

# 地盤改良による側方流動抑止技術に関する実験検討

鹿島技術研究所 正会員 吉迫和生  
正会員 山田岳峰

## I. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、臨海部において重力式岸壁の被災により、岸壁背後の埋立地盤の側方流動が多く発生し、岸壁背後地盤中に存在する構造物に甚大な被害を与えた<sup>1)</sup>。その後、多くの研究者がこの現象に注目し、研究が行われてきている。最近では、「重力式岸壁の簡易耐震性能照査の手引き(案)」<sup>2)</sup>において、重力式岸壁の断面、地盤及び地震動レベルに関する諸条件から、重力式岸壁の地震後の水平・鉛直残留変位並びに傾斜角の概略値を簡易に求めるためのチャートが示され、その現象面においては知見が得られつつある。しかしながら、現在のところ側方流動に対する対策工の設計方法は研究段階にある。

岸壁背後の埋立地盤で発生する側方流動を抑止するためには、これら岸壁の水平移動を抑止するのが効果的である。そこで、本研究では、対象構造物としてケーソン式岸壁を取り上げ、模型実験によって、岸壁の変位を抑止するのに有効な、地盤改良系の対策工法について実験検討を実施したので、その結果について報告する。

## II. 実験概要

### 1. 実験模型

実験には内法寸法幅 700mm×奥行 200mm×高さ 200mmの剛土槽を用い、1gの重力場において、実物の1/100の縮尺模型を作製して実施した。実験モデルと計測点の配置を図-1に示す。地盤には豊浦砂を用い、置換砂、背後地盤を、それぞれ表-1に示す相対密度(Dr)となるように空中落下法により作製した(下層地盤は全ケースを通じてDr=90%)。今回の実験では井合の相似則<sup>3)</sup>に従い、実験モデルの諸量を決定している。間隙流体には粘性を水の約30倍に調整したメチルセルローズ水溶液を用いた。またケーソン模型は、単位体積重量がコンクリート製ケーソンと同等の22kN/m<sup>3</sup>となるように、アルミ製の箱の中に砂を詰めて調整し

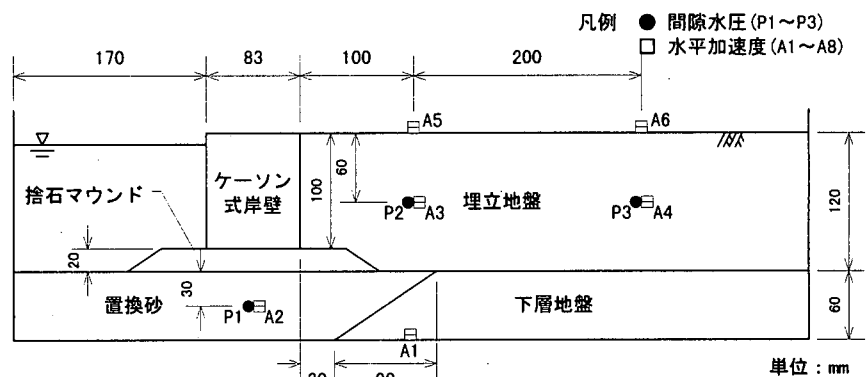


図-1 実験モデルと計測器配置

表-1 実験条件

	置換砂 相対密度	埋立地盤改良	入力 加速度
ケース1	50%	対策無し(Dr=50%)	128Gal
ケース2	90%		127Gal
ケース3	50%	全体を密(Dr=90%)に改良	126Gal
ケース4	90%		126Gal
ケース5	50%	地盤高さの1.5倍の範囲を 密度増加により矩形締固め(Dr=90%)	116Gal
ケース6	90%		121Gal
ケース7	50%	地盤高さの1.5倍の範囲をセメント 改良(qu=30~40kN/m <sup>2</sup> )により三角形固化	117Gal
ケース8	90%		112Gal
ケース9	90%	地盤高さの0.75倍の範囲をセメント 改良(qu=30~40kN/m <sup>2</sup> )により矩形固化	147Gal

キーワード：地震、液状化、側方流動、重力式岸壁

連絡先：〒183-0012 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島技術研究所 土木技術研究部

