

過剰間隙水圧の除去を併用した飽和砂の振動締固めに関する基礎的研究

石黒 健*・飯島 健*・菅井正澄*・
嶋田三朗**

飽和砂の振動締固めに伴って発生する施工時過剰間隙水圧の除去効果を調べる目的で、一連の模型土槽実験を実施した。過剰間隙水圧の除去により締固め時の地盤の振動加速度が大きくなること、締固め後の貫入抵抗値やその影響範囲が増大すること、そして締固め効果向上の原因が、主として「砂の粒子構造の強化」にあることなどが明らかとなった。また、過剰間隙水圧の除去が締固め地盤の耐震性能に及ぼす影響について定性的な検討を加えた。

Key Words : vibrational-compaction, liquefaction, excess pore-water pressure, model test

1. はじめに

飽和砂地盤の液状化対策工法のひとつに、強力な大型パイプロを加振源とする振動ロッドを地中に貫入し、地盤に直接振動を与えて密実化を図る振動棒締固め工法（ロッドコンパクション工法）がある。ところが、緩い飽和砂地盤に対する強制的な加振は過剰間隙水圧の発生を伴い、いわば「人為的な液状化」をもたらす。図-1は振動棒締固め工法施工時に振動ロッドの近傍で測定した地盤内過剰間隙水圧の例であるが、振動ロッドの貫入とともに地盤内の過剰間隙水圧が急増し、振動締固め中はほぼ完全液状化の状態にあることを示している。

このような施工時過剰間隙水圧の影響を検討するために、著者らは過剰間隙水圧の発生を伴う繰返しせん断履歴（＝振動締固め）を受けた飽和砂の液状化強度に関する一連の中空ねじり試験を行い、繰返しせん断時に発生する過剰間隙水圧を抑制すると履歴後の液状化強度が大きくなること、すなわち施工時過剰間隙水圧の人為的な除去が締固め効果の向上をもたらすことを示した¹⁾。

一方、実施工では振動ロッド近傍での施工時過剰間隙水圧の発生が周辺地盤への振動エネルギーの伝達を減少させ、この結果、地盤の置かれる振動状態そのものも変化する。施工時過剰間隙水圧を除去すると、地盤の有効応力状態と振動状態の両者が共に改善されることにより締固め効果の向上がもたらされるものと考えられる。そこで、このような点も含めて施工時過剰間隙水圧の除去効果とそのメカニズムについての検討を試みるために、原位置の振動締固めを定性的に模擬した模型実験を実施した。本文はその結果について報告するものである。

本実験では、飽和砂を投入した小型土槽の中で模型の

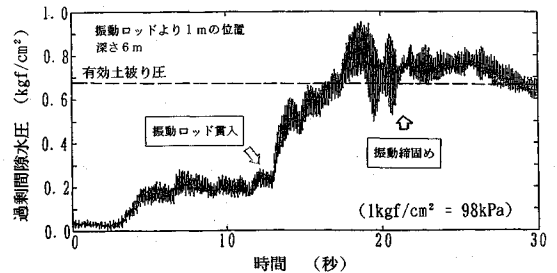


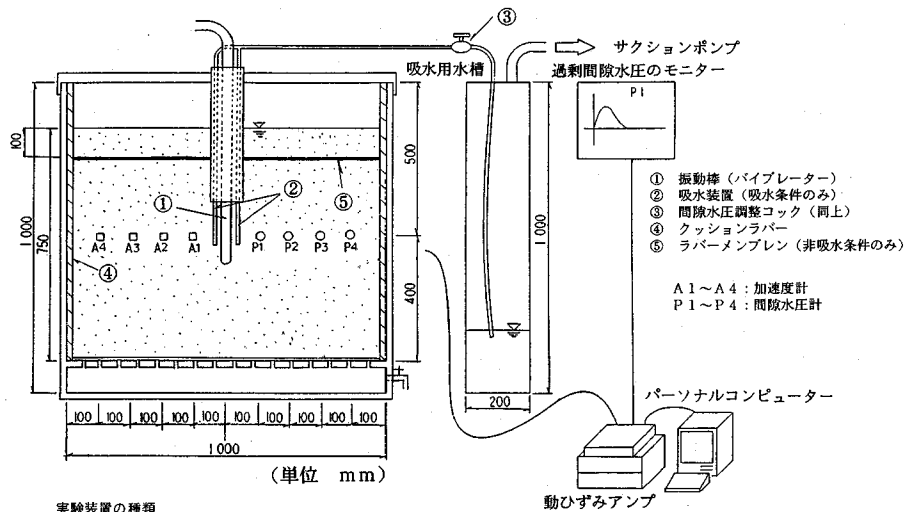
図-1 振動棒締固め工法施工時の過剰間隙水圧測定例

鉛直振動グイを加振し、締固め時の地盤の状態や締固め効果を調べた藤田・多賀谷・日下²⁾の模型実験にならぬ、施工時過剰間隙水圧の除去が振動エネルギーの伝達に及ぼす影響を締固め時の地盤の振動加速度の変化によって調べることにした。また、締固め後の地盤の強度（貫入抵抗値）を測定することで過剰間隙水圧の除去が締固め効果に及ぼす影響を検討するとともに、過剰間隙水圧の除去効果のメカニズムを明らかにする目的で振動締固め効果に影響を及ぼす諸要因や締固め後の地盤の密度と内部構造（粒子配列）に関する検討を行った。さらに、振動台実験を実施して締固め地盤の耐震性能（加振時挙動）に及ぼす影響を調べた。

施工時過剰間隙水圧の問題を取り扱った模型実験の事例は非常に少なく、谷本・野田³⁾が振動締固めを模擬した模型実験によって地下水位低下の併用による締固め効果の向上を報告した事例が挙げられるのみである。また関連するものとして、加振中の過剰間隙水圧の発生がひびき履歴効果を低下させることを示唆した平間・松本の振動台実験の例⁴⁾、あるいは野田・喜田・飯田⁵⁾が実施した「排水機能付き杭」打設時の締固め効果に関する模型実験（排水機能付き杭打設による締固め効果が普通杭よりも大であった事例）等を挙げることができる。

* 正会員 工修 前田建設工業（株）技術本部技術研究所
〒179 東京都練馬区旭町1-39-16

** 正会員 工博 前田建設工業（株）技術本部技術研究所



実験装置の種類

種類	実験条件	実験装置の構成
TYPE-1	吸水条件	振動棒①、吸水装置②(吸水管、吸水用水槽、サクションポンプ)、XYレコーダー(モニター用)
TYPE-2	非吸水条件	振動棒①、ラバーメンブレン⑤

