

格子状固化処理工法を用いた 液状化対策に関する研究

高橋英紀¹・森川嘉之¹

¹港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

液状化対策を目的とした格子状固化処理工法に用いられる深層混合処理工法や高圧噴射式攪拌工法は、施工中の騒音・振動が比較的小さいことや、施工による地盤変形が小さいことなどの多くの利点を有している。一方で、これらの工法は比較的高価であり、低コスト化が望まれている。このため、液状化対策効果を詳細に把握し、格子壁の設置間隔や壁高（固化処理する深度）の設定方法を見直した。検討では、遠心模型実験および有限要素法による数値解析を用いた。検討の結果、格子壁の間隔や壁高を適切に設定する方法が明らかとなり、要求性能のレベルによっては大幅な低コスト化が可能であることを示した。

キーワード 液状化, 格子状固化処理工法, 遠心模型実験, 有限要素法

1. はじめに

液状化対策を目的とした格子状固化処理工法（**図-1**参照）は我が国で開発され¹⁾、近年では、国内において広く利用される工法の1つとなっている。河川堤防下部地盤や中高層建築物基礎地盤、港湾構造物下部地盤の液状化対策としてよく用いられている。この工法の有効性は、模型実験や数値解析に加えて、実際の地震²⁾や実物大の制御発破実験³⁾によっても証明されている。

一方、固化処理した格子壁を地盤内に構築するためには、セメントを用いた深層混合処理⁴⁾が必要であり、比較的施工コストが高くなる。利点が多い格子状固化処理工法を低コストでより広く利用するために、液状化対策効果を詳細に把握しつつ、格子壁の設置間隔や壁高の設定方法を見直すことが有益と考えた。

検討においては、模型実験および数値解析手法を用いた。格子壁の設置間隔や壁高が液状化対策効果に与える影響を詳細に把握するためには、これらをパラメトリックに変化させた多くのケースの実験と解析が必要であっ



図-1 格子状固化処理工法の施工事例

た。そこで、模型実験においては、小さな模型で実物大の地盤の応力状態を再現できる遠心模型実験手法を取り入れ、効率的かつ精度の高い検討を可能とした。

2. 模型実験および数値解析手法

(1) 遠心模型実験

遠心模型実験では、地盤模型に遠心力を加えることで実物大の地盤の応力状態を再現できる。使用した遠心模型実験装置については、文献⁶⁾を参照されたい。なお、格子壁に囲まれた緩い飽和砂地盤が液状化する過程を遠心力場での振動実験で再現できることは、過去に高橋ら⁷⁾がModeling of models手法を用いて調べている。ここでは、10G、25G、50Gの3種類の遠心加速度下で、格子壁で囲まれた飽和砂地盤に対して振動実験を実施し、各遠心加速度下における振動加速度に対する過剰間隙水圧の発生特性はほぼ一致することを確かめた。

図-2に模型地盤の断面図を示す。格子壁の設置間隔の影響を調べた実験シリーズをA、部分的に格子壁を非液状化層から浮かせた実験シリーズをB、全体の格子壁を非液状化層から浮かせた実験シリーズをC、Dとする。実験シリーズCは格子壁高が液状化抑制効果に与える影響を調べるシリーズ、実験シリーズDはより現実的な配置としたシリーズである。なお、実験は遠心加速度25G場（シリーズA、B）あるいは50G場（シリーズC、D）で実施したため、模型寸法の25倍あるいは50倍のスケールの

