

浮型格子状地盤改良工法による護岸背面 荷さばきエリアの液状化対策

津國 正一¹・菅野 高弘²・益本 孝彦³・金田 一広⁴・
平井 芳雄⁵

- ¹ 正会員 株式会社竹中土木 技術・生産本部（〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1竹中技術研究所）
E-mail:tsukuni-s@takenaka-doboku.co.jp
- ² 正会員 名古屋工業大学 高度防災工学センター 客員教授（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）
- ³ 正会員 株式会社竹中土木 技術・生産本部（〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1竹中技術研究所）
E-mail:masumoto-t@takenaka-doboku.co.jp
- ⁴ 正会員 株式会社竹中工務店 技術研究所（〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1竹中技術研究所）
E-mail:kaneda.kazuhiro@takenaka.co.jp
- ⁵ 株式会社竹中工務店 技術研究所（〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1竹中技術研究所）
E-mail:hirai.yoshio@takenaka.co.jp

コンテナヤードの液状化対策に、液状化層の浅い部分だけを改良する浮型格子状地盤改良工法を用いる効果を、南海地震を想定した地震波を用いた遠心模型振動実験によって検討した。実験は無対策と、浮型格子状地盤改良の格子壁高5.0m(格子間隔6m・12m)の2ケース実施した。無対策のコンテナ平均沈下量0.571mに対して、格子間隔6mの浮型格子状地盤改良のコンテナ平均沈下量は0.280mで、無対策の49%に低減する効果があった。無対策では周辺地盤沈下量0.308mでコンテナのめり込み沈下量が大きかった。一方、浮型格子状地盤改良ではコンテナ上載圧の効果でコンテナ直下の格子内地盤で液状化の発生は見られず、格子間隔が狭いと格子内地盤の地表面沈下量とコンテナ沈下量の相対沈下も殆ど発生しないことが分った。

Key Words :liquefaction , floating grid-form soil improvement, centrifuge model test, settlement

1. はじめに

格子状地盤改良工法¹⁾は、液状化対策工法としてこれまで広く適用されており、兵庫県南部地震²⁾・東北地方太平洋沖地震³⁾で液状化防止効果があることが実証されている。しかし液状化層の全層を改良範囲としているので、設計対象の液状化層厚が厚くなると改良土量が多くなりコストが高くなる。それに対して浮型格子状地盤改良工法では、液状化層の浅い部分だけしか改良しないので改良土量を減らすことができるが、浮型格子状地盤改良の下の液状化層の液状化防止効果まで期待できないので、液状化防止効果は液状化層の全層を改良範囲とする格子状地盤改良工法に比べて劣る。

浮型格子状地盤改良に関する既往の研究として、浮型格子状地盤改良の格子間隔と格子壁高を変えた遠心模型振動実験で、格子内地盤と浮型格子状改良下の液状化層の過剰間隙水圧抑制効果を求めた研究⁴⁾がある。また、

浮型格子状地盤改良の対策効果を高めるために、液状化層の全層を改良する着底型の格子状地盤改良と浮型格子状地盤改良を組合せた遠心模型振動実験によって、浮型格子状改良の格子壁高と格子内地盤の地表面沈下量の関係を求めた研究⁴⁾がある。これらの研究で着目しているのは、浮型格子内地盤の過剰間隙水圧発生量であったり地表面沈下量で、実験では浮型格子状地盤改良の上に施工される構造物はモデル化されていない。

本研究では、コンテナヤードの荷さばきエリアに浮型格子状地盤改良工法を適用した時の液状化対策効果を調べるために、南海地震を想定した地震波を入力地震動とした遠心模型振動実験を実施した。実験ではコンテナ模型を用いてコンテナ沈下量を計測した。実施した遠心模型振動実験は、無対策と格子壁高5.0mの浮型格子状地盤改良(格子間隔6m, 12m)の2ケースである。

2. 実験条件

遠心模型振動実験は幅1100mm，奥行400mm，高さ290mmの剛土槽を用いて80G場で実施した。土槽の実寸法は幅88m×奥行き32m×高さ23.28mに相当する(以降，全て実寸法で表示)。コンテナ(幅2.4m，奥行12.2m，高さ2.6m)を水平方向に6列，高さ方向に4段積上げた状態をモデル化したコンテナ模型を製作した。実験では1つのコンテナ模型で水平方向2列・高さ方向4段をモデル化し，3つのコンテナ模型でコンテナを水平方向に6列，高さ方向に4段積上げた状態をモデル化した(コンテナ模型間の間隔0.3m)。コンテナ部の加振方向幅15.0m，加振直交方向幅12.2m，高さ10.4mである。コンテナ接地圧は42.89(kPa)である。

