

河川堤防樋門周辺地盤内のゆるみ領域や空洞の生成・発達現象の観察

Observation of development of loose and void area around sluiceway in river levee

中村太意¹，小高猛司²，崔 瑛²，李 圭太³，榎本文勇⁴

- 1 名城大学大学院・理工学研究科建設システム工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 株式会社 建設技術研究所・大阪本社水工部
- 4 一般財団法人 建設技術研究所

概 要

樋門などの河川堤防横断構造物の周辺に生じるゆるみ領域や空洞は、河川堤防の安全性に懸念を与える。現存する樋門の多くが杭によって剛支持された剛構造樋門であり、それらの底版下部には基礎地盤の沈下等に伴う空洞が発生しやすく、さらに、その底部の空洞に端を発し、樋門側部から上部にまで空洞やゆるみ領域が拡大していくと考えられる。本論文では、河川の水位変動に伴って樋門周辺の土砂が吸い出されることにより、樋門底部の空洞が側部から上部に広がるシナリオに基づいた模型実験を実施することにより、空洞等の発生・発達のメカニズムを検証した。具体的には、繰り返し浸透に伴う樋門周辺の空洞化の過程を、浸透水圧の変動幅や継続時間の影響等に注目して観察した。その結果、ゆるみ領域や空洞の発達は、樋門側部から上部に向かって鉛直に拡大するが、その度合いは水圧の変動量や継続時間が長いほど大きいことが示された。また、土被りが低い場合には、ゆるみ領域は地表面まで到達することも示された。

キーワード：河川堤防，樋門，空洞化，模型実験，浸透

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¹⁾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 1²⁾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、河川管理上、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、実験や数値解析では明確に示されていないのが現状であるため、本論文では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、洪水等によって繰り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

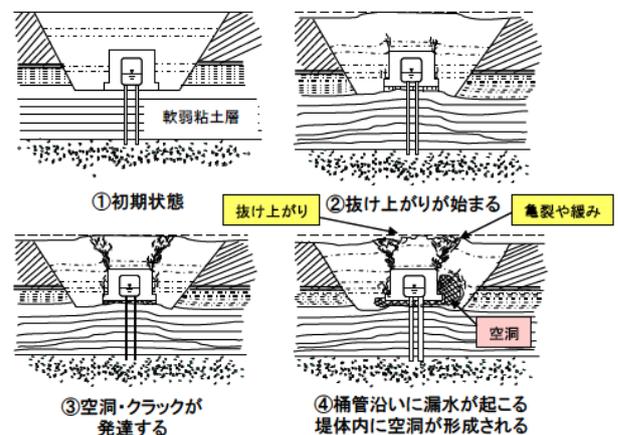


図 1 剛構造樋門周辺の空洞およびゆるみ領域の発生・発達過程のイメージ図²⁾

樋門の側部から上部に広がると仮定する。模型実験では、方向を変えて繰り返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、水圧の変動量や浸透時間等がゆるみ領域や空洞の発生・発達に及ぼす影響について検討する。

2. 実験概要

図 2 に、本実験で用いた模型実験土槽の概要を示す。奥行き内寸は 4cm である。樋門模型は、地盤および樋門の対

称性を考慮して半断面のみを模擬し、杭による剛支持を表現するため実験土槽に固定した。また、樋門直下の領域に意図的に空洞(図2中の赤線で囲んだ部分)を設け、基礎地盤の沈下に伴って存在している樋門直下の空洞を模擬した。本実験では、樋門周辺の地盤に作用させる水頭を繰り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り返し作用する条件下での地盤挙動を観察した。図3に実験概要を示す。本実験では、模型地盤に作用する水頭を変化させるための給排水装置(Tank_H, Tank_L)と、Tank_H, Lに給水するための給水タンクを用いた。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。実験中、給水タンクの栓(バルブ)は常に開き、Tank_Hのオーバーフローを確保する。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、実験土槽に作用させる水頭を繰り返し変化させる。本実験では実験土槽の底面を基準面とし、xおよびyはそれぞれ土槽底面からTank_LおよびHまでの位置水頭である。

以下に、実験手順を示す。なお、本実験では実験試料として三河珪砂6号を用いた。

(I) 珪砂を含水比2.0%に調整し、間隙比1.0となるように各層2cm厚ずつ慎重に締め固める。(II) 層間の境界をなくすため、各層の締め固め後に層の表面をほぐす。実験の際に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(三河珪砂と同粒径:最大粒径280 μ m)を敷く。またカラーサンドによる境界をなくすため、再度層の表面を軽くほぐす。(III) 手順I, IIを繰り返し行い、模型地盤を作製する(土被りが32cmの場合は21層、土被りが24cmの場合は17層、土被りが16cmの場合は13層)。(IV) 給水タンクおよび給排水装置(以降給水装置をTank_H, 排

