

ケーソン岸壁の動的安定性に与える固化処理と裏込め石の効果

笠間, 清伸
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

善, 功企
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

陳, 光斉
九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門

林, 健太郎
五洋建設株式会社技術研究所

<https://hdl.handle.net/2324/21964>

出版情報 : 土木学会論文集C. 66 (1), pp.196-201, 2010-03. Japan Society of Civil Engineers
バージョン :
権利関係 :

ケーソン岸壁の動的安定性に与える 固化処理と裏込め石の効果

笠間 清伸¹・善 功企²・陳 光斉³・林 健太郎⁴

¹正会員 九州大学助教 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail:kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

²フェロー 九州大学教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (同上)

³正会員 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (同上)

⁴正会員 五洋建設株式会社技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

本論文では、液状化対策として背後地盤を固化処理したケーソン岸壁の振動台実験を行い、ケーソン岸壁の動的安定性に与える固化処理と裏込め石設置の併用効果を明らかにした。以下に得られた結論を示す。(1) ケーソン岸壁の背後地盤を固化処理することで、地震時における岸壁および背後地盤の変形を大きく低減でき、その際には固化処理地盤内に裏込め石を設置することはあまり有効でないと考えられる。(2) ケーソン岸壁の背後地盤を固化処理すると、地震時における岸壁と固化処理地盤の水平振動の位相差が小さくなり、岸壁と固化処理地盤が一体化して挙動する。このことにより、背後地盤からケーソン岸壁に作用する地震時土圧は固化処理地盤底部の抵抗力に起因して減少するため、ケーソン岸壁の地震時水平変位は減少すると考えられる。

Key Words : cement mixing, chemical grouting, liquefaction, shaking table test, earth pressure

1. はじめに

地震時において、港湾、空港、道路等の土木施設や建築施設等に多大なる被害を与えてきた原因の一つに地盤の液状化現象がある。現在、様々な液状化対策工法が考案、実用化されており、そのうちの一つに固化材や薬液を用いて地盤を固化する固化処理工法がある。例えば、事前混合処理工法¹⁾のように、砂質土に固化材を混合して造成された固化処理地盤は、新規埋立地盤の液状化対策として活用されている。また、耐久性の高い溶液型薬液を用いて、既設構造物の直下地盤を固化する浸透固化処理工法²⁾などが開発されている。

これら固化処理工法の施工例は増加しているものの、固化処理地盤と周辺構造物の相互作用に関しては、未解明な点も多く、2003年の十勝沖地震では、液状化対策として固化処理した背後地盤に液状化現象が生じていないにもかかわらず、ケーソン式岸壁の水平変位および背後地盤の沈下現象が観察された。この被害の原因として、1)液状化対策として固化処理を用いる際の最適な改良強度とその有効改良範囲、2)岸壁、固化処理地盤およびその背後未処理地盤の振動特性の違い、3)固化処理と裏込

め石の併用の影響、ならびにこれらの相互作用が考えられる。1)と2)に関して、著者らは、重力場における振動台実験を行い、ケーソン岸壁の安定性に与える固化処理地盤の改良強度と改良範囲の影響を明らかにし、それらの結果をもとに背後地盤を固化処理したケーソン岸壁における滑動安全率算定式を提案した³⁾。本報では、3)の影響要因に着目し、ケーソン岸壁の安定性に与える固化処理と裏込め石の併用の影響について報告する。

2. 実験概要

実験条件を表-1に、模型土槽を図-1に示す。模型ケーソンは、2003年十勝沖地震で被災したK港西港地区第4埠頭をモデルに設置圧分布の縮尺を1/40とし、これを奥行き方向に3個設置し、中央のケーソン(高さ H ×幅 B =390mm×410mm)で各種の計測を行った。背後地盤には5号硅砂(最大乾燥密度1.565g/cm³、最小乾燥密度1.250g/cm³、透水係数 8.53×10^{-2} cm/s、 $D_{50}=0.63$ mm)を使用し、脱気水を満たした土槽に水中落下法により相対密度60%に調整した。固化処理地盤の作製に用いた固化材は、初期pHを3

