

# 杭式深層混合処理工法による液状化対策効果

田中智宏<sup>1</sup>・安田進<sup>2</sup>・村沢謙<sup>3</sup>・小西武<sup>4</sup>・内山純一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京電機大学理工学研究科 博士後期課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: tanaka@g.dendai.ac.jp

<sup>2</sup>東京電機大学理工学部建設環境工学科 教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

<sup>3</sup>みらいジオテック株式会社 常務取締役 (〒135-0034 東京都江東区永代1-3-4)

E-mail: y-murasawa@mirai-group.com

<sup>4</sup>みらい建設工業株式会社土木本部技術開発部 副部長 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町2-31-1)

E-mail: t-konishi@mirai-group.com

<sup>5</sup>東京電機大学理工学研究科 修士課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: 02smg02@ed.ccs.dendai.ac.jp

地震時における液状化対策工法の一つとして、ブロック式あるいは格子式に改良体を配置した深層混合処理工法が用いられる。本報告では、経済的で施工性の良い杭式に改良体を配置した場合の液状化対策効果を調べるべく、1G振動台実験を実施した。改良率をいくつか変えて加振し、過剰間隙水圧の挙動を検討した。その結果、改良体のない未対策の場合は加振後すぐに液状化状態に至るのに対し、改良体を配置した場合はすぐには液状化状態に至らなかった。またせん断ひずみについても、未対策の場合と比して、改良体を配置した場合の方が小さくなり、杭式に改良体を配置することでも液状化対策効果があると考えられた。

*Key Words : Liquefaction, shaking table test, earthquake, deep mixing method*

## 1. はじめに

地震時における液状化対策工法として深層混合処理工法が用いられる。その場合、液状化層を全面的に改良し、未改良土を少なくすることで“液状化させない”という考えに基づき、ブロック式や接円式の比較的高い改良率で改良体を配置することが多い。その場合、経済面からは劣位であることはいうまでもない。他には、液状化層を改良体で囲んでしまい、“地震時の地盤のせん断変形や過剰間隙水圧の発生を抑制する”という考え方に基づき、改良率がおおよそ50%程度で、格子式に改良体を配置することも数多く行われている。実際に兵庫県南部地震を経験した護岸近傍の高層建築物は、基礎に格子式に改良体を配置した改良形式であったが、地盤の液状化防止に対し十分に機能したという報告がなされている<sup>1)</sup>。これらの改良形式は改良体同士を一部接合させるため、高い施工技術と監理が要求される。また、配管等の地中構造物を有する既設構造物に対して深層混合処理工法を適用する場合、連続的に改良体を配置するブロック式・接円式・格子式配置で改良することは困難である。そのような場合、改良体

を杭式に配置することで地盤のせん断変形を抑制でき液状化対策として有効ではないかと考えた。本報告では、液状化対策工法として改良体を杭式に配置した場合の効果を検討するために、いくつか改良率を変えた1G振動台実験を行った。

## 2. 実験概要及び方法

図-1に示すように、振動台実験には長さ1200mm、高さ700mm、奥行き450mmの土槽を用いた。この土槽の側壁は、それ自体は1枚の鉄板であるが、下端がヒンジ構造になっており、振動中には地盤がせん断変形しやすいように自由に動くようになっている。また、上端部はロッドで連結するため、左右の側壁は同じ振幅だけ振れるようになっている。改良体の模型として実際に土とセメントを混合したものではなく、外径60mm、高さ510mmの硬質塩化ビニル管に重量調節のため砂利を充填したものを使用した。その両端面には止水加工が施しており、改良体模型内部への水の流入は無い。改良体模型を土槽内へ配置し、その間に豊浦砂を水中落下法で相対密度

