

河川堤防樋門周辺地盤内のゆるみ領域や空洞の生成・発達に関する模型実験

MODEL TEST ON GENERATION AND DEVELOPMENT OF
LOOSENED ZONE AND CAVITY AROUND SLUICeway IN RIVER LEVEE

崔 瑛¹・小高猛司²・李 圭太³
Ying CUI, Takeshi KODAKA and KyuTae LEE

¹正会員 博(工) 名城大学准教授 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

²正会員 博(工) 名城大学教授 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

³正会員 博(工) 株式会社建設技術研究所 大阪本社水工部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

Most of the existing sluiceways are supported by piles, and cavities are occurred under the sluiceway because of the settlement of foundation ground (lower cavity below). On the other hand, cavities and loosened zone around sluiceway are frequently happens in the field. Cavities under the sluice way are thought as the inception of this phenomenon, and in the present paper, two-dimensional cyclic seepage experiment are carried out to make clear the mechanism of this phenomenon. The experimental results suggest that, due to the downward seepage force during repeated water level fluctuation, the soils around the sluice way are sink down in to the lower cavities, that occurred by the settlement of the foundation.

Key Words: Sluiceway, river levee, cavity, loosened zone, seepage

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としている²⁾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・発達過程のイメージ図である。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。一方、図-1のようなゆるみ領域や空洞等の発生・発達のメカニズムはあくまで推測の範囲内であり、実験や数値解析等によって明確に示されていないのが現状である。

本研究では、図-1に示す樋門周辺堤体内の空洞の発生・進展過程に対し、模型実験による検証を行う。具体的には、圧密や地震などを原因とした基礎地盤の沈下によって樋門底部の空洞があらかじめ存在し、堤防横断方向にすでに何らかの水みちが形成されている場合を想定する。その上で、洪水等によって繰返し発生する河川水位の変動に伴って樋門側部の土砂が底部から吸い出されることにより、ゆるみ領域や空洞が樋門の側部から上部に広がることを仮定する。模型実験では、方向を変えて繰返

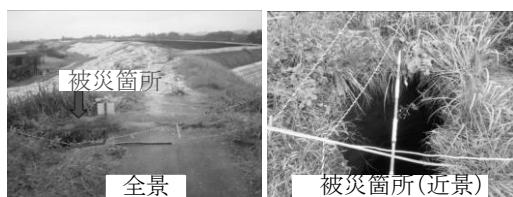


写真-1 樋門周辺地盤に発生した空洞¹⁾

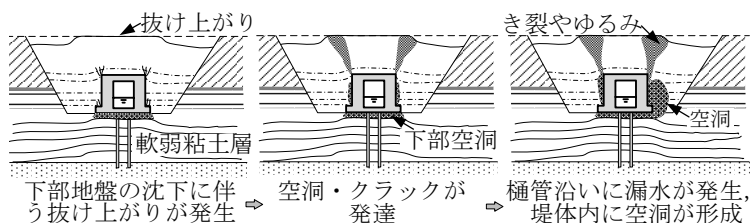


図-1 空洞・ゆるみ領域の発達過程のイメージ (文献3に加筆修正)

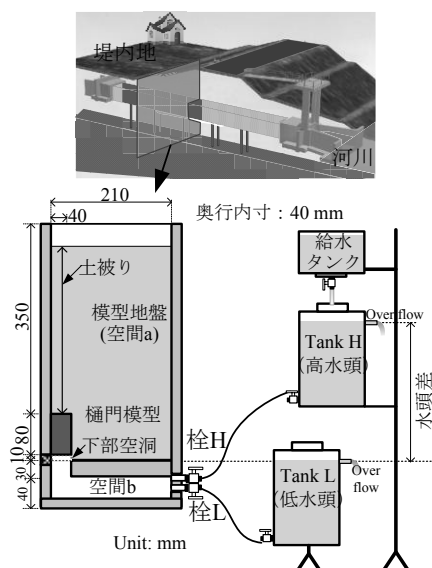


図-2 二次元浸透実験装置の概要

し作用する浸透力による樋門周辺の土砂の吸い出し過程を観察することにより、樋門下部空洞に起因する堤体内空洞およびゆるみ領域の発生メカニズム、水頭の変動量や浸透時間、土被り等がゆるみ領域や空洞の発生・発達過程に及ぼす影響について検討を行う。

