

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18116

研究課題名（和文）樋門周辺堤体内のゆるみや空洞の生成・発達機構の解明と河川堤防危険度評価への応用

研究課題名（英文）Mechanism of the generation of cavities and loosened zones around sluiceway and its influence on the seepage stability of river embankment

研究代表者

崔 瑛 (CUI, YING)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・特任教員（准教授）

研究者番号：60583797

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：杭で剛支持された剛構造樋門の周辺堤防内には、ゆるみ領域や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り、その周辺地盤にはゆるみ領域や空洞が伏在している可能性がある。近年頻発する豪雨に備え、樋門周辺地盤におけるゆるみ領域・空洞の有無の確認や対策の実施は急務となっている。本研究では、剛構造樋門の周辺に発生するゆるみ領域・空洞の生成・発達メカニズムを解明し、さらに、これらの影響を考慮した破堤危険度評価手法の提案を試みた。

研究成果の概要（英文）：Most of the existing sluiceways are rigidly supported by piles to prevent the settlement of the structure. However, because of the consolidation settlement of the foundation ground, cavities are occurred at the under part of the sluiceway. On the other hand, large cavities and loosened zones around sluiceway are frequently happens in the field, and it may have a critical impact on the stability of the river embankment. The lower cavities are thought as the trigger for the generation of the cavities and loosened zones around the sluiceway. Therefore, a series of 2D cyclic seepage experiments and 3D monotonic seepage experiments are conducted to clarify the causal relationship between the lower cavities and the cavities and loosened areas around sluiceway. Moreover, 2D seepage experiments which varied the initial dimension of the loosened zone are conducted to establish the influence of the loosened zone on the seepage stability of the river embankment.

研究分野：地盤工学

キーワード：樋門 河川堤防 空洞 ゆるみ領域 浸透 劣化 河川構造物 土～構造物境界

1. 研究開始当初の背景

堤防の破堤原因の一つに、「樋門・樋管、水門・閘門等の堤防等の堤防横断構造物の周辺地盤におけるゆるみや空洞等の変化を原因とする破堤」がある。図-1 に、H23 年 9 月の台風 15 号に発生した樋門上部地盤の変状状況を示す。これらの変状は豪雨時に一瞬として発生したのではなく、長期に渡って樋門の周辺に伏在していたゆるみ領域や空洞等が、豪雨時に拡大、顕在化したものと推定できる。これらの現象は、主に杭基礎に剛支持された剛構造樋門で確認されており、その生成過程については、剛支持樋門特有の現象である基礎地盤の沈下に伴い発生する下部空洞に端を発し、樋門の側方から上部にも空洞等が拡大して行ったものと考えられる(図-2)。しかしながら、これはあくまで仮定であり、実験や数値解析等を通じて理論的に検証されたものではない。

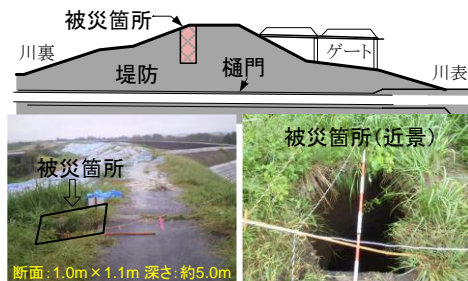


図-1 樋門に起因した堤防の被害¹⁾
(H23.9 台風 15 号)

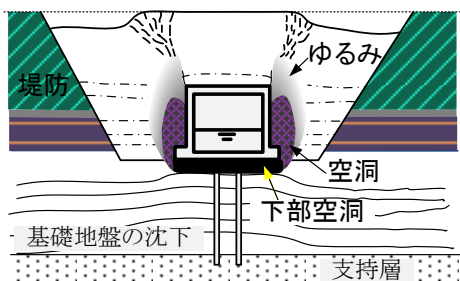


図-2 剛構造樋門周辺の空洞とゆるみ領域²⁾

一方、平成 10 年以降、樋門の設計は柔構造を基本としているが、今なお現存する樋門の約 88% (直轄約 8200 基、県管理樋門はその 10 倍と推定される) は杭基礎を有する剛構造樋門である。これら樋門の周辺には上示のゆるみや空洞が存在すると考えられ、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り、ゆるみ領域や空洞の有無の点検、河川堤防の対する危険度の評価、補修・対策等は至急実施しなければならない課題である。