TEL : 0424-89-7067 FAX : 0424-89-7034

たものである。

## 2. 実験条件及び計測

実験上のパラメータは、置換砂並びにケーソン背後の埋立地盤の密度、背後地盤の地盤改良の形状とし、全9ケース実施した(表-1 参照)。

ケース1は置換砂、埋立地盤ともに緩い基本ケース、ケース2~ケース9は何らかの対策を施したケースである。このうちケース2~ケース4は密度増大系の工法を想定し、埋立地盤あるいは置換砂全体の地盤密度を増大させたものである。

ケース5、ケース6は、置換砂、並びに埋立地盤の一部の密度を増大させた場合である。埋立地盤の改良範囲は、「埋立地の液状化対策ハンドブック」<sup>4)</sup>により求まる範囲(改良領域の内部摩擦角を $42^\circ$ として122mm)の1.5倍と、十分大きなものとした(以下、矩形締固めと呼ぶ)。

ケース7、ケース8は地盤固化工法を想定し、埋立地盤の一部を三角形形状に改良した(以下、三角形固化と呼ぶ)。その改良領域の長さは、先のケース5、ケース6と同じく180mmとした。

ケース9は、同じく地盤固化工法で埋立地盤の一部を矩形に改良(改良体積が、ケース7、ケース8の三角形形状と同じになるように設定)したものである(以下、矩形固化と呼ぶ)。各ケースの改良形状を図-2に示す。

ケース7~ケース9の地盤固化にはセメントを用い、地盤の乾燥重量に対して5%添加した。地盤作製時に、同時に一軸圧縮試験用の供試体を作製し、その強度が一軸圧縮強さ $q_u$ で $30\sim 40\text{kN/m}^2$ 程度(実換算で $3000\sim 4000\text{kN/m}^2$ 相当)となったことを確認した後、実験を実施した。

加振は10Hzの正弦波を10秒間(100波)入力した。またケース5~ケース9では、同一実験モデルに対し、入力加速度レベルを増加させながら複数回加振するステップ加振を行った。

計測は、加速度(A1~A8)、間隙水圧(P1~P3)の他、加振中の実験モデルをビデオカメラにより側面から撮影し、その画像から、ケーソンに描かれたマーカーを読みとり、ケーソン変位を算出した。

## III. 実験結果

ケース1(対策無し)の、加振実験前後の状況を図-3に示す。この図から、本実験は、ケーソンが海側に沈下を伴いながら傾斜及び移動し、ケーソン背後の埋立地盤が陥没するという、重力式岸壁の典型的な被災形態を良く再現していることが判る。更に、ケーソンの前面への移動に伴う、ケーソン前面部の捨石マウンド、並びに置換砂の前方への移動は、一井<sup>5)</sup>らによる有効応力解析とも類似しており、本実験結果は既往の研究と良く対応していることが判る。また、ケーソンの変位に伴い、埋立地盤が広い範囲で側方流動を起こしている状況も観察される。