2. 模型実験の概要

本研究では、樋門周辺の地盤に作用させる位置水頭を繰返し変化させることにより、樋門側面部に鉛直方向の浸透力が上下方向反転しながら繰返し作用する条件下での地盤の挙動を観察した。図-2に二次元繰返し浸透模型実験の概要を示す。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なるように設定した。Tank_Hは洪水等により河川の水位が上昇した際の高水位をモデル化したものであり、その高さを自由に変更することができる。本実験ではTank_H, Lと土槽本体を繋げるための栓H, Lの開閉を繰り返すことにより、実験土槽に作用する水頭を繰返し変化させ、洪水時と平常時における水位の繰返し変動をモデル化する。なお、Tank_H, Lにはオーバーフローのための排水口を設け、給排水過程における水頭一定を図った。Tank_Hより供給される水は、実験土槽の下部に設けた栓より空間bに流入した後、樋門下部空洞を通過して模型地盤に流入し、排水時は逆の経路を辿って水がTank_Lに排出される。以上は、実堤防において樋門底部の下部空洞が横断方向に連通していることを想定したものである。その場合、洪水時の堤体内への浸透水は、連通した下部空洞を通るものが支配的となり、水位低下時には、樋門周辺の土砂は下部空洞に吸い出される。その土砂は、本来は連通し

た水みちを通過して堤体外に排出されると考えて良いが、本論文の2次元模型実験では、連通した水みち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堤体外に搬出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、含水比を2.0%に調整した後、間隙比1.0となるように各層20mm厚ずつ慎重に締め固めた。層間の境界をなくすため、締め固め後に各層の表面をほぐし、模型地盤の変化を確認するため、各層の観察面側にカラーサンド (最大粒径280 μ m) を敷いた。上示の手順を所定の層数分 (土被りが340mmの場合は22層、土被り260mmの場合は18層、土被りが180mmの場合は14層) 繰返し行い、模型地盤を作製した。

模型地盤作製後、以下の手順で繰返し浸透実験を行う。

- I. 給水タンクおよび Tank_H, L に十分に水を入れ、Tank_H, L の給排水口と実験装置の給排水口をチューブにより繋げる。
 - II. Tank_H と実験土槽を繋ぐ栓 H を開き、給水を行う。
 - III. 模型地盤に浸透し始めた時を実験開始時とし、所定の時間 (Time_H), 高水頭を保つ。
 - IV. 所定の時間 (Time_H) が経過した後、栓 H を閉じ、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。
 - V. 手順 (II) ~ (IV) 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を終了とする。
- なお、本実験では実験過程を通してビデオ撮影を行い、色砂の歪み具合でひずみ領域を判断する。

表-1 実験条件

	水頭差 (mm)	Time_H (sec)	Time_L (sec)	土被り (mm)
Case 0	320	30	30	340
Case I 1	520	30	30	340
Case I 2	120			
Case II 1	320	60	30	340
Case II 2		10		
Case III 1	320	30	60	340
Case III 2			10	
Case IV 1	320	30	30	260
Case IV 2				180

本実験では、水頭差、給排水時間、土被りを変化させ、表-1に示す計9ケースについて実験を行い、それぞれの要因が樋門周辺地盤の挙動に及ぼす影響について検討した。水頭差は、Tank_HとTank_Lの位置水頭の差であり、Tank_Hの位置水頭を変化させることにより調整できる。高水位と低水位の継続時間Time_H, Lは、実時間スケールとの直接的な関連はないが、基本ケースとしたTime_L=30secは、ゆるみ領域や空洞の発達の収束が目視で確認できた時間から設定しており、常に湿潤状態で実験を実施している。そのため、実堤防における乾湿繰返しは考慮していない。また、土被りは樋門高さの2, 3, 4倍より少しずつ大きい180, 260, 340 mmとした。なお、いずれのケースにおいても給排水とともに地盤内水位が変化するため、動水勾配も時々刻々変化すると考えられる。