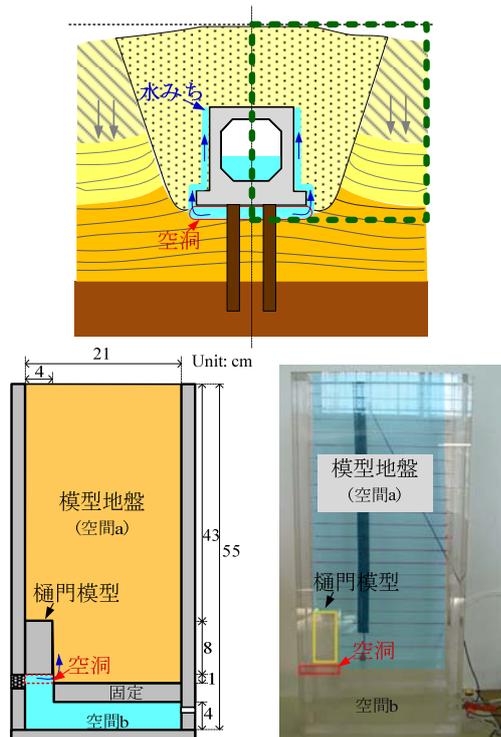


図2 模型実験土槽の概要

水装置をTank_Lと称す)に十分に水を入れ、Tank_H, Lの給排水口と実験機の給排水口をチューブにより繋げる。Tank_Hは図3に示すように模型地盤より高い位置(以降位置Hと称す)、Tank_Lは樋門模型下に水位が同高となる位置(以降位置Lと称す)に設置する。栓H, Lの開閉時間、すなわち各高低水頭を維持する継続時間を設定する。位置H(高水頭の継続時間)すなわち栓Hの開放時間をTime_Hとし、位置L(低水頭の継続時間)すなわち栓Lの開放時間をTime_Lとする。(V) Tank_Hと実験土槽を繋げている栓Hを開き、給水を行う。(VI) 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。(VII) 所定の時間(Time_H)を経過した後、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。(VIII) 所定の時間(Time_L)を経過した後、手順(VI)~(VIII)を繰り返し行い、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。

本研究では、水頭差、土被り、浸透時間、初期空洞高を変化させ、表1に示す計9ケースについて検討を行った。水頭差は、基準面(土槽底面)からのTank_Hの高さyを変化させることにより調整し、河川増水時に堤体内に生じる樋門周辺の水頭の変化を模擬した。浸透時間、すなわち高水位と定水位の継続時間Time_H, Lについては、増水時と渇水時を理想化したものであるが、実時間スケールとの直接的な関連はない。土被りは樋門高さの2倍(16cm)、3倍(24cm)および4倍(32cm)とした。また、初期空洞高は図2の空間bと模型地盤が接する図2中の赤線で囲んだ部分の鉛直高とし、樋門直下に発生した空洞の大きさを模擬した。これらの影響が堤体内における樋門周辺地盤のゆるみ・空洞の発生・発達過程に及ぼす影響を検討した。

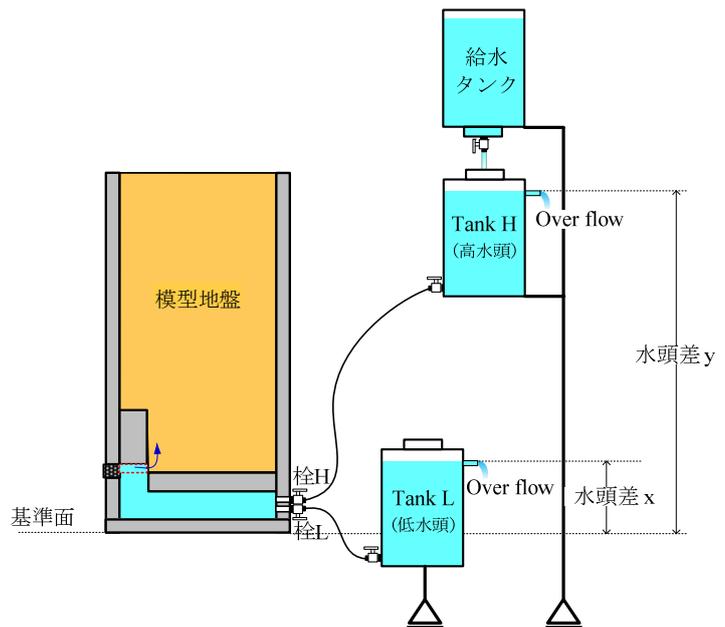


図3 模型実験の概要

表 1 実験条件

	y (cm)	x (cm)	Time_H (sec)	Time_L (sec)	土被り (cm)	初期空洞高 (cm)
Case_1	40	8	30	30	32	1
Case_2	60	8	30	30	32	1
Case_3	20	8	30	30	32	1
Case_4	40	8	60	60	32	1
Case_5	40	8	10	10	32	1
Case_6	40	8	30	60	32	1
Case_7	40	8	30	30	24	1
Case_8	40	8	30	30	16	1
Case_9	40	8	30	30	32	2

3. 実験結果

3.1. 空洞の発生・発達過程

3.1.1. ゆるみ領域および空洞の発生・発達 (Case_1)

ここでは、Case_1 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。すなわち、Tank_H, L の位置 (以降、位置 H および位置 L と称す) を $y=40\text{cm}$, $x=8\text{cm}$ (水頭差 32cm) と設定し、継続時間 Time_H, L をともに 30 秒と設定した。写真 1 に、Case_1 における模型地盤に典型的な変化が観察された時点 (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できた時、樋門上部地盤に空洞が発生した時、および実験最終状態) の様子を示す。また図 4 には、位置 H および L 毎の画像から読み取った土試料の流失量の変化を示す。図 4 より、位置 L-5 回目まで模型地盤から土試料の流失がほぼ見られず、位置 L-5 回目で位置 H, L において土試料の流失が見られた。その後、位置 H-10 回目で多量の土試料の流失が見られ、樋門側面部の土試料の強度が最もゆるくなるのが分かる。それ以降では位置 H における流失はほぼなくなり、主に位置 L において土試料の流失が繰返し発生した。これは、位置 L における水頭の低下により樋門側面部の土試料が吸出しを受けるためだと考えられる。なお、土試料の流失量は H-10 回目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。

