

# コンパクションパイルの複合地盤特性を考慮した液状化対策効果の検討

安田 進<sup>1</sup>・山下 丈二<sup>2</sup>・風見 健太郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工学博士 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

<sup>2</sup>学生会員 東京電機大学 理工学研究科建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

サンドコンパクションパイル (SCP) 工法の杭材の代替材料として、礫材を用いる事例が増えてきている。礫材を用いる場合、グラベルドレーン (GD) 工法のような排水効果が期待されることがある。しかし、GD 工法に比べ礫材を用いた SCP 工法 (グラベルコンパクションパイル (GCP) 工法) は周辺地盤を大きく締め固めるため、地盤の透水性が低下し、GD 工法よりも過剰間隙水圧の発生を抑制する効果が小さいと考えられる。このため、本研究では振動台実験を用い、締め固め杭 (礫杭) の排水効果および締め固め地盤の側方拘束圧効果の検討を行なった。更に、比較的深部における液状化抑止効果の程度を把握するため、上載圧を載荷してある程度の深さの地盤を模擬した土槽でも振動台を用いた動的試験を行なった。

**Key Words:** *Liquefaction · Shaking table test · Compaction pile · Gravel · Earthquake*

## 1. はじめに

コンパクションパイル工法は地盤改良工法の一つとして広く用いられてきている。特に日本においてはサンドコンパクションパイル (以下、SCP) 工法が液状化対策としてこれまでに多く施工され、1983年日本海中部地震などの際に対策効果が確かめられてきている。1995年に発生した兵庫県南部地震においても、大変強い地震動を受けたにもかかわらず、SCP工法等により改良されていた地盤では、液状化による被害がほとんどなかった。

そこで、SCP工法の杭材の代替材料として、礫材を用いれば、グラベルドレーン (以下、GD) 工法のような排水効果も期待され、より高レベルでの地震動に対しての液状化を抑制する効果が考えられる。しかし、GD工法に比べて機材を用いた SCP工法 (以下、グラベルコンパクションパイル工法 : GCP工法)

は周辺地盤を大きく締め固めるため、地盤の透水性が低下し、GD工法よりも過剰間隙水圧の発生を抑制する効果が小さいと考えられる。このため、本研究では振動台実験を用い、締め固め杭 (礫杭) の排水効果の検討を行なった。

なお、この GCP工法の比較的深部における液状化抑止効果の程度を把握するため、上載圧を載荷できる土槽を用いた振動台実験を試みた。

## 2. 上載圧を加えない実験

GCP改良地盤が液状化の発生に与える影響をみるため、GCP改良地盤の模型地盤を作製し、通常のように上載圧を加えないで振動台で加振した。用いた土槽は擬似せん断土槽を用い、長さ 1200mm、高さ 700mm、奥行き 450mm である。GCP改良地盤ではせん断変形を軽減する効果と過剰間隙水圧の消散を助長

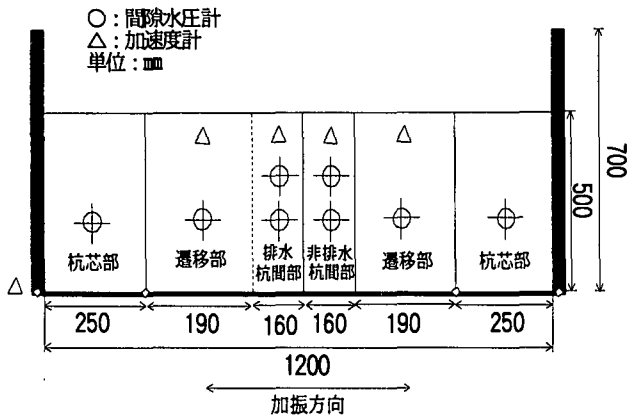


図1 改良地盤の模型

する効果があると考えられたため、これらを再現する2種類のモデル地盤について実験を行った。

サンドコンパクションパイルを施工した後にN値の平面分布を測定した結果によると、杭芯から杭芯に向かってN値が下がっており、きれいな砂では杭芯に比べて杭間のN値は5~10程度小さくなっていることが報告されている。これをモデル化するため、一つ目のモデル地盤は、図1に示すように地盤を杭芯、遷移部、杭間と3つの領域に分ける複合地盤とした。杭間、遷移部は豊浦砂で、コンパクションパイル部は6号碎石で作製した。

