

マイクロフィルム用資料

土木研究所資料

アースダム材料の繰返し強度特性に関する 実験報告書

平成11年3月

建設省土木研究所

耐震技術研究センター動土質研究室

Copyright ©(1999) 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。

アースダム材料の繰返し強度特性に関する 実験報告書

耐震技術研究センター	動土質研究室	室長	松尾修
		研究員	田本修一
		元研究員	島津多賀夫
		研究員	高橋晃浩*
		研究員	林裕士**

要 旨

アースダムに用いられる粒度範囲の土質材料について締固め条件と動的強度の関係を調べた。締固め方法として室内突固め、振動ローラー及びタイヤローラーによる実機転圧を取り上げた。その結果、締め固められた砂質土の飽和非排水条件での繰返し強度（動的強度）は、締固め含水比の影響を強く受け、最適含水比よりも湿潤側で締め固められた場合、乾燥側で同一密度に締め固められたものに比べて小さいこと、締固め含水比が一定であれば、締固め方法にかかわらず締固め密度との間に一意的な関係が認められること等を示した。

キーワード：アースダム、動的強度、締固め、室内突固め、実機転圧

* 現 関東地方建設局 千葉国道工事事務所 酒々井出張所 技術係長

**現 関東地方建設局 千葉国道工事事務所

目 次

1. 概 要	1
2. 研究の目的と背景	2
3. 実験の概要	5
4. 実験方法	6
4.1 試 料	6
4.1.1 物理特性	6
4.1.2 締固め特性	6
4.2 供試体作成	8
4.2.1 室内突固めによる供試体作成	8
4.2.2 現場転圧による供試体作成	11
4.3 繰返し三軸試験及び単調載荷三軸圧縮試験	21
5. 実験結果	25
5.1 供試体作成結果	25
5.2 単調載荷三軸圧縮試験結果とその考察	26
5.3 繰返し三軸試験結果とその考察	37
6. まとめ	49
参考文献	50

1. 概 要

アースダムに用いられるような細粒分を多く含む材料の動的強度変形特性を把握することは、アースダムの地震時安定を検討する上で重要な項目である。アースダム堤体は転圧により築造される。細粒分を多く含む締固め土の動的強度については、締固め度や締固め含水比、締固め方法にも影響されるが、その影響度合については未だ明らかになっていない点が多い。そこで、本研究では、細粒分を多く含む締固め土の飽和非排水条件下における繰返し強度（動的強度）特性を実験的に調べ、動的強度及び静的強度特性、及び両者の関係を調べようとしたものである。試料は、アースダムに用いられ得る粒度範囲の土質材料である。締固めの方法としては、ランマーによる標準的な室内締固め、および振動ローラとタイヤローラによる実機転圧の合計 3 種類の方法を用いた。静的・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、繰返し及び単調載荷圧密非排水三軸圧縮試験を行った。

なお、本調査は河川総合開発事業調査費による調査課題「アースダム材料の動的変形強度特性に関する調査」（平成 6 年度～平成 9 年度）において実施したものである。

2. 研究の目的と背景

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。「フィルダムの耐震設計指針（案）¹⁾」によると、堤体材料として用いられる砂礫及びロック材料のような粗粒材料については、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。しかし、同指針（案）にも述べられているように、フィルダムのコア材、アースダムの築堤材料として用いられるような材料については、動的強度に関するデータの蓄積が少なく、通常排水強度に安全側の余裕をみた値を設計値としている。材料のせん断強度を的確に把握することはフィルダムの安定性を検討する上での最重要課題の一つであり、適切なせん断強度を設計値として採用する必要がある。そこで、本研究では、フィルダムのコア材、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、締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) 締固め方法の違いによる土の締固め特性の違い、および動的強度特性の違いを知ること。

我が国では、建設省関係のフィルダムはほとんどがロックフィルダムであり、地方自治体等が建設するいわゆる補助ダムにおいて、土質材料を用いたアースダムが建設される例がある。なお、農林水産省管轄の農業用ダムには築造年代の古いアースダムが多い。²⁾

ロックフィルダムについては、我が国で発生した地震において致命的な損傷を被った事例はなく、概してきわめて軽微な損傷に留まっており、耐震性が高いことが実証されている。例えば、1984年長野県西部地震では、堤高105mの牧尾ダムの堤頂で最大加速度0.4-0.5g（推定値）の応答を記録したにも拘わらず、変状としては天端に若干のきれつを生じたが本体に異常はなく、機能的な損傷は生じなかった³⁾。また、1995年兵庫県南部地震では、地震断層である野島断層から至近距離に位置する堤高33.5mの常磐ダムなどいくつかのフィルダムが地震動の作用を受けたが、ごく軽微な被害が認められた程度であった⁴⁾。

他方、アースダムについてはこれまでの地震で致命的な被害を生じた例がある。最も有名なのが、1971年サンフェルナンド地震におけるロワーサンフェルナンドダム（Lower San Fernando Dam）の崩壊である。堤高43mのアースダムの堤頂を含む上流側のり面に非常に深いすべり崩壊が生じた。水締め工法で築造された砂質土の上流側シェル部分が液状化したことが崩壊原因とされている⁵⁾。この水締め工法は米国西部の古いダムでは広く使われていた工法であるが、締め固めることがないため、極めて密度の緩い状態が生じ得る。

我が国では築造年代の古い農業用ため池に大規模な地震被害の例が見られる。たとえば、1983年日本海中部地震では堤高5.4mの勘助溜池が、決壊は免れたものの最大1.8mの沈下を生じた。築堤材料は細粒分含有率が20%未満の砂質土であるが、この被害の主因は基礎地盤の液状化であろうとされている⁶⁾。また、1995年兵庫県南部地震では堤高5.5mの井手の尻溜池が決壊した。築堤材料および基礎地盤はいずれもN値が5以下の細砂であった。主に基礎地盤の液状化が原因と推定されている⁷⁾が、堤体材料の液状化の可能性も否定できないと考えられる。

以上に述べたように、シルト質砂ないしは砂質シルトなどの砂質土系の土質材料を築堤材料に用いたアー

スダムは、締固めが不十分である場合には、浸透水で飽和した部分が地震時に液状化して崩壊に至る可能性があることを示している。

液状化のような地震時の軟化現象を生じさせないためには、十分に締め固めることが大切であることはその後の多くの研究により明らかにされている。

しかしながら、砂質土系の材料を用いてアースダムの耐震検討を行う場合、想定する地震動に対して液状化の恐れがないようにするためにはどの程度締め固めれば十分であろうかということは必ずしも明らかにされていない。設計実務とは少し離れるが、築堤材料の締め固め密度を何段階かに変えて供試体を準備し、想定する地震動により発生するであろう繰返し応力をそれら供試体に作用させる一連の試験を行えば、液状化の発生を防ぐに必要な締め固め密度を知ることができるであろう。

ところが、ここにも複雑な要因が絡んでいる。それは、砂質土の締め固め密度と液状化強度のような繰返し非排水せん断強度との関係は必ずしも一意的ではないことである。このことに関連する主な研究事例を以下に紹介する。

1) Mulilis et al.(1977)⁹⁾ は、きれいな砂を用いていくつかの異なる供試体作成法を用いて所定の密度の供試体を用意し、非排水繰返し三軸圧縮試験を実施したところ、同じ密度であっても供試体の作り方により繰返し強度には大きな差が生じることを初めて見出した。

2) 龍岡ら(1984)⁹⁾ は、均等粒径のきれいな砂である豊浦砂と10%未満の細粒分を含む浅間山砂を用いて上と同様の試験をより系統的に行った。その結果、上と同様の結果が得られた。なお、この研究の背景として、当時、東京湾横断道路の人工島(名称:「うみほたる」)を千葉房総半島の浅間山砂で築造することが計画されており、その地震時安定問題に関連して行われたものである。

3) 三原ら(1985)¹⁰⁾ は、砂質土を締め固めるときの含水比やエネルギーに着目し、2種類の砂を用いて同様の試験を実施した。その結果、締め固めた砂の飽和非排水繰返し強度には密度以外に締め固め含水比や締め固めエネルギーによっても影響されることを見出した。

4) 筆者ら(1989)^{11), 12)} は、以上の研究がいずれも室内試験レベルで行われており、現場での転圧条件との関連付けがなされていないことに着目し、締め固め方法と締め固め含水比が繰返し強度に及ぼす影響を調べた。その結果、室内突固めと転圧機械による現場締め固めによって形成された締め固め土の飽和非排水繰返し強度は異なること、また、締め固め含水比の影響が大きいこと、さらにそれらの影響度合いは土質材料によっても異なることなどを見出した。しかしながら、この研究では、3種類の土質材料を使用したために、かならずしも系統的な試験になっておらず、さらなる検討の余地を残した。

5) 以上の実験的な研究では、いずれにおいても、締め固め密度と非排水繰返し強度の間には必ずしも一意的な関係が成立しないことが示されている。締め固め方法が異なると力学特性が異なることの要因は、マトリクス(粒子配列構造)や見かけ上の過圧密効果などの微視的構造にあると類推される。そこで、Jang et al.(1998)¹³⁾ は、異なる供試体作成法により得られた試料について、それらの供試体内の微視的な間隙比の分布を調べた。その結果、同じ供試体密度であっても、微視的な間隙比の空間的なばらつきは、湿潤突固め法よりも空中落下法によるものの方が小さいことを示した。ただし、この研究では対応する力学試験データは示されていない。

上記1)、2)などの実験的研究によれば、いずれも空中落下法による供試体が最も小さな繰返し強度を示すことが報告されている。これらの実験事実より、供試体内の密度のばらつきが小さいものほど繰返し強度が小さくなると結論するのは早計である。Oda(1972)¹⁰⁾によれば、空中落下法による砂の供試体は粒子配列の異方性が大きく、これに対応して変形強度特性の異方性も大きいことが示されている。粒子配列の異方性と供試体の非一様性の影響のいずれが力学特性に大きく影響しているか比較できるデータはないが、おそらく粒子配列の異方性の影響の方が大きいと思われる。

本研究では、上記4)の継続として位置付けるものであり、1種の材料を用いて系統的な試験を行ったものである。

3. 実験の概要

本実験の目的は、転圧されて形成されたアースダム材料が浸透水により飽和した状態で地震動の作用を受けたときに発現する繰返し変形強度特性を把握しようとするものである。しかし、前章で述べたように、土質材料の繰返し強度特性は締固め方法により異なることが既往の研究により明らかにされている。

そこで、ここでは実機転圧と室内突固めの違い、及び締固め含水比が砂質土の非排水繰返し強度に及ぼす影響について実験的に調べた。

締固めは振動ローラ、タイヤローラによる転圧、及びランマーを用いた室内突固め法によった。締め固めて形成された地盤ないしはモールド内試料から三軸供試体を切り出し、非排水繰返し三軸圧縮試験に供した。最後に、このようにして得られた繰返し強度を、締固め方法、締固め含水比等の観点から比較考察した。なお、単調載荷非排水三軸圧縮試験を併せて実施し、有効応力に関するせん断抵抗角の大きさについても検討した。図-3.1に実験手順の概要を示す。

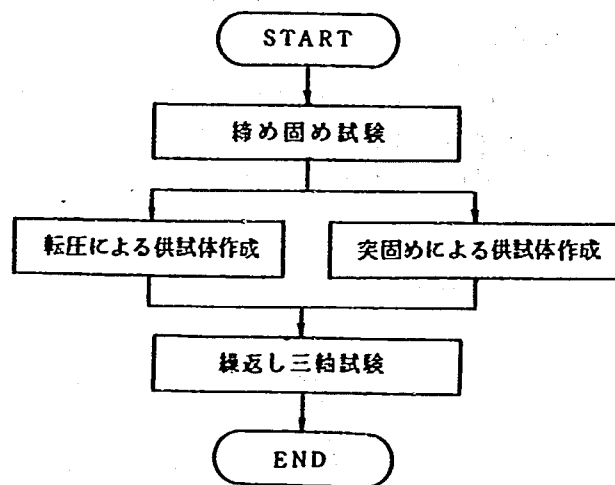


図-3.1 実験手順の概要

4. 実験方法

4.1 試料

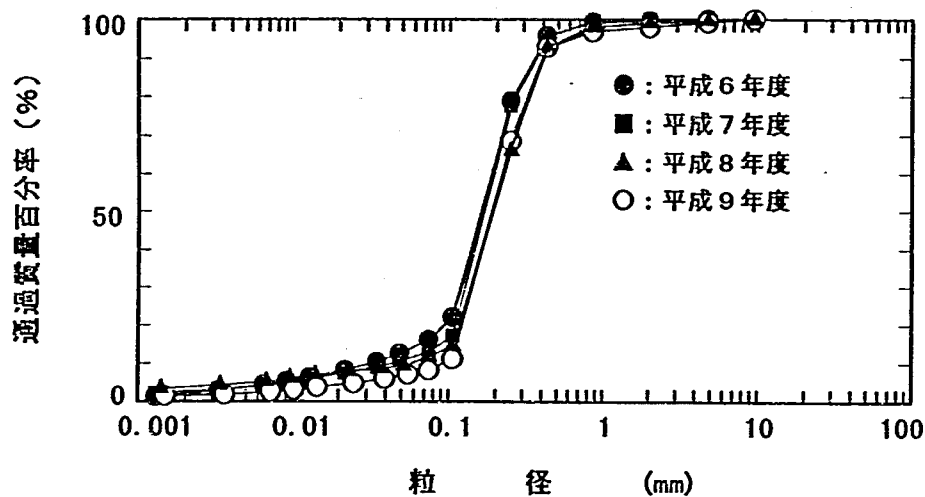
4.1.1 物理特性

実験に用いた砂は、茨城県江戸崎町時崎内の台地から採取した砂（以下江戸崎砂と呼ぶ。）である。表－4.1に江戸崎砂の主な物性値を示す。また、図－4.1に粒度分布を示す。本実験は4年度にわたり実施したため、ここには各年度のデータを示す。この試料は細粒分質砂（SF）あるいは細粒分混じり砂（S－F）に分類される。粒度分布のバラツキは比較的小さい。

表－4.1 試料の物理特性

実施年度	6年度	7年度	8年度	9年度
土粒子の密度 ρ_s	2.759	2.752	2.729	2.718
平均粒径 D_{50} (mm)	0.16～0.17	0.17～0.18	0.19～0.21	0.19～0.21
均等係数 U_c	5.1～6.6	3.7～5.1	3.5～4.8	2.0～2.7
細粒分含有率 F_c (%)	15～18	13～14	11～13	7～9
最大乾燥密度* ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.328	1.328	—	—
最小乾燥密度* ρ_{dmin} (g/cm ³)	0.986	0.928	—	—
日本統一土質分類	細粒分質砂	細粒分混じり砂	細粒分混じり砂	細粒分混じり砂

*) 地盤工学会基準による。ただし、細粒分含有率5%で、最大密度最小密度試験の適用範囲外。



図－4.1 試料の粒径加積曲線

4.1.2 締固め特性

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固め試験を行った。以下に方法及び結果を示す。

(1) 方法

図－4.2に締固め試験の手順の概要を示す。また、表－4.2に締固め試験の概要を示す。3種類の突固めエネ

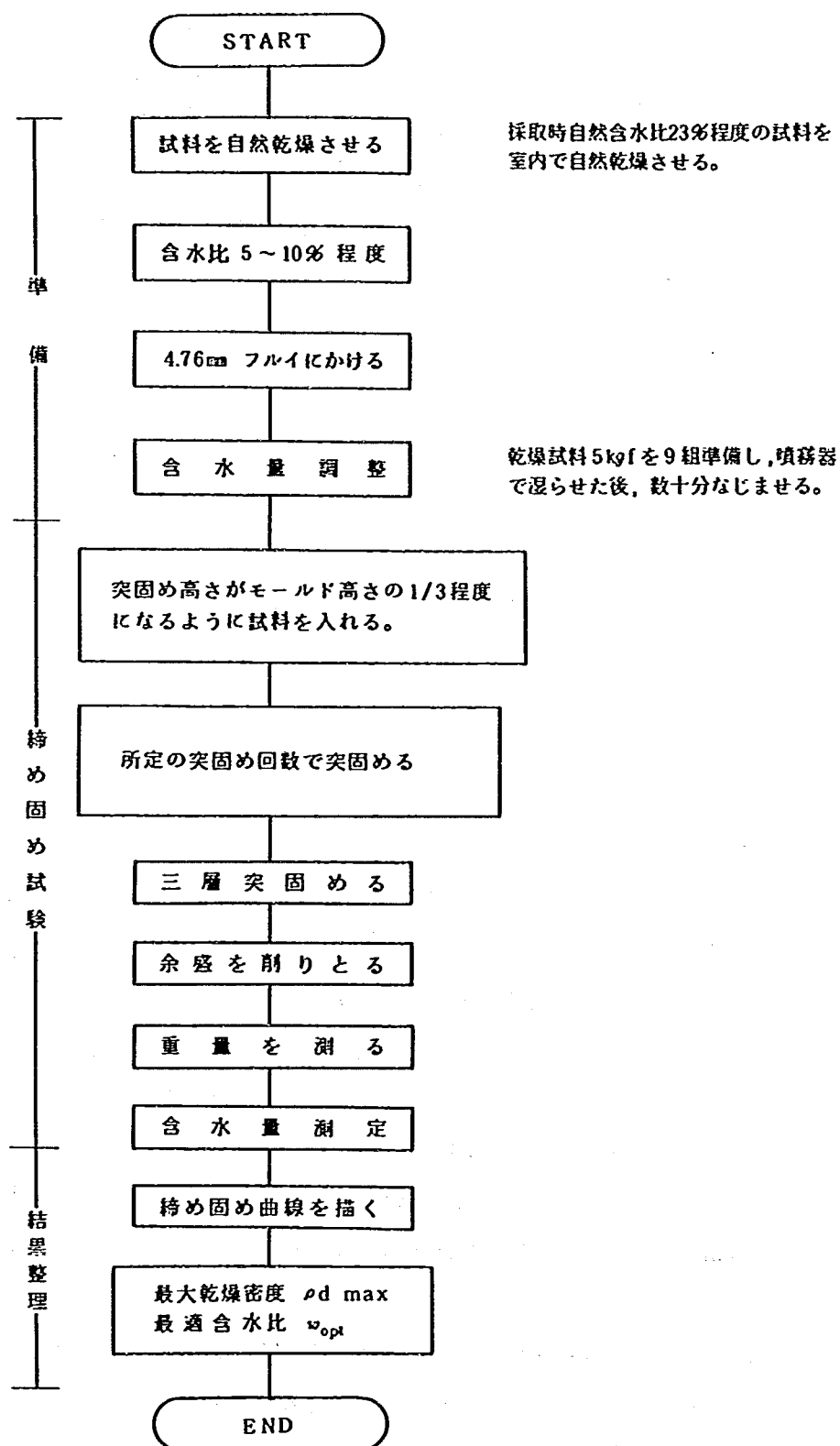


図-4.2 締め固め試験の手順の概要

ルギーを用いた。「突固めエネルギー $E_c=100\%$ 」とは土質試験法¹⁹⁾によるA-b法 (JGS T 711-1990) に相当し、一層当たりの突固め回数は25回である。また、「 $E_c=200\%$ 」、「 $E_c=300\%$ 」とは、それぞれ突固め回数をその2倍、3倍としたものである。なお、突固めには、自動締め固め試験装置を用いた。

表-4.2 締固め試験の概要

締固め条件 \ 締固めエネルギー E_c	100%	200%	300%
呼 び 名	A-b 法		
モ ー ル ド 内 径	10cm		
突 固 め 層 数	3層		
各層当たりの突固め回数 (回)	25回	50回	75回
ラ シ マ ー 重 量	2.5kgf		
落 下 高 さ	30cm		
許 容 最 大 粒 径	4.76mm		

(2) 結 果

図-4.3に江戸崎砂の締固め曲線を示す。図中に各突固めエネルギーの下での最適含水比 w_{opt} と最大乾燥密度 ρ_{dmax} を示す。この図から、突固めエネルギーが高くなるにつれ最適含水比が低くなり、最適含水比より乾燥側での曲線勾配が急になっている。また、 $E_c=100\%$ 、 200% 及び 300% の最適含水比より湿潤側においては、最適含水比より乾燥側の曲線勾配よりも急であることがわかる。

4.2 供試体作成

供試体の作成は、室内突固め及び現場転圧の2方法によった。

4.2.1 室内突固めによる供試体作成

供試体作成の手順の概要を図-4.4に示す。まず、現場から搬入した試料を室内で $w=5\sim10\%$ まで自然乾燥させる。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、これは、乾燥した試料5kgfをハカリ上のバットに入れ、そこへ噴霧器で水を所定の量加えることにより行った。加える水の量は、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、数十分なじませる。

つぎに、図-4.5に示す二つ割りモールドの内壁をラップフィルムで覆い、上述した試料をモールド内へ投入し突固めて、直径 $\phi=10\text{cm}$ 、高さ $H=13\sim15\text{cm}$ の切り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-4.6に供試体の整形概要を示す。以下、詳細を説明する。

モールドを自動締固め試験装置に設置し、試料を必要重量の1/3ず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固め試験の結果から、切り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、切り出したブロックの端面を整える。切り出したブロックをトリマーにセットし、直径 $\phi=5\text{cm}$ に注意深く整形する。トリマーから取り外した後、マイターボックスに入れ、端面整形を行い高さ $H=10\text{cm}$ とする。

