

能登半島地震における矢板式係船岸の被災分析 と健全度評価

藤井 武¹・門前 直樹¹・東宮 真琴¹・永原 優衣¹

¹新潟港湾空港技術調査事務所 設計室（〒951-8011 新潟市中央区入船町 4-3778）

能登半島地震により、七尾港の各岸壁は多大な被害を受けた。大田地区の2号岸壁及び同地区の物専岸壁は、概ね同時期に建設され構造が同じ矢板式であるにもかかわらず、地震時の被害に大きな差が生じた。そのため、現地調査により被害状況を検証し、液状化対策の有無や控え構造の違い、土質特性に着目し、地震時挙動と被害の差の要因について検討を行った。次に、2次元地震応答解析により岸壁の地震時挙動と変形を再現した。また、健全度評価では現地調査結果から推定する方法と再現解析による結果を比較し、その妥当性を検討した。

キーワード： 能登半島地震、矢板式係船岸、有限要素法解析、液状化対策、健全度評価

1. はじめに

令和6年1月1日16時10分、石川県能登地方（北緯37.5度、東経137.3度、深さ16km）を震源とするM_j7.6の大規模地震（能登半島地震）が発生した。七尾港においても震度6弱以上が観測され、港湾施設は多大な被害を受けた（図-1参照）。七尾港の中でも大きく被災を受けた大田地区の連続岸壁（物専岸壁及び2号岸壁（B区、C区））については、岸壁や工区によって岸壁法線の変位量の度合いに大きな差が見られた。

本稿では、まず、地震後に行われた目視調査、深淺測量、陸上測量結果をもとに各岸壁の被災状況を整理し、そして、その結果と各岸壁の液状化対策の有無や控え構造の違い、土質特性に着目し、岸壁や工区によって法線の変位量が異なる要因について検討を行った。次に、能登半島地震の再現地震動を使用した2次元地震応答解析を実施し、適切なパラメータを設定することで両岸壁の地震による挙動と変形を再現できることを示した。また、潜水による詳細調査結果から前面矢板の曲げモーメントを推定する方法を示し、この推定結果と再現解析結果から部材の健全度評価を行った。最後に推定法と再現解析による曲げモーメントの比較を行い、両者の結果が概ね整合することから健全度評価結果が妥当であることを示した。本稿で示す健全度評価までのフローを図-2に示す。

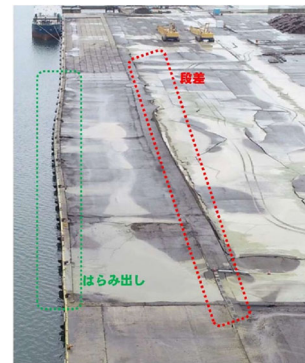


図-1 七尾港大田地区の被災状況

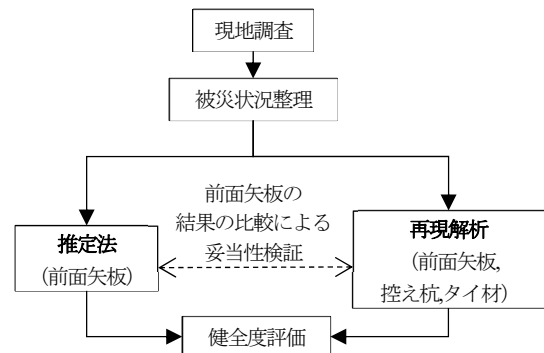


図-2 健全度評価までの検討フロー

2. 対象施設の概要

対象施設は、七尾港大田地区物専岸壁（-10m）と2号岸壁（-10m）であり、平面図を図-3に、各岸壁の断面図を図-4に示す。物専岸壁はA区とB区、2号岸壁はB区とC区に分かれている。

