# 浸透流解析と模型実験による樋管周辺堤防 の漏水・陥没発生メカニズムの検証 THE VERIFICATION OF LEAKING AND COLLAPSE MECHANISM BY

# SEEPAGE-ANALYSIS AND MODEL-EXPERIMENT FOR EMBANKMENT AROUND SLUICE

# 川井正彦<sup>1</sup>・石原雅規<sup>2</sup>・吉田直人<sup>2</sup>・平林学<sup>2</sup>・佐々木哲也<sup>2</sup> Masahiko KAWAI, Masanori ISHIHARA, Naoto YOSHIDA, Manabu HIRABAYASHI and Tetsuya SASAKI

<sup>1</sup>正会員 応用地質株式会社(前土木研究所)(〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)
 <sup>2</sup>正会員 独立行政法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

The damages such as the collapse above sluice and the leaking were occurred at the flood that passed through a half year after an earthquake disaster in the KOZUNAI drainage-sluice which was slight damage by the 2011 great east Japan earthquake. As the result of field work, these damages were caused by the damage of a sealing-plate and the cavity.

The authors carried out the seepage-analysis and the model experiment to verify the damage mechanism on the basis of the result of the field work. The results show that the existing of cavity under the base would outbreak the difference of the water head on both side of sheet-piles. And the function of sheet-pile was spoiled by the difference of water head. Then the flow velocity of cavity was increased and scoured the embankment soil.

Key Words : sluice, seepage analysis, model experiment, leaking, collapse, river embankment

# 1. はじめに

堤防横断構造物である樋管・樋門については、河川堤防と同等の治水安全度が求められる.しかしながら、基礎地盤の圧密沈下などの変形に伴い形成された樋管・樋門直下の空洞や周辺堤防に発生した緩みによって、局部的に耐震浸透機能が劣化する場合がある.

本文で取り上げる鳴瀬川水系吉田川右岸13.7kmに位置 する不来内排水樋管では、平成23年に発生した東日本大 震災において樋管上下流の堤防に甚大な被害は確認され なかったものの、震災後約半年を経た平成23年9月の出 水により堤内のり尻付近での大規模な漏水や樋管直上の 堤防陥没といった変状が発生し、樋管の改築を伴う大規 模な復旧工事が行われることとなった。

この事例は, 樋管周辺堤防の機能低下が地震によって も生じることを示唆する事象であり, 今後の地震後の点 検や復旧対応に重要な知見を与えるものと考えられる.

本文では、不来内樋管において発生した被災の概要や 現地調査で確認された事象について紹介するとともに、 これら変状が発生した機構を検証するために実施した浸 透流解析と模型実験の結果について報告するものである.

# 2. 不来内排水樋管における被災の概要

#### (1) 不来内排水樋管の概要

不来内排水樋管は, 1970年に完成した鋼管杭 (φ457.2mm, L=17m)支持の樋管(RC造)である. 位 置を図-1に示す.



図-1 不来内排水樋管の位置図(地理院地図より)

不来内排水樋管位置の横断図を図-2に示したが,樋管の直下にはN値2~12程度の緩い砂層が層厚10m程度 と厚く分布し、その下位にN値3~6のやや硬質な粘性 土層が2~3m程度の層厚で分布しており、基礎杭は粘性 土下位の締まった砂層を支持層としている.



図-2 不来内排水樋管の断面図

## (2) 東日本大震災による被災の概要

平成23年3月11日に発生した東日本大震災により,不 来内排水樋管の位置する鳴瀬川水系吉田川の河川堤防に おいては開口を伴う縦断亀裂や数mに及ぶ堤防天端の沈 下といった甚大な被災が確認<sup>1)</sup>されているが,地震後に 実施された不来内排水樋管の外観観察では,護岸に開口 幅9cm程度の亀裂が確認された程度であり,甚大な被害 は確認されていない.

一方,地震後に実施された樋管内部の点検では、図-3 に示すように継手の開きや継手に設置された止水板の破 損が確認された.



