

4.2.4 粘性流体の影響

間隙水圧の消散を抑えるため間隙水として水の10倍の粘性を持つ流体を使用した。また試料は細粒分を含んでいないものを使用した。TEST S9は衝撃を1回加振し、TEST S10では衝撃を5回加振している。比較は試料および地盤作製方法が同じであり間隙水のみが違うTEST S1と行う。間隙水圧の消散をみてみると粘性流体を使用した方が遅くなっておりその有効性が伺える。しかし流動変形はほとんど進行していない。数回の加振を加えたときも加振直後に辛うじて少し変形する程度で流動は起こしていない。このように違いができた理由として液状化によって発生する浸透流の影響がある。水であれば、かなりの浸透流の流れがあり砂粒子の構造も乱される。しかし粘性流体では浸透流の流れが小さくこの影響があまり効いてこない。その他の理由として飽和度の問題がある。粘性流体を使用すると水浸時に液体がスムーズに間隙の中を通過せず飽和度が上がらない可能性がある。流動挙動には、間隙水圧の時間に伴う消散より流動変形によって起こるダイランシー挙動が重要であり、粘性流体は間隙水圧の消散時間を遅らせる効果はあるが、ダイランシー挙動は変化させられないため流動実験では効果的とはいえない。

表 4.4 実験の諸データ (TEST S9, S10)

TEST No.	使用試料	地盤作製方法	間隙水	初期間隙比
S9	豊浦砂	湿潤締固め法	粘性流体	1.090
S10	豊浦砂	湿潤締固め法	粘性流体	1.097

4.2.5 格子状のマーカの作製

中型土槽での詳細な実験に備えマーカを格子状に作り、それが悪影響を及ぼすことなく実験を遂行できるか調査した。マーカは側壁近くのみに入れてある。地盤作製は湿潤堆積法で行ったが、あまりにcollapseが大きいとマーカの形が崩れるため地盤を数cm堆積後軽く手で押してある。実験結果(図4.29)を見ればわかるように

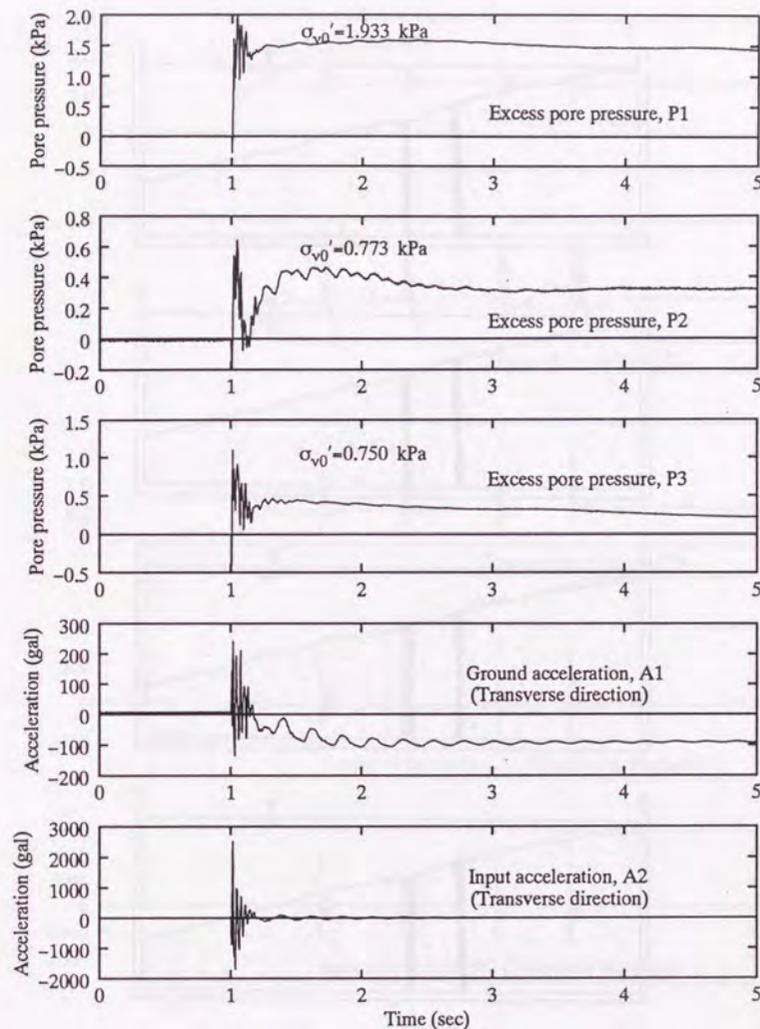


図 4.22 時刻歴測定記録 (TEST S9)

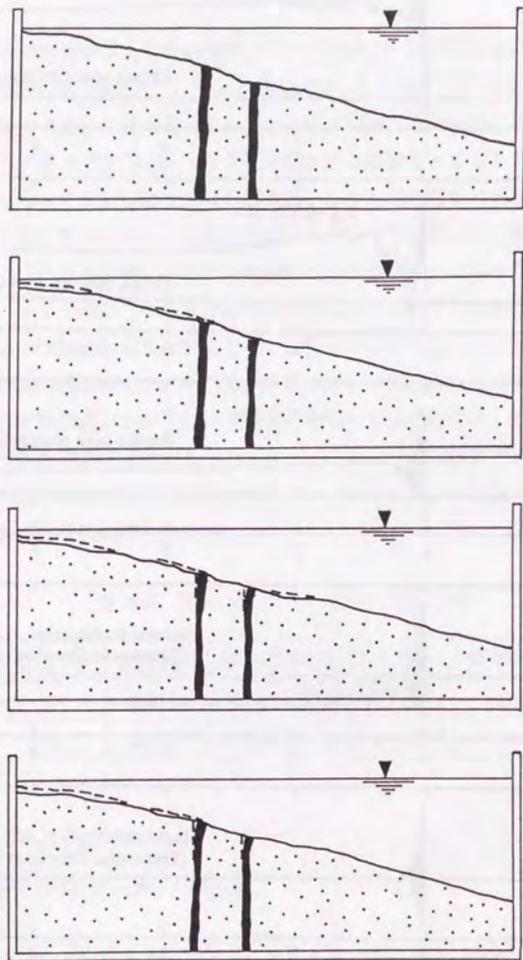


図 4.23 地盤変形図 (TEST S9)

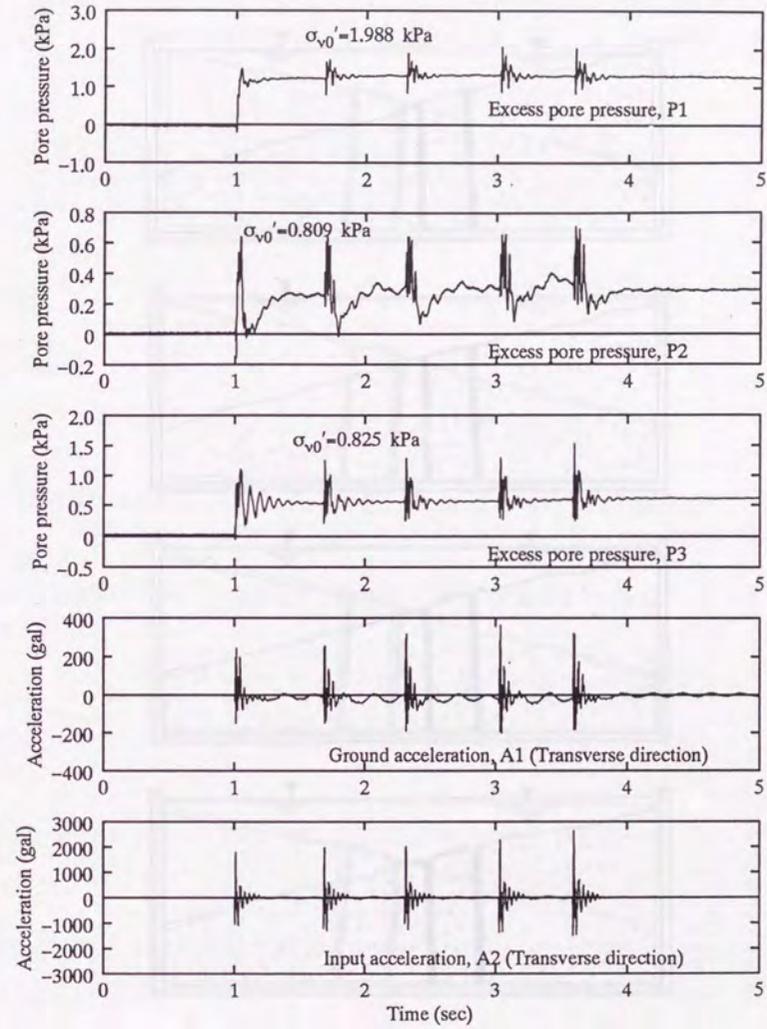


図 4.24 時刻歴測定記録 (TEST S10)

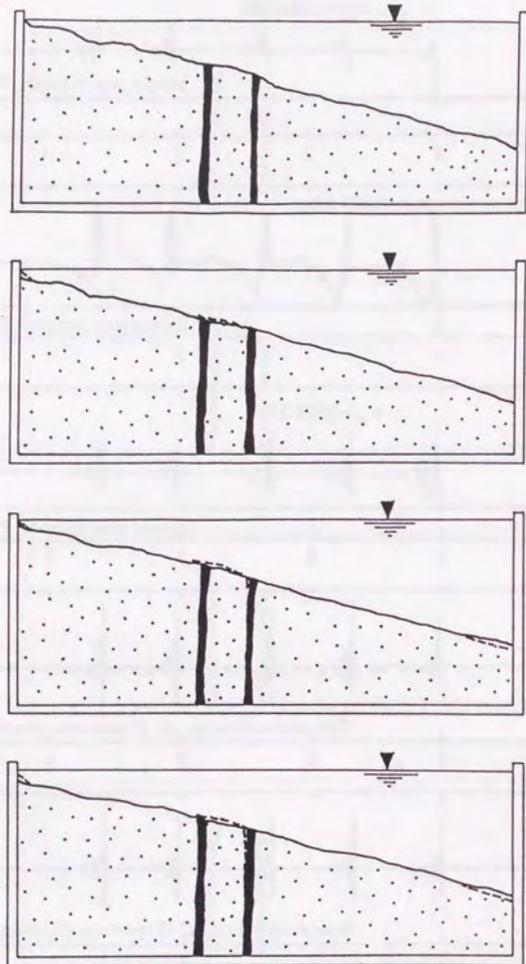


図 4.25 地盤変形図 (TEST S10, その1)

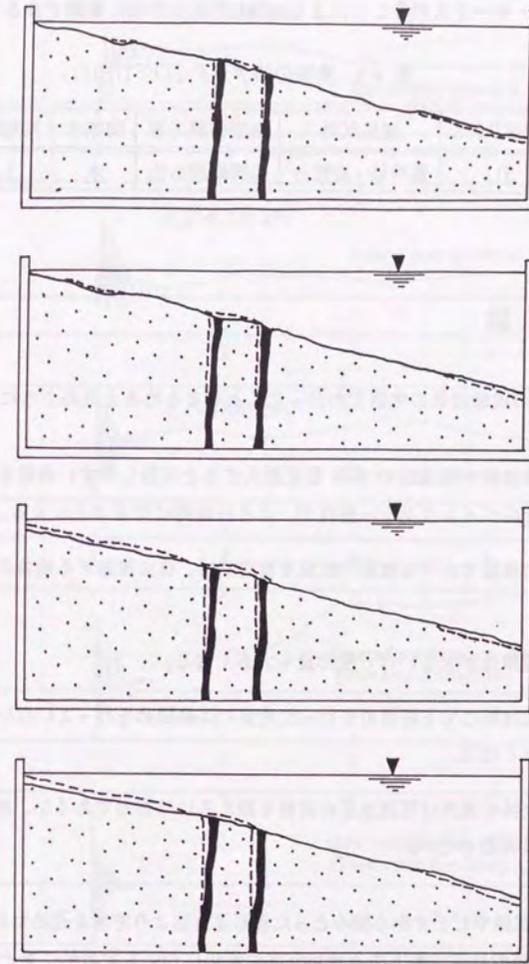


図 4.26 地盤変形図 (TEST S10, その2)

大変形を起こしており、マーカーを格子状に入れたモデルでも流動の再現が可能である。またマーカーを入れることにより地盤の変形が詳細に観測できることもわかった。

表 4.5 実験の諸データ (TEST S11)

TEST No.	使用試料	地盤作製方法	間隙水	初期間隙比
S11	豊浦砂+細粒分	湿潤締め法	水	1.098

4.3 結論

今までの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。

- 砂に細粒分を重量比で10%程度混入すると流動しやすい地盤を作製できる。これは土のダイラタンシー特性が、より圧縮的になることによる。
- 小さな模型で水中堆積法や乾燥堆積法では、自由流動する地盤の作製は不可能である。
- 地盤間隙比が大きいほど変形量も大きくなる。
- 間隙比は同じでも締め固めを行った地盤では締め固めを行っていない地盤より流動量が大きくなる。
- 粘性流体の使用は間隙水圧の消散を抑えるには有効であるが、流動を促進させるには有効でない。

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章では流動に与える模型地盤作製方法と地盤密度の関係について定量的にまとめ評価を行う。

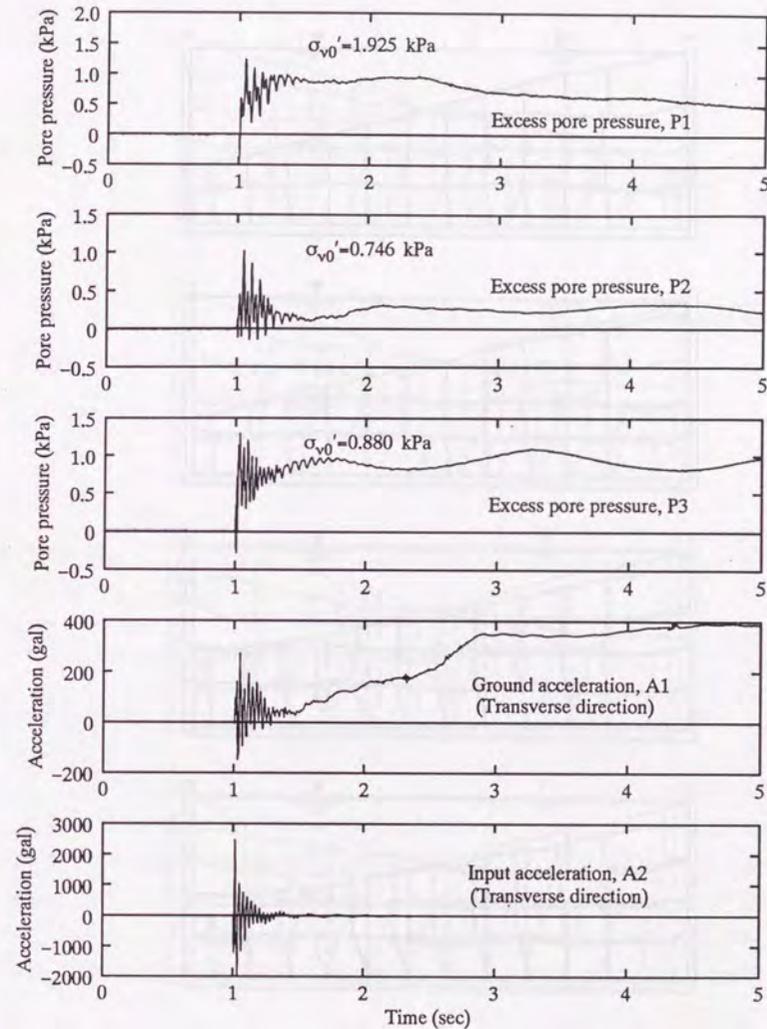


図 4.27 時刻歴測定記録 (TEST S11)

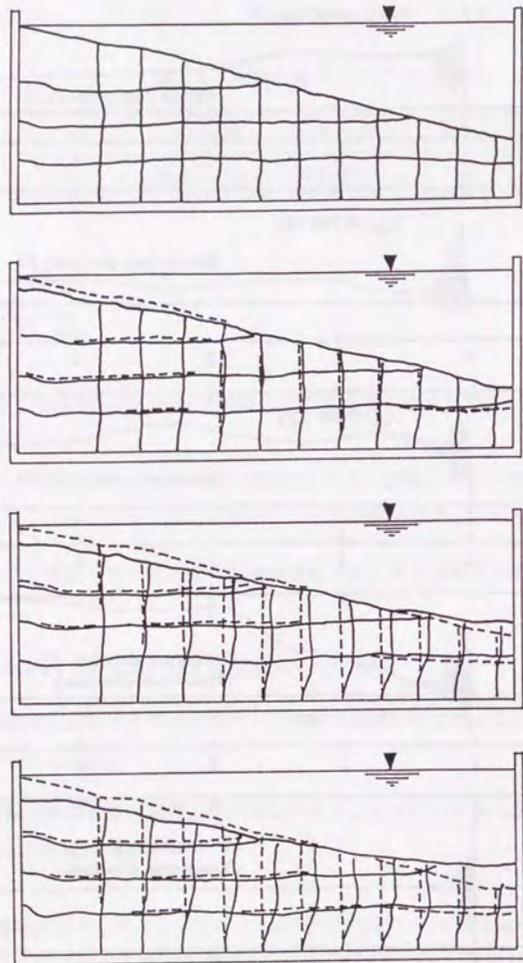


図 4.28 地盤変形図 (TEST S11, その1)

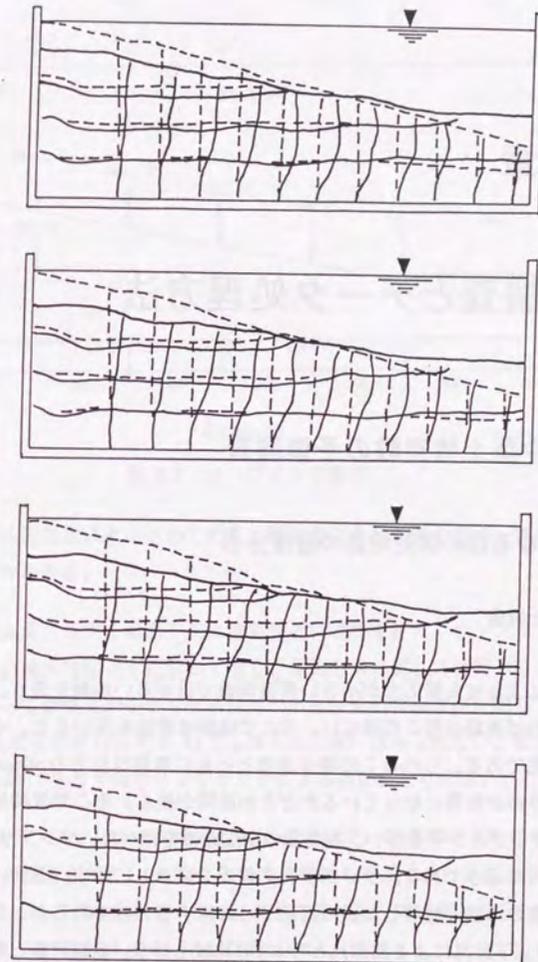


図 4.29 地盤変形図 (TEST S11, その2)

第5章

予備調査とデータ処理方法

5.1 中型土槽実験の予備調査

5.1.1 ゆる詰め模型地盤の密度分布

実験結果と考察

自重によるせん断応力が小さい模型地盤ではゆるい地盤を造り、残留強度を小さくしなければ流動は起こり得ない。そこで湿潤堆積法を用いると、ゆる詰め地盤の作製が可能である。しかしこの場合水浸とともに地盤は沈下 (collapse) を起こし地盤内で密度分布が均等になっているかどうか疑問が残る。そこで湿潤堆積法で地盤を作製した後サンプリングを行い、振動前の密度分布を調べた。サンプリング方法は 3.5.2 小節に述べた通りである。サンプリング箇所を図 5.1 に示す。通常、地盤の平均間隙比は、地盤の体積と使用した砂の質量から計算するわけであるが、この方法で得られた間隙比 (以下計算による間隙比と呼ぶ) の比較も行う。表に計算と書いてあるのはこの間隙比のことである。

表 5.1 に地表面付近で、土槽長辺方向に場所を変えてサンプリングした試料の間隙比の結果を示す。地盤の堆積と砂の質量から計算した間隙比は $e = 1.050$ でありサ

5.1 中型土槽実験の予備調査

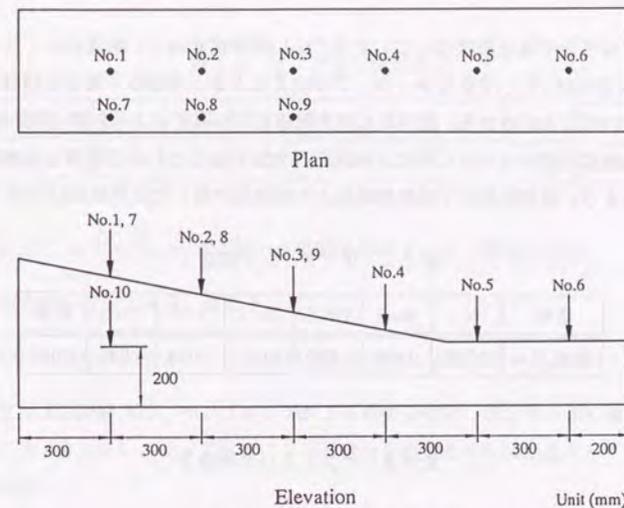


図 5.1 サンプリング箇所

ンプリングによる間隙比より小さめである。斜面先より斜面肩の方が、間隙比が大きくなっているのがわかる。

表 5.2 に地表面付近で、斜面中央と壁面付近に場所を変えてサンプリングした結果を示す。詳しい場所は図 5.1 に示しておく。長辺方向に関しては同じく、斜面先に向かうにしたがって間隙比が小さくなる傾向がある。また短辺方向に関しては、中央 (No.1, 2, 3) でも壁面付近 (No.7, 8, 9) でもほとんど違いはみられない。計算による間隙比は、 $e = 1.046$ でありやはりサンプリングによる間隙比より小さい。

表 5.3 にはサンプリングの距離が短かすぎてお互いに影響を与えるのを防ぐため、サンプリング間隔を大きく (60cm) とった試験結果を示す。計算による間隙比は、 $e = 1.052$ であり、この実験結果もやはりいままでの結果と同じ傾向を示している。したがってサンプリング間隔は 30cm でも問題はない。

最後に長辺方向および深さ方向の間隙比の分布を調べた結果を表 5.4 に示す。サンプリングは地盤から十分に水を抜き、拘束圧が小さくてもサクションによってある程度強度がある状態で行うわけであるが、地盤の下の方は水が完全に抜けずサンプリ

ングを行おうとすると液状化してしまうくらい飽和度が高く、納得のいくサンプリングは1つ(No.10)しかできなかった。この結果によると地盤の下部では間隙比が小さくなっていることがわかる。図5.2に最大間隙比の拘束圧による影響(圧密曲線)を示す。特に拘束圧が小さいところで、拘束圧が増加することによる間隙比の減少率が大きい。つまり、模型地盤の下部は地表面より拘束圧が高いため間隙比は小さくなる。

表 5.1 サンプリング試験 1

場所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	計算
間隙比 e	1.098	1.095	1.083	1.067	1.033	1.045	1.050

表 5.2 サンプリング試験 2

場所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	計算
間隙比 e	1.092	1.072	1.069	1.056	1.031	1.033	1.083	1.074	1.063	1.046

表 5.3 サンプリング試験 3

場所	No.1	No.3	No.5	計算
間隙比 e	1.095	1.080	1.053	1.052

結論

湿潤堆積法によりゆる詰め模型地盤を作ったとき地盤内の間隙比の分布について以下のことがわかった。

- 斜面肩ほど間隙比が小さくなる。地表面付近であるため拘束圧はほぼ等しく、異なる点は地盤の層厚が斜面肩ほど厚いため collapse 量も大きくなっているところ

表 5.4 サンプリング試験 4

場所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.10	計算
間隙比 e	1.088	1.088	1.072	1.059	1.065	1.063	1.035	1.055

である¹。この collapse 量の違いが影響を与えている可能性がある。

- 短辺方向の間隙比の違いはほとんどない。
- 深いほど間隙比が小さい。これは拘束圧の違いによる影響が含まれている。
- 計算による間隙比は、サンプリングによる地表面付近の値より小さく地盤の深いところより大きい。よって計算による間隙比を地盤の平均間隙比として用いて支障はない。

湿潤堆積法を用いたときの模型地盤は、斜面先へ向かうほどまた地盤下部へ向かうほど密になっている。そして、間隙比で最大 0.053 の違いがあった。そこで湿潤堆積法を用いる場合は 5cm くらい堆積後、手で軽く押してやることにより collapse をいくらか抑えるようにした。これにより密度分布がある程度は改善できたはずである。湿潤突固め法を用いて密度を調節した地盤を作製した場合には collapse はほとんど現れず、このような問題は起こらない。実験結果の整理では、計算による間隙比を用いている。

5.1.2 実験の再現性

1度得られた実験結果が2度と実験によって得られないようではその実験に信頼性がない。つまり同じ実験を行えば同じ結果が得られなければならないということである。また自分が出した実験結果を他人の結果と比べて、信憑性を評価する方法がよく用いられるが、模型実験は実験方法が規格化されたような手引き書は存在せず、実験者の感覚と感性にゆだねられるところが大きい。よって各人実験規模や方法および測定項目はまちまちである。以上の理由により他の研究と比較することは困難である

¹層厚が 2.3 倍違うため水浸による地表面沈下量も約 2.3 倍違う

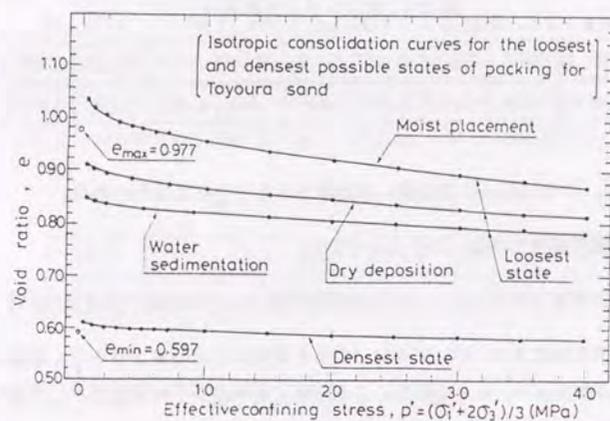


図 5.2 等方圧密による間隙比の変化 [73]

ため、同じ実験を行い同じ結果が得られるか、つまり実験の再現性を確認した (TEST 1, TEST 2)。

実験の概略を述べると、以下のようなものである。板バネ振動台を用いた衝撃加振実験を行う。加振方向は、土槽短辺方向である。地盤は湿潤堆積法で作製する。測定器を所定の位置に同じように設置する。図 5.3, 5.4 に測定器の配置位置を示す。図 5.5, 5.6, 5.7 に TEST 1 の実験結果を、図 5.8, 5.9, 5.10 に TEST 2 の実験結果を示す。A5 は故障のため掲載していない。また TEST 1 の P8 は故障のためこの測定値は使っていない。この実験結果の整理には次節で述べるデータ処理方法で計算処理してある。間隙比の値は TEST 1 で $e=1.034$, TEST 2 で $e=1.044$ とほぼ一致している。まず入力加速度 A7 であるが、TEST 1, 2 とほぼ同様である。この入力には掛矢の打撃によるものであり、機械的に制御するものでないため毎回同じ振動を得るのは難しいように思えるが、実験により同一の人物が行えば十分に再現性ある振動が得られることがわかった。

次に地盤加速度であるが、土槽長辺方向と短辺方向の両方向測定を行った。何れ

の加速度記録も両実験でよく似ている。加振と直角方向でも加速度の値が得られるのは衝撃が土槽を伝わり長辺方向にも伝播しているか、もしくは加速度計が完全に振動と直角方向に設置できていないためにその方向の成分を拾ってしまうかである。加速度計の傾きが原因であれば、これは過失であるので両実験結果の値は違ってくるはずである。しかし値は両実験で非常によく似ていることから加速度の傾きによる影響は小さいといえる。加速度 A3 であるが、一度衝撃が終わった後にまた衝撃加振のような加速度を感知しているが、これは間隙水圧計を固定するための柱に加速度計が当たったためであろう。

変位計の記録は両実験とも、加振後 3 秒程度で終了しており最終変位量は 20cm 強である。最後に間隙水圧であるが、どれも非常によく似た結果を示している。間隙水圧計の結果で例えば P1-P3 となっているのは P1 から P3 の値を引いたという意味である。TEST 5 の間隙水圧計 P1 と P2 が立ち上がりが遅いが、これは水圧計の感度が悪くなっていたためであり信越化学工業株式会社のシリコンオイル (KF-96-1,000CS) の中に漬け、真空で数時間引くと感度がよくなる。間隙水圧計 (P2-P3), (P5-P6) とで上昇した間隙水圧が下降した上昇する挙動がみられる。P2 が下降する挙動は、流動による土被り厚さの減少も一因であるが負の値が現れているため、土のダイレクタンシーによって間隙水圧が消散した影響も入っている。水が流れるために水圧が減少する理由も考えられるが、地盤流動の速度から計算できる水圧の減少は非常に小さく無視できる。このような間隙水圧の減少は地盤の全体でみられるわけではなく特定の場所 (地盤の上方および斜面肩方向) でみられる現象である。以上の実験結果よりこれらの実験は再現性があり信頼できるものである。

5.2 中型土槽実験のデータ処理方法

5.2.1 実験の種類

実験の種類と目的をまとめると次のようである。地盤作製方法はゆるい地盤の作製が可能である湿潤堆積法および湿潤締固め法を用いた。

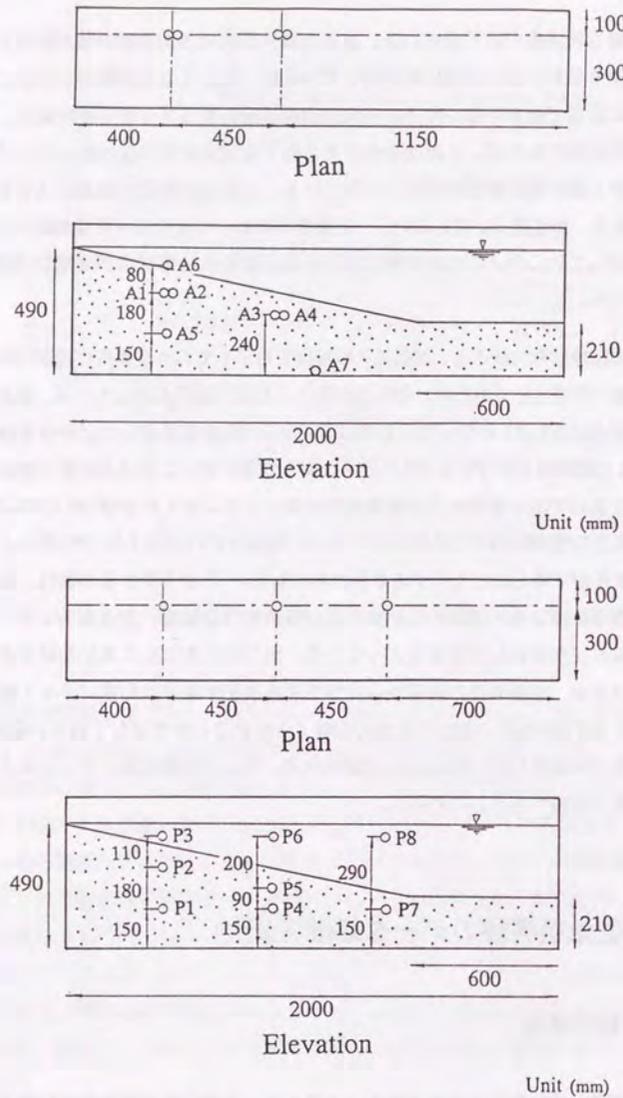


図 5.3 測定器の配置図 (加速度計と間隙水圧計)

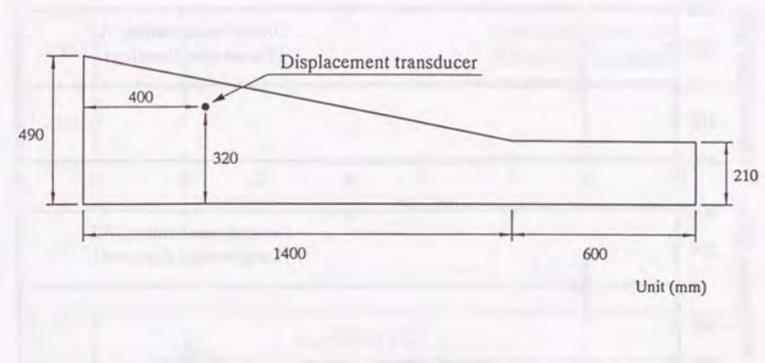


図 5.4 測定器の配置図 (変位計)

- 自由流動実験 1 (TEST 3 ~ TEST 7)
板バネ振動台を用いた衝撃加振実験。振動方向は土槽短辺方向。衝撃振動は地盤を液状化させることを目的とし振動停止後の流動を観測する。間隙比を変化させて実験を行った。地盤の傾きは 20% である。
- 自由流動実験 2 (TEST 8, TEST 9)
自由流動実験 1 と同じ実験および目的である。ただし地盤の傾きは 10% である。
- 振動流動実験 1 (TEST 10 ~ TEST 12)
板バネ振動台を用いた繰り返し加振実験。振動方向は土槽長辺方向。間隙比を変化させて実験を行い、振動が流動している地盤に与える影響を調べた。地盤の傾きは 20% である。
- 振動流動実験 2 (TEST 13)
振動流動実験 1 と同じ実験および目的である。ただし振動方向は、土槽短辺方向である。
- 振動流動実験 3 (TEST 14 ~ TEST 23)
油圧式振動台を用いた繰り返し加振実験。振動方向は土槽長辺方向。間隙比を固定し、入力加速度およびその振動数を変化させて流動地盤に与える影響を調べた。

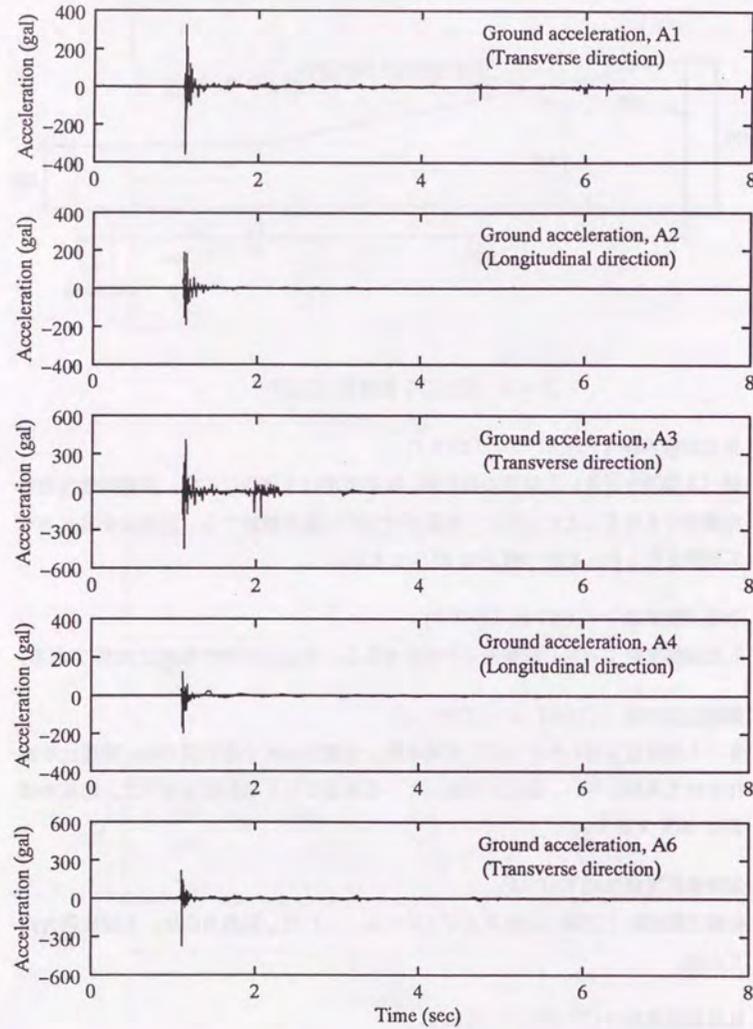


図 5.5 時刻歴計測結果 (TEST 1, その 1)

