

6.1.6 自由流動実験 3

電気油圧式振動台で衝撃振動より強い振動を約1秒間入力し自由流動に与える影響について調べた。データレコーダーの操作ミスで TEST 24 は間隙水圧の値が4秒程度しか得られず、また TEST 26 では間隙水圧のデーターをとることができなかった。加速度はやはり地表面に近づくほど小さくなる。A3 と A4 を比べることにより斜面方向に関しては斜面肩の境界に近いところより中央部の方が加速度が大きくなっているのがわかる。入力波が止まると地盤の振動も直ちに止まっており振動停止後地盤が自由振動するのは極めて短時間である。

間隙水圧記録の初期に現れている振動成分は動水圧によるものである。間隙水圧は直ちに上昇し P9-P6 の記録では水圧の下降再上昇が見られる。

密になるほど変位量は小さくなっており衝撃振動による実験結果と同じ傾向である。間隙比が0.934になると振動が止まると変形も即座に止まっている。つまりこの密度になると自由流動は起こらないということである。衝撃振動による実験との比較は第7章で定量的に取り扱う。

表 6.6 実験の諸データ (自由流動実験 3)

| TEST No. | 地盤作製方法 | 初期間隙比 | 加振方法 | 加振方向 |
|----------|--------|-------|------|------|
| 24 | 湿潤締め法 | 1.034 | 衝撃加振 | 横 |
| 25 | 湿潤締め法 | 1.000 | 衝撃加振 | 横 |
| 26 | 湿潤締め法 | 0.961 | 衝撃加振 | 横 |
| 27 | 湿潤締め法 | 0.934 | 衝撃加振 | 横 |

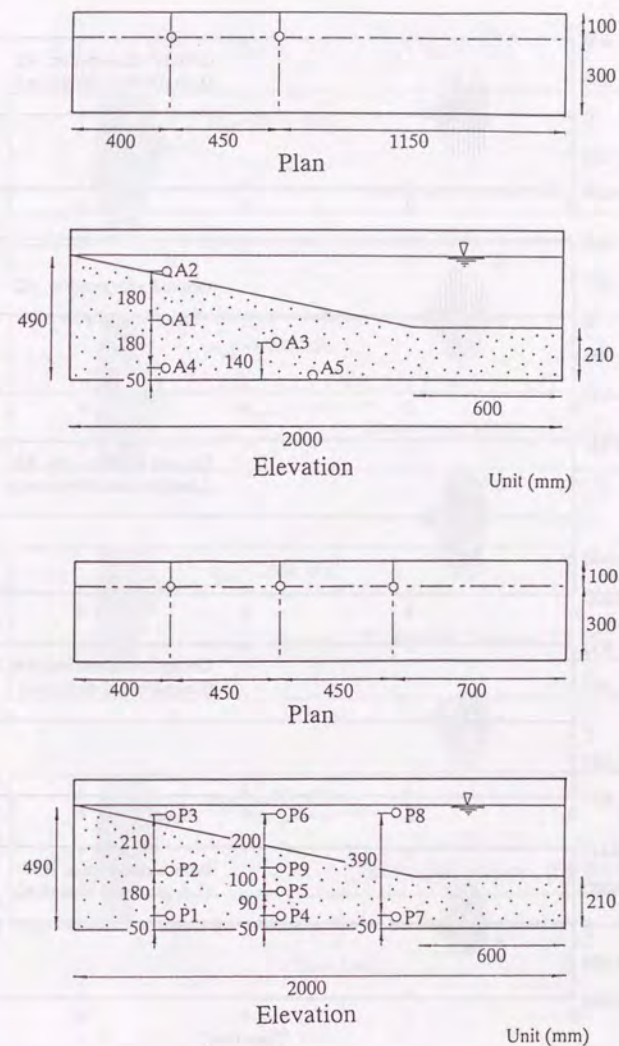


図 6.91 測定器配置図 (自由流動実験 3)

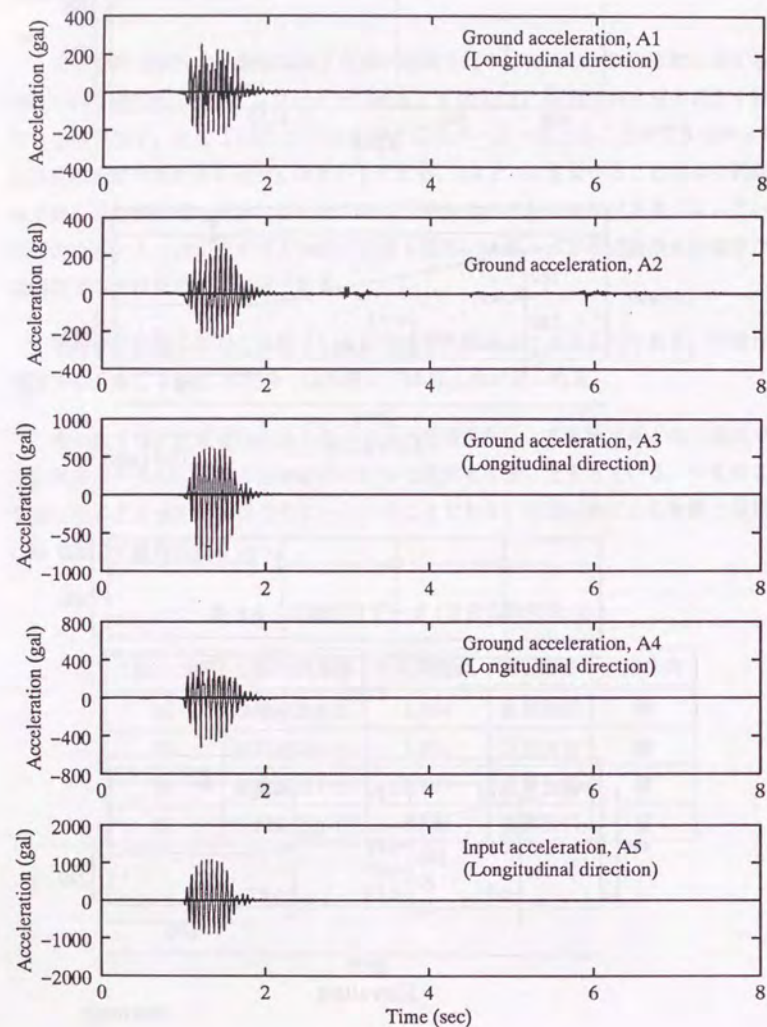


図 6.92 時刻歴測定記録 (TEST 24, その1)

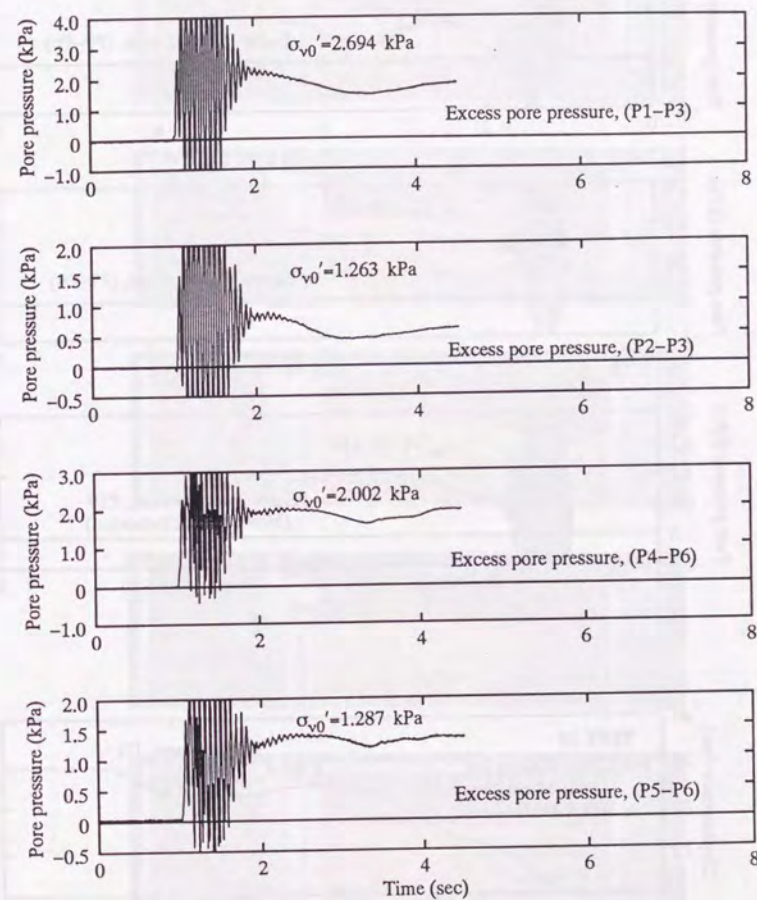


図 6.93 時刻歴測定記録 (TEST 24, その2)

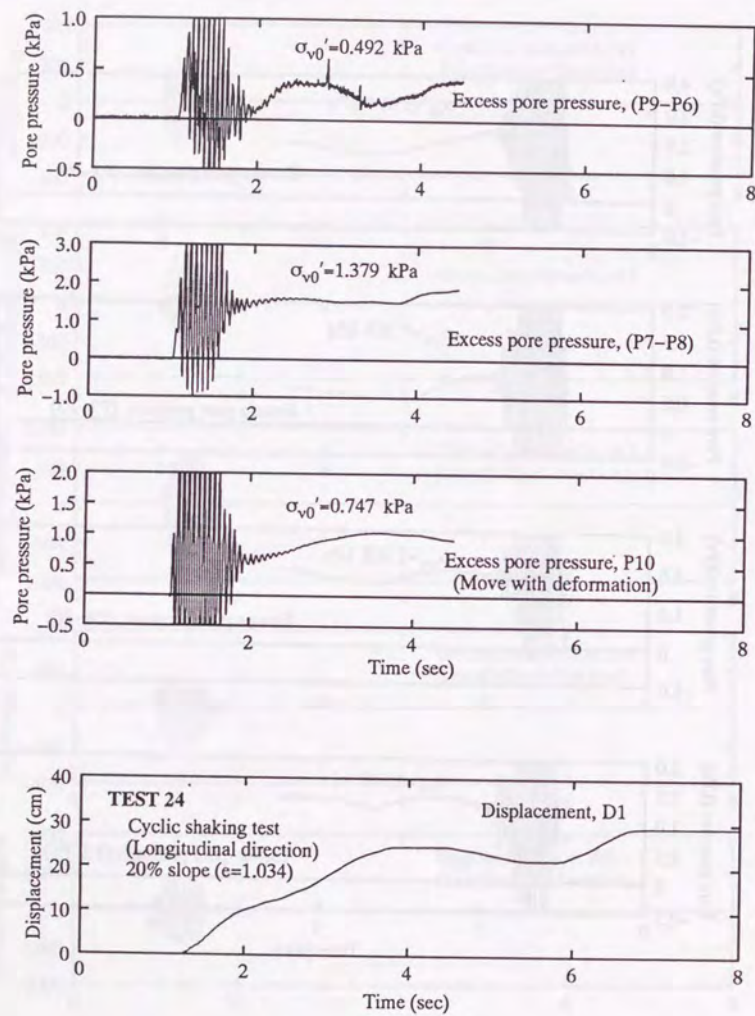


図 6.94 時刻歴測定記録 (TEST 24, その 3)

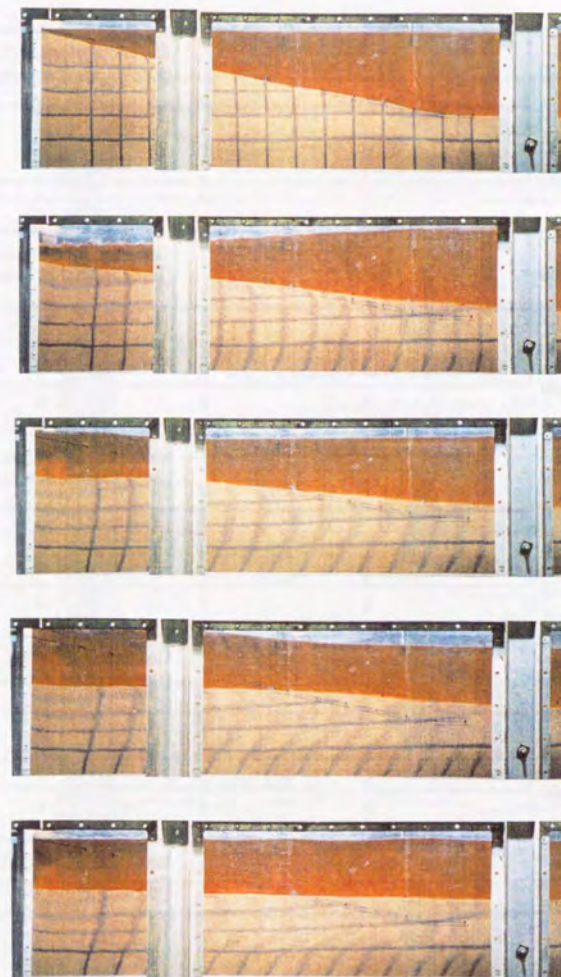


図 6.95 地盤の変形進行写真 (TEST 24)

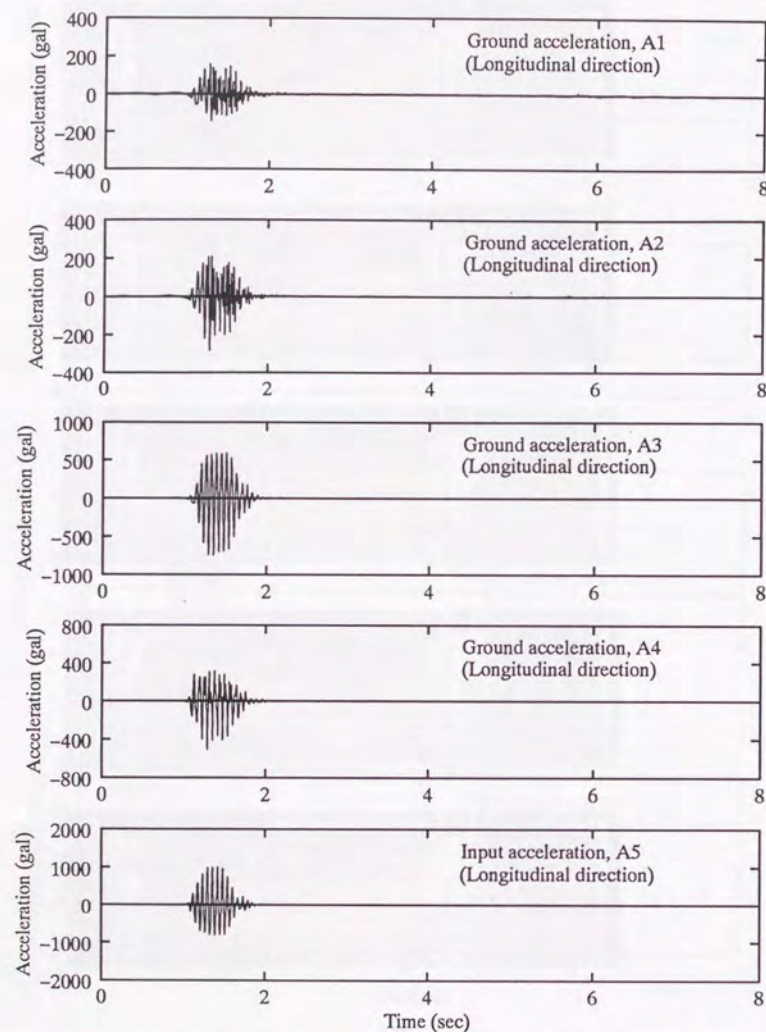


図 6.96 時刻歴測定記録 (TEST 25, その 1)

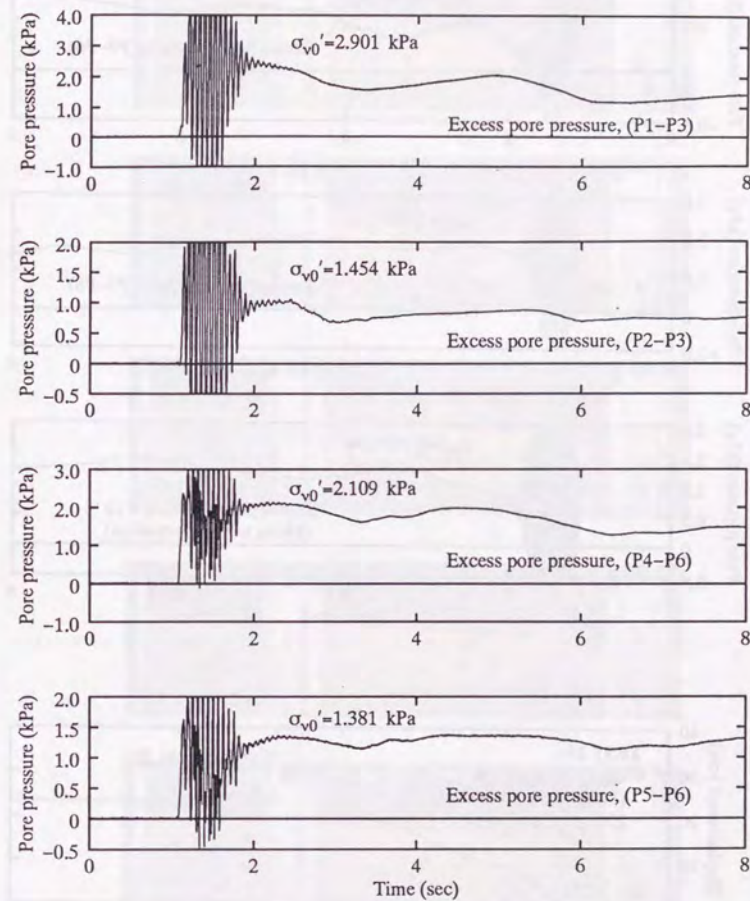


図 6.97 時刻歴測定記録 (TEST 25, その 2)

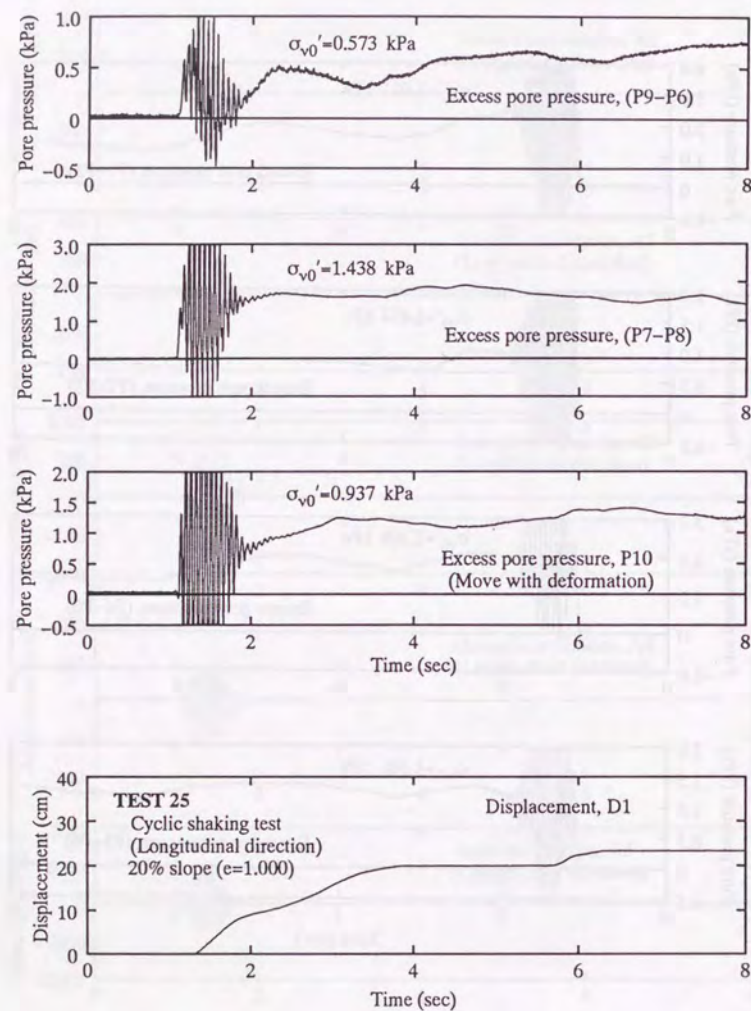


図 6.98 時刻歴測定記録 (TEST 25, その 3)

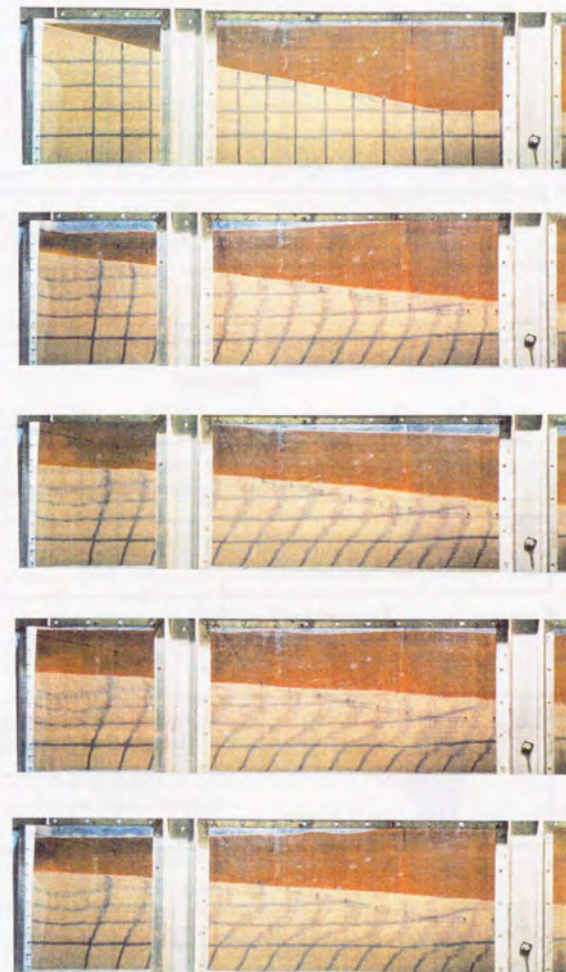


図 6.99 地盤の変形進行写真 (TEST 25)

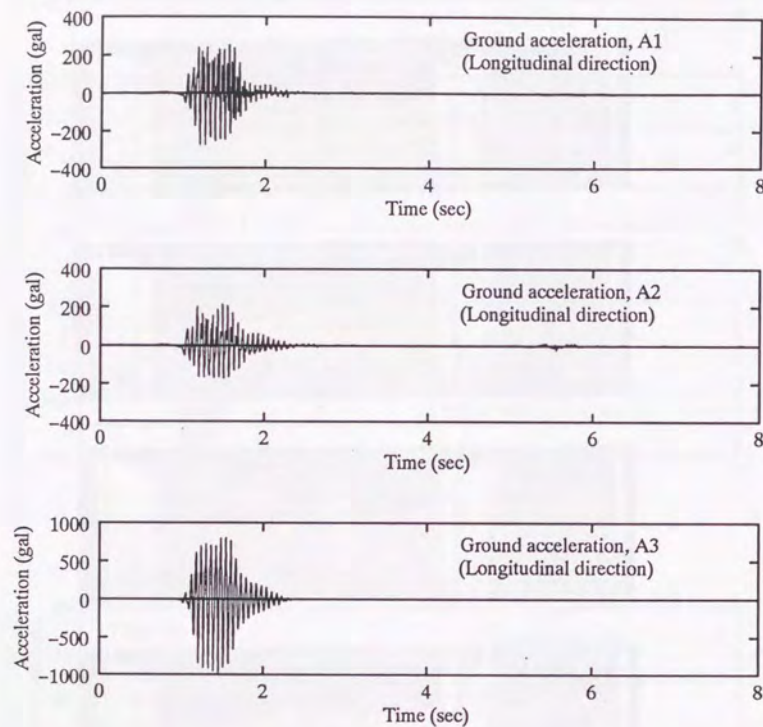


図 6.100 時刻歴測定記録 (TEST 26, その1)

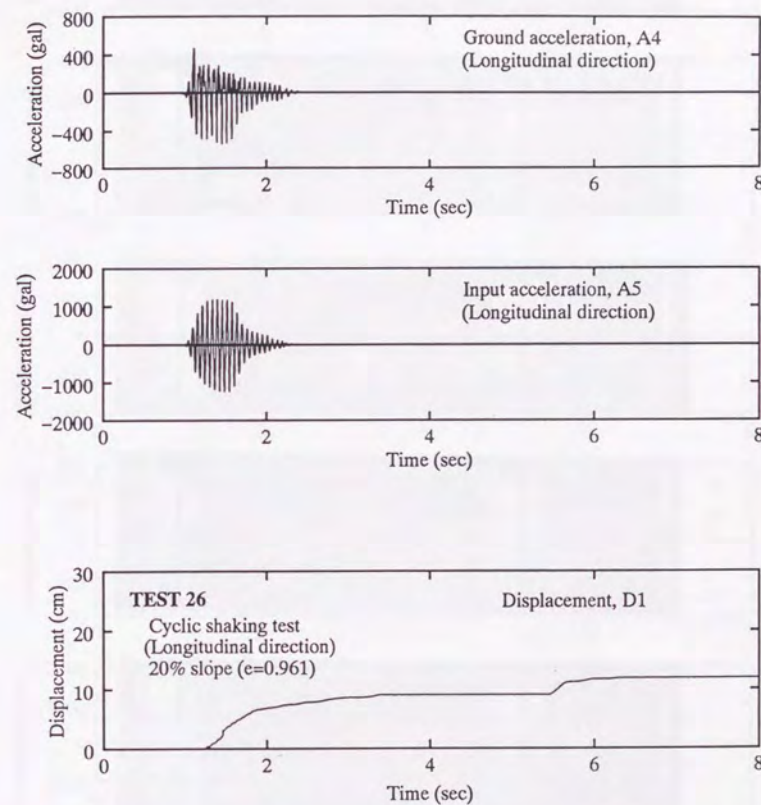


図 6.101 時刻歴測定記録 (TEST 26, その2)

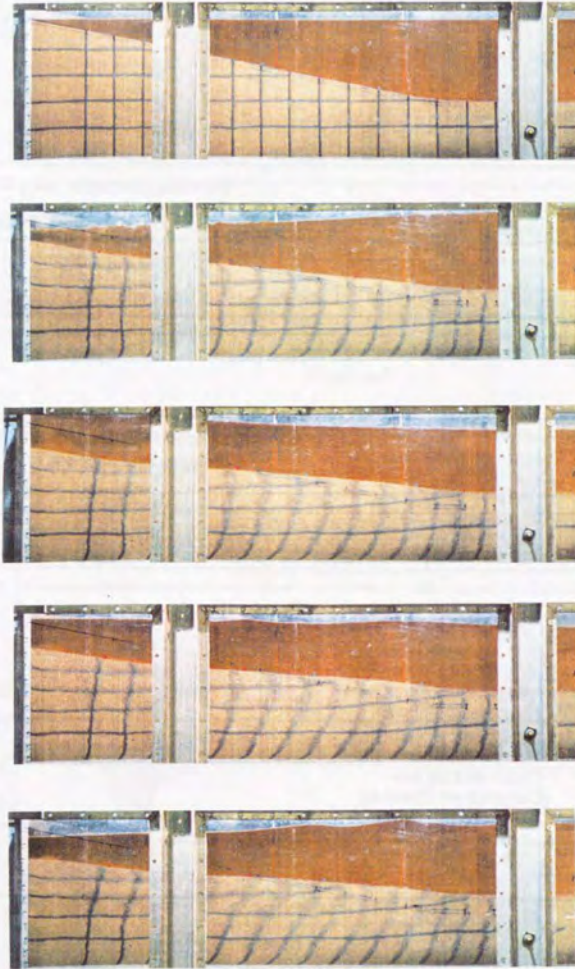


図 6.102 地盤の変形進行写真 (TEST 26)

