

三次元浸透実験に基づく河川堤防の耐浸透性に関する線構造物全体の評価

東京理科大学 学生員 ○町田 陽子
 東京理科大学 正会員 二瓶 泰雄
 東京理科大学 学生員 倉上 由貴

1. はじめに

近年日本各地で発生している集中豪雨により、河川が増水し計画高水位を超える例は少なくない。堤防の浸透により、裏のり面の円弧すべり（のりすべり）やパイピングの発生を促進させ、堤防を弱体化させる大きな要因であり、破堤に至った場合、広域の浸水や家屋流失等の甚大な被害をもたらす。最近では、平成24年の矢部川の浸透破壊が記憶に新しい。そこで、決壊による被害を未然に防ぐために、様々な堤防強化技術の開発が進められている。そのうちの1つであるドレーン工法は堤体内の浸潤面低下を促し、浸透時の不安定化を抑制する効果を有する。しかしながら、河川堤防は全国で約13,000 kmに及ぶ長大な線構造物である一方、決壊幅は一般に長くて数百 m 程度であるため、このような対策工法を効果的に用いる必要がある。すなわち、計画断面の堤防整備を着々と進めると共に、堤防の弱点箇所の抽出や線構造物全体としての堤防強化技術の開発が求められる。土堤の弱点箇所に関しては、①洪水外力が大きいという河川水理学的観点と、②堤体土質による耐浸透性・越水性の安全性が低いという土質力学的観点に基づいて、「線」構造物全体として評価する必要がある。土研グループ¹⁾は②の浸透決壊に着目した数値解析を実施した。福岡・田端²⁾は①を精緻に考慮し浸透破堤確率を評価した。これらを除くと、一つの横断面を対象とした「点」の堤体安全性評価が多く、「線」構造物としての検討事例は非常に少ない。本研究では、②の土質力学的観点に着目し、線構造物としての河川堤防の耐浸透性評価を行うための三次元浸透実験を行う。そのため、堤体の縦断方向長さを堤体高さや横断幅より十分長くした堤防模型を用いた三次元定水位浸透実験を対象とした。

2. 実験方法

(1) 実験方法の概要

図-1に示すように、本学所有の大型水路（長さ20 m、幅1.0 m、高さ1.8 m）に、縦断方向に長い模型堤防を設置した。模型堤防の寸法としては、図-2に示すように、高さ H は0.20 m、天端幅は0.20 m、裏のり面は2割勾配とし、縦断方向長さ L は10.0 mであり、基礎地盤厚さは0.10 mである。堤外地水位を一定に保つ定水位浸透実験を行うため、表のり面は作製せず、堤体は表のり肩部から裏のり尻部までとなっている。堤外地水位は基本的に0.26 mで固定し、状況に応じて0.28 mまで上昇させた。

堤体条件としては、施工方法が異なる二つの土堤（Case1, 3）と、標準型ドレーン工を部分的に設置した場合（Case2）の計3ケースとする。堤体材料は全ケースにて銚田砂（ $D_{50} = 0.173$ mm）を使用し、締固め度 D_c は90%とした。土堤のCase1では、縦断方向に1 m毎に区切りながら模型を作製し、作業の関係で基礎地盤の一部を飽和させて作製した。同じ土堤のCase3ではこの区切りを無くして縦断方向に一様にし、かつ、最適含水比（=13.5%）で締固めた。また、Case2では、Case1の実験後に、のりすべり部分の修復をし、その後裏のり尻部にドレーン工（碎石（13–20 mm）を3枚の不織布で巻いて作製）を設置した（配置の詳細は図-6を参照）。

(2) 計測とデータ解析

計測として、まず、堤体内浸潤高さの縦・横断分布を計測するために、小型水位計（HOBO-U20, Onset社製）を水路底面に設置した（最大34本）。また、実験前後の堤体形状を把握するためにレーザー変位計（IL-600, KEYENCE社製）を用いた。デジタルビデオカメラを水路上部・側面に設置し、堤体表面浸透・侵食状況を計測した。また、浸潤面高さデータを用いて、堤体内の透水係数を内田の理論³⁾に基づいて逆算した。