図-3 函内点検で確認された継手の開きと止水板の破損 (東北地方整備局提供)

#### (3) 出水の概要

東日本大震災からおよそ半年を経た2011年9月21日14 時頃に静岡県浜松に上陸した台風15号は非常に強い勢力 を維持したまま関東から東北地方を縦断するように北東 に進み,翌22日未明に三陸沖に達した.この台風の北上 に伴い,前線の活動が活発化し,宮城県では降り始め (20日0時)からの総雨量は石巻市雄勝で532.5mm,女

川で452.5mmを観測するなど記録的な大雨となった.

この大雨により,鳴瀬川水系吉田川(大和町・落合水 位観測所)では,はん濫危険水位を超え観測史上3番目 の洪水となった.この出水により,堤防決壊などの甚大 な被害の発生には至らなかったものの,鳴瀬川・吉田川 の河川堤防において24か所の被災が発生した2).

一方,不来内排水樋管近傍の幡谷観測所では,図-4に示すように1978年の観測開始以降最も高い水位 (TP+8.19m)を記録した(計画高水位はTP+8.97m).



#### (4) 出水時の被災概要

上述の出水に伴い不来内排水樋管周辺では吐出水槽脇 や堤内側のり尻付近からの激しい漏水が発生(図-5)す るとともに、堤内側のり肩及び吐出水槽脇において大規 模な陥没が発生した(図-6及び図-7).



図-5 吐出水槽脇からの漏水の様子(東北地方整備局提供)



図-6 吐出水槽脇の陥没孔 (東北地方整備局提供)



図-7 堤内側のり肩の陥没孔(東北地方整備局提供)

### (5) 開削調査により確認された事項

陥没孔の発生を受け,漏水・陥没の発生メカニズムを 解明するため堤防開削調査が実施された.開削調査結果 によると,堤内側のり肩に発生した陥没孔は図-8に示し たように樋管のウナギ止めのほぼ直上にあたり,陥没発 生後に投入された復旧土砂(B1層)がウナギ止めまで 連続していることが確認された.



図-8 堤内側のり肩陥没孔から連続する復旧土砂の状況

一方, 樋管の床版下に着目すると図-9に示すように開 削調査前に空洞・亀裂の充填を目的に注入された厚さ 30cmに達するグラウト材が確認されており, 床版下に大 規模な空洞が形成されていたことがわかる.



図-9 床版下で確認されたグラウト材

また,ウナギ止め直下の止水矢板では,図-10に示す ように矢板端部を回り込むようにグラウト材が注入され ており、床版下の空洞がこれら矢板の側方を経由して回り込んで連続していた可能性を示唆している.



図-10 ウナギ止め直下の止水矢板を回り込んで注入されて いるグラウト材(東北地方整備局提供)

なお、開口及び止水板の破断が確認された継手部にお いては、継手を覆うカラーが堤内側に12cm程度ずれて いるとともに、函体とカラーの接触部分が酸化しており、 継手からの漏水が顕著であったことをうかがわせていた.

# 3. 浸透流解析による被災の検証

開削調査の結果より,漏水・陥没発生には

- ① 継手開き・止水板破損による樋管内部からの漏水
- ② 床版下の空洞形成
- ③ 矢板を回り込んだ水ミチの形成

の3つの要因が関与しているものと推定された.そこで, 止水板の破損を考慮した断面二次元浸透流解析によって 空洞の有無や矢板回り込みの有無による水頭分布の違い を検証した.

# (1) 解析モデルと境界条件

解析は図-11に示すように、樋管を通る堤防横断面を モデル化した.



図-11 不来内排水樋管における浸透流解析モデル図

地盤および矢板の透水係数は、図-11中に示すとおり である.土の不飽和特性は手引き<sup>3</sup>に基づき設定した. また,境界条件としては止水板の破断していた門柱部 及び継手部に外水位の変動を与えるとともに,堤内側は 境界条件の影響を受けにくいようにできるだけ遠方まで モデルを拡大し,地表面付近に水位を設定した.

