

# 土 木 研 究 所 資 料

## 粘土地盤上堤防の耐震性に関する 実験的・解析的検討報告書

昭和60年3月

建設省土木研究所  
機械施工部動土質研究室

「Copyright © ( 1 9 8 5 ) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of 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，土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。 」

# 粘土地盤上堤防の耐震性に関する 実験的・解析的検討報告書

動土質研究室室 長 古 賀 泰 之  
研究員 松 尾 修  
唐 沢 安 秋

## 要 旨

粘土地盤上に築堤された堤防の地震動による変形・破壊特性，およびそのような堤防に対するいくつかの耐震対策工の効果を，模型振動実験および解析により調べた。

模型振動実験は，6個の模型について実施した。このうち3個は耐震対策工を施し，比較実験を行った。また，解析は，地震後永久変形解析により，実験結果の検証を行った。

以上より，粘土地盤のせん断変形に伴う堤防の変形の状況，地震加速度と堤防の沈下変形量の関係，および耐震対策工の効果などが定性的に明らかとなり，また，上記解析手法の有用性と適用限界もある程度示された。

キーワード：堤防，耐震，対策工，粘土地盤，模型実験，永久変形解析

## ま え が き

本報告書は、粘土地盤上に築造された河川堤防の耐震性、および、耐震性の低い堤防に対する耐震対策工の効果を、実験的・解析的に検討した結果を報告するものである。

河川堤防等の盛土構造物の耐震性は、基礎地盤の良否に強く支配されることはよく知られている。特に緩く堆積した飽和砂質土層、あるいは軟弱な粘性土層を有する基礎地盤上の盛土はしばしば地震被害を生じる。

前者は液状化現象としてよく知られ、砂質土の液状化特性あるいは地盤の液状化による盛土の変形破壊挙動については、この約20年の間に精力的な研究が進められ、多くの事が明らかにされてきている。

ところが、軟弱粘性土地盤上の盛土の耐震性に関しては、材料学的な粘土の動的変形・強度特性についてはこれまでにある程度調べられてきているものの、構造物全体の地震時安定性について実証的に調べられた例はきわめて少く、不明の事項が数多く残されている。

したがって、粘性土地盤上の盛土の耐震性についても明らかにする必要がある。

本検討は、建設省関東地方建設局荒川下流工事事務所からの依頼調査（課題名：「荒川下流域の耐震対策検討」、昭和58、59年度）において行ったものである。

調査の目的は、荒川下流域の河川堤防の耐震性評価、および耐震対策工の策定を行うための基礎資料を得ることにあり、特に、不明な事項の多い粘性土地盤上の堤防を対象に検討を行うこととした。

昭和58年度には地震時の挙動特性を調べた。

ひきつづき、昭和59年度には数種類の耐震対策工法の効果を調べた。

以下に、その結果を報告する。

# 目 次

ま え が き

図・表一覧表

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1. 目 的                        | 1  |
| 2. 実施内容                       | 1  |
| 3. 室内土質試験                     | 2  |
| 3.1 試 料                       | 2  |
| 3.2 物 理 試 験                   | 2  |
| 3.3 力 学 試 験                   | 4  |
| 3.3.1 予 備 圧 密                 | 4  |
| 3.3.2 圧 密 試 験                 | 4  |
| 3.3.3 三軸圧密( $\bar{C}U$ )試験    | 4  |
| 3.3.4 繰返し三軸圧密( $\bar{C}U$ )試験 | 9  |
| 4. 模型振動実験                     | 13 |
| 4.1 実 験 概 要                   | 13 |
| 4.2 実 験 方 法                   | 13 |
| 4.2.1 実 験 装 置                 | 13 |
| 4.2.2 実 験 手 順                 | 14 |
| 4.2.3 実 験 模 型                 | 15 |
| 4.2.4 共 振 実 験                 | 21 |
| 4.2.5 強 震 実 験                 | 21 |
| 4.2.6 計 測                     | 23 |
| 4.3 実 験 結 果                   | 29 |
| 4.3.1 圧密沈下の記録                 | 29 |
| 4.3.2 地 盤 の 特 性               | 30 |
| 4.3.3 堤体盛立て中の動態観測結果           | 31 |
| 4.3.4 模 型 の 特 性               | 38 |
| 4.3.5 共 振 試 験 結 果             | 41 |
| 4.3.6 強 震 試 験 結 果             | 50 |
| 4.4 模型振動実験結果のまとめ              | 65 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| 5. 地震後永久変形解析 .....  | 67 |
| 5.1 解析方法 .....      | 67 |
| 5.1.1 基本的な考え方 ..... | 67 |
| 5.1.2 解析手順 .....    | 68 |
| 5.1.3 解析条件 .....    | 70 |
| 5.2 解析結果 .....      | 73 |
| 6. ま と め .....      | 81 |
| 謝 辞 .....           | 82 |
| 参 考 文 献 .....       | 83 |

図 ・ 表 名 一 覧 表

| 図番号  | 名 称                                | ページ |
|------|------------------------------------|-----|
| 3.1  | 試料採取位置図                            | 2   |
| 3.2  | 試料採取深さ                             | 3   |
| 3.3  | 粒度曲線                               | 4   |
| 3.4  | 圧密試験結果 ( $e-\log p$ 曲線 )           | 5   |
| 3.5  | 圧密試験結果 ( $\bar{p}-C_v, m_v$ 曲線 )   | 6   |
| 3.6  | 三軸圧縮試験 ( $\overline{CU}$ ) 試験結果    | 7   |
| 3.7  | 繰返し三軸圧縮試験結果                        | 8   |
| 3.8  | 初期せん断応力比と繰返しせん断応力比の関係              | 9   |
| 3.9  | 初期せん断応力比と動的強度比の関係                  | 10  |
| 3.10 | ( 初期せん断応力比 + 繰返しせん断応力比 ) と累積ひずみの関係 | 11  |
| 3.11 | 過圧密比と動的強度                          | 11  |
| 3.12 | 動的強度に及ぼす過圧密比の影響                    | 12  |
| 3.13 | 載荷周波数と動的強度                         | 12  |
| 3.14 | 動的強度に及ぼす周波数の影響                     | 12  |
| 4.1  | 実験土槽模式図                            | 14  |
| 4.2  | 模型振動実験の手順                          | 14  |
| 4.3  | 模型の形状寸法                            | 15  |
| 4.4  | 鋼矢板模型材料の断面性状                       | 17  |
| 4.5  | 圧密の方法                              | 20  |
| 4.6  | 強震実験の方法                            | 21  |
| 4.7  | 加速度レベルと応答特性の変化                     | 23  |
| 4.8  | サウンディング装置                          | 24  |
| 4.9  | サウンディング装置の較正試験結果                   | 25  |
| 4.10 | 計測器の配置およびサウンディング位置図                | 26  |
| 4.11 | 圧密沈下観測結果                           | 27  |
| 4.12 | 双曲線法による地盤の最終沈下量の評価                 | 31  |
| 4.13 | 堤体盛立て時の動態観測結果                      | 32  |
| 4.14 | 模型の特性                              | 36  |
| 4.15 | 加振による地盤の S 波速度の変化                  | 38  |
| 4.16 | 三軸圧縮試験結果 ( 堤体材料 )                  | 39  |
| 4.17 | 共振曲線 ( 入力加速度に対する )                 | 42  |
| 4.18 | 共振時最大加速度モード図                       | 48  |
| 4.19 | 地盤の 1 次共振振動数の実測値と推定値の比較            | 50  |
| 4.20 | 地盤の応答特性に及ぼす側壁の影響                   | 50  |
| 4.21 | 強震実験における加速度, 変位, 間隙水圧変化図           | 51  |
| 4.22 | 強震実験における計測記録の例                     | 55  |
| 4.23 | 加速度応答倍率図                           | 57  |
| 4.24 | 天端沈下量の経時変化                         | 59  |

| 図番号   | 名 称                 | ページ |
|-------|---------------------|-----|
| 4.2 5 | 間隙水圧の経時変化           | 60  |
| 4.2 6 | 加速度－変形量関係           | 61  |
| 4.2 7 | 模型の最終変形状況           | 62  |
| 4.2 8 | タイロッドの張力の変化         | 64  |
| 4.2 9 | 加振加速度と天端沈下量の関係      | 65  |
| 4.3 0 | 実験前せん断強度の比較         | 65  |
| 5.1   | 地震時における土要素の応力，ひずみ状態 | 67  |
| 5.2   | 永久変形解析法の手順          | 68  |
| 5.3   | 現位置と室内試験における応力の対応関係 | 69  |
| 5.4   | 解析モデル               | 70  |
| 5.5   | 地盤強度の変化（模式図）        | 71  |
| 5.6   | 計算結果と実測結果の比較（応答加速度） | 74  |
| 5.7   | 見かけの剛性率 $G^*$ の分布   | 75  |
| 5.8   | 変形図                 | 76  |
| 5.9   | 実験と解析における変形の比較      | 79  |
| 5.1 0 | 繰返し回数と天端沈下量（計算値）    | 79  |
| 5.1 1 | 加振加速度と天端沈下量の関係      | 80  |
| 5.1 2 | 実測および計算沈下量の比較       | 80  |

| 表番号 | 名 称                     | ページ |
|-----|-------------------------|-----|
| 3.1 | 粘土試料の物理特性値              | 2   |
| 3.2 | 実施した室内力学試験一覧            | 5   |
| 4.1 | 模型振動実験ケース一覧表            | 13  |
| 4.2 | 加振条件一覧表                 | 22  |
| 4.3 | 計測器一覧                   | 29  |
| 4.4 | 圧密前後の粘土地盤の諸元            | 29  |
| 4.5 | 最終圧密度の評価                | 31  |
| 4.6 | 模型の主な特性値                | 40  |
| 4.7 | 共振試験結果のまとめ              | 41  |
| 4.8 | 強震試験における応答値の読み取り値一覧表    | 58  |
| 5.1 | 現位置と室内試験における応力，ひずみの対応関係 | 69  |
| 5.2 | 解析パラメータ一覧表              | 71  |

## 1. 目 的

本検討の目的は以下の通りである。

- ① 粘土地盤上の堤防の地震時の変形・破壊挙動特性を定性的に把握すること。
- ② 耐震性評価手法としての地震時安定解析手法の適用性を明らかにすること。
- ③ 耐震対策工法の効果について明らかにすること。

## 2. 実 施 内 容

上記目的に対し、以下の事項を実施した。

### ① 模型振動実験

通常の堤防模型3ケース、および耐震対策工を施した模型3ケース、合計6ケースの模型について振動実験を行い、地震時の変形・破壊挙動、加振加速度と変形量の関係を調べた。

### ② 解 析

地震後永久変形解析を実施した。

これらは、模型実験に対して適用し、その結果得られた計算値と実測値を比較することによりその適用性を検討した。

### ③ 室内土質試験

実験に用いた試料について、一般的な物理試験・力学試験、および繰返し三軸試験を実施した。得られた結果は、②の解析のための入力定数として利用した。

### 3. 室内土質試験

模型振動実験に用いる粘土試料の物理・力学特性を把握するために、一連の室内土質試験を実施したので、その結果を以下に示す。なお、詳細については文献1)を参照されたい。

#### 3.1 試料

実験に用いた試料は、荒川本川と中川を仕切る荒川中堤の基礎地盤に堆積する粘土である。試料採取位置および試料採取深さを図-3.1, 3.2に示す。

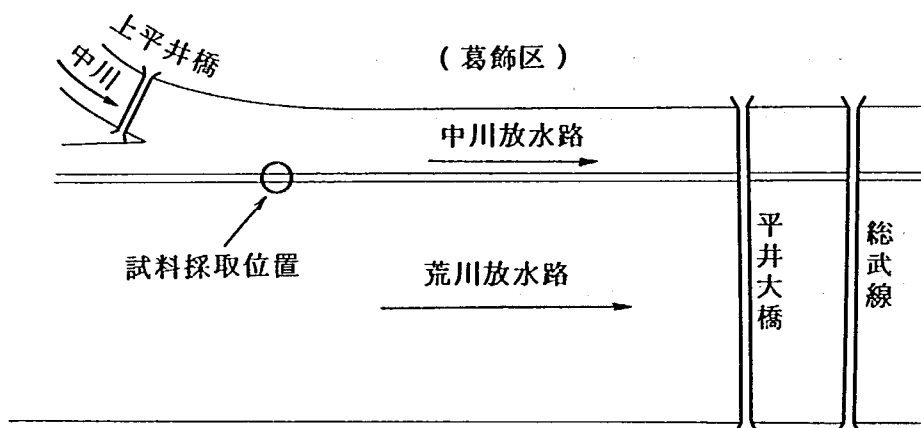


図-3.1 試料採取位置図

これは、この地点での橋台基礎建設工事の際に掘削されたものであり、土木研究所構内に搬入した後、水を加えてコンクリート用強制練りミキサーで10分間程度攪拌し、スラリー状にして0.84mmのふるいで裏ごししたものを実験試料とした。

この粘土は、通称、「有楽町層粘土」と呼ばれる海成沖積粘土である。

上述のように調整した粘土試料を用いて以下に示す室内土質試験を行ったが、力学試験に用いる供試体については、予備圧密を行って再圧密粘土を作成して得た。

表-3.1 粘土試料の物理特性値

|          |                    |       |
|----------|--------------------|-------|
| 比 重      | G <sub>s</sub>     | 2.686 |
| 粒 度 特 性  | 砂 分 (%)            | 19    |
|          | シルト分 (%)           | 40    |
|          | 粘 土 分 (%)          | 41    |
|          | 最大粒径 (mm)          | 0.84  |
| 液性限界     | W <sub>L</sub> (%) | 51.5  |
| 塑性限界     | W <sub>p</sub> (%) | 27.6  |
| 塑性指数     | I <sub>p</sub>     | 23.9  |
| 日本統一土質分類 |                    | CH    |
| 自然含水比    | W <sub>n</sub> (%) | 約60%  |

#### 3.2 物理試験

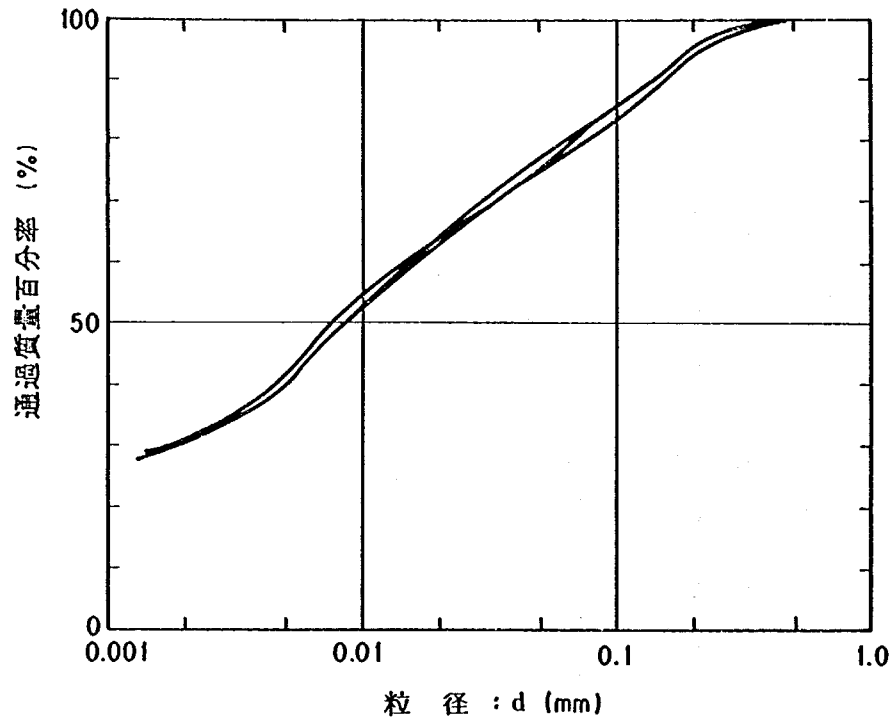
比重試験、粒度試験および液性・塑性限界試験を実施した。試験方法はいずれも「土質試験法<sup>2)</sup>」によった。

試験結果として、物理特性値一覧および粒度曲線をそれぞれ表-3.1, 図-3.3に示す。

試料採取深さ

| 標<br>尺<br>m | 標<br>高<br>m | 深<br>度<br>m | 柱<br>状<br>図 | 標準貫入試験 |    |    |       |         | 地質名 | 色調 | 粒度組成多 |     |   |   | 液性限界 %<br>塑性限界 %<br>自然含水比 %x |    | 湿潤状態の<br>土粒子の比重Gs |    |    |    |    |    |     |               |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|----|----|-------|---------|-----|----|-------|-----|---|---|------------------------------|----|-------------------|----|----|----|----|----|-----|---------------|
|             |             |             |             | N/30cm |    |    |       | 回/cm    |     |    | 粘土    | シルト | 砂 | 礫 | 20                           | 40 | 60                | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 間<br>隙<br>比ex |
|             |             |             |             | 10     | 20 | 30 | 40    |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 1           |             |             |             |        |    |    | 11/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 2           |             |             |             |        |    |    | 3/34  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 3           |             |             |             |        |    |    | 6/30  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 4           |             |             |             |        |    |    | 4/30  | 盛土      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 5           | -1.33       | 5.60        |             |        |    |    | 6/30  | 細砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 6           | -3.43       | 7.70        |             |        |    |    | 4/31  | シルト質細砂  | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 7           | -4.53       | 8.80        |             |        |    |    | 3/30  | シルト     | 暗黄灰 |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 8           | -5.00       | 9.25        |             |        |    |    | 3/34  | 腐植土     | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 9           | -5.53       | 9.80        |             |        |    |    | 6/30  | 細砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 10          | -5.83       | 10.10       |             |        |    |    | 3/30  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 11          | -7.80       | 12.15       |             |        |    |    | 3/31  | シルト     | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 12          | -8.43       | 12.70       |             |        |    |    | 20/30 | 中砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 13          | -9.53       | 13.90       |             |        |    |    | 18/30 | シルト混り細砂 | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 14          | -10.43      | 14.70       |             |        |    |    | 4/31  | 中砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 15          | -11.13      | 15.90       |             |        |    |    | 4/35  | 細砂混りシルト | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 16          |             |             |             |        |    |    | 1/35  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 17          |             |             |             |        |    |    | 0/35  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 18          |             |             |             |        |    |    | 0/36  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 19          |             |             |             |        |    |    | 0/40  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 20          |             |             |             |        |    |    | 1/44  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 21          |             |             |             |        |    |    | 1/30  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 22          | -17.05      | 22.10       |             |        |    |    | 1/32  | シルト     | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 23          |             |             |             |        |    |    | 1/32  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 24          |             |             |             |        |    |    | 1/30  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 25          |             |             |             |        |    |    | 2/33  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 26          | -22.53      | 26.0        |             |        |    |    | 2/30  | 粘土質シルト  | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 27          |             |             |             |        |    |    | 3/30  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 28          |             |             |             |        |    |    | 4/33  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 29          |             |             |             |        |    |    | 4/30  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 30          |             |             |             |        |    |    | 5/35  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 31          |             |             |             |        |    |    | 5/31  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 32          |             |             |             |        |    |    | 5/30  | 粘土質シルト  | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 33          | -29.13      | 33.40       |             |        |    |    | 10/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 34          |             |             |             |        |    |    | 13/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 35          | -31.53      | 35.00       |             |        |    |    | 16/30 | 細砂質シルト  | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 36          | -32.43      | 36.70       |             |        |    |    | 39/30 | シルト混り細砂 | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 37          |             |             |             |        |    |    | 53/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 38          |             |             |             |        |    |    | 41/30 | 細砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 39          | -35.43      | 39.70       |             |        |    |    | 50/21 | シルト混り細砂 | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 40          | -36.33      | 40.60       |             |        |    |    | 41/30 | 中砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 41          |             | 41.15       |             |        |    |    | 41/30 | シルト混り細砂 | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 42          | -39.40      | 42.35       |             |        |    |    | 54/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 43          |             |             |             |        |    |    | 54/15 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 44          |             |             |             |        |    |    | 50/19 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 45          | -42.40      | 45.90       |             |        |    |    | 50/22 | 細砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 46          |             |             |             |        |    |    | 38/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 47          |             |             |             |        |    |    | 34/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 48          | -45.43      | 48.90       |             |        |    |    | 31/30 | シルト混り細砂 | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 49          |             |             |             |        |    |    | 33/30 | 細砂質シルト  | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 50          |             |             |             |        |    |    | 50/14 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 51          |             |             |             |        |    |    | 50/13 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 52          |             |             |             |        |    |    | 50/14 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 53          |             |             |             |        |    |    | 50/18 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 54          | -51.53      | 54.0        |             |        |    |    | 50/14 | 細砂混り中砂  | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 55          |             |             |             |        |    |    | 50/12 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 56          | -52.23      | 56.50       |             |        |    |    | 50/13 | 砂レ礫     | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 57          |             |             |             |        |    |    | 20/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 58          |             |             |             |        |    |    | 22/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 59          |             |             |             |        |    |    | 34/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 60          |             |             |             |        |    |    | 28/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 61          |             |             |             |        |    |    | 32/30 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 62          |             |             |             |        |    |    | 40/30 | シルト     | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 63          | -60.90      | 64.30       |             |        |    |    | 42/30 | 微細砂     | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 64          | -61.53      | 64.80       |             |        |    |    | 50/22 | 固結シルト   | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 65          | -62.08      | 65.30       |             |        |    |    | 50/28 |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 66          |             |             |             |        |    |    | 50/9  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 67          | -64.        | 67.90       |             |        |    |    | 50/8  | 細砂      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 68          | -65.        | 69.81       |             |        |    |    | 50/6  | 砂礫      | 暗灰  |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |
| 69          |             |             |             |        |    |    | 50/6  |         |     |    |       |     |   |   |                              |    |                   |    |    |    |    |    |     |               |

図-3.2 試料採取深さ



図－ 3.3 粒 度 曲 線

### 3.3 力学試験

表－ 3.2 に示す試験を実施した。ただし、三軸圧縮 (UU) 試験は堤体材料について実施したものである。これは上述の粘土試料とは異なるものであり、これについては第 4 章で改めて述べる。

#### 3.3.1 予備圧密

上述したように、力学試験に用いる粘土供試体を得るために予備圧密を行った。

はじめに、ふるいを通した高含水状態 ( $W = 85 \sim 90\%$ ) の粘土試料を脱気槽で約 4 時間真空吸引し、気泡がほぼ除去されたことを確認した後、両面排水が可能な 2 種類の圧密箱に投入し、圧密圧力を  $0.3 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  に設定して一次圧密が終了することを目標にして圧密を継続した。初期厚さは約 30 cm とし、圧密期間は約 1 か月間であった。

詳細は文献 1) を参照されたい。

このようにして作成した再圧密粘土を用いて以下の試験を行った。

#### 3.3.2 圧密試験

3 個の供試体について圧密試験を行った。

試験結果として、 $e - \log p$  曲線、 $\bar{p}$ 、 $m_v$  曲線を図－ 3.4、図－ 3.5 に示す。

#### 3.3.3 三軸圧縮 ( $\bar{C}U$ ) 試験

模型粘土地盤の強度増加率を推定するために、三軸圧縮 ( $\bar{C}U$ ) 試験を行った。

試験方法は「土質試験法」<sup>2)</sup> に準拠した。

試験機については文献 1) を参照されたい。

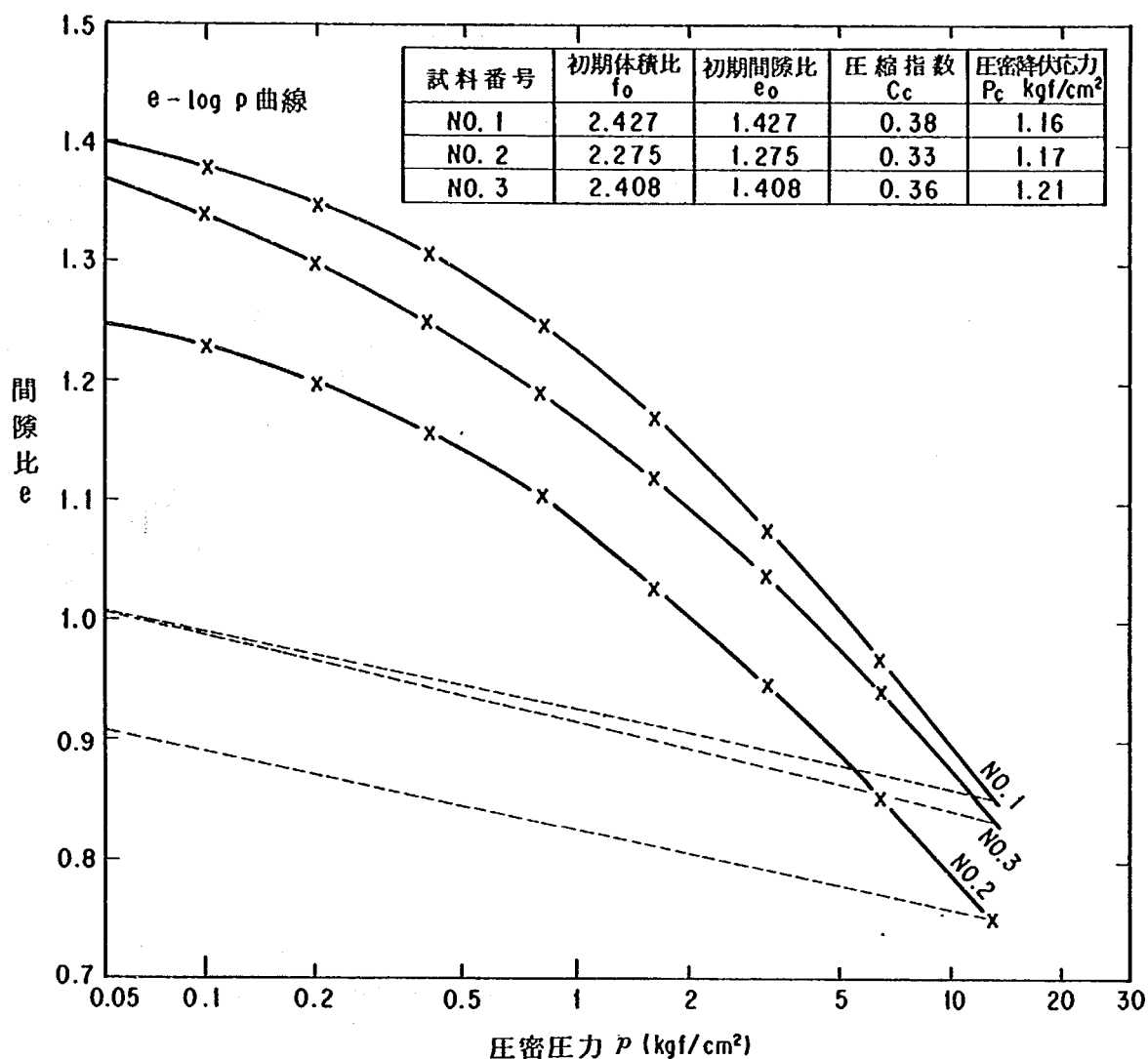


図-3.4 圧密試験結果 ( $e - \log p$  曲線)

表-3.2 実施した室内力学試験一覧

| 試 験 項 目                  | 試験数量 (供試体) |          | 備 考           |
|--------------------------|------------|----------|---------------|
|                          | S.5 8 年度   | S.5 9 年度 |               |
| 圧 密 試 験                  | 3          | 0        |               |
| 三軸圧縮試験 ( $\bar{C}U$ )    | 3          | 0        |               |
| 三軸圧縮試験 ( $UU$ )          | 0          | 4        | 堤体材料のせん断強度の把握 |
| 繰返し三軸圧縮試験 ( $\bar{C}U$ ) | 22         | 11       |               |

試験結果として、応力-ひずみ曲線、ストレスパスおよびモールの応力円を図-3.6に示す。  
これより、この粘土の正規等方圧密条件での強度増加率 ( $c_u/p'$ ) は次のように求められる。

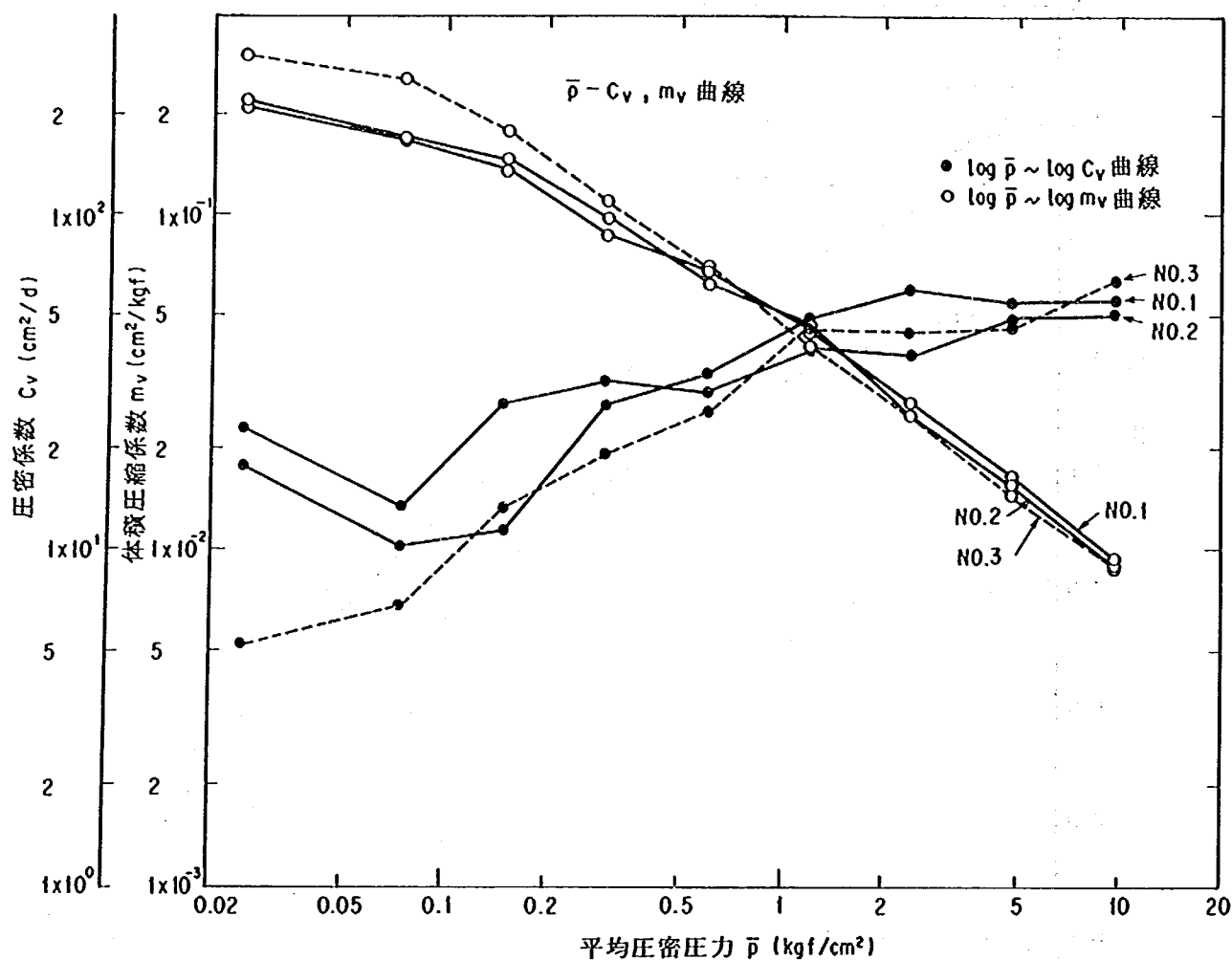


図-3.5 圧密試験結果 ( $\bar{p}-c_v, m_v$  曲線)

$$\text{強度増加率: } \frac{c_u}{p'_c} \approx \left\{ \begin{array}{l} 0.625 \text{ ( } p'_c = \sigma'_c \text{ とした場合) } \\ 0.57 \text{ ( } p'_c = \sigma'_{3c} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \text{ とした場合) } \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

なお、これらの値はたとえばスケンプトンの式により得られる値

$$\begin{aligned} \frac{c_u}{p'} &= 0.11 + 0.0037 \times I_p \quad (I_p \approx 24) \\ &= 0.20 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

などと比べて非常に大きいことがわかる。

これは、式(5.2)が特定の地域の粘性土について得られた関係式であり、しかも同式中の $p'$ 、 $c_u$ はそれぞれ有効土被り圧、原位ベーンせん断強度として与えられているのに対し、式(5.1)の値は再圧密粘土を等方圧密した供試体についての三軸圧縮試験より得られており、しかも $p'$ 、 $c_u$ の与え方が式(5.2)と異なっていることなどによるものではないかと推定される。

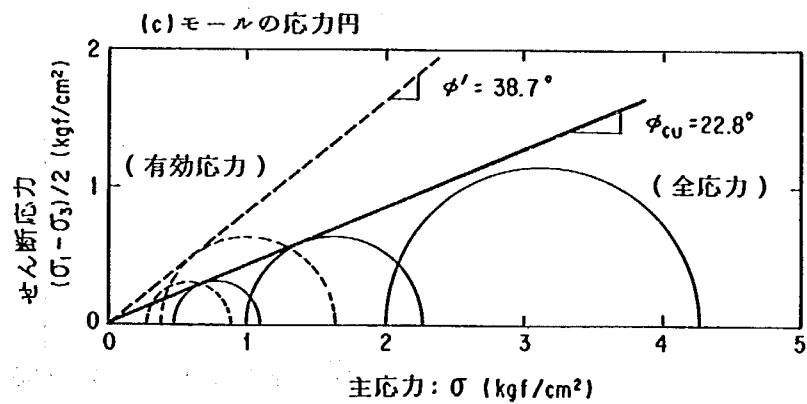
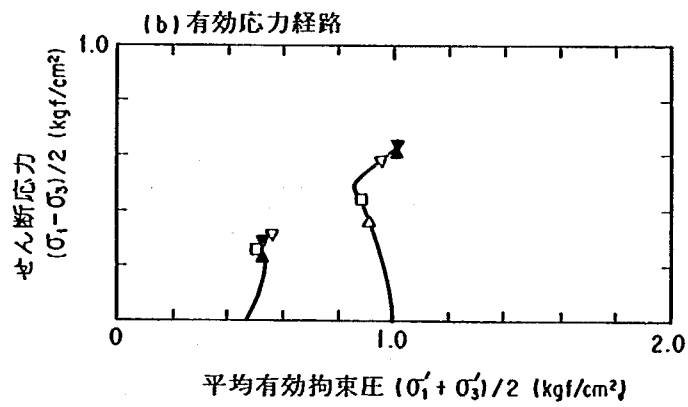
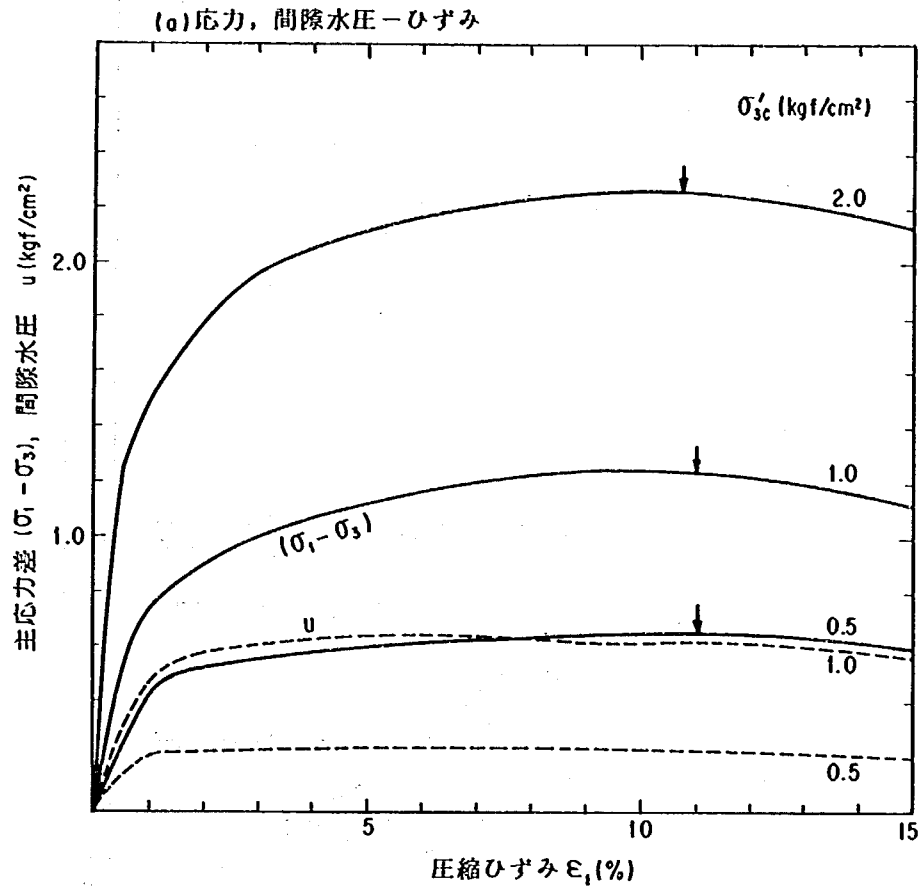


図-3.6 三軸圧縮試験 (CU) 試験結果

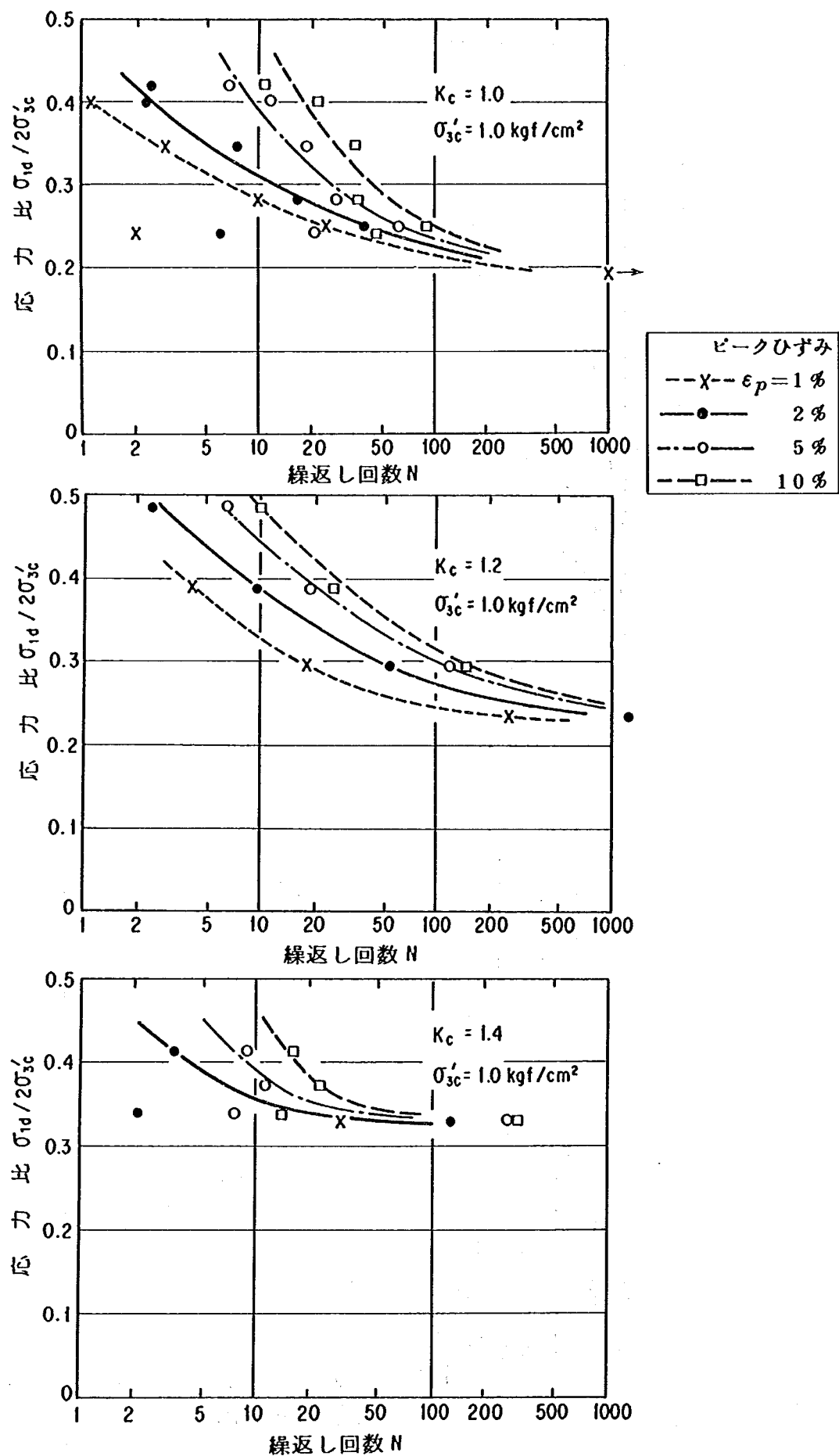


図-3.7 繰返し三軸圧縮試験結果

### 3.3.4 繰返し三軸圧縮 (CU) 試験

種々の応力条件の下での繰返し変形・強度特性を調べるために、一連の繰返し三軸圧縮 (CU) 試験を行った。

ここでは、初期せん断応力、繰返しせん断応力、載荷周波数、および過圧密比の大きさ等をいくつか変えた試験条件を設定した。

試験結果として、はじめに、所定のひずみ量に達する繰返しせん断応力比 ( $\sigma_{1d}/2\sigma'_{3c}$ ) と繰返し回数 (N) の関係を図-3.7 に示す。

