

格子状改良壁の地震時ひずみ計測のための 水中振動台実験

津國 正一¹・大矢 陽介²・小濱 英司³・金田 一広⁴・
今井 政之⁵・高橋英紀⁶

¹ 正会員 株式会社竹中土木 技術・生産本部 (〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1)
E-mail:tsukuni-s@takenaka-doboku.co.jp

² 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:ooya-y@p.mpat.go.jp

³ 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:kohama-e83ab@p.mpat.go.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 正会員 株式会社竹中土木 技術・生産本部 (〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1)
E-mail:imai-m@takenaka-doboku.co.jp

⁶ 正会員 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)
E-mail:takahashi-h@p.mpat.go.jp

地震時の格子状地盤改良壁に発生するひずみ計測を目的に正弦波50波加振の水中振動台実験で、ひずみゲージと光ファイバを用いた計測を行った。格子状改良壁の格子間隔は0.4mと0.8mの2種類である。光ファイバとひずみゲージでの計測結果は概ね対応していた。加振直交方向の格子壁については、水平方向のひずみが鉛直方向のひずみに比べて卓越する傾向があった。加振直交方向と平行方向の格子壁に発生するひずみのピーク位置と大きさは、格子状改良壁底面の拘束条件が影響していることが分かった。

Key Words :liquefaction , grid-form soil improvement, optical fiber, underwater shakig table

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。格子状地盤改良工法に関する研究はこれまで、格子内地盤の過剰間隙水圧発生量⁴⁾や格子内地盤と構造物の沈下量⁵⁾に注目し、過剰間隙水圧発生量か沈下量で液状化対策効果を評価している。格子状地盤改良工法の設計では、格子内地盤の液状化抑止に必要な格子間隔と格子状改良壁の発生応力を許容応力以内に抑えるのに必要な格子間隔を求め、小さい方の格子間隔を設計格子間隔とする。振動台実験の結果から格子間隔Lと液状化層厚Hとの比 $L/H \leq 0.8$ となる格子間隔を、液状化抑止に必要な設計格子間隔として採用する方法がマニュアル¹⁾に記載されている。このマニュアルに示されている格子状

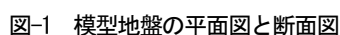
改良壁の発生応力計算方法は、地震時動土水圧を土圧理論から算出する方法に基づいている。

マニュアルに基づいて格子状地盤改良工法の設計を行う方法とは別に動的解析を用いた設計方法も有り、3次元形状の格子状改良地盤を2次元要素を貼り合わせたモデルを使う擬似3次元解析手法という方法を用いて解析を行っている。擬似3次元解析手法を用いた解析では、3次元形状の格子状改良地盤の挙動を再現するために格子状改良壁のせん断剛性を低減させる⁶⁾ 7)場合もある。浦安市の道路と宅地を一体とした液状化対策事業では、遠心模型振動実験で求めた住宅の沈下量を擬似3次元解析手法で再現するために、格子状改良壁のせん断剛性を70%に低減したことを根拠に、70%に低減したせん断剛性を設計で採用している⁸⁾。また、遠心模型振動実験で得られた格子状改良地盤の格子内地盤の過剰間隙水圧発生量を擬似3次元解析手法を用いた解析で再現するため

先に述べたように格子状地盤改良工法の既往の研究で注目しているのは、格子内地盤の液状化抑制効果であるため、実験では格子状改良壁に発生するひずみには注目してこなかった。今後、より合理的な格子状地盤改良工法の設計を行うために、格子状改良壁のせん断挙動を明らかにする必要がある、模型実験等でせん断ひずみの定量的な評価が必要とされる。これまで数多くの遠心模型振動実験が格子状地盤改良工法の研究では実施されてきたが、遠心模型振動実験では模型寸法が小さいため、ひずみゲージを格子壁に貼るスペースも制限され計測が難しい。そこで、比較的大型の格子状改良地盤模型を用いた実験の実績⁸⁾がある水中振動台を用いた実験を計画し実施した。実験では1g場での相似則を用いて模型地盤の寸法を決定し、縮尺比 λ (実スケール/模型スケール)=15とした。格子状改良地盤模型のひずみ計測は、格子壁に光ファイバとひずみゲージを貼付けて実施した。

実験は1g場で実施した. 実験条件を以下に示す.

図-11に模型地盤の平面図と断面図を示す。格子模型は厚さ30mmの亚克力板で製作した。格子模型表面はサンドブラストで凹凸を付けた。これは格子壁と地盤の摩擦抵抗を大きくし、加振時に格子壁と格子内地盤が一体となって挙動することを期待したためである。格子間隔は0.4mと0.8mの2パターン、格子模型の高さは0.8mである。格子間隔0.4mの格子模型の格子数は8、格子間隔0.8mの格子模型の格子数は2である。格子間隔は格子壁の中心間距離で定義している。格子間隔0.8mのL/H=1.0、格子間隔0.4mのL/H=0.5。マニュアルに従った設計法では、格子間隔0.4mでは液化化防止効果がある。格子模型の設置状況を写真-11に示す。直径6mの振動台テーブル上に設置した加振方向幅4m、加振直行方向幅2.8mの剛土



槽を加振直行方向で2分割し、加振直行方向幅1.4mの2つの剛土槽の中に格子間隔0.4mと0.8mの格子模型をそれぞれ設置した。格子間隔0.8mの格子模型を設置した土槽を土槽-A、格子間隔0.4mの格子模型を設置した土槽を土槽-Bと呼ぶ。写真-2に格子模型の固定方法を示す。振動台テーブルに厚さ9mmの鉄板を固定し、その上に格子状改良模型を置いた。格子状改良模型の下端と鉄板との固定にはアングルを用い、加振方向外側だけを固定した。模型地盤の作製は飯豊珪砂6号で行った。水中落下で作製した模型地盤の相対密度は土槽-Aが42.6%、土槽-Bが39.6%であった。地下水位は土槽-A、土槽-Bともに地表から0.067mである。

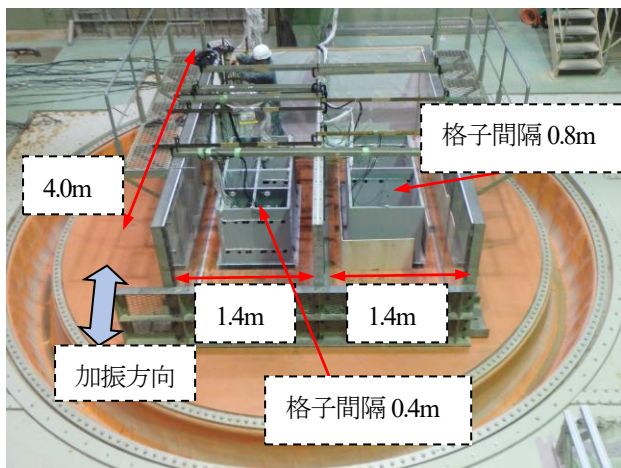


写真-1 剛土槽と格子模型の設置状況

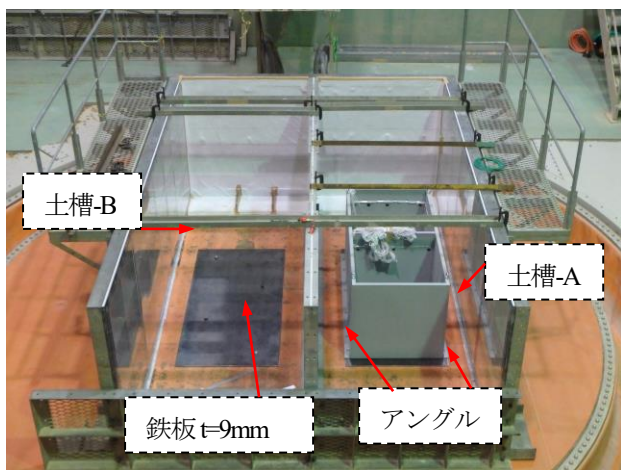


写真-2 格子模型の固定状況

(2) 過剰間隙水圧・加速度・変位量の計測

実験時の計測項目は、過剰間隙水圧・加速度・地表面変位量と格子壁のひずみである。計測位置を図-1の平面図と断面図に示している。過剰間隙水圧の計測は地表面から0.2m、0.4mと0.6mの位置で行った。計測は格子内地盤の中央と周辺地盤で行った。地盤の加速度計測は水平加速度に対して格子内地盤中央と周辺地盤で行った。計

測は地表面、地表面から0.2m、0.4m、0.6mと底面である。格子模型天端では水平加速度と鉛直加速度を計測している。鉛直変位の計測は格子内地盤中央と周辺地盤で実施した。格子模型天端では水平変位量を計測している。

(3) 格子壁のひずみ計測

格子壁に発生するひずみ計測には、ひずみゲージと光ファイバを用いた。ひずみゲージは鉛直・水平の2方向ひずみゲージと、鉛直・水平・斜め45°の3方向ひずみゲージの2種類のひずみゲージを用いて計測を行った。ひずみゲージを用いた計測は格子間隔0.4mと0.8mの両方の格子状改良模型に対して実施した。ひずみゲージを貼っている格子壁とひずみゲージの種類は図-1の平面図に示している。図-2に格子間隔0.8mの格子模型に貼ったひずみゲージの位置を示す。格子間隔0.4mの格子模型に貼ったひずみゲージの位置を図-3に示す。加振平行方向の格子壁の計測は3方向ひずみゲージで行い、格子壁に発生するせん断応力が算出できるようにしている。加振直行方向の格子壁については、格子壁の両側の同じ位置にひずみゲージを貼付け、曲げモーメントが算出できるようにしている。2方向ひずみゲージは、鉛直と水平のそれぞれについて格子壁両側の同じ方向の二つのゲージをブリッジを組んで計測しているため、格子壁の曲げひずみが計測値として計測されている。

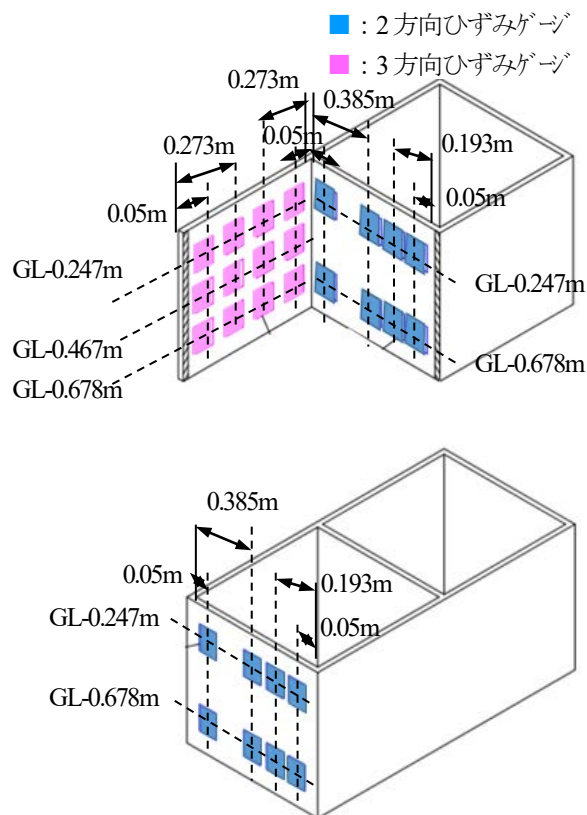


図-2 ひずみゲージ貼付け位置図(格子間隔0.8m)