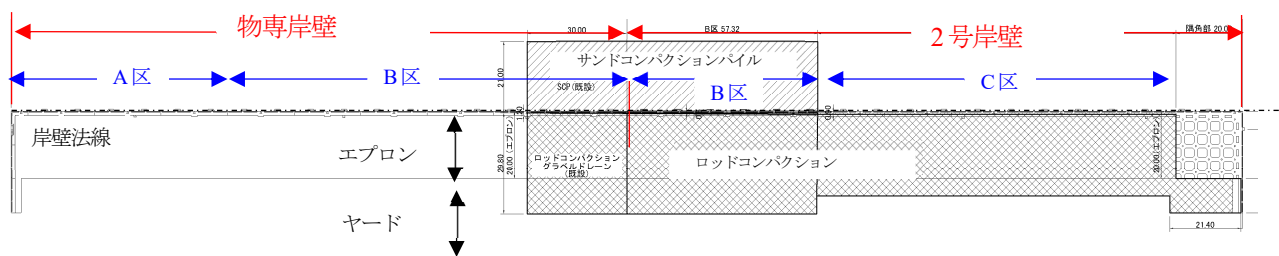
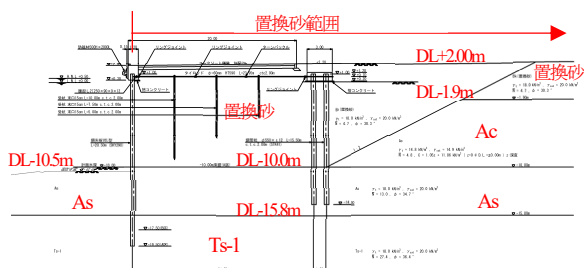
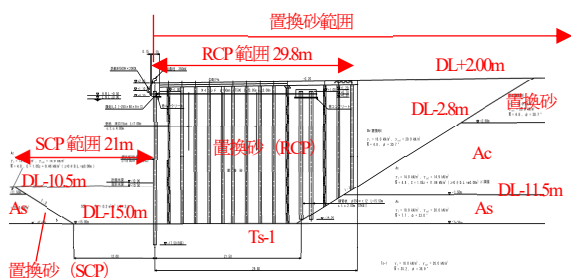


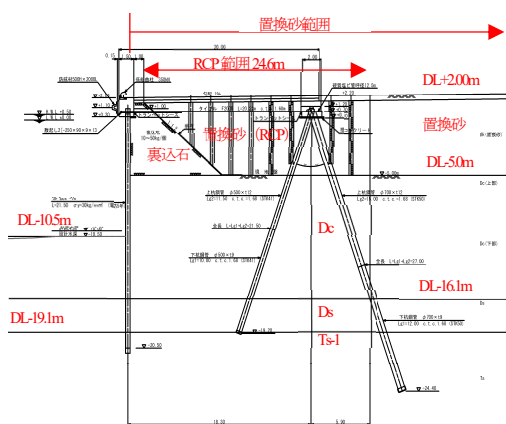
図-3 七尾港大田地区物専岸壁と2号岸壁平面



(a) 物専岸壁 A 区



(b) 2号岸壁 B 区



(c) 2号岸壁 C 区

図-4 標準断面図

また、対象施設は断面ごとに土質や構造に違いがあるため、詳細を以下に記述する。

A 区は As 層が出現するが、B 区は As 層が出現せず、沖積層が全て Ac 層である。本検討では、後述するが、As 層の液状化特性を詳細に検討する必要があるため、物専岸壁の検討断面として As 層が存在する A 区を採用しており、図-4(a)では A 区の断面を示している。物専岸壁と2号岸壁 B 区はどちらも控え直杭式鋼矢板岸壁であり、控え工は2本杭の直杭である。

ただし、2号岸壁 B 区は、液状化対策を目的として岸壁法線より海側の置換砂地盤にサンドコンパクションパイル工法 (SCP)、陸側の置換砂地盤にロッドコンパクション工法 (RCP) による地盤改良を行っている。どちらも改良率は 20% であり、改良後の N 値は設計上同値 (N=16) に設定されている。床掘置換は軟弱な沖積層 (As 及び Ac 層) に対して実施し、砂に置き換えている。置換砂の下の地盤については、物専岸壁は As 層、2号岸壁 B 区は堅固な Ts-1 層となっている。一方、2号岸壁 C 区は、その他の工区と異なり、控え組杭式矢板岸壁を採用している。また、C 区は比較的堅固な洪積層 (Dc 層) が厚く堆積しており、2号岸壁 B 区と比べて置換砂の層厚が薄い。

