

河川堤防の浸透・侵食現象の観測に関する 実大規模モデルによる考察

FULL-SCALE MODEL EXPERIMENT OF THE SEEPAGE / EROSION MONITORING SYSTEM

佐々木博明¹・新村卓也²・増山博之¹・上村雄介¹・渡邊眞道³・藤堂正樹⁴

Hiroaki SASAKI, Takuya NIMURA, Hiroyuki MASUYAMA, Yusuke UEMURA,
Masamitsu WATANABE and Masaki TODO

¹正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 首都圏統括本部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

⁴正会員 博士(工博) パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

Development of a real-time seepage / erosion monitoring system for river embankments enables quick and appropriate measures to prevent floods at their initial stages. Flood evacuations are to be carried out more promptly, as the residents are expected to be provided with useful information.

In-situ seepage / erosion monitoring systems are running in some rivers, but they are yet to be tested by a significant flood.

Practicality and long-term stability of the system are discussed in this paper, based on a full-scale model experiment for the seepage monitoring system and an in-situ field experiment for the erosion monitoring system. The former experiment demonstrated the accuracy in detecting water levels, reliability of the measurements and the long-term stability of the system, under conditions where water levels fluctuate widely in the embankments. In the latter experiment, the erosion depth and the erosion rate during a flood were successfully measured and the practicality of the system was demonstrated.

Key Words : River embankments, monitoring system, erosion, in-situ experiment, model experiment, observing system

1. はじめに

河川堤防は一旦破堤すると大規模なはん濫被害を引き起こす要因となるため、その安全性の監視が今後の河川管理に必要不可欠である。洪水時に河川堤防の浸透および侵食状況をリアルタイムに把握・予測するシステムが構築できれば、水防活動の初動体制を迅速かつ適切に行うことが可能となる。さらに住民の避難勧告が必要となる際の情報提供能力が格段に向上するものと考えられる。

既に実河川実現場へ導入している河川堤防の浸透・侵食に対するリアルタイム・観測システムは、洪水が発生していないためにその検証が行われていなかった。

本論は浸透および侵食に対する観測システムの実用性と長期的な安定性の問題について、実物大スケールでの模型実験と、実河川での現地実験から検証することを目

的とする。なお、その観測システムとは、今後の河川堤防の維持管理の高度化に向けて、洪水時における堤防の浸透および侵食実態をリアルタイムで観測ができ、また、河川事務所で一元管理できる観測システムの開発を共同で行ったものである。

具体には、まず堤体内の水位(浸潤線)観測については、堤体の透水係数の異なる2種類の大型堤防の実験模型を用いて、洪水時の状況を繰返し再現した検証実験を約2年間にわたり行い、堤体内水位を適切に把握するための浸透観測システムについて検討を行った。

なお、本実験は平成17~19年度に、独立行政法人 土木研究所材料地盤研究グループ(土質)、財団法人 国土技術研究センター、及び民会8社との間で実施した共同研究に参画し実施したもので、弊社が実施した内容について検討を行った。加えて、浸透観測システムについては実河川での現地実験結果からも検証を加えた。

b) 水位計の乾湿繰返し実験

図-4に実験施設の概要を示す。本実験は堤体内の乾湿繰返しによる計測器の長期的安定性およびその再現性を確認することを目的に、土研屋外の実験水槽を利用して、今回使用した水圧式水位計を設置し、給排水による乾湿繰返しを約1年間に渡って行った。

実験は水深4mを6時間かけて上昇させ、18時間維持した後に5時間かけて下降させ、次の実験まで乾燥状態を概ね1ヶ月維持する方法を1サイクルとして9サイクル行った。

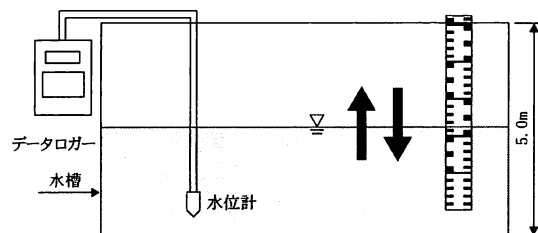


図-4 水位計の乾湿繰返し実験

c) 現地浸透実験

図-5に砂質土堤をモデル化した実大規模の現地実験堤を示す。実験堤は堤体、基礎地盤ともに砂質土である。

透水係数は基礎地盤 $k=1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、堤体 $k=4.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ の細粒分含有率20%以下の砂堤である。

