

土木研究所資料

トンネルの変形と支保荷重に関する研究

平成8年2月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

Copyright © 1996 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, 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。

トンネルの変形と支保荷重に関する研究

道路部 トンネル研究室 室 長 真 下 英 人

前トンネル研究室 研 究 員 角 湯 克 典*

トンネル研究室 研 究 員 池 口 正 晃

要 旨

トンネルは、地山自体およびトンネル支保工の両者の支持機能により地下空間を保持する構造物であり、その合理的な設計・施工をおこなうには、支保工に作用する荷重がトンネルの変形とともに変化するという地山の挙動特性を有効に活用しなければならない。そこで本研究は、トンネルの変形と支保荷重との関係に、地山条件（土被りや水）がどのように影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

キーワード：トンネル，地山の安定問題，特性曲線，落し戸，遠心力

*：現道路局道路環境課 係長

目 次

1. ま え が き	1
2. 落 と し 戸 実 験	2
2.1 概 要	2
2.2 実 験 方 法	3
2.2.1 実 験 装 置	3
2.2.2 地 山 材 料	5
2.2.3 実 験 手 順	6
2.2.4 実 験 条 件	8
2.3 実 験 結 果 お よ び 考 察	9
2.3.1 支 保 荷 重 の 変 化	9
2.3.2 周 辺 土 圧 の 変 化	20
2.3.3 地 表 面 沈 下 量 の 変 化	37
3. 遠 心 力 模 型 実 験	40
3.1 概 要	40
3.2 実 験 方 法	41
3.2.1 実 験 装 置	41
3.2.2 地 山 材 料	45
3.2.3 実 験 手 順	48
3.2.4 実 験 条 件	55
3.3 遠 心 力 模 型 実 験 結 果 お よ び 考 察	59
3.3.1 支 保 荷 重 に つ い て	59
3.3.2 周 辺 土 圧 に つ い て	87
3.3.3 両 実 験 結 果 (上 半 降 下 式 と ゴ ム チ ュ ー プ 式) の 比 較	103
4. 結 論	104
参 考 文 献	105
参 考 資 料	107

1. まえがき

最近のトンネル施工技術の進歩はめざましく、都市内の未固結な含水地山においても、NATM でトンネルが掘削できるようになってきた。トンネルは本来、地山自体およびトンネル支保工の両者の支持機能により地下空間を保持する構造物であり、トンネルの合理的な設計・施工をおこなうには、支保工に作用する荷重がトンネルの変形とともに変化するという地山の挙動特性を有効に活用しなければならない。この関係を概念的に示したものが図-1.1¹⁾であり、Fenner-Pacher 曲線または地山特性曲線といわれている。この曲線は、変形量が小さい範囲の特性曲線 A は、弾塑性的性質を持つ地山において支保荷重 P_i と変形量 u_a の関係を示しており、変形率が大きくなる範囲の特性曲線 B は、緩み領域が大きくなると塑性化した部分の地山の自重が荷重として作用して支保荷重が大きくなることを示しているものである。

しかし、これらの関係は定性的には理解され、現実はこの概念を念頭にトンネル施工がおこなわれているが、いまだ定量化されていない。そこで本研究では、トンネルの変形と支保荷重との関係に、地山条件（土被り圧や水）がどのように影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

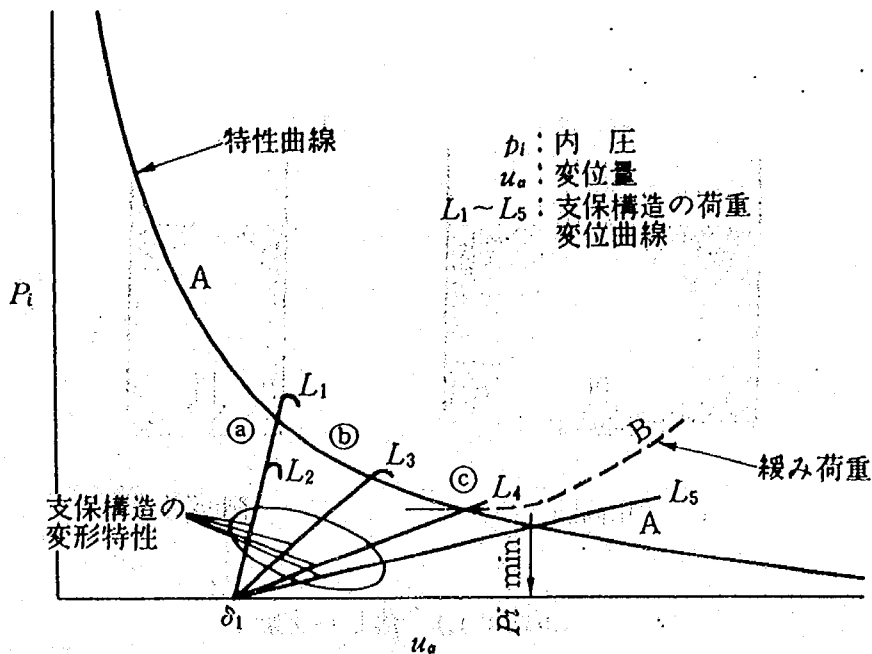


図-1.1 支保構造に作用する荷重と掘削面変位

2. 落とし戸実験

2.1 概要

砂質土や粘着力のない破砕岩の地山中に掘られたトンネルにかかる土圧や周辺地山の挙動を解明するための既往の研究として、乾燥砂やアルミ棒を用いた落とし戸 (lowering panel or trap door) の実験が行われてきた。これらの実験は前面をガラス張りにした箱の中に乾燥砂をいれ、床の一部を水平のまま降下させることで、トンネル掘削を模擬し、床の降下にともない砂の動き方や床にかかる鉛直土圧の変化を計測するものであり、実験目的や装置の規模等の面からそのほとんどが二次元模型にて行われている。

そこでトンネル掘削による鉛直土圧の変化を把握するために、図-2.1.1 のような「二次元落とし戸模型実験」をおこなうこととした。また過去の落とし戸実験の多くは、地山の材料を乾燥砂やアルミ棒というような、粘着力 $c=0$ 、摩擦角 $\phi>0$ のものを用いているが、本実験では粘性土を想定した石粉を用い、トンネルの変形量と支保荷重および周辺地山の挙動について、定性的な解明を試みることにした。

実験は、土被りおよび水位を変化させるとともに、落とし戸の幅および位置を3種類変化させ、それぞれのケースについて、落とし戸の降下による落とし戸および周辺底盤にかかる荷重の変化と地表面沈下の状況を測定した。

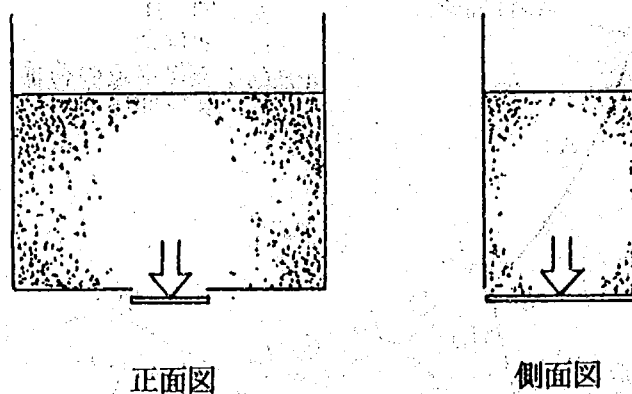


図-2.1.1 落とし戸実験

2.2 実験方法

2.2.1 実験装置

実験装置は、図-2.2.1 に示すように、実験土槽、落とし戸、降下装置および荷重・変位の測定器からなっている。実験土槽は、鋼製で内包寸法 100cm（幅）×60cm（奥行）×65cm（高さ）とし、その前面側には目盛りつきアクリル板をはめ込み、地山の動きが観察できるように考慮した。実験土槽の底盤には、20cm（幅）×60cm（奥行）の穴を設け、この部分に落とし戸（厚さ 12mm の鋼盤）を設置した。落とし戸の降下には、1mm/min のスピードで 20mm 程度まで降下させることができる手動式マイクロジャッキを使用した。荷重の変化は、落とし戸下部にセットした荷重計と、落とし戸周辺の底盤に 5cm 間隔に埋め込んだ小型土圧計で測定し、地表面沈下は地山モデル材料充填後、地表中央部にセットした変位計で測定した。また落とし戸幅の変更（10cm, 20cm）や落とし戸位置の変更（底盤から 10cm 上げた位置）が、仕切り板や底板を取り替えることによって容易にできるように計画した。

実験装置に使われた部材の説明を以下に示す。

(1) 支持ベース盤

実験槽の安定を保ち、実験装置一式を乗せて支える鋼製盤で、レベル調整機能を有する。

(2) 実験槽

形状寸法は前述の通りで、底盤に土圧計（ ϕ 25mm, $t=3\text{mm}$ ）を埋め込むための切込みを 4 箇所設ける。

(3) 槽内仕切り板

落とし戸幅 10cm のケースの場合に使用する鋼製の仕切り板である。これは、落とし戸幅 10cm のケースでは落とし戸幅 20cm のケースに比べて、落とし戸降下による地山への影響範囲が小さいことから、実験槽の規模を縮小する目的で用いられるものである。

(4) 底盤（A）、（B）

落とし戸幅 10cm のケースに使用する鋼製の底盤で、（A）、（B）の 2 種類をそれぞれ 1 組ずつ作製し、（3）槽内仕切り板 とセットで用いる。底板（A）には、土圧計（ ϕ 25mm, $t=3\text{mm}$ ）を埋め込むための切込みを 4 箇所設ける。

①底板（A）は落とし戸幅 10cm, 落とし戸位置 0cm でのケースに用いる。

②底板（B）は落とし戸幅 10cm, 落とし戸位置 10cm でのケースに用いる。

(5) 落とし戸板

厚さ 12mm の鋼板で、幅 10cm 用と幅 20cm 用との 2 種類がある。

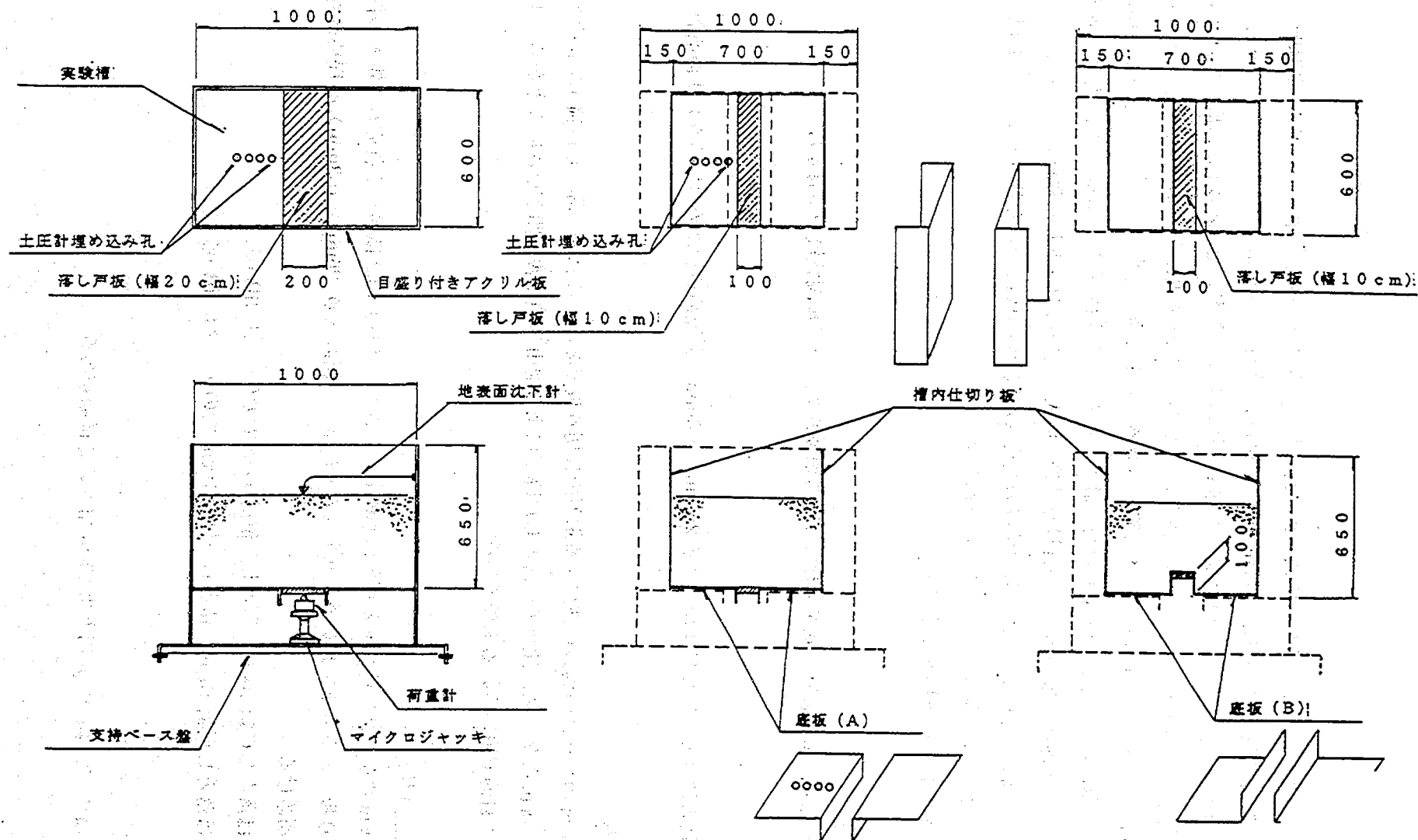


図-2.2.1 落し戸実験装置

2.2.2 地山材料

本実験では以下2種類の地山モデル材料を用いた。

(1) 乾燥地山

自然乾燥状態の石粉を使用する。これをφ 2mm のフルイを通して、常に落下高さが50cm になるように拡散させ、土槽内に所定の条件で充填した。

(2) 水位下地山

水位下の地山を想定した実験地山材料を作成した。これは上記の自然乾燥状態の石粉に適量の水を加え攪拌（泥水状態）した後、実験槽内にて沈澱（養成期間3～4日）させたものである。

材料物性値は、表-2.2.1、図-2.2.2 に示す通りである。

表-2.2.1 土質試験結果

実験ケース			乾燥地山			水位下の地山		
土被り (cm)			10	20	40	10	20	40
自然状態	土粒子の比重 G		2.743					
	含水比 w (%)		0.5			34.4	27.7	
	湿潤密度 ρ (g/cm ³)		1.198	1.218	1.245	1.879	1.960	
力学的特性	三軸圧縮試験	試験条件	CD					
		粘着力 c (kg/cm ²)	0.021	0.004	0.007	0.000	0.027	
		内部摩擦角 ϕ (°)	38.30	38.50	38.80	39.00	36.90	

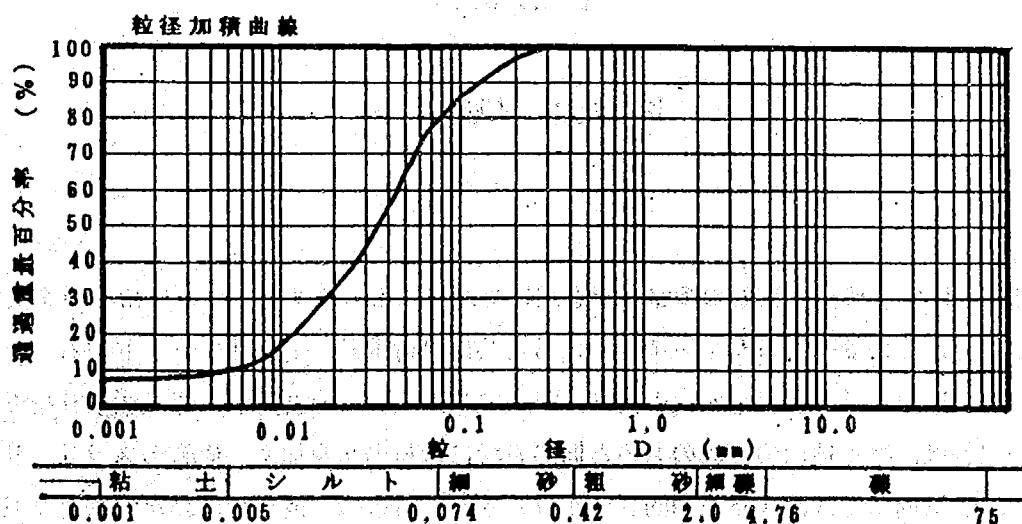


図-2.2.2 実験地山材料の粒度分布

2.2.3 実験手順

実験は図-2.2.3の実験フローに示す手順に従って実施した。

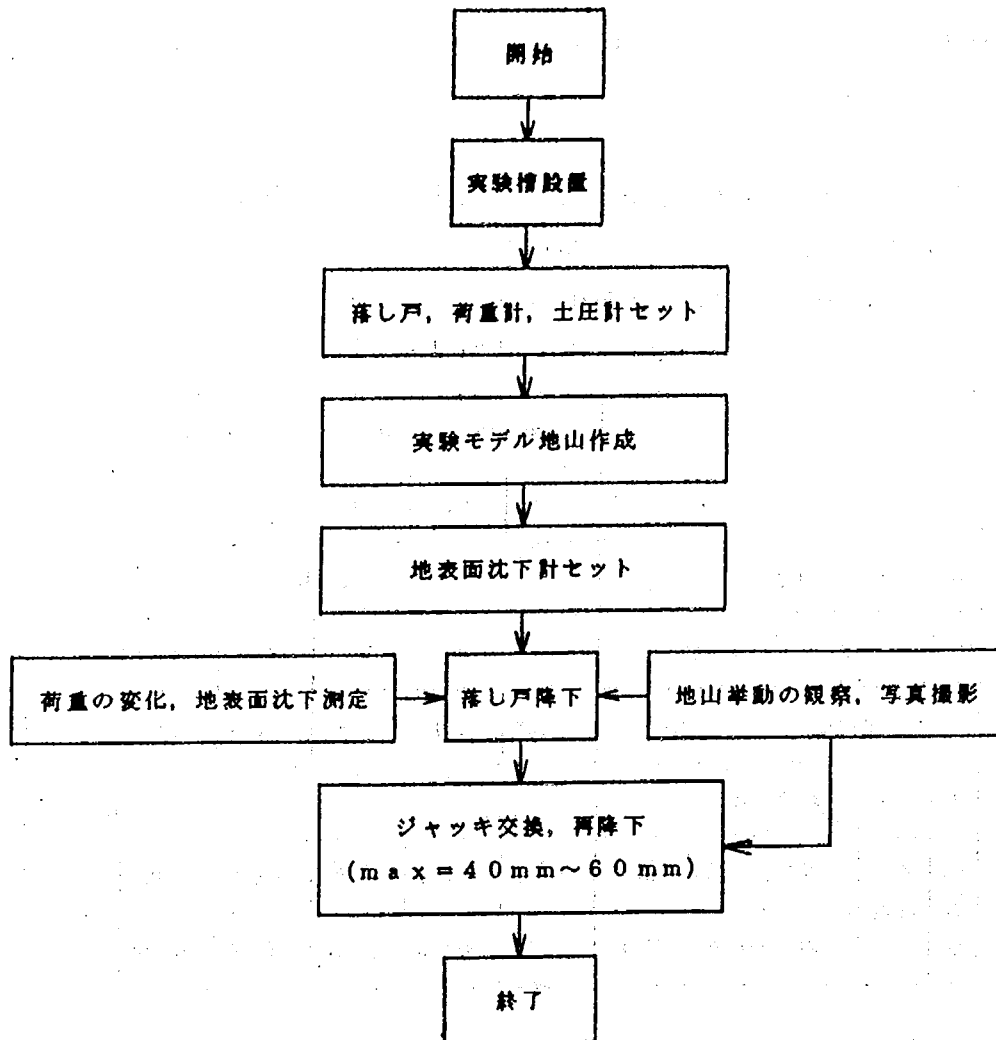


図-2.2.3 実験フロー

(1) 実験準備

まず、実験槽本体を支持ベース盤の調整ネジを用いて水平にセットする。つぎに落し戸を実験槽の底盤と同じレベルになるようにマイクロジャッキで支えると共に、荷重計、土圧計をセットする。それから乾燥地山の場合、槽内に地山モデル材料を所定の高さ、密度にて充填し、地表面中央部に沈下計をセットする。水位下の地山の場合は、感想地山の実験のものと同じ石粉に適量の水を加え、極軟のスラリー状（泥水状）に攪拌した後、実験槽内にて沈澱（養成期間3～4日）させて所定の土被りおよび水位をもたせ、それから後地表面中央部に沈下計をセットした。地山材料の充填のときは、水もれを防ぐために実験装置の継目にはパテを、落し戸周辺には軟性グリース（落し戸がスムーズに動き、かつ水密性が保てる材料）を使用した。

(2) 本実験

前節のような準備が終わると、ジャッキを作動させて 1mm/min の速さで落し戸を降下させ、落し戸及び落し戸周辺に作用する荷重の変化および地表面沈下の状況を計測した。計測は 15mm 降下時までおこない、その後ジャッキを交換して最大 40mm～60mm まで降下させて実験を終了させた。

なお以上の実験に使用する測定器および測定系統を、表-2.2.2, 図-2.2.4 に示す。

表-2.2.2 使用測定器

項 目	測 定 器	形 式	定格容量	メーカー
落し戸荷重	荷重変換器 (圧縮型)	LC-100KF	100kgf	錦共和電業
落し戸周辺土圧	圧力計	P325-01	0.1kg/cm	錦三計測・エレクトロニクス
地表面沈下	変位計	CE-40S	±20mm	錦東京測器研究所
落し戸降下	マイクロジャッキ	7850-001	400kg	錦ミットヨ
測定	デジタル多点歪測定装置	UCAM-5BT	—	錦共和電業
	パーソナルコンピューター	NEC PC-9801E	—	NEC
	ディスプレイ	NEC PC-8853n	—	NEC
	ディスクユニット	NEC PC-9881n	—	NEC

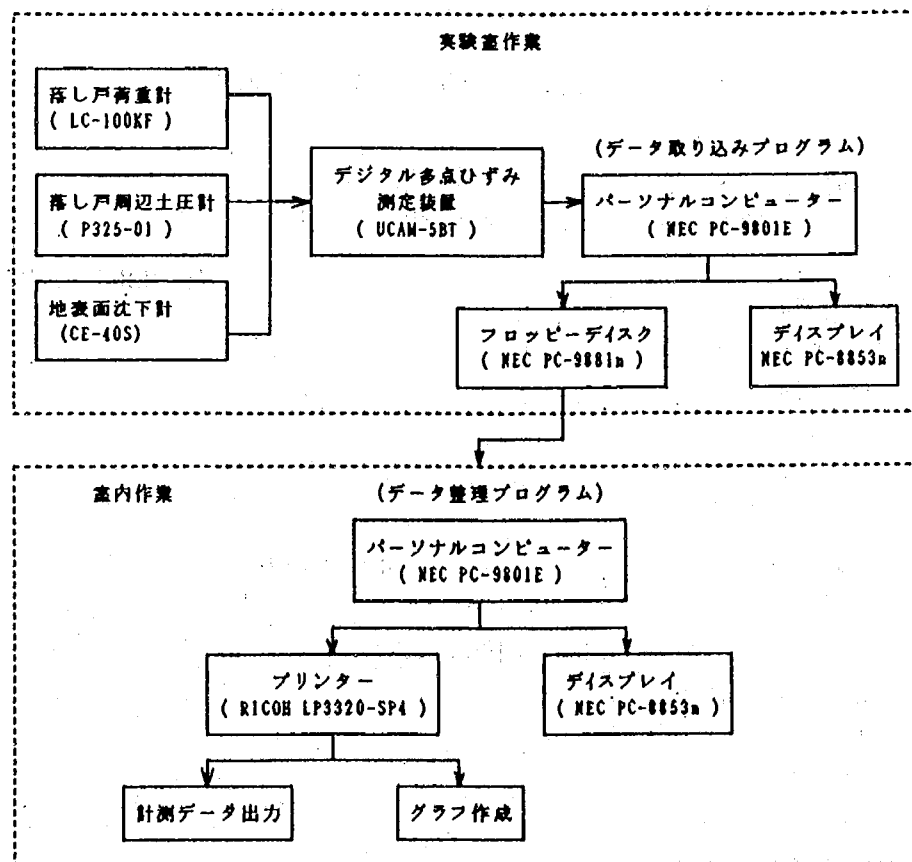


図-2.2.4 データ整理系統図

2.2.4 実験条件

対象地山を粘性土（石粉）を使った乾燥地山と水位下地山とし、土被り厚、水位、落とし戸幅および落とし戸の初期設置高さを変化させて実験を行った。

(1) 乾燥地山

自然乾燥状態の石粉を用いた模型実験では、落とし戸の形状と土被り厚とを変化させ、11 ケースおこなった。落とし戸幅 10cm で落とし戸位置を変化させる目的は、落とし戸の周辺地盤が堅硬な場合と軟弱な場合とでの、荷重の変化の違いを調べるためである。（図-2.2.5 参照）

(2) 水位下地山

水位下地山の模型実験では、落とし戸の形状を一定として土被りと水深（落とし戸底盤からの水位）とを変化させ、7 ケース実施した。

実験ケースの詳細を表-2.2.3 に示す。

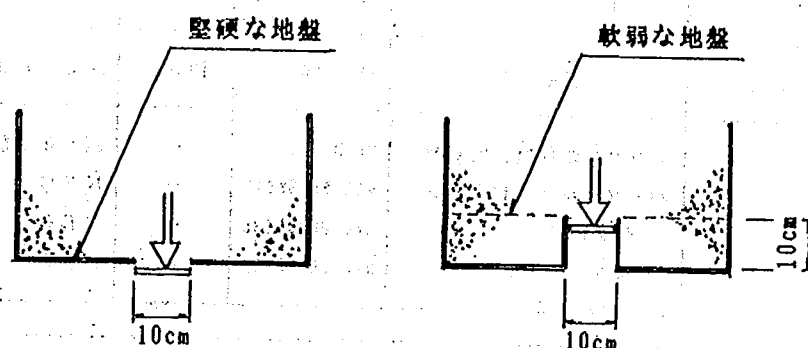


図-2.2.5 落とし戸初期設置場所と周辺地盤

地 山 状 態		乾 燥 地 山			
土 被 り		5cm	10cm	20cm	40cm
水 位		—	—	—	—
落 し 戸 の 形 状	幅 10cm 落とし戸位置 10cm上方	○	○	○	○
	幅 10cm 落とし戸位置 0cm	○	○	○	○
	幅 20cm 落とし戸位置 0cm	—	○	○	○
	幅 20cm 落とし戸位置 0cm	—	○	○	○

表-2.2.3 実験ケース

地 山 状 態		水 位 下 地 山						
土 被 り		10cm			20cm			40cm
水 位		5cm	10cm	20cm	5cm	10cm	20cm	10cm
落 し 戸 の 形 状	幅 10cm 落とし戸位置 10cm上方	—	—	—	—	—	—	—
	幅 10cm 落とし戸位置 0cm	○	○	○	○	○	○	○
	幅 20cm 落とし戸位置 0cm	—	—	—	—	—	—	—
	幅 20cm 落とし戸位置 0cm	—	—	—	—	—	—	—

2.3 実験結果および考察

2.3.1 支保荷重の変化

(1) 実験結果

1) 乾燥地山における実験結果

落し戸の降下量と落し戸に作用する荷重の関係を、図-2.3.1～図-2.3.3 に示す。

これによると、落し戸を降下させることで落し戸にかかる荷重は減少していき、ある降下量のところで最小値に達し、その後わずかであるが増加している。また最小値に達するまでの降下量は、全ての落し戸タイプ（幅、初期設置高さの違い）において、概して土被りが高くなるほど大きくなっている。その最小値は落し戸幅 10cm の場合、落し戸位置の違いおよび土被りの違いに関わりなく、2～4kgf とほぼ同じ数値になることがわかる。

しかし落し戸幅 20cm の場合においては、土被り 10cm、20cm、40cm とで違う値を示している（表-2.3.1 参照）。

2) 水位下の地山における実験結果

落し戸の降下量と落し戸に作用する荷重の関係を、図-2.3.4、2.3.5 に示す。これによると乾燥地山での実験と同様に、落し戸を降下させることで落し戸にかかる荷重は減少していき、ある降下量のところで最小値に達し、その後わずかであるが増加している。最小値に達するまでの降下量は、土被り 10cm のときの方が土被り 20cm のときより大きくなっている（表-2.3.2 参照）

表-2.3.1 荷重の最小値とその降下量（乾燥地山）

地 山 材 料			乾燥地山			
土 被 り			5cm	10cm	20cm	40cm
落し戸の形状	幅 10cm	最小値(kgf)	2.231	3.729	3.896	2.808
	位置 10cm7ヶ所	降下量(mm)	0.90	1.90	7.10	7.70
	幅 10cm	最小値(kgf)	2.730	3.796	3.740	2.730
	位置 0cm	降下量(mm)	1.30	1.70	7.90	8.10
	幅 20cm	最小値(kgf)	—	10.367	16.927	17.249
	位置 0cm	降下量(mm)	—	2.10	12.50	20.10

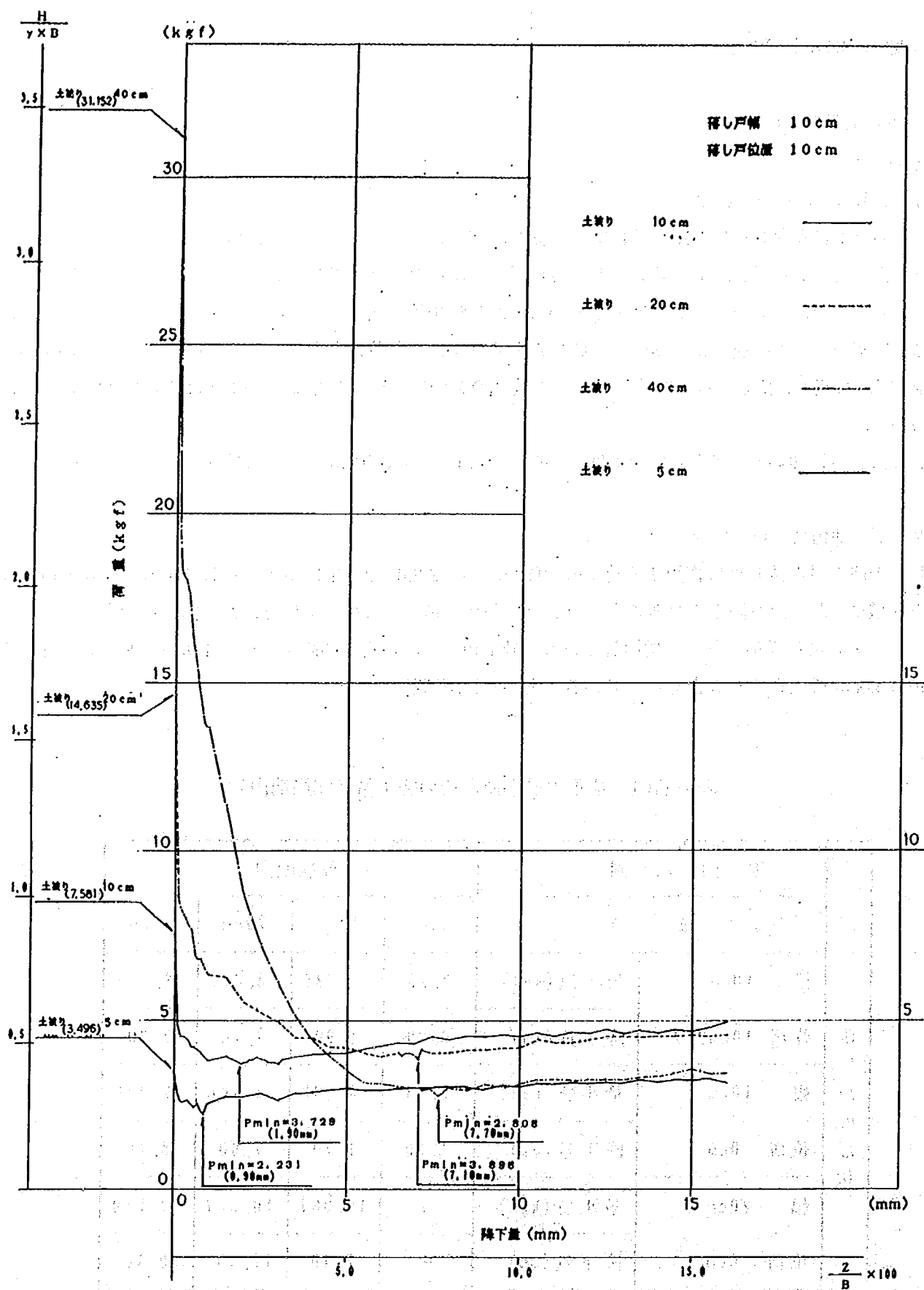


図-2.3.1 降下量と荷重の関係（乾燥地山，幅=10cm，落下戸位置=10cm）

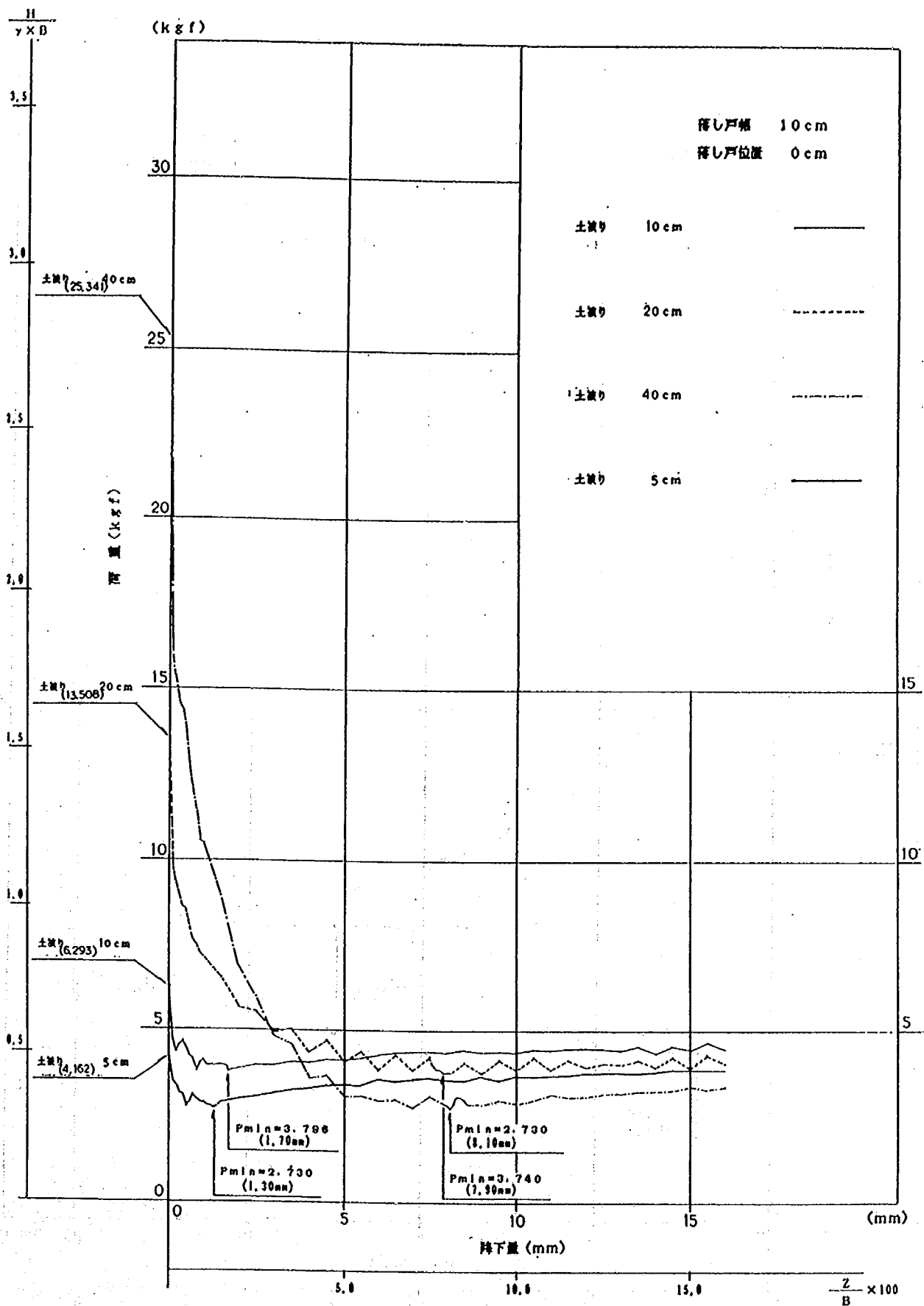


図-2.3.2 降下量と荷重の関係（乾燥地山，幅=10cm，落し戸位置=0cm）

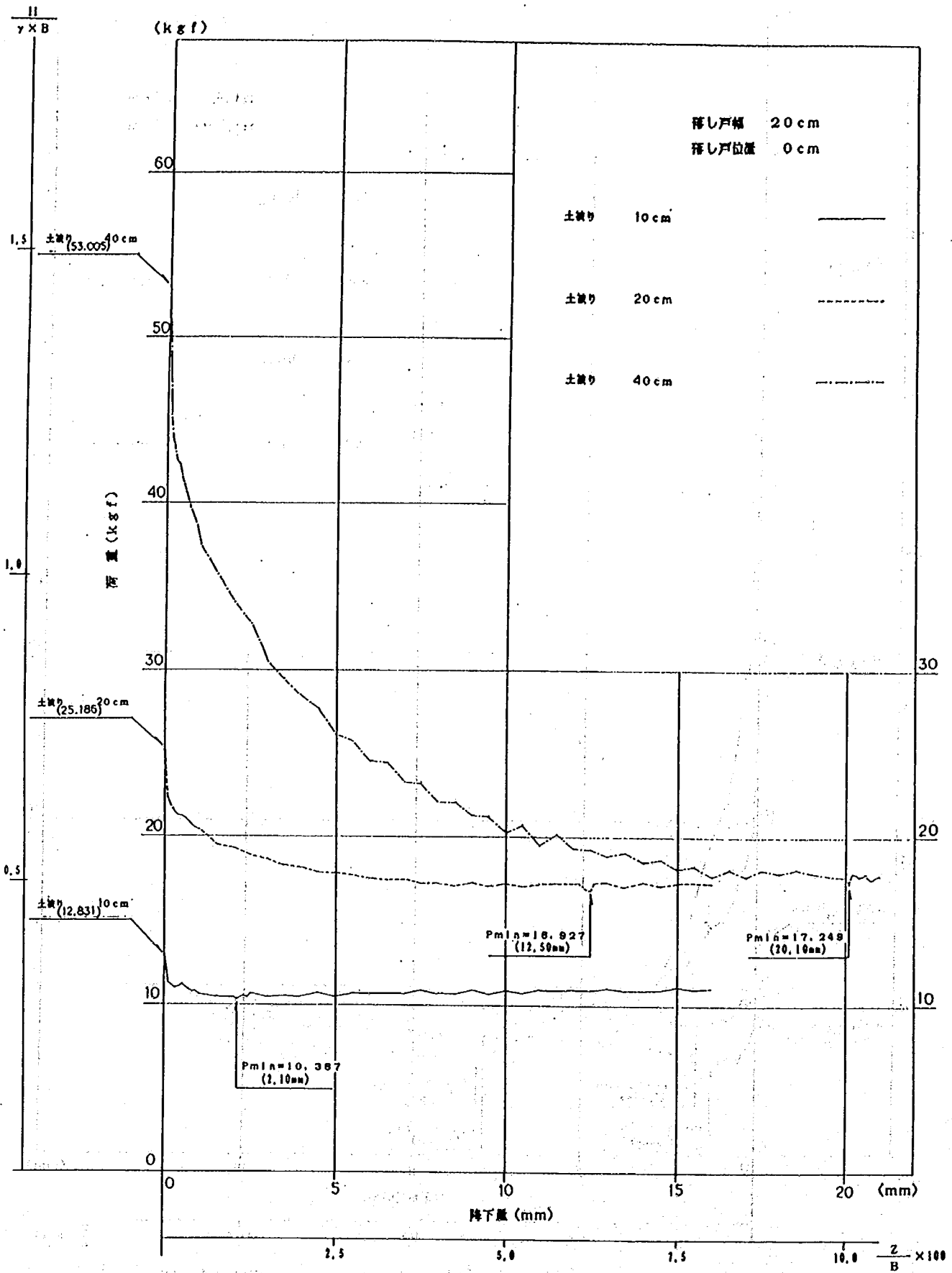


図-2.3.3 降下量と荷重の関係 (乾燥地山, 幅=20cm, 落し戸位置=0cm)

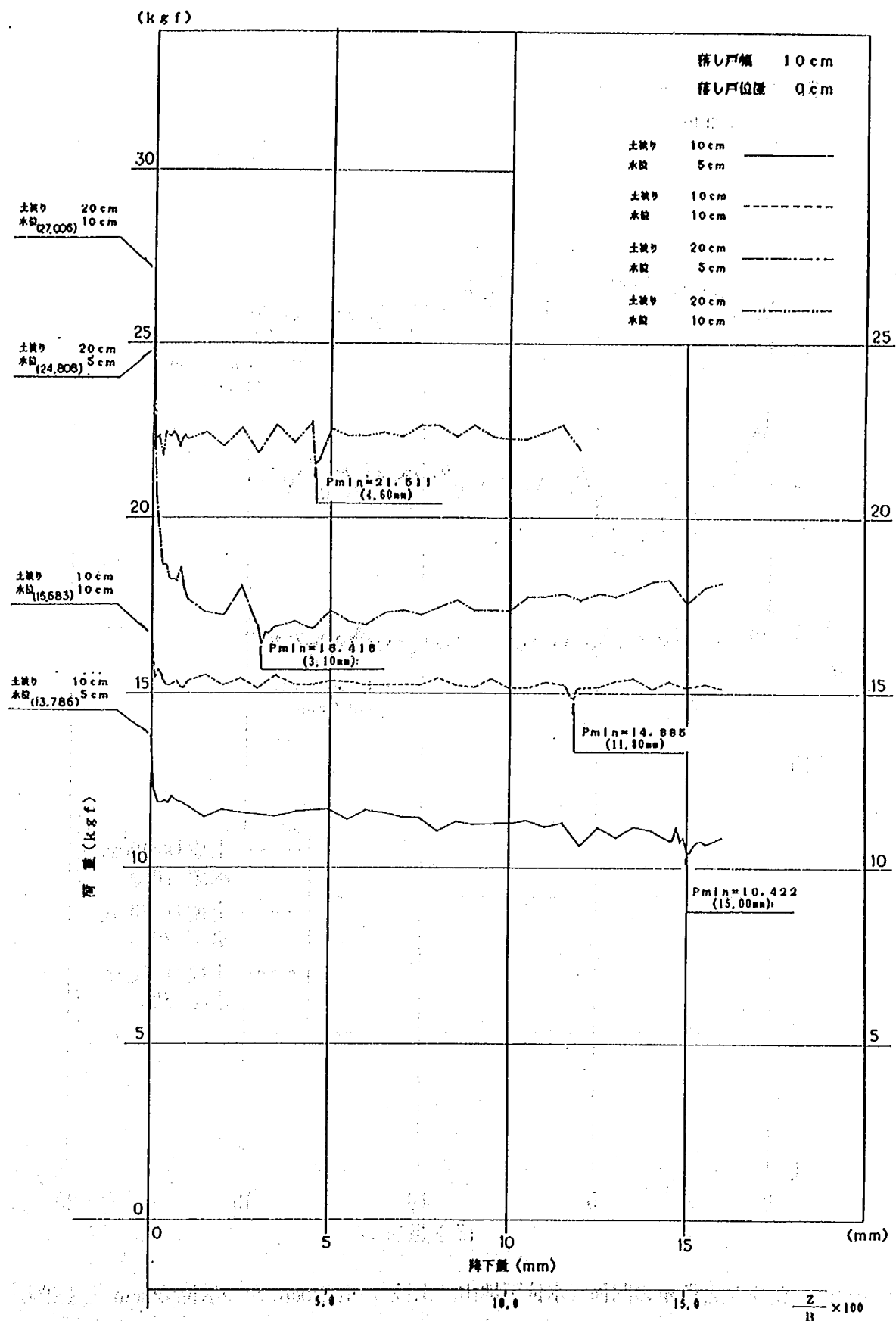


図-2.3.4 降下量と荷重の関係 (水位下地山, 水位=5,10cm かつ土被り=10,20cm)

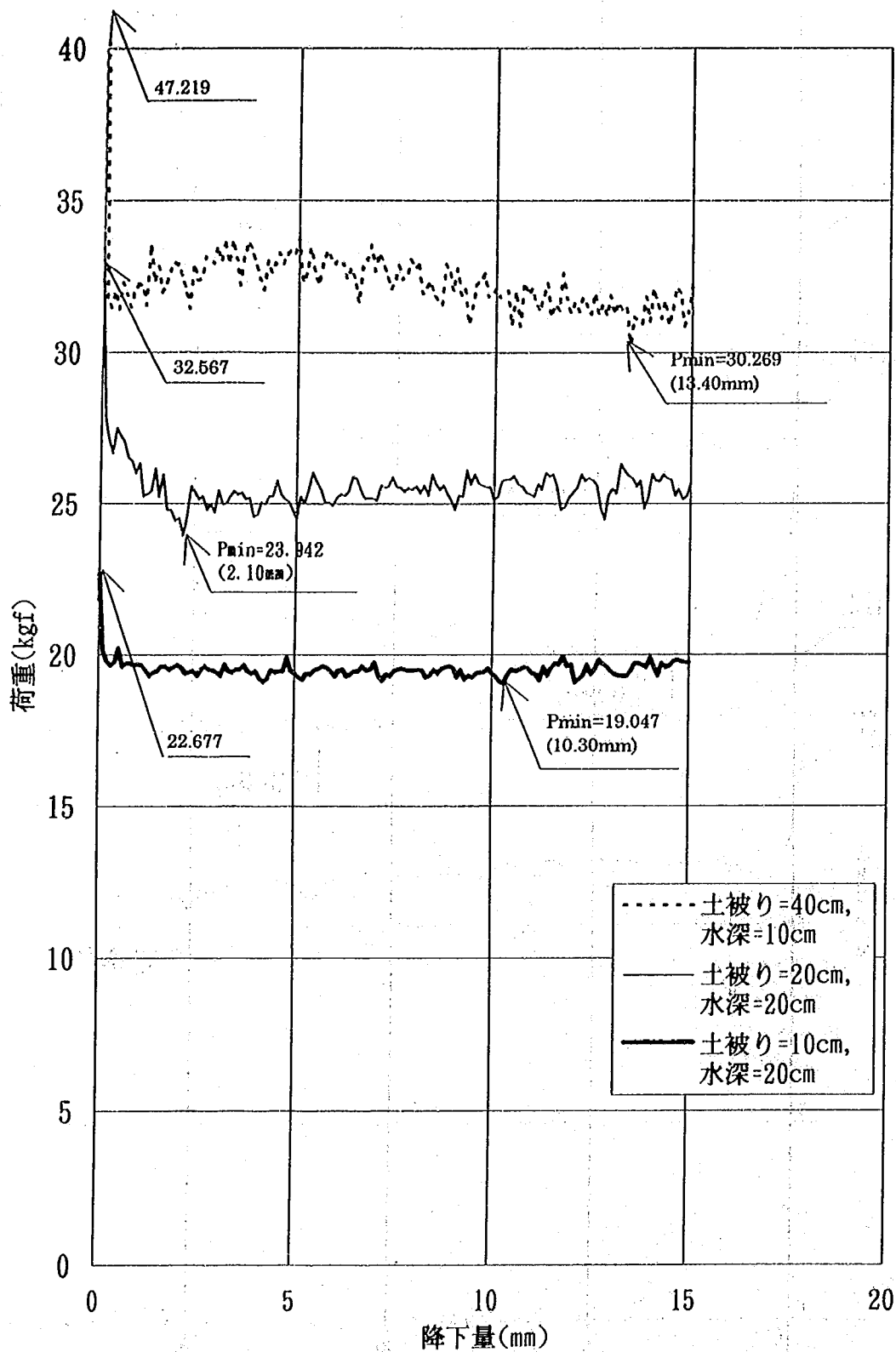


図-2.3.5 降下量と荷重の関係(水位下地山, 土被り=10,20cm かつ水位=20cm と土被り=40cm)

表-2.3.2 荷重の最小値とその降下量（乾燥地山と水位下地山の比較）

土 被 り			10cm				20cm				40cm	
地 山 状 態			乾燥	水 位 下			乾燥	水 位 下			乾燥	水位下
水 位			—	5cm	10cm	20cm	—	5cm	10cm	20cm	—	10cm
幅10cm	計測値	最小値 (kgf)	—	10.42	14.89	19.05	—	16.42	21.51	23.942	—	30.269
		降下量 (mm)	—	15.00	11.80	10.30	—	3.10	4.60	2.10	—	13.40
落し位置 0cm	水頭分 の荷重 を除く	最小値 (kgf)	3.796	3.336	4.799	2.964	3.740	4.512	6.607	3.038	7.482	5.729
		降下量 (mm)	1.70	15.00	11.80	10.30	7.90	3.10	4.60	4.01	15.51	13.40

(2) 考察

村山ら²⁾は、砂質土を対象とした落し戸にかかる鉛直土圧の実験結果より、落し戸の降下に伴いその上の砂層には図-2.3.6に示す3つの領域が生じるとしている。領域-Iは落し戸とともに沈下する直接領域、領域-IIは静止している砂の間隙をゆるませながら領域-Iの方へ流動する間接領域、領域-IIIは落し戸にかかわらず不動の静止領域である。領域-II(間接領域)は落し戸の降下量が増すに従って上方に広がり、ついに地表に達すると考えられている。ここですべり説というものは、落し戸の降下によって土粒子間に大きい相対変位が生ずる外側境界面か内側境界面あるいはその両方に着目して、これらの境界面ではいわゆるすべり現象が起こっていると考える説である。

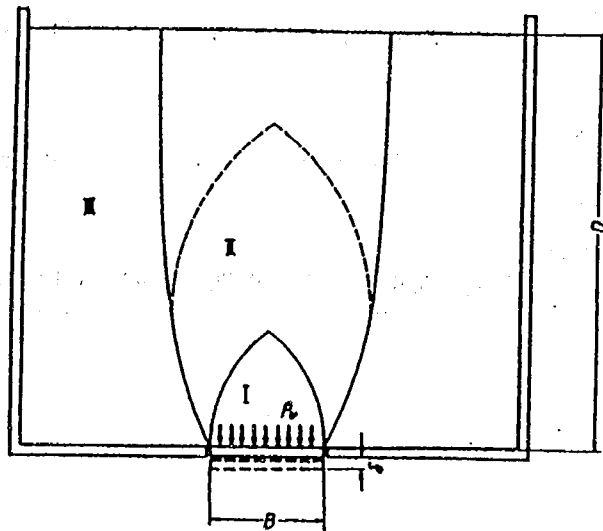


図-2.3.6 落し戸効果に関する地山モデル

落し戸位置の違いや土被りの違いにかかわらず、作用荷重の最小値が一定であるのは、落し戸にかかる鉛直荷重はほとんど領域-Iの自重によって決定され、領域-IIより受ける荷重の影響は非常に小さいということから説明できる。

何れの落し戸タイプ(幅、位置の違い)においても、また最小値に達するまでの降下量が土被りが高くなるほど大きくなっているということは、土被りが小さいほど早期に領域-Iと領域-IIの境界である内側境界線が形成され、土被りが大きくなるほど領域-IIから領域-Iに作用する荷重が大きく、内側境界線の形成が遅れるため、荷重の減少が緩やかになると考えられる。

一方アーチ説というのは、落し戸の降下によってもなって落し戸上のアーチ形状の領域が直ちに緩んで沈下し、その結果粒子間で作用する力の大部分がそのアーチ形状の領域の外周部に沿って左右に分かれ、落し戸外側に伝わるようになり、このアーチ状の粒子間力の伝達線、換言すればアーチ状の最大圧縮主応力線の形成が落し戸上に作用する土圧の大きさを支配する主要な現象であるとする説である。この場合は従来から土圧の大きさを推定するものとして Terzaghi の土圧式³⁾ が用いられている。