また、繰返し回数  $N=20$  回について、所定のひずみ量に達する繰返しせん断応力比 ( $\sigma_{1d}/2\sigma'_{3c}$ ) と圧密応力比  $K_c = \sigma'_{1c}/\sigma'_{3c}$  あるいは初期せん断応力比の関係を同図より求めたものを図-3.8 に示す。なお、同図中に示す  $(\sigma_{1c} - \sigma_{3c})/2\sigma'_{3c}$  と  $K_c$  は次のような関係にある。

$$\frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{2\sigma'_{3c}} = \frac{\sigma'_{1c} - \sigma'_{3c}}{2\sigma'_{3c}} = \frac{K_c - 1}{2} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

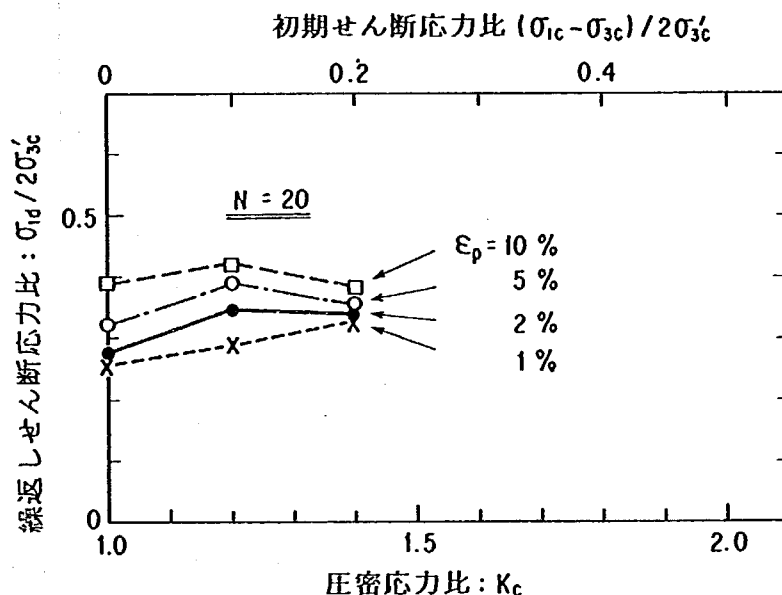
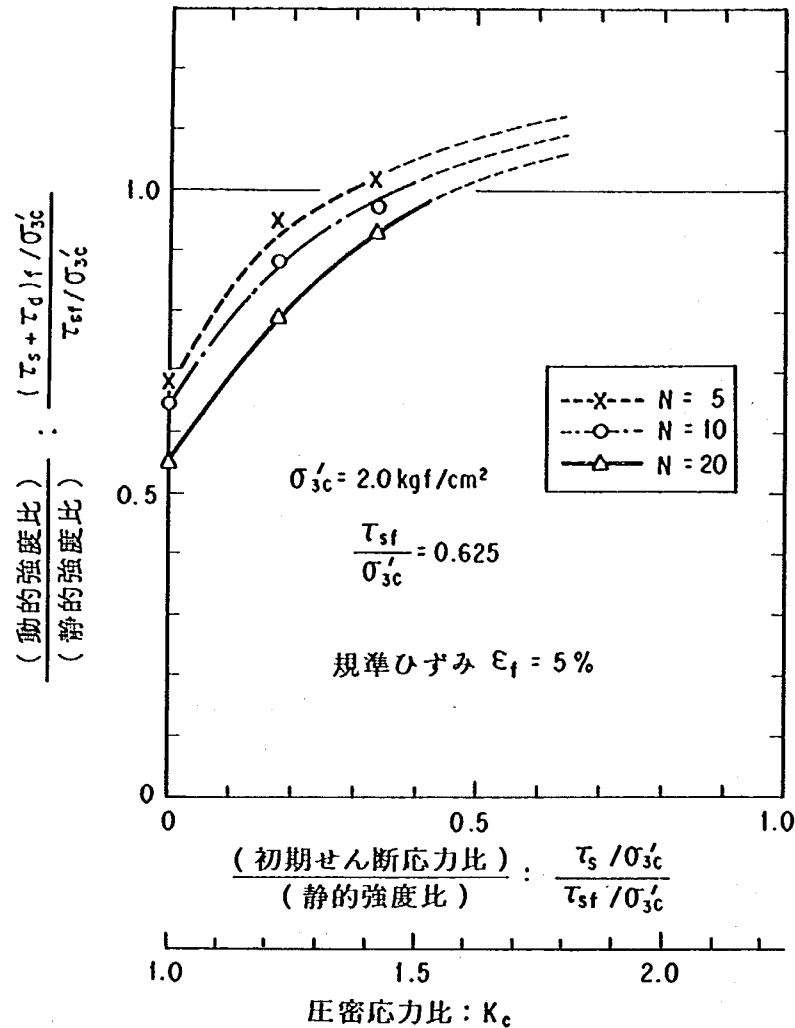


図-3.8 初期せん断応力比と繰返しせん断応力比の関係

同図より、所定のひずみ量に達する繰返しせん断応力比の大きさは、初期のせん断応力の存在により若干変化し、初期せん断応力比が 0.1 で大きくなり、0.2 になると逆に低下していくことがわかる。

図-3.9 はこの関係を別の形で表現したものであり、横軸に (初期せん断応力) / (静的せん断強度)、縦軸に (初期せん断応力 + 繰返しせん断応力) / (静的せん断強度) をとっている。この図によれば、動的強度の静的強度に対する相対的な関係をわかりやすく示すことができる。同図より、動的強度を (初期せん断応力 + 繰返しせん断応力) と定義すれば、動的強度は初期せ



図－3.9 初期せん断応力比と動的強度比の関係

ん断応力が0のときに静的強度の6～7割程度であり、初期せん断応力が大きくなるとともに増大し、初期せん断応力が静的強度の3割程度より大きくなると静的強度よりも高くなることがわかる。

一方、図－3.10は、上記結果を応力とひずみの関係でまとめたものであり、縦軸に（初期せん断応力＋繰返しせん断応力）と有効圧密側圧の比を、横軸にピーク軸ひずみをとっている。そして、データは繰返し回数 $N=5, 10, 20$ 回についてプロットし、圧密応力比別に曲線で結んでいる。また、静的試験結果もあわせて示している。

同図より、たとえば軸ひずみ $\epsilon_1=10\%$ を生ずるのに要するせん断応力をせん断強度とすれば、たとえば $N=5$ で初期せん断応力がない（ $K_c=1.0$ ）ときの動的強度は静的強度の6～7割程度であり、初期せん断応力比が約0.2（ $K_c \approx 1.4$ ）のときに静的強度にほぼ等しくなるという、図－3.9と全く同じ事が読み取れる。

つぎに、図－3.11は過圧密供試体の繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係を調べたものである。この図で、任意の繰返し回数 $N$ において過圧密比の異なる2つの粘土の動的強度の比は繰

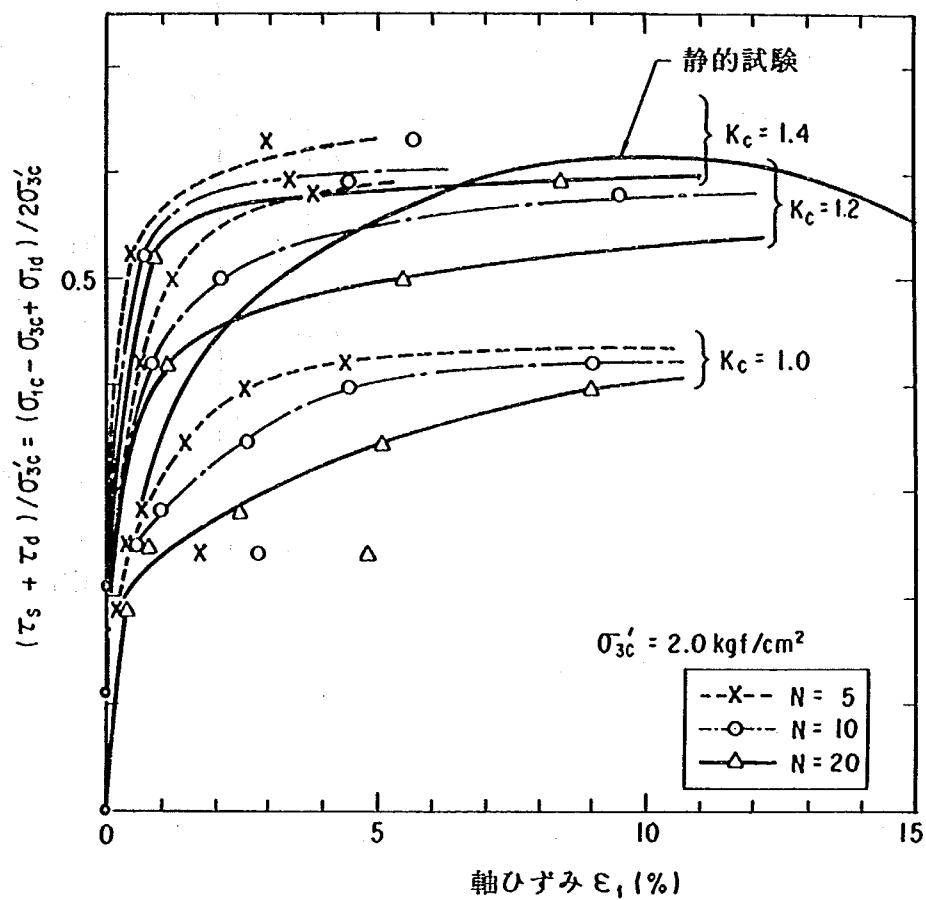


図-3.10 (初期せん断応力比+繰返しせん断応力比)と累積ひずみの関係

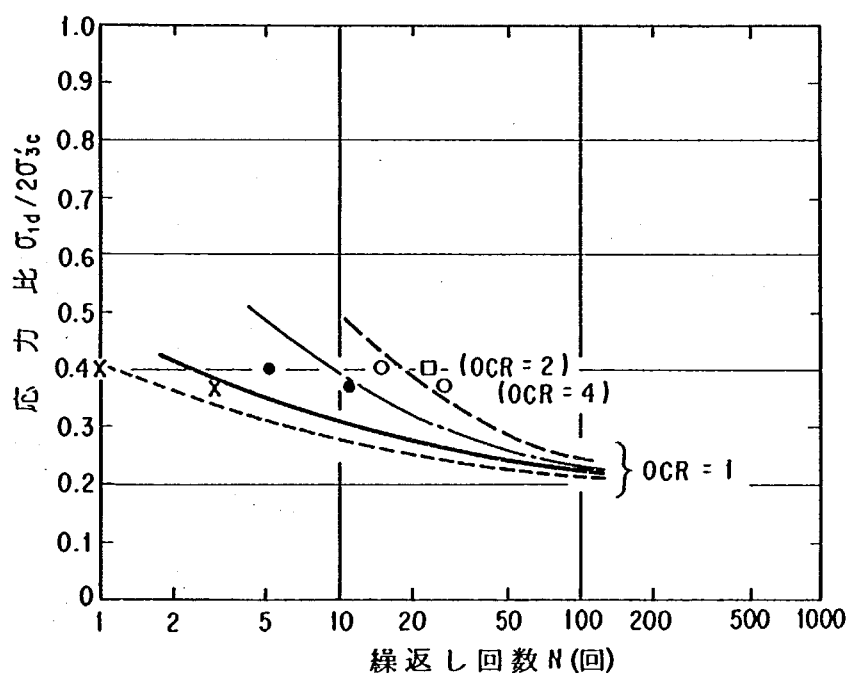


図-3.11 過圧密比と動的強度

返し回数にかかわらず一定であると仮定し、過圧密比と動的強度の関係を求めると図-3.12のようになる。これより、過圧密比が大きくなると動的強度は大きくなり、その増加割合は過圧密比が10倍で約3～4割程度となることがわかる。

つぎに、図-3.13は、载荷周波を変えた場合の試験結果を示したものである。ここで、上で設けた仮定を同様に適用し、载荷周波数と動的強度の関係を求めると図-3.14が得られる。これより、载荷周波数が高くなると動的強度は大きくなり、その増加割合は载荷周波数が10倍で約3割であることがわかる。

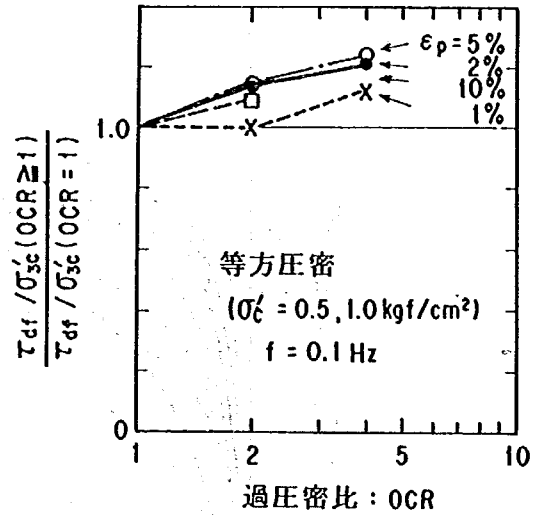


図-3.12 動的強度に及ぼす過圧密比の影響

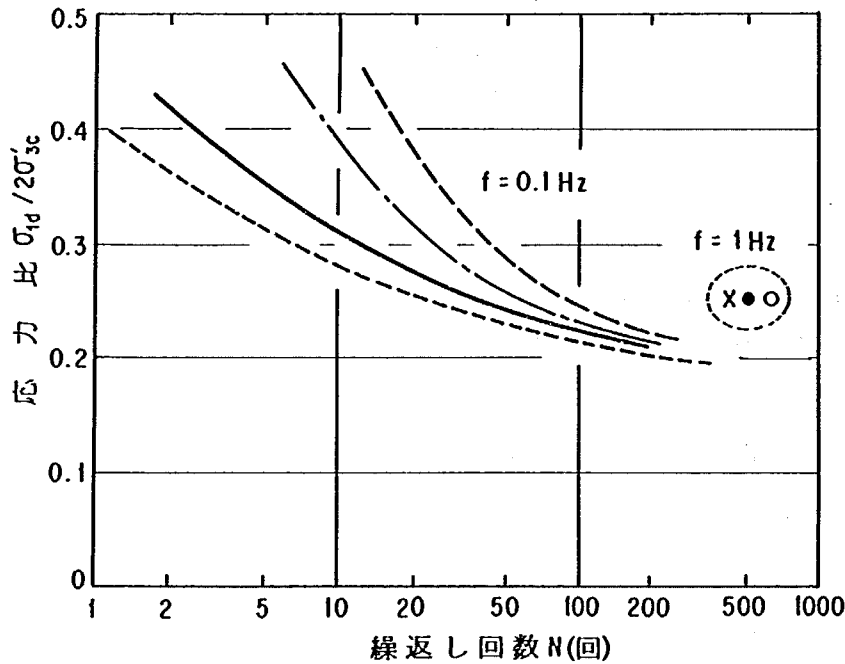


図-3.13 载荷周波数と動的強度

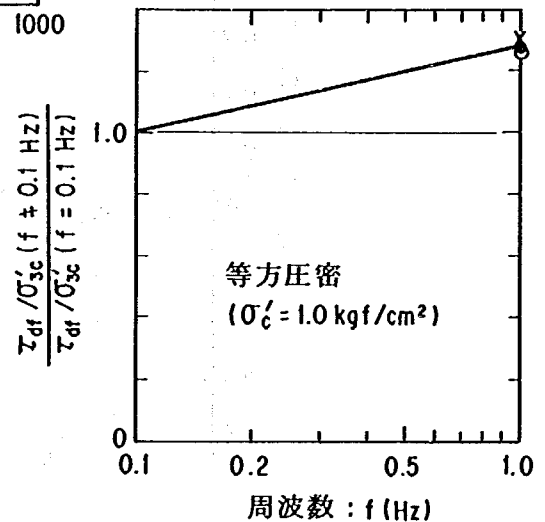


図-3.14 動的強度に及ぼす周波数の影響

## 4. 模型振動実験

### 4.1 実験概要

昭和58年度に、粘土地盤上の堤防の地震時変形・破壊挙動を把握すること、および、地震時安定解析手法の適用性を検証するための実験データを得ること、の2点を目的として2ケースの模型振動実験を実施した。<sup>3)</sup>

昭和59年度は、粘土地盤上の堤防に対する耐震対策工法の効果を実験的に検証することを目的として、対策工のない模型1ケース、対策工を施した模型3ケース、計4ケースについて模型振動実験を実施した。<sup>4)</sup>

表-4.1に実験ケース一覧表を示す。

表-4.1 模型振動実験ケース一覧表

| 実験ケース  | 実施日        | 実験目的         | 内 容   | 備 考             |
|--------|------------|--------------|-------|-----------------|
| 模型-1   | S.59. 2.27 | 破壊挙動の<br>解明  | 無 対 策 | 模型-1の<br>やり直し実験 |
| " - 1' | S.59. 3. 1 |              | "     |                 |
| " - 2  | S.59. 3. 5 |              | "     |                 |
| " - 3  | S.59. 9.28 | 対策工の<br>効果確認 | "     |                 |
| " - 4  | S.59.10. 5 |              | 押え盛土  |                 |
| " - 5  | S.60. 1.18 |              | "     |                 |
| " - 6  | S.60. 1.25 |              | 銅 矢 板 |                 |

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 実験装置

##### (1) 振動台

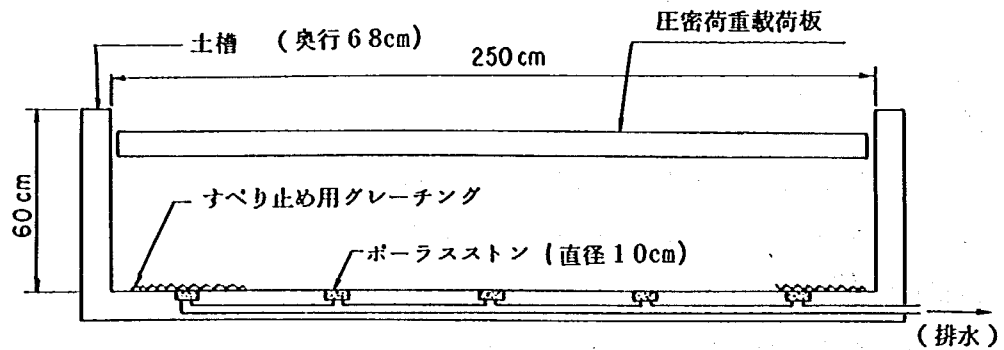
振動台は、土木研究所ダム耐震実験施設内の4m×4mの振動台を用いた。詳細については文献5)を参照されたい。

##### (2) 土 槽

内寸幅250cm、高さ60cm、奥行68cmの鋼製土槽2個を製作し、実験に用いた。その模式図を図-4.1に示す。自重は約1.5tである。

この土槽を4方の側壁が取り外すことができるようになっており、模型の解体時に地盤内の変形状況を観察することができる。

また、粘土地盤をこの土槽内で圧密して作成するため、底面には10個の排水用ポーラストン(直径10cm)を配置しており、パイプで側壁下部へ導いている。また、土槽底面には、振動実験時に粘土と土槽の間にすべりが生じないように、全面にわたってグレーチングを溶接している。



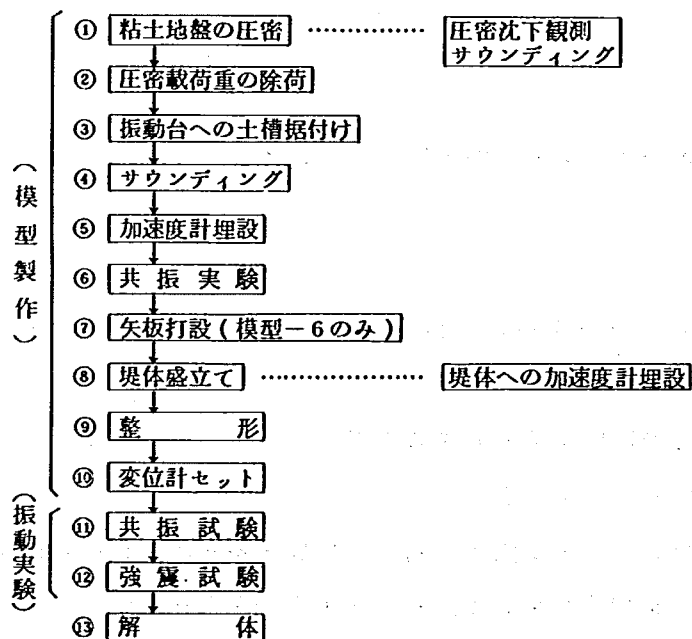
図－ 4.1 実験土槽模式図

なお、土槽の寸法を決定するに当っては、①模型粘土地盤が2～3か月の間に一次圧密を終了することのできる程度の厚さであること、②盛土の高さは最低20～30 cmでかつのり勾配は1：2を標準とし、それに対して土槽の長さは盛土敷幅の3倍程度にとること、③振動実験時の模型の2次元的な変形に対する長手方向の側壁の摩擦（拘束）の影響の度合をできるだけ少なくするために、土槽の奥行は粘土地盤厚さの少くとも2倍以上にすること、等の諸条件を考慮した。

また、図－ 4.1 に示すように、この土槽は圧密荷重載荷板を兼ね備えている。これは鉄板をH型鋼で補剛したものであり、載荷重に対するたわみが大きくならないように設計した。鉄板には圧密排水用に小孔を多数穿っている。

#### 4.2.2 実験手順

模型振動実験は概略図－ 4.2 に示す手順に従い実施した。



図－ 4.2 模型振動実験の手順

#### 4.2.3 実験模型

##### (1) 模型の形状寸法

模型の形状寸法を図-4.3に示す。

地盤の厚さは30cmを目標にして作った。盛土は天端幅20cmで、盛土高さは昭和58年度実施の(模型-1, 2)で30cm, 昭和59年度実施の(模型-3~6)で20cmである。

模型-1, 2についても20cmの予定であったが、模型-1で盛土高20cmとして振動実験を行ったものの、地盤強度が高すぎて変形が小さ過ぎたため、盛土高を30cmにかさ上げして、その翌日に再実験を行った。模型-2についても模型-1とほぼ同一の地盤強度であるため、盛土高さを30cmとしたものである。

したがって、模型-1は2回の振動実験を行っており、再実験の方の地盤はそのような加振履歴を受けたものであることに留意しなければならない。

模型-4, 5は片側に押え盛土を設けたものであり、盛土の幅を30cm, 50cmとしている。

模型-6は控え式鋼矢板を両のり尻に打設したものである。鋼矢板は底部まで到達させている。控え矢板の位置、長さは実状を考慮して決めた。

##### (2) 模型材料

地盤には3.1に述べた粘土試料を用いた。

一方、堤体には、直径2mmの鉛散弾(比重 $G_s=11.3$ )と上述の粘土を混合したものを用いた。これは次のような理由による。

(昭和58年度実施)

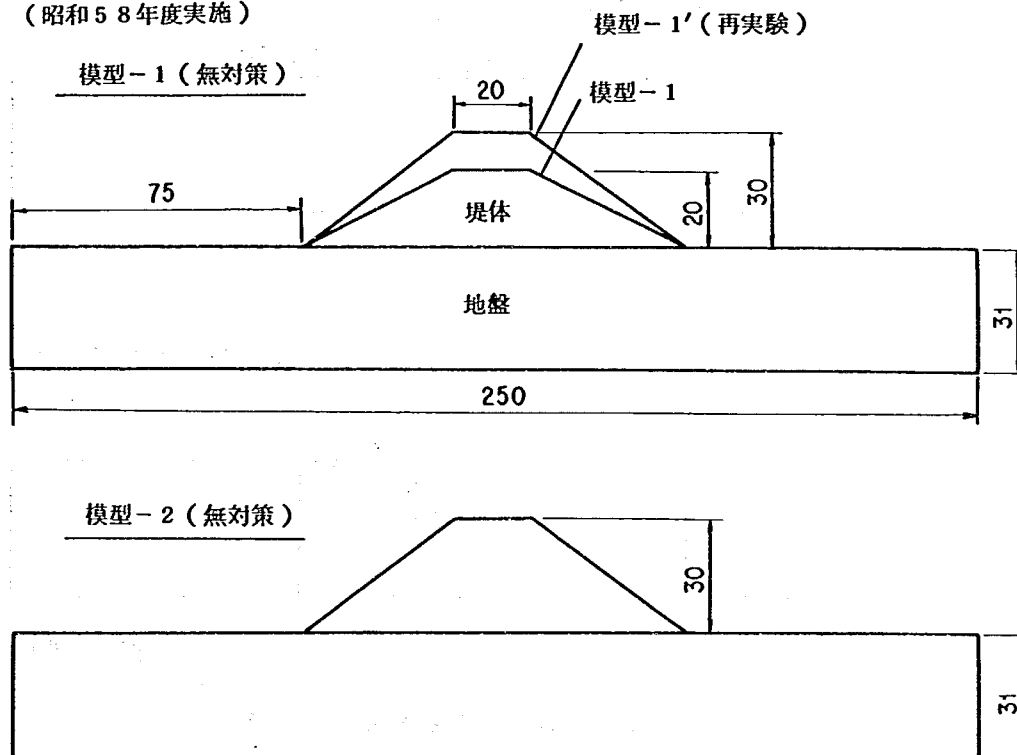
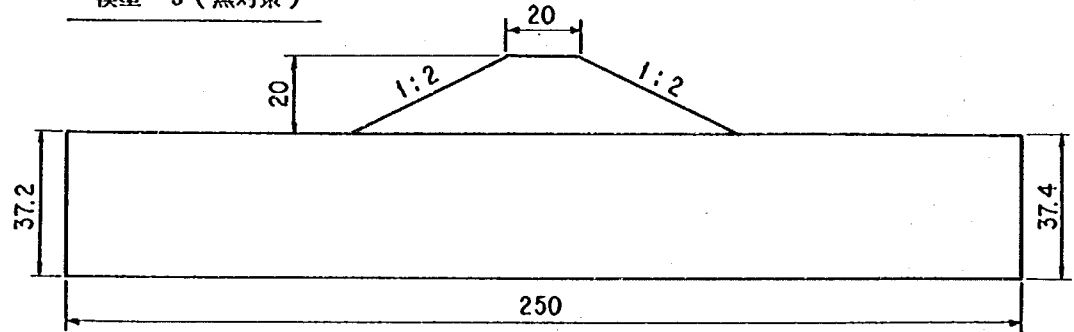


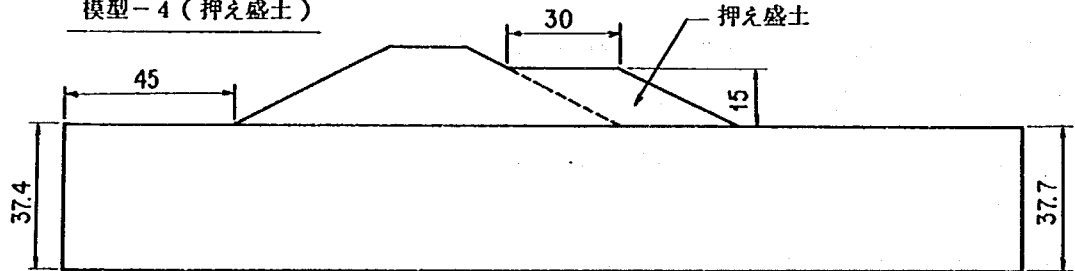
図-4.3 模型の形状寸法

(昭和59年度実施)

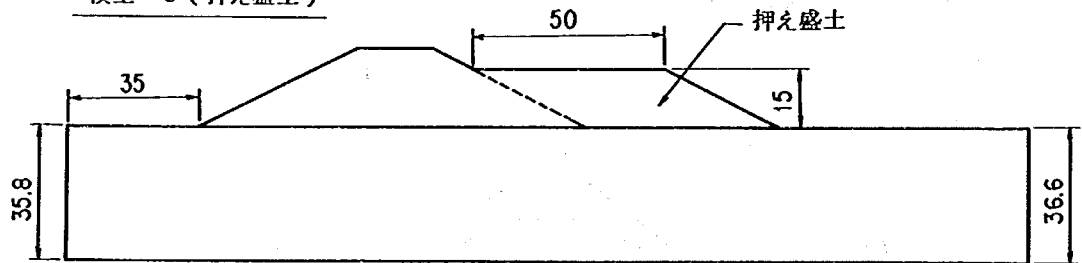
模型-3 (無対策)



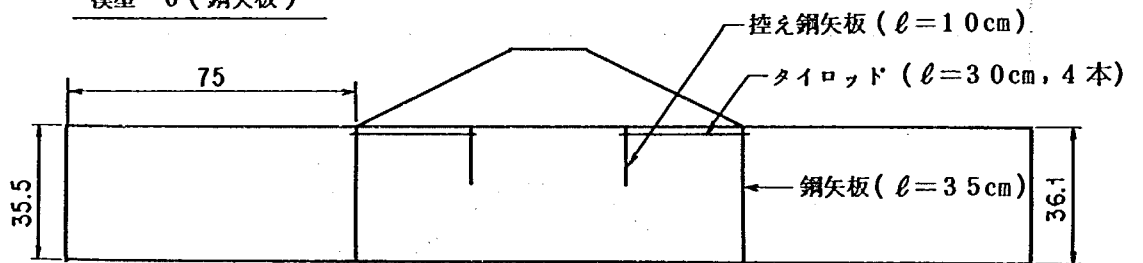
模型-4 (押え盛土)



模型-5 (押え盛土)



模型-6 (鋼矢板)



(単位: cm)

図-4.3 模型の形状寸法(つづき)

すなわち、本実験は地震時安定解析手法の適用性を検証するための実証データを得ること、および一連の耐震対策工法の効果比較を行うことの2つを目的としており、そのためには模型の品質（物理・力学特性）を十分な精度で管理・把握することが必要である。特に、地盤のせん断強度は正確に測定できなければならない。

しかるに、高さ20 cm程度の堤体模型を普通の土質材料を用いて築造した場合に、この盛土が数百ガルの加振で変形破壊を生じさせるように仮定して、震度法円弧すべり計算により地盤の有すべきせん断強度を逆算して求めると、概略 $0.05 \sim 0.1 \text{ tf/m}^2$ 程度となる。

ところが、このオーダーのせん断強度を有するような粘土地盤を作成し、かつ正確に測定することは、経験上および測定技術上、非常に困難であると考えられる。

この問題を解決するためには、地盤のせん断強度を少なくとも $0.2 \text{ tf/m}^2$ 程度以上にすることが必要と判断し、この条件の下で堤体の有すべき密度を上述と同様の方法により逆算して求めると、約 $6 \text{ g/cm}^3$ 以上必要であるという結果が得られた。

したがって、このことを達成するためにはできるだけ比重の大きい金属粒を使用せざるを得ないという結論に達し、比重、材料単価等を勘案して、鉛粒を使用することとした。ただし、粒径についてはできるだけ小さい方が良く考え、市販されている鉛粒の中では最も細かい部類に属する直径2 mmの鉛散弾（散弾銃に用いられる。）とした。

一方、この材料は粒径が均一で、表面が滑らかであり、見かけ上の粘着力は全くなくさらさらしており、これをそのまま盛り立てて堤体を作ると、小さな加速度で容易に壊れることが予想された。このことを解消するためには粘着力を持たせることが必要であり、粘土を混合して用いることとした。この材料に必要な粘着力を斜面の地震時安定性に関するつりあい式を用いて概略評価したところ、 $1 \text{ tf/m}^2$ 程度以上という結果が得られた。

この結果を満足するような堤体材料の配合条件を、鉛散弾と粘土の質量配合比、粘土の含水比などをいくつか変えて一軸試験により事前検討した結果に基づき、堤体材料の作成法を最終的に決定した。

以上が、堤体材料の選定理由である。

つぎに、模型-6に用いた鋼矢板およびタイロッドの模型材料について述べる。

鋼矢板には、図-4.4に示す断面性状を有する波型鉄板を用いた。また、タイロッドには、直径約1 mmのスチールワイヤーを用いた。

それらの選定理由を以下に述べる。

まず、鋼矢板模型材料の選定に当っては、たわみ性に関する相似を考慮した。すなわち、実物と模型の鋼矢板の全長に対する最大たわみ量の比ができるだけ等しくなるようにした。

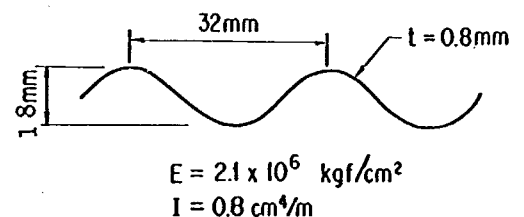


図-4.4 鋼矢板模型材料の断面性状

盛土の高さ、密度を $H$ 、 $p$ ；矢板の長さ、ヤン

グ率，断面 2 次モーメントをそれぞれ  $\ell$ ， $E$ ， $I$ ；矢板の最大たわみ量を  $\delta$  とする。

また，実物，模型をサフィックス  $p$ ， $m$  で区別することとする。

ここで，実物の諸量を次のように想定する。

|               |                                            |
|---------------|--------------------------------------------|
| 盛土の高さ         | : $H_p = 5 \text{ m}$                      |
| " 密度          | : $\rho_p = 1.7 \text{ g/cm}^3$            |
| 矢板の長さ         | : $\ell_p = 1.5 \text{ m}$                 |
| " ヤング率        | : $E_p = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| " 断面 2 次モーメント | : $I_p = 10,600 \text{ cm}^4/\text{m}$     |
| " 最大たわみ量      | : $\delta_p$                               |

相似条件は次式で与えられる。

$$\frac{\delta_p}{\ell_p} = \frac{\delta_m}{\ell_m} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

最大たわみ量  $\delta$  は次のような特性を有すると考える。

$$\delta \sim \frac{\rho \cdot H \cdot \ell^3}{EI} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

これより

$$EI \sim \frac{\rho \cdot H \cdot \ell^3}{\delta} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.1) と (4.3) より次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{(EI)_m}{(EI)_p} &= \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \frac{H_m}{H_p} \cdot \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)^3 \cdot \frac{\delta_p}{\delta_m} \\ &= \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \frac{H_m}{H_p} \cdot \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)^2 \\ &= \frac{7}{1.7} \times \frac{0.2}{5} \times \left(\frac{0.35}{1.5}\right)^2 \\ &\approx 9 \times 10^{-5} \quad \dots\dots\dots (4.4) \end{aligned}$$

(ただし， $\rho_m$ ， $H_m$ ， $\ell_m$  は模型の実情に合わせた値をとっている。)

したがって，模型矢板材の目標とする断面性能が次のように得られる。

$$\begin{aligned} (EI)_m &= 9 \times 10^{-5} \times (EI)_p \\ &= 9 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^6 \times 10,600 \\ &\approx 2 \times 10^6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^4/\text{m} \quad \dots\dots\dots (4.5) \end{aligned}$$

つぎに，模型材料として，市販されている鉄および数種の合成樹脂製の波形板を式 (4.5) の結果に基づいて比較検討したところ，合成樹脂材は鉄に比べてヤング率が約 2 けた低いため，

波高が数cmの大きさになり、模型のスケールに比べて大き過ぎるため、使用しないこととした。そして、波形鉄板の中から式(4.5)の値に近い材料を選んだ結果、図-4.4に示す寸法の波形鉄板を用いることとした。

この鉄板の断面性能は次式の通りであり、式(4.5)の目標値の約4倍である。

$$(EI)_m = 2.1 \times 10^5 \times 0.25 \\ \Rightarrow 5 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2 / \text{m} \dots\dots\dots (4.6)$$

一方、タイロッドは、左右それぞれ4本ずつ用いることとしたが、1本に作用する引張力はせいぜい数10kgfであろうと推定される。そして、タイロッドの曲げ剛性はできるだけ小さく、想定される引張力による伸びひずみも小さい方がよいと考え、直径約2mmのワイヤーを用いることとした。

腹起しには、幅15mm×高さ30mmの溝型アルミ材を用いた。この曲げ剛性は十分に大きいと考えられる。

### (3) 模型の製作

#### 1) 粘土地盤

粘土地盤は、(2)に求めたように、最終せん断強度が0.3tf/m<sup>2</sup>程度となるような圧密荷重で正規圧密させることを目標に製作した。地盤は実験土槽内で圧密させることとした。

はじめに、図-4.2に示した土槽の底面に圧密排水用の透水性シート(ジオテキスタイルの一種)およびロ紙を敷設し、土槽側壁には圧密中および振動実験時の壁面摩擦を軽減させるためにシリコングリースを全面にわたって塗布した。

一方、3.1に示した粘土試料を、練返しが可能な範囲でできるだけ低目の含水比(80~90%程度)になるよう水を加えてこれをミキサーで1バッチ(約50ℓ)当たり10分間程度攪拌してスラリー状にし、順次土槽に投入した。

投入した粘土スラリーの高さが、目標でき上り地盤厚さと予想圧密沈下量の和に等しくなったところで投入を終了し、再びこれをハンドミキサーで十分に攪拌して土槽内の含水比分布が一様になるようにした。

この状態で粘土の初期含水比を測定した。

これを1~2日間放置して自重圧密をさせた後、表面にロ紙、透水性シートおよび圧密荷重載荷板をのせ、図-4.5のような状態で圧密を開始した。

ただ、このような圧密方式は、載荷板と土槽側壁との間の摩擦抵抗およびそこからの粘土の押し出し、圧密荷重の偏心による転倒の恐れなどの問題があるが、前者については透水性シートを適当な厚さになるよう折り返すことで比較的楽に解決できた。後者については、模型-1の実験で転倒させるという失敗を犯したが、それ以後は沈下のアンバランスを動態観測しつつカウンターウェイトで調整することにより解決できた。

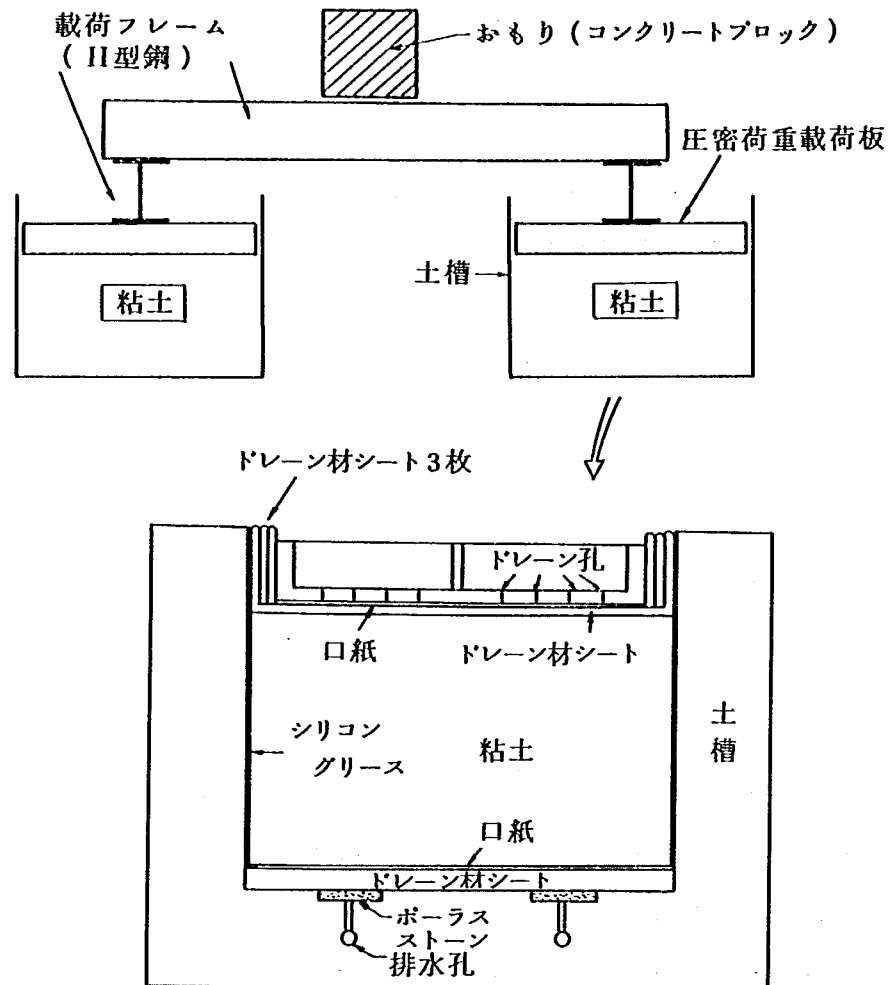


図-4.5 圧密の方法

圧密は、載荷板4隅の沈下量、粘土地盤内4点の間隙水圧の計測および途中数回のベーンせん断試験・コーン貫入試験によるせん断強度発現のチェックを行うことにより管理した。圧密期間はいずれも約3か月であったが、それでもなお1次圧密終了には至らなかった。

さらに、模型-1, 2では圧密促進のために、圧密1か月時点でベーパードレーンを打設した。

圧密観測の結果については4.3において述べる。

## 2) 堤 体

地盤の圧密期間が約3か月を経過した後、圧密載荷重を除荷し、堤体の盛り立てを行った。盛り立ては、(2)に述べた堤体材料を敷き均して小木片で適度に突き固めながら連続して行った。なお、盛り立て中には、堤体周辺部の地盤表面の鉛直変位をダイヤルゲージ式変位計で計測して異常な変形挙動がないことを確認した。

