

水位低下を伴うドレーンによる 液状化対策の研究

上原精治¹・三上博²・山口隆史³・村田秀一⁴・兵動正幸⁵

¹正会員 工修 住友建設(株)技術研究所 (〒329-04 栃木県河内郡南河内町仁良川1726)

²正会員 工学 住友建設(株)技術研究所

³正会員 工修 住友建設(株)技術研究所

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

⁵正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

本研究で取り上げた液状化対策工法は、地震時に砂地盤中に打設したドレーン内の水位を一時的に低下させて過剰間隙水圧の消散を促進するものであり、地盤内に下向きの浸透圧を発生させることにより有効応力を増加させ、液状化強度も併せて増加させることを目指している。

本報では、ゆるぎの砂地盤に設置したドレーンの排水条件を変えた土槽実験について示した。円筒土槽を用いた単独井の実験では、ドレーンの排水条件を種々変えることにより、水位低下を伴うドレーンの液状化対策工法の有効性を確認した。また、矩形土槽を用いた二次元モデルの実験ではドレーンの設置間隔の影響を確認した。さらに、両実験から下向き浸透圧による二次液状化の抑止効果を検証した。

Key Words : *liquefaction, downward-infiltration-pressuer, dewatered, drainage, model-test, shaking-table*

1. まえがき

1964年の新潟地震およびアラスカ地震以来、地盤の液状化現象は土質工学上の重要な研究課題として取り上げられ続けており、30年後の今日においては、地盤が液状化に至るまでのメカニズムについてはほぼ解明されるまでに至っている¹⁾。一方、液状化を防止するための対策工法については古くから様々な工法が提案されているが、経済性と確実性の面から振動や衝撃を用いた締固めによる手法がこれまで主流を成してきた。

近年、市街地や既設重要構造物周辺での液状化対策工法の施工の必要性が増すとともに、締固め工法に代わる低振動、低騒音の工法が望まれている。現在その代表的な工法として挙げられているものがグラベルドレーン工法等の間隙水圧消散工法である。

筆者らは、自然排水による間隙水圧消散工法を更に改善した手法として、水位低下を伴うドレーンによる液状化対策工法に係わる一連の研究を行っている²⁾³⁾。本手法は、鉛直方向に打設したドレーン内の水位を地震時に急速に低下して地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散を促進するものである。

今回、ドレーンの排水条件および設置間隔を変えた鋼製土槽による振動実験を行った。その結果、過剰間隙水圧および沈下量の時刻歴の比較から、液状化対策工法の

有効性を確認した。

2. 間隙水圧消散工法の概況

間隙水圧消散工法の歴史は、1976年に Seed and Booker によってグラベルパイルの設計方法として提案⁴⁾されてから始まる。1977年にはわが国で採用が開始され、1993年の釧路沖地震等でその効果が確認されている。これと併行して、過剰間隙水圧の消散を早めることを主体とした種々の工法も提案されてきた。

間隙水圧消散工法の特徴は、地盤に透水性の非常に良い砕石等の材料でドレーンをつくり、これによって地盤全体としての透水性を増すことにある。その結果、過剰間隙水圧が上昇し始めるとそれを速やかに消散させ、過剰間隙水圧が高まっている時間を短くしたり、上昇量を低く抑えることができる⁵⁾⁶⁾⁷⁾。砕石以外のドレーン材として、穴あきパイプを用いるパイプドレーン工法や合成樹脂性の有孔パイプの開発⁸⁾等も行われている。また、真空を利用した揚水により地盤内の間隙水圧を急速に低下させるアクティブ排水による液状化対策工法の開発⁹⁾も行われている。

なお、液状化対策工法の代表的な工法として、パイプフロートーション工法、サンドコンパクション工法等の密度の増大による地盤改良工法(締固め工法)¹⁰⁾があ

る。しかし、この工法では施工中に振動・騒音が発生するため、近接して構造物がある場合や既設の構造物に対しての対策工法としては不向きである。これに対して間隙水圧消散工法は、オーガー等により地盤を削孔して井戸を形成するので、施工中の振動・騒音は少なく、近接して構造物がある場合や既設の構造物に対しても適用できる¹¹⁾。また、間隙水圧消散工法に地盤改良工法を併せた工法として、突き棒で碎石を地盤中に押し込む形で施工することにより、地盤の密度増加を図る工法も開発されている¹²⁾。

以上のように、グラベルドレーンに代表される間隙水圧消散工法は、近年多く実用に供されているが今回我々は、より効果的かつ経済的な工法の開発を目指して水位低下を伴うドレーン工法を提案している。その特徴および従来の工法に対する改善点について次章に示す。

3. 水位低下ドレーンによる液状化対策工法の原理

グラベルドレーン工法等の一般的な間隙水圧消散工法は、自然排水（排水方向は水平のみ）による水圧消散工法であるのに対して、本工法は、ドレーン内の水位を地震時に一時的に地下水位より低下させ、消散効果を高めたものである。すなわち、グラベルドレーンはドレーン内水位が常時地盤水位と同レベルであるため、ドレーン境界面には液状化によって発生した過剰間隙水圧分の動水勾配のみによる排水である。これに対し、本工法では地盤とドレーン内との水位差がドレーン境界面の動水勾配に付加されるため、排水効果の向上が期待される。

図-1に、本工法の概要を示す。基本部材は、下端側のみToStrainer加工を施したドレーンパイプであり、これを地中に埋設する。パイプの上端は密閉構造となっており、バルブの開閉によりパイプ内への圧気の封入や開放が可能である。通常の状態では、圧気によりパイプ内水位は地下水位よりも強制的に下げられた状態である。したがって、ドレーンは密閉構造であるため、排水機能を果たしていない。地震発生と同時にドレーン内の圧力を大気圧まで開放し、地下水位との水位差に相当する水圧差が排水部分（ストレーナー）に発生する。この時、地盤内に発生した過剰間隙水圧の消散を促すとともに下向き浸透流が生じる。この様に本手法は、自然排水型のドレーンに比べ1本あたりの液状化抑止効果が高まる事が期待される。

