

液状化による護岸背後地盤の流動とその対策工に関する振動台実験

東京電機大学 安田 進* 野村博之* 寺内哲也*
住友金属工業 田中宏征** 喜田 浩**
新日本製鐵 龍田昌毅*** 原田典佳****

兵庫県南部地震ではケーソン護岸等の護岸構造物に前傾や傾斜、沈下等の変状が生じ、それにとまなう背後地盤の側方流動によって構造物基礎に被害が生じた。そこで、護岸の移動をとまなう背後地盤の側方流動に関し、可動式の側壁を持つ土槽を用いた模型振動台実験によって、流動性状とそれが近傍の杭基礎に及ぼす影響、およびその対策工に関する検討を行った。その結果、護岸の移動条件（移動の速度、移動の形態）によって背後地盤の流動性状やそれが近傍の杭基礎に及ぼす影響も異なること、その対策工として杭より下流側に連続壁を設けることで杭の変形量を効果的に低減できること等の知見が得られた。

1. はじめに

兵庫県南部地震ではケーソン岸壁に代表される多くの護岸構造物で前傾や滑動、沈下等の変状が生じ、それに伴って生じた背後の液状化地盤の側方流動によって護岸近傍の構造物基礎が被害を受けた。

従来より、傾斜地盤を対象とした側方流動に関しては実験・解析的研究が見られるが^{1),2)}、護岸の移動にとまなう背後地盤の側方流動をとりあげた例は少なく、その発生機構や特徴、また、近傍の構造物基礎に及ぼす影響などに関しては、未解明な部分が多い。そこで、著者らは可動式の側壁を持つ土槽を使った振動台実験によって護岸背後地盤の側方流動に関する検討を実施している³⁾。ここでは、護岸移動時の地盤の流動性状とそれが近傍の杭基礎に与える影響、および、その対策工として杭周辺に鋼矢板壁などの連続壁を設けた場合の対策効果について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

(1) 実験装置および模型の概要

実験模型と主な計測位置を図-1に示す。実験に用いた土槽は長さ2200mm×高さ500mm×幅450mmで、図-1に示すように片側側壁の内側200mm位置

キーワード：液状化、側方流動、杭基礎

*東京電機大学理工学部 0492-96-2911

**住友金属工業(株)建設技術部 0479-46-5128

***新日本製鐵(株)鋼構造研究開発センター
0439-80-3086

****新日本製鐵(株)建材開発技術部 03-3275-7783

に護岸を想定した可動壁が設置されている。また、地盤内にできるだけ均一なせん断ひずみが生じるように土槽側壁および可動壁には厚さ20mmのゴムラバーが貼り付けられている。杭基礎の模型には、実験の再現性確保の観点からポリカーボネート製中実断面の矩形部材（高さ310mm×幅50mm×厚さ10mm）を用い、可動壁から250mmの位置に下端固定で設置した。地盤は豊浦標準砂による均質な飽和地盤1層で、水中落下法によって相対密度が50%になるように作成した。

(2) 実験ケース

実験は表-1に示す2シリーズ、計16ケースである。

a) 実験シリーズ1

ケーソン護岸の変位は慣性力や直下地盤の軟化、背後地盤の液状化等が原因で、前傾、滑動、沈下等が入り交じった形で生じる⁴⁾。また、慣性力による変位は比較的速く、背後地盤の液状化や直下地盤の軟化による変位は比較的ゆっくり生じるものと考えられる。シリーズ1では、これらの護岸の移動条件が流動性状や杭基礎の変形に及ぼす影響を検討するために、次の条件で計4ケースの実験を行った。

○護岸の移動方式：下端ヒンジ回転(前傾)、平行移動(滑動)(図-2参照)