これまで研究代表者は、樋門下部に空洞があらかじめ存在する場合、河川の繰り返し水位変動をモデル化した二次元繰り返し浸透実験(樋門横断方向)を行い、樋門下部空洞に起因する樋門周辺地盤におけるゆるみ領域・空洞の再現を試みたが、そのメカニズムの解明までには至っていない。

一方、河川堤防においては水位変動だけでなく、高水位時の浸透流等もゆるみや空洞の原因と考えられる。また、実堤体内の水の流れは三次元的であり、樋門縦断方向での浸透流によってもゆるみや空洞の発生・発達有助長される可能性があるが、二次元樋門模型試験ではこのような浸透流が再現されていない。また、ゆるみ領域や空洞といった弱部が河川堤防の浸透安全性に及ぼす影響やそのメカニズムについても十分な検討がなされていない。

<引用文献>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) 中島秀雄：図説 河川堤防, 技報堂, pp.206-210, 2003.

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究は樋門周辺地盤におけるゆるみ領域および空洞の生成・発達のメカニズムを明らかにした上、その影響を考慮した河川堤防の危険度評価方法の提案を目的とする。以下に、本研究で明らかにしたい具体的な項目を示す。

(1) 樋門周辺地盤におけるゆるみ領域・空洞の生成・発達のメカニズムの解明

樋門周辺地盤のゆるみ領域や空洞の生成を促す外力として、常時における外水位の変動、豪雨等による高水位時における浸透流が考えられる。ここでは、既往の研究に引き続き、水位変動および浸透流を再現した二次元と三次元浸透模型実験を行い、ゆるみ領域・空洞を引き起こす要因を特定と、そのメカニズムの解明を目指す。なお、模型実験では浸透に伴う土砂の挙動だけでなく、間隙水圧および空気圧の計測に挑み、上記メカニズムの理論的背景を明確にする。

(2) ゆるみ領域・空洞が堤防の浸透に対する安全性に及ぼす影響の検討

ここでは、ゆるみ領域や空洞を再現した浸透模型実験を行い、劣化領域が堤防の浸透安全性に及ぼす影響とそのメカニズムについて検討する。具体的にはゆるみ領域や空洞を有する堤防の浸透流の特性を解明し、その浸透流に起因する堤防の浸透破壊のメカニズムについて検討する。

(3) ゆるみ領域・空洞による影響を考慮した河川堤防の危険度評価方法の提案

ここでは(1)(2)の知見をまとめ、樋門周辺のゆるみ領域や空洞の存在が堤体全体の安定性に及ぼす影響を適正に評価する手法を開発する。具体的には、現場状況から樋門を有する堤防の破堤危険性をランク付け、至急補修が必要なもの、豪雨時に重点観察が必要な項目等の選別方法を提案する。