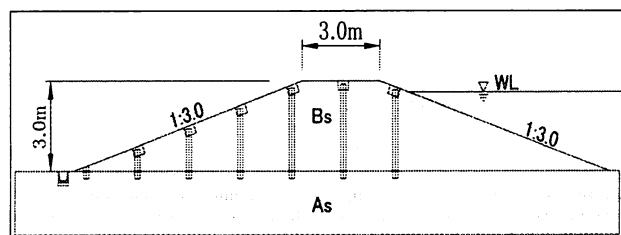


図-5 現地浸透実験堤

(2) 侵食に関するモデル実験の概要

a) 侵食センサーの特徴と原理

写真-2に実用化に向けて開発した侵食センサーを示す。侵食センサーは実際の流水の変化による侵食実態を妨げないように、観測地点の平均粒径程度の河床材料をセンサーに使用している。この自然石を高さ調整用のスペーサーを返して左右2本の拘束棒で挟みながら所定の高さなるように積み上げ一体で連結固定する。

連結した拘束棒は、侵食センサーを一体で吊上げることができ、所定の位置に据付した後に、簡単に引抜けるような構造に工夫をはかった。

また、侵食センサーの特徴は縦置き、あるいは横置きでの設置が可能であり、河岸侵食（側方侵食）および堤防侵食（直接侵食）のいずれの侵食形態も観測できるシステムである。

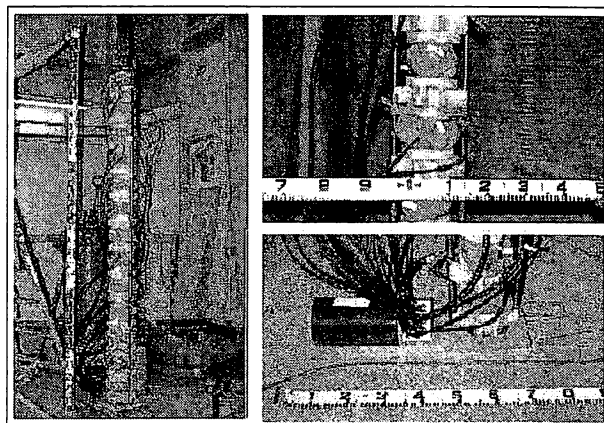


写真-2 侵食センサー（ワイヤレスタイプ）

図-6に侵食センサーの原理を示す。センサー部は電極を取付けた自然石を、受信装置に連結した簡単な構造であり、洪水時に侵食センサー部の自然石が流出すると瞬時に検知できるようになっている。センサーとなる自然石の大きさは、数cm程度の粒径でも加工が容易であることから、緩流河川の利用も十分に可能である。

本システムの特徴は、従来の地上無線を利用したセンサーのように、センサー部が水面に浮上しないと通信ができない欠点を、無線伝送が可能な地中無線装置を採用することで地中や水中においても通信が可能となった。このことは、侵食センサーを埋設した状態で、観測システムの稼動状態が通年で把握できるものであり、本システムの最大の特徴である。