○護岸の移動速度：速い(瞬時)、遅い(3秒程度かけて移動)

b) 実験シリーズ2

対策工として杭基礎周辺に鋼矢板壁等の連続壁を設けた場合の効果を検討するために、護岸の移動条

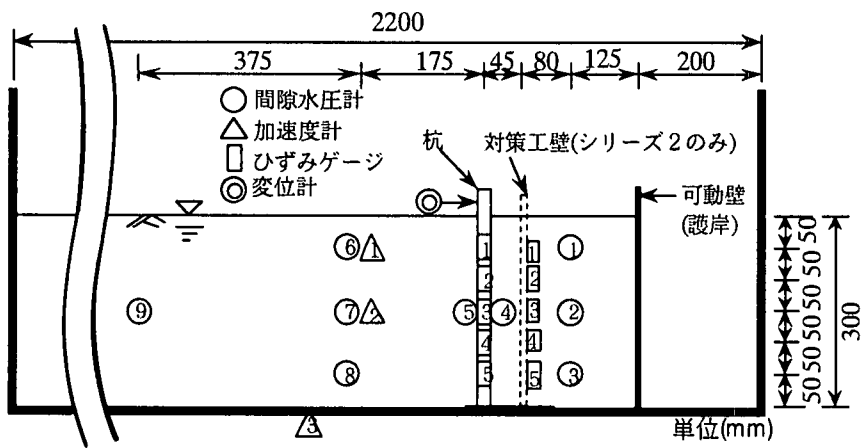


図-1 実験模型と主な計測位置

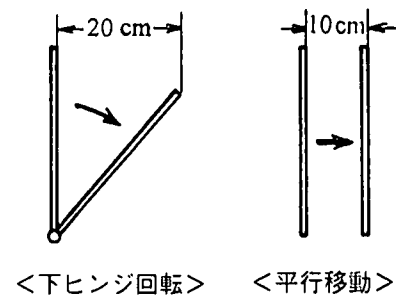


図-2 壁の移動方式

表-1 実験ケース <実験シリーズ2>

<実験シリーズ1>

実験No.	護岸移動方式	護岸移動速度	備考
1-1	下ヒンジ回転	速い	壁の移動方式は図-2参照
1-2	下ヒンジ回転	遅い	
1-3	平行移動	速い	
1-4	平行移動	遅い	

実験No.	対策工壁位置	対策工壁幅	対策工壁板厚	備考
2-1	上流側	150mm	1.2mm	壁移動は ○下ヒンジ回転 ○速い に固定
2-2	上流側	150mm	2.3mm	
2-3	上流側	150mm	3.2mm	
2-4	上流側	150mm	5.0mm	
2-5	下流側	150mm	1.2mm	
2-6	下流側	150mm	2.3mm	
2-7	下流側	150mm	3.2mm	
2-8	下流側	150mm	5.0mm	
2-9	上流側	100mm	2.3mm	
2-10	下流側	100mm	2.3mm	
2-11	上流側	50mm	2.3mm	
2-12	下流側	50mm	2.3mm	

件を下端ヒンジで瞬時に倒す方法に固定し、次の条件で計12ケースの実験を行った。

- 対策工壁の位置：杭の上流側，下流側(いずれも杭中心から45mm位置)
- 対策工壁の幅：150mm, 100mm, 50mm
- 対策工壁の剛性：板厚1.2mm, 2.3mm, 3.2mm, 5.0mmの鋼板

(3) 実験方法

いずれの実験においても、300gal, 3Hzの正弦波による10秒間の加振によって地盤を液状化させ、加振終了後に護岸を強制的に移動させた。計測項目は、地盤の過剰間隙水圧、加速度、杭の曲げひずみと杭頭変位、対策工壁の曲げひずみ等である。

3. 実験結果

(1) 護岸の移動条件が流動性状および杭基礎の変形に与える影響 (実験シリーズ1)

a) 過剰間隙水圧および杭頭変位の経時変化
実験No.1-1で計測された過剰間隙水圧と杭頭変位

の経時変化例を図-3に示す。図の計測点No.は図-1中の計測点番号と対応している。測点No.2を除き加振開始後2~3秒で過剰間隙水圧比がほぼ1に至り、加振終了後の護岸移動時までこの状態が継続している。しかし、護岸移動時(約12秒)にスパイク状の一時的な水圧の低下・回復が見られ、その後、徐々に過剰間隙水圧が消散してゆく傾向を示す。この傾向は護岸近傍において顕著である。これは護岸の移動に背後地盤が追従せず、若干の時間ずれの後に流動したことと対応し、護岸と背後地盤が離れる時に一時的な水圧低下が生じたためと考えられる。杭頭変位は加振1~2秒で増幅した後、地盤の液状化にともないしだいに減衰する。そして、護岸移動時に一時的なスパイク状の最大値を示した後、徐々に減少しある一定の残留変形量に至る。杭の曲げひずみにも同様の傾向が見られた。これは、護岸移動時の水圧低下によって一時的に剛性の高まった地盤が杭を伴って護岸側に変位した後、水圧が再上昇した