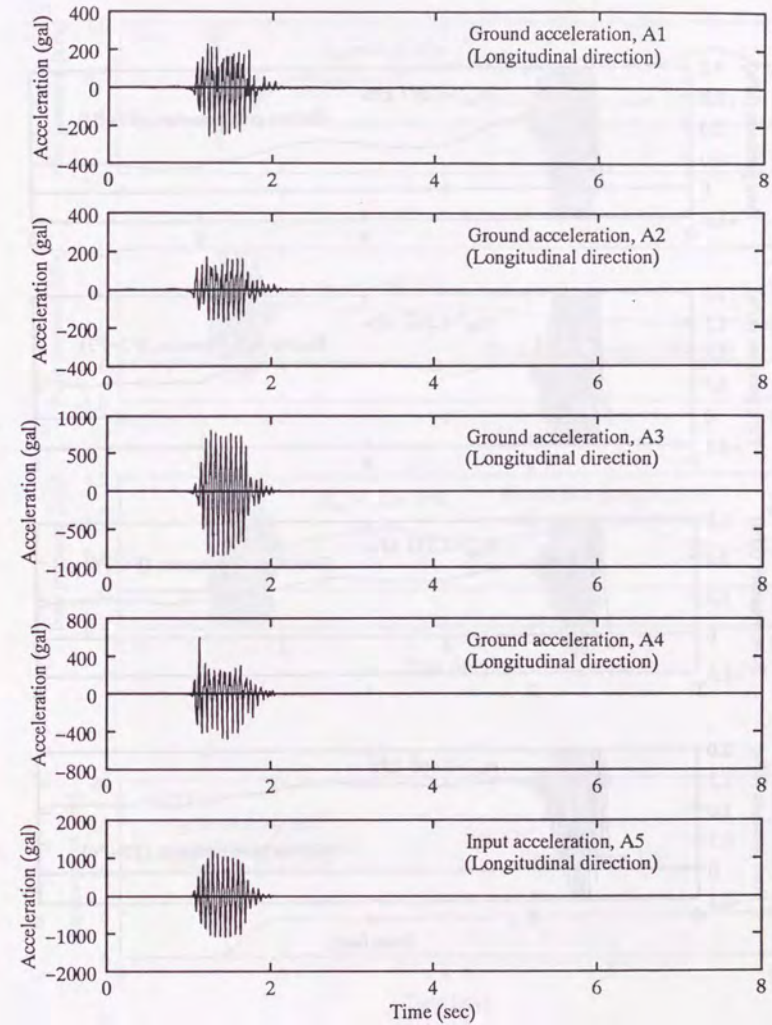


図 6.103 時刻歴測定記録 (TEST 27, その1)

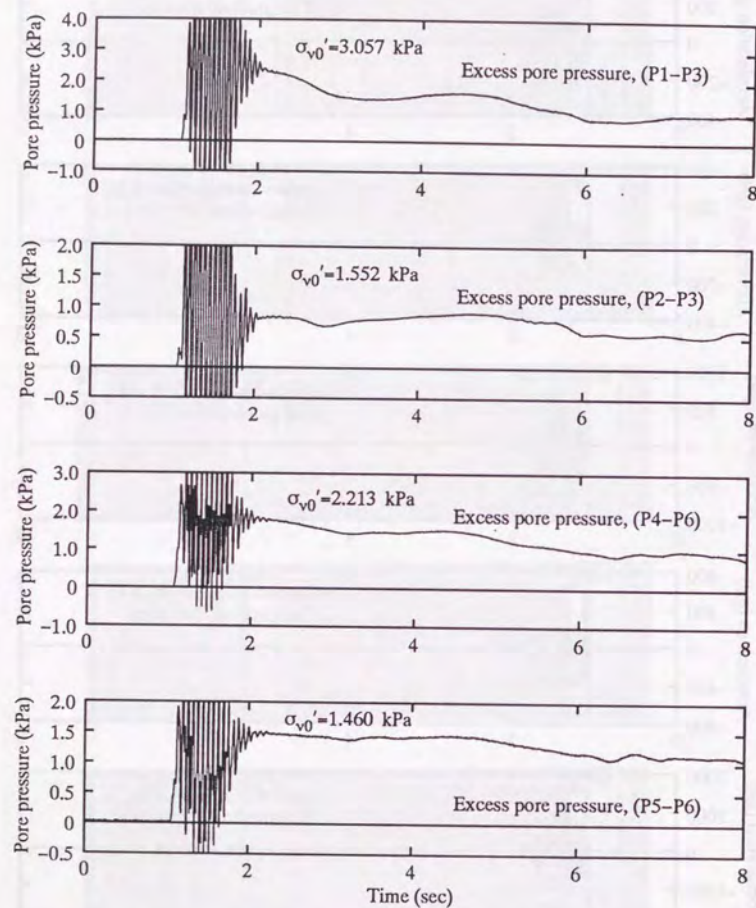


図 6.104 時刻歴測定記録 (TEST 27, その2)

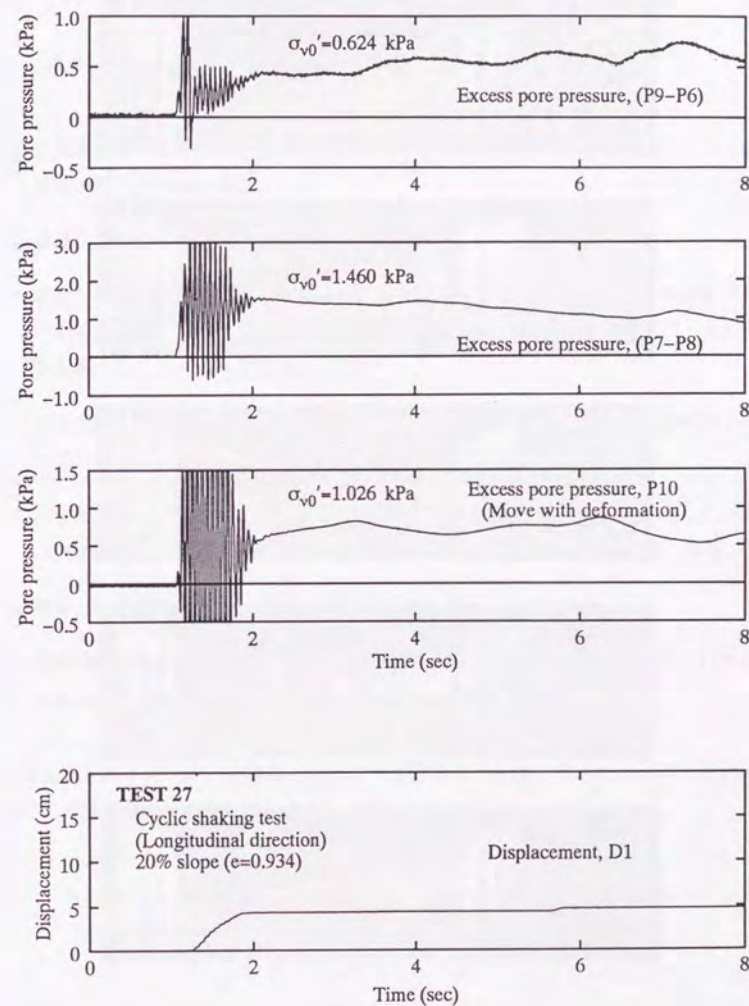


図 6.105 時刻歴測定記録 (TEST 27, その3)

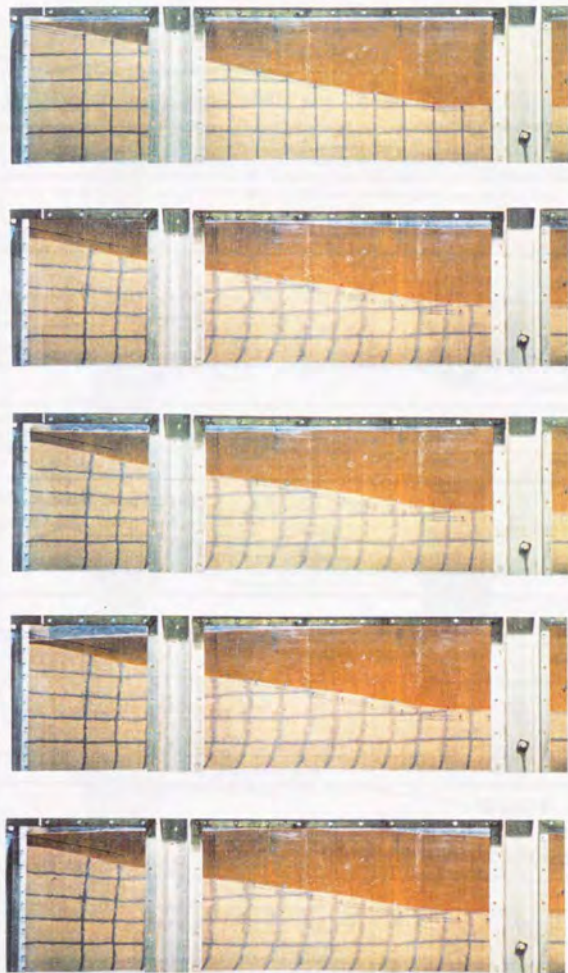


図 6.106 地盤の変形進行写真 (TEST 27)

6.2 時刻歴記録および変位進行図より得られた結論

今まで実験結果の考察でわかったことをまとめると次のようになる。

- 湿潤堆積法および湿潤締固め法で作製した地盤で短時間の動的载荷を行うと自由流動の再現が可能である。
- 液状化層全体にわたってひずみは分布する。
- 地盤のひずみの大きいところではダイレタンスーが発生しやすい。自由流動において地盤のダイレタンスーにより強度が回復し変形を妨げようとするが、水圧が再上昇することにより大変形に至る。
- 自由流動の変位量は間隙比が大きいほど大きくなる。しかし流動継続時間はほぼ一定である。
- 本実験で行った範囲では振動を加え続けると地盤は水平になるまで流動した。そのとき最終変位量は同じになるが流動速度は間隙比が大きいほど大きくなる。
- 斜面と直角方向の動的载荷でも流動を促進させることができる。
- 振動流動する地盤は入力される振動によって影響され、入力加速度が大きいほど流動速度が大きい。しかし入力波の周波数の影響は受けない。

以上時刻歴記録やビデオから読みとった変形進行図より考察を進めたが、第7章ではそれぞれの関係について定量的にまとめ評価を行う。

第7章

流動する地盤の特性

第4章と第6章で実験より得られた時刻歴と写真撮影結果より考察を行ってきたが、ここでは流動特性を説明するため得られた実験結果に手を加え、様々な関係を整理して考察を行う。

7.1 流動特性 (小型土槽実験)

まず小型土槽実験より得られた結果を示す。図7.1に模型地盤作製方法の違いが流動変位進展に与える影響をまとめてある。地盤はそれぞれの方法でできる限りゆるく作製してある。変位はビデオ撮影した画像をコマ送りし、地表面でのマーカーの動きを読みとって求めている。間隙比の記録を見ると湿潤堆積法では非常にゆるく堆積させることが可能であることがわかる。この図より水中堆積法や乾燥堆積法で作製できる地盤密度では小型土槽のような小さな模型において自由流動させることは不可能である。湿潤堆積法で作製した地盤で、砂のみを使用した地盤のほうが間隙比が大きいのにもかかわらず細粒分の混入している方が流動変位が大きい。これは細粒分を混入することにより容易に流動しやすい地盤を作ることができたということで、つまりは細粒分が混じっている地盤は流動しやすいことを意味する。

7.1 流動特性 (小型土槽実験)

233

水中堆積法と乾燥堆積法でできた地盤の密度はほぼ同じであるにもかかわらず流動変位は湿潤堆積法では全く進行せず水中堆積法ではある程度進行している。この差は砂の堆積構造の違いなども考えられるが、おそらく飽和度の違いによるものである。乾燥堆積法で作製した地盤は堆積終了後土槽底部の一点より水を注入して飽和させるため飽和度を上げるのは難しい。一方水中堆積法であればかなり飽和度はよいはずでありこのような流動変位の違いが生じたのである。湿潤堆積法も後から水を注入するのであまり飽和度がよいとは考えにくい、地盤が非常にゆるいため流動が起こるのである。

図7.2に湿潤締め法で密度を調節して最終流動変位に与える影響を調べた結果を示す。間隙比が1.03を越えたところあたりから流動変位が急激に大きくなっている。このように非常にゆるい地盤でないと自由流動は起こり得ないことがわかる。ただしこの間隙比は拘束圧のレベル、土槽壁面、飽和度によっても変化するため実地盤に対して補正をせずこのままの値を適用できるわけではない。後に最終流動変位に与える間隙比の影響を小型土槽と中型土槽で比較したものを示す。

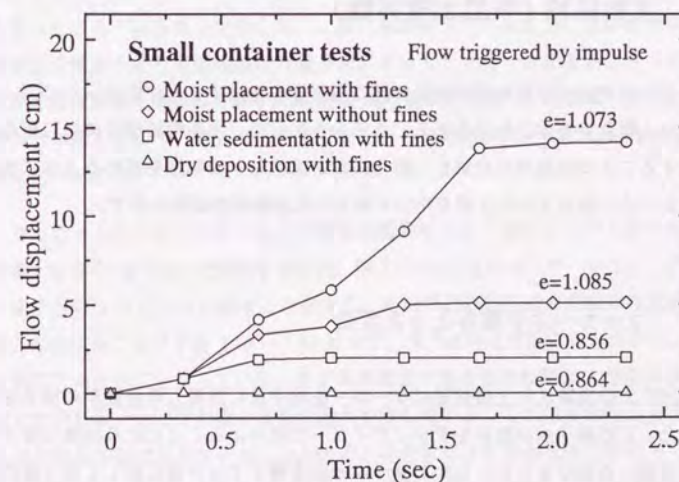


図7.1 模型地盤作製方法の違いが流動変位進展に与える影響

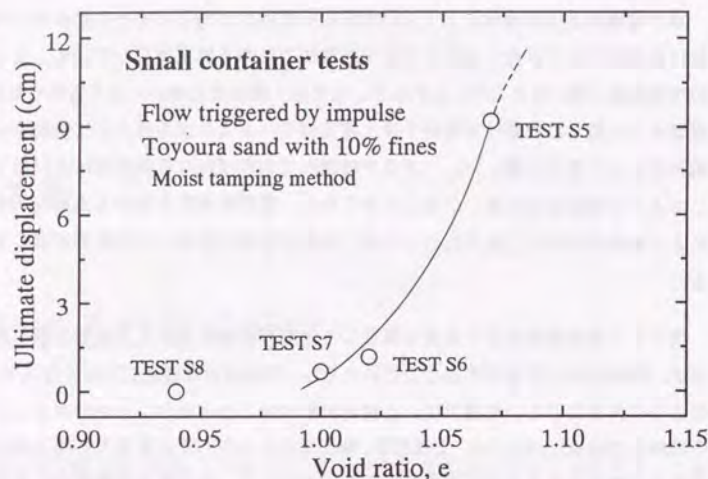


図 7.2 最終流動変位に与える間隙比の影響

7.2 流動特性 (中型土槽実験)

小型土槽実験より飽和度が流動実験に悪影響を及ぼすことがわかったので、中型土槽では土槽底面全体より水を注入できるようにした。水を供給する前に二酸化炭素を注入することで地盤内の空気を二酸化炭素と置換し、飽和度を高めるように改良した。このように改良された土槽を用いて得られた流動特性結果を示す。

7.2.1 マーカーより読みとった変位

TEST 2 の実験より土槽側壁にマーカーを格子状に設置し地盤変形の様子を写真撮影した。この格子点の動きをデジタイザーで読みよることにより地盤の各点での変位量を調べる助けとした。しかしマーカーは土槽アクリル壁に接しており真の地盤の動きをあらわしているかどうかは疑問が残る。そこでマーカーより読みとった変位と変位計より読みとった変位を比べてマーカーの信頼性を評価する。変位計は土槽短

辺方向中央に設置されており側壁の影響はほとんど受けない。ただしマーカーの格子点と変位計の位置が同じものはないため、変位計に最も近い格子点を選んで比較した。用いた実験結果は自由流動 (衝撃振動) 実験である。図 7.3 ~ 7.10 に変位計から得られた流動変位とマーカーから読みとった流動変位を比較した図とマーカーから読みとった変位を定数倍して補正した図を示す。どの結果においてもマーカーより読みとった変位が小さくなっている。これはやはり地盤は動こうとするが側壁は動かないためにあらわれる側壁の影響であり、マーカーより読みとった変位は真の地盤の動きとは違ったものである。しかしマーカーより読みとった変位をある定数倍してやると変位計より読みとった変位と非常に一致を得る。つまりマーカーの動きは、その値は真の値よりやや小さめになるが地盤の動きの特性は定性的によく表現しているということである。

この補正で用いた定数値であるが TEST 3 ~ 7 では変位計の位置とマーカーの位置は変化していないのでこれらの実験結果を用いて議論することにする。図 7.11 にこの補正值と地盤間隙比の関係を示す。地盤が密になるほど補正值は大きくなる傾向にある。しかし間隙比が 1.05 と 1.02 の間に大きく補正值が変化するところがありそれより密なところではあまり変化しない。図に縦線を引いたあたりに湿潤堆積法と湿潤締固め法の境界があり模型地盤の作製方法によっても大きく変化するようである。湿潤締固め法は地盤を突固めており、 K_0 が湿潤堆積法で作製した地盤より大きくなり大きな力で側壁と接している。この影響で壁面との摩擦力が大きくなり、補正值の差ができたのであろう。

マーカーがその値は小さくなるが変形挙動特性をよく表すことがわかったので地盤の様々な場所 (格子点) で変位を求めた。図 7.12 のようにマーカーのラインに記号をふり格子点を 1-A のように表すこととする。それぞれの格子点の変位の時刻歴を水平成分と鉛直成分に分けて図 7.13 ~ 7.44 に示す。水平変位は斜面下り方向が正、鉛直変位は鉛直下向きが正となっている。まず水平変位であるが流動開始 1 秒程度後に変位の傾きが少し緩やかになりその後また傾きを増している。これは変位計から読みとれたものと同じ挙動でありマーカーより読みとった変位より地盤全体にわたってこのような挙動が見られることがわかった。これは地盤のダイレタンスーによると考えているが、第 5 章に示したとおりダイレタンスーによると考えられる間隙水圧の低下を顕

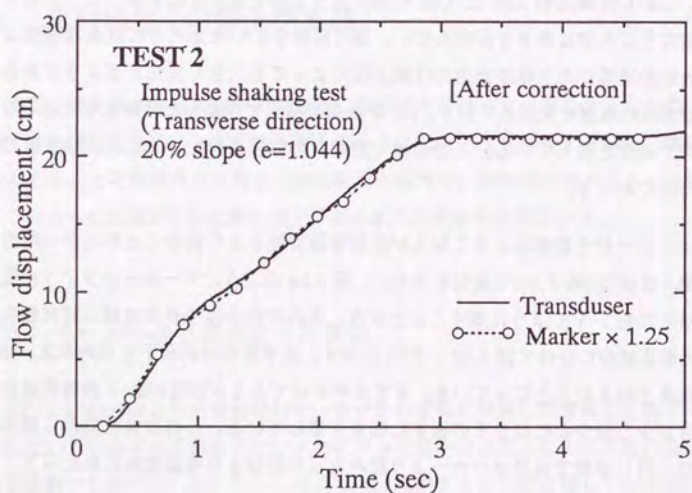
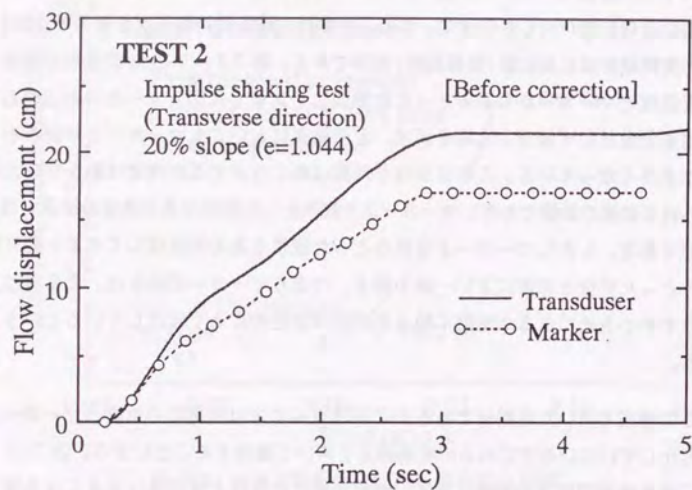


図 7.3 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 2)

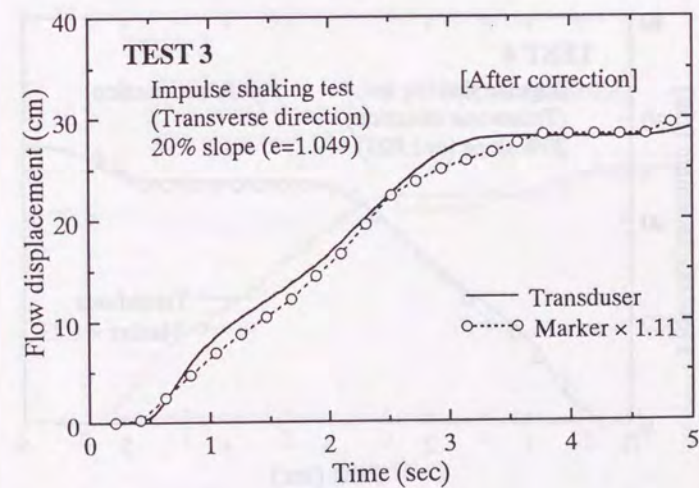
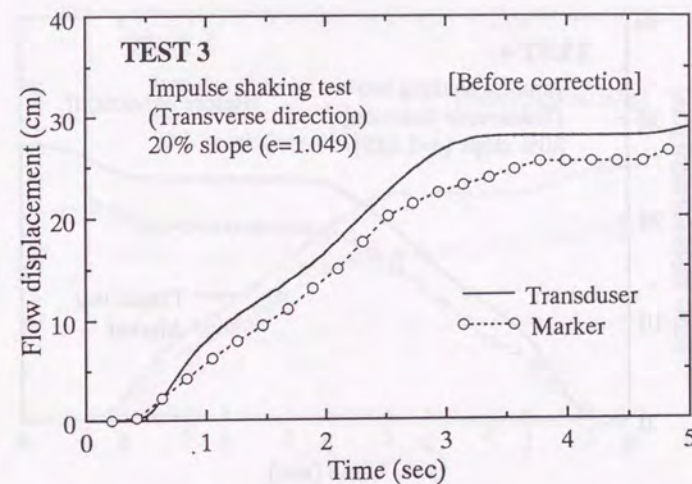


図 7.4 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 3)

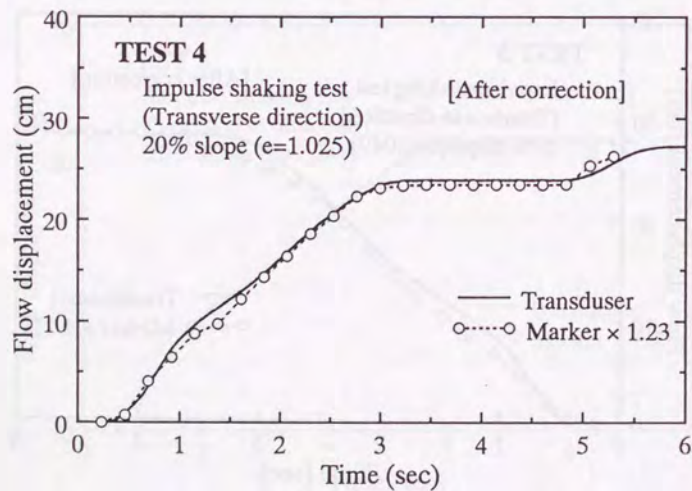
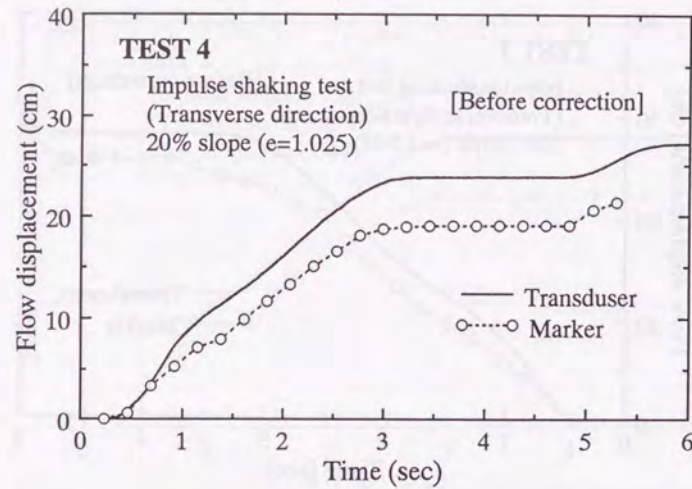


図 7.5 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 4)

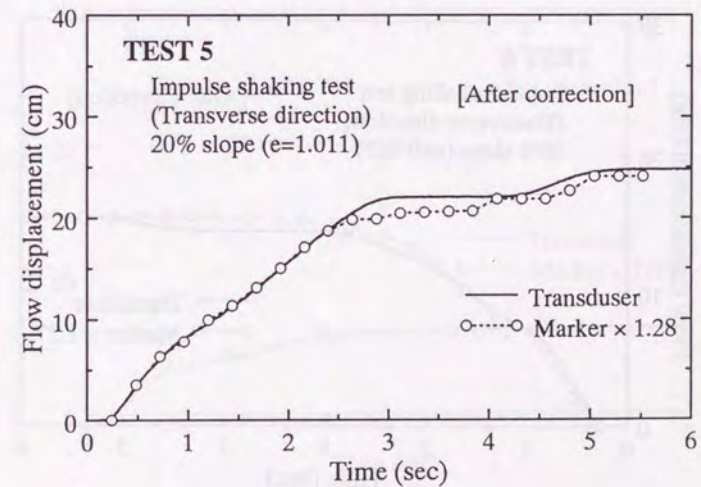
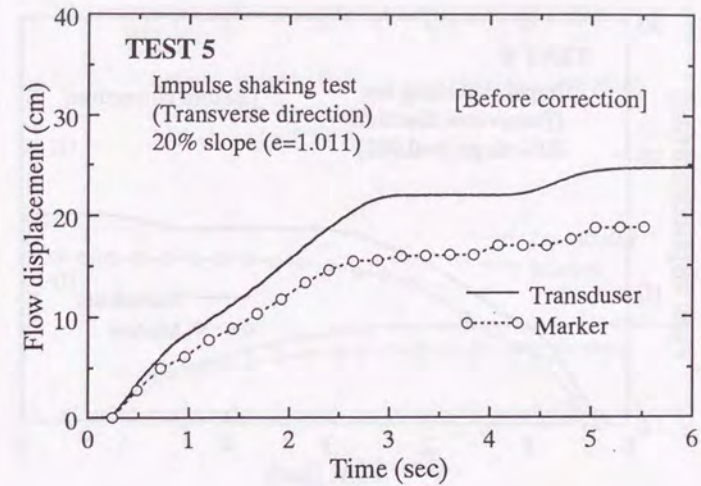


図 7.6 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 5)

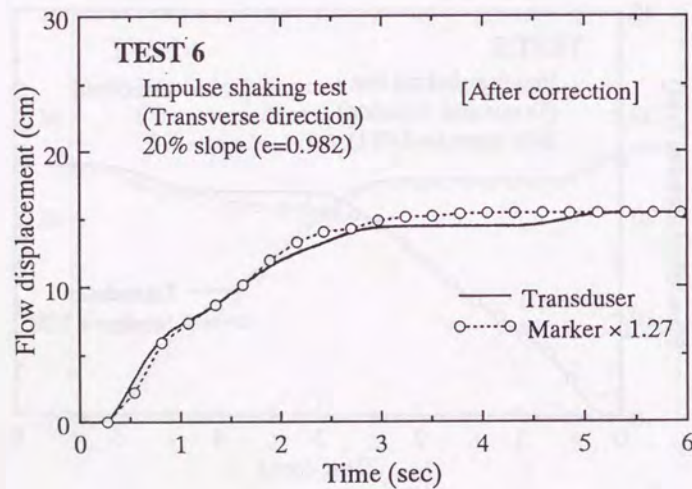
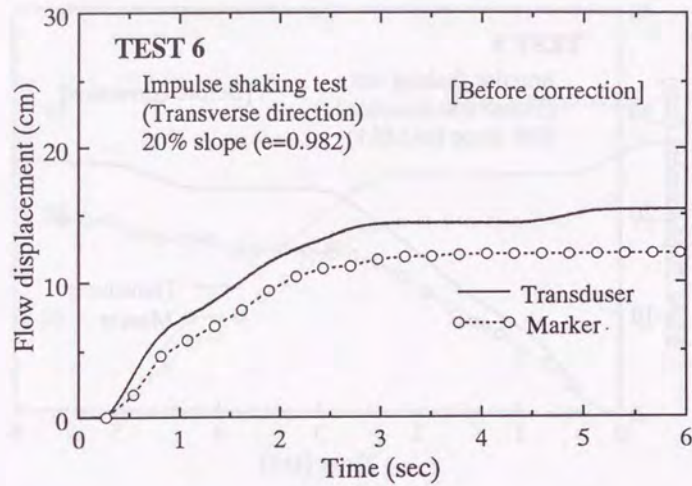


図 7.7 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 6)