* 鋼製土槽、クッションラバー④および計測器は両タイプで共通

図-2 実験装置の概要

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

図-2は、実験に用いた鋼製模型土槽を示したものである。土槽は直径100 cm、高さ100 cmの円筒形で、内側には厚さ5 mmのクッションラバー④を張りつけ、土槽境界での振動の反射を極力防いだ。実験では、過剰間隙水圧の除去を伴うタイプの模型土槽と、比較実験としてこれを伴わない(すなわち従来の振動締めに対応する)タイプの模型土槽の2種類を用いた(図-2中の比較表を参照)。図-2は前者を示したものであり、振動棒①の周辺に吸水装置②を設置している。吸水装置②は、吸水管(鋼製の有孔管を不織布および金網ネットで防護したもの)と吸水用水槽、およびこれに負圧を与えるサクションポンプからなる。実験時には吸水用水槽内にあらかじめサクションを負荷させておき、砂層内に配した間隙水圧計P1の値をXYレコーダー上でチェックしながら、この値が常に初期値(静水圧)と等しくなるように間隙水圧調整コック③によって過剰間隙水圧を低下させた。また、過剰間隙水圧を除去しないタイプの模型土槽については、紙面の関係上割愛するが、図-2と同じ土槽を用い、吸水装置をとりはずして実験を行った。さらに非排水条件下での振動締めを再現するために、図-2中に併記したように砂層表面からの水圧の消散を抑制する目的で砂層中にラバーメンブレン⑤を敷設した(過剰間隙水圧の除去を伴うタイプでは⑤は使用せず)。なお振動源には便宜的にコンクリート締め用のバイブレーターを用いた。模型加振機の振動数や加振方法、加

振力の大きさなどは必ずしも原位置施工に対応しておらず、例えばこの加振機は高周波の200 Hzで水平振動するが実施工では振動数9 Hz程度の鉛直振動が用いられている(模型実験では小型土槽の寸法や剛性の関係で用いる加振機の加振力に限界があり、加振機の振幅を大きくとることができない。一方、振動締め効果を高めるためにはある程度の振動加速度を砂に与える必要があり、このため小振幅、高周波タイプの加振機を用いざるを得なかった)。従って本実験は、例えばある相似則に従って原位置の施工を再現したものではなく、同一の方法で振動締めを行った際の吸水・非吸水条件(以後、過剰間隙水圧の除去の有無をこのように称する)での相対的な効果の違いを定性的に調べることを目的としている。

(2) 実験方法

実験は以下のような手順に従って実施した。

a) モデル地盤の作成

土槽に水を張った後、振動源となるバイブレーター、加速度計(A1~A4)および間隙水圧計(P1~P4)を所定の位置(振動棒中心からの離れ10~40 cm)に配置し、水中落下法によって飽和砂地盤モデルを作成する(初期相対密度は平均値で $D_r=46\%$)。地盤作成後、その初期状態を調べるためにコーン貫入試験を実施し貫入抵抗値の初期値を計測する。なお非吸水条件の実験では、所定の深度に達したらラバーメンブレンを敷設し、さらにその上部を砂で埋め戻す。

b) 振動締めの実施と加振中の地盤挙動の計測

バイブレーターを起動させ振動締めを実施する。な

表-1 実験ケースおよび実験条件一覧

実験No	吸水条件	振動数	加振時間	摘要
1	非吸水	200Hz	5分	繰返し3回実施
2	吸水	200Hz	5分	繰返し2回実施
3	非吸水	200Hz	1~60分	加振時間1.5, 20, 60分
4	吸水	200Hz	1~60分	加振時間1.5, 20, 60分
5	非吸水	200Hz	5分	SEM、密度測定用試料採取
6	吸水	200Hz	5分	SEM、密度測定用試料採取
7	非吸水	200Hz	5分	振動台(100, 500galの2ケース)
8	吸水	200Hz	5分	振動台(100, 500galの2ケース)

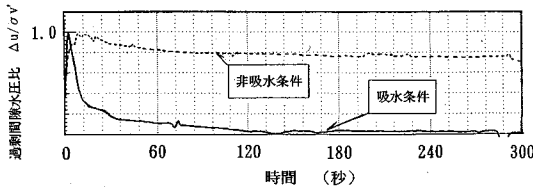


図-3 振動締固め時の過剰間隙水圧比の時刻歴

お、加振条件は振動数 200 Hz、加振時間 5 分間を基本とするが、加振時間の影響を調べるために、一部これを 1~60 分間に変えた実験も実施している。吸水条件の実験では、前述した方法により加振中に発生する過剰間隙水圧を除去する。また振動締固め時には、地盤内に配した加速度計と間隙水圧計により加振中の地盤挙動の計測を実施する。

c) 振動締固め後の事後計測

加振終了後、改良効果を把握するために再びコーン貫入試験を実施する(初期状態の測定位置の反対側で実施)。なお非吸水条件の実験では、過剰間隙水圧が完全に消散し終わったことを確認した後、ラバースメンブレンの位置まで砂を排出し、ラバーを取り除いた後再び砂を埋め戻して測定を行う(コーン貫入試験実施時の土被りを吸水条件の実験と整合させるため)。貫入抵抗値の計測は振動棒中心より 10~40 cm 離れた位置にて実施し、さらに、適宜密度測定および SEM (走査型電子顕微鏡) 用の供試体採取を実施した。

実験は豊浦標準砂を用いて行った。表-1 に実験ケースおよび実験条件の一覧を示す。

3. 過剰間隙水圧の除去が締固め時の地盤挙動に及ぼす影響

過剰間隙水圧の除去による振動エネルギーの伝達の変化を定性的に調べる目的で、締固め時の地盤内間隙水圧と振動加速度の計測を行った。図-3 はまず、振動締固め中の地盤内過剰間隙水圧比の時刻歴を吸水および非吸水の 2 条件で比較した結果を示す(振動源に最も近い P1 のデータ)。非吸水条件の実験では加振開始直後に過剰間隙水圧が急増し、約 10 秒でほぼ完全液状化に近いレベルに達する。一方、過剰間隙水圧を除去した吸水条件のケースでは、加振開始直後のみ過剰間隙水圧が発