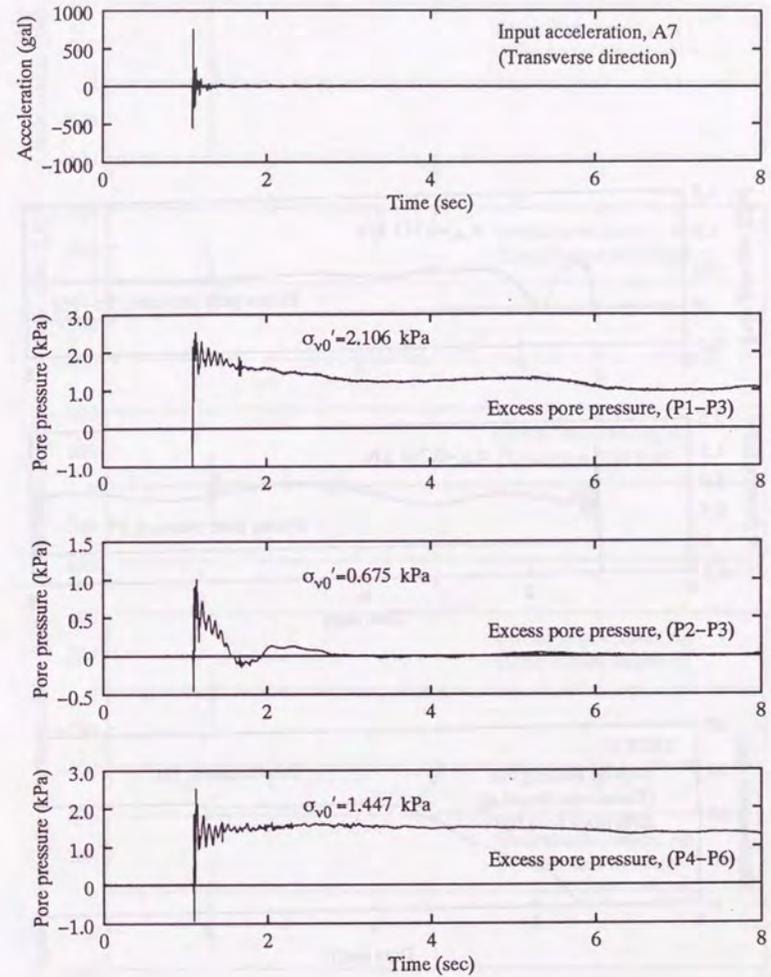


図 5.6 時刻歴計測結果 (TEST 1, その 2)

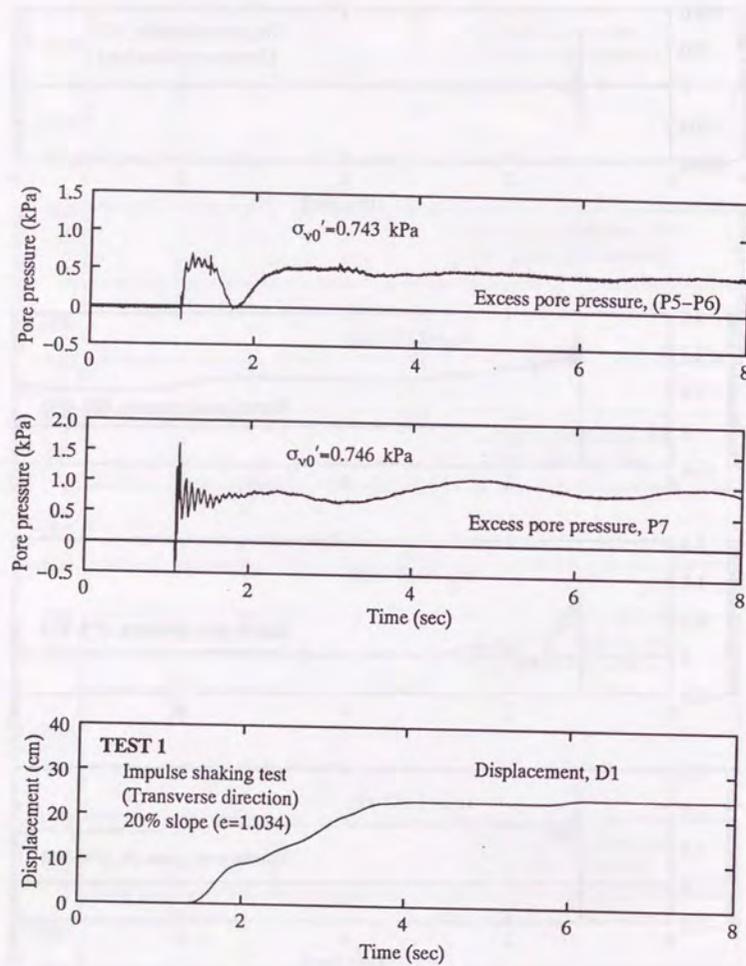


図 5.7 時刻歴計測結果 (TEST 1, その 3)

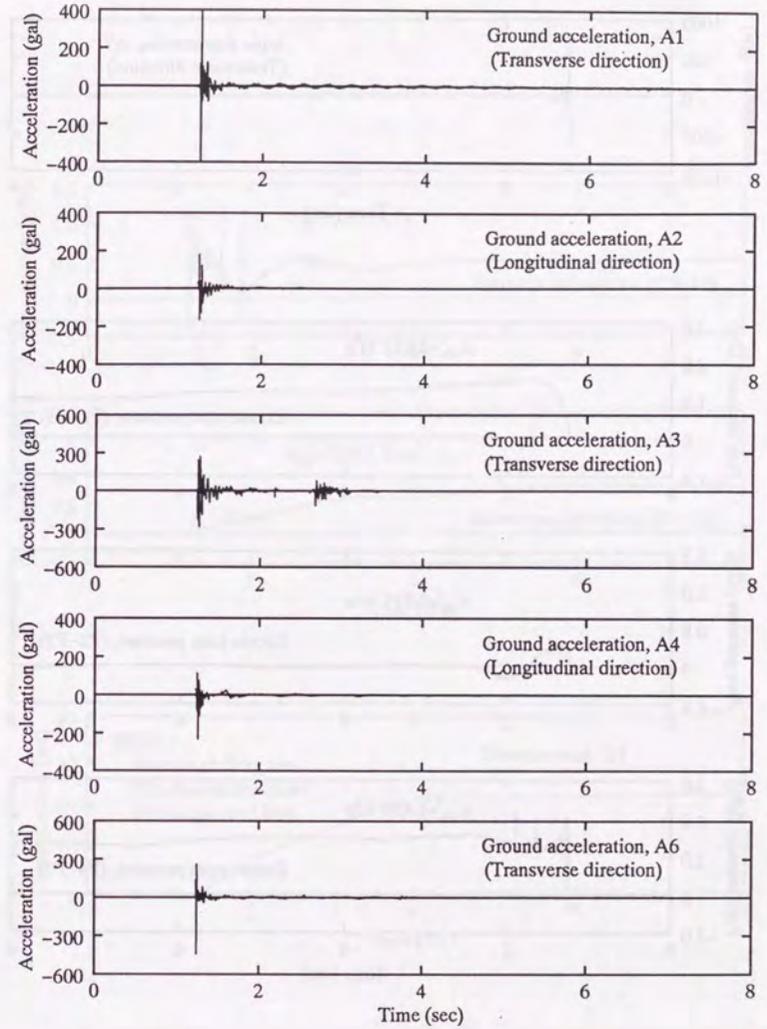


図 5.8 時刻歴計測結果 (TEST 2, その 1)

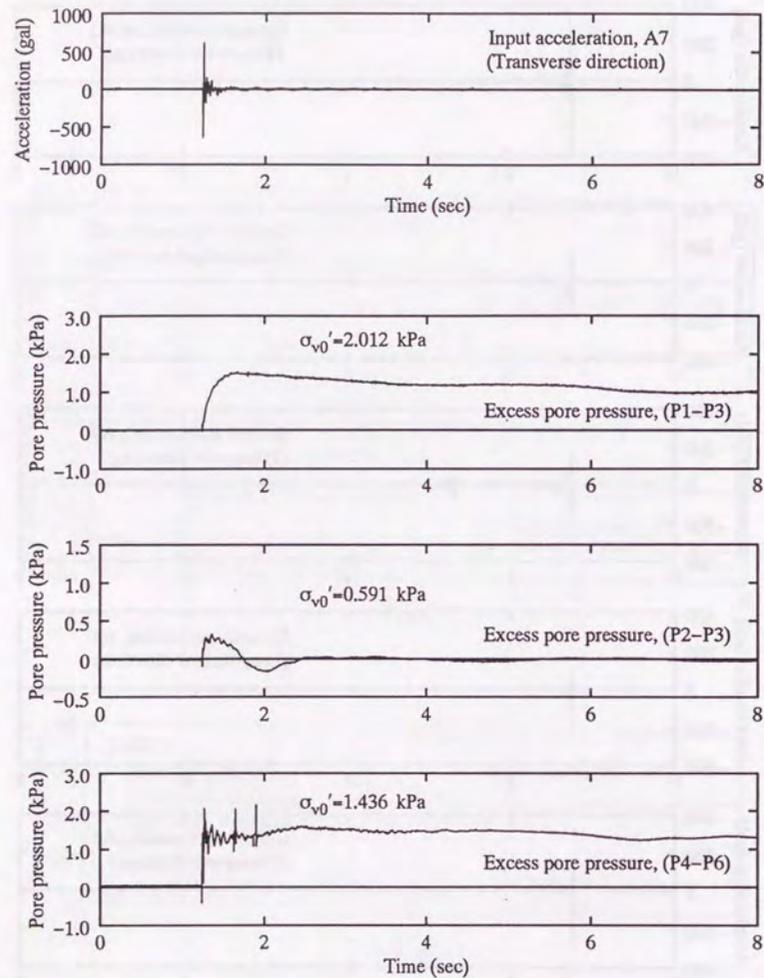


図 5.9 時刻歴計測結果 (TEST 2, その 2)

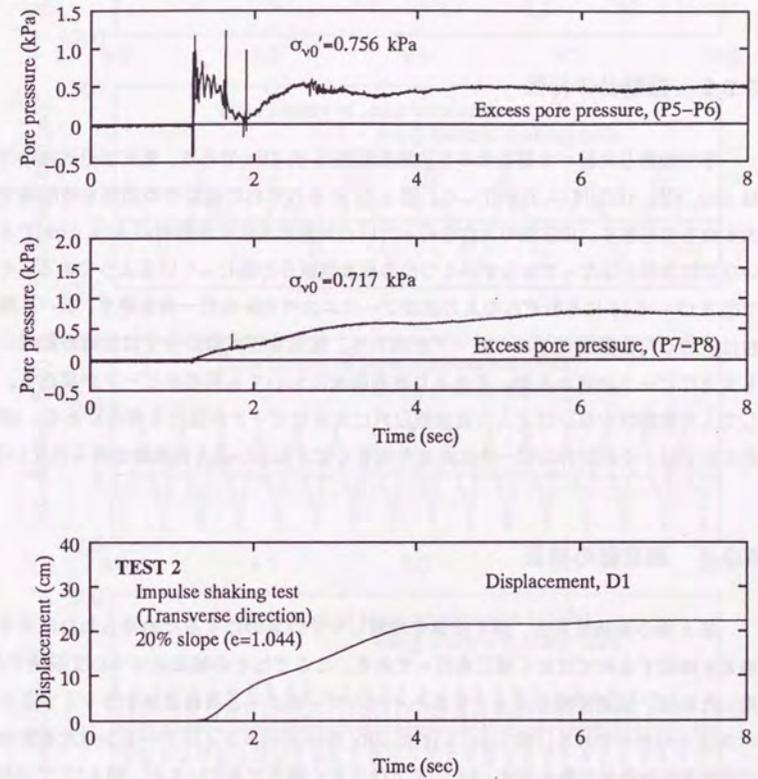


図 5.10 時刻歴計測結果 (TEST 2, その 3)

地盤傾きは20%である。

● 自由流動実験3 (TEST 24 ~ TEST 27)

油圧式振動台を用いた短時間加振実験。振動方向は土槽長辺方向。自由流動実験1より強い入力波を与え、入力波の強さが自由流動に与える影響を調べた。地盤傾きは20%である。

5.2.2 振動台の特性

手で加振した板バネ振動台の自由振動周期は約3Hzであり、電気油圧式振動台では4Hz, 8Hz, 16Hzの入力を行った。図5.11にそれぞれの振動の時刻歴を時間軸で拡大したものを示す。正弦波の入力を行っているが電気油圧式振動台の4Hz, 8Hzできれいな正弦波形とはなっておらずいくつかの周波数成分が混じっているようである。そこで図5.12~5.15にそれぞれの入力波のフーリエスペクトルの一例を示す。板バネ振動台は入力した振動数付近のみピークが現れる。電気油圧式振動台では加振振動数に最も大きなピークは現れるが、それより高周波域においても何点かピークが現れる。そして入力振動数が低いほど入力周波数以外に大きなピークが現れる傾向にある。16Hzの入力では、それ以外のピークはあまり小さくなくねらい通りの振動が得られている。

5.2.3 測定値の補正

第6章の実験結果は、測定結果を理解しやすいものにするため得られた結果をそのまま掲載するのではなく補正を行っている。ここではその補正法について説明する。用いたのは、低周波域をカットするハイパスフィルターと高周波域をカットするローパスフィルターである。図5.16, 5.17に2Hzのハイパスフィルターをかけた衝撃加振の地盤中の加速度記録を示す。図5.16ではうまく補正できているが、図5.17では加振開始点の立ち上がりがかうまく補正できておらず、加振前から加速度が生じているようになっている。カットする周波数を上げていくとこのような立ち上がりもうまく再現できるようになるが、雑音以外の有効な周波数まで取り除いてしまうことはできないので限界がある。そこで振動前にハイパスフィルターの影響が大きくなる場合は、振

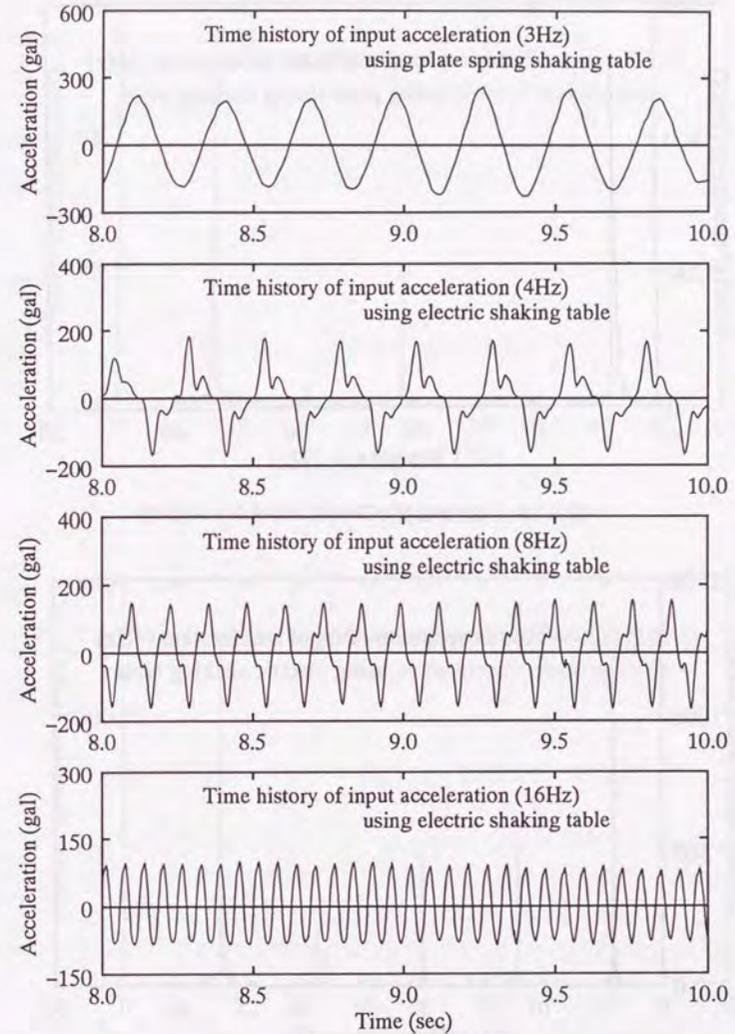


図5.11 入力加速度の時刻歴の詳細(3, 4, 8, 16Hz)

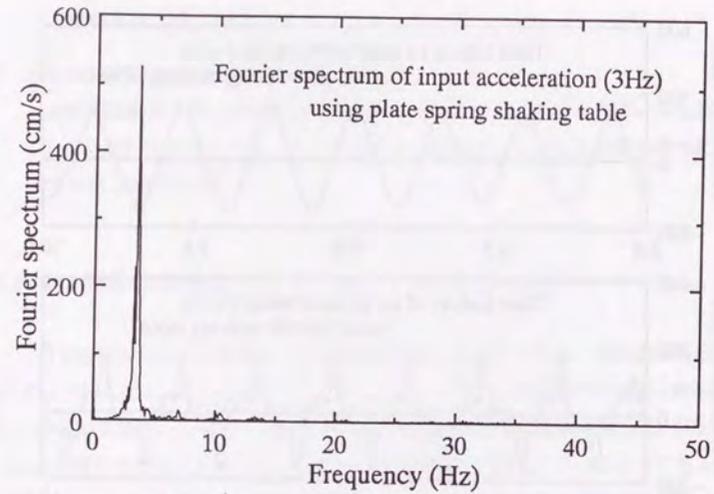


図 5.12 入力加速度のフーリエスペクトル (3Hz)

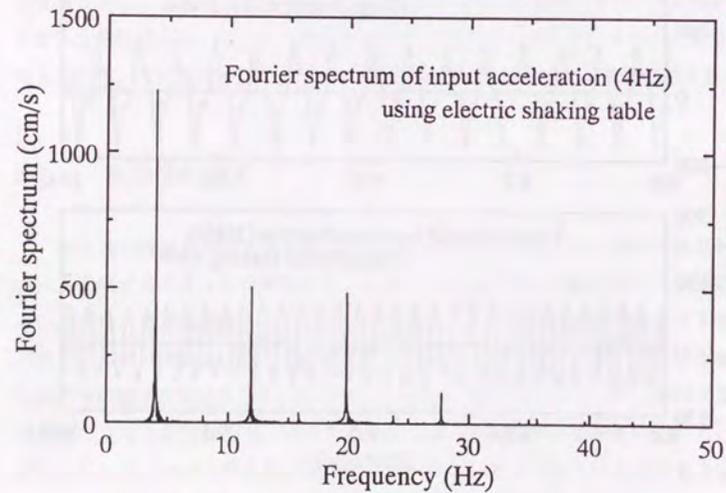


図 5.13 入力加速度のフーリエスペクトル (4Hz)

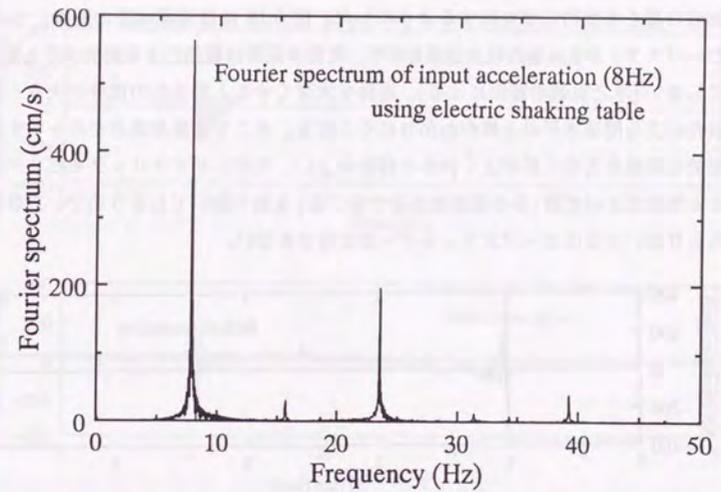


図 5.14 入力加速度のフーリエスペクトル (8Hz)

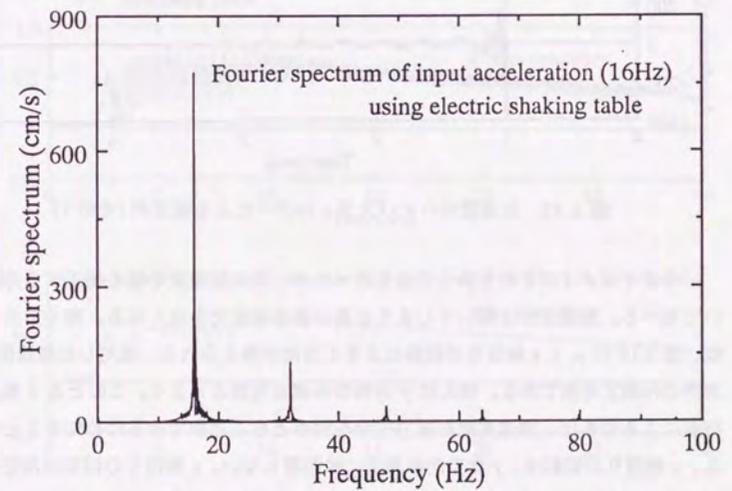


図 5.15 入力加速度のフーリエスペクトル (16Hz)

動前の値を強制的にゼロにするようにした。図 5.18 には間隙水圧の記録に 3.5Hz のローパスフィルターをかけた結果を示す。間隙水圧計は振動による動的水圧も読みとってしまい(水と計器の衝突による)、振動を大きくすると動水圧の成分が大きくなり液状化による間隙水圧の上昇がわかりにくくなる。そこで高周波成分をカットすると巨視的な間隙水圧の上昇がよくわかり都合がよい。ただしサイクリックモビリティによる間隙水圧の変動(ある程度密な砂で起こる)も取り除いてしまうので、この値を読みとりたいときはローパスフィルターは使用できない。

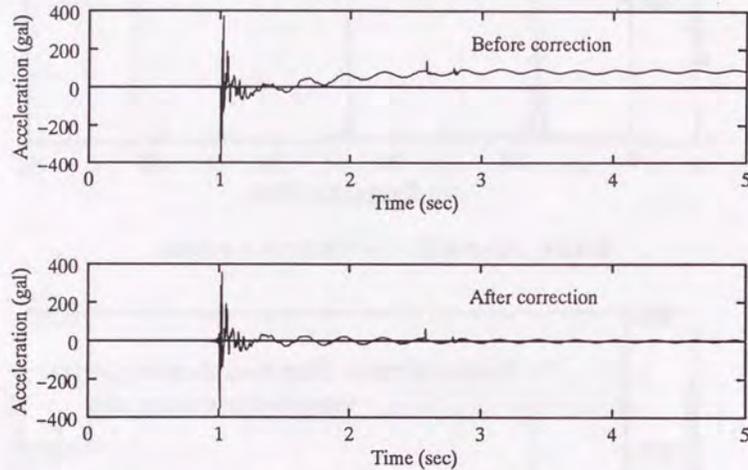


図 5.16 加速度のハイパスフィルターによる補正例(その1)

今まではノイズを取り除く方法を述べたが、次に加速度の値を補正する方法について述べる。加速度計は傾いてしまうと真の値を測定できなくなる。傾く方向としては、図 5.19 の x , y , z 軸回りの回転による 3 方向が考えられる。使用した加速度計は 1 方向のみ測定可能である。例えば y 方向のみ測定可能としよう。このとき x 軸回りの回転による傾きは、加速度計が重力成分を読みとることができるため知ることができる。 y 軸回りの回転は、 y 軸方向の測定には影響しない。 z 軸回りの回転は測定値に影響を与えるが、その値を知ることができないため補正不可能である。よって、加速度計の傾きが測定方向のみかつその傾きがある程度小さい範囲ならこの方法で十分信頼

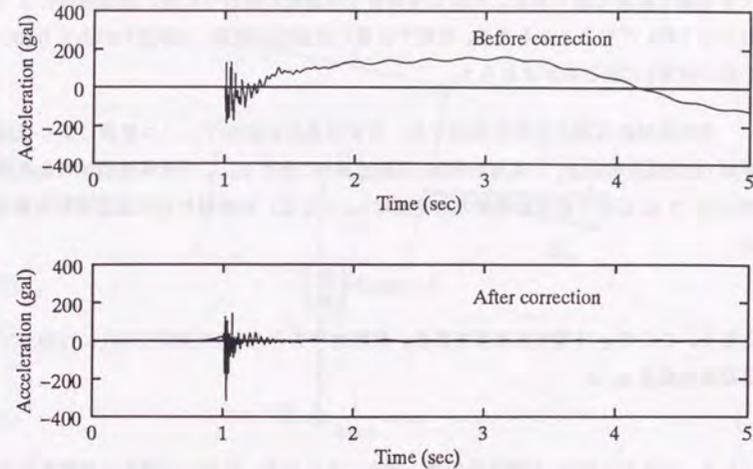


図 5.17 加速度のハイパスフィルターによる補正例(その2)

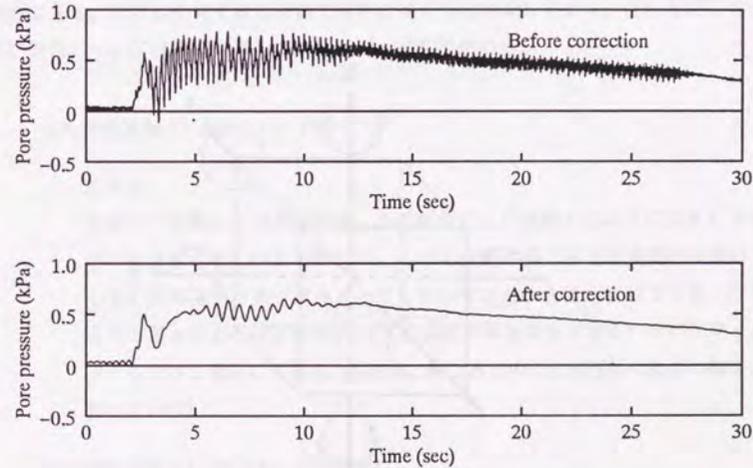


図 5.18 間隙水圧のローパスフィルターによる補正例

できる値を計算可能である。ただし本実験では流動が終わった後、加速度計によってはかなり傾いているものもあり、信頼できるのは流動の初期(加速度計があまり傾いていない状態)に絞るのがよからう。

次に具体的な補正方法を説明する。まず加速度記録をフーリエ変換により低周波領域(加速度計の傾き)と高周波領域(振動成分)に分ける。この低周波領域の加速度は図5.20の a_s になり高周波領域の加速度は a_d となる。鉛直軸からの加速度計の傾き θ は

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a_s}{g} \right) \quad (5.1)$$

となる。ここで g は重力加速度である。実際水平方向(加速度測定方向)に作用している振動加速度 a_r は

$$a_r = \frac{1}{\cos \theta} a_d \quad (5.2)$$

となる。つまりこの a_r が補正後の値と言うことになる。以降この補正を加速度計の傾きの補正と呼ぶ。図5.21に測定結果(Original data), 測定結果の高周波領域と低周波領域への分割, 補正後の結果を示す。

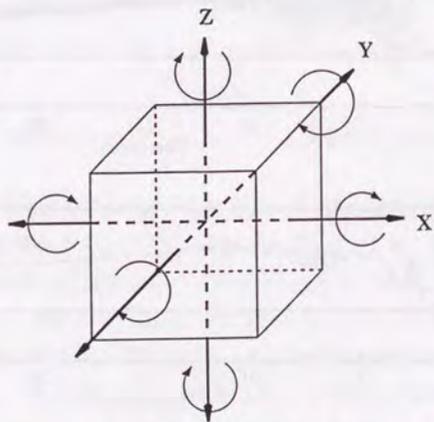


図 5.19 加速度計の傾き

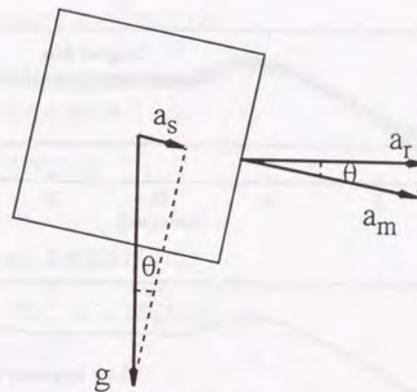


図 5.20 加速度計の傾きによる値の変化

以上の補正方法を用いたわけであるが、それぞれの実験によって補正方法を使い分けてある。以下にそれぞれの実験で用いた補正方法を記しておく。なにも記していない計器については補正を施していないデータを掲載する。

• 自由流動実験 1 (TEST 3 ~ TEST 7)

- 加速度

地盤中に設置した加速度計は、土の動きによく追従するようにスタビライザーを装着させている(図5.22)。しかし流動が起こると加速度計は傾いてしまい重力成分の値を読みとってしまいゼロ点から値がずれてくる。このような傾きによる成分は2Hz以下の低周波域をカットするハイパスフィルターをかけて補正してある。振動は一瞬であるので加速度計の傾きの補正は行っていない。

• 自由流動実験 2 (TEST 8 ~ TEST 9)

- 加速度

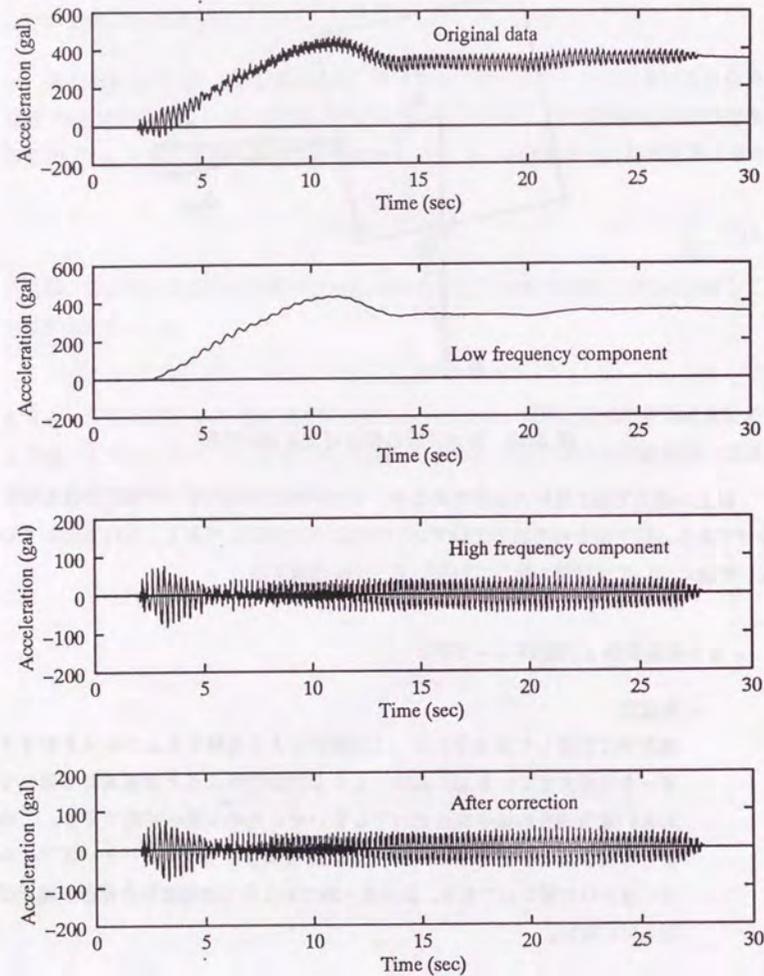


図 5.21 加速度計補正方法の手順

自由流動実験 1 と同じ補正を行っている。。

- 振動流動実験 1 (TEST 10 ~ TEST 12)

- 加速度
加速度計の傾きの補正を行った。

- 振動流動実験 2 (TEST 13)

- 加速度
加速度計の傾きの補正を行った。

- 振動流動実験 3 (TEST 14 ~ TEST 23)

- 加速度
加速度計の傾きの補正を行った。

- 間隙水圧

振動の強さを変化させたこの実験では動水圧がかなり大きく液状化による間隙水圧の上昇があまりはっきりしない場合があるので、このシリーズの実験では 3.5Hz のローパスフィルターをかけた。

- 自由流動実験 3 (TEST 24 ~ TEST 27)

- 加速度
加速度計の傾きの補正を行った。

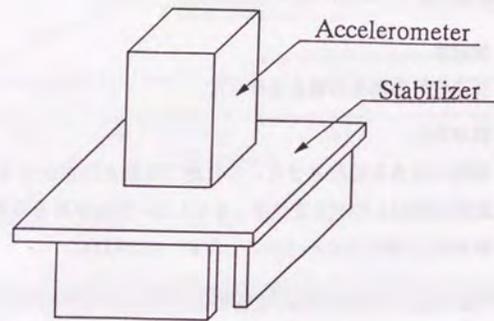


図 5.22 スタビライザーの概略図

第6章

中型土槽による実験結果

6.1 実験結果と考察

中型土槽実験では小型土槽より容易に流動化が再現できたため試料は全実験で豊浦標準砂で行い、細粒分や粘性流体は使用していない。実験シリーズごとに結果をまとめ考察を行う。加振方向で横とは土槽短辺方向を、縦と書いてあるのは土槽長辺方向の振動を意味する。測定器の A は加速度を P は間隙水圧を D は変位計をあらわす。間隙水圧計で例えば P1-P3 となっているのは P1 から P3 の値を引いたという意味である。このような操作は波による水圧の変動を記録から取り除き、地盤の有効応力の変化を計測するために行った。変位計の位置を図 6.1 に示す。またこの変位計には間隙水圧計 P10 も取り付けられており、変位と共に動くようになっている。変位計は地盤の形が同じであれば同じ位置に設置している。加速度計と間隙水圧計の配置については実験シリーズごとに示すことにする。

6.1.1 自由流動実験 1

振動停止後の自由流動について地盤間隙比を変化させて実験を行った。これは小型土槽でも行った実験であるが、さらに詳細な測定を行う中型土槽実験でもって一歩

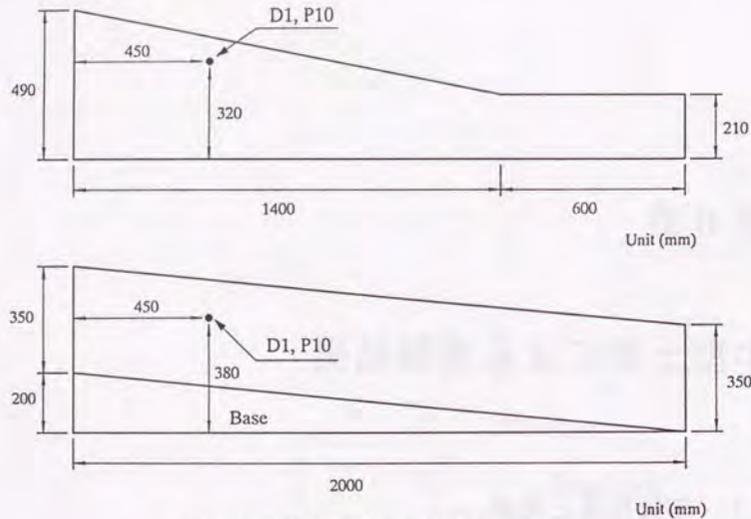


図 6.1 変位計と間隙水圧計 P10 の配置図

進んだ考察を行う。地盤傾きは 20% である。図 6.2 ~ 6.23 に実験結果を示す。加速度計の記録を見てみると入力された衝撃波の振幅の 6 割程度が地中で測定されている。また入力波と直角方向（土槽長辺方向）には入力波の 2 割程度の振幅がある。振動による慣性力の影響を除くため流動と直角方向に入力を行ったわけであるが、流動方向にもかなりの慣性力がでているということになる。これは衝撃振動が土槽を伝わりその波が流動方向の地盤にも伝達したことや加速度計の設置、入力波の方向が完全に斜面と垂直でなかったなどの理由によるものであろう。衝撃波入力後地盤は 2 秒程度自由振動を起こしているようである。しかし非常に大きな加速度は一瞬であり流動中は慣性力や振動の影響は受けず静的な力のみで流動したといえる。

間隙水圧は振動入力後瞬時に上昇しているのがわかる。間隙水圧計は固定されており、流動することにより有効上載圧は逐次変化する。よって斜面先では間隙水圧は流動とともに上昇していく。TEST 3 の P2-P3 は水圧上昇後 1 秒程度でほとんど 0 になっているがこれは流動により土被りがなくなったことによる。TEST 4 では間隙水圧の測定をさらに 10cm 下方で行ったため、大きく変形したにもかかわらず間隙水圧が 0 になっていない。どの試験においても P5-P6 では間隙水圧の下降再上昇が見ら

