

PDF issue: 2025-04-25

堤体内における浸潤面形成過程の再現

坂本, 諭

河井, 克之

(Citation) 神戸大学都市安全研究センター研究報告,18:54-65

(Issue Date) 2014-03

(Resource Type) departmental bulletin paper

(Version) Version of Record

(JaLCDOI) https://doi.org/10.24546/81011443

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011443



堤体内における浸潤面形成過程の再現 Representation of seepage face formation on river dike

坂本諭¹⁾ Satoshi Sakamoto 河井 克之²⁾ Katsuyuki Kawai

概要:河川堤防は土木分野において長い歴史を持った構造物である.それ故に自然災害によって損傷する毎に改 修が行われており,内部の構造を明確に把握することが困難な土構造物である.2011年3月に発生した東日本大 震災では,東北地方にある河川堤防は大きな被害を受けた.そのほとんどが堤防の沈下・陥没などであり,震災 後の調査から河川堤防下の基礎地盤だけでなく,河川水位より高い位置での堤体自体の液状化も確認されている ¹⁾.また,震災復旧後の実大実験²⁾から,堤体内には常時高い地下水位が存在することが分かった.本研究では, 土/水/空気有限要素解析³⁾を用いて,堤体内に保持される浸潤面の再現シミュレーションを行うものである.

キーワード:浸潤面、河川堤防、不飽和土

1. 研究背景

2011 年 3 月に、東日本大震災が発生し、多くの人命を奪った.その被害の大部分は、太平洋から押し寄せた津波 によるものと言われ、これは被害が海岸部に集中していることからも分かる.この地震は、兵庫県南部地震や新 潟県中越地震の様な直下型地震ではなく、太平洋沖に存在する海溝のずれにより発生した海溝型地震である.こ の地震ではこれまでの地震とは違い、地震動の継続時間が長く、余震回数が多いなどの特徴があった.東北地方 では、この地震に伴い多くの土木構造物が被害を受けた.河川堤防においても、この被害は多数報告¹⁾された.こ れまで、地震による河川堤防の被害は、主に堤体下部に存在する基礎地盤の液状化であった.これは、基礎地盤 が河川水位よりも低い部分にあること、そしてその基礎地盤は、堤防を人為的に築くよりも前に、上流部から河 川の流れによって運搬された土砂で形成されていることから、液状化しやすい地盤の条件を概ね満たしているこ とにあった.しかし今回の地震では、基礎地盤そして平常時の河川水位よりも高い位置にある堤体自身の液状化 が報告された.被害が大きかったものの一つに、宮城県阿武隈川枝野地区の河川堤防がある.ここの河川堤防は、 長さ約 8km,に渡り、天端部分が 20~60cm 程度沈下した.この堤防の沈下原因が、堤体の液状化と言われている ²⁾. 震災後の復旧工事の際,この地区において,試験的に堤体内部の状態を測る長期的観測試験²⁾が行われた.図 -1 に復旧の後から観測された降雨量と,堤体内の地下水位のデータを示す.これを見てみると,観測開始から, 特に堤体中央部において基礎地盤よりも高い位置に地下水位があることが分かる.また,降雨による地下水位の 変動が,各観測点で見られる.このことから,常時堤体内に地下水位が存在することが分かった.図-2 は平成 25 年9月 25日に観測された堤体内水位とその浸潤面の予想図である.これまで,河川堤防の堤体内には洪水時以外 に地下水位が存在しないという前提のもと,性能評価や制度設計が行われてきた.しかし,これまで考えられて きたものと,実際の河川堤防の状態に大きな差があることが分かった.このことから,実際の現象を明らかにし, 今後発生する可能性がある自然災害に対して的確に対処していく必要があると考えられる.



図-2 平成 25 年 9 月 25 日に観測された堤体内水位の推定図 3

2. 長方形断面を用いた河川水流入シミュレーション

(1) 解析概要

ここでは洪水時に河川水が堤体内に流入することを想定した解析を行う.解析対象は,高さ 5.0m,幅 20.0mの長 方形断面を想定した.解析領域下端のみ完全固定で,左右端は水平固定となっている.解析メッシュを図-3 に示 す.本解析では,間隙空気圧は常に大気圧と同値として扱っている.また,初期状態で内部での水収支が発生し ないよう,各高さで全水頭は一定となる全水頭分布を与えている.また,初期地下水位は解析領域下端から 0.5m の高さに設定し,右端は常に 0.5m の高さまでは排水境界としている.土中の浸透および浸潤には,透水性および 保水性などの土質物性が影響すると考えられる.ここではそれらの影響を検討するため,標準的なケース(STD), 透水性が異なるもの 2 ケース(SERIES1-LP

および HP), 保水性が異なるもの 2 ケース (SERIES2-LW および HW)を同時に行ってい る.本研究で用いた材料定数一覧を表-1, SERIES1 で変更した物性値を表-2, SERIES2 で変更した水分特性曲線を図-4 に示す.解 析領域に与える洪水波形は,宮城県阿武隈 川で計測された洪水波形を用いている.図-5 は 2001~2009 年に計測された洪水時の水面 波形と本解析の入力波形である.赤線に示 すような入力波形に置き換えている.波形 の入力は,解析領域左端に水頭境界を設け ることで表現している.

