

粘り強い河川堤防の大規模越水実験 ～裏法面に吸出し防止材又はブロックマットを用いた事例～

三好朋宏・西嶋貴彦・福島雅紀

1. はじめに

越水に対して堤防を強化する構造については、我が国では、約50年以上前から検討されている。しかし、強化対策の効果の発揮に幅や不確実性があることが実験で確認されていることに加え、越水という現象が比較的稀であり、現地で強化対策の効果を検証できる機会が少ないこと等から、未だ設計できる段階には至っていない。一方で、令和元年東日本台風による洪水被害（142箇所の堤防決壊のうち122箇所の堤防決壊の主要因が越水とされた）を契機に、改めて越水に対して堤防を強化する必要性が認識されている。

既往の研究や過去から試験的に施工されてきたアーマー・レバー、フロンティア堤防の構造¹⁾は表面被覆型の堤防強化対策である。国総研では、表面被覆型の堤防強化対策の構造検討手法を確立すること、及び民間企業等による技術開発の参考とすることを目的に越水実験を行い、実験結果を技術資料等としてとりまとめた²⁾。

令和5年3月1日に実施された第2回河川堤防の強化に関する技術検討会では、粘り強い河川堤防に関する技術の公募を行う際の基本的な考え方が示され³⁾、同年3月10日より技術の公募が開始された。公募要領には、技術資料等が参照されている。公募された技術の評価の目安は、越流水深30cmの外力に対して、越流時間3時間は越水に対する性能を維持することとしている。

本報では、様々考えられる表面被覆型の構造のうち、一例として、裏法面を吸出し防止材で被覆する構造の実験2ケース（ケース1、ケース2）、裏法面をブロックマットで被覆する構造の実験1ケース（ケース3）の実験結果及び得られた課題について紹介する。

2. 吸出し防止材の越水実験結果

2.1 実験概要（ケース1）

高さ6m、幅5m、長さ65mの大規模堤防模型実験水路（以下「実験水路」という。）に、図-1及び写真-1に示す堤防模型Iを製作した。天端保護工としてアスファルト舗装、法肩保護工として法肩ブロック、裏法保護工として吸出し防止材、法尻保護工としてドレーン工を設置した。また、吸出し防止材の上に50cmの覆土を実施した。実験に用いた吸出し防止材は、幅2m、長さ10mであるため、裏法面を被覆するにあたって、堤防縦断方向に2箇所、堤防横断方向に1箇所の重ね部が存在する（計6枚使用）。堤防縦断方向には15cm、堤防横断方向には30cm重ねて設置した。吸出し防止材の厚さは10mm、開孔径は0.2mm以下のものを使用した。表法面には、実験の効率化のため固定部を設けており、表法面からの浸透は考慮していない。これは、実際の堤防においても、耐浸透性能が問題となる場合には、表法面に遮水シートを設置したり、裏法尻にドレーン工を設置したりするなどの対策を実施し、浸潤線を上昇させないように設計されることを考慮し、実験上実施したものである。

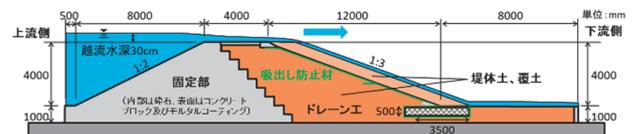


図-1 堤防模型Iの概略図

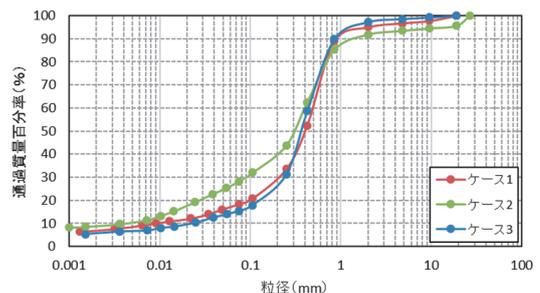


図-2 実験に用いた土の粒度分布

築堤にあたっては、図-2に示す粒度分布の土を用いて、実際の堤防と同様に、締固め度が90%以上となるように施工管理を行いつつ、厚さ30cm毎に締固めた。

越水が生じると、裏法面には越流水によるせん断力が作用し、堤体土羽表面が侵食される。本構造では、吸出し防止材によって堤体土に作用する流速を低減させ、その結果として裏法面に作用するせん断力を低減し、堤体土の侵食を抑制するものである。したがって、越流水が裏法面に作用した時の吸出し防止材の安定性を確保することが重要である。そのため、吸出し防止材の上流端部は天端舗装の下や法面部に差し込み、越流水が作用した場合でもずり落ちないように差し込み長を確保した。また、法肩部には法肩ブロックを配置し、法肩部から裏法部に越流水が滑らかに流れるよう留意した。

