

土 木 研 究 所 資 料

フィルダム材料の動的強度に関する 実験報告書

平成元年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所
機 械 施 工 部 動 土 質 研 究 室

Copyright © (1989) by P.W.R.I.

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

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

フィルダム材料の動的強度に関する 実験報告書

動土質研究室 室 長 古 賀 泰 之

主任研究員 松 尾 修

島 津 多賀夫

唐 沢 安 秋^{*}

(*) 現 建設省関東地方建設局
利根川下流工事事務所

要 旨

フィルダム材料の動的強度について次の2点に関する実験的検討を行った。

1) 部分排水条件下での粗粒材の動的強度

2) 締め固められた土の動的強度

1) は、ロックフィル材料を対象としたものであり、透水性と地震時の液状化強度との関係を繰返し三軸試験により調べている。その結果として、透水性がある程度以上になると液状化強度が急増すること、ロックフィル材といえども地震時には必ずしも完全排水条件とは言えないことを示した。

2) は、アースダム材料を対象としたものであり、砂質土について締め固め条件と動的強度の関係を調べている。締め固め方法として室内突固め、振動ローラーおよびタイヤローラーによる実機転圧をとりあげている。その結果として、最適含水比付近で締め固めると動的強度が最も高くなること、締め固め密度と動的強度の間には必ずしも一意的な関係はなく、締め固め含水比や締め固め方法等の影響を受けること等を示した。

キーワード：フィルダム、動的強度、排水、締め固め

目 次

概 要

I 粗粒材の部分排水条件での動的強度	1
1. まえがき	3
2. 既往の研究	5
3. 予備的解析 — フィルダム材料の透水性がダムの地震時安定性に及ぼす影響	8
3.1 概 要	8
3.2 解析モデル	8
3.3 解析結果	9
4. 室内試験	10
4.1 実験の内容	10
4.2 試 料	10
4.3 透水試験	11
5. 三軸圧密試験	12
5.1 概 説	12
5.2 試験方法	13
5.3 試験結果	14
6. 部分排水液状化試験	16
6.1 実験の概要	16
6.2 実験方法	16
6.3 実験結果	17
6.4 数値シミュレーションによる検討	21
7. 部分排水条件での動的強度に関するまとめ	27
II 締め固められた土の動的強度	31
1. 概 要	33
2. 研究の背景と目的	34
3. 室内突固めにより締め固められた土の動的強度特性	36
3.1 実験の目的と概要	36
3.2 実験方法および実験条件	36
3.2.1 試 料	36
3.2.2 実験の手順	36

3.2.3	実験の条件	42
3.3	実験結果	44
3.3.1	供試体作成結果	44
3.3.2	三軸圧縮試験結果とその考察	47
3.3.3	繰返し三軸試験結果とその考察	51
3.4	まとめ	56
4.	転圧機械により締め固められた土の動的強度特性	58
4.1	実験の目的と概要	58
4.2	実験方法および実験条件	58
4.2.1	試料	58
4.2.2	実験の手順	60
4.2.3	実験の条件	67
4.3	実験結果	71
4.3.1	供試体作成結果	71
4.3.2	繰返し三軸試験結果とその考察	72
4.4	まとめ	82
5.	締め固め土の動的強度特性に関するまとめ	83

I. 粗粒材の部分排水条件での 動的強度

1. ま え が き

現在、フィルダムの耐震設計は震度法円弧すべり面法によってなされている。その中で、堤体材料のせん断強度としては静的強度が使用されている。「ダム設計基準¹²⁾」によると、せん断強度は土質材料では現場条件に応じた圧密および排水条件の下で実施された試験結果を用い、砂れきおよびロック材料ではその透水性の高さから排水せん断強度を用いるようになっているようである。しかし、同基準巻末付録にも述べられているように、フィルダム材料の動的強度と静的強度とは異なるものと一般に考えられ、現行設計法においては動的強度の代用として静的強度が用いられているものとするのが妥当である。このため、フィルダム材料の動的強度特性について十分に検討する事が必要となっている。さらに、フィルダム材料の動的強度特性は粒度、密度、飽和条件および排水条件（透水性）などによって著しく変化することが予想され、多岐にわたる材料が使用されるフィルダムにおいてはこれらの諸条件と動的強度特性の影響を適確に把握しておく必要がある。

さて、フィルダム材料を含めた一般の土質材料が地震時に発揮するいわゆる動的強度は静的強度と異なるとされているが、その定義は必ずしも明確ではない。繰返し応力の下では不可逆的な変形が累積するのが大きな特徴である。そこで、ここでは一応、繰返し载荷により所定のせん断ひずみ量を生じる応力度を動的強度と定義しておくことにする（図-1.1 参照）。

さて、動的強度は静的強度と同様に多くの支配要因を有している。それは次式のように表わされる。

$$(\text{動的強度}) = f(\text{材料特性；状態量})$$

$$= f(\text{粒度，材質；密度，含水比，透水性，応力条件，……}) \quad \text{……… (1)}$$

フィルダム材料を土質別に分類し、それらが有する力学特性と大まかに対応付けると図-1.2のようになるであろう。同図中で動的強度については一般的な傾向を示していないが、これは上式に示す諸要因により著しく変化するためである。この点に関して既往の知見^{6), 8), 14)}をまとめると図-1.3のようになる。

(a)図は、フィルダム材料の土質を横軸に、縦軸に動的強度と静的強度の比 τ_{df}/τ_{sf} にとっている。（砂～ロック材）のいわゆる粗粒材は気乾あるいは完全排水条件であれば動的強度は静的強度を下回ることはない。一方、飽和・非排水条件の場合には細粒材では $\tau_{df}/\tau_{sf} \approx 1$ であるが、砂になると液状化という著しい動的強度の低下が生じる。さらに、礫材になると

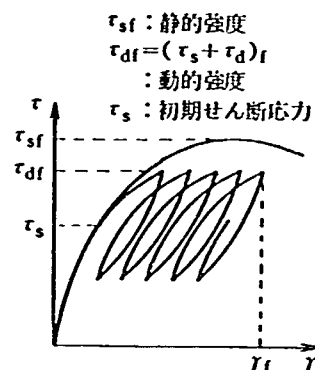
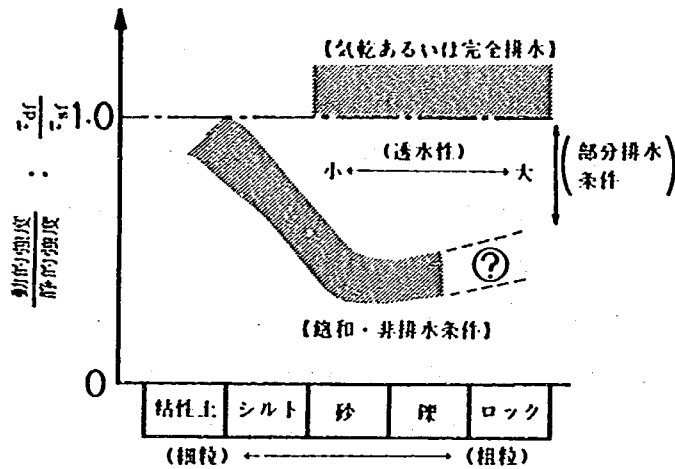


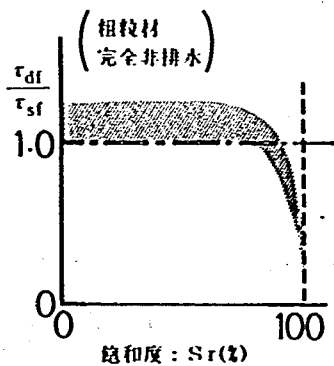
図-1.1 動的強度の説明

土 質		粘性土	シルト	砂	礫	ロック
ロックフィルダム		コア トランジション ロック				
アースダム						
力学特性	透 水 性	小 ←————→ 大				
	変 形 性	大 ←————→ 小				
	動的強度特性	?				

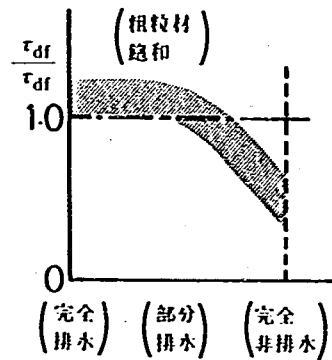
図-1.2 フィルダム材料と力学特性の相関



(a) 土質と動的強度の関係



(b) 飽和度と動的強度の関係



(c) 排水条件と動的強度の関係

図一 1.3 動的強度と諸要因の関係

非排水動的強度は若干上回るがその変化はさほど大きくない。したがって、ロック材についてももし非排水条件であれば砂と同様の液状化が生じ得ると想像される。しかし、実際にはフィルダム堤体は地震時に部分排水状態にあり、ロック材ないしは砂礫材のように大粒径の材料では十分な透水性を有するため完全排水条件に近く、この事が地震時安定解析に（排水）静的強度を用いることの1つの論拠になっているものと考えられる。また、非排水動的強度の低下が著しいのはほぼ完全飽和状態の場合のみであり（(b)図）、飽和状態であっても排水条件により動的強度は大きく変化することが予想される（(c)図）。したがって、これらの条件によって動的強度がどのように変化し、どのような材料・条件であれば静的強度を用いることが安全側の判断であるか把握しておくことが重要である。

そこで、本調査では、粒状土の地震時強度と排水程度の間を繰返し三軸試験により調べてみたので、以下に報告する。

2. 既往の研究

この方面の研究は、現地盤における砂層の液状化強度を、地盤の透水性を考慮した上でより適切に評価しようとする観点から行われてきている。すなわち、一般に砂地盤の液状化強度は非排水条件を仮定して評価されている。そしてこれは一般に安全側の評価として受け入れられる。ところが、長周期の波力を受けるような海洋構造物基礎、あるいは透水性の高い砂礫地盤においてその液状化強度を非排水条件の仮定の下に評価するのは安全側に偏りすぎるきらいがある。ロックフィルダムの水浸部については、従来より完全排水条件が仮定されているが、これも現実には何らかの透水性の影響はあるはずであり、上と同類の問題認識が成り立つ。

さて、部分排水条件下の液状化強度を調べるためのアプローチとして以下のものが見られる。

① 要素試験による方法

② 解析的方法

③ 模型実験

以下、この分類に従って既往の研究をレビューしてみる。

① 要素試験による方法

要素試験において、供試体からの排水条件をコントロールしながら行ったものとして、Leeら(1975)⁷⁾の研究がまず挙げられる。これは北海の海上石油貯留タンク基礎の波力による液状化抵抗を検討したものであるが、波力の長周期性を海底砂地盤の高い透水性を考慮して、排水条件の影響を繰返し三軸試験によって検討している。この試験では、ある一定の繰返し回数ごとに、その時点までに累積した間隙水圧のある一定量を消散させて試験を行い、その消散の程度により液状化が発生するかしないか調べている。結論は、上述したような構造物基礎の液状化抵抗を調べるに当っては排水の影響を十分考慮する必要がある、という一般的な事が述べられている。試験結果の現位置への適用法については、地盤の透水係数・体積圧縮係数・外力の周期などを考慮して対比するよう述べられているが、具体的には示されていない。Brethら(1977)²⁾は繰返し三軸試験装置に直接排水量制御装置を付け、同様の趣旨の実験を行っている。梅原・善ら(1981)¹⁸⁾もBrethら²⁾と同様の方法で実験を行っている。その結果として、部分排水の度合いが高くなるにしたがって液状化強度も大きくなることを示している。さらに、この実験結果を直接的に透水性現地盤の液状化強度の推定に利用する試みがなされているが、理論的に明解でない点がある。この問題は本報告書に述べる研究においても共通的に重要な事項なのでやや詳細に述べる。

すなわち、善らの研究では、現地盤の任意の深さ L において地震時の繰返しせん断により生じた過剰間隙水圧の消散過程がDarcyの法則に従うとして、次式を設定している(図-2.1(a)参照)。

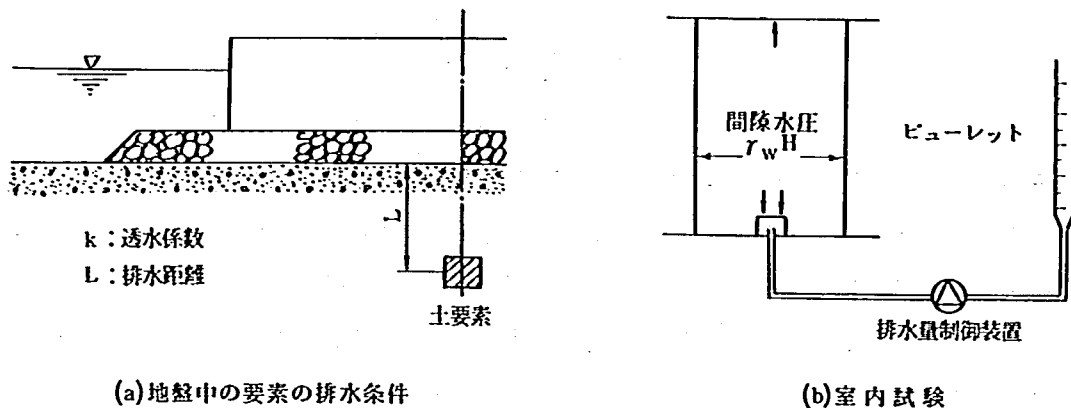


図-2.1 善ら(1981)による排水地盤のモデル化¹⁸⁾

$$v = k \frac{H}{L} = \frac{k}{L} H = \alpha H \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\alpha = \frac{k}{L} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、 v : 流速 (深さ L の間で一定)

k : 地盤の透水係数

H : 水頭差 ($= \Delta u / r_w$; Δu : 過剰間隙水圧)

L : 深さ (= 排水距離)

一方、図-2.1(b)に示す室内試験において、排水量制御装置が差圧に比例する流量を示すような特性を持つとすれば

$$v = \alpha H \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに、 v : 供試体内の平均流速

α : 排水量制御装置の特性を示す定数

H : 排水量制御装置前後の水頭差

が成り立つ。

そこで、(2.1)あるいは(2.2)における α と(2.3)における α を等置して考えれば、通水特性 α を有する排水量制御装置を用いて図-2.1(b)の繰返しせん断試験を行うことにより得られた液状化強度は、図-2.1(a)での $L = k/\alpha$ における液状化強度を示すとしている。さらに、無次元パラメータ $\bar{\alpha} = k/fL$ (ここに、 f : 載荷周波数) (排水効果係数と称している)を導入すれば、異なる周波数条件での液状化強度も推定できるとしている。

この中で、特に議論の前段において2つの問題点を指摘できる。

まず、図-2.1(a)の1次元水平地盤の間隙水圧に関する支配方程式は次式のように示される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_g}{\partial t} + \frac{k}{m_v r_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに、 $\partial u_g / \partial t$: 深さ x での単位時間当り過剰間隙水圧発生量

m_v : 体積圧縮係数

上式から直ちに理解されることは、間隙水圧 u の消散が生じるためには、 $\partial^2 u / \partial x^2 \neq 0$ でなければならないということである。しかるに、(2.1) は地表面から深さ L までの間に一定の動水勾配、すなわち、 $\partial u / \partial x = \text{const.}$ を仮定しており、この場合 $\partial^2 u / \partial x^2 = 0$ となり矛盾する。(2.1) は、定常浸透の場合についてのみに成立するものである。

つぎに、図-2.1(b)において、供試体の部分排水条件下での液状化強度は、(2.3) に示される排水量制御装置の特性値 α によって決まるように述べられているが、この際供試体の断面積は考慮されているものの、供試体高さ（あるいは体積）については考慮されていない。すなわち、同図においてある時点での水頭差が H であるとして、そのとき供試体から単位時間内に排水される量は、(2.3) を用いて、 $q = A \cdot v = \alpha AH$ で表わされる。このとき、供試体の単位体積当り排水量は $q/V = \alpha AH/V$ である。これは明らかに供試体体積により異なる。単位体積当り排水量（排水に伴う体積ひずみ量）が異なれば、得られる液状化強度も異なるのは明白である。本論文¹⁸⁾ ではこの点も問題であると言わざるを得ない（この点に関する考察は 6.4 で改めて行っているので参照されたい）。

さて、元に戻って、同様の実験的研究はこの他、大原ら(1982)¹³⁾、荒川ら(1983)¹¹⁾ によっても行われている。これらの報告では、要素試験レベルでの考察に止まっている。

② 解析的方法

部分排水条件での地盤の液状化抵抗を解析的に調べる場合、間隙水圧の挙動は基本的に(2.4) で表わされるような拡散方程式に支配される。そして、消散（排水）の効果は(2.4) 式右辺第2項で自動的に考慮されている。このとき重要なのは同式右辺第1項の発生項をどのように規定するかということである。これに関しては、初期の研究として Seed ら(1976)¹⁶⁾ の方法、Martin ら(1975)¹⁰⁾ の方法、石原ら(1976)⁴⁾ の方法などがある。これらは半経験的な方法であるが、その後構成方程式に関する研究の進展に伴って種々のモデルが考案されてきている。これらの事についてここで議論するのは本研究の目的に沿わないので省略する。

③ 模型実験

この範ちゅうに属する唯一の事例はグラベルドレーンに関する研究¹⁵⁾ であろう。これは地震時排水の効果を液状化防止対策として積極的に活用しようとするものである。

3. 予備的解析 — フィルダム材料の透水性 がダム地震時安定性に及ぼす影響 —

3.1 概 要

前章において述べたように、フィルダム堤体の一部が浸透水により飽和している状態で地震動を受ける場合には、その部分の堤体材料の応答挙動は透水性の大きさによりかなり異なると考えられる。そこで、ここでは仮想のフィルダム堤体モデルを用いて地震応答解析を行い、堤体の透水性と地震時に堤体内に発生する過剰間隙水圧の蓄積量との関係について予備的に検討してみた。

3.2 解析モデル

問題を簡単にするために、図-3.1に示すような均一材料で構成されるフィルダム堤体を解析モデルとした。高さ100m、のり勾配1:3とし、80mの高さまで水浸しているものとする。

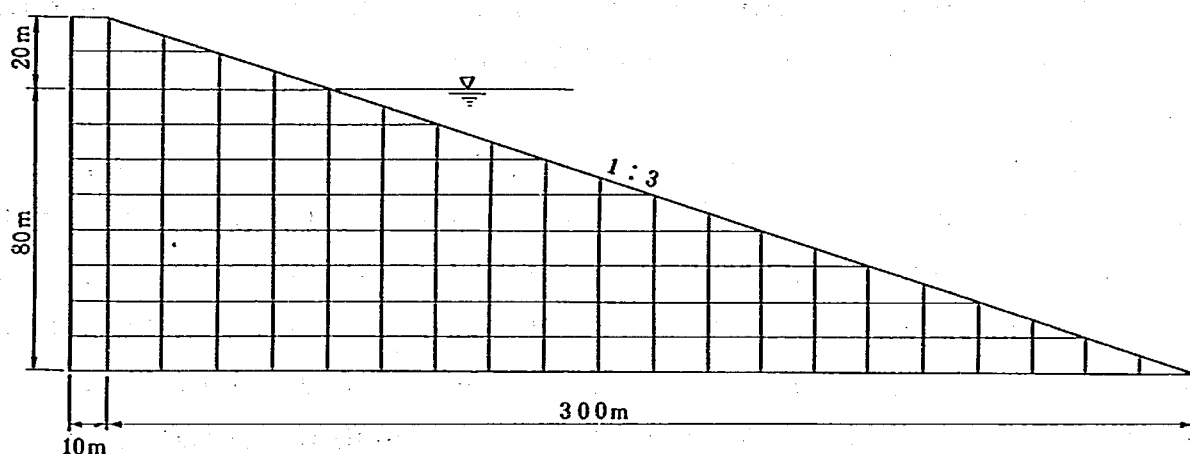


図-3.1 解析モデル

表-3.1 解析に用いた定数

このモデルに対し非線形動的解析を行った。ただし、この応答解析は全応力解析であり、地震時応力により発生する過剰間隙水圧による土の剛性の変化は見込んでいない。表-3.1に解析に用いた物理定数を示すが、応力-ひずみ関係にはHardin-Drnevichモデルを用いている。間隙水圧発生モデルには石原モデルを用い、液状化応力 $R_l = 0.40$ とした。体積弾性係数は水圧の消散において重要なパラ

単位体積重量	$\gamma_t = 2.3 \text{ tf/m}^3$
せん断強度定数	$c = 10.0 \text{ tf/m}^2$
"	$\phi = 40^\circ$
ポアソン比(常時)	$\nu = 0.33$
" (地震時)	$\nu = 0.40$
土の応力-ひずみモデル	Hardin-Drnevichモデル
初期剛性率	$G_0 = 5000 \times (\sigma_m)^{0.5}$
間隙水圧発生モデル	石原モデル $\left(\frac{B_p}{B_s} = 0.2 \right)$ $B_s = 0.012$
液状化応力比	$R_l = 0.40$
透水係数	$k_x = k_y = 0, 1, 10, 100 \text{ cm/sec}$
体積圧縮係数	$m_v = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{tf}$

メータであるが、この値は砂の $1 \sim 10 \text{ kgf/cm}$ 程度の拘束レベルにおいて妥当と思われる数値を用いた。透水係数を 0 (非排水), $1, 10, 100 \text{ cm/sec}$ と 4 段階に変えた。

入力地震動は水平動とし、1983 年日本海中部地震時の津軽大橋 NS 記録の主要動部分を含む 7 秒間を用いた。最大加速度を 150 gal とした。

3.3 解析結果

図-3.2 に、地震終了時の過剰間隙水圧の分布を示す。

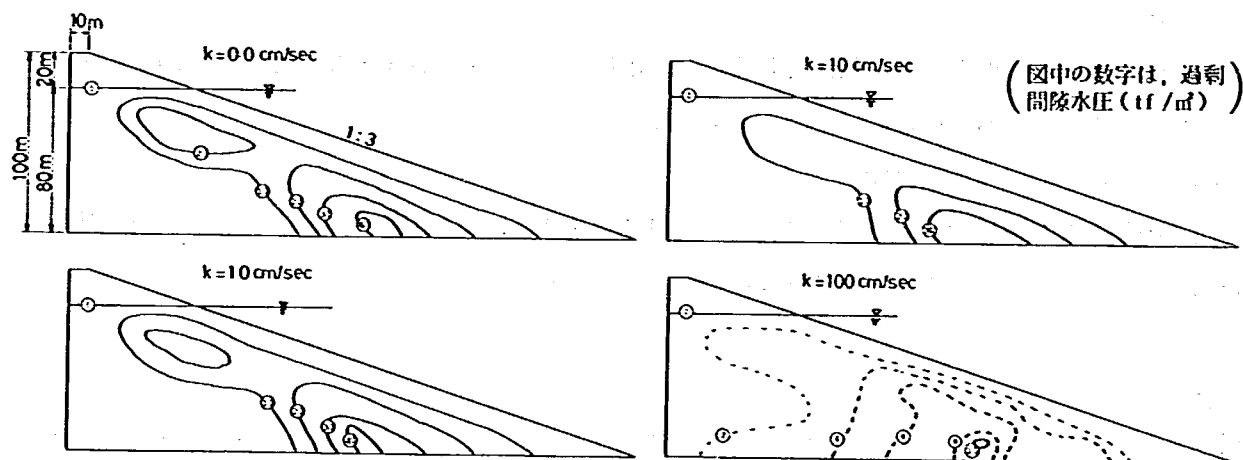


図-3.2 堤体の透水係数と残留間隙水圧

まず、非排水条件 ($k_x = k_y = 0$) の場合、のり面から 20 m 余りの厚さについては初期有効拘束圧レベルにまで達している。堤体中央部においては逆に過剰間隙水圧発生量は小さい。これは、拘束圧に対する地震時せん断応力の比が表層部ほど大きいことによるものである。

つぎに、4 つのケースを比較してみると、 $k = 1.0 \text{ cm/sec}$ では非排水条件の場合とさほど変わらない。 $k = 10 \text{ cm/sec}$ になると水圧消散の効果が顕著になり、 $k = 100 \text{ cm/sec}$ ではほとんど消散しきっているのがわかる。この結果より、地震時間隙水圧発生量に及ぼす透水性の影響は明らかである。ただし、この解析で用いた間隙水圧発生モデルでは土の異方応力状態 (特に初期せん断応力) や、良く締め固められた土に特有の正のダイレンタンスーの効果は考慮されていないため、液状化応力比 R_f を 0.40 とかなり大きく設定しているにもかかわらず、間隙水圧が発生しやすくなっていることに留意しておく必要がある。

一方、現実のロック材の粒径・粒度分布は非常に多様であるが、その透水係数は $k = 10^{-3} \sim 10^0 \text{ cm/sec}$ 程度のオーダーである。したがって、ロック材と言えども地震時には必ずしも十分な透水性を期待できる訳ではないことが本検討の結果から理解される。

ただし、透水性が高い方が堤体の安定性にとって一概に有利と言えるかどうかは別問題である。というのは、十分に密に締め固められた砂質土では、正のダイレンタンスー特性が著しく、非排水条件下での繰返しせん断強度は排水強度よりも大きくなる場合もある³⁾。フィルダム堤体の締め固め基準はかなり厳しいため、上述のような繰返しせん断強度特性を持っているとも考えられるが、本検討ではこのことは考慮されていないことに留意する必要がある。

4. 室内試験

4.1 実験の内容

以下の試験・実験を行った。

- (1) 物理試験
- (2) 透水試験
- (3) 三軸圧密試験

試料の等方圧密特性を、処女載荷時および非排水状態で繰返しせん断を受けて過剰間隙水圧を発生させた後に再圧密する過程において調べたものである。

- (4) 部分排水繰返し三軸圧縮試験

通常の繰返し三軸圧縮試験と異なり、三軸供試体の排水系路に排水バルブを設け、部分排水状態で繰返し三軸を行い、排水抵抗と液状化強度の関係を調べたものである。

4.2 試料

豊浦砂を用いた。試料の物理特性を表－4.1に示す。なお、同表に示すように、最大・最小密度試験は2か年度において実施しているが、それぞれデータのばらつきは表－4.2に示す通りである。

表－4.1 豊浦砂の物理特性

項 目		S.60年度	S.61年度
比 重 G_s		2.639	2.636
粒 度 分 布	0.84 ϕ		100.0 %
	0.42 ϕ		99.7 %
	0.25 ϕ		89.0 %
	0.105 ϕ		1.0 %
	0.074 ϕ		0.0 %
60 % 粒径			0.190 ϕ
30 % 粒径			0.125 ϕ
10 % 粒径			0.110 ϕ
均 等 係 数 U_c			1.72
曲 率 係 数 U_c'			0.75
最大乾燥密度 $\rho_d \max$		1.635 g/cm ³	1.635
最小乾燥密度 $\rho_d \min$		1.334 g/cm ³	1.333
最 大 間 隙 比 $e \max$		0.978	0.977
最 小 間 隙 比 $e \min$		0.614	0.612

表－4.2 最大・最小密度試験結果（単位：g/cm³）

実施年度		S.60		S.61	
試験 デ 1 タ	No	最大密度	最小密度	最大密度	最小密度
	1	1.636	1.337	1.637	1.336
	2	1.633	1.334	1.631	1.333
	3	1.635	1.338	1.637	1.332
	4	—	1.333	—	1.337
	5	—	1.331	—	1.337
	6	—	1.333	—	—
平均		1.635	1.334	1.635	1.333
標準偏差		0.0012	0.0024	0.0028	0.0035

4.3 透水試験

豊浦砂の相対密度60および80%における透水係数を求めた。試験は定水位法（JIS A 1218）によった。供試体は多重フルイ落下法により作成した。試験結果を表－4.3に示す。相対密度が65%と85%での透水係数の差はきわめて小さいことがわかる。

表－4.3 透水試験結果： k_{15} （cm/sec）

測定 番号	供試体 1 (Dr=65%)	供試体 2 (Dr=84.5%)
1	2.16×10^{-2}	2.01×10^{-2}
2	2.13	1.96
3	2.13	2.03
4	2.11	2.02
5	2.11	1.97
平均	2.13×10^{-2}	2.00×10^{-2}

5. 三軸圧密試験

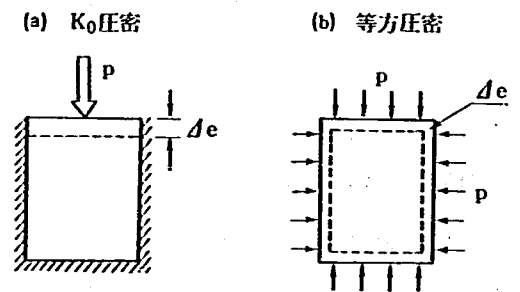
5.1 概 説

ロックフィルダムにおけるロック材のような粗粒材が水浸状態で地震動を受けたときの強度特性を知ることが本研究の目的である。このときの間隙水圧の挙動は、第2章でも述べたように、地震動のほかに、粗粒材の透水係数と体積圧縮係数に大きく支配される。この体積圧縮係数を求めるのが本試験の目的であるが、以下のような特徴を有している。

すなわち、通常の圧密試験では、図-5.1(a), (b)に示すように、 K_0 圧密あるいは等方圧密条件で、処分载荷および除荷過程において体積圧縮（あるいは膨張）係数 m_v （あるいは m_s ）が求められる。この場合には、 m_v および m_s は圧力 p と間隙比 e によって一義的に決まるであろう。ところが、繰返しせん断に伴う過剰間隙の発生あるいは消散などが起こる場合には、係数 m_v, m_s は必ずしも上述のような方法で得られた値と同じとは限らないと考えられる^{5), 19), 20)}。

すなわち、図-5.2で地震前の状態を点Aとする。そこで、仮にこの土が非排水条件（ $\Delta e = 0$ ）で繰返しせん断を受けたとすれば、過剰間隙水圧の上昇、すなわち有効応力 p の減少を生じ、 $\overrightarrow{AB}$ の経路をたどることになる。また、完全排水条件（ $\Delta p = 0$ ）の場合には、繰返しせん断に伴う間隙比の減少（ $\Delta e < 0$ ）を生じ、 $\overrightarrow{AC}$ の経路となる。ところが、一般には地盤あるいは水浸堤体の中の土はその両者の中間的な状態にあり、繰返しせん断に伴う過剰間隙水圧の発生と同時にその消散（伝播）も生じる。この場合には模式的には $\overrightarrow{ADE}$ のような過程になるであろう。ここでその土要素が非排水条件に近ければ点Dは図上で左寄りに、完全排水条件に近ければ右寄りになるであろう。

さらに、この $\overrightarrow{ADE}$ の過程においては、その間の各時点における体積圧縮および膨張特性が経路を支配する主要因の1つとなる。しかし、たとえば図中の点Fに至る経路は、たとえ初期状態を点Aに限定したとしても、いく通りもあり得る。



(c) 圧力-間隙比関係

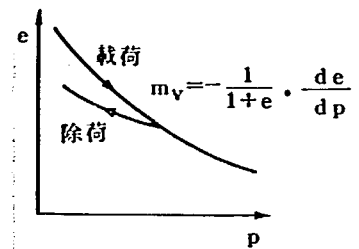


図-5.1 通常の圧密試験

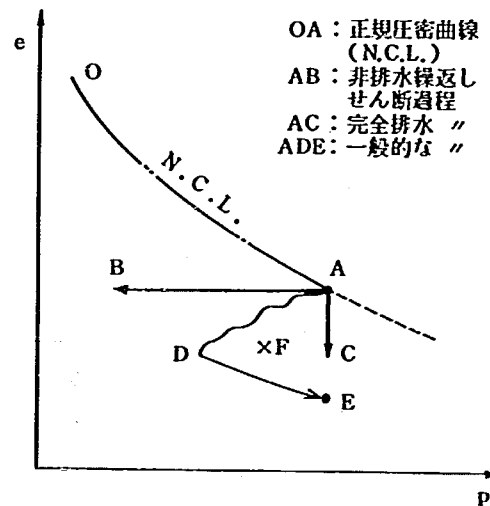


図-5.2 種々の圧密膨張経路

したがって、このように繰返しせん断によりある状態点 (e, p) に達したときの体積圧縮・膨張特性を知るのが本試験の目的である。

5.2 試験方法

土木研究所動土質研究室所有の三軸圧縮試験装置を用いた。主な仕様を表-5.1に示す。供試体寸法は直径5cm、高さ10cmである。試験手順を図-5.3に示す。圧密→繰返しせん断→再圧密→除荷→……の試験過程を図-5.4に示す。

繰返しせん断以外の、圧密および除荷過程では等方応力状態を維持しており、この間での体積変化と間隙水圧（有効応力）を測定した。試験は、初期相対密度が約60, 80, および90%の3供試体について行った。

表-5.1 三軸圧縮試験装置の主な仕様

項 目		仕 様
名 称		繰返し三軸試験機
製 造 者		丸東製作所(株)
載 荷	軸 圧	最大 5.25 kgf/cd (静的+動的)
	側 圧	最大 5.0 kgf/cd (静的)
	軸圧載荷方式	油圧サーボ (静的・動的)
	側圧載荷方式	コンプレッサー→レギュレーターまたは油圧サーボ
発振器	波 形	三角波・正弦波・矩形波・外部入力波
	周 波 数	0.05 ～ 5.0 Hz
計測機器	軸 荷 重	ひずみゲージ式 容量 100 kgf
	側 圧	ひずみゲージ式 容量 5.0 kgf/cd
	間 隙 水 圧	ひずみゲージ式 容量 5.0 kgf/cd
	軸 変 位	差動トランス式 容量 ± 50 μ m
	排 水 量	ビューレット, 容量 50 cc 最小目盛 0.2 cc

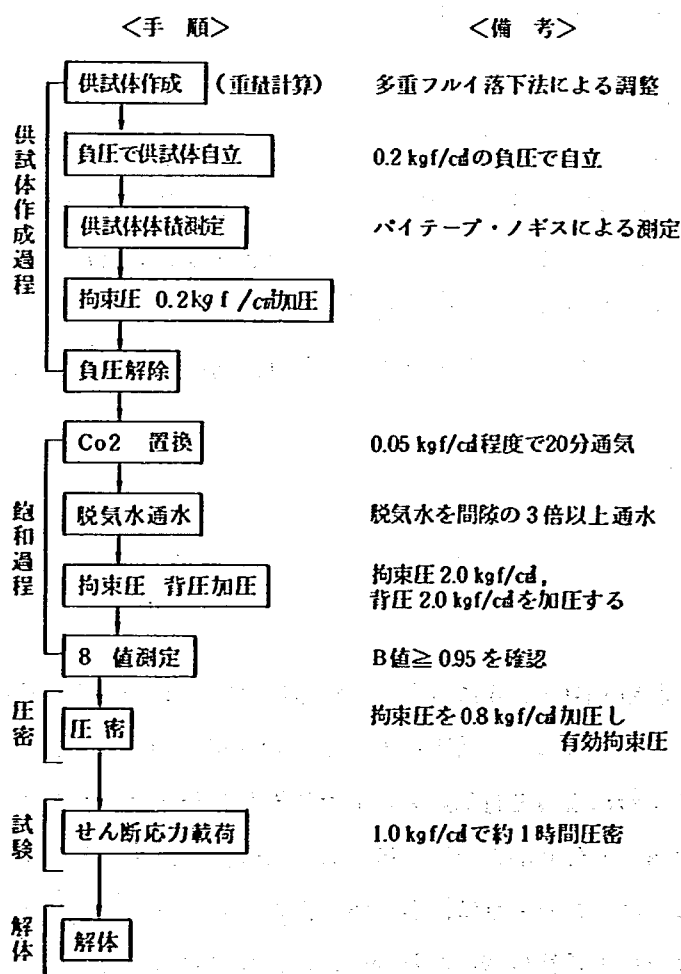


図-5.3 繰返し三軸圧縮試験手順

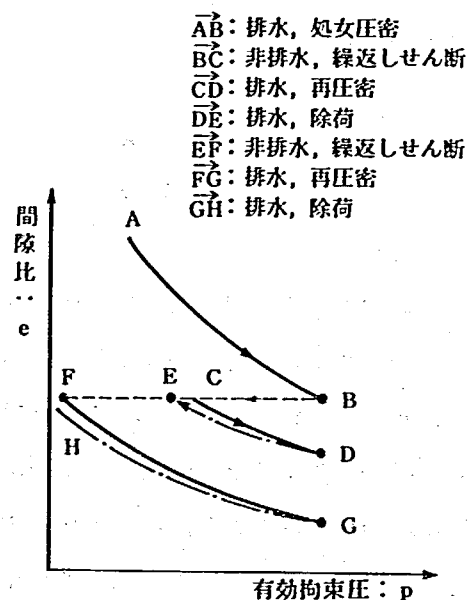


図-5.4 三軸圧密試験の模式図

5.3 試験結果

最初に、初期相対密度が約80%の供試体No.2の試験結果を図-5.5に示す。同図で、STEP1は処女圧密曲線であり、有効拘束圧 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ まで圧密している。つづいて非排水条件で繰返しせん断を行い、過剰間隙水圧 $du \approx 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ となったところで再圧密・除荷させたのがSTEP2である。以後、STEP3, 4, ……と同等の操作を行っている。この結果によれば、いずれの曲線も処女圧密曲線にほぼ平行であり、繰返しせん断によって有効応力の変化を生じた後の圧密・膨張特性は、処女圧密過程での応力履歴とはほぼ無関係であることがわかる。