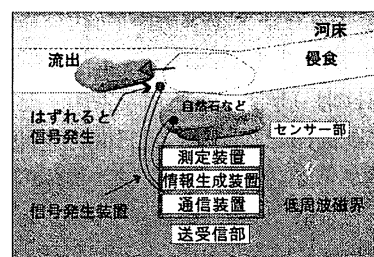


図-6 侵食センサーの原理

b) 現地侵食実験

実洪水を対象とした現地観測を行った。図-7に侵食センサーの設置概要を示す。

侵食センサーは堤防のり尻から横断方向に、3mピッチの1測線に配置した。深度方向は1mとし、センサーを20cmピッチの5深度に配置した。

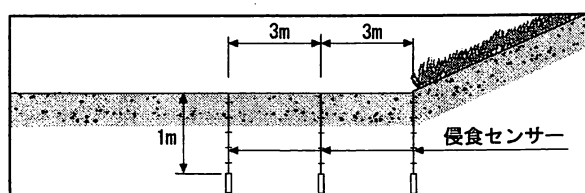


図-7 侵食センサーの設置概要

3. 実験結果および考察

(1) 浸透に関する実験結果と考察

a) 砂堤モデルによる浸透実験

図-8 に約2年間、繰り返し行った半断面堤防模型における堤体内の水位計測結果を示す。

外力条件は1山洪水の台形波形を基本とし、実際に発生する可能性のある2山洪水も対象とした。各水位計測値の経時変化は、堤体の初期含水比の影響を受けて、途中段階に若干バラツキが認められるものの、浸潤線が定常になるに連れて各地点それぞれの計測値の差は小さくなり、ピーク付近では全体的に整合一致していることが認められる。

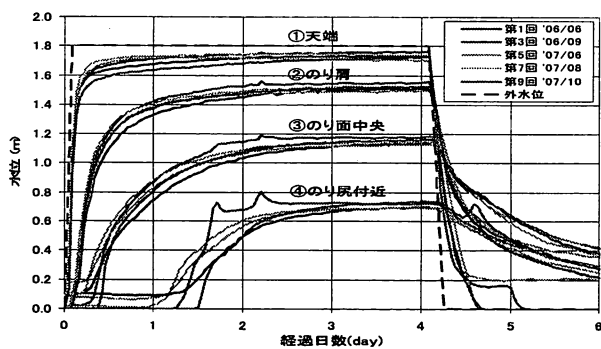


図-8 砂堤モデルによる浸透実験結果

b) 粘性土堤モデルによる浸透実験

図-9 に全断面堤防模型における水位計測結果を示す。

外力条件は砂堤（半断面）とは異なり、ピーク水位の継続時間を半断面の4日間から17日間に延伸させた。各計測値の開始から立ち上がり状況は、堤体内の初期含水条件の違いから差異が認められるものの、ピーク時では概ね整合一致していることが認められる。

以上の土質の異なる2種類の堤防実験結果より、システムの長期的な安定性が認められた。

また、多チャンネル送信機を用いたデータの集約送信についても特に問題はなく、高い実用性が認められた。

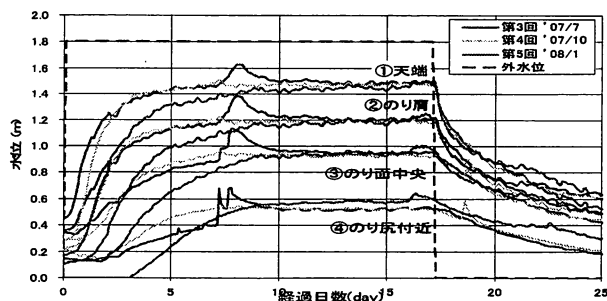


図-9 粘性土堤モデルによる浸透実験結果

c) 水位計の乾湿繰返し実験

図-10 に示すように水位計の乾湿を1サイクルとして、約1年間で9サイクル実施した。その結果を図-11 に、9サイクル分を重ねて水位と時間の関係で示す。

図-11 より、計測結果は水深4mのピーク水位時で最大2cm (0.5%) 程度と僅かに誤差が認められた。また、水位計は外水位の上昇、下降に追従しており、再現性に問題のないことを確認した。