地盤の流動力と杭の復元力の関係に応じて変形が推移し、水圧が消散し地盤の剛性が回復することにより残留変形を生じるためではないかと考えられる。

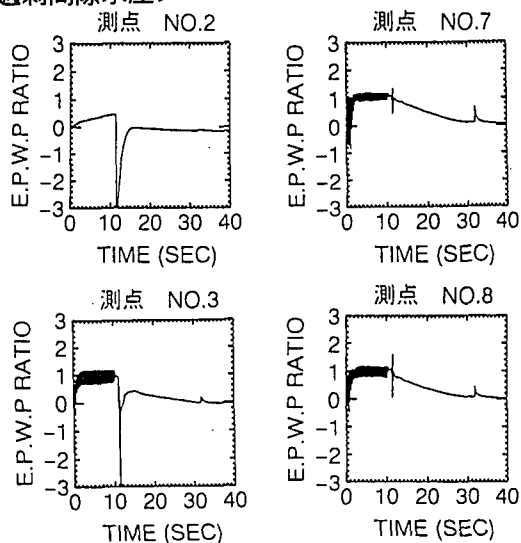
b) 護岸壁の移動速度と地盤の流動性状および杭基礎の変位の関係

実験No.1-2の過剰間隙水圧と杭頭変位の経時変化を図-4に示す。図-3の実験No.1-1に比べ壁移動時のスパイク状の水圧低下や杭の変形が小さくなっている。これは、護岸の移動速度が小さいために背後地盤と壁の相対速度・変位が小さかったためと考えられる。次に、地表面に設置したマーカーの移動量から求めた実験No.1-1およびNo.1-2の地表面の残留変形量の分布を図-5に示す。護岸から150cm程度、またはそれ以上までの広い範囲で残留変位が生じている。なお、No.1-1で●印は変位が護岸と逆方向に生じたことを意味し、これは土槽壁付近の地盤で加振中に変位が生じたものと考えられる。図より、護岸の移動速度の小さい実験No.1-2の方が護岸から遠方での変位量が大きく、流動範囲が大きいような傾向も見られるが、実験No.1-3とNo.1-4の比較では護岸速度の大きい前者の方が遠方でも変位が大きくなる傾向も見られ、護岸移動速度と影響範囲の関係については今後の検討が必要である。

c) 護岸壁の移動方式と地盤の流動性状および杭基礎の変位の関係

実験No.1-3およびNo.1-4の杭頭変位の経時変化を図-6に示す。また、実験No.1-1およびNo.1-3の地表面の残留変形量の分布を図-7に示す。護岸の移動速度が大きい場合には、図-6と図-3の比較よりスパイク状の杭頭変位および杭の残留変形、および、図-7より地表面変形量のいずれについても護岸を平行に移動した実験No.1-3の方が実験No.1-1より大きく、地盤の流動が大きかったことがわかる。これは、壁を平行に強制移動させることから、護岸移動時の水圧低下が激しく、かつ、護岸近傍では地盤の深い領域でも比較的大きな変形が生じたためではないかと考えられる。しかし、図-6と図-4の比較より、移動が遅い場合には、護岸の移動方式にかかわらず両者の杭頭変位の経時変化は比較的良好な結果になっている。いずれの方式も護岸の移動の体積は一定であり、移動速度が小さい場合には移動方式の影響が小さくなることが予想される。

<過剰間隙水圧>



<杭頭変位>

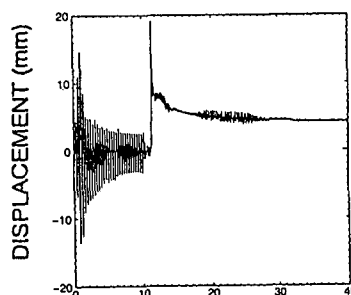
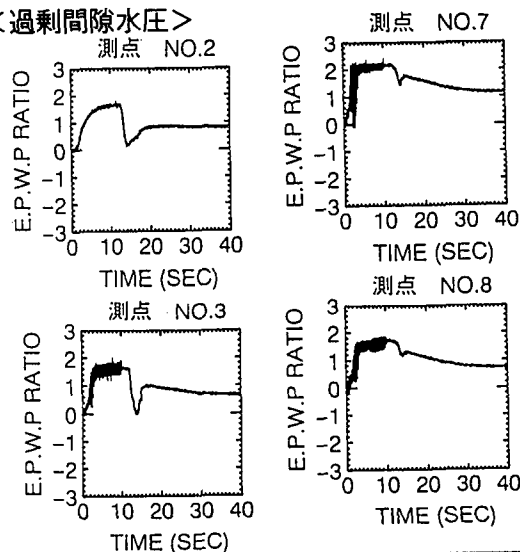


