剛構造樋門周辺堤防の劣化過程の検討 Investigation of the degradation process of the river embankment around rigidly supported sluiceway

崔 瑛¹, 小高猛司², 李圭太³, 劉天明⁴

- 1 名城大学・社会基盤デザイン工学科・cuiying@meijo-u.ac.jp
- 2 名城大学・社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 (株)建設技術研究所・lee@ctie.co.jp
- 4 名城大学・理工学研究科

概 要

杭に剛支持された剛構造樋門では,基礎地盤の沈下によって生じた底版直下の空洞に端を発し,樋門の側 方から上部にまでゆるみや空洞が拡大していくと考えられている。これらゆるみや空洞といった樋門周辺 堤防地盤の劣化は,その分布や規模によっては堤防の安全性に重大な影響を及ぼすことになる。本論文で は樋門を含む堤体の一部を再現した二次元および三次元の繰返し浸透条件下の模型実験を行い,浸透に伴 う樋門周辺地盤の挙動について観察・検討を行った。その結果,樋門下部に空洞が存在する場合,卓越す る下向きの浸透力によって樋門側壁の周辺地盤の土砂は下部空洞に流入し,これらの土砂はさらに樋門底 版下部に発達する堤防横断方向にチャンネリングした水みちの早い流速によって川裏側に流出することで, 樋門周辺堤防の劣化が徐々に進行して行くことが分かった。

キーワード: 樋門, 堤防, 劣化, 空洞, ゆるみ, 模型実験

1. はじめに

樋門・水門などの堤防横断構造物の周辺の堤防内には、 ゆるみ領域や場合によっては写真 1¹)に示すような空洞の 存在がしばしば確認されており、それらの分布や規模によっては堤防の安全性に重大な影響を及ぼすことになる。平 成 10 年以降、樋門の設計は柔構造を基本²¹としているが、 今なお現存する樋門の多くは杭基礎を有する剛構造樋門 である。図 1³は剛構造樋門周辺の空洞およびゆるみ領域 の発生・発達過程の模式図である。杭に剛支持された剛構 造樋門では、基礎地盤の沈下に伴い底版直下に空洞等が生 じ、その後、樋門の側方から上部にも空洞等が拡大してい くと考えられる。河川堤防の横断構造物である樋門の周囲 はただでさえ水みちが形成されやすいと考えられるが、周 辺に空洞等が存在する場合には一層その傾向が強くなる ため、空洞等の存在を事前に把握することが重要である。



写真1 樋門周辺地盤に発生した空洞1)

一方,図1のような空洞やゆるみ領域の発生・発達の過程 はあくまで推測の範囲内であり、実験や数値解析では明確 に示されているものではない。

そこで本研究では、二次元および三次元浸透模型実験装置を製作し、剛構造樋門の底版下部の空洞をトリガーとする周辺堤防の空洞やゆるみ領域の発生・発達のメカニズムについて詳細に検討した。具体的には、二次元模型実験によって、堤防内の水位が繰返し変動する浸透条件下において、樋門底版下の空洞に樋門側壁周辺の土砂が吸い出されることによる空洞やゆるみ領域の発生・発達について検討した。さらに、三次元模型実験によって、樋門側壁から底版下部空洞への土砂の流出、底版下部に形成される水みちのチャンネリング(連通)、そしてその水みちに沿った堤防横断方向への土砂移動などの現象の観察を行った。



図1 空洞・ゆるみ領域の発生・発達(文献3)を加筆修正)



2. 模型実験の概要

図 2 に模型実験装置の概要を示す。二次元および三次 元模型実験は、それぞれ堤防内の樋門周りの一部をモデル 化したものである。なお、本実験では、圧密や地震などに 起因する基礎地盤の沈下により、すでに剛構造樋門の底版 下部に空洞が存在している状況を模擬している。