表-1に実験ケースの一覧を示す。Case-1は無対策。Case-2はGL-1.5m～GL-6.5mに格子間隔6mと格子間隔12mの浮型格子状地盤改良(格子壁高5.0m)をモデル化している。格子間隔は格子壁の中心間の水平距離で表示してい

る。地下水位は両ケースともGL-2.8mに設定した。図-1に模型地盤の平面図と断面図を示す。地表面からGL-20mまでの地盤は飯豊珪砂6号(相対密度 $D_r=72\%$)で作成した。飯豊珪砂6号の最大間隙比 $e_{max}=0.872$ ，最小間隙比 $e_{min}=0.514$ である。飯豊珪砂6号($D_r=72\%$)の繰返し三軸試験で得られる繰返し载荷回数20回に対する片振幅軸ひずみ2.5%の応力比は0.227である。地下水位がGL-2.8mの位置にあるので，液状化層厚は17.2mとなる。GL-20m～GL-22mまでは同じ飯豊珪砂6号を用い， $D_r=90\%$ の密な非液状化層を作成した。模型地盤の作成は空中落下で行い，間隙流体には粘性のあるシリコンオイルを用いて相似則をプロトタイプに合わせた。シリコンオイルの通水は，真空槽内でせん断土槽底面の排水孔から行った。実験時には排水孔を閉鎖し，せん断土槽底面を非排水状態とした。実験時にはコンテナと地表面(GL0m)の沈下量，地盤内の間隙水圧と水平応答加速度を計測した。間隙水圧の計測はGL-5m，GL-10m，GL-15mとGL-20mで行った。水平応答加速度の計測は，間隙水圧を計測した位置以外

表-1 実験ケース

ケース名	格子間隔	改良深度	地下水位
Case-1		無対策	GL-2.8m
Case-2	6m, 12m	GL-1.5m～GL-6.5m (格子壁高5.0m)	GL-2.8m