写真 1 より、位置 L-4 回目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、位置 L-5 回目では土試料の流失が大きくなり、空洞が拡大していく様子が見られた。また位置 L-6 回目には、樋門側面部の模型地盤にゆるみ領域が発生し、位置 L-7 回目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。またその後の位置 H-8 回目では、拡大した空洞部分に上向き浸透流が流入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。位置 L-8 回目では、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。位置 H-10 回目では先程発生した空洞部に浸透することにより、空洞は側方に拡大していった。位置 L-10 回目では空洞および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 22cm (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。またその直前の位置 H-10 回目においては多量の土試料が流失していることより、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。また位置 L-11 回目に、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、位置 H⇔L の工程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。

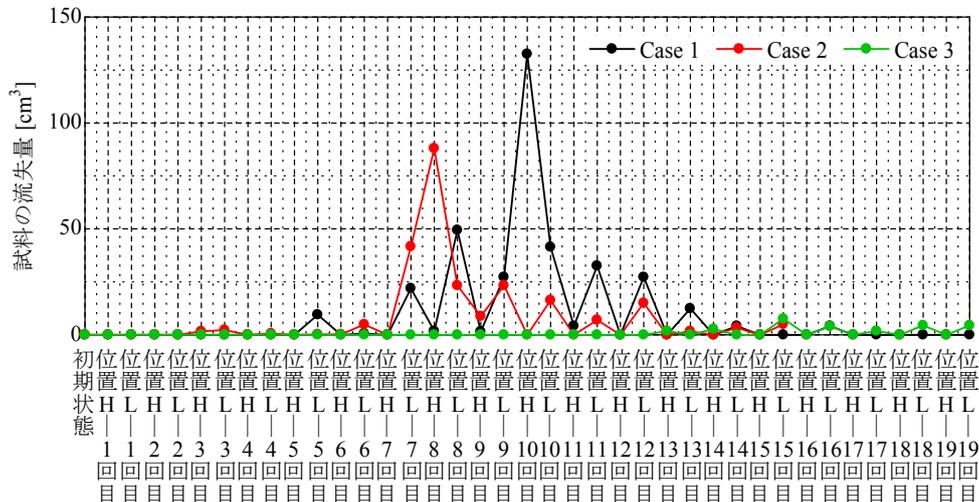


図 4 土試料の流失量 (Case_1 ~ 3)

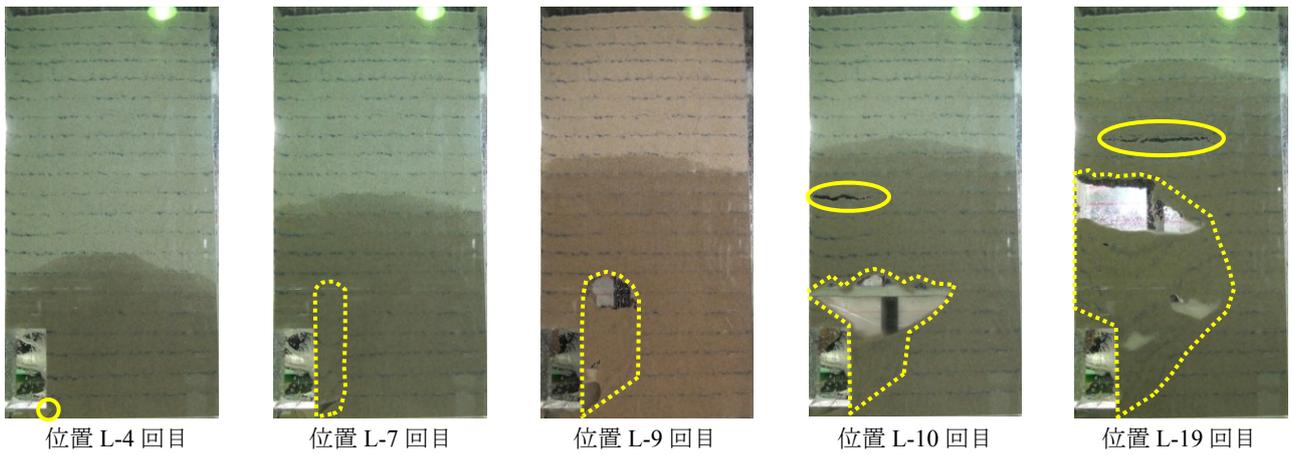
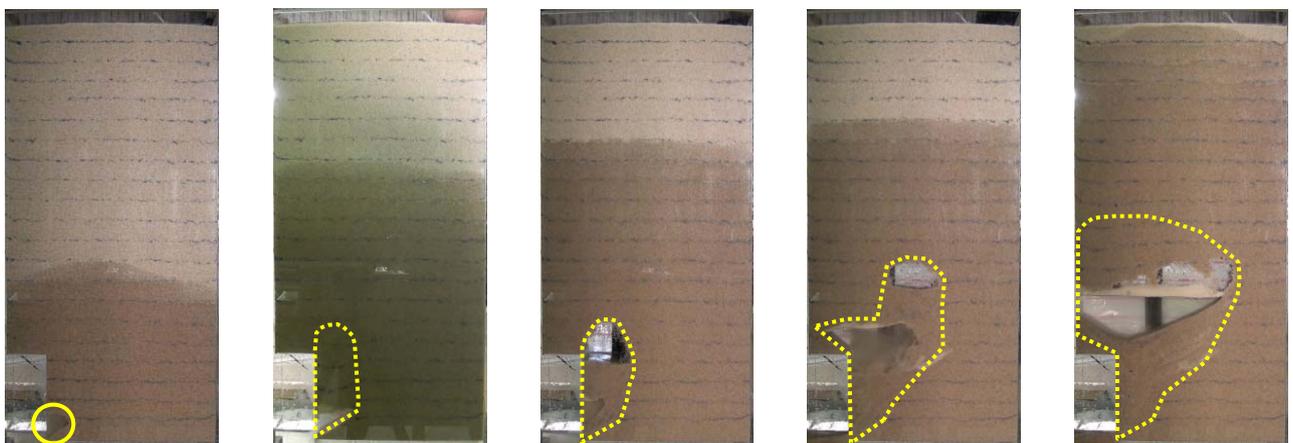
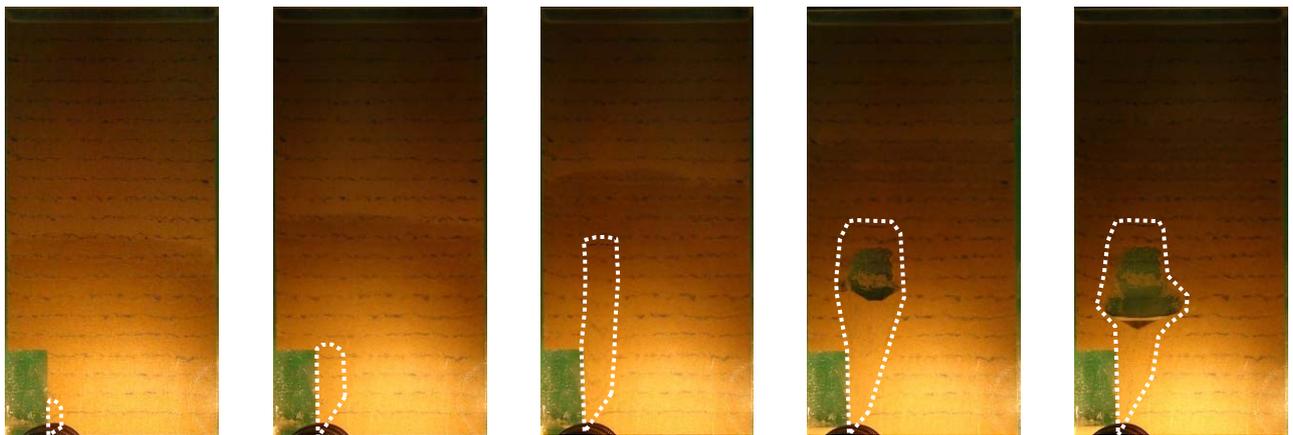