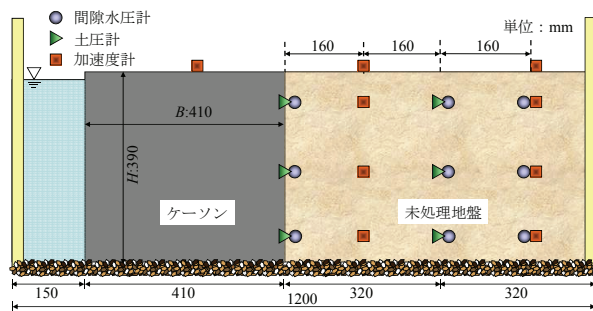
表-1 実験条件

実験ケース	裏込め石	薬液濃度	一軸圧縮強度	改良範囲 L/H
No.1	なし	—	—	0
No.2	あり			
No.3	なし	6%	32kN/m ²	1.642
No.4	あり			
No.5	なし			0.821

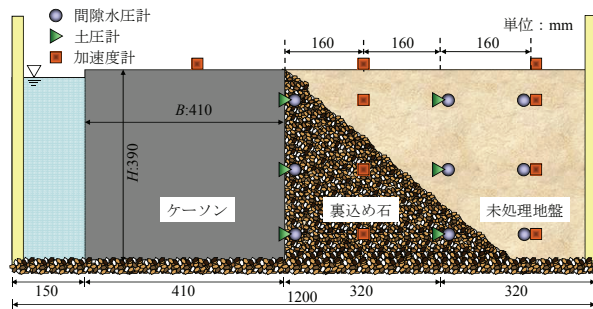
に調整した恒久性の水ガラス(pHは時間とともに中性化する)であり、濃度は6%である。粘着力を有する材料で重力場の模型実験を行う場合、応力の相似則を満足させるためには、模型の縮尺を n とすると、粘着力を実際の強度の n 分の1に調整する必要がある。濃度6%の固化処理土の一軸圧縮強度 q_u は32kN/m²であり、実際の強度に換算すると1280kN/m²となり、実際の固化処理地盤の強度としては高い範囲に相当する。しかしながら、水ガラスを使用した固化処理土のせん断剛性は、母材のせん断剛性とそれほど変化せず比較的小さいままなので、本模型実験で想定した固化処理地盤は、液状化対策として最低限の粘着力を有する地盤であると考えている。実験では、ケーソン式岸壁の滑動変位に着目するため、捨石マウンドのかわりに層圧50mmの礫層を設けた。礫層には、最大粒径19mmのコンクリート粗骨材用碎石を使用した。土槽の両端には、クッションを設置し、波動の鉛直壁からの反射を低減した。なお、本実験では、間隙水圧の消散現象の相似則を合わせるために、水の粘性を調整するなどの配慮はしていない。

裏込め石の設置の影響を調べるために、図-1a)に示す裏込め石がない状態と図-1b)に示すケーソン背後に勾配1:1.2で裏込め石を設置した条件で実験を行った。また、固化処理と裏込め石設置を併用する影響を調べるために、同様な条件で背後地盤に固化処理を施した実験を行った(図-1c)とd)参照)。この時、背後地盤のすべての領域は、薬液濃度6%で固化処理を施した。さらに、部分的な固化処理の効果を評価するために、図-1e)に示すように固化処理の改良範囲を変化させた実験も行った。この時の固化処理の改良範囲 L は、震度法を用いてケーソン岸壁の主働崩壊角の影響範囲を決定する方法を用い、地盤の内部摩擦角 $\phi_i=30^\circ$ 、水平震度 $\alpha_0=0.15$ のときに滑動安全率が1.0となる主働崩壊面の最大水平到達距離320mmを改良範囲とした。この改良範囲 L は、ケーソンの高さ H を基準に正規化すると $L/H=0.821$ となる。参考文献3)には、固化処理による改良強度と改良範囲 L を変化させた条件での実験結果をまとめている。