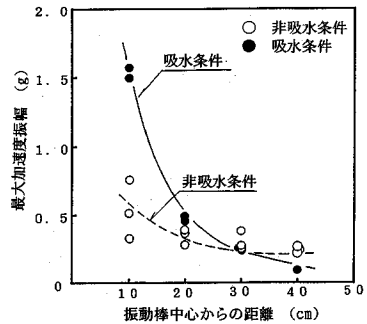


図-4 最大加速度振幅の距離減衰

生しているものの 60 秒以降はこの値はほぼゼロとなり、締固め過程の大部分では静水圧状態が保たれている(なお図に示されるように、間隙水圧の除去はあくまで静水圧からの過剰分のみを対象としており、谷本・野田³⁾のような水位低下には及んでいない)。

図-4 は、振動締固め時の地盤内水平加速度の最大値(片振幅)を振動棒中心からの距離に対する減衰として表したものである。非吸水条件では過剰間隙水圧の発生によって周辺地盤の振動が極端に減衰していること、吸水条件では振動加速度が大きくなり、振動エネルギーの有効な伝達が達成されていることが推測される。また、振動棒からの距離が 30 cm を越えると両者の振動レベルに大きな違いはなく、過剰間隙水圧の値(有効応力の状態)のみが異なる状態にあることが指摘される。本実験では土槽の内側にクッションラバーを張り付けているとはいえ、境界での振動の反射を完全になくすことは難しい。離れ 30 cm 以遠では、このような境界の影響によって両条件での加速度値が近接する結果となった可能性も考えられる。

4. 過剰間隙水圧の除去が締固め効果に及ぼす影響

過剰間隙水圧の除去による締固め効果の変化を調べるために、締固め後の地盤のコーン貫入抵抗値を測定した(ケース 1, 2)。コーン貫入抵抗値は地盤の液状化強度と密接に結びつく指標の 1 つとされており (Shibata, Teperaksa⁶⁾)、本実験でも締固め効果を表す指標として採用した。図-5 は、振動棒中心からの距離 10 cm~40 cm の位置で吸水・非吸水の 2 条件での事後貫入抵抗値の違いを比較した結果を示したものである。締固め後の貫入抵抗値はいずれの位置においても吸水条件と非吸水条件とで大きく異なっており、締固め中の過剰間隙水圧の除去により締固め効果が顕著に増大したことを示している。なお、振動棒は図-2 に示す位置に固定したまま締固めを行っているため、貫入抵抗値の違いは深さ 40 cm 前後で大きく現れる結果となった。図-6 は、コーン貫入抵抗値の距離減衰(ただし深さ 40 cm)を示した

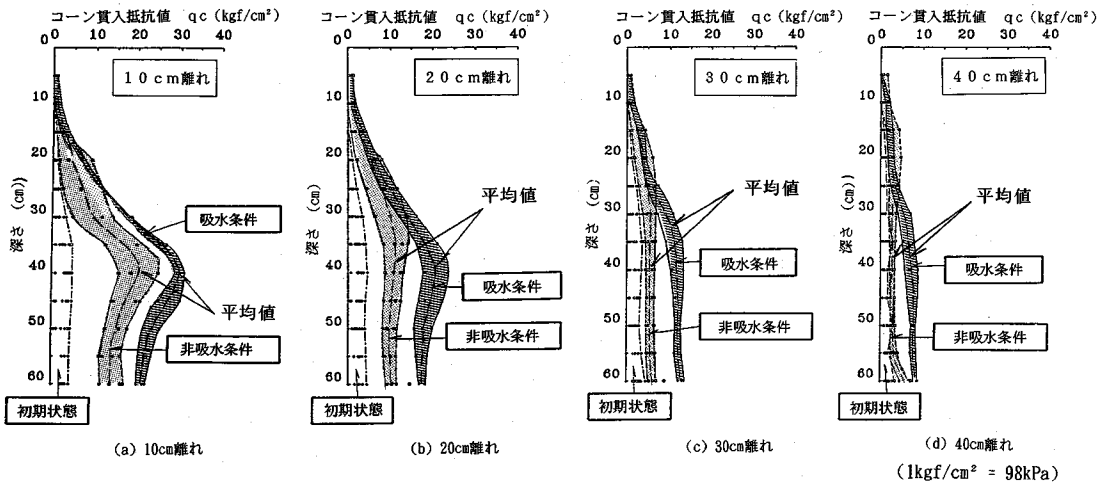


図-5 コーン貫入抵抗値の深さ方向分布の比較

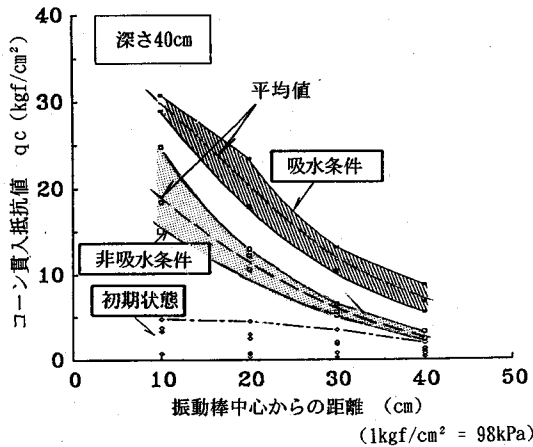


図-6 コーン貫入抵抗値の距離減衰

ものである。過剰間隙水圧の除去による貫入抵抗値の増加率（振動棒から同一の距離・同一深度における、吸水条件での貫入抵抗値と非吸水条件での貫入抵抗値との比率）は概ね 1.5~2.0 倍の値となる。なお振動棒からの距離が 30 cm 以上の領域では締固め時の振動加速度値には顕著な違いが見られないが（図-4 前記）、このような領域においても事後の貫入抵抗値には大きな違いが現れていることがわかる。図-7 は、締固め時の振動加速度と締固め後のコーン貫入抵抗値からなる平面上にデータをプロットしたものであり、図中の矢印の方向が過剰間隙水圧の除去に伴う変化を表している。振動源の近く（A）では振動加速度の増大に伴って事後の貫入抵抗値が増加しているのに対し、前述したように遠方の（B, C）では振動加速度にほとんど変化が見られないにもかかわらず事後貫入抵抗値に大きな違いが現れている。一般に、乾燥砂に対する振動締固め効果は締固め時の振動加速度が大きくなるに伴って増大するものと考え