また、堤体材料の重量を事前に計量し、これを堤体の平均密度の算定に用いた。

堤体を所定の形状に盛り立てた後、表面の整形を行い、模型全体にスプレーで格子線を描くとともに、変位計測用の白色ピンを刺した。

最後に、模型表面に、振動実験中の鉛直変位を計測するためのダイヤルゲージ式変位計を取り付けた。

#### 4.2.4 共振実験

模型の非破壊レベル（低ひずみ領域）での振動特性を調べるために共振実験を行った。

共振実験は堤体盛り立ての前後（図-4.2の⑥および⑩）に実施した。

加振条件は一定の低加速度（5ないし10 gal）で、振動数は5～30ないし50 Hz間を1 Hz刻みに上げていくスイープ方式である。

ただし、これは振動台駆動部とオンラインで連絡しているミニコン制御装置を用いて自動制御方式で実施したが、システムの制御能力の限界のため、加速度レベルは設定値の1/2～2倍程度の幅で変動している。

なお、この実験で模型に生ずるせん断ひずみのレベルは、低振動数域および共振時において大きい、その最大値は大略 $10^{-3}$ 程度と考えられる。

実験により得られた加速度記録は備え付けのデータ自動処理システムで処理し、共振曲線、位相差曲線を得た。

#### 4.2.5 強震実験

模型を振動破壊させる強震実験を行った。

加振条件としては、図-4.6に示すように、加速度レベル一定の5 Hz、5秒間の正弦波加速度加振を、加速度レベルを段階的に上げて繰返し行う方式をとった。

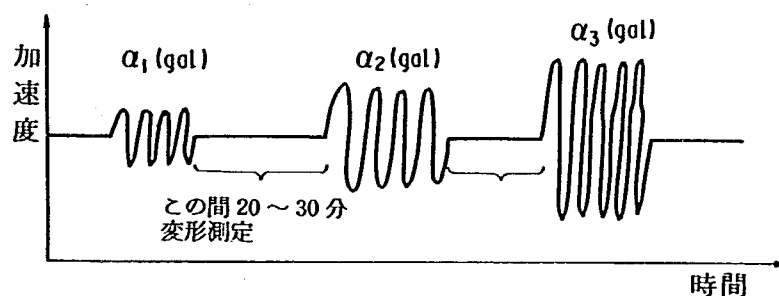


図-4.6 強震実験の方法

加速度レベルは最初50 galとし、50 gal刻みに大きくしていった。

各加振段階の間合いは20～30分であり、この間に模型の変形の計測およびスケッチを行った。また、この間に模型は多少クリープ変形が進行しており、そのため変位、間隙水圧の記録を継続した。

加振条件の一覧を表-4.2に示す。

なお、上述の加振条件による振動実験方式は以下のような得失を有している。<sup>5)</sup>

すなわち、この実験方式によれば最初の加振においてのみ模型の初期条件の把握が可能であり、2回目以降の加振では模型はそれまでの加振の履歴を受けており、加振直前の模型の初期条件を

表-4.2 加振条件一覧表

| 加振種別  | 模型条件   | (公称)入力加速度 (gal) および実験日 |            |            |             |             |             |             | 備 考          |
|-------|--------|------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|       |        | 模型-1                   | 模型-1'      | 模型-2       | 模型-3        | 模型-4        | 模型-5        | 模型-6        |              |
| 共振実験  | 堤体盛立て前 | 10                     | 10         | 10         | 10          | 10          | 10          | 10          | 5 ~ 30,40 Hz |
| 共振実験  | 堤体盛立て後 | 10                     | 10         | 10         | 10          | 10          | 10          | 10          | #            |
| 強震実験  | #      | 50                     | 200        | 100        | 50          | 50          | 50          | 50          | 5 Hz , 5 sec |
|       |        | 100                    | 250        | 150        | 100         | 100         | 100         | 100         | #            |
|       |        | 150                    | 300        | 200        | 150         | 150         | 150         | 150         | #            |
|       |        | 200                    | 350        | 250        | 200         | 200         | 200         | 200         | #            |
|       |        | 250                    |            | 300        | 250         | 250         | 250         | 250         | #            |
|       |        | 300                    |            | 350        | 300         | 300         | 300         | 300         | #            |
|       |        | 350                    |            | 400        | 240         | 350         | 350         | 350         | #            |
|       |        | 400                    |            |            | 350         |             |             | 400         | #            |
|       |        | 500                    |            |            | 400         |             |             |             | #            |
| 実 験 日 |        | (1984.2.27)            | (1984.3.1) | (1984.3.5) | (1984.9.28) | (1984.10.5) | (1985.1.18) | (1985.1.25) |              |

求めるのは一般に困難である。

この方式とは対照的によく用いられるものとして、1回の加振のみで振動実験を遂行する方式がある。

両者を対比すると、後者は初期条件が明確であるが、想定する破壊程度を生じさせる加速度レベルの設定がむづかしい。反対に、前者は2回目以降の加振により得られる結果の解釈に多少の問題を有するものの、破壊加速度レベル、および加速度レベルと破壊程度のある程度知ることができるという利点を有している。

ここでは、そのような点を優先して前者の方式を用いることとした。

また、加振条件は次のように考えて決めた。

#### ① 加速度波形

入力地震動特性が異なると応答も変化する。また、不規則波を用いると、実験結果を一般化して解釈するのが困難である。一方、規則波は現実には生じ得ないものであるにも拘らず、不規則性という不確定要因が消去されているため、結果の解釈が比較的容易である。したがって、ここでは正弦波加速度を用いることとした。

#### ② 周波数

入力加速度レベルが等しくても、入力周波数が異なると、応答特性は変化する。

河川堤防の現地地震動観測によれば、堤防の加速度増幅度は周辺地盤に対して1を大きく上まわらないことがわかっている。このことを実験上再現するには、できるだけ模型の共振振動数から離れた周波数を採用すればよい。ところが、土構造物では、土の非線型特性により、加速度レベルの変化により周波数特性が変化し、一般に図-4.7のようになる。

したがって、加振周波数を模型の1次共振点より大きくとると、2次以上の共振点は比較的

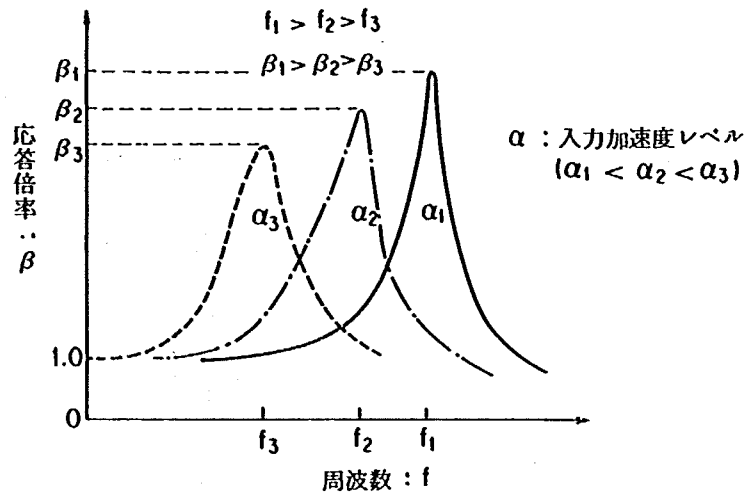


図-4.7 加速度レベルと応答特性の変化

接近して存在するため、加速度レベルが大きくなるとともに模型の共振点に近付く可能性が高くなる。そこで、このような事を避けるため、共振試験における1次共振点よりはるかに低い周波数である5 Hzを採用することとした。

なお、このような条件での模型の応答特性は、各点が同位相に近い、すなわち剛体的である。

### ③ 波 数

不規則な地震動の効果を、それと等価な規則的な地震動の効果に換算するときに、等価繰返し回数として  $N_{eq} = 5 \sim 20$  がよく用いられるが、ここではそのことを考慮して  $N = 25$  とした。

#### 4.2.6 計 測

本実験では、模型の品質管理、圧密・堤体盛立て時の動態観測および振動実験時の応答挙動の観測に関わる各種計測を行った。

計測項目は次の通りである。

(模型の品質管理)

○含水比,    ○せん断強度,    ○S波速度

(動態観測)

○沈下,    ○間隙水圧

(振動実験)

○加速度,    ○変位,    ○間隙水圧    等

#### (i) 含水比

粘土地盤の圧密前平均含水比および振動実験終了後の深さ方向含水比分布を測定した。圧密前においては、土槽内で粘土スラリーを十分に攪拌した状態で3～5点から採取して測定し、その平均値を求めた。また、振動実験後に模型を解体する時点で3か所で深さ方向に5 cmピッ

チで粘土を採取してそれぞれ測定した。

## (2) せん断強度

圧密期間中、圧密終了時（振動実験直前）、および振動実験後の粘土地盤の原位置せん断強度を求めた。試験はベーンせん断試験およびコーン貫入試験を行った。試験装置を図-4.8に示す。

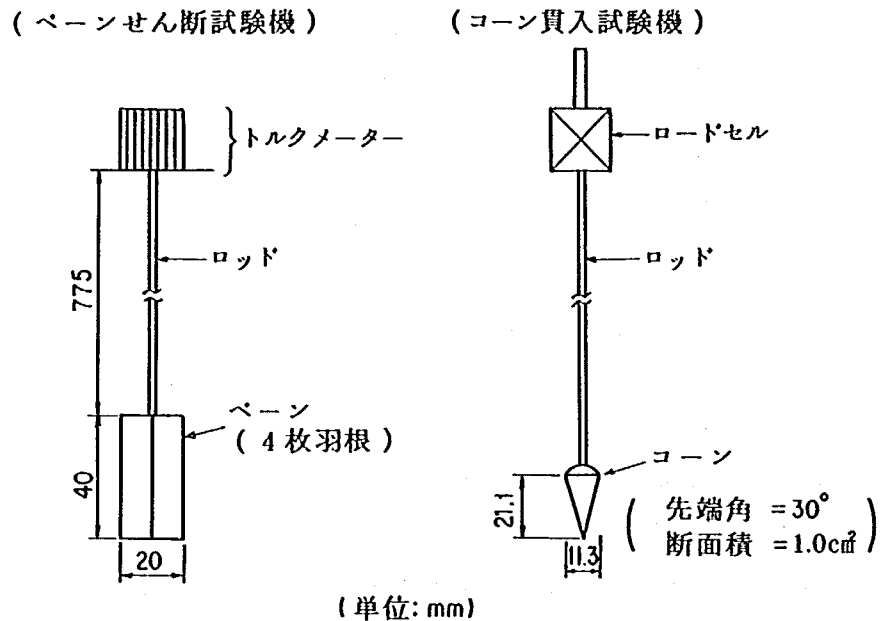


図-4.8 サウンディング装置

また、これらの試験値よりせん断強度を得るために別途較正試験を実施した。それは、直径約30cmの圧密箱2個を用いてそれぞれ異なる圧密圧の下で一次圧密した粘土層で上記2つの試験を行い、同時にその粘土の一軸圧縮試験を行うことにより一軸強度 $q_u$ との相関を調べた。

その結果を図-4.9に示す。これより、ベーンせん断強度、コーン貫入抵抗、一軸強度の間には比例関係が成立することがわかる。

したがって、粘土地盤のせん断強度はこれより得られた換算係数を用いて得た。

ベーンせん断試験は深さ方向に6cmピッチで実施した。せん断速度は、ピーク抵抗に至るまでの時間が約30～60秒程度である。

コーン貫入試験は、貫入速度を10cm/分程度とし、抵抗値を2cm毎に読み取った。

試験位置は図-4.10に示す。

なお、模型粘土地盤は、サンプリング・室内せん断試験を実施するには弱すぎるので、これを行わなかった。

## (3) S波速度

模型のせん断剛性を調べるために、堤体盛り立て前後および振動実験後にS波検層を実施した。これは加速度計埋設位置直上部に小木片(10cm×5cm×2cm程度)を手で軽く押えて木づちで水平に軽くたたき、加速度計の応答をビシグラフで記録するという方法によった。ビシ

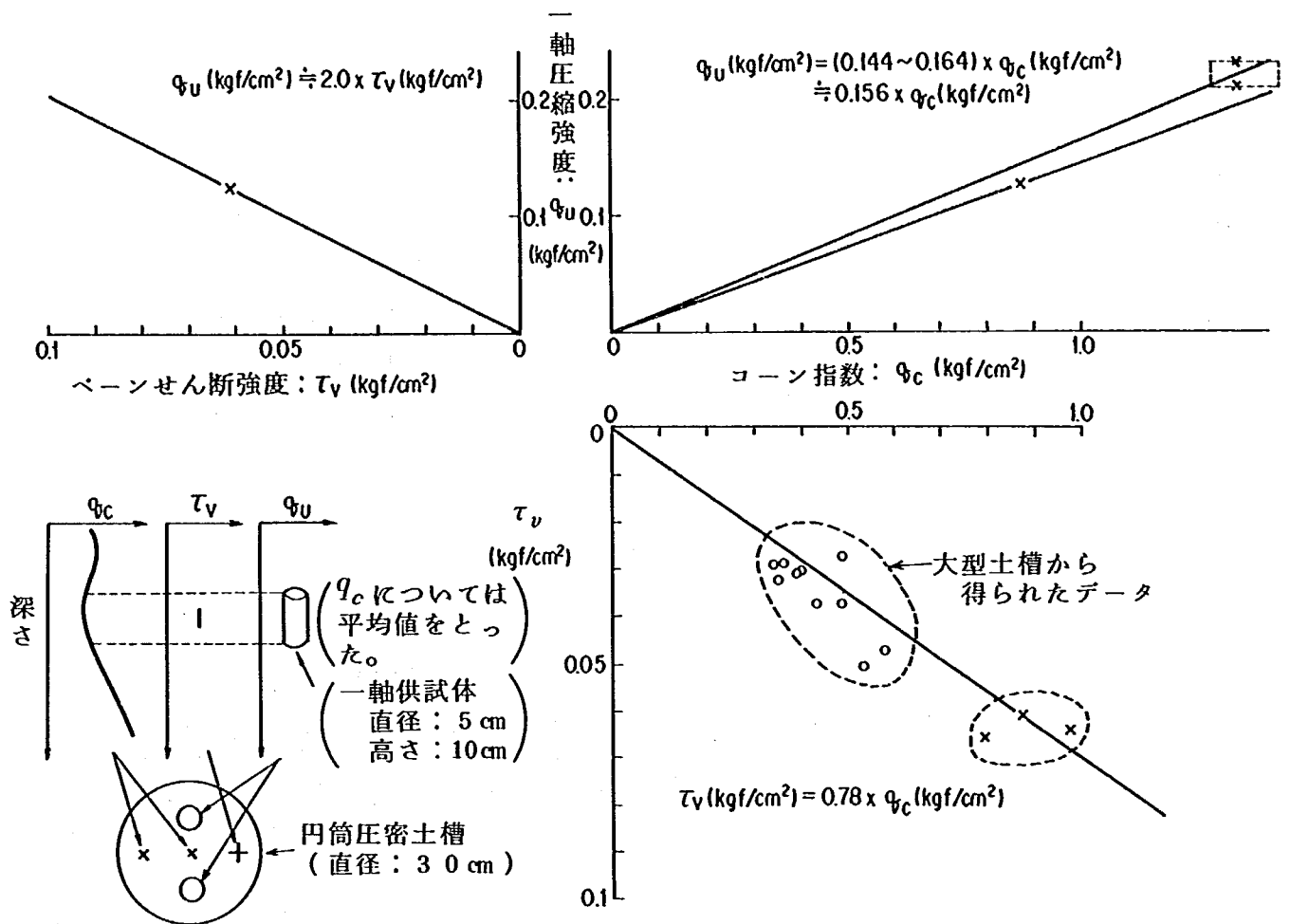


図-4.9 サウンディング装置の較正試験結果

グラフの紙送り速度は 1 m/s とし、この記録より伝達時間を読み取った。

#### (4) 圧密沈下，間隙水圧

圧密管理のために、圧密沈下量・圧密時間隙水圧を計測した。圧密沈下量の測定には土槽の 4 隅でダイヤルゲージ式変位計を、間隙水圧の測定には粘土投入時に埋設した 4 個の間隙水圧計を用いた。なお、間隙水圧は大気圧の変動に反応するので同時に大気圧も測定し、補正した。測定の頻度は数日に 1 回程度である。

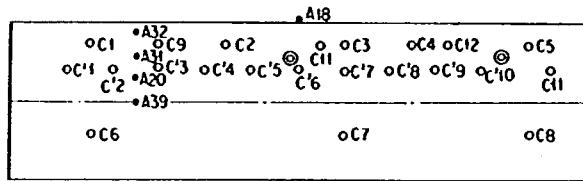
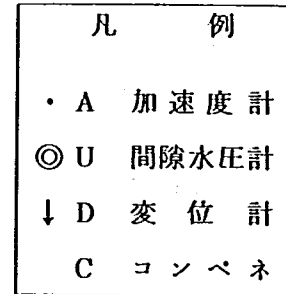
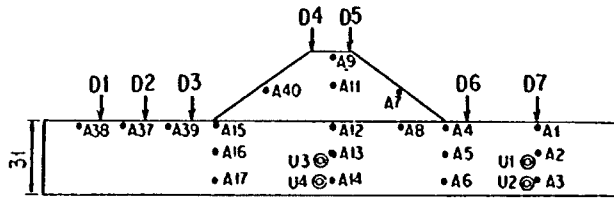
#### (5) 加速度，変位，間隙水圧

振動実験時の加速度，変位，間隙水圧を測定した。

計器設置位置を図-4.10 に示す。

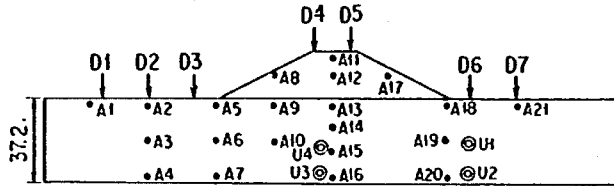
記録はすべてデジタルデータレコーダに収録するとともに、10 成分程度はペンレコーダでモニターした。データレコーダに収録した記録は後日、大型電算システムで図化出力した。表-4.3 に計器一覧を示す。

( 模型 - 1, 2 )

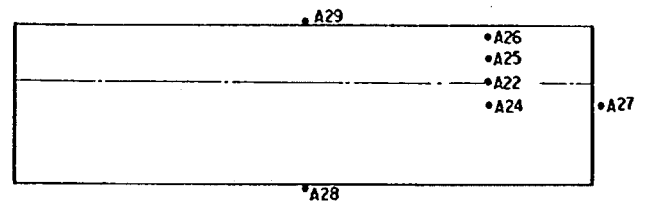
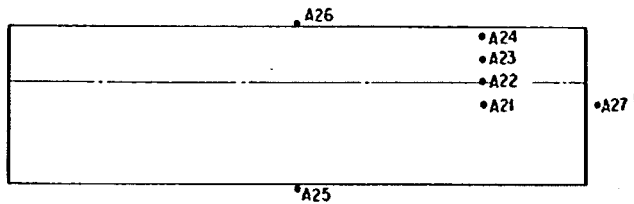
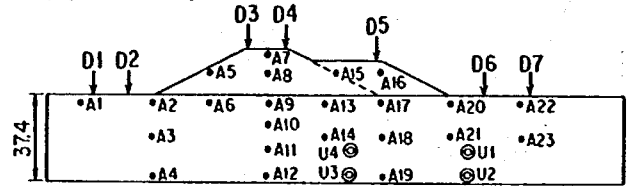


( コンベネについては以下同様 )

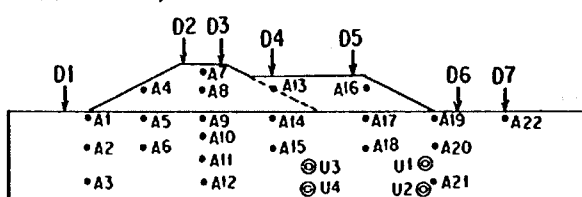
( 模型 - 3 )



( 模型 - 4 )



( 模型 - 5 )



( 模型 - 6 )

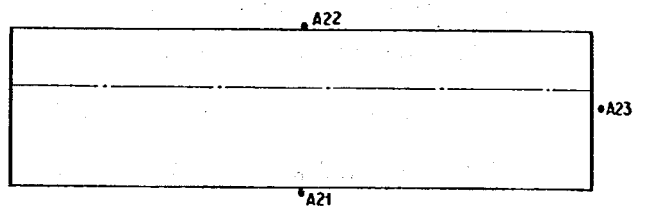
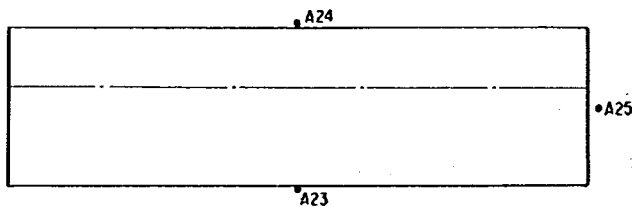
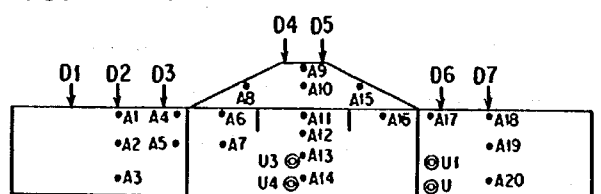


図 - 4.1 0 計測器の配置およびサウンディング位置図

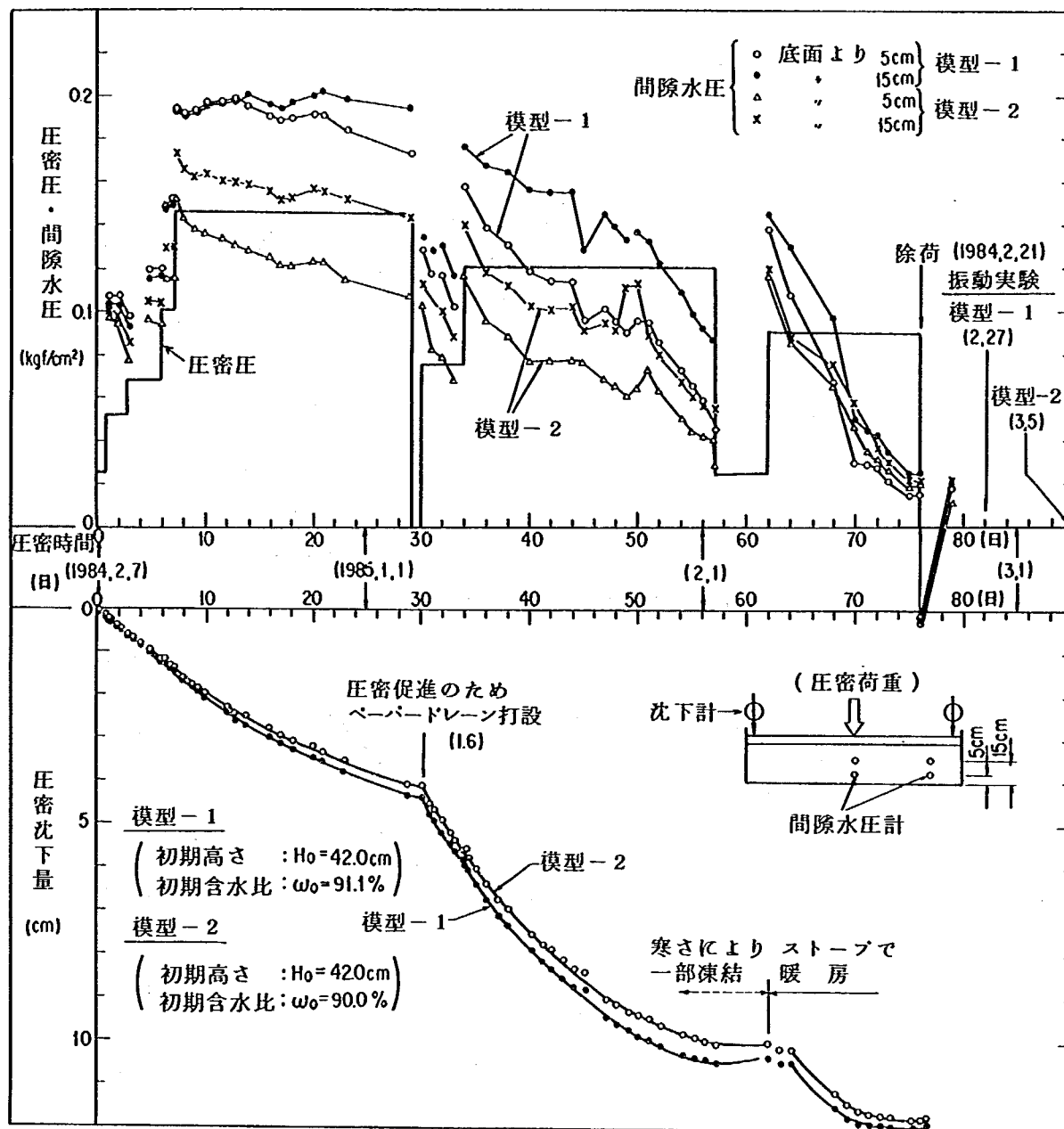


図-4.1 1(1) 圧密沈下観測結果 (模型-1.2)

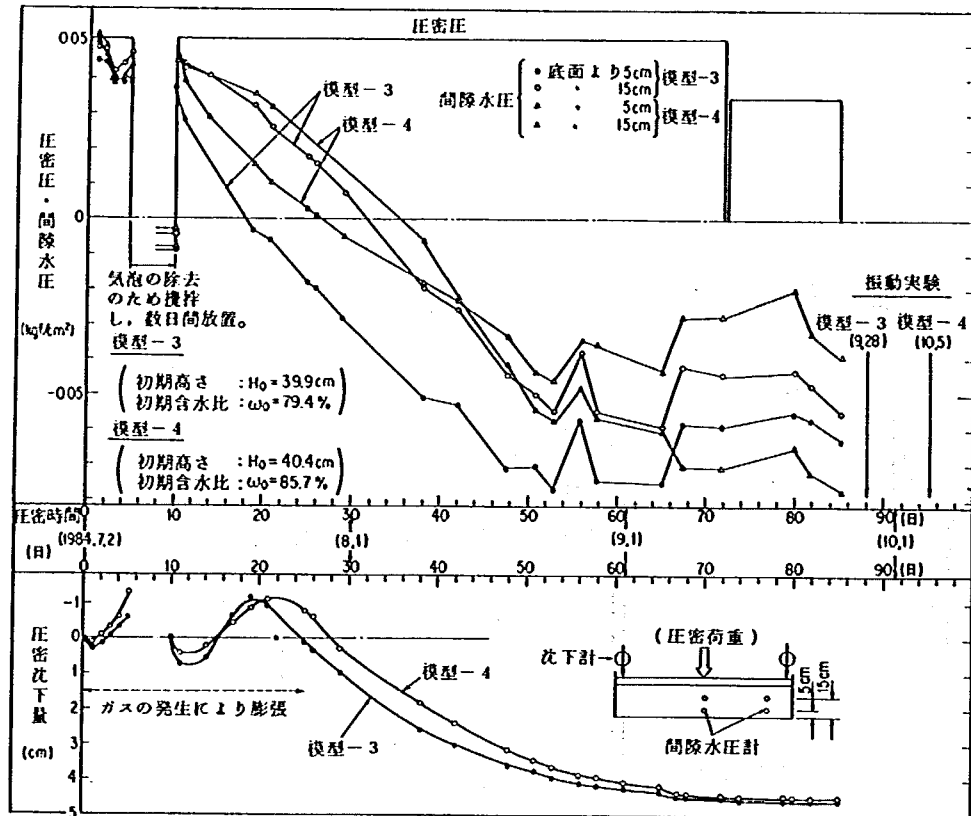


図-4.1 1 (2) 圧密沈下観測結果 (模型-3, 4)

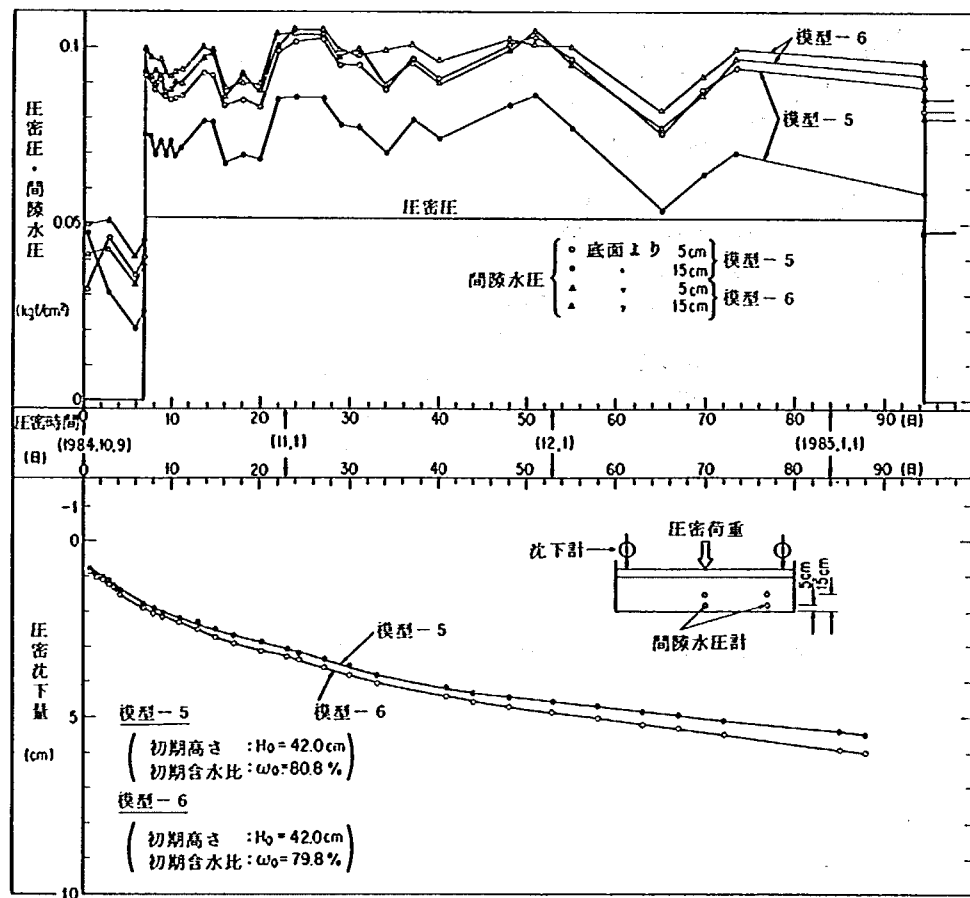


図-4.1 1 (3) 圧密沈下観測結果 (模型-5, 6)

表-4.3 計測器一覧

| 計測器   | 型式      | 規格      | 容量                              | 製作所  | 使用最大成分数 |
|-------|---------|---------|---------------------------------|------|---------|
| 変位計   | ひずみゲージ式 |         | 50mm                            | 東京測器 |         |
| 加速度計  | "       | AS-GA   | 1, 2G                           | 共和電業 |         |
| 間隙水圧計 | "       | BP-KCS4 | 0.5, 1.0<br>kgf/cm <sup>2</sup> | 共和電業 |         |

## 4.3 実験結果

## 4.3.1 圧密沈下の記録

表-4.4に圧密前後の粘土地盤の諸元を示す。また、図-4.11には各々の地盤の圧密沈下観測記録を示す。同図には、圧密沈下量、圧密圧および間隙水圧の経時変化を示している。圧密沈下量は土槽の4隅での測定値の平均である。間隙水圧は粘土投入時を0として、土槽底部から5, 15cmの高さに固定した各々2個の間隙水圧計の測定値の平均値を示している。なお、間隙水圧

表-4.4 圧密前後の粘土地盤の諸元

| 模 型 番 号 |        |                                  | 1     | 2     | 3      | 4      | 5     | 6     |
|---------|--------|----------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| 初期状態    | 1) 高さ  | $H_o$ (cm)                       | 42.0  | 42.0  | 39.9   | 40.4   | 42.0  | 42.0  |
|         | 2) 含水比 | $W_o$ (%)                        | 91.1  | 90.0  | 79.4   | 85.7   | 80.8  | 79.8  |
|         | 3) 密度  | $\rho_{to}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.49  | 1.49  | 1.54   | 1.51   | 1.53  | 1.54  |
|         | 4) 間隙比 | $e_o$                            | 2.45  | 2.42  | 2.13   | 2.30   | 2.17  | 2.14  |
| 圧密後     | 5) 高さ  | $H_c$ (cm)                       | 31.0  | 31.0  | 37.3   | 37.6   | 36.2  | 35.8  |
|         | 6) 含水比 | $W_c$ (%)                        | 54.0  | 56.0  | 60.8   | 63.8   | 63.2  | 62.1  |
|         | 7) 密度  | $\rho_{tc}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.69  | 1.67  | 1.64   | 1.62   | 1.63  | 1.63  |
|         | 8) 間隙比 | $e_c$                            | 1.45  | 1.50  | 1.63   | 1.71   | 1.70  | 1.67  |
|         | 9) 沈下量 | $\Delta H$ (cm)                  | 11.0  | 11.0  | 2.6(?) | 2.8(?) | 5.8   | 6.2   |
|         | 10)    | $e_c$                            | 1.544 | 1.522 | —      | —      | 1.732 | 1.679 |

注 1) 実測値(データ数: 4)

2) " ( " : 3~6)

3)  $S_r = 100\%$ と仮定し,  $\rho_{to} = (S_s + e) \cdot \gamma_w / (1 + e)$ により計算。(  $G_s = 2.686$  )

4) " ,  $e_o = G_s \cdot W$ により計算。(  $G_s = 2.686$  )

5) 実測値(データ数: 4)

6) " ( " : 18~21, 解体時に測定)

7) 3)に同じ。

8) 4)に同じ。

9)  $\Delta H = H_o - H_c$

10)  $e_c = e_o - \Delta e = e_o - (1 + e_o) \cdot \Delta H / H_o$ により計算

はその絶対値が間隙水圧計の容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  に比べて非常に小さく、大気圧および温度変化の影響を受けやすい。そこで、大気圧については気圧計の記録を用いて補正を行った。温度については、受感部での測定ができないため補正を行っていない。ちなみに、用いた間隙水圧計の温度変化に対する変動は  $+0.7\% \text{ F.S./}^\circ\text{C}$  である。

まず、図-4.11を全体を通してみると、沈下は比較的スムーズに進行しているが、間隙水圧の値は圧密圧以上の値や負の値を示したり、あるいは異常な変動（温度変化の影響かもしれない。）を示したりしていることがわかる。したがって、間隙水圧の測定値の絶対量については信頼できそうにない。

つぎに、(1)図で、圧密開始後30日目に、圧密促進のために、地盤に口紙で作ったペーパードレーンを打設（ $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ピッチ）した後、圧密が急速に進行していることがわかる。

(2)図では、圧密初期において膨張しているのが見られるが、これは粘土地盤内で好気性菌（と思われる。）の活動によりガスが発生したためである。したがって、ここではいったん除荷し、粘土を攪拌してガスをできるだけ除去するよう努めた。ちなみに、このような現象は気温  $20^\circ\text{C}$  以上でよく生じるとの事である。一方、間隙水圧は大きな負圧を示しているが、これもガスの発生の影響が大きいものと推定される。

(3)図では、やはり間隙水圧の値が異常であるが、その原因はよくわからない。

#### 4.3.2 最終圧密状態の評価

粘土地盤は1次圧密の終了に至っていない。

そこで、ここでは参考のために、最終状態における地盤の圧密度を調べてみる。

圧密度は仮に次式で求めることとする。

$$U = \frac{\delta_t}{\delta_o} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここに、 $U$  : 圧密度

$\delta_t$  : 時刻  $t_t$  における沈下量

$\delta_o$  : 最終（ $t = \infty$ における）沈下量

また、最終沈下量は次式で示される「双曲線法」<sup>7)</sup>によることとする。

$$\delta_t - \delta_o = \frac{t - t_o}{a + b(t - t_o)} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ここに、 $\delta_t$  : 時刻  $t$  における沈下量

$a, b$  : 定数

式(4.8)を図-4.11に示したデータに対して適用して定数  $a, b$  を求めた結果を図-4.12に示す。

表-4.5にはこれらの結果をまとめて圧密度を計算した結果を示す。

これより、模型粘土地盤の沈下量に基づく圧密度は約80%であることがわかる。

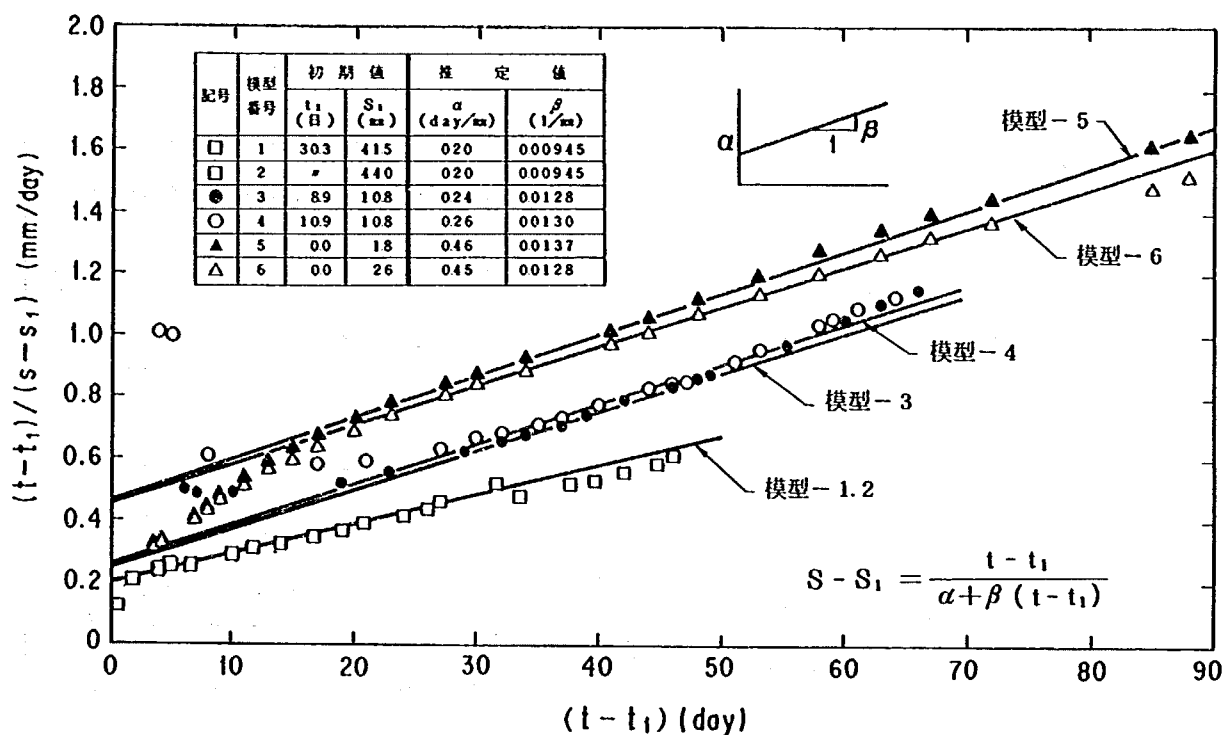


図-4.1.2 双曲線法による地盤の最終沈下量の評価

表-4.5 最終圧密度の評価

| 模型番号 | 初期状態   |        | 最終状態   |         | 最終予測<br>沈下量(cm) | 圧密度<br>(%) |
|------|--------|--------|--------|---------|-----------------|------------|
|      | 高さ(cm) | 含水比(%) | 高さ(cm) | 沈下量(cm) |                 |            |
| 模型-1 | 42.0   | 91.1   | 30.1   | 11.9    | 14.7            | 81         |
| " 2  | 42.0   | 90.0   | 30.3   | 11.7    | 14.9            | 79         |
| " 3  | 39.9   | 79.4   | —      | —       | 8.9             | —          |
| " 4  | 40.4   | 85.7   | —      | —       | 8.8             | —          |
| " 5  | 42.0   | 80.8   | 46.5   | 5.5     | 7.5             | 73         |
| " 6  | 42.0   | 79.8   | 45.9   | 6.1     | 8.1             | 75         |

### 4.3.3 堤体盛立て中の動態観測

堤体盛立て中の地盤の変化を観測した。その結果を図-4.1.3に示す。同図には、盛立て高、間隙水圧および鉛直変位を示しているが、いずれも盛立て直前の値を0としている。

同図より、地盤内の間隙水圧は盛立ての進行とともに上昇していること、盛土直下ほど上昇量が大きいことがわかる。また、間隙水圧の上昇量の最大値は、最大盛土圧(=最大盛土高×盛土の密度)の40～50%であることがわかる。一方、地盤は盛土直下で沈下を生じ、のり先で隆起しているのがわかる。これは軟弱地盤における盛土の場合と似ている。また、変位は盛立て終了後においても明らかに進行しているが、この間の間隙水圧の変動はほとんどないので、これは圧密沈下というよりも即時沈下に続いて起こるクリープ変形によるものと推定される。