2.1 二次元繰返し浸透模型実験

樋門底版下部に空洞が存在し、かつその空洞が堤防横断 方向に連通している場合には、洪水時における堤防内部へ の河川水の浸入は、樋門底版から側壁に沿って最も顕著に 進行すると考えられる。また、実際の堤体内の樋門周辺地 盤の空洞やゆるみ領域は、必ずしも一度の洪水で発生する だけではなく、長期にわたり、洪水時の高水位を繰り返し て経験することによって大きく発達すると考えられる。そ のため、本研究の二次元模型実験では、樋門下部から浸透 水を周期的に流入ならびに排水させることによって、二次 元繰返し浸透条件下での樋門周辺地盤の挙動を模擬し、詳 細に観察した。

図 2(a)に二次元模型実験装置の概要を示す。本実験では 模型地盤に作用する水頭を変化させるため、給排水装置 Tank_H, Tank_L と, Tank_H に給水するための給水タンク を用いた。Tank_L は平常時における低水位をモデル化し たものであり、水頭は樋門底面と同じ高さに設定した。 Tank_H は洪水時の河川水位上昇による高水位をモデル化 したもので、その高さは変更できる。 模型地盤に作用する 水頭は, Tank_H,Lと土槽本体を繋げる栓 H,Lを開閉する ことによって繰返し変化させ、洪水時と平常時における水 位の繰返し変動を模擬した。高水頭時に Tank_H より供給 される水は、透明アクリル製の実験土槽の下部の栓 H よ り空間 b に流入した後, 樋門の下部空洞を通って模型地盤 に流入する。また,低水頭時には,排水は逆の経路を辿り 栓LからTank_Lに出される。その際、排水に伴い樋門周 辺の土砂は下部空洞に吸い出されるが、その土砂は、本来 は樋門底版下部で堤防横断方向に連通した水みちを通っ て堤体外に排出されると考えられる。二次元模型実験では, 連通した水みちによる土砂排出を考慮する代わりに,空間 bを設けることによって,吸い出された土砂が遅滞なく底 版下部から除去されることを模擬した。

模型地盤は、三河硅砂 6 号を使用し、含水比 4.0%に調 整後、間隙比 1.06 となるように各層 20mm 厚ずつ慎重に 締め固めた。また層間には観察用のカラーサンドを敷いた。 模型地盤作製後、次の手順で繰返し浸透模型実験を行った。

- Tank_H と実験土槽を繋ぐ栓 H を開き,所定の時間 (Time_H)高水頭を保つ。この際,模型地盤に浸透し 始めた時を実験開始時とする。
- II. Time_H 経過後, 栓 H を閉じると同時に, Tank_L と実験土槽を繋げている栓Lを開き,所定の時間(Time_L), 低水頭を保つ。
- Ⅲ. 手順 I, Ⅱを繰返し行い,周辺地盤の挙動が変化を示さないと判断した段階で実験終了とする。

なお、すべての実験において、実験過程を通してビデオ 撮影を行い、カラーサンドの歪み具合でゆるみ領域を判断 する。さらに、図 2(a)に示す所定の位置に小型間隙水圧計 (SSK 社 P306AVS-01,定格容量 9.81kPa,精度 0.2%R.O.) を、樋門下端と上端の横、樋門上部(樋門上端から 80mm) の計 10 箇所に設置し、1 秒間隔で給排水に伴う樋門周辺 地盤に作用する間隙水圧の変化を計測した。

2.2 三次元繰返し浸透模型実験

三次元模型実験では,堤防横断面の一部を対象とし,洪 水時に川表から川裏へ発生する浸透場を模擬して,樋門側 壁および底版下部における土砂の挙動を観察した。

図 2(b)に三次元模型実験装置の概要を示す。三次元模型 実験装置も透明アクリル板で作製され,通水孔を設けた仕 切り板によって領域 A, B, C に分けられている。領域 A は