れる。これは地盤のダイレタンスにより水圧が下降するが、まわりからの浸透流などで再上昇したものである。また地盤が密になっていくとこのような現象が地盤の多くの箇所（測定点）で見られる傾向にある（図 6.21, 6.22）。これは地盤が密になることでダイレタンスが発生しやすくなったためである。間隙水圧計 P5 の位置より考えて、ダイレタンスが発生しやすい場所は地盤斜面方向の中央で地表面近くということになる。流動中のマーカの写真撮影結果よりこれは測定点の中で最もせん断ひずみの大きいところである。

変位は振動入力後すぐに進展を始めている。進展を初めて約 1 秒後のところこし変位の傾きが緩やかになるところが存在するが、これは P5-P6 で間隙水圧が低下する時刻とほぼ同じである。つまりダイレタンスが変形を妨げるブレーキのような作用をしているということである。変形が進展して 3 秒程度で一旦止まるが、その後 2 秒くらいして数 cm 変位が進展する。これは地盤が流動を起こすと水面に 2 ~ 3cm の波が起ってしまい、地盤は残留強度である傾きを持って止まるが、なお非常に軟弱な強度しか有しておらず波による小さなせん断力の载荷によっても変形してしまうようである。ただし本研究ではこのような 2 次的な変形は取り扱わず、流動を開始してから残留強度でもって変形が止まるまでの挙動を対象を絞る。

全般的に見て測定結果はどれも非常に似た挙動をしている。最も違いが顕著に現れているのは変位量である。地盤がゆるいほど大きく変位しているのがわかる。自由流動で変位が止まるメカニズムは何かというと、これは地盤の残留強度が地盤の傾きによって発生するせん断応力とが釣り合うことであろう。小さな模型地盤での自由流動の挙動は短時間（3 秒程度）で終わることを考えると、間隙水圧の時間による消散で止まるのではないことがわかる。残留強度の小さいゆるい地盤ほど最終の傾きは小さくなり、同じ形状の地盤であれば大きく変形するということになる。しかし流動継続時間はどれもほぼ 3 秒程度であり、間隙比による違いがほとんどないのは興味深い結果である。流動変位が小さければその流動時間も短いように思われるが変位量によらず流動時間は一定である。別の見方をすると変位量は平均流動速度と流動継続時間を掛け合わせたものになるので平均流動速度は間隙比が大きくなるほど大きくなるということである。この間隙比が大きいほど流動速度が大きくなる理由であるが、まずは残留強度と自重による载荷力の差が大きくなるからである。Newton の運動方程式を

考えると、この不釣り合いの度合いによって加速度が大きくなり、その結果流動速度も大きくなる。その他流動中の砂粒子の衝突によるエネルギー損失も考えられ、地盤が密であるほどこの損失が大きくこれが粘性のような作用をして流動速度に影響を与えるのであろう。

地盤の深さ方向の変位を観測するため地盤内にマーカーを作製した。すべての実験結果において写真撮影されたマーカーの動きからひずみの大きい部分は存在するが、すべり線のような局所的な破壊は起こっておらず液状化層全体にひずみが生じている。つまり液状化による地盤流動は局所破壊によるのではなく液状化層全体が変形するのである。このマーカーの動きを詳しく追跡した結果は第7章で報告する。

表 6.1 実験の諸データ (自由流動実験 1)

TEST No.	地盤作製方法	初期間隙比	加振方法	加振方向
3	湿潤堆積法	1.049	衝撃加振	横
4	湿潤締固め法	1.025	衝撃加振	横
5	湿潤締固め法	1.011	衝撃加振	横
6	湿潤締固め法	0.982	衝撃加振	横
7	湿潤締固め法	0.947	衝撃加振	横

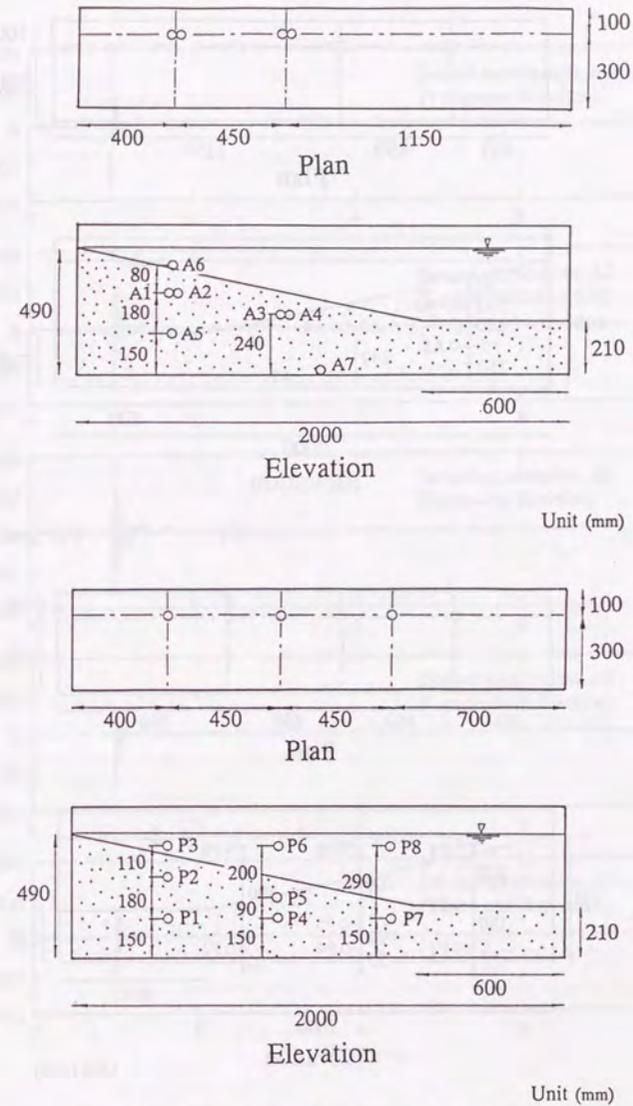


図 6.2 測定器配置図 (TEST 3, 5, 6, 7)

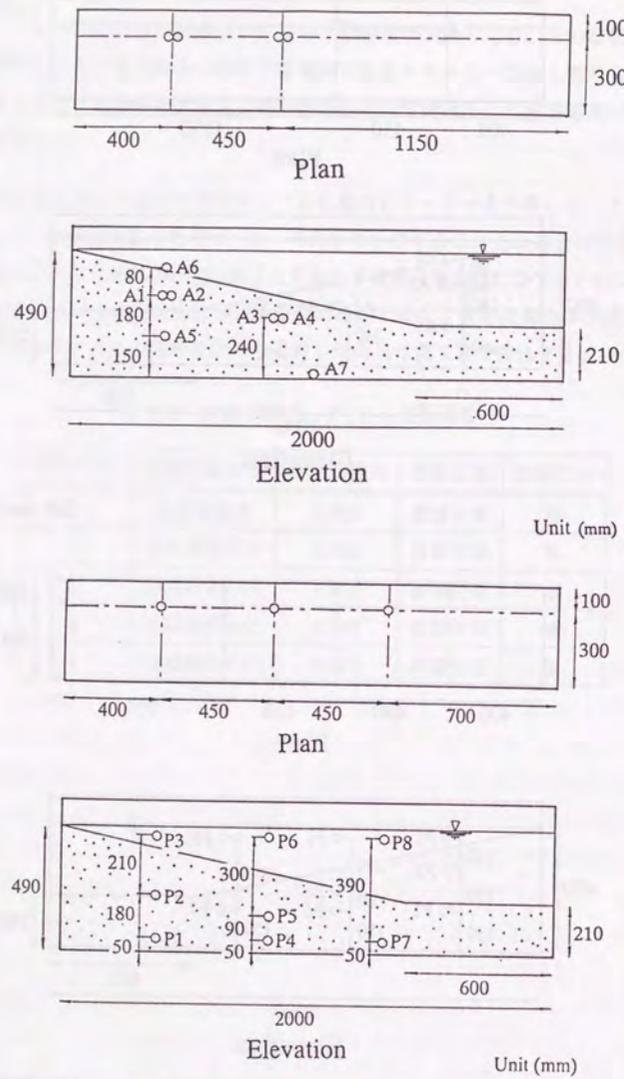


図 6.3 測定器配置図 (TEST 4)

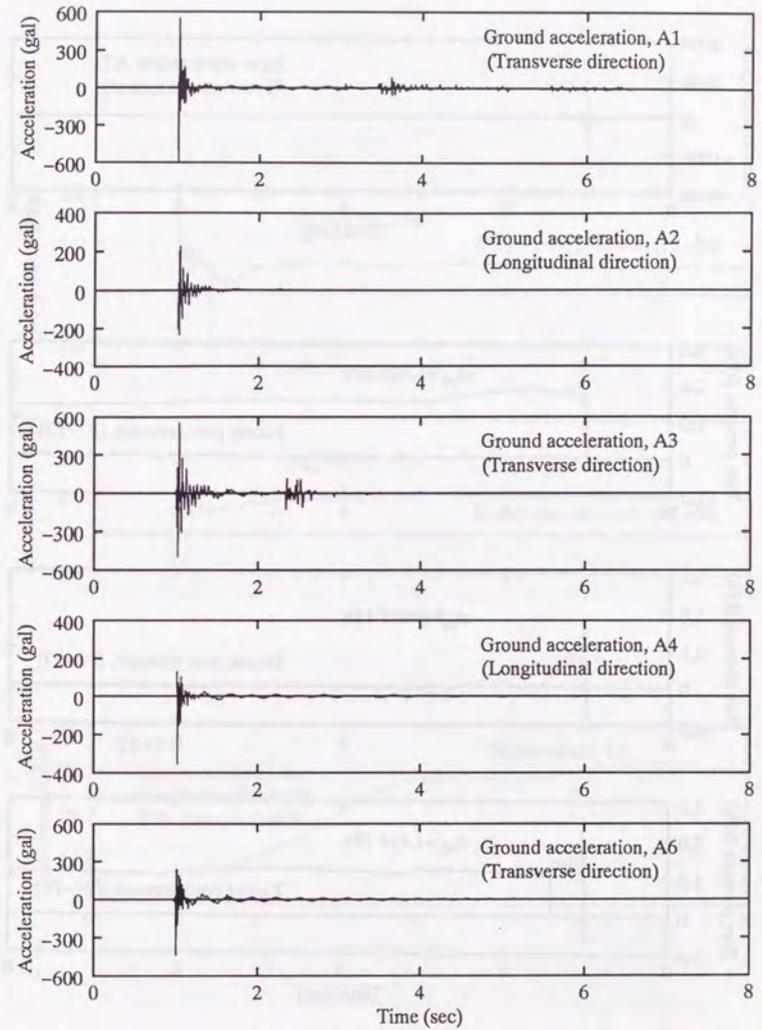


図 6.4 時刻歴測定記録 (TEST 3, その1)

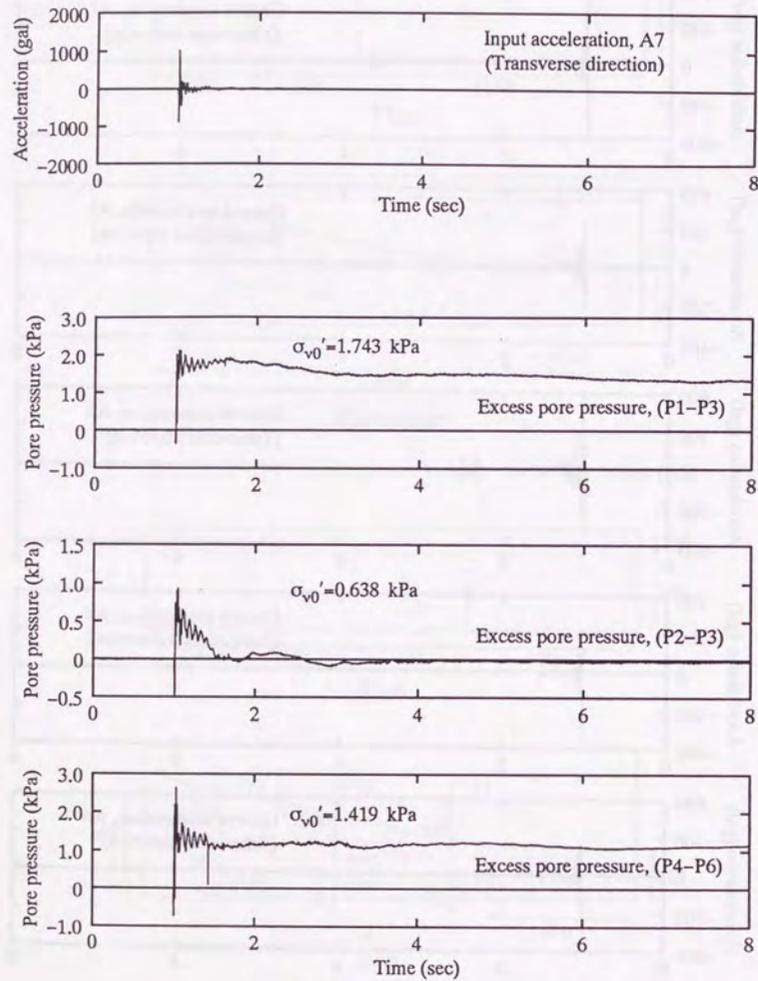


図 6.5 時刻歴測定記録 (TEST 3, その 2)

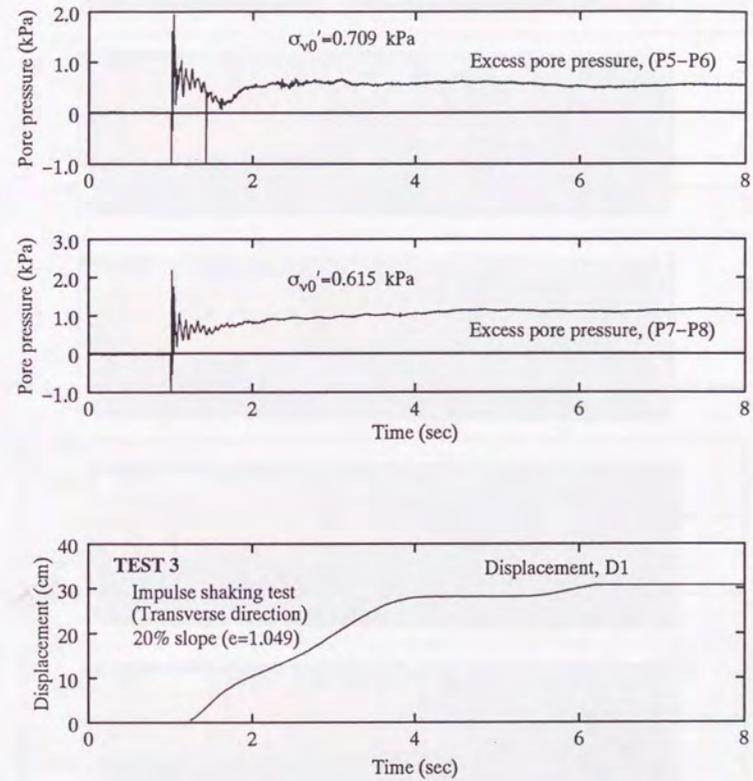


図 6.6 時刻歴測定記録 (TEST 3, その 3)

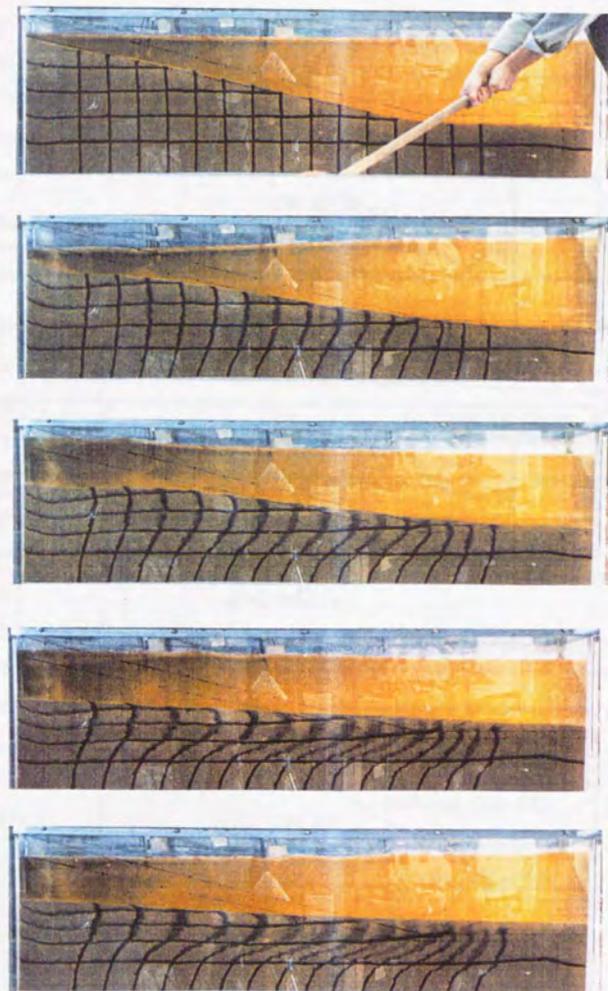


図 6.7 地盤の変形進行写真 (TEST 3)

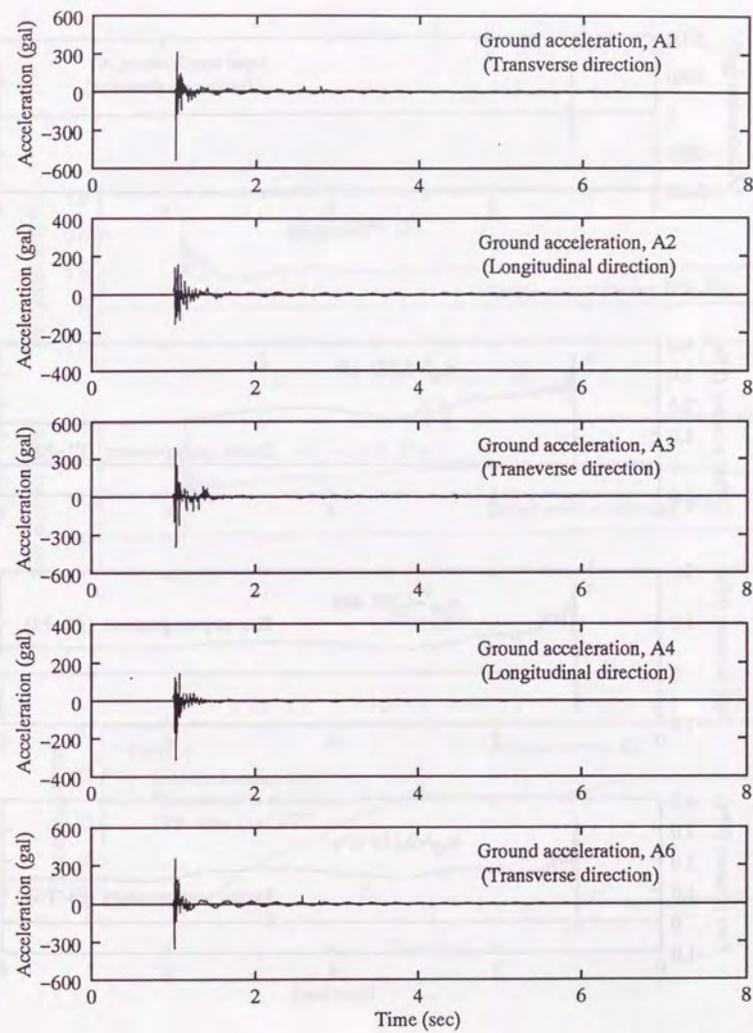


図 6.8 時刻歴測定記録 (TEST 4, その1)

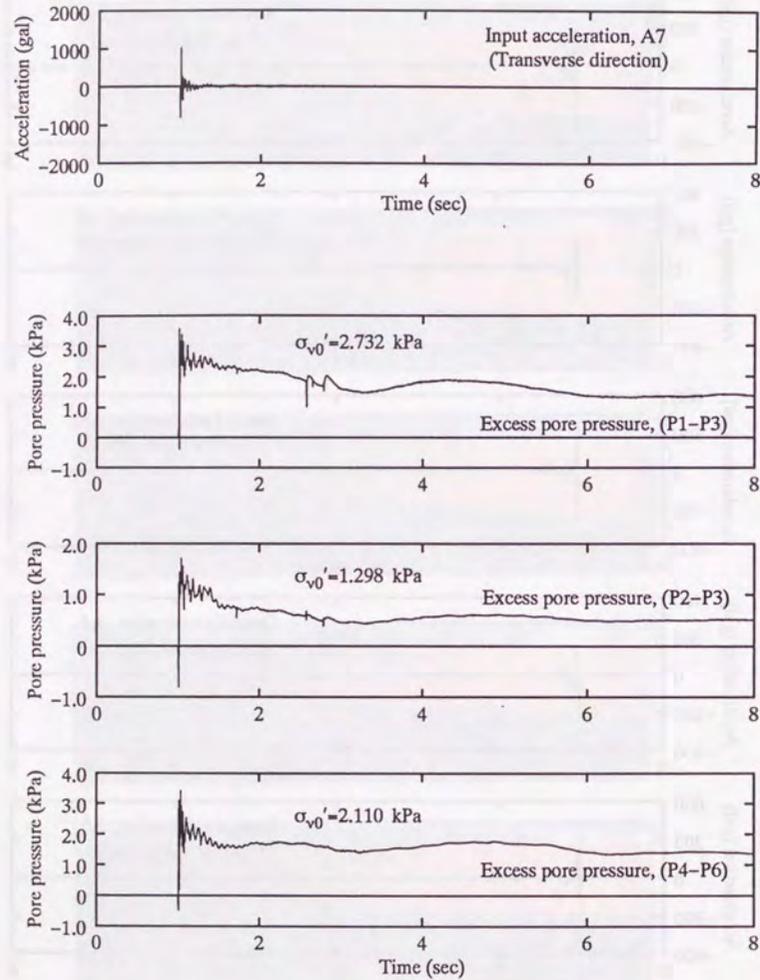


図 6.9 時刻歴測定記録 (TEST 4, その 2)

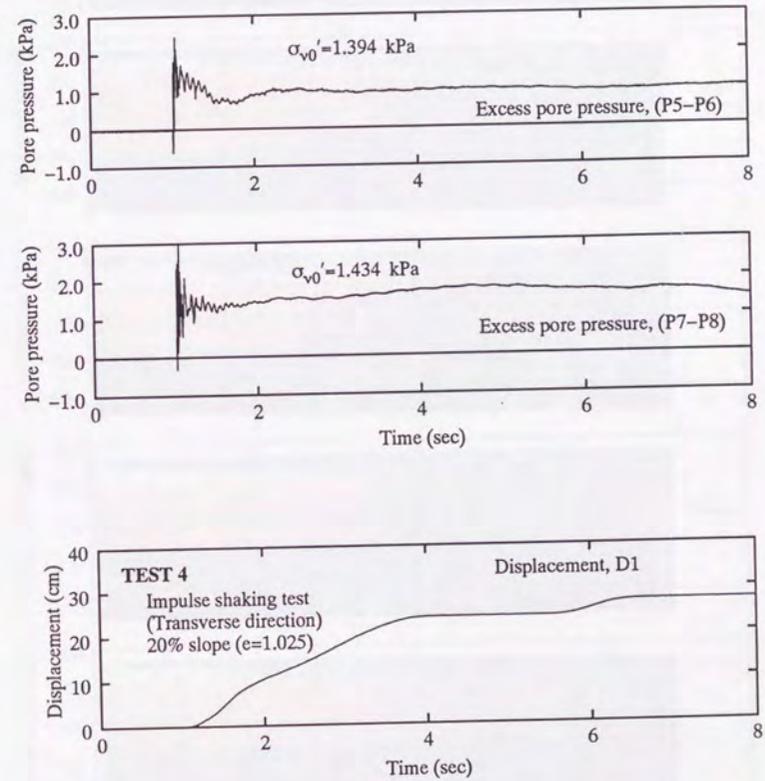


図 6.10 時刻歴測定記録 (TEST 4, その 3)

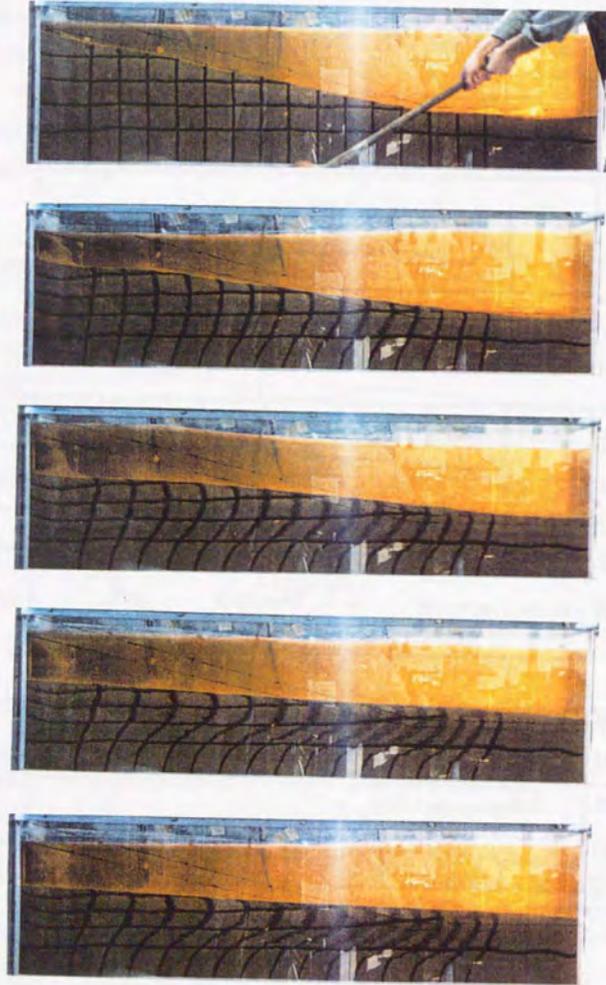


図 6.11 地盤の変形進行写真 (TEST 4)

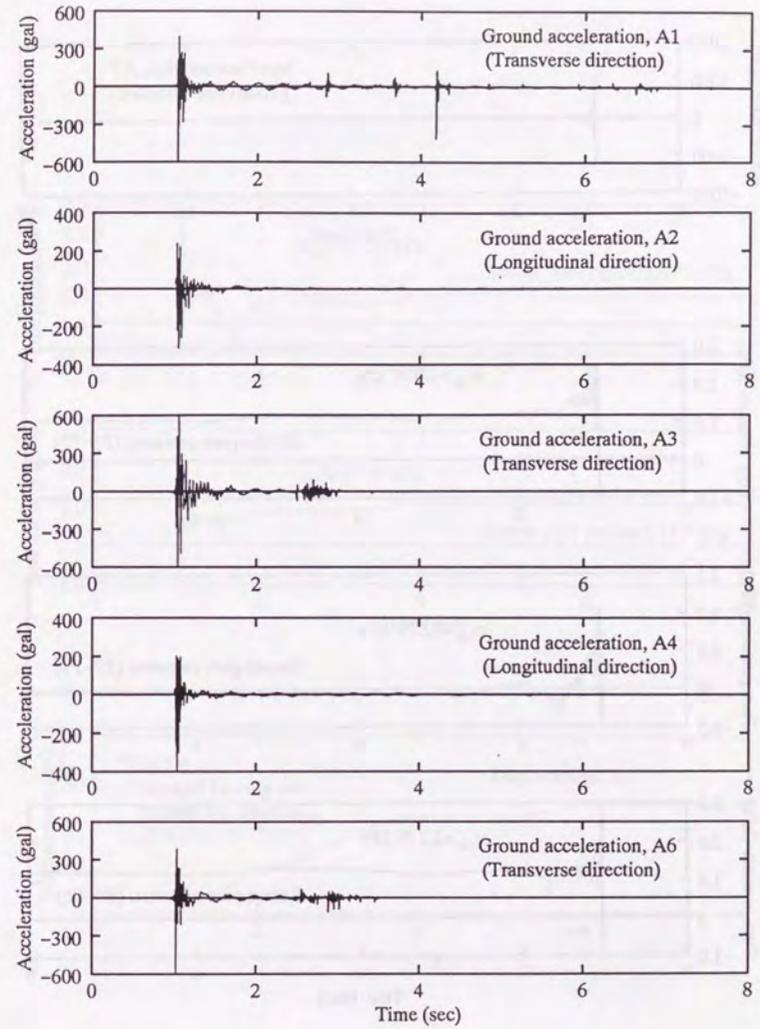


図 6.12 時刻歴測定記録 (TEST 5, その1)

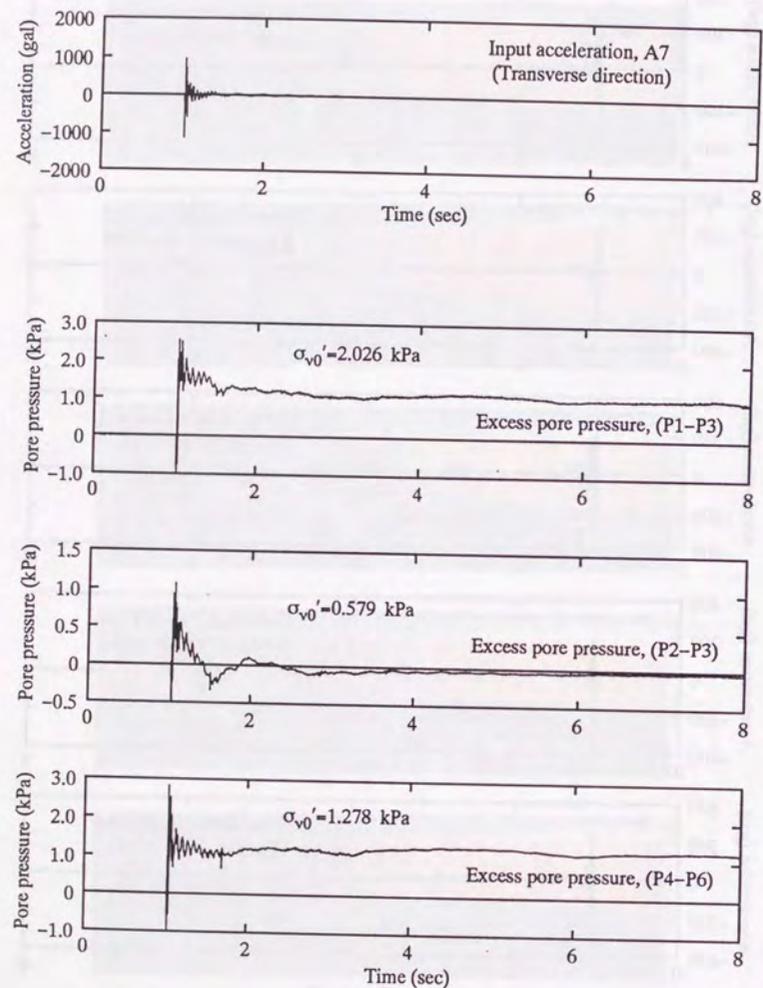


図 6.13 時刻歴測定記録 (TEST 5, その 2)

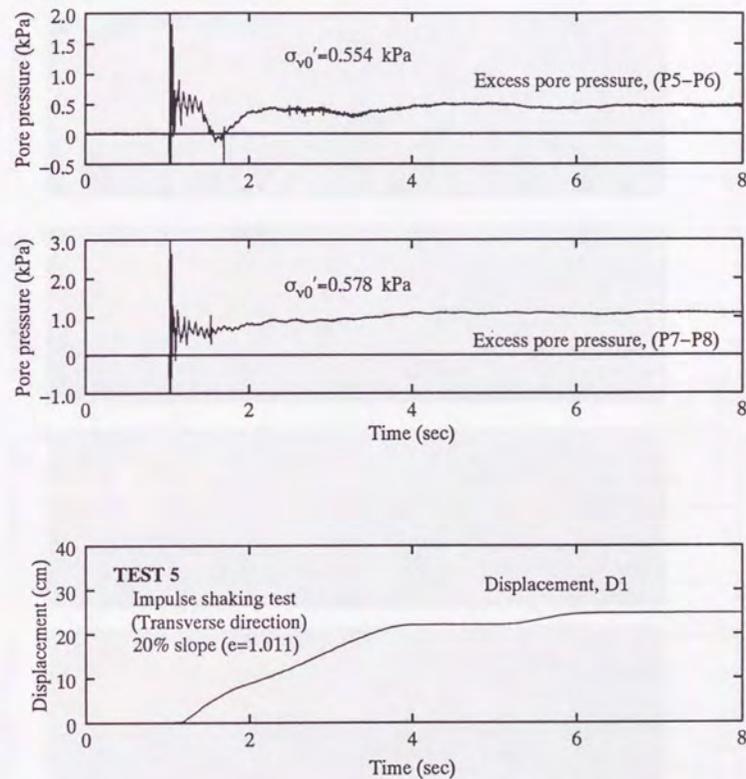


図 6.14 時刻歴測定記録 (TEST 5, その 3)

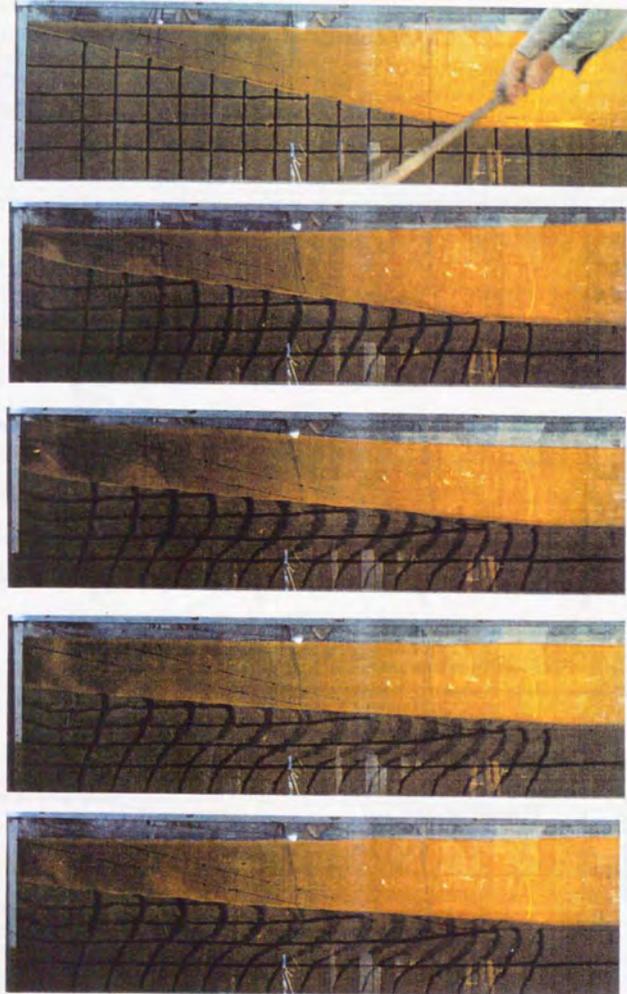


図 6.15 地盤の変形進行写真 (TEST 5)

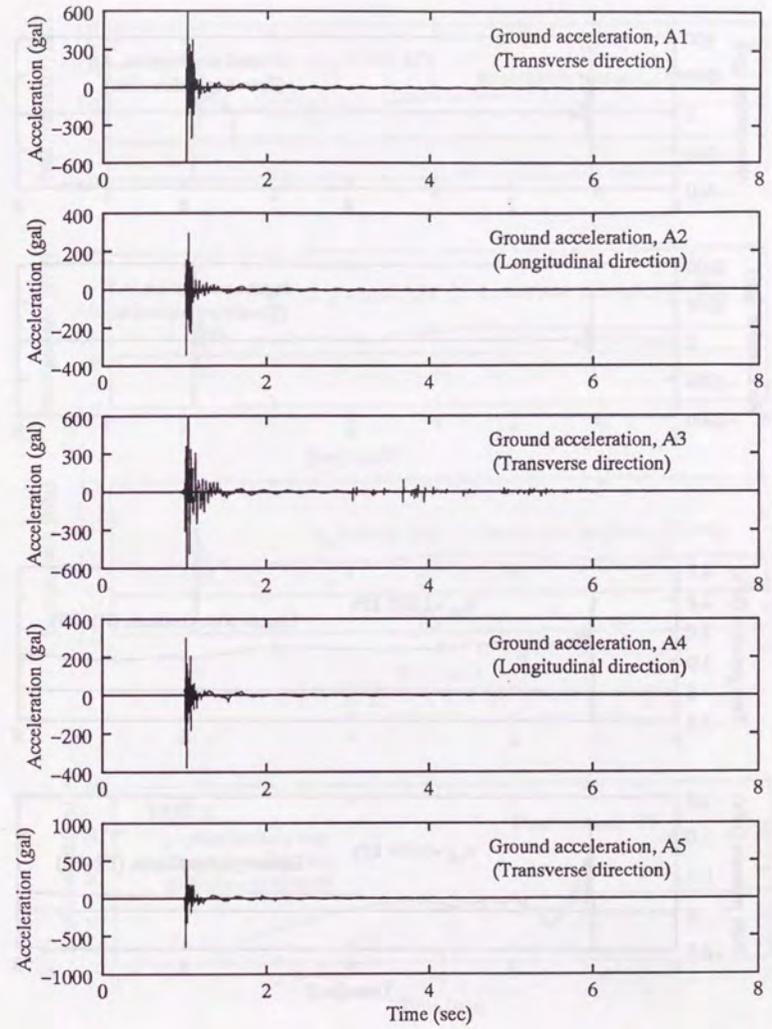


図 6.16 時刻歴測定記録 (TEST 6, その1)