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、電子天秤を用い、高さ及び直径の測定はノギスを用いた。

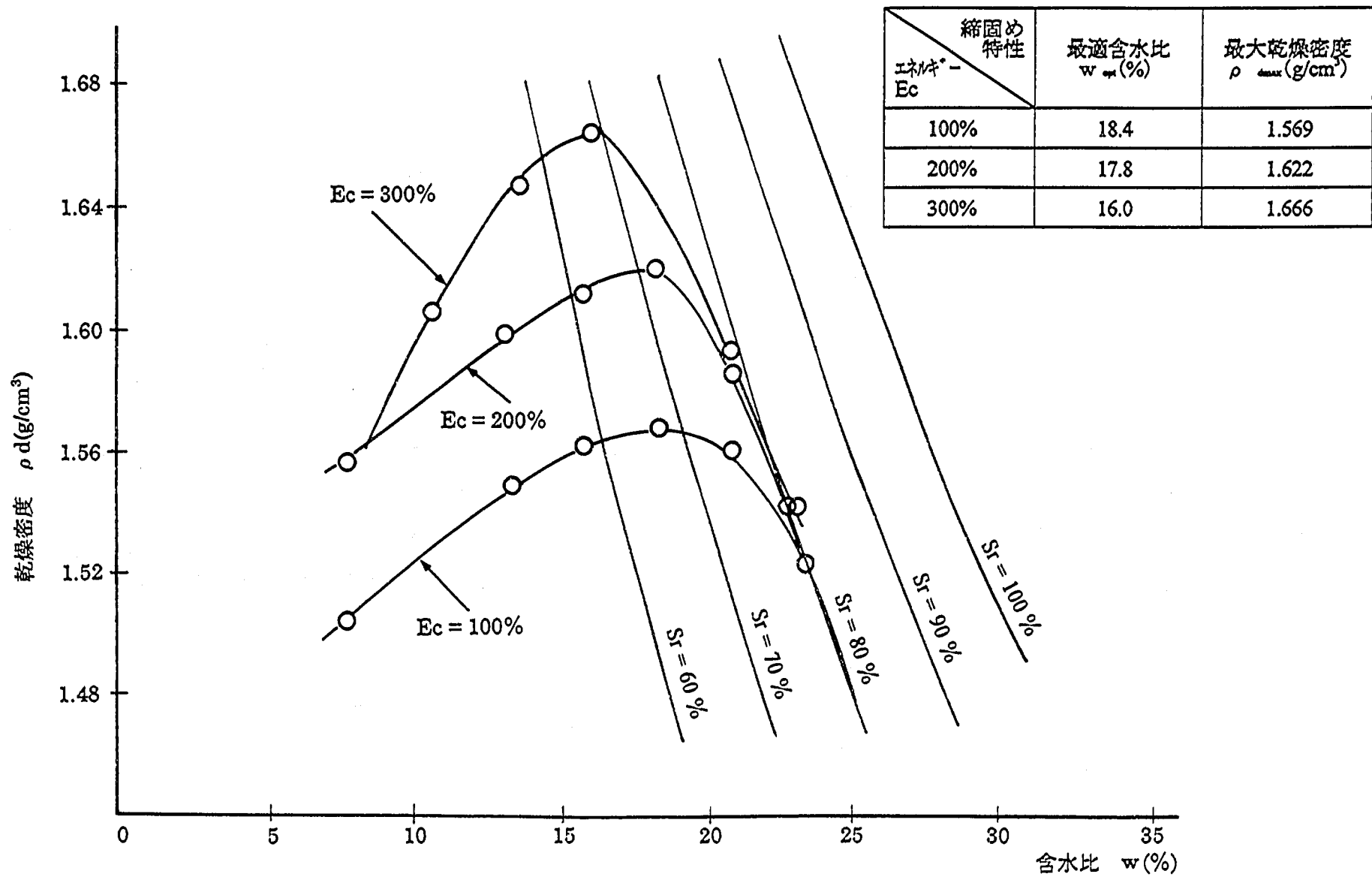


図-4.3 江戸崎砂の締固め曲線

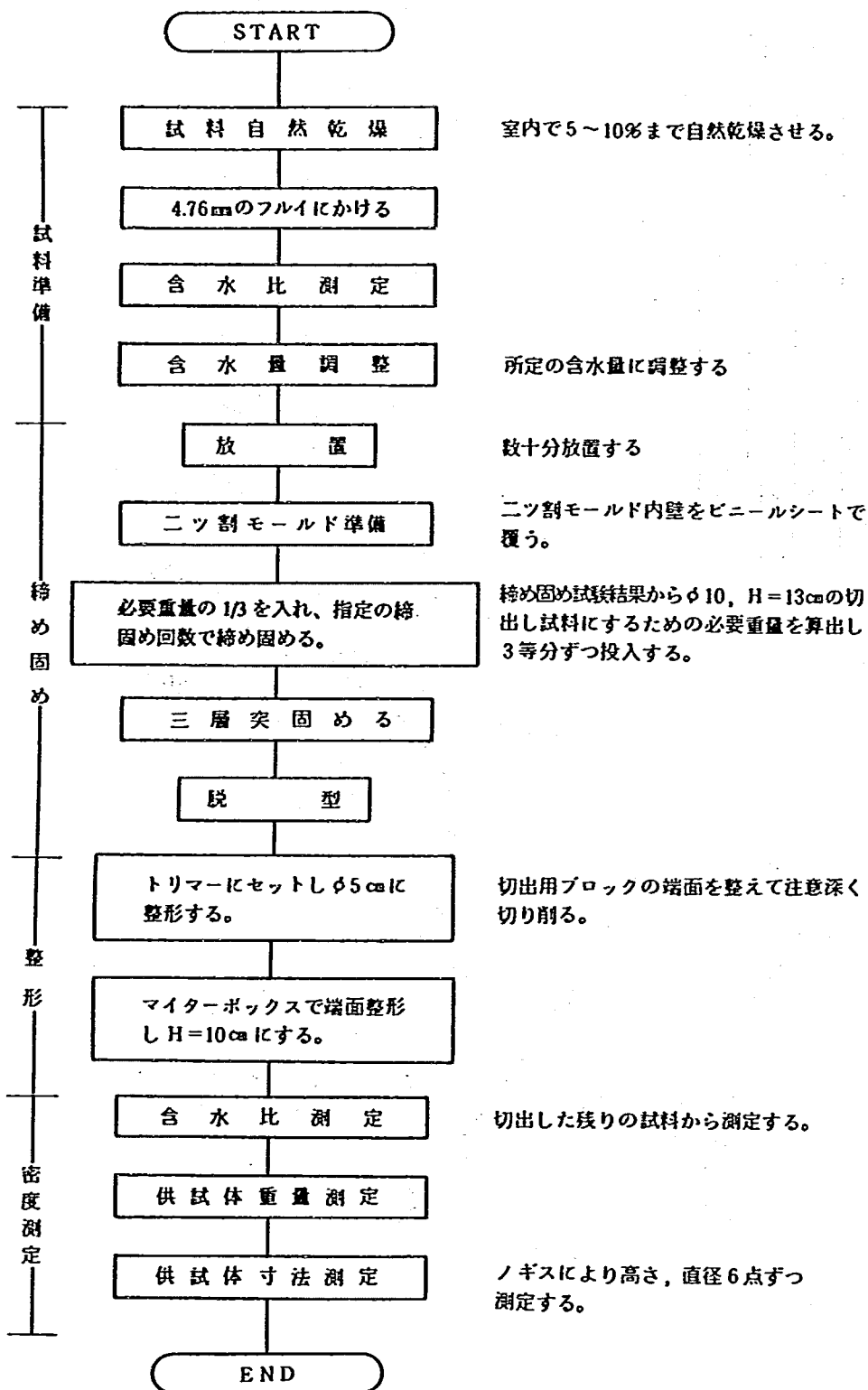


図-4.4 供試体作成手順

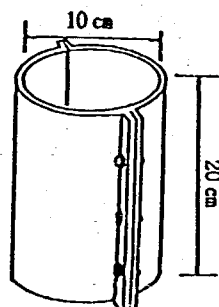


図-4.5 供試体作成用二つ割りモールド

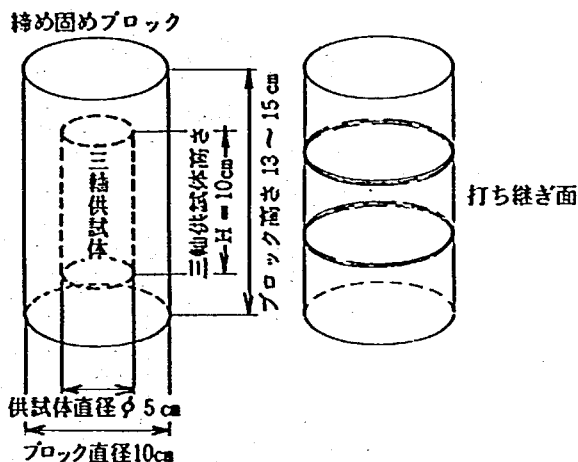


図-4.6 供試体の整形概要

4.2.2 現場転圧による供試体作成

室内ピットに締め固め機械（振動ローラ：写真-4.1、タイヤローラ：写真-4.2）を用いて転圧により締め固めた地盤からブロックサンプリング（ $\phi \approx 10\text{cm}$ 、 $H \approx 15\text{cm}$ ）法により試料を採取する。この試料から、 $\phi = 5\text{cm}$ 、 $H = 10\text{cm}$ の三軸供試体を整形する。用いた締め固め機械の仕様を表-4.3、4.4に、供試体の作成条件を表-4.5に示す。

図-4.7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、平坦に敷き均し、転圧機械で十分に締め固めた。基層地盤は、含水比18%程度の実験試料を用い、平坦に敷き均し、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部分からなっており、基層地盤上に人力で撒きだした。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-4.5に示すように、ゾーン2の含水比 w_2 を最適含水比 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。ダミー部分の含水比は、18%程度とした。

含水比の調整は、以下の手順で行った。

- ① 試料の入ったフレキシブルコンテナを屋内の広場に搬入し、フレキシブルコンテナ1個当たりの平均重量を求めるため、無作為にフレキシブルコンテナを4袋抽出する。2tダンプトラックにフレキシブルコンテナを1袋ずつ載せてトラックスケール（写真-4.3）を用いてフレキシブルコンテナの重量を測定する。求めたフレキシブルコンテナ1個当たりの平均重量を用いて各含水比ゾーンの作成に必要な土量を求め、試料を分割する。
- ② 含水比条件の中で最も含水比の低いゾーン1については、屋内の広場に厚さ7cm程度に敷き均し、扇風機を用いて、ゾーン1の含水比未満になるまで空気乾燥させる。乾燥後、均一になるようにタイヤショベルで十分に混合する。ゾーン2、3については、分割した試料をそれぞれゾーン1と同様にタイヤショベルで混合する。
- ③ 各ゾーン毎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、分割した試料に散水して、タ

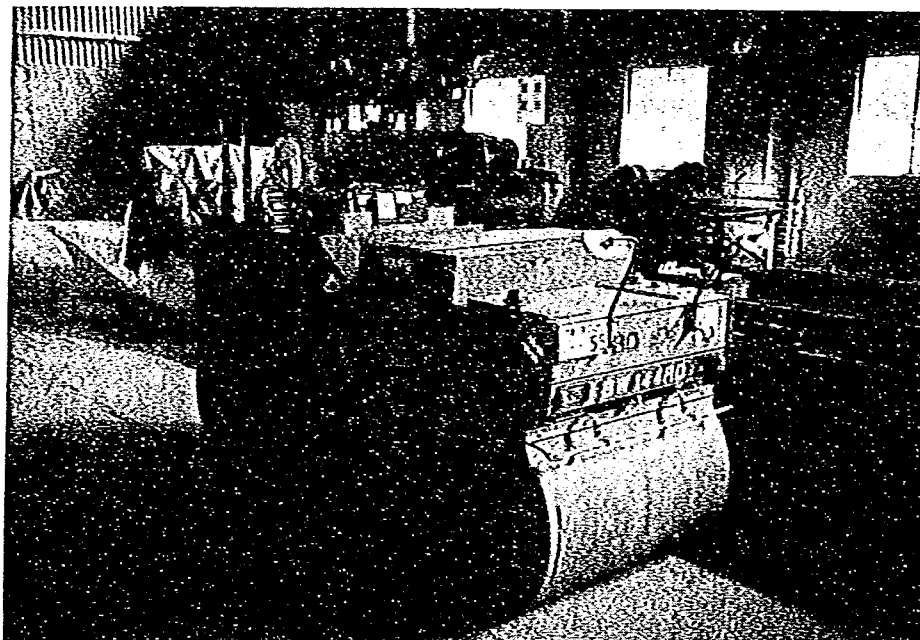


写真-4.1 振動ローラ



写真-4.2 タイヤローラ

イヤショベルで十分に混合する。

人力で撒き出した表層地盤は、締固め機械で締め固め、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種類の異なる締固めエネルギーの試料を得た。図-4.8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、目標乾燥密度 ρ_{dA} となるまで転圧する。ゾーン2が目標乾燥密度 ρ_{dA} 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

表-4.3 振動ローラの主な仕様

総重量 (kgf)	6180
転圧幅 (mm)	1420
全長 (mm)	3680
全幅 (mm)	1600
全高 (mm)	2140
走行速度 (km/h)	1 速 : 0~4.4 2 速 : 0~11
ドラム径幅 (mm)	1050×1420
起振力 (kgf)	10200
振動数 (Hz)	55&35
静線圧 (kg/cm ²)	前輪 : 23.3 後輪 : 21.1

表-4.4 タイヤローラの主な仕様

項 目	仕様
製 造	酒井重工業株式会社
形 式	T 2
駆 動	前輪 3 輪 揺動式 後輪 4 輪 固定式
自 重 (kg)	8500
タイヤ 1 輪当たり荷重 (kg)	前輪~1065 後輪~1325
全 幅 (mm)	2275
速 度 (km/h)	1 速 : 4 2 速 : 7 3 速 : 11 4 速 : 19

表-4.5 供試体の作成条件

締固め方法	転圧回数 (回)	目標乾燥密度 (g/cm ³)	目標含水比 (%)
振動ローラ	転 圧 A $N_A=18$	$\rho_{dA}=1.57$	10, 18, 22
	転 圧 B $N_B=40$	$\rho_{dB}=1.62$	
タイヤローラ	転 圧 A $N_A=14$	$\rho_{dA}=1.57$	10, 18, 22
	転 圧 B $N_B=90$	$\rho_{dB}=1.62$	

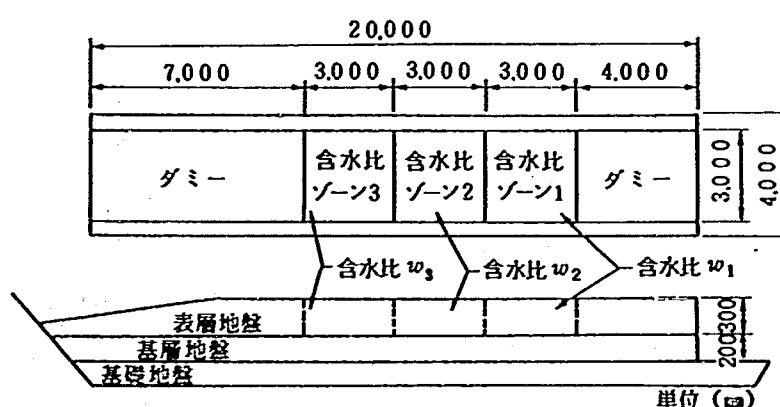


図-4.7 地盤の概要図

ングを行う。その後、ゾーン 2 が目標乾燥密度 ρ_{dB} となるまで転圧を繰り返す。ゾーン 2 の乾燥密度が目標乾燥密度 ρ_{dB} 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。目標乾燥密度 $\rho_{dA} \cdot \rho_{dB}$ は、3.1.2 締固め特性(2)結果の締固め試験結果から、 $E_c=100\%$ 、 200% それぞれの最適含水比における最大乾燥密度とした。転圧の状況を写真-4.4、



写真-4.3 トラックスケール

表-4.5 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
$w_1 < w_{opt}$	$w_2 = w_{opt}$	$w_3 > w_{opt}$

w_{opt} : 最適含水比

真-4.5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（株）フィールドテック製FT-102S2）を用いた。その仕様を表-4.6に示す。

ブロックサンプリングは、図-4.9に示す手順で行った。以下にその内容について述べる。

①転圧された地盤に採取位置のマーキングを行う。

（写真-4.6）

② $\phi = 10\text{cm}$ 、 $H = 15\text{cm}$ 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する（写真-4.7）。

③振動ローラによる転圧では、 $\phi = 9.5\text{cm}$ 程度の円柱状にしていねいに整形する（写真-4.8）。隙があり整形中にバレットナイフにあたるような場合は、注意深くその隙を取り除き、試料をつめて修繕する。

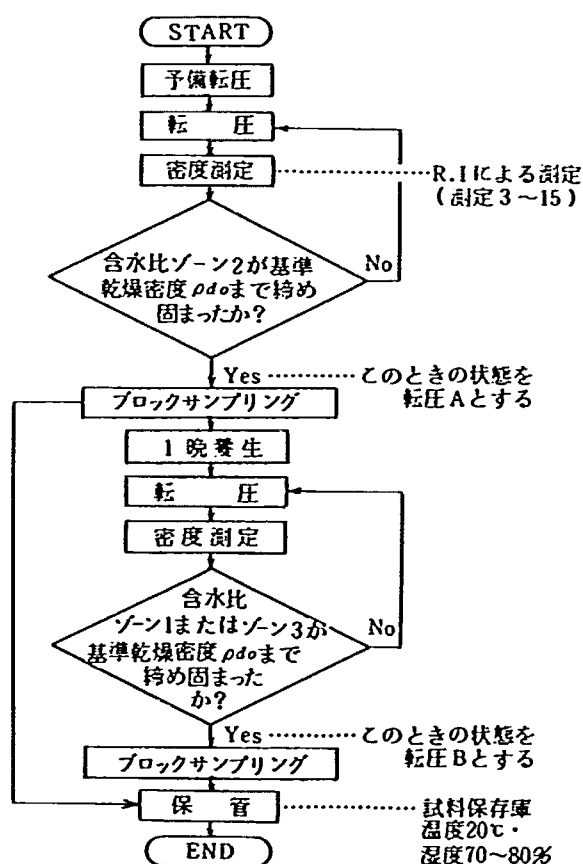


図-4.8 転圧から試料採取までの手順

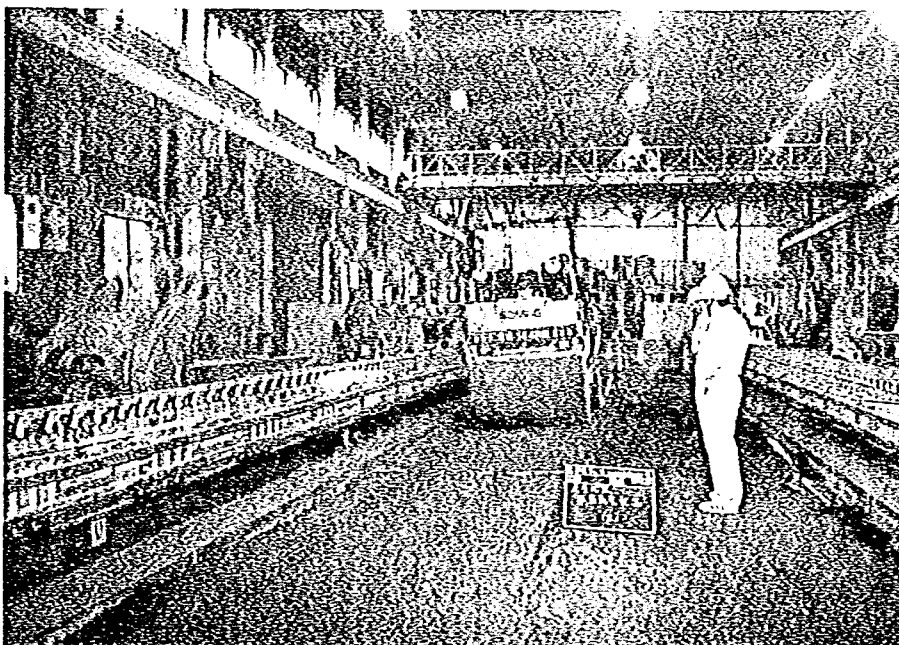


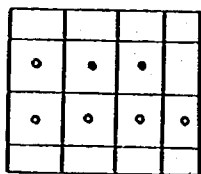
写真-4.4 転圧状況（タイヤローラ）



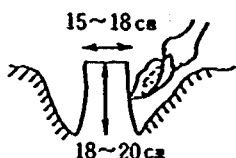
写真-4.5 採取位置のマーキング①

表-4.6 R. I. 水分密度計の仕様

測定方式	湿潤密度 : ガンマ線透過方式 含水量 : 速中性子透過方式			
測定範囲	湿潤密度 : 1.00 ~ 2.50 g / cm ³ 含水量 : 0.05 ~ 0.90 g / cm ³			
放射線源	ガンマ線源 : ⁶⁰ Co (コバルト) 2.6 MBq (メガベクレル) (密度測定) 半減期 5.2 年 速中性子線源 : ²⁵² Cf (カリフォルニウム) 1.1 MBq (水分測定) 半減期 2.6 年 ※ いずれの放射線源もステンレス・スチール製カプセルに密封したものをさらに線源棒先端部に封入。			
検出器	ガンマ線 : GM (ガイガー・ミュラー) 管 5 本 中性子線 : ³ He (ヘリウム・スリ) 管 2 本			
線源深さ	20 cm (線源棒内の線源封入部と、計器設置面までの距離)			
測定の種類	標準本体, 標準 BG, 現場 BG, 現場密度			
測定時間	標準体 : 10 分 現 場 : 1 分			
計数回路	ガンマ線 : 0 ~ 999999 cpm 中 性 子 : 0 ~ 999999 cpm			
表 示	計 数 率 : 5 桁 測 定 値 : 4 桁			
印 字	プリンター内蔵			
演算回路	湿潤密度, 水分密度, 乾燥密度, 含水比, 空隙率, 密度比飽和度, 平均値, 最大・最小値, 標準偏差, 動作チェック			
電 源	内部電源 : 内蔵バッテリー DC6V 6AH 充電器内蔵 完全充電1回当り連続12時間以上使用可能 外部電源 : AC100V 外部電源でも計器使用可能			
使用温度	0 ~ 45 °C (計器内部電子部品保証温度)			
計器本体	寸 法	W310×D360×H160 mm	重 量	約 11 kg
標準体	寸 法	W330×D400×H410 mm	重 量	約 15 kg
トランク外寸法	W440×D685×H595 mm (鍵を含む) 移動・保管用トランク			
オプション	メモリーカードシステム			



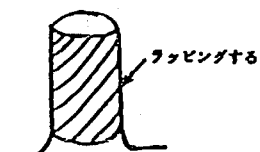
- ① 寸法を入れる
サンプリングエリアに
採取位置をマーキングす
る。



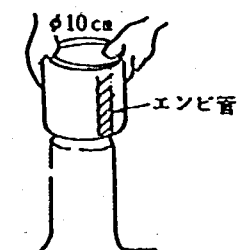
- ② $\phi 10\text{cm}$, H15cmのサン
プリングブロックよりひと
まわり大きな円柱状に掘
削。



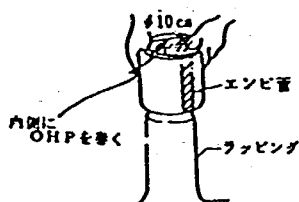
- ③ $\phi 9.5\text{cm}$ 程度の円柱状
にていねいに整形。周囲
をバレットナイフでゆっ
くりと削りとる。小石が
混っている場合は注意深
く取り除き、砂をつめて
修繕する。



- ③' 供試体周辺をラッピング
する。



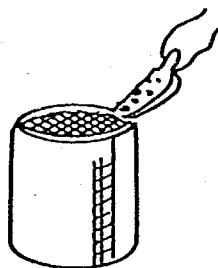
- ④ エンビニツ割モールド
を静かに（真すぐ）降ろ
し、ブロックをモールド
内におさめる。



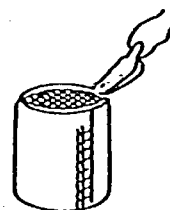
- ④' エンビニツ割モールド
を静かに（垂直）降ろし、ブ
ロックをモールド内にお
さめる。



