

能登半島地震で被災した七尾港（大田地区） 矢板式岸壁の被災メカニズムについて

浅生 凜人¹・朝岡 正典¹・川見 健二¹

¹港湾空港部 海洋環境・技術課 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1) .

令和6年能登半島地震では、北陸地方整備局管内の多くの港湾施設が甚大な被害を受けた。石川県七尾港の中でも大きな被害を受けた大田地区の連続岸壁の内、構造形式が矢板式岸壁である物専岸壁は、矢板天端が最大で1.7m海側へ水平変位し、控え上部工背後に1m程度の段差が生じ、矢板および控え工が損傷を受けている可能性が高いと推察された。本論文では、地震動による施設の損傷状況把握を目的に実施した試掘による地中部の部材調査、再現地震動を用いた有効応力解析と併せ、岸壁の復旧断面(案)における地盤改良範囲の検証を目的に実施した遠心模型実験について報告する。

キーワード 能登半島地震、矢板式岸壁、被災状況調査、有効応力解析、遠心模型実験

1. はじめに

石川県七尾市に位置する七尾港（大田地区）物専岸壁（図-1）は、水深10m、延長185mの控え直杭式鋼矢板岸壁であり、控え工が直列の2列杭となっている。2024年1月1日に発生した能登半島地震では、七尾港において震度6弱が観測され、多くの港湾施設が甚大な被害を受けた。

物専岸壁でも、矢板天端は最大1.7m海側への水平変位が認められ、控え上部工は海側に13度傾斜、控え上部工と地盤の1m程度の段差、エプロンや背後ヤードでは地盤の液状化による噴砂の痕が確認された（図-2, 3）。矢板本体、控え工の被害程度が大きく、岸壁利用不可と判断された。

本論文では、地震動による施設の損傷状況把握を目的に実施した試掘による地中部の部材調査、再現地震動を用いた有効応力解析、岸壁の復旧断面(案)における地盤改良範囲の検証を目的に実施した遠心模型実験について報告する。



図-1 調査場所：七尾港（大田地区）

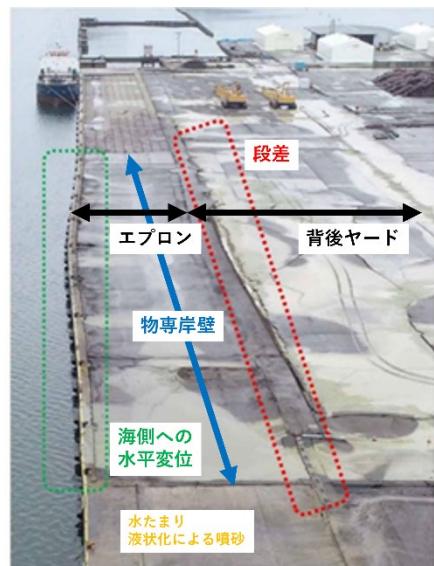


図-2 物専岸壁の被災状況



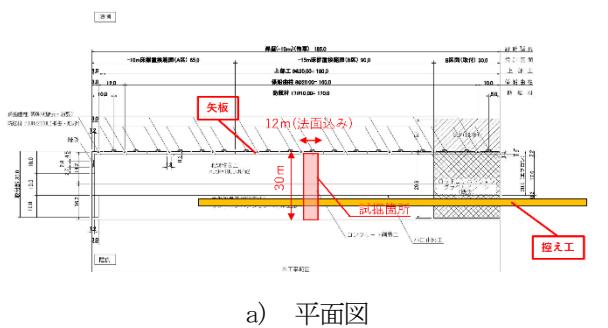
図-3 控え上部工背後で発生した段差

2. 被災メカニズムの解明について

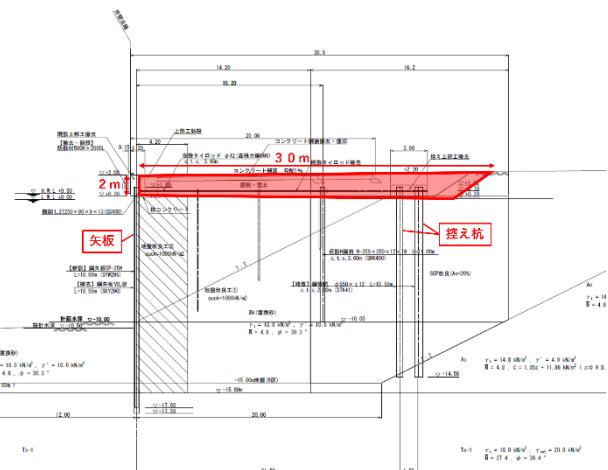
(1) 被災状況調査¹⁾

当該岸壁の地中部における各部材の変形状況の確認や被災メカニズムの解明を目的として、タイロッド3本分が曝露される範囲を試掘し、地上レーザースキャナを使用して、試掘範囲をデジタル測量した。その結果から各部材の変形状況や位置関係などを調べた。