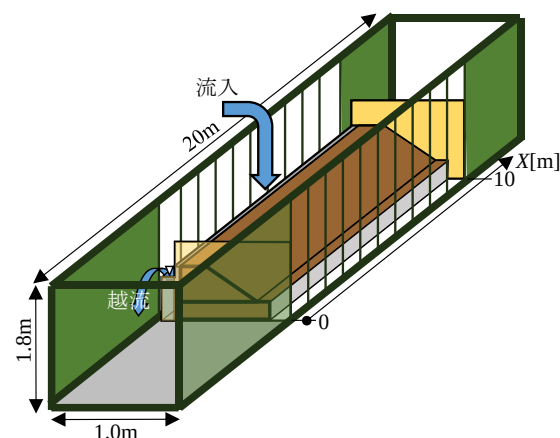


図-1 浸透実験概要

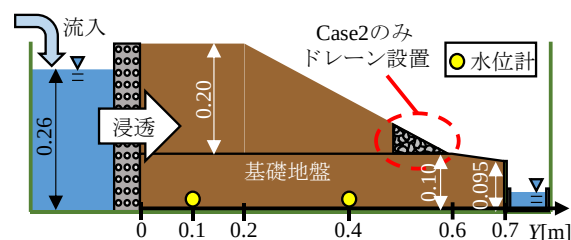


図-2 模型堤体の横断面図（単位：m）

キーワード 線構造物 堤防 浸透 洪水 決壊

〒278-0022 千葉県野田市山崎 2641 五号館三階水理研究室 東京理科大学 TEL04-7124-1501(内線 4069)

3. 実験結果と考察

(1) 土堤における浸潤面高さの時空間分布

土堤における浸透挙動の縦断方向変化の基本特性を把握するために、縦断方向に一樣に作製された Case3 における浸潤面高さの時空間コンターを図-3 に示す。ここでは、のり面中央 ($Y = 0.40\text{m}$) の縦断面を対象に、17 台の水位計で計測されたピエゾ水頭を浸潤面高さで見なし、縦軸を経過時間 t 、横軸を縦断距離 X としたコンターとして表示する。これより、堤体端部に近い $X < 2.0\text{m}$ 、 $X > 8.0\text{m}$ の縦断区間では、コンター線の間隔が時間方向に密になる (図中白矢印)。すなわち浸潤面高さが時間的に急に増加するパターンとなる。これは、縦断方向に変化がない場合の二次元的挙動に近い。その間の区間 ($2.0 < X < 8.0\text{m}$) では、浸潤面の到達後に緩やかに増加し (コンター間隔が粗、図中赤矢印)、縦断方向に浸潤面高さの非一樣性が顕著であり、三次元的挙動が支配的である。

(2) 透水係数の縦断方向変化

この浸潤面高さデータに内田の理論³⁾を当てはめ、Case3 ののり面中央における透水係数を算定した結果を図-4 に示す。なお、Case1 の結果も図中に表示されている。Case1 ではのり面中央には水位計を設置していなかった。そこで、Case3 での各縦断位置の透水係数と裏のり尻への浸潤面到達時刻 (ビデオデータより算出) の相関式を作製し、それと Case1 の浸潤面到達時刻から透水係数を推定した。これより、浸潤面挙動と同様に、透水係数は縦断方向に一樣になっておらず大きく変化している。得られた透水係数の縦断方向平均値と標準偏差は、Case1 では各々 3.4×10^{-5} 、 $6.8 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 、Case3 では各々 4.2×10^{-6} 、 $1.3 \times 10^{-6}\text{m/s}$ となった。このように、透水係数の標準偏差は、縦断方向に区切りを設けて作製された Case1 の方が一樣に作製された Case3 よりも 5 倍も大きく、Case1 の三次元的浸透挙動が卓越していることが定量的に確認された。