これらの密度は現場でのN値に相当するように、杭間  $D_r=70\%$ 、遷移部  $D_r=95\%$ 、杭芯  $\rho_a=14.808\text{kN/m}^3$  の密度によく締め固めた。過剰間隙水圧の伝播に対する検討も行うため、杭間部の中央で左右を仕切り、両側の遷移部との間の排水条件を変えた。二つ目の地盤モデルはコンパクションパイルがない地盤を想定し、杭間部の密度と同じ  $D_r=70\%$  の均一地盤とした。両方のモデルとも3Hzで約500galの台加速度で加振した。

改良地盤における非排水杭間部(図1中右側)と、それに相当する均一地盤の中央部の間隙水圧と加速度の時刻歴を図2・3に示す。両図の間隙水圧をまず比較すると、均一地盤では加振直後、上下層で過剰間隙水圧比が1になり液状化したのに対し、改良地盤では2秒弱あたりで液状化した。加速度を比較すると、均一地盤では加振直後で2000galといった大きな振幅になってその後急激に減少するといった通常の液状化状況となった。これに対し、改良地盤では徐々に加速度が増していき、最終的には1000galほど生じるものの、その振幅の変動は均一地盤ほど激しくはしなかった。このように、改良地盤では杭芯や遷移部に高い剛性の土があるため、せん断変形