乾燥地山の実験結果と Terzaghi の土圧式により求めた計算値の荷重の最小値および最終値(15mm 降下

時)と土被り比との関係を表-2.3.3に示すが(ただしTerzagliの土圧式を適用するにあたり, その中の各定数は実験条件や土質試験結果によって表-2.3.4のとおりとした。), これによると落し戸にかかる荷重の(最小値/初期値)は, 落し戸形状にかかわらず土被り比によって変化し, かつ実験結果と計算値と比較的良く合っていることがわかる。(ただし落し戸幅10cm, 土被り比0.5のケースには, 差異が見られる。これは土被り高が5cmと極めて浅いことから, 良質なモデル地山の作成や均一に落し戸を降下させることが難しく, 実験過程において応力の伝搬に不均一が生じたためと判断される。)

また表-2.3.3から, (落し戸にかかる荷重の最終値/初期値)(当実験においては15mm降下時点)は, 全てのケースにおいて最小値の概ね10%増となっている。

また水位下の地山における実験結果についても, 同様の手法を用いて検討をおこなった(表-2.3.5)。ここでは水位下地山の実験のため, 土被り比に変わって(土被り/水位)によるケース分けをおこなった。これによると, 乾燥地山における実験結果とは明らかな差異が認められ, その主な点を上げると次のようである。

- ① 落し戸にかかる荷重の最小値と最終値がほとんど同じである。すなわち荷重が最小値に達した後, 落し戸の降下にもなう荷重の増加が見られない。
- ② 荷重の実験値は, 土被り比にはあまり依存していないが, 水位の変化に反応する。
- ③ 水位は小さくなるほど荷重の減少度合いは小さく, またその最小値に至るまでの降下量は大きい。

上記現象は, 水位が小さくなるほど顕著なことより, 水位下地山においては, その水圧によって土が本来持っている強度が十分作用していないことが考えられる。

表-2.3.3 落し戸にかかる荷重と土被り比の関係（乾燥地山）

地 山 状 態		乾 燥 地 山										
土 被 り 比		0.5			1.0			2.0			4.0	
落 し 戸 形 状	幅	10		20	10		20	10		20	10	
	位置	10	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0
最終値(15mm降下) ／荷重初期値 (%)		92	92	87	62	71	68	31	29	34	12	13
最小値 ／初期値 (%)	実験値	64	66	81	49	60	67	27	28	33	9	11
	計算値	83		84	63		62	31		31	10	

表-2.3.4 Terzaghi の土圧式に適用する各定数値

実験 ケース	乾燥地山				水位下地山	
土 被 り	5cm	10cm	20cm	40cm	10cm	20cm
γ (g/cm ³)	1.18	1.20	1.22	1.24	1.88	1.96
c (kg/cm ²)	0.021	0.021	0.004	0.007	0.000	0.027
ϕ 度	38.30	38.30	38.50	38.80	39.00	36.90

表-2.3.5 落し戸にかかる荷重が最小のときの降下量と土被り比の関係 (水位下地山)

地 山 状 態		水 位 下 地 山			
落 し 戸 形 状		幅 10cm		位置 0cm	
土被り : 水位		1:1	2:1		4:1
土 被 り (cm)		10	10	20	20
水 位 (cm)		10	5	10	5
最終値(15mm降下) ／荷重初期値 (%)		91	76	81	71
最小値	実験値	90	76	80	66
	計算値	84	81	67	63
降 下 量 (mm)		12	15	5	3

2.3.2 周辺土圧の変化

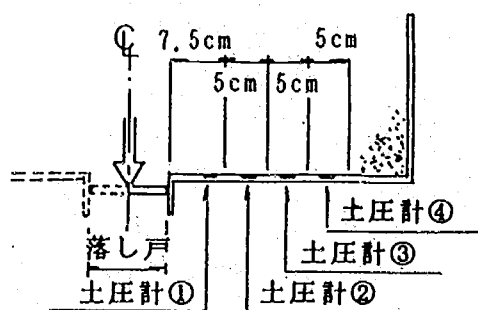
(1) 実験結果

1) 乾燥地山

図-2.3.7に周辺土圧計の設置位置を、図-2.3.8～図-2.3.18に落し戸を降下させることにより減少した荷重の周辺土圧計への伝達状況を示す。この図によると、初期の段階ではどのケースにおいても、落し戸に近い土圧計ほど土圧が増加しているが、離れるにしたがって土圧の増加は小さくなっている（表-2.3.6参照）。

また土被りが小さいと、周辺土圧の増加がゆるやかで減少に転じているケースもあるのに対し、土被りが大きいと、落し戸より離れている土圧計2, 3, 4も土圧の増加がみられるように、落し戸から遠くの位置まで落し戸降下によるアーチ作用の影響が顕著に現れる。これは、土被りが小さいときは、トンネルと地表面までの距離が近いために、地山内に生じるアーチの領域が形成されにくく、その結果周辺土圧へ伝達されないのに対して、また土被りが大きいときはアーチを十分形成できる領域が確保されるために、周辺に土圧が伝達されることが推測される。

(1) 落し戸位置 0 cm の場合



(2) 落し戸位置 10 cm の場合

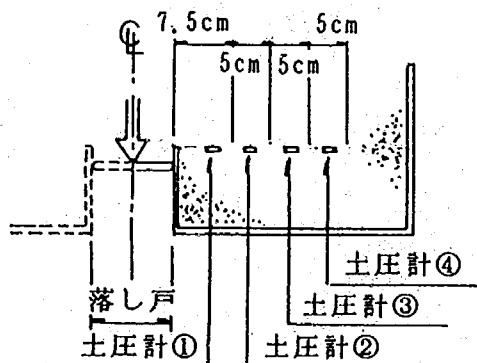


図-2.3.7 土圧計の設置場所

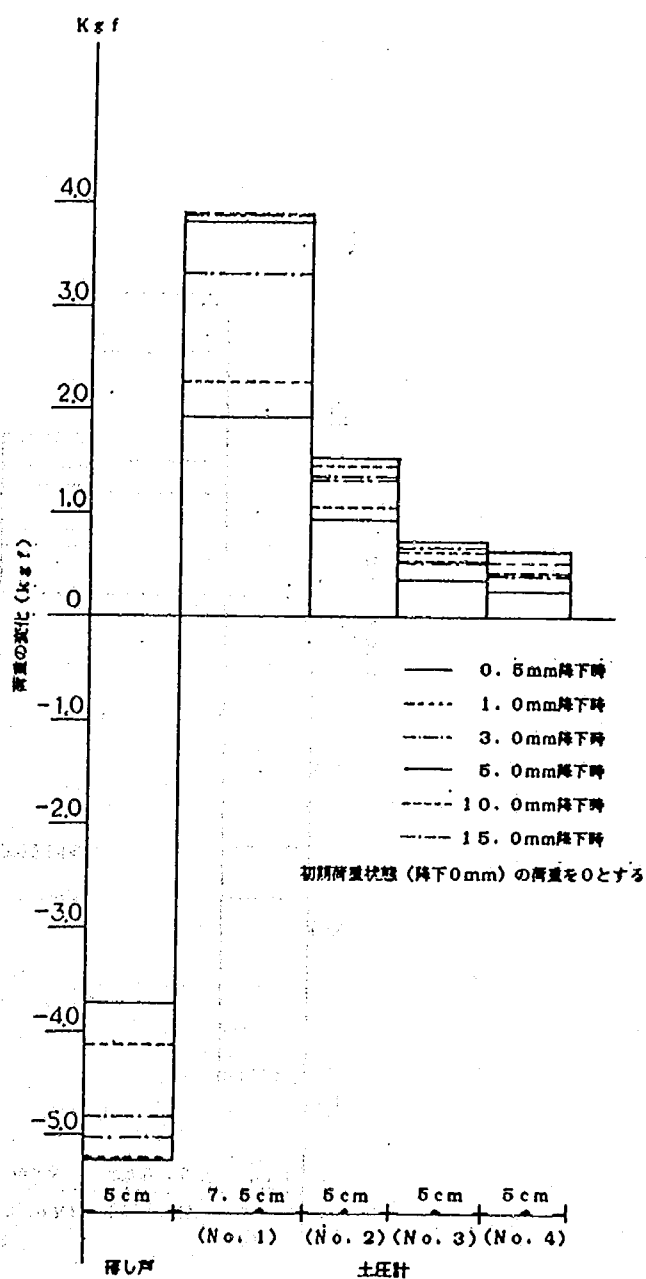
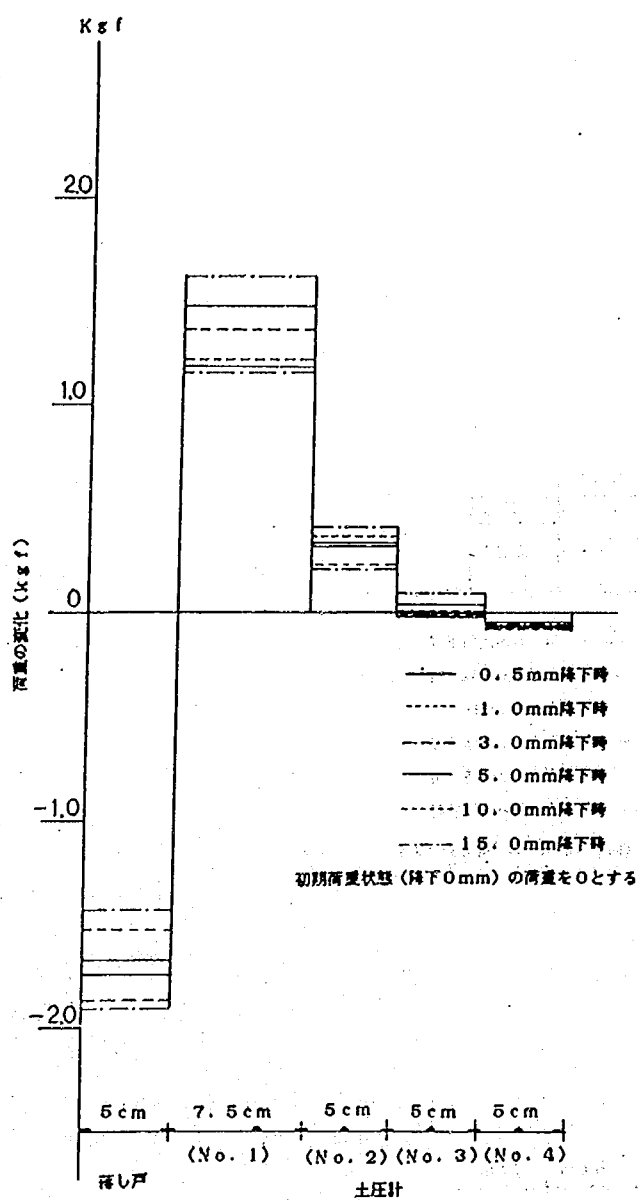


図-2.3.8 降下量と荷重分布状態の変化
(乾燥地山, 幅=10cm, 落とし戸位置=10cm,
土被り=10cm)

図-2.3.9 降下量と荷重分布状態の変化
(乾燥地山, 幅=10cm, 落とし戸位置=10cm,
土被り=20cm)

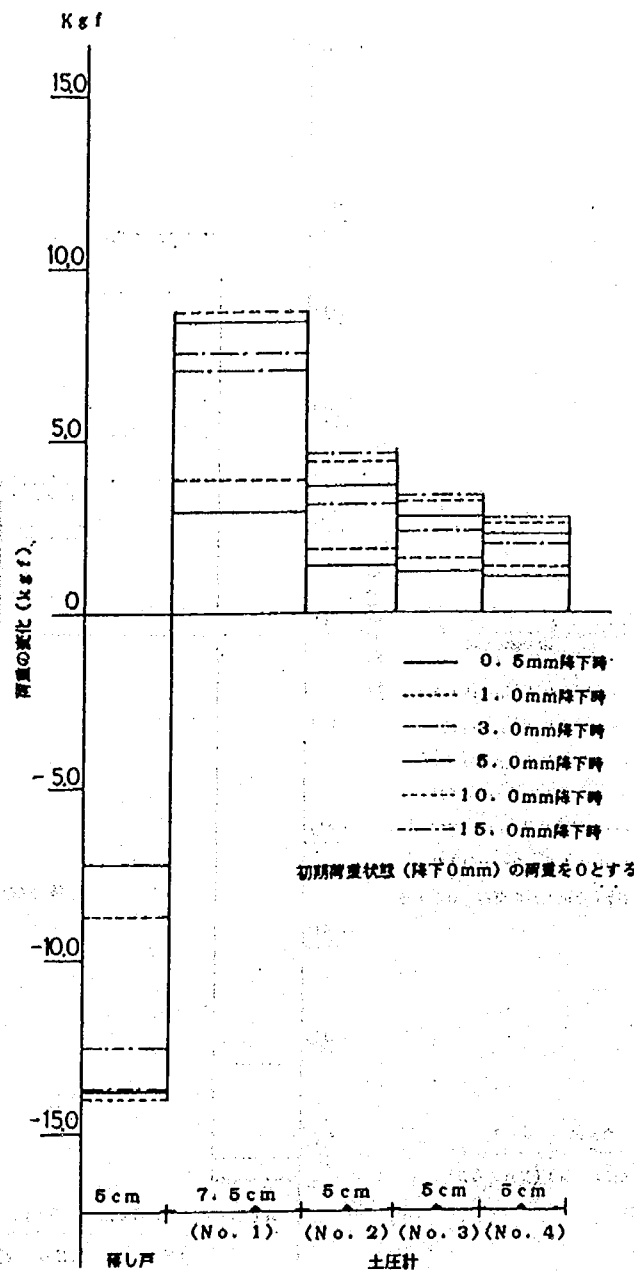


図-2.3.10 降下量と荷重分布状態の変化

(乾燥地山, 幅=10cm, 落し戸位置=10cm, 土被り=40cm)

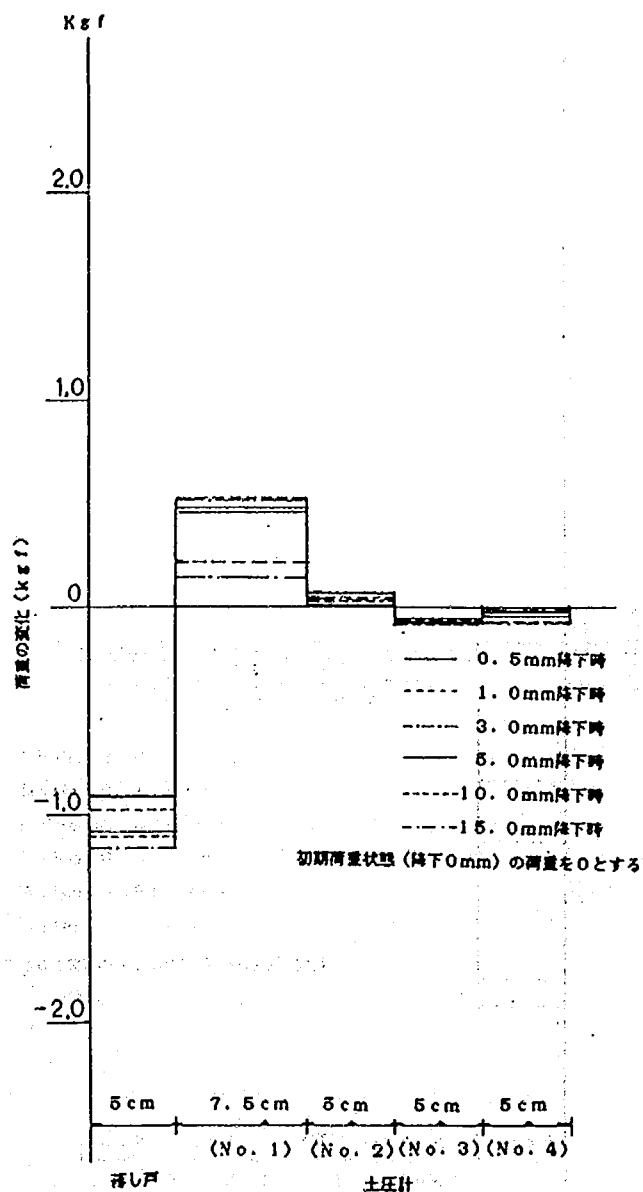


図-2.3.11 降下量と荷重分布状態の変化

(乾燥地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=10cm)

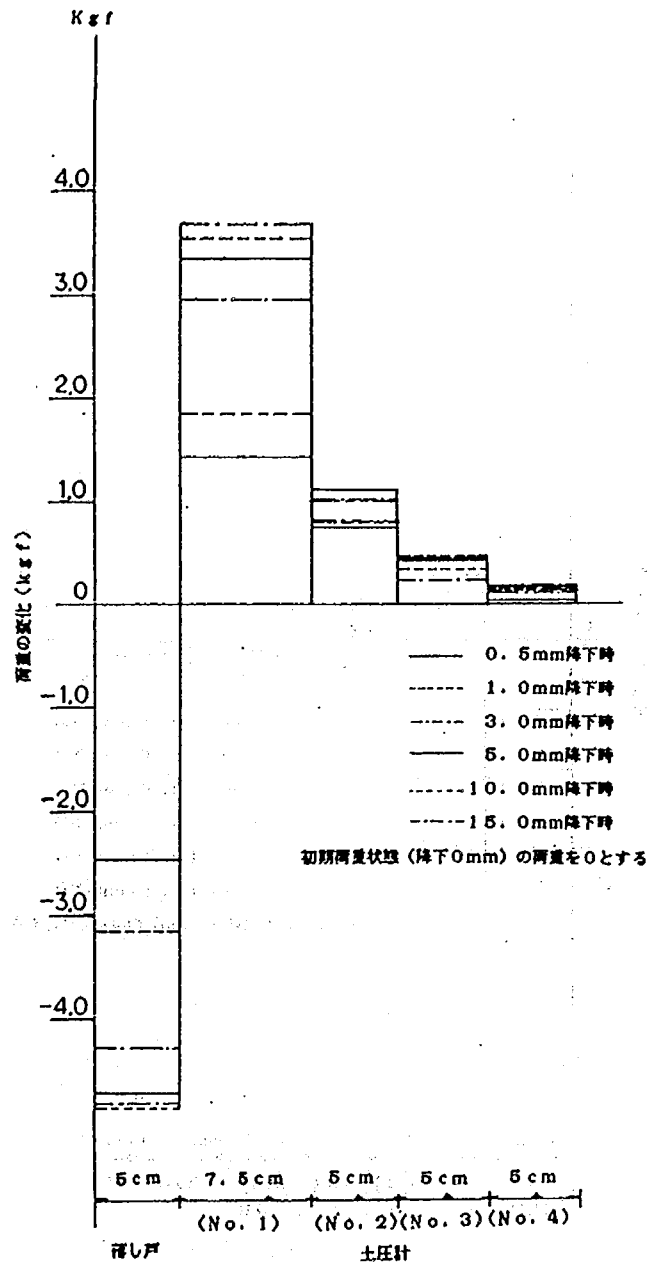


図-2.3.12 降下量と荷重分布状態の変化

(乾燥地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=20cm)

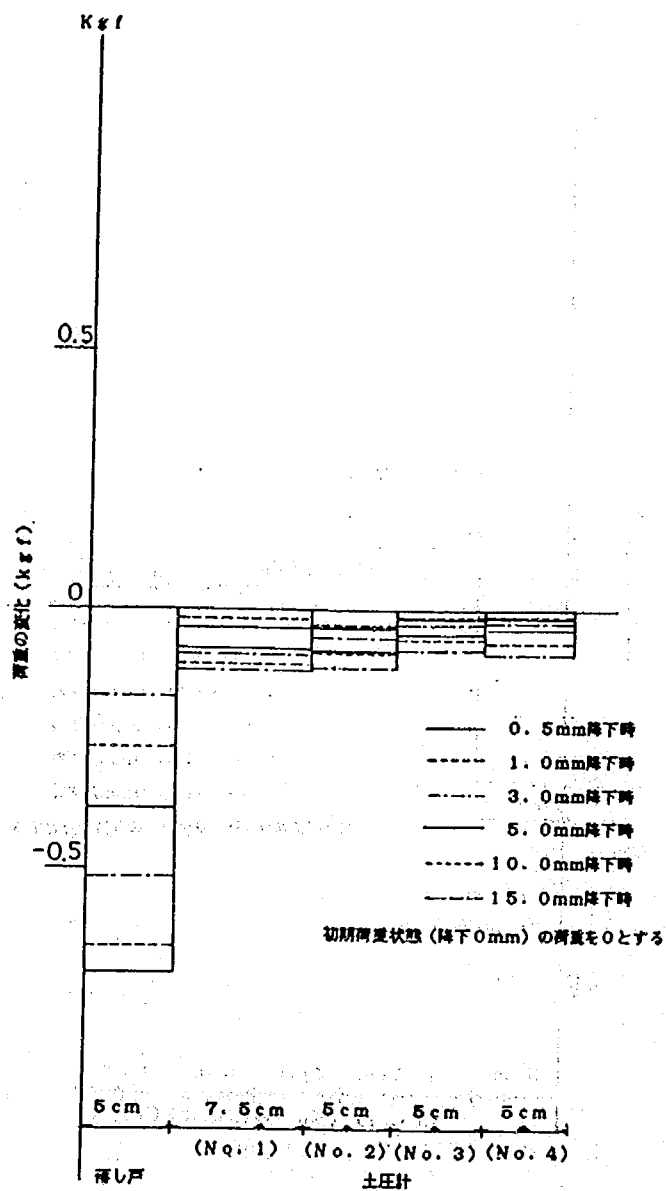
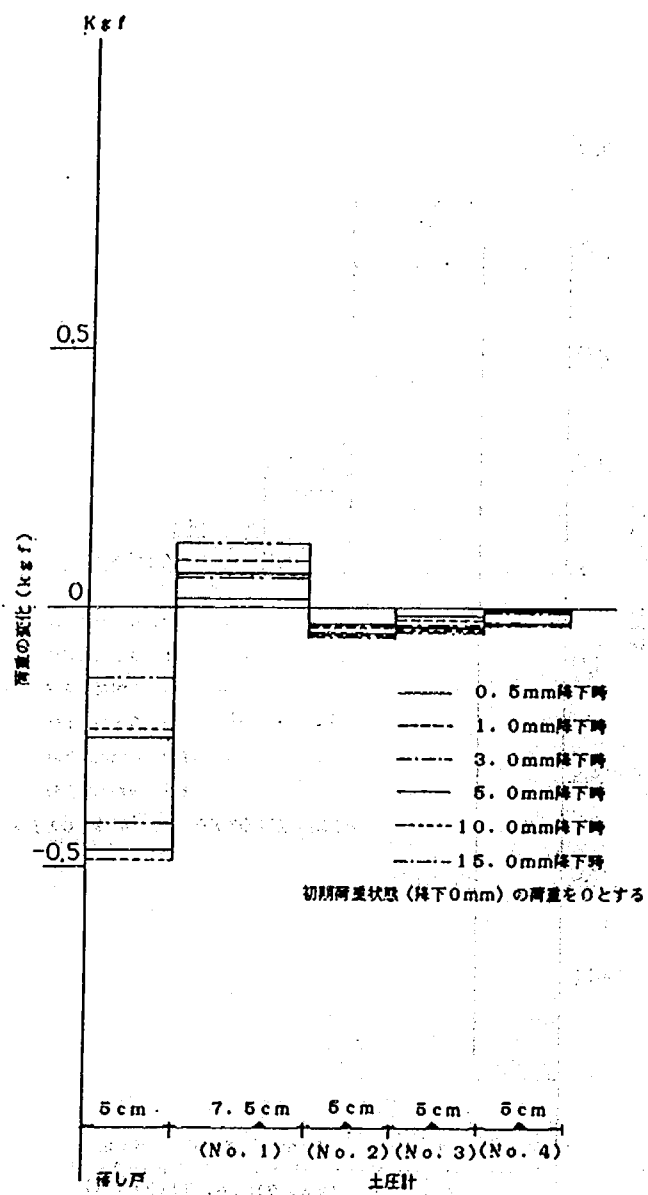


図-2.3.13 降下量と荷重分布状態の変化

(乾燥地山, 幅=10cm, 落とし戸位置=10cm,
 土被り=5cm)

図-2.3.14 降下量と荷重分布状態の変化

(乾燥地山, 幅=10cm, 落とし戸位置=0cm,
 土被り=5cm)

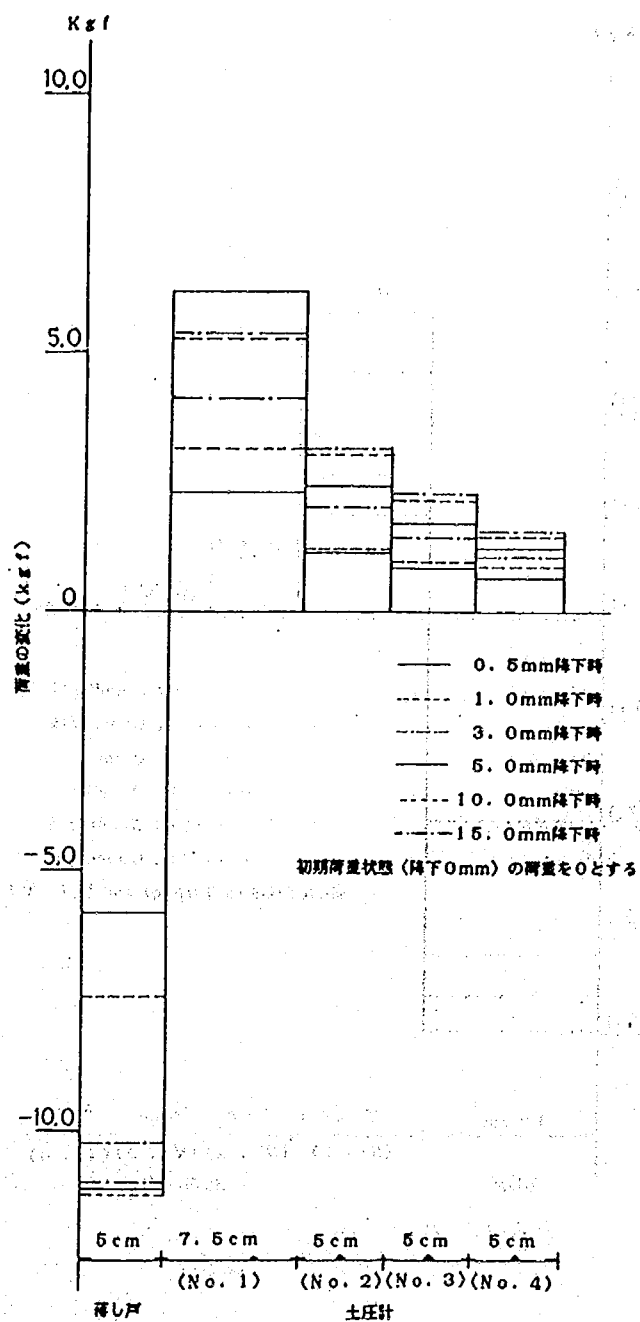


図-2.3.15 降下量と荷重分布状態の変化
(乾燥地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=40cm)

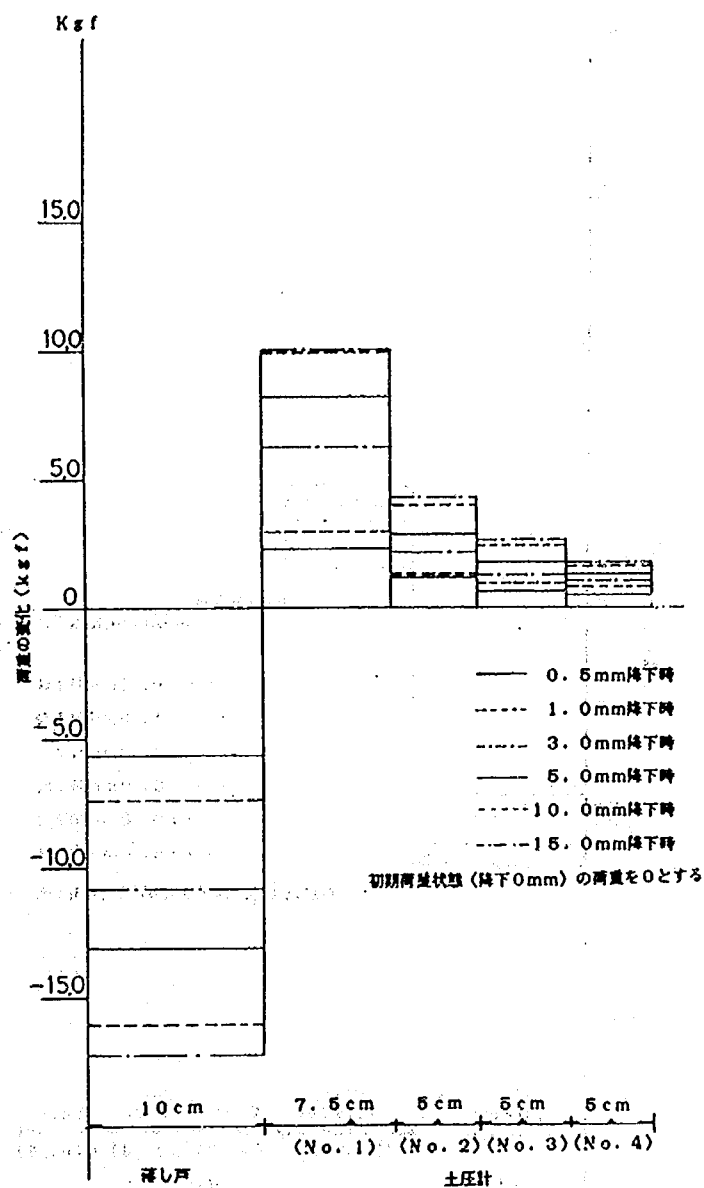


図-2.3.16 降下量と荷重分布状態の変化
(乾燥地山, 幅=20cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=40cm)

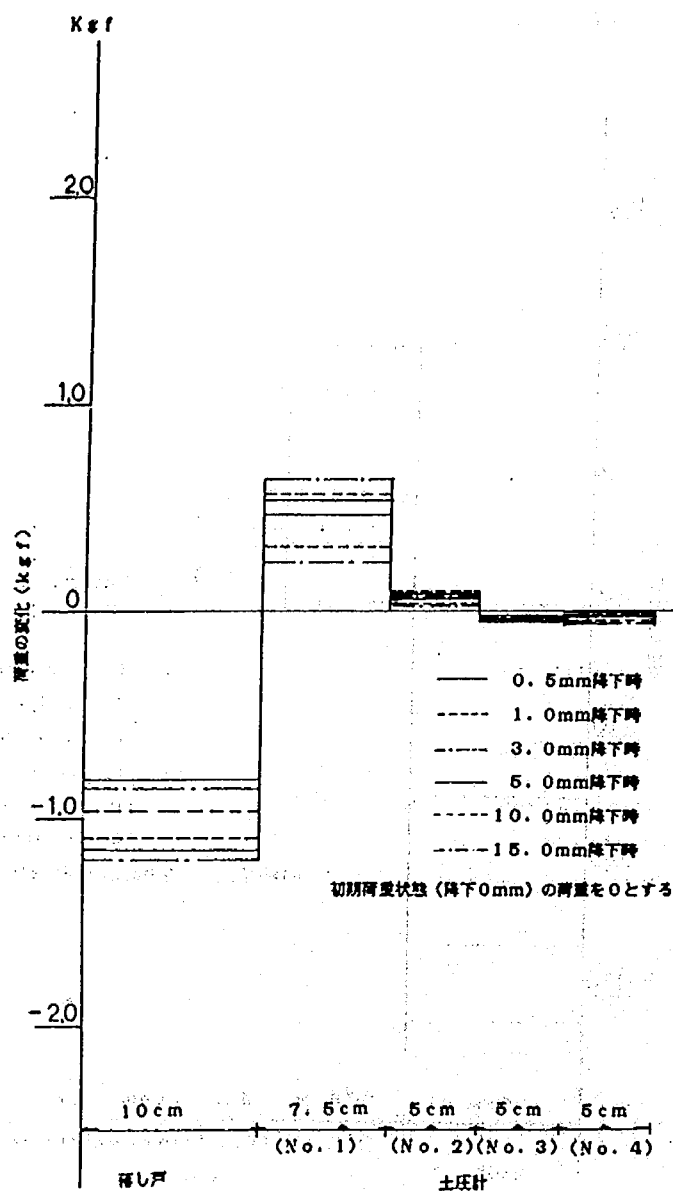


図-2.3.17 降下量と荷重分布状態の変化
(乾燥地山, 幅=20cm, 落とし戸位置=0cm,
土被り=10cm)

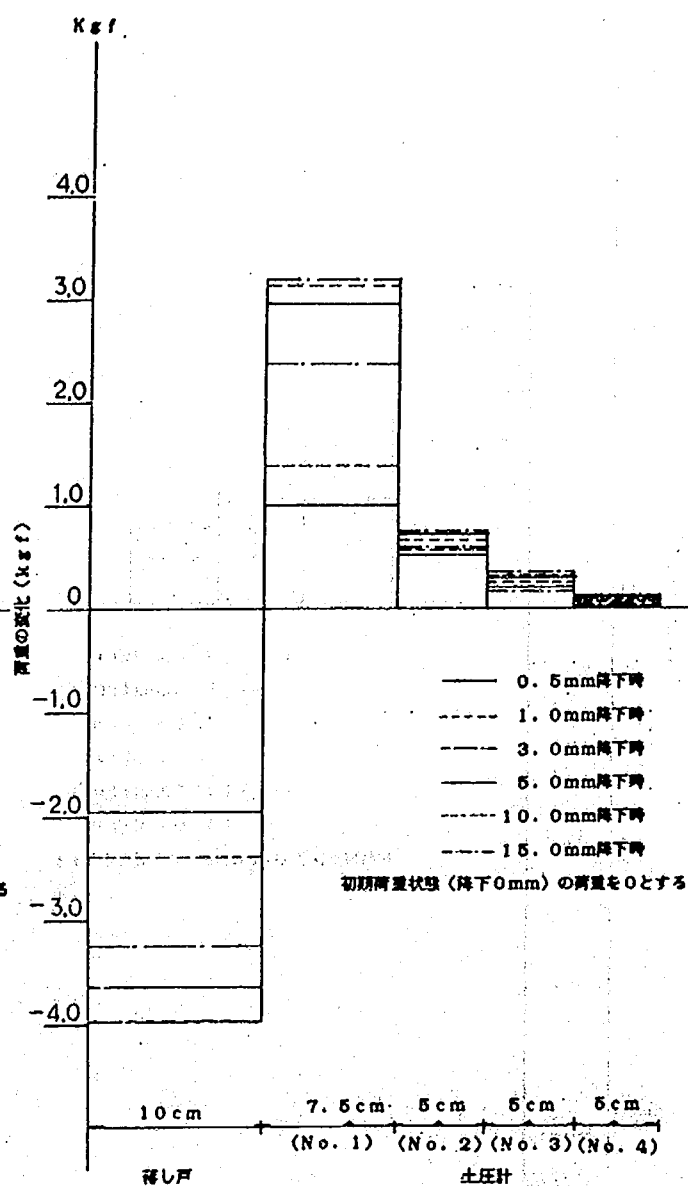


図-2.3.18 降下量と荷重分布状態の変化
(乾燥地山, 幅=20cm, 落とし戸位置=0cm,
土被り=20cm)

表-2.3.6 落し戸周辺の各土圧計に作用する荷重の最大値（乾燥地山）

	地 山 材 料		乾燥地山			
	土 被 り		5cm	10cm	20cm	40cm
落し戸の形状	(kg) 幅 10cm 位置 10cm7ツツ*	土圧計①	0.122	1.619	3.897	8.722
		土圧計②	-0.054	0.401	1.503	4.585
		土圧計③	-0.045	0.084	0.701	3.319
		土圧計④	-0.030	-0.047	0.627	2.704
	(kg) 幅 10cm 位置 0cm	土圧計①	-0.018	0.496	3.695	6.165
		土圧計②	-0.030	0.066	1.101	3.135
		土圧計③	-0.015	-0.046	0.467	2.270
		土圧計④	-0.012	-0.020	0.168	1.551
	(kg) 幅 20cm 位置 0cm	土圧計①	—	0.638	3.138	9.968
		土圧計②	—	0.077	0.752	4.218
		土圧計③	—	-0.018	0.335	2.544
		土圧計④	—	-0.010	0.043	1.619

* 上記数値は、初期荷重状態（降下0mm）での荷重を0とする。

2) 水位下地山

落し戸を降下させることにより、減少した荷重の周辺土圧計への伝達状況を、図-2.3.19～図-2.3.25に示す（なお各土圧計の受ける載荷影響範囲は、乾燥地山での実験と同様である。図-2.3.7 参照）が、これによると土被り 10cm の場合と土被り 20cm の場合とでは、落し戸周辺の荷重増の分布状態に違いが見られる（表-2.3.7 参照）。すなわち、

①土被り 10cm の場合は、落し戸周辺の荷重の分布は概ねどの地点も同じであり、かつその変化分はごくわずかである。よって落し戸を降下させることで減少した荷重が周辺土圧計へ伝達されるという現象は、ほとんど見られないことがわかる。

②土被り 20cm の場合、荷重が増加する範囲は、落し戸近傍に集中しており、離れるにしたがって減少している。この傾向は乾燥の地山材料での実験結果と似ている。

表-2.3.7 落し戸周辺の各土圧計に作用する荷重の最大値（乾燥地山と水位下地山の比較）

落し戸形状	土被り (cm)	10 cm			20 cm		
	地山状態	乾燥	水位下		乾燥	水位下	
	密度 (g/cm ³)	1.198	1.879		1.218	1.960	
	水位 (cm)	—	5 cm	10 cm	—	5 cm	10 cm
幅 10cm 位置 0cm	土圧計① (kg)	0.496	0.072	0.099	3.695	1.985	0.576
	土圧計② (kg)	0.066	-0.012	-0.021	1.101	0.210	0.084
	土圧計③ (kg)	-0.046	0.030	-0.003	0.467	0.015	0.015
	土圧計④ (kg)	-0.020	0.126	0.072	0.168	0.030	0.129

* 上記数値は、初期荷重状態（降下 0mm）での荷重を 0 とする。

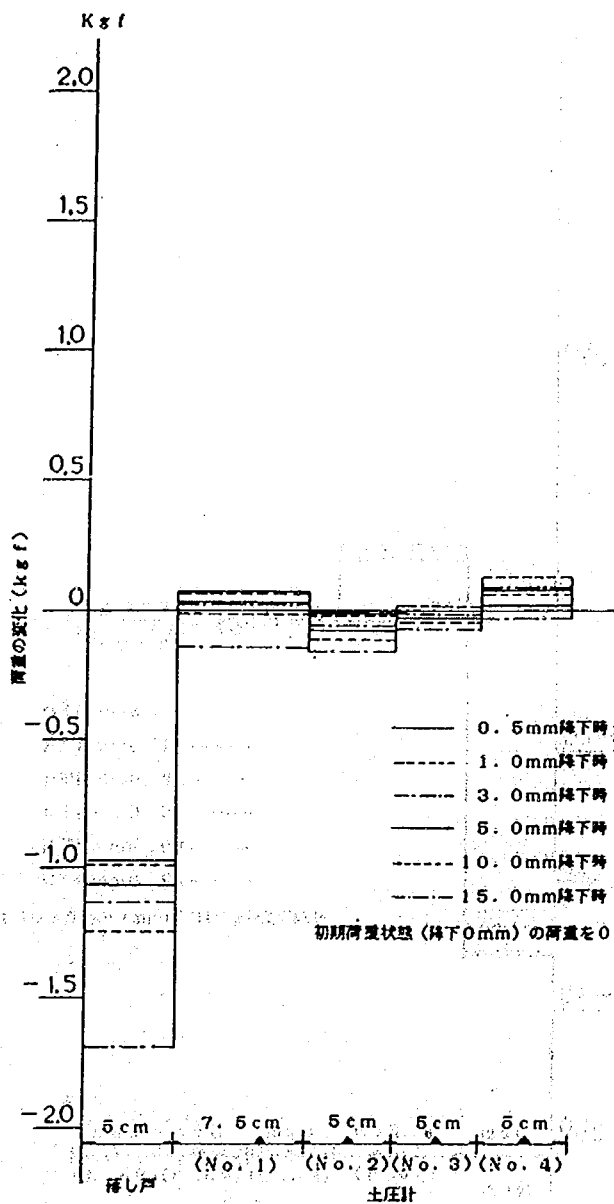


図-2.3.19 降下量と荷重分布状態の変化
(水位下地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=10cm, 水位=5cm)

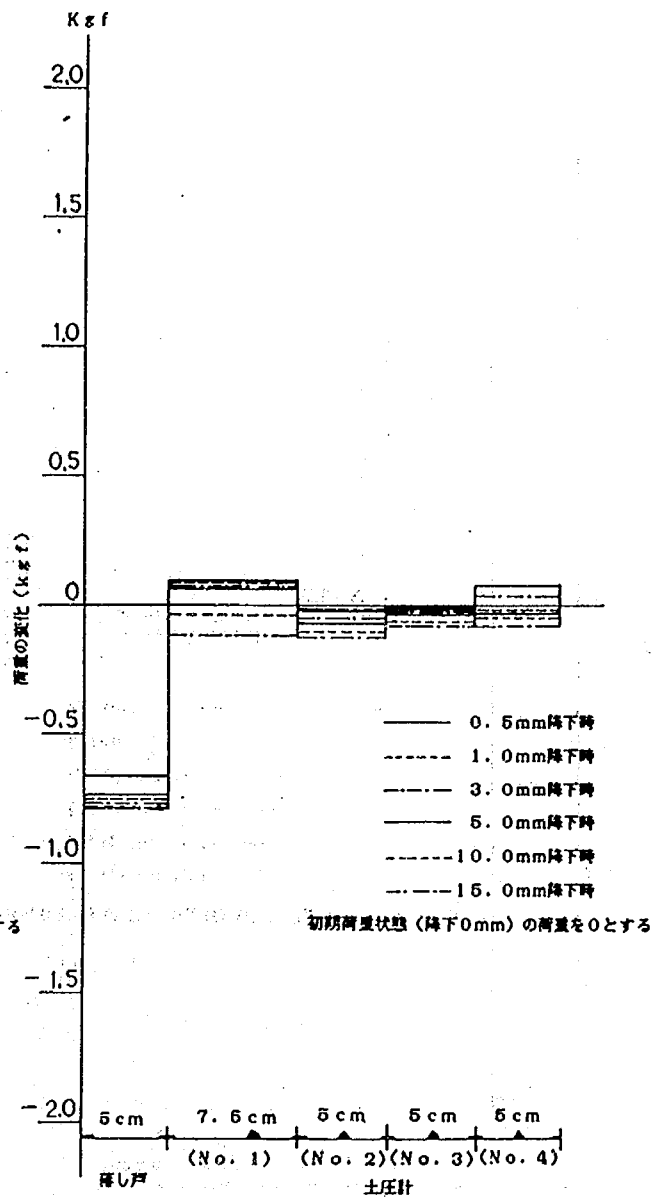


図-2.3.20 降下量と荷重分布状態の変化
(水位下地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=10cm, 水位=10cm)

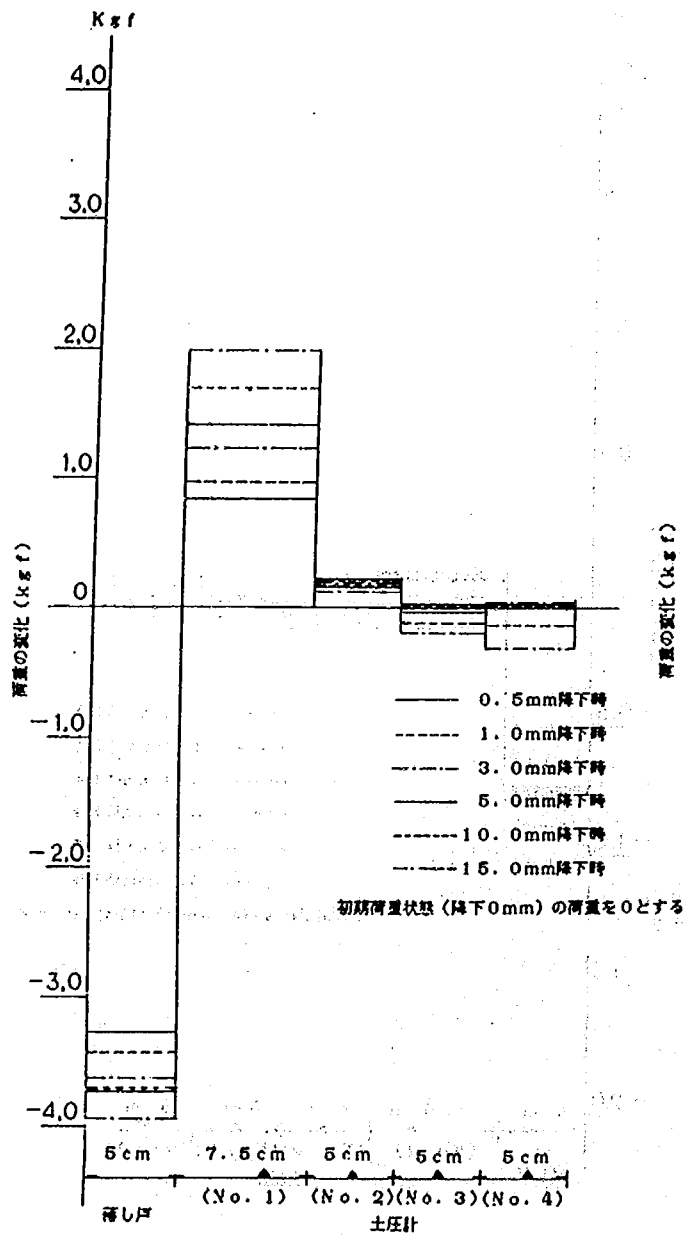


図-2.3.21 降下量と荷重分布状態の変化
 (水位下地山, 幅=10cm, 落とし戸位置=0cm,
 土被り=20cm, 水位=5cm)

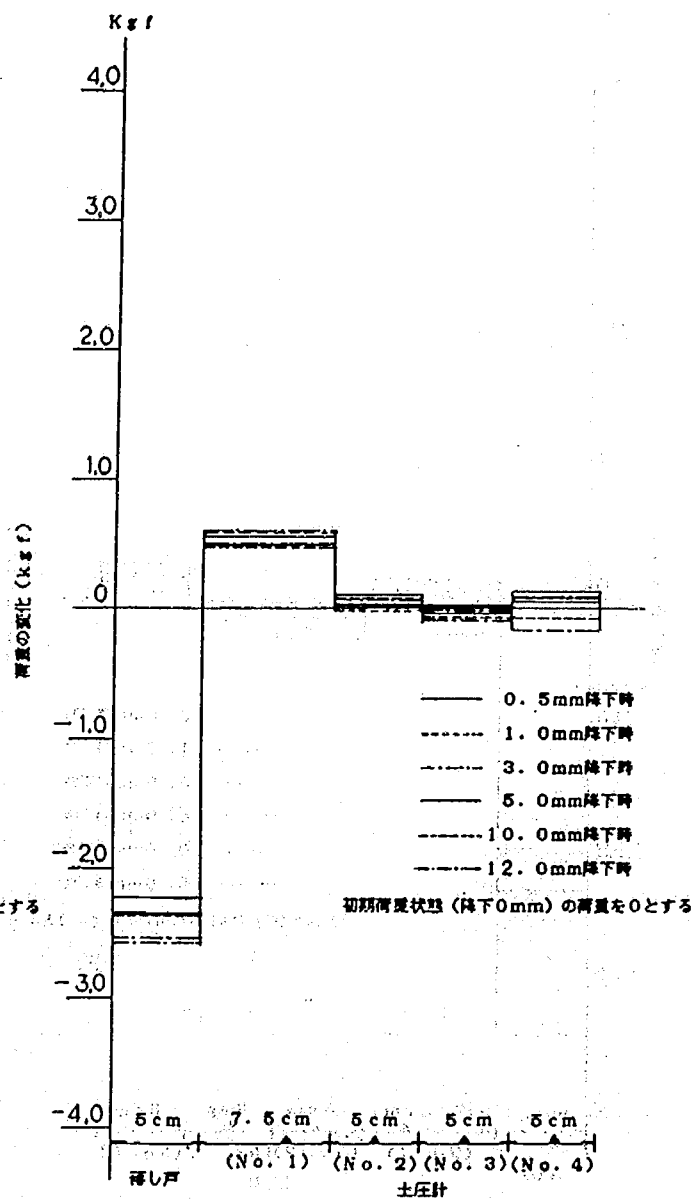


図-2.3.22 降下量と荷重分布状態の変化
 (水位下地山, 幅=10cm, 落とし戸位置=0cm,
 土被り=20cm, 水位=10cm)

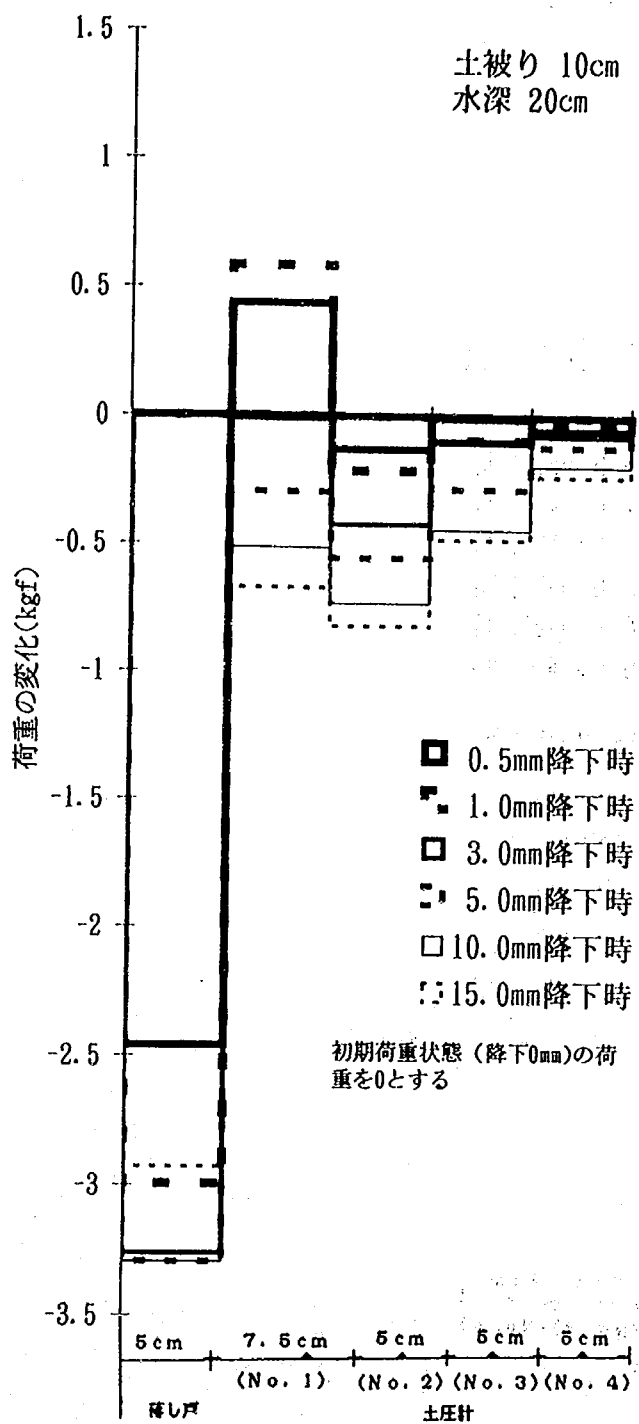


図-2.3.23 降下量と荷重分布状態の変化
(水位下地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=10cm, 水位=20cm)