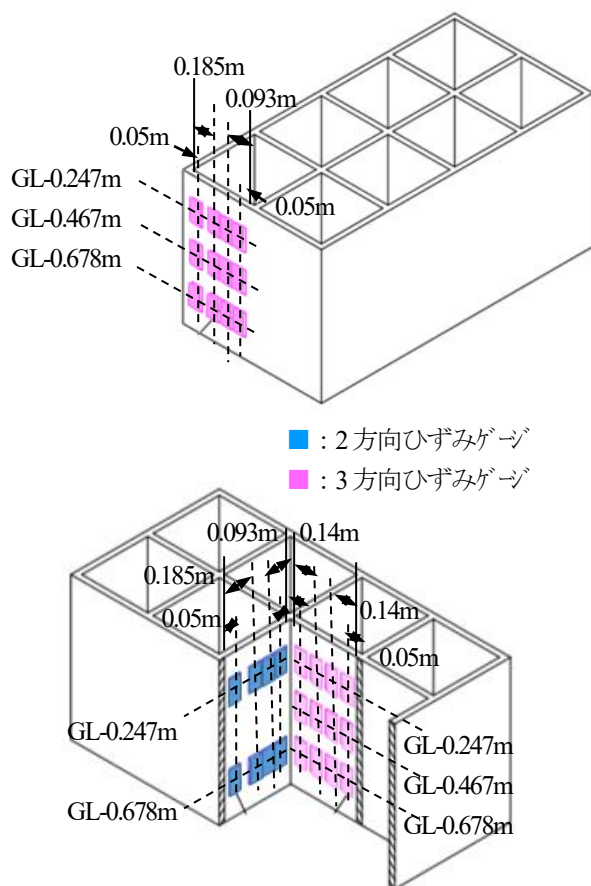


図-3 ひずみゲージ貼付け位置図(格子間隔0.4m)

光ファイバを用いて格子壁に発生するひずみ計測は、格子間隔0.4mの格子模型に対して行った。光ファイバの計測を行った格子模型の位置は、図-1の平面図に示されている。使用した光ファイバはポリイミド光ファイバであり、光ファイバの断面を図-4に示す。1本の光ファイバの長さは10m、計測には4本の光ファイバを使用した。光ファイバは格子壁に設けた幅5mm、高さ1mmの溝に設置し接着剤で固定した後、コーキング剤で防水処理を行っている。溝加工の断面を図-5に示す。1本10mの光ファイバを一筆書きで設置した溝に固定して、格子壁に発生する水平・鉛直・斜め方向のひずみを、計測間隔0.01秒で連続的に計測した。光ファイバの長さ方向のセンサー間隔は2.56mmである。格子壁の発生ひずみをひずみゲージを用いた計測以外に光ファイバを用いた計測でも行った目的は、格子壁に発生するひずみを面的に計測し分析するためである。経路-1～経路-5の光ファイバ経路図を図-6に示す。経路-1と経路-2は1本の光ファイバで2面計測した経路で、経路-3～経路-5はそれぞれ1本の光ファイバを設置して計測した経路になる。

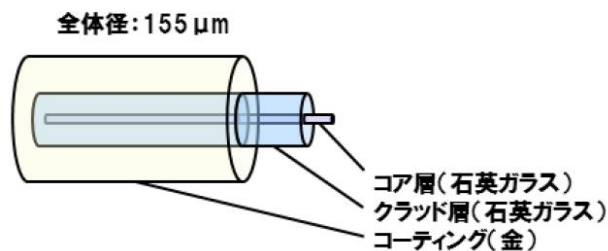


図-4 光ファイバ断面

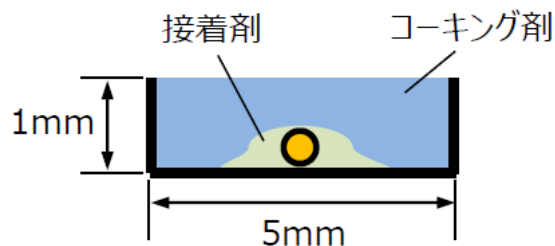


図-5 光ファイバ用の溝加工

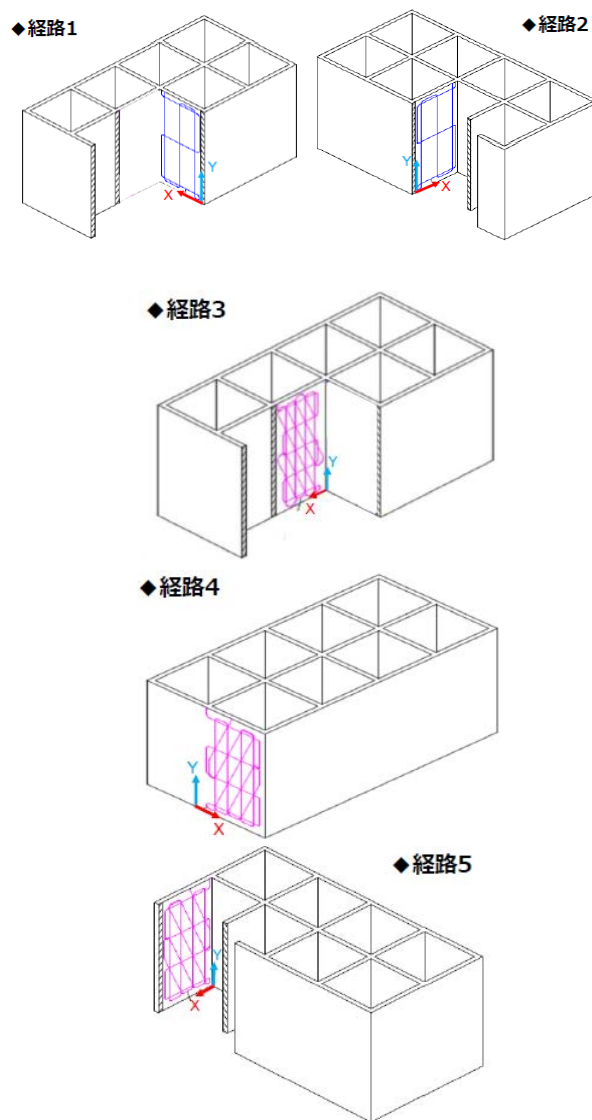


図-6 経路-1～経路-5の光ファイバの設置経路

(4) 入力地震波

加振は7.5Hzの正弦波50波で3回行った。1回目～3回目の加振時に振動台で計測した水平加速度時刻歴を図-7に示す。加振回数と最大水平加速度の関係を表-1に示す。1回目加振時の水平最大加速度は113Gal、2回目加振時253Gal、3回目加振時712Galであった。

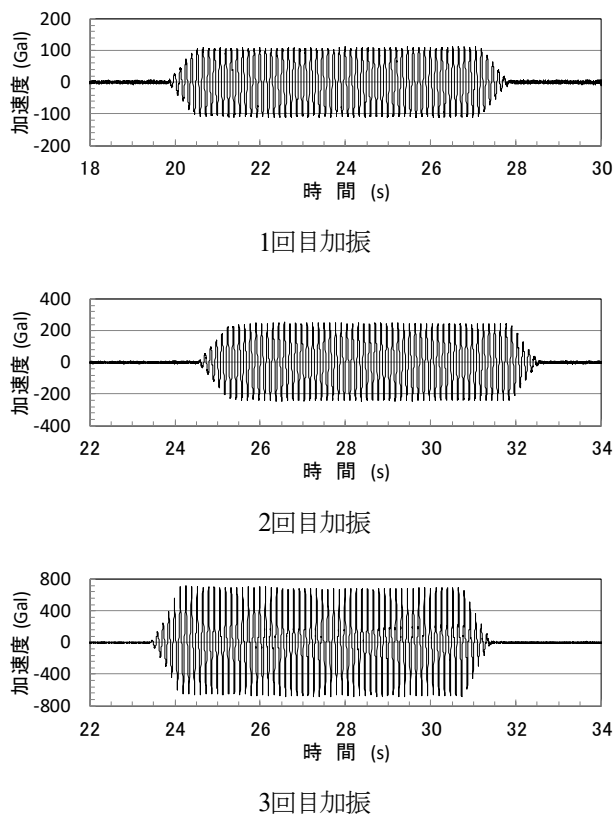


図-7 振動台での水平加速度時刻歴

表-1 加振回数と水平加速度最大値一覧

加振回数	水平加速度最大値
1	113Gal
2	253Gal
3	712Gal

3. 実験結果と考察

実験での計測結果と考察を計測項目ごとに以下に示す。

(1) 加速度

図-8では格子間隔0.8mの格子状改良模型を設置している土槽-Aの周辺地盤(Line-A)での水平加速度最大値の深度分布を、各加振回数で比較している。図-7に示す振動台での水平加速度と比較すると、深度0.6mでの水平加速

度最大値は、入力地震動に近い応答を示しているのに対して、深度が浅くなるにつれて応答は小さくなっている。地表面では各加振回数での最大水平加速度最大値に大きな差が表れていない。これは深度の浅い部分での液状化発生により加速度応答が低下したためと推定される。

格子内地盤中央での水平加速度最大値深度分布を各加振回数で比較しているのが図-9と図-10である。図-9は格子間隔0.8mのLine-B、図-10は格子間隔0.4mのLine-Cの結果をそれぞれ示している。格子間隔0.8mと0.4mともに周辺地盤で見られた地表面での極端な加速度応答の低下は3回の加振全てで見られない。また、深度が浅くなるにつれて加速度応答が小さくなる傾向は周辺地盤ほど顕著ではなく、地表面でも入力地震動に近い最大水平加速度が記録されている。これらの傾向について各加振回数毎に水平応答加速度時刻歴図を用いて考察する。

まず振動台での水平加速度最大値が113Galの1回目加振について考察する。図-11に格子間隔0.8mの格子内地盤中央の地表面とGL-0.2m地点での水平加速度時刻歴を示す。加振から0.5秒程度経過した20.5秒過ぎあたりから加速度応答に低下がみられることから、深度0.2m付近まで液状化が発生していると加速度応答から判断できる。これに対して格子間隔0.4mの格子内地盤中央の地表面とGL-0.2m地点での水平加速度時刻歴を示す図-12では、地表面で格子間隔0.8mの地表面よりも数波遅い時刻から加速度応答の顕著な低下が見られるが、GL-0.2m地点で加速度応答の低下は見られない。また、応答加速度波形も振動台で計測された加速度波形に近いことから、格子間隔0.4mの格子内では地表面付近だけが液状化していたと推定される。

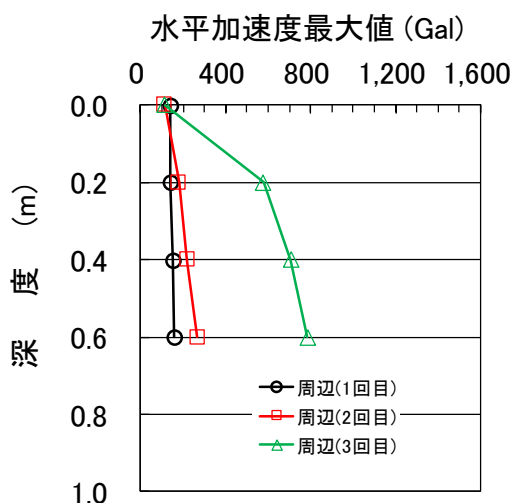


図-8 周辺地盤(土槽-A)の水平加速度最大値深度分布

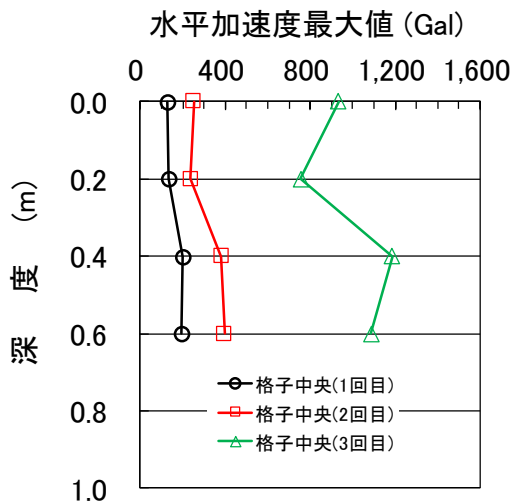


図-9 格子中央(格子間隔0.8m)の水平加速度最大値深度分布

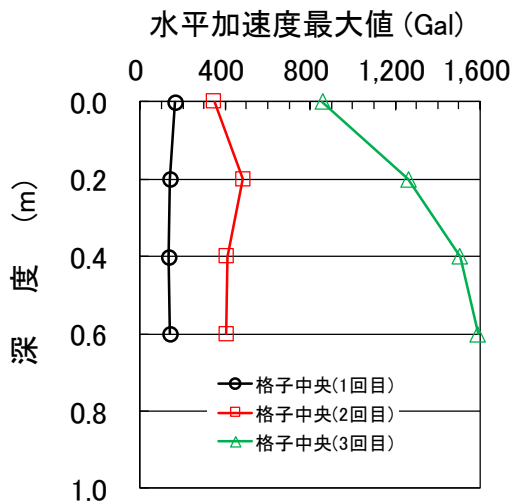


図-10 格子中央(格子間隔0.4m)の水平加速度最大値深度分布

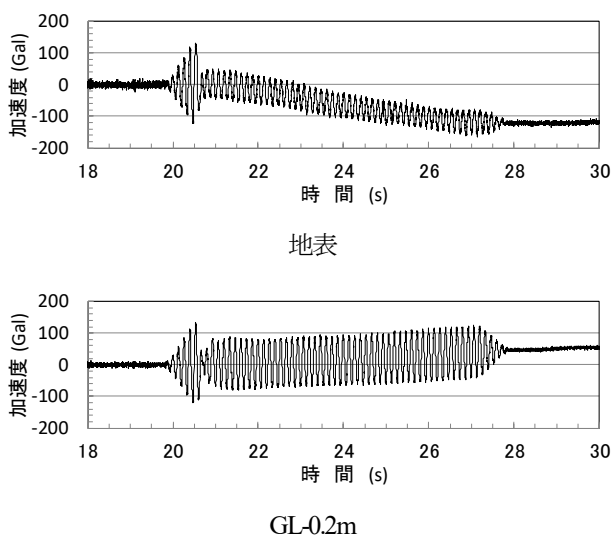


図-11 格子中央(格子間隔0.8m)の水平加速度時刻歴
(1回目加振)