一般的な間隙水圧消散工法の問題点として、①ドレーン材の長期的な目詰まりに対して品質管理ができない、②ドレーン材の排水性能は一定であるため地盤条件、設計震度等の条件に対してはドレーン間隔、ドレーン径でしか対応できない、③上向き浸透圧による二次液状化の

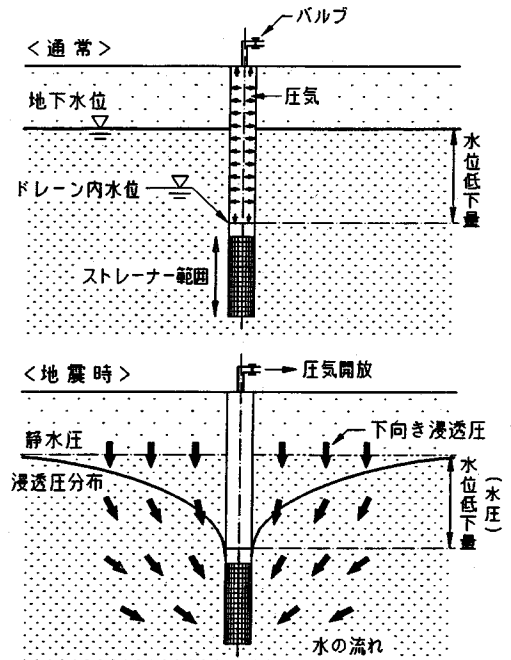


図-1 本工法のイメージ(通常と地震時の比較)

抑止効果が不十分である等が挙げられる。間隙水圧消散工法の場合、長期的にドレーンの透水性を維持することが重要であり、①は重要な課題と言える。一般的な間隙水圧消散工法では、地下水位の変動等による水、砂粒子の移動により目詰まりが発生し、長期的に低下する可能性¹³⁾がある。しかし、本工法では、通常は排水機能を持たないため、ドレーンの目詰まりによる透水性の低下が防止される。また、透水性能の品質管理としてドレーン内の圧気を大気圧に開放、平衡後、再度加圧する透水試験により目詰り状況を把握することができる。さらに、加圧時の逆流により目詰りの解消効果が期待できる等の利点がある。また、②に対しては、ドレーン内の水位低下を設計条件に対して自由に設定できるため一般工法に比べてフレキシブルな設計が可能であり、③に対しては、下向き浸透圧を地盤内に発生させることで地盤の液状化強度を増加できるので二次液状化の抑止も期待できる¹⁴⁾等の効果を併せ持っている。

4. 軸対象モデルによる単独井実験

排水条件の差異が液状化抑止効果に与える影響を把握するために、振動台上に載せた円筒土槽の検証実験を行った。

(1)実験装置

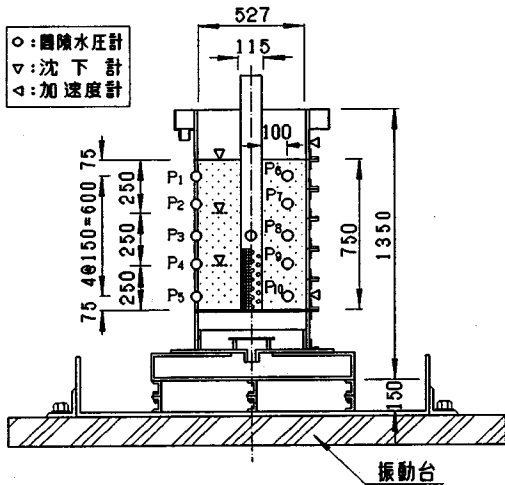


図-2 実験装置図

表-1 排水条件

名称	排水条件
NDP	ストレーナを設けず、排水を行わないもの
DP	ドレーン内の水位を地盤水位と同レベルにしたもの
ADP1	加振中、ドレーン内の水位低下量を一定にするため定常排水を継続したもの
ADP2	ドレーンの上面を密封し、予め圧気によりドレーン内の水位を40cm低下させておき、振動開始と同時に圧気を解放する。圧気解放後は、集水効果により水位は徐々に回復する。

実験は、振動台を用いて地盤全体を完全液化化させるために2 Hzの正弦波、最大加速度400 Galで、振動時間7秒間加えた(加速度の時刻歴を図-5に示す)。ドレーン1本当たりの効果を検証するために軸対象モデルでの実験を試みた。装置は図-2に示す鋼製円筒型の土槽(内径527 mm、高さ1,350 mm)を用いた。この中央にドレーンパイプを設け、周囲に砂を詰めて模型地盤を作成した。ドレーンパイプは、外径115 mm、内径107 mmのPVC製で、先端から300 mmの区間の側面に径15 mmの穴を複数開け、ステンレス製メッシュを巻き付けたストレーナ部を設けている。メッシュの目間隔は、試験砂の10%粒径($D_{10}=0.11$ mm)より小さい0.042 mmメッシュを用いた。模型地盤は、陣屋硅砂7号の絶乾砂を用い2 mmのふるいを介し、水中落下法で作成した。このような方法により概ね $Dr=50\%$ のゆるい模型砂地盤(高さ750 mm)を各試験ケース毎に作成した。

