

液状化側方流動抑止杭工法 “Deterrent Pile Method”

~Countermeasure for the Movement of Structures due to Lateral Spreading of the Ground~

樋口 俊一

Shunichi Higuchi

1. はじめに

液状化地盤に発生する側方流動は、建物・橋梁等の基礎杭および埋設管路等に極めて甚大な被害を与えて来ている。我が国の大都市圏の湾岸部には古い埋立地が広く存在し、それらの多くは護岸、地盤とも液状化対策が施工されておらず、液状化と側方流動を生じる可能性が懸念される。しかしながら、護岸・岸壁は国や地方自治体の所有である場合が多く、その背後の埋立地等にプラントや荷役施設などを有する事業者が直接地震対策を実施するには制約が多い。さらに、護岸自体の耐震補強に一般的な固化系の地盤改良や構造物の追加設置などの方法(Fig.1)を適用する場合には多大な費用が必要である。

このような背景から、本報で紹介する「液状化側方流動抑止杭工法」を開発した。本工法は、護岸背後の地盤に杭を千鳥状に打設して、護岸の変形に伴う液状化地盤の大きな変形を抑制する手法である。したがって、本工法は流動そのものを防止するものではなく、護岸近傍域に建設されている構造物・施設の地盤流動による被害の軽減を目的とするもので、流動による地盤変位の低減効果の目標は地震中および地震後に構造物・施設に要求される性能によって決定される。

2. 液状化側方流動抑止杭工法の概要

「液状化側方流動抑止杭工法」(以下、抑止杭工法とする)は、Fig.2 に示すとおり護岸背後の地盤に間隔を設けた杭を千鳥状に配置することにより、液状化に伴う側方流動による地盤変状を軽減する方法である。この工法は、杭と液状化地盤の相互作用を利用して地盤の流動を阻害するため、多少の地盤変位は許容するが、杭に作用する力を減じることが可能である。また、鋼管矢板のように杭を連続打設しないことから、経済性や施工性の向上が実現できる。具体的には以下の特徴を有する。

(1) 対策工を合理的に配置

- ・地盤の流動性状や流動外力に対して適切な間隔で千鳥状に配置することにより地盤の変形量を抑制できる。
- ・護岸から離れた事業者の敷地内に施工することでも効果を発揮できる。

(2) 施工上の自由度向上

- ・連続的な設置を必要としないため、施工上の制約が少なく、既設設備を避けて設置することが可能である。
- ・既設設備の切り回しが不要となるため、設備の稼働を止める必要がない。

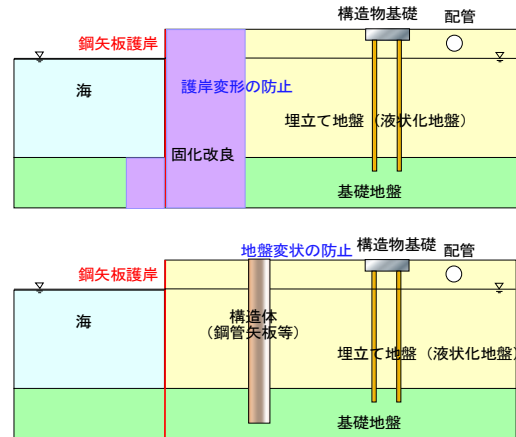


Fig.1 一般的な護岸の側方流動対策例
Conventional Countermeasures for the Lateral Spreading of the Ground

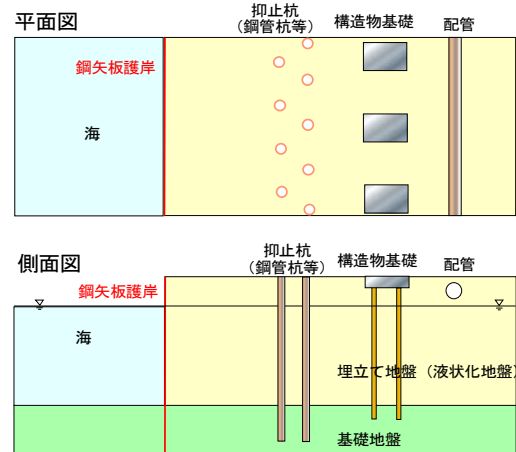


Fig.2 液状化側方流動抑止杭工法の概要
Schematic Drawing of the Deterrent Pile Method

(3) 変形量を制御

対策工近傍で地盤変状が分散するため、それを横断する配管等の局所的な大変形を軽減する効果が期待できる。

3. 阪神・淡路大震災における被災事例の調査

筆者らは液状化に関する過去の実験事実等から、杭基礎の周囲では液状化して流動する地盤の変位量が減少することを経験的に認識していた。そこで、実現象として杭の存在が水平残留変位量にどのような影響を与えるか、兵庫県南部地震における護岸の被災事例を調査した。