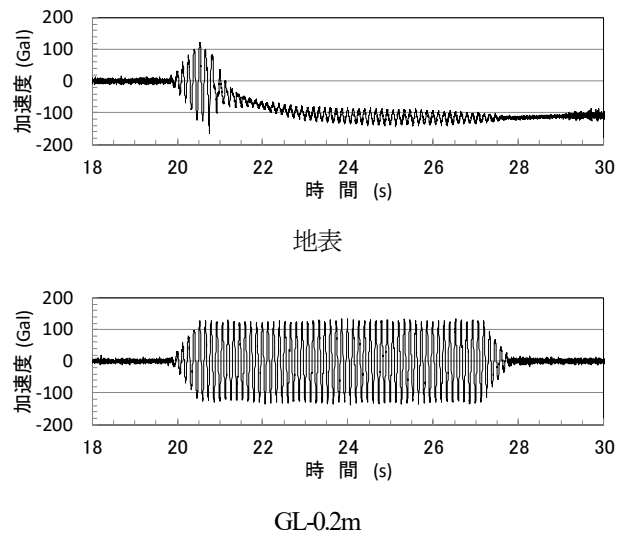
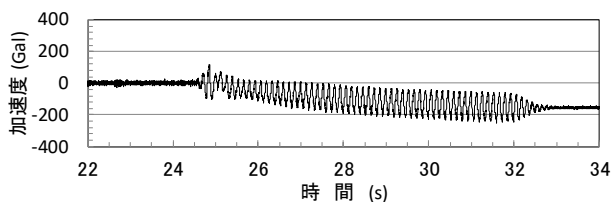


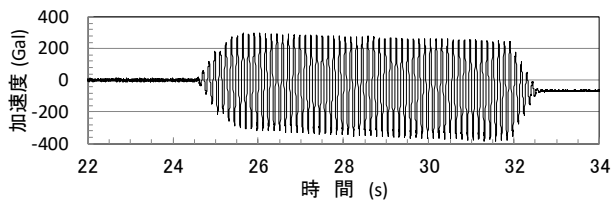
図-12 格子中央(格子間隔0.4m)の水平加速度時刻歴
(1回目加振)

次に水平加速度最大値が253Galの2回目加振について考察する。図-13に格子間隔0.8mの地表、GL-0.4mとGL-0.6m地点での水平加速度時刻歴を示す。地表面では加振後直ぐに顕著な応答の低下が見られ、応答加速度は時間の経過とともにマイナス方向に大きく振れている。GL-0.4m地点では応答の低下は見られないが、水平応答加速度がマイナス方向に時間とともに大きく振れていることから加速度計が液状化発生によって傾いている可能性も考えられる。GL-0.6m地点では応答加速度の一方方向への振れは見られなかった。このことから大部分の深度で液状化発生の可能性が推定される。図-14に格子間隔0.4mの地表、GL-0.4mとGL-0.6m地点での水平加速度時刻歴を示す。格子間隔0.8mと同様に地表面での応答加速度の低下が見られることから、地表付近で液状化が発生していたことが、水平応答加速度時刻歴から推定される。

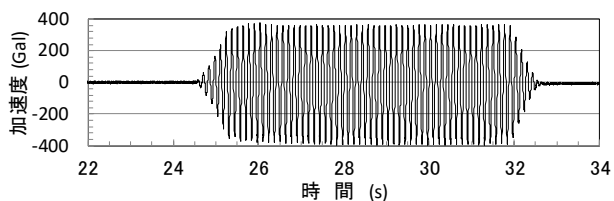
最後に水平加速度最大値が712Galの3回目加振について考察する。図-15に格子間隔0.8mの地表、GL-0.4mとGL-0.6m地点での水平加速度時刻歴を示す。図-16には格子間隔0.4mの地表、GL-0.4mとGL-0.6m地点での水平加速度時刻歴を示す。格子間隔0.8m、格子間隔0.4mともに地表面とGL-0.4m地点で見られる傾向は、2回目加振で見られた傾向と同じであった。3回目加振でも格子間隔0.8mでは大部分の深度で、また格子間隔0.4mでは地表面付近で液状化が発生していたことが、水平応答加速度時刻歴から推定される。



地表

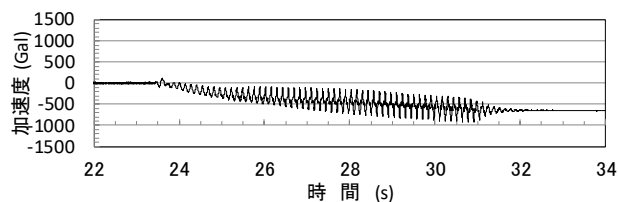


GL-0.4m

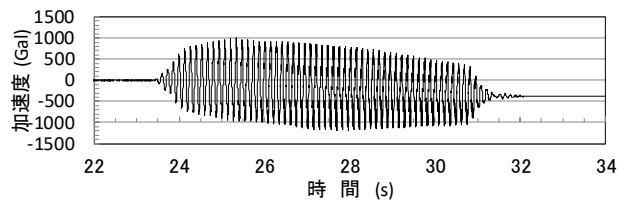


GL-0.6m

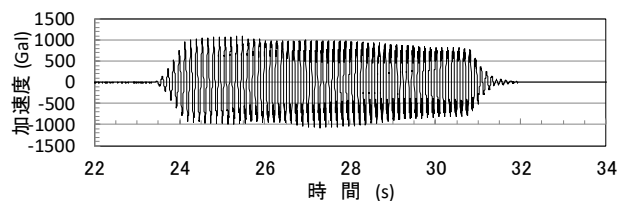
図-13 格子中央(格子間隔0.8m)の水平加速度時刻歴
(2回目加振)



地表

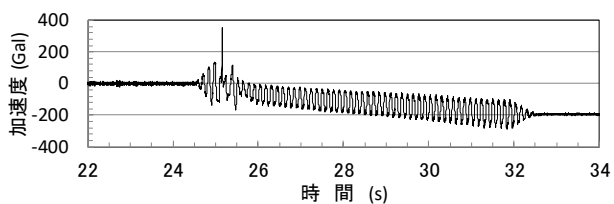


GL-0.4m

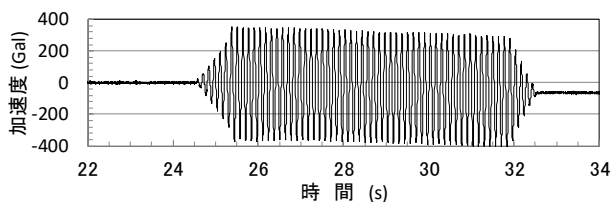


GL-0.6m

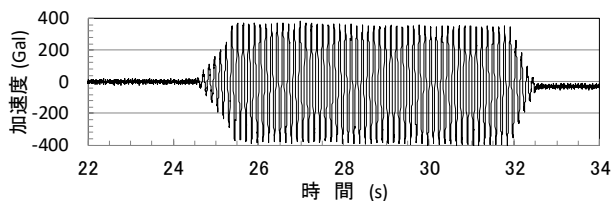
図-15 格子中央(格子間隔0.8m)の水平加速度時刻歴
(3回目加振)



地表

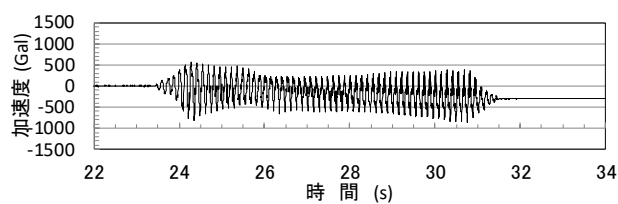


GL-0.4m

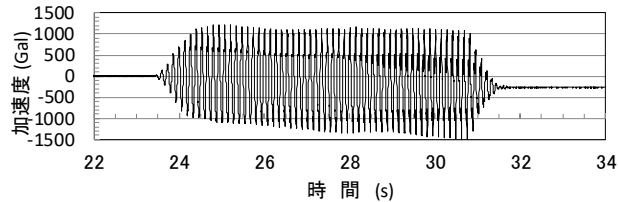


GL-0.6m

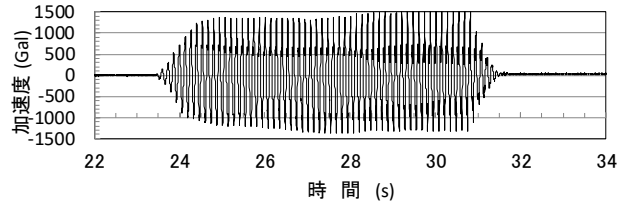
図-14 格子中央(格子間隔0.4m)の水平加速度時刻歴
(2回目加振)



地表



GL-0.4m



GL-0.6m

図-16 格子中央(格子間隔0.4m)の水平加速度時刻歴
(3回目加振)

(2) 過剰間隙水圧比

周辺地盤(Lina-A)、格子間隔0.8mの格子内地盤中央(Line-B)と格子間隔0.4mの格子内地盤中央(Line-C)での過剰間隙水圧比最大値の深度分布をそれぞれ図-17～図-19に示す。過剰間隙水圧比は間隙水圧計で計測した間隙水圧を、間隙水圧計を設置している深度での鉛直有効応力で除した値で算出した。周辺地盤では加振1回目の土槽底面GL-0.876mでの過剰間隙水圧比最大値が0.82と1.0を下回っているが、それ以外のデータは全て1.0を超えている。格子間隔0.8mの場合、各加振回数での全深度の過剰間隙水圧比最大値が1.0を上回っていた。格子間隔0.4mでは、加振回数2回目と3回目では全深度で過剰間隙水圧比最大値が1.0を超えていたが、加振回数1回目で1.0を超えていた深度はなかった。ただし、深度0.2mでの過剰間隙水圧比最大値は0.99で、過剰間隙水圧比が0.95を超えている⁹⁾ので液状化発生レベルの値と言える。各加振回数毎に過剰間隙水圧比時刻歴図を用いて、水平加速度に対する考察結果と合わせて液状化発生の有無に関する考察を行う。

まず振動台での水平加速度最大値が113Galの1回目加振について考察する。図-20に周辺地盤GL-0.2mとGL-0.876m地点での過剰間隙水圧比時刻歴を示す。GL-0.2m地点では、加振直後の20.5秒には既に過剰間隙水圧比は1.0に達しており、加振終了後の28秒以降でも過剰間隙水圧の消散は見られず、過剰間隙水圧比が1.0を超えたままである。これに対してGL-0.876m地点での過剰間隙水圧比最大値は21.5秒付近に見られ、加振中の過剰間隙水圧消散も認められることから、周辺地盤では土槽底面付近では液状化が発生していなかったと考えられる。図-21に格子間隔0.8mのGL-0.2mとGL-0.876m地点での過剰間隙水圧比時刻歴を示す。両地点での過剰間隙水圧の発生消散過程は周辺地盤と大差がなかったことから、格子間隔0.8mでは液状化抑制効果がなく、土槽底面付近を除くほぼ全層で液状化が発生していたと考えられる。図-22に格子間隔0.4mのGL-0.2m地点での過剰間隙水圧比時刻歴を示す。23.5秒付近で過剰間隙水圧比がピークの0.99を示しているが、直ぐに過剰間隙水圧の消散が見られる。GL-0.2m地点では水平加速度時刻歴でもはっきりとした応答波形が見られたことから、格子間隔0.4mでは液状化抑制効果があり、液状化の発生は地表付近に限定されていたと考えられる。