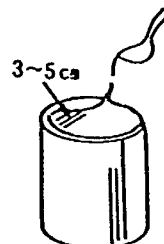
- ⑤ 余盛部 3~5cmを
削り取る。



- ⑥ モールドとブロックの
間の隙間に標準砂をつめ
る。



- ⑥' モールド内側のOHPと、
供試体周辺に巻いたラッ
プとの間をパラフィンで充
填する。



- ⑦ モールド上端より3~
5mm内側に削り取り、あ
たため溶かしたパラフィ
ンで上面をキャッピング
する。



- ⑧ パラフィンがまだあた
たかいうちに、ビニール
シートで覆いシールする。
パラフィンが十分堅くか
たまったらブロックの根
元から切る。



- ⑨ 平坦な板の上に載せ③
~⑥を繰返し両面完全に
キャッピングする。

図-4.9 ブロックサンプリングの手順

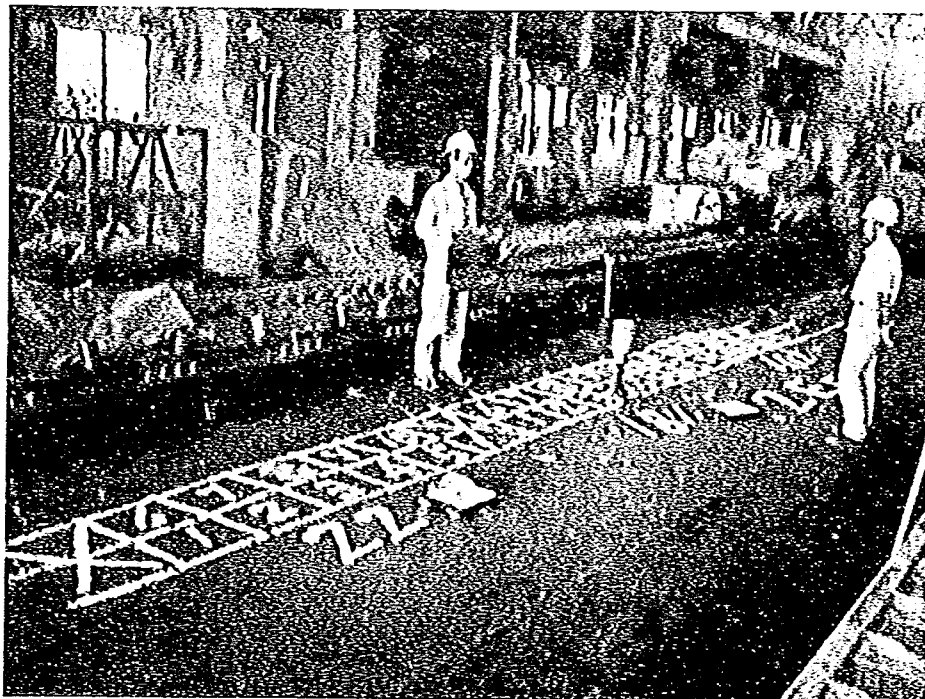


写真-4.6 採取位置のマーキング②



写真-4.7 円柱状に掘削

③' タイヤローラによる転圧では、 $\phi=8.0\text{cm}$ 程度の円柱状にしていねいに整形する。礫がある場合、③と同様な処理を行う。そして、整形されたブロックの側面をラップフィルムで巻き付け、図-4.10に示す塩化ビニル製の二つ割りモールドの内側にOHPシートをグリスで貼り付けた

④二つ割り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収める（写真-4.9）。余盛部を削り取る。

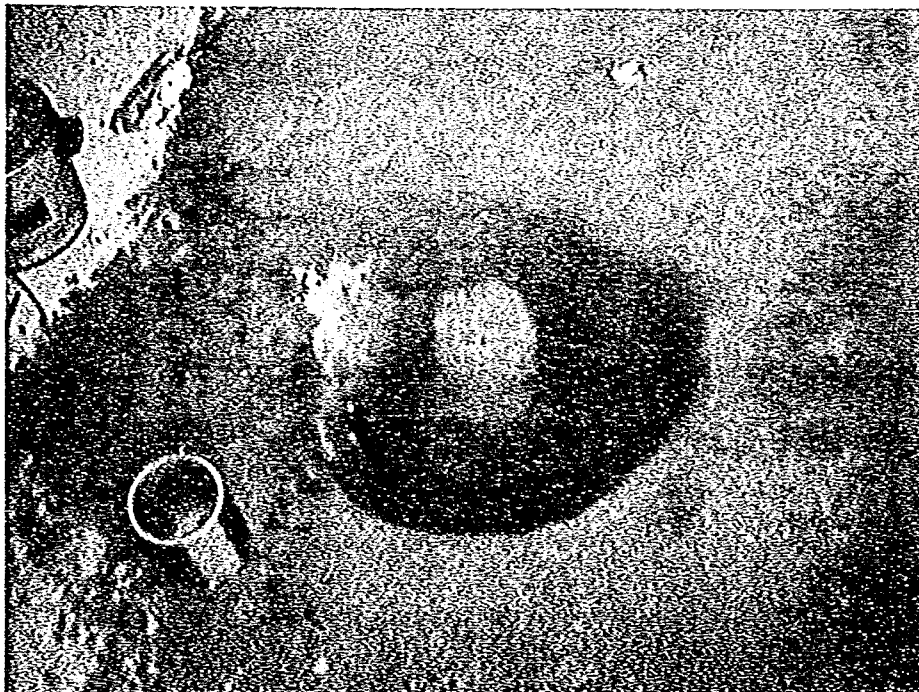
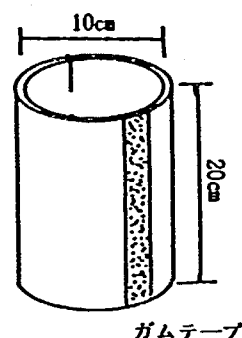


写真-4.8 $\phi 9.5\text{cm}$ の円柱に整形

- ⑤振動ローラによる転圧では、モールドとブロックの隙間に標準砂をつめる。
- ⑤' タイヤローラによる転圧では、暖めて溶かしたパラフィンをもールドとブロックの隙間にそそぎ込みパラフィンが冷めて固まるまで放置しておく。
- ⑥モールド上端より3~5mm内側にブロックを削り取り (写真-4.10)、暖めて溶かしたパラフィンで上面をキャッピングする。
- ⑦パラフィンが暖かい内に、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-4.11)。パラフィンが十分固くなったら、ブロックを根元から切る。



エンビ管肉厚 4 mm

二つ割エンビ管の継目の隙間は
パラフィンで充填した

図-4.10 二つ割りモールド

- ⑧平坦な板の上に逆にして載せ、整形した後、パラフィンで両面完全にキャッピングする。
- ⑨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%) に一時保管した。

上記のように③及び⑤の手順が二通りになったのは、振動ローラによる転圧後の地盤より採取された試料が、地盤の目標含水比に対して2~3%乾燥していたこと、運搬によるものと思われる試料のひび割れがおきていたことからこれらを防ぐために行った。また、③の手順において円柱状のブロックに切り出すとき $\phi = 9.5\text{cm}$ から $\phi = 8.0\text{cm}$ 程度の径にしたのは、モールドとブロックの隙間にパラフィンを流し込むためブロックの径を小さくした。

ブロックサンプリングによって採取したブロック状の試料を三軸試験に供するため、試験の直前に ϕ

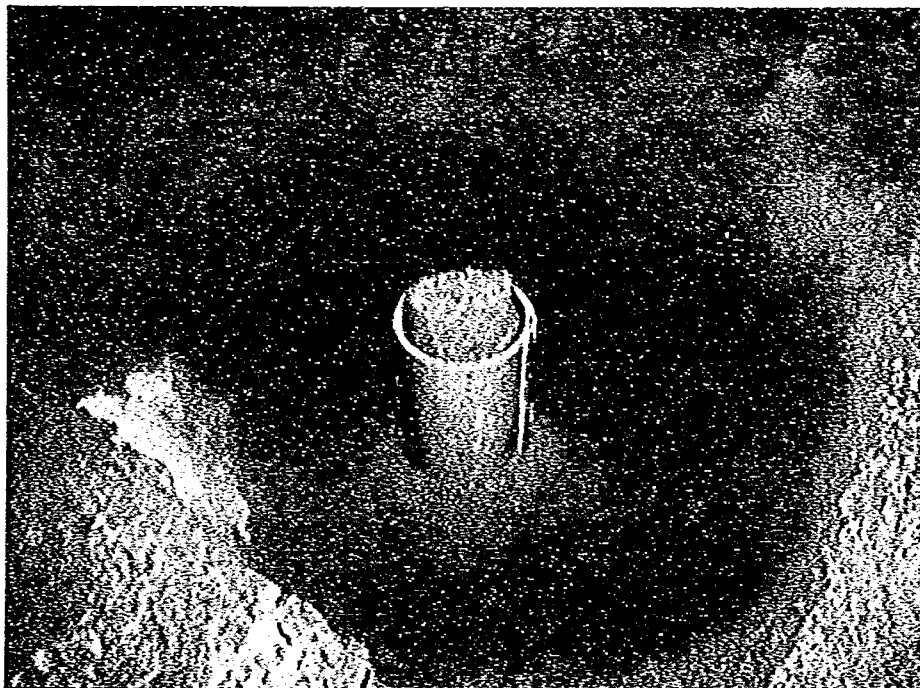


写真-4.9 モールド内におさめる



写真-4.10 上面を削り取る

=5cm、H=10cmに整形した（図-4.11）。整形の際、礫、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。そして、できあ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、高さを測定した。

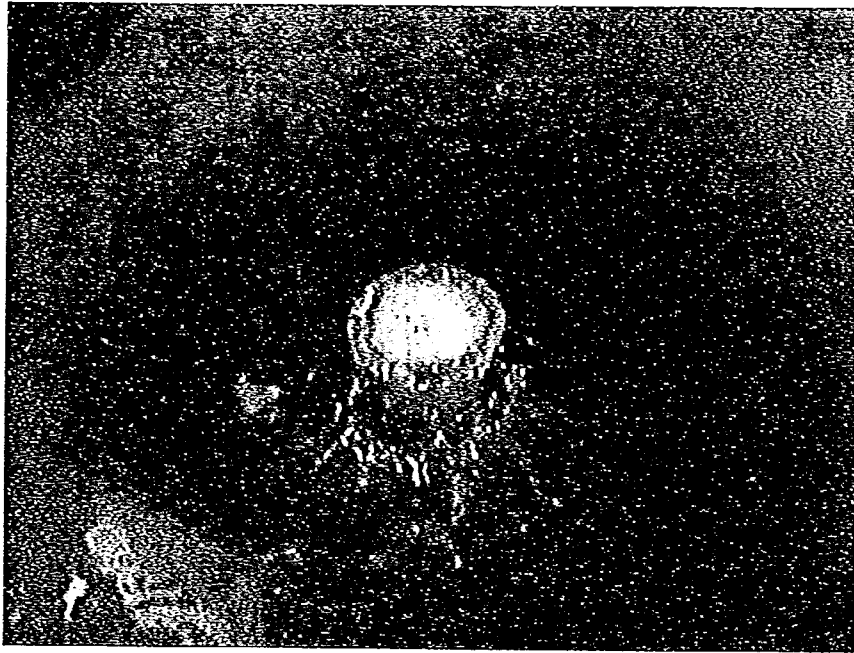


写真-4.11 キャッピング

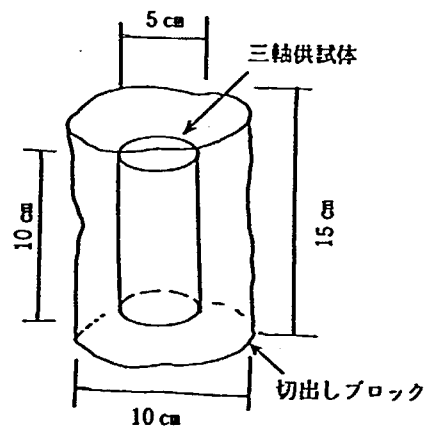
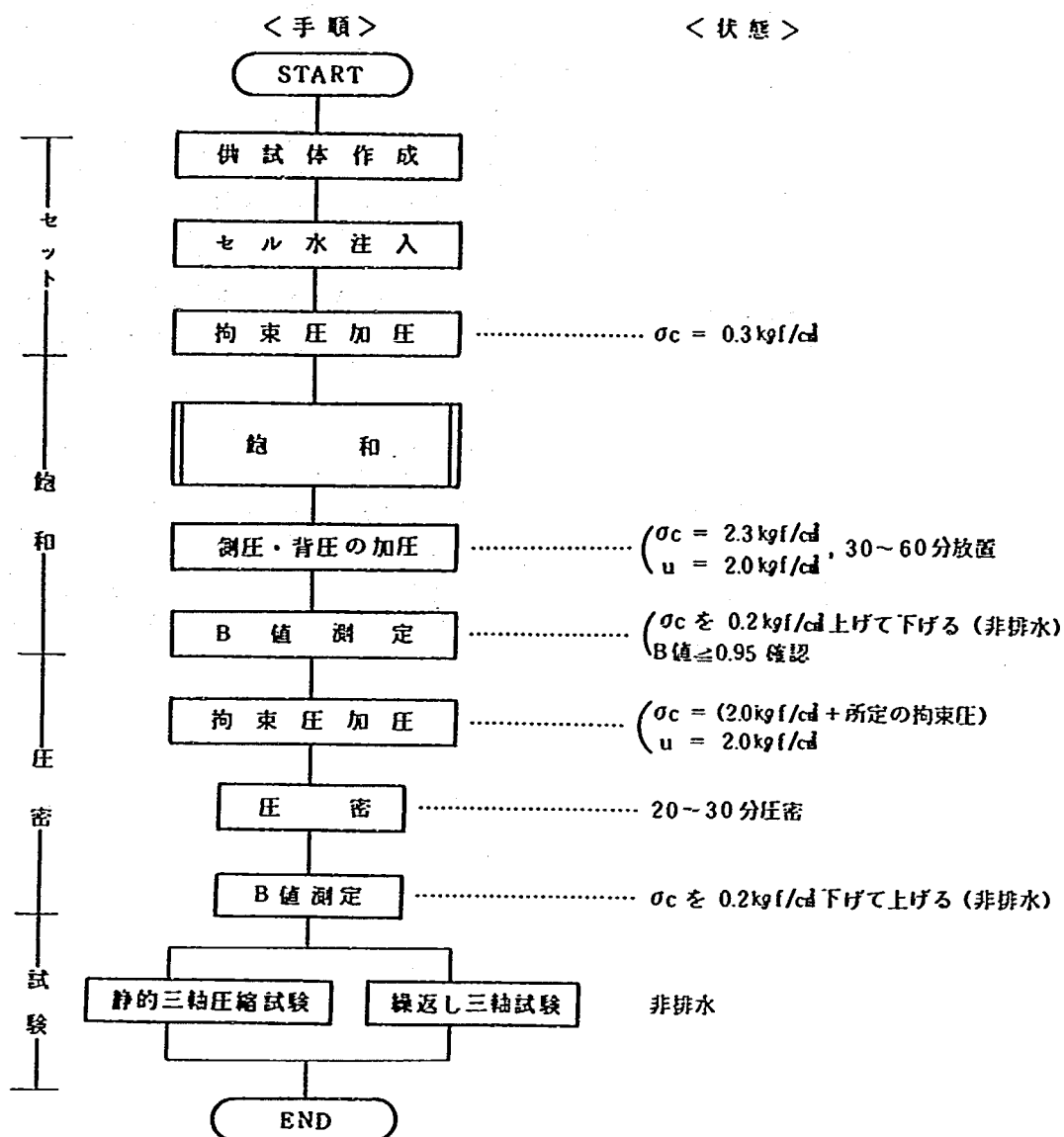


図-4.11 転圧試料整形概要

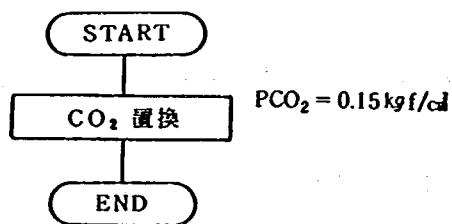
4.3 繰返し三軸試験及び単調載荷三軸圧縮試験

載荷までの実験の手順は両試験とも同様である。図-4.12にその手順を示す。おおむね、土質試験法¹³⁾の三軸圧縮試験のCU試験に準じている。

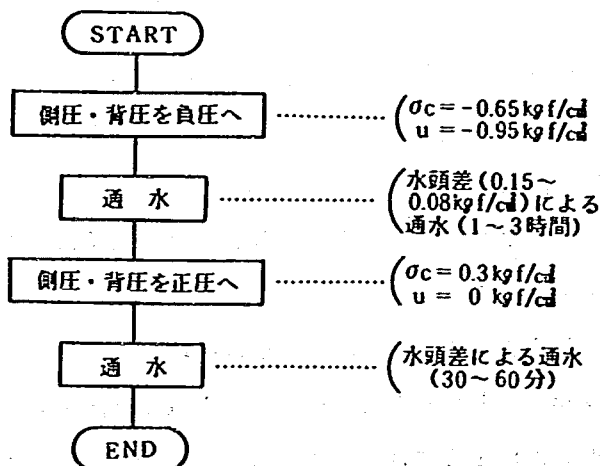
ベディスタルの上に、ろ紙を置き、その上に供試体をのせる。ストレッチャーでメンブレンを拡張させ供試体の上からかぶせる。ストレッチャーをはずしメンブレンをベディスタルにOリングで固定し、供試体上部にろ紙をのせる。この時、ろ紙は乾燥しているものを使用する。次に、三軸室の上板、支柱、ロッド、キャップが一体となったものを三軸室下板と固定する。この時、ロッドはクランプで固定しておくが、供試体にあたらないように注意する。ロッドとキャップの重量が供試体に加わらぬようにするため、図-4.13に示すようにカウンターウェイトを取り付け、その後、クランプをはずし、供試体とキャップを接触させ、メンブレンをキャップにゴムバンドで固定する。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。



(a) 概略



(b) 飽和の方法①



(c) 飽和の方法②

図-4.12 実験の手順

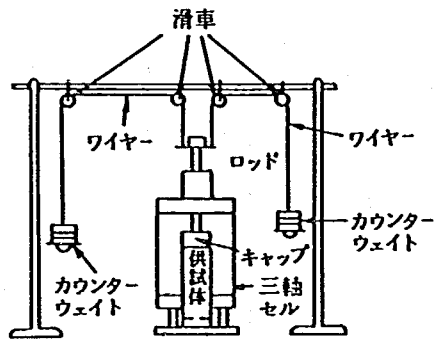


図-4.13 キャップとロッドの重さをキャンセルする機構

注入時に中の空気が圧縮して拘束圧がかから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、次の二つの方法のいずれかによって行った。

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。供試体内の下部から上部へ、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（二重負圧法）

供試体内を真空として、空気のない状態で通水する。図-4.14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二つの真空用レギュレーターを並列に接続し、側圧調整用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、供試体内圧調整用レギュレーターの出力は、供試体の上下面それぞれ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、室内突固めによる供試体の三軸試験は①の方法を、実機転圧により作成された模型地盤では②の方法で供試

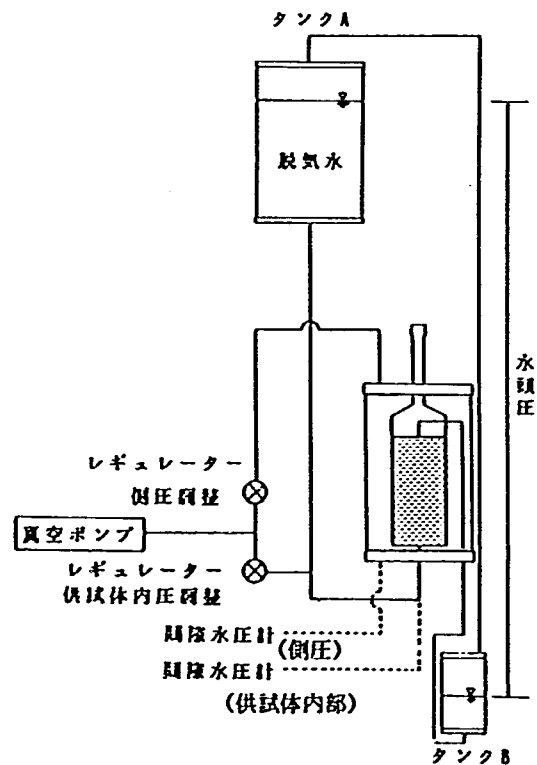


図-4.14 二重負圧法

表-4.7 三軸試験条件

	供試体作成方法	突固め エネルギー E _c (%)	突固め回数 (回)	転圧回数 (回)	締固め含水比 (目標値) W (%)	有効拘束圧 σ'_c (kgf/cm ²) (B. P. =2or3kgf/cm ²)	載荷条件	供試体本数
三軸圧縮試験	室内突固め	100	25	-	10, 14, 18, 22	0.5, 1.0, 2.0	ひずみ制御： ひずみ速度 0.1%/min	12
		200	50	-	10, 18, 20, 22			12
		300	75	-	10, 16, 18, 20			12
	振動ローラー	-	-	18	10, 18, 22			9
		-	-	40	10, 18, 22			9
	タイヤローラー	-	-	14	10, 18, 22			9
		-	-	90	10, 18, 22			9
繰返し三軸試験	室内突固め	100	25	-	10, 14, 18, 22	1.0	応力制御： 繰返し周波数 0.1Hz	16
		200	50	-	10, 18, 20, 22			16
		300	75	-	10, 16, 18, 20			16
	振動ローラー	-	-	18	10, 18, 22			12
		-	-	40	10, 18, 22			12
	タイヤローラー	-	-	14	10, 18, 22			12
		-	-	90	10, 18, 22			12

体の飽和を行った。

飽和した供試体に背圧を2.0kgf/cm²または3.0kgf/cm²加圧する。この段階で一度B値を計っておく。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にした。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。

載荷は、ペロフラムシリンダーもしくは載荷アクチュエーターとロッドを接合し、三軸圧縮試験では、定ひずみ速度で載荷し、繰返し三軸試験では、応力制御で一定振幅繰返し周波数0.1Hzの正弦波で載荷した。表-4.7に三軸試験条件を示す。なお、個々の供試体の試験条件については、後出の表-5.1に一覧にして示している。

5. 実験結果

5.1 供試体作成結果

(1) 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図-5.1に示す。図中には、締固め試験の結果も示す。全体的に締固め試験結果より高いバラツキで供試体が作成されているが、締固め試験と似た形になっており、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。

