

土 木 研 究 所 資 料

土砂地山におけるロックボルトの 作用効果に関する研究報告書

平成 17 年 3 月

独立行政法人 土木研究所
基礎道路技術研究グループ

Copyright © (2005) 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 Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事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、独立行政法人土木研究所理事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。

土砂地山におけるロックボルトの 作用効果に関する研究報告書

独立行政法人 土木研究所 基礎道路技術研究グループ

上席研究員（トンネル）	真下英人
元主任研究員（トンネル）	蒲田浩久
（現 清水建設（株））	
元研究補助員（トンネル）	森本 智
（現 （独）土木研究所企画部研究企画課）	
専門研究員（トンネル）	木谷 努

要旨

本研究では、ロックボルトや先受け工の作用効果の解明を目的として、模型実験および数値解析を行った。

実験と解析は、斜めボルトの作用効果に関する遠心力載荷実験と数値解析、先受け工の作用効果に関する遠心力載荷実験、トンネル掘削に伴う緩みとロックボルトの作用効果に関する落戸実験と数値解析である。

これら遠心力載荷実験と解析により、斜めボルトや先受け工の打設角度、ピッチや長さトンネル天端の安定性について明らかにした。さらに、落戸実験と数値解析によりロックボルトの作用効果とトンネル掘削に伴う緩み、ロックボルトの打設時期、打設角度や長さ等の関係について明らかにした。

キーワード：ロックボルト，先受け工，斜めボルト，遠心力載荷実験，落戸実験

目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の概要	2
2. 斜めボルトの効果に関する実験と解析	3
2.1 はじめに	3
2.2 斜めボルトの効果に関する実験	3
2.2.1 実験の概要	3
2.2.2 実験ケース	6
2.2.3 実験状況	6
2.2.4 実験結果	8
2.3 斜めボルトの効果に関する数値解析	11
2.3.1 解析方法	11
2.3.2 解析結果	12
2.4 まとめ	17
3. 先受け工の効果に関する実験	18
3.1 実験方法	18
3.1.1 実験の概要	18
3.1.2 実験ケース	20
3.2 実験状況	21
3.3 実験結果	23
3.3.1 無対策の場合の実験結果	23
3.3.2 先受け工を打設した場合の実験結果	24
3.4 まとめ	26
4. 緩み域でのロックボルトの効果に関する実験	27
4.1 はじめに	27
4.2 実験方法	27
4.2.1 実験の概要	27
4.2.2 実験ケース	29
4.3 実験状況	31
4.4 無対策の場合の実験結果と変形挙動	32
4.5 直方向打設の場合の実験結果	36
4.5.1 実験結果の概要	36
4.5.2 ボルト打設の効果（緩み域なし）	50
4.5.3 ボルト打設の効果（緩み域あり）	53

4.6 横断方向打設の場合の実験結果	55
4.6.1 横断方向ボルト打設の効果（緩み域なし）	55
4.6.2 横断方向ボルト打設の効果（緩み域あり）	62
4.7 解析による検討	65
4.7.1 解析方法	65
4.7.2 解析結果	66
4.8 まとめ	69
5. おわりに	70
参考資料 1. 遠心力載荷実験装置の概要	73
1.1 実験原理	73
1.2 遠心力載荷装置	74
1.3 実験装置の概要	76
参考資料 2. 崩落時の状況写真	78
2.1 斜めボルトに関する実験の崩落状況	78
2.2 先受け工に関する実験の崩落状況	80

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

ロックボルトは、山岳トンネルにおける主たる支保部材の一つと考えられている。しかしながら、その作用効果については、縫付け効果、はり形成効果、内圧効果、アーチ形成効果、地山改良効果といった概念が挙げられているものの、統一的に理論化され、設計に利用できる段階まで解明されるに至っていない。したがって、現在は、過去に施工されたトンネルの実績から標準的な配置と長さが定められているにすぎない。

一方、近年、施工状況等からロックボルトの打設が多様化せざるを得ない場合が多くなってきている。例えば、近年、車両の大型化、交通需要の増大などに伴い既設トンネルの断面を拡大するケースが増えてきている。この断面拡大トンネルについて、これまで実施されてきた支保構造（鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルト）を調査した結果を表 1.1 に示す。表 1.1 によれば、支保構造の中でもロックボルトに関しては、新設と同様に地山に直角にパターンボルトを打設した事例はそれほど多くなく、施工性から新設トンネルに比べ変則的パターンを採用していた事例が多い。

表 1.1 断面拡大トンネルのロックボルトおよび補助工法の例

トンネル	活線状態	地山等級	距離(m)	最大土被り(m)	掘削工法とロックボルト	補助工法
A	○	D	126	20	NATM(側壁導坑先進) ボルトなし	全線フォアポーリング
B	○	D	40	9	在来工法(中段導坑先進)	地山改良工(天端部)
C	○	D	80	15	NATM(3分割施工) パターンボルト(人力施工+継ぎボルト)	坑口部フォアポーリング
D	○	D	124	30	NATM(側壁導坑先進) ボルトなし	全線フォアポーリング
E	○	D	108	30	NATM(上半先進) パターンボルト(人力+継ぎボルト)	先行ボルト(天端部)
F	○	D~CL	56	23	NATM(上半先進) 側壁部のみロックボルト	フォアポーリング
G	△	D~CL	55	20	NATM(上半先進) 側壁部のみロックボルト	フォアポーリング
H	○	D	97	40	NATM(不明) 天端部 L=3m, 40° 斜打ちボルト	先行ボルト(天端部)
I	△	D	98	50	在来工法(上半先進)	特になし

その例として、上半先進工法の場合は、側壁部のロックボルトのみで天端部を省略したり、斜めロックボルトを採用したりしている事例があり、側壁導坑先進工法の場合には、天端部も側壁部もロックボルトを打設していないものなどがある。また、パターンボルトを採用したトンネルでも施工空間が狭いため、人力施工で継ぎボルトになるため非常に苦労したとの報告もある。さらに、補助工法に関して、既設トンネル覆工取り壊し前に、既設トンネルの天端部に

ロックボルトを打設する事例(先行ボルト)があるが、新設トンネルと異なり、既設トンネルの天端部の地山は緩んでいる場合が多く、ボルトの長さや配置の決定方法など設計上不明な点が残されている。

このようにロックボルトに関して、その効果のメカニズムを明らかにして、合理的な設計手法を確立することは、断面拡大トンネルをはじめ、多様化してきているトンネルを設計する上で特に重要であると考えられる。

このような背景のもと、本研究では、作業上の制約等からトンネル進行方向に対して斜めにロックボルトを打設する、いわゆる“斜めボルト”や先受け工の作用効果の解明を目的とした、遠心力載荷実験と数値解析を行う。さらに、ロックボルトの作用効果とトンネル掘削による緩み、ロックボルトの打設時期、打設角度や長さ等との関係を明らかにするため、ロックボルトの打設時期を考慮した落戸実験および数値解析を行った。

1.2 研究の概要

前節で述べた研究の背景と目的のもと、本研究では、以下の検討を行う。

まず、第 2 章において、斜めボルトの作用効果に関して、遠心力載荷装置を用いた模型実験および数値解析を行う。これにより、斜めボルトの打設角度、打設ピッチや長さトンネル天端の安定について考察する。

次に、第 3 章では、フォアポーリング等の先受け工の効果に関して、遠心力載荷装置を用いた模型実験を行う。この実験により、先受け工の打設角度、ピッチと長さトンネル天端部の安定について考察する。

さらに、第 4 章では、ロックボルトの作用効果とトンネル掘削に伴う緩みとの関係とともに、ロックボルトの打設角度、施工時期や長さ支保効果の関係を検討するため、落戸実験を行い検討する。さらに、この実験に対する数値解析を行う。

最後に第 5 章においては、第 2 章から第 4 章において行われた検討内容をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

2. 斜めボルトの効果に関する実験と解析

2.1 はじめに

NATM では、主要な支保部材の一つとしてロックボルトが用いられている。しかしながら、その効果に関しては、縫い付け効果、内圧効果、アーチ効果、地山改良効果などいくつかが挙げられているものの、未だ不明な点が多く、適切な配置、長さなどの決定方法も明確になっていない。特に低土被りの未固結地山や破碎帯などの軟弱層でのロックボルトの効果、核残し掘削等の採用時に作業上の制約から少し斜めに打設し、支保効果と切羽前方の安定化（先受け効果）の両方を期待した場合のロックボルトの効果等をより明確化した、合理的な設計法の確立が必要である。

ここでは、トンネル進行方向に対する打設角度（斜めボルト）の天端安定効果に対する影響を明らかにするため遠心力载荷実験を行った。さらに、これらの実験結果の妥当性を検証するため、3次元有限差分法（FDM）を用いた数値解析を行った。

2.2 斜めボルトの効果に関する実験

2.2.1 実験の概要

本章では、トンネル進行方向に対して斜めにロックボルトを打設する斜めボルトの支保効果の影響を明らかにすることを目的として遠心力载荷模型実験を行った。

実験装置は、図 2.1 に示す内寸 $140 \times 500 \times 400$ (mm)の模型容器に、アクリル製の半円筒の支保模型と、トンネル掘削を模擬するアクリル製の半円柱（径 $D=80$ mm）のトンネル掘削模擬装置が設置したものである。

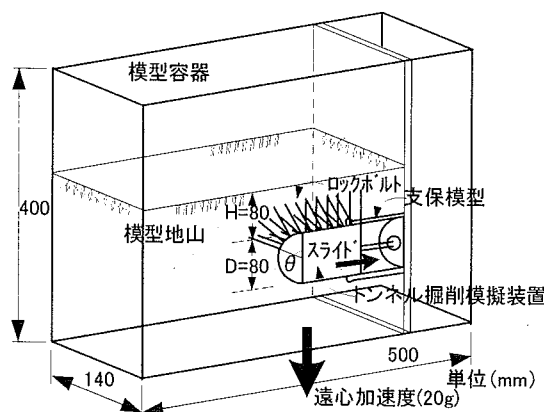


図 2.1 実験装置概要図

実験は、模型地山にロックボルトとトンネル模型を設置し、所定の遠心力加速度（20g）まで遠心力载荷を行い、その状態でトンネル掘削模擬装置を引き抜いて 1.0D の素掘区間を設け、応力解放を行い、そのときの地山安定状態の観察を行った。

模型地山は、含水比 $w=6.5\%$ に調整した豊浦砂標準を、湿潤密度が $\gamma_t=15.1\text{kN/m}^3$ となるように、角材（55mm×55mm）を用いて 2cm 毎に突き固めて作成した。表 2.1 に物性値を、表 2.2 に地盤作成

時の試料投入重量を示す。なお、土被り比 H/D （本章では、 H :トンネル土被り、 D :トンネル径）は 1 とした。

ロックボルトは、表面に砂を付着させた径が 1.6mm のりん青銅を用い、地山作成後に模型容器側板を一旦取り外し、トンネル掘削模擬装置を引き抜き、地山を素堀状態にして、所定の位置に挿入した。図 2.2 に先受工の配置図を示す。実験手順のフローを図 2.3 に示す。

表 2.1 地山材料物性値

地山材料 (豊浦砂)	単位体積重量 : γ t(kN/m ³)	15.1
	含水比 : w (%)	6.5
	粘着力 : c (kPa)	4.6
	内部摩擦角 : ϕ (deg)	34.5

c , ϕ は一面せん断試験より求めた。
(垂直応力 2.9~14.7kN/m²)

表 2.2 地盤作成時の試料投入重量

層目	摘要	地盤高さ (cm)	撒き出し厚さ (cm)	体積 (cm ³)	試料重量 (kg)
10		20.0	2.0	1106.0	1.690
9		18.0	2.0	1106.0	1.690
8	トンネル天端	16.0	2.0	1106.0	1.690
7		14.0	2.0	1106.0	1.690
6	トンネル中央	12.0	2.0	988.1	1.510
5		10.0	2.0	922.3	1.410
4	トンネル底部	8.0	2.0	922.3	1.410
3		6.0	2.0	988.1	1.510
2		4.0	2.0	1106.0	1.690
0		2.0	2.0	1106.0	1.690

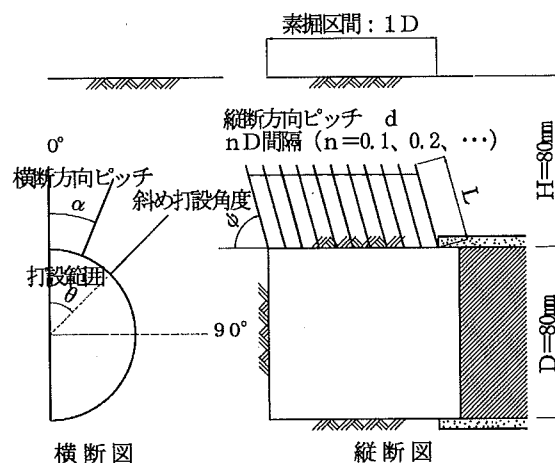


図 2.2 ロックボルト配置図

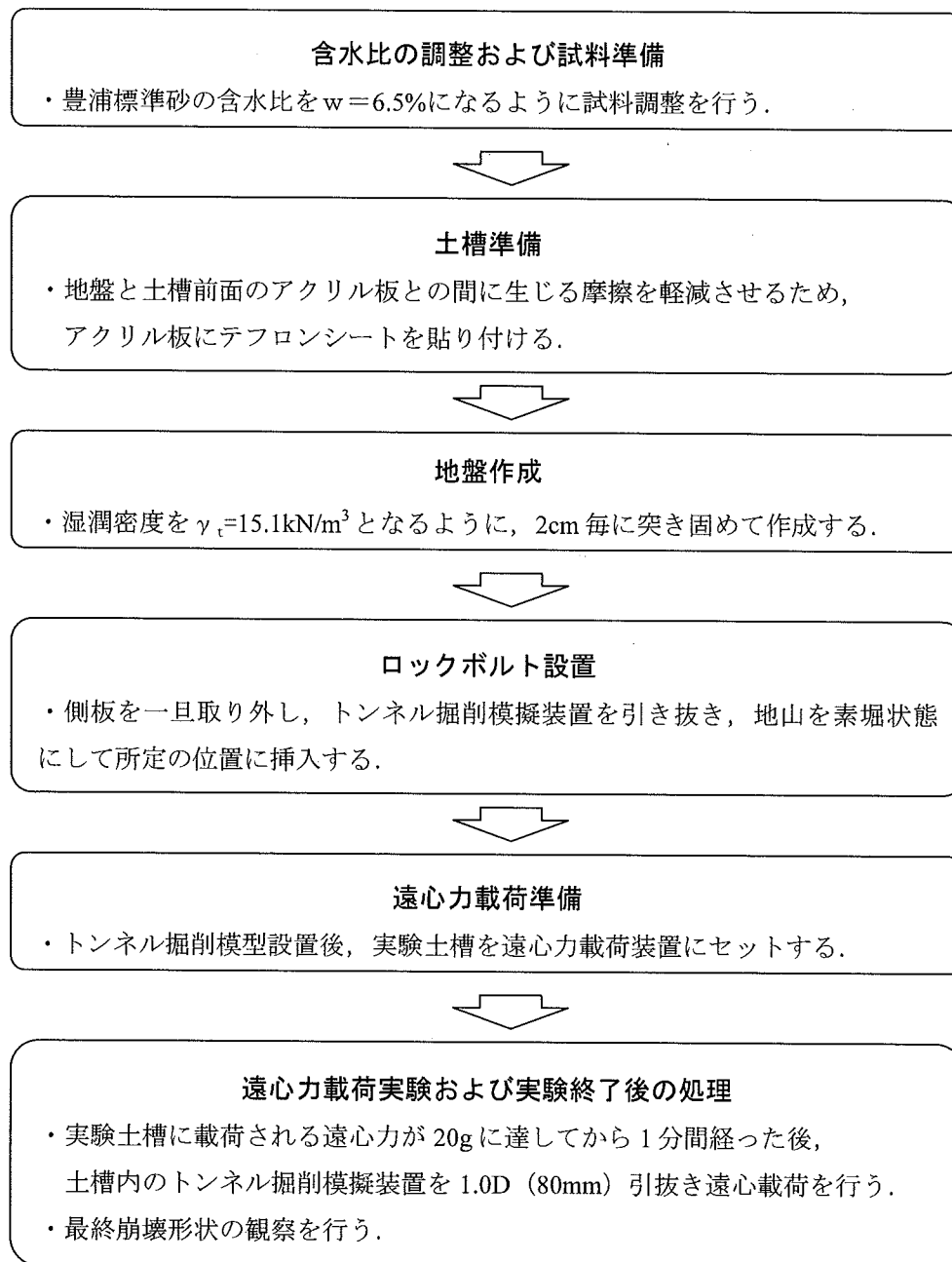


図 2.3 実験手順フロー

2.2.2 実験ケース

実験ケースは、打設範囲 θ を 45° に固定して、ロックボルトの長さ L (20, 40 mm) , 横断方向ピッチ α ($22.5^\circ, 11.25^\circ$) を変化させた 3 種類の横断配置パターンについて、斜め打設角度 ϕ ($90^\circ \sim 15^\circ$) , 縦断方向ピッチ d ($0.1D, 0.2D$) を変化させた場合について行った。

実験条件一覧表を表 2.3 に示す。

表 2.3 実験条件一覧表

打設角度 先受工長 横断ピッチ	縦断方向 打設ピッチ と 打設範囲	斜め打設 角度 $\phi = 90^\circ$	斜め打設 角度 $\phi = 75^\circ$	斜め打設 角度 $\phi = 45^\circ$	斜め打設 角度 $\phi = 30^\circ$	斜め打設 角度 $\phi = 15^\circ$
$L=40\text{mm}$ $\alpha=11.25^\circ$	$d=0.2D$ $0 \sim 45^\circ$	○	○	○	—	—
$L=40\text{mm}$ $\alpha=22.5^\circ$	$d=0.1D$ $0 \sim 45^\circ$	○	○	○	○	○
$L=40\text{mm}$ $\alpha=22.5^\circ$	$d=0.2D$ $0 \sim 45^\circ$	○	○	○	—	—
$L=20\text{mm}$ $\alpha=11.25^\circ$	$d=0.1D$ $0 \sim 45^\circ$	○	○	○	—	—
$L=20\text{mm}$ $\alpha=11.25^\circ$	$d=0.2D$ $0 \sim 45^\circ$	○	○	—	—	—

【凡例】 ○ : 実験を実施したケース — : 実験を実施しなかったケース

2.2.3 実験状況

実験状況を写真 2.1～写真 2.6 に示す。

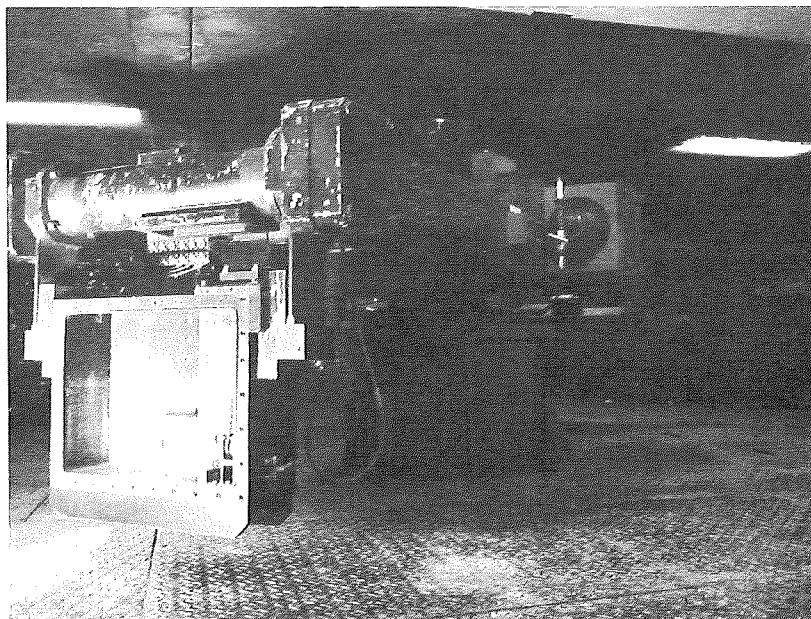


写真 2.1 遠心力载荷実験装置

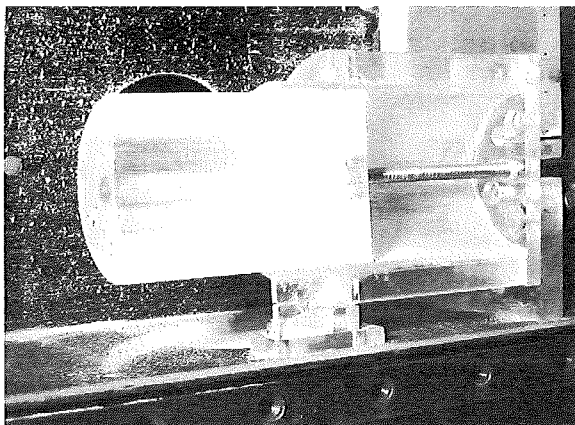


写真 2.2 トンネル掘削模擬装置

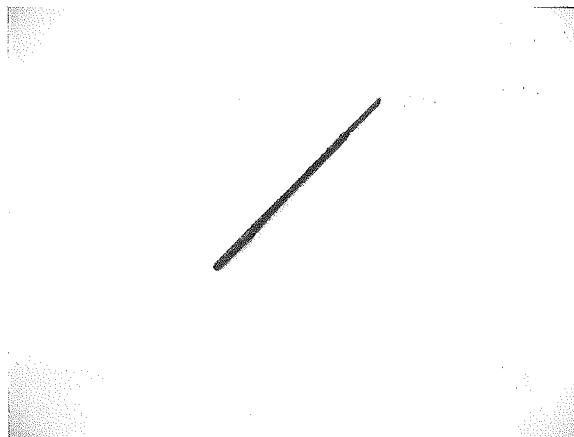


写真 2.3 ロックボルト

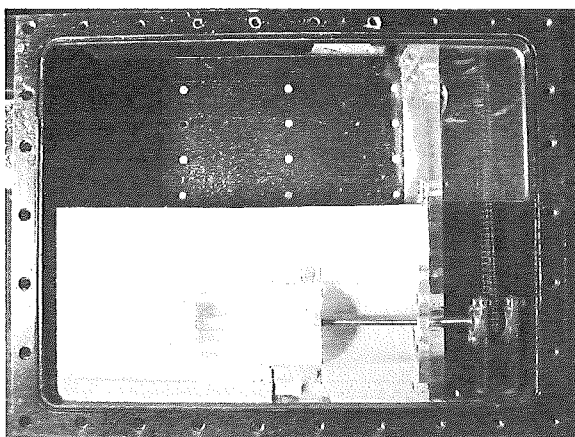


写真 2.4 地山作成状況

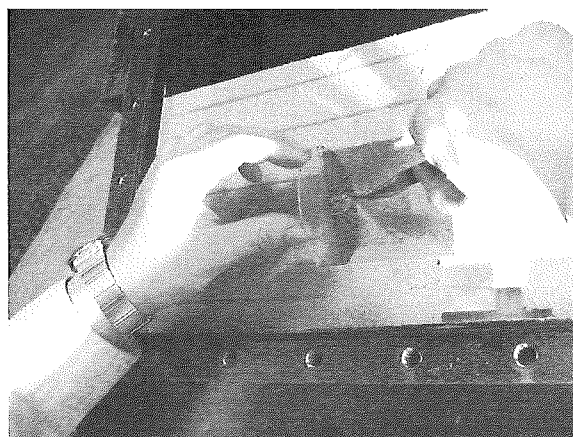


写真 2.5 ロックボルト打設状況

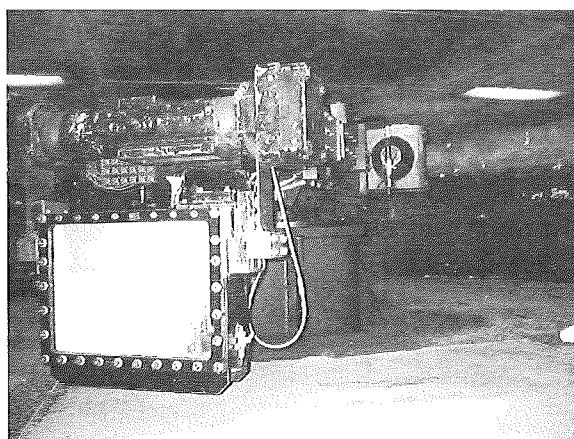


写真 2.6 遠心力載荷装置設置状況

2.2.4 実験結果

(1) 無対策の場合の実験結果

無対策時の天端崩壊写真および天端崩落図を図 2.4 に示す。無対策時に遠心力加速度 20g の状態でトンネル掘削模擬装置を 1.0D 引き抜くと、切羽の崩壊とともに、地表面まで達する天端崩落が発生した。

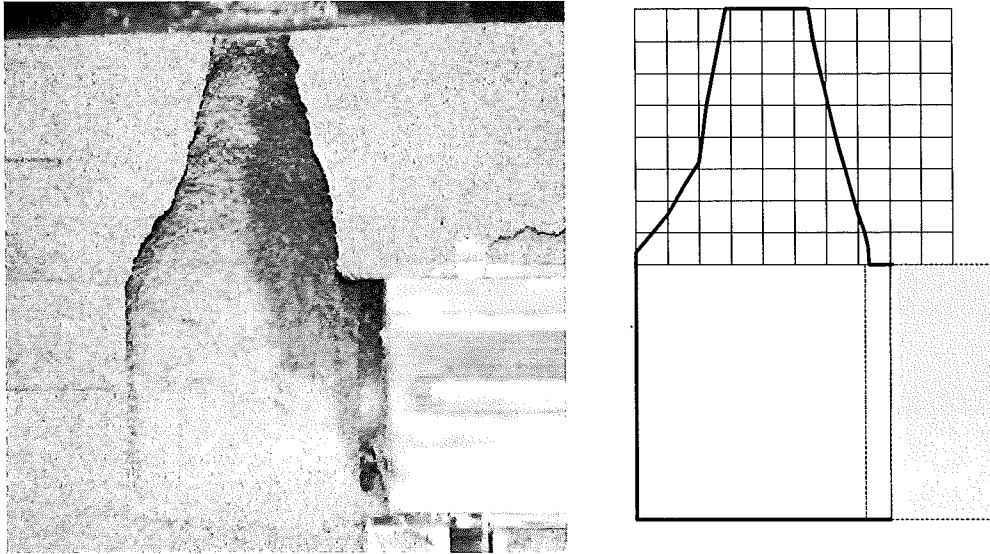


図 2.4 天端崩落写真および同崩落図（無対策）

(2) 斜めボルト工を打設した場合の実験結果

斜め打設角度、横断方向ピッチ、縦断方向ピッチ等を変化させた場合の崩落図一覧を図 2.5 に示す。

(a)の $\phi=90^\circ$ （以下、直ボルトと呼ぶ）の結果を見ると、無対策時の結果に比べ天端崩壊は発生せず、天端部のロックボルトには、天端安定効果があることが分かる。

次に斜めに打設した場合の打設角度の影響について見てみる。全体に打設角度を小さくすると天端安定が悪くなる傾向があることが分かる。この結果から、天端を安定させるためにはある程度の角度が必要であると考えられる。この点について詳細に見てみる。 $\phi=75^\circ$ までは、 $d=0.1D$ の場合、すべての配置パターンにおいて、直ボルトとほぼ同程度の天端安定効果が得られることがわかる。さらに、 $L=40\text{mm}$ 、 $\alpha=22.5^\circ$ （(e)～(i)）の結果から、ある長さ以上のボルトを密にして打設すれば、 $\phi=30^\circ$ 程度までは斜めにしても直ボルトと同程度の効果が発揮される場合があることがわかる。

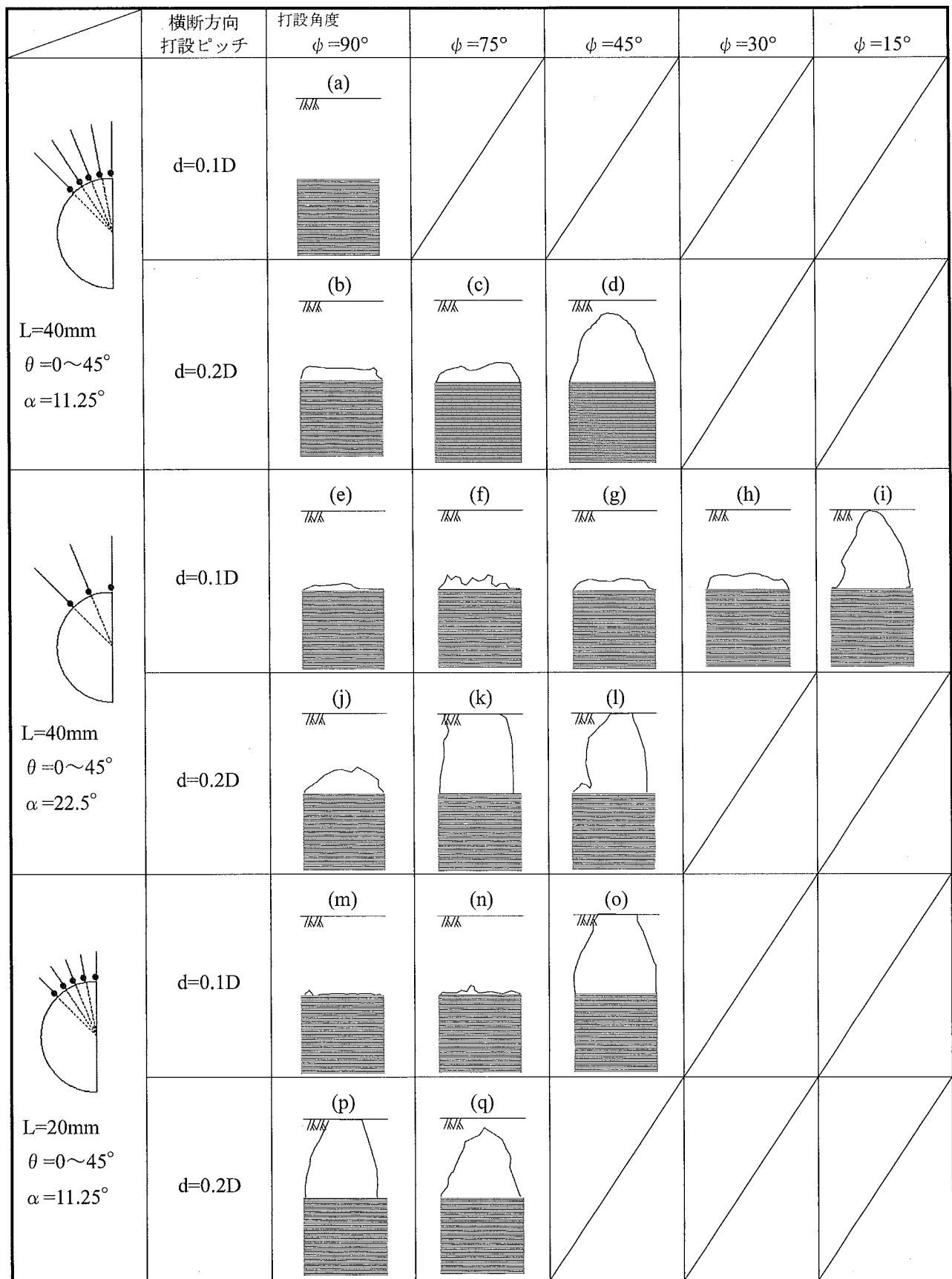


図 2.5 崩落図一覧

斜めに打設した場合のボルト長および縦断方向のピッチの影響について見てみる。ボルト長だけ異なる(c) ($L=40\text{mm}$, $\alpha=11.25^\circ$, $0.2D$, $\phi=75^\circ$) と(q) ($L=20\text{mm}$, $\alpha=11.25^\circ$, $0.2D$, $\phi=75^\circ$) の結果から、天端安定効果を発揮するためには、ある程度の長さが必要であることが分かる。縦断方向のピッチについてはすべての配置パターンにおいて縦断方向の間隔を狭くすることで天端の安定性が向上していることから、斜めに打設せざるを得ない場合は、縦断方向を密に打設する必要があることが分かる。