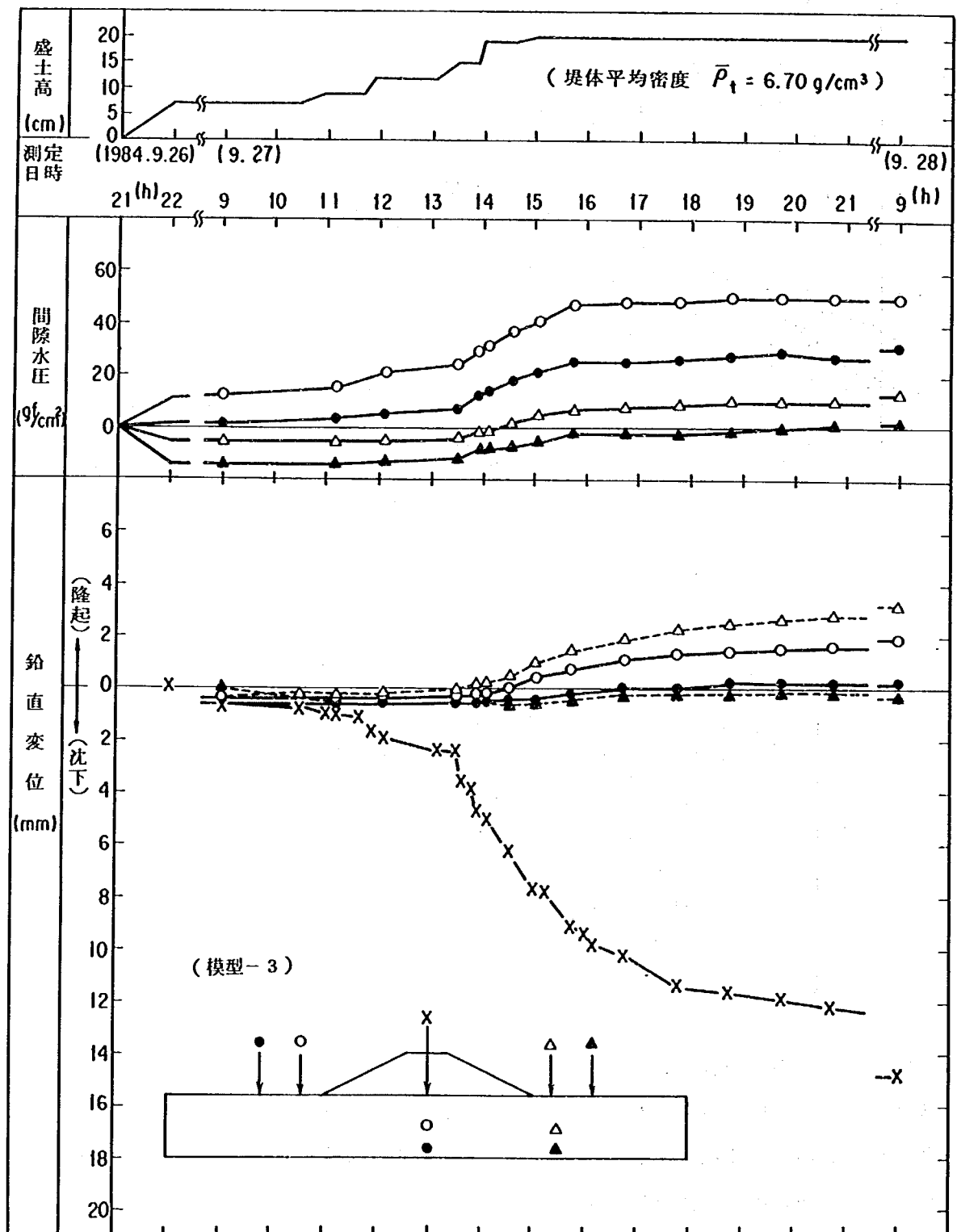


図-4.1 3(1) 堤体盛立て時の動態観測結果 (模型-3)

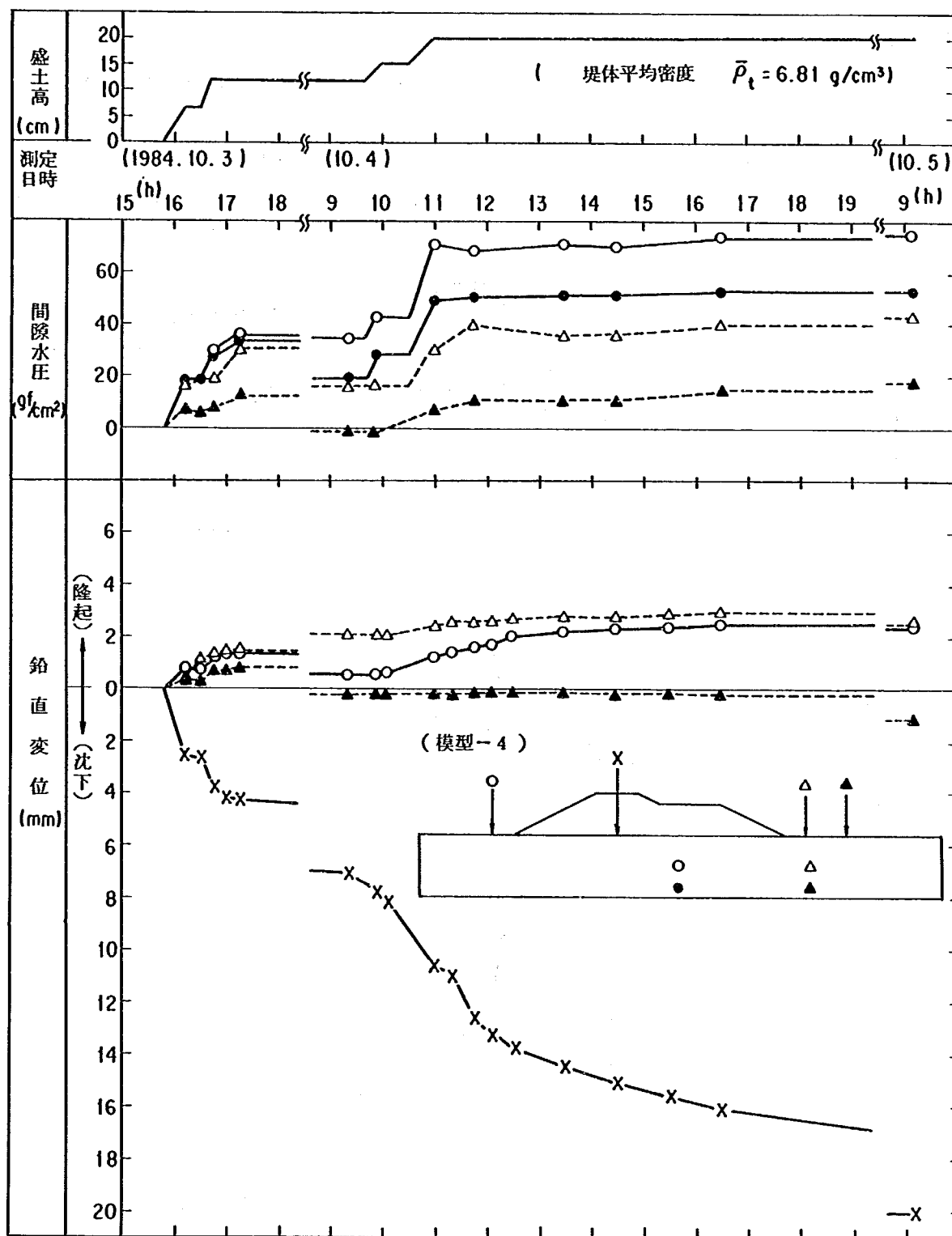


図-4.13(2) 堤体盛立て時の動態観測結果 (模型-4)

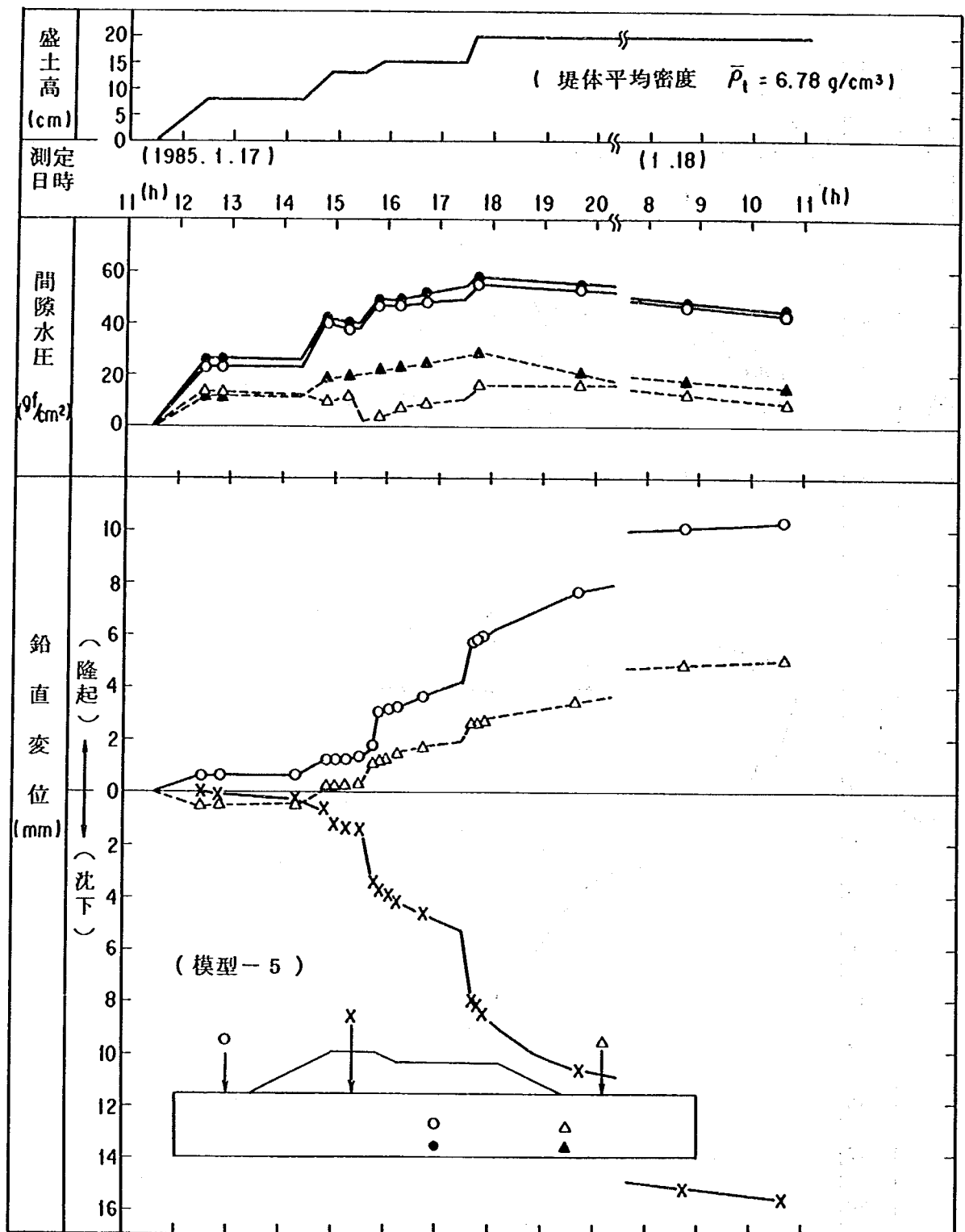


図-4.13(3) 堤体盛立て時の動態観測結果 (模型-5)

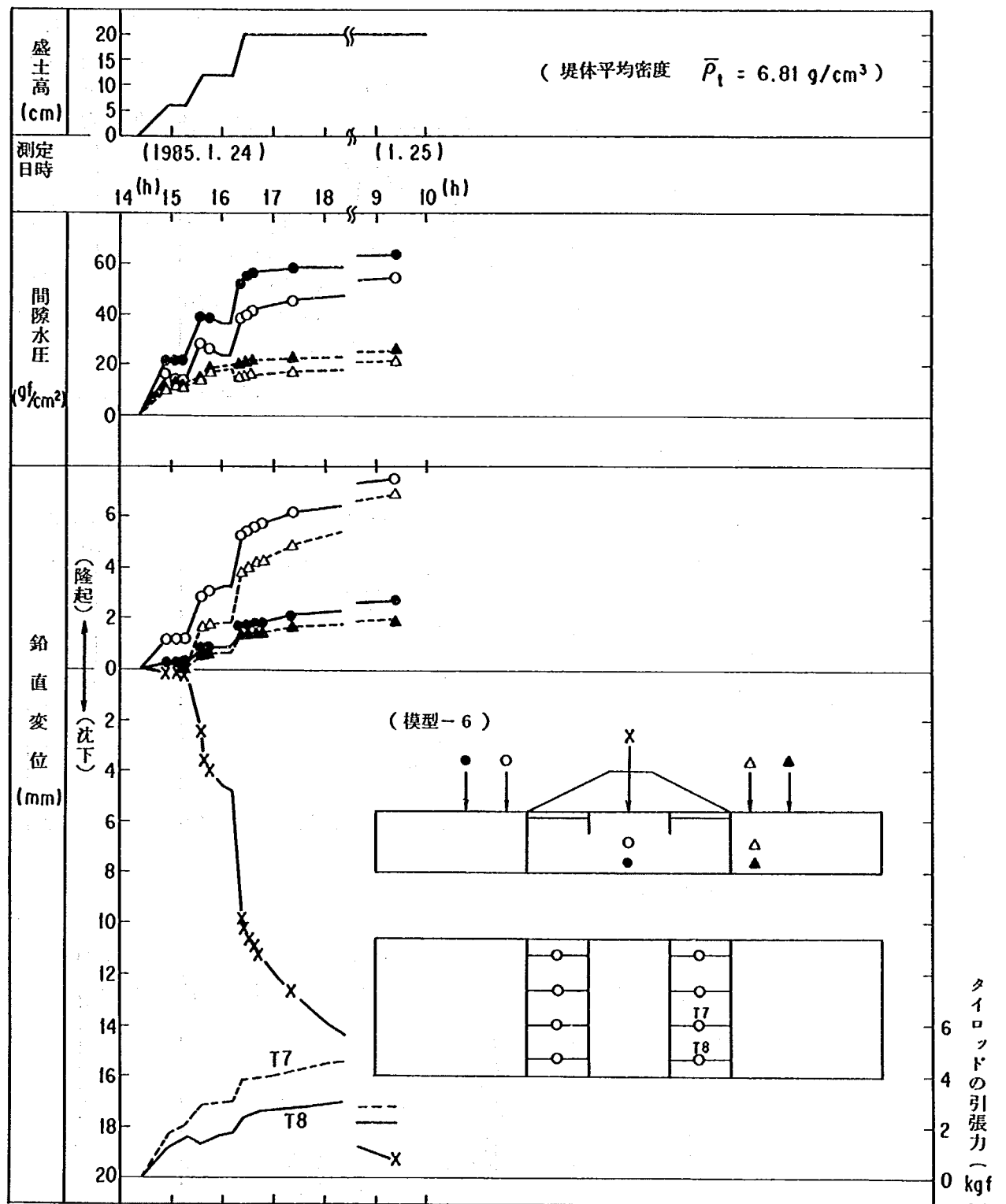


図-4.13(4) 堤体盛立て時の動態観測結果 (模型-6)

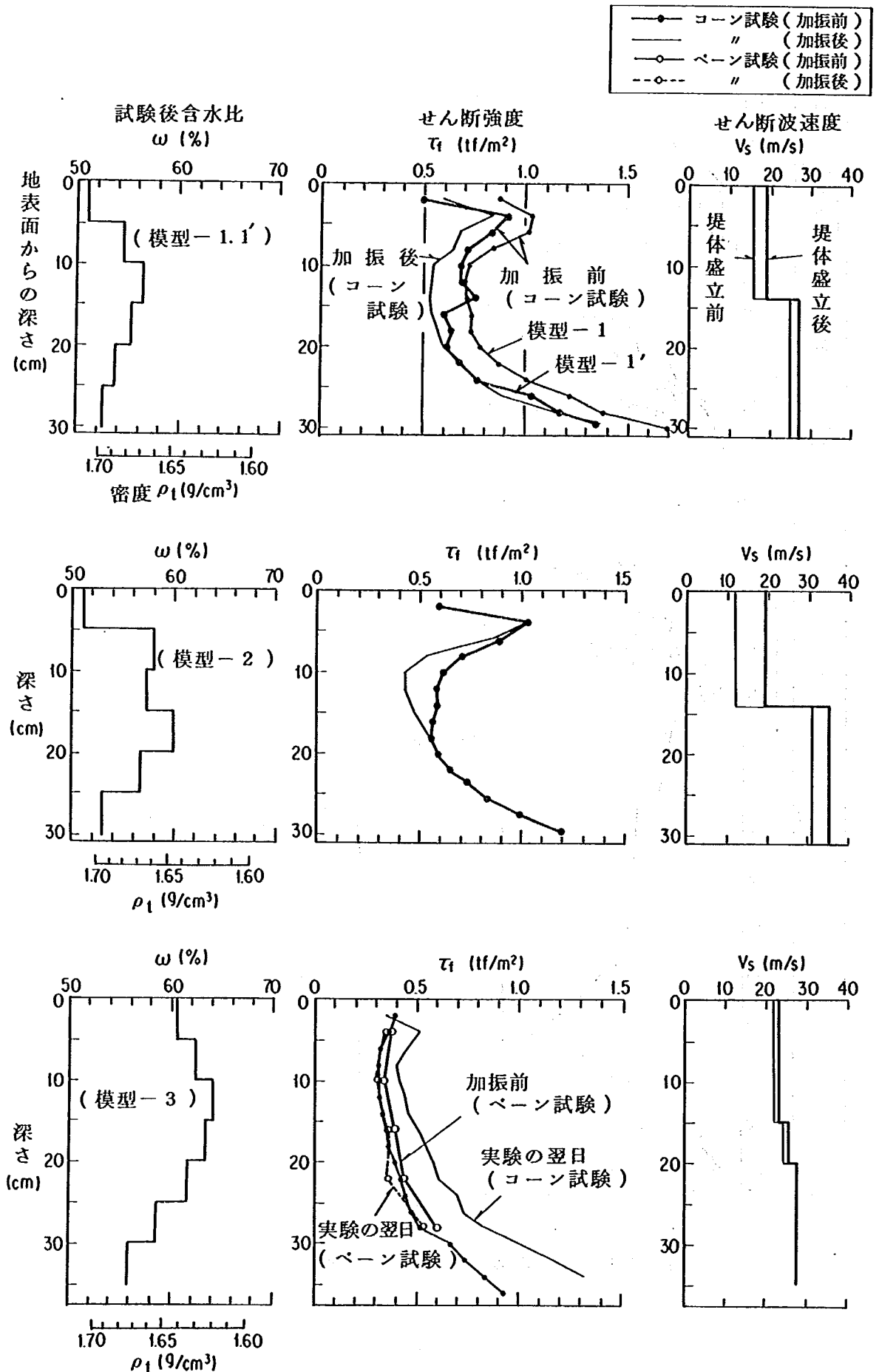
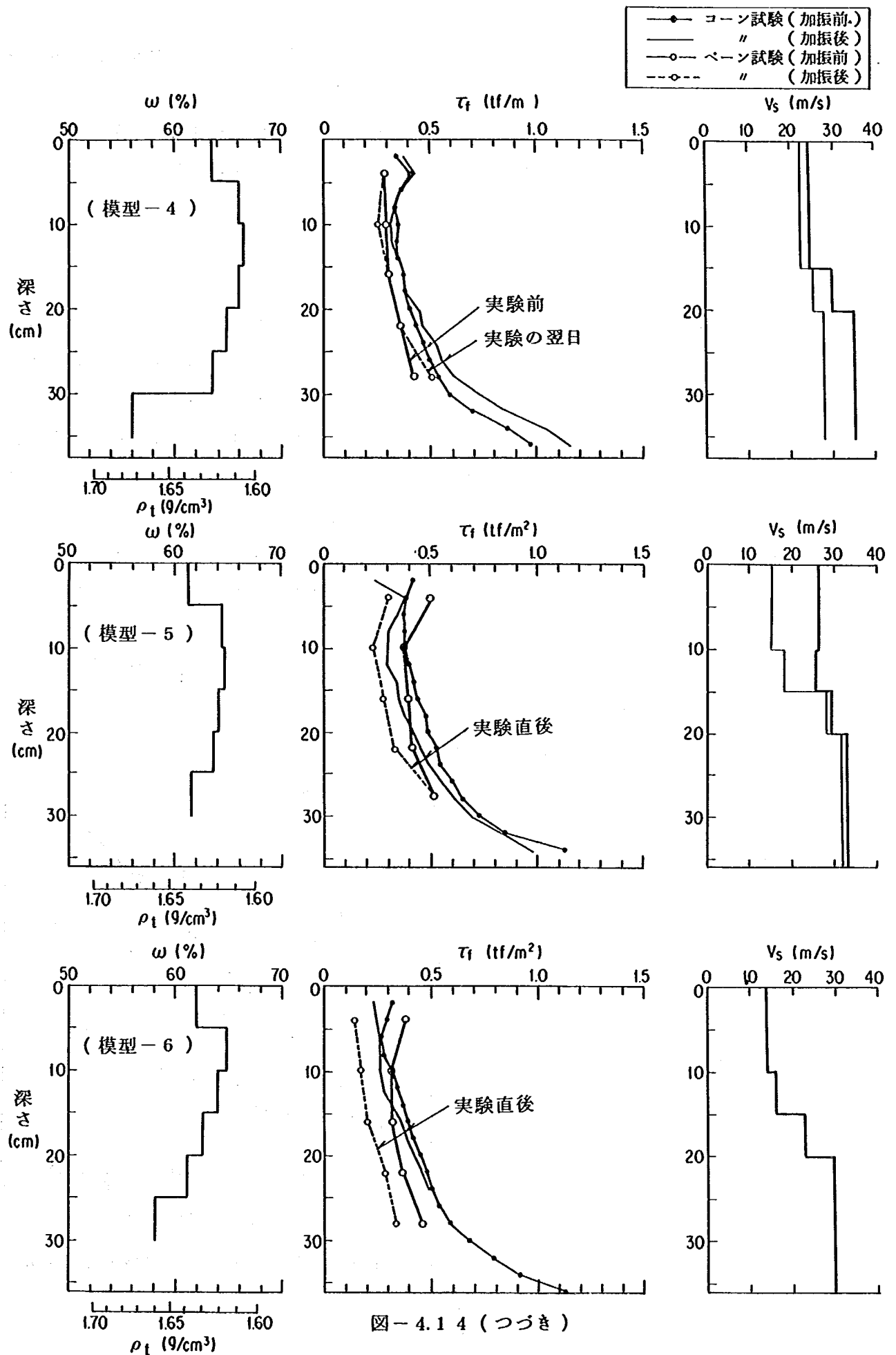


図-4.14 模型の特性



#### 4.3.4 模型の特性

作成した模型の物理特性および力学特性を調べた。項目は密度、含水比、せん断強度およびS波速度である。

密度は堤体についてのみ測定した。含水比は振動実験終了後の模型解体時の地盤について5 cm 層厚ごとに3地点で測定した。せん断強度は振動実験前後の地盤について測定した。S波速度は振動実験前後に測定した。

測定位置は図-4.10に示した。

図-4.14は、地盤についての結果をまとめて示したものである。これによれば、地盤の含水比分布は、上下端部で低く、中央部で高くなっており、せん断強度はそれに対応して上下端部で高く、中央部で低くなっていることがわかる。このことは、地盤の中央部において圧密が十分に進行していないことを示すものであり、4.3.2に述べたことと対応している。ただし、せん断強度の大きさについては、圧密圧の大きさと3.3.3で示した粘土の強度増加率から推定される強度よりもはるかに大きな値を示しており、その理由については現在のところ明らかでない。また、振動実験終了後のせん断強度は模型-1, 2, 5, 6で振動実験前の値より低下しているが、その低下の度合はそれほど顕著ではない。模型-3, 4については逆に大きくなっているが、これは振動実験の翌日に測定したため、その間の間隙水圧の消散およびチキソトロピーにより強度回復したためと推定される。

S波速度については15~30 m/sの範囲にあり、下部ほど大きいこと、堤体盛立て後の方が若干大きくなることなどがわかる。

また、図-4.15には振動実験前後のS波速度の関係を示す。

一方、堤体については、S波速度、密度、せん断強度を調べた。密度は堤体全重量から平均値を求めた。せん断強度は直接測定するのが困難なため、堤体と同一の材料で同程度の密度になるように突き固めた三軸供試体を別途作成して三軸圧縮(UU)試験を実施して求めた。その結果を図-4.16に示す。

最後に、模型の主な特性値をまとめて表-4.6に示す。

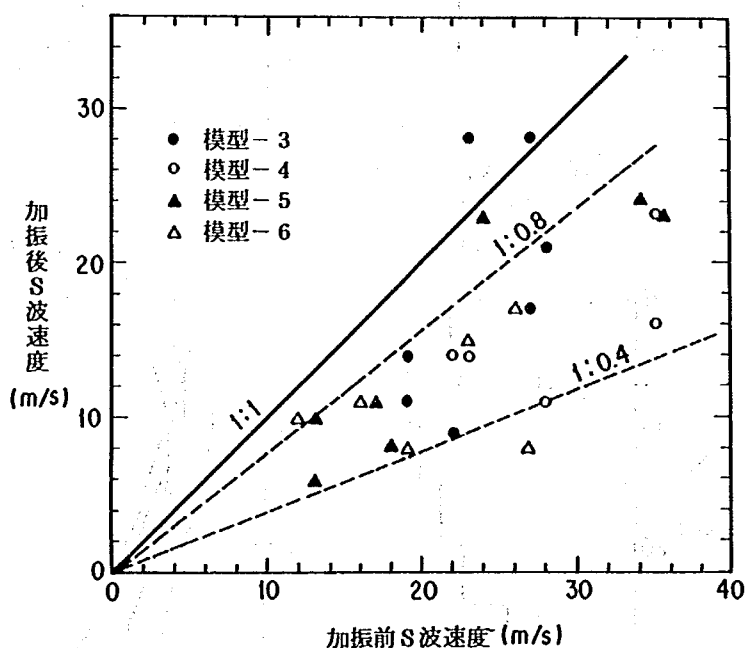


図-4.15 加振による地盤のS波速度の変化

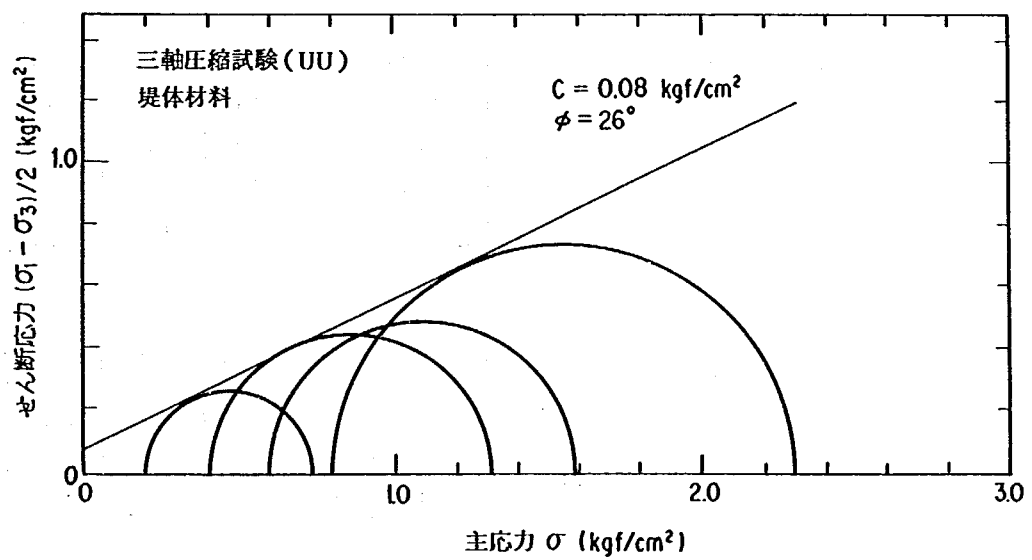
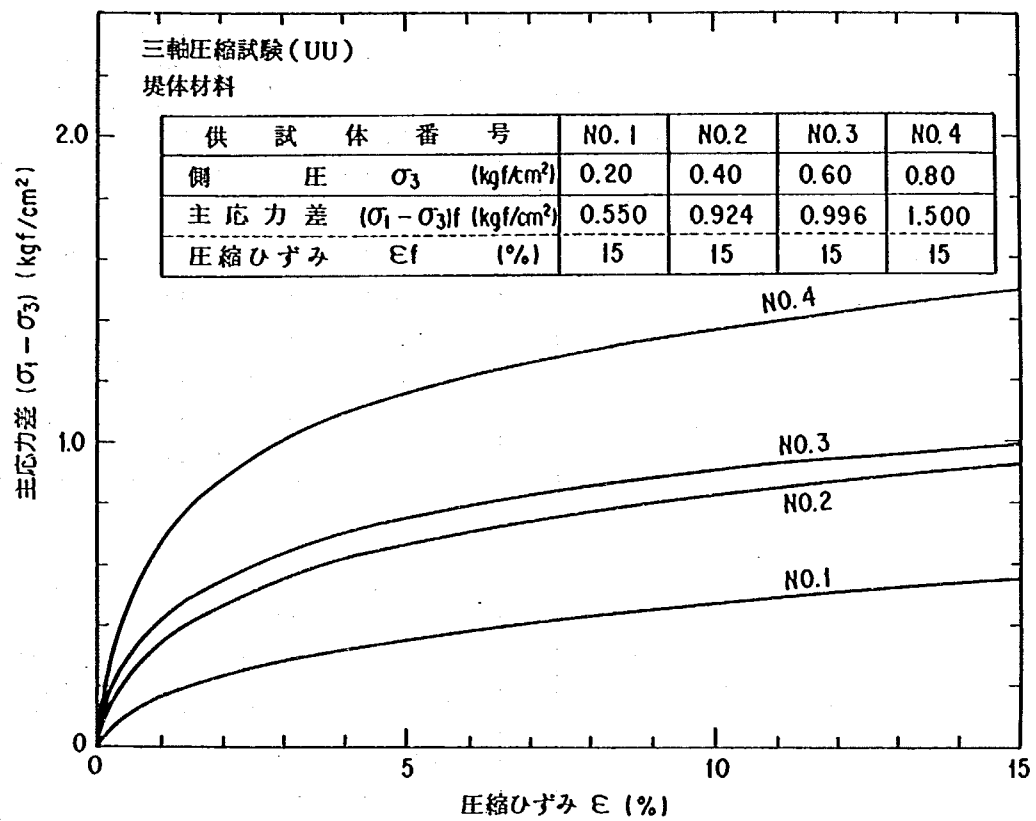


図-4.16 三軸圧縮試験結果(堤体材料)

表-4.6 模型の主な特性値

(模型-1')

|    | 標高<br>(cm) | 物理特性              |                                | 力学特性                           |                            |
|----|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|    |            | 含水比<br>$w$<br>(%) | 密度<br>$\rho_t$<br>( $g/cm^3$ ) | せん断強度<br>$C_u$<br>( $tf/m^2$ ) | S波速度<br>$V_s$<br>( $m/s$ ) |
| 堤体 | 15~30      | —                 | 6.81                           | 0.95                           | 27                         |
|    | 0~15       | —                 | #                              | 0.95                           | 34                         |
| 地盤 | 0~5        | 51.1              | 1.71                           | 0.73                           | 19                         |
|    | 5~10       | 54.6              | 1.68                           | 0.72                           | #                          |
|    | 10~15      | 56.5              | 1.67                           | 0.69                           | #                          |
|    | 15~20      | 55.6              | 1.67                           | 0.62                           | 27                         |
|    | 20~25      | 53.8              | 1.69                           | 0.78                           | #                          |
|    | 25~31      | 52.6              | 1.70                           | 1.21                           | #                          |

(模型-4)

|    | 標高<br>(cm) | 物理特性              |                                | 力学特性                           |                            |
|----|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|    |            | 含水比<br>$w$<br>(%) | 密度<br>$\rho_t$<br>( $g/cm^3$ ) | せん断強度<br>$C_u$<br>( $tf/m^2$ ) | S波速度<br>$V_s$<br>( $m/s$ ) |
| 堤体 | 10~20      | —                 | 6.81                           | —                              | 45                         |
|    | 0~10       | —                 | #                              | —                              | 37                         |
| 地盤 | 0~5        | 63.5              | 1.62                           | 0.38                           | 23                         |
|    | 5~10       | 66.0              | 1.61                           | 0.36                           | #                          |
|    | 10~15      | 66.5              | 1.61                           | 0.35                           | #                          |
|    | 15~20      | 66.0              | 1.61                           | 0.39                           | 25                         |
|    | 20~25      | 64.9              | 1.61                           | 0.45                           | 28                         |
|    | 25~30      | 63.5              | 1.62                           | 0.54                           | #                          |
|    | 30~37      | 56.0              | 1.67                           | 0.81                           | #                          |

(模型-2)

|    | 標高<br>(cm) | 物理特性              |                                | 力学特性                           |                            |
|----|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|    |            | 含水比<br>$w$<br>(%) | 密度<br>$\rho_t$<br>( $g/cm^3$ ) | せん断強度<br>$C_u$<br>( $tf/m^2$ ) | S波速度<br>$V_s$<br>( $m/s$ ) |
| 堤体 | 15~30      | —                 | 7.17                           | 0.95                           | 44                         |
|    | 0~15       | —                 | 7.17                           | 0.95                           | 40                         |
| 地盤 | 0~5        | 51.0              | 1.71                           | 0.80                           | 20                         |
|    | 5~10       | 57.9              | 1.66                           | 0.80                           | #                          |
|    | 10~15      | 57.3              | 1.66                           | 0.58                           | #                          |
|    | 15~20      | 60.0              | 1.65                           | 0.56                           | 42                         |
|    | 20~25      | 56.7              | 1.67                           | 0.69                           | #                          |
|    | 25~31      | 53.0              | 1.70                           | 1.00                           | #                          |

(模型-5)

|    | 標高<br>(cm) | 物理特性              |                                | 力学特性                           |                            |
|----|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|    |            | 含水比<br>$w$<br>(%) | 密度<br>$\rho_t$<br>( $g/cm^3$ ) | せん断強度<br>$C_u$<br>( $tf/m^2$ ) | S波速度<br>$V_s$<br>( $m/s$ ) |
| 堤体 | 10~20      | —                 | 6.78                           | —                              | 42                         |
|    | 0~10       | —                 | #                              | —                              | 30                         |
| 地盤 | 0~5        | 61.2              | 1.64                           | 0.41                           | 15                         |
|    | 5~10       | 64.4              | 1.62                           | 0.38                           | #                          |
|    | 10~15      | 64.6              | 1.62                           | 0.41                           | 14                         |
|    | 15~20      | 64.1              | 1.62                           | 0.47                           | 28                         |
|    | 20~25      | 63.6              | 1.62                           | 0.53                           | 32                         |
|    | 25~30      | 61.5              | 1.64                           | 0.65                           | #                          |
|    | 30~        | #                 | 1.64                           | 0.94                           | #                          |

(模型-3)

|    | 標高<br>(cm) | 物理特性              |                                | 力学特性                           |                            |
|----|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|    |            | 含水比<br>$w$<br>(%) | 密度<br>$\rho_t$<br>( $g/cm^3$ ) | せん断強度<br>$C_u$<br>( $tf/m^2$ ) | S波速度<br>$V_s$<br>( $m/s$ ) |
| 堤体 | 10~20      | —                 | 6.70                           | —                              | 48                         |
|    | 0~10       | —                 | #                              | —                              | 34                         |
| 地盤 | 0~5        | 60.5              | 1.64                           | 0.36                           | 22                         |
|    | 5~10       | 62.2              | 1.63                           | 0.31                           | #                          |
|    | 10~15      | 64.0              | 1.62                           | 0.31                           | #                          |
|    | 15~20      | 63.3              | 1.62                           | 0.35                           | 25                         |
|    | 20~25      | 61.5              | 1.64                           | 0.40                           | 28                         |
|    | 25~30      | 58.6              | 1.66                           | 0.48                           | #                          |
|    | 30~37      | 55.8              | 1.67                           | 0.75                           | #                          |

(模型-6)

|    | 標高<br>(cm) | 物理特性              |                                | 力学特性                           |                            |
|----|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|    |            | 含水比<br>$w$<br>(%) | 密度<br>$\rho_t$<br>( $g/cm^3$ ) | せん断強度<br>$C_u$<br>( $tf/m^2$ ) | S波速度<br>$V_s$<br>( $m/s$ ) |
| 堤体 | 10~20      | —                 | 6.81                           | —                              | 31                         |
|    | 0~10       | —                 | #                              | —                              | 30                         |
| 地盤 | 0~5        | 62.0              | 1.63                           | 0.31                           | 14                         |
|    | 5~10       | 64.8              | 1.62                           | 0.28                           | #                          |
|    | 10~15      | 63.9              | 1.62                           | 0.34                           | 16                         |
|    | 15~20      | 62.6              | 1.63                           | 0.42                           | 23                         |
|    | 20~25      | 61.1              | 1.64                           | 0.49                           | 30                         |
|    | 25~30      | 58.1              | 1.66                           | 0.59                           | #                          |
|    | 30~        | #                 | 1.66                           | 0.91                           | #                          |

#### 4.3.5 共振試験結果

図-4.17に、各模型の堤体盛立て前後に実施した共振試験の結果を共振曲線で示す。同図で、加速度応答倍率は台加速度に対する模型内各点の応答加速度の比として求めている。

図-4.18は、図-4.17の共振曲線から求められる1次共振点における最大加速度モードを描いたものである。

堤体盛立て前の1次共振モードは、地盤各部で若干の変動はあるものの、ほぼ1次元せん断モードとみなせるようである。一方、堤体盛立て後の1次共振モードについてみると、地盤のモードは盛立て前と似た形状を維持しながらも応答倍率が若干低下しており、堤体では応答倍率の変化があまりないという性状を示している。堤体はそれ自体の固有周期が地盤のそれよりも比較的大きく、したがって地盤の固有振動数付近では堤体は剛体的に振動しているものと考えられる。

表-4.7には共振試験により得られた共振周波数の値をまとめて示している。

表-4.7 共振試験結果のまとめ

| 模型条件                    | 測点    | 1次共振周波数: $f_1$ (Hz) |       |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------|---------------------|-------|------|------|------|------|------|
|                         |       | 模型-1                | 模型-1' | 模型-2 | 模型-3 | 模型-4 | 模型-5 | 模型-6 |
| 堤体盛立て前<br>(地盤のみ)        | (地表面) | 21                  | 14    | 19   | 22   | 18   | 20   | 18   |
| 堤体盛立て後<br>(強震試験前)       | (天端)  | 16                  | 16    | 17   | 18   | 17   | 17   | 15   |
| 堤体盛立て後<br>(強震試験後)       | (天端)  | —                   | 17    | 20   | —    | —    | —    | —    |
| 地盤のみ*)<br>( $V_s$ より推定) | (地表面) | 16.1                | 14.6  | 16.5 | 16.4 | 16.8 | 15.9 | 14.1 |

\*)  $V_s$ の実測値(図-4.14)を用い、 $f_1 = 1/\Sigma(4H/V_s)$ により計算

同表より、堤体を盛り立てた後の各模型の共振周波数はその前に比べていずれも低下していることがわかる。これは前述のように、せん断振動系の地盤上にそれよりも基本周波数の高い重量(堤体)が載ったことによるものと考えることができる。

また、同表には、地盤で実測したS波速度(図-4.14参照)をもとに計算して求めた地盤の共振周波数を示した。これを実測値と比較して示したのが図-4.19である。これより、模型-1'を除くすべてのケースについて、共振試験より得られた1次共振周波数の方が高いことがわかる。この理由として、S波速度を用いた次の推定式

$$f_1 = \frac{1}{\Sigma(4H/V_s)} \dots\dots\dots (4.9)$$

が近似式であること(これが過大値を与えるが過少値を与えるかは、条件により異なる。たとえば文献8)を参照されたい。)、および上式は1次元せん断振動系として求められるものであるのに対し、共振試験の場合には土槽で拘束された条件で共振振動数が得られるという違いがあることが考えられる。特に後者は図-4.19に示したような差を生じる直接的な要因になっているも

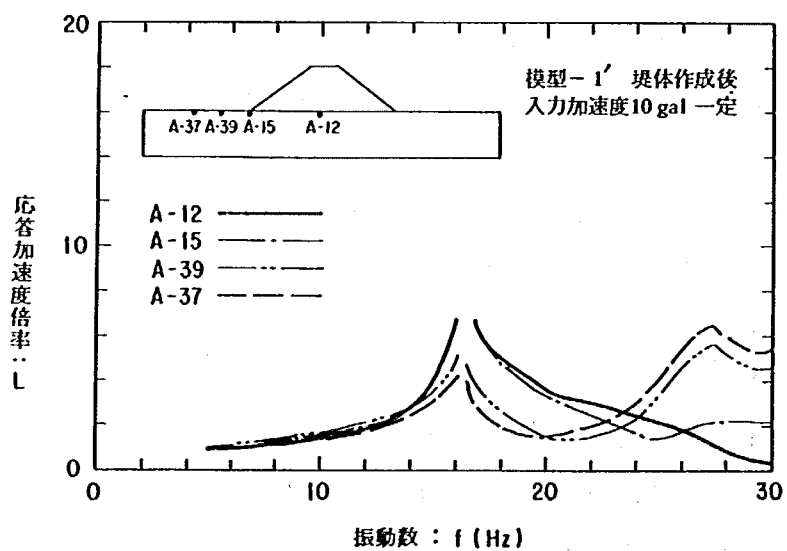
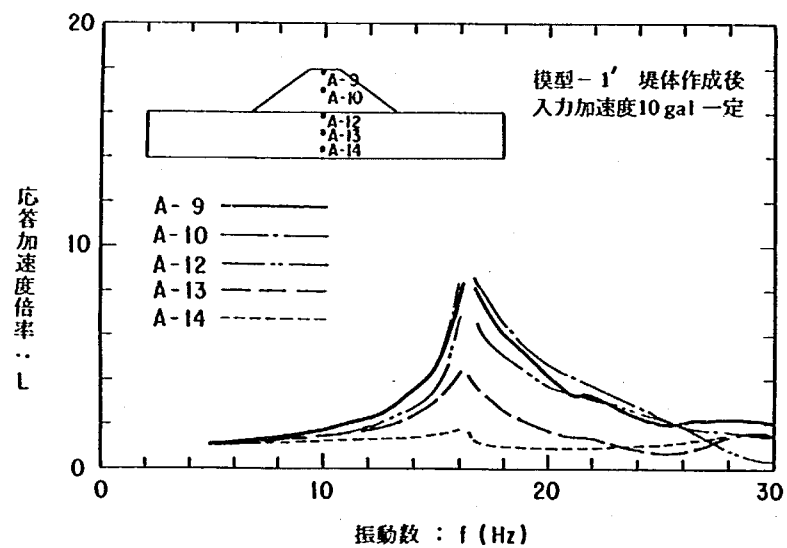