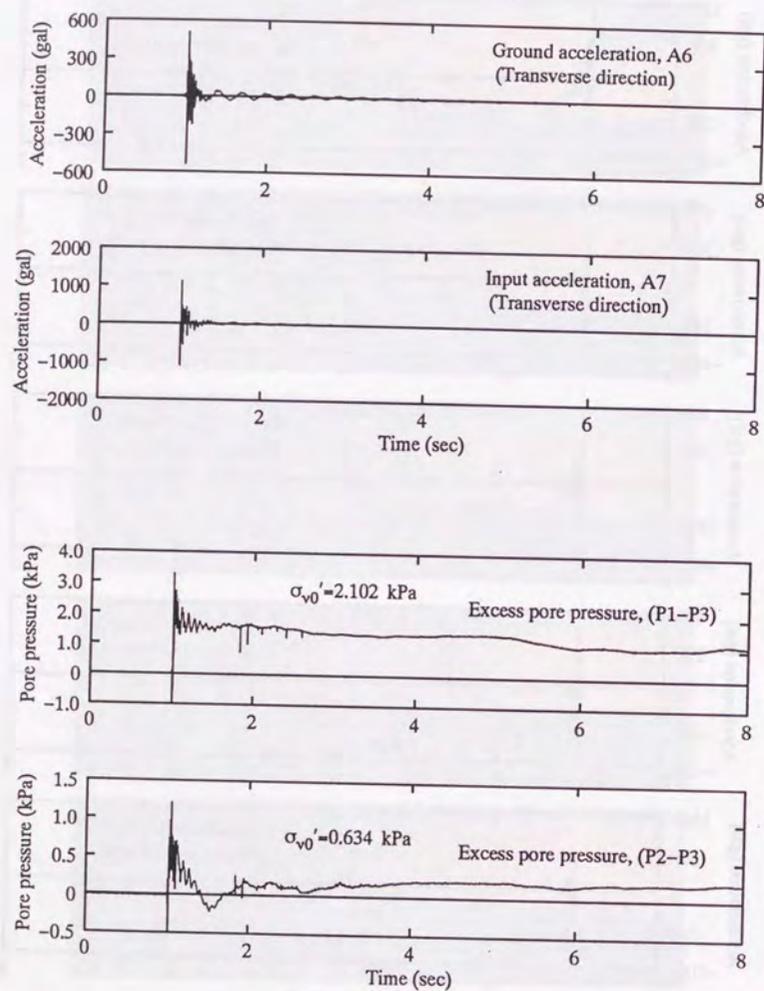


図 6.17 時刻歴測定記録 (TEST 6, その2)

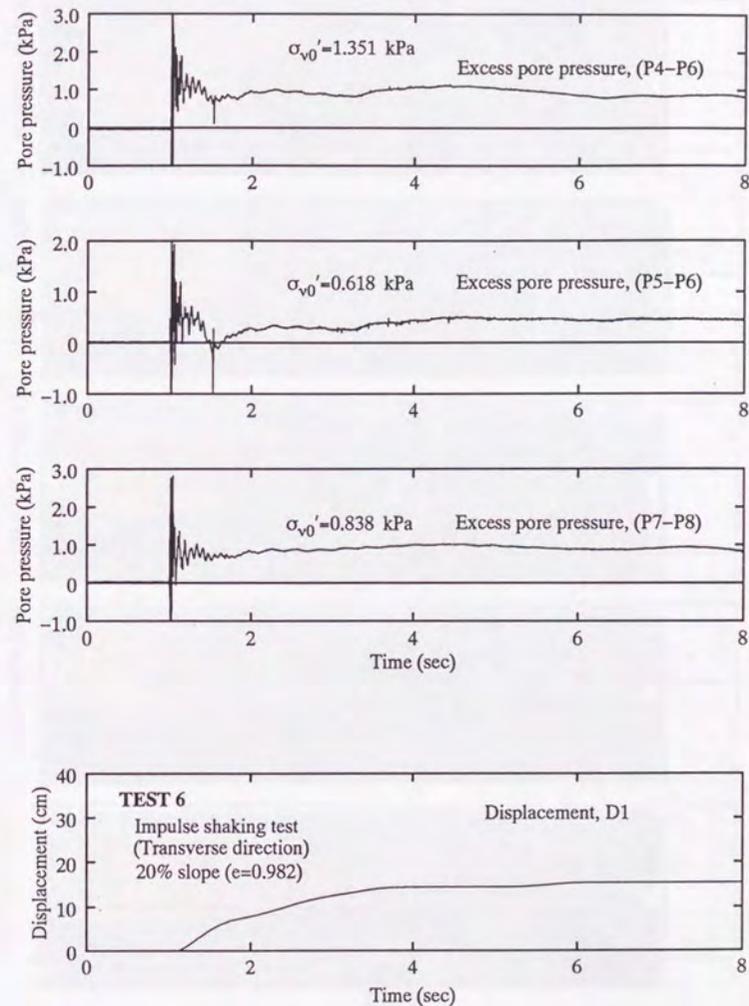


図 6.18 時刻歴測定記録 (TEST 6, その3)

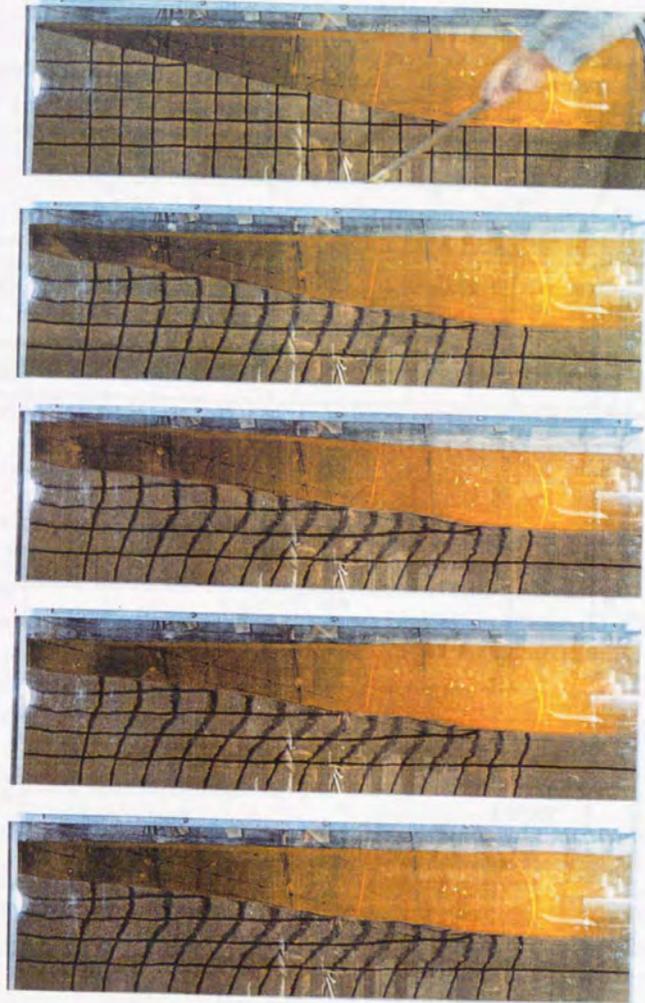


図 6.19 地盤の変形進行写真 (TEST 6)

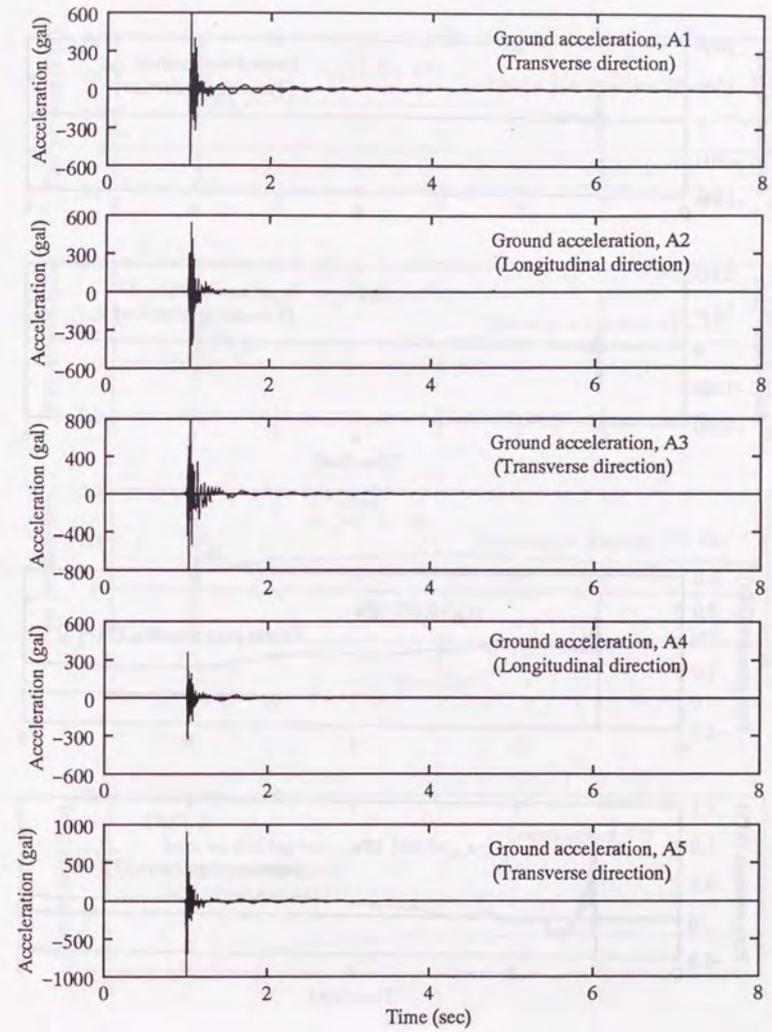


図 6.20 時刻歴測定記録 (TEST 7, その1)

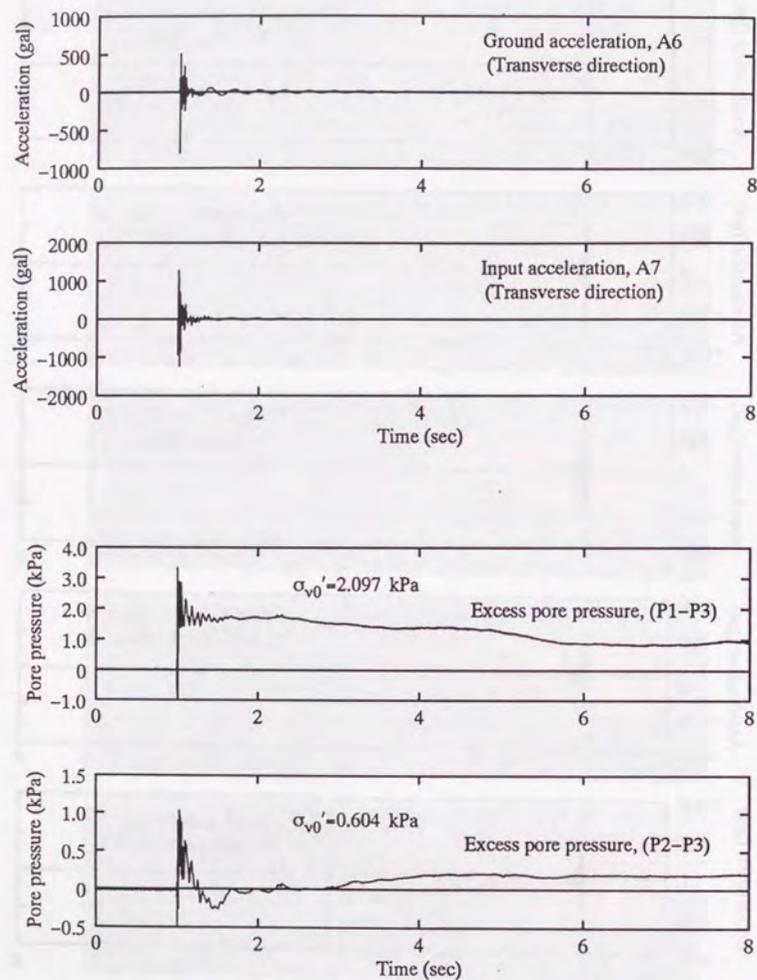


図 6.21 時刻歴測定記録 (TEST 7, その 2)

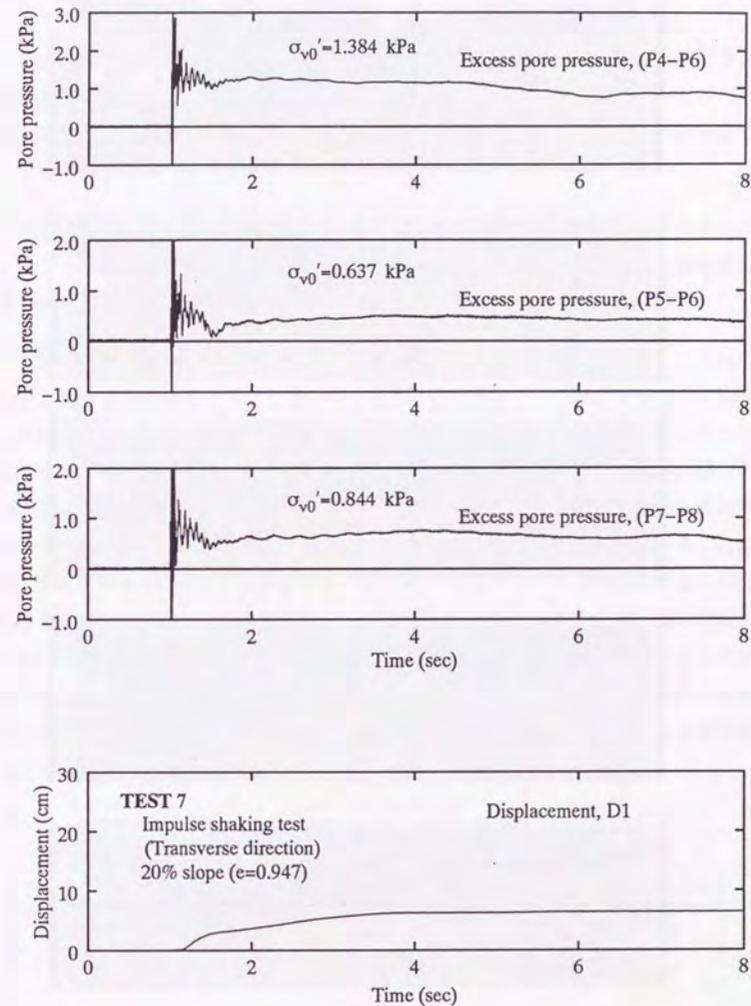


図 6.22 時刻歴測定記録 (TEST 7, その 3)

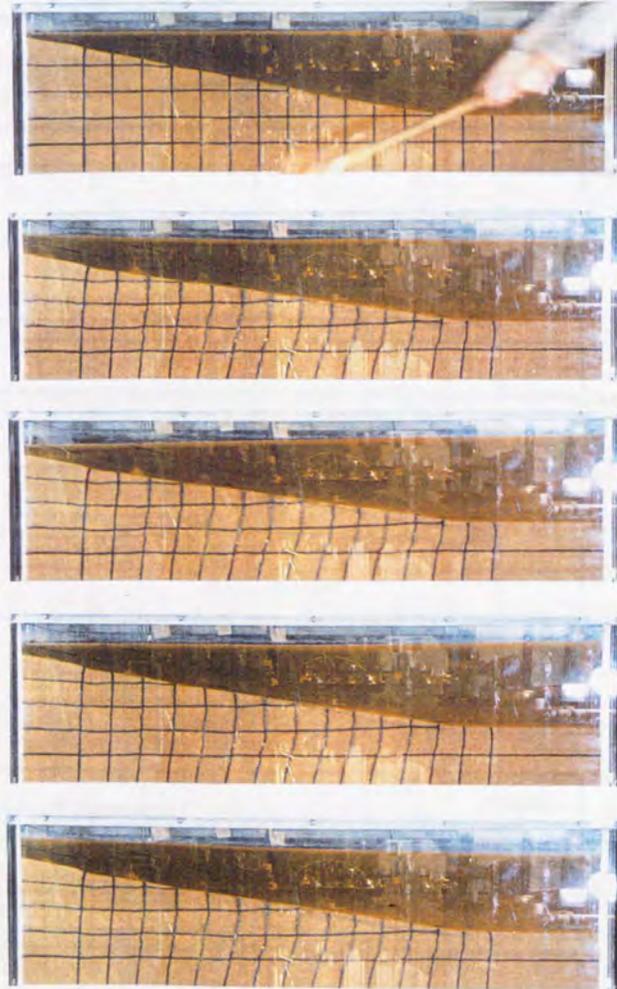


図 6.23 地盤の変形進行写真 (TEST 7)

6.1.2 自由流動実験 2

斜面の傾きは 10% で間隙比を変えて実験を行った。加速度計 A1, A2, A3 はそれぞれ基盤直上の液状化層, 液状化層の真ん中, 地表面で測定を行っている。A1 は入力波の 6 割程度, A2 は 5 割程度, A3 は 3 割程度の伝播がある。地表面に行くほど小さくなっており衝撃波は地盤中で減衰されているのがわかる。

間隙水圧の記録を見ると斜面傾き 20% の場合と同様に急激に上昇する。しかしダイレンシーによる間隙水圧の低下と再上昇が顕著に現れていない。これは測定する位置の問題か、発生するひずみが 20% の斜面より小さかったからであろう。

変位の時刻歴において 20% 斜面では少し傾き (速度) が緩やかになるところが現れたが、10% 斜面ではほとんど止まってしまうところがある。これはやはりダイレンシーによりブレーキがかかるが、10% 斜面では静的に作用しているせん断力が小さいためほとんど止まってしまうのであろう。間隙比が違っても加速度と間隙水圧の挙動は非常に似ている。流動変位のみには違いが現れており、間隙比が小さくなるほど流動変位も小さくなっている。自由流動実験 1 と自由流動実験 2 の結果を比べることにより、流動速度は斜面傾きにも影響されており傾きが大きいほど流動速度も大きくなっているのがわかる。また自由流動実験 1 と自由流動実験 2 では液状化層下面の勾配が違うわけであるが、流動が起こるかどうかは地表面の勾配に大きく依存しており液状化層下面の傾きはそれほど重要でない [113]。6.1.1 小節でも述べたような Newton の運動方程式に基づいた自由流動のメカニズムを考えればこれらの両実験による流動速度などの違いは当然である。

表 6.2 実験の諸データ (自由流動実験 2)

TEST No.	地盤作製方法	初期間隙比	基盤間隙比	加振方法	加振方向
8	湿潤締固め法	1.039	0.756	衝撃加振	横
9	湿潤締固め法	1.009	0.710	衝撃加振	横

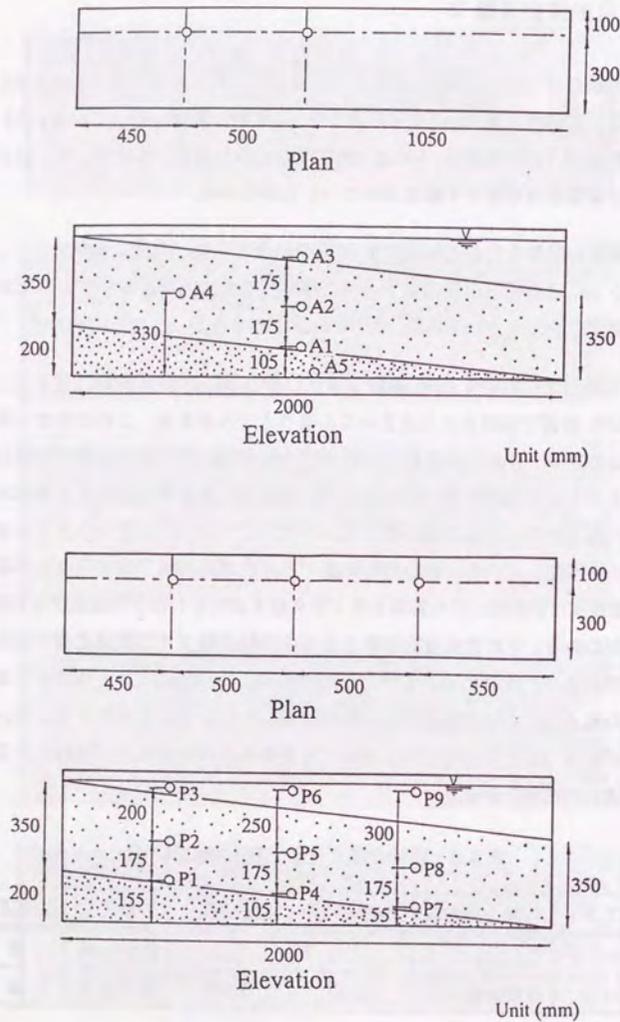


図 6.24 測定器配置図 (自由流動実験 2)

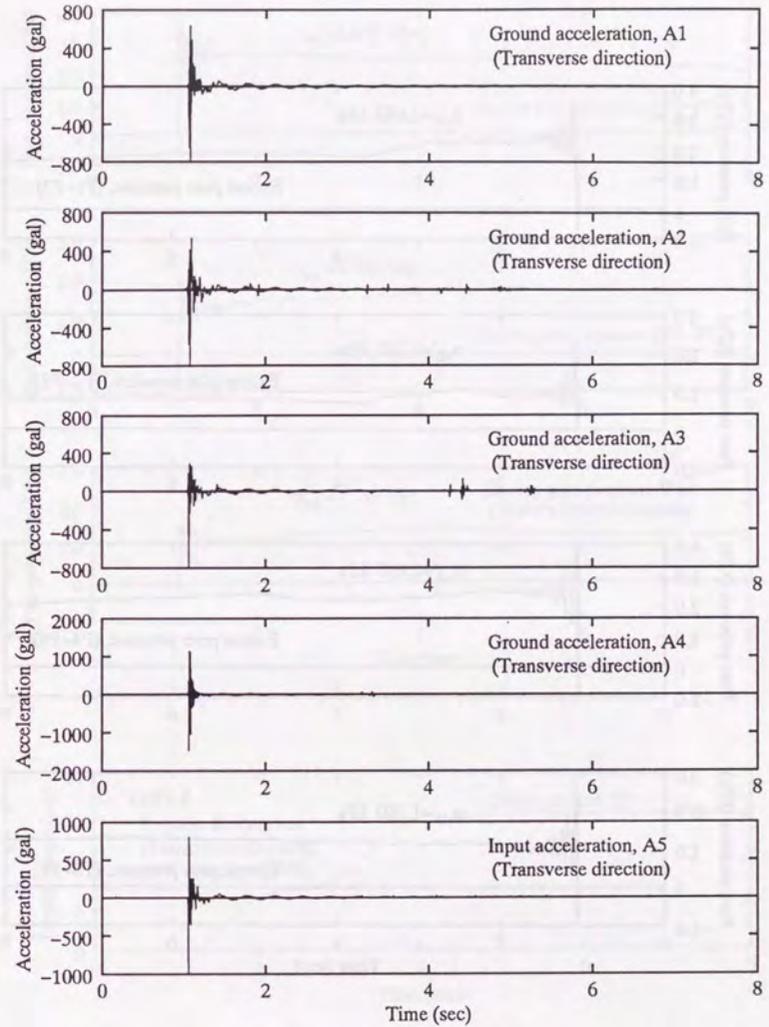


図 6.25 時刻歴測定記録 (TEST 8, その1)

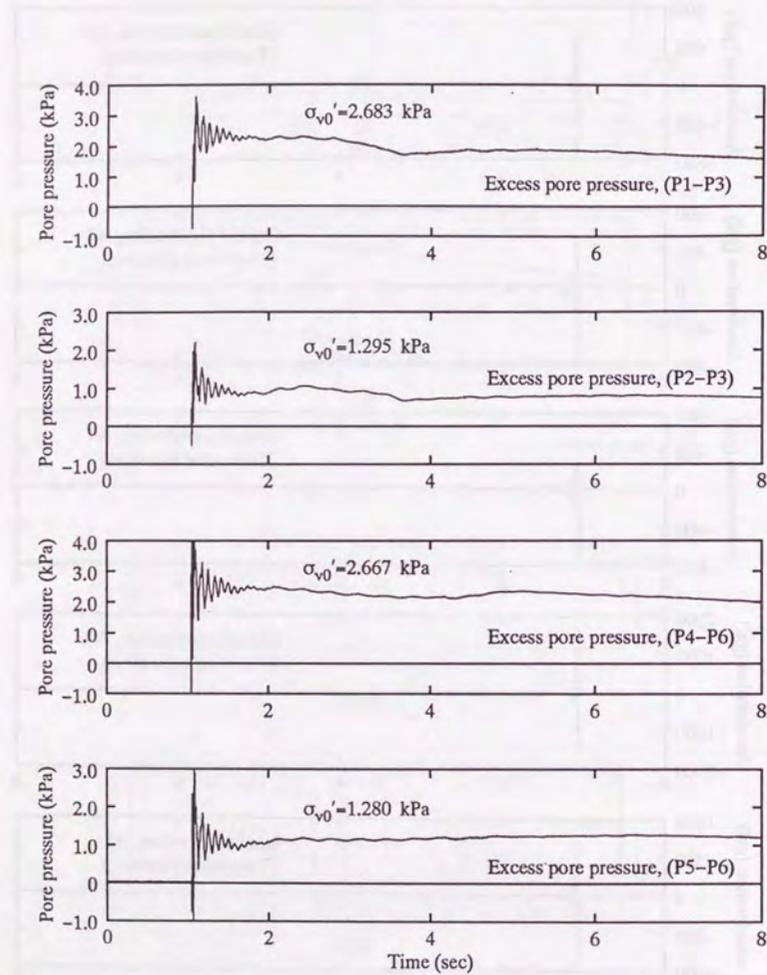


図 6.26 時刻歴測定記録 (TEST 8, その 2)

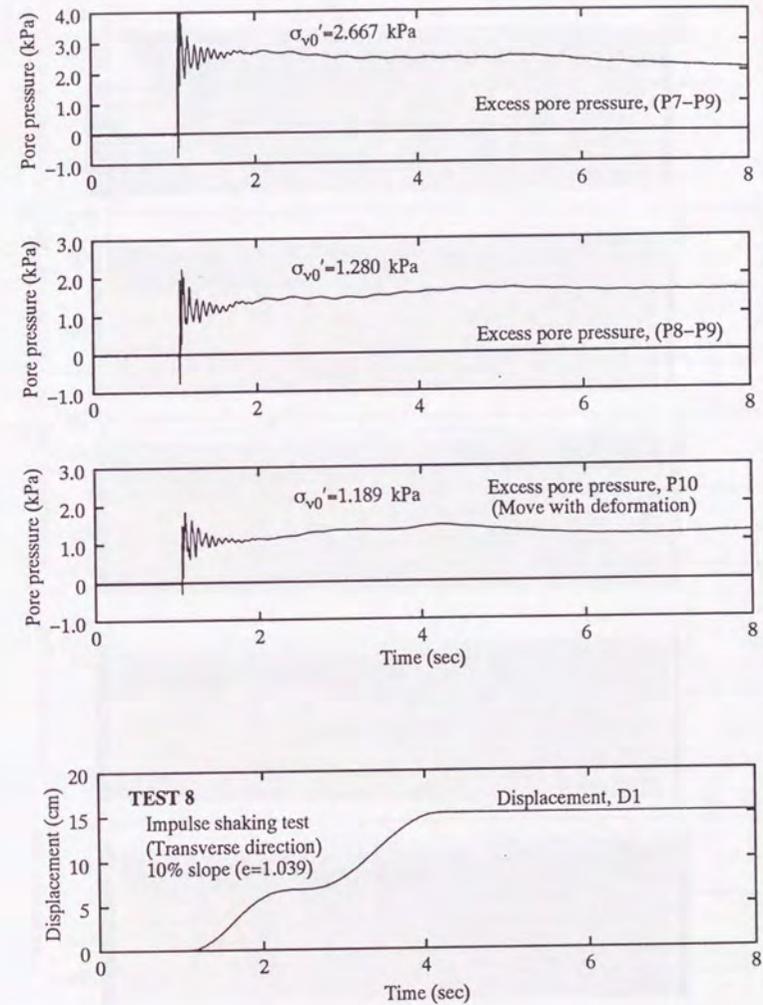


図 6.27 時刻歴測定記録 (TEST 8, その 3)

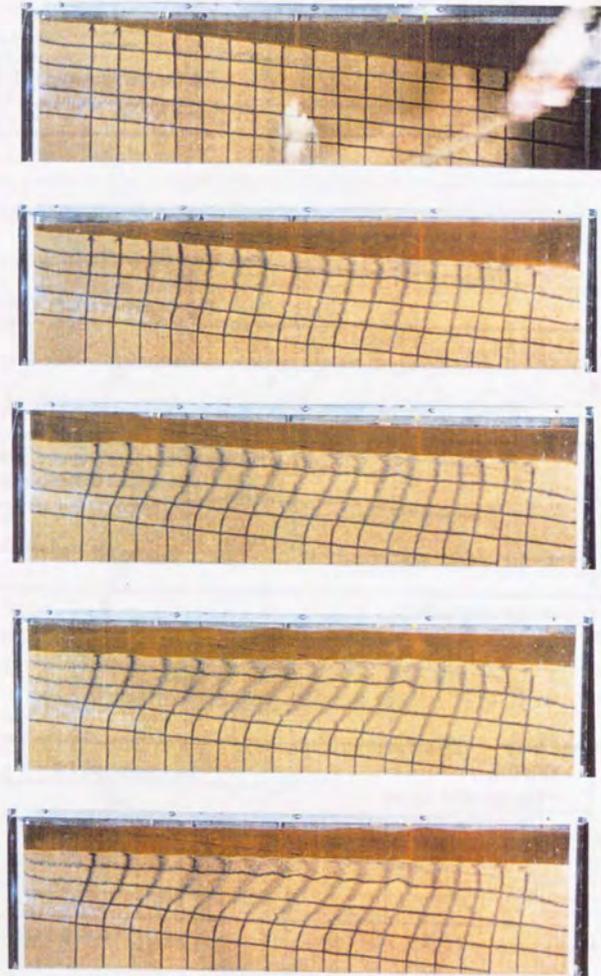


図 6.28 地盤の変形進行写真 (TEST 8)

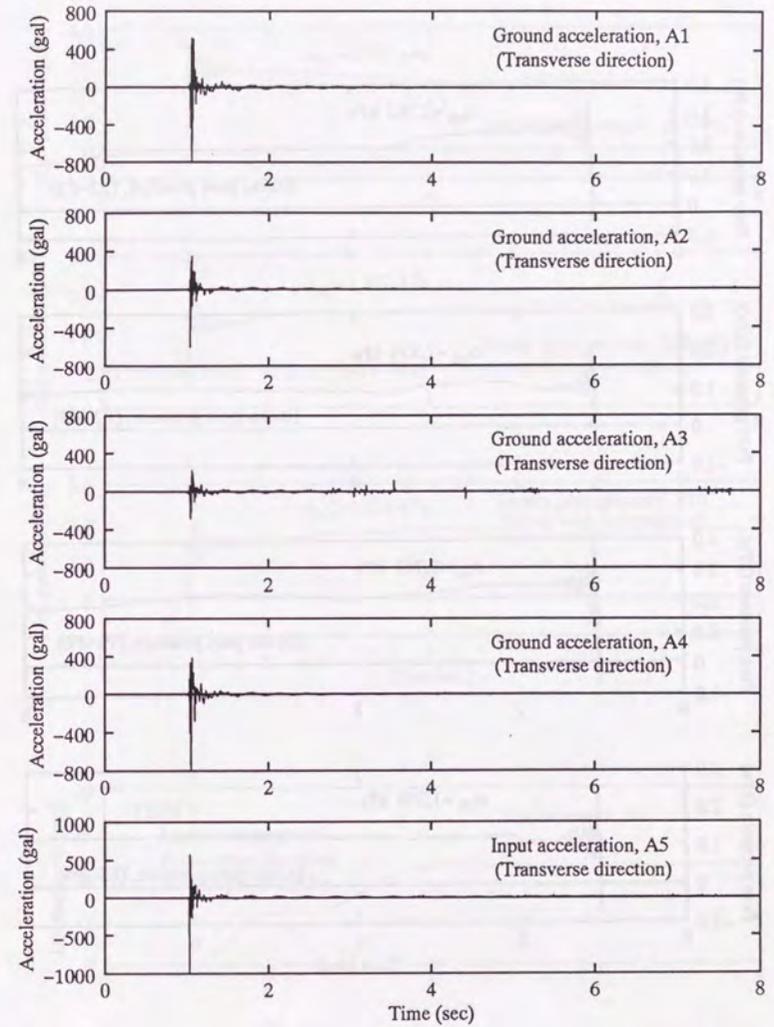


図 6.29 時刻歴測定記録 (TEST 9, その1)

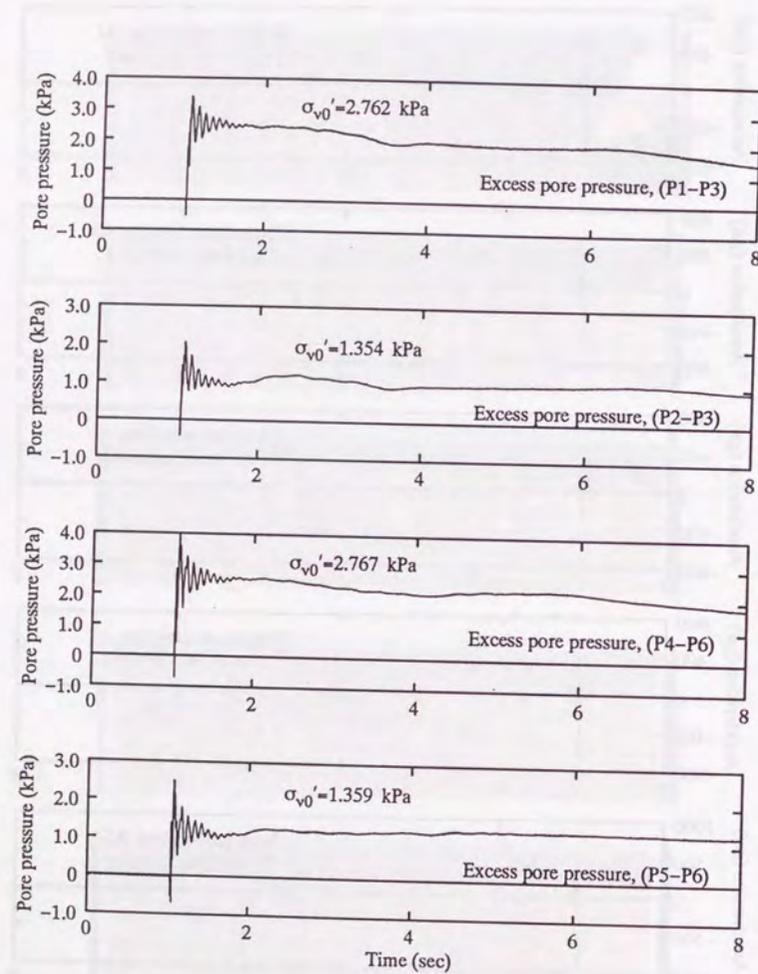


図 6.30 時刻歴測定記録 (TEST 9, その 2)

