

土 木 研 究 所 資 料

偏荷重が作用する地盤の
液状化による地盤流動特性に関する研究

平成 3 年11月

建設省土木研究所
地震防災部振動研究室

Copyright © (1991) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

偏荷重が作用する地盤の 液状化による地盤流動特性に関する研究

Deformation Characteristics of Eccentrically Loaded Ground
Induced by Soil Liquefaction

地震防災部	部長	佐々木	康
振動研究室	室長	常田	賢一
	研究員	松本	秀應
		佐谷	祥一*
平成2年度部外研究員		森	利弘**

*：現関東地方建設局千葉国道工事事務所

**：現熊谷組筑波技術研究所

【要 旨】

近年、地盤の液状化に伴って発生する被害の内、地盤の永久変位（地盤の側方流動）に起因した被害事例が確認され、地盤の永久変位のメカニズムの解明あるいは永久変位量の予測法の開発の必要性が指摘されている。そこで地盤のモデルとして、橋台背面のように盛土による偏荷重が地表面に作用する場合を対象とし、偏荷重の大きさが地盤の流動特性に与える影響を模型実験により検討するとともに、流体モデルにより地盤流動の解析を行い実験結果との比較を行った。

キーワード：液状化、永久変形、流動、偏荷重、盛土、模型実験、数値解析

まえがき

新潟地震(1964年)を契機として一躍注目をあびるようになった地盤の液状化とは、地盤がせん断強さを失って液体のように振舞う現象を指す。その結果、液状化は地盤の支持力低下による構造物の傾斜・沈下、過剰間隙水圧の発生による軽量構造物の浮上り、土圧の増大による護岸のはらみ出し、土の強度低下による土構造物の崩壊などの被害をもたらす。また、近年これらの被害要因の他に新しく、地盤の永久変位(地盤の側方流動)に起因した被害事例が確認されるようになり、永久変位のメカニズムの解明あるいは永久変位量の予測法などに関する研究がさかんに行われるようになってきた。

道路橋示方書においては液状化の可能性がある場合には、耐震設計上土質定数を低減させ、基礎の安定性を照査するように規定されている。しかしながら、液状化に伴う地盤の側方流動による影響や、その影響を考慮した合理的な検討・設計方法がなく、検討課題となっている。

このような背景のもとに、地盤流動に関する模型実験を実施し、地盤流動の特性について検討した。

この報告書では、モデルとして永久変位が発生する地形条件のうち橋台背面のように盛土による偏荷重が地表面に作用する場合を対象とし、偏荷重の大きさが地盤の流動特性に与える影響を実験結果から整理した結果と、流体モデルにより地盤流動の解析を行い実験結果との比較を行った結果について示す。

平成3年11月

目 次

まえがき

1. 研究の目的と内容	1
2. 既往の研究	3
3. 小型土槽を用いた地盤流動実験	5
3. 1 実験概要	5
3. 2 実験装置	5
3. 3 実験条件と測定項目	5
3. 4 地盤特性	6
3. 5 実験結果	7
3. 6 まとめ	12
4. 中型土槽を用いた地盤流動実験	33
4. 1 実験概要	33
4. 2 実験装置	33
4. 3 実験条件と測定項目	33
4. 4 地盤特性	34
4. 5 実験結果	34
4. 6 まとめ	37
5. 地盤流動の解析的検討	52
5. 1 概要	52
5. 2 解析的検討方法	52
5. 3 実験結果との比較検討	60
5. 4 まとめ	62
6. まとめ	68
参考文献	69

巻末資料	1. 小型土槽を用いた地盤流動実験における時刻歴結果	73
	2. 中型土槽を用いた地盤流動実験における時刻歴結果	101

1. 研究の目的と内容

液状化に伴う地盤の永久変位に関する研究は緩やかな斜面に対するものが多く、被害事例が報告されているにもかかわらず、地盤の永久変位が発生する地形条件として橋台等の地表面形状が大きく変化する場合に関する研究は比較的少ない。

液状化に伴い発生する地盤の永久変位の発生パターンを分類すると、図1.1 に示すように

①：広範囲にわたる地形的な非一様さに起因して発生する変形

②：盛土や橋台といった局所的な地形の変化に起因して発生する変形

に大別され、②については、その変形の発生挙動や構造物への影響のメカニズムの違いから

2-1：構造物の前後における荷重の不釣り合い（偏荷重）に起因する変形

2-2, 2-3：地形の変化方向への変形

に分類される。

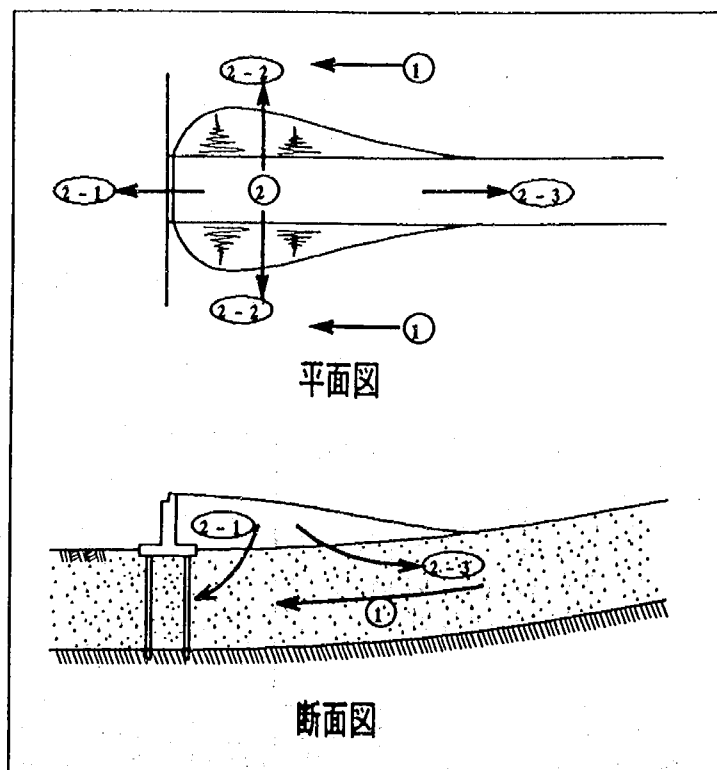


図1.1 液状化に伴う地盤の永久変形の発生パターンの概念図

橋台のように盛土荷重によって常時偏荷重を受ける構造物（図1.2 参照）の場合には、液状化に伴い2-1に分類される変形が生じ、橋台が被害を受けることが予想される。すなわち、飽和砂層が液状化することにより、盛土部分が沈下し橋台前面方向に地盤の側方流動が生じる。その結果、橋台等の構造物には外力として側方流動による流動地盤からの流動圧が作用することになり、その力が大きければ構造物に有害な変形・被害が生じることになる。

そこでこのような盛土や橋台部の地盤の流動特性及びその影響を検討するために、図1.3 に示す研究フローにより検討を進めることとした。最終的には偏荷重を受ける橋台基礎の安定性を照査する手法の開発を目的としているが、本報告ではこのうち

- ①小型土槽を用いた地盤流動実験
- ②中型土槽を用いた地盤流動実験
- ③流体モデルを用いた簡易解析結果と実験結果の比較

を実施したので、これらの結果を報告する。実験の対象とした地盤のモデルを図1.4 に示す。

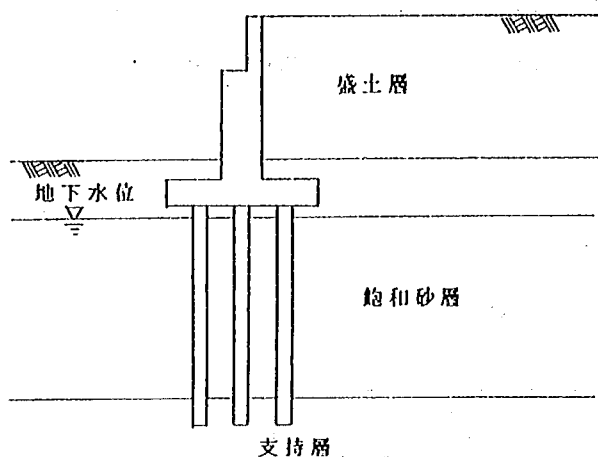


図1.2 偏荷重を受ける橋台基礎の概念図

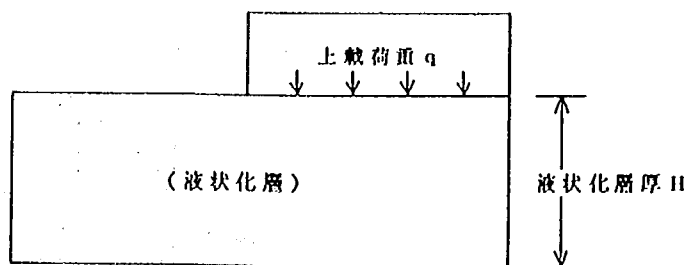


図1.4 実験対象モデル

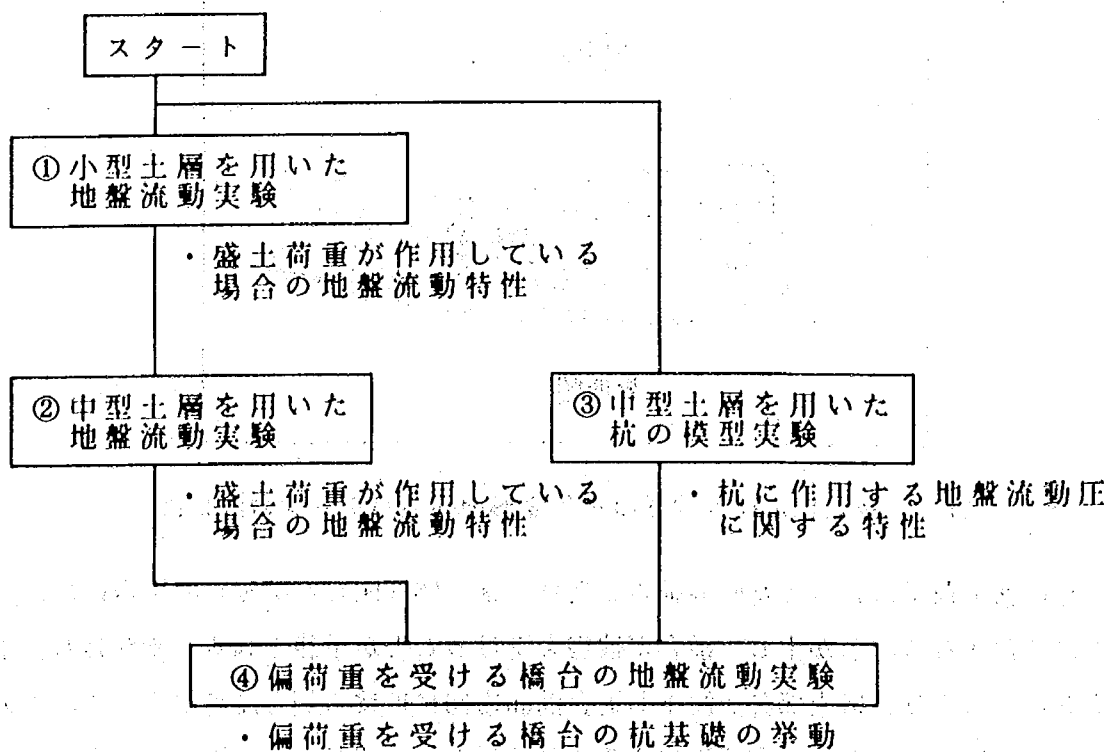


図1.3 研究フロー（全体計画）

2. 既往の研究

液状化に伴う地盤の永久変位に関する研究には、永久変位の発生メカニズムの解明に関するもの、永久変位量の予測法に関するもの、あるいは永久変位による被害予測に関するものがある。発生メカニズムの解明に関する研究としては、現地調査によるものと振動実験によるものとがあり、また、永久変位による被害予測に関する研究としては、永久変位が構造物に与える影響を数値解析によって検討したものがある。以下に主な研究概要を示す。

2. 1 現地調査による研究

液状化に伴う地盤の永久変位に関する研究は、現地調査によるものが出発点である。その主なものとして、浜田他^{1), 2)} が実施した地震前後における航空写真測量による永久変位の測定がある。その報告によれば、液状化に伴う永久変位が発生する条件として、次の3タイプがあることが明らかにされている。

- ①地表面が緩やかに傾斜し、その下に液状化層が広範囲に分布する場合
- ②護岸が存在し、かつ液状化層が川あるいは海方向に傾斜している場合
- ③地表面はほぼ平坦であるが、液状化層の下面が傾斜している場合

また、永久変位量と地形・地盤条件との要因分析の結果、液状化層厚、地表面勾配および液状化層の下面勾配を用いて永久変位量を推定する回帰式を提案している。

2. 2 振動実験による研究

現地調査による地盤の永久変位はあくまで地表面において観察できる範囲に限定され、必ずしも永久変位発生メカニズムの解明という点において充分ではない。そこで、振動台実験を行うことにより、地盤内の永久変位の分布までも認識した上で、永久変位の発生メカニズムを定性的に解明しようとするのが試みられている。

安田他³⁾ が実施した実験によると、次のような報告がされている。

- ・永久変位はある面をすべり面として表層がすべった結果として生じているのではなく、液状化層が一定の歪量でせん断変形をして生じている。
- ・永久変位量には、地表面または液状化層下面の傾き、液状化層厚の影響が認められる。

後者は、浜田他が実施した現地調査による研究結果と同じような結果となっている。

東畑他^{4), 5)} が実施した実験によれば、次のような知見が得られている。

- ・液状化した土は液体または極めて剛性の小さな固体として振舞うので、始めに地表面が傾斜していても、液状化の後ではほぼ水平に近づく。
- ・永久変位は、地表面または基盤の下層勾配方向に発生する。このことは、永久変位の発生に重力が何らかの形で関与していることを示唆する。
- ・永久変位は、液状化層下端で小さく、上端で大きい。その分布形状は正弦曲線に似ている。

また、当土木研究所における実験によれば、地表面の永久変位量は液状化層の厚さ、地盤の応答加速度の大きさ、地盤が液状化してからの加振継続時間、地形による初期せん断力の大きさ（地表面勾配）との相関が高いことが指摘されている^{6), 7)}。

2. 3 数値解析による永久変位の研究

地盤の液状化による被害予測を行う上で、永久変位量の予測は大変重要である。現地調査または振動実験に基づいた仮定から、あるいは比較的自由的な立場からさまざまな検討方法が提案されている。

主なものを挙げると次のようである。

- ・有効応力解析的アプローチ
- ・流体モデルによるアプローチ
- ・エネルギー説
- ・静的線形解析によるアプローチ
- ・静的非線形解析によるアプローチ

これらの解析方法はいずれの場合も、一応の適用性を有することが報告されている。

2. 4 数値解析による構造物被害の研究

地盤の永久変位に起因する構造物基礎の被害が数多く報告されている⁸⁾。これらの被害は、上部工慣性力のみでは説明が難しく、杭の残留変形方向と地盤の永久変位方向が概ね一致していることから、地盤の永久変位によって生じた可能性が大きいと考えられている。

解析は杭を梁とし、地盤は水平方向のばねとしてモデル化し、外力は永久変位量に比例する形で考慮されている。このような仮定の基に解析を行った結果と、実被害例とは一致しているようであるが、現実には発生している地盤の永久変位は数メートルにも及ぶ場合があり、永久変位量の大きさが構造物に与える力に比例すると考えると不合理が生じる可能性がある。現段階では他に合理的な検討方法がなく、今後の検討課題として残されている。

3. 小型土層を用いた地盤流動実験

3. 1 実験概要

本実験は、図1.4 に示したように液状化地盤の地表面に盛土等による偏荷重が作用する場合における地盤の流動特性を把握するために実施するものであり、主な目的は次の通りである。

- ・ 盛土荷重が地盤の流動特性に及ぼす影響
- ・ 液状化層厚が地盤の流動特性に及ぼす影響

また、本実験は振動台実験ではなく、加振は土槽の側面を打撃することにより行う。

予備実験を実施したところ次のようなことが分かっている。

- ・ 打撃直後に地盤が液状化し、流動が開始する。
- ・ 土槽の揺れが停止した後においても流動が継続して生じている。

3. 2 実験装置

用いた実験装置を写真3.1, 図3.1に示す。この装置は液状化再現装置と呼ばれるものであり、小型で簡単に地盤の液状化が再現できるという特徴がある。この装置のしくみは次のようになっている。

土槽（60cm×40cm×30cm）の中に豊浦標準砂を入れる。土槽の底部にはドレーン層（豆砂利をジオテキスタイルで被った層）があり、その中には通水できるように多くの孔を設けた塩ビ管が挿入されている。ポンプを利用してドレーン層に水を送り込み、砂層をボイリング状態にさせることができる。しばらくボイリングさせた後、水の循環を停止すると砂は徐々に最堆積する。その後ドレーン層から水を排水し、水位を地表面に一致させる。このようにして緩い飽和砂層を作成することができる。この土槽の底部は、2枚の板ばねで支持されており、土槽全体が揺れやすくなっている。土槽の側面を手で打撃することにより容易に砂層は液状化し、間隙水が地表面に湧き出てくる。

3. 3 実験条件と測定項目

(1) 実験条件と実験手順

実験条件を表3.1 に示す。本実験では上載荷重（盛土荷重）及び液状化層厚の二つをパラメータとし、表3.1のように実験条件を設定した。液状化層厚240mmはこの土槽を用いて実験可能な最大の液状化層厚である。また、上載荷重11.7gf/cm²は初期圧密時に液状化しない最大の荷重である。なお、上載荷重には水あるいは鉛散弾を入れたビニール袋を用いた。

実験の手順を図3.2に示す。

(2) 測定項目と測定方法

各実験における測定項目を表3.2に、測定器の配置を図3.3に、測定方法を図3.4に示す。

地盤の流動は土層中央に設置した模型板（塩化ビニール製、高さ300mm、奥行き150mm、 $t=0.5\text{mm}$ ）の

の変位量を測定することにした。予備実験の段階では、模型板の頭部に水系を取付けて変位量（水平変位量）を直接変位計で測定する方法を採用していたが、模型板に引張り力を与える結果、その影響が顕著に生じることが分かり、今回は非接触型の変位計を用いることにした。その取付け位置は地表面から50mmの場所である。また、深さ方向の流動分布を見るために図3.3に示しているように模型板に超小型の加速度計（Eシリーズでは5cmピッチ、Fシリーズでは4cmピッチ）を取付け、加速度から変位量を算出した。その方法は下に示しているように加速度から各区間の変位量Dを算出し、模型板の最深部から累積していく方法によった。ただし、模型板下端はピン支持とした。地表面変位はアクリル板を地表面に設置し、その変位量を測定することによった。また、間隙水圧は鉄筋棒に取付け、液状化前後で移動しないようにした。測定のサンプリングは100Hzで実施し、すべてデータはフロッピーディスクに収録した。

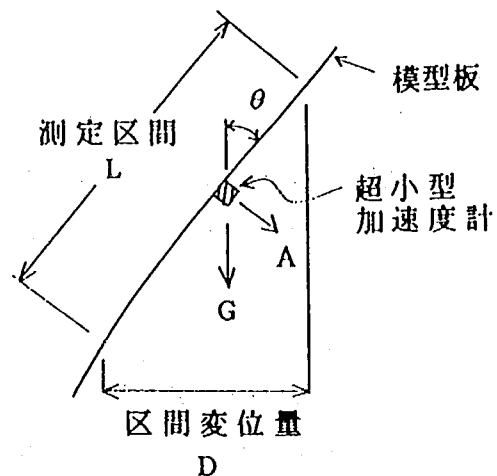
（加速度計から変位量を求める方法）

測定区間における変位 $D = L \sin \theta$

ただし、 $\theta = \sin^{-1}(A/G)$

ここに、A: 加速度計の読み値

G: 重力加速度



3. 4 地盤特性

実験に用いた豊浦標準砂の粒径加積曲線と物理特性を図3.5に示す。比重は2.637、最大間隙比0.973、最小間隙比0.609である。

土槽内にある豊浦標準砂の乾燥重量を測定し、次式により相対密度と飽和単位体積重量を算出した結果、表3.3のようになった。ただし、この相対密度は土層全体としての平均としての値であり、地盤の流動に大きく寄与する土層の中央部分の領域ではこの値よりも小さな相対密度となっていることが予想される。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}, \quad \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e}$$

$$\text{ただし、} e = \frac{G_s \cdot V}{m} - 1$$

ここに、 D_r : 相対密度 (%)

G_s : 比重

γ_{sat} : 飽和単位体積重量 (gf/cm³)

V: 砂層の体積 (cm³)

e_{max} : 最大間隙比

m: 砂の乾燥重量 (gf)

e_{min} : 最小間隙比

3. 5 実験結果

3. 5. 1 各実験ケースにおける測定結果

(1) 時刻歴結果

各実験において得られた時刻歴結果は巻末資料に示し、ここでは主なものについて述べる。

1) E J シリーズ

E J シリーズは液状化層厚240mm、上載荷重0gf/cm²の実験である。

図3.6 に土槽側面に取り付けた加速度計から得られた時刻歴結果を示す。図中に示した横軸（時間軸）の2秒時において土槽の側面を打撃しており、その後3秒ほど揺れている様子がうかがえる。

図3.7 に間隙水圧の時刻歴を示す。土槽の側面に打撃を加えると同時に過剰間隙水圧は有効上載荷重に近い値に達していることから、全層にわたって液状化していると考えられる。また、過剰間隙水圧は土槽の最深部から上部へとほぼ一次関数的に消散していることがわかる。この現象は過去に実施されている振動箱の現象と一致している。打撃開始から消散がほぼ終了するまでに要する時間は12秒程度である。

図3.8 に地表面における変位量の時刻歴を示す。地表面は打撃を加えた直後から沈下し始め、過剰間隙水圧が消散する時刻まで徐々に沈下している。最終沈下量は7~10mm程度となっているが、このうち打撃直後に5mm程度沈下している。これは、沈下量の計測方法として、アクリル板に働く浮力により浮き上がらないようにアクリル板に重りを載せているために液状化直後には支持力不足から、急激に沈下したものと推定される。

過剰間隙水圧の消散時における透水係数は次のようにして求めることができる。ダルシーの法則によれば、間隙水の流出速度は(3.1)式のようになる。

$$v = \kappa i = \kappa \times \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad \text{----- (3.1)}$$

ここに、 v : 間隙水の流出速度

κ : 砂の透水係数、

i : 動水勾配

γ' : 砂の有効単位体積重量

γ_w : 水の単位体積重量

地表面の沈下が終了するまでに要する時間と過剰間隙水圧の消散に要する時間がほぼ等しいので、間隙水の流出速度が液状化層の沈下速度に等しいとすれば次式が成り立つ。

$$\frac{S}{t} = \kappa \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad \text{----- (3.2)}$$

ここに、 S : 地表面の沈下量

t : 地表面の沈下が終了するまでに要する時間

したがって、間隙水圧の消散時における透水係数を推定すると次のようになる。

$$\kappa = \frac{S}{t} \times \frac{\gamma_w}{\gamma'} = \frac{0.2}{12} \times \frac{1.0}{0.89} \sim \frac{0.5}{12} \times \frac{1.0}{0.89} = 1.9 \sim 4.7 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$$

図3.9 及び図3.10に模型板に取り付けた非接触型変位計及び超小型加速度計から得られる変位量の時刻歴を示す。なお、図3.10の縦軸に示したDに続く値は地表面との位置関係（単位はmm）を示している。変位の動きについて見ると土槽のゆれがほぼ終了すると同時に変位が停止している。5mm程度変位が生じているが、試験開始前における模型板は必ずしもまっすぐ鉛直に設置されているわけではなく、液状化することにより砂による拘束が失われるため、その影響で模型板に多少変位が生じている可能性がある。

2) EM～EI シリーズ

これらのシリーズは、液状化層厚 240mmで地表面の約半分に盛土の代わりに上載荷重を加えた場合である。ここでは、実験No. EL3における時刻歴結果について示し、その特徴的なことがらについて記す。

図3.11に土槽加速度の時刻歴を示す。EJシリーズに比べ打撃後における振幅、継続時間ともに小さくなっている。

図3.12に間隙水圧の時刻歴を示す。無載荷側の過剰間隙水圧は有効上載圧よりも大きくなっているのに対して、載荷側においては有効上載圧よりも小さく、また過剰間隙水圧の消散が無載荷側より早くなっている傾向が見られる。

図3.13に地表面変位の時刻歴を示す。載荷側の地表面は沈下し、無載荷側では隆起している。

図3.14及び図3.15に模型板変位量の時刻歴を示す。図3.14に示した時刻歴について見ると、地盤の流動は打撃後 5 秒程度継続している。また、図3.15に示した時刻歴について見ると、深度（75mm）の位置における変位量が最大となっている。

3) FA シリーズ

このシリーズは、液状化層厚160mm、上載荷重0gf/cm²の場合である。

図3.16～図3.20に時刻歴結果を示す。概ねEJシリーズと同じであるが、特徴的なことがらについて記す。間隙水圧が消散するまでに要する時間は6秒程度である。地表面における最終沈下量は 3～6mm程度であるが、このうち2～4mmは打撃直後に生じている。EJシリーズの場合と同様にして間隙水圧の消散時における透水係数を求めると次のようになる。

$$\kappa = \frac{s}{t} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma'} = \frac{0.1}{6} \cdot \frac{1.0}{0.89} \sim \frac{0.2}{6} \cdot \frac{1.0}{0.89} = 1.9 \sim 3.7 \times 10^{-2} (\text{cm/sec})$$

この値はEJシリーズの場合とほぼ同じである。

4) FB～FE シリーズ

これらのシリーズは液状化層厚 160mmに対して、地表面の約半分に盛土の代わりに上載荷重を加えた場合である。ここでは、実験No. FC3における時刻歴結果について示し、その特徴的なことがらについて記す。

図3.21～図3.25に時刻歴結果を示す。間隙水圧の時刻歴について見ると、無載荷側における過剰間隙水圧は有効上載圧とほぼ等しくなっているのに対して、載荷側においてはその値よりも小さく、間隙水圧の消散が初期において早くなっている。ただし、過剰間隙水圧が完全に消散するまでの時間は載荷側、無載荷側ともに6秒程度と変わっていない。地表面の変位について見ると、無載荷側においても地表面は沈下している。

(2) 過剰間隙水圧比

各実験ケースにおいて得られた過剰間隙水圧の最大値を読み取り、有効上載圧に対する比（過剰間隙水圧比）を表3.4、表3.5に示した。

Eシリーズ（液状化層厚：240mm）について見ると上載荷重がゼロの場合、一部下回っている場合があるものの、ほぼ1に近い値となっている。

また、上載荷重の増加に伴い無載荷側の過剰間隙水圧比は大きくなっている。これは、無載荷側の有効上載圧を載荷側の荷重の大小によらず一定として過剰間隙水圧比を算出しており、無載荷側の上載荷重の増加につれ無載荷側の過剰間隙水圧の値が大きくなっていることによる。一方、載荷側においては上載荷重が増大しても過剰間隙水圧の値はほとんど変わらないため、過剰間隙水圧比は小さくなる傾向にある。

一方、Fシリーズ（液状化層厚：160mm）について見ると、載荷側ではEシリーズと同様の結果となっているが、無載荷側においては上載荷重が大きくなっても過剰間隙水圧比はほぼ1.0となっている。

これらEとFシリーズの傾向の違いは、液状化地盤内の水平方向の間隙水圧の伝播程度の違いや、載荷側の上載荷重の増加による無載荷側の有効上載厚の増加割合の違いが原因として考えられる。

3.5.2 地盤流動量

(1) 地盤流動量の分布形状

模型板に取り付けた加速度計から求めた地盤流動の深さ方向に対する分布形状を図3.26に示す。図に示したのは各実験条件における一例であるが、他の場合もほとんど分布形状には差がない。

図には、打撃を加えた1秒後とほぼ流動が終了している5秒後の分布形状について示している。5秒後における分布形状について見ると、液状化層厚が160mmの場合には、常に地表面において流動量が最大となる三角形分布を示している。これに対して240mmの場合には、上載荷重が増加すると地中において最大となる放物線分布を示している。1秒後から5秒までの変位量について見るといずれの場合も、地表面に近いほど大きくなっている傾向が見られる。

この液状化層厚が異なると地盤流動量の分布形状に違いが見られる理由の一つとして、模型板の深さ方向に対する剛性の違いが考えられる。模型板先端の位置を一致させることにより、両者における分布形状は比較的一致しており、分布形状に模型板の剛性の影響が生じている可能性がある。

(2) 上載荷重との関係

各深度における地盤の最終流動量 D と上載荷重 q の関係を図3.27～図3.28に示す。図3.27に示した液状化層厚 240mmの場合、地盤流動量は上載荷重に対して増加する傾向が認められる。図から、上載荷重が 3gf/cm^2 程度以下の場合、流動量はごく小さくなることが予想される。液状化層厚が 160mmの場合には上載荷重に対する明確な傾向は認められず、流動量にはほとんど差が認められない。

(3) 地表面沈下量との関係

載荷側における地表面沈下量 S と地盤流動量 D の関係を図3.29～図3.30に示した。図に見られるように液状化層厚 240mm、160mmの場合ともに右上がりの傾向が見られ、載荷側における地表面沈下量が大きいほど地盤の流動量も大きくなっている。

(4) 流動時間

各深度において地盤が流動している時間の分布を図3.31に示した。図に見られるように、いずれの場合にも地盤の流動は地表面に近い位置ほど長く継続している。上載荷重が増加しても流動時間には差が見られない。また、模型板先端の位置を合わせると液状化層厚 240mmの場合と 160mmの場合、比較的一致するように思われる。過剰間隙水圧が消散するのに要する時間は液状化層厚 240mmの場合には12秒、160mmの場合には6秒程度であり、流動が継続している時間の二倍以上となっている。すなわち、地盤の流動は液状化が継続（過剰間隙水圧が残留）しているにもかかわらず、ある時点で終了していることがわかる。

そこで一例として、液状化層厚が 240mmで上載荷重が 8.3gf/cm^2 の E L シリーズについて、間隙水圧（図3.12）と模型板の水平変位（図3.14）の時刻歴から考察すると、模型板の水平変位が停止する7秒頃における間隙水圧が、無載荷側では地盤上半断面において有効上載圧に近い値（過剰間隙水圧比にして1）を示しているものの、載荷側では地盤全体にわたり間隙水圧比にして0.2～0.3程度まで消散しており、載荷側の地盤の強度回復が地盤の流動を停止させていると考えられる。

3. 5. 3 地盤の流動速度

地盤流動特性について考える場合、最終値だけではなく最終値にいたる過程についても考慮する必要があると考えられる。今回の実験では、加振力として土槽の側面に打撃を瞬時に加えているだけであるが、打撃後5秒近くは地盤が流動している。一方、前述したように過剰間隙水圧は打撃後最深部から徐々に消散しており、液状化している範囲が徐々に小さくなっていると予想される。そこで、地盤の流動量を流動速度の積分としてとらえ、液状化している層厚などとの関係について検討する必要があると考えられる。また、杭基礎に作用する流動圧を推定する際、流体モデルからアプローチしようとする、流動速度は重要な指標となる。

(1) 時刻歴結果

地盤の流動速度は模型板に取り付けた加速度計から得られた地盤の流動量を微分することにより求めた。一例として、図3.32に地盤流動速度の時刻歴を示す。図中の縦軸の符号は無載荷側への変位が増加する場合をプラスとしている。図に示しているように打撃後0.15秒程度において流動速度が最大となり、その後は徐々に小さくなる傾向がある。

(2) 最大流動速度

図3.33～図3.35に最終流動量と最大流動速度の関係を示した。図に見られるように最終流動量は最大流動速度が大きいほど大きくなっており、地表面よりも地表面から深い位置程相関は強くなっている傾向にある。

(3) 液状化相厚との関係

流動速度が最大となる0.15秒頃には過剰間隙水圧の消散は非常に小さく、ほとんど全層が液状化しており、最大流動速度の違いを液状化層厚の違いで説明することはできない。そこで、消散がある程度始まり、完全液状化に達している層厚が変化し始める0.5秒以降における流動速度と、間隙水圧計から推定される液状化層厚との関係を図3.36～図3.37に示した。なお、液状化層厚は次のようにして推定した。

$$H_t = P_t / \gamma' \quad \text{----- (3.3)}$$

ここに、 H_t : 時間 t において液状化している層厚
 P_t : 時間 t における間隙水圧 (載荷側における最下段の値)
 γ' : 砂の有効単位体積重量

地盤の流動速度には地表面に近い位置で計測された値を用い、液状化層厚にはその位置よりも下方に存在する液状化層厚を示した。いずれの場合も液状化層厚が厚いほど、地盤の流動速度も大きくなっており、上載荷重とは無関係になっていることが分かる。

3. 6 まとめ

液状化が予想される地盤の地表面に盛土等による偏荷重が作用する場合における地盤の流動特性を把握する目的で小型土槽を用いて実験を行った。地盤の作成はボイリングにより行い、加振は土槽の側面を打撃する方法によった。また、地盤の流動量は剛性の小さな模型板（塩化ビニール製）の変位量を測定する方法によった。実験結果をまとめると次のようになる。

- (1) 打撃直後に地盤は液状化し、地盤の流動が生じる。土槽の振動が停止した後にも地盤の流動は生じている。
- (2) 深さ方向に対する地盤の流動分布は液状化層厚が 160mm の場合には地表面で最大となる三角形分布となった。液状化層厚が 240mm の場合には、上載荷重によって分布形状が異なり、上載荷重が増加すると三角形分布から地中で最大となる放物線分布となった。
- (3) 液状化層厚が 240mm の場合、地盤の流動量は、上載荷重の増加とともに大きくなる傾向が見られたが、160mm の場合にはそのような傾向は見られず、上載荷重の影響がほとんど見られない。
- (4) 地盤の流動量は、載荷側地表面沈下量が大きいほど、大きくなる傾向にある。
- (5) 地盤が流動している時間は地表面に近い位置ほど長くなっている。ただし、過剰間隙水圧の消散により、液状化が継続しているにもかかわらず、流動は数秒で終了している。
- (6) 流動量から流動速度を算出した結果、最大流動速度は最終流動量と相関関係がある。
- (7) 最大流動速度のピークを過ぎた比較的小さい流動速度の範囲内では液状化している地盤の層厚が大きいと地盤の流動速度も大きくなり、その関係に上載荷重の影響は見られない。

表3.1 実験条件

実験No.	液状化層厚(mm)	上載荷重(gf/cm ²)	実験回数
EJ	240	0	3
EM	240	3.3	3
EK	240	5.0	3
EL	240	8.3	3
EI	240	11.7	3
FA	160	0	2
FB	160	3.3	3
FC	160	5.0	3
FD	160	8.3	3
FE	160	11.7	3

表3.2 測定項目

測定項目	測定器	測点数	測定器の型式
土槽の加速度	加速度計	1	Shinkoh(BA-2L-SH)
地表面の鉛直変位	変位計	1(載荷側) 1(無載荷側)	東京測器(SDP-100R)
間隙水圧	間隙水圧計	2~3(載荷側) 2~3(無載荷側)	共和電業(BP-500GRS)
地盤流動量	DV付IVB変位計	1	誠研舎(MODEL EA-330)
	加速度計	5	SSK(AL5-2)

注) 間隙水圧計の測点数は液状化層厚240mmのケースでは3点、160mmのケースでは2点とした。

表3.3 小型土槽における地盤特性

間隙比 e	相対密度 $D_r(\%)$	飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}(gf/cm^3)$
0.842	36	1.89

表3.4 過剰間隙水圧比 (Eシリーズ)

実験 No.	液状化 層厚 (mm)	上載荷重 (gf/cm ²)	載荷側間隙水圧比			無載荷側間隙水圧比		
			①	②	③	①	②	③
EJ1 EJ2 EJ3	240	0	0.68 0.78 0.81	0.80 0.84 0.82	0.93 0.97 0.97	0.79 0.79 0.83	1.02 1.01 1.01	1.00 1.03 1.02
EM1 EM2 EM3		3.3	0.58 0.49 0.35	0.72 0.72 0.67	0.89 0.88 0.88	1.39 1.50 1.19	1.19 1.21 1.14	1.13 1.13 1.09
EK1 EK2 EK3		5.0	0.52 0.51 0.44	0.70 0.70 0.68	0.86 0.84 0.84	1.60 1.66 1.56	1.27 1.30 1.26	1.15 1.14 1.14
EL1 EL2 EL3		8.3	0.31 0.49 0.24	0.60 0.66 0.51	0.80 0.84 0.78	1.85 1.90 1.50	1.35 1.38 1.21	1.20 1.21 1.13
EI1 EI2 EI3		11.7	0.31 0.19 0.17	0.58 0.50 0.51	0.83 0.81 0.79	2.13 1.73 1.60	1.47 1.33 1.28	1.23 1.20 1.16

注) ①②③はそれぞれ間隙水圧の測定位置を示し、①: σ_1' , ②: σ_2' , ③: σ_3' に対応する。

表3.5 過剰間隙水圧比 (Fシリーズ)

実験 No.	液状化 層厚 (mm)	上載荷重 (gf/cm ²)	載荷側間隙水圧比		無載荷側間隙水圧比	
			①	②	①	②
FA1 FA2	160	0	0.81 0.81	1.01 1.02	1.03 0.95	0.98 0.98
FB1 FB2 FB3		3.3	0.37 0.48 0.48	0.80 0.89 0.81	0.99 1.31 1.03	0.99 1.04 0.99
FC1 FC2 FC3		5.0	0.36 0.40 0.33	0.82 0.84 0.73	1.19 1.03 1.19	1.03 0.98 1.02
FD1 FD2 FD3		8.3	0.21 0.23 0.23	0.54 0.61 0.57	0.99 1.15 1.15	0.93 1.01 0.99
FE1 FE2 FE3		11.7	0.18 0.21 0.19	0.49 0.67 0.48	1.05 1.15 1.15	1.02 1.03 1.01

注) ①②はそれぞれ間隙水圧の測定位置を示し、①: σ_1' , ②: σ_2' に対応する。



写真3.1 実験装置（液状化再現装置）

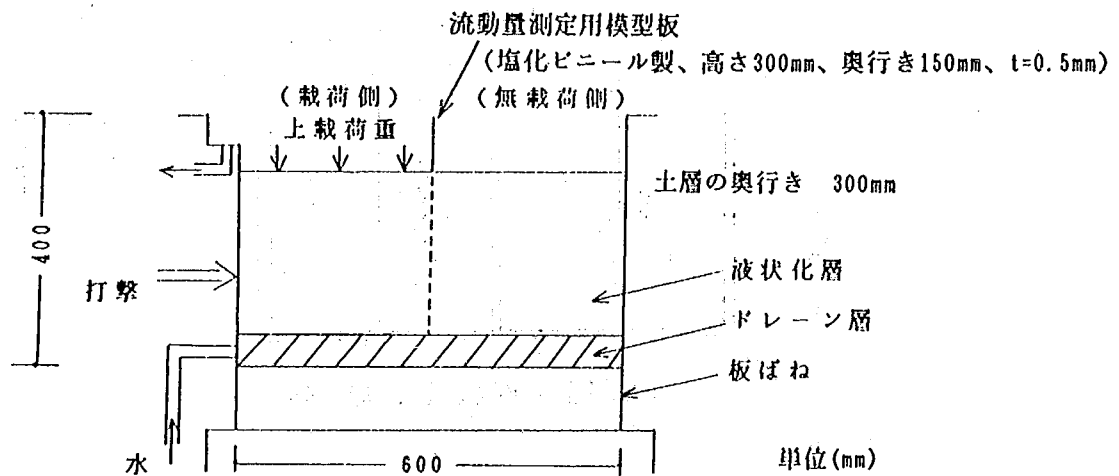
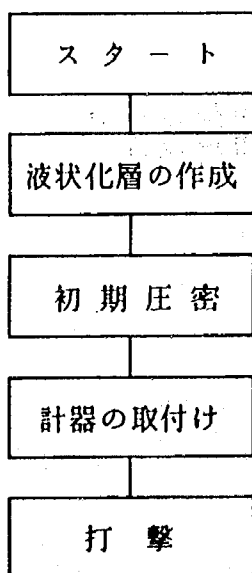
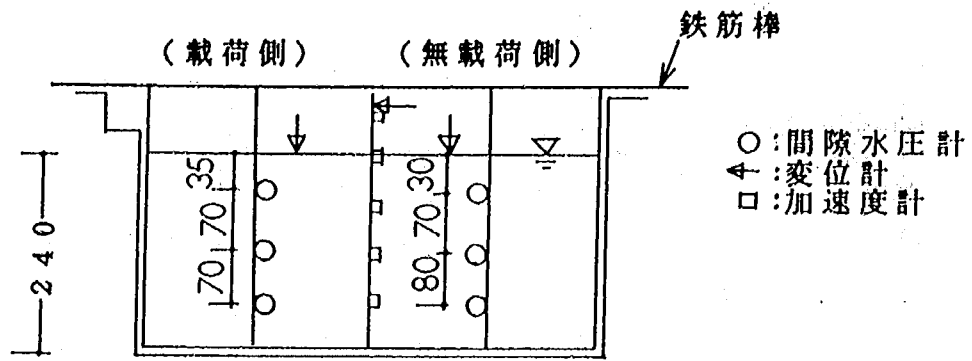


図3.1 実験装置

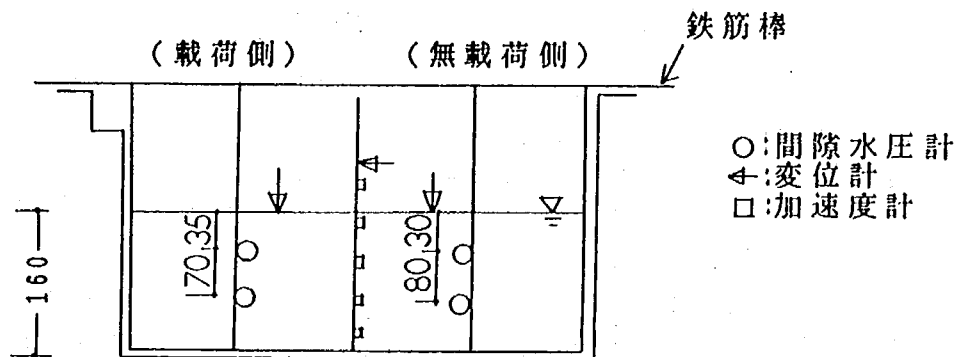


- ・ボイリング装置を利用して飽和砂層を作成する。間隙水圧計及び流動量測定用模型板はボイリングの時にセットしておく。
- ・地表面に上載荷重を加えて初期圧密させる。その後、一度上載荷重を取り除く。
- ・再度所定の上載荷重を加える。変位計等を取付け、打撃を加える直前から計測を開始する。
- ・土槽の側面に打撃を加えることにより液状化させる。過剰間隙水圧の消散が終了するのを待って計測を終了する。

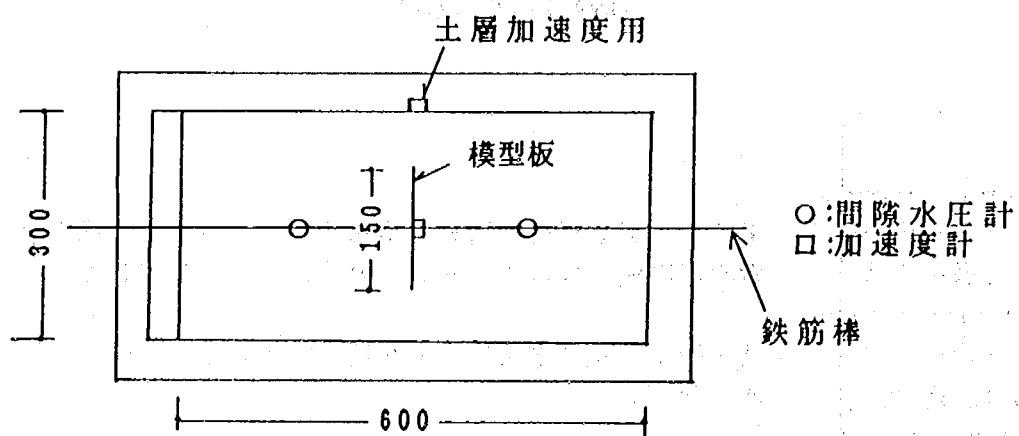
図3.2 実験の手順



平面図 (液状化層厚 240mm)



平面図 (液状化層厚 160mm)



断面図

図 3.3 測定器の配置

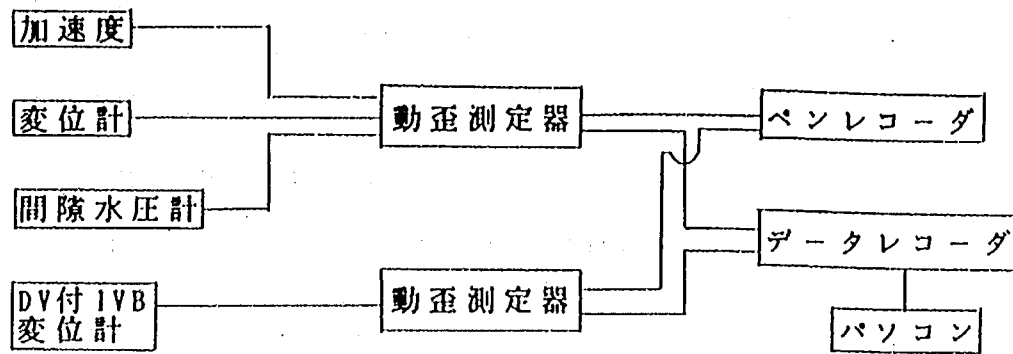


図3.4 測定ブロック図

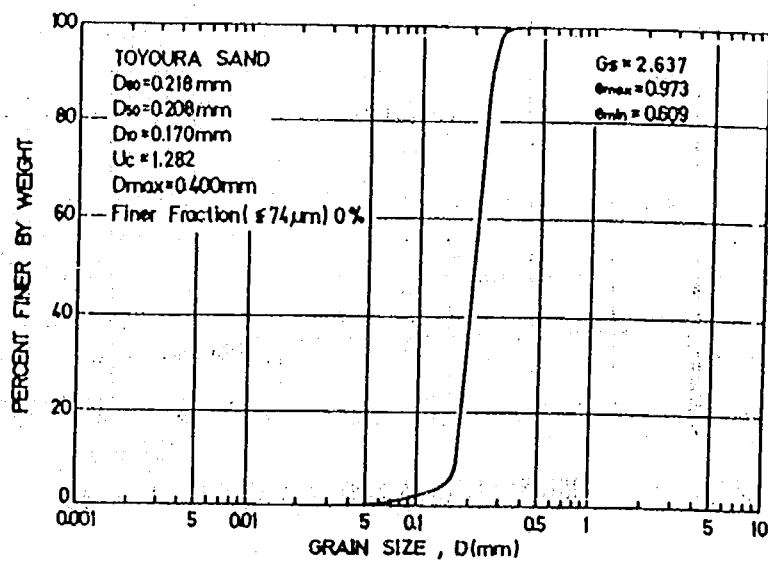


図3.5 粒径加積曲線と物理特性

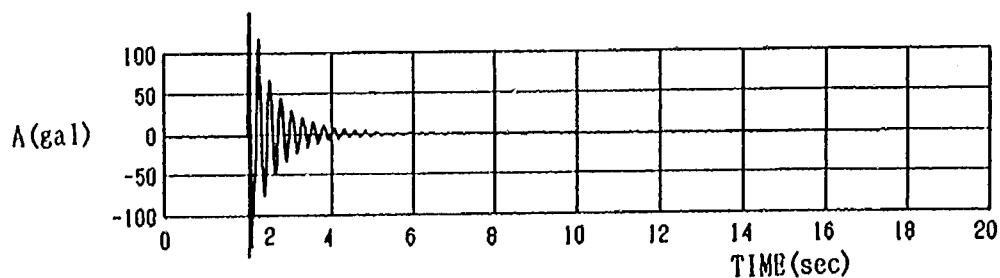


図 3. 6 土槽加速度の時刻歴 (実験 N0. E J 2)

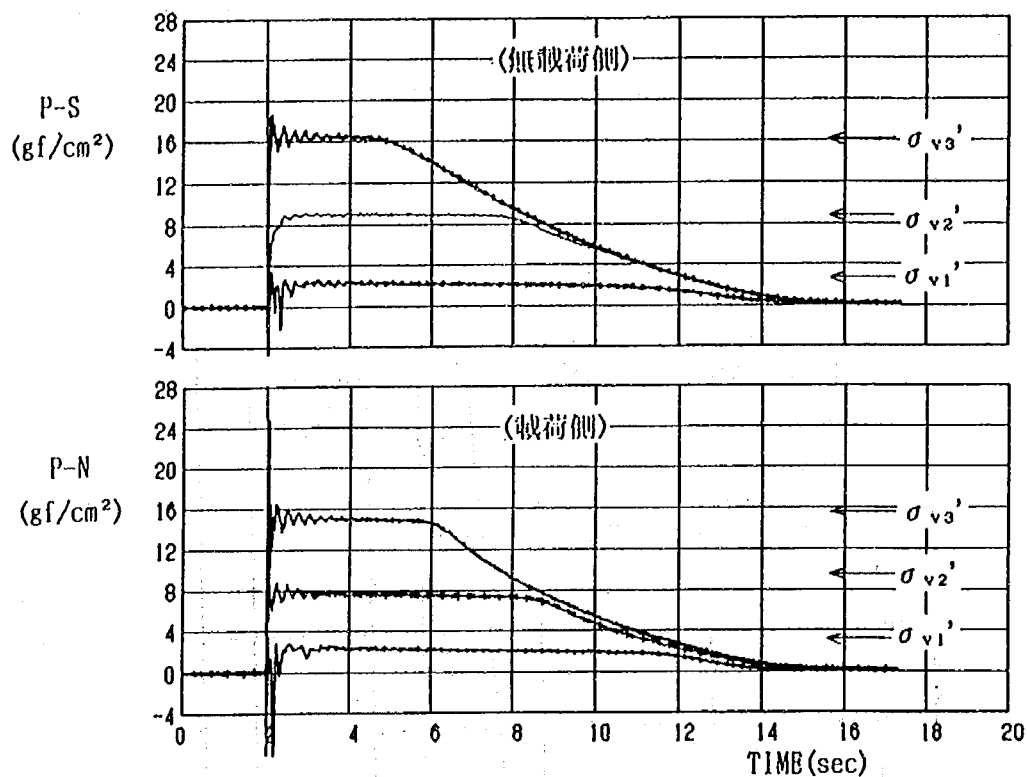


図 3. 7 間隙水圧の時刻歴 (実験 N0. E J 2)

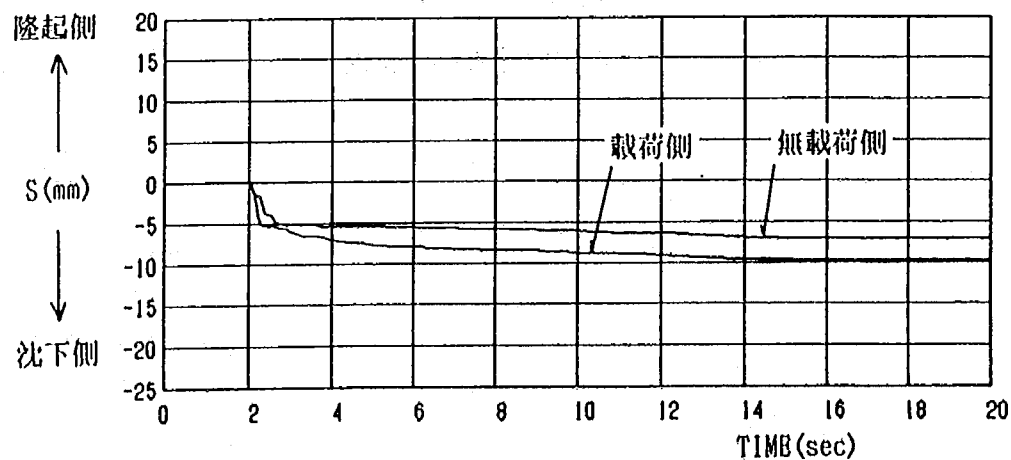


図 3. 8 地表面変位の時刻歴 (実験 N0. E J 2)

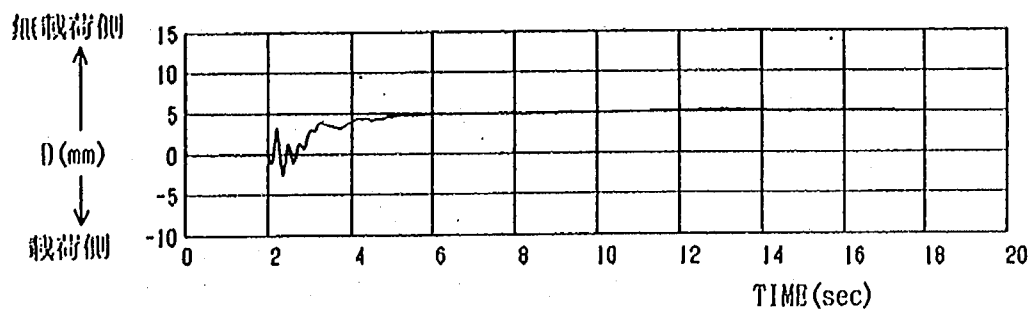


図 3. 9 非接触型変位計による模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. EJ 2)

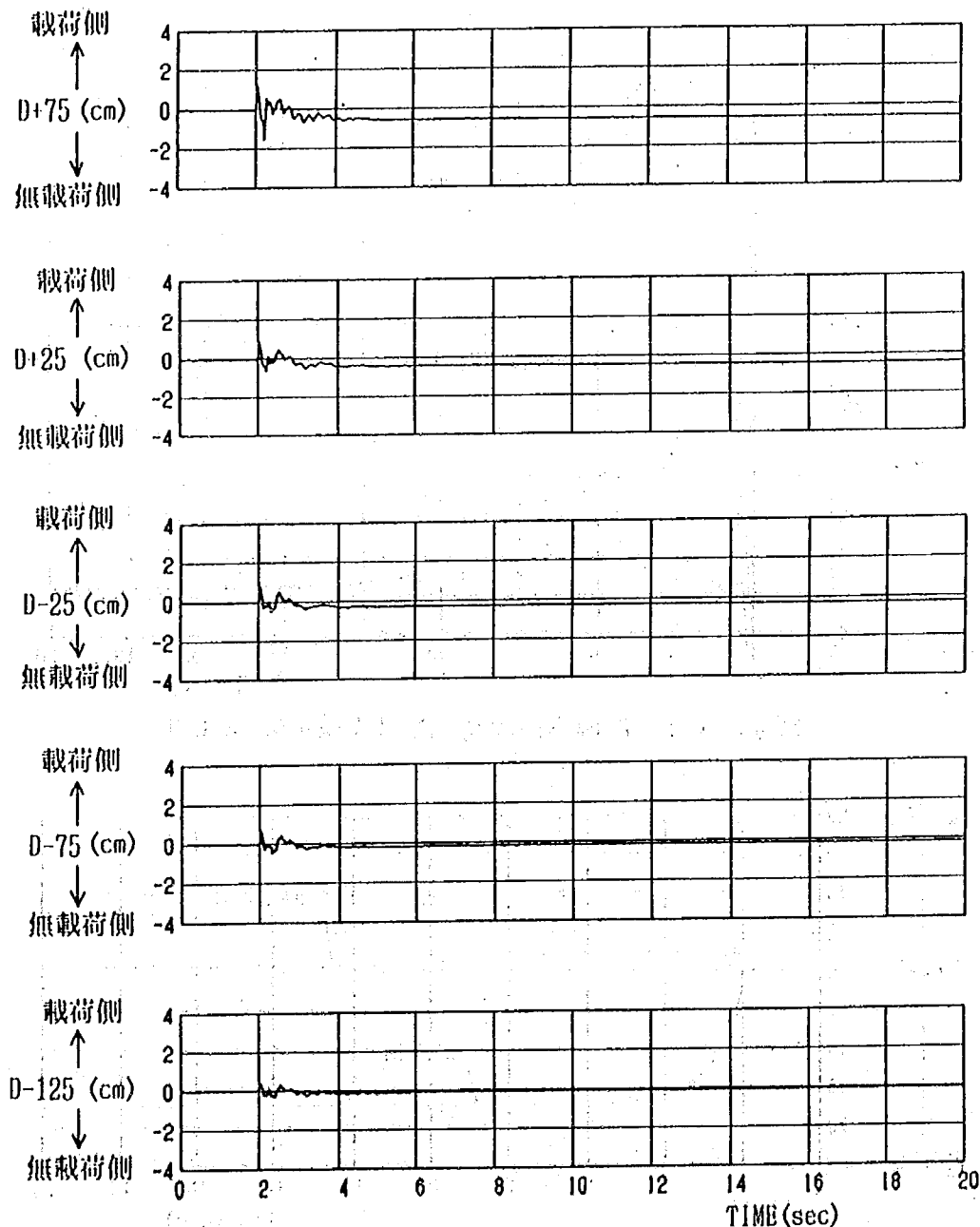


図 3. 10 加速度計から得られた模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. EJ 2)

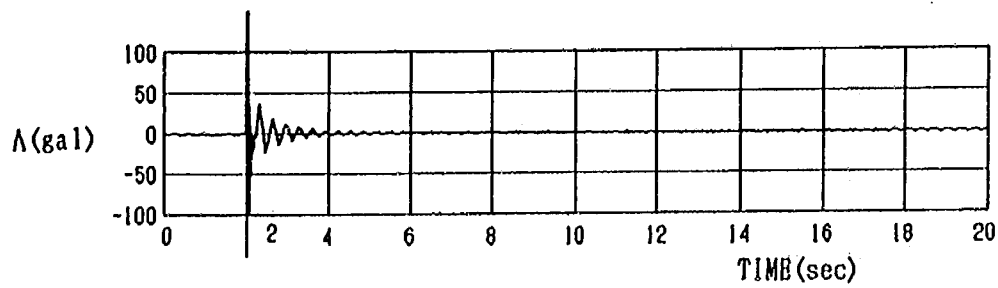


図 3. 1 1 土層加速度の時刻歴 (実験 N0. E L 3)