図-4.17(1) 共振曲線 (入力加速度に対する)

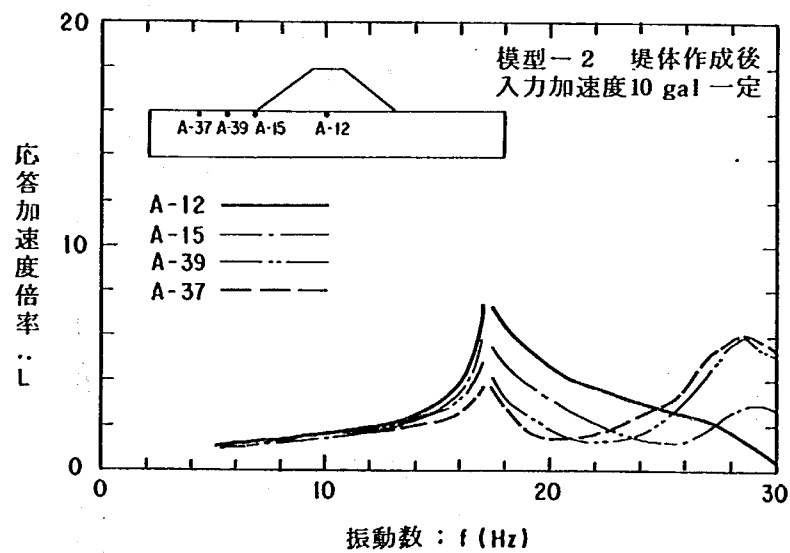
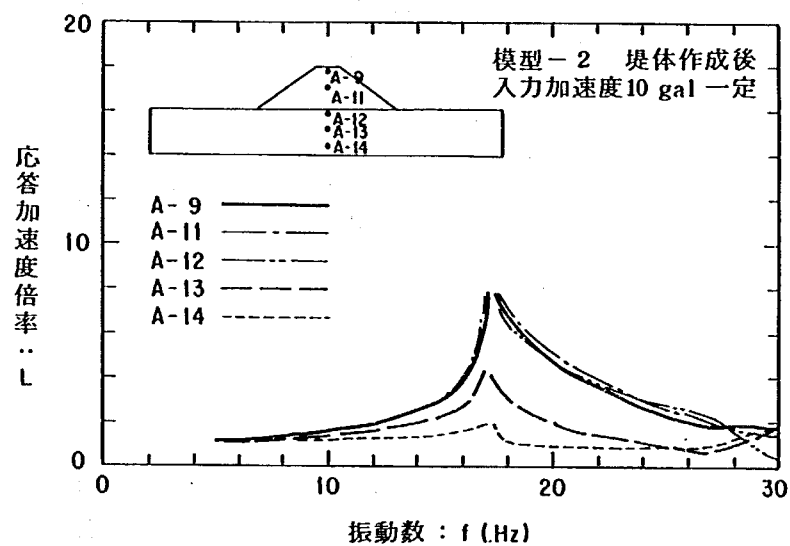
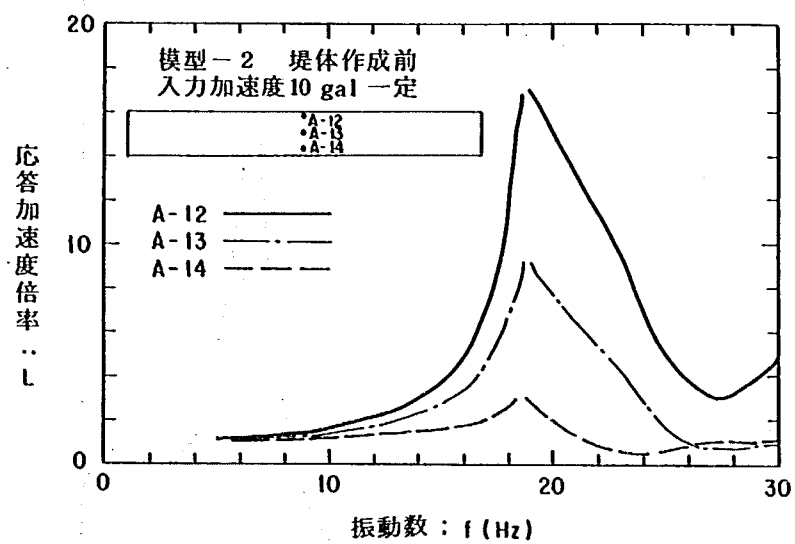


図-4.17(2)

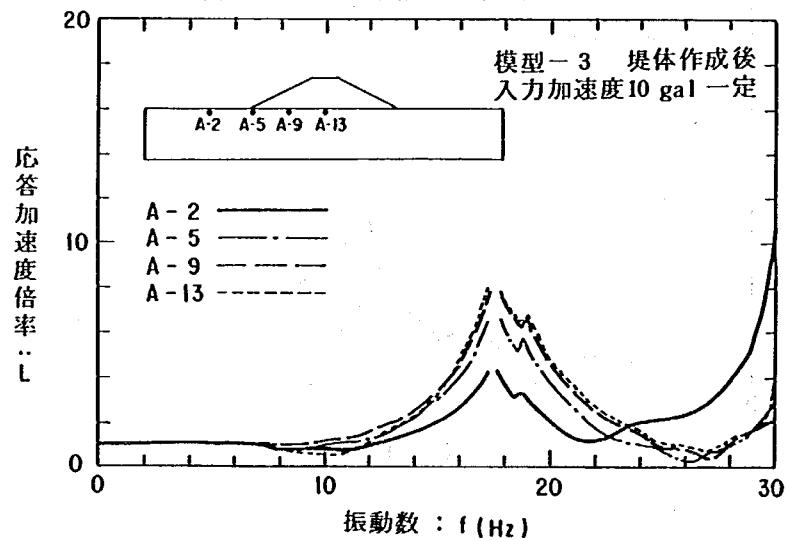
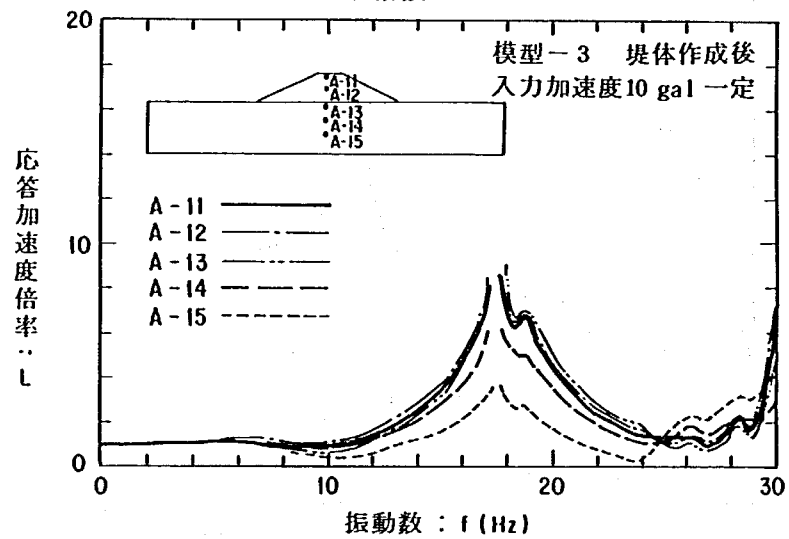
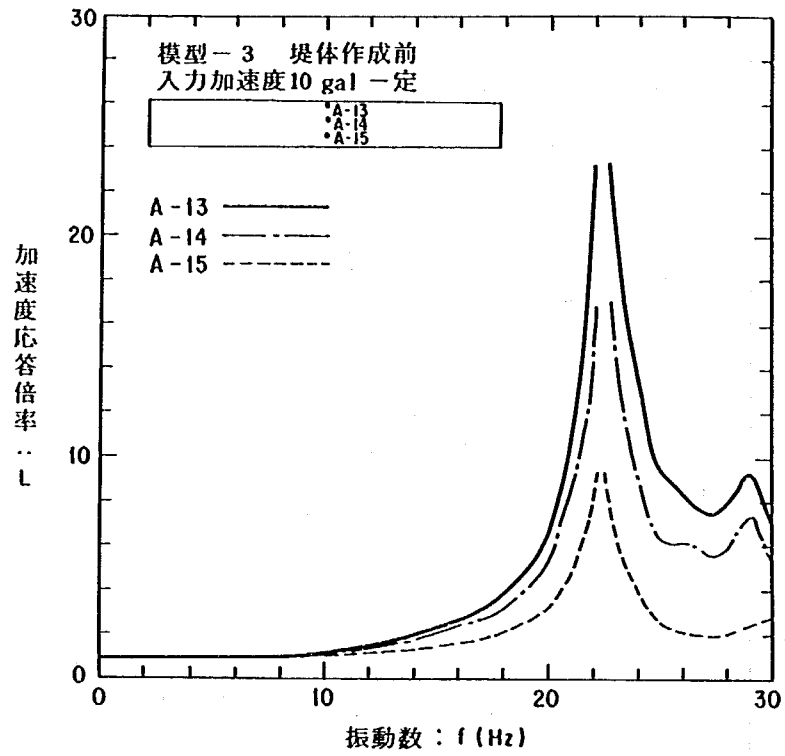


図-4.17(3)

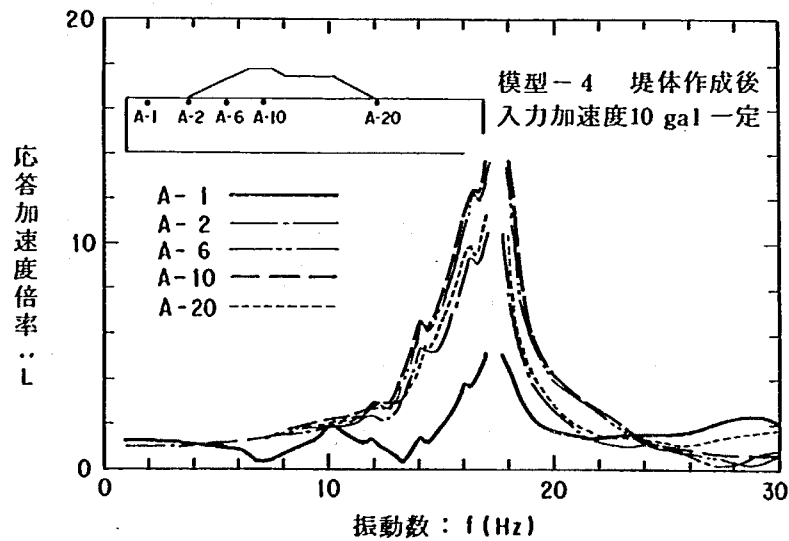
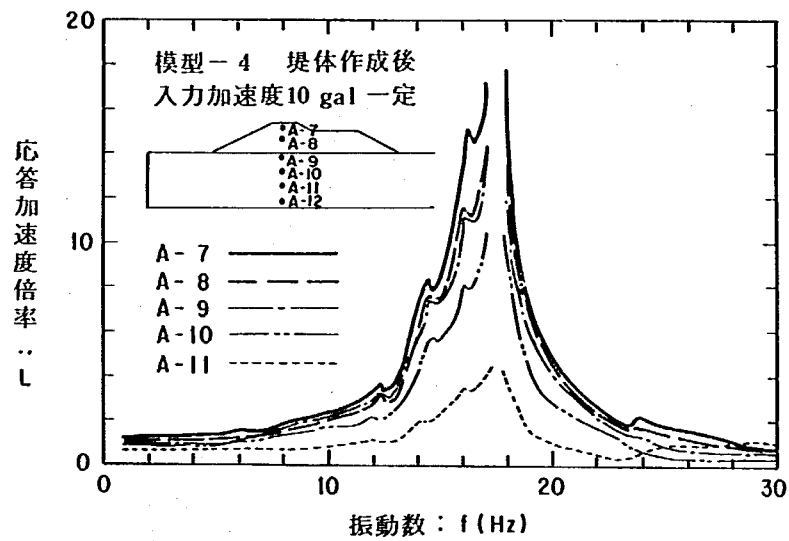
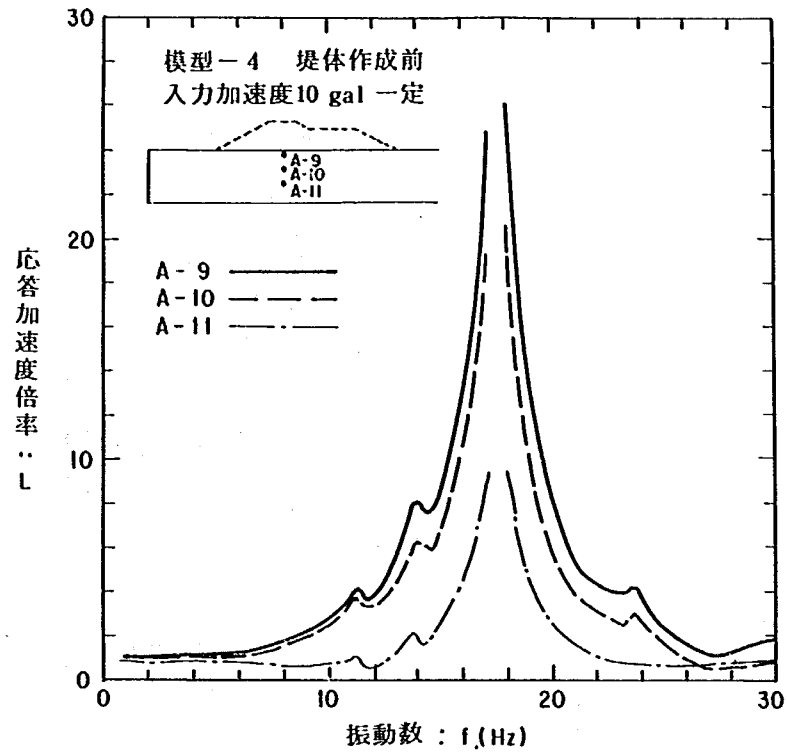


図-4.17(4)

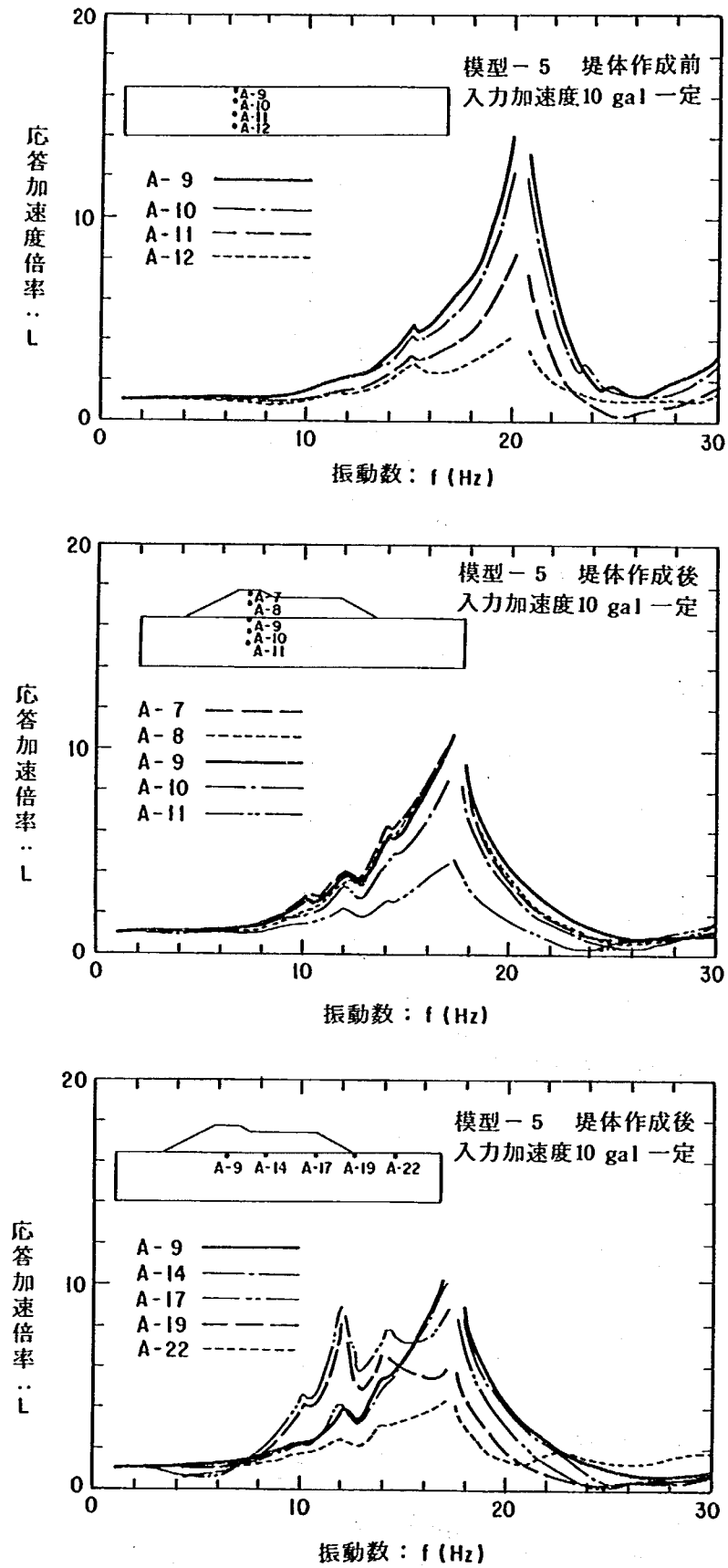


図-4.17(5)

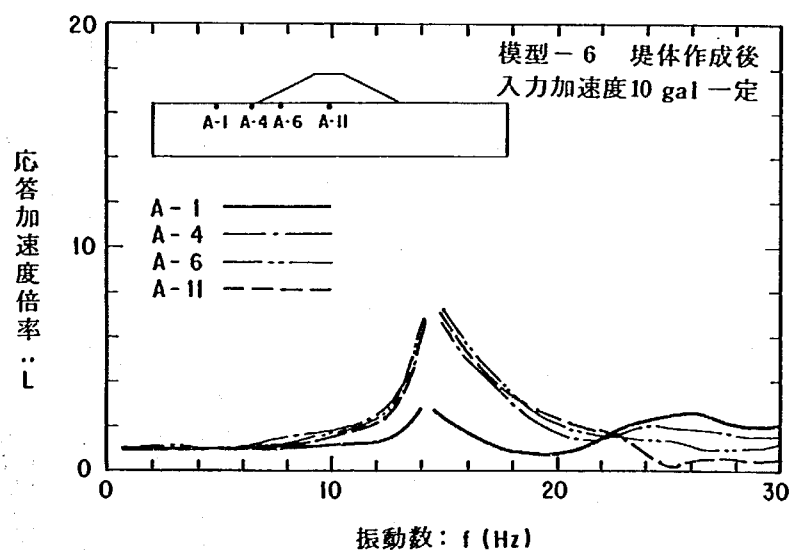
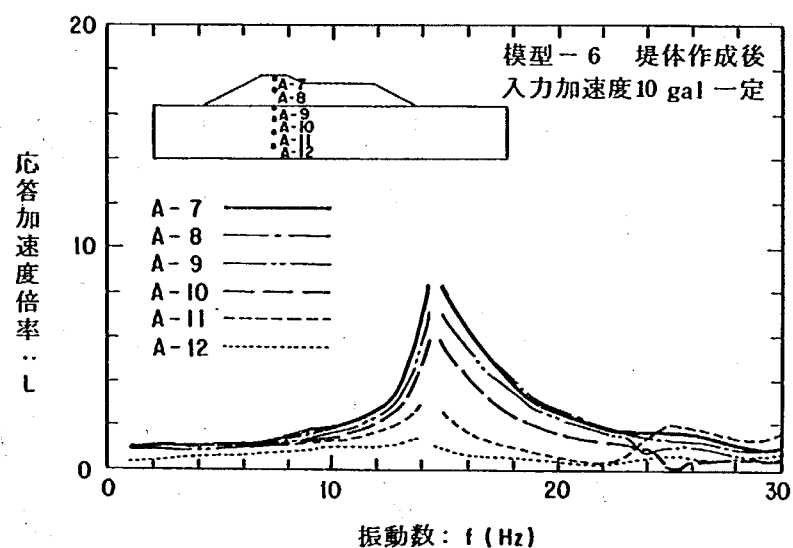
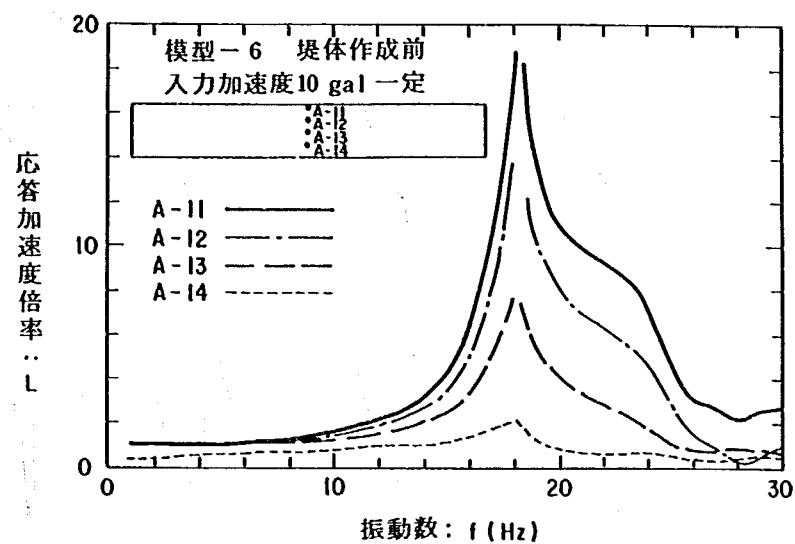


図-4.17(6)

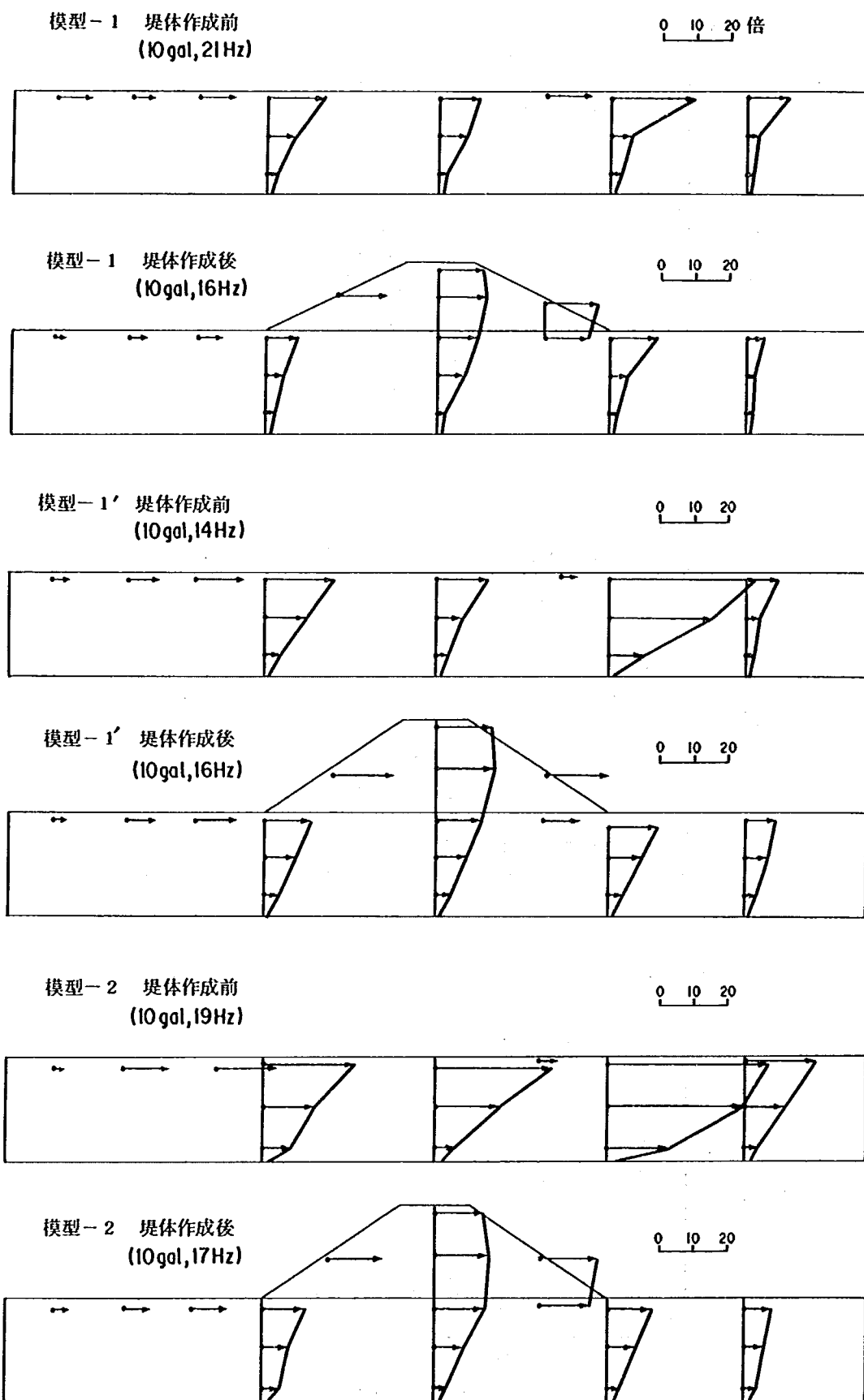
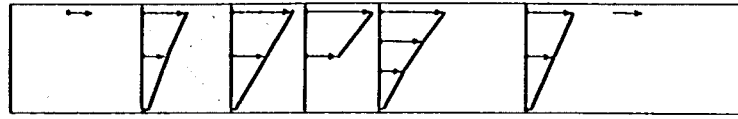


図-4.18 共振時最大加速度モード図

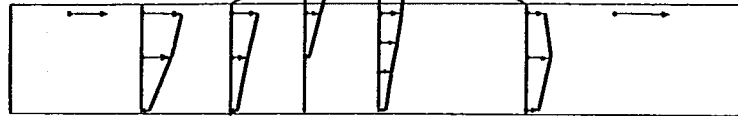
模型-3 堤体作成前  
(10gal, 22Hz)

0 10 20



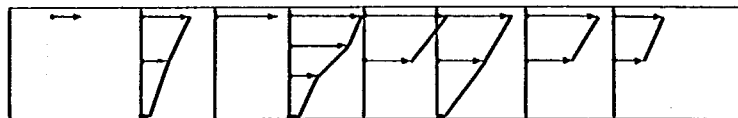
模型-3 堤体作成後  
(10gal, 18Hz)

0 10 20



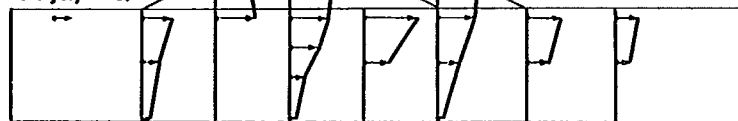
模型-4 堤体作成前  
(10gal, 18Hz)

0 10 20



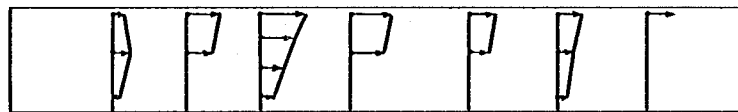
模型-4  
堤体作成後  
(10gal, 17Hz)

0 10 20



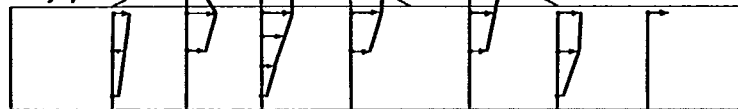
模型-5 堤体作成前  
(10gal, 20Hz)

0 10 20



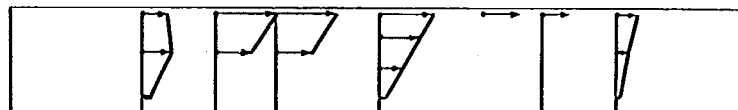
模型-5  
堤体作成後  
(10gal, 17Hz)

0 10 20



模型-6 堤体作成前  
(10gal, 18Hz)

0 10 20



模型-6 堤体作成後  
(10gal, 15Hz)

0 10 20

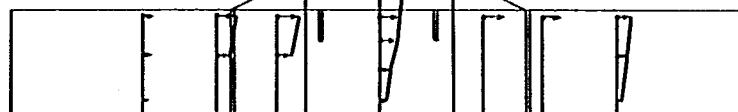
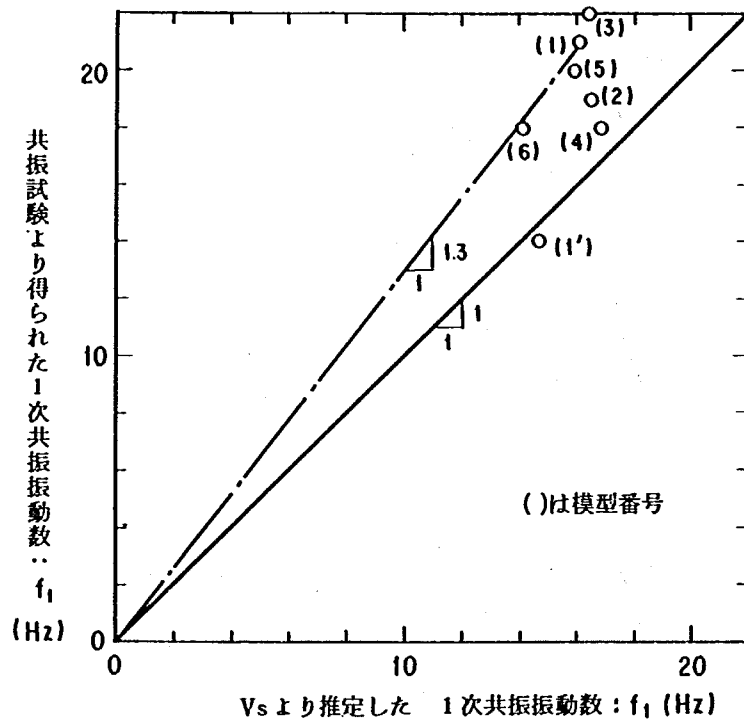


図-4.18 (つづき)



図－4.19 地盤の1次共振振動数の実測値と推定値の比較

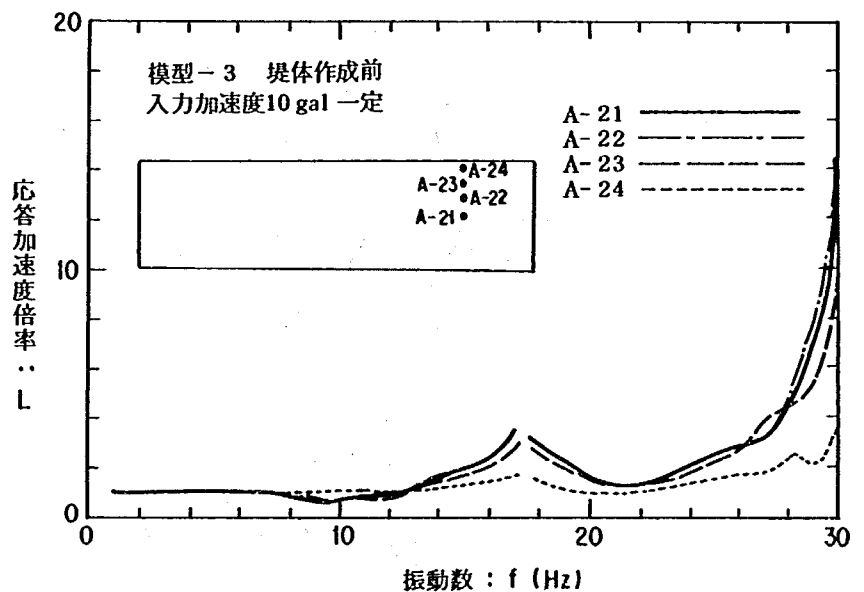
のと考えられる。

そこで、堤体がない状態における地表面の異なる位置における周波数応答特性の違いを調べてみると図－4.20のようになる。これより、側壁に近い点ほど一般に加速度応答倍率は1に近づいており、明らかに側壁の拘束の影響を受けていることがわかる。

#### 4.3.6 強震試験結果

はじめに、各模型の代表的な点における加速度、変位および間隙水圧の、全加振段階にわたる変化をまとめて図－4.21に示す。

まず、全般的な面について述べると、応答加速度は模型－3～6においては100～150 gal加振時に急増し、これ以降は逆に低下し、入力加速度に対する応答倍率が1を下まわるまでになることがわかる。また、応答加速度の最大値は400～500 gal程度であることがわかる。ただし、模型－1'、2については、地盤作成条件(圧密荷重)が他と異なるので、いく分強めである。



図－4.20 地盤の応答特性に及ぼす側壁の影響

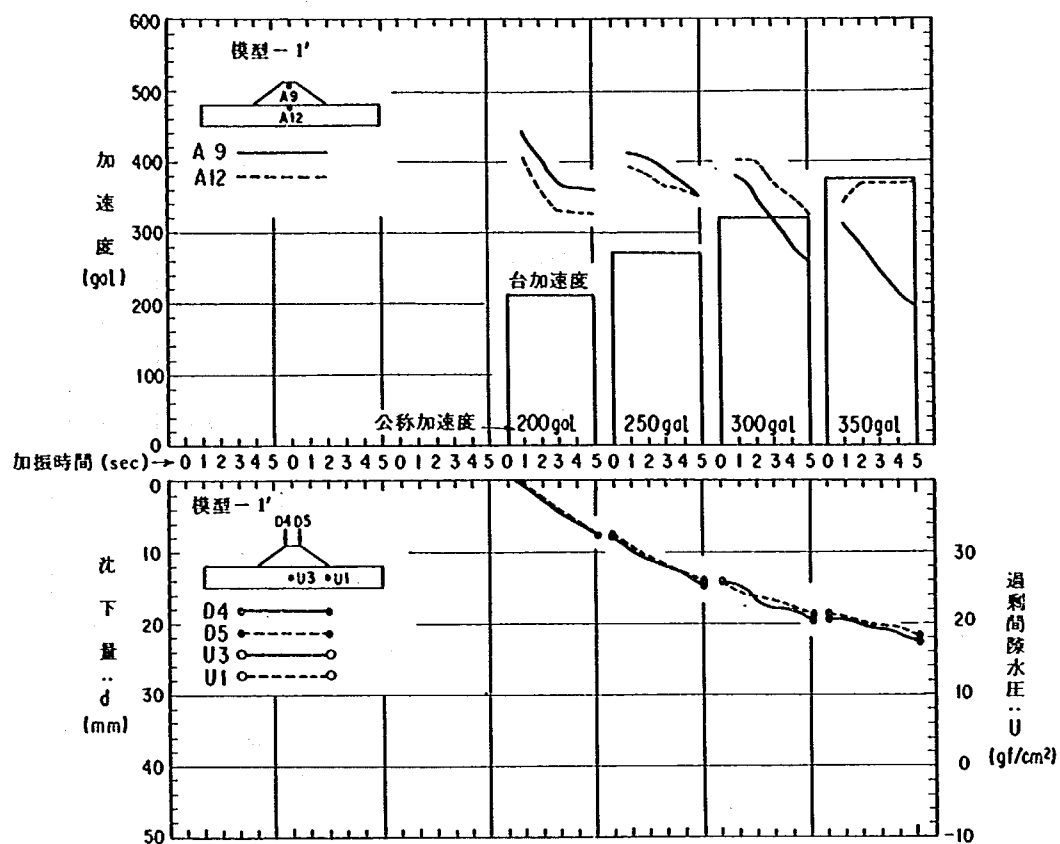


図-4.2 1.(1) 強震実験における加速度，変位，間隙水圧変化図

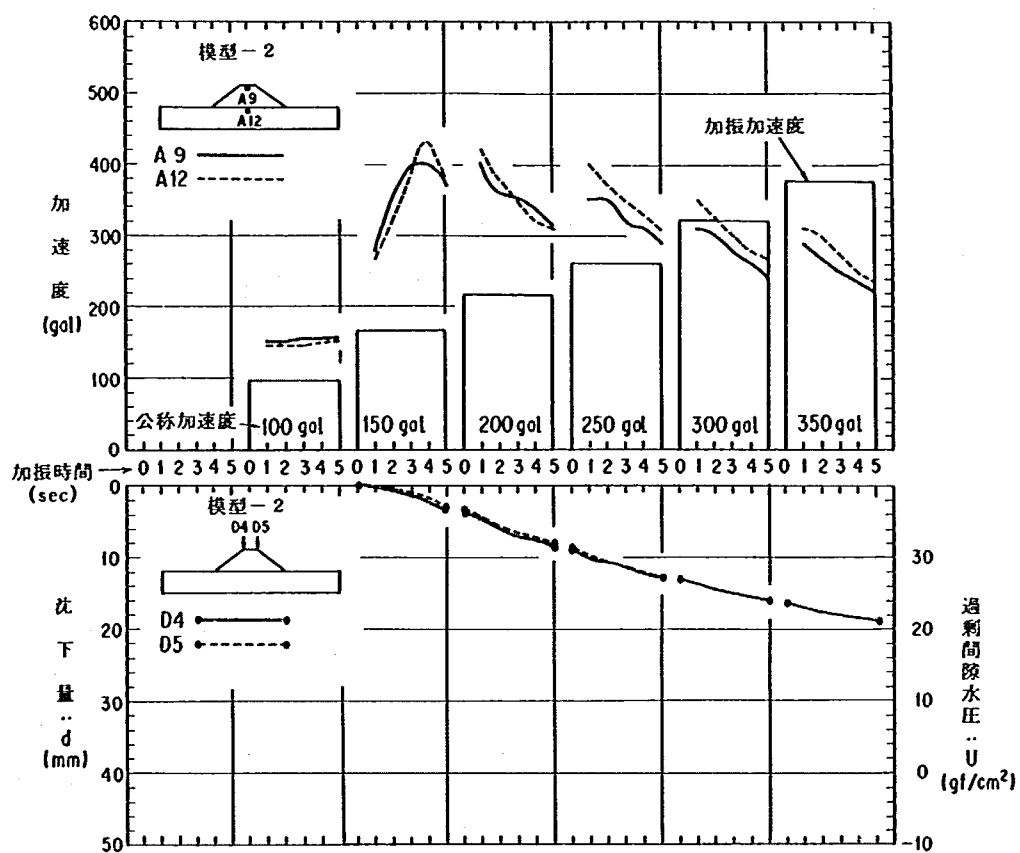


図-4.2 1 (2)

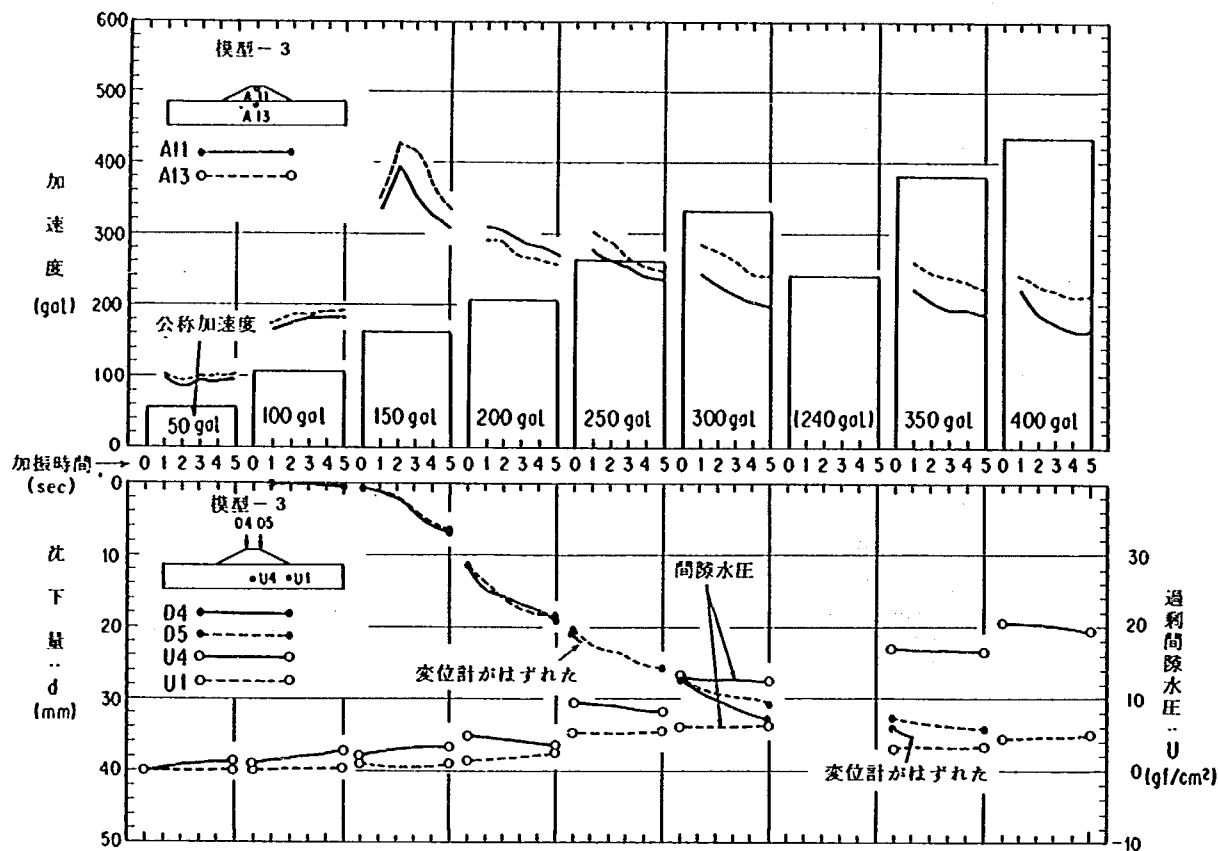


図 - 4.2.1 (3)

