

液状化・側方流動に対する地中連壁を用いた杭基礎補強

片田敏行¹・末政直晃²・佐藤恭孝³・長野正⁴

¹正会員 工博 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒158 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

²正会員 工博 武蔵工業大学講師 工学部土木工学科 (〒158 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

³学生会員 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒158 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

⁴正会員 ㈱福田組 建設本部 (〒951 新潟県新潟市一番堀通町3番地10)

地震による、砂地盤の液状化に起因する側方流動が原因と見られる杭基礎の被害が多く発生している。その結果、上部構造物にも被害が生じている。そこで、このような杭基礎の被害を防ぐことが、構造物の耐震性を高める上での急務となっている。本研究では、側方流動対策として、杭体周辺に構築した連壁の効果을明らかにするために遠心模型実験を行った。この実験では、せん断土槽内に設置した上層が液状化しやすい緩い砂層、下層が液状化しにくい密な砂層より成る2層飽和砂模型地盤を用いた。この模型地盤に対して杭基礎模型を補強しない場合、連壁で補強した場合について遠心加振実験を行い、その補強効果を調べた。その結果、連壁が非液状化層に根入れされている場合に、その効果が確認された。

Key Words : Centrifuge Modeling Test, Pile Foundations, Diaphragm Walls, Laminated Container, Liquefaction,

1. はじめに

先の兵庫県南部地震において、多くの地域で砂地盤が液状化した。その液状化による側方流動が発生した地域では、その流動により埋設管や杭基礎に被害が生じた¹⁾。杭の被害状況としては、杭頭部分や液状化層と非液状化層の境界面での破損が多く報告されている。このような被害を軽減させるため、液状化及びそれに伴う側方流動現象が、杭基礎に与える影響の解明とその対策を考えることが重要である。現在、液状化地盤内の杭基礎の挙動についての実験は様々な形で行われている^{2),3)}。

本研究でも、側方流動対策として、杭体周辺に連壁を構築する対策を考え、それについて遠心模型実験⁴⁾を行う。この実験では、模型杭を設置したせん断土槽内に、緩い砂層と密な砂層より成る2層の飽和砂模型地盤を作成した。実験は、連壁で杭基礎を補強した場合としない場合、さらに、連壁を液状化しやすい上層の緩い砂層まで構築した場合と、液状化しにくい下層の密な砂層まで構築した場合の計3ケースについて、補強効果を調べる。

