

# 水平振動を利用した地盤改良工法 (MVCP 工法) の 締固め改良機構に関する実験研究

平 間 邦 興      松 本      伸  
早 洩 敬 太 郎

## Experimental Study on Compaction Mechanism of Ground Improvement Method (MVCP Method) Making Use of Horizontal Vibration

Kunioki Hirama      Shin Matsumoto  
Keitaro Hayabuchi

### Abstract

The MVCP method which provides horizontal-torsional vibrations to sand layers has been developed as a liquefaction countermeasure. This method makes use of the dynamic characteristics of the sand shown in the previous report<sup>1)</sup>. However, in the present situation, the resistance to liquefaction of the improved sand layer cannot be measured directly in situ, and the effectiveness of providing horizontal-torsional vibrations in addition to vertical vibration to sand layers cannot be clearly shown.

Vibration table tests were thus carried out on the sand layer which had been compacted by vertical and horizontal-torsional vibrations using a miniature vibrohammer. As a result, the layer improved by vertical and horizontal-torsional vibrations were found to need 30 to 60 gal greater acceleration than that improved by vertical vibrations only, and increase of resistance to liquefaction of about 25 to 50 percent was confirmed.

### 概 要

緩い砂質地盤の液状化対策として地盤に水平ねじり振動を加えて締固める改良工法・MVCP工法が開発された。この工法は前報<sup>1)</sup>でも示したように液状化抵抗の増大に有効な土の特性を利用するものであるが、改良された地盤の液状化抵抗を現地で直接測る手法がなく、水平ねじり振動を加えることによる有効性を明確にできないのが現状である。そこで、小型起振機を用い、鉛直振動および水平ねじり振動による締固めを行なったモデル砂層を直接振動台に載せて液状化実験を実施し、両改良砂層の液状化抵抗の比較を試みた。その結果、鉛直振動のみによる締固めに比べて、それに水平ねじり振動を付加した砂層の方が密度はほとんど変わらないにもかかわらず液状化する加速度は30～60gal大きくなり、25～50%の液状化抵抗の増大が確認された。

### 1. まえがき

緩い砂質地盤の液状化対策工法として、従来からサンドコンパクションパイル工法が用いられてきた。この工法は鉛直振動によって砂地盤内に砂を強制的に圧入し砂杭を造成し密度の増大を図るものであるが、次のような液状化抵抗の増大に有効な土の“加工硬化特性”および“微少ひずみ履歴効果”を利用するには、鉛直振動の他に水平方向の振動を地盤に与えるのが望ましい。このよ

うな理由で開発されたのが MVCP 工法 (Multi-Vibrohammer-Compaction-Pile Method) である。

ところが、この工法によって改良された地盤の液状化抵抗を直接測る手法がなく、水平振動を加えることによる有効性を現地で確認できないのが現状である。

そこで、鉛直振動および水平ねじり振動も加振することのできる小型起振機を用い、振動台上の砂層を両振動によって直接締固めた後、液状化実験を実施し、締固めの振動方向の違いが液状化抵抗に与える影響を定量的に

検討した。

また、水平振動を加振させた場合、地盤に伝播する振動のうち、どの程度の割合で前述した土の特性に関係するせん断波成分が存在するかを間隙水圧計を用いた手法で検討を試みたので以下に紹介する。

## 2. せん断土槽を用いた振動台実験

### 2.1. 実験方法

図-1に示すような長さ120 cm、幅80 cm、高さ100 cmの小型せん断土槽に層厚90 cmの飽和砂層（鬼怒川砂、 $G_s=2.69$ 、 $U_c=2.71$ 、 $D_{50}=0.44$  mm）を作成する。このせん断土槽は、各層がベアリングによって連結されており、砂層のせん断変形を拘束しない構造となっている。次に、図-2に示すような小型起振機を用いて、同図に示してある改良パターンに従って処女砂層を締固め、その後振動台で加振実験を行なった。なお、処女砂層の作成法は、土槽下部より圧力水を上方に向けて吹き上げるボーリング方法を繰り返し用いるため、再現性は非常に良かった。この処女砂層の平均的な相対密度は40%であった。