なお,解析ケースは表-1に示す6ケースであり,床版 下や吐出水槽脇などに空洞を設定するとともに,矢板頭 部に空洞と同等の透水係数を与えることで矢板頭部の回 り込みを考慮することとした.

ケース	継手 破損	空 洞			左振同
		床版下	吐出水 槽脇	のり尻	り込み
А	有	無	無	無	無
В	有	有	無	無	無
С	有	有	有	無	無
D	有	有	有	無	有
Е	有	有	有	有	無
F	有	有	有	有	有

表-1 浸透流解析ケースの条件一覧

※空洞を考慮する場合には当該部に1×10<sup>2</sup>m/secを設定した

# (2) 解析結果

浸透流解析によって得られる圧力水頭の分布を表-2に示した.

表-2 浸透流解析による圧力水頭の分布(外水位ピーク1時間 前の594hrを抽出)



これら解析結果より、以下のことが明らかとなった.

- ケースAとケースBを比較すると、空洞がある ケースBでは川裏側小段直下で水頭が高くなっ ている。
- ケース B 及びケース C より、床版下の空洞と吐出水槽脇の空洞が連続すると、空洞部で水頭が高くなり上に凸の形状となる。
- ケースC及びケースDより、矢板頭部の遮水性 が損なわれると、吐出水槽脇の空洞で発生する 水頭値はより高くなり、地表面を越えて噴き出 す状況となる。
- ケース E 及びケース F より、空洞が堤内側まで 連続した状態で矢板の機能が喪失すると吐出水 槽脇空洞の水頭が高くなるとともにのり尻部の 水頭が高くなる。

### (3) 解析結果の考察

浸透流解析結果をもとに、矢板頭部の回り込みを考慮 していないケースA,B,C,Eにおける矢板を挟んだ圧力水 頭差を図-12~図-14に示した.







図-13 ウナギ止め直下の矢板を挟む圧力水頭差の変化



図-14 川裏矢板を挟む圧力水頭の変化

図によると、川表矢板では空洞の無いケースAで2.5m 程度、空洞があるケースB,C,Eで1.8mの圧力水頭差が発 生しており、門柱部の止水板が破断したことで、川表矢 板頭部に外水位の水圧が直接的に作用し、大きな圧力水 頭差が常に生じることを示している.一方、ウナギ止め 直下の矢板では空洞が無いケースAに比べ、空洞がある ケースB,C,Eで大きな圧力水頭差が生じており、空洞の 存在により矢板頭部への負荷が大きくなることを示して いる.また、川裏矢板では空洞が形成された場合(ケー スB,C)に4mの圧力水頭差、裏のり尻まで空洞が発達 (ケースE)すると5.7mもの圧力水頭差が生じる結果と なっており、空洞が存在することで矢板の止水性を保持 することが難しくなることがわかる.

一方,吐出水槽脇に発生する流速に着目すると,図-15に示すように,矢板の止水機能喪失を想定したケース D及びケースFにおける流速が他ケースの数倍速く,また, のり尻まで空洞が形成されたと仮定したケースFの流速 がケースDの2倍以上速い解析結果が得られた.



図-15 浸透流解析によって得られた吐出水槽脇に発生する流 速の時間変化

### 4. 模型実験による水頭差発生の検証

浸透流解析により,矢板を挟む水頭差により矢板の止 水機能が損なわれた結果,空洞内に大きな流速が発生し, 堤体土砂を侵食・運搬することにより陥没が発生したものと考えられた.そこで、模型実験によって矢板前後の水頭差の発生を再現することとした.

#### (1) 模型実験の装置と外力

実験模型は、不来内排水樋管実物の1/20の縮尺模型と して、高さ1,200mm、幅1,000mm、長さ4,000mmの土槽 の中に作製し、基礎地盤の高さを350mm、堤体地盤の高 さを500mmとし、樋管の函体の大きさを150×150mmと した. 樋管の構造は、陥没が発生した堤体中央(ウナギ 止め付近)から川裏側の部分を再現することとし、給水 槽側よりウナギ止めを含む止水矢板とカラー付きの継手 部、川裏側に函体底面のみの止水矢板を含むものとなっ ている. なお、函体及び止水矢板は、厚さ15mmの木材 及びアクリルを用いて作製した.