模型地盤の計測器配置

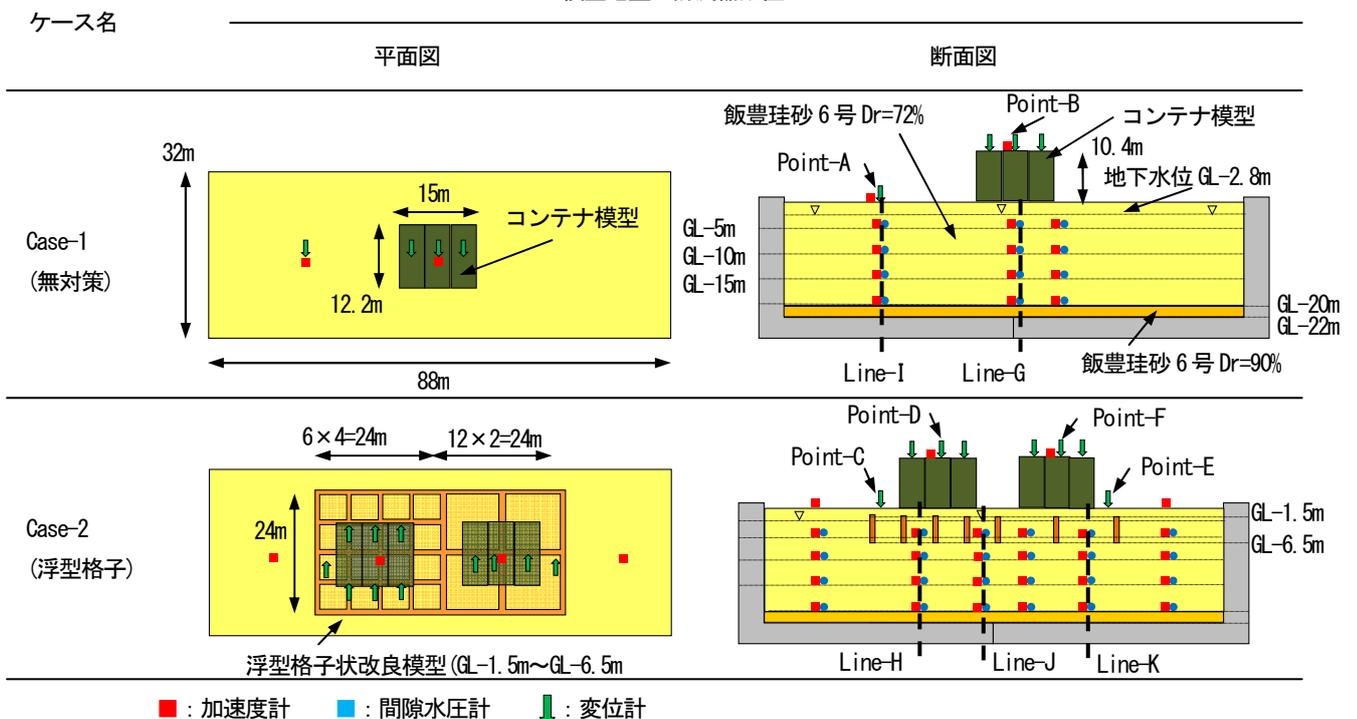


図-1 模型地盤の平面図と断面図(表記は実大スケール換算)

に、地表面とコンテナ天端でも行った。

写真-1にCase-1の模型地盤の作成完了と、Case-2の模型地盤作成状況を示す。浮型格子状地盤改良の模型は幅0.9mのガラスエポキシ製である。

実験には南海地震を想定した地震波を入力地震動として用いた。図-2にCase-1の実験時に振動台で計測した水平応答加速度時刻歴を示す。振動台で計測した水平方向最大加速度はCase-1で253Gal、Case-2で248Galであった。

3. 実験結果に対する考察

ここに示す実験結果は全て実物換算した値である。

(1) コンテナ沈下量に対する考察

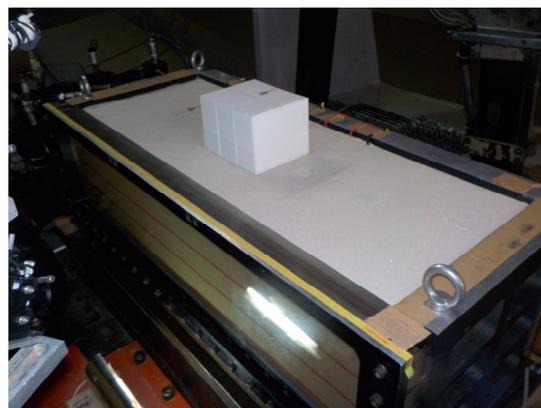
表-2に各ケースのコンテナ沈下量一覧を示す。コンテナ沈下量は地盤中の過剰間隙水圧が完全に消散した時刻で計測した値である。無対策(Case-1)のコンテナ平均沈下量0.571mに対して、浮型格子(Case-2)のコンテナ平均沈下量は、格子間隔6mで0.280m、格子間隔12mで0.358mと、無対策に比べてそれぞれコンテナ沈下量を49%と63%に低減する効果があった。また、コンテナ間の沈下量の差は無対策の0.106mに対して、浮型格子の格子間隔6mで0.034m、格子間隔12mで0.026mと、無対策に比べてコンテナ間の沈下量の差が小さくなることが分かった。

図-3では無対策の周辺地盤地表面と(Point-A)と中央のコンテナ(Point-B)の沈下時刻歴を比較している(図-1参照)。周辺地盤地表面に比べてコンテナの沈下量は大きく、最終的な周辺地盤沈下量0.308mに対してコンテナ沈下量0.619mと差が大きく、コンテナが周囲の地盤に対して0.311mの相対沈下量が発生していた。

図-4では浮型格子での地表面沈下量と中央のコンテナ(格子間隔6m：Point-D、格子間隔12m：Point-F)の沈下時刻歴を比較している。比較している地表面沈下量は格子内地盤の地表面沈下量(格子間隔6m：Point-C、格子間隔12m：Point-E)である(図-1参照)。格子間隔6mでの最終的な格子内地盤地表面沈下量0.272mに対してコンテナ地下量0.276mと殆ど差は無く、コンテナのめり込み沈下が殆ど発生していなかった。一方、格子間隔12mでの最終的な格子内地盤地表面沈下量0.223mに対してコンテナ沈下量0.359mと0.136mの差が生じており、格子間隔6mと比較してコンテナのめり込み沈下量は大きかった。