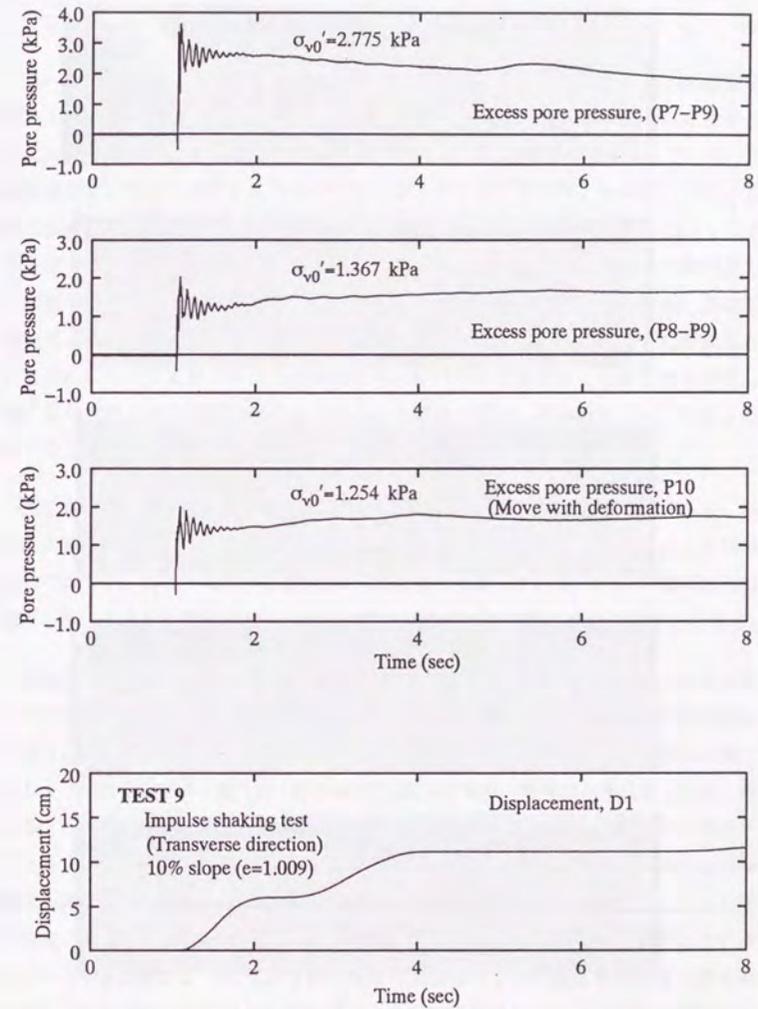


図 6.31 時刻歴測定記録 (TEST 9, その 3)

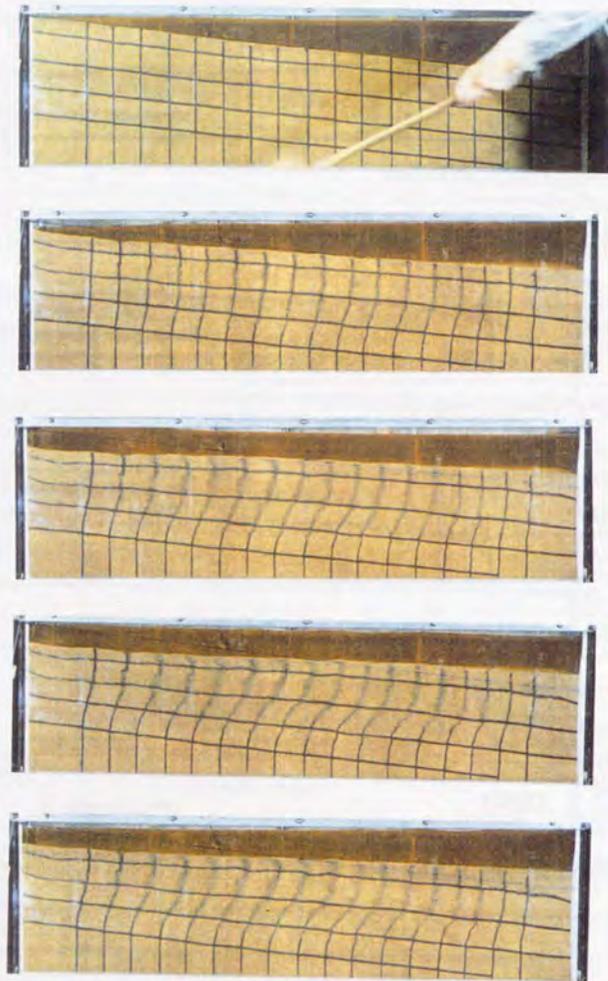


図 6.32 地盤の変形進行写真 (TEST 9)

6.1.3 振動流動実験 1

板バネ振動台で土槽長辺方向に加振を行い密度を変えて実験を行った。地盤形状は図 6.33 に示す通りである。振動の強さは一定値になっていないので表 6.3 には最大値を記しておく。加速度の伝播を見ても地盤上方に行くほど小さくなっている。また地盤間隙比が大きいほどあまり伝わらなくなっている。その他、加速度計によっては加速度が振動初期の値より小さくなるものがある。これは斜面が水平に近づくにつれて地盤も軟化しているためである。斜面上り方向 (図は斜面下り方向が正の加速度として作成してある。) に加速度は大きくできる傾向にある。これは斜面上り方向に加速度が働いたときは、慣性力とせん断変形は斜面下り方向であり流動によるせん断変形と同じ方向になる。つまりこのように動的なせん断ひずみと静的なせん断ひずみが同じ方向になり大きくせん断変形が与えられたとき強度が回復して加速度がよく伝達されるが、逆方向になると強度が軟化し加速度があまり伝わらないようである。

間隙水圧は短周期の変動があるが、これは地盤が非常にゆるいことを考えると、振動による動水圧の変動によるものがほとんどであり、ダイレタンシーの作用により変動したのではない。2, 3 サイクルで間隙水圧は急激に上昇している。P2-P3 は間隙水圧が低下しているように見えるが、これは流動により上載圧が小さくなったためである。

変位は間隙水圧が十分上昇した後進展している。振動载荷中流動変位はやはり振動しており慣性力により地盤が振動しているのがわかる。間隙比の大きい地盤では変位が最大点に達した後、少し減少している。これは変位計が地盤の動的な揺れも測定できるように流動逆方向に働く力 (約 0.49N) を持っており、地盤が水平になった後、地盤にほとんど強度がなければ引き戻されてしまうからである。しかし変位計に接続されているプレートの面積は約 60cm^2 あり、地盤が流動している間このプレートは流動地盤と一緒に動くと考えている。振動を加えた地盤では最終変位量は密度によらずほぼ一定値である。これは振動を加え続ければ地盤は水平になるまで変位することを意味している (写真参照)。つまり繰り返し载荷は流動によるせん断変形の残留強度を低下させる働きがある。これはせん断変形により残留強度を持つような土粒子構造が形成されるが、繰り返し载荷でこの構造が壊され (粒子のかみ合わせがはずれる) 強度が低下するのであろう。この実験結果から間隙比が影響を与えている測定値は流動して

いる時間である。図 6.36, 6.40, 6.44 の変位計測定記録より間隙比が大きいほど短い時間で流動が終わっている。最大変位量がほぼ同じことを考えると間隙比が大きいほど流動速度が大きいということである。

表 6.3 実験の諸データ (振動流動実験 1)

TEST No.	地盤作製方法	初期間隙比	加振方法 (方向)	加振強さ (周波数)
10	湿潤締め法	0.985	繰り返し (縦)	250gal (3Hz)
11	湿潤締め法	0.945	繰り返し (縦)	250gal (3Hz)
12	湿潤締め法	1.034	繰り返し (縦)	250gal (3Hz)

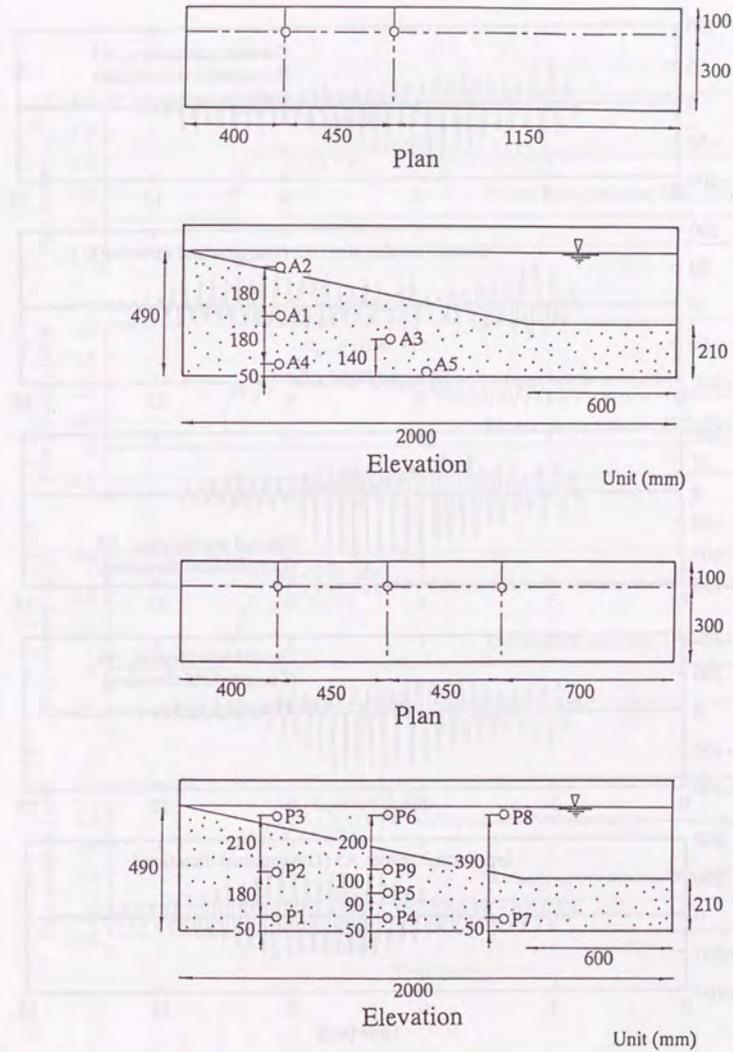


図 6.33 測定器配置図 (振動流動実験 1)

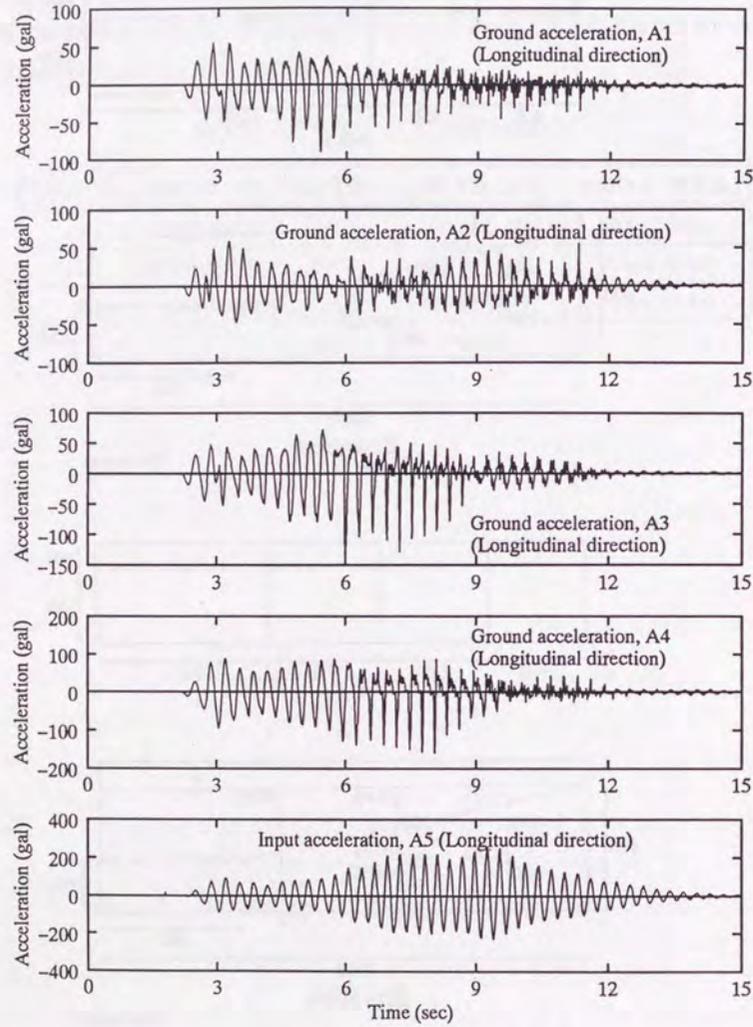


図 6.34 時刻歴測定記録 (TEST 10, その1)

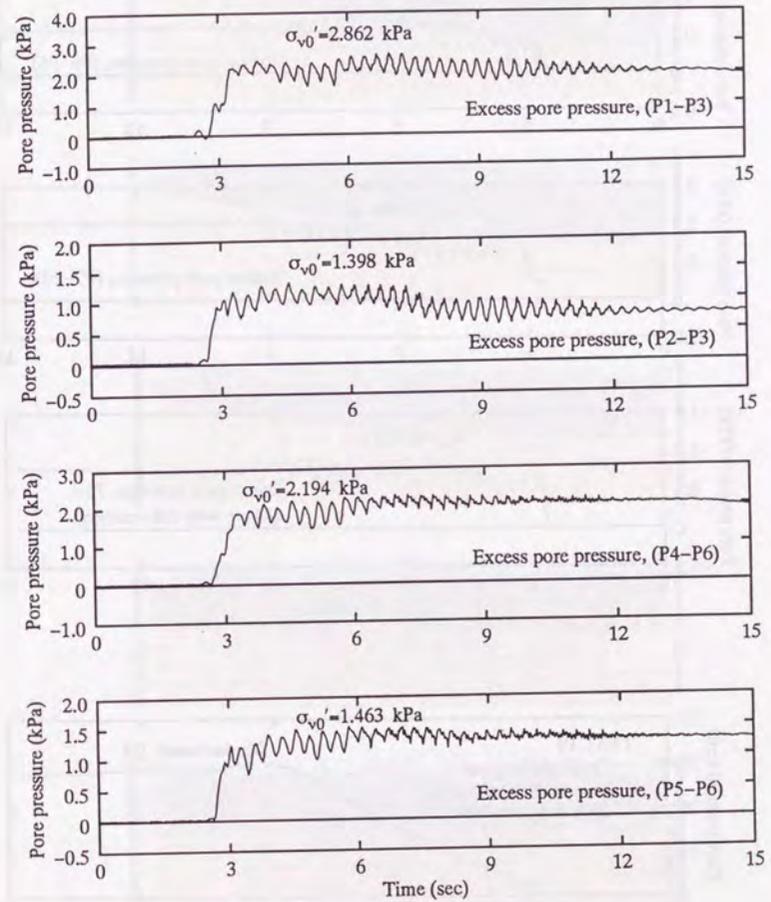


図 6.35 時刻歴測定記録 (TEST 10, その2)

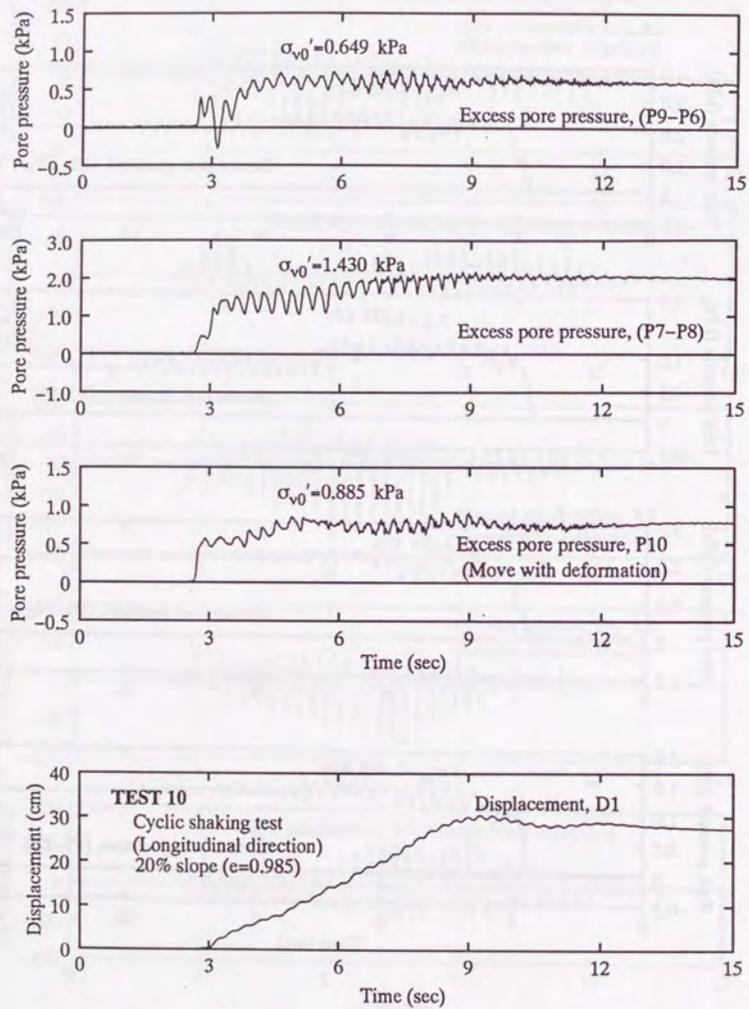


図 6.36 時刻歴測定記録 (TEST 10, その 3)

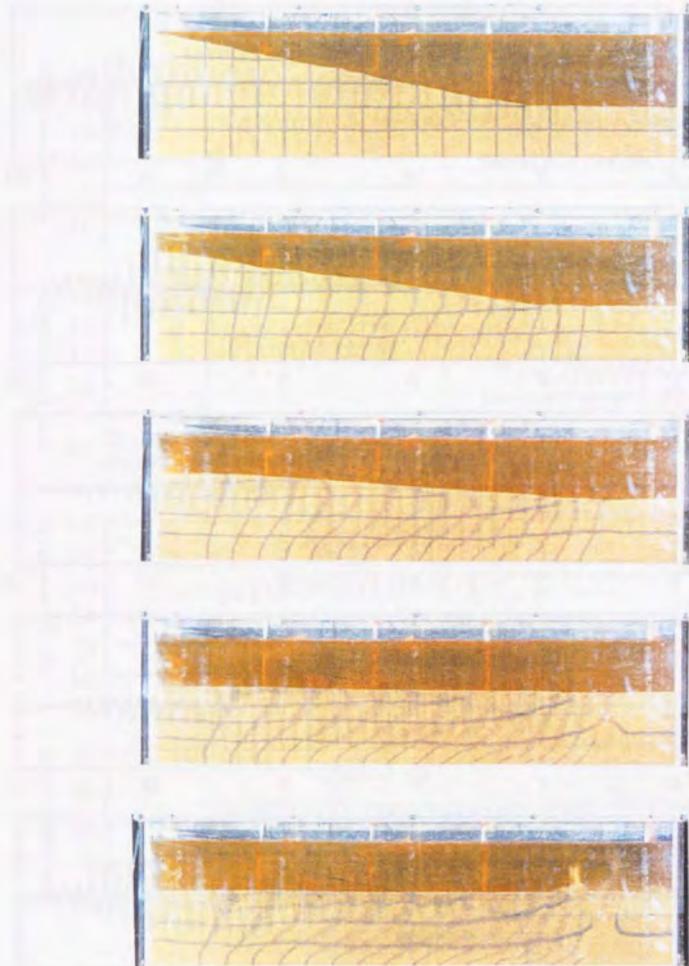


図 6.37 地盤の変形進行写真 (TEST 10)

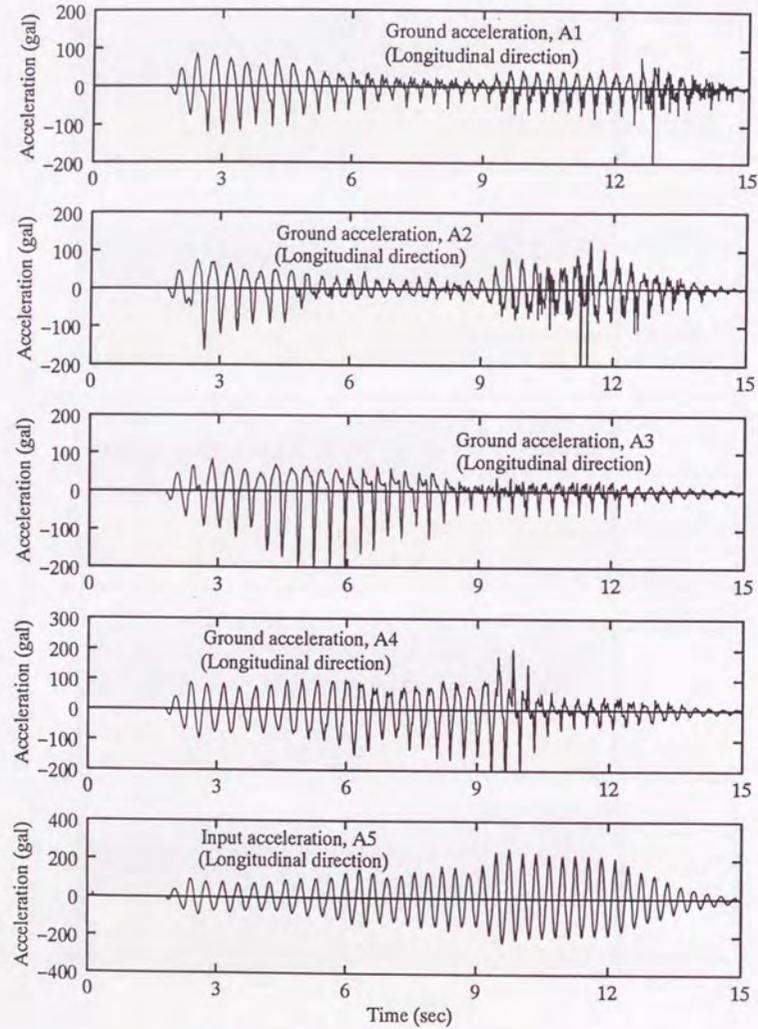


図 6.38 時刻歴測定記録 (TEST 11, その1)

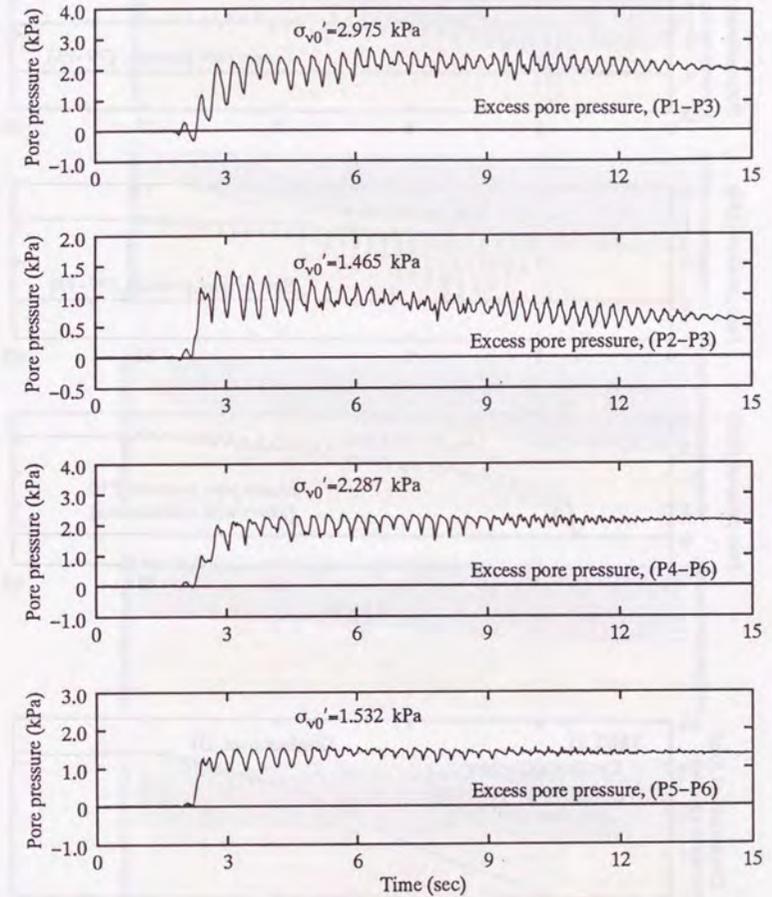


図 6.39 時刻歴測定記録 (TEST 11, その2)

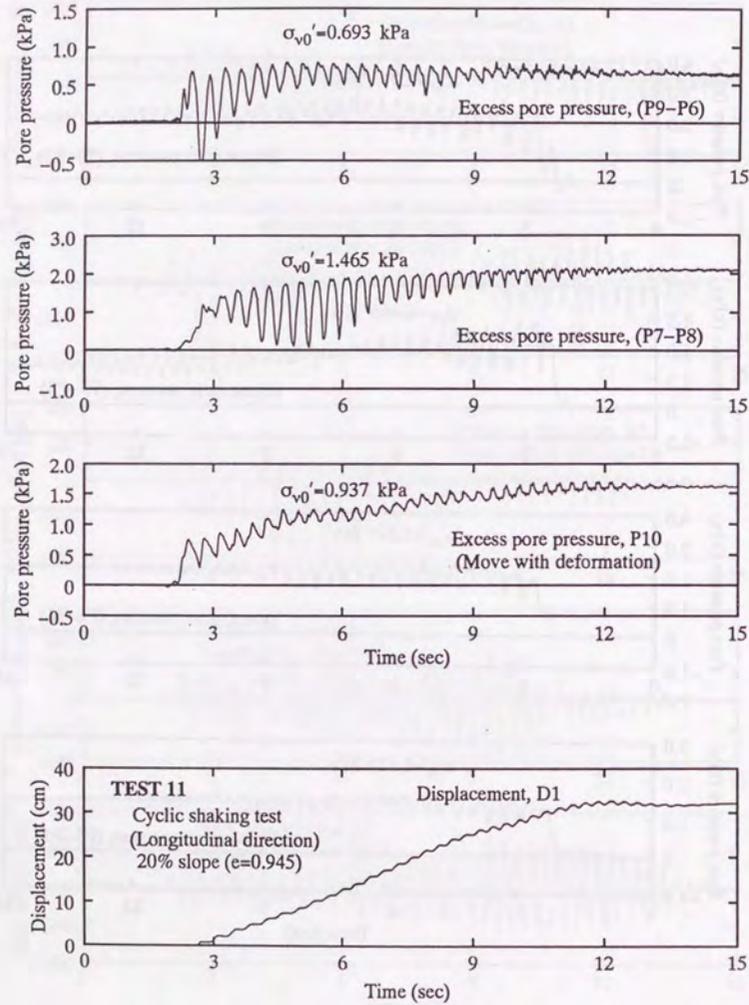


図 6.40 時刻歴測定記録 (TEST 11, その3)

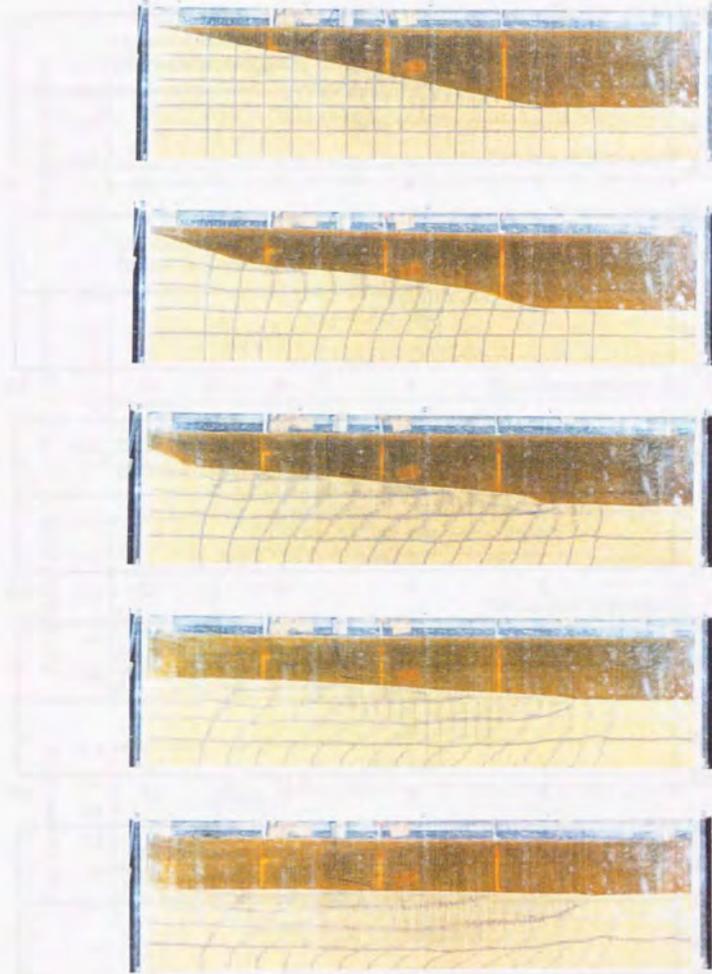


図 6.41 地盤の変形進行写真 (TEST 11)

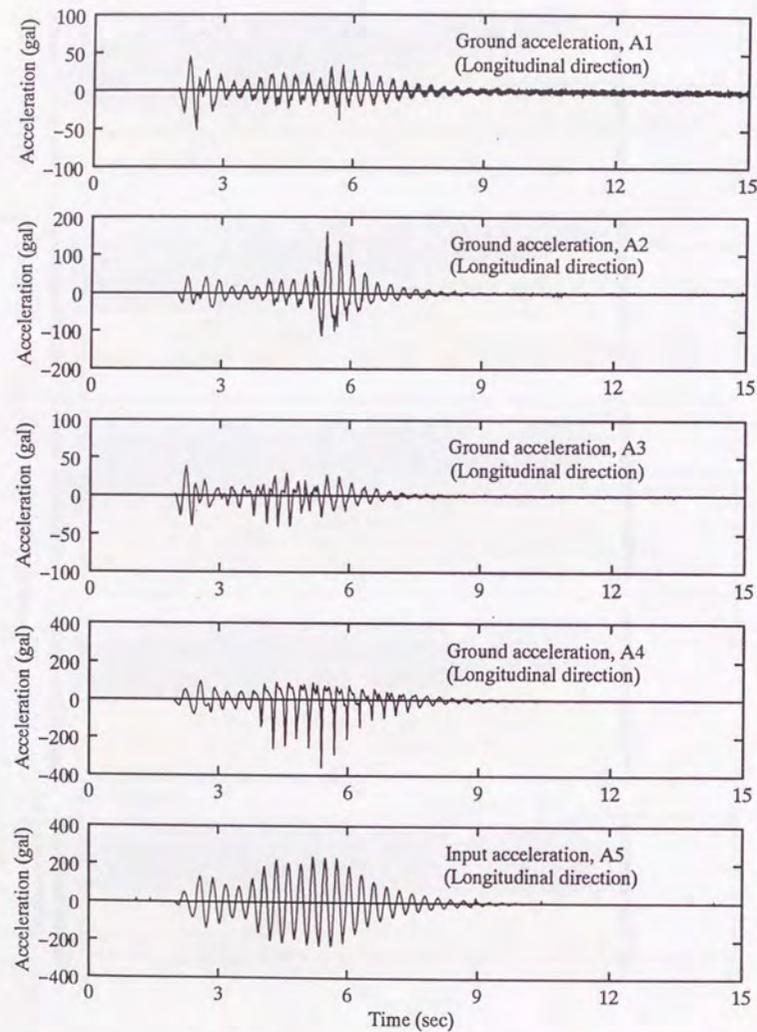


図 6.42 時刻歴測定記録 (TEST 12, その1)

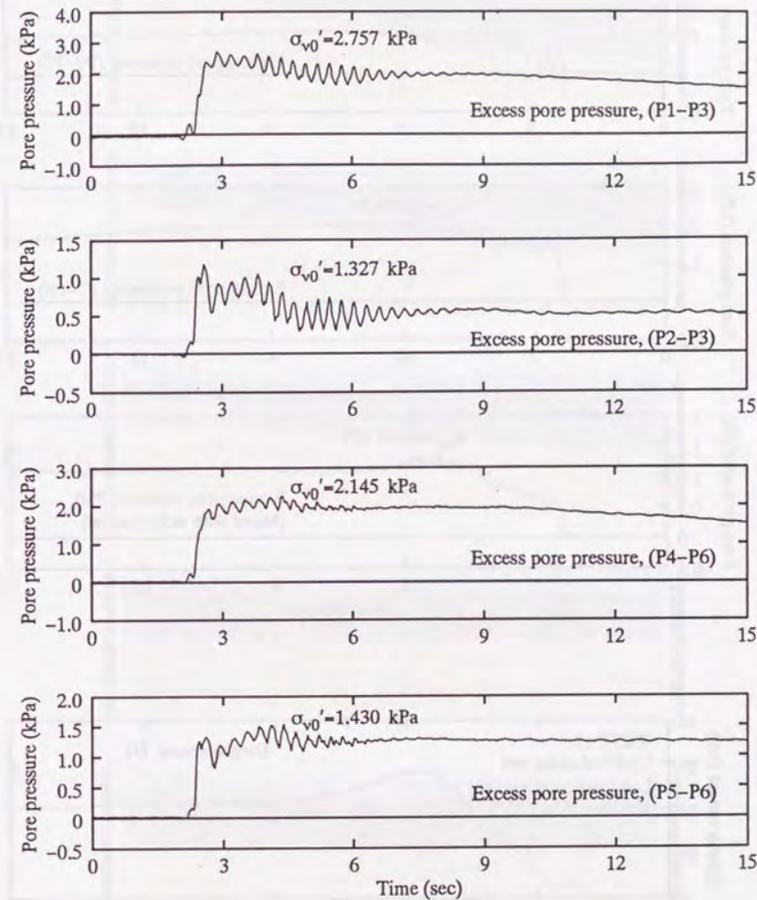


図 6.43 時刻歴測定記録 (TEST 12, その2)

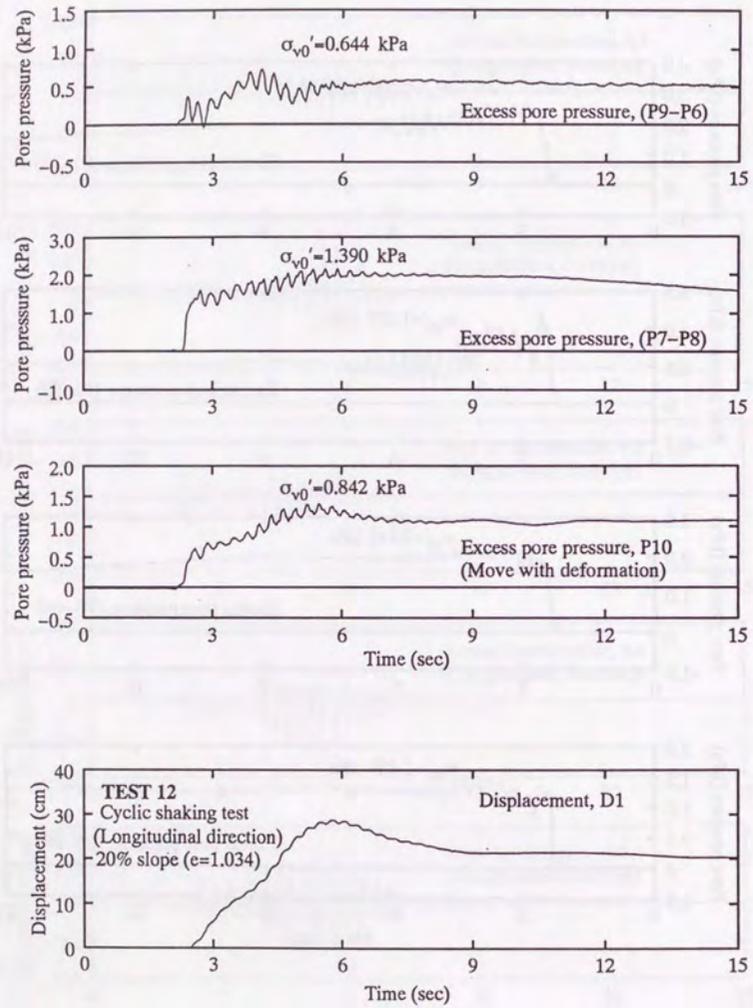


図 6.44 時刻歴測定記録 (TEST 12, その3)