3. 岸壁の被災状況

(1) 物専岸壁の詳細な被災状況

物専岸壁の被災状況は岸壁法線のはらみ出し、エプロン舗装の沈下、控え上部工の傾斜などが確認された。(図-5 参照)

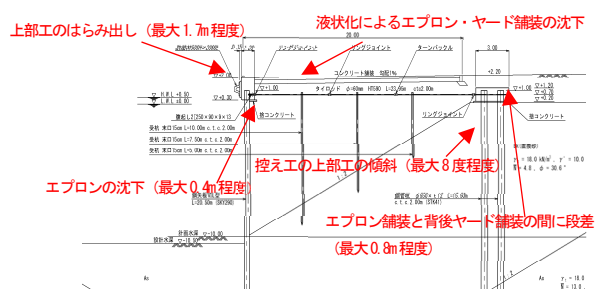


図-5 物専岸壁の被災状況

(2) 2号岸壁の詳細な被災状況

2号岸壁の被災状況は、B区の岸壁法線の水平変位、B区背後ヤード舗装の液状化による沈下などが確認された。

(図-6 参照)

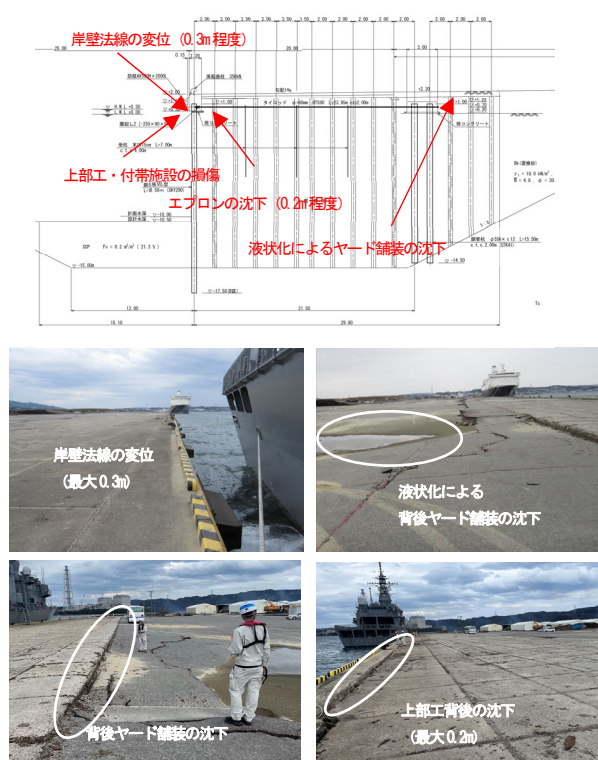


図-6 2号岸壁B区の被災状況

(3) 岸壁及び工区による水平変位量の差とその要因

図-7 (左) に岸壁法線の変位量(プラスが海側への変位)を示すが、物専岸壁ではA区最大1.2m程度、B区最大1.7m程度、2号岸壁ではB区最大0.3m程度、C区最大0.02m程度となっており、2号岸壁と物専岸壁では岸壁法線の変位量に大きな差が見られた。この要因について考察する。

図-7 (右) の写真に被災後の物専岸壁及び2号岸壁の岸壁エプロン部及びその背後のヤード部の状況を示す。写真に示すように、物専岸壁のエプロン部及びその背後のヤード部では噴砂といった液状化の痕跡が確認できる。一方、2号岸壁では、ヤード部で噴砂など液状化の痕跡が確認できるものの、エプロン部では噴砂などの液状化の痕跡は確認されなかった。この理由は、2号岸壁ではエプロン部にRCPによる液状化対策が施されていたためと考えられる。このことから、物専岸壁では液状化対策が実施されていないため、地盤が液状化して矢板に泥土圧が作用して岸壁法線が大きく変位したが、2号岸壁ではSCPやRCPによる液状化対策が実施されていたため、岸壁法線は大きく変位せず、2号岸壁と物専岸壁で岸壁法線の変位量に大きな差が発生したと考えられる。