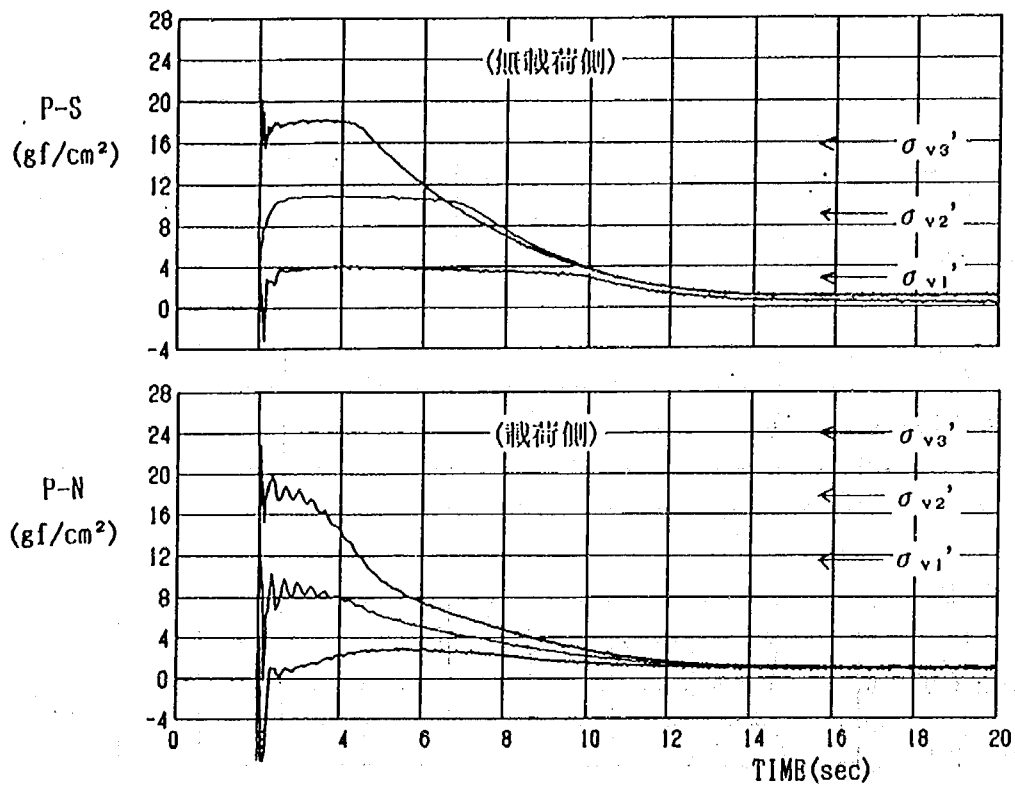


図 3. 1 2 間隙水圧の時刻歴 (実験 N0. E L 3)

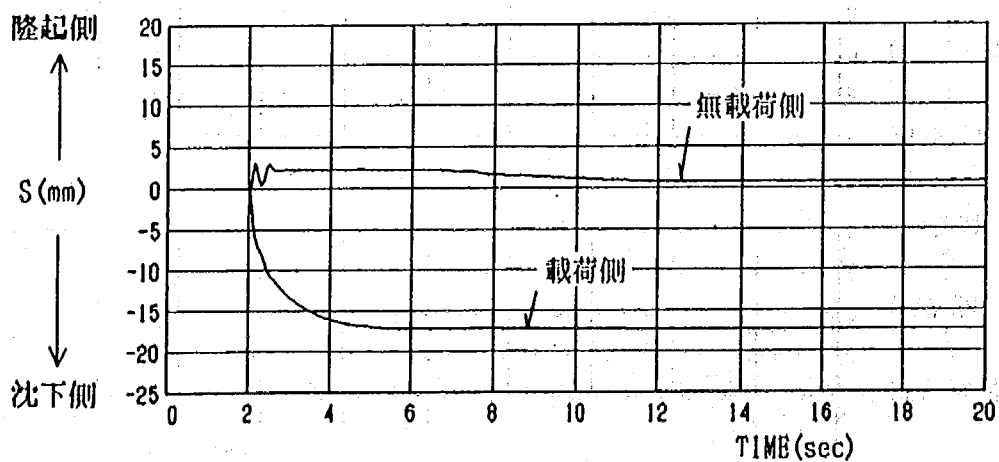


図 3. 1 3 地表面変位の時刻歴 (実験 N0. E L 3)

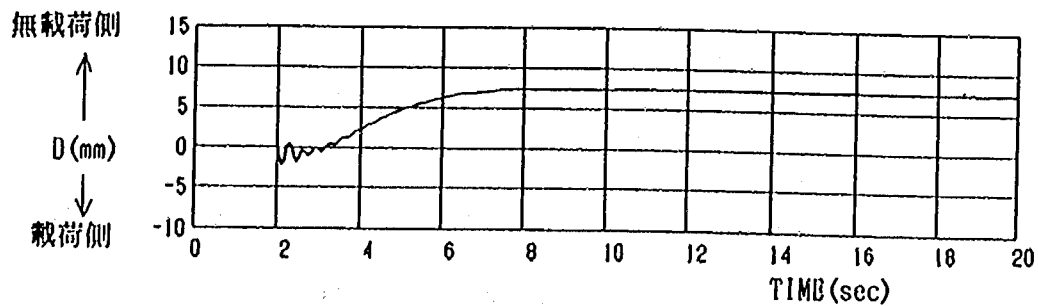


図 3. 1 4 非接触型変位計による模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. E L 3)

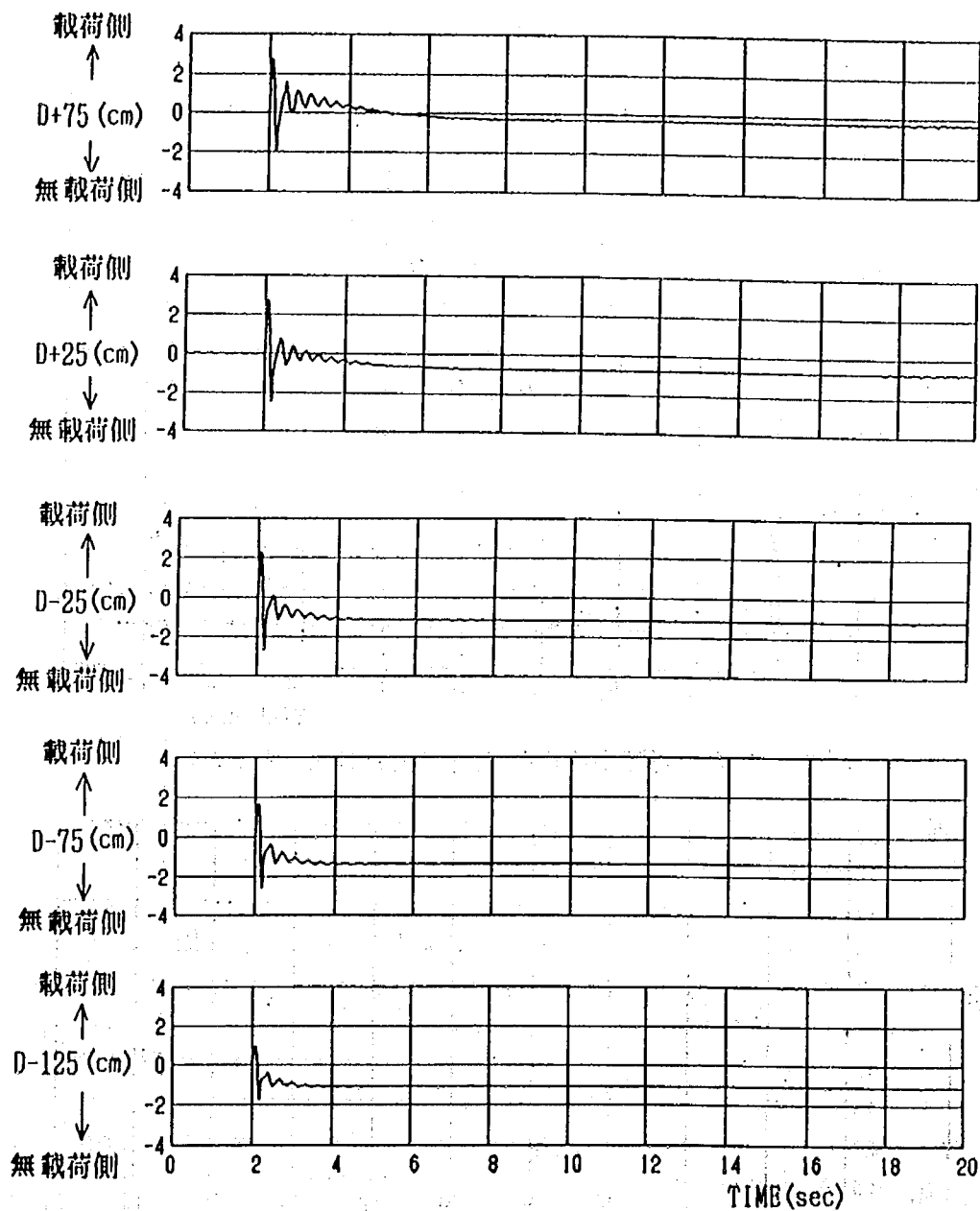


図 3. 1 5 加速度計から得られた模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. E L 3)

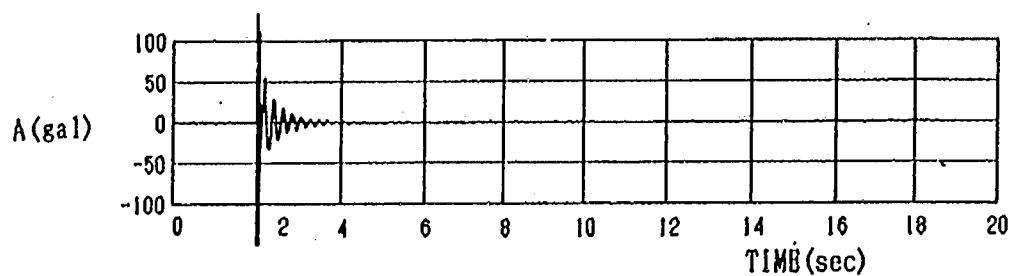


図 3. 1 6 土層加速度の時刻歴 (実験 N0. F A 2)

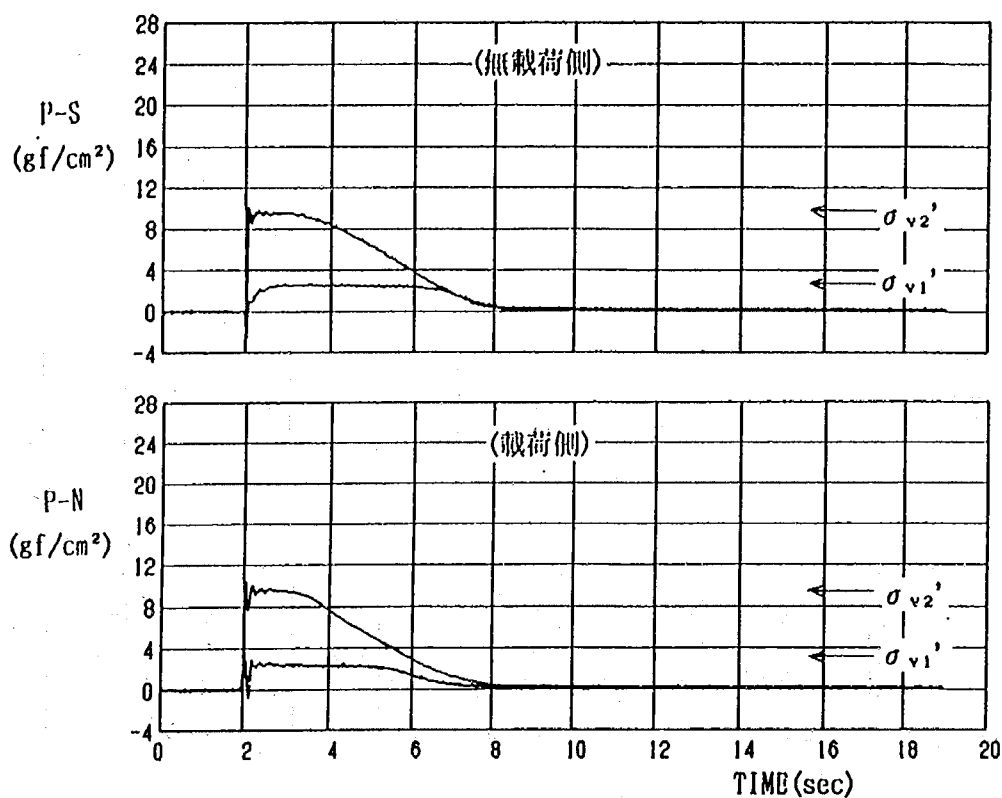


図 3. 1 7 間隙水圧の時刻歴 (実験 N0. F A 2)

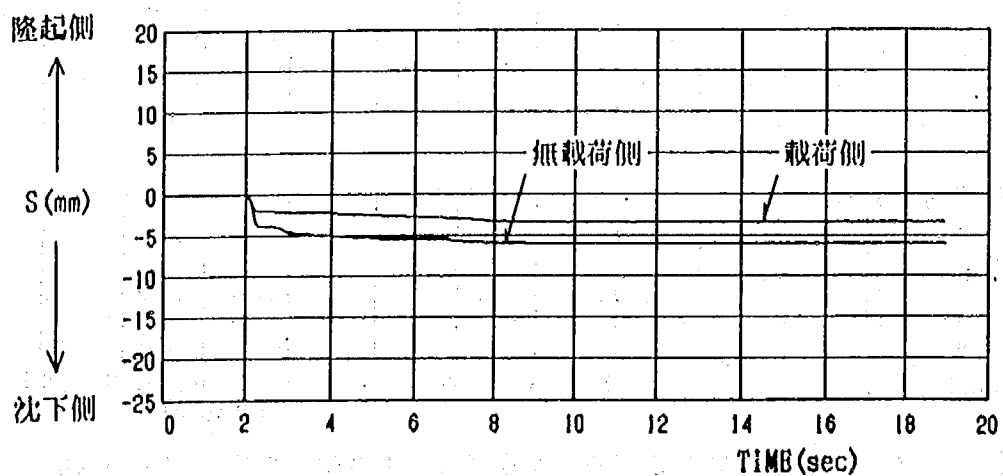


図 3. 1 8 地表面変位の時刻歴 (実験 N0. F A 2)

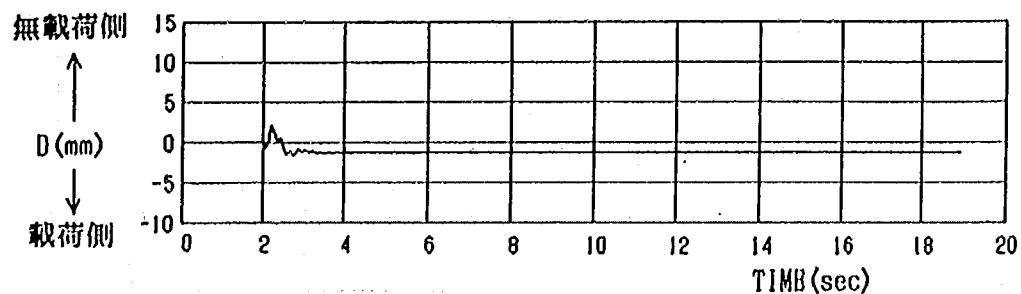


図 3. 19 非接触型変位計による模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. F A 2)

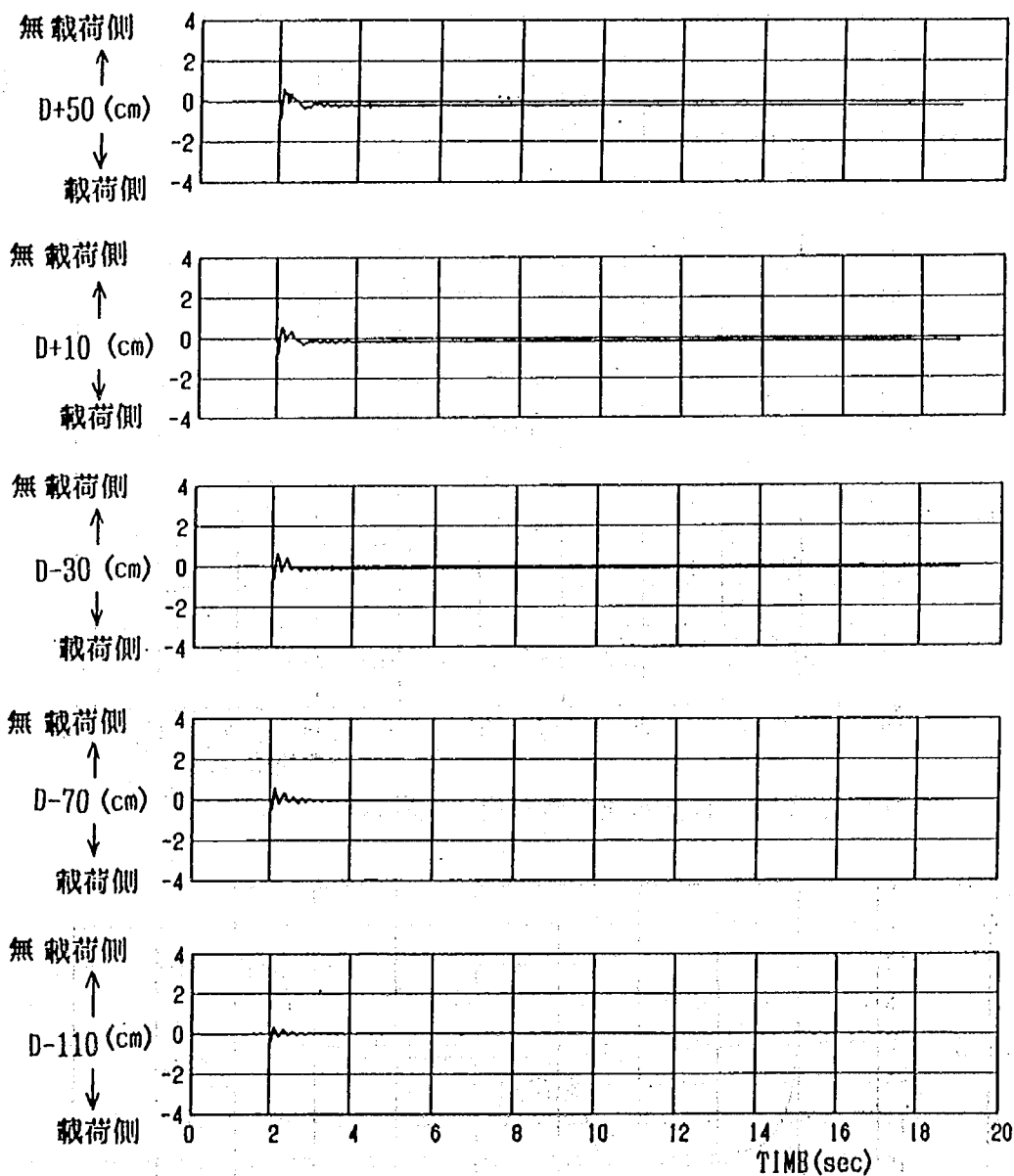


図 3. 20 加速度計から得られた模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. F A 2)

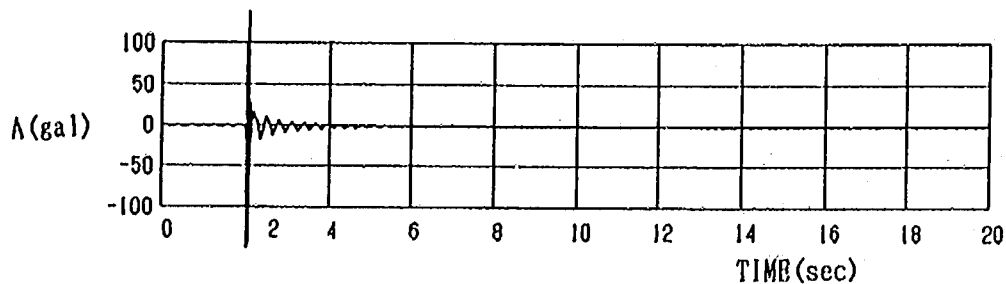


図 3. 2 1 土層加速度の時刻歴 (実験 N0. F C 3)

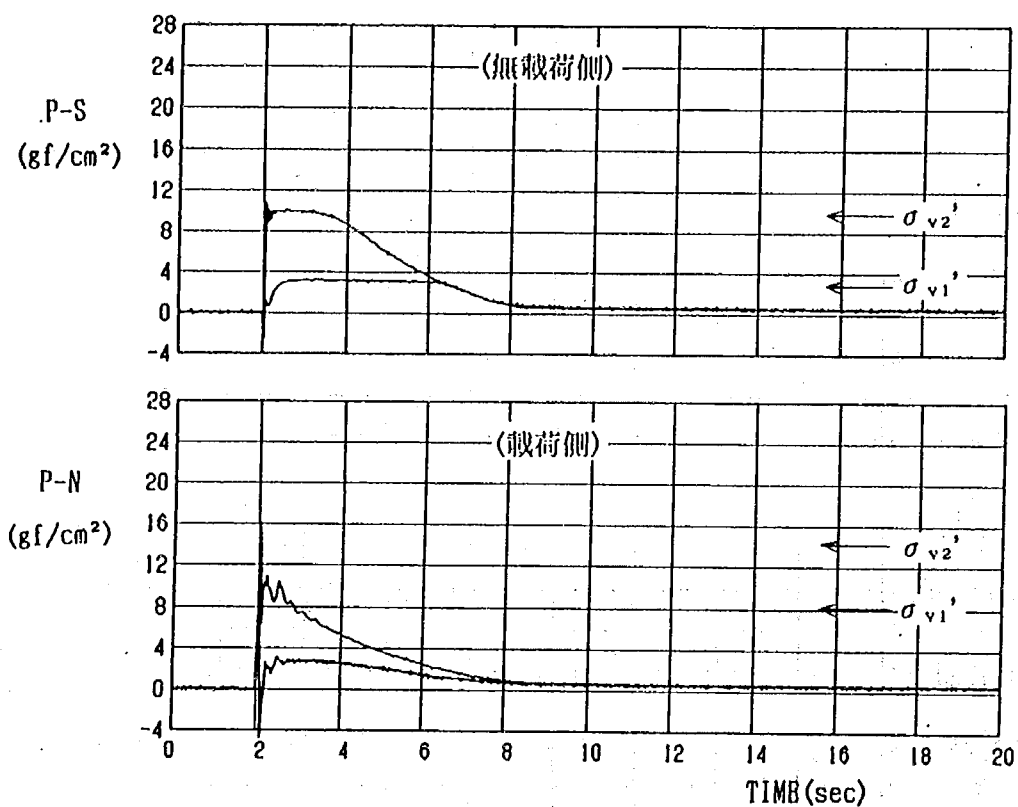


図 3. 2 2 間隙水圧の時刻歴 (実験 N0. F C 3)

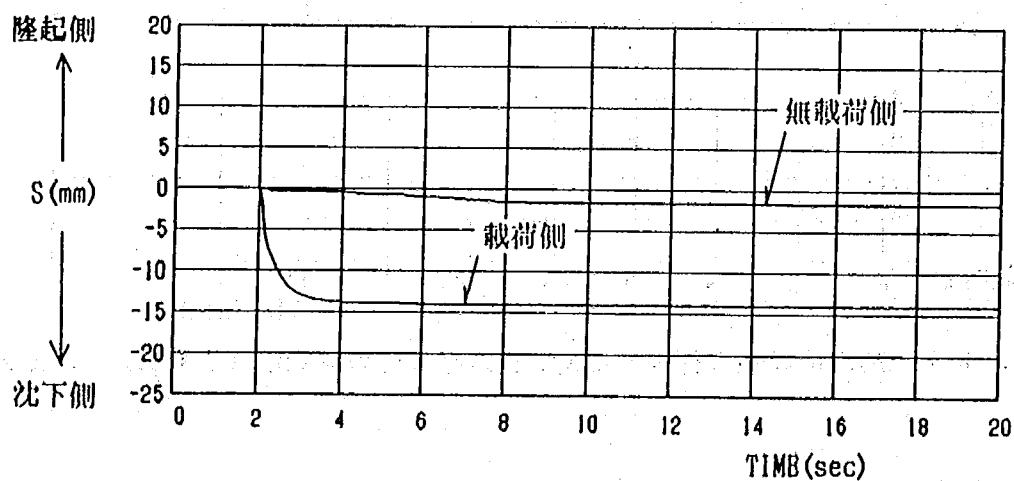


図 3. 2 3 地表面変位の時刻歴 (実験 N0. F C 3)

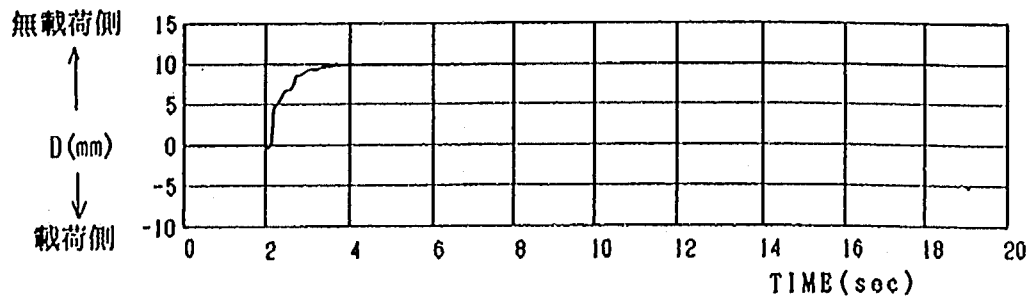


図 3. 2 4 非接触型変位計による模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0, F C 3)

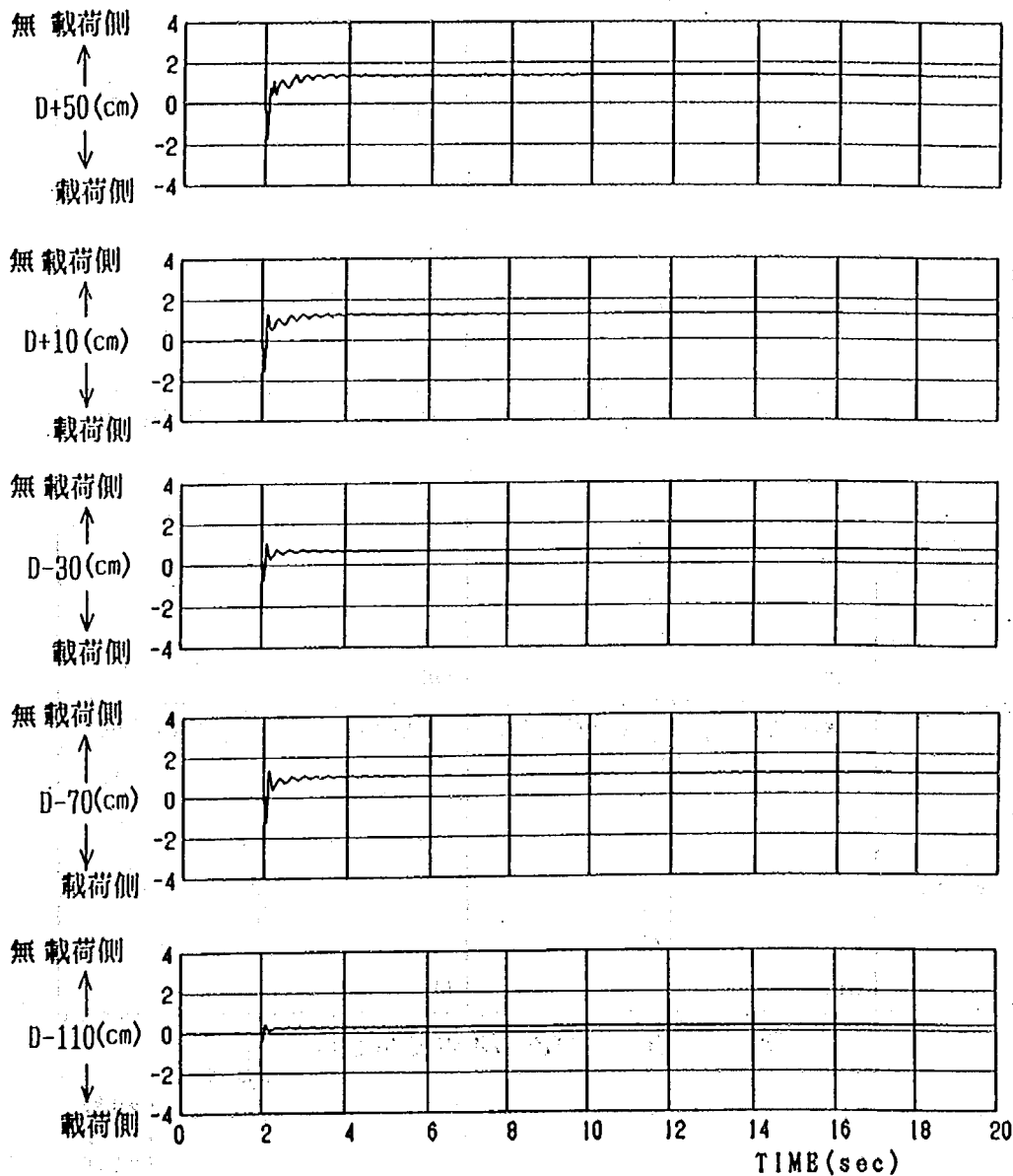


図 3. 2 5 加速度計から得られた模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0, F C 3)

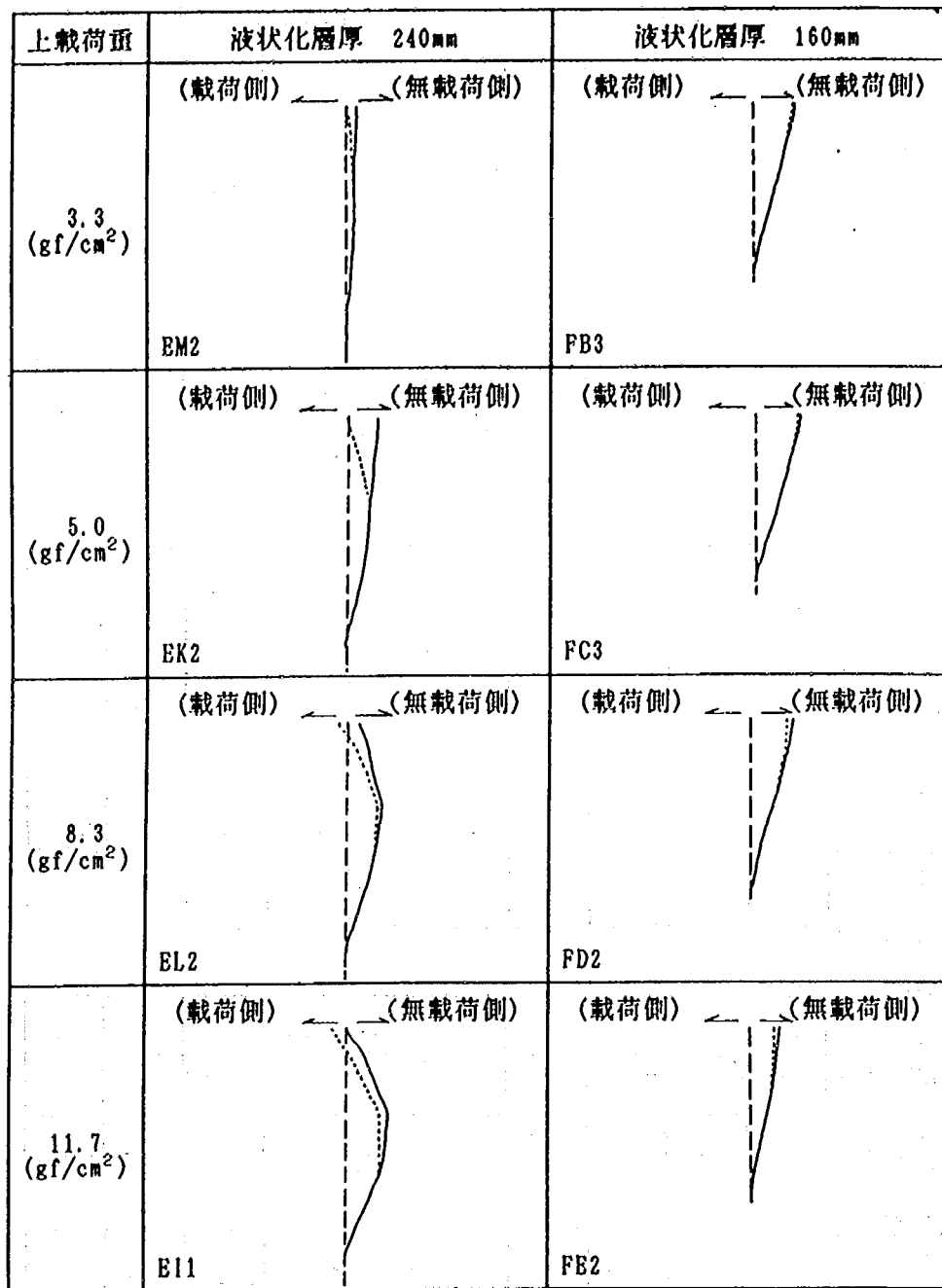


図 3. 2 6 地盤流動量の分布形状

(凡例)

--- t = 0 秒
 t = 1 秒
 ——— t = 5 秒

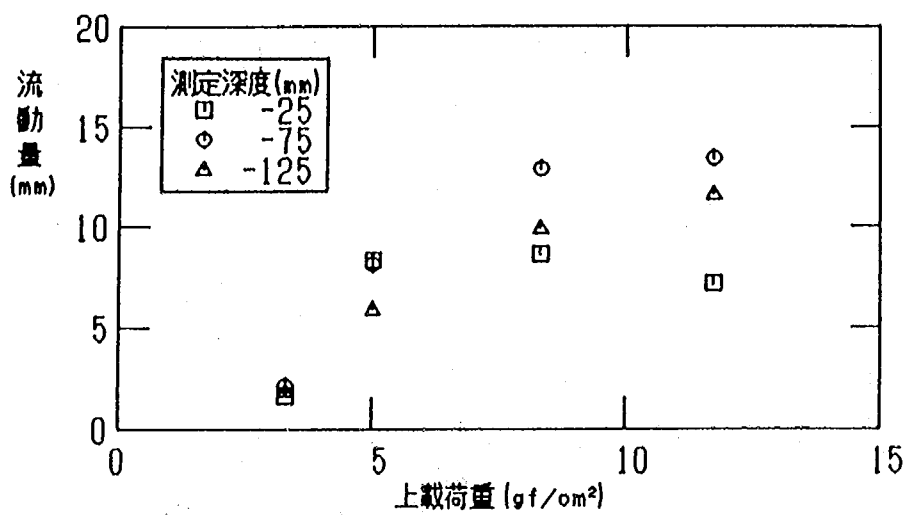


図 3. 2 7 地盤の流動量と上載荷重の関係 ($H=240\text{mm}$)

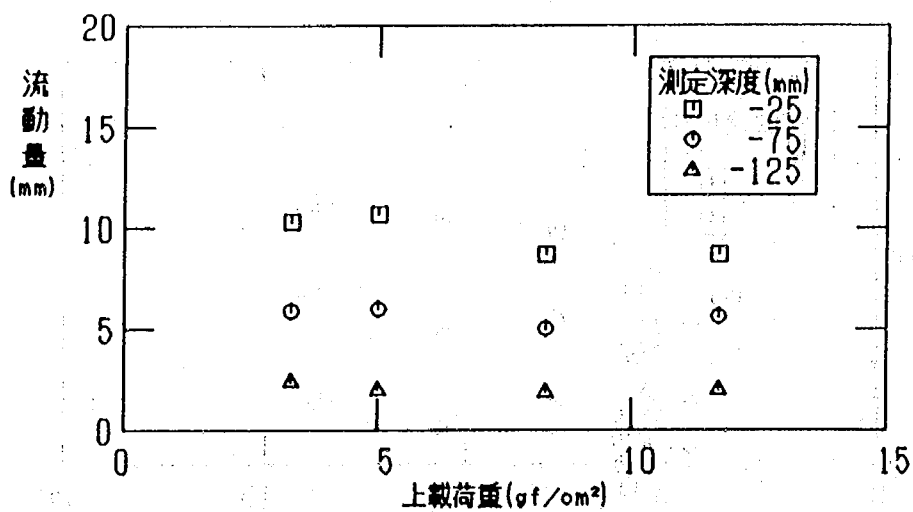


図 3. 2 8 地盤の流動量と上載荷重の関係 ($H=160\text{mm}$)

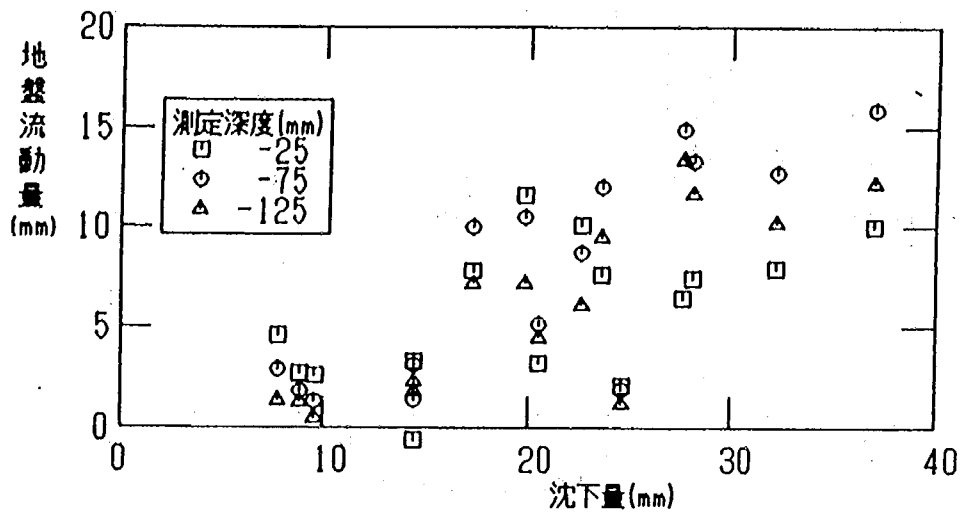


図 3. 2 9 地盤流動量と沈下量の関係 ($H=240\text{mm}$)

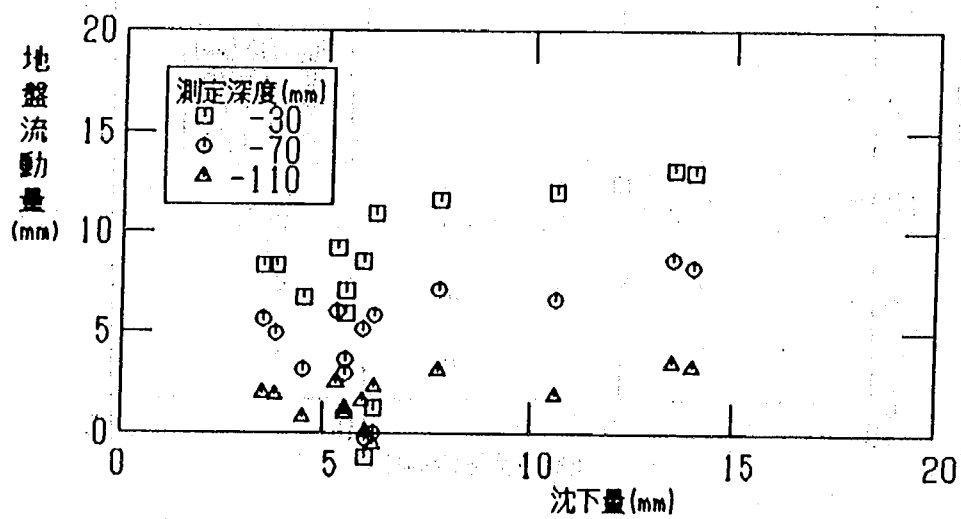


図 3. 3 0 地盤流動量と沈下量の関係 ($H=160\text{mm}$)

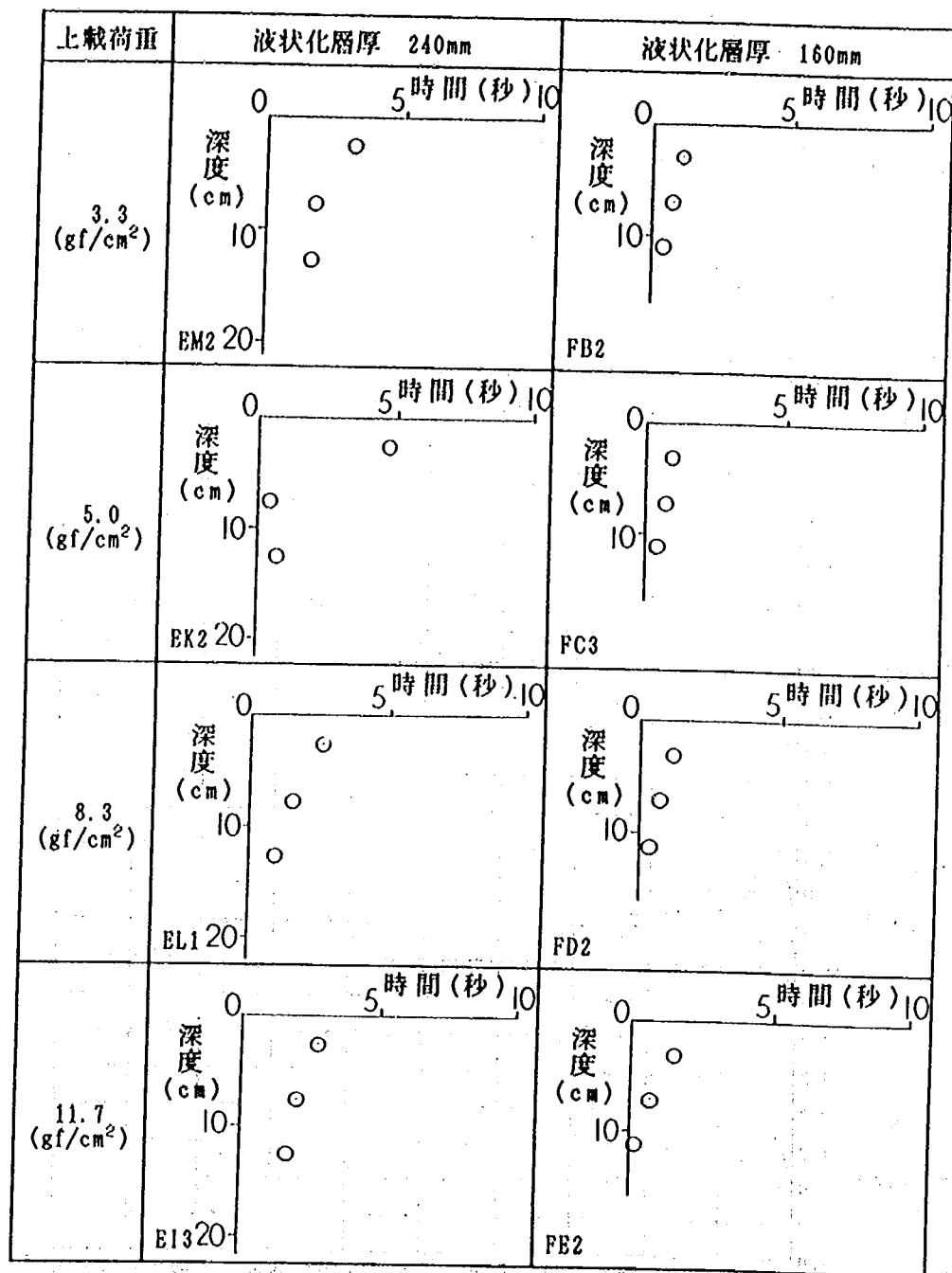


図 3. 3 1 地盤流動の継続時間

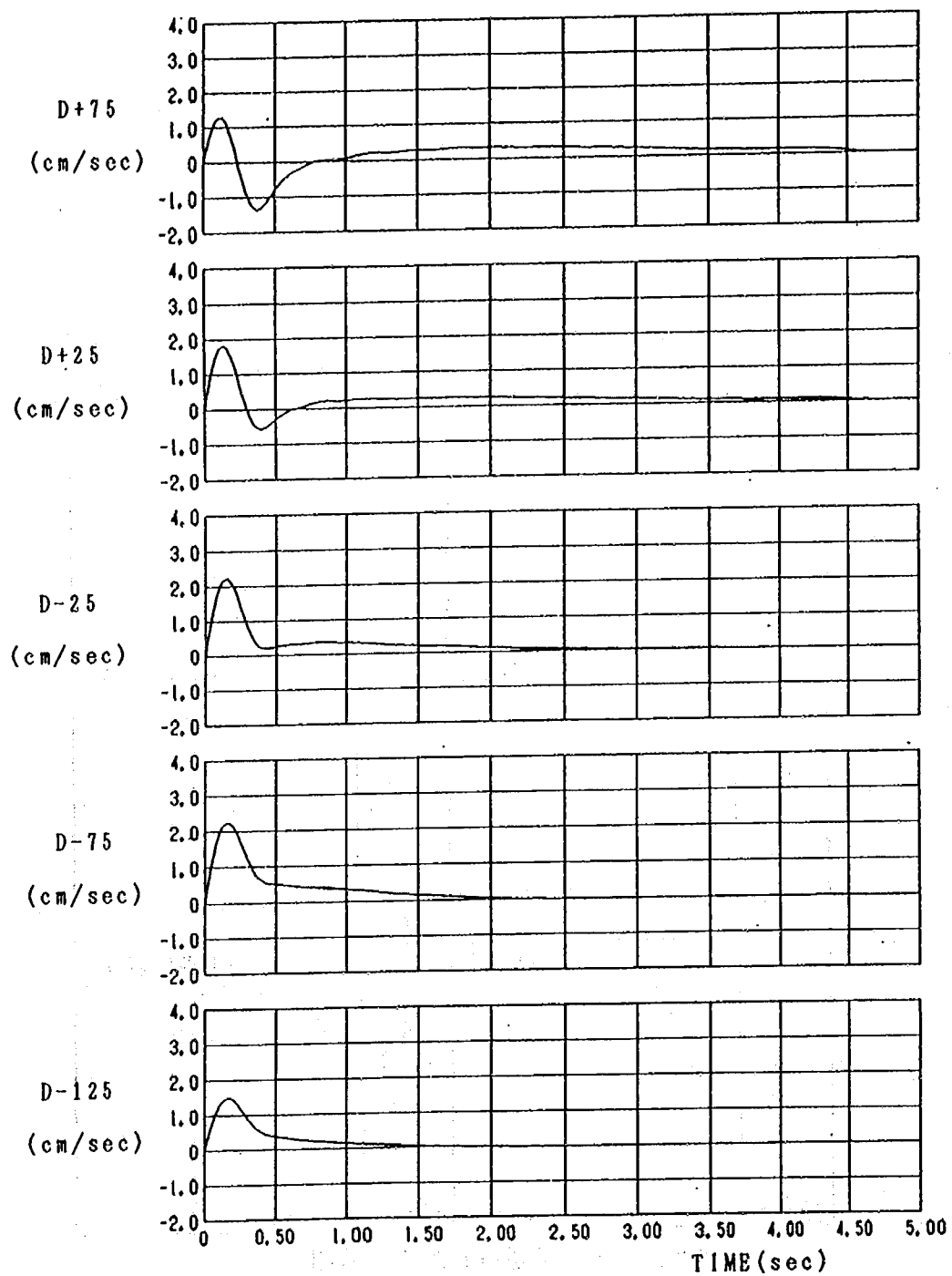


図 3. 3 2 地盤流動速度の時刻歴 (実験 N0. E L 3)

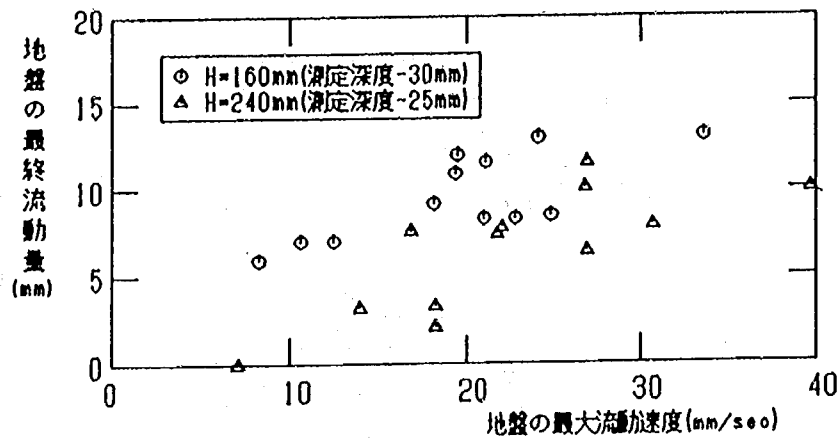


図 3. 3 3 地盤の最終流動量と最大流動速度の関係 (その 1)

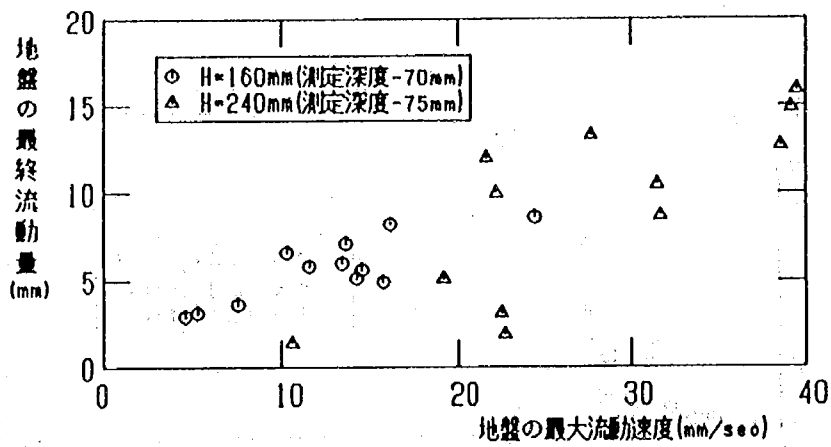


図 3. 3 4 地盤の最終流動量と最大流動速度の関係 (その 2)

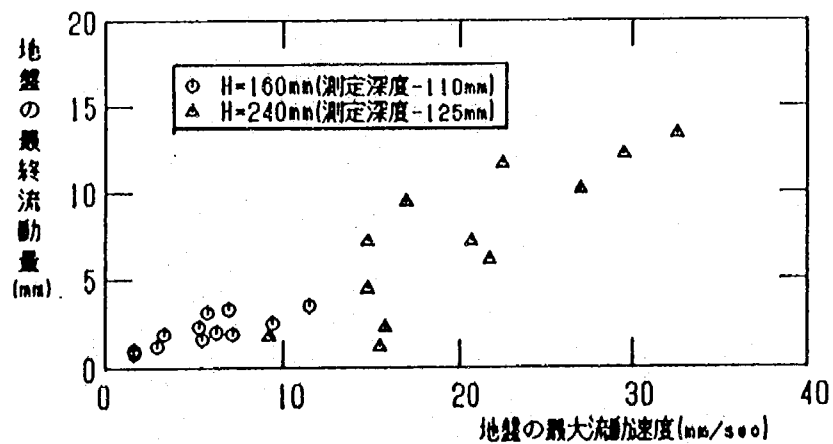


図 3. 3 5 地盤の最終流動量と最大流動速度の関係 (その 3)

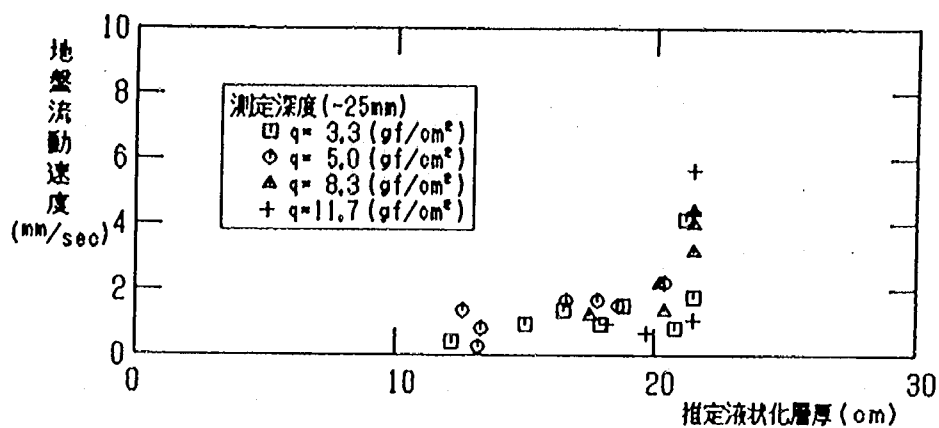


図 3. 3 6 地盤流動速度と液状化層厚の関係 ($H=24$ cm)

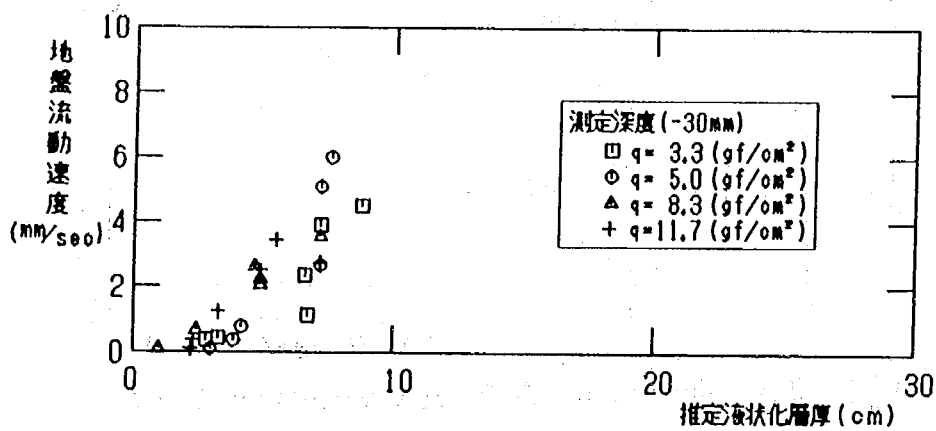


図 3. 3 7 地盤流動速度と液状化層厚の関係 ($H=16$ cm)

4. 中型土槽を用いた地盤流動実験

4. 1 実験概要

本実験は、小型土槽の実験結果と比較を行うことにより地盤の流動特性に与える地盤の寸法効果を把握するとともに、小型土槽の実験では実施できない液状化層の厚さと長さの組み合わせに対する実験を行うために、中型土槽（長さ1.8m, 高さ1.1m, 幅0.6m）を用いて行った模型実験である。実験モデルは小型土槽（長さ0.6m, 高さ0.4m, 幅0.3m）において実施したモデル（図1.4）と同じである。

4. 2 実験装置

実験に用いた土槽を図4.1に示す。小型土槽の実験と同じように、ボイリングを利用して地盤作成を行う。地盤の作成は次のような方法で行った。

- ①土槽内に豊浦標準砂を25cm程度締め固め、その上にボイリング用タンクを設置する。
- ②ボイリング用タンクの上部には砂がタンク内に流入しないように予めジオテキスタイルを取り付けてある。
- ③その上に豊浦標準砂を詰める。
- ④ボイリング用タンク内に給水し、タンクより上部の砂をボイリングさせる。ボイリングの状況は土槽全体にわたってボイリングする場合、土槽の片側半分だけボイリングする場合、局部的にしかボイリングしない場合があり、人為的に砂をかき混ぜる必要があった。
- ⑤比較的土槽全体にわたりボイリングした段階で給水を停止する。停止すると同時にボイリングしていた砂は再堆積し始める。
- ⑥再堆積が終了するのを待って、地表面からポンプを利用して排水し、地表面まで水位を低下させる。

このようにして液状化層を作成した。

液状化の方法は図4.1(b)に示すように土槽の側面（液状化層のほぼ中央の高さ）を打撃することにより行った。なお、打撃は地盤流動の方向と直角方向に行った。

4. 3 実験条件と測定項目

(1) 実験条件と実験手順

実験条件を表4.1に示す。実験条件としては、液状化層を一定（約500mm）にし、上載荷重を徐々に増加させて実施した。荷重段階は0, 3.57, 6.61, 9.64(gf/cm²)の4段階とした。地表面と計器との位置関係は、砂がボイリング用タンク内に流入し、実験を繰り返すにつれ位置関係にずれが生じたため、表4.1に値を示しておいた。模型板先端支持条件が2種類存在しているのは、当初固定支持で行っていたところ、支持部分で模型板が折れ曲がる傾向にあったためピン支持に変更したことによる。

実験は図3.2に示した手順のうち、初期圧密を行わないで実施した。

(2) 測定項目と測定方法

各実験における測定項目を表4.2に、測定器の配置を図4.2に示す。また、模型板に取り付けた超小型加速度計の配置を図4.3に示す。非接触型の変位計取付け位置は地表面から100mmの位置である。

測定方法は図3.4に示した方法と同じで、測定のサンプリングは100Hzで行った。

4. 4 地盤特性

実験に用いた砂は豊浦標準砂であり、3章に示したのと同じである。液状化層作成時における相対密度の推定であるが、中型土槽の場合には水の給排水装置が不十分であったため、ボーリング中に砂の質量が変化し、推定が困難となった。したがって、3章に示した小型土槽における場合とほぼ同程度であると考え、有効上載圧の算出等には表4.3に示す値を用いた。

4. 5 実験結果

4. 5. 1 時刻歴結果

各実験ケースにおいて得られた時刻歴結果は巻末資料に示し、ここでは実験ケースNo. IID1における結果を基にして結果の概要を述べる。

(1) 土槽加速度

図4.4に土槽側面に取り付けた加速度計の時刻歴結果を示す。測定した加速度の方向は地盤が流動する方向であり、横軸(時間軸)のゼロ秒時において土槽の側面に打撃を加えている。打撃後0.5秒程度振動している様子がわかる。

(2) 間隙水圧

図4.5に過剰間隙水圧の時刻歴結果を示す。無載荷側における結果を見ると、中型土槽においても小型土槽の実験と同じように最深部から上部へ徐々に過剰間隙水圧が消散していることがわかる。また、載荷側においては各深度ともに打撃直後から消散が始まっている。最下段に取り付けた間隙水圧計から得られる値は無載荷側のものとほぼ一致しており、過剰間隙水圧の消散が終了するまでに要する時間は約20秒である。

表4.4に各実験において得られた過剰間隙水圧比を示す。これによれば、載荷側、無載荷側ともに最下段に取り付けた⑤の値は他の値と比較して小さくなっていることが分かる。この理由として、最下段のすぐ下にはボーリング用タンクがあり、過剰間隙水圧がタンクの中に向かって消散している可能性がある。無載荷側の値について見ると上載荷重がゼロでない場合、①及び②の値は1.0を上回っているケースが存在している。IIシリーズとIシリーズの値を比較して見ると、IシリーズはIIシリーズに比べて小さくなっていることが分かる。これは、IIシリーズの場合には比較的土層全体