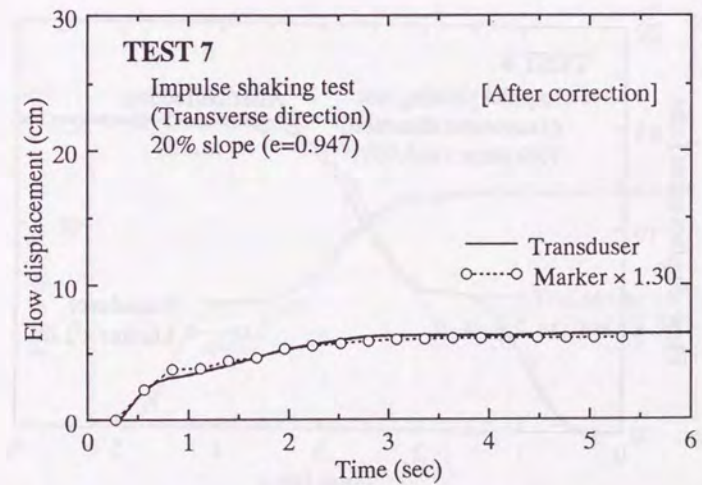
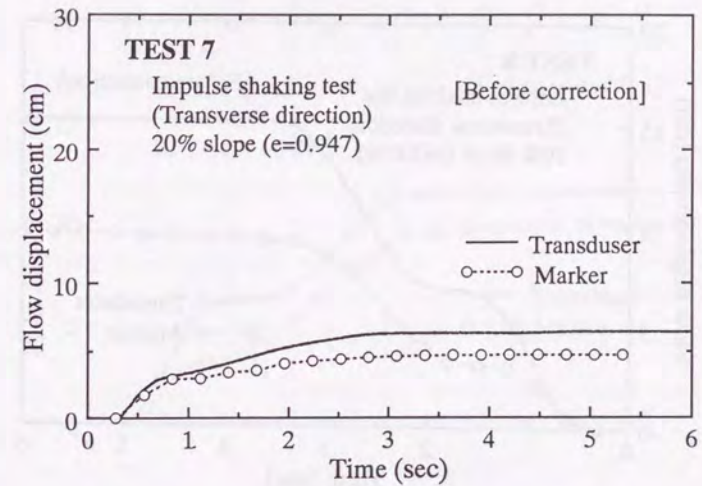


図 7.8 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 7)

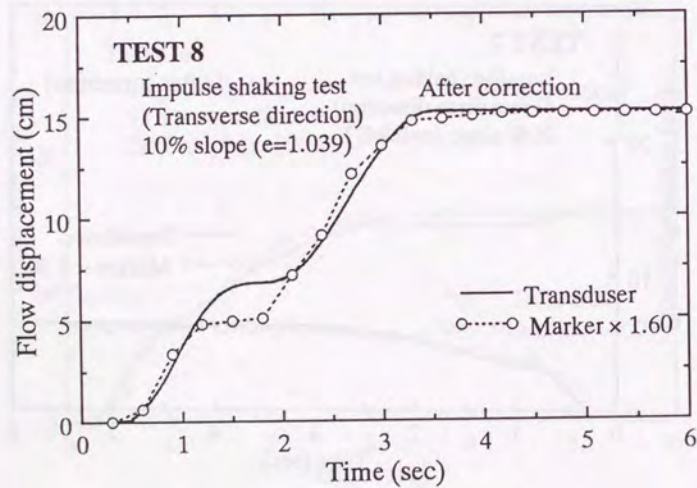
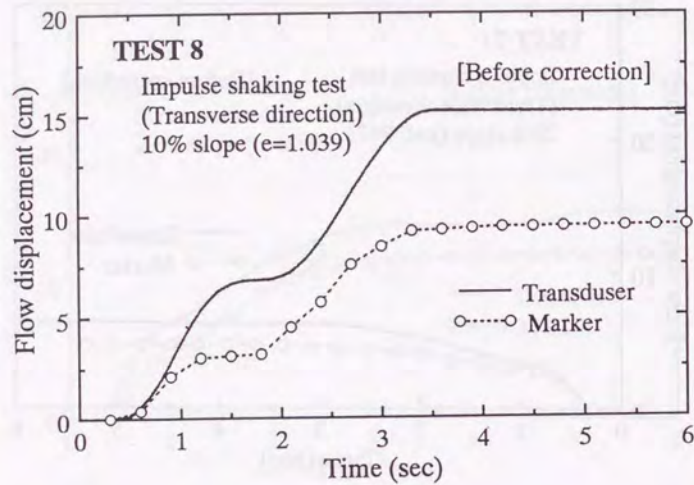


図 7.9 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 8)

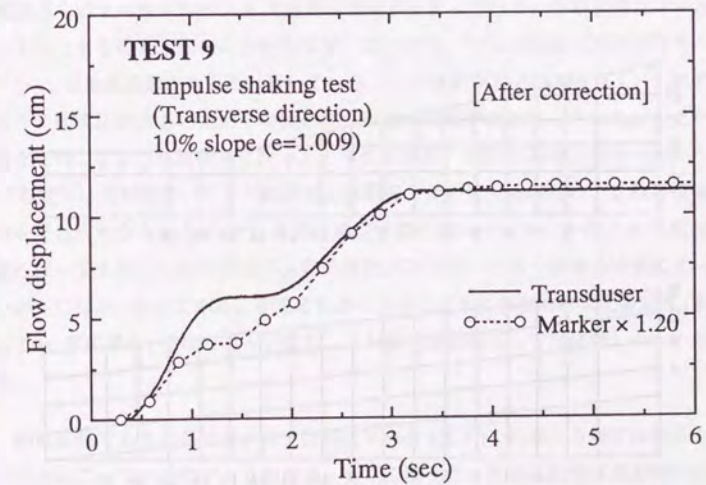
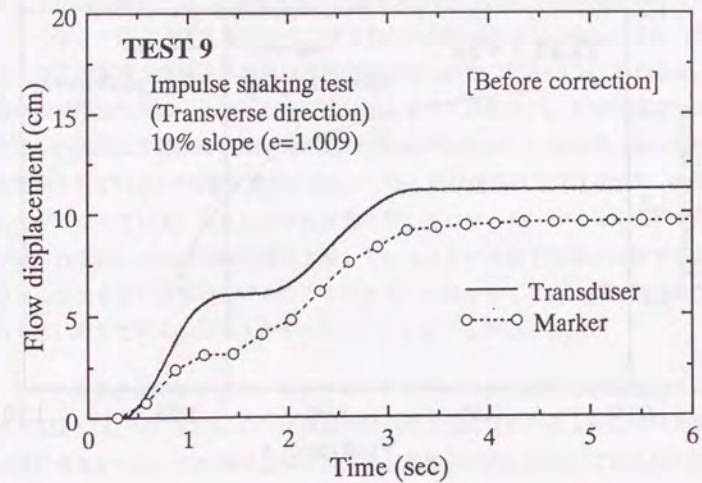


図 7.10 変位計およびマーカーから読みとった流動変位の比較 (TEST 9)

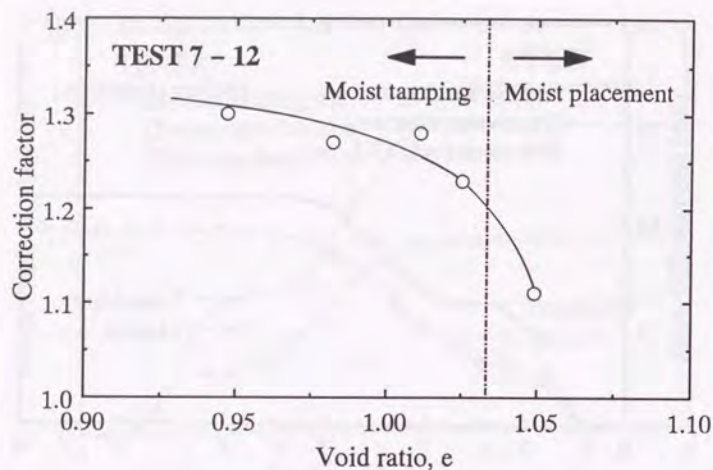


図 7.11 補正値と地盤間隙比の関係

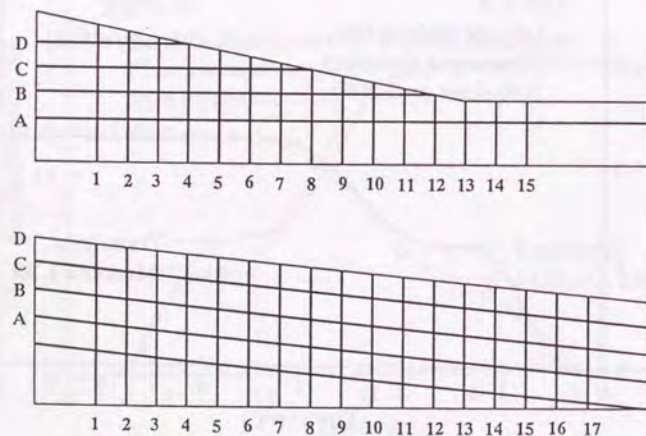


図 7.12 マーカー (格子点) の配置

著に示すのは地盤の一部分 (せん断変形の最も大きいところ) であった。つまり地盤のダイレタンシーによる強度増加はせん断ひずみの大きいところで発生するが、変形に関してはこの影響が地盤全体の流動速度の低下を引き起こすということである。地盤全体が強度増加したのであればそこで変形が止まってしまうが、まわりの強度増加をしていない地盤より浸透流などの作用により水圧が再び上昇し (この再上昇は間隙水圧計に記録されている) その後大変形に至っている。液化化層の上方ほど水平、鉛直変位とも大きくなっている。ただし水平変位量に関してはマーカーライン C, D であまり差が見られない。これは流動地盤は水浸しており大きい速度で地盤が流動すると地表面は水の抵抗を受け変形が妨げられたのである。流動が起こると水面に波が起こることより水に対して何らかのエネルギーを与えていることがわかる。

20%の斜面の間隙比の大きい地盤において斜面先方向の変位の開始が遅れるものがある (図 7.14, 7.22 など)。これは模型地盤の形を見ればわかるように斜面先端では地表面に傾きがない。この部分は斜面肩方向の地盤の流動に押されて引き起こされた変形であり二次的なものであるためこのような遅れを生じたのである。斜面肩方向の基盤面近くのマーカーライン A では早く変形が止まっている。その上部のマーカーについては止まる時刻は変位にかかわらず一定である。ただし斜面先方向ではマーカーライン A は地盤流動がある間は動いている。これは斜面肩方向では 5.1.1 小節で述べたように拘束圧が大きいため他の部分に比べ地盤が密になっている。したがって流動化を起こすようには至らなかったと考えている。10%の地盤ではマーカーライン A でも変形は長時間続いており斜面肩と斜面先で違いは見られない。これは模型地盤形状を見ればわかるように 20% 斜面の模型地盤と違いマーカーライン A で初期有効上載圧は一定となるため斜面長手方向の密度分布は均一であり斜面の場所によっての違いが生じなかったのである。写真撮影からわかるように模型の液化化層底部 (基盤上から 5cm 位の厚さ) ではほとんど変形しておらず基盤の直上では流動しにくいのがわかる。

鉛直変位であるが斜面肩方向では鉛直下向き (沈下)、斜面先方向では鉛直上向きに変形が起こっているのがよくわかる。ここで読みとった鉛直変位は撮影時間が短時間であることより、流動による土の移動によって生じる変位であり液化化後の圧密沈下によって生じるものではないことに注意する必要がある。斜面肩方向での地盤の沈

下の時刻歴結果は地盤の水平変位の動きと非常によく似ている。鉛直変位をほとんど起こさないところで、変位の値が大きくずれるところが存在するが、これはマーカーの読みとりミスによるものである。変位の読みとりは流動地盤を写真撮影しこれを拡大コピーしてデジタイザーで読みとっている。この方法で数 mm 単位の動きまで正確に読みとることは不可能であり、測定機器の精度を上げるなどの措置を施さなければならない。

ここに示したのは衝撃振動による自由流動実験の結果のみでありあまり問題はなかったが振動流動で強く揺すった場合には液状化で土粒子が乱されマーカーが隠れてきて正確な値を知るのは難しくなってしまう。しかし今回使用したマーカーが地盤の動きをよく表しており、地盤全体の動きを知るのに非常に有効であることがわかった。

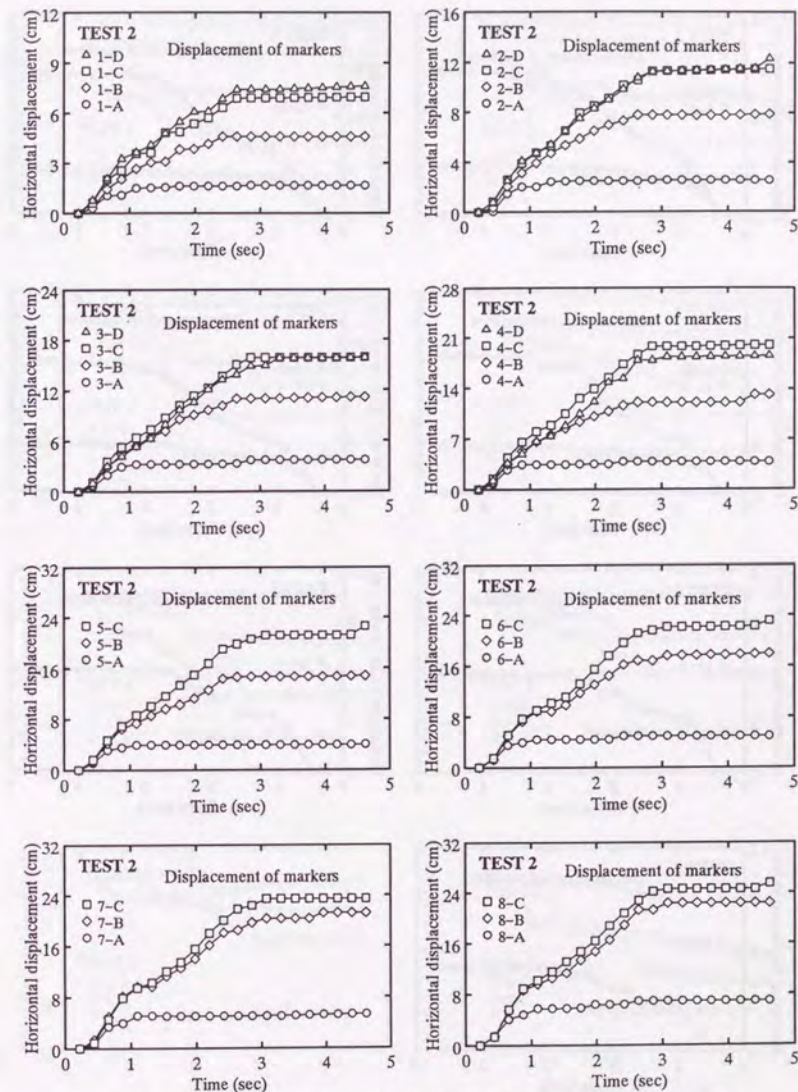


図 7.13 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 2, その 1)

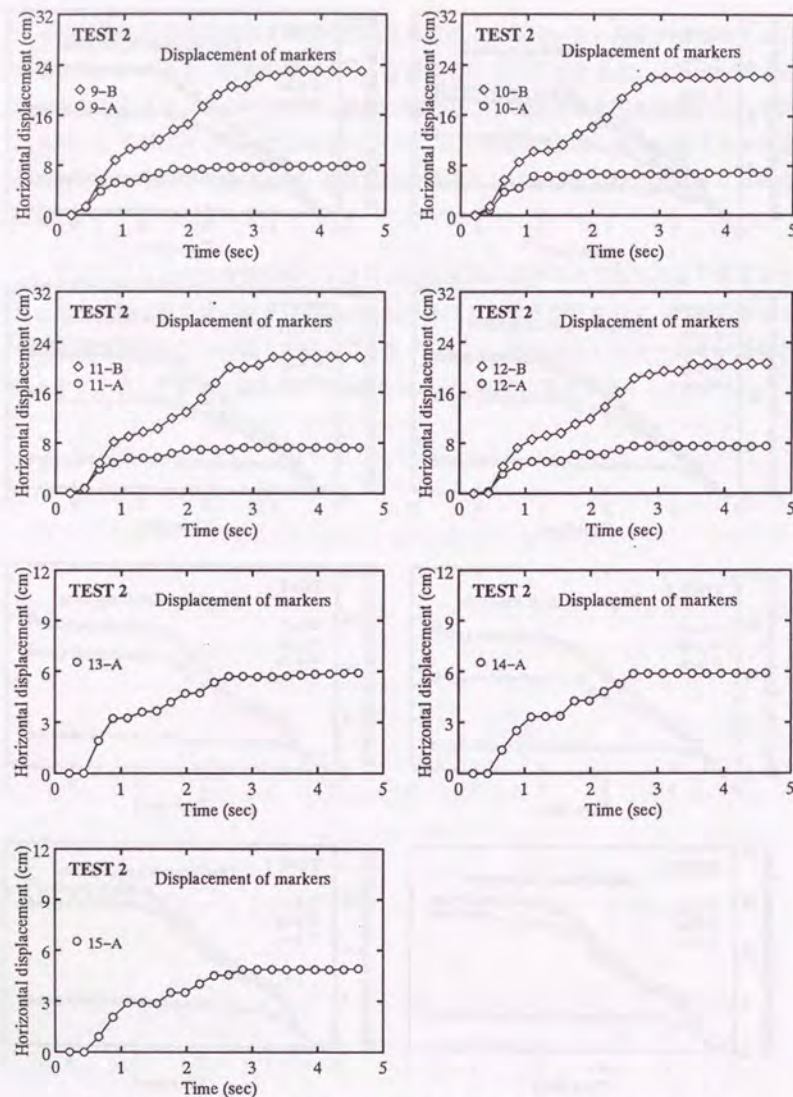


図 7.14 マーカから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 2, その2)

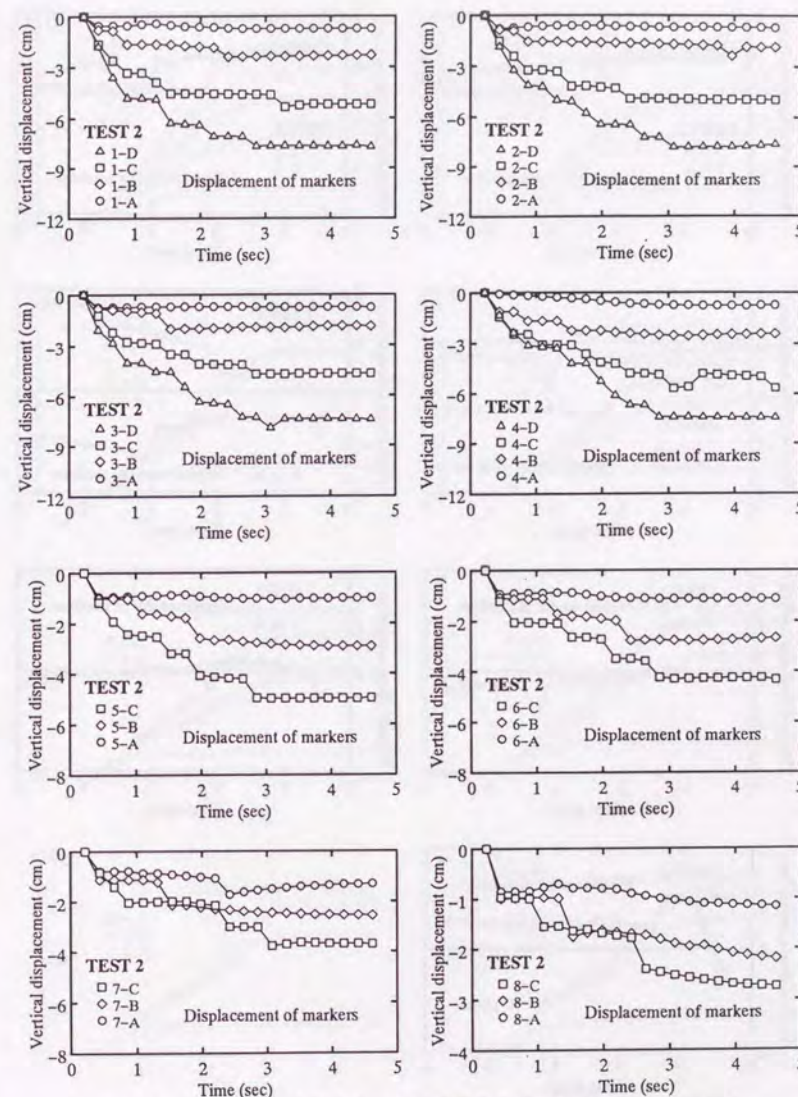


図 7.15 マーカから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 2, その1)

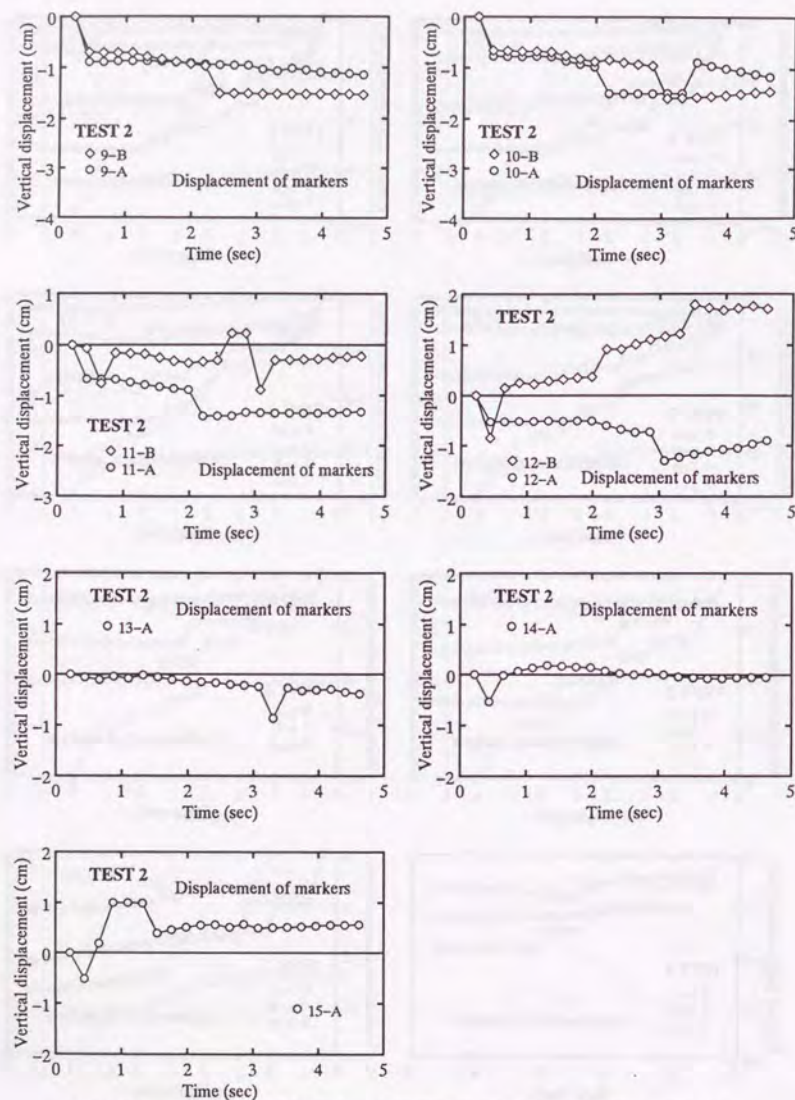


図 7.16 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 2, その2)

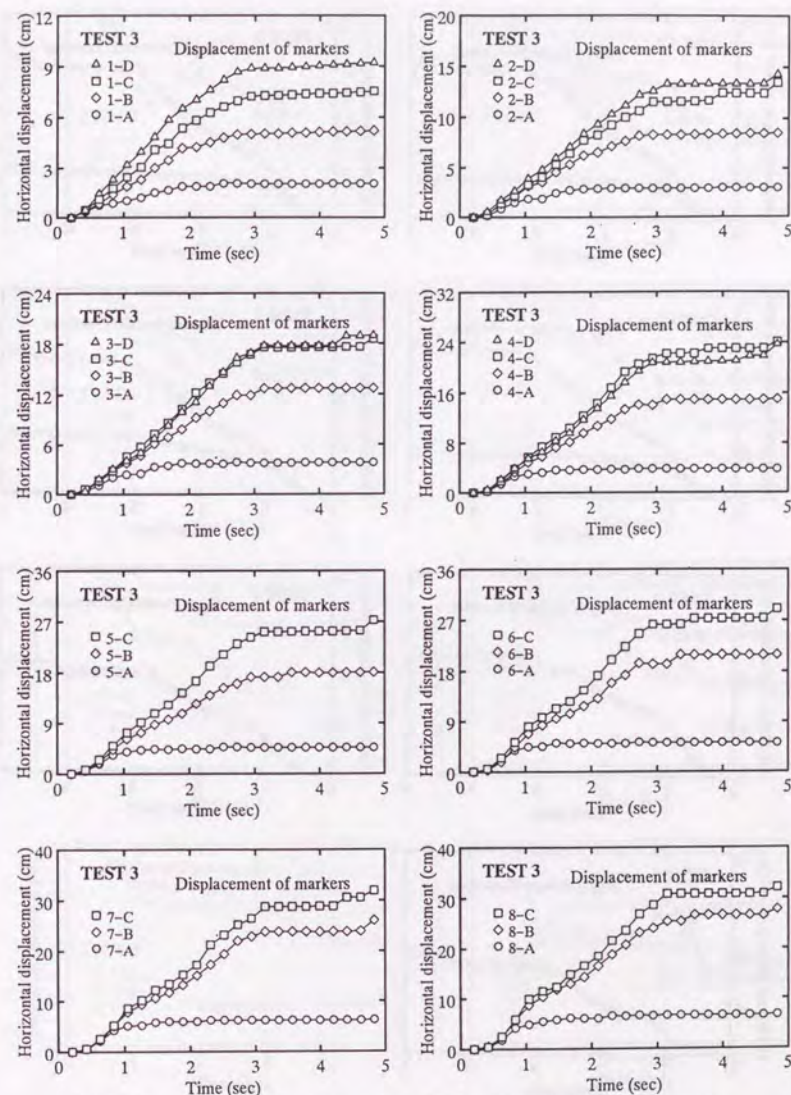


図 7.17 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 3, その1)

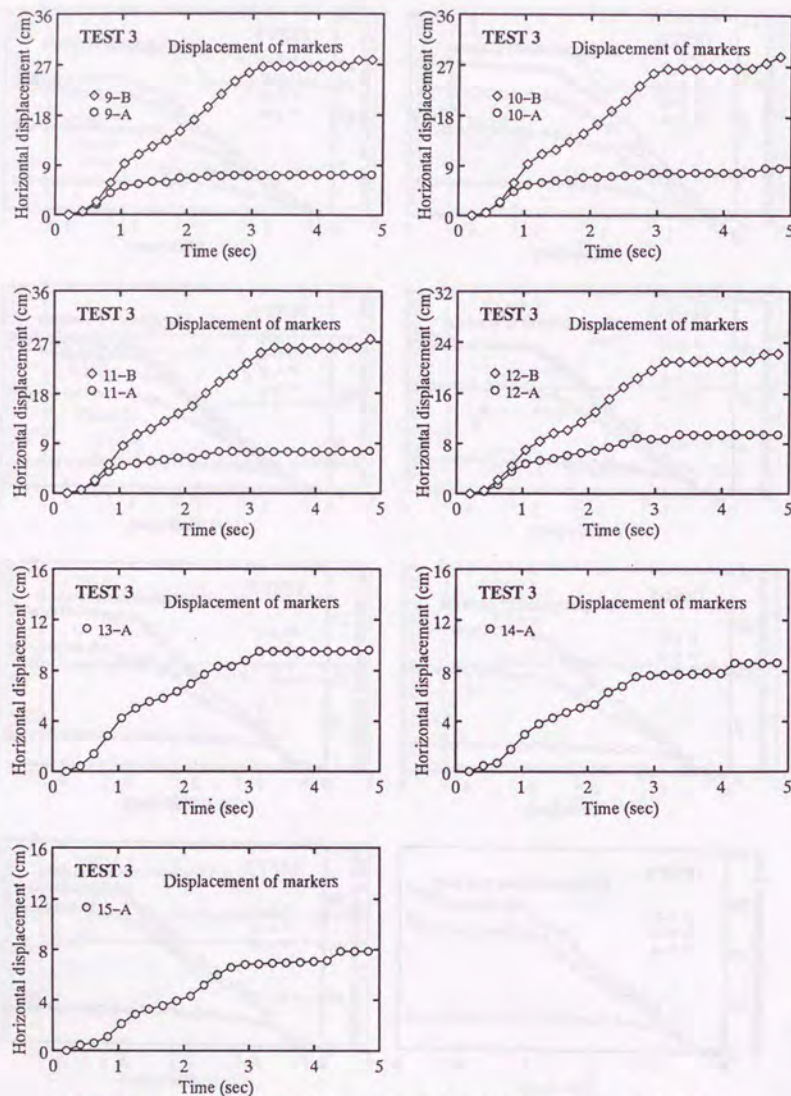


図 7.18 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 3, その 2)