一方、2号岸壁B区とC区でも岸壁法線の変位量に差が見られ、2号岸壁C区は岸壁法線の変位量は極めて小さい。この理由についての考察は後述する。

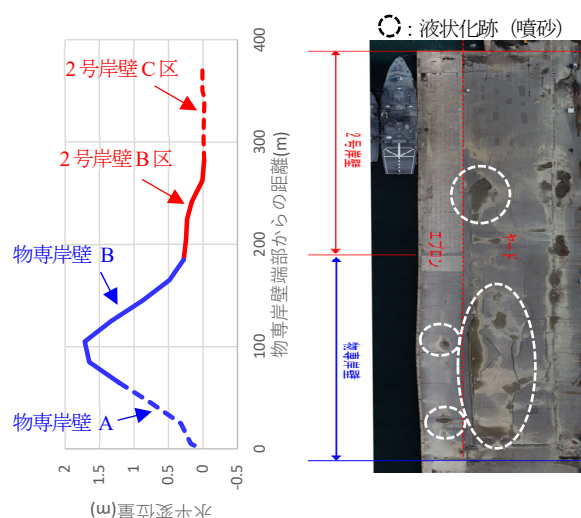


図-7 岸壁法線の水平変位量と液状化状況

4. 被災した岸壁の再現解析

(1) 解析条件

解析に用いる地震動は、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所にて作成された当該岸壁位置での再現地震動¹⁾を利用した。再現解析は被災した物専岸壁A区と2号岸壁B区、C区を対象とし、2次元地震応答解析により行った。2次元地震応答解析には解析コードFLIP²⁾を利用した。解析メッシュ図を図-8に示す。地盤パラメータは現在FLIPで用いられている一般的な設定法³⁾で設定した。

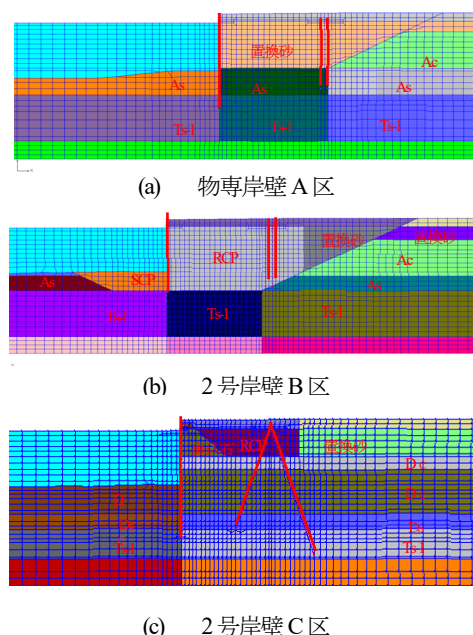


図-8 解析メッシュ図

(2) 物専岸壁 A 区の再現解析

物専岸壁 A 区の As 層は $N_{65}=13$ (N_{65} : 等価 N 値⁵⁾), $F_c=47.3\%$ であって, 砂地盤としては細粒分が多く, 港湾構造物設計事例集⁴⁾に示されている方法で液状化判定を行うと, 液状化しない判定となる. よって, 液状化を表現するパラメータを設定すると, 岸壁の変位量を過大評価する可能性がある. このため, As 層に対して, 以下の 2 ケースで再現解析を行った.

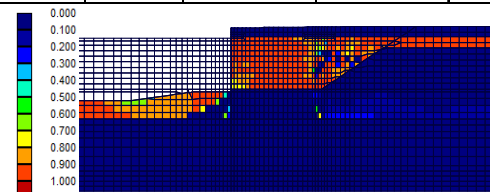
- ・ Case1: 液状化パラメータを設定する解析
- ・ Case2: 液状化パラメータを設定しない解析

Case1 は As 層の地盤特性として液状化特性を設定する解析であり, 地震動の強さによっては液状化が発生する. 一方, Case2 は地震動の強さによらず As 層は液状化を起こさない解析である.

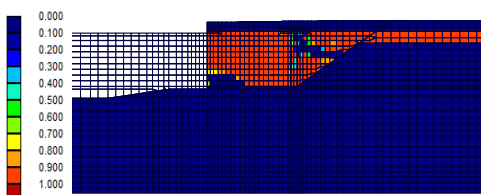
各ケースの最大過剰間隙水圧比図を図-9 に, 岸壁天端での水平変位量を表-1 に示す. Case2 の方が, 実際の物専岸壁 A 区の最大変位量 1.2m に近く, 被災状況をより再現できる結果となった.