2. 実験概要

(1) 実験土槽

図-1に実験に用いたせん断土槽(幅42cm, 奥行き15cm,

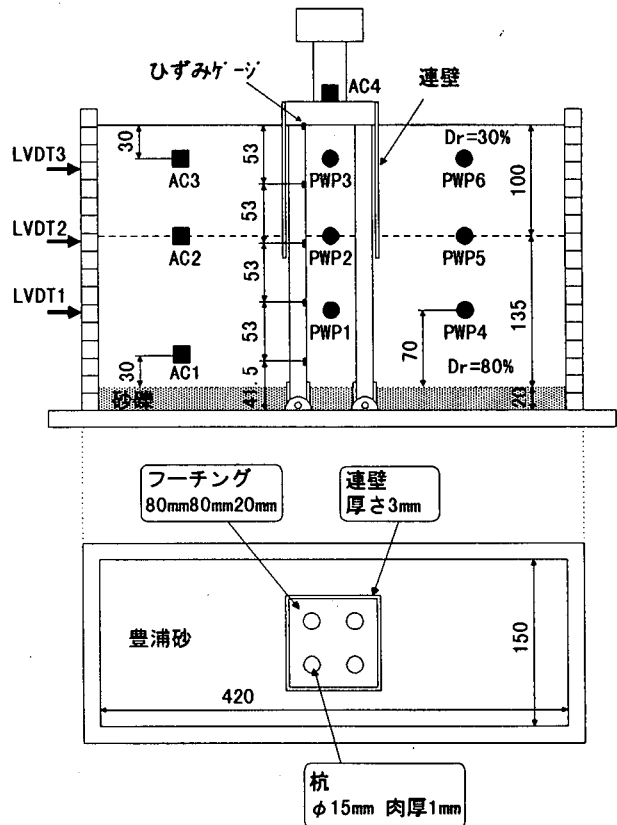


図-1 模型土槽の概略と計器位置

高さ27cm)を示す。このせん断土槽は、厚さ15mmのアルミ製水平枠を17段からなり、上下にベアリングを介することで枠同士の摩擦を低減し、模型地盤が自由にせん断変形をするように考慮されている。

(2) 杭基礎模型及び連壁模型

杭模型は、直径15mm、厚さ1mmの中空アルミ製で、曲げ剛性の相似則より換算すると直径81.3cm、厚さ14mmの鋼管杭を想定したものとなっている。杭内部には、5ヶ所にひずみゲージが張り付けてあり、杭に掛かる外力の測定が可能となっている。この模型杭4本をフーチングに剛結し、群杭としている。フーチング上部には、橋脚などの上部構造物を模擬した1kgfのおもりを設けている。また杭先端は、せん断土槽底部に特殊治具によりヒンジ結合されている。連壁模型は、ステンレス製の厚さ3mmの板でフーチング部分を取り囲むように作成されている。

(3) 模型地盤の作成方法

あらかじめ模型杭を設置したせん断土槽底部に砂利を敷き、その上に相対密度が80%になるように豊浦砂を空中落下法により降らし、厚さ13.5cmの下層を作成する。その後、相対密度約30%の上層(10cm)を作成する。なお、上層は液状化層、下層は非液状化層を模擬している。連壁を埋設する場合は、連壁の膝下部まで地盤を作成した後、連壁を上から装着し、内部に砂を降らせた。地盤内部には、図-1の示す位置に計測器を埋設及び、設置している。その後、模型地盤を真空容器において真空にし(約4時間)、粘性が水の50倍であるシリコンオイルを模型土槽下部より約2日かけて徐々に浸透させ飽和させた。

(4) 実験条件

実験は補強しない場合、液状化層内のみを連壁で補強した場合、非液状化層まで連壁で補強した場合の3ケースについて行った(表-1)。飽和砂地盤は約1°傾斜させて遠心模型実験装置に置き、約50Gの遠心力場で20波の正弦波(100Hz)を1回とした振動を加えて、杭と地盤の挙動を計測した。なお、入力地震動は約20G(水平震度0.4)とした。

表-1 実験ケース

ケース	条件	連壁の長さ	最大入力加速度
1	補強なし地盤	—	±20G
2	短い連壁補強	4cm	±20G
3	長い連壁補強	12cm	±20G

スについて行った(表-1)。飽和砂地盤は約1°傾斜させて遠心模型実験装置に置き、約50Gの遠心力場で20波の正弦波(100Hz)を1回とした振動を加えて、杭と地盤の挙動を計測した。なお、入力地震動は約20G(水平震度0.4)とした。

3. 実験結果

(1) 連壁による補強がない場合

実験結果を図-2に示す。応答加速度(図-2(1))を見ると、緩い砂層である深さ3cmの位置では、最初の4,5波目までは波形が見られるが、その後は応答が見られない。一方、密な砂層である深さ20.5cmの位置では、加振中期までは入力加速度とほぼ同じ正弦波の波形を示している。しかし、その後は上層ほどではないが波形が乱れ、応答加速度が小さくなっている。フーチング部の応答加速度は、地盤の斜面上方向に約20Gの応答加速度が生じているが、地盤の斜面下方向には、最大35Gの応答加速度となり入力加速度よりも大きい。