以上の結果を総合すると、ロックボルトにより地山安定を図るためにはトンネル壁面に直角に打設するのが最も効果的であるが、作業空間などの関係上、直角にロックボルト打設できない場合には、ボルトを長くし、縦断方向に密に打設することで、斜めに打設しても直ボルトと同程度の効果を確保できる場合があるものと考えられる。

ところで、斜めボルトの支保効果は、ボルト直角方向の投影長さで評価されることが多いが、それを検証するために、斜めボルトの直角方向の投影長さとほぼ等しくなる長さを有するボルトをトンネル壁面に直角 ($\phi=90^\circ$) に打設する実験を行った。その結果を図 2.6 に示す。この結果を見ると、(d), (o)のように斜めボルトで天端効果が期待できない場合は、投影長がほぼ等しいロックボルトを直角方向に打設しても効果が期待できないことがわかる。さらに、(h)のように、斜めボルトの方が、投影長がほぼ等しいロックボルトを直角方向に打設した場合よりも効果が大きい場合も見られる。以上のことから、斜めボルトの支保効果は、斜めボルトの直角方向の投影長さがほぼ等しいロックボルトをトンネル壁面に直角方向に打設した場合とほぼ等しいか、やや大きいと評価できるものと考えられる。

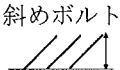
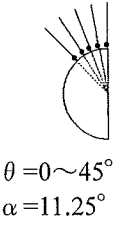
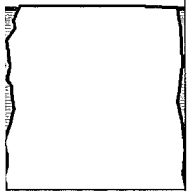
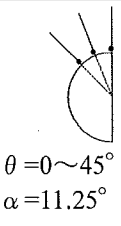
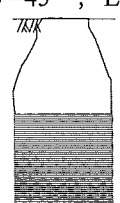
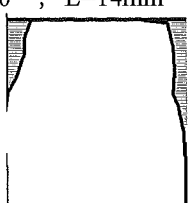
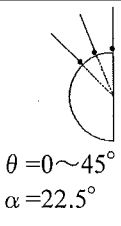
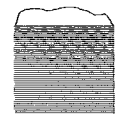
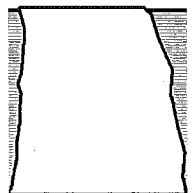
	横断方向 打設ピッチ	斜めボルト 	直ボルト 
 $\theta=0\sim45^\circ$ $\alpha=11.25^\circ$	$d=0.1D$	(d) $\phi=45^\circ$, $L=40\text{mm}$ 	$\phi=90^\circ$, $L=28\text{mm}$ 
 $\theta=0\sim45^\circ$ $\alpha=11.25^\circ$	$d=0.2D$	(o) $\phi=45^\circ$, $L=20\text{mm}$ 	$\phi=90^\circ$, $L=14\text{mm}$ 
 $\theta=0\sim45^\circ$ $\alpha=22.5^\circ$	$d=0.1D$	(h) $\phi=30^\circ$, $L=40\text{mm}$ 	$\phi=90^\circ$, $L=20\text{mm}$ 

図 2.6 投影が等しいボルトの比較

2.3 斜めボルトの効果に関する数値解析

2.3.1 解析方法

三次元弾塑性解析を用いて実験結果との比較を行った。解析手法は、非線形性が強い土砂地山を対象とするため、非線形問題、大変形問題への適用性が高いと考えられている陽解法に基づく有限差分解析法（解析コード F LAC3D）を用いた。解析領域は、実験模型と同じとしたが、実際の計算はボルトの配置の関係もあり模型地山の倍の領域（ $280 \times 240 \times 420$ ）のモデルとした。図 2.7 にモデル図を示すが、ここでは分かり易くするため解析モデルの半分を示している。要素数は 10080 である。地山の破壊基準は Mohr-Coulomb を用い、ロックボルトは、軸力のみ作用するケーブル要素を用いた。解析定数は実験条件と同じとしたが、粘着力については、違いがより明確に出るように若干小さな値を採用した（表 2.4）。なお、ケーブル要素の付着剛性、付着強度は、仮想グラウト径（3mm）を考え、グラウト材で補強された地山の物性値を用いて算定した。

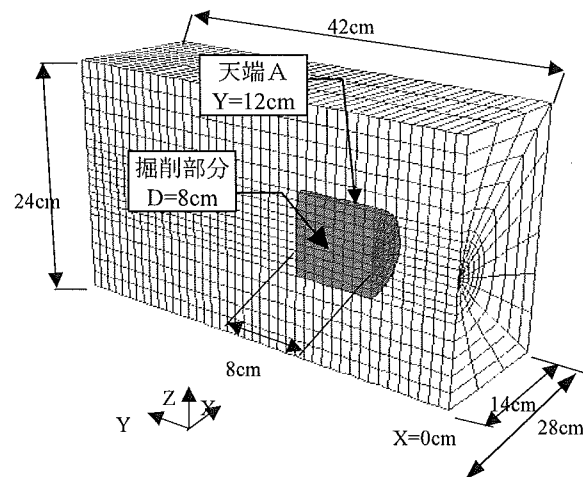


図 2.7 解析モデル図

表 2.4 解析入力定数

地 山 (Mohr-Coulomb)	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	15.1
	弾性係数 (MPa)	20
	ポアソン比	0.3
	粘着力 c (kPa)	1.0
	内部摩擦角 ϕ (deg)	34.5
ロックボルト (ケーブル要素)	弾性係数 E (kN/mm^2)	117.6
	ボルト径 (mm)	1.6
	付着剛性 (kN/m/m)	$7.67\text{e}+03$
	付着強度 (kN/m)	$5.03\text{e}-03$

計算は、 $-20g$ を Z 方向に载荷して初期応力状態を解析し、次に初期応力状態から実験と同様に図 2.7 の着色部分を取除いてトンネル掘削を模擬した。ロックボルトのあるケースは、初期応力解析後の状態にロックボルトを設置し、その後トンネル掘削を行った。

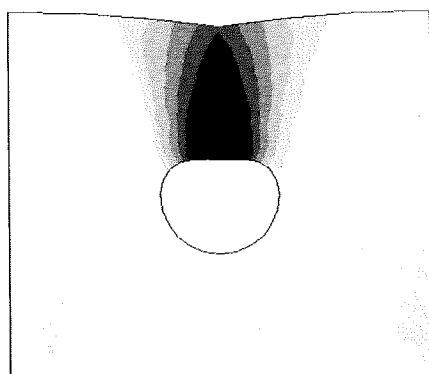
トンネルの安定状況の違いは、図 2.7 に示す天端 A の Z 方向の変位量の大きさで判定できる。さらに、有限差分法では、運動方程式と構成側をステップ毎に繰り返し、釣り合い状態を求めるため、安定化する場合（釣り合い状態の存在する場合）は、ステップの増加に伴い変位が一定値に収束して行く。一方、崩落するような不安定化する場合は、ステップの増加に伴い変位は収束せず発散する方向に進む結果となる。このように収束状況の違いによっても天端安定状況の違いが判定できると考えられる。以上のように、絶対変位量及び収束状況の両方によって天端安定状況を評価した。

2.3.2 解析結果

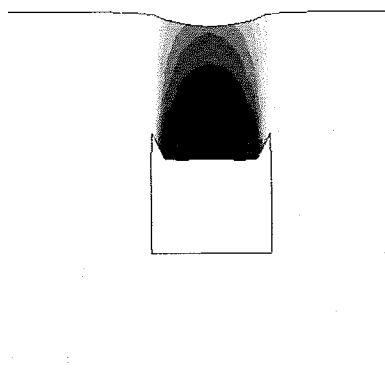
(1) 直ボルトの効果について

これまで行ってきた地山安定効果に対する、ボルトの配置の影響に関する実験結果を確認するために、無対策時（ケース 1）、天端部のみボルト打設（ケース 2：実験ケース(e)に対応）、側壁部のみボルト打設（ケース 3）について計算を行った。ロックボルトは $\phi=1.6\text{mm}$ $L=40\text{mm}$, $\alpha=22.5^\circ$ $d=0.1D$ で、ケース 2 は打設範囲 $0\sim 45^\circ$ 、ケース 3 は打設範囲 $45\sim 90^\circ$ とした。図 2.8 にそれぞれのケースの解析結果（Z 変位等高線図）を示しているが、それぞれの結果は横断方向と縦断方向での切断面を表示し、さらに、ロックボルトのあるケースは、その軸力分布結果を示している。収束状況を見るため、図 2.9 に天端 A の Z 方向変位量と解析ステップ数の関係を示している。

無対策時は、図 2.8(a), (b)から実験結果と同じように天端部が大きく変形していることが分かる。図 2.9 から、一定に収束せず発散しているのが分かり、無対策では、天端が崩壊する状況が発生している。次に、図 2.8 (c), (d)から、天端部のみロックボルトを設置した場合、天端変位が無対策時に比べ大きく抑制され、図-7 から天端変位は収束し安定していることが分かる。実験結果と同様、天端部のロックボルトに地山安定効果があることが分かる。一方、側壁部のみロックボルトを設置した場合も、実験結果では崩壊したが、解析結果では、図 2.8(e), (f)及び図 2.9 の収束状況から、地山安定効果があることが分かる。ただし、ケース 2 と比べると天端変位量は大きく、加えて、かなり局所的に変位が発生しており、天端部に打設したロックボルトの結果に比べると、効果は小さいと言える。また、実際は地山が粒状体であることを考えると、この部分の変位増加が実験では、天端崩壊につながる場合もあるのではないかと考えられる。

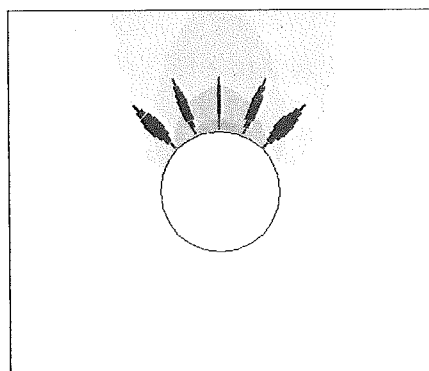


(a) Y=12cm 横断面 (ケース 1)
(XZ 平面)

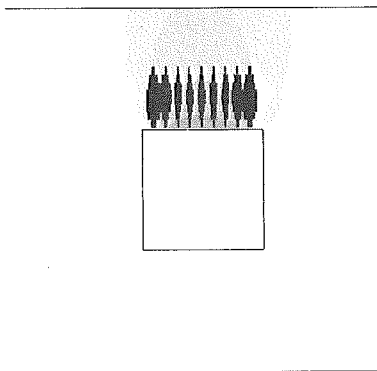


(b) X=0cm 横断面 (ケース 1)
(YZ 平面)

Contour of Z-Displacement
Plane: on
-1.7961e+000 to -1.4000e+000
-1.4000e+000 to -1.2000e+000
-1.2000e+000 to -1.0000e+000
-1.0000e+000 to -8.0000e-001
-8.0000e-001 to -6.0000e-001
-6.0000e-001 to -4.0000e-001
-4.0000e-001 to -2.0000e-001
-2.0000e-001 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 9.6748e-003
Interval = 2.0e-001

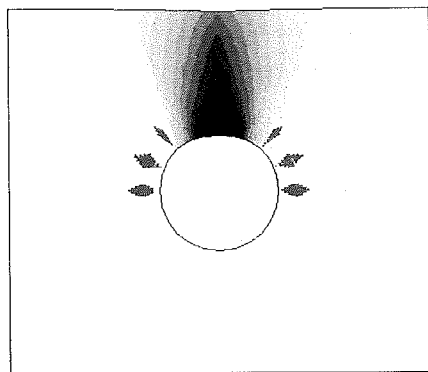


(c) Y=12cm 横断面 (ケース 2)
(XZ 平面)

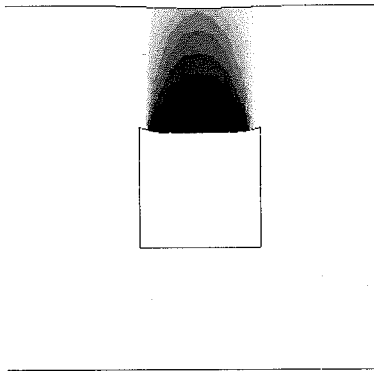


(d) X=0cm 横断面 (ケース 2)
(YZ 平面)

Contour of Z-Displacement
Plane: on
-3.0000e-002 to -2.7500e-002
-2.7500e-002 to -2.5000e-002
-2.5000e-002 to -2.2500e-002
-2.2500e-002 to -2.0000e-002
-2.0000e-002 to -1.7500e-002
-1.7500e-002 to -1.5000e-002
-1.5000e-002 to -1.2500e-002
-1.2500e-002 to -1.0000e-002
-1.0000e-002 to -7.5000e-003
-7.5000e-003 to -5.0000e-003
-5.0000e-003 to -2.5000e-003
-2.5000e-003 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 0.0000e+000
Interval = 2.5e-003



(e) Y=12cm 横断面 (ケース 3)
(XZ 平面)



(f) X=0cm 横断面 (ケース 3)
(YZ 平面)

Contour of Z-Displacement
Plane: on
-3.0000e-002 to -2.7500e-002
-2.7500e-002 to -2.5000e-002
-2.5000e-002 to -2.2500e-002
-2.2500e-002 to -2.0000e-002
-2.0000e-002 to -1.7500e-002
-1.7500e-002 to -1.5000e-002
-1.5000e-002 to -1.2500e-002
-1.2500e-002 to -1.0000e-002
-1.0000e-002 to -7.5000e-003
-7.5000e-003 to -5.0000e-003
-5.0000e-003 to -2.5000e-003
-2.5000e-003 to 0.0000e+000
0.0000e+000 to 0.0000e+000
Interval = 2.5e-003

図 2.8 Z 変位等高線図

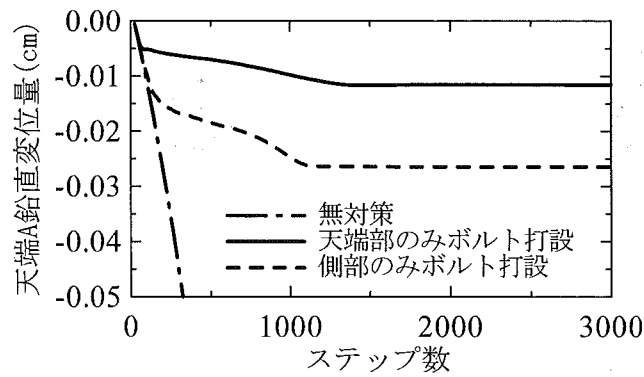


図 2.9 天端変位と解析ステップ数の関係

次に、長さの効果を見るため、配置は同じとして、ボルト長を $L=20\text{mm}$ とした場合の天端部のみ打設（ケース 4）、側壁部のみ打設（ケース 5）の計算を行った。図 2.10 と図 2.11 にケース 4、5 の結果をそれぞれ示す。ケース 4 の変位は最終的に収束し安定した。しかしケース 2 に比べ天端変位は大きくなっており、ボルトが長い方が地山安定効果は高いとのこれまでの実験結果と一致した。一方、ケース 5 では、天端変位は収束せず、地山は安定化しなかった。この結果からも天端部のボルトの方が、側壁部のボルトより地山安定効果が高いことが分かる。

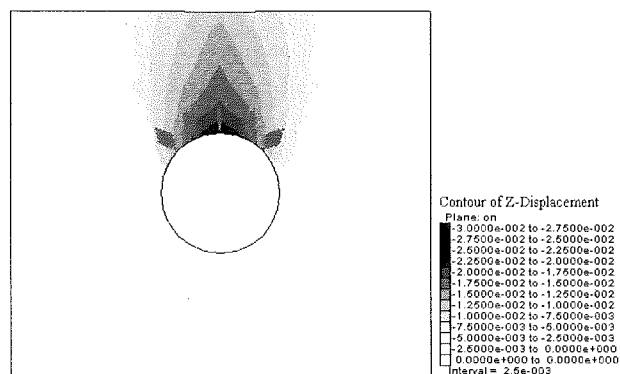


図 2.10 Z 変位等高線図（ケース 4）Y=12cm 横断面

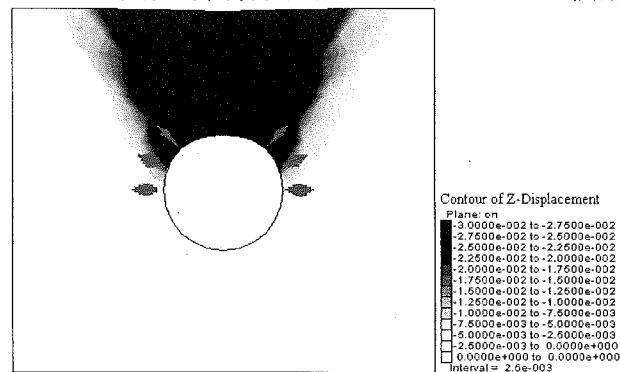


図 2.11 Z 変位等高線図（ケース 5）Y=12cm 横断面

(2) 斜めボルトの効果について

斜めボルトの効果を確認するため、ケース 2（ $\theta=0\sim 45^\circ$ 、 $L=40\text{mm}$ 、 $\alpha=22.5^\circ$ 、 $d=0.1D$ ）と同じ配置で、斜め打設角度 ϕ を 75° 、 45° 、 30° と変えた場合の計算を行った。それぞれ実験ケース(f), (g),

(h)に対応している。図 2.12～図 2.14 は、それぞれに対応した解析結果 ($X=0\text{cm}$ 縦断面)，図 2.15 は、天端AのZ変位量と解析ステップ数の関係を示している。

図 2.12 から $\phi=75^\circ$ では、図 2.8(d)の $\phi=90^\circ$ の結果と比較して、ボルト軸力がやや左右非対称となっているが、天端変位量もほぼ同じく地山は安定した。図 2.15 の収束状況からも、 $\phi=90^\circ$ とほぼ同じになっているのが分かる。図 2.13 の 45° の場合は、さらに、ボルトの軸力分布・変位分布が非対称形となったが、図 2.15 から分かるように最終的には収束し地山は安定した。一方、 $\phi=30^\circ$ まで傾斜させると、図 2.14 から急激に変位が大きくなり、一部のボルトに圧縮応力が発生しているなど地山が不安定しているのが分かる。さらに、図 2.15 から天端変位は、収束していないことが分かる。これらの結果は、実験結果の直ボルトが最も地山安定効果が高く傾斜するに従いその効果は下がる傾向と一致している。また、実験結果では $\phi=30^\circ$ (図 2.5 (h)) まで安定化し 15° で不安定化したが、数値解析においても、 45° から 30° で急激に地山安定効果無くなる傾向が再現された。

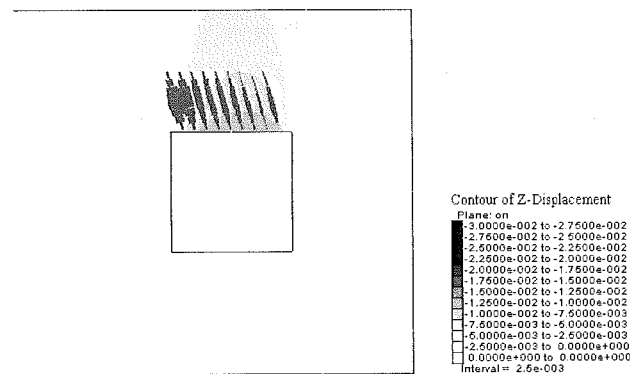


図 2.12 Z 変位等高線図 ($\psi=75^\circ$ ケース 6) $x=0\text{cm}$ 縦断面

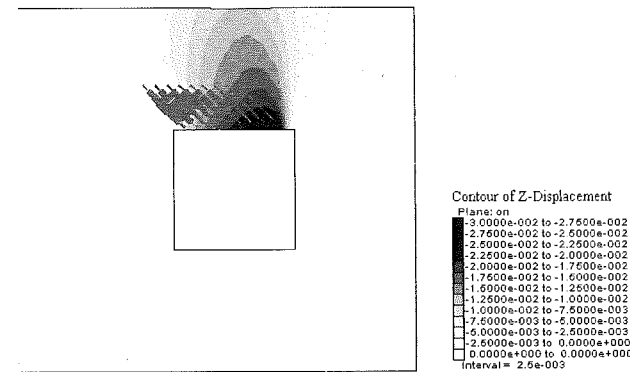


図 2.13 Z 変位等高線図 ($\psi=45^\circ$ ケース 7) $x=0\text{cm}$ 縦断面

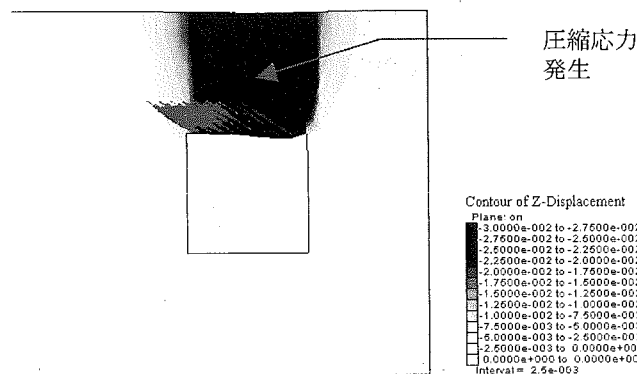


図 2.14 Z 変位等高線図 ($\psi=30^\circ$ ケース 8) $x=0\text{cm}$ 縦断面

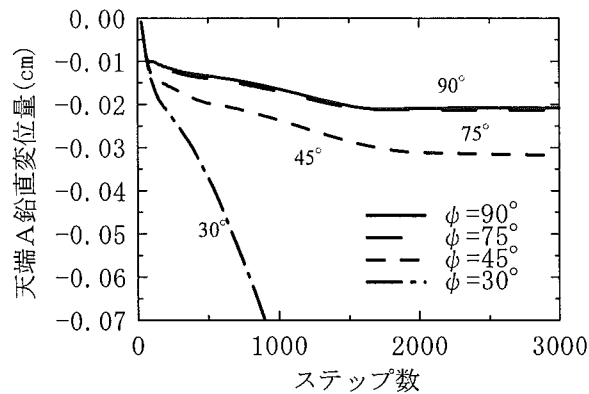


図 2.15 天端変位と解析ステップ数の関係（斜めボルトの効果）

次に、ボルトの長さや縦断方向のピッチの影響を見るためケース 7 ($L=40\text{mm}$, $d=0.1D$, $\theta=0\sim 45^\circ$, $\alpha=22.5^\circ$, $\phi=45^\circ$) のボルト長 $L=20\text{mm}$ としたケース 9 および縦断方向のピッチを $d=0.2D$ としたケース 10（実験ケース(I)に対応）を計算した。図 2.16、図 2.17 にケース 9,10 の結果を示している。図 2.18 は、天端AのZ変位量と解析ステップ数の関係を示している。これらを見ると、どちらのケースも図 2.13 のケース 7 の結果に比べ、天端変位が大きくなっており、さらに、図 2.18 から天端変位は収束せずに発散していくことが分かる。この結果より、ボルト長を短くすること、縦断方向のピッチを広げることは、それぞれ地山を不安定化させることになることが分かり、実験結果と同様な傾向となった。

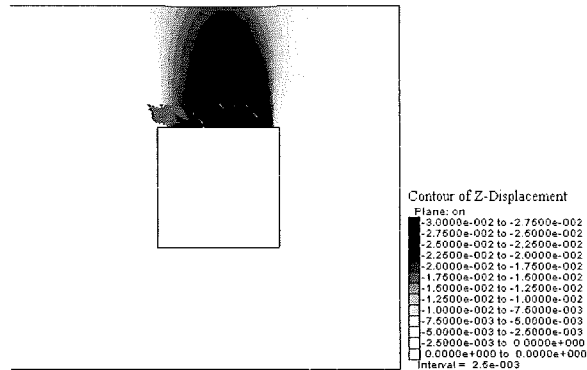


図 2.16 Z 変位等高線図（ケース 9） $x=0\text{cm}$ 縦断面

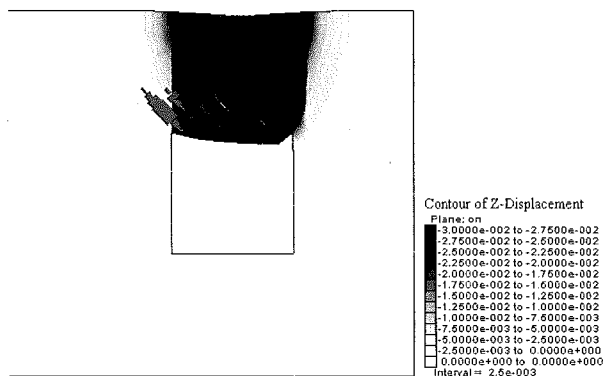


図 2.17 Z 変位等高線図（ケース 9） $x=0\text{cm}$ 縦断面

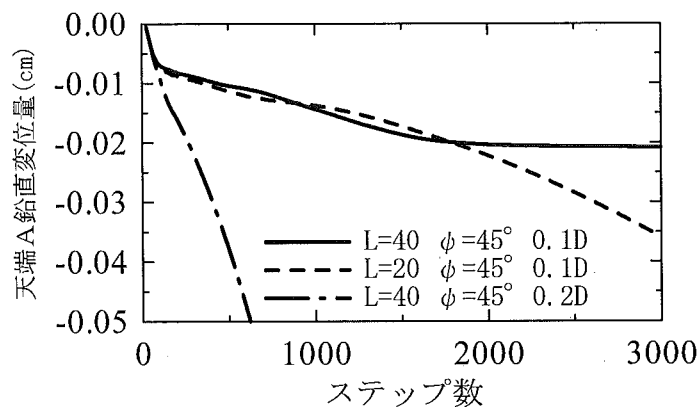


図 2.18 天端変位と解析ステップ数の関係（斜めボルトの縦断ピッチ，長さの関係）

2.4 まとめ

本研究では，天端部のロックボルトに関して，トンネル進行方向の打設角度の影響を明らかにすることを目的とした遠心力载荷実験および実験結果と比較するため三次元弾塑性解析（FDM）を実施した．その結果，以下のことが明らかになった．

- ①実験結果より，地山（天端）安定効果は，直ボルトが最も高いことが分かった．しかしながら，配置や長さを適切に設定することにより，斜めボルトでも直ボルトと同程度の地山安定効果が期待できる場合があることが明らかになった．
- ②数値解析により，天端部のみに打設された直ボルト（打設角度=90°）の地山安定効果をシミュレーションすることができた．さらに，解析では，側壁部にのみ打設された直ボルトでも，天端部のみの打設より効果は低いものの，地山安定効果があることが示された．また，斜めボルトに対する解析結果では，ボルトの打設角度が小さくなると地山安定効果が小さくなること，ある角度より小さくなると急激に効果が期待できなくなることなど，実験結果と同じ傾向を再現することができた．

3. 先受け工の効果に関する実験

3.1 実験方法

3.1.1 実験の概要

本章では，土砂地山における先受け工の打設角度が天端崩落の抑制効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的として遠心力载荷模型実験を行った．

実験装置は，図 3.1に示す内寸 $140 \times 500 \times 400(\text{mm})$ の模型容器に，アクリル製の半円筒の支保模型と，トンネル掘削を模擬するアクリル製の半円柱（径 $D=80\text{mm}$ ）のトンネル掘削模擬装置が設置してある．

実験は，模型地山に先受工（ロックボルト）とトンネル模型を設置し，所定の遠心加速度（ $30g$ ）まで遠心载荷を行い，その状態でトンネル掘削模擬装置を引き抜いて $0.1D$ の素掘区間を設け応力解放を行い，そのときの地山安定状態の観察を行った．

模型地山は，含水比 $w=6.5\%$ に調整した豊浦標準砂を，湿潤密度が $\rho_t=1.40\text{g/cm}^3$ となるように，角材（ $55\text{mm} \times 55\text{mm}$ ）を用いて 2cm 毎に突き固めて作成した．表 3.1に物性値を，表 3.2に地盤作成時の試料投入重量を示す．なお，土被り比 H/D （本章では， H ：トンネル土被り， D ：トンネル径）は 1 とした．

先受工には，表面に砂を付着させた径が 1.6mm のりん青銅を用いた．先受け工は，遠心载荷前の地山作成時に，一旦トンネル模擬装置を引き抜き，地山を素掘状態にして，所定の位置に挿入した．先受工の端部は長さ $0.1D$ の“かかりしろ”を設けている．図 3.2に先受工の配置図を示す．実験手順のフローを図 3.3に示す．