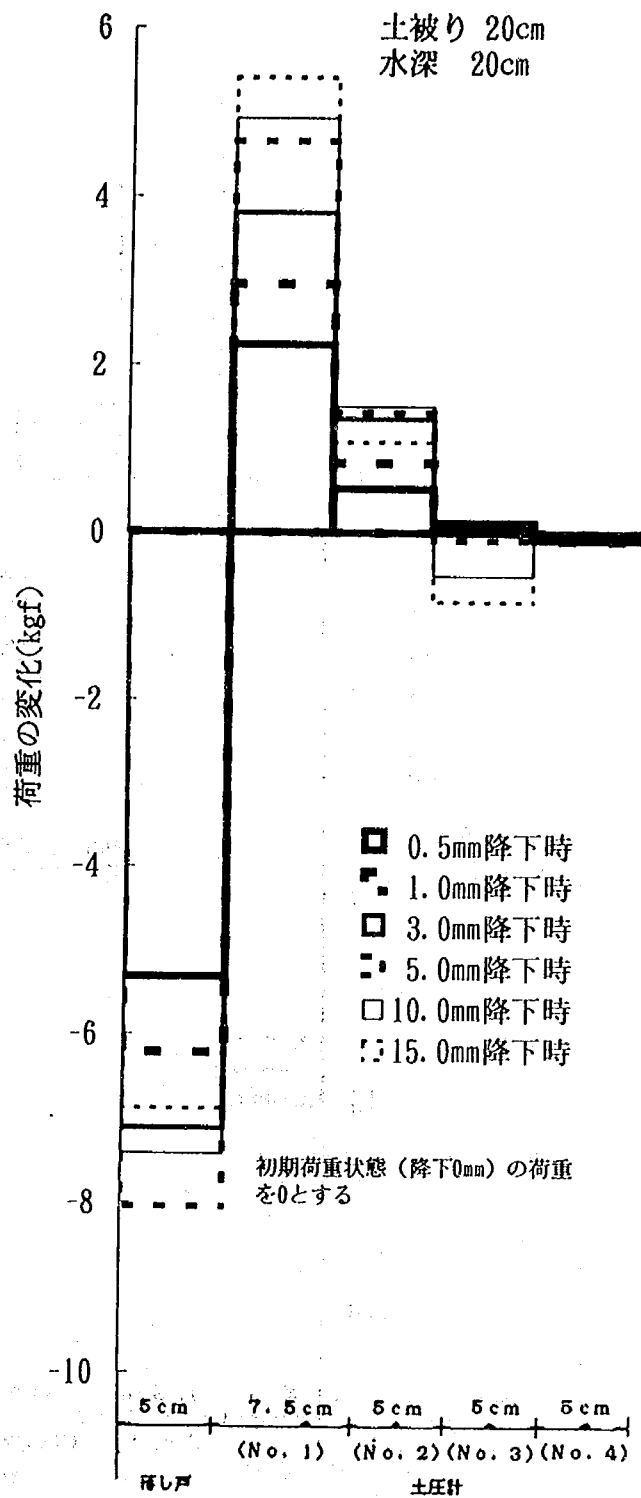


図-2.3.24 降下量と荷重分布状態の変化
(水位下地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=20cm, 水位=20cm)

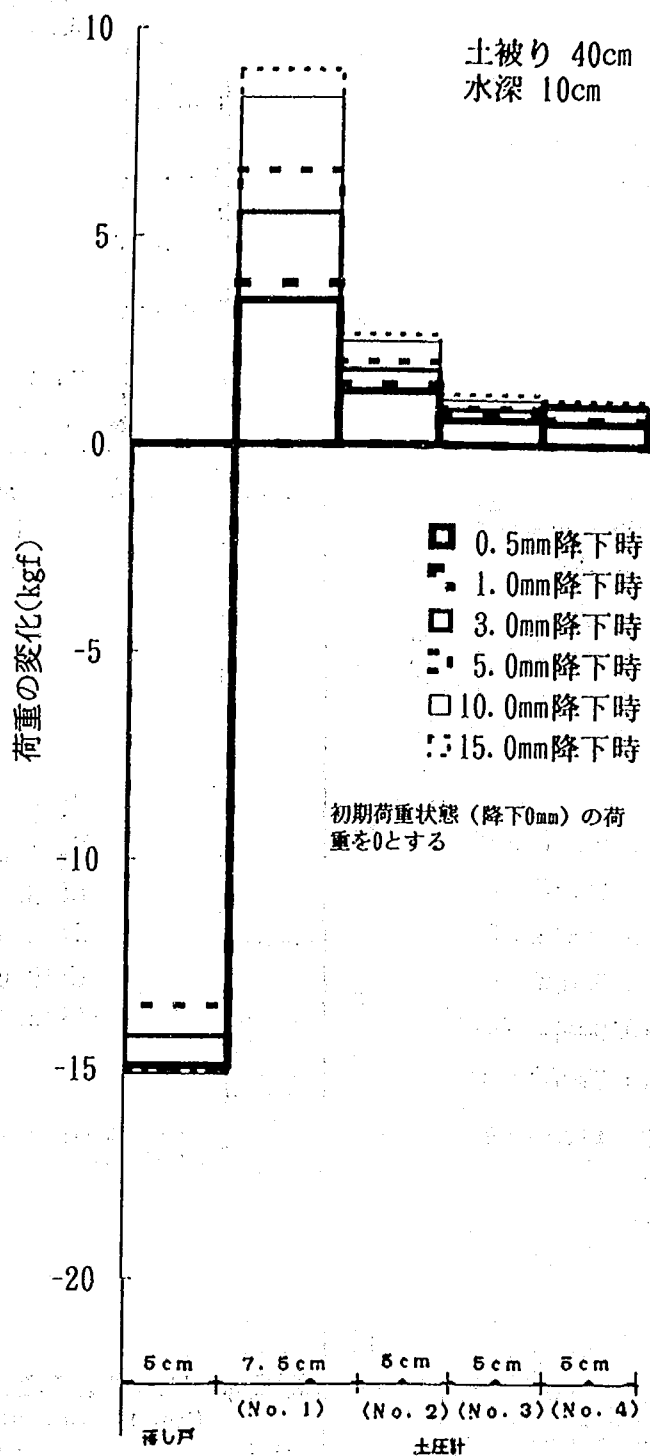


図-2.3.25 降下量と荷重分布状態の変化

(水位下地山, 幅=10cm, 落し戸位置=0cm,
土被り=40cm, 水位=10cm)

(2) 考察

各土被りごとに、乾燥地山と水位下の地山を比較したものを図-2.3.26～図-2.3.37 に示すが、水位下の地山は乾燥地山に比べてゆるやかに変化している。また乾燥地山のときはアーチ作用が広範囲におよんでいるが、水位下の地山のときは落し戸付近の狭い範囲でしかアーチが形成されていないことが見受けられる。

土被り別にみると、土被り 10cm（土被り比 1.0）のケース（図-2.3.26～2.3.29）は、乾燥地山と水位下の土圧の差が落し戸に近いほど大きく、落し戸から離れるにしたがって小さくなっている。

土被り 20cm（土被り比 2.0）のケース（図-2.3.30～2.3.33）は、全ての土圧計において、乾燥地山の方が大きな土圧を示し、土圧は落し戸に近いほど増加している。

土被り 40cm（土被り比 4.0）のケース（図-2.3.34～2.3.37）は、乾燥地山では、土圧計が落し戸から遠くなるほど、降下初期の土圧の増加はゆるやかになり、落し戸の降下にともなう土圧の増加は小さくなる。そして後に一定値を示す方向に向かっている。それに対して水位下の地山では、土圧計 1 から 2 にかけて急に少なくなり土圧計 3、4 では、ほとんど同じ土圧を示している。また土圧計 3、4 では、落し戸降下初期に土圧が増大するが、その後落し戸の降下量が増しても土圧に変化はみられない。

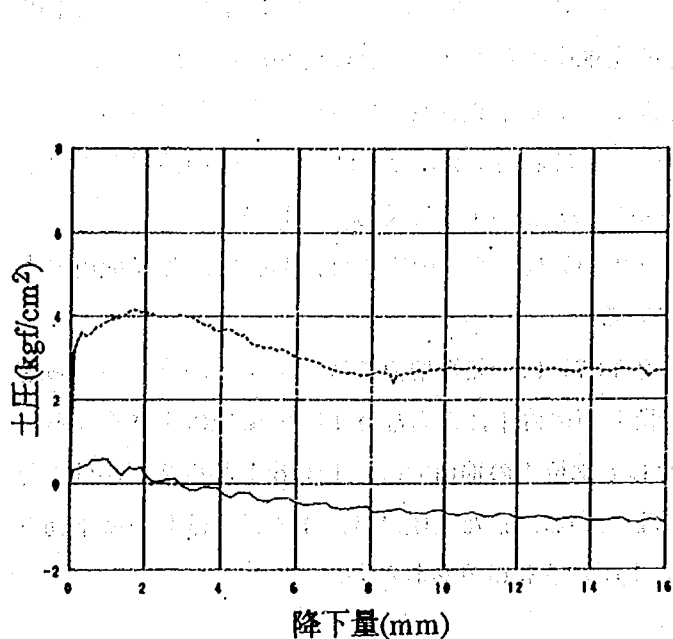


図-2.3.26 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=10cm, 幅=10cm, 土圧計 1)

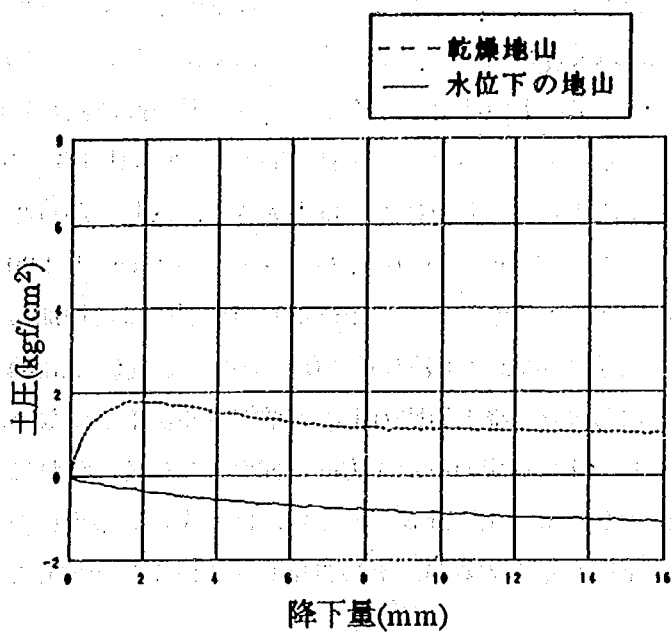


図-2.3.27 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=10cm, 幅=10cm, 土圧計 2)

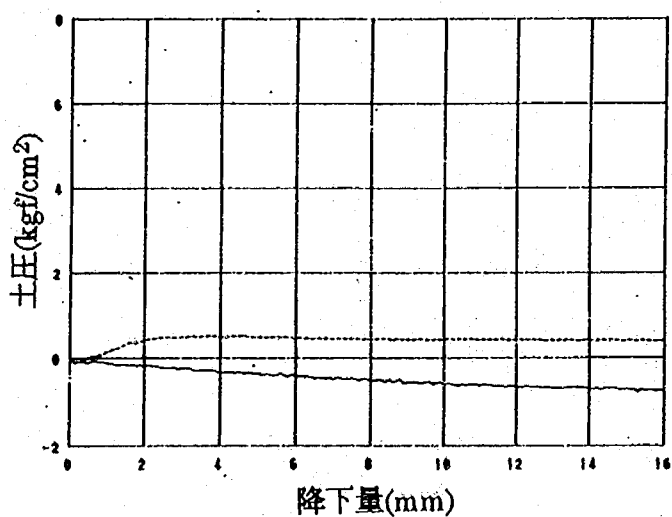


図-2.3.28 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=10cm, 幅=10cm, 土圧計 3)

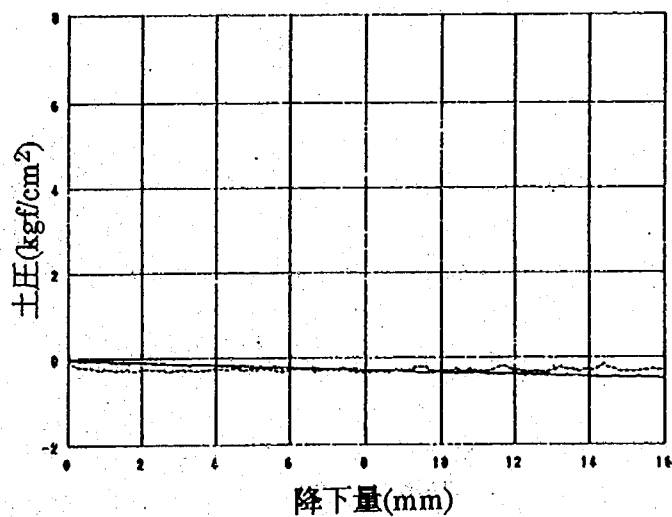


図-2.3.29 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=10cm, 幅=10cm, 土圧計 4)

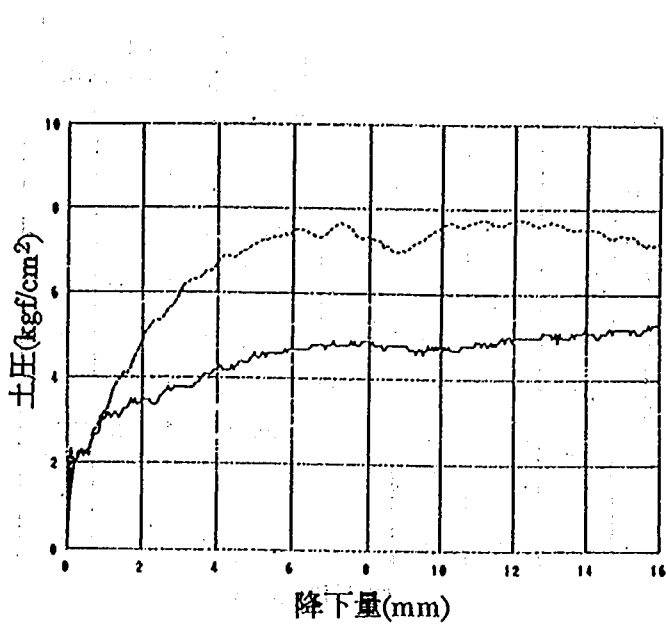


図-2.3.30 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=20cm, 幅=10cm, 土圧計 1)

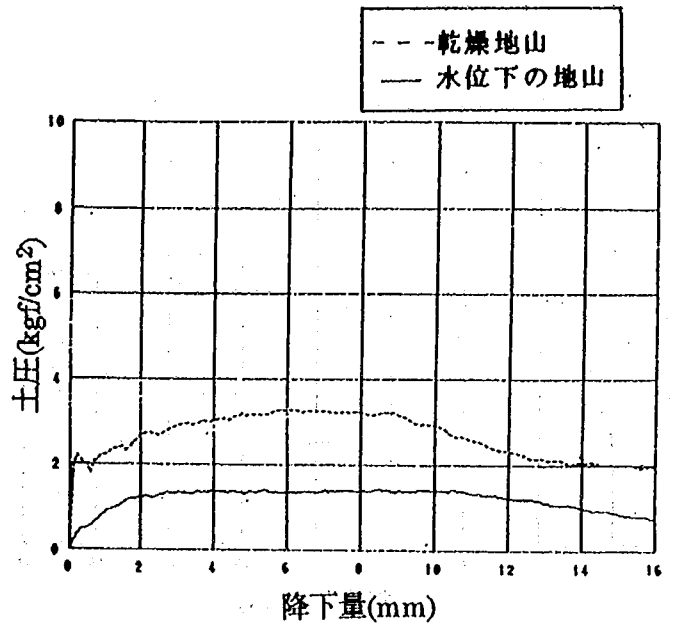


図-2.3.31 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=20cm, 幅=10cm, 土圧計 2)

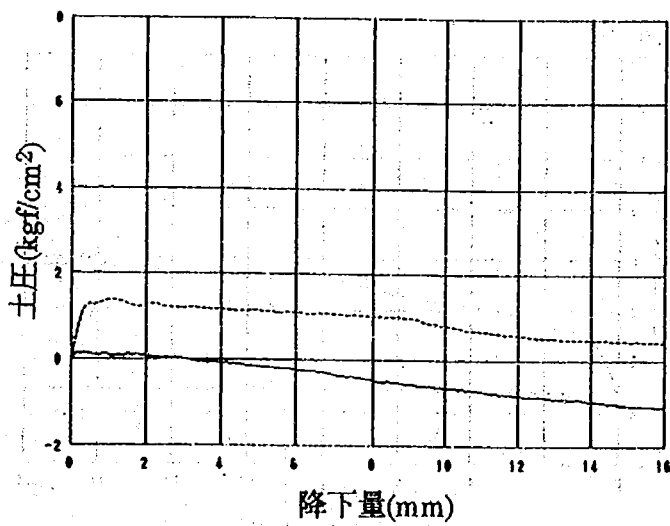


図-2.3.32 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=20cm, 幅=10cm, 土圧計 3)

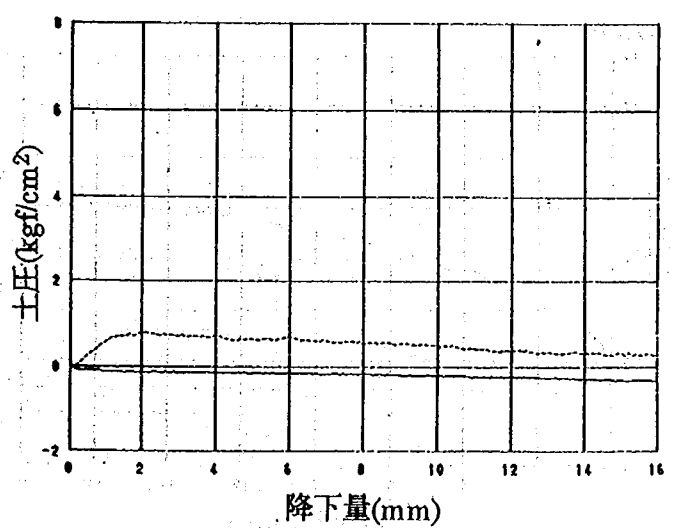


図-2.3.33 降下量と周辺土圧の関係
(土被り=20cm, 幅=10cm, 土圧計 4)

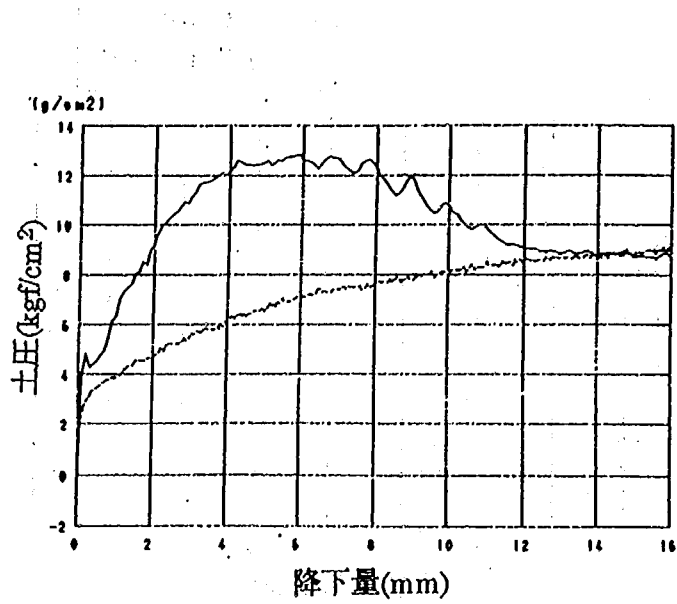


図-2.3.34 降水量と周辺土圧の関係
(土被り=40cm, 幅=10cm, 土圧計 1)

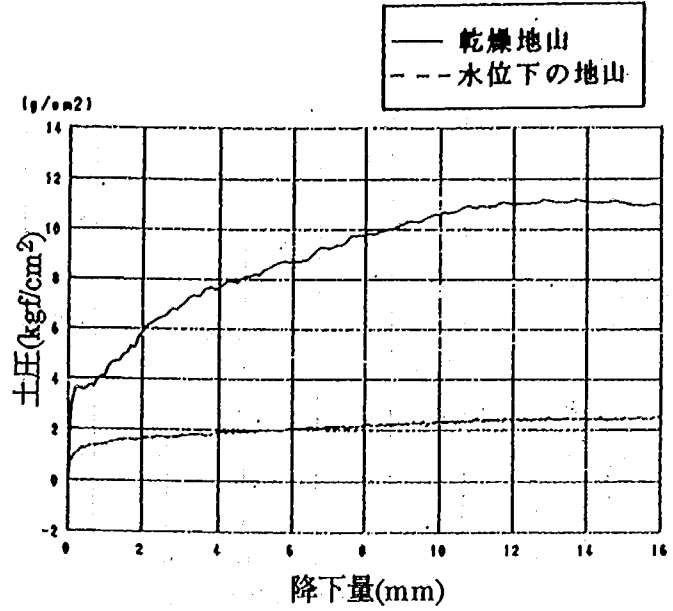


図-2.3.35 降水量と周辺土圧の関係
(土被り=40cm, 幅=10cm, 土圧計 2)

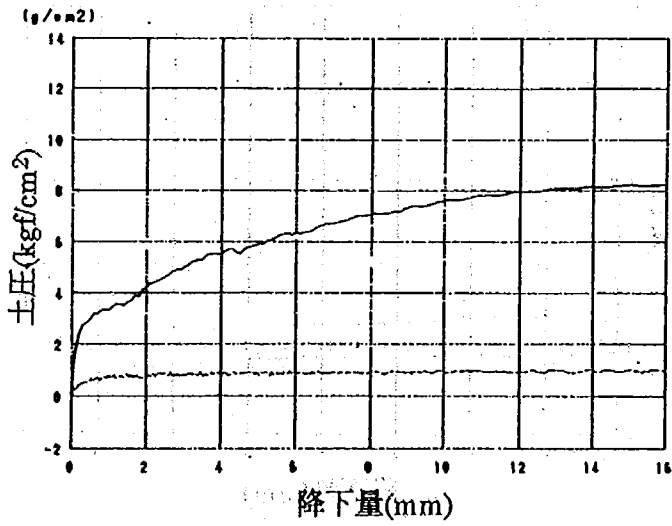


図-2.3.36 降水量と周辺土圧の関係
(土被り=40cm, 幅=10cm, 土圧計 3)

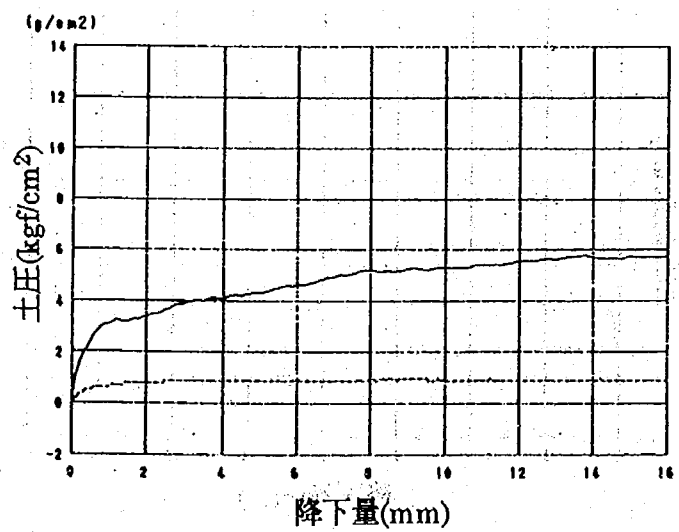


図-2.3.37 降水量と周辺土圧の関係
(土被り=40cm, 幅=10cm, 土圧計 4)

2.3.3 地表面沈下量の変化

(1) 乾燥地山の実験結果と考察

落し戸の降下量と地表面沈下量（以下沈下量と呼ぶ）との関係を、図-2.3.38～図-2.3.40に示す。何れのケースにおいても、降下量に比例して沈下量は増加している。また、土被りが大きいほど沈下量が小さいことが分かるが、特に降下量が大きくなるに従ってその傾向が顕著になっている。

落し戸幅 10cm の実験ケースの場合、落し戸 15mm 降下時の沈下量について以下のことがいえる。

- ① 土被り 10cm（土被り比=1.0）のケースでは、降下量と概ね同じ値
- ② 土被り 20cm（土被り比=2.0）のケースでは、降下量の約 2/3
- ③ 土被り 40cm（土被り比=4.0）のケースでは、降下量の約 1/2

このことは落し戸幅 20cm の場合においても、同じ土被り比のケースで比較すると同じ傾向がみられる。

また初期の落し戸設置場所の違い（落し戸周辺地盤状態の違い）が沈下量に与える影響を見てみると、ほとんど無いことがわかる（表-2.3.8 参照）。このことは、前述の落し戸に作用する荷重および落し戸周辺の荷重分布の実験結果においても同様である。

したがって、地山の挙動に対して落し戸の幅が同じであれば、初期落し戸の設置場所の違い（落し戸周辺地盤状態の違い）はほとんど影響が無いと言える。

表-2.3.8 落し戸降下量と地表面沈下量との関係

実験ケース			地表面沈下量		
落し戸形状	土被り (H)	土被り比 (H/B)	5mm降下時 (mm)	10mm降下時 (mm)	15mm降下時 (mm)
幅 10cm (B) 位置 10cm7ツブ°	10cm	1.0	4.91	10.22	15.50
	20cm	2.0	3.53	6.76	10.76
	40cm	4.0	3.45	5.37	6.86
幅 10cm (B) 位置 0cm	10cm	1.0	4.00	8.94	13.70
	20cm	2.0	3.18	5.98	9.82
	40cm	4.0	3.02	5.07	6.50
幅 20cm (B) 位置 0cm	10cm	0.5	4.21	9.12	14.08
	20cm	1.0	4.31	8.71	13.16
	40cm	2.0	3.83	7.39	10.68

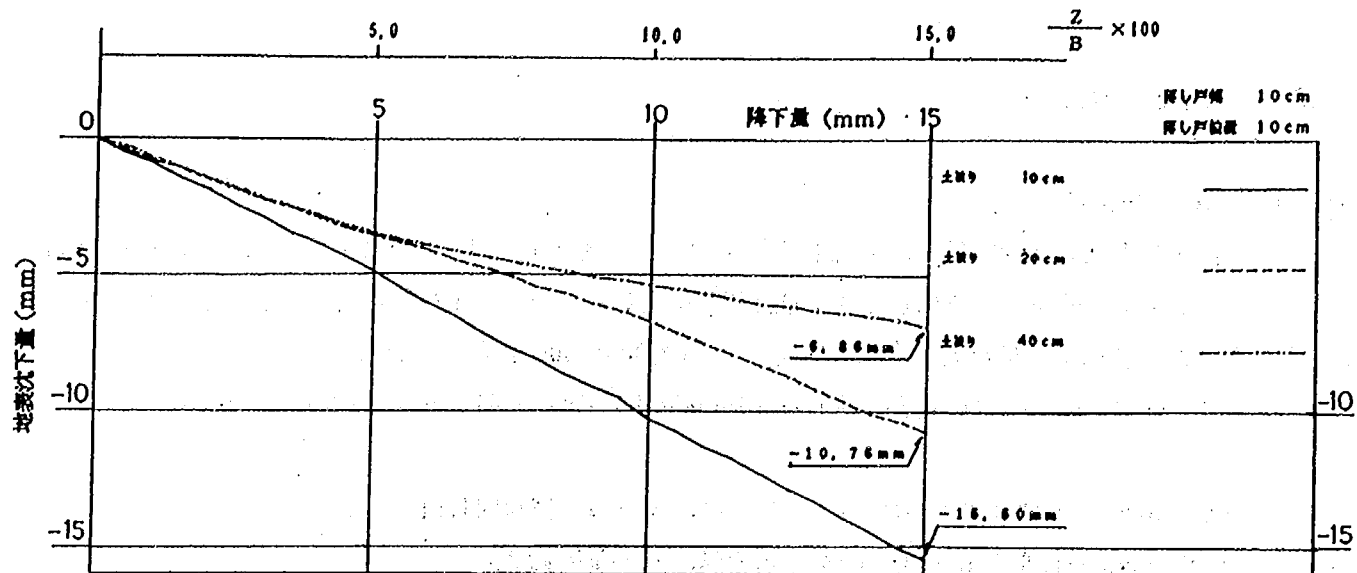


図-2.3.38 落し戸降下量と地表沈下量の関係（幅=10cm，落し戸位置=10cm）

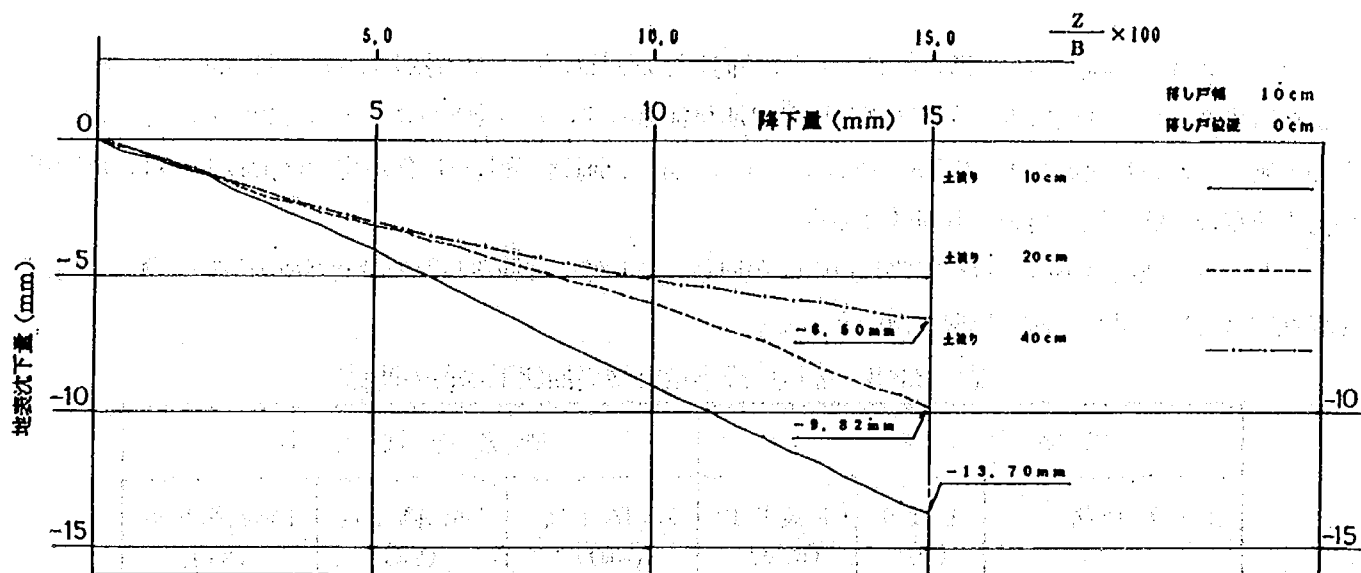


図-2.3.39 落し戸降下量と地表沈下量の関係（幅=10cm，落し戸位置=0cm）

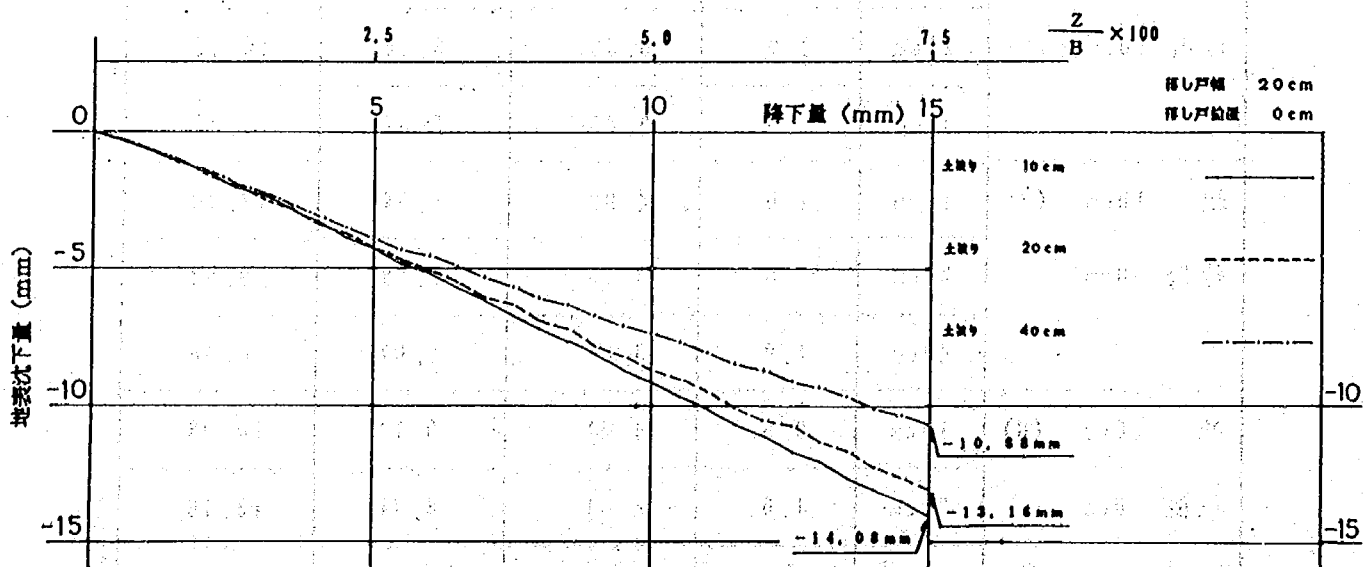


図-2.3.40 落し戸降下量と地表沈下量の関係（幅=20cm，落し戸位置=0cm）

(2) 乾燥地山と水位下地山の実験結果の比較と考察

(沈下量/降下量)と土被り比の関係を図-2.3.41に示す(水位下の地山, 乾燥地山(落し戸幅 10cm のケースと 20cm のケース)の計3種類)。土被り比 1.0 のときは, (沈下量/降下量)が 1.0 を超えているが, これは降下量以上に沈下量が発生したのではなく, 変位計を設置した地表面が軟らかく変位計が地山にめり込んだためだと考えられるもので, 水位下地山の土被り比 1.0 のケースを除いて考えれば, 概して土被り比が大きくなるに従って(沈下量/降下量)は小さくなっていく。

このことから, 土被り比 1.0 以下の場合は, 落し戸降下と一緒に落し戸上部の石粉が移動するが, 土被り比が 1.0 以上となるとアーチアクションやすべり面の影響で落し戸の降下が直接地表面にまで達していないことが考えられる。

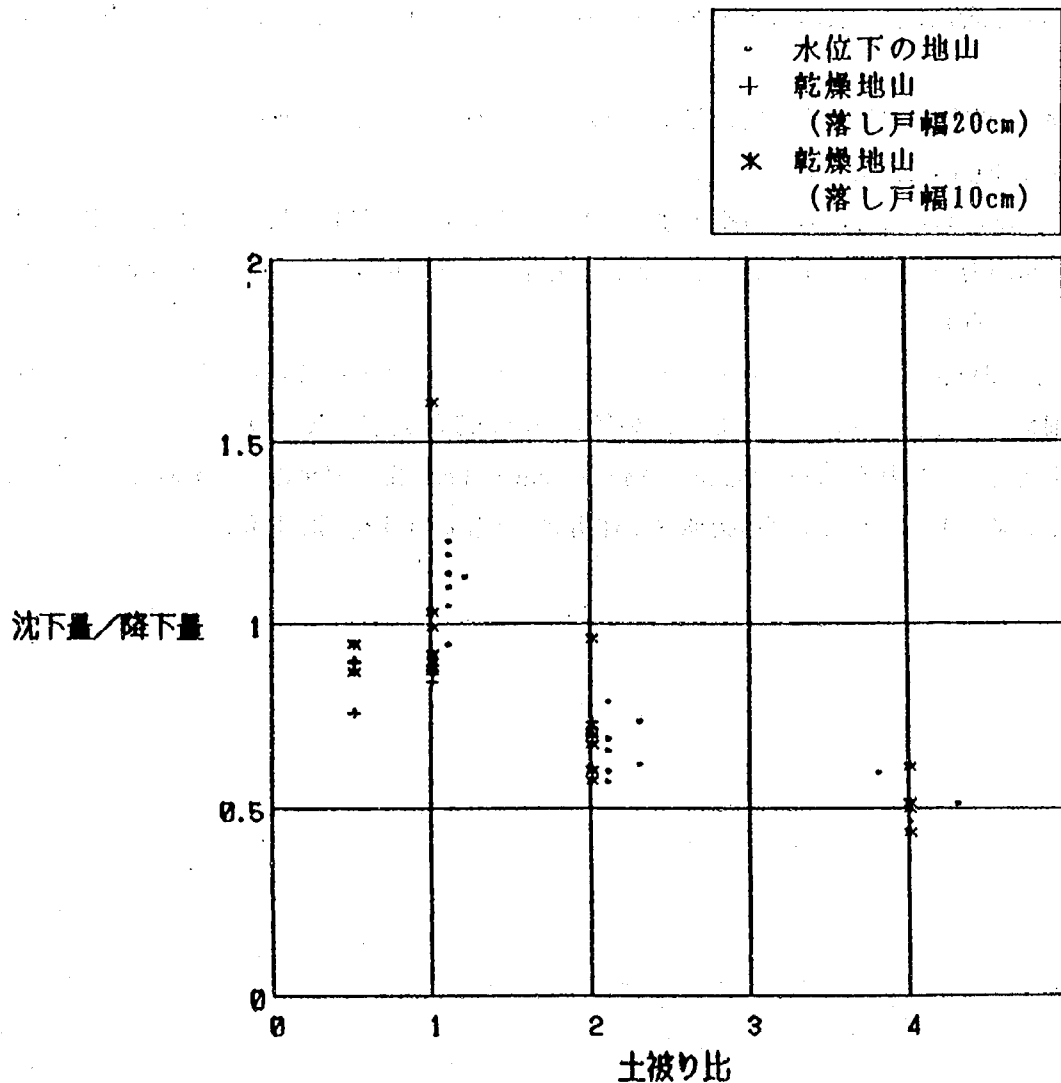


図-2.3.41 土被り比と地表面沈下量の関係(乾燥地山と水位下地山の比較)

3. 遠心力模型実験

3.1 概要

従来、砂質土や粘着力のない破砕岩の地山中に掘られたトンネルにかかる土圧や周辺地山の挙動を解明するための既往の研究として実施されてきた「二次元落とし戸模型実験」は、そのほとんどが重力場でかつ長さスケールの小さい実験であった。しかしこの実験では応力場が小さく、初期応力や拘束圧として小さな応力しか与えることができないという根本的な問題を抱えている。そこでこれを改善し、変位と応力の関係を高応力場で精度良く測定し、これらの関係を把握することを主目的と考え、遠心力場で実験をおこなうこととした。

なお模型実験は、現場で発生する現象をどのようにシミュレートするかが重要となるが、今回トンネル掘削は以下に示す2通りの方法でシミュレートした。

まずひとつは、落とし戸装置の考え方を流用し、トンネルを上半部と下半部に分割し、半円形のトンネル上半部を外部からの力で強制的に降下させることによりトンネル掘削をシミュレートした⁴⁾（以下「上半降下式模型実験」という）。

もうひとつは、側壁部の緩みを考慮するためゴムチューブをトンネルと見立て全体を収縮させることによりトンネル掘削をシミュレートした（以下「ゴムチューブ式模型実験」という）。

実験は、両実験とも土被りを5cm～20cm、水位を5cm～10cmまで変化させ、それぞれのケースについて、トンネル変形量とトンネルおよび周辺地盤に作用する土圧の変化を測定した。

3.2 実験方法

3.2.1 実験装置

実験装置は、図-3.2.1、3.2.2に示すように模擬地盤を入れる土槽（以下「試験容器」と呼ぶ）、遠心力載荷装置、計測用トンネル模型、トンネル掘削模擬装置および荷重の測定装置で構成されている。

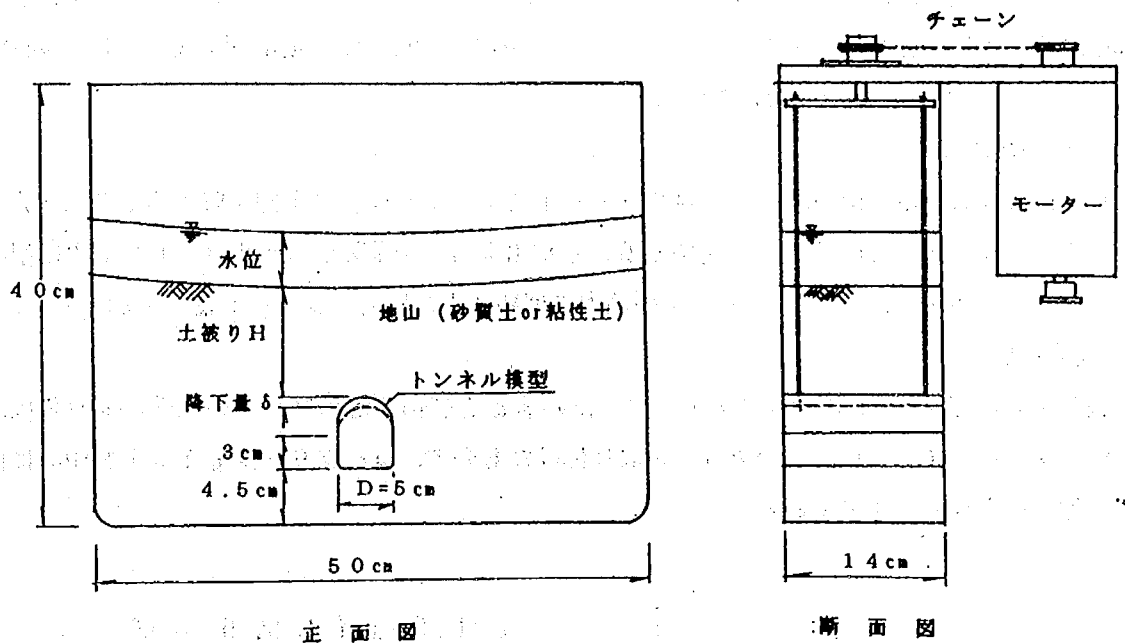


図-3.2.1 実験装置（上半降下式）

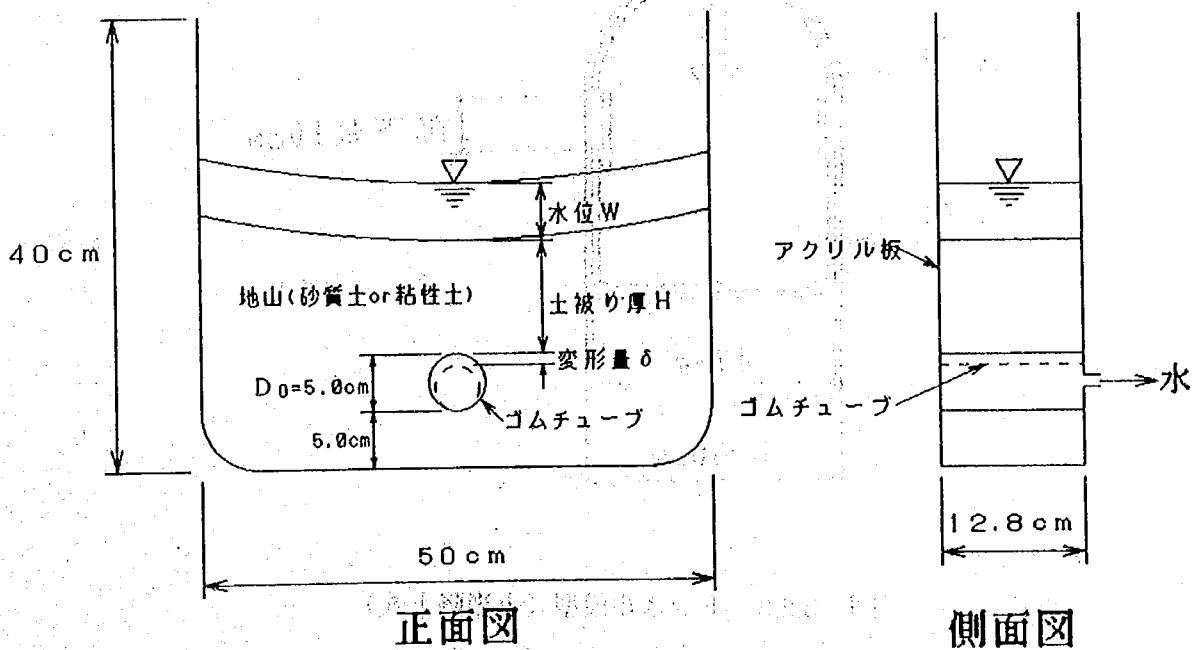


図-3.2.2 実験装置（ゴムチューブ式）

(1) 上半降下式模型実験

試験容器は、鋼製で内包寸法 50cm (幅) × 14cm (奥行) × 40cm (高さ) とし、前面にはアクリル板をはめ込み、地山の動きが観察できるようにした。支保荷重の変化は、トンネル模型の天端 (土圧計②)、斜め 45° の側面 (土圧計①、③) および地中に埋め込んだ圧力センサー (土圧計④～⑦) によって測定した。

1) トンネル模型

降下式模型実験装置の計測用トンネル模型は、図-3.2.3 に示すようにトンネル上部と下部からなり、上部を 10mm 程度降下させることができる。またトンネル模型内部に水や地山材料の浸入するのを防ぐために 1.5mm 厚のゴムスリーブを取り付けている。

2) トンネル掘削模擬装置

トンネル掘削模擬装置は、16～90(sec) 程度のスピードでトンネル模型の上部を降下させることができ、リミッターによりトンネル上部の降下量を調整することが出来る。支保荷重の変化は、トンネル模型の天端および斜め 45° に張り付けた圧力センサーおよび地中に埋め込んだ圧力センサーを使って測定した。

3) 遠心力载荷装置

遠心力载荷装置は図-3.2.4 に示す装置であり、試験容器を载荷装置のブームの先端に取り付け、もう片方にはカウンターウェイト (釣り合い重り) を取り付けたもので、ロータリージョイントを中心に回転し、試験容器に加速度を与えるものである。

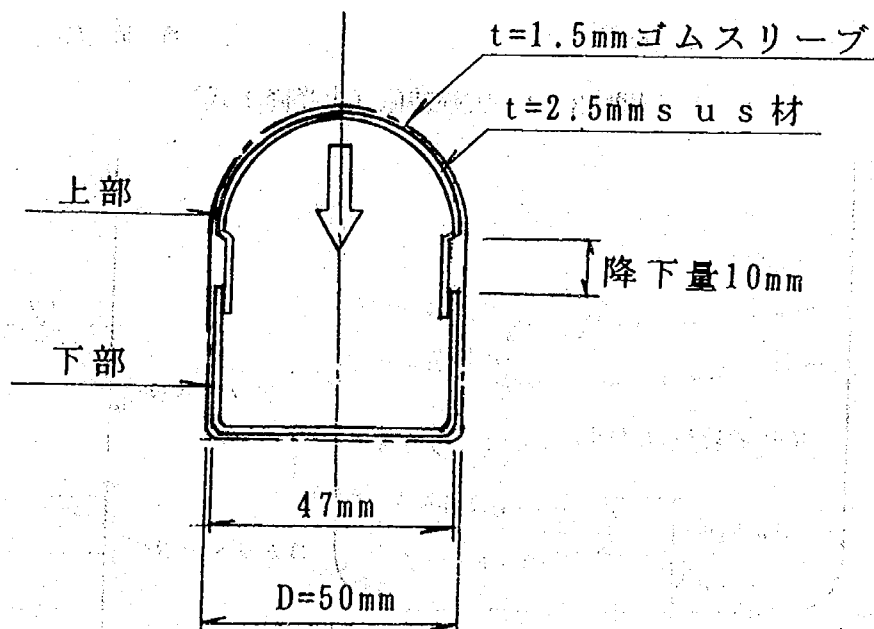


図-3.2.3 トンネル模型 (上半降下式)

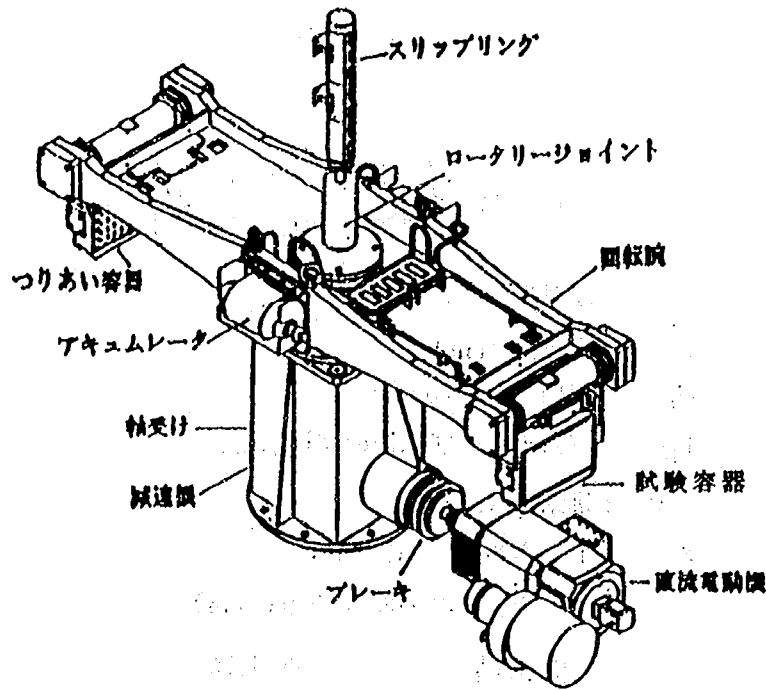


図-3.2.4 遠心力载荷装置

(2) ゴムチューブ式模型実験

試験容器は、鋼製で内法寸法 50cm (幅) × 40cm (高さ) × 12.8cm (奥行き) とし、その前面側と背面側にはアクリル板をはめ込み、地山の動きが観察できるようにした。支保荷重の変化は、トンネル中心の位置に配置した水圧計とトンネル模型の天端および斜め 45° の側面に貼り付けた圧力センサ (土圧計①、②) および地中内に埋め込んだ圧力センサ (土圧計③～⑦) により測定した。

1) トンネル模型

トンネル模型は、図-3.2.5 に示すように 厚さ 0.2mm、初期内径 43.0mm のゴム製で、内部に充填する水の量を調整することで外径の調整ができるようになっている。

2) トンネル掘削模擬装置

トンネルの掘削模擬はゴムチューブ内部の水を排水することによりおこなう。ゴムチューブ内部の水は、図-3.2.6 に示す排水系統により、ゴムチューブ端部の取付金具に開けられた穴から出て、流量微調整用バルブと電磁バルブを中間に取り付けたテフロンパイプを通り計量容器内に導き、電磁バルブの開閉操作により排水が可能な構造となっている。

トンネル模型内の水を排水する速度の調整は、流量微調整用バルブを手動にて操作しおこなう。

トンネルの変形率は、ゴムチューブ内部の初期水量より排水され計量容器内に出た水量から、ゴムチューブ内に残っている水量を計算で求め、さらにゴムチューブの外径に換算し、初期の外径に対する割合でもとめた。

その計算式を (3.1), (3.2) に示す。

$$\varepsilon = \frac{\delta}{D_0} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\delta = D_0 - \left(\sqrt{\frac{4 \cdot (V_0 - \Delta V)}{\ell \cdot \pi}} + 2t \right) \quad (3.2)$$

ここに,

- ε : 変形率 (%)
 δ : 変形量 (cm)
 D_0 : 初期外径 (=5cm)
 V_0 : ゴムチューブ内部の初期水量
 ΔV : 排水量 (cc)
 ℓ : トンネル長 (=12.8cm)
 t : ゴムチューブの厚さ (=0.02cm)

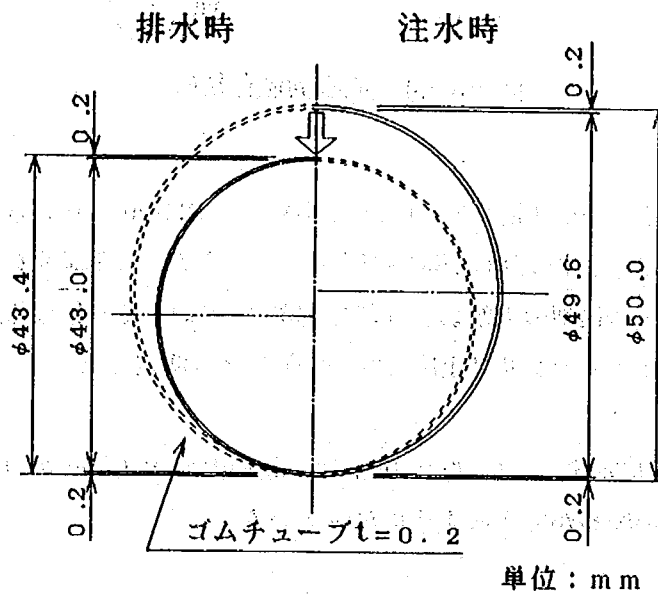


図-3.2.5 トンネル模型 (ゴムチューブ式)

