

港湾技研資料

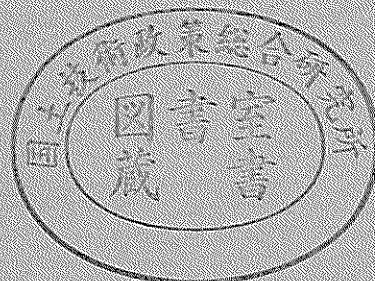
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.647 June 1989

液状化対策としてのプラスチックドレーンの振動実験と解析

井 合 進
梶 谷 卓 美

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 振動台実験	4
2.1 振動台	4
2.2 使用砂	4
2.3 ドレーン材	4
2.4 実験ケースと計測器の配置状況	6
2.5 模型地盤の作成方法	7
2.6 加振方法	9
2.7 実験条件	10
3. 実験結果	16
3.1 模型地盤の加速度	16
3.2 模型地盤の過剰間隙水圧	17
3.3 実験の再現性について	34
4. ドレーンの断面形状の影響	34
4.1 実験的検討	35
4.2 解析的検討	35
5. プラスチックドレーンの打設間隔の設計	41
5.1 設計図表の作成	41
5.2 設計図表の適用性	42
5.3 設 計 例	47
6. 結 論	50
参 考 文 献	50
記 号 表	50
付 録 矩形断面プラスチックドレーンの透水試験結果	52

Shaking Table Tests and Analyses of Plastic Drains

Susumu IAI *

Takumi KAJITANI **

Synopsis

Performance of plastic drains, i. e. drains made of plastic material, was studied as to whether they are applicable as a countermeasure against soil liquefaction. The shaking table tests and analyses were conducted upon typical plastic drains of which cross sections were rectangular and circular. The cross sectional areas of both of the plastic drains were 20cm^2 . The drains were installed in the model ground of the depth of 90cm at the spacing of 50cm and 75cm. Apart from the model tests, design charts were made for determining the spacing of plastic drains based upon the method proposed by one of the authors for gravel drains.

The results of the model tests and analyses indicate that the plastic drains of both types of cross sections are applicable as a countermeasure against liquefaction. The applicability of the design charts for determining the spacing of plastic drains is also confirmed by the present study.

Key Words : Drain, Earthquake, Liquefaction

* Chief, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structural Engineering Division

** Visiting Researcher at Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structural Engineering Division (on leave from Research Institute, Penta Ocean Co.)

液状化対策としてのプラスチックドレーンの振動実験と解析

井 合 進 *

梶 谷 卓 美 **

要 旨

液状化対策としての適用性の検討およびその設計法を開発することを目的として、プラスチックドレーンの模型振動実験と解析を行った。検討対象として取り上げたものは、プラスチックドレーンのうち代表的と考えられる円形と矩形断面の2種類のドレーンである。両ドレーンの断面積はいずれも約20cm²である。これらのドレーンを、層厚90cmの模型地盤に対し50cmおよび75cm間隔に設置して、その間隙水圧に注目して実験を実施した。また、設計法については、著者らの一人がグラベルドレーンを対象として提案した方法を用いて、プラスチックドレーンの条件に合致するように新たな設計図表を作成した。

本研究により、今回用いたドレーンに関しては円形と矩形の断面による差はほとんどなく、両ドレーン共に液状化対策としての効果が期待できる旨の結論を得た。また、模型振動実験の結果から、これらのドレーンに対して提案した簡易設計図表の適用性が確かめられた。

キーワード：液状化，地震，ドレーン

1. はじめに

砂地盤の液状化に関する研究は1964年の新潟地震以来活発に行われてきた。その結果、液状化の予測法に関しては多くの提案がなされ、実際に地盤の安定性の検討に適用されるようになってきた。しかし、液状化対策に関する研究には未だ検討の余地が多く残されているのが現状である。

液状化対策工法には各種のものがあるが、これまでは締固め工法が用いられることが多く、またこれから多くの場合には締固め工法が用いられるものと思われる。しかし、建設工事に伴う振動・騒音に制約がある場合や既設構造物の近傍のように締固め工法が適用しにくい場合に対しては、他の工法を採用することも必要となる。このような制約条件を満たす工法の一つに、地盤内にドレーンを打設し地震時に発生する地盤の過剰間隙水圧を消散させることをねらった工法、すなわち、ドレーン工法がある。この工法の原理は、地盤内に柱状にドレーンを打設することによって地盤全体としての排水性を高め、これにより地盤中に発生する過剰間隙水圧を早期に消散させるものである。

これまでのところ、この工法のドレーン材としては碎石が一般に用いられて来た。したがって、液状化対策と

してのドレーン工法の適用性並びに設計法に関しては、ドレーン材として碎石を用いる場合を念頭においてなされてきた研究が多い^{1)~5)}。これに対し、近年、プラスチック製のドレーンも経済性・施工性等の観点から検討されつつある。もちろん、ドレーン材が異なるとはいえ、ドレーン材としてプラスチック製のものを用いた場合と碎石を用いた場合のいずれであっても、さきに述べたドレーン工法としての原理に変わりはない。したがって、プラスチック製のドレーンを用いた場合であっても、ドレーン工法としての適用性に関しては、碎石ドレーンを念頭においた既往の研究成果が参考になることも多いと考えられる。しかし、プラスチック製のドレーンの場合、ドレーン一本当りの断面積は数十cm²程度であり、碎石ドレーンのそれに比べて百分の一程度である場合が多く、このように条件が著しく相違する場合を対象として得られた既往の研究成果を無条件に準用することは適当ではないと考えられる。また、既往の設計法の多くは、このように条件が異なる場合を包含する体系とはなっていないので、新たにプラスチック製のドレーンを用いた場合の設計法を開発する必要がある。そこで、本研究では、プラスチック製のドレーンを使用する場合について、液状化対策としてのドレーン工法の適用性を検討しその設計法を開発することを目的として、模型振動実験および

*構造部 地盤震動研究室長

**構造部 地盤震動研究室 研修生（五洋建設(株)技術研究所）

その解析を実施した。以下において、プラスチック製のドレーンのことを、プラスチックドレーンと呼ぶこととする。本研究ではプラスチックドレーンのうち代表的と思われる円形および矩形の断面を有する2種類のものを対象とした。

2. 振動台実験

本研究では、断面積が約20cm² 円形および矩形の断面のドレーンを土槽(幅3.0m, 奥行き1.5m, 高さ1.2m)に50cmと75cmの正方形ピッチに配置して、模型振動実験を実施した。また、液状化対策としてのドレーンの効果を確認するため、ドレーンを打設しない場合(以下、無処理地盤とよぶ)についても振動実験を実施した。振動実験はこれらの延べ4ケースについて行った。本章では、これらの一連の実験について、その実験方法について述べることにしたい。

2.1 振動台

実験に用いた振動台は電動型タイプのものである。一般に、油圧駆動型タイプに比べ波形の制御が容易であるといわれている。

本振動台の仕様は表-1に示す通りである。加振方向は水平一方向であり、長さ3.0m, 奥行き3.0m, 高さ1.2mの剛性箱が振動台上に固定されている。この振動

箱は加振方向に中央部を板(地盤と側壁の摩擦を小さくする目的で超高分子ポリエステルが使用されている)で仕切られており、左右2つの土槽(長さ3.0m, 奥行き1.5m, 高さ1.0m)に同時に2種類の模型地盤を作成し、振動実験を行うことができる。以下において、図-1に示すように振動台から振動子(振動台を駆動する装置)に向かって左側をA土槽、右側をB土槽と呼ぶこととする。

2.2 使用砂

実験に使用した砂は秋田港外港地区から採取したものである。ただし、模型地盤の透水性の一様性を確保する目的で細粒分(粒径0.074mm)以下の成分を除去している。使用砂の粒径加積曲線は図-2に、また各ケースの土質試験結果は表-2に示す通りである。この土質試験結果より、本研究で実施した一連の実験を通じて各ケース毎の試料のバラツキはほとんどない事が分かる。

2.3 ドレーン材

今回の模型振動実験には、先にも述べた通り、円形と矩形断面の2種類のプラスチックドレーンを用いた。各ドレーンの諸元は以下の通りである。

(1) 円形ドレーン

円形ドレーンとしては、内径50mm, 外径56mm, 開口率13%のネトロンパイプ(品名E-50)を用いた。その

表-1 振動台の仕様

項目	性能・寸法・方式
周波数範囲	1 ~ 100 Hz
振動方向	水平一方向
最大加振力	18 tonf・G
稼働部重量	15 tonf
最大振幅	100 mm
最大速度	25 cm/sec
最大加速度	0.45G (25 tonf 搭載時)
振動波形	正弦波, 任意波
波形精度	1~50Hz 5%以下, 1~100Hz 10%以下
位相角精度	±20度以下
最大搭載重量	25 tonf
振動台寸法	4000(振動方向) × 3500 mm
冷却方式	電力増幅器 強制水冷 励磁電源 強制空冷 振動子 強制水冷
駆動方式	電動型
台支持方式	油圧軸受

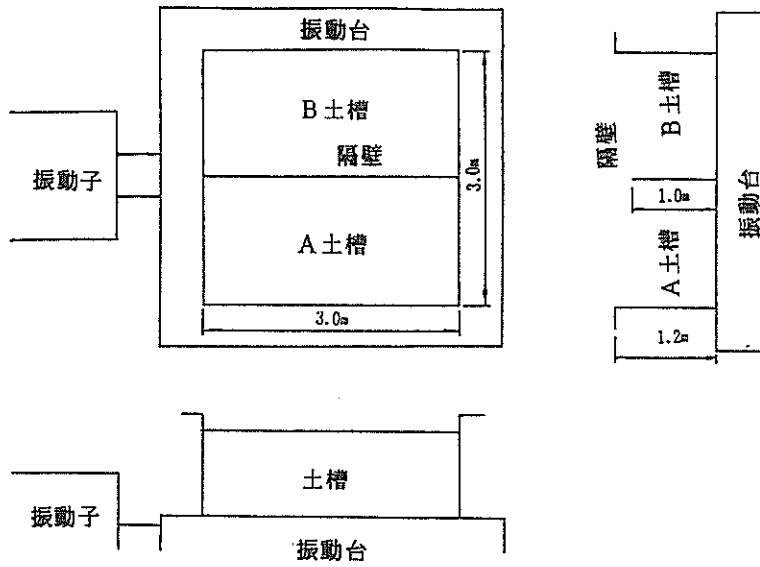


図-1 土槽設置状況

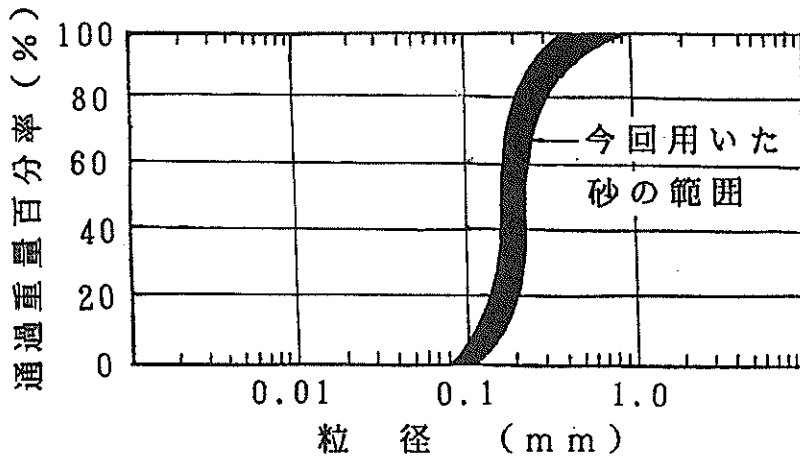


図-2 使用砂の粒径加積曲線

表-2 土質試験結果の一覧

試験番号	ケース-1		ケース-2		ケース-3		ケース-4	
	土槽A	土槽B	土槽A	土槽B	土槽A	土槽B	土槽A	土槽B
比重 G_s	2.632	2.634	2.639	2.632	2.638	—	2.628	—
粒度分布 (%)	レキ	0	0	0	0	—	0	—
	砂	99.1	99.4	99.6	99.5	99.5	—	99.1
	シルト	0.9	0.6	0.4	0.5	0.5	—	0.9
均等係数	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	—	1.4	—
曲率係数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	—	1.0	—

構造図を図-3(a)に示す。材料は高密度ポリエチレンである。このドレーンをフィルターを用いずに模型地盤内に設置すると、砂がドレーン内に入り目詰まりを生じる。そこで、実験はドレーンにフィルターを被せた状態で行った。フィルターには袋状にしたポリエチレン織布(NBC製、品番50目;メッシュ42/inch)を用いた。

(2) 矩形ドレーン

矩形ドレーンとしては図-3(b)に示す構造図のものを用いた。同図に示すように本ドレーンは、幅155mm、厚さ12.6mmで内部に14個の通水路を有し、この通水路を仕切るリブによって、地盤内においても断面が潰れにくい構造になっている。また、地盤中の間隙水が流入

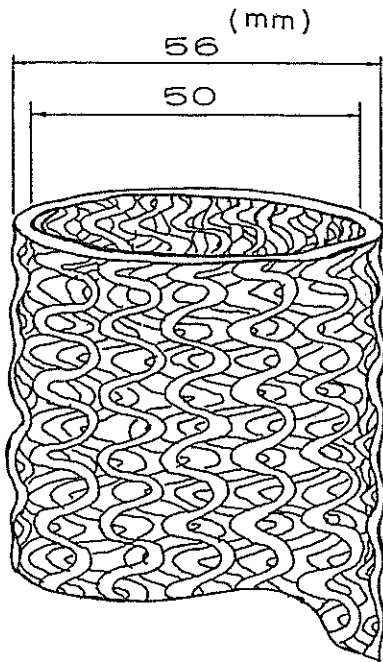


図-3(a) 円形ドレーンの構造図

する側面には幅5mmのスリットを水平に10mm間隔で有しており、開口率は60%である。なお、材質としては塩化ビニール樹脂を使用し、加える可塑剤の量を変えることでドレーンの硬軟が自由に調整できるという特徴を持っている。この矩形ドレーンは、ロール状に巻くことができ、マンドレルを用いて打設できるので、施工性においてすぐれている。フィルターとしては、円形ドレーンで用いたものと同じものを用いて実験を実施した。

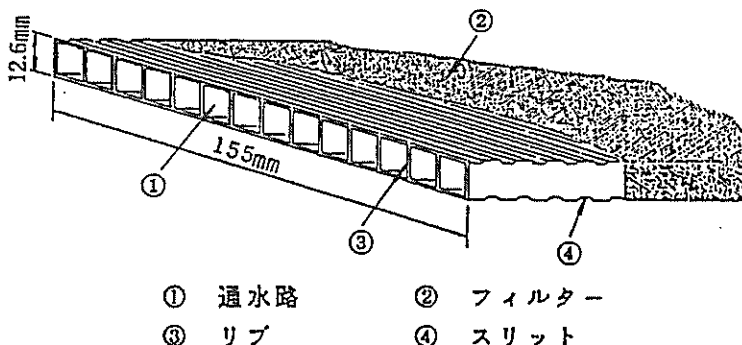
2.4 実験ケースと計測器の配置状況

さきに述べた通り、振動実験はA、B2つの土槽を用いて4ケースについて行った。

各ケース毎のドレーンの配置状況は図-4に示すとおりである。同図に示すように、ケース-1では、円形と矩形断面のドレーンを各土槽共に50cmピッチに、ケース-2では矩形断面のドレーンを50cmと75cmのピッチに、ケース-3では円形断面のドレーンを75cmピッチに配置している。また、ケース-3のB土槽およびケース-4では、ドレーンを打設しない場合(無処理地盤)の基本的特性の把握および実験の再現性の確認を目的とした実験を実施した。

今回の模型振動実験においては、ドレーンの排水効果、特にドレーンの配置によって過剰間隙水圧の上昇がどの程度抑えられ、また、ドレーンからの距離によってその効果がどの程度になるかを定量的に捉えることを目的とした。そのため、上記のケースにおいて間隙水圧計をドレーン内及びドレーンを取り囲む位置に設置した。また、地盤の振動性状を知る目的で加速度計を間隙水圧計と同じ深度に設置した。

各ケースの加速度計と間隙水圧計の配置状況は図-5に示す通りである。同図に示すようにケース-1~3における計測器の設置位置は、土槽の側壁の影響が小さい中央部に、底面から30cmと60cmの位置(それぞれ模型地盤の地表から60cmと30cmの位置に対応する)に設



- ① 通水路
- ② フィルター
- ③ リブ
- ④ スリット

図-3(b) 矩形ドレーンの構造図

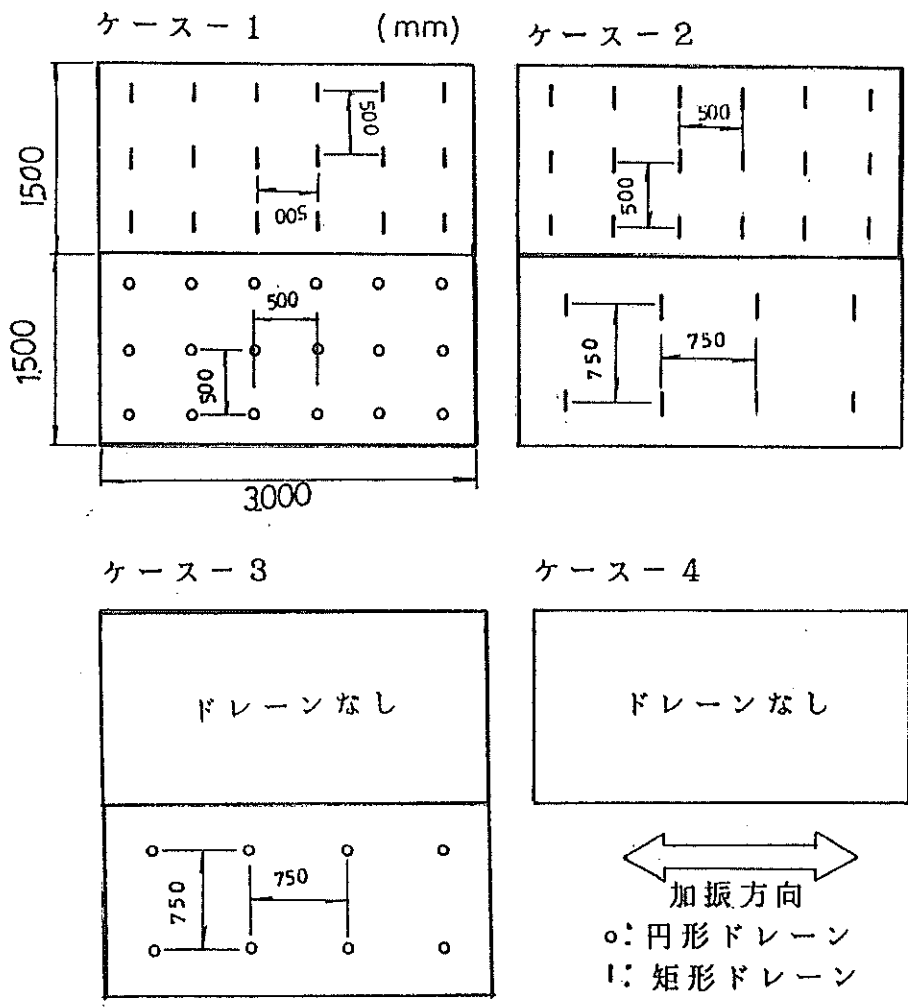


図-4 ドレーンの配置状況

置した。ただし、ケース-4の場合には、土槽底面から15cmピッチに5個設置した。なお、いずれのケースにおいても、土槽外側底部には台加速度（振動台の入力加速度）を測定するために加速度計を固定した。

2.5 模型地盤の作成方法

模型地盤の作成フローを図-6に示す。同図に示すように、まず、ドレーンと計測器を所定の位置に設置した後、乾燥砂を約5mmメッシュのふるいを通してまきだし、水中で自然に堆積させながら模型地盤を作成した。これら計測器の設置方法と砂地盤の作成方法の詳細は以下の通りである。

(1) 計測器の設置

地盤内の所定位置の加速度と過剰間隙水圧を正確に測定するため、加速度計と間隙水圧計の位置が地盤作成時および実験時に変化しないように釣り糸を用いて設置し

た。特に、加速度計は地盤内に水平に、しかも加振方向に対して方向がずれないように注意して設置した。

図-7、図-8はそれぞれ加速度計と間隙水圧計の設置状況を示したものである。同図に示すように、加速度計は、振動方向に直角な2側面に釣り糸を張り、これにより方向を拘束しながら、4点吊りの糸の張り具合によって傾きを調整した。また、間隙水圧計は3点釣りとして高さ方向のみの調整を行った。また、これらの計測器の見かけの単位体積重量を地盤の単位体積重量（約1.8gf/cm³）と一致させるために発泡スチロールを用いて調整を行った。

(2) 砂地盤の作成

模型地盤の作成に当たっては、A、B2つの土槽のそれぞれ所定の位置にドレーンと計測器を設置した後、水位が35cm程度になるように注水し、乾燥砂を4.76mm

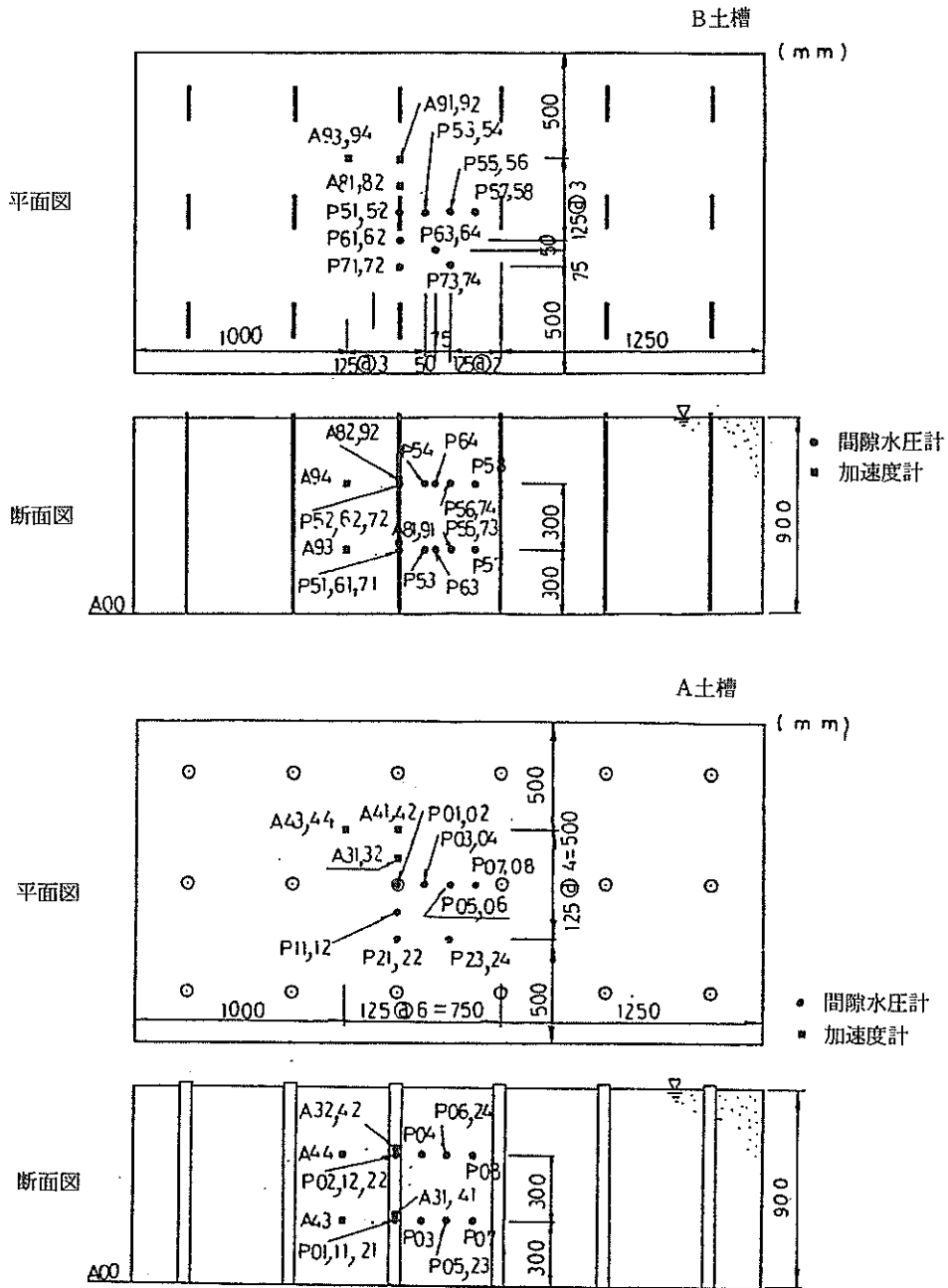


図-5(a) 計測器の配置状況 (ケース-1)