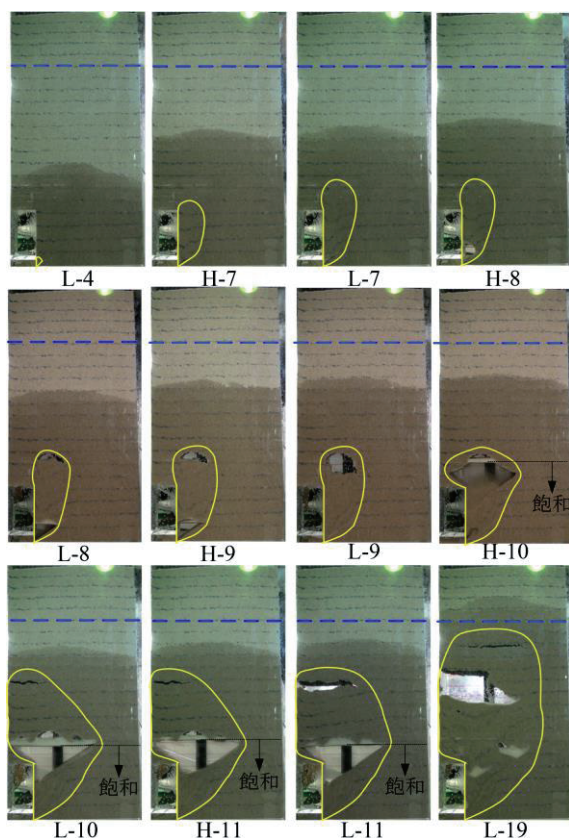


写真-2 ゆるみ領域および空洞の発生・発達過程

3. ゆるみ領域および空洞の発生・発達過程

ここでは、Case_0を例にゆるみ領域および空洞の発生・発達過程を議論する。表-1に示すように、Case_0の水頭差は320mm、給排水時間はそれぞれ30秒ずつである。写真-2に、Case_0における模型地盤に典型的な変化が観察された時点、および明確な砂の流出が見られたサイクル7から11までの給排水後の様子を示す。写真中の点線は高水頭の水位を示し、実線は写真から推定して読み取ったゆるみ領域である。

写真-2より、排水4回目(L-4)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7回目(L-7)では樋門高さを超えた模型地盤までゆるみ領域は拡大した。またその後の給水8回目(H-8)では、拡大した空洞部分に上向き浸透流が発生することによって空洞内部が侵食を受けてさらに拡大した。排水8回目(L-8)では、ゆるみ領域に沿って模型地盤が落ち、視覚により確認していたゆるみ領域の最大高さの位置に空洞が発生した。さらに、給水10回目(H-10)ではこの空洞部から水が浸透することにより、空洞は側方に拡大した。排水10回目(L-10)では空洞・ゆるみ領域は模型地盤上部に拡大していき、模型地盤底部から220mm（10層目と11層目の境界）の位置に水平クラックが発生した。またその直前のH-10においては多量の土試料が流失していることよ

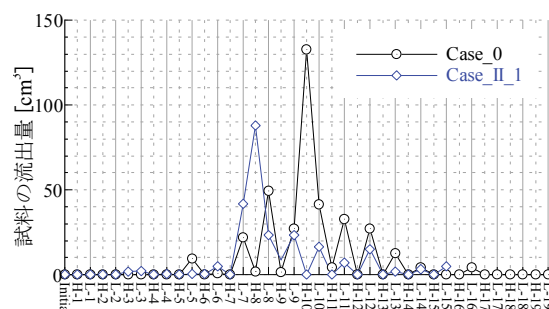


図-3 土試料の流失量 (Case_0, Case_II_1)

り、高水位時に樋門側面部の空洞やゆるみ領域に沿って多くの水が浸透するため、その後の低水位時には下向き浸透によって土砂が流失し、樋門付近の空洞が一層拡大する。また排水11回目(L-11)で、水平クラック部分の空洞が拡大し、その直下の模型地盤が鉛直方向に下がる様子がみられた。その後、給排水の工程(H⇔L)を繰り返す行うことにより、水平クラックの発生および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様子が観察された。さらに、模型地盤内に発生した空洞から見られる水位より下部の地盤は飽和したと考えられ（写真中矢印で示した部分）るが、これら飽和した地盤では安息角に沿ってすべり破壊が発生する現象がみられる。

