

能登半島地震における矢板式係船岸の被害と再現解析

北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 ○東宮真琴
北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 正会員 千葉明裕
北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 藤井武
パシフィックコンサルタンツ (株) 非会員 鈴木信夫
パシフィックコンサルタンツ (株) 正会員 宮下健一朗

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（図-1参照），港湾施設は多大な被害を受けた。七尾港の中でも大きく被災した大田地区の連続岸壁（物専岸壁及び2号岸壁（B区，C区））は，岸壁や工区によって岸壁法線の変位量に大きな差が見られた。

本稿では，まず，地震後に行われた調査結果をもとに各岸壁の被災状況を整理し，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行い，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。

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-2に，各岸壁の断面図を図-3に示す。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。物専岸壁と2号岸壁B区の鋼部材は同じ諸元である。ただし，2号岸壁B区は，液状化対策により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工法，陸側の置換砂地盤にロッドコンパクション工法を採用している。どちらも改良率は20%である。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。置換砂の下の地盤はどちらの岸壁も堅固な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



図-1 震度分布図（気象庁HP公表図に港湾名を加筆）

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（図-4参照）

- ①岸壁法線のはらみ出し，水平変位最大1.7m程度
- ②前面矢板上部工付近に0.4m程度の段差
- ③控え工の上部工が8度傾斜
- ④エプロン舗装と背後ヤード舗装に段差（0.8m程度）

(2)2号岸壁の詳細な被災状況（図-5参照）

- ①B区の岸壁法線の水平変位量0.3m程度
- ②B区背後ヤード舗装は液状化による沈下が発生
- ③B区の上部工背後で0.2m程度の沈下が発生

(3)岸壁及び工区による水平変位量の差とその要因

図-6（左）に岸壁法線の変位量（プラスが海側への変位）を示す。物専岸壁では最大1.7m程度，2号岸壁B区では0.3m程度，2号岸壁C区では0.02m程度で，2号岸壁と物専岸壁では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-6（右）の写真に示すように，物専岸壁の岸壁エプロン部及びその背後のヤード部で液状化の痕跡が確認できる。一方，2号岸壁では，エプロン部の液状化の痕跡は確認されなかった。この理由は，液状化対策の有無と考えられる。物専岸壁では液状化対策が実施