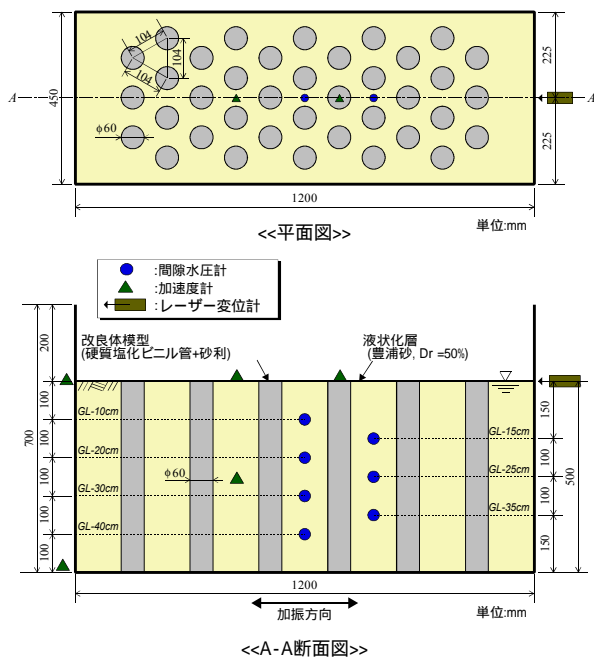


図-1 実験 CASE2 における土槽と計測器配置図

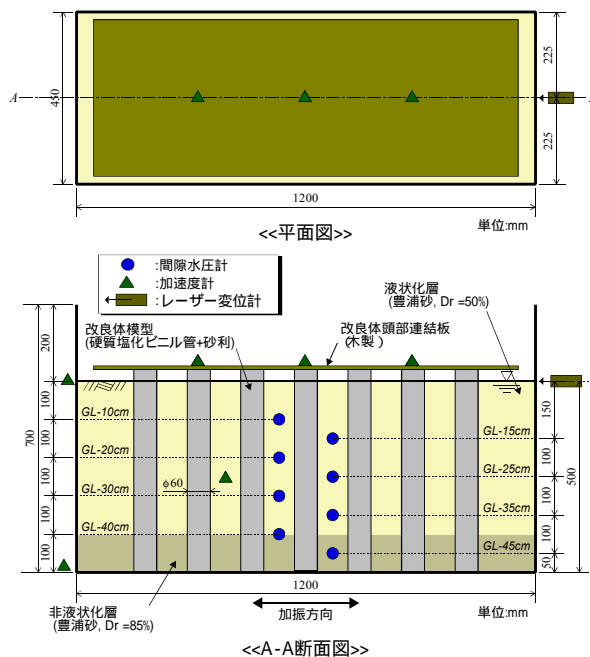


図-2 実験 CASE4 における土槽と計測器配置図

50%になるように高さ500mmまで堆積させ模型地盤を作成した。

図-1には計測器の配置を併せて記してある。所定の高さに間隙水圧計と加速度計を数個設置した。土槽側壁には加速度計とレーザー変位計を設置し、その傾きと変位量を測定した。

改良率による液状化発生状況を調べるため、改良率を0%、30%、50%と変えて実験を行った。また改良率50%の場合には、図-2に示すように土槽底面10cmを相対密度約85%に締め固めた地盤に改良体を設置し、さらにその頭部を連結した条件下で実験を行った。実験ケースを表-1に示す。なお、加振は全ての実験ケースにおいて加速度200gal、振動数3Hzの正弦波を10秒間行った。

表-1 実験ケース

実験 CASE	改良率 (%)	備考
CASE1	0	・未改良
CASE 2	30	・非液状化層無し
CASE 3	50	・非液状化層無し
CASE 4	50*	・非液状化層に根入れ (GL-40 ~ 50cm) ・改良体頭部連結

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 過剰間隙水圧の挙動

ここでは液状化の判定は過剰間隙水圧が初期有効上載圧と等しくなった場合に、地盤が液状化したと判断した。図-3に未改良の実験CASE1における過剰間隙水圧の時刻歴を示す。加振開始後すぐに過剰間隙水圧は上昇しはじめ、およそ1秒後には初期有効上載圧分まで過剰間隙水圧が上がり液状化に至っている。その後加振中は液状化状態を保ち、加振終了後は土槽下部から徐々に過剰間隙水圧が消散している。

改良率50%で改良体の頭部を連結した実験CASE4の過剰間隙水圧の時刻歴を図-4に示す。未改良の実験CASE1と比べて過剰間隙水圧の上昇は緩やかで、間隙水圧計の深度にもよるが、およそ4秒から8秒で