表-1 岸壁天端の水平変位量 (物専岸壁 A 区)

		水平変位量	調査変位量	判定
物専岸壁 A 区	Case①	210cm	120cm程度	○
	Case②	149cm		



(a) Case1



(b) Case2

図-9 最大過剰間隙水圧比図 (物専岸壁 A 区)

(3) 2 号岸壁 B 区の再現解析

2 号岸壁 B 区においては改良率 20% の低改良のコンパクションが液状化対策として実施されている. また, コンパクションは改良地盤が $N=16$ の砂地盤となるよう設計されていたため, $N=16$ の地盤として各種地盤パラメータを設定した. また, 標準的な設定法の場合, コンパクション地盤は液状化は発生しないことを前提としているが, 低改良でも同前提が妥当かどうかは不明であったため, 以下の 2 ケースで低改良のコンパクション地盤のパラメータを設定した再現解析を行い, 適切なパラメー

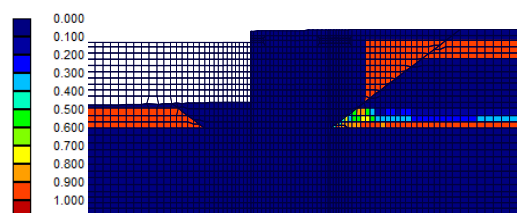
タ設定法について検討を行った.

- ・ CaseA: 液状化パラメータを設定しない解析
- ・ CaseB: 液状化パラメータを設定する解析

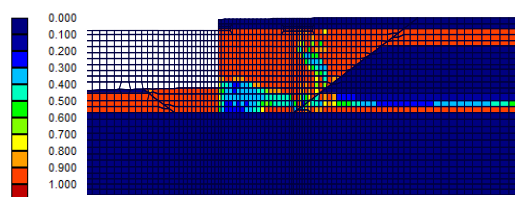
各ケースの岸壁天端での水平変位量を表-2 に示す. この結果, CaseA の方が実際の被災の変位量 0.3m に近く, 被災状況の変位量を再現できた. CaseA と CaseB の最大過剰間隙水圧比図を図-10 に示すが, CaseB は置換砂層が大きく液状化しており, 図-7 の液状化状況と整合していない. そのため, 変位量を過大評価したと考えられる.

表-2 岸壁天端の水平変位量 (2 号 B 区)

		水平変位量	調査変位量	判定
2 号岸壁 B 区	CaseA	30cm	30cm程度	○
	CaseB	74cm		



(a) CaseA



(b) CaseB

図-10 最大過剰間隙水圧比図 (2 号 B 区)

(4) 2 号岸壁 C 区の再現解析

2 号岸壁 C 区においては, 2 号岸壁 B 区の CaseA と同解析条件により再現解析を行った. 得られた 2 号岸壁 C 区の岸壁天端での水平変位量を表-3 に, 過剰間隙水圧比図を図-11 に示す. 解析による水平変位量は概ね地震後の調査による変位量と同程度となっており, 2 号岸壁同様, コンパクション地盤に液状化パラメータを設定しないことにより, 変位量が十分に小さい状況を再現できた.

表-3 岸壁天端の水平変位量 (2 号 C 区)

	水平変位量	調査変位量
2 号岸壁 C 区	9cm	2cm程度

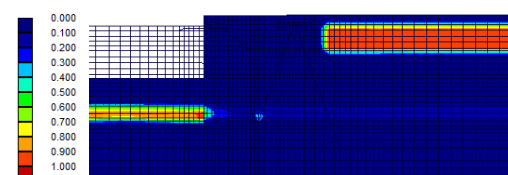


図-11 最大過剰間隙水圧比図 (2 号 C 区)