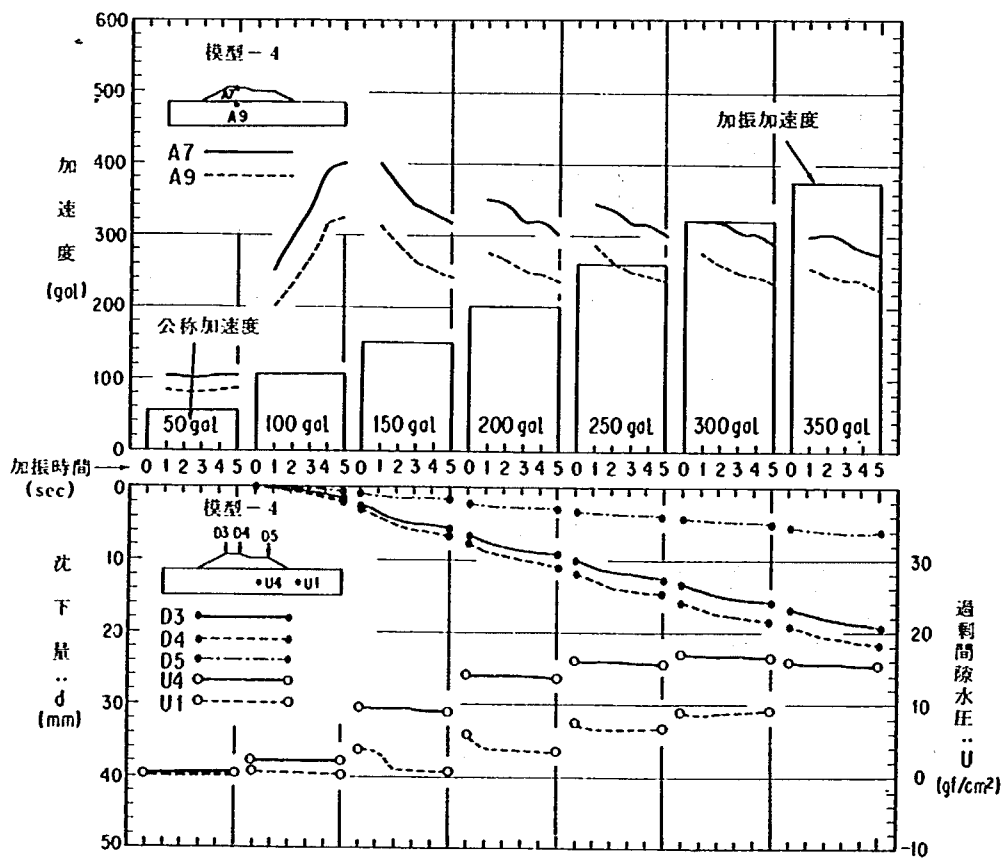


図 - 4.2.1 (4)

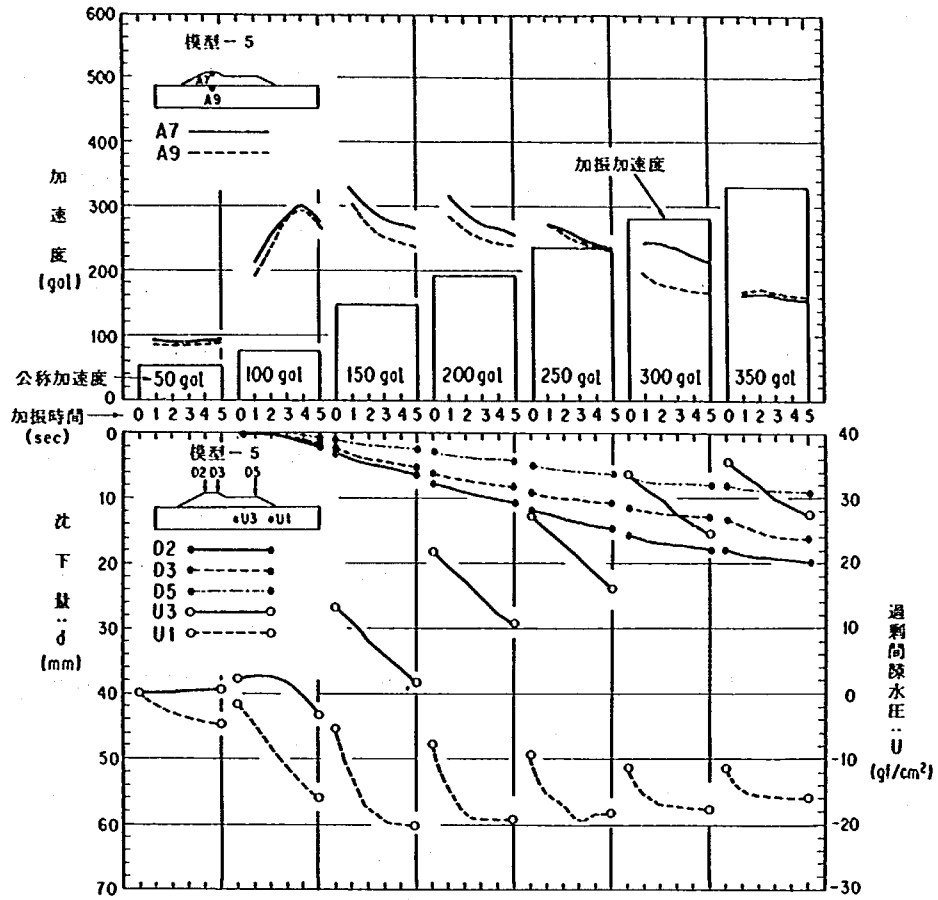


図 - 4.21 (5)

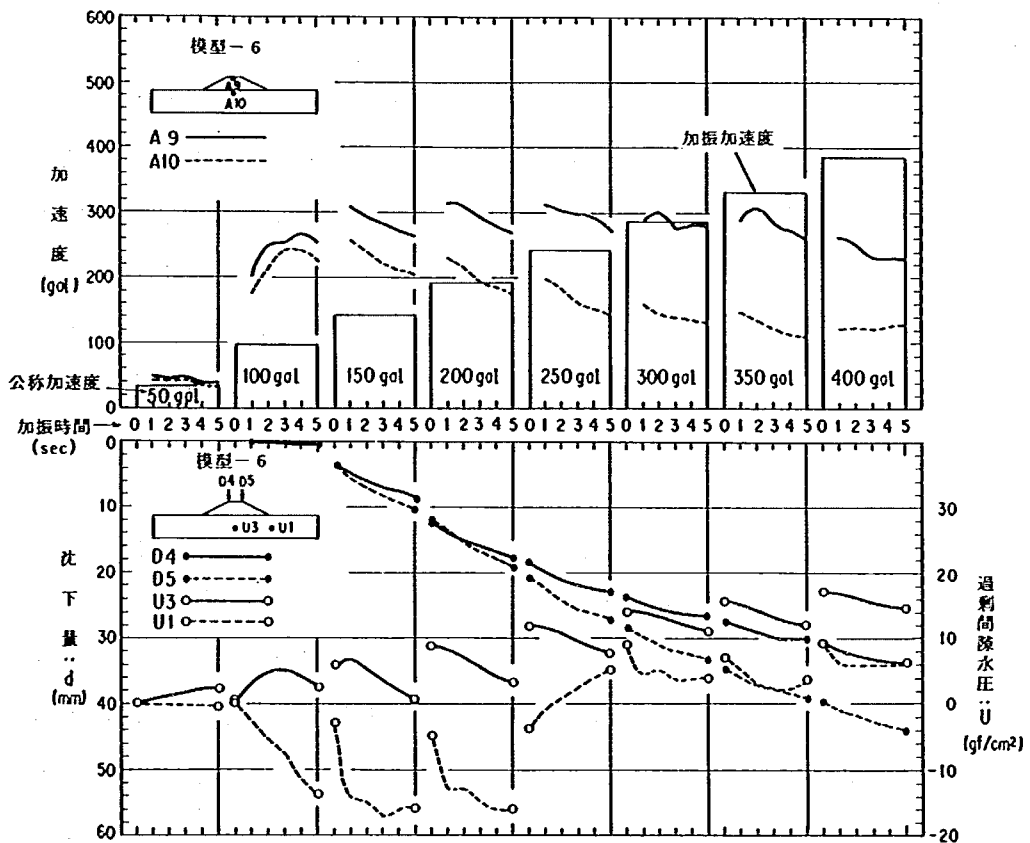


図 - 4.21 (6)

また、堤体天端の沈下は100～150 gal 加振時あたりから生じ始めているが、これは上述の応答加速度が急増し始める時点ときわめてよく一致している。なお、この沈下は加振停止時間（20～30分）内にも若干進行しているのが示されている。

一方、過剰間隙水圧についても、加速度レベルの増大とともにその変化量が大きくなっているが、その傾向は必ずしも一様ではない。堤体直下部では比較的単調に増大しているが、堤体から離れた地点では逆に低下するところもある。これは加振による過剰間隙水圧の発生他に、測定点付近での応力状態の変化にも影響されているのではないかと推定する。すなわち、たとえば堤体直下では模型が変形しても拘束応力の変化はそれほど大きくないと考えられる。ところが、のり先地盤においては、後述するように、加振により堤体が沈下するとのり先地盤には膨れ上がりが生じ、このとき鉛直方向に近い方向の直応力が低下している可能性が十分に考えられる。したがって、この全（拘束）応力の低下がのり先地盤内の間隙水圧を低下させているのではないかと推定される。さらに、間隙水圧の記録で、加振中には低下し、加振停止中に上昇するというケースが多いのに気付く。この理由については必ずしも明確ではないが、筆者の考えでは計測上の問題に起因しているのではないかと推定している。それは次の通りである。

間隙水圧計はすべて受圧面を上に向けてセットしている。模型が加振により変形すると間隙水圧計の周辺地盤も同時に変形する。たとえばその部分が沈下（圧縮）変形状態であれば、受圧面は正の全応力増分を受けるであろうが、変形（ひずみ）量が大きくなると間隙水圧計が剛なため受圧面円周の金属枠の存在によりアーチ作用を生じ、これにより逆に全応力が低下するということが考えられる。

なお、間隙水圧の定量的な信頼性については以上の事の他に、粘土の飽和度の問題がある。すなわち、間隙水圧計の受圧面前面のポーラスメタルは事前に十分に脱気し、大気に触れないようにして圧密前の粘土内に埋設したが、粘土自体は特に脱気されていない。さらに重大な問題として、圧密中の粘土中でガスが発生したことがある。これは好気性菌(?)の存在によるものと考えられるが、気温が20℃以上では特に活発になるということであり、特に夏季に圧密した模型-3、4ではガスの発生が激しく、粘土層の膨張が生じるほどであった。このような事は他の模型についても多少なりとも生じているものと考えられ、粘土層はいずれもやや不飽和であったと考えられる。

図-4.2.2に強震試験における測定記録の一例を示す。同図で、天端の応答加速度は加振の継続とともに若干低下しているのがわかる。

一方、間隙水圧についてみると、まず、堤体直下での上昇量はのり先地盤に比べて大きいことに気付く。これは、堤体直下地盤の方が地震時せん断応力比（有効拘束圧に対する地震時せん断応力の比）が大きく、かつ全拘束応力が大きいことによる。また、堤体直下地盤での応答はやや頭打ちに近い形になっているが、これは前段階加振までにある程度発生してしまったためと考えられる。さらに、堤体直下地盤での応答値の振動数は入力加速度およびのり先地盤での応答のそ

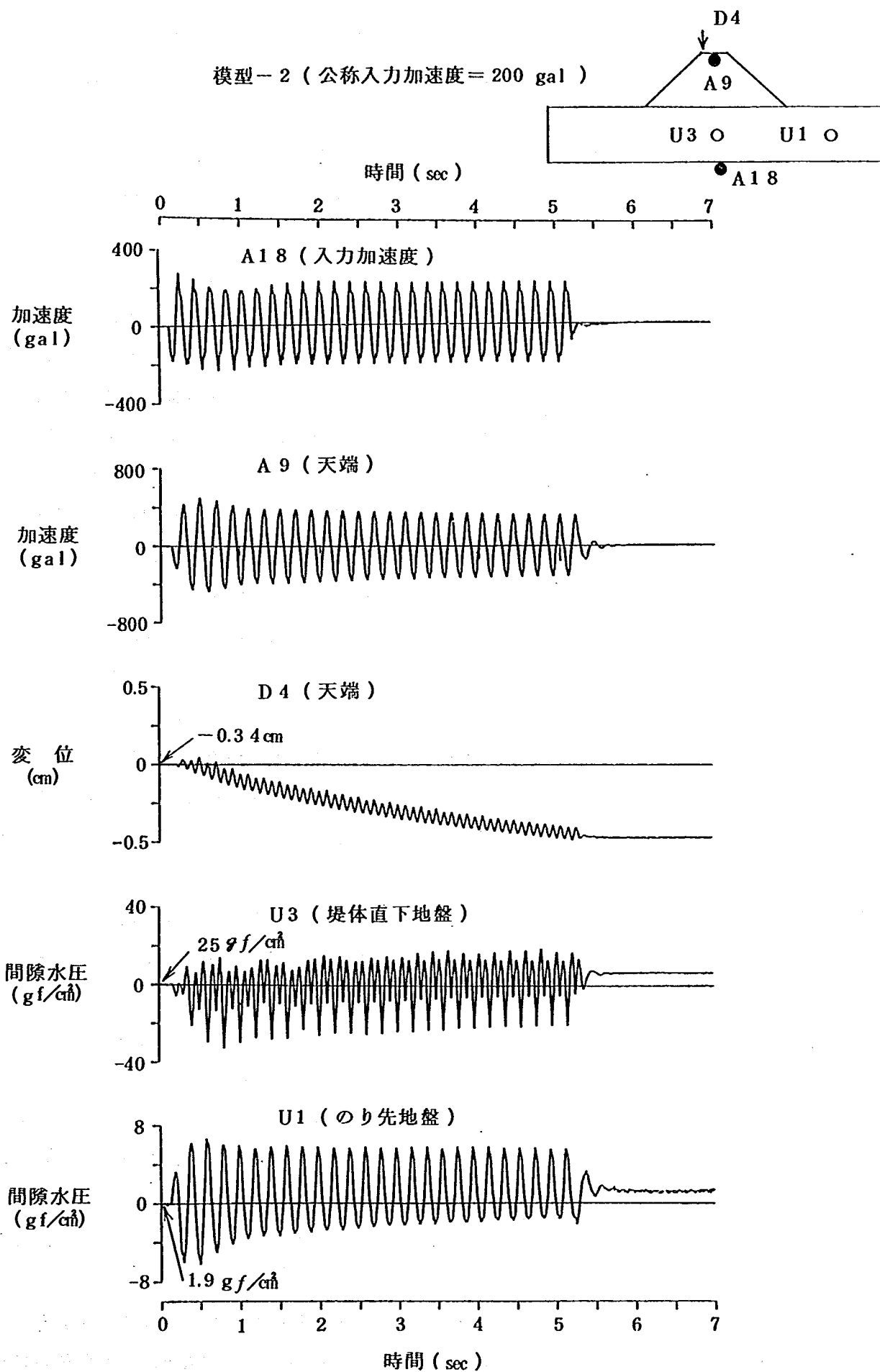


図-4.22 強震実験における計測記録の例

れに対して2倍になっているが、これはこの部分での地震時せん断応力が両振り状態になっているためであり、それに対し、のり先地盤では初期せん断応力が大きく、片振りせん断になっているためではないかと考えられる。

図-4.23は、各入力加速度レベルごとの模型の加速度応答倍率の分布をまとめて示したものである。ただし、応答加速度は前図に示したように経時的に変化しているため、ここでは5秒加振の最終時付近の値を示している。

同図より、既述した通り、100～150 gal加振あたりまでは応答倍率は大きくなり、それ以降は逆に低下しているのがわかる。また、比較的低加速度レベルにおいては堤体での入力に対する加速度増幅度は1.5～2.0倍程度であること、のり先地盤での増幅はあまりないことがわかる。

さらに、模型-6では矢板打設地点付近での地盤の加速度応答が他の模型に比べて大きいことがわかる。その他の模型については、地盤のせん断強度の分布(図-4.14)および応答加速度の分布(図-4.23)から、大きな加速度レベルにおいて地盤の中～上層部で降伏しているように推察される。ところが、鋼矢板を有する模型-6の場合には、地盤が降伏しても鋼矢板が地震時せん断力を上方へ伝達し、全体の応答加速度が低下しないのではないかと想定される。

表-4.8に、強震試験における各種記録成分の応答の読み取り値をまとめて示す。ただし、同表中、実測入力加速度および応答加速度の値については、最初の数波(約5波)を除く部分で読み取ったものである。というのは、今回の実験では振動台がやや不調であり、最初の1～2波で設定加速度の1.5倍程度の振幅が表われたためである。また、加速度の値はすべて両振幅の1/2をとっている。堤体天端沈下量および間隙水圧については、各加振段階の最初と最終時、およびその差で得られる増分を示している。また、これらはすべて最初の加振段階の直前の値を0として求めている。なお、ある加振段階の最終的と次の加振段階の初期値との間に若干の差があるが、これはその間に生じたクリープ変形等によるものである。

図-4.24、図-4.25には、天端沈下量および間隙水圧の加振中の経時変化を示す。ここに、天端沈下量は天端で計測した2成分の平均値で示している。一方、間隙水圧は土槽中央部(堤体直下部にほぼ対応する。)の中央高さにおける観測値を示している。

つぎに、図-4.26には各模型の変位計により記録された鉛直変位と加振加速度の関係をまとめて示した。同図で、鉛直変位は、模型-1'および2以外については、加振による変形、休止中に生じるクリープ変形の双方を含めた累積量で表わし、模型-1', 2についてはクリープ変形のみを除去した累積量で表わしている。同図より、堤体天端は沈下し、のり先地盤表面は隆起しているのが明らかである。また、変形はいずれの位置でも同一の加振段階で生じ始めているのがわかる。押え盛土のある模型-4, 5では、押え盛土の沈下量は本堤よりも小さく、また取付け部に近いほど小さい。

つぎに、図-4.27は各模型の最終段階加振後の変形の状況を示したものである。ここに、模型表面の変形は変位測定用マーカーの変位を元に描き、断面内の変形状況は模型解体時に切り出

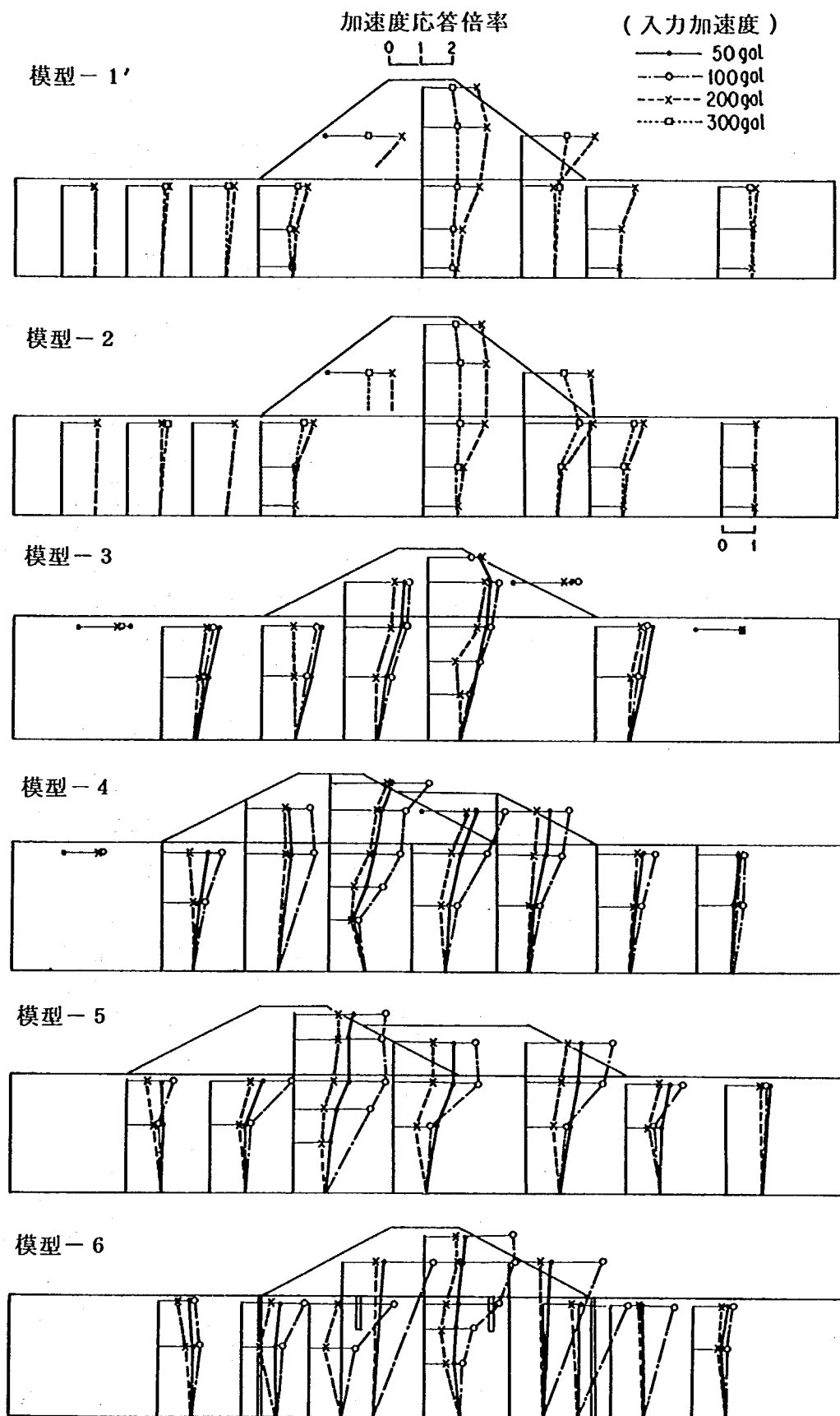


図-4.23 加速度応答倍率図

表-4.8 強震試験における応答値の読み取り値一覧表

| 模型<br>番号 | 入力加速度 (gal) |          | 応答加速度 (gal) |     |         |      | 構体下端下置 (mm) |      |      |       |      |          |      |      |     |      | 間隙水圧 (gf/cm) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|----------|-------------|----------|-------------|-----|---------|------|-------------|------|------|-------|------|----------|------|------|-----|------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----|----|--|--|--|
|          | 公称          | 実測       | 天端          |     | 構体直下地表面 |      | 左           |      |      | 右     |      |          | 平均   |      |     |      | U1           |      |      | U2   |      |      | U3   |      |      | U4   |      |     |    |    |  |  |  |
|          |             |          | 最小          | 最大  | 最小      | 最大   | 最初          | 最後   | 増分   | 最初    | 最後   | 増分       | 最初   | 最後   | 増分  | 最初   | 最後           | 増分   | 最初   | 最後   | 増分   | 最初   | 最後   | 増分   | 最初   | 最後   | 増分   | 最初  | 最後 | 増分 |  |  |  |
| 1'       |             | (A18・19) | (A9)        |     | (A12)   |      | (D-4)       |      |      | (D-5) |      | (D4, D5) |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 200         | 210      | 375         | 438 | 390     | 465  | 0.0         | 7.8  | 7.8  | 0.0   | 7.6  | 7.6      | 0.0  | 7.7  | 7.7 | 0.0  | 5.0          | 5.0  | 0.0  | 0.3  | 0.3  | 0.0  | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 17.0 | 18.0 | 1.0 |    |    |  |  |  |
|          | 250         | 270      | 360         | 440 | 350     | 400  | 7.9         | 14.6 | 6.7  | 7.6   | 14.2 | 6.6      | 7.8  | 14.4 | 6.7 | 5.0  | 14.5         | 9.5  | 2.4  | 2.6  | 0.2  | 3.00 | 3.30 | 3.0  | 17.0 | 18.0 | 1.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 300         | 320      | 260         | 420 | 340     | 400  | 14.7        | 19.2 | 4.5  | 14.2  | 18.7 | 4.5      | 14.5 | 19.0 | 4.5 | 4.5  | 8.0          | 3.5  | 0.1  | 0.1  | 0.0  | 2.4  | 4.4  | 2.0  | 1.6  | 1.6  | 0.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 350         | 375      | 200         | 340 | 320     | 400  | 19.3        | 22.4 | 3.1  | 18.7  | 21.8 | 3.1      | 19.0 | 22.1 | 3.1 | 3.6  | 6.8          | 3.2  | 0.0  | 0.2  | 0.2  | 0.2  | 0.8  | 0.6  | 0.0  | 0.2  | 0.2  |     |    |    |  |  |  |
| 2        |             | (A18・19) | (A9)        |     | (A12)   |      |             |      |      |       |      |          |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 100         | 95       | 155         | 155 | 145     | 145  | 0.0         | 0.1  | 0.1  | 0.0   | 0.1  | 0.1      | 0.0  | 0.1  | 0.1 | 0.0  | 0.8          | 0.8  | 0.0  | 0.7  | 0.7  | 0.0  | 1.30 | 1.30 | 0.0  | 12.0 | 12.0 |     |    |    |  |  |  |
|          | 150         | 165      | 275         | 413 | 233     | 438  | 0.2         | 3.4  | 3.2  | 0.2   | 3.0  | 2.8      | 0.2  | 3.2  | 3.0 | 0.8  | 2.6          | 1.8  | 0.7  | 3.5  | 2.8  | 11.8 | 32.8 | 21.0 | 11.0 | 28.0 | 17.0 |     |    |    |  |  |  |
|          | 200         | 215      | 320         | 490 | 320     | 560  | 3.7         | 8.5  | 4.8  | 3.4   | 8.2  | 4.8      | 3.6  | 8.4  | 4.8 | 1.6  | 3.0          | 1.4  | 2.9  | 5.2  | 2.3  | 20.6 | 21.3 | 0.7  | 17.0 | 23.0 | 6.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 250         | 320      | 300         | 360 | 263     | 275  | 8.8         | 12.8 | 4.0  | 8.6   | 12.8 | 4.2      | 8.7  | 12.8 | 4.1 | 1.2  | 2.7          | 1.5  | 2.4  | 4.6  | 2.2  | 7.0  | 9.0  | 2.0  | 3.0  | 3.1  | 0.1  |     |    |    |  |  |  |
|          | 300         | 320      | 240         | 320 | 260     | 360  | 13.1        | 16.0 | 2.9  | 13.1  | 16.0 | 2.9      | 13.1 | 16.0 | 2.9 | 1.5  | 2.5          | 1.0  | 2.3  | 3.9  | 1.6  | 2.0  | 2.5  | 0.5  | 1.0  | 3.5  | 2.5  |     |    |    |  |  |  |
|          | 350         | 375      | 220         | 300 | 240     | 340  | 16.3        | 18.7 | 2.4  | 16.3  | 18.6 | 2.3      | 16.3 | 18.7 | 2.4 | 1.0  | 1.8          | 0.8  | 1.7  | 3.0  | 1.3  | 0    | 1.0  | 1.0  | 2.5  | 5.5  | 3.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 400         |          |             |     |         |      |             |      |      |       |      |          |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
| 3        |             | (A25・26) | (A11)       |     | (A13)   |      | (D4)        |      |      | (D5)  |      | (D4, D5) |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 50          | 55       | 90          | 95  | 95      | 95   | 0.0         | 0.1  | 0.1  | 0.0   | 0.1  | 0.1      | 0.0  | 0.1  | 0.1 | 0.0  | 0.0          | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 0.2  | 0.0  | 0.0  | 1.3  | 1.3  |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 100         | 105      | 165         | 175 | 180     | 180  | 0.2         | 0.6  | 0.4  | 0.2   | 0.6  | 0.4      | 0.2  | 0.6  | 0.4 | 0.3  | 0.3          | 0.0  | 0.2  | 0.2  | 0.0  | 0.8  | 1.0  | 0.2  | 0.7  | 0.9  | 0.2  |     |    |    |  |  |  |
|          | 150         | 160      | 300         | 400 | 330     | 400  | 0.7         | 6.7  | 6.0  | 0.7   | 6.7  | 6.0      | 0.7  | 6.7  | 6.0 | 1.0  | 1.3          | 0.3  | 0.5  | 0.6  | 0.1  | 1.5  | 1.6  | 0.1  | 1.9  | 3.1  | 1.2  |     |    |    |  |  |  |
|          | 200         | 205      | 270         | 313 | 255     | 300  | 11.8        | 19.1 | 7.3  | 11.5  | 18.6 | 7.1      | 11.7 | 18.9 | 7.2 | 1.2  | 2.9          | 1.7  | 0.8  | 0.9  | 0.1  | 0.3  | 0.3  | 0.0  | 4.6  | 6.4  | 1.8  |     |    |    |  |  |  |
|          | 250         | 260      | 235         | 285 | 250     | 305  | 21.1        | ?    | ?    | 20.1  | 25.9 | 5.8      | 20.6 | 26.4 | 5.8 | 4.9  | 5.4          | 0.5  | 5.0  | 5.2  | 0.2  | 2.7  | 2.9  | 0.2  | 9.4  | 10.6 | 1.2  |     |    |    |  |  |  |
|          | 300         | 330      | 175         | 263 | 240     | 300  |             |      |      | 27.3  | 30.6 | 3.3      | 27.8 | 31.1 | 3.3 | 6.1  | 6.1          | 0.0  | 4.5  | 4.7  | 0.2  | 5.0  | 5.0  | 0.0  | 12.8 | 13.3 | 0.5  |     |    |    |  |  |  |
|          |             | 240      | 165         | 201 | 190     | 230  |             |      |      | 32.7  | 34.2 | 1.5      | 33.2 | 34.7 | 1.5 |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 350         | 380      | 165         | 240 | 230     | 260  |             |      |      | 35.0  | 37.8 | 2.8      | 35.5 | 38.3 | 2.8 | 3.2  | 3.5          | 0.3  | 5.1  | 5.3  | 0.2  | 8.4  | 8.6  | 0.2  | 16.9 | 17.4 | 0.5  |     |    |    |  |  |  |
|          | 400         | 435      | 163         | 235 | 210     | 250  |             |      |      | 38.6  | 41.0 | 3.4      | 39.1 | 41.5 | 3.4 | 4.6  | 4.8          | 0.2  | 6.2  | 6.3  | 0.1  | 10.8 | 10.8 | 0.0  | 20.6 | 22.1 | 1.5  |     |    |    |  |  |  |
| 4        |             | (A28・29) | (A7)        |     | (A9)    |      |             |      |      |       |      |          |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 50          | 55       | 93          | 105 | 85      | 85   | 0.0         | 0.1  | 0.1  | 0.0   | 0.1  | 0.1      | 0.0  | 0.1  | 0.1 | 0.0  | 0.0          | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.2  | 0.6  | 0.4  | 0.2  | 0.4  | 0.2  |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 100         | 105      | 260         | 400 | 215     | 325  | 0.2         | 1.8  | 1.6  | 0.2   | 2.0  | 1.8      | 0.2  | 1.9  | 1.7 | 0.4  | 0.4          | 0.0  | 0.6  | 0.8  | 0.2  | 1.8  | 2.5  | 0.7  | 1.9  | 1.9  | 0.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 150         | 150      | 310         | 400 | 250     | 300  | 2.8         | 5.8  | 3.0  | 3.1   | 6.9  | 3.8      | 3.0  | 6.4  | 3.4 | 3.5  | 6.7          | 3.2  | 2.9  | 3.1  | 0.2  | 5.9  | 5.9  | 0.0  | 9.3  | 9.9  | 0.6  |     |    |    |  |  |  |
|          | 200         | 200      | 300         | 360 | 237     | 280  | 6.8         | 9.2  | 2.4  | 7.8   | 11.0 | 3.2      | 7.3  | 10.1 | 2.8 | 0.1  | 0.1          | 0.0  | 0.3  | 0.5  | 0.2  | 0.7  | 1.0  | 0.3  | 0.2  | 0.2  | 0.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 250         | 260      | 290         | 350 | 238     | 285  | 10.1        | 12.6 | 2.5  | 11.9  | 14.8 | 2.9      | 11.0 | 13.7 | 2.7 | 7.3  | 8.0          | 0.7  | 5.8  | 6.0  | 0.2  | 9.2  | 9.4  | 0.2  | 15.0 | 15.6 | 0.6  |     |    |    |  |  |  |
|          | 300         | 320      | 290         | 335 | 240     | 280  | 13.4        | 16.0 | 2.6  | 15.9  | 18.7 | 2.8      | 14.7 | 17.4 | 2.7 | 9.0  | 9.0          | 0.0  | 10.2 | 10.2 | 0.0  | 9.6  | 9.8  | 0.2  | 16.7 | 17.3 | 0.6  |     |    |    |  |  |  |
|          | 350         | 375      | 280         | 315 | 230     | 260  | 16.8        | 19.3 | 2.5  | 19.1  | 21.5 | 2.4      | 18.0 | 20.4 | 2.5 | 10.3 | 11.2         | 0.9  | 8.6  | 8.8  | 0.2  | 9.5  | 9.5  | 0.0  | 15.8 | 16.2 | 0.4  |     |    |    |  |  |  |
| 5        |             | (A23・24) | (A7)        |     | (A9)    |      |             |      |      |       |      |          |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 50          | 53       | 93          | 95  | 88      | 88   | 0.0         | 0.1  | 0.1  | 0.0   | 0.1  | 0.1      | 0.0  | 0.1  | 0.1 | 0.1  | 5.3          | 5.2  | 0.3  | 1.0  | 0.7  | 0.1  | 1.0  | 0.9  | 0.2  | 0.2  | 0.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 100         | 100      | 220         | 300 | 200     | 280  | 0.2         | 2.3  | 2.1  | 0.2   | 1.9  | 1.7      | 0.2  | 2.1  | 1.9 | 1.7  | 18.7         | 17.0 | 0.5  | 5.9  | 5.4  | 2.1  | 10.1 | 8.0  | 1.6  | 3.9  | 2.3  |     |    |    |  |  |  |
|          | 150         | 145      | 265         | 320 | 238     | 300  | 3.3         | 6.9  | 3.6  | 2.8   | 5.5  | 2.7      | 3.1  | 6.2  | 3.2 | 5.6  | 22.1         | 16.5 | 0.3  | 6.3  | 6.0  | 13.0 | 27.5 | 14.5 | 9.4  | 10.9 | 1.5  |     |    |    |  |  |  |
|          | 200         | 190      | 255         | 305 | 238     | 283  | 8.0         | 10.9 | 2.9  | 6.4   | 8.4  | 2.0      | 7.2  | 9.7  | 2.5 | 8.0  | 12.0         | 14.0 | 2.4  | 7.4  | 5.0  | 21.7 | 35.7 | 14.0 | 13.0 | 14.0 | 1.0  |     |    |    |  |  |  |
|          | 250         | 235      | 235         | 275 | 225     | 263  | 12.1        | 14.8 | 2.7  | 9.2   | 10.9 | 1.7      | 10.7 | 12.9 | 2.2 | 9.6  | 20.1         | 10.5 | 3.2  | 7.8  | 4.6  | 26.8 | 40.3 | 13.5 | 15.2 | 16.0 | 0.8  |     |    |    |  |  |  |
|          | 300         | 280      | 220         | 250 | 220     | 250  | 15.7        | 17.9 | 2.2  | 11.6  | 12.9 | 1.3      | 13.7 | 15.4 | 1.8 | 11.5 | 19.2         | 7.7  | 4.7  | 19.2 | 4.4  | 33.5 | 45.5 | 12.0 | 15.0 | 15.5 | 0.5  |     |    |    |  |  |  |
|          | 350         | 330      | 200         | 235 | 220     | 240  | 17.9        | 19.9 | 2.0  | 13.4  | 16.0 | 2.6      | 18.2 | 18.0 | 2.3 | 11.4 | 17.1         | 5.7  | 5.9  | 9.3  | 3.4  | 35.7 | 45.3 | 9.6  | 15.3 | 15.7 | 0.4  |     |    |    |  |  |  |
| 6        |             | (A21・22) | (A9)        |     | (A11)   |      |             |      |      |       |      |          |      |      |     |      |              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |    |    |  |  |  |
|          | 50          | 33       | 42          | 51  | 36      | 44   |             |      |      |       |      |          |      |      |     |      | 0.2          | 0.9  | 0.7  | 0.3  | 0.5  | 0.2  | 0.1  | 2.5  | 2.4  | 0.1  | 1.5  | 1.4 |    |    |  |  |  |
|          | 100         | 95       | 210         | 275 | 220     | 245  |             |      |      | 0.0   | 3.3  | 3.3      |      |      |     |      | 0.1          | 1.5  | 1.4  | 0.2  | 12.2 | 12.0 | 0.4  | 0.8  | 0.4  | 0.3  | 1.4  | 1.1 |    |    |  |  |  |
|          | 150         | 140      | 260         | 305 | 205     | 255  | 4.0         | 8.7  | 4.7  | 4.0   | 10.6 | 6.6      | 4.0  | 9.7  | 5.7 | 3.2  | 4.6          | 1.4  | 2.3  | 14.3 | 12.0 | 5.7  | 12.7 | 7.0  | 3.5  | 6.2  | 2.7  |     |    |    |  |  |  |
|          | 200         | 280      | 270         | 320 | 130     | 160  | 12.8        | 18.0 | 5.2  | 12.0  | 19.3 | 7.3      | 12.4 | 18.7 | 6.3 | 5.1  | 6.1          | 1.0  | 3.3  | 4.1  | 0.8  | 8.4  | 14.8 | 6.4  | 5.0  | 7.7  | 2.7  |     |    |    |  |  |  |
|          | 250         | 240      | 275         | 315 | 145     | 200  | 18.8        | 23.2 | 4.4  | 20.9  | 27.2 | 6.3      | 19.9 | 20.2 | 5.4 | 4.3  | 14.3         | 10.0 | 4.9  | 5.6  | 0.7  | 11.6 | 16.4 | 4.8  | 6.8  | 10.0 | 3.2  |     |    |    |  |  |  |
|          | 300         | 190      | 275         | 300 | 180     | 225  | 24.0        | 27.0 | 3.0  | 18.5  | 33.6 | 7.6      | 21.3 | 30.3 | 5.3 | 8.8  | 13.8         | 5.0  | 6.2  | 6.7  | 0.5  | 13.7 | 17.3 | 3.6  | 7.0  | 10.4 | 3.4  |     |    |    |  |  |  |
|          | 350         | 330      | 258         | 305 | 110     | 150  | 27.2        | 30.0 | 2.8  | 34.4  | 39.1 | 4.7      | 30.8 | 34.6 | 3.8 | 6.8  | 9.8          | 3.0  | 6.3  | 6.9  | 0.6  | 15.5 | 19.2 | 3.7  | 6.3  | 10.8 | 4.5  |     |    |    |  |  |  |
| 400      | 385         | 225      | 270         | 125 | 125     | 31.0 | 32.4        | 1.4  | 39.7 | 44.1  | 4.4  | 35.4     | 38.3 | 2.9  | 9.1 | 14.1 | 5.0          | 9.0  | 9.6  | 0.6  | 17.0 | 19.8 | 2.8  | 9.0  | 12.9 | 3.9  |      |     |    |    |  |  |  |