(2)排水条件

実験は、表-1および図-3に示す4種類のドレーン

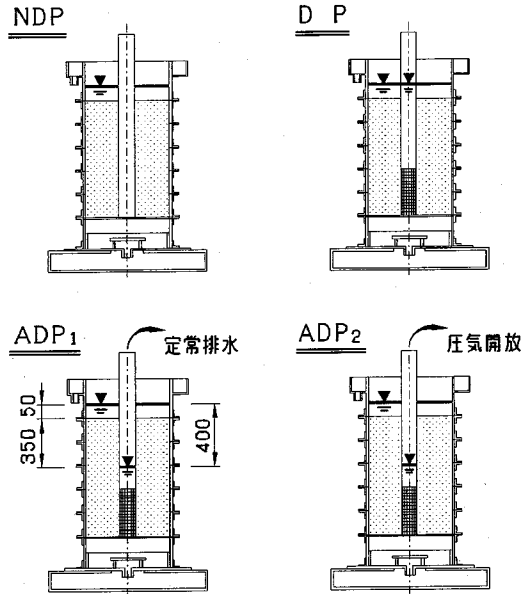


図-3 排水条件概略図

表-2 計測項目

計測項目	数量	備考
地盤内過剰間隙水圧	10	5断面×2点
ドレーン内水位	1	
層別沈下量	3	3断面×1点
加速度	2	土槽の上下端

内の排水条件で行った。本手法を示すモデルはADP2で、NDP、DP、ADP1は、比較のために実施した。NDPは、無処理地盤をモデル化したものであり、境界条件を同一にするために非排水のパイプを地盤内に設置したものである。ドレーン内の水位低下による効果を明確にするために、加振中のDPおよびADP1のドレーン内水位は、それぞれ地盤水位、地盤水位より-40 cmで一定に保持した。以下、本論においては、排水条件の説明にこれらの略号を用いるものとする。

(3)計測項目

計測項目は、表-2に示す様に、地盤内の過剰間隙水圧10点、ドレーン内水位1点、層別沈下量3点、加速度2点とした。層別沈下量は、図-4に示す様に、地盤内の所定位置に埋設した沈下板の変位を土槽外で測定した。沈下板の比重は液状化地盤の比重と同程度とし、円盤の底部に羽根を付けて抵抗を増し、できる限り液状化時の地盤変位に追従できる様な工夫を施した。加振中の地盤振動は、地盤表面および底面の高さに位置する土槽外壁に取り付けた加速度計により計測した。

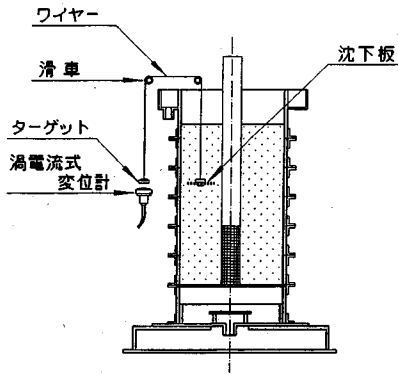


図-4 層別沈下計測の概要

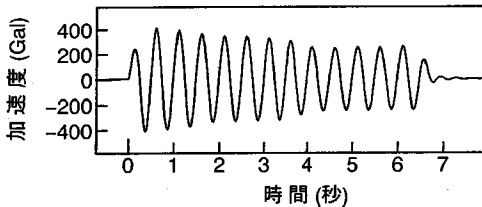


図-5 加速度の時刻歴

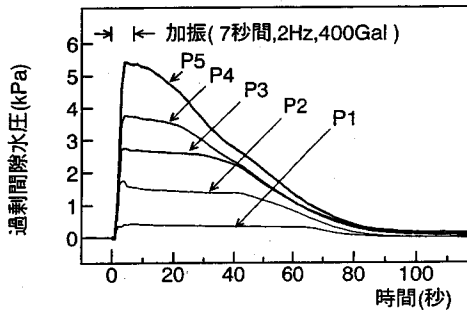


図-6 過剰間隙水圧の経時変化 (NDP)

(4) 実験結果および考察

土槽上部で測定(水平加振方向)した加速度の時刻歴を図-5に示す。

各排水条件における過剰間隙水圧および孔内水位の経時変化を図-6~12に示す。ただし、ADP1およびADP2の過剰間隙水圧は、水位低下前の値を零としており、図中の負値はドレーン内水位低下により間隙水圧が静水圧よりも低下したことを示す。

NDP(図-6参照)では、加振中に各位置の間隙水圧波形に平坦な部分が見られ、各深度の有効土被り圧に相当する過剰間隙水圧が発生し、完全液状化状態に達していたことがわかる。また、加振終了後も同程度の値がしばらく継続している。その後、深部から消散が始まっており、表層付近のP1では下層からの上向き浸透流の影響で60秒間完全液状化が継続している。

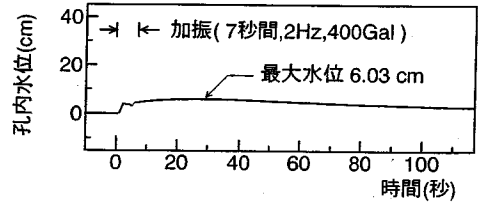


図-7 孔内水位の経時変化 (DP)

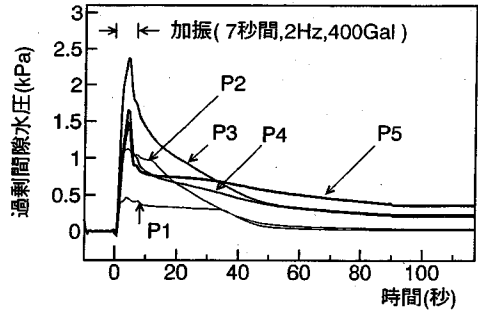


図-8 過剰間隙水圧の経時変化 (DP)

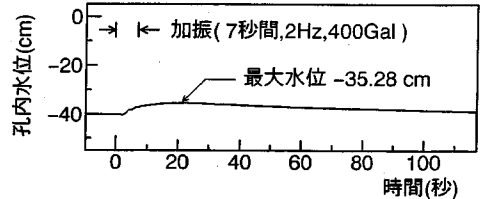


図-9 孔内水位の経時変化 (ADP1)

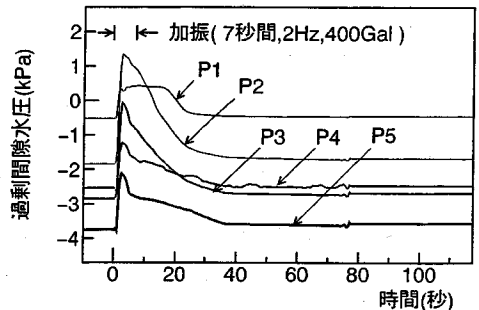


図-10 過剰間隙水圧の経時変化 (ADP1)