のふるいを通しながら水中に落下させた。砂の投入にあたっては天井クレーンに吊り下げられたホッパーのノズルによって砂の流出量を調整した。両土槽への砂の投入は、層厚 20cm 毎に交互に行った。また、地盤と水面の高さが常に 30cm 程度になるように水位を調整しながら行った。また、砂の投入にともなって砂層中に設置される加速度計の方向の微調整を行った。

模型砂層地盤の単位体積重量は、土槽内に投入した全乾燥砂重量をその体積で除することによって求めた。全乾燥砂重量の測定は、一回毎の砂の投入の前後にホッパーの重量を計り、その差を地盤作成終了まで合計することによって求めた。また、模型地盤高さは砂投入後地表面に貯った水を抜き地盤面を乱さないように注意を払いながら平らに仕上げた後、その地表面と所定高さに水平

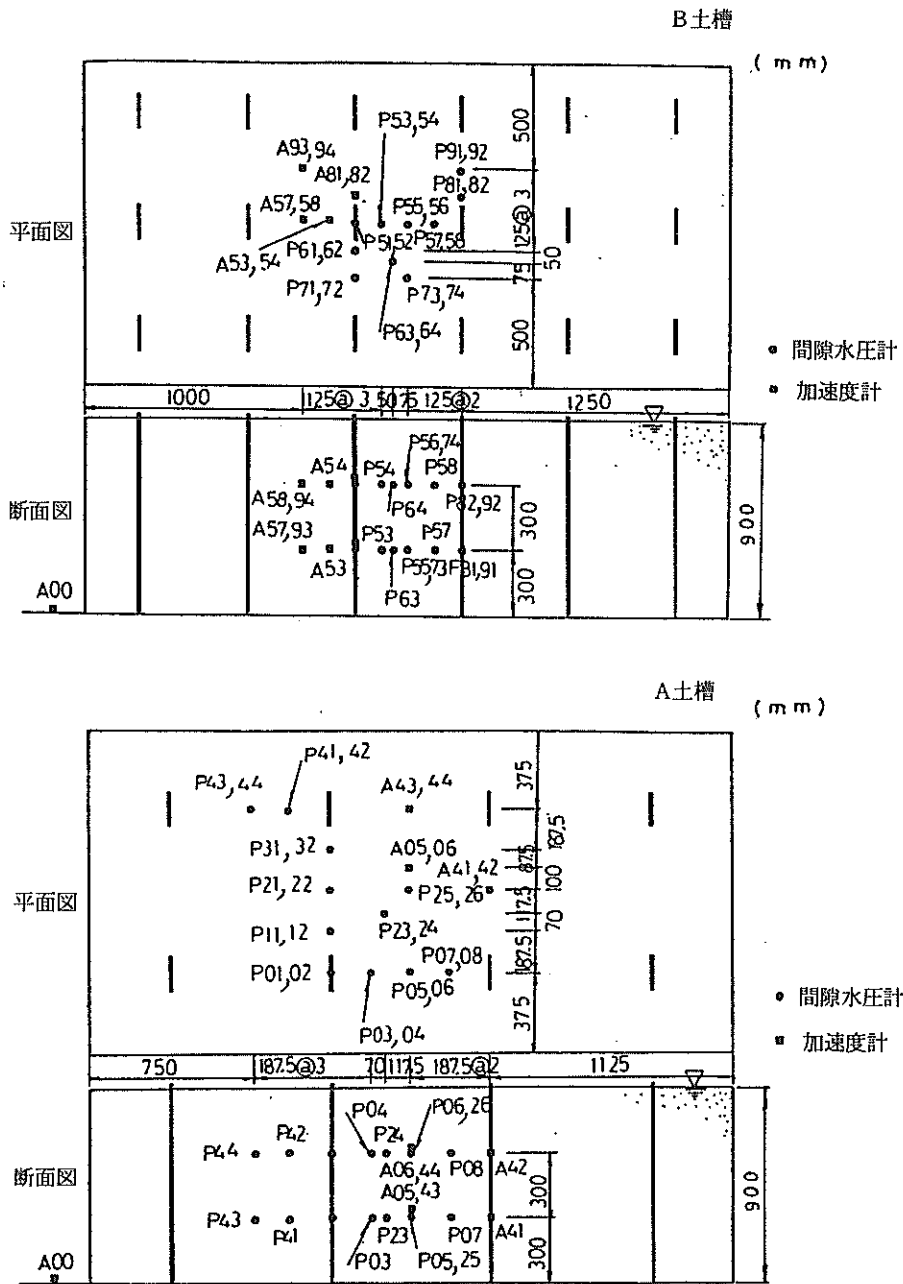


図-5 (b) 計測器の配置状況 (ケース-2)

に張った水糸との距離を計り、予め測定しておいた土槽底面から水糸までの高さから差し引くことによって求めた。なお、地盤高さの測定点は30cm間隔の格子点とした。その総数は、各土槽ともに50測点である。

2.6 加振方法

各ケース毎の実験の概略手順は図-9に示す通りである。同時に示すように、振動実験は本実験と共振実験か

ら成っている。本実験は入力加速度を段階的に上げながら加振を行ういわゆるステージテストである。今回の実験において加振の目標とした加速度レベルは60, 90, 140 Gal程度の3段階とした。加振波形は正弦波とし周波数10Hzで20波とした。なお、共振実験では、入力加速度1 Gal程度で周波数を2 Hz刻みに90 Hzまで増加させた。

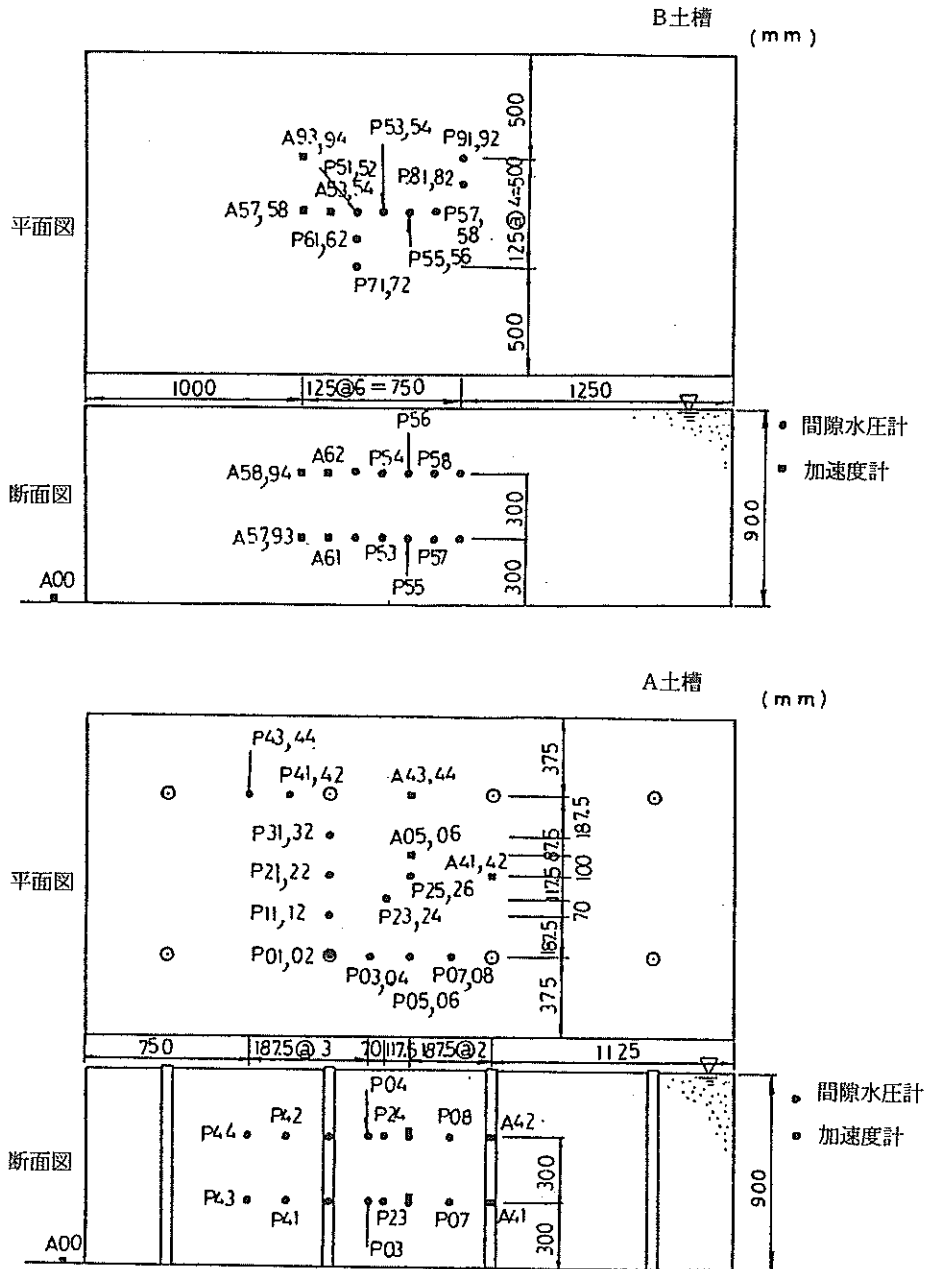


図-5(c) 計測器の配置状況 (ケース-3)

これらの実験のデータの取り込みには、デジタルデータレコーダ(64ch)を用い、サンプリングタイムは本実験時が200Hz、共振実験時が500Hzで行った。また、動歪アンプのローパスフィルターは、共振実験時が100Hzで、本実験時においては間隙水圧に対しては30Hz、加速度に対しては100Hzに設定した。

2.7 実験条件

以上に述べてきた方法により作成された模型地盤の密度および入力最大加速度等に関する実験条件をまとめれば表-3に示すとおりとなる。同表における本実験では、さきに述べた通り、それぞれ60Gal, 90Gal, 140Galで加振することを目標とし、同表に示すとおり、おおむね目標とした加振レベルで実験が実施された。ただし、ケース-1のNo.102の実験では、振動台の不調で目標

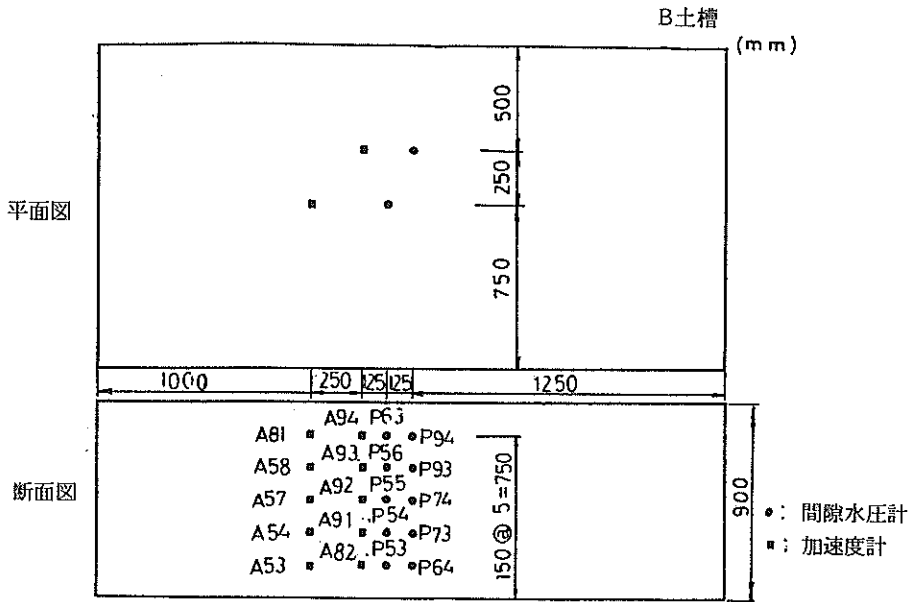


図-5(d) 計測器の配置状況 (ケース-4)

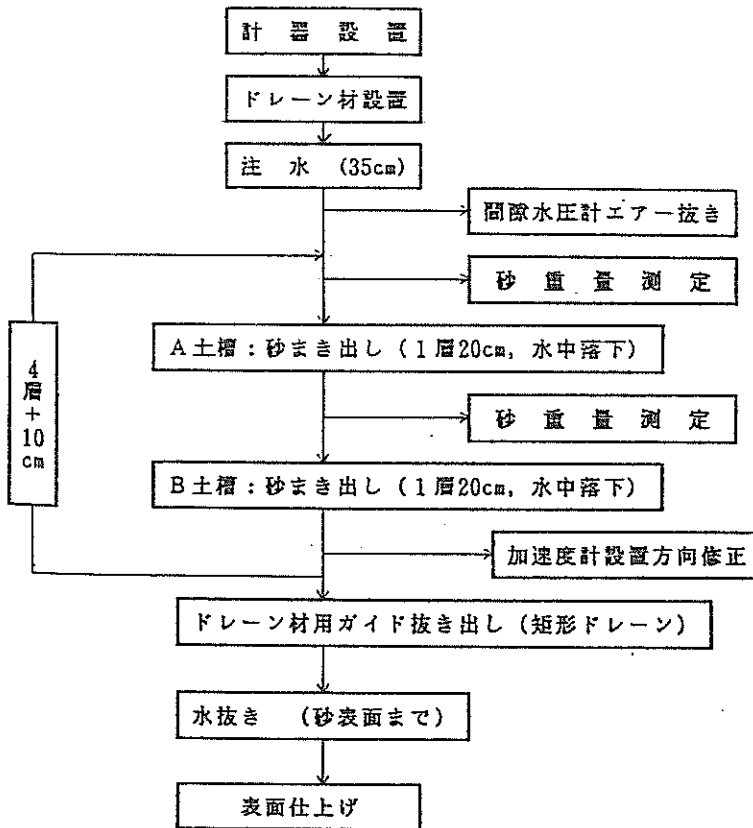


図-6 模型地盤作成フロー

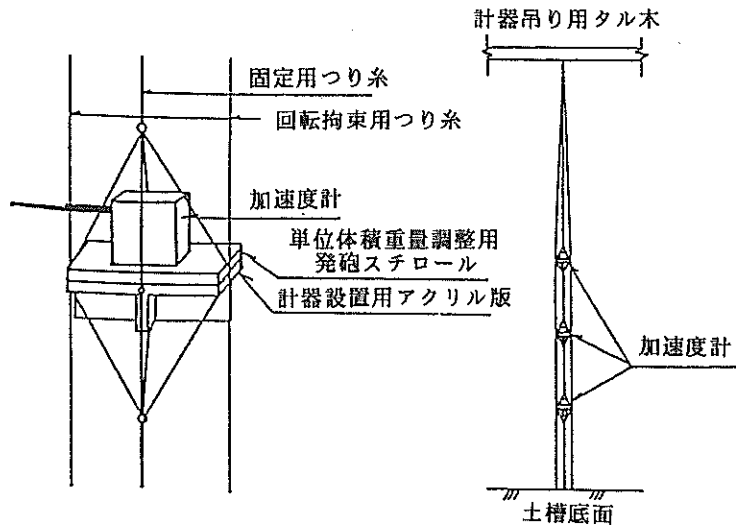


図-7 加速度計設置状況

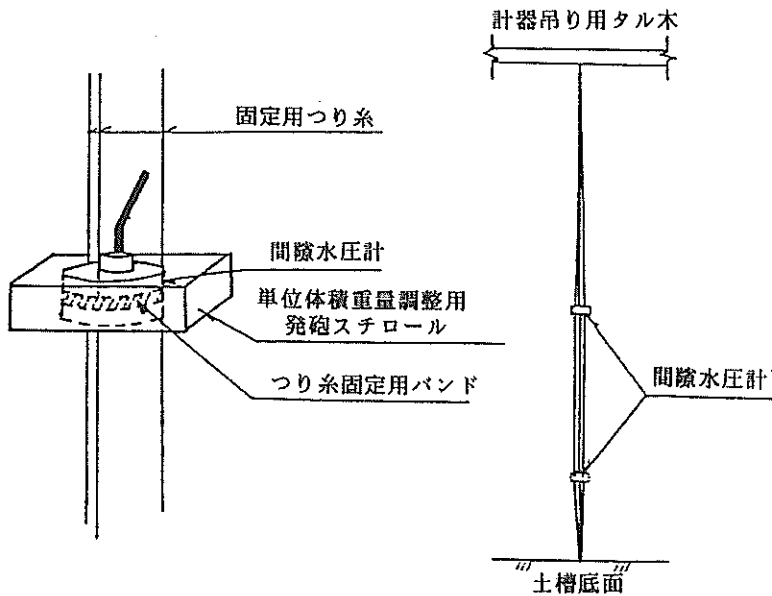


図-8 間隙水圧計設置状況

とする加速度に達せず、この実験は失敗に終わった。したがって、次章以後においては、ケース-1のNo.102の実験結果は省略することとした。

次に、作成された模型地盤の状態について見てみることにする。今回、模型地盤の作成においては、各ケースともに同一の作成方法を用い、また非常に注意深く行った。しかし、結果としては、地盤の初期相対密度は29～

36%となり、相対密度には最大および最小の値の間に7%程度の差が生じた。このような差が生じたことについては著者らは必ずしも満足してはいないが、相対密度が30%前後と比較的低い範囲での差であるので、この差が模型地盤の持つ液化抵抗に及ぼす影響は著しくはないものと思われる。このことを裏付けるための定量的な調査は未だ実施していないが、龍岡ら(1982)により実施

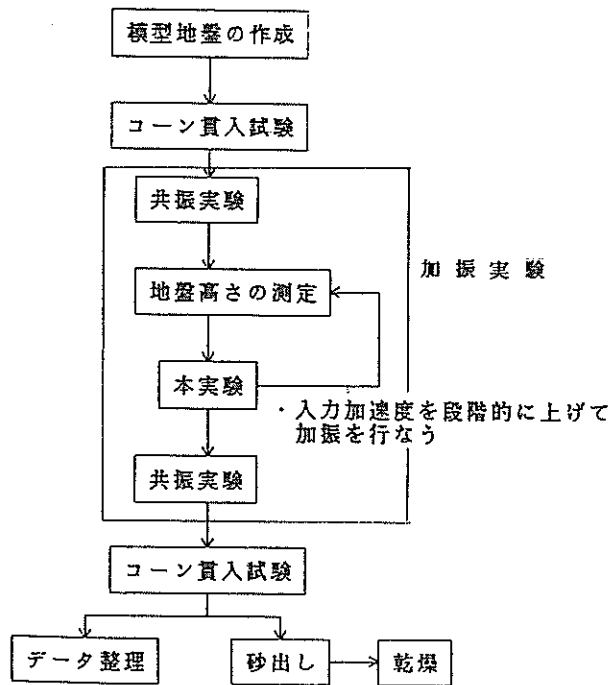


図-9 各ケース毎の一連の実験手順の概要

表-3 実験条件一覧

実験 ケース	実験 No.	実験内容	入力 加速度 (Gal)	実験前の地盤状態							
				地盤高さ H (cm)		間隙比 e		単位体積重量 γ_t (gf/cm ³)		相対密度 Dr (%)	
				A土槽	B土槽	A土槽	B土槽	A土槽	B土槽	A土槽	B土槽
1	101	共振実験	—	88.4	88.7	1.131	1.129	1.768	1.769	31.0	36.2
	102	本実験	28.2	88.4	88.7	1.129	1.104	1.769	1.778	31.4	36.5
	103		87.8	88.1	87.7	1.123	1.095	1.771	1.781	32.7	38.5
	104		137.4	87.8	87.5	1.116	1.082	1.774	1.786	34.2	41.2
	105	共振実験	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	201	共振実験	—	89.5	88.7	1.126	1.139	1.770	1.765	32.0	29.4
	202	本実験	61.3	89.5	88.5	1.124	1.135	1.771	1.767	32.4	30.2
	203		95.5	89.2	88.2	1.118	1.128	1.773	1.769	33.7	31.7
	204		138.8	88.8	87.8	1.108	1.117	1.777	1.773	35.9	33.9
	205	共振実験	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	301	共振実験	—	89.5	89.6	1.120	1.131	1.772	1.768	33.2	31.0
	302	本実験	59.2	89.7	89.3	1.118	1.124	1.773	1.771	33.7	32.6
	303		95.2	89.5	89.0	1.113	1.117	1.775	1.773	34.8	34.0
	304		131.5	89.1	88.5	1.104	1.105	1.778	1.778	36.8	36.4
	305	共振実験	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	401	共振実験	—	—	89.5	—	1.107	—	1.777	—	36.1
	402	本実験	63.4	—	89.3	—	1.101	—	1.779	—	37.3
	403		98.2	—	89.0	—	1.094	—	1.782	—	38.8
	404		141.4	—	88.6	—	1.083	—	1.786	—	41.0
	405	共振実験	—	—	—	—	—	—	—	—	—

された豊浦砂の要素試験結果⁶⁾を参考とすれば、このような推測が成り立つものと見ている。

以上に示した地盤の密度は、あくまでも地盤の平均的な密度である。模型地盤が均一に作成されたか否かについては、別途調査が必要である。そこで、模型地盤の深度方向の均一性を調べる目的で静的コーン貫入試験を行

った。図-10は各実験ケースの前後に行った静的コーン貫入試験の結果を示したものである。同図より、実験前後ともに静的貫入抵抗 q_c の値は、深度が増すに従ってほぼ比例的に増加していることがわかる。このことから、模型地盤が深度方向にはほぼ均一となっていると判断してよいものと思われる。また、明らかに実験後は実験前に

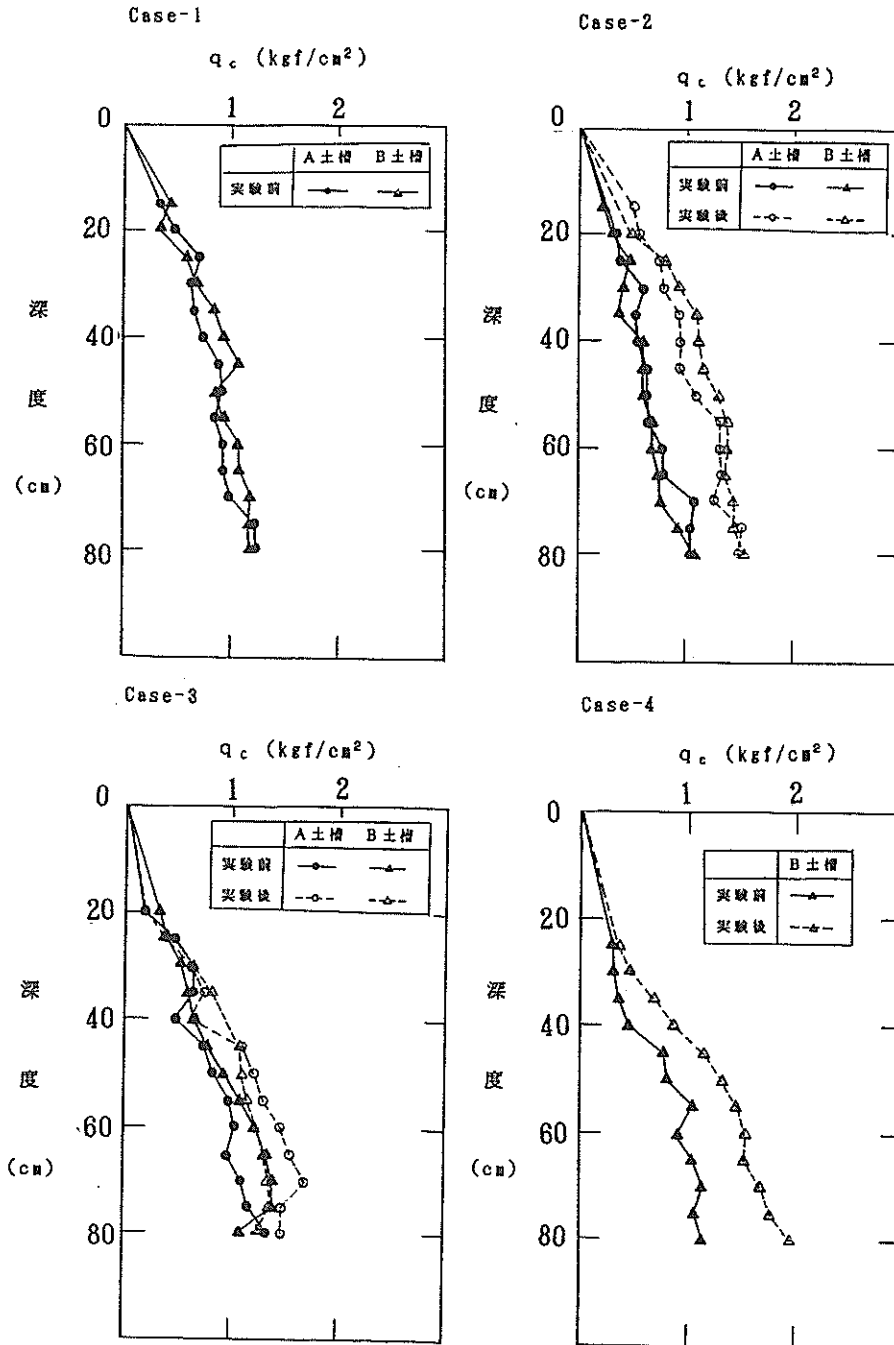
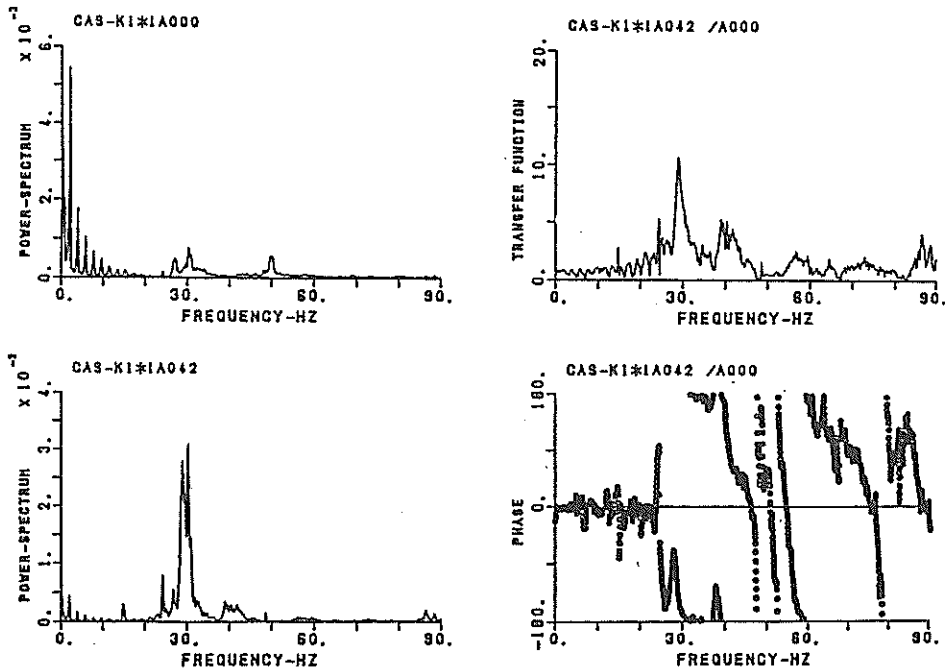