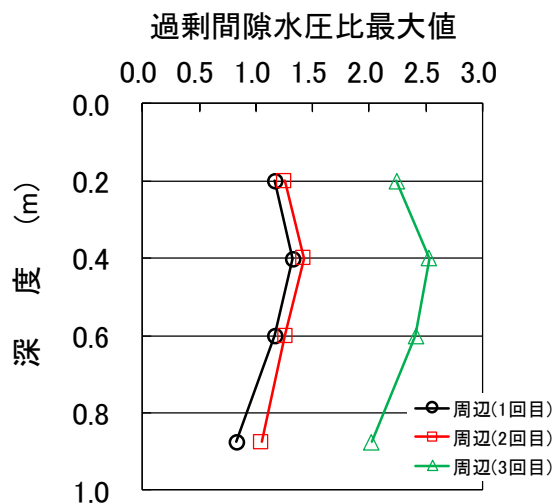


図-17 周辺地盤(土槽-A)の過剰間隙水圧比最大値深度分布

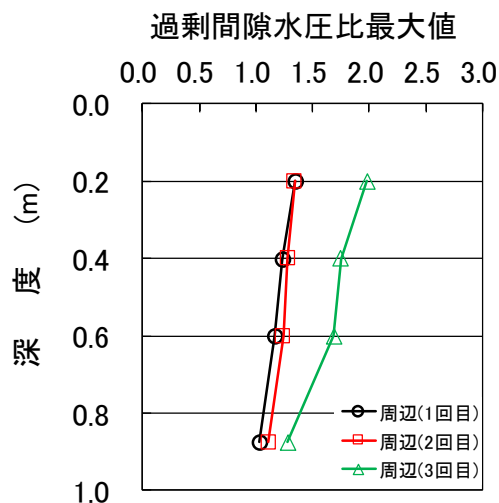


図-18 格子中央(格子間隔0.8m)の過剰間隙水圧比最大値深度分布

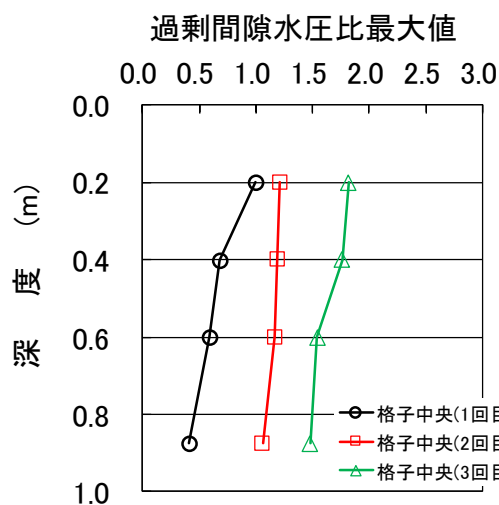
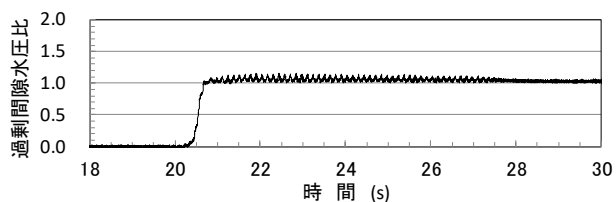
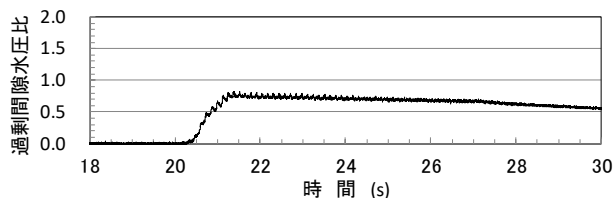


図-19 格子中央(格子間隔0.4m)の過剰間隙水圧比最大値深度分布

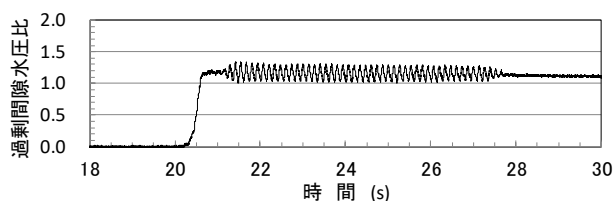


GL-0.2m

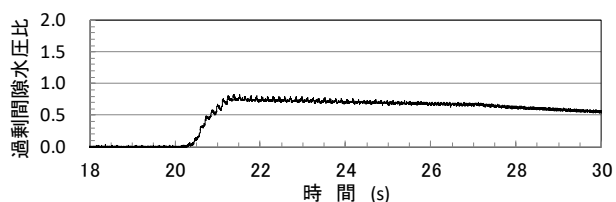


GL-0.876m

図-20 周辺地盤の過剰間隙水圧比時刻歴
(1回目加振)

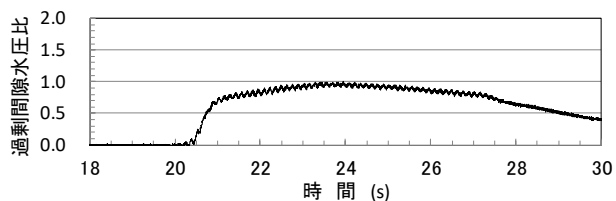


GL-0.2m



GL-0.876m

図-21 格子中央地盤(格子間隔0.8m)の過剰間隙水圧比時刻歴
(1回目加振)



GL-0.2m

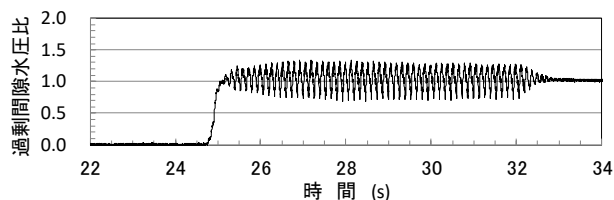
図-22 格子中央地盤(格子間隔0.4m)の過剰間隙水圧比時刻歴
(1回目加振)

次に水平加速度最大値が253Galの2回目加振について考察する。格子間隔0.8mと格子間隔0.4mのGL-0.2m地点での過剰間隙水圧比時刻歴をそれぞれ図-23と図-24に示す。加振後すぐに過剰間隙水圧比が1.0を超え、その後、過剰間隙水圧比が1.0付近で振れているのは両地点とも同じであるが、振れ幅は格子間隔0.8mの方が格子間隔

0.4mより大きかった。このように加振レベルが大きく液状化発生後に動水圧成分が含まれていることが、過剰間隙水圧比最大値が1.0を大きく超えている原因である。加振2回目には格子間隔0.4mでも液状化抑制効果は見られず、格子間隔0.8mと格子間隔0.4mともに全層で液状化が発生していたと考えられる。

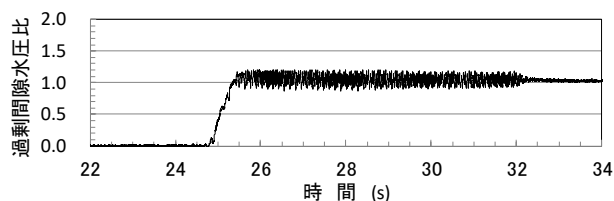
最後に水平加速度最大値が712Galの3回目加振について考察する。格子間隔0.8mのGL-0.2mとGL-0.6m地点の過剰間隙水圧比時刻歴を図-25に示す。図-26は、格子間隔0.4mの同一深度での過剰間隙水圧比時刻歴である。格子間隔0.8mと格子間隔0.4mともに、加振後すぐに過剰間隙水圧比が1.0を超えているのは、液状化発生後に動水圧成分が表われているためである。動水圧成分は2回目加振時よりも明らかに大きくなっており、格子間隔0.8mでの動水圧成分は格子間隔0.4mよりも大きかった。これらのことから、格子間隔0.8mと格子間隔0.4mともに全層で液状化発生しており、格子内地盤は全深度で液体状で大きく振動していたと考えられる。

格子内地盤各深度での液状化発生程度の判定について各加振回数毎に色分けを行った。図-27に格子間隔0.8mの結果、図-28に格子間隔0.4mの結果をそれぞれ示す。図中の赤色は明確な液状化発生を示す。黄色は液状化が発生しても水圧の消散が直ぐに起こり、液状化発生が限定的であったことを示す。青色は液状化が発生していないことを示している。



GL-0.2m

図-23 格子中央地盤(格子間隔0.8m)の過剰間隙水圧比時刻歴
(2回目加振)



GL-0.2m

図-24 格子中央地盤(格子間隔0.4m)の過剰間隙水圧比時刻歴
(2回目加振)

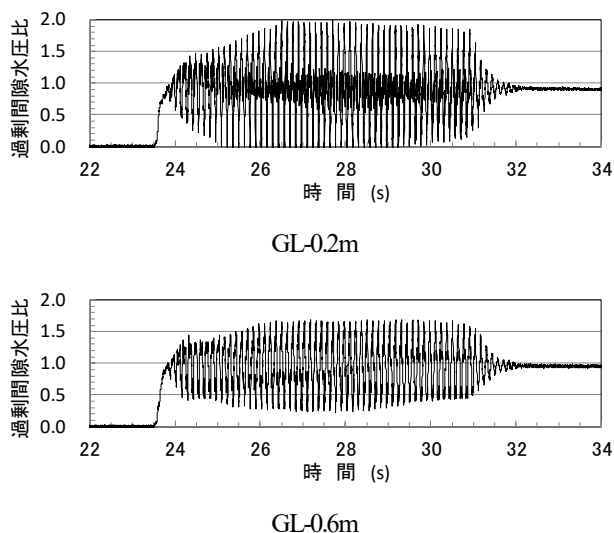


図-25 格子中央地盤(格子間隔0.8m)の過剰間隙水圧比時刻歴
(3回目加振)

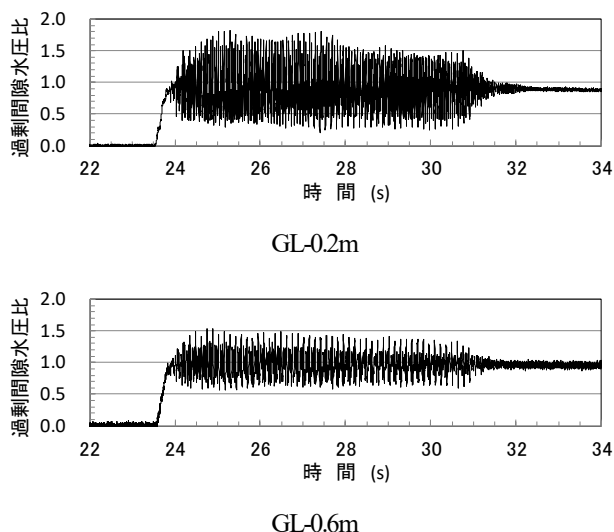


図-26 格子中央地盤(格子間隔0.4m)の過剰間隙水圧比時刻歴
(3回目加振)