液状化状態に至る。

全実験ケースにおけるGL-25cmとGL-40cmに設置した過剰間隙水圧の時刻歴をそれぞれ図-5, 6に示す。時間軸は加振中の10秒間に行っている。また図中には振動成分を除いた漸増成分を破線で示している。これをみると各深度とも改良体を設置した実験CASE2 ~ 4で負に作用する水圧が発生している。その大きさは改良率が大きくなるほど、深度が深いほど大きくなるように見てとれる。これは加振開始から液状化による剛性低下が生じるまでは、改良体と改良体間の地盤は同一に挙動する。液状化が生じると改良体間の地盤は剛性が低下するため、改良体と改良体間の地盤は各々別々に挙動する。そして改良体と地盤の間に相対的な開きが生じたときに負に作用する水圧が発生していると考えられる。また、改良体頭部を連結した実験CASE4をみると、改良体頭部を連結していない実験CASE2, 3と比べて負に作用する水圧が小さい。改良体は改良体間地盤が液状化して

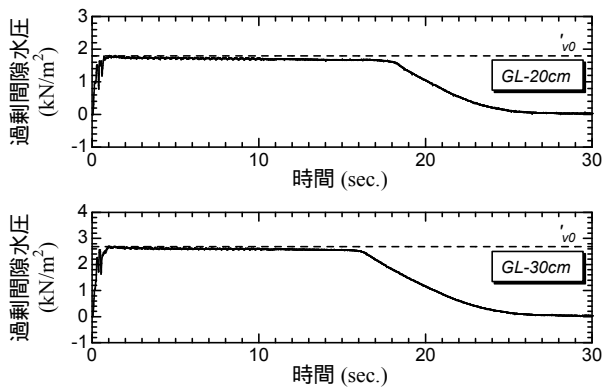


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴 (実験 CASE1)

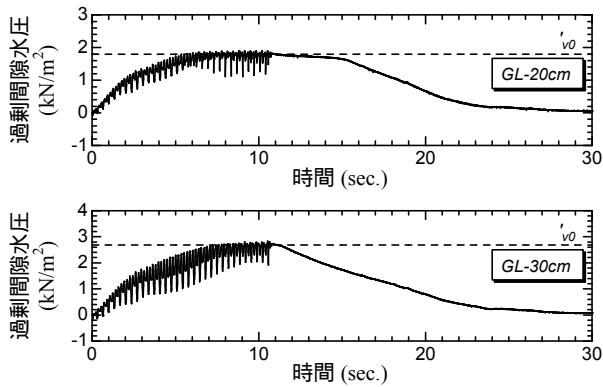


図-4 過剰間隙水圧の時刻歴 (実験 CASE4)

も一体となって挙動し、さらに完全ではないが改良体間地盤を含めてある程度一体となって挙動するためと考えられる。

ここで改良体を配置することによる繰返しせん断応力の増加比率を求めることを試みる。しかし、計測器から実測値は求められなかったため、以下のように求めることとする。まず、過剰間隙水圧時刻歴の漸増成分に着目し、各実験ケースにおける液状化に至るまでの時間と繰返し加振回数を読みとり、表-2にまとめた。現行の設計では液状化安全率 $F_L$ は液状化強度 $R$ と繰返しせん断力比 $L$ で除した値と定義されている。本実験では改良体間の地盤の密度が同じなので、液状化強度比 $R$ が一定と考える。しかし、表-2を見てわかるように実験ケース番号が増加するほど、言い換えると改良体を多く設置するほど液状化する繰返し回数は増加する。そのため繰返しせん断力比 $L$ は減少していると考えられる。したがって、同じ加振動で行った一連の実験では、改良体を多く設置するほど液状化安全率 $F_L$ は増加することになる。