図-3には、給水および排水完了時の画像から読み取った各ステップでの土試料の流失量の変化を示す。図より、土試料の流出は主に排水時に発生する。Case_0では排水4回目(L-4)までは模型地盤からの土試料の流失がほぼ見られず、排水5回目(L-5)で土試料の流失が見られ、さらにL-7, 8, 9, 10, 11, 12等排水時において比較的に多い土試料の流出見られた。これは、排水時樋門周辺地山に下向きの浸透力が作用し、土試料が下部空洞に吸出されるためであると考えられる。一方、給水10回目(H-10)で多量の土試料の流失が見られたが、これはゆるんだ樋門周辺地盤が飽和することによりサクシオンを失い、既に発生した空洞内に落下したためであると考えられる。なお、土試料の流失量は給水10回目(H-10)をピークに徐々に減少するが、その原因は図-2に示す空間bに試料が詰まるためであり、実験装置の改善が求められる。

以上の観察結果により、空洞・ゆるみ領域は給排水とともに次のように発生・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、サクシオ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。ただし、上向きに働く浸透力により、ゆるみ領域は拡大されない。排水時は、空洞周辺の水位の低下に伴う下向きに働く浸透力により、土粒子が下方に移動し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。これは空洞が大きくなるとともにアーチ効果が低下し、上部地盤を支え切れなくなったためだと考えられる。

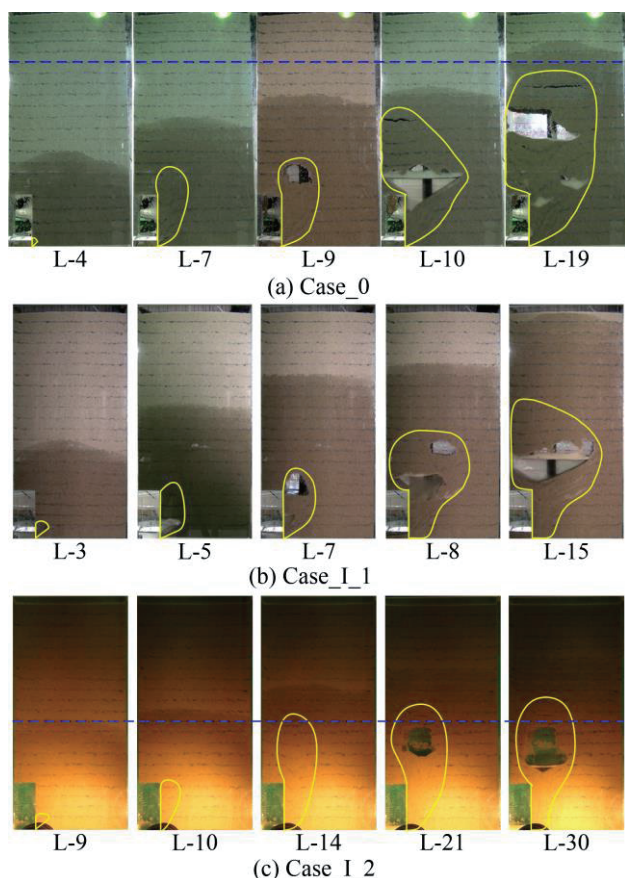


写真-3 水頭差による影響

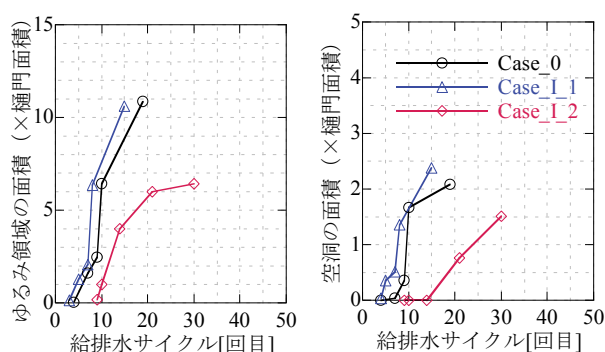


図-4 水頭差が空洞・ゆるみ領域に及ぼす影響

4. 影響要因の検討

(1) 水頭差 (Case_0, Case_I_1, 2)