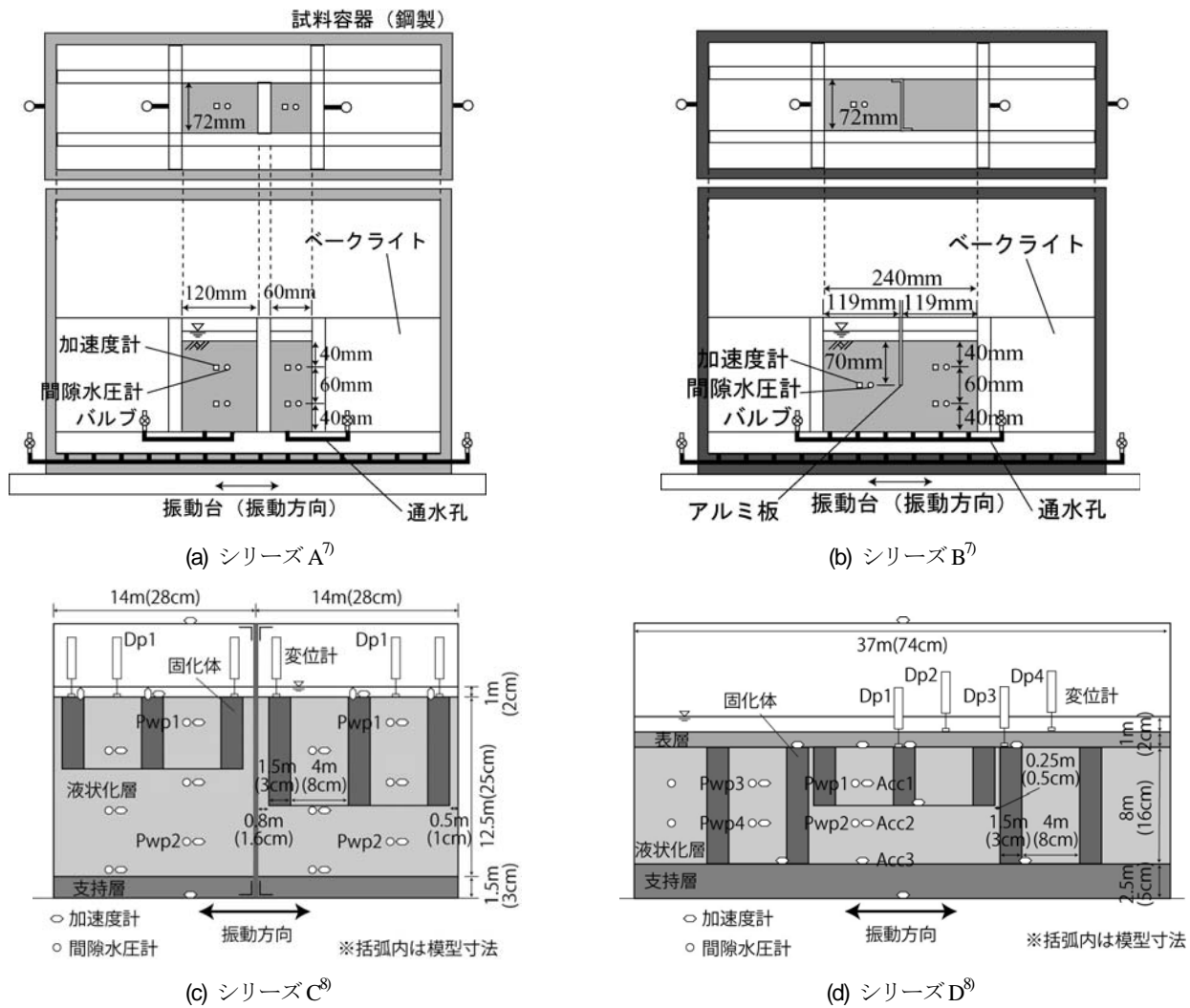


図2 遠心模型実験断面図

地盤挙動を再現したことになる。

試料容器に加速度や間隙水圧を計測するためのセンサーを吊るした後、乾燥砂を空中落下させることで均一な緩い砂地盤を形成した。その後、飽和度の高い砂地盤とするために、二酸化炭素で間隙を置換して、脱気状態で粘性流体を通水するか、遠心力場で粘性流体を通水した。その他の種々のセッティングを行った後、遠心力場で模型地盤を振動させ、地盤内の応答加速度や過剰間隙水圧、地表面変位等を計測し、液状化抑制効果について検討を行った。なお、詳細な地盤作製方法や振動方法については、文献⁷⁾を参照されたい。