が均一にボイリングしているのに対して、Ⅰシリーズの場合にはボイリングが局部的に偏っており、地盤の作成状態が良くなかった可能性がある。

（３）地表面変位

図4.6 に地表面変位の時刻歴を示す。載荷側は沈下、無載荷側は隆起し、過剰間隙水圧の消散に伴い地盤全体が徐々に沈下している。

（４）地盤流動量（模型板の水平変位）

図4.7 及び図4.8 に地盤流動量の時刻歴結果を示す。図4.7 は非接触型変位計から得られた値、図4.8 には加速度計から得られた値を示した。なお、加速度計から水平変位を求める方法は小型土槽の実験の際の計測方法で示した通りである。

非接触型変位計を取り付けている位置は地表面から上に約100mm の位置である。図4.8 に示す値と比較してみると、加速度計から得られた最終変位量（D+120 mm）と非接触変位計から得られた最終変位量はほぼ等しく、変位の発生挙動もD+120 mmを除けば類似の時刻歴を示しており、共に良好な計測が行われていると考えられる。

しかし、今回の実験では模型板に厚さ 0.5mmのステンレスを使用しているため、小型土槽の実験に比べ模型板の剛性が大きく、模型板の存在が地盤の流動量に影響を及ぼしていることが考えられる。そこで図4.9 に示すような位置で、地表面における流動量の分布を測定した。測定の方法は、あらかじめ墨汁で黒く染めた豊浦標準砂を地表面にライン状に設置し、地盤流動の終了時にそのラインの移動量を測定するという方法によった。その結果を表4.5 に示す。これより模型板背面における流動量は、その他の地表面の流動量に比べ約6割程度と小さく、模型板が地盤の流動を抑制していることが確認された。

このことは、地盤の流動量そのものを小型土槽の実験結果と比較する場合、模型の寸法比だけを乗じて換算すると誤差を含むことを示している。

4. 5. 2 地盤流動量

（１）分布形状

図4.10に模型板に取り付けた加速度計を用いて求めた地盤流動の分布形状を示す。前述したようにⅡシリーズの実験では模型板先端の支持条件を固定としていたため、液状化地盤の作成時に模型板の先端部分を曲げてしまい、塑性変形を生じていたことが実験終了後に判明した。その影響のためか、Ⅱシリーズは比較的先端部分から変位が生じているのに対して、支持条件をピン支持にしたⅠシリーズの場合にはⅡシリーズに比べ分布形状も異なり、上端の変位量も小さい傾向にある。

（２）上載荷重との関係

図4.11～図4.12に地盤の最終流動量と上載荷重の関係を示した。ⅡシリーズとⅠシリーズは別々に

示し、値は各実験における平均値で示した。実験データが少ないこともあり充分ではないが、実施した範囲内では上載荷重が大きいほど流動量も大きくなることがわかる。

(3) 載荷側地表面変位との関係

図4.13～図4.14に地盤の最終流動量と載荷側地表面沈下量との関係を示した。IIシリーズの場合には、データのバラツキが見られる。Iシリーズの場合には沈下量が大きいほど流動量も大きくなる傾向が認められる。

(4) 流動時間

図4.15に地盤流動の継続時間を示した。地盤流動の継続時間とは模型板に水平変位が生じている時間であるが、ここでは最終流動量の95%の値に達するまでの時間で示した。中型土槽においても地表面に近いほど流動が長く継続していることが読み取れ、特に深度15cm以浅では急激に長くなる傾向にある。

4. 5. 3 地盤流動速度

(1) 時刻歴

模型板に取り付けた加速度計から得られた流動変位を微分して、流動速度を求めた。その一例（実験No. 1A1）を図4.16に示した。図中の縦軸の符号は無載荷側への変位が増加する場合をプラスとしている。いずれの深度においても打撃後に最大となり、徐々に小さくなっている。

(2) 最大流動速度

図4.17～図4.18に地盤の最大流動速度と上載荷重の関係を示した。図4.11～図4.12に示した最終流動量と上載荷重の関係と類似した関係にあることが分かる。

(3) 液状化層厚との関係

図4.19～図4.20に流動速度と推定液状化層厚の関係を示した。流動速度には地表面に近い深度-25(mm)の位置における値を示した。(2)で示した最大流動速度は流動量に比べ、大きすぎるように思われるために、ピークを過ぎた値を用いた。液状化層厚は(3.3)式を用いて推定した。ただし、中型土槽では最下段における間隙水圧の値に載荷側と無載荷側で差が見られないので、無載荷側における値を用いた。図に見られるように液状化層厚が大きい程、流動速度も大きくなっている。

4. 6 まとめ

中型土槽を用いて、液状化地盤の地表面に盛土等による偏荷重が作用する場合の地盤流動実験を実施した。その結果をまとめると次のようになる。ただし、地盤の作成状態には多少のバラツキがあるものと推定される。

- (1) 模型板にステンレス ($t=0.5\text{mm}$) を使用した結果、模型板背面の地表面における流動量は、板模型から離れた地表面の流動量の約 6 割程度になっており、小型土槽の実験に用いた模型板よりも、板による地盤の流動の抑制効果が大きかった考えられる。
- (2) 流動量は載荷側地表面沈下量と相関があり、沈下量が多いほど流動量も大きくなっている。また、沈下が継続している時間と流動が継続している時間はほぼ等しい。
- (3) 地盤流動の最終分布形状は I シリーズでは三角形分布となっており、小型土槽実験の F シリーズ（液状化層厚の薄い場合）に類似である。
- (4) 過剰間隙水圧は完全に消散するまでに 20 秒程度要するのに対して、流動の継続時間は 4～5 秒程度と短く、小型土槽の実験と同様に、液状化が継続（過剰間隙水圧が残留）しているにもかかわらず流動は停止してしまう。
- (5) 最大流動速度と上載荷重の関係は、最終流動量と上載荷重の関係と類似している。
- (6) 最大流動速度のピークを過ぎた範囲内では、流動速度は液状化層厚が大きいほど大きくなっている。

また、中型土槽の実験結果を小型土槽の実験結果と比較すると、模型板の剛性の違いが地盤の流動量の値や流動量の深度分布に与える影響が大きいことが確認され、偏荷重を受けている地盤そのものの流動特性を把握するためには、より剛性の小さな模型板を用いる工夫が必要である。

さらに、板の剛性の違いが地盤の流動特性を変化させるということは、板に作用する流動圧の発生挙動が板の剛性に影響を受けることを示唆しており、流動圧の検討・整理の際に用いるべき指標に、板の剛性を含める必要があることがわかる。

表4.1 実験条件

実験No.	液状化層厚 H (mm)	上載荷重 q (gf/cm ²)	載荷幅 B (mm)	地表面と計器との位置関係			模型板先端 の支持条件
				間隙水圧計		加速度計	
H C 1	510	3.57	900	-120mm	-120mm	40mm	固定
H C 2	515	3.57	900	-120mm	-120mm	60mm	固定
H C 3	514	3.57	900	-110mm	-110mm	50mm	固定
H D 1	518	6.61	900	-110mm	-120mm	60mm	固定
H D 2	522	6.61	900	-100mm	-110mm	50mm	固定
H D 3	512	6.61	900	-100mm	-120mm	60mm	固定
I A 1	508	6.61	900	-100mm	-100mm	30mm	ピン
I A 2	493	6.61	900	-65mm	-100mm	50mm	ピン
I A 3	490	6.61	900	-90mm	-90mm	50mm	ピン
I B 1	485	9.64	900	-90mm	-90mm	50mm	ピン
I B 2	498	9.64	900	-110mm	-110mm	30mm	ピン
I B 3	500	9.64	900	-95mm	-100mm	35mm	ピン
I C 1	484	0	900	-90mm	-90mm	50mm	ピン
I C 2	440	0	900	-40mm	-40mm	95mm	ピン

注) 地表面と間隙水圧計との位置関係は 左: 無載荷側, 右: 載荷側を示す。

表4.2 測定項目

測定項目	測定器	測点数	測定器の型式	備考
地盤流動量	DV付IVB 変位計	1点	誠研舎(MODEL EA-330)	模型板の頭部に 取り付ける
	超小型 加速度計	9点	SSK(AL5-2)	シリコンで加速 度計をおおう
間隙水圧	間隙水圧計	5点(載荷側) 5点(無載荷側)	共和電業 (BP-500GRS)	金物に間隙水圧 計を取り付ける
地表面の 鉛直変位	変位計	1点(載荷側) 1点(無載荷側)	東京測器 (SDP-100R)	
地表面の 加速度	加速度計	1点	Shinkoh(BA-2L-SH)	アクリル板に取り 付ける
土槽の 加速度	加速度計	1点	Shinkoh(BA-2L-SH)	土槽の側面に取り 付ける

表4.3 中型土槽における地盤特性

間隙比 e	0.842
相対密度 D_r (%)	36
飽和単位体積重量 γ_{sat} (gf/cm ³)	1.89

表4.4 過剰間隙水圧比

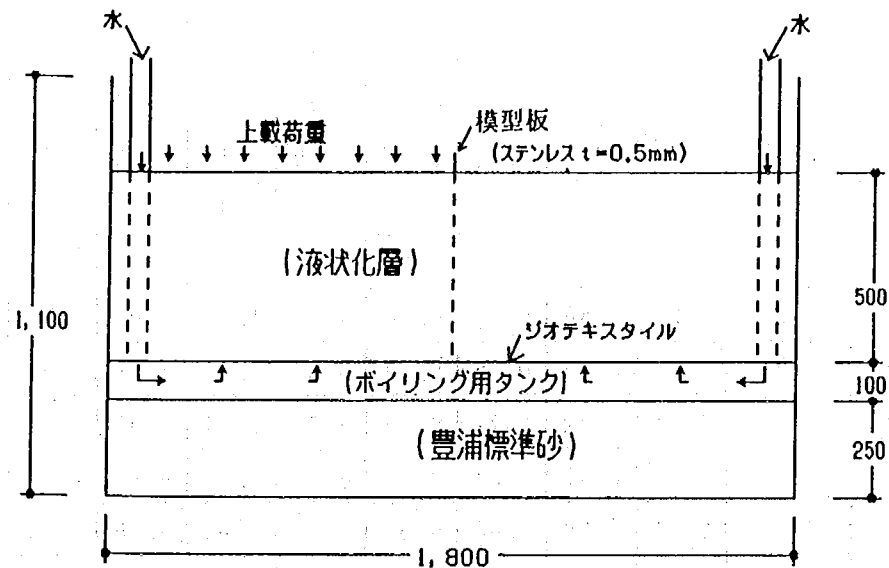
実験 No.	液状化 層厚 (mm)	上載荷 重 (g /cm ²)	載荷側 (南側) 間隙水圧比					無載荷側 (北側) 間隙水圧比				
			①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤
HC1	510	3.57	0.88	0.88	0.89	0.82	0.74	1.06	1.00	0.95	0.94	0.68
HC2	515	3.57	0.81	0.93	0.90	0.80	0.78	1.11	1.04	0.97	0.91	--
HC3	514	3.57	0.75	0.95	0.92	0.92	0.80	1.12	1.02	0.96	0.96	0.84
HD1	518	6.61	0.72	0.84	0.89	0.84	0.77	1.24	1.06	0.94	0.93	0.78
HD2	522	6.61	0.89	0.93	0.90	0.92	0.69	1.24	1.10	1.01	0.99	0.82
HD3	512	6.61	0.61	0.88	0.88	0.87	0.76	1.26	1.09	0.99	0.99	0.87
IA1	508	6.61	0.58	0.75	0.79	0.81	0.63	1.46	1.26	1.10	1.11	0.82
IA2	493	6.61	0.74	0.92	0.91	0.81	0.69	1.04	0.95	0.95	0.91	0.81
IA3	490	6.61	0.72	0.91	0.87	0.82	0.70	1.05	0.98	0.95	0.93	0.77
IB1	485	9.64	0.59	0.70	0.68	0.65	--	1.05	0.96	0.92	0.93	0.72
IB2	498	9.64	0.72	0.83	0.83	0.88	0.73	1.22	1.08	1.02	0.97	0.81
IB3	500	9.64	0.46	0.67	0.77	0.74	0.67	1.02	0.97	0.93	0.71	0.79
IC1	484	0	0.89	1.01	0.95	0.87	0.73	0.95	0.93	0.90	0.75	0.73
IC2	440	0	1.10	1.12	0.99	0.91	0.78	0.98	1.00	0.94	0.86	0.73

注) ①～⑤は間隙水圧の測定位置を示し、①： σ_1' ，⑤： σ_5' に対応する。

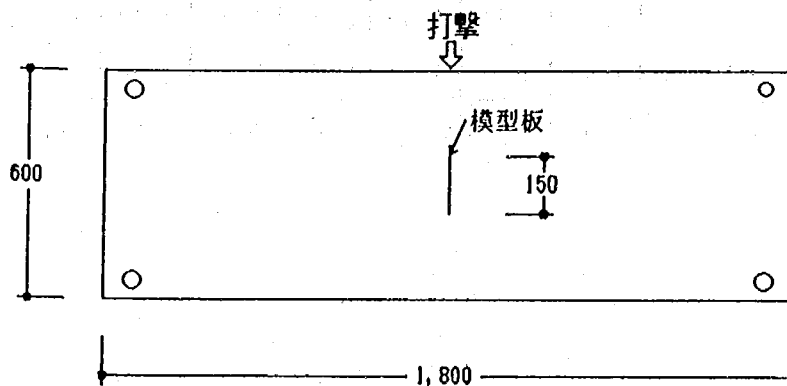
表4.5 地表面の流動変位置

実験 No.	液状化 層厚 (mm)	上載荷重 (g/cm^2)	変位置 (mm)												
			変位置測定位置 (cm)												
			(西側)											(東側)	
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
IA1	508	6.61	15	15	25	30	25	20	15	15	20	25	30	45	5
IA2	493	6.61	15	15	15	15	10	10	10	10	15	15	20	25	15
IA3	490	6.61	15	15	15	15	15	15	10	8	5	5	5	3	3
IB2	498	9.64	10	15	20	20	15	15	10	10	15	15	30	30	10

注) 数字の上の・印はその測定位置が板の背面であることを示す。

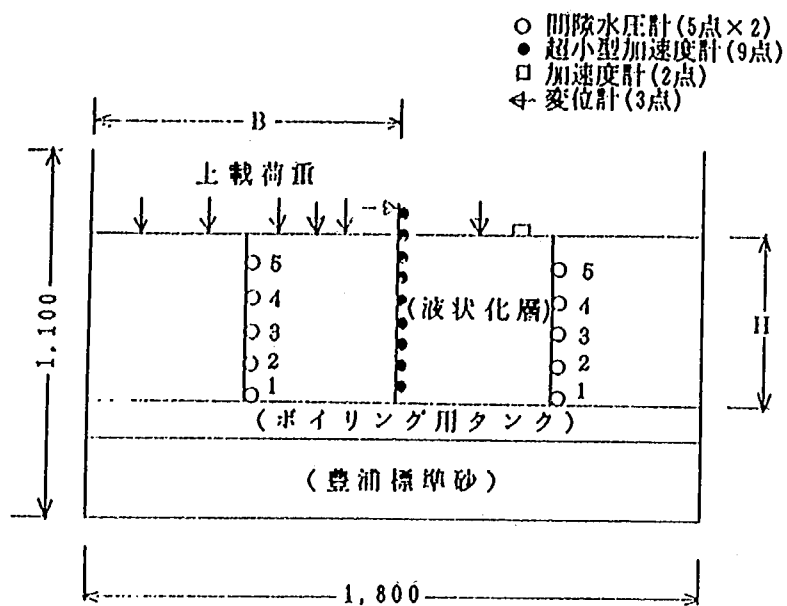


(a) 断面図

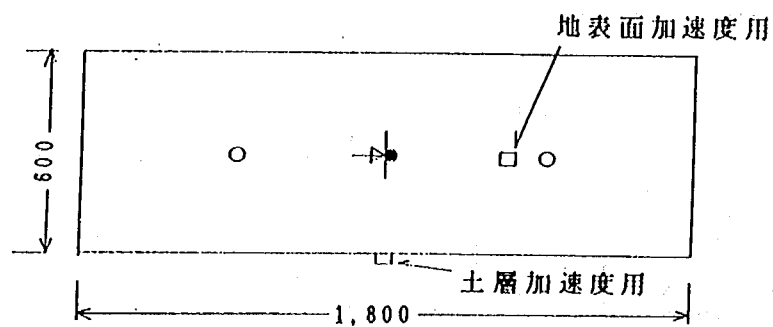


(b) 平面図

図4.1 実験装置 (中型土槽を用いた地盤流動実験)

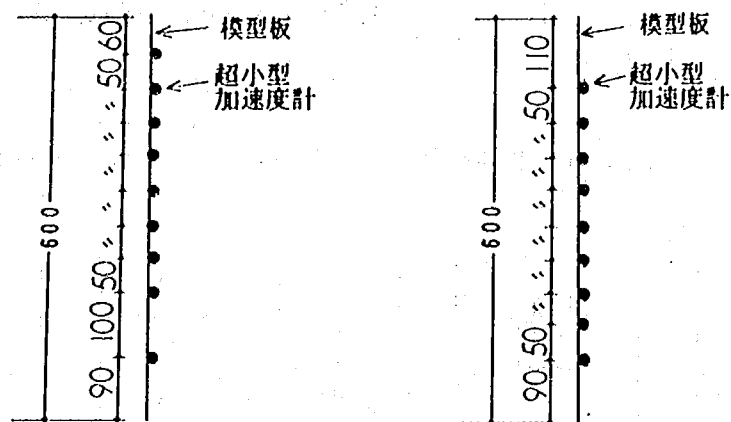


(断面図)



(平面図)

図4.2 測定器の配置



(a) Hシリーズ (b) Iシリーズ
図4.3 模型板に取り付けた加速度計位置

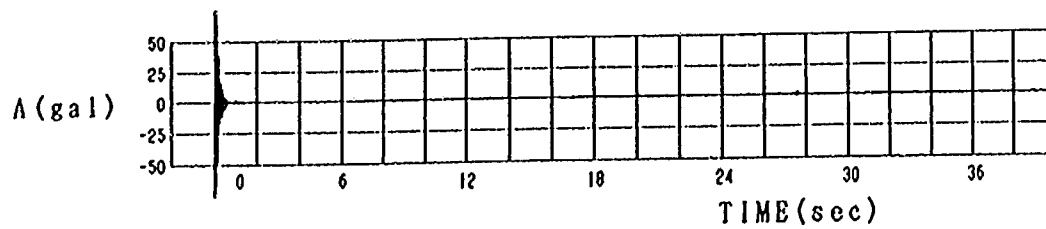


図4.4 土層加速度の時刻歴 (実験No. HD1)

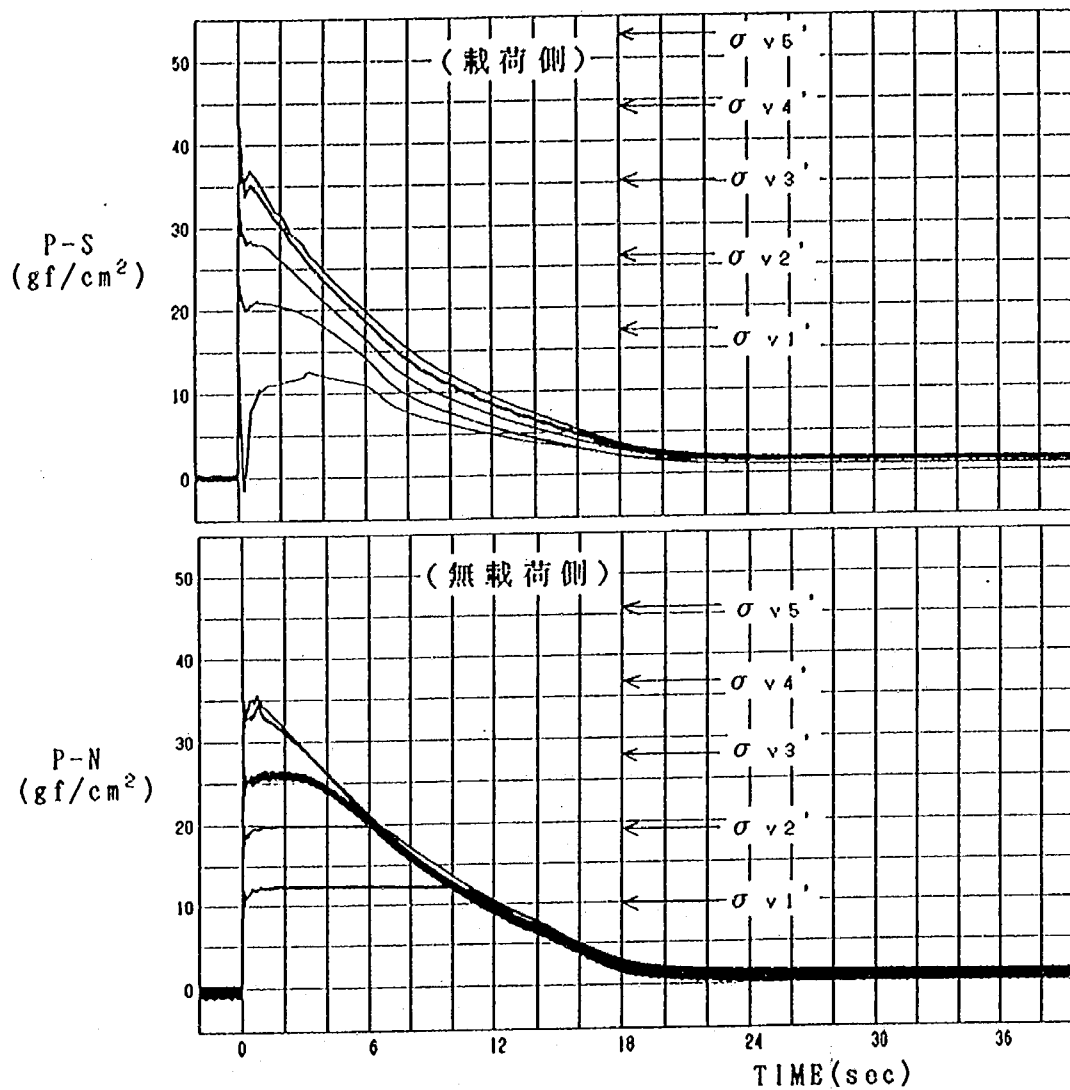


図4.5 間隙水圧の時刻歴 (実験No. HD1)

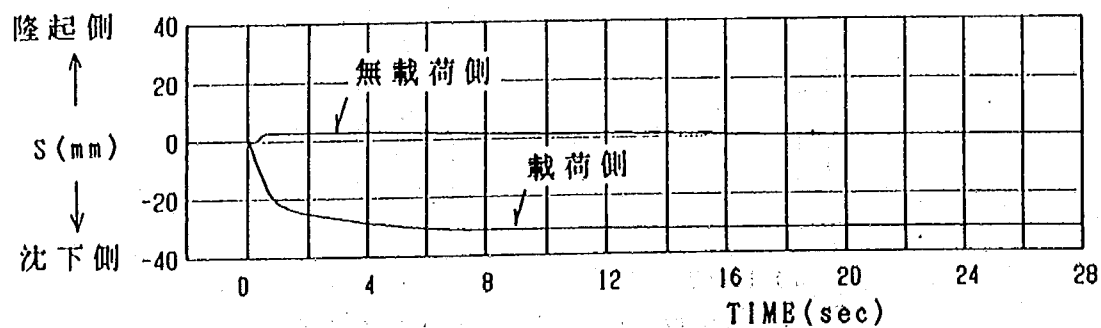


図4.6 地表面変位の時刻歴 (実験No. HD1)

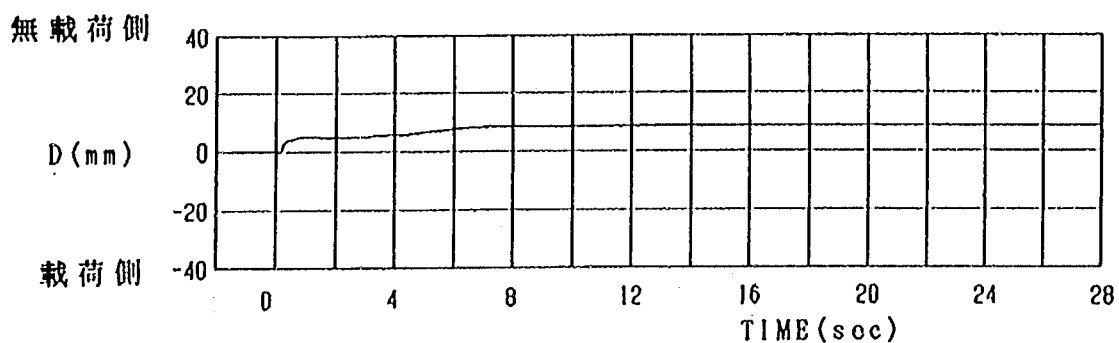


図 4. 7 非接触型変位計による模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. H D 1)

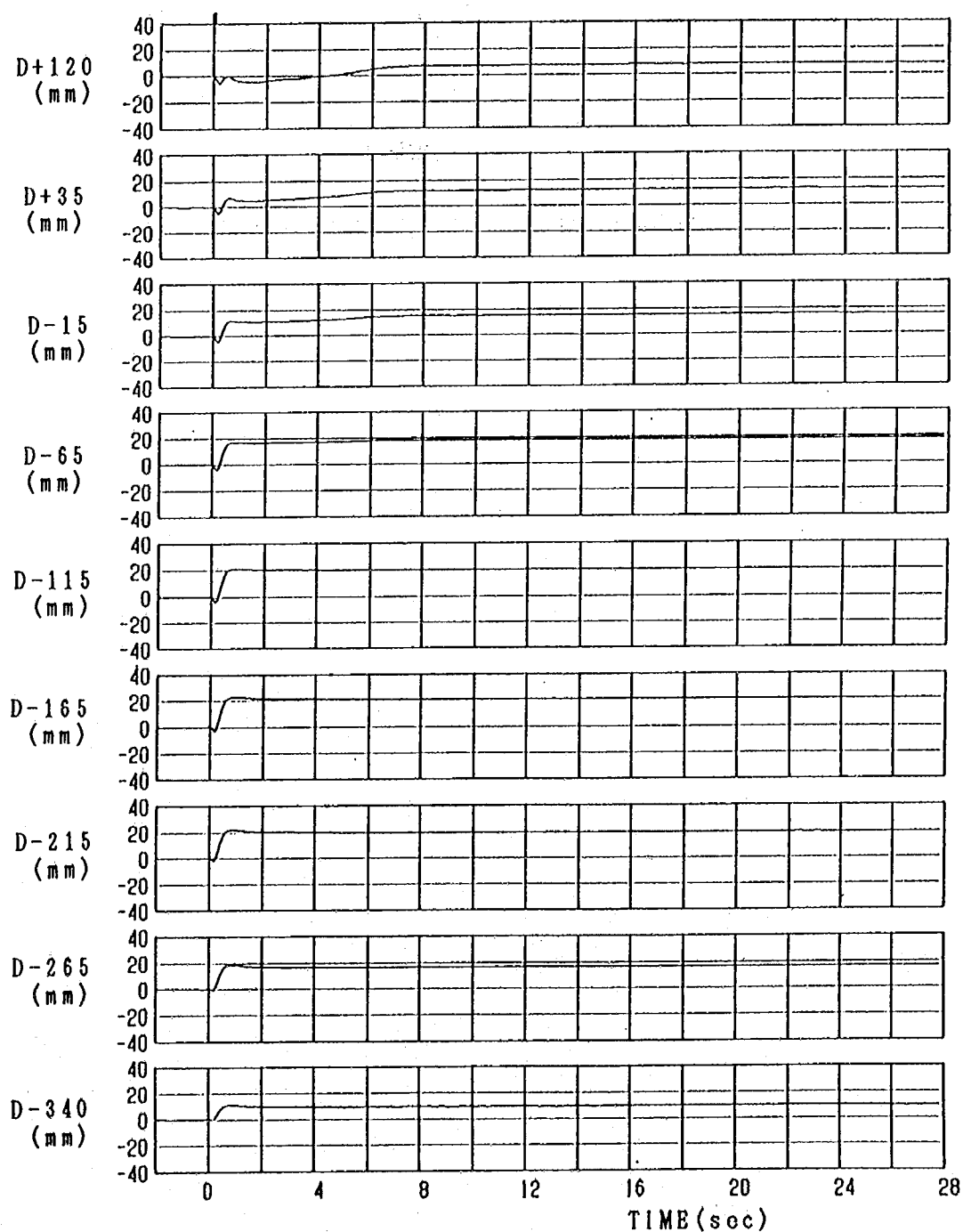


図 4. 8 加速度計から得られた模型板水平変位の時刻歴 (実験 N0. H D 1)

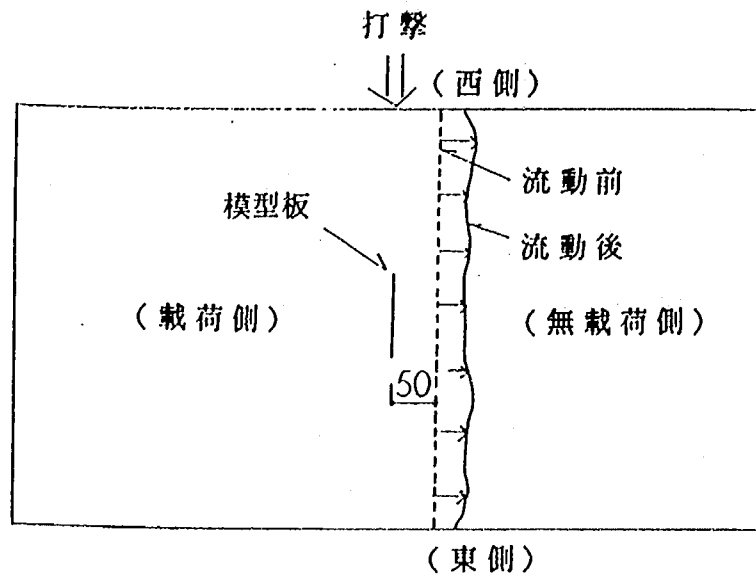


図4.9 地表面における流動量測定方法（平面図）

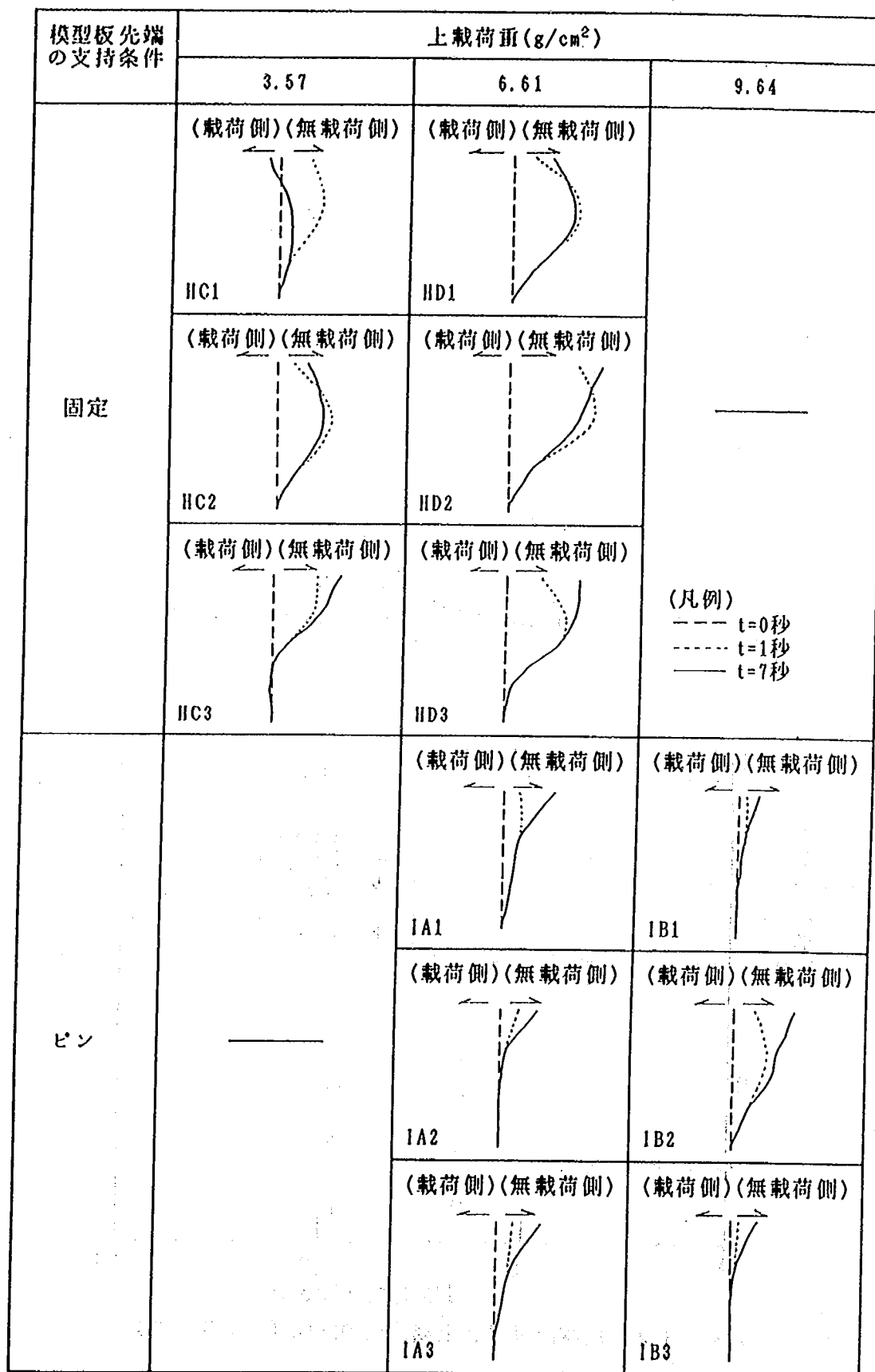


図 4. 1 0 地盤流動分布の形状

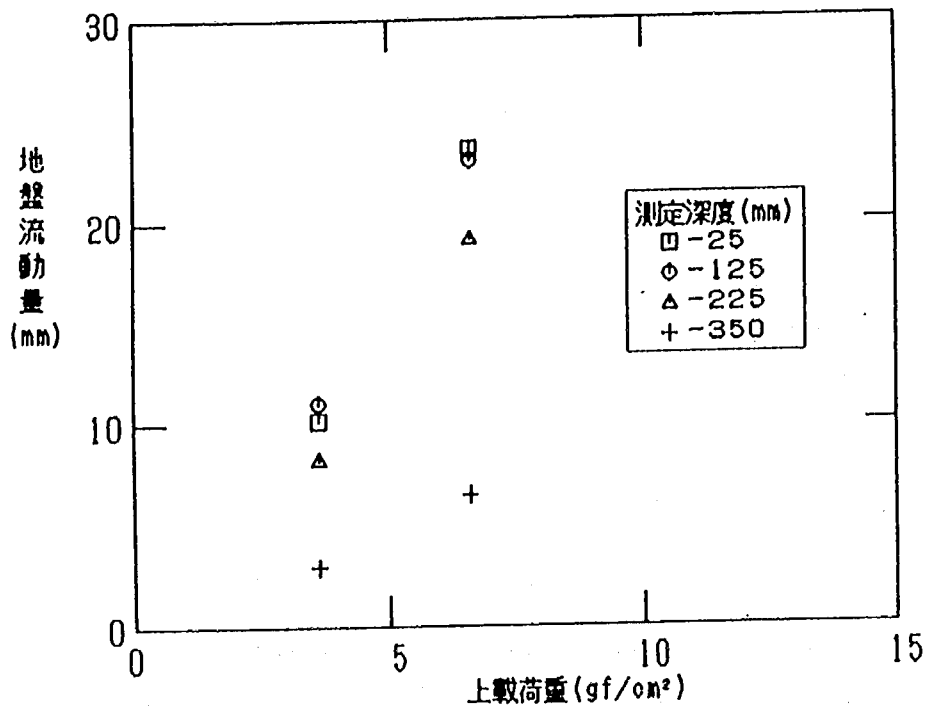


図 4. 1 1 地盤流動量と上載荷重の関係 (H シリーズ)

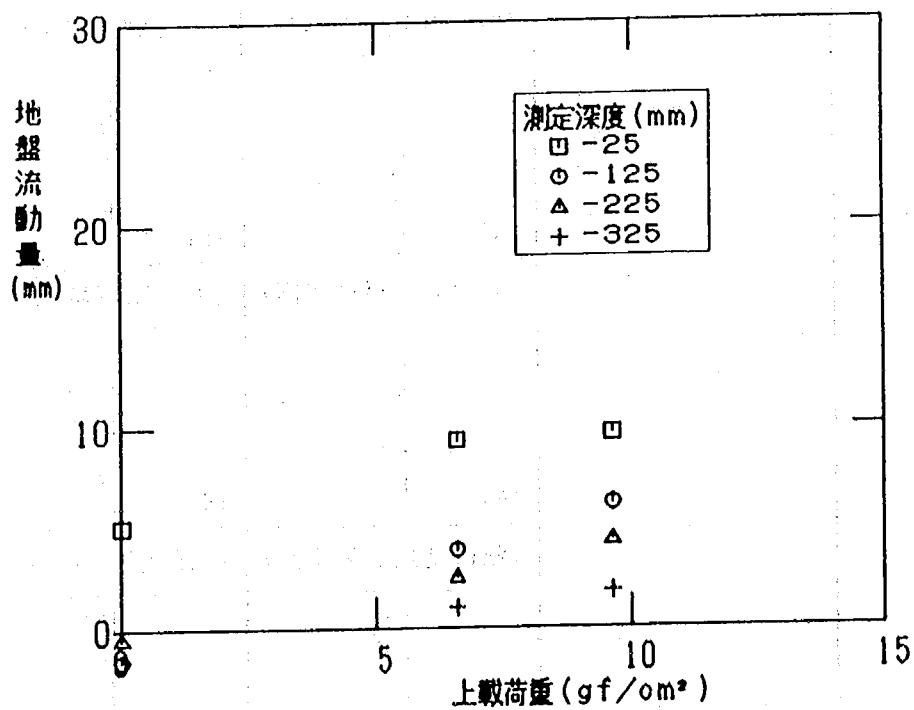


図 4. 1 2 地盤流動量と上載荷重の関係 (I シリーズ)

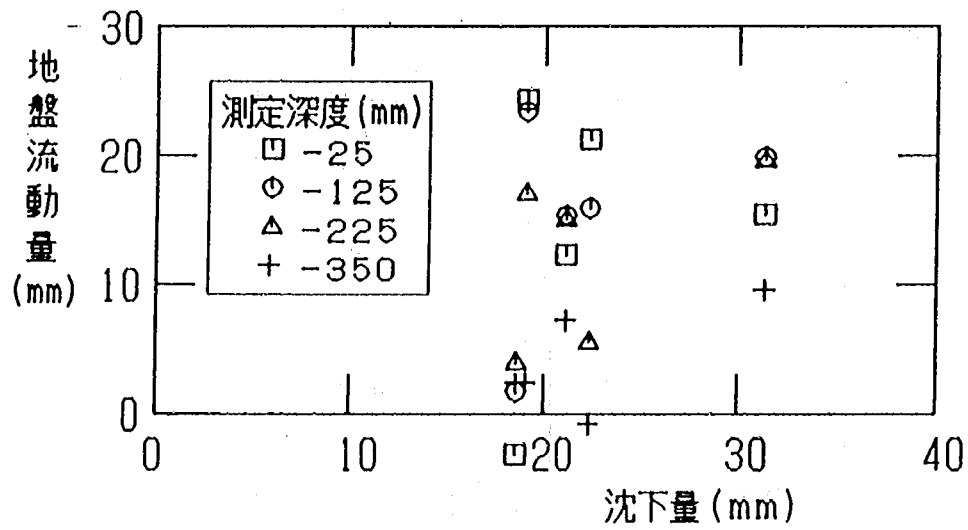


図4. 1 3 地盤流動量と載荷側地表面沈下量との関係 (Hシリーズ)
(Hシリーズ)

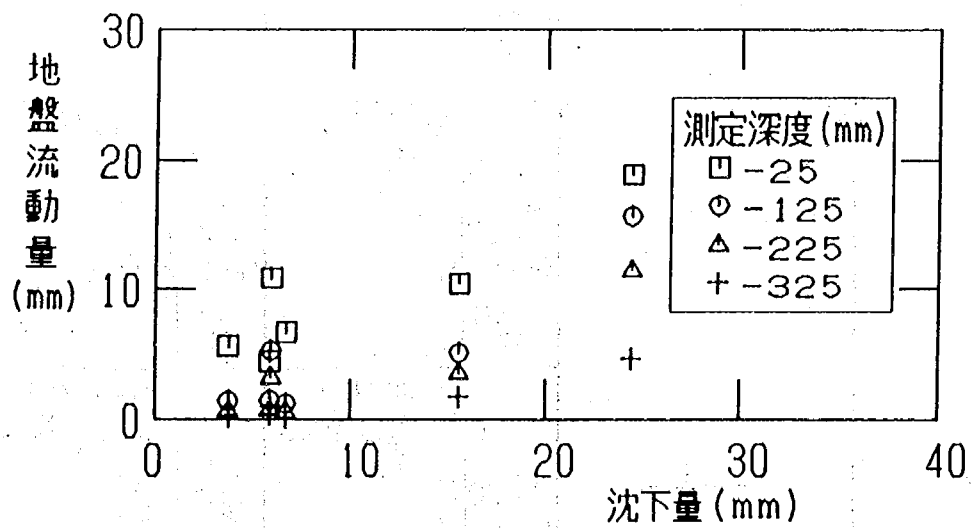


図4. 1 4 地盤流動量と載荷側地表面沈下量との関係 (Iシリーズ)
(Iシリーズ)

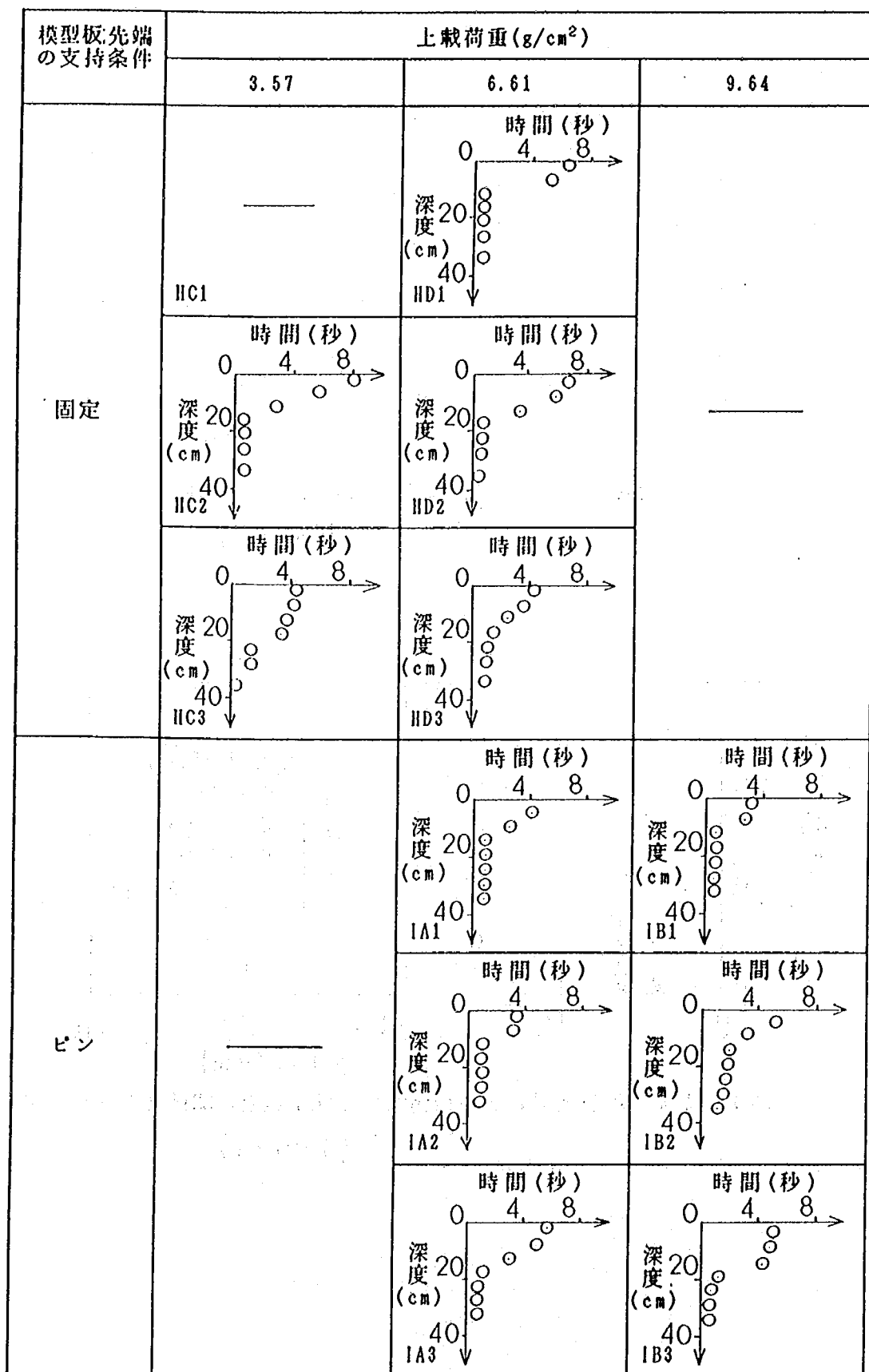


図 4. 1 5 地盤流動の継続時間

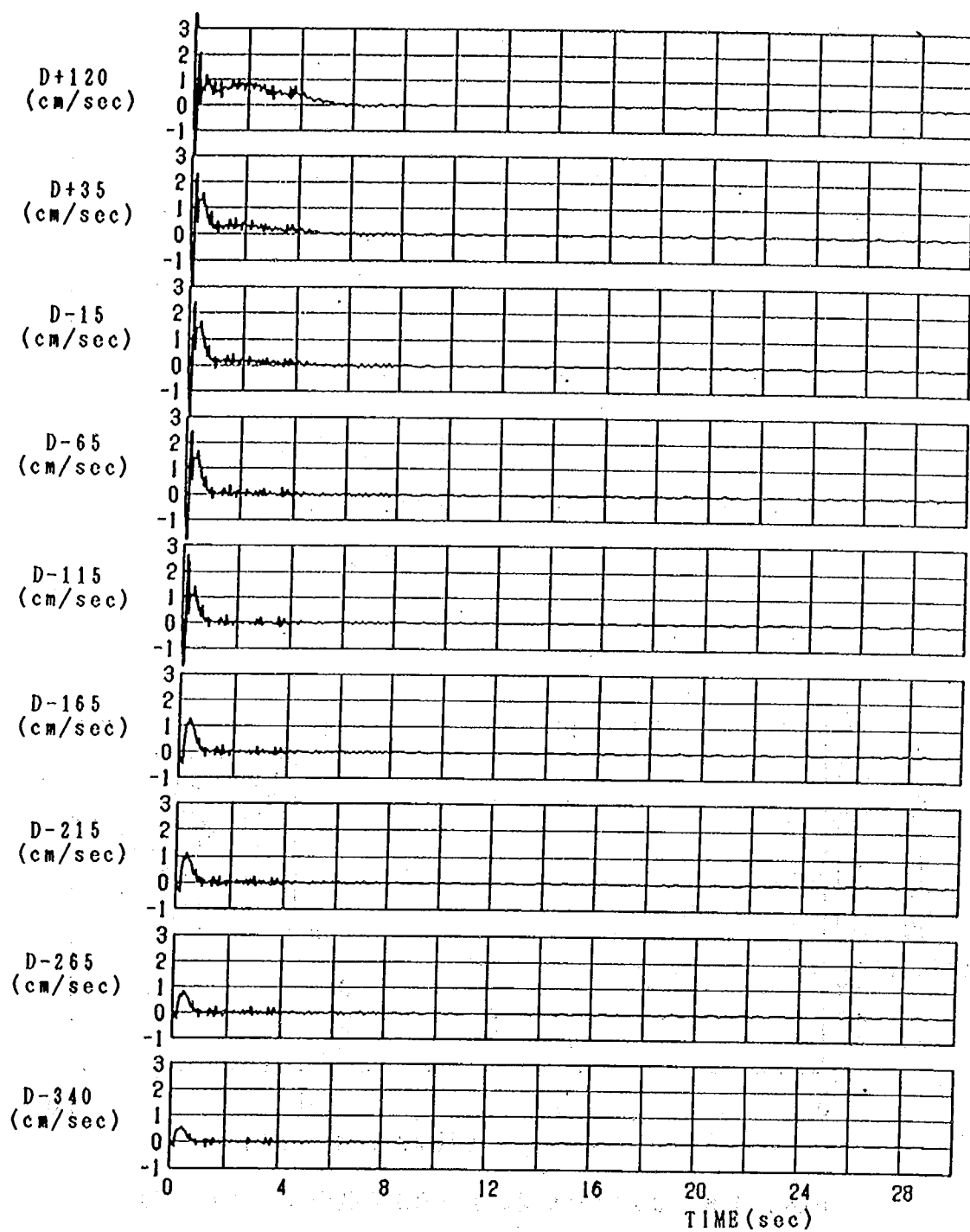


図 4. 1 6 地盤流動速度の時刻歴 (実験 N0. 1 A 1)

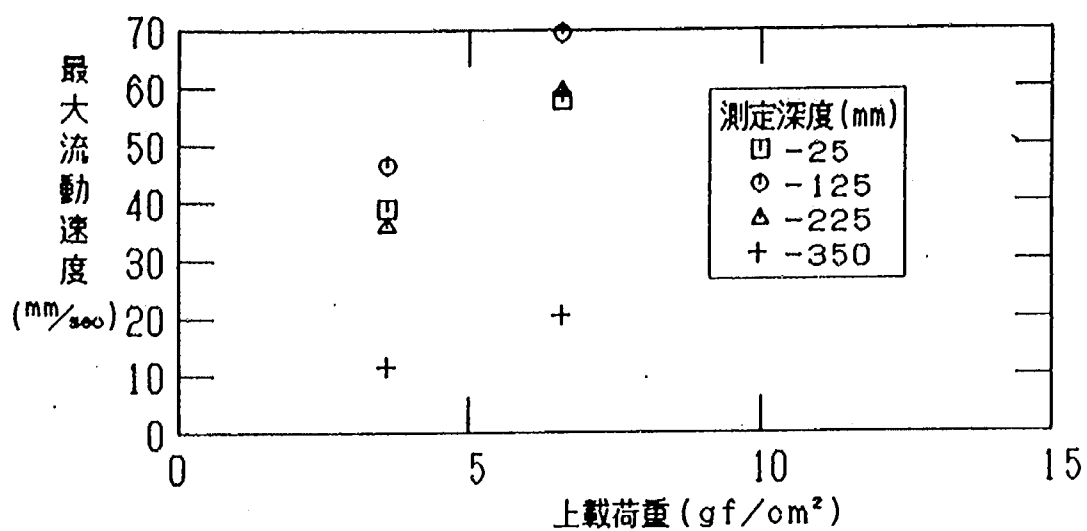


図 4. 1 7 最大流動速度と上載荷重の関係 (H シリーズ)
(H シリーズ)

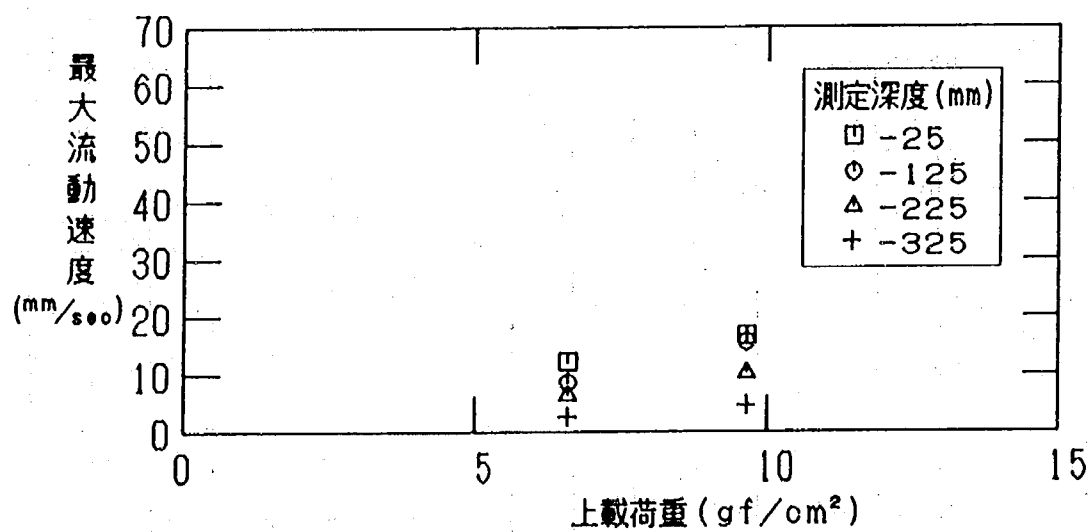


図 4. 1 8 最大流動速度と上載荷重の関係 (I シリーズ)
(I シリーズ)

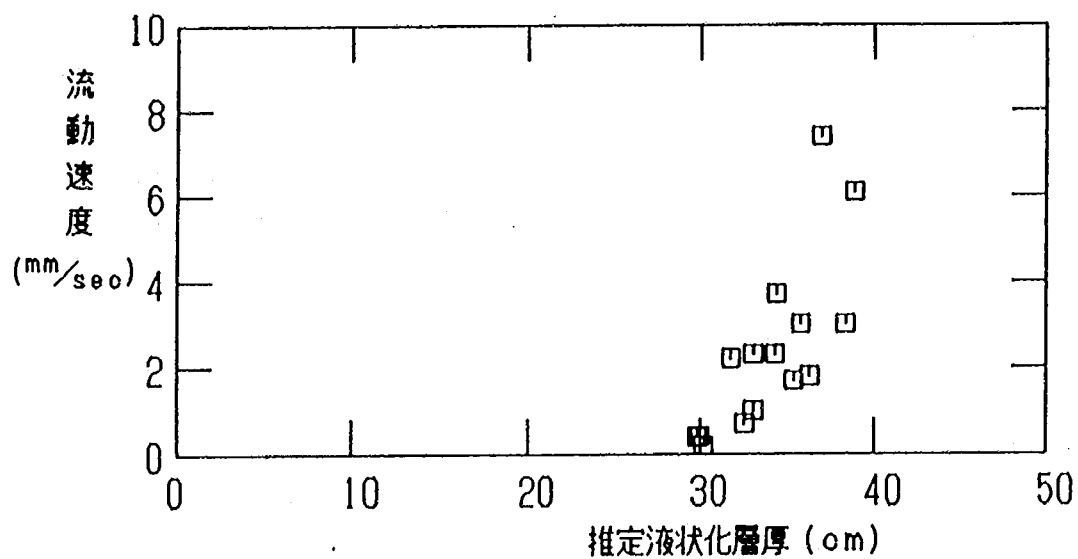


図 4. 19 地盤流動速度と推定液状化層厚の関係 (H シリーズ)
(H シリーズ)

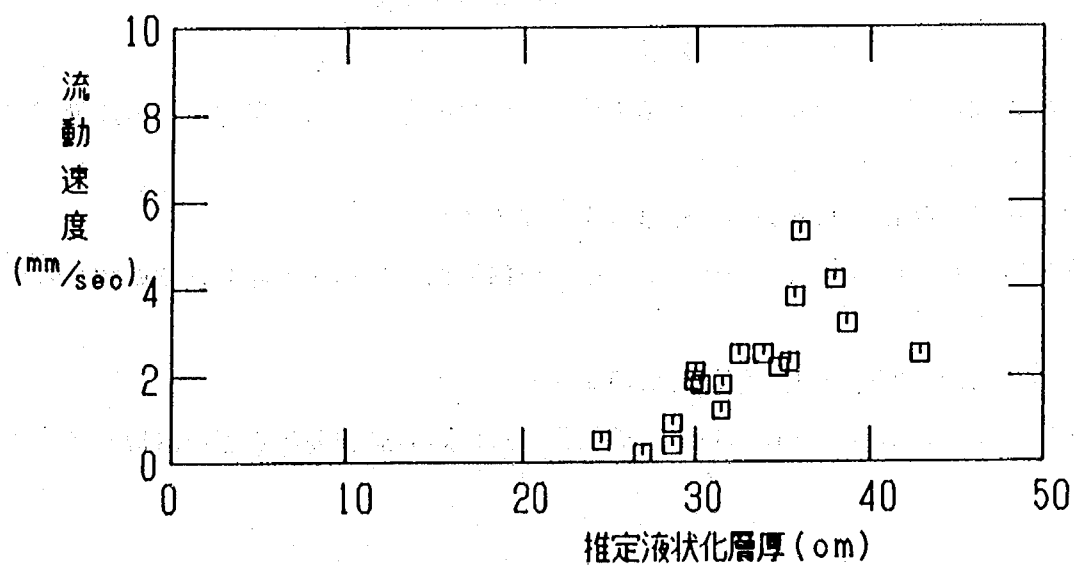


図 4. 20 地盤流動速度と推定液状化層厚の関係 (I シリーズ)
(I シリーズ)

5. 地盤流動の解析的検討

5. 1 概要

本章では、流体モデルによるアプローチから、地盤流動の解析を行い、3章に示した地盤流動実験結果との比較検討を行う。

2章で述べたように地盤流動の解析的アプローチの方法としてさまざまな角度から検討されているが、ここでは流体モデルによるアプローチから解析を行う。この方法は、液状化した砂層を流体と見なし、その収支バランスを考慮して流動量を推定するものである。

5. 2 解析的検討方法

5. 2. 1 モデルの概要

液状化した砂層を流体と見なし、以下に示すようなモデルを考えることにする。

(1) モデル1 (重力と浮力の釣り合い)

半無限に液状化した砂層が存在するものと考え、その地表面に盛土が加わる場合を考える。盛土に作用する重力と浮力が釣り合う位置(地表面の沈下量)を求める。

(2) モデル2 (載荷側と無載荷側のバランス)