DPの孔内水位(図-7参照)は、加振開始直後に数cm上昇しているが、ほぼ地盤水位と同レベルに保たれている。ストレナからの排水効果による下層からの上向き浸透圧の軽減によりP1の完全液状化継続時間(図-8)は40秒に減少している。

ADP1の孔内水位(図-9参照)も、加振開始直後に数cm上昇しているが、ほぼ地盤水位から-40cmの水位に保たれている。水位低下による排水効果がさらに付加されP1の完全液状化継続時間(図-10)は20秒に減少している。

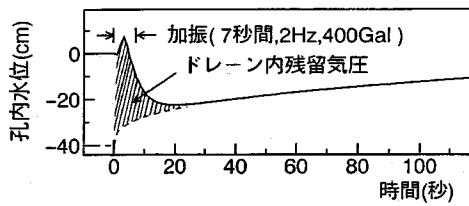


図-1 1 孔内水位の経時変化 (ADP 2)

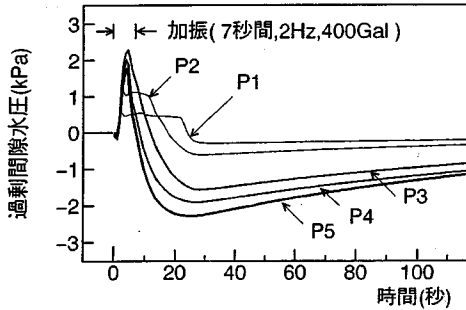


図-1 2 過剰間隙水圧の経時変化 (ADP 2)

図-1 1 に示す実線は、孔内の水圧計から測定した孔内水位(静水位状態をゼロとする)の経時変化である。加振前には圧気的作用により見かけ上の水面位置は-40cmの位置にあるが実質圧力は静水圧と同じである。ちなみに見かけ上のドレーン内水面位置の推移の様子をイメージすると図中の点線の様になる。加振と同時に圧気解放弁を開いているが、排気抵抗が存在するために瞬間的に孔内気圧は大気圧まで低下していない。従って実線で示す実質的なドレーン内水位は約20秒後に最低値(-20cm)を示している。P1の完全液状化継続時間(図-1 2 参照)はADP1よりやや長く25秒程度である。

各排水条件における過剰間隙水圧比 γ_u の代表的な経時変化を図-1 3および図-1 4に示す。ただし、過剰間隙水圧比 γ_u は、地盤中の過剰間隙水圧を初期有効土被り圧で除した値である。図から以下(小項目 a~d)のことが考察される。

a)完全液状化継続時間

均質な地盤が液状化した場合、下層からの上向き浸透流によって表層部が最も長く完全液状化が継続する。地盤内の排水条件を変えた場合、その効果は最終的に表層部の完全液状化継続時間に影響をおよぼす。そのため、完全液状化継続時間は、ドレーンの排水効果を全体的に評価する簡易なパラメータとして有効と考える。図-13では排水効果の差異が明確に見られ、完全液状化継続時間はNDP 60秒、DP 40秒、ADP2 25秒、ADP1 20秒である。

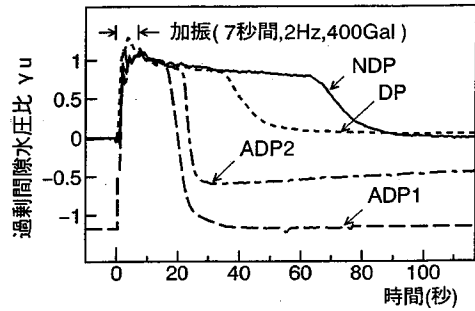


図-1 3 過剰間隙水圧比の経時変化 (P 1)

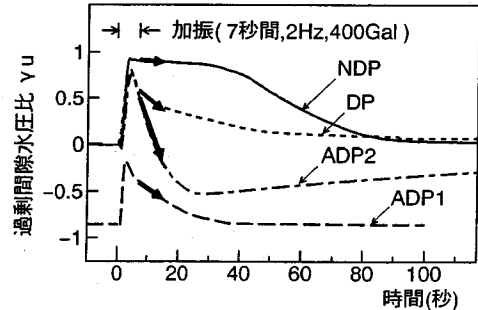


図-1 4 過剰間隙水圧比の経時変化 (P 8)

b)過剰間隙水圧発生量

図-1 4より、加振終了時の過剰間隙水圧比 γ_u は、NDPでは完全液状化状態 $\gamma_u=1$ であったのに対して、DPは $\gamma_u=0.8$ に抑制されている。この差は、DPのストレーナーによる排水効果を示すものである。さらに、ADP1では、過剰間隙水圧の発生量も小さく、40cmの水位差をドレーン内に与えることによってストレーナーによる排水効果がさらに向上したことを示している。

c)過剰間隙水圧消散速度

図-1 4より、過剰間隙水圧比が最大に達してからの消散の時間変化に着目すると、ADP2が最も早く、次いでADP1、DP、NDPの順である。

NDPは加振終了後もしばらく完全液状化状態が継続しているのに対してストレーナーを設けた他のケースとでは消散速度に明確な差が見られる。これは、排水条件を向上させることで消散速度が速まることが推察される。ADP2の場合、バルブを通じて圧気が完全に解放されるまでに約20秒要する。そのため、加振初期の圧気開放が不完全な状態では、間隙水圧発生量はDPと同程度である。しかし、圧気開放の進行とともに排水条件が向上し加振終了後の消散速度(図-1 4中の矢印)はADP2が卓越している。ドレーン内の定常排水を維持せず孔内水位の回復を許しても、効果的に過剰間隙水圧の消散が行われていることがわかる。