表-1に締固め方法を示す。処女砂層にロッドを貫入させて鉛直振動を加えて、締固める方法および鉛直振動の他に水平ねじり振動を付加して締固める2種の方法を用いている。また、改良ピッチは3ケースとした。締固め後の状態は、砂層の平均沈下量および板タタキ法によるS波速度の測定とともにせん断強度の指標として、あらかじめ埋設しておいたセルロイド板（長さ  $L=50$  cm、幅  $B=10$  cm で表面に砂粒を接着したもの）の引抜き抵抗( $R$ )を測定した。

$$R=L^2 \cdot B \cdot K_0 \cdot \gamma' \cdot \tan \phi \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $K_0$ : 静止土圧係数、 $\gamma'$ : 水中単体重量( $tf/m^3$ )

$\phi$ : せん断抵抗角

(1)式のうち、締固め条件によって変化すると考えられるものについて  $K_t=K_0 \cdot \gamma' \cdot \tan \phi (=R/L^2 \cdot B)$  なる指数を仮定し、締固め方法の違いによる改良後の砂層のせん断強度を比較した。

振動台の加振振動数は、模型砂層の非液化化時の固有振動数が共振実験より10 Hz前後であったことから、この振動数より十分低い3 Hzを採用した。なお、間隙水圧計と加速度計の計器配置を図-1に示す。

### 2.2. 実験結果および考察

図-3は、締固め後の砂層の沈下量、S波速度および引抜き抵抗( $K_t$ )を締固め条件ごとに示したものである。これらすべての値は、改良ピッチが密になるにつれて大きくなるが、改良ピッチが同じ場合には、水平ねじり振動を付加することによる増加はみられず、締固め度に関

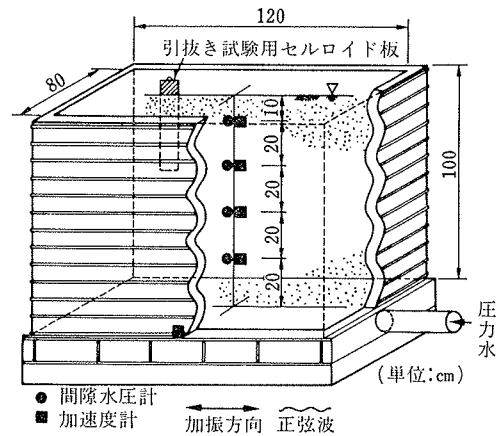


図-1 せん断土槽

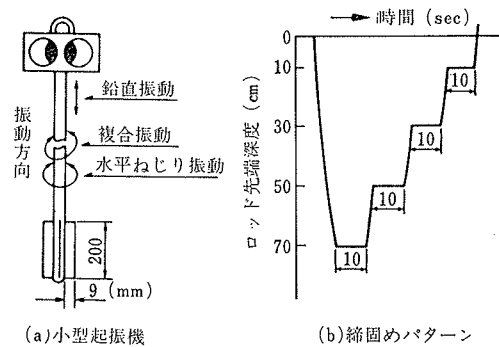


図-2 小型起振機

case	締固め方法	改良ピッチ
V-4	鉛直加振による改良4地点	60×100cm
VH-4	V-4+水平ねじり加振による改良4地点	同上
V-8	鉛直加振による改良8地点	40×40cm
VH-8	V-8+水平ねじり加振による改良8地点	同上
V-16	鉛直加振による改良16地点	30×30cm
VH-16	V-16+水平ねじり加振による改良16地点	同上