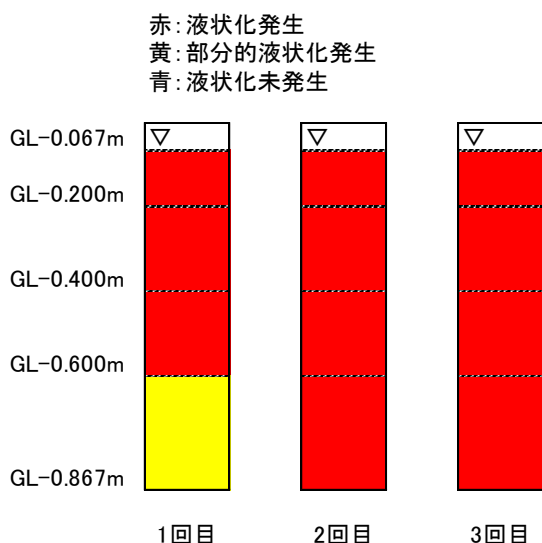


図-27 格子間隔0.8mの液状化発生判定

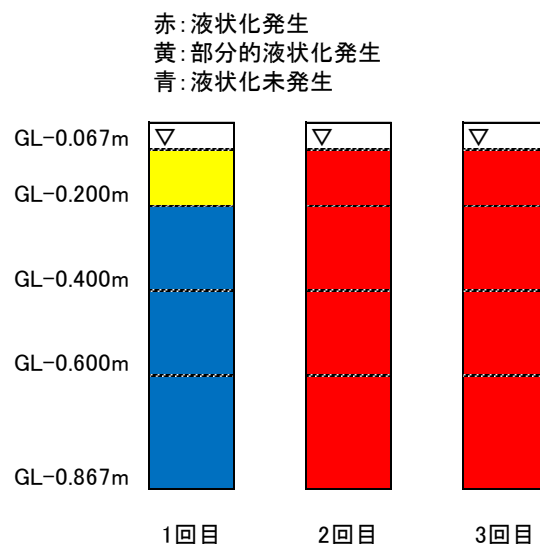


図-28 格子間隔0.4mの液状化発生判定

(3) 格子壁のひずみ

a) ひずみゲージでの計測結果

図-29に水平ひずみ時刻歴を示す。格子間隔0.8m, 加振平行方向壁のGL-0.467mのD点でのひずみゲージで計測した結果で、水平ひずみの最大値は910 μ であった。格子壁に発生するひずみに対する考察は、ひずみゲージで計測した結果の最大値を使って行う。最大値分布図の凡例でAはGL-0.247m地点、BはGL-0.467m地点、CはGL-0.687m地点でのそれぞれ計測結果を示しており、括弧内は加振回数を示している。横軸の水平距離は格子模型の外周側を基本的に0としている。

図-30に格子間隔0.8mの加振平行方向壁(壁-Aと呼ぶ)の水平ひずみ、鉛直ひずみと斜め45度方向ひずみのそれぞれ最大値の水平分布を示す。水平ひずみ最大値は、壁の拘束効果が高い格子壁の交差部で大きく、拘束効果の小さい格子壁の中央部で小さくなる傾向がある。格子壁交差部の水平ひずみ最大値は、周辺地盤に近い交差部の方が大きい。鉛直ひずみ最大値については、2回目加振以降に格子壁の交差部で大きく、格子壁の中央部で小さくなる傾向が見られる。2回目加振以降、ひずみが最も大きいのが水平ひずみ、次に斜めひずみ、鉛直ひずみの順番であった。

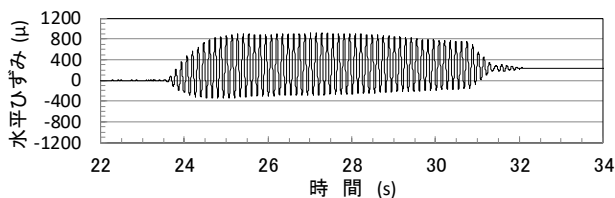


図-29 D点の水平ひずみ時刻歴
(3回目加振, 格子間隔0.8m, GL-0.467m)

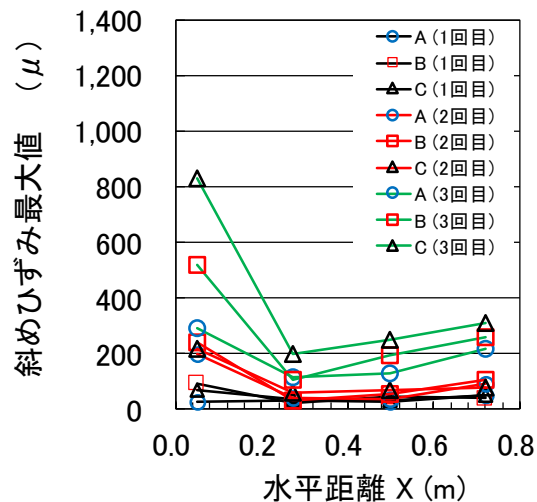
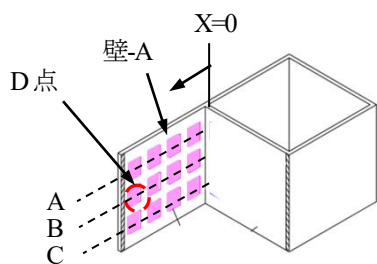


図-30 加振平行方向壁(壁-A)の最大ひずみ分布(格子間隔0.8m)

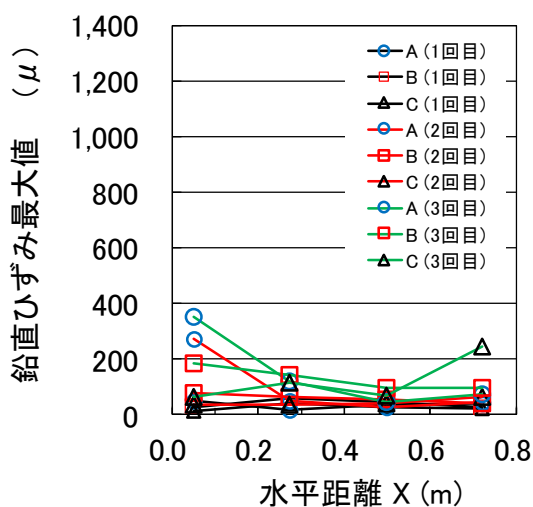
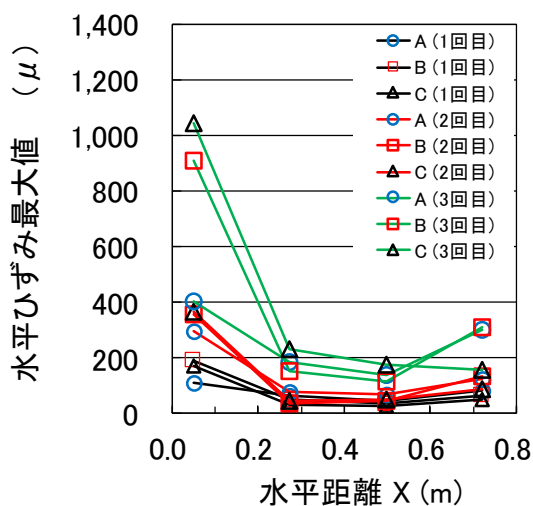


図-31に格子間隔0.8mの両側が格子に囲まれた加振直交方向壁(壁-Bと呼ぶ)の水平曲げひずみ最大値と鉛直曲げひずみ最大値の水平分布を示す。実験では格子壁両面の対応した位置に貼っているひずみゲージで計測したひずみの差を計測している。この値を曲げひずみと呼んでいる。水平曲げひずみ最大値については、水平距離0.577m地点の値が水平距離0.72m地点の値に比べて小さくなっているが、格子壁交差部に比べて格子壁中央部での値が大きい傾向が見られる。鉛直曲げひずみ最大値については、格子壁交差部に比べて格子壁中央部での値が大きくなっている傾向が見られる。鉛直曲げひずみ最大値の大きさは、水平曲げひずみ最大値よりも大幅に小さかったことから、水平方向の曲げモーメントが鉛直方向の曲げモーメントに比べて卓越して作用していたことが確認できる。

図-32に格子間隔0.8mの周辺地盤に接している加振直交方向壁(壁-Cと呼ぶ)の水平曲げひずみ最大値と鉛直曲げひずみ最大値の水平分布を示す。水平曲げひずみ最大値は、水平距離0.385mの壁中央部で格子壁の交差部に比べて大きくなる傾向がある。鉛直曲げひずみ最大値についてもほぼ、水平距離0.385mの壁中央部で格子壁の交差部に比べて大きくなる傾向が見られる。水平曲げひずみ最大値に比べて鉛直曲げひずみ最大値の方が値は小さい。水平距離0.385mの壁中央部で発生する周辺地盤に接する壁-Cの水平曲げひずみ最大値と鉛直曲げひずみ最大値は両側を格子に囲まれた壁-Bに比べて大きかった。水平曲げひずみと鉛直曲げひずみはそれぞれ水平・鉛直曲げモーメントに対応していることから、加振直交方向格子壁に発生する曲げモーメントは、鉛直方向に比べて水平方向の方が大きく、周辺地盤に接している格子壁の方が曲げモーメントが大きくなると言える。これは格子内の地盤は格子壁に囲まれているため、液状化しても地盤の水

平変位が格子壁によって拘束されるので、格子外地盤よりも地盤の水平変位が小さくなるためと考えられる。

図-33に格子間隔0.4mの加振平行方向壁(壁-Dと呼ぶ)の水平ひずみ、鉛直ひずみと斜め45度方向ひずみのそれぞれ最大値の水平分布を示す。格子間隔0.8mの加振平行方向壁(壁-A)に発生しているひずみレベルに比べて大幅に値は小さくなっている。水平ひずみ最大値、鉛直ひずみ最大値と斜めひずみ最大値の間に明確な大小関係の傾向は認められなかった点、図-30に示す格子間隔0.8mの加振平行方向壁で見られた傾向と異なっていた。

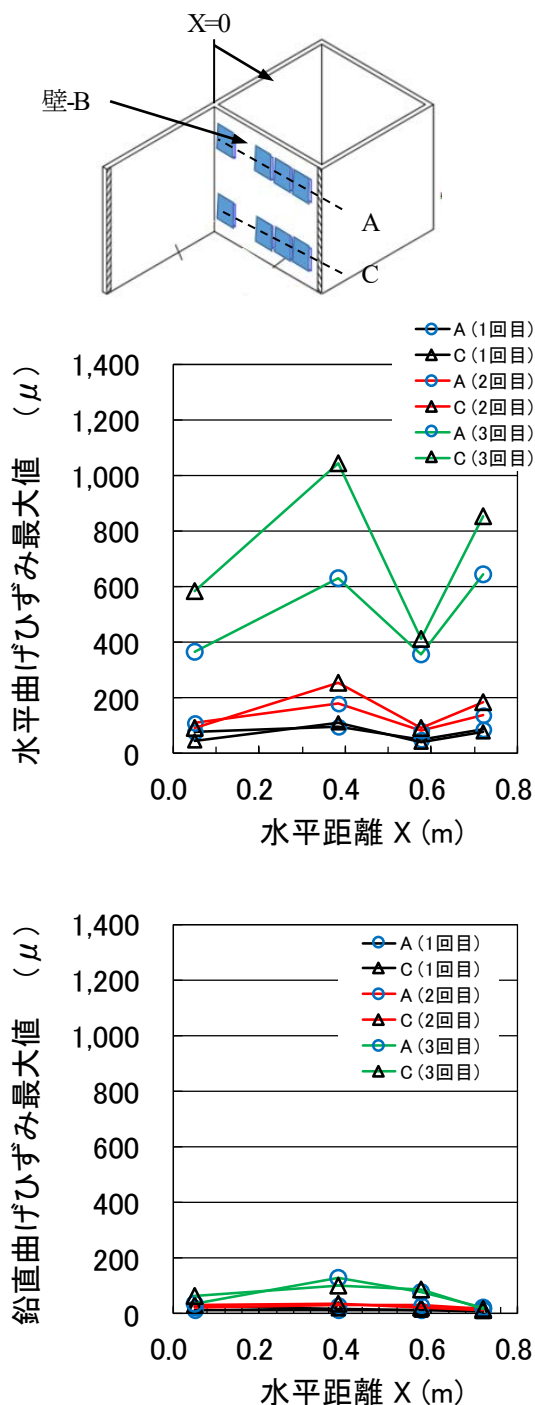


図-31 加振直行方向壁(壁-B)の最大ひずみ分布(格子間隔0.8m)