写真2 ゆるみ領域および空洞の発生・発達過程

実堤防での河川側の高水位をモデル化するための水槽,領 域 B は樋門を含む堤体の一部をモデル化するための土槽, 領域 C は堤内地側の低水位をモデル化するための水槽で ある。水槽 A, C は様々な高さでオーバーフローさせるこ とで,流入と流出側の水位を自由に変化させることができ る。なお,水槽 C は下部空洞より流出される土砂の受け皿 の役割も併せ持っている。剛支持樋門を模擬して実験装置 に固定した樋門模型は,コの字型の半断面矩形筒状の透明 アクリルであり,樋門内部から側部ならびに下部の土砂移 動状況を観測することができる。

模型地盤は二次元模型実験と同じく,含水比を4%に調整した三河珪砂6号を用いて,間隙比1.06になるように, 一層20mmずつ締め固めて作製した。その際,下部空洞は 空洞部分に予め厚さ10mmのアクリル製のスペーサーを 挿入した状態で模型地盤を作製し,実験開始前にスペーサ ーを外すことにより下部空洞を再現した。模型地盤作製後, 次の手順で繰返し浸透模型実験を行った。

- 高水位水槽 A, C の水位を樋門下端に維持し、12 時間 以上飽和させる。(水頭差 0)
- II. 水槽 A, C の水位を 160mm 上昇させ、水位を樋門下端 から 160mm で 30 分間維持する。(水頭差 0)
- III. 水槽 C の栓を開け,水位が樋門下端になるまで排水し, 30 分間維持する。(水槽 A, C 水頭差 160mm)。
- IV. 手順 II, III を 10 回繰返し行う。ただし、実験中に模型 地盤で顕著な崩壊が見られた場合は、その段階で実験 を終了する。

なお,すべての浸透過程において,実験装置の正面および 随門内部からビデオ撮影を行い,樋門周辺地盤および底 面下部における土砂の挙動を観察した。



図3 ゆるみ・空洞面積の経時変化(樋門面積により無次元化)

3. 二次元繰返し浸透模型実験結果

3.1 給排水に伴うゆるみ・空洞の発生発達過程

ここでは、水頭差 320mm,給排水時間をそれぞれ 30 秒 に設定したケースを例に,給排水に伴う樋門周辺地盤にお けるゆるみおよび空洞の発生・発達過程について説明する。 写真 2 に,各給排水ステップにおける給排水直後の樋門周 辺地盤の様子,図 3 にゆるみ領域および空洞の面積の推移 を示す。ゆるみ領域(実線)および空洞の面積は、ビデオ 撮影した写真から推定して読み取ったものから計算した ものであり,いずれも樋門模型の断面積で無次元化してい る。なお、写真中の点線は高水頭の水位を示す。

写真より,排水4回目(4L)で空洞部と接している模型地 盤から微量の土試料が流失し初め,その後給排水とともに ゆるみ領域が徐々に大きくなり,排水10回目(10L)では 樋門上端より高い領域までゆるみ領域が拡大した。またそ の後の給水11回目(11H)では,緩んだ樋門下部周辺の地



図4 排水過程における典型的な変位速度ベクトル

盤が飽和に伴い強度を失ったため、下向きに落下し、空洞 が拡大した。その後給排水に伴ってゆるみ領域は樋門上部 方向に発展し、排水13回目(13L)では、樋門の上部地盤 に顕著な空洞が確認できている。その後,給排水 (H⇔L) を繰り返すことにより, 空洞およびゆるみ領域は模型地盤 の上部に拡大していく。排水 15 回目では樋門の斜め上の 地盤領域に樋門とほぼ同じ面積の空洞が発生し,その後の 16 回目 の給水時には、空洞部分に水が侵入し、空洞が側 方に拡大した。これは 13H と同じく,非常に緩んだ地盤 が飽和することによって有効拘束圧を完全に失ったため であると考えられる。排水16回目(16L)では、空洞周辺 地盤が一気に下部空洞に向かって移動し, 樋門高さの2倍 の領域まで空洞が広まった。これは、給水 16 回目に空洞 部分に水が浸入することによって地盤内の水位が高くな り, 排水時に大きい動水勾配が発生したためであると考え られる。17回目の給排水後には、ほぼ高水位の高さまで ゆるみ領域が発生し、排水17回目でゆるみ領域の約7割 が空洞化している。なお、給水16回および17回目は、模 型地盤内に発生した空洞に水が浸入しており,その水位よ り下の地盤は飽和したと考えられるが,これらの飽和領域 で生成した空洞の下端部では、土砂が飽和することにより 崩れ落ち、安息角に近い斜面が形成された。