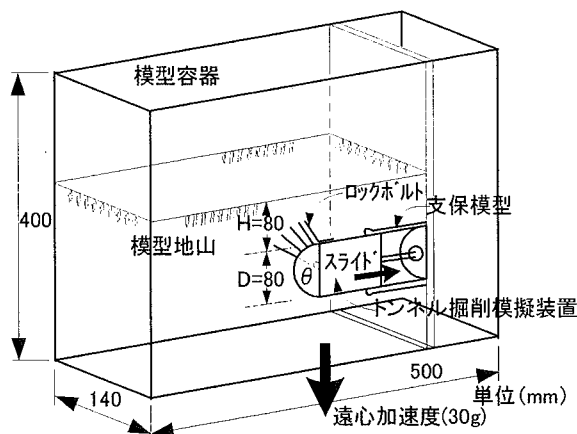


図 3.1 実験装置概要図

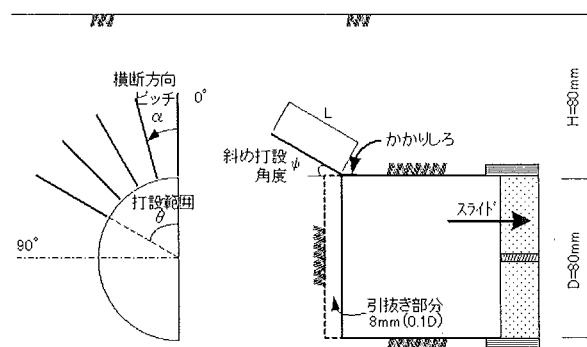


図 3.2 先受け工配置図

表 3.1 地山材料物性値

地山材料 (豊浦砂)	単位体積重量	: $\gamma \text{ t}(\text{kN/m}^3)$	14.0
	含水比	: $w(\%)$	6.5
	粘着力	: $c(\text{kPa})$	4.6
	内部摩擦角	: $\phi(\text{deg})$	34.5

c ， ϕ は一面せん断試験より求めた．
(垂直応力 $2.9 \sim 14.7\text{kN/m}^2$)

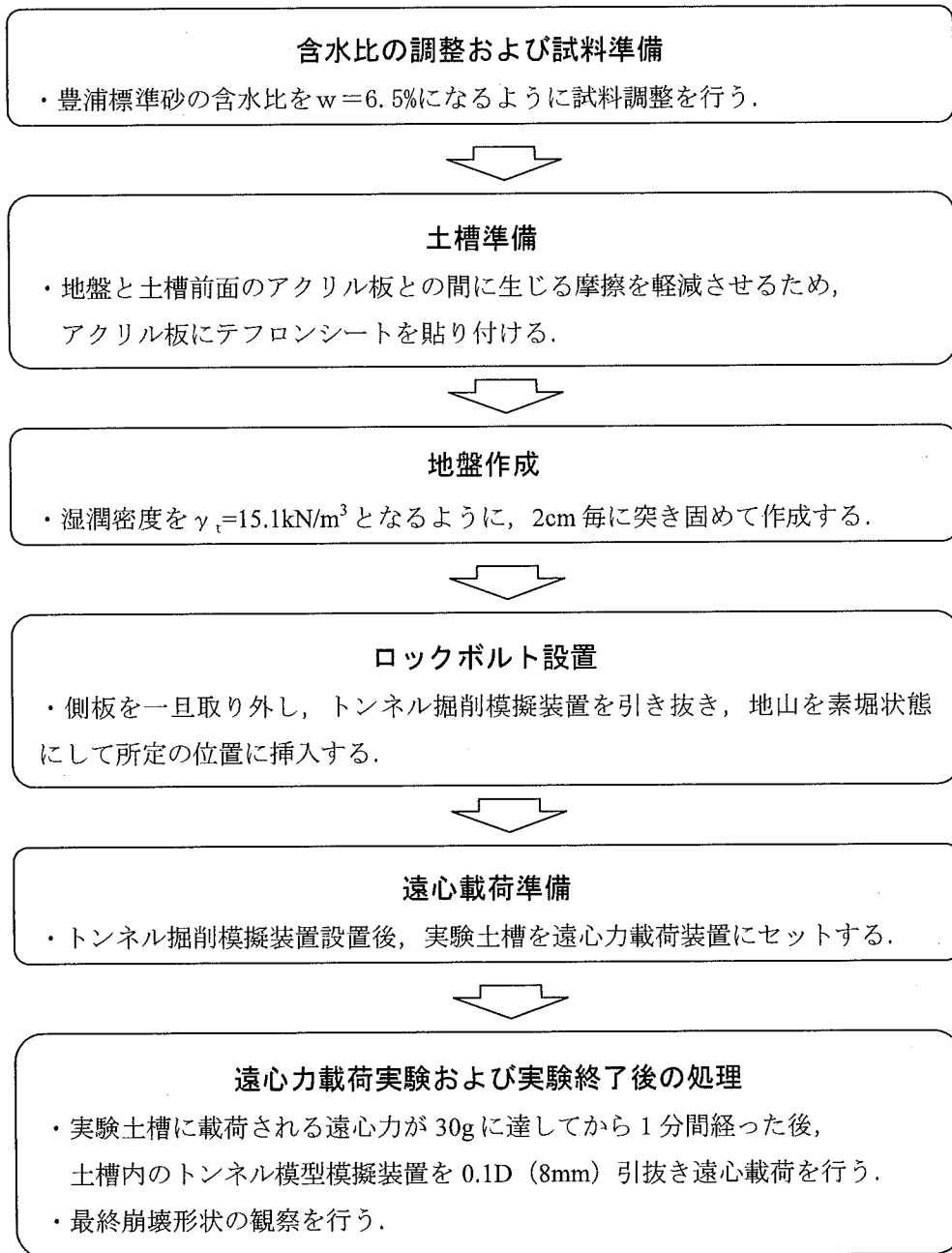


図 3.3 実験手順フロー

表 3.2 地盤作成時の試料投入重量

層目	摘要	地盤高さ (cm)	撒き出し厚さ (cm)	体積 (cm ³)	試料重量 (kg)
10		20.0	2.0	1106.0	1.690
9		18.0	2.0	1106.0	1.690
8	トンネル天端	16.0	2.0	1106.0	1.690
7		14.0	2.0	1106.0	1.690
6	トンネル中央	12.0	2.0	988.1	1.510
5		10.0	2.0	922.3	1.410
4	トンネル底部	8.0	2.0	922.3	1.410
3		6.0	2.0	988.1	1.510
2		4.0	2.0	1106.0	1.690
0		2.0	2.0	1106.0	1.690

3.1.2 実験ケース

実験ケースは、打設範囲 θ を 60° に固定して、先受工の長さ L (20,30,40,80mm)，斜め打設角度 ϕ ($0,10,15,45,60,75^\circ$)，横断方向ピッチ α ($7.5,15^\circ$) を変化させたケースを行った。実験条件一覧表を表 3.3 に示す。

実験状況を写真 3.1～写真 3.7 に示す。

表 3.3 実験条件一覧表

打設角度 先受工長 横断ピッチ	$\phi=0^\circ$	$\phi=10^\circ$	$\phi=15^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=45^\circ$	$\phi=60^\circ$	$\phi=75^\circ$
L=40mm $\alpha=15^\circ$	○	○	○	○	○	—	—
L=40mm $\alpha=7.5^\circ$	—	—	○	○	○	○	—
L=30mm $\alpha=15^\circ$	○	○	—	—	—	—	—
L=30mm $\alpha=7.5^\circ$	—	○	○	○	○	—	—
L=80mm $\alpha=15^\circ$	—	—	○	○	○	○	○
L=20mm $\alpha=15^\circ$	○	—	—	—	—	—	—
L=20mm $\alpha=7.5^\circ$	○	○	—	—	—	—	—

【凡例】 ○：実験を実施したケース —：実験を実施しなかったケース

3.2 実験状況

実験状況を写真 3.1～写真 3.7 に示す。

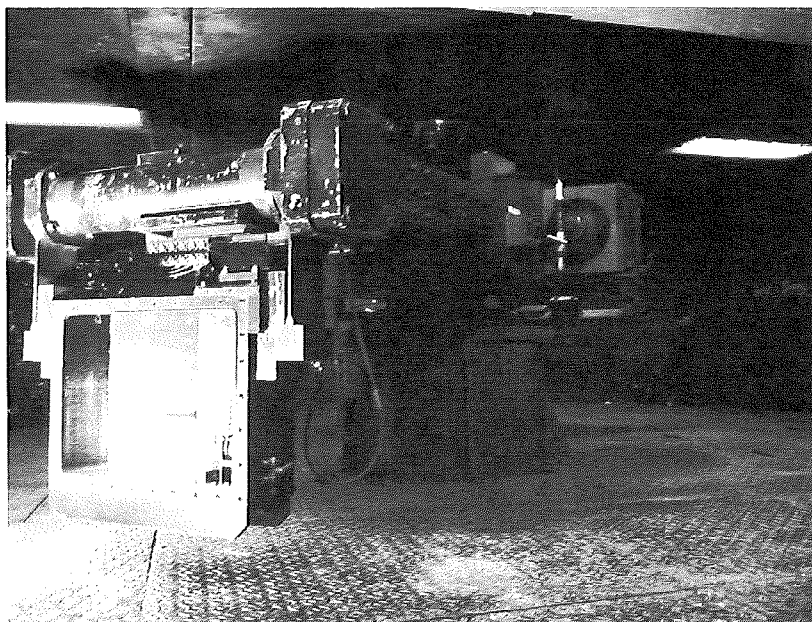


写真 3.1 遠心力载荷実験装置

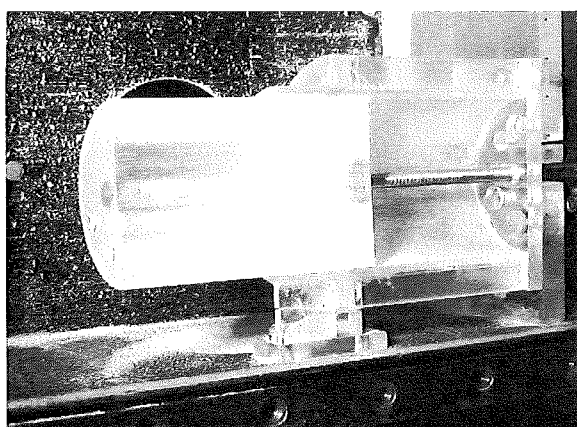


写真 3.2 トンネル掘削模擬装置



写真 3.3 ロックボルト

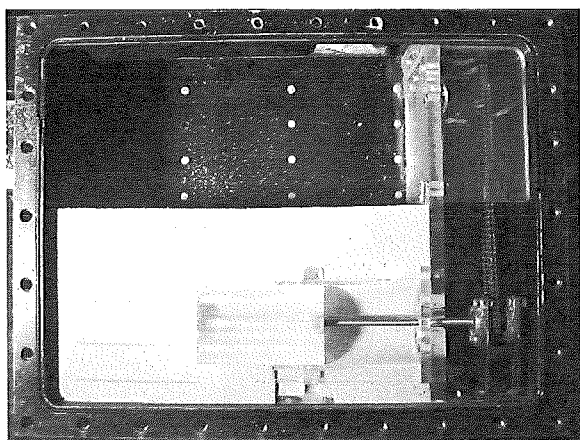


写真 3.4 地山作成状態

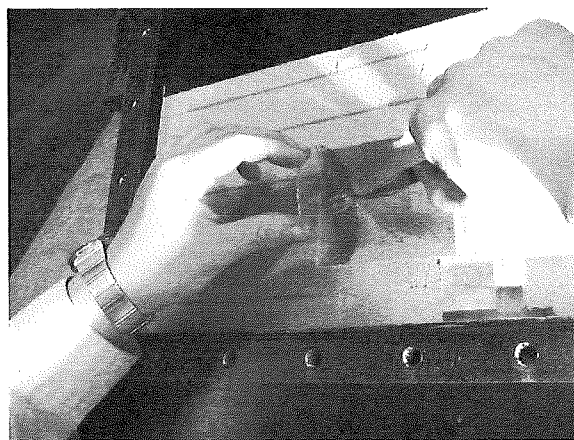


写真 3.5 ロックボルト打設状況



写真 3.6 ロックボルト打設完了状況

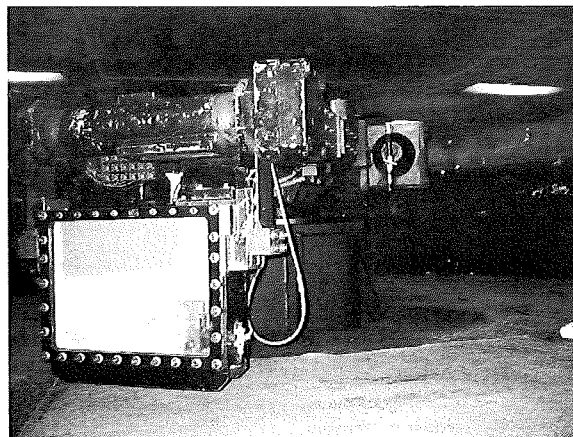


写真 3.7 遠心载荷装置設置状況

3.3 実験結果

3.3.1 無対策の場合の実験結果

無対策時の天端崩壊写真および天端崩落図を図 3.4 に示す。無対策時に遠心加速度 $30g$ の状態でトンネル掘削模擬装置を $0.1D$ 引き抜くと、切羽の崩壊とともに、地表面まで達する天端崩落が発生した。

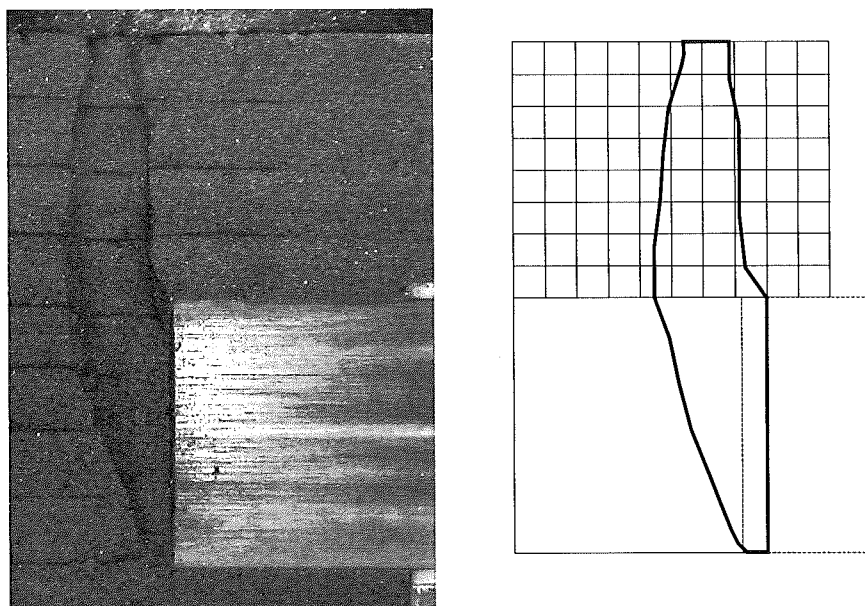


図 3.4 天端崩落写真および同崩落図（無対策）

3.3.2 先受け工を打設した場合の実験結果

先受工を長さ、横断方向ピッチ、角度を変化させて打設した場合の崩落図一覧を図 3.5 に示す。

(1) 打設角度の影響

打設角度の影響は、図 3.5 において、(a)-(b)-(c)-(d)-(e)や(f)-(g)-(h)-(i)や(j)-(k)および(l)-(m)-(n)-(o)等を比較することで考察することができる。

ここでは、例として、長さ $L=40\text{mm}$ 、ピッチ $\alpha=15^\circ$ の場合である、(a)-(b)-(c)-(d)-(e)により考察する。

それによると、(a)の $\phi=0^\circ$ （水平先受工）や(b)の $\phi=10^\circ$ の場合は、切羽は崩壊しているものの、天端は打設した先受工を境にして崩落は発生せず、天端崩落の抑制効果が確認できた。

一方、先受け長さと横断方向ピッチを同じとした(c) $\phi=15^\circ$ (d) $\phi=30^\circ$ 、(e) $\phi=45^\circ$ の場合には、崩壊領域は、先受け工を巻き込み、天端から高さが 1D 近くに達した。

このように、崩落領域を小さく押えるには、同じ先受け工であっても、打設角度を出来るだけ水平に近くすることが有効であることが分かる。

(2) 先受け長さの影響

先受け長さの影響は、図 3.5 において、(a)-(j)や(b)-(k)や(c)-(p)や(d)-(q)や(f)-(m)や(g)-(n)および(h)-(o)等を比較することで考察することができる。

ここでは、例として、ピッチ $\alpha=15^\circ$ 、打設角度 $\phi=0^\circ$ の場合である、(a)-(j)により考察する。

それによると、(a)の長さ $L=40$ の場合は、切羽のみで天端上部の崩落は防がれている。一方、(j)の長さ $L=30\text{mm}$ の場合には、天端より上部 1D 近くまで到達する大きな崩落領域が認められる。

このことから、天端崩落を抑制するには、先受け工に一定以上の長さが必要であることが分かる。

(3) 打設ピッチの影響

打設ピッチの影響は、図 3.5 において、(c)-(f)や(d)-(g)や(e)-(h)や(k)-(l) および(u)-(v)等を比較することで考察することができる。

ここでは、例として、打設角度 $\phi=15^\circ$ 、長さ $L=40\text{mm}$ の場合である、(c)-(f)により考察する。

それによると、(c)のピッチ 15° の場合は、天端から 1D 近くの高さまで、崩落が発生している。一方、(f)のピッチ 7.5° の場合は、先受け上部にはほとんど崩落が発生していない。

このように、打設角度や先受け長さが決まっている場合であっても、先受けピッチを密にすれば、崩落領域を小さく出来るということが分かる。

(4) その他

なお、天端の崩落を抑制した全てのパターンに共通することとして、先受工を境に崩落は抑制されており、先受工の先端は切羽崩壊後も地山の奥まで打設された状態であることから、地山側と支保側に設けた“かかりしろ”を支点に天端崩落を抑制していると考えられる。

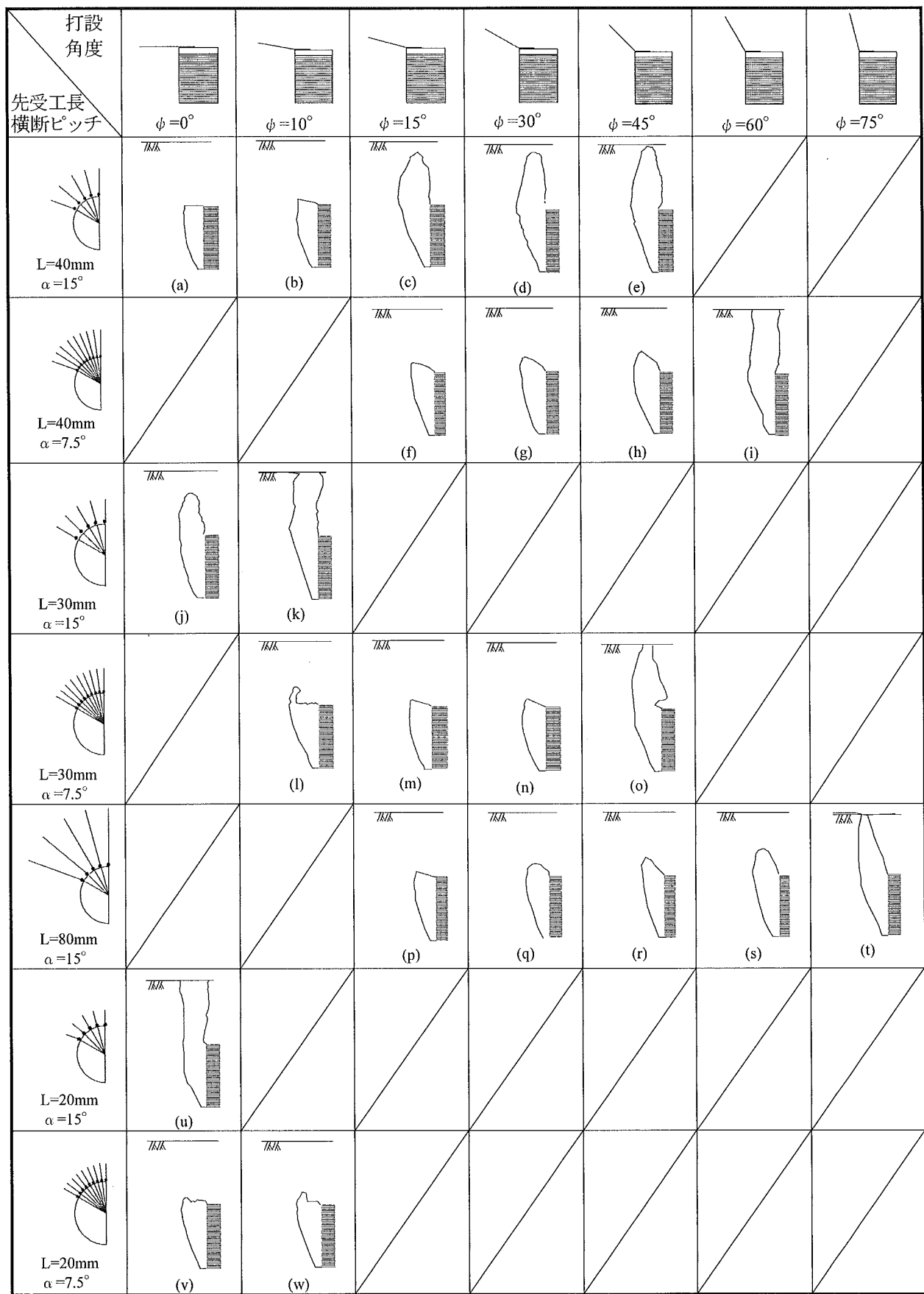


図 3.5 崩落図一覧

3.4 まとめ

本章では、先受け工の効果に関する遠心力載荷実験を行った。その結果、以下のことが分かった。

- ①先受け工の打設角度については、同じ先受け工であっても、打設角度を出来るだけ水平に近くすることが有効である。
- ②先受け工の長さは、長い方が有効であり、先受け上部の天端からの崩落を抑制するには、先受け工に一定以上の長さが必要である。
- ③打設ピッチを密にすれば、たとえ打設角度や先受け長さが決まっている場合であっても、崩落領域を小さく出来る。
- ④天端の崩落を抑制したパターンでは、先受け工が地山側と支保側を両支点とする梁として働き、天端崩落を抑制したと考えられる。

4. 緩み域でのロックボルトの効果に関する実験と解析

4.1 はじめに

ロックボルトは、NATMにおける主たる支保部材の一つと考えられている。しかしながら、その作用効果については、縫付け効果、はり形成効果等様々概念が挙げられているものの、統一的に理論化されるに至っていない。このような背景のもと、ロックボルトの作用効果を解明するため、これまで様々な研究がなされてきている。

一方で、ロックボルトは、現在需要が高まりつつある既設トンネルの断面拡大施工にのみならず、通常のロックボルトにおいても、緩んだ地山に対して施工されている。しかし、これまでの研究では、この緩みとロックボルトの効果に着目したものが少なかった。また、既設トンネル断面拡大施工における斜めボルト等の様々な形態のロックボルトに対する研究もほとんどなされていない。

本章では、緩み域が既に発生している状態で打設するロックボルトの効果、および、打設時期、打設角度や長さ等とロックボルトの効果の関係を明らかにすること目的として落戸模型実験と数値解析を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 実験の概要

ここでは、緩み域が既に発生している状態で打設するロックボルトの効果、および、打設時期、打設角度や長さ等とロックボルトの効果の関係を明らかにすること目的として落戸模型実験を行った。

実験装置を図 4.1 に示す。

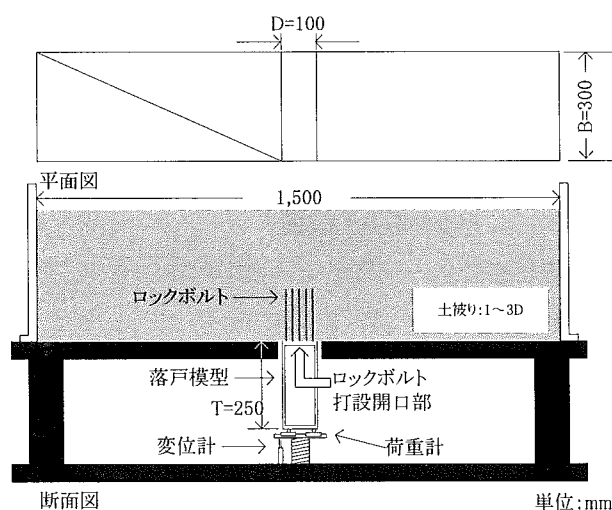


図 4.1 実験装置概要図

寸法奥行き:300×幅: 1,500×高さ:500(mm)の模型容器に、矩形の落戸模型（奥行き:300×幅:100×厚

さ:250(mm)) が設置してあり、模型には地山作成後にロックボルトが打設出来るよう側部と上部に開口部を設けてある。

実験は、模型地山作成後、落戸模型を一定の速度（0.25mm/分）で連続的に降下させた。ボルトを打設するケースについては、いったん落戸模型の降下を停止し開口部より打設を行った。また、落戸にかかる荷重、落戸模型周辺地山の土圧、地表面変位、ボルト軸力を連続的に測定し、写真撮影による観察を行った。

地山材料は、乾燥状態にある珪砂 4 号($\gamma=15.7\text{kN/m}^3$)を使用し、密度が一定となるように 2cm の高さから自由落下させて作成した。ロックボルトは表面に砂を付着させた $\phi=1.6\text{mm}$ のリン青銅の丸棒を使用した。実験手順のフローを図 4.2 に示す。

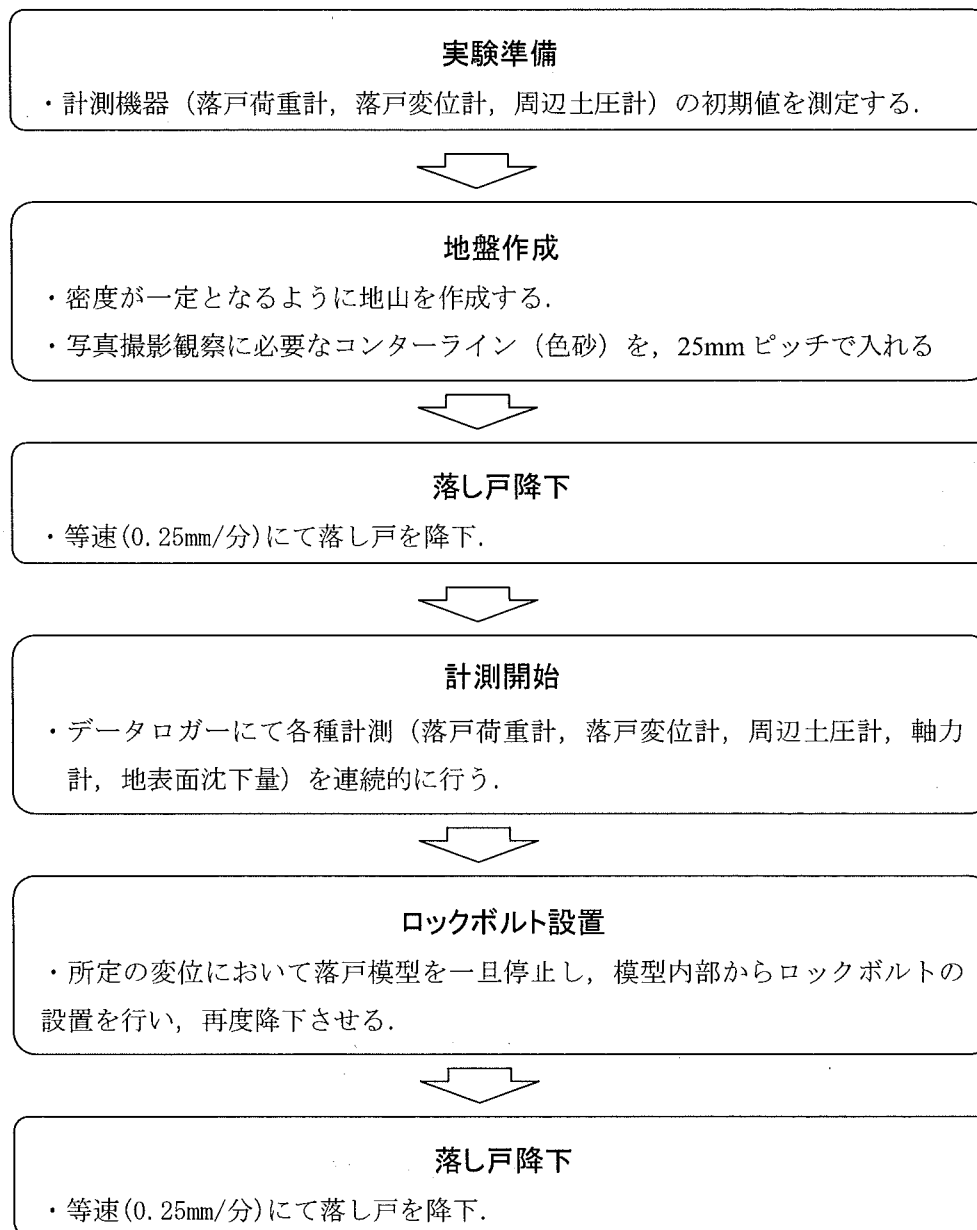


図 4.2 実験手順のフロー

4.2.2 実験ケース

実験ケースは、地山作成後に無対策で落戸を降下させるケース（無対策）、ボルトを垂直方向真上に打設するケース（直方向打設）、模型トンネル対して扇状に打設するケース（横断方向打設）、模型トンネルに対して先受け方向に打設するケース（縦断方向打設）とした。

この実験では、土被り H (3D, 2D, 1D なお、本章では D: 落戸幅=100mm)、ボルト長さ (1.0D, 1.5D, 2.0D)、打設時期 (打設時の落戸変位量=0mm, 5mm, 10mm)、打設角度 (90° , 75° , 60° , 45° , 30°) を変化させた。ロックボルト打設配置図を図 4.3 に、軸力計配置図を図 4.4 に、土圧計配置図を図 4.5 に示す。実験ケースを表 4.1～表 4.3 に示す。

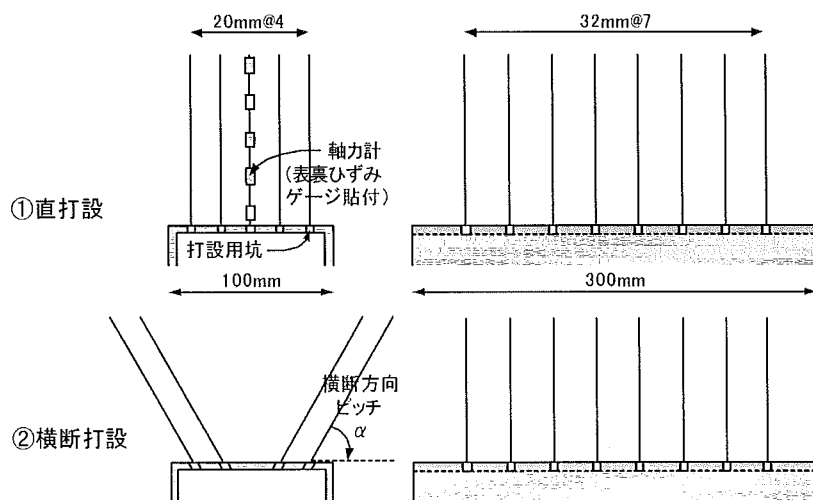


図 4.3 ロックボルト配置図

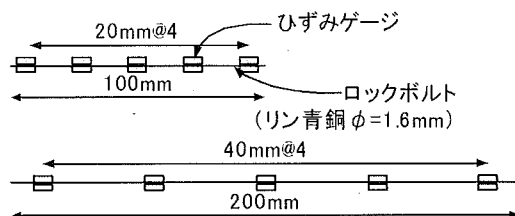


図 4.4 軸力計

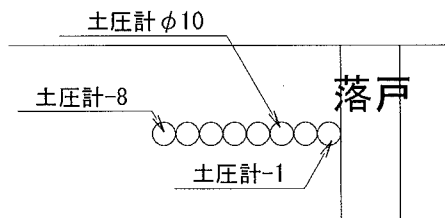


図 4.5 土圧計

表 4.1 無対策の実験ケース

土被り	3D	2D	1D
	※☆	※☆	※☆

凡例 ※：「土圧」計測有 ☆：「地表面沈下」計測有

表 4.2 「直方向」打設ケース

「直方向」打設		ボルト打設時期			
土被り	ボルト長(mm)	0mm	5mm	10mm	15mm
3D	50	○※	△		
	100	○※☆	○※☆	△	
	150	☆	☆	△	
	200	○※☆	○※☆	○※☆	△
2D	50				
	100	☆	☆		
	150				
	200	☆			
1D	50				
	100	○※☆	☆		
	150				
	200				

凡例

○：「軸力」計測有 ※：「土圧」計測有
 ☆：「地表面沈下」計測有 △：落戸荷重-変位関係のみ有

表 4.3 「横断方向」打設ケース

「横断方向」打設		0mm 降下時打設					5mm 降下時打設
		ボルト打設角度					
土被り	ボルト長(mm)	90° (4本)	75°	60°	45°	30°	60°
3D	50	☆	☆	☆	☆	☆	
	100	○※☆	○	○※☆	☆	△	○※☆
	150						
	200						
2D	50						
	100	☆		☆			☆
	150						
	200						
1D	50	☆		☆			
	100	△	☆	☆	☆	△	☆
	150						
	200						

凡例

○：「軸力」計測有 ※：「土圧」計測有
 ☆：「地表面沈下」計測有 △：落戸荷重-変位関係のみ有

4.3 実験状況

実験状況の写真を写真 4.1 から 写真 4.8 に示す.