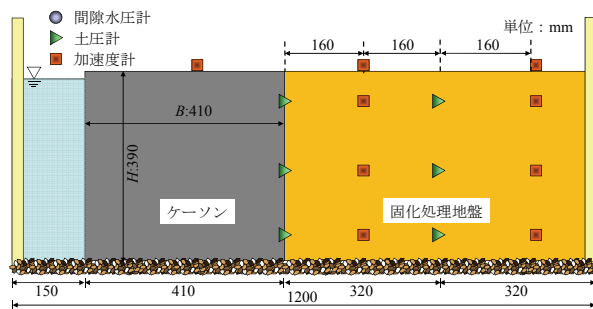
間隙水圧計、加速度計および土圧計を図-1のように設置し、また、ケーソンの水平変位および背後地盤の沈下量を測定した。なお、固化処理地盤内では間隙水圧の上



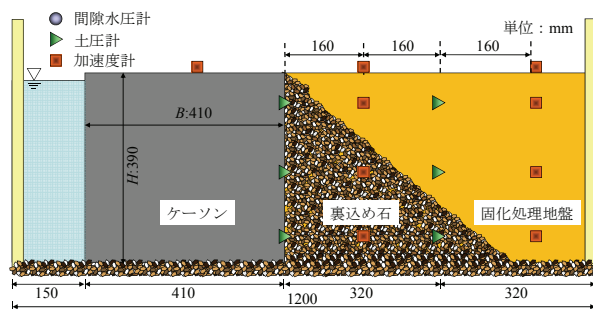
a) 未処理・裏込め石なし



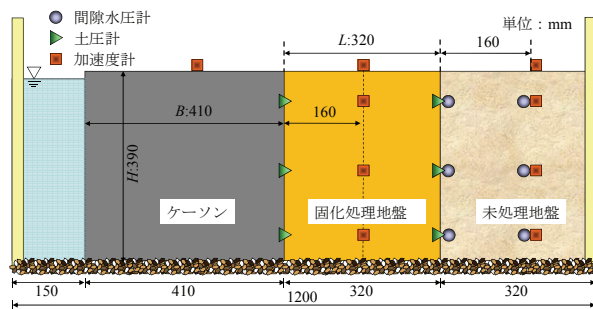
b) 未処理・裏込め石あり



c) 固化処理・裏込め石なし



d) 固化処理・裏込め石あり



e) 部分固化処理・裏込め石なし

図-1 模型土槽

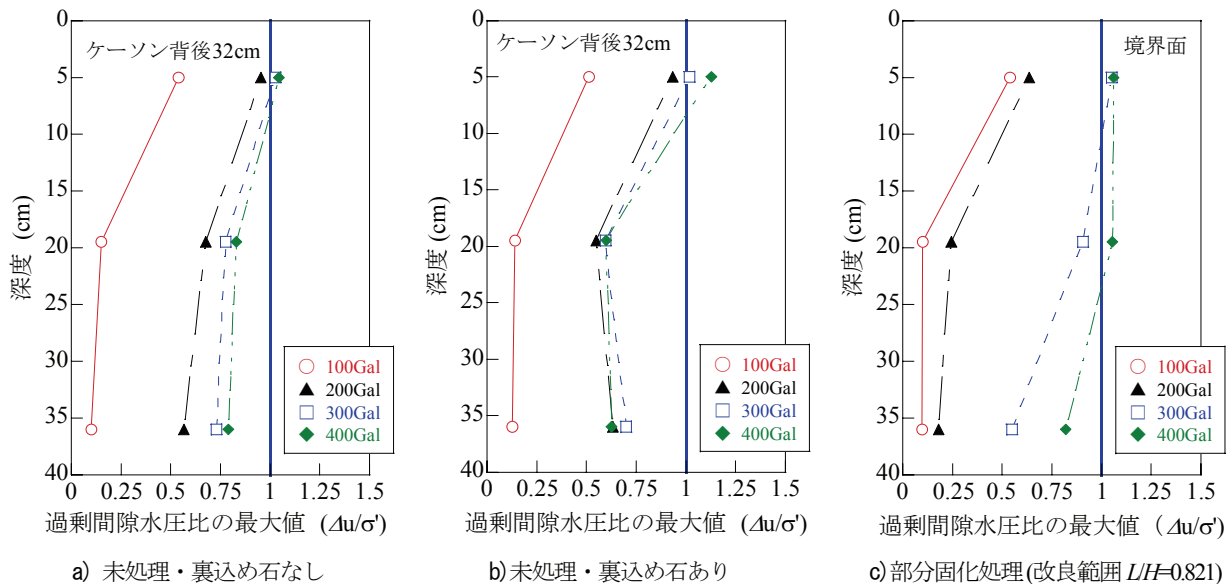


図-2 未処理地盤に発生する最大過剰間隙水圧比の深度分布図

昇がないことを確認しているため、固化処理部には間隙水圧計を設置していない。また、裏込め石内に土圧計を水平方向に配置して、土圧変化を計測することを試みたが、使用した土圧計に比べて裏込め石の大きさが大きかったため、うまく計測することができなかった。加振は3Hzの正弦波を10波ずつ、100Gal～400Galまで100Gal単位で増加させるステップ载荷で行った。

3. 間隙水圧発現特性

裏込め石の有無ならびに部分固化処理が背後の未処理地盤の液状化の程度に与える影響を調べるために、ケーソン背面から320mmの地点(部分改良範囲 $L/H=0.821$ で固化処理部と未処理部の境界位置)における最大過剰間隙水圧比の深度分布図を図-2に示す。未処理(固化処理なし)の条件では、裏込め石の設置の有無にかかわらず、200Galで地表面付近において最大過剰間隙水圧比が1.0となり液状化が発生した。