(2) 水平応答加速度に対する考察

図-5に無対策のコンテナ中央位置(図-1のLine-G)での水平応答加速度時刻歴を示す。地表面からの深度が15mの位置では、図-2に示す振動台で計測された水平方向応答加速度とほぼ同じ応答が観測されている。このことから、



Case-1(無対策)の模型地盤作成完了



Case-2(浮型格子)の模型地盤作成状況

写真-1 模型地盤作成状況

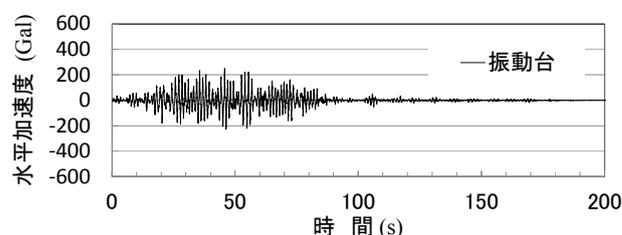


図-2 無対策(Case-1)の振動台での水平方向加速度時刻歴

表-2 コンテナ沈下量の一覧

ケース名	格子間隔	コンテナ沈下量 (m)			
		左	中央	右	平均
CASE-1	無対策	0.513	0.619	0.582	0.571
CASE-2	6 m	0.265	0.276	0.299	0.280
	12 m	0.344	0.359	0.370	0.358

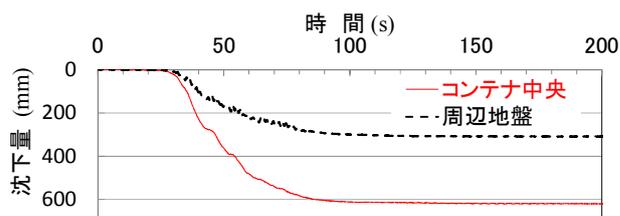


図-3 無対策(Case-1)のコンテナと周辺地盤の沈下時刻歴

深度15m以深では液状化の発生が考えられないのに対して、地表面からの深度が5mの位置では、60秒過ぎから入力地震動と比較して応答は小さくなっており、地表面からの深度が5m~15mの間で液状化が発生していたと考えられる。

図-6に浮型格子の格子間隔6m側のコンテナ中央位置(図-1のLine-H)での水平応答加速度時刻歴を示す。地表面からの深度15m位置の波形は無対策の場合と殆ど変わらないことから、深度15m以深では液状化の発生が考えられないのに対して、地表面からの深度が5mの位置では、入力地震動と比較して応答は小さくなっている。このことから浮型格子状地盤改良を用いても深度5m~深度15mの間で液状化が発生していたと考えられ、浮型格子状地盤改良による対策範囲よりも下の地盤の液状化を防止する効果が無かったことが分る。

(3) 過剰間隙水圧に対する考察

図-7に無対策の周辺地盤(図-1のLine-I)とコンテナ中央位置(Line-G)での過剰間隙水圧比時刻歴を示す。コンテナ中央位置での過剰間隙水圧比の算出では、有効鉛直応力にコンテナの接地圧を加えている。周辺地盤の深度5m位置では加振後25秒付近から過剰間隙水圧の上昇が始まり、30秒過ぎには過剰間隙水圧比が1.0に近づき液状化が発生していると考えられる。それに対してコンテナ中央位置では、過剰間隙水圧比の最大値は深度5mで0.79までしか上昇しておらず、深度15mでも0.72までしか上昇していない。図-8に示すのは、周辺地盤とコンテナ中央位置での過剰間隙水圧比最大値の深度分布である。コンテナ周囲の地盤では液状化が発生しているため入力地震動の減衰が発生し、コンテナ下の深度5m位置では水平応答加速度が小さくなっていったと判断できる。

図-9に示すのは、浮型格子の過剰間隙水圧比時刻歴である。最初に格子間隔6mに対して考察する。深度5mで鉛直有効応力にコンテナ上載圧が足されているLine-Hと、コンテナ上載圧が足されていないLine-Jを比較する。Line-Hの過剰間隙水圧比は上載圧の効果で0.55までしか上昇しておらず、液状化が発生していないと言えるのに対して、Line-Jの過剰間隙水圧比最大値は0.99まで上昇しており、コンテナ上載圧の効果が無いと格子間隔が狭い6mでも液状化が発生することが分る。次に格子間隔12mの場合、コンテナ上載圧が足されるコンテナ下のLine-Kの過剰間隙水圧比最大値は0.54までしか上昇しておらず、格子間隔6mと同様にコンテナの下では上載圧の効果で浮型格子内地盤で液状化は発生していなかった。図-10に示すのは格子間隔6mと12mのそれぞれコンテナ下の地盤(Line-HとLine-K)での過剰間隙水圧比最大値の深度分布である(格子間隔6mの深度10mは計測不良でデータ無し)。格子間隔6mと12mともに深度の浅い5mでの過剰間隙水