表-1 砂層の締固め方法

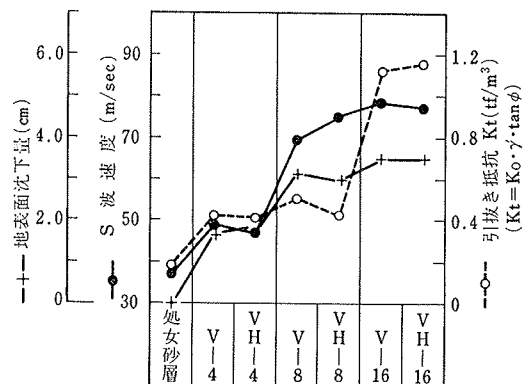


図-3 締固め後の砂層の状態

連するデータについては鉛直振動のみによる場合と比べて有意の差は認められない。なお、表-2に沈下量から求めた締め後の間隙比および相対密度を示す。

case	処女砂層	V-4	VH-4	V-8	VH-8	V-16	VH-16
間隙比 e	0.920	0.881	0.881	0.854	0.855	0.844	0.845
相対密度 Dr	40%	49%		55%		58%	

表-2 砂層の間隙比および相対密度

図-4は、G.L.-10 cm, G.L.-50 cmにおける相対密度と液状化を生じるのに必要な台加速度(液状化加速度)との関係を示している。ここで、間隙水圧が初期有効上載圧と等しくなった時を液状化とした。また、液状化に至るまでの繰返し回数はどれも10回前後であった。同図からも明らかなように、液状化に必要な加速度、言い換えれば、砂層の液状化抵抗は密度が増大するに従って大きくなる。これは当然の結果であるが、特に注目されるのは水平ねじり振動を付加することによって両深度のいずれについても30~60 gal, 比率で示せば25~50%の液状化加速度の増大が認められたことである。また、この傾向は密度の大きな砂層、つまり改良ピッチの密な砂層ほど著しいことが明らかとなった。これは、ある程度砂層が締まっていなくて水平ねじり振動が伝播しにくいという加速度測定結果と一致するものである。

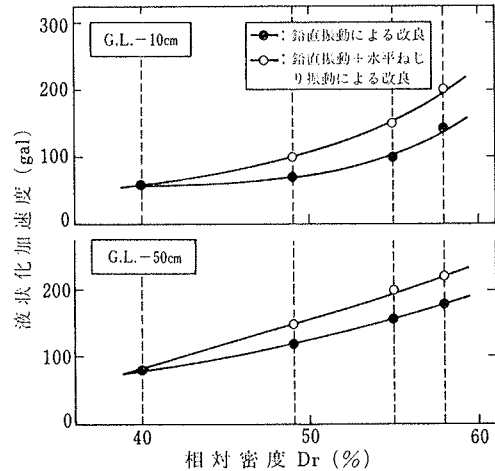


図-4 相対密度と液状化加速度の関係

図-5は、case・V-8, case・VH-8の場合について液状化加速度の深度分布を示したものである。ただし、G.L.-70 cmは完全液状化に至っていない。同図から解かるように液状化加速度は、浅層よりも深層の方で大きい。すなわち、浅層ほど液状化し易い。この傾向は、処女砂層よりも改良砂層で著しく、拘束圧の小さな表層は振動による締め効果が十分に得られないことを示している。また、前述の水平ねじり振動付加による液状化加速度の増加は、全深度で認められる。

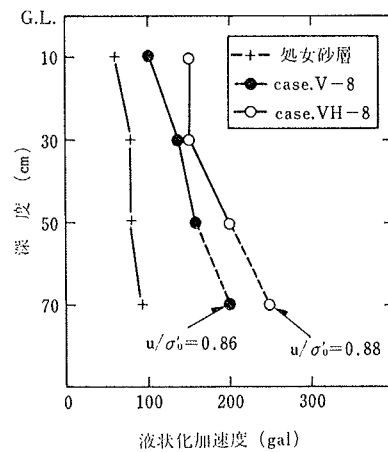


図-5 液状化加速度の深度分布

### 3. 地盤内の伝播波に占めるせん断波成分の割合

振動台実験の結果から、水平ねじり振動が地盤に歪あるいは応力履歴を水平方向に与えているものと考えられる。このような履歴は、振動によって発生する地盤内の伝播波のうち、特にせん断波成分によって与えられると考えられるので、ここでは、水平ねじり振動加振時の伝播波に占めるせん断波(S波)成分の割合について検討する。