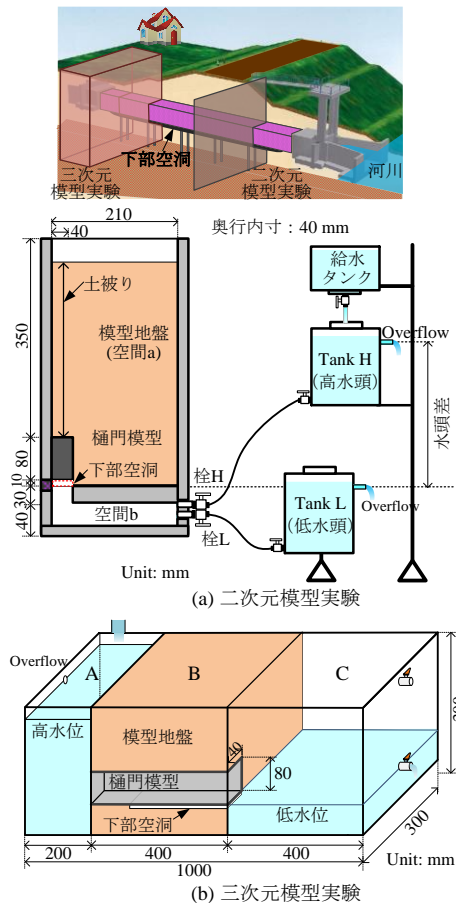


図-3 二次元および三次元模型実験の概要

3. 研究の方法

研究項目ごとの研究方法を以下に示す。

(1)では、図-3 に示す二次元および三次元模型実験を実施し、ゆるみ領域や空洞が生成・拡大するメカニズムを明確にし、これらの現象が発生しやすい施工条件や環境条件について検討する。

(2)では、(1)と同じく模型実験を通じ、ゆるみ領域や空洞が、河川堤防の浸透流特性と浸透安全性に及ぼす影響を明確にする。

(3)では、(1)、(2)の研究結果と現場データに対する比較・分析により得られた知見をまとめ、実現場に適用できる、ゆるみ領域や空洞による影響を考慮した河川堤防の浸透に対する危険度評価方法を提案する。

4. 研究成果

4.1 樋門周辺地盤におけるゆるみ領域・空洞の生成・発達のメカニズム

(1) 模型実験の概要

図-3(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、洪水時と平時における水位の繰返し変動を模擬した。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 1.0 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色砂 (最大粒径 280 μ m) を敷いた。模型地盤作成後、高水位および定水位を繰返し作用させ、その際の地盤の力学挙動および間隙水圧の計測を行った。

図-3(b)に三次元模型実験装置の概要を示す。二次元の実験土槽と同様に透明アクリル板で作製し、幅 1000mm、高さ 300mm、奥行 300mm の寸法である。仕切り板によって、高水位の水槽 A、樋門を含む堤体の一部を模擬する土槽 B、低水位の水槽 C に区切られており、水槽 C は、模型地盤から流出する土砂の受け皿にもなる。模型地盤内に設置する樋門模型はコの字型断面を持つ透明アクリル製であり、樋門内部から側壁ならびに底盤下部の地盤の状況が観測できる。

模型地盤は二次元模型実験と全く同様の手順で作製した。樋門模型の直下には 10mm 厚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、実験時にはそのスペーサーを抜き取ることによって樋門底盤下にあらかじめ存在する空洞を模擬した。また、定常浸透場での実験を行うため、水槽 A, C の水位を所定の高さにしてから、地盤がほぼ飽和し、定常状態に達するまで、スペーサーを挿入したまま静置した。この静置時間は、全実験共通で 45 分間とした。

(2) 二次元模型実験結果

ここでは表-1 に示す各ケースを例に、水頭差および土被りが、その過程に及ぼす影響について議論する。

表-1 二次元模型実験における実験条件

	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	30	30	260
Case_II_2				180

図-4 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状が見られた時点 (左から順番に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。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) に樋門上部部に空洞が発生す