写真1 空洞・ゆるみ領域の発生・発達過程 (Case_1)



(a) Case_2



(b) Case_3

写真2 水頭差が空洞・ゆるみ領域の発生・発達に及ぼす影響

3.1.2. 水頭差による影響 (Case_1, Case_2, Case_3)

写真2に、水頭差が異なるケース (Case_1, 2, 3) における、3.1.1と同様な模型地盤に典型的な変化が観察された時点の様子を示す。表1より、Case_1の Tank_H および Tank_L の水頭差は 32cm, Case_2 の水頭差は 52cm, Case_3 の水頭差は 12cm である。全ケースにおいて Tank_L はい

ずれも基準面から $x=8\text{cm}$ の位置に設置し、水頭差の差異は Tank_H すなわち給水タンクの高さ y により設けている。写真1,2より、Case_1では4回目の排水 (位置L) を行う際に、空洞が発生しているのに対し、水頭差が大きい Case_2 では3回目の排水時 (位置L-3回目)、水頭差が小さい Case_3 では9回目の排水時 (位置L-9回目) にそれ

ぞれ空洞が発生している。また Case_1 では 9 回目の排水時（位置 L-9 回目）に樋門上端部に空洞が発生するのに対し、Case_2 では 7 回目の排水時（位置 L-7 回目）、Case_3 では 14 回目の排水時（L-14 回目）にそれぞれ空洞が発生するなど、Case_2、Case_1、Case_3 の順に空洞の発生・発達

が遅れていることがわかる。また、模型地盤内への浸潤状況を比較すると、同様な順に浸潤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発生・発達が進むことがわかった。