図-16 実験模型の形状

実験に用いた外力は, 陥没が発生した平成23年9月出 水時の河川水位をもとに図-17に示す外力を目標として 水位を制御した.



- なお、実験は以下の3ケースについて実施した.
  - ケース1:床版下の空洞及び継手の開きが無い状態
  - ケース2:床版下の空洞及び継手の開きがある状態で、川裏矢板の止水機能がある場合
  - ケース3:2と同様の条件で川裏側の矢板が止水 機能を喪失した場合

#### (2) 模型実験の結果

実験によって得られたマノメータの水頭値をもとに、 ウナギ止め直下の矢板・川裏側の矢板を挟む水頭差に着 目して整理すると図-18及び図-19に示すとおりである.

これらの図によると,ウナギ止め直下の矢板を挟む水 頭値は健全な状態(ケース1)においても最大4.5cm程 度の水頭が作用するが,ケース2(空洞・継手の開きが 有り,かつ,川裏側の矢板が健全な場合)には継手部か らの漏水の圧力が川裏矢板で遮断され,ウナギ止め直下 の矢板の背後に作用するため極端な水頭差を生じない. 一方,ケース3(川裏矢板の機能が喪失した場合)には 最大5cm以上の水頭差が発生することとなる.



図-18 実験ケース毎のウナギ止め直下の矢板を挟む水頭差

また、川裏矢板を挟む水頭差では、図-19に示すよう にケース2において最大6cm以上の水頭差が発生してい るのに比べ、ほかのケースでの水頭差は半分以下である.



図-19 実験ケース毎の川裏側の矢板を挟む水頭差

以上の実験結果から、不来内排水樋管では、床版下の 空洞及び継手の開きが形成されることによって、まず、 川裏矢板に大きな水頭差が作用した結果、その止水機能 を喪失し、次いでウナギ止め直下の矢板に大きな水頭差 が作用した結果、止水機能の喪失に至ったものと考えら れる.

# 5. 結論

これまで述べてきた浸透流解析及び模型実験の結果より,当該樋管周辺の被災は以下のメカニズムにより発生したものと考えられる.

- 不来内排水樋管では、継手の開き(止水板の破損)と床版下の空洞の存在により、まず、川裏側の矢板に大きな水頭差が作用し、この機能が喪失した可能性が高い。
- これに伴い、川表側の矢板に作用する水頭差も増
  大し、矢板を回り込む流れが形成されるなど、その機能が失われた。
- 矢板の止水機能が喪失した結果,空洞内に発生する流速が増大し、周辺の土砂(堤体土)を洗掘し、 大規模な陥没を生じた.

謝辞:不来内排水樋管における調査・研究に際しては, 国土交通省東北地方整備局ならびに北上川下流河川事務 所に詳細なデータや資料をご提供いただきました.また, 広島大学 名誉教授 佐々木康氏には貴重なご指導・ア ドバイスをいただきました.本文を終えるにあたり,こ こに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 1)東北地方整備局:東北地方整備局地震災害情報 第63報, 2011.4.10
- 2)国土交通省東北地方整備局 北上川下流河川事務所:平成23 年9月出水(台風15号)出水概要【速報版】,2011.9.29
- 3) (財) 国土技術研究センター:「河川堤防の構造検討の手引 き(改訂版)」,平成24年2月
- 4) 石原,齋藤,川井,佐々木,大沼:不来内排水樋管周辺堤防の漏水に及ぼす函体周りの空洞の影響,土木学会第68回年次学術講演会,2013.
- 5) 吉田,川井,平林,石原,佐々木:樋門周辺堤防の函体底面 下に生じる圧力水頭と漏水に関する小型模型実験,第49回地 盤工学研究発表会,2014(投稿中)