

# 能登半島地震による飯田港東防波堤の被災メカニズムについて

川瀬 寛己<sup>1</sup>・青木 さやか<sup>1</sup>・渡辺 義<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新潟港湾空港技術調査事務所 調査課 (〒950-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778 )

令和6年能登半島地震および津波の襲来により石川県珠洲市の飯田港東防波堤が被災した。本論文では、飯田港東防波堤復旧技術検討会により被災メカニズムの解明及び現地における復旧方針の検討内容について報告する。

キーワード 防波堤, 地震, 津波, 粘性土地盤, 技術検討委員会

## 1. はじめに

の解明と早期復旧方針をとりまとめた。

本論文では、技術検討会設置による被災メカニズムの解明と現地における復旧方針について報告する。

石川県の北東部、能登半島の先端の珠洲市に位置する飯田港(図-1)は、令和6年能登半島地震および津波来襲により甚大な被災を受けた。特に東防波堤においては、基部から300mは重力式防波堤となっておりこの区間については港内側へ堤体が変位し、港外側に傾斜。300mから沖側の傾斜堤区間については、堤頭部から150mにわたり水没し、状況不明となる被災を受けた(図-2)。

一般的な津波による防波堤の被災形態は図-3(a)に示すように堤体が港内側に傾斜若しくは滑動する<sup>1)</sup>のに対し、東防波堤は図-3(b)に示すように堤体が港外側に傾斜し、港内側に大きく移動、沈下しており、特異な被災形態が確認された。この特異な被災状況について、被災状況の調査結果や数値解析及び断面実験により得られる成果を踏まえ「飯田港東防波堤復旧技術検討会(以降、「技術検討会」とする。)」を設置し、被災メカニズム



図-1 飯田港位置図 (出展: 国土地理院地図を加工)

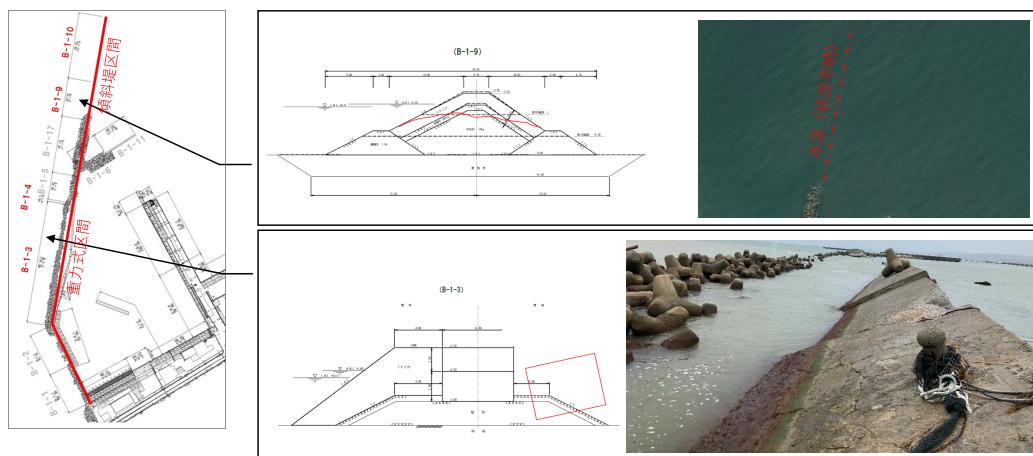
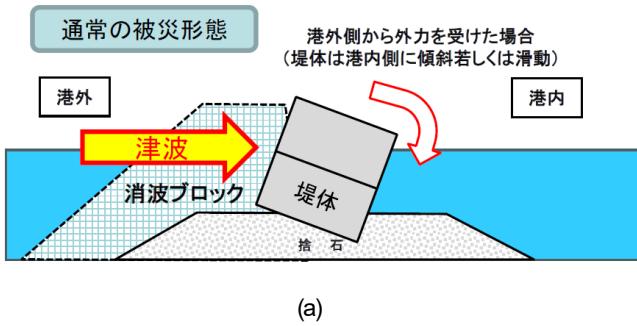
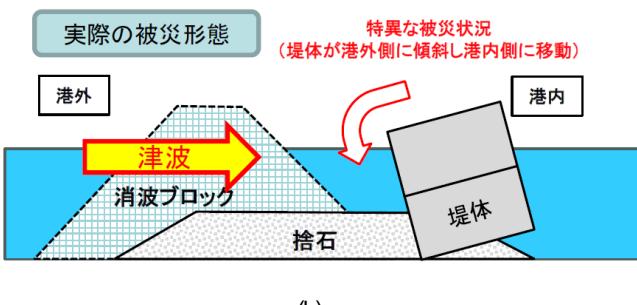