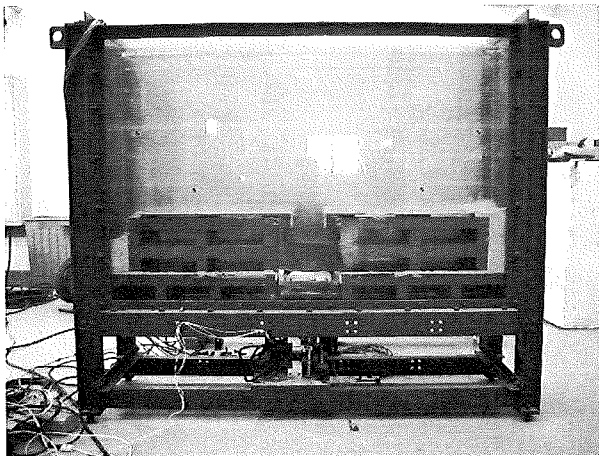


写真 4.1 実験土槽

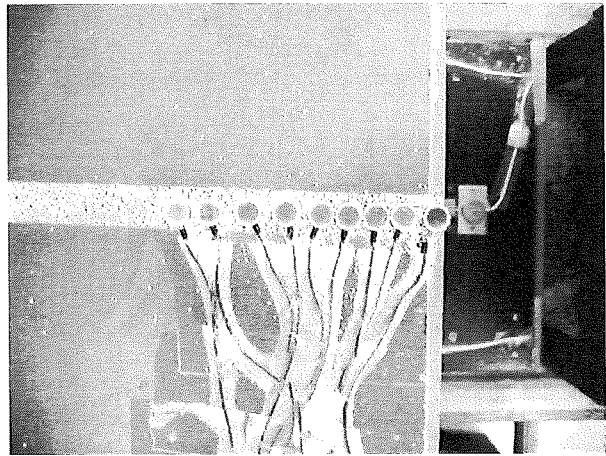


写真 4.2 土圧計設置状況

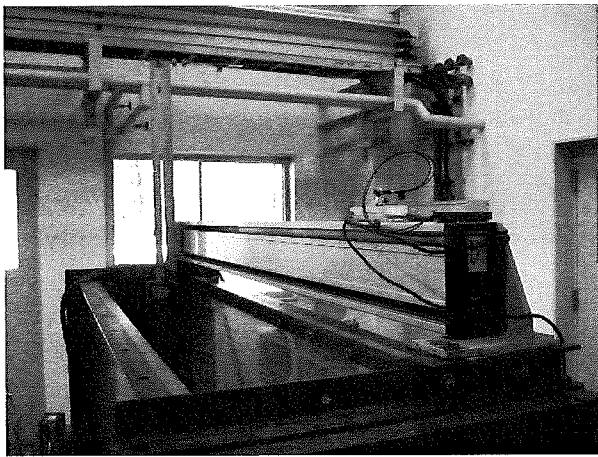


写真 4.3 レーザー変位計用スライダー

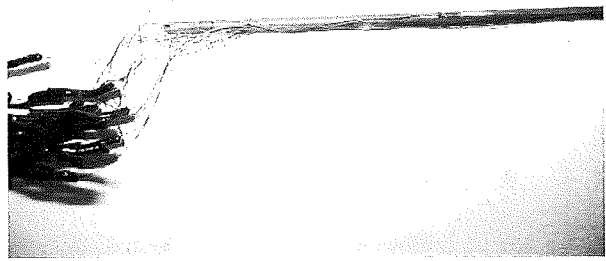


写真 4.4 ロックボルト軸力計

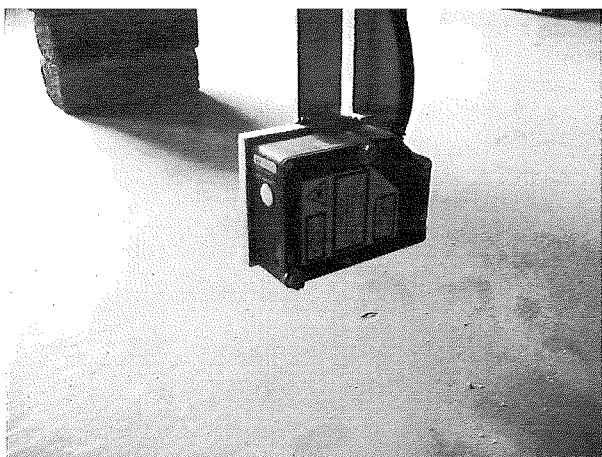


写真 4.5 レーザー変位計

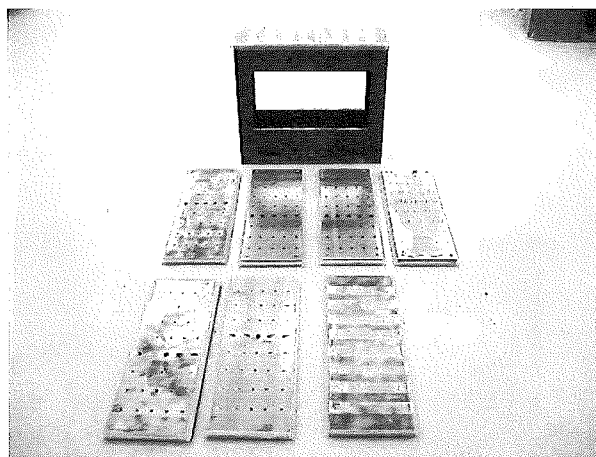


写真 4.6 落戸部とロックボルト挿入孔

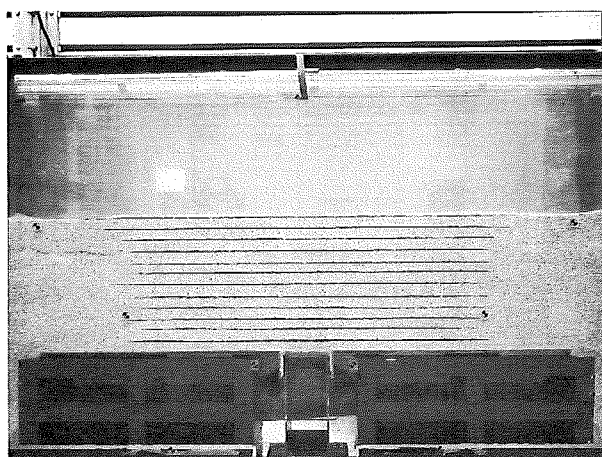


写真 4.7 初期状態

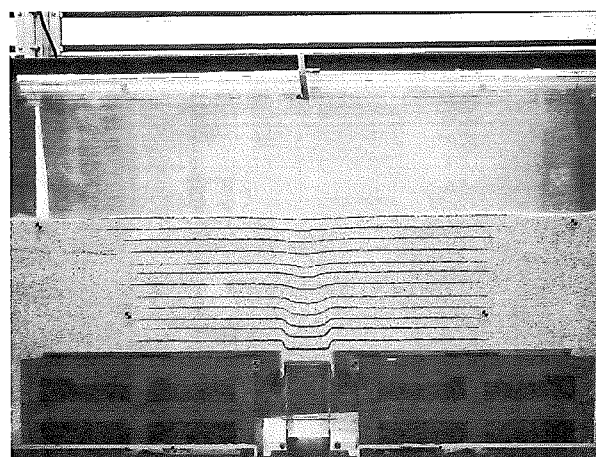


写真 4.8 落戸降下時

4.4 無対策の場合の実験結果と変形挙動

図 4.6 に土被り 3D, 2D, 1D の場合の落戸降下量と落戸荷重の関係を示す。また、図 4.7 に降下量と周辺土圧の関係を示す。さらに、図 4.8 に地表面沈下を降下量 4mm 毎にレーザー変位計により計測した図を示す。また、図 4.9 に降下前と 20mm 降下後の写真を重ねたものを示す。図 4.10 に土被り 3D における 20mm 降下後の写真から読み取ったデータを基に作成した鉛直変位量等高線図(2mm ピッチ)を示す。

図 4.6 より、無対策の場合、落戸模型にかかる荷重は初期土圧から降下開始後すぐに減少を始め、降下量約 3mm で最小荷重を示し、それ以降はすべての土被りではほぼ一定値となることが分かる。

また、図 4.7 より、周辺土圧は、落戸荷重の減少と連動して増加していることが分かる。また、その増加値は、土被り 3D が最も大きかった。なお、土圧の増加は、1D, 2D では、落戸に近いところが顕著であるが、3D では落戸に若干離れたものが最も顕著であることが分かる。

さらに、図 4.8 より土被り 3D から、土被り 2D, 1D になるにつれて、地表面沈下が大きく、かつ、

沈下が局所的に発生していることが分かる。

図 4.9 および図 4.10 から、落戸降下による、幅 10cm、高さ 10cm 程度の三角形の共下がり領域（落戸とほぼ同じ量だけ沈下する領域）の形成が確認できた。

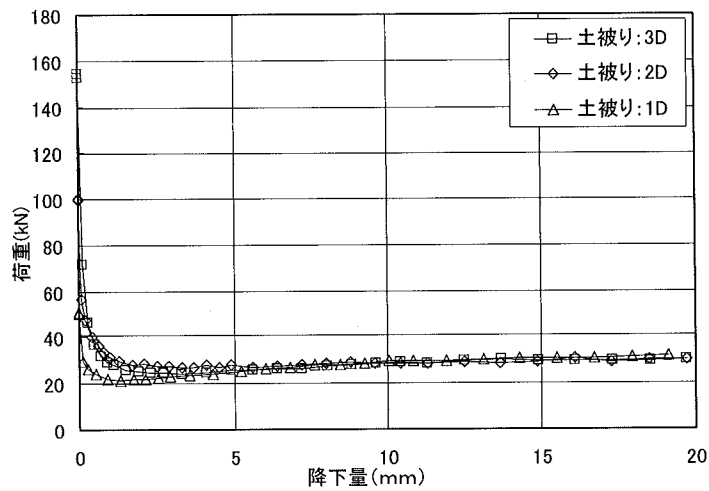
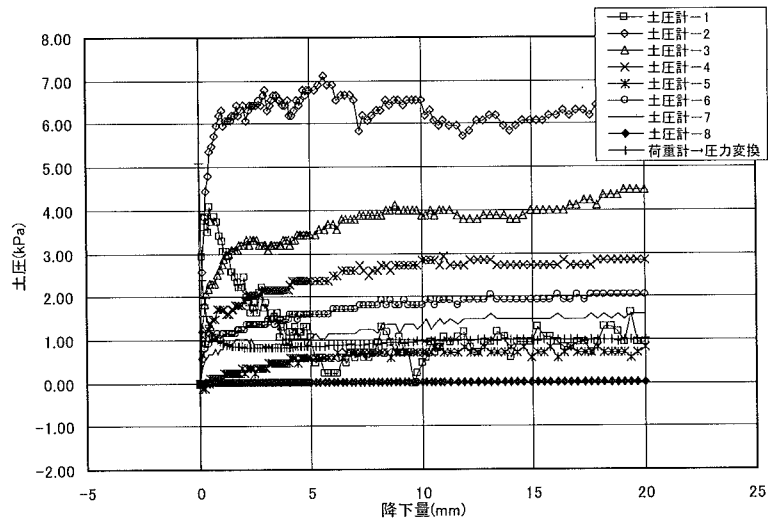
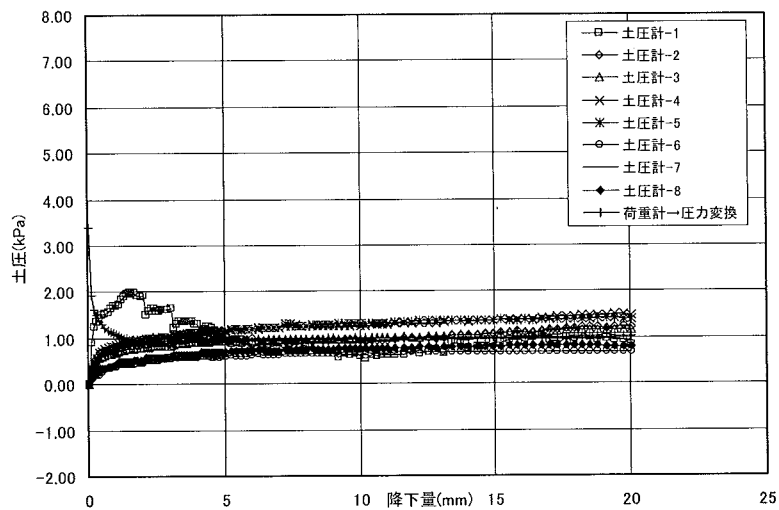


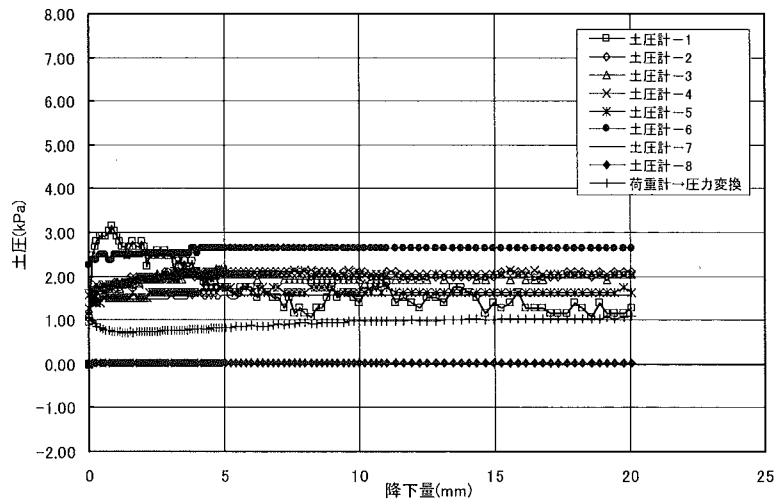
図 4.6 降下量-荷重の関係



(a) 土被り 3D

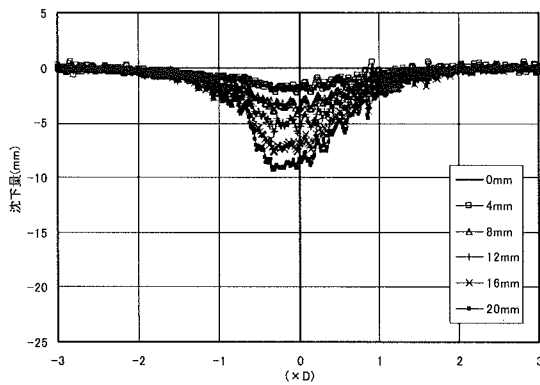


(b) 土被り 2D

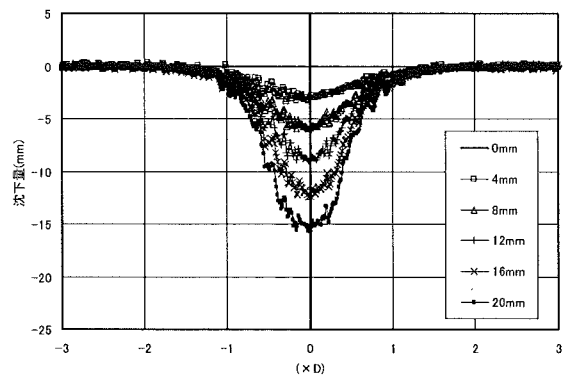


(c) 土被り 1D

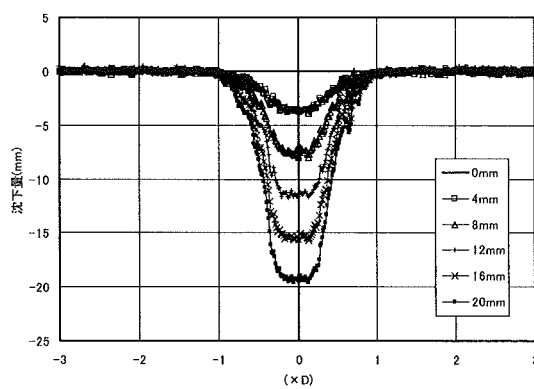
図 4.7 降下量-周辺土圧の関係



(a) 土被り 3D



(b) 土被り 2D



(c) 土被り 1D

図 4.8 地表面沈下量

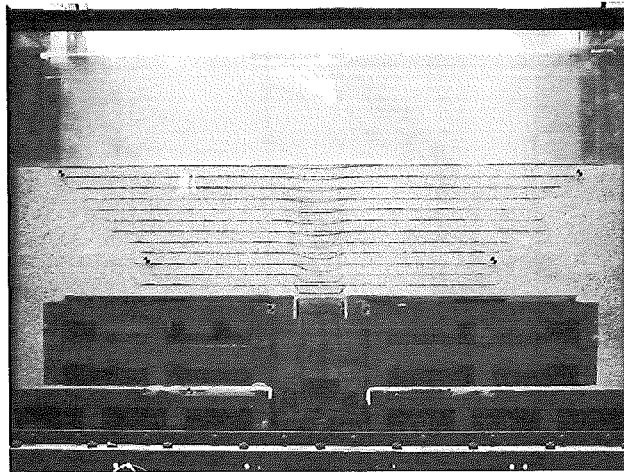


図 4.9 初期状態と最終沈下時(20mm)の重ね合わせ写真 (土被り 3D)

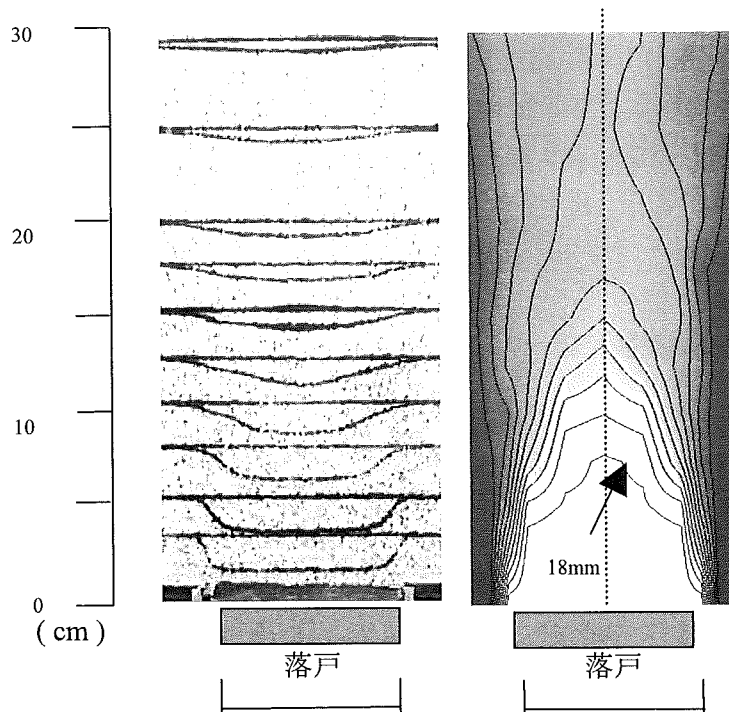


図 4.10 鉛直変位量等高線図 (土被り 3D)

図 4.11 は、降下量毎の画像より求めた無対策時の落戸降下量と模型中央での各深さ(H:落戸からの高さ(cm))の沈下量の関係を示す。

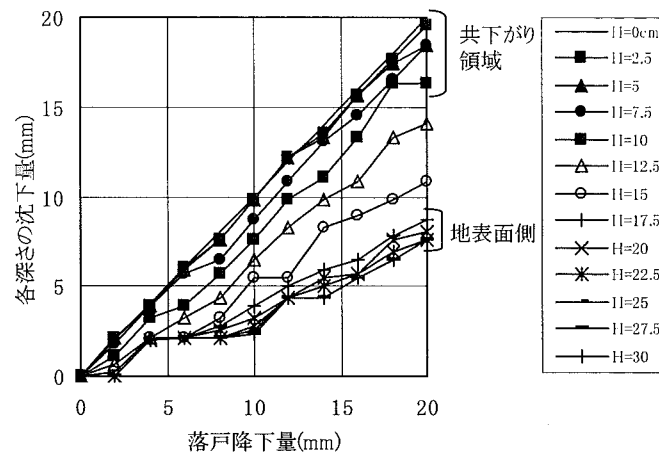


図 4.11 落戸降下量と模型中央での各深さの沈下量(土被り 3D)

なお、この図で直線の傾きが 45° に近いほど、地山が落戸と共下がりをしていることを意味している。地山は荷重が一定値となる降下量 3mm 付近から、落戸と共下がりしようとする領域 ($H=0\sim 10\text{cm}$) とアーチ効果により自立しようとする地表面側の領域 ($H=17.5\sim 30\text{cm}$) に分かれていくことが分かり、この分離過程により三角形共下がり領域が形成されたと言える。この三角形共下がり領域はゆるみ域と定義できる。

4.5 直方向打設の場合の実験結果

4.5.1 実験結果の概要

(1) 落戸荷重－落戸降下量関係

落戸荷重-落戸降下量関係を土被り 3D については図 4.12 に、土被り 2D については図 4.13 に、土被り 1D については図 4.14 にそれぞれ示す。

これによると、特に土被り 3D についての図 4.12 が明確に示すようにロックボルトの効果は、その長さと打設時期によって異なることが分かる。

図 4.12(a), (b)の 0.5D, 1.0D ボルトについては、ボルト打設の効果は、ほとんど見られない。すなわち、打設時期を緩みのない 0mm に行っても、緩みのある 5mm に行っても、すぐに荷重は無対策の変形挙動と同様になっている。

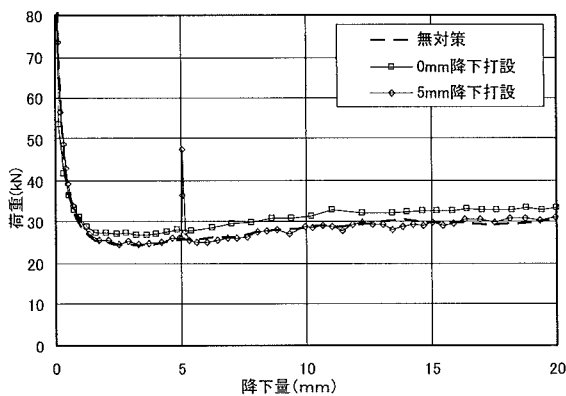
図 4.12(c)の 1.5D ボルトについては、変形挙動がボルト打設なしの無対策と、落戸降下前ボルト打設 (0mm 降下打設) とで大きく異なっていることが分かる。初期の 5mm, 10mm, 15mm の各ボルト打設までの間は、無対策と同様の変形挙動をたどる。しかし、打設後のボルトの効果は、その打設時期によって異なっているようである。5mm 降下打設後が打設後に 0mm 降下打設と同様の変形挙動となっているのに対して、10mm 降下打設は、打設後も無対策の変形挙動と同様に戻る挙動となる。このことは、落戸降下に伴う緩み領域の大きさとボルトの長さの関係に起因するものと考えられ、短いボルトは早期に打設しないとボルト打設の効果が発揮されないことを意味している。

図 4.12(d)の 2.0D ボルトについては、変形挙動がボルト打設なしの無対策と、落戸降下前ボ

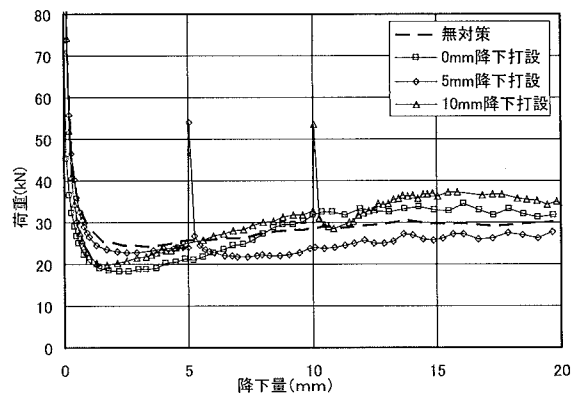
ルト打設（0mm 降下打設）と大きく異なっていることは、(c)の 1.5D ボルトと同様である。しかし、2.0D ボルトでは、ボルト打設時期に関わらず、荷重は減少し、0mm 降下打設のものと同様となっている。すなわち、長いボルトは、その効果が打設時期に関わらずある程度期待できることが分かる。

なお、図 4.12(b)での 1.0D ボルトがあまり効果が得られないことは、土被り 2D についての図 4.13(b)や土被り 1D についての図 4.14 においても同様である。

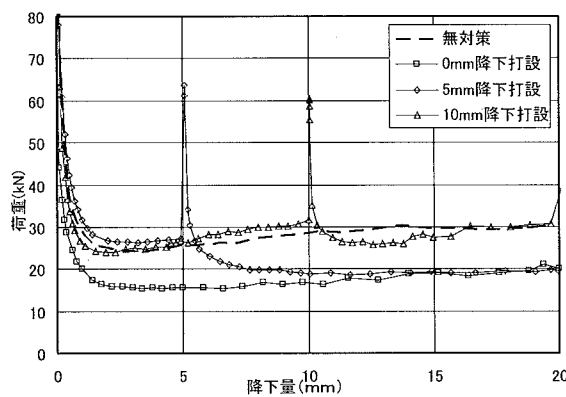
1.5D ボルトや 2.0D ボルトは、共下がり領域より長いことから、緩み領域が既に発生している場合、緩み域よりも長いロックボルトを早期に打設することで、ロックボルトの効果を発揮させることができると考えられる。一方、土被りが浅い場合、緩み域がある状態で打設したロックボルトの効果は、期待できないと言える。