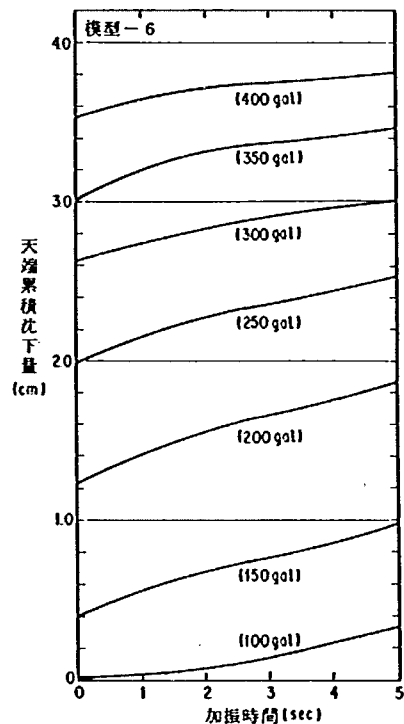
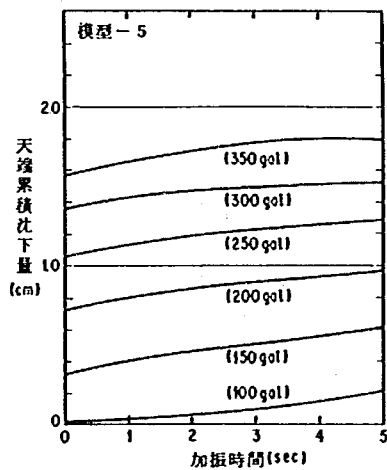
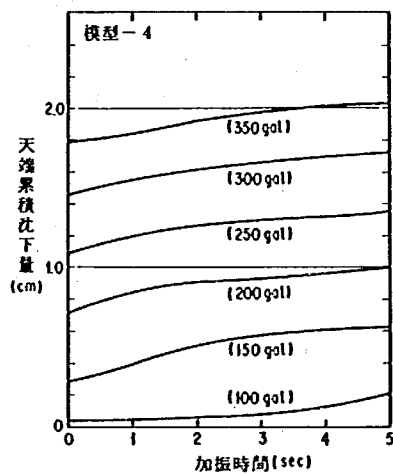
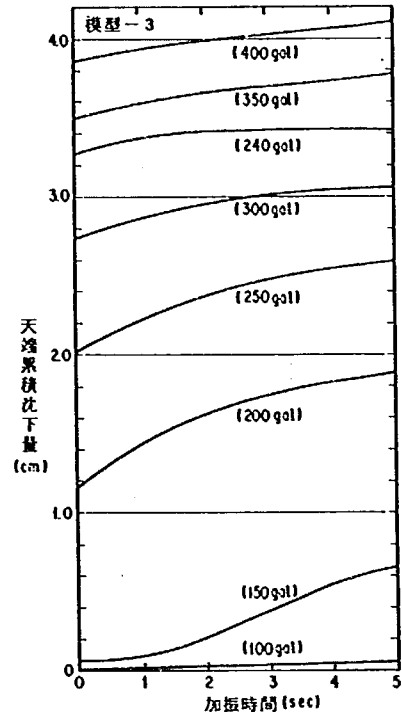
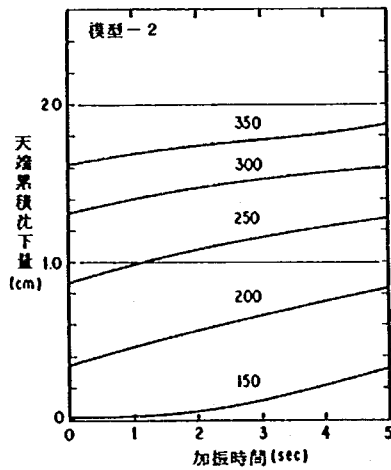
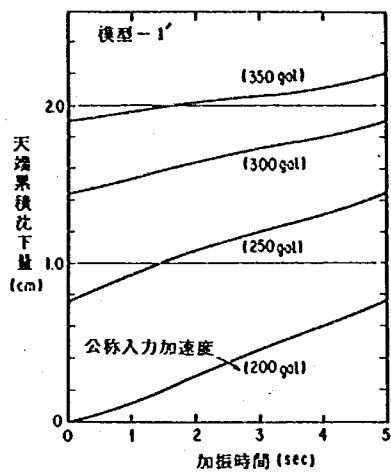


図-4.24 天端沈下量の経時変化

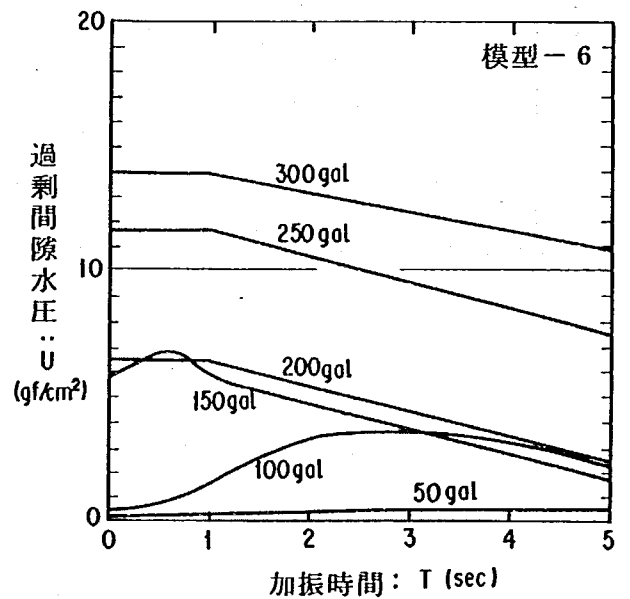
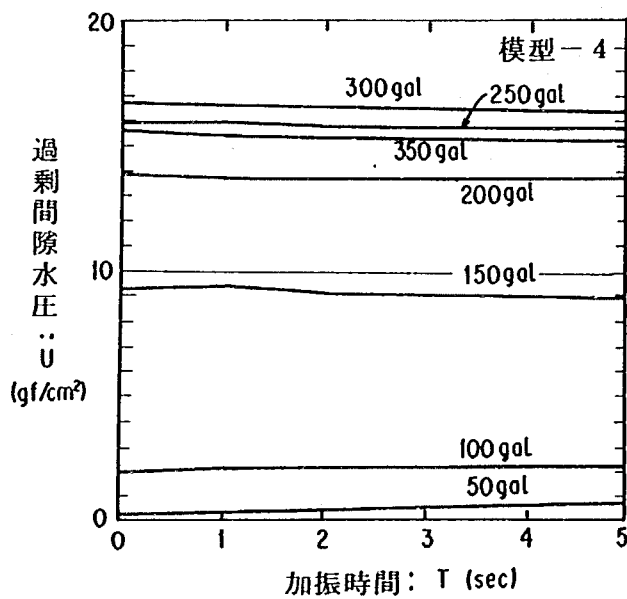
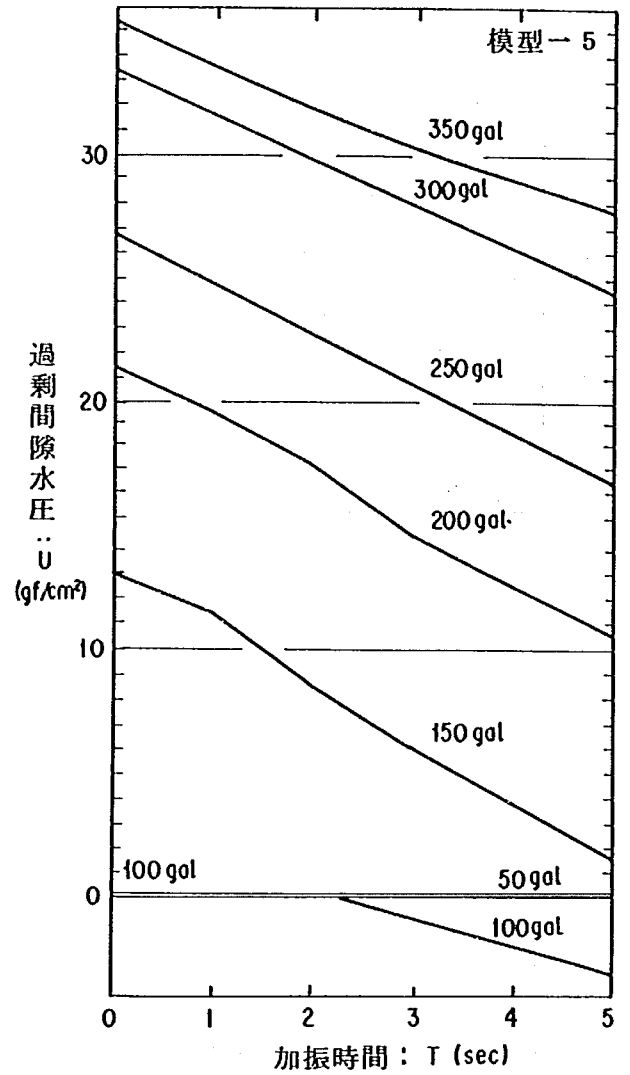
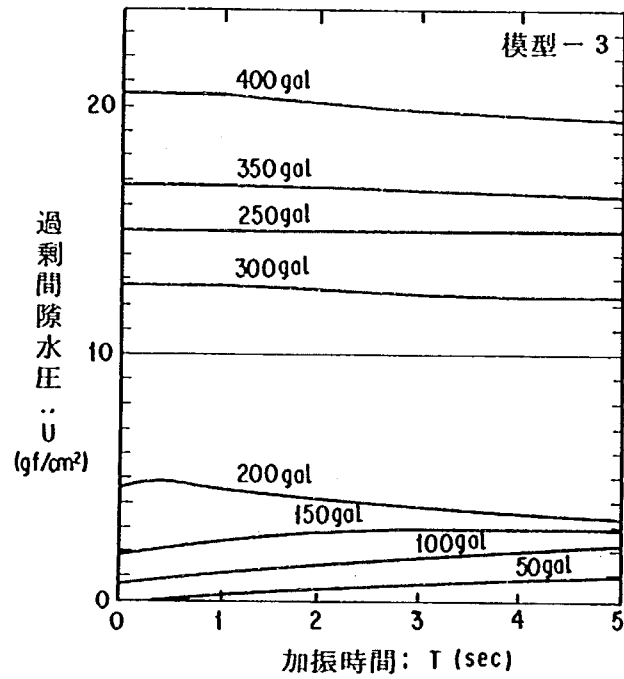


図-4.25 間隙水圧の経時変化

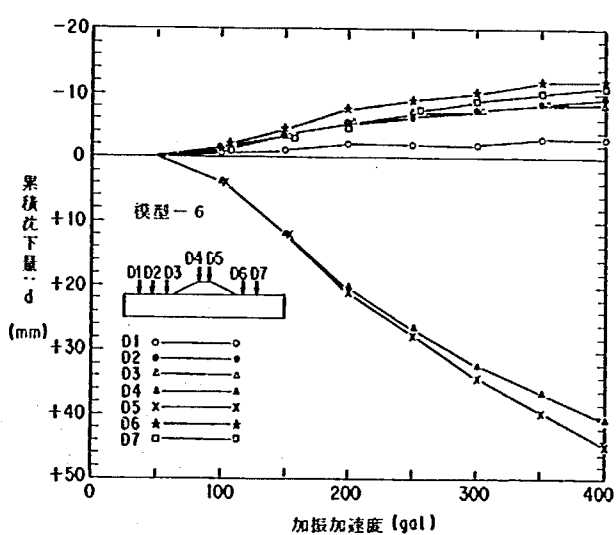
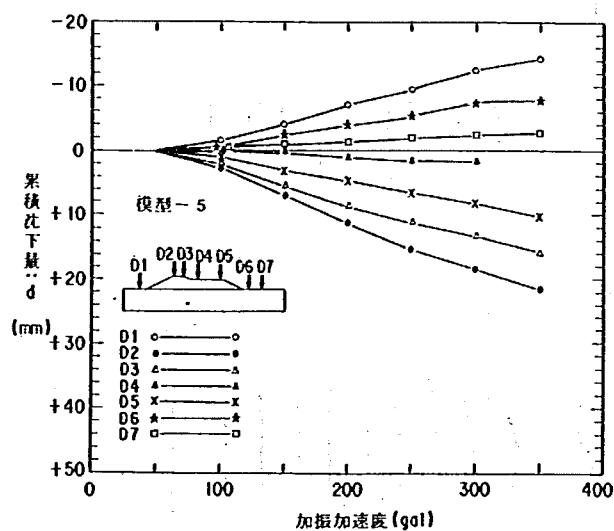
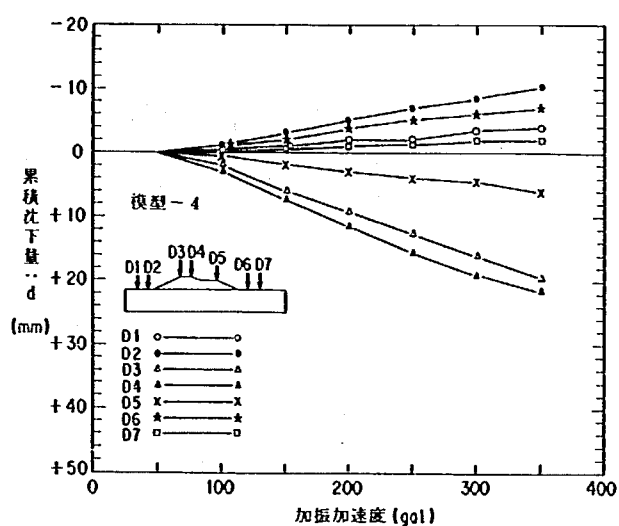
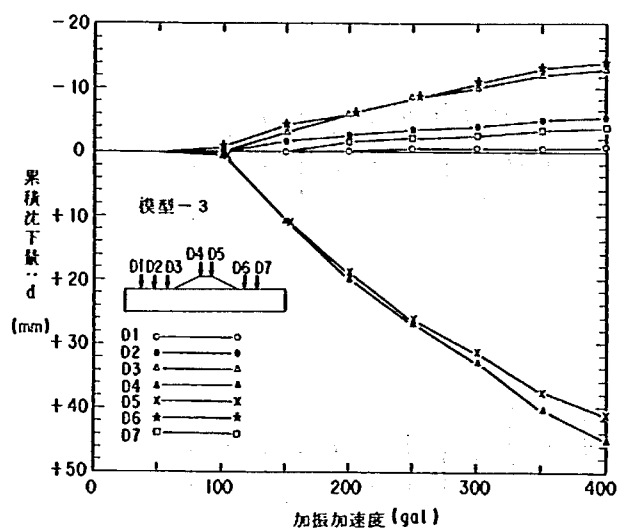
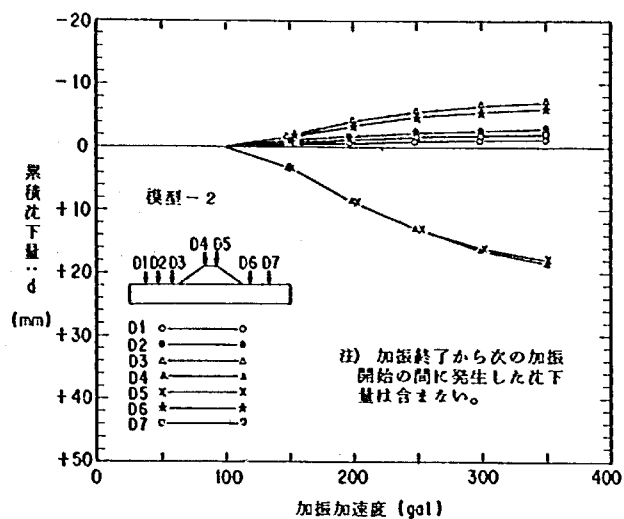
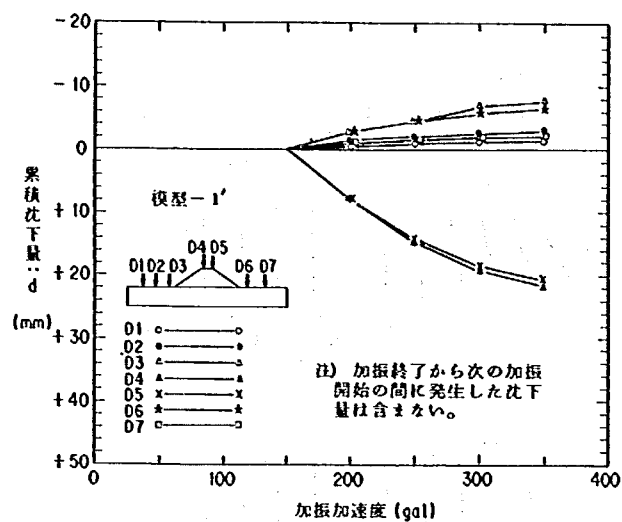
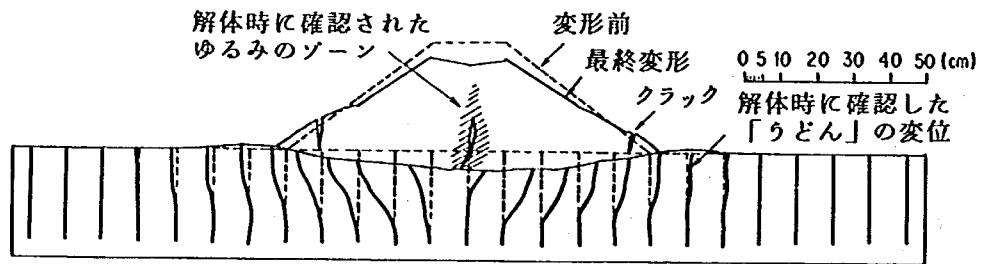
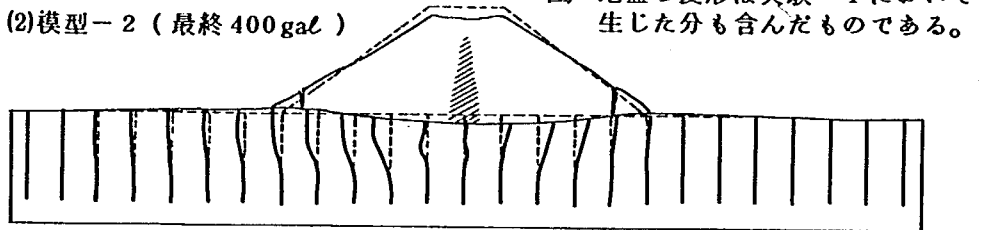


図-4.26 加速度-変形量関係

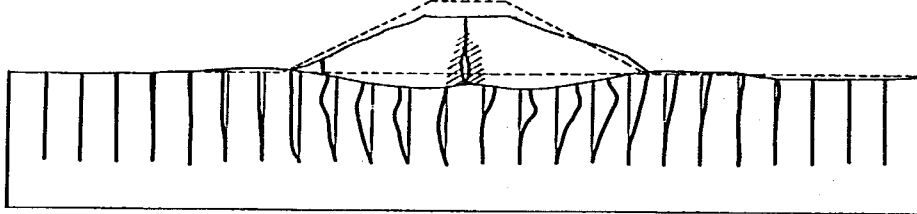
(1) 模型-1' (最終 500 gal)



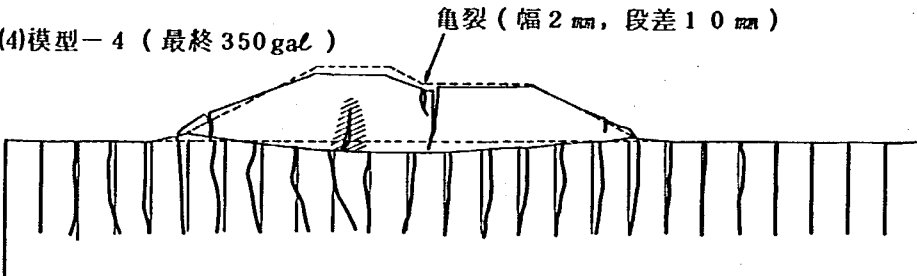
(2) 模型-2 (最終 400 gal)



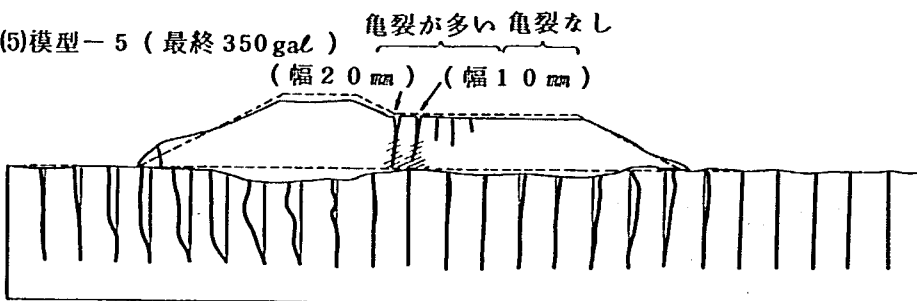
(3) 模型-3 (最終 400 gal)



(4) 模型-4 (最終 350 gal)



(5) 模型-5 (最終 350 gal)



(6) 模型-6 (最終 400 gal)

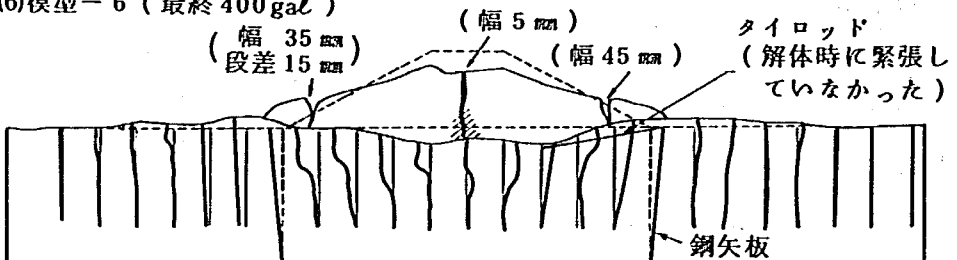


図-4.27 模型の最終変形状況

して観察した記録を元にして描いた。

同図より以下の事が観察される。

模型-1', 2, 3は無対策のものであるが、変形は天端の沈下、粘土地盤の側方変位、のり先地盤の隆起および堤体内へのクラックの発生などであり、ほぼ左右対称に生じている。

堤体は天端が沈下しているが直下の地盤面もそれと同程度かあるいはやや少ない程度に沈み込んでいる。同時に水平方向には広がっており、それに伴い堤体中央部およびのり尻部に鉛直亀裂が生じている。これは、堤体が水平方向に伸びていること、すべり変形的でないことから、引張亀裂と考えられる。事実、堤体中央部の亀裂の周囲は、解体時に竹ひごを突き刺すと他の部分より明らかに抵抗が小さく、この部分一帯にゆるみのゾーンが確認された。さらに、この亀裂は内部亀裂となっているが、これは堤体中央部が沈み込むように変形したためである。

一方、地盤の変形について見ると、変形は地盤の上半部で著しい。そしてこの範囲のせん断強度の分布を図-4.14で見ると明らかに低い値を示しており、地盤の変形はせん断強度の低い部分で生じていることがわかる。

つぎに、押え盛土工法の模型-4, 5について見ると、まず亀裂の発生状況が異なるのに気付く。大きな亀裂は押え盛土取付部で発生している。また、これは上述の内部亀裂ではなく、表面から発生した開口亀裂となっている。それは模型-4の場合に特に顕著である。これは次のような理由によるものと思われる。すなわち、模型-3では堤体中央部が特に大きく沈み込むような変形を生じたが、模型-4, 5のように堤体幅が広くなると、堤体が同じ沈下量を生じるためには、粘土地盤は非排水変形しか生じ得ないから、地盤の側方変位量はその分だけ大きくならなければならないことになる。極端な例として、堤体敷幅がきわめて広ければ、その沈下はほとんどないであろう。ところが、そのような変形を生じさせる作用を及ぼす盛土荷重にさほど違いはなく、また地震時繰返しせん断による堤体下部地盤の軟化の程度も同様と想定されることから、そのような沈下変形は起りにくいことになる。したがって、このときの堤体の主な沈下変形は、のり面からのある限られた範囲内で生じることになるものと考えられる。

また、このことに関連して、地盤の変形状況も無対策の場合と多少異なり、押え盛土を付けた方の地盤の側方変形は相対的に抑制されていることが認められる。

鋼矢板工法の模型-6について変形状況の特徴を挙げると、まず、のり先地盤の変形が鋼矢板の倒れ込みに対応して比較的直線的になっていることがわかる。また、堤体直下地盤の変形状況から、控え矢板が前面矢板の倒れ込みに抵抗しているようにも見えるが、タイロッドは加振中にも後にもその張力は増加しておらず、その控えとしての効果はなかったようである。したがって、堤体直下部の左側の地盤に見られるせん断変形的な変形は、加振中の控え矢板の引き抜き力の作用によるものか、あるいは矢板間の範囲内に限られた浅いすべり変形なのか明確ではない。

ちなみに、図-4.28はそのタイロッドの加振中、加振停止中における張力の変化を示したものである。なお、強震実験前には1本当たり約2kgfの張力が発生しているが、タイロッドのセット

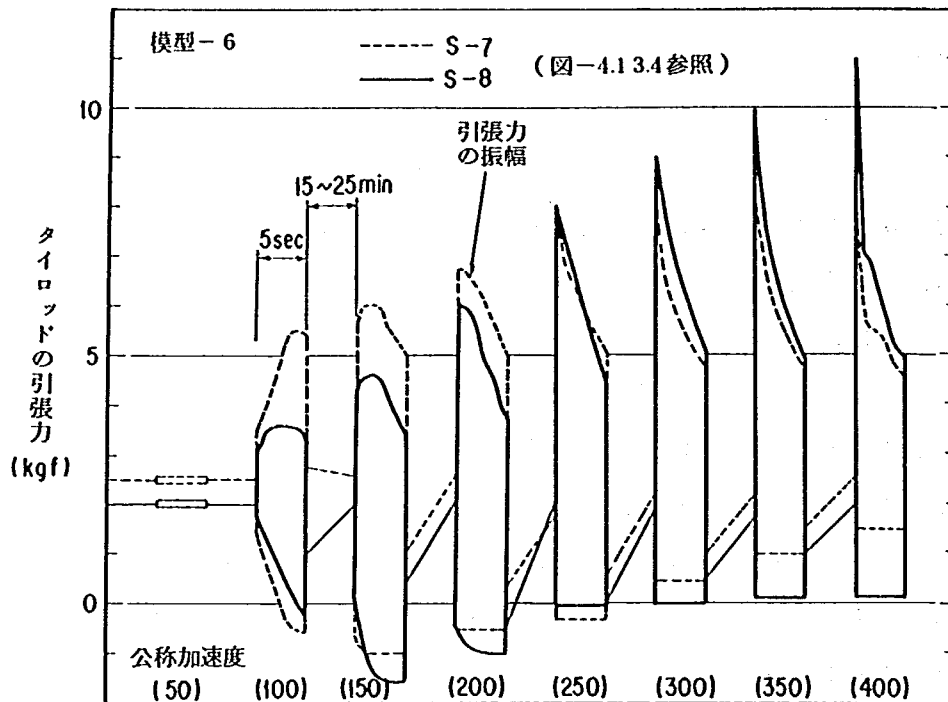


図-4.28 タイロッドの張力の変化

時に約1kgfのプレテンションを与えており、残り1kgfは堤体盛立ておよび強震実験までの間に生じたものである。

同図より、加振による残留張力の増加はほとんどなく、逆に少し減少気味である。また、加振中の張力の振幅は入力加速度レベルと共に増加しているが、堤体全荷重から考えるとそれほど大きくはないようにも思える。ただし、張力の振幅は非対称であるが、これは下限値が0（少し測定誤差が見られるが）で抑えられているためである。

以上より、今回の控え矢板の配置では、堤体沈下の抑制効果としての控えの有効性はないようであることが結論付けられる。

最後に、模型-3～6の実験における加振加速度と天端沈下量の関係をまとめて図-4.29に示す。ただし、天端沈下量は前段階加振および停止中のクリープ変形により生じた沈下量をすべて累積した値であり、天端にセットされた2個の変位計の記録の平均値をとっている。

同図に示された天端沈下量の大小関係から各対策工の地震時沈下量の抑制効果、すなわち耐震効果を読み取ることができる。

ただし、各模型の地盤強度は、図-4.14に既に示したように必ずしも等しくなく、この点若干の配慮が必要である。ちなみに、各模型の地盤強度の比較のためにこれらをまとめて示すと図-4.30のようになる。これより、地震強度は全体的に模型-3で最も低く、模型-5で最も高いことがわかる。

実験のレベルではこれらの差を補正することはできないので、ここではこの事をある程度考慮しながら図-4.29の結果を検討してみる。

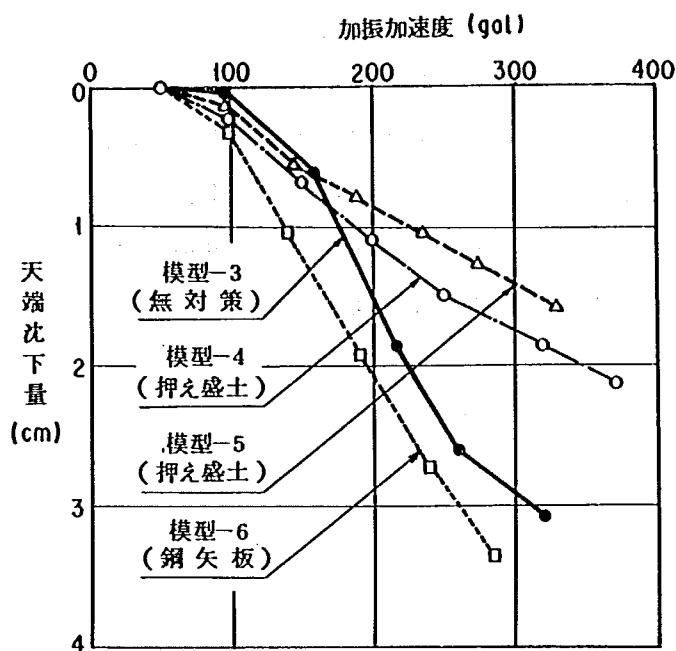


図-4.29 加振加速度と天端沈下量の関係

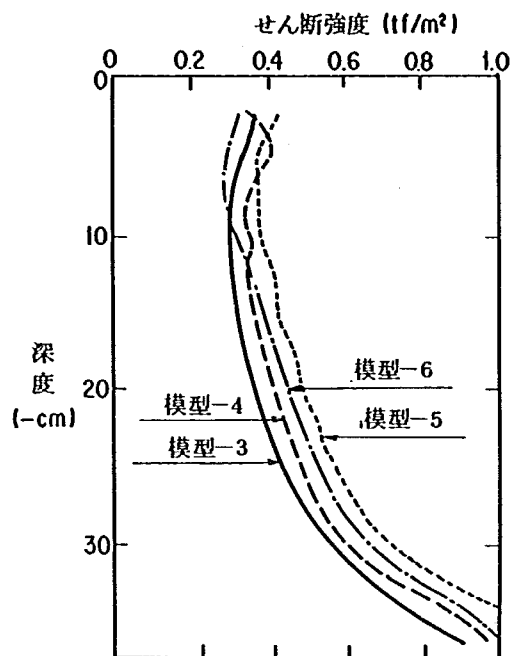


図-4.30 実験前せん断強度の比較

押え盛土工法は無対策に比べ、大きい沈下を抑制していることがわかる。またその沈下量の増加のしかたも押え盛土が大きいほど緩やかである。地盤強度に若干の違いはあるものの、この傾向は認められるものと考えられる。また、鋼矢板工法では逆に沈下量が大きくなっている。この理由としては、浅部での地盤強度が他に比べて低い事が考えられるが、もう一つ、前に述べたように、応答加速度が他に比べて大きかった事が沈下量を増加させる作用をしたという可能性も考えられる。

たしかに、控え矢板の効果はさほどなかったようであるが、前面の鋼矢板は地盤の局所的な側方変形を抑える働きを示しており、鋼矢板工法の耐震効果があるかどうかという点については今後の検討が必要であろう。

#### 4.4 模型振動実験結果のまとめ

昭和58、59年度の2カ年にわたって実施した計6ケースの模型振動実験について以上に示した。

その結果は以下のようにとまとめられる。

- (1) 粘土地盤上の堤防は地震により沈下変形を生じるが、それは粘土地盤が地震時せん断力により降伏し、側方変形することに伴い生じる。また、それに応じて堤体も側方に変形し、引張亀裂を生じる。
- (2) 押え盛土工法は、地盤の側方変形を抑制することにより本堤の沈下を抑制する効果がある。
- (3) 鋼矢板工法は地盤の局所的な側方変形（せん断すべり的な変形もこれに属する。）を抑える

効果がある。ただし、堤体の沈下を抑制する効果については今回の実験では確かめられなかった。また、控え矢板は、今回の模型実験での配置では控えとしての効果はなかった。

(4) 上記2つの対策工法の定量的な耐震効果の評価は、実験の範囲内ではできなかった。

この点についての詳細な検討は、今後の実験的・解析的検討に委ねられよう。

ただし、以上の中で示した結論的な部分の記述は、ごく限られた実験の中から導かれたものであり、より一般的な結論を得るためにはさらに多くの検討を進めなければならない。

## 5. 地震後永久変形解析

本章では、昭和58年度に実施した模型振動実験（第4章の模型-2）に対して行った解析の結果について報告する。

本解析は、地震動を受ける盛土に生じる永久変形量を計算するものである。

この解析の方法および結果については既に文献9)に報告しているので、ここではその引用により示すこととする。

### 5.1 解析方法

#### 5.1.1 基本的な考え方

本解析手法は、盛土の地震動による永久変形は、盛土および地盤内の土要素が地震動により付加される繰返しせん断応力によりひずみの累積を起こすことにより生じるものであるという考え方に基づいている。

図-1(a)に示す盛土および地盤が地震動を受けると、要素Aには図-1(b)に示すように初期応力（ $\sigma'_{vc}$ ,  $\sigma'_{hc}$ ,  $\tau_{hs}$ ）に加え、動的応力  $\tau_{hd}$  が作用する。ここに、 $\sigma'_{vc}$ ,  $\sigma'_{hc}$ ：初期有効鉛直および水平拘束圧， $\tau_{hs}$ ：初期（水平面内）せん断応力， $\tau_{hd}$ ：動的（水平面内）せん断応力である。このとき要素Aの応力-ひずみ状態は、図-1(c)に模式的に示したように、地震前にA点にあったものが、繰返しせん断によりひずみが累積し、地震後にB点に至る。この間のせん断ひずみの増分が累積せん断ひずみである。

本法では、各々の土要素が上記のように変形することにより全体構造としての盛土の最終的な

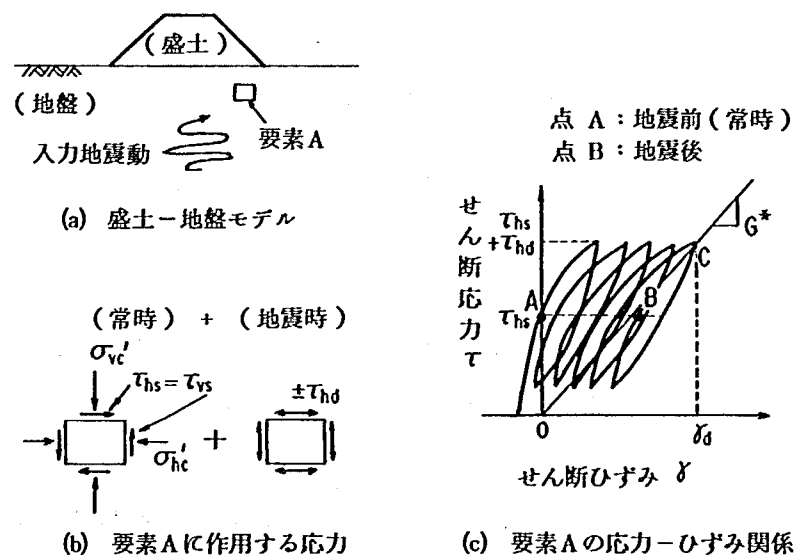


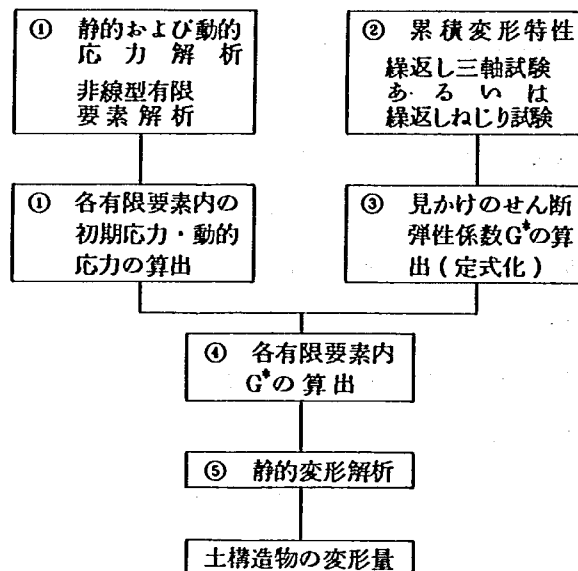
図-5.1 地震時における土要素の応力，ひずみ状態

変形が生じるとの考えに立っているが、各要素がB点で表わされる応力－ひずみ状態にあり、しかも全体系としての応力－ひずみ関係が適合するような解は一般に存在しない。これは、地震時に土に累積ひずみが生じると盛土の応答特性は変化し、一方、図－1(c)のような土の変形特性を調べるのに用いるせん断応力の算定にあたってはこのような変化を考慮しないことの違いによるものである。

したがって、本法では地震後の土の応力－ひずみ関係が図－1(c)上のOC線上に存在するものと仮定し、この勾配を見かけの剛性率 $G^*$ と定義し、この剛性率を用いて自重変形解析を行い、全体の変形を求めている。

### 5.1.2 解析手順

図－5.2に本法の解析手順を示す。



図－5.2 永久変形解析法の手順

まず、①では、設定された盛土および地盤のモデルに対して非線型有限要素解析により各要素の初期応力および動的応力を計算する。ただし、ここでは地震時における過剰間隙水圧の発生や土の軟化特性は考慮しない。

②では、各種の応力条件の下における土の累積ひずみ特性を室内試験により求める。これは通常、繰返し三軸圧縮試験あるいは繰返しねじり三軸試験機を用いた一定応力振幅の繰返しせん断試験により行う。

③では、上記の試験データを用いて、図－1(c)に示した累積せん断ひずみ $r_d$ を次のような形に整理する。

$$r_d = f(\sigma'_{mc}, \tau_s, \tau_d, N) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

あるいは、累積ひずみ特性の応力比依存性を仮定すれば、

$$r_d = g (\tau_s / \sigma'_{mc}, \tau_d / \sigma'_{mc}, N) \dots\dots\dots (5.2)$$

ここに、 $\sigma'_{mc}$ ：初期平均有効拘束圧、 $N$ ：繰返し回数 である。

したがって、②では、上式のような関係を明らかにできるだけの数の試験を行う必要がある。  
また、上式は土質材料、密度、含水比等のパラメータを含んでいないが、これらを考慮する場合  
にはさらに多くの試験を必要とする。

つぎに、見かけの剛性率  $G^*$  を図-1(c)を参照して次式で求める。

$$G^* = (\tau_s + \tau_d) / r_d \dots\dots\dots (5.3)$$

④では、①より求めた応力パラメータを式(5.1)、(5.2)および式(5.3)に代入することにより各要素の見かけ  
の剛性率  $G^*$  を求める。このとき、土要素と室内試験（ここでは繰返し三軸試験を示す。）との応  
力、ひずみの対応関係は、表-5.1のように与える（図-5.3参照）。ここで、累積ひずみを式  
(5.1)により求めるとき、表5.1のすべての対応関係が成り立つ必要があるが、式(5.2)が可能  
な場合には、表-5.1のうち、応力に関する項は等しくする必要はない。

表-5.1 現位置と室内試験における応力、ひずみの対応関係

|          | 現位置の土要素                                            | 三 軸 供 試 体                                                                                         |
|----------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 平均有効拘束圧  | $\sigma'_{mc} = (\sigma'_{vc} + \sigma'_{hc}) / 2$ | $\sigma'_{mc} = (\sigma'_{1c} + \sigma'_{3c}) / 2$<br>あるいは<br>$(\sigma'_{1c} + \sigma'_{3c}) / 3$ |
| 初期せん断応力  | $\tau_{hs}$                                        | $\tau_s = (\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) / 2$                                                        |
| 繰返し "    | $\tau_{hd}$ (不規則的)                                 | $\tau_d = \sigma_{1d} / 2$ (規則的)                                                                  |
| 初期せん断応力比 | $\tau_{hs} / \sigma'_{mc}$                         | $\tau_s / \sigma'_{mc}$                                                                           |
| 繰返し "    | $\tau_{hd} / \sigma'_{mc}$                         | $\tau_d / \sigma'_{mc}$                                                                           |
| せん断ひずみ   | $r_h$ (水平面内)                                       | $r = (3/2) \times \epsilon_1$                                                                     |

なお、表中、 $\tau_{hd}$  が時間的に不規則な変化を示す場合には、これを等価な一定振幅応力に変換  
する操作が必要である。

最後に、⑤において、上記の  $G^*$  を用いて自  
重による静的変形解析を行い、盛土の変形を求  
める。ところで、変形に関するパラメータとし  
ては剛性率  $G$  の他にヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、  
体積弾性係数  $K$  があり、これらの間には次のよ  
うな関係がある。

$$E = 2(1 + \nu)G,$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} = \frac{2(1 + \nu)G}{3(1 - 2\nu)} \dots\dots (5.4)$$

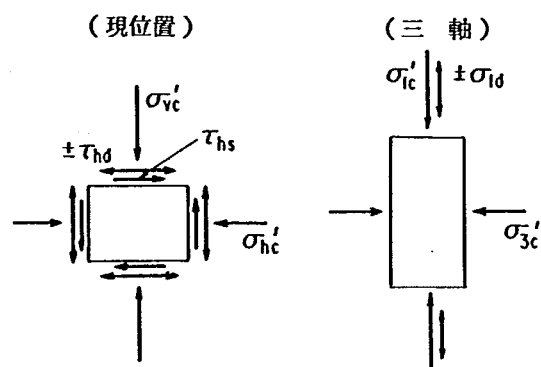


図-5.3 現位置と室内試験における  
応力の対応関係

したがって、独立なパラメータは2つであり、変形解析においては見かけの剛性率 $G^*$ とポアソン比 $\nu$ を与えることとし、 $\nu = 0.5$ （実際には0.499など）としている。この仮定は、地震前後での体積ひずみをほぼ無視し、地震による変形が主にせん断ひずみのみによると考えていることになる。