図-2 東防波堤被災状況



(a)



(b)

図-3 重力式区間の被災形態のイメージ図

## 2. 飯田港東防波堤復旧技術検討会

技術検討会は計3回開催し、それぞれ以下の内容について検討を行った。

### (1) 第1回技術検討会（2024年11月）

東防波堤の被災メカニズムの要因分析ならびに再現数値解析に活用するため、被災状況、地盤状況、測量結果等の資料整理と再現数値解析の検討方法を整理した。また、被災メカニズム解明にあたり実施する水理模型実験、遠心模型実験内容を整理した。

### (2) 第2回技術検討会（2025年1月）

再現数値解析の検討結果及び水理模型実験、遠心模型実験に関する検討状況報告を行った。また東防波堤の復旧方針（案）についても検討した。

### (3) 第3回技術検討会（2025年3月）

再現数値解析、水理模型実験及び遠心模型実験の結果報告と被災メカニズムのとりまとめについて検討を行った。被災メカニズムの解明に向けた各種実験とその結果、また、復旧方針の詳細については次章以降で述べる。

## 3. 被災メカニズム解明に向けた実験

### (1) 東防波堤の水理模型実験

#### a) 実験概要

飯田港東防波堤の傾斜堤区間及び重力式区間（消波ブロック被覆堤）を対象とした水理模型実験を実施し、津波越流状況を再現して堤体に作用させた際に、どのような挙動を示すのかを確認する。

#### b) 実験方法

写真-4に示す大規模波動地盤総合水路（長さ184 m×幅3.5 m）において実施する。本実験では造波装置及び環流装置を用いて津波を再現する。写真-5に再現津波を堤体に作用させている様子の一例を示す。

#### c) 実験結果

傾斜堤区間に關しては、再現津波の波力により碎石部も含めて一挙に崩壊する様子が確認された。重力式区間に關しては、港内側のマウンドの洗掘と堤体のわずかな滑動が見られた。津波の水位差による波力だけでは堤体は安定しており、越流により碎石マウンドが潜掘を受けたことで堤体がわずかに傾斜した。今回の特殊な被災状況は再現できず、津波波力では堤体が滑動しないことが考えられる。

### (2) 重力式区間の遠心模型実験

#### a) 実験概要

原地盤やマウンドを含めて実物スケールの防波堤の挙動を把握できる遠心模型実験によって、地震による地盤及び当該防波堤の挙動を確認する。

#### b) 実験方法

写真-6に示す実験装置を用いて遠心模型実験を行う。幅1.3 m、奥行0.08 mの土槽内に1/50の大きさの防波堤模型を作製し、50g場で実物スケールを再現した。

津波水位の漸増に伴う模型地盤の変状を評価するため、実験動画に対してPIV（Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法）解析を用いて変位を数値化する。

#### c) 実験結果

地震後に津波を作用させた実験のPIV解析結果と、実験後の模型の様子を図-7に示す。画像の位置に至るまでの一秒間の変位量をセンターとし、ベクトルの長さは実際の4倍として表示している。図-7(a)時点ではまだ変状が確認されないが、その後水位差が5.2 mに達すると地盤が動き出し、水位差5.4 m時点では前趾から明確な円弧すべりが起こり、堤体・マウンド・粘性土地盤が一体として大きく動いた（図-7(b)）。水位差が6.4 mに達すると地盤の変形モードが変わり、堤体直下に楔状の土塊が形成し（図-7(c)），徐々に地盤の変形が収束した。これは、堤体が沈下したことで港内マウンドの土圧が増加し、同時に越流した津波で形成された静水圧が抵抗力と

なることで、波力との均衡状態に至ったためだと考えられる。津波の作用により堤体は港外側に約7.5度傾斜した（図-7(d)）。定性的ではあるが、東防波堤の被災形態の特徴である港外側への傾斜（図-2）を再現できた。

繰返し載荷により間隙水圧が高まった状態の粘性土は、せん断に対する剛性および強度が低下することから<sup>2)</sup>、地震により粘性土地盤内の間隙水圧が高まり、地盤が軟化した状態で津波が来襲したため、特殊な被災形態に至ったと考えられる。