図-4は、対象岸壁の復旧工事の平面図・断面図に試掘範囲を記載したものである。矢板から控え工の背後まで約30m、タイロッド3本分の幅約12m(法面含む)、タイロッドおよび控え上部工下方までの深さ約2mを試掘した。試掘後、レーザースキャナ(Leica ScanStation P50、距離精度1.2mm+10ppm、水平・鉛直測角精度8秒)を設置し、試掘範囲をデジタル測量した。後述の調査結果で示される各部材の傾斜や部材間の距離等は、デジタル測量で得られた点群データから点群データ処理ソフトを使用して求めた。



a) 平面図



b) 断面図
図-4 試掘範囲

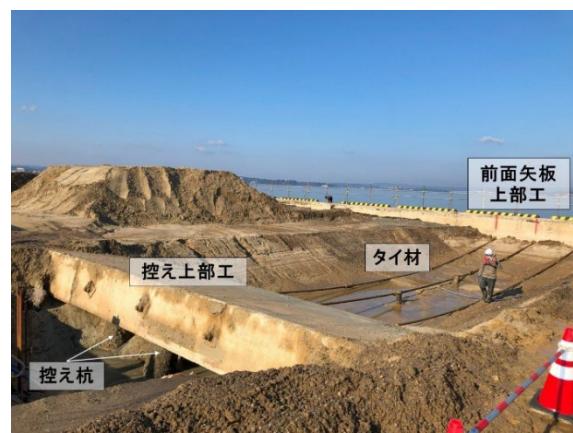


図-5 試掘状況

図-5は、試掘範囲の全景の様子を示している。この試掘範囲は矢板が約1.7m海側に水平変位した位置にあるが、控え上部工も海側に大きく傾斜している様子がわかる。曝露されたタイロッド3本はいずれも大きくなっていた。控え上部工の直下には前後が繋がるほどの空洞が出来ていたが、今回直接掘削してできた空洞ではない。これは、地震時の液状化等の影響で、地下水により土砂が流出し、空洞化したものであると考えられる。空洞化により控え杭頭部が曝露された状態であるが、目視確認できる範囲では後列側の杭体に損傷はみられなかった。

図-6は、点群データより各部材の傾斜や距離等を計測した結果である。データ処理にあたっては、曝露された3本のタイロッドがそれぞれ位置する断面から各値を計測しており、図中には計測された値の範囲と平均値を示した。図より、矢板は海側に平均2度、控え上部工は海側に平均13度傾斜しており、控え工がより大きく傾斜していることがわかった。タイロッドは最大で平均0.77m程度たわみ、タイロッド取付点間の直線距離は平均19.65mであった。被災前のタイロッド取付点間の設計距離が20.05mであるため、現状はそれより平均0.4m短い、すなわち矢板と控え工が近づく結果となった。

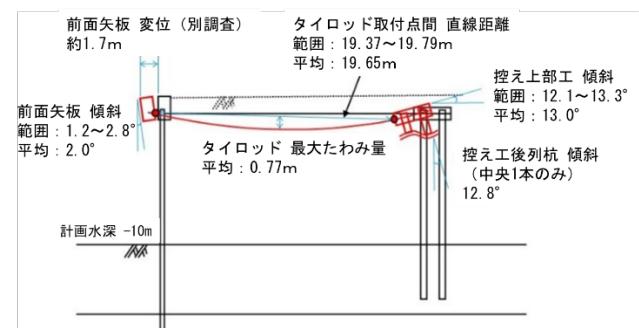


図-6 各部材の位置関係

(2) 有効応力解析

試掘を実施した断面を対象に被災状況を検討するため有効応力解析を行った。図-7は、解析に用いた入力加速度の時刻歴であり、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所（以降、「港空研」という。）にて作成された再現地震動²⁾を用いた。