(2) 解析結果

a) STD の結果

図-6は STD における間隙水圧の時間変化で ある.外力の水位を上昇させていくと,領 域内の浸潤面が上昇することが分かる.こ こでの浸潤面は飽和状態であり間隙水圧が 0の状態を示している.外力の水位を低下さ せていくと,領域中央部で上に凸の浸潤面 が形成される.またこれは入力波形を初期



図-3 解析に用いたメッシュ

表-1 材料定数一覧(STD)

| λ | κ | М | ν' | m | γ |
|--------|--------|-------------|----------------|-------|-----|
| 0.1074 | 0.0107 | 1.344 | 0.33 | 0.8 | 0.5 |
| а | n | P'sat (kPa) | n _E | e_0 | |
| 1.0 | 1.0 | 200.0 | 1.3 | 0.85 | |

表-2 SERIES1 で変更した物性値

| | 透水係数 k _w (m/day) | 透気係数 k _a (m/day) |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| LP | 8.64×10 ⁻⁴ | 8.64×10 ⁻² |
| STD | 8.64×10 ⁻³ | 8.64×10 ⁻¹ |
| HP | 8.64×10 ⁻² | 8.64 |



図-4 SERIES2 で変更した水分特性曲線

水位まで低下させるまで維持されている.水頭を与え終えた後もこの浸潤面は残留している.

b) SERIES1の結果

図-7 は透水性の異なる場合の間隙水圧時間変化である.浸透量は入力された水頭との水頭差と,飽和時の透水係 数および不飽和時の比透水係数³⁾⁴⁾から計算される.従って,同様な操作を行う本解析では,透水性の低いものの 方が内部への浸透は少ない.透水性が高くなると,解析領域右端の水位が上昇するに至っている.外力の水位を 低下させていくと,透水性の高い場合は速やかに浸潤面が低下しているものの,透水性が低くなると堤体内の変 化に時間がかかっていることが分かる.また,放置を開始しても内部で上に凸の浸潤面を形成している.従って, 透水性が低くなると内部への流入は少なくなるが,排水にも時間がかかると言える.

c) SERIES2 の結果

図-8 は保水性の異なる場合の間隙水圧時間変化である.保水性が異なると、水頭分布は同じだが、その時の飽和 度分布が異なる.ここでは、保水性が高いほど、同じ水頭と比べ飽和度は高い値となっている.保水性が低い場 合、初期状態では全体の飽和度が低いことから内部への浸透が少なくなることが分かる.しかし、水分特性上、 保水性が低くなると水頭差が大きくなることから、外力推移を低下させると、排水が速やかに行われることが分 かる.一方、保水性の高い場合は初期飽和度が高いことから浸透し易く、また飽和し易い.しかし外力推移を低 下させても、水頭差を生じにくいことから排水には時間を要していることが分かる.これらの結果から、保水性 が高くなると飽和し易く、また排水による水位低下に時間がかかると言える.



3. 実測された堤体内水位を踏まえた実大断面シミュレーション

(1) 実測データ

図-9は兵庫県内の一級河川で平成18年から計測された日雨量・河川水位・堤体内水位のデータ5である.堤体内

水位は、6つの観測抗で計測されている.河川水位は、一日の間で小さな変動はあるものの、概ね一定の範囲での 変動となっている.この河川の出水期である6月から10月の間では、河川水位は僅かに上昇傾向にあることが分 かる.河川水位は上流および下流の流下性能に依存しており、流域全体の降雨量には大きな影響を受けていると 考えられるが、この地点で計測された日雨量に大きく影響されているとは言えない.堤体内水位を見ると、河川 水位・堤体内水位共に同じ高さを基準としていることから、6つの観測坑全てにおいて、堤体内水位は常に河川水 位よりも高い位置で確認されていることが分かる.また、まとまった雨量が計測されると、河川水位は一時的に 上昇し、その後速やかに下降しているものの、堤体内水位は時間をかけて上昇し、その後緩やかに下降している ことが分かる.そして、堤体内水位は降雨が観測された時点では上昇しておらず、多少の時間の遅れを持って上 昇していることも分かる.これは、降雨が堤体内に浸透し、観測坑内の水位が上昇するまでの時間のずれと考え られる.降雨が観測されていない部分を見ると、堤体内水位は一定の値をとっておらず、常時緩やかに下降して いる.従って、排水にはかなりの時間を有しているものの、堤体内の水分は堤体外のどこかへ排水され続けてい ることがわかる.ただ、降雨がある頻度で堤体に浸透することから、一向に堤体内水位は収束していないという ことが言える.この挙動は、阿武隈川での計測においても確認されている.従って、堤体の大きさには関係なく、 堤体内では高い浸潤面を形成する可能性が高いと言える.