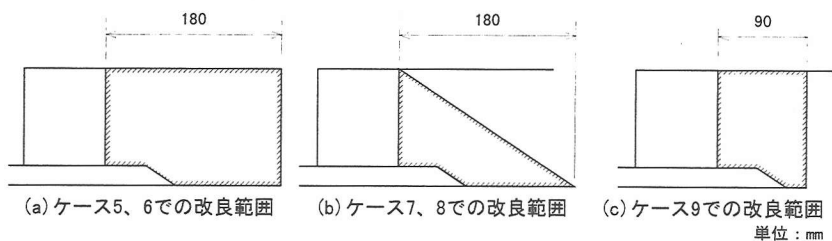


図-2 地盤改良の範囲

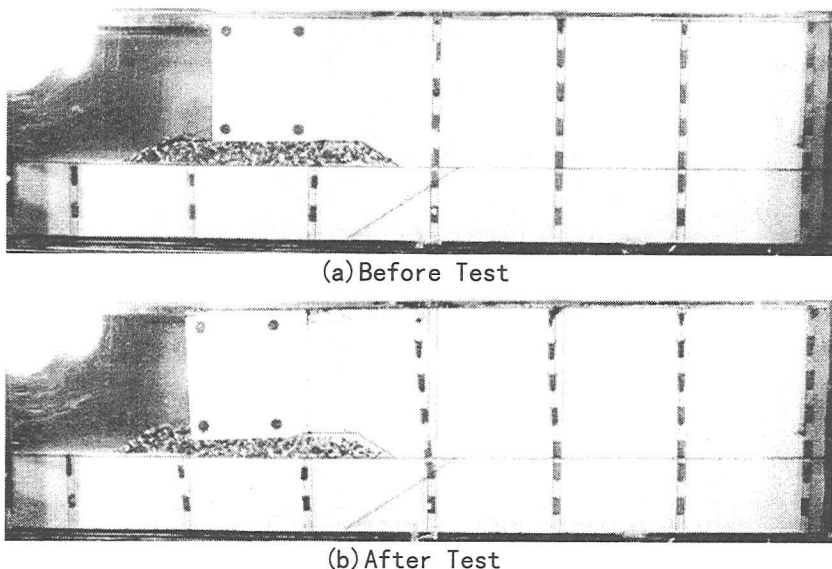


図-3 ケーソンと地盤の側方流動の様子(ケース1)

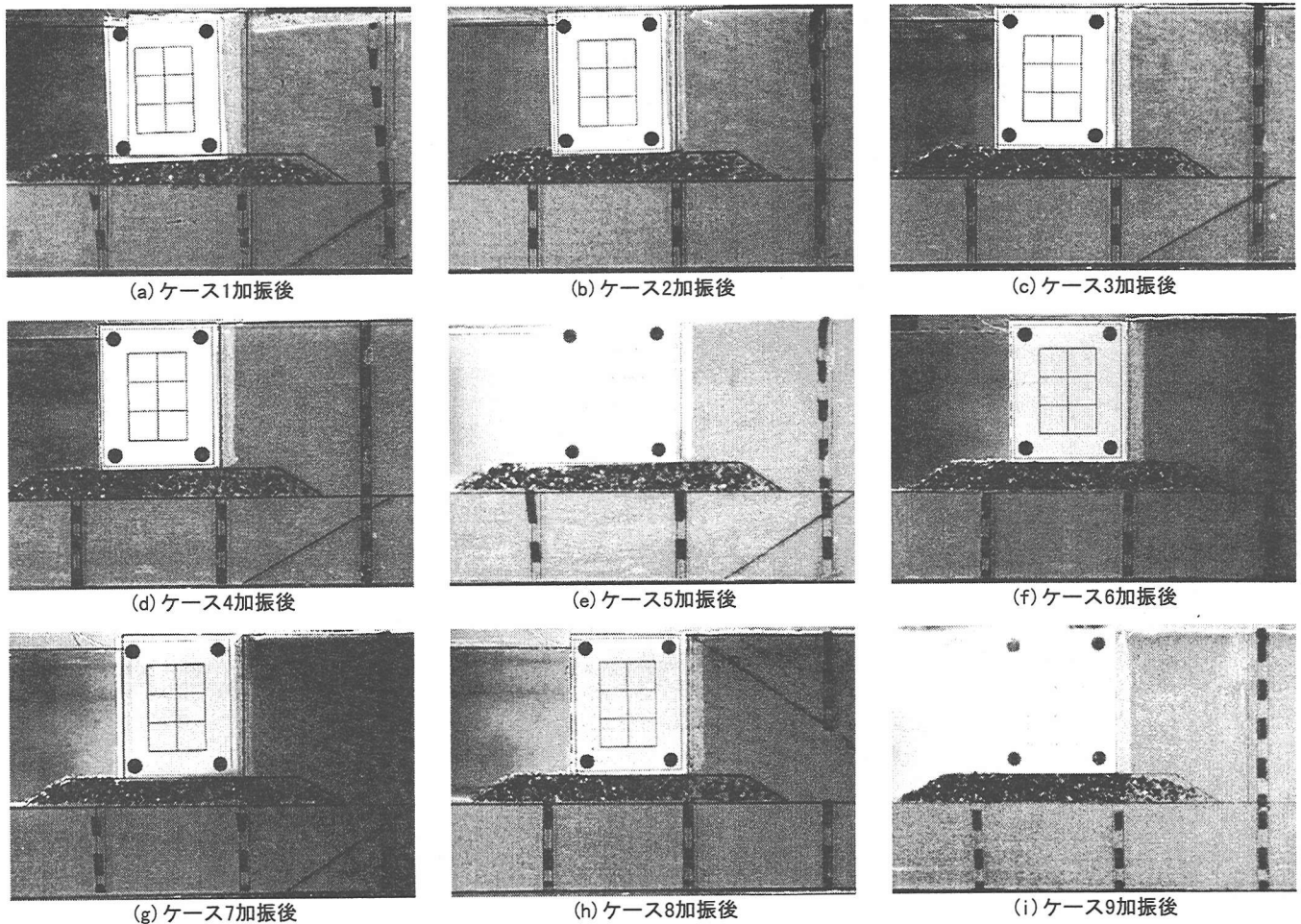


図-4 ケーソンと周辺地盤の変形状況(第1ステップ後)