樋門周辺地盤の挙動をさらに詳細に検討するため、撮影した画像に対して PIV 解析を行った。図4に、樋門周辺地盤で比較的顕著な変位が見られた7、9~15回目の排水過程における典型的な変位速度ベクトルを示す。例えば、

「10H→10L」は、10回目の排水過程中(30秒)のある2 秒間に発生した変位速度を示しており、同様な変位の積み 重ねによって写真2に示す10Hから10Lの状況に変化す ることを意味する。図より、いずれの排水過程においても、 排水に伴って樋門付近の土粒子は吸い込まれるように樋



門下部空洞に向かって変位している。さらに、排水時にお ける変位は主に樋門近傍の狭い領域で発生し、樋門直上領 域でも大きい変状は見られていない。これは、不飽和状態 にある樋門周辺地盤がアーチ効果を発揮することにより、 ゆるみや空洞が遠方まで広まらなかったと考えられる。

3.2 樋門周辺地盤の水頭の変動

上述の樋門周辺地盤の挙動をもたらす要因を検討する ため、本実験では図2に示すように樋門周辺に間隙水圧計 を設置し、水位の繰返し変動に伴う間隙水圧の変動を計測 した。図5に、給排水に伴う圧力水頭の変化を示す。図に 示す圧力水頭は、間隙水圧から水頭に換算したもの(U/_{γw}: Uは間隙水圧, _{γw}は水の単位体積重量)である。

図より, 樋門下端と同じ高さの計測箇所①②では, 初回 の給水直後から圧力水頭が急激に上昇し, その後給排水を 繰り返すことによって圧力水頭が徐々に高くなり, 給水 8 回目ではほぼ高水頭の 320mm になる。これは, 写真 2 に 示すように, 排水 7 回目から給水 8 回目にかけて, 下部空 洞周辺に空洞が発生したため, 給水時に間隙水圧計周辺地 盤には高水頭 (320mm)が直接作用することになったため であると考えられる。なお, 樋門上端部と同じ高さの計測 箇所⑤⑥では給水 4 回目から, 樋門上部(樋門上端から 80mm)の計測箇所⑧⑩では給水 10 回目から間隙水圧の上 昇が見られ, 同時刻に間隙水圧計の計測位置まで飽和領域 が広まったと考えられる。

それぞれの地盤領域に作用する浸透力を検討するため, 各間隙水圧の計測位置における全水頭の経時変化を,図 6,7に示す。全水頭は,樋門下端を基準面とした位置水頭 と,図5に示す圧力水頭の和である。

図6は、下部空洞から最も近い計測位置①,および樋門 と同じ高さの計測位置⑤⑥における全水頭の経時変化を 示す。図6(a), (b)は、それぞれ樋門周辺地盤で比較的顕著 な変位が見られた、給排水8,9回目、給排水10,11回目に おける計測値である。いずれの給排水過程においても、計 測位置①では上述のように高低水頭を直接反映している ため、給排水変換直後に水頭も変化している。一方、下部 空洞からある程度離れた計測位置⑤⑥では、給水過程では 水位の上昇につれて全水頭が徐々に増加し、排水過程では 水位の下降に伴って徐々に減少するが、いずれの過程でも