3章で示したように載荷側における地表面は沈下し、無載荷側では隆起している。そこで、載荷側と無載荷側のバランスを考えることにより、地表面の沈下量を求める。

(3) モデル3 (一自由度系の運動方程式)

載荷側の地表面変位を未知数とし、土槽全体を一つの系と考えた一自由度系の運動方程式を作成し、その解(載荷側地表面変位)を求める。

(4) モデル4 (液状化した砂層の粘性抵抗を考慮する)

モデル3で考えた運動方程式に液状化した砂層の粘性抵抗の項を追加し、その解(載荷側の地表面変位)を求める。

(5) モデル5 (過剰間隙水圧の消散を考慮する)

モデル4で考えた運動方程式において、液状化した砂層の過剰間隙水圧の消散を考慮するものである。

5. 2. 2 モデル1 (重力と浮力の釣り合い)

図5.1に示すように半無限に液状化した砂層が存在するものとする。その地表面に盛土荷重が加わるものとする、盛土荷重には重力とそれに働く浮力が働き、釣り合いを考慮すると盛土層の沈下量は(5.1)式で与えられる。

$$\begin{aligned}\rho_2 A h g &= \rho_1 A S g \\ \therefore S &= \rho_2 h / \rho_1\end{aligned}\quad \text{----- (5.1)}$$

ここに、 S : 盛土層の沈下量 (cm)

ρ_1 : 液状化層の密度 (g/cm^3)

ρ_2 : 盛土層の密度 (g/cm^3)

h : 盛土高さ (cm)

A : 盛土面積 (cm^2)

g : 重力加速度 (cm/s^2)

5. 2. 3 モデル2 (載荷側と無載荷側のバランス)

図5.2 に示すように盛土が作用する載荷側地表面の最終沈下位置を基準面と考え、その面に加わる載荷側と無載荷側の力が等しいと仮定する。盛土層の沈下量は(5.2)式で与えられる。

$$\begin{aligned}\rho_2 A h g &= 2 \times S A \rho_1 g \\ \therefore S &= \rho_2 h / (2 \times \rho_1) \quad \text{-----} \quad (5.2)\end{aligned}$$

ここに、 S : 盛土層の沈下量 (cm)

ρ_1 : 液状化層の密度 (g/cm^3)

ρ_2 : 盛土層の密度 (g/cm^3)

h : 盛土高さ (cm)

A : 盛土面積 (cm^2)

g : 重力加速度 (cm/s^2)

5. 2. 4 モデル3 (一自由度系の運動方程式)

モデル1及びモデル2では力の釣り合いを考え、載荷側地表面の沈下量を予測した。モデル3では時間 t の関数である載荷側地表面の沈下量 $S(t)$ を未知数とした1自由度系の運動方程式を作成し、 $S(t)$ の挙動を追跡する。なお、ここでは過剰間隙水圧の消散に伴って生じる圧密沈下は考慮していない。

液状化地盤の解析モデルを図5.3 に示す。液状化地盤の鉛直、水平変位を $S(t)$ を用いて表わすことを考える。載荷側における液状化地盤の鉛直変位を次のように仮定すると、

$$w = S(t) \frac{z}{H} \quad \text{-----} \quad (5.3)$$

流動は体積一定で起こるから、連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

に代入すると、

$$\frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{S(t)}{H} \quad \therefore u = -S(t) \frac{x}{H} + E$$

境界条件として、 $x=0$ のとき $u=0$ であることを考慮すると水平変位は次のように求められる。

$$u = -S(t) \frac{x}{H} \quad \text{-----} \quad (5.4)$$

一方、無載荷側においては同様に

$$w = -S(t) \frac{z}{H} \quad \text{-----} \quad (5.5)$$

$$u = -S(t) \frac{2B-x}{H} \quad \text{-----} \quad (5.6)$$

が得られる。

ラグランジュの運動方程式における一般座標としてこの $S(t)$ を用いることにすると、次の方程式が得られる。ただし、土層全体を一つの系と考える。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{S}} \right) - \frac{\partial K}{\partial S} + \frac{\partial F}{\partial \dot{S}} + \frac{\partial V}{\partial S} = 0 \quad \text{-----} \quad (5.7)$$

ここに、 K : 運動エネルギー

F : 散逸関数 (単位時間に系のエネルギーが失われる割合の半分)

V : ポテンシャルエネルギー (位置エネルギー + ひずみエネルギー)

モデル 3 ではとりあえず散逸関数は考慮しないことにする。また、ポテンシャルエネルギーには位置エネルギーのみを考える。土層全体を 2 次元として考えると K 、 V はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \rho_2 B h \dot{S}^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \left\{ \int_0^H \int_0^B (\dot{w}^2 + \dot{u}^2) dx dz + \int_0^H \int_0^{2B} (\dot{w}^2 + \dot{u}^2) dx dz \right\} \\ &= \frac{1}{2} \rho_2 B h \dot{S}^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \left\{ \int_0^H \int_0^B \left(\frac{z^2}{H^2} \dot{S}^2 + \frac{x^2}{H^2} \dot{S}^2 \right) dx dz + \right. \\ &\quad \left. \int_0^H \int_0^{2B} \left(\frac{z^2}{H^2} \dot{S}^2 + \frac{(2B-x)^2}{H^2} \dot{S}^2 \right) dx dz \right\} \\ &= \frac{1}{2} \rho_2 B h \dot{S}^2 + \frac{1}{2} \rho_1 I \dot{S}^2 / H^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} I &= \int_0^H \int_0^B (z^2 + x^2) dx dz + \int_0^H \int_0^{2B} (z^2 + (2B-x)^2) dx dz \\ &= \int_0^H \left(z^2 B + \frac{B^3}{3} \right) dz + \int_0^H \left(z^2 B + \frac{B^3}{3} \right) dz \\ &= \frac{2}{3} B H (B^2 + H^2) \end{aligned}$$

$$V = -\rho_2 B h g S + \frac{1}{2} B \rho_1 g \{ (H-S)^2 + (H+S)^2 - 2H^2 \} = -\rho_2 B h g S + B \rho_1 g S^2$$

これらを (5.7) 式に代入すると

$$\rho_2 B h \ddot{S} + \rho_1 I \ddot{S}/H^2 - \rho_2 B h g + 2B \rho_1 g S = 0$$

$$\therefore \ddot{S} + p^2 S = q \quad \text{-----} \quad (5.8)$$

$$\text{ここに、} p^2 = \frac{2B \rho_1 g}{\rho_2 B h + \rho_1 I / H^2} = \frac{2 \rho_1 g}{\rho_2 h + 2 \rho_1 (B^2 + H^2) / (3H)}$$

$$q = \frac{\rho_2 B h g}{\rho_2 B h + \rho_1 I / H^2} = \frac{\rho_2 h g}{\rho_2 h + 2 \rho_1 (B^2 + H^2) / (3H)}$$

(5.8)式の一般解は通常次式で与えられる。

$$S(t) = E \cos(pt) + F \sin(pt) + q/p^2$$

ここに、E、F：積分定数

初期条件として、 $t=0$ のとき $S = \dot{S} = 0$ を考慮すると、載荷側地表面の沈下量 $S(t)$ は次のように求まる。

$$S(t) = \frac{\rho_2 B h g}{2B \rho_1 g} (1 - \cos(pt)) = \frac{\rho_2 h}{2 \rho_1} (1 - \cos(pt)) \quad \text{-----} \quad (5.9)$$

5. 2. 5 モデル4 (液状化した砂層の粘性抵抗を考慮する)

モデル3で示した解はいわゆる1自由度系の自由振動の解であって、一般には収束しない。そこで、モデル4ではラグランジュの運動方程式における散逸関数を考慮する。すなわち、液状化砂層における粘性抵抗を考えることにする。粘性係数を η とすれば、抵抗力は

$$\eta \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z}$$

で与えられる。モデル3で示した(5.4)式、(5.6)式を用いると上式の値はゼロとなってしまう。したがって、モデル4においては載荷側鉛直変位を次のように仮定する。式の誘導はモデル3の場合と同様である。

(載荷側)

$$w = S(t) \frac{z^2}{H^2}, \quad u = -S(t) \frac{zx}{2H^2}$$

(無載荷側)

$$w = -S(t) \frac{z^2}{H^2}, \quad u = -S(t) \frac{z}{2H^2} (2B - x)$$

運動エネルギー、ポテンシャルエネルギーは次のようになる。ただし、ポテンシャルエネルギーはモデル3と変わらない。

$$K = \frac{1}{2} \rho_2 B h \dot{S}^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \left\{ \int_0^H \int_0^B (\dot{w}^2 + \dot{u}^2) dx dz + \int_0^H \int_0^{2B} (\dot{w}^2 + \dot{u}^2) dx dz \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \rho_2 B h \dot{S}^2 + \frac{1}{2} \rho_1 I \dot{S}^2 / H^4$$

$$V = -\rho_2 B h g S + B \rho_1 g S^2$$

$$\text{ただし、} I = \int_0^H \int_0^B (z^4 + z^2 x^2 / 4) dx dz + \int_0^H \int_0^{2B} (z^4 + z^2 (2B-x)^2 / 4) dx dz$$

$$= \int_0^H (z^4 B + \frac{z^2 B^3}{12}) dz + \int_0^H (z^4 B + \frac{z^2 B^3}{12}) dz$$

$$= 2BH^3 (B^2/36 + H^2/5)$$

また、散逸関数は次のように与えられる。

$$F = \frac{1}{2} \eta \left\{ \int_0^H \int_0^B \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right)^2 dx dz + \int_0^H \int_0^{2B} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right)^2 dx dz \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \eta \frac{\dot{S}^2}{4H^4} \left\{ \int_0^H \int_0^B x^2 dx dz + \int_0^H \int_0^{2B} (2B-x)^2 dx dz \right\}$$

$$= \frac{\eta B^3 \dot{S}^2}{12H^3}$$

これらを用いるとラグランジュの運動方程式(5.7)は次のようになる。

$$\rho_2 B h \ddot{S} + \frac{\rho_1 I}{H^4} \ddot{S} + \frac{\eta B^3}{6H^3} \dot{S} + 2B \rho_1 g S = \rho_2 B h g$$

$$\therefore \ddot{S} + 2cn\dot{S} + n^2 S = p \quad (5.10)$$

$$\text{ここに、} n^2 = \frac{2H \rho_1 g}{\rho_2 B h + 2 \rho_1 (B^2/36 + H^2/5)}$$

$$p = \frac{\rho_2 B h g}{\rho_2 B h + 2 \rho_1 (B^2/36 + H^2/5)}$$

$$2cn = \frac{\eta B^2 / (6H^2)}{\rho_2 B h + 2 \rho_1 (B^2/36 + H^2/5)}$$

(5.10)の解であるが、右辺=0とおいた解を求める。 $S(t) = e^{\lambda t}$ とおくと

$$\lambda^2 e^{\lambda t} + 2cn \lambda e^{\lambda t} + n^2 e^{\lambda t} = 0$$

$$\lambda^2 + 2cn \lambda + n^2 = 0$$

$$\therefore \lambda = -cn \pm n\sqrt{c^2 - 1} \quad (5.11)$$

が得られ、 c の大小により $S(t)$ は振動しながら収束する場合、振動しないで収束する場合がある。実験結果における載荷側地表面沈下量の結果についてみると、振動しないで収束している。したが

って、(5.11)式において $c>1$ の場合を考えればよい。

(5.11)式の解は2実根になり、これらを λ_1 、 λ_2 とすると

$$\lambda_1 = -cn + n\sqrt{c^2 - 1} = -q_1$$

$$\lambda_2 = -cn - n\sqrt{c^2 - 1} = -q_2 \quad (q_2 > q_1)$$

となるから(5.10)式の一般解は特解 $S = p/n^2$ を考慮して

$$S(t) = Ee^{-q_1 t} + Fe^{-q_2 t} + p/n^2$$

$$\dot{S}(t) = -q_1 Ee^{-q_1 t} - q_2 Fe^{-q_2 t}$$

初期条件として、 $t=0$ のとき $S=\dot{S}=0$ とすると

$$E + F + p/n^2 = 0, \quad q_1 E + q_2 F = 0$$

$$\therefore E = \frac{q_2 p}{n^2 (q_1 - q_2)}, \quad \therefore F = \frac{q_1 p}{n^2 (q_1 - q_2)}$$

したがって、載荷側地表面沈下量 $S(t)$ は(5.12)式で与えられる。

$$S(t) = \frac{q_2 p}{n^2 (q_1 - q_2)} e^{-q_1 t} - \frac{q_1 p}{n^2 (q_1 - q_2)} e^{-q_2 t} + p/n^2 \quad (5.12)$$

また、 $x = B$ における水平変位 u は(5.13)式で与えられる。

$$u = -\frac{Bz}{2H^2} \left\{ \frac{q_2 p}{n^2 (q_1 - q_2)} e^{-q_1 t} - \frac{q_1 p}{n^2 (q_1 - q_2)} e^{-q_2 t} + p/n^2 \right\} \quad (5.13)$$

$$\dot{u} = \frac{Bp q_1 q_2 z}{2n^2 H^2 (q_1 - q_2)} (e^{-q_1 t} - e^{-q_2 t})$$

5. 2. 6 モデル5 (過剰間隙水圧の消散を考慮する場合)

モデル5はモデル4に加えて、過剰間隙水圧の消散を考慮する。液状化地盤の透水係数を k 、有効単位体積重量を γ' 、水の単位体積重量を γ_w とすると、単位面積当り、1秒間に地盤からしぼり出される水の量は

$$v = i k = \frac{\gamma'}{\gamma_w} k$$

一方、地盤の体積収縮歪を ε_v とすると、1秒間に地盤から出ていく水の量は

$$-\varepsilon_v \frac{\Delta H}{\Delta t}$$

で表される。両式の値は等しいから

$$\frac{\gamma'}{\gamma_w} k = -\varepsilon_v \frac{\Delta H}{\Delta t}$$

$$\therefore H = -k \frac{\gamma'}{\varepsilon_v \gamma_w} t + E$$

初期条件として、 $t = 0$ のとき $H = H_0$ とおくと

$$E = H_0$$

したがって、

$$H = H_0 - k \frac{\gamma'}{\varepsilon_v \gamma_w} t = H_0 - k_1 t \quad \text{-----} \quad (5.14)$$

$$\text{ここに、} k_1 = k \frac{\gamma'}{\varepsilon_v \gamma_w}$$

5. 2. 5に示したように載荷側地表面変位を $S(t)$ とすると液状化地盤の変位は次のように表せる。

(載荷側)

$$w = S(t) \frac{z^2}{H_0^2}, \quad u = -S(t) \frac{zx}{2H_0^2}$$

(無載荷側)

$$w = -S(t) \frac{z^2}{H_0^2}, \quad u = -S(t) \frac{z}{2H_0^2} (2B - x)$$

ただし、 H_0 は時刻 $t=0$ において液状化している範囲を示す。

過剰間隙水圧の消散を考慮すると液状化範囲は(5.14)式で表せるので、散逸関数は液状化範囲 ($k_1 t \leq z \leq H_0$) を積分することにより求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \eta \frac{\dot{S}^2}{4H_0^4} \left\{ \int_{k_1 t}^H \int_0^B x^2 dx dz + \int_{k_1 t}^H \int_0^{2B} (2B-x)^2 dx dz \right\} \\ &= \frac{\eta B^3}{12H_0^4} (H_0 - k_1 t) \dot{S}^2 \end{aligned}$$

これを考慮すると、ラグランジュの運動方程式は次のようになる。ただし、運動エネルギー、ポテンシャルエネルギーは変わらないものとする。

$$\rho_2 B h \dot{S} + \frac{\rho_1 I}{H_0^4} \dot{S} + \frac{\eta B^3}{6H_0^4} (H_0 - k_1 t) \dot{S} + 2B \rho_1 g S = \rho_2 B h g \quad \text{-----} \quad (5.15)$$

上式の解は簡単には求められない。そこで級数を用いて求めることにする。上式を簡略し、次式の解を求めることにする。

$$A \dot{S} + (B - Ct) \dot{S} + DS = F \quad \text{-----} \quad (5.16)$$

(5.16)式の右辺 = 0 とおいた解を次のようにおく。

$$S(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n$$

順次微分すれば

$$\dot{S}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n t^{n-1}$$

$$\ddot{S}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + \dots = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n t^{n-2}$$

が得られる。これらを $F=0$ とした (5.16) 式に代入すると

$$A(2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + \dots) + (B - Ct)(a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + \dots) + D(a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots) = 0$$

上式は t に関する恒等式であるから、 t^n の各係数をゼロとすれば

$$2Aa_2 + Ba_1 + Da_0 = 0$$

$$6Aa_3 + 2Ba_2 - Ca_1 + Da_1 = 0$$

$$12Aa_4 + 3Ba_3 - 2Ca_2 + Da_2 = 0$$

⋮

$$(n+1)nAa_{n+1} + nBa_n - (n-1)Ca_{n-1} + Da_{n-1} = 0$$

これらの関係から級数の係数 a_n について次の漸化式が得られる。

$$a_{n+1} = \frac{-nBa_n + (n-1)Ca_{n-1} - Da_{n-1}}{(n+1)nA} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

また、(5.16)式の特解は F/D であるから、(5.16)式の一般解は次のようになる。

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n + F/D$$

初期条件として、 $t=0$ のとき $S=\dot{S}=0$ であるから

$$a_0 = -F/D, \quad a_1 = 0$$

したがって、(5.15)式の解は次のように求められる。

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n + F/D \quad \text{-----} \quad (5.17)$$

ただし、 $a_0 = -F/D, a_1 = 0$

$$a_n = \frac{-(n-1)Ba_{n-1} + (n-2)Ca_{n-2} - Da_{n-2}}{n(n-1)A} \quad (n=2, 3, 4, \dots)$$

$$\text{また、} A = \rho_2 B h + \frac{\rho_1 I}{H_0^4}, \quad B = \frac{\eta B^3}{6 H_0^3}$$

$$C = \frac{\eta B^3 k_1}{6 H_0^4}, \quad D = 2 B \rho_1 g, \quad F = \rho_2 B h g$$

5. 3 実験結果との比較検討

ここでは前節に示した簡易予測法と3章に示した小型土槽を用いた実験結果との比較検討を行う。

5. 3. 1 モデル1（重力と浮力の釣り合い）及びモデル2（載荷側と無載荷側のバランス）

載荷側地表面における最終沈下量について、計算した結果を実験値と比較して表5.1に示した。実験値は、同一条件で実施した値の平均値であり、その値には過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量も含まれている。

モデル1で計算した値に比べ、実験値は小さくなっている。すなわち、実験結果では液状化地盤を流体と見なし、重力と浮力の釣り合いから求めた位置よりも浅い位置で沈下が終了していることがわかる。モデル2で計算した値は、Eシリーズにおいては比較的实验値に近い値となっているが、Fシリーズにおいては実験値より随分大きくなっている。

5. 3. 2 モデル3（一自由度系の運動方程式）

モデル3の仮定で求めた載荷側沈下量 $S(t)$ は自由振動の解であり、沈下量の最大値はモデル1と同じ値である。そこで、実験結果との比較は最大沈下量に達するまでに要する時間で行う。計算値では図5.4に示した t_1 の値、実験値では最終沈下量の95%の値に達するまでの時間を用いた。表5.2に実験結果との比較を示す。

実験値における時間について見ると、上載荷重が大きいほどまた液状化層厚が小さいほど小さくなっているのに対して、計算値ではほとんど一定で測定値に比べると随分小さくなっている。最終沈下量は計算値の方が大きくなっているため、測定値と計算値の関係は図5.4に示すようになっていることがわかる。

5. 3. 3 モデル4（液状化した砂層の粘性抵抗を考慮する）

モデル4においては液状化砂層中の粘性抵抗を考え、載荷側地表面変位 $S(t)$ を求めた。(5.12)式は振動せず、 P/n^2 の値に収束していく。また、同様に土層中央($x=B$)における水平変位は $B P_2 / 3 H^2 n^2$ の値に収束していくことがわかる。そこで、最終流動量 D 及び載荷側地表面沈下量 S について実験結果と比較する。 D 及び S は次のようになる。

$$S = \frac{P}{n^2} = \frac{\rho_2 h}{2 \rho_1} = \frac{q}{2 \rho_1}$$

$$D = \frac{BPz}{2H^2 \rho_1} = \frac{Bqz}{4H^2 \rho_1}$$

ここに、 q : 上載荷重 (g/cm^2)
 ρ_1 : 液状化層の密度 (g/cm^3)
 B : 上載荷重の載荷幅 (cm)
 H : 液状化層厚 (cm)

D は深さ方向 z に対して一次関数となり、 D の値の平均値 D_m は (5.18) 式となる。また、 D_m と S との間には (5.19) 次の関係がある。

$$D_m = \frac{Bq}{4H^2 \rho_1} \times \frac{H}{2} = \frac{Bq}{8H \rho_1} \quad \text{-----} \quad (5.18)$$

$$D_m = \frac{BS}{4H} \quad \text{-----} \quad (5.19)$$

図5.5～図5.6は実験で得られた地盤の流動量と上載荷重の関係に (5.18) 式を示したものである。また、図5.7～図5.8は実験で得られた地盤の流動量と載荷側地表面沈下量の関係に (5.19) 式を示したものである。図5.5に示したように液状化層厚240mmの場合、実験の範囲内では流動量は (5.18) 式を多少上回っている。また、(5.18) 式では D と q の間に直線関係があるのに対して、実験結果では対数関数にあり、 q が大きくなると D はある値に収束する傾向がある。一方、図5.6に示したように160mmの場合、測定値は上載荷重 q に対してほぼ一定となっており、傾向は一致していない。流動量と沈下量の関係について見ると、液状化層厚240mm、160mmの場合ともにその分布形状を考えると測定値は (5.19) 式と良く一致している。

次に、最終値にいたるまでの挙動について考える。この中間における挙動は粘性係数の値に支配されることになり、計算値と測定値から、粘性係数の値を推定した。表5.3に推定した液状化砂層中の粘性係数の値を示す。測定値と計算値のフィッティングは便宜上、測定値の50%の沈下量近傍においておこなった。水の粘性係数 (10^{-1} g/cm/s) とこれらの値を比較して見ると数十万倍になっていることが分かる。また、比較的最終値が一致していたEシリーズについて見ると、粘性係数は上載荷重が大きいほど大きくなっている傾向が見られる。

5. 3. 4 モデル5 (過剰間隙水圧の消散を考慮する)

モデル5においては過剰間隙水圧の消散を考慮して運動方程式の作成を行った。その解 (載荷側地表面沈下量) を求めると振動していることがわかり、実験結果と一致していない。

5. 4 まとめ

本章では、液状化層を流体とみなしたモデルで簡易解析を行い、3章に示した小型土槽を用いた実験結果に適用した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 盛土層（上載荷重）に作用する重力と浮力が釣り合う位置を求め、実験値（載荷側地表面沈下量）と比較したところ、実験値の方が小さく、釣り合い位置に達するまでに沈下が終了している。
- (2) 載荷側地表面変位を未知数とし、土槽全体を一つの系と考えた一自由度系の運動方程式を作成し、その解を求めたところ、最大値に達するまでの時間は実験における値（最終沈下量に達するまでの時間）よりも随分小さくなった。また、実験では上載荷重が大きいほど時間が短くなっていくのに対して、計算値ではわずかながら増大しており、傾向は一致していない。
- (3) 地表面沈下に対するブレーキ機構として液状化地盤中における粘性抵抗を運動方程式に考慮した。実験値と比較した結果、液状化した砂層の粘性係数が水の粘性係数の数十万倍のオーダーであれば、実験結果をある程度説明することができる。

表5.1 実験結果との比較(モデル1及びモデル2)

実験No.	上載荷重 (gf/cm ²)	液状化層厚 (mm)	実験による 沈下量 (cm)	計算による沈下量(cm)	
				モデル1	モデル2
E M	3.3	240	1.79	1.75	0.87
E K	5.0		2.09	2.65	1.32
E L	8.3		2.89	4.39	2.20
E I	11.7		2.64	6.19	3.10
F B	3.3	160	0.59	1.75	0.87
F C	5.0		0.97	2.65	1.32
F D	8.3		0.81	4.39	2.20
F E	11.7		0.49	6.19	3.10

表5.2 実験結果との比較(モデル3)

実験 No.	上載荷重 (g/cm ²)	液状化 層厚 (mm)	最終沈下量(cm)		要する時間(秒)	
			測定値	計算値	測定値	計算値
EM1 EM2 EM3	3.3	240	2.33 1.38 1.38	1.75	4.69 1.08 4.42	0.46
EK1 EK2 EK3	5.0		1.88 2.14 1.94	2.65	3.41 3.39 3.91	0.47
EL1 EL2 EL3	8.3		3.07 3.71 1.73	4.39	2.24 2.66 2.39	0.48
EI1 EI2 EI3	11.7		2.62 2.67 2.24	6.19	2.12 1.72 1.86	0.49
FB1 FB2 FB3	3.3	160	0.36 0.74 0.59	1.75	1.63 1.64 1.38	0.50
FC1 FC2 FC3	5.0		1.00 0.43 1.33	2.65	1.23 1.28 1.31	0.51
FD1 FD2 FD3	8.3		0.52 1.28 0.52	4.39	0.84 1.43 0.98	0.51
FE1 FE2 FE3	11.7		0.56 0.50 0.33	6.19	0.89 0.94 1.17	0.52

表5.3 粘性係数 η の推定値(モデル4)

単位: g/cm/s

実験 No.	上載荷重 (g/cm ²)	液状化層厚 (mm)	S/S _{max}	η の推定値
EM1 EM2 EM3	3.3	240	0.10 0.25 0.50	8.01*10 ⁴ 7.69*10 ⁴ 8.66*10 ⁴
EK1 EK2 EK3	5.0		0.50 0.50 0.50	9.82*10 ⁴ 8.16*10 ⁴ 9.97*10 ⁴
EL1 EL2 EL3	8.3		0.50 0.50 0.50	9.93*10 ⁴ 9.66*10 ⁴ 2.39*10 ⁵
EI1 EI2 EI3	11.7		0.50 0.50 0.50	1.39*10 ⁵ 2.32*10 ⁵ 2.77*10 ⁵
FB1 FB2 FB3	3.3		0.50 0.50 0.50	8.36*10 ⁴ 3.72*10 ⁴ 4.77*10 ⁴
FC1 FC2 FC3	5.0		0.50 0.50 0.50	5.82*10 ⁴ 1.55*10 ⁵ 2.68*10 ⁴
FD1 FD2 FD3	8.3		0.50 0.50 0.50	6.76*10 ⁴ 4.86*10 ⁴ 1.12*10 ⁵
FE1 FE2 FE3	11.7		0.50 0.50 0.50	1.00*10 ⁵ 9.74*10 ⁴ 1.53*10 ⁵

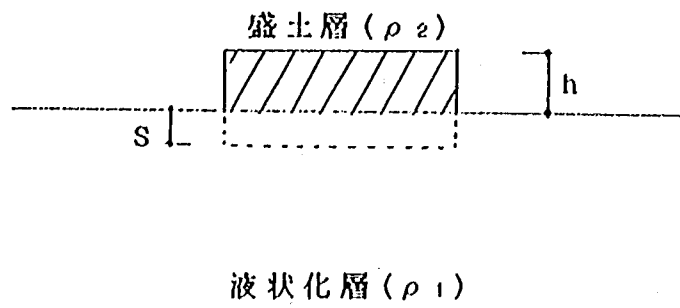


図5.1 モデル1 (重力と浮力の釣りり合い)

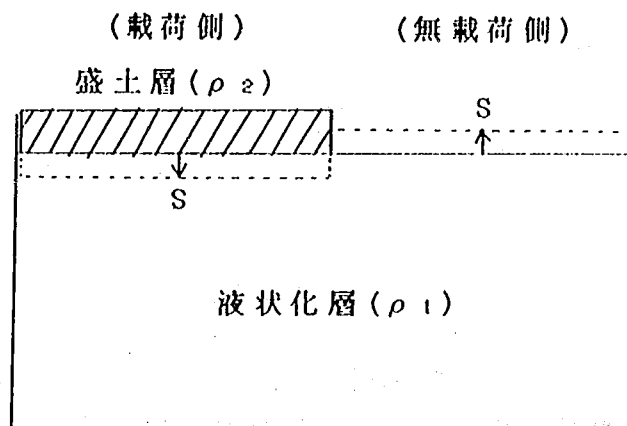


図5.2 モデル2 (载荷側と無载荷側のバランス)

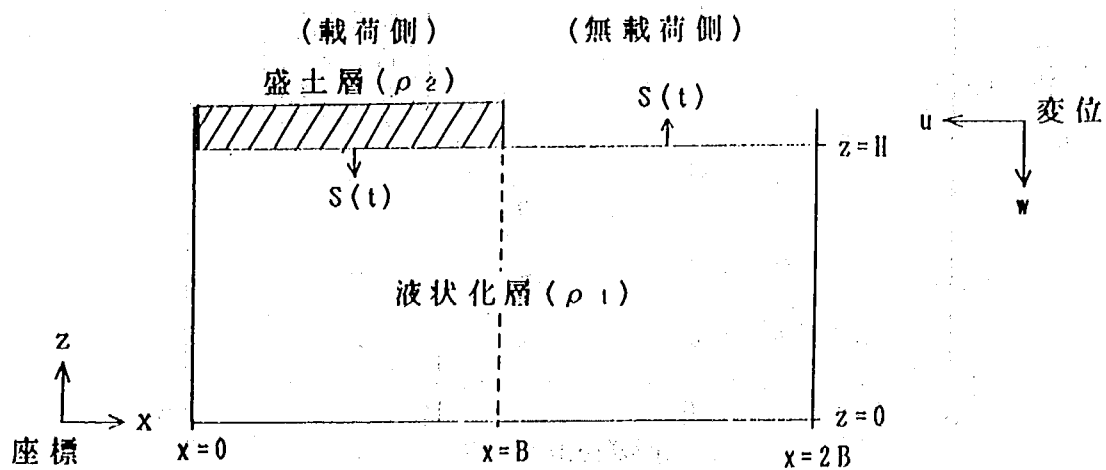


図5.3 液状化地盤の解析モデル

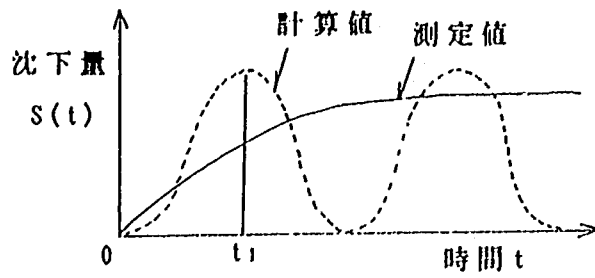


図5.4 載荷側地表面変位(モデル3)

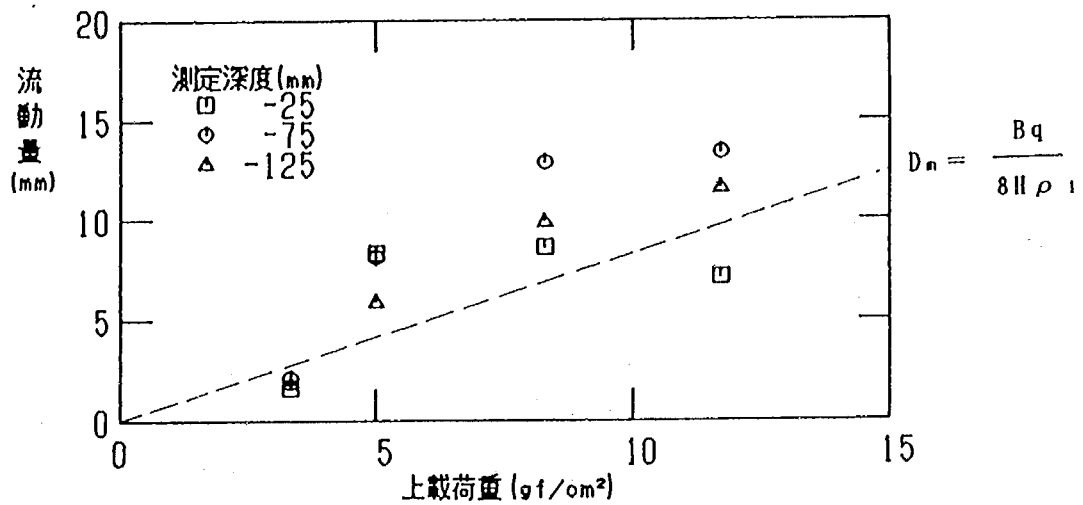


図5.5 地盤流動量と上載荷重の関係(H=240mm)

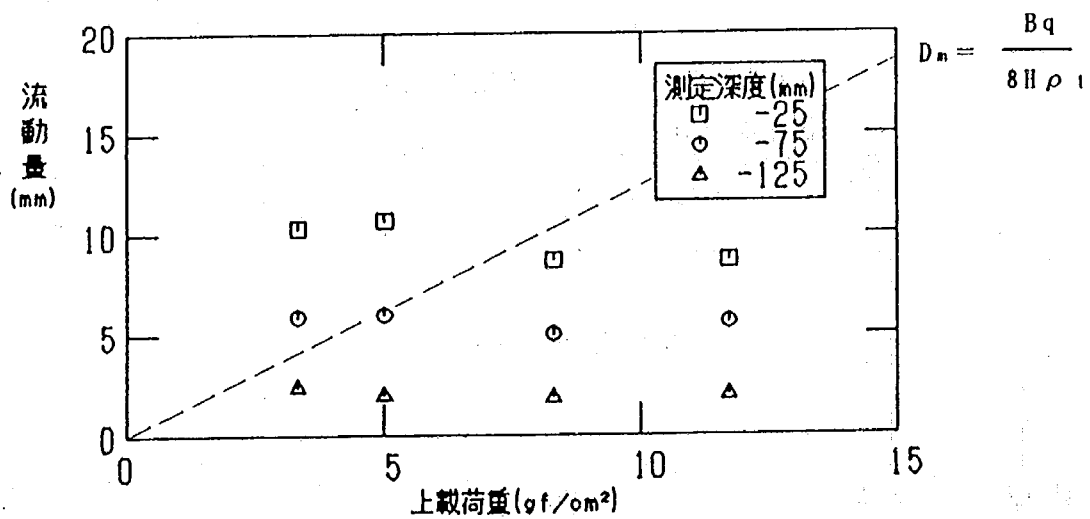


図5.6 地盤流動量と上載荷重の関係(H=160mm)

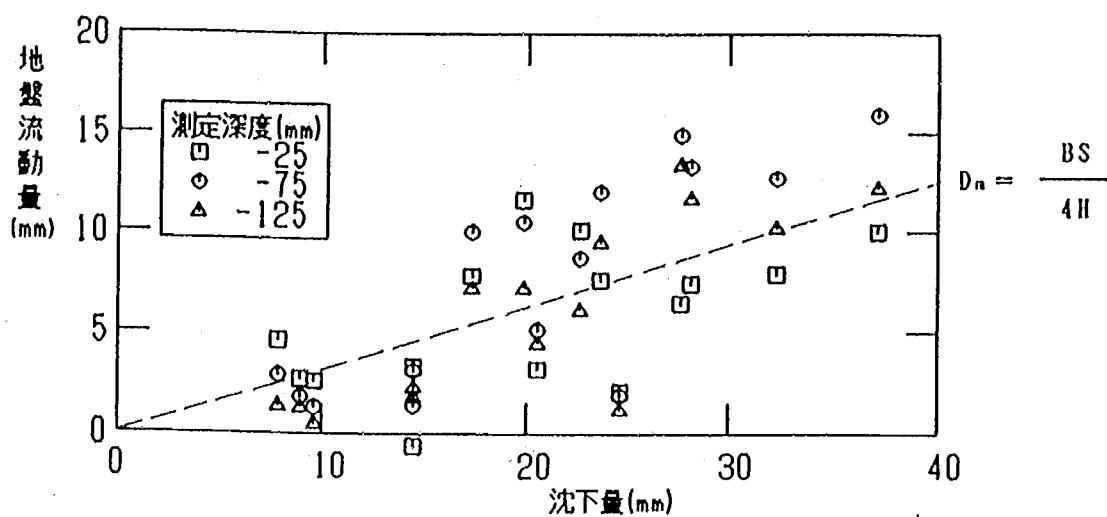


図 5.7 地盤流動量と載荷側地表面沈下量の関係 ($H=240\text{mm}$)

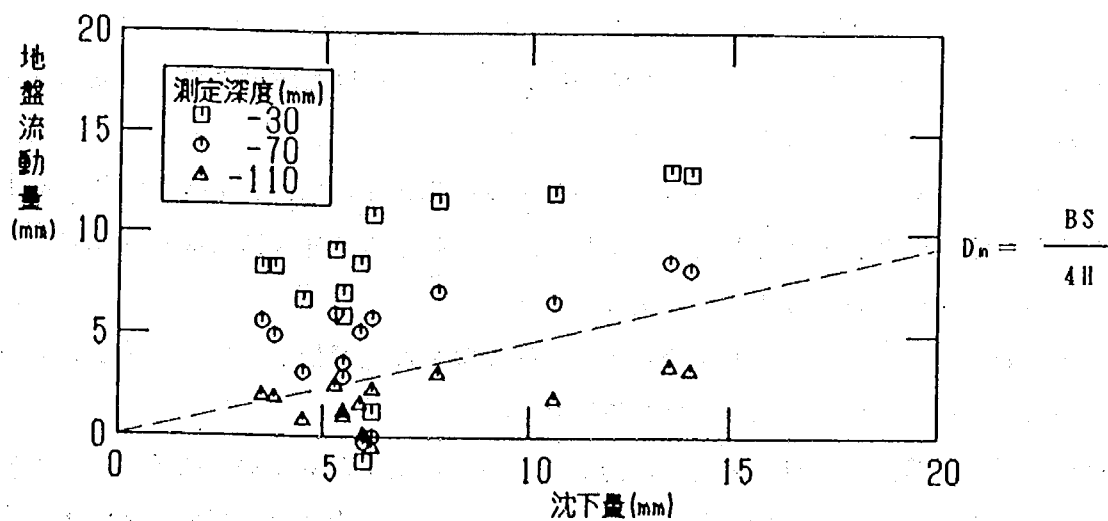


図 5.8 地盤流動量と載荷側地表面沈下量の関係 ($H=160\text{mm}$)

6. まとめ

橋台背面のように、地表面形状が大きく異なる場合における地盤流動特性を把握する目的で模型実験を実施した。実験は図2.3に示すように液状化地盤の地表面に盛土等による偏荷重が作用するモデルで実施した。実験方法の新しい試みとして、液状化地盤の作成にボイリング装置を利用し、極緩い地盤を作成した。また、模型板に取り付けた超小型の加速度計から、深さ方向における地盤流動分布を推定した。なお、液状化は土槽の側面を打撃することにより生じさせた。小型土槽並びに中型土槽を用いた実験結果から、次のような現象が見られた。

- ・ 打撃後、土層全体が液状化し、最深部から徐々に過剰間隙水圧が消散し始めるが、その過程において地盤の流動が打撃後振動が停止してもなお数秒間継続していた。また、流動は地表面に近い位置ほど長く継続している。ただし、流動は液状化継続（過剰間隙水圧が残留）中であっても、載荷側の地盤内の間隙水圧比が0.2～0.3程度まで減少すると流動は停止する。
- ・ 地盤の最終流動量は載荷側地表面沈下量と相関があり、沈下量が大きいほど流動量も大きくなっている。また液状化層厚の違いにより、盛土荷重が大きくなると地盤の流動量も大きくなる場合、一定の場合及びある一定値に収束する場合の3形態が見られた。
- ・ 深さ方向における流動量の分布形状に模型板の剛性による影響が表れている可能性があるが、地表面において最大となる三角形分布あるいは地中のある深度において最大となる放物線分布の2形態が見られた。
- ・ 地盤流動速度は打撃直後に急激に大きくなっており、最大流動速度は最終流動量が大きいほど大きくなる傾向がある。また、最大流動速度が生じた以降の時刻における流動速度は、液状化層厚が大きいほど大きくなる傾向がある。

このように極緩い地盤を作成し、打撃により地盤を液状化させた場合、土槽の振動が停止した後においても地盤の流動現象が確認された。ただし、流動が生じる条件（例えば液状化層厚と盛土荷重の比）については定量化を行うまでには至っていない。

また、液状化層を流体としたモデルを用いて、地盤流動の簡易解析を行い、小型土槽を用いた実験結果に適用した。その結果次のような知見を得た。

- ・ 実験における載荷側沈下は、重力と浮力が釣り合う位置よりも浅い位置で停止している。
- ・ 載荷側地表面沈下量を未知数とし、土槽全体を一つの系と考えた一自由度系の運動方程式を作成し、その解を求めた。沈下に要する時間について比べて見ると、実験値は計算値の数倍大きくなっている。
- ・ 液状化地盤中の粘性抵抗を運動方程式に考慮した結果、液状化砂層の粘性係数を水の粘性係数の数十万倍のオーダーとすれば、最終沈下量にいたるまでの挙動をある程度説明することができる。

【参考文献】

- 1) 浜田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集 第376号/Ⅲ-6、pp. 211-220、1986
- 2) 浜田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究、土木学会論文集 第376号/Ⅲ-6、pp. 221-229、1986
- 3) 安田進, 多田浩, 福崎真介, 中島良二, 山本芳生: 液状化による地盤の永久変位に関する振動台実験、第22回土質工学研究発表会、pp. 731-734、1987. 6
- 4) 山田和彦, 石原研而, 東畑郁生, 久保弘明, 菊田正史: 振動台を用いた液状化地盤の永久変位に関する研究、第24回土質工学研究発表会、pp. 1029-1032、1989. 6
- 5) 東畑郁生, 山田和彦: 液状化した地盤の永久変位置の簡易予測法、第20回地震工学研究発表会、pp. 265-268、1989. 7
- 6) 佐々木康, 松本秀應, 佐谷祥一: 液状化にともなう地盤流動に関する振動台実験、第24回土質工学研究発表会、pp. 1025-1028、1989. 6
- 7) 松本秀應, 常田賢一, 佐谷祥一: 液状化による地盤流動に関する模型実験、第25回土質工学研究発表会、pp. 1045-1046、1990. 6
- 8) 森伸一郎, 清水勝美, 鈴木信久, 高木政美, 中村晋: 液状化による地盤の永久変位に起因する杭基礎の被害と解析、第20回地震工学研究発表会、pp. 25-28、1989. 7
- 9) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化、技報堂、1985. 5
- 10) 佐々木康, 常田賢一, 松本秀應, 佐谷祥一: 液状化に伴う地盤流動特性、土木技術資料、土木研究センター、Vol. 33、No. 1、pp. 56-61、1991. 1
- 11) Yashusi Sasaki, Ken-ichi Tokida, Hideo Matsumoto, Shoichi Saya: EXPERIMENTAL STUDY OF LATERAL FLOW OF GROUND INDUCED BY SOIL LIQUEFACTION、第8回日本地震工学シンポジウム、pp. 825-830、1990. 12
- 12) Yashusi Sasaki, Ken-ichi Tokida, Hideo Matsumoto, Shoichi Saya: EXPERIMENTAL STUDY OF LATERAL FLOW OF GROUND DUE TO SOIL LIQUEFACTION、Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics、University of Missouri-Rolla、pp. 263-270、1991. 3
- 13) 森利弘, 佐々木康, 常田賢一, 松本秀應, 佐谷祥一: 液状化に伴う盛土周辺地盤の流動特性に関する検討、第21回地震工学研究発表会、pp. 265-268、1991. 7
- 14) 松本秀應, 常田賢一, 佐谷祥一: 液状化に伴う地盤の流動特性に与える境界条件の影響の検討、第21回地震工学研究発表会、pp. 269-272、1991. 7
- 15) 松本秀應, 常田賢一, 佐谷祥一: 液状化による地盤の流動特性に関する実験的検討、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集 第3部、pp. 228-229、1991. 9
- 16) 森利弘, 常田賢一, 松本秀應, 佐谷祥一: 液状化に伴う盛土周辺地盤の流動特性に関する模型実験、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集 第3部、pp. 232-233、1991. 9

卷末資料

1. 小型土槽を用いた地盤流動実験における時刻歴結果

2. 中型土槽を用いた地盤流動実験における時刻歴結果

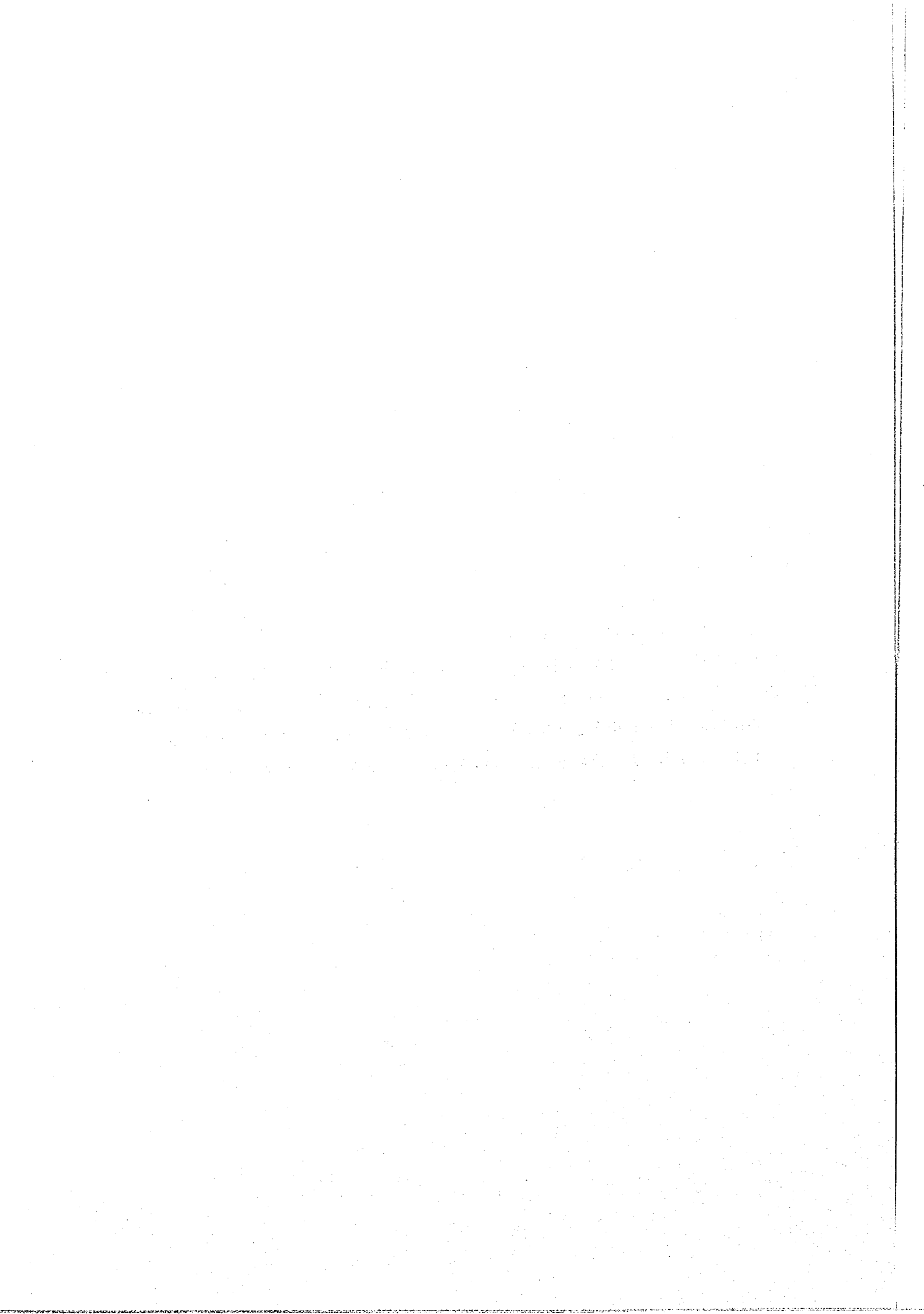
1. 小型土槽を用いた地盤流動実験における時刻歴結果

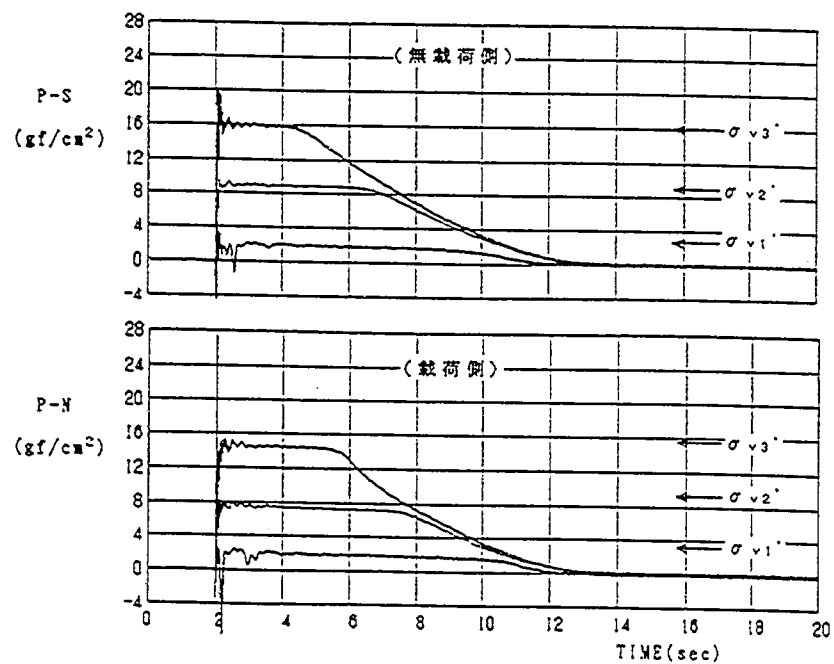
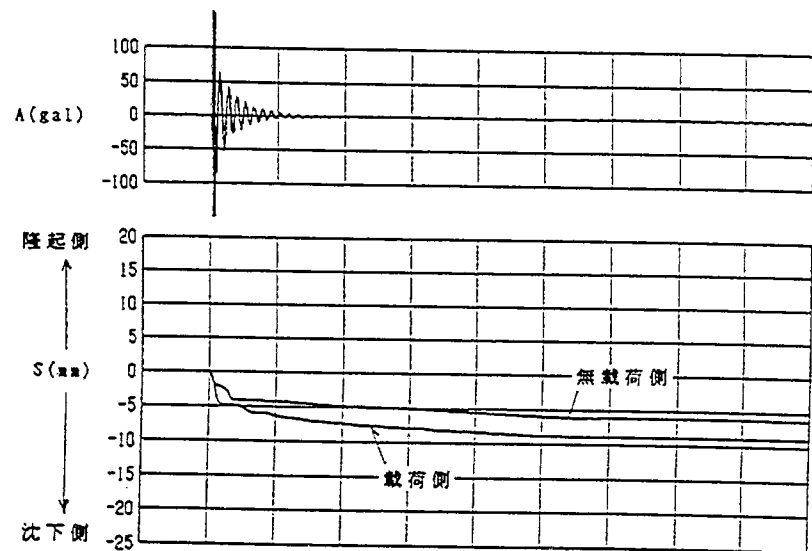
○記号説明

- A ----- 土槽の加速度、 P-S ---- 無載荷側における間隙水圧
S ----- 地表面の鉛直変位、 P-N ---- 載荷側における間隙水圧
D ----- 地盤流動量(模型板の水平変位)

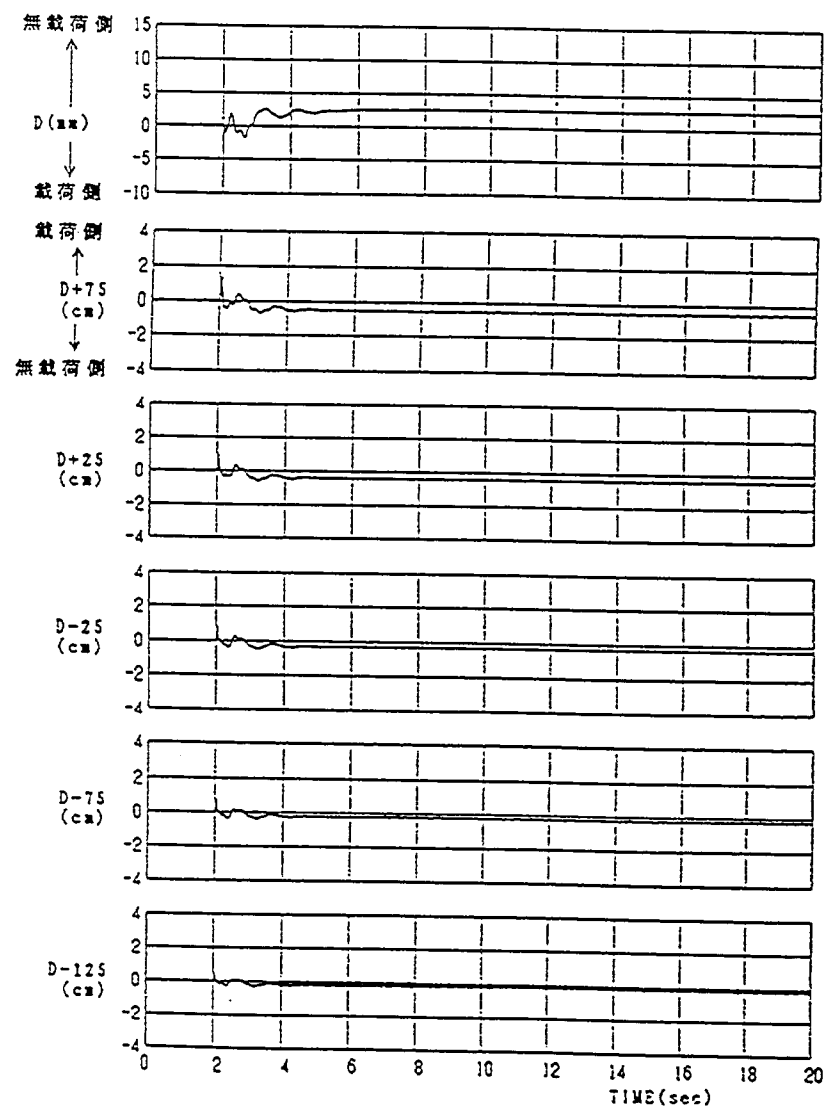
○注意事項

- ・本文中に示した時刻歴結果(実験No. EJ2, EL3, FA2, FC3)は省略した。
- ・打撃は横軸(時間軸)の2秒時に行った。
- ・間隙水圧の時刻歴には初期有効上載荷重の値を示した。
- ・地盤流動量は上側に非接触型変位計から得られた値、下側には超小型加速度計を用いて算出した値を示した。D-10における10という数字は地表面からの深度(mm)を示し、流動量は無載荷側に変位した場合をプラス側とした。ただし、Eシリーズの実験では超小型加速度計を用いて算出した変位のみ、載荷側に変位した場合をプラス側としている。

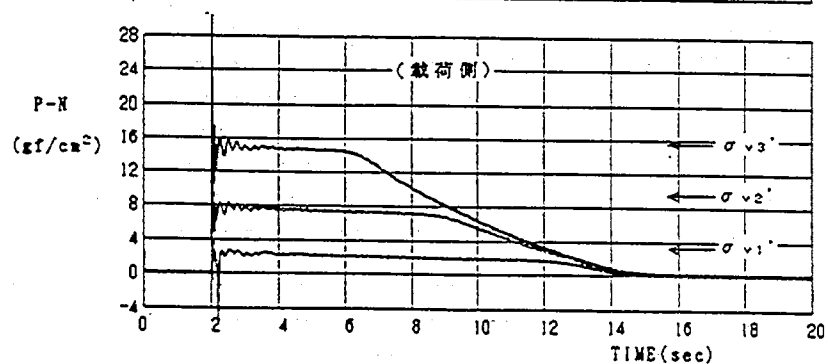
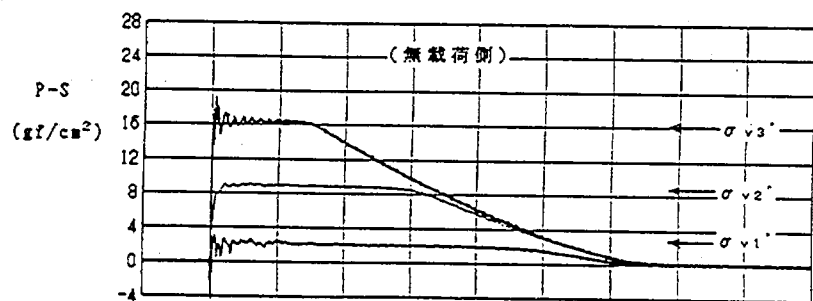
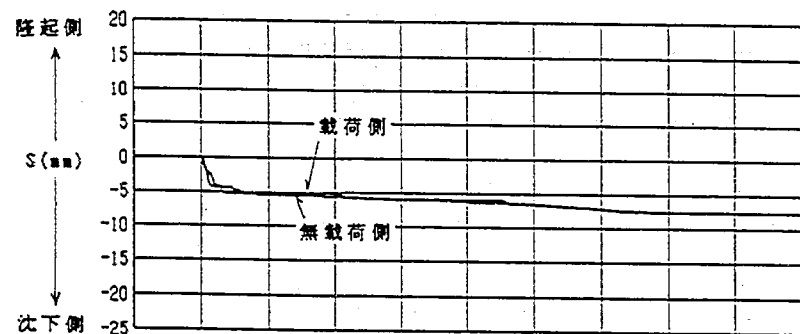
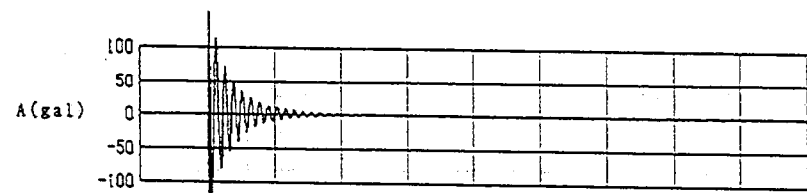