過去に行われた研究で龍岡ら<sup>2)</sup>は非排水条件下で繰返し三軸試験を数多く行い、繰返し応力比 $R_s$ と液状化が発生する繰返し回数 $N_s$ の間に式(1)のような関係を明らかにしている。

$$R_s = a(N_s)^b \quad (1)$$

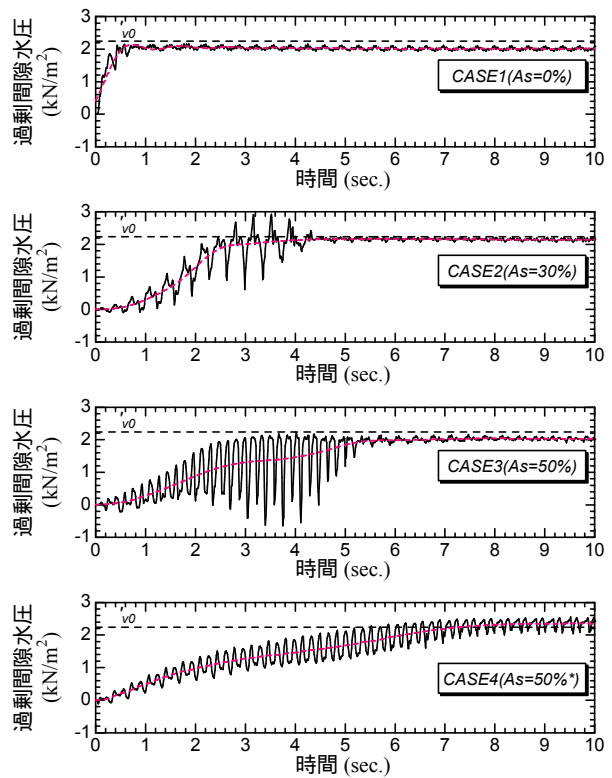


図-5 各実験ケースにおける過剰間隙水圧の時刻歴 (GL-25cm)

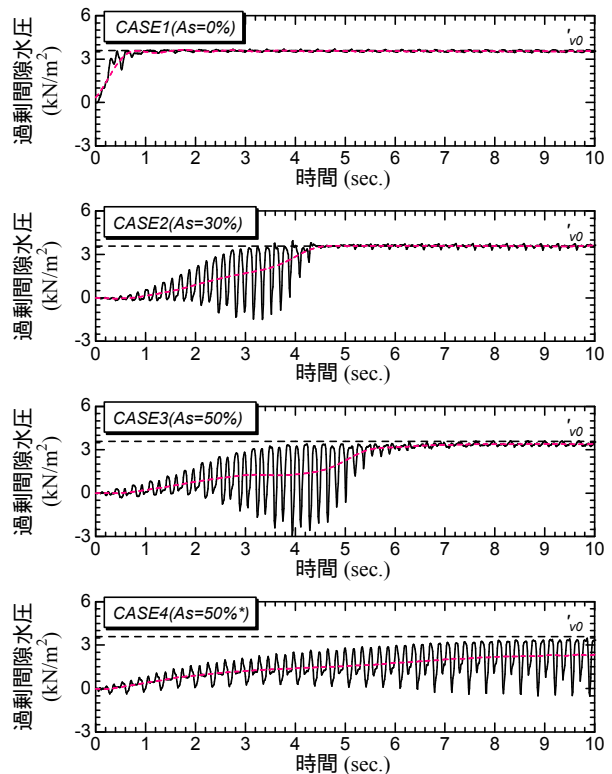


図-6 各実験ケースにおける過剰間隙水圧の時刻歴 (GL-40cm)

ここに $a$ ,  $b$ は定数で、きれいな砂の場合は軸ひずみ両振幅5%で $b$ は-0.17となる。

また、繰返し三軸試験と振動台実験でも以下の関係が成り立つと仮定すると、繰返しせん断応力比 $L$ と振動台実験による液状化が発生する繰返し回数 $N$ は式(2)のような関係で表せる。

$$L = a(N)^b \quad (2)$$

未対策の実験CASE1における $N$ を1.68とする。すると式(3)のような関係が成り立つ。

$$L_N/L_1 = F_{L1}/F_{LN} = (N_N/1.68)^b \quad (3)$$

式(3)の添字1と $N$ はそれぞれ実験CASE1と実験CASE2~4の値であることを示している。繰返しせん断応力比と液状化安全率は逆数の関係になっており、液状化強度 $R$ が一定と考えた場合には繰返しせん断応力比 $L$ の減少が液状化安全率の増加を意味する。式(3)によって求めた改良率と液状化安全率 $F_L$ の増加の関係を図-7に示す。図に示すように改良体を配置することによって液状化安全率は約1.4~1.6倍に増加している。杭式に改良体を配置することでも液状化対策効果があると考えられる。