それ以上の入力加速度では、未処理・裏込め石なしの条件においてほぼ全深度で約0.5以上の最大過剰間隙水圧比が観測された。また、未処理・裏込め石ありの条件では、裏込め石の付近で最大過剰間隙水圧比が若干小さくなる傾向がみられた。一方、部分固化処理と未処理地盤の境界部では、300Gal以上の加振条件のとき、深度200mm以浅において過剰間隙水圧比が0.75以上となり、境界面付近の未処理地盤で噴砂が観察されたことから、液状化が発生したと考えられる。

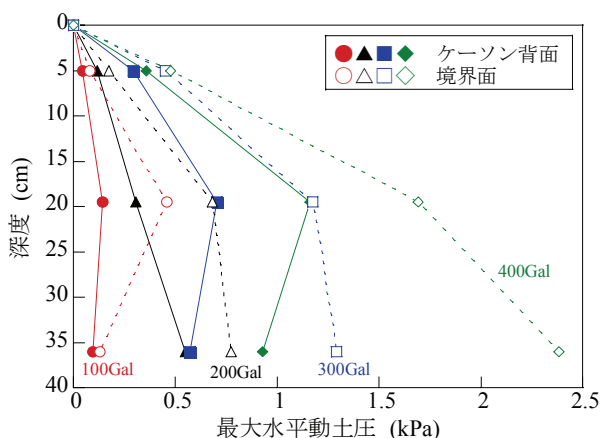
4. 地震時最大水平土圧

ケーソン背面に作用する地震時水平土圧に与える部分固化処理の影響を評価するために、ケーソン背面および

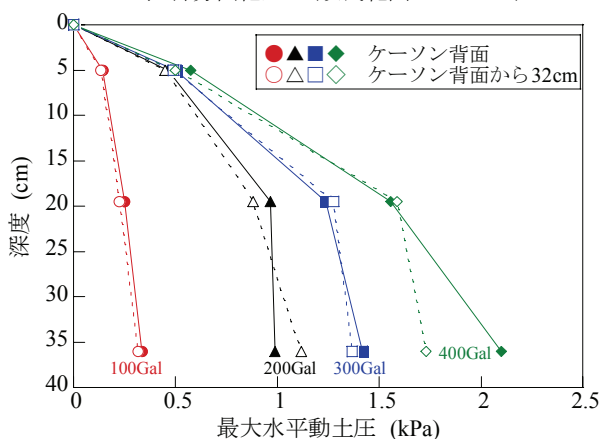
固化処理地盤と未処理地盤の境界部で計測された、各入力加速度における水平動土圧の最大値を図-3に示す。実験で使用した土圧計は、直径6.5mm・厚さ1mmのひずみゲージ式であり、水平土圧の変動を計測するために、加振方向と垂直に受圧面を向けて土圧計を設置した。土圧計の設置後、模型地盤を底面から鉛直方向に作製した。この地盤作製時において生じたと思われる土圧計と砂粒子の間の摩擦力や応力集中などにより、加振を加える前の初期土圧は非常に大きな値を示す結果となった。このような理由から本論文では、加振中の水平土圧と初期土圧の差を動土圧と考へて、特に動土圧の最大値に着目して考察した。さらに、比較として、未処理・裏込め石なしの条件における、ケーソン背面およびケーソン背面から320mmにおける最大水平動土圧も示した。