図-9 計測されたデータ

(2) 実測データを踏まえた排水シミュレーション

a) 解析概要

解析対象は、前節で示した兵庫県内の一級河川の堤防断面(以下断面1とする)と、阿武隈川の堤防断面(以下断

面2とする)である. 断面1の解析メッシュ図を図-10に, 断面2の解析メッシュ図を図-11に示す. 断面1は底部 幅30.0m, 天端高さ5.0mであり, 断面2は底部幅77.1m, 天端高さ11.2mである. 変形は底部のみ完全固定で, その他は拘束していない. 間隙空気圧は大気圧で常に一定とし, 初期では解析領域全面で非排水とした. また, 本解析では主吸水曲線および主脱水曲線上に初期水頭を設定し, それぞれ2つの解析を行っている.

堤体内部は,初期に底面部よりも1.0mほど高い位置に地下水位があると仮定した.初期飽和度分布および水頭 分布は,定常状態となるように設定した.その後,両法尻部に底面部の高さと同じ位置の水頭境界を与え,堤体 外部への排水を模擬した.図-12に,本解析の概要図を示す.



b) 解析結果

断面1について

図-13 に断面 1 の間隙水圧の時間変化を示す. 断面 1 は底部幅が 30.0m と, 断面 2 と比べれば半分以下である. 従って, 断面 2 と比較して排水経路が短いため堤体内の水分は排水されやすい. 排水境界を設置すると, 急速に 飽和領域が減っていることが分かる.これは,排水境界を0.0mの高さに設置したことにより,内部との水頭差が 発生したことによるものである.また,断面1では排水開始から50日経過すると堤体内に飽和領域はなくなる結 果となった.図-14に断面2の各点に水位の時間変化を示す.これを見ると,排水を開始するとどの点においても 水位が下がっていることが分かる.また,初期水頭および初期飽和度を主吸水曲線上と主脱水曲線上に設定し2 パターンの解析を行ったが,これの間に大きな差は見られなかった.これは,堤防高さが5.0mであり,2つの水 分特性曲線に大きな差がないことに起因していると考えられる.



図-14 主吸水曲線(左)および主脱水曲線における堤体内水位の時間変化(断面 1)

断面2について

図-15 に断面 2 の間隙水圧の時間変化を示す.初期では地下水位は堤体内で 1.0m の水位を同じ高さで保っている.両法尻に排水境界を設けると,堤体内水位との水頭差から両法尻への排水が行われる.断面 1 と比べ底部幅が 70m 超であり,河川堤防としては大断面をもつ堤体と言える.この場合,断面 1 よりも排水経路が長いことか

ら,排水には時間がかかっていることが分かる.図-16 に各点における堤体内水位の時間変化を示す.これを見る と,排水境界を設けてから5 日程度は法尻に近い ELM5 および ELM29 において急激な水位の低下がみられる.こ れは初期で 1.0m の高さに地下水位を設け、そこに 0.0m の高さの排水境界を設置したことから、大きな動水勾配 が発生したことが原因と考えられる.またこの挙動は断面 1 でも確認できた.しかし、その際に中央部の ELM11,17,23 では急激な水位低下は発生していない.これは中央付近の堤体内水位が、その5 日間に大きな低下を 起こしていないことからも分かる.また時間が経過すると各点の水位低下が緩やかになっており、100 日経過後で も中心部の ELM17 では 0.3m 程度の低下に留まっている.また、図-7.14 から初期水頭を主脱水曲線上に設定した 場合の方が、堤体内水位が下がりにくい傾向があることが分かった.これは断面 1 とは違い、天端高さが 10m 超 であることから、初期に設定した水頭と飽和度が、水分特性曲線上で異なるサクションー飽和度関係を示す区間 にまで達していることが原因と考えらえる.