間隙水圧(図-2(2))の変化を見ると、どの深さでも加振中に急激な上昇が見られる。また、上昇後は一定値となるが、それまでの速さが、浅い位置ほど速い。

杭の曲げモーメント(図-2(3))を見ると、深さ16cmから上の位置では、残留曲げモーメントが生じている。その値は、浅い位置ほど大きい。また、深さ16cmの位置で曲げモーメントの値は大きくなっている。

(2) 短い連壁で杭基礎を囲んだ場合

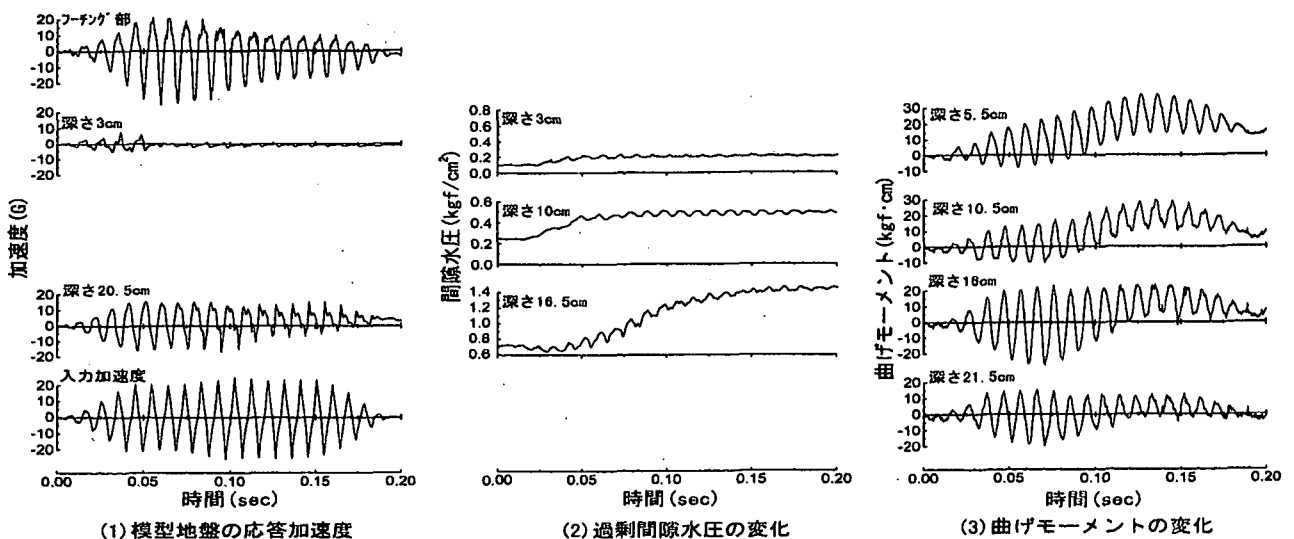


図-2 連壁による補強がない場合の実験結果

実験結果を図-3に示す。応答加速度(図-3(1))と間隙水圧(図-3(2))については、補強のない杭のケースとほぼ同様の結果が見られた。つまり、緩い砂層では、加振初期から波形が見られなくなり、密な砂層では、波形が小さくなる程度である。

杭の曲げモーメント(図-3(3))では、浅い位置ほど大きな残留曲げモーメントが生じている。その値は、補強のない杭のケースより大きい。また振幅の大きさは、上層の緩い砂層では加振後期に大きくなるのに対し、下層の密な砂層では加振初期に大きくなる。さらに、密な砂層において加振後期は、かなり波形に乱れが生じている。

(3) 長い連壁で杭基礎を囲んだ場合

実験結果を図-4に示す。応答加速度(図-4(1))では、前2ケースとは違い、加振後期から波形が見られなくなる。フーチング部の応答加速度は、加振後期の波形に乱れが見られるが、補強のない杭のケースのような大きな振幅の片振れが生じていない。