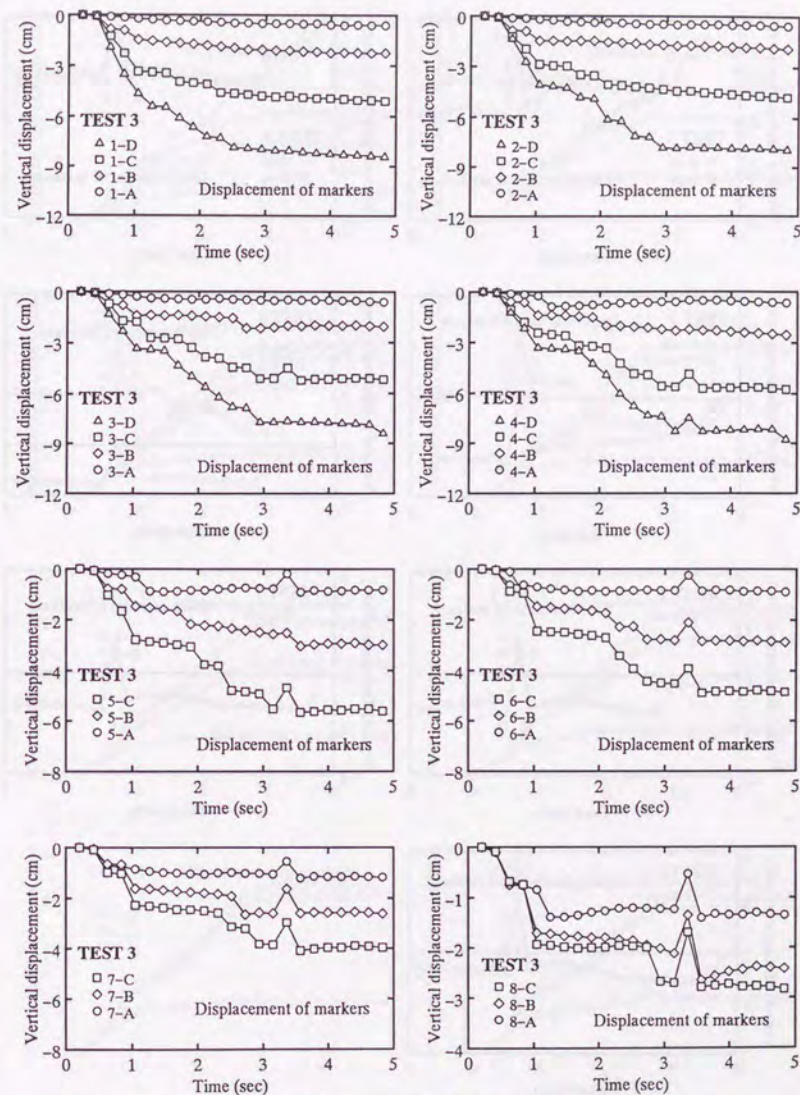


図 7.19 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 3, その 1)

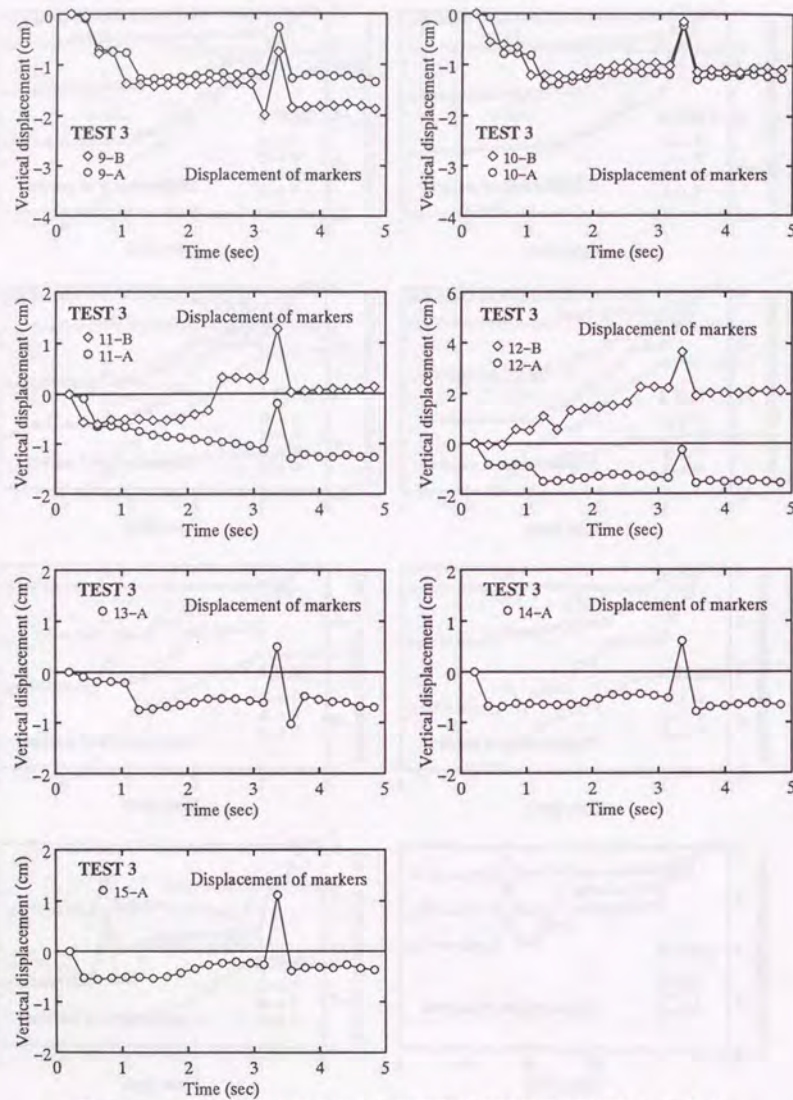


図 7.20 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 3, その 2)

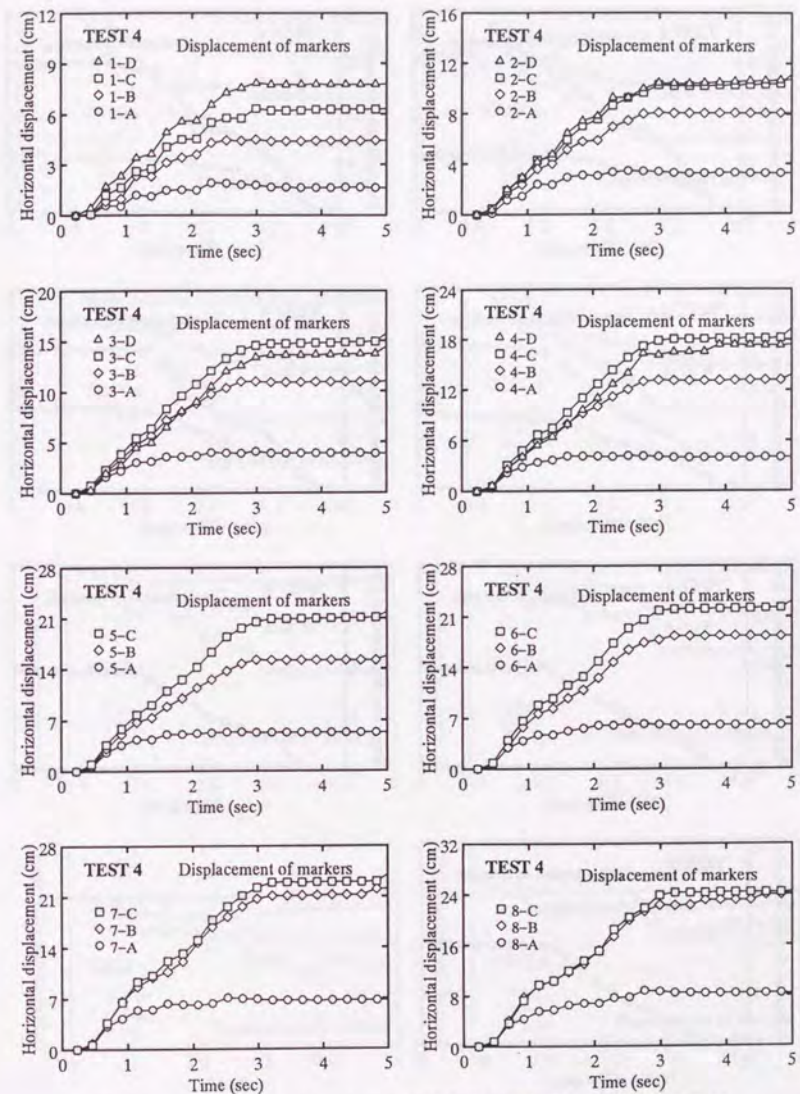


図 7.21 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 4, その 1)

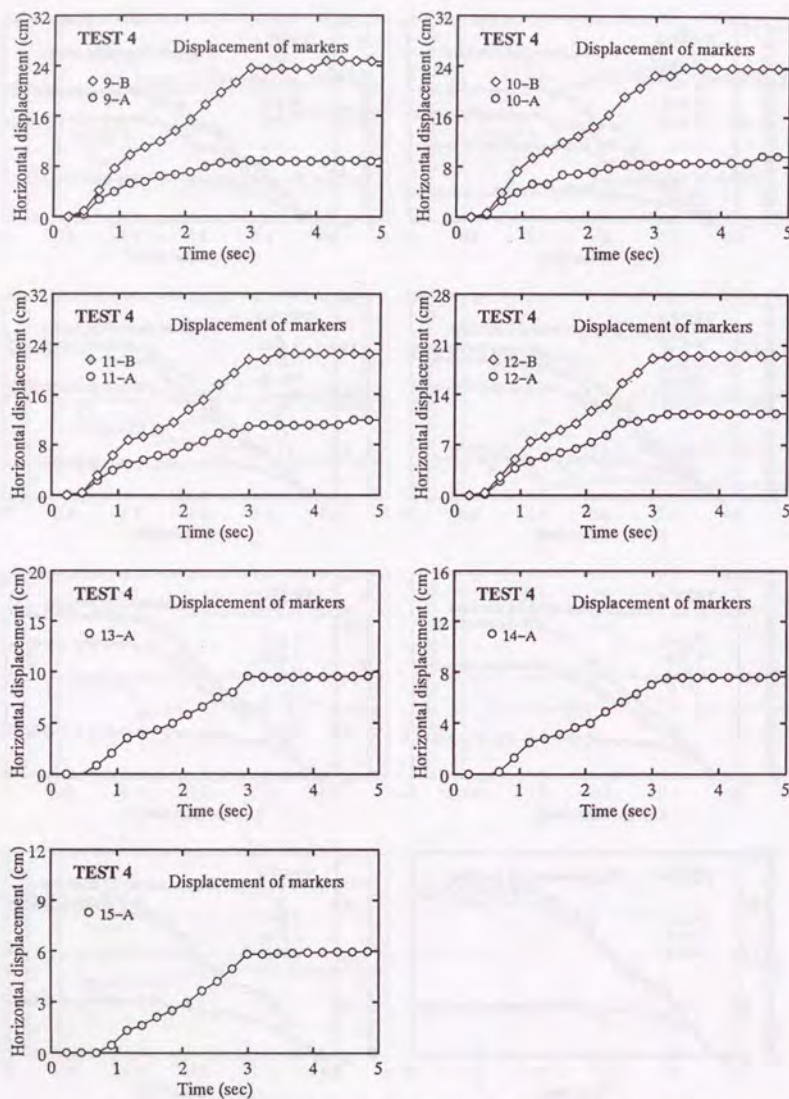


図 7.22 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 4, その 2)

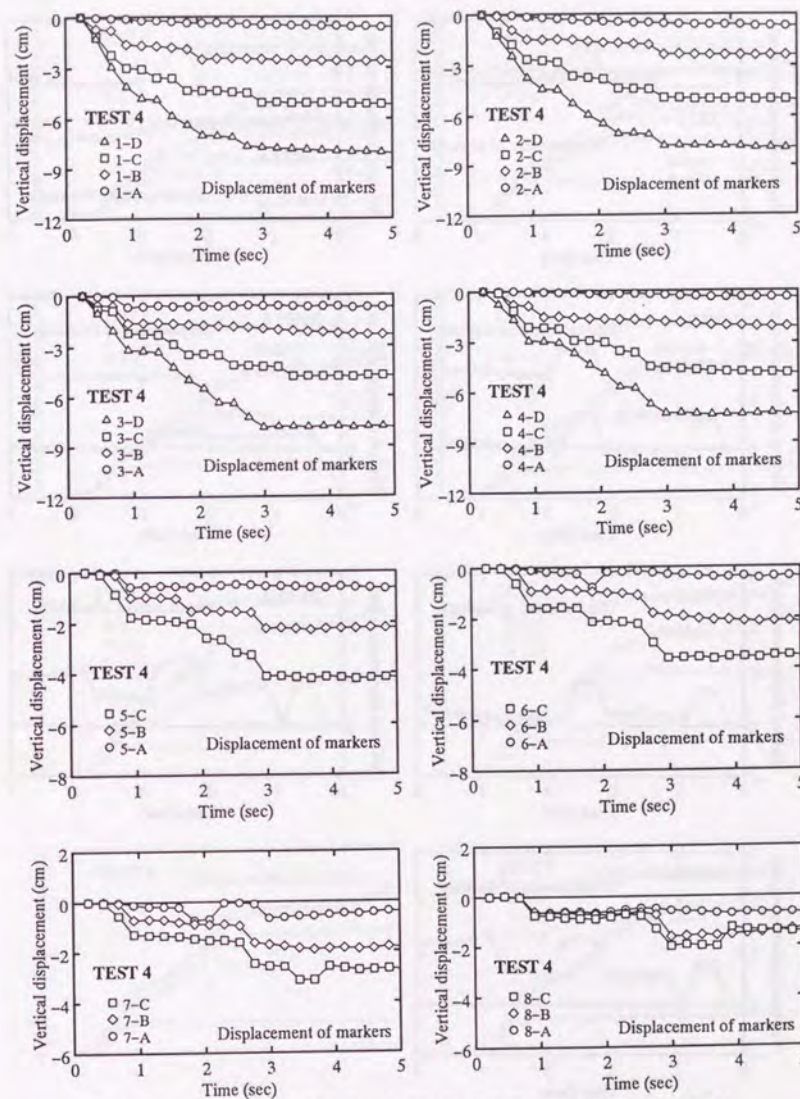


図 7.23 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 4, その 1)

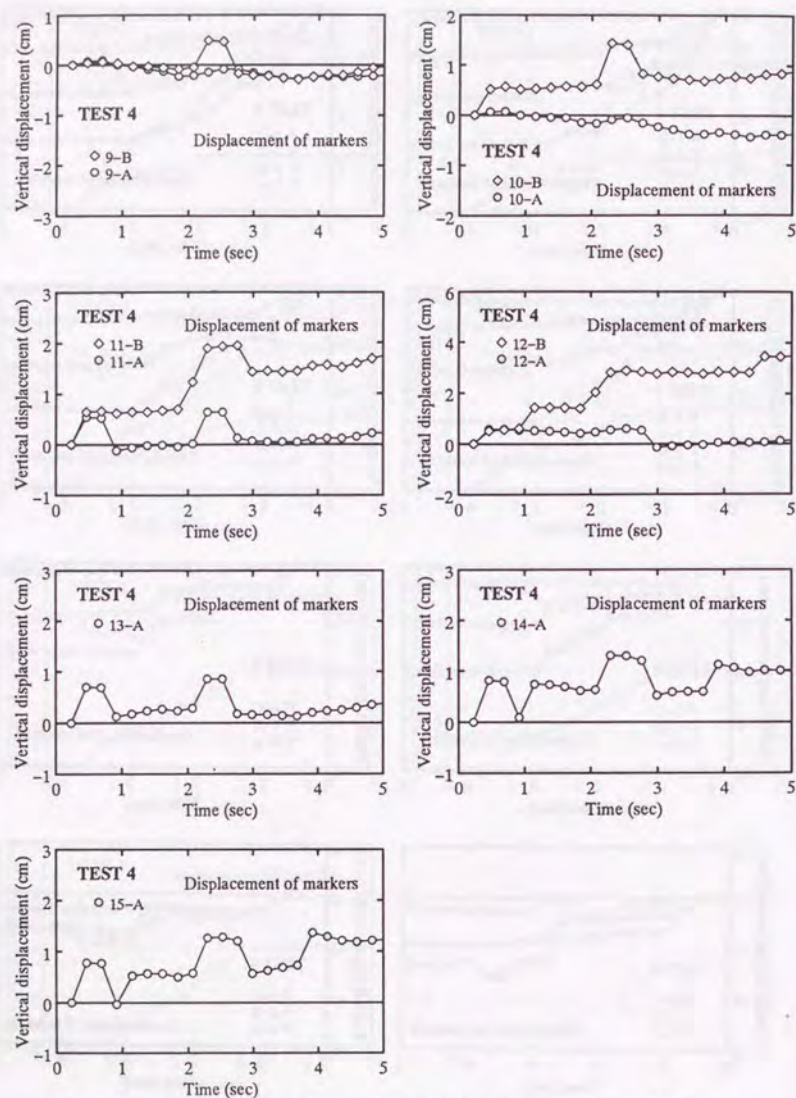


図 7.24 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 4, その2)

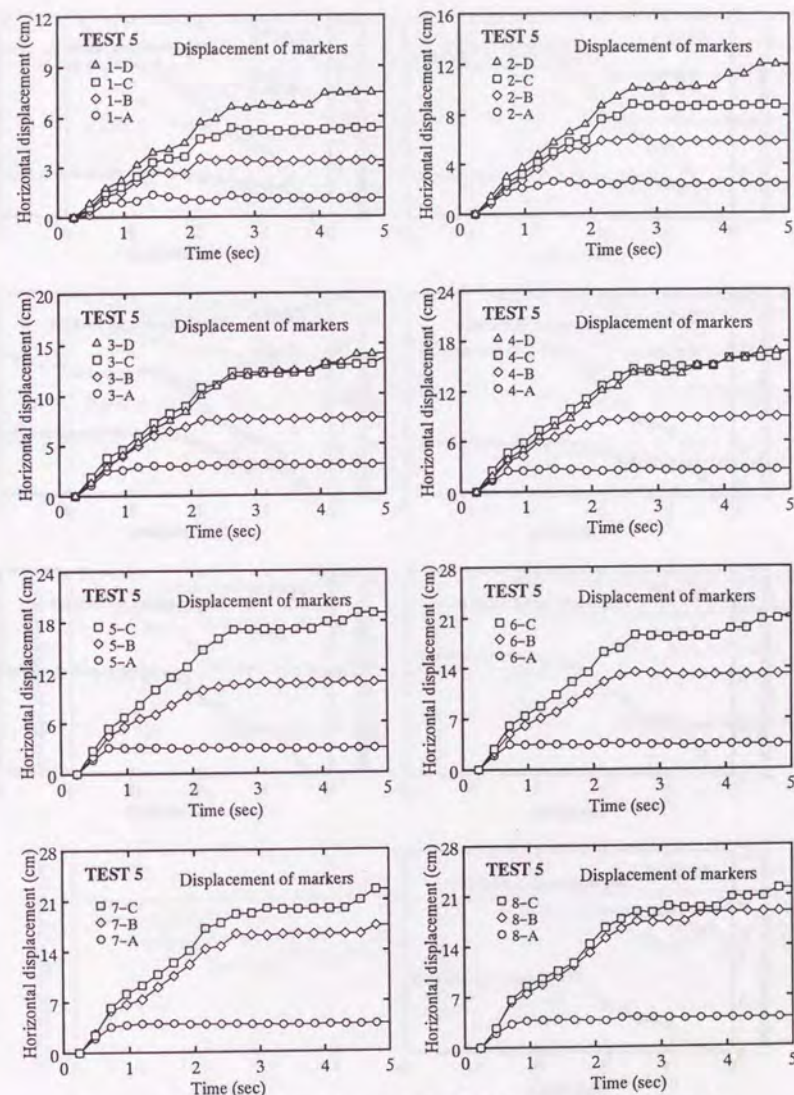


図 7.25 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 5, その1)

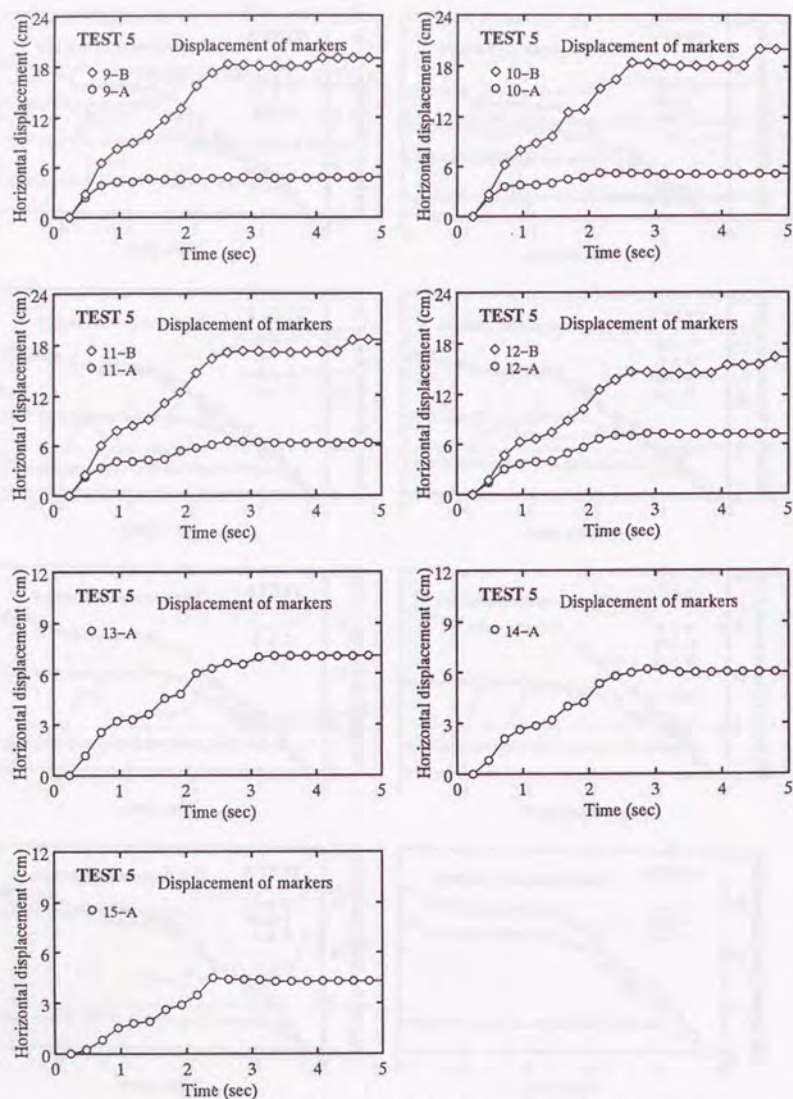


図 7.26 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 5, その2)

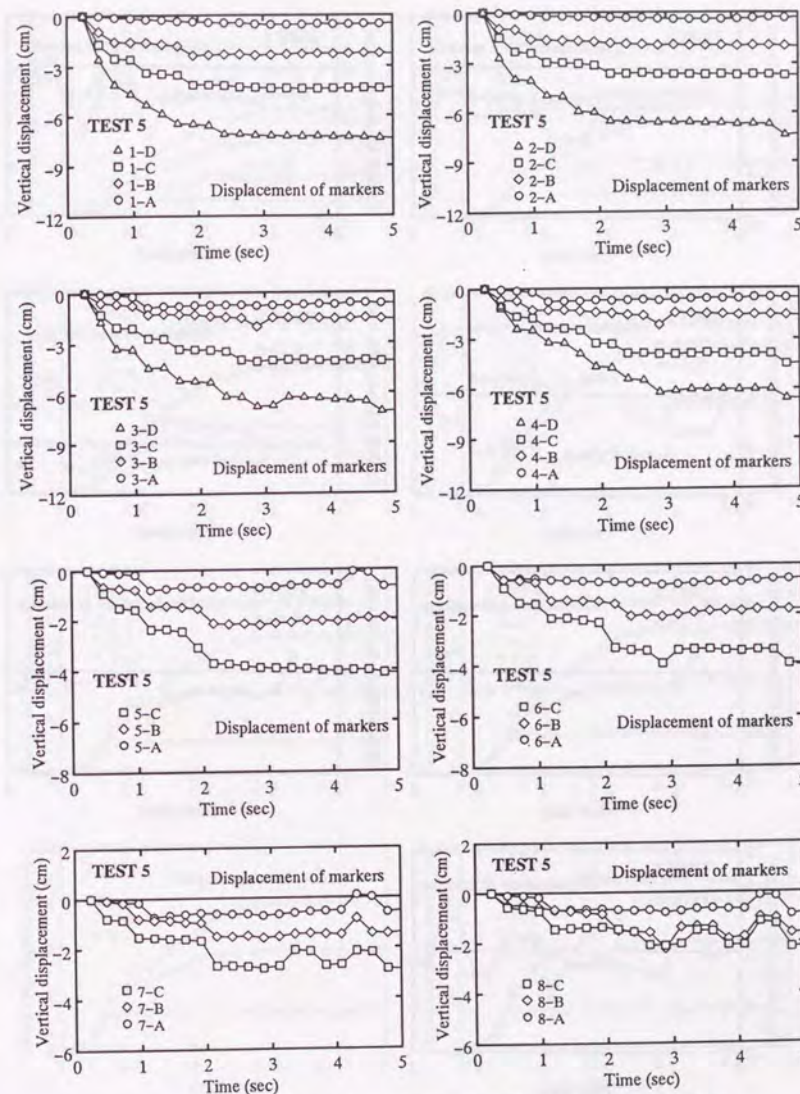


図 7.27 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 5, その1)

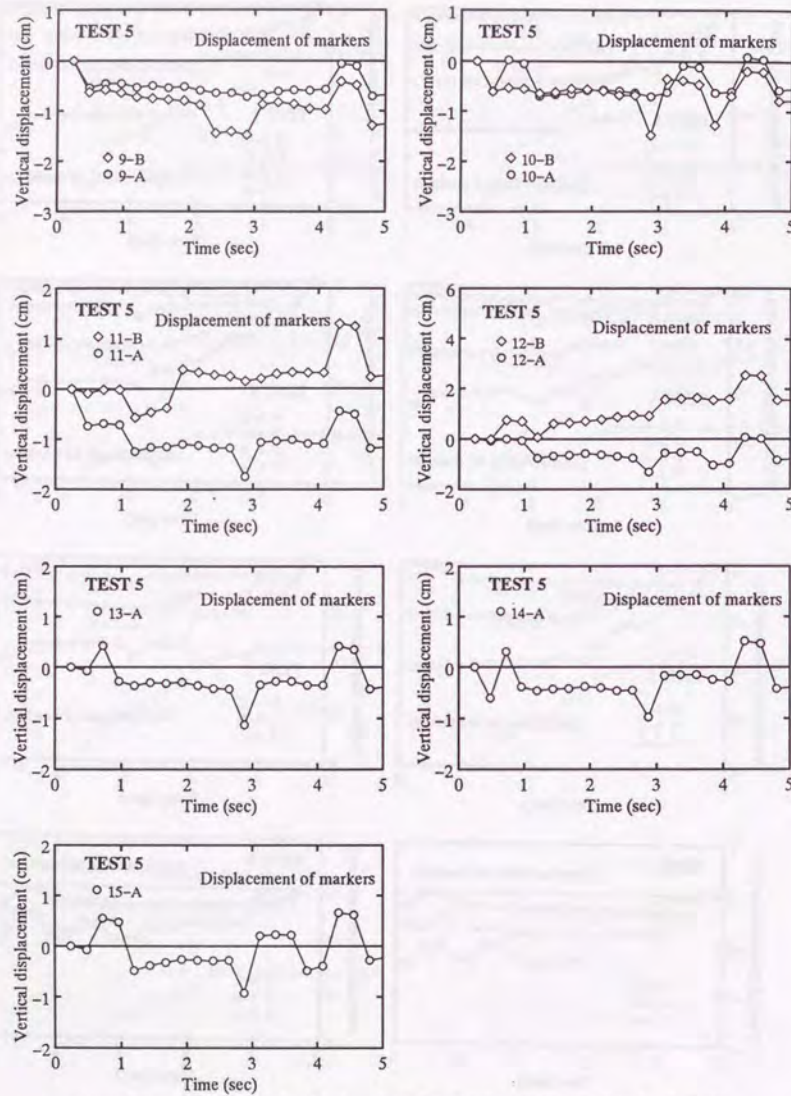


図 7.28 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 5, その 2)