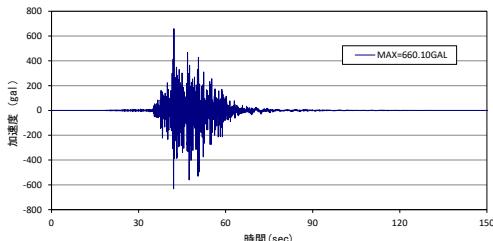


図-7 入力加速度時刻歴（七尾港の再現地震動）

図-8は、ボーリング調査を元に作成した有限要素モデル図であり、有効応力解析には解析コードFLIP³⁾を用いた。地盤パラメータは、FLIP用に提案された標準貫入試験結果による簡易的な設定⁴⁾、試掘調査位置で実施した原位置試験及びサンプリング試料を用いて実施した室内土質試験より設定した。

解析結果である変形図を図-9に、過剰間隙水圧比を図-10に示す。過剰間隙水圧比は赤色の範囲が液状化した範囲を示している。

置換砂層全域で液状化が発生し、矢板および控え杭が海側へ変位する変形状況であり、矢板天端の残留水平変位は1.92mとなり、実測値の最大値1.7mよりやや大きい結果となった。これは、図-2からも窺えるように当該岸壁が平面的に海側に凸形状で変形し、周りの変位は小さかつたため、解析結果と差がでたものと考えられる。

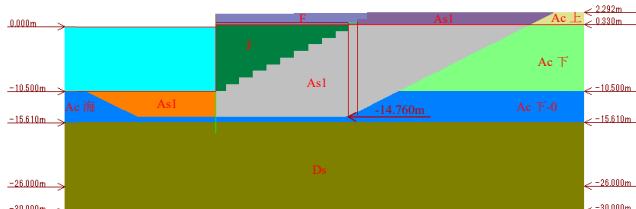


図-8 有効応力解析の解析モデル

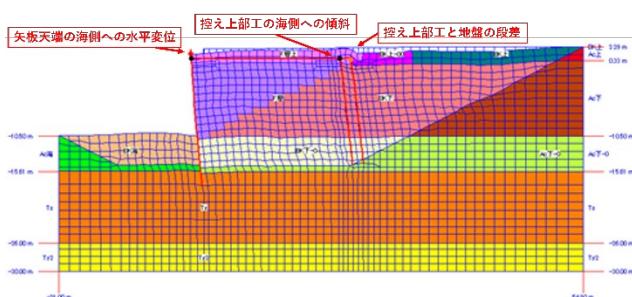


図-9 変形図（解析終了時点）

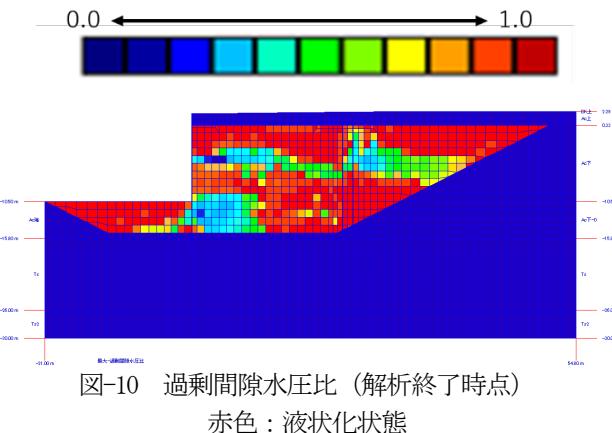


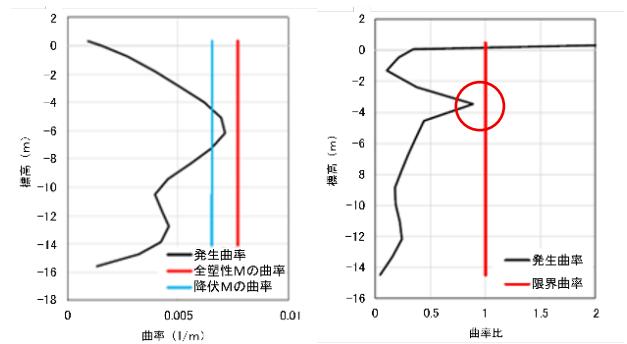
図-10 過剰間隙水圧比（解析終了時点）

赤色：液状化状態

図-11に矢板及び控え杭の変形照査結果を示す。矢板の曲げモーメントは深度-6mの位置で降伏モーメントを超過したが、全塑性モーメントは超過しなかった。控え杭については、陸側の杭頭部で限界曲率を超過した。