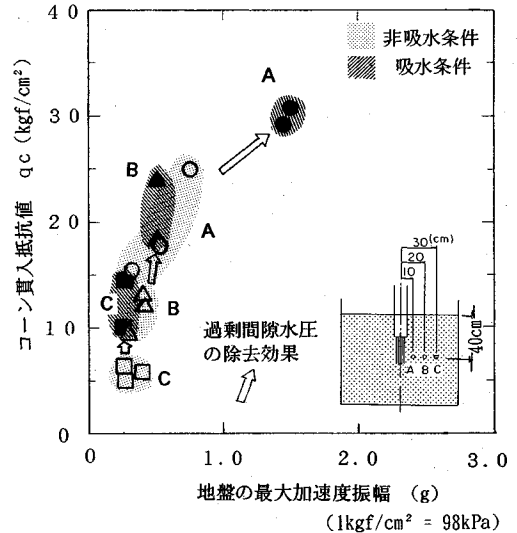


図-7 振動加速度と貫入抵抗値の関係

られている（Youd⁷⁾、最上・徳江⁸⁾など）が、飽和砂の場合、振動加速度以外に有効応力状態の違いが締固め効果に関与しているものと考えられる。本結果はまた、施工時過剰間隙水圧の除去による締固め効果の向上が、単に振動状態の改善のみならず有効応力状態の改善との足し合わせによってもたらされている可能性を示唆するものといえる。

図-4 は、過剰間隙水圧の除去により振動エネルギーの伝達範囲が拡大することをあらわしているが、このような変化は、当然締固めの有効範囲の拡大をもたらす。図-8 は、吸水および非吸水条件の両者における事後貫入抵抗値の等値線（コンター）を描いた結果を表している。図中には $q_c=10 \text{ kgf/cm}^2$ (980 kPa) のコンターをハッチして示したが、締固め時の過剰間隙水圧を除去することにより締固めの影響範囲が大きく拡大している。

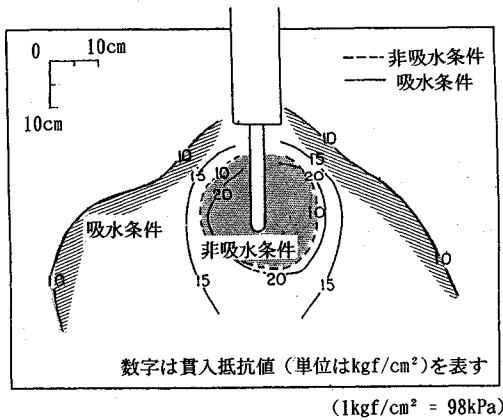


図-8 貫入抵抗値の等値線 (コンター)

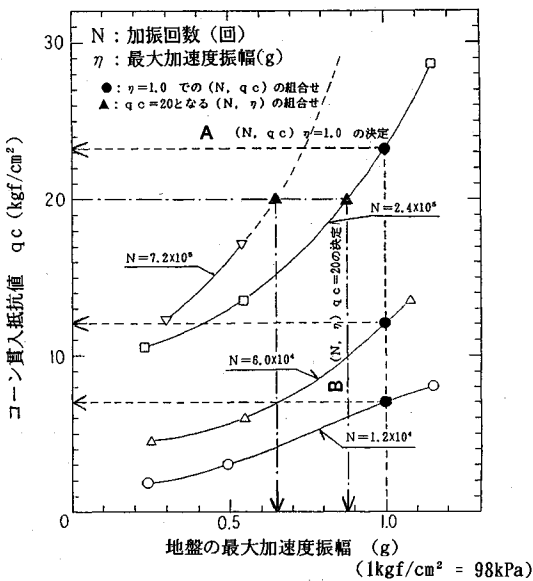


図-9 締固め時の最大加速度と事後貫入抵抗値の関係

5. 振動締固め効果に影響を及ぼす諸要因

前報¹⁾では、振動締固め施工を繰返しせん断履歴に置き換えた要素試験を実施し、履歴の各条件と履歴後の液状化強度との関係を調べた。この結果、締固め効果に影響を及ぼす主要因として次の3者を挙げることができた。

- ① せん断履歴時の有効応力状態 (過剰間隙水圧量)
- ② 履歴時における供試体のせん断ひずみ (あるいは履歴時に加わるせん断応力比) の大きさ
- ③ 履歴の繰返し回数

ここでは、要素試験で指摘されたこれらの影響因子を模型実験の各条件に置き換え、現実の締固め施工により近い形で振動締固め効果を決定づける諸要因を検討してみる。先に述べた各種要因は、模型実験では各々

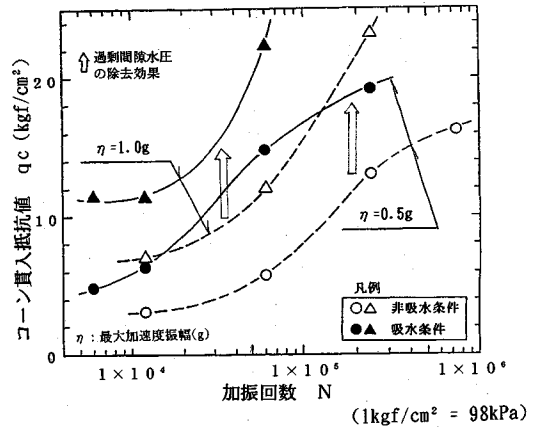


図-10 加振回数と貫入抵抗値の関係

- ① 振動締固め時における過剰間隙水圧の発生の有無
- ② 地盤の振動状態の大きさ (例えば振動加速度)
- ③ 加振時間 (加振回数)