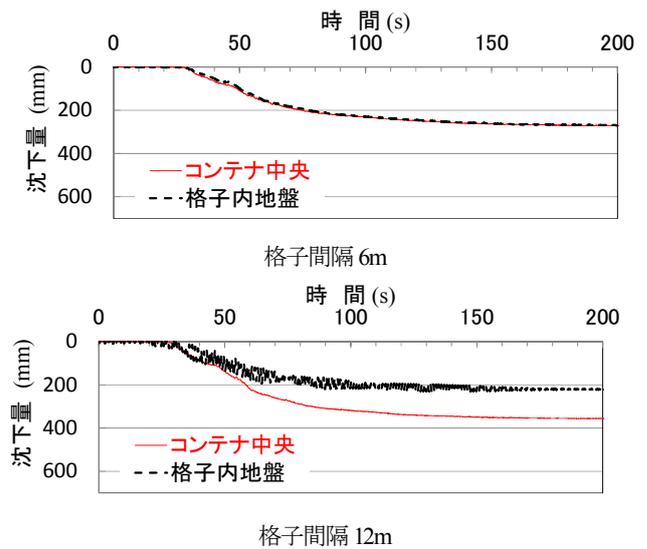


図-4 浮型格子 (Case-2) のコンテナと周辺地盤の沈下時刻歴

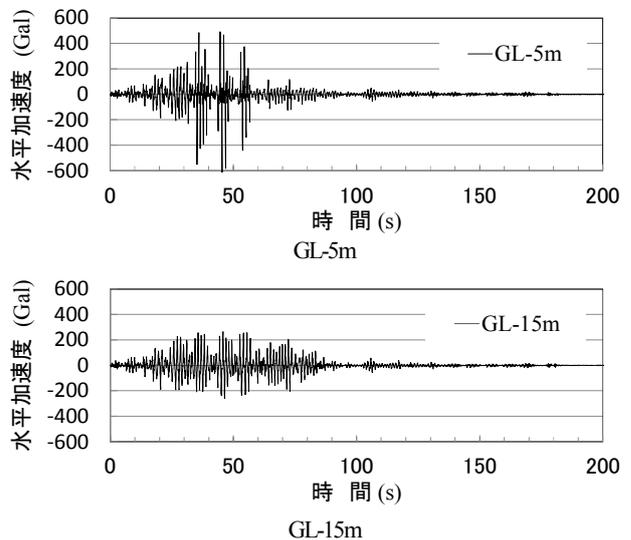


図-5 無対策 (Case-1) の水平応答加速度時刻歴 (Line-G)

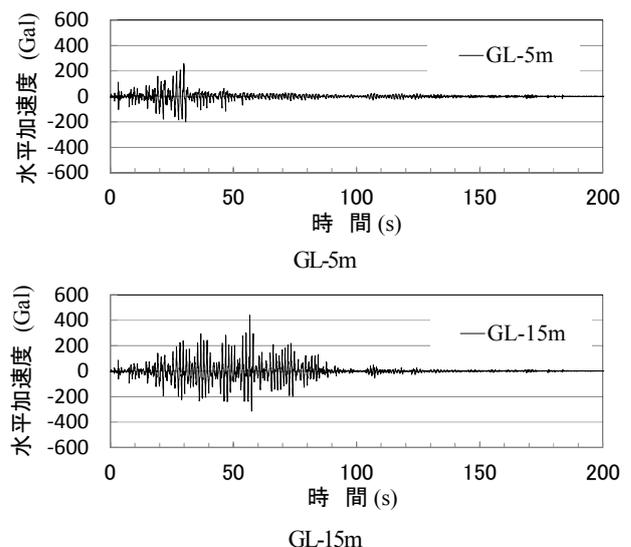


図-6 浮型格子 (Case-2) 格子間隔 6m での水平応答加速度時刻歴 (Line-H)