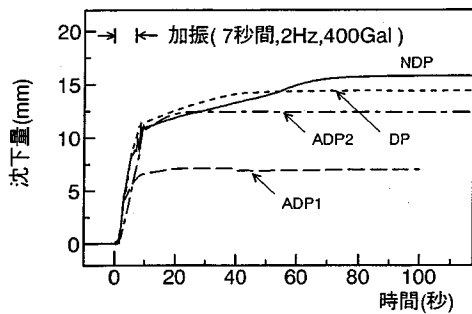


図-15 各排水条件における沈下量の経時変化

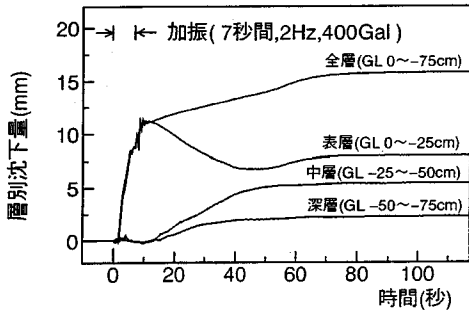


図-16 層別沈下量の経時変化 (NDP)

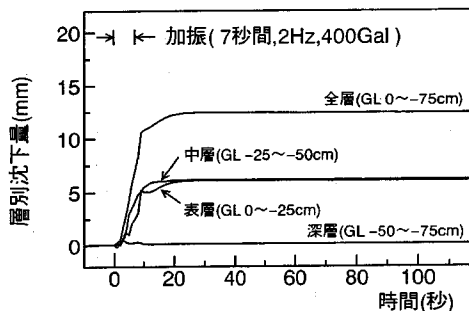


図-17 層別沈下量の経時変化 (ADP2)

d) 圧気開放の時期

今回の実験では、圧気の開放を加振開始と同時にを行った。図-11のADP2の孔内水位の経時変化を見ると、最低値 -20 cm に達するまでに約 20 秒程度要している。これは、実験に用いた開放バルブ口径の制約により、圧気の大气圧までの回復に 20 秒程度要したものである。もし、実際の地震時において、初期の振動を検知して、主要動の始まる数秒間に圧気バルブを開放することができれば、より効果的に過剰間隙水圧の発生を抑制することが期待できる。

e) 沈下量

各排水条件における沈下量時刻歴の比較図を図-15に示す。排水機能を強化させたものほど、最終沈下量は抑

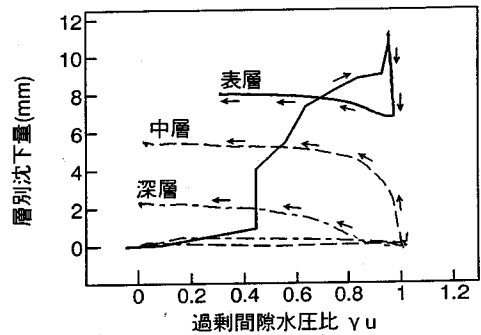


図-18 過剰間隙水圧比と層別沈下量の関係 (NDP)

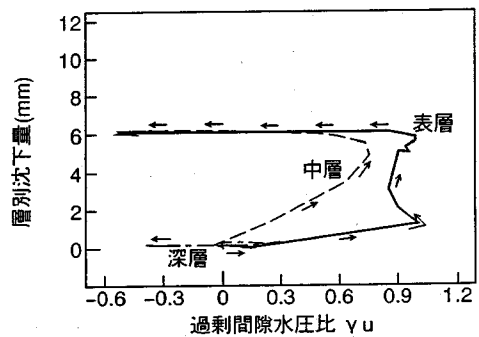


図-19 過剰間隙水圧比と層別沈下量の関係 (ADP2)

制されている。沈下量の大半は加振中に発生しているが、加振後の変化は各排水条件により異なる傾向を示す。NDPおよびDPでは加振後も沈下は発生しており、過剰間隙水圧消散に伴う圧密沈下であることが推察される。これに対して、ADP1およびADP2では圧密沈下はほとんど発生しておらず、水位低下による排水効果が二次液状化を抑制したことが推察される。

次に、NDPおよびADP2の層別沈下量を図-16および図-17に示す。

NDPの層別沈下(図-16)を見ると、表層部では加振中に急激な沈下を生じ加振終了後は逆に隆起している。さらに50秒前後から再度沈下を生じている。中層および深層においては、加振終了後徐々に沈下が進行している。ADP2の場合(図-17)では、沈下のほとんどは加振中に生じており、深層部では沈下が生じていない。また、NDPの表層部でみられる体積膨張はみられない。

上述の、NDP表層部の一時的な隆起は、深部からの上向き浸透圧に起因する体積膨張によるものと推察され、過剰間隙水圧変化と対比させてみると興味深い現象が認められる。過剰間隙水圧比と層別沈下量の関係を図-18および図-19に示す。

NDPの表層沈下(図-18)は、過剰間隙水圧発生

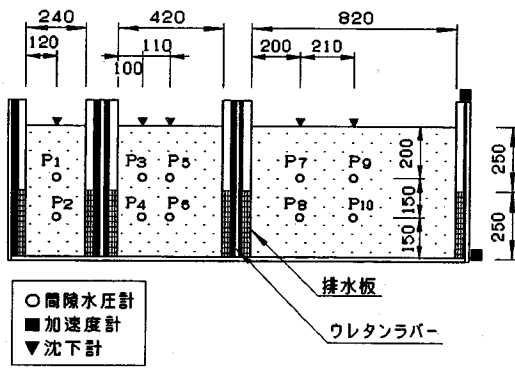


図-20 実験装置図

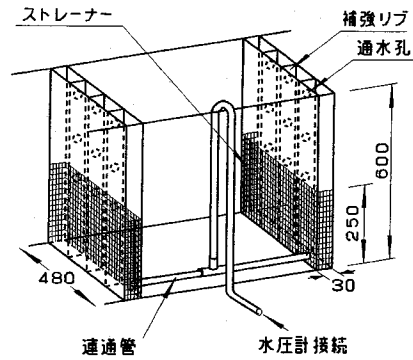


図-21 排水装置図

表-3 縮尺モデルと実寸の比較

	10分の1モデル	実物
加振時間	5 s	28.1 s
液状化層厚	50 cm	5 m
透水係数	0.02 cm/s	0.11 cm/s
有効土被り圧	3.92 kPa	39.2 kPa