図7 計測位置①⑦⑧⑩における全水頭の経時変化

約 20 秒で頭打ちになっている。下部空洞直近の計測位置 ①における全水頭と比べると、給水過程では、計測位置⑤ ⑥のほうが小さく、排水過程においては、⑤⑥に作用する 全水頭が大きい。すなわち、給水過程においては、下部空 洞から上部地盤に向かって透水力が作用し、その大きさが 水中における土粒子の重量を上回った場合には、地盤が上 向きに押し上げられるような挙動を示すと考えられる。一 方、排水過程においては樋門上部・側方地盤から空洞に向 かって透水力が作用し、さらに重力が加わることによって 周辺地盤は空洞に向かって変位すると考えられる。

極門上端部と同じ高さの計測位置⑤⑥における全水頭 を比較すると、給水時においては常にほぼ同じ値を示して いるが、これは給水時には下部空洞から侵入してきた水が 樋門近傍地盤領域ではほぼ同速度で上向きに浸透してい くためであると考えられる。一方、排水時においては、樋 門に近い⑤に作用する全水頭がより遠方の⑥に比べて小 さい値を示す。すなわち、水平方向においては、排水時に 周辺地盤から樋門に向かって浸透力が発生すると考えら れ、排水時に樋門周辺地盤には下部空洞へ向かう斜め下の 浸透力が作用すると考えられる。

図7は、下部空洞から最も近い計測位置①,および樋門 上端から80mmの高さにある計測位置⑦800における,全 水頭の経時変化を示す。図7(a),(b)はそれぞれ,樋門上部 地盤で比較的顕著な変位が見られた,給排水10,11回目, 給排水12,13回目過程での値である。図より,樋門上部地 盤に設置した⑦800における全水頭は,計測位置が吸水口 である下部空洞からの距離が遠いことを反映して,給排水 過程において水頭が変化し続けている。空洞近くの①と比 較すると,樋門上部地盤に作用する全水頭は,給水過程に おいては常に①より小さく,上向きの浸透力が発生すると 考えられる。排水過程では,全水頭が常に①より大きく, 下向きの浸透力が発生する。

一方,同じ高さに位置する⑦⑧⑩を比較すると,樋門模型左端から20mm離れた⑧に最も小さい水頭が作用し,その他の樋門左端直上の⑦と,樋門から最も離れた⑩に発生する水頭はほぼ同じ値を示す。すなわち,排水過程において,樋門上部領域では,計測位置⑦⑩から⑧に向う透水力が作用していることになる。

3.3 樋門横断方向における周辺地盤の力学挙動

以上の実験結果により,空洞・ゆるみ領域は水位の繰返 し変動によって次のように発生・進展していくとまとめら れる。給水時, 地盤内に水が浸透するとともに空洞周辺が 飽和状態となる。 飽和した空洞周囲の土は、 サクションの 消失により不安定になり,一部の土粒子が水中に落下し, 空洞が拡大される。さらに、上向きの動水勾配が大きくな った場合は, 樋門周辺地盤が上向きに押上げられる現象も 見られている。排水時は、水位低下に伴って下向きに作用 する浸透力により, 土粒子が下部空洞に向かって下方に移 動し下部空洞から排出される。また、空洞がある程度進展 すると、空洞上部の地盤が不安定となり、ひび割れの発生 や,徐々に崩落するなどの現象がみられる。樋門周辺地盤 に樋門の断面積の数倍程度のゆるみおよび空洞が発生し たにも拘わらず、地表面からは変状が確認できていない。 また, 樋門側方領域が崩れ落ちた土砂で埋もれ, 樋門上部 地盤には大きい空洞が発生している場合でも, 樋門側方地 盤では空洞が見られない。すなわち、地表面変状の目視点 検,もしくは樋門内部からの空洞検査のみでは,地中のゆ るみ・空洞を適切に評価できていない可能性がある。



写真3 繰返し浸透に伴う樋門周辺地盤の挙動(500mm)