図-16 主吸水曲線(左)および主脱水曲線における堤体内水位の時間変化(断面 2)

(3) 計測データを踏まえた堤体内水位変動シミュレーション

a) 解析概要

前節では断面の違いによる堤体 内水位の低下について述べた. ここではさらに降雨を与えた場 合の堤体内の水分移動および堤 体内水位の変動について検討を 行う.解析領域は,兵庫県内に ある一級河川の堤体を想定し, 底部幅30m,天端高5.0mの小段を 有しない台形断面とした(前節図 -10参照).初期条件は,変形境界 として底面部全面固定,空気境 界として全面排気(大気圧で一



定),水理境界として全面非排水を与えた.初期地下水位は,領域下端から1.0m上方に設定し,各高さに応じた初期水頭および初期飽和度を与えることで,定常状態とした.解析は,まず要素発生後に両法尻に排水境界を与える.これにより,堤体中央部で水位が高く,法面付近で低いような実際の河川堤防にみられる状態を模擬する. その後降雨を与える.今回の解析フローを図-7.16 に示す.降雨の入力は 1mm/hr の降雨を与える場合を CASE-X,3mm/hr の降雨を与える場合を CASE-Y とした.共に継続的に2時間の降雨を想定している.解析概念図 を図-17 に示す.

b) 解析結果

図-18 に CASE-X の間隙水圧変化を示す.要素発生時,地下水位は下端から 1.0m の高さにある.排水境界を両 法尻に設定し,排水を行うと両側の堤体内水位が低下し,堤体下部において凸の浸潤面が形成されることが分か る.降雨を与え始めると,表面部から飽和しはじめる.従って,初期に存在した浸潤面と,法面部および天端部 分の浸潤面が合わさることで領域境界面を囲むような浸潤面が形成される.降雨を与えた後,法尻からの排水の みを行い放置させると,次第に堤体下部の浸潤面が上昇していることが分かる.これは,上部からの水分移動に よるものと考えられる.図-19 に CASE-X および CASE-Y の堤体中央下部における間隙水圧時間変化を示す.降雨 を与えた後の放置期間の変化をみると,堤体下部への水分移動が起きていることが分かる.このことから,堤体 中央部で大きく堤体内水位が上昇する挙動が見られた.本章で示した実測データにおいても,この様な降雨後に 堤体に水位が上昇する傾向がある.このことから,実際の河川堤防においても,降雨が与えられてから堤体下部 への浸透にかかる時間が存在すると考えられる.



図-18 CASE-Xの間隙水圧変化



図-19 CASE-X(左)と CASE-Y における堤体中央下部の間隙水圧変化

4. 結論

本研究では、河川堤防の堤体内に存在する浸潤面の形成過程について検討を行った.初めに行った河川堤防へ の河川水の流入に関する解析では、保水性が高く、また透水性の低い土は、内部に水分を保持しやすく、また浸 潤面が時間的に長期に亘って残留し続ける傾向が見られた.実際の計測データからは、河川水位の影響よりも降 雨の影響が卓越していることが分かった.また常に高い位置に水位があることも分かった.これらの実測データ を踏まえ初期条件や外力の入寮をより実測に近づけた解析を行った.その結果、堤体内の水分は、堤体断面が大 きくなると排水に時間を要すること、降雨を与えると同時に堤体内水位は上昇するわけではなく、堤体下部まで の浸透後に上昇挙動があることが分かった.本研究で行った解析からは、初期に堤体内に浸潤面が形成されてい ない状態から、堤体中央部で上に凸となるような浸潤面の形成は確認できなかったが、初期条件や境界条件を再 考することで、実際の挙動を模擬できると考える.

参考文献

- 1) 成田秋義,三浦高史,加藤悠司:液状化による堤防被災過程に関する考察,国土交通省東北地方整備局
- 2) 堤防研究小委員会:堤体内浸潤線の再現 WG 原位置不飽和透水試験 関連資料
- Mualem,Y.1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water resources Reasearch*,12(3):514-522
- Van genuchten.1980. A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, Soil Science Society American Journal,44:892-898
- 5) 国土交通省より

筆者

1) 坂本諭,工学研究科,学生 2) 河井克之,都市安全研究センター,准教授

Representation of seepage face formation on river dike

Satoshi Sakamoto Katsuyuki Kawai

Abstract

River dike is a historic civil engineering structure, which currently exists through some renovations and extensions in that long history. It consists of some soil materials and has complicated stratigraphic structure. Moreover, river dike is exposed to severe environment, such as rainfall, flood, and earthquake. Therefore, it is so difficult to know current stress and moisture distributions even if field investigation and monitoring are conducted. It can lead to misestimate for soundness of river dike.

In this study, the representations of phreatic surface formation were simulated with soil/water/air coupled F.E code. Here, rainfall, river level, and settlement of foundation are considered as natural impact to river dike.

©2014 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.