同様に、横断面の土質構造に基づいて行われている。しかしながら、堤防強化を実施したにもかかわらず、再度漏水するなどの事例が見られていることから、効果的な対策を実施するためには、堤防縦断方向の浸透流が堤防強化対策に与える影響を明らかにする必要がある。
- ・川表で遮水する対策として、表のり面被覆工法と矢板工法を、川裏で排水する対策として、ドレーン工法と透水トレンチ工法を検討対象とし、三次元浸透流解析を実施した。
- ・結果より、川表で河川水を遮断する工法は、いずれも対策効果発現の遷移区間が存在する可能性があることがわかった。遷移区間の長さについては、堤体や基礎地盤の透水係数の大きさ・組み合わせ等様々な影響因子があると考えられる。また、川裏から浸透水を排水する工法は、対策区間の端部に水が集中する可能性があることがわかった。対策区間の端部においては、ドレーンや透水トレンチの目詰まりに対する監視等維持管理について特に留意が必要であると考えられる。

#### 【樋門・樋管構造物周辺堤防の空洞対策選定手法に関する研究】

- ・樋門・樋管構造物の周辺では空洞・ゆるみを生じる事例があり、洪水時の浸透に対する堤防の安全性に重要な影響を及ぼす可能性があるため、その適切な評価と効果的な対策工法の確立が求められている。
- ・堤防で行われた調査結果（本研究に用いたデータは、国土交通省武雄河川事務所による「樋管周辺空洞化対策事業（平成14年度～平成18年度）」で実施したものである。なお、対象水系は嘉瀬川水系、六角川水系および松浦川水系）から樋管周辺部の空洞・ゆるみ発生状況に関して検討した。
- ・樋管下の空洞としてはグラウト注入による空洞充填が広く普及しているが、他工法の効果確認を目的として押え盛土工法、遮水矢板工法の2対策工法について模型実験を実施した。押え盛土工法は、土工のみであり施工

## 2. 治水安全度向上のための河川堤防の質的強化技術の開発

性に優れるとともに安価である点より選定した。遮水矢板工法は、樋管周辺部の空洞・ゆるみに対して局所的に対策を行い水みちの遮断ができることに加え、押え盛土工法と異なり堤内地側に用地確保を要しないことから選定した。

・樋管上部のゆるみ発生状況、ならびに洪水時の安定性を把握するための模型実験、模型実験をもとに樋管上にゆるみを想定した3次元浸透流解析を実施した。

・その結果、①現地の樋門・樋管周辺堤防における空洞・ゆるみの発生頻度・分布幅・連続性の傾向が確認できた。②樋門・樋管下の空洞対策工法として、押え盛土工法、遮水矢板工法の有効性が確認できた。③樋門・樋管上のゆるみが浸潤線に与える影響について評価することができた。

### (3) 侵食に対する堤防強化対策の提案

#### 【河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発】

①過去の堤防被災の事例分析や堤防に関する研究のレビューによって、破堤の主な原因が越水による堤防裏のり面の侵食であることを確認するとともに、堤体材料の特性として締固度等の耐侵食機能に及ぼす影響を水理実験によって概略把握した。

②現況堤防を大きく改変しないような効率的な対策について検討した。本実験では堤防の裏のり表面部だけ締固め度を高くすることにより、越流水による侵食速度は、締固め度の低い場合に比べて小さく、耐侵食機能が大きく向上されることがわかった。