写真4 大規模波動地盤総合水路の写真（水路上から造波装置方向を臨む）



写真5 再現津波を堤体（傾斜堤）に作用させている様子の一例



写真6 遠心模型実験装置 PARI MarkII-Rの写真

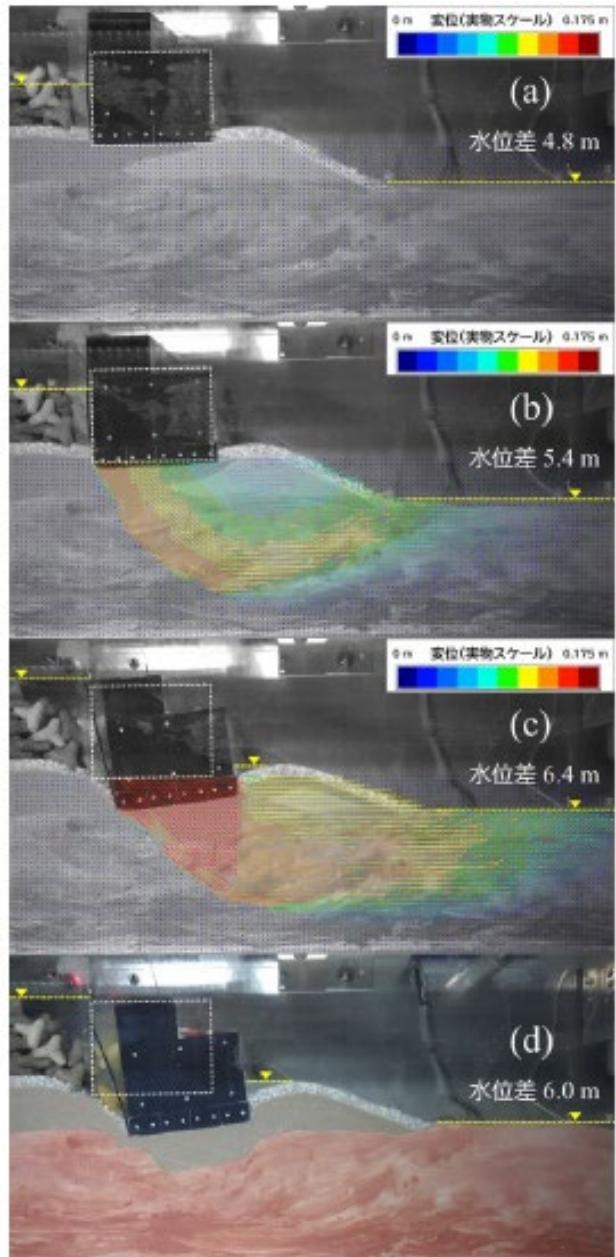


図-7 遠心模型実験のPIV結果

#### 4. 被災メカニズムの解明

数値解析、模型実験及び遠心模型実験により、被災状況を再現したことでの以下の被災メカニズムを解明した。イメージを図-8に示す。

##### (1) 傾斜堤区間

- i ) 地震動により堤体直下の置換砂が液状化し、堤体が沈下。
- ii ) 津波の越流により港内側の消波ブロックが破壊、飛散。

iii) 消波ブロックがなくなった状態で津波の越流が継続したため、消波ブロックの被覆効果がなくなり、堤体が全般的に崩落、飛散。

## (2) 重力式区間

- i ) 地震動により地盤内の粘性土中の水圧が上昇し、地盤が軟化。
- ii) 津波による、マウンド内への水の流れが発生し、地盤を洗掘。津波が堤体を越波し、堤体背後の地盤及びマウンドを洗掘。これらの洗掘により、地盤の支持力が低下し、堤体と地盤において一体的に円弧滑りが発生。
- iii) マウンド・地盤の洗掘により抵抗を失った堤体が波力により港内側に大きく滑動。

## 5. 飯田港東防波堤復旧方針

前述した被災メカニズムを踏まえ、傾斜堤区間及び重力式区間における復旧方針を検討した。

### (1) 傾斜堤区間

復旧断面のイメージ図を図-9に示す。当該区間については、被災前と同じ構造で復旧する。なお、模型実験の結果から、防波堤の高さを超えるような波の力に耐えられるよう、港内ブロックの重量を増大させ、構造体を強化する。