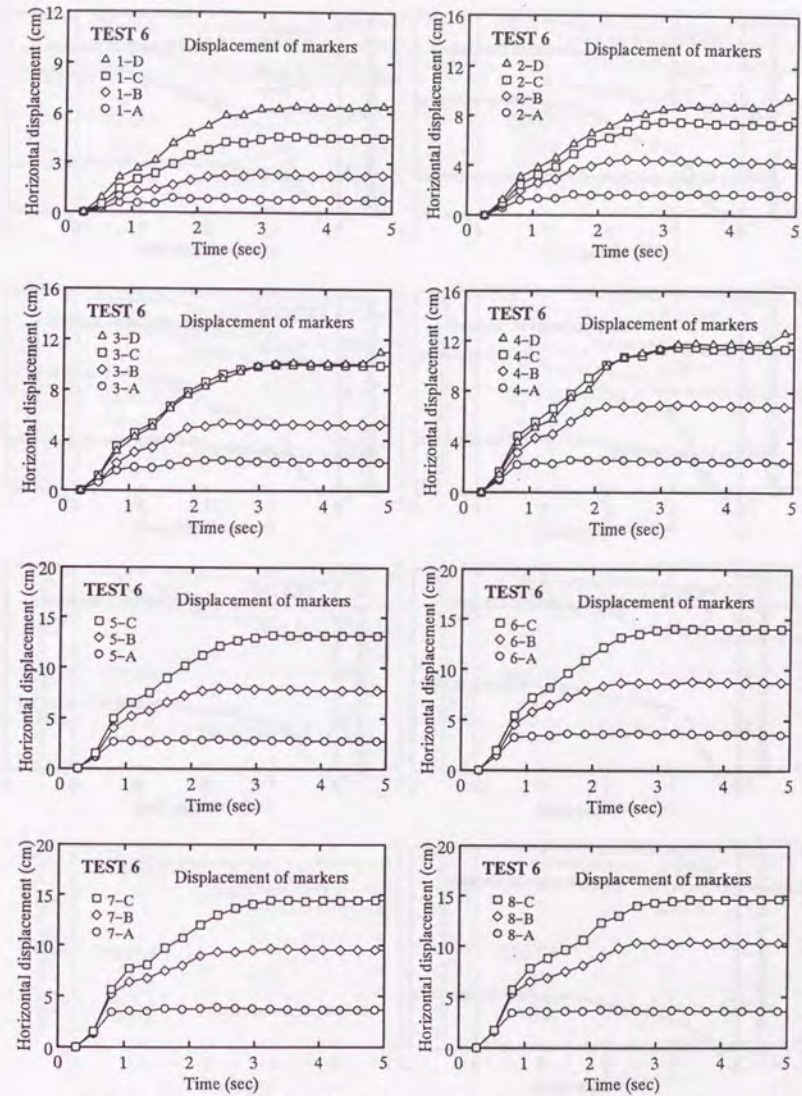


図 7.29 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 6, その 1)

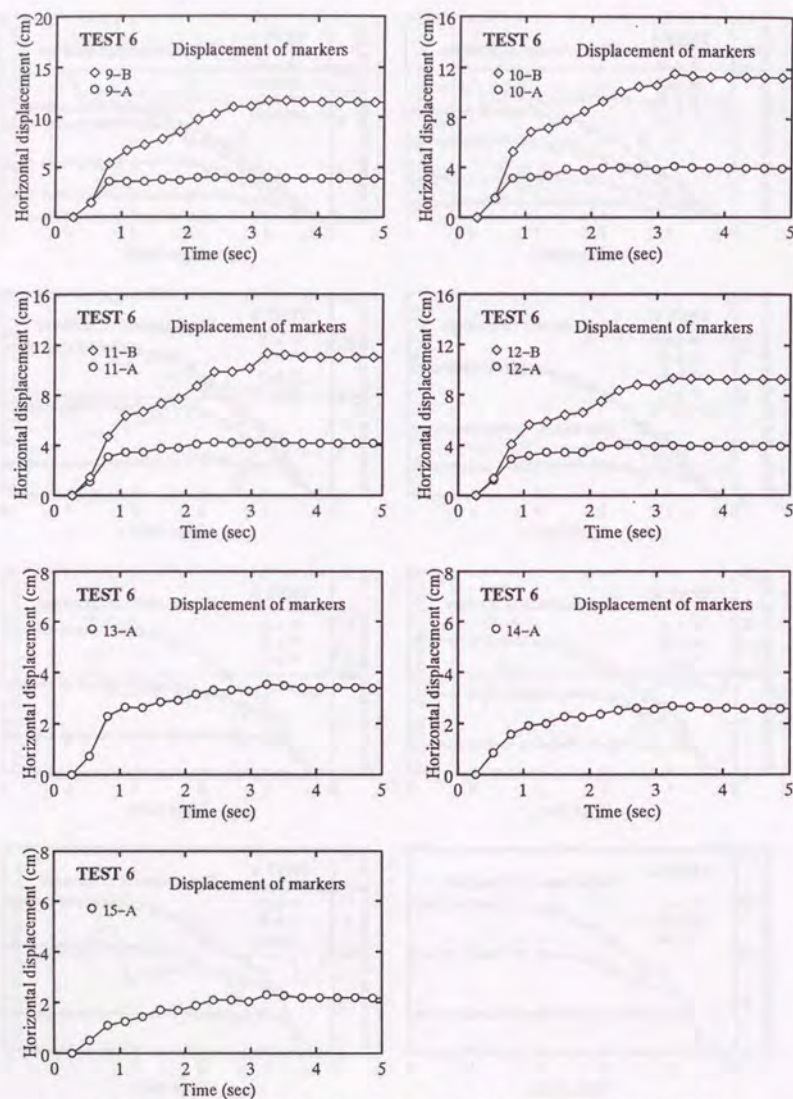


図 7.30 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 6, その 2)

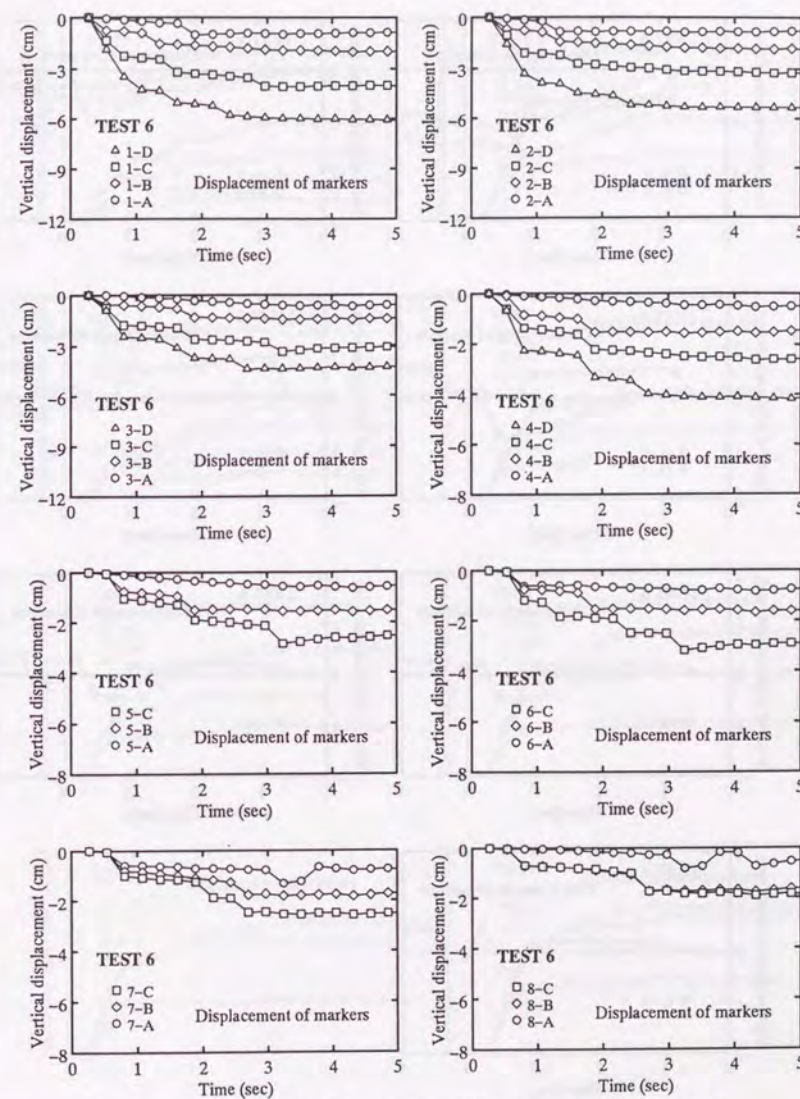


図 7.31 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 6, その 1)

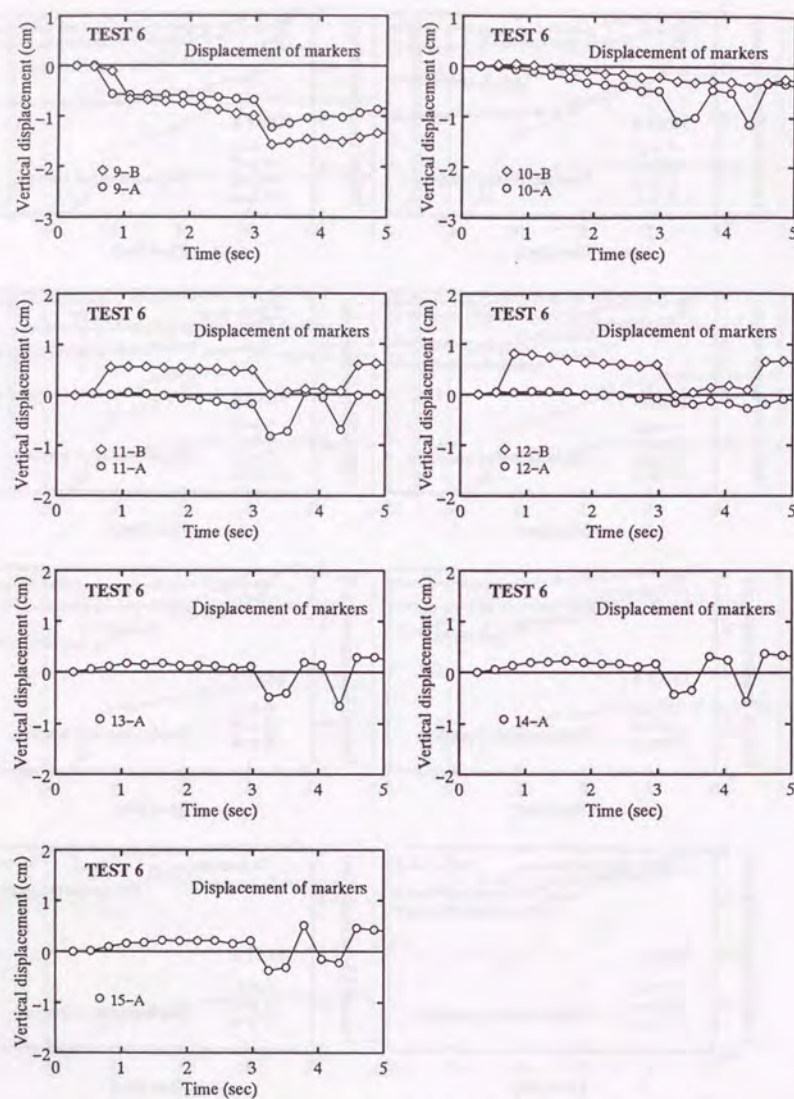


図 7.32 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 6, その2)

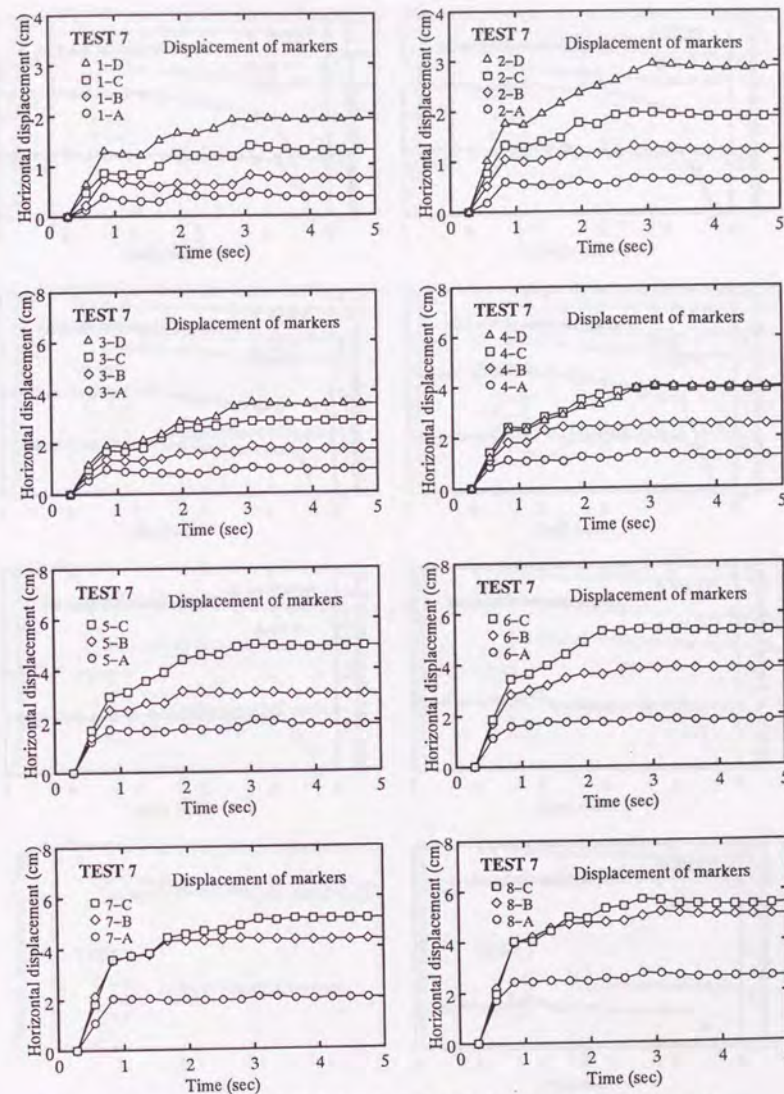


図 7.33 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 7, その1)

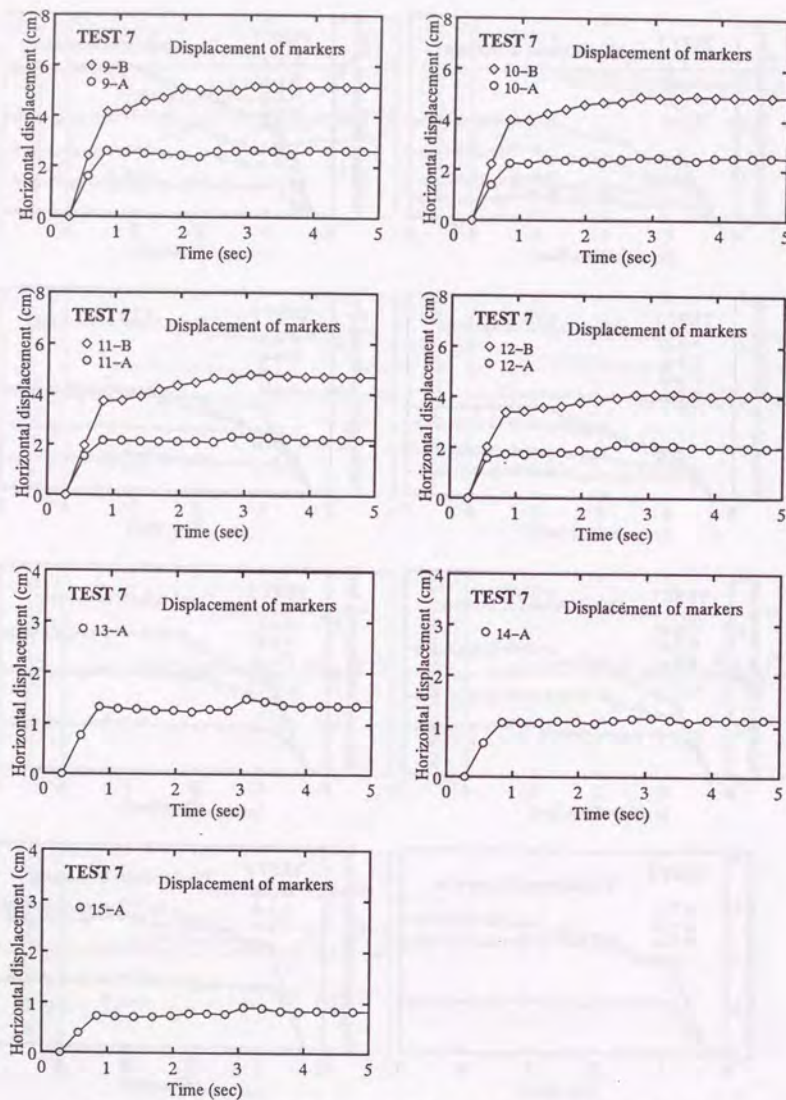


図 7.34 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 7, その2)

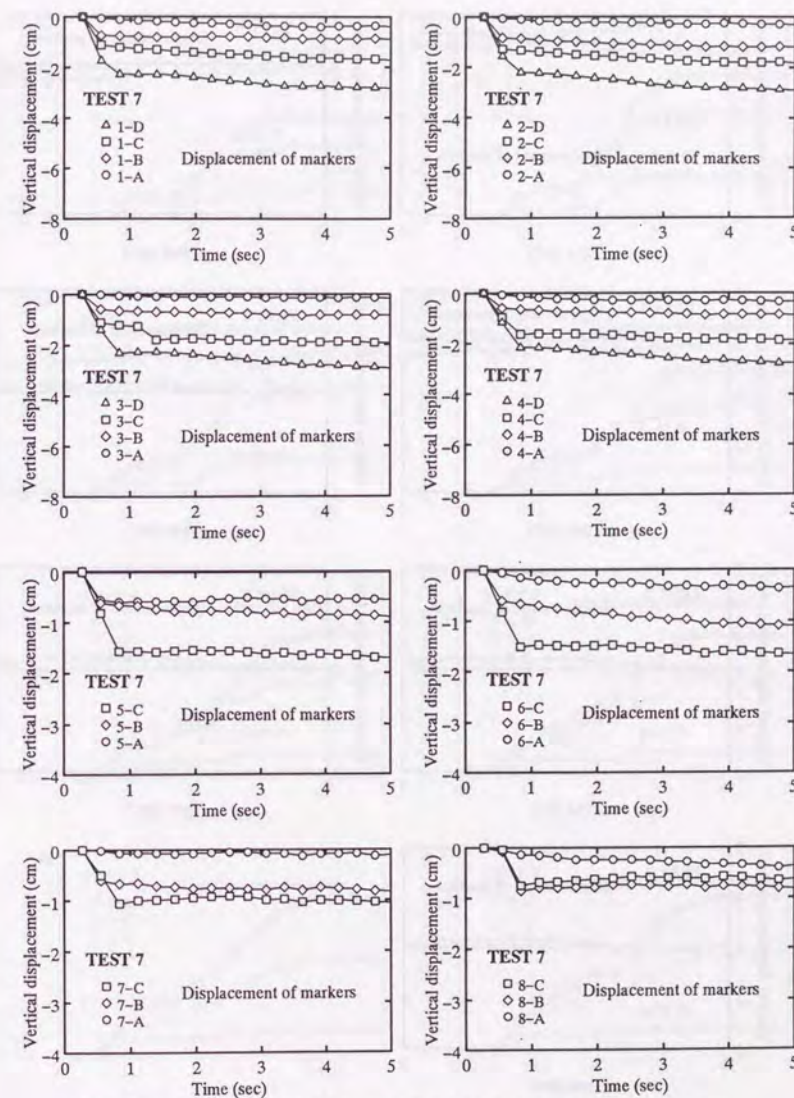


図 7.35 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 7, その1)

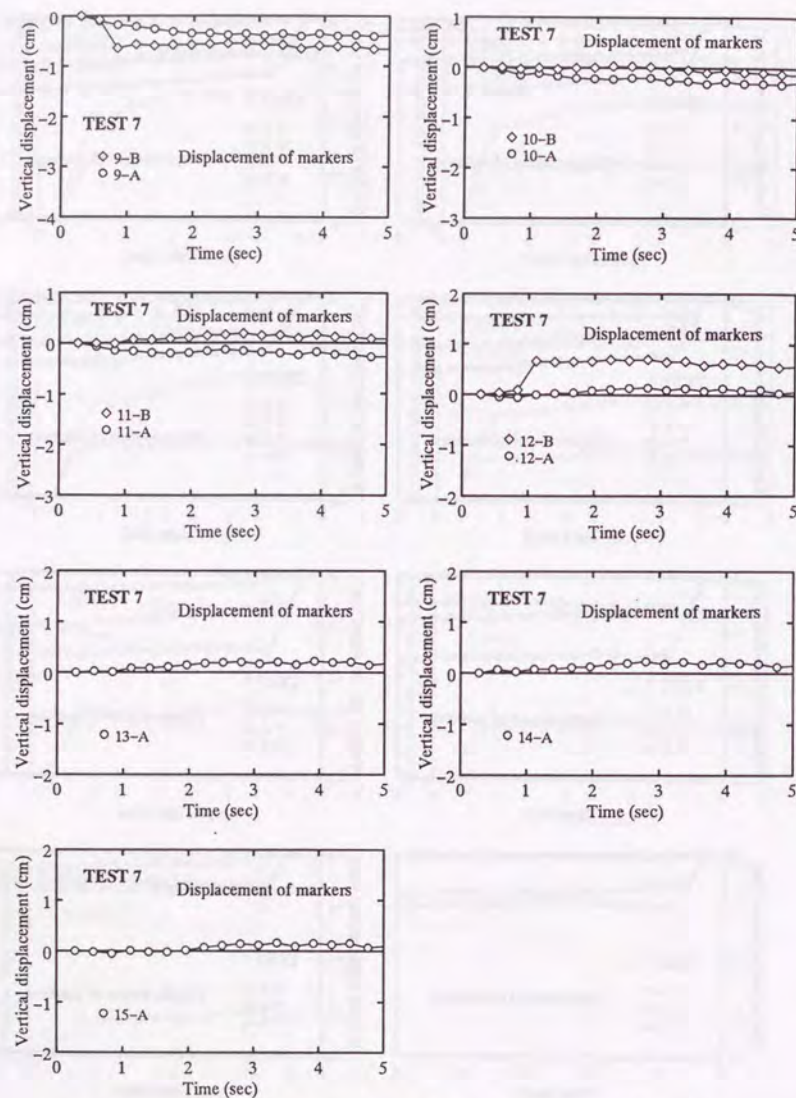


図 7.36 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 7, その2)

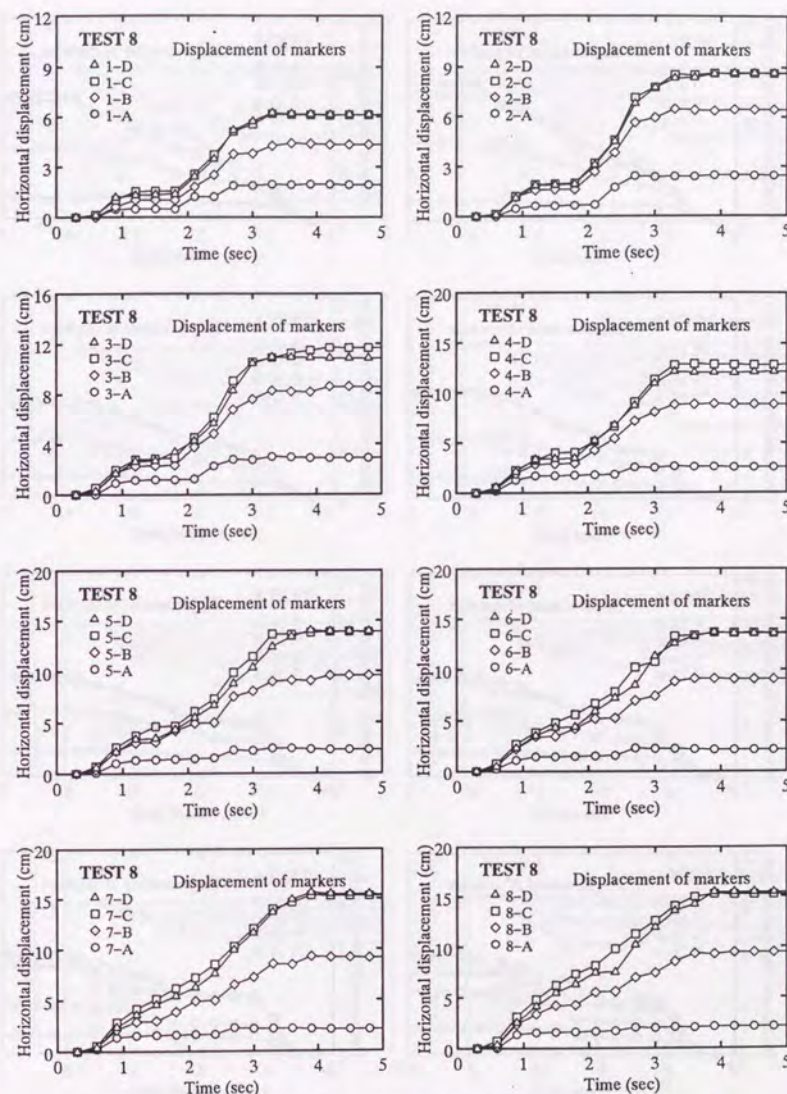


図 7.37 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 8, その1)

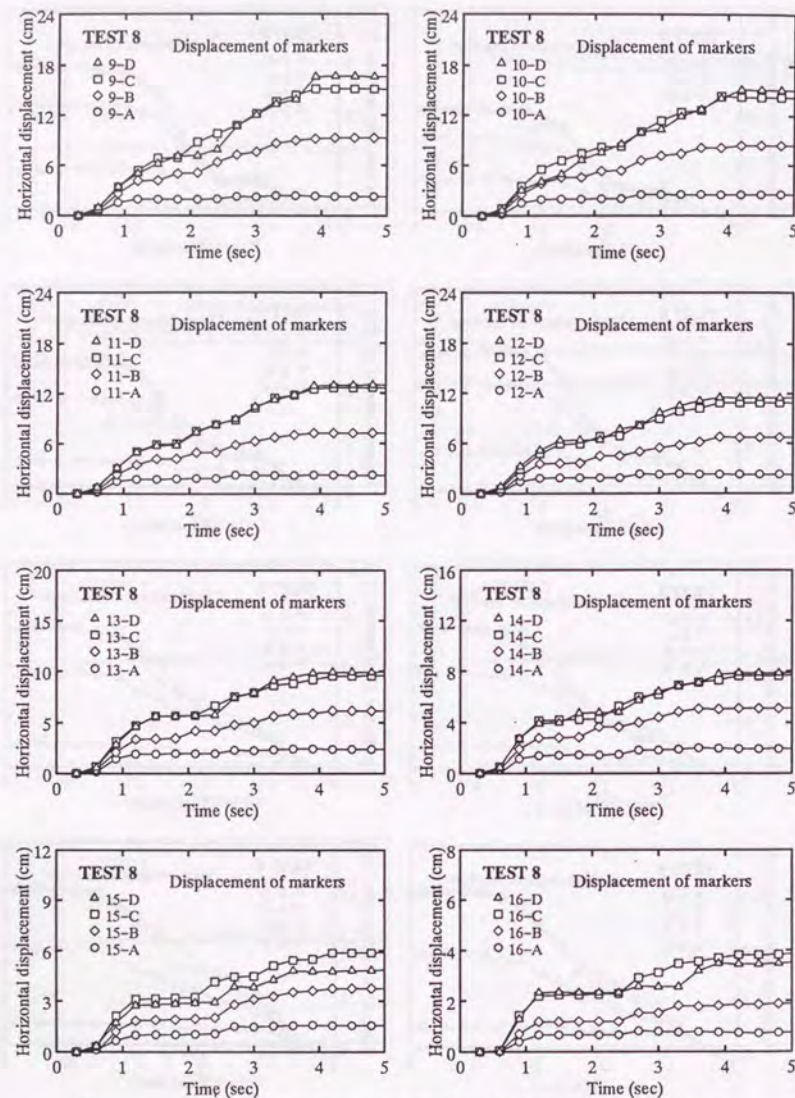


図 7.38 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 8, その2)