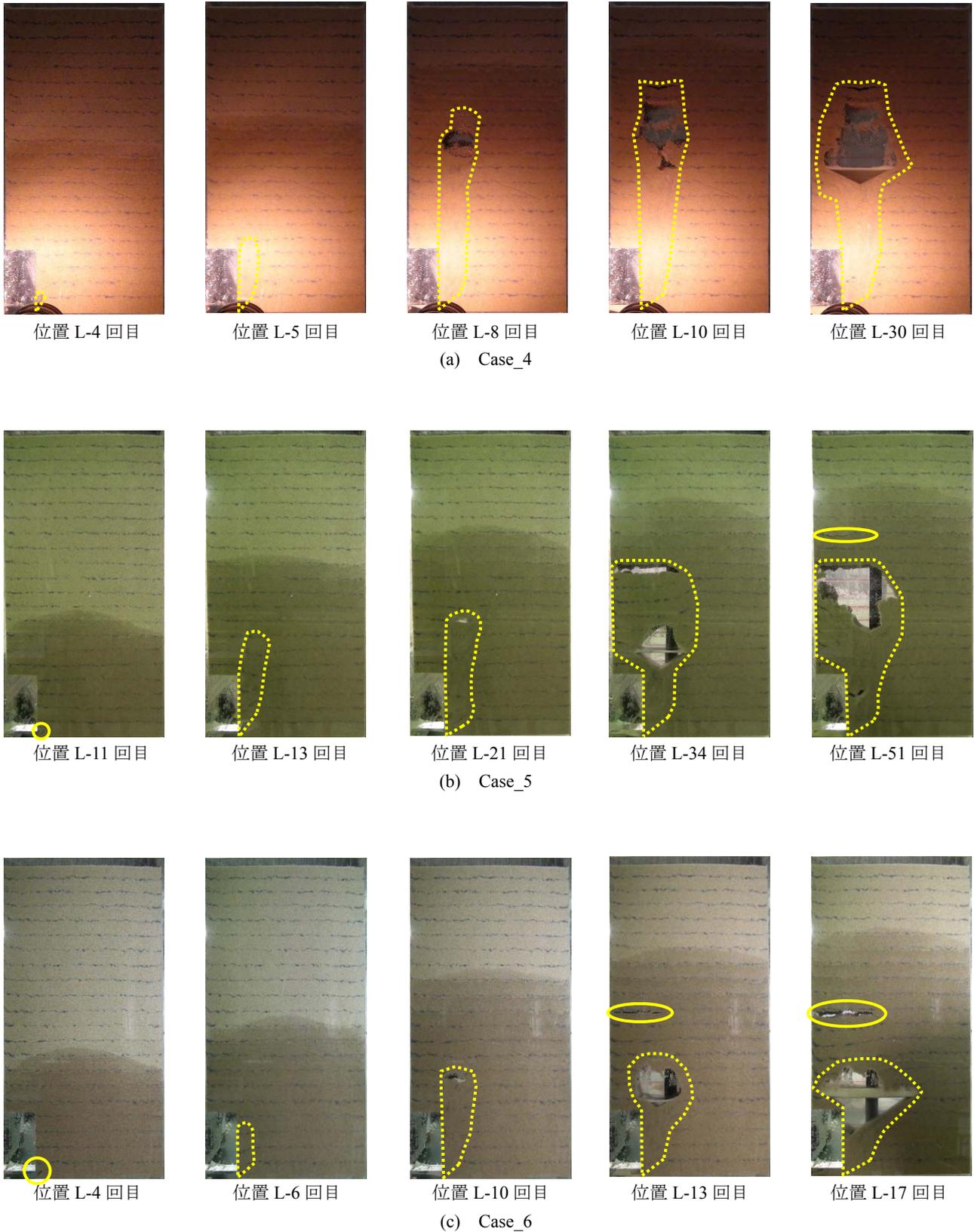


写真3 浸透時間が空洞・ゆるみ領域の発生・発達に及ぼす影響

3.1.3. 浸透時間（浸透条件）の影響（Case_1, Case_4, Case_5, Case_6）

写真3は、浸透時間が異なる4ケース（Case_1, 4, 5, 6）における、模型地盤に典型的な変化が観察された時点（3.1.1と同様）の様子である。なお、浸透時間とは位置H, Lにおける所要の時間Time_H, Lを示す。写真3より、浸透時間が異なっても、空洞の発達状況はほぼ同様であることがわかる。Time_H, LのいずれもCase_1の2倍であるCase_4は、空洞発達の進度はCase_1とほぼ同様であるが、樋門の上端部に発生する空洞の位置はCase_1より高くなった。一方、Time_H, LのいずれもCase_1の3分の1であるCase_5は、約3倍の給排水回数で空洞の発達が観察されている。また、Time_LのみCase_1の2倍としたCase_6の空洞発生・発達の進度はCase_1とほぼ同様であり、空洞が発生した位置に多少の違いが見られた。以上より、空洞の発達の進度にはTime_H（給水時間）が密接に関連している。

3.1.4. 土被りによる影響（Case_1, Case_7, Case_8）

写真4に、土被りが異なるケース（Case_1, 7, 8）における空洞の発生・発達過程を示す。写真1～3で見られたように、Case_1～6では土被りが比較的大きい32cmであるため、水頭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。一方、写真4に見られるように、土被りをCase_1の4分の3としたCase_7においては、Case_1～6と同様に空洞が地表面までは到達していないが、土被りをCase_1の2分の1としたCase_8では、空洞が地表面まで発達し、地表面が大きく沈下する現象が見られた。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。

3.1.5. 初期空洞高による影響（Case_1, Case_9）

写真5に、樋門直下の初期空洞高が異なる両ケース（Case_1, 9）における空洞の発生・発達過程を示す。写真5より、初期空洞高がCase_1の2倍であるCase_9は、1回目の給水時（位置H-1回目）に、上向き浸透流により樋門境界部を侵食し、その後の1回目の排水時（位置L-1回目）に、ゆるんだ領域の試料土が多量に流失した。また3回目の排水時（位置L-3回目）に、樋門の上端部に空洞が発生し、Case_1よりも早い段階で空洞が発達していることがわかる。以上より、樋門直下の初期の空洞が大きいほど、浸透および樋門周辺に発生する空洞発生・発達の発達が早まることがわかる。