に対応するものと考えられる。そこでこれらの影響を検討するために、吸水および非吸水条件のもとで加振時間を1, 5, 20, 60分に変化させた実験 (ケース3, 4) を実施し、次のように結果を整理した。図-9は、締固め時における地盤内の最大加速度と、同一位置 (振動棒から同一の離れ, 同一深度) での事後コーン貫入抵抗値 q_c との関係を各加振時間 (図中では加振回数 N (=加振時間 (秒) × 振動数 (200 Hz) として表記) ごとにプロットしたものである。ただし、ここでは図の煩雑を避ける目的で吸水条件のデータのみを記した。この図をもとにまず、「ある同一の加振加速度における加振回数 N と事後コーン貫入抵抗値の組み合わせ」を図中の●印のように内挿的に求めた (図中のAの矢印)。これを吸水・非吸水条件別に示したものが図-10である。前章で述べたように、過剰間隙水圧の除去による締固め効果の向上は、振動状態の改善と有効応力状態の改善の両者の効果が複合された結果もたらされるものと推測される。図-10のようにデータを整理することにより、例えば同一振動条件下での有効応力状態の影響のみを抽出することができる。図より、同一の振動加速度であっても過剰間隙水圧を除去することで事後コーン貫入抵抗値が増大すること (図中の矢印の方向への変化) や、加振回数の増加とともに貫入抵抗値が増大していく傾向などを認めることができる。模型実験での地盤の振動加速度の大きさが、要素試験における供試体の履歴ひずみや履歴時のせん断応力の大きさと定量的にどう対応しているかは明確ではないが、この結果は前報¹⁾の中空ねじり試験で得られた知見 (例えば、同一の履歴ひずみであっても履歴中の過剰間隙水圧を除去するほど、また履歴回数が増すほど履歴後の液状化強度が高まるなど) と定性的に符合するものと思われる。また図-11は、これを「ある所定

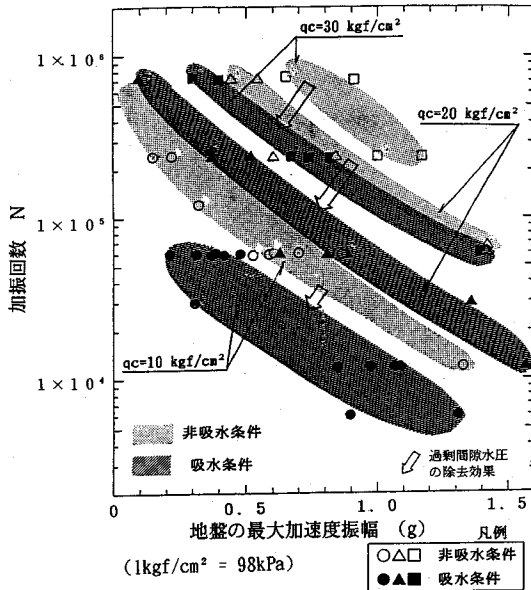


図-11 所要貫入抵抗値を得るための加振条件

のコーン貫入抵抗値を得るために必要な振動加速度と加振回数 N の組み合わせ] として整理し直した結果である (例えば、図-9 中の B の経路で求められる \blacktriangle 印のプロットを連ねることにより得られる)。図中にハッチングを施したように、実験データは吸水条件と非吸水条件の両方で明瞭に区分されており、本結果は、飽和砂の振動締固め効果が前述した 3 つの要因に支配されることを如実に物語っている。例えば吸水条件下 (濃いハッチ) では、非吸水条件下 (薄いハッチ) に比べてより小さな振動加速度で (すなわちより広い施工ピッチで)、あるいはより少ない加振時間で (より短い施工サイクルで) 同等の効果が得られることになる (矢印の変化)。なお、図-11 の縦軸の加振回数は $10^4 \sim 10^6$ 回とかなり多い。実施工では、ある深度に着目すると 9 Hz 程度の振動数でせいぜい数分間程度の締固めしか行われなため、加振回数のオーダーは図よりも小さい。今回の実験では前述したような理由により高周波の振動源を用いたために、加振回数のオーダーを室内と現場で合わせる事が不可能であった。この点については、実施工機を用いた現場実験のなかで検討を加えていきたい。

6. 過剰間隙水圧の除去が砂の内部構造に及ぼす影響

過剰間隙水圧の除去による締固め効果向上のメカニズムについて検討を加えてみる。前報¹⁾では、中空ねじり試験において見られた過剰間隙水圧の除去効果 (繰返しせん断履歴時の過剰間隙水圧を低下させることによる履歴後の液状化強度の増大) の原因について、砂の密度と内部構造に着目した検討を試みた。この結果、吸水およ

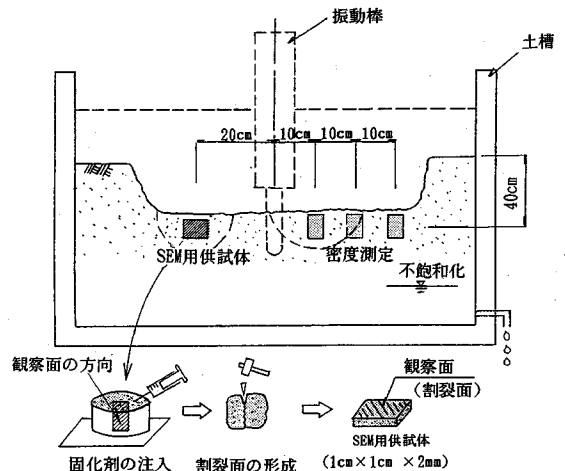


図-12 SEM 用供試体の採取および密度測定の状態

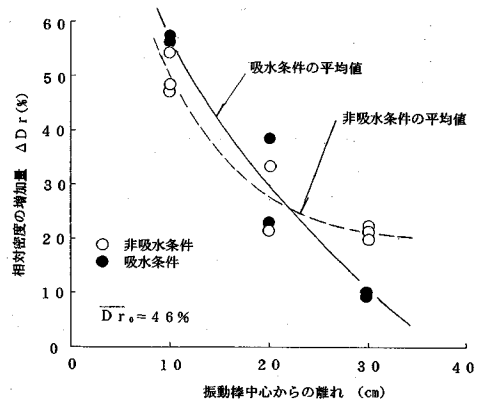
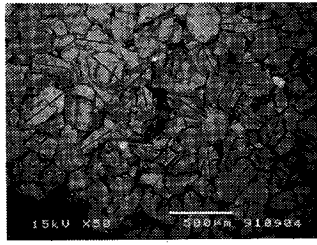


図-13 締固め後の相対密度の比較

び非吸水条件に相当する履歴によって、同一の相対密度でありながら内部構造 (砂粒子の配列や噛み合い) の異なる 2 つの供試体が生み出されること、この構造の違いが両条件での締固め後の強度の違いをもたらしていることなどが示唆された。しかしながら、要素試験では供試体の不均一化 (ひずみの集中) の影響 (例えば Castro⁹⁾ の指摘) やメンブレンなどの境界の影響が生ずること、あるいは厚さ 2 cm の中空供試体からのサンプリングの難しさなどから、粒子構造の違いを定量的に明確化するには至らなかった。そこで、このような影響の少ない模型実験において模型土槽内で作成した締固めモデル地盤から供試体をサンプリングし、締固め後の密度と粒子構造を調べた (ケース 5, 6)。なお砂の内部構造の変化を調べる方法としては、前報¹⁾と同様に走査型電子顕微鏡 (SEM) による構造観察を採用した。図-12 は、模型土槽からの SEM 用試料の採取状況と構造観察用供試体の作製方法を示したものである。実験では、非吸水および吸水条件での振動締固め終了後、土槽下部より水を抜いてモデル地盤を不飽和化し (粒子構造の攪乱を避ける