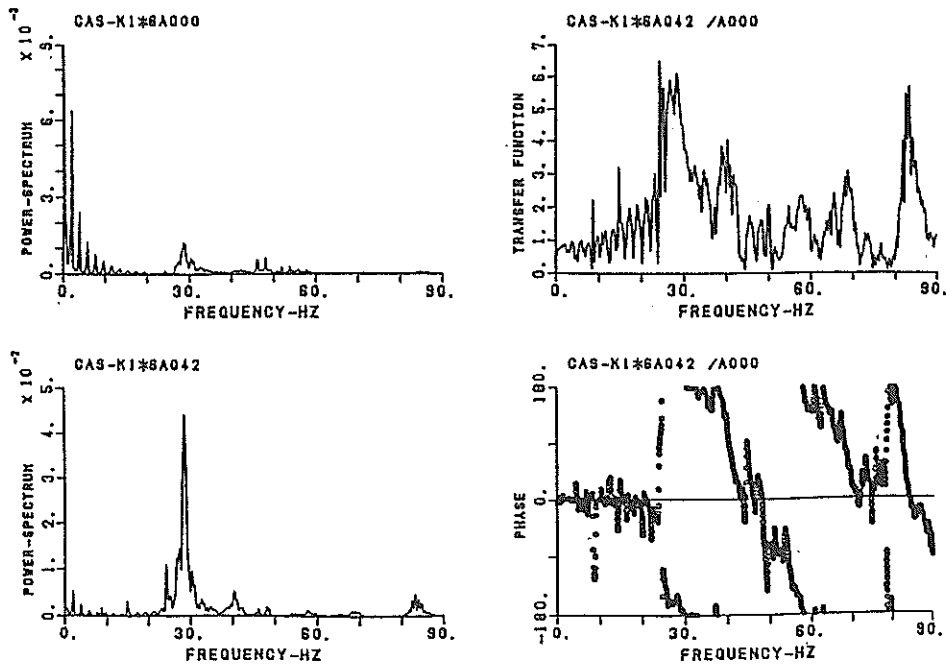
図-10 静的コーン貫入試験結果

比静的貫入抵抗 q_c の値は大きくなっている。これは加振実験によって模型砂地盤が締まった状態になったためと考えられる。

また、模型地盤の微小振動時におけるせん断剛性を調べる目的で共振実験を実施した。図-11はケース-1の実験の前後における共振実験結果の一例を示したもので



(a) 実験前



(b) 実験後

図-11 地震動のパワースペクトルと伝達関数

ある。同図には加速度のパワースペクトル、伝達関数の振幅と位相を示している。これらの結果から、今回作成した模型地盤の共振振動数は約 28 Hz 付近にあることがわかる。また、この値は実験の前後においてほとんど変わっていないことがわかる。他の実験ケースについても同様の結果が得られている。したがって、本研究において実施した一連の実験においては、模型地盤のせん断剛性についてもほぼ同一の条件が保たれたことが確認された。

3. 実験結果

前章までに述べてきた実験方法により、液状化対策としてのプラスチックドレーンの効果を検討するための実験結果として、模型地盤の加速度および過剰間隙水圧(間隙水圧から静水圧を差し引いた値)の測定値が得られた。本章では、これらの測定値を提示する。

3.1 模型地盤の加速度

(1) 加速度の時刻歴

さきに図-4 に示した 4 ケースの模型地盤に対して、加速度レベルを 60 Gal, 90 Gal, 140 Gal を目標として加振した結果、図-12 ~ 15 に示す加速度の時刻歴が得られた。各図の上から順に、地盤模型の底面からの高さ 60 cm, 30 cm および底面の加速度(台加速度)を示している。ただし、図-15 に示すケース-4 においては、前章で述べたように 15 cm ごとの測定点で計測された加速度を示している。また、各時刻歴の縦軸のスケールは、波形が見やすいように波形毎に異なっており、統一はされていないので、これらの図をもとに波形相互の比較をする場合には、この点に対する注意が必要である。また、ここに示す結果以外にも、図-5 に示すように他の多数の測定点で加速度を計測しているが、土槽内の地点の相違による加速度応答波形の差異は見られなかった。

これらの加速度の時刻歴を順を追って見ていくと、まず、図-12 に示すケース-1 では、台加速度のレベルが約 90 Gal のときには、同図(a)に示すように、円形及び矩形のいずれの断面のドレーンの場合にも、波形の振幅には振動継続中を通じて著しい変化はない。これに対し、台加速度のレベルが約 140 Gal のときには、同図(b)に示すように、円形及び矩形のいずれの断面のドレーンの場合にも、地盤最上部の加速度振幅が約 3 波目から著しく小さくなっている。

同様に、加速度時刻歴の振幅の変化に注目してケース-2 以下の実験結果を見ていくと、図-13 に示すケース-2 においては、台加速度のレベルが約 60 Gal のときには、同図(a)に示すように、打設ピッチが 75 cm、

50 cm いずれのドレーンの場合にも、波形の振幅には振動継続中を通じて著しい変化はない。台加速度のレベルが約 90 Gal になると、同図(b)に示すように、打設ピッチが 50 cm のドレーンの場合には、波形の振幅には振動継続中を通じて著しい変化はないが、打設ピッチが 75 cm のドレーンの場合には、波形の振幅は地盤最上部において徐々に減少していることが認められる。さらに、台加速度のレベルが約 140 Gal になると、同図(c)に示すように、打設ピッチが 75 cm, 50 cm いずれのドレーンの場合にも、地盤最上部の加速度振幅が著しく小さくなっている。特に、打設ピッチが 75 cm ドレーンの場合に、この傾向が著しい。

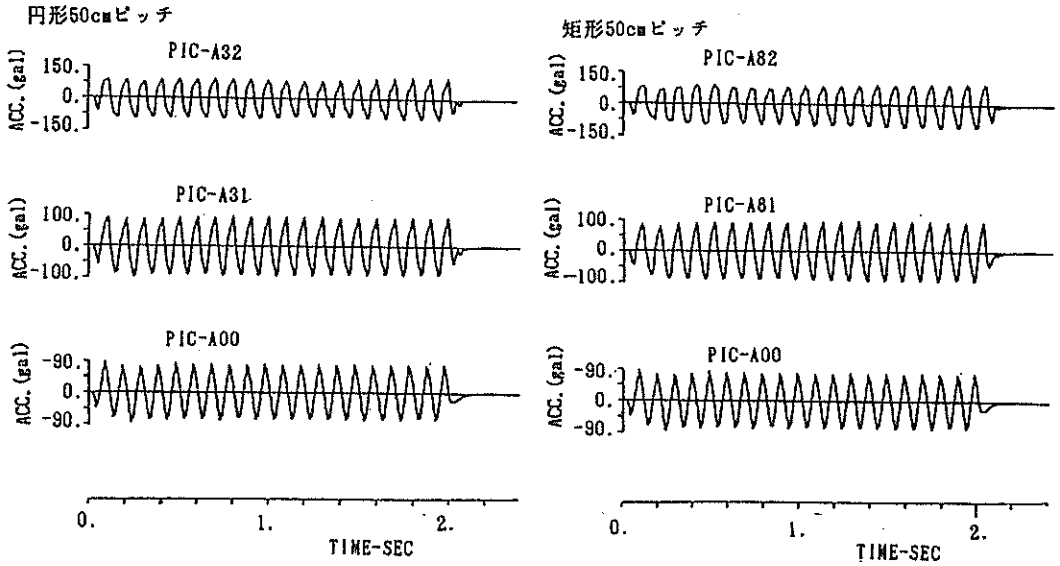
同様の傾向は、図-14, 15 においても認められる。図-14 に示す打設ピッチが 75 cm の円形断面ドレーンにおいては、ほぼ図-13 に示す同じ打設ピッチの矩形断面のドレーンの結果と同様の結果が得られている。これに対して、無処理地盤の場合には、加速度振幅の減少の傾向がさらに著しいことが認められる。特に、図-15 に示されるように、測定点が密に配置された場合の結果では、模型地盤の最上部から下部へと加速度振幅が減少する時点がずれていることも明瞭に認められる。

(2) 最大加速度の地盤内分布

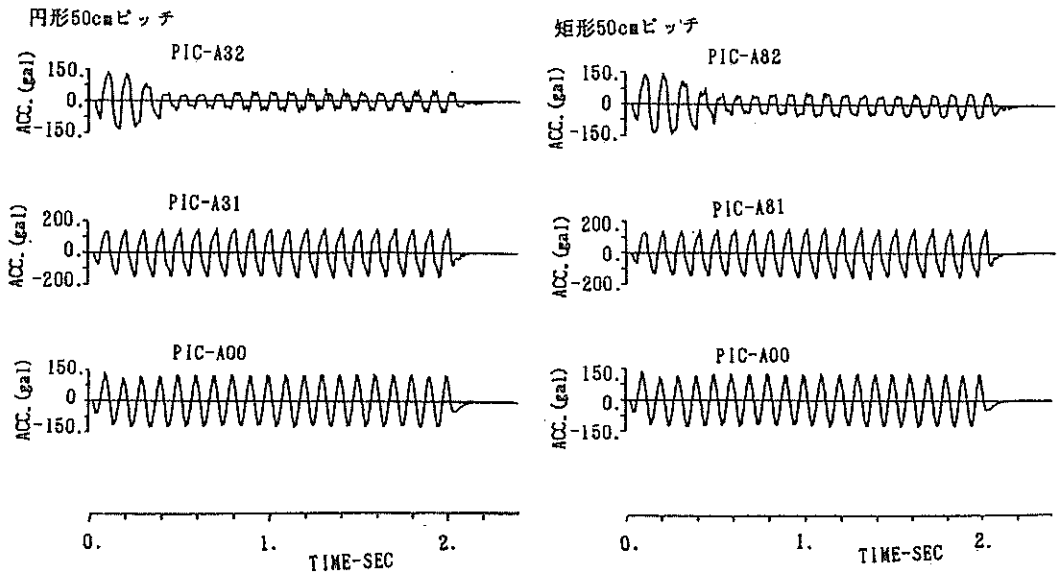
これらの模型地盤内の加速度の最大値の分布を通覧すれば、図-16 に示すとおりとなる。同図においては、スペースを節約するため、横軸に示した加速度の原点は統一していないので、この点に注意されたい。同図において、まず、台加速度のレベルに応じて地盤内の加速度分布がどのように変化するかについて見ると、ドレーンの断面形状もしくは打設ピッチ(もしくはドレーンの有無)に関わらず、台加速度が 60 Gal 程度と小さい場合には地盤の上層部にかけて加速度が増幅される傾向が認められるのに対して、台加速度のレベルが増大するに連れて、地盤の上層部において模型地盤の加速度が低減する傾向が認められる。

つぎに、これらの傾向をドレーンの断面形状および打設ピッチ(もしくはドレーンの有無)との関連において見ると、ドレーンの断面形状の相違による加速度の増幅特性の差は無いものと判断されるのに対して、ドレーンの打設ピッチ(もしくはドレーンの有無)の相違による加速度の増幅特性の差は、明かに認められる。すなわち、ドレーンの打設ピッチが小さいほど加速度が増幅傾向を示す限界の台加速度レベルは高くなる傾向が認められる。

これらの地盤内の加速度分布は、地盤の液状化の状態と密接な関係があるものと考えられる。そこで、次節においては、地盤の液状化の状態を直接的に示す過剰間隙



(a) 実験 No.103 (入力加速度 87.8 gal)



(b) 実験 No.104 (入力加速度 137.4 gal)

図-12 加速度時刻歴 (ケース - 1)

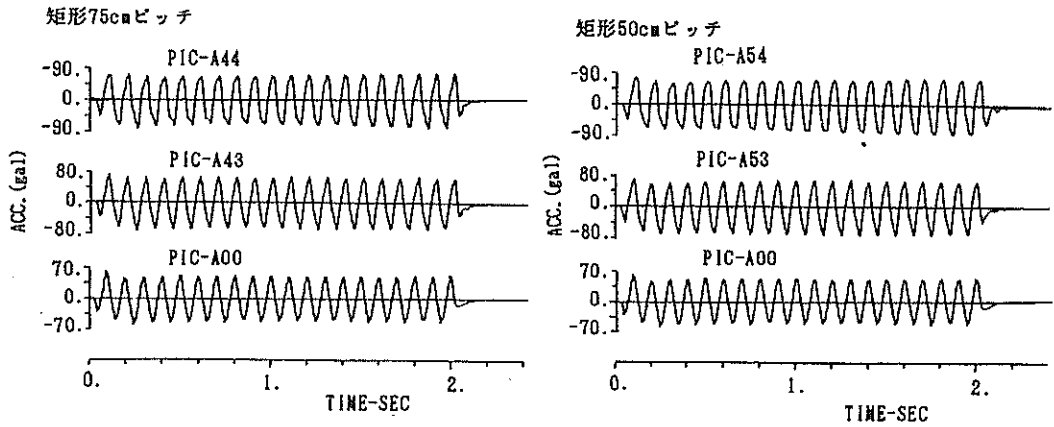
水圧の計測値を提示することとした。

3.2 模型地盤の過剰間隙水圧

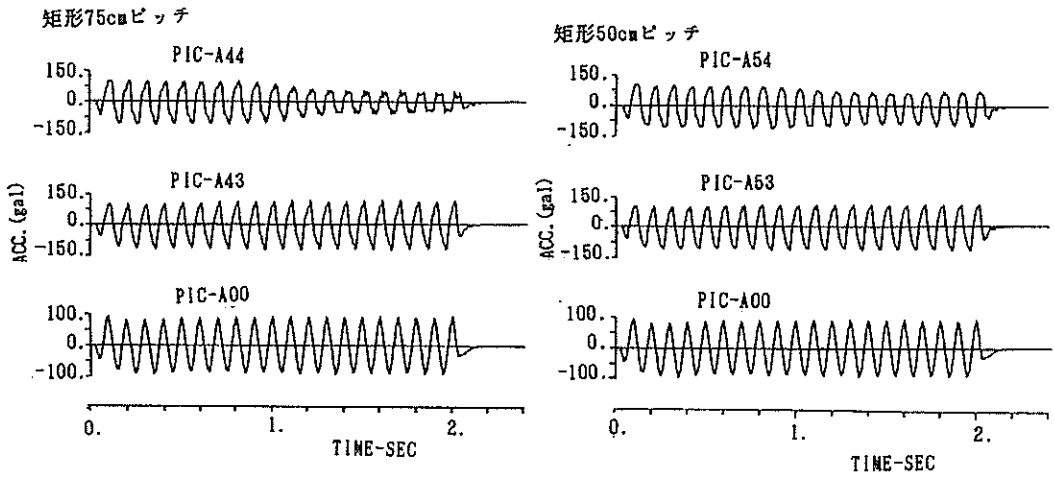
(1) 過剰間隙水圧の時刻歴

さきに図-4に示した4ケースの模型地盤に対して、加速度レベルを60 Gal, 90 Gal, 140 Galを目標とし

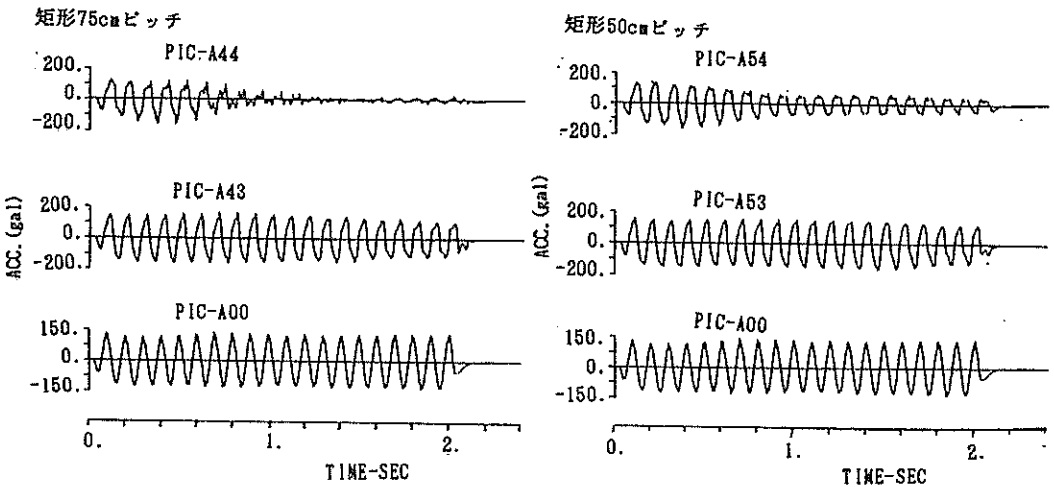
て加振した結果、図-17~23に示す過剰間隙水圧の時刻歴が得られた。ドレーンを打設した模型地盤の実験結果を示す図-17~21(ケース-1~3)においては、各図において左上に示されているように、各図の上から順に、ドレーンから最も離れた位置からドレーン内まで



(a) 実験 No.202 (入力加速度 61.3 gal)

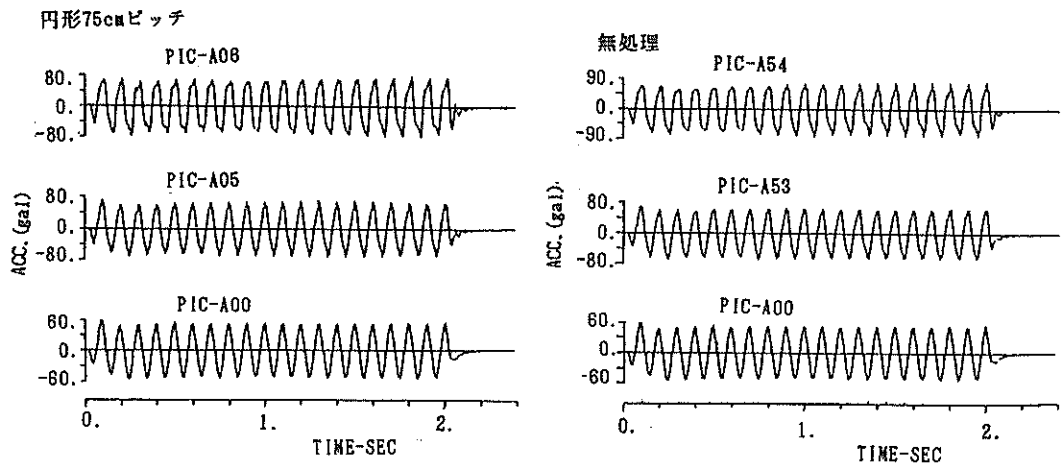


(b) 実験 No.203 (入力加速度 95.5 gal)

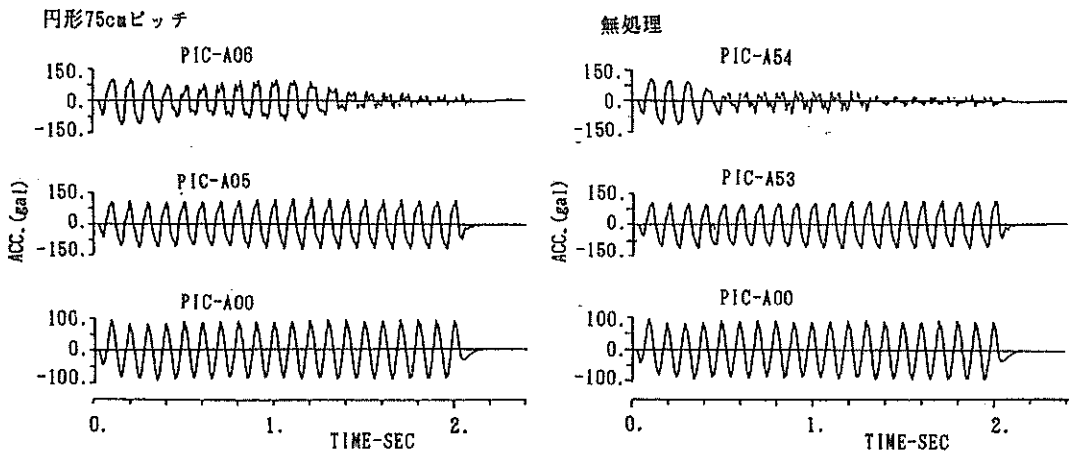


(c) 実験 No.204 (入力加速度 138.8 gal)

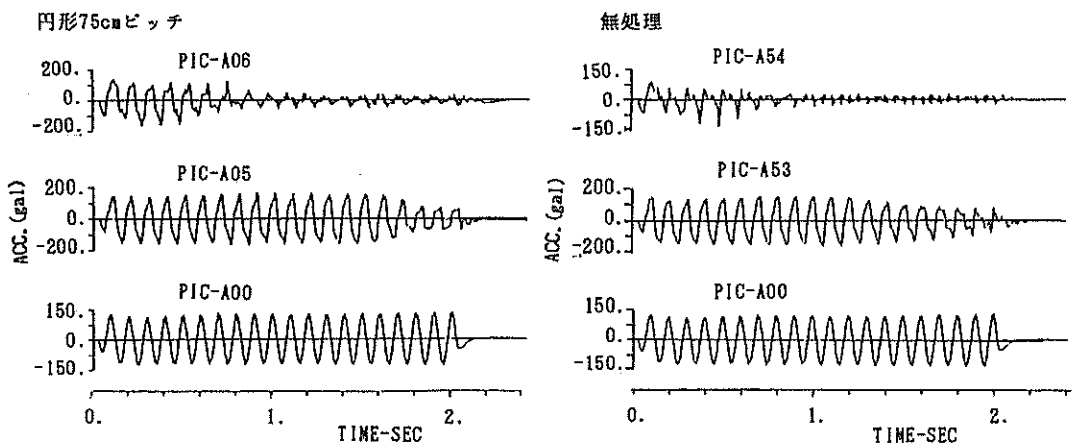
図-13 加速度時刻歴 (ケース-2)



(a) 実験 No.302 (入力加速度 59.9 gal)