5. 調査結果による健全度の推定

前面矢板については、速やかな利用可否判断を行うことを目的として、潜水調査で得られた水平変位量の深度分布をもとに曲げモーメントを推定し、推定結果と降伏曲げモーメントを比較することにより健全度評価を行った。具体的な曲げモーメント推定方法を以下に示す。まず潜水調査において、前面矢板の変形量を下げ振りを基準にして、水平器を取りつけたスタッフにより深度を変えて計測する。次に、その結果をもとに水平変位量深度分布の近似曲線を設定し、この近似曲線を2階微分することにより曲率を求める。最後に、前面矢板を弾性体と仮定して、この曲率に腐食を考慮した曲げ剛性を乗じることによって矢板の曲げモーメントを推定した。本推定は、解析等を使用せずに矢板の曲げモーメント（地中部を除く）を推定することが出来るため、比較的短期間で前面矢板の健全度を評価することが出来る。また、近似曲線は深度の5次関数として設定している。これは、土圧が深度を変数とした1次関数で表せるとすると、曲げモーメントは深度の3次関数となるため曲率も3次関数となり、曲率の2階積分が水平変形量の深度分布となるからである。近似曲線の設定と矢板の曲げモーメントの推定結果を図-12に示す。なお、図-12は後述する再現解析結果を併記している。

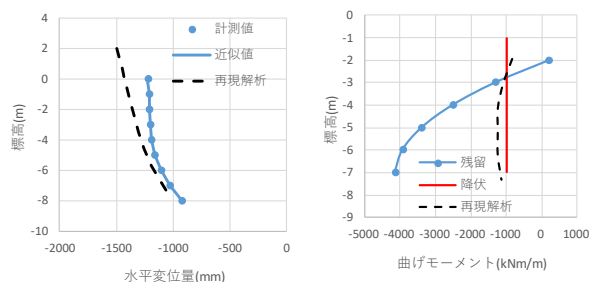
図-12(i)(b)に示す様に物専岸壁においては、推定による矢板の曲げモーメントが降伏を超える結果となったため、耐力無と判断した。

2号岸壁B区においては図-12(ii)(b)に示す様に、物専岸壁同様、推定による矢板の曲げモーメントが降伏を超える結果となったため、耐力無と判断した。2号岸壁C区においては図-12(iii)に示す様に、矢板の変位量が小さいため、深度の5次関数としている本検討の近似曲線は、短い深度の変化で波打つような曲線となり、妥当な近似曲線を設定することが出来ず、本推定法では矢板の曲げモーメントを評価することが出来なかった。しかしながら、水深7.5m以上の一般的な控え組み杭式矢板式岸壁では天端残留水平変位が15cm以下のとき鋼部材の応力は降伏応力以下であるとの既往の解析結果⁹⁾を参考に耐力有と判断した。

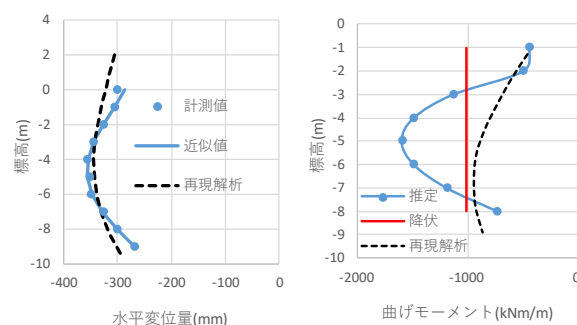
6. 推定法と再現解析の比較

前面矢板の健全度評価は、上述の通り潜水調査結果から曲げモーメントを推定することにより行ったが、ここでは健全度評価の妥当性を検証するため、潜水調査結果に基づく推定法と再現解析による前面矢板の曲げモーメントの比較を行う。推定法と再現解析結果による前面矢

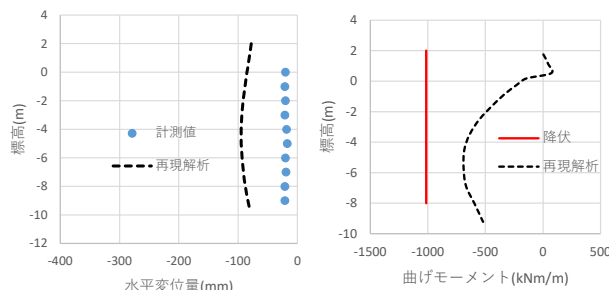
板の水平変位量と曲げモーメントの比較を図-12に示す。再現解析結果は残留変位量と最大曲げモーメントである。また、推定法と再現解析ともに腐食量を考慮した結果である。