(1) 被災状況調査にて矢板と控え杭の距離が約0.4m近づいたと述べたが、有効応力解析の結果は地震動作用により約2cm離れた。また、控え上部工の傾斜は実測値13度に対して有効応力解析の結果は7.5度となり、5.5度の差が生じた。つまり、有効応力解析では控え工の曲げ変形が過小評価されている可能性がある。

ここで、図-11 b)に示す控え杭で曲率比が大きかったDL-3.5m位置で、控え杭が曲がって13度まで傾斜したと考えると、控え杭は海側へ2.209m変位することとなり、矢板と控え杭は0.29m近づき、試掘調査結果と概ね整合する。すなわち、試掘調査の結果を踏まえ、控え杭が地中で折れている可能性を示唆する結果が得られた。



a) 矢板
(全塑性モーメントの曲率に対する曲率分布)
b) 控え杭（陸側）
(限界曲率に対する曲率分布)

図-11 矢板及び控え杭の変形照査

3. 復旧断面(案)の検証

能登半島地震により被害を受けた七尾港（大田地区）物専岸壁の復旧断面(案)について、遠心模型実験による振動試験により検証を行った。

(1) 復旧断面(案)について

復旧断面(案)を図-12に示す。

復旧断面(案)は、擬似重力式構造（制約の多い現場で採用される固化改良工法で地耐力を強化する）で考えており、海側は高圧噴射攪拌工法（当該工法での施工箇所を以降「改良体」という。）、陸側はSCP工法による地盤改良を実施することで検討している。SCP工法により液状化層を改良することで、液状化の発生を抑制でき、改良体に作用する土圧を低減できる。

SCP改良部には液状化層からの過剰間隙水圧が伝播する挙動が想定され、SCP改良範囲の大きさによっては改良体の土圧特性に影響が現れることが考えられる。復旧断面(案)では、改良体背後の主働崩壊角に30°分散に相当する余改良を設ける条件となっており、これは埋立土の液状化対策ハンドブック⁵⁾に記載されている液状化させない範囲に加えて30°分散を取った範囲まで改良するという考え方に基づいたものである。

液状化させない範囲に加えて余改良分を広くとることで、土圧特性に及ぼす過剰間隙水圧の伝播の影響を低減できるが、改良範囲を広くとりすぎると不経済となる。そこで、SCP改良幅の影響を確認することを目的として、改良幅を変えた実験断面を設定し、遠心模型実験による検証を行った。

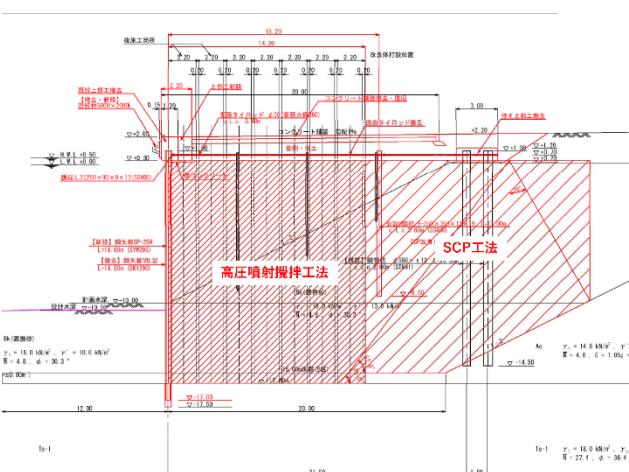


図-12 復旧断面(案)の横断面図

(2) 遠心模型実験

遠心模型実験装置（以降、「装置」という。）は模型に遠心力を加えて実物スケールの応力の状態を模型に発生させることで、実物の挙動を再現できるものである。使用した港空研の装置の場合は、上記に加え、装置に搭載されている振動台による地震の実験や造波機能による波の実験も可能となっている。

実験方法は、作製した地盤模型を装置のバケットに設置し、回転させ、地盤模型に遠心力を加えることで、地盤内に大きな応力が発生し、実物スケールの地盤での剛性や強度を再現した。（図-13参照）