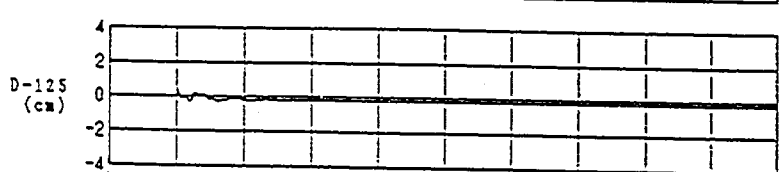
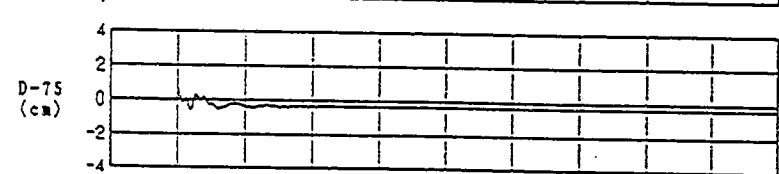
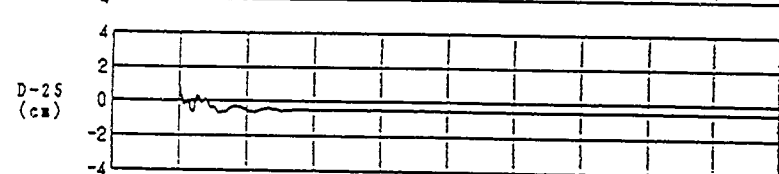
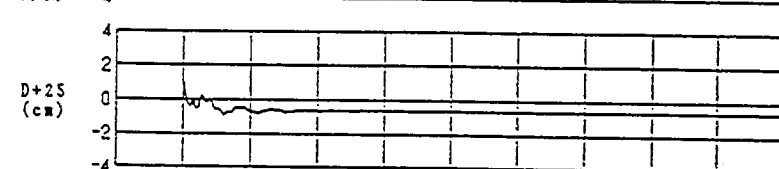
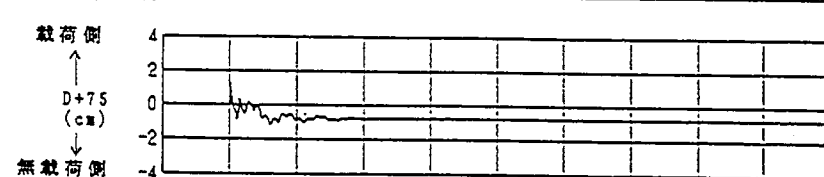
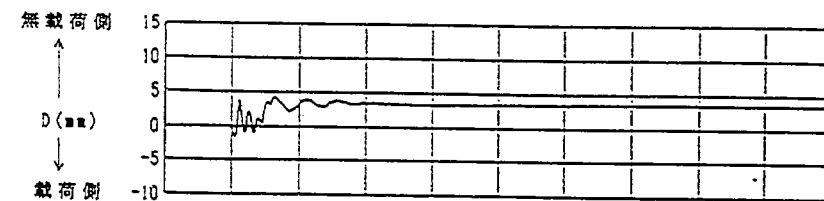
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EJ1)



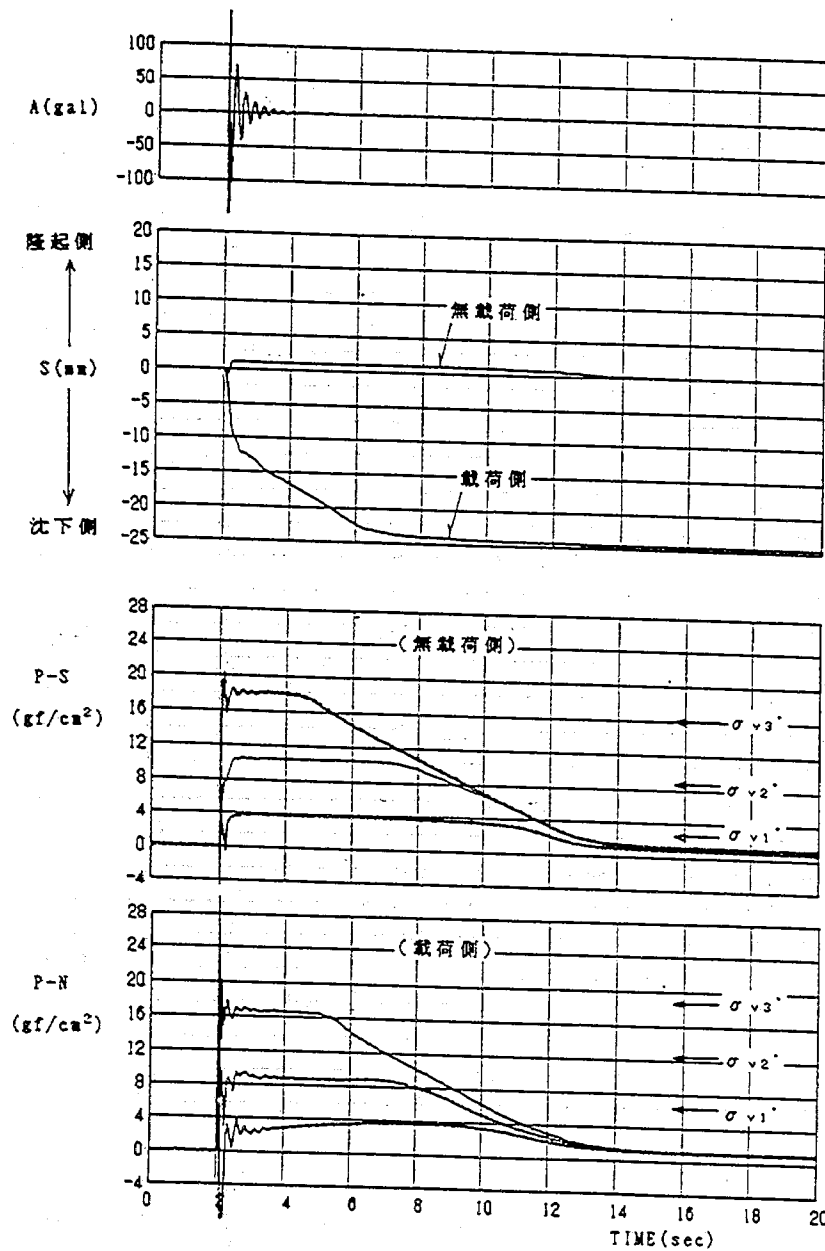
地盤流動量 (EJ1)



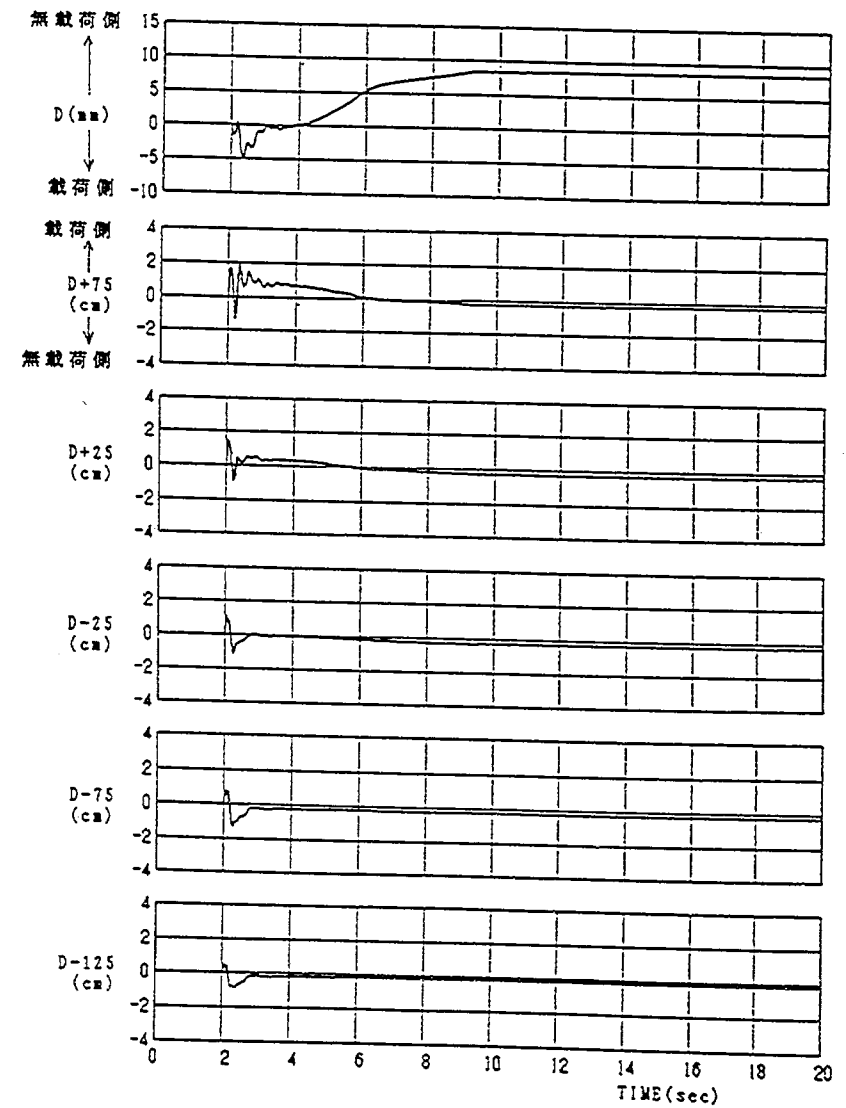
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EJ3)



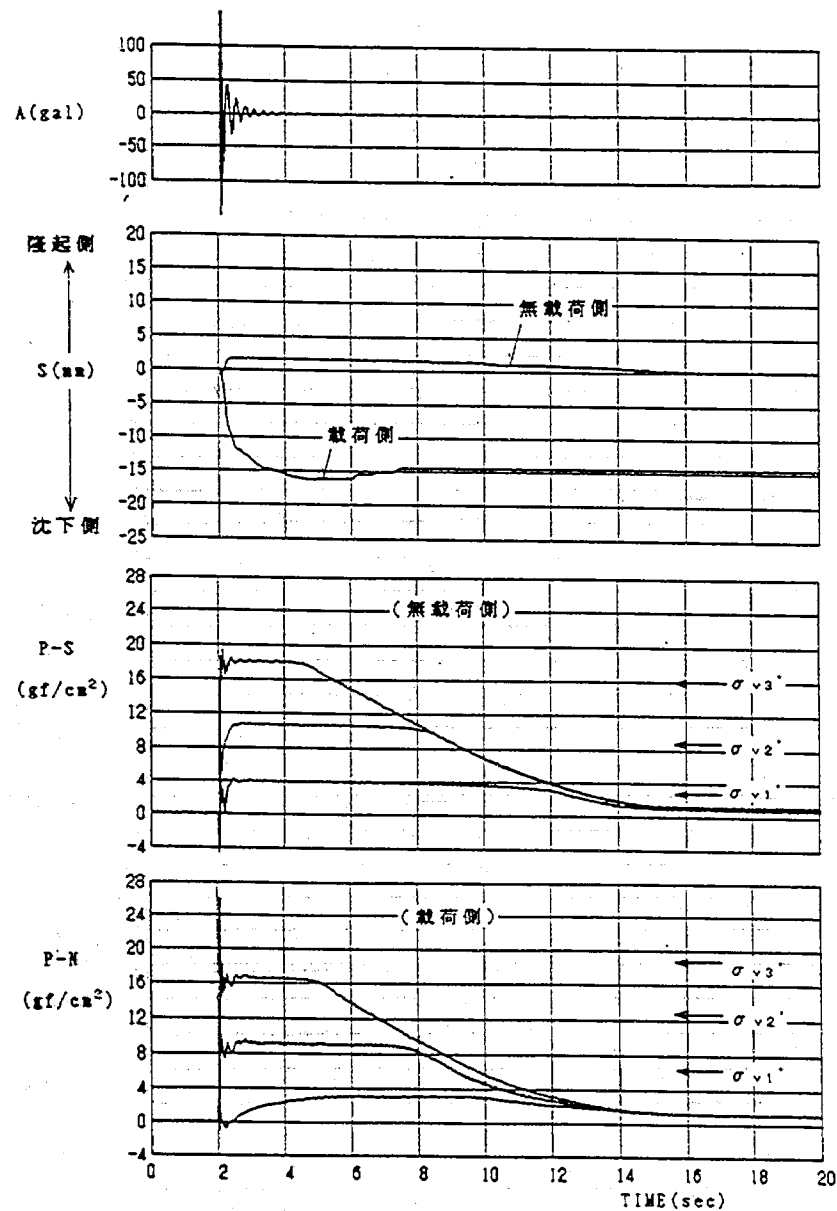
地震流動量 (EJ3)



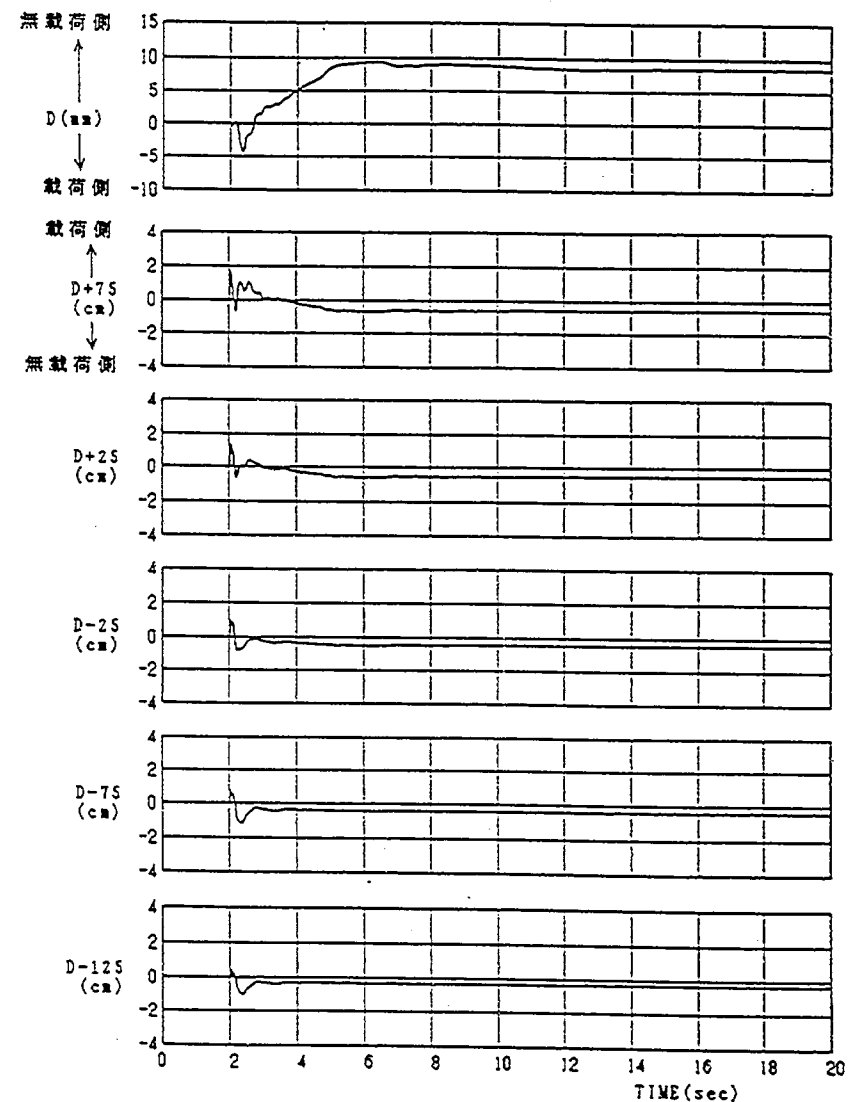
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EM1)



地盤流動量 (EM1)

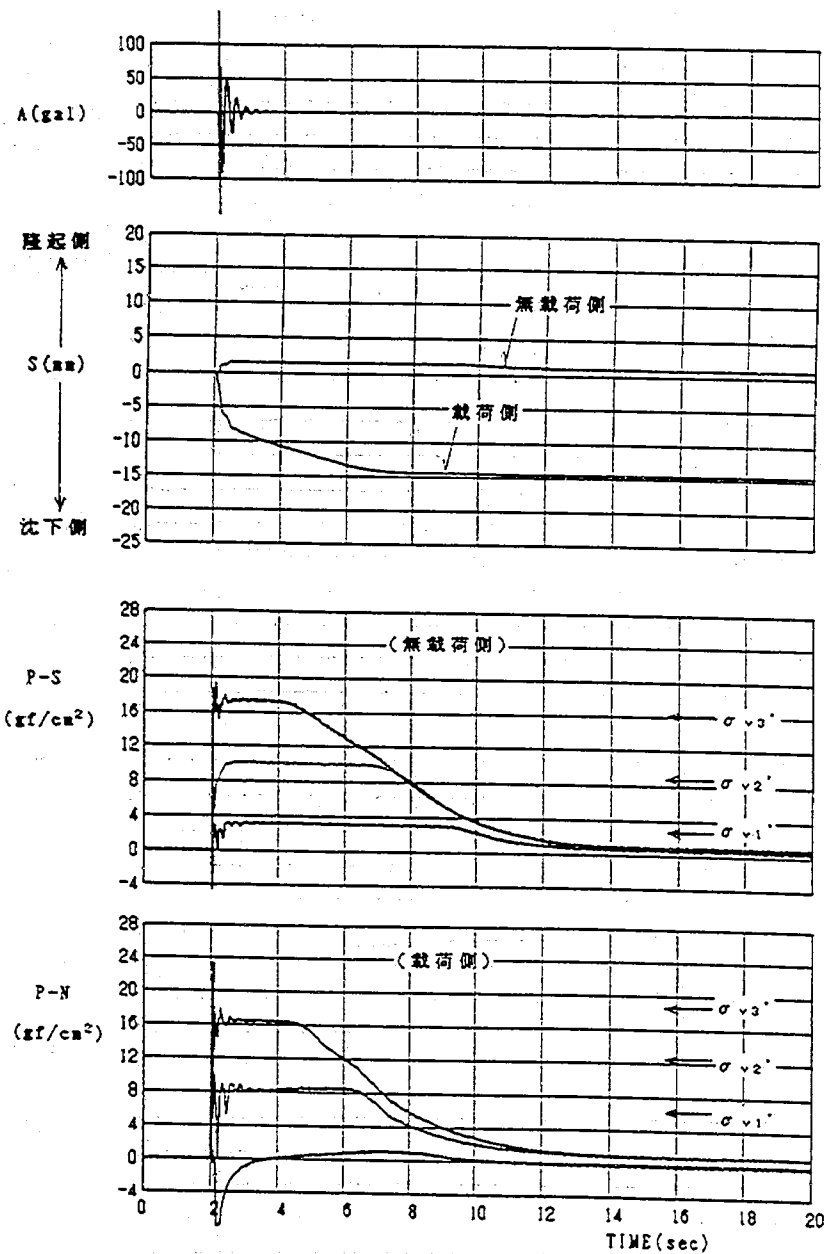


土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EM2)

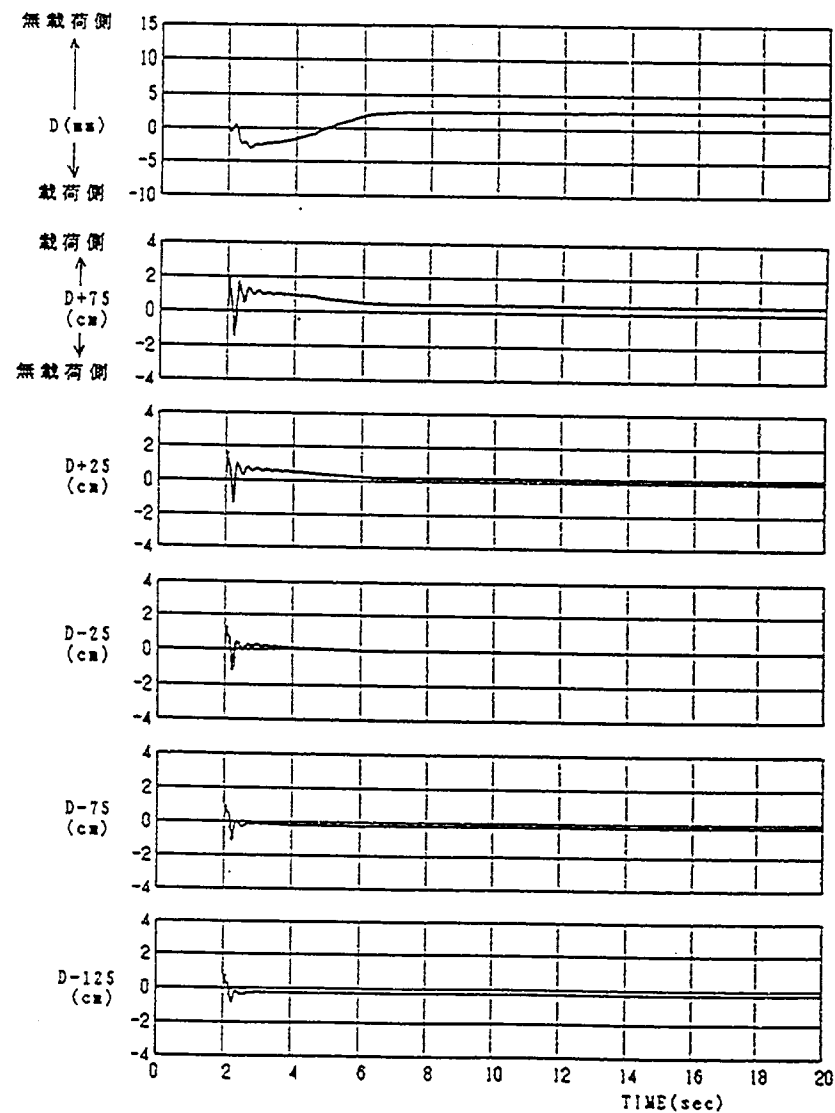


$D-125$
(cm)

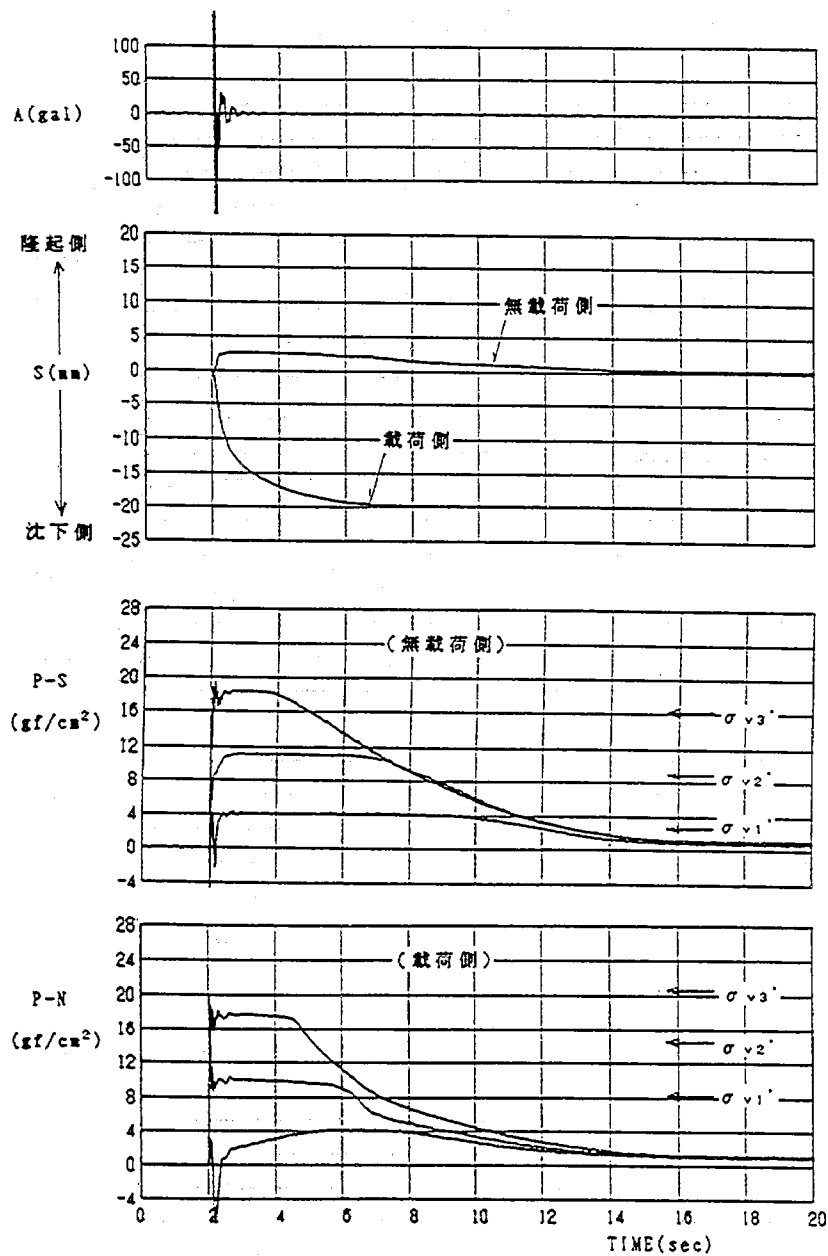
地盤流動量 (EM2)



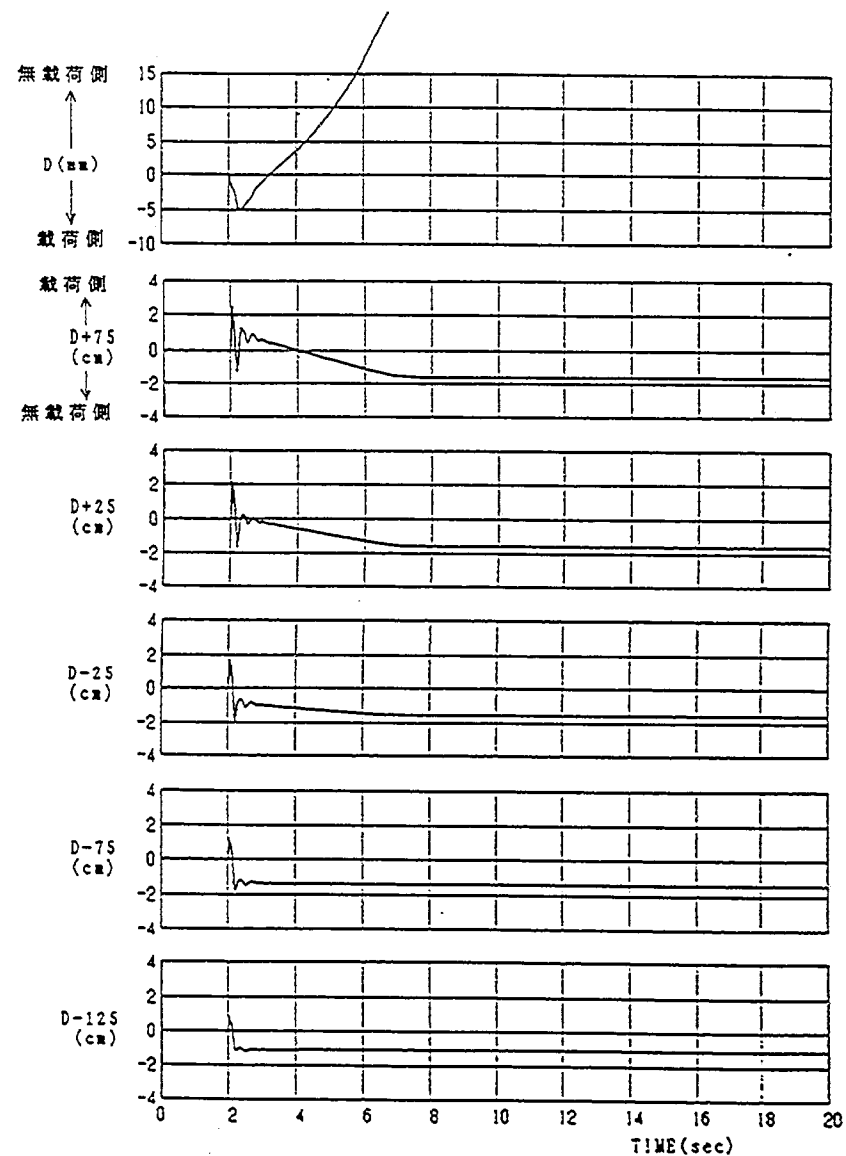
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EM3)



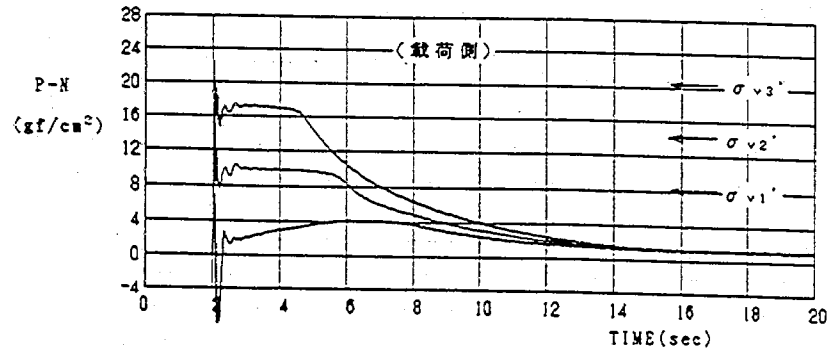
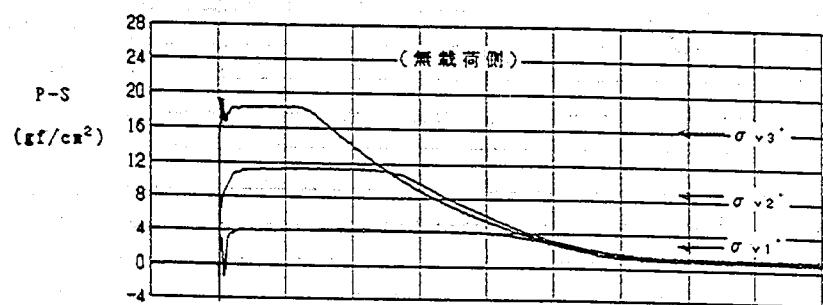
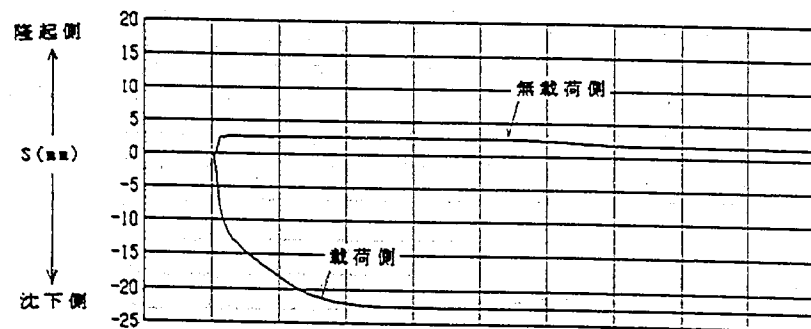
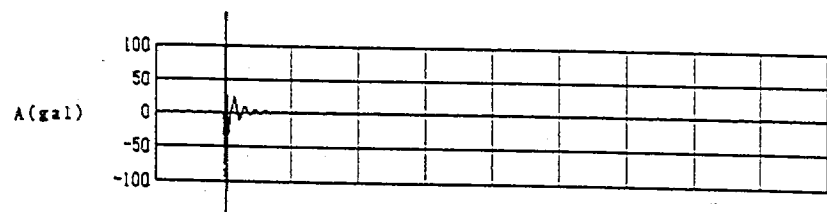
地盤流動量 (EM3)



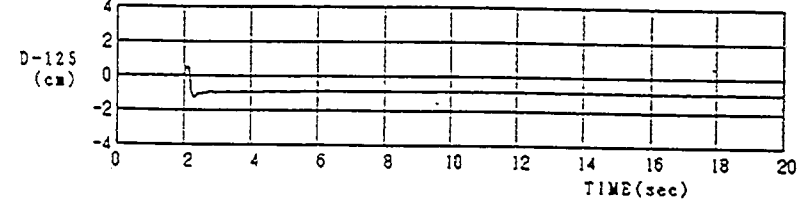
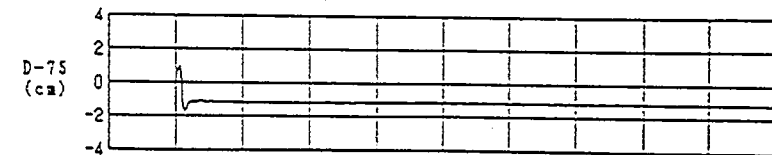
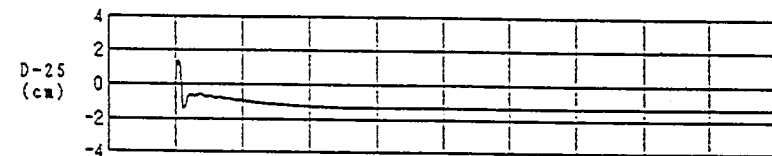
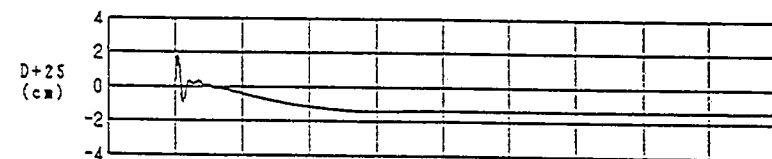
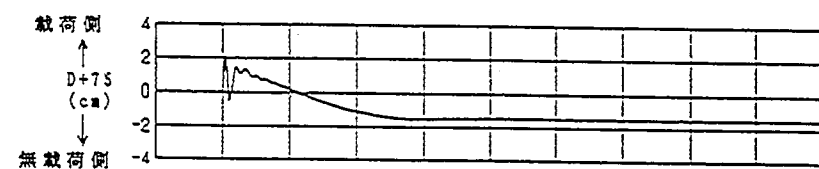
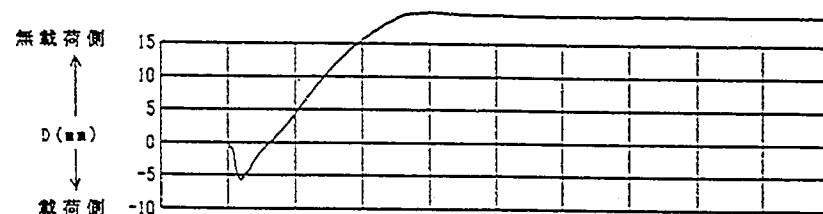
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EX1)



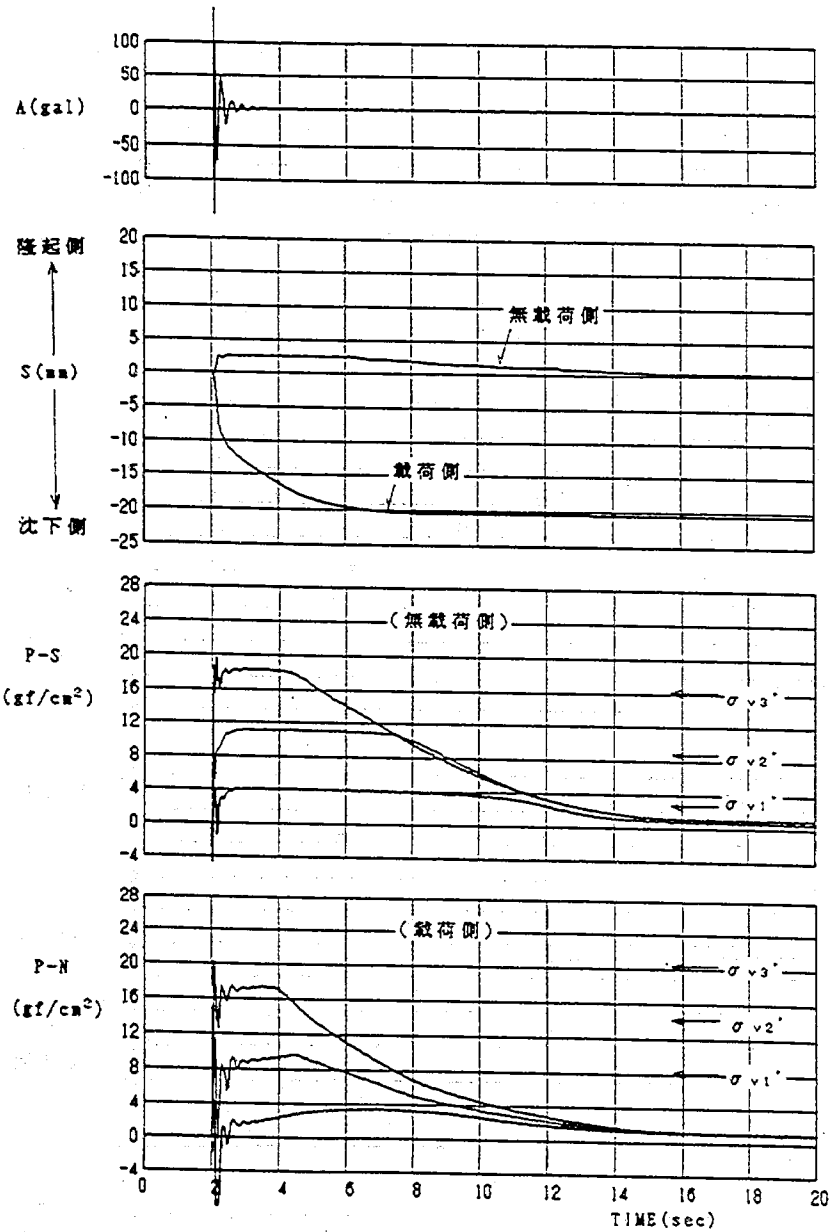
地盤流動量 (EX1)



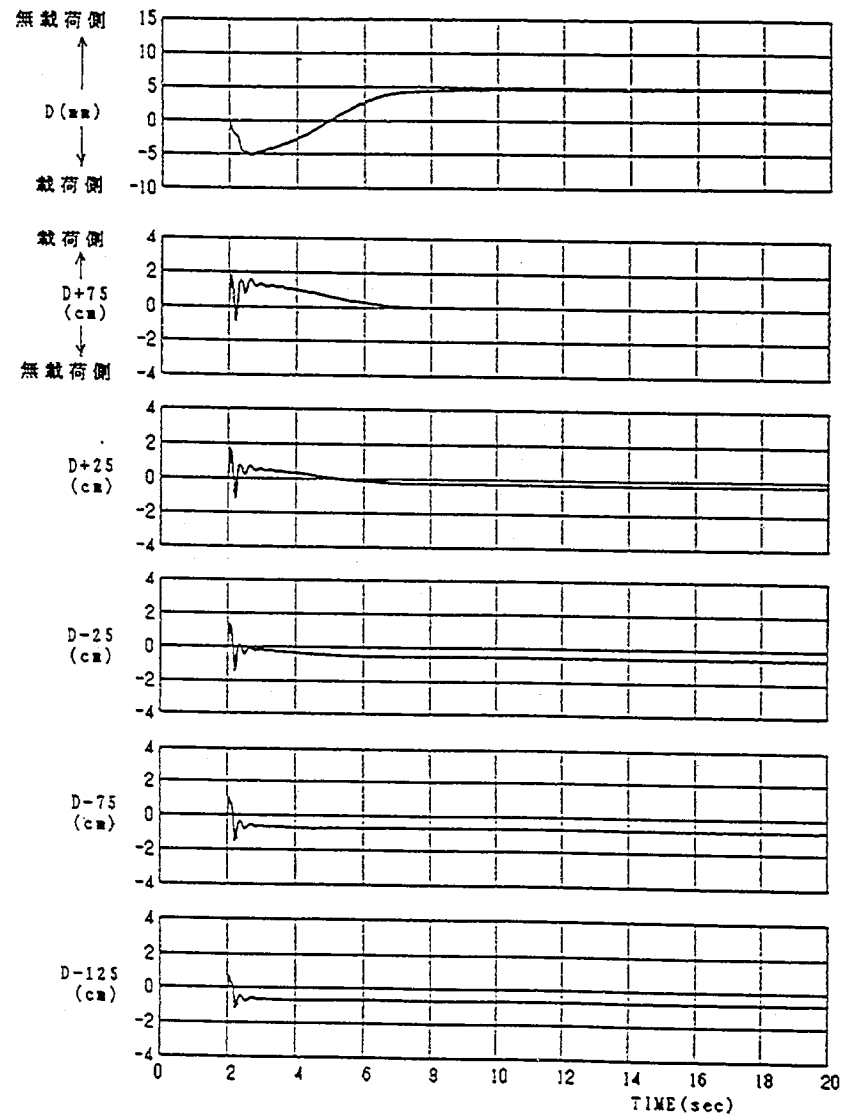
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EX2)



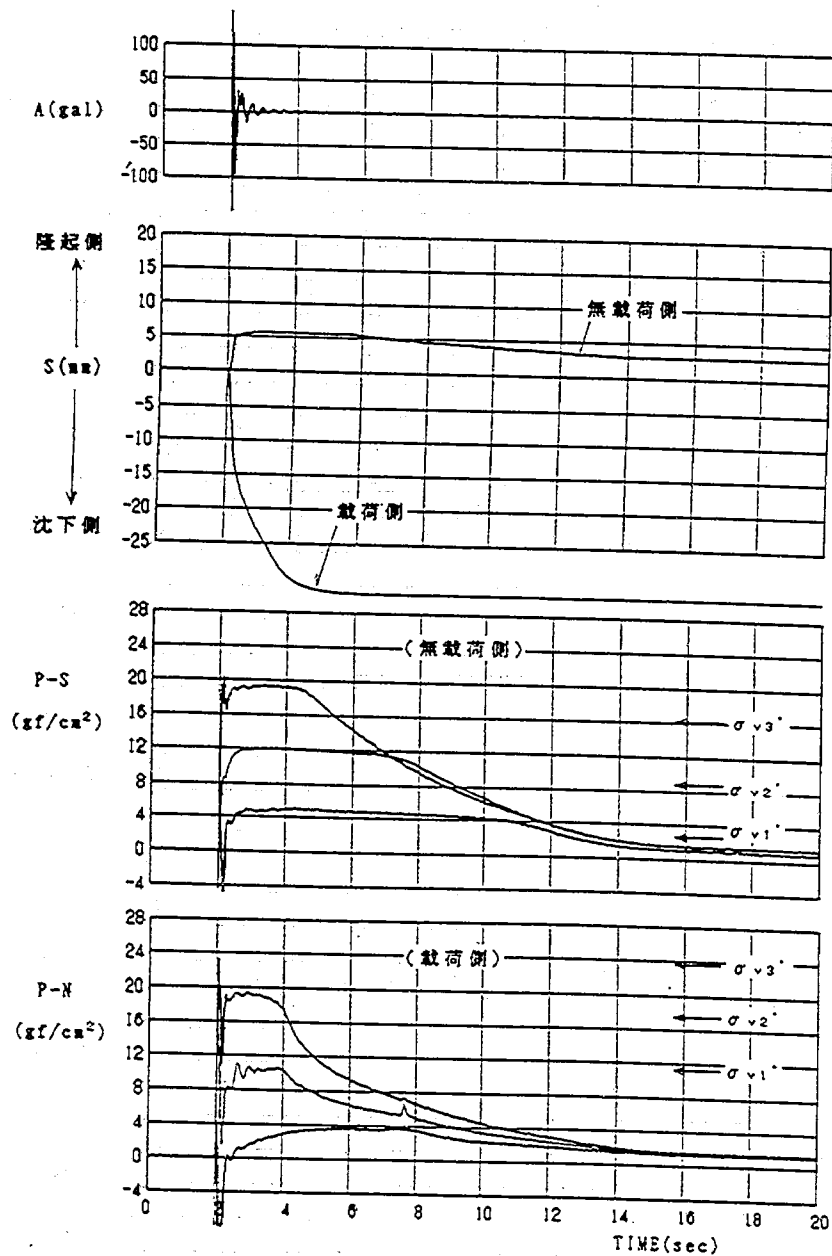
地盤流動量 (EX2)



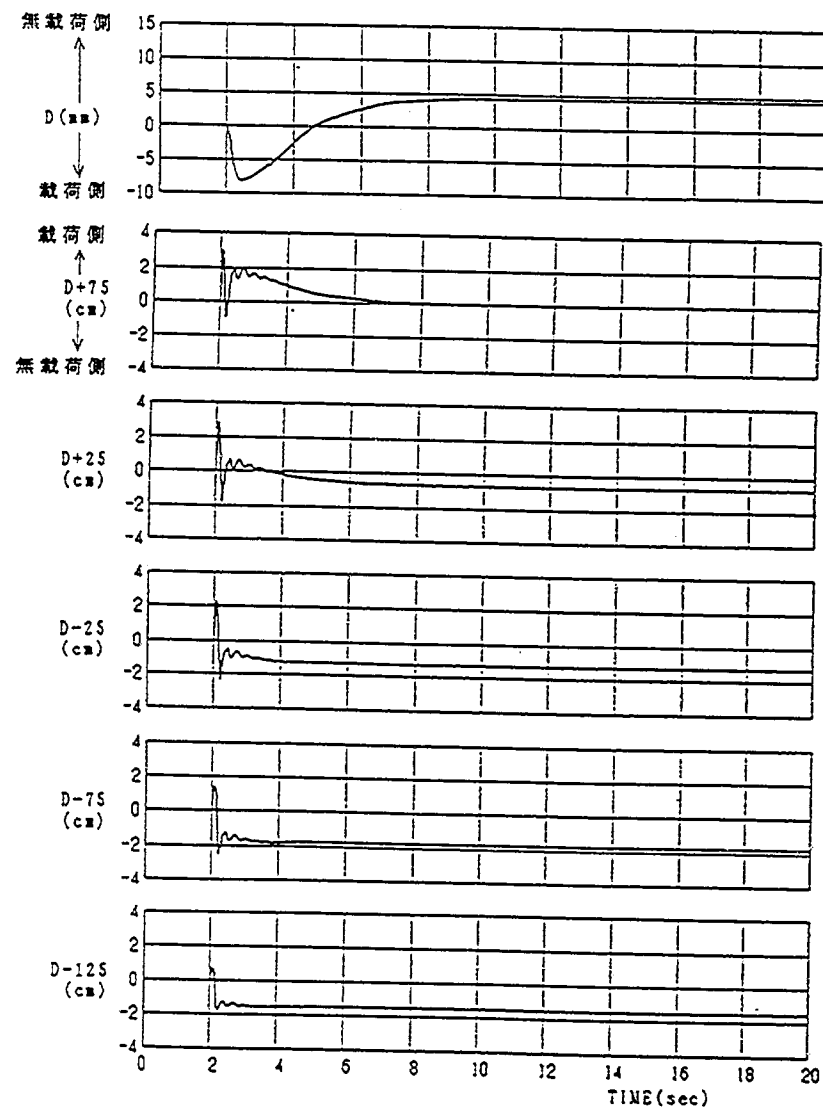
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EX3)



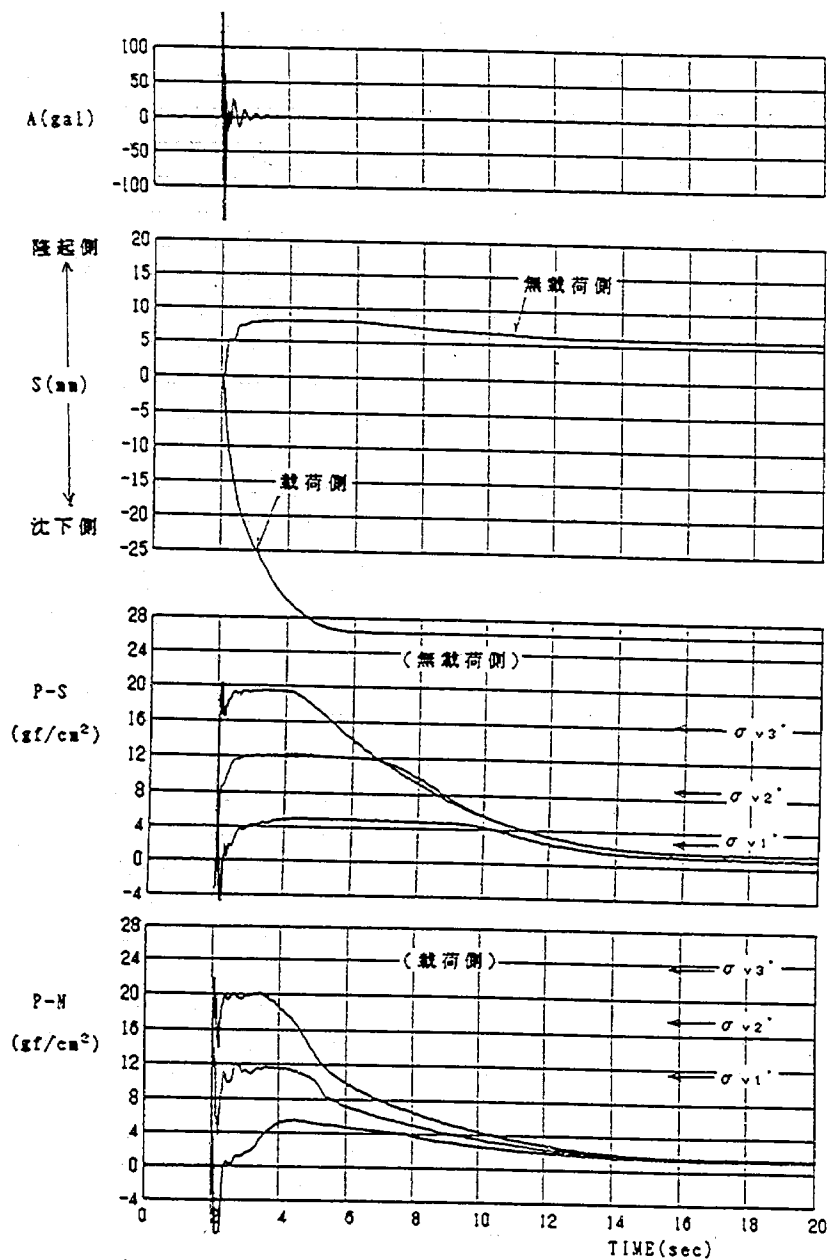
地盤流動量 (EX3)



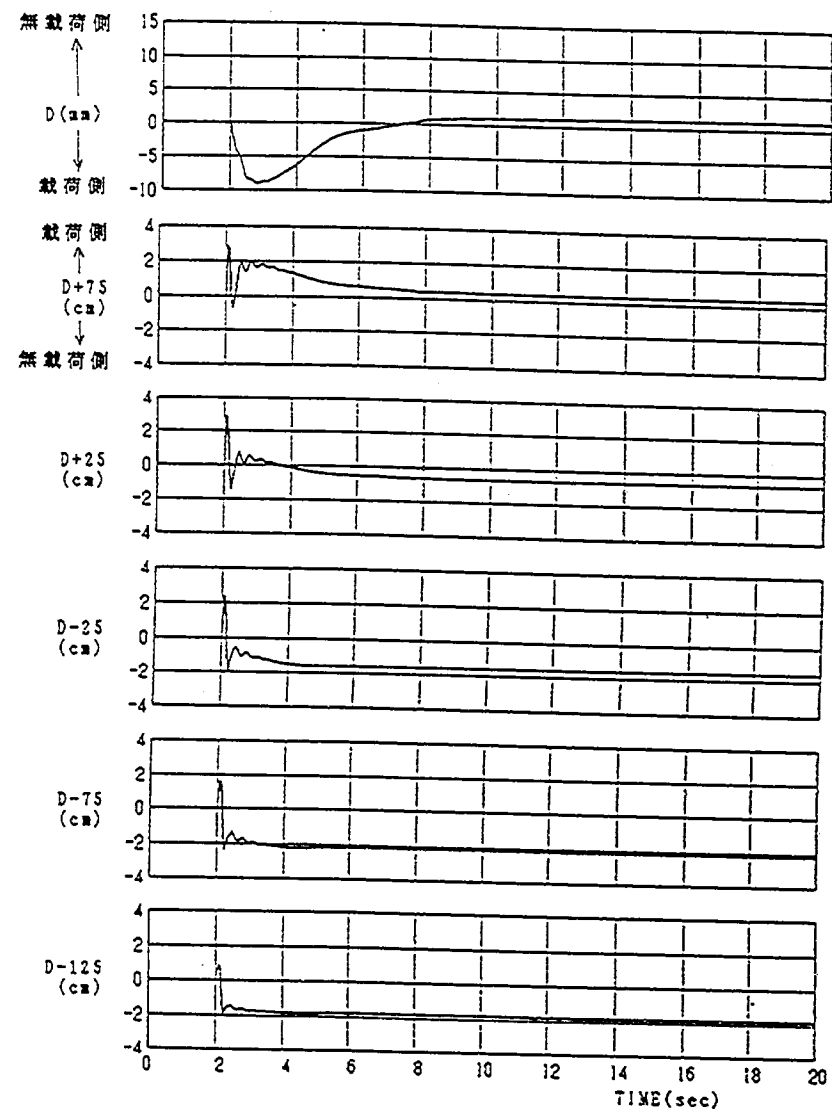
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EL1)



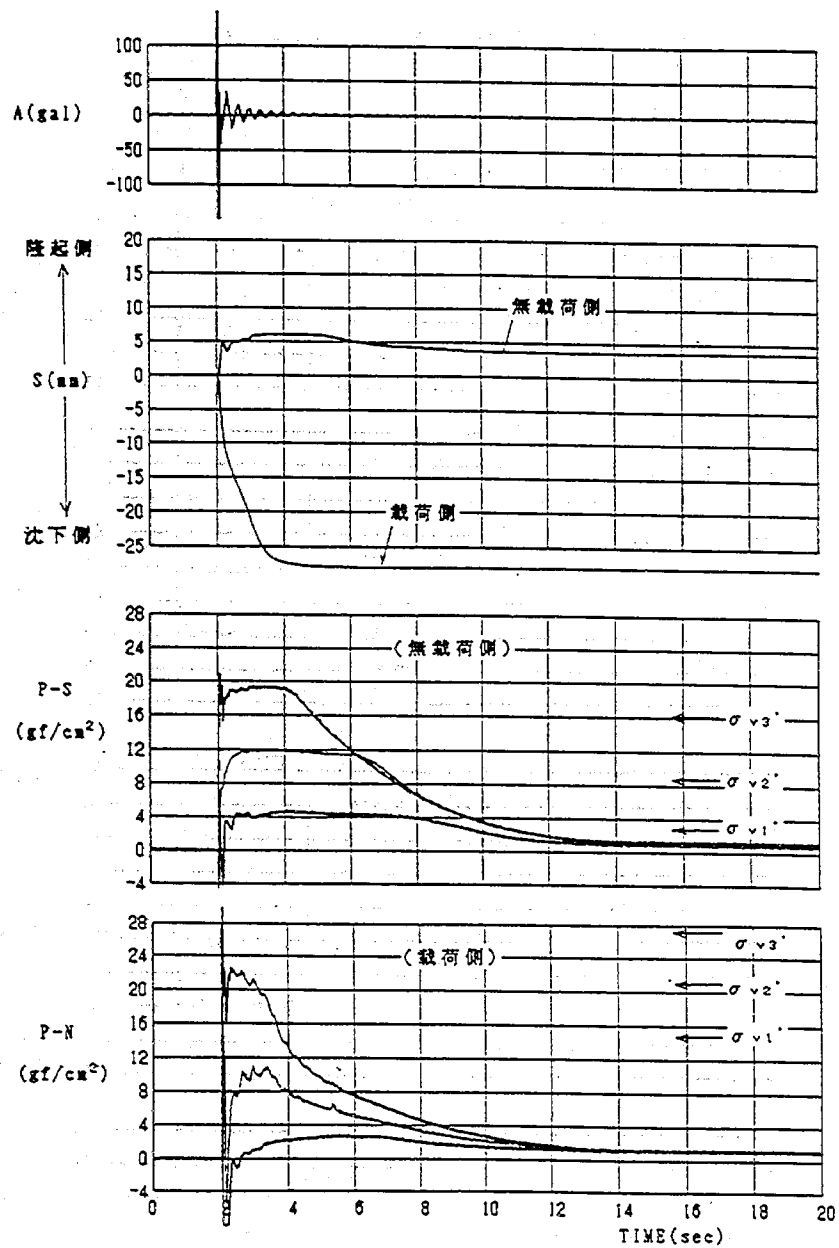
地盤流動量 (EL1)



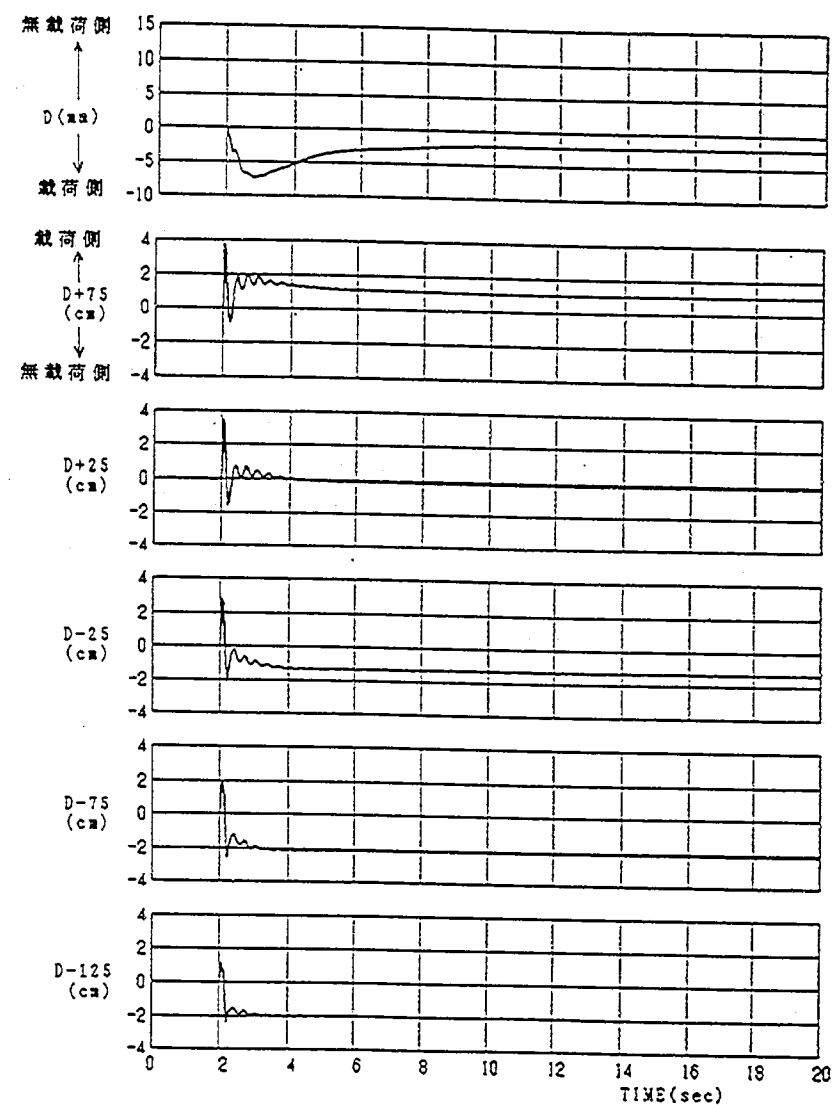
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (EL2)