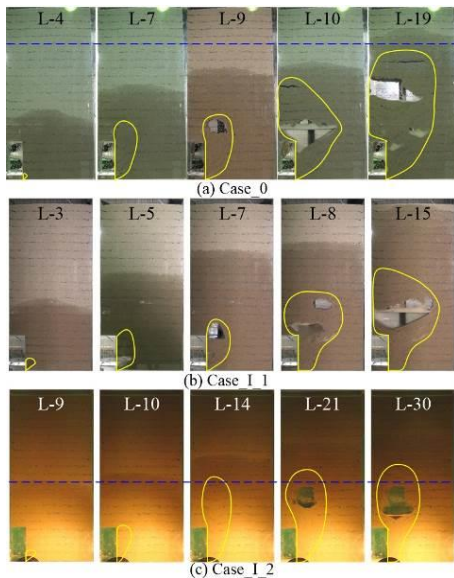


図-4 水頭差による影響

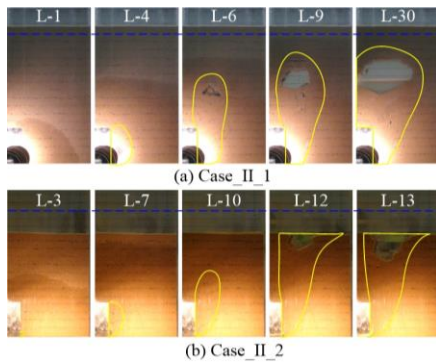


図-5 土被りによる影響

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。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。

図-5に、土被りが異なるケース(Case_0、Case_II_1、2)における空洞の発生・発達過程を示す。土被りが比較的大きいCase_0、II_1では、空洞が地表面まで到達していないが、土被りがCase_0の半分であるCase_II_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で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。換言すると、土被りが比較的大きい場合には、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ことが示唆される。

(3) 三次元模型実験結果

ここでは、土被り240mm、水頭差160mm(水槽Aの水位240mm、水槽Cの水位80mm)のケースを説明する。

図-6に、実験装置の正面から観測された浸

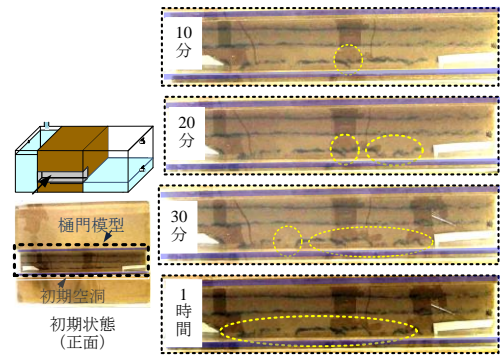


図-6 樋門側面地盤におけるゆるみの発生

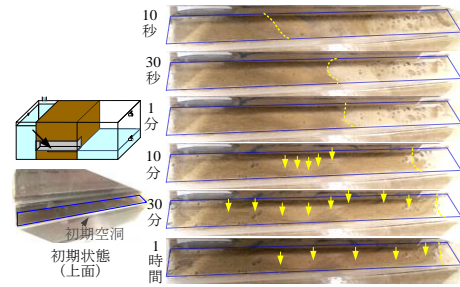


図-7 下部空洞における土砂流出

透に伴う樋門側壁周辺の変位状況を示す。写真中の点線は、色砂の変形状況から顕著な変位が見られる地盤領域である。実験開始後10分経過した際、樋門側壁周辺地盤に敷設した一層目の色砂が下向きに変形し始めるが、これは樋門周辺地盤が下向きの浸透に伴って樋門下部空洞に流入し、側壁周辺にゆるみが発生したためと考えられる。樋門側壁周辺の地盤変位は徐々に大きくなり、一時間後には最下層の色砂が全体的に下向きに変位している。図-7に、樋門内部から観察された樋門底盤下部の様子を示す。模型地盤製作時に樋門模型下部に挿入したスペーサーによって、長さ320mmの初期下部空洞を設置していた。そのため、実験開始直後から、樋門下部では水平方向の顕著な水流が発生するが、流入してくる土砂によって下部空洞が徐々に埋められ、10分後にはほぼ土砂で充満される。これらの土砂は、初期下部空洞より上流側の樋門下部の土砂や樋門側壁周辺地盤から流入した土砂である。しかし、土砂で充満したように見える下部地盤においては、蛇行した水みちがチャンネルリング(連通)しており(写真-6中の矢印で示した部分)、下部空洞に流れ込んだ土砂が水みちの速い水流に乗って低水位水槽Cに徐々に流出した。

