

粘り強い河川堤防における鋼矢板二重壁補強堤防に関する一考察

堤防 鋼矢板 洗掘

日本工営 正会員 ○海野瀬綾乃 大瀧諭
 日本工営 国際会員 李圭太
 日本工営 正会員 岡部貴之 松下朋哉
 名城大学 国際会員 小高猛司
 日本製鉄 国際会員 森安俊介 乙志和孝

1. はじめに

令和元年台風第19号では洪水により全国で142箇所の堤防決壊が発生し甚大な被害が発生した。この堤防決壊の主要因は86%が越水によるものであることから国土交通省では河川堤防を越水した場合においても決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果を発揮する「粘り強い河川堤防」に必要となる性能について技術検討を実施している。これら検討にあたっては、粘り強い河川堤防構造として「表面被覆型」, 「自立型」, 「その他構造」を想定している。本研究ではこれらの中で自立型となる河川堤防天端に鋼矢板二重壁を施した堤防構造を対象として1/15スケールで室内実験を行った研究報告¹⁾(以下, 「越水模型実験」と呼ぶ)を基本モデルとして, 今後の設計に関する基礎資料となることを目的に実物大スケールによる解析的検討を行った。本解析は解析コードALID/Winを用いて, 堤体を弾塑性挙動が表現できる非線形モデル, 鋼矢板を梁モデル, 鋼矢板と堤体との接触部に非線形ジョイント要素を適用した鉛直二次元平面ひずみによるFEM解析を行った。本報は実験結果との比較検討により, 設計照査への解析コードの適用性を考察し, 越水時の堤内地盤洗掘モデルの設定に関する考察を行ったものである。

2. 検討対象モデル・手法

検討対象モデルは越水模型実験が1/15(1/2)スケールであることから, 天端幅, 堤防高, 基礎地盤厚を越水模型実験の寸法に λ を乗じた長さとし, 法勾配は同じ1:2とした。川表川裏の地盤長は越水模型実験とは異なり, 境界条件の影響を及ぼさない目的から両端に50mを付加した。これら検討対象モデルと越水模型実験の寸法, FEM解析ステップを図1に示す。解析ケースは, 川裏の洗掘形状の異なる4ケースを設定した。

物性値を表1に示す。せん断剛性は模型実験の土被りが非常に小さいことから, 比較的小さい N 値となるDunham式(角ばった粒形分布のよい $\sqrt{12N} + 20$)を適用し, ポアソン比(0.333)と変形係数を介して設定した。変形係数は, ケース1は道路橋示方書などで広く一般に用いられている標準貫入試験の N 値より $E_0 = 2800N$ で推定した。ケース2, 3, 4においては, 実験における変状から地盤反力係数とひずみレベルの非線形性を考慮し, 先の道路橋示方書などで示される孔内水平載荷試験で測定した変形係数 $E_m = E_0/4 = 700N$ で推定した。土質モデルの物性値は越水模型実験と同値とした。

川裏側の洗掘形状について, ケース1, 2は越水模型実験で得られた洗掘形状に λ を乗じ, 実大スケールに引き延ばした。形状は実験から得られた値であり, 設計時に一般的な洗掘形状としては推定が困難であることから, ケース3はケース1, 2で設定した洗掘と面積が等価になるよう, 洗掘形状を矩形で置き換えた。一方で, 堤防越水に伴う川裏側の洗掘に関する近年の研究では, 田中ら²⁾により堤防天端における越水時のエネルギー水頭から洗掘深と洗掘長が求められることが示されている。そこで, ケース4ではこの越水模型実験を実大スケールに換算した場合のエネルギー水頭から洗掘深, 洗掘長を算出し, 考えられる最大の洗掘として矩形としたものを洗掘モデルとした。各ケースにおける洗掘形状を図1のステップ③に示す。

3. 検討結果

越水模型実験と実スケールにおける解析結果との比較にあたり, 模型実験の相似則は井合による既往文献³⁾を適用し曲げモーメントは相似比 λ^3 , 変位は相似比 $\lambda^{1.5}$ を用いて実大換算した。図2に変形モードを, 図3に川表, 川裏の鋼矢板における曲げモーメントと変位をそれぞれ示す。検討結果は越水模型実験を再現したケース1~3とも変形モード(モーメントと変位の深さ方向の分布)は実験結果と整合しているが, ピーク値には差異が生じている。変位は地盤の変形係数の推定方法による影響が大きく, 地盤形状が顕著に変化するよ