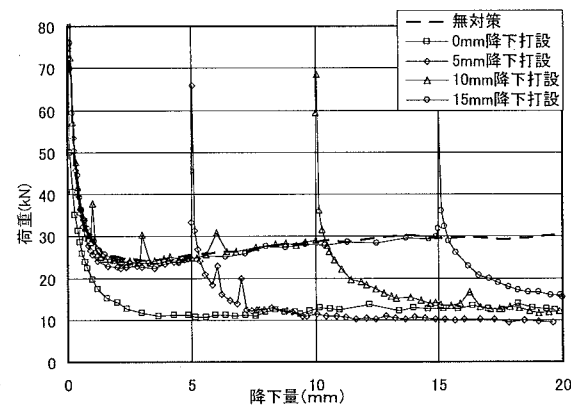
(a) 0.5D ボルト



(b) 1.0D ボルト



(c) 1.5D ボルト



(d) 2.0D ボルト

図 4.12 土被り 3 D の落戸荷重－落戸降下量関係

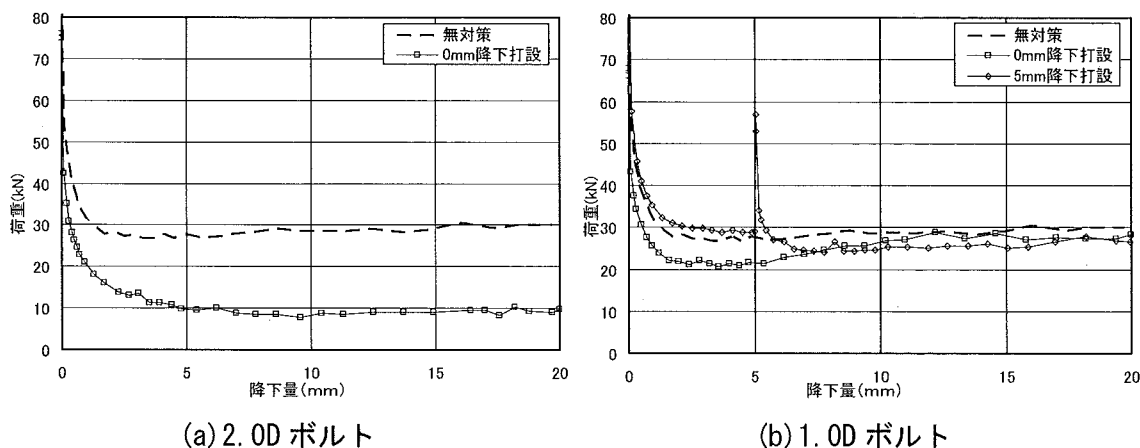


図 4.13 土被り 2 D の落戸荷重－落戸降下量関係

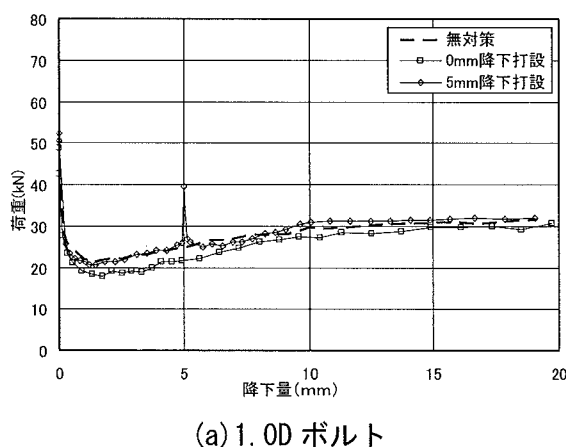


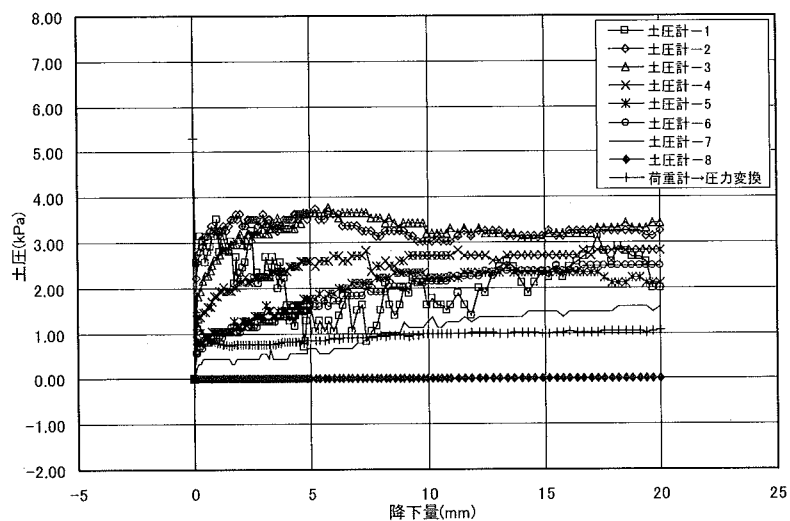
図 4.14 土被り 1 D の落戸荷重－落戸降下量関係

(2) 周辺土圧変化

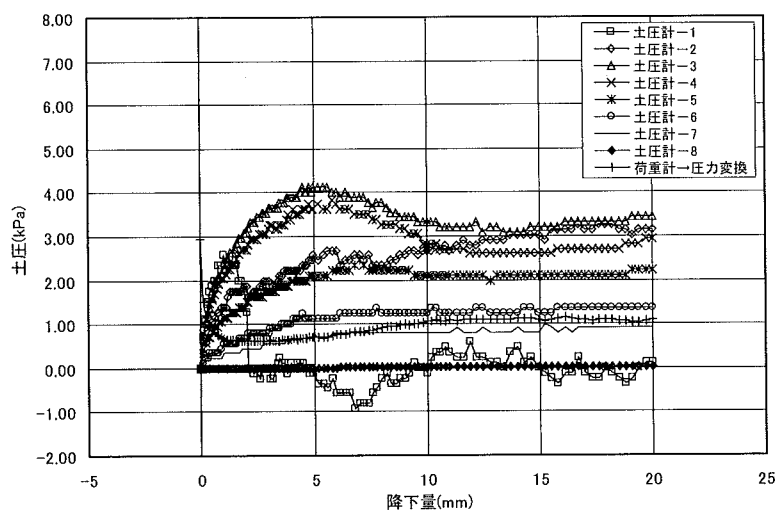
落戸周辺の土圧について、落戸降下量との関係を土被り 3D については図 4.15 に、土被り 1D については図 4.16 にそれぞれ示す。これによれば、落戸荷重が落戸降下に伴い減少していくのに対して、周辺土圧は増大していることが分かる。これは、落戸の降下により形成された地山のアーチ効果により、土圧が落戸上部から周辺地山に分散したためであると考えられる。また、増加量は、多くの場合、最も落戸に近い土圧計-1 より土圧計-2 が大きく、最も離れた土圧計-8 ではほとんど見られない。このことから、アーチ効果による土圧の分散は、落戸から少し離れた所に顕著であり、0.8D 程度離れた所では、ほとんど影響がないことが分かる。

また、落戸降下後（緩み領域ありで）ロックボルトを打設する (c), (e), (f) の場合は、増加していた周辺土圧がロックボルト打設時に一旦減少し、その後、落戸降下につれば再び増加する。このことにより、ロックボルト打設により形成されていた地山のアーチ効果が一旦失われるものの、再度の落戸降下とロックボルトの作用効果により地山アーチが再び形成されていることが考えられる。

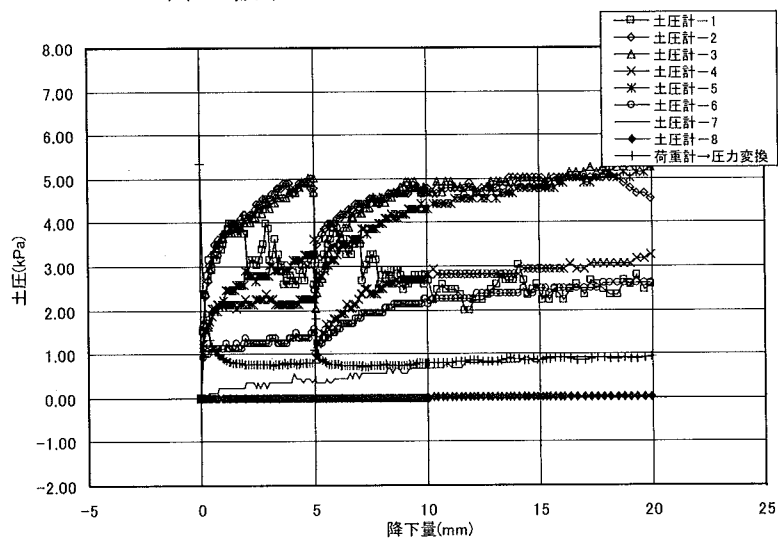
なお、無対策に対して、ロックボルトを打設した場合には、周辺土圧は、突出した部分を除き、3D の場合で総じて減少、1D の場合では減少している。



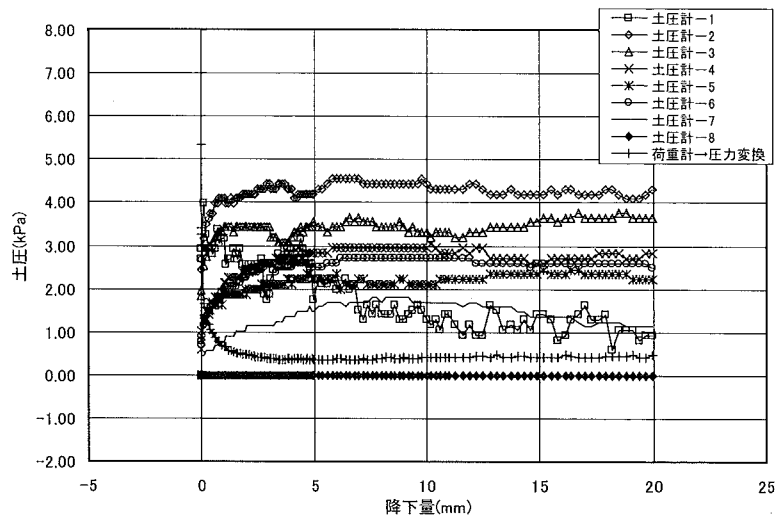
(a) 土被り 3D-0.5D ボルト-0mm 打設



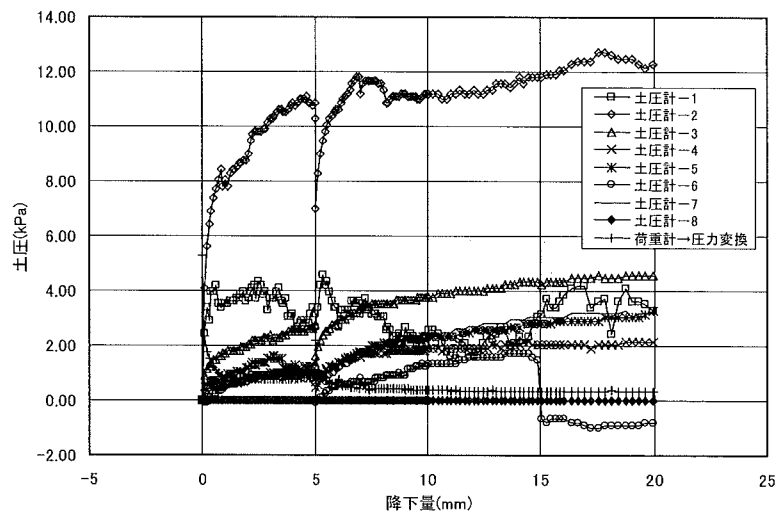
(b) 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設



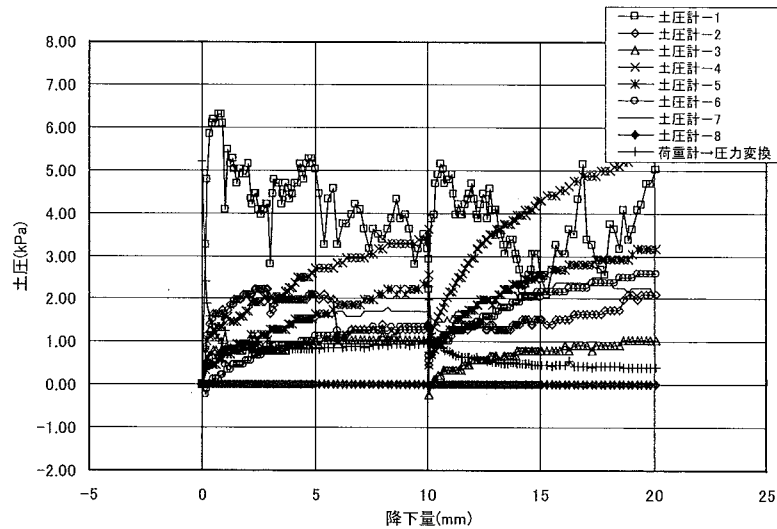
(c) 土被り 3D-1.0D ボルト-5mm 打設



(d) 土被り 3D-2.0D ボルト-0mm 打設

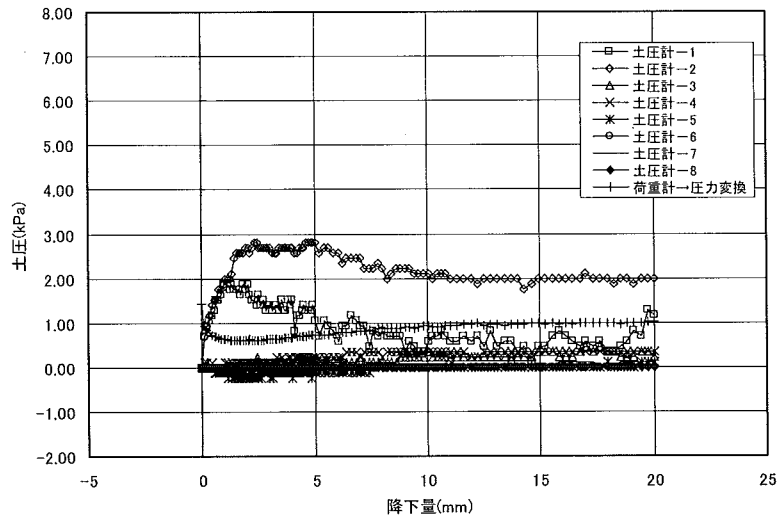


(e) 土被り 3D-2.0D ボルト-5mm 打設



(f) 土被り 3D-2.0D ボルト-10mm 打設

図 4.15 土被り 3D の場合の周辺土圧変化



(a) 土被り 1D-1.0D ボルト-0mm 打設

図 4.16 土被り 1D の場合の周辺土圧変化

(3) ロックボルトの軸力

ロックボルトに発生する軸力の変化を落戸降下量との関係で土被り 3D については、図 4.17 から図 4.22 に、土被り 1D については、図 4.23 に示す。

図 4.17 の 0.5D ボルトでは、落戸降下量 8mm 付近でボルトに引張力が急激に加わっているが、これは、実験中の振動などの不確定要素であると考えられる。これによるとボルトは圧縮傾向から落戸降下に伴い徐々に引張傾向に移行していつている。また、このケースではボルトの箇所による軸力の傾向に大きな違いは認められない。

一方、図 4.18 と図 4.19 の 1.0D ボルトについては、0mm 降下打設、5mm 降下打設とも落戸降下とともにやや圧縮となり、その後は、ほぼ一定値となるか、または、やや引張側へと変化する挙動となっている。また、このケースでは、ボルト最下端の軸力計-5 が圧縮される傾向が強い。

また、図 4.20、図 4.21、図 4.22 の 2.0D ボルトについては、落戸両端の軸力計-3 が圧縮される傾向が強い。一方、落戸中央部では、軸力では軸力計-5 が圧縮される傾向が強い。さらに、同じボルトであっても場所によって、圧縮、引張傾向が大きくことなり、軸力分布が大きく 2 分されるものもある。