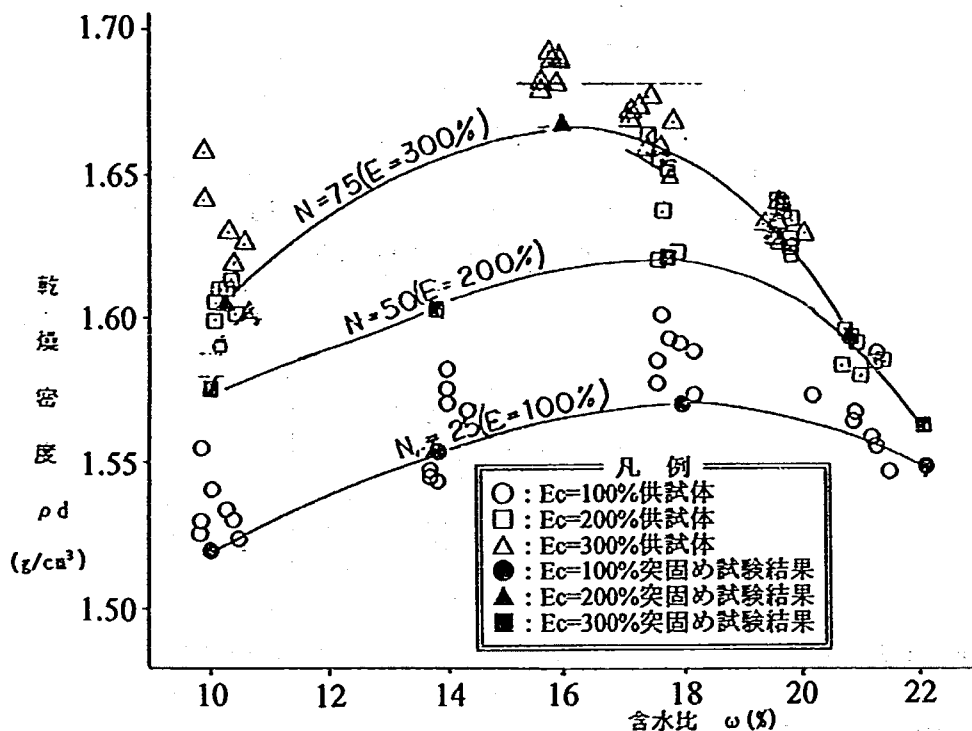


図-5.1 突固めにより作成した供試体の乾燥密度と突固め含水比との関係

(2) 転圧供試体について

実機転圧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、図-5.2に示す。図中の線は、各締固め含水比でサンプリングされた試料毎の乾燥密度の平均値を結んだ線であるが、含水比が高くなるにつれて乾燥密度が高くなっており、また、転圧回数の多い転圧Bの方が転圧Aの乾燥密度よりも高いことがわかる。そして、全体的にバラツキが大きく、表-4.5に示す目標含水比における目標乾燥密度は得られているものの、締固め試験結果と同様な曲線を描く密度分布にはならなかった。これは締固め試験ではモールド内で締固めを行うため側方が拘束された状態で土を締め固めるが、図-4.7に示すような実機転圧により締め固められた試験盛土では、実験を行ったピット幅の制約上転圧機械1台分の幅で転圧を行いのり肩部分の土留めを行わなかったため、土がのり肩側へ広がるように締め固められた。すなわち、側方が拘束されない状態で土を締め固めた。この違いが実機転圧により作成した供試体の密度分布が締固め試験同様な曲線を描く密度分布にならなかった要因の一つではないかと考える。

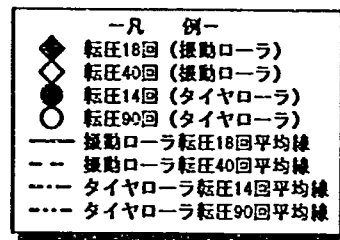
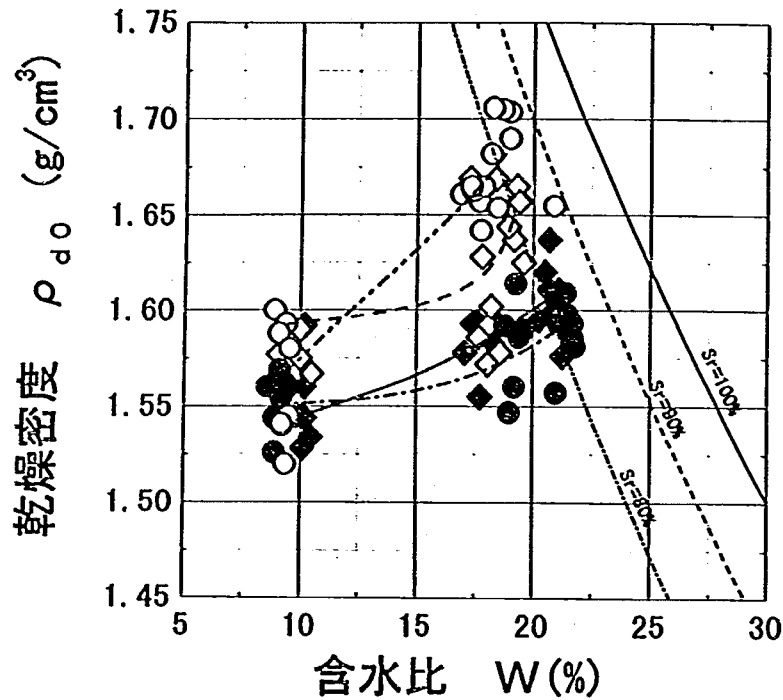


図-5.2 実機転圧により作成した供試体の乾燥密度と突固め含水比との関係

5.2 単調載荷三軸圧縮試験結果とその考察

表-5.1に単調載荷非排水三軸圧縮 (CU) 試験結果の一覧を示す。なお、表-5.1に示している試験結果のうち、「主応力差最大時」の結果については、図-5.5, 5.7でも述べるが、これは圧縮载荷による体積膨張から発生する負の間隙水圧が真空圧に近づくにつれ、供試体内に残留している空気が膨張して等体積条件が確保されていないという問題があり、参考程度に表に掲載した。次に「せん断抵抗角 ϕ' 」、 c' とは各締固め含水比の試験結果 3 供試体から得られる 3 本の有効応力経路から主応力比最大の点を求め、その 3 点を最小二乗法により直線近似し、勾配 m_1 、縦軸切片 f_1 が得られる。そして、得られた勾配 m_1 、縦軸切片 f_1 から次式を利用してせん断抵抗角 ϕ' 、粘着力 c' を求めた。

$$\phi' = \sin^{-1} m_1$$

$$c' = f_1 / \sqrt{1 - m_1^2}$$

また、「 $c' = 0$ としたせん断抵抗角 ϕ' 」は、各試験結果の主応力比最大時のモールの有効応力円を一つずつ描き、原点を通る円の接線を引きそのときの角度を「 $c' = 0$ としたせん断抵抗角 ϕ' 」とした。

図-5.3及び図-5.4は室内突固めにより締固めエネルギー $E_c = 100\%$ で作成した供試体の初期有効拘束圧 1.0 kgf/cm^2 での試験結果の一例である。まず、図-5.3では軸ひずみが増加するに従い主応力差は、上に凸の

表-5.1① 三軸圧縮試験結果の一覧

締固め方法	供試体 製作条件		試験前供試体					圧密後供試体			B 値		有効 拘束圧 σ_3 (kgf/ cm ²)	B ・ P (kgf/ cm ²)	試験結果												
	縮エ 固メル ギ Ec (%)	含水比 w (%)	含水比 w (%)	湿潤 密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥 密度 ρ_{d0} (g/cm ³)	間隙 比 e ₀	相対 密度 D _{ro} (%)	乾燥 密度 ρ_{dc} (g/cm ³)	間隙 比 e _c	相対 密度 D _{rc} (%)	圧 密 前	圧 密 後			主応力差最大時					主応力比最大時					せん断 抵抗角 ϕ' (度)	粘着力 c (kgf/ cm ²)	c'=0 とした せん断 抵抗角 ϕ' (度)
															主応力 差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/ cm ²)	間隙 水圧 u (kgf/ cm ²)	軸歪み ϵ (%)	主応力 差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/ cm ²)	主応力 比 σ_1 / σ_3 (%)	間隙 水圧 u (kgf/ cm ²)	軸歪み ϵ (%)						
室内突固め	100	10	9.9	1.682	1.530	0.802	138	1.545	0.786	141	0.99	0.96	0.50	2.00	10.01	-2.87	15.0	2.16	4.83	-0.07	2.1	36.8	0.14	40.6			
			9.9	1.709	1.555	0.774	142	1.576	0.751	145	1.00	0.97	1.00	2.00	11.98	-2.91	12.7	3.64	4.84	0.05	1.9			40.6			
			9.9	1.677	1.526	0.806	138	1.555	0.774	142	1.00	0.94	2.00	2.00	10.41	-1.74	12.6	5.86	4.30	0.23	3.3			38.3			
		14	14.0	1.803	1.582	0.745	146	1.593	0.732	148	0.98	0.93	0.50	2.00	11.20	-2.88	9.4	3.03	4.89	-0.28	2.4	37.6	0.16	41.3			
			14.0	1.795	1.575	0.751	145	1.595	0.730	148	0.97	0.93	1.00	2.00	11.44	-2.38	7.5	5.04	4.69	-0.37	2.6			39.8			
			14.0	1.791	1.571	0.755	145	1.600	0.724	148	1.00	0.94	2.00	2.00	14.37	-2.85	13.9	6.98	4.41	-0.04	3.2			39.0			
		18	17.7	1.884	1.601	0.723	148	1.609	0.715	150	0.95	0.83	0.50	2.00	5.86	-0.90	3.9	4.71	5.23	-0.61	2.9	39.0	0.22	42.8			
			17.8	1.877	1.593	0.731	148	1.608	0.716	150	0.96	0.88	1.00	2.00	10.64	-2.04	11.5	5.86	4.97	-0.48	3.2			41.3			
			18.0	1.878	1.592	0.733	148	1.614	0.709	151	0.95	0.85	2.00	2.00	12.41	-1.70	11.7	8.84	4.77	-0.35	3.7			40.6			
		22	20.9	1.892	1.565	0.762	144	1.577	0.750	146	0.95	0.78	0.50	2.00	8.76	-2.22	13.7	3.75	4.82	-0.48	3.9	39.0	0.08	40.6			
			20.9	1.895	1.567	0.759	144	1.586	0.740	147	0.97	0.89	1.00	2.00	10.73	-2.47	14.4	4.71	4.54	-0.33	3.9			39.7			
			20.2	1.891	1.573	0.752	145	1.604	0.720	149	0.98	0.82	2.00	2.00	13.74	-2.45	14.4	6.72	4.50	0.11	3.7			39.8			
		200	10	10.3	1.780	1.614	0.709	151	1.626	0.697	153	0.99	0.98	0.50	2.00	11.80	-2.97	9.2	2.65	5.42	-0.10	1.6	36.2	0.24	42.8		
				10.2	1.769	1.605	0.718	150	1.625	0.698	153	0.99	0.99	1.00	2.00	13.25	-2.99	9.6	3.95	5.11	-0.04	1.5			42.0		
				10.1	1.751	1.590	0.735	148	1.614	0.709	152	1.00	0.93	2.00	2.00	14.03	-2.78	15.0	6.15	4.46	-0.23	2.2			39.0		
			18	17.9	1.914	1.623	0.699	153	1.632	0.691	154	0.98	0.90	0.50	2.00	11.65	-2.74	9.0	3.35	5.28	-0.28	1.6	39.8	0.17	42.8		
				17.8	1.932	1.640	0.681	155	1.654	0.668	157	0.95	0.76	1.00	2.00	13.50	-2.51	8.5	5.74	5.27	-0.34	2.0			42.8		
				17.6	1.905	1.620	0.702	152	1.642	0.680	155	0.96	0.79	2.00	2.00	14.61	-2.20	10.7	9.82	4.80	-0.58	3.6			31.1		
			20	19.6	1.953	1.633	0.689	154	1.641	0.681	155	0.95	0.64	0.50	2.00	8.04	-1.72	10.2	4.40	5.19	-0.49	3.6	39.8	0.12	42.0		
				19.6	1.963	1.641	0.679	155	1.660	0.662	158	0.95	0.62	1.00	2.00	10.32	-1.93	11.3	5.85	4.95	-0.48	4.1			41.3		
				19.6	1.961	1.640	0.682	155	1.666	0.656	159	0.95	0.59	2.00	2.00	12.58	-2.02	14.1	8.60	4.87	-0.22	4.0			40.6		
			22	20.7	1.928	1.597	0.726	149	1.607	0.717	150	0.95	0.72	0.50	2.00	9.11	-2.25	14.5	3.92	4.96	-0.49	3.8	39.0	0.14	41.3		
				20.8	1.927	1.595	0.729	149	1.613	0.711	151	0.96	0.71	1.00	2.00	9.90	-2.01	15.1	5.39	4.80	-0.42	4.2			40.6		
				20.6	1.910	1.584	0.741	147	1.613	0.711	151	0.95	0.72	2.00	2.00	12.33	-1.86	14.3	8.06	4.62	0.23	5.3			39.8		
	300	10	10.5	1.795	1.626	0.692	153	1.636	0.682	154	0.99	0.96	0.50	2.00	12.31	-2.98	9.1	2.68	5.31	-0.12	1.3	38.3	0.15	42.8			
			10.5	1.769	1.603	0.717	150	1.618	0.701	152	0.99	0.97	1.00	2.00	13.33	-2.97	8.7	3.79	5.13	-0.08	1.1			42.0			
			10.5	1.766	1.600	0.720	149	1.625	0.694	153	0.99	0.94	2.00	2.00	15.31	-2.96	9.1	6.76	4.67	-0.16	1.9			39.8			
		16	15.8	1.945	1.681	0.637	161	1.689	0.629	162	0.99	0.93	0.50	2.00	13.18	-2.72	8.1	4.07	5.67	-0.37	1.8	41.3	0.16	44.5			
			16.0	1.959	1.688	0.630	162	1.701	0.618	163	0.96	0.78	1.00	2.00	14.85	-2.62	7.7	6.00	5.50	-0.32	1.6			43.6			
			16.1	1.971	1.698	0.621	163	1.715	0.605	165	0.95	0.49	2.00	2.00	17.26	-2.41	8.9	12.52	5.12	-1.03	3.2			42.0			
		18	17.4	1.967	1.677	0.641	160	1.685	0.633	161	0.95	0.74	0.50	2.00	11.66	-2.38	9.3	4.76	5.56	-0.54	2.7	40.6	0.24	43.6			
			17.2	1.962	1.674	0.644	160	1.689	0.629	162	0.96	0.62	1.00	2.00	12.35	-2.18	8.0	7.55	5.42	-0.71	2.9			42.8			
			17.1	1.955	1.671	0.647	159	1.694	0.625	162	0.95	0.51	2.00	2.00	16.04	-2.27	8.8	10.93	5.03	-0.71	3.3			41.9			
		20	19.4	1.944	1.629	0.689	153	1.637	0.681	154	0.95	0.68	0.50	2.00	9.51	-2.18	11.9	5.75	4.93	-0.96	5.2	38.3	0.17	41.3			
			19.5	1.953	1.635	0.683	154	1.650	0.668	156	0.96	0.77	1.00	2.00	12.26	-2.54	12.5	5.41	4.72	-0.46	3.9			40.6			
			19.7	1.949	1.628	0.690	153	1.658	0.660	157	0.95	0.54	2.00	2.00	14.27	-2.23	15.0	8.45	4.63	-0.33	5.7			39.8			

表-5.1② 三軸圧縮試験結果の一覧

試験方法	供試体 作製条件		試験前供試体					圧密後供試体			B 値		有効 拘束圧 σ_3' (kgf/ cm ²)	B ・ P (kgf/ cm ²)	試験結果										
	転圧 回数 (回)	含水 比 w (%)	含水 比 w (%)	湿潤 密度 ρ_w (g/cm ³)	乾燥 密度 ρ_{d0} (g/cm ³)	間隙 比 e ₀	相対 密度 D _{ro} (%)	乾燥 密度 ρ_{dc} (g/cm ³)	間隙 比 e _c	相対 密度 D _{rc} (%)	圧 密 前	圧 密 後			主 応 力 差 最 大 時			主 応 力 比 最 大 時					せん断 抵抗角 ϕ' (度)	粘着力 c' (kgf/ cm ²)	c' = 0 とした せん断 抵抗角 ϕ'' (度)
															主応力 差 $\sigma_1 - \sigma_3$	間隙 水圧 u	軸歪み ϵ	主応力 差 $\sigma_1 - \sigma_3$	主応力 比 σ_1 / σ_3	間隙 水圧 u	軸歪み ϵ	せん断 抵抗角 ϕ' (度)			
															(kgf/ cm ²)	(kgf/ cm ²)	(%)	(kgf/ cm ²)	(kgf/ cm ²)	(%)	(kgf/ cm ²)	(kgf/ cm ²)	(%)	(度)	(kgf/ cm ²)
振 動 ローラー	18	10	9.82	1.697	1.545	0.777	132	1.550	0.771	133	0.967	1.000	0.50	3.00	9.01	-2.560	12.0	3.14	4.85	-0.31	1.7	37.5	0.13	41.2	
			10.49	1.695	1.534	0.789	130	1.549	0.772	133	0.988	0.980	1.00	3.00	6.24	-1.04	9.2	3.59	4.55	-0.01	4.0			39.8	
			10.23	1.702	1.544	0.778	132	1.567	0.752	137	0.989	0.980	2.00	3.00	11.72	-1.93	15.0	5.72	4.44	0.34	4.7			39.2	
		18	17.09	1.858	1.587	0.722	133	1.593	0.716	134	0.967	0.967	0.50	3.00	13.02	-3.39	10.2	3.50	5.42	-0.29	2.3	38.9	0.15	43.5	
			17.75	1.831	1.555	0.756	126	1.571	0.739	129	0.975	0.980	1.00	3.00	12.39	-3.22	15.0	5.62	4.57	-0.57	4.5			39.9	
			17.43	1.871	1.593	0.715	134	1.617	0.689	139	1.000	1.000	2.00	3.00	16.94	-3.23	9.7	8.56	4.73	-0.30	3.0			40.6	
		22	20.96	1.937	1.601	0.698	128	1.606	0.693	129	1.000	1.000	0.50	3.00	7.82	-2.03	15.0	3.04	4.82	-0.30	3.8	38.0	0.13	41.0	
			20.26	1.918	1.595	0.705	127	1.609	0.689	130	1.000	0.980	1.00	3.00	12.39	-2.89	15.0	4.62	4.68	-0.25	3.9			40.4	
			21.28	1.911	1.576	0.725	123	1.599	0.701	127	0.989	0.980	2.00	3.00	12.47	-2.03	15.0	6.50	4.47	0.12	4.8			39.4	
振 動 ローラー	40	10	9.08	1.720	1.577	0.728	129	1.580	0.724	130	1.000	0.967	0.50	3.00	12.13	-3.35	10.9	3.19	5.99	-0.14	1.5	40.4	0.07	45.3	
			10.53	1.732	1.567	0.738	127	1.578	0.727	130	0.988	0.980	1.00	3.00	6.96	-1.46	15.0	3.21	4.33	0.04	2.6			46.0	
			6.05	1.757	1.657	0.644	149	1.682	0.620	154	0.983	0.960	2.00	2.00	13.76	-2.42	9.5	6.93	4.88	0.21	1.8			41.7	
		18	17.69	1.866	1.586	0.724	134	1.591	0.717	135	0.967	0.967	0.50	3.00	13.89	-3.55	8.8	3.43	5.92	-0.20	1.9	39.6	0.32	45.6	
			17.81	1.918	1.628	0.679	143	1.643	0.664	146	1.000	1.000	1.00	3.00	16.49	-3.47	7.2	5.49	6.11	-0.07	2.1			38.7	
			18.07	1.856	1.572	0.783	121	1.593	0.716	135	0.972	0.980	2.00	3.00	17.23	-3.46	11.0	8.56	4.98	-0.15	2.6			41.3	
		22	19.60	1.944	1.625	0.674	128	1.630	0.669	129	1.000	0.967	0.50	3.00	12.26	-2.86	11.6	5.52	4.92	-0.91	4.4	39.6	0.14	41.5	
			19.19	1.951	1.637	0.662	131	1.650	0.649	133	0.988	0.980	1.00	3.00	13.63	-2.71	9.2	7.02	4.83	-0.84	4.2			41.0	
			18.94	1.955	1.644	0.655	132	1.670	0.630	137	0.967	0.967	2.00	3.00	16.43	-2.60	11.2	11.20	4.70	-1.03	5.9			40.5	
タイヤ ローラー	14	10	9.12	1.712	1.569	0.733		1.577	0.724		0.987	0.980	0.50	3.00	10.79	-3.01	11.1	3.10	5.22	-0.24	2.2	41.9	0.009	42.7	
			9.19	1.697	1.554	0.750		1.568	0.734		0.986	0.962	1.00	3.00	12.73	-3.42	15.0	4.65	4.89	-0.20	2.3			41.3	
			9.23	1.682	1.540	0.766		1.564	0.738		0.994	0.962	2.00	3.00	13.66	-2.03	15.0	6.72	5.11	0.36	3.0			42.3	
		18	19.26	1.925	1.614	0.683		1.620	0.677		0.977	0.967	0.50	3.00	13.25	-3.38	9.3	3.31	5.32	-0.03	1.8	39.3	0.155	43.1	
			19.59	1.901	1.590	0.709		1.605	0.693		0.980	0.950	1.00	3.00	14.25	-3.34	11.2	4.97	4.97	-0.25	2.8			41.7	
			19.40	1.894	1.586	0.713		1.610	0.688		0.990	0.970	2.00	3.00	16.16	-3.28	14.7	6.74	4.83	0.24	2.8			41.1	
		22	21.46	1.941	1.598	0.700		1.605	0.693		0.973	0.973	0.50	3.00	10.78	-3.13	14.9	4.28	4.61	-0.69	5.7	38.3	0.128	40.0	
			21.38	1.953	1.609	0.689		1.640	0.657		0.978	0.952	1.00	3.00	12.94	-2.84	15.0	5.18	4.79	-0.37	6.3			40.9	
			21.21	1.932	1.594	0.705		1.613	0.684		0.988	0.984	2.00	3.00	14.86	-2.79	15.0	6.68	4.51	0.10	5.2			39.6	
タイヤ ローラー	90	10	9.36	1.662	1.520	0.787		1.527	0.779		0.997	0.980	0.50	3.00	9.27	-2.57	14.5	2.81	5.68	-0.10	1.3	37.2	0.300	44.5	
			9.06	1.733	1.588	0.710		1.600	0.698		0.980	0.950	1.00	3.00	14.64	-3.54	8.2	5.04	5.67	-0.08	1.3			44.4	
			9.56	1.732	1.580	0.719		1.603	0.694		0.996	0.952	2.00	3.00	13.79	-2.98	10.9	6.11	4.57	0.29	1.6			39.9	
		18	17.85	1.962	1.665	0.658		1.671	0.652		0.987	0.966	0.50	3.00	16.19	-3.68	6.9	5.74	5.71	-0.72	2.6	43.4	0.084	44.6	
			17.33	1.954	1.665	0.658		1.680	0.643		0.982	0.966	1.00	3.00	18.58	-3.74	8.0	7.68	5.62	-0.66	2.6			44.3	
			17.74	1.933	1.642	0.681		1.668	0.655		0.982	0.970	2.00	3.00	20.89	-3.93	8.5	11.30	6.55	-0.03	2.0			47.3	
		22	18.27	2.018	1.706	0.593		1.713	0.586		0.983	0.974	0.50	3.00	15.86	-3.68	10.0	5.30	5.17	-0.77	3.6	39.5	0.213	42.4	
			18.46	1.960	1.654	0.643		1.670	0.627		0.984	0.972	1.00	3.00	16.57	-3.67	8.8	4.95	5.33	-0.14	1.9			43.2	
			18.19	1.988	1.682	0.615		1.703	0.595		0.990	0.976	2.00	3.00	20.20	-3.89	10.1	10.96	4.82	-0.87	4.5			41.0	