堤防模型製作後、通水を開始し、越流水深が30cmとなるまで流量を増加させ、越流水深が30cmとなった段階から合計3時間の通水を実施した。その後、堤体土の耐侵食力を確認するため、吸出し防止材を剥ぎ取り、再度越流水深30cmで通水した。

2.2 実験結果（ケース1）

越流水深30cmで9分通水後、覆土が全て流出した（写真-2）。覆土の流出過程において、覆土が一部残ることで、不規則な流れが生じ、吸出し防止材の重ね部のズレやめくれが生じた。写真-3に3時間通水後の堤防模型の状況を示す。法肩付近の吸出し防止材は流出しなかったが、吸出し防止材重ね部のズレやめくれを契機として、法尻付近の吸出し防止材が流出した。その結果、堤体土が露出し、越流水が直接作用することによって、堤体土の侵食が見られたことから、越水に対する性能を有するとの評価には至らなかった。そのため、吸出し防止材のズレやめくれが生じないような、重ね部の固定方法等について改善する必要がある。

写真-4には、吸出し防止材を剥ぎ取った後、15分間通水した後の堤防模型の状況を示す。裏法面の半分程度が流出しており、堤体土のみでは侵食を抑制できないことを確認した。



写真-1 堤防模型 I の完成時の状況



写真-2 覆土流出後の状況



写真-3 3時間通水後の状況



写真-4 吸出し防止材剥ぎ取り後15分通水後の状況

2.3 実験概要（ケース2）

ケース2の実験は、裏法面を770kg/m²のコンクリートブロックで被覆した構造の実験を行った後にコンクリートブロックを取り除いて、継続して実験を行っている。図-3及び写真-5に堤防模型IIの概略図を示す。堤防模型IIは、堤防模型Iの裏法面勾配を2割に変更し、吸出し防止材の重ね部にズレやめくれ防止のためアンカーピンを設置した構造である。堤防模型Iに比べ、勾配が急であるため、裏法面の等流流速はより速くなるが、実験ケース数が限られるため、より厳しい条件でアンカーピンの効果を確認することとした。写真-5の赤点がアンカーピンの設置位置である。アンカーピンは、直径10mm、長さ500mmの鉄筋（図-4参照）を使用した。アンカーピンの設置間隔の検討のため、堤防縦断方向に2箇所ある重ね部のうち1箇所は1mピッチ、もう1箇所は2mピッチでアンカーピンを設置した。なお、覆土は省略した。

築堤にあたっては、図-2に示す粒度分布の土を用いて、ケース1と同様の方法で製作した。

堤防模型製作後、ケース1と同様に越流水深30cmで合計3時間の通水を実施した。

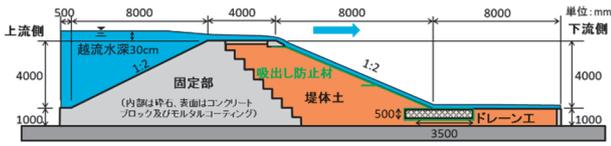


図-3 堤防模型Ⅱの概略図

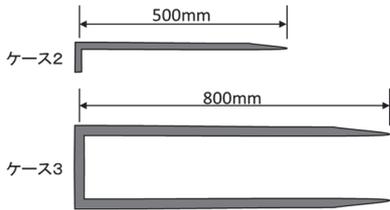


図-4 実験で使用したアンカーピンの形状



写真-5 堤防模型Ⅱ完成後の状況

写真-6 3時間通水後の状況

2.4 実験結果（ケース2）

写真-6に、3時間通水後の堤防模型の状況を示す。吸出し防止材の重ね部のズレやめくれがみられず、アンカーピンによって重ね部のズレやめくれを防止する効果が見られた。なお、アンカーピンの設置間隔による違いは見られなかった。

なお、ケース2については、実験工程の都合上、吸出し防止材を剥ぎ取り、土堤のみの状態での実験ができなかった。また、堤防模型Ⅰに比べ、ブロックの重量によって、土が締固められた状態であり、土堤そのものが、侵食に対して強かった状態での実験結果であることに留意する必要がある。

3. ブロックマットの越水実験結果

3.1 実験概要（ケース3）

実験水路に図-5及び写真-7に示す堤防模型Ⅲを製作した。堤防模型Ⅲは、堤防模型Ⅰの裏法面保護工をブロックマットに変更した構造である。

裏法保護工には、吸出し防止効果を有するフィルターシート（不織布）と多数の小型コンクリートブロックを一体化したブロックマットを用いた。

実験に用いたブロックマットは、幅1.6m、長さ3.4mであるため、裏法面を被覆するにあたって、堤防縦断方向に2箇所、堤防横断方向に3箇所の重ね部が存在する（計12枚使用）。フィルターシートの厚さは3mm程度であった。