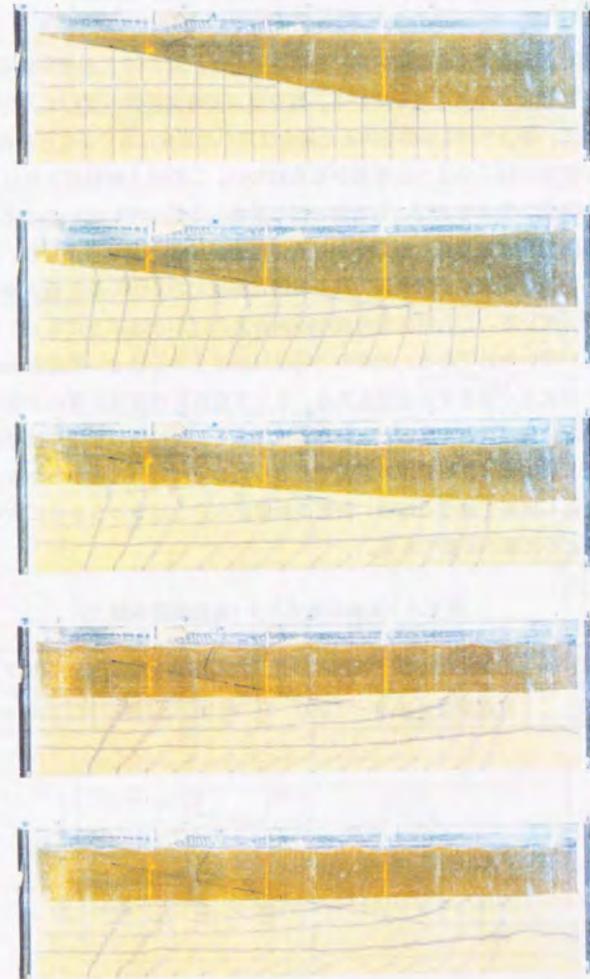


図 6.45 地盤の変形進行写真 (TEST 12)

6.1.4 振動流動実験 2

板バネ振動台で土槽短辺方向に振動を加えた。図 6.46 に地盤形状を示す。地表面近くほど加速度が小さくなっている。地中加速度時刻歴は一貫して入力波と同様の形をしている。長辺方向に振動を加えた場合は地中加速度は後半かなり乱れてきたが、短辺方向の载荷ではこのような挙動が見られない。これは土槽短辺方向は 40cm しかなく側壁が地盤の動きを妨げ、入力波と同じ動きしか許していないのである。したがって土槽短辺方向に繰り返し振動をかけるのは自然地盤とかなり異なり、深いところが液化し難い。間隙水圧は長辺方向の実験と同様である。しかし最大変位量はかなり大きくなっている。これは流動地盤の写真を見ればわかるように地盤下部ではあまり変形していないためである。地盤の上部だけが変位する場合、地盤が完全に水平になるためには大きく変形する必要がある。そして変位計は液化化層の上部に設置されているため変位量が大きくなったというわけである。変位計の記録には動的成分は現れておらず、剛体すべりモデルの原理で変形したのではないことがわかる。土槽短辺方向に繰り返し加振を加えるには、側壁の影響が小さくなるようさらに大きな土槽を使用するなどの措置が必要である。

表 6.4 実験の諸データ (振動流動実験 2)

TEST No.	地盤作製方法	初期間隙比	加振方法 (方向)	加振強さ (周波数)
13	湿潤締め法	1.000	繰り返し (横)	250gal (3Hz)

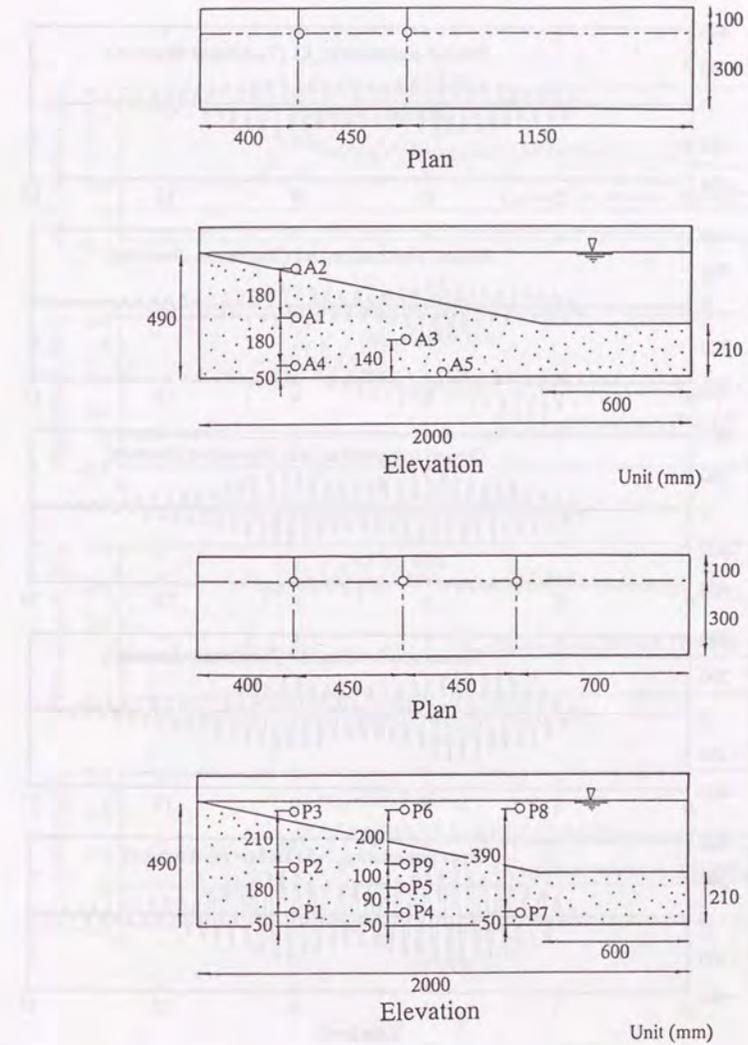


図 6.46 測定器配置図 (振動流動実験, 2)

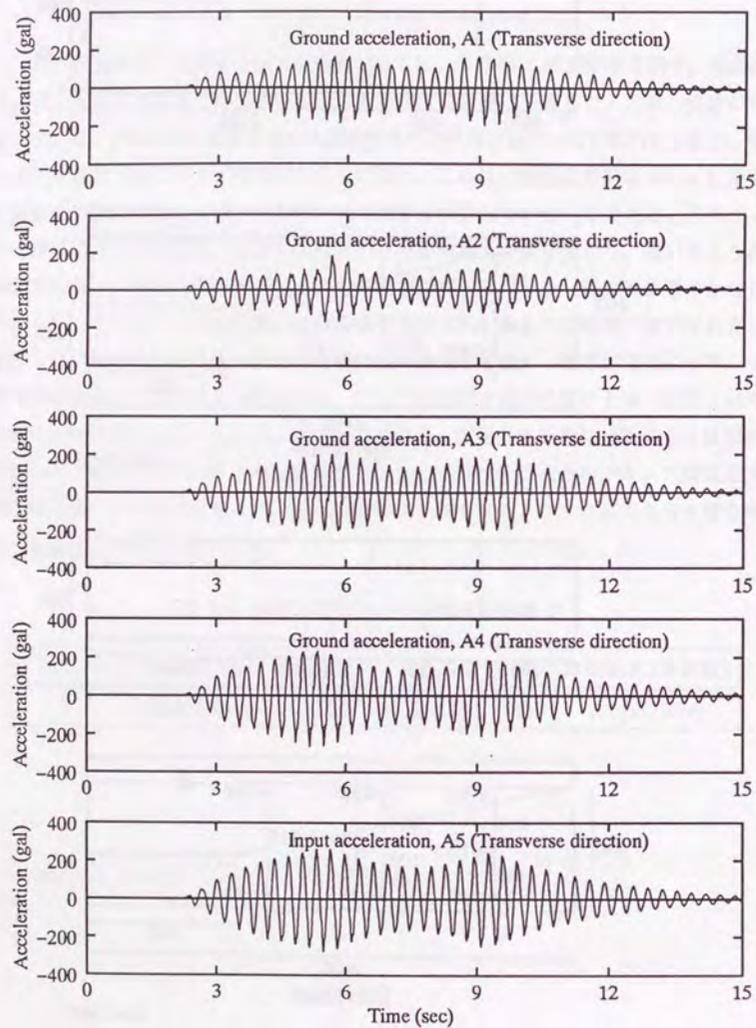


図 6.47 時刻歴測定記録 (TEST 13, その1)

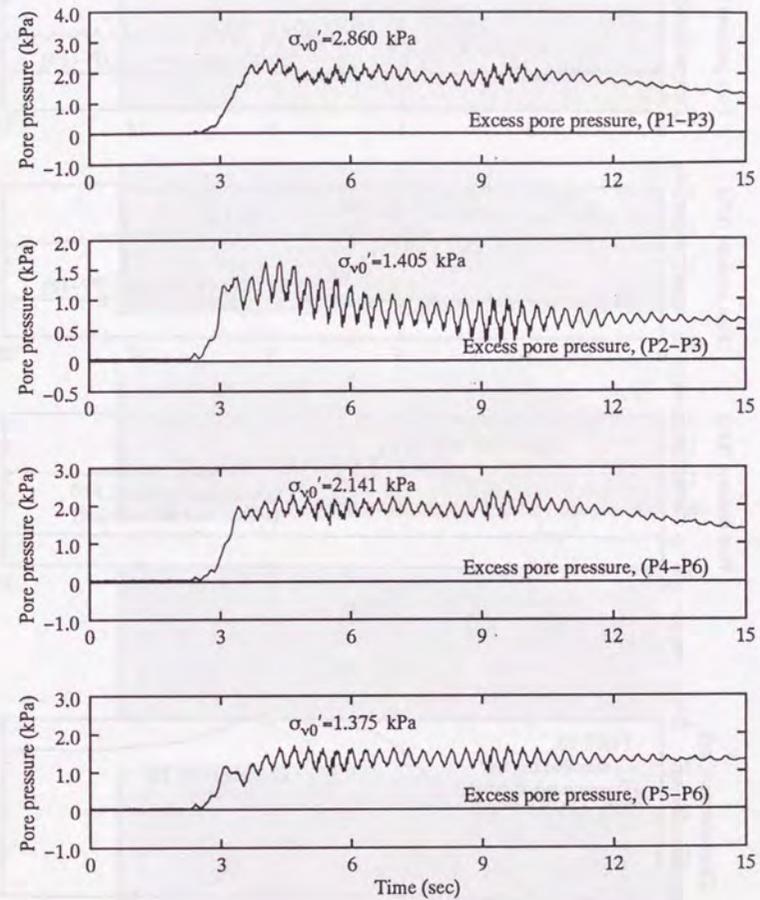


図 6.48 時刻歴測定記録 (TEST 13, その2)

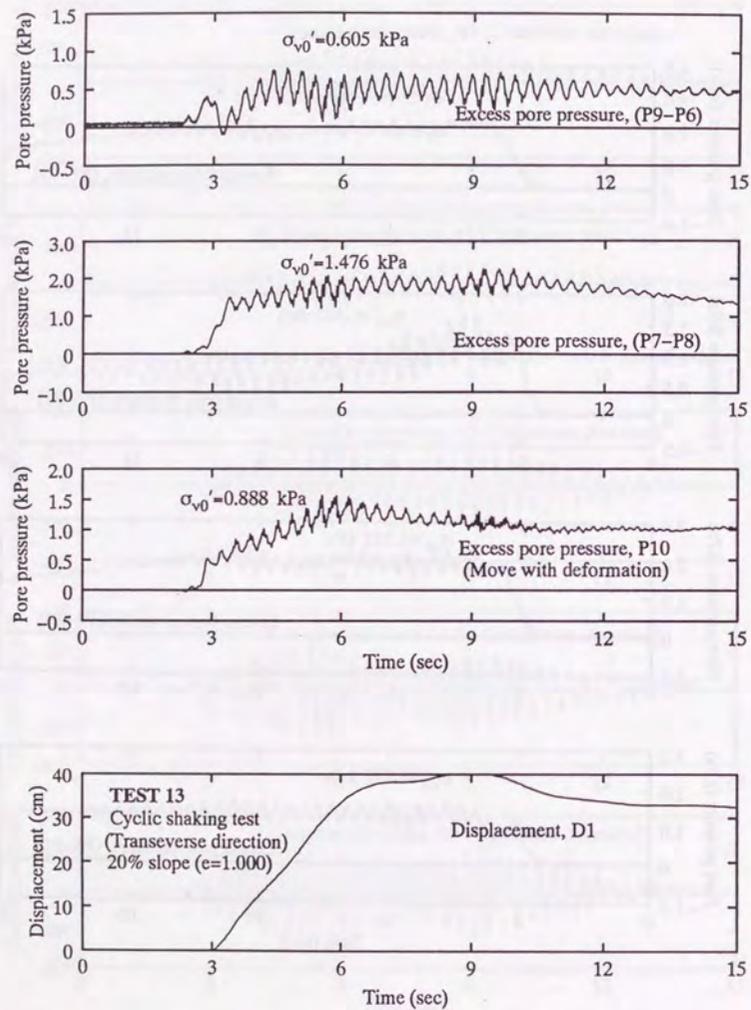


図 6.49 時刻歴測定記録 (TEST 13, その 3)

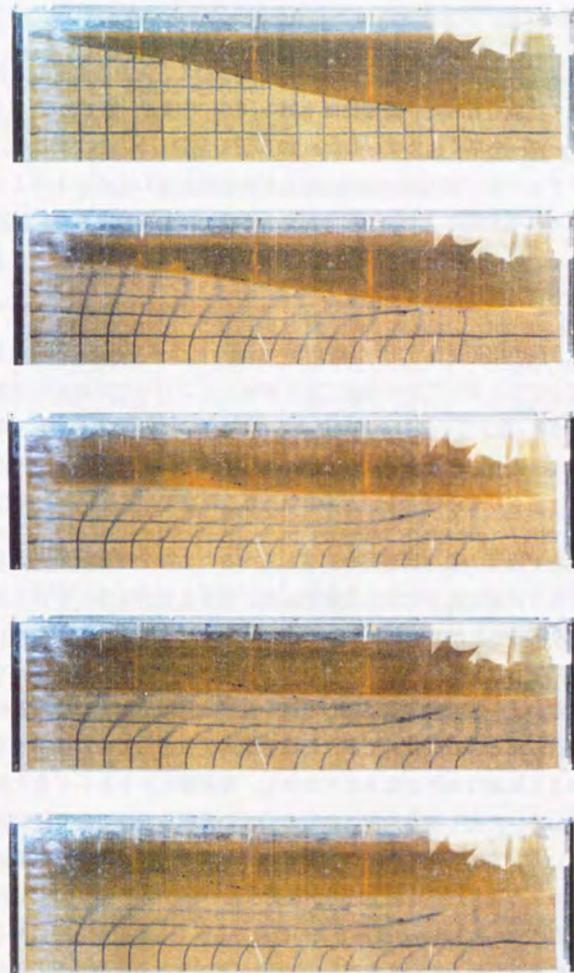


図 6.50 地盤の変形進行写真 (TEST 13)

6.1.5 振動流動実験 3

電気油圧式振動台で土槽長辺方向に振動を加え、入力加速度の大きさと周波数を変化させて実験を行った。間隙比は 0.91 ~ 0.94 でほぼ一定である。TEST 16 はデータレコーダーを早く止めすぎたため 10 秒弱の記録しかとれていない。加速度は液状化を起こすと小さくなるが、中にはだんだん増加しているものもある(例えば図 6.79 の A2)。これは流動により加速度計が大きく傾いてしまい誤差を生じたためであると考えている。5.2.3 小節で述べたような補正は施してあるが、あまり傾きが大きくなってしまうと信頼性は薄れてしまう。

間隙水圧の記録には 5.2.3 小節で述べたようにフィルターをかけてある。この操作で動水圧の変動を除いたため流動によるダイレタンシーで間隙水圧が消散しているのがよくわかる(動水圧の変動が流動によるダイレタンシーより短周期であるため、動水圧の変動のみ取り除ける)。P9-P6 で最も顕著に間隙水圧の低下再上昇がよく現れている。これは最もひずみの大きいところでありこれまでの実験結果と同じ傾向である。

本実験では入力波の周波数の影響も調べるため高い周波数の入力も行った。変位計は巻き取り式変位計を使用し流動逆方向に巻きとる力を持たせることにより地盤の揺れも読みとることができるようになっている。しかし非接触型ではないので高周波の揺れに追随できない。したがって振動による地盤の揺れをこの変位計で読みとるのは得策ではない。一方流動変位に関しては十分に地盤に追随して読みとれるため高周波の入力を行ったときは変位計で得た記録を流動変位としてのみ使用するのがよい。振動が加わると地盤は水平になるまで流動し、周波数にかかわらず最大変位はほぼ同じとなっている。ただし流動速度は振動の強さの影響を受けており振動が強いほど速く流動している。まず考えられるのは慣性力の影響である。つまり摩擦床上の剛体すべりモデルのようにある一定以上の力が載荷されている間のみ動くという考え方である。しかし TEST 13 より斜面と直角方向の載荷でもって地盤が水平になるまで変位させることができるため(図 6.49 参照)、慣性力が直接すべり変位を起こさせているわけではない。つまり慣性力のみでは液状化による流動を説明できない。そこで、強い振動を与えることで地盤が大きく軟化してしまうと考えている。これは液状化問題でも、加速度の大きさによりその程度を判定する F_L 値 [25] が用いられるように、流動問題で

も振動の強さにより土そのものの特性が変化し流動速度に影響を与えるのである。この密度の地盤では入力振動が大きいほど地盤が軟化し、流動速度が大きくなる。今回は密度を一定に保って実験を行ったが、振動流動する地盤は密度と入力波によって影響を受けており、これらの関係を調べることは有用である。入力波の周波数の影響やさらに定量的評価については第 7 章で行う。

表 6.5 実験の諸データ (振動流動実験 3)

TEST No.	地盤作製方法	初期間隙比	加振方法 (方向)	加振強さ (周波数)
14	湿潤締固め法	0.935	繰り返し (縦)	180gal (4Hz)
15	湿潤締固め法	0.918	繰り返し (縦)	280gal (4Hz)
16	湿潤締固め法	0.938	繰り返し (縦)	470gal (4Hz)
17	湿潤締固め法	0.906	繰り返し (縦)	570gal (4Hz)
18	湿潤締固め法	0.918	繰り返し (縦)	150gal (8Hz)
19	湿潤締固め法	0.940	繰り返し (縦)	320gal (8Hz)
20	湿潤締固め法	0.935	繰り返し (縦)	90gal (16Hz)
21	湿潤締固め法	0.931	繰り返し (縦)	320gal (16Hz)
22	湿潤締固め法	0.941	繰り返し (縦)	510gal (8Hz)
23	湿潤締固め法	0.935	繰り返し (縦)	250gal (16Hz)

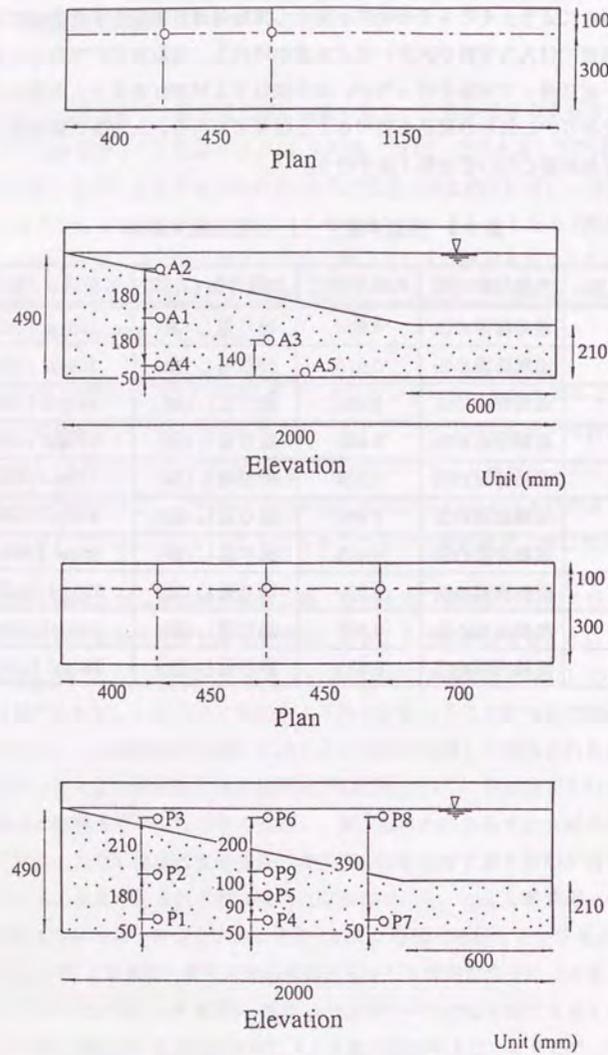


図 6.51 測定器配置図 (振動流動実験 3)

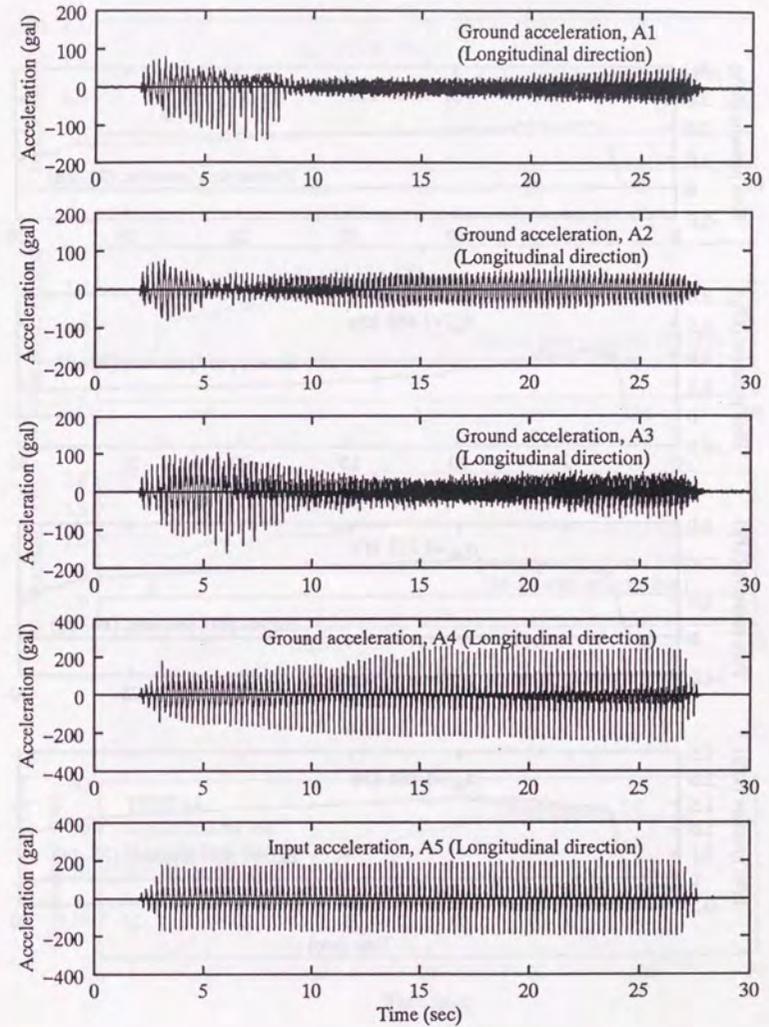


図 6.52 時刻歴測定記録 (TEST 14, その1)

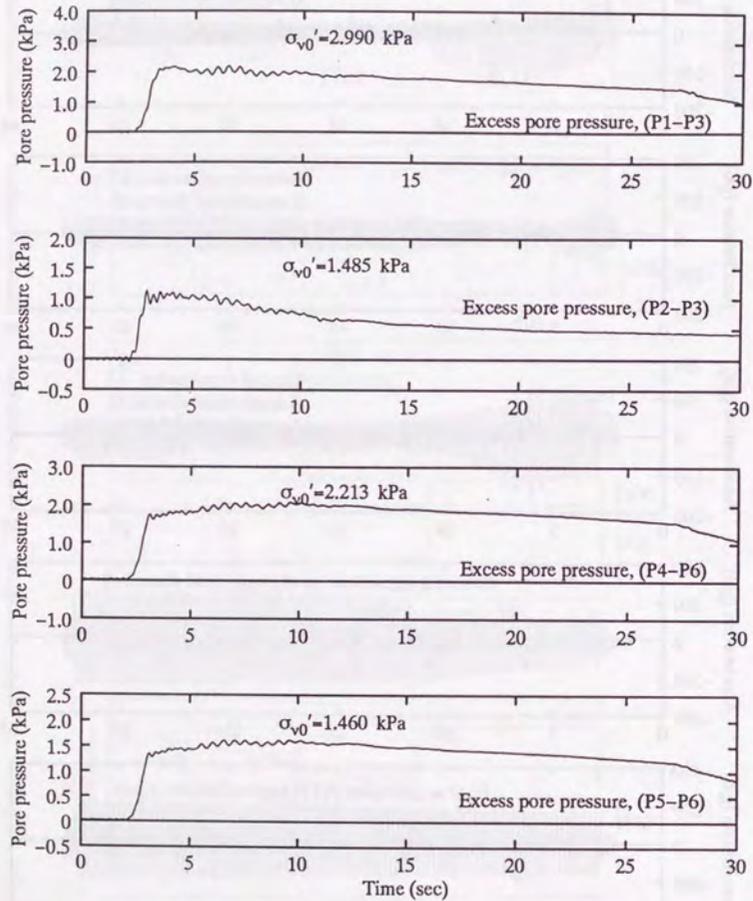


図 6.53 時刻歴測定記録 (TEST 14, その 2)

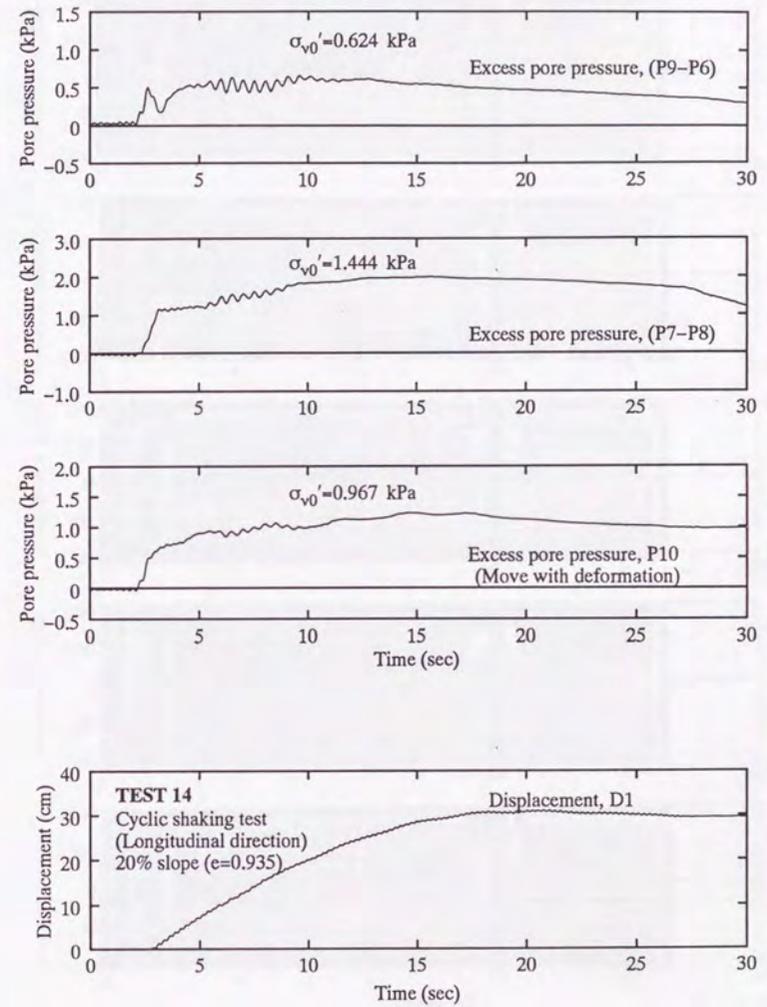


図 6.54 時刻歴測定記録 (TEST 14, その 3)

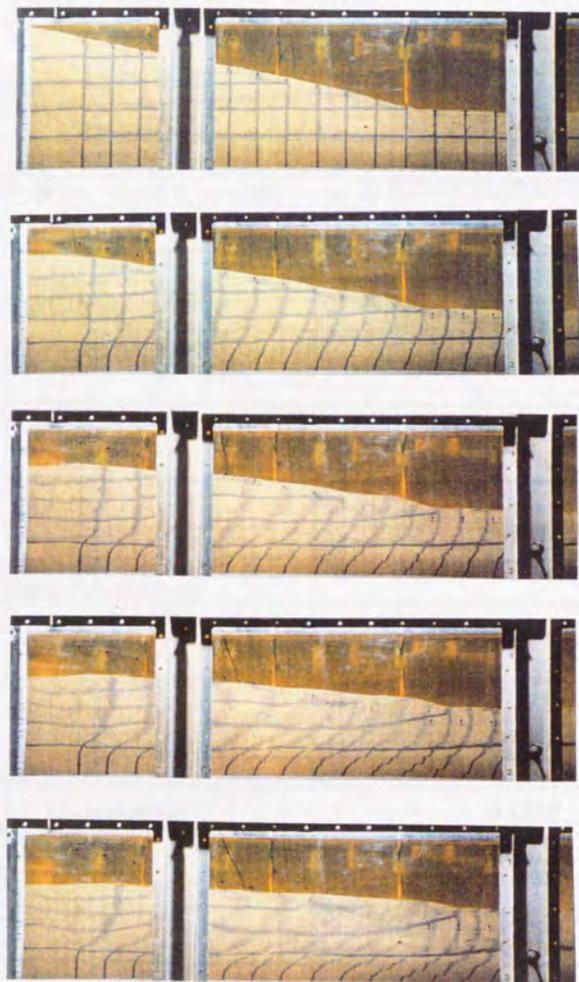


図 6.55 地盤の変形進行写真 (TEST 14)

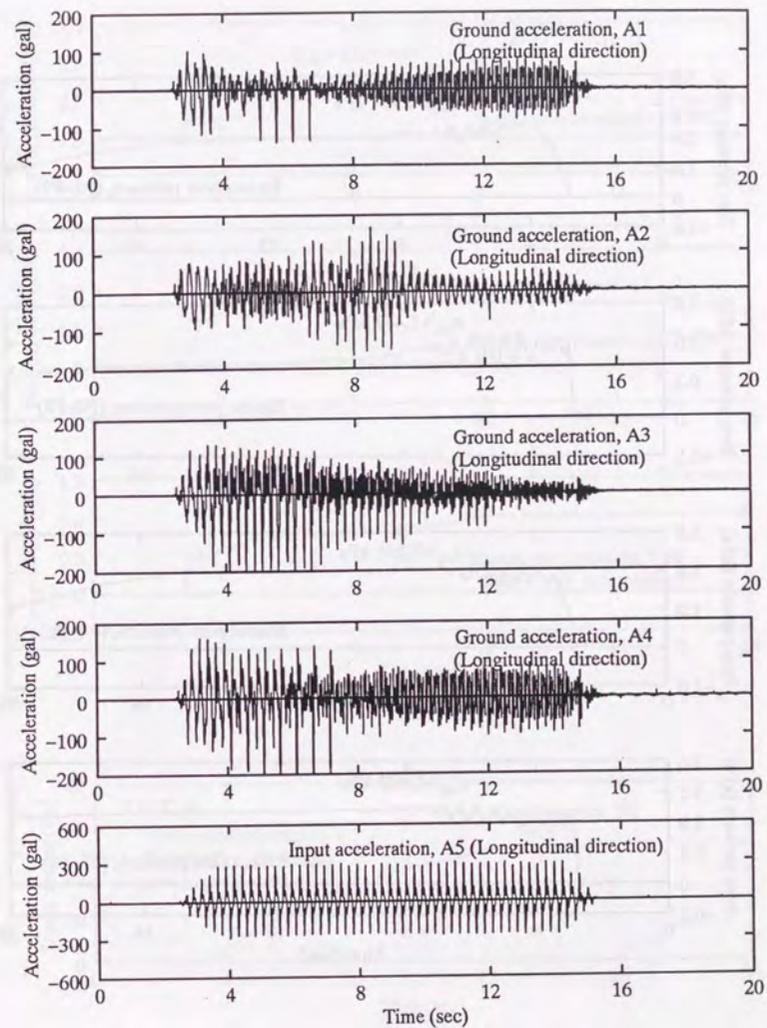


図 6.56 時刻歴測定記録 (TEST 15, その1)

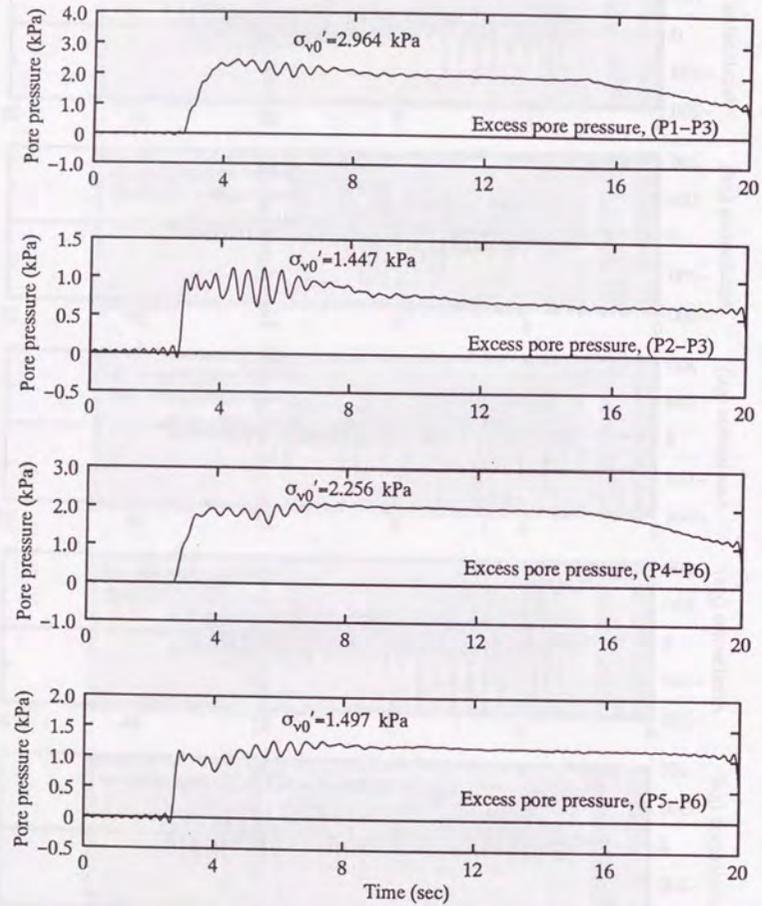


図 6.57 時刻歴測定記録 (TEST 15, その 2)

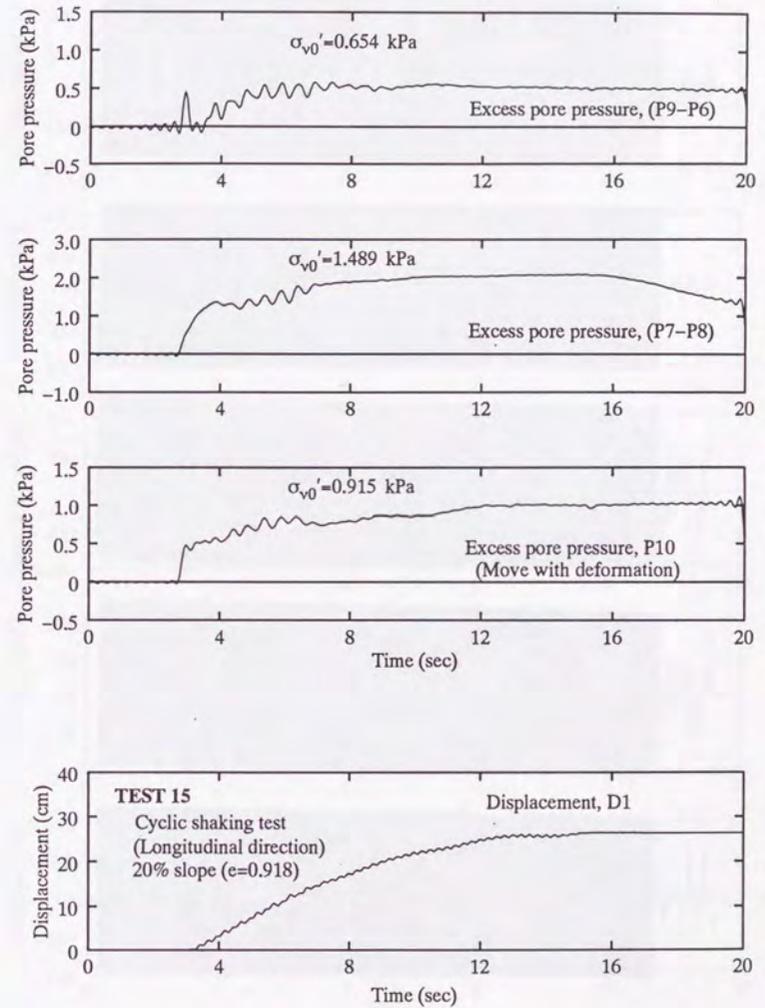


図 6.58 時刻歴測定記録 (TEST 15, その 3)