実験ケースを表-1に、実験断面を図-14に示す。SCP1は、改良体背後に主働崩壊面相当の範囲を非液状化層としたケースである。さらにSCP2は、SCP1に対して30°分散の余改良域を考慮した断面であり、復旧断面(案)の考え方と同じ条件である。このように、改良体背後の地盤条件が異なる計2ケースの模型実験を実施し、SCP改良範囲の違いを確認することで復旧断面(案)を検証した。

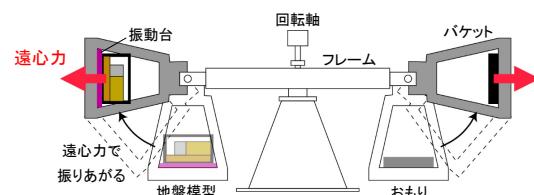


図-13 遠心模型実験の概念図

表-1 実験ケース

ケース名	背後地盤	備考
SCP1	非液状化地盤 + 液状化地盤	SCPの改良範囲は主働崩壊範囲相当
SCP2	非液状化地盤 + 液状化地盤	SCP1に対して30度分散の余改良域を考慮

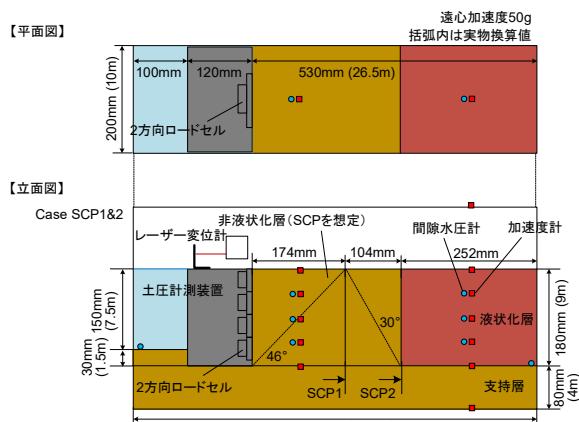


図-14 実験断面

実験では、現地の複雑な地盤条件を模擬することは難しいことから、地盤材料としては珪砂7号($\rho=2.639\text{Mg/m}^3$, $D_{50}=0.21\text{mm}$, $e_{max}=1.196$, $e_{min}=0.663$)のみを使用して、液状化層は相対密度50%，非液状化層は相対密度90%を目標に

作製した。また、図中に示すように、実験では間隙水圧計や加速度計を設置するとともに、改良体の模型の水平変位量をレーザー変位計で計測した。改良体の背面には2方向ロードセルを高さ方向に4段設置しており、背後地盤からの土圧を計測した。

遠心力場の振動台実験で入力した加速度は、1Hzの正弦波20波であり、SCP1における土槽底部の加速度計で計測された加速度時刻歴を図-15に示す。なお、SCP2においても同様の加速度が得られている。

図-16には、各ケースにおける改良体の水平変位量(実スケール換算)の時刻歴を示す。この図より、SCP1とSCP2における改良体の水平変位量は変わらない結果となった。

図-17には、SCP1とSCP2のケースにおける模型地盤内の過剰間隙水圧比の最大値の大きさをプロットした。過剰間隙水圧比は、加振中の間隙水圧計の測定値/初期有効上載圧により求めたものである。各ケースにおける液状化層及び非液状化層は図-14に示す位置のセンサーから得られたものである。SCP1では非液状化層内における水圧の上昇がみられたが、SCP2では水圧比の上昇が小さく、深部では0.5未満であった。したがって、改良体背後の主働崩壊角に30度分散を考慮した余改良を設けた場合、SCP改良範囲の過剰間隙水圧比の上昇が小さく抑えられた。改良幅をこれよりも小さくした場合、浅～中層の位置での水圧の上昇が確認され、背後の液状化地盤との境界面からの過剰間隙水圧の伝播の影響を受けていると考えられる。

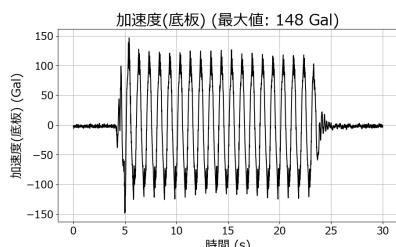


図-15 入力加速度(SCP1, SCP2)