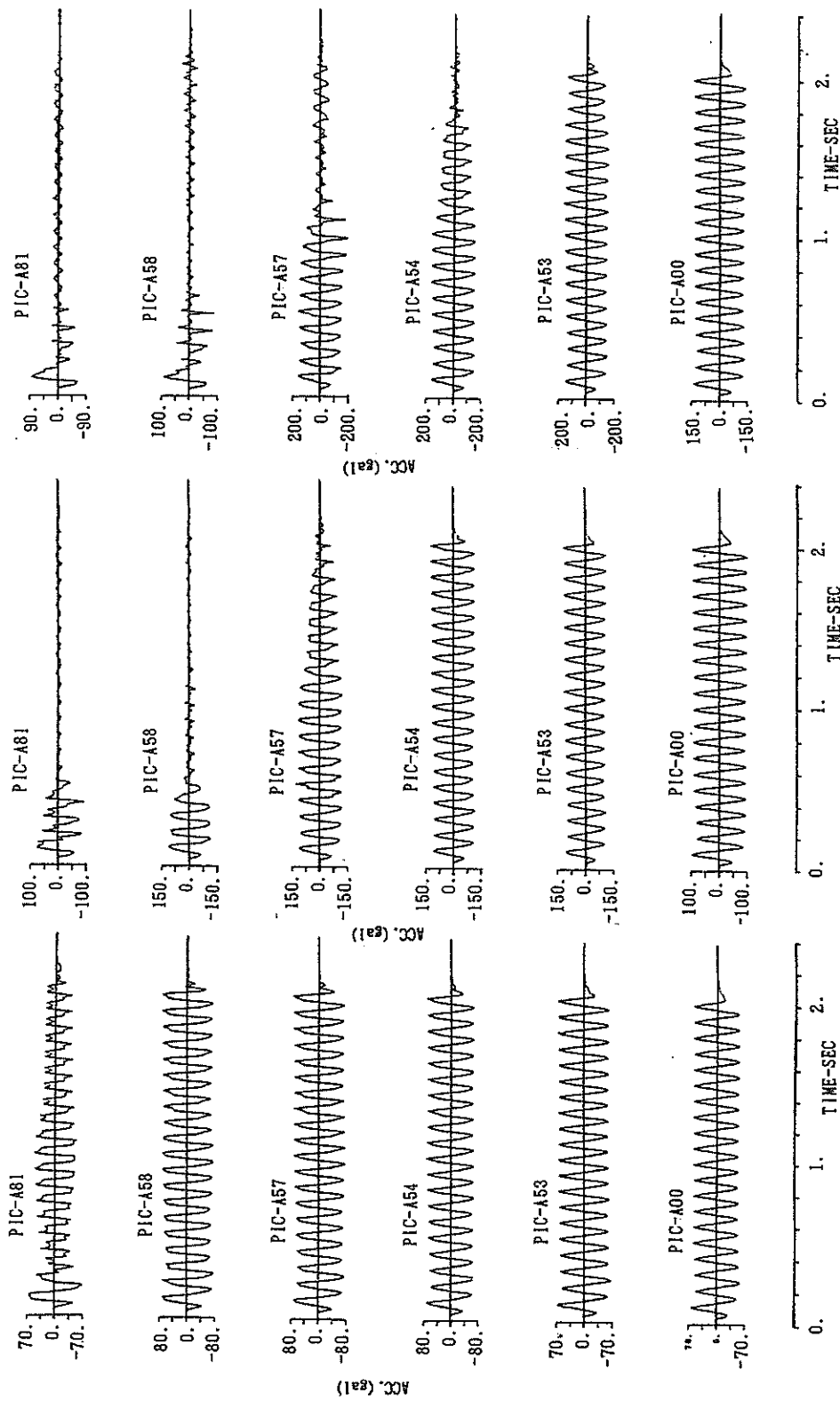


(b) 実験 No.303 (入力加速度 95.2 gal)



(c) 実験 No.304 (入力加速度 131.5 gal)

図-14 加速度時刻歴 (ケース-3)



(a) 実験 No.402
(入力加速度 63.4 gal)

(b) 実験 No.403
(入力加速度 98.2 gal)

(c) 実験 No.404
(入力加速度 141.4 gal)

図-15 加速度時刻歴 (ケース - 4)

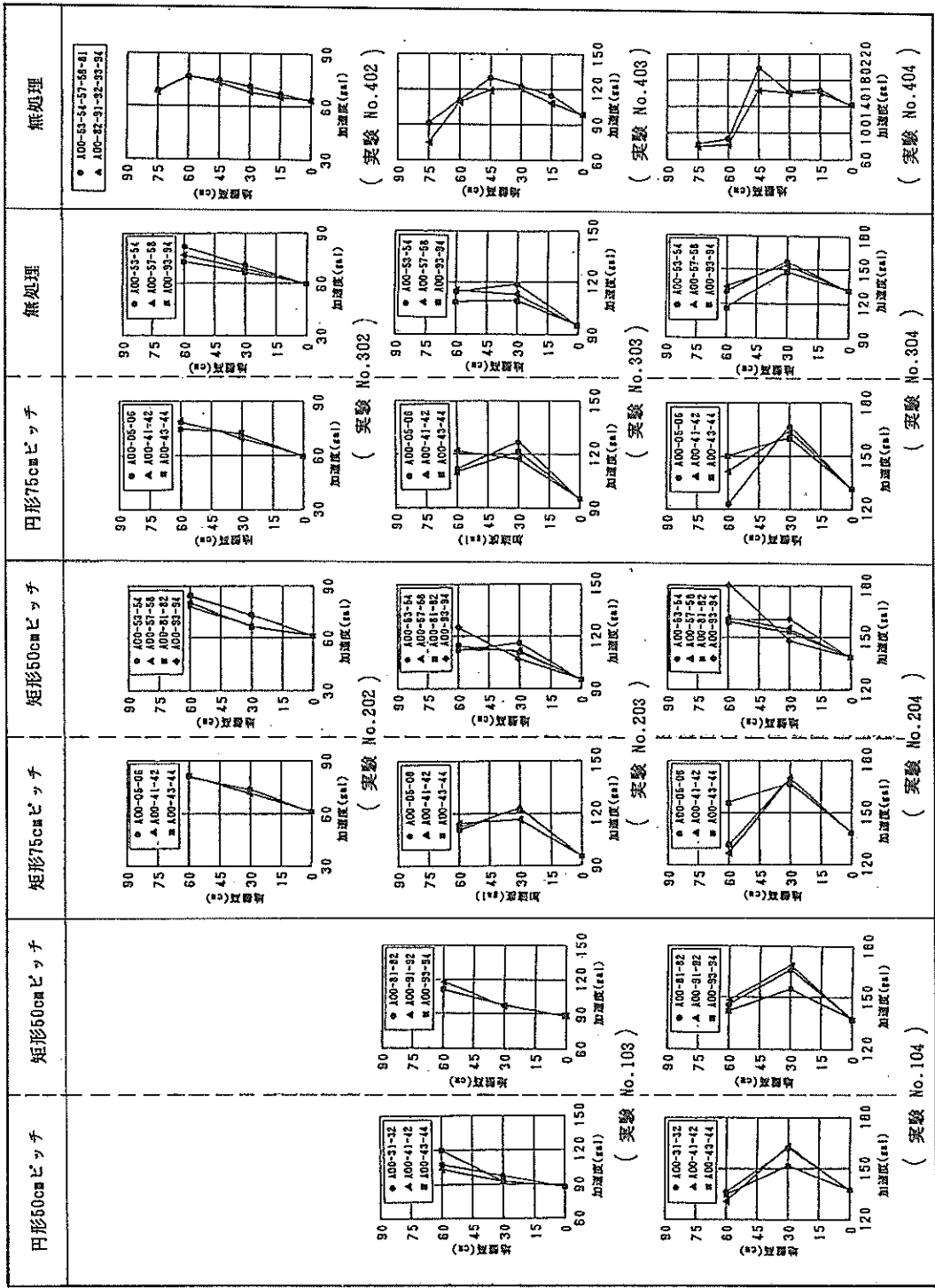
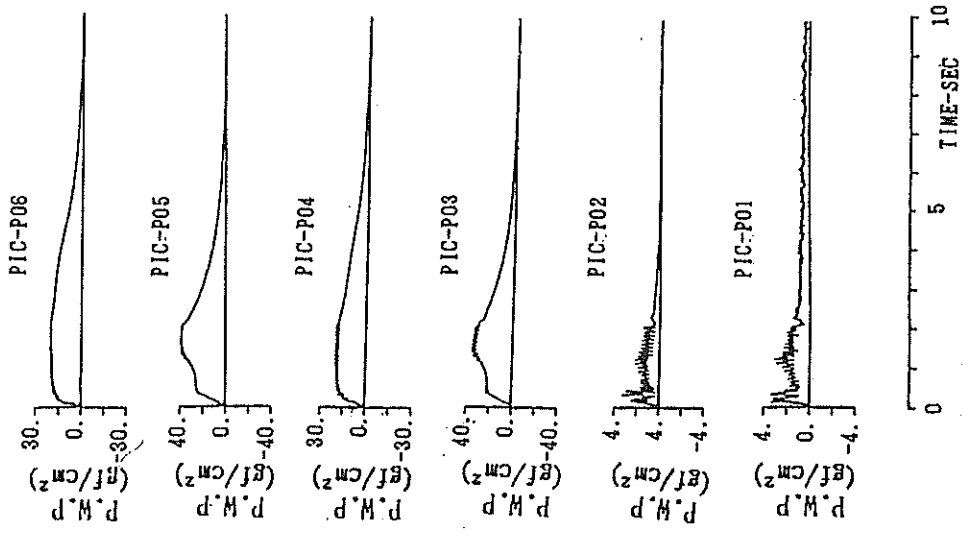
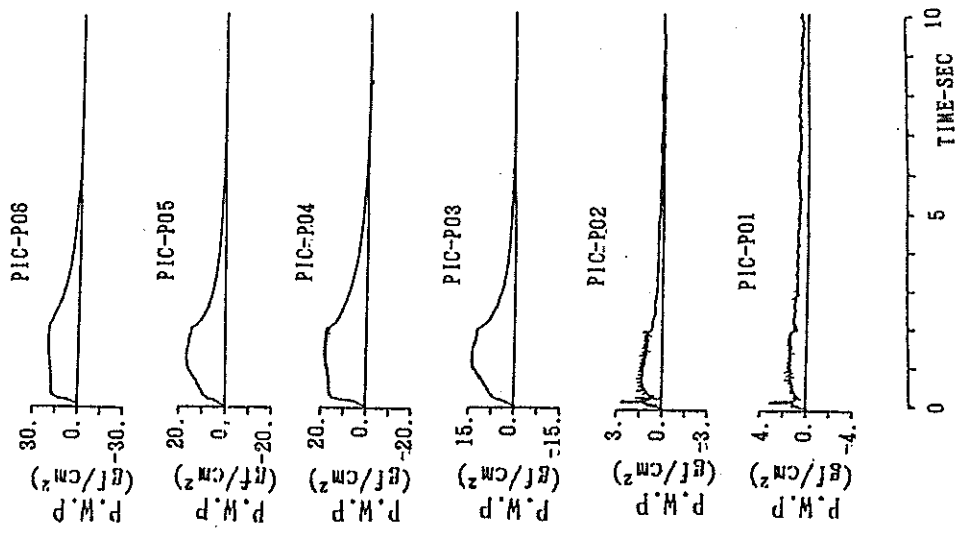


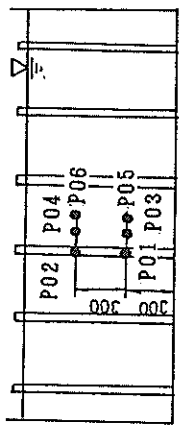
図-16 加速度の鉛直方向分布



(b) 実験 No.104
(入力加速度 187.4 gal)

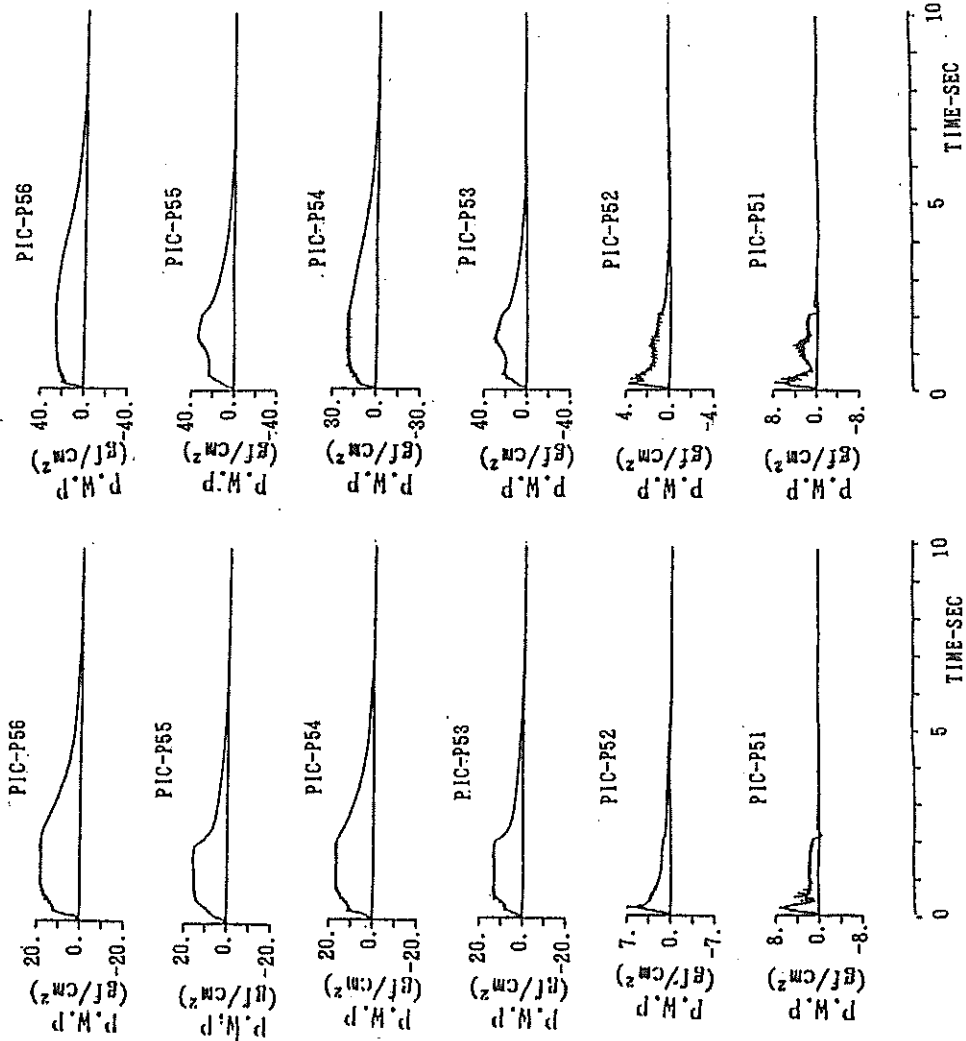


(a) 実験 No.103
(入力加速度 87.8 gal)



深度 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期有効上載圧 (gf/cm ²)
30	P02, P04, P06	23.1
60	P01, P03, P05	46.2

図-17 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-1, 円形ドレーンピッチ 50 cm)



(a) 実験 No. 103
(入力加速度 87.8 gal)

(b) 実験 No. 104
(入力加速度 137.4 gal)

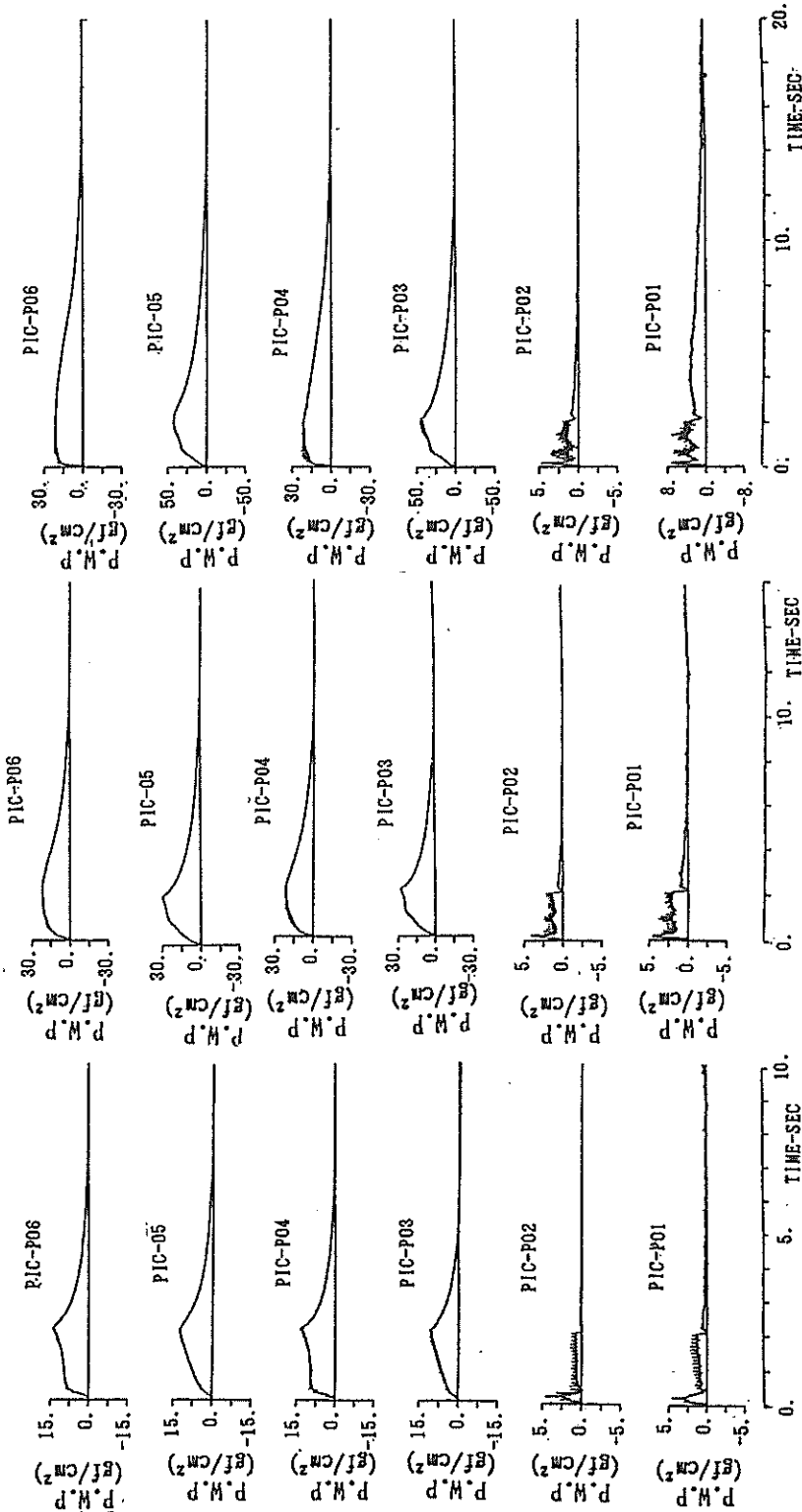
図-18 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-1, 矩形ドレーンピッチ 50 cm)

		▽	
	P54		
	P52, P56		
	P51, P55		
	P53		

深度 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期有効上載圧 (gf/cm ²)
30	P52, P54, P56	23.3
60	P51, P53, P55	46.7

	P04	●	P06
	P02	●	P05
	P01	●	P03

深度 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期有効 上載圧 (gf/cm ²)
30	P02, P04, P06	23.1
60	P01, P03, P05	46.2



(a) 実験 No.202
(入力加速度 61.3 gal)

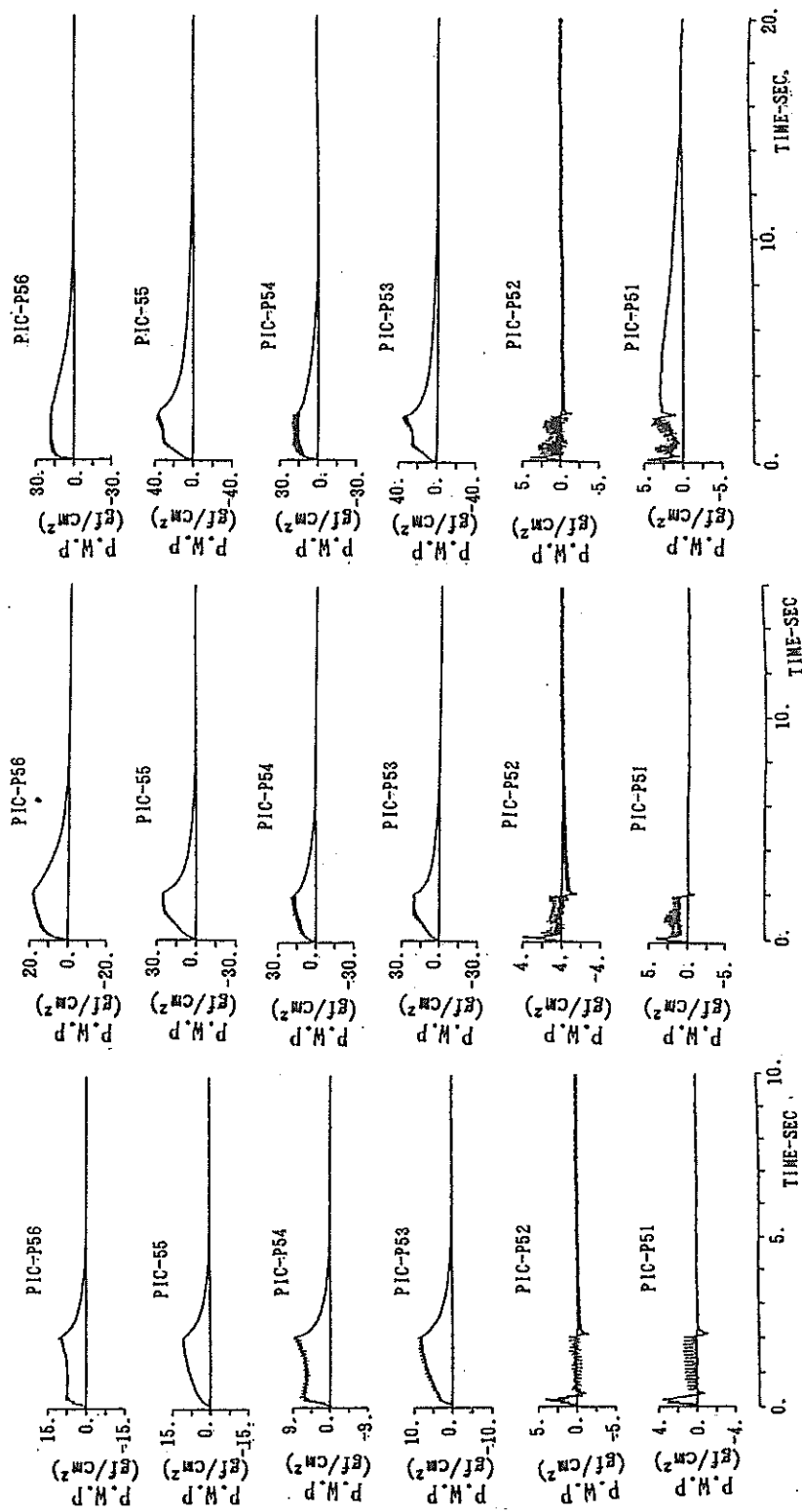
(b) 実験 No.203
(入力加速度 95.5 gal)

(c) 実験 No.204
(入力加速度 138.8 gal)

図-19 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-2, 矩形ドレーンピッチ 75 cm)

				▽
	P54			
	P52 ●●●P56			
	P51 ●●●P55			
	P53			

深度 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期有効 上載圧 (gf/cm ²)
30	P52, P54, P56	23.3
60	P51, P53, P55	46.0



(a) 実験 No. 202

(入力加速度 61.3 gal)

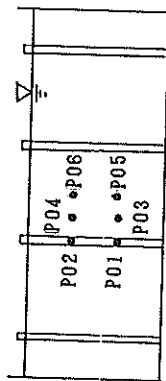
(b) 実験 No. 203

(入力加速度 95.5 gal)

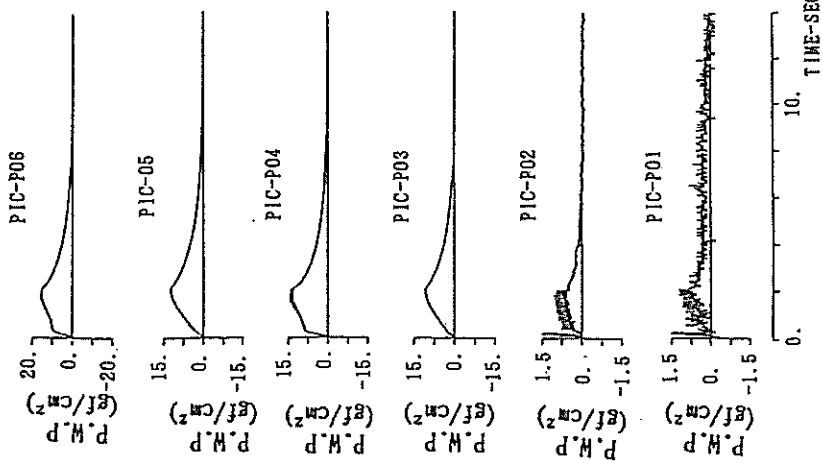
(c) 実験 No. 204

(入力加速度 138.8 gal)