(2) 有限要素法解析 (FLIP)

有限要素法による動的数値解析によって、実験シリーズAを再現するとともに、格子壁の間隔をパラメトリックに変化させて、その影響を評価した。この解析に用いたプログラムは、地震応答解析プログラムFLIP⁹⁾である。FLIPでは、土の応力ひずみ関係に双曲線モデルを用いて、主応力軸の回転が自動的に考慮されるマルチスプリングモデル¹⁰⁾を地盤の構成式として採用している。また、有

効応方法によって非排水条件下での地盤の液状化を考慮した解析⁹⁾が可能である。詳細は文献^{9) 10)}を参照されたい。

(3) 有限要素法解析 (MuDIAN)

有限要素法による動的数値解析によって、実験シリーズCとDを再現するとともに、格子壁高をパラメトリックに変化させて、その影響を評価した。この解析に用いたプログラムは、地震時の過剰間隙水圧の発生および消散過程をモデル化できる解析コードMuDIANである。詳細は文献¹¹⁾に譲るが、液状化層に対しては、構成式として修正Densificationモデル¹²⁾を用いている。修正Densificationモデルでは、塑性せん断ひずみとダイレイタンスンシーによって発生する塑性体積ひずみを別々に計算しており、土質試験結果を用いたパラメータ設定が容易である。また、塑性せん断ひずみについては、Mohr-Coulombの破壊基準で定義した降伏面内において下負荷面モデルを適用して算定した。さらに、塑性体積ひずみの計算には、累積損傷度理論を用いている。

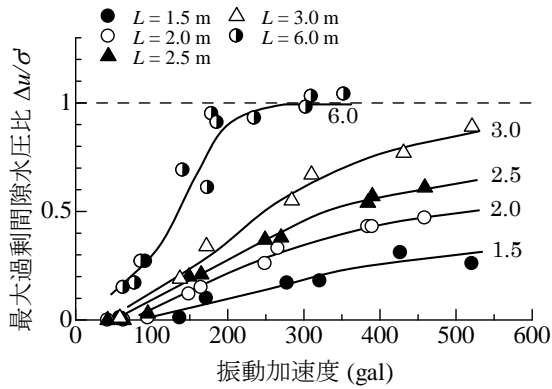


図-3 最大過剰間隙水圧比と振動加速度の関係⁷⁾
(実験シリーズA)

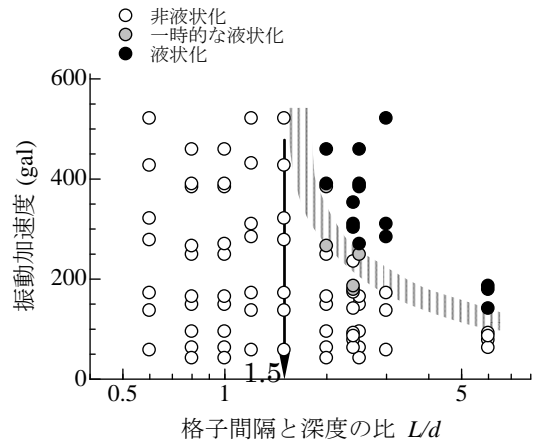


図-4 液状化が生じる加速度とL/dの関係⁷⁾
(実験シリーズA)

3. 格子壁の設置間隔の影響検討

(1) 格子壁の間隔の影響

格子壁の設置間隔の影響評価を行ったのは、実験シリーズAである。このシリーズでは、合計5種類の格子壁間隔での液状化特性について検討した。これらの5種類の格子壁間隔は6, 8, 10, 12, 24 cmであり、遠心加速度を25Gとしたので実物スケールに換算すると格子壁間隔は1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 6.0 mとなる。また、加振した波形は、振動数が100 Hzの正弦波50波であり、実物換算では振動数4 Hz (周期で0.25 s) に相当する。加振は段階的に大きな加速度の波形を加えるステップ加振方式とした。