間隙水圧(図-4(2))は、前2ケースと違ってゆっくり

と上昇し、加振終了後(0.2sec)も一定値まで達しない。

杭の曲げモーメント(図-4(3))では、加振初期は、どの位置においても同様な波形であるが、加振後期は、深さ10.5cm, 16cmという連壁の膝下部近くで、振幅がかなり増大している。さらに、残留モーメントも大きくなっている。一方、地表付近では、加振後期の振幅と残留曲げモーメントがいずれも小さい。

4. 考察

(1) 地盤の液状化性状

補強のない杭のケースと短い連壁のケースは、加速度応答と間隙水圧で、ほぼ同様の変化をしている。緩い砂層は、加振初期に液状化を生じている。また、密な砂層では、加振後期から液状化し始めるが、完全な液状化に至っていない。一方、長い連壁のケースでは、加振後期から完全な液状化に達する。これにより、長い連壁で杭を補強することは、周辺地盤の液状化の速さを遅らせ

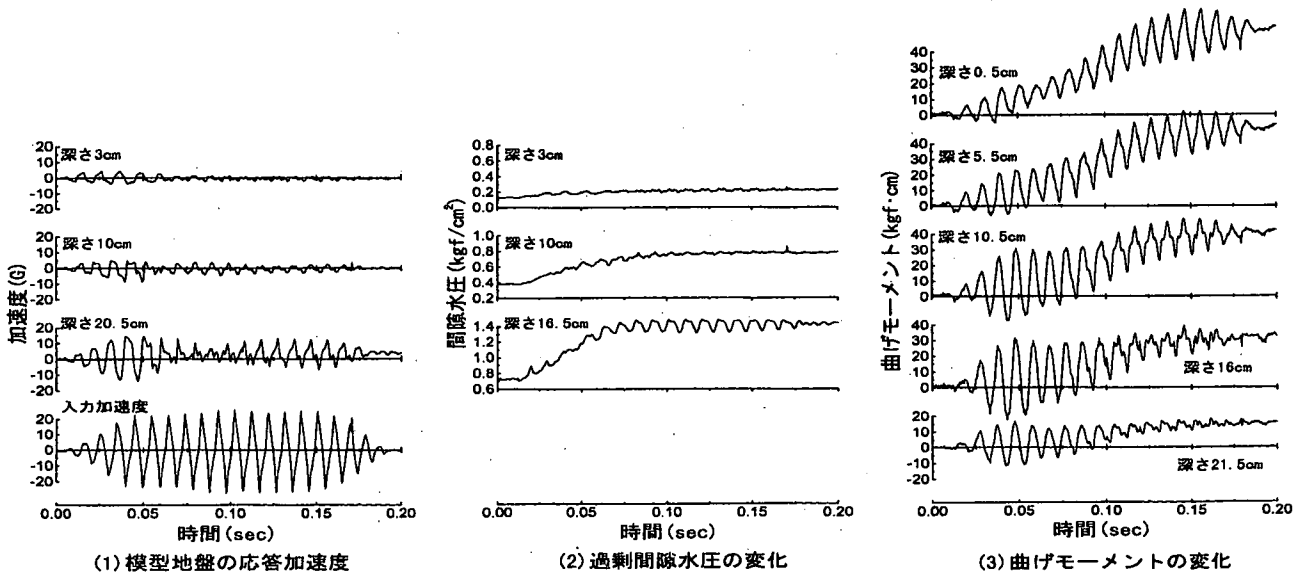


図-3 短い連壁で杭基礎を囲んだ場合の実験結果

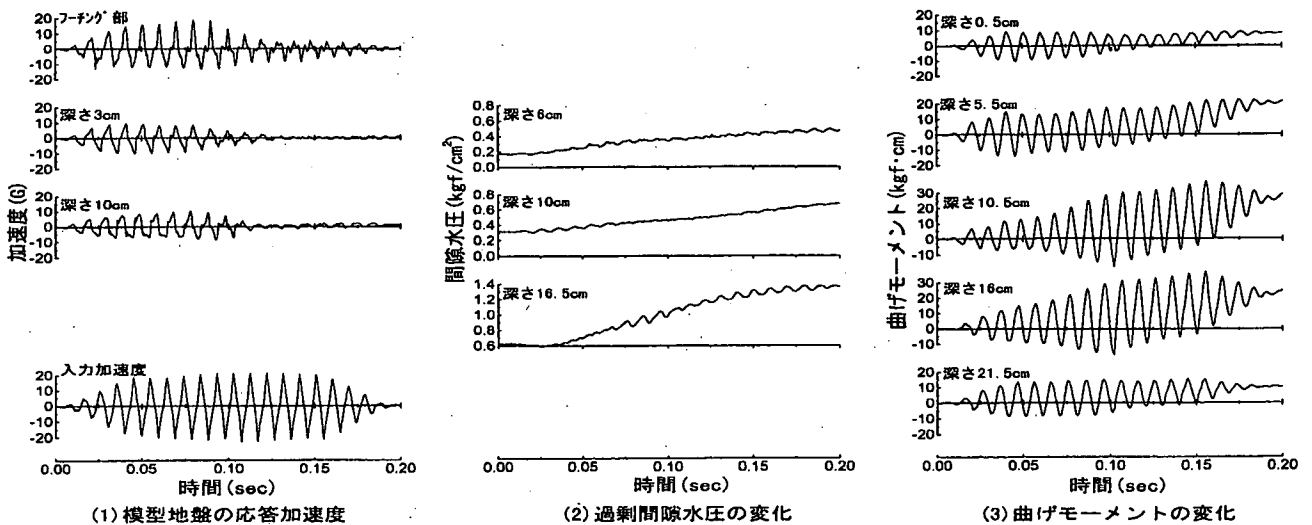


図-4 長い連壁で杭基礎を囲んだ場合の実験結果

る効果があると思われる。

液状化した砂地盤にどの程度の残留変位が生じるかを遠心加振実験により調べた。その結果を図-5に示す。0.05secの時、浅い位置では約1mm程度の変位しか生じていない。一方、0.1secから0.2secでは、大きい残留変位が見られる。浅い位置でも最大約7mmの残留変位が生じている。この値は、実地盤では約35cmの側方流動に相当する。また、深さ16.5cmの位置でも残留変位が生じていることから、最終的にはこの位置から液状化が生じたと思われる。