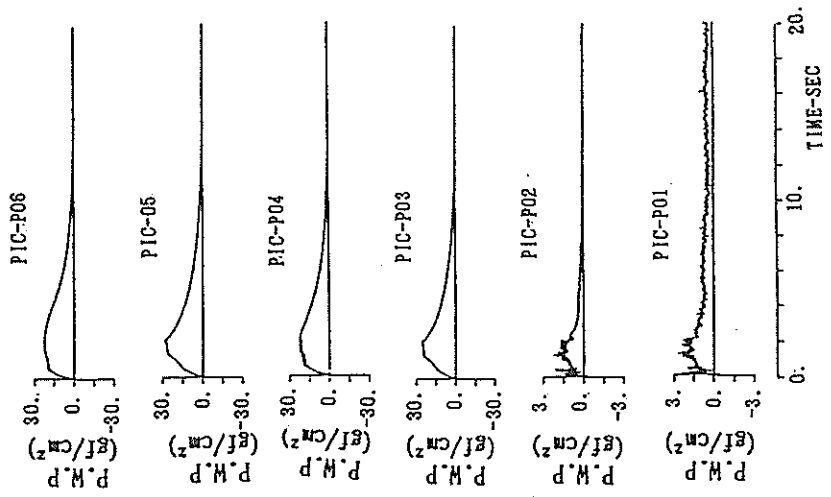
図-20 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-2, 矩形ドレーンピッチ 50 cm)



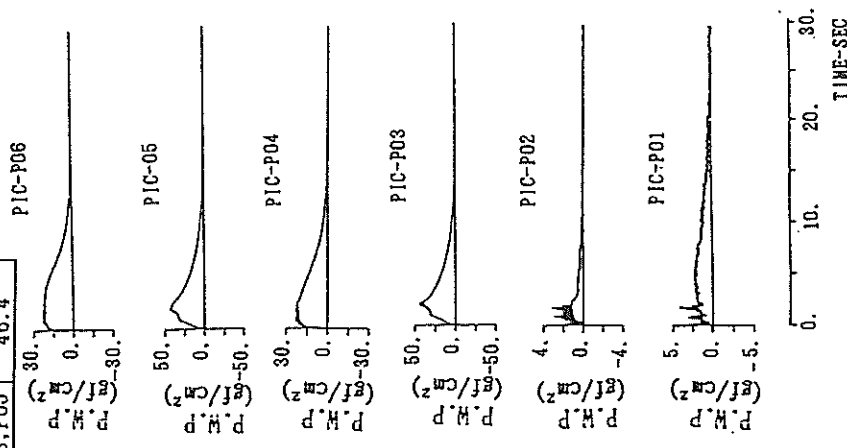
深度 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期有効上載圧 (gf/cm ²)
30	P02, P04, P06	23.2
60	P01, P03, P05	46.4



(a) 実験No.302
(入力加速度 59.9 gal)

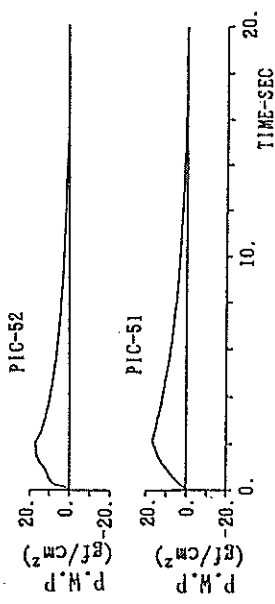


(b) 実験No.303
(入力加速度 95.2 gal)

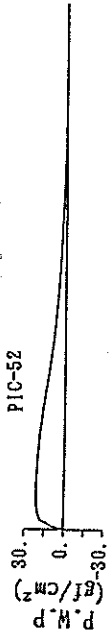
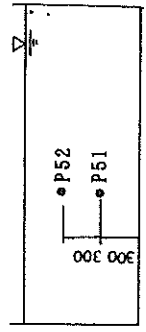


(c) 実験No.304
(入力加速度 131.5 gal)

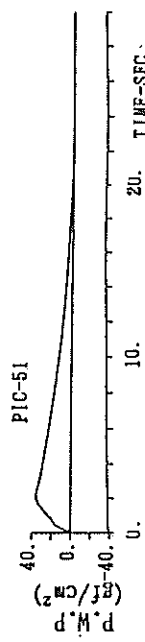
図-21 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-3, 円形ドレーンピッチ75 cm)



(a) 実験 No. 302
(入力加速度 59.9 gal)



(b) 実験 No. 303
(入力加速度 95.2 gal)



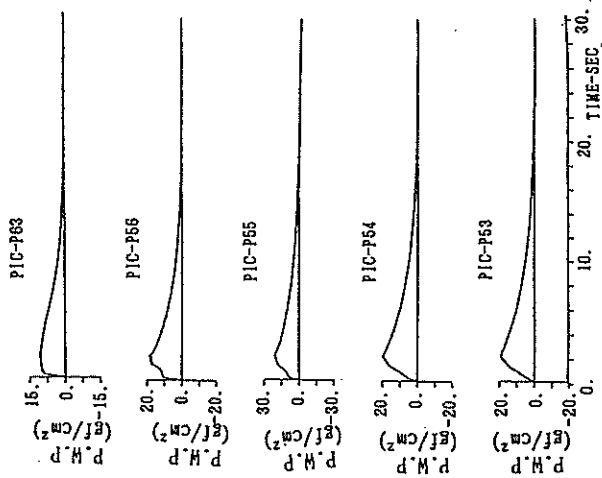
(c) 実験 No. 304
(入力加速度 131.5 gal)

深度 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期有効上載圧 (gf/cm ²)
30	P52	23.0
60	P51	46.0

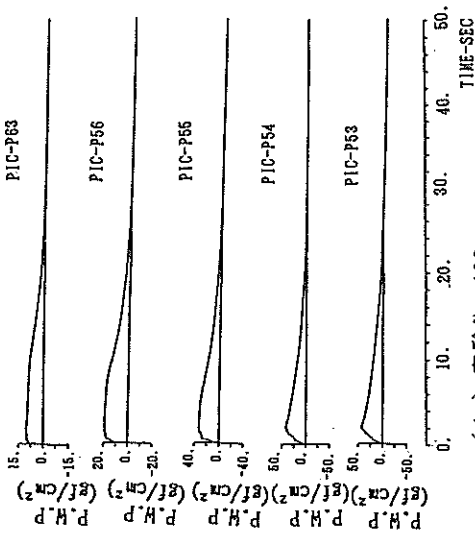
図-22 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-3, 無処理)

P63 ●
P56 ●
P55 ●
P54 ●
P53 ●

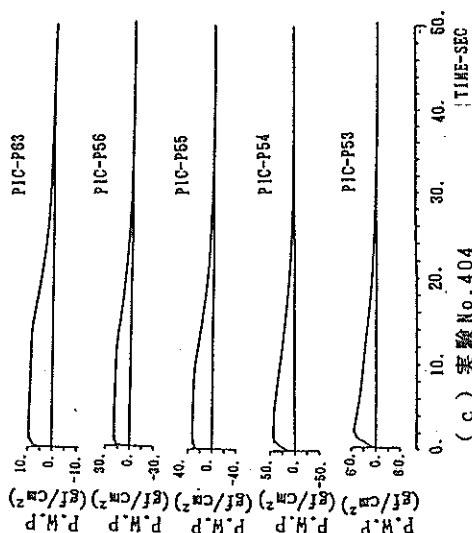
深底 (cm)	間隙水圧計 (No.)	初期直効上載圧 (gf/cm ²)
15	P63	11.7
30	P56	23.3
45	P55	35.0
60	P54	46.8
75	P53	58.3



(a) 実験 No. 402
(入力加速度 63.4 gal)



(b) 実験 No. 403
(入力加速度 98.2 gal)



(c) 実験 No. 404
(入力加速度 141.4 gal)

図-23 過剰間隙水圧時刻歴 (ケース-4, 無処理)

の順に、しかも地盤模型の地表からの深さ 30cm と 60cm における値を交互に、示している。また、無処理地盤の実験結果を示す図-22～23（ケース-3～4）においては、地盤中央の位置における計測値を上層部から下層部へ向かって順に示している。また、前章でも触れたようにケース-4（図-23）においては、15cm ごとの測定点で過剰間隙水圧を計測している。

各時刻歴の縦軸および横軸のスケールは、波形が見やすいように波形毎に異なっており、統一はされていないので、これらの図をもとに波形相互の比較をする場合には、この点に対する注意が必要である。なお、ここに示す結果以外にも、図-5 に示すように他の多数の測定点で過剰間隙水圧を計測しているが、余りに多数のデータを一挙に示すことは、実験結果の把握をかえって妨げる恐れもあるため、代表的な計測結果のみを示すこととした。

これらの過剰間隙水圧の時刻歴を順を追って見ていくと、まず、図-17 に示すケース（円形断面ドレーンピッチ 50cm）では、台加速度のレベルが約 90 Gal の時には、地表から 30cm の深さにおいては、同図(a)において最上段および第3段に示す2つの時刻歴に示されるように、ドレーンを打設しているにもかかわらず過剰間隙水圧が加振直後に初期有効上載圧力に達している（すなわち、液状化が発生している）。しかし、地表から 60cm の深さにおいては、同図(a)において第2段および第4段に示す2つの時刻歴に示されるように、過剰間隙水圧は初期有効上載圧力には達していない（すなわち、液状化は発生していない）。

これらの地盤内の過剰間隙水圧に対し、同図(a)において第5、6段に示す2つの時刻歴に示されるとおり、ドレーンの中の水圧は著しく小さい値となっている。ドレーンの中は、図-3の構造図に示すとおり中空となっており、単純に考えると過剰間隙水圧がゼロであるべきである。実際には、これらの時刻歴に示されるとおり、まず、加振直後にドレーン周囲の地盤から間隙水が流入し、これに応じてドレーンからの排水がなされるが、この排水開始直後にはドレーン内の水の慣性に起因すると思われる瞬間的な間隙水圧の上昇が見られる。これ以降もドレーン内には、若干の過剰間隙水圧が発生したままとなるが、これは、地表面においてドレーン開口部から周囲へ間隙水が排水されるに当たって、ドレーン開口部において若干水位が上昇するためであると思われる。振動実験において、ドレーン開口部の挙動を観察したところでは、そのような水位の上昇が確認されている。

台加速度のレベルが約 140 Gal の時にも、図-17 (b)

に示すとおり、概ね台加速度のレベルが約 60 Gal の時と同様の結果が得られている。しかし、同図(b)の第2、4段に示すように地表からの深さ 60cm においては、台加速度のレベルが約 60 Gal の時と比べて有効上載圧力にかなり近い過剰間隙水圧となっている。また、同図 (b) の最上段および第3段に示すように地表からの深さ 30cm においては、台加速度のレベルが約 60 Gal の時と比べて加振終了後（加振時間 2 秒）の過剰間隙水圧の消散速度が著しく小さくなっている。

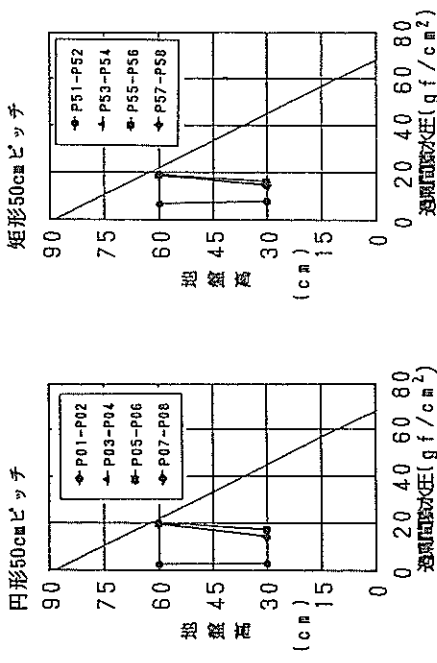
同様の結果は、図-18 に示すケース（矩形断面ドレーンピッチ 50cm）についても得られている。また、図-19～21 には、それぞれ矩形断面ドレーンピッチ 75cm、矩形断面ドレーンピッチ 50cm、円形断面ドレーンピッチ 75cm のケースについて、過剰間隙水圧の時刻歴が示されているが、各図の(a)に示すように、台加速度のレベルが約 60 Gal の時には、地盤の上層部においても液状化が発生していない結果が得られている点を除けば、これまでに述べてきた結果と同様の結果が得られている。

以上の結果はドレーンを打設した模型地盤に対する結果であったが、無処理地盤の結果は、図-22～23 に示すとおりとなっている。これらの結果は、後にプラスチックドレーンの設計法の適用性の検討において用いることとなるので、本章においては、単に、結果を提示するのみに留めることとしたい。

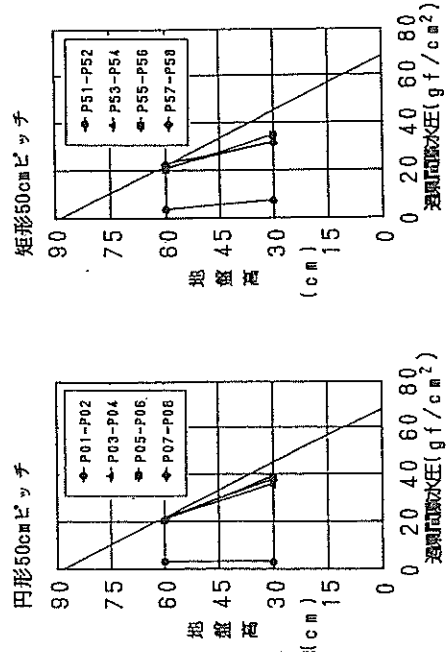
以上のとおり図-17～23 に示してきた過剰間隙水圧の時刻歴を閲覧すると、少なくともプラスチックドレーンの加振終了後における排水効果は明かに認められる。例えば、各図において台加速度のレベルが約 90 Gal の結果を閲覧すると、まず、無処理地盤の実験 No.408（図-23 (b)）では、加振終了後において過剰間隙水圧がほぼゼロになるまでに要する時間は約 24 秒程度である事がわかる。これに対し、ドレーンを 50cm と 75cm ピッチに設置した場合（図-17 (b)～21 (b)）には、それぞれ、6 秒と 10 秒程度になることが分かる。このことから、ドレーンの打設ピッチが小さくなるに従って、過剰間隙水圧の消散時間は早くなる事が分かる。なお、ドレーンの断面には円形と矩形の二種類があるが、これらの断面の違いによる過剰間隙水圧の消散速度の差はほとんど認められない。

(2) 最大過剰間隙水圧の地盤内分布

これらの時刻歴に対応する模型地盤内の過剰間隙水圧の最大値の分布は図-24～27 に示すとおりとなる。これらの図においては、過剰間隙水圧の最大値に加えて、初期有効上載圧力を実線で示している。まず、台加速度のレベルに応じて地盤内の加速度分布がどのように変化



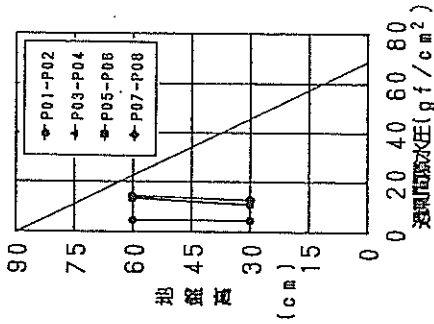
(a) 実験No.103
(入力加速度 87.8 gal)



(b) 実験No.104
(入力加速度 137.4 gal)

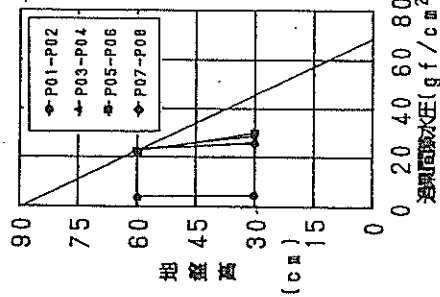
図-24 過剰間隙水圧の鉛直方向分布 (ケース-1)

矩形75cmピッチ



(a) 実験 No.202

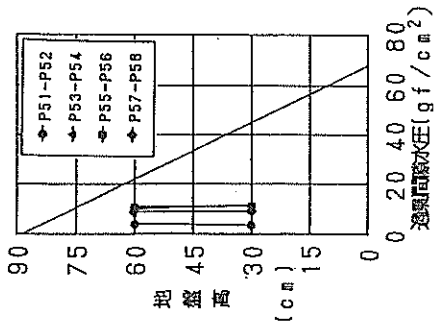
矩形75cmピッチ(入力加速度 61.8 gal)



(b) 実験 No.208

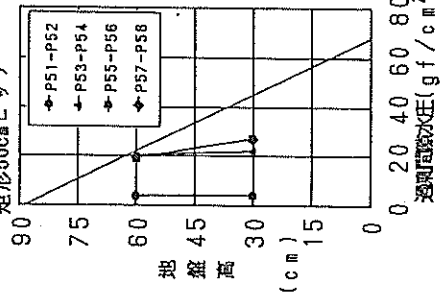
(入力加速度 95.5 gal)

矩形50cmピッチ



(a) 実験 No.202

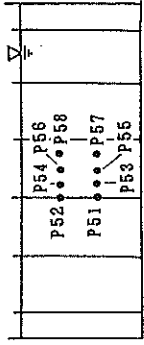
矩形50cmピッチ



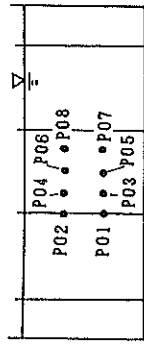
(b) 実験 No.208

(入力加速度 95.5 gal)

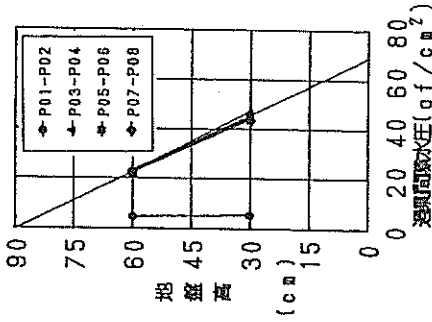
矩形50cmピッチ



矩形75cmピッチ



矩形75cmピッチ



(c) 実験 No.204

(入力加速度 138.8 gal)

矩形50cmピッチ

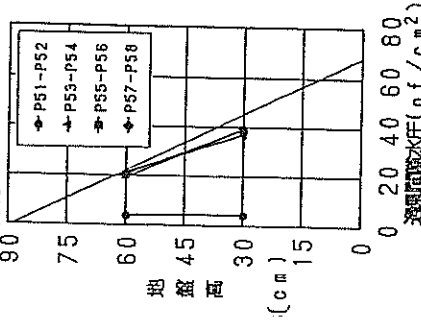
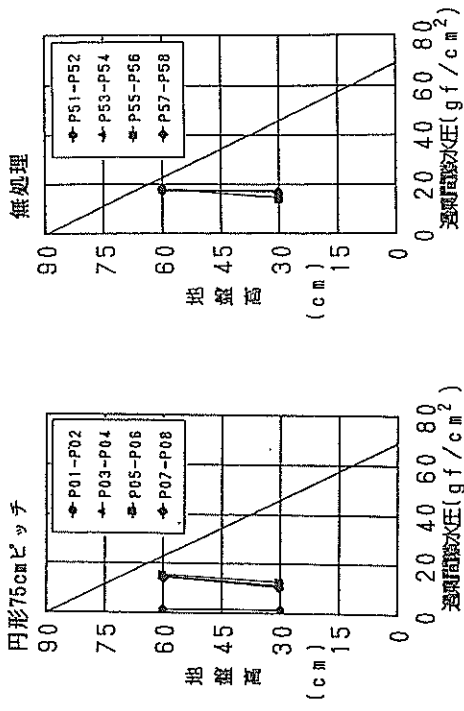
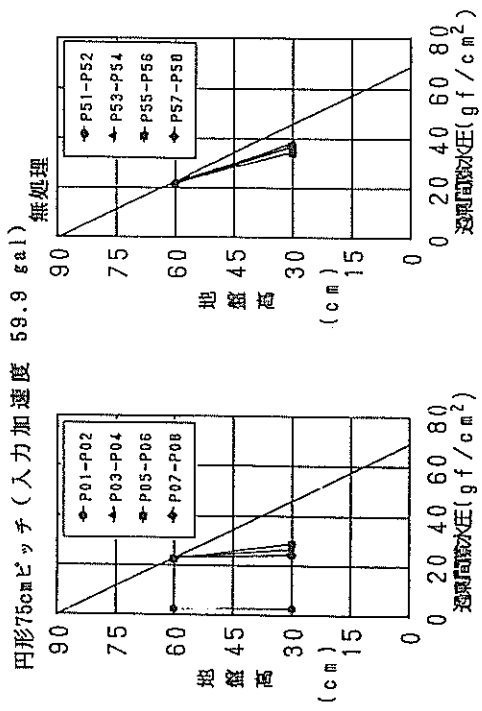


図-25 過剰間隙水圧の鉛直方向分布 (ケース-2)

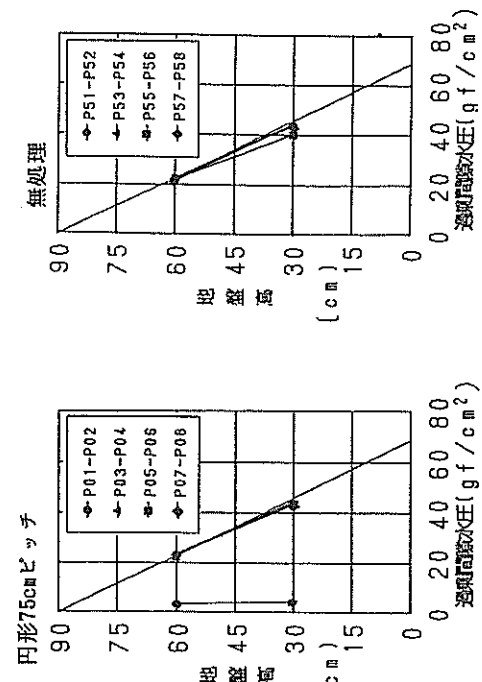
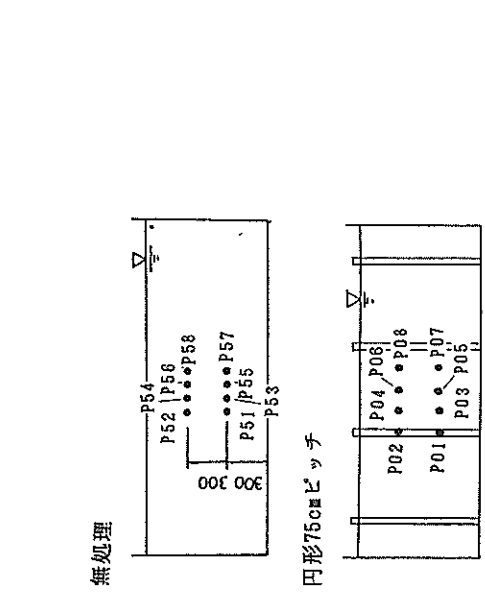


(a) 実験No.302



(b) 実験No.303

(c) 実験No.304



(c) 実験No.304

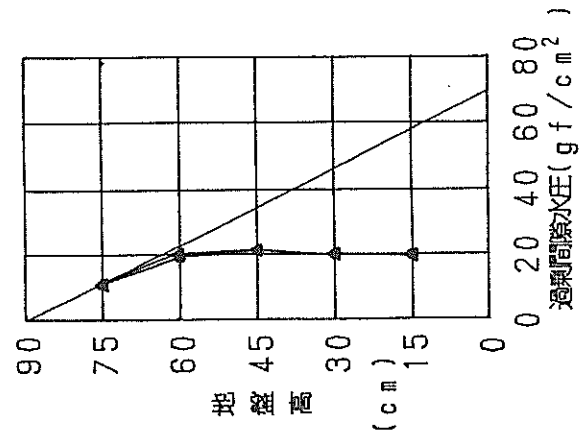
(入力加速度 131.5 gal)

図-26 過剰間隙水圧の鉛直方向分布 (ケース-3)

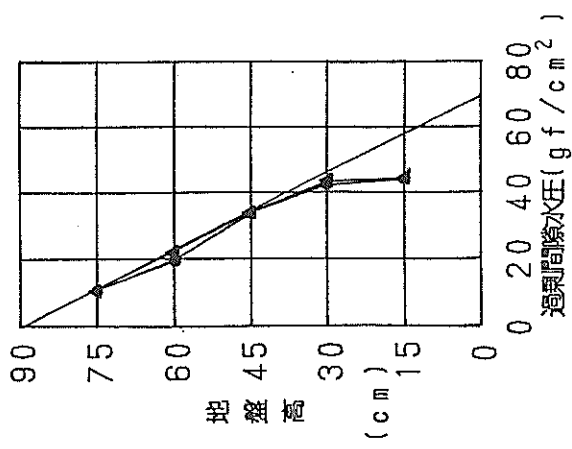
$\frac{\Delta}{\Xi}$
P63 ● P94 P56 ● P93 P55 ● P74 P54 ● P73 P53 ● P64