図-3 過剰間隙水圧、杭頭変位の経時変化(実験No.1-1)

<過剰間隙水圧>



<杭頭変位>

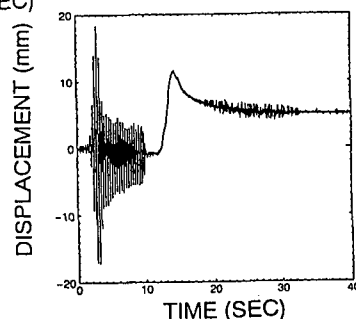
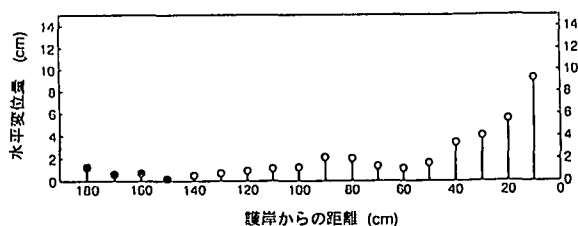


図-4 過剰間隙水圧、杭頭変位の経時変化(実験No.1-2)

<実験No.1-1>



<実験No.1-2>

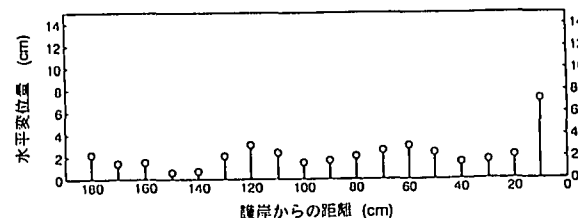
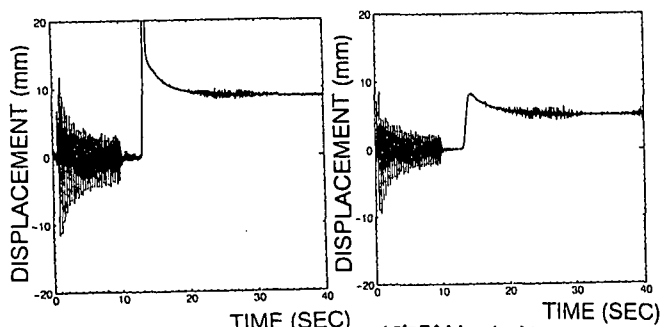


図-5 地表面の残留変形量の分布



<実験No.1-3>

<実験No.1-4>

図-6 杭頭変位の経時変化

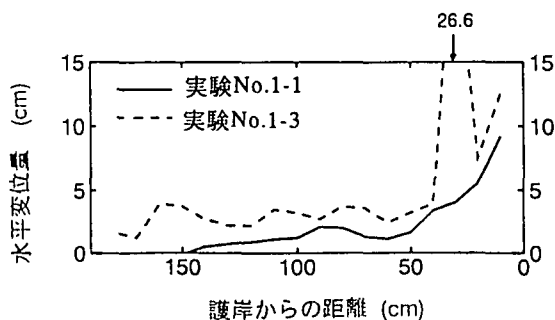


図-7 地表面の残留変形量の分布(実験No.1-1,1-3)

(2) 連続壁による杭基礎の側方流動対策について (実験シリーズ2)

a) 過剰間隙水圧の経時変化

実験No.2-1(板厚 $t=1.2\text{mm}$, 上流側)とNo.2-3($t=3.2\text{mm}$, 上流側), および実験No.2-5($t=1.2\text{mm}$, 下流側)とNo.2-7($t=3.2\text{mm}$, 下流側)における杭の上流側・下流側両面の過剰間隙水圧の経時変化を図-8に示す。対策工壁が杭より上流側に位置する実験No.2-1と2-3, および剛性の低い壁が下流側に位置するNo.2-5では杭周辺地盤に護岸移動時の急激な水圧低下が顕著に見られるが, 剛性の高い対策工壁が杭の下流側に位置する実験No.2-7ではその影響