過程で進行し、完全液状化状態 ($\gamma_u=1$) で一時的に隆起している。表層部の完全液状化は深部からの上向き浸透圧に起因するものであり、この間に生じた隆起は体積膨張によるものと推察される。その後、表層、中層、深層の全層において過剰間隙水圧の消散に伴って沈下が進行しており、圧密沈下によって生じた静的な沈下であると推察される。ADP 2 の場合 (図-19)、沈下は過剰間隙水圧発生過程に生じており、NDP でみられた完全液状化時の隆起、消散過程の沈下はみられない。これは、ドレーンパイプ下部のストレーナーへ向かう水の流れにより、深部からの上向き浸透圧が抑制されたことを示唆するものである。

5. 矩形土槽による 2 次元モデル実験

ドレーン間隔の影響を確認するために、振動台上に載せた矩形土槽による検証実験を行った。

(1) 実験装置

図-20 に実験装置図を示す。ドレーン間隔の影響を確認するために、装置は矩形の 2 次元土槽 (長さ 180 cm × 奥行 50 cm × 高さ 60 cm) を、排水装置の配置間隔の比が 4 : 2 : 1 となるよう 3 槽に仕切った構造とした。これにより 3 種類の模型地盤を同時に加振実験できるようにした。また、各隔壁にウレタンラバーを貼付けて固定端の影響を小さくした。ウレタンラバーの厚みは、隔壁間隔の影響を考慮して、地盤剛性を同程度にすることを意図して土槽間隔に反比例させ予備実験を行い確認のうえ決定した。

排水装置の概要を、図-21 に示す。装置は、元来円柱状のドレーンを 2 次元的にモデル化したものであり、鋼製の中空矩形板 (幅 3 cm × 奥行 48 cm × 高さ 60 cm) で、下端 25 cm を 42 μ m のステンレスメッシュで覆った構造である。この装置を各土槽の両端部 (加振方向に

直交した仕切板) に取り付けてある。なお、両端のドレーン内の水位を常に等しく保つため、それぞれの下端部は連通管で繋いである。この連通管内の水圧によりドレーン内水位を計測した。

地盤材料は、陣屋珪砂 7 号 (平均粒径 0.23 mm, 土粒子比重 2.64) を用い、ふるいを介した水中落下法により相対密度 40 % の模型地盤を作成した。実験は縮小率 1/10 のモデルとした。ここで、支配方程式に基づいた併合の方法による相似則を参考にすれば、実物の各パラメータ時間 T 、間隙水圧 P 、透水係数 k 、距離 L は、縮小率 γ により以下のように表せる。

$$T' = T \times \gamma^{3/4}$$

$$P' = P \times \gamma$$

$$K' = K \times \gamma^{3/4}$$

$$L' = L \times \gamma$$

上式の相似則を考慮した場合、今回のモデルと実物の比較は、表-3 のようになる。

模型地盤で陣屋珪砂 7 号 ($D_r=50\%$ で $k=0.02\text{cm/s}$) を用いる場合、実物での透水係数は $k=0.11\text{cm/s}$ となり、粗砂地盤相当を対象にしていることとなる (表-4 参照)。本実験は、本来、液状化が容易に生じうる細砂・中砂 (透水係数 $k=0.005 \sim 0.1\text{cm/s}$) 程度の地盤を対象にしているため、1/10 のモデルの透水係数は、間隙水に粘性溶液を加えて小さくする必要がある。そのため、水道水に CMC (カルボキシルメチルセルロース) を加えて粘度を 0.1 Pa·s とし、透水係数を 0.002 cm/s (水道水の場合の 1/10) に低下させた (図-22 参照)。

表-4 粒径と透水係数の関係¹⁴⁾

分類	平均粒径 (mm)	粒径範囲 (mm)	透水係数 (cm/s)
微細砂	0.1	0.05~0.10	0.001~0.005
細砂	0.15	0.10~0.25	0.005~0.01
中砂	0.35	0.25~0.50	0.01~0.1
粗砂	0.6	0.50~1.00	0.1~1.0
小砂礫	2.0	1.00~5.00	1.0~5.0

表-5 計測項目

項目	数量	備考
地盤内過剰間隙水圧	10	3地盤 × 2点 × 2断面
ドレーン内水位	3	3地盤 × 1点
加速度	2	土槽の上下端
地表面沈下量	5	3地盤 × 2点 × 1断面

(2)排水条件

ドレーンの排水条件は、大型円筒土槽実験と同様に表-1のADP1を除く3種類で行った。NDPは無処理地盤をモデル化したものであり、土槽幅、ウレタンラバーの厚みの影響を確認するために実施した。ADP2では、あらかじめドレーン上部を密封して25cm水頭の気圧を作用させ、加振と同時に大気圧に解放し水位回復を計した。

(3)実験方法

加振実験は、振動台を用い地盤全体を完全液状化させるために最大加速度180Gal、5Hzの正弦波で5秒間振動させた。加振方向は、長手方向の水平1方向とした。NDPの無処理地盤(Dr=40%)で、ほぼ5秒後に完全液状化に達すること、および、3つの各土槽で液状化過程が同一であることを確認している。計測項目は、表-5の通りである。

地盤内に設置する間隙水圧計は、吊り糸により所定の高さに設置した。ケーブルは、壁面まで水平に延ばし壁面から垂直に地表へ導いた。この時、ケーブルと壁面の隙間が水みちにならないよう粘着テープでシールした。同様に底面に沿わせた連通管もシールした。