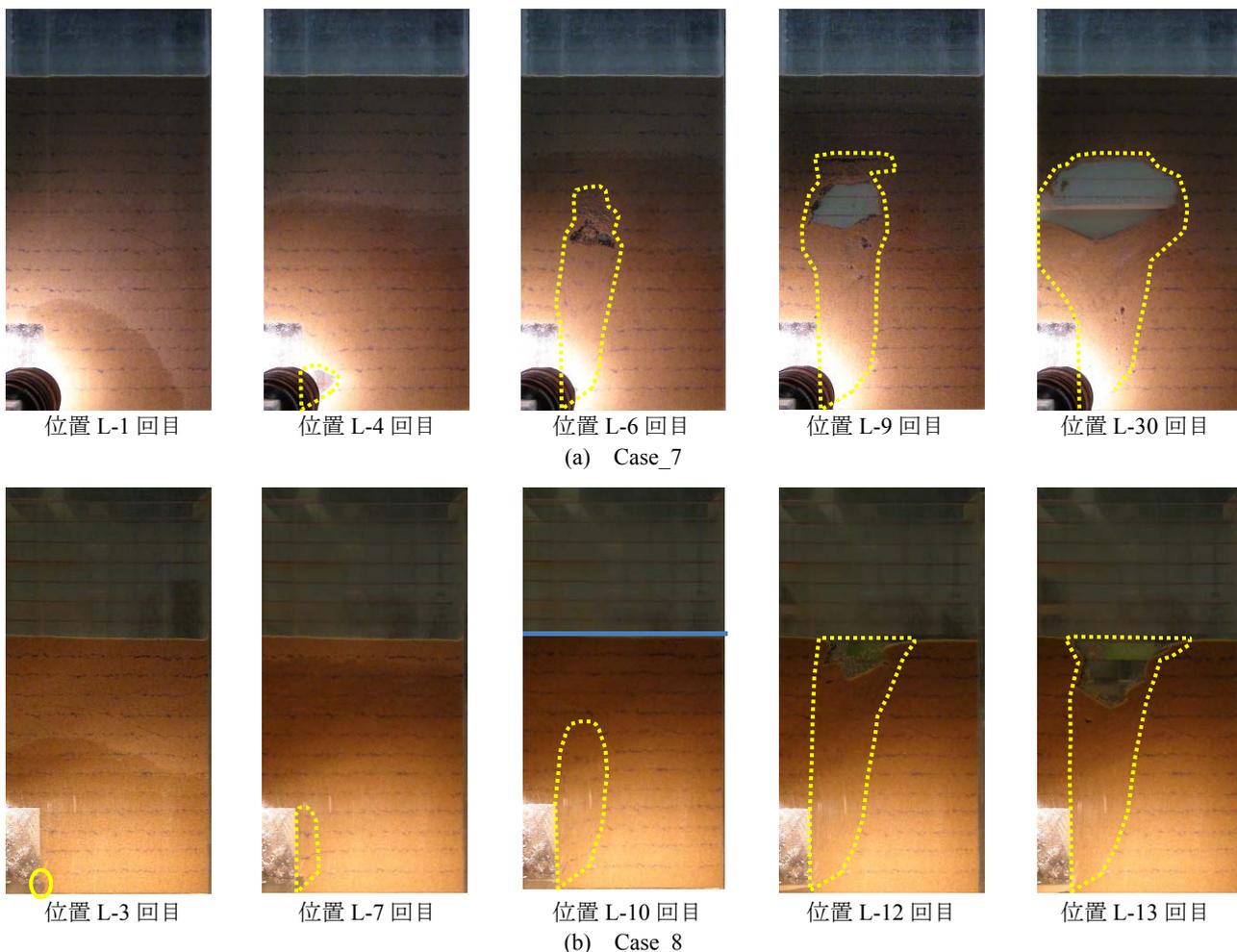


写真4 土被りが空洞・ゆるみ領域の発生・発達に及ぼす影響

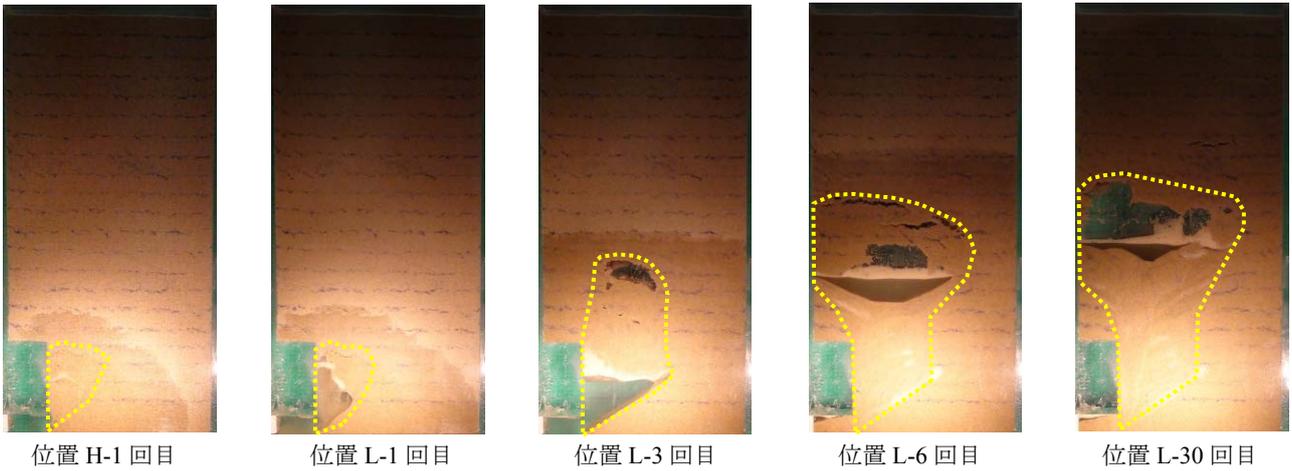


写真5 樋門直下の初期空隙高が空洞・ゆるみ領域の発生・発達に及ぼす影響 (Case_9)