写真-3に、水頭差が異なる3ケース (Case_0, Case_I_1, 2) における、地盤内で典型的な変化が見られた時点 (左から順番に空洞部と接している模型地盤に初めて空洞が発生した時、その空洞が樋門側面部に拡大した時、樋門の上端部に空洞が出現した時、樋門上部地盤に空洞が発生した時、および実験最終時点) の様子を示す。図-4はゆるみ領域および空洞面積の推移を示し、横軸は給排水回数、縦軸は写真から読み取った空洞・ゆるみ領域の面積を樋門の面積によって無次元化したものである。

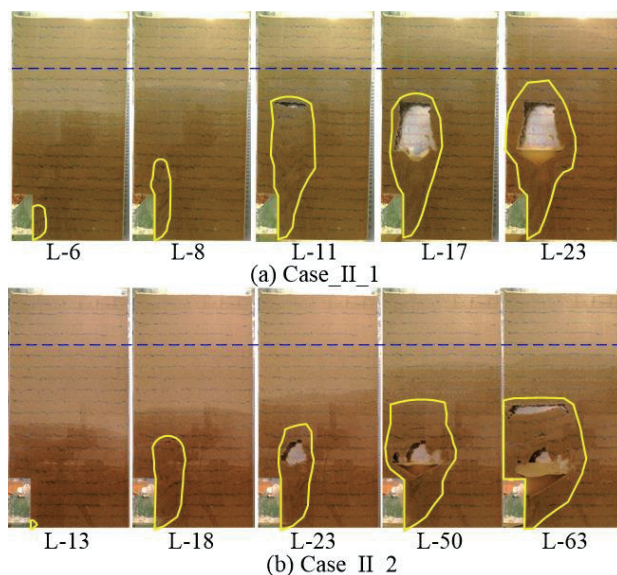


写真-4 給水時間Time_Hによる影響

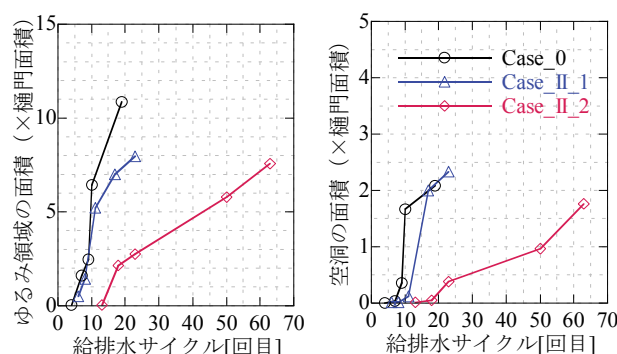
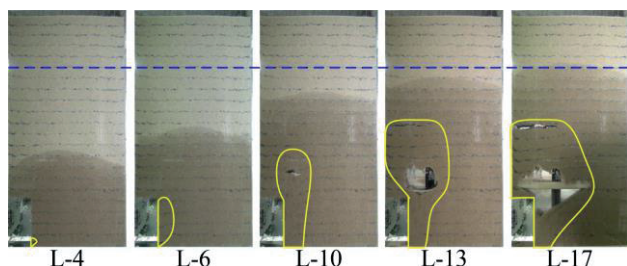