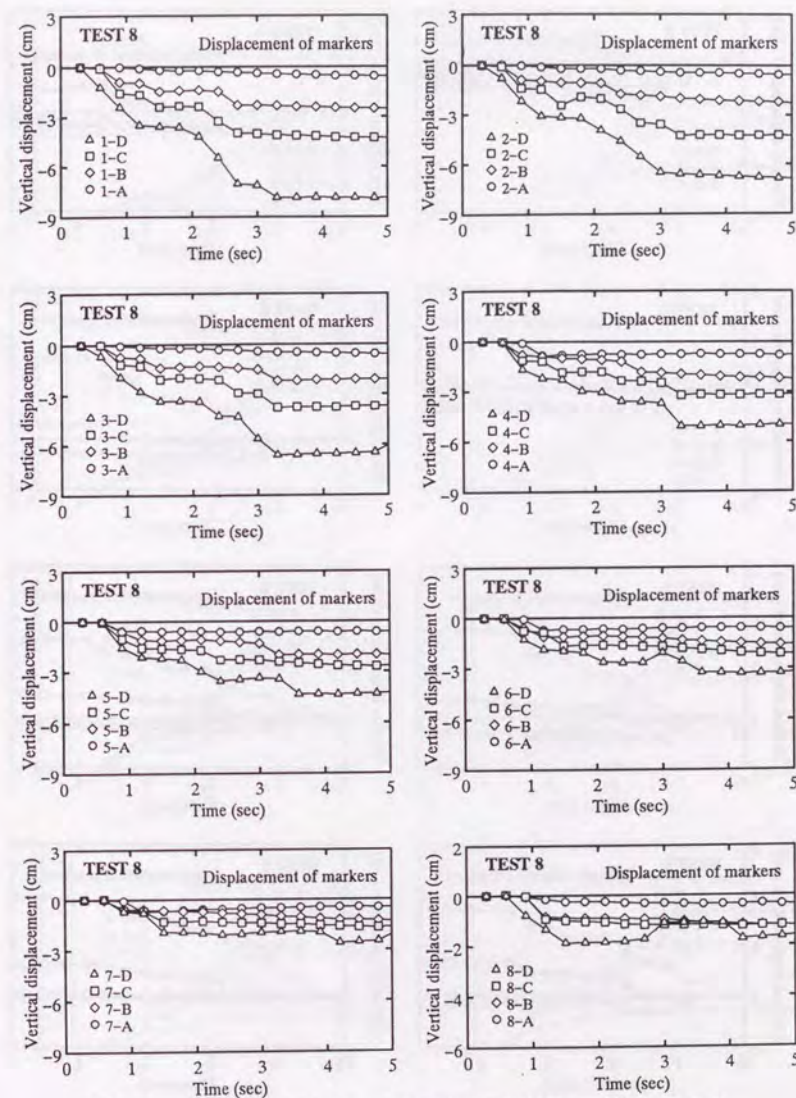


図 7.39 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 8, その1)

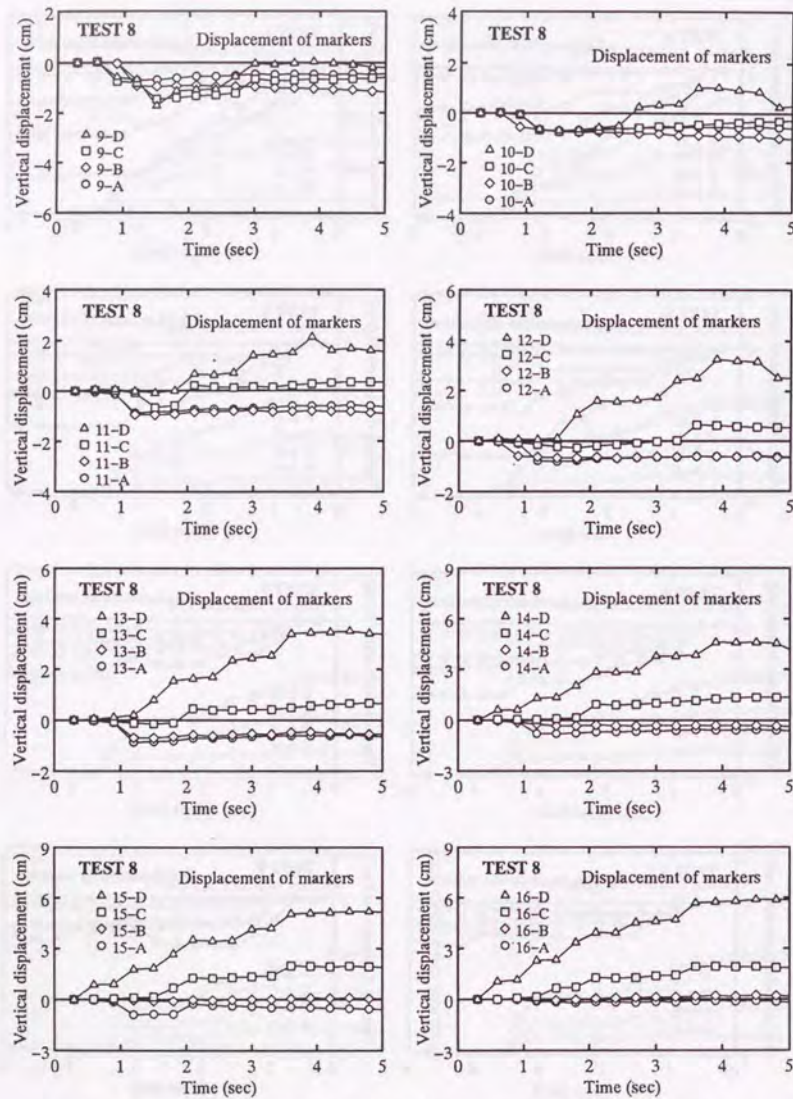


図 7.40 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 8, その2)

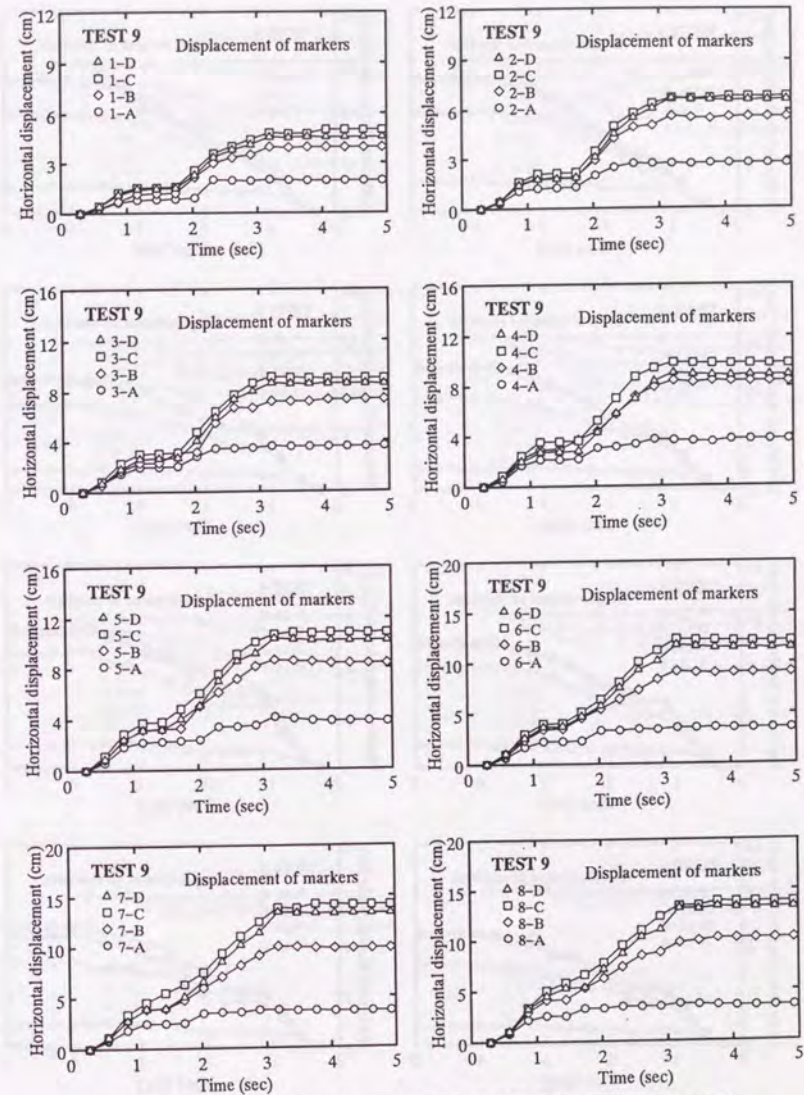


図 7.41 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 9, その1)

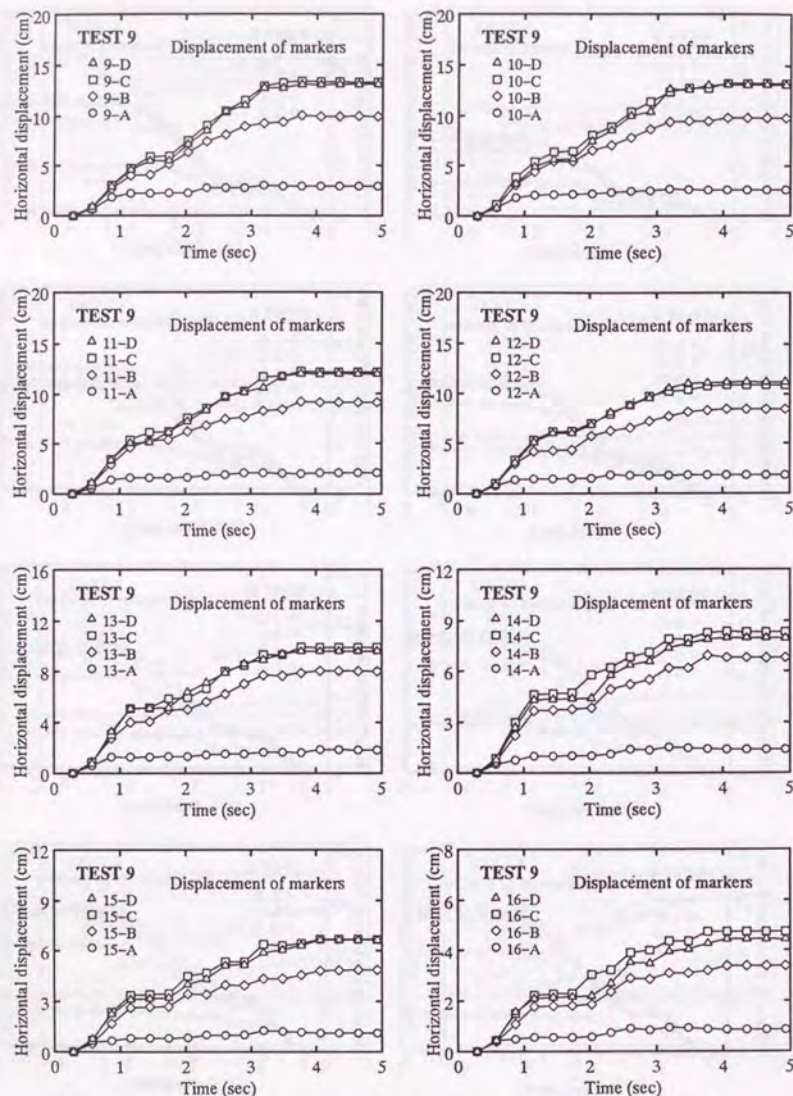


図 7.42 マーカーから読みとった水平変位の時刻歴 (TEST 9, その2)

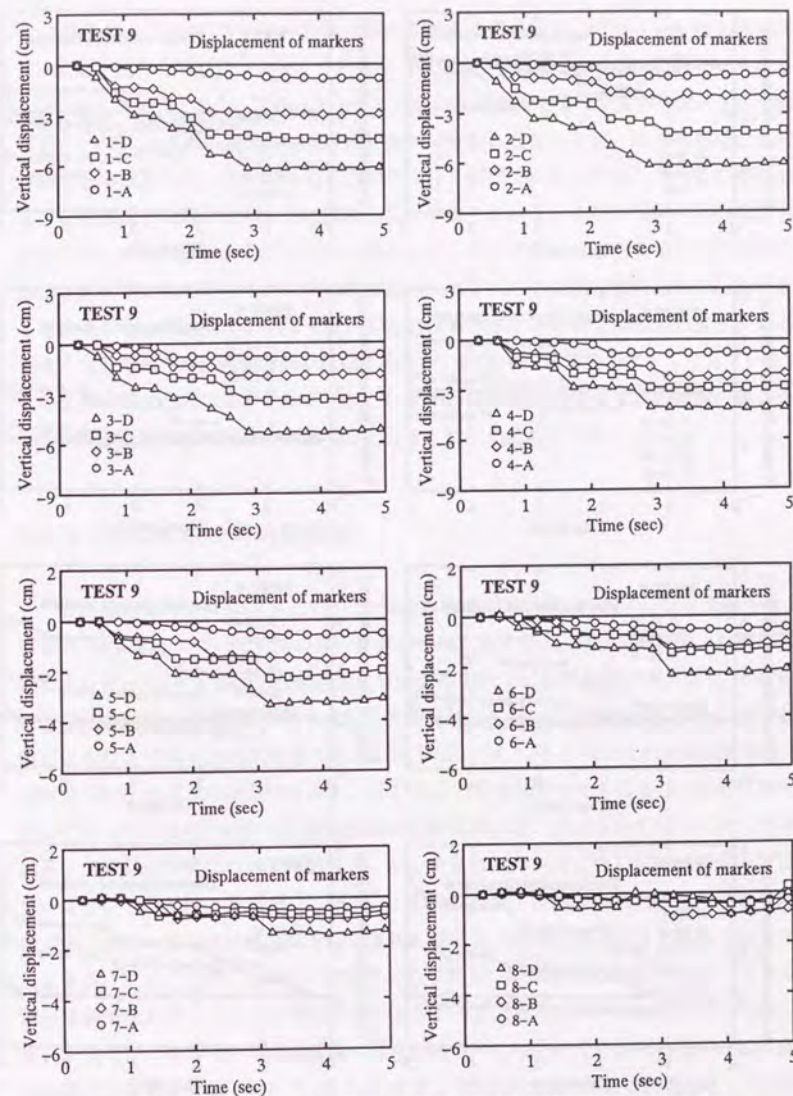


図 7.43 マーカーから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 9, その1)

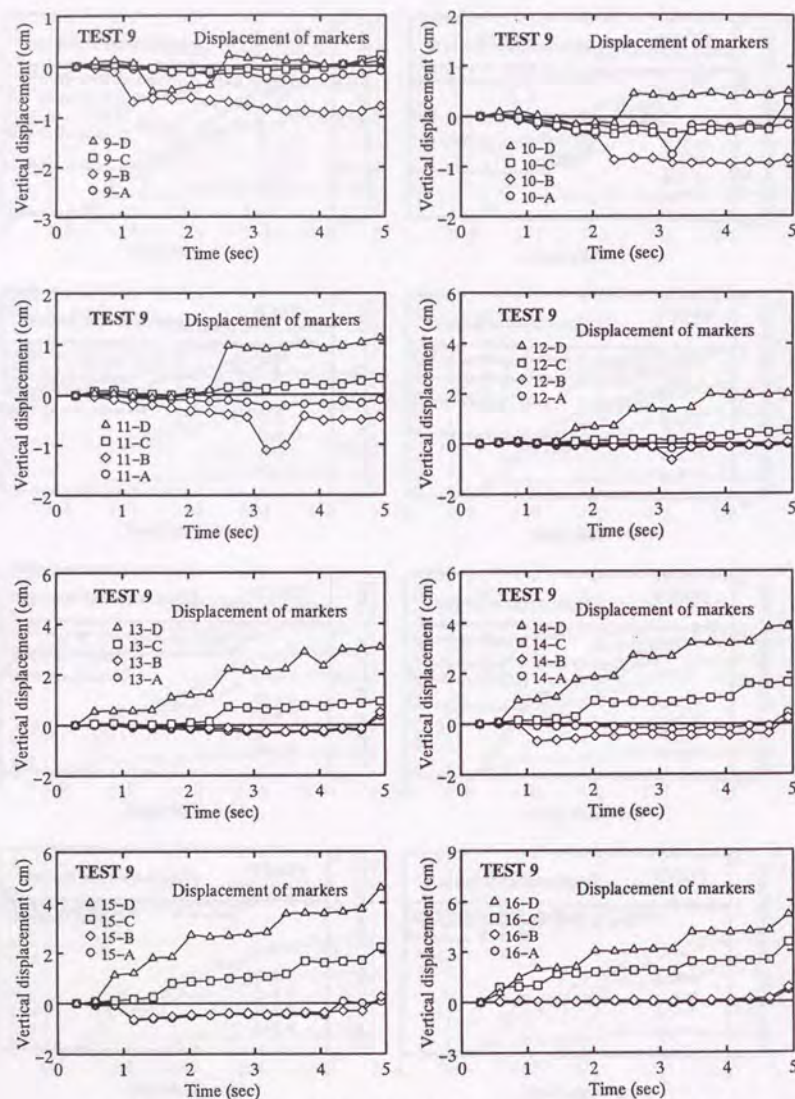


図 7.44 マーカから読みとった鉛直変位の時刻歴 (TEST 9, その2)

図 7.45 ~ 7.52 にマーカの格子点の動きを模型地盤上にプロットしたものを示す。変形が大きく隣り合うマーカが重なって見にくいので2つの図に分けてマーカ1つおきに図示してある。プロットされている白丸は変形の進行写真から読みとった値である。20%の斜面の模型では地表面の動きは追跡しなかったが、10%の斜面の模型は地表面の追跡も行った。斜面先の表面で大きく鉛直上向きに変位しているのがわかる。この図より地盤がどのように変形したかがよくわかる。まず斜面深さ方向の変形であるが、液状化層の上部ほど大きく変位している。地盤の最上部の格子点では変位が小さめにでる傾向があるがこれは先程述べたように水の抵抗で変形が妨げられたからである。もし地表面が水でなく空気であれば抵抗は小さいので地表面の変位が最も大きくなるであろう。斜面方向の変位であるが、斜面中央部で最も大きくなっている。この土槽の壁は固定であり亀裂も現れないため、水平変位に対して両端固定の働きをしている。したがって斜面中央部で最も大きく変形するのである。

7.2.2 自由流動の時刻歴特性

自由流動実験1 (TEST 3 ~ 7), 自由流動実験2 (TEST 8, 9) および自由流動実験3 (TEST 24 ~ 27) について流動の進行に焦点を当て考察する。自由流動実験1は衝撃振動による傾き20%の斜面の流動実験、自由流動実験2は衝撃振動による傾き10%の斜面の流動実験、自由流動実験3は電気油圧振動台を用いた短時間(約1秒)の強振振動による傾き20%の斜面の流動である。図 7.53, 7.54, 7.55 にそれぞれ自由流動実験1の変位, 速度, 加速度の時刻歴を示す。図 7.53 より間隙比が大きくなるほど最終変位が大きくなっているのがわかる。流動速度は間隙比が大きいくほど大きくなっておりその結果、流動継続時間については図 7.53, 7.54 を見ればわかるように間隙比によらずほぼ一定という興味深い結果がでている。この流動実験では地盤は流動の進行とともに緩やかになり、変位は地盤の傾きによるせん断応力と地盤の残留強度が等しくなったら止まる。このことから地盤が不安定になり変形し、その釣合の位置(傾き)に至る時間は地盤形状が同じであれば地盤密度によらず一定であるということである。地盤が変位を初めて1秒くらいした後変位の傾きが緩やかになるところが現れるが、これは流動速度では速度の低下として(図 7.54 参照)、流動加速度では負の加速度として(図 7.55 参照)現れている。これが地盤のダイレーションによるということは今までにも

TEST 2 Deformation of ground (Movement of markers)
Flow triggered by impulse ($e=1.044$)

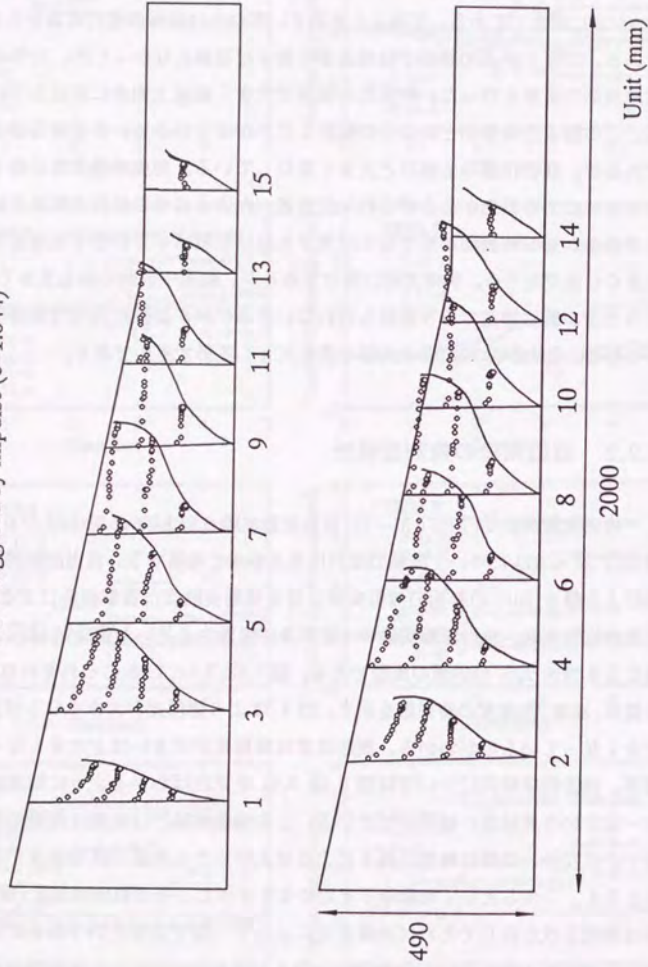


図 7.45 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 2)

TEST 3 Deformation of ground (Movement of markers)
Flow triggered by impulse ($e=1.049$)

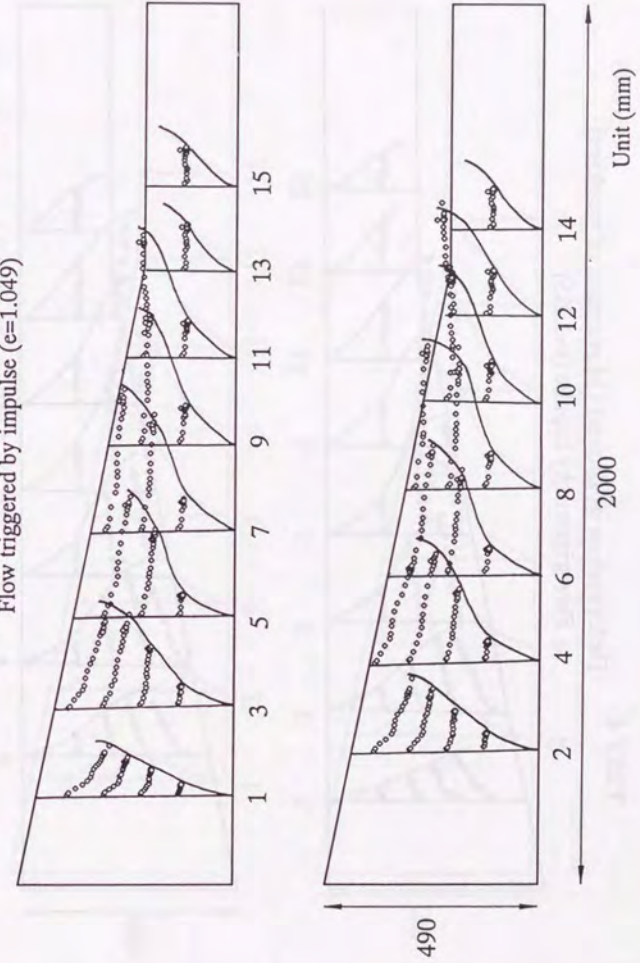


図 7.46 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 3)

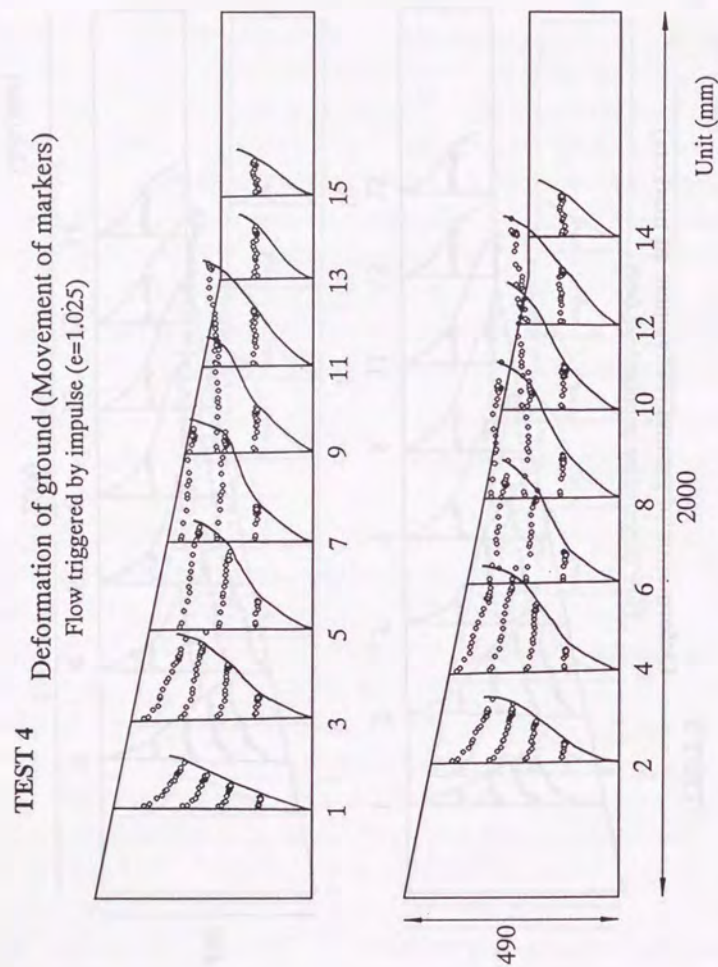


図 7.47 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 4)

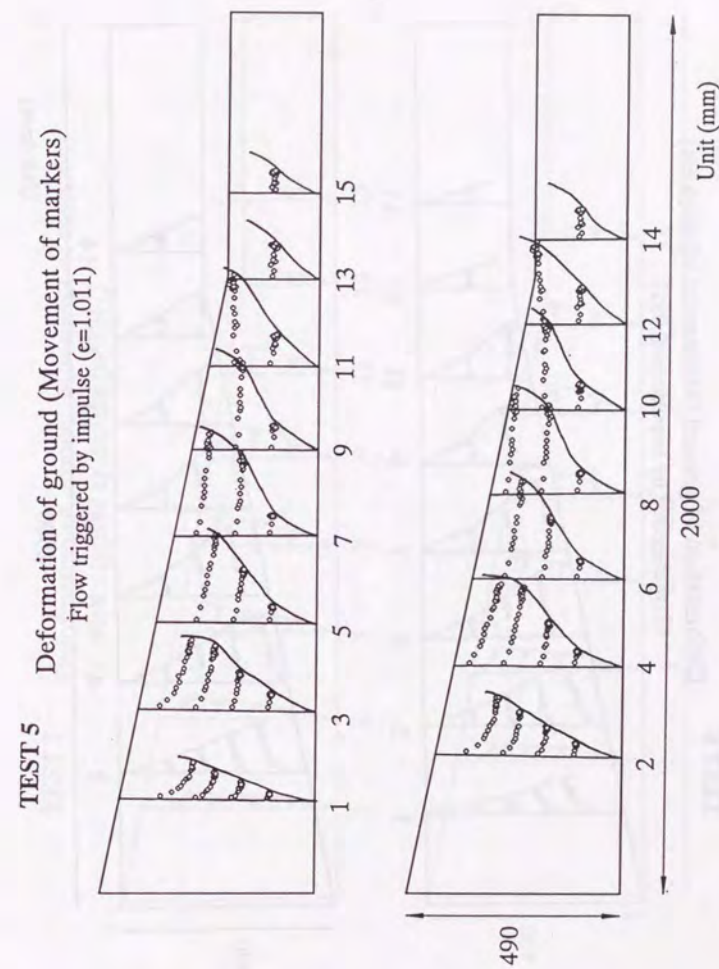


図 7.48 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 5)

TEST 6 Deformation of ground (Movement of markers)
Flow triggered by impulse ($e=0.982$)