がほとんど見られない。これは下流側に低剛性の壁があっても護岸移動の影響で対策壁も瞬時に変形してその影響が後方の地盤に伝達するのに対し, 剛性が高い壁では変形が小さく後方地盤への護岸移動の影響を遮断する役割を果たしたためと考えられる。

b) 対策工壁の板厚と杭頭変位の関係

杭頭の変位量として護岸壁移動時の一時的なスパイク状の変位と流動終了後の残留変位の2つに注目し, 実験No.2-1~2-8に関し, これらと対策工壁の板厚の関係を示したものが図-9である。図中には無対策の場合として実験シリーズ1の実験No.1-1の結果も含まれている。図より以下のことがわかる。①護岸移動時の変位, 残留変位いずれに対しても下流側に対策工壁を設置する方が効果的で, 特に残留変位は対策工壁の板厚が比較的小さい場合でもほとんど見られない。②対策工壁が上流側の場合には板厚にかかわらず無対策時とほぼ同程度の残留変位が生じている。③護岸移動時のスパイク状の変位を抑止するためには剛性の高い対策工壁が必要である。これらの原因として次のことが考えられる。①今回の実験では図-5に見られるように杭より下流側の護岸近傍地盤の流動が支配的で, 杭より上流側からの流動力はそれほど大きくなかったと考えられる。②(a)で前述のように, 剛性の高い壁を設置すると, 護岸移動時の急激な水圧低下の影響がそれより後方の地盤へ伝達するのを遮断する効果が期待できる。

c) 対策工壁の幅と杭頭変位の関係

対策工の幅と護岸移動時の杭頭変位および流動終了後の杭頭の残留変位の関係を図-10に示す。今回の実験条件(杭から杭幅と同程度の距離の位置に対策工壁を設置)では, 杭幅の倍程度の幅の対策壁を設ければその効果が発揮され, それ以上幅を大きくしても対策効果は変わらない結果になっている。

d) 護岸移動時の杭頭変位と残留変位量の関係

護岸移動時に生じるスパイク状の杭頭変位と流動終了後の残留杭頭変位の関係を全実験ケースについて図-11に示す。図より, 壁移動時の杭頭変位が大きくなると残留変位も大きくなる傾向が見られるが, その関係はそれほど明瞭ではない。これは, 前者は護岸の移動速度の影響を強く受けると考えられるのに対し, 後者は前者の護岸移動時の変形量の他に地盤の流動性状, 流動力と杭自身の復元力のバラ

ンスなどの影響を受けるためと考えられる。

e) 杭および対策工壁の残留ひずみ

実験No.2-2 (t=2.3mm, 上流側)と実験No.2-6 (t=2.3mm, 下流側)の加振終了後の杭および対策工壁の残留ひずみの深さ方向分布を図-12に示す。対策工壁が上流側の実験No.2-2においては杭の残留ひずみが大きく、対策工壁にはほとんどひずみが生じていないのに対し、対策工壁が下流側の実験No.2-6では対策工壁に残留ひずみが生じ、杭の残留ひずみが実験No.2-1に比べて小さくなっている。これより、今回の実験条件では対策工壁が上流側の場合にはほとんどこれに荷重が分担されておらず、下流側の場合には対策工壁に荷重が分担され杭の変形が低減されていることがわかる。