図-3に、実験で観察された深度G.L. -2.5 mでの振動加速度と最大過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ の関係を示している。なお、振動加速度は実物スケールに換算し、過剰間隙水圧を有効上載圧で除することによって過剰間隙水圧比を求めている。図に示すように、格子壁の間隔が6.0 mの場合には、 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が1.0まで上昇するが、これよりも間隔が狭い場合には500 Galと大きな加速度を加えても $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は1.0まで達しなかった。また、格子壁の間隔が異なる実験での $(\Delta u/\sigma)_{max}$ を同じ振動加速度で比較すると、間隔が狭いほど $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は小さい。これから、間隔が狭いほど液状化が生じにくい傾向が確認できた。

(2) 格子壁間隔の設定方法の提案

格子壁の間隔の設定方法としては、液状化の発生が予想される層の厚さHと格子壁の間隔Lの比LHを指標にして、LHを0.8以下(設計マニュアルでは1/3~1/5以下)にすると液状化を抑制できるとされている。しかしながら、液状化層厚が薄い場合には、必要なLHを保つために格子壁の間隔を極端に狭くする必要がある。また、液状化強度は上載圧に依存するため、液状化層厚Hではなく着目する深度dで液状化特性を評価する方が合理的と言える。液状化特性は格子壁の間隔Lにも影響を受けるため、Lとdによって液状化抑制効果を評価することとした。

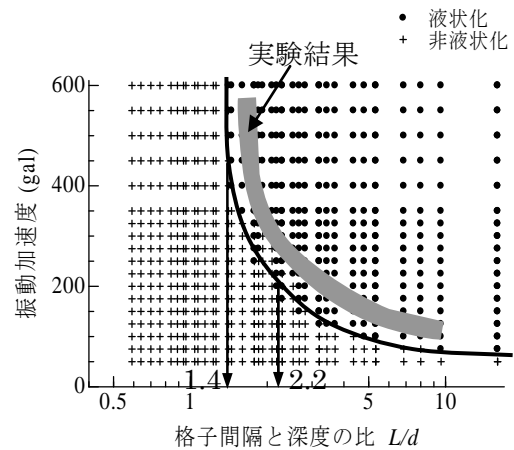


図-5 液状化が生じる加速度とL/dの関係⁷⁾
(数値解析)

遠心模型実験においてデータを計測した深度dで格子壁の間隔Lを除した比L/dと振動加速度の関係を図-4に示す。計測した地点において液状化した場合には黒丸で、液状化しなかった場合には白丸で示した。判断に迷うものは灰色とした。図のように、黒丸と白丸は2つの領域にほぼ分けられ、この領域をハッチで示した。これが液状化するか否かの境界である。この境界部に着目すると、L/dを小さくすると液状化するための振動加速度は大きくなり、L/dが1.5以下になると500 Galと大きな振動加速度でも地盤が液状化していない。このことは、L/dを1.5以下になるように格子壁の間隔を設定すると、大きな液状化抑制効果が期待されることを示している。

図-5には、この実験シリーズを数値解析 (FLIPにて実施) でシミュレートし、さらにパラメトリックに格子壁の幅を変化させた計算結果を示している。計算結果を出力した要素において $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.9に達した場合には黒点で、達しなかった場合には十字をプロットした。その境界線に注目すると、L/dが1.4以下になると600 Gal程度の振動加速度でも $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.9に達しなかった。灰色のハッチで示した実験の境界領域と解析での境界線はほぼ近い位置である。これらのことから、安全側の結論として、

液状化を抑制したい深度 d の1.4倍の格子壁の間隔に設定すればよいことが分かった。

例えば、仮に地下水位が地表面から-2 mにあり、液状化層が地表面-2 mから-10 mまでの地盤を対象に格子状固化処理工法を適用することを考える。LHによる設計法によると、 H が8 mであるからLHを0.8以下とするには L を6.4 mとする必要がある。一方、 L/d による設計法によると、 $LH < 0.8$ の設定根拠となっている液状化層の中心点 (GL. -6 m) までの液状化抑制を考えると、 d は6 mであるから L/d を1.4以下とするには L を8.4 mとすればよい。より安全側の設定として、液状化層の上端から例えば1/3の深度GL. -4.67 mまでの液状化抑制を考えると、 L は6.5 mとなり、LHによる設計法の結果とほぼ同程度になる。このように、 L/d による設計法では、どの深度までの液状化を許容するかといった要求性能に見合った細かい設定が可能であり、許容できる深度によっては格子壁の間隔を広げられることが分かった。