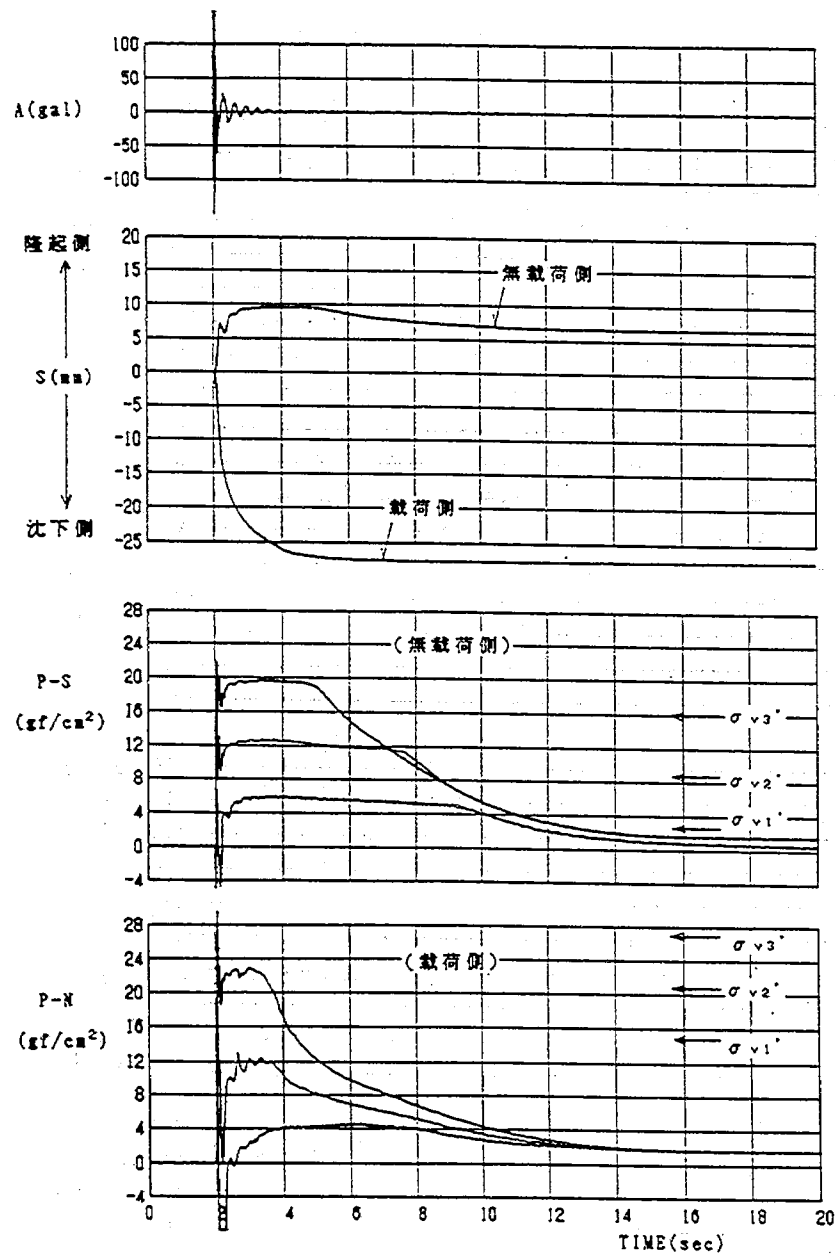
地盤流動量 (EL2)



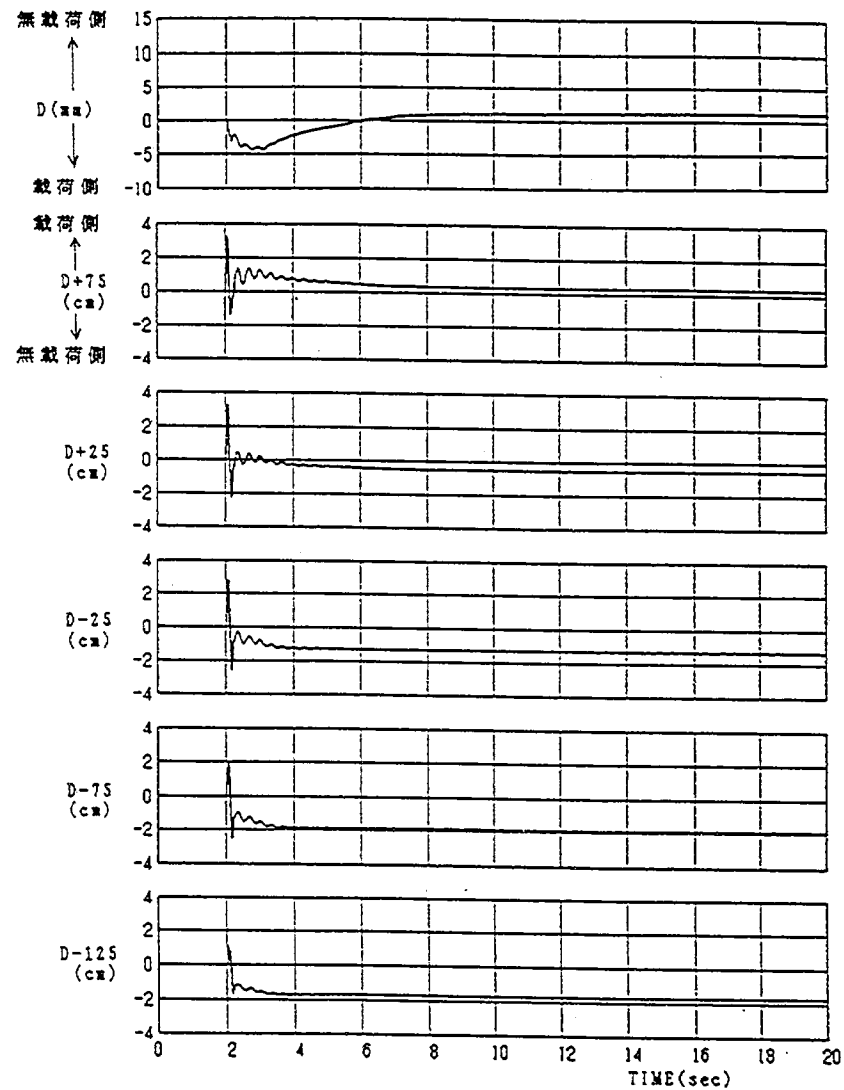
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧(E11)



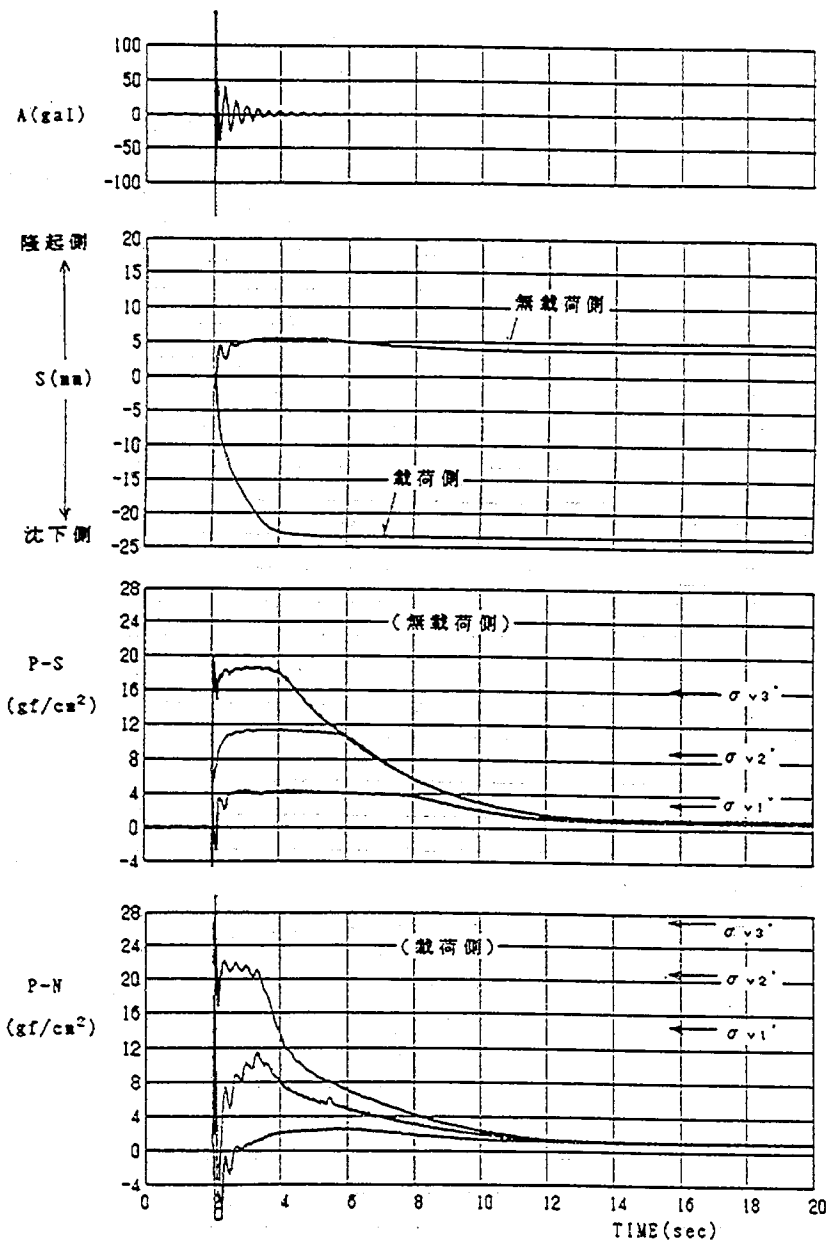
地盤流動量(E11)



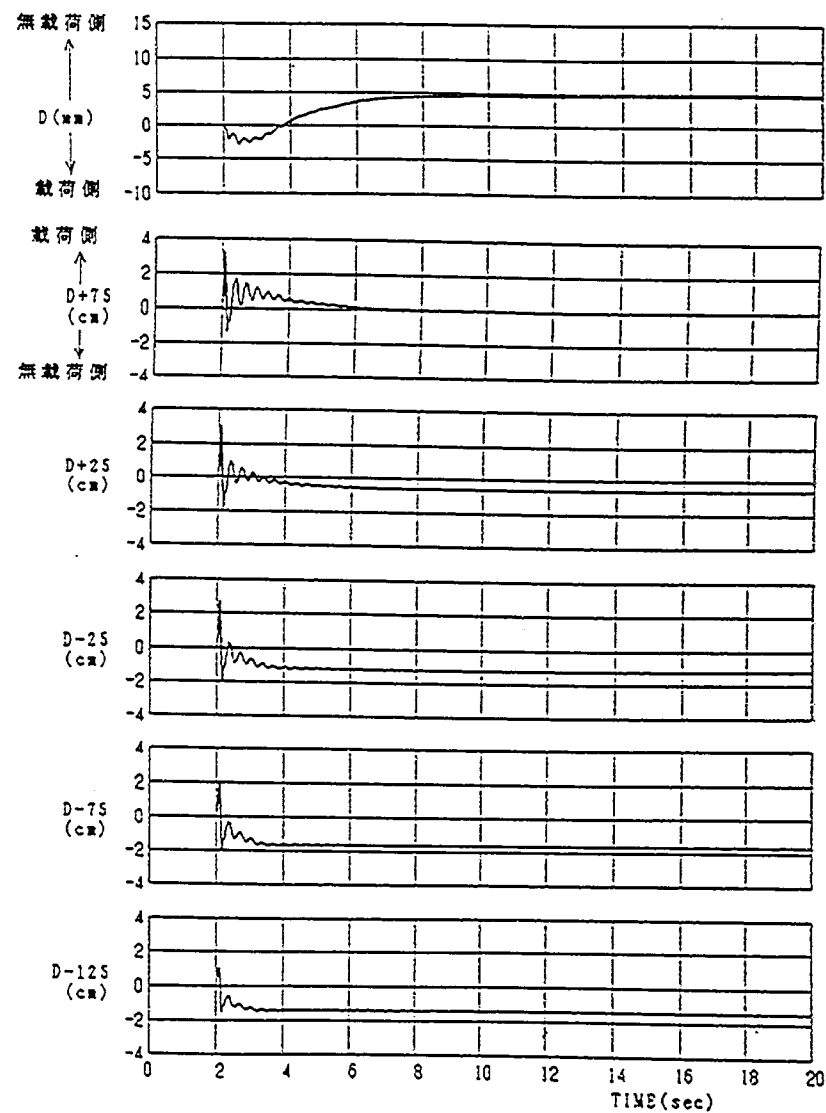
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (E12)



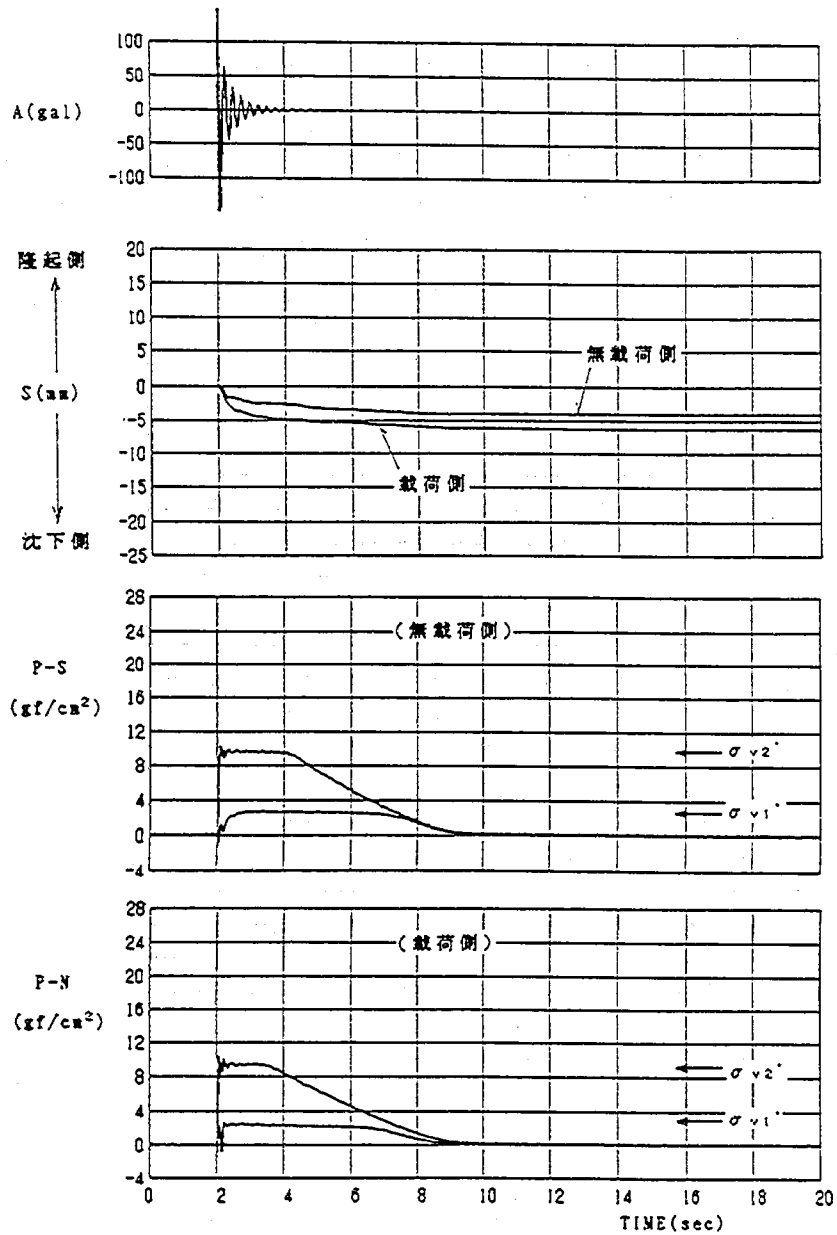
地盤流動量 (E12)



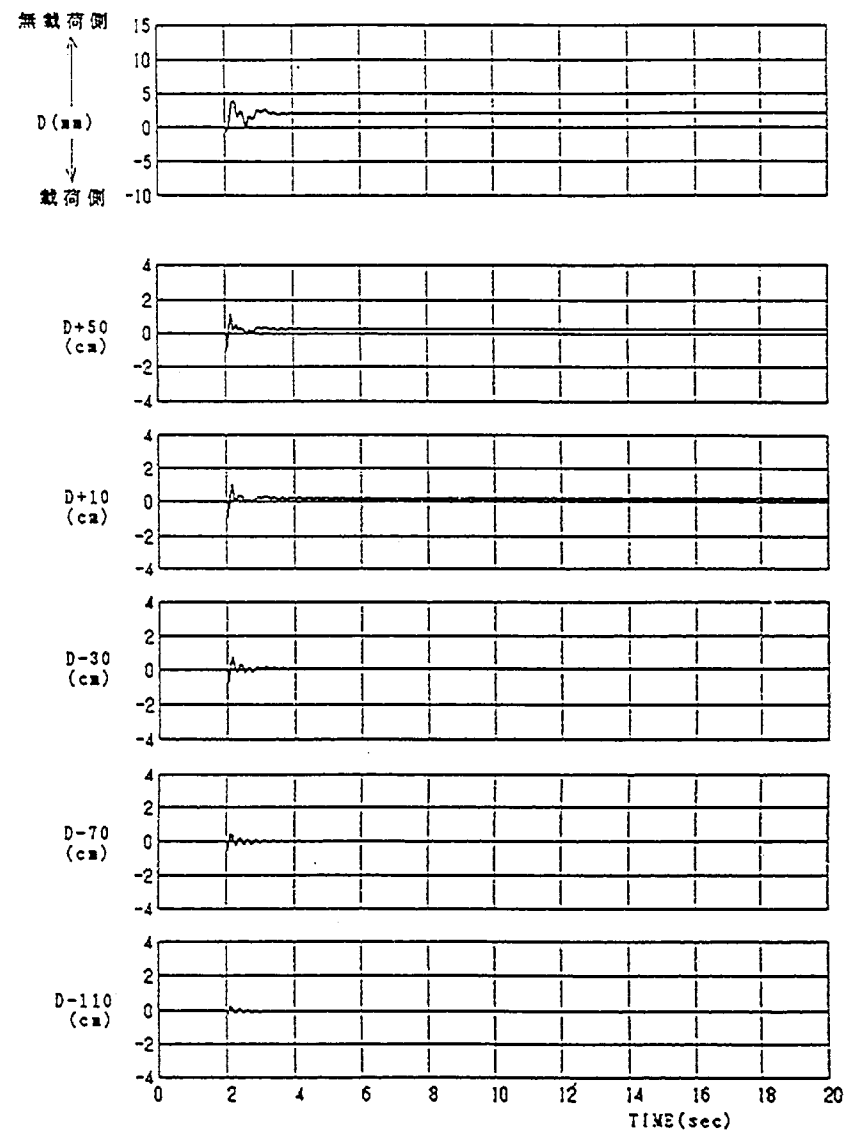
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (E13)



地盤流動量 (E13)

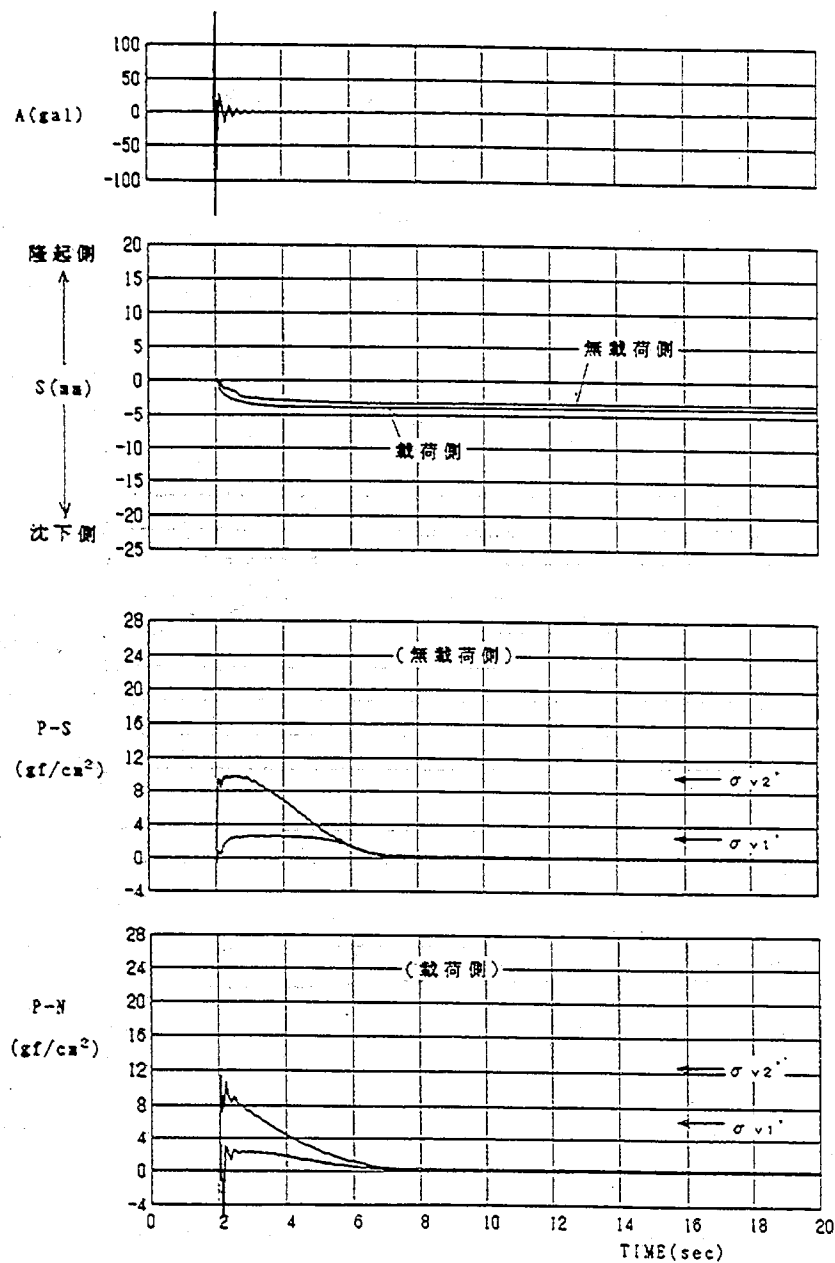


土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FA1)

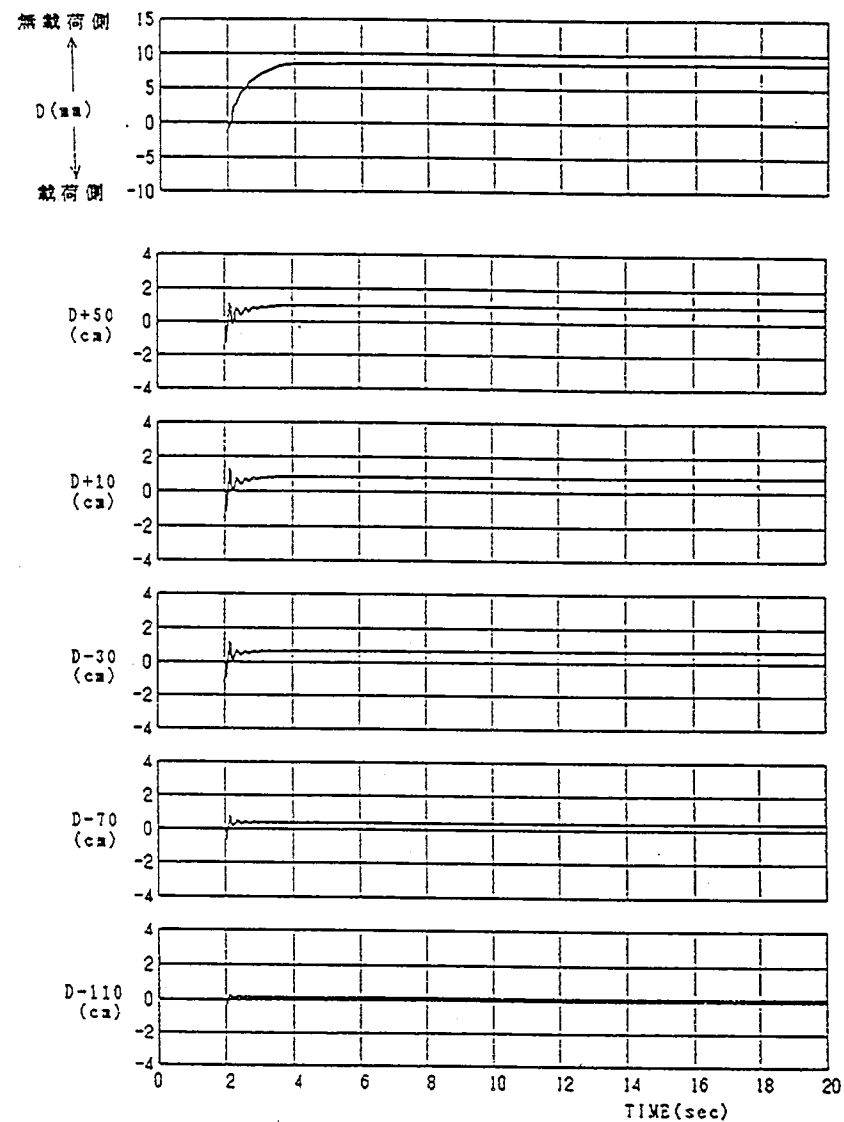


$D-110$
(cm)

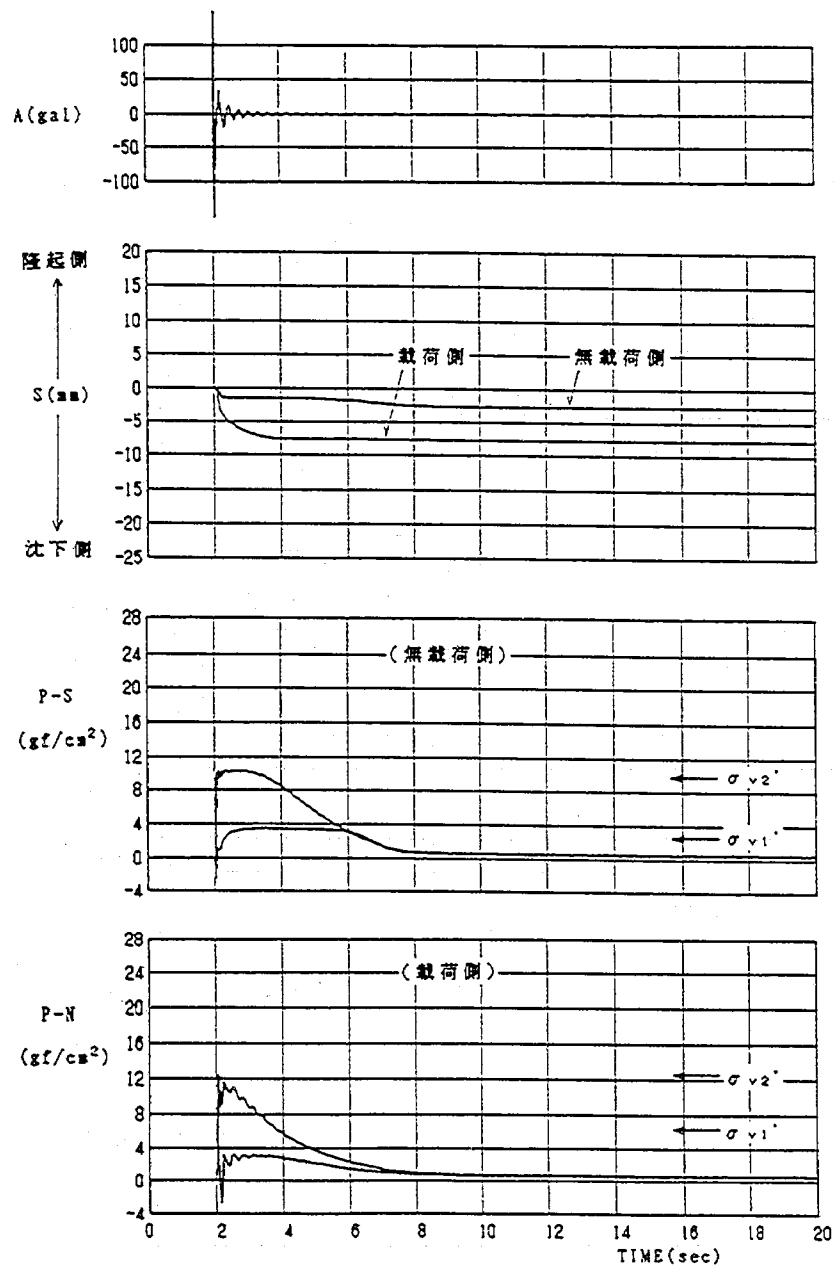
地盤流動量 (FA1)



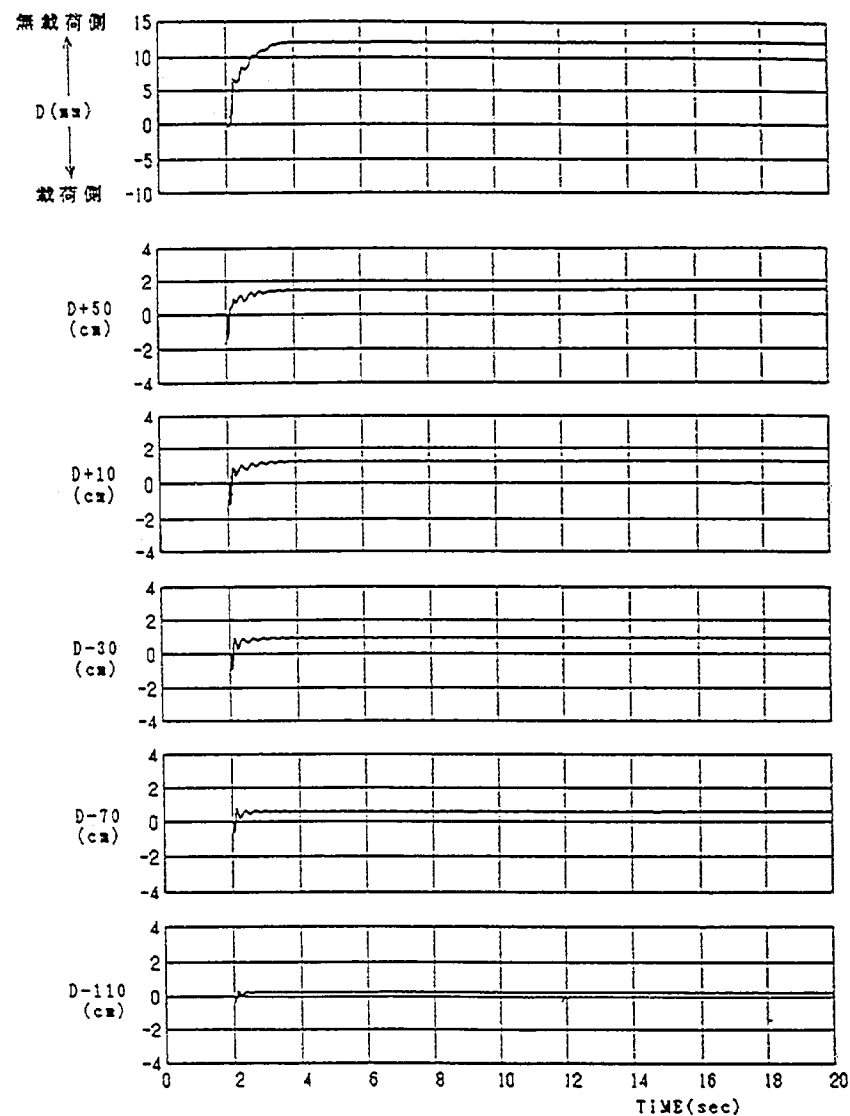
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FB1)



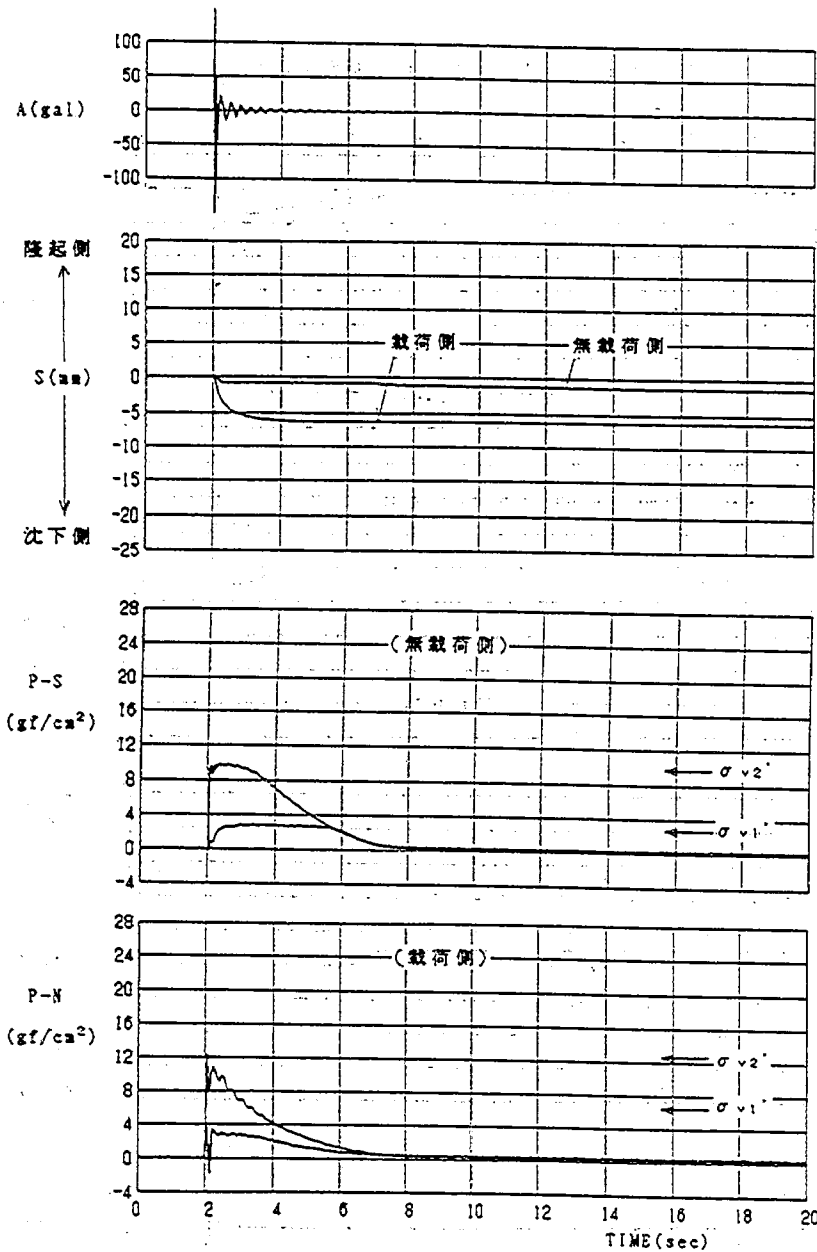
雄釜流動量 (FB1)



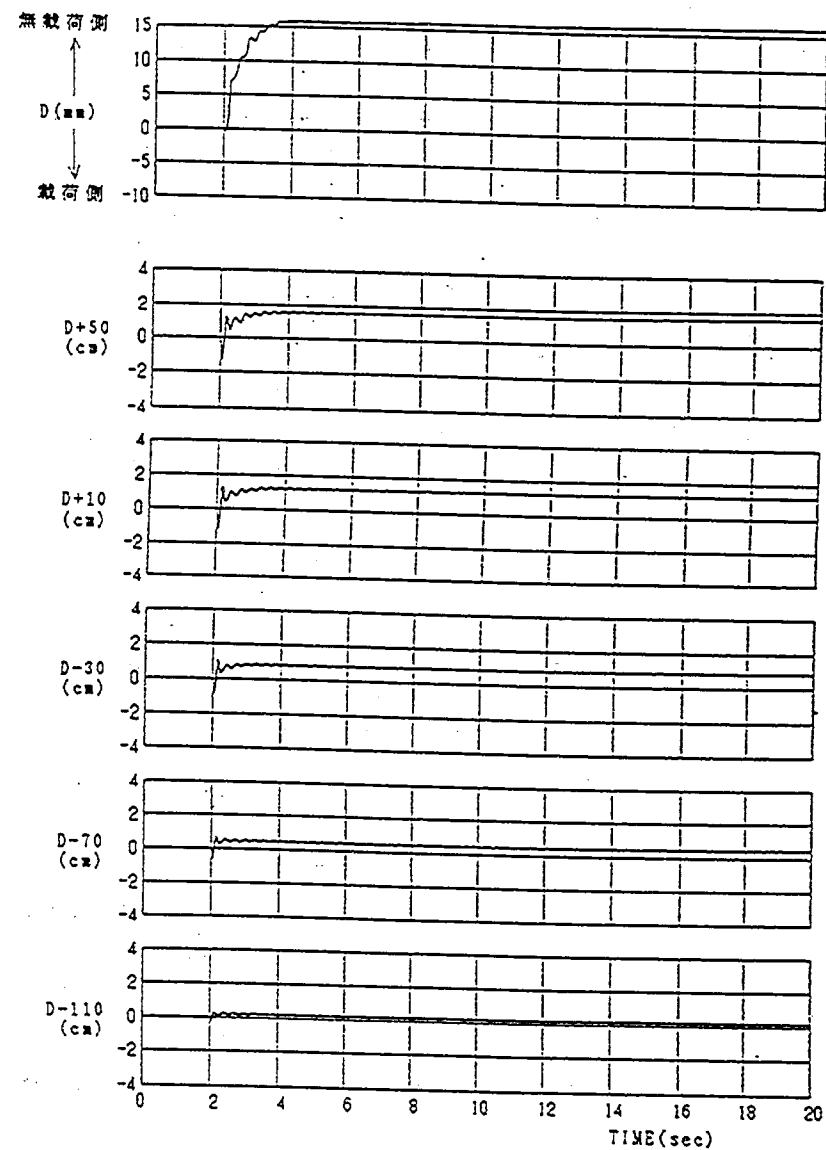
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FB2)



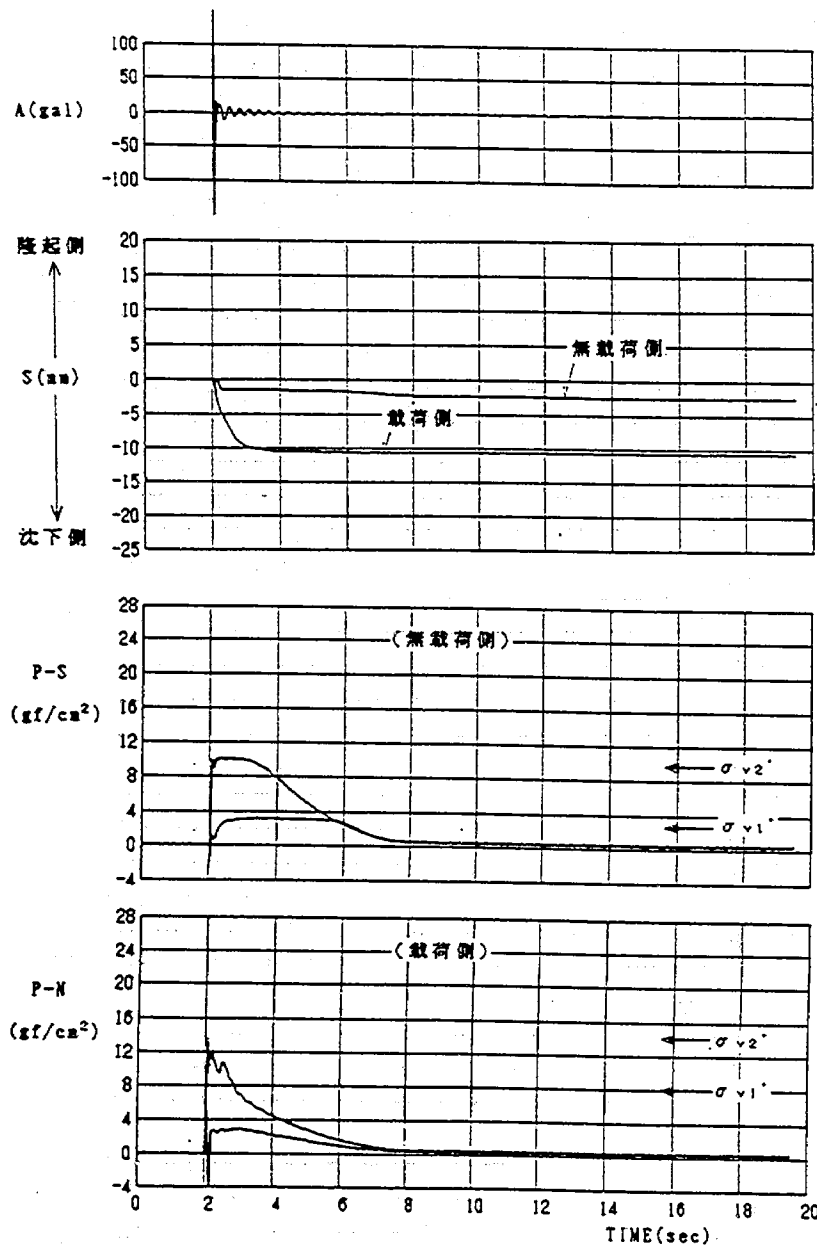
地盤流動量 (FB2)



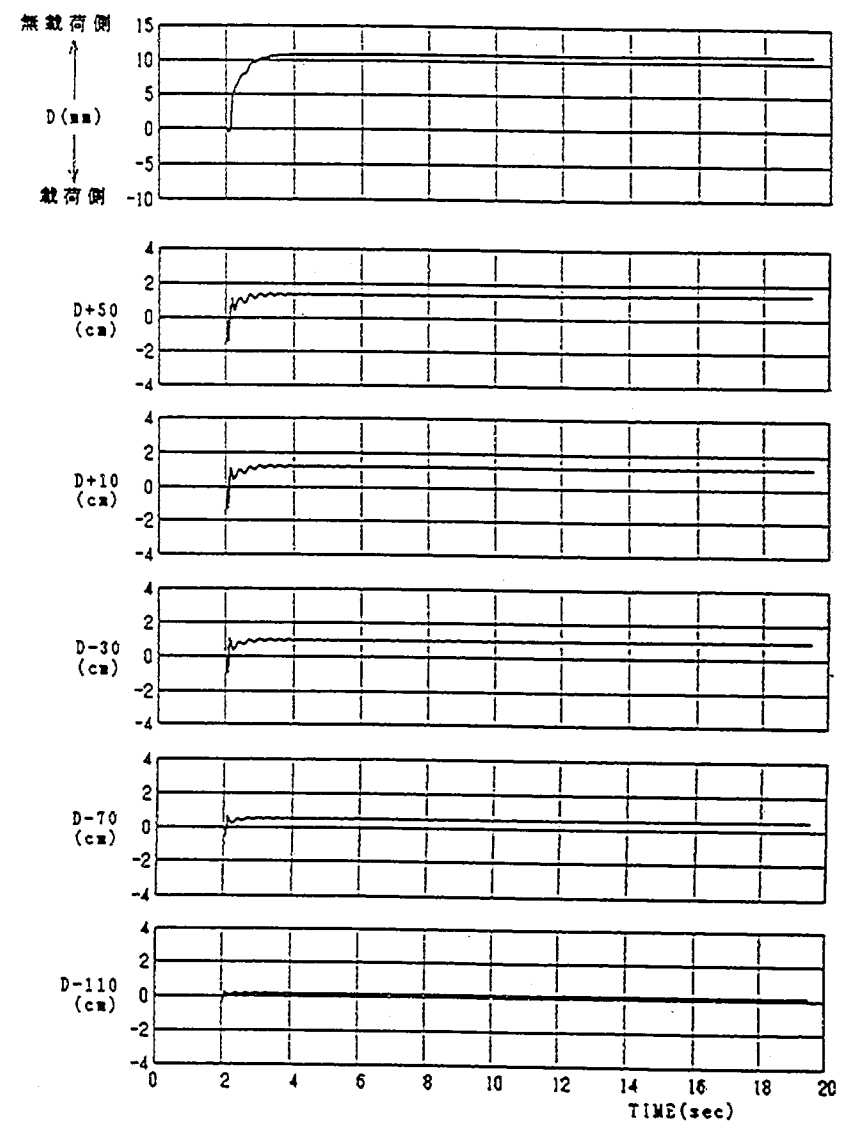
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FB3)



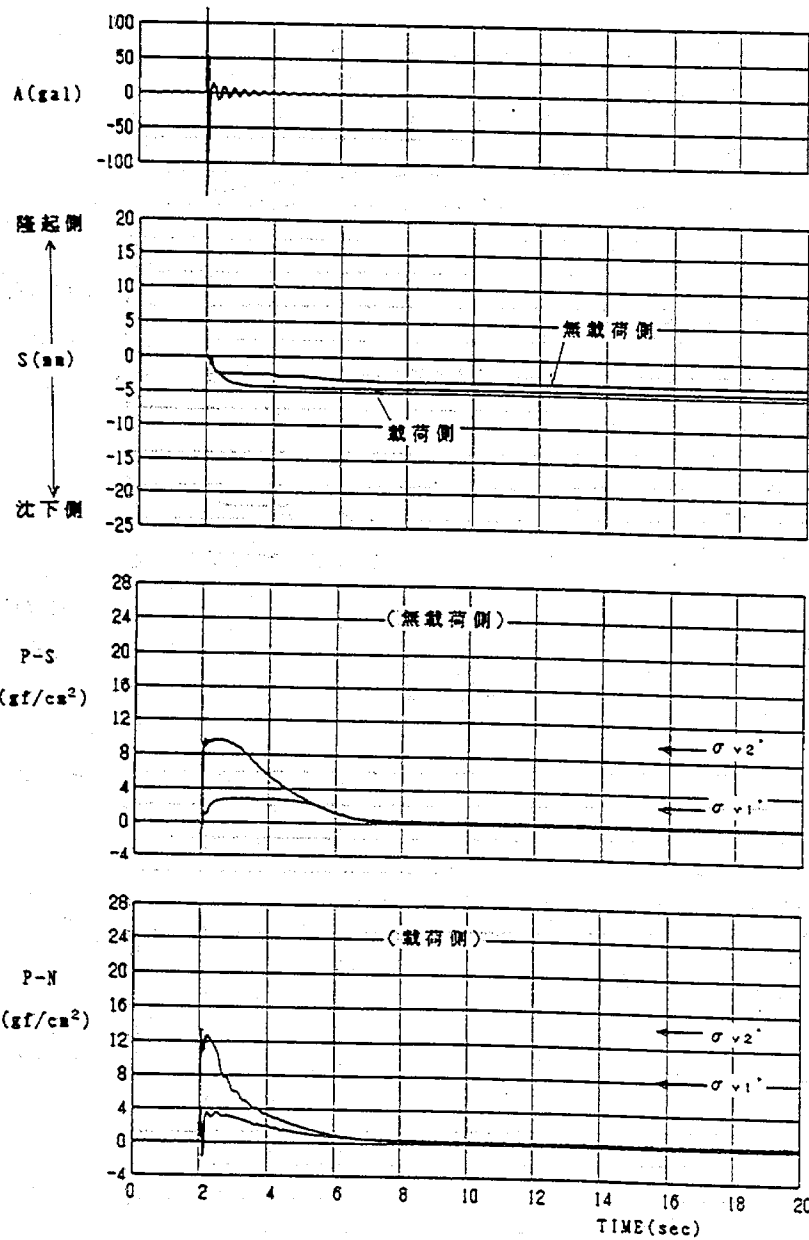
地盤流動量 (FB3)



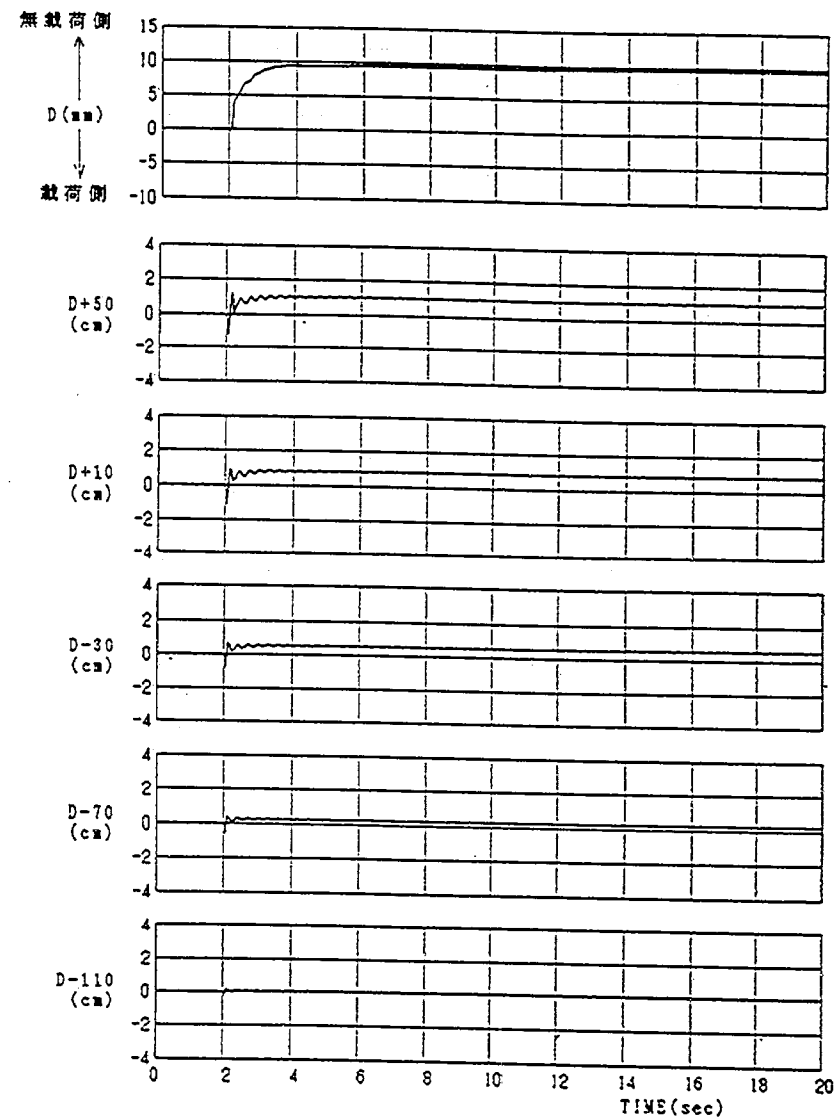
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FC1)



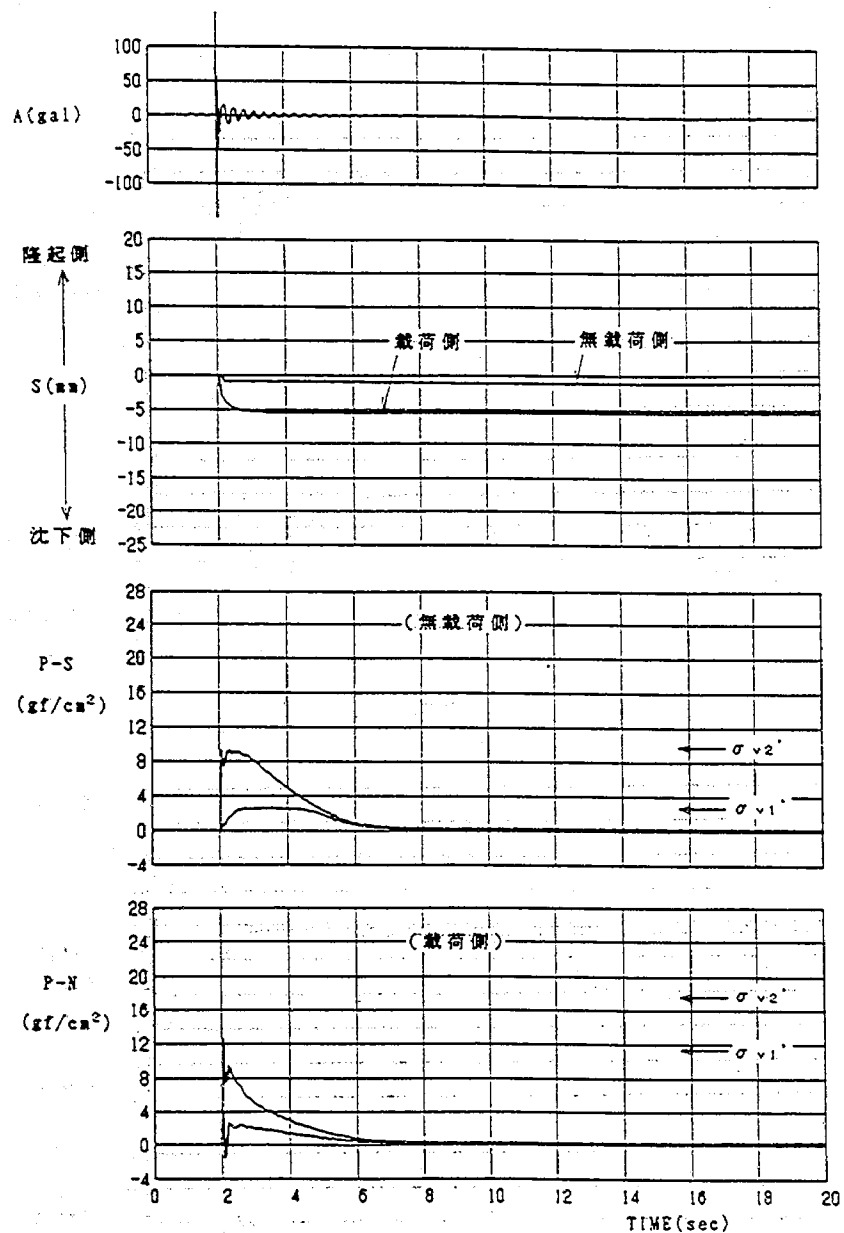
地盤流動量 (FC1)



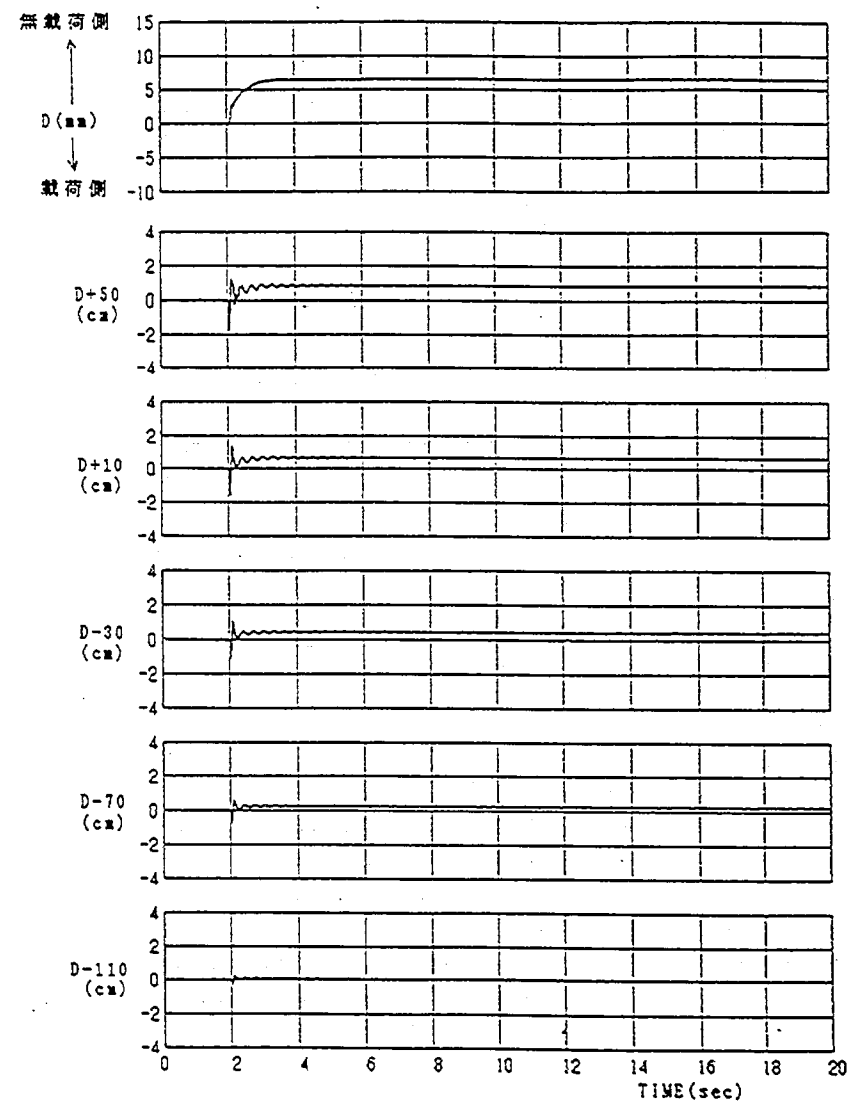
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FC2)