各ケースの第1ステップ加振後の、ケーソン並びに周辺地盤の変形状況を図-4に示す。加振後の状況は、程度の差はあるが各ケースともケーソンが前傾するような変形状況を示している。

この画像から読みとった、ケーソン重心の水平変位並びに鉛直変位を表-2に示す。何も対策をしないケース1では、ケーソンの水平

表-2 ケーソン重心の水平・鉛直変位量

ケース名(置換砂条件, 背後地盤条件)	水平		鉛直	
	変位(mm)	正規化	変位(mm)	正規化
ケース1(Dr=50%, 全面Dr=50%)	14.9	1.00	3.5	1.00
ケース2(Dr=90%, 全面Dr=50%)	6	0.40	1	0.30
ケース3(Dr=50%, 全面Dr=90%)	1.4	0.09	0.8	0.23
ケース4(Dr=90%, 全面Dr=90%)	0.8	0.05	0.4	0.12
ケース5(Dr=50%, 一部矩形Dr=90%)	3.3	0.22	1.2	0.35
ケース6(Dr=90%, 一部矩形Dr=90%)	0.2	0.02	0.2	0.07
ケース7(Dr=50%, 三角形セメント改良)	3.1	0.21	1.4	0.39
ケース8(Dr=90%, 三角形セメント改良)	0.5	0.03	0.3	0.09
ケース9(Dr=90%, 矩形セメント改良)	0	0	0	0

変位は14.9mm、鉛直変位は3.5mmとかなり大きくなった。これに対して、何らかの改良を施したケース2以下では、水平変位・鉛直変位共に1/2以下となっており、明らかな対策効果が確認される。

#### IV. 考察

##### 1. 既往研究との比較

本実験における、ケース1(対策無し)と、背後地盤あるいは置換砂の全面を密度増大させたケース2~ケース4について、既往の研究結果と比較する。

先に示した「重力式岸壁の簡易耐震性能照査の手引き(案)」<sup>2)</sup>では、ケーソン式岸壁の地震後の水平残留変位  $h$  を、壁高  $H$ 、提体幅  $W$ 、置換砂層厚  $D_1$ 、液化化地盤の等価  $N$  値、をパラメータとし、有効応力解析に

表-3 実験条件に対する変形率

	W/H	D <sub>1</sub> /H	等価N値	変形率	ケース1の変形率 で規準化した値	実験結果より 求めた値
ケース1	0.9	0.5	10	0.055	1.00	1.00
ケース2		0	10	0.015	0.27	0.40
ケース3		0.5	20	0.005	0.09	0.09
ケース4		0	20	0.002	0.04	0.05

より求めた加速度と変形率(h/H)の関係をチャートに示している。本実験では、

$$\frac{W}{H} = \frac{83(\text{mm})}{100(\text{mm})} = 0.83 \quad \frac{D_1}{H} = \frac{60(\text{mm})}{100(\text{mm})} = 0.6$$

となるので、チャートの中から最も近い条件として、W/H=0.9、D<sub>1</sub>/H=0.5を選んだ(置換砂を改良したケースは、D<sub>1</sub>=0とし、D<sub>1</sub>/H=0)。このチャートを図-5に示す。液状化地盤の等価N値は、Dr≒50%の場合でN=10、Dr≒90%の場合でN=20とした。

加速度は、不規則波を等価な等振幅繰返し波に置き換える場合、不規則波中の最大振幅の65程度の値とすることが多いことから、ケース1~ケース4の加速度(126Gal~128Gal)の1/0.65倍≒200Galとした。

以上の設定より求めた、ケース1~ケース4の変形率を表-3に示す。同表では、各ケースでの変形率をケース1での変形率で規準化し、表-2に示した、実験結果から求めた規準化した水平変位と比較している。実験値は、解析により求められたチャートからの値と良い対応を示している。

## 2. 側方流動抑止効果

各ケースの水平・鉛直変位(表-2)を、ケース1の水平・鉛直変位で除して規準化したものを図-6に示す。

各ケース間の水平変位と鉛直変位の大小関係は、ほぼ同様の傾向を示している。これは、各ケースそれぞれの地盤改良が、ケーソンの水平変位と鉛直変位に対して、同じ様な効果を発揮していることを示している。これらの結果から、以下のことが判る。