つぎに、このデータを用いて、圧縮指数 C_c および体積圧縮係数 m_v を求めてみる。これらは次式のように定義される。

$$C_c \equiv - \frac{de}{d(\log_{10} p)} = - (\log_{10} e) p \frac{de}{dp} = - 2.303 p \frac{de}{dp} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$m_v \equiv \frac{de}{dp} = \frac{-1}{1+e} \frac{de}{dp} = \frac{0.434 C_c}{p(1+e)} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

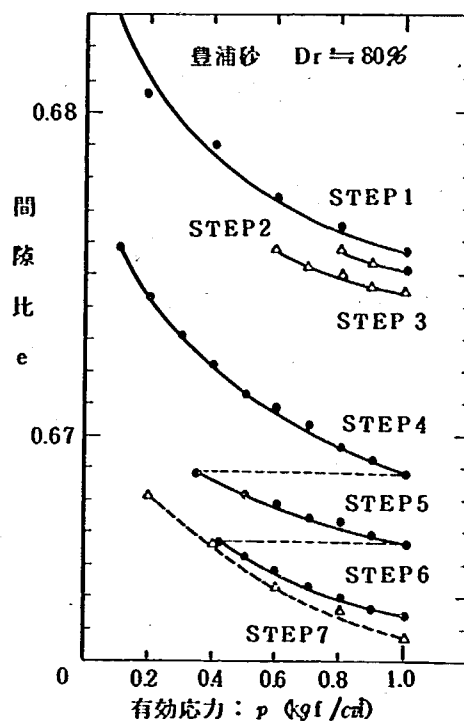


図-5.5 有効応力と間隙比の関係

図-5.5の結果を $e - \log p$ 関係に書き改めて C_c を求めてみると、有効応力が非常に小さい範囲(0.2 kgf/cm²以下)を除けば、有効応力、載荷・除荷過程にかかわらずほぼ一定の値 $C_c \approx 0.006$ が得られた。圧縮指数のこのような傾向は、古賀ら⁵⁾、龍岡¹⁹⁾の同種の実験結果においても見られる。このことは、砂の等方応力に対する変形(体積ひずみ)特性がかなり可逆的であることを意味しており、粘性土とは異なる傾向である。

式(4.2)を用いると、この実験結果に対して

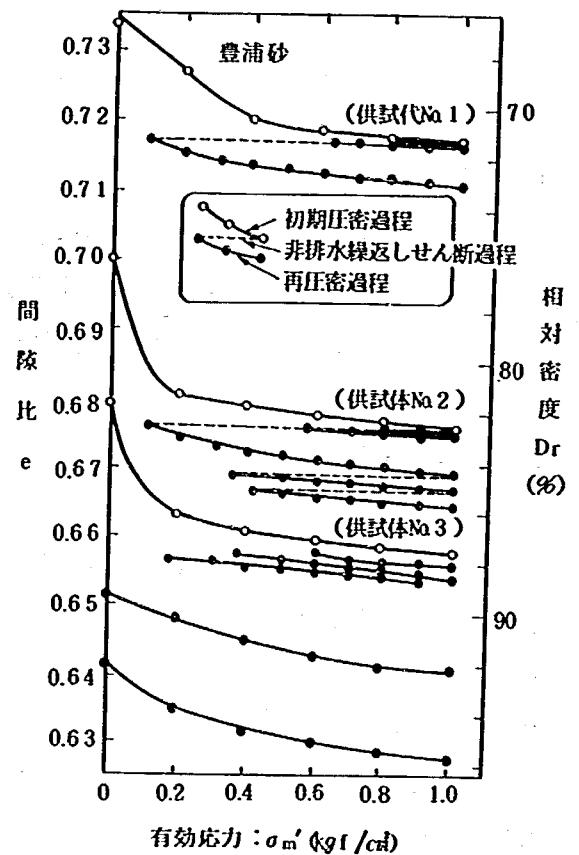
$$m_v \approx \frac{0.434 \times 0.006}{p(1+e)}$$

と得られる。

初期相対密度の異なる3供試体の試験結果をまとめて図-5.6に示す。これらについて上と同様に圧縮指数を求めてみると、初期相対密度の低い供試体から順に(供試体No.1, 2, 3の順に)、0.005, 0.006, 0.008と得られた。ただし、この結果は繰返しせん断によって有効応力がゼロに達しなかったデータについて求めた値であり、同図中最下部にある2本の曲線(有効応力がゼロに達した後の再圧密曲線)については圧縮指数は大きく、 $C_c \approx 0.01 \sim 0.012$ と得られた。このように、供試体の有効応力がいったんゼロに達するか否かで圧縮指数の値が大きく異なるのは土粒子骨格構造の乱れの度合に大きな差があることを示唆するものと考えられる。すなわち、有効応力が少しでも残っているという事は、その時点の土粒子構造

が初期の土粒子構造から次第に変化した状態のものであり、初期の土粒子構造をある程度記憶しているものと考えられる。一方、有効応力がいったんゼロに達した供試体ではその時点で土粒子がばらばらになり、初期の土粒子構造の記憶が消去されるものと考えることができる。そして、再堆積・再圧密の過程では、個々の土粒子はそれぞれより安定な位置・土粒子方向をとろうとするため、結果的に圧縮性が高くなるのではないかと想像される。

上の議論はやや推論に傾いているくらいはあるが、液状化後の圧縮指数が大きく変化するというのは実験事実であり、このことは液状化過程をシミュレートする有効応力解析においてよく考慮されるべきものである。つまり、圧縮指数が大きいという事は間隙水圧の消散により時間を要することを意味し、小さめの圧縮指数を用いた液状化解析は危険側の評価を与えることとなる。



図一 5.6 三軸圧密試験結果

6. 部分排水液状化試験

6.1 実験の概要

部分排水条件下での動的強度は、その透水性だけでなく土の密度、外力の載荷速度等も重要な因子となる。そこで、本実験では、相対密度、載荷周波数、および排水度（定義は後述）をいくつか変えた条件下で、繰返し三軸圧縮試験により部分排水液状化試験を行った。

6.2 実験の方法

(1) 試験装置

動土質研究室所有の繰返し三軸圧縮試験機（丸東製作所製）を用いた。繰返し軸荷重は油圧サーボ機構によって加えるようになっている。三軸セルはロードセル内蔵型である。供試体寸法は直径 5 cm、高さ 10 cm である。

(2) 試料

豊浦砂を用いた。物理特性は表 4.1 に示した通りである。

(3) 供試体の作成

多重ふるい落下法（Multiple Sieve Pluviation : MSP 法）によった。この方法は目標とする密度の供試体を容易に作るできるとされているが、結果的には相対密度で 10% 程度のばらつきが出た。観察によると、このばらつきの原因はふるいを設置したときの微妙な傾斜、砂が落下するときに空気をまきこんでゆらぎを生じさせることにあるようであった。この点は今後改良すべきである。また、多重ふるい落下法により作成された豊浦砂の液状化強度は、各種の供試体作成法によるもののうち最も低い値を示す¹⁷⁾。これは、この方法による供試体が強い異方性を有することによると言われている¹⁸⁾。

さて、MSP 法で供試体を作った後キャッピングし、CO₂ 通気、脱気水通水の後、2 kgf/cm² の背圧を加えた。この時点で B 値を測定し、これが 0.95 以上であることを確認した後圧密した。

(4) 部分排水繰返し試験の方法

部分排水繰返し三軸試験においては、図 6.1 に示すように、供試体上下端に通じる水系路中に「流量調整バルブ」を取り付け、「水もれ」が生じ得るようにした。同図において、供試体が繰返し応力を受けて過剰間隙水圧を発生すると、供試体上下端から流量調整バルブを通してビューレットに排水される。ビューレット内の圧力は背圧に等しく一定である。供試体の間隙水圧は両端で測定した。また、排水量は差圧計で測定した。ただし、差圧計による排水量の測定値は、管路の摩擦損失等の影響のために信頼できる結果が得られなかった。

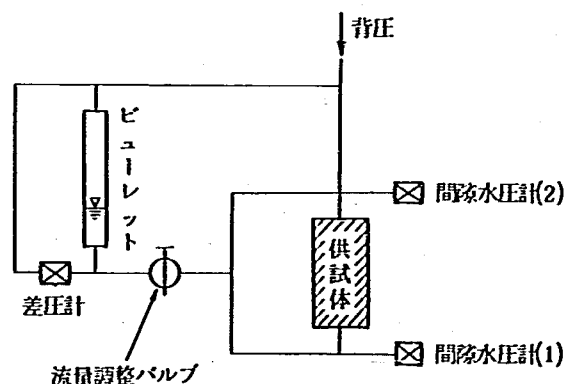


図 6.1 部分排水繰返し三軸試験における排水系統図

流量調整バルブの検定結果を図-6.2(a), (b)に示す。同図で、排水速度は一定のバルブ開度、一定の圧力差の下で、単位時間当りに通過する流量として求めている。また、この検定試験においては、バルブでの抵抗だけでなく、ボラスストーン、コック、チューブ、ビューレットなど経路途中での抵抗をすべて含んでいる。同図(b)から、バルブ開度一定の下での流量速度と差圧の関係は必ずしも1次比例的ではないことがわかる。

(5) 試験ケース

繰返し三軸試験の各供試体の試験条件、試験結果をまとめて表-6.1に示す。供試体番号は3桁で表わし、1桁目のA, B, Cはそれぞれ目標相対密度が65%, 80%, 90%の供試体グループに対応する。2桁目のUあるいはDは、それぞれ非排水、部分排水条件を意味する。3桁目の番号はそれぞれのグループにおける供試体番号である。したがって、試験ケースは、相対密度3種類、部分排水・非排水の2種類の6種類のグループに分けられる。そして、部分排水条件においては、載荷周波数および流量調整バルブの目盛をいくつか変えている。

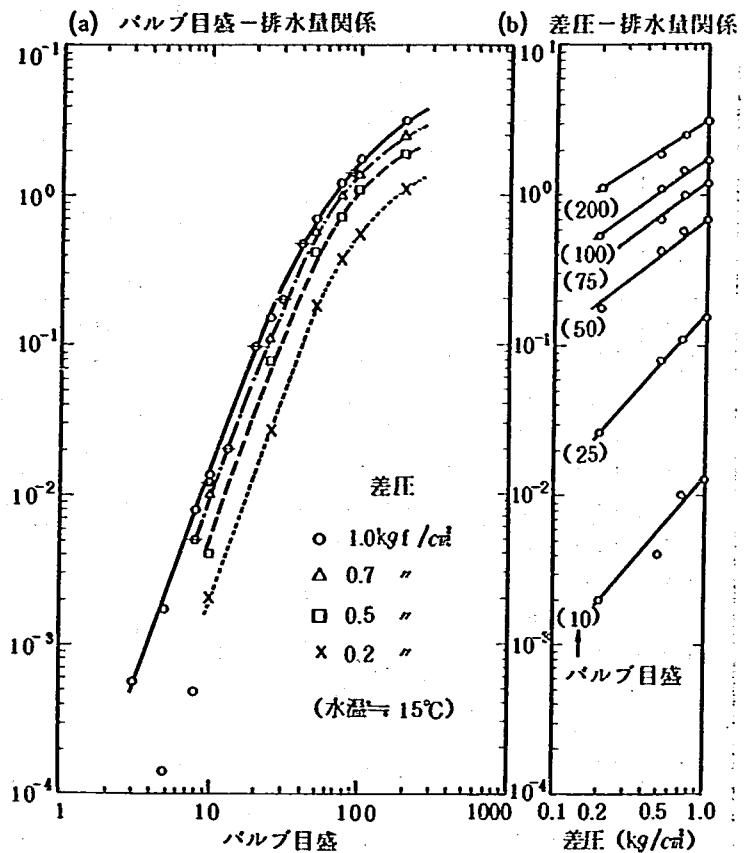


図-6.2 流量調整バルブ検定結果

6.3 実験結果

(1) 非排水せん断試験

まず、通常非排水条件での試験結果を図-6.3に示す。同図には、相対密度の異なる3グループの試験結果をあわせて示している。破壊規準としては、過剰間隙水圧が初期有効拘束圧に等しくなる初期液状化、およびひずみ両振幅 $\epsilon_{D.A.} = 10\%$ の2つをとっている。

同図において、相対密度により液状化強度が異なるのが明らかである。ちなみに、この試験結果より、相対密度と液状化強度の関係を描いてみると図-6.4のようになり、相対密度が80%を超すと液状化強度が急激に大きくなるのが確かめられる。

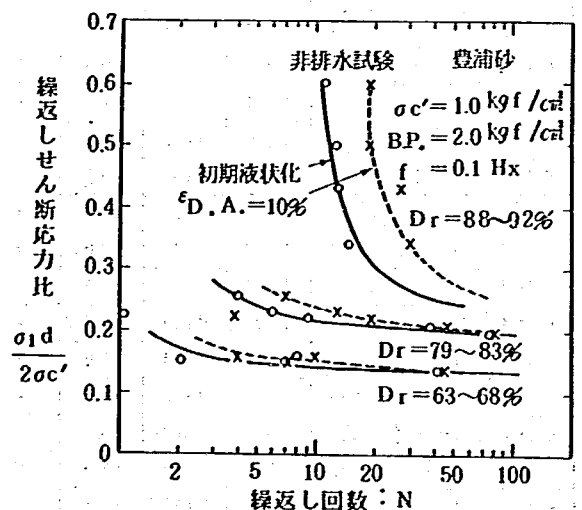


図-6.3 非排水繰返しせん断試験結果

表-6.1 繰返し三軸試験条件・結果一覧表

供試体 番 号	初 期 状 態		圧 密 後			応 力 条 件					流 量 調 整バルブ 目 盛	試 験 結 果 ^{a)}		
	乾 燥 密 度 ρ_{ds} (g/cd)	間 隙 比 e_c	乾 燥 密 度 ρ_{dc} (g/cd)	間 隙 比 e_c	相 対 密 度 D_{rc} (%)	有 効 拘 束 圧 σ'_c (kgf/cd)	背 圧 B.P. (kgf/cd)	B 値	せん 断 応 力 比 R ($=\frac{\sigma_{1d}}{2\sigma'_c}$)	載 荷 周 波 数 f (Hz)		初 期 液 状 化 回 数 N ₁ (回)	再 振 幅 幅 び す り	
													5.0%	10%
A U 1	1.507	0.75	1.525	0.73	68.0	1.00	2.00	0.99	0.130	0.1	0	—	—	—
A U 2	1.495	0.77	1.513	0.74	64.4	—	—	0.98	0.134	—	—	44	42	45
A U 3	1.515	0.74	1.522	0.73	67.1	—	—	0.98	0.147	—	—	7	6	7
A U 4	1.500	0.76	1.508	0.75	62.7	—	—	0.97	0.152	—	—	2	2	4
A U 5	1.510	0.75	1.523	0.73	67.3	—	—	0.98	0.157	—	—	8	8	10
A U 6	1.499	0.76	1.520	0.74	66.6	—	—	0.95	0.225	—	—	1	2	4
A D 1	1.503	0.76	1.519	0.74	66.3	—	—	0.96	0.147	—	20	2	—	—
A D 2	1.507	0.75	1.519	0.74	67.0	—	—	0.98	0.203	—	—	2	—	—
A D 3	1.515	0.74	1.525	0.73	68.2	—	—	0.98	0.205	—	—	4	—	—
A D 4	1.517	0.74	1.537	0.72	71.7	—	—	0.99	0.131	—	40	—	—	—
A D 5	1.497	0.76	1.516	0.74	65.3	—	—	0.97	0.175	—	—	2	—	—
A D 6	1.496	0.77	1.512	0.75	64.0	—	—	0.97	0.185	—	—	1	—	—
A D 7	1.490	0.77	1.510	0.75	63.2	—	—	0.97	0.188	—	—	1	—	—
B U 1	1.550	0.70	1.563	0.69	79.7	—	—	0.95	0.196	—	0	77	76	82
B U 2	1.566	0.68	1.575	0.67	83.3	—	—	0.97	0.208	—	—	38	41	47
B U 3	1.577	0.67	1.589	0.66	87.2	—	—	0.98	0.220	—	—	9	10	19
B U 4	1.556	0.70	1.564	0.69	80.0	—	—	0.97	0.231	—	—	6	8	13
B U 5	1.554	0.70	1.560	0.69	78.6	—	—	0.99	0.255	—	—	4	5	7
B D 1	1.551	0.70	1.572	0.68	82.3	—	—	0.96	0.200	—	8	—	—	—
B D 2	1.566	0.69	1.590	0.66	87.4	—	—	0.98	0.213	—	—	—	—	—
B D 3	1.578	0.67	1.586	0.66	86.2	—	—	0.99	0.216	—	—	—	—	—
B D 4	1.558	0.69	1.573	0.68	82.5	—	—	0.98	0.225	—	—	6	3	6
B D 5	1.566	0.69	1.578	0.67	83.9	—	—	0.96	0.230	—	—	5	4	7
B D 6	1.545	0.71	1.558	0.69	78.0	—	—	0.98	0.237	—	13	—	—	—
B D 7	1.555	0.70	1.574	0.68	82.8	—	—	0.97	0.242	—	20	—	—	—
B D 8	1.583	0.67	1.602	0.65	90.8	—	—	0.95	0.234	—	40	—	—	—
B D 9	1.542	0.71	1.564	0.69	80.0	—	—	0.95	0.446	—	—	1.0	1.0	—
C U 1	1.566	0.683	1.590	0.658	87.6	—	—	0.96	0.21	—	0	—	—	—
C U 2	1.582	0.666	1.606	0.641	92.0	—	—	0.98	0.50	—	—	13	8	18
C U 3	1.560	0.690	1.592	0.656	88.0	—	—	0.96	0.43	—	—	13	10	27
C U 4	1.578	0.670	1.591	0.657	87.7	—	—	0.96	0.34	—	—	15	14	30
C U 5	1.583	0.665	1.596	0.652	89.2	—	—	0.97	0.60	—	—	11	8	19
C U 6	1.565	0.684	1.596	0.652	89.2	—	—	0.98	0.63	—	—	(23)	(24)	(30)
C D 1	1.573	0.676	1.591	0.657	87.7	—	—	0.98	0.57	0.5	4	9	10	20
C D 2	1.590	0.658	1.599	0.649	90.0	—	—	0.96	0.36	—	—	—	—	—
C D 3	1.573	0.676	1.594	0.654	88.6	—	—	0.98	0.52	—	—	59	54	—
C D 4	1.584	0.664	1.595	0.653	88.8	—	—	0.99	0.43	—	—	—	—	—
C D 5	1.572	0.677	1.594	0.654	88.6	—	—	0.98	0.68	—	—	9	12	31
C D 6	1.561	0.689	1.578	0.670	84.0	—	—	0.97	0.45	1.0	—	—	—	—
C D 7	1.578	0.670	1.588	0.660	86.9	—	—	0.96	0.62	—	—	9	13	23
C D 8	1.592	0.656	1.595	0.653	88.9	—	—	0.98	0.50	—	—	68	75	—
C D 9	1.576	0.673	1.596	0.652	89.2	—	—	0.98	0.54	—	—	14	19	—

a) —は液状化あるいは5,10%びすりが生じなかったことを示す。

また、図-6.3において、相対密度が80%以下の2グループの強度曲線はかなりフラットである。これは多重ふるい落下法あるいはロート法（空中落下法）により作成された供試体に特徴的なものである。さらに、このことは工学的には、繰返しせん断応力のわずかな違いにより、液状化あるいは非液状化に分かれてしまうことを意味している。このような結果が生じる理由として、実験結果から次のような事が推論された。図

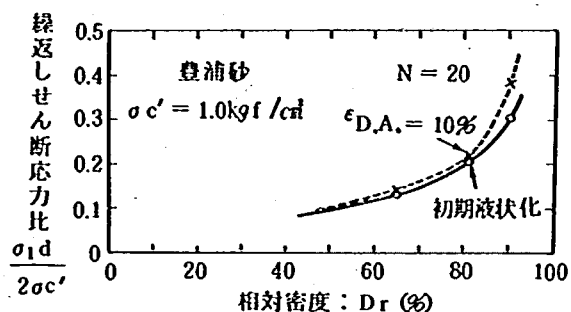
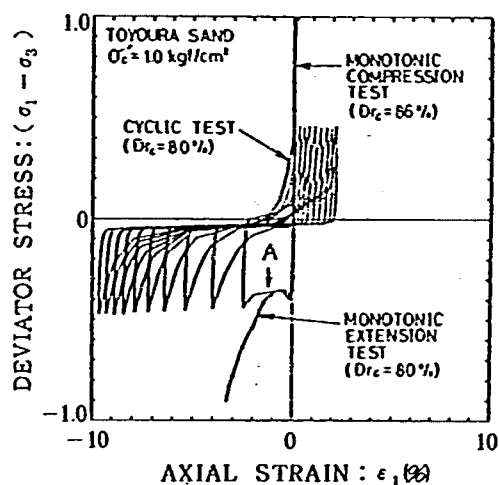


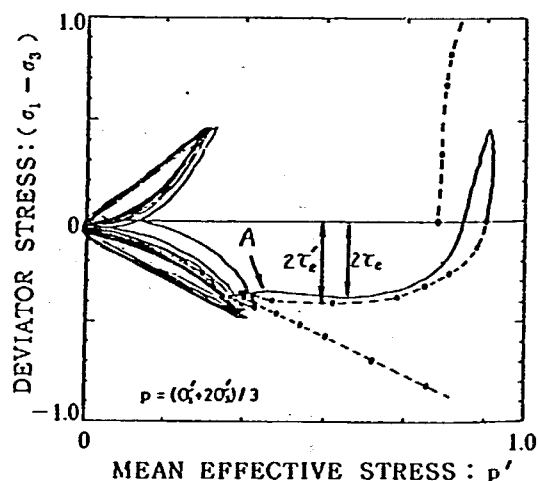
図-6.4 相対密度と液状化強度の関係

-6.5は相対密度が80%程度の供試体での繰返し三軸圧縮試験および単調載荷（圧縮，引張）試験の例である⁹⁾。(a)図より、応力-ひずみ関係は圧縮・引張で非常に異なっており、また(b)図より、有効応力径路が引張側で一気に破壊線に達しているのがわかる。また、(a)図においてA点に示されるように引張側でいったん流れ変形が生じている。今回の繰返し試験において、このような現象は相対密度60~80%の多くの供試体に見られ、これが発生すると直ちに液状化が生じた。そしてこの現象が生じる τ_c の下限値は、単張引張試験での τ_c' にほぼ等しいレベルであり、 τ_c がこれより少し小さいとほとんど液状化が生じなかった。

このように、MSP供試体は非排水条件下では繰返し応力レベルにかなり敏感な供試体であると考えられる。



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 有効応力径路

図-6.5 繰返し三軸試験結果例

(2) 部分排水繰返しせん断試験

相対密度の異なる3グループに分けて試験結果をまとめたものを図-6.6に示す。同図には比較のために非排水試験の結果もあわせて示している。部分排水試験で注目すべき試験条件はバルブ目盛と载荷周波数である。バルブ目盛が大きいほど、また、载荷周波数が小さいほど排水度は高くなる。

同図から次のことがわかる。

- 1) 部分排水条件下での液状化強度は非排水条件に比べて高くなる。

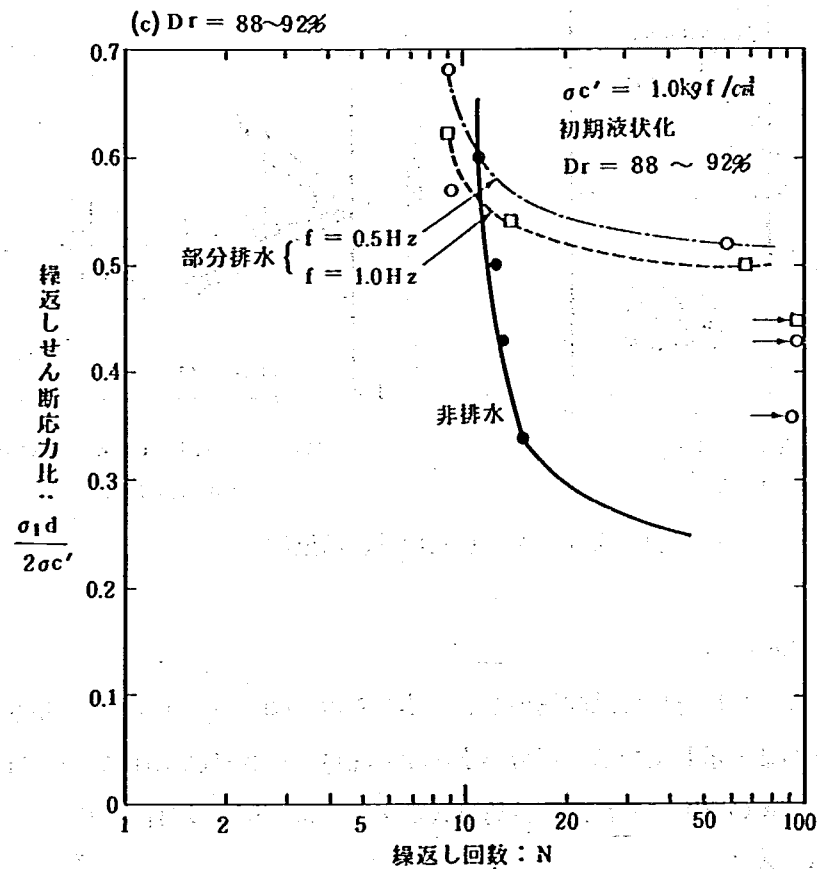
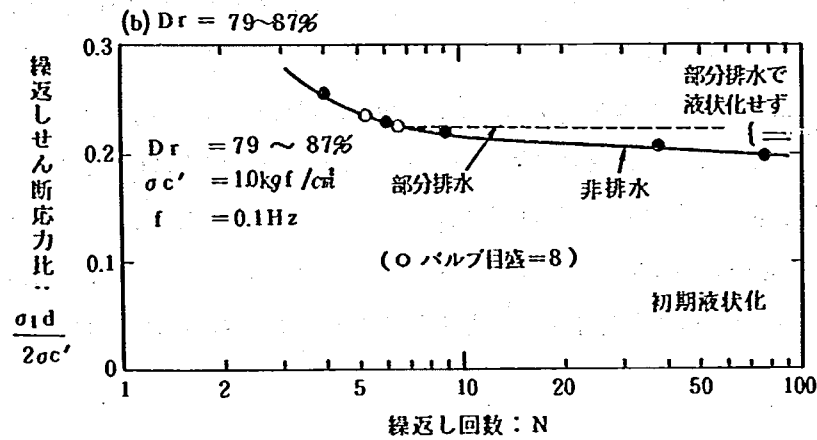
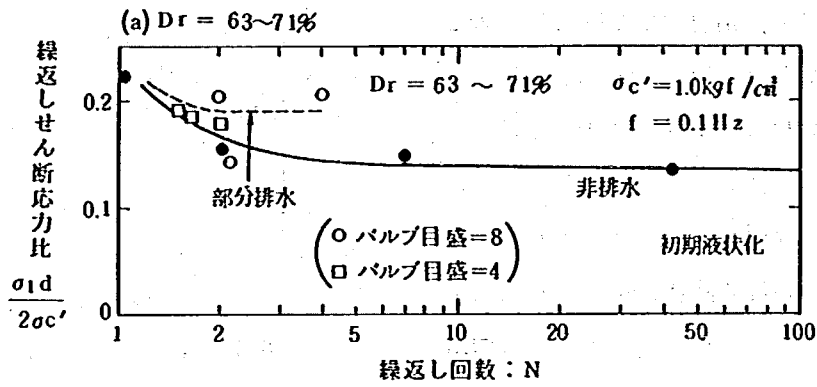


図-6.6 部分排水液化化試験結果

2) 繰返し応力レベルが高く、少ない繰返し回数で液状化するような場合、排水程度にもよるが、非排水条件での液状化強度とあまり変わらない。一方、非排水条件下で液状化に要する繰返し回数を多く要するような応力レベルにおいては、排水の効果は明らかに見られる。そして、その液状化曲線は繰返し回数の多い所で平行になっている。これを言い換えれば、一定の部分排水条件下で10回程度の繰返し応力が載荷される間に液状化が生じなければ、それ以上繰返し載荷を継続しても液状化しない、ということになる。

3) 相対密度の高いケース (図(c)) における部分排水の効果は、密度の緩いケース (図(a), (b)) に比べてより明瞭である。これは1つには、図-6.5に示したような、1波の応力で間隙水圧が急激に上昇して液状化に至るような現象が $D_r = 88 \sim 92\%$ では生じなかったためである。もう1つは、密な場合には繰返しせん断による体積収縮量が小さいため、排水の効果がより顕著に現われたものである。

図-6.7は、相対密度および繰返しせん断応力比がほぼ等しい2つの試験結果を例示したものであり、(a)図が非排水条件、(b)図が部分排水条件の結果である。同図より、部分排水条件においては、最初間隙水圧の上昇蓄積が始まるが、20波目付近から平衡状態に移り、さらに繰返しが進行すると間隙水圧が次第に低下しているのがわかる。

6.4 数値シミュレーションによる検討

上述した部分排水液状化試験の結果に対し、排水の程度と液状化強度の関係についてさらに理解を深めるために、簡単な数値シミュレーションによる検討を行ってみたので以下に示す。

6.4.1 モデル化と基本方程式

部分排水条件においては、供試体内部での間隙水圧は高さ方向に一様ではないから、一次元連続体として取り扱う必要がある。この場合、支配方程式は図-6.8(a)を参照して次のようになる。

$$\text{消散方程式: } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_g}{\partial t} + \frac{k}{m_v \rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$\text{連続の式: } \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

記号については表-6.2にまとめて示す。

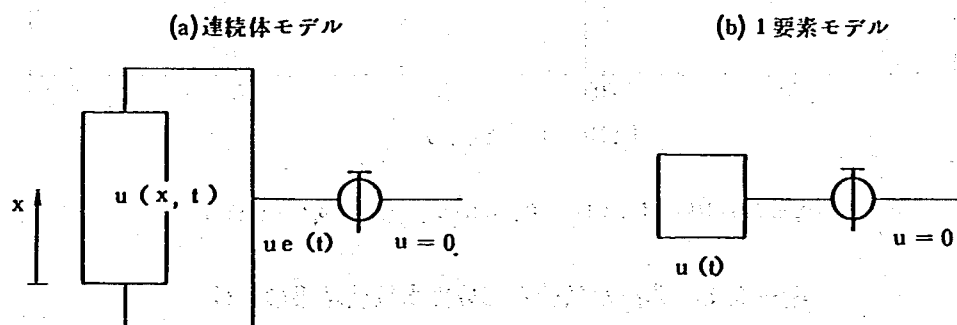
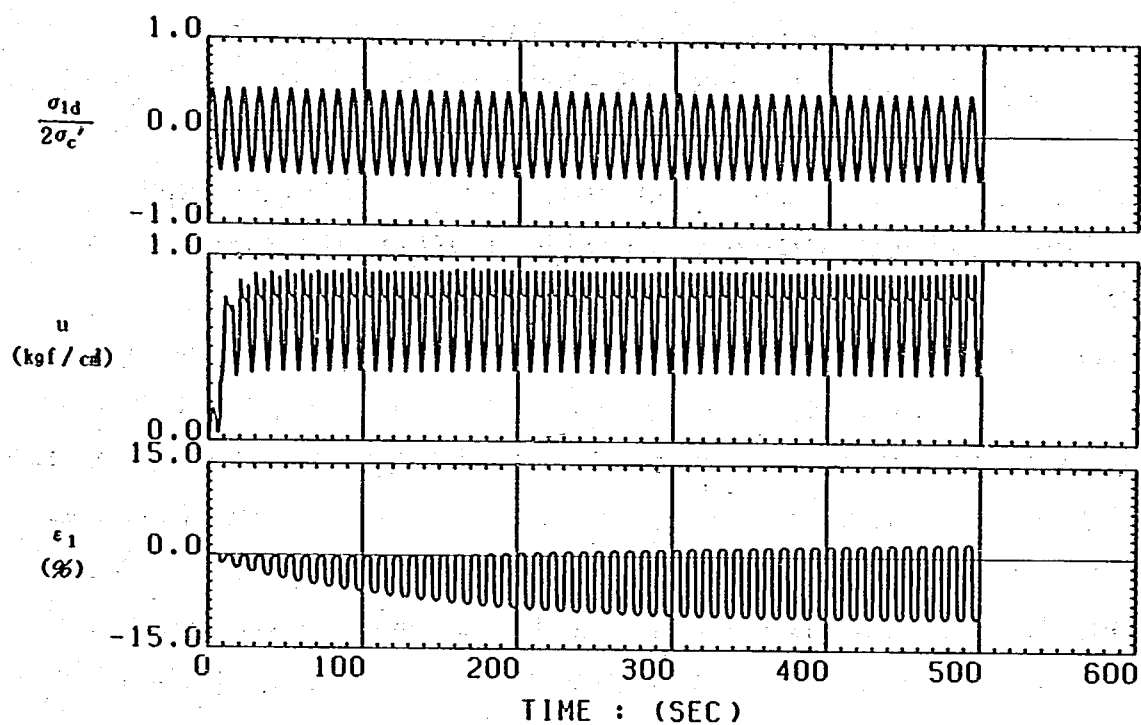
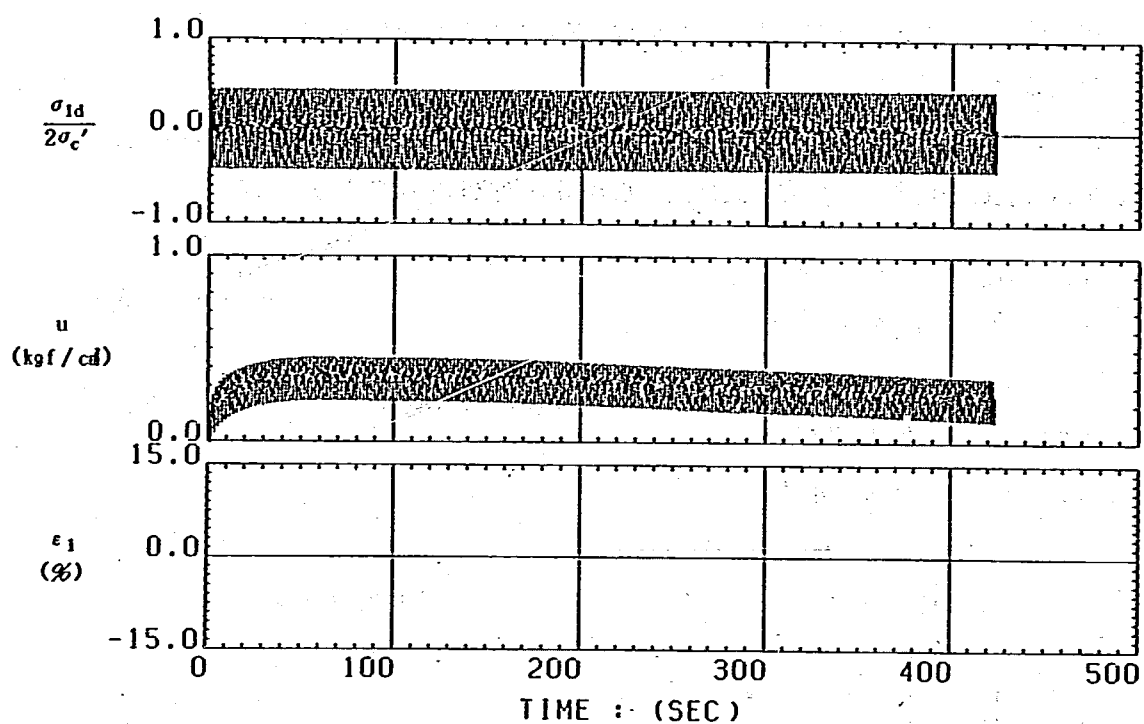


図-6.8 部分排水シミュレーションモデル



(a) 非排水 (供試体番号 : CU3, $D_r = 88\%$, $\sigma_{1d}/2\sigma_c' = 0.43$)



(b) 部分排水 (供試体番号 : CD4, $D_r = 89\%$, $\sigma_{1d}/2\sigma_c' = 0.43$)