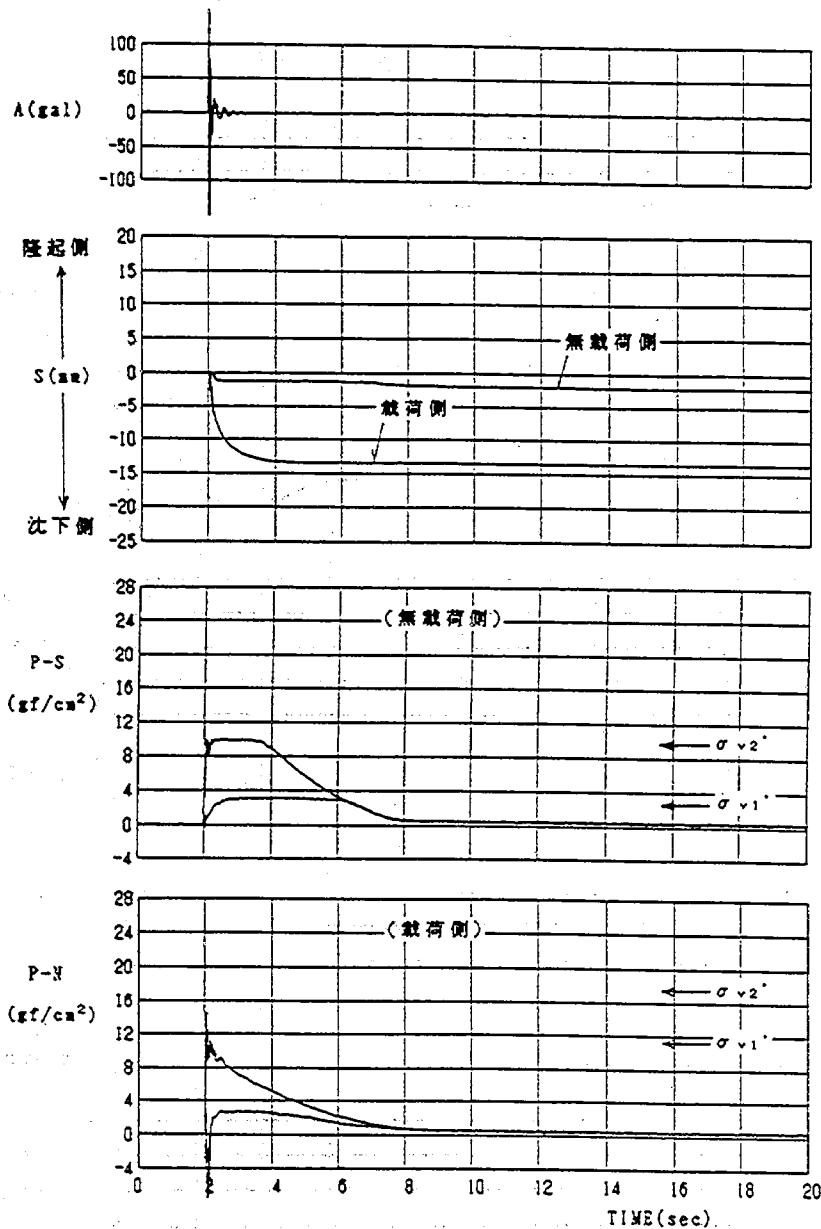
地盤流動量 (FC2)



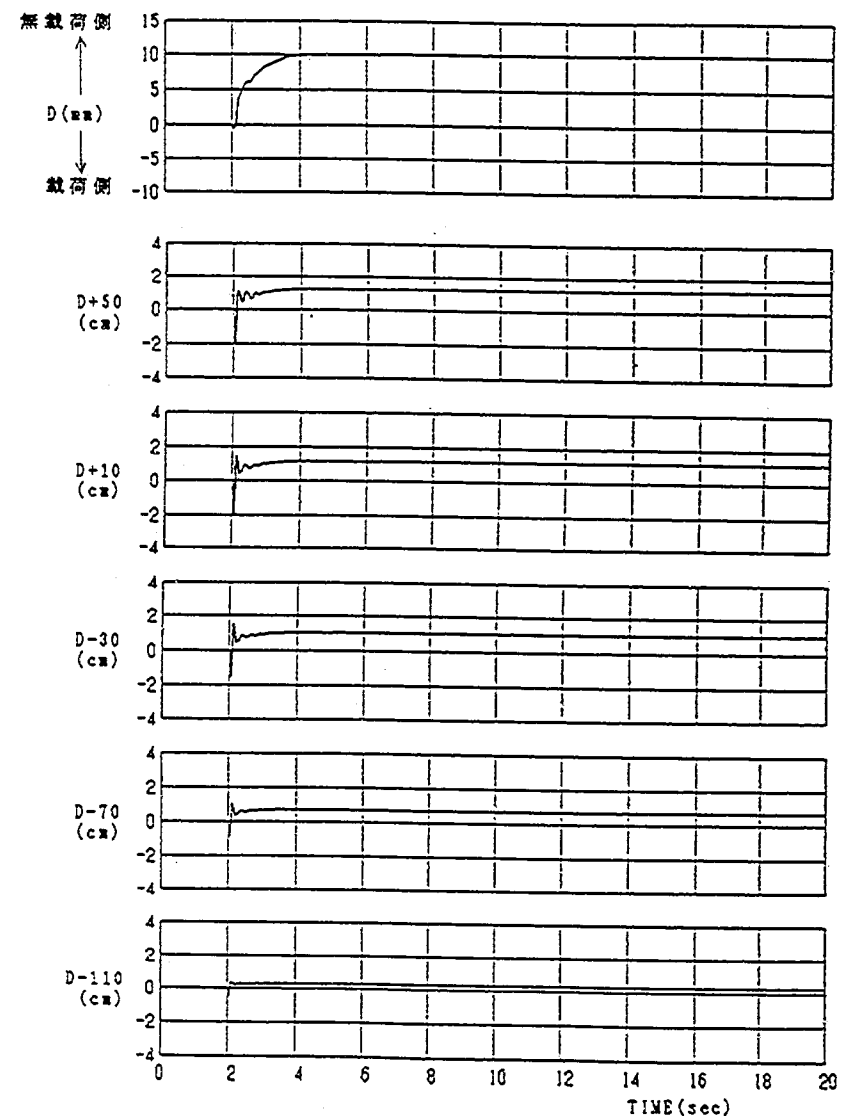
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FD1)



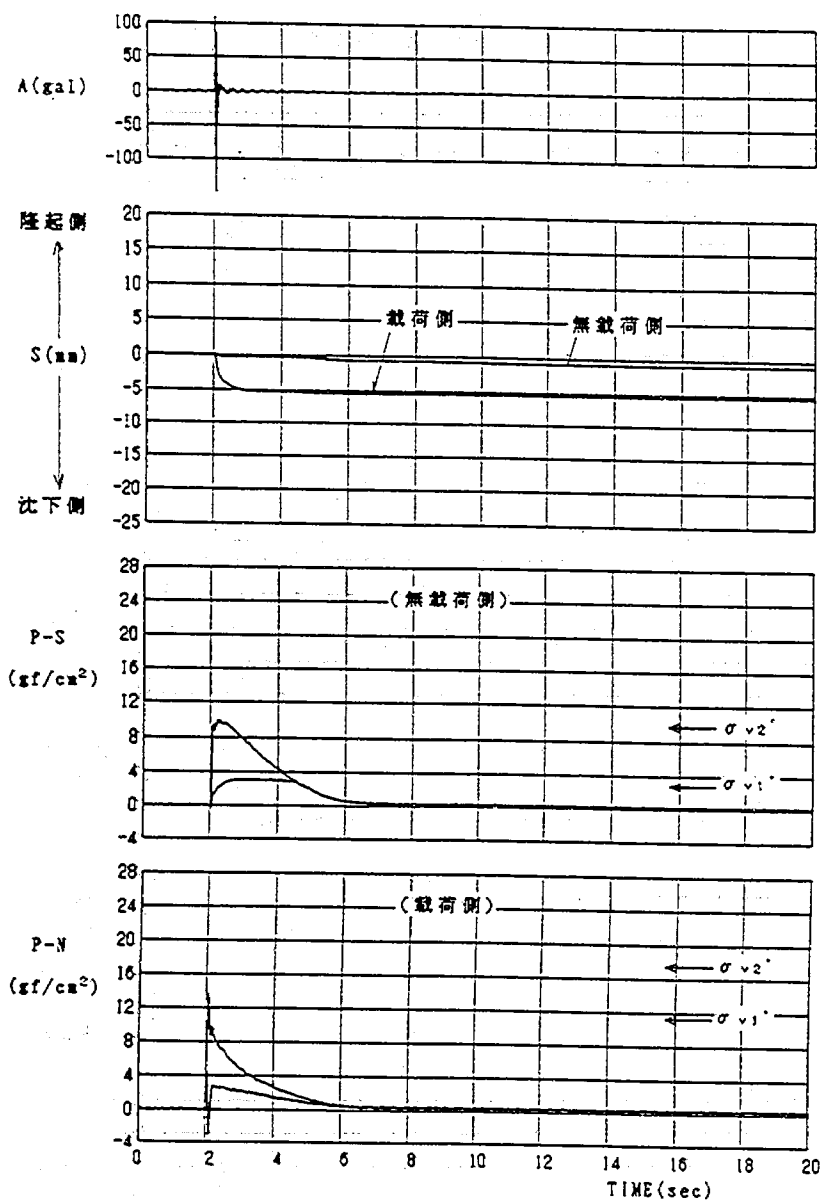
地盤流動量 (FD1)



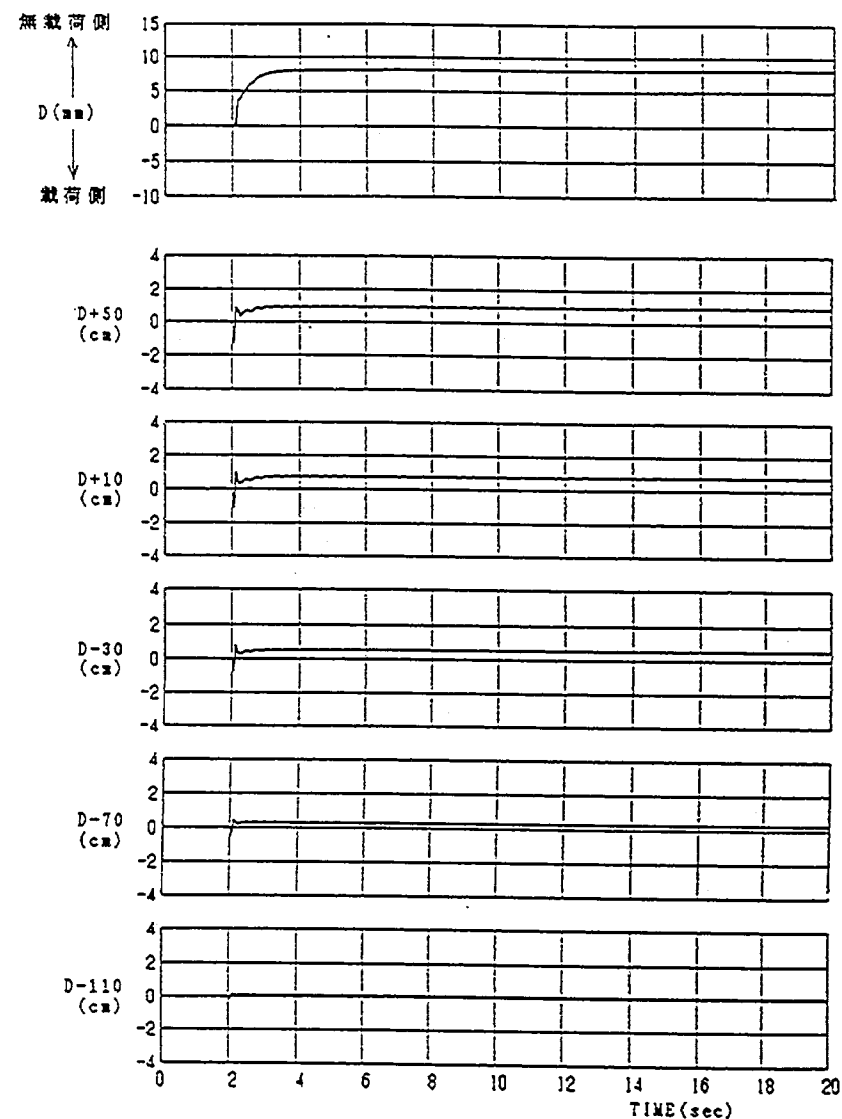
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FD2)



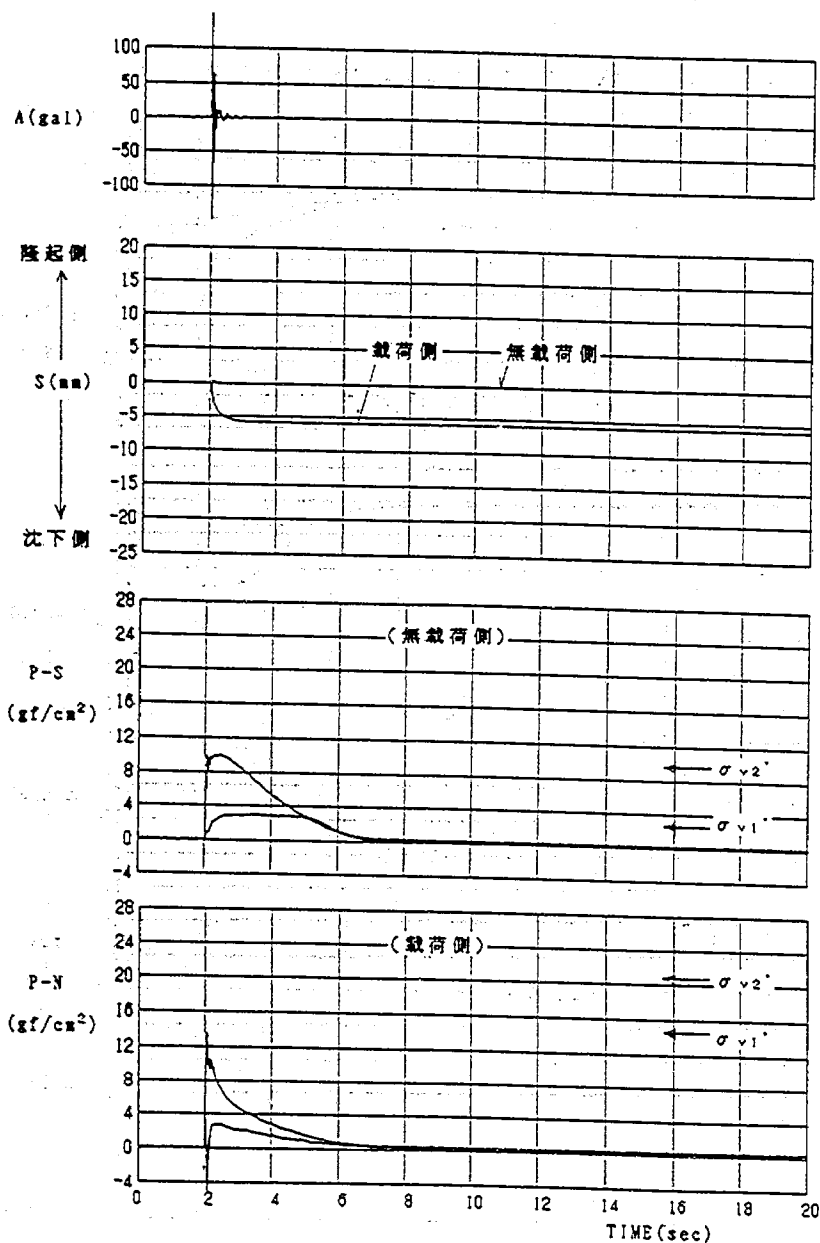
地盤流動量 (FD2)



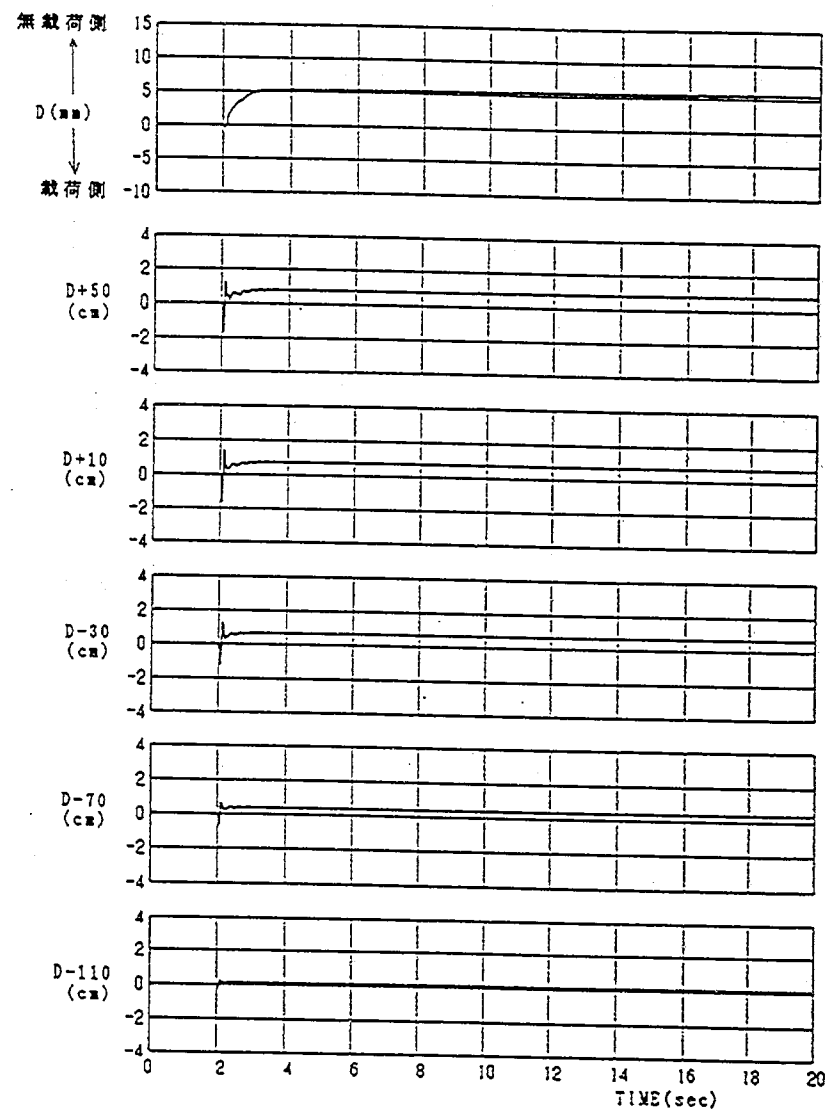
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FD3)



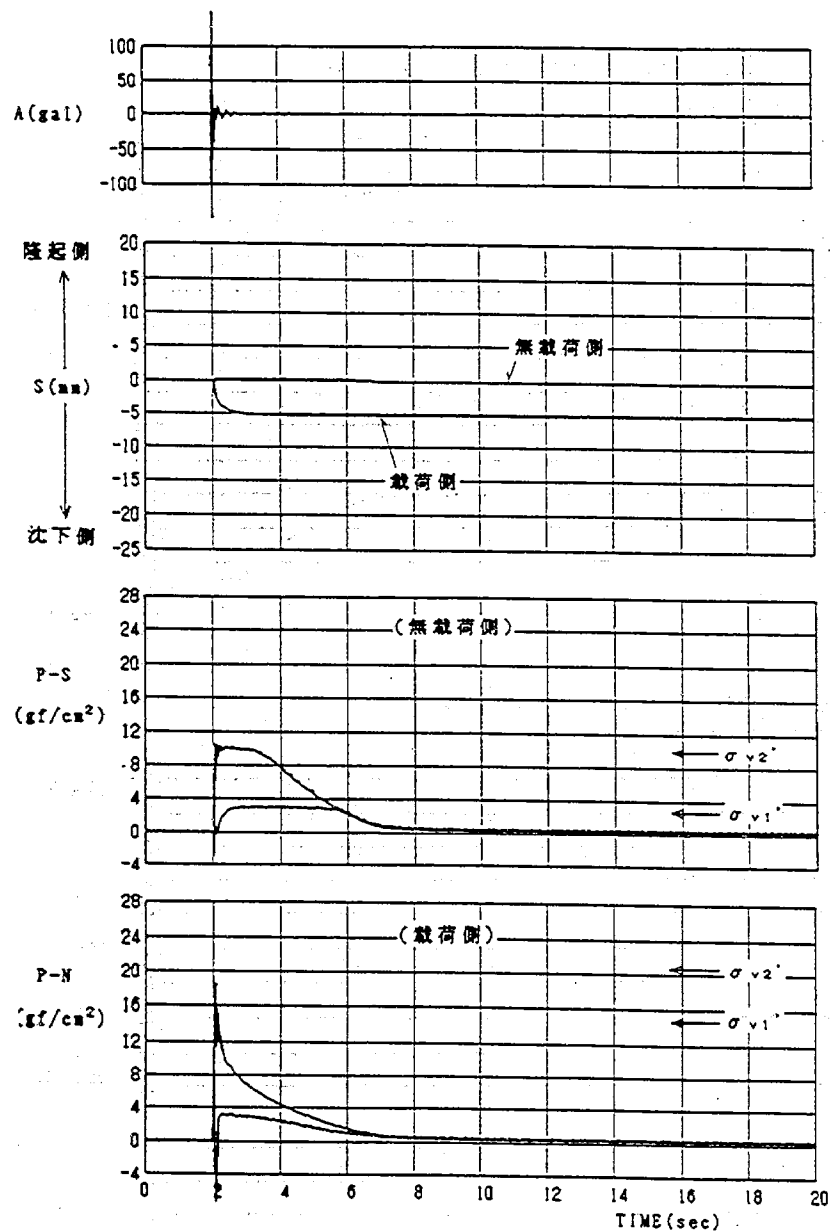
地盤流動量 (FD3)



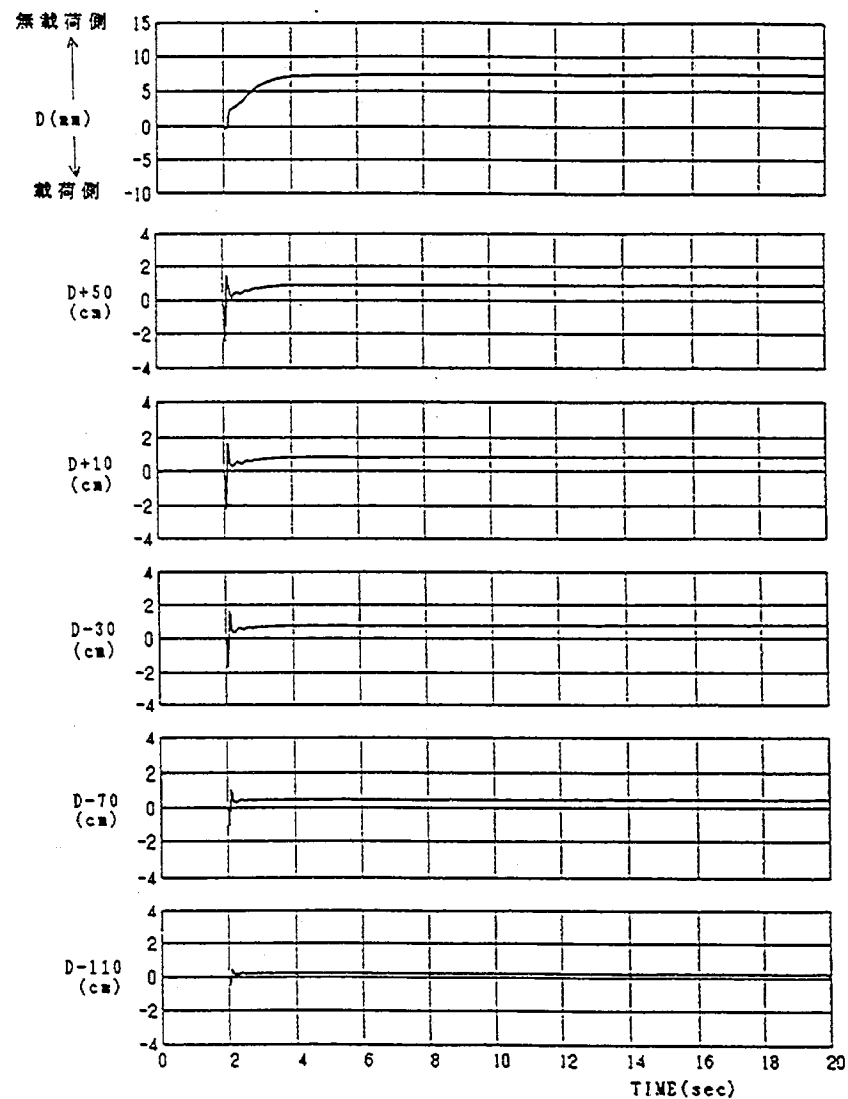
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FE1)



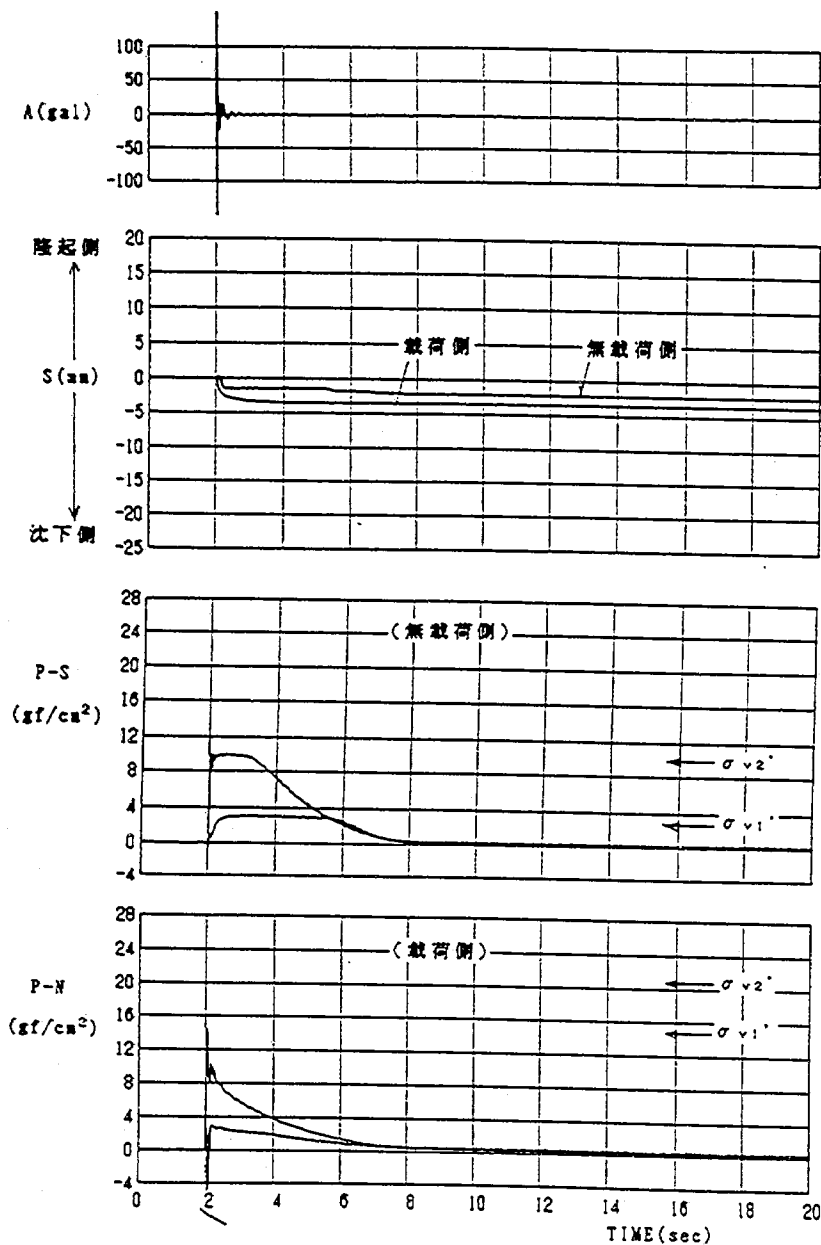
地盤流動量 (FE1)



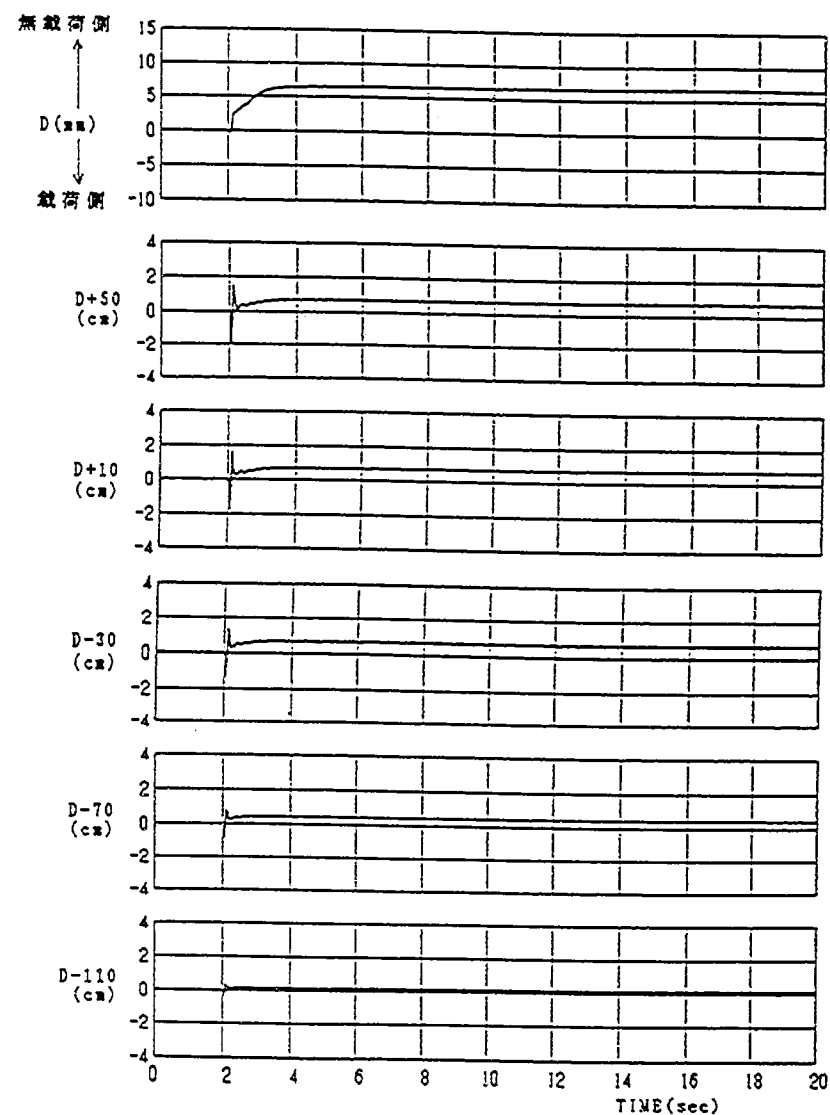
土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FE2)



地盤流動量 (FE2)



土層の加速度、地表面の鉛直変位、間隙水圧 (FE3)



地盤流動量 (FE3)

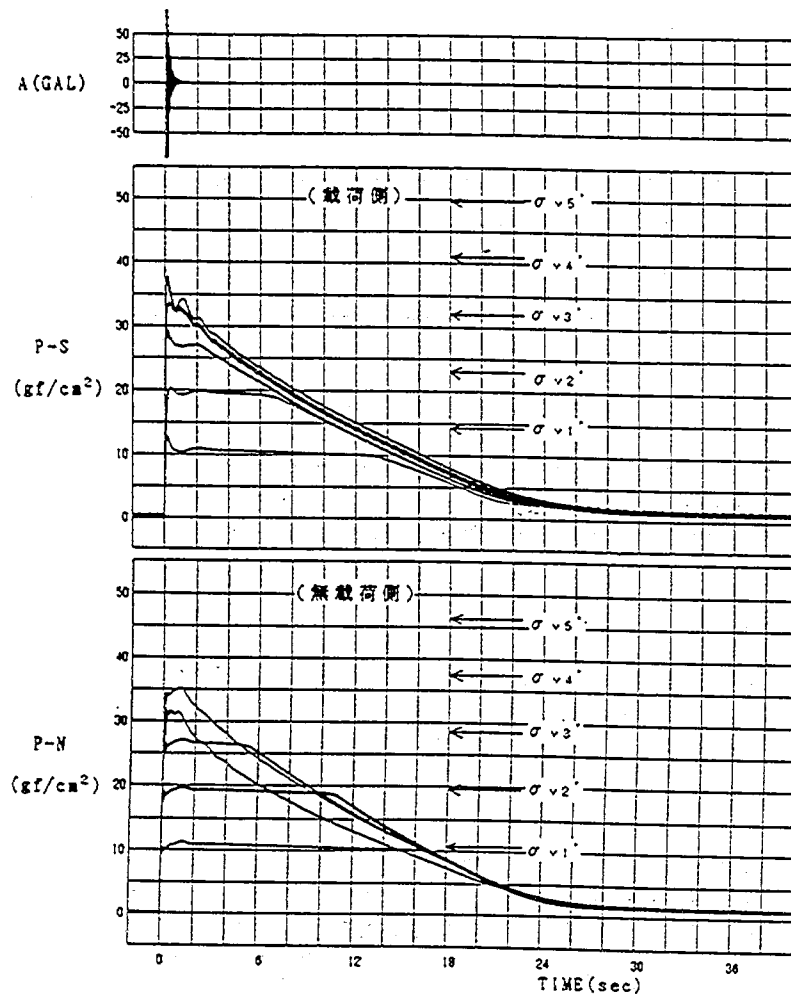
2. 中型土槽を用いた地盤流動実験における時刻歴結果

○記号説明

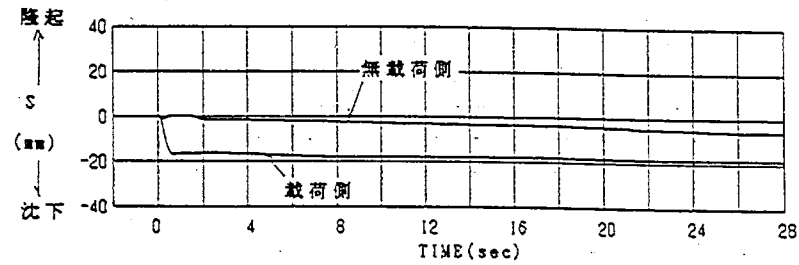
- A ····· 土槽の加速度、 P-S ---- 載荷側における間隙水圧
S ····· 地表面の鉛直変位、 P-N ---- 無載荷側における間隙水圧
D ····· 地盤流動量(模型板の水平変位)

○注意事項

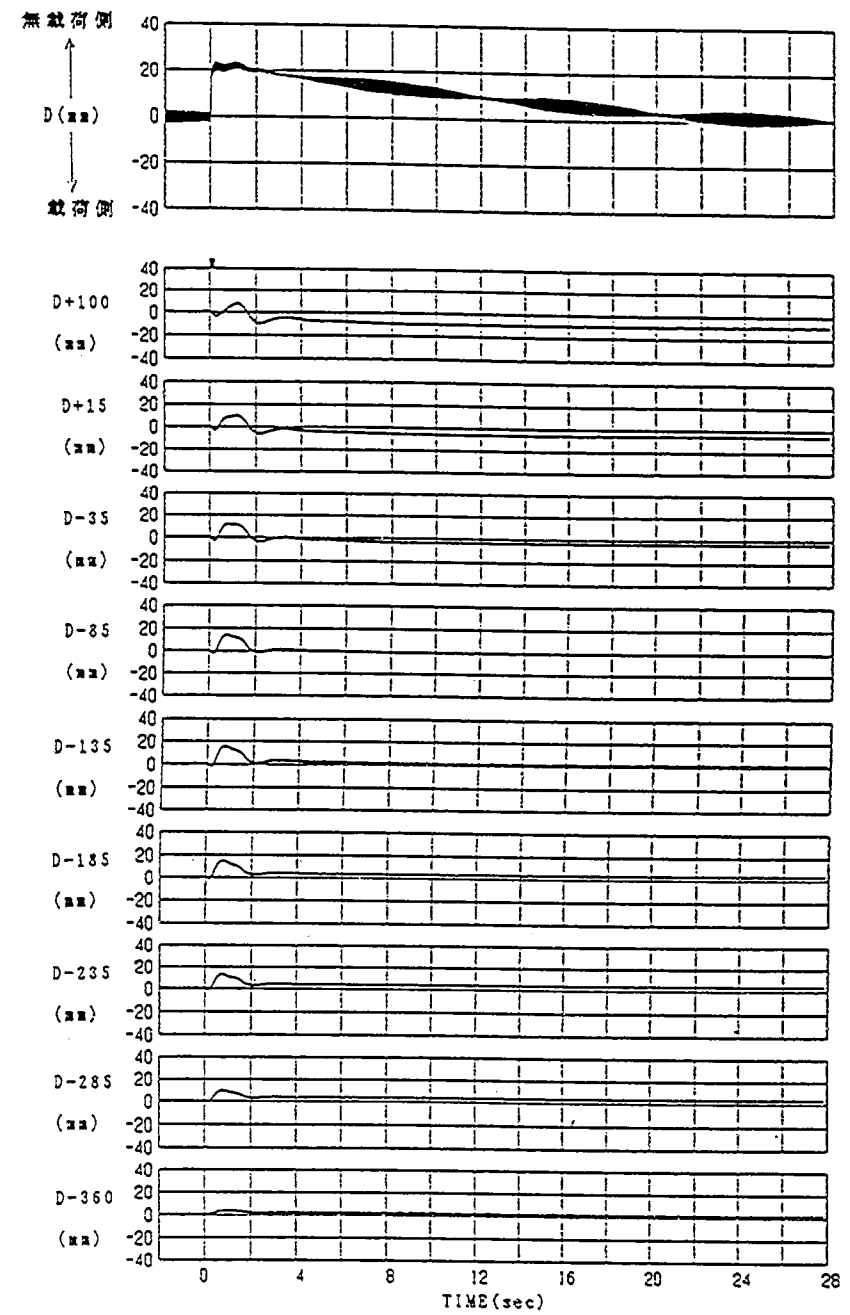
- ・本文中に示した時刻歴結果(実験No. HD1)は省略した。
- ・打撃は横軸(時間軸)のゼロ秒時に行った。
- ・間隙水圧の時刻歴には初期有効上載荷重の値を示した。
- ・地盤流動量は上側に非接触型変位計から得られた値、下側には超小型加速度計を用いて算出した値を示した。D-35における35という数字は地表面からの深度(mm)を示し、流動量は無載荷側に変位した場合をプラス側とした。



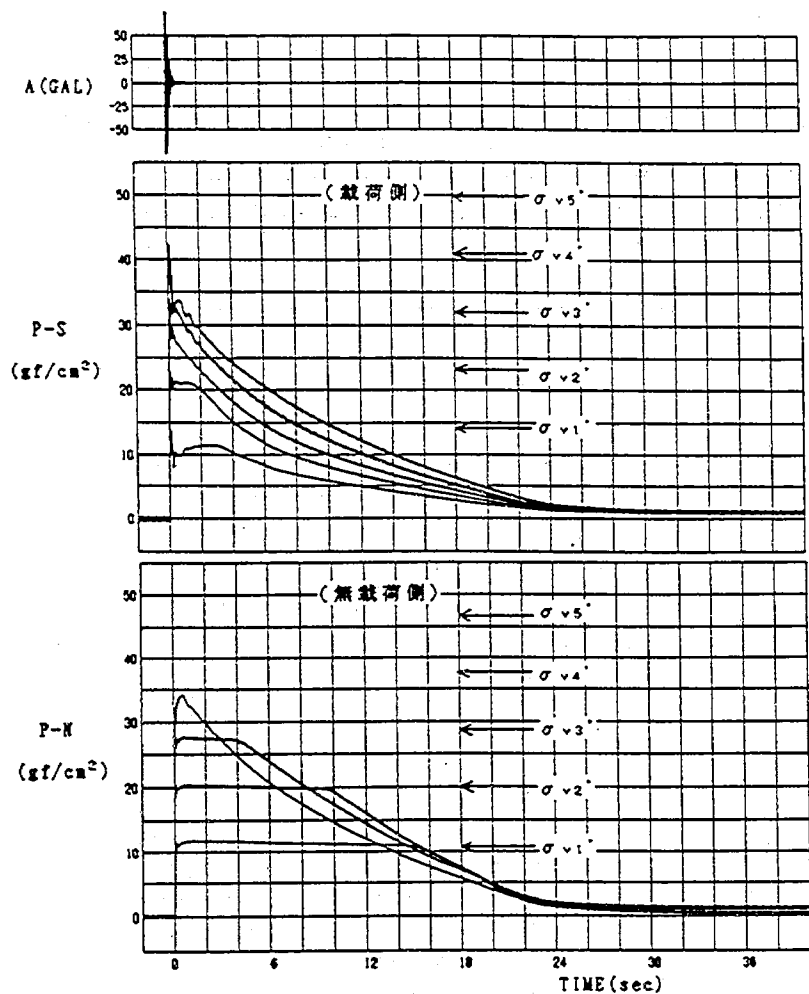
土槽の加速度、間隙水圧 (H C 1)



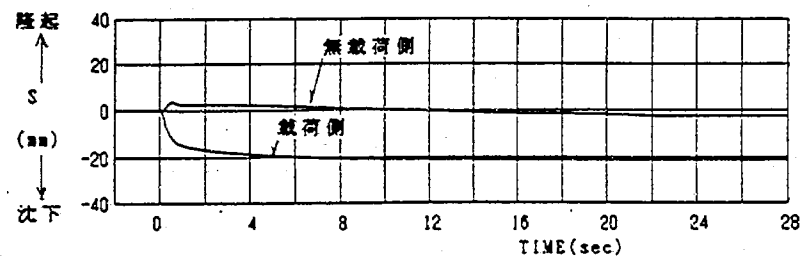
地表面の鉛直変位量 (H C 1)



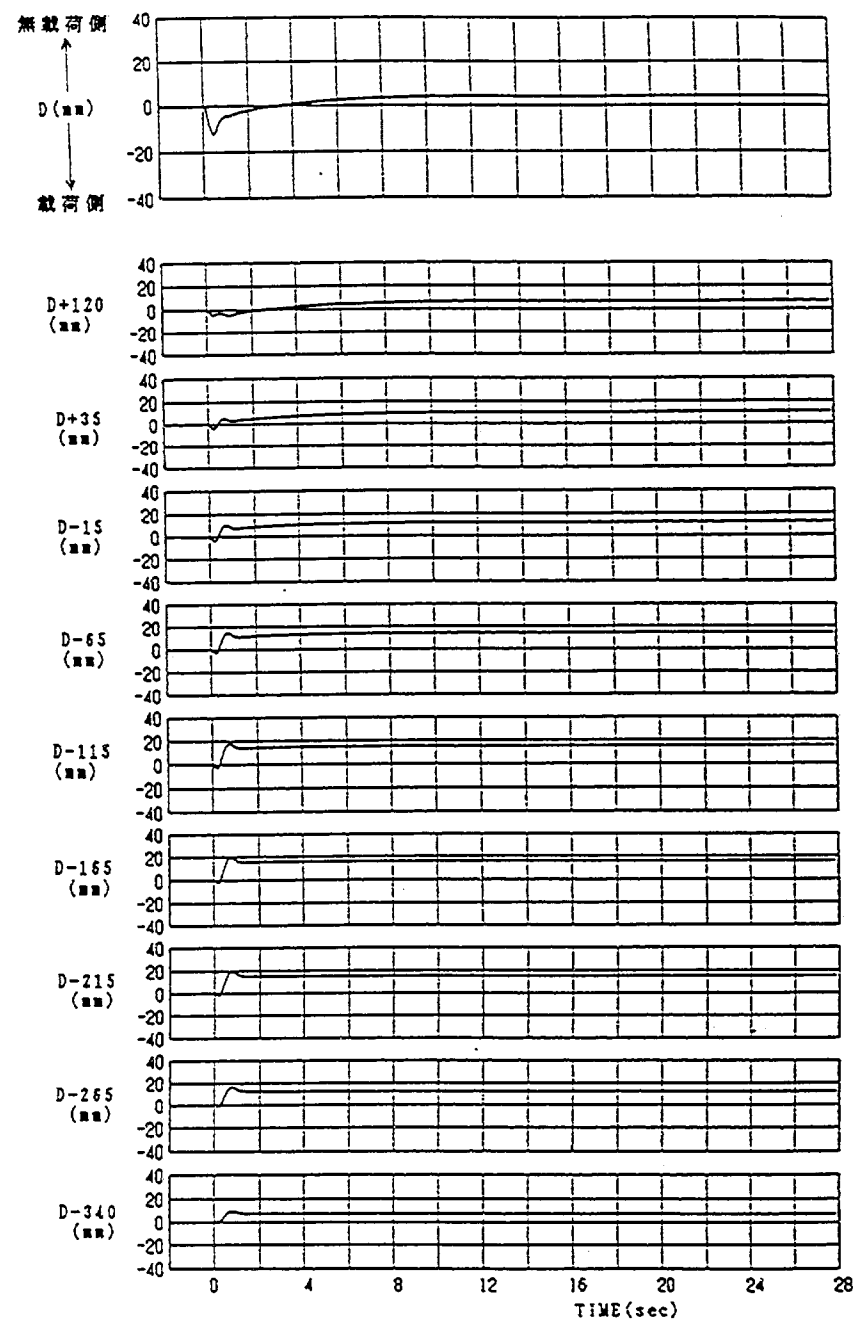
土槽の鉛直変位量 (H C 1)



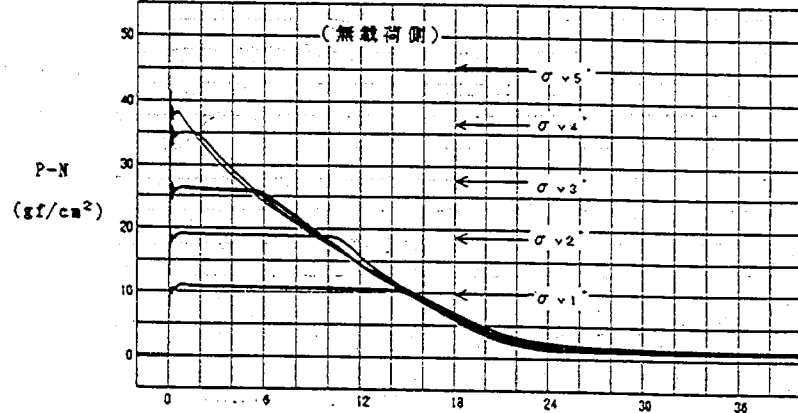
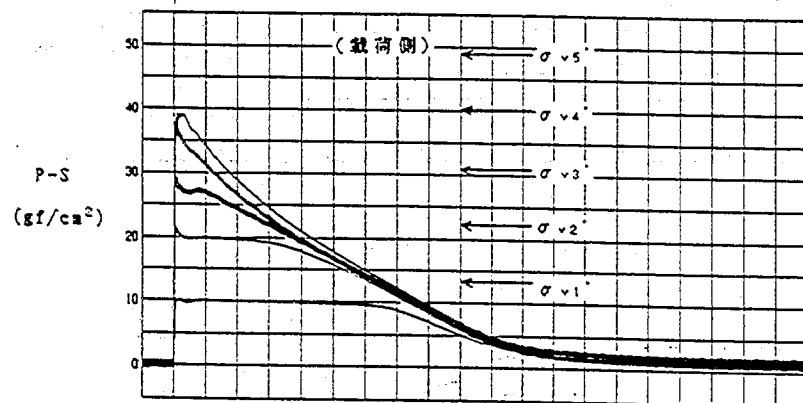
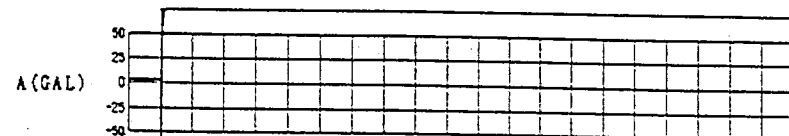
土槽の加速度、間隙水圧 (H C 2)



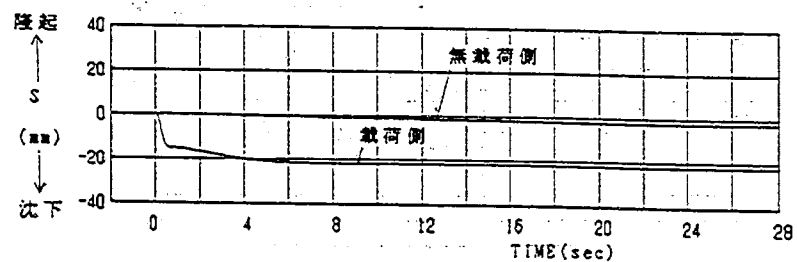
地表面の鉛直変位量 (H C 2)



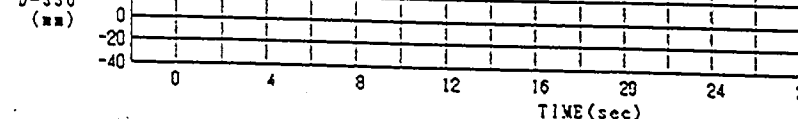
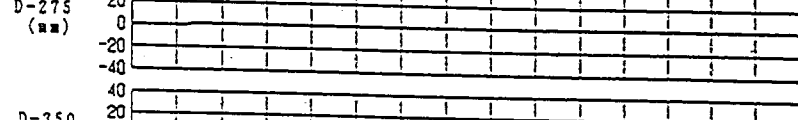
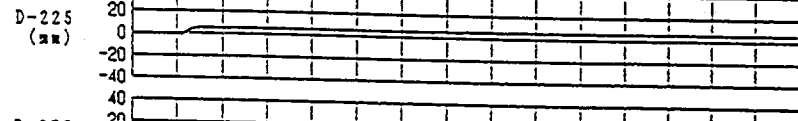
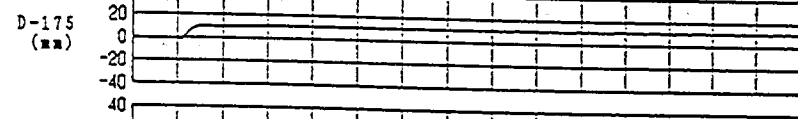
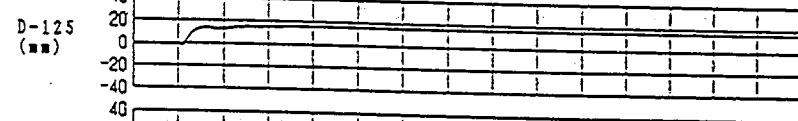
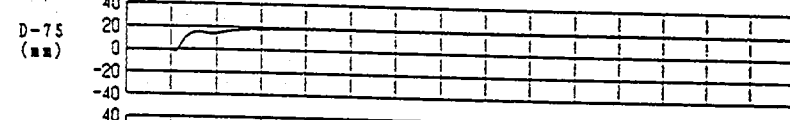
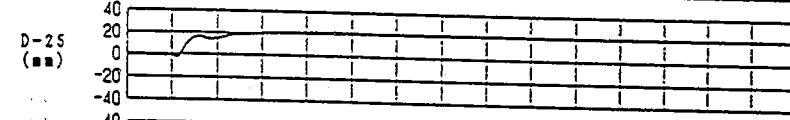
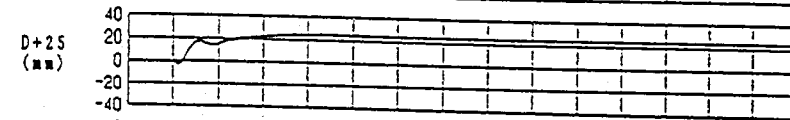
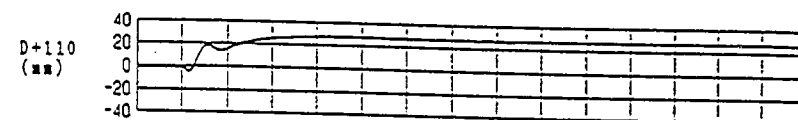
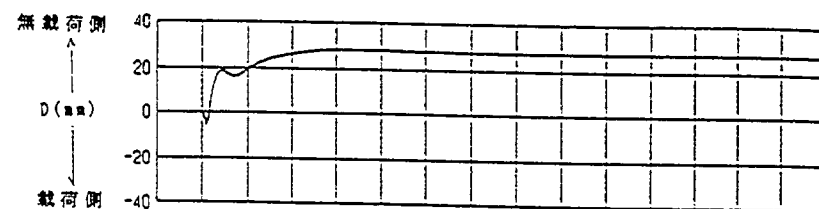
地盤流動量 (H C 2)



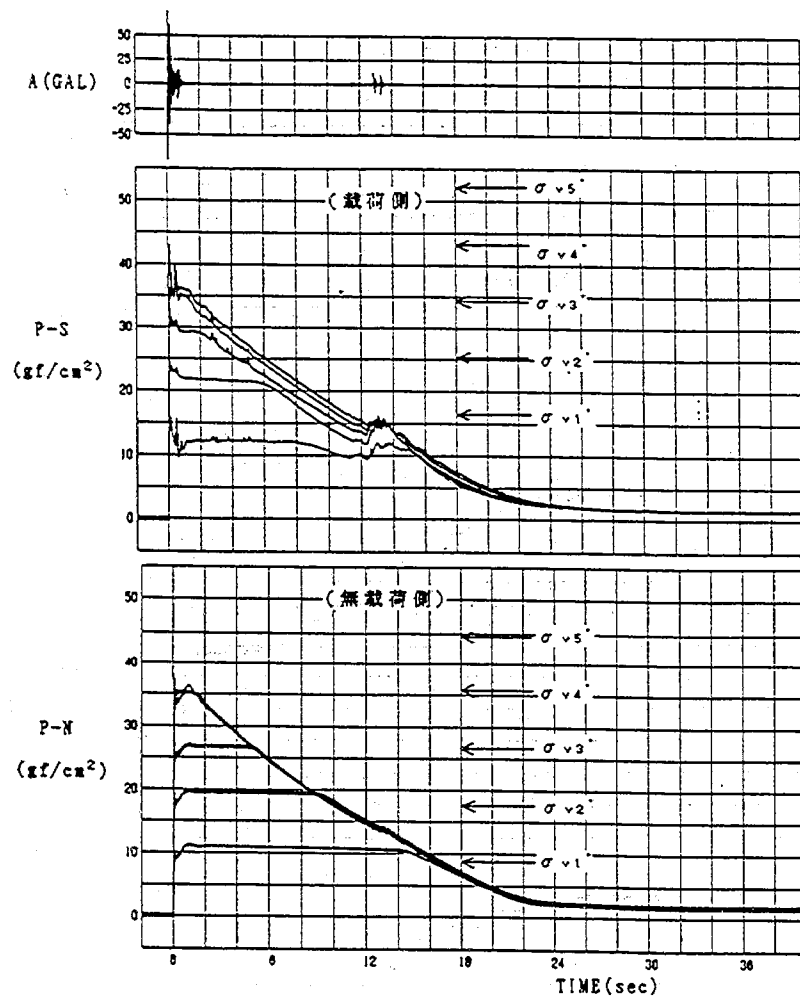
土槽の加速度、間隙水圧 (H C 3)



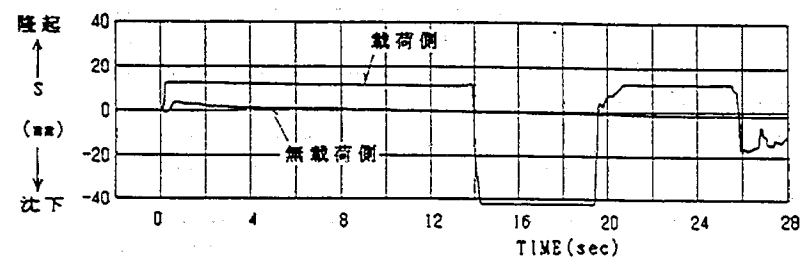
地表面の鉛直変位量 (H C 3)



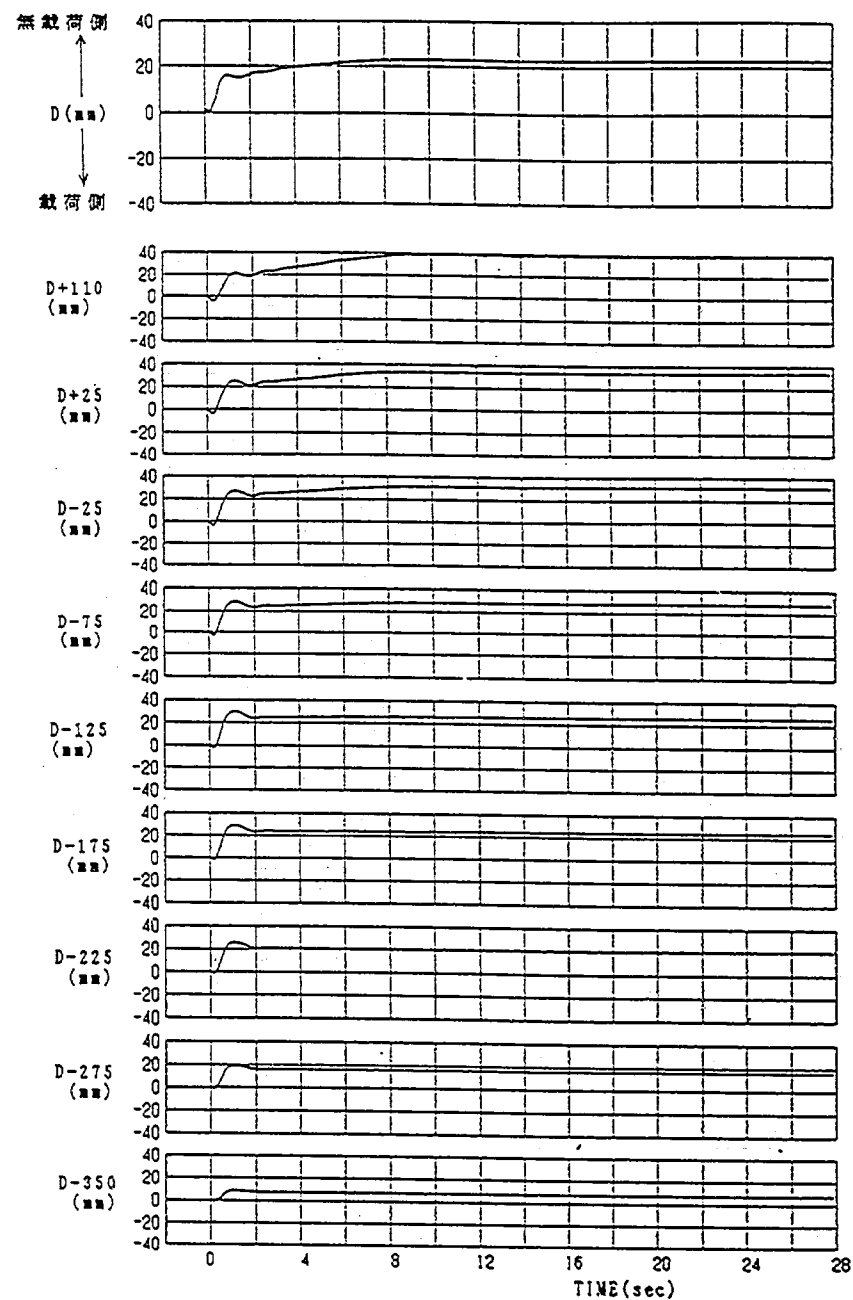
地盤流動量 (H C 3)