(4) ゆるみ・空洞の発生メカニズム

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ル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

4.2 樋門周辺地盤におけるゆるみ領域・空洞の生成・発達のメカニズム

ここでは、樋門周辺地盤のゆるみ・空洞の広がり具合が、洪水時における堤防の浸透安全性に及ぼす影響について検討した。具体的には、**図-3(a)**の装置を用い、二次元繰返し浸透模型実験を実施し、比較的低い所定の水頭差を繰返し作用させてゆるみを所定の高さまで生成させた後、洪水をモデル化した高い水頭差を作用させ、樋門周辺地盤の力学挙動について観察した。以下に、(樋門下端を基準面に、Case_1で40mm、Case_2で80mm、Case_3で160mm)ゆるみ領域の初期高さが異なる三ケースの結果について説明する。所定の高さまでゆるみ領域が達した後、TankHの高さを調整し、水頭差を320mmに上昇させ、急激な洪水をモデル化した。

図8~10に、Case_1~3における、初期ゆるみが所定の位置まで発達した時点と、高い水頭差を設けた後、各完全給排水サイクル後の様子を示す。写真中の実直線は高水位(TankH)の高さ、点線は目視で観察できる浸潤線の位置を示している。なお、実曲線は実験中に撮影した画像における色砂の歪み具合から推定したゆるみ領域の境界を示し、点線は目視で判断できる空洞領域を示す。いずれのケースにおいても、比較的低い水頭差を設けた初期段階の1回目の給排水後(L_L1)、ゆるみ領域が所定の位置まで発達している。その後、水頭差を320mmに変化させ、給排水に伴う樋門周辺地盤の挙動を観察した。

初期段階において初期劣化領域を樋門高さの半分まで設けたCase_1では、完全給排水1回目(L_L1)で樋門高さの2.5倍の領域までゆるみ領域が発達し、上部地盤に空洞が発生した。その後、ゆるみは上部および横に拡大して行き、完全排水3回目(L_L3)には地表面近くまでゆるみ領域が発達し、樋門の3倍の高さまで空洞が拡大している。

初期劣化領域を樋門上2cmまで設けたCase_2では、完全給排水1回目(L_L1)で、ゆるみ領域が樋門直上220mmの高さまで拡大し、さらに樋門上部地盤で小さい空洞が確認できた。その後の給排水過程において、空洞・ゆるみ領域が急激に地表付近まで拡大していく様子が見られる。

初期劣化領域を樋門より高い位置まで設けたCase_3では、比較的低い水位差を設けた初期段階における浸透により、樋門上部地盤に既に小さい空洞が発生している。高水頭差における給排水1回目(L_L1)で、ゆるみ領域が樋門直上280mmの領域まで拡大して行き、その後の給水過程においてゆるみ領域が地表面近くまで発達すると同時に複数の空洞が確認でき、完全排水2回目(L_L2)ではゆるみ領域と空洞がさらに拡大した。