さらに、約1年間の長期に亘る乾湿繰返し実験においても温度ドリフト等の影響によるゼロ点に誤差を生じることなく、適切に繰返し計測ができることを確認した。

従って、本実験に用いた水圧式水位計は、乾燥状態から乾湿を繰返すような条件下においても長期的な安定性および再現性に問題のないことが認められた。

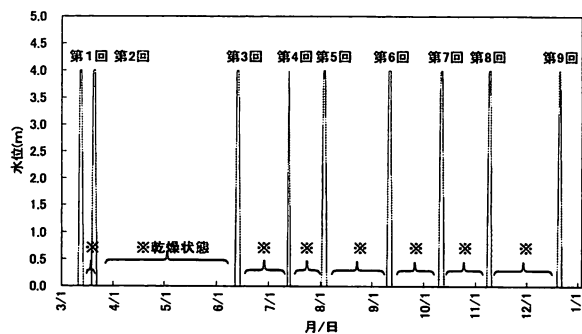


図-10 水位計の乾湿繰返し実験サイクル

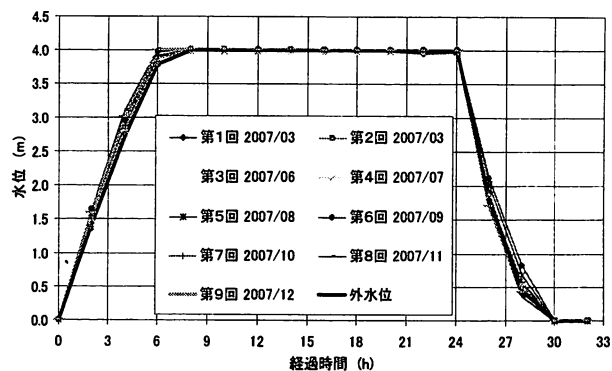


図-11 水位計の乾湿繰返し実験結果

(2) 現地実験結果と考察

a) 現地浸透実験

図-12 に実洪水作用時における堤体内水位（浸潤線）の観測値を示す。図中には実洪水波形を用いた非定常の飽和・不飽和浸透流解析結果を併せて示す。解析値は堤体の透水係数 $k=4.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の浸潤線（下側の浸潤線ライン）に加えて、堤体土の細粒分含有率が20%以下と比較的粒径が揃っている砂堤であることを勘案して、1オーダー高く設定した $k=4.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ の解析値（上側の浸潤線）を参考に示した。

これより、観測値は解析値に比べて川表と川裏付近で

高くなっていることが認められる。堤防の浸透点検では試験値を基本に設定しているものの、今回のケースのように、土質試験結果を用いた解析値は、浸透に対する安全性を危険側に評価することもあり得ることが認められた。このことは観測の重要性を裏付けるものである。

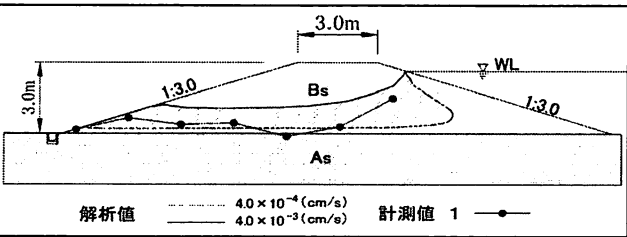


図- 12 現地浸透実験結果

b) 現地侵食実験

図-13および図-14に実河川での侵食センサーによる観測結果を示す。堤防のり尻から3mの位置（②地点）では、20cm程度の洗掘を受け、その3分後には同位置で深さ40cmまで洗掘を受けていることが認められる。

さらに、のり尻から6m離れた位置（③地点）では、水深が変化していない状態で、瞬時に深さ60cm程度の洗掘を観測した。この時、洗掘速度は③地点で60cm/min程度、②地点で10cm/min程度であることが観測された。