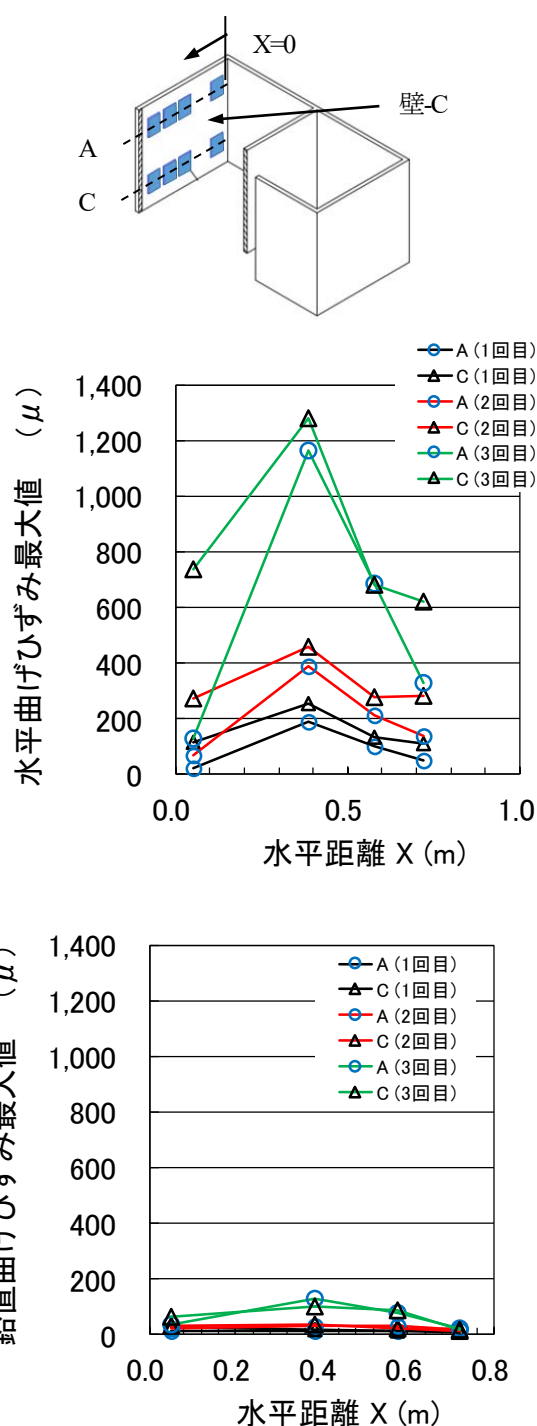


図-32 加振直行方向壁(壁-C)の最大ひずみ分布(格子間隔0.8m)

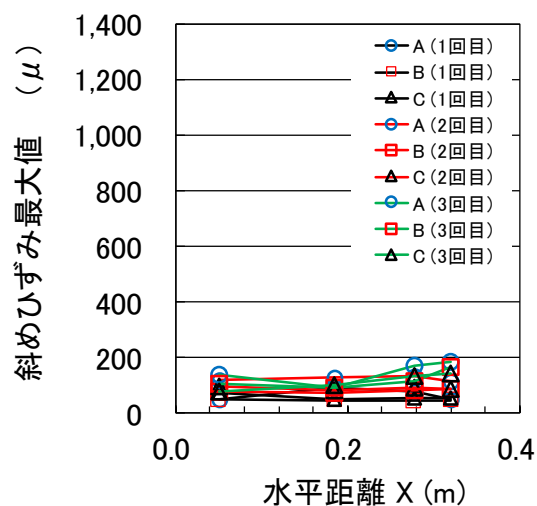
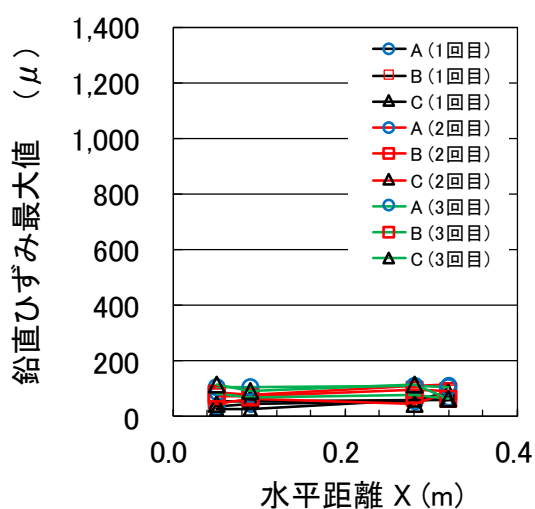
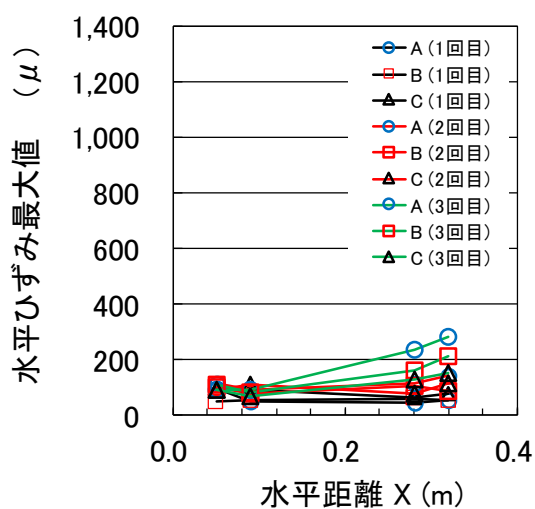
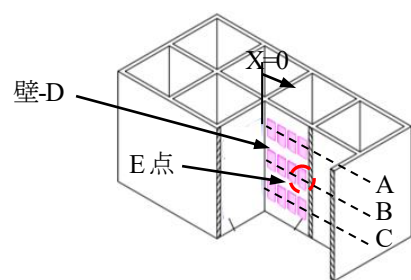


図-33 加振平行方向壁(壁-D)の最大ひずみ分布(格子間隔0.4m)

図-34に格子間隔0.4mの格子模型外周地盤に接する加振直交方向壁(壁-Eと呼ぶ)の水平ひずみ、鉛直ひずみと斜め45度方向ひずみのそれぞれ最大値の水平分布を示す。水平ひずみ最大値は水平距離が大きく両側に格子がある格子壁交差部に近づくにつれて値が大きくなる傾向が見られる。鉛直ひずみ最大値は水平ひずみ最大値に比べて全体的に小さな値であったため、明確な傾向が確認できなかったと考えられる。斜めひずみ最大値も水平ひずみ最大値と同じように水平距離が大きく両側に格子がある格子壁交差部に近づくにつれて値が大きくなる傾向が見られる。斜めひずみ最大値は鉛直ひずみ最大値よりも大きく、水平ひずみ最大値よりも小さい傾向であった。図-35に壁-EのF点での水平ひずみ時刻歴を示す。加振平行方向の壁DのE点での結果と異なり、入力地震動に対応した波形での応答が見られた。

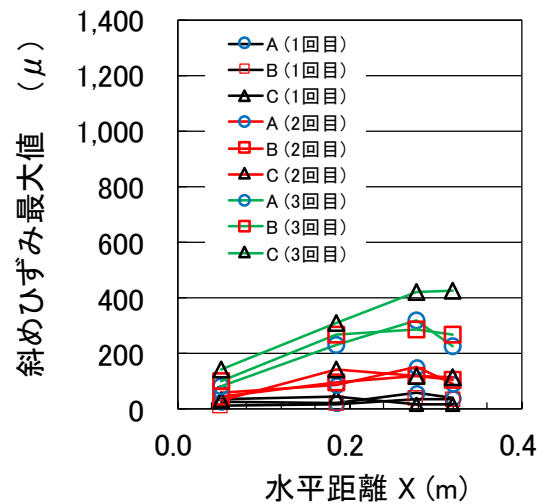
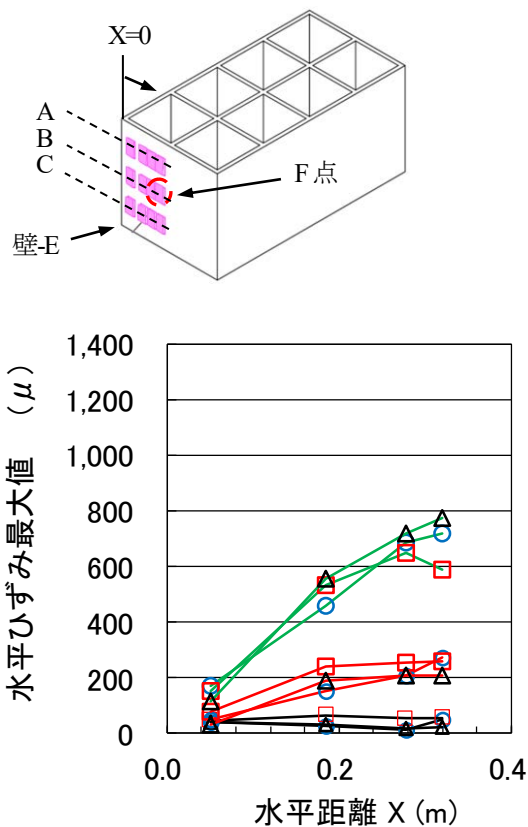


図-34 加振直方向壁(壁-E)の最大ひずみ分布(格子間隔0.4m)

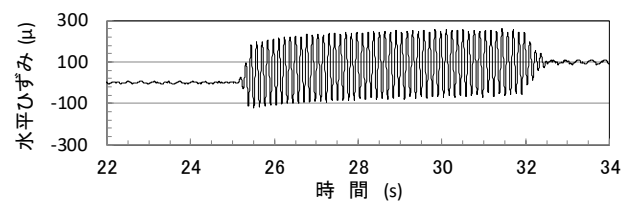


図-35 F点の水平ひずみ時刻歴

(2回目加振, 格子間隔0.4m, GL-0.467m)

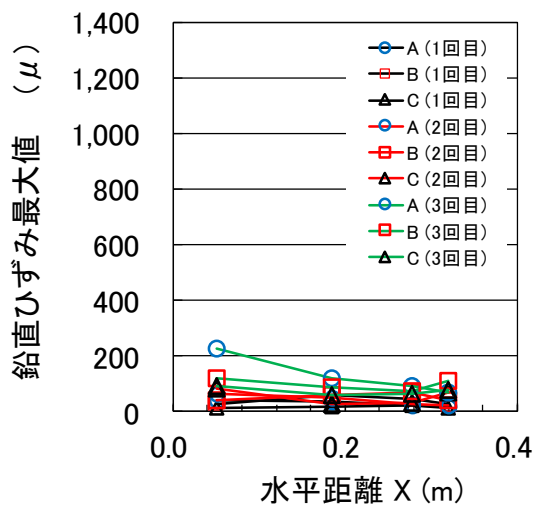


図-36に格子間隔0.4mの両側を格子に囲まれた加振直交方向壁(壁-Fと呼ぶ)の水平曲げひずみ最大値と鉛直曲げひずみ最大値の水平分布を示す。水平曲げひずみ最大値は壁-Eと同様に水平距離が大きく両側に格子がある格子壁交差部に近づくにつれて値が大きくなる傾向が見られる。鉛直曲げひずみ最大値は水平曲げひずみ最大値よりも小さい傾向にあった。格子間隔0.8mの加振直交方向格子壁の壁-Bと壁-Cの水平曲げひずみ最大値が格子壁の交差部側でなく格子壁の中央側でピークが表われていたのに対して、格子間隔0.4mの加振直交方向格子壁の壁-Eと壁-Fでは逆に格子壁の交差部側でピークが表われている。このような逆の傾向が表われた原因として、格子模型と振動台との固定に用いたアングルを、格子模型の加振平行方向側の外周に2本しか設置していなかったことが考えられる。格子間隔0.8mの格子模型底面では格子壁交差部が全て固定されているのに対して、格子間隔0.4mの格子模型底面の格子壁交差部は周辺地盤に接している格子壁交差部だけしか固定されていない。そのため、両側を格子に囲まれた中央の格子壁交差部の動きが大きくなり、水平ひずみ最大値は水平距離が大きく両側に格子がある格子壁交差部に近づくにつれて値が大きくなる傾向が見られたと考えられる。今後、この考察の妥当性について格子模型の固定方法を変えた実験条件での実験