圧比最大値は小さく、深度10m以下でも過剰間隙水圧比は1.0まで上昇しておらず、格子間隔6mと格子間隔12mの深度分布に大きな差は見られなかった。コンテナ下の地盤の過剰間隙水圧比最大値の深度分布に差は見られないが、格子間隔12mのコンテナ沈下量は格子間隔6mに比べて大きかった原因について考察する。図-1の断面図を見ると、格子間隔6mではコンテナが載っている格子では、ほぼ1つの格子全体でコンテナ上載圧の効果が見込め、格子全体で液状化の発生が無いと考えられる。それに対して格子間隔12mでは、1つの格子の中にコンテナが載っている部分と載っていない部分があり、コンテナが載っている部分では上載圧の効果で液状化が発生しないが、コンテナが載っていない部分では上載圧の効果を見込めないため液状化が発生する。そのためコンテナのめり込み沈下量に差が出ることで、格子間隔が12mに広くなるとコンテナ沈下量が大きくなった原因と考えられる。

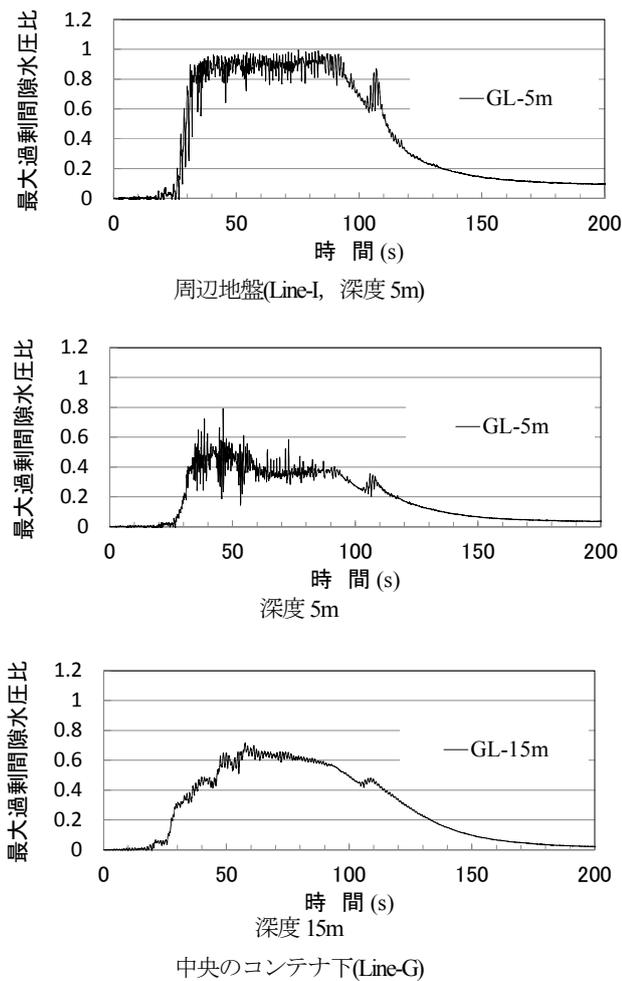


図-7 無対策 (Case-1) の過剰間隙水圧比時刻歴

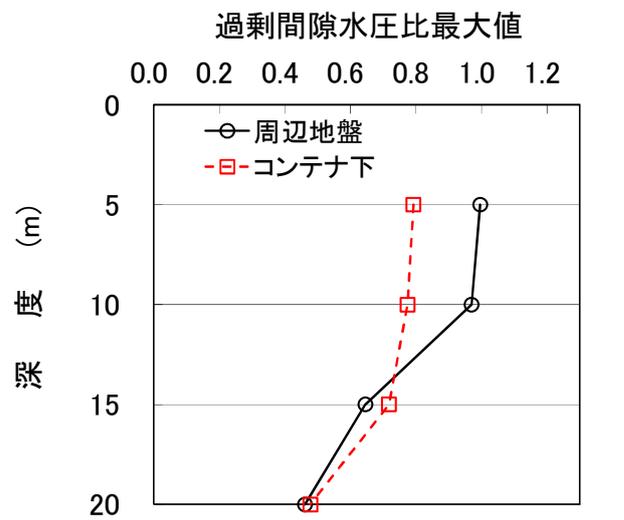


図-8 無対策 (Case-1) の過剰間隙水圧比最大値の深度分布

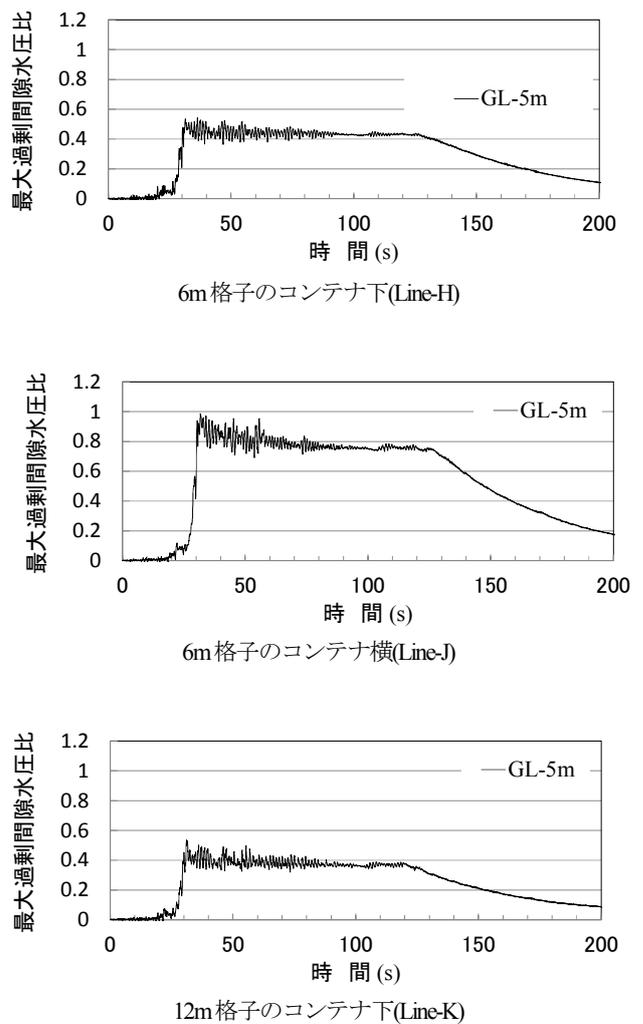


図-9 浮型格子 (Case-2) の過剰間隙水圧比時刻歴

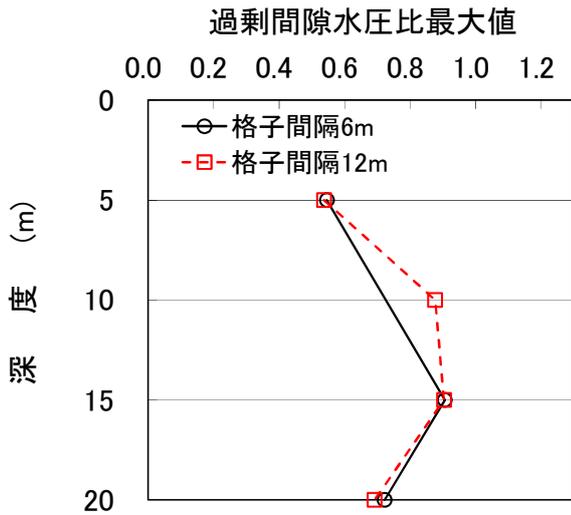