3.2. 樋門周辺地盤の変位

本実験では、排水過程（位置 L での Time_L）において高速度カメラ（HAS-L1, Detect 社）を用いて樋門付近の土粒子の変位の状況を撮影した。さらに、撮影した画像に対して、PIV 法による画像解析を行い、排水過程における地盤の変位について詳細な検討を行った。図 5 に Case_7, 図 6 に Case_8 における典型的なモデル地盤の変位ベクトル（Vector_1, 2）をそれぞれ示す。この変位ベクトルは、排水過程における、代表とする 2 時刻を基点として 0.5 秒間の変形量から計算したものであり、図のベクトルの長さは、Case_7 においては実際の変位の 4 倍、Case_8 においては

10 倍に拡大して表示している。図 5, 6 より、排水に伴い樋門付近の土粒子は吸い込まれるように樋門下部の空洞部に向かって変位していることが分かる。さらに、空洞発生後、空洞上部の地盤も変位は小さくなるが、停止することなく、樋門下部の空洞部に向かって変位していく現象が見られる。また、排水過程の終了間近では、変位がおちつくが、給排水の回数が増えるにつれて変位の発生は継続するようになるとともに変形の領域も拡大してゆく。これは給排水の回数が増えるにつれて浸潤領域が大きくなるからであり、樋門の境界部分における変位も大きくなる。