(a) 初期状態

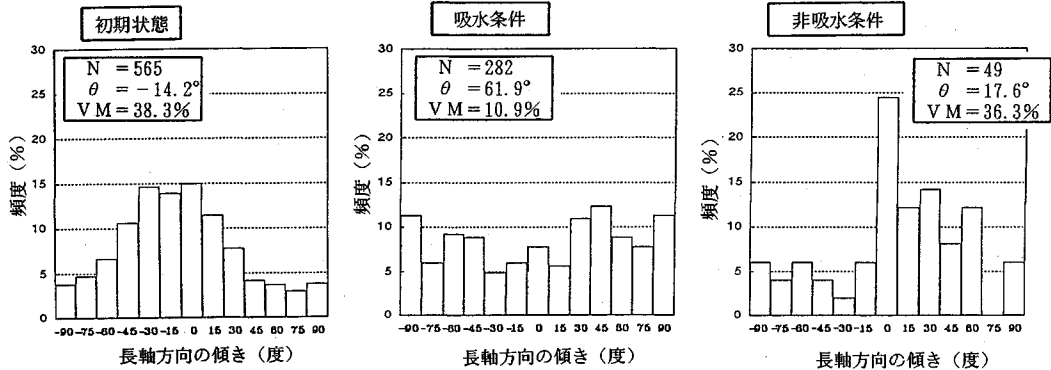


(b) 吸水条件



(c) 非吸水条件

写真—1 走査型電子顕微鏡による観察例
・写真中には粒子長軸方向を一で示した。



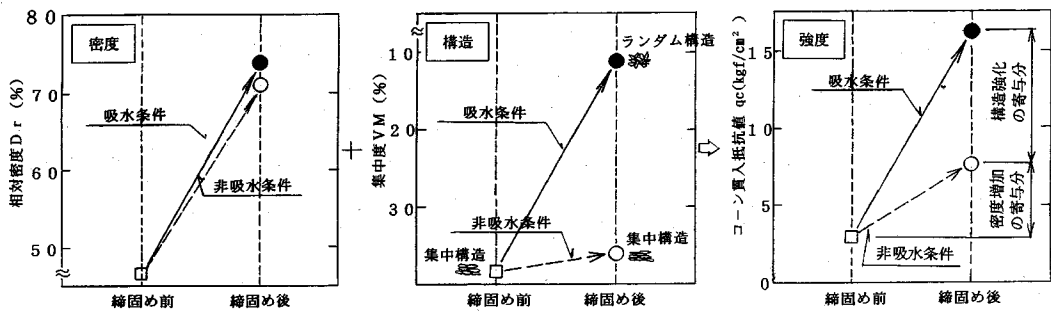
図—14 粒子長軸方向のヒストグラム
N:母数
 θ :卓越方向
VM:Curryの集中度
(θ , VMの算定法は文献¹⁾参照)

ために、数時間かけてゆっくりと水を抜いた)、目標深度(貫入抵抗値に最も顕著な差が現れた表層から40 cmの位置)まで地盤を掘削した後、試料に振動を与えないよう細心の注意を払いながらシンウォールサンプラーによって試料採取を行った。SEM用に採取した試料はその場で注射器により固化剤を注入し、24時間放置後炉乾燥させ、構造観察用の供試体を作製した。なお、観察面の方向については図中に示したような鉛直断面とした。その後顕微鏡写真を撮影し、粒子の長軸方向の配列を観察した。また図に示すように、同一の深度において密度測定を実施し、締め地盤の相対密度を求めている。なお、密度測定と構造観察は締めを行う前の初期状態に対しても実施した。

相対密度の測定結果を初期状態からの増分量 ΔD の距離減衰として図—13に示す(離れ40 cmでは土槽境界の影響で測定が難しかったため記していない)。ややばらつきが大きいものの、図—6の貫入抵抗値に見られた吸水条件>非吸水条件なる明確な関係は認められず、むしろ30 cm離れでは非吸水条件のほうが密度値が大となる結果となった。これは、吸水条件の締めめでは排水条件下での繰返しせん断に伴う体積変化により、非吸

水条件下では振動締めめによって発生した過剰間隙水圧の消散に伴う液状化後の沈下によって結果的に同程度の密度増加がもたらされたものと解釈されるが、もちろんこの結果のみからは、両条件でのコーン貫入抵抗値の違いを説明することはできない。

写真—1(a)~(c)は各々、水中落下試料、吸水条件下での締めめ地盤、非吸水条件下での締めめ地盤に対する顕微鏡写真の一例を示したものである。この写真から粒子の長軸方向を読みとり(写真参照、長短軸が明確にわかるもののみ採用)、そのヒストグラムを求めた結果を図—14に示す。なお、非吸水条件の実験ではサンプリングした試料が脆弱であったため、結果的に作製できたSEM用供試体の個数がかなり少なくなってしまった。非吸水条件のヒストグラムの母数が少ないのはこの理由による。図よりも、初期地盤では粒子の長軸方向が水平方向に配列した集中した構造となっていることがわかるが、これは水中落下後の自然堆積による地盤の造成過程を如実に反映したものと見える。一方締めめ地盤においては、吸水条件下でのモデル地盤では長軸方向が各方向に均等に分布するランダムな構造を示しているのに対し、非吸水条件のモデル地盤では初期状態と同様の、0