あるいは解析で検証する必要がある。

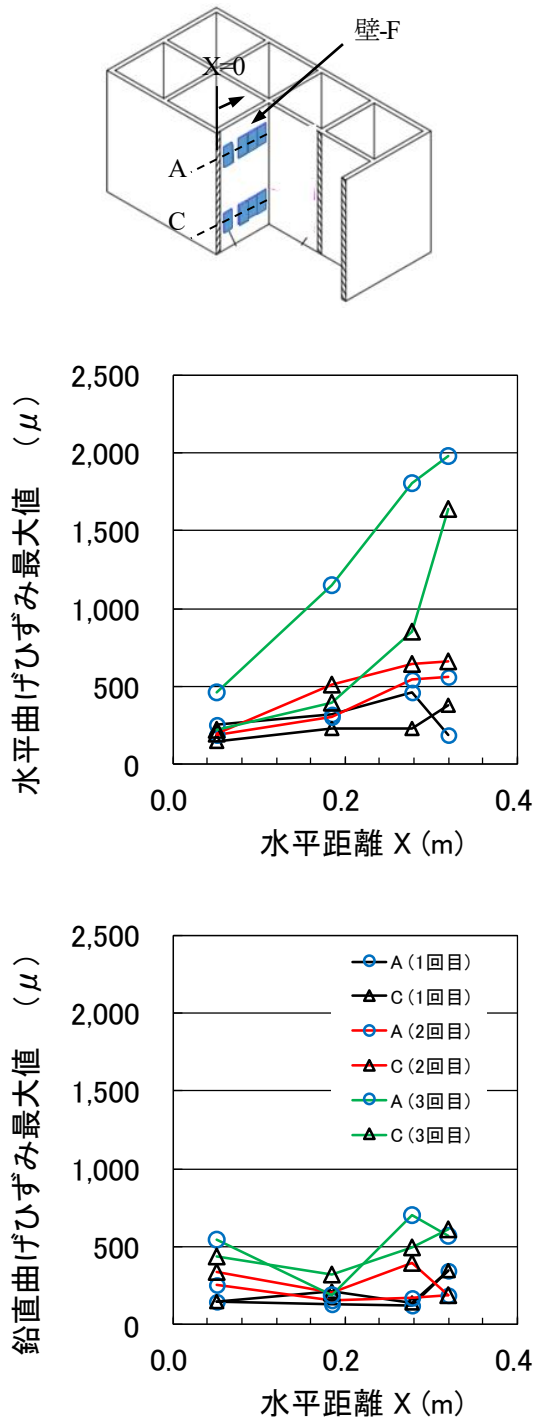


図-36 加振直行方向壁(壁-F)の最大ひずみ分布(格子間隔0.4m)

b) ひずみゲージと光ファイバでの計測結果比較

図-37に示すのは、2回目加振時に光ファイバで計測したひずみが最大値を示した25.49秒時点でのひずみコンターである。コンターは $-250\mu \sim 250\mu$ の範囲で描画している。光ファイバを貼っている方向のひずみを計測しているので、鉛直方向ひずみに比べて水平方向ひずみの方が卓越しているのが分かる。この傾向は図-36に示すひずみゲージ計測で得られた傾向と同じであった。図中の経路1では左側、経路2では右側で水平ひずみの値が大きくなっており、図の表示では水平ひずみのピークが表われる位置が左右逆になっている。これはそれぞれの面の法線方向から見たコンターを描いているためである。格子壁の対応する反対側の面の同じ位置で経路1の水平ひずみと経路2の水平ひずみの符号が逆になっており、水平方向の曲げが発生していることが分かる。

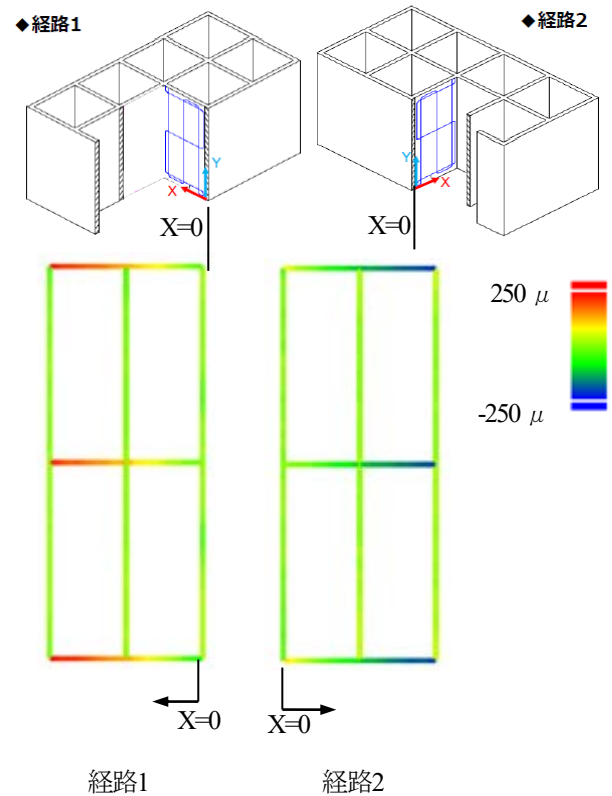


図-37 光ファイバ経路1, 2のひずみコンター(2回目加振)

図-38に経路1，経路2と同じ25.49秒時点での加振平行方向壁の経路3のひずみコンターを示す。コンターは $-20\mu \sim 40\mu$ の範囲で描画されており，経路3に比べて発生ひずみの値が明確に小さい。ひずみゲージで計測した加振平行方向壁-Dのひずみレベルも加振直方向壁の壁-E，壁-Fに比べて小さかったことから，ひずみゲージ計測で得られた傾向と対応している。

図-39に示すのは，G点の光ファイバで計測した2回目加振時の水平ひずみ時刻歴である。水平ひずみの時刻歴波形中には入力地震動に対応した波形が見られず，プラス方向に水平ひずみが蓄積している傾向が得られた。

図-40では，2回目加振時に壁-Dの光ファイバで計測した水平ひずみ最大値と鉛直ひずみ最大値を，ひずみゲージで計測したそれぞれの最大値と比較している。水平ひずみ最大値と鉛直ひずみ最大値ともに，光ファイバでの計測結果はひずみゲージの計測結果に比べて値が小さかった。

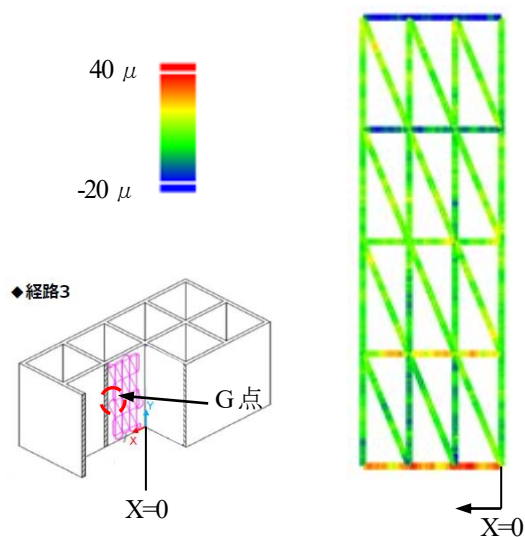


図-38 光ファイバ経路3のひずみコンター(2回目加振)

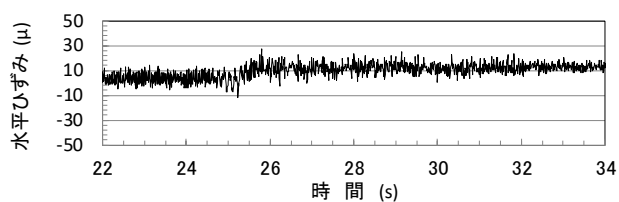


図-39 G点(光ファイバ経路3, GL-0.467m)の水平ひずみ時刻歴(2回目加振)

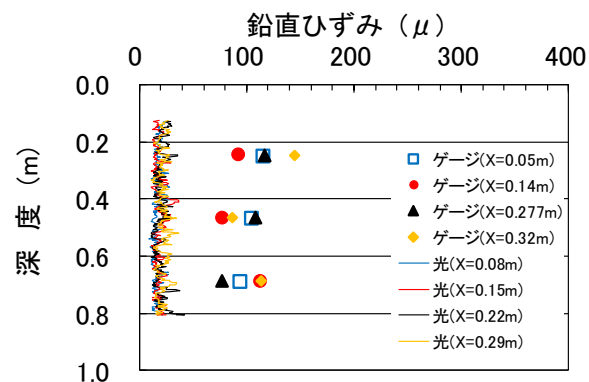
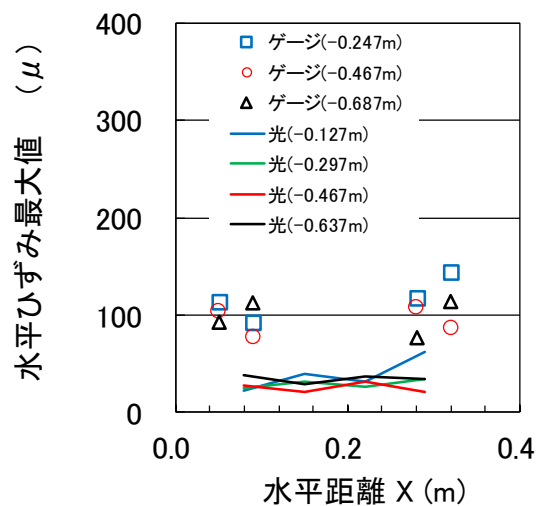
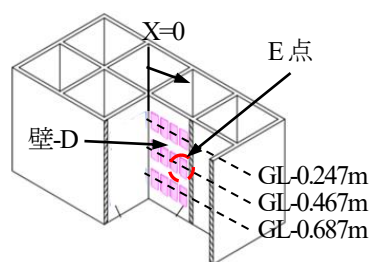


図-40 光ファイバとひずみゲージのひずみ最大値比較(2回目加振, 壁-D)

図-41に25.49秒時点での周辺地盤に接する加振直交方向壁の経路4と経路5の光ファイバで計測したひずみコンターを示す。鉛直ひずみに比べて水平ひずみが卓越している傾向は、経路1、経路2と同じであった。鉛直ひずみに比べて水平ひずみが卓越している傾向は、図-34に示す周辺地盤に接する加振直行方向壁で、ひずみゲージで計測して得られた傾向と同じであった。

図-42に示すのは、経路4のH点で加振2回目に光ファイバで計測した水平ひずみ時刻歴である。水平ひずみ時刻歴の波形は、入力地震動の7.5Hの正弦波の波形に対応している。ひずみゲージで計測したF点の波形で得られた傾向と同じであった。

図-43では、2回目加振時に壁-Eの光ファイバで計測した水平ひずみ最大値と鉛直ひずみ最大値を、ひずみゲージで計測したそれぞれの最大値と比較している。水平ひずみ最大値の光ファイバ計測値とひずみゲージ計測値の対応は良かった。鉛直ひずみについては、ひずみゲージ計測値の方が光ファイバ計測値よりも値が大きい傾向が見られるが、壁-Dで見られたような両計測法による値の差はなく、比較的良い対応が得られていた。

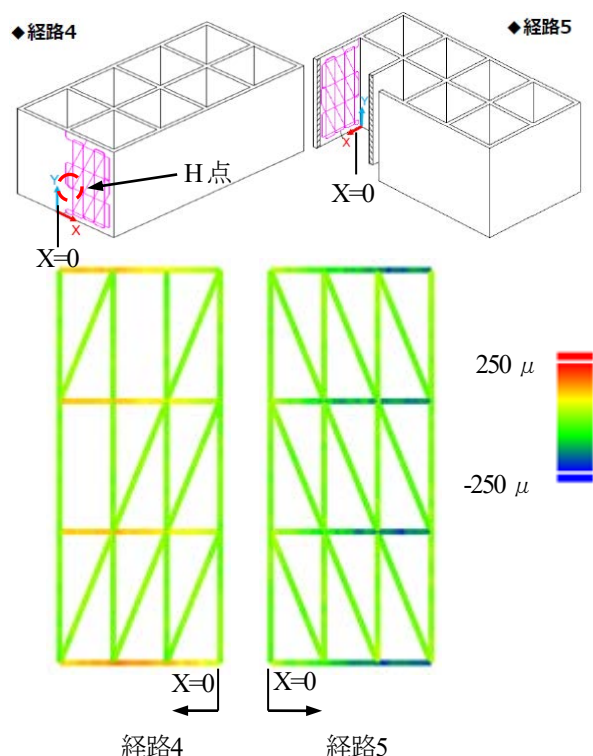


図-41 光ファイバ経路4、5のひずみコンター(2回目加振)