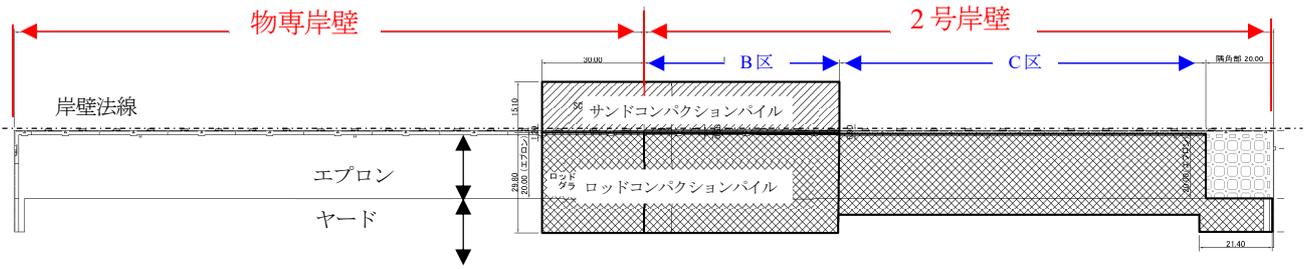


図-2 七尾港大田地区物専岸壁と2号岸壁平面図

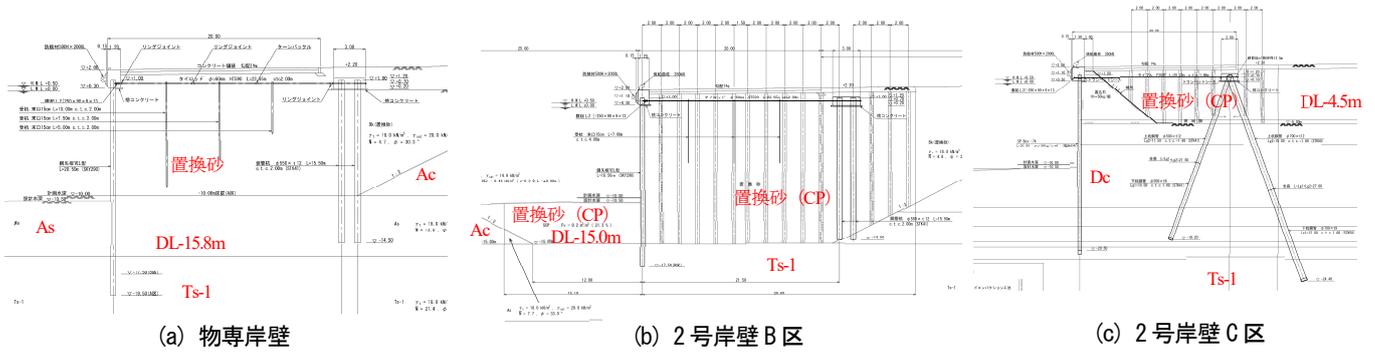


図-3 標準断面図



図-4 物専岸壁の被災状況



図-5 2号岸壁B区の被災状況

されていなかったため、地盤が液状化して矢板に泥土圧が作用し、岸壁法線が大きく変位した。

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。この理由は、2号岸壁C区は、液状化対策が実施されているのに加え、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洪積層(Dc層)であったことや、控え工が剛な組杭であったことが要因と考えられるが、土質特性と控え工のどちらの方が大きく変位の抑制に寄与したかなど、詳細な要因の検討は今後の課題である。

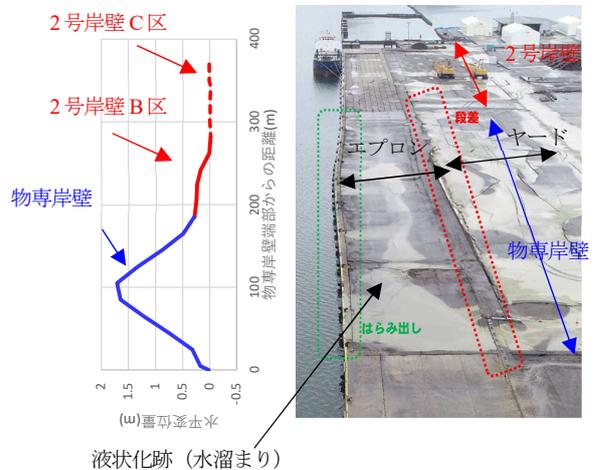


図-6 岸壁法線の水平変位量と液状化状況

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。当該岸壁位置での再現地震動の地震波形と加速度フーリエスペクトルを図-7に示す。

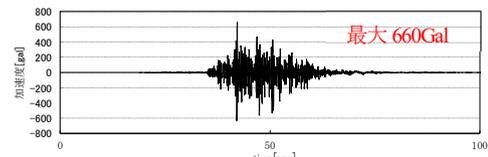
再現解析は、被災した2号岸壁B区と物専岸壁を対象とし、2次元地震応答解析により行った。2次元地震応答解析には解析コードFLIP²⁾を利用した。作成した2号岸壁B区と物専岸壁の解析メッシュ図を図-8に示す。解析手法は、地盤の初期応力が実際の応力を再現するように、岸壁の施工過程を踏まえ自重解析を3段階に分けて行った後で動的解析を実施する手法³⁾⁴⁾を採用した。また、矢板と矢板前面地盤の間にはJOINT要素(摩擦角15度)を設置し、控え杭と地盤の相互作用は、地盤反力に与える影響を考慮できる相互作用バネ⁵⁾で控え杭と地盤をつなぐことによって表現した。地盤パラメータは現在FLIPで用いられている一般的な設定法⁶⁾で設定した。

(2) 2号岸壁B区の再現解析

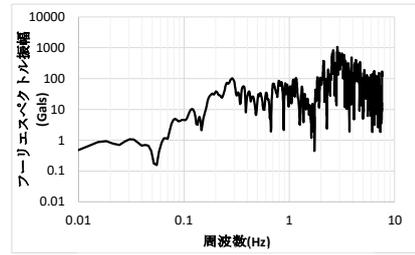
2号岸壁B区においては改良率20%の低改良のコンパクションが液状化対策として実施されている。粘性土地盤を対象とした高改良のコンパクション地盤の場合は標準的な設定法⁸⁾があるが、低改良のコンパクションについては標準的なパラメータ設定法が存在しない。そこで、本検討では、以下の2ケースで低改良のコンパクション地盤のパラメータを設定した再現解析を行い、低改良のコンパクション地盤の適切なパラメータ設定法について検討を行った。

- ・CaseA：高改良と同設定
- ・CaseB：目標N値としての砂地盤として設定

なお、コンパクションの砂杭は改良によるN値の増加、水平応力の増加などを考慮し、 $N_{65}=20$ の砂地盤として取り扱うのが標準的な方法⁸⁾である。ここで、 N_{65} は等価N値⁹⁾である。CaseAは上述の通りであり、CaseBは改良地盤が設計上 $N=16$ の砂地盤となるよう設定されていたため、目標通りのN値増加が達成したことを想定しての設定である。ただし、 $N=16$ に見合った液状化特性を解析において設定するため、地震動