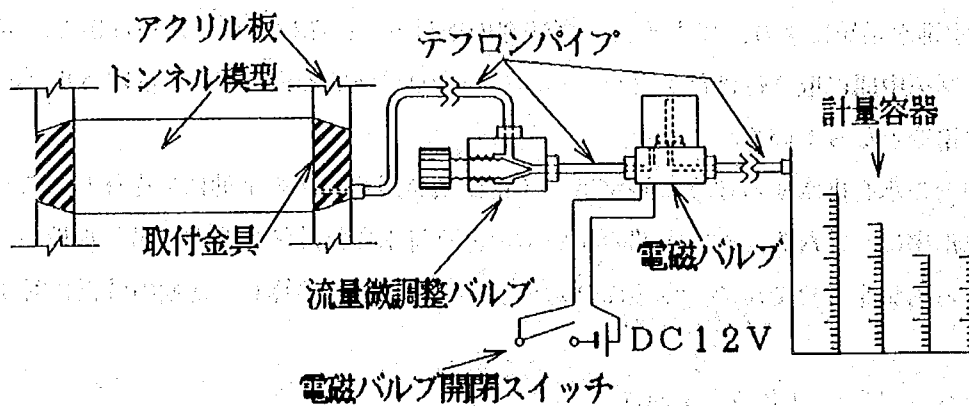


図-3.2.6 排水系統図

3.2.2 地山材料

本実験では砂質土の試料として豊浦標準砂、粘性土の試料として石粉を使用し、乾燥と水位下の2種類の地山状態での実験をおこなった。

地山の作成方法を以下に示す。

(1) 乾燥地山

試験容器内に地山材料（自然乾燥状態）を落下高さが常に50cmになるようにして、口径1cmのろうとから落下させて、均一な密度の地山を作製した。

(2) 水位下の砂質土地山

試験容器内に地山材料（自然乾燥状態）を落下高さが常に50cmになるようにして、口径1cmのろうとから落下させて、均一な密度の地山を作製した。ただし一層の厚さを20mm程度と考え、各層毎に随時、水をかけながら地山を作製した。

(3) 水位下の粘性土地山

1) 降下式模型実験の粘性土水位下の地山の作成は、自然乾燥状態の石粉に適量の水を加え攪拌し（泥水状態）た後、遠心力（80G）を加えた状態で沈殿させ、所定の土被りおよび水位を持たせた。

2) ゴムチューブ式模型実験では、自然乾燥状態の石粉に適量の水を加え、含水比を20%前後に調整してよく練り混ぜてだんご状にしたものを、試験容器内で空気を押し出しながら積み重ねて所定の土被りとした。その後所定の水位となるように水を加えた。

材料の特性は、図-3.2.7、表-3.2.1、3.2.2、3.2.3、3.2.4に示す通りである。

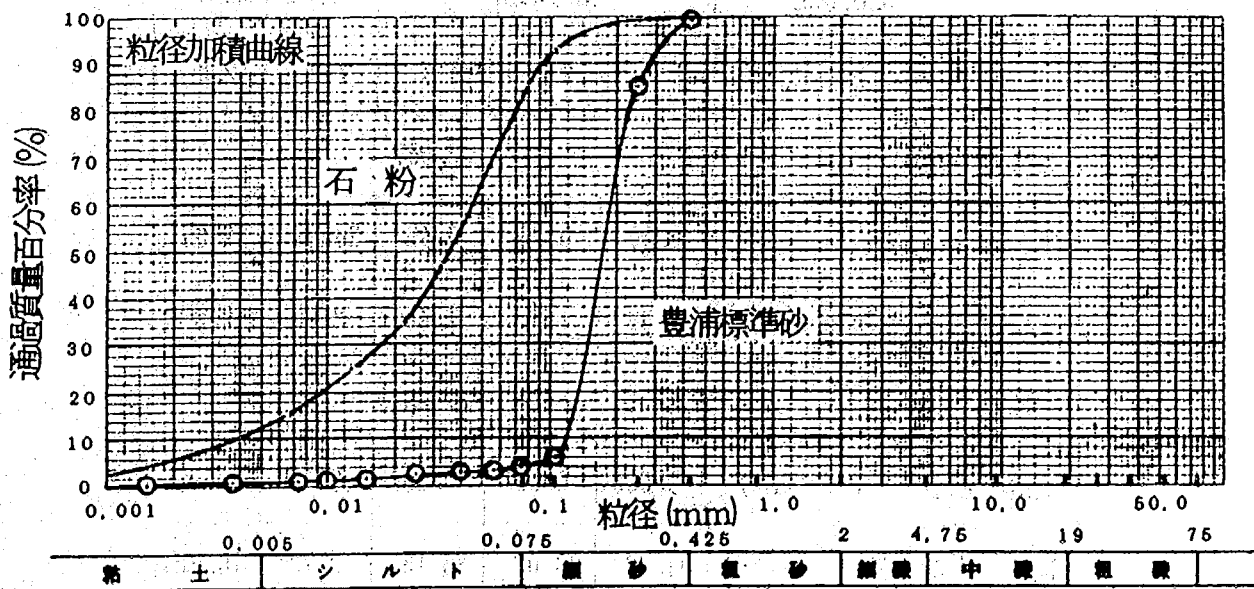


図-3.2.7 地山材料の粒度分布

表-3.2.1 地山材料の土質試験結果（上半降下式，標準砂）

実験ケース	地山状態	乾燥地山			水位下地山		
	土被り比	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	4.0
土粒子の比重 G		2.642					
含水比 w (%)		0.114	0.110	0.050	21.74	22.56	22.30
湿潤密度 ρ (g/cm ³)		1.472	1.485	1.485	1.933	1.968	1.943
三軸	試験条件	C D 試験					
圧縮	粘着力 c (kg/cm ²)	0.000					
試験	内部摩擦角 ϕ (°)	38.22	36.87	36.60	41.07	39.90	40.37

表-3.2.2 地山材料の土質試験結果（上半降下式，石粉）

実験ケース	地山状態	乾燥地山			水位下地山	
	土被り比	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0
土粒子の比重		2.667				
含水比 w (%)		0.50	0.34	0.49	20.87	22.67
湿潤密度 ρ (g/cm ³)		1.38	1.40	1.44	2.05	2.03
三軸	試験条件	U U 試験				
圧縮	粘着力 c (kg/cm ²)	0.000	0.000	0.000	0.035	0.090
試験	内部摩擦角 ϕ (°)	34.40	36.02	38.15	2.72	16.38

表-3.2.3 地山材料の土質試験結果（ゴムチューブ式，標準砂）

実験ケース	地山状態	乾燥地山			水位下地山		
	土被り比	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	4.0
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.37					
含水比 w (%)		0.0	0.0	0.0	27.63	26.56	27.64
湿潤密度 ρ (g/cm ³)		1.462	1.433	1.464	1.909	1.905	1.938
三軸	試験条件	C D 試験					
圧縮	粘着力 c (kg/cm ²)	0.00			0.07		
試験	内部摩擦角 ϕ (°)	36.43			32.67		

表-3.2.4 地山材料の土質試験結果（ゴムチューブ式，石粉）

実験ケース	地山状態	乾燥地山			水位下地山	
	土被り比	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.671				
含水比 w (%)		0.0	0.0	0.0	20.91	20.69
湿潤密度 ρ (g/cm ³)		1.348	1.369	1.365	2.070	2.030
三軸	試験条件	C D 試験				
圧縮	粘着力 c (kg/cm ²)	0.00			0.28	
試験	内部摩擦角 ϕ (°)	35.06			33.44	

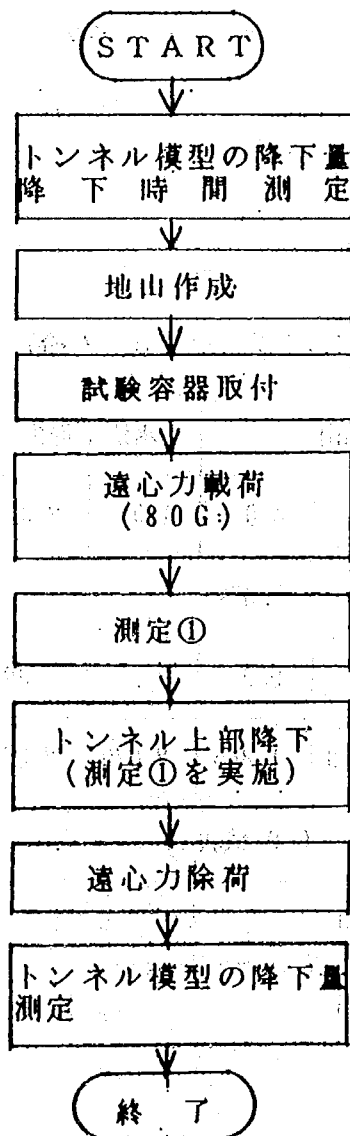
3.2.3 実験手順

(1) 上半降下式模型実験

実験は、図-3.2.8の実験フローに示す手順に従って実施した。

まずトンネル模型を設置した試験容器に地山を作成し、図-3.2.9に示す位置に圧力センサーをセットする。ただし石粉は80Gまで遠心载荷をおこなうと沈下が大きいため、遠心载荷による圧密沈下が完了した後、所定の位置に設置する。つぎに試験容器を遠心力载荷試験装置のブーム先端に取り付ける。以上の作業の終了後、80Gの加速度が得られるまで回転して、土圧および間隙水圧等の初期値を計測する。最後にトンネル模型の上部を降下させ、トンネル模型の天端および両側と、トンネル模型周辺に作用する土圧の変化及び間隙水圧の変化を計測する。降下速度は0.11mm/sec程度である。ただし、実験ごとに降下量と降下速度は多少変化したので表-3.2.5にその一覧表を示す。

なおこの実験に使用した測定器および測定系統は、表-3.2.6、図-3.2.10に示す。



測定①：トンネル支保工作用荷重、間隙水圧
周辺土圧の測定、写真撮影

図-3.2.8 実験フロー（上半降下式）

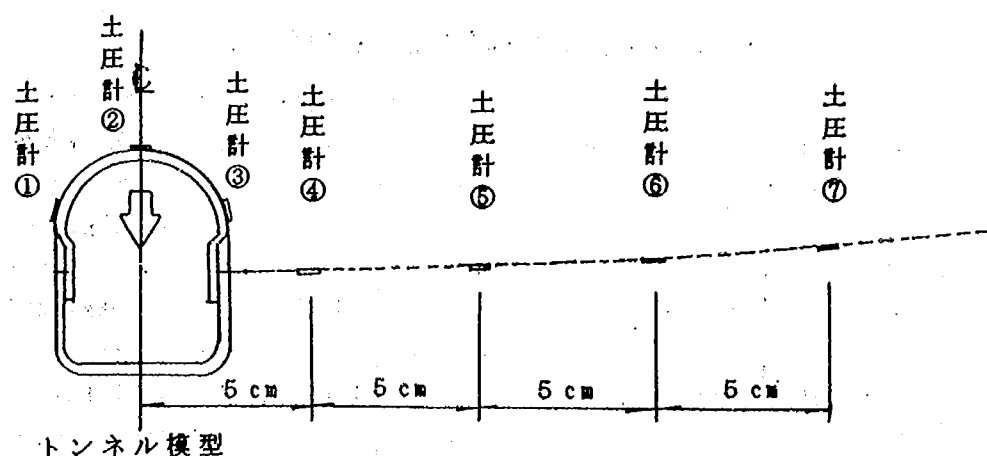


図-3.2.9 圧力センサの配置図（上半降下式）

表-3.2.5 降下量と降下速度の関係（上半降下式）

地山状態	土被り比	降下時間(s)	降下量(mm)	降下速度(mm/s)
砂質土 乾燥	1.0	215	9.7	0.045
	2.0	193	9.6	0.050
	4.0	89	9.8	0.110
砂質土 水位下	1.0	92	9.6	0.104
	2.0	90	9.8	0.109
	4.0	86	9.8	0.114
粘性土 乾燥	1.0	88	9.7	0.110
	2.0	90	9.8	0.109
	4.0	88	9.6	0.109
粘性土 水位下	1.0	93	9.8	0.105
	2.0	97	9.7	0.100

表-3.2.6 使用測定機器（上半降下式）

項 目	測 定 器	形 式	定格容量
支保工荷重	圧力センサ	PS-5KA	5kgf/cm ²
周辺土圧	圧力センサ	PS-5KA	5kgf/cm ²
間隙水圧	間隙水圧計	PDCR 81	3 Bar
測 定	シグナルコンディショナ	CDV-230C	----
	シグナルメモリー	9A16	----
	パーソナルコンピューター	NEC PC-9801VX	----

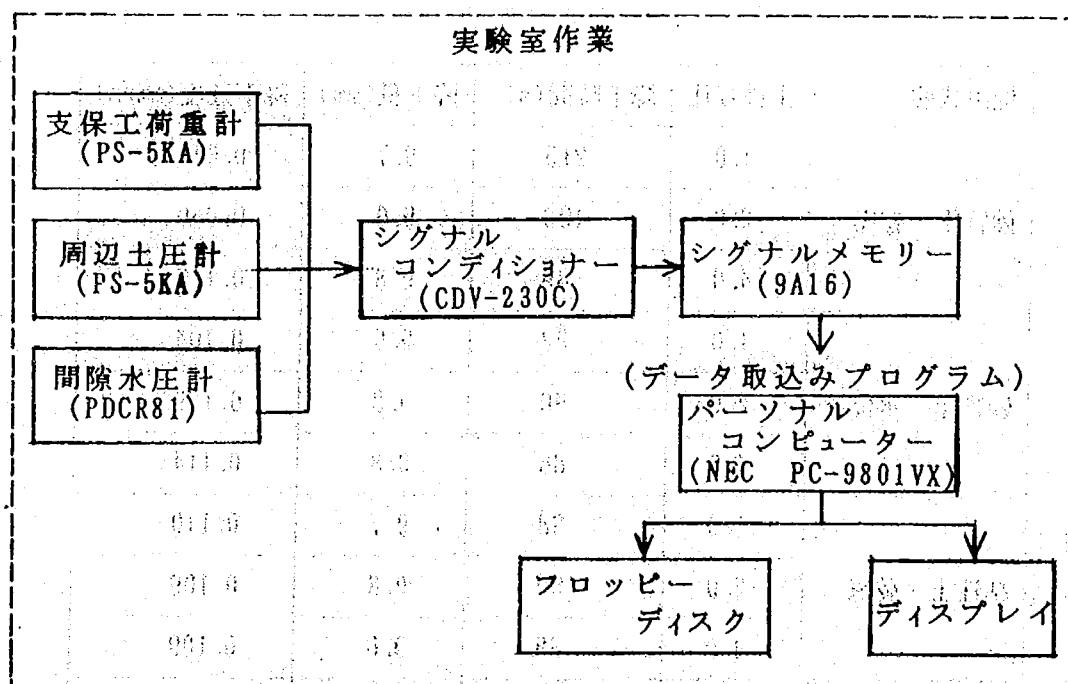


図-3.2.10 測定系統図（上半降下式）

(2) ゴムチューブ式模型実験

実験は図-3.2.11の実験フローに示す手順に従って実験した。実験フローは降下式模型実験と概ね同じである。

まず試験容器の内面には、土粒子との摩擦を低減するためにフッ素潤滑剤を塗布する。そしてトンネル模型を設置した試験容器内に地山を作製する。また今回使用したゴムチューブは柔軟で、地山作成前にゴムチューブ内に水を充填すると水の重さにより大きく変形してしまうため、水を充填したゴムチューブを図-3.2.12に示すゴムチューブ受け台にのせた後、地山を作成した。また圧力センサーの配置図を図-3.2.13に示す。ただし粘性土乾燥地山に使用する石粉は80 Gまで遠心载荷をおこなうと沈下が大きいため、遠心载荷(80 G)で沈下したときに所定の高さとなるように、所定の位置より2cm高く設置した。以上の作業の完了後、80 Gの加速度で遠心力载荷して、土圧および水圧計の初期値を計測する。最後にトンネル模型内部の水を排水し変形させ、トンネル模型の天端および斜め45°の側面とトンネル模型周辺に作用する荷重の変化を計測した。排水に要する時間は実験ごとに変化し、62secから2,850secであった。実験ごとの排水時間と変形速度の関係を表-3.2.7に示す。

なお、以上の実験に使用した測定器および測定系統は、表-3.2.8および図-3.2.14に示す。

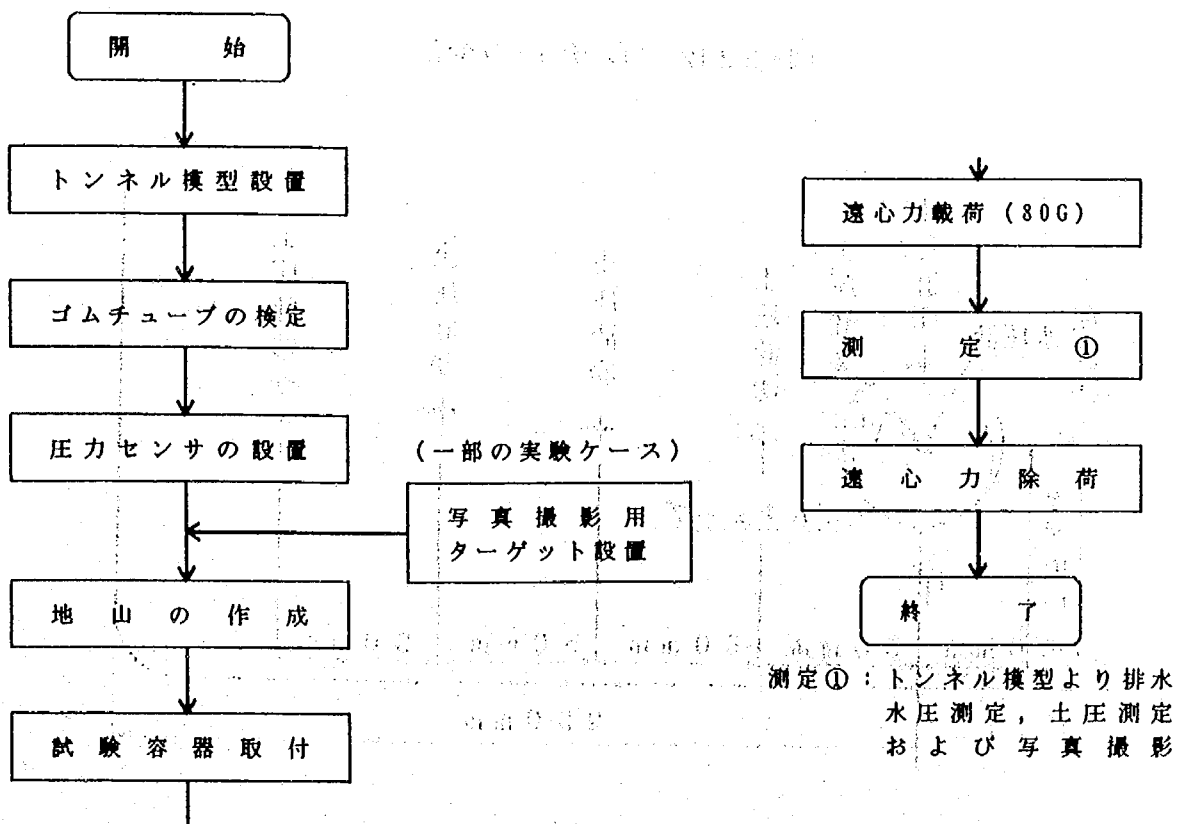


図-3.2.11 実験フロー (ゴムチューブ式)

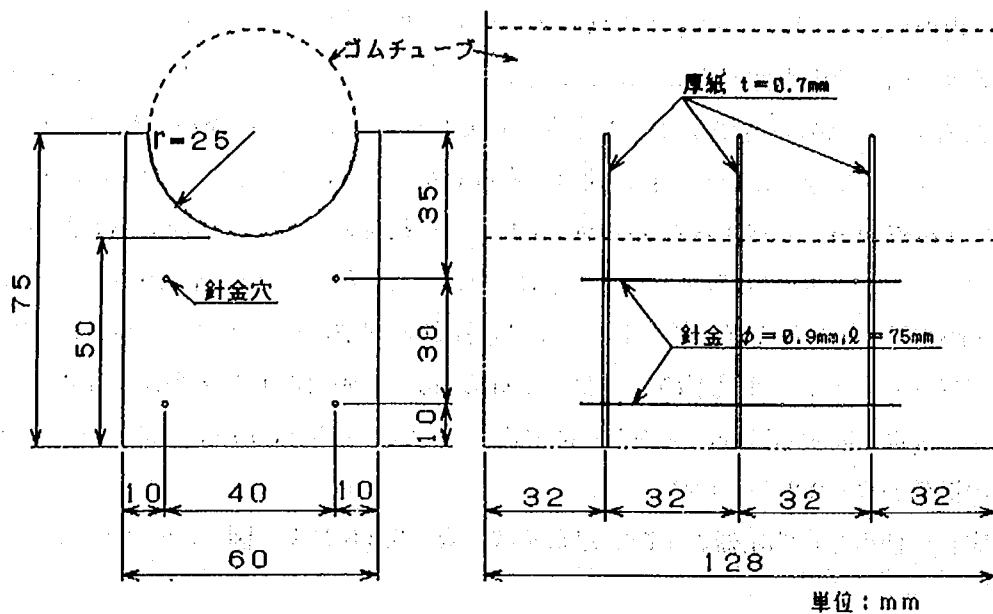


図-3.2.12 ゴムチューブ受台

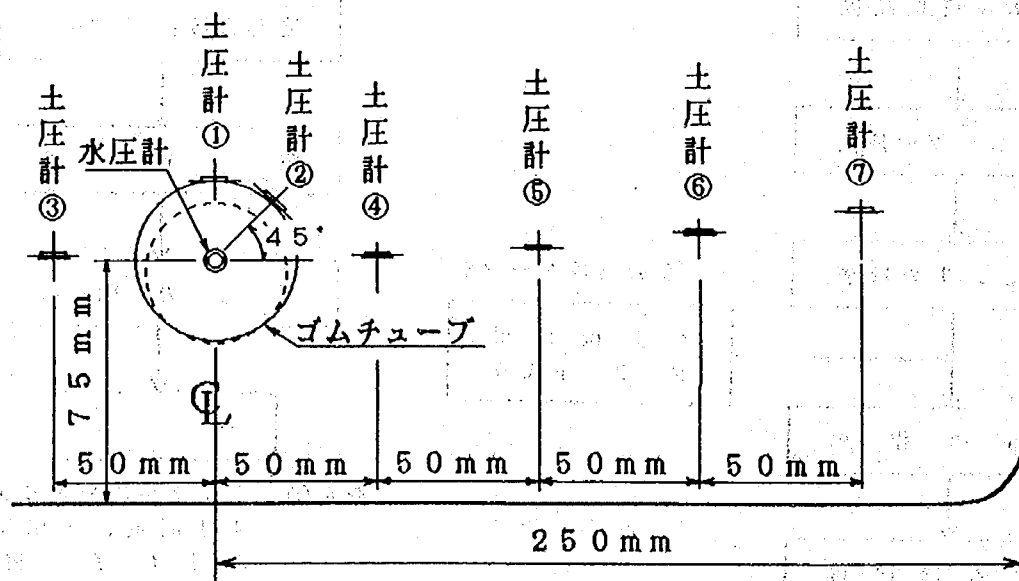


図-3.2.13 圧力センサの配置図 (ゴムチューブ式)

表-3.2.7 排水量と変形速度の関係（ゴムチューブ式）

地山状態	土被り比	排水量(cc)	変形率(%)	排水時間(sec)	変形速度(%/sec)
砂質土 乾燥	1.0	75	16.40	460.0	0.0357
	2.0			2695.0	0.0061
	4.0			2850.0	0.0058
砂質土 水位下	1.0			320.0	0.0513
	2.0			105.0	0.1562
	4.0			80.0	0.2050
粘性土 乾燥	1.0			310.0	0.0529
	2.0			580.0	0.0283
	4.0			175.0	0.0937
粘性土 水位下	1.0			62.0	0.2645
	2.0			145.0	0.1131

表-3.2.8 使用測定機器（ゴムチューブ式）

項 目	測 定 器	型 式	定 格 容 量
トンネル模型作用荷重	圧力センサ	PS-5KA	5kgf/cm ²
トンネル模型内水圧	圧力センサ	PGM-2KC	2kgf/cm ²
周 辺 土 圧	圧力センサ	PS-5KA	5kgf/cm ²
測 定	データロガー パーソナルコンピュータ	UCAM-10A PC9801VM2	
写 真 撮 影	カメラ レンズ モータードライブ フィルム	R-3 マイクロニッコール MD-4 フラス-X	55mm; F2.8
写真読み取り・作図	デジタイザー XYプロッター	KD4030 MP4300	

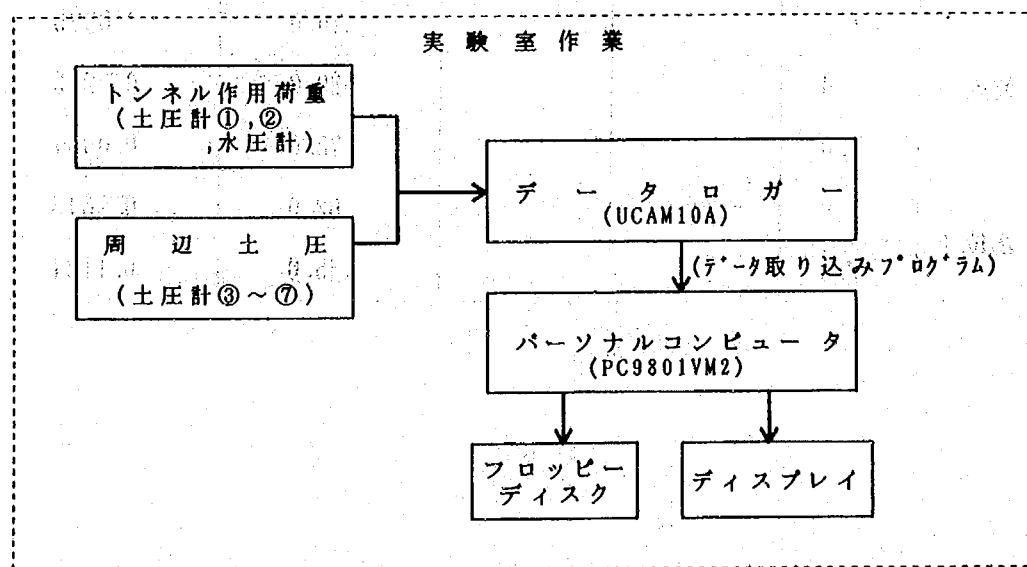


図-3.2.14 測定系統図（ゴムチューブ式）

3.2.4 実験条件

地山材料は砂質土（豊浦標準砂）と粘性土（石粉）の、それぞれ乾燥地山と水位下地山の場合を作成し、掘削前の土被り厚（ H ）とトンネル外径（ D ）との比である土被り比（ H/D ）を変化させた実験をおこなった。

(1) 上半降下式模型実験

降下式模型実験における詳細の実験条件を図-3.2.15、表-3.2.9に示す。ただし2章で扱った1G（遠心载荷しない状態）の実験では、トンネル上部の降下時間および降下量は測定可能であったのが、今回の実験では、重力加速度が80Gとなり測定不可能であるため、1Gの時に測定したトンネル上部の降下スピードが80Gのときでも変化しないと仮定した。降下量については、実験終了時に再度測定をおこなった。

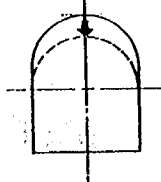
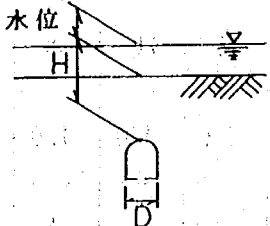
実験方法	 トンネル上部降下
土被り条件	 D：トンネル模型の直径 H：土被り厚
対象地山	(a) 砂質土 (b) 粘性土

図-3.2.15 実験条件（上半降下式）

表-3.2.9 実験ケース（上半降下式）

実験条件	上半降下式										
地山条件	砂質土						粘性土				
	乾燥地山			水位下地山			乾燥地山			水位下地山	
土被り厚 (cm)	5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10
土被り比(=H/D)	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0
水深 (cm)	—	—	—	5	5	5	—	—	—	10	10

(2) ゴムチューブ式模型実験

ゴムチューブ式模型実験における詳細の実験条件を図-3.2.16, 表-3.2.10 に示す。なお今回の実験では, 排水速度の調整は手動式の排水量微調整バルブでおこない, 電磁バルブは排水中開いたままの状態ですべての計測を実施した。また排水中は排水量 5cc 毎に所要時間を記録し, データロガーで収録した圧力センサーの測定値と照合した。

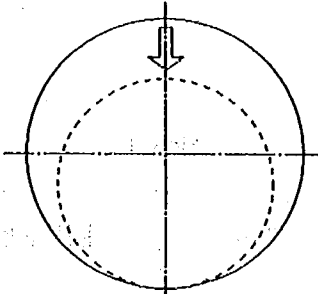
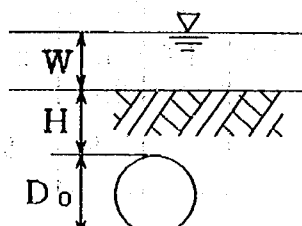
実 験 方 法	 ゴムチューブ（トンネル）の収縮
土 被 り 条 件	 W : 水 位 H : 土 被 り 厚 D_0 : トンネル模型の直径
対 象 地 山	(a) 砂 質 土 (b) 粘 性 土

図-3.2.16 実験条件（ゴムチューブ式）

表-3.2.10 実験ケース (ゴムチューブ式)

実験条件	ゴムチューブ式										
地山条件	砂質土						粘性土				
	乾燥地山			水位下地山			乾燥地山			水位下地山	
土被り厚 (cm)	5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10
土被り比(=H/D)	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0
水深 (cm)	—	—	—	5	5	5	—	—	—	10	10

3.3 遠心力模型実験結果および考察

3.3.1 支保荷重について

(1) 実験結果

1) 上半降下式模型実験

(a) 砂質土地山について

図-3.3.1 は、乾燥地山において掘削前の土被り厚 H とトンネル外径 D との比 H/D (以降、「土被り比」と言う) が 1.0, 2.0, 4.0 の場合の各実験ケースにおける、トンネル変形率 ε と天端支保荷重の関係を示したものである。ここでトンネル変形率 ε はトンネル降下スピードが一定の仮定のもとで、トンネル降下量 δ を求めトンネル外径 D ($=5\text{cm}$) で除し無次元化した値である。この図より、天端支保荷重は急速に減少していき、土被り比に関係なくほぼ一定の値に近づいていることがわかる。また変形率 $\varepsilon=20\%$ 程度まで変形させても、ゆるみ領域が大きくなって、塑性化した部分の自重が荷重として作用し、支保荷重が大きくなるという傾向はみられなかった。

図-3.3.2 は、図-3.3.1 の縦軸を支保荷重率 (初期支保荷重を 100% として百分率で示す) で表したものであるが、トンネル上部降下開始直後に急激な天端支保荷重の減少が現れ、その後ほぼ一定の値となっている。また土被り比が大きくなるにしたがって減少する割合が速くなっている。

図-3.3.3 は変形率と側方支保荷重の関係を示している。ただし装置上の問題で完全な側方支保荷重は測定不可能であった。この図より、土被り比 1.0 の土圧計①を除くと土被り比が大きくなるにしたがって、変形率の増加にともなう側方支保荷重の減少が顕著にあらわれていることがわかる。

水位下の地山を想定した実験結果であるが、土と水が混在する地山において土圧の取り扱いは、

a) 土圧と水圧を分離して取り扱う考え方

b) 水圧を土圧の一部として包含する考え方

の 2 つの考え方が実用化されているが、一般的に a) は砂質土において、b) は粘性土に適用される傾向がある。また a) においては土の単位体積重量は、地下水位以上では湿潤重量、地下水位以下では水中重量を用い、b) においては地下水位以上では a) と同じであるが、地下水位以下では水を含めた単位体積重量を用いる。

a) では土と水の力の力学的挙動が互いに独立であると考えられるから、今回は地山のトンネルに作用する荷重は土圧と水圧を分離して取り扱うことにした。よって以降とくに断りのない限り、水位下地山における土圧とは、実験測定値からそのときの土槽内のピエゾ水頭分の荷重を引いた値を指すことにする。

土圧と水圧を分離した水位下の地山の測定値と乾燥地山の測定値との比較を図-3.3.4 に示す (本章のグラフで適用した荷重値は、とくに断りのない限り初期荷重で除した荷重比としている。なお参考のために除していない値を軸にしたグラフもまとめて参考資料に記すことにした。) が、水位下の地山は乾燥地山と比較して、支保荷重の減少スピードが速くなっており、最小値に達した後、土被り比 1.0 でわずかに増加し、土被り比が大きくなるとほとんど増加しないことがわかる。

一方、最小支保荷重と変形率の関係を見ると（表-3.3.1），水位下地山の場合，土被り比によって最小値を示すトンネル上部の変形率の差異が生じているが，乾燥地山の場合はほとんど相違が見られない．またどの土被り比の場合でも，水位下地山の方が乾燥地山より小さい変形率で最小支保荷重を示している．換言すれば，水位下地山の場合は土被り比が大きくなるにしたがい急激に荷重が減少し，その後ゆっくりと最小値に向かって減少していく傾向がある．

表-3.3.1 最小支保荷重と変形率の関係（上半降下式，砂質土）

	土被り比 H / D	最小支保荷重時の 変形率 (%)	最小支保荷重 (kgf/cm ²)	Terzaghiの 式による 計算値 (kgf/cm ²)
乾燥地山	1.0	18.8	0.13	0.30
	2.0	18.1	0.18	0.38
	4.0	16.4	0.15	0.38
水位下地山	1.0	8.8	0.11	0.18
	2.0	13.9	0.04	0.22
	4.0	10.2	0.01	0.22

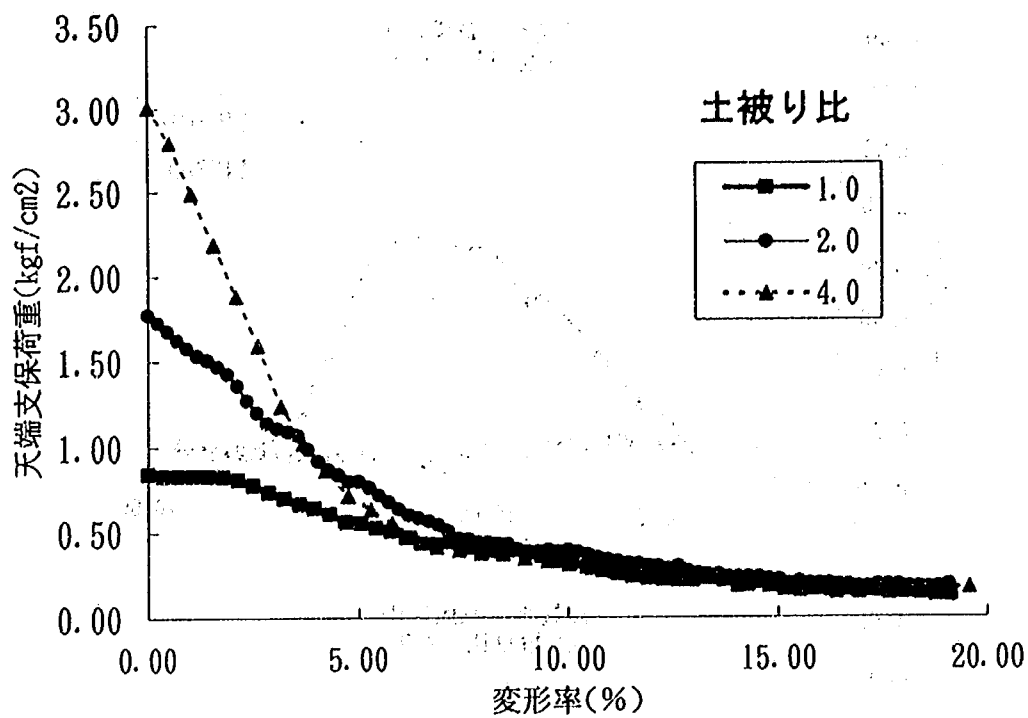


図-3.3.1 変形率と天端支保荷重の関係 (砂質土乾燥地山)

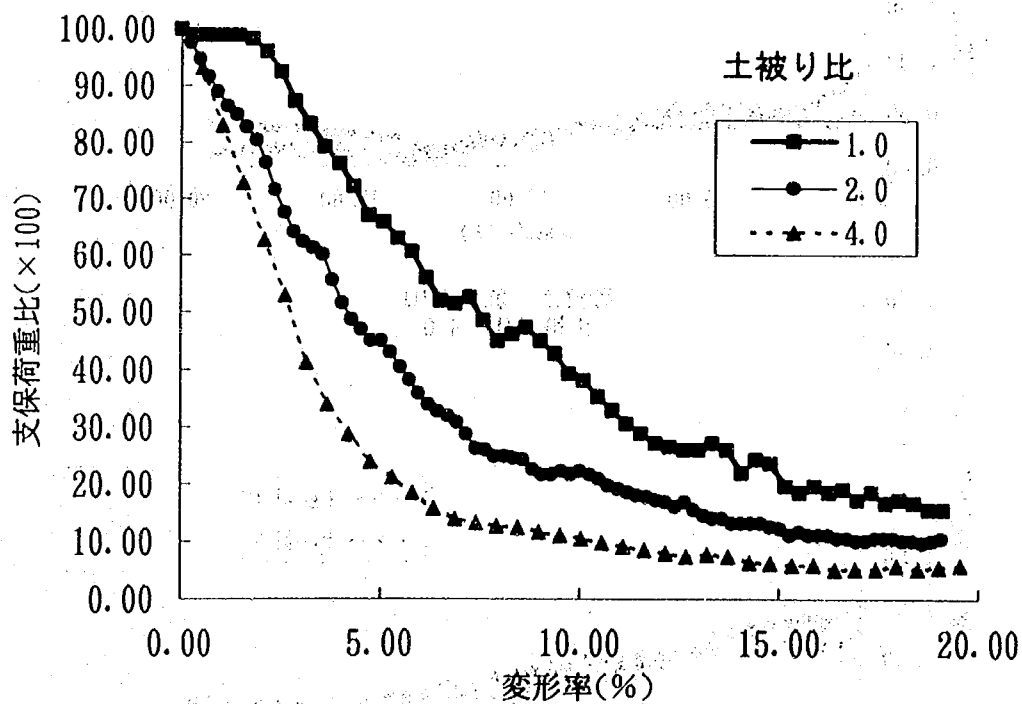


図-3.3.2 変形率と天端支保荷重比の関係 (砂質土乾燥地山)

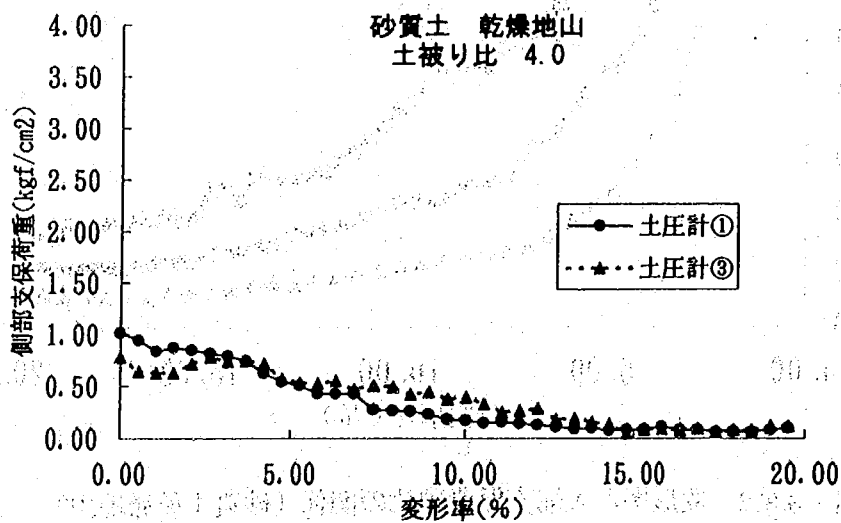
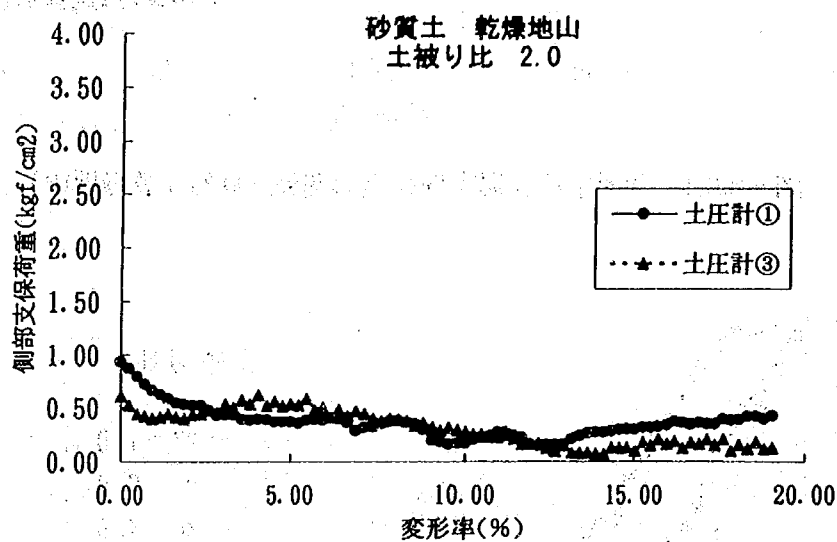
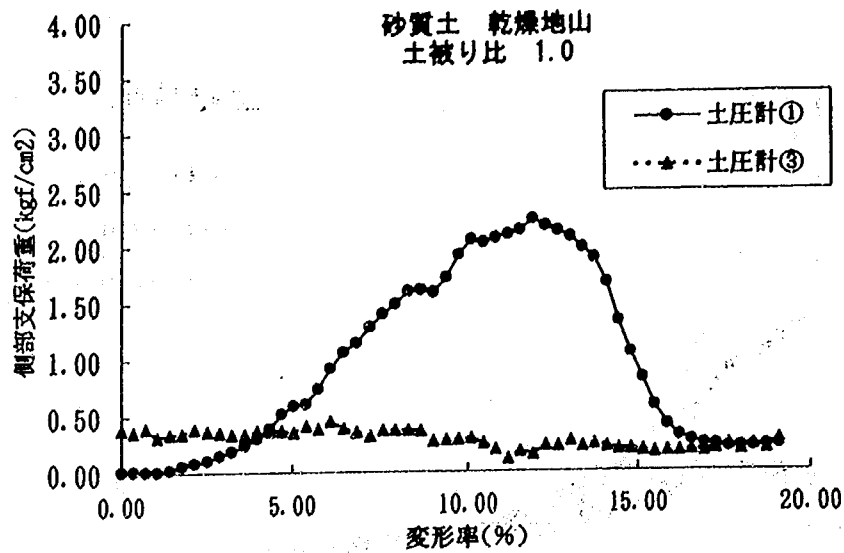


図-3.3.3 変形率と側部支保荷重の関係(砂質土乾燥地山)

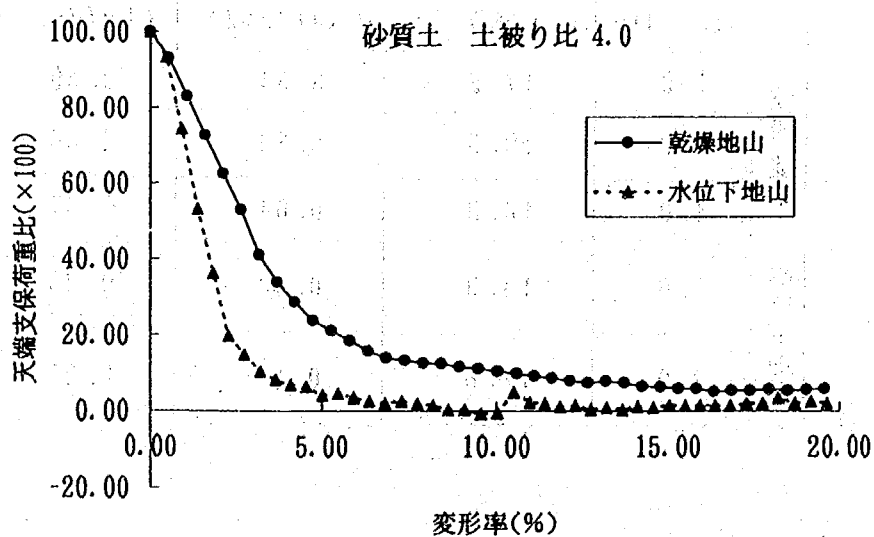
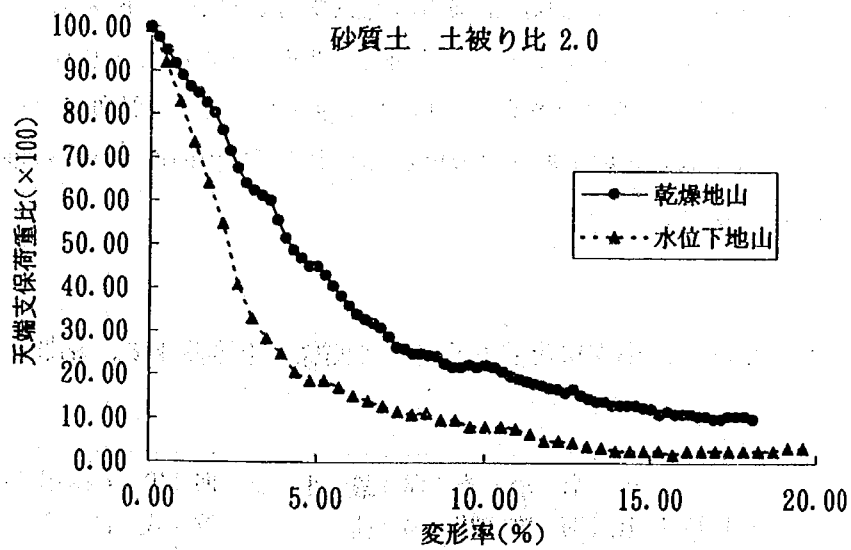
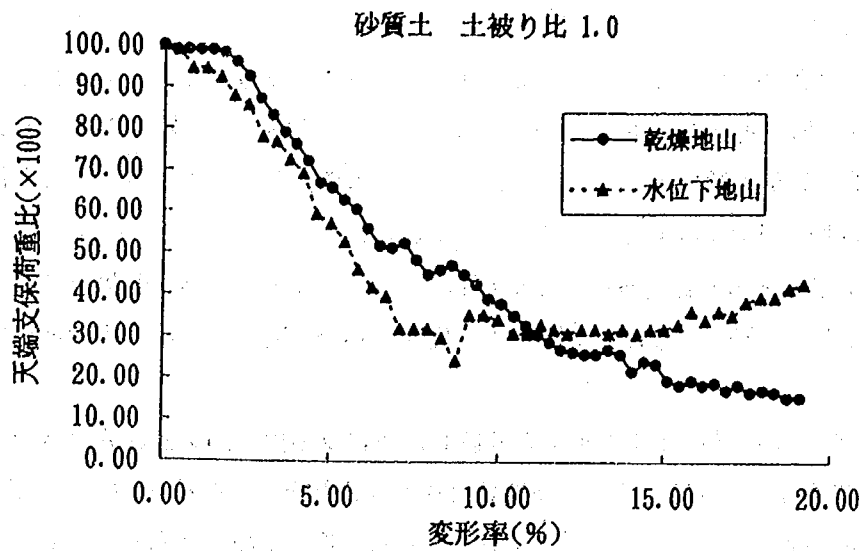


図-3.3.4 変形率と天端支保荷重比の関係（砂質土乾燥地山と水位下地山の比較）

(b) 粘性土地山について

乾燥地山で掘削前の土被り比 (H/D) が 1.0, 2.0, 4.0 の場合の各実験ケースにおける, トンネル変形率 ε と天端支保荷重比の関係を示したものを図-3.3.5 に示す. 砂質土と比較すると, トンネル上部降下開始直後の部分で, 急激な荷重の減少はみられず, 徐々に一定の値に近づいている. また土被り比が大きくなるにしたがって支保荷重の減少する割合が速くなっている.

図-3.3.6 は, 変形率と側方支保荷重の関係を示しているが, 土被りが 4.0 のケースのときの土圧計③の値を除くと, 砂質土の場合と同じように, 土被り比の増加に伴い, 変形率がある程度増加すると, 側方支保荷重は減少傾向を示す.

水位下地山についてであるが, 土圧と水圧を分離した水位下地山の測定値と乾燥地山の測定値とを比較したものを図-3.3.7 に示す. これによると土被り比 2.0 の場合だと, 水位下の地山は乾燥地山と比較して支保荷重の減少スピードが程度速くなっており, 最小値に達した後, 増加の傾向がみられる. これは砂質土の水位下地山土被り比 1.0 でもみられる. また水位下地山の土被り比 1.0 では, トンネル上部降下初期に荷重の増加傾向が見られたが, 地山を作製する上で何らかの問題があることが考えられる.

最小値支保荷重とそのときの変形率の関係を表-3.3.2 に示すが, どの土被りのケースのときにも変形率の値はあまり変わっていない. またどの土被り比の場合でも水位下地山のほうが乾燥地山より小さい変形率で最小支保荷重を示している.