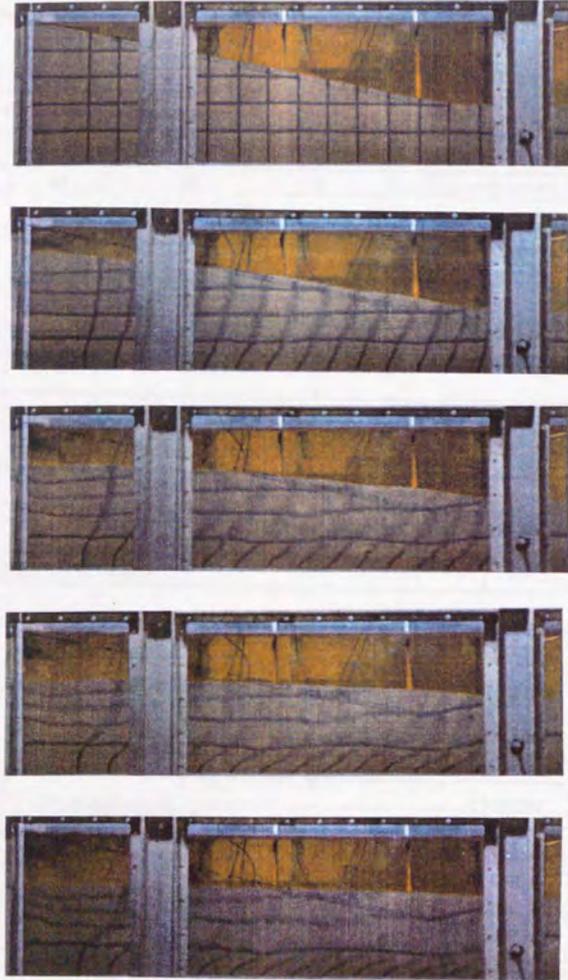


図 6.59 地盤の変形進行写真 (TEST 15)

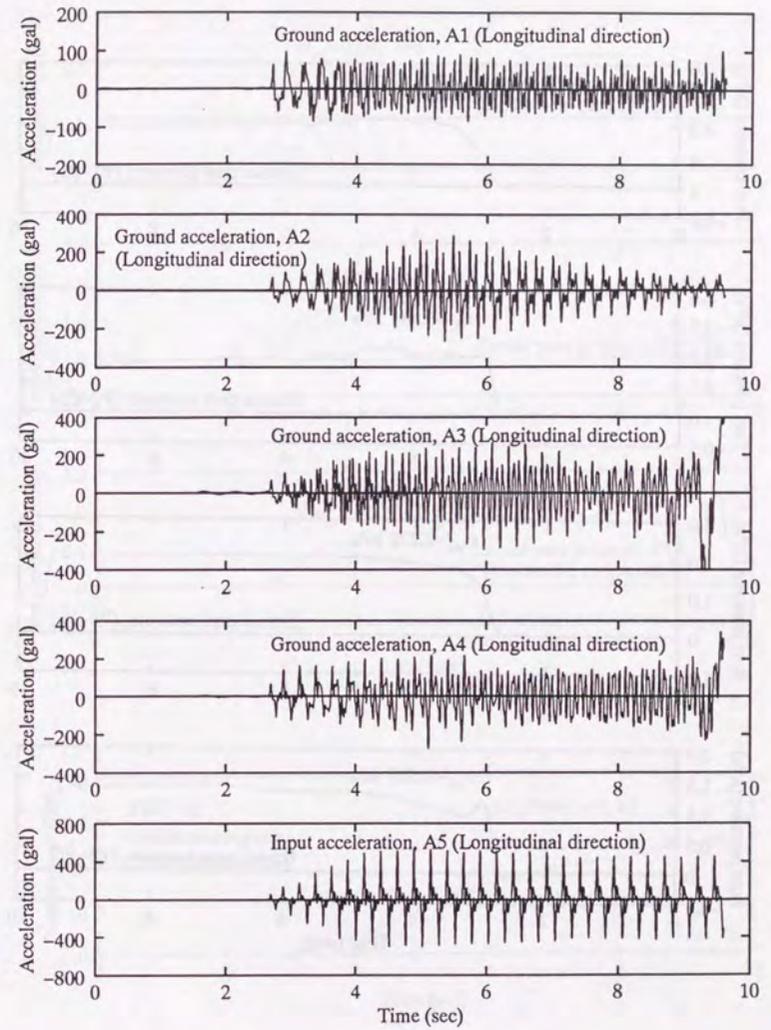


図 6.60 時刻歴測定記録 (TEST 16, その1)

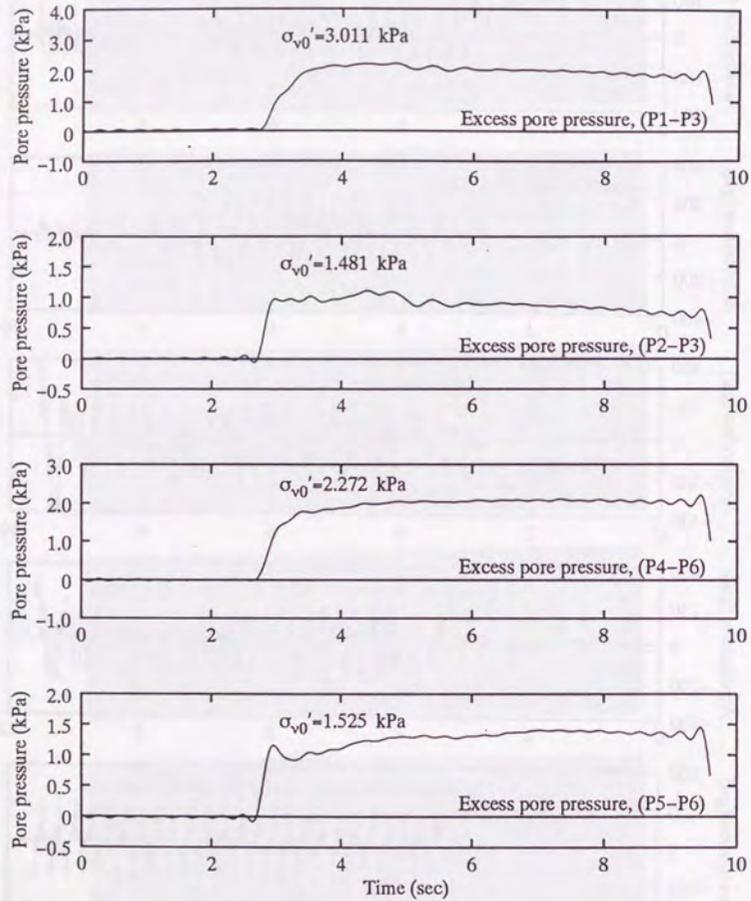


図 6.61 時刻歴測定記録 (TEST 16, その2)

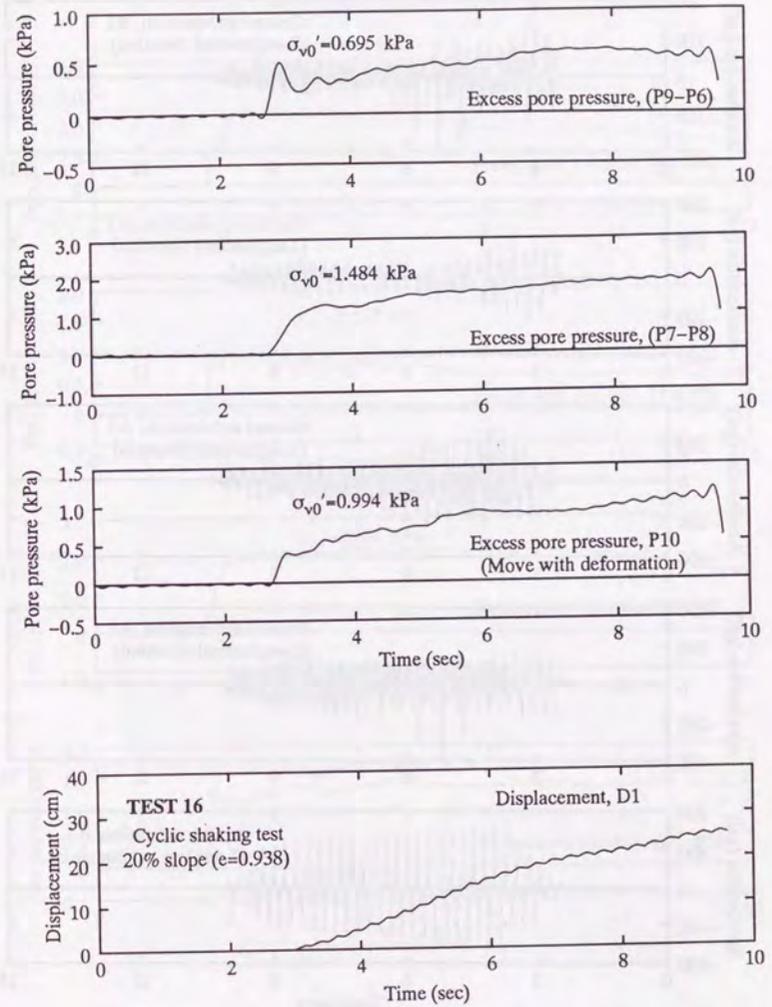


図 6.62 時刻歴測定記録 (TEST 16, その3)

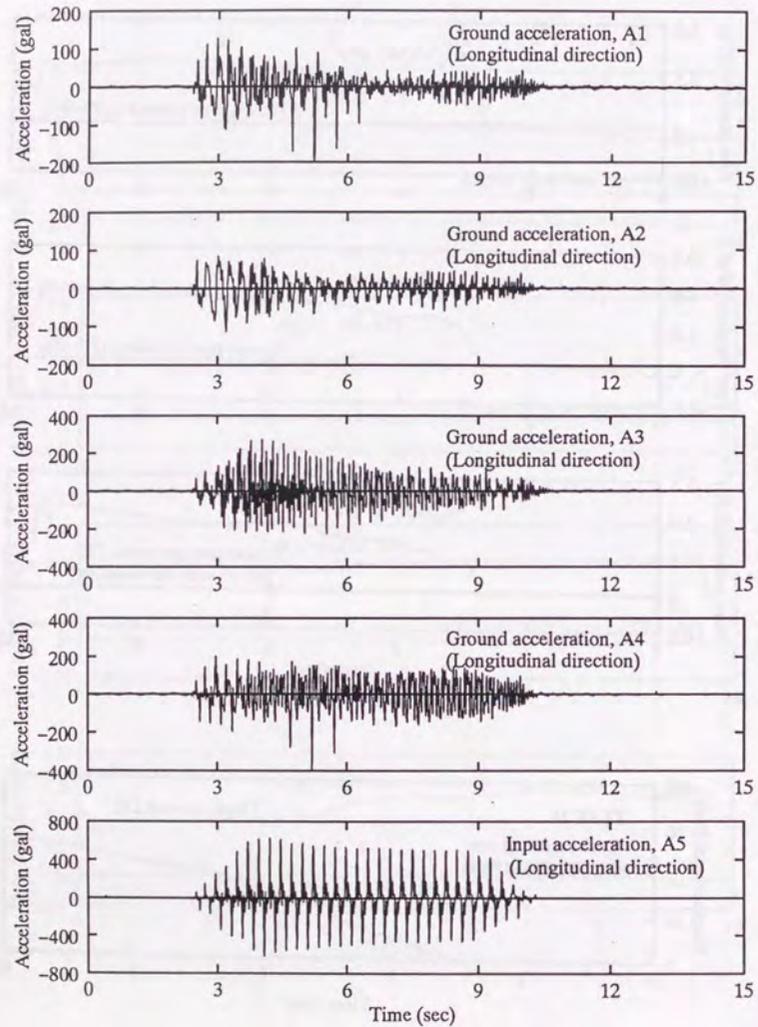


図 6.63 時刻歴測定記録 (TEST 17, その1)

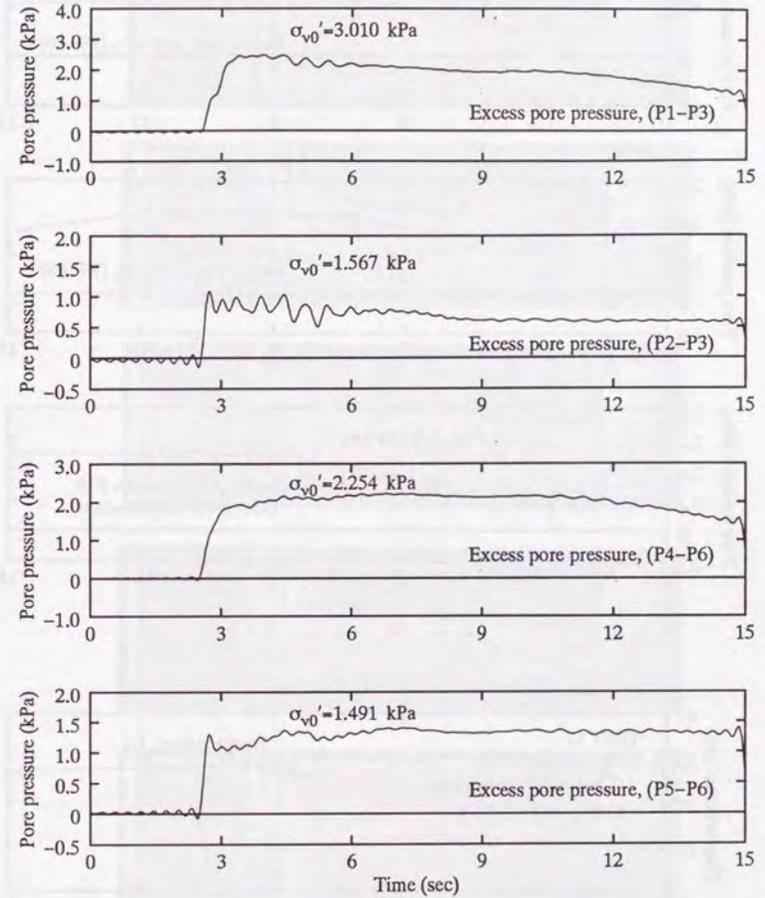


図 6.64 時刻歴測定記録 (TEST 17, その2)

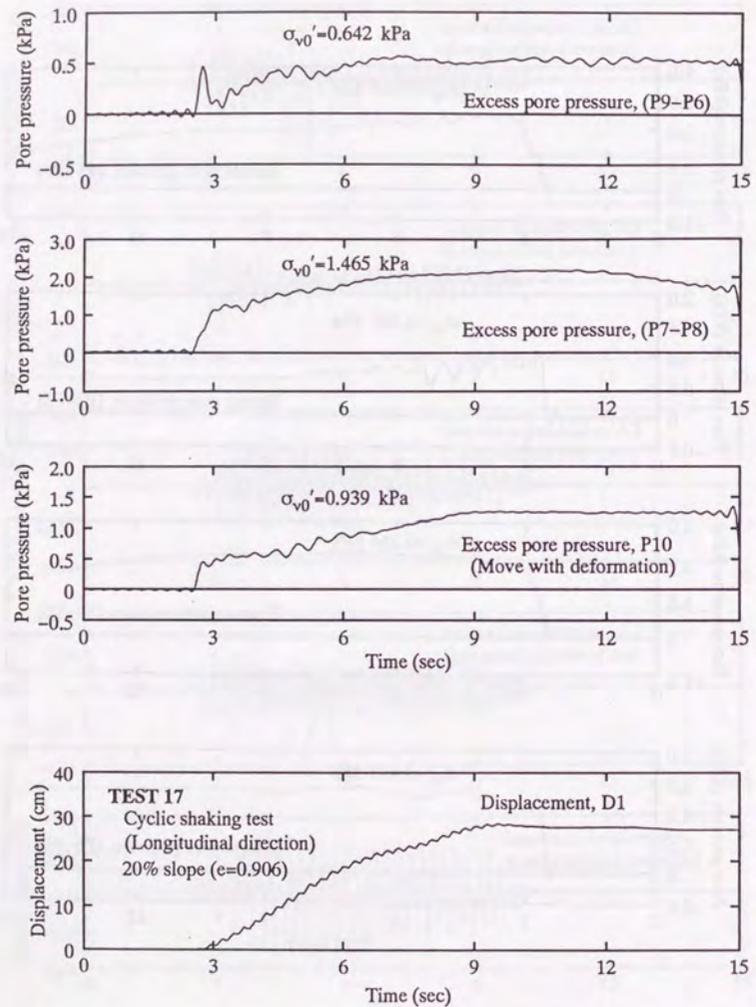


図 6.65 時刻歴測定記録 (TEST 17, その 3)

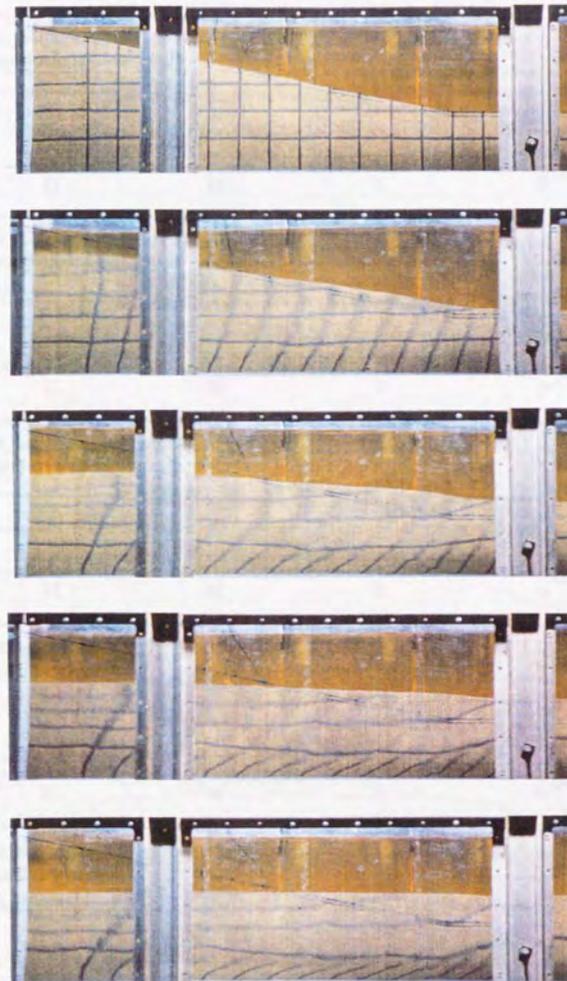


図 6.66 地盤の変形進行写真 (TEST 17)

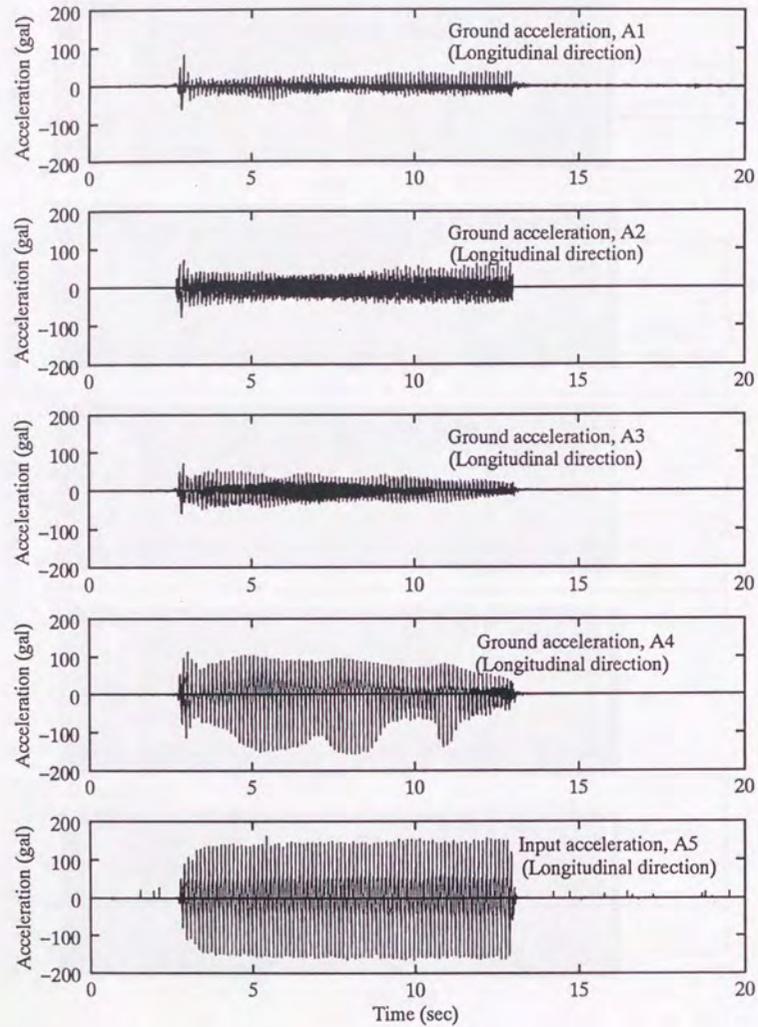


図 6.67 時刻歴測定記録 (TEST 18, その1)

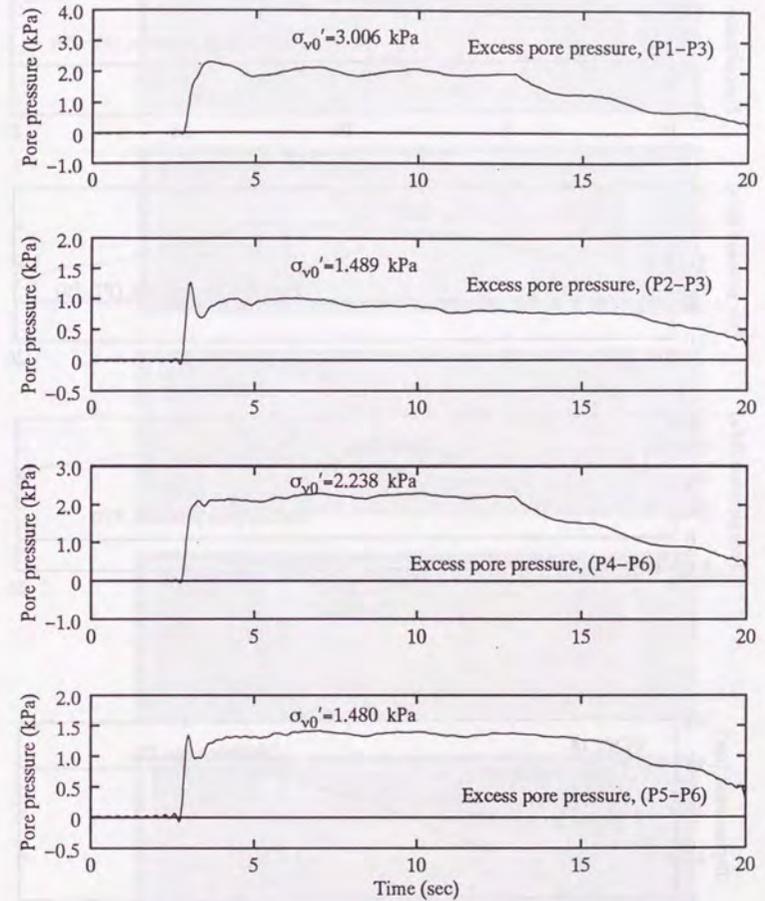


図 6.68 時刻歴測定記録 (TEST 18, その2)

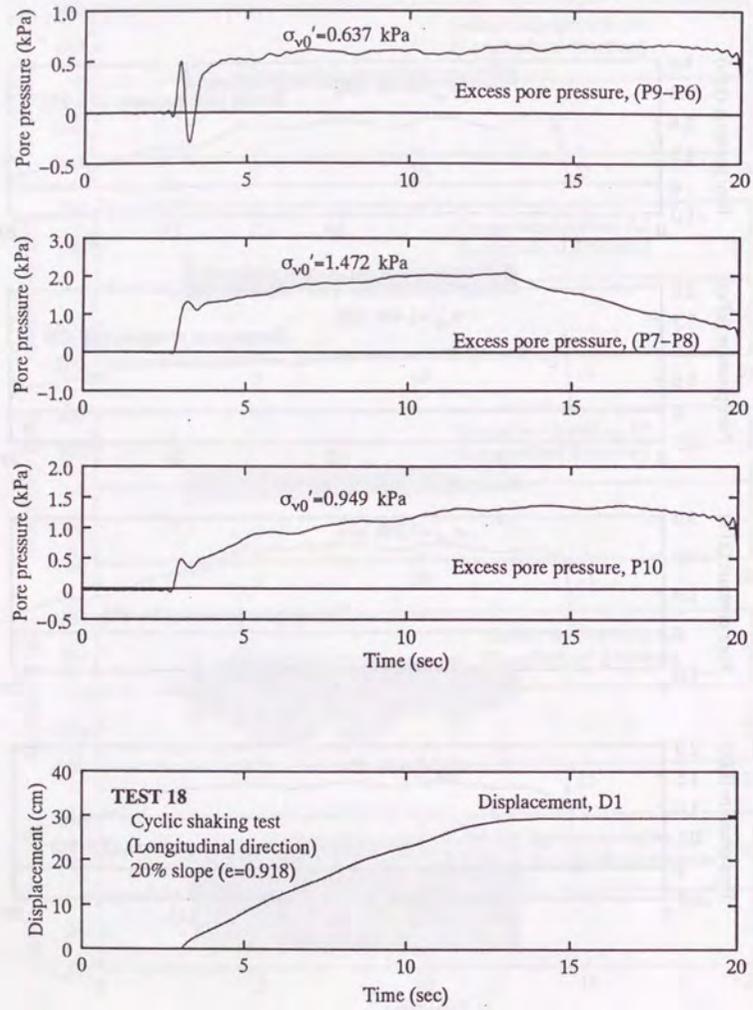


図 6.69 時刻歴測定記録 (TEST 18, その3)



図 6.70 地盤の変形進行写真 (TEST 18)

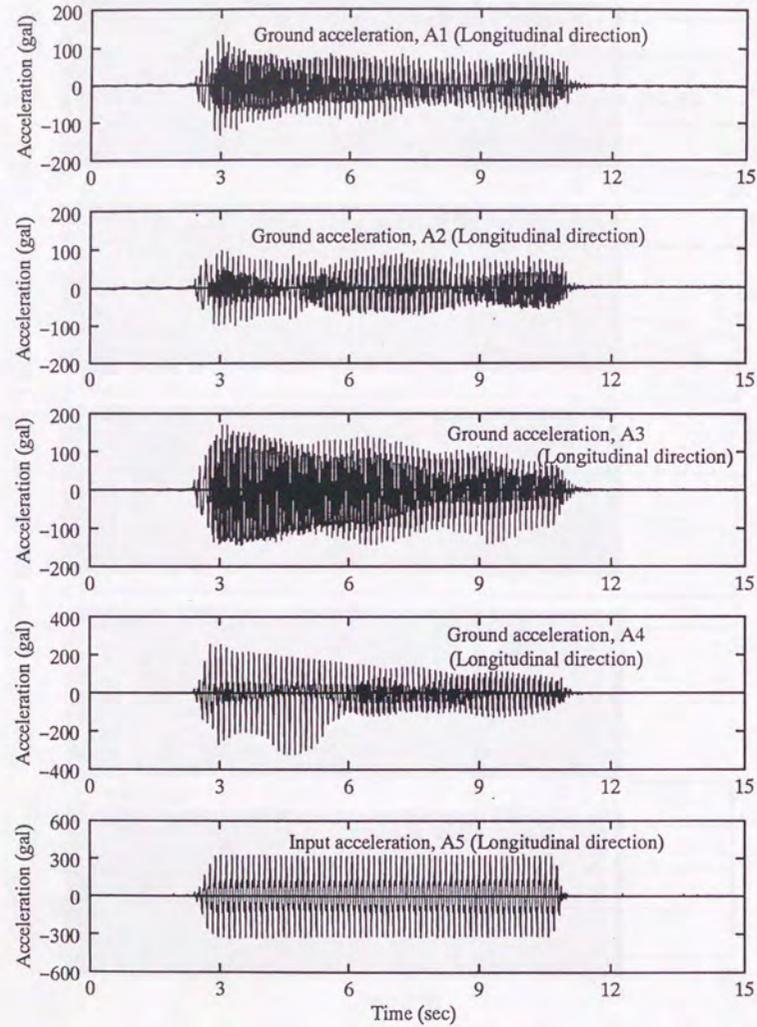


図 6.71 時刻歴測定記録 (TEST 19, その1)

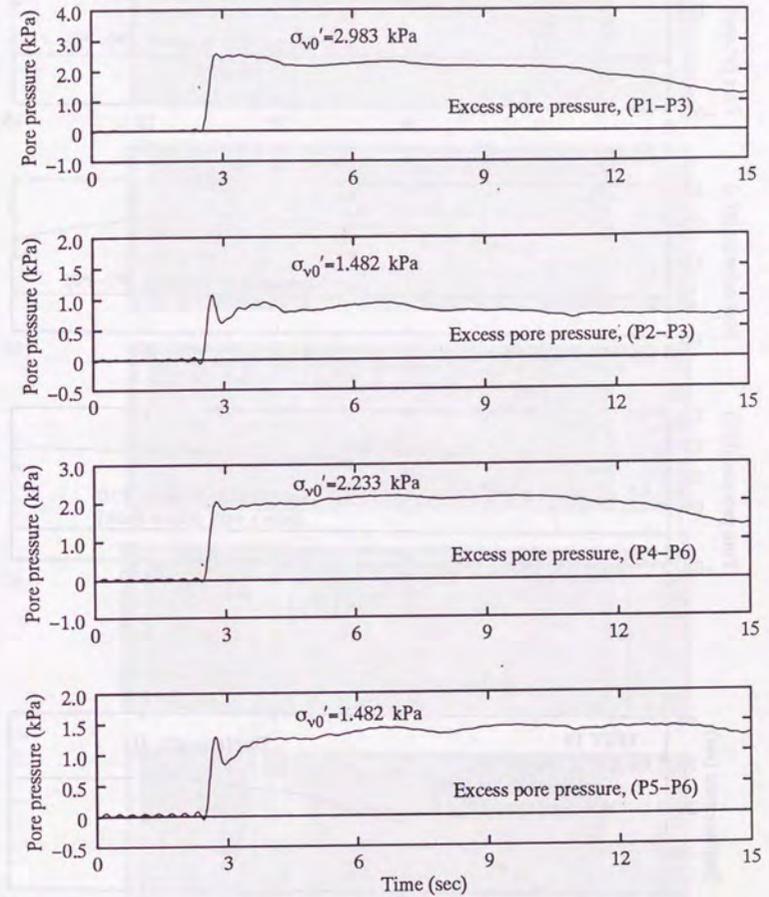


図 6.72 時刻歴測定記録 (TEST 19, その2)

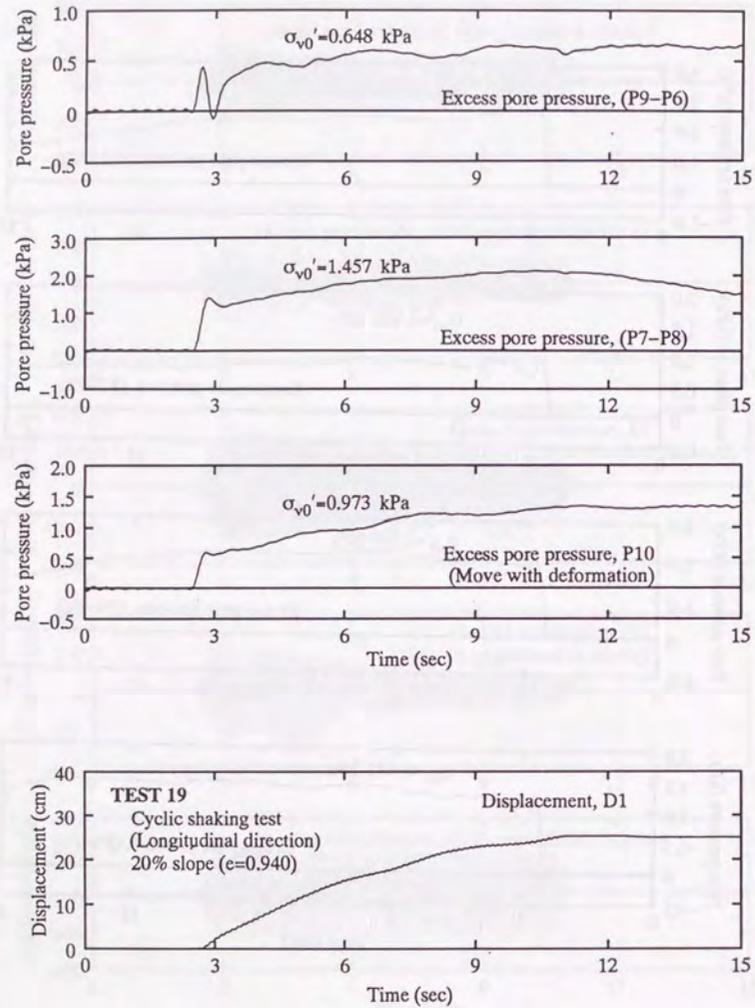


図 6.73 時刻歴測定記録 (TEST 19, その3)

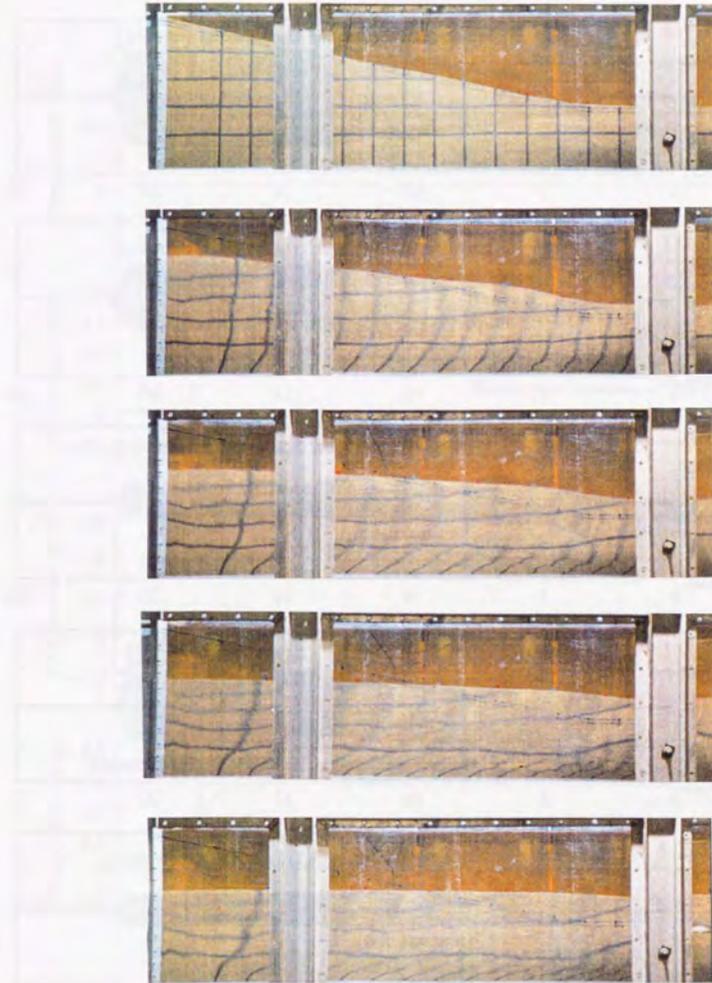


図 6.74 地盤の変形進行写真 (TEST 19)