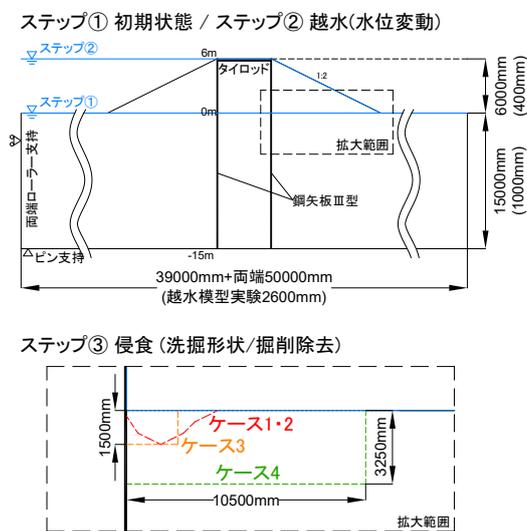


図1 解析モデル

表1 解析に用いる地盤特性値

項目	物性値	
	ケース1	2・3・4
せん断弾性係数 G (kN/m ²)	18656.1	4664.0
湿潤単位体積重量 γ (kN/m ³)	17.4	
粘着力 c (kN/m ²)	3.9	
せん断抵抗角 ϕ (°)	39.6	

うな越水時においては、孔内水平載荷試験で測定した変形係数 $E_m = E_0/4 = 700N$ 相当としたケース 2, 3 が実験結果により近い結果となった。洗掘形状に着目すると、実験による洗掘形状をモデル化したケース 2 の矢板頭水平変位 196.0mm に対し簡素化したケース 3 の矢板頭水平変位は 209.5mm となり、これら変位差は 13.5mm (6.9%) と軽微であった。また、鋼矢板に作用する曲げモーメントも水平変位と同様にケース 2 の川裏矢板モーメントピーク値は 125.7kN*m/m となりケース 3 は 131.0kN*m/m であることから、これら発生曲げモーメントとの差は 5.3kN*m/m (4.2%) と軽微であった。これらより、本解析コードを用いた設計照査において洗掘形状は矩形による簡便化が可能であると考えられる。ケース 3 と模型実験とを比較すると、川裏矢板の実験ピーク値(197.7kN*m/m)とケース 3 との差は 66.7kN*m/m (33.7%) となり顕著な違いとなった。川表矢板では実験ピーク値: -161.2kN*m/m, ケース 3: -66.7kN*m/m となり、その差は 94.5kN*m/m (58.6%) と川裏と同様に顕著であった。一方、水平変位は川裏矢板の実験ピーク値: 233.7mm, ケース 3: 209.5mm となり、その差は 24.2mm (10.4%) と両ケースとも同等である。川表矢板の水位変位は実験ピーク値: 232.2mm, ケース 3: 210.7mm となり、その差 21.5mm (9.3%) で川裏と同様である。これより、ケース 3 の洗掘形状では実験を過小評価する結果となることから、設計時における本手法の適用にあたっては再考する必要がある。洗掘形状を既往研究より大きく設定したケース 4 では、川裏矢板におけるモーメントピーク値は 178.7kN*m/m でありケース 3 と比較して 47.7kN*m/m (36%) 大きい川表矢板のモーメントピーク値は -65.1kN*m/m でありケース 3 と比較して 1.7kN*m/m (2.5%) 大きく、実験結果と同等のモーメントとなった。川裏矢板の水平変位は 333.6mm でありケース 3 と比較して 124.1mm (59%) 大きく、川表矢板の水平変位は 335.9mm であり、ケース 3 と比較して 125.2mm (59%) 大きいことから、実験結果より過大となった。模型実験結果と比較すると変位は大きく算出されているが、モーメントは他ケースと同様に小さい傾向にある。設計照査として考えた場合、モーメントが過少に評価される課題は残るものの、設計時に正確な洗掘形状を設定することの困難さを考慮するとケース 4 の適用性が高いと考えられる。また、鋼矢板二重壁の鋼矢板規格は川裏側がクリティカルと考えられる。