4. 格子壁高の影響検討 (部分浮き型方式)

格子壁の間隔と液状化の抑制効果の関係を検討した結果、格子壁の間隔が狭く、深い地点ほど液状化が生じにくかった。このことから、図-6の概念図に示すように一部の格子壁の深度を他のものよりも浅くする部分浮き型方式の工法が発想される。遠心模型実験 (実験シリーズB) によって、この工法の有効性を検討した。格子壁の間隔が24 cm (実物換算で6 m) の格子内中央部にアルミ板を固定し、深度の浅い浮き型の格子壁をモデル化した。アルミ板の深さは4, 7, 10 cm (実物換算で1.0, 1.75, 2.5 m) の3種類とした。また、加振した波形は、実験シリーズAと同様のものである。

浮き型格子壁の深度と液状化が発生する振動加速度の関係を図-7に示した。図-7(a)と(b)には、格子壁の間隔が6.0 mと3.0 mでの実験結果 (図中の破線) と、格子壁間の中央部に深さが1.0 mと2.5 mの浮き型格子壁を設けた場合の実験結果を示している。各振動加速度において液状化した場合には黒丸、液状化しなかった場合には白丸をプロットした。図で格子壁の間隔が6.0 mと3.0 mでの液状化の生じる加速度を比較すると、いずれの深度においても格子壁間隔が狭い3.0 mでの値の方が大きい。すなわち、液状化しにくいことが分かる。次に、浮き型の格子壁の深さを1.0 mとした場合の図-7(a)を見ると、液状化の生じる振動加速度は格子壁の間隔が6.0 mでの値とほぼ等しく、浮き型の格子壁による液状化抑制効果の増加は確認できなかった。一方、図-7(b)に示したように、浮き型の格子壁の深さを2.5 mと深くした場合、1.0 mの深度において液状化の生じる振動加速度は格子壁間隔が3.0 mでの値とほぼ等しくなった。1.75 mの深度において

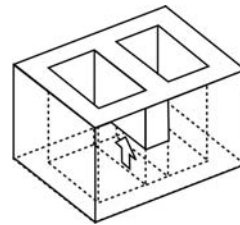
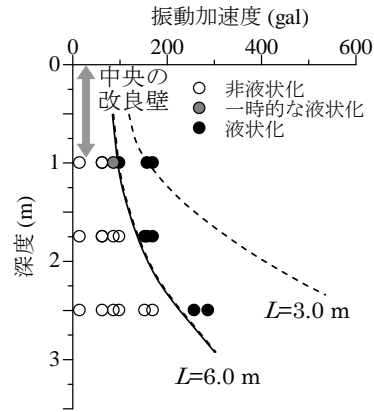
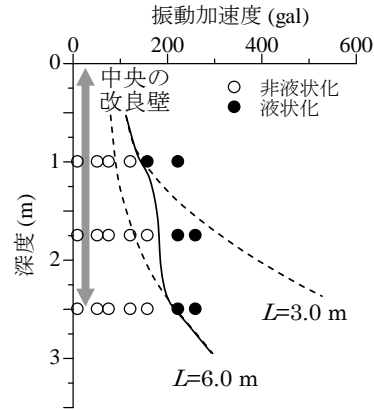


図-6 部分浮き型方式の概念図⁷⁾



(a) 浮き型格子壁の深さ 1.0 m



(b) 浮き型格子壁の深さ 2.5 m

図-7 格子壁の深さと液状化が生じる加速度の関係⁷⁾
(実験シリーズB)