- 同一の背後地盤条件で比較した場合(ケース1とケース2、ケース3とケース4、ケース5とケース6、ケース7とケース8)、置換砂の相対密度の大きい方(Dr=90%)が、明らかに水平・鉛直変位共に低減効果がある。
- 置換砂の相対密度が小さい場合(Dr=50%)、埋立地盤を全面改良した場合(ケース3)が一番効果がある。しかし、部分改良(ケース5とケース7)でも相当の改良効果(水平変位で約80%減、鉛直変位で約60%減)が得られた。また、三角形固化(ケース7)では、改良範囲が矩形締固め(ケース5)の半分程度でも、同

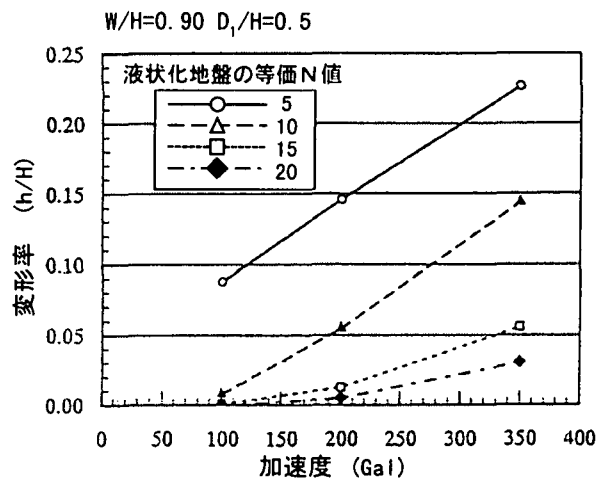
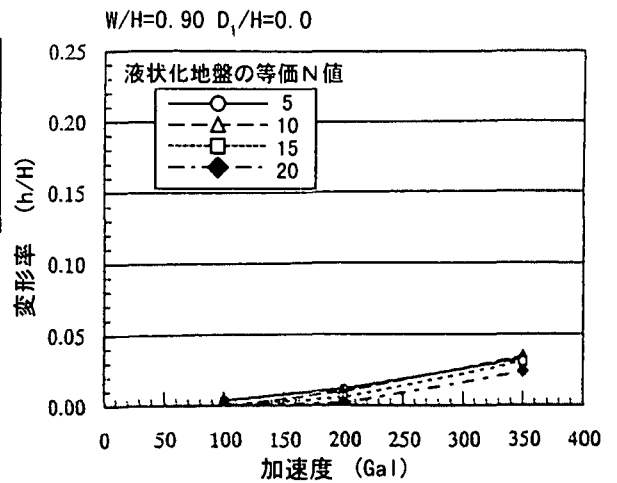


図-5 加速度と変形率の関係<sup>2)</sup>

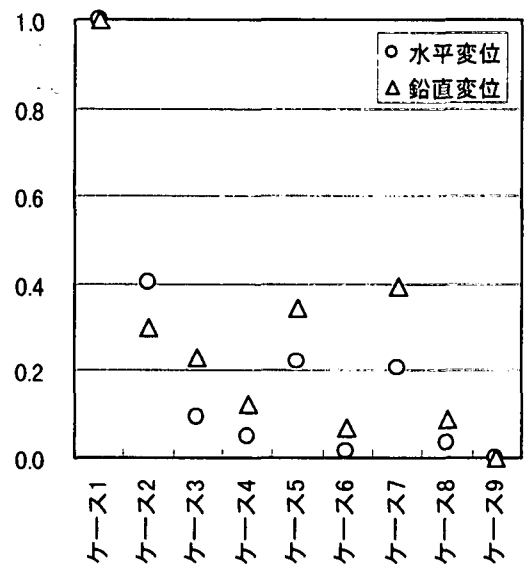


図-6 規準化したケーソンの水平・鉛直変位量

等の低減果が得られた。

c. 置換砂の相対密度が大きい場合 ( $Dr=90\%$ )、埋立地盤を全面改良した場合(ケース 4)と、部分改良(ケース 6 とケース 8)では、ほぼ同程度の低減効果(水平変位で約 95%減、鉛直変位で約 90%減)が得られた。