図-6.7 非排水試験と部分排水試験結果の比較

表-6.2 記号の説明

記号	単位	説明
A	cm^2	断面積
C_e	—	圧縮指数
e	—	間隙比
g	cm/sec^2	重力の加速度
k	cm/sec	透水係数
K	$\text{cm}^3/\text{sec}/\text{kgf}/\text{cm}^2$	流量調整バルブの通水能
m_v	cm^3/kgf	体積圧縮係数
N	—	繰返し回数
N_t	—	非排水条件下での液状化回数
q	cm^3/sec	流量速度
t	sec	経過時間
u	kgf/cm^2	間隙水圧
$\frac{\partial u_g}{\partial t}$	$\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{sec}$	単位時間当りの間隙水圧発生量
v	cm/sec	流速
α	—	Seedの間隙水圧発生モデルを規定するパラメータ (定数)
σ	kgf/cm^2	初期拘束圧 (一定)
ρ_w	g/cm^3	水の密度

境界条件は供試体端部において

$$q_e = A \cdot v_e = A k \left(- \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e \quad \text{..... (6.3)}$$

で与えられる。さらに、流量調整バルブについて次式が成り立つ。

$$q_e = K \cdot (u_e - 0) = K u_e \quad \text{..... (6.4)}$$

以上が供試体を連続体として考えた場合の支配方程式であり、初期条件および間隙水圧発生項 $\partial u_g / \partial t$ (x, t) を与えれば解くことができる。しかし、予備実験において、供試体を片面排水条件にして同様の試験を行い、供試体上下端の間隙水圧を測定したところほとんど同じ値を示し、供試体の透水抵抗は流量調整バルブの透水抵抗に比べて無視しうることがわかった。この事実を用いれば、供試体を1つの土要素として取り扱うことが可能となり (図-6.8(b)参照)、支配方程式は次のように簡略化される。

$$\frac{du}{dt} = \frac{du_g}{dt} - \frac{1}{m_v} \cdot \frac{q}{V} \quad \text{..... (6.5)}$$

$$\frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} = - \frac{q}{V} \quad \text{..... (6.6)}$$

$$q = K u \quad \text{..... (6.7)}$$

ここに、

$$m_v = \frac{0.434 C_e}{(\sigma - u)(1+e)} \quad \text{..... (6.8)}$$

また、間隙水圧発生項は、Seedら¹⁵⁾の提案式を用いれば次のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{du_g}{dt} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{2\sigma}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_l} \right)^{1/2\alpha} \right) \\ &= \frac{dN}{dt} \frac{\sigma}{\alpha \pi N_l} \left\{ \sin \left(\frac{\pi u}{2\sigma} \right) \right\}^{1-2\alpha} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\pi u}{2\sigma} \right) \dots\dots\dots (6.9)\end{aligned}$$

初期条件は次のように与えられる。

$$u(t=0) = 0 \quad ; \quad e(t=0) = e_0 \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

6.4.2 無次元化

基本方程式(6.5)～(6.10)を無次元化する。

物理量 t , u , u_g に対し、以下の無次元量を定義する。

$$\left. \begin{aligned} T &= t/t_d \quad (0 \leq T \leq 1) \\ U &= u/\sigma \quad (U \leq 1) \\ U_g &= u_g/\sigma \quad (U_g \leq 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.11)$$

そうすると、式(6.5)～(6.10)は次のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\partial U_g}{\partial T} - \frac{K t_d}{m_v V} U \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

$$\frac{\partial U_g}{\partial T} = \frac{1}{\alpha \pi N_l} \frac{dN}{dT} \left\{ \sin \left(\frac{\pi U}{2} \right) \right\}^{1-2\alpha} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\pi U}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

$$\frac{dN}{dT} = f(\text{周波数}) \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

6.4.3 計算条件

相対密度 $D_r = 79 \sim 87\%$ の試験結果に対して数値シミュレーションを行ってみた。計算は式(6.11)～(6.13)を差分化して行った。

定数は、前述の実験結果から次のように与えた。 $C_c = 0.006$, $\alpha = 0.9$, $f = 0.1 \text{ Hz}$, $V = 195 \text{ cm}^3$ 。

非排水条件における液状化回数 N_l は、図-6.3の結果より次のように与えた。

$$\left. \begin{aligned} \log R &= -0.568 \log N_l - 0.2518 \quad (R \geq 0.2318) \\ \log R &= -0.0562 \log N_l - 0.597 \quad (R < 0.2318) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.15)$$

ここに、 R は繰返しせん断応力比である。

流量調整バルブの通水能は6種類の値を用いた。

6.4.4 計算結果

流量調整バルブの通水能を $K = 10^{-0.5} \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{kgf}/\text{cm}^2$ としたときの間隙水圧の経時変化を図-6.9に示す。同図で、繰返し応力比を4種類に変えている。それらは非排水条件での液状化回数で $N_l = 1, 2, 3, 4$ 回に対応する値である。図より、非排水条件では3回で液状化するような応力比 $R = 0.30$ ですでに液状化せず、過剰間隙水圧比が0.3程度で頭打ちになっているのがわかる。また、 $R = 0.30$, $R = 0.25$ のケースでは過剰間隙水圧が平衡状態を保っている。これは、図-6.7(b)に例示したように、間隙水圧が次第に

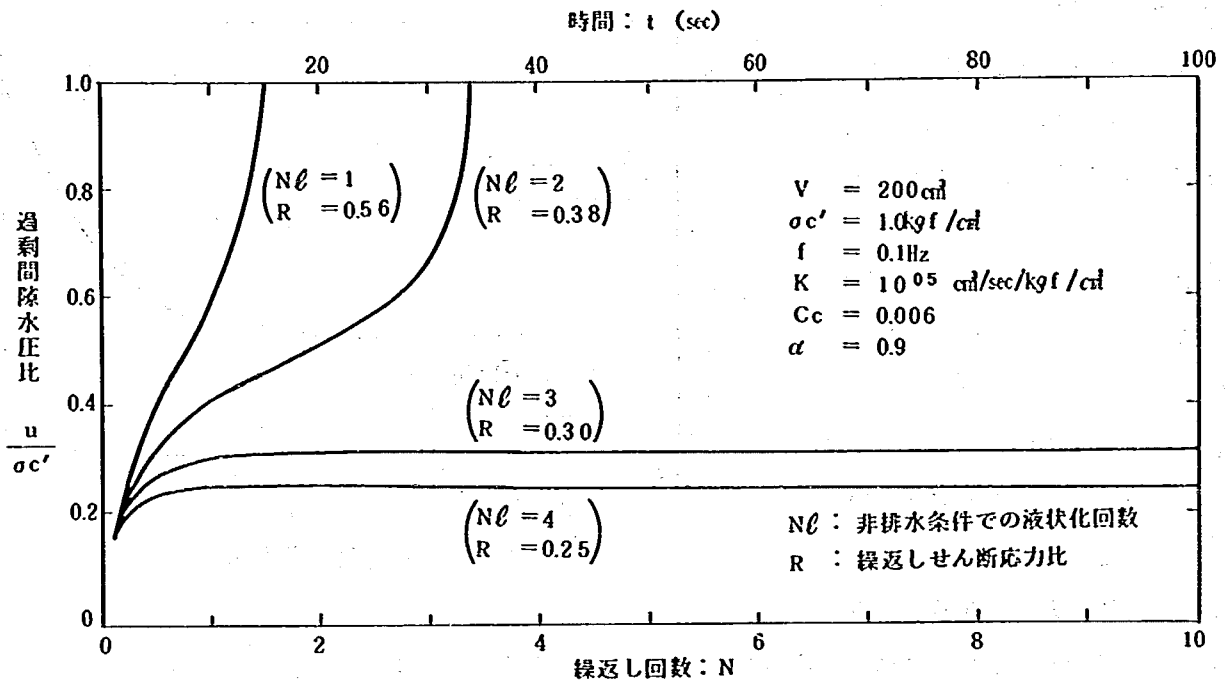


図-6.9 計算結果例

低下していくという実験事実と異なっている。この違いは、実験では、繰返しせん断により発生した過剰間隙水圧が消散されて体積ひずみが進行するにつれて、体積ひずみポテンシャルが小さくなっていく、すなわち、1回の繰返し応力による間隙水圧発生量が小さくなっていく。そうすると、発生量よりも消散量の方が卓越する。一方、解析では間隙水圧発生特性は式(6.9)で規定されているが、この式は現時点での間隙水圧の関数であり、体積ひずみの進行とともにひずみポテンシャルが小さくなるという事が考慮されていない。したがって、この場合には間隙水圧がある値に達した時点で発生量と消散量とがバランスするということになる。

図-6.9に示したのと同様の計算を、流量調整バルブの通水能 K を変えて実施し、それらの計算結果をまとめて部分排水条件での液状化曲線として図-6.10に示す。図より、通水能を大きくするとともに液状化応力比は高くなり、繰返し回数の大きいところで特に高くなっているのがわかる。このことは、実験結果(図-6.6)とも符合している。

つぎに、この結果を通水能と液状化強度との関係に整理し直したのが図-6.11である。

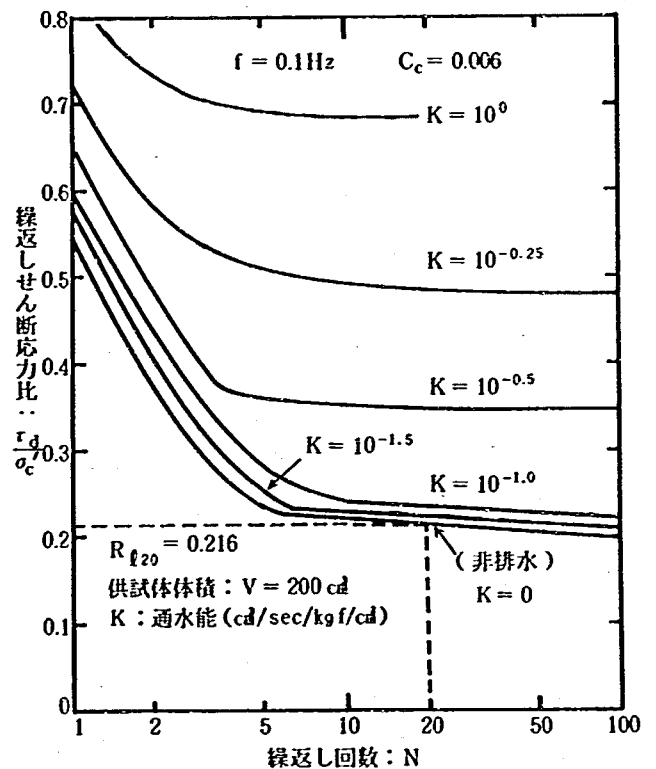


図-6.10 部分排水条件での液状化強度

同図には、実験結果もあわせて示している。ただし、実験結果は図-6.6に示したもののほか、バルブ開度（通水能）の異なる供試体の分（表-6.1）についてもプロットしているが、これらは繰返し回数20回での液状化応力比ではない。それは液状化したデータ（黒丸プロット）と非液状化データ（白丸プロット）の中間に位置する。計算・実験のいずれにおいても、通水能が大きいほど液状化応力比が大きくなるという

傾向が示されている。また、計算による曲線は液状化・非液状化プロットの間に位置しており、データ数は少ないものの実験と大きな矛盾は生じていない。

実験データの数も十分でなく、また計算においてもかなりの簡略化を行っているので確かな事は言えないが、大筋としては以上に示したような方法で数値シミュレーションを行うことにより堤体材料の透水性の影響を検討できる可能性はあると言えよう。

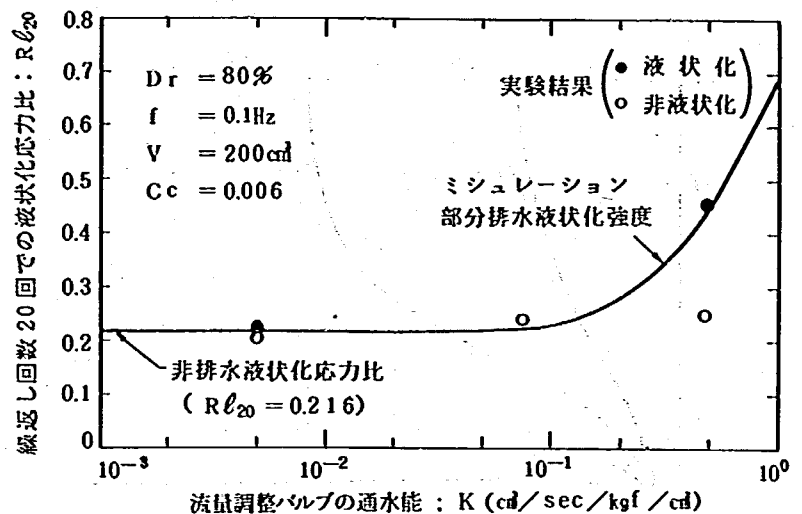


図-6.11 通水能と液状化強度の関係

7. 部分排水条件での動的強度に関するまとめ

ロックフィルダムにおけるロック材のように、粒状土でかつ透水性の高い材料について、地震時強度と透水性の関係を繰返しせん断試験および数値計算により調べ、以下の結果を得た。

- (1) 透水係数が 1 cm/sec 以下程度のロック材から成る大規模ロックフィルダムにおいて、ロックゾーンは地震時において十分な排水条件が必ずしも成り立たないようである。
- (2) 飽和砂の地震時液状化に対する強度は排水条件の影響を強く受ける。ここに、排水条件としては、透水係数、排水長などの排水抵抗の他、繰返し外力の周波数も含む。そして、非排水条件において数波の繰返しにより液状化を生じるような高い応力レベルの下では排水の効果はあまり発揮されず、排水による液状化強度の増加はさほど見られない。反対に、それよりやや低い応力レベルにおいては排水の効果は著しい。これらの結果として、部分排水条件下での液状化曲線（液状化応力比と繰返し回数の関係を表わす曲線）は、液状化下限値が引き上げられ、よりフラットな形となる。

また、地震時の粒状材の排水性に関わる補足的事項として以下の点が明らかになった。

- (3) 砂の透水性は、その密度が変化しても大きく変らない。
- (4) 体積圧縮係数 m_v は式 (5.2) で示されるように圧縮指数 C_c 、有効拘束圧 p 、および間隙比 e で規定されるが、この中で圧縮指数 C_c は正規圧密過程、繰返しせん断により過剰間隙水圧が発生した後の除荷過程および再圧密過程においてほぼ一定であった。しかし、砂がいったん液状化した後の再圧密過程においては圧縮指数（圧縮性）がかなり大きくなった。このことは、いったん液状化が生じると、一定の間隙水圧量を消散させるのにより多くの排水を要することを意味する。

参 考 文 献

- 1) 荒川直士, 木全俊雄, 近藤益央, 小原利美: 排水条件を考慮した液状化強度, 第18回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 541~542, 1983.
- 2) Breth, H. and Schwab, H.H.: Liquefaction of a Fully Saturated Sand Under Anisotropic Initial States of Stress in a Controlled Drainage System, Proc. of DMSR77, Vol. 2, Sept., 1977.
- 3) 土質工学会: 土質地震工学, p. 73, 1983.
- 4) Ishihara, K., Lysmer, J., Yasuda, S. and Hirao, H.: Prediction of Liquefaction in Sand Deposits During Earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 1~16, 1976.
- 5) 古賀泰之, 間三男, 三木英夫, 神保広光, 熊崎光吉: 水浸砂層の液状化沈下現象に関する振動実験, 土木研究所資料第1063号, 1975.
- 6) Lee, K.L. and Fitton, J.A.: Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil, ASTM, STP 450, 1968.
- 7) Lee, K.L. and Focht, J.A.: Liquefaction Potential at Ekofisk Tank in North Sea, J. GED, Proc. ASCE, Vol. 101, No. GT1, pp. 1~18, 1975.
- 8) 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, 1985年2月.
- 9) 松尾修, 武藤正人, 古賀泰之: 飽和砂の繰返し三軸圧縮試験におけるひずみ量の予測, 第22回土質工学研究発表会講演集, pp. 571~572, 1987.
- 10) Martin, G.R., Finn, W.D.L. and Seed, H.B.: Fundamental of Liquefaction Under Cyclic Loading, J. GED, Proc. ASCE, Vol. 101, No. GT5, pp. 423~438, 1975.
- 11) Miura, S. and Toki, S.: A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand, Vol. 22, No. 1, pp. 61~77, 1982.
- 12) (社)日本大ダム会議: 第2次改訂ダム設計基準, 1978年8月.
- 13) 大原資生, 山本哲郎: 飽和砂の液状化に及ぼす排水の影響に関する振動台実験, 土と基礎, Vol. 30, No. 8, Ser. No. 295, pp. 17~22, Aug. 1982.
- 14) 佐々木康, 古賀泰之, 松尾 修, 舟見清己, 館山 悟: 河床砂レキ層の耐震安定性に関する調査報告, 土木研究所資料第1669号, 1981年3月.
- 15) たとえばSeed, H.B. and Booker, J.R.: Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, J. GED, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT7, pp. 757~768, 1977.
- 16) Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J.: Pore-Pressure Changes During Soil Liquefaction, J. GED, Proc. ASCE, Vol. 102, No. GT4, pp. 323~346, 1976.

- 17) Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fujii, S. : Effect of Sample Preparation Method on Cyclic Undrained Strength of Sand in Triaxial and Torsional Shear Tests, Bulletin of ERS, No. 17, 1984.
- 18) 梅原靖文, 善功企, 浜田浩二 : 排水効果を考慮した飽和砂の液状化強度, 港湾技術研究所報告, 第20卷, 第1号, pp. 3~33, 1981.
- 19) 吉見吉昭 : 砂地盤の液状化, 技報堂出版(株), p. 42, 1980.
- 20) Yoshimi, Y., Kuwabara, F. and Tokimatsu, K. : One-Dimensional Volume Change Characteristics of Sands Under Very Low Confining Stresses, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 3, pp. 51~60, 1975.

II. 締め固められた土の動的強度

(100)

1. 概 要

本研究は、フィルダム堤体のように、土を締め固めることにより築造された土構造物の動的（地震時）強度特性を実験的に調べようとしたものである。試料は、アースダムの築堤材料として用いられる粒度範囲の土質材料である。締め固めの方法としては、ランマーによる標準的な室内締め固め、および振動ローラーとタイヤローラーによる実機転圧の合計3種類の方法を用いた。動的強度特性を調べるための試験は、締め固められた土を供試体として用いて、非排水繰返し三軸圧縮試験を行った。

以上の試験の結果から、締め固め方法と締め固め密度の関係、およびそれらと動的強度との関係について整理し、考察を加えている。

本編では第3章および第4章に実験の内容を示している。第3章に述べる実験では、室内突固めにより作成された供試体について、締め固め含水比、締め固めエネルギーと動的強度の関係を調べている。第4章に述べる実験では、室内突固めおよび実機転圧の2つの締め固め方法を用い、それぞれの締め固め方法に対して第3章と同様の検討を行うとともに、締め固め方法と動的強度の関係について調べている。

2. 研究の目的と背景

本研究は、アースダムの築堤材料として用いられるような土質材料の、締め固めに関する諸条件と動的強度特性との関係を調べることを目的としている。主な具体的内容は次の通りである。

- (1) 締め固められた土の繰返し外力に対する一般的な動的変形・強度特性を知ること。
- (2) 締め固めの方法の違いによる土の締め固め特性の違い、および動的強度特性の違いを知ること。

この研究を実施するに至ったことの背景として以下の諸点が挙げられる。

- (1) フィルダム堤体のように締め固めによって形式された土質材料の力学特性は、締め固め時の含水比、エネルギー、締め固め方法（転圧機械の種類）、あるいは現在の応力条件、含水条件などの種々の要因によって複雑に変化することが知られている。堤体のすべり破壊に対する安定を検討するに当たっては土のせん断強度特性を知ることが特に重要である。このため、締め固められた土の静的せん断強度特性についてはこれまでにかなりの研究の積み重ねがなされてきている。¹⁾しかし、地震時の安定性を考える場合には、土の動的強度特性を知ることが基本的に重要であるが、締め固め土についてこの点はほとんど明らかにされていない。
- (2) 一般に、ロックフィルダムにおけるロック材やコア材のせん断強度定数は、現場と同じ含水比の下で、同じ密度になるように室内で締め固められた供試体をせん断試験に供して求められているようである。つまり、現位置でのせん断強度特性を、室内供試体のそれで代用している訳であるが、静的排水せん断強度特性については、同じ密度・含水比であれば両者にあまり大きな違いはないとされており、問題は少ないと考えられる。しかし、動的強度特性についてもこのようなことが成り立つかどうかはほとんど調べられていないのが実状である。

さて、締め固められた土の動的強度特性に関する既往の研究についてここで簡単にまとめてみることにする。

まず、締め固め土の動的強度特性を支配する要因の1つとして、土粒子構造が考えられる。同じ土であっても、堆積のしかたあるいは締め固めの方法の違いにより異なってくる。このような観点から、砂質土の液化強度特性について、供試体作成方法の影響を調べた研究がある。

Ladd (1974,²⁾ 1977³⁾) は、振動締め固めおよび突固めの2種類の供試体作成方法、2種類の含水比において一定の密度の三軸供試体を作成し、液化強度の違いを調べている。その結果、乾燥状態で締め固められた供試体の液化強度がかなり小さいこと、振動締め固めより突固めの方がやや強くなることを示した。Mulilis ら (1977)⁴⁾ は、Monterey 砂について Ladd³⁾ と同様の検討を行っている。ただし、供試体作成方法は多様であり、上に示した方法の他、空中落下法、水中落下法、棒突き法などを含んでいる。彼らの実験結果によれば、空中落下法、水中落下法による供試体が最も弱い液化強度を示している。また、乾燥状態で締め固められた場合に弱くなることは Ladd³⁾ の結果と同様である。Tatsuoka ら (1984)⁵⁾ は、豊浦砂および浅間山砂に対してより系統的な実験的検討を行っている。実験の結果として、供試体作成法の違いは三軸よりもねじり単純せん断試験においてより明瞭に顕われること、湿潤状態で振動により

締め固めると液状化強度が最も高くなり、逆に空中落下法で最も低くなること等を示している。

以上が、砂の液状化強度を求める室内試験において、供試体作成法の影響について検討した研究である。この影響は主に土粒子構造の違いによるものと考えられるが、上に示した研究のうち土粒子構造について観察し考察を加えているのはMulilisら⁷⁾のもののみである。

また、締め固め土の動的強度に着目したものとして、三原(1984,⁵⁾ 1985⁶⁾)の研究がある。この研究は砂質土を用いて築造される盛土構造物の液状化抵抗を調べる目的で行われたものである。締め固め方法はJISに規定された突固め試験方法に準拠したものである。実験の結果として、締め固めエネルギーが大きいとき、また、最適含水比付近で締め固めたときに液状化強度は高くなること、同じ締め固め密度であっても締め固め含水比が異なると液状化強度が異なることを示している。

この他、実際に転圧機械で締め固められた土に対して動的強度を調べた研究は見当たらない。

3. 室内突固めにより締め固められた土の動的強動特性

3.1 実験の目的と概要

室内突固めにより締め固められた土の動的強度が、突固めエネルギーや突固め時の含水比の違いによって、どのような影響を受けるかを調べるため、実験を行った。

試料を4種類の含水比に調整した後、それぞれの試料をモールド内にランマーで突き固めた。突固めエネルギーは、突固め回数を変化させ2種類とした。突き固めた試料は、モールドをはずした後成形し、静的強度および動的強度を求めるため、三軸圧縮試験および繰返し三軸試験を行った。また、各々の試験において拘束圧の影響を調べるため、拘束圧を変えた試験も行った。

3.2 実験方法および実験条件

3.2.1 試料

実験に用いた砂は、千葉県長柄町の長柄ダムサイト上流の土砂採取場で採取した砂（以下成田砂と呼ぶ。）を用いた。表-3.1に成田砂の主な物性値を示す。また、図-3.1に粒度分布を示す。この試料はシルト質細砂（SM）に分類される。図-3.1中の実線と破線は各々異なる土のうから採取した試料の粒度分布を表わしているが、これから試料自体のバラツキは小さいものといえる。

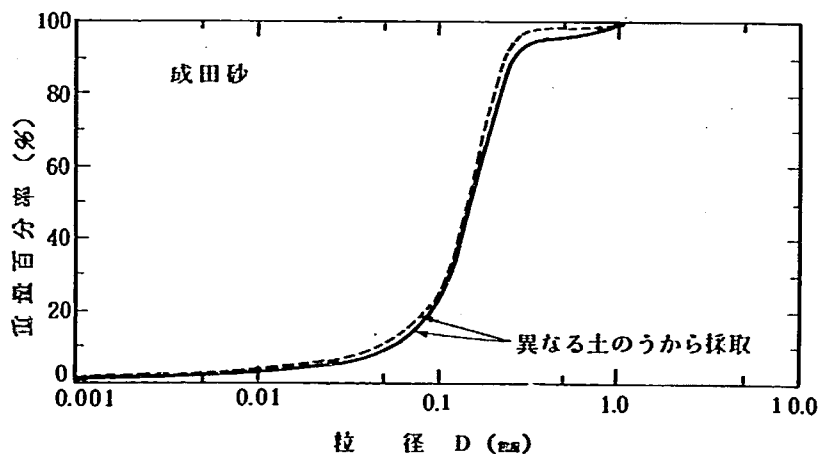


図-3.1 成田砂の粒度分布

表-3.1 成田砂の主な物性値

項 目		物 性 値
比 重 G_s		2.652
粒 度 分 布	0.84 mm	98.4 %
	0.42	95.6 %
	0.25	93.6 %
	0.105	23.1 %
	0.074	15.9 %
60%粒径		0.17 mm
30%粒径		0.11 mm
10%粒径		0.053 mm
均等係数 U_c		3.19
曲率係数 $U_{c'}$		1.55
最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$		1.201 g/cm ³
最小乾燥密度 $\rho_{d \min}$		0.903 g/cm ³
$e_{\max}$		1.208
$e_{\min}$		0.937

3.2.2 実験の手順

図-3.2に実験の手順の概略を示す。以下、その詳細について述べる。

(1) 締め固め試験

突固め含水比の決定や供試体作成時の試料の必要重量の計算のために前もって締め固め試験を行う。図-3.3に締め固め試験の手順

の概要を示す。また表-3.2に締め固め試験の概要を示す。基本的には、土質試験法による1-1-c)法に準じているが、突固め回数は、3.2.3で述べる突固めエネルギーと同じとした。また、突固めは、自動締め固め試験装置を用いた。

(2) 供試体作成

供試体作成の手順の概要を図-3.4に示す。

まず、現場から搬入した試料は、室内で $w = 5 \sim 10\%$ まで乾燥させる。乾燥後、試料を4.76mmのフルイにかけ、粗粒分を除去する。次に試料を所定の含水比に調整するが、調整の方法は、ハカリ上のバットに試料を入れ、そこへ噴霧器で水を所定の量加える。加える水の量は、調整前の試料の含水比を測定しておき、調整後の目標の含水比と試料の重量からあらかじめ計算しておく。加水した試料を均質となるよう十分混合し、バットにラップフィルムをかぶせ、2～3時間放置する。

供試体は、上述した試料をモールドで突き固め、直径 $\phi = 10\text{cm}$ 、高さ $H = 13 \sim 15\text{cm}$ の切出し用ブロックを作成し、このブロックより直径 $\phi = 5\text{cm}$ 、高さ $H = 10\text{cm}$ の供試体を切り出し整形する。図-3.5に供試体の整形概要を示す。以下、詳細を説明する。

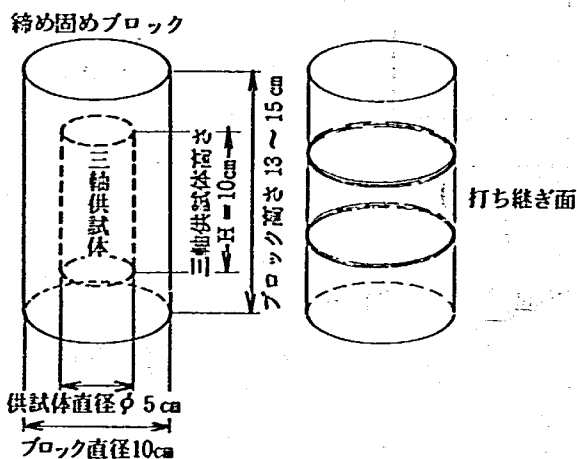


図-3.5 供試体の整形概要

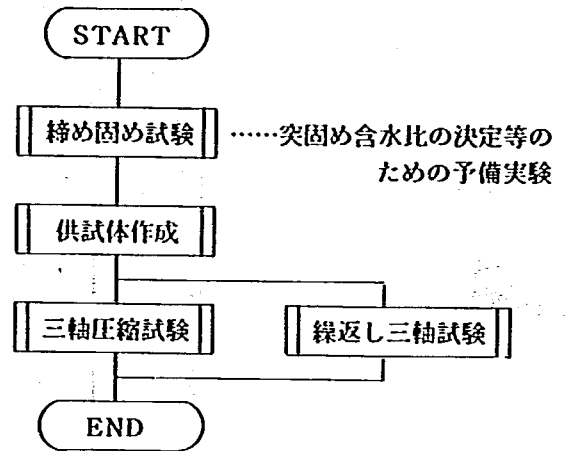


図-3.2 実験の概要

表-3.2 締め固め試験の概要

締め固め条件 \ 締め固めエネルギー E_c	100 %	200 %
呼 び 名	1-1-(C)法	
モ ー ル ド 内 径	10cm	
突 固 め 層 数	3層	
各層当りの突固め回数(回)	25回	50回
ラ ン マ ー 重 量	2.5 kgf	
落 下 高 さ	30cm	
許 容 最 大 粒 径	4.76 mm	

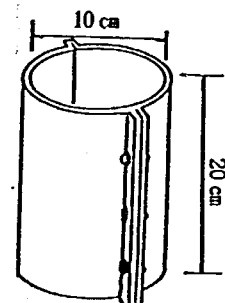


図-3.6 供試体作成用
2割モールド

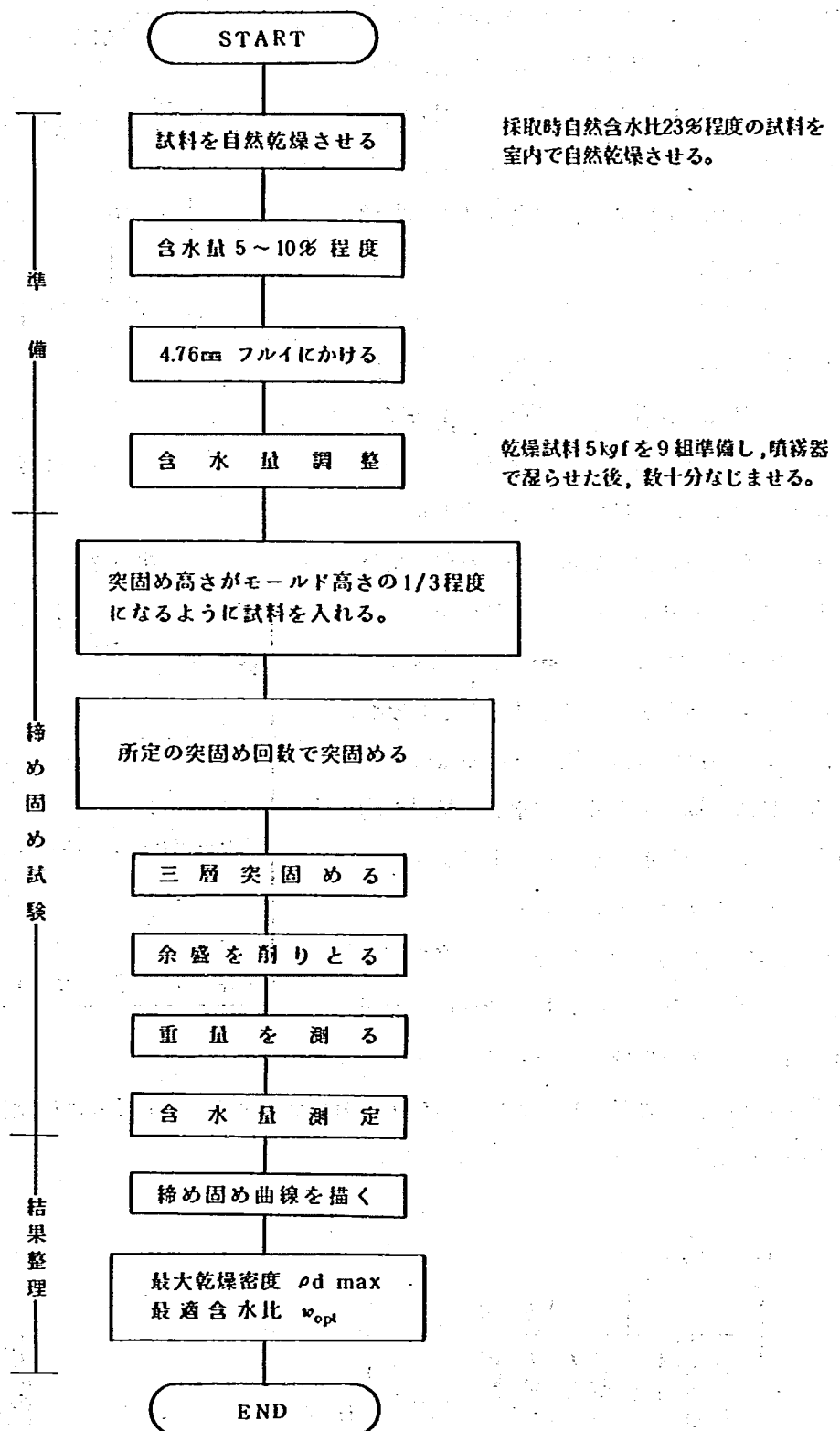


図- 3.3 締め固め試験の手順の概要

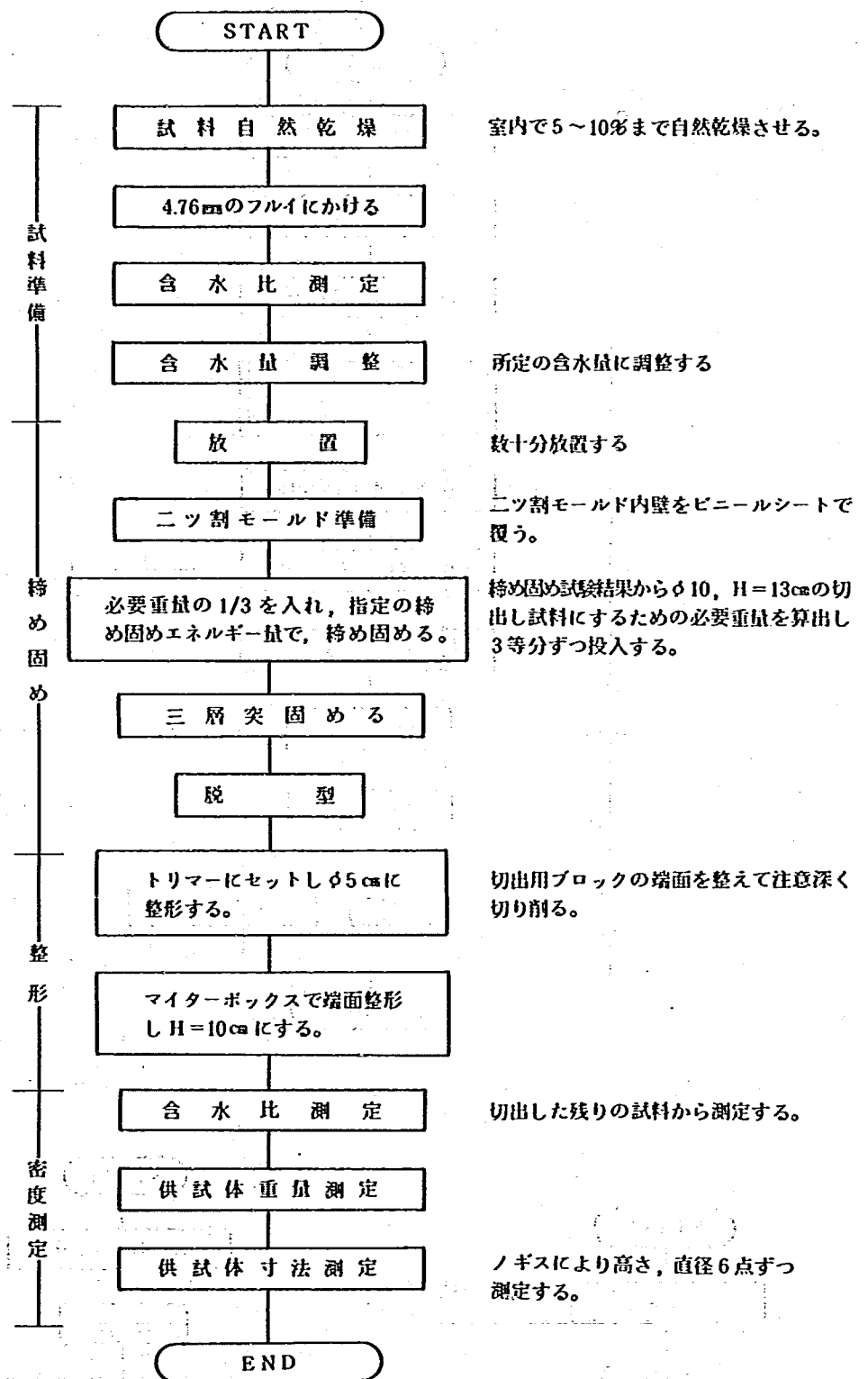
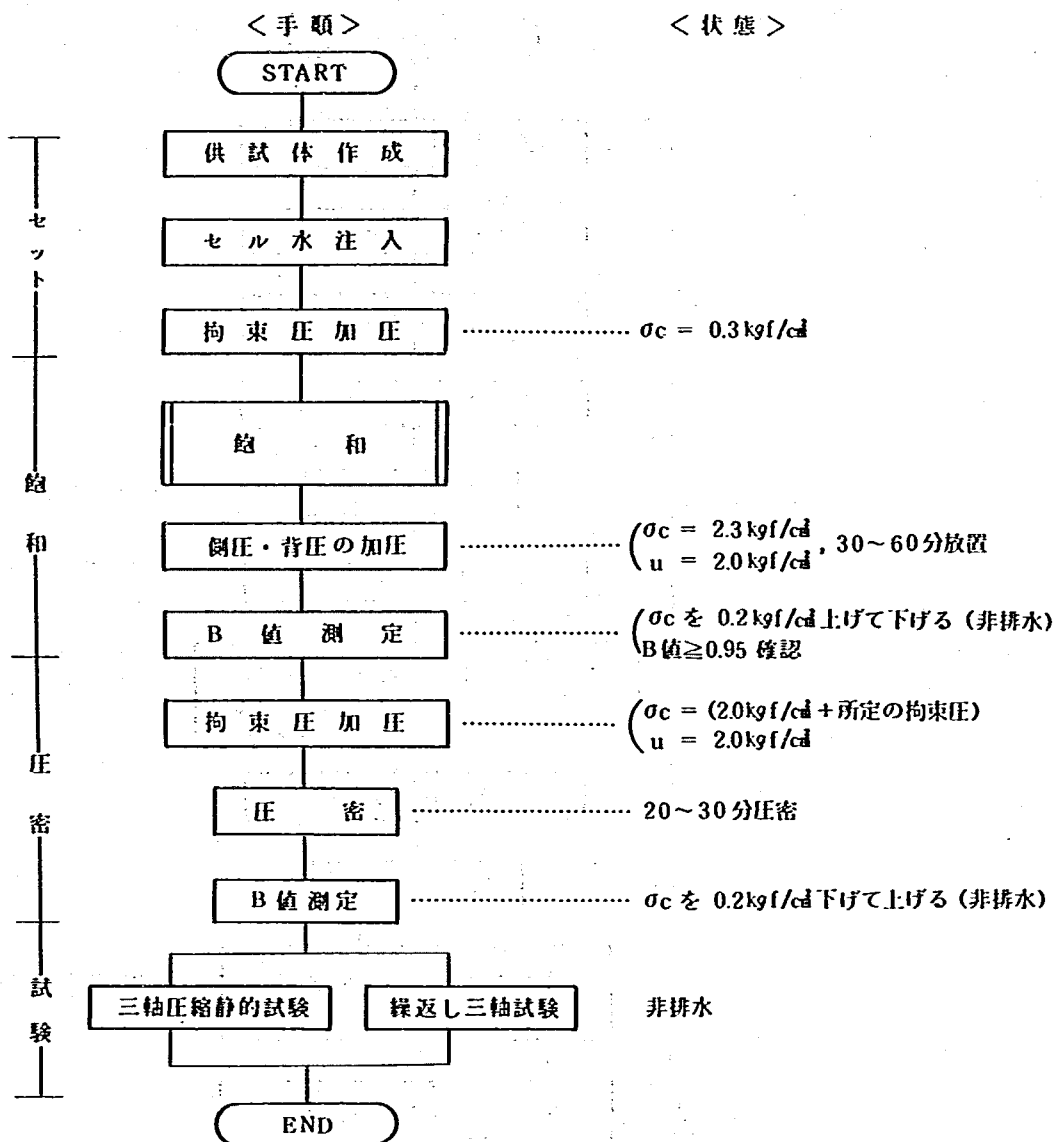
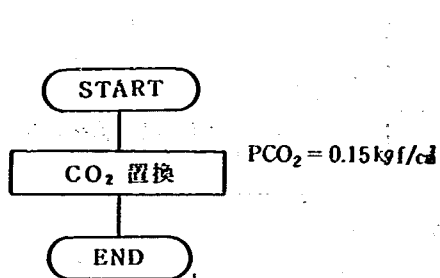