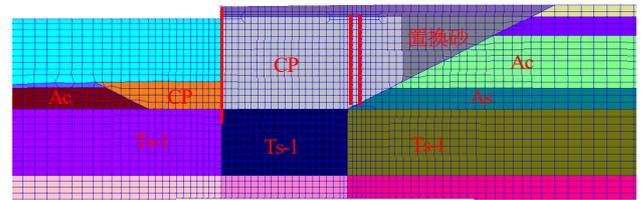


(a) 地震波形

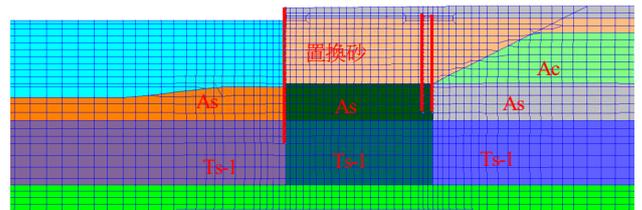


(b) フーリエスペクトル

図-7 再現地震動

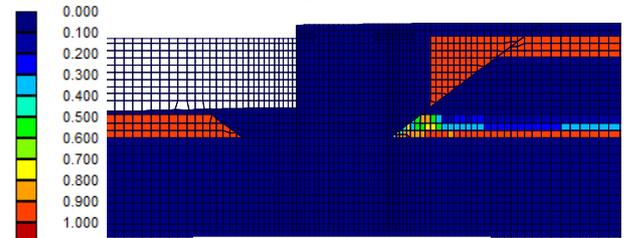


(a) 2号岸壁

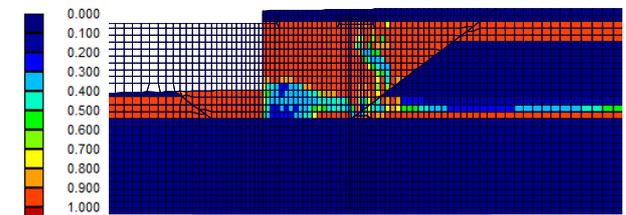


(b) 物専岸壁

図-8 解析メッシュ図



(a) CaseA



(b) CaseB

図-9 最大過剰間隙水圧図

の強さによっては液状化が発生することとなる。

各ケースの岸壁天端での水平変位量を表-1に示す。この結果、CaseAが実際の被災の変位量0.3mに最も近く、被災状況を再現できた。CaseAとCaseBの最大過剰間隙水圧図を図-9に示す。CaseBは置換砂層が大きく液

状化しており、図-6 の実際の被災状況と整合しておらず、変位量を過大評価したと考えられる。

表-1 岸壁天端の水平変位量 (2号岸壁B区)

	水平変位量	判定
CaseA	30cm	○(被災の変位量に最も近い)
CaseB	74cm	

(3) 物専岸壁の再現解析

物専岸壁のAs層は $N_{65}=13$, $F_c=47.3\%$ であって、砂地盤にしては細粒分が大きく、港湾の技術基準⁹⁾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：液状化特性を設定する解析
- Case②：液状化特性を設定しない解析

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。

各ケースの岸壁天端での水平変位量を表-2に示す。実際の最大変位量1.7mとの差はどちらのケースも同程度であったが、Case②の方が、やや実際に近く、被災状況をより再現できる結果となった。

表-2 岸壁天端の水平変位量 (物専岸壁)

	水平変位量	判定
Case①	210cm	
Case②	149cm	○(被災の変位量に最も近い)

5. まとめ

本稿の主要な結論は以下の通りである。

- ① 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、液状化対策実施の有無により、岸壁法線の変位量に大きな差が見られた。
- ② 2号岸壁C区の岸壁法線の変位量が極めて小さかったのは、矢板背後地盤が埋立土ではなく、比較的堅固なDc層であったことや、控え工が剛性の高い組杭であったことに起因している。
- ③ 2次元地震応答解析では、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、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。

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に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) 井合進, 龍田昌毅, 小堤治, 溜幸生, 山本裕司, 森浩章：地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.809-812, 2001.
- 4) 岡由剛, 三輪滋, 石倉克真, 平岡慎司, 松田英一, 吉田晃：鋼矢板岸壁の被災事例による有効応力解析における初期応力状態のモデル化手法の検証, 第26回地震工学研究発表会, pp.813-816, 2001.
- 5) 三輪滋, 小堤治, 池田隆明, 岡由剛, 井合進：初期応力状態を考慮した有効応力解析による鋼矢板岸壁の地震被害の評価, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.369-380, 2003.
- 6) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 梅木康之：2次元地震有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1899-1900, 2003.
- 7) 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ータの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997
- 8) 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集, 2018
- 9) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018