4. まとめ

本研究では、鋼矢板二重壁を施した堤防構造の越水模型実験を再現するための鉛直二次元平面ひずみによる FEM 解析を実施した。解析の結果、変形モードや変位の整合性から、鉛直二次元平面ひずみによる FEM 解析で鋼矢板二重壁の越水時の挙動を解析的に扱うことが可能であり、越水による洗掘形状を簡易な形状(矩形)とした場合においても解析結果に大きな差異はないことが確認できた。これらより、鋼矢板二重壁による粘り強い河川堤防に関する設計照査の解析コードとして鉛直二次元 FEM 解析を用いることが可能であり、越水時の堤内地侵食形状を簡素化することで、解析モデルの設計への適用が可能と考える。今後、①変形係数と許容変位量の設定方法と妥当性評価、②設計照査で用いる洗掘深、洗掘長の設定方法、③越水以外の堤防機能(耐浸透、耐侵食、耐震)に対する評価方法について検討を継続し模型実験と解析から自立型の粘り強い河川堤防に関する設計手法確立に取り組む必要がある。

参考文献

- 1) 持田祐輔, 山崎弘芳, 妙中真治, 藤澤和謙, 高橋章浩: 越水による河川堤防の決壊に対する鋼矢板補強構造の抵抗機構に関する実験的研究, 第9回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.89-92, 2021.
- 2) Tanaka, N., Sato, M.: Scoured depth and length of pools and ditches generated by overtopping flow from embankments during the 2011 Great East Japan Tsunami, *Ocean Engineering*, 109, pp.72-82, 2015.
- 3) 井合進: 1g 場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則, 港湾技術研究所報告, Vol.27, No.3, pp.3-24, 1988.

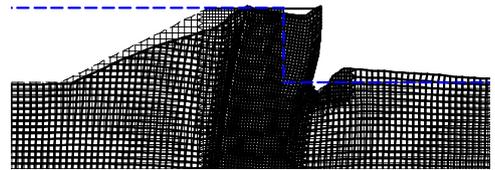


図2 変形モード

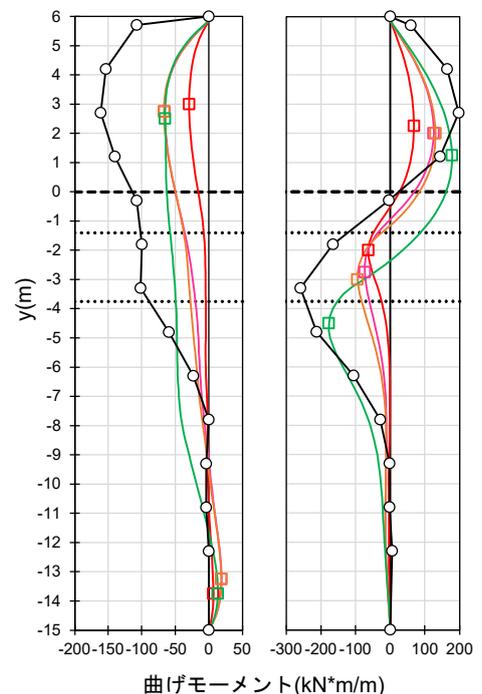
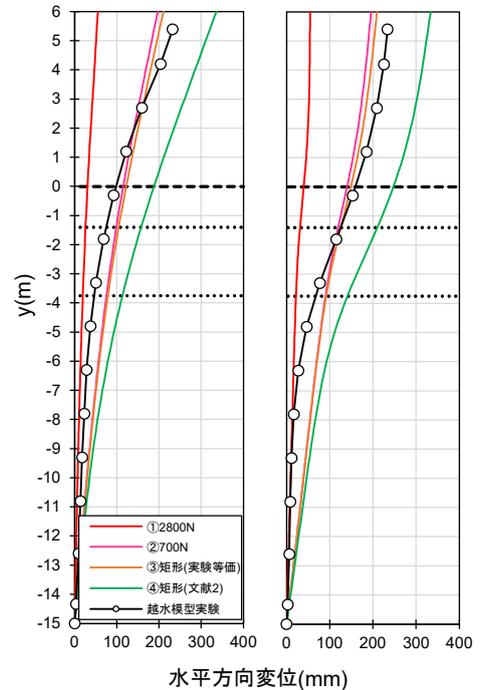


図3 解析結果