(3) 裏のり面ののりすべり発生状況

Case3 では、裏のり面にてのりすべりは発生しなかったが、Case1 でほぼ全域にわたりのりすべりが発生した。その Case1 におけるのりすべりの初期発生過程と浸潤面の進行過程を図-5 に示す。これより、浸潤面が早く到達しているところとすべり発生位置は概ね対応している。また、これらの間隔はおおよそ 1m であり、堤体作製時の区切り位置と対応する。これより、築堤上の縦断方向の不連続部が相対的な透水係数の増大とのりすべりの発生点となり、線構造物としてみたときの堤防弱部となる可能性の一つが示唆された。また、Case2 においてドレーン工を部分的に配置した箇所ではのりすべりは見られず (図-6)、部分的なドレーン工による線構造物全体としての浸透安全性の向上につながることも示された。

4. まとめ

土堤の透水係数を求めた結果、縦断方向に区切りを設けて作製された Case1 の方が一樣に作製された Case3 よりも 5 倍も大きく、Case1 の三次元的浸透挙動が卓越している。築堤上の縦断方向の不連続部が相対的な透水係数の増大とのりすべりの発生点となり、線構造物としてみたときの堤防弱部となる可能性の一つが示唆されたが、その対策としてドレーン工を部分的に設置するだけでものりすべり抑制に大きく寄与する。

参考文献

1) 杉田ら : <https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2008/pdf/2008-2-1.pdf>, 2) 福岡・田端 : 河川技術論文集, Vol.22, pp.261-266, 2016, 3) 内田 : 土木学会誌, Vol. 37, No.2, pp.10-14, 1952.

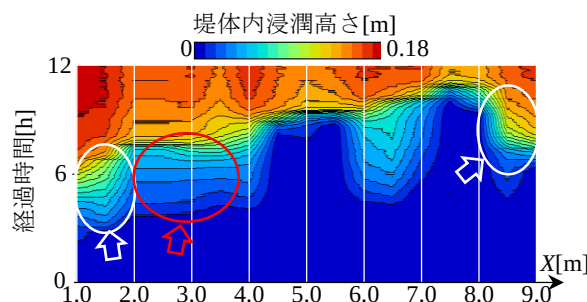


図-3 浸潤面高さの時空間コンター (Case3, $Y=0.40\text{m}$)

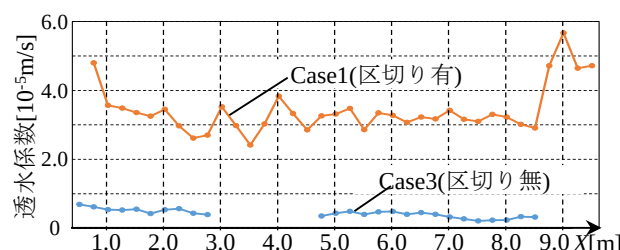


図-4 土堤における透水係数の縦断変化 (Case1, 3)

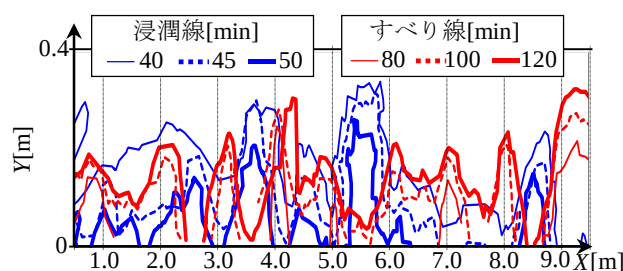


図-5 裏のり面の浸潤面とのりすべりの進行状況 (Case1)

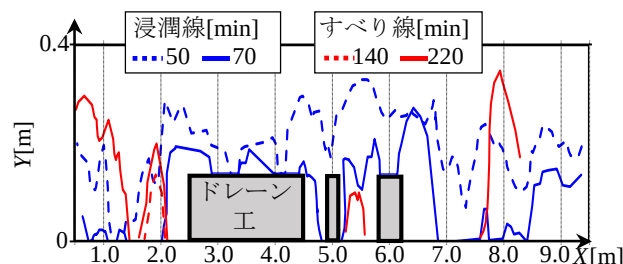


図-6 Case2 におけるのりすべり状況