● P53-54-55-56-63 ▲ P64-73-74-93-94
--

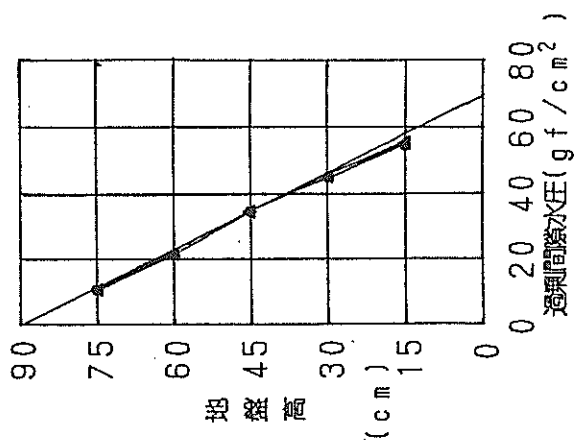
無処理



(a) 実験 No. 402
(入力加速度 63.4 gal)



(b) 実験 No. 403
(入力加速度 98.2 gal)



(c) 実験 No. 404
(入力加速度 141.4 gal)

図-27 過剰間隙水圧の鉛直方向分布 (ケース-4)

するかについて見ると、図-26および27に示す無処理地盤においては、台加速度が60 Gal程度と小さい場合には地盤の上部（深さ30cm程度まで）が液状化する（過剰間隙水圧の最大値が初期有効上載圧力に等しくなる）のに対し、台加速度が90 Gal程度の場合には地盤の深さ60cm程度まで、台加速度が140 Gal程度の場合には地盤全層にわたって液状化することがわかる。これに対して、ドレーンを設置したケースにおいては、図-24～26に示すように、台加速度が60 Galおよび90 Gal程度の場合には、ドレーンからの距離によって差はあるものの過剰間隙水圧の値は無処理の場合に比べて小さく抑えられていることがわかる。しかし、台加速度が140 Gal程度の場合には、ドレーンの断面形状および打設ピッチに関わらず各ケース共に地盤内における過剰間隙水圧の値はかなり初期有効上載圧力の値に近づいてくることが分かる。

3.3 実験の再現性について

以上、加速度と過剰間隙水圧の実験結果を示してきたが、ここで、ドレーンの効果は無処理地盤の液状化に関する挙動との関連で検討する場合に重要となる無処理地盤の実験の再現性について検討することとしたい。

このため、同一の条件で行われた無処理地盤に対する実験ケース-3とケース-4について比較を行ってみる。図-28は加速度の最大値の深度方向分布を示したもの

である。破線がケース-3であり実線がケース-4である。同図より60, 90 Gal程度の台加速度入力に対して両者はよく一致している。また、140 Gal程度の台加速度入力の加振実験No.304, No.404については、ケース-4の入力加速度がケース-3に比べ10 Gal程度大きくなっている為に多少その傾向が異なったものになっている。しかし、同程度の入力加速度に対してはかなり一致した結果が得られるものと考えられる。図-29は、これらの加振により発生した過剰間隙水圧の最大値の深度方向分布を各入力段階毎に示したものである。同図より、各加振段階とも入力加速度の値はケース-4の方が多少大きいことを考えると、得られた過剰間隙水圧は比較的良好一致しているものといえる。なお、両ケースの加速度と間隙水圧の時刻歴においても、ほぼ一致した結果が得られている。これらの事実より、今回の実験においては、地盤条件並びに入力加速度が等しい場合、同一の実験結果が得られ、実験に再現性があることが確かめられた。

4. ドレーンの断面形状の影響

3.に示してきた実験結果をもとに、液状化対策としてのプラスチックドレーンの効果の検討およびその設計法を開発するにあたり、予め明かにすべき点の一つある。ドレーンの断面形状の影響である。はじめに述べた通り、

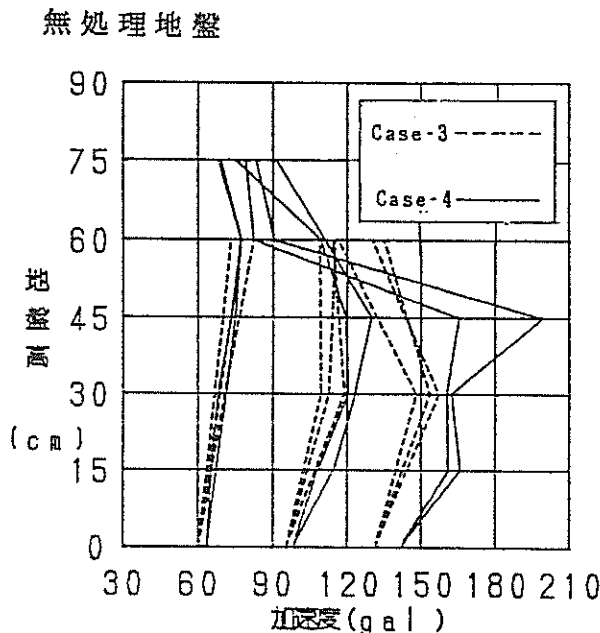


図-28 最大加速度分布の比較

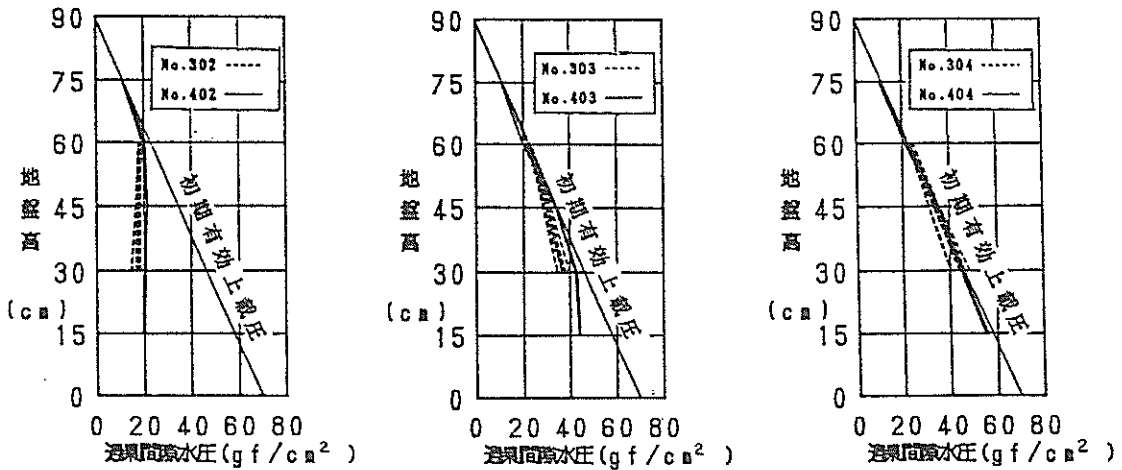


図-29 最大過剰間隙水圧の比較

プラスチックドレーンの断面形状としては、各種のものが考えられる。本研究では、これらの内の代表的と思われる円形及び矩形断面のドレーンを用いて実験を行ってきた。液状化対策としてのドレーンの効果に、もしもこれらの断面形状が著しい影響を与えるものとなれば、その設計法を開発する上でもこれらの相違を考慮せねばならないであろう。これまでに示してきた実験結果に対しては、ドレーンの断面形状による相違は著しくはないと所見を得ているが、本章においては、この点について実験および解析の両面からやや詳しく検討することとしたい。

4.1 実験的検討

(1) 円形と矩形断面ドレーンの比較

円形と矩形断面のドレーンを比較するに当たり、まず、本項では、過剰間隙水圧の最大値がドレーン中心からの距離に応じてどの様に分布するかを見ることにする。

図-30は入力加速度がそれぞれ60, 90 Gal程度における実験で深さ60 cmの位置における結果を示したものである。これらの結果と合わせて、同図には無処理地盤の実験から得られた過剰間隙水圧データの平均値及び初期有効上載圧力も示している。同図に示される結果より、ドレーンの断面形状に関わらず、無処理地盤に対する結果と比べ、ドレーンを配置することによって過剰間隙水圧の最大値はかなり低下することが分かる。また、同図(b)に示す台加速度が約90 Galの場合においては、ドレーンの断面形状に関わらず打設ピッチの小さい方がドレーンによる過剰間隙水圧の低減効果がより顕著になる結果が得られている。また、前章において述べたように、加速度および過剰間隙水圧の時刻歴においても、ドレーン

の断面形状の影響は認め難い。これらの事実から、今回用いたドレーンに関しては円形と矩形の断面による液状化対策としての効果に関する差は認め難いと言える。

(2) 矩形ドレーンの方向による差

次に、矩形ドレーンの断面の方向によって生じる地盤内の過剰間隙水圧の差を見るために用意したのが図-31である。矩形ドレーン断面の中心からのX, Y, Z方向の定義は同図右上に示す通りである。なお、加振方向はX方向である。また、これらの結果は深度さ60 cmにおける値を示したものである。

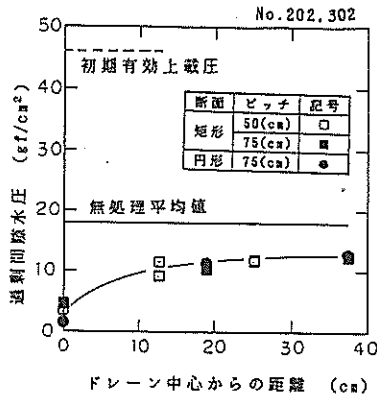
これらの図のX, Y, Z方向のドレーン中心からの距離が等しい位置における過剰間隙水圧の最大値を比較すると、各加振段階共にドレーンに近い所においては多少の差があるものの、ドレーン中心からの距離が増加するに従ってその差は縮まる傾向にあることがわかる。また、この差は、ドレーンの打設ピッチが異なっても、ドレーンの打設間隔の半分程度離れるとほぼゼロとなっている。このことから、ドレーンが矩形の場合であっても間隙水圧の低減効果は円形断面の場合と著しくは相違しないものと判断される。

4.2 解析的検討

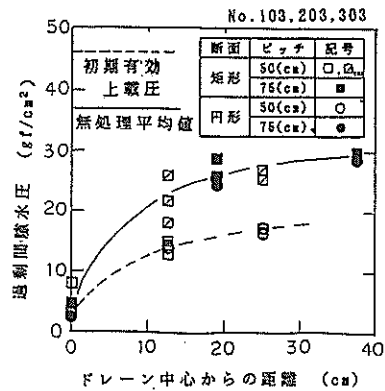
前項においては、ドレーンの断面形状による液状化対策としての排水効果には著しい相違は無いとの結論が、実験データをもとにして得られた。本項においては、この結論の妥当性を解析的に検討することとしたい。

(1) 矩形ドレーンに対する基礎方程式

矩形ドレーンに対して解析的な検討を実施するに当たり、まず、矩形ドレーン一本分のドレーンおよび地盤に対してX, Y, Z座標を図-32のように設定する。こ

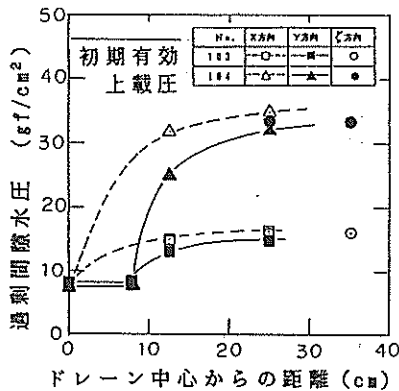


(a) 入力加速度60Gal

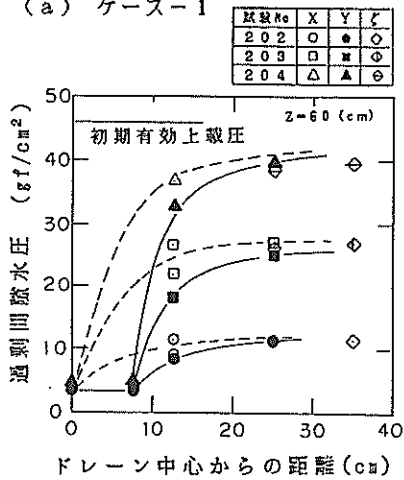
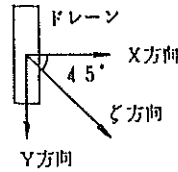


(b) 入力加速度90Gal

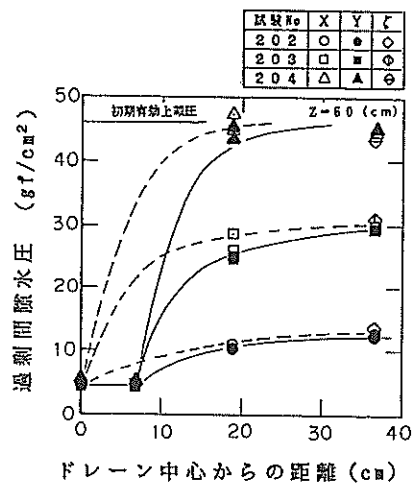
図-30 最大過剰間隙水圧の比較



(a) ケース-1



(b) ケース-2 (50cmピッチ)



(c) ケース-2 (75cmピッチ)

図-31 矩形ドレーンの方向による差

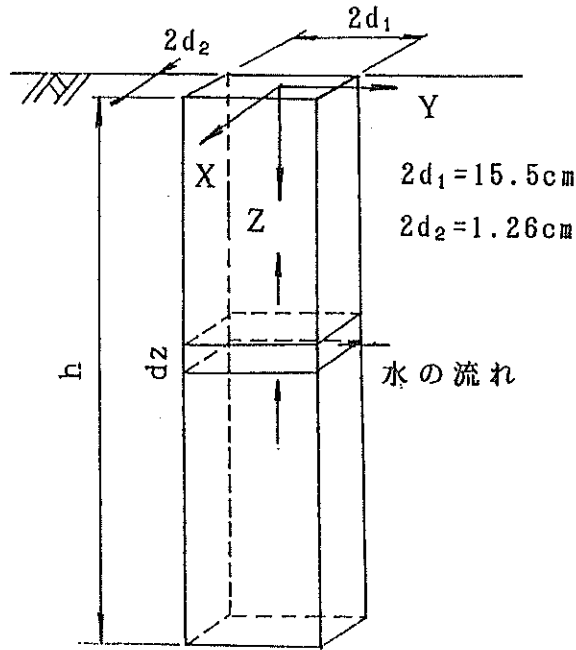


図-32 矩形ドレーンの解析モデル

の座標系において、砂層内の過剰間隙水圧 u に関する基礎方程式は、Seed ら¹⁾がグラベルドレーンの挙動の解析において用いた方程式と同様に、過剰間隙水圧の蓄積と消散を考慮した以下の式で与えられるものとした。但し、砂層の透水係数は水平及び鉛直のいずれの方向にも同一の値をとるものと見なしている。

$$\frac{k_s}{m_v \gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

- ここに、 γ_w : 水の単位体積重量
 k_s : 砂層の透水係数
 m_v : 土の体積圧縮係数
 u_g : 地震時に発生する非排水状態での過剰間隙水圧

ここで、過剰間隙水圧の発生項 u_g は、次式で与えられる。

$$\frac{u_g}{\sigma'_{v0}} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\left(\frac{N}{N_1} \right)^{1/2} \alpha \right] \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial N} = \frac{\sigma'_{v0}}{\alpha \pi N_1} \left[\sin^{2\alpha-1} \left(\frac{\pi u_g}{2 \sigma'_{v0}} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi u_g}{2 \sigma'_{v0}} \right) \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots(3)$$

- ここに、 σ'_{v0} : 初期有効上載圧力
 α : 間隙水圧の上昇特性を決定する定数 (0.7 を使用)
 N_1 : 非排水状態で液状化に至るまでの繰り返し回数
 N_{eq} : 不規則なせん断応力を等価な一定振幅のせん断応力に換算した場合の繰り返し回数
 t_d : N_{eq} に対応する地震動の継続時間

一方ドレーンの透水性が有限である場合のドレーンと砂地盤の境界における間隙水に関する連続の条件は、図-32 に示す水の流入および流出の条件を考慮すれば、次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} + \frac{k_s}{k_d} \frac{1}{d_2} \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{k_s}{k_d} \frac{1}{d_1} \frac{\partial u}{\partial X} = 0 \quad \dots\dots(4)$$

- ここに、 k_d : ドレーンの透水係数
(2) 円形ドレーンの基礎方程式
円形ドレーンに対する基礎方程式も、矩形ドレーンの場合と同様に図-33を参照することによって、次式のように表される。

$$\frac{k_s}{m_v \gamma_w} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 u_g は、矩形ドレーンの場合と同じく(2)式で定義される。また、円形ドレーンの場合の間隙水の連続に関する式は次式で表される⁷⁾。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{2}{a} \frac{k_s}{k_d} \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

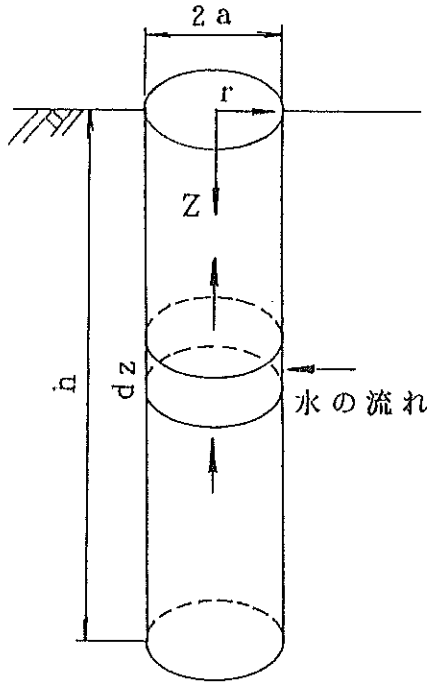


図-33 円形ドレーンの解析モデル

(3) 矩形および円形断面ドレーンの比較

以上の基礎方程式を用いて、矩形と円形断面のドレーンについて、有限要素法を用いて解析を行った。解析に用いた基本的な入力定数の値は表-4に示す通りである。同表に示すとおり、本項での解析においては、模型振動実験の条件を離れて、実地盤におけるドレーンを念頭においた。また、矩形断面ドレーンと比較する円形断面ドレーンの半径は、断面積が等しくなるように定めている。解析は、ドレーンの透水係数 k_d (吉國ら⁷⁾ が円形ドレーンに対して定義したウェルレジスタンス係数 $R=(8/\pi^2)(k_s/k_d)(h/a)^2$ を変化した場合と t_d (Seedら¹⁾ が用いた時間係数 $T_d=(k_s \cdot t_d)/(r_w \cdot m_v \cdot a^2)$

表-4 解析条件

$k_s = 1.0 \times 10^{-2}$	cm/s
$m_v = 1.125 \times 10^{-2}$	cm ² /kgf
$r_w = 1.03 \times 10^{-3}$	kgf/cm ³
$N_{eq} / N_1 = 1$	
$t_d = 12$	秒
$h = 1400$	cm
$b = 30$	cm (有効集水半径)
・円形ドレーンの場合	
$a = 2.5$	cm (ドレーンの半径)
・矩形ドレーンの場合	
$2 d_1 = 15.5$	cm (長辺方向の長さ)
$2 d_2 = 1.26$	cm (短辺方向の長さ)

を変化させた場合について行った。ただし、この解析に当たって、矩形ドレーンのウェルレジスタンス係数は、矩形断面の断面積と等しい円形断面の半径を用いて定義することとした。

まず、矩形ドレーンにおける解析結果のうち、ドレーンの透水係数 k_d を 2.6 m/s ($R=10$) とした場合について、ドレーンの方向による砂層内の過剰間隙水圧比の挙動について見てみることにする。なお、ドレーンの透水係数をこのような値にとったのは、付録に示すように、検討対象とした矩形断面ドレーンの透水係数がこの値であるからである。さて、図-34は、深度 $z=8$ m の位置におけるドレーンの中心からの距離が等しい位置におけるX方向とY方向の過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧の初期有効上載圧力に対する比)を比較したものである。この結果によれば、同図(a)に示すように過剰間隙水圧比の上昇速度にはドレーンに近い位置において多少の差がみられるものの、同図(c)に示すように有効集水円の半径に等しい位置ではほとんど同じ値になっていることがわかる。また、ドレーンの透水係数 k_d を変えた場合についても同様の結果が得られている。

次に、円形断面ドレーンと矩形断面ドレーンとの比較をすることとしたい。図-35, 36は、それぞれウェルレジスタンス係数 R と時間係数 T_d をパラメータにして、円形ドレーンと矩形ドレーンの砂層部における過剰間隙水圧比の最大値をドレーン中心からの距離に対してプロットしたものである。なお、矩形ドレーンの過剰間隙水圧の最大値は、ドレーン中心から等しい距離における値を平均したものをを用いている。また、ドレーン中心から

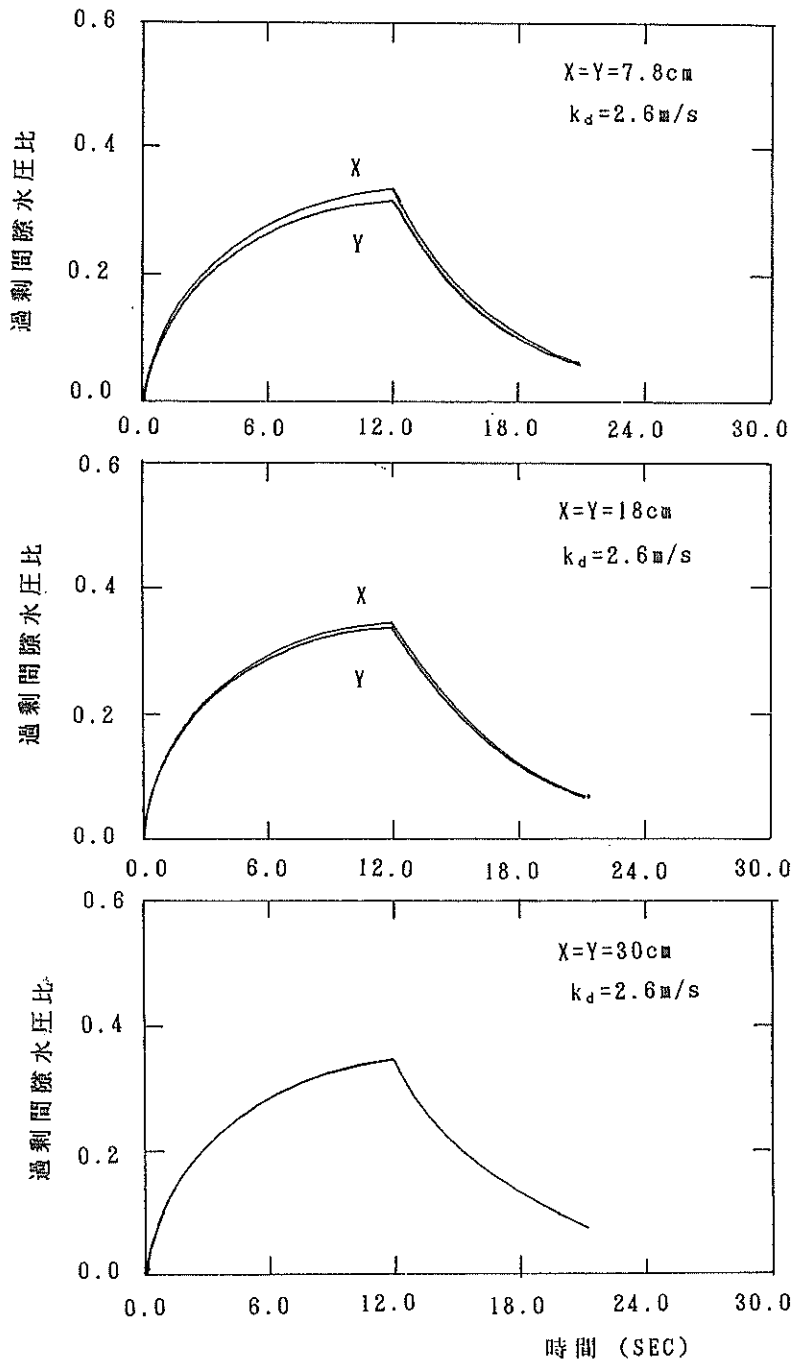


図-34 矩形ドレーンの方向による過剰間隙水圧の比較

の距離は円形断面に対するドレーンの半径 a と有効集水半径 b を用いて変換した無次元半径 $(r-a)/(b-a)$ で表した。ここに、矩形ドレーンの場合の無次元半径の計算では、矩形断面の断面積と等しい円形断面の半径を用いている。これらの図に示すとおり、円形と矩形断面

の解析結果はよく一致していることがわかる。

以上の結果より、今回検討の対象とした矩形ドレーンについては、同面積の円形の断面を有するドレーンと見なすことによりほぼ同様の排水効果が期待されるとの結論が、解析的にも導かれたことになる。