は、格子壁の間隔が3.0 mと6.0 mでの値の中間的な値で液状化しており、格子壁の深さと同じ深度の2.5 mとなると格子壁間隔が6.0 mでの値と等しくなっていた。このことから、一部の格子壁を浮き型としても、その格子壁より浅い箇所においては格子壁の間隔を狭くすることと同様の液状化抑制効果が期待できることが確認された。この工法の適用に関しては、特に液状化層厚が大きい場合において、コストの縮減化に有効な手段となり得る。

5. 格子壁高の影響検討 (全浮き型方式)

(1) 全浮き型方式の工法原理

本章では、さらに固化量を減らす観点から、図-8に示すように格子壁の全体を非液状化層に着底させない形式

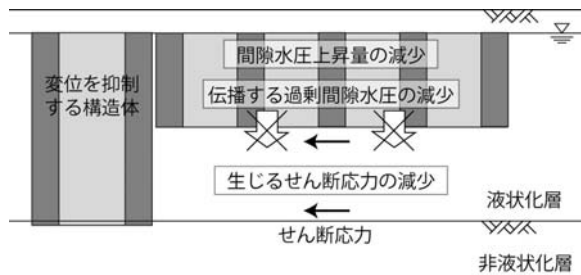


図-8 全浮き型方式の概念図と工法原理⁸⁾

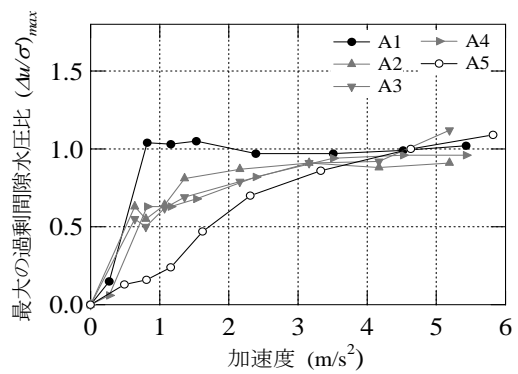
について検討を行った。ただし、浮かせた格子壁で形成された固化体の側方には、着底型の構造体（着底型の固化体や岸壁のケーソンなど）を設置することが必要である。工法の原理としては、格子壁に囲まれた浅層での液状化抑制効果は通常の格子状固化処理工法と同様である。深層では、浮き型の固化体と着底型の構造体の相互作用で、深層に発生するせん断応力が低減され、液状化が抑制されると著者らは考えている。すなわち、非液状化層と浮き型の固化体の水平方向の振動を同期させて、両者で挟んだ深層でのせん断応力を低減する。これに加えて、格子壁に囲まれた浅層において間隙水圧の上昇を抑えられるため、深層の過剰間隙水圧が浅層へ消散しやすくなる。また、浅層から深層への水圧伝播の可能性も減るため、さらなる液状化対策効果が見込める。

(2) 格子壁の深さの影響

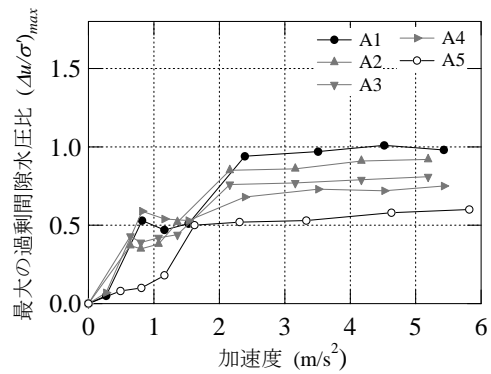
格子壁の深さの影響評価を行ったのは、実験シリーズCとDである。シリーズCでは、合計5種類の格子壁の深さでの液状化特性について検討した。これらの5種類の深さは0, 10, 15, 20, 25 cmであり、遠心加速度を50Gとしたので実物換算では0, 5, 7.5, 10, 12.5 mとなる。また、加振波形は、振動数が100 Hzの正弦波50波であり、実物換算では振動数2 Hz（周期で0.5 s）となる。加振は、段階的に大きな加速度の波形を加えるステップ加振方式とした。