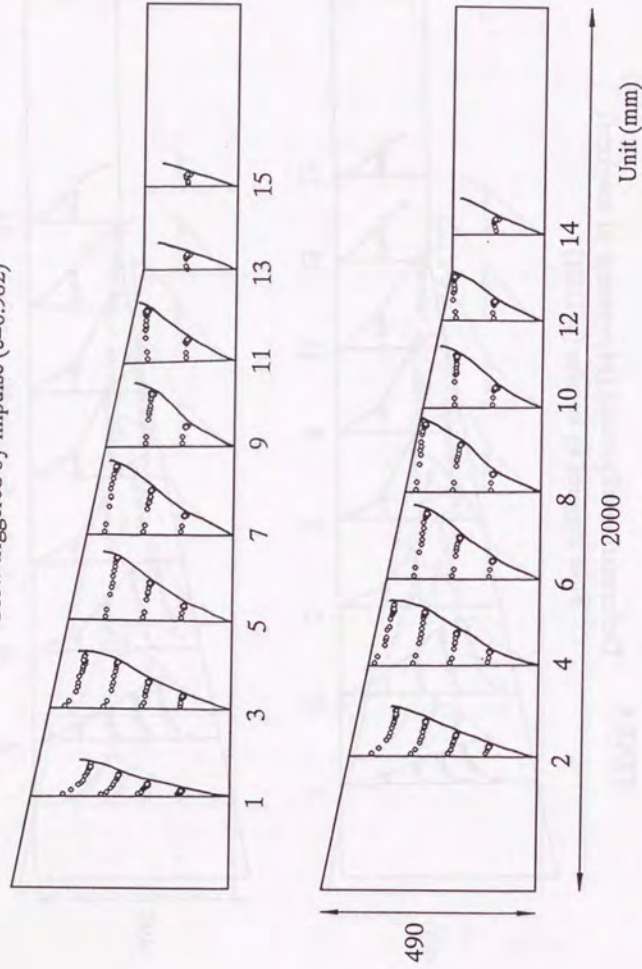


図 7.49 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 6)

TEST 7 Deformation of ground (Movement of markers)
Flow triggered by impulse ($e=0.947$)

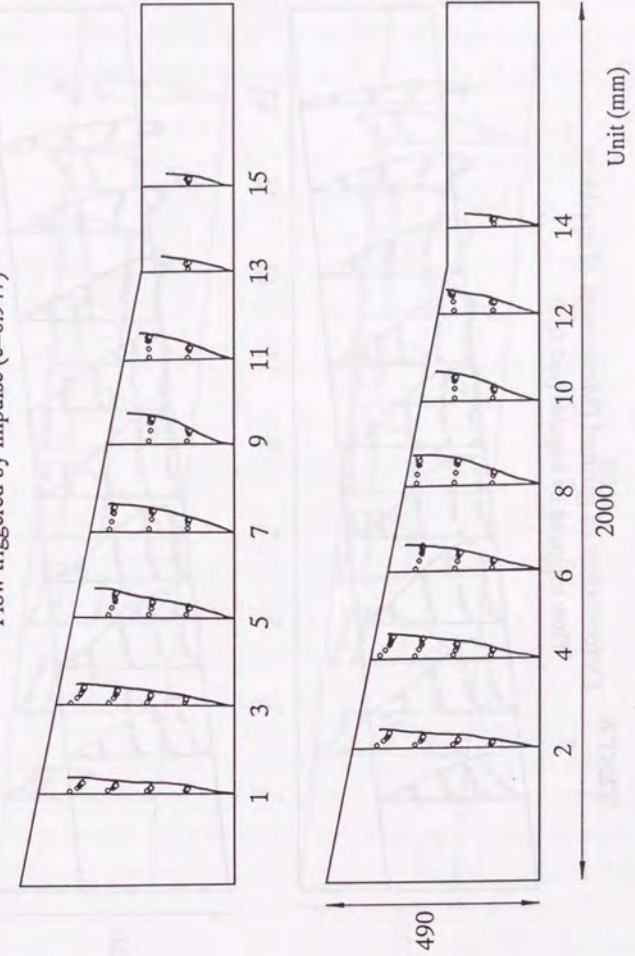


図 7.50 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 7)

TEST 8. Deformation of ground (Movement of markers)
Flow triggered by impulse ($e=1.039$)

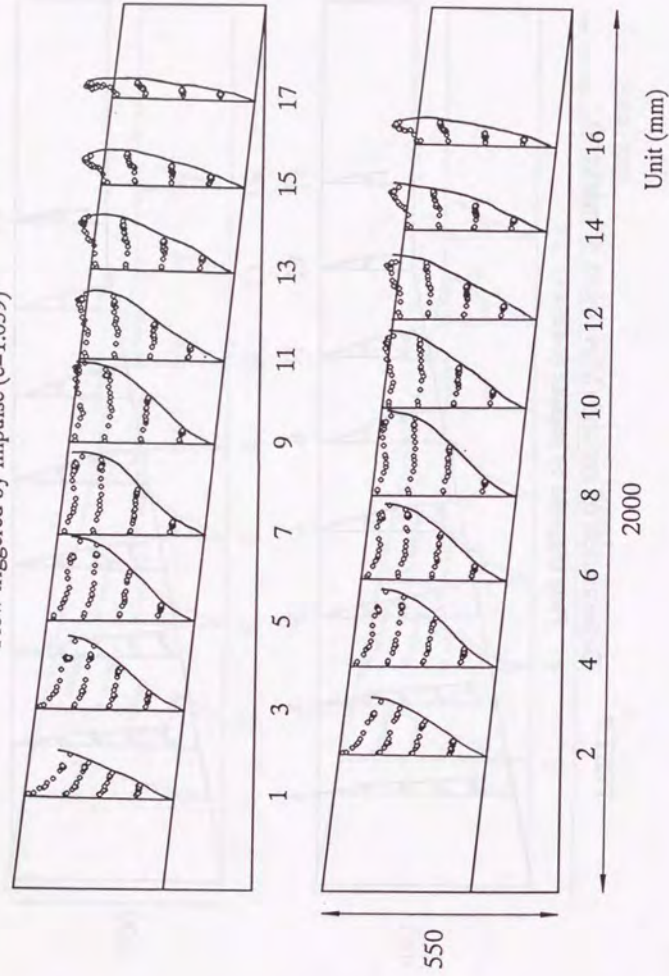


図 7.51 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 8)

TEST 9 Deformation of ground (Movement of markers)
Flow triggered by impulse ($e=1.009$)

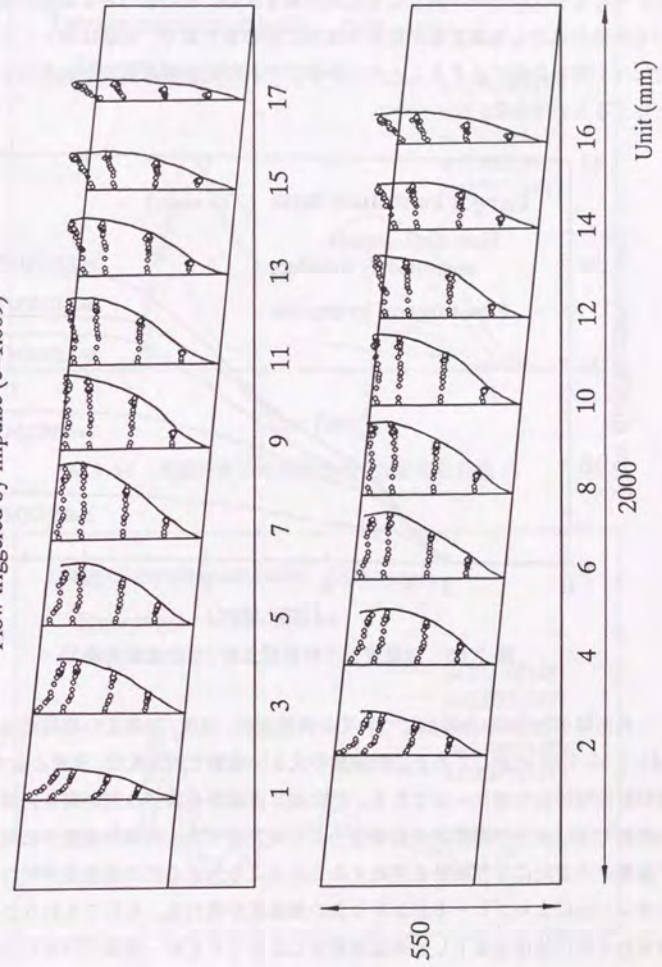


図 7.52 マーカーから読みとった地盤の変形状態 (TEST 9)

説明してきた。流動加速度記録を見ると流動開始時に大きく正の値を取り、ダイレタ
ンシーによるブレーキが働くときに負の値を取る。その後小さな加速度運動を行い
ながら流動が進行し地盤変位が止まる直前に負の値を取り、地盤はゆっくりと止まるの
ではなく割合急激に止まることわかる。これは地盤残留強度が載荷力を上回ったこ
とによるものである。

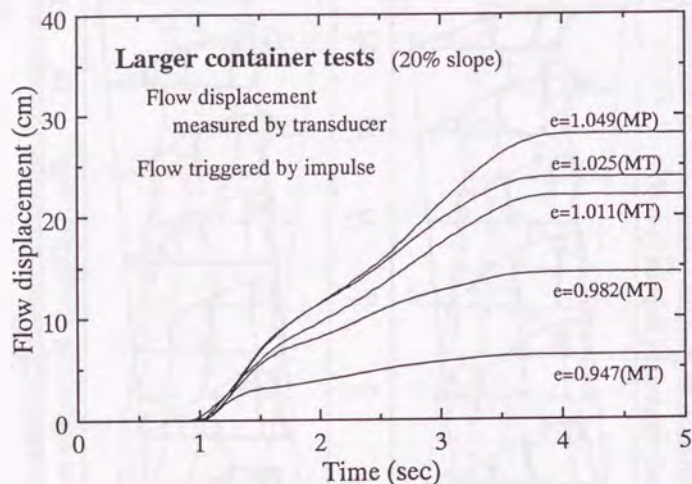


図 7.53 流動変位の時刻歴比較 (自由流動実験 1)

斜面傾きが 10% の地盤についての流動変位、速度、加速度の時刻歴はそれぞれ図
7.56, 7.57, 7.58 に示してある。間隙比の大きい地盤で流動変位、速度とも大きくなり、
流動継続時間はやはり一定である。変位進行後流動を妨げる力が働き、傾きの緩いこ
の地盤ではほとんど速度が 0 になるところが存在する。流動加速度の記録を見るとま
ず地盤が不安定になり流動を開始することにより大きく正の加速度が現れるが、ダイ
レタンスーによりブレーキがかかり負の加速度が現れる。そしてまわりから水圧が供
給されて再び強度が低下し加速度運動をしようとするが、地盤の傾きが小さくなり残
留強度により地盤が止まろうとするため負の加速度が現れる。傾きの緩い地盤は傾き
の急な地盤より変形量が小さくなる。これは地盤流動は地盤の残留強度と等しい傾き
になったとき止まるわけであるが、急な傾きの地盤はそれだけ多くの土が移動しなけ

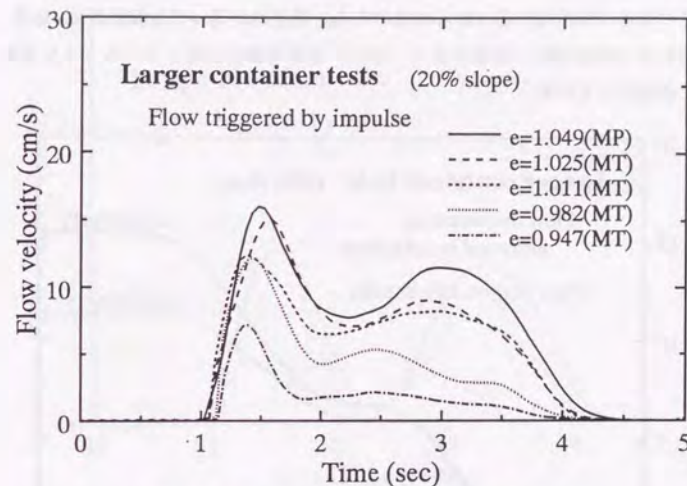


図 7.54 流動速度の時刻歴比較 (自由流動実験 1)

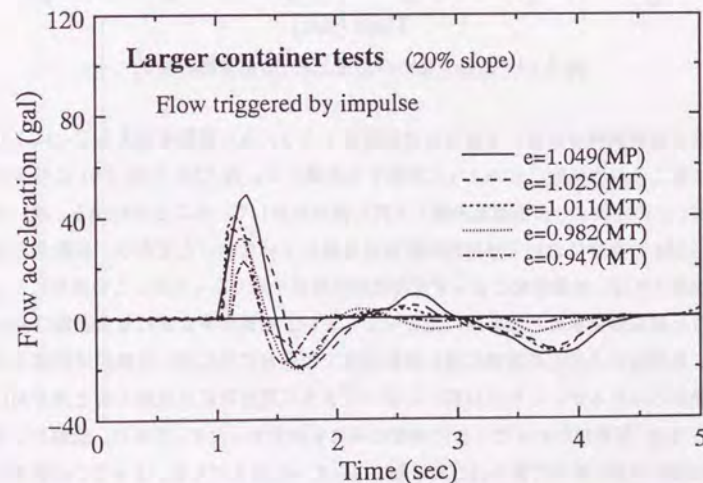


図 7.55 流動加速度の時刻歴比較 (自由流動実験 1)

ればその傾きになれないことから当然である。間隙比が違っても流動変位、速度、加速度の時刻歴は時間軸は一定のままで、その大きさが相似になっているような非常によく似た挙動をしている。

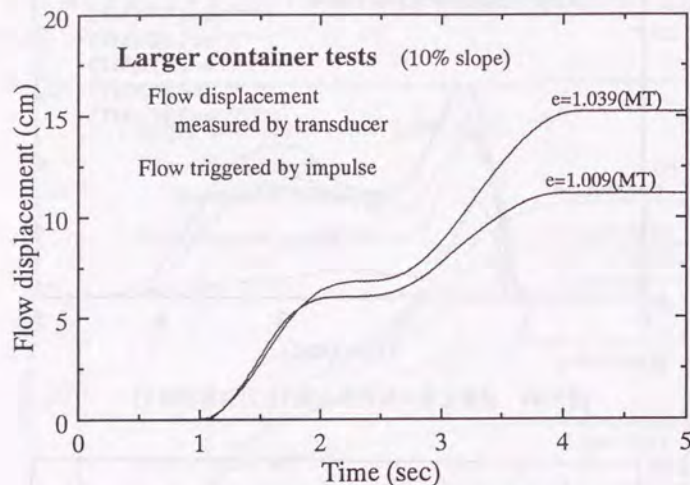


図 7.56 流動変位の時刻歴比較 (自由流動実験 2)

自由流動実験 3 においては自由流動実験 1 より大きな振動を加えることによりその後起こる自由流動にどのように影響するか調べた。図 7.59, 7.60, 7.61 に結果を掲載する。この結果より自由流動実験 1 と同じ傾向を示していることがわかる。違いは間隙比 0.934 の実験においては振動後変形は進展していないことである。振動停止後変形が進展すれば、地盤密度によらず変形継続時間は一定であったが、この密度になってしまうと振動停止後変形は即座に止まってしまう、地盤が不安定になる挙動は見られない。間隙比が 1.034 の非常に緩い実験結果では最終変位に達した後変位が減るような挙動がみられるが、これは以前にも述べたように変位計には流動方向と逆方向に働く小さな力 (振動がかかったときの地盤の揺れを測定するため) があり、流動が止まった後地盤が非常に軟弱であり逆方向に動いてしまった結果である。よってこの動きは無視する。ここでは自由流動実験 1 と時刻歴結果を見ての定性的な比較を行った。7.2.4 小節では最終変位量や平均速度の違いを定量的に比較してみる。

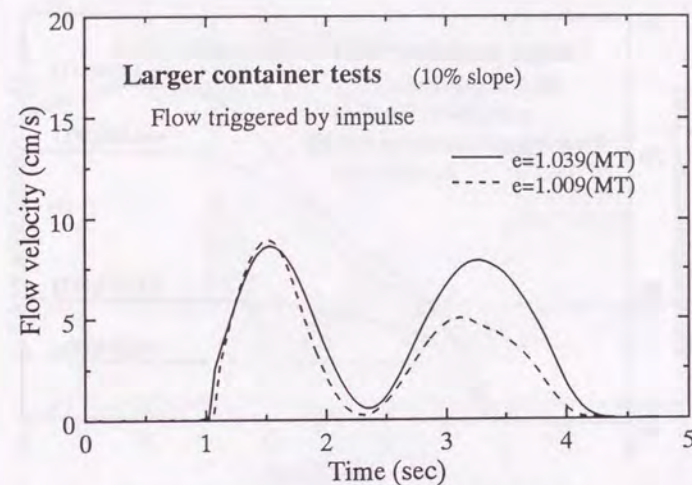


図 7.57 流動速度の時刻歴比較 (自由流動実験 2)

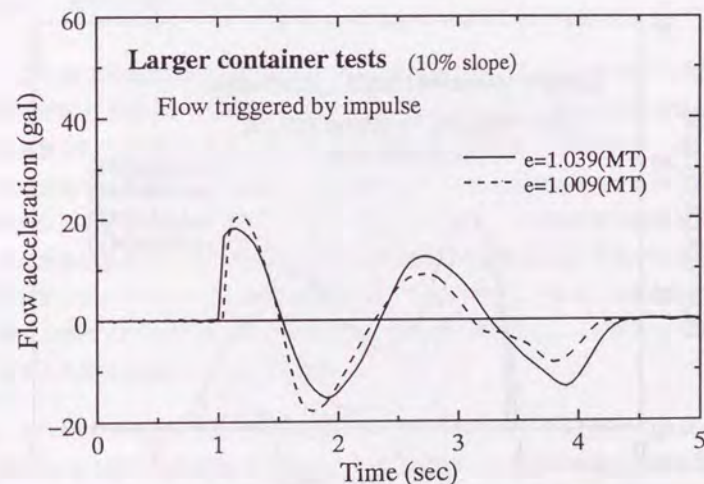


図 7.58 流動加速度の時刻歴比較 (自由流動実験 2)

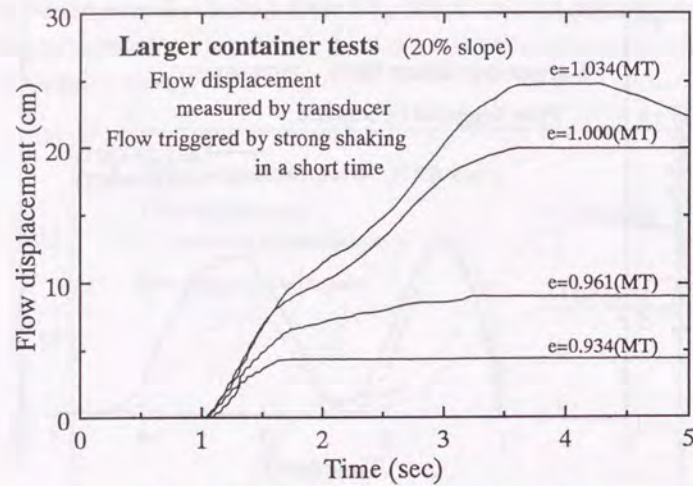


図 7.59 流動変位の時刻歴比較 (自由流動実験 3)

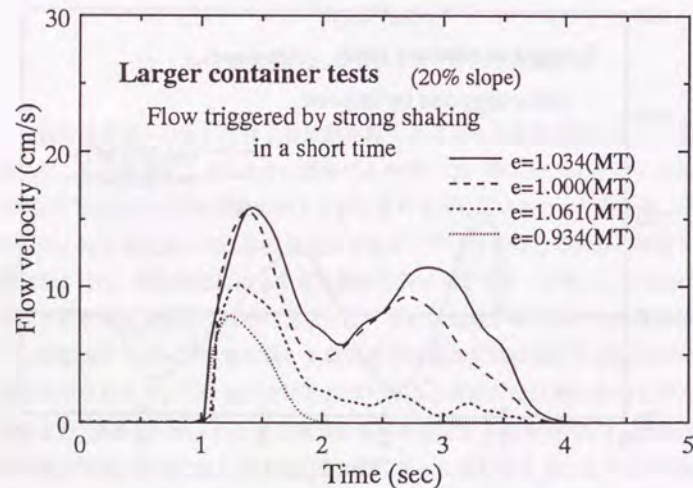


図 7.60 流動速度の時刻歴比較 (自由流動実験 3)

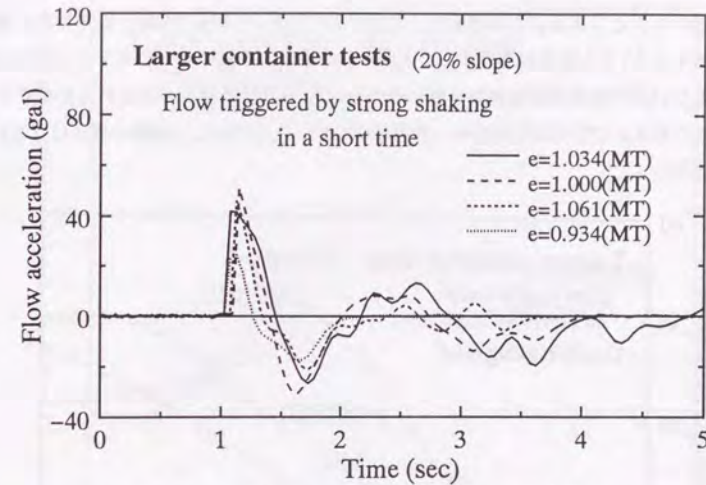


図 7.61 流動加速度の時刻歴比較 (自由流動実験 3)

7.2.3 振動流動の時刻歴特性

図 7.62 に地盤流動中にも加振を加え続け、地盤間隙比を変化させて行った実験 (振動流動実験 1) の変位の時刻歴を示す。間隙比の大きい地盤ほど変位の進行が速いのは自由流動と同じ結果である。しかしこの両実験の差は最終変位量に現れている。つまり自由流動では間隙比が小さくなれば変位量も小さくなったが振動を与え続けた実験では変位は止まらず地盤が水平になるまで進行している。この結果地盤流動継続時間は密な地盤が長くなり、密な地盤ほど長い時間流動する結果になる。地盤が水平になるまで変形したということは、地盤の残留強度は 0 ということである。流動変形の進行中変位が揺れているのは変位計が振動による地盤の変位を読みとったからである。自由流動との詳細な比較は 7.2.4 小節で行う。

図 7.63 に地盤密度は一定として流動中に加える加振の大きさを変えた実験 (振動流動実験 3) の変位の時刻歴結果を示す。ただし実験を行った地盤密度は自由流動を起こさない密度である。入力加速度が大きくなるほど流動変位進行が速くなっているのがわかる。つまりこの密度では地盤流動挙動は流動中に加わる振動の影響を大きく受

けるということである。この理由は、TEST 13 で行った実験(斜面と直角方向に振動を作用させる)でも変形が進行することより、摩擦床上の剛体すべりモデルのみでは説明できない。つまり大きな振動を受けるほど土粒子の接触構造が壊され土の軟化が進むようである。ここでは時刻歴の一例を挙げたが、さらに詳しい振動の評価は7.2.5小節で行う。

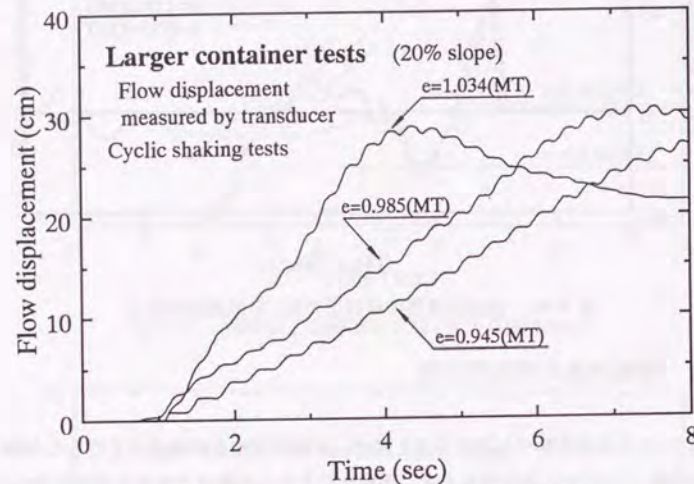


図 7.62 流動変位の時刻歴比較 (振動流動実験 1)

7.2.4 自由流動と振動流動の比較

図 7.64 に自由流動と振動流動の両実験において最終変位量と間隙比の関係を示す。これまで考えてきた流動停止のメカニズム(作用しているせん断応力が残留強度に等しい)を使うと、流動後の地盤の傾きによって残留強度がわかる。またこれらの実験で地盤形状および変位の測定点が同じであることを考えると、実験より得られた最終変位量と流動後の地盤の傾きには関連がある。つまりこの図で用いられている最終変位量は地盤の残留強度と何らかの関係があるということである。自由流動の時には地盤間隙比が小さくなるほど最終変位量も小さくなっており残留強度が強くなっていくの

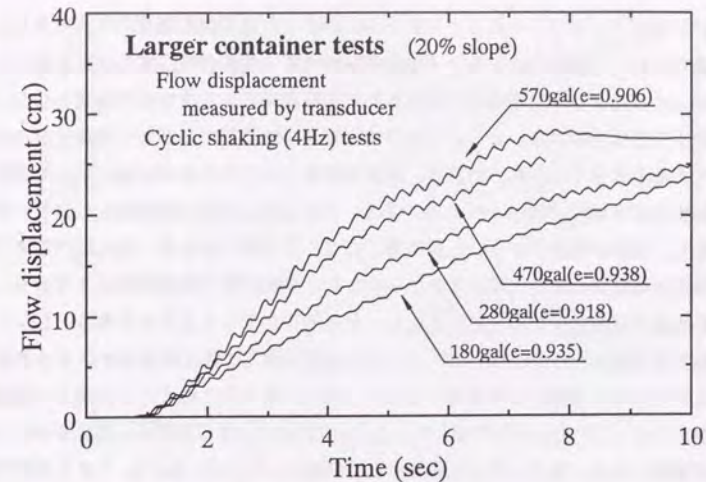


図 7.63 流動変位の時刻歴比較 (振動流動実験 3)

がわかる。そして間隙比が 0.93 より小さくなってしまうと自由流動は起こらない。これに比べ振動流動では間隙比が 0.93 程度でも地盤は水平になってしまい本実験で行った間隙比では残留強度は 0 ということになる。振動流動では間隙比が小さくなるほど少し最終変位量は大きくなっているような傾向が見られる。地盤が密になると基盤近くでは流動化が起こり難くなり液状化層の上部で流動が進行する。流動が止まるのは地盤が水平になってからであり地盤が水平になるまでにどれだけの土が移動しなければならぬかは決まっているため流動化層が薄くなればそこではそれだけ大きく変形しなければならない。ただしここにあらわれた差は小さくほとんど気にならない。本実験で取り扱ったのは流動する地盤ということで、流動を起こさせるために地盤密度は小さく振動もある程度大きいものを使用した。そのため振動流動ではすべて地盤が水平になるまで流動した。しかし密度が大きくなったり振動が小さくなれば振動流動であっても地盤が水平になる前に止まったり流動が起こらなかったりするの当然である。

次に流動速度に着目して結果を考察してみる。図 7.65 に自由流動と振動流動の両実験において平均流動速度と間隙比の関係を示す。ここで平均流動速度とは自由流動

においてはダイレンシーによりブレーキがかかった後の流動速度の平均であり、振動流動においては流動が止まる時地盤密度が大きくなると少しずつ速度を落としながらゆっくり止まる傾向があるため流動が6割程度進行するまでの平均値とした。この結果より間隙比の大きいところでは自由流動と振動流動に差がなく間隙比が小さくなってくると大きく差があらわれる。振動の影響があらわれるのは図に示してありおり間隙比が0.99より小さいところである。流動速度は地盤の残留強度に大きく依存しており、地盤が非常にゆるいときは同じになって当然であるが、前に述べたように残留強度を流動停止後の地盤の傾きから考えると振動流動の残留強度は0であり、自由流動地盤で残留強度があらわれるにしたがって差がでてくるはずである。しかしある間隙比まで差があらわれないということは振動流動では常に残留強度が0を維持しているのではなく振動により変動しており、傾きが緩やかになるにしたがって残留強度も小さくなっていくことを示唆している(自由流動ではある程度せん断変形が起こると残留強度になり、傾きと共に残留強度の値が変化したりはしない)。つまり地盤密度だけでなく、動的せん断力の大きさ(反転があるかないかなど)も流動特性を決める重要な要因となってくる。