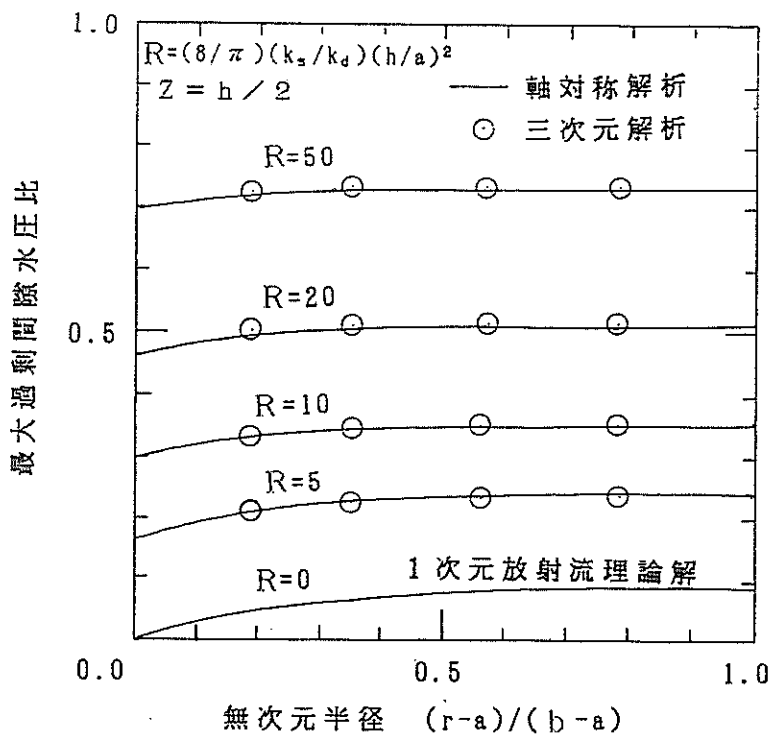


図-35 円形と矩形の比較

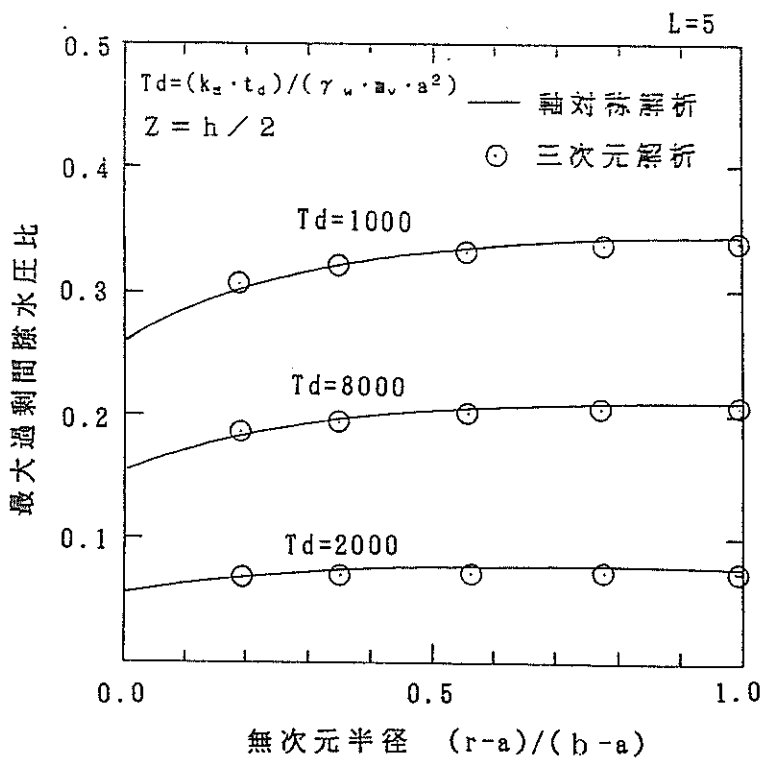


図-36 円形と矩形の比較

5. プラスチックドレーンの打設間隔の設計

4. における検討により、プラスチックドレーンの断面形状には差異はあるが、矩形断面の場合でも、それと同面積の円形断面のドレーンと同一視できることが明らかにされた。そこで、本章では、このようなプラスチックドレーンの打設間隔を設計する上で必要となる設計図表を作成し、その適用性を、3. に示した実験結果をもとに検討することとした。

5.1 設計図表の作成

これまでにも何回か触れてきたように、プラスチックドレーンは、地盤中に図-37 に示すように柱状に打設される。同図における矢印は地震時における地盤からの間隙水の流れを示している。正三角形配置または正方形配置の場合、ドレーン一本分が分担する地盤部分の水平方向の断面は、同図に示すように、それぞれ、正六角形および正方形となるが、これらの面積と等しい面積を持つ円を等価有効円と呼ぶ。プラスチックドレーンの打設間隔を定めるためには、この等価有効円の半径 b を求めればよい。

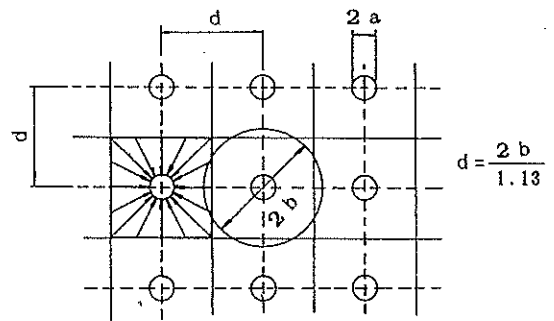
これらのプラスチックドレーンの打設間隔を決定するために必要となる設計図表は、かつて著者らの一人がグラベルドレーンの設計を対象として用いた方法に準じた方法により、プラスチックドレーンの条件に合うように作成することとした。この方法の概要は以下の通りである⁴⁾⁸⁾。まず、基礎方程式としては、4.1 で用いたものとはほぼ同一のものを用いている。過剰間隙水圧の発生項に関しては(2)式を $t = N/f$ (f Hz の繰り返し載荷の経過時間)、 $t_1 = N_1/f$ (初期液化化に要する繰り返し載荷の経過時間) なる関係を用いて次のように書き換えた次式を用いている。

$$\frac{u_g}{\sigma_{v0}'} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\left(\frac{t}{t_1} \right)^{1/2} \alpha \right] \dots\dots\dots(7)$$

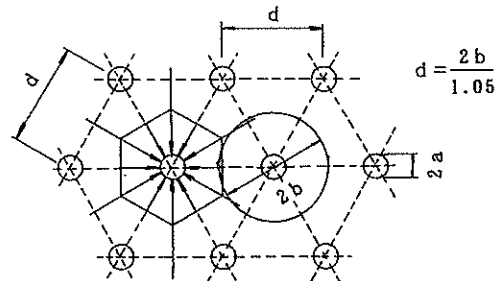
上式を用いて解析を行うと、過剰間隙水圧比の最大値が0.5以下の場合には、 $t = t_1 (= 0.5 t_d)$ より前に過剰間隙水圧比の値は、ほぼ定常値(最大値)に達することが確かめられている。このことは、 t_d/t_1 の値に関係なく過剰間隙水圧比の最大値が決定されることを意味する。このことから表-5 に示す4つの無次元パラメータから過剰間隙水圧比の最大値が決定されることになる。

以下に、4つの無次元パラメータを用いた簡易設計図表の具体的な作成方法について説明する。解析対象としては、ドレーンと回りの砂層部を深度 $h = 10$ m、等価有効円の半径 $b = 1$ m の軸対象と考え、深度方向に40、

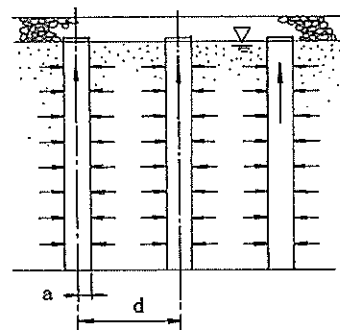
半径方向に7分割した要素モデルを用いた。ただし、計算に用いたこれらの定数は、計算結果を設計図表に取りまとめる段階において無次元化しているため、求めた設計図表は、これらの定数以外のあらゆる定数に対して適用可能であることは言うまでもない。計算において、砂層部の透水性は水平方向のみに対して、また、ドレーン部では水平と鉛直方向について考慮している。なお、ドレーン部では過剰間隙水圧が発生しないように入力定数を与え、砂層部の N_1 と m_v は全層で一定としている。また、過剰間隙水圧の上昇特性を示すパラメータ α とし



(a) 正方形配置



(b) 正三角形配置



(c) 断面図

図-37 ドレーンの配置状況

表-5 無次元パラメータと定義

パラメータ	定義
b / a	ドレーンの幾何的形狀比 a : ドレーンを円形と仮定した場合の半径 b : 有効円の半径
T ₁	時間係数 : $k_s t_1 / (m_v r_w a^2)$ k _s : 砂の透水係数, m _v : 体積圧縮係数 t ₁ : 初期液状化に要する繰り返し載荷時間
R	ウェルレジスタンス係数 : $(8/\pi^2) (k_s/k_d) (h/a)^2$ h : 改良深度, k _d : ドレーンの透水係数
α	arcsin 関数に基づく過剰間隙水圧の上昇を決めるパラメータ (0.7 を使用)

では 0.7 を用いている。このようにして求めた砂層部の中間層における過剰間隙水圧比の最大値を、半径方向に平均した値を平均最大過剰間隙水圧比 $(\bar{u}/\sigma'_{v0})_{max}$ としている。

以上のようにして各種の条件に対して計算を実施し、その結果を、ウェルレジスタンス係数 R に対して時間係数 T₁ をパラメータにして b/a と平均過剰間隙水圧比の関係としてプロットしたのが図-38 である。この図表を用いることにより設計条件として改良深度 h, 平均最大過剰間隙水圧比 $(\bar{u}/\sigma'_{v0})_{max}$ を設定し、地盤条件と t₁ がわかれば、時間係数 T₁ 及びウェルレジスタンス係数 R が求められることになり、これより b/a の値を求めることができる。

5.2 設計図表の適用性

5.1 において作成した設計図表はあくまでも数値計算によるものであり、その適用性については必ずしも明かではない。そこで本節では、この点について模型振動実験の結果に基づいて検討することにした。

(1) 模型地盤の定数の決定

この検討に際しては、まず模型地盤の諸定数を決定する必要がある。必要となる主な定数は、既に表示した基礎方程式にも示されるとおり、透水係数 k_s、体積圧縮係数 m_v、液状化強度曲線 $\tau/\sigma'_{v0} \sim N$ である。このうち、透水係数に関しては透水試験結果から、また、その他については無処理地盤の実験をインデックス的な試験と考えこれらの定数を逆算的に定めた。なお、インデックス的な試験として用いた実験結果は No. 402 である。

これらの定数の決定過程はやや複雑ではあるが、これらの定数いかににより設計図表の適用性の可否が左右されることとなるのでその決定過程を詳しく示す必要があるものと考えられる。そこで、以下に、これらの定数の決定方法について、説明することとした。

a) 透水係数 k_s

模型地盤の透水係数 k_s は過去に行われた試験結果⁹⁾を基に、今回の地盤密度並びに実験時の気温を考慮して求めた。図-39 は間隙比 e と透水係数 k_s の関係を示したものである。同図は気温 15 度において求めた関係である。そこで、今回行った実験時における気温 20 度に対する透水係数 k₂₀ を以下の式を用いて水の粘性を考慮することによって求めた¹⁰⁾。

$$k_{20} = \frac{\eta_{15}}{\eta_{20}} k_{15} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、η₂₀、η₁₅ : 気温 15 度と 20 度における水の粘性

k₂₀、k₁₅ : 気温 15 度と 20 度における透水係数

$$\eta_{15} / \eta_{20} = 0.88$$

上式を用いることによって、無処理地盤の透水係数 k_s は 0.00902 cm/s と求められた。

b) 体積圧縮係数 m_v

体積圧縮係数 m_v は透水係数とともに過剰間隙水圧の消散速度を決定する定数である。一般に、圧密問題に対して過剰間隙水圧は時間に対して片対数座標上で直線

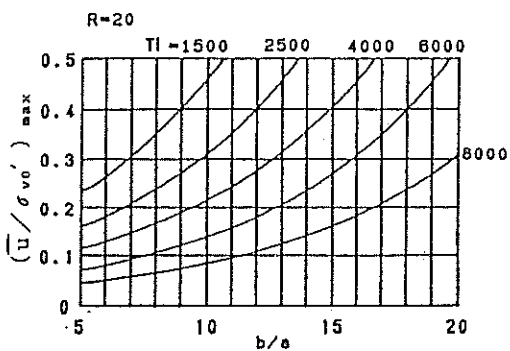
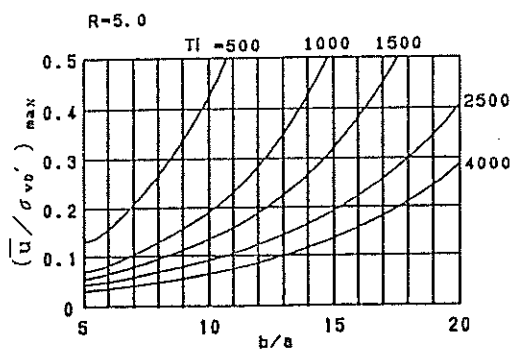
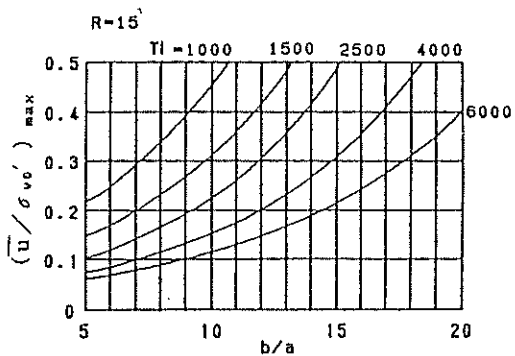
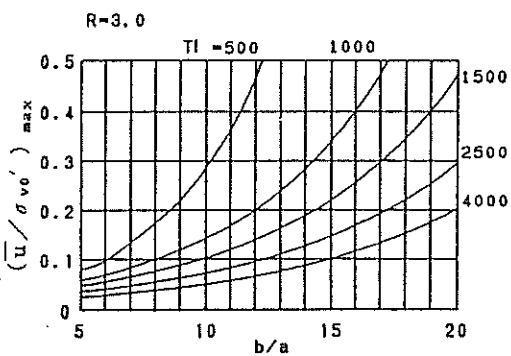
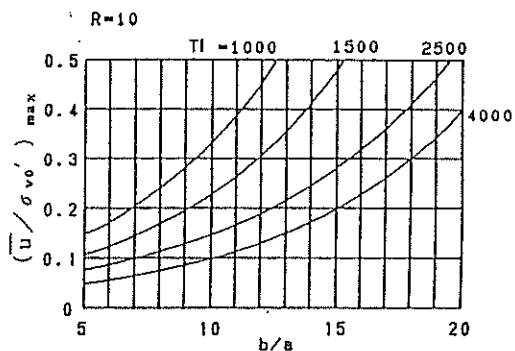
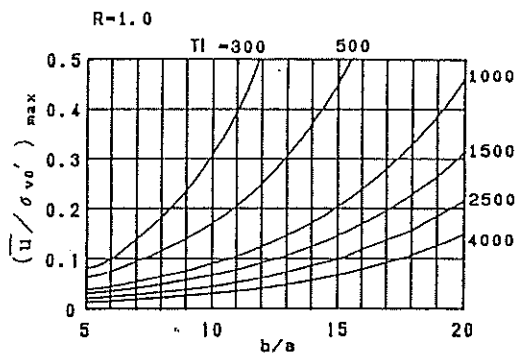
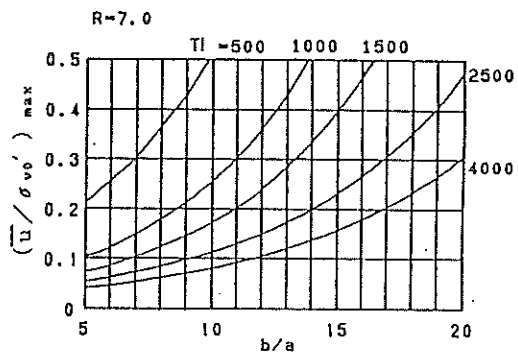
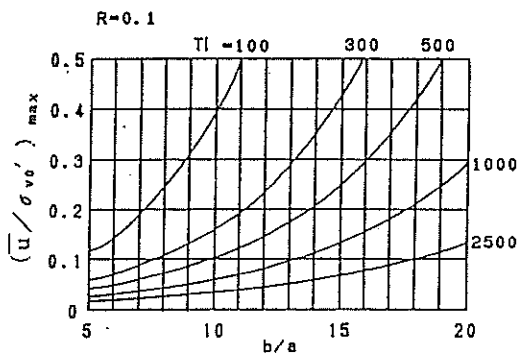


图-38 设计图

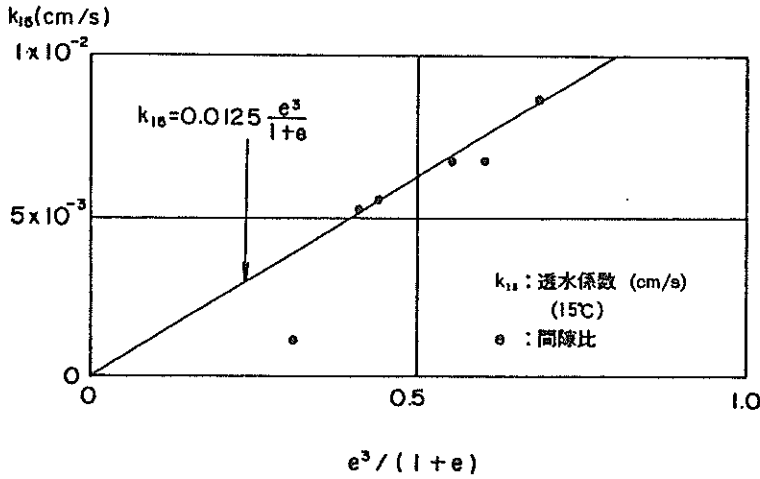


図-39 使用砂の透水係数

的に減少する傾向にある。今回の解析においても、加振終了後の過剰間隙水圧の消散が一般の圧密現象と同様であると考へ、以下に示す Terzaghi の圧密の式を適用し、解析結果が実験結果に最も合うように逆算的に m_v を求めた。この場合、 m_v は片対数座標軸上で直線の傾きを示すことになる。

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H} \right) \exp(-M^2 T_v) \dots (9)$$

ここに、 $M = (2m+1)\pi/2$ 、 m は正の整数

$$T_v = C_v t / H^2, \quad C_v = k / m_v \gamma_w$$

図-40 は加振終了後の過剰間隙水圧比と経過時間の関係を示したものである。なお、同図に示した実験値は砂層の中間深度での値である。この実験値に合うように解析における m_v を 1.0×10^{-5} 、 1.6×10^{-5} 、 $2.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gf}$ の3通りに変えた計算を行った。この結果、計算値と実験値が最もよく一致している $m_v = 1.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{gf}$ をこの砂層の平均的な体積圧縮係数の値とした。

c) 液状化強度曲線 $\tau / \sigma'_{v0} \sim N$

模型地盤の液状化強度は以下の様にして試行的に求めた。なお、試行手順を単純化するため、模型地盤の液状化強度は全層において一定と仮定した。具体的な手順は以下の通りである。

① 地盤のモデル化

解析対象地盤(実験 No.402, 地盤高 90cm)を、一次的なモデルにおきかえ、各層 15cm 毎に6層に分割する。

② せん断応力比の算定

各層でのせん断応力比を実測した加速度に基づいて、以下の式を用いて算定する。

$$\tau_i = \tau_{i-1} + \frac{W_i \cdot \ddot{X}_i}{A \cdot g} \dots \dots \dots (10)$$

- ここに、 τ_i : i 層の下面に作用するせん断応力
 τ_{i-1} : $i-1$ 層の下面に作用するせん断応力
 W_i : i 層の重量
 \ddot{X}_i : i 層の加速度
 g : 重力加速度
 A : 各層の要素としての断面積

③ 液状化強度曲線の仮定

全層で液状化強度が一定であると仮定して、適当と思われるに強度曲線(液状化するに要するせん断応力比 τ / σ'_{v0} と繰返し回数 N の関係)を仮定する。

④ 液状化に到る繰返し回数 N_1 の決定

ステップ③で仮定した液状化強度曲線を用いて、ステップ②で求めた各層毎のせん断応力比に対する N_1 を求める。

⑤ 過剰間隙水圧の上昇の計算

さきに求めた透水係数 k_s と体積圧縮係数 m_v 及び N_1 を用い、4.2 の円形断面のドレーンの解析で用いた方法を一次元モデルの場合に適用して、解析的に加振中の各層毎の過剰間隙水圧の上昇を求める。

⑥ 実測値との比較

このようにして求めた過剰間隙水圧の上昇を実測の結果と比較する。両者が一致しないならばステップ③の液状化強度曲線の修正を行い、以下同様の計算を行うことになる。この操作を繰返し、最も計算結果と解析結果

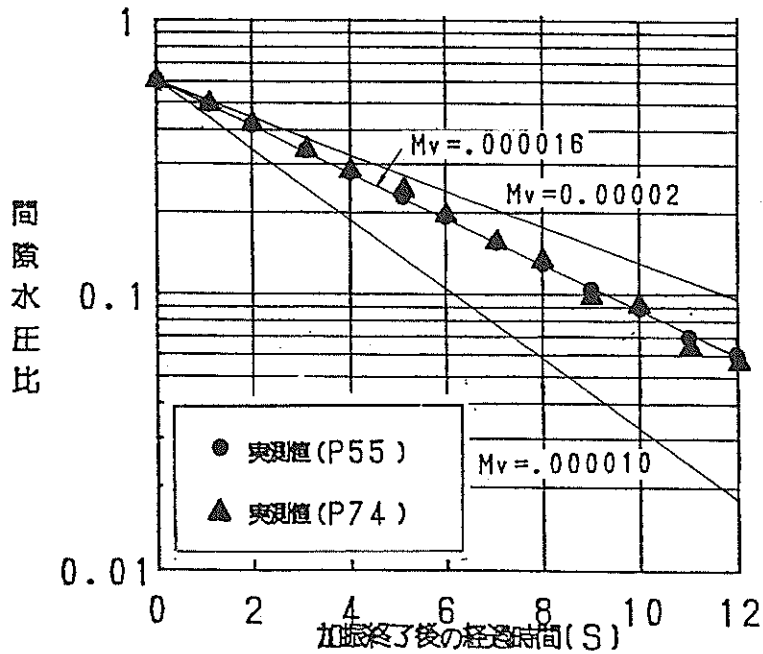


図-40 過剰間隙水圧の消散過程

が一致したと考えられる場合を、その地盤の液状化強度曲線とする。

ところで、今回の解析の対象とした実験 No.402 は入力加速度が 63.4 Gal で、過剰間隙水圧の最大値は図-27 (a) に示すように地盤高さが 60cm 程度まではほぼ同程度の 20 gf/cm^2 の値となっており、それ以浅においては過剰間隙水圧の最大値と初期有効上載圧が等しくなっている (液状化している)。このような地盤の液状化に対応して地盤の加速度時刻歴は、図-15 (a) に示すように最上層における加速度波形がほぼ 1 波目が作用した時点から大きく乱れている。また、図-16 の右上端に示した最大加速度の鉛直方向分布をみると、地盤の最上層部においてはかなり小さい値となっている。試みに、これらの加速度振幅を直接に用い、地盤の全層にわたって同一の液状化強度曲線を用いて過剰間隙水圧の計算を行ったところ、地盤の最上層部においては、過剰間隙水圧の上昇はほとんど見られないという結果が得られた。これは明かに実験事実と反する傾向の結果であり、地盤の全層にわたって同一の液状化強度曲線を用いたことが事実と反するものと考えられた。しかし、地盤の深さに応じて液状化強度曲線を変えることは、余りにも試行手順を煩雑化させるものと判断し、本研究では、便宜的に、図-41 に示すような加速度分布を用いて、過剰間隙水圧の計算を実施した。

計算で用いた
加速度値
(gal)

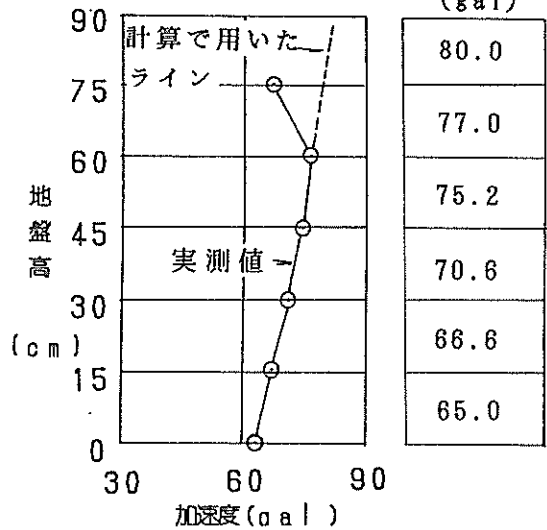


図-41 計算で用いた加速度

これらの試行計算の結果、図-42 に示すように過剰間隙水圧の上昇過程における実験結果と解析結果とは概ね満足すべき一致度に達した。これに対応して、設計図表の適用性の検討の為に用いるべき模型地盤の液状化強