図-9には、深度GL-2.6 mと-10.0 mにおける振動加速度と最大過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ の関係を実物換算で示している。図-9(a)を見ると、振動加速度が1.0 m/s²（100 Gal）以下で無改良のケースA1での $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は1.0に達している。浮き型のケースA2～A4（改良深さはA2: 5 m, A3: 7.5 m, A4: 10 m）では $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.7以下となっており、浮き型であっても浅層での液状化対策効果が確認された。さらに、A2～A4において $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が1.0に達するのは振動加速度が4.0 m/s²（400 Gal）以上となった段階であり、これは着底型のケースA5の結果とほぼ等しい。

次に、図-9(b)を見ると、振動加速度が2.0 m/s²（200 Gal）以上で、無改良のケースA1の $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は1.0近くで、浮き型のケースA2～A4の $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は0.7～0.9で定常化していた。A2～A4においては、固化体の深さが大きいほど $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は小さかった。また、着底型のケースA5では $(\Delta u/\sigma)_{max}$ は0.5～0.6で定常化していた。これらのことから、浮き型形式であっても格子状の固化を行っていない深層



(a) 深度 GL-2.6 m



(b) 深度 GL-100 m

図-9 最大過剰間隙水圧と振動加速度の関係⁸⁾
(実験シリーズC)

を含めて液状化対策効果が発揮されることが確認された。

(3) 格子壁の深さと液状化抑制効果の関係

実験シリーズCを数値解析（MuDIANにて実施）でシミュレートし、さらにパラメトリックに格子壁の深さを変化させて計算を実施した。この計算結果と実験結果を併せて、液状化抑制に必要であった浮き型格子壁の深さと液状化層厚の関係をまとめたものが図-10である。3種類の違いは、2.0 m/s²（200 Gal）程度の振動加速度で格子壁下部の地盤で $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.8以上の場合（黒丸）、0.5～0.8の場合（灰色の丸）、0.5未満の場合（白丸）である。

図に示すように、灰色と白色の丸の間に境界を設定できる。安全側の結論として、 $(\Delta u/\sigma)_{max}$ が0.5未満である灰色と白色の間の境界（図中のハッチ部）に基づいて格子壁の深さを仮に設定できる。境界の位置については、今後より広範な条件下で検証する必要があるが、液状化が抑制される格子壁の深さを概略的に設定することが可能となった。

(4) 現実的な配置での実験的検証

実験シリーズDにおいて、より現実的な配置によって全浮き型方式の格子状固化処理工法の有効性について確認した。このシリーズでは、浮き型格子壁の深さを変化させて合計6種類の実験を実施した。深さは0, 4, 8（2種類）、12, 16 cmであり、遠心加速度を50Gとしたので実物

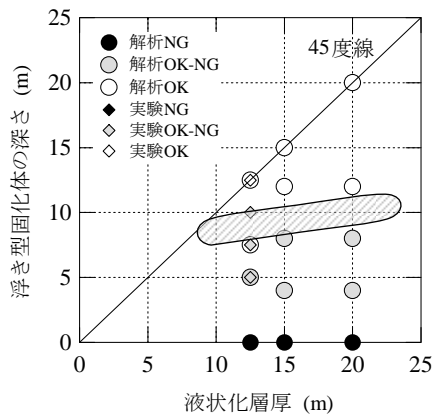


図-10 浮き型格子壁の深さと液状化層厚の関係
(実験シリーズCと数値解析)

換算では0, 2, 4 (2種類), 6, 8 mとなる。また、加振波形はL2地震動を想定した模擬不規則波である。波形の形状を保って徐々に大きな加速度振幅の波形を入力するステップ加振方式によって振動実験を実施した。