表-3.3.2 最小支保荷重と変形率の関係 (上半降下式, 粘性土)

	土被り比 H/D	最小支保荷重時の 変形率 (%)	最小支保荷重 (kgf/cm ²)	Terzaghiの 式による 計算値 (kgf/cm ²)
乾燥地山	1.0	17.2	0.54	0.30
	2.0	19.6	0.30	0.36
	4.0	18.3	0.04	0.37
水位下地山	1.0	13.9	0.43	0.33
	2.0	12.8	0.10	0.27

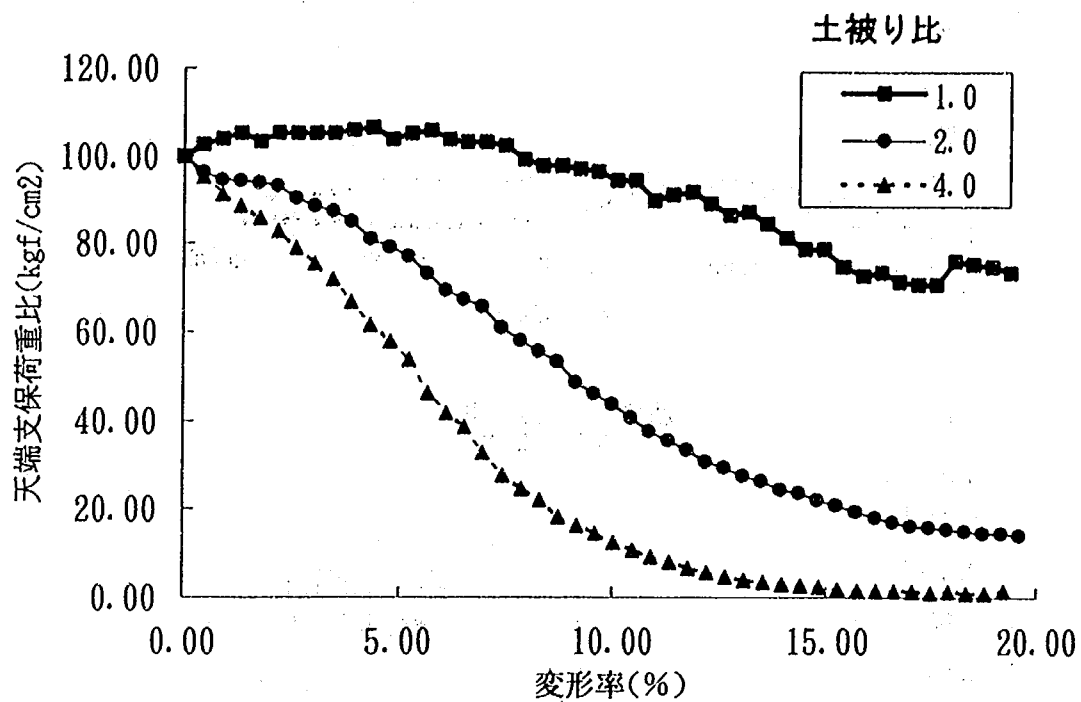


図-3.3.5 変形率と天端支保荷重比の関係（粘性土乾燥地山）

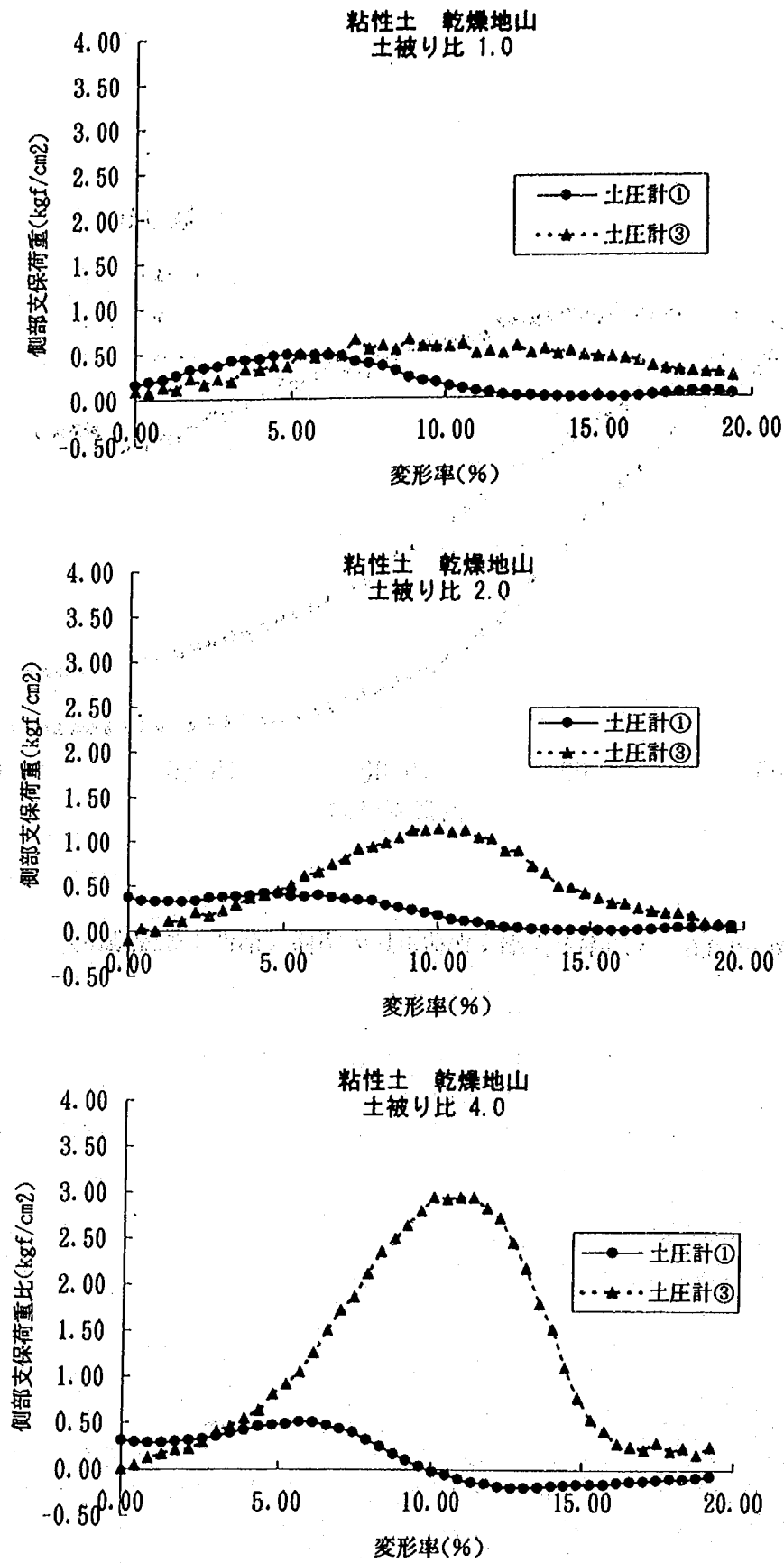


図-3.3.6 変形率と側部支保荷重比の関係（粘性土乾燥地山）

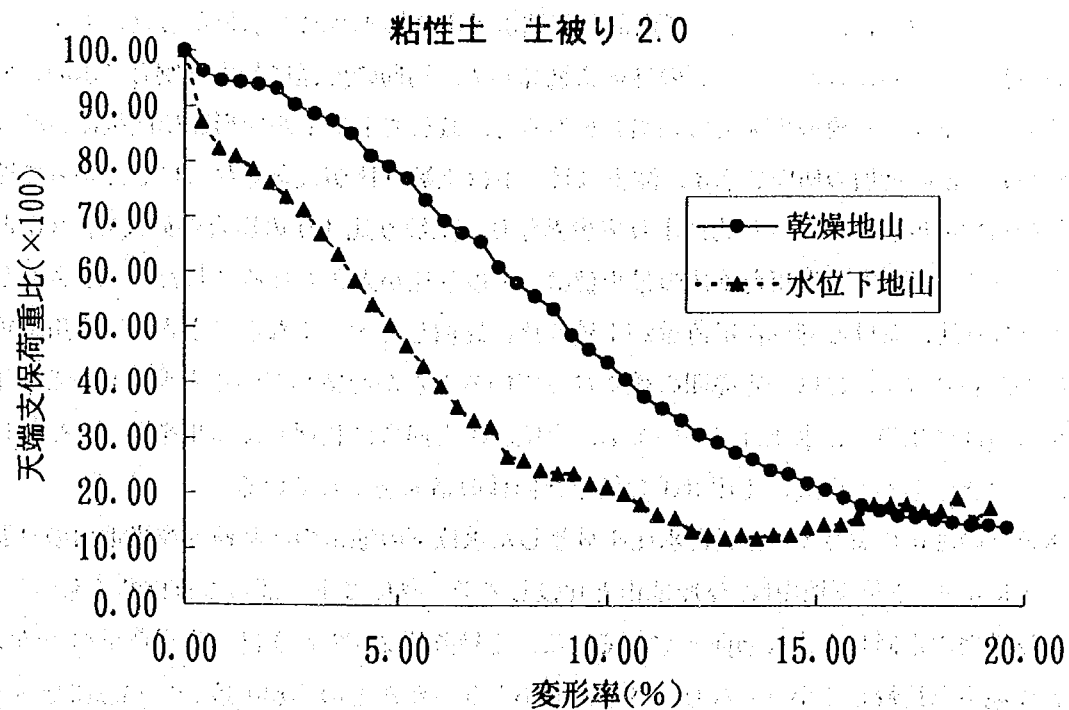
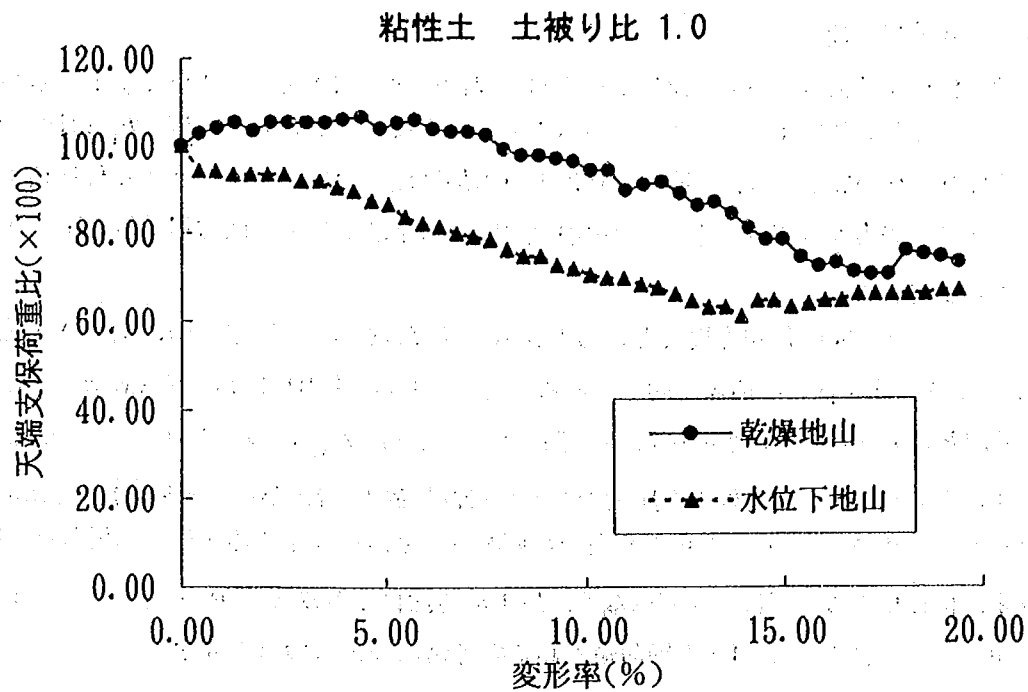


図-3.3.7 変形率と天端支保荷重比の関係 (粘性土乾燥地山と水位下地山の比較)

2) ゴムチューブ式模型実験

トンネル模型に作用する荷重のうち、水圧計の取扱いは次のように考えた。実験ではトンネル内の水に発生する圧力 P_w が圧力センサにより求まるが、ゴムチューブを薄肉円筒と考えれば、 P_w は図-3.3.8 に示すように計測位置の静水圧 $Nh \gamma_w$ (N : 遠心加速度と重力加速度との比, γ_w : 水の単位体積重量) と、膨張したゴムチューブの張力 σ_θ に釣り合うための圧力 P_E 、およびトンネルに作用する土圧(作用荷重) P_c の和と考えることができる。

ここで P_E については、80G 加速度場におけるトンネル(ゴムチューブ)内の水の体積 V_w と P_E との関係が、1G における V_w と P_E との関係と同一であると考え、1G の重力場における V_w と P_E の関係を示す曲線と、各変形段階のトンネル内の水の体積から求めた。また $Nh \gamma_w$ についてはトンネルはほぼ真円を保ちながら変形すると考え、トンネル外径と圧力センサの設置位置との関係から計算によって求めた。このようにして求まる P_E 、 $Nh \gamma_w$ を P_w から差し引いた値をトンネルに作用する土圧(作用荷重) P_c と考えた。

ただしトンネルに作用する土圧は一樣ではなく、以上の方法により求まる P_c はトンネルに作用する土圧の一種の平均値と考えられるため、 P_c の絶対値としての評価は今後の検討を要する。

(a) 砂質土地山について

乾燥地山において、掘削前の土被り厚 H と、トンネル外径 D_o との比 H/D_o (以降「土被り比」と言う) が 1.0, 2.0, 4.0 の場合の、各実験ケースにおけるトンネル変形率 ε と作用荷重比の関係を図-3.3.9 に示す。ここでトンネル変形率 ε は、ゴムチューブ内部の初期水量より排水された水量からゴムチューブ内に残っている水量を算出し、さらにゴムチューブの外径に換算して、初期の外径に対する割合で求めた値である。この図の土圧計①(トンネル模型の天端に相当)をみると、概してトンネル変形開始直後に急激な天端作用荷重の減少が現れ、後の増加の傾向を示す。減少スピードは土被り比が大きくなるにしたがって速くなっている。その後の増加の度合いは土被り比により多少異なり、土被り比 1.0 の場合が最大で、2.0 と 4.0 は大差無い結果となっている。また作用荷重比の最小値は、土被り比が大きくなるにしたがい小さくなっている。これは、各土被り比における初期作用荷重が土被り比に比例して大きくなることと、作用荷重の最小値が土被り比にかかわらず、ほぼ一定範囲の値になっていることが影響していると考えられる。土圧計②(トンネル模型の肩部に相当)と水圧計についても、土圧計①と同様に整理した結果を図-3.3.10 に示すが、値に多少のばらつきはあるものの、土圧計①の結果と同様の傾向を示している。

つぎに水位下の地山における、土圧と水圧を分離した水位下の地山の計測値と乾燥地山の計測値との比較を図-3.3.11 に示す。水位下地山は、乾燥地山と比較してデータに多少のばらつきはあるものの土被り比 1.0 のときは、乾燥地山と同じような傾向となっている。土被り比 2.0 のときは、作用荷重率の値が最小となる変形率が乾燥地山と比較して小さくなり、さらに最小となったあとの増加の度合いが急になっている。土被り比の 4.0 でも、は作用荷重比の値の最小値が乾燥地山よりも大きくなっている。土圧計②と水圧計についても、土圧計①と同様に整理した結果を図-3.3.12, 3.3.13 に示すが、土圧①の結果と同様、いったん減少した作用荷重が最小値となった後増加している。

水位下地山の場合、最小作用荷重と変形率の関係をみると(表-3.3.3)、どの土被り比の場合でも、水位下地山のほうが乾燥地山より比較的小さい変形率で最小作用荷重を示す傾向を示している。いいかえれば、

水位下地山の場合は土被り比が大きくなるにしたがい急激に荷重が減少し、その後ゆっくりと最小値に向かって減少していく傾向がある。

表-3.3.3 最小支保荷重と変形率の関係（ゴムチューブ式、砂質土）

地山条件	土被り比 H/D	最小作用荷重 時における 変形率 (%)	最小作用荷重 (土圧計①) (kgf/cm^2)	Terzaghiの式 による計算値 p_v (kgf/cm^2)
自然乾燥地山	1.0	3.884	0.174	0.299
	2.0	4.946	0.173	0.367
	4.0	3.868	0.157	0.392
水位下地山	1.0	1.539	0.149	0.126
	2.0	1.565	0.087	0.161
	4.0	2.943	0.195	0.176

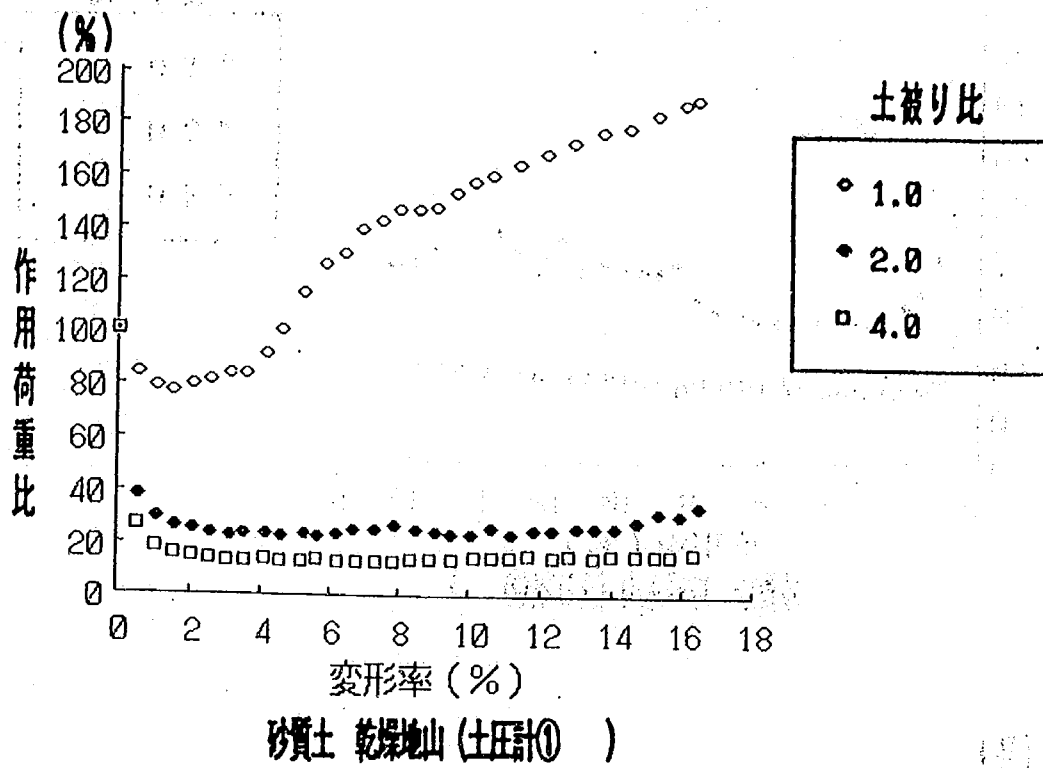


図-3.3.9 変形率と天端支保荷重比の関係 (砂質土, 乾燥地山)

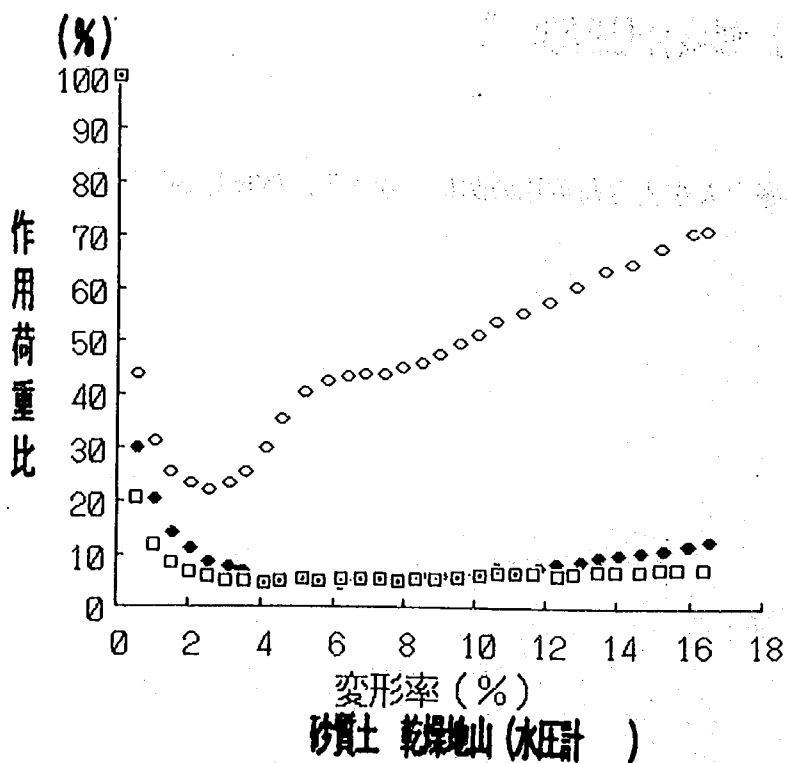
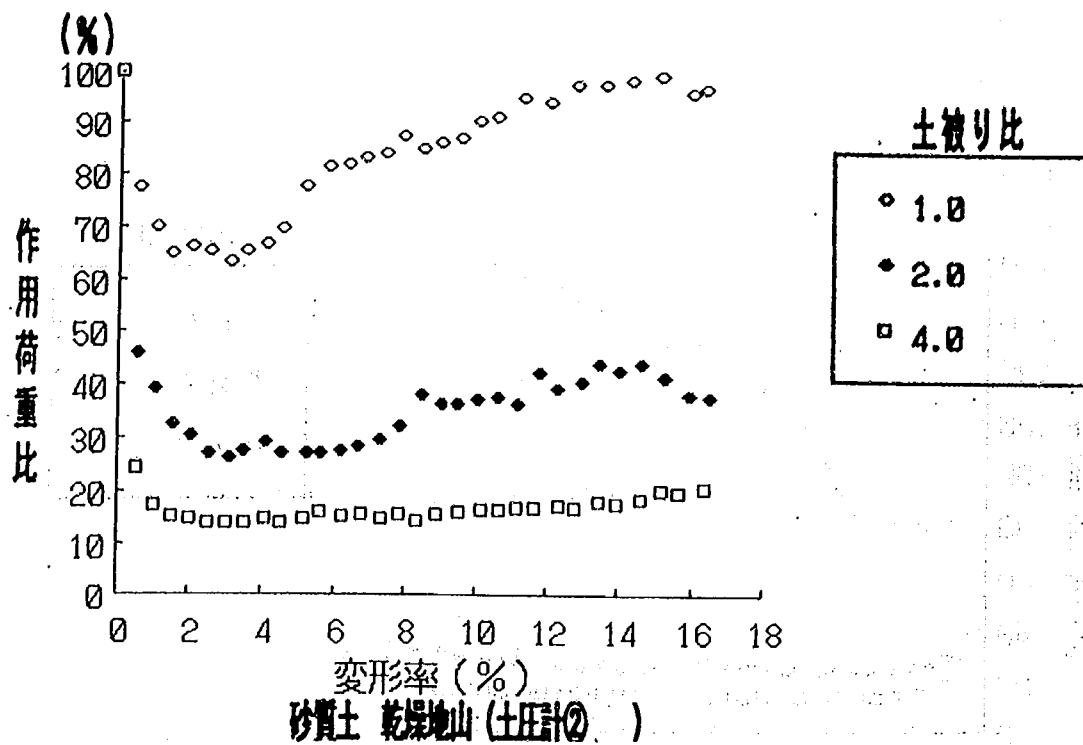


図-3.3.10 変形率と作用荷重比の関係 (砂質土, 土圧計② (側部支保荷重) と水圧計)

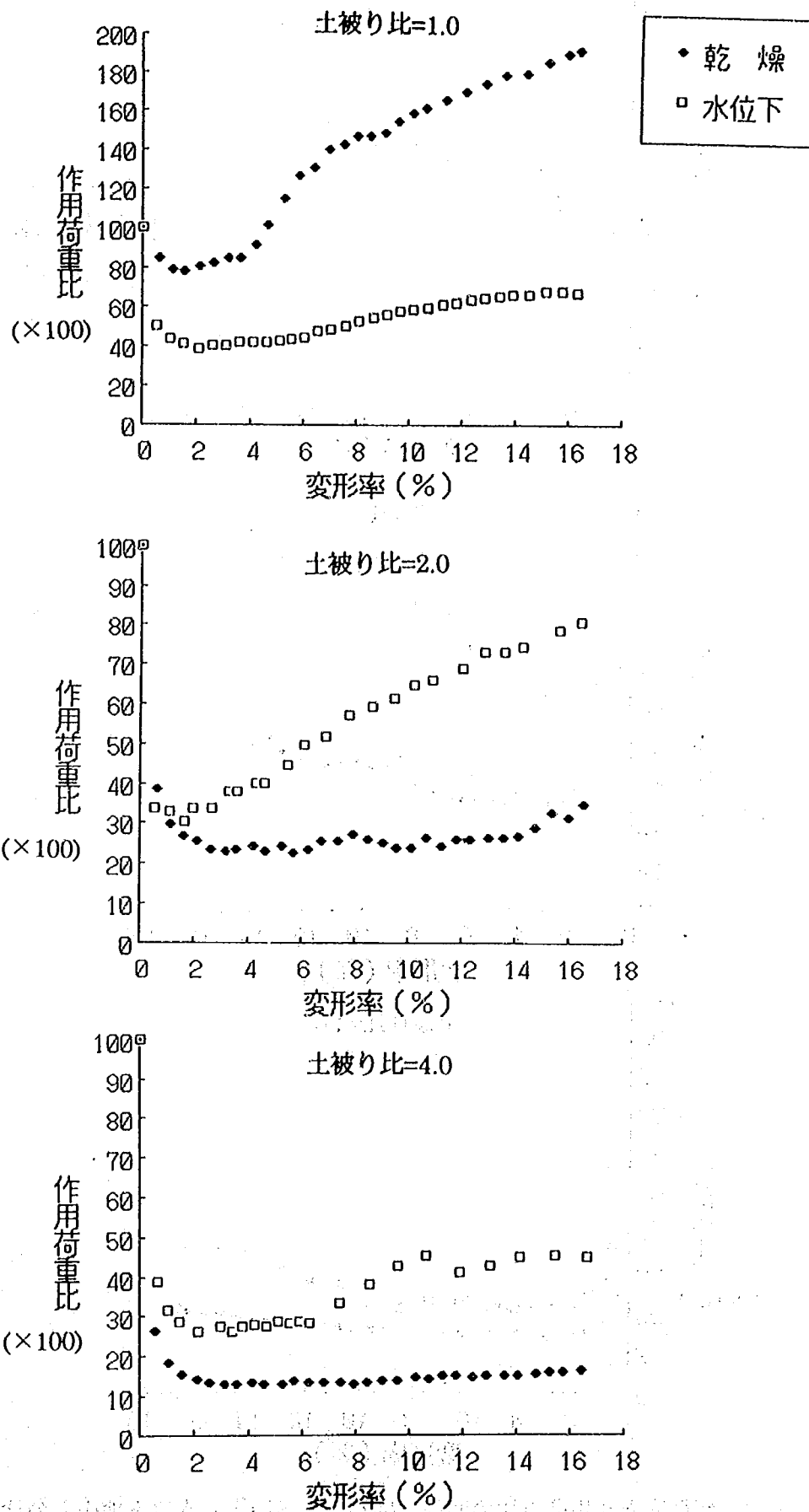


図-3.3.11 変形率と天端支保荷重比の関係 (砂質土乾燥地山と水位下地山との比較)

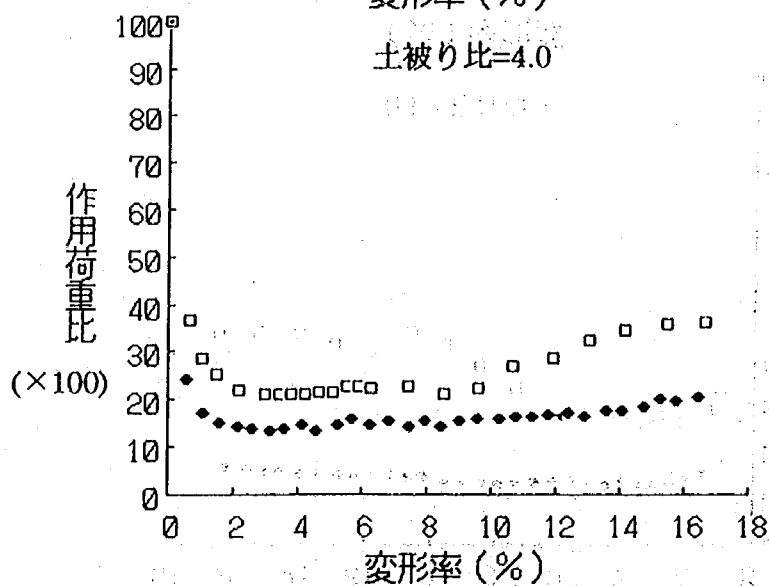
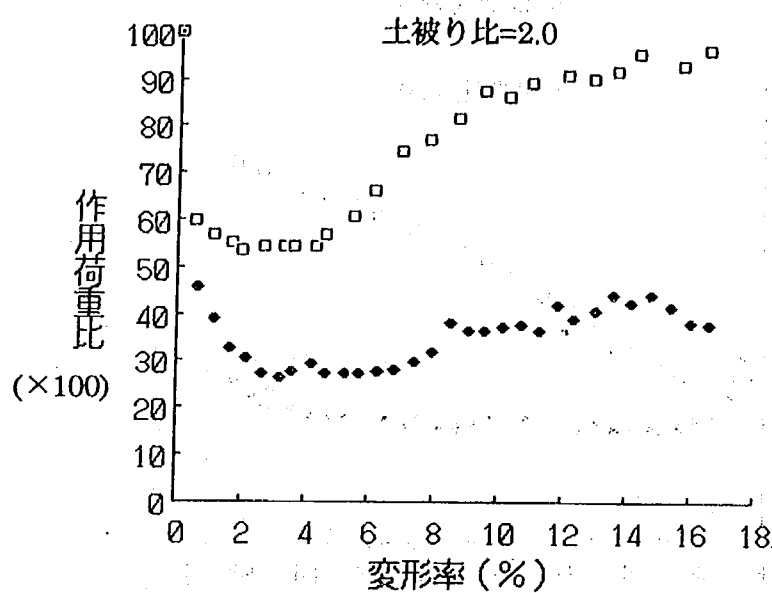
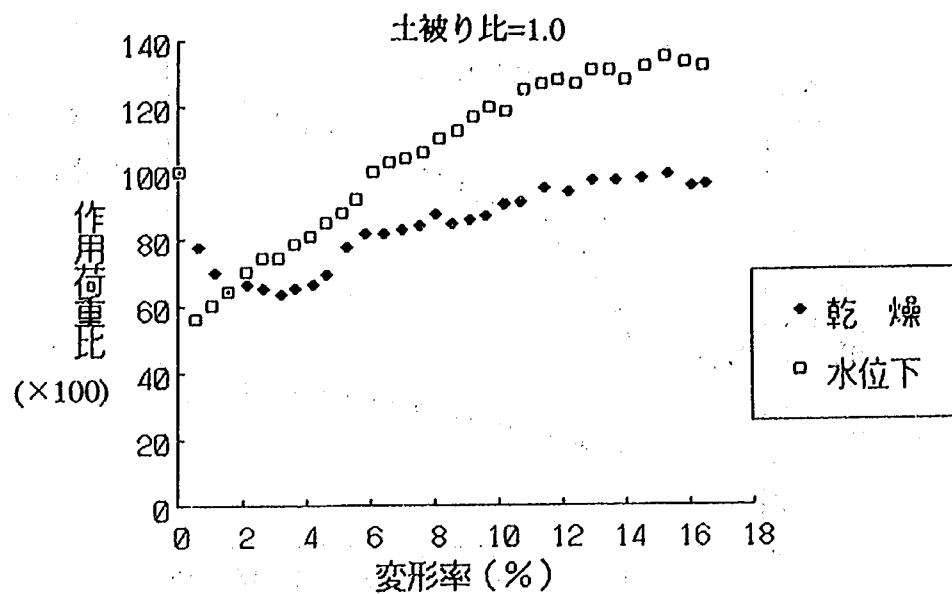


図-3.3.12 変形率と作用荷重比の関係(砂質土乾燥地山と水位下地山との比較,
土圧計②(側部支保荷重))

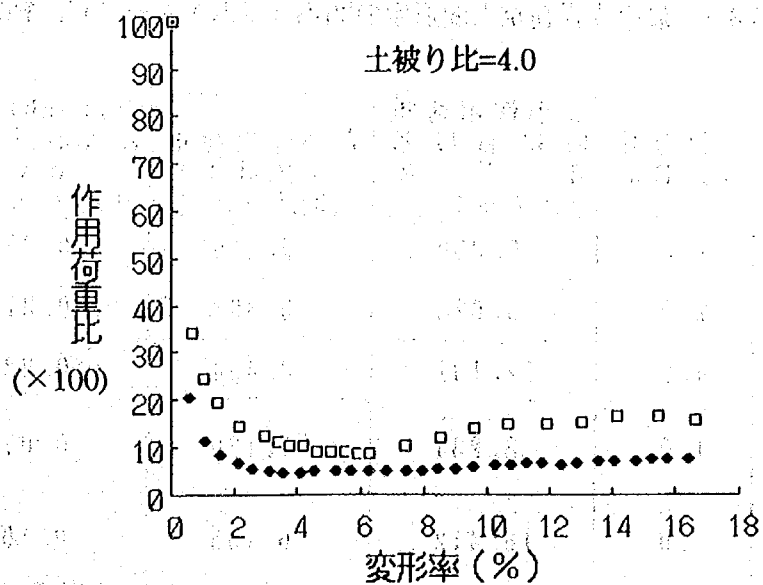
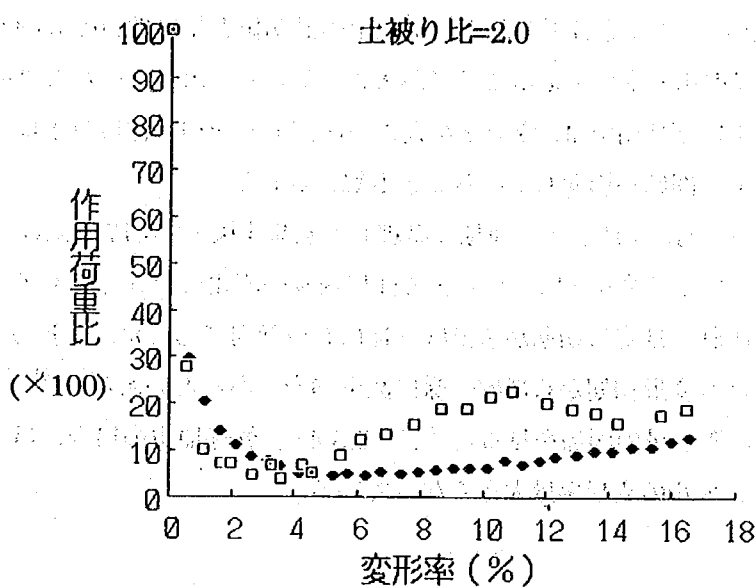
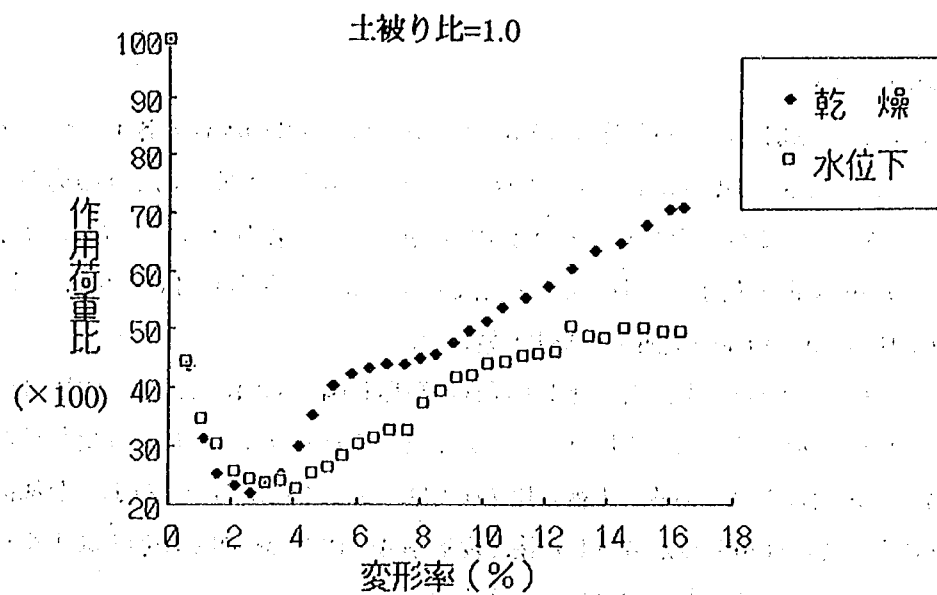


図-3.3.13 変形率と作用荷重の関係(砂質土乾燥地山と水位下地山との比較, 水圧計)

(b)粘性土地山について

乾燥地山において掘削前の土被り比 (H/D_0) が 1.0, 2.0, 4.0 の場合の各実験ケースにおける, トンネル変形率 ε と作用荷重比の関係を示したものを図-3.3.14 に示す. 土被り比 1.0 の場合, 変形率 5%程度で作用荷重比は 60%ぐらいで最小となり, その後増加に転じた. 土被り比 2.0 の場合, 変形率 5%程度で作用荷重比は 30~40%の範囲で最小となり, その後増加に転じた. 土被り比 4.0 の場合, 変形率 10%程度付近までは作用荷重比は 20~30%の範囲まで減少を続けた.

土圧計②, 水圧計についても, 土圧計①と同様に整理し図-3.3.15 に示す. 水圧計については, 土圧計①と似たような傾向を示している. 土圧計②については, 土被り比 1.0 では, 作用荷重が減少後増加勾配が土圧計①の場合と比較して急である. 土被り比 2.0 では, データにばらつきはあるが傾向としては似ている. 土被り比 4.0 のときは作用荷重が減少した後, 変形率 4~12%の範囲で増加と減少を繰り返し, それ以降は増加しているためデータの信頼性は低いと考えられる.

水位下地山について, 土圧と水圧を分離した水位下地山の計測値と乾燥地山の計測値とを比較したものを図-3.3.16 に示すが, 乾燥地山と水位下地山で結果が大きく異なり, 両者にはかなりの差が見受けられる. しかし, 土被り比=1.0 の水位下地山では, 変形率が大きい区間でも初期の作用荷重以上の土圧が計測されていることから, 計測装置上の問題が影響していることも想定される.

土圧計②, 水圧計についても, 土圧計①と同様に整理した結果を図-3.3.17 および 3.3.18 に示すが, 土被り比 1.0 のとき, 土圧計①では変形率 5%ぐらいまで作用荷重の変化は小さく, その後減少増加を繰り返しているが, 土圧計②と水圧計では変形初期からほぼ一様に減少傾向であった. 土被り比 2.0 の場合も, 土圧計①, 土圧計②, 水圧計とも変形初期からほぼ一様に減少傾向であるといえる.

一方, 最小値作用荷重と変形量の間係を見ると(表-3.3.4), 乾燥地山の場合には土被り比の増加にしたがって最小荷重を示すトンネルの変形率は大きくなっている.

表-3.3.4 最小支保荷重と変形率の関係(ゴムチューブ式, 粘性土)

地山条件	土被り比 H/D_0	最小作用荷重 時における 変形率 (%)	最小作用荷重 (土圧計①) (kgf/cm^2)	Terzaghiの式 による計算値 p_v (kgf/cm^2)
自然乾燥地山	1.0	5.080	0.419	0.289
	2.0	5.623	0.307	0.370
	4.0	12.101	0.454	0.388
水位下地山	1.0	8.234	0.120	-0.076
	2.0	16.412	0.155	-0.103

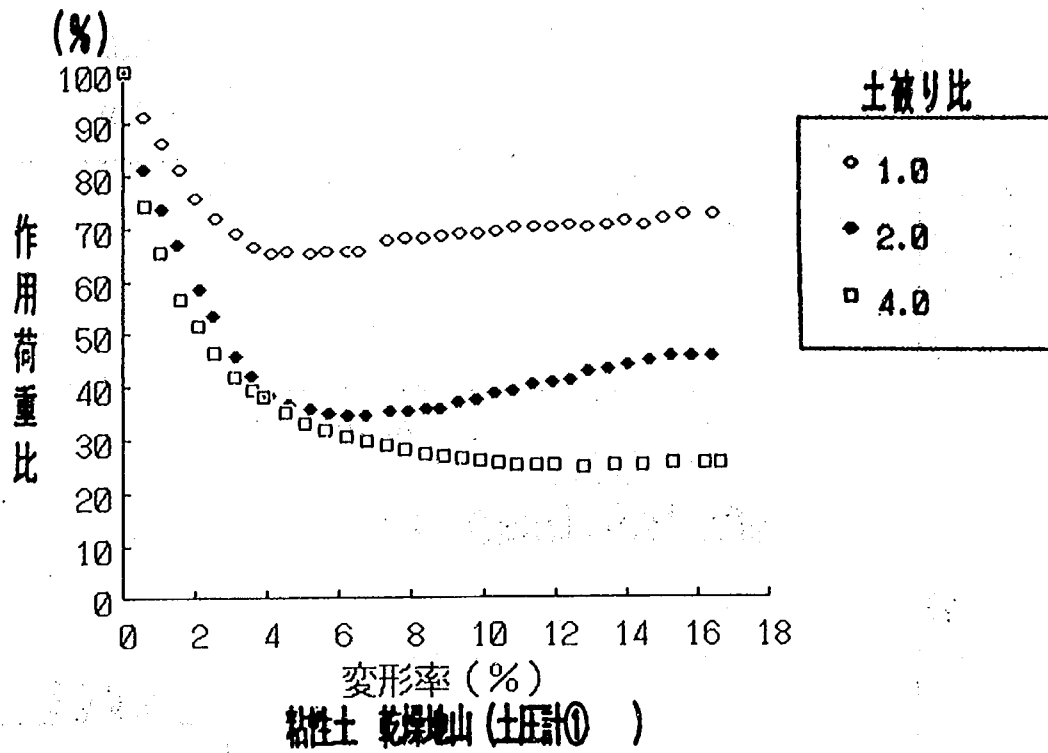


図-3.3.14 変形率と天端支保荷重比の関係 (粘性土, 乾燥地山)

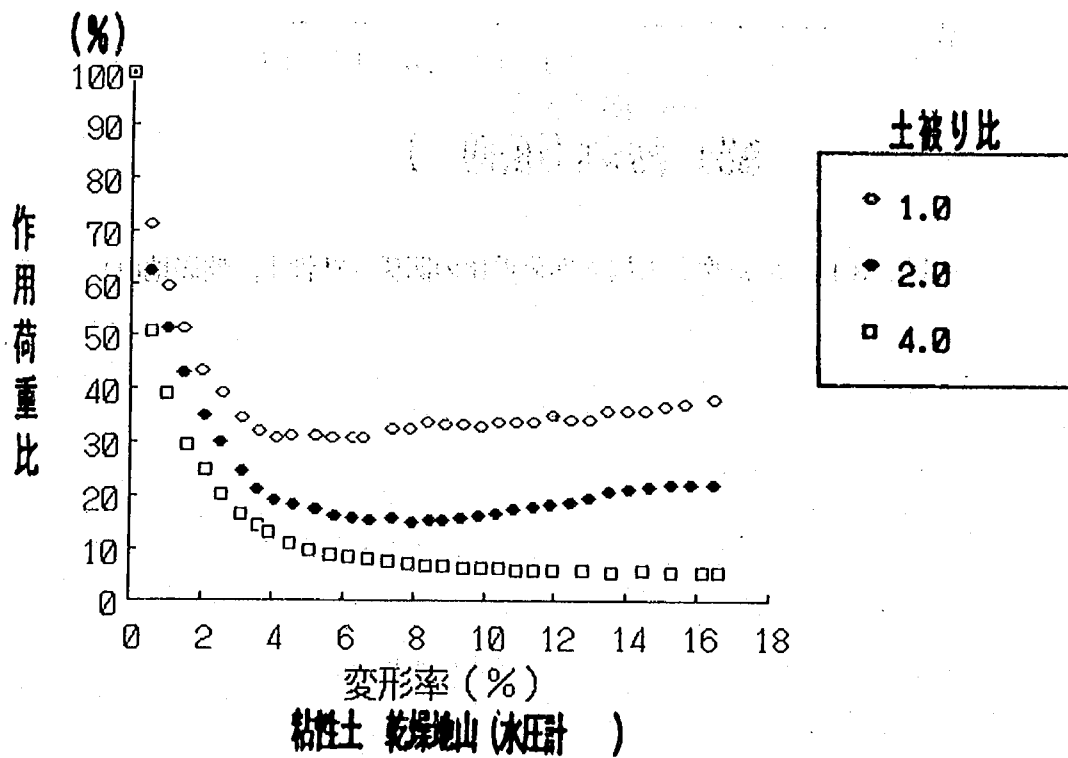
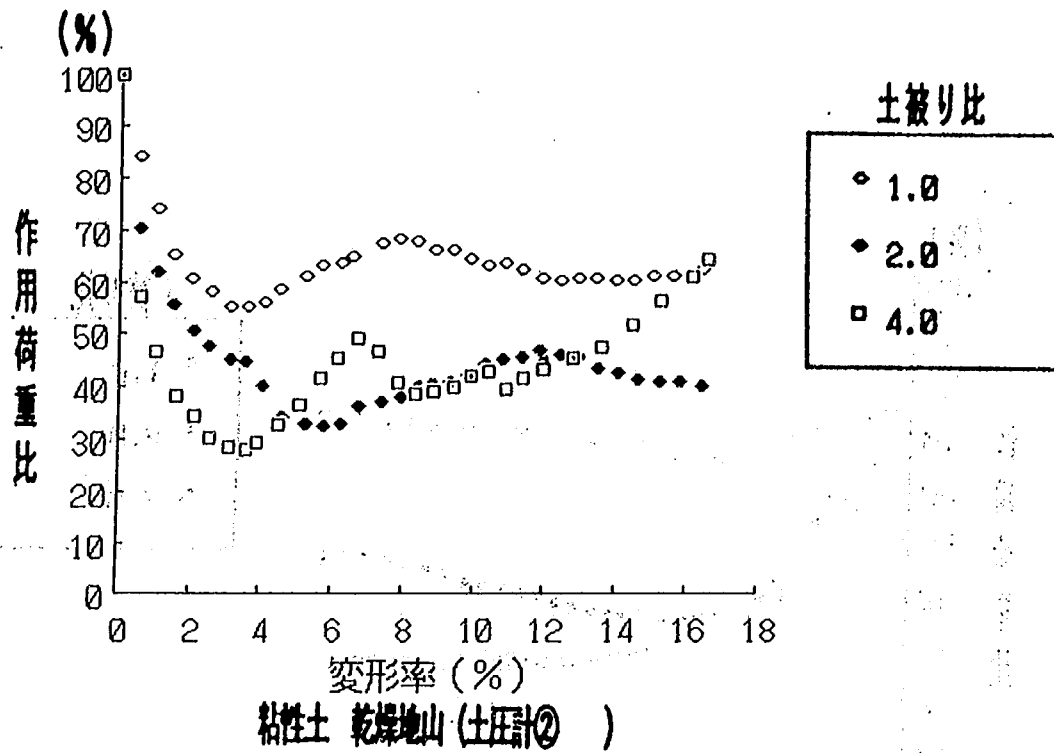


図-3.3.15 変形率と作用荷重比の関係 (粘性土, 土圧計② (側部支保荷重) と水圧計)

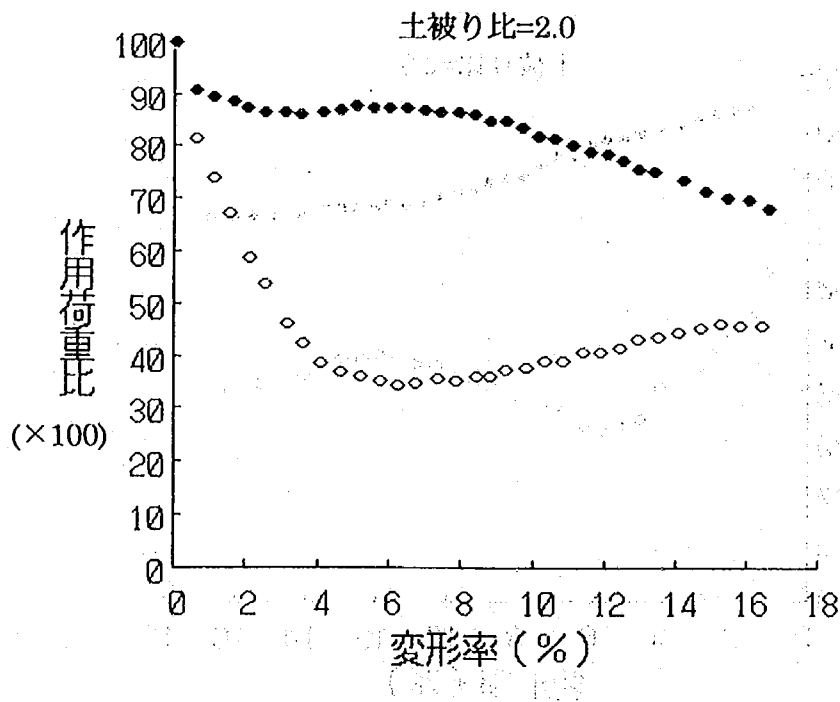
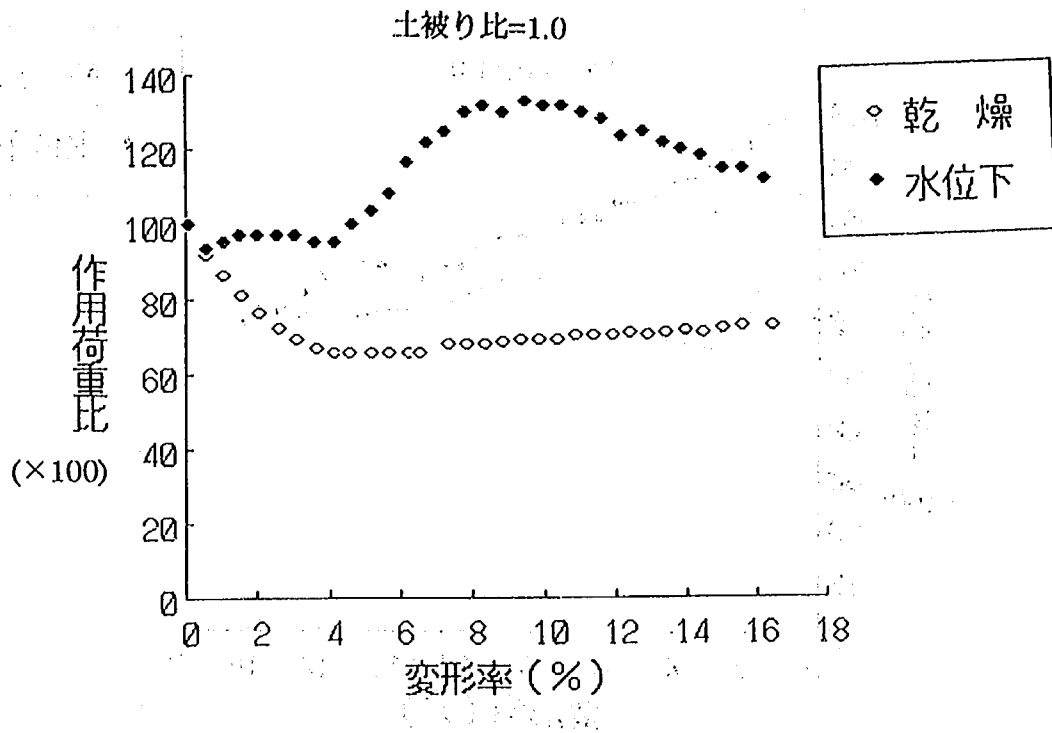


図-3.3.16 変形率と天端支保荷重比の関係 (粘性土乾燥地山と水位下地山との比較)

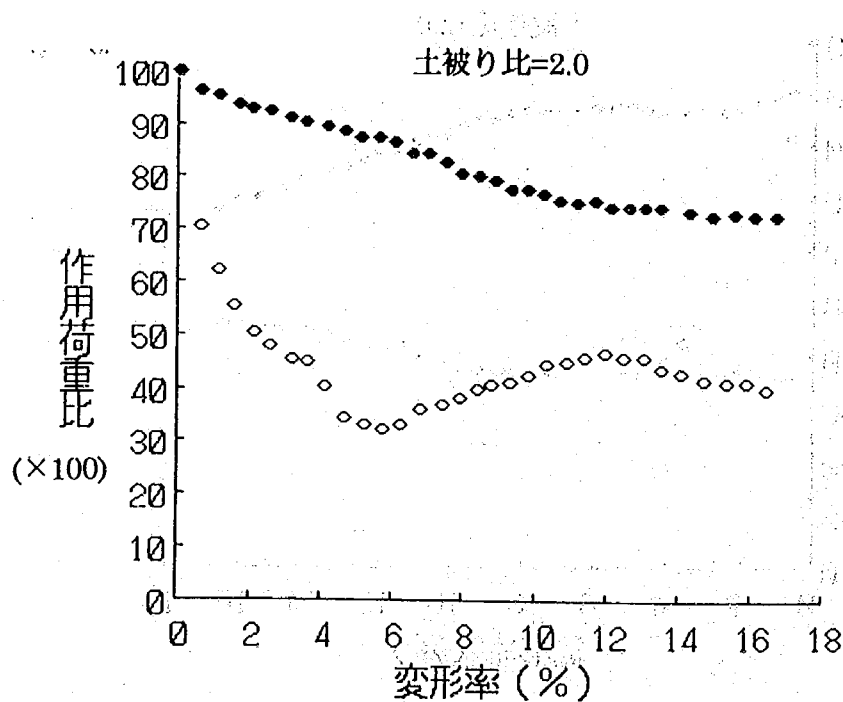
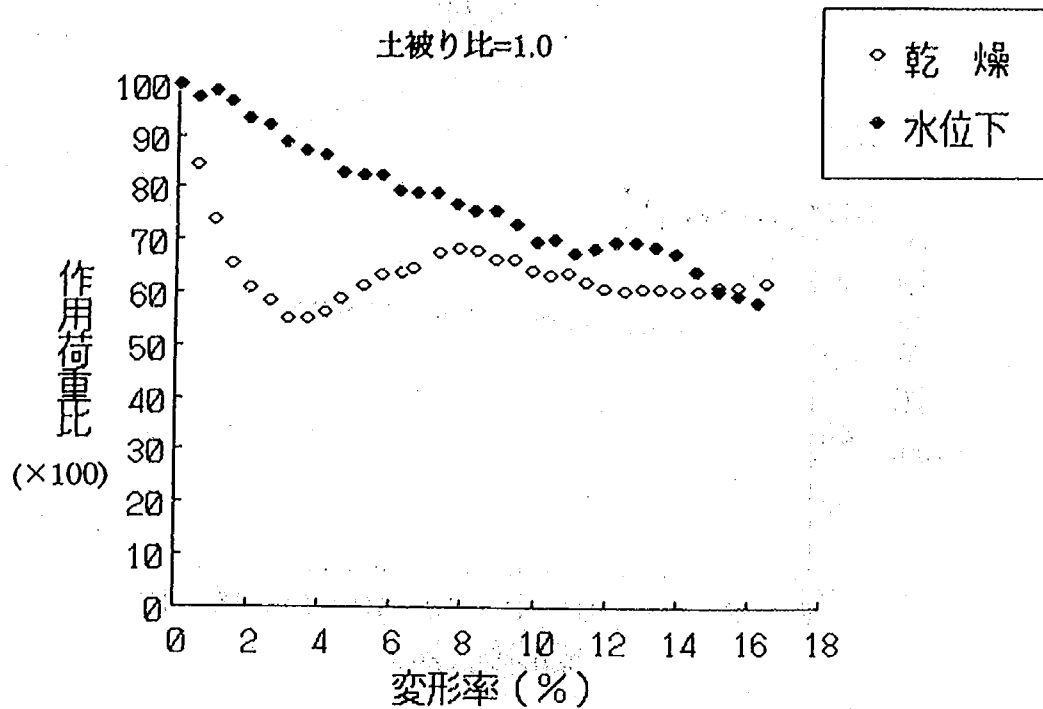