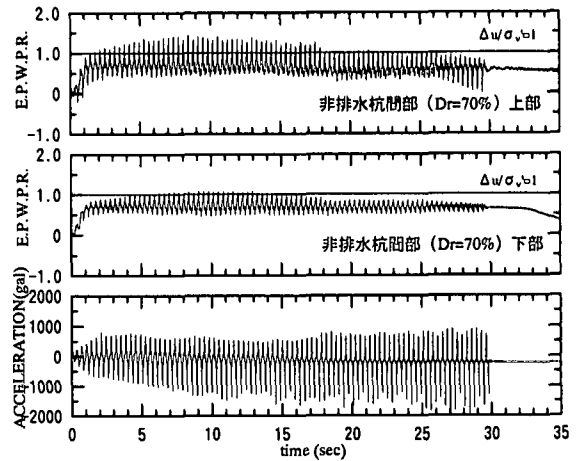


図2 改良地盤、非排水杭間部のデータ

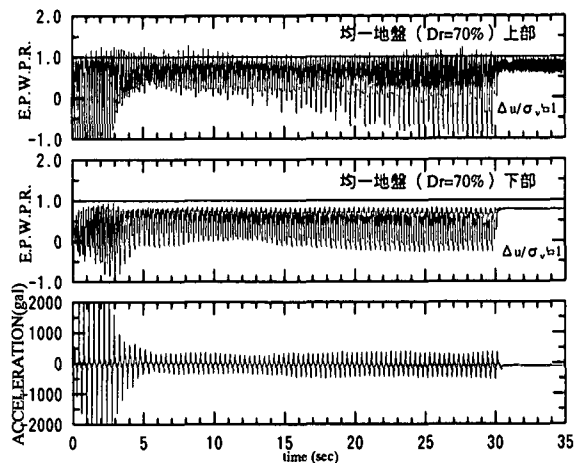


図3 均一地盤、中心部のデータ

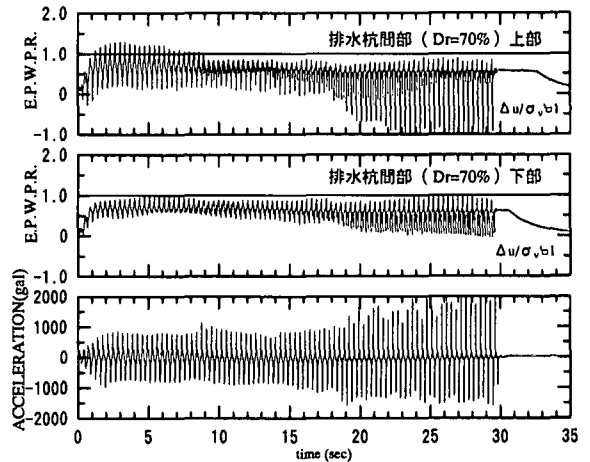


図4 改良地盤、排水杭間部のデータ

を抑制し、液状化しにくくなったものと考えられる。

次に、改良地盤において杭間地盤から遷移部へ排水を許した左側部分の間隙水圧と加速度を図4に示す。非排水条件下では、過剰間隙水圧比が1に達している時間が長く、液状化後の剛性がなかなか回復しないが、排水条件下では過剰間隙水圧水圧比が1に達している時間が短く、液状化後の剛性の回復が非排水部よりも早くしていることがわかる。杭芯や遷移部では杭間に比べて過剰間隙水圧が大きくな

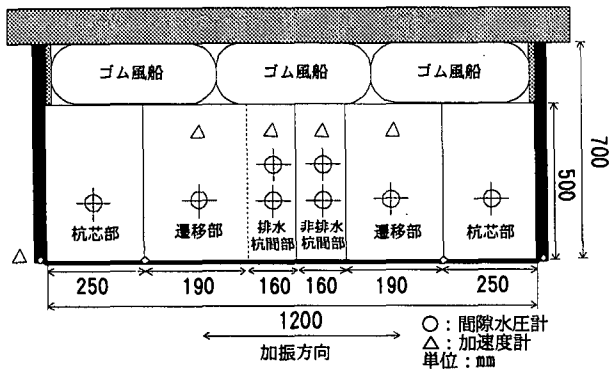


図5 比較的深部を再現した模型地盤

ないため、杭間で上昇する間隙水圧が遷移部や杭芯部に向かって消散したと考えられる。

以上の実験に示されるように、コンパクションパイル打設で複合地盤になると、せん断変形の抑制効果や過剰間隙水圧の水平方向への消散効果により、杭間地盤が液状化しにくくなる効果があるのではないかと考えられる。ただし、ここでは2次元断面のモデルに対して実験しており、実地盤の3次元では効果の程度も違う可能性もあると考えられる。

### 3. 上載圧を加えた実験

#### (1) 上載圧を加える場合と加えない場合の違い

GCP改良地盤の比較的深部での液状化抑止効果を検討するため、図5のようにゴム製のバルーンに空気圧を加えていき上部から9.8kPaの拘束圧をかけ、上載圧を載荷して比較的深部の地盤を模擬した土槽で加振した。比較の対象として、上載圧の無いものを対象にした。(前述の図2・4)比較をするため加速度は同じ値の500galにした。

上載圧を加えた改良地盤における杭間部の間隙水圧と加速度の時刻歴を図6に示す。この間隙水圧を見てみると、過剰間隙水圧比は1に達しておらず、この場合通常は、液状化していないとの判定になる。しかし、実験中の様子やこの波形からみると、液状化していたと思われる。この原因として過剰間隙水圧比を求める際、有効上載圧を実際にかかっている力よりも大きく考慮してしまっていることが考えられる。つまり、バルーンのなんらかの影響により9.8kPaの圧力が地盤内部まで伝わらず4.9kPa程度しか実際にはかかっていないと仮定すると、この場合の過剰間隙水圧比は液状化していると判断できる。つまり、この波形のピーク辺りを液状化したであろうと仮定して、これ以降は考えていく。