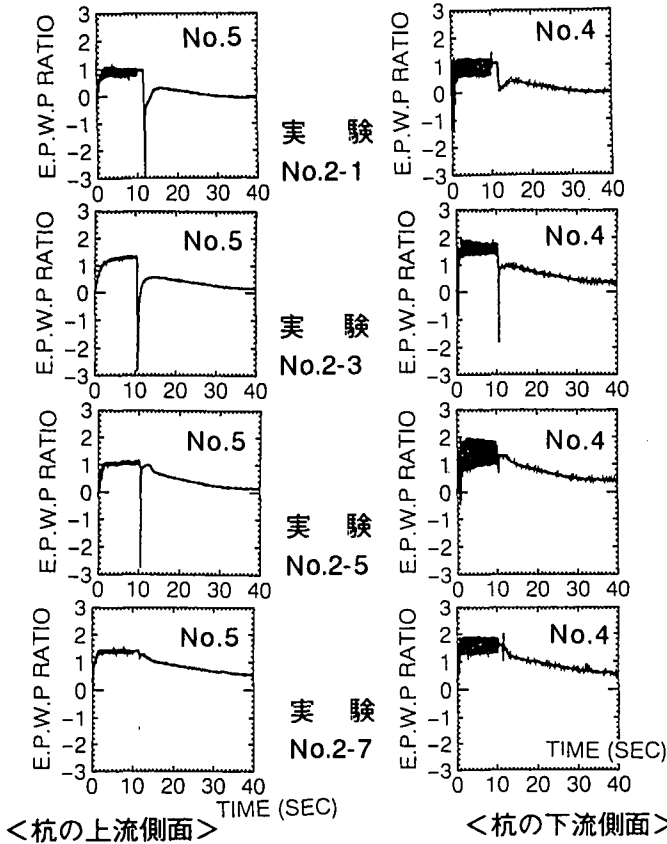


図-8 過剰間隙水圧の経時変化 (実験No.2,3,5,7)

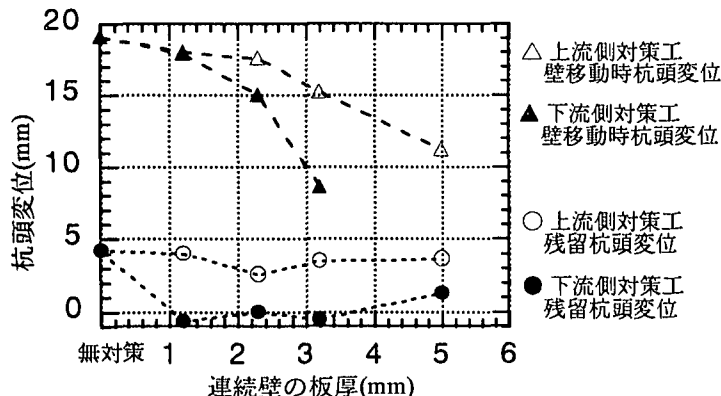


図-9 対策工壁の板厚と杭頭変位の関係 (実験No.2-1~8)