図—15 過剰間隙水圧除去効果のメカニズム

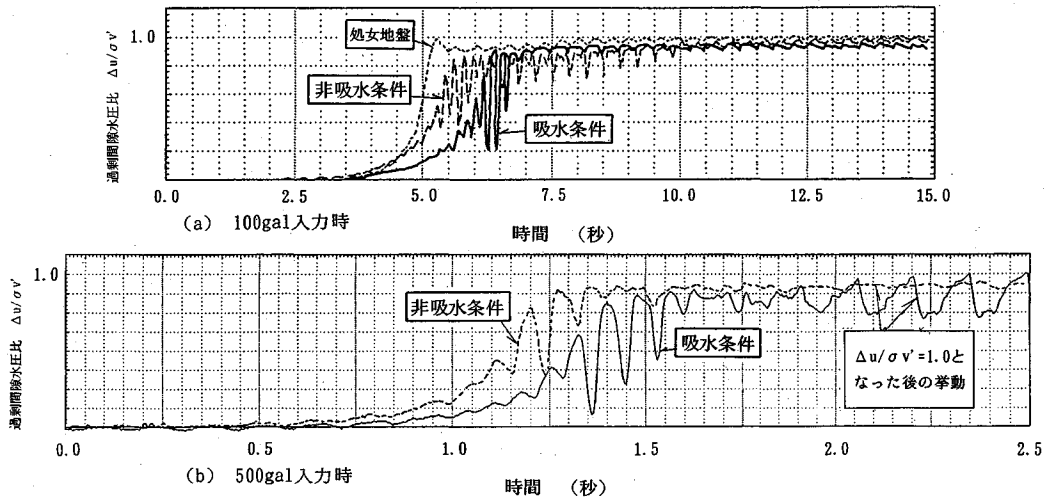
～30°の方向に卓越した集中した構造を示している点が特徴的である。この結果は、吸水条件での締固めでは砂粒子に繰返しせん断が直接加えられて構造強化が図られるのに対し、非吸水条件下では液状化によっていったん浮遊状態となった砂粒子が再び堆積する過程で水中落下時と同様の粒子配列が生じ、いわば「構造の初期化」がもたらされたことを物語っている。両者の相対密度が非吸水条件で71%、吸水条件で74%と大差のないことから、両条件での事後貫入抵抗値の違いは、図—14に示したような内部構造の違いによるものと考えられることができる。なお前報¹⁾の中空ねじり供試体を用いた検討では、前述した理由により両条件での明確な差異を確認するには至らなかった。これに対して本実験では、図—14中に示したCurry¹⁰⁾による集中度VM(前報¹⁾参照)を見ると、初期状態と非吸水条件で共に36～38%、吸水条件で約11%と今回は両者の内部構造の違いが明瞭に現れる結果となった(VMが小さいほどランダム性が強く、砂の内部構造が強固であると考えられている(鈴木・鈴木¹¹⁾)。

図—15は、このような過剰間隙水圧の除去による締固め効果向上のメカニズムをとりまとめたものである。振動締固めによる砂の強度増加は、密度増加と構造強化の2つの効果の足し合わせによってもたらされるものと考えられる。吸水条件と非吸水条件での改良効果の違いは、振動締固め時に地盤で生じている現象の違い(前者が繰返しせん断の確実な付与であるのに対して、後者は人為的な液状化の発生が主体)がもたらす内部構造の差異によるところが大であると結論される。なおSEMによる構造観察は土槽内の1カ所で行っていないが、図—5、図—13に示したように、吸水・非吸水の2条件で貫入抵抗値が異なることや相対密度値に大差のない事実は振動棒からの離れや深度にかかわらず土槽内の各所で見られており、図—15で述べた現象はモデル地盤内で全体的に生じていたものと推察される。

7. 過剰間隙水圧の除去が締固め地盤の耐震性に及ぼす影響

過剰間隙水圧の除去による締固め効果の向上を、より直接的に「締固め地盤の耐震性(加振時の応答)」の面から調べるために振動台実験を実施した(ケース7, 8)。本実験では、振動台の上に設置したせん断土槽に前述した模型実験の各装置(振動棒、吸水装置、非排水境界のメンブレンなど)を取り付け、吸水および非吸水条件にて締固めを行った後、引き続き振動台より正弦波を入力として与えた。モデル地盤を用いた振動台実験では、締固めの効果を耐震性向上の面から定量的に評価することは容易ではない。これは、模型実験での締固め自体が現場締固めとの相似性を満たしていないうえに、例えば、台入力の大きさとモデル地盤の締固め度との関係などについても原位置での地震入力と改良強度との関係を反映させることは不可能に近いからである。従ってここでは、吸水条件および非吸水条件の2種類の締固め地盤の耐震性能に対するあくまで定性的・相対的な考察にとどめることとする。なお、実地盤における締固めを行った場合でも、大地震の到来を待って直接的に地震入力時の挙動を検討することは難しい。これに代わるものとして液状化強度と密接な関係を有するN値(Tokimatsu, Yoshimi, Ariizumi¹²⁾)が用いられているわけであるが、実際の地震時により近い状況を再現する方法としては、例えば現場締固め地盤に振動ロッドを再圧入して強制加振し、その際の間隙水圧挙動を測定する方法(石原・根井・三井・高橋¹³⁾や谷本・末松・坪井¹⁴⁾)が考えられる。このような原位置加振実験の結果については次報にて詳述したい。

実験では、① 締固め前の処女地盤、② 非吸水条件による締固め地盤、③ 吸水条件による締固め地盤、の3者に対して加速度振幅100 galおよび500 galの正弦波(3 Hz)を30秒間入力した(ただし、未改良地盤に対しては100 galのみ)。図—16はその際の過剰間隙水圧比の時刻歴を示している。(a)は100 gal入力のケースを示したものであるが、小型パイプレーターで作製し



図一六 振動台実験における過剰間隙水圧比の時刻歴例

たモデル地盤に対しては加速度振幅 100 gal でさえ過酷な入力であったものと考えられ、3 者とも過剰間隙水圧比が 1 近くに達する結果となった。ただし、水圧比がピークに達するまでに要する時間（繰返し回数）は未改良→非吸水条件→吸水条件の順に大となっており、また、そこに至るまでのサイクリックモビリティ的な挙動も吸水条件での締固め地盤が最も顕著である。この結果から、吸水条件で締固められた地盤の耐震性が非吸水条件よりも相対的に優れていることがうかがえよう。また（b）は、より過酷な 500 gal の入力を与えたケースであるが、この場合も水圧比が 1 に至るまでの時間の違い、サイクリックモビリティの違いなどに吸水条件で締固めた地盤の「ねばり強さ」がうかがわれる。特に吸水条件では、水圧比が 1 に達した後のサイクリックモビリティが著しく、強震時においても有効応力の完全な消失を免れている様子がうかがわれる。このような「ねばり強さ」は締固め工法に特有のものと考えられている（吉見¹⁵⁾）が、吸水条件での締固め地盤では前述した構造強化の影響によってその効果が顕著に現れたものと推察される。なお、このような間隙水圧挙動の差異は加振後の地表面沈下量の違いとなって現れた。例えば（b）の 500 gal 加振後の地表面沈下量を比較すると、非吸水条件で 14.2 mm、吸水条件では 4.6 mm（いずれも平均値）であり、過剰間隙水圧比の最大値は同じであっても加振後の沈下がかなり低減される結果となった。このことは、吸水条件での締固め地盤では、大地震により過剰間隙水圧比が 1 近くまで上昇したとしても、その後の被害は非吸水条件の場合に比べてかなり低減されることを示唆している。