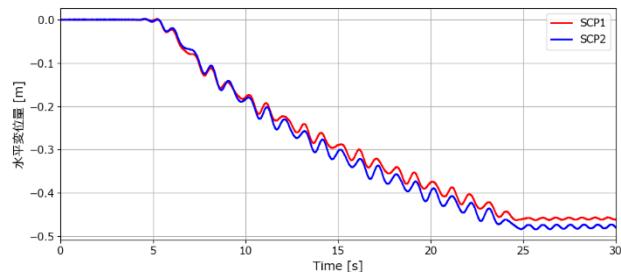


図-16 改良体の水平変位

図-18には、改良体に埋め込んだ2方向ロードセル(図-14参照)の測定値から求めた水平方向の土圧合力の時刻歴である。

SCP1とSCP2を比較すると、改良幅の狭いSCP1の方が土圧合力が大きい結果となった。このことについて、図-17に示した過剰間隙水圧比の傾向と合わせて考えると、SCP1においては背後未改良部分から伝播した水圧の影響により、改良体背後の改良部分の有効応力が減少することとなり、改良体へ作用する土圧が増加したことと考えられる。

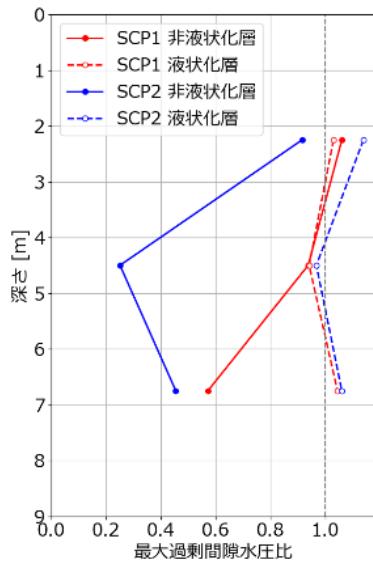


図-17 模型地盤内の過剰間隙水圧比の最大値

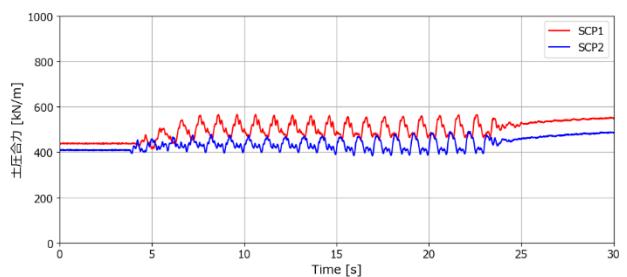


図-18 加振中の土圧合力の比較

4. まとめ

能登半島地震により大規模な被害を受けた七尾港（大田地区）物専岸壁について、地震動による施設の損傷状況把握を目的に、試掘による地中部の部材調査、再現地震動を用いた有効応力解析を実施した。また、岸壁の復旧断面(案)における地盤改良範囲について遠心模型実験を用いて検討した。

検討の結果、復旧断面(案)で採用している擬似重力式岸壁の改良体背後の地盤改良範囲、主働崩壊角に加えて30°分散の余改良は、余改良の有無に依らず、改良体の水平変位量に違いが現れなかつたが、余改良の無いケースでは、広い範囲での過剰間隙水圧の上昇がみられ、改良体に作用する水平土圧も上昇する傾向が確認された。この結果は背後の未改良地盤の液状化による水圧の伝播の影響を受けていることから、余改良を見込む必要性が考えられる。復旧断面(案)は、余改良幅を見込む考え方を採用しているため、その妥当性が確認された。また、現況断面について実施した有効応力解析・部材調査において、控え杭が地中で折れている可能性を示唆する結果が得られていることからも、控え杭を再利用する構造ではない疑似重力式の復旧断面(案)は妥当であると言える。

謝辞：被災メカニズム解明にあたり、ご尽力頂いた国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術事務所 港湾空港技術研究所に謝意を表する。

参考文献

- 1) 松村聰, 國里立紀, 大矢陽介, 毛利惇士, 小濱英司 : 令和6年能登半島地震で被災した七尾港（大田地区）矢板式係船岸の部材調査, 土木学会第80回年次学術講演会, II-29, 2025.9.
- 2) 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）, https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2024/jr_59.html
- 3) 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.
- 4) 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, 港湾技術資料, No. 869, 1997
- 5) 沿岸開発技術研究センター : 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997