なお、総じて、ロックボルト軸力計測は、左右対称での再現も良いとは言えず、極めて評価が難しい計測項目であると言える。

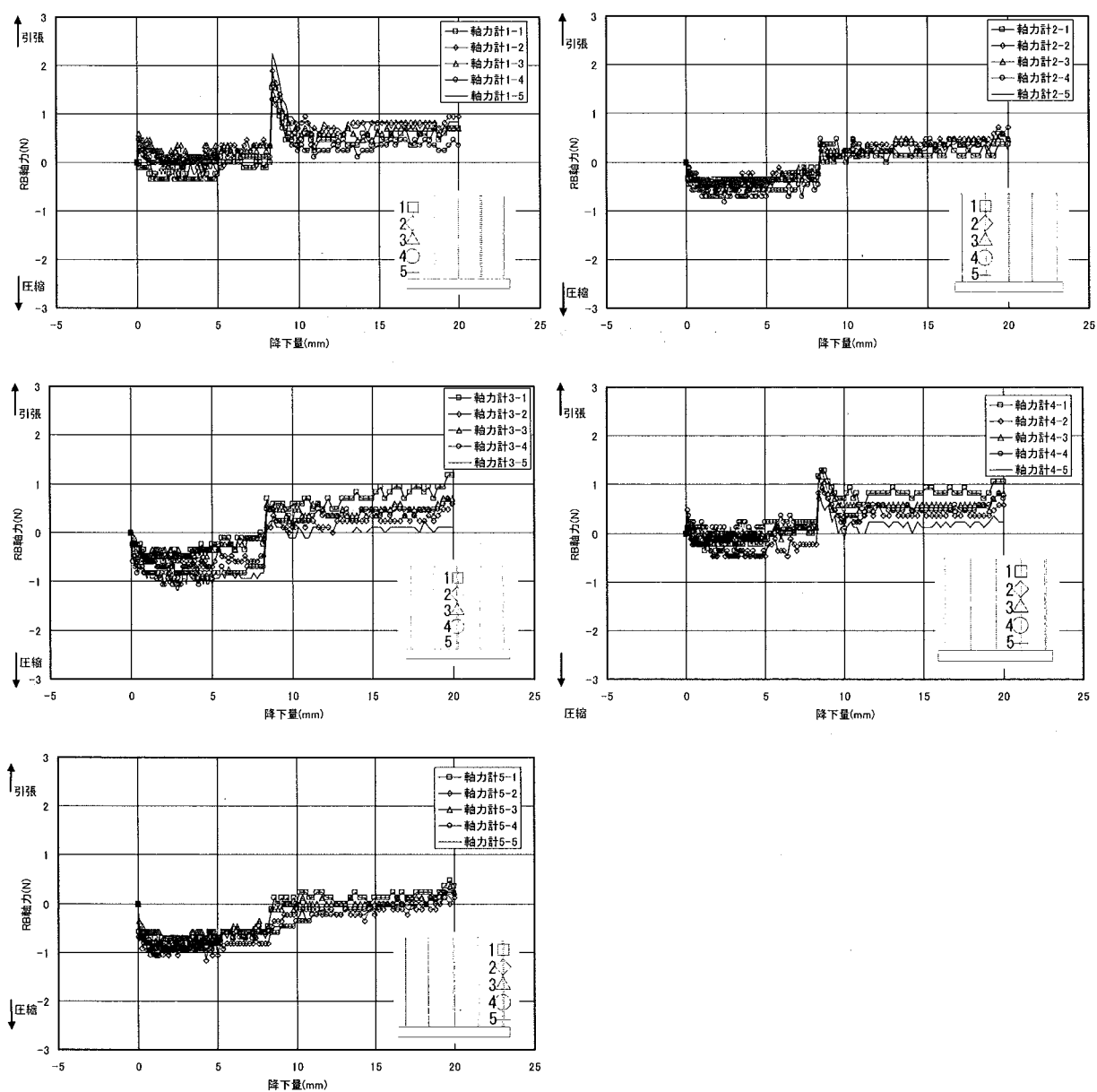


図 4.17 土被り 3D-0.5D ボルト-0mm 打設の場合のロックボルト軸力

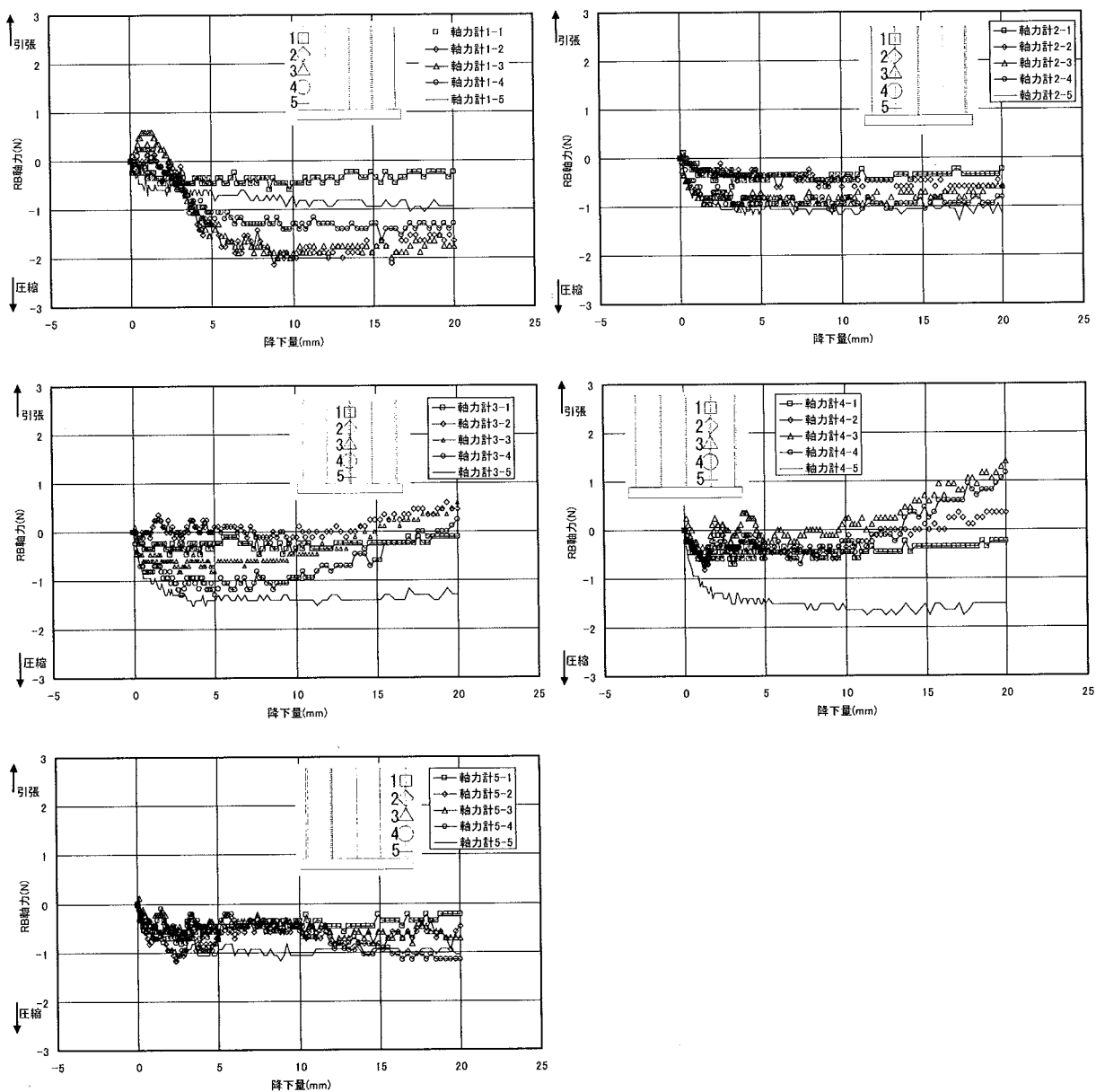


図 4.18 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設の場合のロックボルト軸力

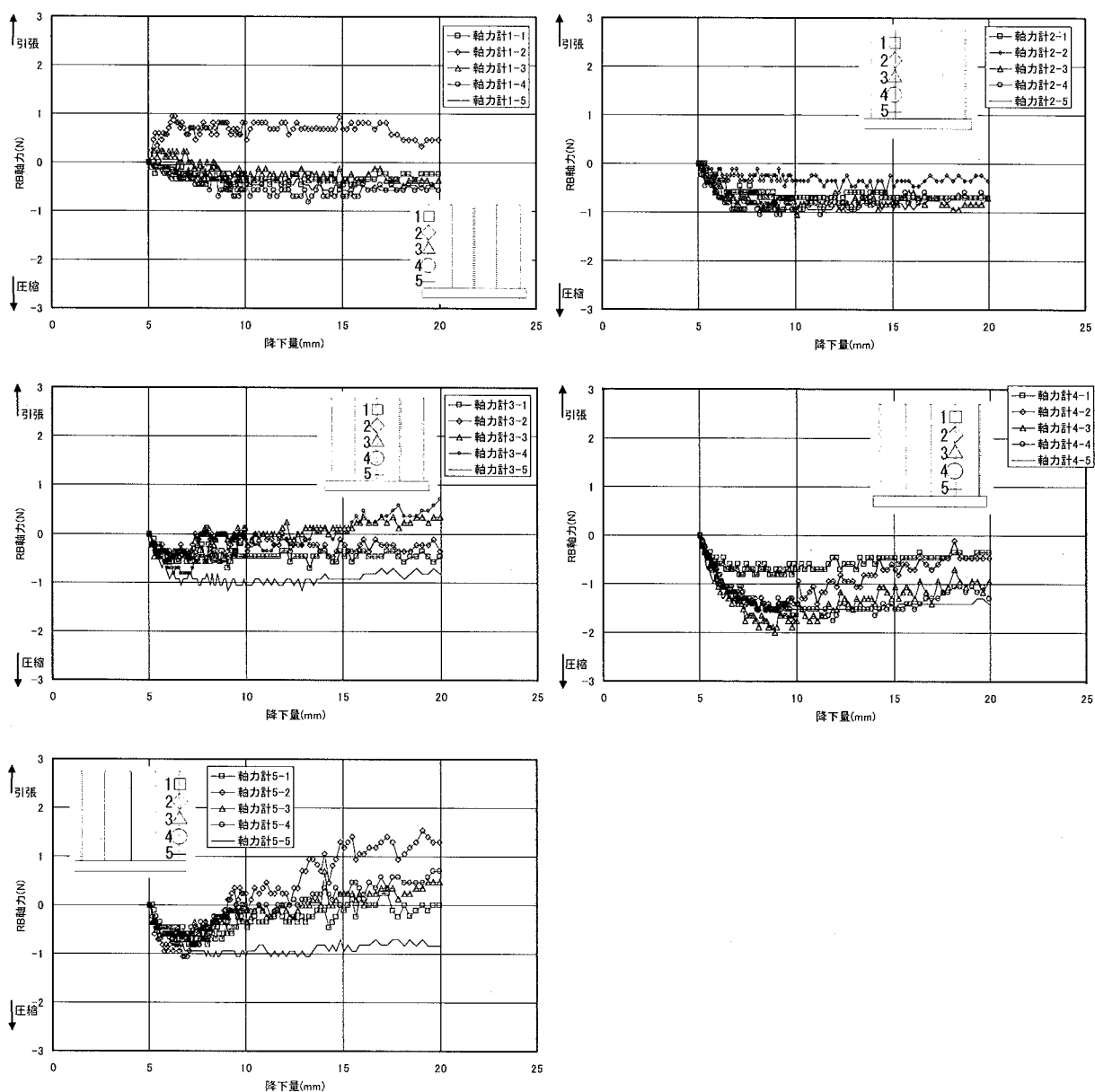


図 4.19 土被り 3D-1.0D ボルト-5mm 打設の場合のロックボルト軸力

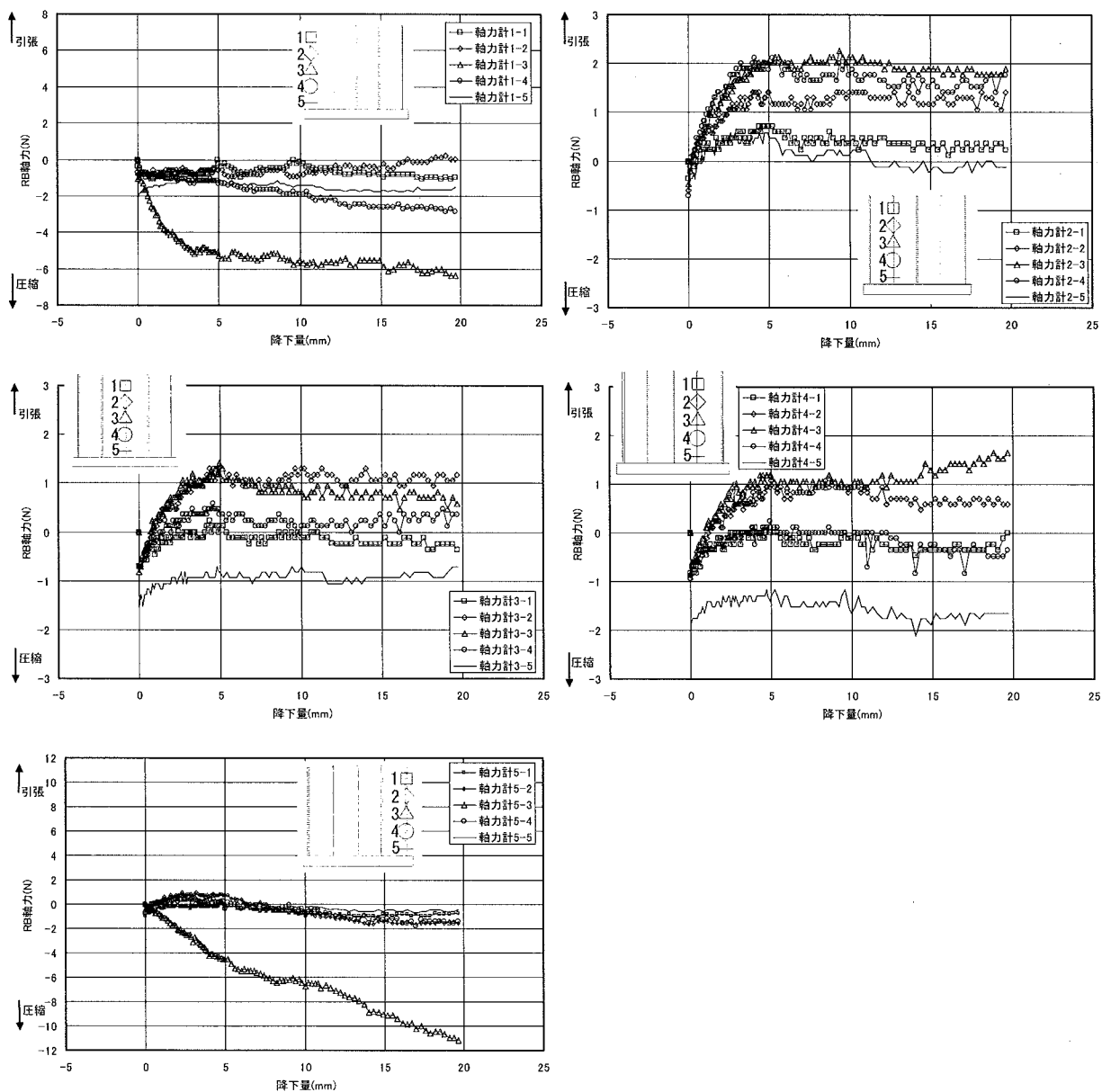


図 4.20 土被り 3D-2.0D ボルト-0mm 打設の場合のロックボルト軸力

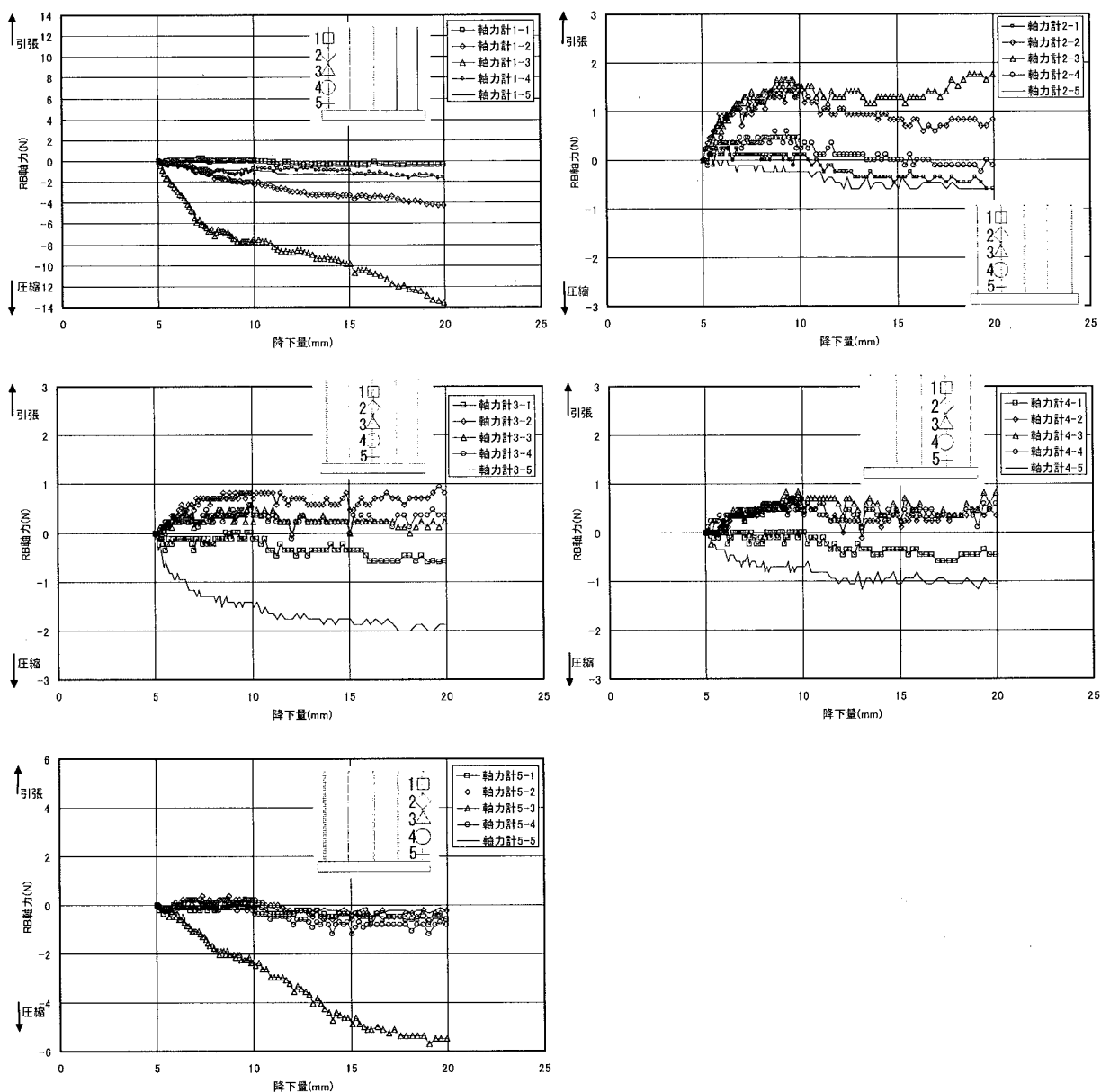


図 4.21 土被り 3D-2.0D ボルト-5mm 打設の場合のロックボルト軸力

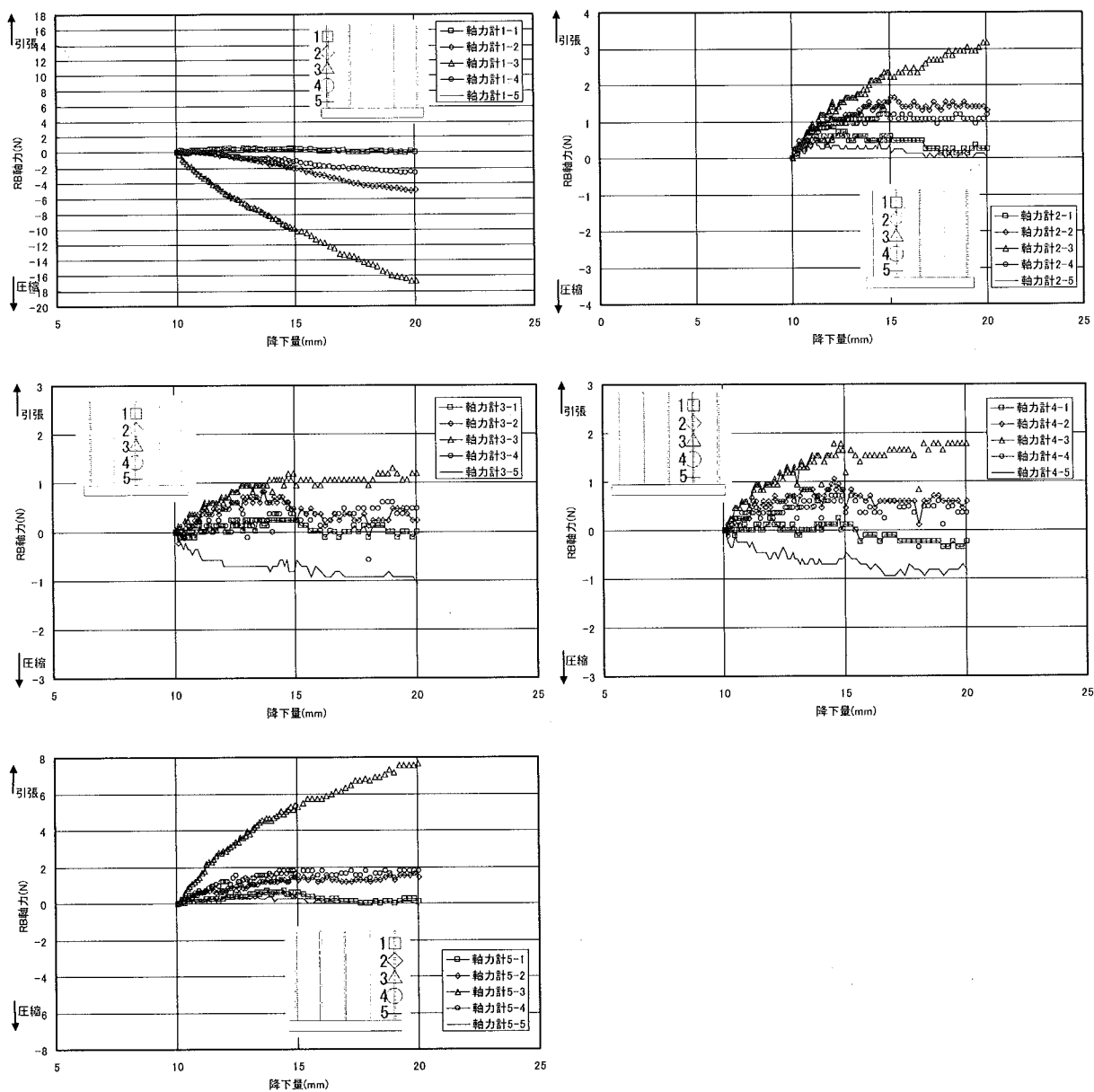


図 4.22 土被り 3D-2.0D ボルト-10mm 打設の場合のロックボルト軸力

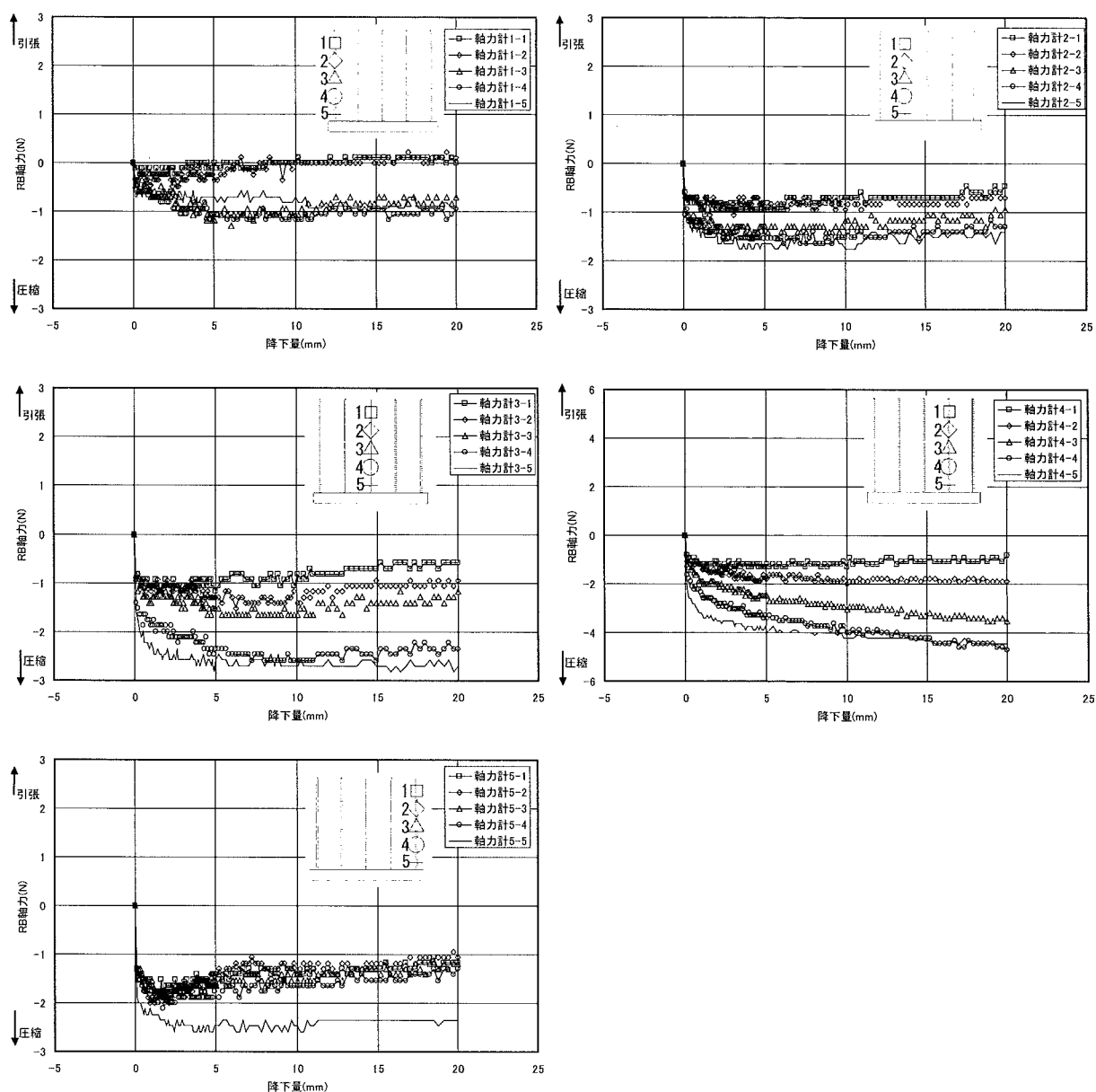
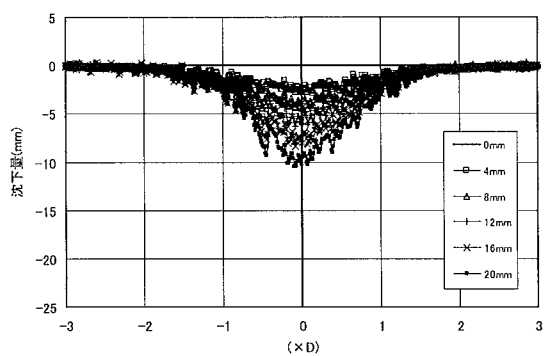


図 4.23 土被り 1D-1.0D ボルト-0mm 打設の場合のロックボルトの軸力

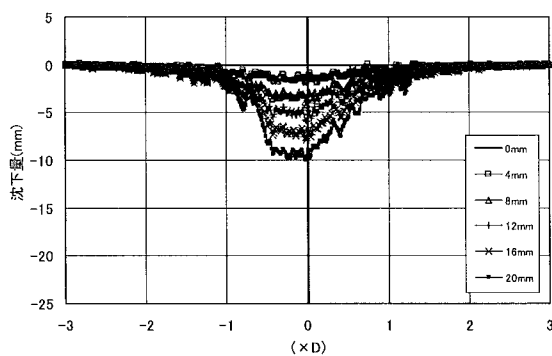
(4) 地表面沈下

図 4.24 から図 4.26 に各落戸降下量時の地表面沈下を示す．これによると，土被りが小さくなると地表面沈下が大きくなり，かつ，地表沈下が局所化することが分かる．また，図 4.8 の無対策のものと比較すれば，ロックボルト打設により，若干地表面沈下が大きくなっていることが分かる．このことは，ロックボルトにより地山が一体化され，落戸降下が地山に大きく伝達しているためと考えられる．

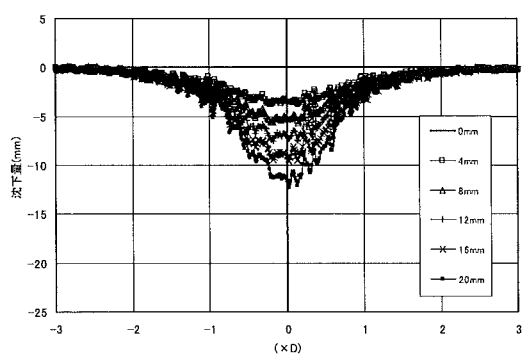
また，ボルトを落戸降下過程で打設するケース((b), (d), (f), (g))では，ボルト打設前後において地表面沈下曲線がなだらかな曲線と急な曲線に分かれていることが分かる．さらに，地表面沈下は，ボルトを打設した場合の方が局所的であることも分かる(例えば図 4.8(b)と図 4.25(c)).



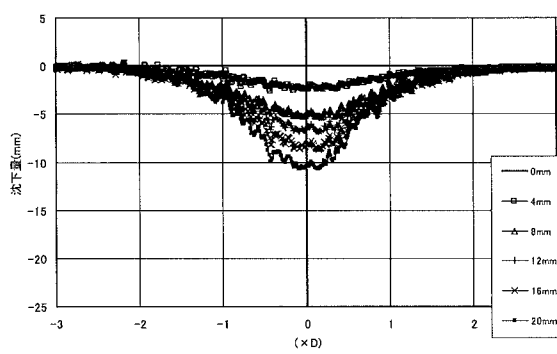
(a) 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設



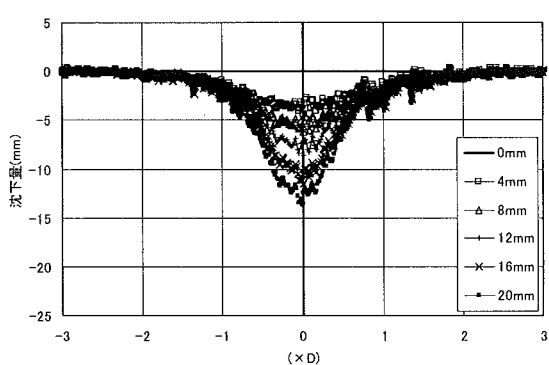
(b) 土被り 3D-1.0D ボルト-5mm 打設



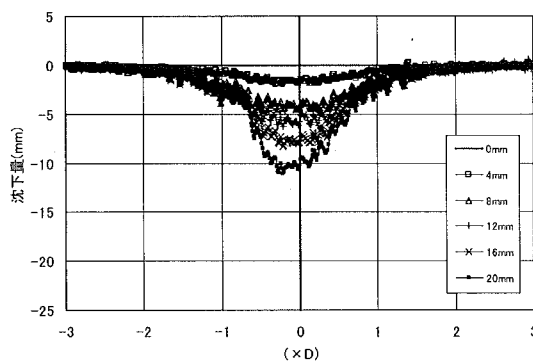
(c) 土被り 3D-1.5D ボルト-0mm 打設



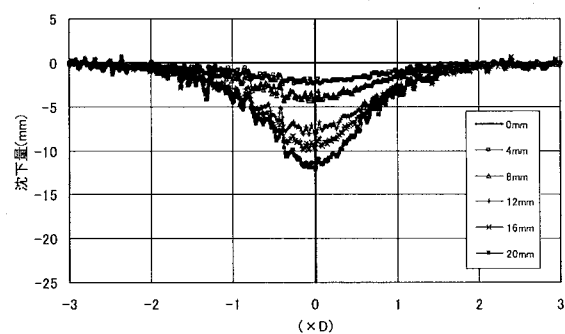
(d) 土被り 3D-1.5D ボルト-5mm 打設



(e) 土被り 3D-2.0D ボルト-0mm 打設

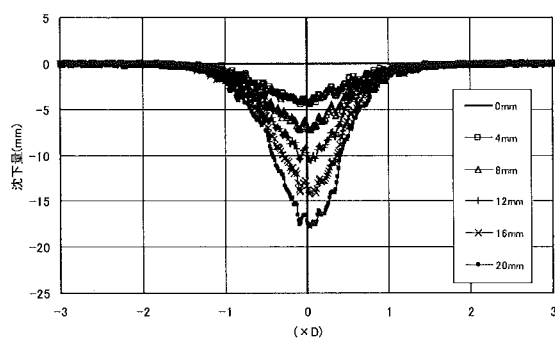


(f) 土被り 3D-2.0D ボルト-5mm 打設

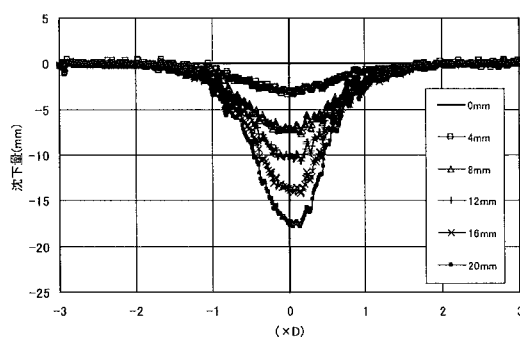


(g) 土被り 3D-2.0D ボルト-10mm 打設

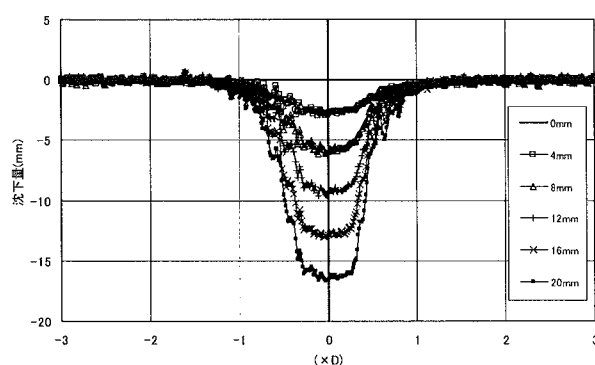
図 4.24 土被り 3D の場合の地表面沈下



(a) 土被り 2D-1.0D ボルト-0mm 打設

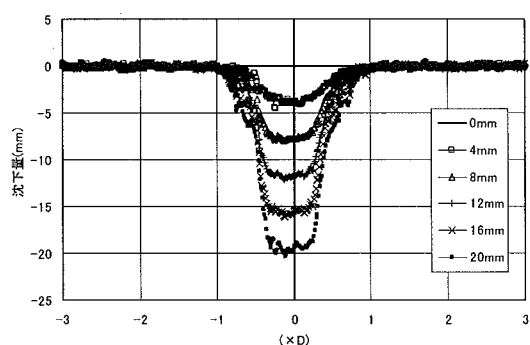


(b) 土被り 2D-1.0D ボルト-5mm 打設

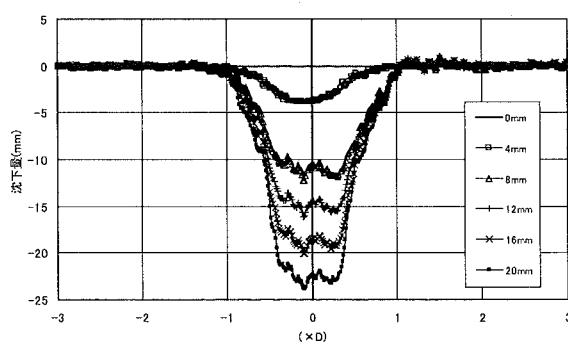


(c) 土被り 2D-2.0D ボルト-0mm 打設

図 4.25 土被り 2D の場合の地表面沈下



(a) 土被り 1D-1.0D ボルト-0mm 打設



(b) 土被り 1D-1.0D ボルト-5mm 打設

図 4.26 土被り 1D の場合の地表面沈下

4.5.2 ボルト打設の効果（緩み域なし）

各ロックボルト長さについて、落戸降下前にロックボルトを打設した場合の落戸荷重と落戸降下量の関係を図 4.27 には土被り 3D について、図 4.28 には土被り 2D について、図 4.29 には土被り 1D について示す。

これによると、ロックボルト長さが 2D や 1.5D の場合、ロックボルト打設を行わない無対策に比べ、落戸荷重がかなり小さくなり、地山のアーチ効果が顕著であることが分かる。一方、ロックボルトが 1.0D の場合には、ある程度の変位までは、ロックボルトの効果が見られ、無対策に比べ落戸荷重の軽減が見られる。しかし、変位がさらに増大するとロックボルトの効果は損なわれ、無対策

の荷重に漸近していく．このことは，ロックボルトが短いと，変位の増大によって地山のアーチ効果が損なわれ，緩み領域内部にロックボルトが包含され，ロックボルトが有効に働かなくなるためと考えられる．

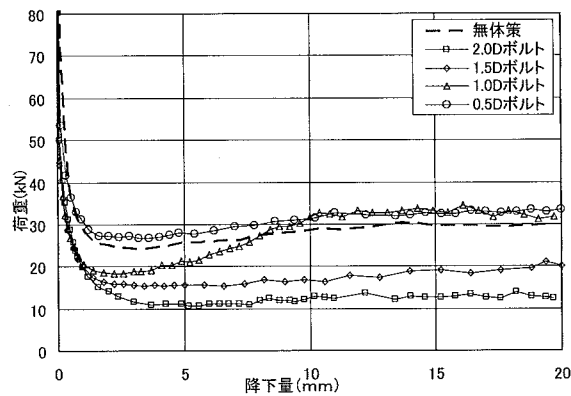


図 4.27 ボルト長さ毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 3 D，0mm 降下打設）

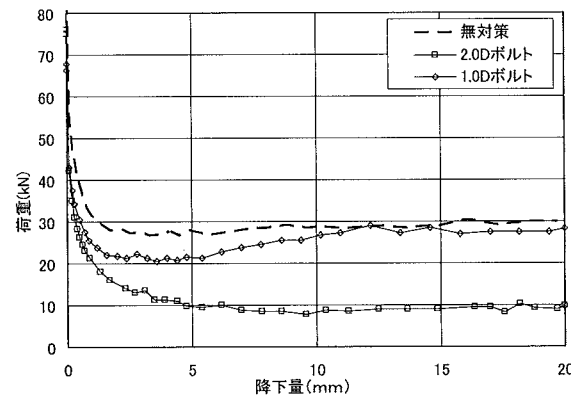


図 4.28 ボルト長さ毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 2 D，0mm 降下打設）

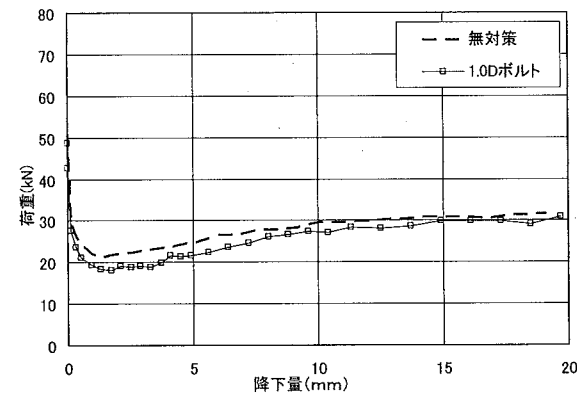
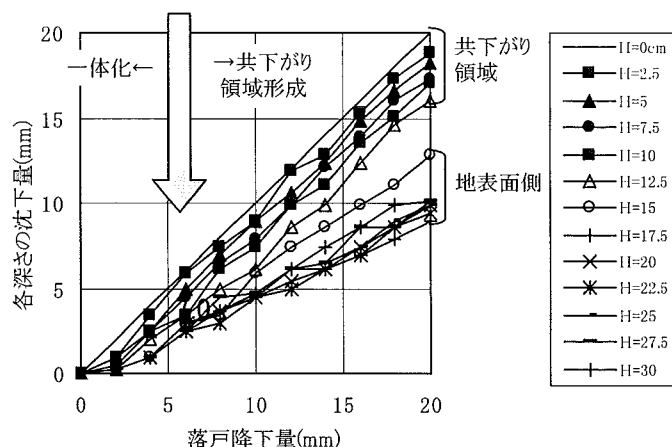


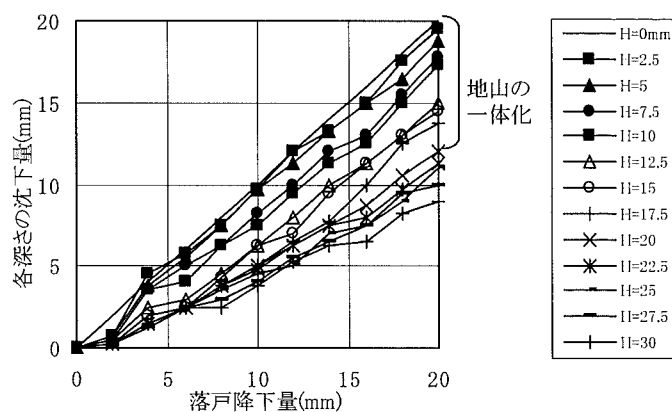
図 4.29 ボルト長さ毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 1 D，0mm 降下打設）

図 4.30 に，1.0D，1.5D，2.0D ボルトの落戸降下量と各層沈下量の関係を示す。
 図 4.30 より，1.0D ボルトの場合は，荷重低減効果が小さくなる降下量 6mm 付近までは地山が一体化しているが，その後，無対策（図 4.11）と同様に共下がり領域（高さ 12.5cm 程度）と地表面側領域に分離して行くのがわかる．一方，1.5D，2.0D ボルトについては共下がり領域が形成される現

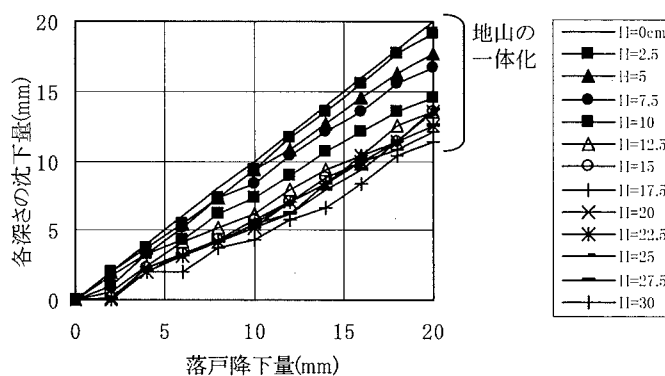
象は最後までみられず、地山が一体化し、地表面まで連続的に変形していることがわかる。さらに、無対策時より地表面沈下量が大きくなることも特徴的である。



(a) 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設



(b) 土被り 3D-1.5D ボルト-0mm 打設



(c) 土被り 3D-2.0D ボルト-0mm 打設

図 4.30 降下量-各層沈下量鉛直変位等高線図

図 4.31 に、20mm 降下時の無対策、1.5D ボルトの鉛直変位等高線図を示す。

図 4.31 より、ロックボルトがある場合は、共下がり領域が無対策時に比べ小さく抑えられていることがわかる。これにより、ロックボルトを打設することで地山が一体化し、無対策時に比べ共下がり領域が小さくなり、荷重低減効果が得られると考えられる。また、共下がり領域高さ程度の

長さのロックボルト(1.0D)では、初期（降下量の小さい）段階では効果があるものの、降下量が大きくなると効果はなくなる結果であった。

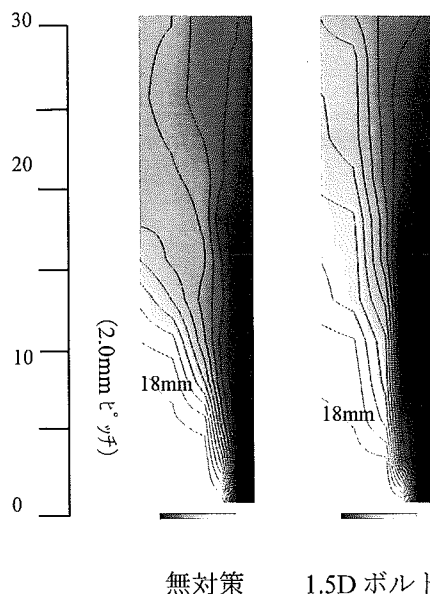


図 4.31 コンター図の比較（無対策，1.5D ボルト）

4.5.3 ボルト打設の効果（緩み域あり）

ここでは、緩み領域がある時（落戸がある変位まで降下した時）にロックボルトが打設された場合の落戸荷重-落戸降下量の関係について示す。

図 4.32 は、土被り 3D で落戸降下量が 5mm の時にロックボルトが打設されたものであり、図 4.33 は土被り 3D で落戸降下量が 10mm の場合にロックボルトが打設されたものである。

これによると、5mm 降下時点で打設されたロックボルトが 0.5D の長さであった場合、打設直後に一旦落戸荷重が上昇し、その後は、無対策と同程度まで落戸荷重が再び戻った。一方、2D ボルトの場合には、打設直後の上昇の後、無対策よりかなり小さい荷重まで落戸荷重が軽減した。一方、1.5D ボルトの場合には、2D ボルトよりやや大きいものの、無対策に比べれば小さい落戸荷重に収束した。対して、1.0D ボルトにおいてはボルト打設後、一時的に 1.5D ボルトと同程度に落戸荷重の軽減が見られたものの、落戸降下量の増大により落戸荷重も増大し、最終的には無対策と同程度まで増大し収束した。

このように、ロックボルトの効果は、ロックボルトの長さと落戸降下量によって異なり、この場合では、1.0D ボルトが変形挙動の境界となっているようである。

また、10mm 降下時打設である図 4.33 においても 2.0D ボルトについては、落戸荷重軽減の効果が顕著である。一方、5mm 降下打設である程度効果があつた 1.5D ボルトについては、10mm 降下打設においてその効果が認められず、また 1.0D ボルトについては、無対策を上回るなど効果が見られない。

このように、ロックボルトの効果は、同じ長さであっても、その打設時期により異なるものと考えられる。このことは、落戸効果に伴い拡大する緩み領域とロックボルトの長さが、ロックボルト打設による地山アーチ効果形成に関係するためと考えられる。