ケーソン背面から320mmにおける固化処理地盤と未処理地盤の境界部で発生する最大水平動土圧に着目すると、入力加速度の増加とともに増加した。また、未処理・裏込め石なしの条件でケーソン背面から320mmの地点で発生する最大水平動土圧の値とも、ほぼ等しくなった。

一方、図-3a)に示す固化処理した条件でのケーソン背面に作用する最大水平動土圧は、固化処理地盤と未処理地盤の境界部での最大水平動土圧に比べて減少した。この時、加振によって固化処理地盤の底面とその下の礫層との境界部が繰返しせん断を受けることで柔らかくなり、固化処理地盤の深部から崩壊するといった破壊形態を示した。このことは、液状化に起因して発生する未処理地盤の地震時水平土圧に対して固化処理地盤の底部が抵抗し、ケーソンに直接作用する水平土圧を低減するためであると考えられる。このような固化処理による土圧低減効果は、比較的低強度の固化処理地盤においても報告されている⁴⁾。なお、固化処理地盤の改良強度と改良範囲が土圧低減効果に与える影響は、参考文献3)に詳しい。



a) 部分固化処理(改良範囲L/H=0.821)



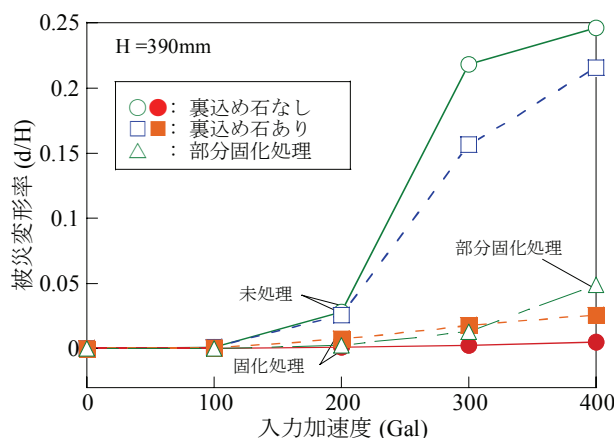
b) 未処理・裏込め石なし

図-3 地震時最大水平土圧

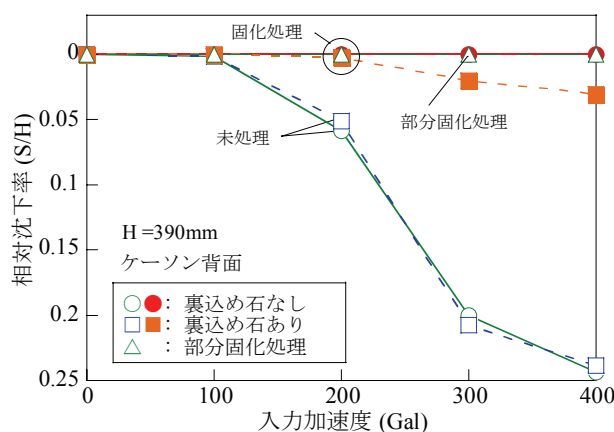
5. ケーソンおよび背後地盤の変位挙動

固化処理と裏込め石設置の併用によるケーソンの水平変位および背後地盤の沈下量を比較する。各入力加速度におけるケーソンの被災変形率と背後地盤の相対沈下率を、それぞれ図-4a)とb)に示す。ここで被災変形率とは、ケーソンの水平変位量をケーソンの高さ $H=390\text{mm}$ で除したもので、相対沈下率は、ケーソン背面での地盤の沈下量をケーソンの高さ $H=390\text{mm}$ で除したものである。未処理の条件では、裏込め石の有無によらず共に200Gal加振時に水平変位が生じ、さらに300Gal加振時に大幅な水平変位が生じた。これは、前節で示したように200Gal加振時に、地表面付近が液状化し、300Gal加振時に地盤の中央付近の深さまで液状化したことが原因である。裏込め石設置の影響に着目すると、裏込め石を設置した場合は、裏込め石を設置しない場合に比べてケーソンの水平変位量が小さく、裏込め石設置の効果がみとれる。これは、裏込め石の設置により、ケーソンに作用する水平土圧が低減したことが原因である⁹⁾。しかしながら、図-4b)によると、未処理の場合に生じる相対沈下率は、裏込め石設置の有無によらずほぼ同じ値をとった。