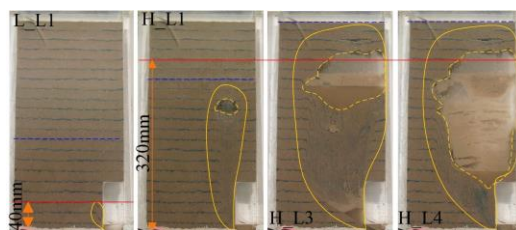


図-8 Case_1における模型地盤の様子

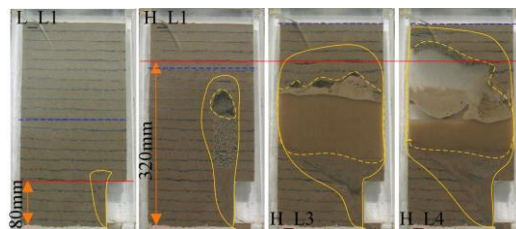


図-9 Case_1における模型地盤の様子

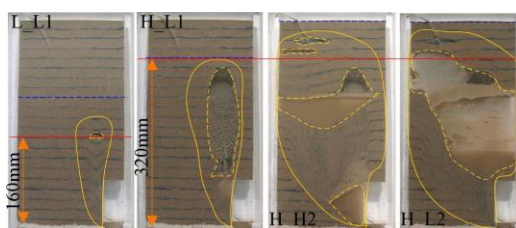


図-10 Case_1における模型地盤の様子

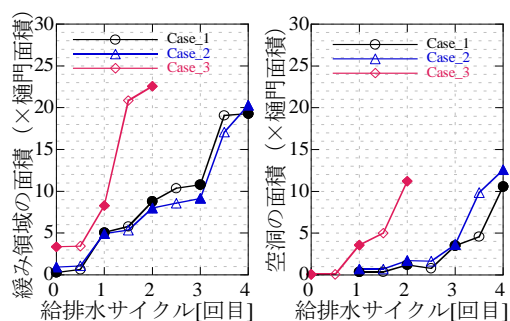


図-11 ゆるみ領域と空洞の面積の推移

図-11に給排水による空洞とゆるみ領域の面積の推移を示す。密実なマーカーは排水終了後の値、内空のものは給水終了後の値を示す。初期段階でゆるみ領域を比較的高い位置まで設けたCase_3ではCase_1,Case_2よりゆるみ領域・空洞の進展が早い結果が見られた。一方、Case_1,Case_2はほぼ同じ傾向を示している。すなわち、初期段階において所定の劣化領域が樋門より高い位置まで発達していた場合、その後続の高い水頭差の作用によるゆるみや空洞の発生・発達が早いといえる。以上の結果より、初期の劣化領域が広いほど、その後の高い水頭差の作用によるダメージが大きいことが分かった。特に、初期劣化領域が樋門の高さ以上に発生した場合は、その後発生する一回目の洪水によって周辺地盤に大きい空洞が発生し、河川堤防の安全性に大きい影響を及ぼす可能性があると考えられる。一方、ゆるみが樋門より低く、もしくは樋門とほぼ同じ高さまで発生した場合は、劣化の進行速度が明らかに遅い。

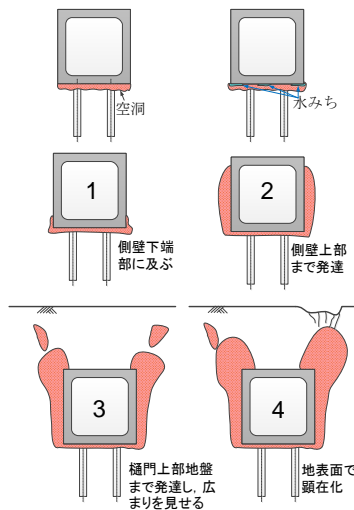


図-12 ゆるみ領域の各レベル段階

表-2 ゆるみ領域と破堤危険度

	ゆるみ領域の説明	樋門周辺の破堤危険度
レベル1	底版直下における空洞化領域が、側壁下端部に及び、側壁に沿って緩み領域が発生	底版直下における空洞化領域もしくは水みちが、側壁下端付近の緩み領域・空洞化に進展する。
レベル2	側壁に沿う空洞化領域が発達して、側壁の上端に及ぶ。	<ul style="list-style-type: none"> 空洞が堤防横断方向に連続し、連通している。 堤防横断方向に連通下水みちが形成されている。
レベル3	<ul style="list-style-type: none"> 空洞化領域が樋門上部地盤まで発達し、空洞化領域が横方向に広まる。 土被りが小さい場合、地表面（堤防天端、堤内地の地表等）にクラック・沈下の発生が確認されるなどの変状が発生。 	<ul style="list-style-type: none"> 洪水時、樋門周辺の空洞化領域で水位の変化が卓越し、空洞化領域が急激に広まり、地表面の陥没等が発生する。 堤防の急激な劣化とともに、大量の浸透水が堤内地に浸出する。堤内側では、月の輪工、釜段工等による水防対策が必要。
レベル4	地表面に発生したクラックが陥没溝として確認されるなど、側壁の空洞化領域の影響が、地表面で顕在化	洪水時には、切迫する破堤を防止するための緊急水防活動が必要となる。