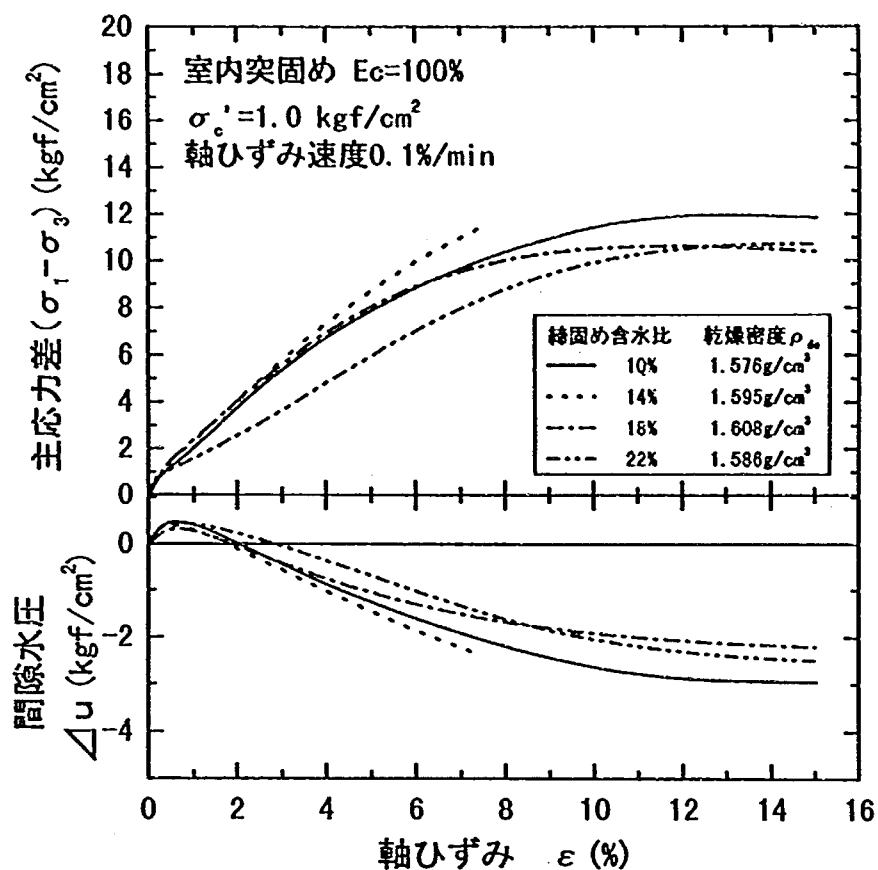


図-5.3 試験結果の一例—主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係（室内突固め $E_c=100\%$ ）—

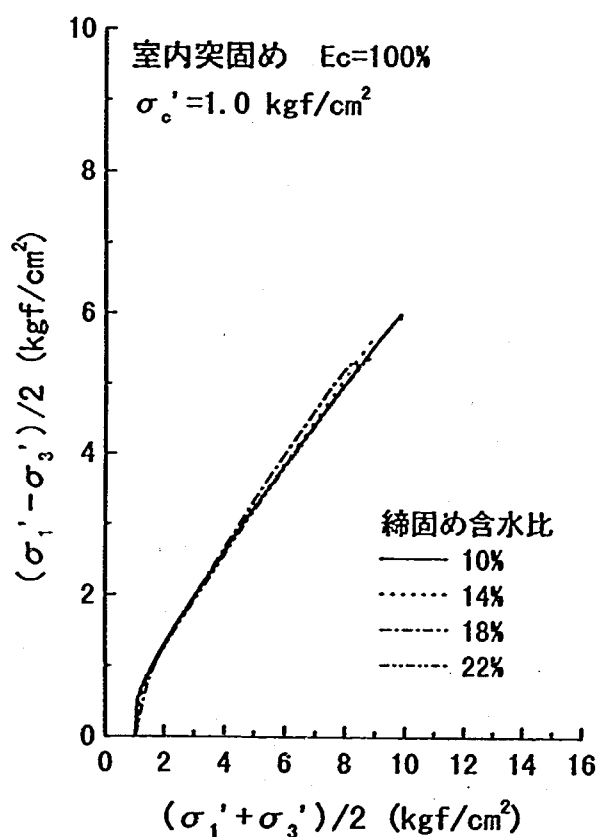


図-5.4 試験結果の一例—応力経路図（室内突固め $E_c=100\%$ ）—

曲線を描きながら増加する傾向を示している。また、間隙水圧は軸ひずみの増加に従い、一度正の間隙水圧が発生し、その後ピークを示してから減少していく。この間隙水圧の変化は、供試体のダイレイタンスー特性を表し、軸ひずみが小さいときは圧縮傾向を示し、軸ひずみが増加していくと膨張傾向に変化することを表している。次に図-5.4で示す応力経路については、一般的な密な砂の応力経路と同じ傾向を示している。主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係では、締固め含水比の違いは明らかであったが、応力経路ではあまり差がみられない。

図-5.5~5.8は、それぞれ室内突固めにより締固めエネルギー $E_c=200\%, 300\%$ で作成した供試体での試験結果の一例である。図-5.5, 5.7では、軸ひずみの増加に伴う間隙水圧の変化は、締固めエネルギー $E_c=100\%$ の場合と同じ傾向を示している。ただし、図-5.3に比べ軸ひずみの増加に伴う主応力差の曲線はピークを示すデータが目立っているが、これは前述したように、供試体内に発生した負圧により供試体の等体積条件が保たれなくなった結果、供試体のせん断抵抗が低下したものである。図-5.6, 5.8に示す応力経路について見ると、図-5.4で述べた傾向と同様な傾向が見られ、ここでも締固め含水比の違いは明瞭ではないことがわかる。

次に図-5.9, 5.10に示すように同じ締固め含水比で締固めエネルギーの違いについて着目すると、図-5.9では締固めエネルギーが大きくなるとともに主応力差及び間隙水圧の増加の割合は大きくなっているが、他方、図-5.10では $E_c=200\%$ の主応力差及び間隙水圧の増加の割合が最大となっている。これは、図-5.9で見られる傾向が他の拘束圧の違うデータでも見られ、図-5.10に示すデータだけが特異であった。図-5.10の結果については、試験誤差または表-5.1をみると圧密後のB値が低下しており、これらが原因になっているものと考えられる。

図-5.11~5.14は、それぞれタイヤローラにより試料を転圧し採取作成された供試体の試験結果の一例である。これらの図から室内突固めにより作成された供試体の試験結果と同様な傾向を示している。また、振動ローラにより試料を転圧し採取作成された供試体の試験結果のデータを見てもタイヤローラと同じ傾向が見られることから、次のようなことがいえる。①締固め方法によらず主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係では、締固め含水比の違いは明らかであるが、応力経路ではその差がみられない。②締固め方法によらず最適含水比付近の応力経路は、微妙に高いようである。③どの締固め方法においても締固めエネルギーが高くなるにつれて、応力経路も高くなっている。③については、最適含水比付近の破壊線の勾配が微妙に急であり、締固めエネルギーが高くなるにつれて破壊線の勾配も急になっていくことが考えられるため、最適含水比付近でかつ締固めエネルギーが高くなるにつれて供試体の強度が強くなっていくものとする。

各々の試験結果より、土の静的強度を表す指標として最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ を求め、締固め含水比 w 、乾燥密度 ρ_d との関係について整理し考察する。全試験結果をプロットすると図が煩雑になってしまうため、ここでは有効拘束圧 1.0kgf/cm^2 の最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ について整理した。

図-5.15, 5.16に、締固め含水比 w と最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ の関係を示す。併せて、締固め含水比と供試体の圧密前乾燥密度 ρ_{d0} との関係を示す。ここで、図中の最大主応力比は有効拘束圧 1.0kgf/cm^2 の下での試験結果である。

大局的にデータを見ると、乾燥密度が大きくなるとともに最大主応力比も大きくなっている。ただし、室

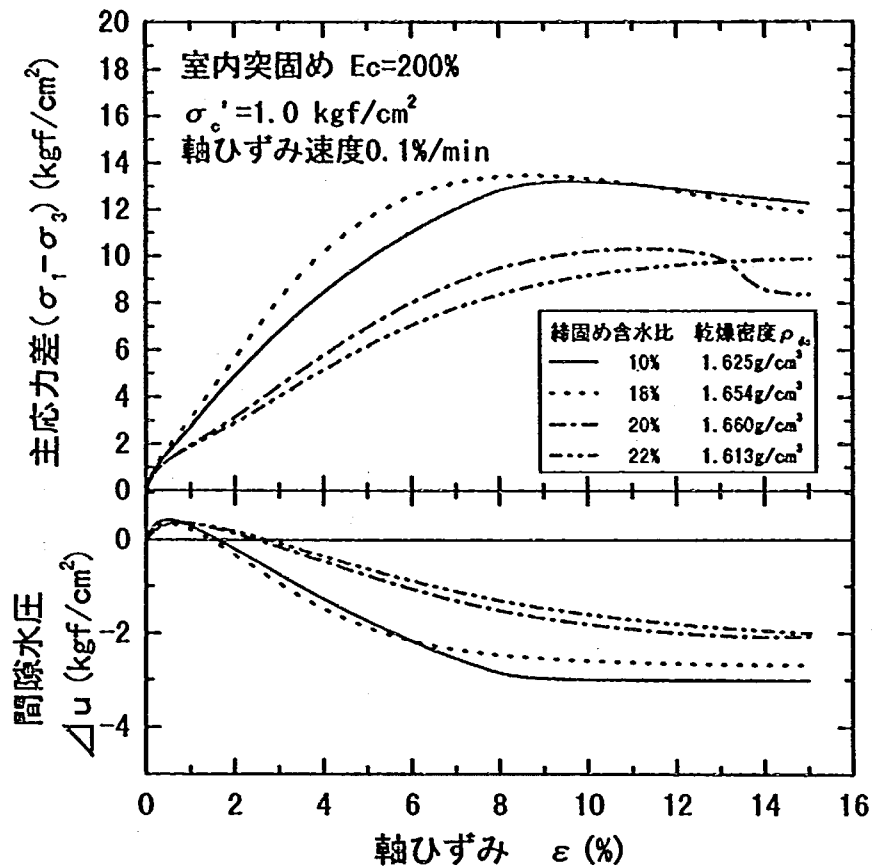


図-5.5 試験結果の一例—主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係（室内突固め $E_c=200\%$ ）—

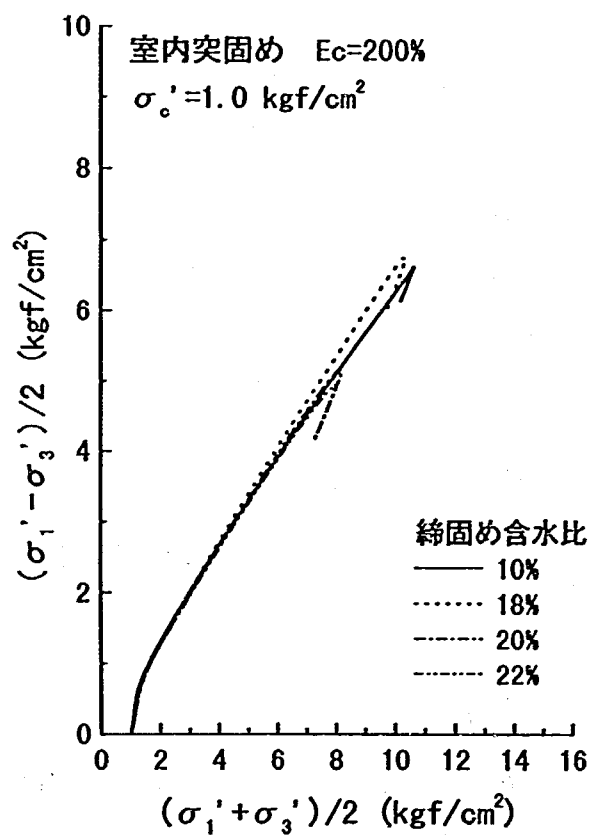


図-5.6 試験結果の一例—応力経路図（室内突固め $E_c=200\%$ ）—

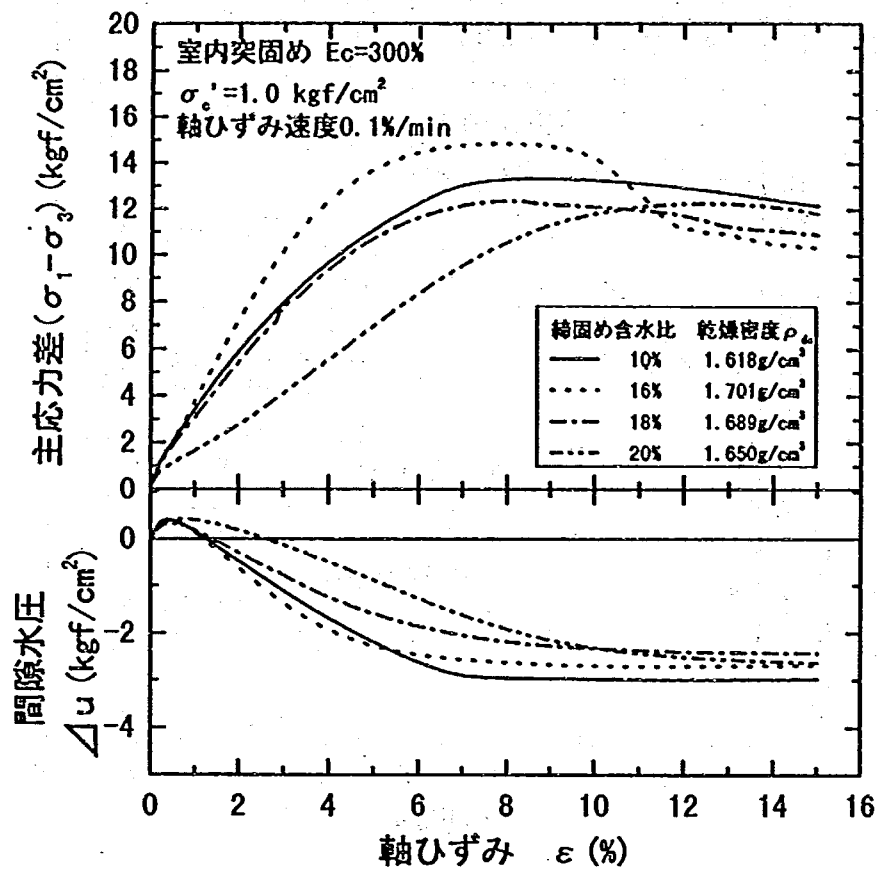


図-5.7 試験結果の一例—主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係（室内突固め $E_c=300\%$ ）—

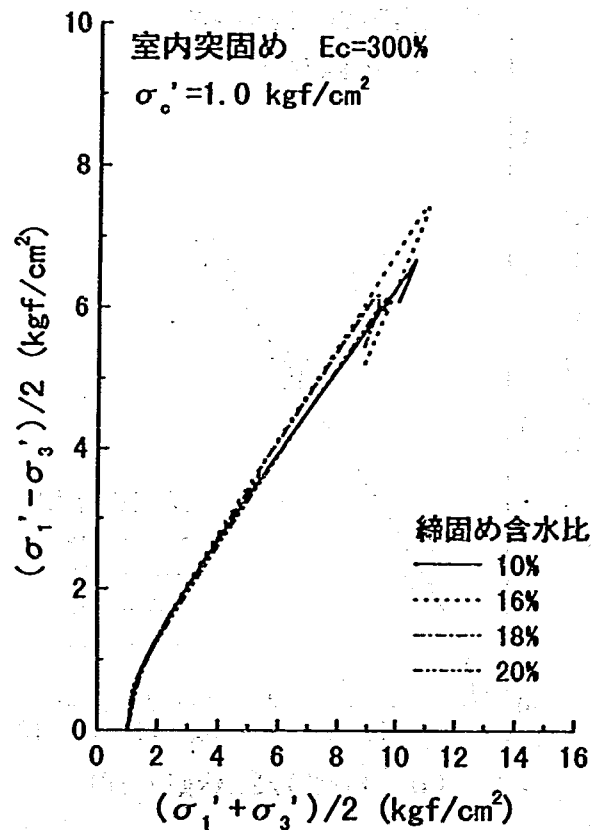


図-5.8 試験結果の一例—応力経路図（室内突固め $E_c=300\%$ ）—

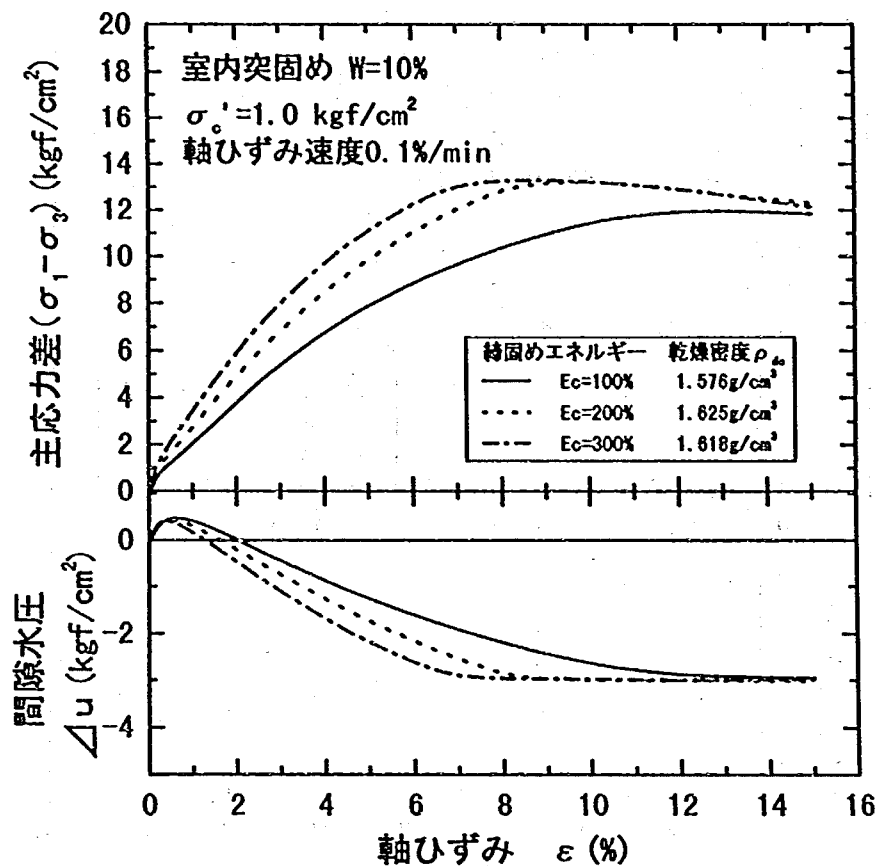


図-5.9 試験結果の一例—主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係
 (室内突固め、締固め含水比 $W=10\%$ ；締固めエネルギーを変化させた場合) —

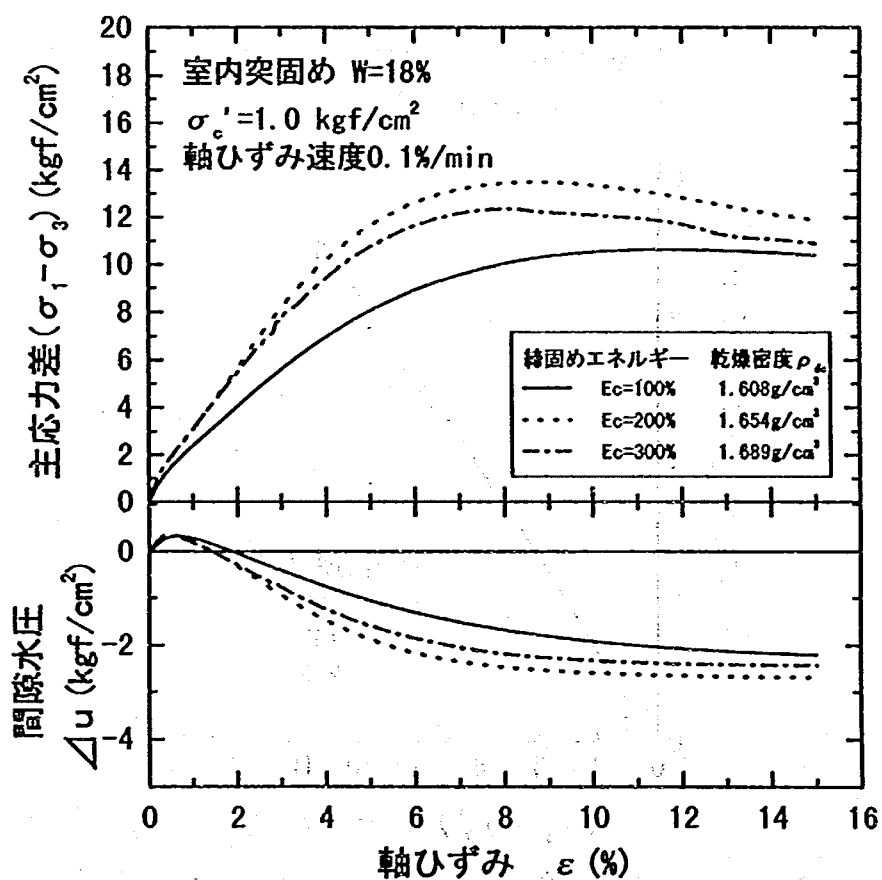


図-5.10 試験結果の一例—主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係
 (室内突固め、締固め含水比 $W=18\%$ ；締固めエネルギーを変化させた場合) —

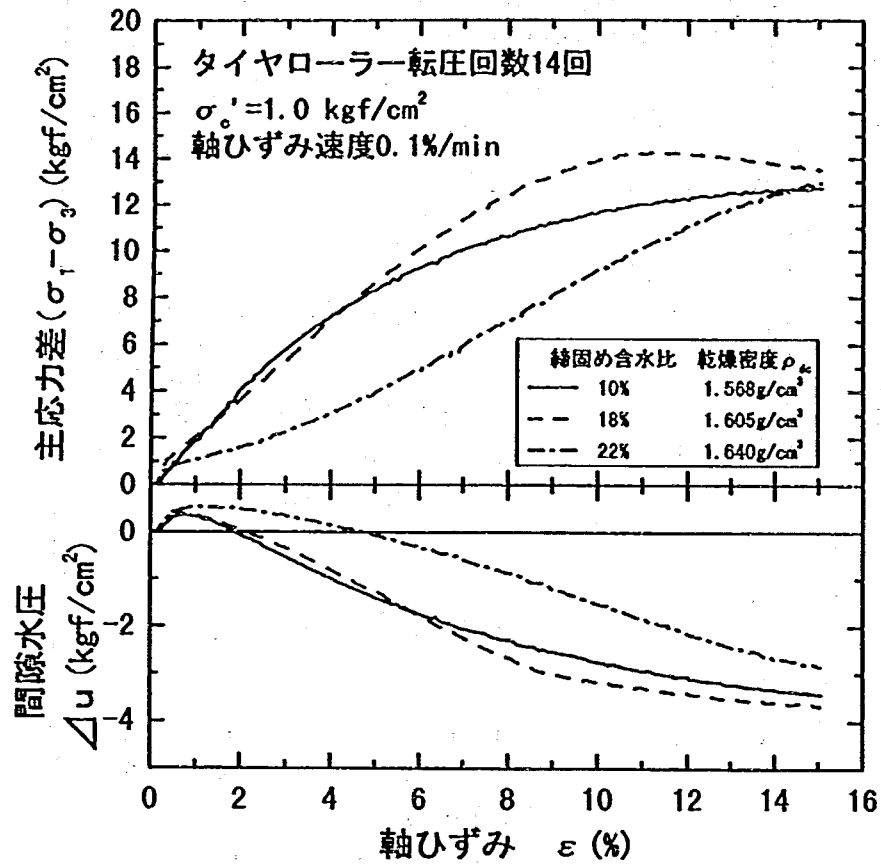


図-5.11 試験結果の一例—主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係（タイヤローラー転圧A）—