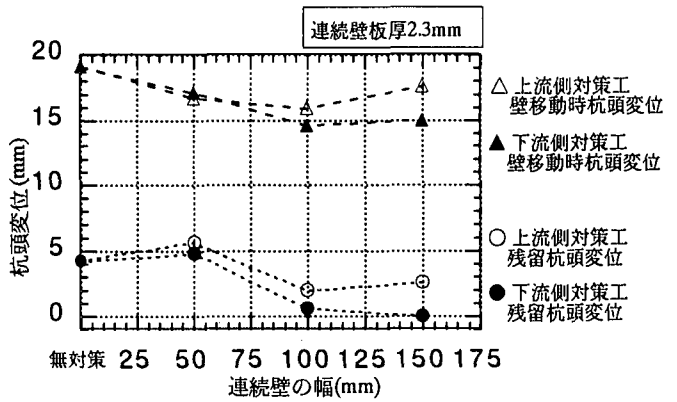


図-10 対策工壁の幅と杭頭変位の関係

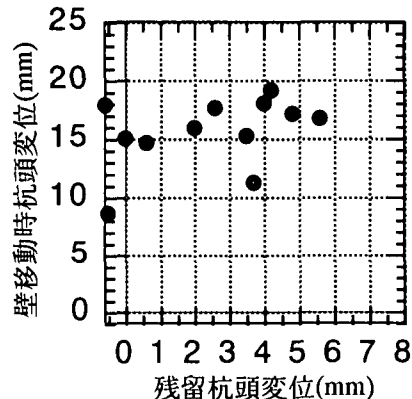


図-11 護岸移動時の杭頭変位と残留杭頭変位の関係

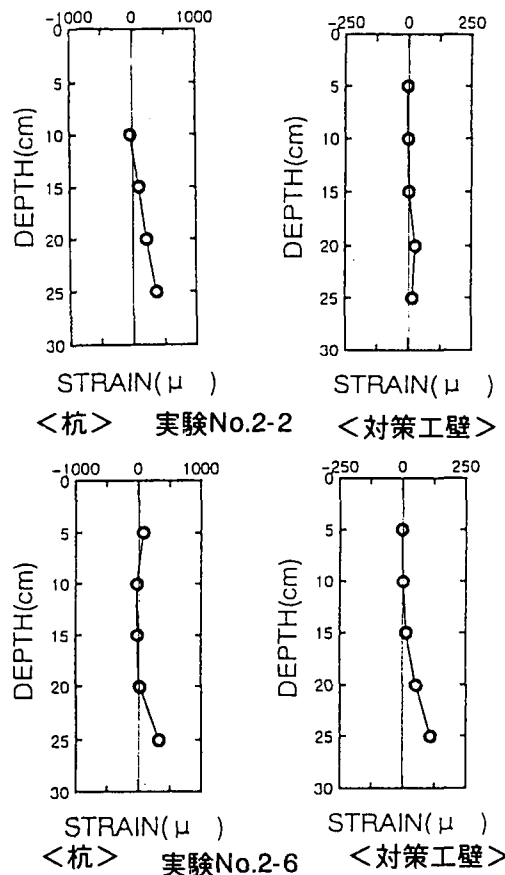


図-12 杭および対策工壁の残留ひずみ (実験No.2-2,2-6)

4. おわりに

可動式の側壁を持つ土槽を用いた模型振動台実験によって、護岸背後地盤の流動性状とそれが近傍の杭基礎に及ぼす影響、およびその対策工に関する検討を行った。主な結果は次のとおりである。

(1) 護岸の移動と背後地盤の流動との間に時間ずれが生じる時には間隙水圧にスパイク状の低下・回復が見られ、その影響で近傍の杭にも護岸方向への急激な変位が生じる。その後、杭の変形は過剰間隙水圧が回復した地盤からの流動力と杭の復元力の関係に応じて推移し、水圧が消散し地盤の剛性が回復することにより残留変形を生じたと考えられる。

(2) 護岸の移動が遅い時は背後地盤の流動との時間ずれの影響が小さくなるためにスパイク状の水圧低下や杭の変形は小さくなる。また、護岸の移動速度が大きい場合には、護岸の移動方式(下ヒンジ、平行)によって流動性状や杭の変形に差が見られたが、護岸の移動が遅い場合は杭頭変位の計測結果に及ぼす護岸移動方式の影響が比較的小さかった。

(3) 杭より下流側に連続壁を設けることで杭の変形を低減することができる。しかし、上流側に連続壁を設置することの効果は小さかった。これは、今回の実験においては杭より下流側の護岸近傍地盤の流動が卓越し、上流側からの流動力はそれほど大きくなかったためと考えられる。

今回の実験は護岸背後地盤の側方流動とその対策工に関する基礎的検討を目的とし、単純化したモデル・条件で実施した。実際の護岸の移動形態は複雑で、今回の実験条件との対応や護岸の移動と背後地盤の流動との時間ずれ、それによる水圧低下の大きさや影響範囲、近傍構造物に与える影響度等、対策工に関してもその設置位置や幅、剛性等、また、液状化層上部の不飽和層がある場合の影響等に関して、今後さらに検討を実施していく予定である。

【参考文献】

- 1) 佐々木, 常田他: 液状化にともなう地盤流動特性, 土木技術資料33-1,1991
- 2) Yasuda, S., H.Nagase et al.: The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction, Soil and foundation Vol.32, No.1, JSSMFE,pp.149~160,1992.3
- 3) 寺内, 安田他: 岸壁・護岸のはらみ出しにともなう液状化した背後地盤の側方流動に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演会, III-pp.250~251,1996.9
- 4) 一井, 井合他: 有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集,pp.397~404,1996.1

SHAKING TABLE TESTS ON THE LATERAL FLOW OF LIQUEFIED GROUND BEHIND QUAY WALLS AND THE COUNTERMEASURE AGAINST IT

Susumu Yasuda, Hiroyuki Nomura, Tetsuya Terauchi, Hiroyuki Tanaka, Hiroshi Kita, Masataka Tatsuta and Noriyoshi Harada

Lateral flow of the liquefied ground behind quay walls in 1995 Hyogoken-nambu earthquake damaged pile foundations of many structures. This paper reports on the mechanism of the lateral flow behind the quay wall and the countermeasure against it for the pile foundation, investigated through model tests using shaking table. Test results indicated that the characteristics of the lateral flow was varied by the patterns and the speed of the quay wall movement and that the sheet pile wall driven at the lower side from the pile foundation was effective to prevent the residual displacement of the pile foundation.