#### 3.1. 圧縮波(P波)と間隙水圧<sup>2)</sup>

図-6に示すような容器に、スピーカーで音圧を与えた場合、飽和砂層内には圧縮波(P波)成分のみ発生するものと考えられる。ここで、間隙水圧は受圧面の変位(x)から圧力に変換するものであるから、間隙水圧出力(U)とP波加速度出力(A<sub>p</sub>)とは次の関係がある。

$$U = \alpha x, \quad x = \frac{1}{(2\pi f)^2} A_p \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\therefore U = \alpha \frac{A_p}{(2\pi f)^2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、α: 定数, f: 振動数  
従って、U ∝ A<sub>p</sub>  
A<sub>p</sub>が予想でき比例定数αを実験によって求めることによって、両者が関係づけられ、間隙水圧からP波加速度を推定することが可能となる。

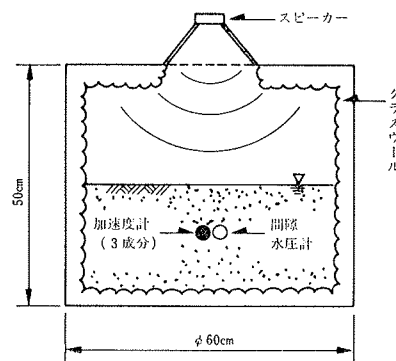


図-6 P波発生容器

図-7は、試料として緩い鬼怒川砂を用いて音圧一定試験を行なった結果を示している。間隙水圧は振動数によらずほぼ一定値を示すのに対して、加速度は振動数に関して(2πf)<sup>2</sup>に比例した傾向を示す。すなわち、A<sub>p</sub>/(2πf)<sup>2</sup> ∝ U また、図-8に示される振動数一定(5 Hz)試験によれば、加速度と間隙水圧とは正比例関係にある。以上の結果から、次の関係が成立する。

図-7は、試料として緩い鬼怒川砂を用いて音圧一定試験を行なった結果を示している。間隙水圧は振動数によらずほぼ一定値を示すのに対して、加速度は振動数に関して(2πf)<sup>2</sup>に比例した傾向を示す。すなわち、A<sub>p</sub>/(2πf)<sup>2</sup> ∝ U また、図-8に示される振動数一定(5 Hz)試験によれば、加速度と間隙水圧とは正比例関係にある。以上の結果から、次の関係が成立する。

$$A_p(\text{P波加速度, gal}) = \frac{f^2}{49.6} \cdot U(\text{gf/cm}^2) \dots\dots(4)$$

ただし、この定数49.6は砂の種類、密度などによって異なるものと考えられる。

3.2. 伝播波からのせん断波成分の分離

起振機によって地盤内に生ずる伝播波の中で圧縮波(P波)以外をせん断波(S波)と考えれば、次の関係が成立する。なお、実地盤においては、せん断に伴う間隙水圧の上昇・蓄積が生ずるので、次式に示す間隙水圧は、この上昇分つまり、静的な部分を除いた動的成分のみを考えている。

$$A_s = A - A_p$$

$$= A - \frac{f^2}{49.6} \cdot U_d \dots\dots(5)$$

A: 全加速度 ( $= \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$ , gal)

A<sub>s</sub>: S波加速度 (gal)

U<sub>d</sub>: 間隙水圧の動的成分 (gf/cm<sup>2</sup>)

3.3. 実験および解析方法

実験に用いた土槽は、図-9に示すような長さ225 cm、幅153 cm、深さ150 cmの水締め土槽である。この土槽についても、下部から圧力水を送り、試料をボイリングできる機構となっている。試料は鬼怒川砂を用いており、初期砂層の状態は図-10に示すとおりである。

実験は図-2に示す小型起振機を用いており、ロッドを45 cm貫入させ、その位置で鉛直振動、水平ねじり振動およびこれらの複合振動を加振させ、それぞれの場合について、伝播波を図-9に示す位置で測定するものである。各加振につき数ケース行なった。なお、起振機に加振振動数は、模型砂層の固有振動数より十分低く、かつ起振機の安定性も考慮して5 Hz前後とした。