紙面制約の都合上、過剰間隙水圧の発生特性については、説明を省く。ここでは、各加振ステップでの格子内の累積の地表面沈下量を図-11に示している。沈下量は実物換算している。図に示すように、無改良のケースB1ではStep 2において0.23 m程度の沈下が生じ、その後の加振ステップ毎に沈下量は増加し、最終的にはStep 6において沈下量が0.72 mまで達していた。一方、着底型のケースB2では、Step 6で0.17 m程度の沈下であり、それほど大きな沈下は生じていなかった。浮き型のケースB3～B6では、いずれの加振ステップにおいてもB2より沈下量が大きくなる傾向にあるが、B1と比べて沈下は大幅に低減されており、浮き型であっても沈下量の低減効果が大きいことが分かった。特に、B1と比べてB3～B6では、繰り返し加振による沈下量を大幅に低減できた。

6. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると、1) 遠心模型実験(シリーズA)とFLIPによる数値解析に基づいて、格子壁の間隔 L を液状化させない深度 d に対する比 L/d から求める方法を提案した。2) 一部の格子壁の深さを浅くする部分浮き型方式の工法を提案し、遠心模型実験(シリーズB)によってその有効性を示した。また、格子壁の深さの考え方について述べた。3) 着底型構造体と組み合わせた全浮き型方式の工法を提案し、遠心模型実験(シリーズCとD)と数値解析によってその有効性を示した。また、格子壁の深さの設定方法を提案した。

これらの結果に基づいて、要求性能を満たしつつコストを低減できる可能性を示せた。

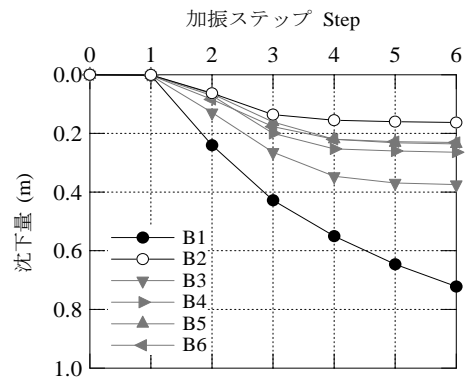


図-11 格子内の累積地表面沈下量⁸⁾ (実験シリーズD)

謝辞：全浮き型方式の工法は、港湾空港技術研究所、五洋建設、清水建設、竹中土木、東亜建設工業、東洋建設、不動テトラで実施した共同研究で開発したものである。ここに記して各位の協力に感謝の意を表す。

参考文献

- 古賀泰之, 松尾 修, 榎田実, 伊藤浩二, 鈴木吉夫: 深層混合処理工法による砂地盤の液状化対策に関する模型振動実験(その2), 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 1019-1020, 1988.
- 鈴木吉夫, 齊藤 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, 1995.
- 東 祥二, 原田健二, 仁田尾洋, 橋本則之, 鈴木亮彦, 初山幸治, 館下和行, 菅野高弘, 中澤博志: 実大実験における格子状固化改良の液状化対策効果に関する研究, 材料, Vol. 59, No. 1, pp. 14-19, 2010.
- 沿岸技術研究センター: 海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル(改訂版), 沿岸技術研究センター, 289p., 2008.
- 日本ジェットグラウト協会: ジェットグラウト工法技術資料(第18版), 日本ジェットグラウト協会, 82p., 2010.
- 北詰昌樹: 新遠心模型実験装置の開発と研究への適用, 港湾技術研究所資料, No. 812, 35 p., 1995.
- 高橋英紀, 山脇秀仁, 北詰昌樹, 石橋伸司: 深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 45, No. 2, pp. 135-167., 2006.
- 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を低減に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 51, No. 2, 2012. (掲載決定済み)
- Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, No. 29, Vol. 4, pp. 27-56, 1990.
- Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, Proceedings of 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, pp. 523-530., 1985.
- 塩見忠彦, 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 津國正一: 地盤と構造物の非線形性を考慮した構造解析システムの開発, 竹中技術研究報告, No. 54, pp. 1-8, 1998.
- 津國正一, 塩見忠彦: 格子状改良地盤の過剰間隙水圧発生量を予測できる解析法の検討, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集(III部門), pp. 172-173, 2001.