図-3.3.17 変形率と作用荷重比の関係（粘性土乾燥地山と水位下地山との比較，
土圧計②（側部支保荷重））

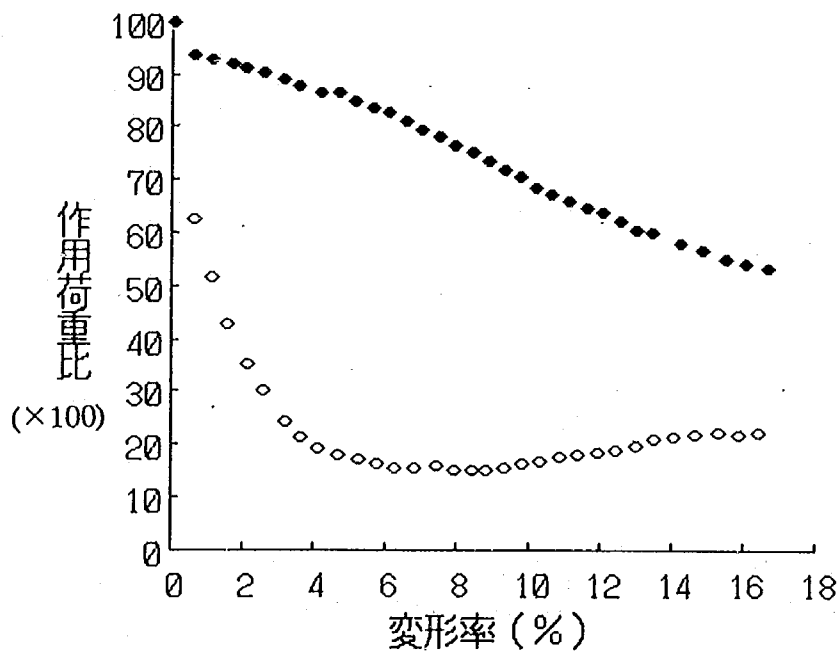
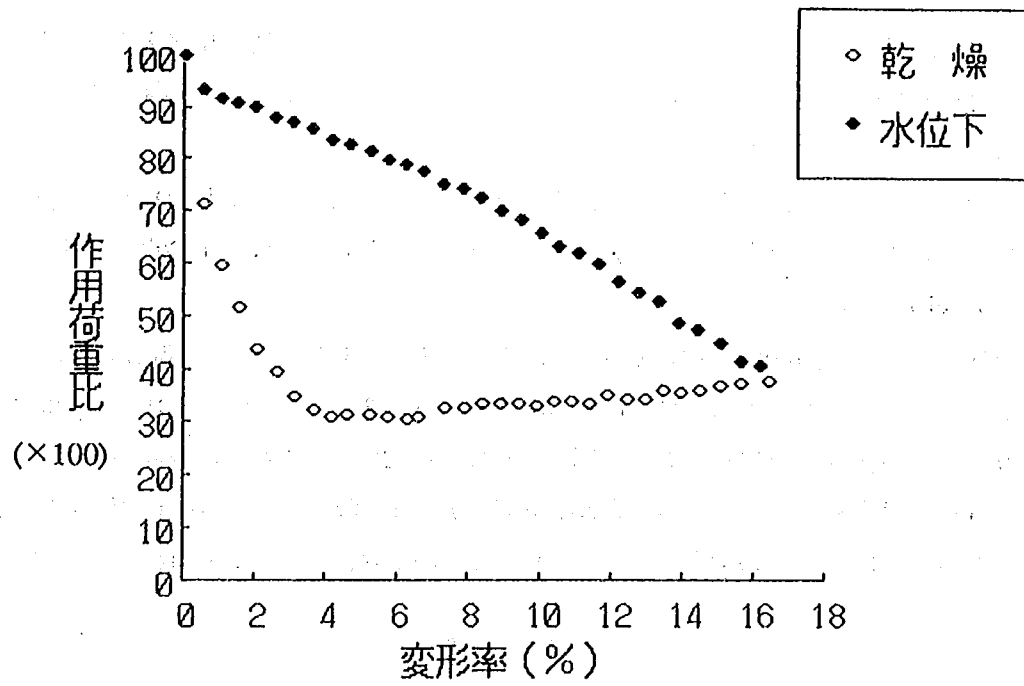


図-3.3.18 変形率と作用荷重の関係（粘性土乾燥地山と水位下地山との比較，水圧計）

(2) 考 察

降下式模型実験、ゴムチューブ式模型実験でともにいえることは、土被り比が大きくなればなるほど変形率と天端作用荷重の関係を表す曲線の減少勾配は大きくなることと、土被り比に関わらず天端作用荷重の最小値はほぼ同じであることである。

土被り比に関わらず天端に作用する荷重の最小値は同じであることは、落し戸模型実験の考察でも述べたように、最小支保荷重の値は村山ら³⁾が述べた3つの領域のうちの領域-Iの自重によって決定されるということからも説明される。

また最小支保荷重は Terzaghi の土圧式から算定できるのでこれについて比較検討した。降下式模型実験における土被り比、最小支保荷重および Terzaghi の土圧式との関係を図-3.3.19, 3.3.20 に、ゴムチューブ式模型実験における同様に整理したものを図-3.3.21, 3.3.22 に示すが、Terzaghi の土圧式で求めた計算結果と最小支保荷重はよく整合していることがわかる。ただしゴムチューブ式模型実験の土被り比2.0のときに、Terzaghi の土圧式の計算結果がマイナスとなっているが、これは地山が緩まないことを意味している。

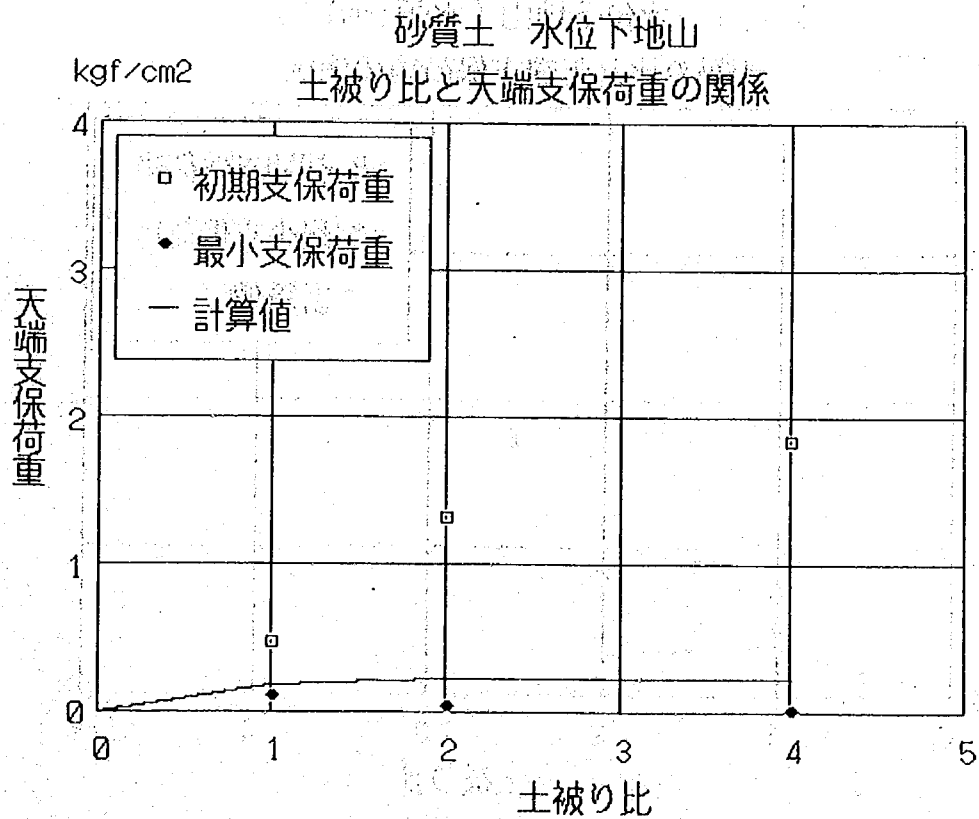
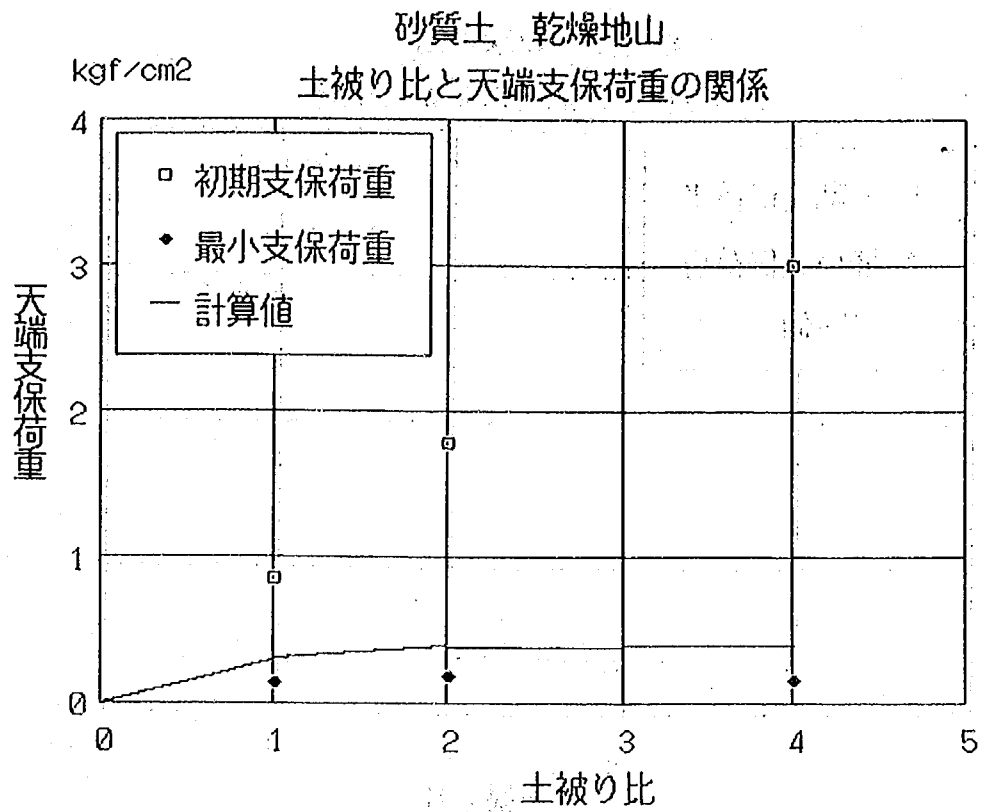


図-3.3.19 土被り比と天端支保荷重の関係（上半降下式砂質土，実験値と計算値との比較）

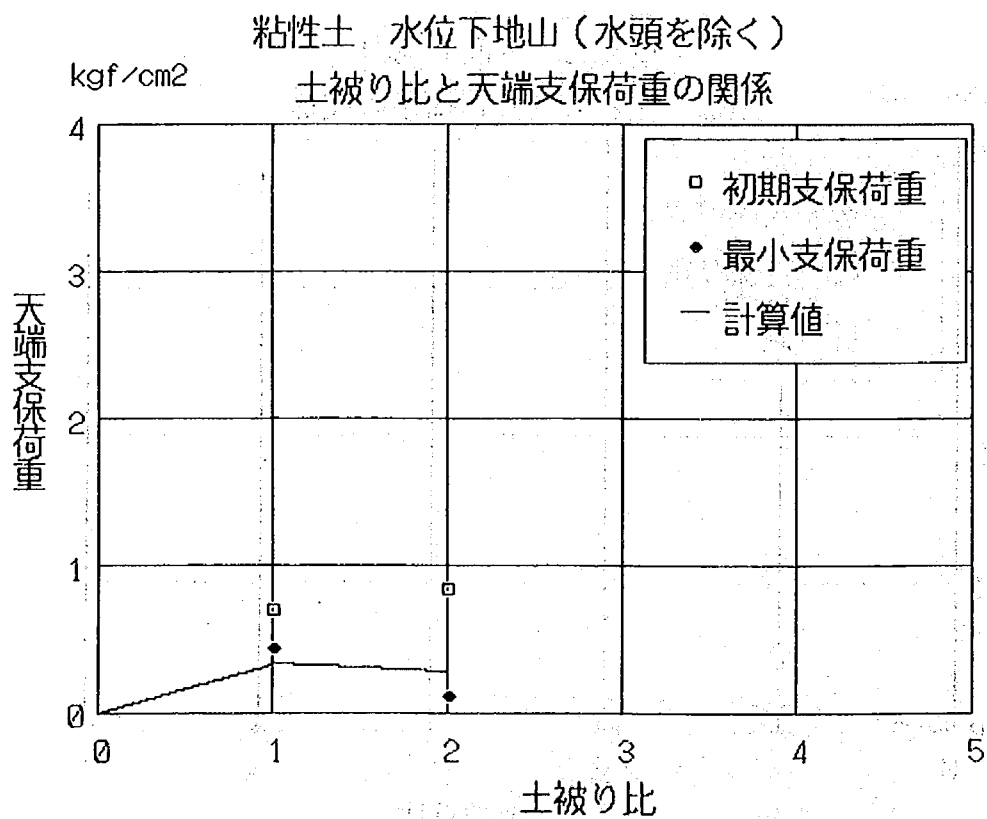
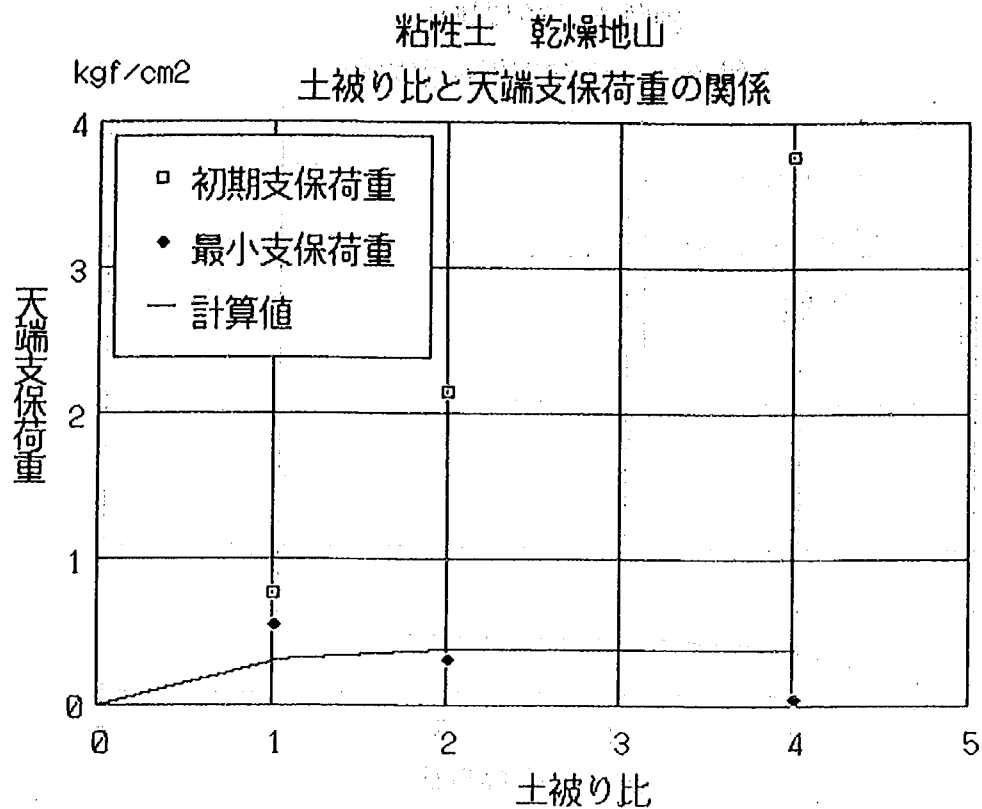


図-3.3.20 土被り比と天端支保荷重の関係（上半降下式粘性土，実験値と計算値との比較）

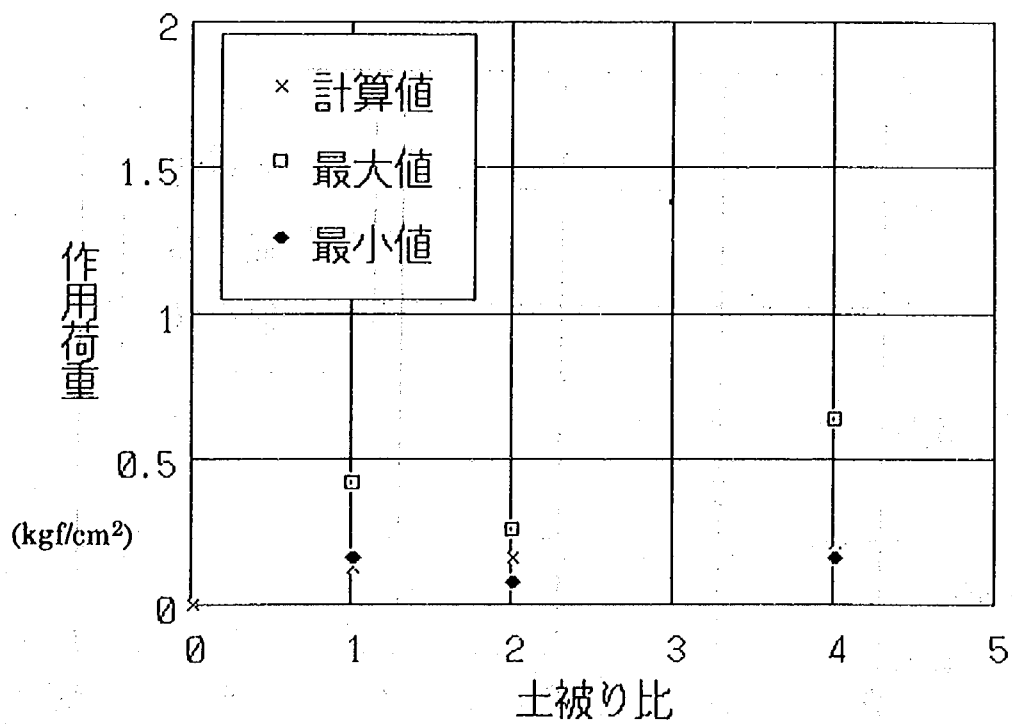
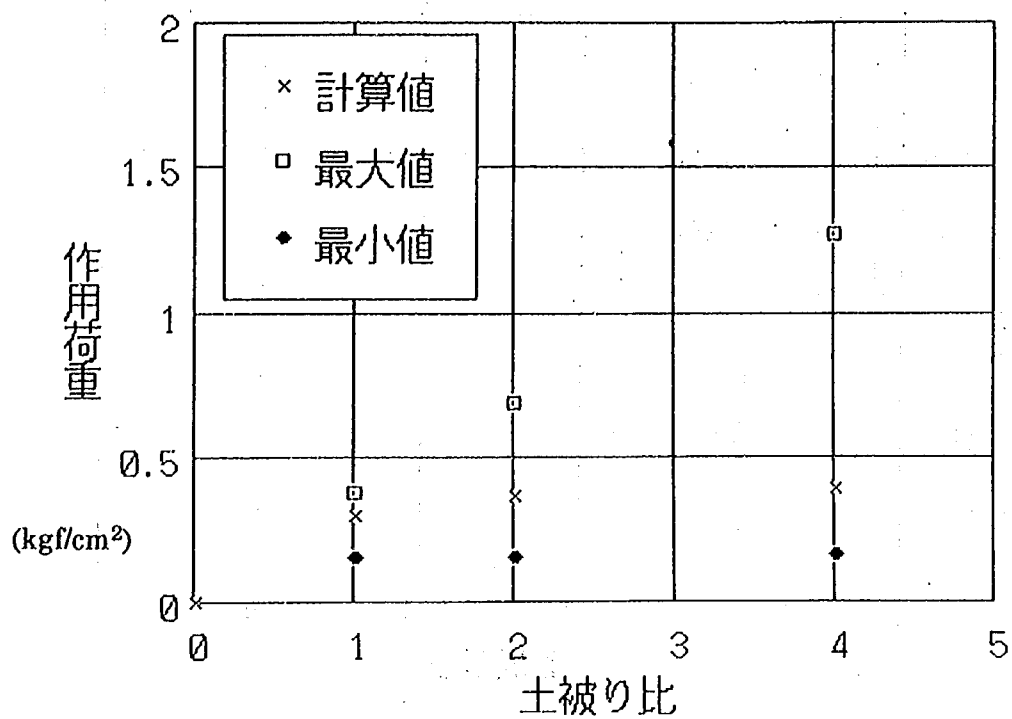


図-3.3.21 土被り比と天端支保荷重の関係（ゴムチューブ式砂質土，実験値と計算値との比較）

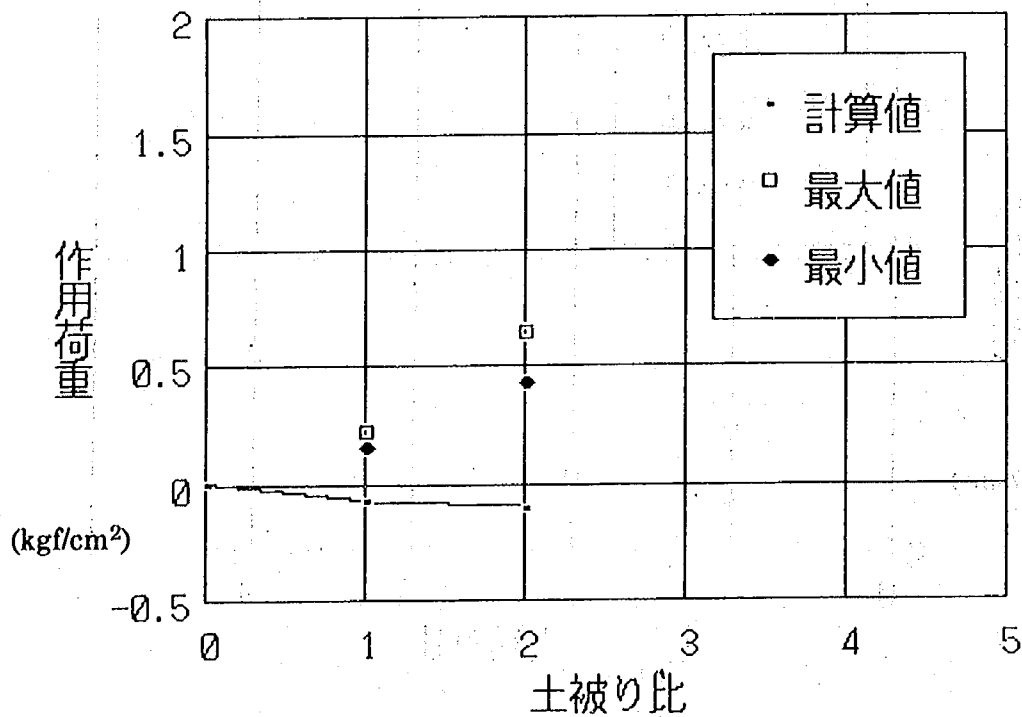
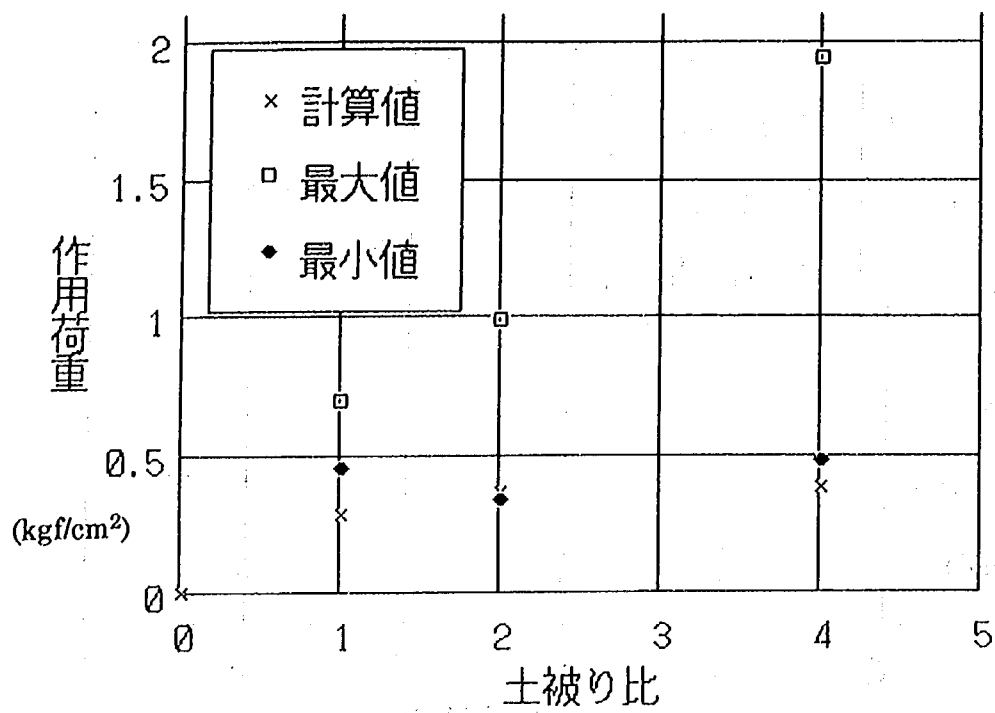


図-3.3.22 土被り比と天端支保荷重の関係 (ゴムチューブ式粘性土, 実験値と計算値との比較)

3.3.2 周辺土圧について

(1) 実験結果

1) 上半降下式模型実験

(a) 砂質土地山について

図-3.3.23~3.3.25 に乾燥地山のトンネル周辺土圧の初期値からの変化を、各土被り比ごとにトンネル中心の距離（各土圧計）で整理したものを示す。この図によると土被り比4.0の場合を除いてトンネル近傍に荷重の増加が集中しておこり、離れるにしたがって土圧の増加は小さくなっている。また土被り比が小さい1.0や2.0のケースの土圧のなかには土圧が減少に転じているものもある。土被り比4.0においては、降下初期の段階ではトンネルに最も近い土圧計④の土圧が急激に増加するものの、途中より減少し再度増加している。二番目に近い土圧計⑥も降下初期の段階で増加している。また土圧計⑥、⑦もゆるやかではあるが、同様に増加している。上記現象の原因については、降下初期段階ではトンネル近傍に荷重の増加が集中しているが、土圧の集中が大きいため破壊し残留分を受け持つようになり、この差分はその外側の地山でもつようになるということも考えられるが、他の実験ケースにおいてあまりその傾向がみられないものがあることから、一概に言及できない。

水位下地山では、降下量と支保荷重の関係の場合と同様に、土圧に及ぼす水位下の影響は認められないので、水位の影響は静水圧のみと考え、初期土圧を0としてその後の変化をみることにする。水位下地山の周辺土圧を整理したものを図-3.3.26~3.3.28に示すが、トンネル近傍の土圧計④で急激な荷重の増加が見られ、他の土圧計ではゆっくりとした荷重の増加しか見られない。これは支保荷重の減少分が応力の再配分でトンネル近傍に集中する傾向が顕著にでているものと考えられる。土被り比1.0のケースでは、トンネルより一番離れた土圧計⑦が増加して他の土圧計はあまり増加の傾向はみられない。これは土圧計のセットの仕方に問題があることも考えられる。また図-3.3.29に、トンネル上部の降下スピードを6倍程度速くした実験ケースの結果を示すが、変位速度を速くしたために、トンネル周辺へ土圧の再配分がおこなわれなかったことが想定される結果が得られたことから、トンネル変形に伴う周辺への土圧の再配分を考える場合は、トンネルの変形スピードも考慮する必要があると思われる。

(b) 粘性土地山について

乾燥地山の周辺土圧（初期値からの変化）を整理したものを図-3.3.30~3.3.32に示すが、土被り比にかかわらず砂質土に見られたようなトンネル近傍への極端な荷重の集中は見られず、トンネルからの距離に比例して緩やかな土圧の増加が見られる。

水位下地山については、水圧の影響は静水圧としてだけ考えることとし、初期水圧を0として整理した（図-3.3.33, 3.3.34に示す）が、土被り比1.0では、トンネル近傍の土圧計④に急激な荷重増加が見られ、他の土圧計はゆっくりと増加した。土被り比2.0では、降下初期の段階時はトンネルに最も近い土圧計④の土圧が急激に増加するものの、途中から横ばいになった。二番目に近い土圧計⑥にも増加傾向がみられる。

砂質土 乾燥地山 土被り比1.0

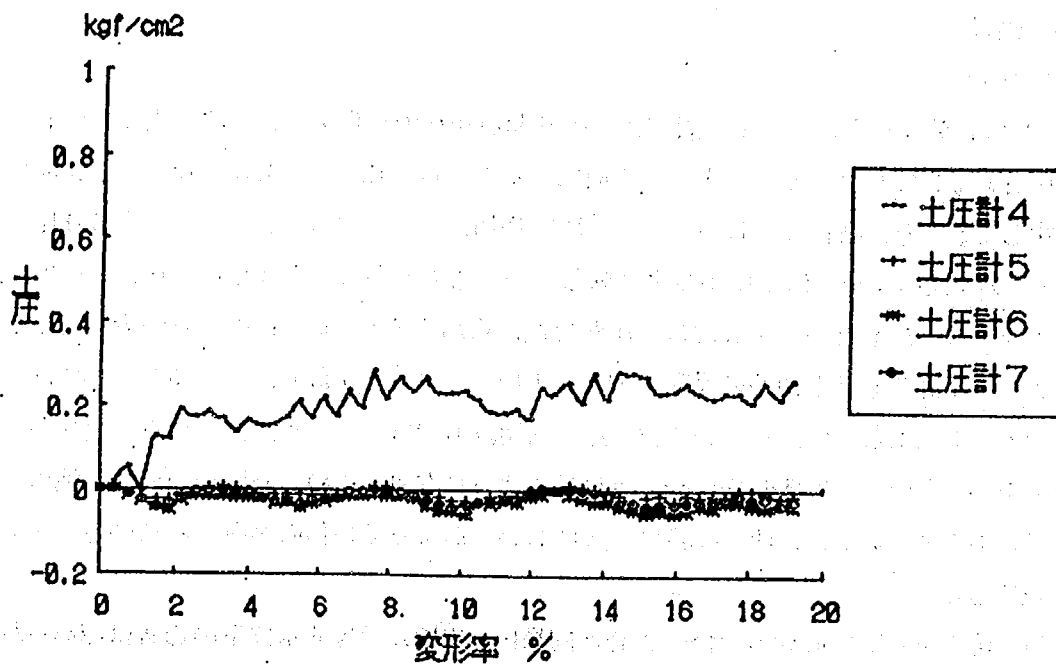


図-3.3.23 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土乾燥地山，土被り比=1.0）

砂質土 乾燥地山 土被り比2.0

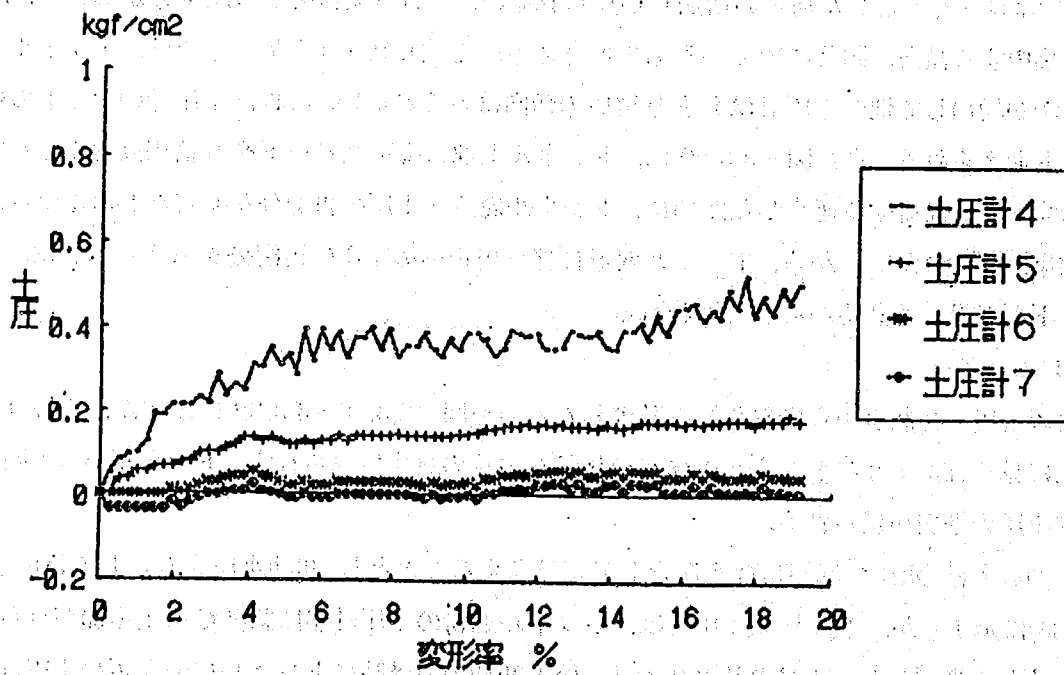


図-3.3.24 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土乾燥地山，土被り比=2.0）

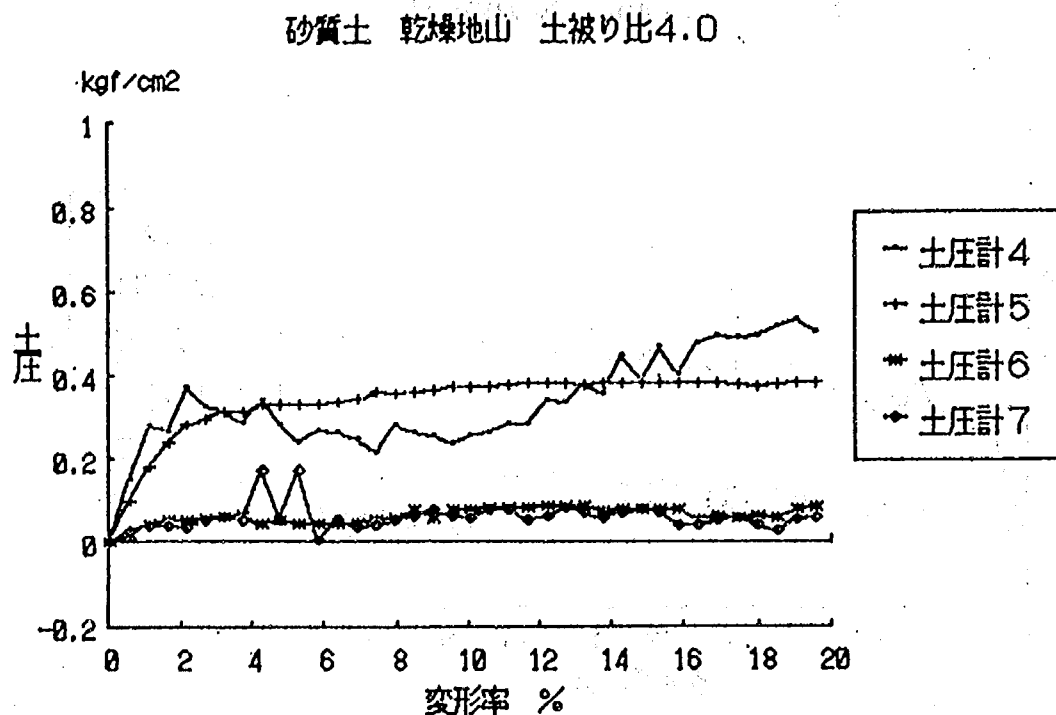


図-3.3.25 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土乾燥地山，土被り比=4.0）

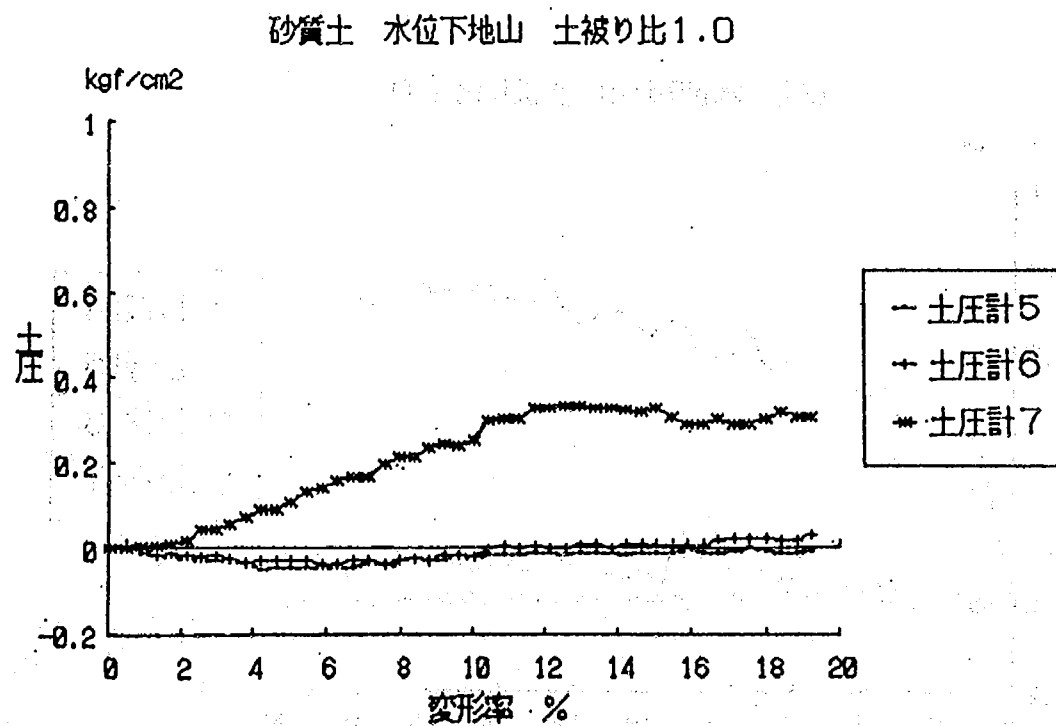


図-3.3.26 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土水位下地山，土被り比=1.0）

砂質土 水位下地山 土被り比2.0

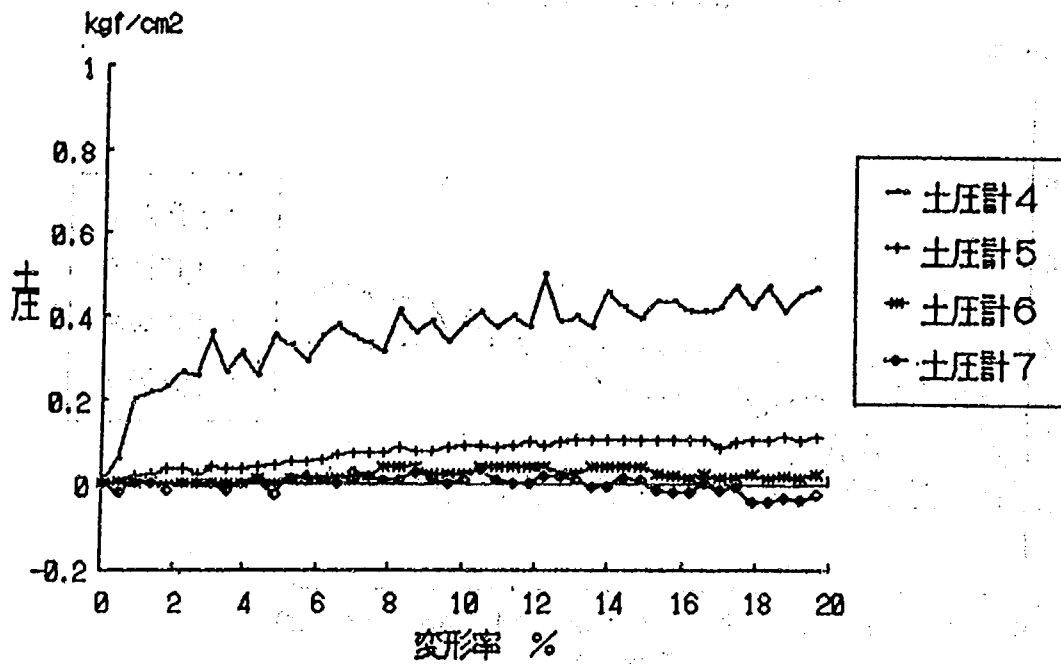


図-3.3.27 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土水位下地山，土被り比=2.0）

砂質土 水位下地山 土被り比4.0

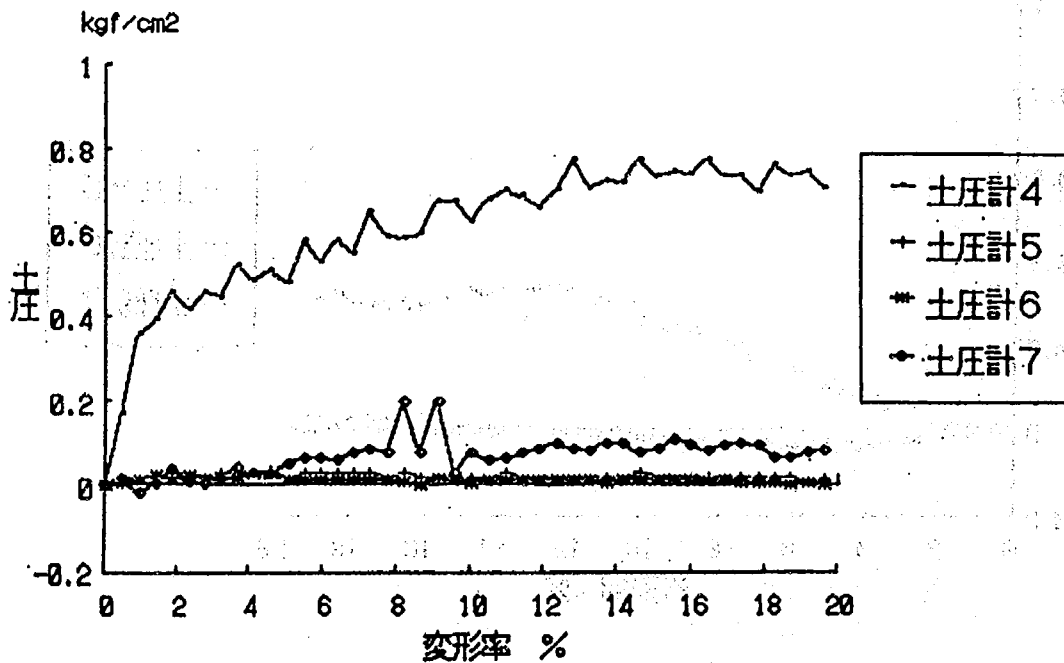


図-3.3.28 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土水位下地山，土被り比=4.0）

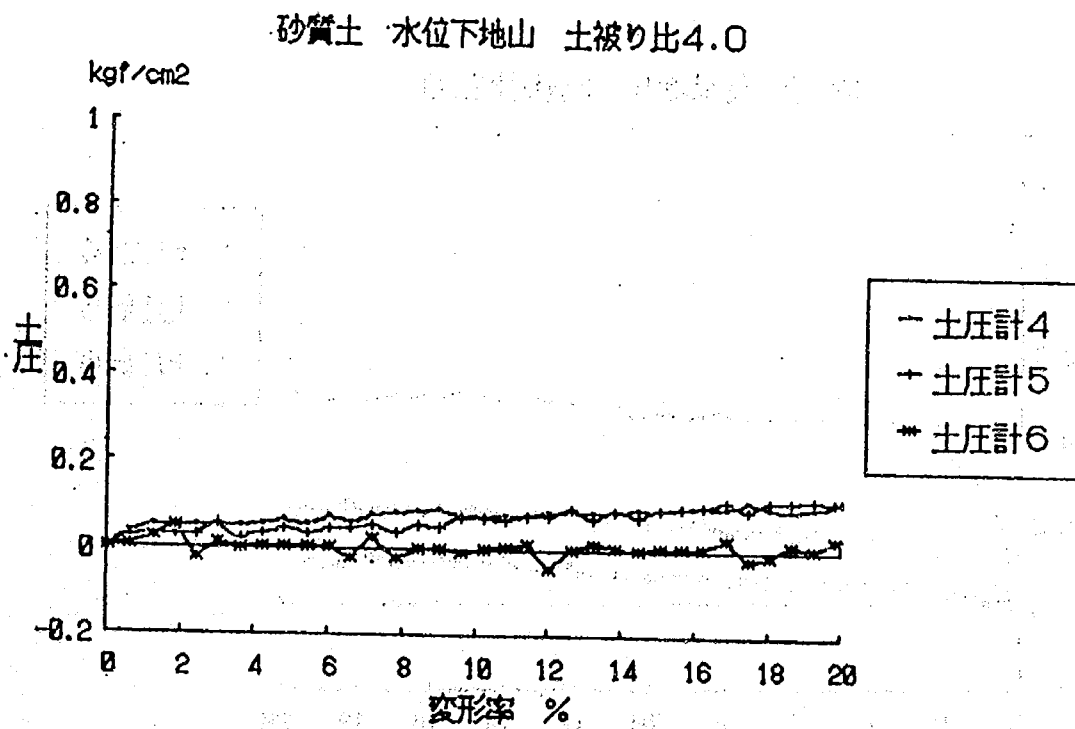
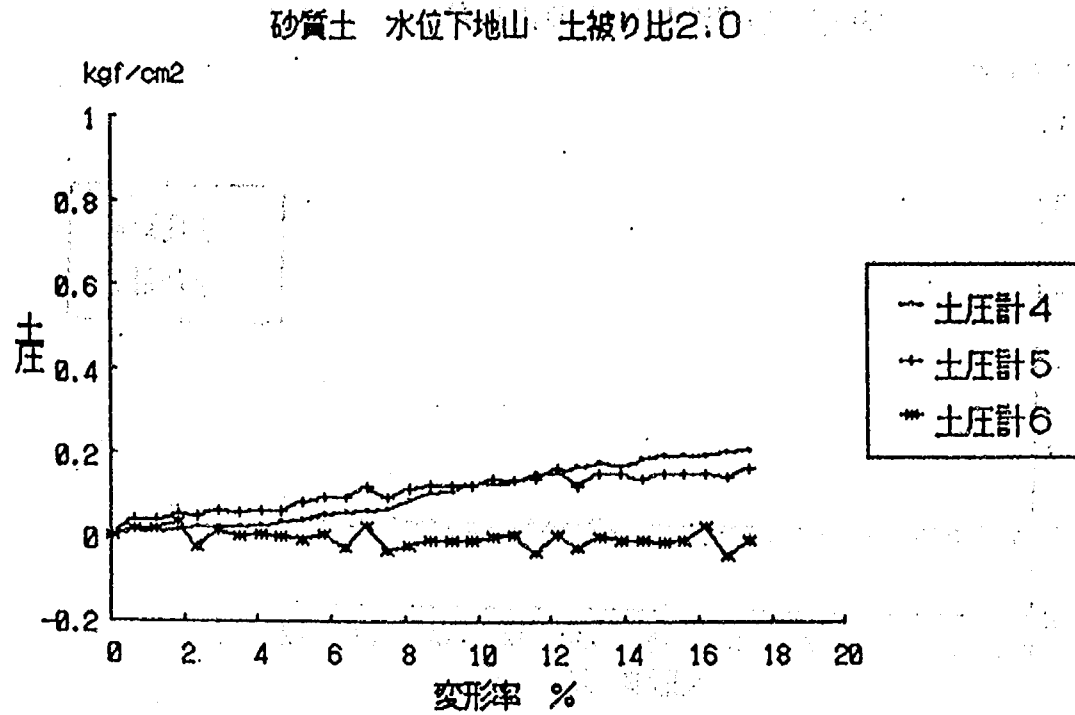


図-3.3.29 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，砂質土水位下地山，降下速度を速くした場合）