③河川堤防の侵食対策工法として、吸出し防止シートを堤防裏のり天端～のり尻付近に設置する「シート工法」を検討した。研究成果は、次の通りである。

- ・「シート工法」の耐侵食機能は、堤体材料や締固などによって大きく左右されるが、対策無しの場合の同一土堤に比較して1オーダー程度向上することが確認された。
- ・堤体内部の空洞が存在する場合の揚圧力の影響について実験した。シートの膨れは越流直前で最も大きくなるが、越流後は越流水圧によってシートの膨れは小さくなり、シートが捲かれてのり面が侵食されることはなかった。
- ・シートの揚圧力に対する安定性について理論的裏付けをした。遮水シート下に空気溜まりが発生しないように排気装置等を設けることは、十分な施工・管理を前提とすれば非常に有効であるが、万一排気管が詰まった等の不測の事態を想定すると、排気層の空隙が空気溜まりの発生を助長させるという面もある。
- ・シートの種類及び設置方法による堤防の耐侵食機能について実験的に比較検討した。遮水シートで繋ぎ部を溶着しない場合には、繋ぎ部への越流水の集中に伴って裏のり面の侵食が急激に進行する可能性が高くなる。
- ・吸出し防止シートの場合、重ね幅（15cmと30cm）による影響の差異はあまり見られず、また溶着による耐侵食性の向上も見られたが、溶着部分の強度の長期的保持や施工性なども含めた検討が今後必要である。
- ・現地の新堤防（土堤）のり面で降雨時に表層崩壊が発生した事例が多いことから、「シート工法」の表層崩壊に対する影響について検討した。その結果、「シート工法」の表層崩壊のリスクは、降雨強度にはあまり関わらず、対策無しに比較して低下しないことを実験で確認した。
- ・これまでの研究成果を整理し、堤防越流時の耐侵食機能を向上させる河川堤防の構造の設計・施工に関する試験施工のための手法について、別途技術資料として取り纏めた。越流による堤防の不安定化や変形のメカニズム等が完全には解明されていないため、河川堤防の耐侵食の構造設計・施工が実務的・定量的に行える段階には至っていないが、この技術資料で示した対策は、このような段階での技術的知見をもとにした試行的なものである。

④河川堤防の侵食対策工法として、短繊維混合土を用いた被覆工について、検討した。研究成果は、次の通りである。

- ・堤防裏のり面の被覆工に求められる性能として、耐侵食性のほか、透水性、変形追随性、植生に対する適応性

## 2. 治水安全度向上のための河川堤防の質的強化技術の開発

などが挙げられる。

- 耐侵食性については、裏のり尻付近の施工範囲を留意することにより、堤防高さ 3m、のり面勾配 1:3、越流水深 30cm という一定の条件下では機能向上効果が確認された。
- 耐侵食機能の持続性について、短繊維混合土被覆工を約 1 年間屋外の気象条件で曝露したところ、被覆工は凍結・融解等により表層から深さ約 10mm ゆるんだものの、ゆるんだ部分より深い層は流速約 5~6m/s まで床掘れが発生しない程度の耐侵食性を保持した。
- 植生については、本研究の被覆工の条件ではセメントの影響は見られず、初期の播種の条件に応じて生育した。実際の堤防に適用する場合は、個々の現場に求められる生育速度に応じて、初期の播種を適切に行うことにより植生は確保することができる。
- 本研究で検討した短繊維混合土被覆工を、実際の河川堤防に導入することを想定した場合、植生に対する適応性や吸い出し以外の変形追随性、透気性、維持管理については、長期的な検討が必要なこと、照査方法が確立されていないことなどから、現場における試験施工等を通じて引き続き調査が必要である。
- 本研究の検討結果と既往の知見に基づいて、試験施工を対象とする短繊維混合土被覆工の設計・施工技術マニュアルを作成した。今後は、試験施工等により技術的知見を集積し、実用化を図っていきたい。

⑤本研究は、実物大堤防模型に一定の越流量で二次元的に流し、種々の堤防条件の下で比較検討したものである。破堤進行速度を遅らせる対策工検討の観点からはこのような二次元的な実験である程度十分な結果が得られたと考えている。しかし実現象は、破堤進行に伴う堤防天端の低下や流量の増加、さらに破堤開口部の進行が生じること等が考えられる。また越流量やその継続時間が大きく異なる場合も想定される。このような条件下における対策の効果についてはまだ不十分であり、今後、試験施工による分析や三次元実験等による検討の必要性があると考えられる。

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING RIVER LEVEES AGAINST FLOODS

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Project Leader** : Toshikazu Nakamura

**Research Period** : FY2006-2010

**Research Team** :

Advanced technology Research Group (Special  
Unit on Geophysical Exploration)

Material and Geotechnical Engineering Research  
Group (Soil Mechanics and Dynamics , Geology)

Hydraulic Engineering Research Group (River  
and Dam Hydraulic Engineering)

**Abstract** : More frequent concentrated rainfall caused by recent climatic change has increased damage caused by the breaching of river levee. Purpose of this project is to improve flood safety by strengthening of levees. Goals of the project are shown as follows ;

- (1) To improve river levee vulnerability assessment method and prepare the Manual of River Levee Investigation Using Integrated Physical Investigation Technology.
- (2) To improve levee strengthening measures against seepage
- (3) To improve levee strengthening measures against erosion due to overflow of river water

**Key word** : river levee, flood safety, vulnerability assessment, integrated physical investigation technology, levee strengthening measures