以上に述べた方法により、地震動に伴う盛土の永久変形が計算される。

### 5.1.3 解析条件

解析モデルを図-5.4に示す。解析プログラムは“SADAP”<sup>10)</sup>である。

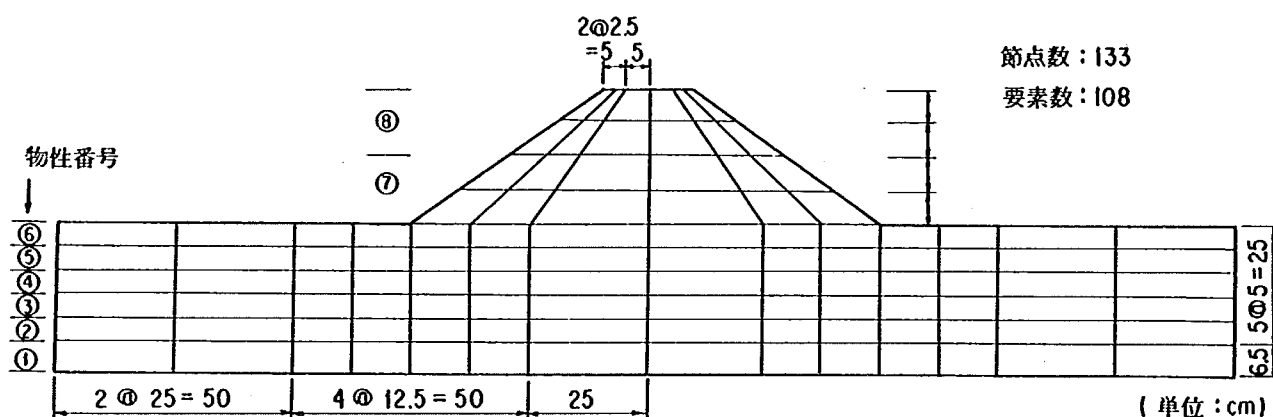


図-5.4 解析モデル

初期応力解析、動的解析に必要な初期剛性率、せん断強度定数は4.3.4で示したS波速度、せん断強度等をもとにして決めた。

ただし、初期応力解析においては、模型の特殊性を考慮し、次のようにした。

すなわち、模型は最初に地盤を圧密荷重により圧密し、圧密荷重を除荷した直後に盛土を行い、1日後に振動実験を行っている。

この間の地盤内の有効応力の変化を示すと図-5.5のようになっているものと推定される。そこで、振動実験時の地盤内の有効応力は圧密直後から変化しておらず、かつ盛土による圧密も進行していないと考え、振動実験時の地盤の有効応力は圧密時の有効応力に等しいとした。

このような仮定に基づき、初期応力解析を行ったが、築堤過程は地盤、盛土の2段階とした。

動的応力解析においては、時間刻み $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ 、100ステップ( $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $T = 1 \text{ sec}$ )の正弦波加速度を入力した。

表-5.2に解析パラメータを示す。

つぎに、粘土の累積ひずみ特性あるいは見かけの剛性率 $G^*$ は、3.3.4に示した繰返し三軸試験結果を整理して次式を得た。

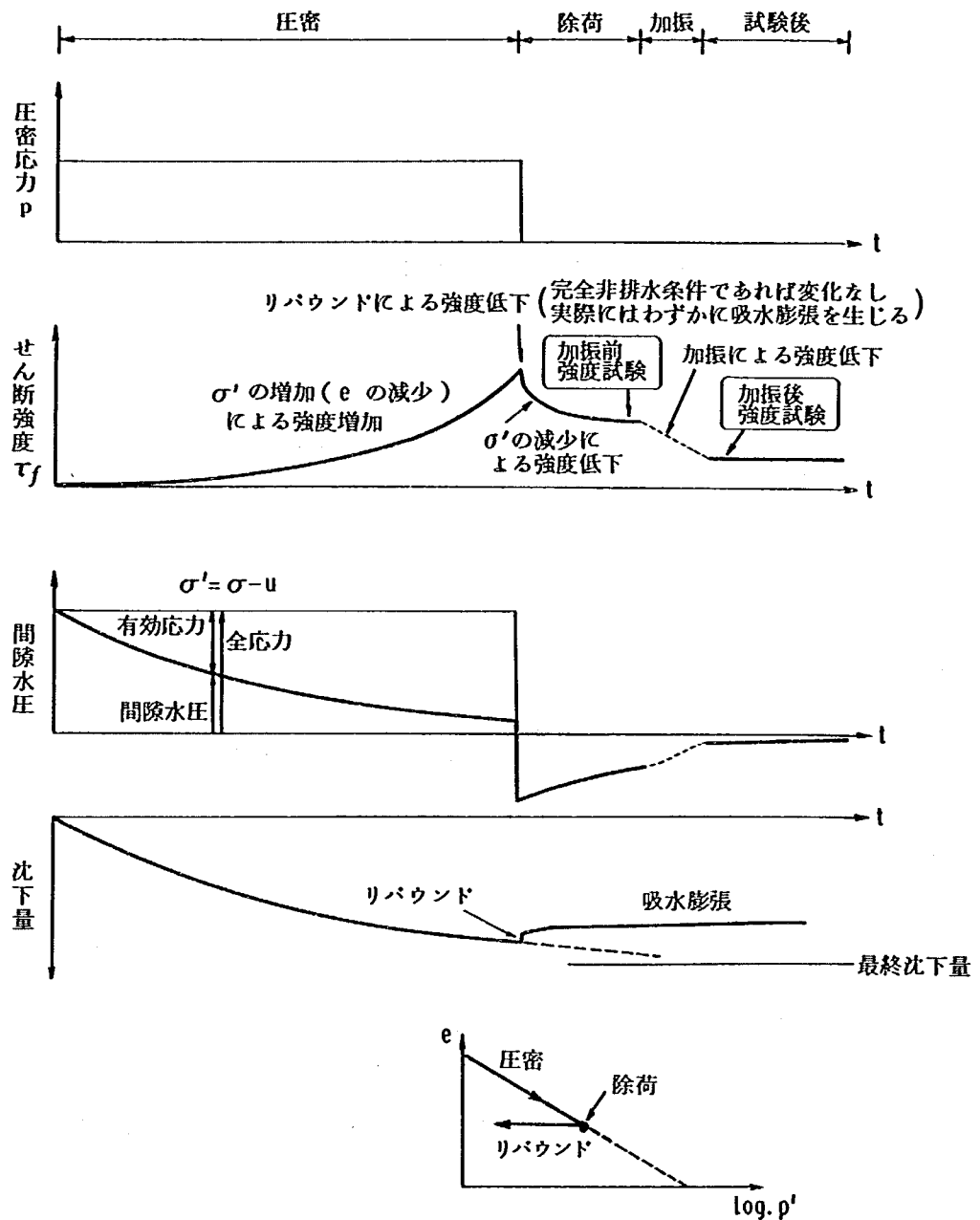


図-5.5 地盤強度の変化(模式図)

表-5.2 解析パラメーター一覧表

| 物性<br>番号 | Gの初期値<br>$G_i$<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | 単体重量<br>$\gamma_t$<br>(tf/m <sup>3</sup> ) | 強度定数<br>C<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | 強度定数<br>$\phi$<br>(°) | 土圧係数<br>$K_0$ | ポアソン比<br>$\nu$ | *)<br>$\alpha_1$  | *)<br>$n_1$ | **) $\alpha$ |
|----------|----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|----------------|-------------------|-------------|--------------|
| 1        | 300                                    | 1.70                                       | 1.00                              | 0.0                   | 0.999         | 0.499          | Gi<br>に<br>同<br>じ | 0.0         | 1.0          |
| 2        | "                                      | 1.67                                       | 0.69                              | "                     | "             | "              |                   | "           | "            |
| 3        | "                                      | 1.65                                       | 0.56                              | "                     | "             | "              |                   | "           | "            |
| 4        | 68                                     | 1.66                                       | 0.58                              | "                     | "             | "              |                   | "           | "            |
| 5        | "                                      | 1.66                                       | 0.80                              | "                     | "             | "              |                   | "           | "            |
| 6        | "                                      | 1.70                                       | 0.80                              | "                     | "             | "              |                   | "           | "            |
| 7        | 1200                                   | 7.17                                       | 0.95                              | "                     | "             | 0.400          |                   | "           | "            |
| 8        | 1400                                   | 7.17                                       | 0.95                              | "                     | "             | "              |                   | "           | "            |

\*)  $G_0 = \alpha_1 (\sigma'_m)^{n_1}$

\*\*)  $\tau = \frac{G_0 r}{1 + \alpha \frac{G_0 r}{\tau_f}}$

$$\begin{aligned}
 G^* &= \frac{\tau_s + \tau_d}{r_p} \\
 r_p &= \frac{3}{2} \epsilon_p \\
 \frac{\epsilon_p - \epsilon_p(N=1)}{\epsilon_p = 5\% - \epsilon_p(N=1)} &= \frac{N-1}{N(\epsilon_p = 5\%) - 1}^m \\
 \epsilon_p(N-1) &= 2.453 \cdot R_d^{3.419} \\
 N(\epsilon_p = 5\%) &= 0.35 - \frac{1}{215 \cdot R_s + 4.8} \cdot R_d^{-4.11} \\
 m &= (0.154 - 0.26 \cdot R_s) \cdot R_d^{(-1.92 - 10.35 R_s)} \\
 R_s &= \frac{\tau_s}{\sigma'_c}, \quad R_d = \frac{\tau_d}{\sigma'_c}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} G^* &= \frac{\tau_s + \tau_d}{r_p} \\ r_p &= \frac{3}{2} \epsilon_p \\ \frac{\epsilon_p - \epsilon_p(N=1)}{\epsilon_p = 5\% - \epsilon_p(N=1)} &= \frac{N-1}{N(\epsilon_p = 5\%) - 1}^m \\ \epsilon_p(N-1) &= 2.453 \cdot R_d^{3.419} \\ N(\epsilon_p = 5\%) &= 0.35 - \frac{1}{215 \cdot R_s + 4.8} \cdot R_d^{-4.11} \\ m &= (0.154 - 0.26 \cdot R_s) \cdot R_d^{(-1.92 - 10.35 R_s)} \right\} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここに、上式中の応力パラメータは三軸供試体とモデル要素の間でそれぞれ表-5.1のように対応付けている。その他のパラメータは次の通りである。

$R_s$  : 初期せん断応力比

$R_d$  : 繰返しせん断応力比

$N(\epsilon_p = 5\%)$  :  $\epsilon_p = 5\%$ となる繰返し回数

$\epsilon_p(N=1)$  :  $N=1$ におけるピークひずみ

ただし、圧密有効応力  $\sigma'_c$  については、前述の仮定に従って与えている。 $\sigma'_c$  の推定は次のようにした。すなわち、粘土地盤の有効応力の発現とせん断強度の発現は比例的であると仮定し、次式によった。

$$\sigma'_c = \frac{\tau_f}{\tau_{fmax}} \cdot \sigma'_{max}$$

ここに、 $\tau_f$  : コーン貫入試験で得られた地盤のせん断強度

$\tau_{fmax}$  : " 最大せん断強度

$\sigma'_{max}$  : 最大せん断強度発揮点における最終圧密有効応力

また、最終の静的自重変形解析は、式(5.5)で得られた  $G^*$  を用いて線型解析により行った。ただし、模型の地震による永久変形は非排水変形を生ずると考え、ポアソン比は完全非排水条件に近い  $\nu = 0.499$  を与えた。

## 5.2 解析結果<sup>11)</sup>

### 5.2.1 動的応答解析結果

図-5.6に、最大応答加速度分布を解析結果と実測値を合せて示す。

ただし、実測の応答加速度は、図-4.21に示すように加振時間ともに変化しているが、ここでは $N=25$ 時点における値をプロットしている。

図より、解析値は入力加速度レベルが大きくなるとともに応答倍率が若干大きくなっていることがわかる。これは図-4.21に示した事情によるものと考えられる。

一方、実測値では入力加速度レベルが大きくなると応答倍率は逆に低くなっていることがわかる。これは、模型地盤が加振の履歴を受けて次第に軟化したこと、および模型に変状を生じたことによるものと考えられる。

応答解析の結果からは繰返しせん断応力の値が読み取られ、以後の変形解析に用いられるため、ここでの解析値と実測値の誤差は直接最終的な結果を左右する。

図を見ると、双方の一致はあまり良くないが、特に修正は加えず結果の読み取りを行った。

#### 2) 見かけの剛性率 $G^*$ の分布

図-5.7には、以上の初期応力解析、動的応答解析により得られた応力解を式(5.5)に代入して計算された見かけの剛性率 $G^*$ の分布を示す。同図より、入力加速度レベルが大きくなるほど、また、繰返し回数が多くなるほど、 $G^*$ の低い領域が拡がっているのがわかる。また、 $G^*$ の低い領域は地盤中央深さの盛土下部に集中しているが、これは地盤中央深さのせん断強度が低いこと、および盛土の慣性力によりせん断応力が大きくなっていることによるものである。

#### 3) 変形解析結果

図-5.8は、上に示した見かけの剛性率 $G^*$ を用いて自重変形解析して得られた変形図である。ただし、同図で盛土中央部に鉛直に亀裂が生じているが、これは線型弾性解析においてこの部分に発生する水平方向引張応力をできるだけ解放するためにモデル作成上設けたものである。この亀裂を設けない解析では盛土下部に非常に大きな引張応力が発生し、盛土の沈下量はきわめて小さかった。したがって、この引張応力をより合理的に解放させることが、本解析の精度向上につながるものと考えられる。

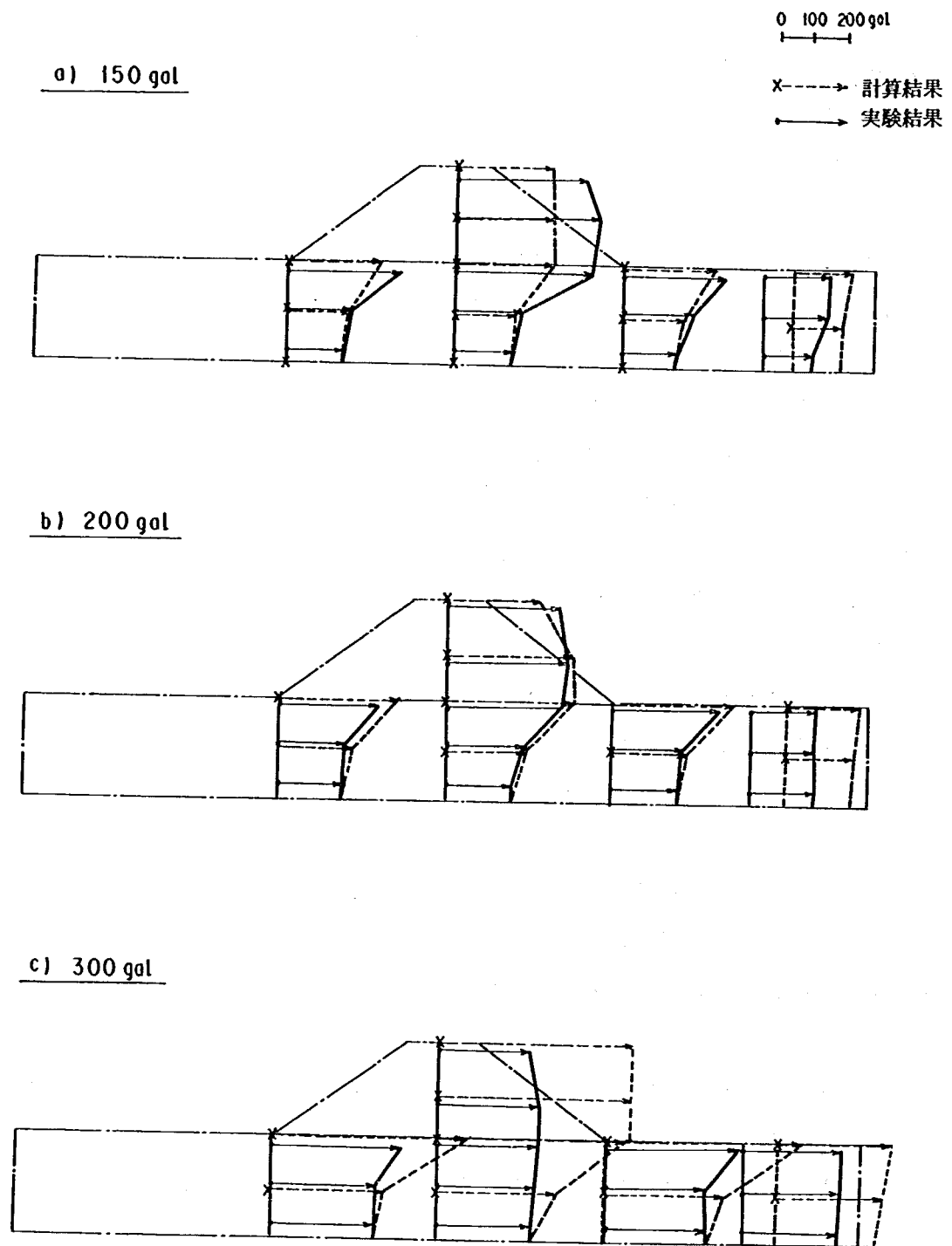
同図より、入力加速度レベル、繰返し回数とともに盛土の沈下変形が進行しているのがよく理解されるであろう。

盛土が沈下を生じて盛土下部地盤は側方へ変位し、それとともにのり先地盤の盛り上りが生じているのがわかる。また、変形の大きな要素は、図-5.7に示した $G^*$ の低い要素と対応している。

図-5.9は、変形の状況を実験結果と解析結果で比較した一例を示したものである。

これより、上述したような変形の状況は定性的にほぼ一致しているのがわかる。

つぎに、図-5.10は繰返し回数と天端沈下量の関係を示したものである。ただし、天端沈下量は天端中央と法肩の平均値をとっている。これより、入力加速度レベルが大きいほど天端沈下



図－ 5. 6 計算結果と実測結果の比較（応答加速度）

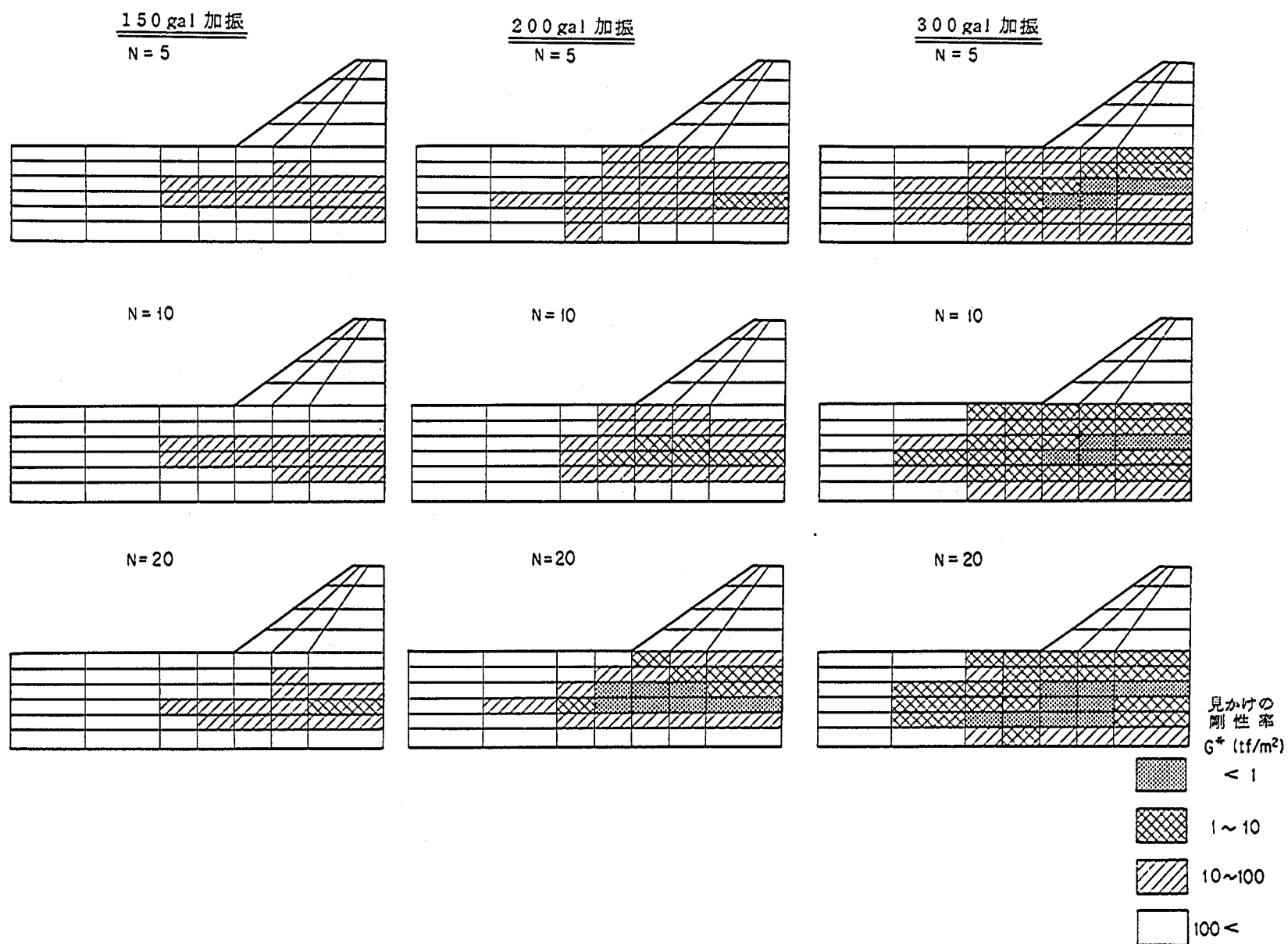
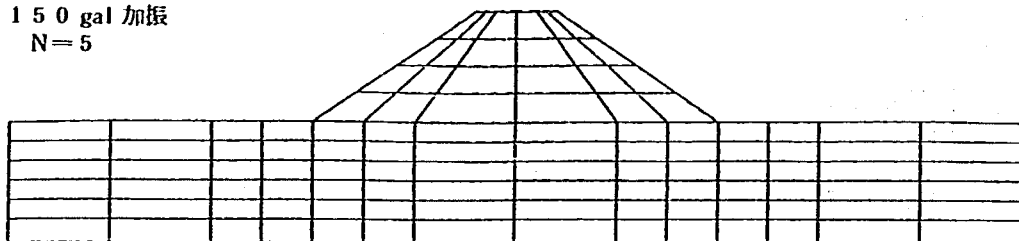


図-5.7 見かけの剛性率  $G^*$  の分布

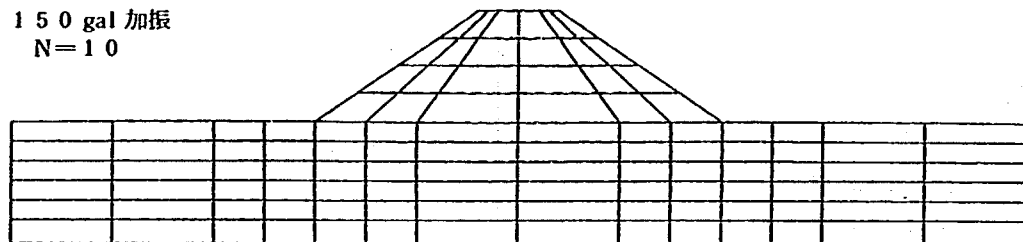
変位のスケール

0 5cm  
└───┘

150 gal 加振  
N=5



150 gal 加振  
N=10



150 gal 加振  
N=20

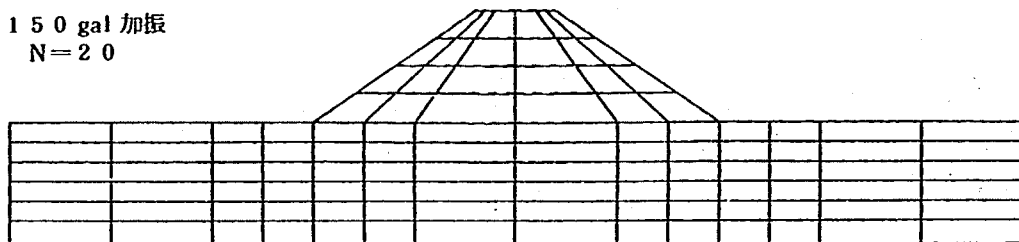
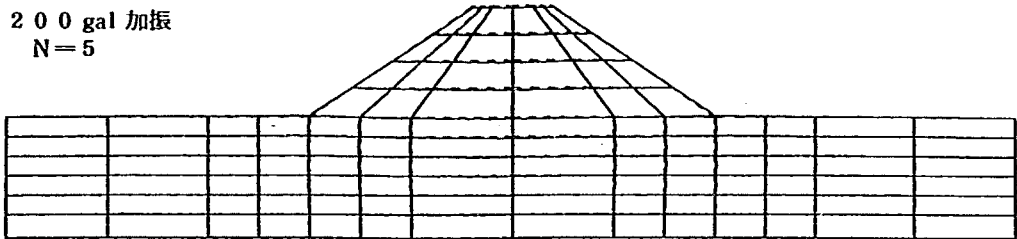


図-5.8.1 変形図(入力加速度150gal)

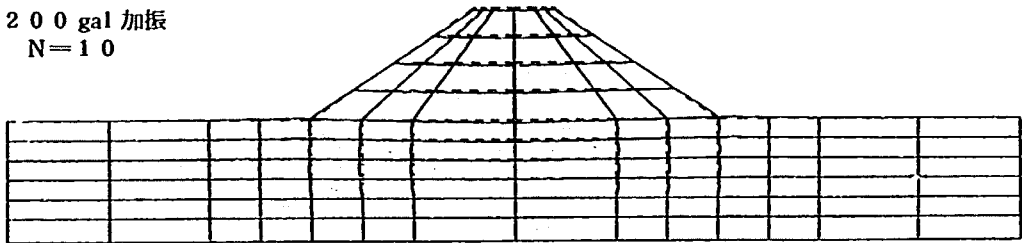
変位のスケール

0 5cm  
└───┘

200 gal 加振  
N=5



200 gal 加振  
N=10



200 gal 加振  
N=20

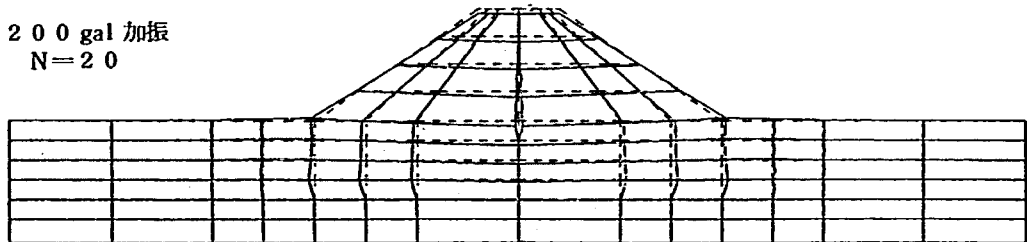
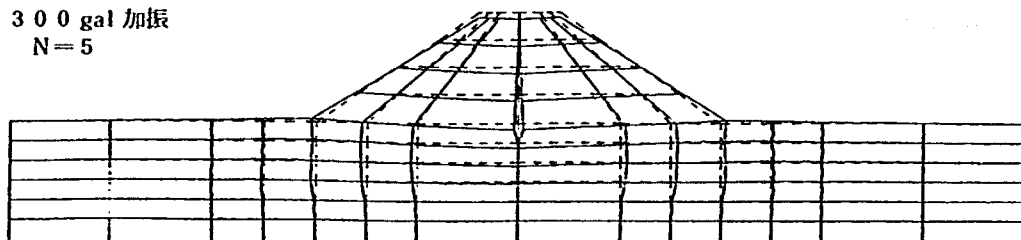


図-5.8.2 変形図(入力加速度200 gal)

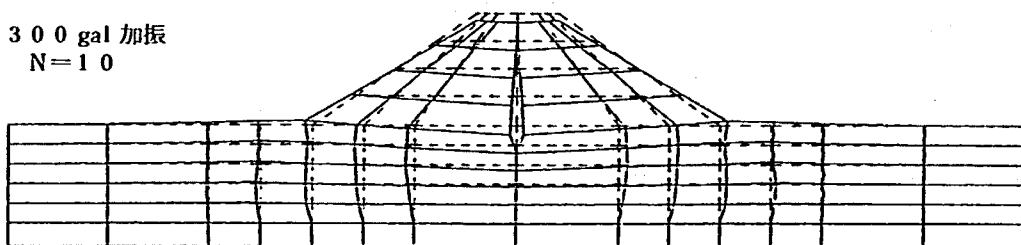
変位のスケール

0 5 cm  
└───┘

300 gal 加振  
N=5



300 gal 加振  
N=10



300 gal 加振  
N=20

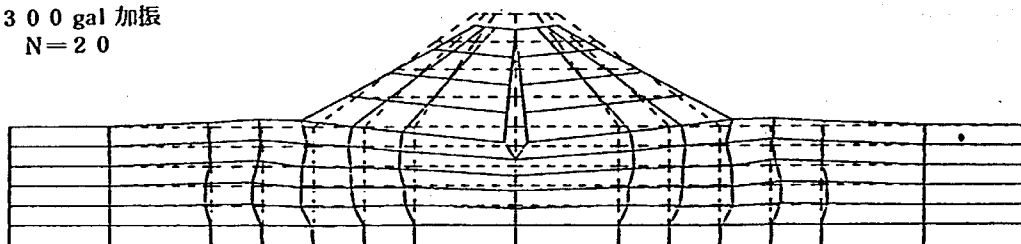
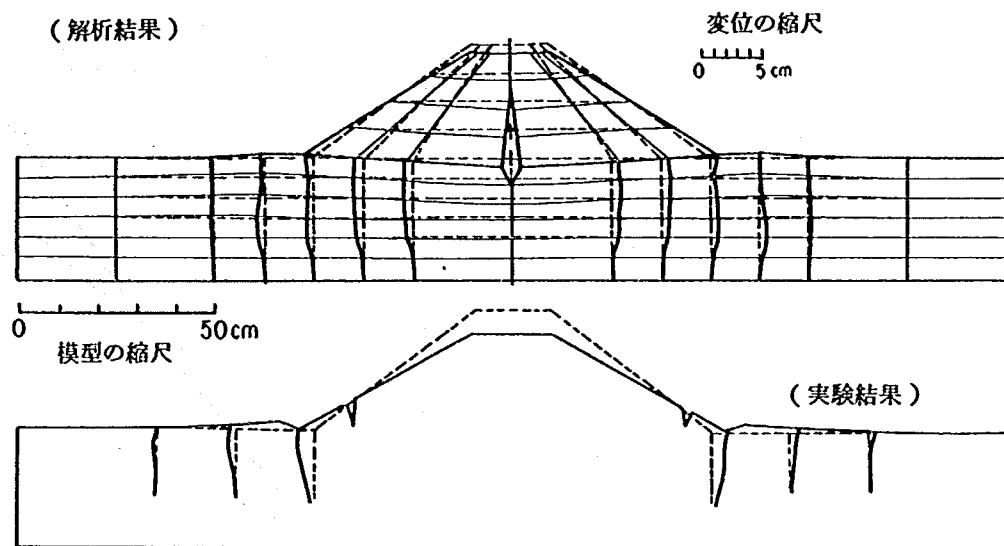


図-5.8.3 変形図(入力加速度300 gal)



図－5.9 実験と解析における変形の比較

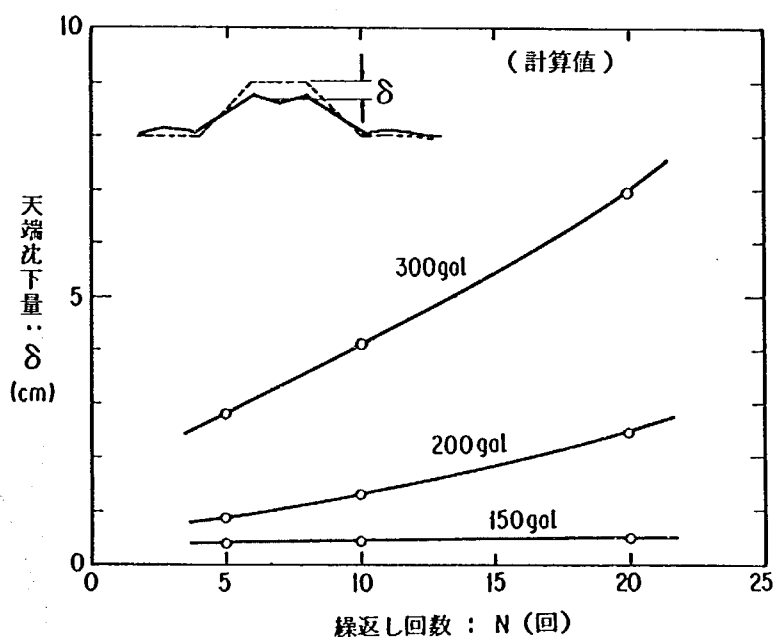
量の進行は速いことがわかる。

なお、この図を前出の図－4.2.4と比べると、実験においては加振により生じる沈下量は必ずしも加速度レベルの大きい段階で大きくなっている訳ではないのに対し、計算では加速度レベルとともに沈下量は大きくなっている。結果としては計算値の方が素直である。

この違いは、実験では前段階までの加振の影響を受けた模型をさらに大きな加速度で加振しているのに対し、計算ではそのような履歴を全く受けていないという条件で実行されているためである。

図－5.1.1は、加速度レベルと天端沈下量の関係を示したものである。ただし、同図で2種類の実測沈下量が示されているが、一つは累積沈下量であり、他の一つは、前段階までの加振の履歴による沈下を省くよう若干の補正を加えたものである。

いずれにしても、この図で実測沈下量と計算沈下量を比較すると、その大きさに違いはあるが、沈下を生じ始める加速度レベルは一致していること、およびそれ以降の沈下量の増え方は近似していることがわかる。



図－5.1.0 繰返し回数と天端沈下量（計算値）

この両者を直接比較して示すと図-5.12のようになる。ただし、実測沈下量としては上述の補正值を用いている。

同図より、実測値と計算値の間にはほぼ比例的な関係があることがわかる。その違いは約2倍である。

しかるに、この2倍程度の差は、本解析法をこれまで他の事例に適用してきた経験から考えると、許容すべきものであると思われる。

なお、震度法円弧すべり計算による耐震性の評価、あるいはここで扱わなかったモデル-3~6についての解析的検討の結果については次の機会に報告する予定である。

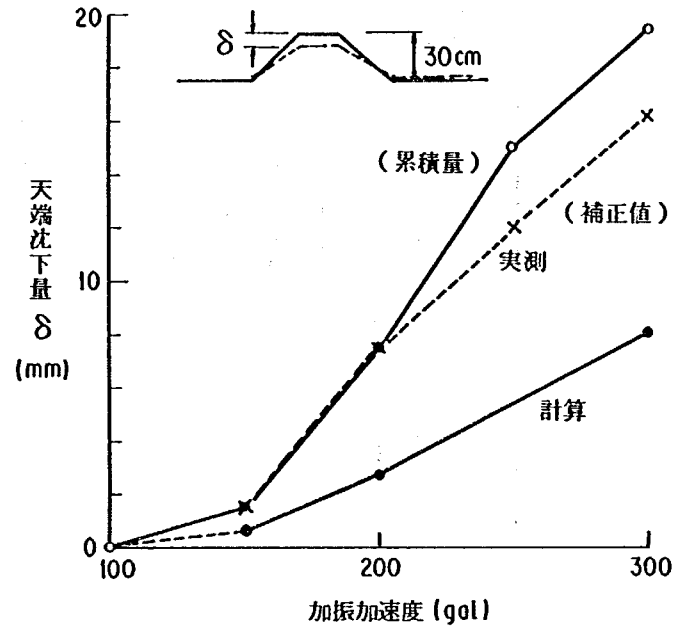


図-5.1.1 加振加速度と天端沈下量の関係

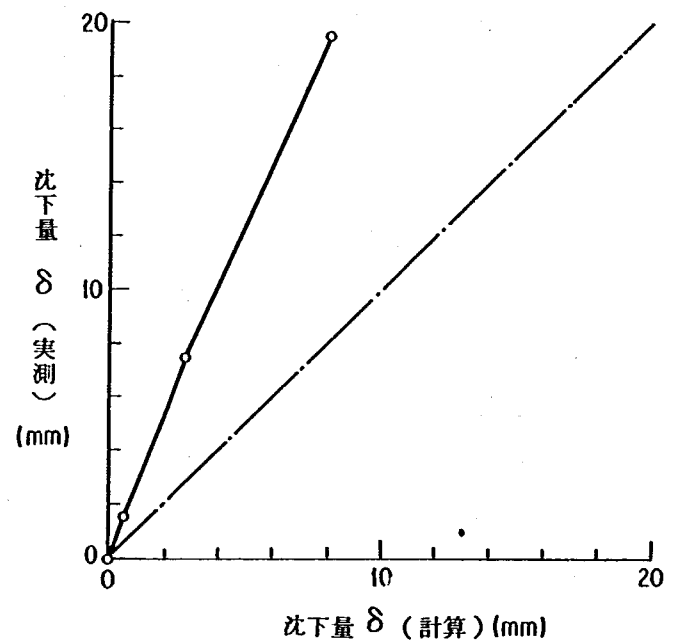


図-5.1.2 実測および計算沈下量の比較

## 6. ま と め

粘土地盤上に築造された堤防の耐震性、およびそれに対する耐震対策工の効果について、模型振動実験および永久変形解析により検討を加えた。

これにより得られた結果は以下のようによまとめられる。

- (1) 粘土地盤上の堤防は地震動により沈下変形することが実験的に確かめられた。このとき、粘土地盤は側方変形を起すが、これはその部分の粘土が地震時せん断力により降伏するためと考えられた。また、そのような繰返しせん断を受けると粘土地盤でも過剰間隙水圧が発生することが確かめられた。
- (2) 押え盛土工法は、それを設置した部分の地盤の側方変形を抑制することにより堤防本体の地震時沈下量を低減させる効果を有し、その規模が大きいほど効果も高くなるようであることが確かめられた。
- (3) 鋼矢板工法は地盤のすべり変形を抑制することが確かめられたが、堤防の地震時沈下量の抑制効果については今回の実験ではよく確かめることができなかった。

また、控え矢板は、今回の実験模型における配置ではその効果が認められなかった。

- (4) 地震後の土構造物の地震による永久変形を計算する地震後永久変形解析法の適用性が確かめられた。

なお、この解析法は、鋼矢板、改良地盤など、円弧すべり計算で検討し難いものについても適用し得る可能性があり、今回検討しなかった対策工を有するモデルについても今後検討を行ってゆく予定である。

## 謝

## 辞

本調査は建設省関東地方建設局荒川下流工事事務所からの依頼調査（課題名：荒川下流堤防の耐震対策検討，昭和58～60年度）の中で実施したものであり，当該域の堤防および基礎地盤の実態に関する資料の御提供，実験に用いた粘土の手配など，本調査を実施するに当り多くの便宜を図っていただいた。その事に対し，当事務所の関係各位にはここに記して謝意を表します。

また，実験・解析で御協力いただいた動土質研究室の方々，および日本技術開発㈱にもあわせて謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 松尾修, 唐沢安秋, 古賀泰之: 粘土の動的強度特性に関する繰返し三軸試験報告書, 土木研究所資料 第2160号, 建設省土木研究所, 昭和60年2月。
- 2) 土質工学会: 土質試験法—第2回改訂版, 1979.
- 3) 松尾修, 佐々木康, 唐沢安秋: 粘土地盤上盛土の模型振動実験, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集 第3部, pp. 103~104, 1984.
- 4) 唐沢安秋, 松尾修, 古賀泰之: 粘性土地盤上盛土に対する耐震対策工の効果に関する模型実験 (その1), 土木学会第40回年次学術講演会, 1985. (投稿中)
- 5) 佐々木康, 松尾修, 館山悟: シラス堤防の耐震性に関する検討 (その2), 土木研究所資料 第1919号, p. 10, 建設省土木研究所, 1983.
- 6) 同上, pp. 13~15.
- 7) 土質工学会: 土質工学ハンドブック, p. 180, 1982.
- 8) 田中努: 表層地盤の固有周期の簡易算定法に関する検討, 第6回日本地震工学シンポジウム (1982) 講演集, pp. 1441~1448, 1982.
- 9) 佐々木康, 松尾修, 唐沢安秋: 地震による盛土の永久変形解析法とその適用例, 土木技術資料, Vol. 27, No. 3, pp. 46~51, 1985.
- 10) 古賀泰之, 館山悟, 唐沢安秋: 土構造物の非線型履歴特性を考慮した静的及び動的変形解析プログラム: SADAP-1, 土木研究所資料第1668号, 建設省土木研究所, 1981.
- 11) 唐沢安秋, 古賀泰之, 松尾修: 地震後永久変形解析法による粘土地盤上盛土の地震沈下量の計算, 第19回土質工学研究発表会, 1985. (投稿中)

粘土地盤上堤防の耐震性に関する ISSN 0386-5878  
実験的・解析的検討報告書 土木研究所 第2227号  
昭和60年3月(1985)

古賀泰之, 松尾修, 唐沢安秋

要旨 粘土地盤上に築造された堤防の耐震性およびそれ  
に対して適用されるいくつかの耐震対策工の効果を実験的  
および解析的に検討したものである。

キーワード: 堤防, 耐震, 対策工, 粘土地盤, 模型実験, 解析



郵便はがき

305-□□

40円切手  
をはって  
下さい。

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地  
建設省土木研究所  
機械施工部動土質研究室 御中

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 2227 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