(2) 曲げモーメントのモード

図-6はある時間における杭の曲げモーメントのモードと地盤の深さの関係を示している。深さ21.5cmを基準としており、実線は地盤が斜面上方向に振れた場合、点線は地盤が斜面下方向に振れた場合としている。短い連壁のケースの曲げモーメント(図-6(1))では、0.05secにおいて両曲げモーメントがほぼ対称な形を示しており、中心の軸もあまり傾きがない。しかし、0.1secから0.15secにかけて、地盤の斜面上方向に振れた場合の曲げモーメントが、逆方向に移動している。さらには、傾きも大きくなってゆき、0.2secには深さ0.5cm部分で約55kgf・cmに達している。これは、緩い砂層の液状化及び側方流動により、連壁全体が力を受け、地盤と共に流動したためと思われる。一方、の長い連壁のケースの曲げモーメント(図-6(2))は、0.05secから0.2secまで中心の軸があまり傾かない。深さ10.5cm、16cmでは、地盤の斜面下方向の曲げモーメントが山として徐々に大きくなっている。これは、考察の(1)で述べたように、密な砂層まで根入れしたはずの連壁の膝下部分も液状化していたためかもしれない。

5. おわりに

本研究では、3ケースの実験を行った。その実験結果から得られた周辺地盤の状況及び、杭の曲げモーメント等から、連壁の補強効果について、次のようなことが言える。まず、非液状化層まで根入れをした長い連壁は、地盤の液状化の速さを遅らせる効果や、杭頭の曲げモーメントを抑える効果がある。一方、液状化層のみを補強した短い連壁は、あまり効果が見られない。連壁膝下部の非液状化層への根入れの長さが補強効果の大きな要因であると思われる。