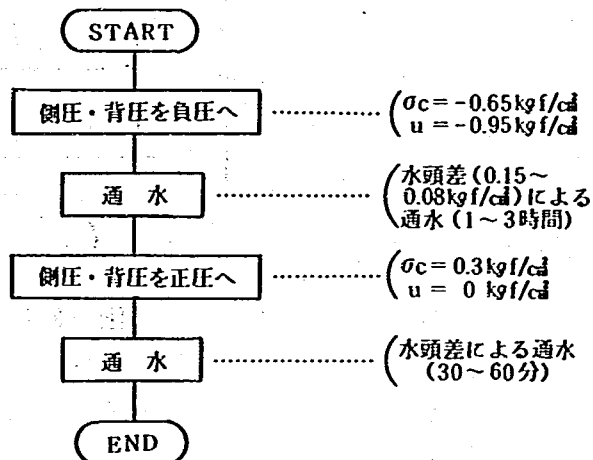
図-3.4 供試体作成手順



(a) 概略



(b) 飽和の方法①



(c) 飽和の方法②

図-3.7 実験の手順

試料を突き固めるためのモールドには、図-3.6に示す二ッ割りモールドを用いた。二ッ割りモールドの内壁は、突き固める前にラップフィルムで覆う。

モールドを自動締め固め試験装置に設置し、試料を必要重量の1/3づつモールドに投入し、3層に分けて、所定のエネルギーで突き固める。必要重量は、あらかじめ行った締め固め試験の結果から、切出し用ブロックを作成するのに必要な重量を求める。突固め後、モールドから脱型し、切出し用ブロックの端面を整える。切出しブロックをトリマーにセットし、注意深く削り、直径 $\phi = 5\text{ cm}$ に整形する。トリマーから取りはずした後、マイターボックスに入れ、端面整形を行い高さ $H = 10\text{ cm}$ として、供試体はでき上がる。

でき上がった供試体の乾燥密度 ρ_d を求めるため、切り出した残りの試料から含水比を測定し、供試体の重量、高さ、直径を測定する。なお、重量の測定には、ひょう量 2 kgf 、感量 0.01 gf の電子天びんを用い、高さ及び直径の測定はノギスを用いた。

(3) 三軸圧縮試験および繰返し三軸試験

載荷までの実験の手順は、三軸圧縮試験、繰返し三軸試験とも同様である。図-3.7にその手順を示す。おおむね、土質試験法の三軸圧縮試験のCU試験に準じている。

ベディスタルの上に、ポーラスストーンとろ紙を置き、その上に供試体をのせる。ストレッチャーでメンブレンを拡張させ、供試体の上からかぶせる。ストレッチャーをはずしメンブレンをベディスタルにゴムバンドで固定し、供試体の上部にろ紙、ポーラスストーンをのせる。この時、ポーラスストーン、ろ紙は乾燥しているものを使用する。次に、三軸室の上板、支柱、ロッド、キャップが一体となったものを三軸室下板と固定する。この時、ロッドはクランプで固定しておくが、供試体にあたらないように注意する。ロッドとキャップの重量が供試体に加わらぬようにするため、図-3.8に示すようにカウンターウェイトを取り付け、その後、クランプをはずし、供試体とキャップを接触させ、メンブレンをキャップにゴムバンドで固定する。その後、アクリル円筒をかぶせ、セル内にセル水を注入する。注入時に中の空気が圧縮して拘束圧がかかぬように三軸室上板から空気を解放させておく。セル水の注入後、側圧を $0.2 \sim 0.3\text{ kgf/cm}^2$ 程度かける。

次に、供試体の飽和となるが、試料の通水の良し悪しにより、次の2つの方法のいずれかあるいは併用によって行った。

① 二酸化炭素で供試体内の空気を置換する方法

供試体内の空気を、水溶性に富んだ二酸化炭素に置き換える。供試体の下部から上部へ、二酸化炭素を $0.1 \sim 0.15\text{ kgf/cm}^2$ で約10分間通す。その後、約 0.1 kgf/cm^2 の静水圧で、供試体下部から上部へ3~8時間通水する。

② 初期拘束圧を保ちながら、供試体内を真空にする方法⁹⁾

供試体内を真空として、空気の無い状態で通水する。図-3.9に示すように、真空ポンプに側圧調整用と供試体内圧調整用の2つの真空圧レギュレーターを並列に接続し、側圧調整用のレギュレーターの出力は、三軸セルの側圧供給口に接続し、供試体内圧調整用のレギュレーターの出力は、供試体の上下面それぞれ

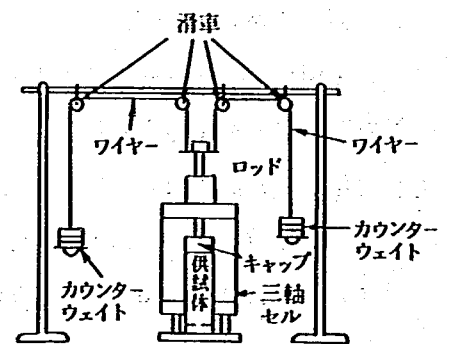


図-3.8 キャップとロッドの重さをキャンセルする機構

に接続したタンクにつなぐ。

側圧、供試体内圧それぞれの調整用レギュレーターを使い、供試体の初期有効拘束圧を保ちながら、供試体内圧をなるべく真空に近づける。その後、供試体下部から上部へ $0.1 \sim 0.15 \text{ kgf/cm}^2$ の静水圧で脱気水を1～3時間通水させる。通水後、有効拘束圧を保ちながら、供試体内圧を大気圧にもどし、更に静水圧で3～8時間通水させる。

②の方法は、シルト分を多く含み、通水が困難な供試体の飽和には有効な方法である。今回の実験では、①、②の方法を併用した。

飽和した供試体に背圧を 2.0 kgf/cm^2 加圧する。この段階で一度B値を計っておく。その後、所定の拘束圧を加え、20～30分圧密する。圧密終了後、B値を測定する。この段階でのB値の測定は、拘束圧を減少させて行う。B値は0.95以上であることを確認するが、B値が0.95未満の場合は、もう一度通水しなおす等して条件を満たすよう努力した。

载荷は、载荷アクチュエーターとロッドを接続し、三軸圧縮試験では、定ひずみ速度で载荷し、繰返し三軸試験では、応力制御で一定振幅の正弦波で载荷した。図-3.10、表-3.3に使用した三軸試験機の概要を示す。

3.2.3 実験の条件

実験の目的から、突固め含水比、突固めエネルギーの2項目を変化させることとし、さらに、拘束圧の違いが強度に与える影響を調べるため拘束圧も変化させた。これらの組み合わせの内訳を、三軸圧縮試験、繰返し三軸試験に分けて表-3.4に示す。また、表-3.5にそれらの試験条件の詳細を示す。

突固めエネルギーは、突固めエネルギーを変化させて、異なるエネルギーを得、土質試験法による1-1-c)法の標準の一層あたりの突固め回数25回を突固めエネルギー $E_c = 100\%$ とし、 $E_c = 200\%$ はその倍の突固め回数の50回とした。

突固め含水比は、3.2.2で述べた締固め試験の

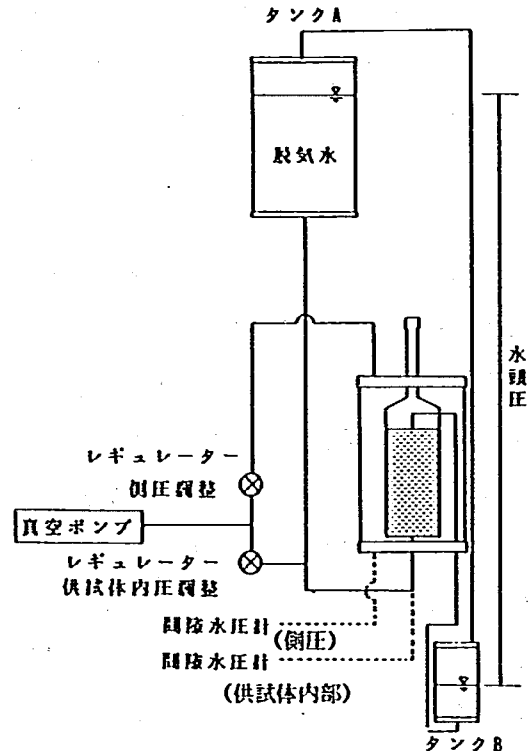


図-3.9 供試体内を真空にする方法

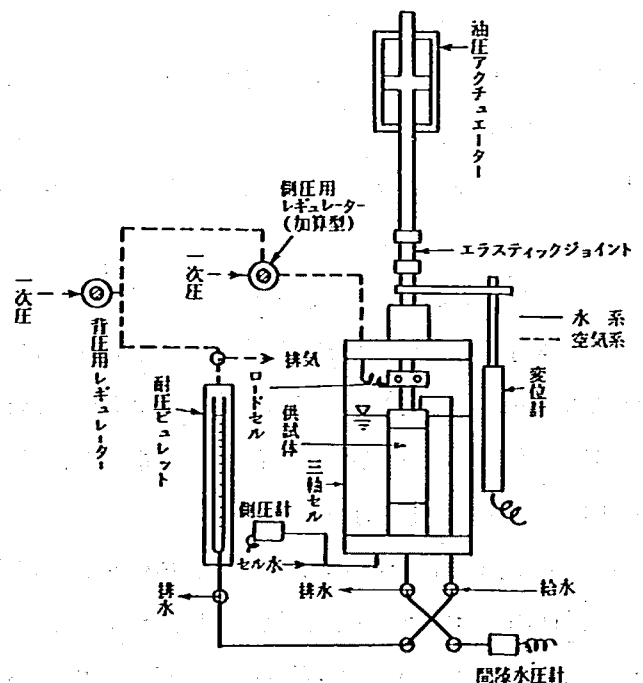


図-3.10 三軸試験機概要図

表-3.3 三軸試験機の概要

項 目		仕 様
名 称		繰返し三軸圧縮試験機
製 造 者		丸東製作所(株)
載 荷	軸 圧	最大 5.25 kgf/cm ² (静的+動的)
	側 圧	最大 5.0 kgf/cm ² (静的)
	軸圧荷重方式	油圧サーボ (静的・動的)
	側圧荷重方式	コンプレッサー→レギュレーターまたは油圧サーボ
発振器	波 形	三角波・正弦波・矩形波・外部入力波
	周 波 数	0.05 ~ 5.0 Hz
計 測 機 器	軸 荷 重	ひずみゲージ式 容 量 100 kgf
	側 圧	ひずみゲージ式 容 量 5.0 kgf/cm ²
	間 隙 水 圧	ひずみゲージ式 容 量 5.0 kgf/cm ²
	軸 変 位	差動トランス式 容 量 ±50mm
	排 水 量	ビューレット, 容量50cc, 最小目盛 0.1 cc

表-3.4 試験の内訳

	突 固 め エネルギー Ec	突固め回数 (回)	突固め含水比 w (%)	拘 束 圧 σ_c (kgf/cm ²)	供試体数
三軸圧縮試験	100 %	25	15, 20, 25, 30	1.0	4
			25	0.2, 0.5, 2.0	3
	200 %	50	15, 20, 25, 30	1.0	4
繰返し三軸試験	100 %	25	15, 20, 25, 30	1.0	16
			25	0.5, 2.0	6
	200 %	50	15, 20, 25, 30	1.0	16

表-3.5 三軸試験の条件

三軸圧縮試験	圧 縮 方 法	ひずみ制御による
	ひずみ速度	1.0 %/min
	載 荷 範 囲	間隙水圧のピークが得られるまで
繰返し三軸試験	載 荷 方 法	応 力 制 御
	載 荷 波 形	正 弦 波
	周 波 数	0.1 Hz
	載 荷 範 囲	両振幅 D.A. ≥ 10%, あるいは繰返し回数 N 500回以上

結果(図-3.11に示す。)から、15%、20%、25%、30%の4種類とした。

拘束圧については、1.0 kgf/cm²を標準とし、その他三軸圧縮試験では、0.2、0.5、2.0 kgf/cm²、繰返し三軸試験では、0.5、2.0 kgf/cm²の拘束圧での実験も行った。

三軸圧縮試験、繰返し三軸試験の排水条件は、どちらも圧密非排水せん断試験とした。

今回行った三軸圧縮試験の試験条件の一覧を試験結果と合わせ表-3.6に示す。また、繰返し三軸試験についても同様に表-3.7に示す。

3.3 実験結果

3.3.1 供試体作成結果

図-3.12に、作成した供試体の乾燥密度と含水比の関係を示す。図中の破線、一点鎖線は、それぞれ突固めエネルギー $E_c=100\%$ および $E_c=200\%$ 時の締め固め曲線である。各供試体の状態は、突固めエネルギー $E_c=100\%$ 、200%どちらにおいても、乾燥密度や含水比のバラツキが若干あるものの、締め固め曲線に沿ったものとなっている。この供試体の乾燥密度や含水比のバラツキは、次のことが要因となっていると考えられる。①締め固め試験のモールドではカラーが付き、供試体作成用のモールドとは若干高さが異なるため、単位体積あたりの締め固めエネルギーが異なり、三軸供試体の方が締め固め試料より締め固めエネルギーが15%程度大きいこと、②供試体を作成するための切出しブロックは、モールドから抜き出すときに応力解放が生じること、③切出しブロックから三軸供試体へ整形するときに、乱れを伴うこと。

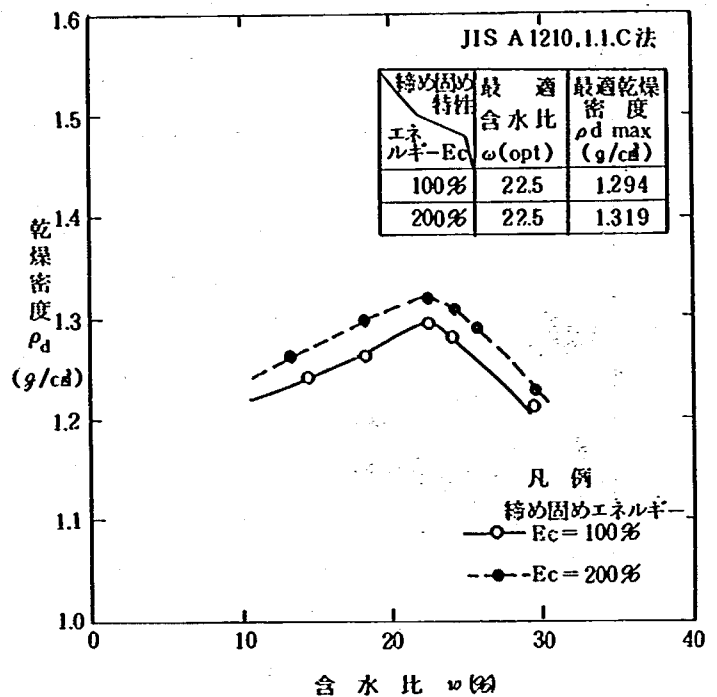


図-3.11 締め固め試験結果

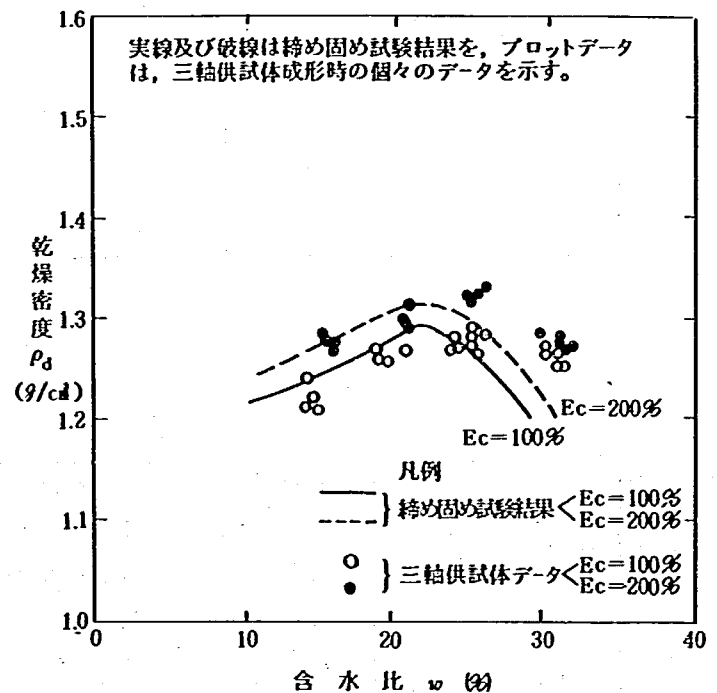


図-3.12 三軸供試体作成結果

表-3.6 静的非排水三軸圧縮試験一覧

突 固 め		供 試 体 作 製 時 状 況									圧 密 後 供 試 体 状 況					試 験 条 件				試 験 結 果				
突固めエネルギー Ec (%)	目標突固め含水比 w (%)	供 試 体 No	湿 潤 重 量 m (g)	供試体寸法		含 水 比 w (%)	湿 潤 密 度 ρ_{tc} (g/cm ³)	乾 燥 密 度 ρ_{dc} (g/cm ³)	相 対 密 度 Dr _o (%)	間 隙 比 e _o	圧 密 量 V (cm ³)	湿 潤 密 度 ρ_{tc} (g/cm ³)	乾 燥 密 度 ρ_{dc} (g/cm ³)	相 対 密 度 Dr _c (%)	間 隙 比 e _c	B 値		拘 束 圧 σ_c' (kgf/cm ²)	軸 ひずみ 速度 %/min	間隙水圧ピーク時			最 大 主 応 力 比 (σ_1'/σ_3') _{max}	ϕ' $\sin^{-1} \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \right)$
				高 さ Ho (cm)	直 径 Do (cm)											間 隙 水 圧 u (kgf/cm ²)	軸 歪 量 ϵ_1 (%)			軸 差 応 力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/cm ²)				
				背 圧 加 圧 後	圧 密 後																			
100	15	1	272.5	9.99	5.00	15.0	1.389	1.208	102	1.20	1.30	1.398	1.216	104	2.18	0.96	0.93	1.0	1.0	0.43	1.2	1.6	3.464	33.5
	20	2	301.2	10.00	5.01	20.8	1.528	1.265	115	1.10	1.45	1.620	1.275	118	1.08	0.95	0.92	1.0	1.0	0.44	1.1	1.7	4.204	38
	25	3	310.8	9.95	5.02	24.2	1.578	1.270	116	1.09	1.85	1.592	1.282	119	1.07	0.96	0.94	1.0	1.0	0.38	1.0	1.5	4.815	41
	30	4	330.1	9.99	5.06	30.1	1.643	1.263	115	1.10	1.10	1.652	1.270	116	1.09	0.96	0.87	1.0	1.0	0.38	1.1	1.6	6.188	46.2
	25	5	321.4	10.01	5.03	26.2	1.616	1.281	119	1.07	0.95	1.624	1.287	120	1.06	0.95	0.91	0.2	1.0	0.04	0.5	0.6	7.18	49.1
	25	6	319.0	10.01	5.02	26.2	1.610	1.276	118	1.08	0.80	1.617	1.281	119	1.07	0.95	0.90	0.5	1.0	0.12	0.7	1.0	6.22	46.3
	25	7	319.7	10.02	5.02	25.2	1.612	1.287	120	1.06	3.05	1.622	1.307	125	1.03	0.96	0.90	2.0	1.0	0.89	0.6	3.2	4.57	39.9
200	15	1	295.4	10.03	5.04	15.3	1.476	1.279	118	1.07	2.15	1.491	1.293	122	1.05	0.97	0.90	1.0	1.0	0.40	0.6	1.8	5.975	45.5
	20	2	311.1	10.03	5.03	20.5	1.561	1.295	120	1.05	1.50	1.572	1.305	124	1.03	0.95	0.89	1.0	1.0	0.40	0.7	2.2	7.078	48.8
	25	3	336.4	10.01	5.06	25.9	1.671	1.327	129	1.00	0.30	1.673	1.329	129	0.99	0.95	0.88	1.0	1.0	0.36	0.8	2.0	7.269	49.3
	30	4	328.4	10.01	5.01	31.5	1.664	1.266	116	1.09	1.25	1.675	1.274	117	1.08	0.96	0.90	1.0	1.0	0.38	0.6	1.5	7.078	48.8

*) 突固めエネルギー E_c は 2.5 kgf のランマーを30cmの高さから25回自由落下させて突固める状態を 100 %とし、50回自由落下させて突固める状態を 200 %とする。

表-3.7 繰返し三軸試験一覧

突固め条件 特め固めエネルギー Ec (%)		目標突固め含水比 w (%)	供試体作製時状況										圧密後供試体状況					試験条件			試験結果			液状化強度 R _{l20}	
			供試体 No	湿潤質量 m (g)	供試体寸法		含水率 w (%)	湿潤密度 ρ _{lo} (g/cd)	乾燥密度 ρ _{do} (g/cd)	相対密度 D _r (%)	間隙比 e _o	排水量 V (cc)	湿潤密度 ρ _{lc} (g/cd)	乾燥密度 ρ _{dc} (g/cd)	相対密度 D _{rc} (%)	間隙比 e _c	拘束圧 σ' _c (kgf/cd)	B 値		せん断応力比 R	初期液状化回数 N _f (回)	両板幅 DA=5.0% DA=10.0%			
					高さ H _o (cm)	直径 D _o (cm)												背圧加圧後	圧密後			再振回数 N _t (回)	繰返し回数 N _t (回)		
100	15	1	274.5	10.02	5.02	14.2	1.384	1.212	113	1.19	1.50	1.395	1.221	115	1.17	1.0	0.95	0.89	0.31	9	6	10	0.24	109	109
		2	281.9	10.01	5.03	14.2	1.417	1.241	120	1.14	2.20	1.433	1.255	124	1.11	-	0.95	0.89	0.24	105	104	109			
		3	278.1	10.05	5.02	14.8	1.398	1.218	114	1.18	1.45	1.409	1.227	117	1.16	-	0.96	0.92	0.27	18	16	19			
		4	276.1	10.02	5.01	14.8	1.398	1.218	114	1.18	1.45	1.409	1.227	117	1.16	-	0.96	0.93	0.22	46	43	46			
	20	1	298.0	10.03	5.01	19.1	1.507	1.265	126	1.09	1.40	1.517	1.274	129	1.08	-	0.96	0.90	0.30	48	55	68	0.31	580	580
		2	298.5	10.04	5.02	19.1	1.502	1.261	125	1.10	1.90	1.518	1.273	128	1.08	-	0.95	0.89	0.21	575	575	580			
		3	296.0	10.02	5.01	19.6	1.503	1.257	124	1.11	1.55	1.515	1.267	127	1.08	-	0.95	0.90	0.34	17	14	19			
		4	299.5	10.03	5.02	19.0	1.509	1.268	127	1.09	0.95	1.516	1.274	129	1.08	-	0.98	0.91	0.44	9	7	11			
	25	1	313.5	10.02	5.02	24.4	1.581	1.271	128	1.09	1.40	1.592	1.280	130	1.07	-	0.95	0.87	0.27	42	35	44	0.33	26	26
		2	313.3	10.04	5.01	25.3	1.583	1.263	125	1.10	1.25	1.603	1.271	128	1.09	-	0.96	0.90	0.34	24	18	26			
		3	319.7	10.03	5.03	25.3	1.604	1.280	130	1.07	1.55	1.616	1.290	132	1.06	-	0.95	0.92	0.40	18	13	20			
		4	313.9	10.02	5.02	23.9	1.583	1.278	130	1.08	1.55	1.593	1.288	132	1.06	-	0.95	0.90	0.24	58	51	60			
	30	1	328.4	10.01	5.05	30.9	1.638	1.251	123	1.12	1.90	1.653	1.263	126	1.10	-	0.97	0.94	0.27	48	45	60	0.36	550	550
		2	332.4	10.00	5.06	30.9	1.653	1.263	126	1.10	1.60	1.666	1.273	128	1.08	-	0.98	0.93	0.29	510	530	550			
		3	330.1	10.01	5.06	31.1	1.640	1.251	123	1.12	1.75	1.654	1.262	126	1.10	-	0.97	0.92	0.42	10	17	30			
		4	331.2	10.01	5.05	30.1	1.652	1.270	128	1.09	2.15	1.670	1.284	131	1.07	-	0.96	0.90	0.37	30	34	53			
		5	321.4	10.05	5.02	25.2	1.616	1.291	135	1.05	0.65	1.609	1.295	134	1.05	0.5	0.95	0.87	0.30	27	28	35			
		6	318.1	10.02	5.02	24.4	1.604	1.281	130	1.07	1.55	1.606	1.291	133	1.05	-	0.95	0.90	0.37	14	12	18			
	25	7	315.1	10.02	5.01	24.2	1.595	1.284	131	1.07	1.05	1.603	1.291	133	1.05	-	0.96	0.91	0.25	75	75	87	0.27	50	50
		8	310.8	10.03	5.01	23.9	1.572	1.269	127	1.09	2.60	1.593	1.286	132	1.06	2.0	0.96	0.91	0.25	48	42	50			
		9	315.3	10.00	5.02	25.1	1.593	1.273	128	1.08	2.90	1.616	1.292	130	1.05	-	0.98	0.92	0.28	19	15	21			
		10	317.9	10.01	5.02	25.1	1.605	1.283	131	1.07	2.90	1.621	1.302	135	1.04	-	0.95	0.89	0.32	17	11	20			
200	15	1	294.4	10.05	5.03	15.2	1.474	1.279	118	1.07	1.55	1.485	1.289	132	1.06	1.0	0.95	0.92	0.38	(10)	9	(-)	0.30	14	14
		2	290.7	10.02	5.02	15.9	1.466	1.265	115	1.10	1.25	1.475	1.273	128	1.08	-	0.96	0.90	0.36	12	11	14			
		3	292.8	10.01	5.06	15.9	1.478	1.275	118	1.08	1.40	1.488	1.285	131	1.06	-	0.95	0.91	0.29	55	51	60			
		4	295.1	10.03	5.05	15.3	1.469	1.274	117	1.08	1.70	1.481	1.285	131	1.06	-	0.95	0.92	0.24	85	81	90			
	20	1	309.4	10.04	5.02	20.9	1.557	1.288	120	1.06	1.55	1.569	1.298	134	1.04	-	0.95	0.90	0.37	35	30	42	0.38	42	42
		2	315.2	10.06	5.02	20.9	1.583	1.309	125	1.03	1.50	1.595	1.319	139	1.01	-	0.97	0.91	0.31	105	98	(-)			
		3	311.5	10.05	5.03	20.7	1.560	1.292	121	1.05	1.70	1.560	1.303	136	1.04	-	0.96	0.89	0.45	9	7	13			
		4	309.0	10.02	5.02	20.7	1.558	1.291	121	1.05	1.65	1.571	1.302	135	1.04	-	0.98	0.96	0.32	180	170	(-)			
	25	1	325.8	10.00	5.02	24.7	1.646	1.320	140	1.01	1.35	1.657	1.329	142	1.00	-	0.95	0.89	0.34	85	100	(-)	0.54	45	45
		2	329.8	10.01	5.05	24.9	1.644	1.316	139	1.01	1.80	1.671	1.328	143	1.00	-	0.97	0.92	0.43	25	35	45			
		3	328.8	10.02	5.04	24.9	1.645	1.317	139	1.01	1.35	1.655	1.326	141	1.00	-	0.96	0.90	0.28	(-)	(-)	(-)			
		4	332.9	10.02	5.05	25.5	1.659	1.322	140	1.01	1.20	1.669	1.330	142	0.99	-	0.98	0.91	0.50	21	26	58			
	30	1	328.5	10.01	5.02	31.2	1.658	1.264	126	1.10	1.40	1.670	1.273	128	1.08	-	0.98	0.92	0.40	25	24	38	0.35	17	17
		2	328.5	10.01	5.02	30.9	1.670	1.276	129	1.08	1.40	1.682	1.285	132	1.06	-	0.97	0.95	0.43	14	10	17			
		3	332.7	10.00	5.05	30.9	1.661	1.269	127	1.09	1.55	1.674	1.279	130	1.04	-	0.97	0.92	0.33	35	30	43			
		4	333.5	9.99	5.06	29.5	1.660	1.282	131	1.07	1.25	1.671	1.290	132	1.06	-	0.98	0.93	0.30	120	120	133			

備考

(-) 繰返し回数500回以内に液状化しない。

(・) 供試体が伸びたために、10%重まで、試験を続行できなかったケース。

*) 突固めエネルギーは2.5kgfランマーを30cmの高さから25回自由落下させたものを100%, 50回自由落下させたものを200%とした。

**) 破壊規準: 初期液状化

備考

(-) 繰返し回数 500 回以内に液状化しない。

(・) 供試体が伸びたために、10%重まで、試験を続行できなかったケース。

*) 突固めエネルギーは 2.5 kgf ランマーを 30cm の高さから 25 回自由落下させたものを 100%, 50 回自由落下させたものを 200% とした。

**) 破壊規準: 初期液状化

また、図-3.12から突固めエネルギー $E_c=100\%$ の場合と $E_c=200\%$ の場合では、突固めエネルギー $E_c=200\%$ の場合の方が、 $E_c=100\%$ の場合より密度が大きいことがわかる。

3.3.2 三軸圧縮試験結果とその考察

三軸圧縮試験は、3.2で述べたようにCU試験を行っている。したがって、以下に述べることは、締め固めの土の非排水強度特性である。

図-3.13は突固めエネルギー $E_c=100\%$ で作成した供試体での試験結果である。軸差応力は、軸ひずみが増加するに従い、すべての突固め含水比の条件の供試体で、軸差応力は上に凸の曲線を描きながら増加する傾向を示している。また、間ゲキ水圧は、軸ひずみの増加に従い、いったん正の間ゲキ水圧が発生し、その後ピークに達したのち減少していく。この間ゲキ水圧の変化は、供試体のダイレイタンス特性を表わし、軸ひずみが小さなきは、圧縮傾向を示し、軸ひずみが増していくと膨張傾向に転じることを表わしている。

軸差応力と軸ひずみの関係は、突固め含水比の違いによって異なっているが、特に突固め含水比15%の供試体は、間ゲキ水圧がピークに達した後では、他の含水比条件に比較して、同じ軸ひずみに対して軸差

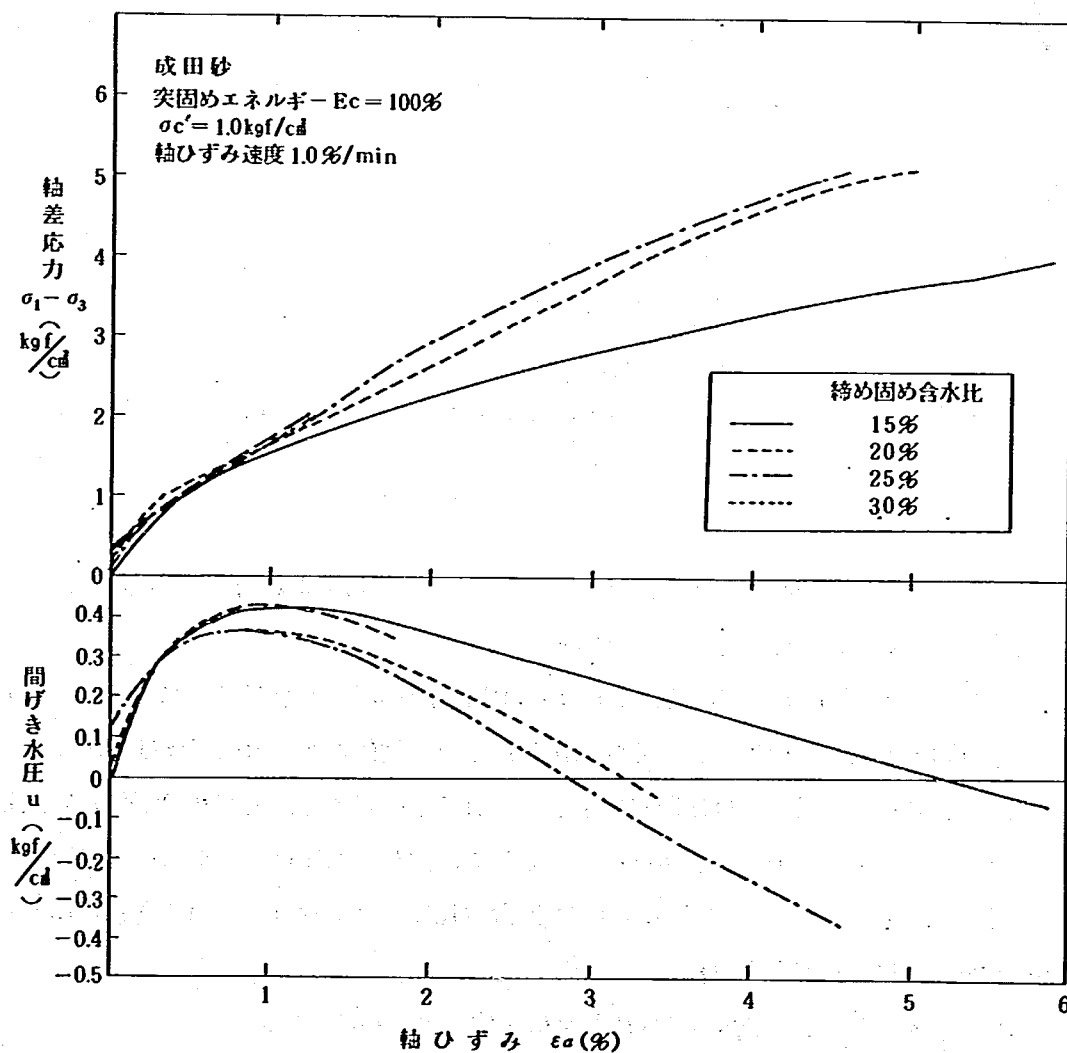


図-3.13 三軸圧縮非排水試験結果
—— 軸差応力、間ゲキ水圧と軸ひずみの関係 (突固めエネルギー $E_c=100\%$)