図-5 Time_Hが空洞・ゆるみ領域に及ぼす影響

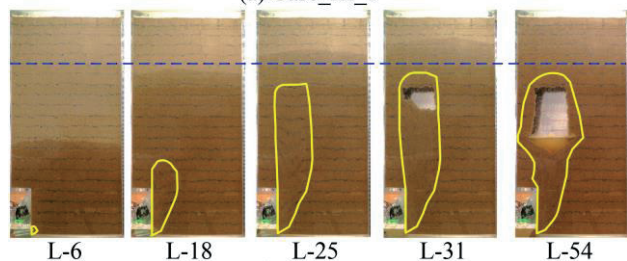
写真-3および図-4より、水頭差が大きいほど空洞・ゆるみが早い段階で出現し、その進行も早い傾向が見られる。具体的には、Case_0では排水4回目 (L-4) にゆるみ領域が発生したことに対し、水頭差が大きいCase_I_1では排水3回目 (L-3)，水頭差が小さいCase_I_2では排水9回目 (L-9) にそれぞれ最初のゆるみ領域が発生している。また、Case_0では排水9回目 (L-9) に樋門上端部に空洞が発生するのに対し、Case_I_1では排水7回目 (L-7)，Case_I_2では排水14回目 (L-14) にそれぞれ空洞が発生するなど、Case_I_1, Case_0, Case_I_2の順に空洞の発生・発達が遅れていることがわかる。さらに、模型地盤内への浸潤状況からは、同様な順に浸潤が遅れている現象が見られる。以上より、水頭差が大きいほど、浸透および樋門周辺に発生する空洞・ゆるみ領域の発生・発達が早いと考えられる。

(2) 給水時間Time_H (Case_0, Case_II_1, 2)

写真-4は、Case_0から給水時間Time_Hのみ変化させたケース (Case_II_1, 2) における、地盤内で典型的な変化が見られた時点の様子で、図-5は、同写真より読み取ったゆるみ領域および空洞面積の推移を示す。