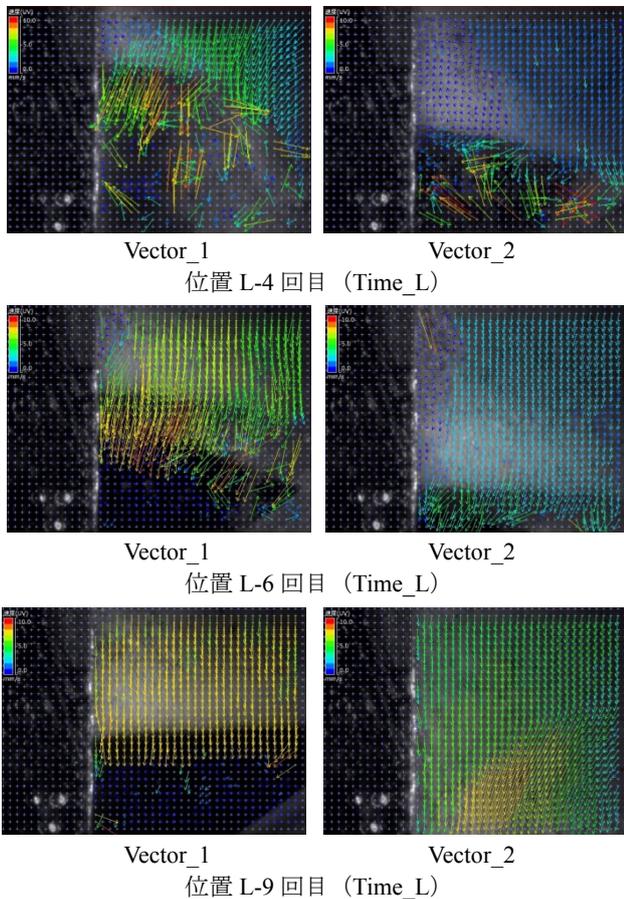


図 5 Case_7 の変位ベクトル

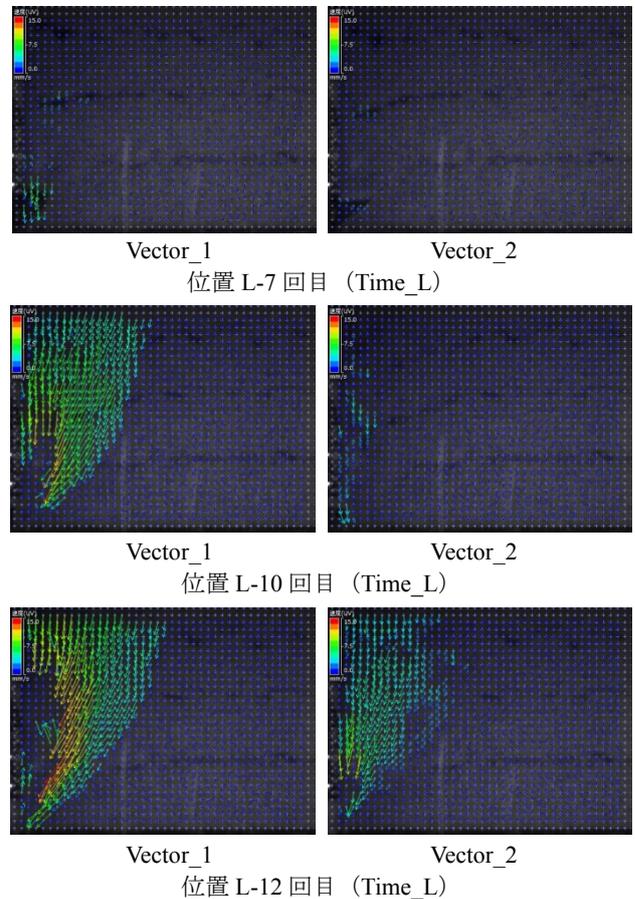


図 6 Case_8 の変位ベクトル

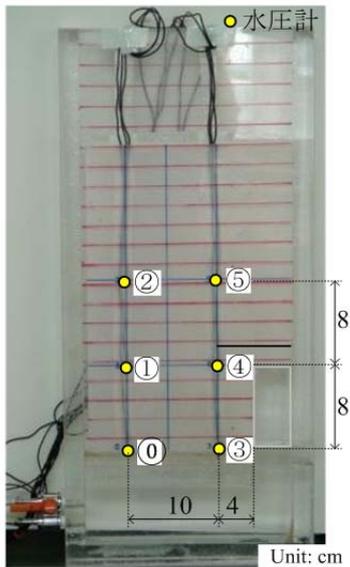


写真6 水圧計の設置位置 (装置背面)

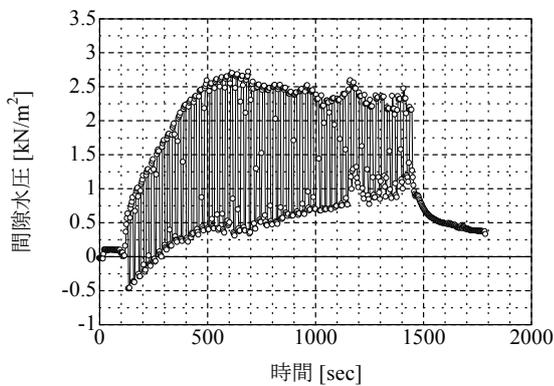


図7 間隙水圧の経時変化 (Case_1)

3.3. 間隙水圧の変化

本実験では、空洞の発生・発達に伴う間隙水圧の変化について検討するため、写真6に示す位置で間隙水圧の計測を行った。図7, 8, 9に、Case_1, 5, 6における樋門下部付近に作用する間隙水圧の経時変化をそれぞれ示す。いずれのケースにおいても、給水時には間隙水圧が高くなり、排水時には間隙水圧が急激に減少する。また、給水毎に間隙水圧は上昇するが、ある回数を超えるとその値は頭打ちになることが確認できる。これは、ある回数を超えると模型地盤内の水位はある一定の高さを保ち、ゆるみ領域・空洞も発達しなくなる観察結果と一致している。

4. 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り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。以下に本実験で得られた知見を示す。① 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。② 空洞は主に排水過程 (低水位 (位置 L) 時) において発生する。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、

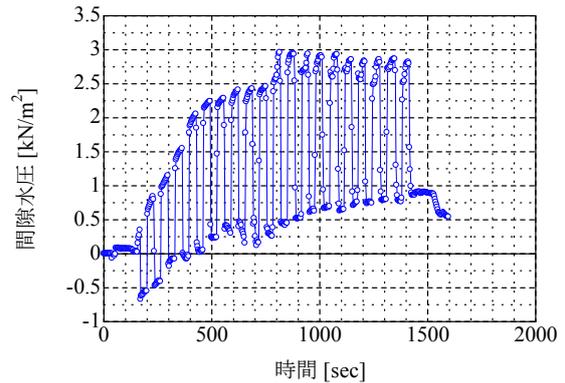


図8 間隙水圧の経時変化 (Case_5)

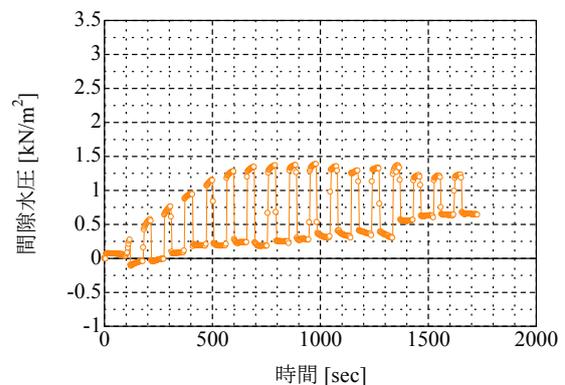


図9 間隙水圧の経時変化 (Case_6)

樋門周辺地盤は下部空洞に吸い込まれるように変位する。③ 給水過程 (高水位 (位置 H) 時) においても、空洞が若干拡大する現象が見られるが、これは地盤が給水により飽和され、有効拘束圧が低くなったためだと考えられる。④ 高水位時に樋門側面部の地盤の有効拘束圧が最も低くなる時、その部分の土試料が侵食を受け、その後の低水位時にゆるんだ土試料が流失し、樋門付近の空洞が拡大する様子が観察できた。⑤ 水頭差が大きいほど、樋門周辺に発生する空洞の発達が早い。⑥ 給排水時間が長いほど、樋門周辺に空洞の発生・発達が早まる。⑦ 土被りが低い場合には空洞は地表面まで発達する。⑧ 樋門直下の初期の空洞が大きいほど、浸透および樋門周辺に発生する空洞発生・発達の発達が早まる。

今後、ゆるみ領域・空洞の寸法および変形に関する定量的評価手法の確立など、実験方法や実験条件の問題点を改善しつつ、模型地盤の粒度組成や間隙比、浸透条件などの影響について更なる検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) (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.
- 2) 中島秀雄：図説 河川堤防、技報堂、pp.206-210、2003.