ケーソン背面を固化処理した場合には、裏込め石の



a) 被災変形率



b) 相対沈下率

図-4 ケーソン岸壁の地震時挙動に与える裏込め石の影響

設置の有無にかかわらず、ケーソンの被災変形率および背後地盤の相対沈下率は、未処理の場合に比べて大幅に減少し、固化処理による地震時のケーソンの変形抑制効果がみとれる。特に、部分固化処理を施した場合においても、被災変形率ならびに相対沈下率は大きく低減した。しかしながら、未処理の場合とは逆に、裏込め石を設置した条件での被災変形率および相対沈下率は、裏込め石なしの条件に比べて増加した。

これらの原因を明らかにするために、ケーソン、裏込め石および背後地盤の振動特性の違いに着目して、地震時のケーソンの安定性を考察する。図-5に、300Gal加振時における入力加速度、ケーソン上面、ケーソン背面から160mmおよび480mmの位置に設置した加速度計の加振から1.0秒までの時刻歴を示す。図-5a)とb)に示すように未処理の条件では、裏込め石の有無によらず、入力加速度と比較して、ケーソンならびに背後地盤の加速度波形が崩れており、また徐々に波形に遅れが生じることが分かる。また、図-5d)に示す固化処理・裏込め石ありの条件でも、ケーソンと背後地盤で若干の波形の差異と遅れがみられる。一方、図-5c)とe)に示す固化処理・裏込め石なしの条件では、ケーソンならびに背後地盤は、入力加速度と同様に变化した。