4. 三次元繰返し浸透模型実験結果

ここでは、土被り 200mm 初期空洞長 500mm ケースを例 に、繰返し浸透に伴う樋門側面および樋門底版下部領域に おける地盤の挙動について検討する。写真3に、代表的な 実験中の様子を示す。写真より、排水一回目では、実験開 始後2分後に土砂の流出が見られ、10分後には樋門領域 で蛇行した水みちが確認できる。水みちと樋門側面地盤の 接続部分(図中矢印で示した位置)の側方地盤では、カラ ーサンドが沈み込む現象が見られ,下部空洞に吸込まれた 土砂は、水みちに沿って領域 C に流出することが分かった。 その後、約20分までは、水みちが形状を変化させながら 土砂を運び出し続けるが、その後はほとんど変化が見られ ない。排水2回目にもほぼ同じ現象が見られるが、30分 後にはかなり幅の広い水みちが形成されている。排水3回 目では, 樋門下部ではすべての水みちが一気に繋がり, 土 砂が急激に動き出す現象が確認できた。樋門側面では全領 域に渡ってカラーサンドが大きく沈み込み, 樋門側部から 大量の土砂が流出していると考えられる。その後の浸透サ イクルにおいても、3回目と同じく、土砂が下部空洞に吸 出された後、下部空洞から急速に流出ている。

さらに、本実験では、排水側である領域 C に網の受け皿 を設置し、浸透サイクル毎の空洞からの土砂の流出量を計 測した。図 8(a)に、初期空洞幅が異なる各ケースにおける 累計流出土砂量を示す。図 8(b)には、各浸透サイクルの排 水時に計測した単位時間内の平均流量を示している。中空 のものはサイクル毎の計測結果であり、密実なものは



平均値を示している。図より、多少のバラツキはあるもの の、概ね初期空洞の幅が長いほど流速が早い傾向を示して いる。初期空洞長 500mm のケースでは、給排水サイクル 3回目から流出土砂が急激に増加するが、これは写真 3の 説明で述べたように、3回目以後水みちが連通することで 激しい土砂の流れが発生したことを反映したものである。 初期空洞長 600mm のケースでは、給排水サイクル 1回目 から、大量の土砂が流出し続けており、初期空洞幅が広い ほどゆるみ・空洞の発達が早い結果が見られた。初期空洞 を設けていないケースでは、他ケースに比べて土砂の流出 量は極端に少ないものの、繰返し浸透力の作用により、 徐々に土砂が流出する。これは、樋門下部に初期空洞が存 在しない場合でも、繰返し浸透力の作用によって樋門と周 辺地盤の境界から土砂が流出し、樋門周辺堤防土が劣化す ることを示している。

5. まとめ

本研究では, 樋門底部への樋門側部土砂の吸い出しに加 え, 樋門底版直下に形成される水みちの発達やそれに伴う 土砂流失についての観察, 考察を行った。その結果, 樋門 横断方向では, 地盤内の浸透流もしくは水位の変動により 土砂が下方向に変位して, 空洞に流入し, この土粒子はま た堤防横断方向にチャンネリングした水みちの早い流速 によって川裏側に排出されることで, 樋門周辺地盤の劣化 が進行して行くことが分かった。今後は, 樋門と周辺地盤 の境界における土砂の挙動に着目し, 水みちの発生から連 通までのメカニズムについても検討を進めていく必要が ある。さらに, 模型地盤の材料特性および土被り, 水頭差, 流速等による影響についても検討して行く予定である。

謝辞:本研究は JSPS 科研費 15K18116 と国土交通省 H24 年度河川砂防技術研究開発の助成を受けたものであり,記 して謝意を表する。

参考文献

- 国土交通省東北地方整備局:台風15号概要及び樋管周辺の変状, 第4回北上川等堤防復旧技術検討会 資料,2011.
- (財)国土技術研究センター編:柔構造樋門設計の手引き、山 海堂、1998.
- 3) 中島秀雄: 図説 河川堤防, 技報堂, pp.206-210, 2003.