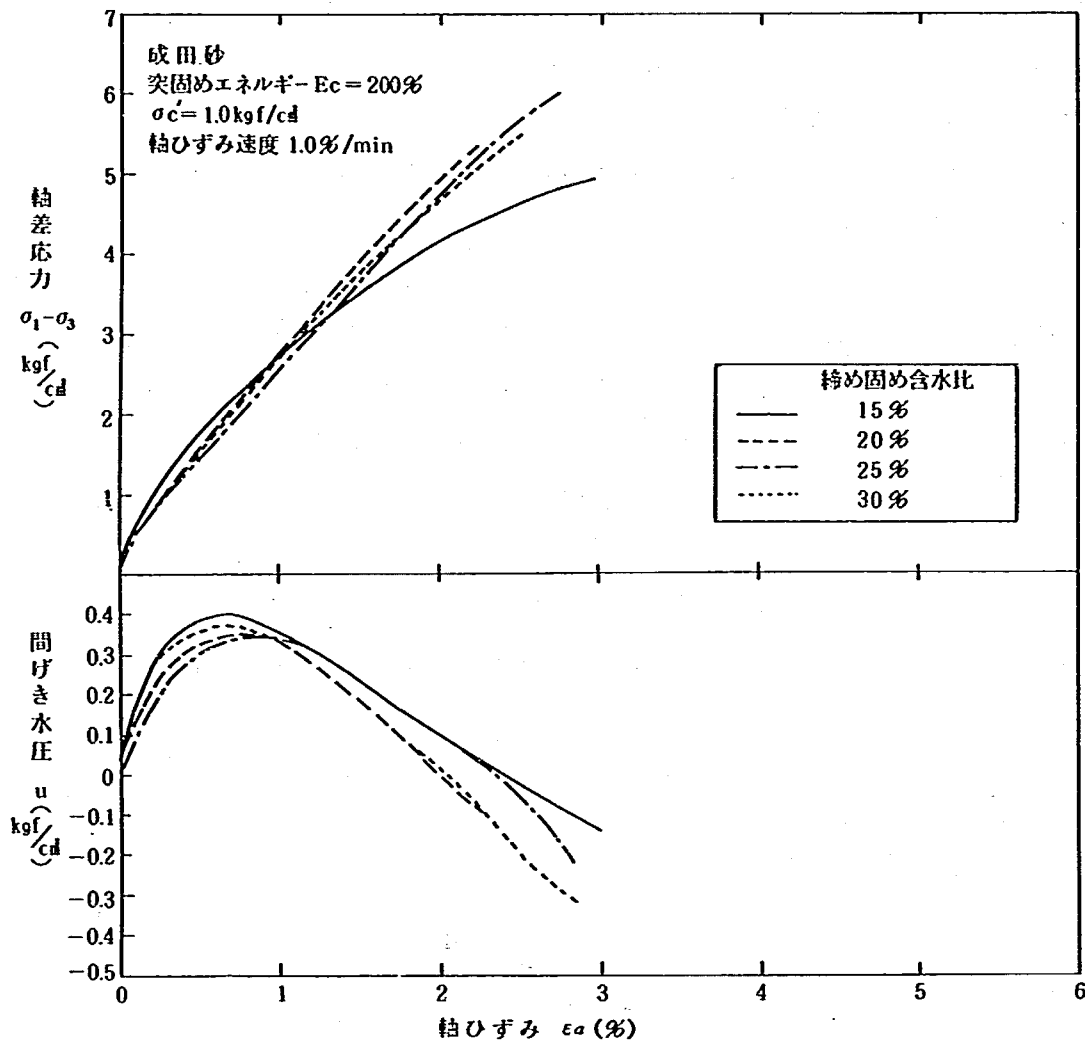


図-3.14 三軸圧縮非排水試験結果
 — 軸差応力、間ゲキ水圧と軸ひずみの関係 (突固めエネルギー $E_c=200\%$)

応力は小さい。

この要因として、供試体の乾燥密度等により、ダイレイタンス特性が異なるためと考えられる。このことは、間ゲキ水圧と軸ひずみの関係をみるとより明確である。

間ゲキ水圧は、軸ひずみ $\epsilon_a=1\%$ 程度するとき、全ての突固め含水比条件の供試体において、ピークに達している。そのときの間ゲキ水圧の値は、突固め含水比が15%の供試体と20%の供試体はほぼ同じ値を示し、また25%の供試体と30%の供試体がほぼ同じ値を示す。前者と後者では、前者の突固め含水比が15%と20%の供試体の方が間ゲキ水圧のピーク値は高い。そして、間ゲキ水圧はピークに達した後、軸ひずみが増すに従い減少していくが、その減少の割合は各含水比により異なり、突固め含水比15%のものが一番ゆるやかで、20%、30%、25%と急になっていく。

図-3.14は、突固めエネルギー $E_c=200\%$ で作成した供試体での試験結果である。

軸ひずみの増加に伴う、軸差応力、間ゲキ水圧の変化は、突固めエネルギー $E_c=100\%$ の場合と同じ傾向であるが、軸差応力は、突固めエネルギー $E_c=100\%$ の場合に比べ、同じ軸ひずみでは $E_c=200\%$ の方が大き

い。間ゲキ水圧においても、間ゲキ水圧のピークに達する軸ひずみは約0.6%であり、突固めエネルギー $E_c = 100\%$ の場合に比較して小さいひずみで間ゲキ水圧がピークに達する。そのピークの値は突固め含水比15%の供試体で一番高く、30%、20%、25%と低くなっていく。また、間ゲキ水圧ピーク後の間ゲキ水圧の減少の割合は、全ての突固め含水比条件において、突固めエネルギー $E_c = 100\%$ の場合に比較して急になっており、その間ゲキ水圧の減少割合は、突固めエネルギー $E_c = 100\%$ の場合と大小関係が異なり、突固め含水比15%の供試体が一番ゆるやかで、25%、30%、20%と急になっていく。

以上のように試験結果は、供試体の乾燥密度等の違いによるダイレイタンスー特性の違いをよく表わしている。

次に応力径路について整理する。図-3.15に突固めエネルギー $E_c = 100\%$ における各含水比条件での応力径路、図-3.16に突固めエネルギー $E_c = 200\%$ における各含水比条件での応力径路を示す。どちらのエネルギーの場合においても、一般的に密な砂の応力径路と同じ傾向を示している。軸差応力、間ゲキ水圧と軸ひずみの関係では突固め含水比の違いは明らかであったが、応力径路ではあまり差がみられない。

また、図-3.16と3.17を比較してみると突固めエネルギー $E_c = 100\%$ の場合に比較して $E_c = 200\%$ の場合の方が正のダイレイタンスー効果が著しく、密度が高いことを裏付けている。

各々の試験結果から、土の静的強度を表わす指標として最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ を求め、突固め含水比 w 、乾燥密度 ρ_d との関係について整理し考察する。

図-3.17に最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ と突固め含水比 w の関係を、供試体の圧密前の乾燥密度の平均値と突固め含水比との関係とともに示す。

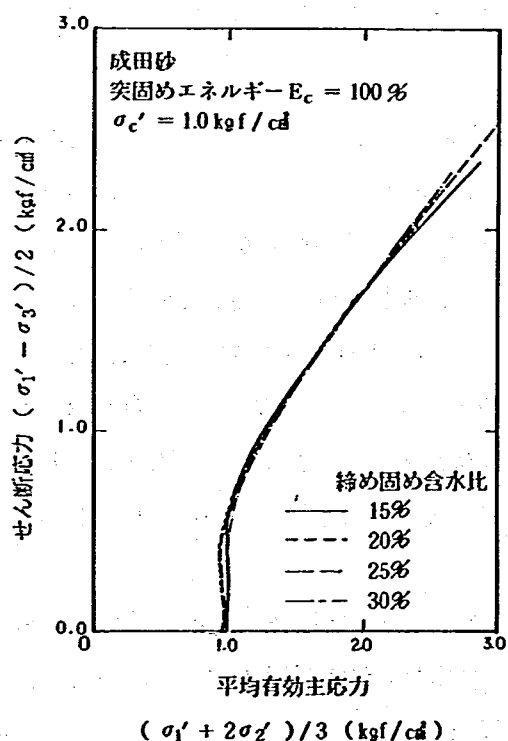


図-3.15 応力径路図
(突固めエネルギー $E_c = 100\%$)

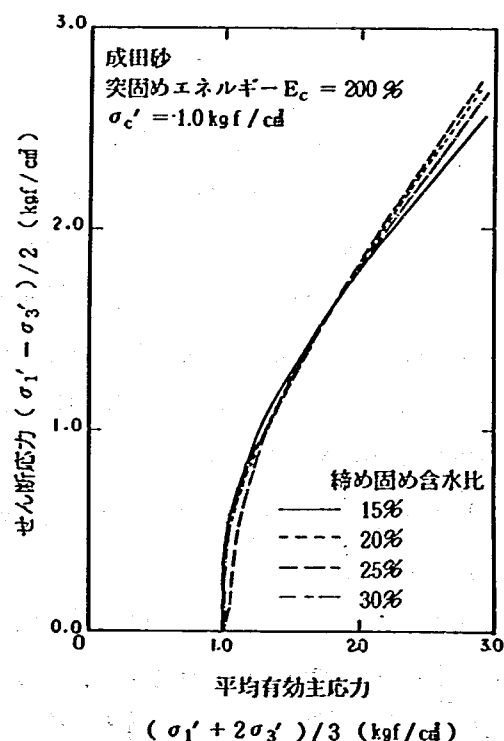


図-3.16 応力径路図
(突固めエネルギー $E_c = 200\%$)

突固めエネルギー $E_c = 200\%$ の場合は、乾燥密度と対応して乾燥密度 ρ_d が大きくなると最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ も大きくなる。したがって、最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ は最適含水比 w_{opt} 付近で最大となる。しかし、突固めエネルギー $E_c = 100\%$ の場合、供試体の乾燥密度は最適含水比 w_{opt} 付近で最大値を示すが、最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ は、突固め含水比とともに大きくなる傾向を示す。これは、静的非排水強度は、乾燥密度 ρ_d だけに左右されるものではないことを示しており、突固めエネルギーや突固めエネルギーによっても静的非排水強度は左右されると考える。また、一般的に締め固め土の水浸後の静的排水強度は、最適含水比 w_{opt} 付近でもっとも大きくなるといわれているが^{2),10)}、非排水強度については、ここに示したように単純ではない。

次に図-3.18に最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ と乾燥密度 ρ_d との関係を示す。プロットした点の側の数字は供試体作成時の突固め含水比である。この図から、静的非排水強度と乾燥密度の関係は、おおよそ乾燥密度とともに大きくはなっているが一意的でなく、突固め含水比の影響も明らかにある。含水比が乾燥側から最適含水比に近づくに従って、乾燥密度は増していき、静的非排水強度も増していく。最適含水比に達した後、さらに含水比を増していくと、突固めエネルギー $E_c = 100\%$ の場合では乾燥密度は小さくなっていくものの静的非排水強度は増加していく、また突固めエネルギー $E_c = 200\%$ の場合では、乾燥密度も静的非排水強度も下がっていくが、乾燥側から最適含水比に至るまでの強度よりは大きい。したがって、同じ突固めエネルギーにおいては、同一乾燥密度に対して、突固め含水比の違いにより、2つの静的非排水強度があることがわかる。

また、突固めエネルギー $E_c = 100\%$ 、突固め含水比 $w = 30\%$ の供試体と突固めエネルギー $E_c = 200\%$ 、突固め含水比 $w = 30\%$ の供試体とでは、乾燥密度 ρ_d 、突固め含水比 w がほぼ等しいにもかかわらず、最大主応力比 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ は異なる値を示す。このことは、乾燥密度、突固め含水比が同じでも、突固めエネルギーが異なれば静的非排水強度が異なることを示している。

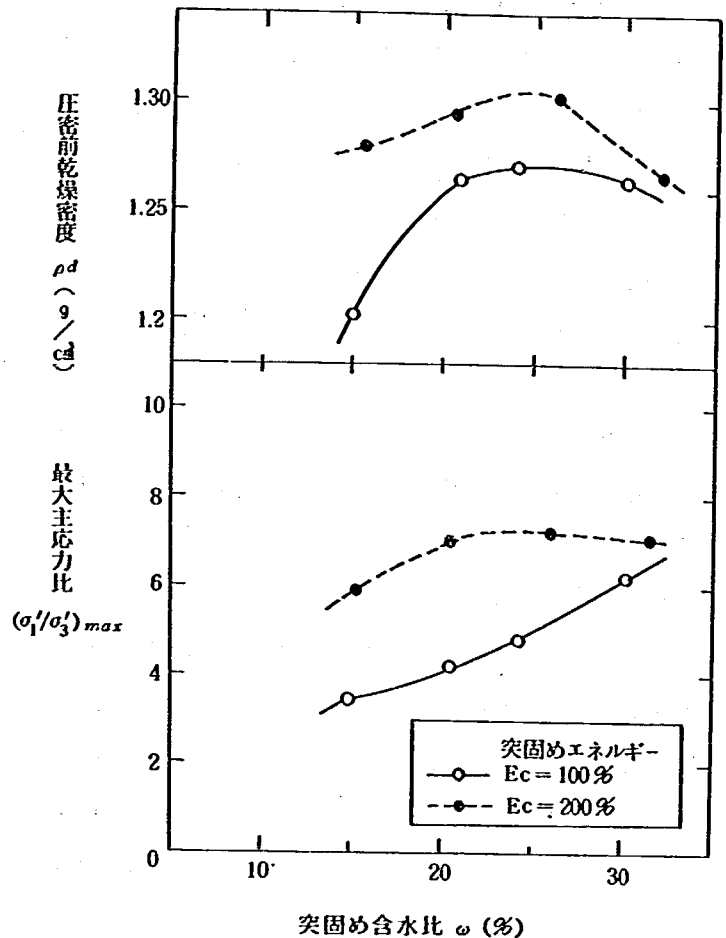


図-3.17 最大主応力比と突固め含水比の関係

このように同一試料において、静的非排水強度は、乾燥密度だけでなく、突固め含水比、突固めエネルギーによって変化するが、この要因として、突固めエネルギー、突固め含水比の違いにより土粒子構造が異なってくるためと考える。

次に、拘束圧の影響について述べる。図-3.19に拘束圧を変化させて行った一連の三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係と応力径路を示す。また、図-3.20に最大主応力比 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ と拘束圧 σ_c の関係を示す。これから、拘束圧が増加すると最大主応力比は減少する傾向にあることがわかる。これは過圧密的傾向を示しており、原位置において、表層に近いところでの強度については拘束圧の影響を考慮しなければならないと考えられる。

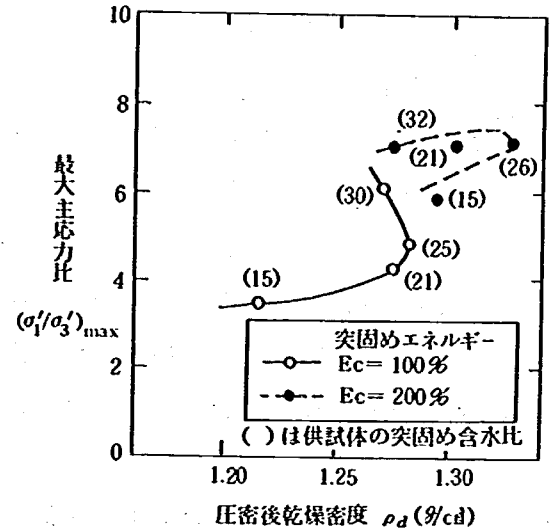
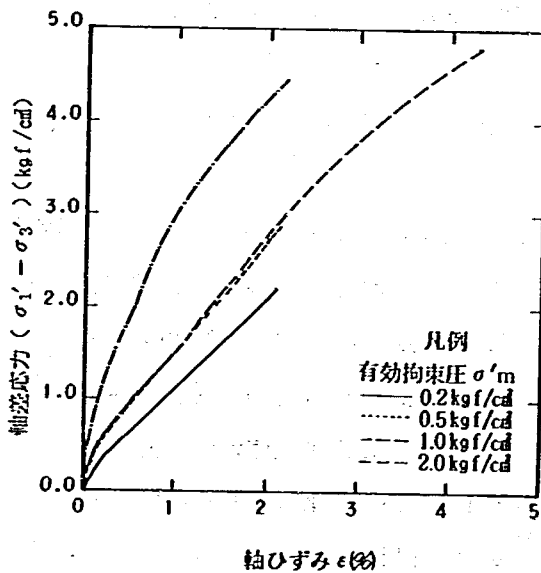
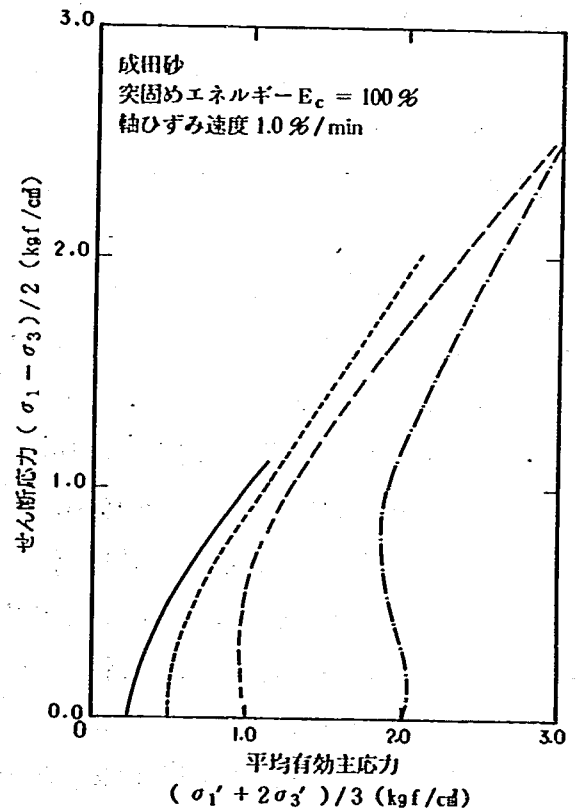


図-3.18 最大主応力比と圧密後乾燥密度の関係



(a) 軸差応力と軸ひずみの関係



(b) 応力径路図

図-3.19 静的試験結果 (突固めエネルギー $E_c=100\%$; 拘束圧を変化させた場合)

3.3.3 繰返し三軸試験結果とその考察

図-3.21に繰返し三軸試験の結果の一例を示す。軸荷重の繰返し回数が増すに従って過剰間隙水圧が上昇し、有効応力が減少していく過程がよくうかがえる。軸ひずみの時刻歴や応力ひずみ曲線から、引張り

方向にひずみが卓越していくことがわかるが、今回の実験では、すべてこの様な傾向にあった。

図-3.22に今回行ったすべての繰返し三軸試験における、繰返し応力比(R)($\sigma_d/2\sigma'_c$)と繰返し回数(N)の関係を突固めエネルギー、突固め含水比ごとに示した。この図から、今回の一連の実験は、比較的データがよくそろっていることがわかる。図-3.23には、図-3.23から初期液状化時の繰返し応力比(R)～繰返し回数(N)曲線を抽出し、突固めエネルギーごとに整理したものを示す。どちらの突固めエネルギーにおいても、突固め含水比15%供試体の強度が最小であり、また25%供試体の強度が最大であることがわかる。また、20%、30%供試体は、15%および25%供試体の中間に位置し、ほぼ同じ強度を示している。さらに、突固めエネルギーの違いについてみると、同一の含水比の下では突固めエネルギー $E_c=100\%$ 時よりも、突固めエネルギー $E_c=200\%$ 時の方が明らかに大きい。

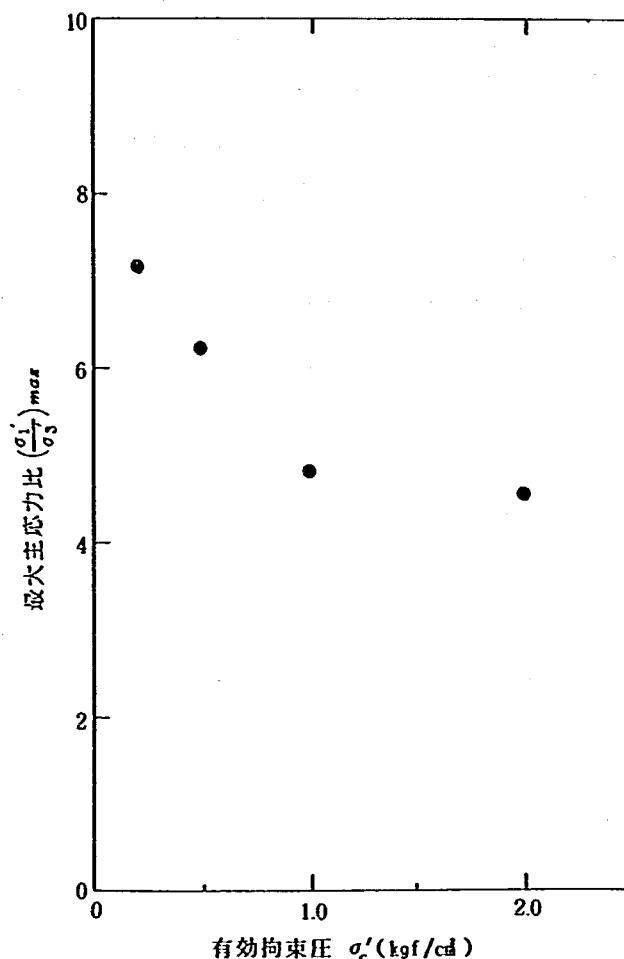


図-3.20 最大主応力比と有効拘束圧の関係

繰返し応力比(R)～繰返し回数(N)の関係において、

繰返し回数 $N=20$ 回のときに両振幅軸ひずみ $D.A. = 5\%$ に達する繰返し応力比 R を液状化強度 R_{l20} とし、3.2.3で示した表-3.7の繰返し三軸試験の一覧表に記した。

次に液状化強度 R_{l20} と突固め含水比 w との関係を、供試体の圧密後の乾燥密度の平均値と突固め含水比の関係とともに図-3.24に示す。この図から、液状化強度 R_{l20} と突固め含水比 w との関係は、突固めエネルギー $E_c=100\%$ のときは、含水比の増加に従って液状化強度も増加する。また、突固めエネルギー $E_c=200\%$ のときは、締め固め含水比の変化による乾燥密度と対応して、最適含水比付近で乾燥密度も液状化強度も最大となる山なりの曲線を描く。これらのことから、液状化強度は、供試体の乾燥密度との間に何らかの関係があることがわかる。また、突固めエネルギー $E_c=100\%$ の場合よりも $E_c=200\%$ の場合の方が液状化強度が大きいことも、液状化強度 R_{l20} と乾燥密度 ρ_d の間に相関があることを示唆している。

図-3.25は、液状化強度 R_{l20} と供試体の圧密後の乾燥密度 ρ_d の関係を示すが、この図から、単に乾燥密度 ρ_d だけで液状化強度 R_{l20} が規定されるのではないことがわかる。突固め含水比が最適含水比より乾燥側から増加していき、最適含水比に至るまでは、含水比の増加に従い乾燥密度が増加し、そのため液状化強度 R_{l20} も増加していく。さらに突固め含水比が増して、最適含水比より湿潤側となると、突固め含水比が増すことによって乾燥密度が低下し、液状化強度 R_{l20} も低下する。しかし、液状化強度 R_{l20} は、乾燥側から最適含水比に至るまでの液状化強度 R_{l20} と乾燥密度 ρ_d の関係を逆にたどらず、乾燥側から最適含水

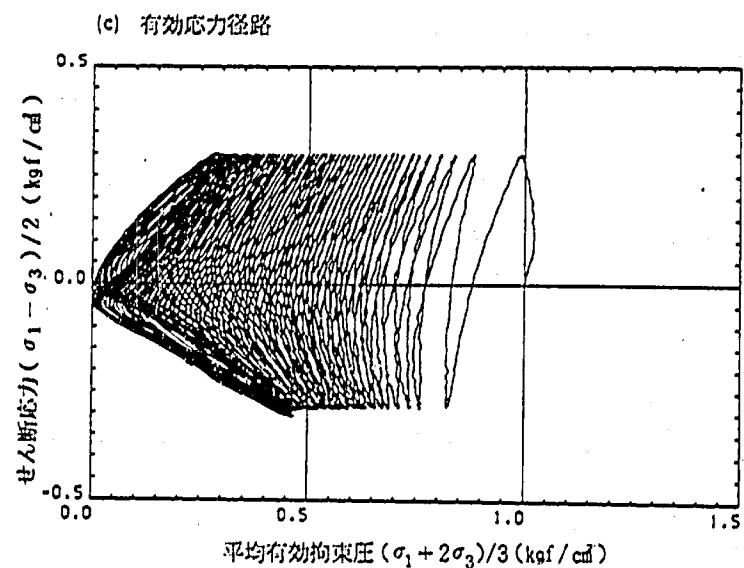
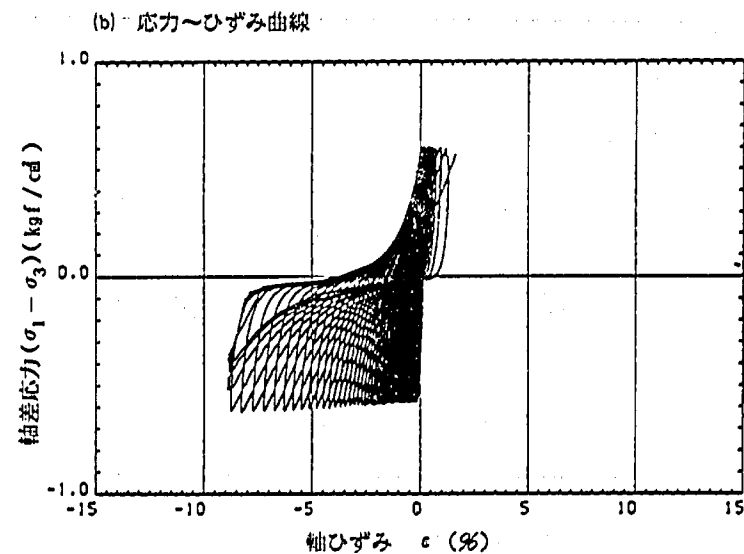
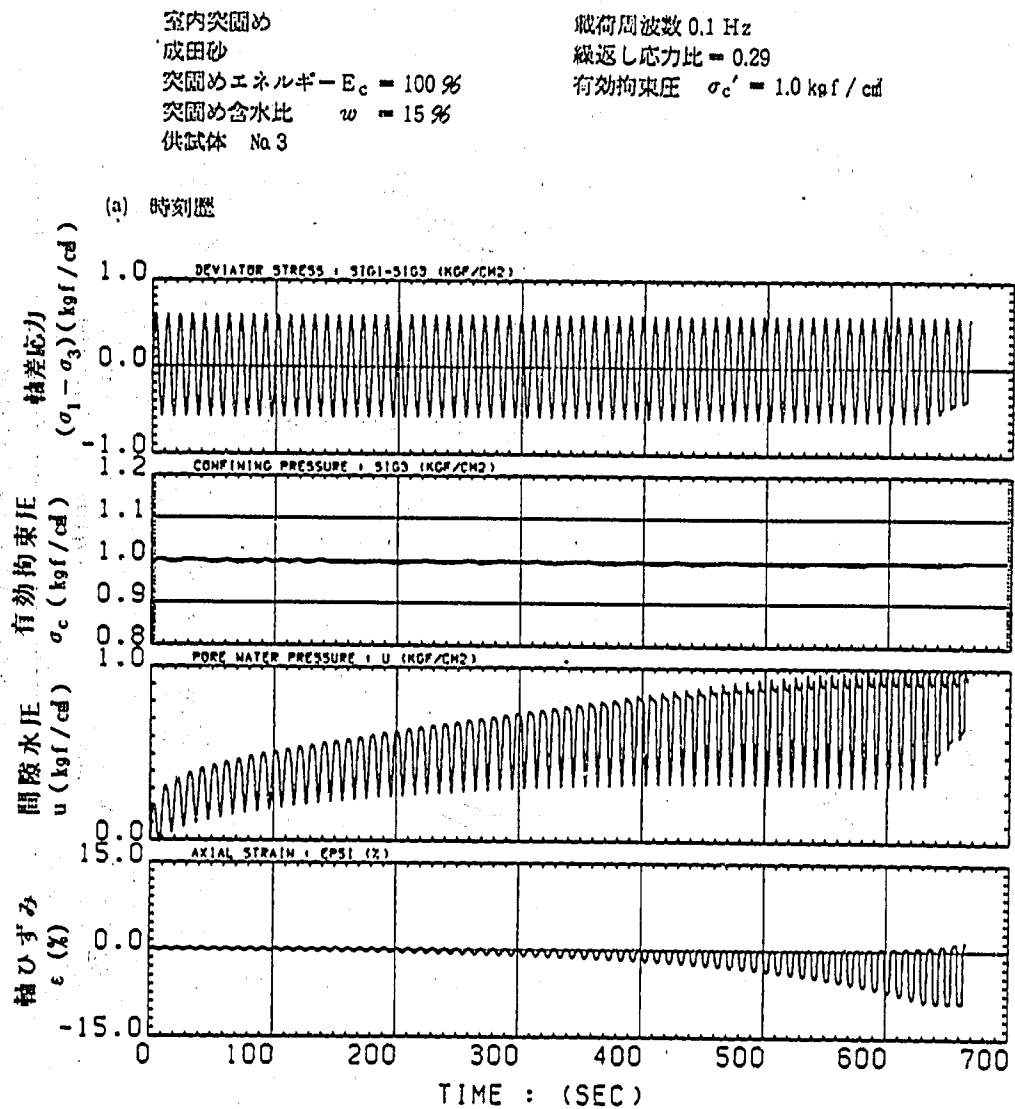


図 - 3.21 繰返し三軸試験結果の例

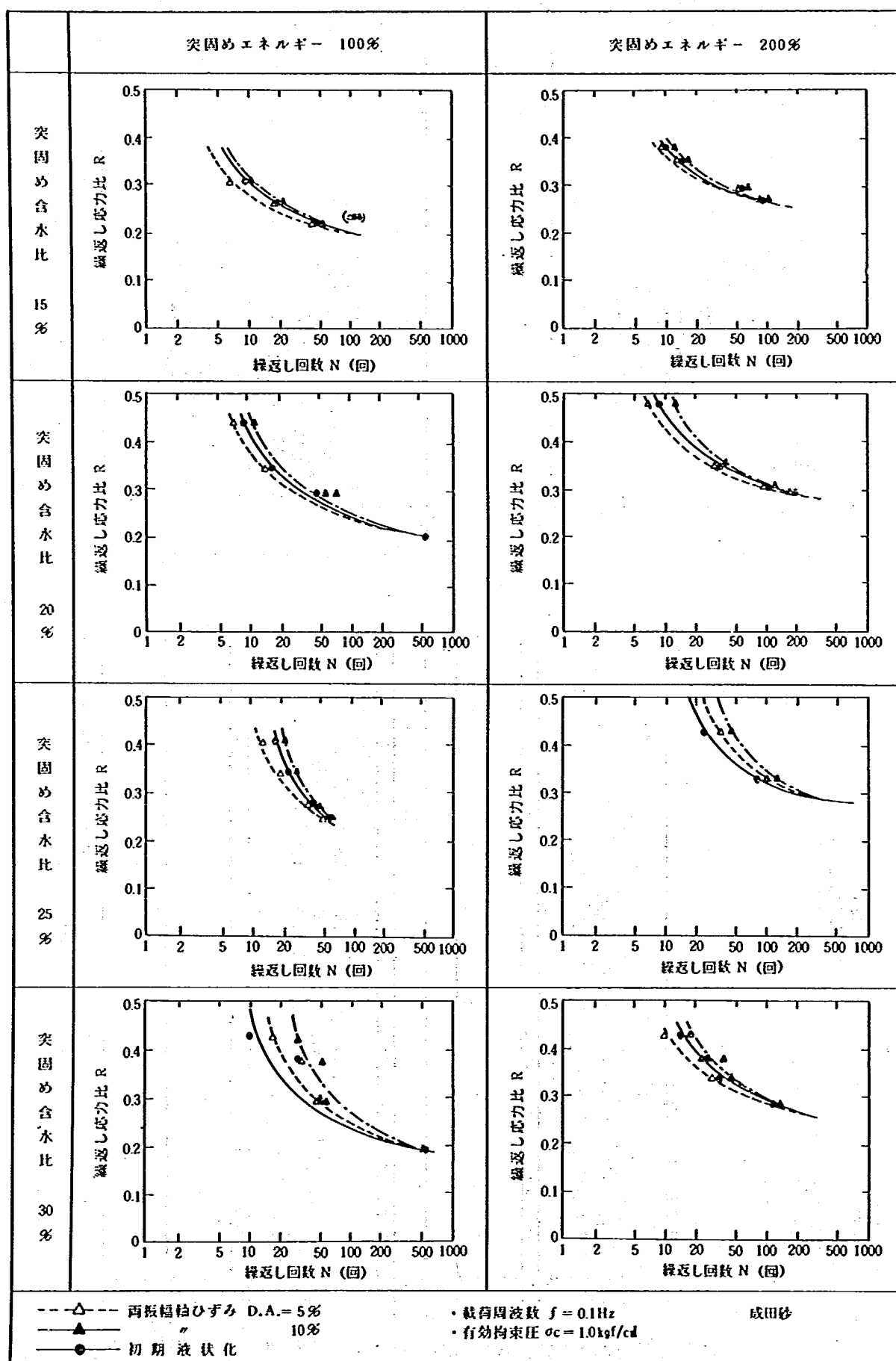


図 - 3.22 繰返し三軸試験結果

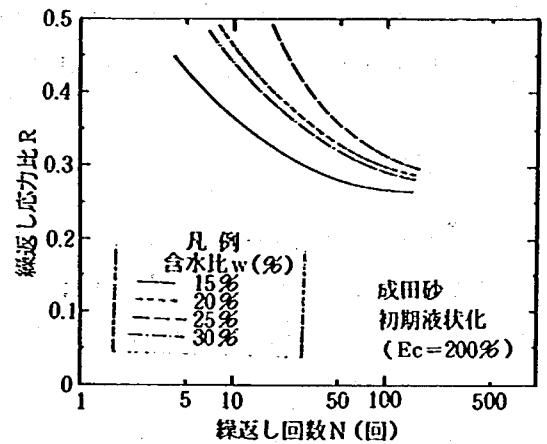
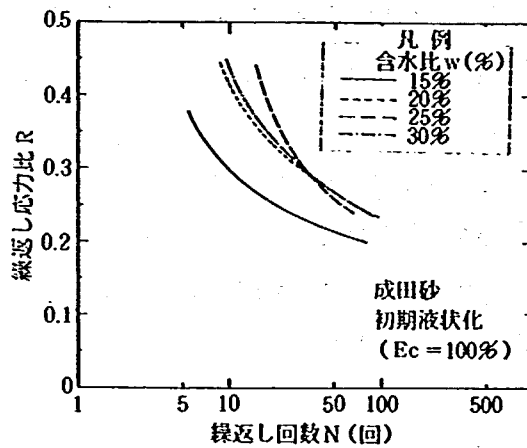