粘性土 乾燥地山 土被り比1.0

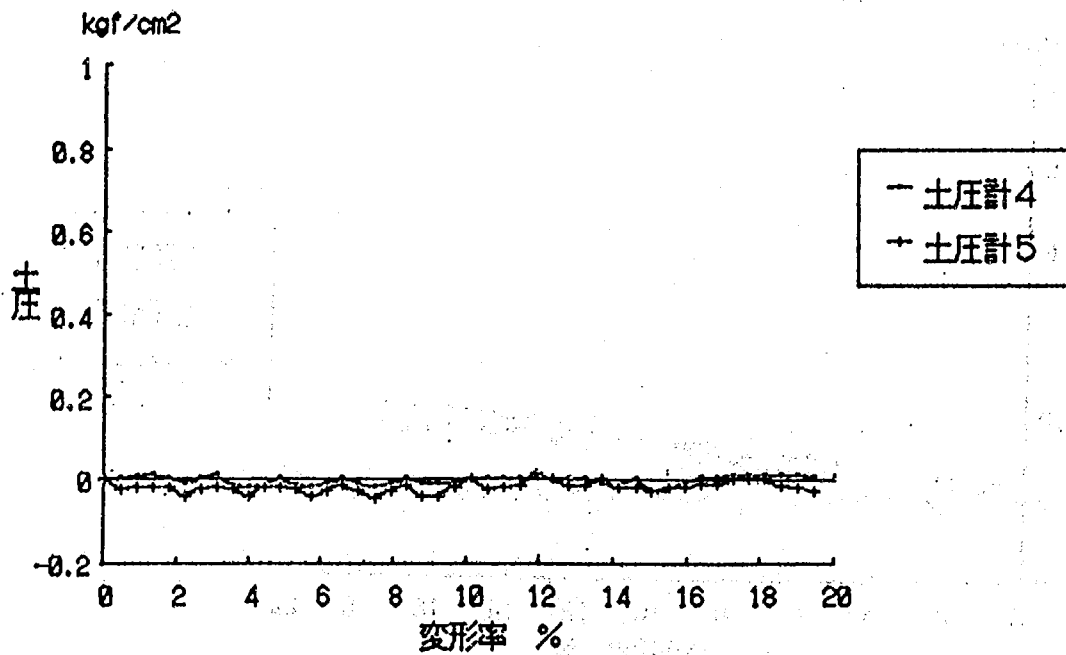


図-3.3.30 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，粘性土乾燥地山，土被り比=1.0）

粘性土 乾燥地山 土被り比2.0

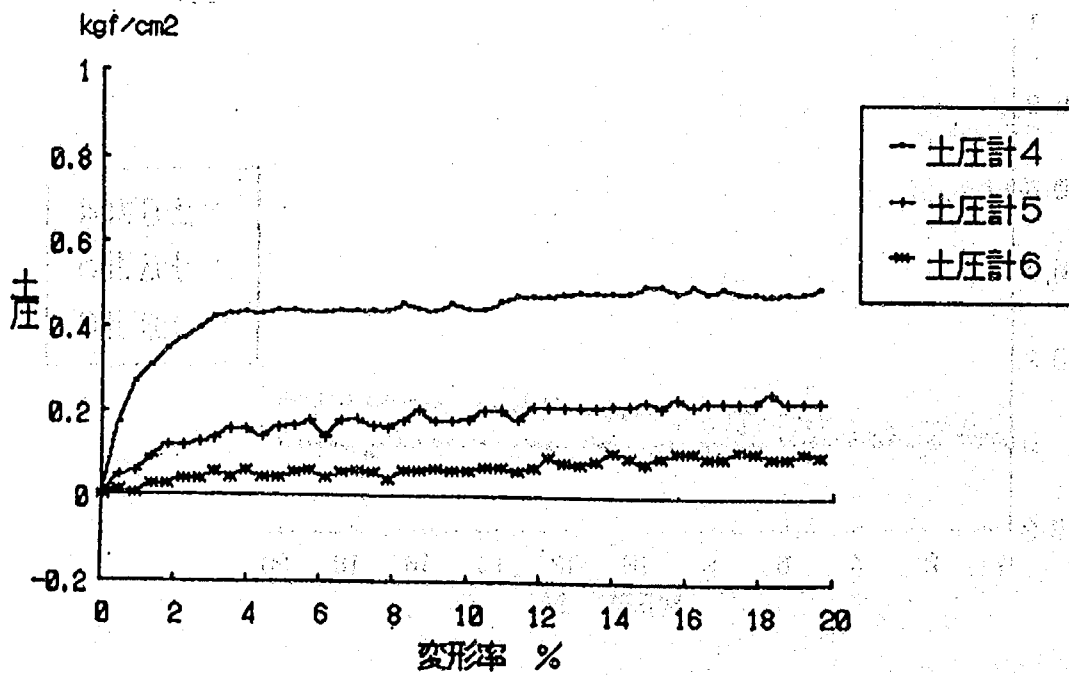


図-3.3.31 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，粘性土乾燥地山，土被り比=2.0）

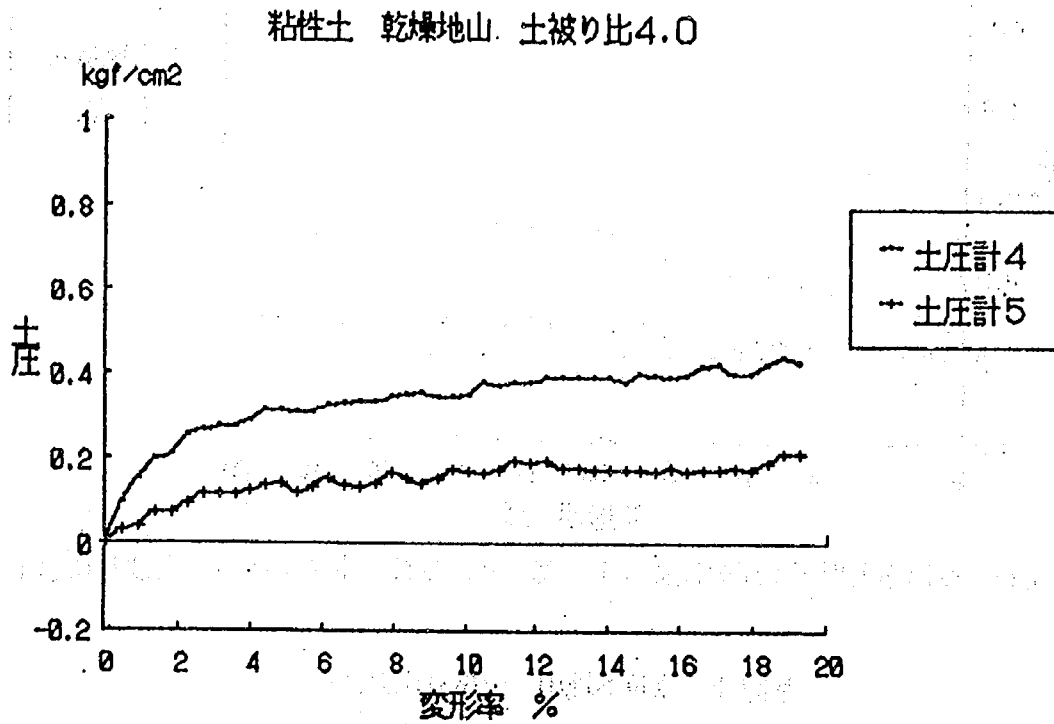


図-3.3.32 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，粘性土乾燥地山，土被り比=4.0）

粘性土 水位下地山 土被り比1.0

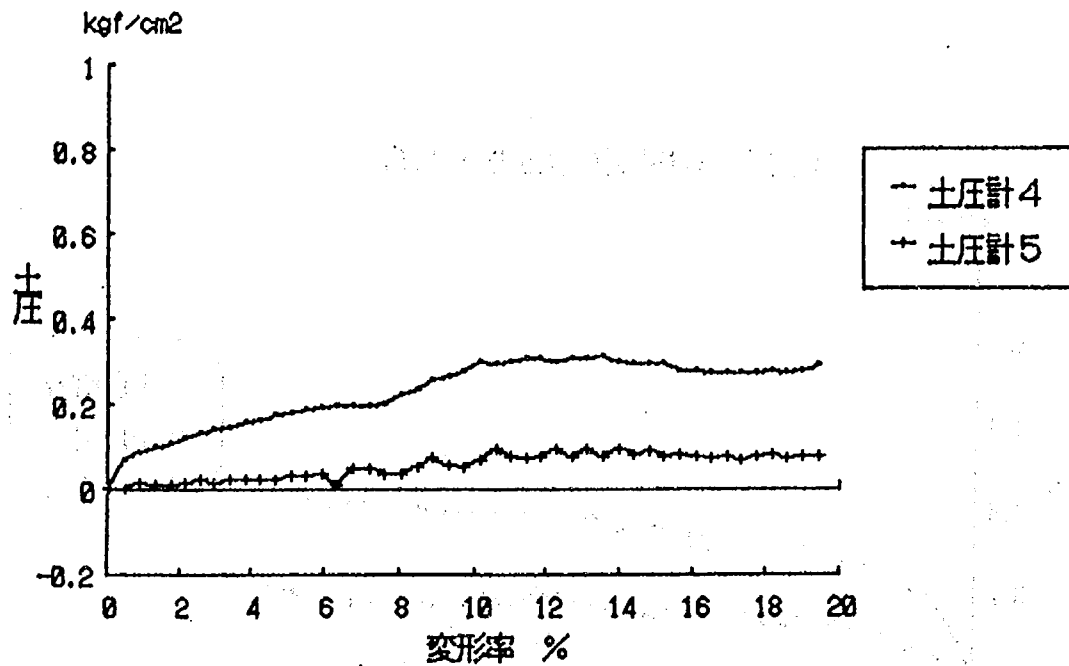


図-3.3.33 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，粘性土水位下地山，土被り比=1.0）

粘性土 水位下地山 土被り比2.0

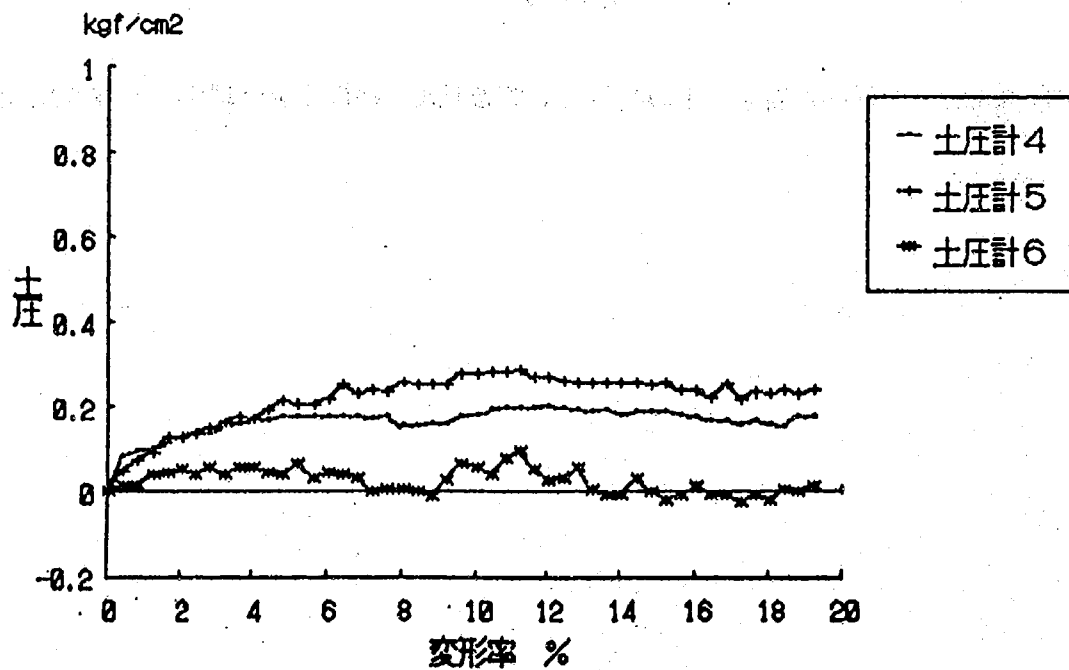


図-3.3.34 変形率と周辺土圧の関係（上半降下式，粘性土水位下地山，土被り比=2.0）

2) ゴムチューブ式模型実験

(a) 砂質土地山について

砂質土乾燥地山における、変形率と周辺土圧計に作用する荷重の変化との関係を図-3.3.35～図-3.3.37に示す。土被り比との関係では、土被り比 1.0 のとき、荷重の増加はトンネル模型に最も近い土圧計③と土圧計④に集中している。また土被り比が増えるにしたがって、トンネル模型中心より離れた土圧計にも荷重の増加がみられる。土被り比 2.0 のときは、土圧計⑤に増加がみられる。また土圧計⑥と土圧計⑦が単調減少している。土被り比 4.0 のときは、トンネル模型より最も離れた土圧計⑥、土圧計⑦にも荷重の増加がみられた。各ケース毎での荷重の増加量は、トンネル模型に近いほど大きく、離れるにしたがい小さくなる傾向にある。

砂質土水位下地山での、変形率と周辺土圧計に作用する荷重の変化との関係を図-3.3.38～図-3.3.40に示す。土被り比との関係では、土被り比 1.0 のとき、荷重の増加はトンネル模型に最も近い土圧計③と土圧計④に集中している。また土被り比が増えるにしたがい、トンネル模型中心より離れた土圧計にも荷重の増加がみられる。土被り比 2.0 のときは、土圧計⑤に増加がみられる。土被り比 4.0 のときは、トンネル模型より最も離れた土圧計⑥、土圧計⑦にも荷重の増加がみられた。トンネル模型より等距離にある土圧計と比較をすると、土被り比に比例して土圧が増加している。各ケース毎での荷重の増加量は、トンネル模型に近いほど大きく、離れるにしたがい小さくなる傾向がある。

(b) 粘性土地山について

粘性土乾燥地山での、変形率と周辺土圧計に作用する荷重の変化との関係を図-3.3.41～図-3.3.43に示す。各土被り比とも、すべての実験ケースで、トンネルの変形にともない各周辺土圧計には作用荷重の変化がみられた。トンネルに最も近い土圧計③と土圧計④は、最も作用土圧の変化があり、いずれもトンネルが変形するにつれ増加の傾向を示している。増加量は土被り比に比例して大きくなっている。土圧計⑤についても、土圧計③、土圧計④と同じような傾向にあるが、増加量および減少量については比較的小さい。土圧計⑥、土圧計⑦については、土被り比 1.0 と 2.0 は似たような傾向を示している。増加量は他の土圧計と比較していずれも小さい。土被り比 4.0 のときは、各土圧計とも一様に増加する傾向にあるが、土圧計④にのみ変形率 6 % のときに減少がみられた。

粘性土水位下地山での、変形率と周辺土圧計に作用する荷重の変化との関係を図-3.3.44, 3.3.45に示す。土被り比 1.0 のときは、変形率が 8 % 程度まで周辺土圧作用荷重には大きな変化はあらわれず、その後はトンネルに最も近い土圧計③と土圧計④が増加したが、土圧計⑤、土圧計⑥、土圧計⑦には大きな変化はあらわれていない。土被り比 2.0 のときは、変形率 5 % 程度まで変化がみられないが、そのうち土圧計③、土圧計④、土圧計⑤に土圧の増加がみられた。土圧計⑥、土圧計⑦には大きな変化はあらわれていない。

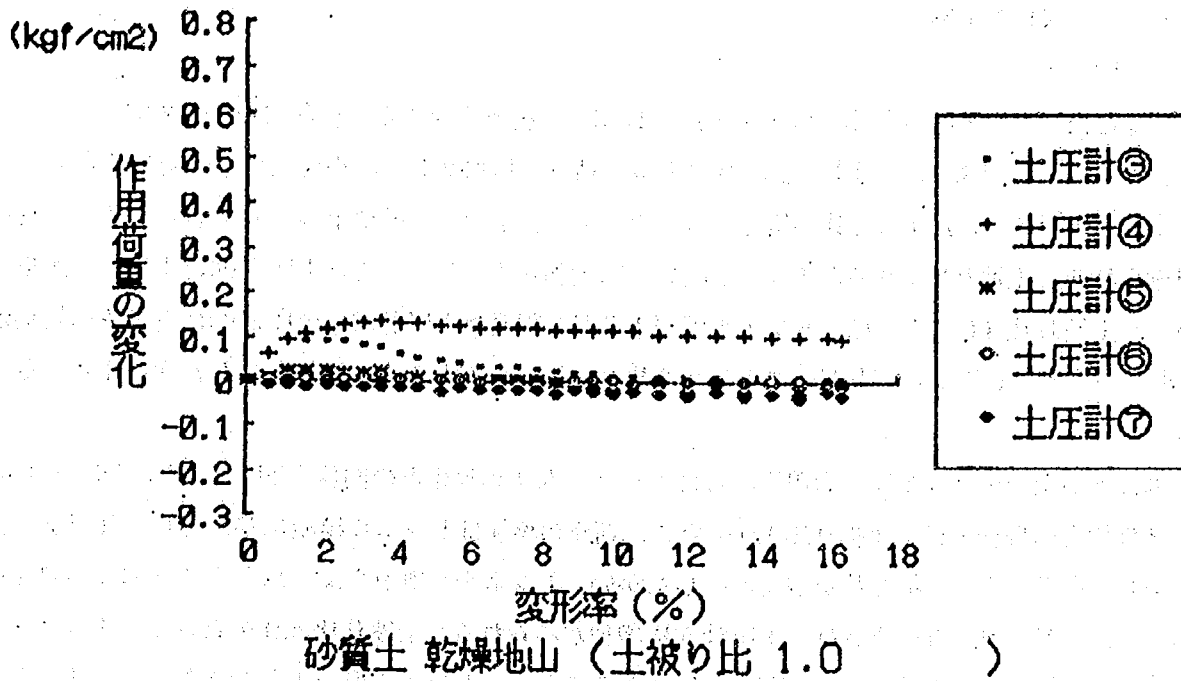


図-3.3.35 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土乾燥地山, 土被り比=1.0)

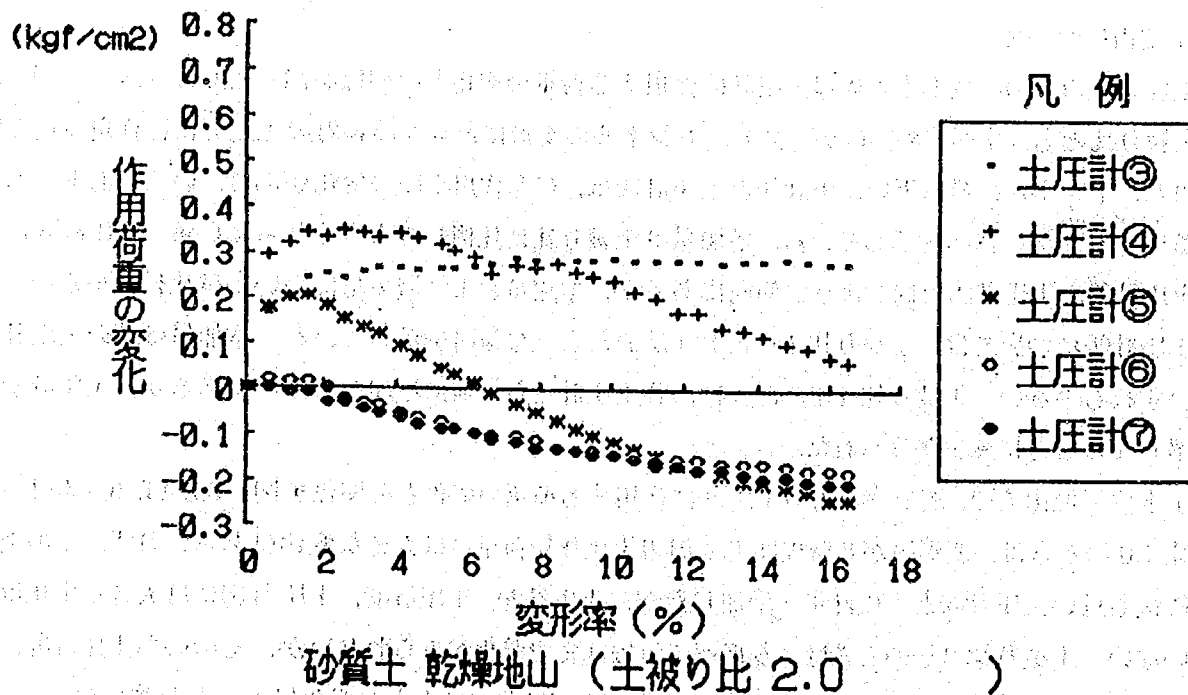


図-3.3.36 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土乾燥地山, 土被り比=2.0)

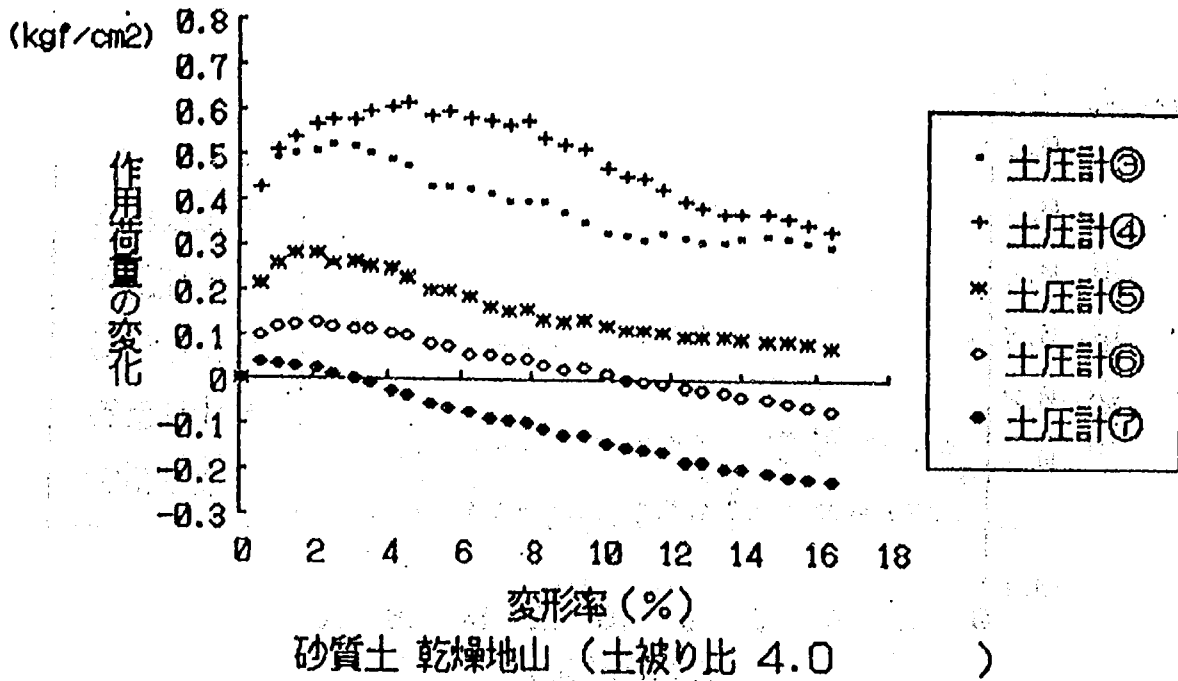


図-3.3.37 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土乾燥地山, 土被り比=4.0)

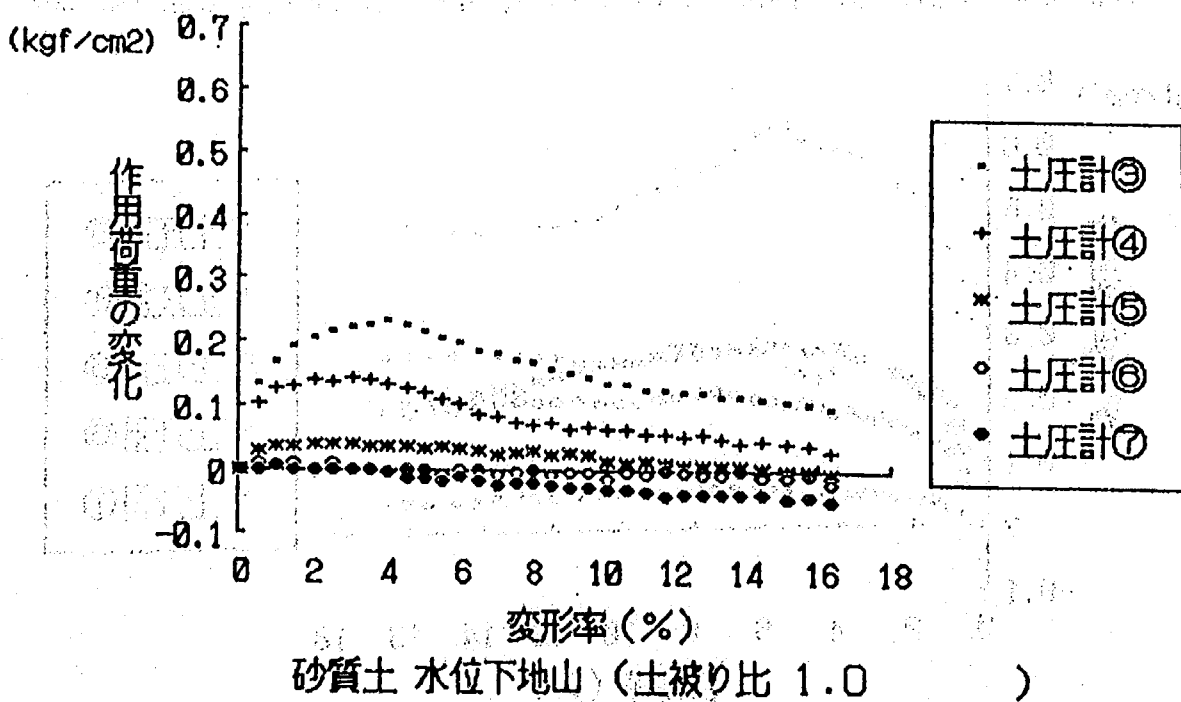


図-3.3.38 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土水位下地山, 土被り比=1.0)

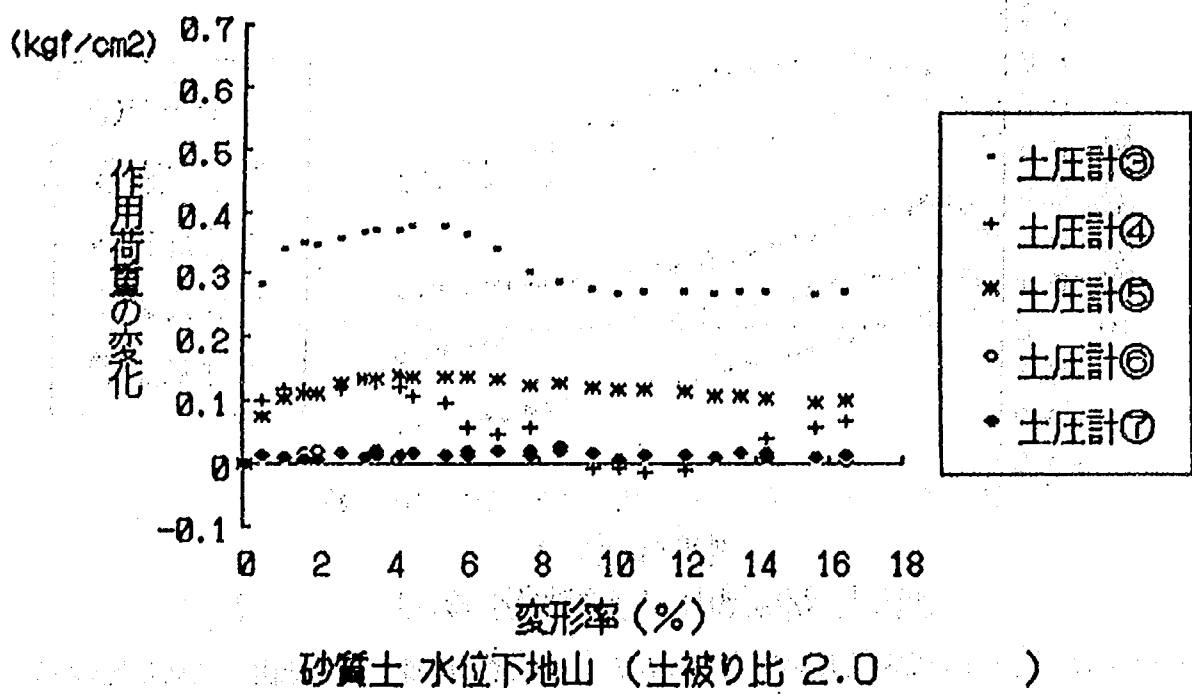


図-3.3.39 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土水位下地山, 土被り比=2.0)

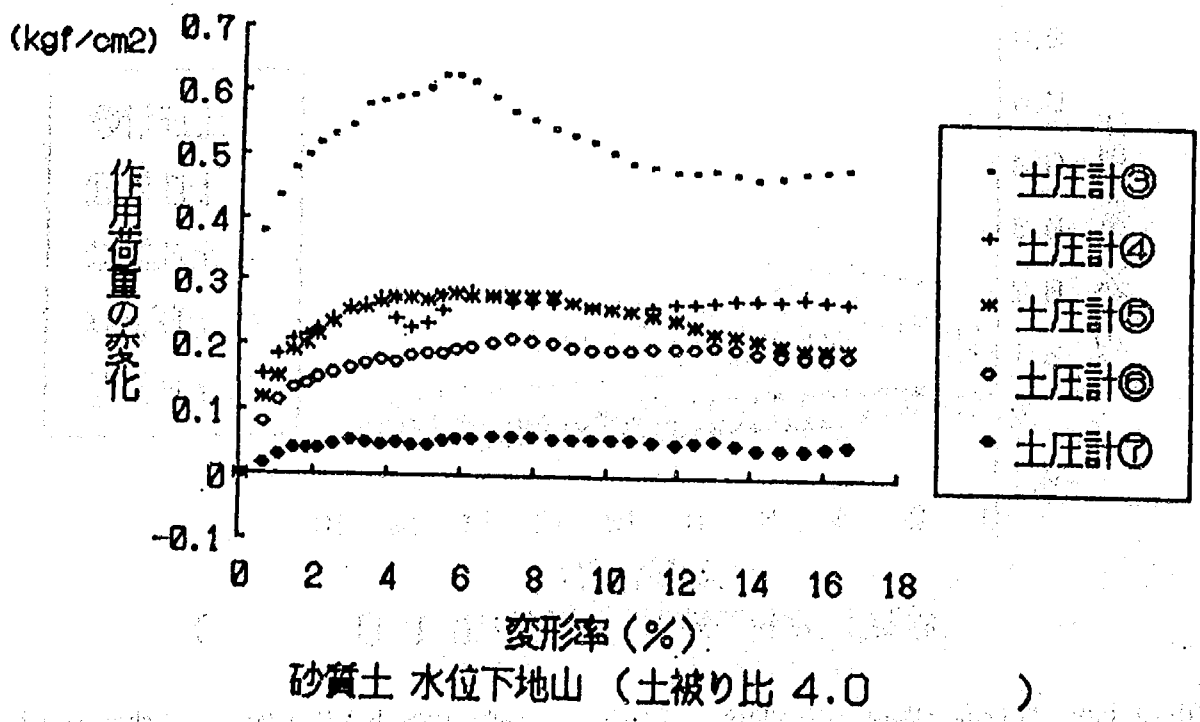


図-3.3.40 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土水位下地山, 土被り比=4.0)

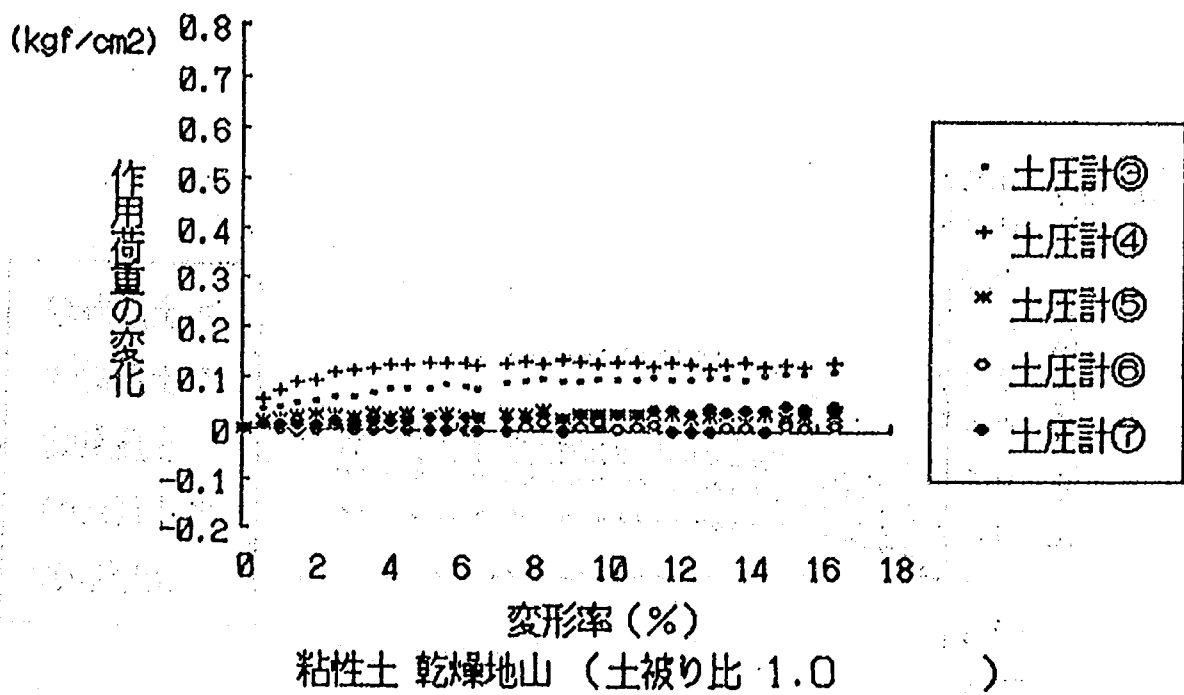


図-3.3.41 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土乾燥地山, 土被り比=1.0)

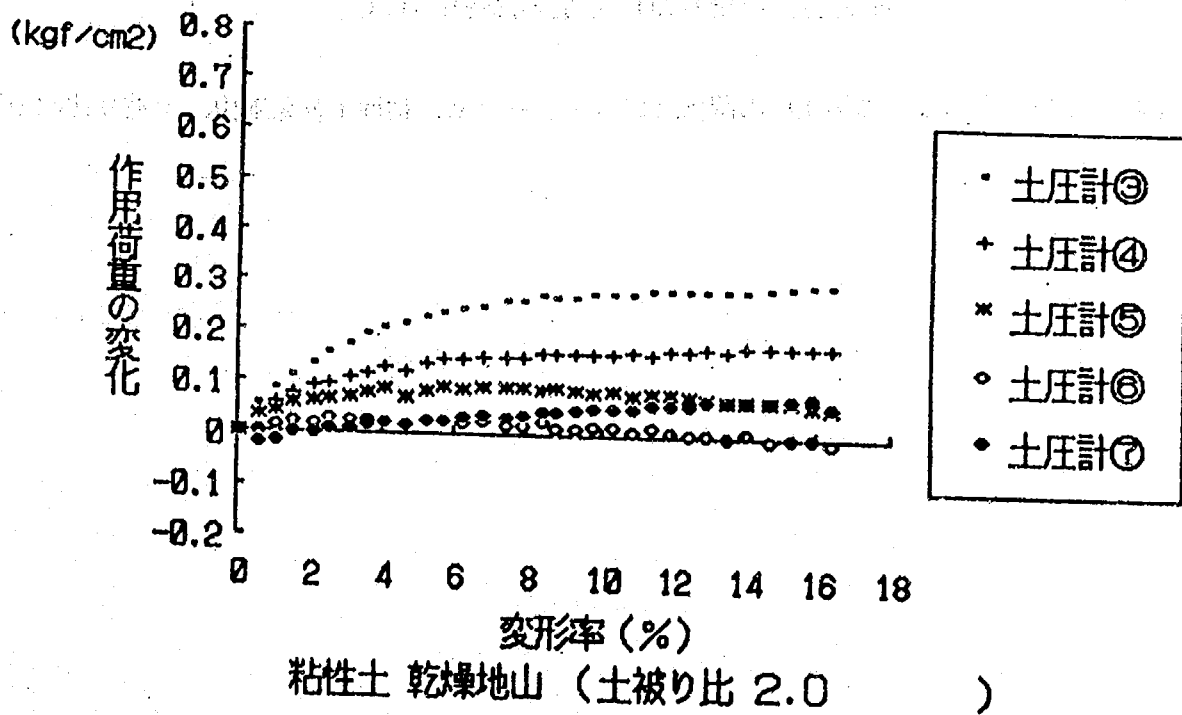


図-3.3.42 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土乾燥地山, 土被り比=2.0)

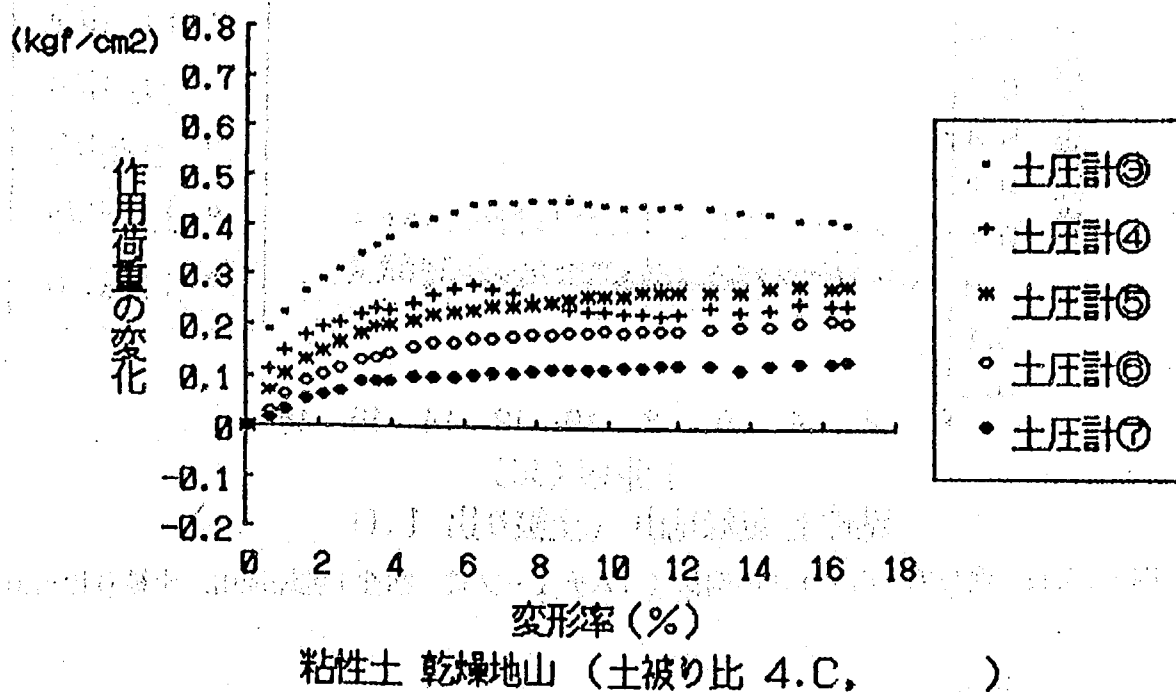
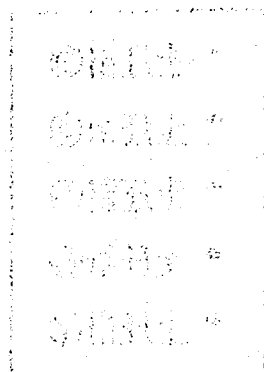


図-3.3.43 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土乾燥地山, 土被り比=4.0)



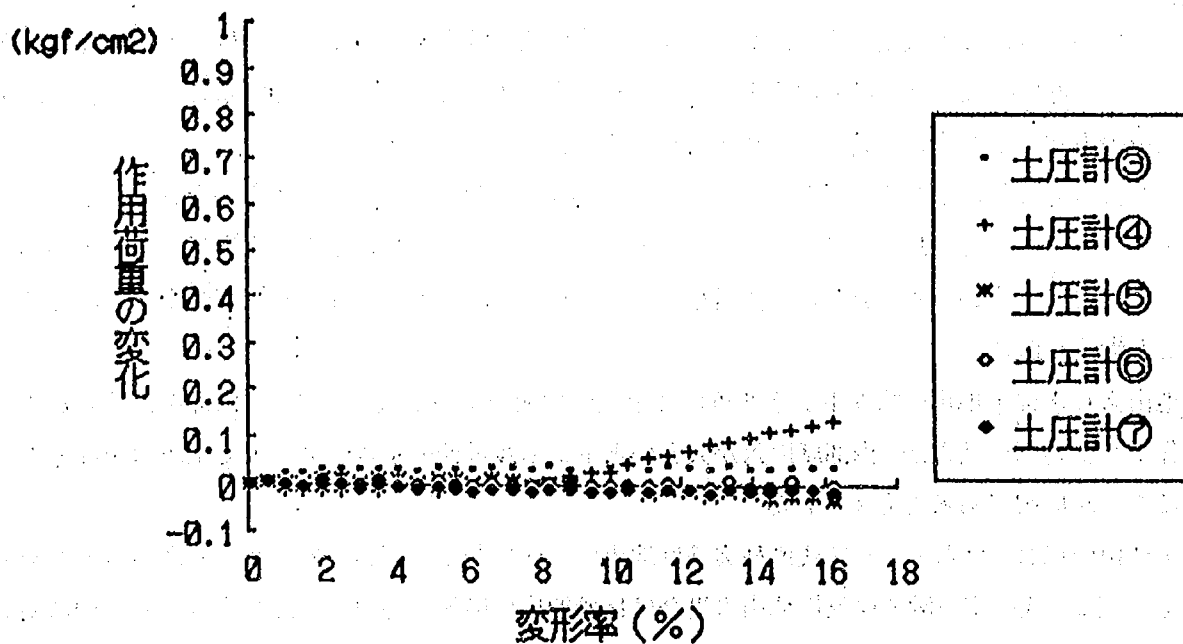


図-3.3.44 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土水位下地山, 土被り比=1.0)

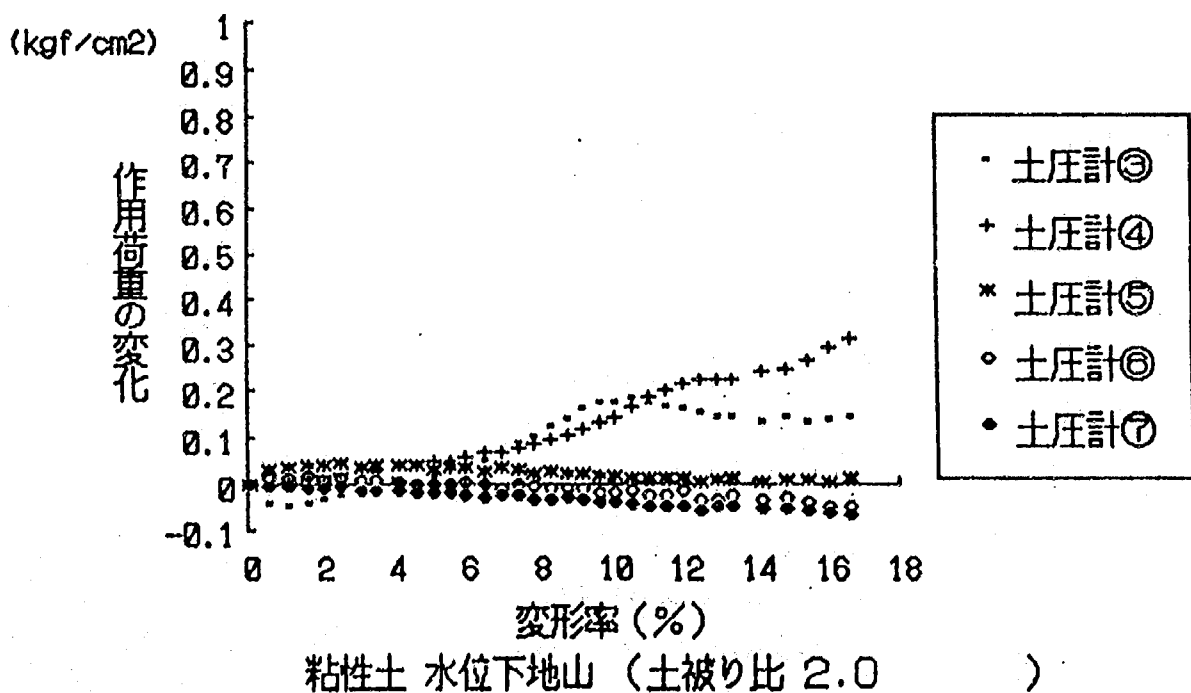


図-3.3.45 変形率と周辺土圧の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土水位下地山, 土被り比=2.0)

(2) 考 察

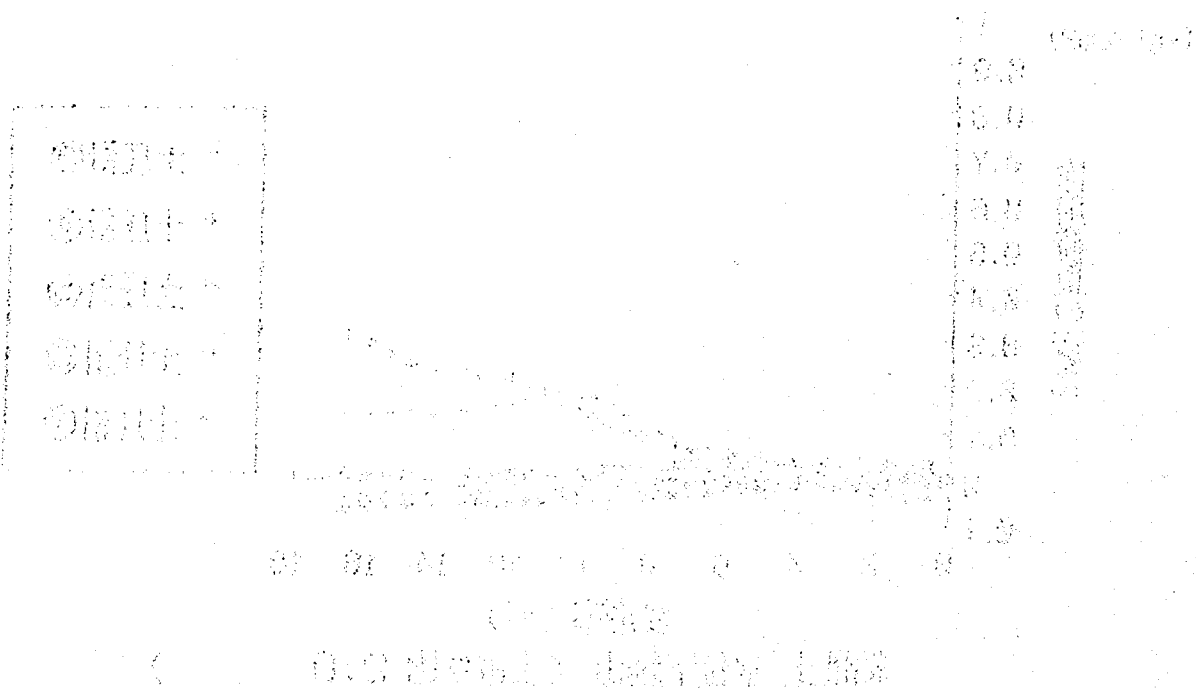
砂質土地山の場合、降下式模型実験、ゴムチューブ式模型実験ともに言えることは、土被り比が大きくなると、トンネル近傍の土圧計だけでなくトンネルより遠方の土圧計も土圧が増加することと、乾燥地山より水位下地山の方が、トンネル近傍に土圧の増加の集中が大きいことである。

土被りが大きくなればトンネルより遠方の土圧も増加するのは、土被り比が大きいときは、トンネル上部の変形量が大きくなっても地山内でアーチを形成しているが、土被り比が小さいときは、アーチの領域が地表面にまで達してしまい、アーチとして作用しなくなるために周辺土圧に与える影響が小さくなることが原因であると考えられる。

乾燥地山より水位下地山の方がトンネル近傍に土圧の増加の集中が大きいのは、内部摩擦角 ϕ が小さいとアーチ作用が広範囲に及ぶが、内部摩擦角が大きいとトンネル近傍の小さなアーチで土圧の再配分をおこなっていることが原因であると考えられる。

粘性土地山の場合（ゴムチューブ式模型実験は地山の作成で若干の問題があったと考えられるため考察からは除く）、降下式模型実験では乾燥地山の場合は比較的広い範囲で地山を保持しようとするのに対して、水位下地山ではトンネル近傍で地山を保持しようとしている。これは水位下地山の強度定数が乾燥地山より大きいことを示唆しており、三軸圧縮試験でもこの傾向がみられる。

図 10-10-1 土被り比と土圧計の位置関係（単位：cm）



3.3.3 両実験結果（上半降下式とゴムチューブ式）の比較

実験に使用したトンネル模型の形状の違いが実験結果にどのような影響を与えたか、上半降下式トンネル模型とゴムチューブ式模型の実験結果の比較を行った。

両模型の最大の違いはトンネルの掘削のシミュレート方法である。上半降下式は、模型の上半部が鉛直に降下し側方の緩みを全く許さないという方法でトンネルの掘削を模擬しているのに対して、ゴムチューブ式は、ほぼ真円を保ちながら収縮し、側方の緩みを許すという方法をとっている点にある。

両者の作用荷重値の傾向を比較すると、以下のことがいえる。

(a) 乾燥地山の場合

ゴムチューブ式は、上半降下式と比較して初期の作用荷重減少の度合いが大きい。また上半降下式は、変形が進むにつれ作用荷重がほぼ一定の値となるのに対し、ゴムチューブ式では作用荷重の増加がある。

(b) 砂質土・水位下地山の場合

変形率が小さいとき、土被り比が 1.0 と 2.0 ではゴムチューブ式の方が作用荷重の減少の度合いは大きい。土被り比 4.0 では上半降下式のほうが大きくなる。変形率が 3% を超えると、(a) のときと同様、変形が進むにつれ上半降下式は作用荷重がほぼ一定の値となるのに対し、ゴムチューブ式では作用荷重の増加がある。

(c) 粘性土・水位下地山の場合

土被り比 1.0 では、方式による違いがはっきりとは現れていない。土被り比 2.0 ではデータにばらつきがあり、はっきりとした判断はできない。

このように両方式での結果にこのような大きな違いが現れたのは、トンネル掘削のシミュレート方法が起因しているものと考えられ、側方の緩みを許さなければ地山特性曲線の特性曲線 B（図-1.1 参照）、つまり変形量が大きくなるにしたがって、支保に作用する荷重が大きくなるという現象を再現できないことがわかった。

4. 結論

4.1 落し戸実験

落し戸の初期設置場所の違いおよび土被りの違いに関係なく作用荷重の最小値が一定であるのは、落し戸にかかる鉛直荷重は、村山³⁾が示した3つの領域のうち領域-I（落し戸とともに沈下する直接領域）の自重によって決定されるからであり、その値はTerzaghi²⁾の土圧式とも良い一致を示すことがわかった。落し戸の降下にともなうトンネル周辺土圧への影響については、土被り比の違いによって差はあるが、落し戸から離れるに従ってその影響は小さくなることがわかった。また地表面沈下に与える土被り比の影響については、土被り比が1以上になればアーチアクションが作用し、落し戸降下量より地表面沈下量の方が小さくなることがわかった。

4.2 遠心力実験⁴⁾

土被りが大きくなるほど変形率と天端作用荷重の関係を表す曲線の減少の度合いは大きくなること、および土被り比に関わらず天端作用荷重の最小値はほぼ同じであることがわかった。また実験で得られた最小支保荷重は、Terzaghiの土圧式の計算結果ともよく整合していた。

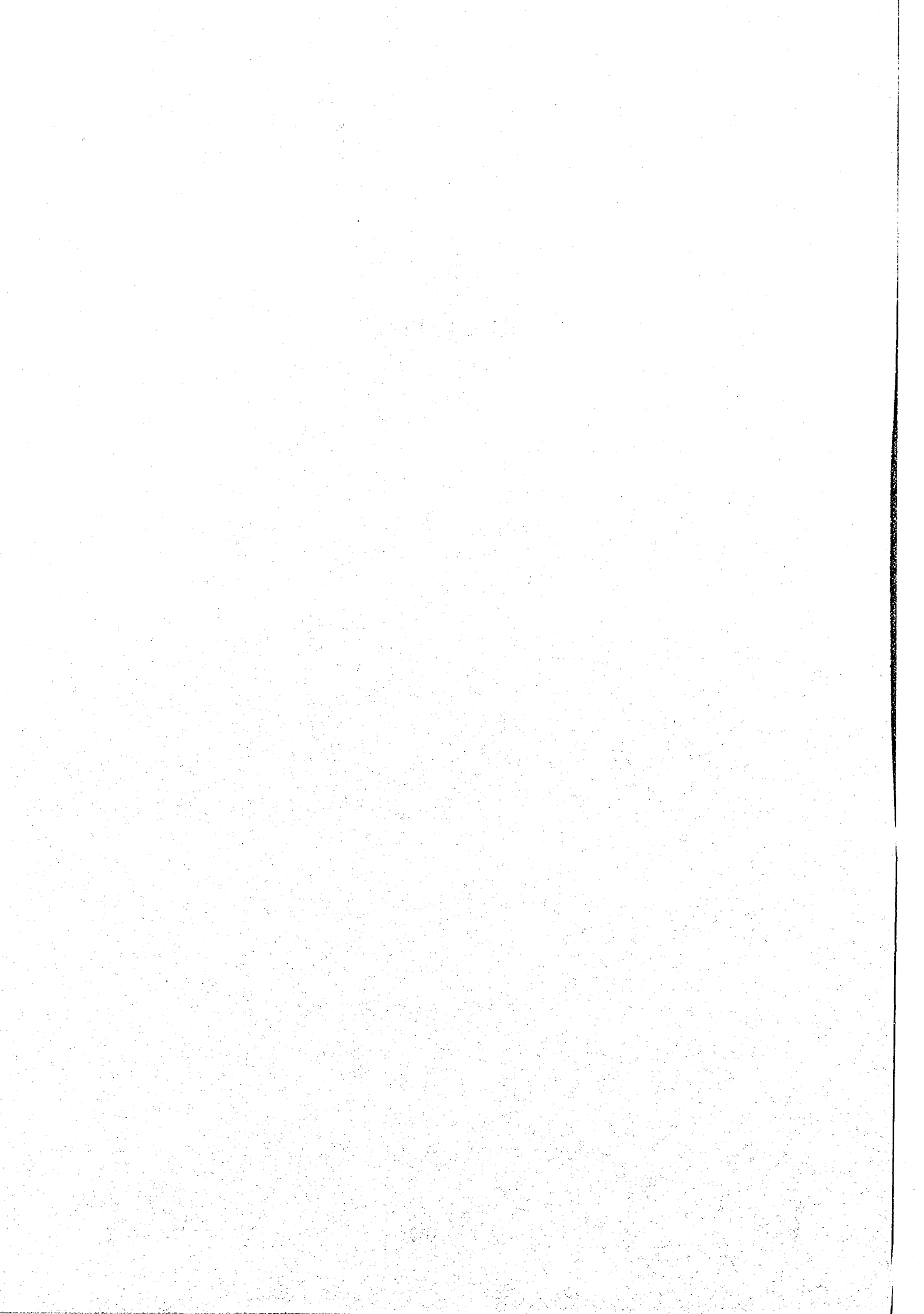
トンネル周辺地山については、土被り比が大きくなると、トンネル近傍の土圧計だけでなくトンネルより遠方の土圧も増加すること、および水位下地山と比較して乾燥地山の場合も、同様に遠方の土圧も増加することがわかった。