以上より、従来計測することが困難であった時系列で侵食状況が観測できるとともに、最大洗掘深、洗掘速度が把握できることが認められた。

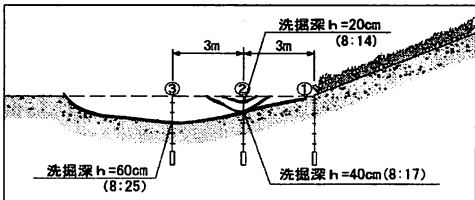


図- 13 侵食センサーの設置概要

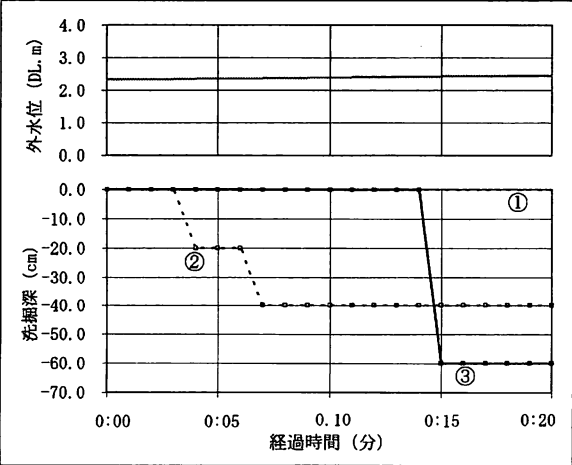


図- 14 実河川での侵食状況観測結果

4. 浸透・侵食観測システムの概要

図-15 に河川堤防の浸透および侵食状況を一元管理するための観測システムの概要を示す。

侵食センサーの下部に取付けた通信装置は、センサーである自然石が流されると、その信号を感知し瞬時に受信アンテナへ送信する。その信号は受信アンテナから光ファイバーを経由し、河川事務所等へ送信される。河川管理者は手元のパソコンで洪水時における侵食の状況と堤体内の水位状況がリアルタイムに観測できるシステムである。

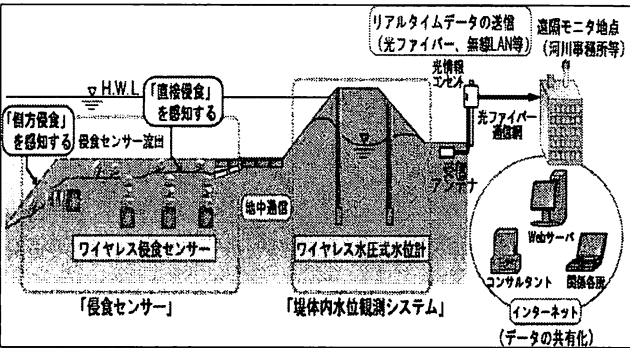


図- 15 浸透・侵食観測システムの概要

図-16 に浸透・侵食状況のリアルタイムでの観測画面を示す。表示画面は観測位置図と堤防横断面図に浸透・侵食状況のリアルタイムを表示したものである。

これは、手元のパソコンに送信された数値データでは現在の堤防の状況が瞬時には判別が付かないことから、観測地点の堤防断面図で示し、一目でその時点の堤体浸潤線の状況や侵食状況、洗掘深が分かるように工夫を図った。また、データベース化を図るために、同時にCSV方式でも出力が可能となっている。

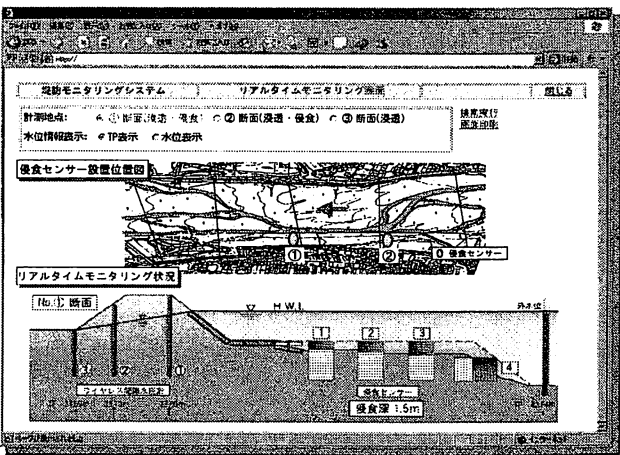


図- 16 浸透・侵食観測システムの概要

5. おわりに

(1) 浸透観測システムの適用性

浸透に関する観測システムについては実物大規模モデルでの土質の異なる2種類の実験堤と、水位計の乾湿繰返しを再現した水槽実験を用いて、最長2年間にわたり検証実験を行ってきた。