図 - 3.23 繰返し応力比と繰返し回数の関係

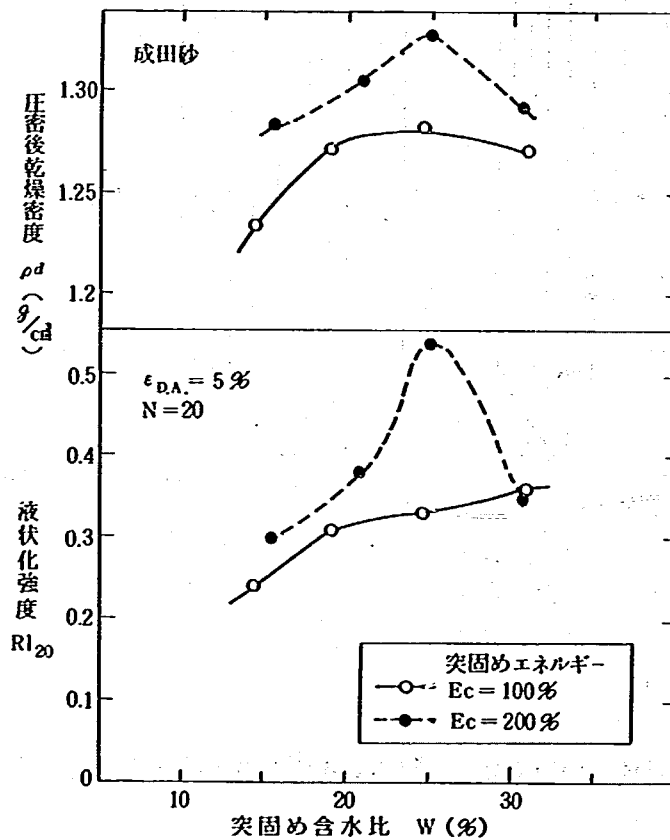


図 - 3.24 液状化強度と突固め含水比の関係

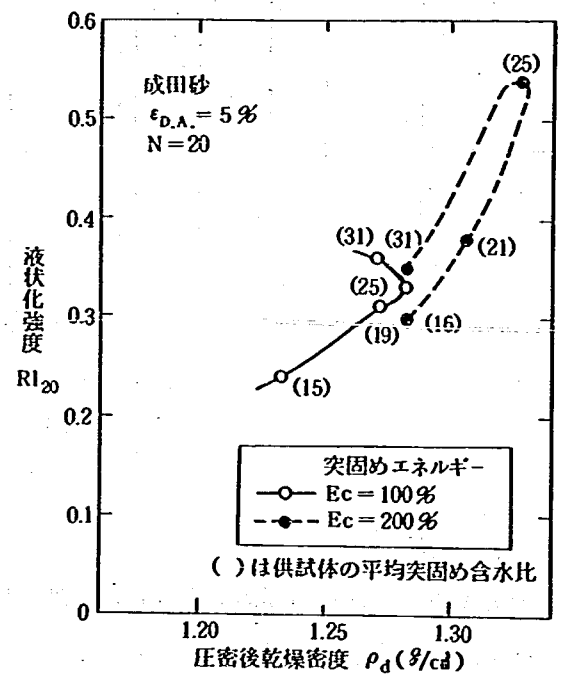


図 - 3.25 液状化強度と乾燥密度の関係

比に至るまでの液状化強度 R_{l20} より大きい。そのため、液状化強度 R_{l20} と乾燥密度 ρ_d の関係は、突固め含水比が最適含水比より乾燥側から湿潤側に変化するのに伴い、ひらがなの「つ」の字を逆にした曲線を描く。また、突固めエネルギー $E_c=200\%$ の場合の方が、 $E_c=100\%$ の場合よりも「つ」の字の開きが大きい。このことから、突固めエネルギーの大きさによって、突固め含水比等が液状化強度に与える影響の度合いが変化すると考えられる。

これらのことから、液状化強度 R_{l20} は、乾燥密度 ρ_d だけでなく、突固めエネルギー E_c 、突固め含水

比 w の影響を受けることがわかる。そして、この要因としては、3.3.2で述べたように、同じ乾燥密度であっても、突固めエネルギーや突固め含水比の違いによって、供試体の土粒子構造が異なるためと考えられる。

次に拘束圧の影響について述べる。図-3.26に、拘束圧が0.5, 1.0, 2.0 kgf/cm²で行った繰返し三軸試験における、繰返し応力比 R と繰返し回数 N との関係（両振幅軸ひずみ $D. A.=5\%$ 時）を示す。この図は、液状化強度が拘束圧の影響を受けることを示している。このことはまた、不攪乱試料を用いたせん断試験において、土構造物の完成後の拘束圧を考慮しなければならないことを示している。

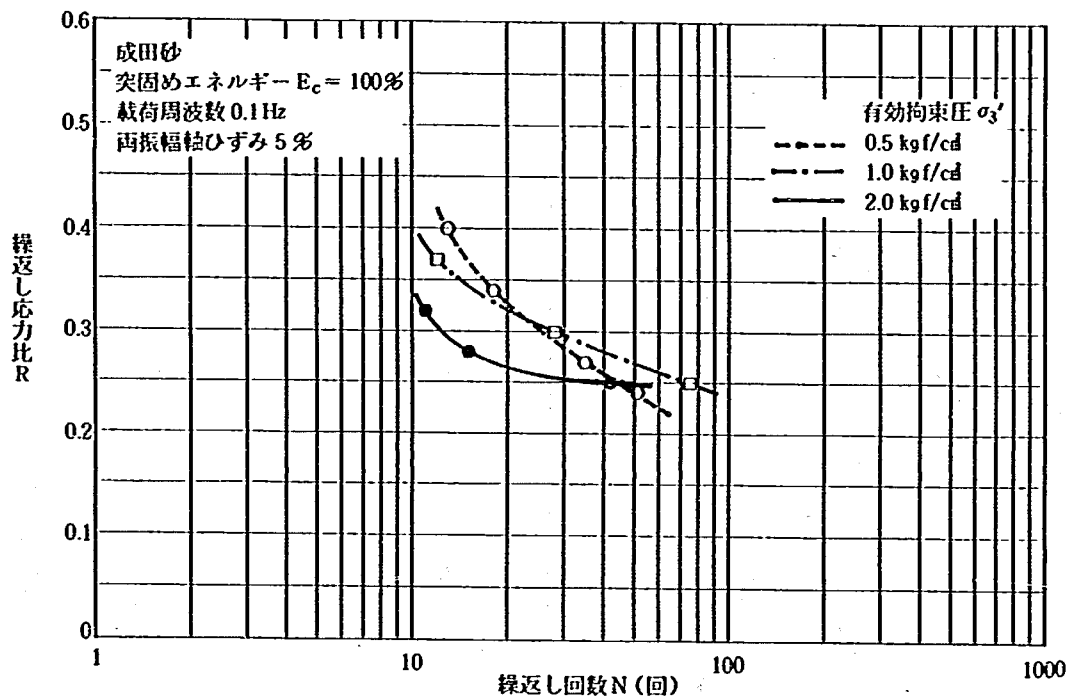


図-3.26 繰返し応力比と繰返し回数との関係
(拘束圧を変化させた場合)

3.4 まとめ

室内突固めにより締め固めて作成した三軸飽和供試体について静的非排水せん断強度と液状化強度を求めた結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 静的非排水せん断強度は、乾燥密度だけでなく、突固めエネルギーや突固め含水比によっても影響を受ける。今回の実験では、同じ乾燥密度であっても、最適含水比より湿潤側の方が乾燥側より強度が大きく、乾燥密度、突固め含水比が同じであっても、突固めエネルギーが大きい方が強度も大きくなった。
- ② 液状化強度も静的非排水せん断強度特性と同様に、乾燥密度だけでなく、突固めエネルギーや突固め含水比の影響を受ける。今回の実験では、静的非排水せん断特性と同様に、最適含水比より湿潤側の方が乾燥側より強度が大きい。また、突固めエネルギーの違いによって、突固め含水比が液状化強度に影響を与える度合いが異なる。

③ 今回の実験では、突固め含水比が最適含水比より湿潤側の場合よりも、乾燥側の場合の方が、静的非排水せん断強度も液状化強度も小さかったが、一般に静的排水せん断強度では、土質によっては、最適含水比より乾燥側の方が湿潤側に比べ高くなることもあり、静的非排水せん断強度も液状化強度も土質によっては、大小関係が異なることが考えられる。

④ このように、静的非排水せん断強度や液状化強度が乾燥密度だけでなく、突固めエネルギーや突固め含水比によっても影響を受ける要因として、突固めエネルギーや突固め含水比の違いにより、同じ乾燥密度でも土粒子構造が異なることが考えられる。

4. 転圧機械により締め固められた土の動的強度特性

4.1 実験の目的と概要

締め固め土の動的強度は、第3章で明らかとなったように、単に乾燥密度だけでなく、突固めエネルギーや突固め含水比の影響を受ける。

ところで、実際のアースダム等では、各種の転圧機械を用いて土を締め固めている。このようにして締め固められた土は、室内突固めのように側方が拘束された状態で締め固められたのではなく、側方の拘束は明らかに室内突固めより弱い。このことにより、同じ密度や締め固め含水比であっても、現場転圧と室内締め固めとでは土粒子構造が異なり、さらには動的強度にも影響を与えることが考えられる。つまり、乾燥密度、締め固めエネルギー、締め固め含水比の他に締め固め方法の違いも動的強度に影響を与える因子のひとつであると考えられる。

したがって、転圧機械によって締め固められた土の動的強度特性を調べることで、そして、室内突固めにより締め固められた土との比較を行うことが本実験の目的である。

本実験の概要を以下に述べる。

室内ピット内に試料を3種類の異なる含水比にそれぞれ調整してまき出す。次にこれを転圧機械により締め固め、締め固められた地盤から三軸供試体をサンプリングする。サンプリングされた供試体を用いて、繰返し三軸試験を行い動的強度特性を調べる。また、サンプリングされた供試体と同じ含水比、同じ密度の供試体を室内突固めにより作成し、繰返し三軸試験を行い、転圧により作成した供試体の動的強度特性と比較する。

4.2 実験方法および実験条件

4.2.1 試料

実験に用いた砂は、千葉県富津市天羽地区から採取した砂（以下天羽砂とする）と、千葉県君津市箕輪地区から採取した砂（以下箕輪砂とする）の2種類を用いた。

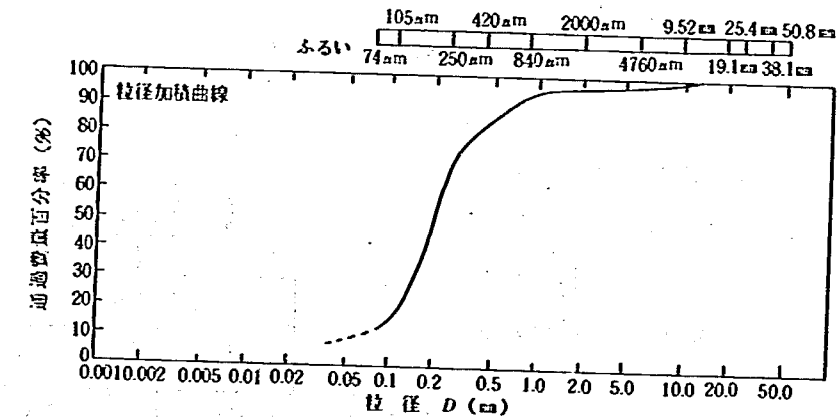
表-4.1に試料の主な物性値を示す。また、図-4.1、図-4.2に天羽砂、箕輪砂それぞれの粒径加積曲線を示す。表-4.1中で、突固め試料とは、4.2.2で述べるところの室内突固めによる供試体に用いた試料であり、最大粒径を4.76mmとなるように調整している。さらに、天羽砂において突固め試料が2種類あるものは、採取位置の違いによるバラツキを調べるため異なる2つの土のうから採取し、粒度試験を行ったものである。また、転圧試料とは、転圧に用いた試料であり、地山から採取した試料から、目立つ程の大きさ（3cm程度）のレキ、シルト塊等を人力で取り除いた試料である。箕輪砂において、4.76mm以上のレキ分の無い転圧試料のデータは、4.76mm以上のレキ分を含む試料のデータから、レキ分を除去したものとして計算して得たものである。

粒度試験結果や、その他の物理試験から、天羽砂はシルト混じり砂、箕輪砂はシルト質砂といえることができる。

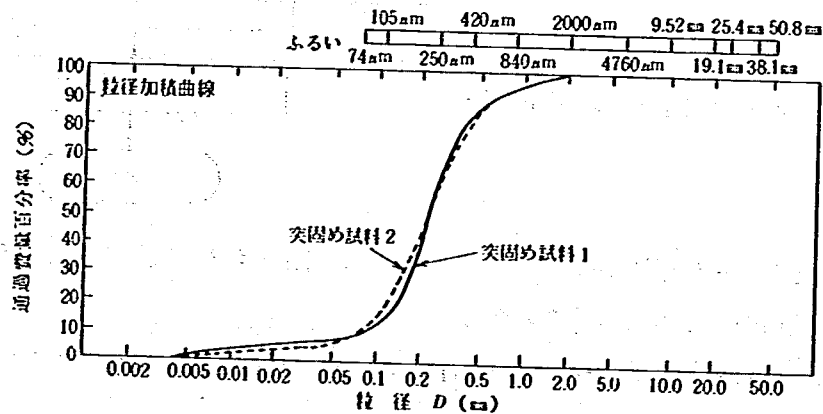
表-4.1 試料の物性

試料		天羽砂			箕輪砂		
		突固め試料1	突固め試料2	転圧試料	突固め試料	転圧試料	
		レキ分無し		レキ分有り	レキ分無し	レキ分有り	レキ分無し
比重 G_s		2.724	2.736		2.743	2.750	
粒度組成	粗レキ分 $\sim 4.76 \text{mm}$ (%)	0	0	2.4	0	5.8	0
	細レキ分 $4.76 \sim 2.00 \text{mm}$ (%)	0.7	1.4	1.1	3.6	3.0	3.2
	粗砂分 $2.00 \sim 0.42 \text{mm}$ (%)	15.6	14.8	12.7	13.8	15.1	16.0
	細砂分 $0.42 \sim 0.074 \text{mm}$ (%)	73.3	72.9	72.0	47.0	40.3	42.8
	シルト分 $0.074 \sim 0.005 \text{mm}$ (%)	10.4	9.5	11.8	19.4	19.8	21.8
	粒土分 $0.005 \text{mm} \sim$ (%)				16.2	16.0	16.2
特性	60% 粒径 $D_{60} (\text{mm})$	0.255	0.248	0.220	0.230	0.220	0.200
	30% 粒径 $D_{30} (\text{mm})$	0.170	0.144	0.150	0.028	0.036	0.030
	10% 粒径 $D_{10} (\text{mm})$	0.070	0.070	—	0.001	0.001	0.001
	均等係数 U_c	3.64	3.56	—	230	220	200
	曲率係数 U_c'	1.62	1.20	—	3.41	5.89	4.50
最大・最小密度	最大乾燥密度 $\rho_d \text{ max (g/cm}^3\text{)}$	1.750					
	最小乾燥密度 $\rho_d \text{ min (g/cm}^3\text{)}$	1.336					
三角座標分類		S-F (シルト混じり砂)			SF (シルト質砂)		

・斜線は試験を行わず ・—は結果が求まらない

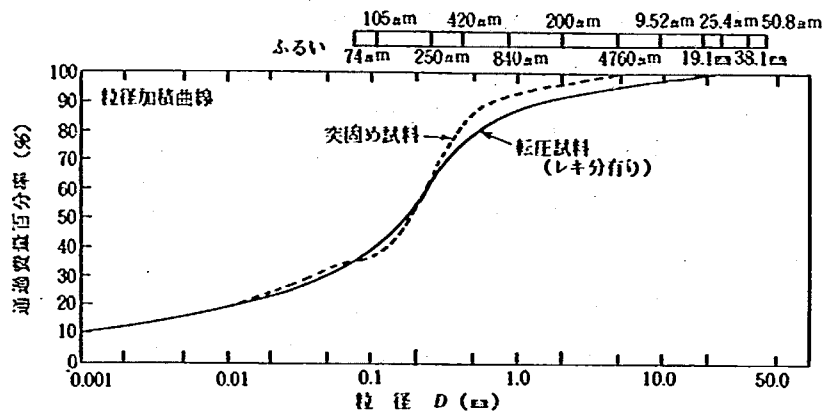


(a) 転圧試料の粒径加積曲線

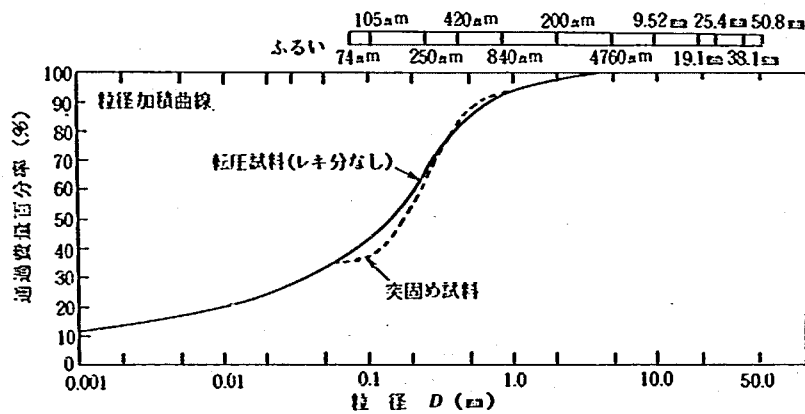


(b) 土のうの違いによる粒径加積曲線の違い

図-4.1 天羽砂の粒径加積曲線



(a) 転圧資料と突固め試料の粒径加積曲線



(b) 突固め試料とレキ分を除いたものとして計算した転圧試料との粒度の比較

図-4.2 箕輪砂の粒径加積曲線

図-4.1(b)の天羽砂の突固め試料の粒径加積曲線から、試料の採取位置によるバラツキは小さいといえる。また、図-4.2(b)の箕輪砂の突固め試料とレキ分の無い転圧試料の粒径加積曲線から、箕輪砂においても試料の採取位置のバラツキは少ないといえることができる。

4.2.2 実験の手順

図-4.3に実験の手順の概略を示す。以下、詳細を述べる。

(1) 締め固め試験

地盤の転圧時の含水比の決定や転圧条件の決定、突固め供試体作成時の試料の必要重量の計算のため

に前もって締め固め試験を行う。試験方法は3.2.2(1)で述べているものと同様なので省略する。

(2) 転圧による供試体の作成

室内ピットに作成した地盤を締め固め機械(振動ローラー、タイヤローラー)で転圧し、締め固めた地盤か

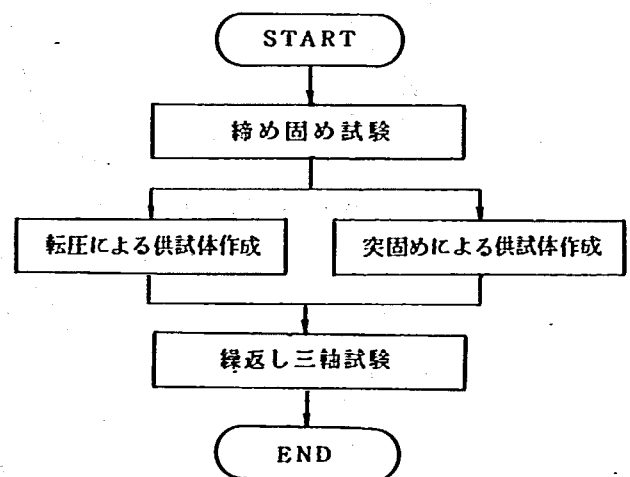


図-4.3 実験の手順の概要

ら試料をブロックサンプリング ($\phi \approx 10 \text{ cm}$, $H \approx 15 \text{ cm}$) 法により採取する。このコアブロックから、 $\phi = 5 \text{ cm}$, $H = 10 \text{ cm}$ の三軸供試体を成形する。

図-4.4に室内ピットに作成した地盤の概要図を示す。地盤は基礎地盤、基層地盤、表層地盤の3層から構成される。基礎地盤は室内ピット内にある砂質シルトを用い、平坦に敷きならし、転圧機械で十分に締め固めた。基層地盤は、含水比17%程度为天羽砂を用い、転圧機械で十分に締め固めた。表層地盤は、試料を採取する3種類の含水比の部分と、転圧機械が待避・反転するためのダミーの部分から成っており、基層地盤上に人力で撒き出した。3種類の含水比の部分のそれぞれを、ゾーン1、ゾーン2、ゾーン3とし、各ゾーンの含水比を w_1 , w_2 , w_3 , としたとき、表-4.2に示すように、ゾーン2の含水比 w_2 を最

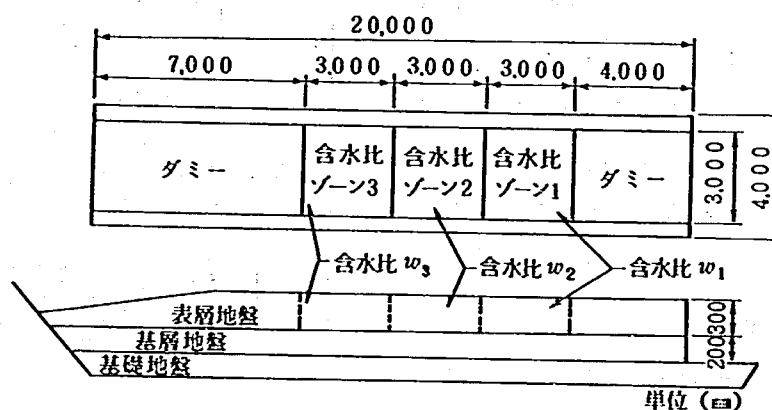


図-4.4 地盤の概要図

適含水比 w_{opt} 程度とし、ゾーン1はゾーン2より乾燥側、ゾーン3はゾーン2より湿潤側となるようにした。ダミーの部分には、天羽砂を用いた。

含水比の調整は、以下の手順で行った。

- ① 搬入した試料のうち約20 m³を、屋内の広場に厚さ7 cm程度に敷きならし、扇風機を用いて、含水比条件の中で最も含水比の低いゾーン1の含水比以下になるまで空気乾燥させる。このとき、粒径3 cm程度以上の目立つレキ、草根等を取り除く。乾燥後、均一になるようにタイヤショベルで十分に混合し、一箇所に集めシートで覆い養生する。
- ② 乾燥した試料を、2 tダンプトラックを用い、各ゾーンの作成に必要な土量に分割する。
- ③ 各ゾーンごとの目標とした含水比に調整するために必要な水の量を計量し、分割した実験土に散水して、タイヤショベルで十分混合する。

人力で撒き出した表層地盤は、一晚養生した後、転圧機械で締め固め、その後各ゾーンにおいてブロックサンプリングを行い試料を採取する。実験の目的から、異なる締め固めエネルギーで試料を採取する必要があるため、転圧し一度サンプリングした後、さらに転圧しサンプリングして、2種類の異なる締め固めエネルギーの試料を得た。図-4.5に転圧から試料採取までの手順を示す。まず1回の予備転圧を行い、次に含水比条件の中位の部分であるゾーン2の部分が、基準乾燥密度 ρ_d となるまで転圧する。この基準乾

表-4.2 地盤の含水比条件

含水比 ゾーン1	含水比 ゾーン2	含水比 ゾーン3
$w_1 < w_{opt}$	$w_2 \approx w_{opt}$	$w_3 > w_{opt}$

w_{opt} : 最適含水比

乾燥密度 ρ_{d0} は、(1)締め固め試験の結果から、最適含水比において最大乾燥密度の95%程度とした。ゾーン2が基準乾燥密度 ρ_{d0} となったときの転圧回数を N_A とし、このときの状態を転圧Aとする。ここで、転圧Aにおける試料のブロックサンプリングを行う。その後、ゾーン1またはゾーン3が基準乾燥密度 ρ_{d0} となるまで転圧を繰り返す。ゾーン1またはゾーン3のどちらかの乾燥密度が基準乾燥密度 ρ_{d0} となったときの転圧回数を N_B とし、このときの状態を転圧Bとする。ここで、転圧Bにおける試料のブロックサンプリングを行う。図-4.6に転圧回数と乾燥密度の関係を模式的に示す。転圧の状況を写真-4.1、写真-4.2に示す。なお、地盤の含水比・乾燥密度の管理には、R.I. 水分密度計を用いた。その仕様を表-4.3に示す。

ブロックサンプリングは、図-4.7に示す手順で行う。写真-4.3に示すように、転圧された地盤に

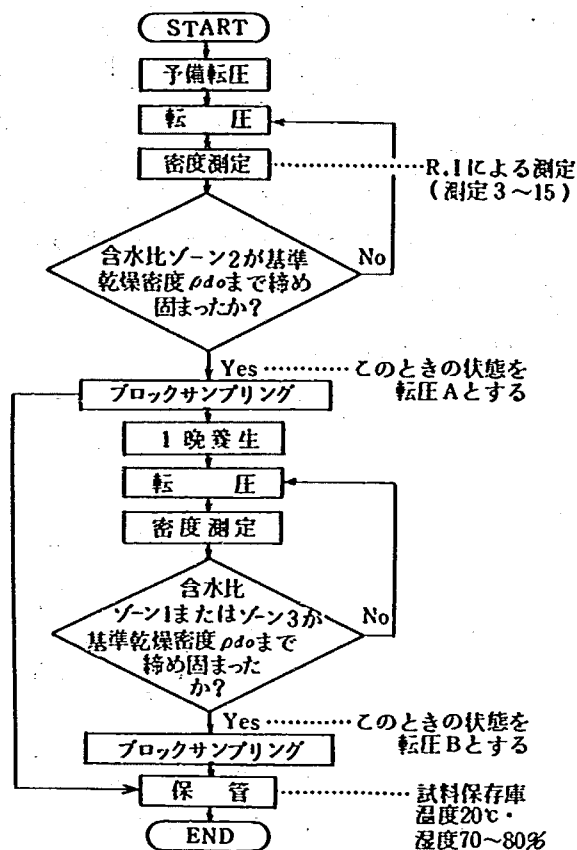


図-4.5 転圧から試料採取までの手順

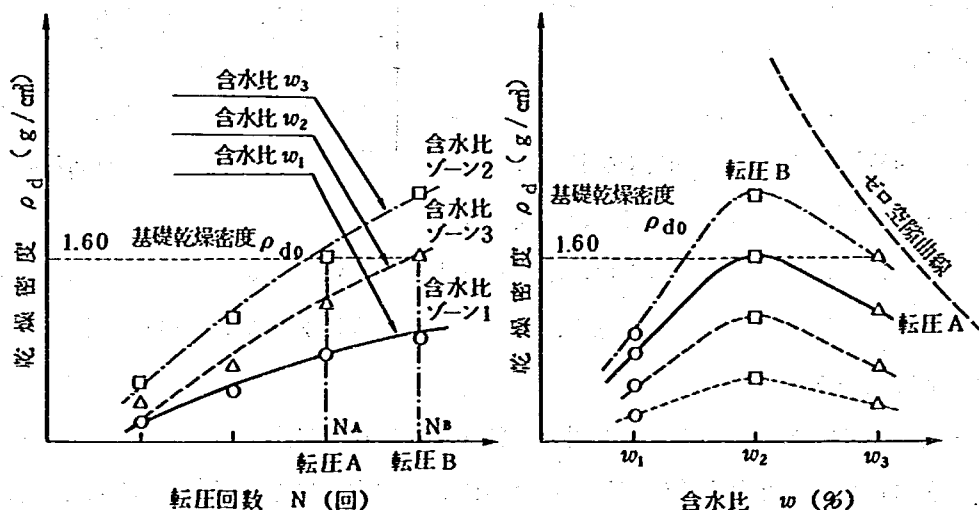


図-4.6 転圧回数と乾燥密度の関係

採取位置のマーキングを行う。次に $\phi = 10\text{cm}$, $H = 15\text{cm}$ のサンプリングブロックよりひと回り大きい円柱状に掘削し(写真-4.4), その後 $\phi = 9.5\text{cm}$ 程度の円柱状に丁寧に整形する(写真-4.5)。レキがあり整形中にパレットナイフにあたるような場合は、注意深くそのレキを取り除き、試料をつめて修繕する。図-4.8に示す二割モールドを静かに真直に降ろし、ブロックをモールド内におさめる(写真



写真-4.1 振動ローラーによる転圧

表-4.3 R.I. 水分密度計の仕様

測定方法	密 度	ガンマ線透過型
	水 分	速中性子透過型
測定範囲 (標準)	湿潤密度	1.000 ~ 2.500 t / m ³
	水分密度	0.050 ~ 0.900 t / m ³
	含 水 比	2.000 ~ 300.0 %
測定時間	標準体	10 分
	現 場	1 分
線 源	ガンマ線	2.6 MBq (70 μ Ci) Co-60 密封線源 半減期 5.2 年
	速中性子	1.1 MBq (30 μ Ci) Cf-252 密封線源 半減期 2.6 年
検 出 器	ガンマ線	GM管 5 本
	中 性 子	He-3管 2 本
計数回路	ガンマ線	0 ~ 999,999 cpm
	中 性 子	0 ~ 999,999 cpm
表 示	計 数 率	6 桁
	測 定 値	4 桁
校 正 式		公団校正式固定 (高速道路技術センターで決定)
演 算 回 路		湿潤密度・水分密度・乾燥密度・含水比・空気間 隙率・締固度・飽和度・平均値・動作検定
電 源	外 部	AC 100 V 0.1 A
	内 部	バッテリー DC 6 V 6 A H 充電器内蔵 連続使用時間 12時間以上
本 体 寸 法		D = 365 W = 310 H = 160 mm
本体重量 (プリンター含む)		12 kg
製 造 元		(株) フィールドテック
型 番		FT-101



写真-4.2 転圧された地盤（箕輪砂：転圧A）

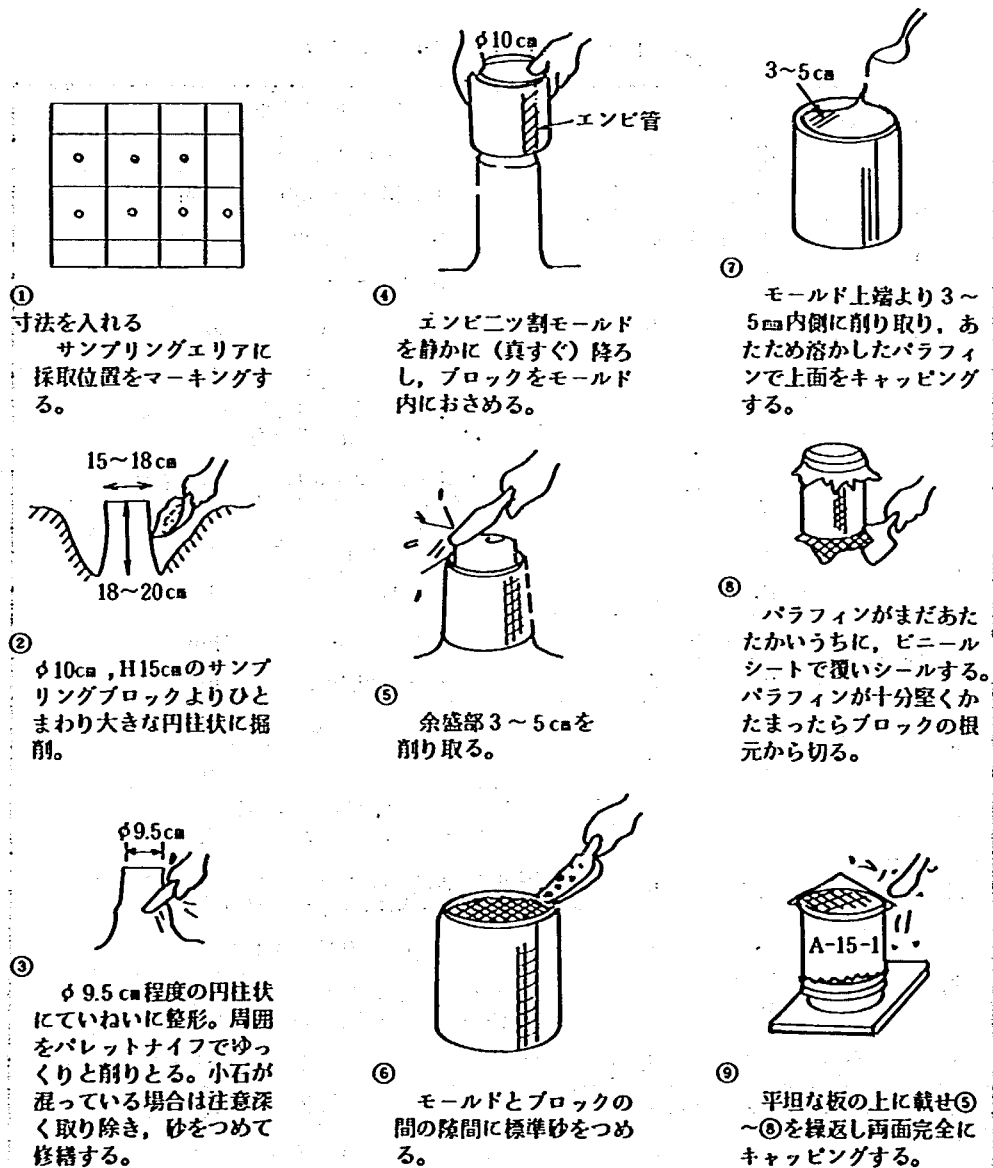


図-4.7 ブロックサンプリング手順

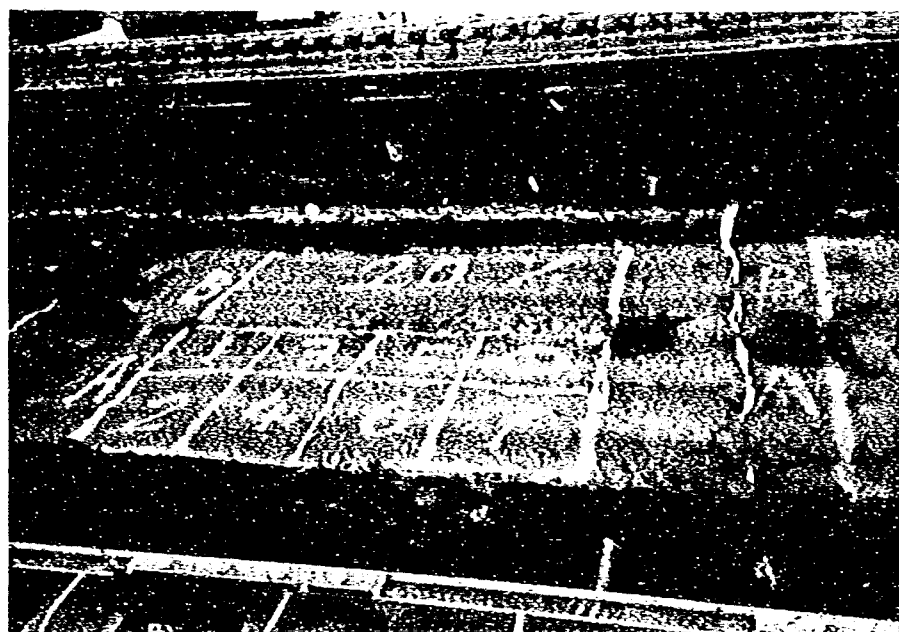


写真-4.3 採取位置のマーキング

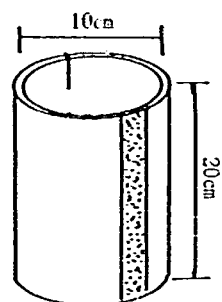


写真-4.4 円柱状に掘削



写真-4.5 $\phi 9.5$ cmの円柱に整形

—4.6)。余盛部を削りとり、モールドとブロックの間の隙間に標準砂をつめる。次に、モールド上端より3～5mm内側にブロックを削りとり(写真-4.7)、あたためて溶かしたパラフィンで上面をキャッピングする。パラフィンがあたたかいうちに、ラップフィルムで覆い、ビニールテープでシールする(写真