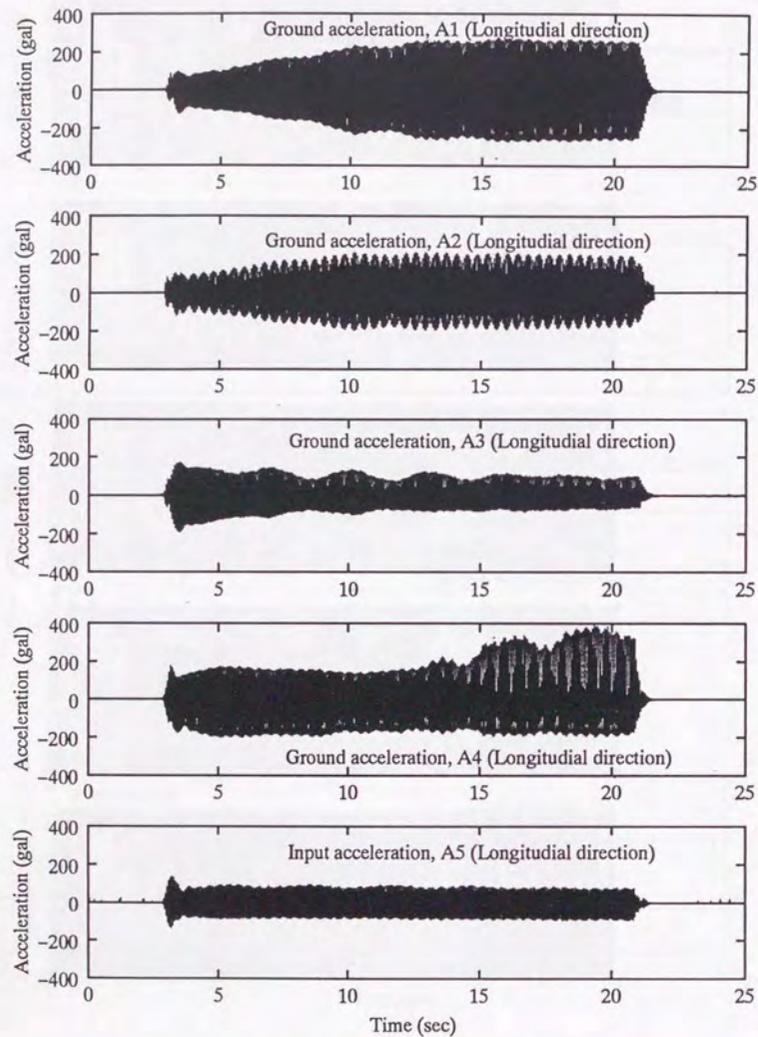


図 6.75 時刻歴測定記録 (TEST 20, その1)

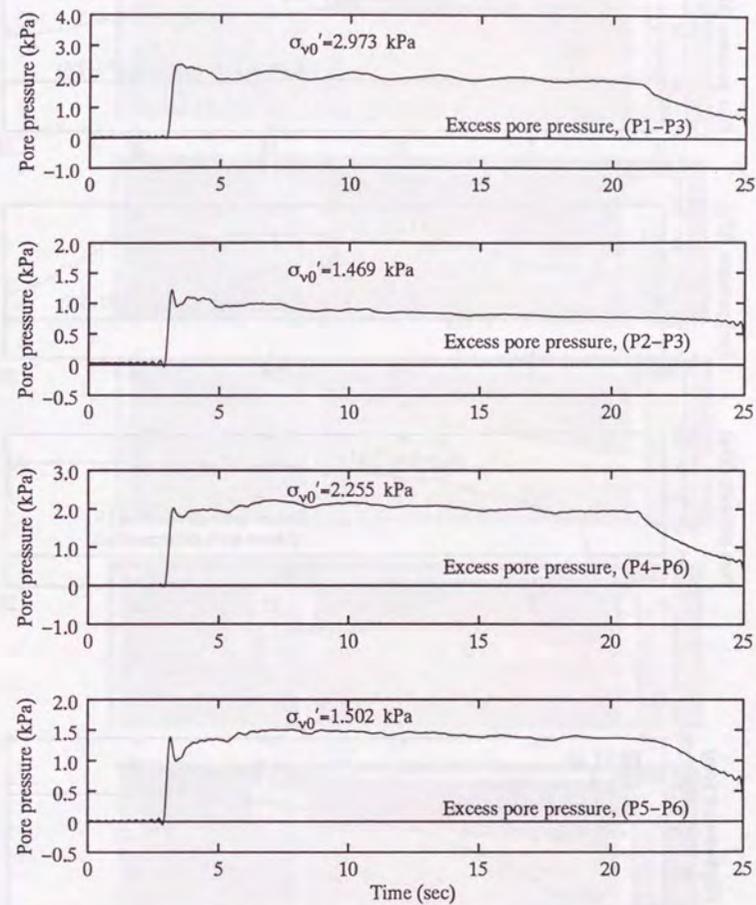


図 6.76 時刻歴測定記録 (TEST 20, その2)

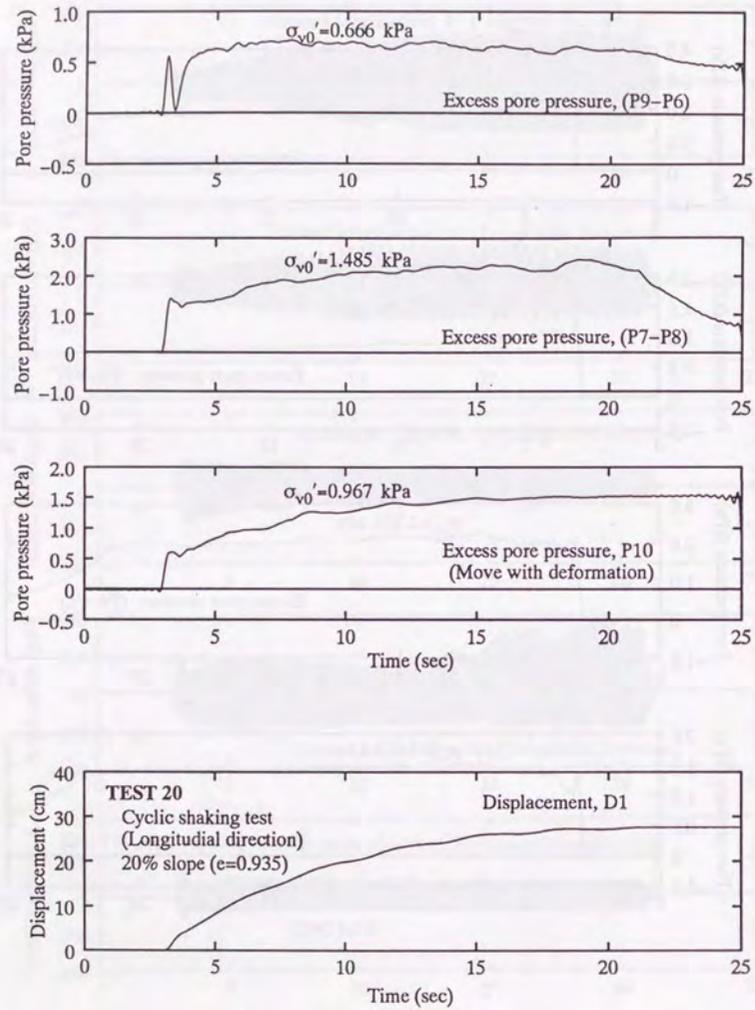


図 6.77 時刻歴測定記録 (TEST 20, その3)

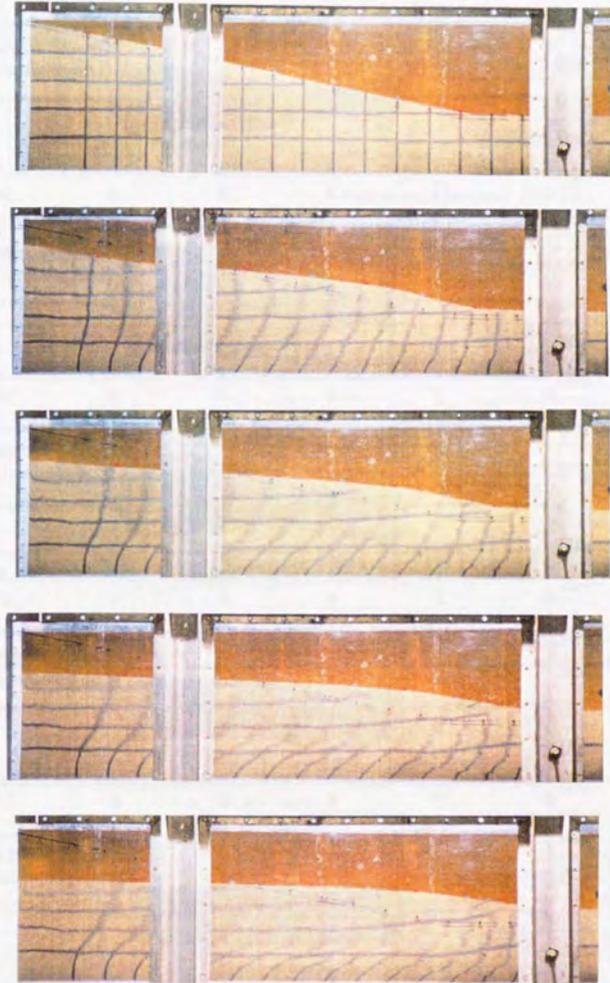


図 6.78 地盤の変形進行写真 (TEST 20)

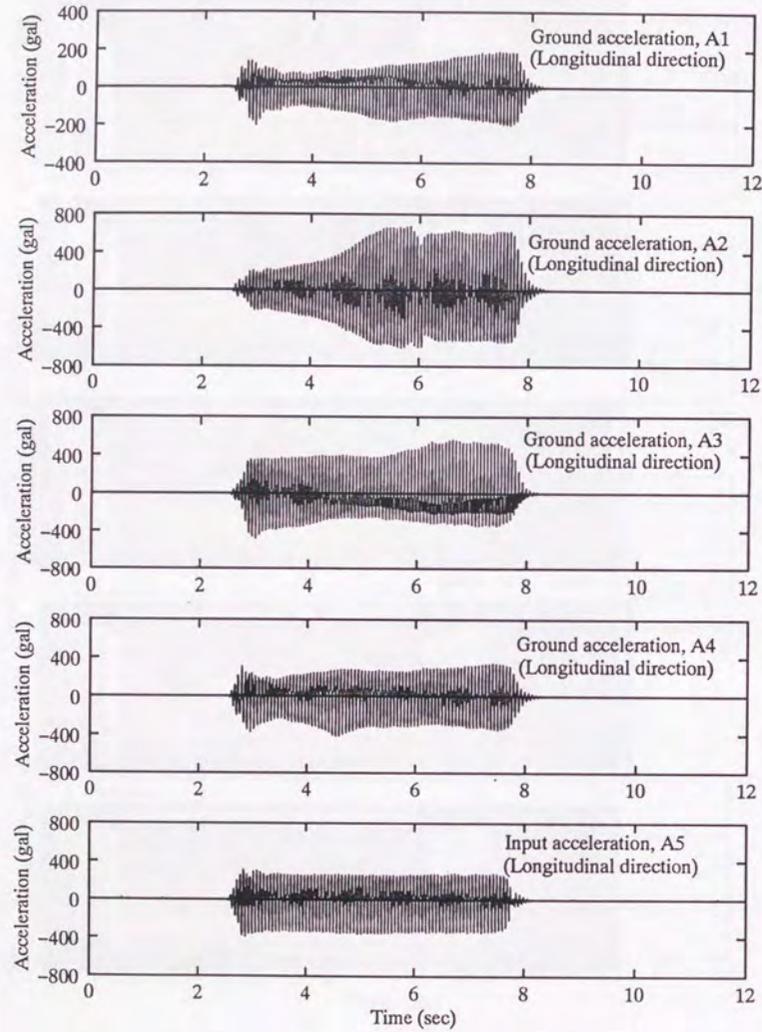


図 6.79 時刻歴測定記録 (TEST 21, その1)

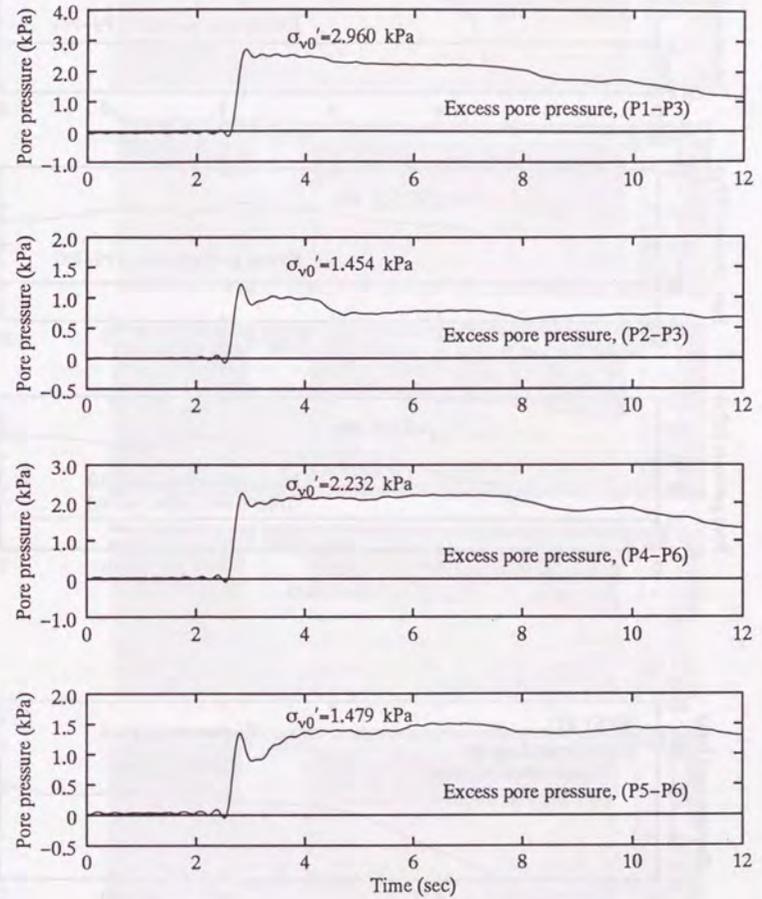


図 6.80 時刻歴測定記録 (TEST 21, その2)

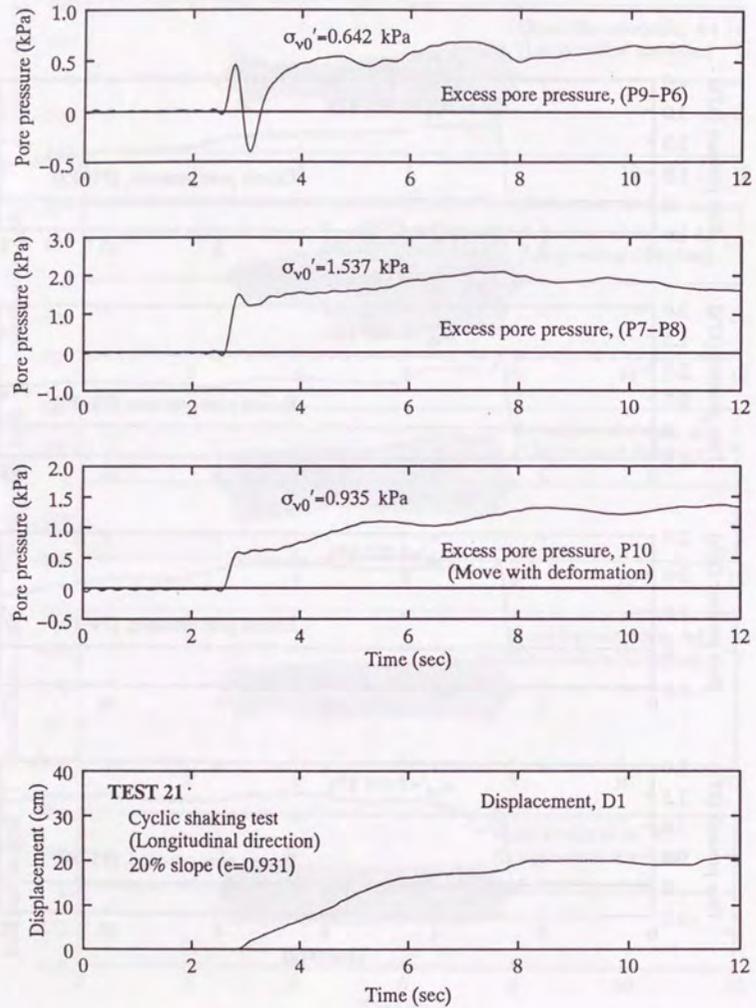


図 6.81 時刻歴測定記録 (TEST 21, その 3)

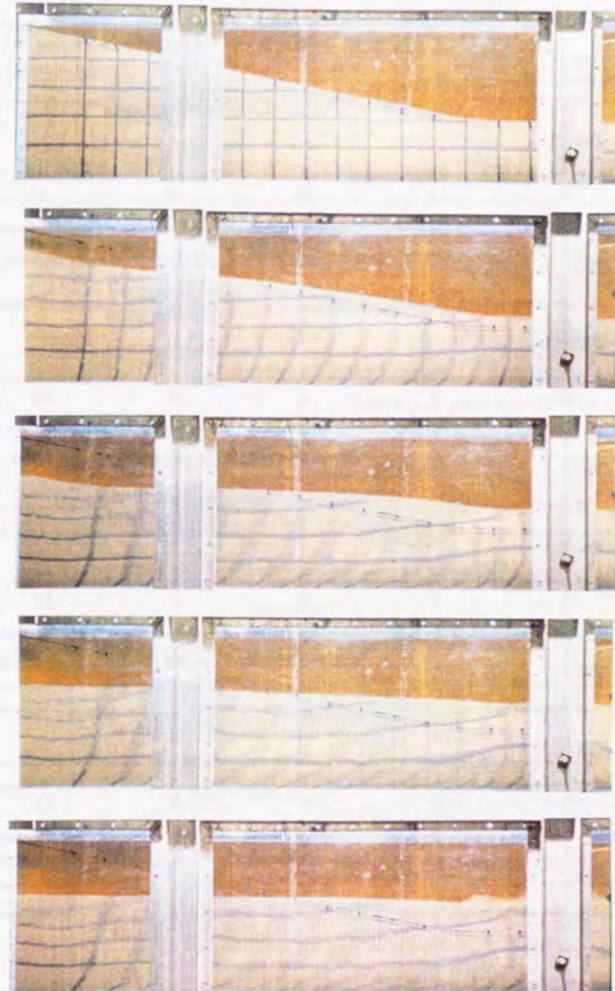


図 6.82 地盤の変形進行写真 (TEST 21)

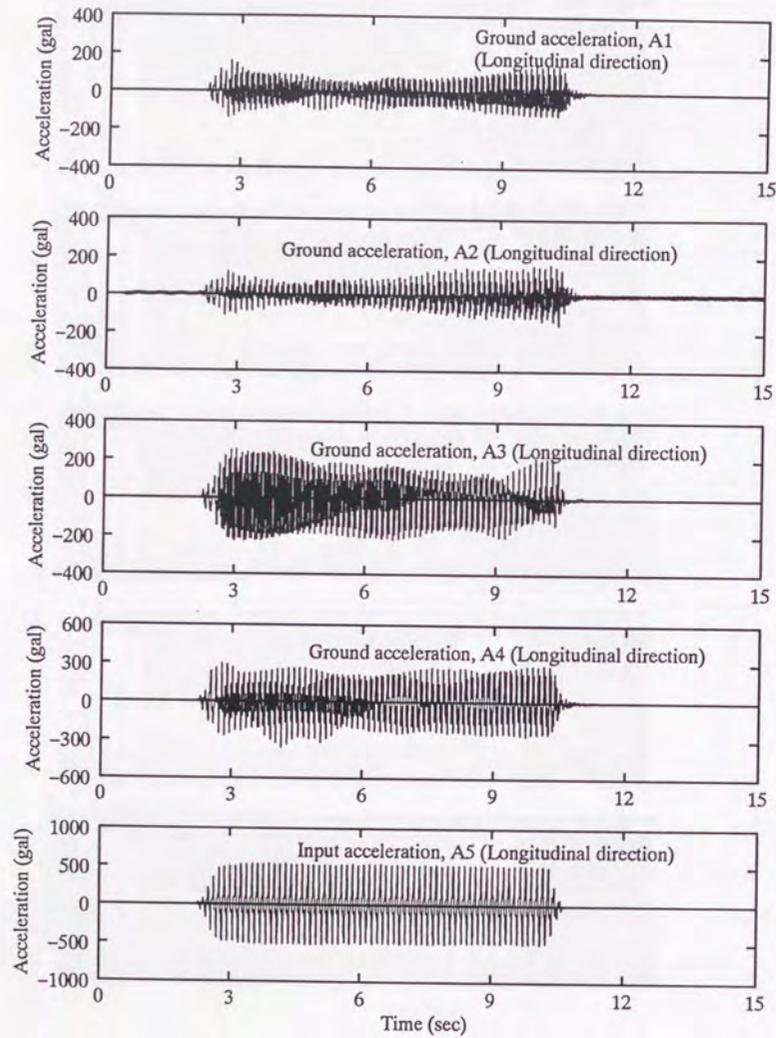


図 6.83 時刻歴測定記録 (TEST 22, その1)

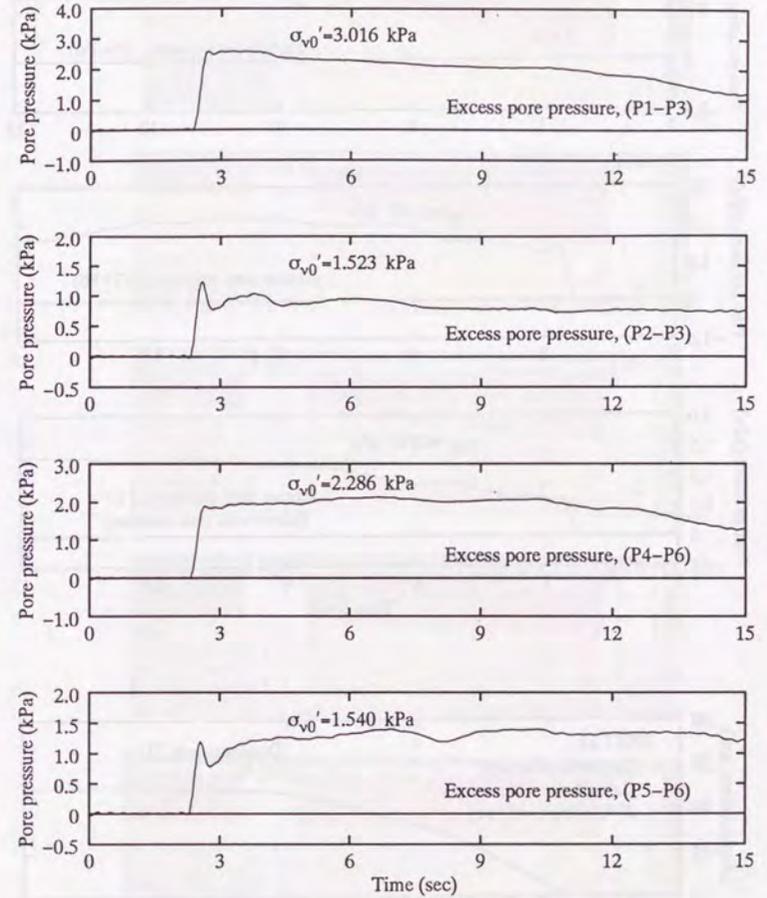


図 6.84 時刻歴測定記録 (TEST 22, その2)

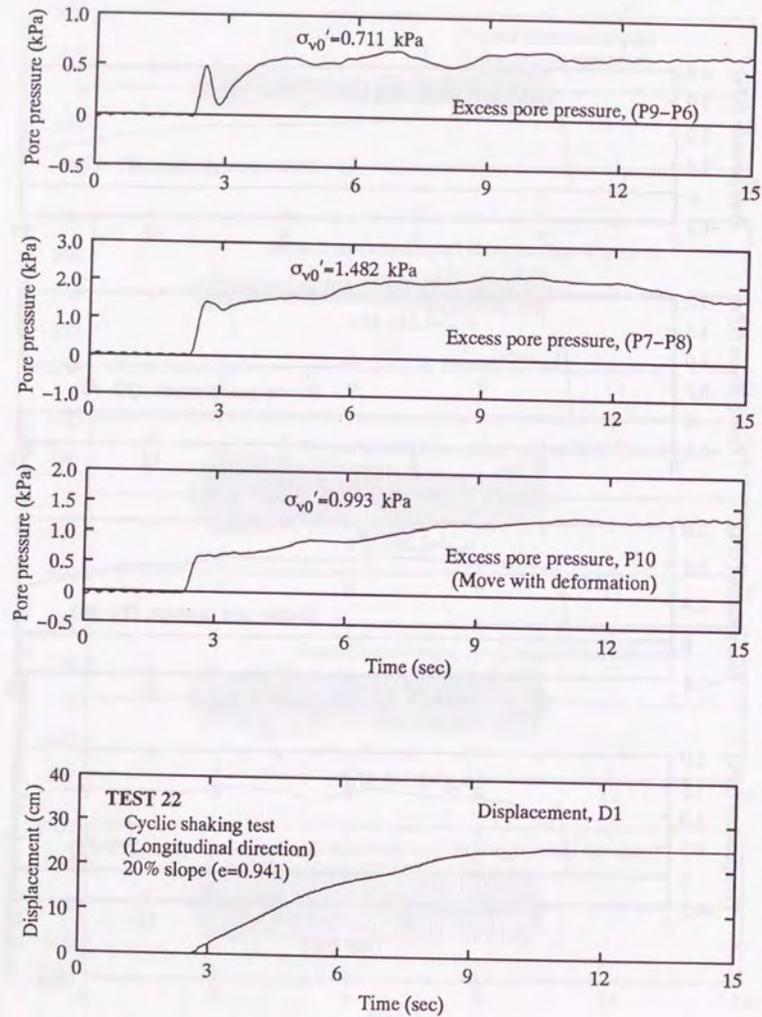


図 6.85 時刻歴測定記録 (TEST 22, その 3)

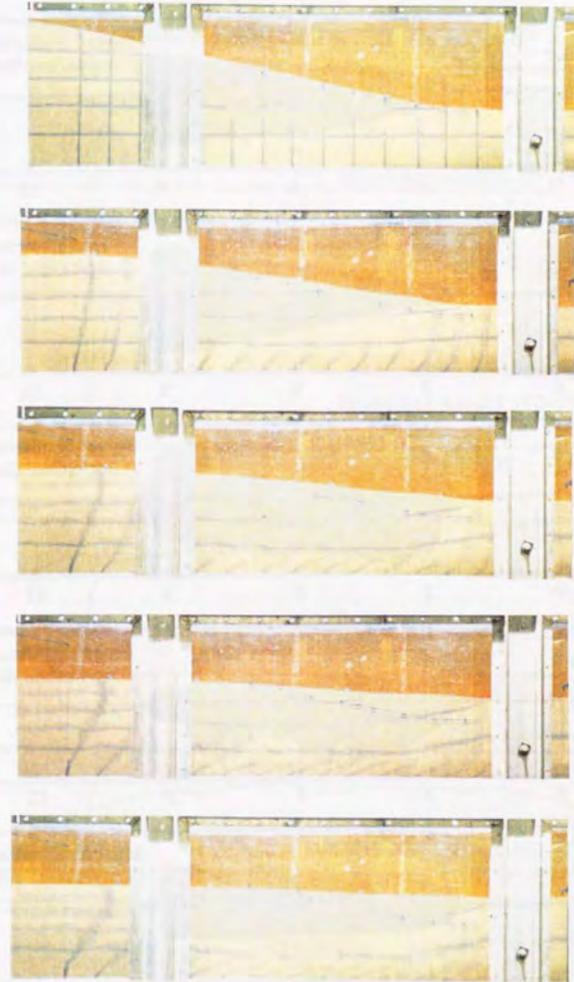


図 6.86 地盤の変形進行写真 (TEST 22)

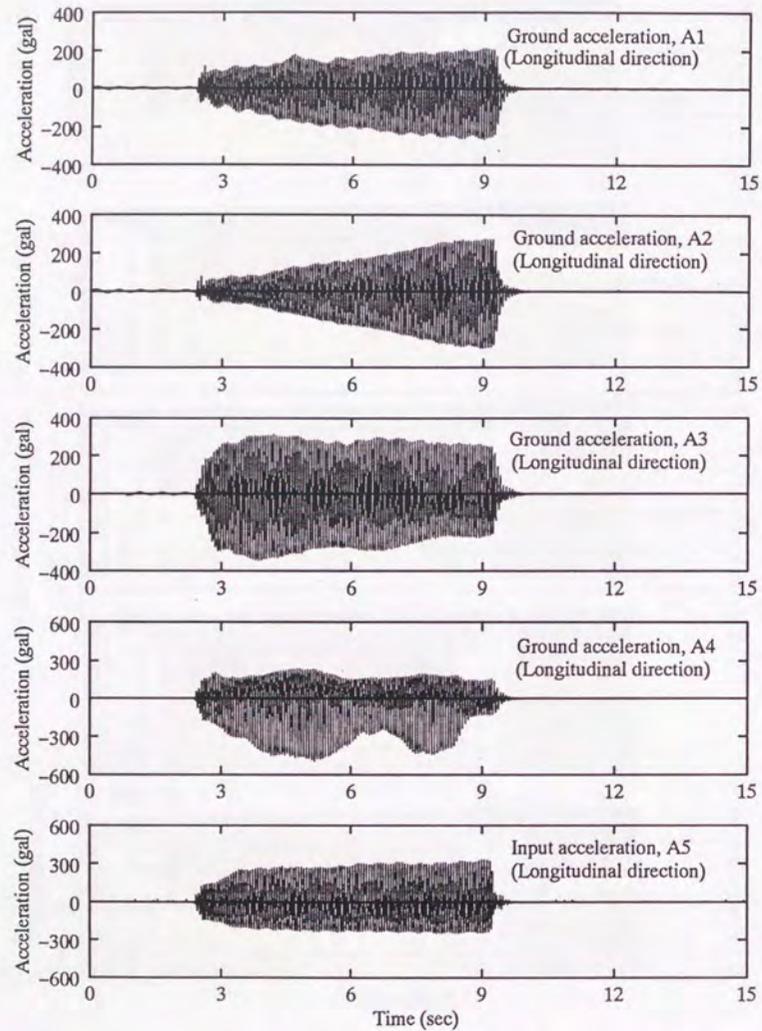


図 6.87 時刻歴測定記録 (TEST 23, その1)

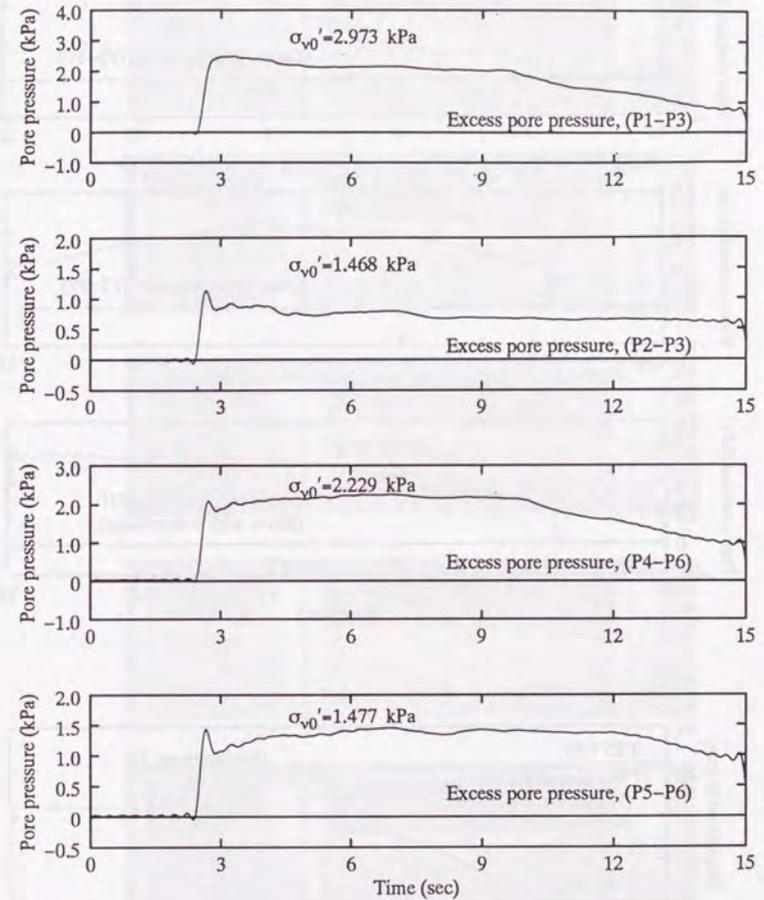


図 6.88 時刻歴測定記録 (TEST 23, その2)

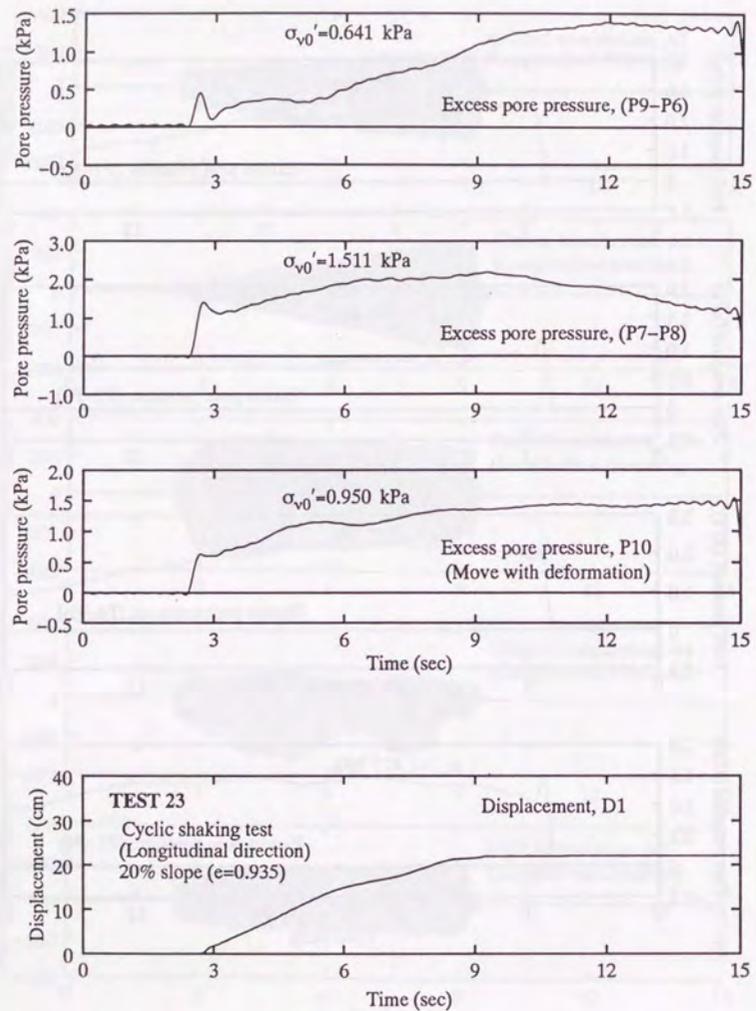


図 6.89 時刻歴測定記録 (TEST 23, その 3)

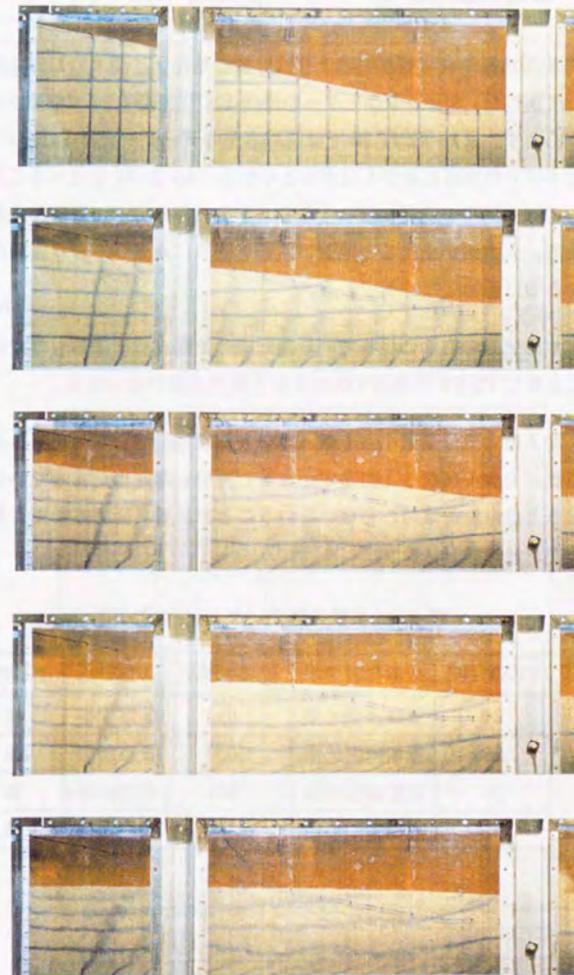


図 6.90 地盤の変形進行写真 (TEST 23)