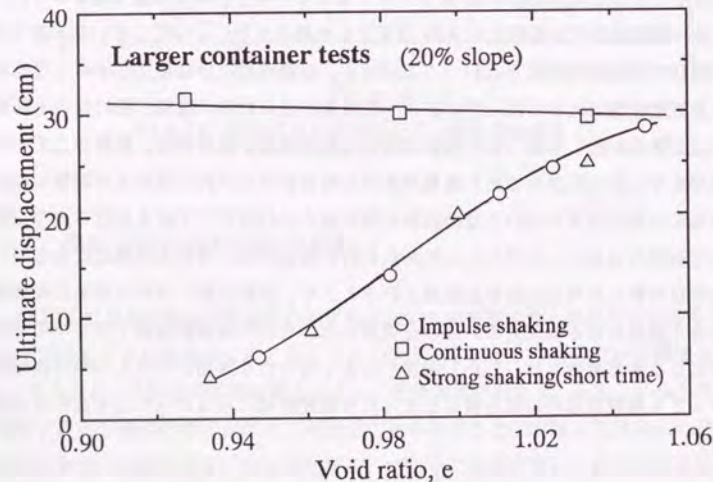


図 7.64 自由流動と振動流動における最終変位量と間隙比の関係

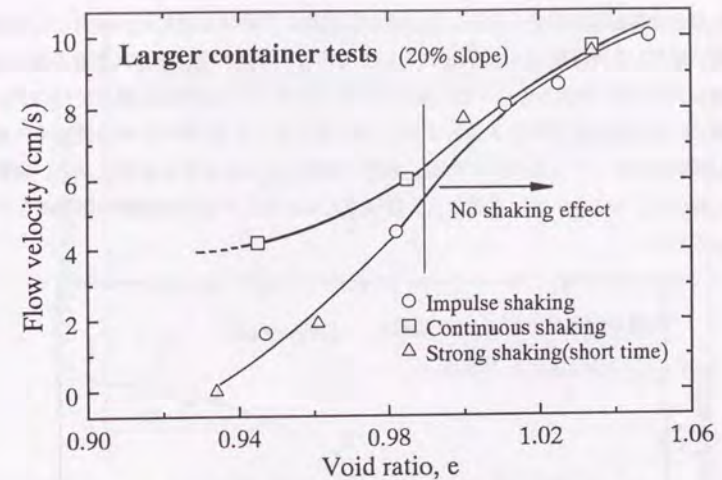


図 7.65 自由流動と振動流動における流動速度と間隙比の関係

7.2.5 流動特性に与える振動の影響

流動速度と入力加速度, 速度, 変位の関係

7.2.4 小節である程度地盤が密になってくると振動によって流動特性が影響を受けることがわかったので間隙比を一定 ($e=0.91 \sim 0.94$) とし定常波の入力を行い、加速度と周波数を変化させて実験を行った(自由流動実験3)。図 7.66, 7.67, 7.68 にそれぞれ流動速度と入力加速度, 速度, 変位の大きさと実験結果をまとめたものを示す。このように入力波と流動挙動との何らかの関係がわかれば地盤を要素に分けて細かく解析する必要もなく、流動挙動を簡略化して扱うことができ有益である。ここで実際に測定を行ったのは入力加速度であり、速度と変位は入力加速度の値を時間で積分することにより求めた(フーリエ変換によりノイズは取り除いた)。入力加速度, 速度, 変位とも大きくなるにしたがって流動速度が速くなっている。入力加速度で整理したものに関しては入力周波数の影響はほとんどでいていない。そして入力速度, 変位となるにしたがって周波数の影響が大きくなっている。つまり入力加速度で整理すると加速度が大きく

なるほど流動速度は大きくなり、入力波の周波数の影響は受けない。ただしこれは本実験で採用した周波数(4~16Hz)においてであり、流動時間に比べ入力波の周期が長い場合(例えば地盤流動中に1波しか入力できないなど)には保証の限りではない。本実験では例えば流動時間を5秒とすると4Hzの入力でも20サイクルは流動中に繰り返し振動がかかっているわけである。実際の問題と対比させるとを考えると、流動時間に対してこのように長い周期の入力波は考えられず入力波の周波数の影響はないといっていよい。

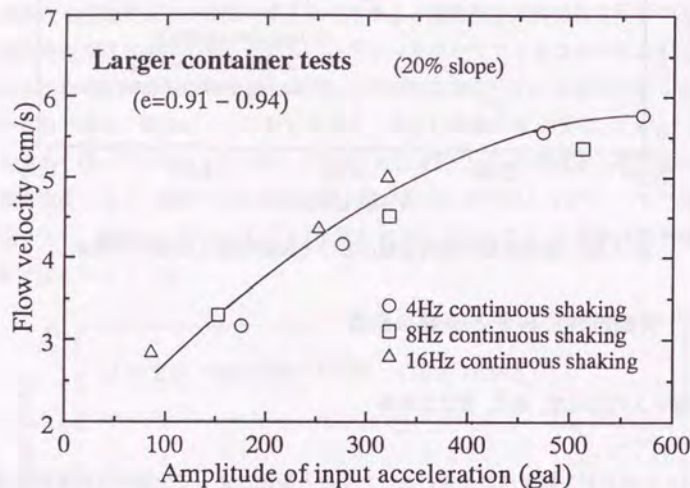


図 7.66 流動速度に与える入力加速度の影響

不規則波の取り扱いについての一考察

今までの考察で入力加速度の大きさが流動に影響を与えることがわかったが、これらは定常波についての結果である。実際の地震波は不規則波でありどのように入力加速度の強さを定義するかが問題となる。ここでは入力地震波が得られたとき地盤の流動がどのようになるか考える。最大加速度で整理する方法もあるが、これでは一波だけ大きな加速度が観測された場合と定常的に大きな加速度が測定されたときで同じ流動を起こすということになってしまい、何らかの指針にはなるが流動挙動を的確に

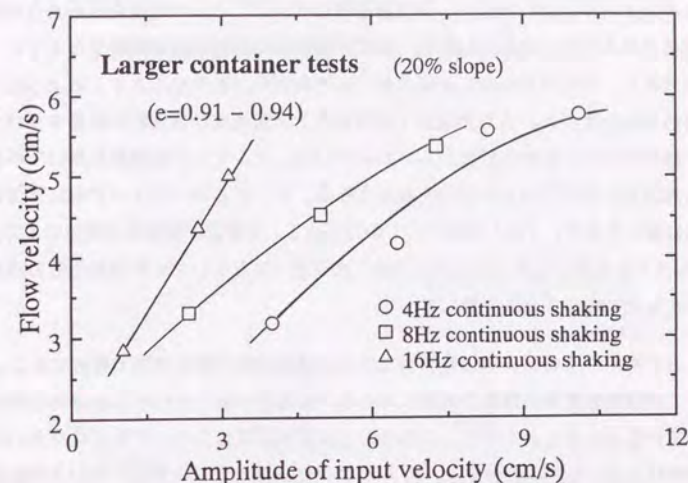


図 7.67 流動速度に与える入力速度の影響

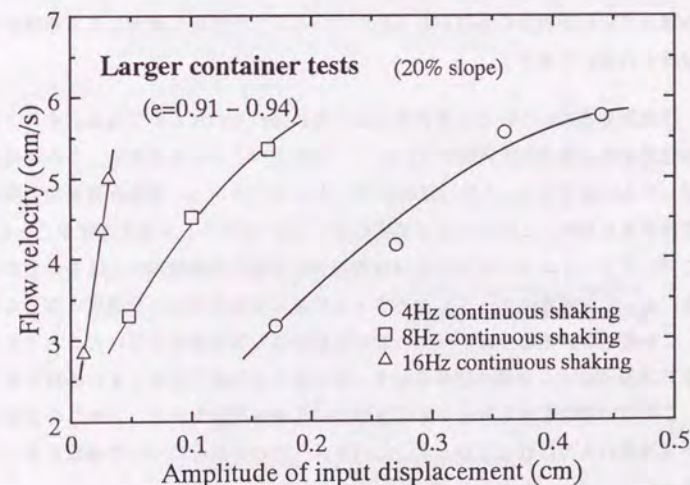


図 7.68 流動速度に与える入力変位の影響

表すパラメータとはいえない。入力加速度のピークごとにその値を読みとり流動速度を変化させる方法もある。しかし一波ごと独立して流動速度に影響を与えているかは疑問であり、やはり全体的に評価するべきであろう。またなによりこのような方法は実用的とはいえない。入力加速度で整理すると流動速度は周波数の影響を受けず、うまく説明できることが定常波からわかっている。そこで入力加速度を用いて不規則波にも適用できそうなパラメータを考えてみる。そしてこのパラメータを定常波の実験結果に用いてみて、うまく説明がつくか確かめる。定常波の実験は正弦波の入力を行ったが、5.2.2 小節でも述べたとおり完全な正弦波ではなくいくつかの周波数の成分が混じったものであることに注意しておく。

まず考えつくのは、単位時間当たりの加速度の絶対値を時間で積分することである。これは加速度の時刻歴の面積にあたる。加速度が働くということは何らかの力が働いているということであり、この考え方は単位時間当たりに平均どれくらいの力で載荷を行っていたかに相当する。図 7.69 に流動速度と単位時間当たりの入力加速度の絶対値の積分関係を示す。この横軸の単位であるが、これは単位時間当たりの加速度の積分ということで加速度と同じ単位になる。8Hz と 16Hz はよく一致しているが、4Hz のみ離れており周波数の影響があらわれているので地震波に適用しても関連のある関係は得られないであろう。

不規則波とはいろいろな周波数の波が重ね合わされたものである。そこで次に入力加速度を周波数成分に分解するためフーリエ スペクトルを計算し、これを周波数で積分したものを考える。これは縦軸がフーリエ スペクトル、横軸が周波数の関係の図の面積をあらわす。これを入力加速度のフーリエ スペクトル強度と呼ぶことにする。ここでいうフーリエ スペクトルとは各周波数の振幅に振動時間の 1/2 を乗じたものである。よって加速度のフーリエ スペクトル強度の単位はやはり加速度と同じものになる。この値のよいところはデータ数や振動時間の影響を受けないところである。図 7.70 に流動速度とこの値の関係を示す。それぞれの実験で非常によい相関を示しており、この値の意味を考えると十分不規則波にも適用可能である。しかし今回の実験では不規則波の入力は行っておらずこのパラメータの有効性について確認するには至らなかった。

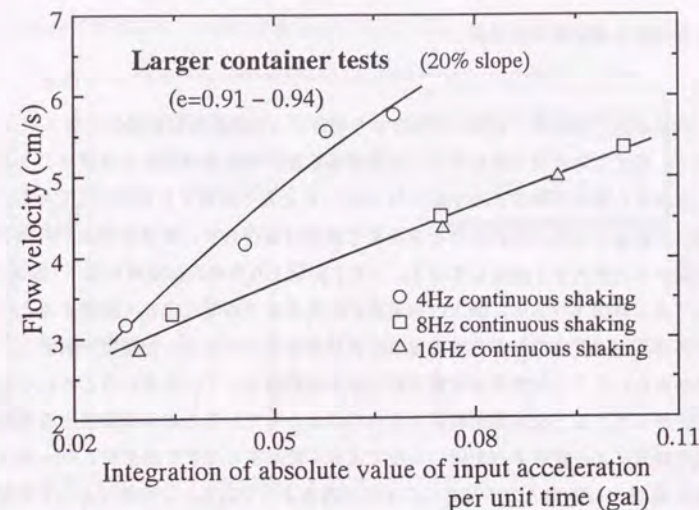


図 7.69 流動速度と単位時間当たりの入力加速度の絶対値の積分との関係

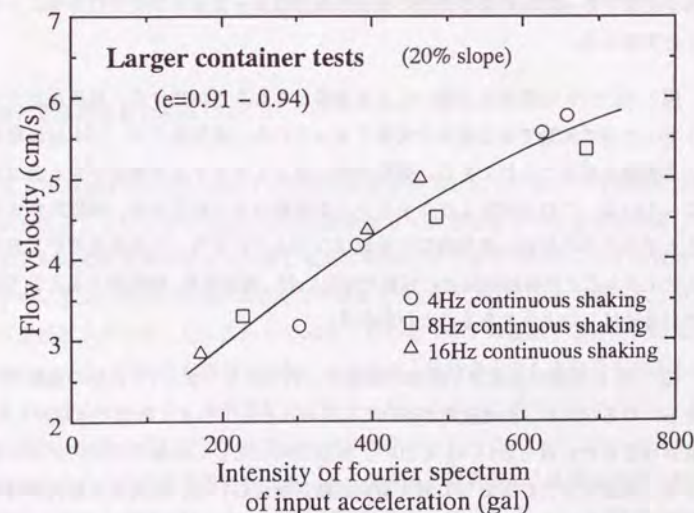


図 7.70 流動速度と入力加速度のフーリエスペクトル強度の関係

入力加速度と流動変位の関係

縦軸に入力加速度、横軸に変位計より読みとった流動変位の関係を図 7.71 ~ 7.74 に示す。図では大体同じ変位のところを抽出したので地盤の傾きもほぼ同じとみてよい。加速度と変位の測定方向は図 7.71 に示したとおり斜面下り方向が正である。加速度増分が斜面上り方向に向かうときあまり変位は進行せず、加速度増分が斜面下り方向に向かうとき大きく変位している。つまり斜面上り方向の加速度が低下(除荷)しはじめてから斜面下り方向に最大の加速度がかかるまでの間に大きく流動するというのである。加速度を力におきかえ地盤の変形を考えると、加速度が斜面上り方向にかかるということは地盤は流動方向にせん断変形をしているということになる。このことから考えると加速度が斜面上り方向にかかっているときは流動による変形方向と動的载荷による変形方向が同じなので大きく変形するはずであるが、3Hz の入力では 1/4 周期、4Hz の入力ではさらにずれがあるようである。この原因として流動する軟弱な地盤では载荷と変形の間に位相のずれがあり、またここで用いたのは入力波と地盤の変位であったため深さ方向の場所の違いによっても位相のずれを起こしたということであろう。

図 7.71, 7.72 は間隙比の違いによる影響とみることができる。間隙比が大きいかほど 1 サイクルで流動できる変位が大きくなっている。また図 7.73, 7.74 は振動の強さによる影響とみることができる。振動が強いほど 1 サイクルで流動できる変位が大きくなっている。これらの図より 1 サイクルの挙動はよく似ており、間隙比が大きくなると 1 サイクルの挙動が時間軸に引き延ばしたようになり、入力加速度が大きくなると 1 サイクルごとの挙動が完全に相似ではないが、加速度軸、時間軸ともそれぞれの倍率で引き延ばしたようであることがわかる。

図 7.75 には地中加速度と変位の関係の一例を示しておく(その他の実験では地盤がさらにゆるいため、加速度計が傾いてしまったりしてうまく計測できなかった)。加速度計は変位計に最も近い A1 を用い、測定方向は同じく斜面下り方向が正の加速度である。加速度を力になおして考えると流動初期において、動的せん断力が静的せん断力と同じ方向に働き最大値に近いあたりで流動変形が大きく進行し、その他ではほとんど流動が進行していないのがわかる。つまりせん断応力がある値を超えて大きく

なったときに変形は大きく進行するというのである。

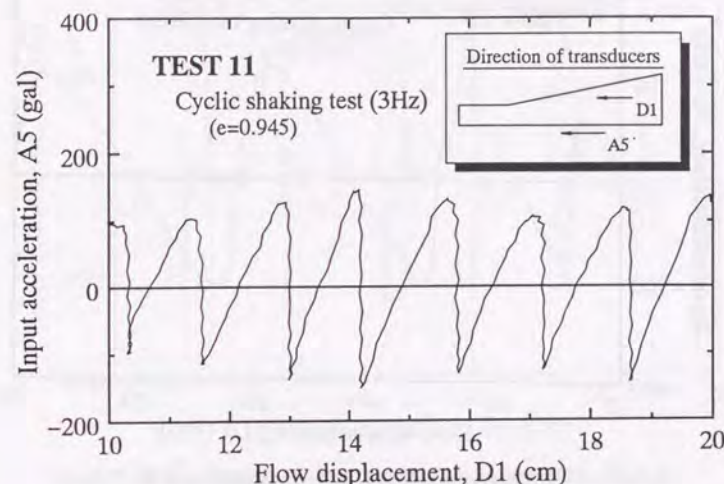


図 7.71 入力加速度と流動変位の関係(地盤間隙比の影響, その 1)

入力波と最終変位量の関係

図 7.76 は最終変位量に及ぼす入力波の影響をあらわしている。この最終変位量は変位計で読みとったものである。どの振動実験でも地盤は水平になるまで流動したので深さ方向の変位分布が同じなら同じ最終変位量になるはずである。まず入力加速度が小さくなるほど最終変位量が大きくなる傾向がある。これは 7.2.4 で述べたとおり流動する地盤厚さが小さくなったからである。その他 16Hz の振動では最終変位量が小さくなっている。これは高周波で振動させた方が、基盤近くでも流動化させることができるということである。写真撮影の結果からもこのような傾向が読みとれる。地盤形状が変わった場合ここでいう高周波とは地盤厚さに比べてということになる。つまり実地盤のようにある程度層厚の大きいような場合、地震波による流動化は基盤面直上の液状化層から流動が起こるとしても差し支えないであろう。ここに挙げた実験では振動の停止は見た目地盤が水平になったと思うや否や止めるようにしたため、実

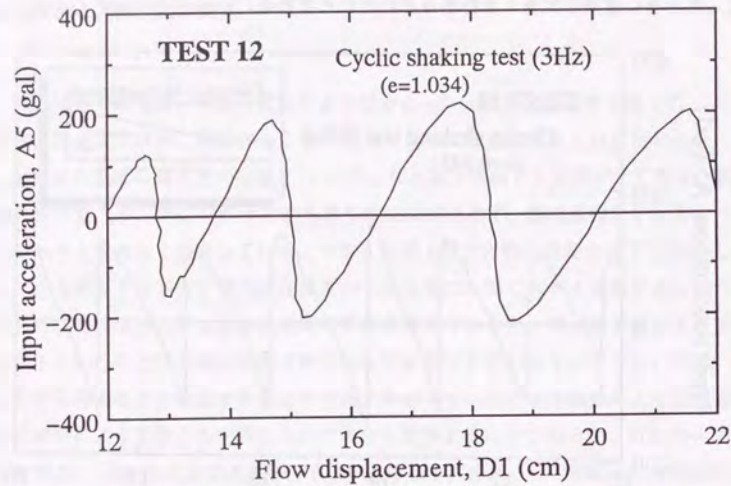


図 7.72 入力加速度と流動変位の関係 (地盤間隙比の影響, その2)

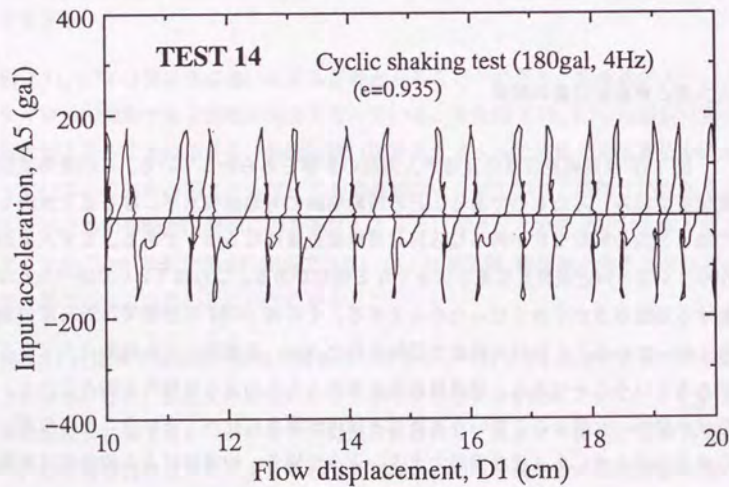


図 7.73 入力加速度と流動変位の関係 (振動強さの影響, その1)

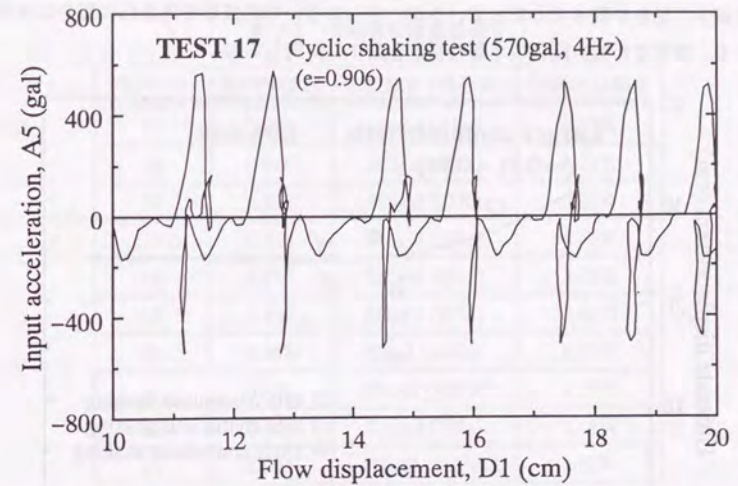


図 7.74 入力加速度と流動変位の関係 (振動強さの影響, その2)

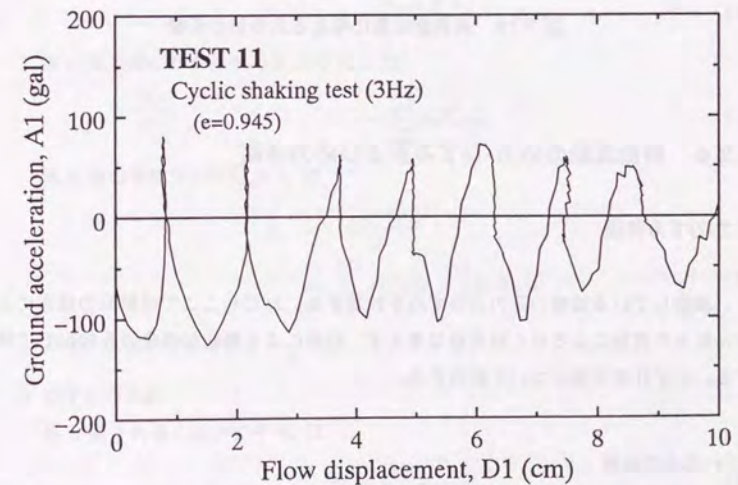


図 7.75 地中加速度と変位の関係

験後少し傾きが残っているが、さらに長い時間振動を加えれば完全に水平になる。参考のため実験後の地盤の傾きを表 7.1 に記しておく。

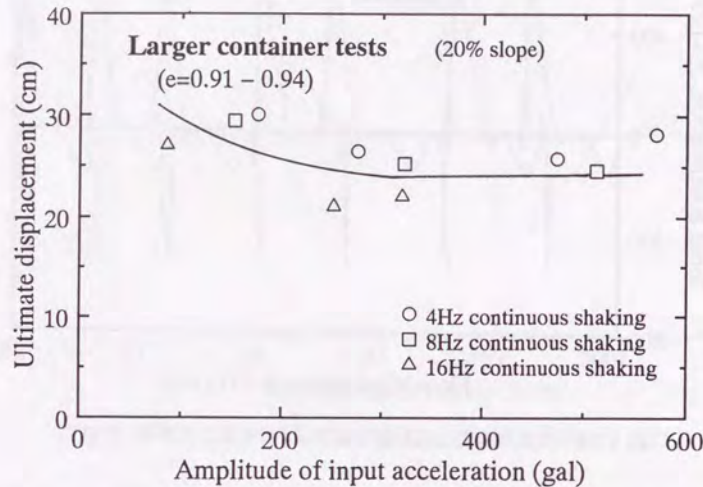


図 7.76 最終変位量に与える入力波の影響

7.2.6 振動流動の応力-ひずみおよび応力径路

応力-ひずみ関係

流動している地盤の応力とひずみを計算する。ただしここでは斜面の傾きによるせん断力や流動によるせん断変形は考えず、振動による動的な成分のみ抽出して計算する。まず計算方法について説明する。

• 応力の計算

図 7.77 のような水平な層地盤を考える。 a は加速度, D は変位, ρ は土の密度, H は層厚をあらわす。添字は層および境界面の番号を意味する。第 n 層の平均加速

表 7.1 実験後の地盤の傾き

| TEST No. | 初期間隙比 | 加振強さ (周波数) | 実験後の傾き |
|----------|-------|---------------|--------|
| 14 | 0.935 | 180gal (4Hz) | 2.55% |
| 15 | 0.918 | 280gal (4Hz) | 1.25% |
| 16 | 0.938 | 470gal (4Hz) | 0.77% |
| 17 | 0.906 | 570gal (4Hz) | 0.61% |
| 18 | 0.918 | 150gal (8Hz) | 3.05% |
| 19 | 0.940 | 320gal (8Hz) | 2.41% |
| 20 | 0.935 | 90gal (16Hz) | 3.50% |
| 21 | 0.931 | 320gal (16Hz) | 3.33% |
| 22 | 0.941 | 510gal (8Hz) | 1.43% |
| 23 | 0.935 | 250gal (16Hz) | 1.81% |

度 \bar{a}_n は

$$\bar{a}_n = \frac{a_{n-1} + a_n}{2} \quad (7.1)$$

第 n 層上面にかかるせん断応力 τ_{n-1} は

$$\tau_{n-1} = \sum_{k=0}^{n-1} \rho_k H_k \bar{a}_k \quad (7.2)$$

第 n 層の平均せん断応力 $\bar{\tau}_n$ は

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_n &= \frac{\tau_{n-1} + \tau_n}{2} \\ &= \sum_{k=1}^{n-1} \rho_k H_k \bar{a}_k + \frac{1}{2} \rho_n H_n \bar{a}_n \end{aligned} \quad (7.3)$$

のように計算できる。

• ひずみの計算

第 n 層平均せん断ひずみ $\bar{\gamma}_n$ は

$$\bar{\gamma}_n = \frac{D_n - D_{n-1}}{H_n} \quad (7.4)$$

のように計算できる。

この第 n 層の平均せん断応力 τ_n をせん断応力として、第 n 層の平均せん断ひずみ γ_n をせん断ひずみとして用いるのが最良の方法であろう。ただし本実験においては地表面加速度計は大きく傾いてしまい信用性がないのでこれを用いずに次のように計算することにした。第 n 層せん断応力 τ_n は次のように計算する。

$$\tau_n = \sum_{k=1}^{n-1} \rho_k H_k a_k + \frac{1}{2} \rho_n H_n a_n \quad (7.5)$$

つまり平均加速度を用いるのではなく、各層底部の加速度で代用したわけである。

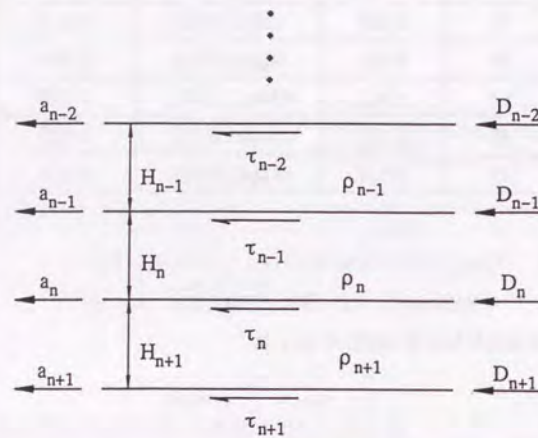


図 7.77 応力とひずみの計算のための多層地盤モデル

土の密度として飽和単位体積質量 ρ_{sat} を、加速度の値は 5.2.3 小節で述べたように補正したものを用了。またせん断ひずみの計算で用いる変位 D であるがこれは加速度を 2 回積分することにより求めた。この積分を行うとき低周波と高周波成分はフーリエ変換により取り除いてある。低周波は加速度計の傾きによる単調増加成分を、高周波は測定ノイズを取り除くためである。上載圧は流動とともに変化する。流動前と流動後の値はわかるので流動変位を始めてから流動変位を起こしている時間の 7 割の時間までで上載圧を線形に変化させる簡易法を用いた。この 7 割の意味であるが、流動変形の後半はほとんど傾きが水平になっており上載圧の変化が小さいため、流動時

間すべてを使うのではなくこの値で線形に変化させたのである。解析した実験結果は振動流動実験 1 と振動流動実験 3 である。解析した層は加速度計 (A4 - A5), (A1 - A4), (A3 - A5) の間の 3 層である。加速度計の補正は行っているが、完璧な補正ができていないわけではないので信用できそうな結果のみ掲載することにする。

図 7.78 ~ 7.103 に計算した応力-ひずみ関係の結果を示す。これらの結果は地盤が流動しているときの挙動である。振動開始から数サイクルで急激に剛性を失っている。流動している地盤の剛性はほぼ 0 とみてよいようである。せん断ひずみは拘束圧や場所の違いによってはあまり変化していない。入力加速度が 300gal 以下のとき加速度が大きくなるとひずみも大きくなる傾向を示すが、それ以上の加速度になるとひずみはあまり変化しない。これは入力した加速度が地盤中にあまり伝わらなくなるのが大きな原因であろう。高周波数の加速度を入力した方がせん断ひずみは小さくなっている。しかしせん断応力は小さくなっておらず、加速度は地盤中でそれほど増幅や減衰をせずに伝わるのであろう。剛性はほぼ 0 であるが、せん断応力は伝わっており初期有効拘束圧の 1/6 程度の値になっている。例えば図 7.96 のように高周波の入力になると地盤の上部ではせん断応力が正の方向に増すとせん断ひずみが負の方向に増すという奇妙な応力-ひずみ関係になるときがある。これは地盤中で波の位相がずれてきたことをあらわしているのであろう。これらの結果より流動している地盤の剛性は 0 であるといえる。また応力-ひずみ関係は入力波の周波数に依存する傾向がみられ、高周波になるほどせん断ひずみは小さくなるが、せん断応力はあまり変化しないことがわかった。