実験記録は、図-11のフローに従ってすべての計測値を周波数分析(FFT, サンプルタイム0.01 sec)した。解析は加振振動数が5 Hz前後であることから、2.0~8.0 Hz間で行なっている。伝播波の中からのS波の分離については、(5)式を用いて各振動数ごとに行なっている。

図-12は、加速度ベクトルの模式図である。以下、S波成分の割合を考えると、全加速度に占めるS波加速度の割合  $D = A_s / \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$  および全加速度に占める水平面投影加速度の割合  $D' = A'_s / \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$  の2種類の整理法を用いている。

図-13は、水平ねじり振動加振時に各測定点で得られた加速度のフーリエスペクトル図である。図から明らかのように4.2 Hzのところで卓越している。また、図-14はこの時のS波成分の割合(D')をプロットしたものであるが、振動数によって値はかなり変動する。卓越振動

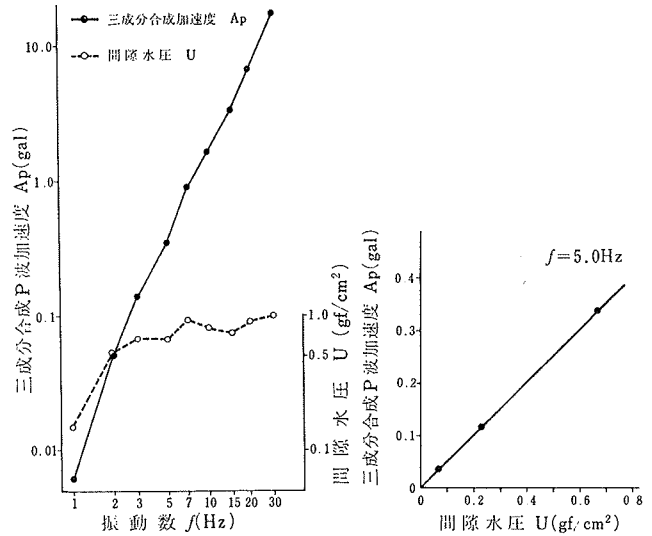


図-7 A<sub>p</sub>とUの関係 (音圧一定)

図-8 A<sub>p</sub>とUの関係 (振動数一定)