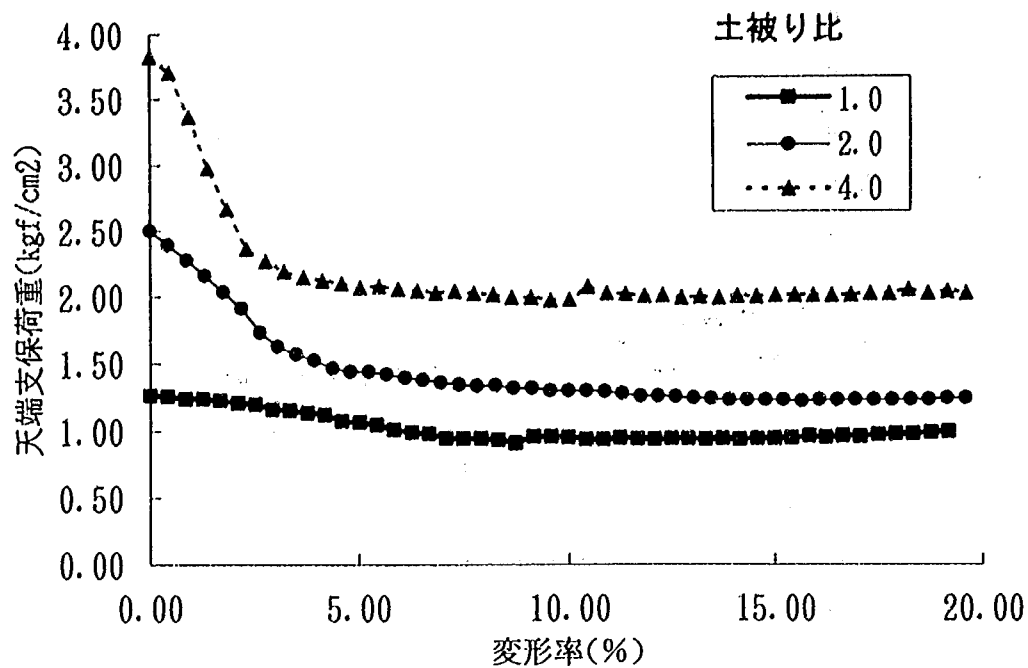
トンネル掘削のシミュレート方法の違いの検討については、断面側部を緩ませるか否かで、地山特性曲線の形状が著しく異なることがわかった。このことから地山特性曲線¹⁾（図-1.1参照）の特性曲線Bの部分、つまり変形量が大きくなるにしたがって支保に作用する荷重は大きくなるという部分は、側方の緩みを前提として考えられていて、この前提条件を満たさないような地山条件や施工条件の現場には、地山特性曲線概念が適用できないことが推察される。

参考文献

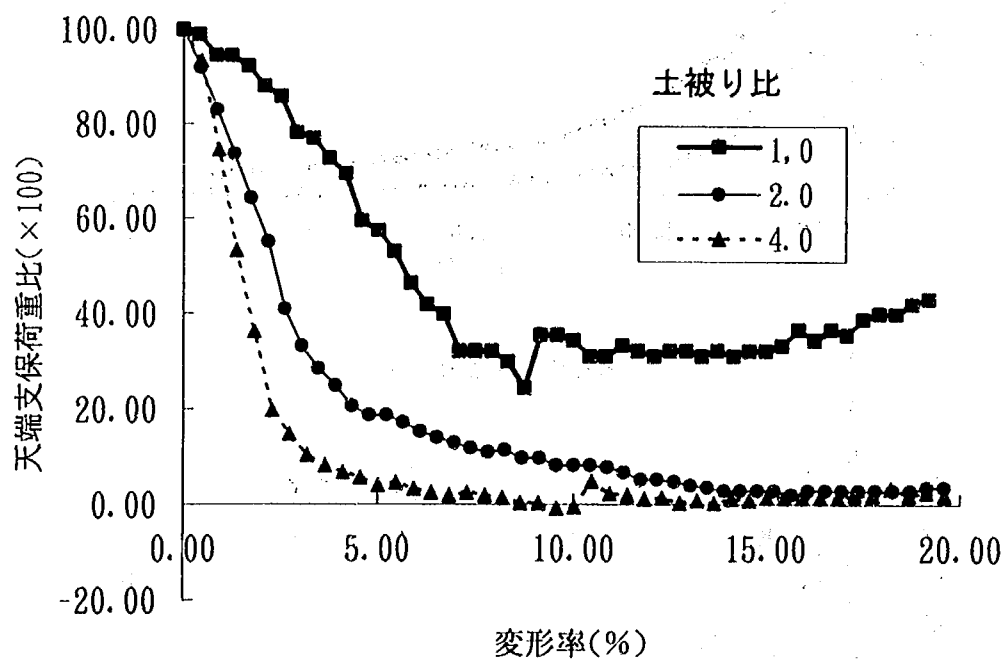
- 1) 日本道路協会トンネル委員会 ; 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説 ; (社)日本道路協会, p.97 ; 1988, 6
- 2) Terzaghi, K., ; Rock Tunneling with Steel Support (Introduction to Tunnel Geology) ; The Commercial Shearing & Stamping Co., 1946
- 3) 村山朔郎, 松岡 元 ; 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究 ; 土木学会論文報告書, No.187, pp95-108, 1971
- 4) 猪熊 明, 角湯克典, 山本隆洋 ; トンネルの変形と支保に作用する荷重との関係ー遠心載荷装置を使ったトンネル掘削に関する模型実験ー, 土木技術資料 35-2, 1993. 2

参 考 資 料

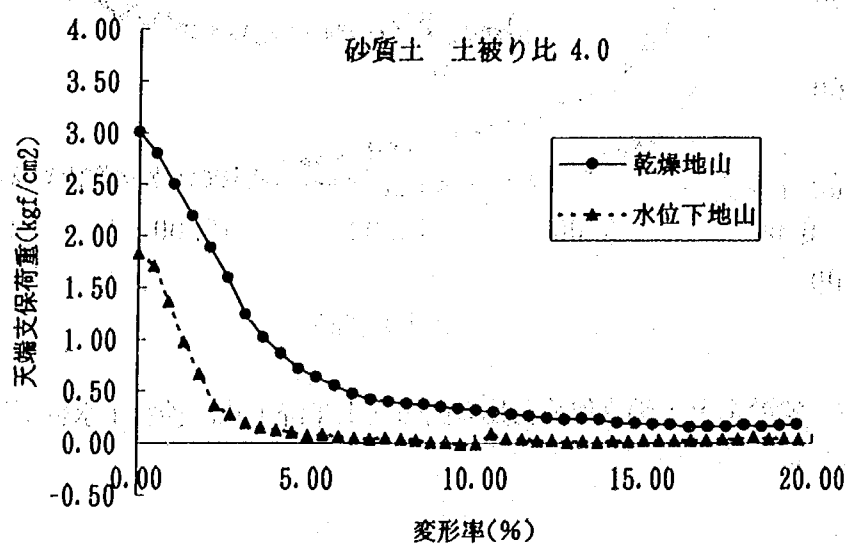
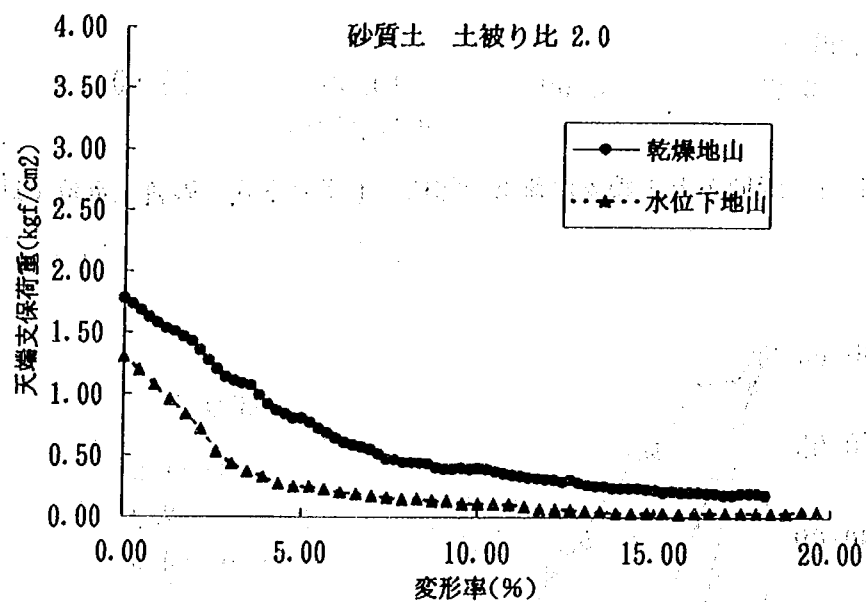
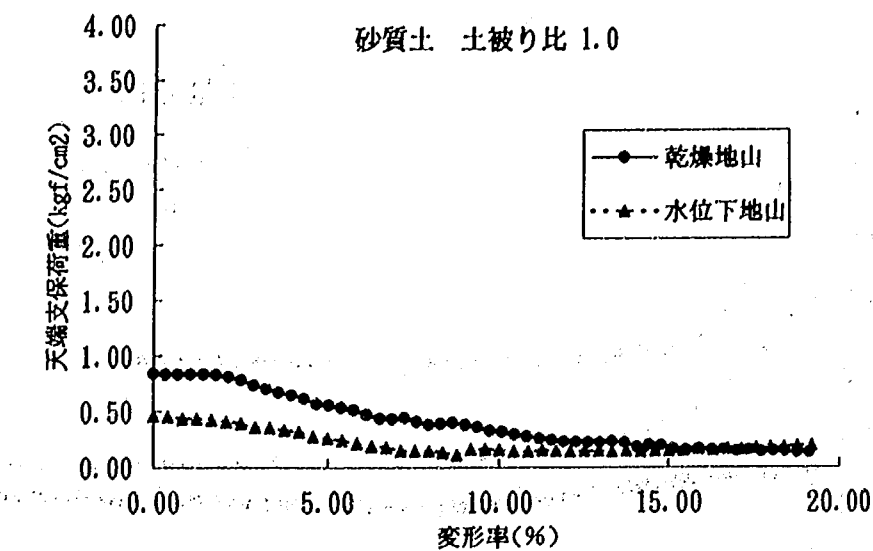




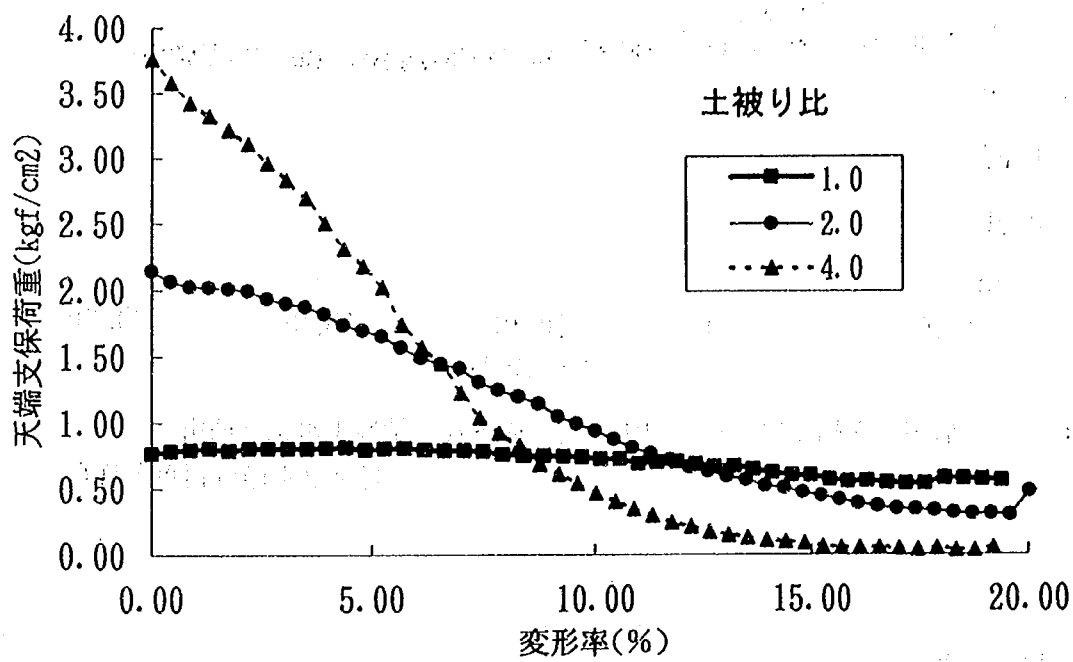
参図-1 変形率と天端支保荷重の関係（上半降下式，砂質土水位下地山）



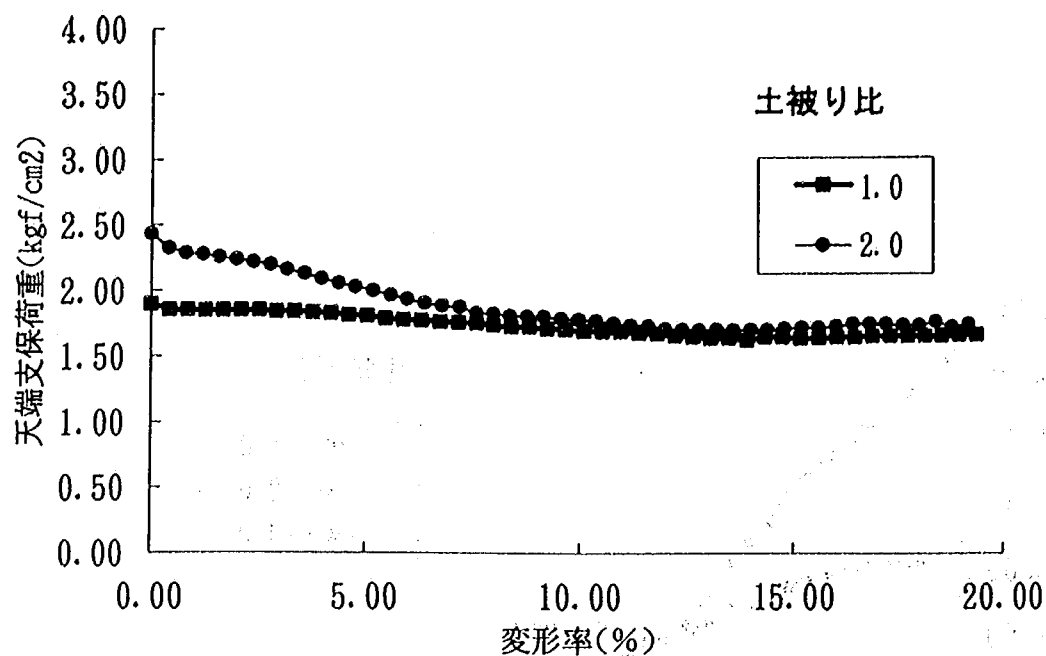
参図-2 変形率と天端支保荷重比の関係（上半降下式，砂質土水位下地山）



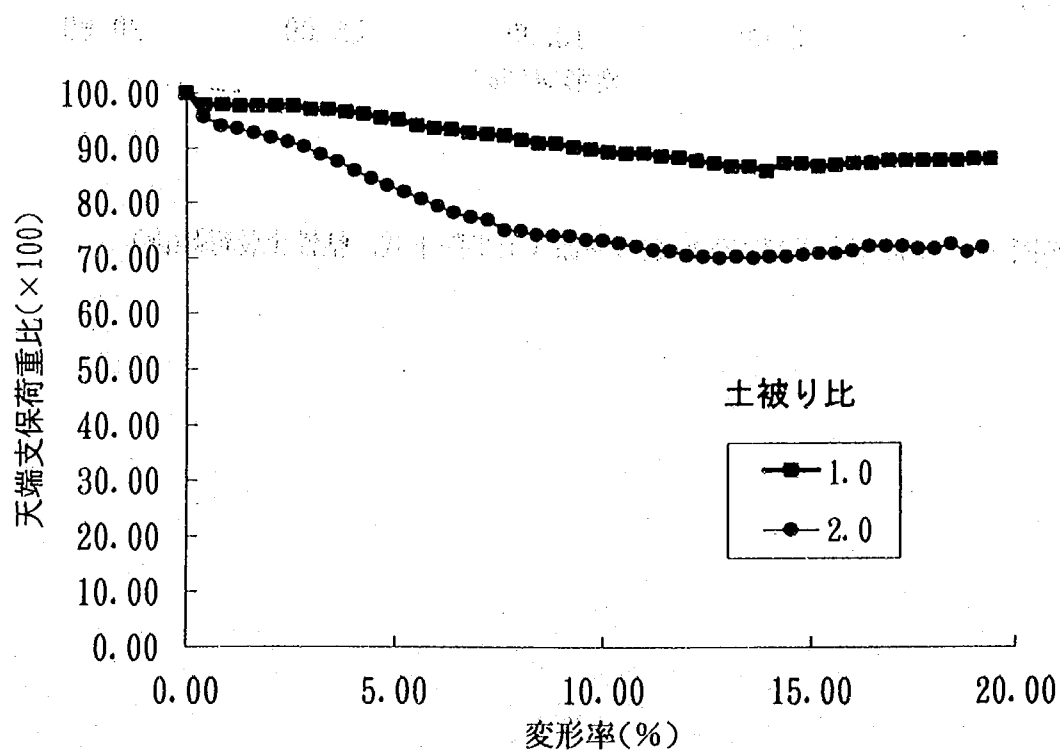
参図-3 変形率と天端支保荷重の関係（上半降下式，砂質土乾燥地山と水位下地山との比較）



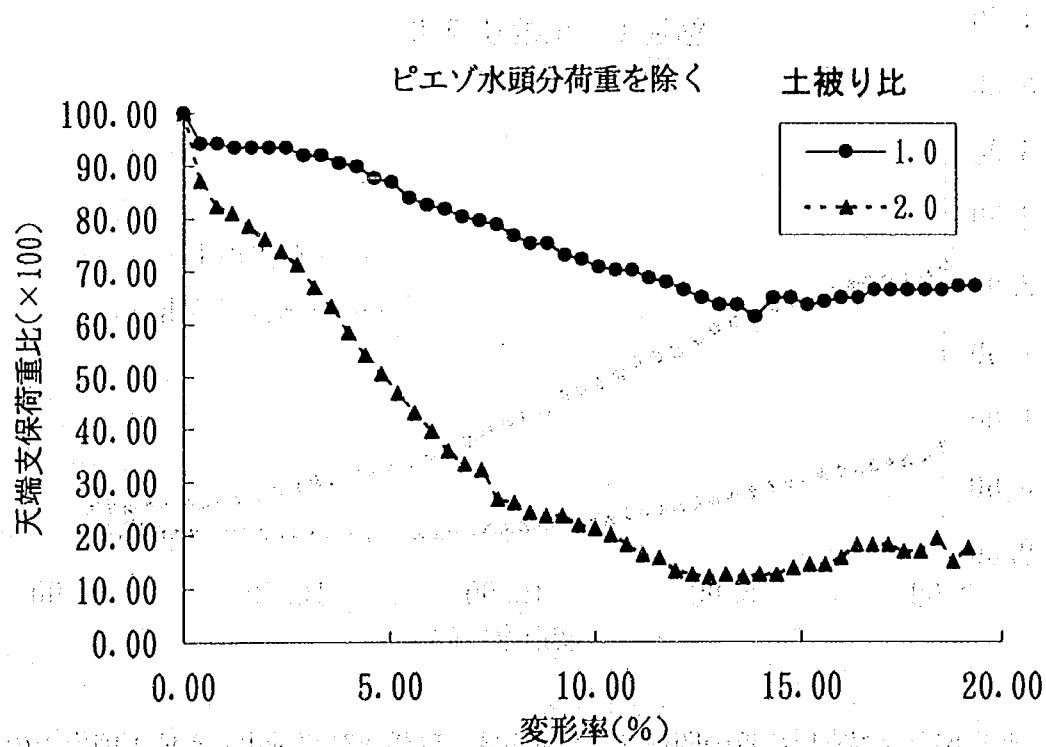
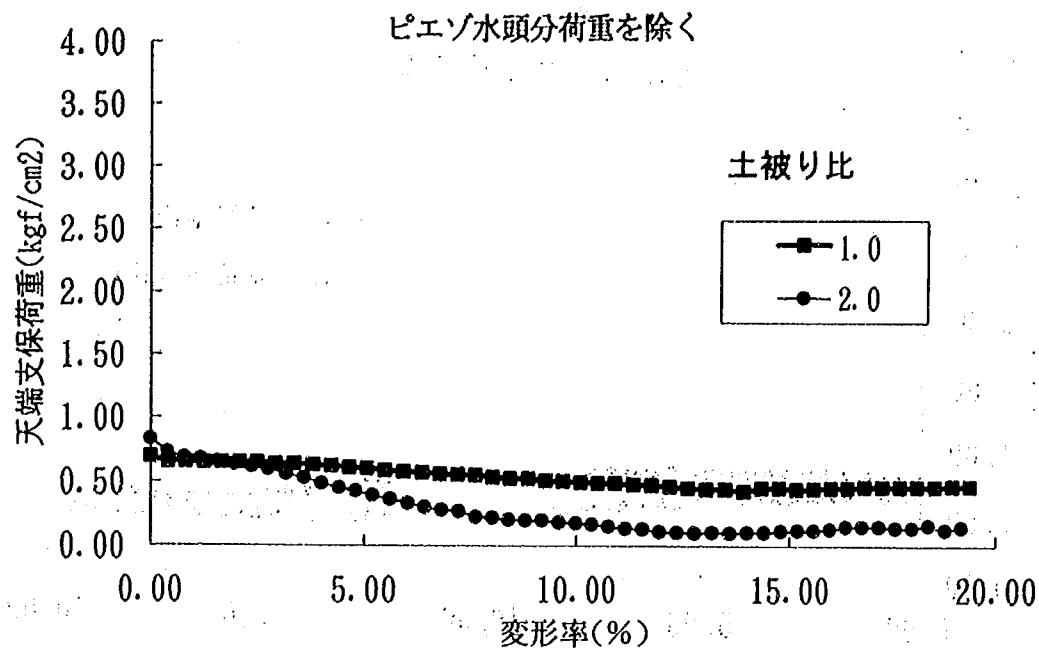
参図-4 変形率と天端支保荷重の関係（上半降下式，粘性土乾燥地山）



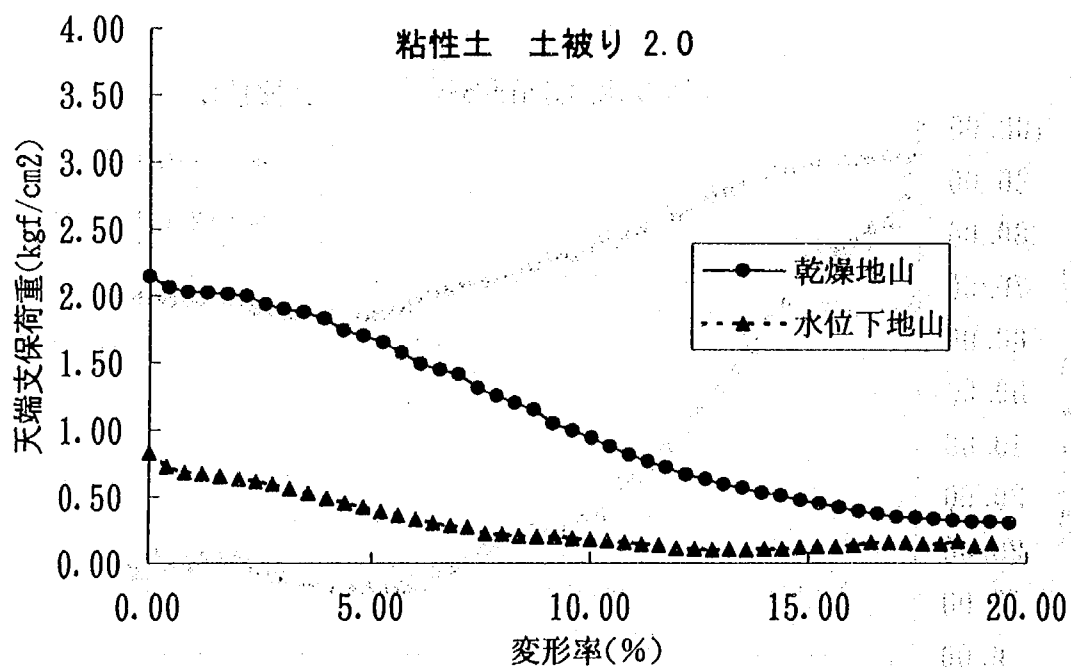
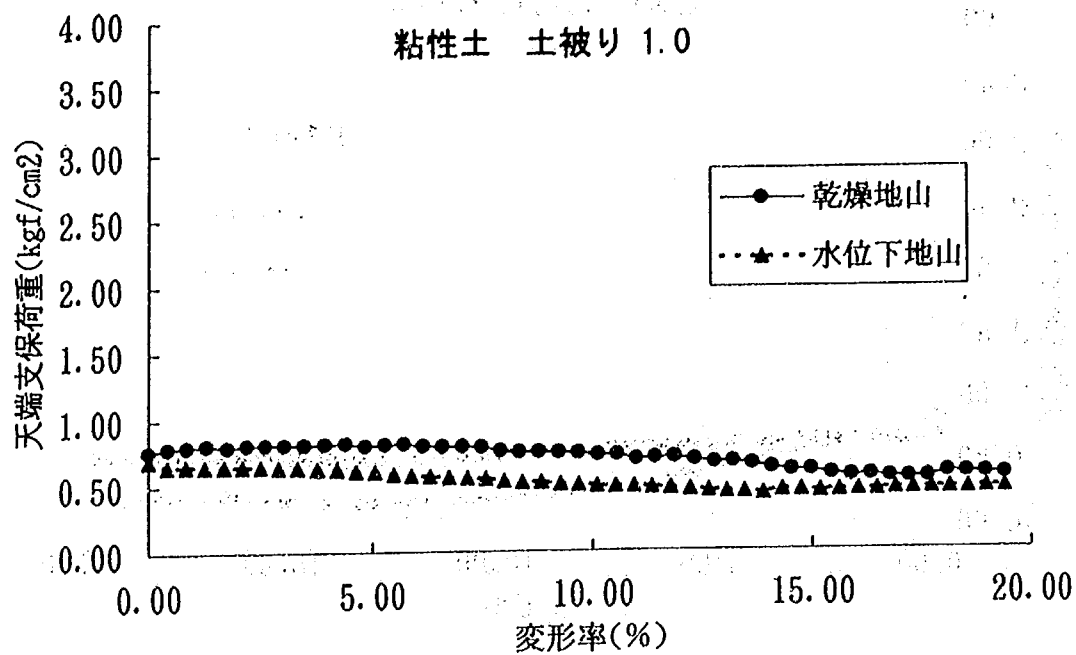
参図-5 変形率と天端支保荷重の関係（上半降下式，粘性土水位下地山，
ピエゾ水頭分荷重を含む）



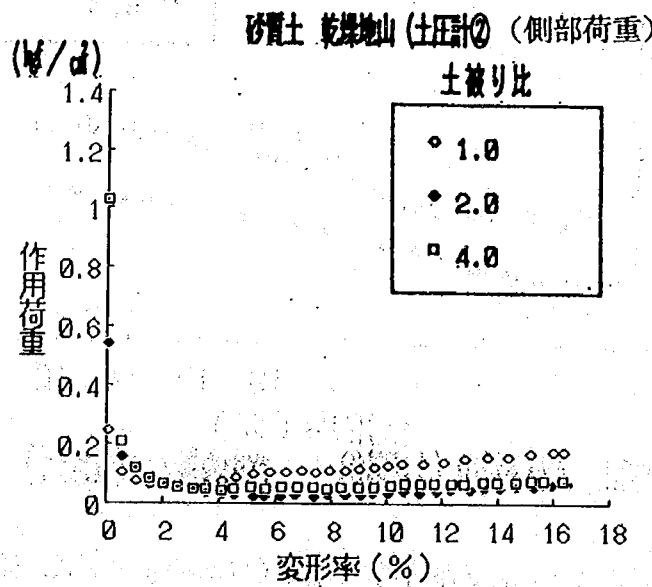
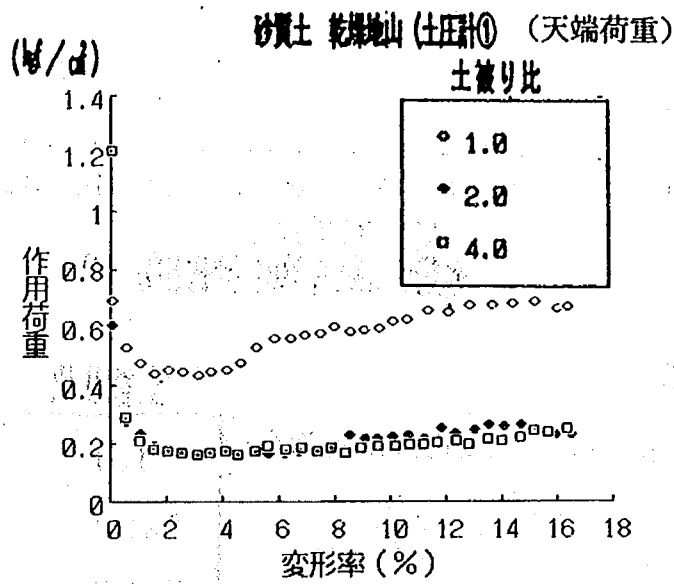
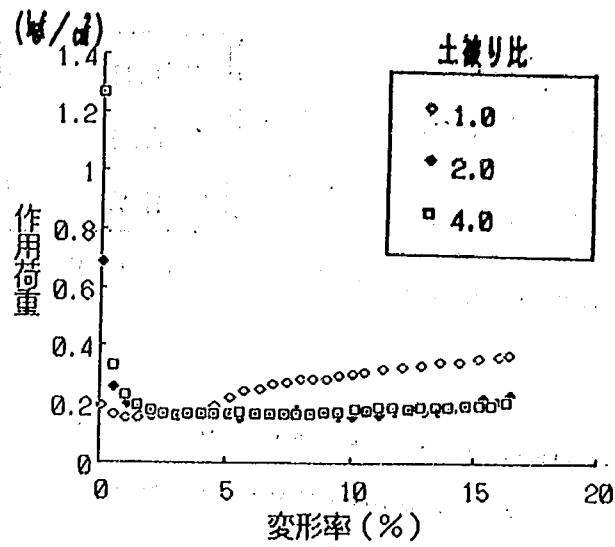
参図-6 変形率と天端支保荷重比の関係（上半降下式，粘性土水位下地山，
ピエゾ水頭分荷重を含む）



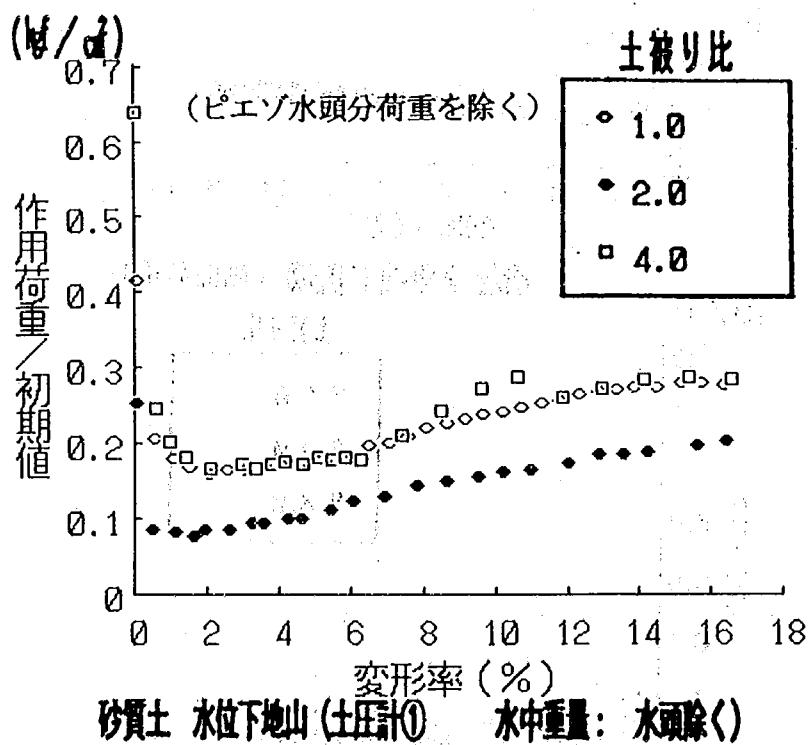
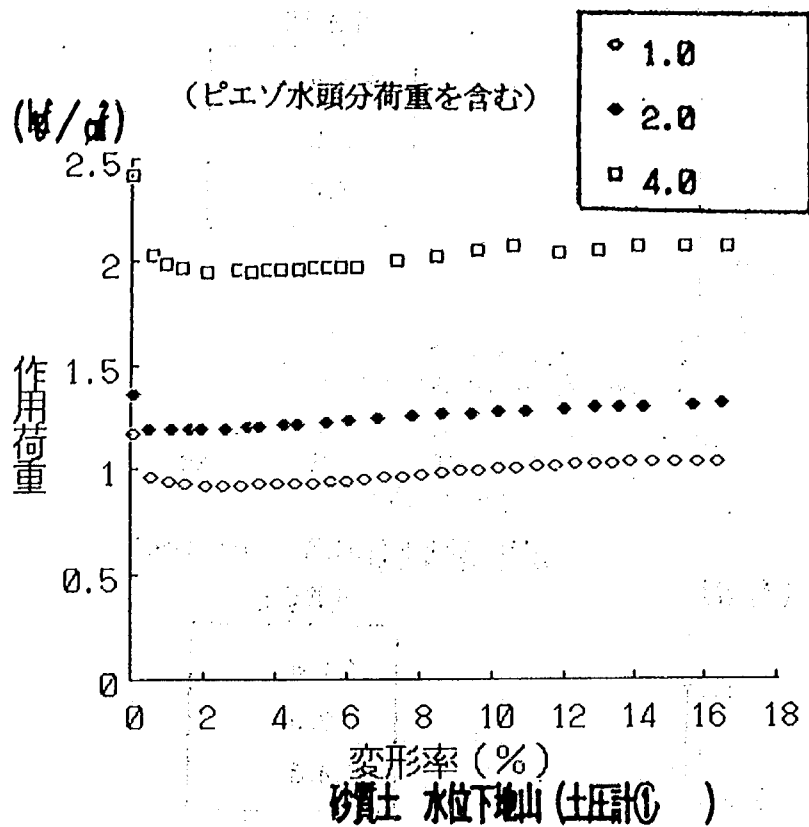
参図-7 変形率と天端支保荷重比の関係(上半降下式, 粘性土水位下地山)



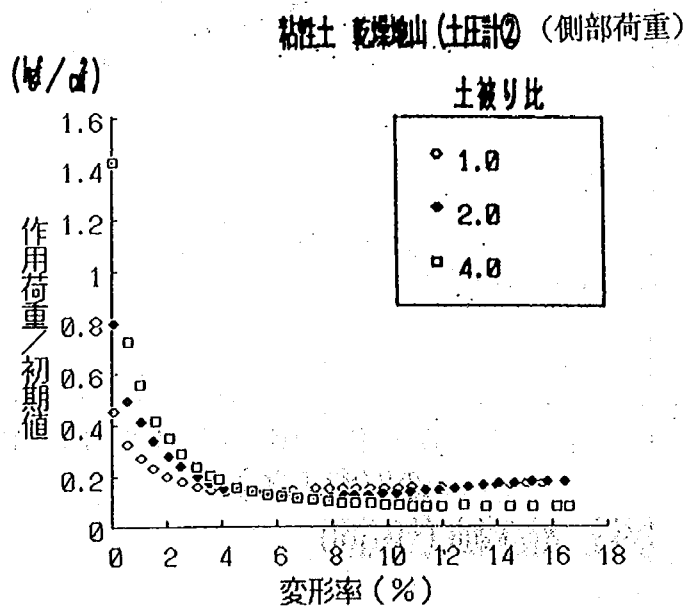
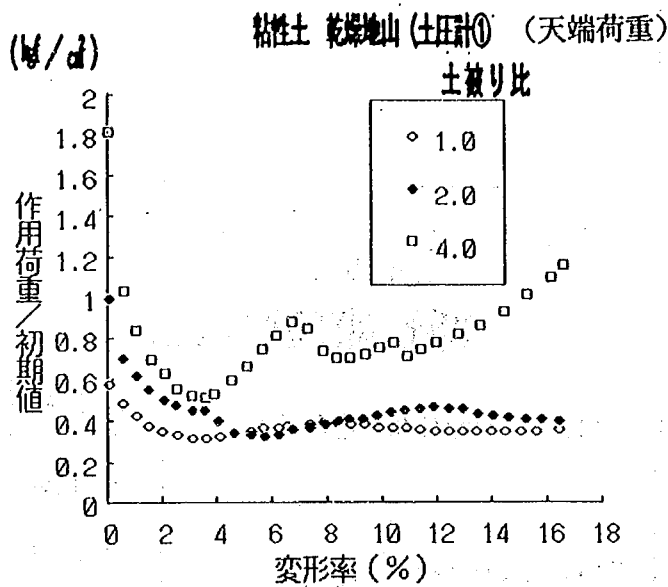
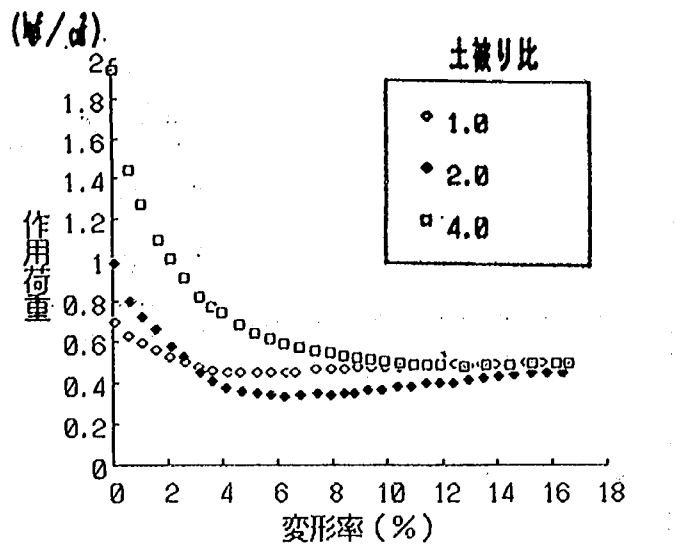
参図-8 変形率と天端支保荷重の関係（上半降下式，粘性土乾燥地山と水位下地山との比較）



参図-9 変形率と作用荷重の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土乾燥地山)

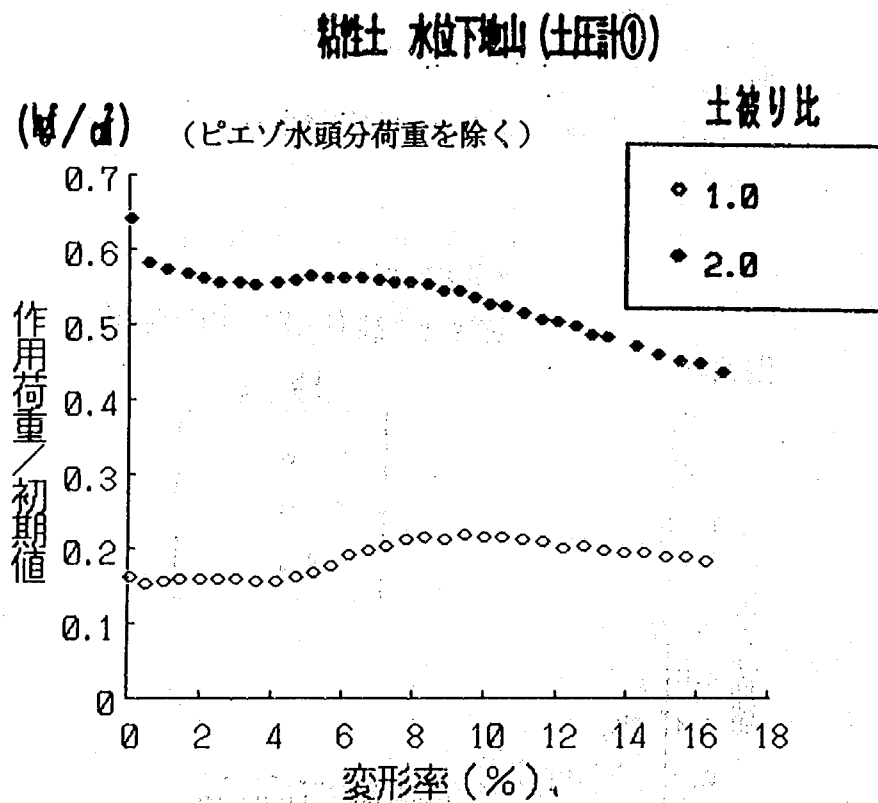
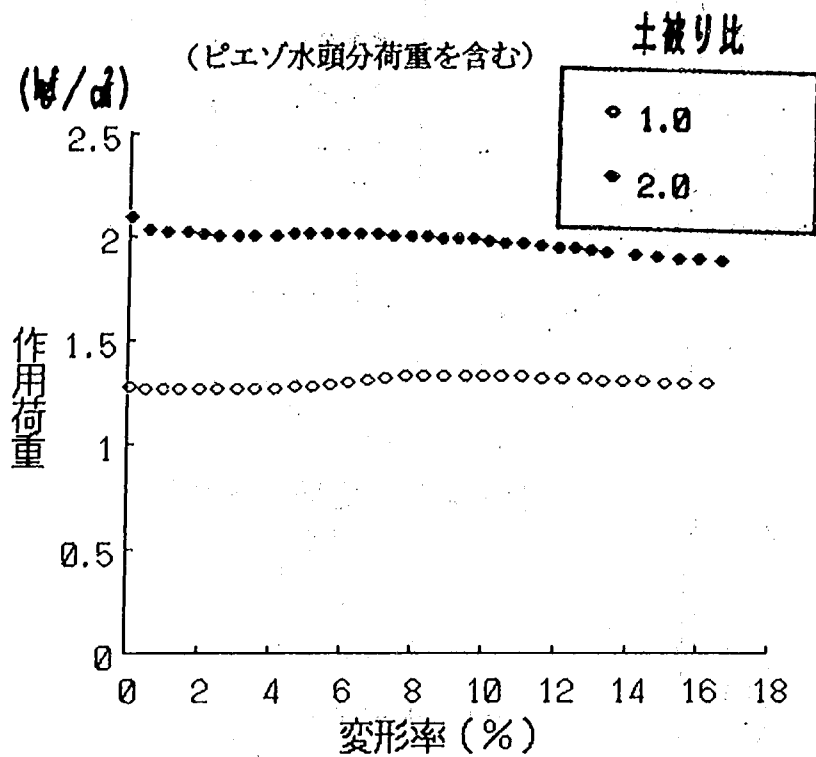


参図-10 変形率と天端支保荷重の関係 (ゴムチューブ式, 砂質土水位下地山)



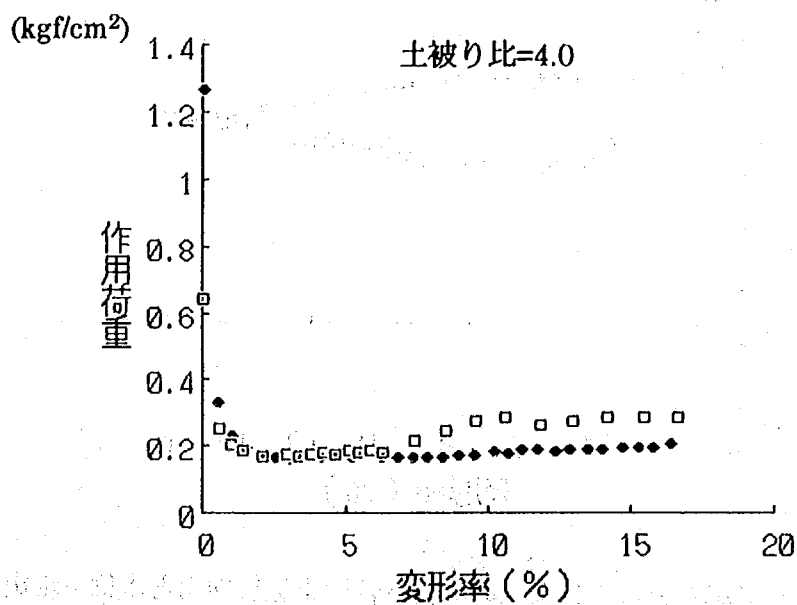
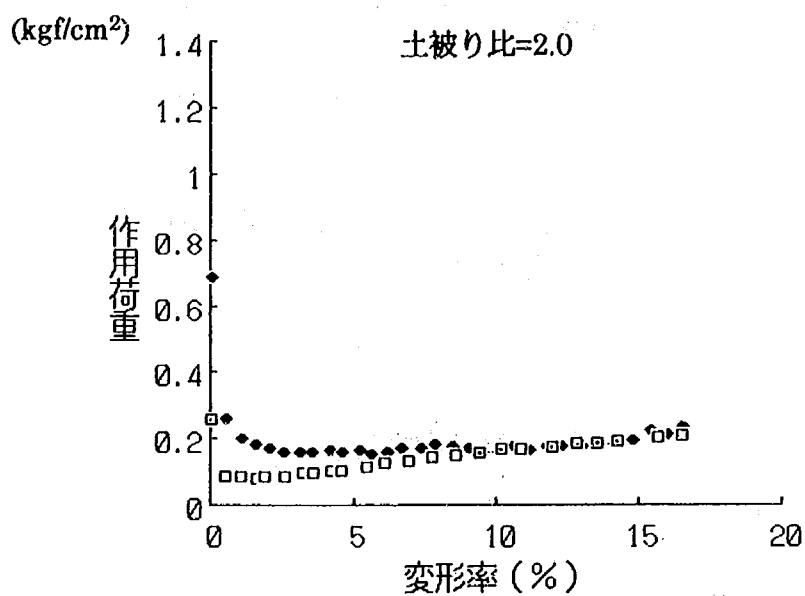
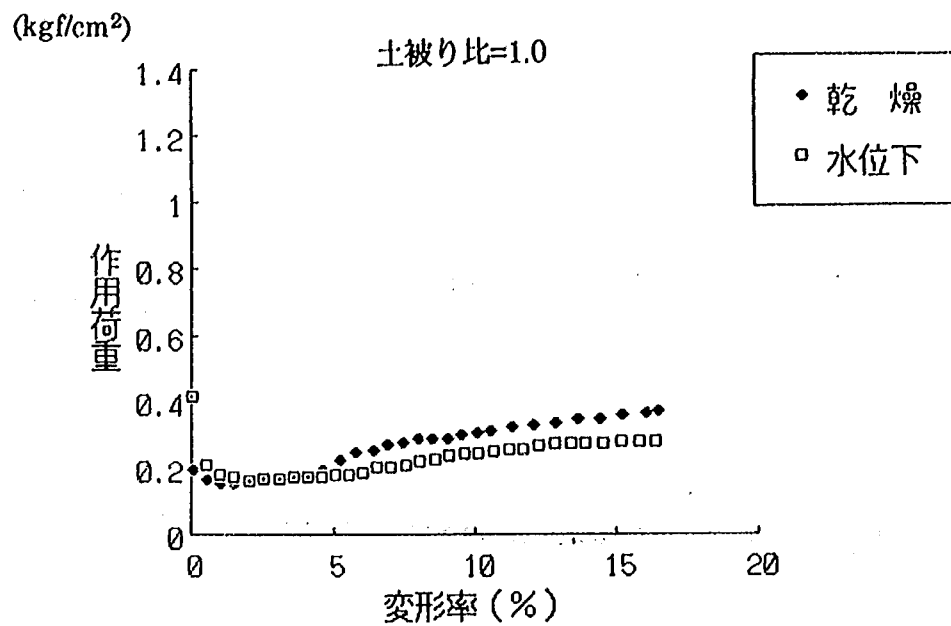
粘性土 乾燥地山 (水圧計)

参図-11 変形率と作用荷重の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土乾燥地山)

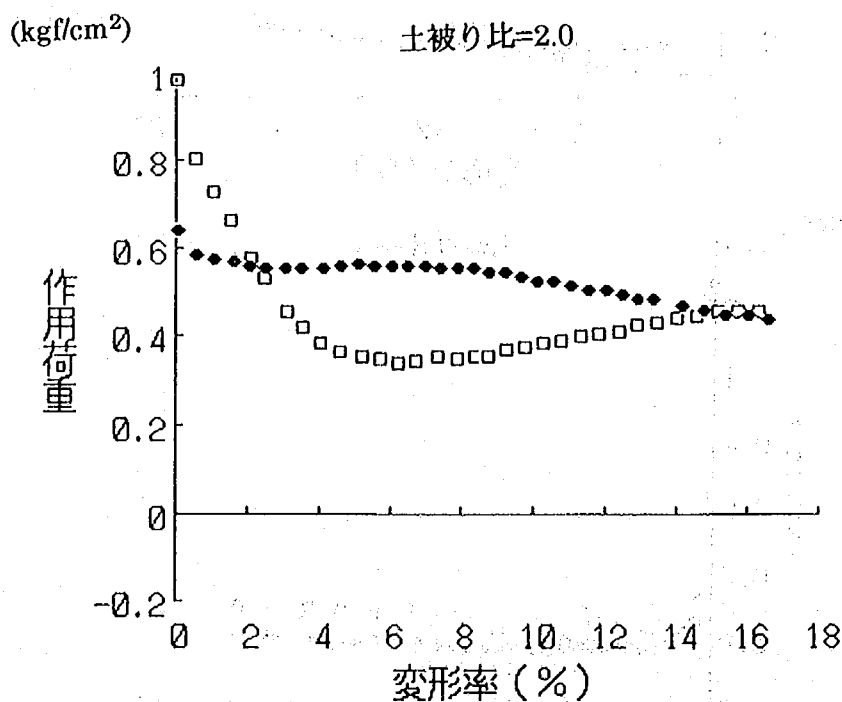
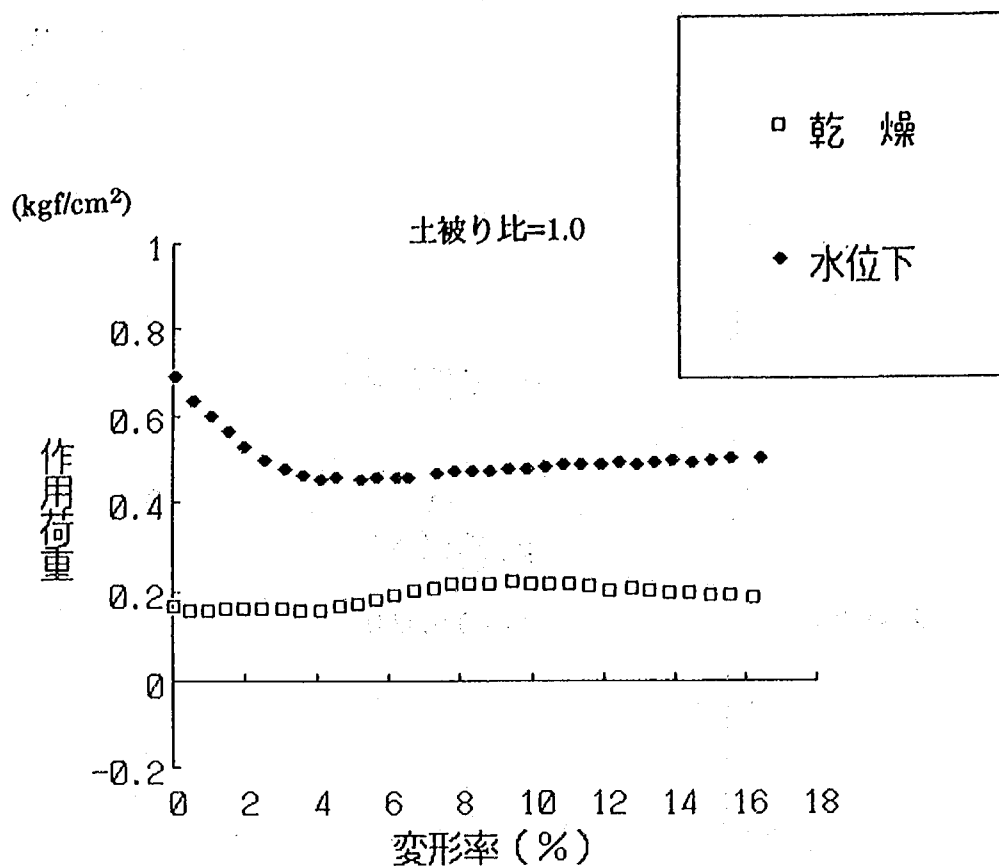


粘性土 水位下地山 (土圧計①)

参図-12 変形率と天端支保荷重の関係 (ゴムチューブ式, 粘性土水位下地山)



参図-13 変形率と天端支保荷重の関係 (砂質土乾燥地山と水位下地山との比較)
(ゴムチューブ式)



参図-14 変形率と天端支保荷重の関係 (粘性土乾燥地山と水位下地山との比較)

トンネルの変形と支保荷重に
関する研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3430号
平成8年2月(1996)

真下 英人 角湯 克典
池口 正晃

要 旨

トンネルは、地山自体およびトンネル支保工の両者の支持機能により地下空間を保持する構造物であり、その合理的な設計・施工をおこなうには、支保工に作用する荷重がトンネルの変形とともに変化するという地山の挙動特性を有効に活用しなければならない。そこで本研究は、トンネルの変形と支保荷重との関係に、地山条件(土被りや水)がどのように影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

キーワード：トンネル，地山の安定問題，特性曲線，落し戸，遠心力

郵便はがき

3 0 5 - □ □

切手
は
を
は
て
さ
い
下

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

道路部トンネル研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第3430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3430号

○ トンネルの変形と支保荷重に関する研究