なお、加振実験に先立ち、ウレタンラバーの厚みの影響および間隙水の粘度の影響を確認するための予備実験を実施した。

(4)実験結果および考察

加振実験に先だち実施した、間隙水のCMC濃度を変えた定水位透水試験の結果を図-22に示す。CMCにより粘性を調整した間隙水の場合、透水係数kは粘度ηに反比例しており、図から明らかのように粘度比(η₀/η)と透水係数比(k/k₀)は1:1の関係にある。本実験に用いる粘性溶液の粘度を0.1Pa・s(粘度比0.1)

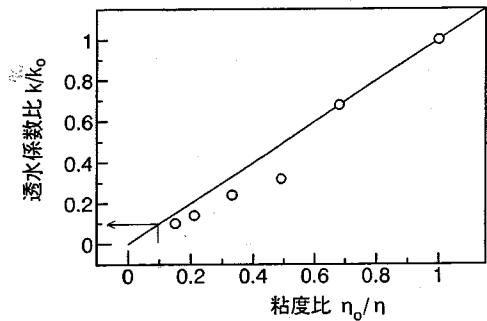


図-22 CMC濃度0%時の透水係数、粘度をk₀、η₀とした場合のk/k₀とη₀/ηの関係

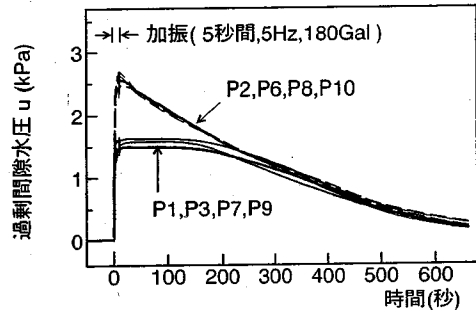


図-23 過剰間隙水圧の経時変化(NDP)

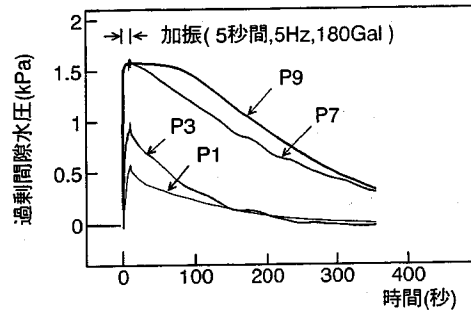


図-24 過剰間隙水圧の経時変化(DP)

とした場合、透水係数は1/10に低下する。

各排水条件における代表的な過剰間隙水圧の経時変化を、図-23~25に示す。図-23は、NDP(無処理地盤)に対する実験結果である。ただし、本ケースのP4、P5位置では、残念ながらセンサー不良のためデータが得られなかった。過剰間隙水圧の発生および消散は同一深度で、ほとんど類似した波形である。仕切り間隔の異なる各土槽部分において、ほぼ均等に過剰間隙水圧が発生、消散しており、ほぼ同一な地盤振動条件であったことが伺える。従って、以後の各実験ケースにおいて、隔壁間隔が異なることによる境界条件の差違は無視できるものとする。DP(図-24)およびADP2(図

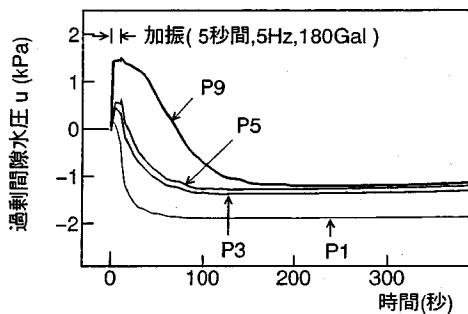
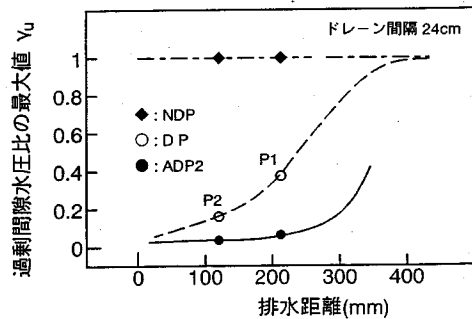


図-2 5 過剰間隙水圧の経時変化 (ADP 2)

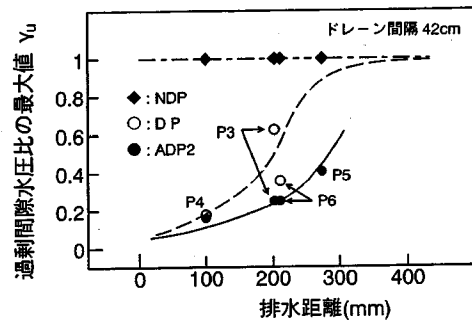
- 2 5) の場合、初期(加振中および直後)の過剰間隙水圧の発生量ならびに消散速度はドレーン間隔により異なる結果を示している。また、過剰間隙水圧の最大値は、ドレーン間隔が狭くなる(P9→P7→P5→P3→P1)に従って低下している。また、過剰間隙水圧の消散速度もドレーン間隔が狭くなるに従って早くなっていることがわかる。ただし、図-2 4のP5および図-2 5のP7位置では、センサー不良のため記録が取れていない。

ドレーン間隔毎に排水距離と過剰間隙水圧比の最大値の関係を各排水条件について整理すると図-2 6のようになる。本来、排水距離は流線に沿った距離であるが、ここでは概略の傾向を把握するため水圧計からストレーナーまでの最短(直線)距離とした。ドレーン間隔 24 cm の場合、排水条件の違いによって過剰間隙水圧比の最大値には明確な差違がみられる。ドレーン間隔 42 cm の図において、P 3、P 6のDP、ADP 2の両者の結果を比較すると興味深い傾向が推察される。P 3、P 6の排水距離はほぼ等しいにもかかわらずDPの場合(○印)、過剰間隙水圧比の最大値は異なる結果を示している。これは、グラベルドレーンに代表される自然排水のみによる間隙水圧消散工法では水平方向の排水が卓越しているためにストレーナーと同レベルにあるP 6は過剰間隙水圧比が効果的に抑制されているもののストレーナーより上部のP 3では上向き浸透圧による二次液状化によりP 6程は過剰間隙水圧の発生が抑制されなかったものと思われる。同様のことが、ドレーン間隔 82 cm の場合のP 7およびP 10についても推察される。これに対して、ADP 2ではP 3もP 6と同程度に抑制されており、水位低下による下向き浸透圧がストレーナーより上部の地盤の二次液状化を効果的に抑制したことが伺える。ただし、DPはADP 2と比較するためにストレーナーはドレーン下半部のみ設けており、基本的にグラベルドレーンとは異なる。そのため、グラベルドレーンであれば、P 3の位置においてはP 4(○印)と同等の効果があるものと思われる。