ガムテープ

エンビ管内厚4mm

二つ割エンビ管の継目の隙間は
ハラフィンで充填した

図-4.8 二つ割モールド



写真-4.6 モールド内におさめる



写真-4.7 上面を削りとる

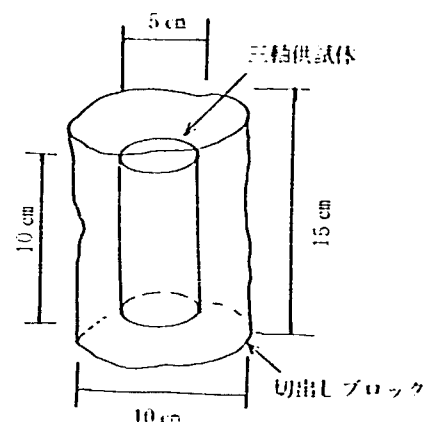


写真-4.8 キャッピング

4.8)。パラフィンが十分固くなったら、ブロックを根元から切り、平田な板の上に逆にして載せ、整形したのち、パラフィンで両面完全にキャッピングする。

採取された試料は恒温恒湿の試料保存庫（温度20℃、湿度70～80％）に一時保管する。

上記のように採取したブロック状の試料を繰返し三軸試験に供するため、試験の直前に $\phi = 5\text{ cm}$ 、 $H = 10\text{ cm}$ に整形する（図 4.9）。整形の際、レキ、シルト塊によって整形しにくい場合は、それを注意深く取り除き、その部分には切り出した残りの試料を軽く手で締めて整形した。



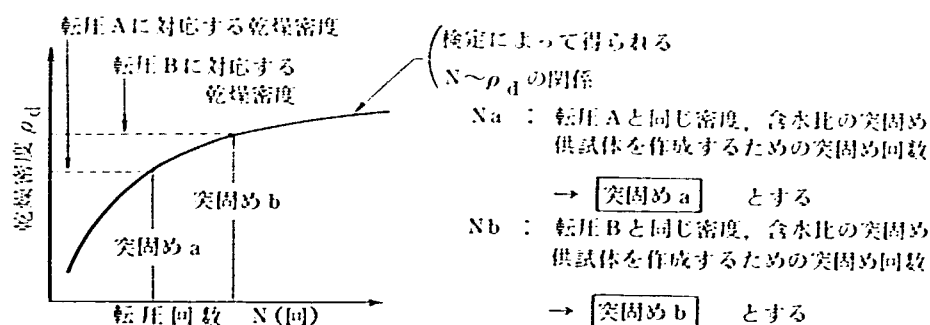
図－4.9 転圧試料整形概要

でき上がった供試体の乾燥密度 ρ_d を求めるため切り出した残りの試料から含水比を測定し、供試体の重量、直径、高さを測定する。測定には、3. 2. 2(2)で述べたのと同様のハカリ等を用いた。

(3) 突固めによる供試体の作成

転圧による供試体と同一乾燥密度の供試体を室内突固めにより作成した。このため、事前に突固め回数を変化させて締め固め試験を実施し、突固め回数と乾燥密度との関係を求め、転圧A、転圧Bそれぞれの密度に対応する突固め回数を決定する。転圧Aの密度に対応する突固め回数を N_a とし、このときの状態を突固め a とする。同様に、転圧Bの密度に対応する突固め回数を N_b とし、このときの状態を突固め b とする（図－4.10参照）。

突固めによる供試体の作成は 3. 2. 2(2)で述べた方法と同様である。



図－4.10 突固めエネルギー検定概念

(4) 繰返し三軸試験

試験の方法は、3. 2. 2(3)の中で、繰返し三軸試験に述べたものと同様であるので省略するが、供試体の飽和化は、天羽砂においては通水性が良いことから二酸化炭素を用いる方法で行い、箕輪砂においてはシルト分を多く含むため供試体内を真空にする方法によった。

4.2.3 実験の条件

表－4.4 に供試体作成条件の一覧を示す。締め固め方法は、写真－4.9 に示す振動ローラー、写真－4.10

表-4.4 供試体の作成条件

試料	締め固め方法	転圧回数(回) or 突固め回数(回/層)	基準乾燥密度 ρ_{d0} (g/cm ³)	目標 含水比(%)
天羽砂	振動ローラー	転圧A NA=3 転圧B NB=4	1.6	10. 15. 19
	突固め	突固めa Na=10 突固めb Nb=20	—	15
箕輪砂	タイヤローラー	転圧A NA=3 転圧B NB=12	1.6	15. 20. 25
	突固め	突固めa Na=8 突固めb Nb=14	—	20

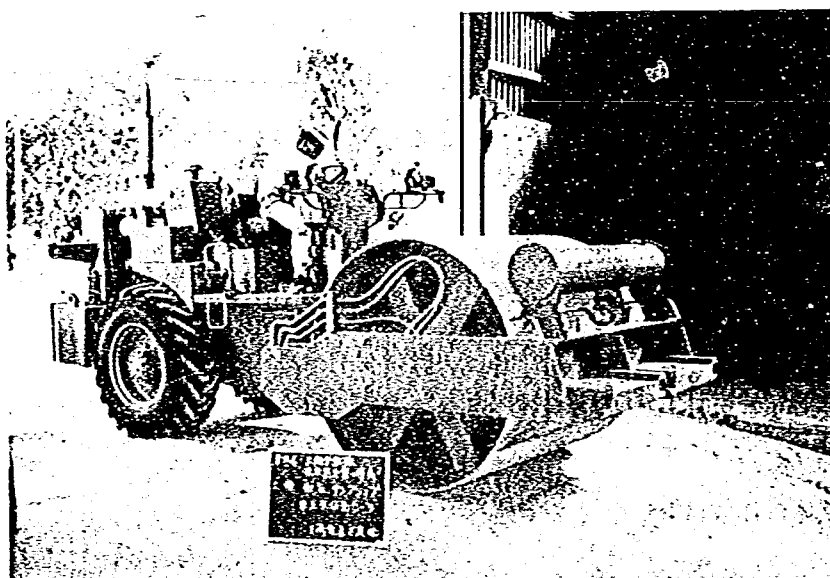


写真-4.9 振動ローラー

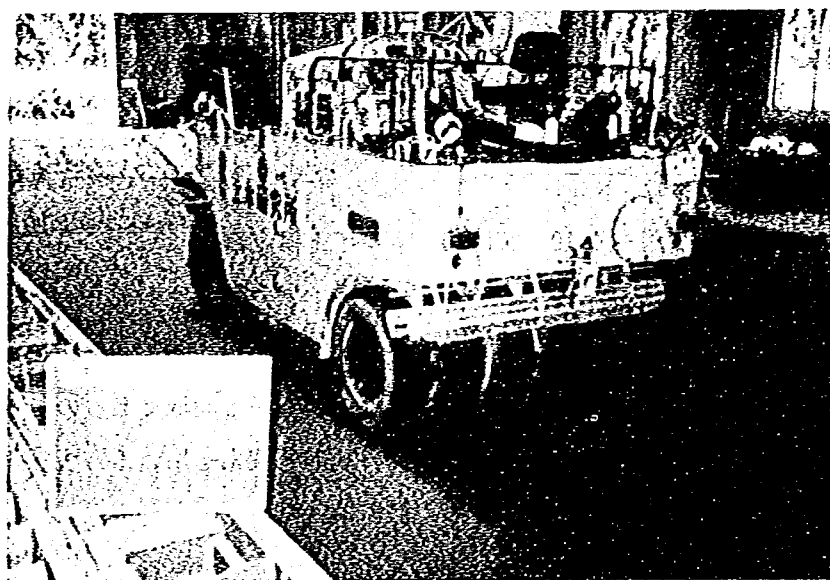


写真-4.10 タイヤローラー

に示すタイヤローラの2種類の転圧機械と、室内突固めの計3種類とした。表-4.5に振動ローラ、表-4.6にタイヤローラの諸元を示す。室内突固めは、ランマー重量2.5 kgfの自動締め固め試験機を用いた。

基準乾燥密度 ρ_{d0} は、図-4.11、図-4.12に示す締め固め試験の結果から、天羽砂、箕輪砂とも1.6 kgf/cm³とした。また、転圧時の目標含水比は、ゾーン2の含水比 w_2 をほぼ最適含水比として、ゾーン1、ゾーン3の含水比 w_1 、 w_3 をゾーン2の含水比 w_2 の $\pm 5\%$ 程度になるようにした。突固め試験の含水比は、ゾーン2の含水比 w_2 と同じとした。

表-4.5 振動ローラの主な仕様

総重量 (kgf)	8.448
転圧幅 (mm)	2.134
全長 (mm)	5.563
全幅 (mm)	2.357
全高 (mm)	2.210
走行速度 (km/h)	1速: 0~6.4 2速: 0~12.2
ドラム径幅 (mm)	1.499×2.134
起振力 (kgf)	18.014
振動数 (vpm)	1.400~1.850
振幅 (mm)	1.35
静線圧 (kgf/cm)	23.0
動線圧 (kgf/cm)	108.4

表-4.6 タイヤローラの主な仕様

項目	仕様
製造	渡辺機械工業株式会社
形式	WP-15
駆動	前輪5輪 相互揺動式 後輪6輪 固定式
自重	8500 kgf
タイヤ1輪当り荷重	前輪~645 kgf 後輪~875 kgf
全幅	2240 mm
速度	3.2~21.4 km/h

転圧回数は、結果的に表-4.4に示す値となった。なお、転圧Bの状態は、天羽砂ではゾーン1が基準乾燥密度 ρ_{d0} となった状態で、箕輪砂では、ゾーン3が基準乾燥密度 ρ_{d0} となった状態である。

突固め供試体の目標乾燥密度と目標突固め含水比は、転圧供試体の作成結果(4.3.1で述べる)から表-4.7のようになった。

突固め回数は、図-4.13、図-4.14に示す突固め回数と乾燥密度の関係から、表-4.4に示す突固め回数となった。

表-4.8に繰返し三軸試験の試験条件を、また、表-4.9に供試体ごとの試験条件を試験結果とともに示す。

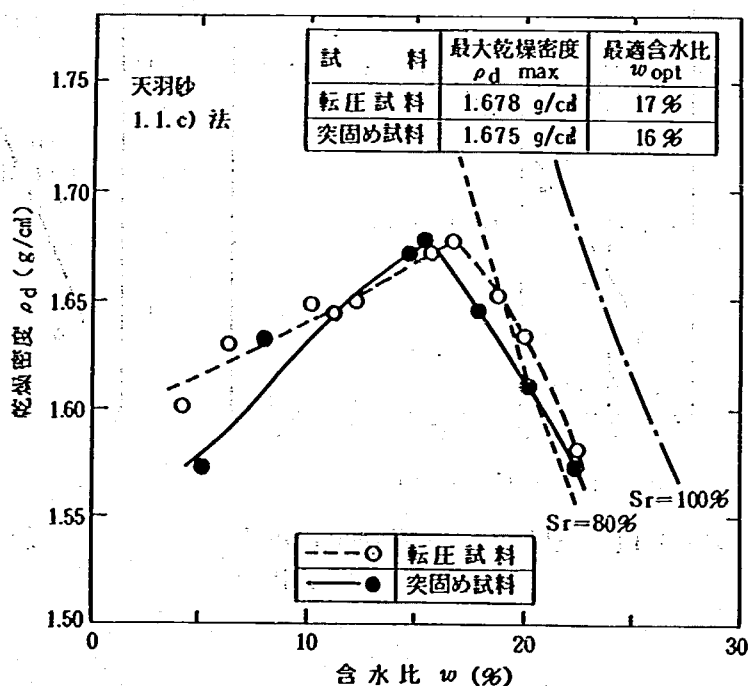


図-4.11 天羽砂の締め固め試験結果

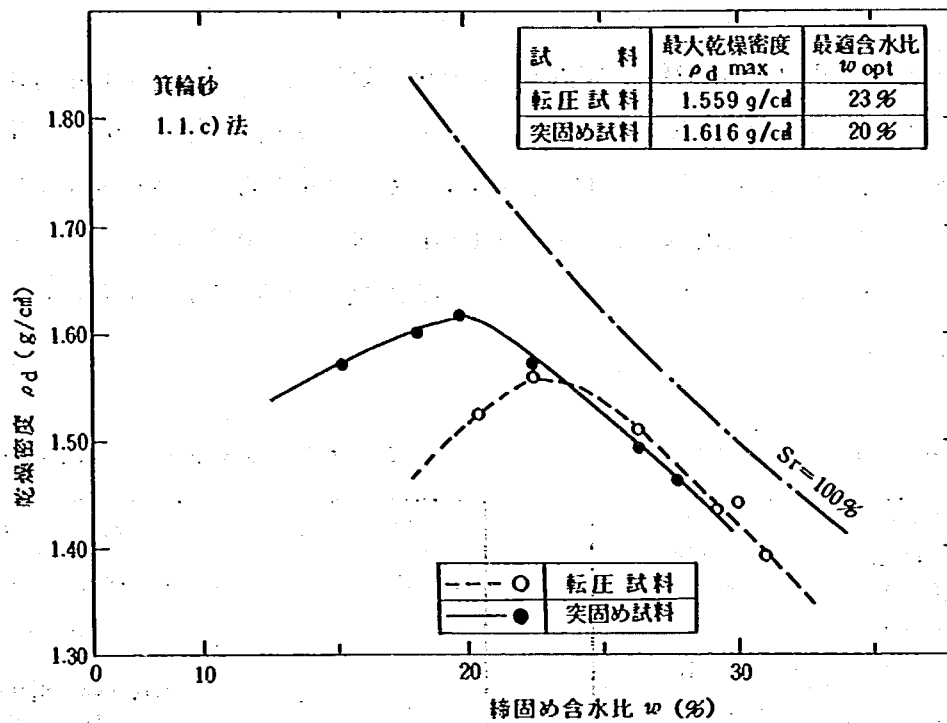


図-4.12 箕輪砂の締め固め試験結果

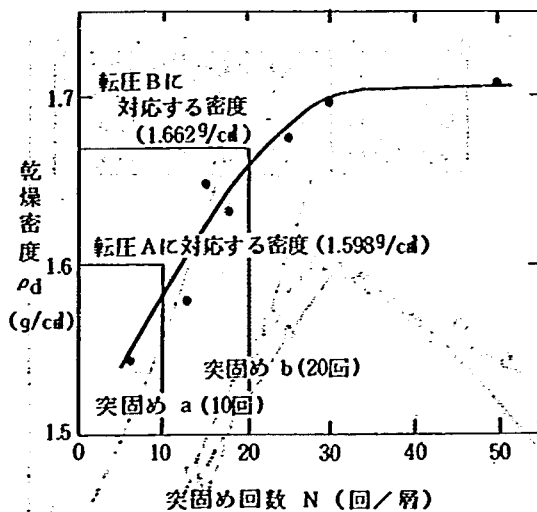


図-4.13 乾燥密度と突固め回数関係 (天羽砂)

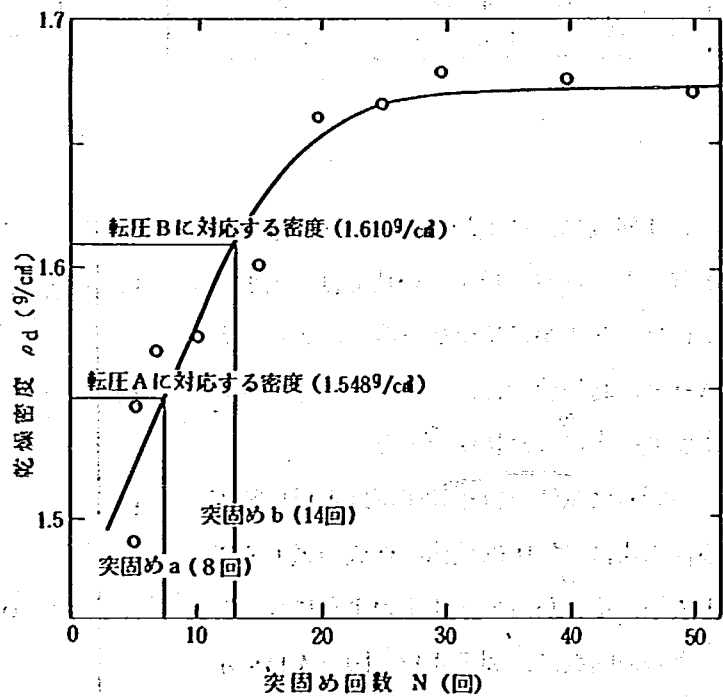


図-4.14 乾燥密度と突固め回数関係 (箕輪砂)

表-4.7 突固め供試作の目標乾燥密度と目標含水比

試料	突固め条件	目標乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	目標含水比 (%)
天羽砂	突固め a	1.598	15
	突固め b	1.662	15
箕輪砂	突固め a	1.548	20
	突固め b	1.610	20

表-4.8 繰返し三軸試験の試験条件

項目		試験条件
応力条件	有効拘束圧 σ_c (kgf/cm ²)	1.0
	背圧 B.P. (kgf/cm ²)	2.0
試験条件	載荷波形	正弦波
	周波数	0.1 HZ
	排水条件	非排水
	供試体数	4~5 本/1試料

4.3 実験結果

4.3.1 供試体作成結果

(1) 転圧供試体について

図-4.15に天羽砂の転圧により作成した供試体の乾燥密度 ρ_d と含水比 w の関係を示す。また、図-4.16に箕輪砂における同様の図を示す。図中の線は、平均的なところを結んだ線であるが、どちらの試料についても、室内突固めによる締め固め曲線（図-4.11、図-4.12参照）と似た形をしており、また、転圧回数の多い転圧Bの方が転圧Aのときより乾燥密度 ρ_d が大きいことがわかる。図中の点は、供試体ごとのプロットであるが、天羽砂においては比較的小さいバラツキが小さく、箕輪砂においてはバラツキが大きくなっている。

(2) 突固め供試体について

突固めにより作成した供試体の乾燥密度 ρ_d と突固め含水比との関係を、天羽砂については図-4.17に、

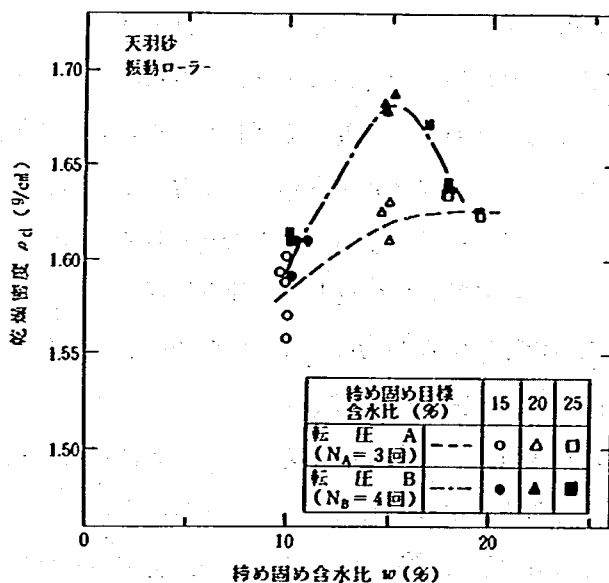


図-4.15 転圧により作成した供試体の作成結果 (天羽砂)

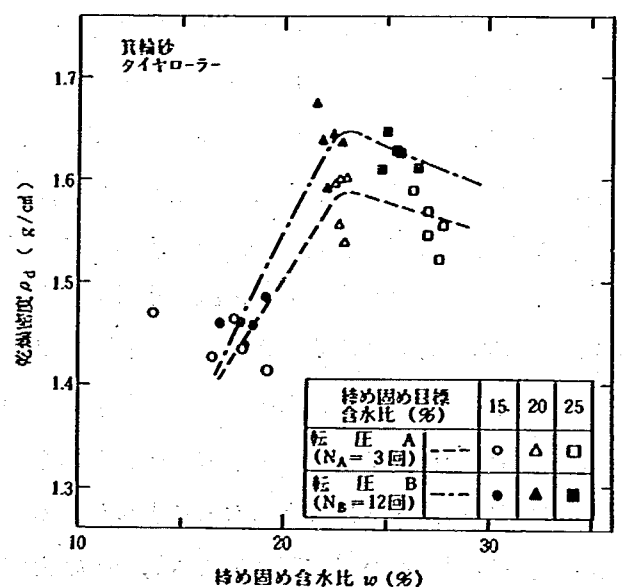


図-4.16 転圧により作成した供試体の作成結果 (箕輪砂)

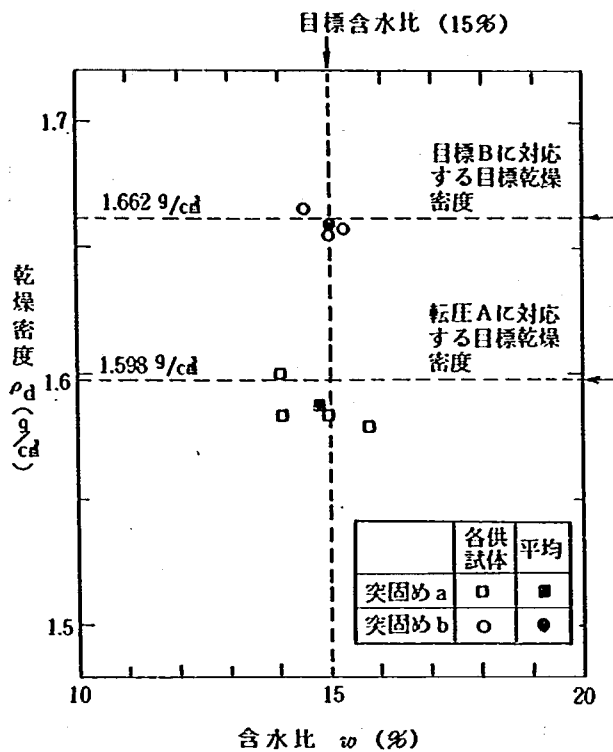


図-4.17 突固めによる供試体の乾燥密度と含水比の関係（天羽砂）

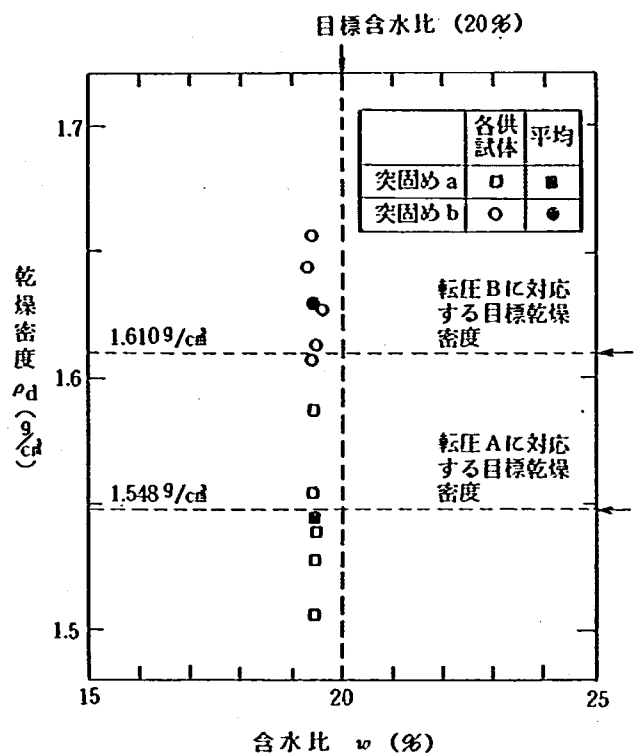


図-4.18 突固めによる供試体の乾燥密度と含水比の関係（箕輪砂）

箕輪砂については図-4.18に示す。天羽砂においてはバラツキが小さく、また、目標乾燥密度、目標含水比に近いものが作成できたといえる。また、箕輪砂においては、平均値としては目標乾燥密度、目標含水比を満たしているといえるがバラツキが大きい。

4.3.2 繰返し三軸試験結果とその考察

図-4.19に天羽砂、図-4.20に箕輪砂の繰返し三軸試験の一例を示す。軸ひずみの時刻歴を見るとどちらの試料においても同じように徐々にひずみが大きくなっている。しかし、間ゲキ水圧の時刻歴に注目すると、箕輪砂では、軸差応力が正のピークに達するとき間ゲキ水圧もピークに達するが、天羽砂では、軸ひずみが大きくなると軸差応力がゼロのときに間ゲキ水圧がピークに達するというように、試料の違いによって傾向が異なる。また、応力～ひずみ曲線でも、天羽砂では、図の原点付近でくびれた形をしているが、箕輪砂では、原点を中心として、繰返し载荷の度に、徐々にヒステリシスループが大きくなっている。このような差は、細粒分含有率の違いによるダイレイタンス特性の違いによるものと考えられる。

すべての試験結果をまとめて、図-4.21に天羽砂、図-4.22に箕輪砂の繰返し応力比と繰返し回数の関係を締め固め条件ごとに示す。さらに、これらの図から、両振幅軸ひずみ $D.A. = 5\%$ 時の曲線を抽出し、締め固め方法ごとに整理したものを図-4.23（天羽砂）、図-4.24（箕輪砂）に示す。

転圧供試体の結果では、天羽砂の転圧Aを除き、最適含水比付近の含水比のとき（天羽砂では15%、箕輪砂では20%）、強度は最大となることがわかる。また、どちらの試料においても、転圧Bの方が転圧Aに比べて強度が大きい。突固めによるものの結果では、どちらの試料でも、突固めbの方が突固めaに比べて強度が大きい。

繰返し応力比と繰返し回数の関係において、繰返し回数20回のときに両振幅軸ひずみが5%に達するよう

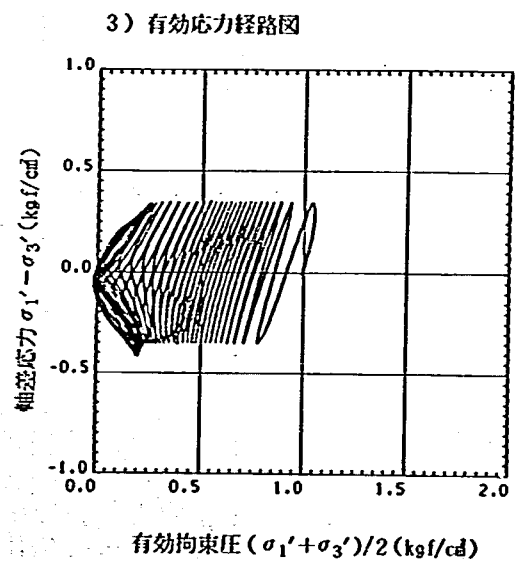
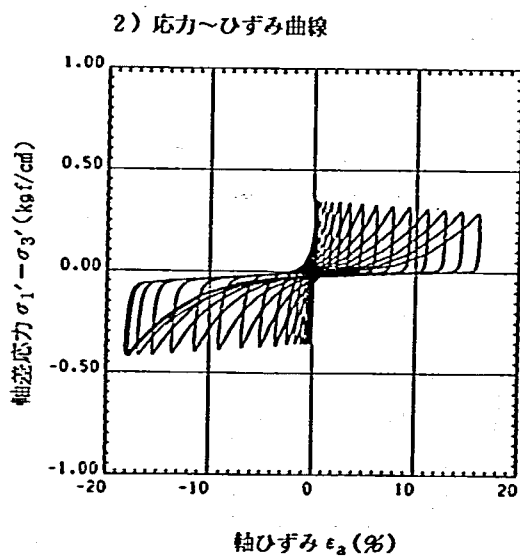
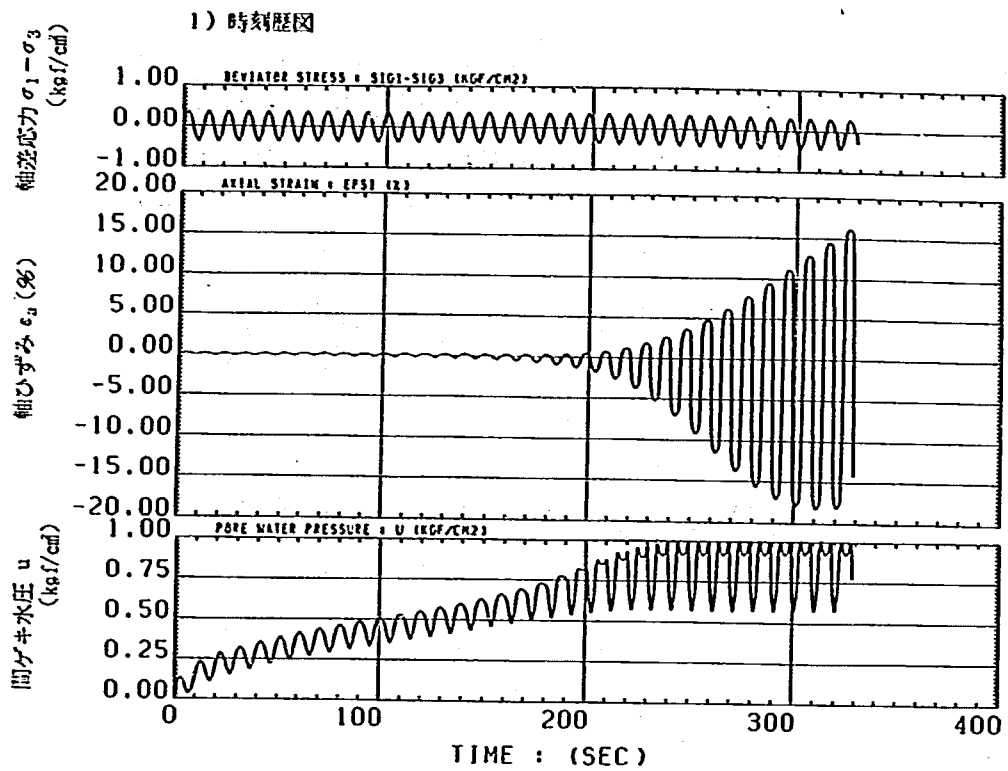


図-4.19 繰返し三軸試験の結果の一例
 (天羽砂, 転圧A, 締め固め含水比10%, 供試体No.2)

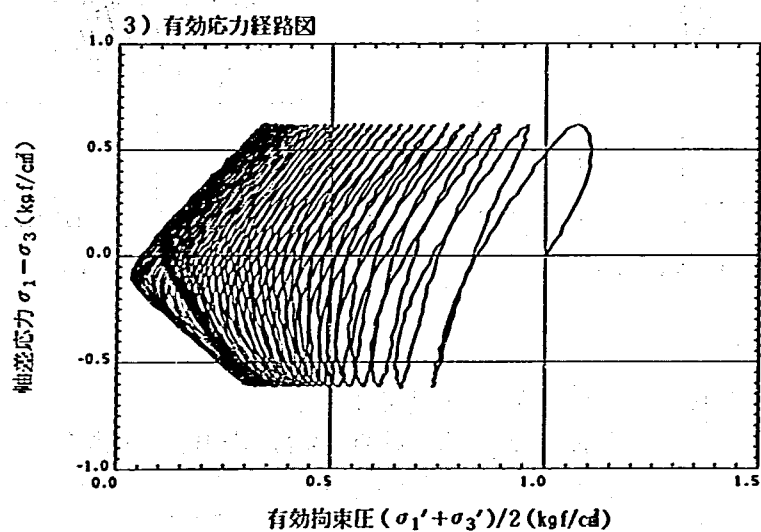
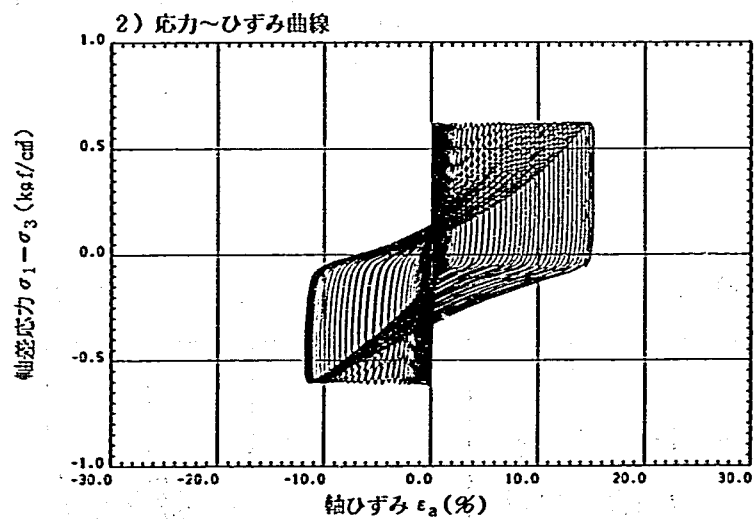
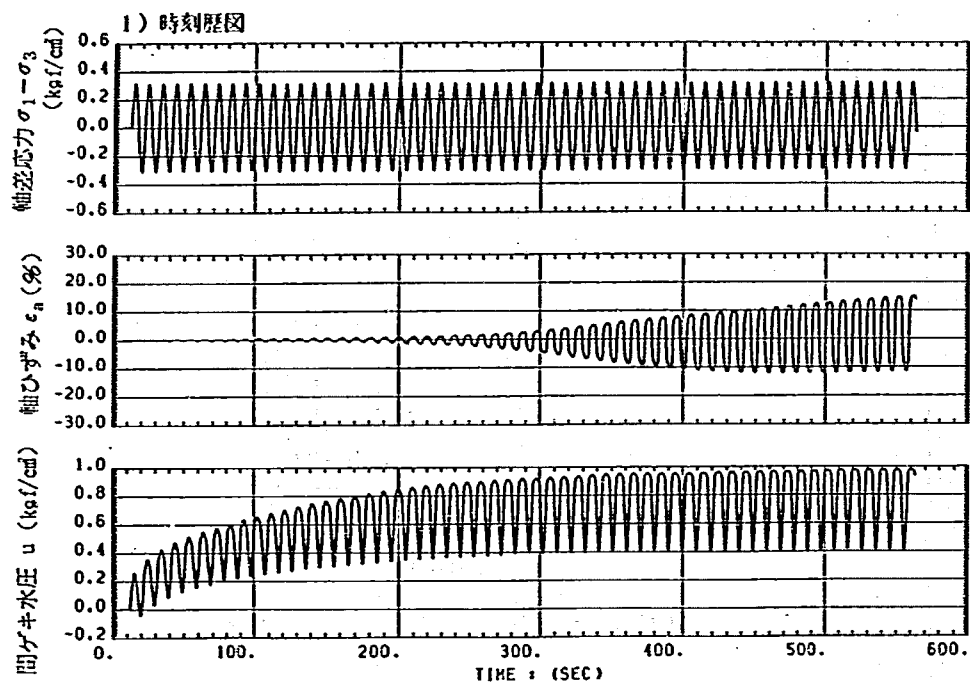


図-4.20 繰返し三軸試験の結果の一例
(箕輪砂, 転圧A, 締め固め含水比20%, 供試体No.3)