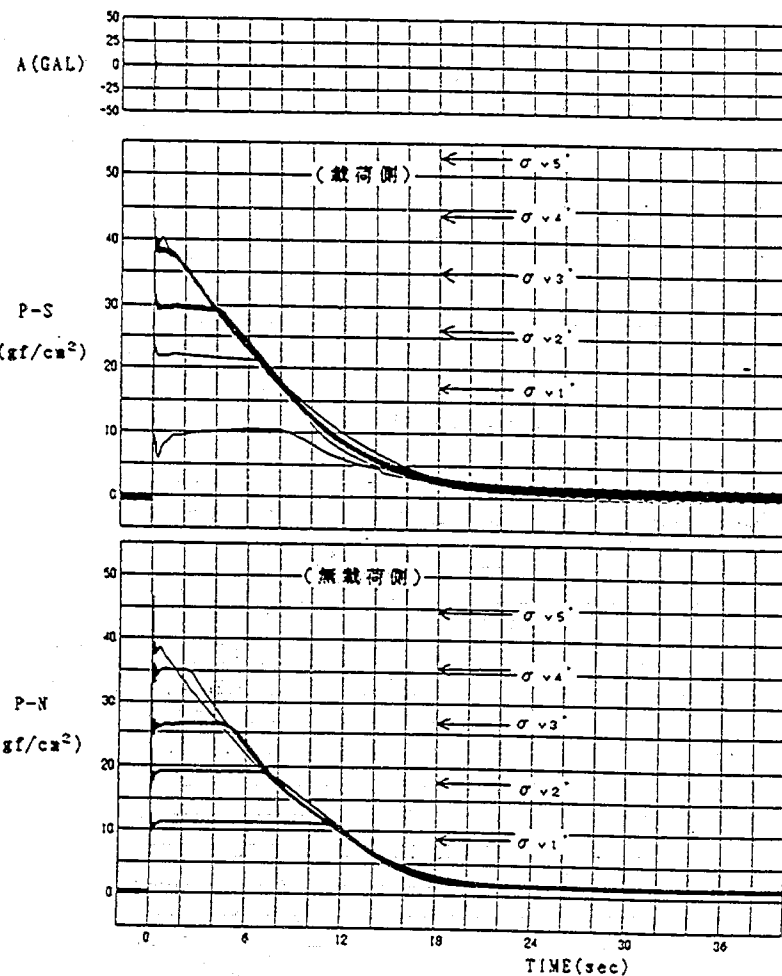
土槽の加速度、間隙水圧 (H D 2)



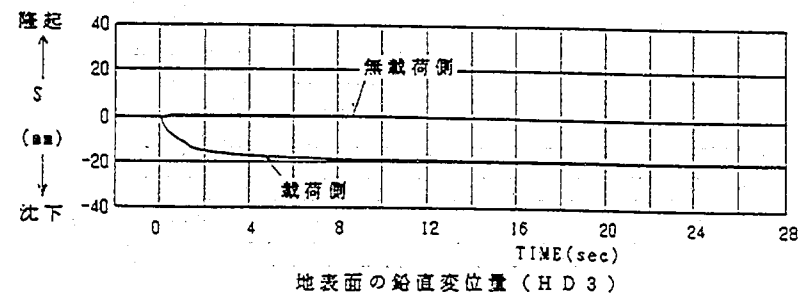
地表面の鉛直変位量 (H D 2)



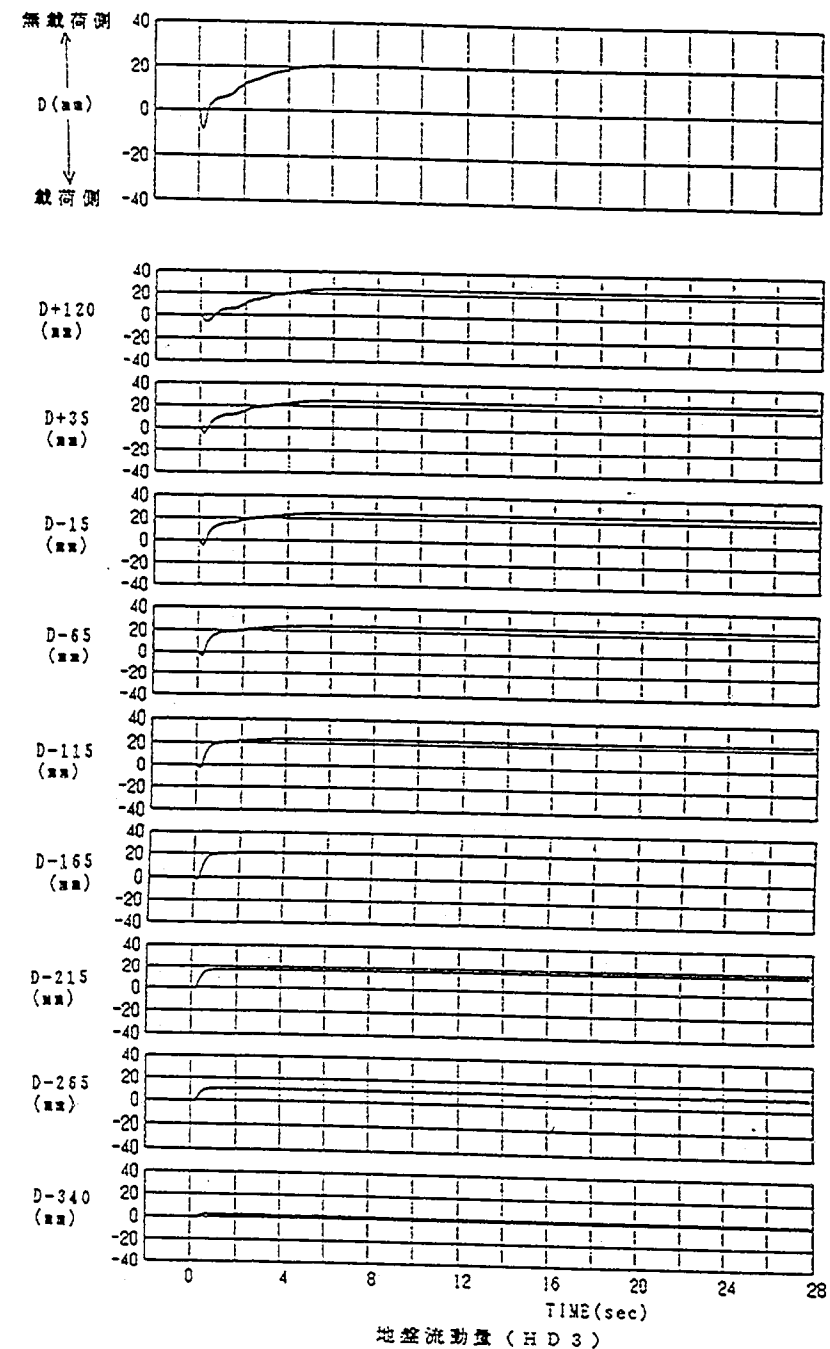
地盤流動量 (H D 2)



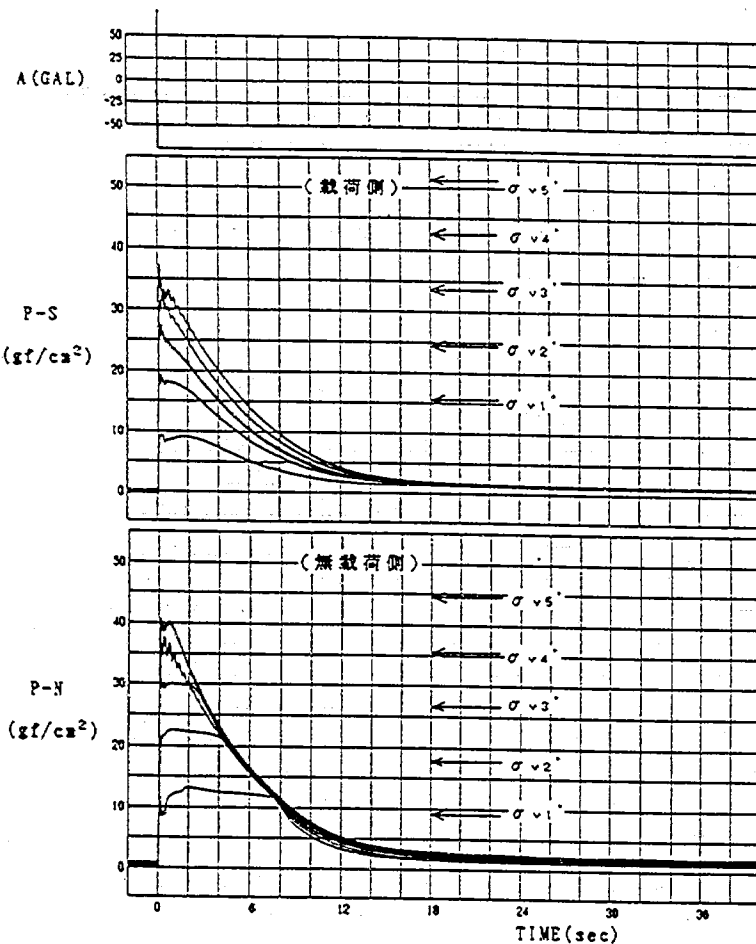
土槽の加速度、間隙水圧 (H D 3)



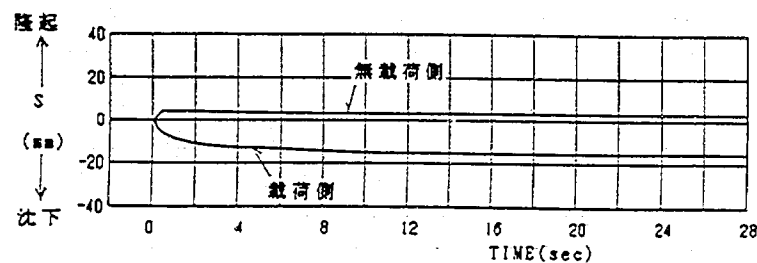
地表面の鉛直変位量 (H D 3)



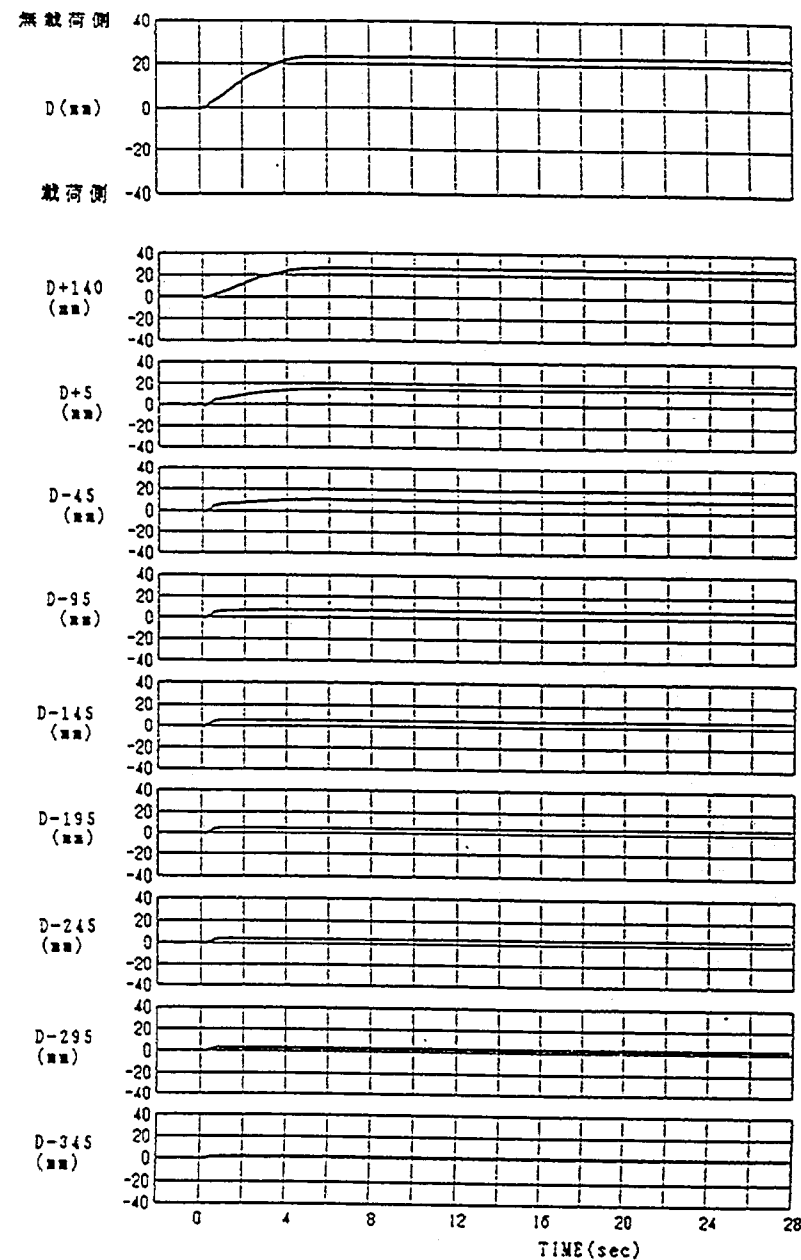
地盤流動量 (H D 3)



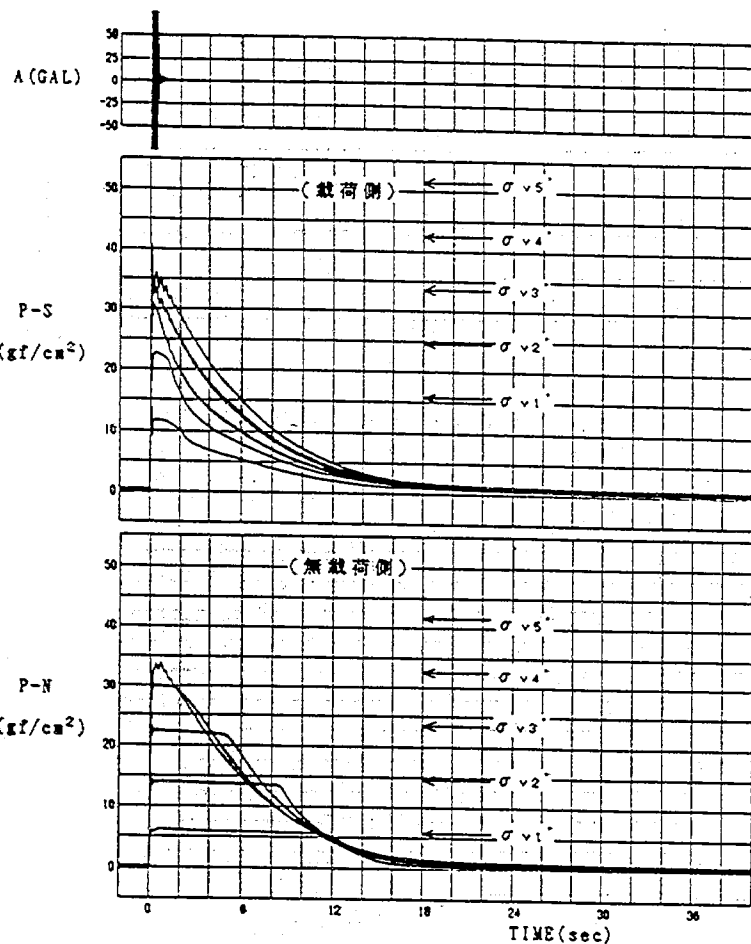
土槽の加速度、間隙水圧 (I A 1)



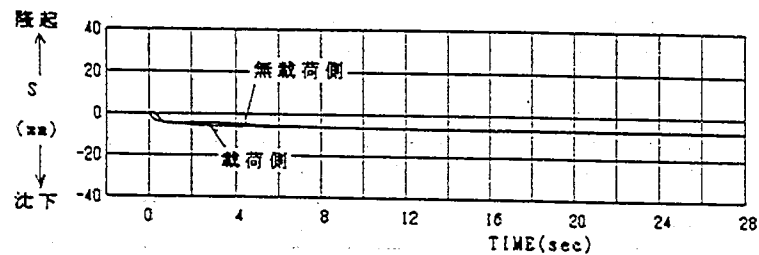
地表面の鉛直変位量 (I A 1)



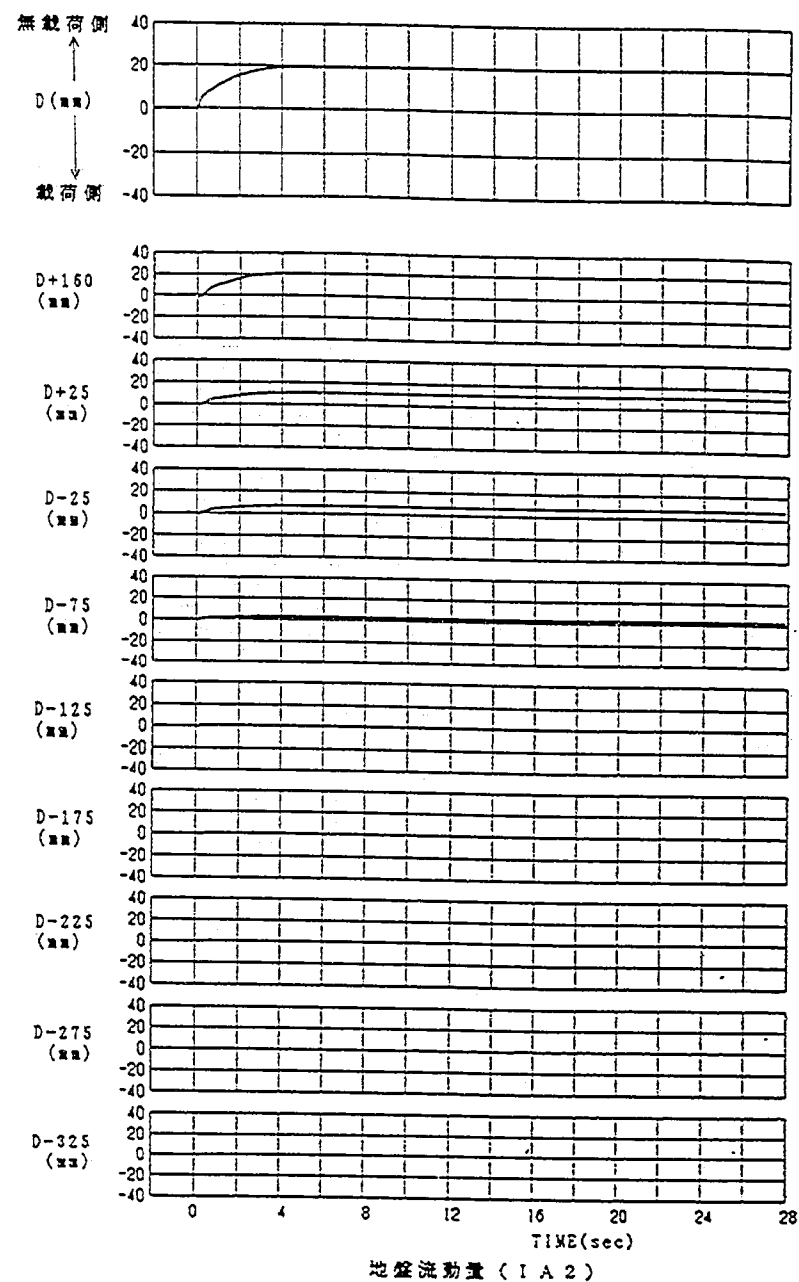
地盤流動量 (I A 1)



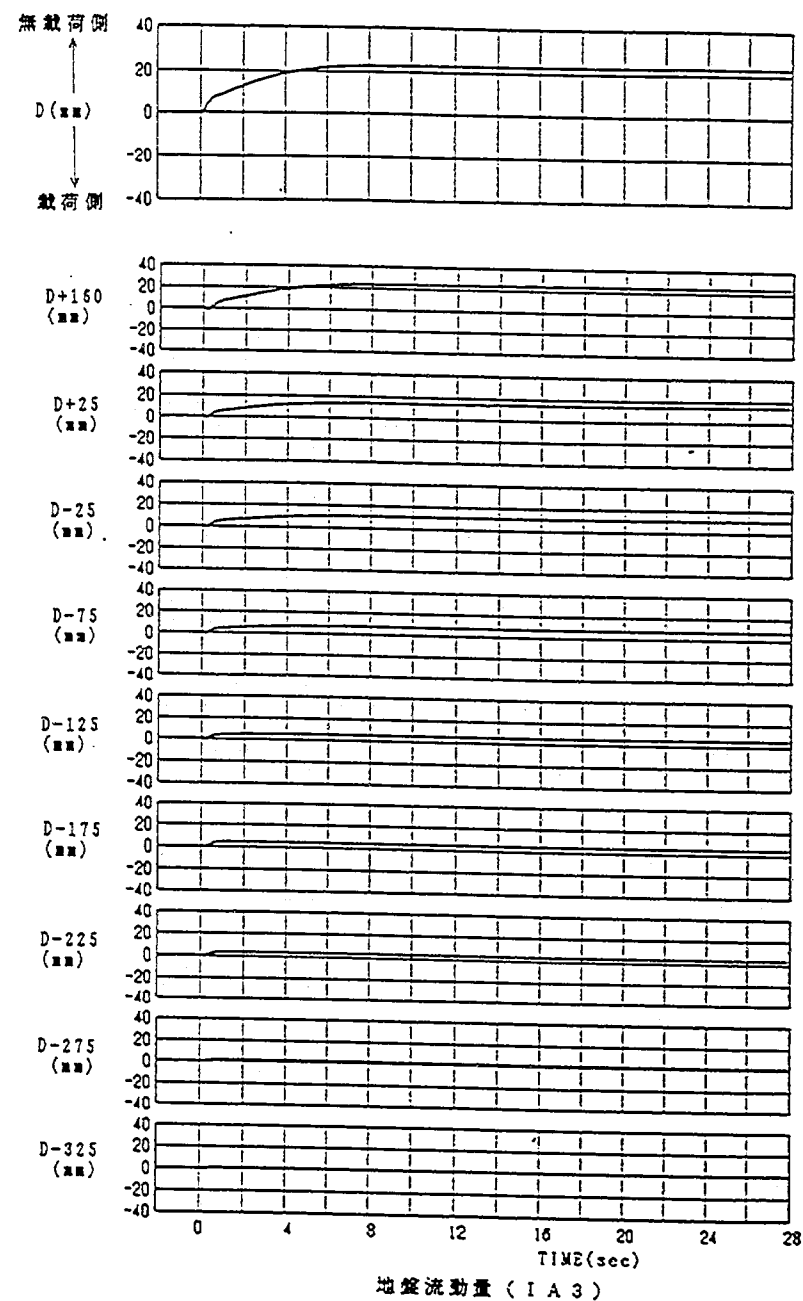
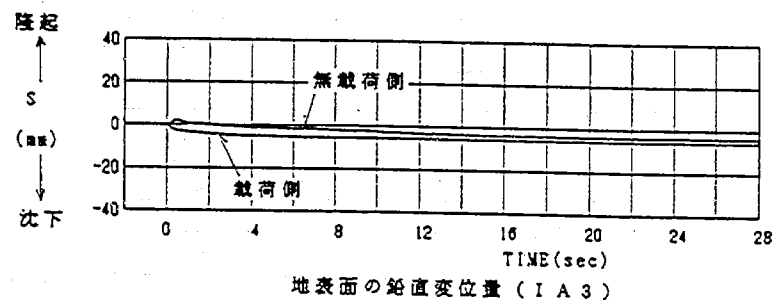
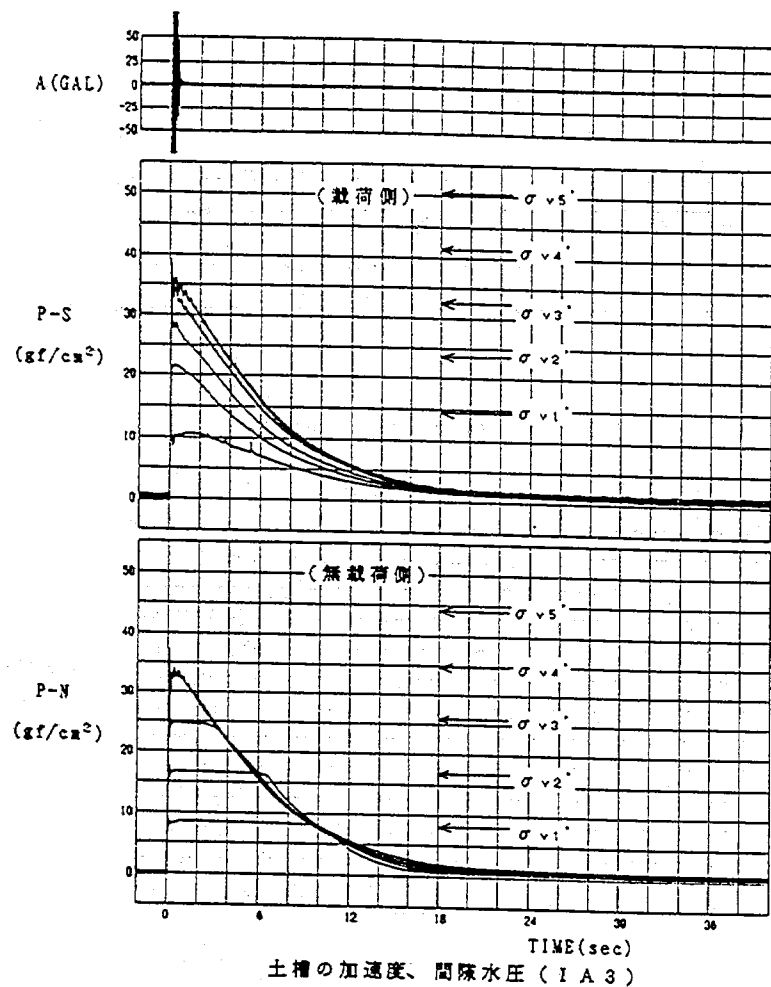
土槽の加速度、間隙水圧 (I A 2)

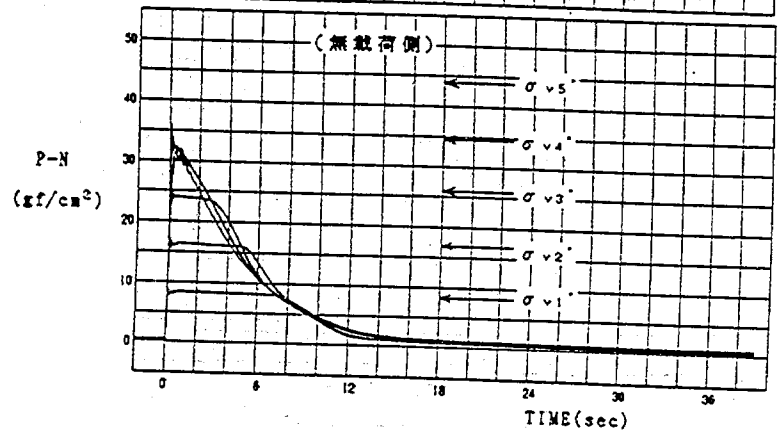
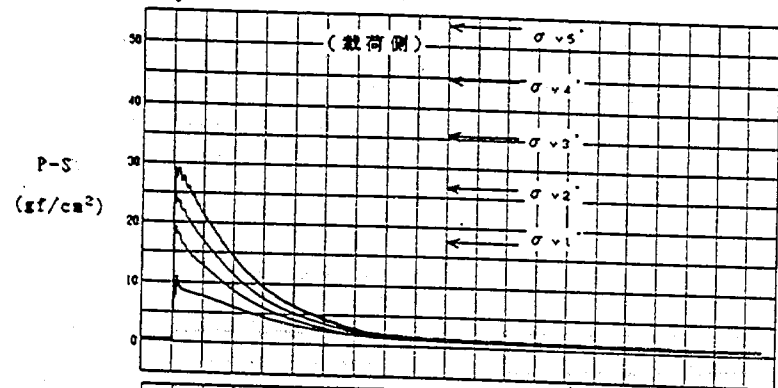
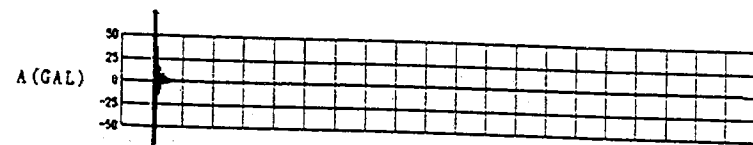


地表面の鉛直変位量 (I A 2)

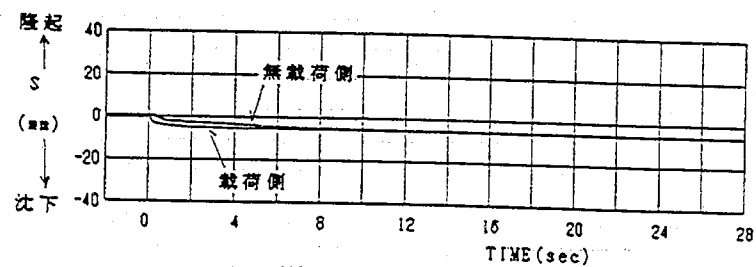


芯部流動量 (I A 2)

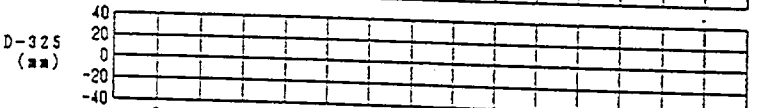
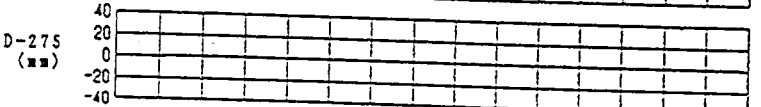
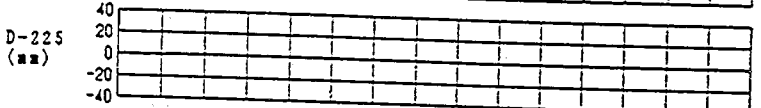
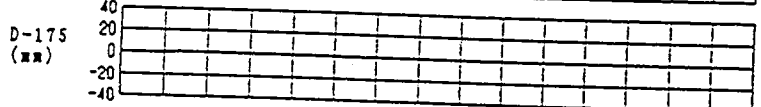
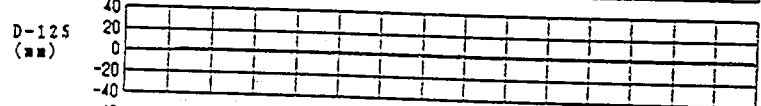
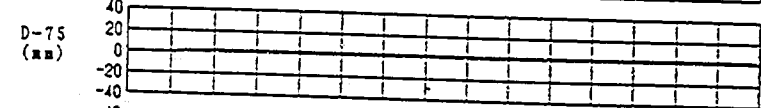
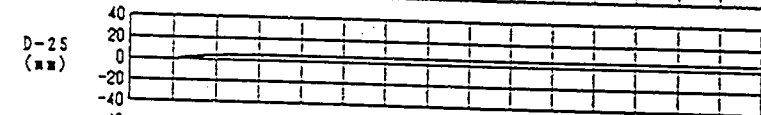
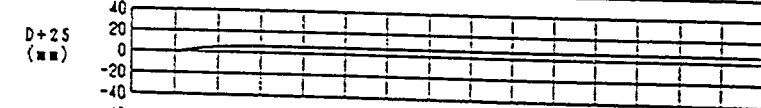
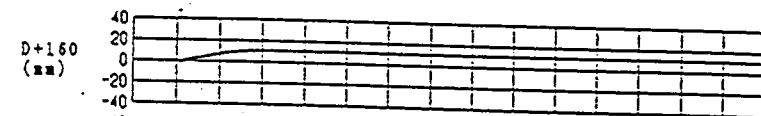
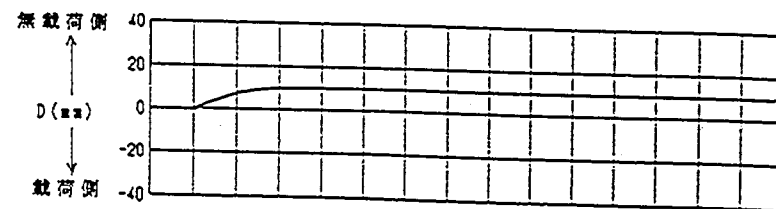




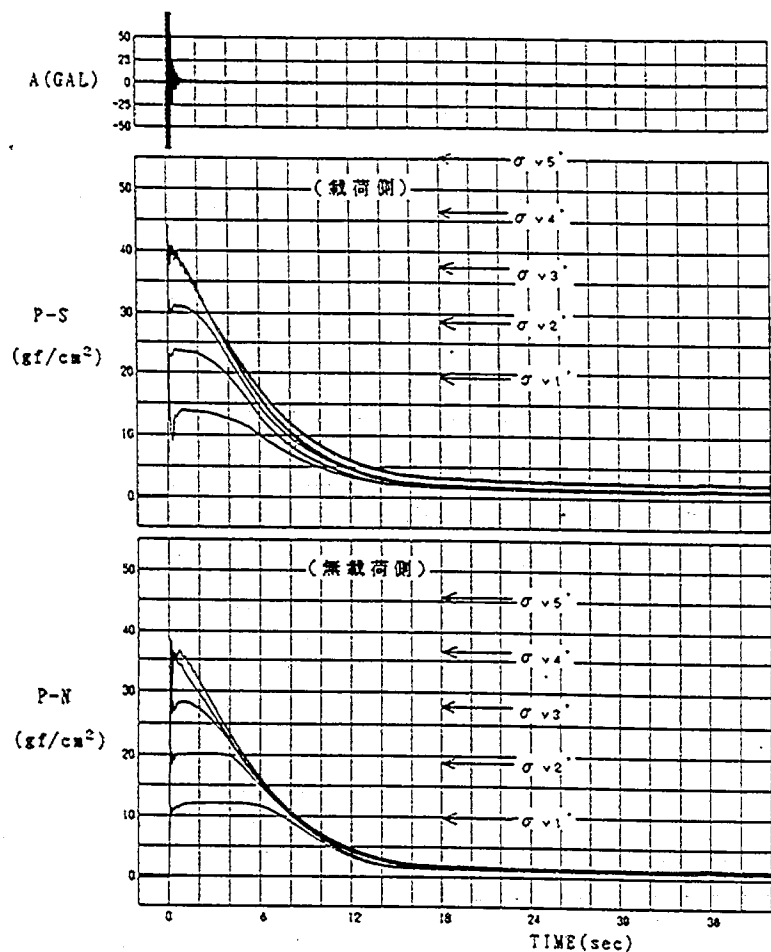
土槽の加速度、間隙水圧 (I B 1)



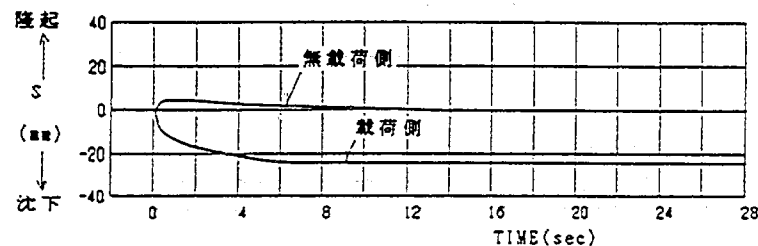
地表面の鉛直変位量 (I B 1)



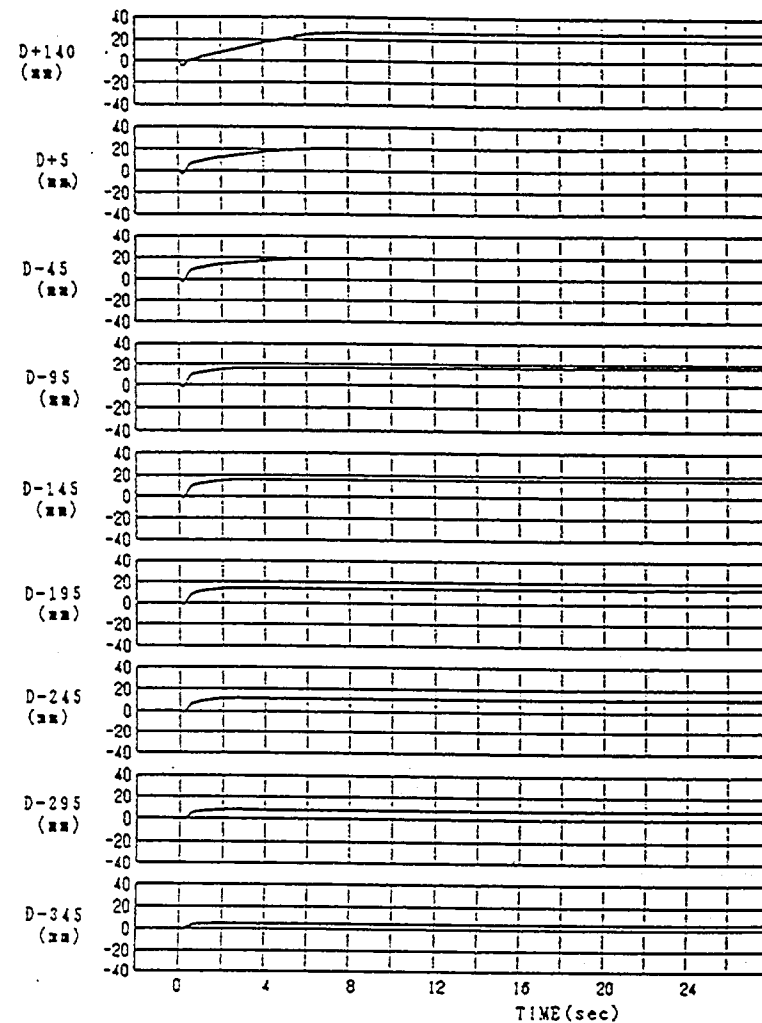
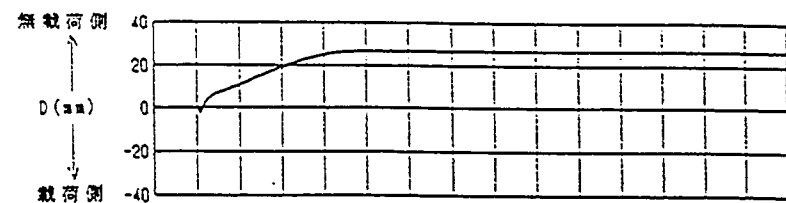
地盤流動量 (I B 1)



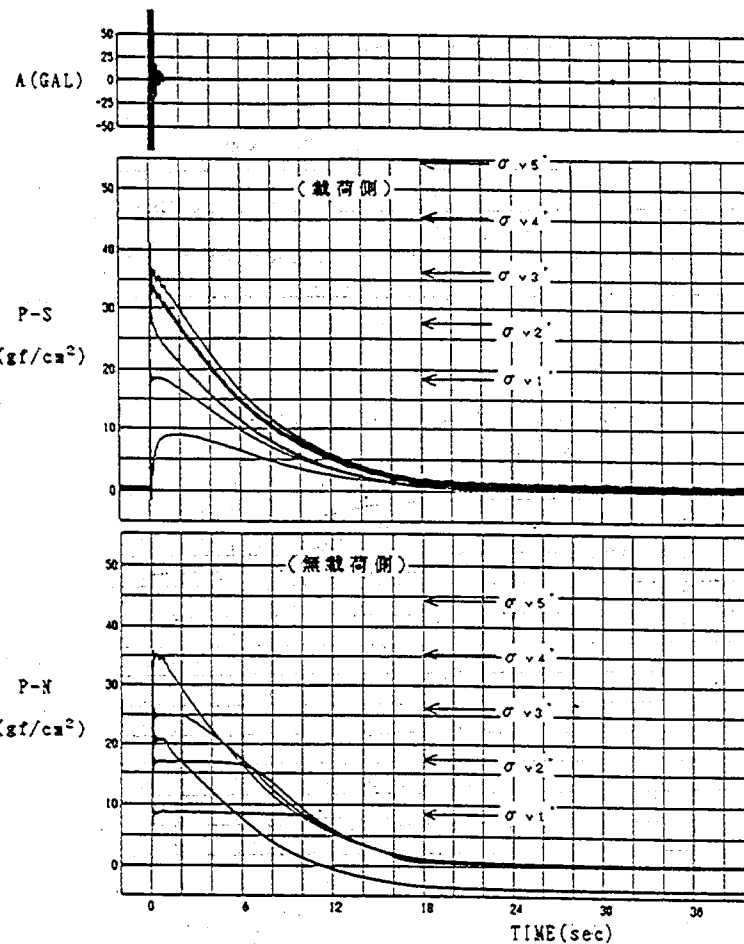
土槽の加速度、間隙水圧 (I B 2)



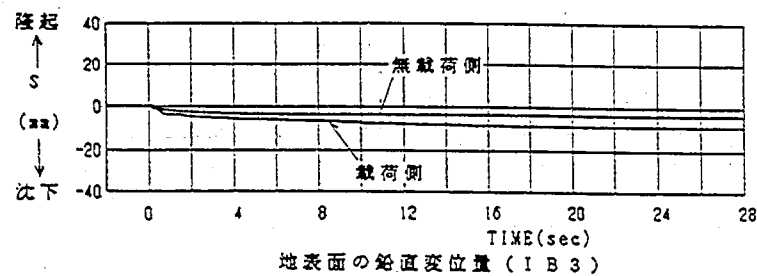
地表面の鉛直変位量 (I B 2)



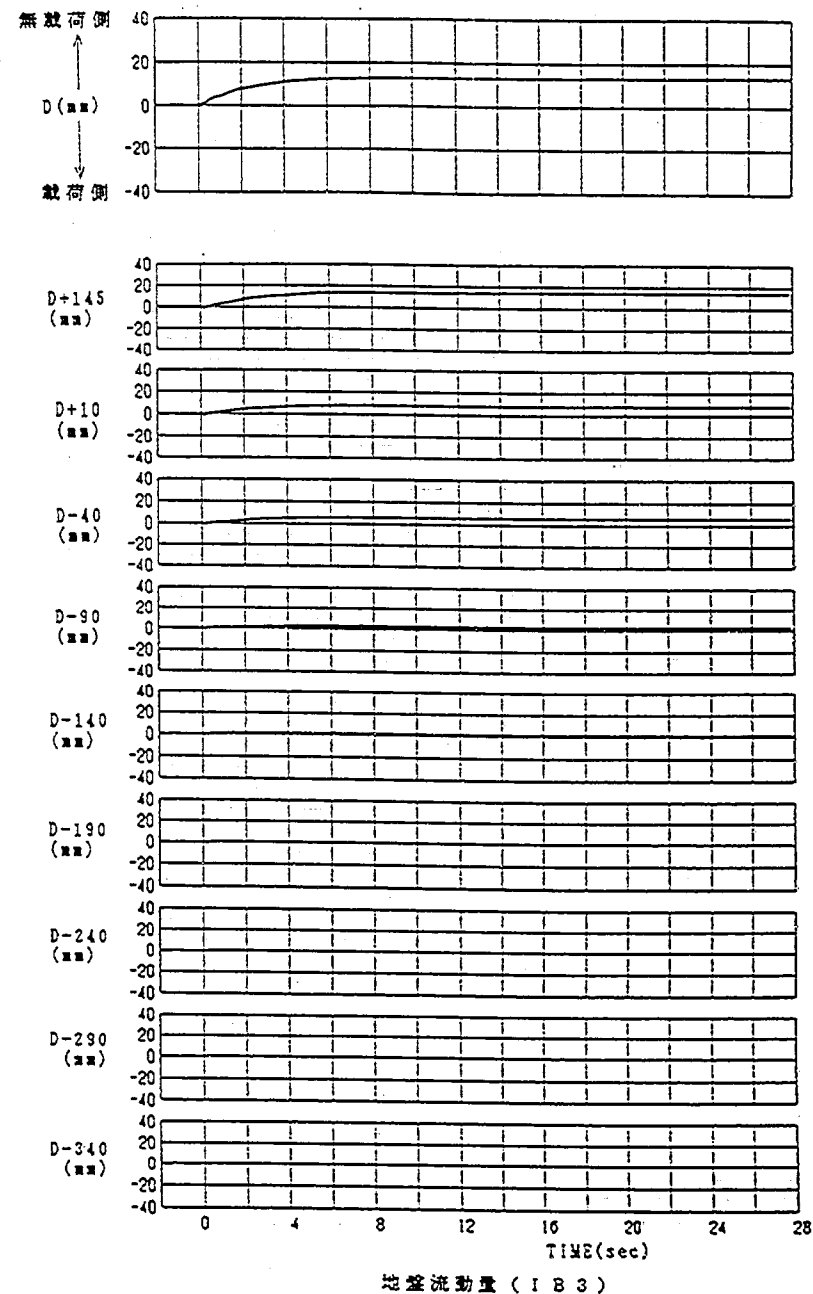
地盤流動量 (I B 2)



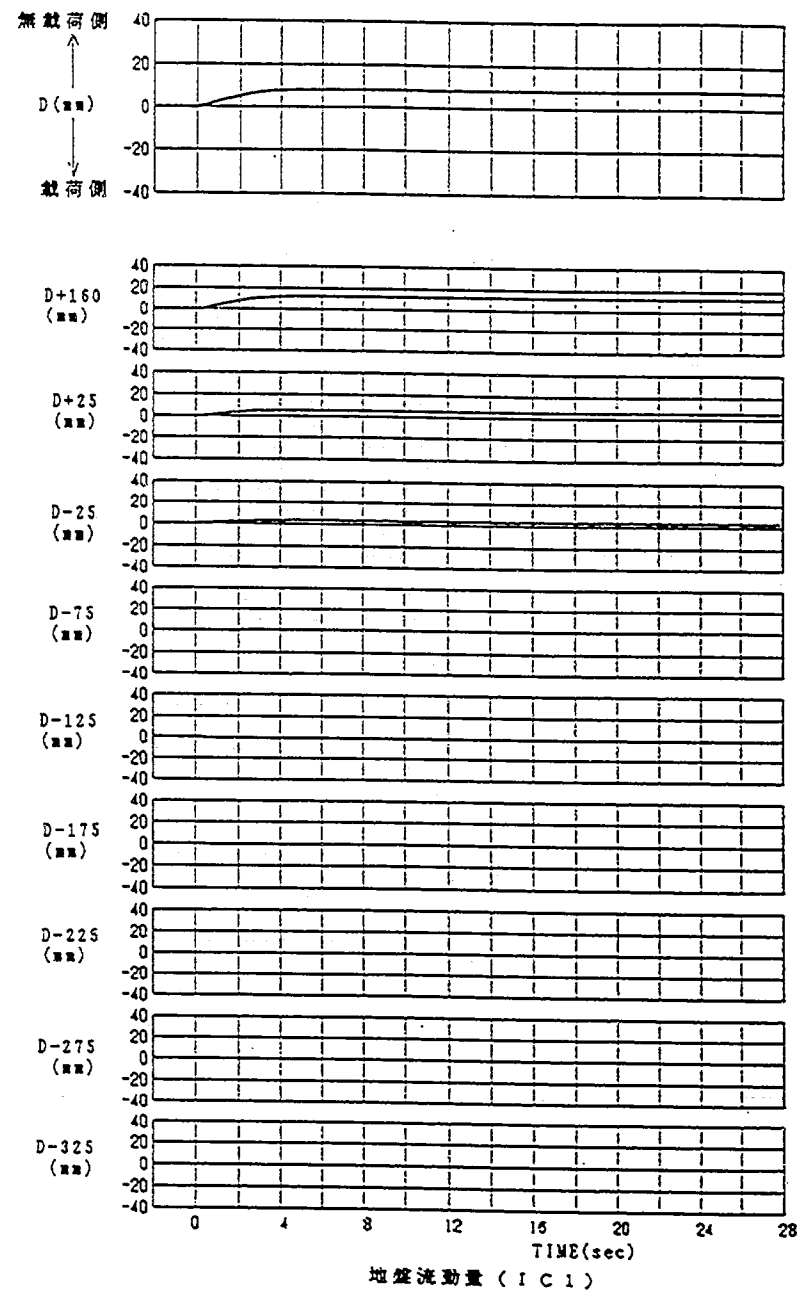
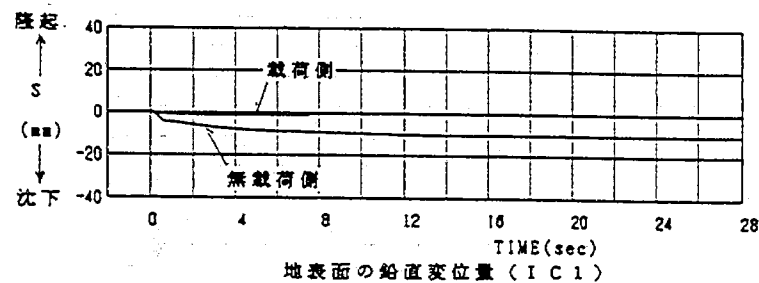
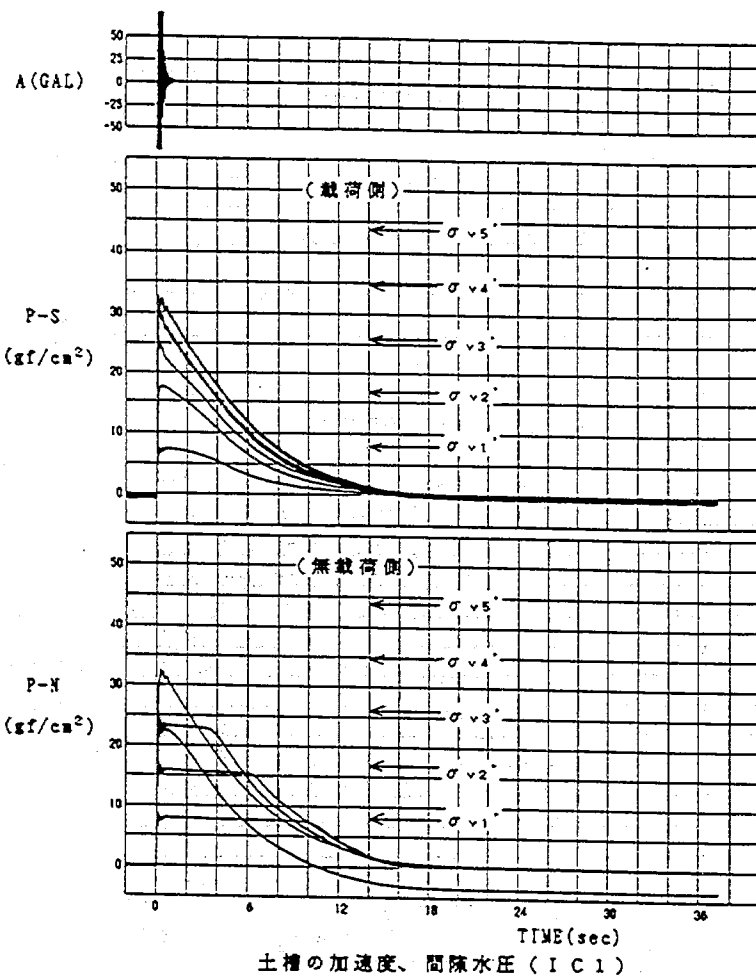
土槽の加速度、間隙水圧 (I B 3)

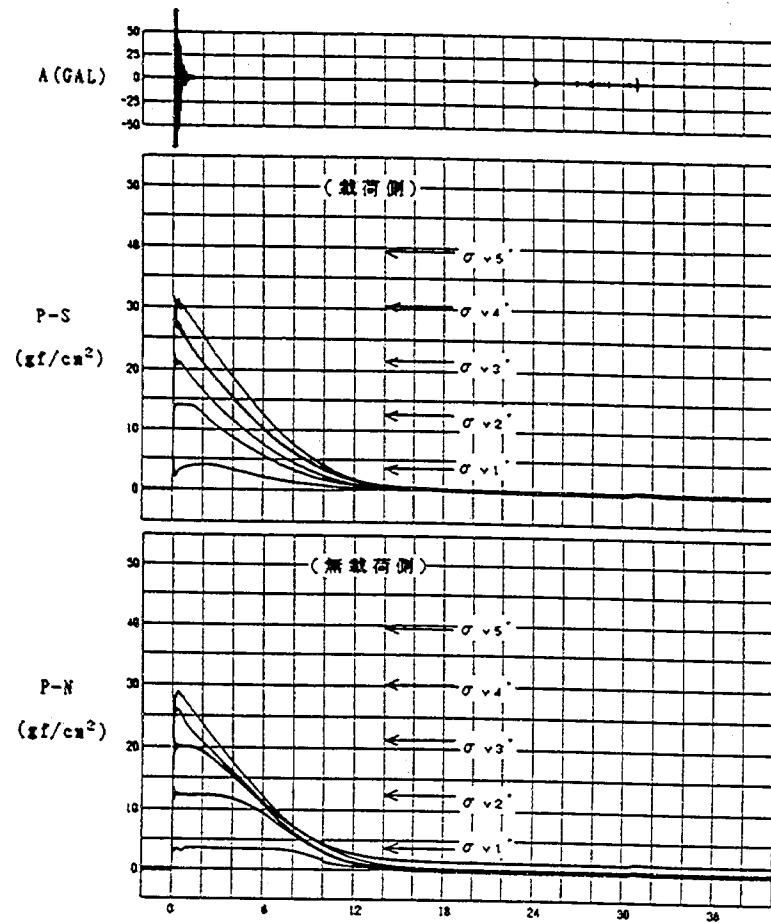


地表面の鉛直変位量 (I B 3)

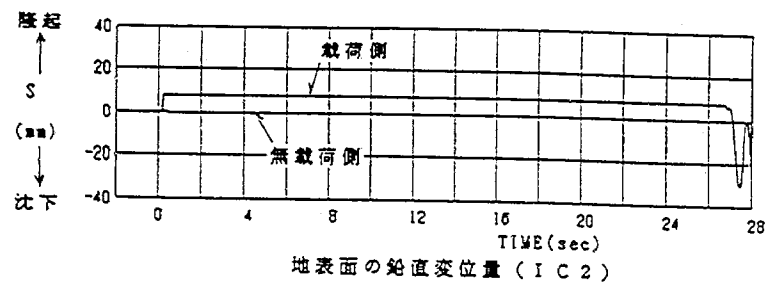


地盤流動量 (I B 3)

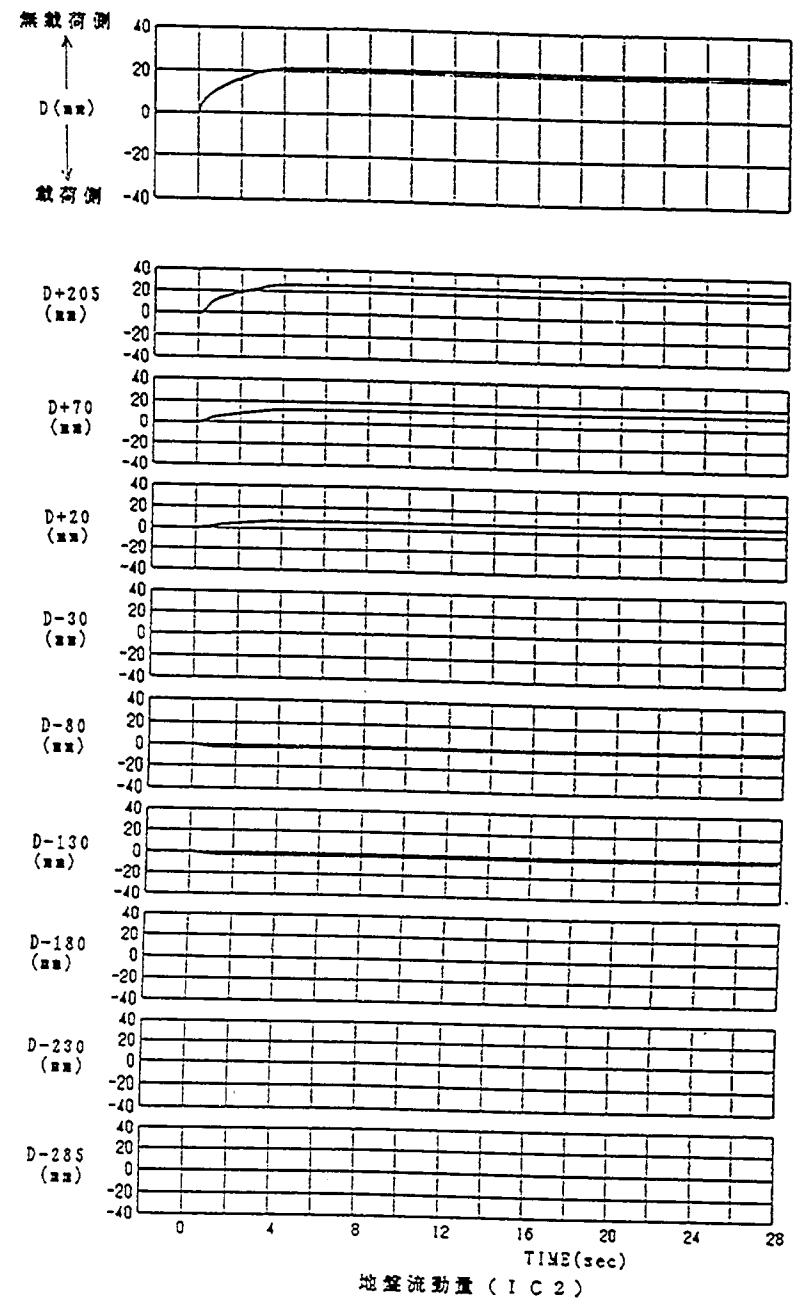




土槽の加速度、間隙水圧 (I C 2)



地表面の鉛直変位量 (I C 2)



地盤流動量 (I C 2)

偏荷重が作用する地盤の液状化による
地盤流動特性に関する研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3000号
平成3年11月 (1991)

佐々木 康 常田 賢一
松本 秀應 佐谷 祥一
森 利弘

要 旨 : 近年、地盤の液状化に伴って発生する被害の内、地盤の永久変位(地盤の側方流動)に起因した被害事例が確認され、地盤の永久変位のメカニズムの解明あるいは永久変位量の予測法の開発の必要性が指摘されている。そこで地盤のモデルとして、橋台背面のように盛土による偏荷重が地表面に作用する場合を対象とし、偏荷重の大きさが地盤の流動特性に与える影響を模型実験により検討するとともに、流体モデルにより地盤流動の解析を行い実験結果との比較を行った。

キーワード: 液状化、永久変形、流動、偏荷重、盛土、模型実験、数値解析

郵便はがき

41円切手
をはって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室

御中

No. 193

No. 193

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3000号 部
偏荷重が作用する地盤の液状化による
地盤流動特性に関する研究

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印



土木研究所資料3000号
偏荷重が作用する地盤の液状化による
地盤流動特性に関する研究