

(96) サンドコンパクションパイルによる地盤改良の効率化と液状化防止効果

若築建設(株)                   ○兵頭 武志  
 熊本大学工学部               秋吉 卓  
 八代工業高等専門学校       瀧田 邦彦  
 熊本大学工学部               松本 英敏

1. はじめに

サンドコンパクションパイル(以下、SCP)工法等の振動締固め地盤改良工法が液状化防止に有効であることはよく知られている。しかし、都市部での施工については、振動による近接構造物への影響が無視できず、振動を低減する必要があると考えられる。すでにSCPの高振動数かつ小荷重での締固めによる試みもいくつかあるが<sup>1)・2)</sup>、著者らは簡易な振動実験により得た飽和砂地盤の振動数特性を、著者らが開発した波動累積プログラムWAP3<sup>3)</sup>に適用してSCPの振動締固めプロセスの効率化を図り、液状化解析についてはBiotの多孔質媒体理論による有効応力解析プログラムNUW2<sup>4)</sup>で行うことにより地盤改良評価システムを構築している<sup>5)</sup>。今回の研究では、SCP以外の工法(グラベルドレーン(GDP)、締固めグラベルドレーン(GCP))を交えた模型振動台実験を行って効果の比較を行い、また、いくつかの現場施工例をとおして改良地盤の液状化性能と本解析システムとの適合性について考察を行った。

2. 飽和砂地盤の振動数特性

飽和砂地盤の振動数特性を調べるために図-1に示す装置を用いて実験を行った。この装置は振動台の上にアクリル製の円筒形砂槽(高さ800mm、内径80mm、肉厚7mm)を取り付けて、その中に水中落下法によりゆる詰め砂地盤を層厚300mm作成したものである。試料砂の物性値は表-1のとおりである。地表面に上載圧として重錘を載荷したのち、振動台により砂槽を鉛直方向に正弦加振して、その際の砂面の沈下状況を砂槽天端に取り付けた沈下計により計測した。以下、この実験を便宜的にe(間隙比)-Nn(加振回数)実験と呼ぶことにする。

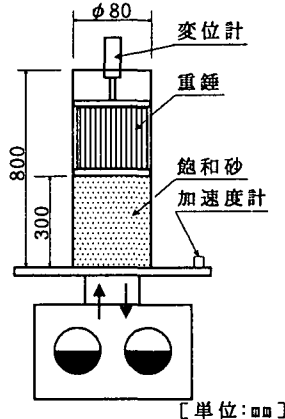


図-1 e-N<sub>n</sub>実験装置

表-1 試料砂の物性値

土粒子密度(tf/m <sup>3</sup> )	2.862
最大粒径(mm)	2.0
最大間隙比	1.007
最小間隙比	0.666
均等係数	2.33

表-2 試料碎石物性値

土粒子密度(tf/m <sup>3</sup> )	2.981
最大粒径(mm)	16.0

図-2は、加振回数と砂面沈下量から計算される間隙比との関係をプロットした一例を示しており、これらの実験結果をもとに次に示す近似式を仮定し、振動締固めを評価することにした。

$$e = (e_0 - e_{min}) \cdot \exp(-Z) + e_{min}$$

$$Z = ae^{0.75} N_n$$

ここに、e<sub>0</sub> : 初期間隙比、e<sub>min</sub> : 最小間隙比、e : ひず

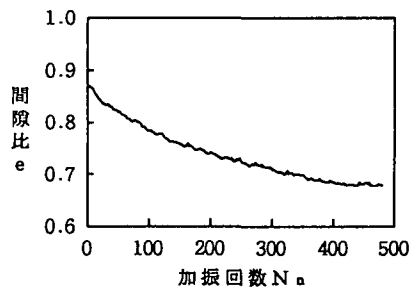


図-2 e-N<sub>n</sub>曲線

み、 $a$  :  $e - N_n$ 実験による回帰係数、 $N_n$  : 加振回数。

振動数をいくつか変化させて実験を行った結果、回帰係数と振動数の間に図-3に示すような上に凸の関係が得られ、この図から振動数が20Hz付近で回帰係数が最大値を示すことがわかった。回帰係数は、上式より分かるとおり、締め固まりやすさの度合いを表す係数であるから、本実験で用いた試料砂においては振動数20Hzが最も効率よく締め固まることが明らかとなった。