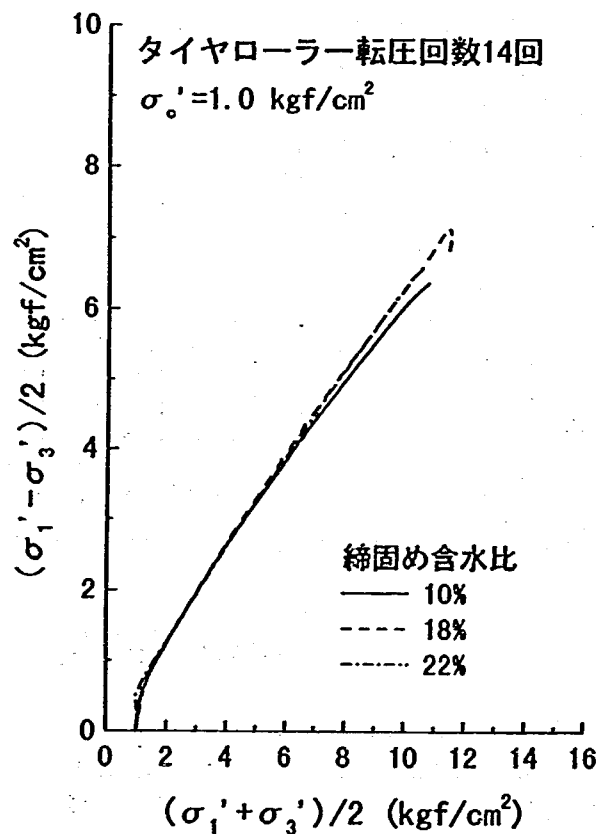


図-5.12 試験結果の一例—応力経路図（タイヤローラー転圧A）—

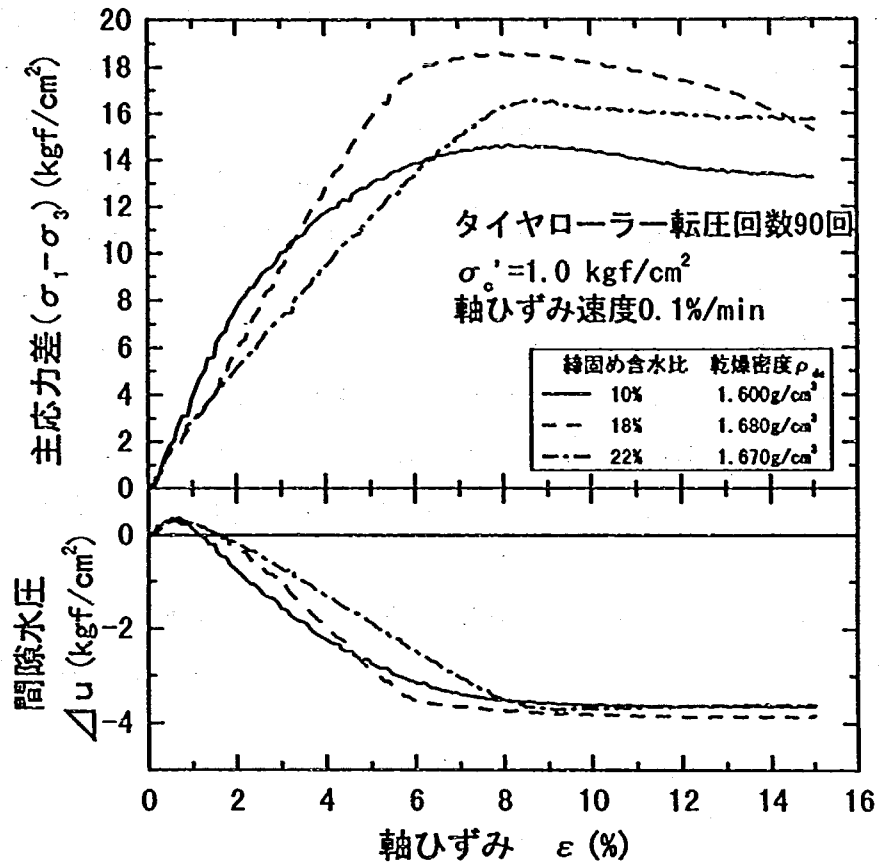


図-5.13 試験結果の一例-主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係 (タイヤローラー転圧B) -

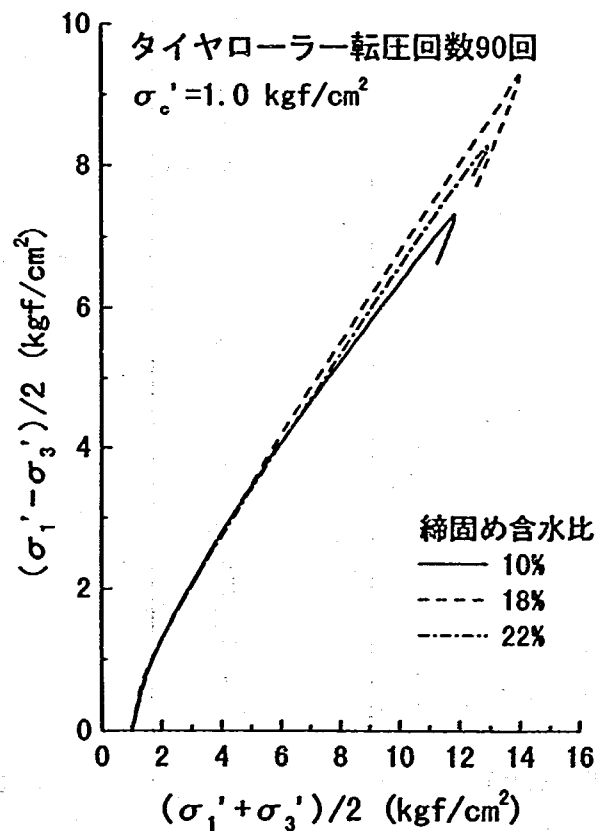


図-5.14 試験結果の一例-応力経路図 (タイヤローラー転圧B) -

室内突固めと実機転圧の間には締固め含水比と最大主応力比の相関は低い。これは、他の拘束圧においても同様であった。図-5.15の室内突固め試料の結果について見ると、図-4.3に示す締固め試験結果の最適含水比をピークとした曲線になっている。また、乾燥密度が大きくなると最大主応力比も大きくなっているが、その差は小さい。他方、図-5.16の実機転圧試料の結果について見ると、室内突固め試料の結果に比べてデータのバラツキが大きい。また、締固め含水比と最大主応力比の間には相関が見られない。これは、前述したように試験誤差の影響、または振動ローラによる動的な転圧とタイヤローラによる静的な転圧により粒子構造の違いが生じている可能性が考えられるが、いずれにしても推測の域であり理由は不明である。

次に図-5.17, 5.18に室内突固めと実機転圧における圧密後乾燥密度 ρ_{d0} と最大主応力比 $(\sigma_1' / \sigma_3')_{max}$ の関係を示す。プロットした点の側の数字は目標締固め含水比である。これらの図から最大主応力比と乾燥密度の関係は、室内突固めにおいては乾燥密度とともにおよそ大きくなっており、締固め含水比の影響も受けるが締固め方法の違いについては相関が見られない。

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締固め含水比及び締固め方法によって変化しているが、実機転圧においては締固め方法、締固め含水比及び乾燥密度の違いから特に相関は見

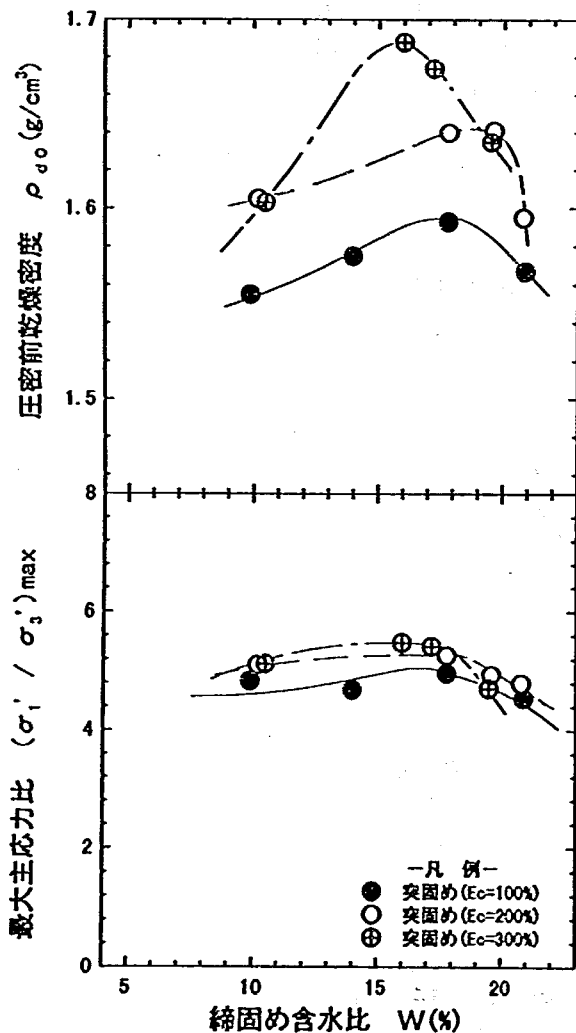


図-5.15 締固め含水比 w と最大主応力比の関係 (室内突固め)

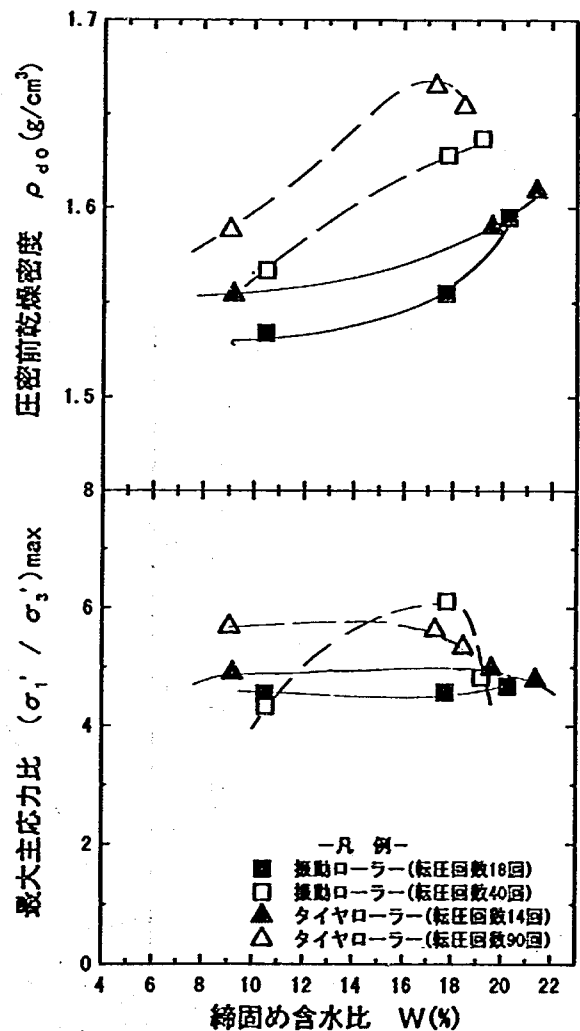


図-5.16 締固め含水比 w と最大主応力比の関係 (実機転圧)

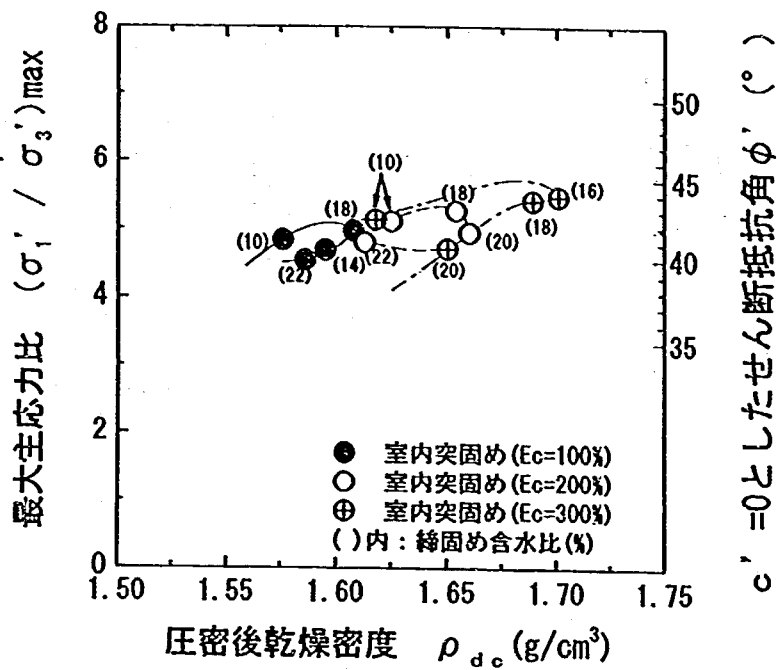


図-5.17 圧密後乾燥密度と最大主応力比の関係（室内突固め）

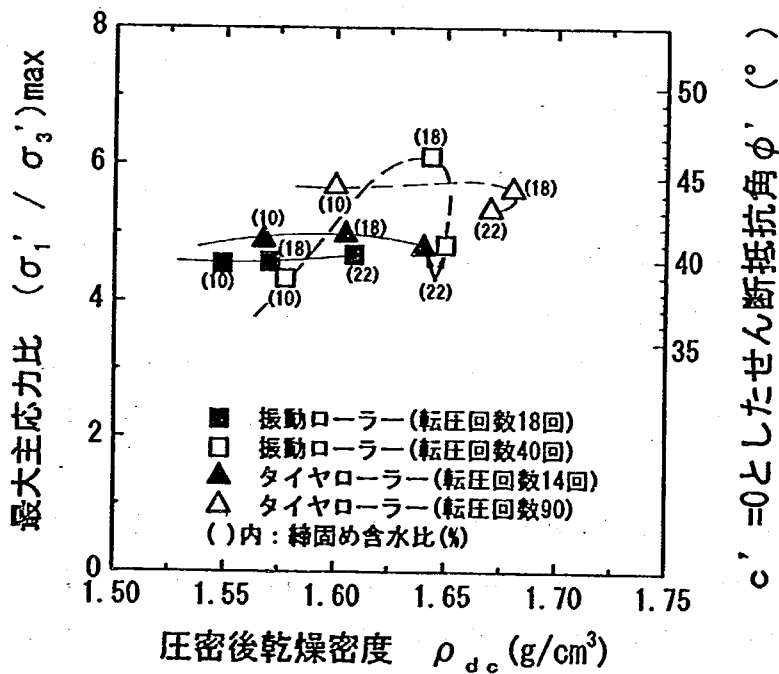


図-5.18 圧密後乾燥密度と最大主応力比の関係（実機転圧）

られなかった。この原因として、締固め方法、締固め含水比及び乾燥密度の違いにより土粒子構造が異なることや試験誤差によるばらつきが考えられる。

5.3 繰返し非排水三軸試験結果とその考察

まず、室内突固め、タイヤローラ転圧による試料の繰返し三軸試験結果の例を図-5.19に示す。軸ひずみ

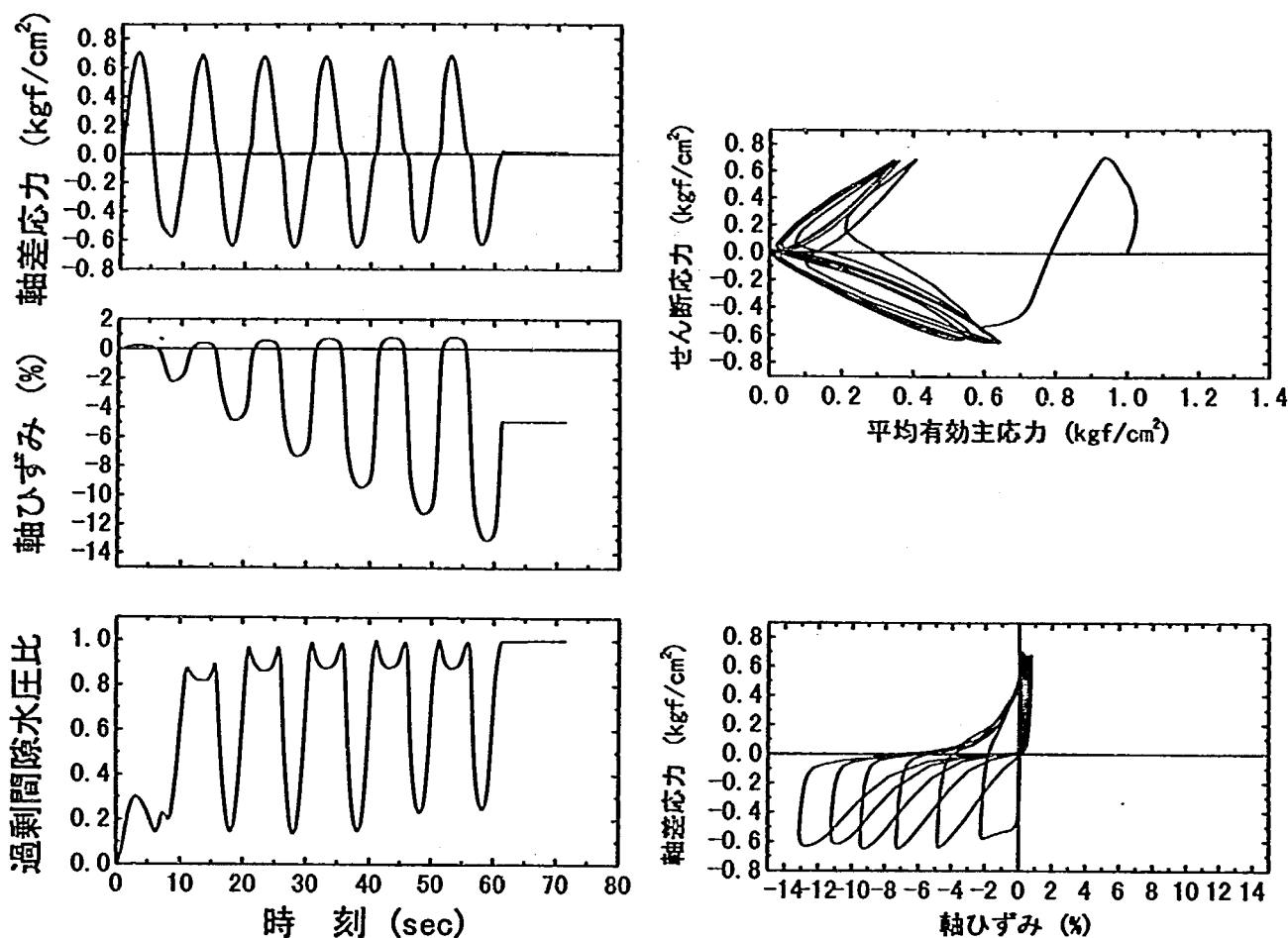


図-5.19 繰返し三軸試験結果の一例（振動ローラ転圧回数40回、締固め含水比10%）

の時刻歴を見るとどちらも徐々に引張側（軸差応力が負）に軸ひずみが卓越していることがわかる。また、過剰間隙水圧は圧縮側よりも伸張側において大きく低下しており、密な試料に特有のグレイタンシー効果が強く出ていること、及び異方性が強いことがわかる。ヒステリシスループからも左記のようなことがわかる。次に間隙水圧の時刻歴に着目すると軸差応力が正のピークに達するとき間隙水圧もピークに達していることがわかる。

すべての繰返し非排水三軸圧縮試験の結果を表-5.2にまとめて示す。また、これらの結果を繰返し応力比と繰返し回数の関係にプロットしたものを図-5.20に示す。同図の結果から、繰返し回数20回で両振幅軸ひずみが5%に達するような応力比を動的強度比 R_{120} として読み取った。この値は表-5.2の最右欄に掲げている。

以下、動的強度比 R_{120} についていくつかの分析結果を示し、考察を加える。

まず、図-5.21は、締固め密度が近い室内突固め（ $E_c=100\%$ ）とタイヤローラ転圧（転圧回数14回）試料について、締固め含水比と圧密後乾燥密度及び動的強度比の関係を示す。同図より以下のことが観察される。

(1) 締固め含水比と乾燥密度の関係

室内突固めでは、最適含水比をピークとした曲線を描いているのに対し、タイヤローラーでは締固め含水比が高くなるにつれて乾燥密度も高くなっている。何故、このような傾向を示しているのか原因は不明である。