次に、各実験ケースにおける地盤のせん断ひずみを算出することを試みた。本実験では改良体間の地盤等、局所的なせん断ひずみとは多少異なるが、可動式の土槽側壁の動きからせん断ひずみを求めた。この方法の場合、地盤が液状化に至ると剛性が低下し、土槽側壁の動きに明瞭な違いが認められなかったため、GL-25cmにおける過剰間隙水圧比が0.5に至った時点での土槽側壁の動きに着目した。土槽側壁に取り付けた加速度計より側壁の傾きを求め、地盤のせん断ひずみを算出した。また、レーザー変位計で計測した土槽側壁の変位からもそれを算出した。その結果を図-8に示す。土槽側壁の傾き及び変位から求めたせん断ひずみの値にはばらつきがあるものの、改良率が大きくなるとせん断ひずみが小さくなる傾向にあることが伺える。

#### 4. まとめ

本報告では、液状化対策工法として改良体を杭式に配置した場合の効果を検討するために、いくつか改良率を変えた1G振動台実験を行った。これより以下のことがわかった。

- 1) 未改良地盤では過剰間隙水圧がすぐに上昇するのに対し、改良体を杭式に配置することで過剰間隙水圧は徐々に上昇した。
- 2) 改良体を杭式に配置することで、液状化時の地盤のせん断ひずみを小さくした。改良率が大きいほど、せん断ひずみは小さくなった。
- 3) 改良体を連結して、改良体と改良体間の地盤を一体化することで過剰間隙水圧の上昇やせん断変形の抑制が促進することができる。

表-2 各実験ケースにおける液状化に至る時間と繰返し回数

実験 CASE	改良率 (%)	液状化に至る時間(sec.)	液状化に至る回数, $N$	$F_{L1}/F_{LN} = (N_N/1.68)^b$
CASE1	0	0.56	1.68	1.00
CASE2	30	3.97	11.91	1.40
CASE3	50	5.48	16.44	1.47
CASE4	50*	8.73	26.19	1.59

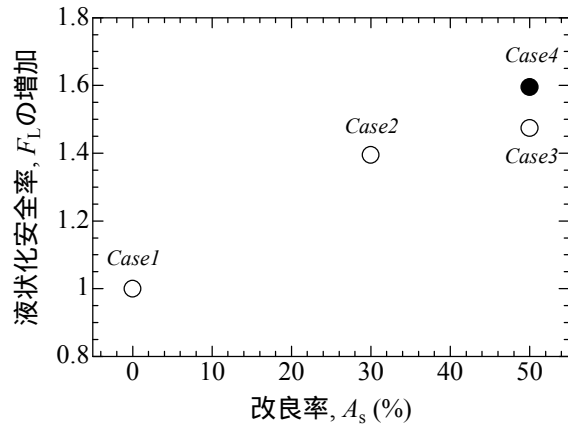


図-7 改良率と液状化安全率の増加の関係

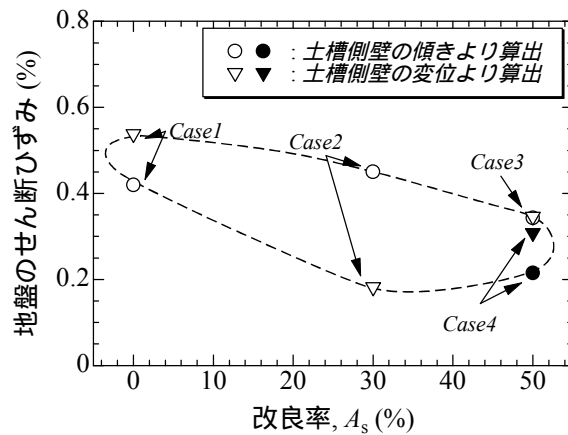


図-8 改良率と地盤のせん断ひずみの関係

#### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，土木構造物の被害原因の分析，pp.119-123，1998.
- 2) Tatsuoka, F., Yasuda, S., Iwasaki, T., Tokida, K.: Normalized dynamic undrained strength of sands subjected to cyclic and random loading, *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 3, pp.1-16, 1980.

(2003. 10. 10 受付)