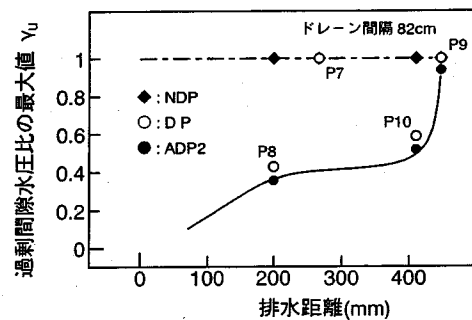
次に、ADP 2のドレーン間隔毎に排水距離と過剰間



(a)ドレーン間隔24cm



(b)ドレーン間隔42cm



(c)ドレーン間隔82cm

図-2 6 排水距離と過剰間隙水圧比の最大値

隙水圧比の最大値の関係を整理すると図-2 7のようになる。ドレーン間隔が 82 cm の場合、排水距離が 40 cm 以上になると過剰間隙水圧比は 0.5 を越えている。ドレーン間隔 42 cm、24 cm では、ほぼ全槽で過剰間隙水圧比は 0.4 以下に抑制されている。

6. まとめ

水位低下を伴うドレーンによる液状化抑制効果を、排水条件を変えた比較実験から検討し、以下の知見を得た。(1)水位低下を伴うドレーンは、自然排水型のドレーンに比べて、過剰間隙水圧の消散速度が早く、また、下

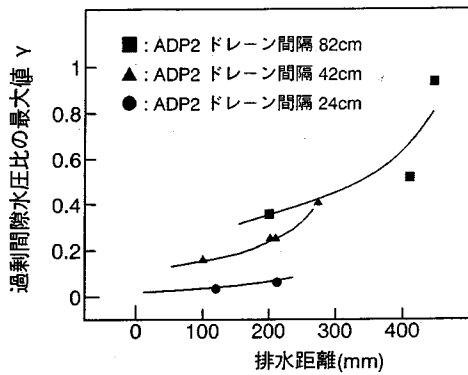


図-2.7 排水距離と過剰間隙水圧比の最大値(ADP2)

向きの浸透圧を生じさせることが可能である。その結果、自然排水型のドレインに比べ1本当りの液状化対策効果を飛躍的に向上できることを確認した。

- (2) ドレイン内の定常排水を維持せず孔内水位の回復を許しても、効果的に過剰間隙水圧の消散がおこなわれることを排水条件を変えた比較実験による過剰間隙水圧の消散波形から確認した。
- (3) 下層からの上向き浸透圧に伴う二次液状化が水位低下ドレインによる下向き浸透圧によって抑止できることを単独井実験による層別沈下量の比較および2次元モデル実験による排水距離と最大過剰間隙水圧比の関係より検証した。
- (4) ドレイン設置間隔が液状化抑止効果に与える影響について定性的な範囲で把握することができた。

今後は、本工法の設計手法の確立に向けて解析的な検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂出版，pp. 98-99, 1991.
- 2) 森信介，三上博，山口隆史：水位低下ドレイン工法の液状化対策効果について，土木学会第48回年次学術講演会，pp. 586-587, 1993.
- 3) 上原精治，森信介，三上博，山口隆史，村田秀一：水位低下ドレインの液状化対策効果について，第29回土質工学研究発表会，pp. 1089-1090, 1994.
- 4) Seed, H.B. and Booker, J.R. : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, J. GED, ASCE, Vol. 103, No. GT7, pp. 757-768, 1977.
- 5) 田中幸久，国生剛治，江刺靖行，松井家孝：グラベルパイルの液状化防止効果，電力土木，No. 188, pp. 11-20, 1984.
- 6) Iai, S. and Koizumi, K. : Estimation of Earthquake Induced Excess Pore Water Pressure for Gravel Drains, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 679-684, 1986.
- 7) 伊藤克彦，中島豊，大北康治，大石博：締固めを伴うグラベルドレイン工法，土と基礎，Vol. 39, No. 2, pp. 41-46, 1991.
- 8) 井合進，梶谷卓美：液状化対策としてのプラスチックドレインの振動実験と解析，港研資料，No. 647, 1989.
- 9) 石川裕他：アクティブ排水による液状化対策工法，第27回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 1173-1174, 1992.
- 10) 同(1), pp. 142-144.
- 11) 同(1), pp. 145-146.
- 12) 同(7)
- 13) 善功企，大根田秀明，入沢一明：砕石ドレイン材の目詰り評価法に関する室内試験，港研資料，No. 534, p. 20, 1985.
- 14) 土質学会；土質工学ハンドブック，pp. 69-70, 1982.

(1995. 8. 1 受付)

EFFECT OF THE DEWATERED VERTICAL DRAIN METHOD AGAINST SOIL LIQUEFACTION

Seiji UEHARA, Hiroshi MIKAMI, Takashi YAMAGUCHI,
Hidekazu MURATA and Masayuki HYODO

This paper describes a new countermeasure for soil liquefaction proposed by the authors. The method consists of promoting excessive pore water pressure dispersion during an earthquake by temporarily lowering the water level in the vertical drains driven into sandy soil.

Two shaking table tests using a large-size axisymmetric model and a two-dimensional model were carried out in order to verify the effect of the spacing distance and the drainage condition of vertical drains. The results showed the effect of dewatered vertical drains against the soil liquefaction, and some information on the effect of drain spacing distance was obtained.