表-5.2① 繰返し三軸試験結果一覧

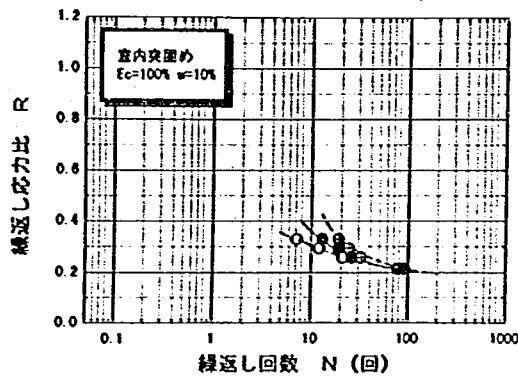
締固め 方法	供試体 製作条件		試験前供試体					圧密後供試体			B 値		拘束 圧 σ_3 (kgf/ cm ²)	試験結果					液状化 強度 R_{100}
	締固め エネルギー E_c (%)	含水比 ケース	含水比 w (%)	湿潤 密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥 密度 ρ_{do} (g/cm ³)	間隙 比 e_o	相対 密度 D_{ro} (%)	乾燥 密度 ρ_{do} (g/cm ³)	間隙 比 e_c	相対 密度 D_{ro} (%)	圧 密 前	圧 密 後		繰返し 応力 振幅比 R	繰返し載荷回数 N				
															間隙 水圧比 95% N_{95} (回)	軸歪み 振幅 2% N_2 (回)	軸歪み 振幅 5% N_5 (回)	軸歪み 振幅 10% N_{10} (回)	
実 験 内 容	100	10	10.1	1.697	1.541	0.790	139.9	1.561	0.787	143.1	1.00	0.93	1.00	0.329	13	7.1	13	19	0.284
			10.1	1.691	1.534	0.799	138.7	1.554	0.776	141.9	0.98	0.91		0.293	16	12	19	24	
			10.5	1.683	1.524	0.810	137.1	1.545	0.785	140.5	0.98	0.91		0.258	26	21	26	32	
			10.4	1.690	1.530	0.803	138.1	1.551	0.779	141.1	1.00	0.92		0.214	79	77	84	91	
		14	13.8	1.756	1.543	0.788	140.2	1.582	0.766	143.2	0.95	0.91	1.00	0.365	9	3.2	8.3	15	0.298
			14.3	1.793	1.568	0.760	144.1	1.587	0.738	147.1	0.95	0.93		0.230	100	96.0	108	121	
			13.7	1.760	1.547	0.783	140.8	1.568	0.759	144.2	0.95	0.93		0.298	18	13.0	20	28	
			13.7	1.757	1.545	0.786	140.5	1.564	0.764	143.6	0.98	0.89		0.253	28	25.0	32	41	
		18	17.6	1.855	1.577	0.750	145.5	1.597	0.727	148.6	1.00	0.83	1.00	0.349	16	8.3	17	28	0.332
			17.6	1.864	1.585	0.741	146.8	1.602	0.722	149.4	0.98	0.88		0.299	21	18.0	31	48	
			18.2	1.859	1.573	0.754	144.9	1.593	0.732	147.9	0.98	0.88		0.395	16	3.4	13	23	
			18.2	1.878	1.588	0.737	147.2	1.604	0.720	149.7	0.95	0.85		0.260	58	58.0	78	103	
		22	21.5	1.888	1.547	0.783	140.8	1.562	0.766	143.2	0.98	0.82	1.00	0.247	4	>500	3.3	10	0.183
			21.3	1.886	1.556	0.773	142.3	1.573	0.754	144.9	0.95	0.79		0.193	12	1.1	15	25	
			21.5	1.889	1.552	0.778	141.6	1.566	0.762	143.8	0.95	0.82		0.159	37	11.0	40	47	
			21.2	1.880	1.559	0.770	142.7	1.577	0.749	145.6	0.95	0.84		0.134	>500	36.0	>500	>500	
実 験 内 容	200	10	10.4	1.782	1.614	0.709	151.1	1.631	0.691	153.6	1.00	0.89	1.00	0.404	12	4.3	13	20	0.362
			10.3	1.786	1.620	0.703	152.0	1.639	0.684	154.6	1.00	0.93		0.359	22	13	25	38	
			10.1	1.762	1.600	0.724	149.0	1.618	0.706	151.6	0.95	0.89		0.467	9	2.2	7.8	15	
			10.2	1.785	1.620	0.703	152.0	1.638	0.684	154.6	0.98	0.92		0.329	24	18	31	42	
		18	17.6	1.945	1.654	0.668	156.8	1.668	0.654	158.7	0.95	0.76	1.00	0.415	28	13.0	45	96	0.520
			17.4	1.952	1.662	0.660	157.9	1.693	0.630	162.1	0.95	0.74		0.336	39	39.0	90	236	
			17.6	1.923	1.635	0.686	154.3	1.652	0.670	156.6	0.95	0.71		0.594	16	1.3	12	27	
			17.7	1.943	1.651	0.671	156.4	1.664	0.658	158.3	0.95	0.70		0.492	19	5.3	31	77	
		20	19.8	1.945	1.624	0.699	152.6	1.642	0.680	155.2	0.95	0.64	1.00	0.251	7	4.0	10	27	0.228
			19.7	1.964	1.641	0.681	155.0	1.658	0.664	157.4	0.95	0.65		0.221	23	21.0	30	56	
			19.8	1.945	1.624	0.699	152.6	1.645	0.677	155.5	0.95	0.66		0.292	5	1.2	5.3	21	
			19.8	1.950	1.628	0.695	153.1	1.646	0.677	155.7	0.95	0.62		0.208	38	36.0	47	76	
		22	21.3	1.925	1.588	0.737	147.2	1.603	0.721	149.5	0.95	0.74	1.00	0.245	4	1.4	4.4	13	0.186
			21.4	1.926	1.587	0.739	147.1	1.603	0.721	149.5	0.95	0.71		0.199	10	7.4	12	20	
			21.0	1.913	1.581	0.745	146.1	1.598	0.727	148.7	0.95	0.70		0.168	100	99.0	106	125	
			20.9	1.927	1.593	0.732	148.0	1.615	0.708	151.2	0.95	0.72		0.177	29	28.0	33	46	
実 験 内 容	300	10	9.9	1.823	1.658	0.660	157.4	1.676	0.642	159.9	0.98	0.92	1.00	0.349	78	56.0	91	140	0.430
			9.9	1.803	1.641	0.677	155.0	1.661	0.657	157.8	0.97	0.94		0.379	32	23.0	40	67	
			10.3	1.798	1.630	0.688	153.4	1.649	0.669	156.2	1.00	0.93		0.436	24	11.0	26	42	
			10.4	1.787	1.619	0.700	146.2	1.640	0.678	148.9	1.00	0.94		0.528	10	2.2	8.2	17	
		16	15.7	1.943	1.679	0.639	160.3	1.695	0.624	162.4	0.95	0.67	1.00	0.503	42	16.0	47	109	0.697
			15.7	1.945	1.681	0.637	160.5	1.697	0.622	162.7	0.95	0.76		0.605	26	4.1	34	113	
			15.8	1.955	1.688	0.630	161.5	1.705	0.614	163.7	1.00	0.75		0.946	32	0.4	10	31	
			15.7	1.956	1.690	0.628	161.8	1.704	0.615	163.7	1.00	0.82		0.780	18	1.0	15	44	
		18	17.2	1.954	1.667	0.651	158.6	1.682	0.636	160.7	0.95	0.66	1.00	0.399	92	61.0	116	226	0.490
			17.4	1.945	1.656	0.662	157.1	1.671	0.647	159.2	0.98	0.73		0.503	21	6.1	22	53	
			17.8	1.964	1.667	0.651	158.6	1.682	0.636	160.6	0.95	0.59		0.461	6	0.4	4.3	38	
			17.6	1.949	1.658	0.660	157.4	1.672	0.646	159.4	0.95	0.64		0.578	7	0.3	3.2	19	
		20	19.5	1.945	1.628	0.690	153.1	1.646	0.672	155.7	0.95	0.50	1.00	0.252	6	3.1	8.4	30	0.209
			19.6	1.946	1.627	0.691	153.0	1.644	0.674	155.4	0.95	0.52		0.221	10	7.0	15	43	
			19.4	1.949	1.632	0.686	153.7	1.647	0.671	155.9	0.95	0.51		0.199	35	34.0	44	96	
			20.0	1.955	1.630	0.688	153.4	1.648	0.670	156.0	0.95	0.52		0.179	41	40.0	49	79	

* 繰返し回数20回のとときに両振幅軸ひずみが5%に達するような繰返し応力振幅比を液状化強度 R_{100} と定義。

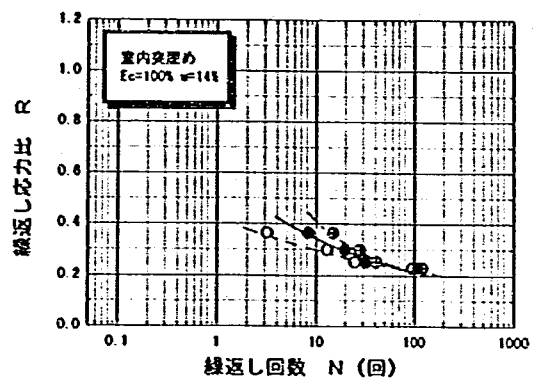
表-5.2② 繰返し三軸試験結果一覧

締固め 方法	供試体 製作条件		試験前供試体					圧密後供試体			B 値		拘束 圧 σ。 (kgf/ cm ²)	試験結果					液状化 強度 R ₁₀₀
	転圧回数 (回)	含水比グレース	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ _t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ _{do} (g/cm ³)	間隙比 e _o	相対密度 D _{ro} (%)	乾燥密度 ρ _{dc} (g/cm ³)	間隙比 e _c	相対密度 D _{rc} (%)	圧密前	圧密後		繰返し 応力 振幅比 R	繰返し載荷回数 N				
															間隙 水圧比 95% Nu ₉₅ (回)	軸歪み 振幅 2% N ₂ (回)	軸歪み 振幅 5% N ₅ (回)	軸歪み 振幅 10% N ₁₀ (回)	
振動ローラー	18	10	9.6	1.710	1.560	0.759	135.8	1.578	0.740	139.8	1.00	0.99	1.00	0.295	15	12.4	22.4	32.9	0.268
			10.2	1.719	1.560	0.759	135.8	1.582	0.735	140.8	1.00	0.99		0.313	4	2.3	4.3	7.3	
			10.1	1.701	1.545	0.777	132.0	1.563	0.756	136.4	1.00	1.00		0.354	2	0.8	2.2	4.5	
			10.1	1.682	1.528	0.797	127.8	1.545	0.776	132.2	1.00	1.00		0.263	10	8.1	12.8	19.5	
			18.5	1.887	1.593	0.715	133.9	1.611	0.696	137.7	1.00	0.98		0.389	6	3.0	9.2	27.6	
			17.6	1.875	1.594	0.714	134.1	1.611	0.696	137.7	0.99	1.00		0.355	23	18.3	51.7	99.3	
		18	18.3	1.872	1.583	0.726	131.8	1.602	0.706	135.7	0.99	0.99	0.436	4	1.6	5.9	15.8	0.345	
			18.1	1.877	1.589	0.720	132.9	1.608	0.699	137.1	0.97	0.99	0.314	12	9.2	15.5	27.8		
			20.5	1.951	1.620	0.678	131.8	1.636	0.662	135.0	0.97	0.98	0.327	3	1.1	3.3	9.6		
			20.7	1.976	1.637	0.661	135.2	1.656	0.642	138.9	0.97	0.99	0.293	4	2.9	6.2	15.3		
			21.1	1.951	1.611	0.688	129.9	1.629	0.669	133.9	0.99	0.98	0.234	9	8.1	12.1	21.8		
			20.7	1.944	1.611	0.688	129.9	1.628	0.670	133.4	0.99	0.99	0.197	28	28.0	34.3	52.6		
振動ローラー	40	10	10.2	1.754	1.592	0.712	133.0	1.610	0.692	137.6	1.00	1.00	1.00	0.392	21	12.7	31.9	52.7	0.380
			10.1	1.751	1.591	0.713	132.8	1.609	0.693	137.4	1.00	1.00		0.490	7	2.4	9.3	17.7	
			9.9	1.746	1.590	0.714	132.6	1.611	0.691	137.8	0.99	1.00		0.317	2	0.8	1.8	3.9	
			10.0	1.733	1.575	0.729	129.1	1.595	0.708	133.9	1.00	1.00		0.327	10	6.2	14.7	26.3	
			17.3	1.958	1.669	0.638	151.7	1.687	0.620	155.5	1.00	0.99		0.349	16	11.8	37.9		
			18.1	1.880	1.592	0.717	135.0	1.609	0.698	139.0	0.99	0.99		0.492	7	3.7	14.3	21.6	
		18	18.2	1.894	1.602	0.706	137.3	1.620	0.687	141.4	0.97	0.99	0.690	4	0.7	4.8	26.6	0.430	
			18.6	1.872	1.578	0.732	131.9	1.593	0.710	135.2	1.00	0.99	0.595	9	2.4	18.8	57.0		
			19.4	1.979	1.658	0.642	134.7	1.676	0.623	138.6	0.97	0.99	0.384	3	1.0	4.1	23.4		
			18.4	1.977	1.669	0.630	137.2	1.687	0.613	140.7	0.99	0.99	0.296	23	20.4	57.9			
			19.3	1.988	1.665	0.634	136.4	1.683	0.617	139.9	0.97	0.99	0.322	6	4.1	10.0	42.3		
			19.4	1.978	1.657	0.642	134.7	1.674	0.625	138.2	1.00	1.00	0.302	7	5.2	13.6	114.5		
クイヤーローラー	14	10	8.85	1.681	1.544	0.761		1.560	0.743		0.994	0.956	1.00	0.284	19.2	16.5	27.6	37.3	0.320
			8.57	1.693	1.560	0.743		1.574	0.727		0.984	0.964		0.350	8.6	5.5	13.9	21.4	
			9.09	1.708	1.565	0.737		1.582	0.719		0.992	0.972		0.430	9.7	3.1	12.3	20.0	
			8.86	1.662	1.526	0.782		1.540	0.766		0.986	0.950		0.235	81.3	79.4	88.5	96.1	
			20.99	1.884	1.557	0.745		1.571	0.729		0.980	0.944		0.312	18.6	15.6	49.6	116.0	
			19.18	1.859	1.560	0.742		1.569	0.732		0.980	0.960		0.351	30.7	10.2	26.9	48.1	
		18	18.73	1.901	1.601	0.697		1.618	0.679		0.988	0.942	0.394	13.4	3.0	14.8	41.2	0.371	
			18.84	1.892	1.592	0.707		1.608	0.690		0.988	0.950	0.271	26.6	24.4	56.2	106.0		
			21.80	1.926	1.581	0.719		1.599	0.699		0.984	0.950	0.185	24.0	23.3	26.9	43.3		
			21.06	1.929	1.593	0.706		1.612	0.685		0.990	0.962	0.299	1.0	1.0	3.0	7.6		
			21.75	1.93	1.586	0.713		1.599	0.699		0.990	0.966	0.251	8.6	7.0	11.1	19.8		
			21.68	1.939	1.593	0.706		1.608	0.690		0.982	0.952	0.152	135.0	137	144.1	> 200		
クイヤーローラー	90	10	8.92	1.704	1.600	0.698		1.615	0.682		0.990	0.964	1.00	0.363	76.2	61.1	108.0	143.0	0.464
			9.42	1.743	1.593	0.705		1.600	0.698		0.984	0.956		0.447	21.8	14.0	39.4	62.3	
			9.48	1.691	1.545	0.758		1.558	0.743		0.988	0.956		0.547	5.2	1.5	7.2	11.1	
			9.22	1.683	1.541	0.762		1.558	0.743		0.996	0.956		0.497	8.1	5.4	12.0	15.1	
			17.38	1.950	1.662	0.637		1.675	0.624		0.984	0.958		0.553	13.4	1.0	18.7	> 200	
			16.89	1.942	1.661	0.638		1.675	0.624		0.984	0.946		0.399	8.3	4.4	60.9	> 200	
		18	17.70	1.951	1.657	0.642		1.670	0.629		0.984	0.950	0.333	29.9	26.6	170.0	> 200	0.553	
			17.38	1.952	1.663	0.636		1.677	0.623		0.984	0.946	0.478	8.7	2.9	170.0	> 200		
			19.01	2.028	1.704	0.594		1.721	0.579		0.980	0.944	0.187	108.0	108	128.0	> 200		
			19.00	2.011	1.690	0.608		1.708	0.591		0.984	0.958	0.250	11.2	12.1	23.8	> 200		
			20.94	2.002	1.655	0.642		1.671	0.626		0.978	0.942	0.352	14.7	4.8	20.2	> 200		
			18.67	2.023	1.705	0.594		1.721	0.579		0.994	0.960	0.448	5.0	1.8	11.7	> 200		

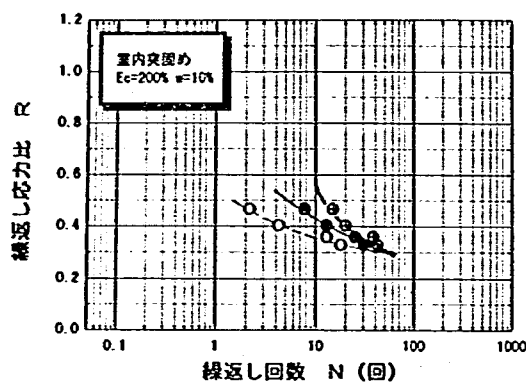
* 繰返し回数20回のときに両振幅値のずれが5%に達するような繰返し応力振幅比を液状化強度 R_{100} と定義。



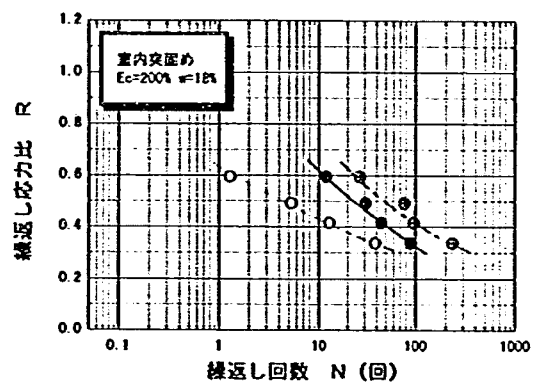
①-1



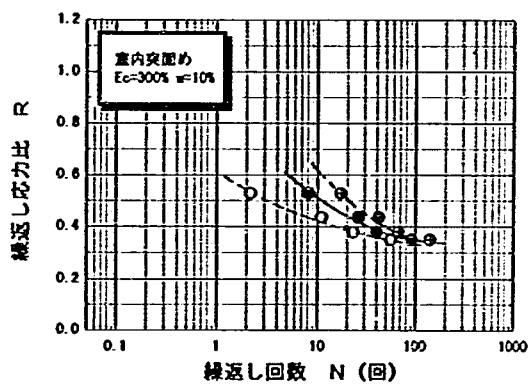
①-2



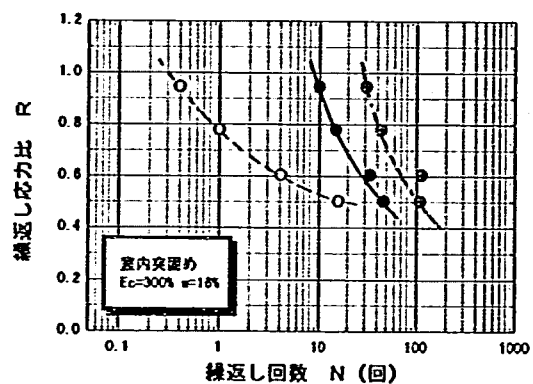
①-5



①-6



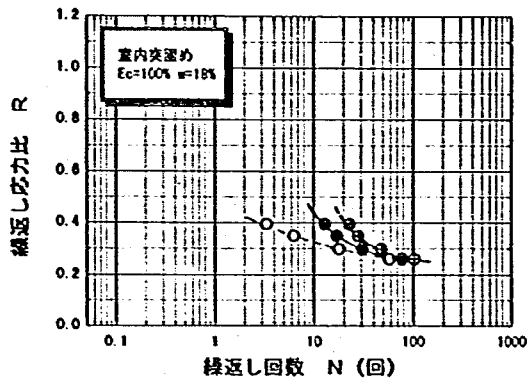
①-9



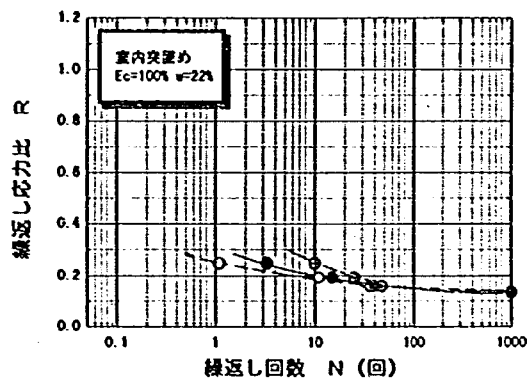
①-10

— 凡 例 —
 ○ 両振幅軸ひずみ $DA=2\%$
 ● 両振幅軸ひずみ $DA=5\%$
 ⊙ 両振幅軸ひずみ $DA=10\%$
 w : 締固め含水比

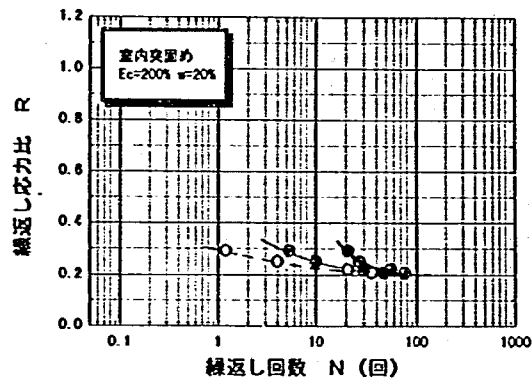
図-5.20① 繰返し応力比と繰返し回数の関係 (室内突固め)



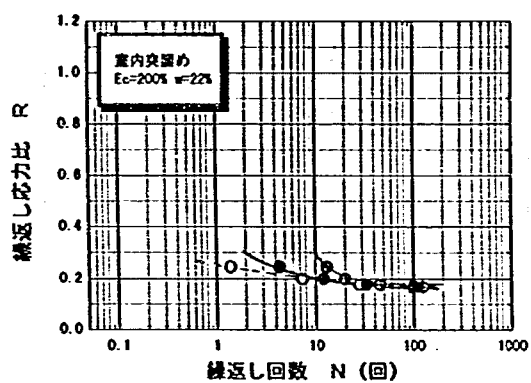
①-3



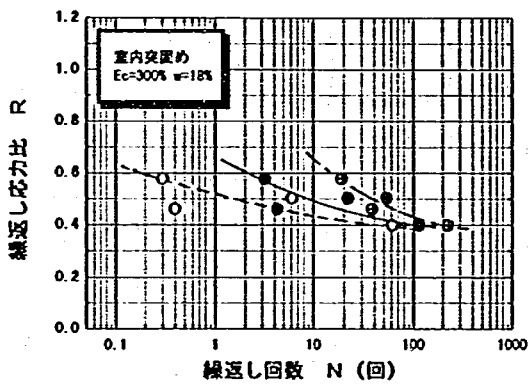
①-4



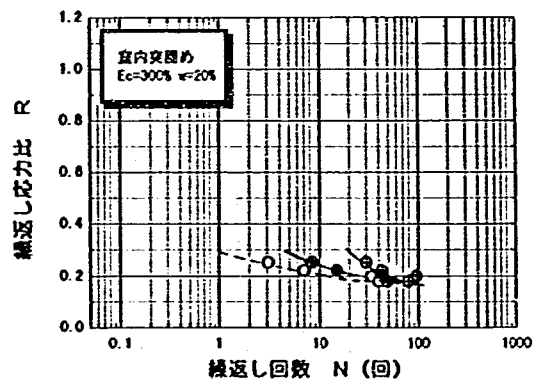
①-7



①-8



①-11

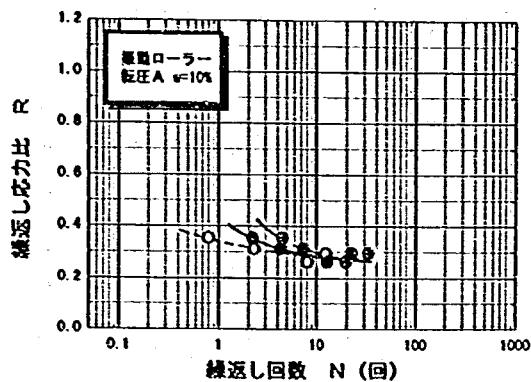


①-12

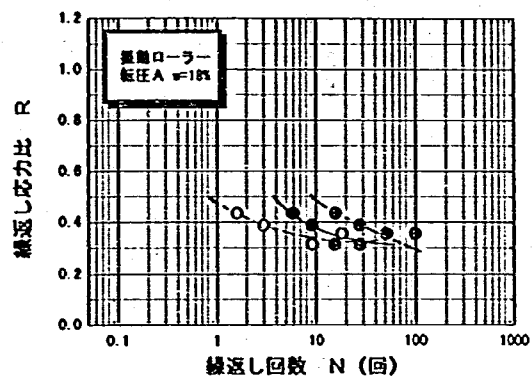
— 凡 例 —

- 両振幅軸ひずみDA=2%
- 両振幅軸ひずみDA=5%
- ◐ 両振幅軸ひずみDA=10%
- w : 締固め含水比

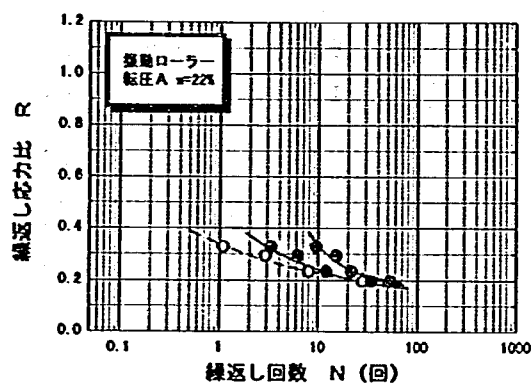
図-5.20① 縦返し応力比と縦返し回数の関係 (室内突固め)