4.3 ゆるみ領域・空洞による影響を考慮した河川堤防の危険度評価方法の提案

樋門等の堤防横断構造物の周辺堤防のゆるみ領域と破堤危険度指標の評価樋門等の堤防横断構造物の周辺堤防・直下地盤におけるゆるみ領域は、常時（降雨）や中小洪水の繰り返し作用に起因する堤防横断構造物の直下地盤・周辺堤防ゆるみ領域・空洞の発展状況を推定すると、図-12に示すような6段階に大別できると考えられる。

樋門等堤防横断構造物周辺堤防の“破堤危険度”は、常時における樋門周辺堤防のゆるみ領域・空洞等の弱点部の広がり、洪水時において破堤に至る原因となる危険性の大きさを示すもので、図-12に示す剛支持樋門における空洞化の進行イメージ図において、“破堤危険度指標をレベル1, 2, 3, 4”の4段階に設定したものである（表-2）。樋門等堤防横断構造物周辺堤防の安全性を確保するためには、樋門・水門などの構造物周辺堤防の定期点検・調査により、側壁周辺のゆるみ・空洞化の広がりやその特性を調査して、必要な安全管理を実施する必要がある。定期点検・調査により、現有の樋門等堤防横断構造物が破堤危険度指標（破堤危険度指標：レベル1, 2, 3, 4）でどのレベルにあるかを把握することで、樋門等堤防横断構造物の周辺堤防の安全管理を実施する。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 河川構造物周辺堤防における空洞およびゆるみ領域の発生・発達に関する実験的検討, 地盤工学会会誌, Vol.63, No.9, pp.22-25, 2016 (査読有)
- ② 崔瑛, 小高猛司, 李圭太, 劉天明: 樋門下部空洞をトリガーとする剛構造樋門周辺堤防の劣化過程の検討, 第28回中部地盤工学シンポジウム論文集, Vol.28, 75-80, 2016 (査読有)
- ③ 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 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, 河川技術論文集, 第21巻, pp.395-400, 2015 (査読有)

〔学会発表〕（計7件）

- ① 滝澤伊織: 土一構造物境界が内部浸食に及ぼす影響に関する実験的検討, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018
- ② 劉天明: 樋門周辺地盤のゆるみ・空洞領域が河川堤防の浸透安定性に及ぼす影響, 第71回土木学会年次学術講演会, 2016
- ③ 劉天明: 樋門周辺堤体の劣化が河川堤防の浸透安定性に及ぼす影響, 第51回地盤工学研究発表会, 2016
- ④ 劉天明: 水位変動に伴う樋門周辺堤防の劣化に及ぼす水頭差の影響, 土木学会中部支部研究発表会, 2016
- ⑤ 劉天明: 繰返し浸透場における樋門周辺地盤の劣化に関する三次元模型実験, 第70回土木学会年次学術講演会, 2015
- ⑥ 崔瑛: 剛構造樋門周辺堤防の劣化に関する三次元模型実験, 第50回地盤工学研究発表会, 2015
- ⑦ 劉天明: 水位変動に伴う剛構造樋門周辺堤防の劣化に関する模型実験, 第50回地盤工学研究発表会, 2015

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
崔瑛 (CUI, Ying)
横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・特任教員 (准教授)
研究者番号: 60583797