### 3. 振動台による液状化実験概要

#### (1) 実験概要

図-4に示すような、加振方向に可動側板を有する砂槽を用い、3種類の改良工法（SCP、GCP、GDP）についてそれぞれ模型振動台実験を行い、各工法ごとの液状化性能を調べた。中詰材については、砂は表-1と同じものを、また、グラベルドレーン用の碎石は表-2に示すものを使用した。水中落下法により作成した層厚800mm、相対密度 $D_r \approx 20\%$ のゆるい飽和砂地盤に、内径70mm、長さ900mmの鋼製ケーシングパイプを正方形配置で深さ500mmまで押し込み、それぞれの工法と同じ打設手順でサンドパイル、またはグラベルパイルを16本造成した。砂槽加振時の挙動を調べるために、砂地盤内に図中に示す位置に水圧計、加速度計を配置し、加振に伴う過剰間隙水圧および応答加速度の経時変化を計測することにした。振動台の加振条件は、振動数5Hz、加振時間20秒、加速度100galの正弦加振である。また、杭間の強度変化は、小型の静的簡易コーン貫入試験機により測定されるコーン貫入抵抗値 $q_c$ より換算して評価することにした。

#### (2) せん断弾性係数の比較

振動締め固め解析プログラムWAP3はケーシングの圧入効果と振動締め固め効果を評価できるので、これを用いる。杭長500mm、杭間隔200mm、振動締め固め加振力18kgfでSCP改良した場合の実験結果（ $q_c$ より得られる換算値、以下実験値と呼ぶ）と解析結果をプロットすると図-5が得られた。改良後の地盤について液状化解析を行う都合上、以下において地盤剛性はせん断弾性係数 $G$ で評価することにする。実験値と解析値を比較すると、ケーシングの圧入および振動によるせん断弾性係数の増加傾向はよく対応していることがわかる。

#### (3) 液状化評価

振動台による液状化実験結果を、過剰間隙水圧比と杭間比（杭間隔 $L$ と杭径 $\phi$ の比）の関係でまとめると図-6が得られた。水圧測定箇所は砂槽中央部の杭間で、深さ300mmの位置で

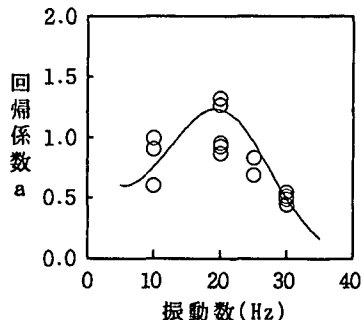


図-3 振動数と回帰係数 a の関係

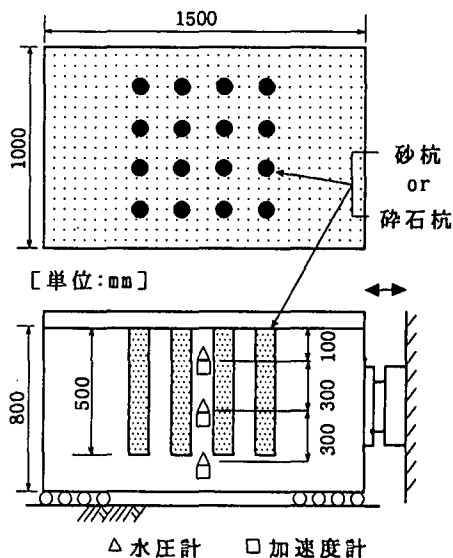


図-4 実験砂槽概要

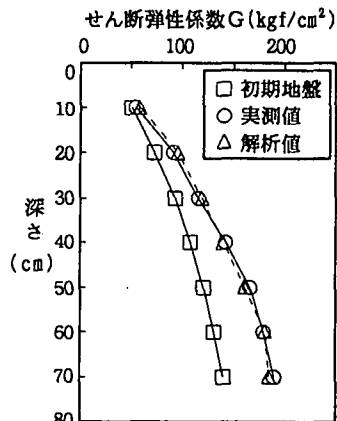


図-5 実験結果と解析結果の比較

ある。工法別に観察すると、最も液状化しやすいのはSCPの締固め加振力18kgfのケースであった。これはSCPの中詰材に周辺地盤と同じ試料砂を用いているため、ドレーン効果が発揮できず、また、締固め加振力が小さいことから、周辺地盤のせん断強度があまり改良されなかったためと考えられる。したがって、同じ締固め加振力でも、ドレーン効果を期待できるGCP工法では過剰間隙水圧が十分抑えられており、一方、締固め加振力を大きくしたSCP工法においては周辺地盤の改良度が比較的大きいため、GCP工法と同程度の液状化抑止効果を発揮している。