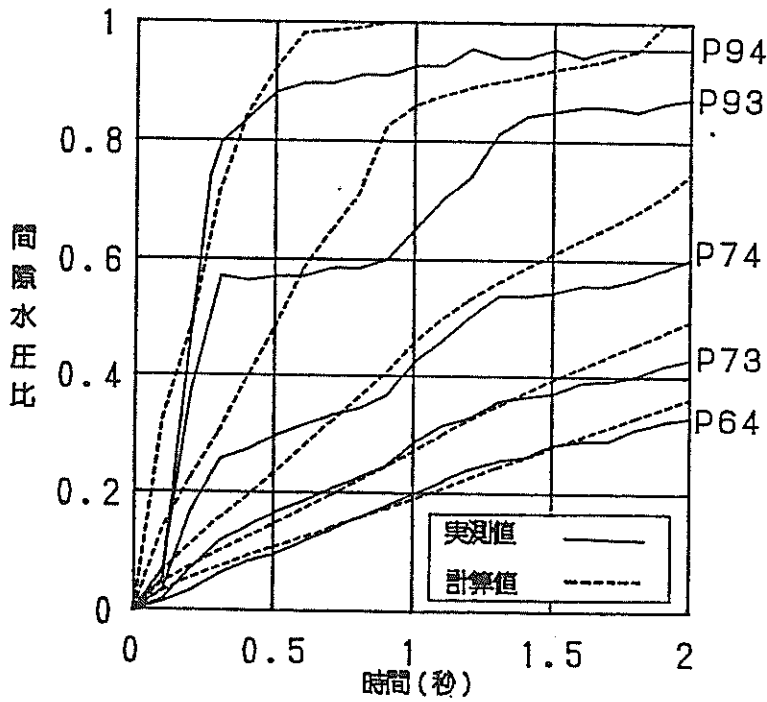


図-42 過剰間隙水圧の上昇過程の比較

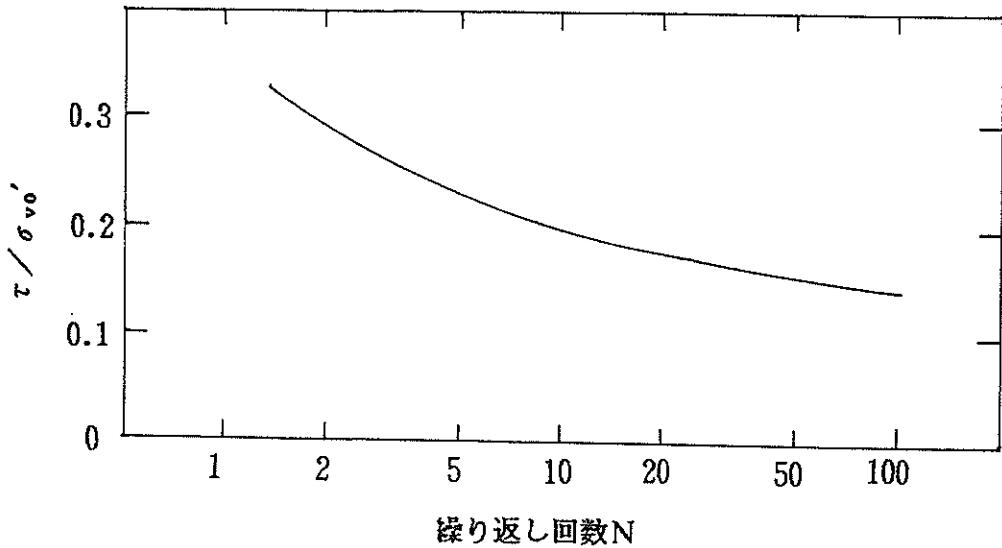


図-43 $\tau/\sigma'_{v0} \sim N_1$ の関係

度曲線が図-43のように求められた。

(2) 設計図表と実験値との比較

上記の手順により求めた模型地盤の定数を用い、実測した加速度から算定した T_1 と実験から得られた過剰間隙水圧の実測値を用いて、簡易設計図表上に実験値のプ

ロットを試みた。ここで、今回の振動実験において対象とした過剰間隙水圧比の最大値は0.5以下の場合である。

ここで、時間係数 T_1 の算定方法は図-44に示すフローに基づいて行っている。このフローにより求められた各ケースの時間係数 T_1 および過剰間隙水圧比の最大

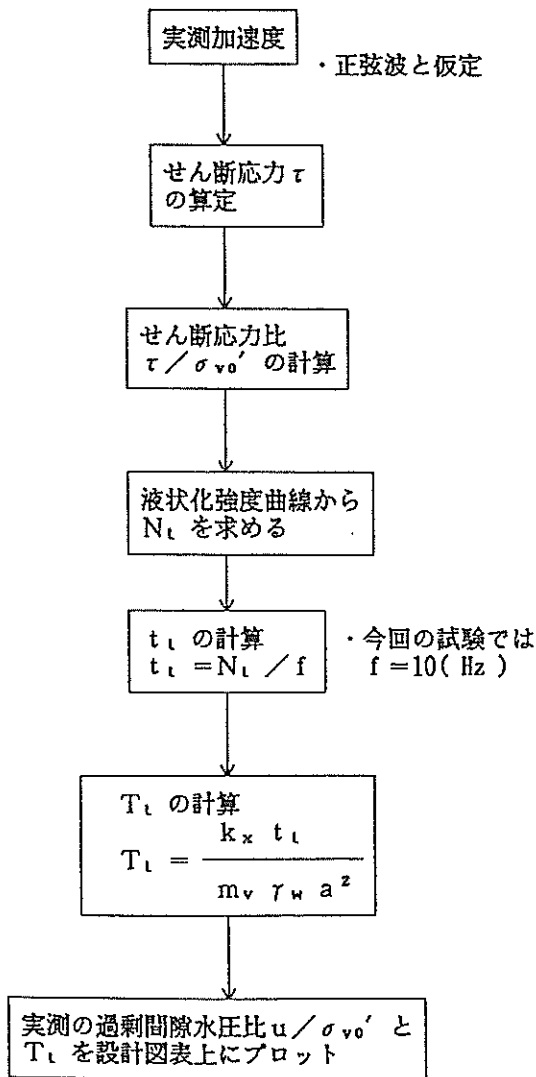


図-44 T₁ を求めるフロー

値は表-6に示すとおりである。なお、今回の実験で用いたプラスチックドレーンの透水係数は付録に示すとおり2.6m/s以上であり、設計図表で対象としたウェルレジスタンス係数Rについては、0.01を用いて検討を行っている。

図-45はその比較を示したものである。同図より、円形・矩形断面のプラスチックドレーンともに50cmピッチにおける実験値は比較的良好に適合していることがわかる。しかし、75cmピッチの場合には円形・矩形断面のプラスチックドレーン共に実験値の過剰間隙水圧比は設計図表から示される値と比べかなり小さい値となっている。

この原因を検討するため、3.において提示した過剰間隙水圧の上昇過程における時刻歴を見直し、この点に

ついて検討するために必要な時刻歴を改めて図-46に示しなおすこととした。同図より理解されるとおり、50cmピッチのドレーン打設地盤では今回の加振時間(2秒)中に発生した過剰間隙水圧が定常状態に達しているのに対して、75cmピッチのドレーン打設地盤の実験においては、加振中に水圧が上昇し続ける傾向にあることが伺える。この現象は50cmピッチのドレーン打設地盤では加振中に過剰間隙水圧の発生と消散がほぼ釣り合った状態が達成されるのに対して、75cmピッチのドレーン打設地盤では過剰間隙水圧の上昇速度が消散速度を上回った状態が継続するためであると解釈される。本研究において、解析的に求めた設計図表は過剰間隙水圧の上昇と消散が釣り合った定常状態に対して求めたものであることを考えると、75cmピッチのドレーン打設地盤での値は加振時間をもう少し長く取ることによって、さらに過剰間隙水圧の値は上昇することが予測され、設計図表に示される値に近づいてくると考えられる。

以上の検討から、解析的に求めた値と振動台を用いた模型振動実験から得られた値は整合性があるものと判断される。したがって、本設計図表はやや安全側の場合もあるが、実用上の適用性を有するものと考えられる。

なお、ここで示した設計図表は、この実験で用いたプラスチックドレーンと同様な他のプラスチックドレーンに対しても適用が可能であると考えられる。但し、今回用いたドレーンと断面積が同じでも今回の矩形断面のドレーンより偏面の断面のものに関しては、そのドレーンを円形断面のものと同じ視して取り扱ってよいか否かについては別途検討する必要がある。

5.3 設計例

プラスチックドレーンを打設する場合の設計フローは図-47に示す通りである。その原理はグラベルドレーンの設計に対して提案された方法⁴⁾⁸⁾と同じである。同図に示すように、入力地震動、地盤、ドレーン、許容する過剰間隙水圧比が決まればドレーンの打設間隔が決定されることになる。

ここで、具体的な例として、表-7に示された条件に対して計算を行ってみる。まず、この条件に対して、時間係数T₁とウェルレジスタンス係数Rを計算すると、それぞれ3200と10になる。次に、この時間係数T₁とウェルレジスタンス係数R及び最大過剰間隙水圧比 $(\bar{u}/\sigma'_{v0})_{max}$ を用いて図-45に示した設計図表からb/aの値を求めると、15となる。表-7に示された条件の内、ドレーンの半径はa=2.5cmであるから、等価有効円の半径bは37.5cmとなる。なお、等価有効円からドレーンの打設間隔を求めるための換算は、等価有効円の定義

表-6 最大過剰間隙水圧比と時間係数の一覧

実験 ケース	ドレーン 配置状況	深度 (cm)	最大過剰間 隙水圧比*) (No.)	入 力 加速度 (gal)	時間係数 T ₁
1	円形 50cm ピッチ	60	0.31 (P 03) 0.30 (P 11) 0.31 (P 07)	87.8	90
	矩形 50cm ピッチ	60	0.32 (P 53) 0.31 (P 57) 0.28 (P 61)	87.8	30 ~ 40
2	矩形 75cm ピッチ	60	0.24 (P 03) 0.23 (P 11) 0.22 (P 31)	61.3	210 ~ 220
		30	0.41 (P 62) 0.39 (P 54) 0.44 (P 82)	61.3	85 ~ 110
	矩形 50cm ピッチ	60	0.20 (P 53) 0.19 (P 61) 0.25 (P 81)	61.3	200 ~ 360
3	円形 75cm ピッチ	60	0.24 (P 03) 0.22 (P 07) 0.22 (P 11)	59.9	210 ~ 250

*) ここで用いた過剰間隙水圧比の値は、ドレーン一本に対する有効集水円を考え、ドレーン中心からの距離がその半径のほぼ半分における値を、そのドレーン一本に対する平均値と考えて用いている。

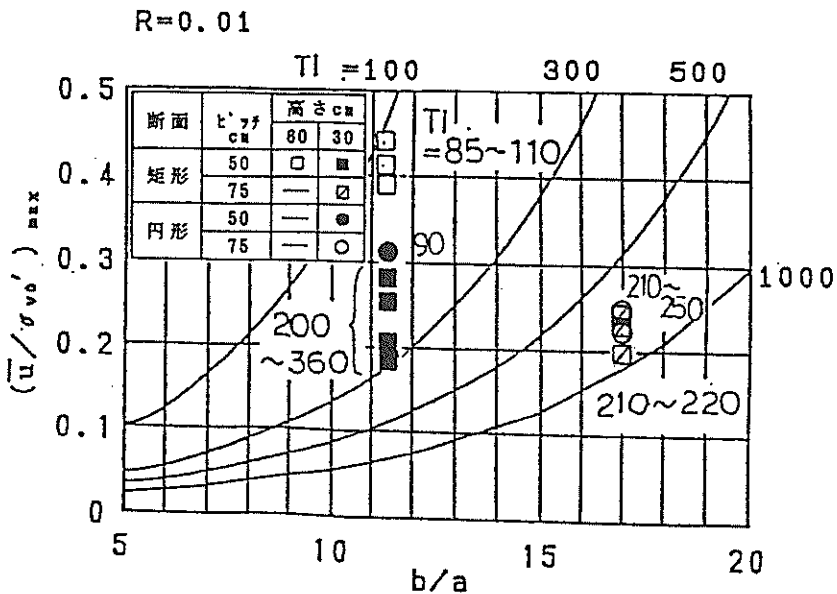


図-45 解析結果と実験結果の比較

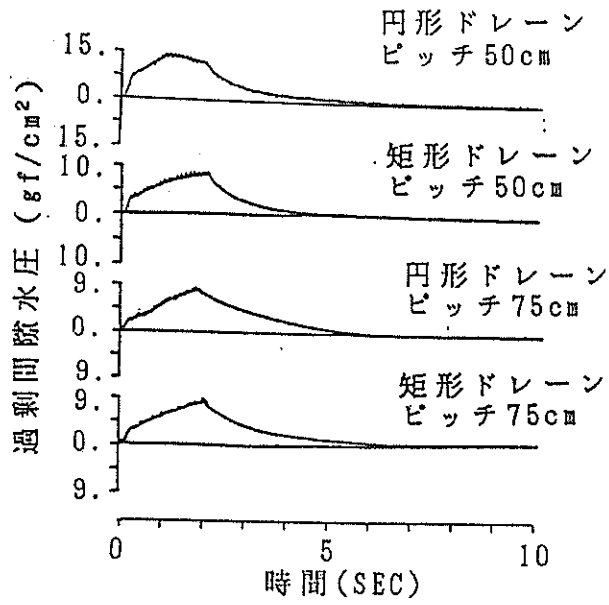


図-46 過剰間隙水圧の上昇過程の比較

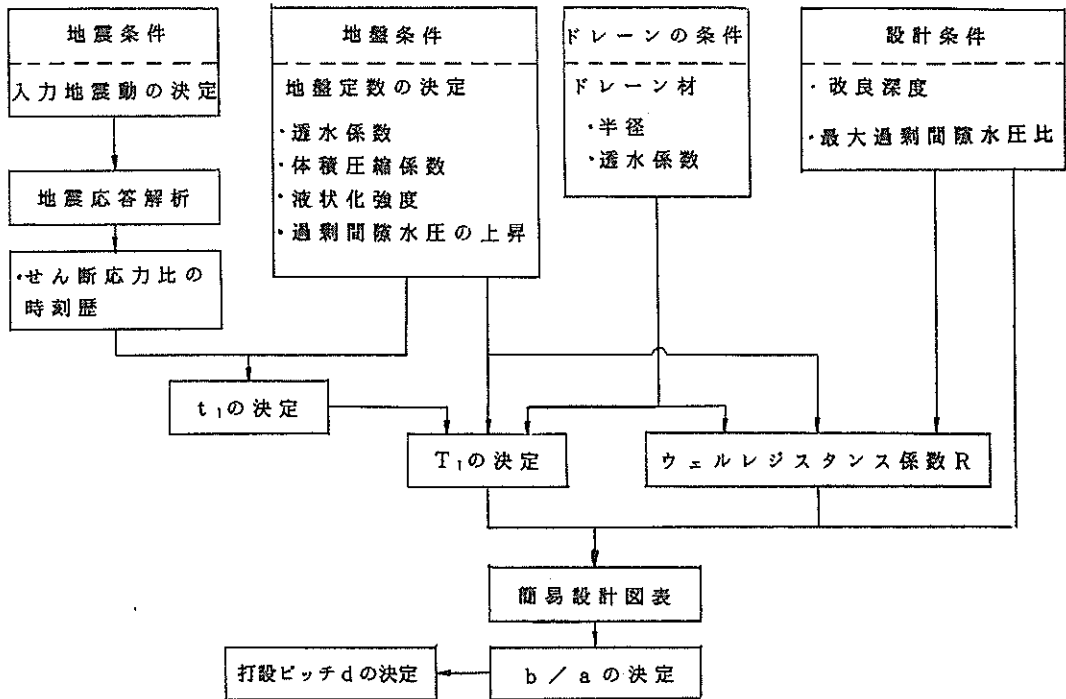


図-47 設計のフロー

表-7 計 算 条 件

$(\bar{u}/\sigma_v'0)_{\max}$	0.25
t_1	2.0 秒
a	2.5 cm
h	1000 cm
k_d	400 cm/s (動水勾配 0.25)
m_v	3×10^{-3} cm ² /kgf
k_s	3×10^{-2} cm/s

に従って、図-37中に示した式により求められる。例えば、正方形配置に打設する場合のドレーンの打設間隔は、 $d = 66$ cmと求まる。

なお、通常の設計においては、未改良地盤が液状化するに要する時間 t_1 の値が直接に設計条件として与えられることは少ない。通常は、対象とする入力地震動波形から求められるせん断応力波形と液状化強度曲線を用いることによって t_1 の値が決定される。これらの手順の詳細は、文献 8) に示されている。

6. 結 論

液状化対策としての効果を検討する目的で、円形と矩形断面の2種類のプラスチックドレーンを用いた模型振動実験と解析を行った。また、これらのドレーンを地盤に柱状に打設する場合の設計図表を作成し、室内実験結果との比較検討を行った。

その結果得られた結論は以下の通りである。

(1) 円形及び矩形断面の両プラスチックドレーン共に、液状化対策としての効果がある。また、この効果は打設ピッチが狭くなるに従って大きくなる。

(2) 円形と矩形の断面の違いによる排水効果の差は、実験結果においても、また、解析結果においてもみられなかった。

(3) 今回用いた矩形断面のドレーンを同じ断面積の円形断面のドレーンと見なしてよいことが実験と解析において確かめられた。

(4) これらのドレーンに対して解析的に求めた簡易設計図表は、模型振動実験の結果と比較的よい一致がみられ、その適用性が確かめられた。

(1989年3月29日 受付)

謝 辞

本研究を実施するに当たって、運輸省第二港湾建設局

よりのご協力を頂いた。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) H. B. Seed & J. R. Booker : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol.103, No.GT7, 1977, pp.757-769
- 2) K. Tokimatu & Y. Yoshimi : Effects of Vertical Drains on the Bearing Capacity of Saturated Sand During Earthquakes, *Proc. International Conference on Engineering for Protection from Natural Disasters*, 1980, pp.643-655
- 3) 田中幸久, 国生剛治, 江刺靖行, 松井家孝 : グラベルパイルによる水平地盤の液状化防止について, 土木学会論文集, 第352号/Ⅲ, 1984, pp.89-98
- 4) S. Iai & K. Koizumi : Estimation of Earthquake Induced Excess Pore Water Pressure for Gravel Drains, *Proc. 7th. Japan Earthq. Eng. Symp.*, 1986, pp.679-684
- 5) A. Onoue : Diagrams Considering Well Resistance for Designing Spacing Ratio of Gravel Drains, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No.3, Sept., 1988, pp. 160-168
- 6) F. Tatsuoka, M. Muramatsu and T. Sasaki : Cyclic Undrained Stress-Strain Behavior of Dense Sands by Torsional Simple Shear Test, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 2, June 1982, pp.55-70
- 7) H. Yoshikuni & H. Nakanodo : Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability, *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, 1974, pp.35-46
- 8) 井合進, 小泉勝彦, 野田節男, 土田肇 : グラベルドレーンの大型模型実験と解析, 天然資源の開発利用に関する日米会議(耐風・耐震構造専門部会), 第19回合同部会会議録, 1987
- 9) S. IAI : Large Scale Model Tests and Analyses of Gravel Drains, *Report of The Port and Harbour Research Institute*, Vol.27 No.3, 1988, pp.25-160
- 10) 土質工学会編 : 土質試験法, 1979

記 号 表

- A : 要素の水平断面積
 a : ドレーンの有孔半径
 b : ドレーンの集水有効半径
 D_r : 砂の相対密度
 d_1 : 矩形ドレーンの長辺方向長さの半分
 d_2 : 矩形ドレーンの短辺方向長さの半分
 d : ドレーンの打設ピッチ

e : 間隙比	t_d : N_{eq} の継続時間
G_s : 砂の比重	t_l : 初期液状化に要する繰り返し载荷の経過時間
g : 重力加速度	u : 間隙水圧
H : 土槽の地盤高さ	u_g : 地震時に発生する過剰間隙水圧
h : ドレーンの改良深度	W_i : i 層の重量
i : 動水勾配	\ddot{X}_i : i 層の加速度
k_d : ドレーンの透水係数	X : 座標軸
k_s : 砂層の透水係数	Y : 座標軸
m_v : 体積圧縮係数	Z : 座標軸
N_{eq} : 不規則なせん断応力を等価な一定振幅のせん断 応力になおした場合の繰り返し回数	α : 過剰間隙水圧の上昇の特性を決める実験定数
N_l : 非排水状態で液状化に到るまでの繰り返し回数	γ_w : 水の単位体積重量
q_c : 静的貫入抵抗	γ_t : 砂層の単位体積重量
R : ウェルレジスタンス係数	η : 水の粘性
r : 軸対称における半径方向座標軸	ζ : 座標軸
T_d : 時間係数	σ'_{v0} : 初期有効上載圧力
t : 時間軸	τ_i : i 層下面でのせん断応力
	τ_{i-1} : i 層上面でのせん断応力

付録 矩形断面プラスチックドレーンの透水試験結果

本研究では、振動台を用いた小規模な地盤模型の実験を実施したに過ぎない。例えば、用いたプラスチックドレーンの打設深度は約 90cm に過ぎない。このような条件においては、プラスチックドレーンの透水係数が液状化対策としてのドレーンの性能に悪影響を及ぼすことはまず無いものと思われる。しかし、実地盤においては、深さ 20m 程度までの液状化対策が必要とされる場合もある。このように、打設長が著しく長い場合には、ドレーンから短時間に排水すべき水の量も多くなり、地表までの排水距離も長くなるので、プラスチックドレーンのように透水性が大きいものであっても、その透水係数を把握し、そのウェルレジスタンス係数を求めることが必要である。

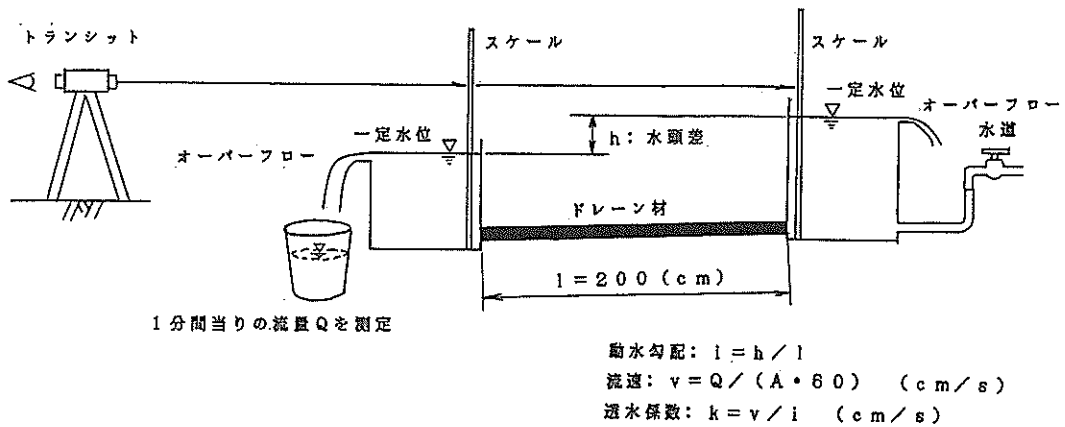
付図-1 は本研究に用いた矩形ドレーンの透水性を調べる目的で行った試験方法の概要を示したものである。用いた方法は、同図に示すようにドレーンの両端にある

一定の水頭を与え、ドレーン内を流れる水の単位時間当りの流量を測定する、いわゆる定水位透水試験法である。

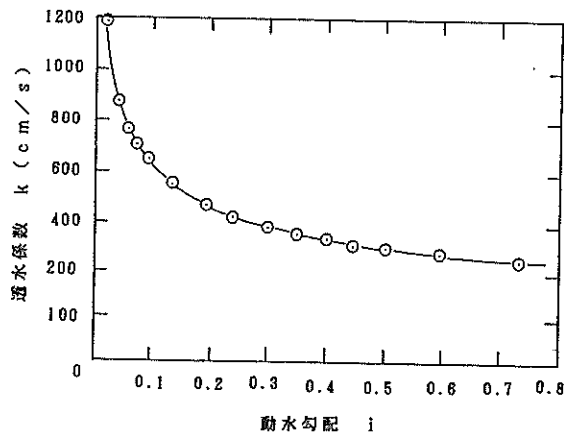
この結果得られた動水勾配 i と透水係数 k の関係を示したのが付図-2 である。

一般に、グラベルドレーンで用いられる砕石に対しては、動水勾配 i が 0.3 に対して 10cm/s 程度のオーダであることを考えると、同じ動水勾配 i に対して矩形ドレーンは約 40 倍程度の透水係数を持っていることがわかる。

いま、矩形ドレーンの断面積が 19.53cm^2 であることから、単純にドレーン内を流れる水の量が、グラベルドレーンの場合と等しいと仮定すると、断面積に換算して 781.2cm^2 となる。つまり、今回用いた矩形ドレーンは、通水量のみから比較すると直径 30cm 程度のグラベルドレーンに相当することがわかる。



付図-1 矩形ドレーンの透水試験の概要



付図-2 矩形ドレーンの透水試験結果

港湾技研資料 No.647

1989・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有楽社 つばき印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.