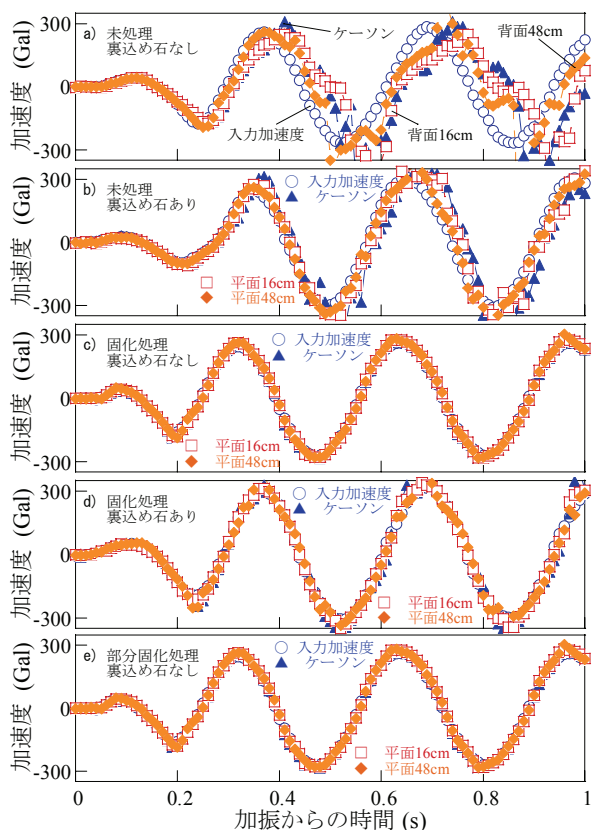


図-5 300Gal加振時のケーソンおよび背後地盤の加速度履歴

入力加速度に対するケーソンおよび背後地盤の加速度波形の遅れに着目して、ケーソン上面、ケーソン背面から160mmおよび480mmの位置に設置した加速度計の計測結果を用いて、300Gal加振時におけるケーソンと背後地盤の加速度の位相差を図-6に示す。位相差とは、ケーソンの加速度がピーク値を示す時間から背後地盤の加速度がピーク値を示す時間を引いて、入力加速度の周期で除して計算したものである。ケーソンが海側に移動する場合に位相差が正のときは、背後地盤がケーソンに衝突し、位相差が負のときはケーソンに遅れて背後地盤が移動することを意味する。逆に、ケーソンが陸側に移動する場合に位相差が正のときは、背後地盤に遅れてケーソンが移動し、位相差が負のときは、背後地盤にケーソンが衝突することを意味する。本来、動的応答特性は、加振時の周波数に依存することが予想されるが、ここでは本実験で行った周波数(3Hz)に着目して位相特性を考察した。ただし、地盤のせん断波速度から推定した未処理地盤の固有振動数は、10.7Hzであり、ケーソン模型の固有振動数は、様々な周波数での加振実験から、6.0Hzとなった。未処理・裏込め石ありの条件では、ケーソン背後から160mmと480mmの位置の違いによらず、ケーソンと背後の未処理地盤の位相差は、加振時間の増加とともに負の位相差が増加する傾向を示した。つまり、海側に地震による慣性力が作用する場合には、ケーソンと裏込め石の間に空間が生じ、裏込め石と液状化した背後地盤がそ

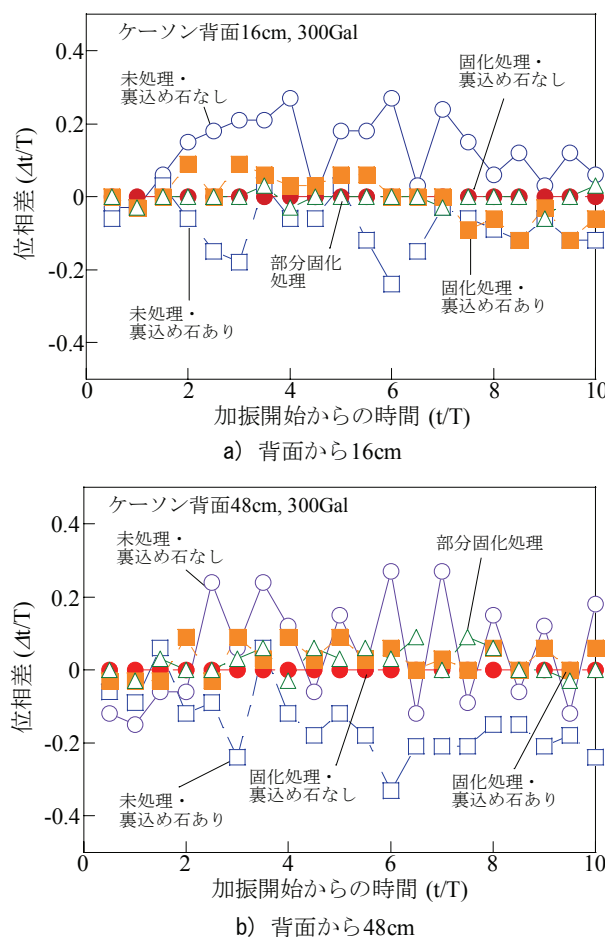


図-6 ケーソンと背後地盤の位相差

の空間に流入する。その後、陸側に慣性力が作用しケーソンが戻ろうとする際には、ケーソンが元の位置にまで戻ろうとするのを妨げるという悪循環のもと、ケーソンの水平変位およびケーソン背後地盤の沈下が累積したと考えられる。また、未処理・裏込め石なしの条件では、正の位相差が生じ、海側に振動する際に液状化した未処理地盤がケーソンに衝突することで、ケーソンに作用する水平土圧が増加し、ケーソンの水平変位が、他の条件に比べて増大した可能性がある。液状化・非液状化地盤の振動特性の違いによって、岸壁に作用する地震時水平土圧が増加し、地震時の岸壁が不安定化することは、三浦ら⁶⁾、小濱ら⁷⁾によっても報告されている。

一方、背後地盤に固化処理を行った場合には、裏込め石の設置の有無にかかわらず、位相差はかなり低い値を示した。特に、固化処理・裏込め石なしの条件ならびに部分固化処理の条件では、ケーソン背面から160mmの位置での固化処理地盤とケーソンの位相差はほぼみられず、固化処理地盤とケーソンが、加震時において一体化して挙動することを示唆する。このことにより背後地盤からケーソン岸壁に作用する地震時土圧は、前節で示したように大きく減少し、その結果ケーソン岸壁の地震時水平変位は減少すると考えられる。一方、固化処理・裏