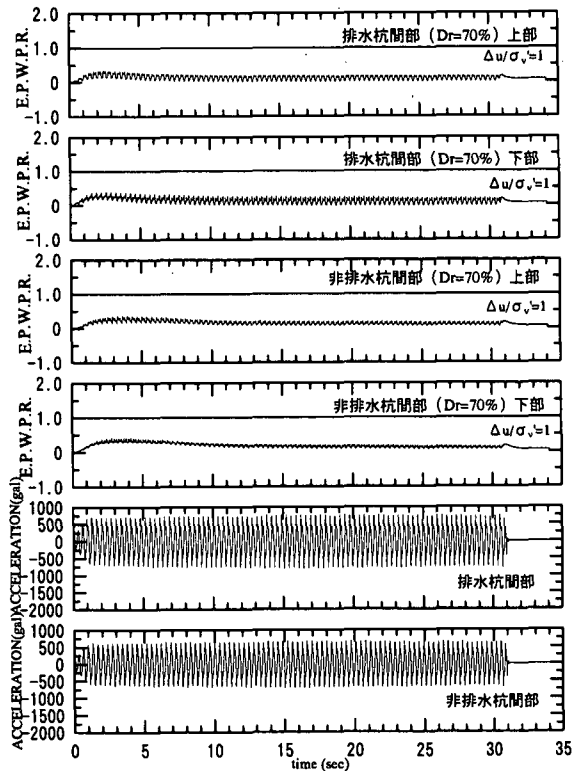


図6 上載圧が有るときの杭間部のデータ

以上のような条件により上載圧無しと、上載圧有りの間隙水圧と加速度の時刻歴である図2・4と図6を比較してみると、上載圧が無い場合は液状化するまでの時間が2秒弱であるのに対し、上載圧がある場合では約3秒で液状化していることがわかる。次に、加速度を比較してみると上載圧が無い場合の方が、上載圧が有る場合よりも乱れていることがわかる。以上のことから上載圧がある場合の方が、同じ台加速度の場合、液状化しにくくなる効果があるのではないかと考えられる。

#### (2) 杭間の距離の違いによる影響

次に、GCP改良地盤の比較的深部での液状化抑止効果が、杭間の距離にどう影響するかを検討するため、図1の杭間の距離を24cmと狭くしたものと、42cmと広くしたものにそれぞれ同じ加速度500galを加え比較した。

杭間を狭くした改良地盤における杭間部と、杭間を広くした杭間部の間隙水圧と加速度の時刻歴を図7・8に示す。両図の間隙水圧を比較してみると、杭間を狭くした方は間隙水圧比がほぼ変化が無いことがわかる。一方、杭間を広くしたものは過剰間隙水圧比が図6と同じぐらいまで上昇していることから液状化していると判断される。また、図6よりも図8の方が早く上昇していることから、杭間部が広

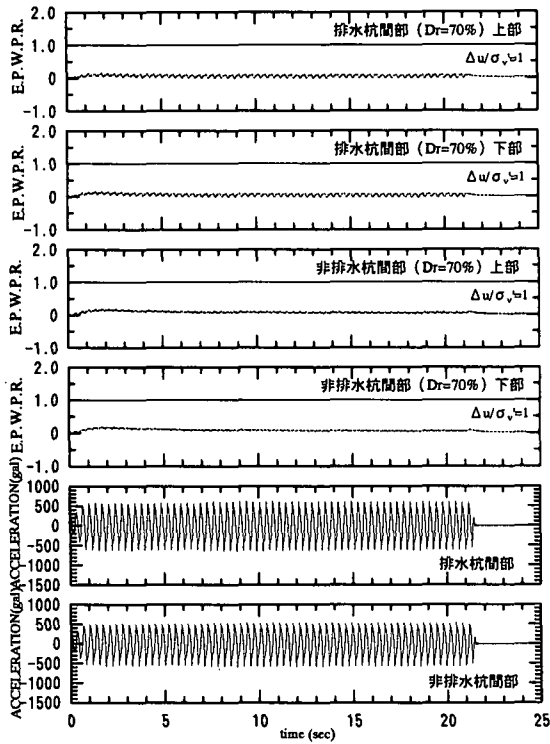


図7 狭くした改良地盤杭間部のデータ

い方が液状化しやすいことがわかった。この原因として、杭間部が狭くなり遷移部が広がると模型地盤全体として剛性が大きくなることが考えられる。

### (3) 過圧密による影響

最後に、過圧密によるGCP改良地盤の影響を検討するため、模型地盤を19.6kPaで30分圧密した後、9.8kPaの上載圧をかけた状態で加振した。

このときの杭間部の間隙水圧と加速度の時刻歴を図9に示す。過剰間隙水圧の波形は、上述してきたものと比較すると約2秒弱で液状化しそうになっているのがわかる。しかし、その後すぐに下降し、剛性がすぐに回復しているのがわかる。このことから、一度過圧密することにより、地盤全体の剛性が大きくなり液状化しにくくなる影響があることがわかった。