(a) 近似曲線の設定 (b) 曲げモーメントの評価
(i) 物専岸壁 A 区



(a) 近似曲線の設定 (b) 曲げモーメントの評価
(ii) 2号岸壁 B 区



(a) 近似曲線の設定 (b) 曲げモーメントの評価
(iii) 2号岸壁 C 区

図-12 前面矢板の耐力評価

物専岸壁 A 区では、潜水調査結果に基づく推定法による矢板の曲げモーメントが再現解析と比べて大きいのが、これは再現解析では前面矢板を全塑性モーメントを上限としたバイリニア型の梁としてモデル化しているが、推定法では曲率に曲げ剛性を乗じているので全塑性モーメントを超過した結果が表示されるためである。矢板の曲げモーメントは降伏を超え、全塑性に達するとそれ以上大きくはならないが、本推定法はこれを考慮できないため、降伏曲げモーメントと比べて非常に大きな値となっている。推定法と再現解析ともに降伏を超える曲げモーメントが発生しており、推定法と再現解析結果は概ね整

合している。

2号岸壁B区においては、物専岸壁同様、潜水調査結果に基づく推定法が矢板の降伏を考慮できないため、再現解析結果と比べて大きな曲げモーメントとなっている。再現解析結果も降伏に近い曲げモーメントが発生し、推定法と再現解析結果は概ね整合している。

2号岸壁C区においては、矢板の変位量が小さいため、近似曲線を設定することが出来ず、潜水調査結果に基づく推定法では矢板の曲げモーメントを評価することが出来なかったが、再現解析においても、矢板の曲げモーメントは降伏以下で、判断結果と整合している。以上のよう、全ての比較結果で、推定法と再現解析結果は概ね整合しており、前面矢板の健全度評価は妥当であったと考えられる。

7. まとめ

本稿では地震後に行われた各調査結果をもとに、各岸壁の被災状況の整理、岸壁によって被災度合いが異なる要因の分析、能登半島地震の再現地震動を使用した2次元地震応答解析による各岸壁の再現解析、各岸壁の鋼部材の健全度評価を行った。主な結論は以下の通りである。

(1) 地震時挙動の要因と解析

- a) 物専岸壁と隣接する2号岸壁B区では同じ控え直杭式鋼矢板構造、同じ部材諸元であるものの、岸壁法線の変位量に大きな差が見られた。この変位量の差は、コンパクションによる液状化対策実施の有無によるものと考えられる。
- b) 更に、2号岸壁C区では、岸壁法線の変位量が極めて小さかった。これは、2号岸壁C区の矢板背後地盤が埋立土ではなく、比較的堅固な原地盤であるDc層であったことが主たる要因と考えられる。
- c) 本検討においては、低改良のコンパクション地盤及び細粒分の高い砂地盤を「液状化しない設定」とすることで、2次元地震応答解析は、実際の被災による変位量を概ね再現することが出来た。これにより、解析によっても液状化対策が岸壁の変位量を減少させたことを説明することが出来た。

(2) 健全度評価の妥当性

- a) 潜水調査に基づく推定法と再現解析による前面矢板の曲げモーメント評価結果は概ね整合しており、今回行った前面矢板の健全度評価結果が概ね妥当であることを示した。また、推定法は前面矢板の降伏を考慮できないといった実運用における留意点を考察した。

謝辞：本稿で用いた再現地震波は防災科学技術研究所の全国強震観測網（K-NET）による波形をもとに作成しました。また、再現地震動の設定については国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所に多大なる支援を頂いたことをここに感謝申し上げます。

REFERENCES

- 1) 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所：2024年能登半島地震の再現地震動（七尾港9328番），2024, https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2024/jr_59.html
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 3) 森田年一，井合進，H. Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.
- 4) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，2018.
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.
- 6) 長尾毅，岩田直樹，藤村公宜，森下倫明，佐藤秀政，尾崎竜三：レベル1地震動に対する重力式及び矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，No.310，2006.