込め石ありの条件では、若干の位相差が観測された。このような位相差に起因して、ケーソンと裏込め石が離れ始め、ケーソンの水平変位および背後地盤の沈下につながったと考えられる。以上のことから、地震時におけるケーソン岸壁の変形抑制のためには、背後地盤を固化処理することは非常に効果的であり、その際には固化処理地盤内に裏込め石を設置することはあまり有効でないと考えられる。

6. まとめ

本論文では、背後地盤を固化処理したケーソン岸壁の振動台実験を行い、ケーソン岸壁の動的安定性に与える固化処理と裏込め石設置の併用効果を明らかにした。以下に得られた結論を示す。

- (1) ケーソン岸壁の背後地盤を固化処理することで、地震時における岸壁および背後地盤の変形を大きく低減でき、その際には固化処理地盤内に裏込め石を設置することはあまり有効でないと考えられる。
- (2) ケーソン岸壁の背後地盤を固化処理すると、地震時における岸壁と固化処理地盤の水平振動の位相差が小さくなり、岸壁と固化処理地盤が一体化して挙動する。このことにより、背後地盤からケーソン岸壁に作用する地震時土圧は固化処理地盤底部の抵抗力に起因して減少するため、ケーソン岸壁の地震時水平変位は減少すると考えられる。

参考文献

- 1) Zen, K., Yamazaki, H., Yoshizawa, H. and Mori, K.: Development of premixing method against liquefaction, *Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.461-464, 1992.
- 2) Yamazaki, H. Hayashi, K. and Zen, K.: New liquefaction countermeasure based on pore water replacement, *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.4, pp.2741-2744, 2006.
- 3) 笠間清伸, 善功企, 陳光齊: 固化処理工法を用いたケーソン式岸壁の動的変形抑制に関する振動台実験, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.225-230, 2008.
- 4) 土田孝, 菊池喜昭, 福原哲夫, 輪湖建雄, 山村和弘: 分割法による土圧算定法とその軽量混合処理工法への適用, 港湾技研資料, No.924, pp.1-28, 1998.
- 5) 北島昭一, 阪本浩, 岸正平, 中野拓治, 柿崎秀作: 港湾構造物設計基準作成にあたっての諸問題について, 港湾技術研究所資料, No.30, pp.34-44, 1967.
- 6) 三浦均也, 小濱英司, 栗田悟, 大塚夏彦: 地震動を受ける重力式岸壁の振動台実験, 土と基礎, Vol.45, No.8, Ser.No.475, pp.17-20, 1997.
- 7) Kohama, E., Miura, K., Yoshida, N., Ohtsuka, N. and Kurita, S.: Instability of gravity type quay wall induced by liquefaction of backfill during earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.4, pp.71-83, 1998.

(2009. 5. 15 受付)

SHAKING TABLE MODEL TEST ON SEISMIC STABILITY OF CAISSON TYPE QUAY-WALL IN APPLICATION OF CEMENT-MIXING METHOD

Kiyonobu KASAMA, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kentaro HAYASHI

Ground solidification techniques such as cement-mixing and permeable-grouting methods have been developed for the purpose of liquefaction countermeasure. In order to investigate the effect of ground solidification for reducing the seismic damage of caisson type quay-wall, a series of shaking table tests in 1g gravitational field was performed in terms of the combination effect of ground solidification and back-filling stone behind quay-wall. The main conclusions obtained from this study are as follows; 1) Ground solidification behind quay-wall is effective for reducing the seismic damage of quay-wall although the combination of ground solidification and back-filling stone is not useful in current experimental results. 2) The acceleration phase shift between quay-wall and solidified ground is small compared to that without ground solidification and then the seismic behavior of quay-wall sympathizes with solidified ground as if solidified ground and quay-wall are a combined structure. Consequently, the seismic earth pressure from liquefied ground is supported by solidified ground reducing the seismic earth pressure against quay-wall.