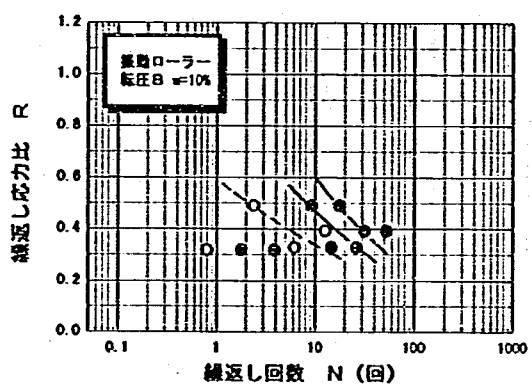
②-1



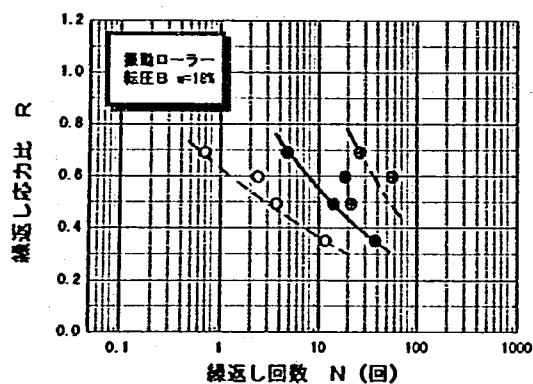
②-2



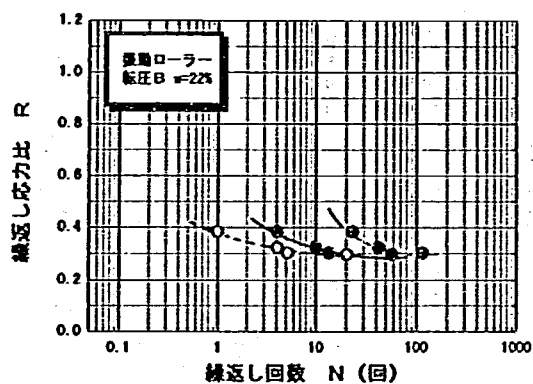
②-3



②-4



②-5



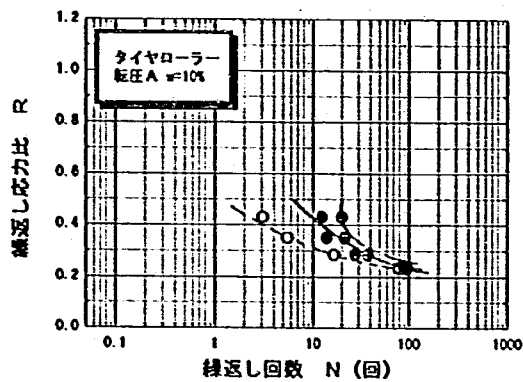
②-6

— 凡 例 —

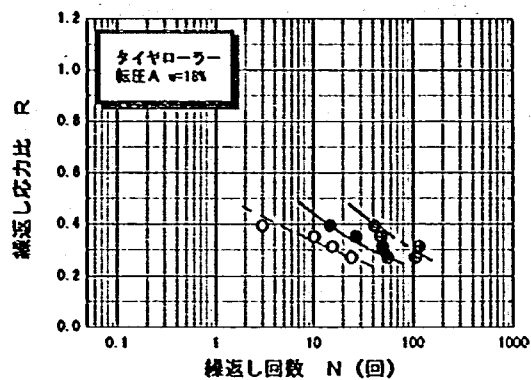
- 両振幅軸ひずみ $DA=2\%$
- 両振幅軸ひずみ $DA=5\%$
- 両振幅軸ひずみ $DA=10\%$

w : 締固め含水比

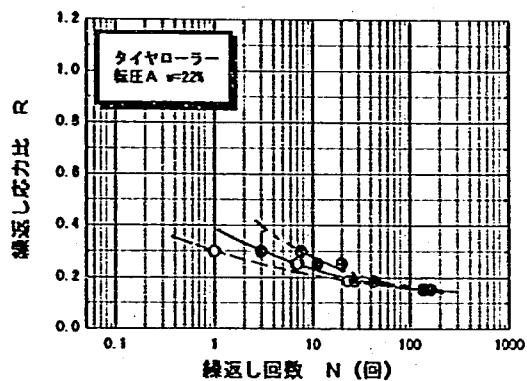
図-5.20② 縦返し応力比と縦返し回数関係 (振動ローラー)



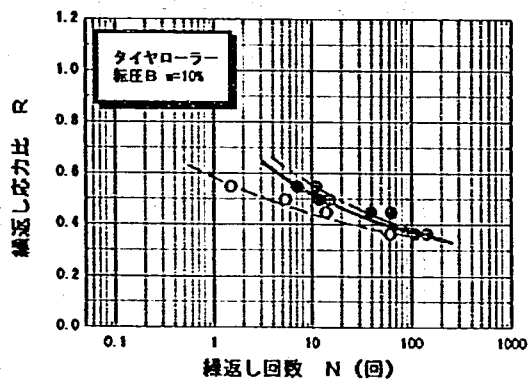
③-1



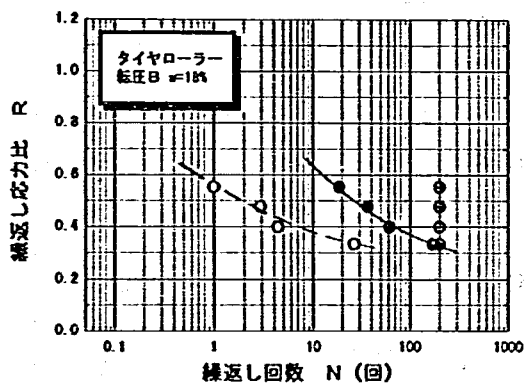
③-2



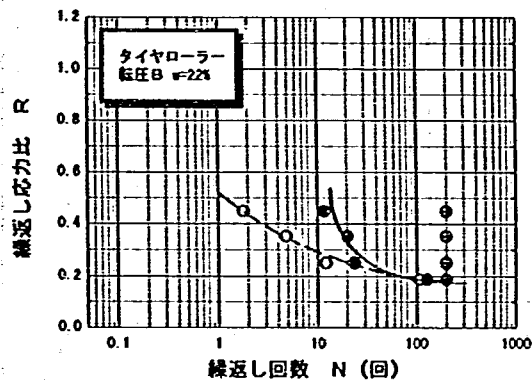
③-3



③-4



③-5



③-6

- 凡 例 —
- 両振幅軸ひずみ $DA=2\%$
 - 両振幅軸ひずみ $DA=5\%$
 - ◐ 両振幅軸ひずみ $DA=10\%$
 - w : 締固め含水比

図-5.20③ 繰返し応力比と繰返し回数関係 (タイヤローラ)

(2) 締固め含水比と動的強度比の関係

室内突固め及びタイヤローラ転圧のいずれにおいても最適含水比で動的強度比がピークを示していること、また、この試料では最適含水比よりも乾燥側の試料に比べて湿潤側の試料の動的強度比が低い。このことから締め固められた試料の動的強度比すなわち動的強度は、締固め含水比の影響を受けることがわかる。これは三原¹⁰⁾、古賀ら¹¹⁾の研究にも同様な傾向が見られる。

次に、全ての試験結果をプロットすると図-5.22のようになる。突固め回数、転圧回数および締固め方法を変えても先ほどの図-5.21と同様に室内で突き固めた試料はピークを持ち、実機転圧した試料は今回の実験の範囲では右上がりの曲線となっている。

図-5.22の結果を乾燥密度と動的強度比の関係に再整理すると図-5.23が得られる。この図を見るとデータ数が多いため図の傾向が見えにくいので、図-5.24に示すように最適含水比における最大乾燥密度が同程度のデータを図-5.23から抜粋した。同図から、いずれの締固め方法においても乾燥密度と動的強度比の間には一意的な関係は無いことがわかる。すなわち、いずれの締固め方法においても最適含水比より乾燥側で締

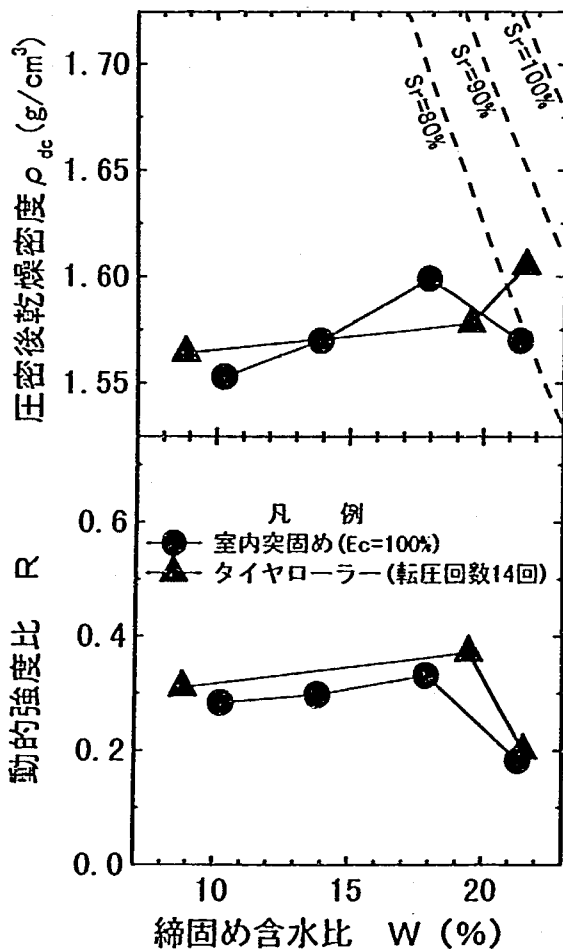


図-5.21 締固め含水比と動的強度比の関係
(室内突固め $E_c=100\%$ とタイヤローラ転圧回数14回)

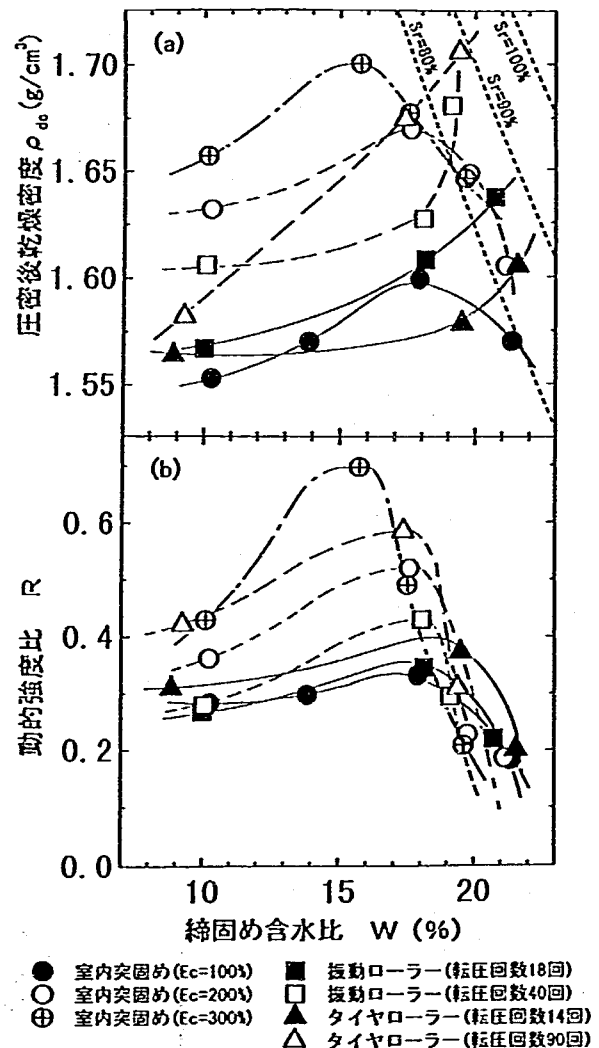


図-5.22 締固め含水比と動的強度比の関係
(全データ)

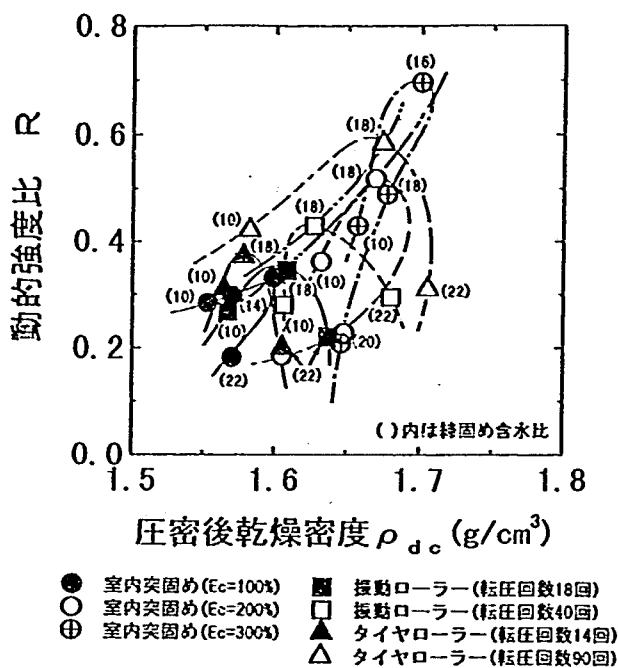


図-5.23 乾燥密度と動的強度比の関係

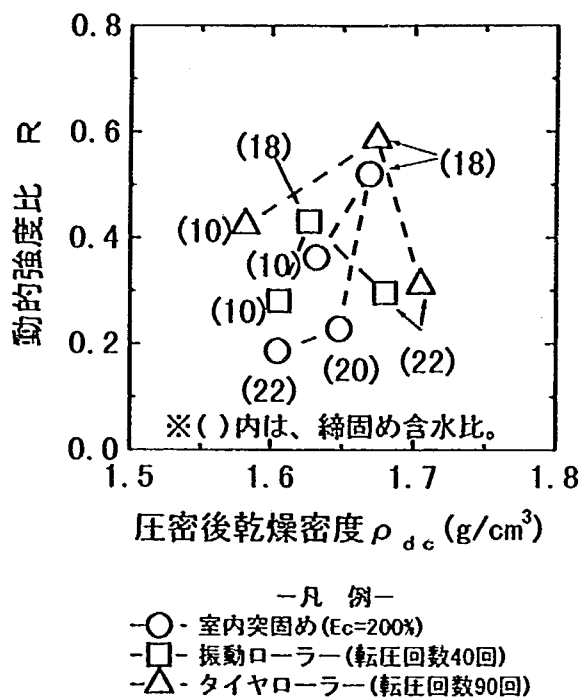


図-5.24 乾燥密度と動的強度比の関係

(室内突固め $E_c=200\%$ 、振動ローラ転圧回数40回及びタイヤローラ転圧回数90回)

め固めたものと湿潤側で締め固めた試料では、たとえ乾燥密度が同じでも動的強度は大きく異なっている。この原因として、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は変化することが考えられる。

既に第2章で述べたように、古賀ら¹³⁾は、3種類の試料で、最適含水比より乾燥側で締め固めたものと湿潤側で締め固めたものの動的強度比の大小関係は異なることを報告している。しかしながら、最適含水比のもとで室内突固め及び実機転圧により締め固められた土の動的強度については、両者の差は比較的小さかったとしている。ただし、最適含水比以外の条件の下での対比はなされていない。

そこで、今回の試験結果について、含水比別に図-5.25のような整理を行い、室内突固め及び実機転圧により締め固められた土の動的強度現場の動的強度を比較してみた。同図から、締め固め方法が異なっても締め固め密度と動的強度の間には概ね一意的な関係が成立しており、このことから締め固め方法の影響は比較的小さいと考えられる。ただし、締め固め含水比が10%でタイヤローラ転圧のデータのみがやや離れた位置にプロットされており、これは試験誤差が大きかったのか、あるいは締め固められた試料の力学特性が本質的に異なるのか、いずれかであろう。

以上まとめれば、一部の例外的なデータを除けば、現場実機転圧と同じ含水比条件で同一密度に締め固めた試料を用いれば、実機転圧によって締め固められた試料の動的強度を室内突固め試料によって概ね推定することができると言える。

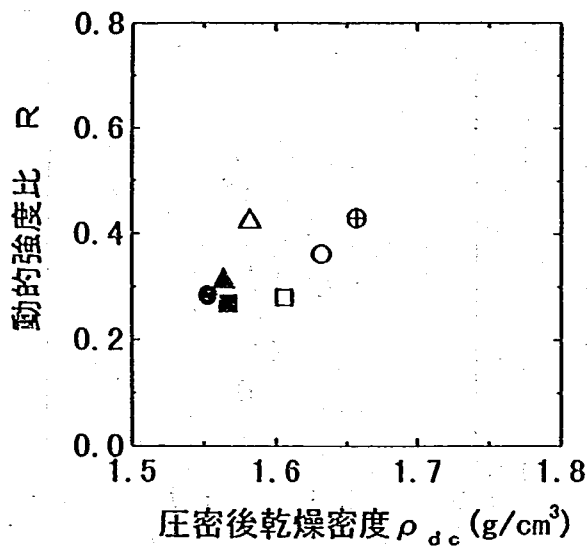


図-5.25 (a) 締固め含水比10%
乾燥密度と動的強度比の関係

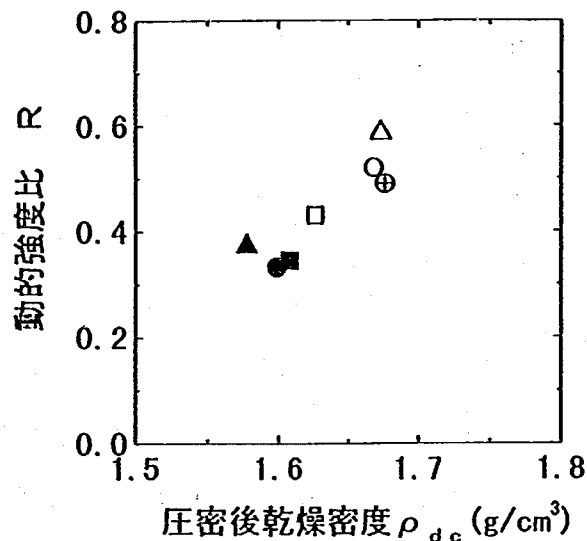


図-5.25 (b) 締固め含水比18%
乾燥密度と動的強度比の関係

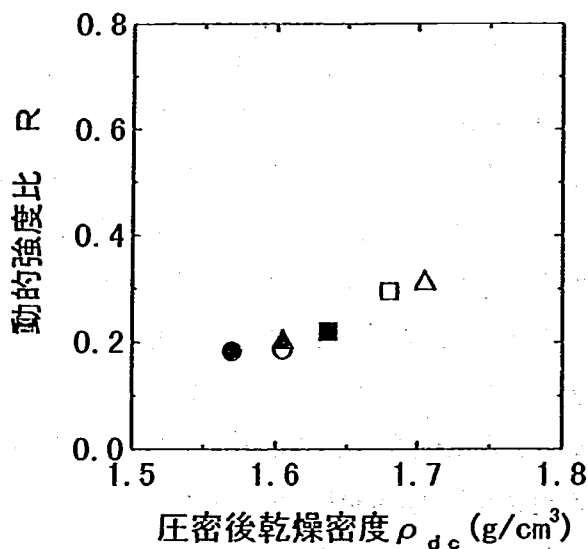


図-5.25 (c) 締固め含水比22%
乾燥密度と動的強度比の関係

6. まとめ

実機転圧及び室内突固めにより締め固められた細粒分を多く含む材料の飽和非排水条件における静的・動的強度特性について一連の三軸試験により調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 締め固められた砂質土の動的強度は、締固め含水比の影響を強く受け、最適含水比よりも湿潤側で締め固められた場合、乾燥側で同一密度に締め固められたものに比べて小さい。
- ② 締固め含水比が一定であれば、締固め方法にかかわらず締固め密度との間に一意的な関係が認められた。すなわち、締固め含水比が一定であれば、現場の動的強度を室内で推定することができそうである。
- ③ 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締固め含水比及び締固め方法によって変化しているが、実機転圧においては締固め方法、締固め含水比及び乾燥密度の違いから特に相関的な関係は見られなかった。

締固めにより築造される堤体材料の動的強度を正しく把握するためには、堤体あるいは堤体と同一条件で締め固められた試験盛土から直接サンプリングして得た供試体について試験を行わなければならない。しかし、実際の現場においては大粒径礫を含むような材料等、不攪乱試料の採取が困難な場合がある。そこで、室内突固めにより作成した供試体で代用しなければならないが、締固め含水比一定で転圧された土の動的強度比は、締固め方法、締固めエネルギーによらず、締固め密度との間にはほぼ一意的な関係があることから、室内で突き固めた試料を用いて堤体の動的強度を推定することができそうである。しかし、本研究で行われた一連の三軸試験は、等方圧密状態での試験であるため、初期せん断をかけた状態での締め固められた試料の動的強度特性は明らかになっていない。また、土粒子構造に着目した締め固められた試料の動的強度特性も明らかになっていないので、これらについては今後の課題である。

参考文献

- 1) 建設省河川局開発課：フィルダムの耐震設計指針（案）、（財）国土開発技術研究センター、1991.6.
- 2) 谷 茂、堀 俊和：日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震災害に関する研究、農業工学研究所報告 第37号、pp.51-90, 1998.
- 3) 松本徳久、安田成夫、志賀三智：昭和59年（1984年）長野県西部地震災害調査報告、土木研究所報告第182号、pp.247-262, 1991.
- 4) 藤沢侃彦他：平成 7 年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、土木研究所報告第196号、pp.321-339, 1996.
- 5) Seed, H.B., K.L. Lee, I.M. Idriss and F.I. Makdisi: The slides in the San Fernando Dams during the earthquake of February 9, 1971, J. GED, ASCE, Vol. 101, No. GT7, pp.651-688, 1975.
- 6) 谷茂：4. 4. 6 溜池・ダム、1983年日本海中部地震震害調査報告、土木学会、pp.322-340, 1986.
- 7) Tani, S. and T. Shiomi: Analysis of earth dam damages caused by the Hyogoken-nanbu earthquake, The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake -Investigation into Damage to Civil Engineering Structures-, Committee of Earthquake Engineering, JSCE, pp.115-124, June 1996.
- 8) Mulilis, J.P., H.B. Seed and C.K. Chan: Effects of sample preparation on sand Liquefaction, J. GED, ASCE, Vol. 103, No. GT2, pp.91-108, 1977.
- 9) Tatsuoka, F., K. Ochi and S. Fujii: Effect of sample preparation method on cyclic undrained strength of sand in triaxial and torsional shear tests, Bulletin of ERS, No. 17, 1984.
- 10) 三原正哉：砂地盤の液状化強度に対する締固め含水比、締固めエネルギーの影響、第40回土木学会年次講演会、1985.
- 11) 古賀泰之、松尾修、島津多賀夫、唐沢安秋：フィルダム材料の動的強度に関する実験報告書、土木研究所資料第2755号、1989.
- 12) 島津多賀夫、松尾修、古賀泰之：締固め土の動的強度特性、第24回土質工学研究発表会講演集、pp. 795-796, 1989.
- 13) Jang, D.-J. and J.D. Frost: Sand structure differences resulting from specimen preparation procedures, Proceedings of A Specialty Conference on "Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III", Geotechnical Special Publication No. 75, ASCE, pp. 234-245, 1998.
- 14) Oda, M.: Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 1, pp. 17-36, 1972.
- 15) (社) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、1990.