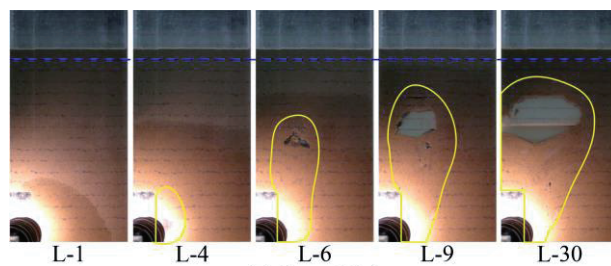


(a) Case_III_1

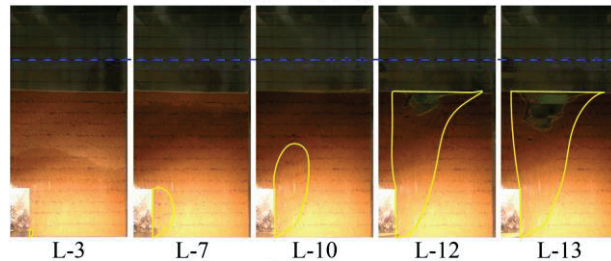


(b) Case_III_2

写真-5 Time_Lによる影響



(a) Case_IV_1



(b) Case_IV_2

写真-6 土被りによる影響

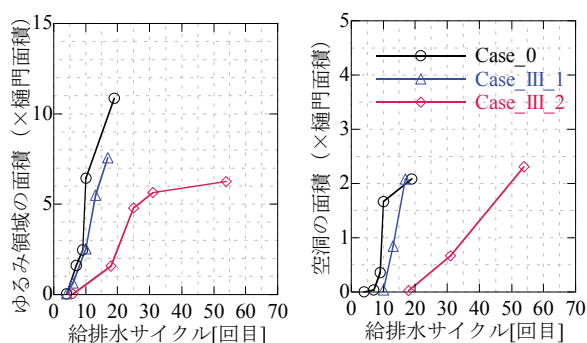


図-6 Time_Lが空洞・ゆるみ領域に及ぼす影響

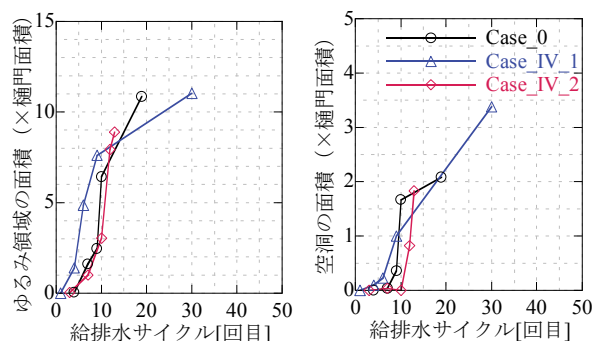


図-7 土被りが空洞・ゆるみ領域に及ぼす影響

Time_Hは、給水タンクTank_Hからの給水時間であり、豪雨等による増水後の、高水位の維持時間を模擬したものである。給水時間Time_Hが30secと10secの両ケースを比較すると、Time_Hが小さいCase_II_2では空洞・ゆるみ領域の発達が遥かに遅く、空洞が発生する時および実験終了時など典型的な地盤の変化が見られるのに所要する給排水回数は、Case_0の約3倍である結果が見られる。また、Case_0ではゆるみ領域が高水頭近く（写真中点線）まで広まることに対し、Case_II_2では高水頭から100mm位離れた高さに止まる結果が見られるが、これはCase_II_2では給水時間が短いため、模型地盤内の水位が十分に上昇できなかったためであると考えられる。

一方、給水時間Time_Hが30secと60secの両ケースにおける空洞・ゆるみ領域の発達はほぼ同じ傾向を示すが、これは給水によって模型地盤内の水位が上昇するとともに、樋門周辺地盤に作用する動水勾配および浸透力が小さくなり、30sec後にはその値が小さくなったためであると推察できる。また、給水時間の長いCase_II_1でCase_0より若干小さいゆるみ領域を示す結果が見られるが、これはゆるみ領域の発生形状が異なるためであると考えられる。写真より、両ケースにおける空洞・ゆるみ領域はほぼ同じ高さまで発達するものの、給水時間が長

いCase_II_1では空洞・ゆるみ領域の幅が狭い現象が見られ、これにより面積が小さくなったと考えられる。給水時間が長いCase_II_1の空洞・ゆるみ領域幅が狭くなっている理由については更なる検討が必要である。

(3) 排水時間Time_L (Case_0, Case_III_1, 2)

写真-5に、Case_0から排水時間Time_Lのみ変化したケース（Case_III_1, 2）における、地盤内で典型的な変化が見られた時点での様子、図-6に各写真より読み取ったゆるみ領域および空洞面積の推移を示す。Time_Lは、排水タンクTank_Lへの排水時間であり、豪雨等により堤防が飽和した後、渇水時の低水位の維持時間を模擬したものである。Case_0とCase_III_1では、空洞・ゆるみ領域の発生・発達はほぼ同じ進行過程を辿っているが、排水時間が長いCase_III_1ではゆるみ領域が高水頭より100mm程度離れた位置に止まり、Case_0よりゆるみ領域が小さい結果が見られる。これは、排水時により多くの水を排出することにより、模型地盤内に残留する水が少なくなるためであると考えられる。

一方、排水時間Time_Lが小さいCase_III_2はCase_0およびCase_III_1に比べて空洞・ゆるみ領域の発生・発達が遥かに遅く、Case_III_2の空洞が発生する時および実