ブロックマットの水利特性値を用いて、護岸の力学設計法を援用し、滑動に対する安定性を検討すると、ブロックマット単体では安定しない結果となった。そのため、ブロックマットはアンカーピンで固定することによって、安定性を確保する構造とした。アンカーピンは、ブロックマットの固定に一般的に用いられる直径16mm、長さ800mmのコの字型の鉄筋（図-4参照）を使用した。アンカーピンの滑動に対する抵抗力（軸直角方向の支持力）は、港湾構造物設計基準を準用し、算出した。

築堤にあたっては、図-2に示す粒度分布の土を用いて、ケース1と同様の方法で製作した。

堤防模型製作後、ケース1と同様に越流水深30cmで合計1時間程度の通水を実施した。

3.2 実験結果（ケース3）

写真-8に越流水深30cmにおいて、合計1時間程度通水後の堤防模型の状況を示す。ブロックマットの境界部から土砂の吸出しが生じ、徐々に、ブロックマットの表面にも凹凸が見られるようになった。1時間経過後には、流下方向を向いて左側の堤体が大きく侵食されたことから越水に対する性能を有するとの評価には至らなかった。ブロックマットは、堤体土の侵食に伴い、徐々に沈下したが、アンカーピンにより固定されていたため、滑動はしなかった。

堤体土の吸出し、侵食を軽減するためには、吸出し防止材等によって、堤体土の吸出しを抑制することや堤体土羽表面に作用する流速（ブロックの隙間等から吸出し防止材等に浸透した流れによって、吸出し防止材等と堤体土との境界部に作用する流速）を低減することが重要となる。堤体土の吸出しの抑制効果については、吸出し防止材等のシート材の開孔径等が関係すると考えられ、堤体土羽表面に作用する流速低減効果については、シート材の厚さ等が関係すると考えられる。しかし、フィルターシートには、開孔径の規定がなく、大きな開孔径となっていた可能性があること、

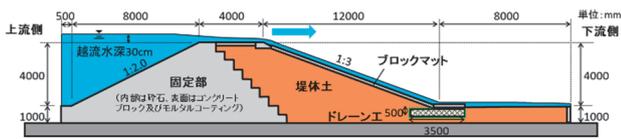


図-5 堤防模型Ⅲの概略図



写真-7 堤防模型Ⅲ完成後の状況



写真-8 1時間通水後の状況

フィルターシートの厚さが3mm程度と薄かったことが堤体土の侵食が進行した要因の1つと推測される。このうち、シート材による流速低減効果については、厚さの異なる複数の吸出し防止材や材質の異なる他のシート材を用いた堤防越水実験によって、その影響を確認しているが、詳細は別に述べることとする。堤体土の侵食を軽減する方法としては、現状、フィルターシートを厚くする又は、ブロックマットの下に吸出し防止材を敷設する対策若しくは、堤体土表層の土を粘性土で置き換える等の対策が考えられる。ただし、粘性土で表層を置き換える場合には、川表から堤体内に浸透した水の排水を阻害するなどの耐浸透性能に対する悪影響がないか確認する必要がある。

4. まとめ

本報では、表面被覆型の堤防強化構造として、裏面に吸出し防止材を用いた構造と、ブロックマットを用いた構造を対象とした大規模越水実験の概要と課題を紹介した。なお、ケース1及びケース3の実験結果の詳細については、「粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考資料【表面被覆型】」(<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/download.html>)を参照されたい。ケース2の結果については吸出し防止材による表面被覆型の構造を改善する上で活用する予定である。

冒頭に、粘り強い河川堤防の技術の公募を開始していることを述べた。現場の条件に応じて経済的、かつ効果的な構造が選択可能になるような粘り強い河川堤防の構造が多数提案されることを期待する。

謝 辞

関東地方整備局河川工事課及び江戸川河川事務所からは築堤に用いる堤体土を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会、2020。
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/index.html
- 2) 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室、国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ（土質・振動）：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）、令和5年3月。
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：河川堤防の強化に関する技術検討会、2022。
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/teibo_u_kentoukai/index.html

三好朋宏



国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室主任研究官
MIYOSHI Tomohiro

西嶋貴彦



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室 交流研究員、現 共和コンクリート㈱ 技術部
NISHIJIMA Takahiko

福島雅紀



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室室長、現 信濃川河川事務所 所長、博士（工学）
Dr. FUKUSHIMA Masaki