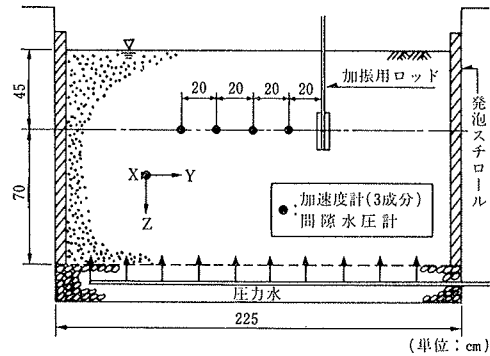


図-9 水締め土槽

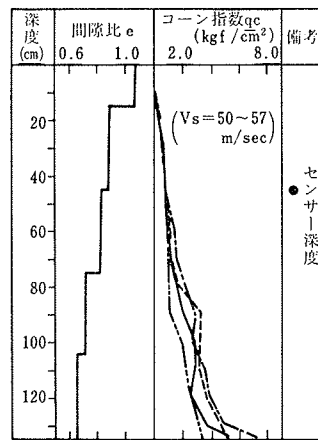


図-10 e, qc

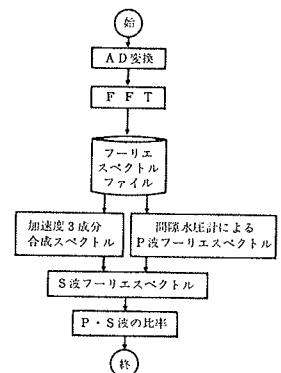


図-11 解析方法

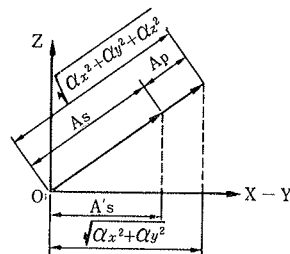
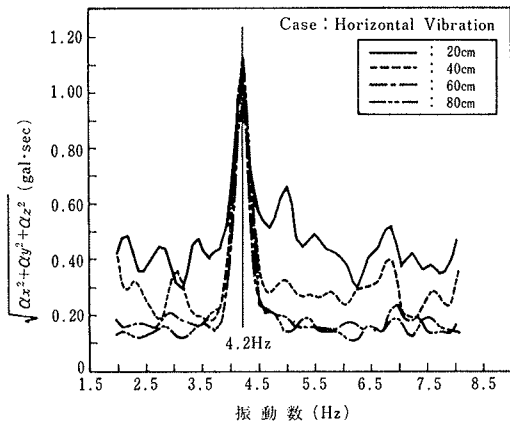


図-12 加速度ベクトル図

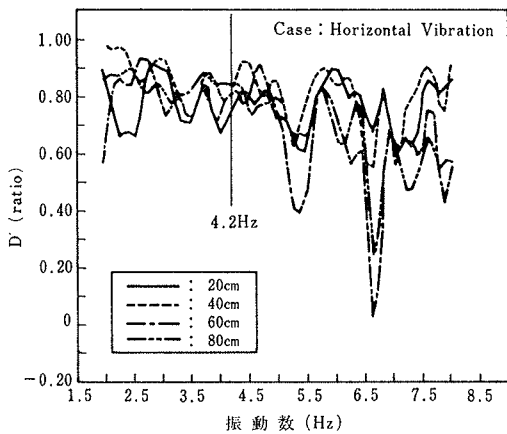
$$D = A_s / \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$$

$$D' = A'_s / \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$$

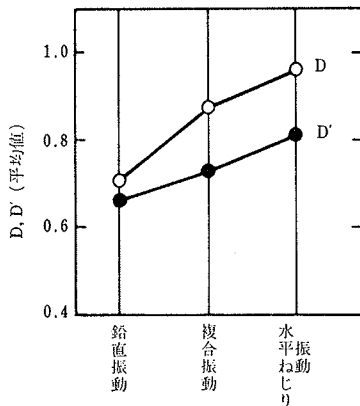
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ : x, y, z方向加速度  
 $A_s$ : S波加速度振幅  
 $A'_s$ : 水平面S波加速度振幅  
 $A_p$ : P波加速度振幅



図一13 加速度フーリエスペクトル



図一14 水平面内S波成分の割合



図一15 加振方向の違いによるS波成分の割合

数 4.2 Hz 周辺で D' は 80% 前後となっており、かなりの割合で S 波成分が存在しているといえる。

図一15は、鉛直振動（卓越振動数 6.4 Hz）、複合振動（4.8 Hz）および水平ねじり振動加振時に伝播する加速度に占める S 波成分の割合 D および D' を示したものであるが、どちらの値も鉛直振動<複合振動<水平ねじり振動の順に大きくなっている。例えば、水平ねじり振動は、鉛直振動の場合に比べて D の値で 25%、D' で 15% 大きくなるという結果が得られた。

このことから、水平ねじり振動は、土に応力履歴を与えるのに有効な方法であると言えよう。

#### 4. 結 論

振動台実験によって、砂層の締固めには、鉛直振動のみでなく水平ねじり振動を付加して応力履歴を与えることが液状化に必要な加速度を 25~50% 増加させることから液状化抵抗の増大に有効な方法であることが明らかとなった。また、実際に地盤内を伝播する振動の中から、微小応力履歴や歪硬化を与えるせん断波成分の割合が水平ねじり振動加振時に非常に高い値を示していることからこの実験結果を裏づけることができよう。

今後、実際に改良された地盤の地震時の液状化抵抗を直接的な手法によって把握できるように検討を進めるつもりである。

最後に、この研究を進めるにあたって、(株)タケル技術コンサルタント、武富正憲氏にご協力頂いた。末筆ながら深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 木村, 平間, 菱河, 八戸, 羽生田, 松本: MVCP 工法と施工例, 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 72~77
- 2) 岩本, 平間, 木村: 起振機によって生ずる飽和砂地盤振動からの S 波の分離について, 第 21 回土質工学研究発表会講演集, (1986), pp. 559~560