図-7は、液状化実験と同じ条件のもとで、NUW2を用いて解析した結果を、図-6と同様に過剰間隙水圧比と杭間比の関係でまとめたものである。同図には実験で行えなかったケースについても、WAP3による改良後のせん断弾性係数を用いて液状化解析を行っているが、図-6と比較するとよく対応しているようすが見て取れる。

#### 4. 実地盤モデルによる解析結果

実地盤モデルを用いて解析した各工法ごとの液状化対策効果について考察する。図-8は、締固め効果について解析した結果を示しており、SCPおよびGCP工法の締固め加振条件は、加振力60.4tonf、加振振動数9.3Hz、1ステップごとの加振時間は60秒で、全工法において杭間距離2.0mの正方形配置としている。GDP工法は振動締固め効果はほとんど無視できるので、杭間のせん断剛性は初期地盤と同じ値としている。

本研究の目的の一つであるSCPの高振動数、小荷重による振動締固めの優位性を検討するため、図-1のような振動台実験を行って飽和砂の振動数特性を調べた結果、締固め振動数が20Hzの場合が最も効率的であることは前述したとおりである。そこで、この結果から得られた振動数特性を実施工上でも適用できるものとし、図-8の初期地盤条件のもとで締固め加振力および加振回数（加振時間）を一定として、締固め振動数のみを変化させてWAP3で解析した結果、図-9が得られた。同図において、実施工上で一般に使用されるパイロハンマの締固め振動数約10Hzの場合の結果と、e-Nn実験から得られた最適加振振動数20Hzの場合の結果とを比較すると、深さ3mで浅では両者の違いは見られないが、3mで深になると大きいところで20%程度後の方が効率よく締め固まることがわかる。したがって、締固め振動数を変化させることによる効率化を図り、その分締固め加振力を低減することによって、経済性の面でも優位であることが言える。

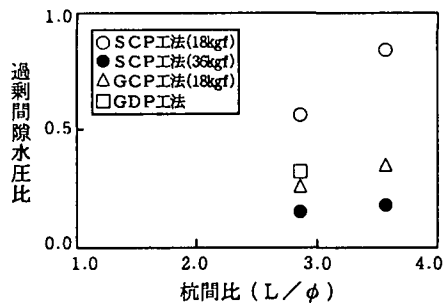


図-6 過剰間隙水圧比と杭間比の関係（実験）

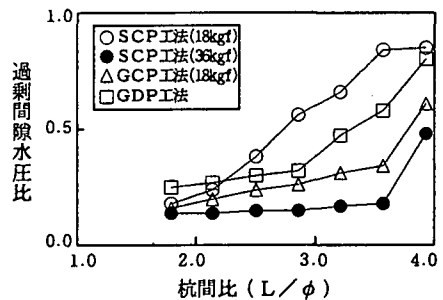


図-7 過剰間隙水圧比と杭間比の関係（解析）

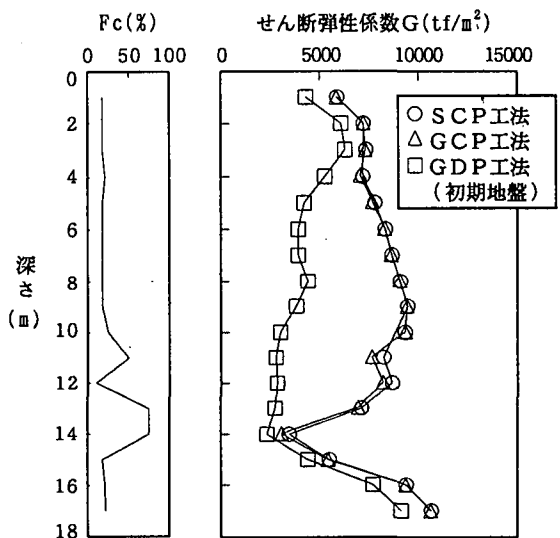


図-8 改良後のせん断弾性係数の分布

図-8の結果を用いて、NUW2による液状化解析を行うと図-10に示す過剰間隙水圧比の時刻歴が得られた。なお、基盤入力加速度はEl-Centro地震波形のN-S成分を最大130および200galに調整し、10秒間入力している。同図よりSCP工法とGDP工法は、GDP工法や無対策に比べて水圧の上昇は抑えられており、また、両者とも同程度の過剰間隙水圧比で推移していることがわかる。深さ別に見ると、8m地点よりも12m地点の方が過剰間隙水圧が上昇しにくく、細粒分含有率の分布と上載圧の大小の影響が過剰間隙水圧の上昇に大きく影響していると言える。