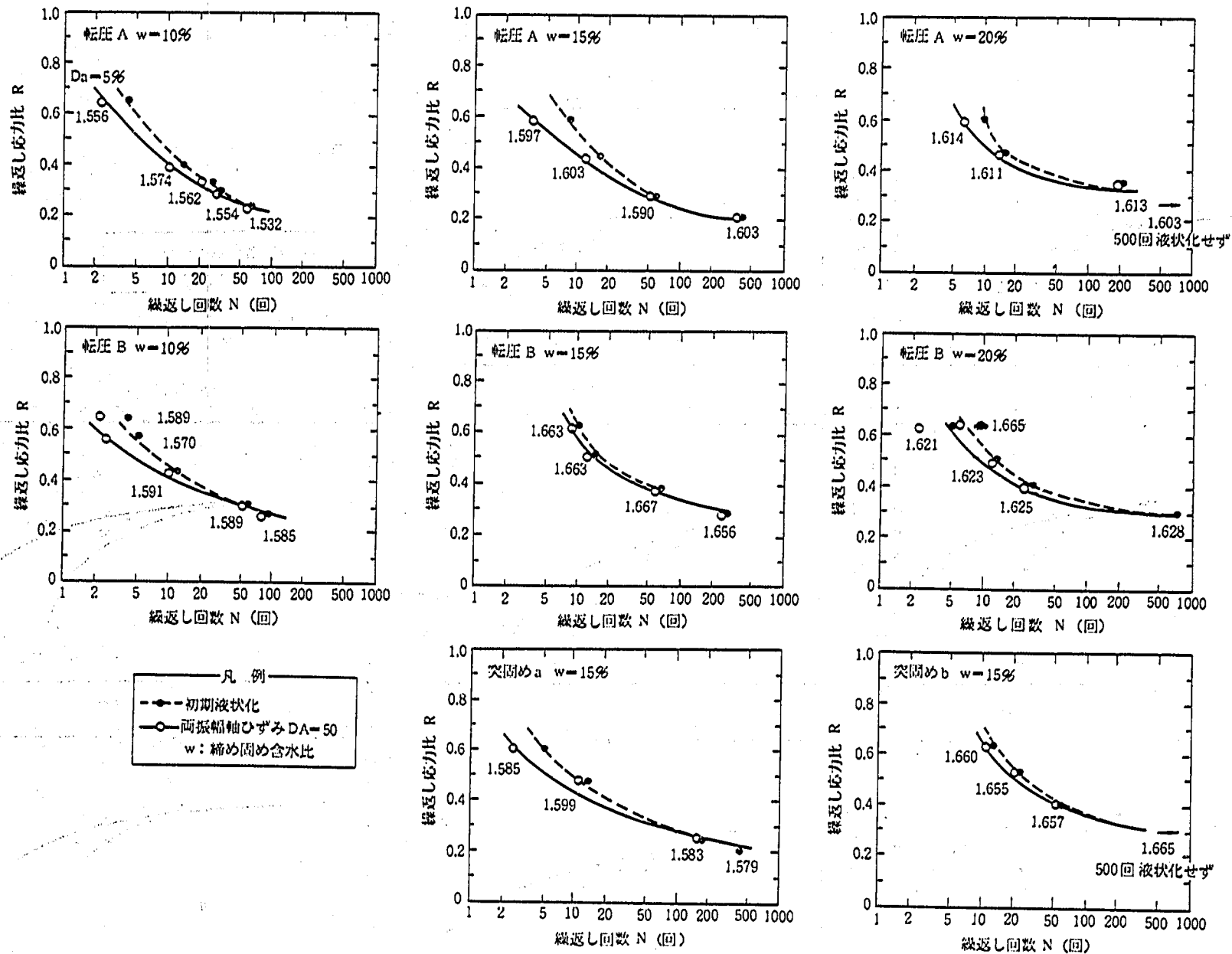


図-4.21 天羽砂における繰返し応力比と繰返し回数との関係

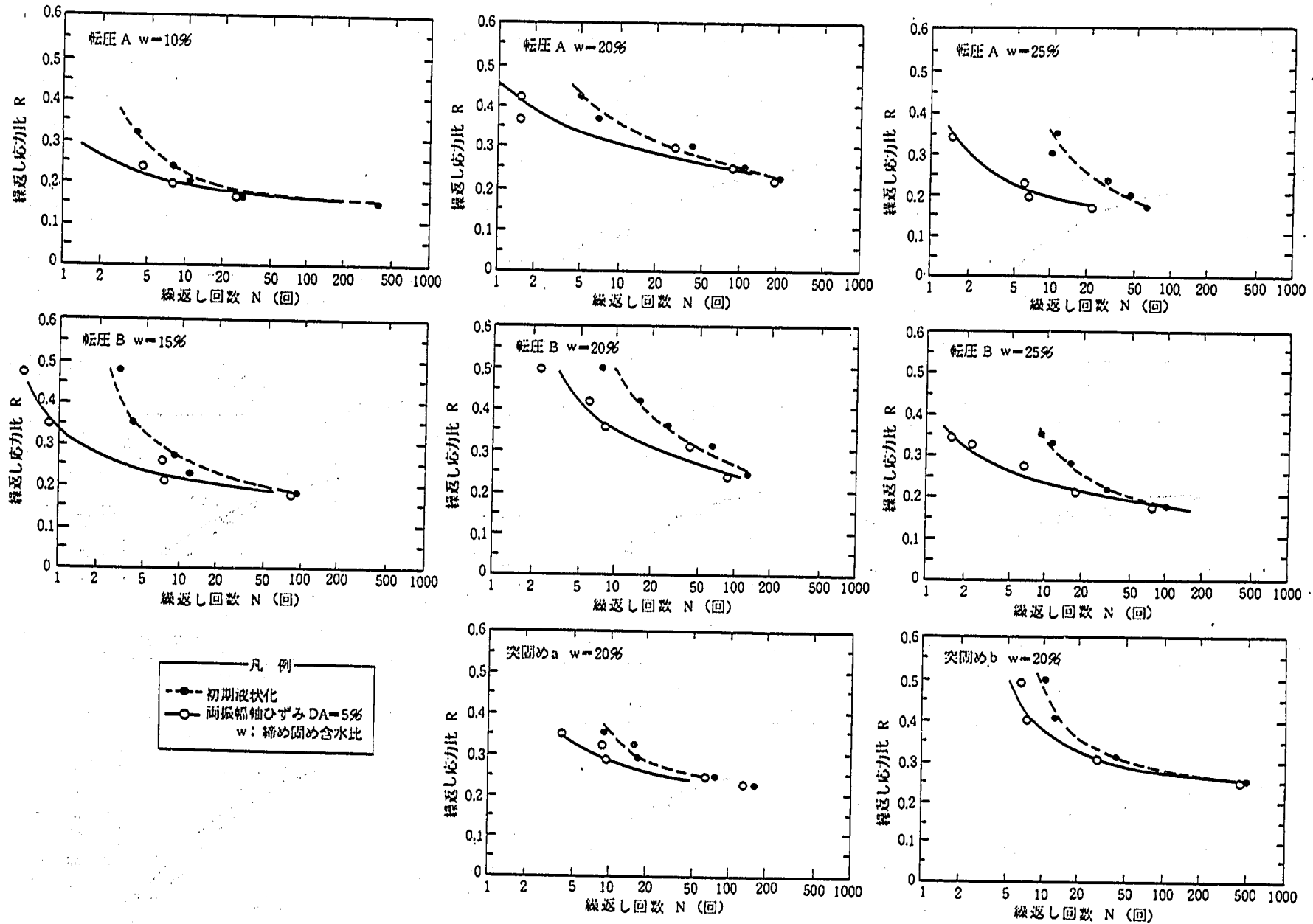


図-4.22 箕輪砂における繰返し応力比と繰返し回数の関係

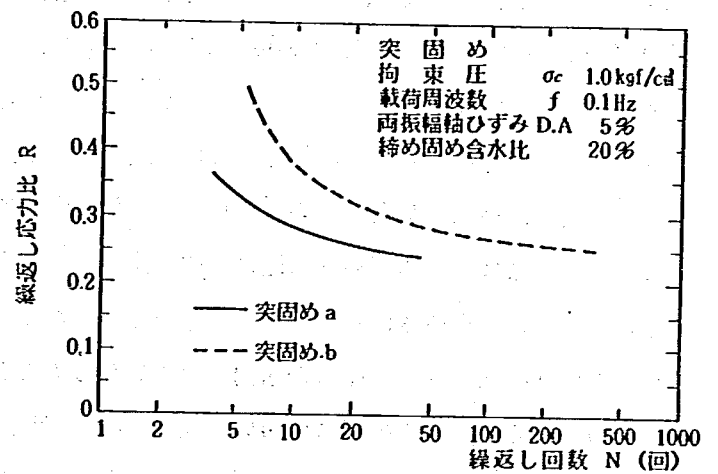
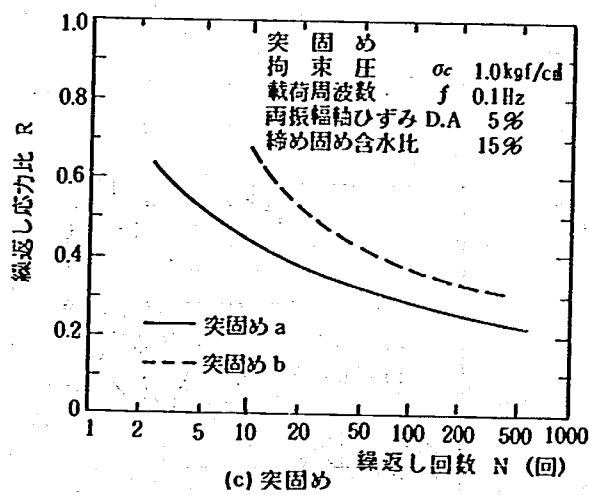
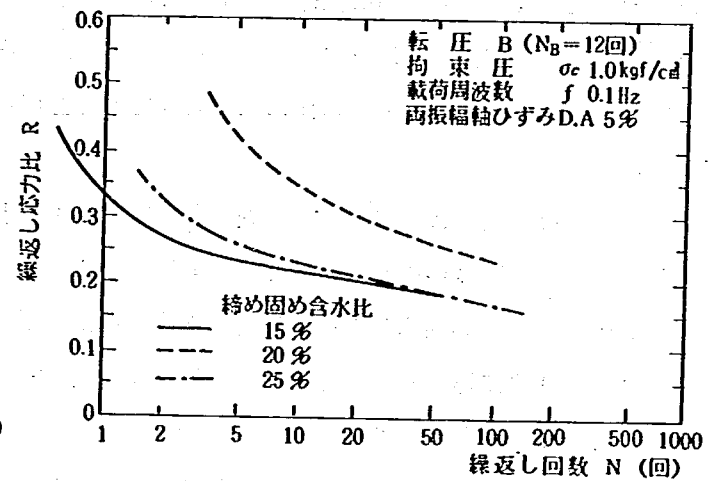
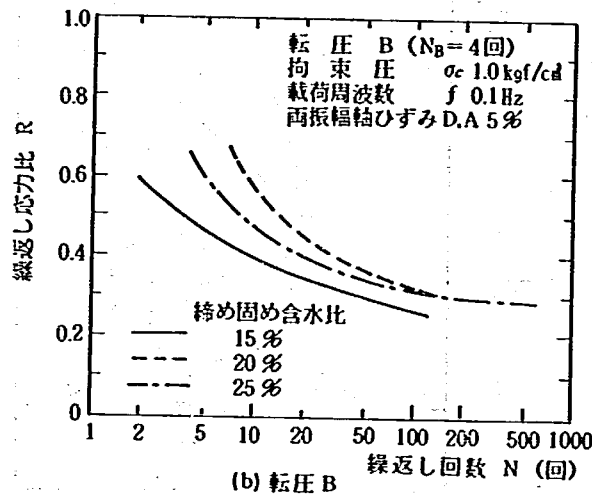
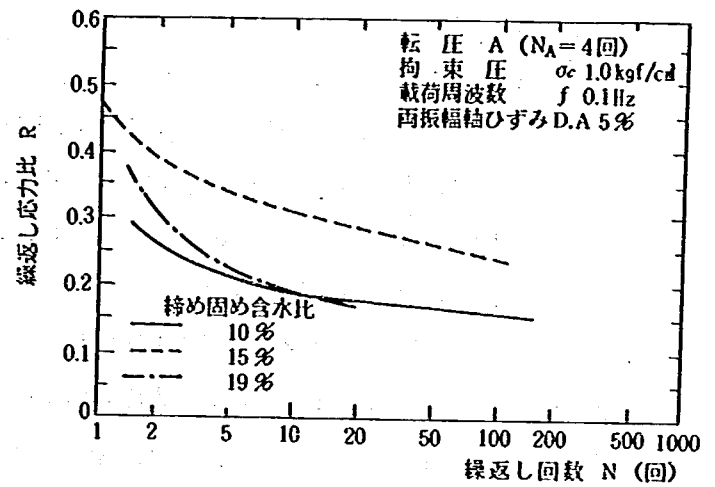
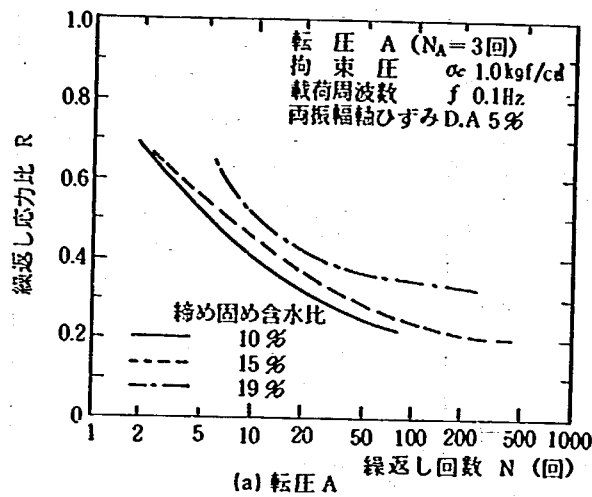


図-4.23 天羽砂の繰返し応力比～
 繰返し回数曲線
 (両振幅ひずみ D.A=5%)
 の比較

図-4.24 箕輪砂の繰返し応力比～
 繰返し回数曲線
 (両振幅ひずみ D.A=5%)
 の比較

な繰返し応力比を液状化強度 R_{l20} とし、各実験条件における液状化強度は、4.2.3 で示した表 - 4.9 に記した。

次に転圧供試体について、液状化強度 R_{l20} と締め固め含水比 w との関係を、供試体の乾燥密度の平均値と締め固め含水比の関係とともに図 - 4.25 に示す。この図から、どちらの試料においても、転圧 B の方が転圧 A より液状化強度 R_{l20} が大きく、乾燥密度と締め固め含水比の関係と類似していることがわかる。そこで、液状化強度と乾燥密度との関係を整理したものを図 - 4.26 に示す。この図には、転圧供試体の結果だけでなく、突固め供試体の結果も合わせて示した。この図から、液状化強度は乾燥密度と一意的な関係にあるのではなく、締め固め時の含水比の影響も受けることがわかる。

天羽砂では、転圧 A の場合、締め固め含水比が増すごとに供試体の乾燥密度が増し、液状化強度も増大する。また、転圧 B の場合、締め固め含水比が最適含水比より乾燥側から最適含水比まで増加していくときは、供試体の乾燥密度が増加し、液状化強度も増加していく。そして、締め固め含水比がさらに増加して最適含水比より湿潤側になると、締め固め含水比の増加に従い供試体の乾燥密度は減少し、液状化強度も低下する。しかし、締め固め含水比が乾燥側から最適含水比に達するまでの液状化強度よりも、最適含水比より湿潤側の方が強度が高い。そのため、液状化強度と乾燥密度との関係は、締め固め含水比の増加に伴って、ひらがなの「つ」の字を逆さにしたような曲線を描く。ただし、これは天羽砂の転圧 A と転圧 B の傾向が全く異なることを示すものでなく、転圧 A の場合においても、さらに締め固め含水比が大きくなれば転圧 B と同じ傾向を示すと考えられる。

箕輪砂においても、締め固め含水比が最適含水比を境に乾燥側であるか湿潤側であるかによって、同じ乾燥密度であっても液状化強度が異なることを図 - 4.26 は示している。しかし、天羽砂とは異なり、最適含水比より湿潤側の方が乾燥側より液状化強度は低く、締め固め含水比が増すに従い、液状化強度と乾燥密度の関係は、ひらがなの「つ」の字のような曲

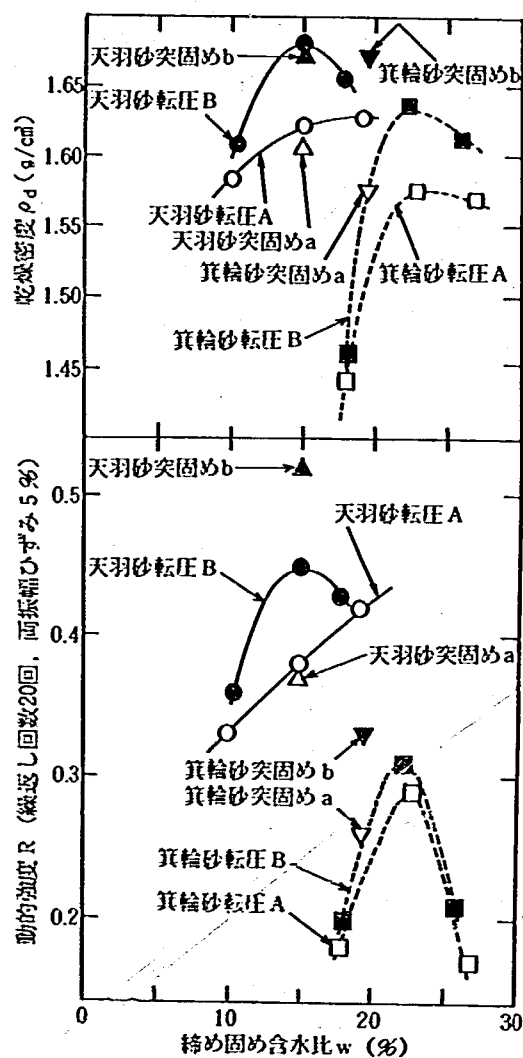


図 - 4.25 液状化強度と締め固め含水比の関係

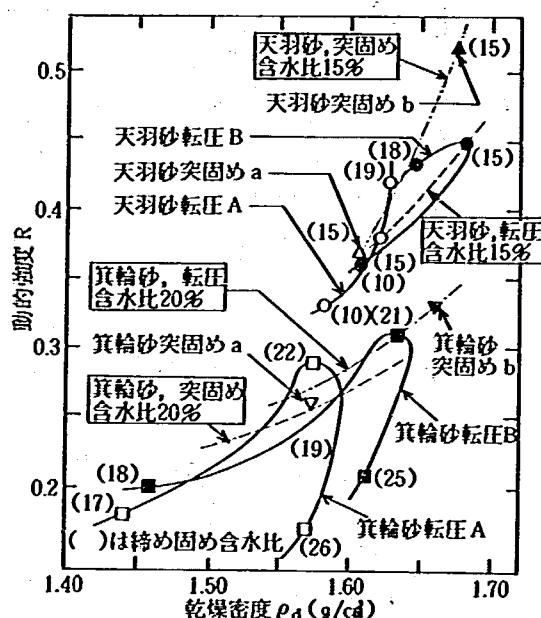


図 - 4.26 液状化強度と乾燥密度の関係

表-4.9(1) 繰返し三軸試験一覧表

締め固め方法	試料	目標含水比W (%)	エネルギー(回/層) 転圧回数(回)	供試体 No	物理特性				圧密後供試体条件				拘束圧 σ _c (kgf/cm ²)	B 値	試験結果				液状化強度 R			
					比重 G _s	含水比 W (%)	分 粒 分		湿潤密度 ρ _t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	間隙率 e	相対密度 D _r (%)			せん断応力比 (σ _d /2σ _c)	繰返し回数 N				D.A=2.5%	D.A=5%	(初期液状化)
							(4.96mm) (%)	(〜47μm) (%)								面振軸ひずみ			間隙率水圧比 u/e=1.0			
																2.5%	5%	10%				
振動ローラー	天羽	10	3	1	—	10.0	0.43	10.6	1.761	1.601	0.701	—	1.0	0.98	0.40	8.5	11	14	13	0.30	0.33	0.35
				2	—	9.9	0.06	10.5	1.744	1.587	0.716	—	1.0	0.98	0.34	21	23	26	27			
				3	2.724	9.7	0.21	10.8	1.748	1.593	0.710	—	1.0	0.99	0.65	0.5	23	3	4			
				4	—	10.1	0.08	10.1	1.729	1.570	0.735	—	1.0	0.98	0.30	27	29	31	34			
				5	—	10.0	0.11	10.1	1.714	1.558	0.748	—	1.0	0.97	0.25	60	62	65	64			
振動ローラー	天羽	10	4	1	—	10.2	0.90	11.5	1.777	1.614	0.688	—	1.0	0.98	0.43	7.5	9.8	13	12	0.31	0.36	0.38
				2	—	10.4	1.02	10.9	1.777	1.610	0.692	—	1.0	0.98	0.30	50	52	56	55			
				3	2.724	10.1	3.20	8.8	1.774	1.611	0.691	—	1.0	0.99	0.64	0.4	2.2	3	4			
				4	—	11.0	0.09	12.1	1.788	1.611	0.691	—	1.0	0.98	0.26	77	79	85	85			
				5	—	10.2	1.02	10.2	1.754	1.592	0.711	—	1.0	0.97	0.57	0.8	2.5	3	5			
振動ローラー	天羽	15	3	1	—	14.9	1.97	11.3	1.874	1.631	0.681	—	1.0	0.97	0.45	9	12	16	16	0.36	0.38	0.42
				2	—	15.1	2.15	9.0	1.866	1.621	0.680	—	1.0	0.98	0.59	2.5	3.5	6	7			
				3	2.724	14.6	1.93	11.8	1.862	1.625	0.676	—	1.0	0.98	0.22	346	350	355	353			
				4	—	15.0	0.51	9.3	1.852	1.610	0.692	—	1.0	0.96	0.30	48	50	53	53			
振動ローラー	天羽	15	4	1	—	14.7	1.02	10.2	1.928	1.681	0.620	—	1.0	0.97	0.63	4.8	8.5	18	10	0.43	0.45	0.42
				2	—	14.9	0.03	11.1	1.928	1.678	0.623	—	1.0	0.96	0.30	239	249	259	252			
				3	2.724	14.7	0.99	9.8	1.929	1.682	0.620	—	1.0	0.99	0.52	9	12	25	14			
				4	—	15.1	0.18	10.9	1.941	1.687	0.615	—	1.0	0.98	0.39	52	57	70	60			
振動ローラー	天羽	19	3	1	—	19.5	1.54	7.6	1.942	1.625	0.676	—	1.0	0.96	0.26	—	—	—	—	0.40	0.42	0.45
				2	—	17.9	0.69	11.4	1.928	1.635	0.666	—	1.0	0.95	0.60	4.8	6.3	10	10			
				3	2.724	19.5	0.02	11.6	1.943	1.626	0.675	—	1.0	0.95	0.36	211	216	225	220			
				4	—	19.5	0.93	10.5	1.944	1.627	0.674	—	1.0	0.96	0.47	10	14	19	16			
振動ローラー	天羽	19	4	1	—	18.0	3.61	9.9	1.934	1.639	0.662	—	1.0	0.96	0.64	1.2	2.3	7	5	0.40	0.43	0.46
				2	—	17.8	0.21	10.2	1.934	1.624	0.659	—	1.0	0.97	0.41	22	25	34	29			
				3	2.724	17.8	0.11	11.1	1.927	1.636	0.665	—	1.0	0.97	0.51	8.5	12	16	13			
				4	—	17.8	0.61	10.2	1.934	1.642	0.659	—	1.0	0.95	0.30	780	795	803	798			
				5	—	16.9	0.87	10.4	1.955	1.672	0.629	—	1.0	0.95	0.65	3.4	5.8	15	9			
突固め	天羽	15	10	1	—	14.1	0.0	10.9	1.848	1.620	0.681	74	1.0	0.99	0.48	9.5	11	14	13	0.36	0.37	0.42
				2	—	14.1	0.0	11.2	1.829	1.603	0.699	70	1.0	0.98	0.60	1.4	2.5	5	4			
				3	2.724	15.8	0.0	8.9	1.852	1.599	0.704	70	1.0	0.98	0.21	379	385	390	385			
				4	—	15.0	0.0	9.9	1.842	1.602	0.700	70	1.0	0.97	0.26	156	160	164	164			
突固め	天羽	15	20	1	—	15.0	0.0	11.3	1.927	1.676	0.625	86	1.0	0.98	0.63	6.5	11	16	13	0.48	0.52	0.55
				2	—	14.5	0.0	11.7	1.916	1.673	0.628	85	1.0	0.99	0.30	—	—	—	—			
				3	2.724	15.0	0.0	10.8	1.932	1.671	0.630	85	1.0	0.96	0.53	14	21	28	23			
				4	—	15.3	0.0	11.3	1.935	1.678	0.623	86	1.0	0.99	0.40	60	66	70	68			

表-4.9(2) 繰返し三軸試験一覧表

締め固め方法	試料	目標含水比W(%)	エネルギー(回/層) 転圧回数(回)	供試体 No	理 理 特 性				圧密後供試体条件				拘束圧 σ_c (kgf/cm ²)	B 値	試 験 結 果				液状化強度 R			
					比重 G_s	含水比 W (%)	分 分 (4.96mm) ($\sim 47\mu m$) (%)	細粒分 (%)	湿潤密度 ρ_t (kg/cm ³)	乾潤密度 ρ_d (kg/cm ³)	間ギャ 比 c	相対密度 D_r (%)			セン断力比 ($\sigma_d/2\sigma_c$)	繰 返 し 回 数 N				D.A= 2.5%	D.A= 5%	(初期液 状化)
																両振幅軸ひずみ						
																2.5%	5%	10%	間ギャ水圧比 $u/\sigma_c=1.0$			
クイヤ ローラー	真輪	15	3	1	—	(13.7)	9.1	21.1	1.651	1.469	—	—		0.96	0.17	24	26	27	29	0.17	0.18	0.19
				2	—	16.6	7.9	23.0	1.643	1.426	—	—		0.97	0.24	3.3	4.4	5.0	8.0			
				3	—	17.6	8.6	23.1	1.654	1.463	—	—	1.0	0.96	0.32	0.3	0.4	0.5	4.0			
				4	—	18.0	7.1	27.0	1.677	1.433	—	—		0.97	0.15	362	366	369	380			
				5	—	19.2	6.1	29.9	1.693	1.413	—	—		0.97	0.20	6.6	7.6	8.7	11			
クイヤ ローラー	真輪	15	12	1	—	16.9	6.1	26.4	1.683	1.458	—	—		0.98	0.48	0.3	0.5	0.6	3.0	0.19	0.20	0.21
				2	—	19.1	6.2	26.5	1.746	1.482	—	—		0.96	0.18	76	80	83	88			
				3	—	18.5	7.1	26.1	1.710	1.458	—	—	1.0	0.97	0.27	6.4	7.0	7.3	9.0			
				4	—	17.9	9.4	24.9	1.690	1.460	—	—		0.98	0.22	6.7	7.5	8.0	12			
				5	—	18.1	8.3	25.6	1.662	1.437	—	—		0.97	0.35	0.7	0.8	0.9	4.0			
クイヤ ローラー	真輪	20	3	1	—	22.7	5.6	25.8	1.884	1.554	—	—		0.96	0.42	1.2	1.6	2.4	5.0	0.28	0.29	0.30
				2	—	22.6	7.1	24.4	1.935	1.593	—	—		0.96	0.22	190	198	207	220			
				3	—	23.0	8.8	20.9	1.943	1.591	—	—	1.0	0.97	0.30	25	31	37	42			
				4	—	22.9	8.6	20.5	1.876	1.539	—	—		0.97	0.27	1.3	1.6	2.3	7.0			
				5	—	22.7	7.6	21.1	1.994	1.597	—	—		0.96	0.25	82	90	106	112			
クイヤ ローラー	真輪	20	12	1	—	21.7	6.4	30.5	2.021	1.673	—	—		0.96	0.50	0.4	2.3	6.4	8.0	0.28		0.38
				2	—	22.9	5.8	29.2	1.996	1.633	—	—		0.98	0.36	4.2	8.3	19	30			
				3	—	22.2	5.8	28.0	1.928	1.591	—	—	1.0	0.96	0.24	73	86	110	134			
				4	—	21.8	6.6	29.3	1.975	1.634	—	—		0.96	0.42	3.3	5.7	13	17			
				5	—	22.5	6.0	26.2	1.996	1.640	—	—		0.97	0.31	29	41	54	68			
クイヤ ローラー	真輪	25	3	1	—	27.1	7.2	24.2	1.952	1.545	—	—		0.98	0.20	3.7	6.7	9.7	45	0.16	0.17	0.25
				2	—	27.5	6.6	26.6	1.921	1.523	—	—		0.97	0.30	0.6	1.0	2.0	10			
				3	—	26.3	6.9	25.8	1.975	1.589	—	—	1.0	0.97	0.17	17	22	31	62			
				4	—	27.8	7.0	27.3	1.953	1.558	—	—		0.97	0.23	3.0	6.2	8.0	23			
				5	—	25.5	7.2	25.7	1.993	1.628	—	—		0.97	0.35	1.2	1.5	2.4	11			
クイヤ ローラー	真輪	25	12	1	—	25.7	10.3	20.0	2.018	1.627	—	—		0.96	0.33	1.3	2.3	4.2	11	0.20	0.21	0.26
				2	—	26.6	5.0	21.9	2.012	1.612	—	—		0.96	0.28	5.2	9.2	9.2	16			
				3	—	24.8	6.9	27.4	1.983	1.608	—	—	1.0	0.97	0.22	12	2.7	27	33			
				4	—	25.1	7.5	25.8	2.030	1.645	—	—		0.97	0.18	67	89	89	103			
				5	—	27.0	7.6	24.6	1.970	1.569	—	—		0.96	0.35	0.6	1.6	36	9.0			
突固め	真輪	20	8	1	—	19.4	5.4	31.2	1.827	1.585	—	—		0.96	0.22	6.4	8.5	10	16	0.25	0.26	0.28
				2	—	19.5	4.8	30.0	1.814	1.533	—	—		0.98	0.29	7.4	9.2	11	17			
				3	—	19.5	3.9	29.9	1.916	1.621	—	—	1.0	0.96	0.23	131	142	155	160			
				4	—	19.3	4.7	29.2	1.854	1.569	—	—		0.97	0.35	3.3	4.1	5.3	9.0			
				5	—	19.5	4.8	32.6	1.843	1.557	—	—		0.96	0.25	56	63	69	75			
突固め	真輪	20	14	1	—	19.6	5.0	28.1	1.984	1.673	—	—		0.97	0.80	0.2	0.3	0.4	2.0	0.31	0.33	0.36
				2	—	19.4	3.6	31.1	1.961	1.658	—	—		0.96	0.31	22	28	0.34	41			
				3	—	19.5	3.9	30.4	1.992	1.688	—	—	1.0	0.97	0.25	391	432	0.45	488			
				4	—	19.5	4.2	29.6	1.943	1.641	—	—		0.97	0.50	3.4	6.4	10	11			
				5	—	19.4	4.5	23.5	1.937	1.638	—	—		0.96	0.41	4.8	7.4	1.2	13			

線を描く。

天羽砂と箕輪砂では、締め固め含水比の違いによる液状化強度の差は、箕輪砂の方が大きい。

同一の試料においても、転圧AとBでは、転圧Bの方が、同じ密度に対して、含水比の違いによる液状化強度の差が大きく、3章で述べたように突固め試料においても同じ傾向がみられ、突固めエネルギーの大きな方が、同じ密度に対して、含水比の違いによる液状化強度の差が大きくなる。

一般的に静的排水強度は、低塑性土の場合は最適含水比より乾燥側で、シルト質土の場合は最適含水比より湿潤側で締め固めた方がせん断強度が大きいといわれているが²⁾、動的強度についても、土質の違いや締め固め含水比、転圧機械の違いによって、土粒子構造等が異なって、上述したような結果となると考えられる。

次に、図-4.26において、転圧供試体と突固め供試体の結果の比較を行う。まず、天羽砂において、締め固め含水比15%における転圧Aおよび突固めaの供試体を比べると、突固めaの方が転圧Aに比べ、液状化強度は若干小さいが、乾燥密度も若干小さいことから、乾燥密度が同じであれば強度の差は小さいものと推測される。締め固め含水比15%における転圧Bおよび突固めbの供試体を比べると、突固めbの方が転圧Bに比べ液状化強度は大きく、明らかに有意な差がみられる。箕輪砂において、締め固め含水比20%における転圧Aおよび突固めaの供試体を比べると、突固めaの方が転圧Aに比べ液状化強度は小さい。また、締め固め含水比20%における転圧Bおよび突固めbの供試体を比べると、突固めbの方が転圧Bに比べ液状化強度は大きい、乾燥密度も大きく、このことを考慮すると両者に有意な差はないといえることができる。これらの結果から、乾燥密度、締め固め含水比が同じであっても、締め固め方法が異なれば液状化強度も異なる場合があるといえることができる。しかし、全体として、転圧により締め固められた土と室内突固めにより締め固められた土の液状化強度は、おおむね同じということもできる。ただし、今回の実験では、室内突固めにより締め固められた土の供試体は、最適含水比付近の1つの含水比条件だけであり、上に述べたことが、他の含水比条件についてもいえるかどうかはわからないということに注意しなければならない。

転圧により締め固められた土と突固めにより締め固められた土との動的強度の差の要因としては以下のことがあげられる。

- ① 転圧機械等の締め固め方法の違いによる締め固め機構・締め固めエネルギーの違い。
- ② 試料の締め固め時の側方拘束条件の違い。
- ③ ①、②に伴う粒子骨格の違い。
- ④ レキ含有による影響
- ⑤ 試料の整形時における乱れの影響

②について、地盤を振動ローラーで転圧した場合と鉄製のモールドで突固めた場合では、水平方向力と垂直方向力の比率が異なる。地盤では、圧縮に伴う水平拘束力はあまり期待できず、土粒子は水平に層状に配列していると推測される。これに比べ、モールド内の試料を打ちつける場合、モールドによる側方拘束圧(土圧)が発揮し、かなりの水平方向力が働き土粒子は転圧試料よりもランダムに配列していると考えられる。前者のような層状配列よりもランダムに配列している方がせん断に対しての抵抗が高いと考えられる。

④については、前述しているように、突固めに用いた試料については4.76 mm以上のレキ分が除去されており、レキ分の有無が強度に影響を与えている可能性がある。

このように、一概に乾燥密度や締め固め含水比が同じだからといっても液状化強度は全く同じではなく、締め固め方法によっても液状化強度が変わることが明らかとなった。

4.4 まとめ

転圧機械で締め固められた地盤から採取した三軸供試体と、室内突固めによって作成した三軸供試体を繰返し三軸試験に供し、動的強度特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 転圧により締め固められた土の動的強度は、室内突固めにより締め固められた土の動的強度と同様に、乾燥密度と一意的な関係にあるのではなく、締め固め含水比や転圧機械、締め固めエネルギーなどの締め固め条件によって影響される。
- ② 本実験では、転圧供試体において締め固め含水比が最適含水比付近で液状化強度が最大となること、また、最適含水比の乾燥側と湿潤側とでは同一密度であっても強度が異なることが明らかとなった。天羽砂では、最適含水比より湿潤側より乾燥側の方が、また箕輪砂では、乾燥側より湿潤側の方が液状化強度が小さい。このように土質によっても動的強度特性は異なる。
- ③ 転圧により締め固められた土の動的強度と室内突固めにより締め固められた土の動的強度を比較してみると、最適含水比付近での締め固め含水比では、締め固め方法の違いにより液状化強度が異なる場合があることが明らかとなった。しかし、その違いはさほど大きくはない。
- ④ これらの原因として、乾燥密度、締め固め含水比、締め固め方法の違いによって、土粒子構造が変化するため、同じ乾燥密度、締め固め含水比でも締め固め方法が異なれば、動的強度が変化すると考えられる。

5. 締め固め土の動的強度特性に関するまとめ

締め固め土の動的強度特性を調べるため、室内突固めや転圧機械によって締め固められた土を供試体として繰返し三軸試験を行った結果、締め固め土の飽和非排水条件での動的強度は単に乾燥密度だけに支配されるのではなく、締め固め含水比、締め固め方法、締め固めエネルギーによっても影響されることが明らかとなった。特に転圧により締め固められた場合と室内突固めにより締め固められた場合との動的強度の差は、最適含水比付近の締め固め含水比の場合、若干みられたが、巨視的にみれば、動的強度はほぼ同じといえる。

転圧により締め固められた土と室内突固めにより締め固められた土の動的強度が等しいということは、アースダム等の土構造物において動的強度を求めるとき、原位置においてサンプリングをせずに、室内突固めによって原位置と同じ乾燥密度と締め固め含水比である三軸供試体を作成し、繰返し三軸試験を行ってもよいことを示すが、今回の試験結果からでは、最適含水比付近以外の含水条件における動的強度の違い等のため、そこまではいいきれない。このことは、さらに調査し、明らかにしていかなければならない課題である。

参 考 文 献

- 1) 河上房義, 柳沢栄司: 土の締め固め, 鹿島出版会, 1982.
- 2) 久野悟郎: 締め固めと力学特性の相関, 土と基礎, Vol. 22, No 4, pp. 5~10, 1974. 4.
- 3) Ladd, R. S. : Specimen Preparation and Liquefaction of Sands, J. GED, ASCE, Vol. 100, NoGT 10, pp. 1180~1184, 1974.
- 4) Ladd, R. S. : Specimen Preparation and Cyclic Stability of Sands, J. GED, ASCE, Vol. 103, NoGT 6, pp. 535~547, 1977.
- 5) 三原正哉: 盛土材料の液状化抵抗に及ぼす供試体作成方法の影響について——(その1) 締め固め含水比および締め固め方法の影響, 間組研究年報, pp. 23~32, 1984.
- 6) 三原正哉: 同上——(その2) 締め固め含水比および締め固めエネルギーの影響, 間組研究年報, pp. 147~153, 1985.
- 7) Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K. and Arulanandan, K. : Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction, J. GED, ASCE, Vol. 103, NoGT 2, pp. 91~108, 1977.
- 8) 龍岡文夫: 土質せん断試験機の設計と製作——試験法あれこれ——, 地質と調査, 通巻第29号, pp. 53~56, 1986. 9.
- 9) Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fujii, S. : Effect of Sample Preparation Method on Cyclic Undrained Strength of Sand in Triaxial and Torsional Shear Tests, Bulletin of ERS, No17, 1984.
- 10) 吉国洋, 宇野尚雄, 柳沢栄司: 土の力学(Ⅱ)——特殊土・締め固め・土と水——, 新体系土木工学17, pp. 155~178, 技報堂出版, 1984. 9.

フィルダム材料の動的強度に
関する実験報告書

I S S N 0386-5878
土木研究所資料 第2755号
平成元年3月(1989年)
古賀泰之, 松尾 修,
島津多賀夫, 唐沢安秋

要旨

フィルダム材料の動的強度に関し, 部分排水条件下での粗粒材の
液状化強度, および締め固められたアースダム材料の動的強度を繰
返し三軸試験により調べている。

キーワード: フィルダム, 動的強度, 排水, 締め固め

郵便はがき

305-□□

41円切手
をはって
下さい

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所

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 2755 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名

印

土木研究所資料第2755号