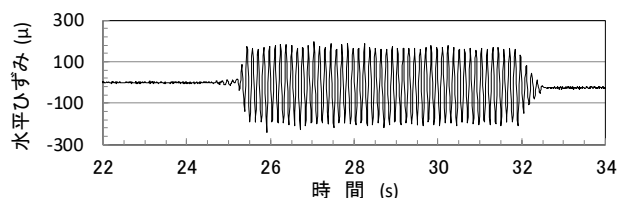


図-42 H点光ファイバ経路4、GL-0.577mの水平ひずみ時刻歴(2回目加振)

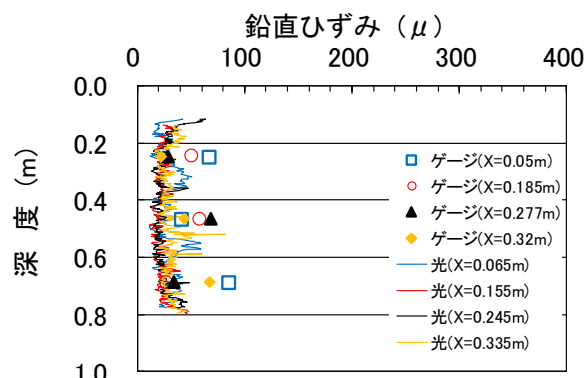
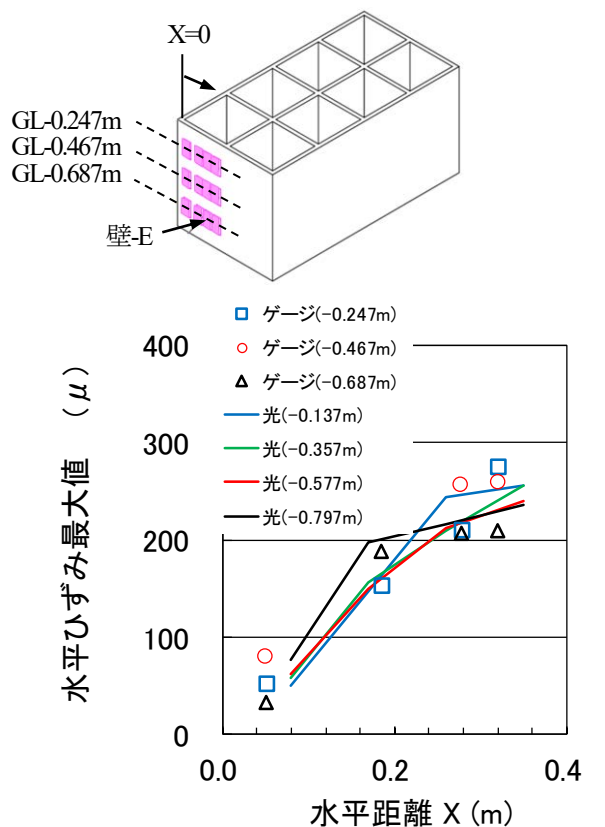


図-43 光ファイバとひずみゲージのひずみ最大値比較(2回目加振、壁-E)

(4) 地表面沈下量の計測

周辺地盤(Line-A), 格子間隔0.8m中央地盤(Line-B)と格子間隔0.4m中央地盤(Line-C)での地表面沈下量時刻歴を図44～図46に示す。図44は1回目加振, 図45は2回目加振, 図46は3回目加振の結果をそれぞれ示している。1回目加振時, 格子間隔0.8m中央地盤での沈下量が一番大きくなっているのは, 格子間隔0.8mでは1回目加振でも全層に近い範囲が液状化していたためである。格子間隔0.4m中央地盤での沈下量と周辺地盤沈下量の差がなかったのは, 格子間隔0.4mでも1回目加振時に地表面付近で液状化が発生していたことが影響していると考えられる。1回目加振時の周辺地盤と格子間隔0.4mの地表面沈下量の最終値はほぼ同じであるが, 発生スピードが異なっている。周辺地盤では加振後も間隙水圧の消散による圧密により地表面沈下が進行しているのに対して, 格子間隔0.4mの地表面では加振中に沈下量の進行が終了している。格子間隔0.4mでは地表面付近で液状化の発生が確認されている。格子内地盤では地表付近まで入力地震動に近い応答が見られたことから, 液状化した地表面付近の地盤が強くせん断されて加振中に周辺地盤よりもお大きな地表面沈下量が発生したと考えられる。

2回目加振時に格子間隔0.8m中央地盤よりも格子間隔0.4m中央地盤の沈下量が大きかったのは, 格子間隔0.8mは1回目ではほぼ全層が液状化していたのに対して, 格子間隔0.4mではほぼ全層が液状化したのは2回目加振であったことから, 液状化発生の履歴の影響を受けたためと考えられる。3回目加振時に格子間隔0.4m中央地盤で加振初期に地表面が隆起しているのは, 地表面付近の液状化発生によって沈下量を計測しているターゲットが傾いた影響である。

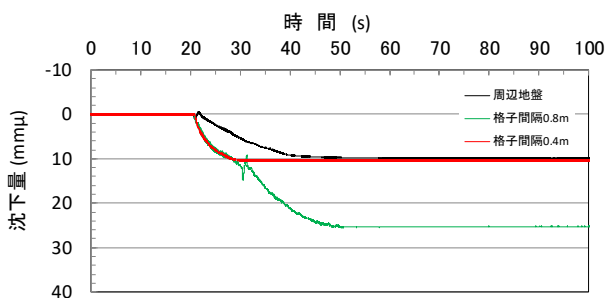


図-44 地表面沈下時刻歴(1回目加振)

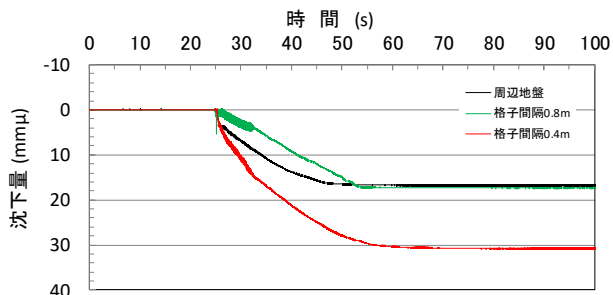


図-45 地表面沈下時刻歴(2回目加振)

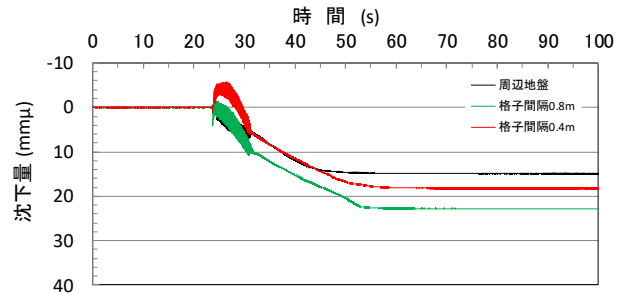


図-46 地表面沈下時刻歴(3回目加振)

図47に振動台で計測した水平加速度最大値と周辺地盤, 格子間隔0.8m中央地盤, 格子間隔0.4m中央地盤での地表面沈下量の関係を示す。図48に示すのは, 振動台で計測した水平加速度最大値と周辺地盤, 格子間隔0.8m中央地盤, 格子間隔0.4m中央地盤での地表面累積沈下量の関係である。累積沈下量が最も小さいのは周辺地盤であった。また, 格子間隔0.8mと格子間隔0.4mで, 2回目加振以降は沈下量に大きな差が見られなかった。今回の実験では格子間隔が狭い格子間隔0.4mでも加振1回目で地表面付近で液状化が発生している。地表面付近で液状化が発生していることが, 格子内地盤地表面の沈下量が周辺地盤地表面沈下量に比べて全体的に大きくなっていた原因と考えられることから, 地表面付近の液状化抑制効果を高めることが, 地表面沈下量を抑制するのに効果的であると考えられる。

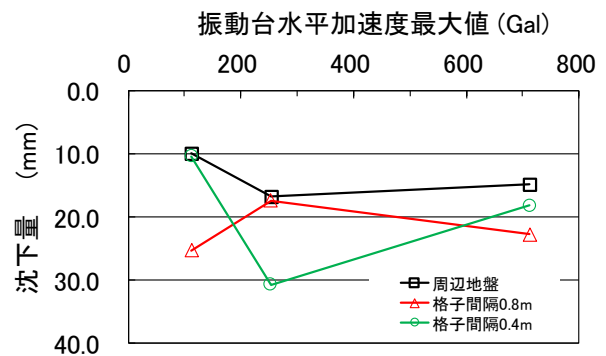


図-47 地表面沈下量と振動台加速度最大値との関係

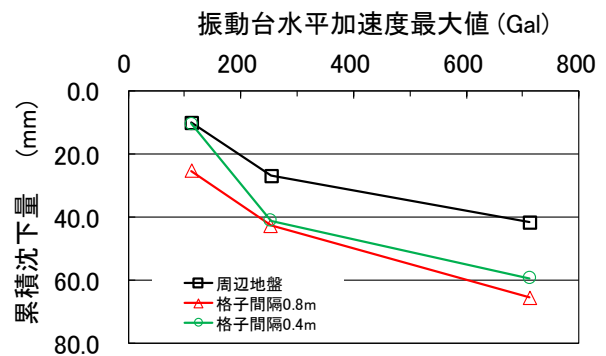


図-48 地表面累積沈下量と振動台加速度最大値との関係

4. まとめ

水中振動台を用いた実験により格子状地盤改良に関する以下の知見が得られた。

(1)液状化抑止効果

格子間隔の狭い格子間隔0.4mの格子状改良地盤の方が、格子間隔0.8mの格子状改良地盤よりも液状化抑止効果が高かった。しかし、格子間隔が狭くても入力最大水平加速度113Galの正弦波50波の加振で地表面付近は部分的に液状化していることから、格子状改良地盤の液状化抑制効果を高めるためには、地表面付近の液状化抑制効果を高めることが効果的である。

(2)格子壁に発生するひずみ

加振平行方向の格子壁については、格子間隔0.8mの場合、水平ひずみ、斜め45度方向ひずみ、鉛直ひずみの順番で発生ひずみが小さくなる傾向が得られた。格子間隔0.4mでは、発生ひずみの大きさに格子間隔0.8mで見られたような明確な傾向は得られなかった。

加振直交方向の格子壁については、格子間隔0.8mの場合、水平ひずみ発生量が鉛直ひずみ発生量に比べて卓越しており、格子壁の中央部で水平ひずみ、鉛直ひずみともに大きくなる傾向が得られた。格子間隔0.4mでも、水平ひずみが鉛直ひずみに比べて卓越する傾向が得られた。しかし、水平ひずみのピークが表われる位置は、格子壁中央部ではなく格子壁交差部の方であった。格子状改良地盤模型底面を全て拘束していれば、格子壁中央部に水平ひずみのピークが表われたと推定されることから、格子壁に発生するひずみの傾向について確認するために今後、実験条件を変えた実験あるいは解析によって更に検証していく必要がある。

光ファイバとひずみゲージでの計測結果は概ね対応していた。

(3)地表面沈下量

格子状改良地盤を用いても地表面付近で液状化が発生すると地表面沈下量を抑止する効果が、無対策に比べて向上しているとは言えない。従って、格子状地盤改良を用いた対策では地表面付近の液状化抑制効果を高めることが、格子内地盤の地表面沈下量抑制に効果的であると考えられる。

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) 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)－格子状改良地盤の液状化抑制効果について－，土質工学研究発表会，pp.1019-1020，1998。
- 5) 津國正一，内田明彦，本多剛，小西一生：格子状地盤改良による住宅沈下量抑制効果に着目した遠心模型振動実験，地盤工学ジャーナル，Vol.9，No.4，pp.761-771，2014。
- 6) Ishii, I., Hiradate, R., Tsukuni, S., Uchida, A., Sawada, S. and Yamauchi, T. 2017 (Publication decision). Design of grid-wall soil improvement to mitigate soil liquefaction damage in residential areas in Urayasu, *Journal of JSCE*.
- 7) 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。
- 8) 大矢陽介，小濱英司，菅野高弘，今井政之，東中邦夫，金田一広，本田剛：空港舗装直下地盤への格子状地盤改良工法の適用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1308，June，2015。
- 9) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，2009。