### (2) 重力式区間

復旧断面のイメージ図を図-10に示す。地震により支持力が低下した地盤への影響を低減するため、堤体断面の縮小による軽量化を図り復旧することとする。

### (3) その他の区間

被災状況が軽微な区間は、上部コンクリートの補修及

び嵩上げ等を実施。

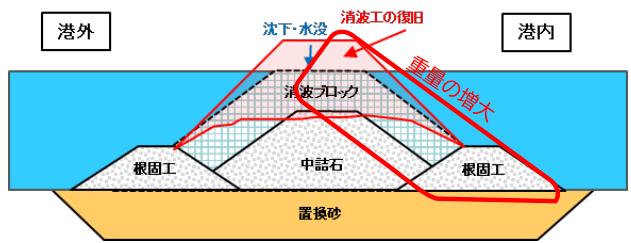


図-9 傾斜堤区間における復旧断面案のイメージ図

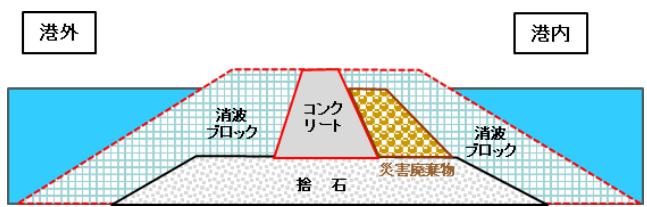


図-10 重力式区間における復旧断面案のイメージ図

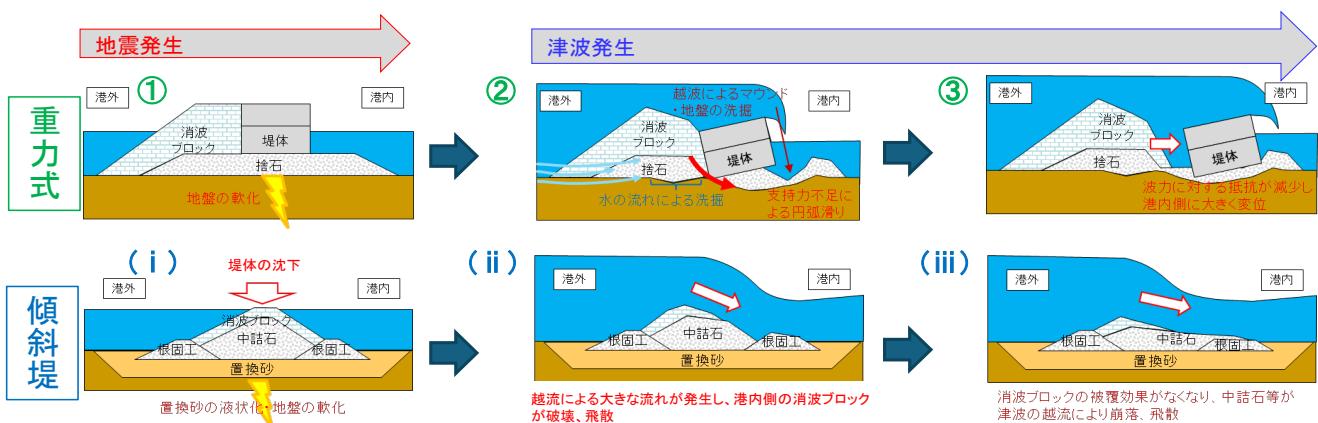


図-8 被災メカニズムのイメージ図

## 6. おわりに

本論文では、令和6年能登半島地震及び津波来襲により被災した東防波堤について、技術検討会設置による被災メカニズムの解明と現地における復旧方針について報告した。模型実験等により解明した被災メカニズムについては、今後、類似の被災を受けた際の復旧に寄与すると考える。また、飯田港は通常時において背後圏域で使用する砂・砂利の移出入に利用されているほか、応急復旧により利用可能な施設においては2024年7月より災害廃棄物の海上輸送拠点として利用されている。早期に東防波堤を復旧し、港内静穏度を確保することが地域の復旧・復興に繋がるため、引き続き、設計及び施工支援に努める。

**謝辞：**飯田港東防波堤復旧技術検討会の委員の方々より被災メカニズムの解明及び復旧方針の検討にあたり、貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 細川真也, 宮田正史, 青木伸之, 鴨打浩一：津波に対して粘り強い港湾構造物の設計手法に関する研究, 2012  
<https://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h24giken/program/kadai/pdf/shitei/shi2-02.pdf>
- 2) 西田一彦, 井上啓司, 中山義久：繰り返し載荷を受ける鋭敏粘土のせん断挙動, 土木学会論文集特集号, 1993巻, 481号, pp. 1-10, 1993.