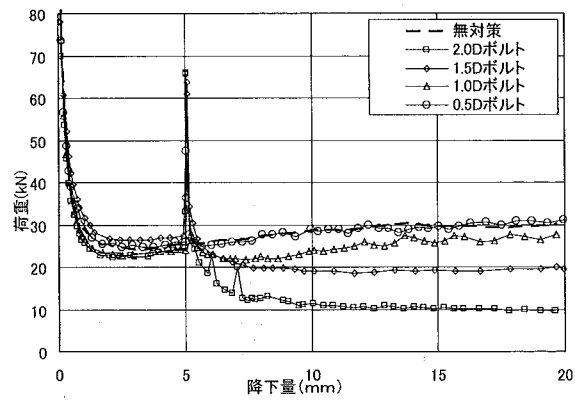


図 4.32 ボルト長さ毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 3 D, 5mm 降下打設）

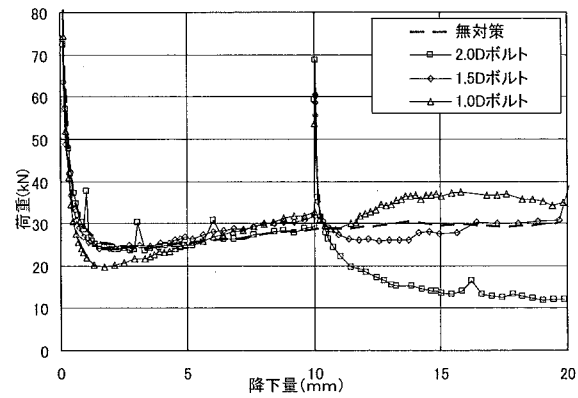


図 4.33 ボルト長さ毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 3 D, 10mm 降下打設）

4.6 横断方向打設の場合の実験結果

4.6.1 横断方向ボルト打設の効果（緩み域なし）

(1) 落戸荷重－落戸降下量関係

横断方向に角度をもって（傾斜させて），ロックボルトを打設した場合の落戸荷重-落戸降下量の関係について示す．図 4.34 は土被り 3D， 図 4.35 は土被り 2D， 図 4.36 は土被り 1D についてである．

これによると，ロックボルトの効果は，打設角度によっても異なる場合があることが分かる．図 4.34 では，(b)の 0.5D ボルトについては，打設角度とロックボルトの効果の顕著な関係は認められない．しかし，(a)の 1.0D ボルトについては，打設角度が 90° （落戸に対して直角に打設．前節までに示した直方向打設と同様であるが，他の打設角度のものと比べるため，ボルト本数を 4 本とした）の場合は，落戸降下量の増大により最終的に無対策のものと同じレベルの荷重値に収束しているのに対し， 75° ， 60° ， 45° ， 30° については，落戸荷重の軽減が見られる．土被り 3D の場合の 1.0D ボルト打設は，直方向打設でのボルトの効果が認められなかったため（図 4.27 参照），ここで横断方向に傾斜させる効果がよく現れている．

図 4.35 に示した土被り 2D の 1.0D ボルトにおいては，土被り 3D の 1.0D ボルトものとはほぼ同様の傾向が見られるが，若干土被り 2D の方が 90° 打設の効果が見られ荷重が無対策に対して減少している．

図 4.36 に示した土被り 1D の場合は，1.0D ボルトでは，打設角度が小さくなると若干落戸荷重が低減する傾向があるものの，ボルト打設角度によってボルトの効果が顕著に変わるといったことはほとんど認められない．また，0.5D ボルトについても打設角度の影響は認められない．

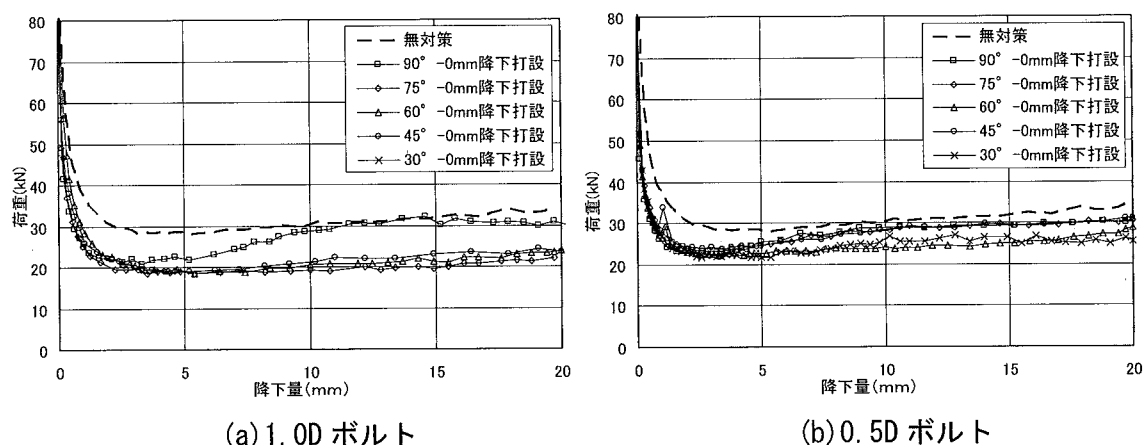
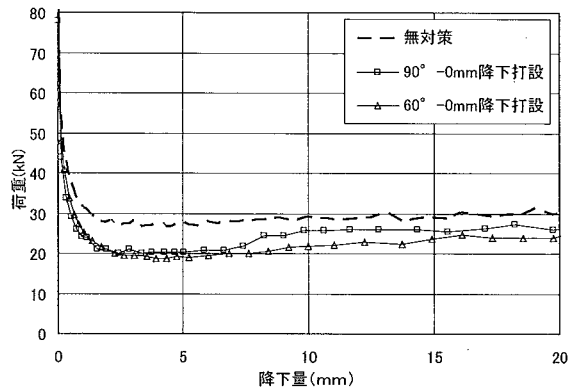
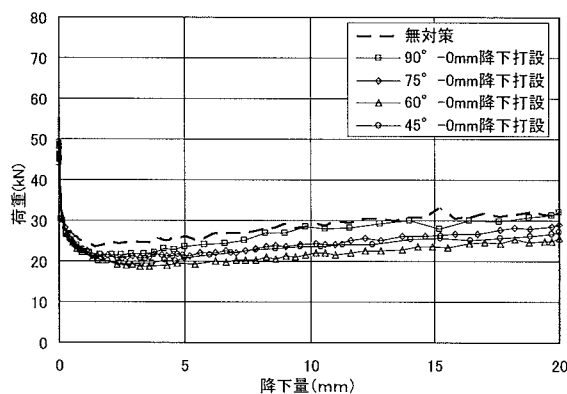


図 4.34 横断方向打設角度毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 3 D， 0mm 降下打設）

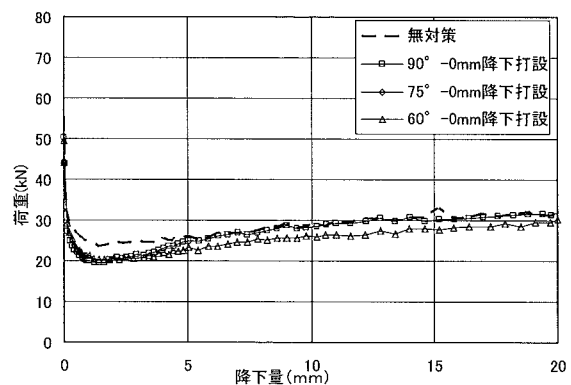


(a) 1.0D ボルト

図 4.35 横断方向打設角度毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 2 D, 0mm 降下打設）



(a) 1.0D ボルト



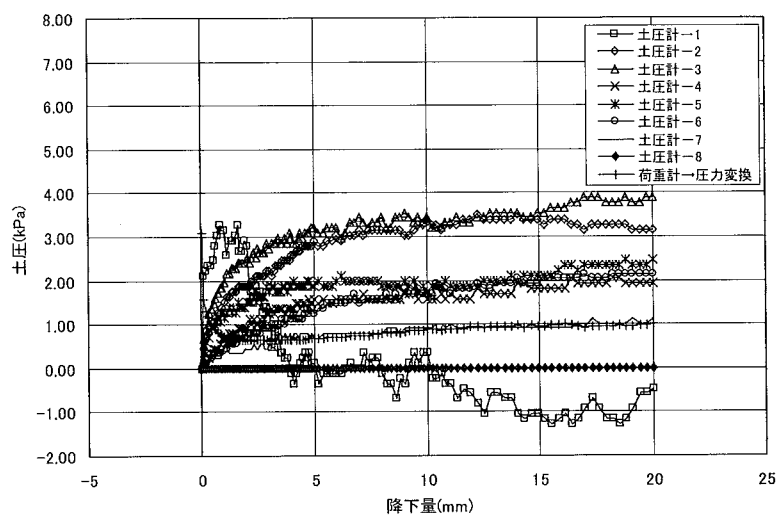
(b) 0.5D ボルト

図 4.36 横断方向打設角度毎の落戸荷重－落戸降下量関係（土被り 1 D, 0mm 降下打設）

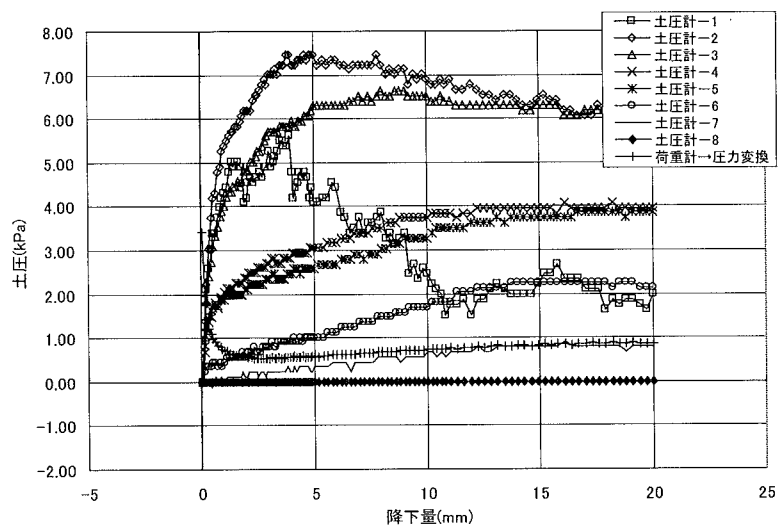
(2) 周辺土圧変化

横断方向に角度をもって（傾斜させて），ロックボルトを打設した場合の落戸周辺土圧の変化を図 4.37 に示す．これによると，土圧計-2 や土圧計-3 で顕著に土圧の増加傾向が認められ，落戸降下による地山アーチ作用の影響が窺える．なお，最も落戸に近い土圧計-1 は，落戸降下量の増大に伴って，徐々に増加から減少傾向に移行しており，落戸が降下するにつれて落戸近傍も地山アーチ内に包含されていく可能性が考えられる．

また，90° 打設と 60° 打設を比較すれば 60° 打設の方が周辺土圧の増加が顕著であり，ロックボルトを斜めに打設することによって，ロックボルトの打設効果が大きくなっていることが分かる．



(a) 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設 (90° 4本横断方向)



(b) 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設 (60° 横断方向)

図 4.37 横断方向打設の場合の周辺土圧変化

(3) ロックボルトの軸力

図 4.38, 図 4.39 に, 横断方向に角度をもって (傾斜させて) ロックボルトを打設した場合のロックボルト軸力の変化を示す. これによると, 60° 打設の方が 90° 打設よりもロックボルトの引張傾向が顕著であり, その傾向は, 落戸の両端になるほど大きいことが分かる. このことより, ロックボルトを斜めに打設する効果は, 落戸部分から外にロックボルトを定着させ, 落戸降下により緩む範囲と緩まない範囲を横断させることにより, 顕著になるものと考えられる.

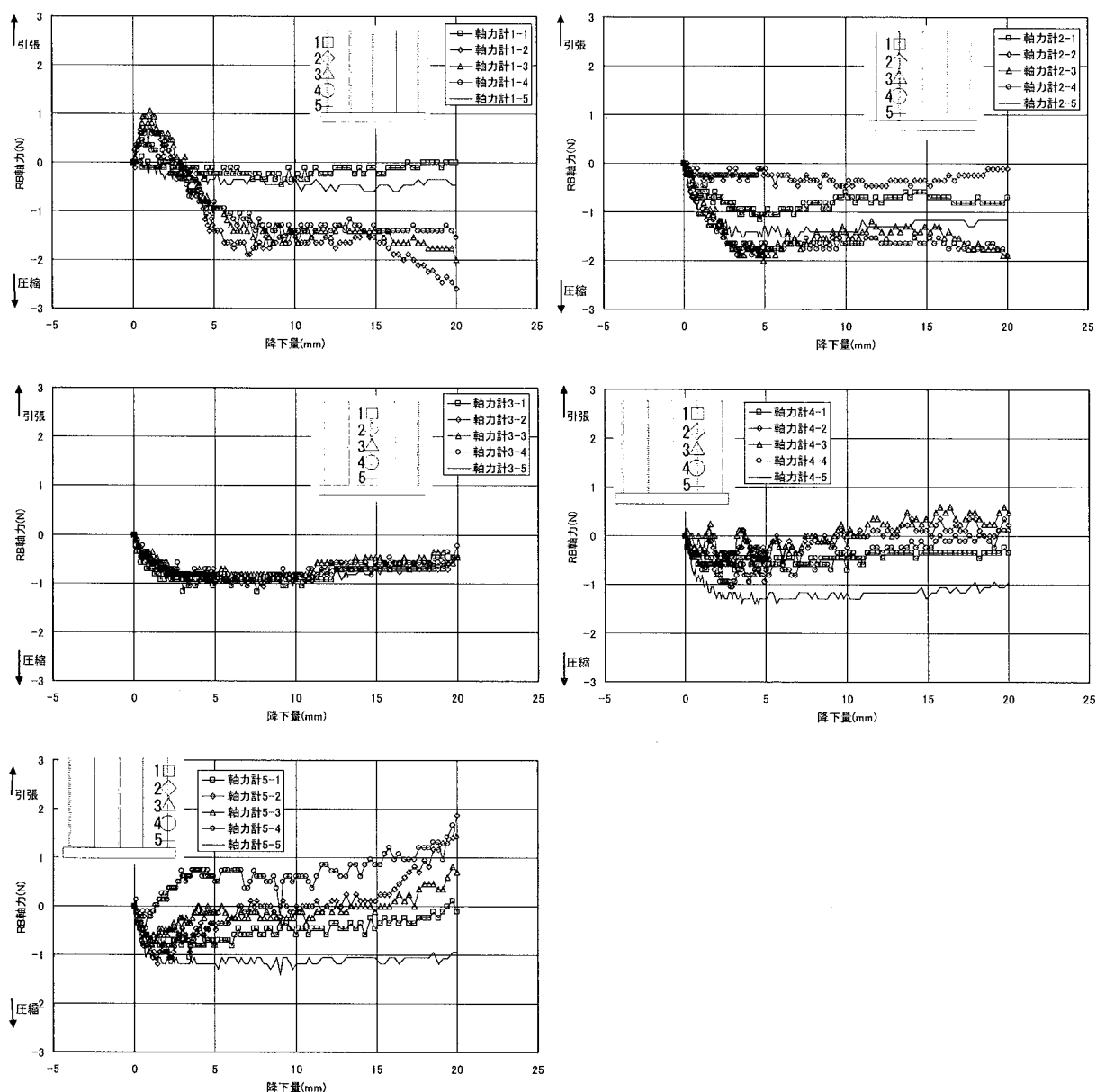


図 4.38 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設 (90° 横断) の場合のロックボルト軸力

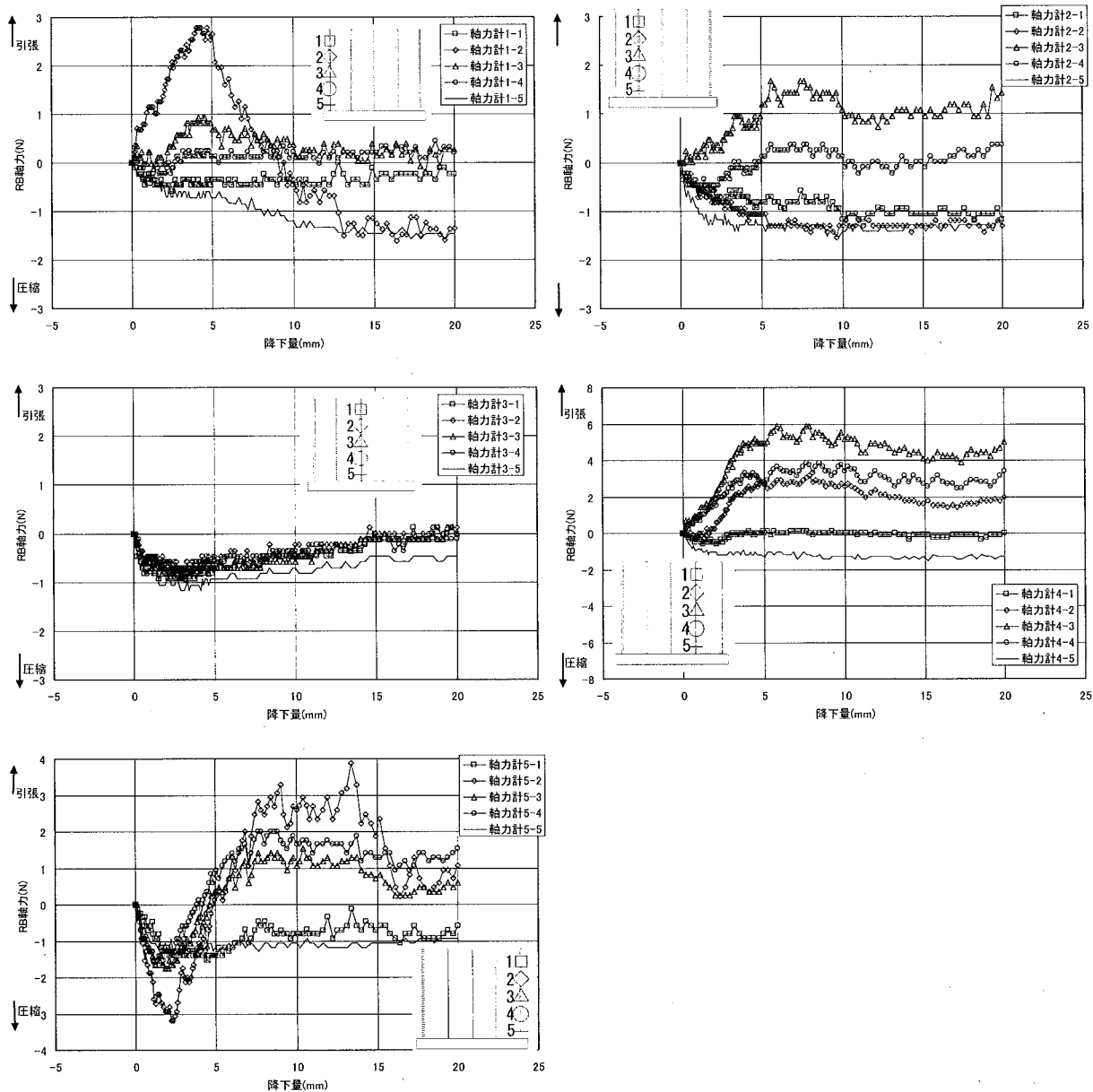
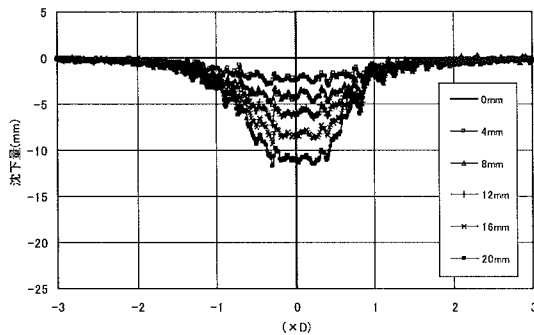


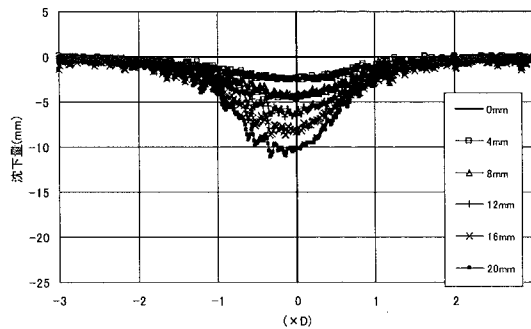
図 4.39 土被り 3D-1.0D ボルト-0mm 打設 (60° 横断) の場合のロックボルトの軸力

(4) 地表面沈下

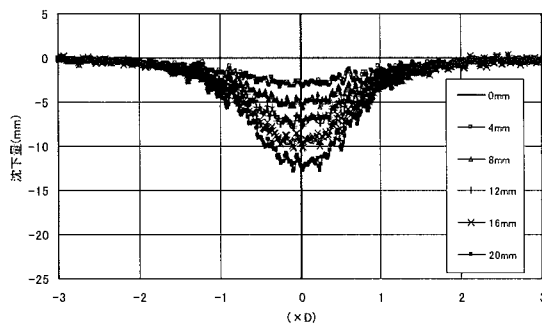
図 4.40 から図 4.42 に各落戸降下量時の地表面沈下を示す。これによると、土被りが 3D の場合、ボルトの打設角度によって地表面沈下には大きな変化が認められないことが分かる。一方、土被りが 2D, 1D の場合には、ボルトの打設角度が小さくなると、地表面沈下が若干小さくなる傾向があることが分かる。なお、 45° のようにボルトを傾斜しすぎると地表面沈下が逆に若干増大する場合もある。



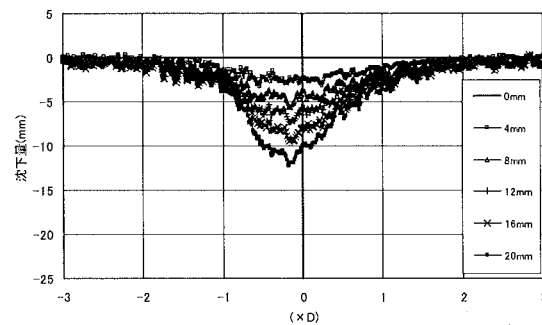
(a) 土被り 3D-0.5D ボルト- 90° -0mm 打設



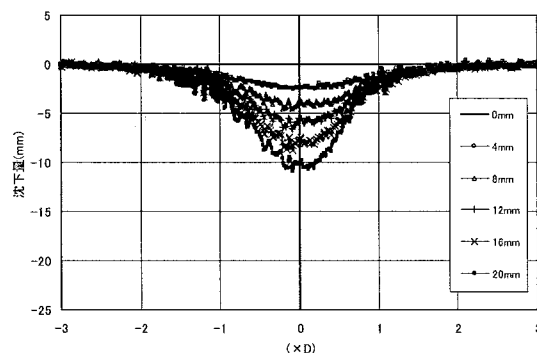
(b) 土被り 3D-0.5D ボルト- 75° -0mm 打設



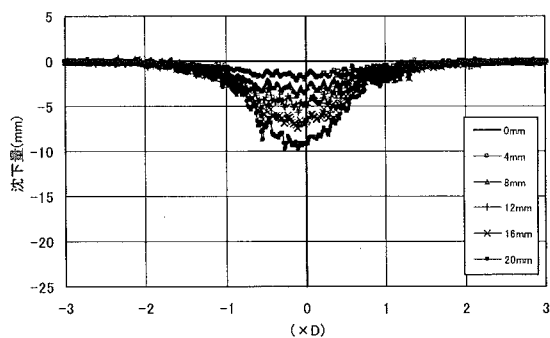
(c) 土被り 3D-0.5D ボルト- 60° -0mm 打設



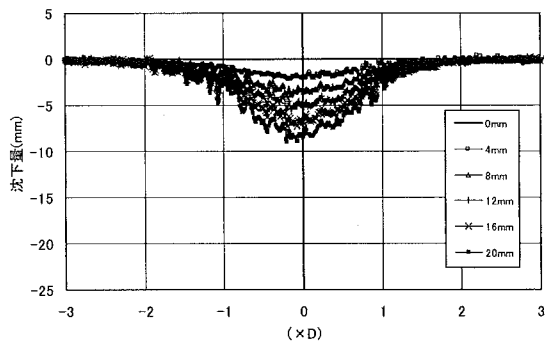
(d) 土被り 3D-0.5D ボルト- 45° -0mm 打設



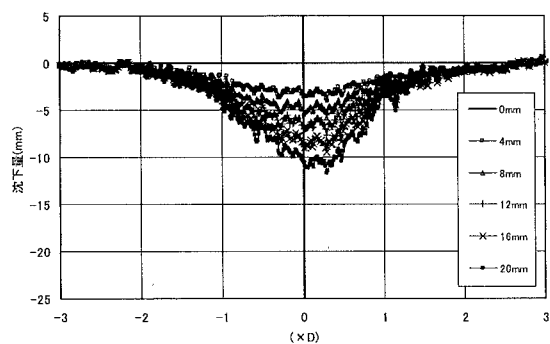
(e) 土被り 3D-0.5D ボルト- 30° -0mm 打設



(f) 土被り 3D-1.0D ボルト-90° -0mm 打設

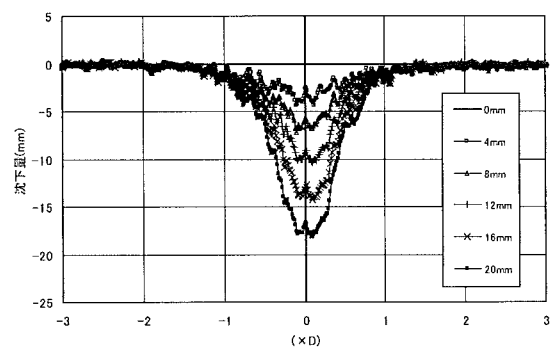


(g) 土被り 3D-1.0D ボルト-60° -0mm 打設

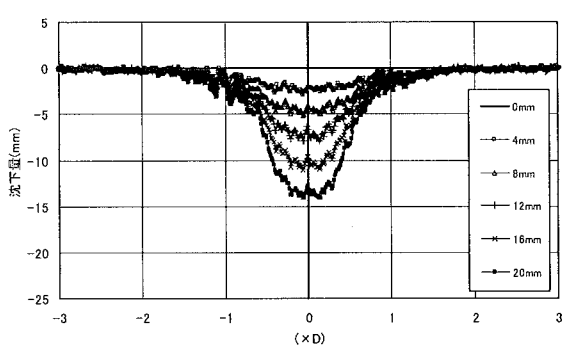


(h) 土被り 3D-1.0D ボルト-45° -0mm 打設

図 4.40 3D の場合の地表面沈下

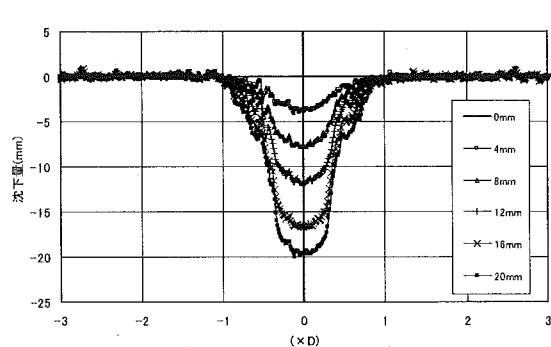


(a) 土被り 2D-1.0D ボルト-90° -0mm 打設

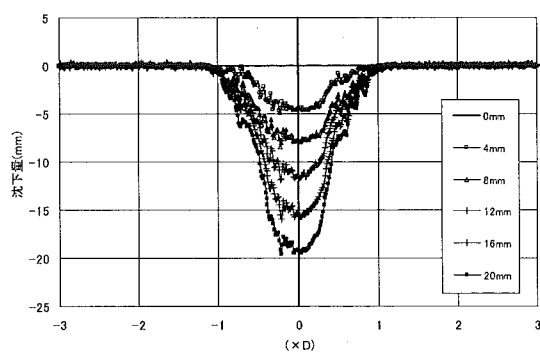


(b) 土被り 2D-1.0D ボルト-60° -0mm 打設

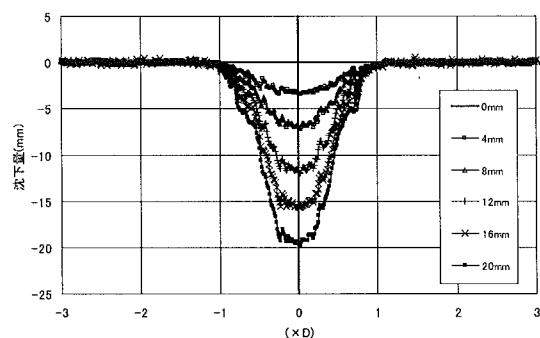
図 4.41 2D の場合の地表面沈下



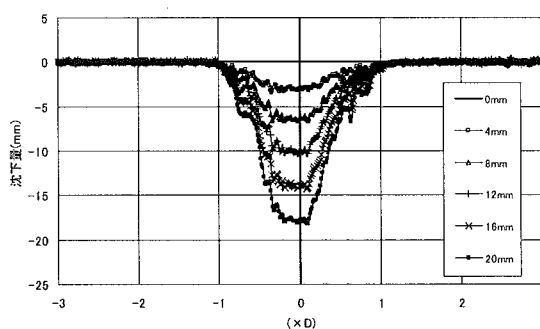
(a) 土被り 1D-0.5D ボルト-90° -0mm 打設



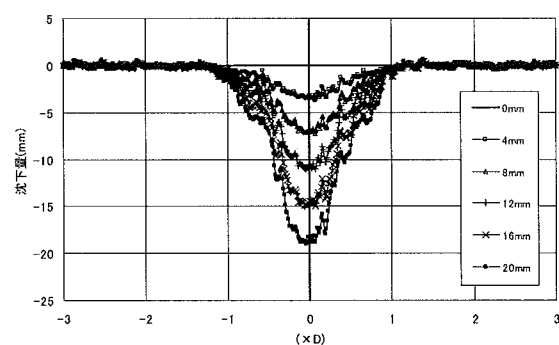
(b) 土被り 1D-0.5D ボルト-60° -0mm 打設



(c) 土被り 1D-1.0D ボルト-75° -0mm 打設



(d) 土被り 1D-1.0D ボルト-60° -0mm 打設



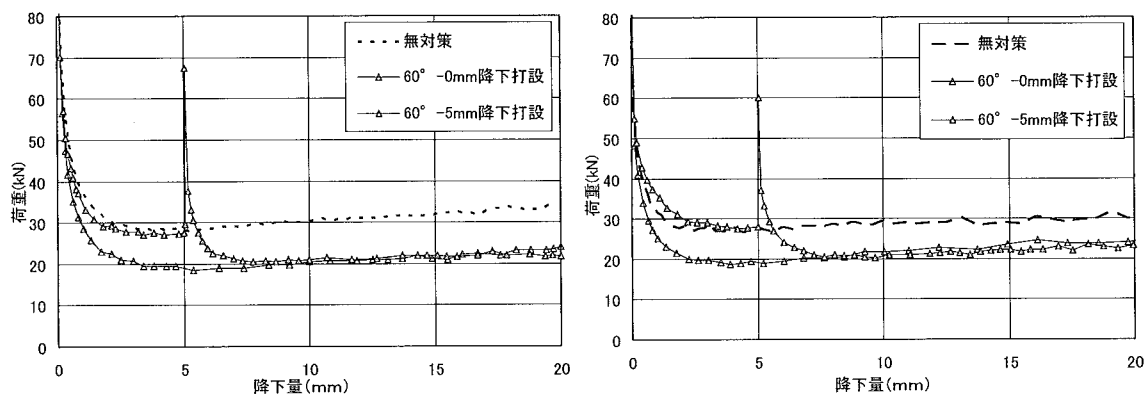
(e) 土被り 1D-1.0D ボルト-45° -0mm 打設

図 4.42 1D の場合の地表面沈下

4.6.2 横断方向ボルト打設の効果（緩み域あり）

(1) 落戸荷重－落戸降下量関係

落戸降下後に、前節と同じく横断方向に角度をもって（傾斜させて）、ロックボルトを打設した場合の落戸荷重-落戸降下量の関係を図 4.43 に示す。これによれば、打設前までは無対策と同様の挙動であるが、ロックボルト打設後は、緩み域がない状態でロックボルトを打設した場合と大差ない挙動となっている。したがって、緩み域がある状態で横断方向に角度をもってロックボルトを打設しても、その効果は十分期待できることが分かる。