図-10 浮型格子 (Case-2) の過剰間隙水圧比最大値の深度分布

4. まとめ

新しく得られた知見をまとめると以下のようになる。

- ①無対策ではコンテナと周辺地盤の沈下量の差が大きい。
- ②浮型格子状改良の格子壁高が5.0mでも、コンテナ沈下量と格子内地盤表面の沈下量の差は無対策に比べて小さく、コンテナのめり込み沈下量を低減する効果がある。
- ③浮型格子状改良の格子間隔を狭くすると、コンテナ沈下量を軽減する効果が高くなる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所耐震技術センター動土質研究室ほか：液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)，土木研究所共同研究報告書，第186号，1999。
- 2) 鈴木吉夫，斎藤聡，鬼丸貞友，木村玄，内田明彦，奥村良介：深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工，土と基礎，Vol.44，No.3，pp.46-48，1996。
- 3) 内田明彦，小田島暢之，山下清：東北地方太平洋沖地震における格子状地盤改良を施した建物基礎の挙動，日本建築学会技術報告集，Vol.19，No.42，pp.481-484，2013。
- 4) 高橋英紀，森川嘉之，津國正一，吉田誠，深田久：液状化対策としての格子状固化処理工法の改良深さ低減に関する研究，港湾空港技術研究報告，Vol.51，No.2，pp.3-39，2012。