その結果、河川堤防への浸透観測システムの適用性について次の2点が明らかになった。

- ・河川堤防への適用性については、地中通信を用いた浸透観測システム、水圧式水位計、観測孔仕様等について長期的な安定性を有しており、実用性に問題ないことを確認した。

- ・今回使用した水圧式水位計は乾湿繰返し実験においても損傷無く、長期的な安定性および再現性が認められた。

なお、本研究の成果は『河川堤体内水位観測マニュアル(案)』および『共同研究報告書「堤防管理技術高度化のための堤体内水位観測方法の開発に関する共同研究報告書」』（(独)土木研究所、(財)国土技術研究センター、民間8社との連名)として取りまとめられた。

(2) 侵食観測システムの適用性

侵食観測システムについては、実河川・実洪水を対象とした現地観測により侵食の実態を把握することができた。

侵食観測システムは洪水時の最大洗掘深が把握でき、護岸の基礎工天端高を検討する際の基礎的なデータとして活用できるなど、有効な観測技術であることが認められた。

今後は、侵食センサーを面的に配置し、平面的な侵食状況を把握するなど、実河川での観測の継続的な実施と観測データの蓄積が期待される。

(3) 浸透・侵食観測システムの実用性

今回、提案実施した浸透・侵食観測システムは、現地観測成果から、実用性が高いことが明らかになった。

今後は実績の蓄積とさらなる改良を加え、洪水時における河川堤防の浸透・侵食状況をリアルタイムに把握・予測が可能なシステムとして構築を進めるなど、河川管理の高度化に向けてさらなる実用化が期待される。

(4) 実堤防の浸透観測の必要性

今回、締固め管理を十分に行って築堤しているモデル実験堤においても、堤体の透水係数は $k=2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ $\sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ と1オーダーの幅があることが分かった。現地での浸透観測実験では、土質試験結果を用いた解析値であっても観測値とは異なっており、実態との乖離は避けられないのが現実である。

今後は、堤防点検によって抽出された弱部箇所や不確実性が残る検討ケースにおいては、浸透安全性を裏付けるための観測に基づく実態把握が必要であり、実堤防での浸透観測が最も重要な視点と考える。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション; 受注に効く新技術、特集●土木工法2006、プロポーザル①、2006.4.28, p58-59, 日経BP社
- 2) 須賀原慶久, 渡邊眞道, 佐々木博明, 増山博之, 新村卓也, 上村雄介ら: 地中無線技術を用いた河川堤防の浸透モニタリングの開発と実験結果; 地盤工学会 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2008
- 3) 渡邊眞道, 佐々木博明, 増山博之, 新村卓也, 上村雄介, 木村茂: 河川堤防の危険度予測を行うための浸透・侵食モニタリングシステム: 3-361, p721-722, 土木学会第63回年次学術講演会(平成20年9月)
- 4) 渡邊眞道, 佐々木博明, 新村卓也, 増山博之, 上村雄介: 河川堤防の浸透・侵食モニタリングシステム: 第8回建設コンサルタント業務・研究発表会(平成20年7月)
- 5) 渡邊眞道, 佐々木博明, 増山博之, 新村卓也, 上村雄介ら: 河川堤防の浸透モニタリングシステムの開発: H-04, p1117-1118, 559, 第43回地盤工学研究発表会(平成20年7月)
- 6) 渡邊眞道, 佐々木博明, 新村卓也, 増山博之: 急流河川用侵食センサーの開発: 北陸技術研究発表会, H18年度建設技術報告(新技術・新工法)
- 7) 渡邊眞道, 佐々木博明, 新村卓也, 増山博之: 急流河川用侵食センサーの開発: 建設コンサルタンツ協会 北陸支部 広報誌「雪の音」
- 8) 独立行政法人 土木研究所 共同研究報告書 第337号: 堤防管理技術高度化のための堤体内水位観測方法の開発に関する共同研究報告書, 「河川堤防における堤体内水位観測マニュアル(案)」. 2008年3月

(2009.4.9受付)