### 5. おわりに

今回の研究により明らかにされたことは以下のとおりである。

- ① 振動締固めにおける加振振動数の影響を円筒砂槽を用いた振動台実験により調べた結果、他の条件を一定とした場合、実施工上で用いられている加振振動数よりも高振動数（今回の実験では約20Hz）で加振する方が効率的であり、小荷重で施工できるため、より経済的である。
- ② 振動台による室内液状化実験を行った結果、締固め加振力が小さい場合には、グラベルパイルによるドレーン効果が顕著であるが、加振力がある程度大きくなると、周辺地盤への振動締固め効果が顕著に現れる。
- ③ SCP、GCP、GDP工法の液状化抑制効果を実地盤モデルでシミュレートして解析した結果、一定の杭間距離・杭径・杭長の条件下では、SCPとGCPはGDPに比べ液状化抑止効果が高く、かつ、両者は同程度の効果がある。

#### 【参考文献】

- 1) 河本・他4名：高周波小径サンドコンパクションパイル工法の施工結果，第27回土質工学研究発表会講演集，pp.2153-2156，1992。
- 2) 高橋，小屋町，仁田尾，重野：高周波小口径サンドコンパクションパイル工法の適用，土と基礎，42-42-4(435)，pp.45-48，1994。
- 3) 秋吉卓，瀧田邦彦，松本英敏，兵頭武志，方火浪：サンドコンパクションパイル工法による地盤剛性改良の動的評価について，土木構造・材料論文集，第8号，pp.51-60，1992。
- 4) T. Akiyoshi, K. Fuchida, H. Matsumoto, T. Hyodo and H. L. Fang, Soil Dyn. and Earthq. Eng. Vol. 32, NO. 5, pp. 299-307, 1993.
- 5) 兵頭武志，秋吉卓，瀧田邦彦，松本英敏，方火浪：SCPによる地盤改良評価システムの開発，第29回土質工学研究発表会講演集，pp.2131-2134，1994。

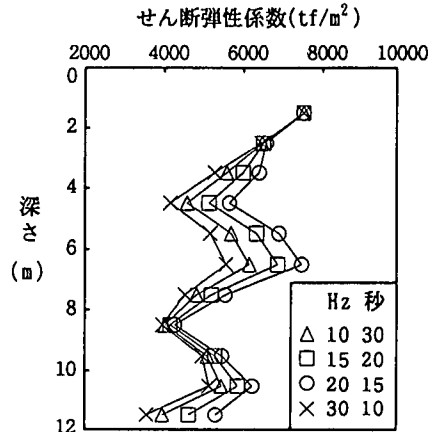


図-9 振動数と加振時間の効果比較

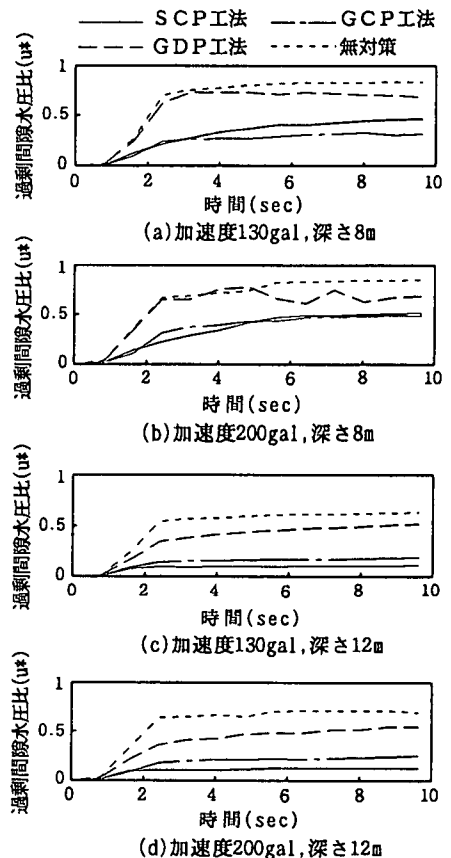


図-10 施工別の過剰間隙水圧比の時刻歴