## 4. 結論

以上のような振動台実験から次のようなことがわかった。

①地盤改良することで剛性が増し、地盤全体のせん断変形が抑制される。また、杭間で発生する過剰間隙水圧も水平方向に消散し易くなり、液状化しにくくなる効果があると思われる。よって、同密度の地

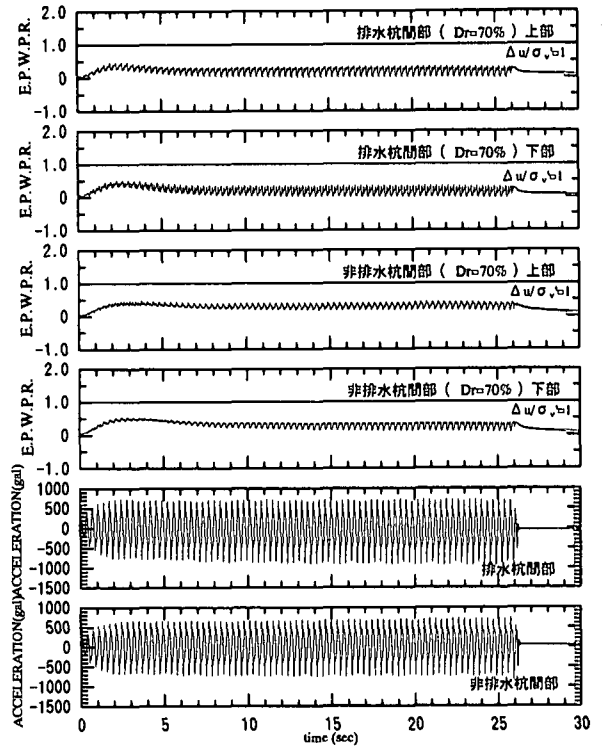


図8 広くした改良地盤杭間部のデータ

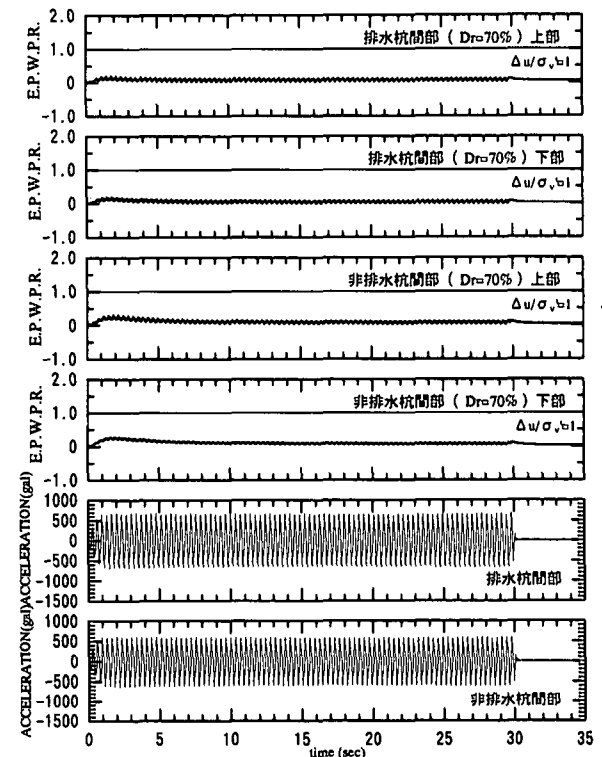


図9 圧密した改良地盤杭間部のデータ

盤でも未改良と改良では以上のような影響効果があるため、改良地盤での剛性を過小評価している恐れがある。

②上載圧をかけることにより、液状化しにくくなった。また、上載圧をかけた状態でも、杭間の距離や過圧密は、地盤の剛性に大きく影響していることがわかった。