Fig.3 に航空写真から測定した護岸背後地盤の水平残

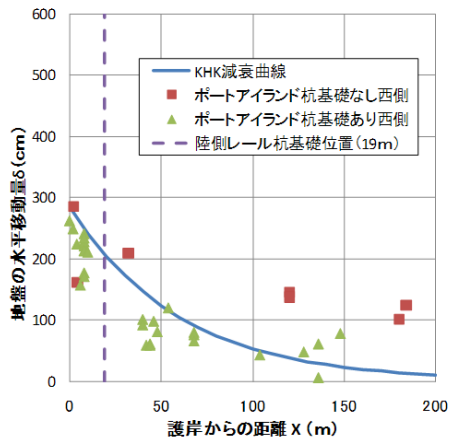


Fig. 3 護岸背後地盤の水平残留変位分布
Residual Lateral Displacement Distributions on the Backyard of Quays (Port Island, Kobe)

留変位の調査結果の一例を示す。調査対象は、岸壁周囲の地盤で、荷役用クレーンの杭基礎が護岸背後にある場合とない場合を比較したものである。図中において赤い■は杭基礎がない護岸、緑の▲は杭基礎がある場合の残留水平変位量を示している。また、青の実線は「高圧ガス設備等耐震設計指針」¹⁾に示された護岸背後地盤の水平地盤変位量を推定する減衰曲線から算定した地盤の水平残留変位分布である。この整理から、杭基礎背後側での地盤の水平残留変位が杭基礎の有無で明らかに異なることが実験だけでなく実被害事例からも確認できた。

4. 遠心模型振動実験による変位抑制効果検証

50Gの遠心力載荷場で模型実験(縮尺N=1/50)により本工法による地盤の水平・鉛直変位の抑止効果を比較・検証した。Fig.4に模型地盤、既設護岸と抑止杭工法の模型および計測機器の配置を示す。抑止杭の配置はFig.5に示すような6種類である²⁾。

Fig.6に実験後の模型地盤の断面変形図を示す。抑止杭を入れた断面では、護岸矢板天端の水平および回転角が大きく減少していることが分かる。

Fig.7に無対策および抑止杭工法のそれぞれのケースにおける地表面の水平残留変位を、Fig.4の護岸直角方向に沿って示す。これより、無対策に対して抑止杭のある断面では抑止杭よりも背後(護岸から10m)の地盤変位が大幅に減少していることがわかる。打設間隔4Dの場合、正三角形配置、列間隔1/2配置および一列配置(杭間隔2D)では抑止杭上流での地盤の水平変位の抑止効果はほぼ同等で、抑止杭下流での地盤変位の抑止効果も同様であった。また、6D配列でも同様の傾向が見られ、4D配列での抑止効果より若干下回るが、6D配列でも地盤変位の抑制効果が同様に得られることが分かった。

5. 数値解析モデルの構築シミュレーション

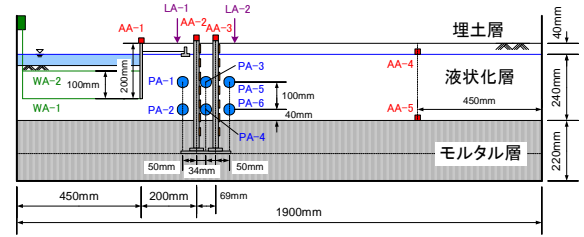


Fig. 4 遠心模型振動実験の概要(抑止杭断面)
Centrifuge Model (Deterrent Pile Section)

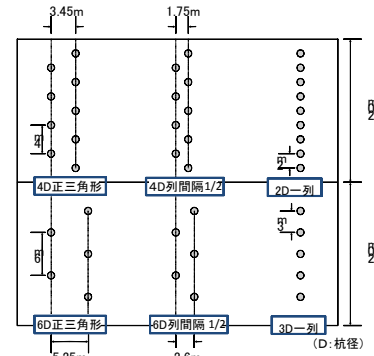


Fig. 5 抑止杭の配置
Arrangements of the Deterrent Piles

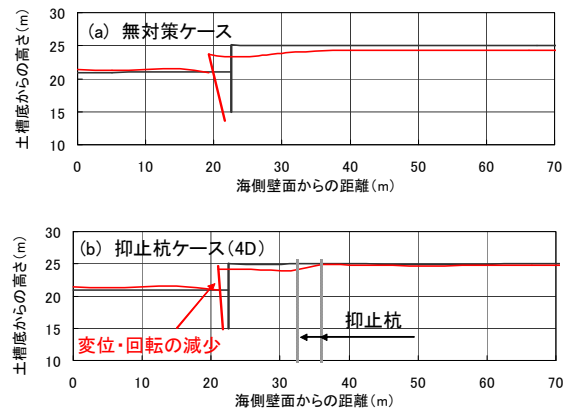


Fig. 6 実験後の模型地盤の断面変形
Deformation Mode after the Experiment

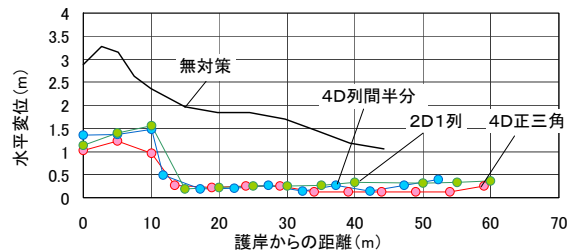


Fig. 7 地盤の水平残留変位分布の比較(杭間隔4D)
Comparison of the Residual Lateral Displacement

1章で述べたように、抑止杭工法の要求性能は変形量で規定されることが基本となるため、設計においては2次元有効応力解析により残留地盤変位を照査する。Fig. 8に解析モデルの概要を示す³⁾。抑止杭の千鳥配置をモデ