以上より、ケーソン背後地盤の全域を改良するのではなく、矩形締固め、三角形固化、矩形固化といった部分改良でも、十分な側方流動低減効果が得られることが判った。また、その効果は置換砂が密であるほど顕著であることが判った。

次に、入力加速度の大きさと、ケーソン重

心の水平変位量の関係を図-7 に示す。点線で表したケース 5(矩形締固め)とケース 7(三角形固化)は、置換砂の  $Dr=50\%$  のケースである。このケースは加振レベルの小さな段階から 3mm 程度の水平変位量が計測されている。両者の水平変位量は、入力加速度が 140Gal 程度まではほとんど同じだが、それ以降、ケース 7 では水平変位量が増加傾向にある。

一方、実線で表したケース 6(矩形締固め)、ケース 8(三角形固化)、ケース 9(矩形固化)は、置換砂の  $Dr=90\%$  のケースである。3 ケースとも加振レベルの小さな段階での変位量は小さく抑えられており、置換砂の改良効果が現れている。加振レベルを上げていった時の、ケース 6(矩形締固め)とケース 8(三角形固化)の水平変位量はほぼ同等で、水平変位量の増加の割合が低く抑えられている。それに対して、ケース 8(三角形固化)と同じセメント改良率で、形状がケース 8 の三角形形状と異なり矩形形状となるケース 9(矩形固化)は、加振レベルを上げると、水平変位量が急激に増大していることが判る。

これらの結果より、地盤改良を行う場合、三角形固化の様に、改良領域の重心を低くすることで、同じ改良体積をもつ矩形固化よりも、滑動・転倒に対して安定な構造となり、加振レベルが大きくなった場合でも、靱性をもって側方流動に抵抗できるものと考えられる。特にその対策効果は、置換砂が密の場合、より広い範囲を地盤改良した場合と同等の側方流動抑止効果が確認できた。

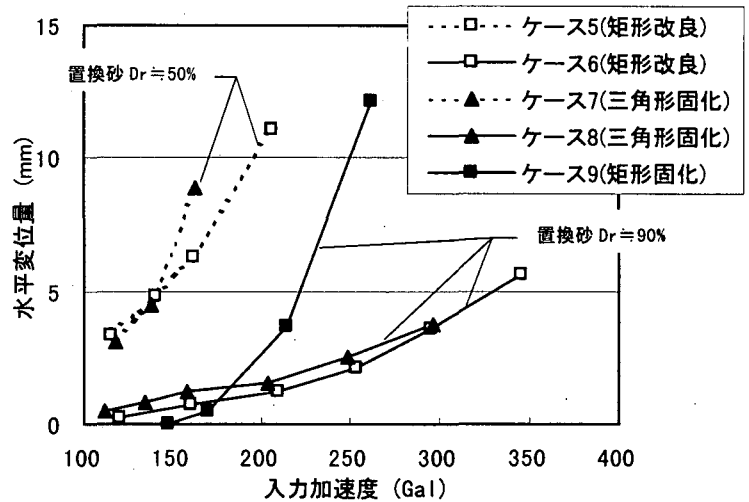


図-7 入力加速度に対する水平変位量

## V. まとめ

岸壁背後の埋立地盤で発生する側方流動を抑止するため、これら岸壁・護岸の水平移動を抑止する、地盤改良系の対策工法について検討を実施した。その結果、

- ケーソン式岸壁の背後地盤を改良する場合、埋立地盤(液状化地盤)厚の 1.5 倍の範囲の矩形締固めでも相当の側方流動抑止効果があることが確認された。
- a. の矩形締固めと同じ地盤改良長さを持ち、半分の体積の三角形形状の地盤改良でも、同等の側方流動抑止効果があることが確認された。

地盤改良領域を三角形とした場合の側方流動抑止のメカニズムの解明、側方流動抑止効果の定量的評価が、今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) 稲富隆昌他; 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告、港湾技研資料、No. 857、1997、pp. 49-219
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター; 重力式岸壁の簡易耐震性能照査の手引き(案)、平成 11 年 7 月

- 3) 井合進 ; 1g 場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則、港湾技術研究所報告、第 27 卷、第 3 号、1988
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター ; 埋め立て地の液状化対策ハンドブック、1993
- 5) 一井康二、井合進、森田年一 ; 兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析、港湾技術研究所報告、第 36 卷、第 2 号、1997、pp. 41-86