謝辞：この研究を行うにあたり、労働省産業安全研究所の遠心模型実験装置を使用させていただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

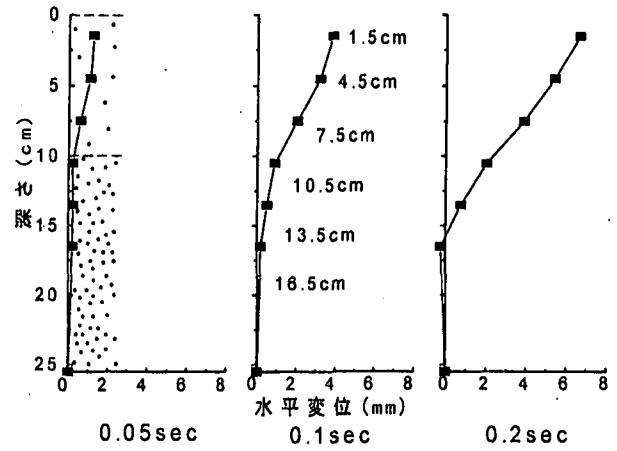
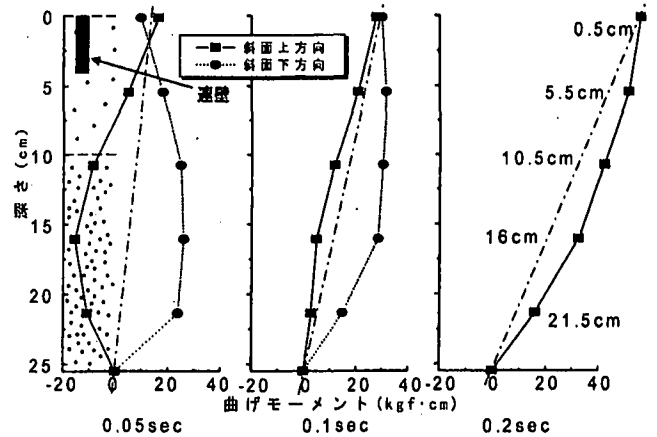
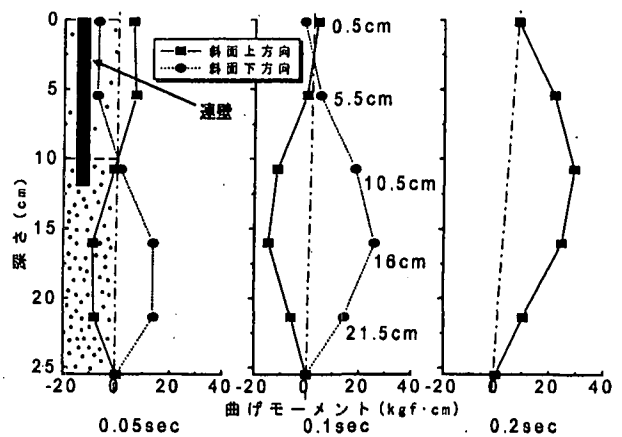


図-5 杭のない模型地盤における残留変形



(1) 短い連壁地盤



(2) 長い連壁地盤

図-6 曲げモーメントのモード変化

- 1) 時松孝次：地盤及び基礎構造から見た建物被害，土と基礎，Vol. 44, No. 2, p14~18, 1996.
- 2) R.Dobry: Centrifuge modeling of liquefaction effects during earthquakes, First international conference geo-technical engineering (IS Tokyo), 14-16ember, Tokyo, Japan .
- 3) 高橋ら：地震時の砂地盤の側方流動と構造物の応答が杭に与える影響，土木学会題51回年次学術講演会概要集，p286~287.
- 4) 講座「遠心模型実験」，土と基礎，Vol. 35, No. 11~Vol. 36, No. 8, 1987~1988年.