8. 結 論

本文では、飽和砂を振動によって締固める際に発生す

る施工時過剰間隙水圧の除去効果とそのメカニズムを調べるために行った模型実験の結果を報告した。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 非吸水条件および吸水条件での振動締固めが可能な 2 種類の模型土槽を用いて、施工時過剰間隙水圧の除去効果の検証を試みた。この結果、振動締固め中に発生する過剰間隙水圧を人為的に除去することで、振動締固め時の周辺地盤の加速度振幅が大となり、振動エネルギーがより有効に伝達されていることがわかった。

(2) 締固め後の貫入抵抗値を調べた結果、過剰間隙水圧の除去によって顕著な増加が見られた。また、締固めの影響範囲も拡大することから、施工ピッチを広くとった、より効率的・経済的な締固め施工の可能性が示唆された。

(3) 飽和砂の振動締固め効果が、締固め時の過剰間隙水圧の有無（人為的な水圧低下の有無）、地盤の振動加速度、加振時間（回数）の 3 者の組み合わせによって決定づけられることが明らかとなった。

(4) 締固め終了後の土槽からサンプリングした試料を用いて走査型電子顕微鏡による構造観察を行った。この結果、吸水条件と非吸水条件では締固め地盤の構造（粒子配列）が大きく異なり、前者が「ランダム構造」、後者が「集中構造」の傾向を示すことが判明した。また締固め後の密度には両者で顕著な違いが見られないことから、水圧低下による締固め効果の向上が主に「砂の粒子構造の強化」によってもたらされていることが裏付けられた。

(5) せん断土槽内で作成した締固めモデル地盤を振動台上で加振し、耐震性能の面から過剰間隙水圧の除去効果の検証を試みた。この結果吸水条件で締固めた場合、同一の入力に対し非吸水条件の場合よりも過剰間隙水圧

の発生が遅く、かつサイクリックモビリティが顕著に現れることがわかった。

本研究では、前報¹⁾で述べた中空ねじり試験結果の中で示唆された施工時過剰間隙水圧の除去効果を、より実施工に近い模型実験のレベルで検証することができた。

謝辞 本研究を行うにあたり、(財)電力中央研究所企画部 西 好一博士より貴重なる御助言をいただいた。また実験に際しては、前田建設技術研究所 清水英樹研究員の助力を得た。末筆ながら記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 石黒 健・飯島 健・嶋田三朗：過剰間隙水圧の発生を伴う繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液化強度特性，土木学会論文集投稿中。
- 2) 藤田秀夫・多賀谷宏三・日下 理：振動グイによる飽和砂の締固め，土質工学会論文報告集，Vol.15，No.1，pp.103~111，1975。
- 3) 谷本喜一・野田 耕：飽和砂層の振動締固めについて，第2回土質工学会研究発表会講演集，pp.195~198，1967。
- 4) 平間邦興・松本 伸：砂地盤の再液化特性に関する実験的研究，大林組技術研究所報，No.35，pp.1~5，1987。
- 5) 野田節男・喜田 浩・飯田 毅：排水機能付鋼杭による液化対策に関する実験的検討，地盤の液化対策に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.227~232，1991。
- 6) Shibata, T. and Teperaksa, W. : Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests, 土質工学会論文報告集，Vol.28，No.2，pp.49~60，1988。
- 7) Youd, T.L. : Densification and Shear of Sand During Vibration, Jour. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.96, No. SM 3, pp.863~880, 1970。
- 8) 最上武雄・徳江俊秀：振動締固め現象に関する基礎的研究，第6回土質工学会研究発表会講演集，pp.293~296，1971。
- 9) Castro, G. : Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, Jour. of the Geotech. Eng. Found. Div., ASCE, Vol.101, No. GT 6, pp.551~568, 1975。
- 10) Curray, J.R. : The Analysis of Two Dimensional Orientation Data, Jour. of Geology, Vol.64, pp.117~131, 1956。
- 11) 鈴木輝之・鈴木利文：飽和砂の再液化強度に及ぼす密度と構造変化の影響，土質工学会論文報告集，Vol.28，No.2，pp.187~195，1988。
- 12) Tokimatsu, K., Y. Yoshimi and K. Ariizumi : Evaluation of Liquefaction Resistance of Sand Improved by Deep Vibratory Compaction, 土質工学会論文報告集，Vol.30，No.3，pp.153~158，1990。
- 13) 石原研而・根井基雄・三井進平・高橋康二：砂地盤における振動時の原位置間隙水圧測定，第7回土質工学会研究発表会講演集，pp.317~320，1972。
- 14) 谷本喜一・末松直幹・坪井英夫：砂柱による地盤改良効果の動的判定法に関する研究，第12回土質工学会研究発表会講演集，pp.485~488，1977。
- 15) 吉見吉昭：「ねばり強さ」に関する液化対策の評価基準，土と基礎，No.38-6，pp.33~38，1990。

(1993.8.27 受付)

A BASIC STUDY ON THE VIBRATIONAL COMPACTION OF SATURATED SANDS WITH ELIMINATION OF EXCESS PORE-WATER PRESSURE

Takeshi ISHIGURO, Takeshi IJIMA, Masazumi SUGAI and Saburo SHIMADA

A series of model compaction tests have been carried out to investigate the effect of elimination of excess pore-water pressure during the vibrational compaction work. Consequently, the acceleration of ground during compaction, the penetration resistance of ground after compaction, and the sphere of compacted zone were cleared to be increased by eliminating excess pore-water pressure. And the rise of compaction effects was confirmed to be achieved by "intensifying the structure of sand particles". Furthermore, the qualitative investigation about the earthquake resistance of compacted ground has been done by shaking table tests.