ル化するため、護岸側(以下、海側杭)の杭と背後地盤側の杭(以下、陸側杭)に対して、それぞれ2次元平面ひずみモデルを構築した。表層地盤のない遠心模型実験で得られた抑止杭の曲げモーメント分布と最終地盤水平変位をターゲットとして液状化流動地盤と杭の相互作用を検討した。その結果、相互作用ばねの低減係数 $\kappa=0.005$ とした場合に解析値と実験値が適合することがわかった。

Fig.9に地盤の水平残留変位分布を実験値と比較して示す。実験結果と解析結果の水平残留地盤変位分布は整合し、解析モデルの妥当性が確認できた。

6. 抑止杭工法の経済性

抑止杭工法の経済性を検討するため、Fig.10に示す断面について試設計を実施した。Fig.11に示すように、比較対象として締固め(SCP)工法および固化系地盤改良(TOFT)工法による対策を選定した。大規模地震を対象とした場合、これらの比較工法では広範囲な施工が必要となる。Table 1に各工法の施工性と経済性を比較したが、抑止杭工法の優位性が示されている。

7. まとめ

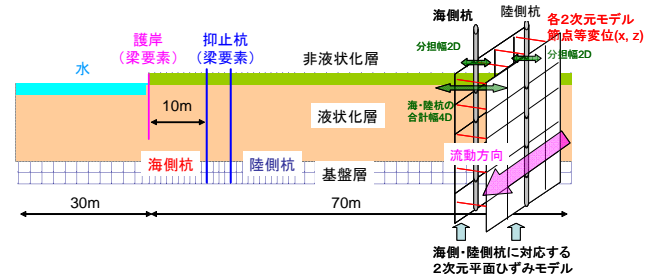
- 1) 兵庫県南部地震における護岸被災事例の分析から、杭基礎背後側での地盤の水平残留地盤変位が杭基礎の有無で明らかに異なることが確認された。
- 2) 杭を千鳥状に配置した側方流動抑止杭工法(杭間隔が4D~6Dの範囲)により液状化地盤の側方流動変位を大きく低減できることを、遠心模型実験により確認した。
- 3) 抑止杭工法の設計に用いる2次元有効応力解析モデルを構築した。遠心模型実験のシミュレーションより、提案モデルが杭の曲げモーメント分布および水平残留地盤変位を妥当に評価できることを示した。
- 4) 試設計により、既存の側方流動対策工法に対して抑止杭工法は施工性と経済性において優位であることがわかった。

謝辞

遠心模型振動実験の実施にあたり、早稲田大学創造理工学部社会環境工学科・濱田研究室には多大なるご支援を賜りました。ここに記し、深謝致します。

参考文献

- 1) 高压ガス保安協会：高压ガス設備等耐震設計指針(KHK E012), (2000)
- 2) 濱田他：液状化地盤の流動抑制工法に関する実験的研究,土木学会論文集A1(構造工学・地震工学), Vol.66,



(a) FEMモデル (b) 杭と地盤の関係

Fig. 8 抑止杭工法解析モデル概要

Outline of 2D-FEM Model

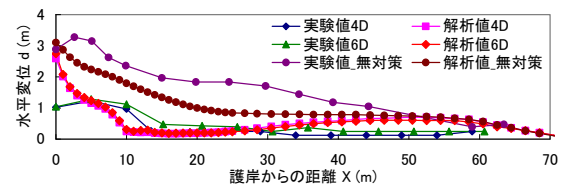


Fig. 9 地盤の水平残留変位分布の比較
Comparison of the Tested and Analytical Results

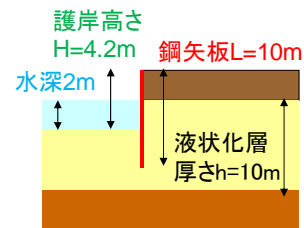


Fig. 10 試設計断面(鋼矢板式護岸)
Section for Trial Design

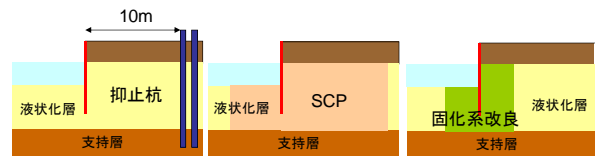


Fig. 11 比較工法の概要とその施工範囲
Summaries of Competitive Countermeasures

Table 1 経済性・施工性の比較
Comparison of Costs and Workability

工法	抑止杭	SCP	固化改良
施工範囲	数m	60m	45m
概算工費比率	1	1.7	1.7
その他	陸上施工のみ	海上施工要	海上施工要

No.1, pp.84-94, (2010)

- 3) 樋口他：抑止杭による護岸近傍の液状化側方流動対策に関する数値シミュレーション, 土木学会第65回年次学術講演会, I-052, pp.103-104, (2010)