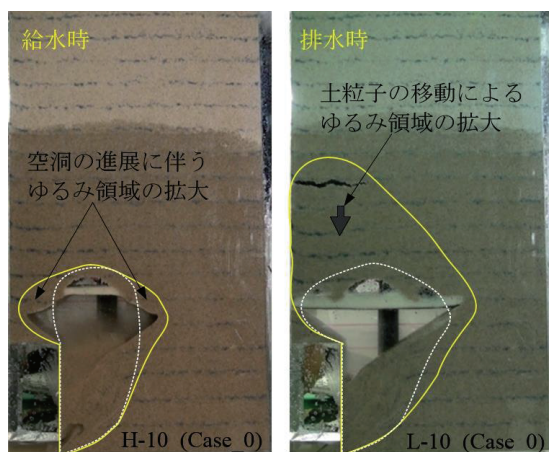


図-8 給排水に伴うゆるみ領域の進展過程

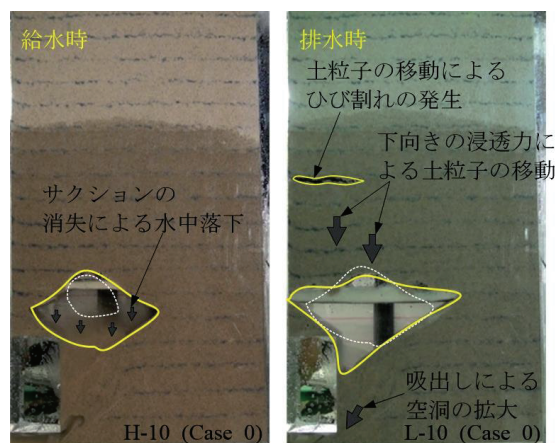


図-9 給排水に伴う空洞の進展過程

験終了時など典型的な地盤の変化が見られるのに所要する給排水回数は、Case_0の約3倍である。これは、排水時間が短く、模型地盤内に水位が残留している排水途中に吸水に切り替えることにより、土砂が十分に排出できなかったためである。ゆるみ領域の範囲を比較すると、Case_III_2とCase_0ではほぼ同じ高さまでゆるみが発生するものの、排水時間の短いCase_III_2では狭い範囲に発生している現象が見られ、そのメカニズムについては更なる検討が必要である。

(4) 土被り (Case_0, Case_IV_1, 2)

写真-6に、土被りが異なるケース (Case_0, Case_IV_1, 2) における空洞の発生・発達過程を示す。Case_0, Case_I~IIIでは土被りが比較的大きい340mmであり、水頭差および浸透時間によって多少の差異があるものの、空洞が地表面まで到達することはなかった。土被りがCase_0の半分であるCase_IV_2では、空洞が地表面まで発達し、地表面に大きな陥没が発生した。その原因として、高水頭の水位が地表面より高い位置にあるため、地盤全体が飽和することによって強度が低下したことや、土被りが小さいため十分なアーチ効果が得られなかったことが考えられる。図-7に、土被りが空洞・ゆるみ領域面積の進行に及ぼす影響を示す。図より、土被りが最も小さいCase_IV_2の空洞・ゆるみ領域が他のケースより小さい値を示すが、これはCase_IV_2ではゆるみ領域および空洞が地表面まで達し、変形できる領域が限定されたためであると考えられる。また、土被りが最も小さいCase_IV_2でゆるみ領域の進行が他ケースより遅い傾向が見られるが、その理由については更なる検討が必要である。また、空洞・ゆるみ領域が地表面まで達していないCase_0とCase_IV_1を比較すると、比較的に土被りが小さいCase_IV_1のほうが空洞・ゆるみ領域の進行が速く、その面積も大きい結果が見られた。以上の結果より、堤体内の樋門の位置関係によって、土被りが比較的大きい場合には、地盤内のアーチ効果により、地表面に変状が現れないまま空洞が存在している可能性が示唆される。

5. まとめ

本実験では、樋門周辺の地盤に作用させる水頭を繰返し変化させることにより、樋門周辺にゆるみ領域ならびに空洞が発生・発達する様子を観察し、そのメカニズムの検証を行った。本実験は、断面二次元の実験であり、外水位の変動の影響は、樋門直下の空洞に直接給排水することで発生する条件となっている。

実験により、ゆるみ領域や空洞は、樋門下部の空洞部から樋門側面部、そして地盤上部に向かって、垂直方向に発生・発達し、樋門直上の地盤まで拡大する様子が確認できた。給排水に伴う空洞・ゆるみ領域の発生・発達過程は図-8, 9のようにまとめることができる。図中の実線は現段階での空洞・ゆるみ領域を示し、点線は前段階での空洞・ゆるみ領域を示す。給水時、飽和した土はサクシヨンを失い、土粒子が水中落下するため空洞が拡大される。空洞の拡大に伴い、ゆるみ領域も広まるが、上向きの浸透力が働くためその量は大きくない。排水時、樋門周辺の地盤に下向き（樋門下部空洞方向）の浸透圧が作用することにより、樋門周辺地盤は下部空洞に吸い込まれるように変位し、下部空洞付近の土粒子は空間b（図-2）に吸い出され、空洞が拡大する。土粒子が下向きに移動することにより、ゆるみ領域は縦方向に大きく拡大し、上部地盤にひびが発生する可能性がある。

参考文献

- 1) 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。
- 2) (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。

(2015. 4. 3受付)