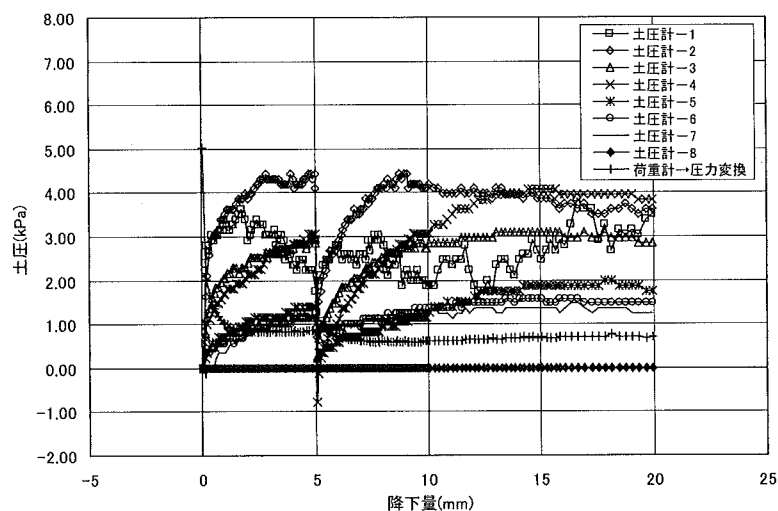
(a) 土被り 3D 1.0D ボルト 60° 打設

(b) 土被り 2D 1.0D ボルト 60° 打設

図 4.43 打設時降下量の違いによる落戸荷重—落戸降下量関係 (0mm と 5mm 降下打設)

(2) 周辺土圧変化

図 4.44 に、落戸降下後（緩み域ありの状態）横断方向に角度をもって（傾斜させて），ロックボルトを打設した場合の落戸周辺土圧の変化を示す．これによれば，打設前までに増加していた土圧は，ロックボルトの打設に伴い一旦減少し，さらなる落戸降下によって再度土圧増加が生じていることが分かる．



(a) 土被り 3D-1.0D ボルト-5mm 打設 (60° 横断方向)

図 4.44 横断方向打設（緩み域あり）の場合の周辺土圧変化

(3) ロックボルトの軸力

図 4.45 に、横断方向に角度をもって（傾斜させて），落戸降下後（緩み域ありで）ロックボルトを打設した場合のロックボルト軸力の変化を示す．これによると，図 4.39 で示した緩み域がない打設より両端のロックボルトの引張力が大きいが，中央のロックボルトには軸力はさほど作用しないという共通点もある．

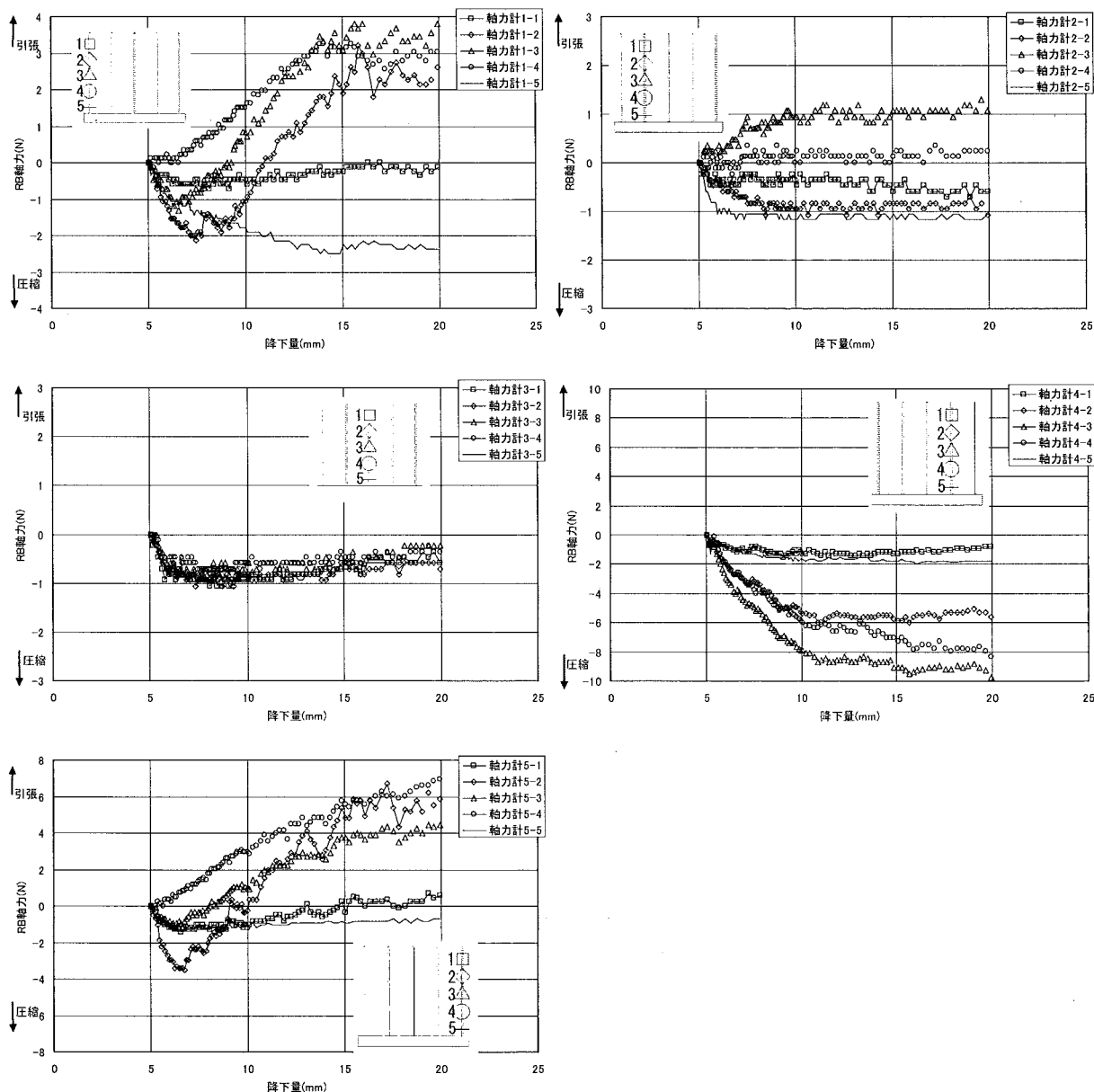
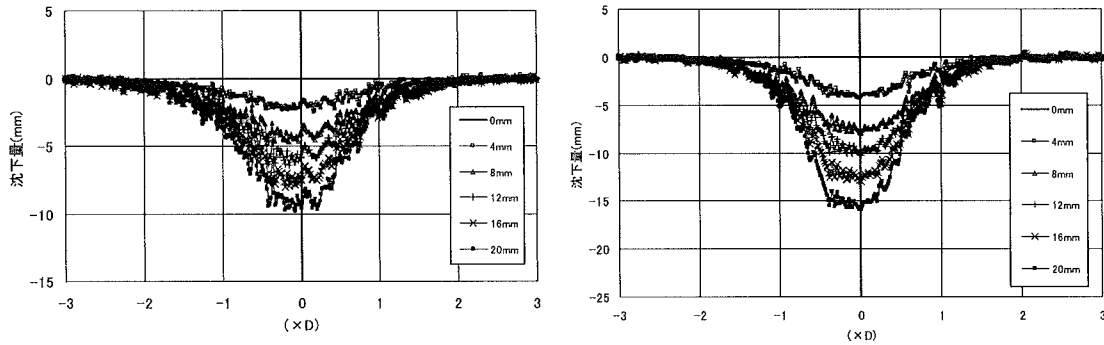


図 4.45 土被り 3D-1.0D ボルト-5mm 打設（60° 横断）の場合のロックボルトの軸力

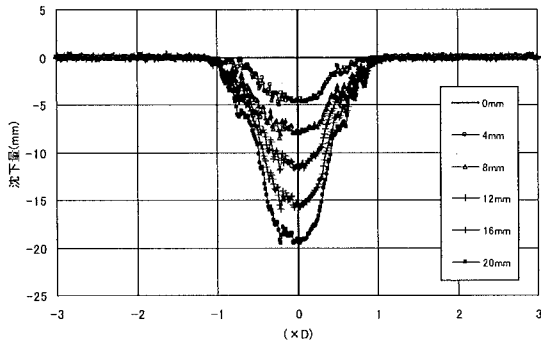
(4) 地表面沈下

図 4.46 に各落戸降下量時の地表面沈下を示す。これによると、図 4.40 から図 4.42 の緩み域がない状態より、地表面沈下は大きくなっており、早期にロックボルトを打設しなかった影響が窺える。なお、地表面沈下が増加する傾向は、土被り大きい場合の方が顕著であった。



(a) 土被り 3D-1.0D ボルト-60° -5mm 打設

(b) 土被り 2D-1.0D ボルト-60° -5mm 打設



(c) 土被り 1D-1.0D ボルト-60° -5mm 打設

図 4.46 地表面沈下

4.7 解析による検討

4.7.1 解析方法

落戸実験結果の検証をするため数値解析を実施した。ここでは、解析手法として大変形・非線形性の高い現象の再現に向いている有限差分法を用いた。解析コードは FLAC 2D である。解析モデルは、実験と同じ大きさとし、図 4.47 に示す。解析手順は実際の実験と同様に行う。①初期応力の解析を実施する②落戸に相当する部分(10cm)の支点に微小の強制変位 (0.05mm) を与える。③この状態で解が収束するまで計算を行う。このステップを繰り返し、所定の降下量になるまで解析を行う。なお、各解析収束後、落戸部分の支点反力を合計し、奥行き方向の長さをかけた値が落戸荷重となる。解析定数を表 4.4 に示す。地山構成則はモール・クーロンの式を用いた。また、ボルトは軸剛性のみ働くケーブル要素を用いた。

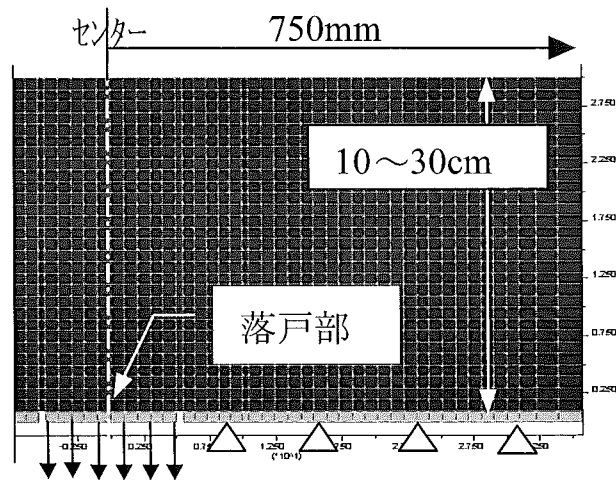


図 4.47 解析モデル図

表 4.4 解析入力定数

地 山 (モーラー・クーロン)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	16.0
	弾性係数 (Mpa) ※	1
	ポアソン比	0.3
	粘着力 c (kPa)	0.0
	内部摩擦角 ϕ (degree)	34.5
	ダレイタシ ϕ (degree)	10.0
ロックボルト (ケーブル要素1本当り)	弾性係数 E (kN/mm ²)	117.6
	ボルト径 (mm)	1.6
	面積 (mm ²)	0.000201
	周長(mm)	5.03
	降伏耐力 (kN)	0.402
	付着剛性 Kb (kN/m/m)	3.844E+2
	付着強度 cb (kN/m)	0.0
	摩擦角度 ϕ (degree)	34.5

4.7.2 解析結果

(1) 無対策

最初に土被り 3D の無対策時の解析を行った。図 4.48 に 20mm 降下時の鉛直変位等高線の結果を示す。図 4.10 の実験結果と比較すると、実験結果と同じように、落戸直上には三角形の共下がり領域が形成されているのが分かる。また、その形状・大きさもほぼ同じである。さらに、落戸中央の高さ方向の各レベルでの鉛直変位量の解析結果と実験結果の比較を図 4.49 に示すが、定量的にも良い一致を示していることが分かる。次に、図 4.50 に落戸荷重と降下量の関係の結果を示すが、実験結果と比較すると、最小荷重に到達するまでの降下量は解析結果の方が小さいものの、最小荷重値は良い一致を示していると言える。なお、同図には土被り 1D の結果も併記してあるが、実験結果と良い一致を示している。

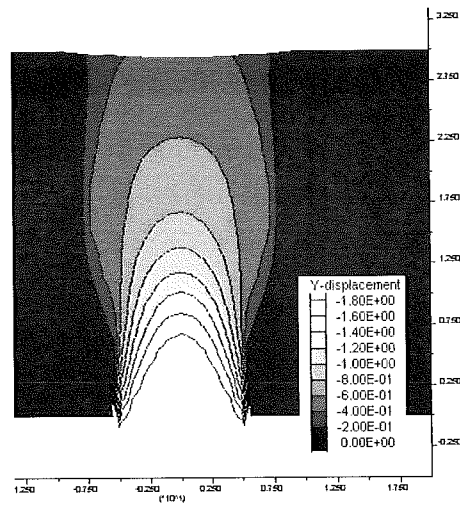


図 4.48 鉛直変位等高線図（無対策）

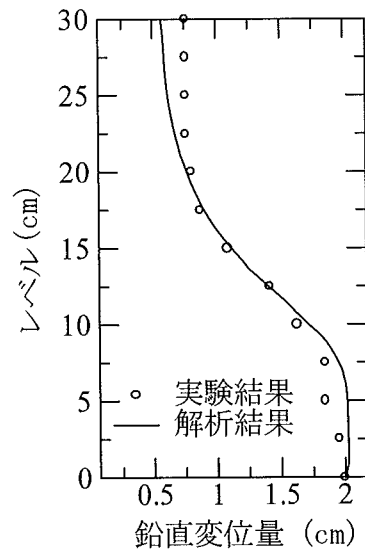


図 4.49 鉛直変位量図（センターライン）

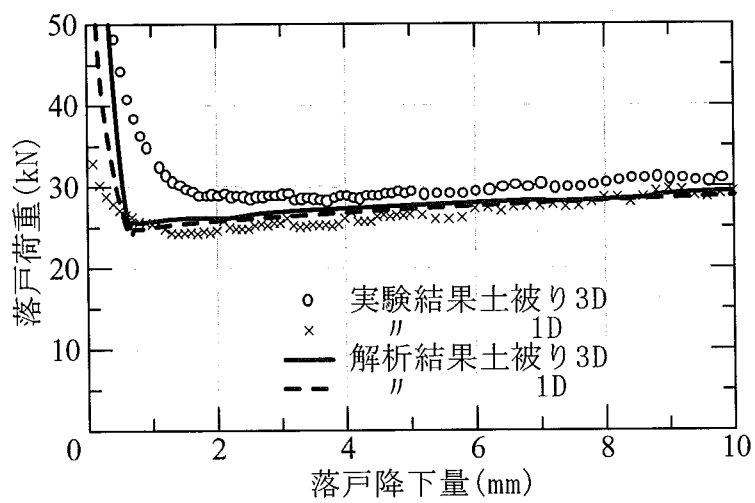


図 4.50 荷重沈下量図（無対策）

(2) 対策工（ボルトあり）

図 4.51 に土被り 3D でボルトを打設した場合の荷重-降下量の結果を示す。なお、ボルトの解析は落戸降下量 10mm までの結果で比較した。1.5D ボルトの降下前打設の解析結果と実験結果を比較すると、ほぼ同程度の荷重低減効果となっているのがわかる。図 4.52 に鉛直変位等高線図を示すが、無対策に比べ、共下がり領域は小さく、地表面変位が大きくなっており、実験結果の傾向と一致している。次にボルト長の違いを見てみると、図 4.51 の 1.0D ボルトの荷重-降下量曲線は 1.5D ボルトのものとほぼ一致し、1.0D ボルトは 1.5D ボルトと同程度の効果となった。0.5D ボルトの場合は、最初は効果あるものの徐々にその効果が小さくなる傾向となった。一方、実験では 1.5D ボルト以上の効果は同じで、1.0D ボルト以下の場合は荷重低減効果が持続しない結果であった。このように、実験では 1.0D ボルトから、解析では 0.5D ボルトからと異なる結果となったが、これは地山を連続体としてモデル化しているが、実際は粒状体の地山であることの影響であると考えられる。次に、降下後打設の効果を見てみる。図 4.51 の降下後打設の結果を見ると、いずれのボルト長の場合も実験結果と同様に、ボルト打設後の荷重降下量曲線は降下前打設の曲線と一致する結果となり、降下後打設の荷重低減効果が確認できた。

図 4.53 に土被り 1D の結果を示す。降下前打設の場合を見ると、実験結果より若干大きいものの荷重低減効果が確認できる。一方、降下後打設は、降下前打設に比べてさらに小さな効果しか現れていない。土被り 3D の場合と比較すると荷重低減効果の大きさが小さくなっており、さらに降下後打設の場合は、より顕著になっていることなど、実験結果と同様な傾向を示し、打設時期の違いに対する土被りの影響が大きいことが示された。なお、解析が 4mm 程度降下時に終了しているのは、この時点でボルトと地山の相対変形が大きくなり、計算が発散したためである。土被り 1D の場合は土被り 3D の場合と異なり、地表面まで大きな変形が発生するため、追従できなくなったと考えられる。降下後打設に関しても同様に 9.5mm 降下時に発散した。

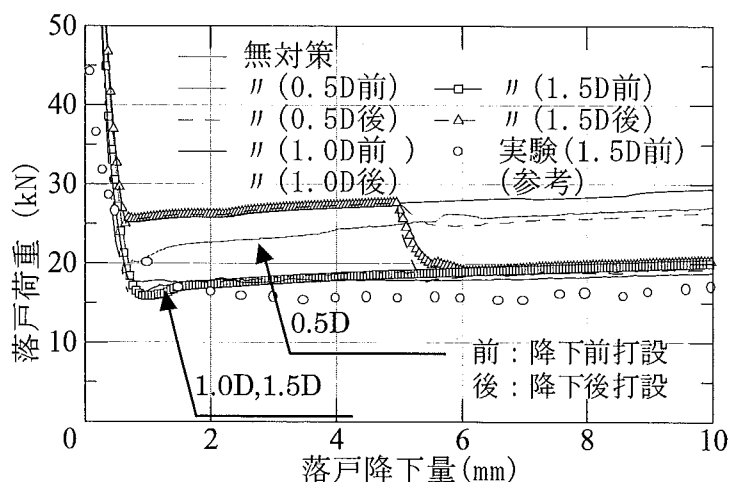


図 4.51 荷重沈下量図（土被り 3D）

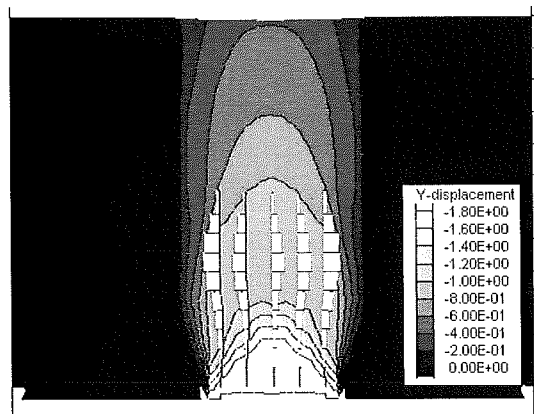


図 4.52 鉛直変位等高線図 (1.5D ボルト)

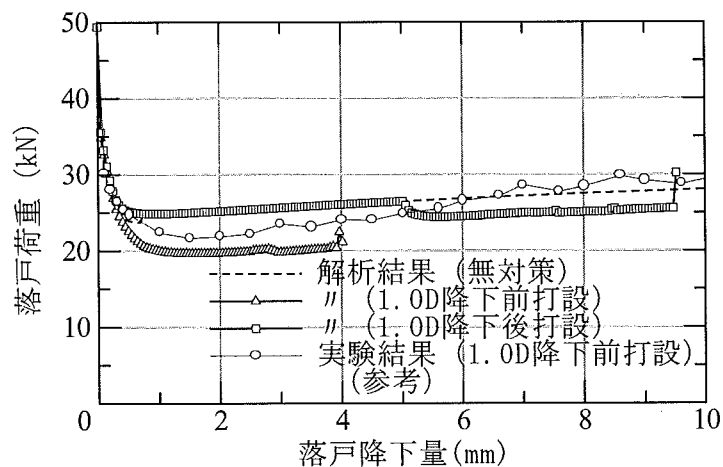


図 4.53 荷重降下量図 (土被り 1D)

4.8 まとめ

本章では、ゆるみ域が既に発生している領域に打設するロックボルトの効果を確認することを目的として落戸模型実験を行った。その結果、以下のことが分かった。

- ①ロックボルトは、地山を一体化させる効果があり、落戸荷重を軽減することができる。
- ②ロックボルトの作用効果は、土被り、ボルト長さや打設時期によって異なり、土被りが大きい場合は、緩み域が発生している場合でも、緩み域程度の長さのロックボルトを早期に打設することにより支保効果が認められた。さらに、緩み域を超えるような長さのロックボルトを打設すれば、緩み域が無い状態に打設した場合と同程度の支保効果が期待できる。一方、土被りが小さい場合は、緩み域が発生している状態でロックボルトを打設しても支保効果はほとんど期待できない。
- ③ロックボルトをある程度横断方向に角度を持って打設する方が、直角に打設するよりもその効果が期待できる場合もある。
- ④有限差分法による数値解析を行った結果、無対策時、ロックボルト打設時とも実験結果をよく再現できた。

5. おわりに

ロックボルトは、山岳工法トンネルの主たる支保部材の一つと考えられているが、その作用効果については、統一的に理論化され、設計に利用できる段階まで解明されるに至っていない。さらに、近年、施工状況等からロックボルトの打設が多様化せざるを得ない場合が多くなっている。

このような背景のもと、本研究では、作業上の制約等からトンネル進行方向に対して斜めにロックボルトを打設する、いわゆる“斜めボルト”の作用効果の解明を目的とした、遠心力載荷実験と数値解析を行った。また、先受け工を対象とした遠心力載荷実験を行った。さらに、ロックボルトの作用効果とトンネル掘削によるゆるみ域との関係を明らかにするため、ロックボルトの打設時期を考慮した落戸実験を行った。

これらの検討から得た知見を以下に示す。

斜めボルトの作用効果に関する遠心力載荷実験からは、以下のことが分かった。

- ①実験結果より、地山（天端）安定効果は、直ボルトが最も高いことが分かった。しかしながら、配置や長さを適切に設定することにより、斜めボルトでも直ボルトと同程度の地山安定効果が期待できる場合があることが明らかになった。
- ②数値解析により、天端部のみに打設された直ボルト（打設角度=90°）の地山安定効果をシミュレーションすることができた。さらに、解析では、側壁部にのみ打設された直ボルトでも、天端部のみの打設より効果は低いものの、地山安定効果があることが示された。また、斜めボルトに対する解析結果では、ボルトの打設角度が小さくなると地山安定効果が小さくなること、ある角度より小さくなると急激に効果が期待できなくなることなど、実験結果と同じ傾向を再現することができた。

先受け工の効果に関する遠心力載荷実験からは、以下のことが分かった。

- ①先受け工の打設角度については、同じ先受け工であっても、打設角度を出来るだけ水平に近くすることが有効である。
- ②先受け工の長さは、長い方が有効であり、先受け上部の天端からの崩落を抑制するには、先受け工に一定以上の長さが必要である。
- ③打設ピッチを密にすれば、たとえ打設角度や先受け長さが決まっている場合であっても、崩落領域を小さく出来る。
- ④天端の崩落を抑制したパターンでは、先受け工が地山側と支保側を両支点とする梁として働き、天端崩落を抑制したと考えられる。

ロックボルトの効果を確認することを目的とした落戸模型実験からは、以下のことが分かった。

- ①ロックボルトは、地山を一体化させる効果があり、落戸荷重を軽減することができる。
- ②ロックボルトの作用効果は、土被り、ボルト長さや打設時期によって異なり、土被りが大

きい場合は、緩み域が発生している場合でも、緩み域程度の長さのロックボルトを早期に打設することにより支保効果が認められた。さらに、緩み域を超えるような長さのロックボルトを打設すれば、緩み域が無い状態に打設した場合と同程度の支保効果が期待できる。一方、土被りが小さい場合は、緩み域が発生している状態でロックボルトを打設しても支保効果はほとんど期待できない。

- ③ロックボルトをある程度横断方向に角度を持って打設する方が、直角に打設するよりもその効果が期待できる場合もある。
- ④有限差分法による数値解析を行った結果、無対策時、ロックボルト打設時とも実験結果をよく再現できた。

今後は、実トンネルでの計測結果等を用いたロックボルトの作用効果の検討や、そのメカニズムを明確に表現できる数値解析手法の検討が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うに際し、ご協力頂きました関係者各位に深く感謝致します。

参考資料 1. 遠心力載荷実験装置の概要

1.1 実験原理

物体を半径 r の円上を一定の角速度 ω で回転させるとき，物体には遠心力加速度

$$a = r \cdot \omega^2 \quad \dots\dots\dots \text{(式-1.1)}$$

が作用する．実験では地山に見立てた実験土槽を回転腕に取り付け，等速回転させることにより遠心力加速度を作用させる．このとき実験土槽に作用する遠心力加速度が地球の重力加速度の n 倍であれば，トンネル外径 D の模型実験では実物に換算すと外径 nD のトンネル掘削に相当する．実物に対する遠心力重力場における模型の縮率は，参考表 1.1 に示すとおりである．

参考表 1.1 実物に対する遠心力重力場における模型の縮率（ n ：重力加速度倍数）

物性値	実物	模型
密度	1	1
長さ	1	$1/n$
重力加速度	1	n
加振加速度	1	n
質量	1	$1/n^3$
力	1	$1/n^2$
応力	1	1
ひずみ	1	1
時間（動的現象）	1	$1/n$
時間（浸透現象）	1	$1/n^2$

1.2 遠心力载荷装置

遠心力载荷装置は、回転腕に吊り下げる形で取り付けした土槽を回転によって水平方向へ振り上げるスイングバスケット式で、公称回転半径は 2.0m である。参考図 1.1 に装置の概要を示す。土槽を回転腕に取り付け等速度で回転させることによって一定の遠心力加速度を与え、見かけの自重を増加させることによって試料の重量に起因する拘束圧と荷重を意図的に変化させられるようになっている。

土槽が半径 $r(\text{m})$ 、回転数 $N(\text{rpm})$ で回転しているとき、遠心力加速度 $a(\text{m/s}^2)$ は、

$$a = r \times \left(\frac{2 \pi \times N}{60} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (\text{式-1.2})$$

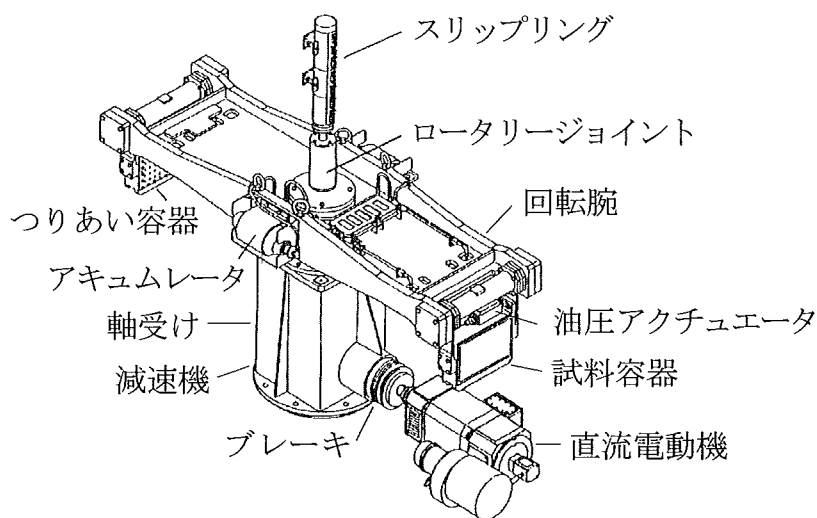
で表される。

遠心力加速度を重力加速度倍数で管理する場合には $a = n \cdot g$ を代入して、

$$N = \frac{60}{2 \pi} \times \left(\frac{n \cdot g}{r} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (\text{式-1.3})$$

で求められる。

今回の実験においては土槽内のトンネル中心部における遠心力加速度が重力加速度の倍数となるようにするため、 $r = 2.170\text{m}$ として計算した。各重力加速度倍数に対応する回転数の値を参考表 1.2 に示す。



参考図 1.1 装置概要

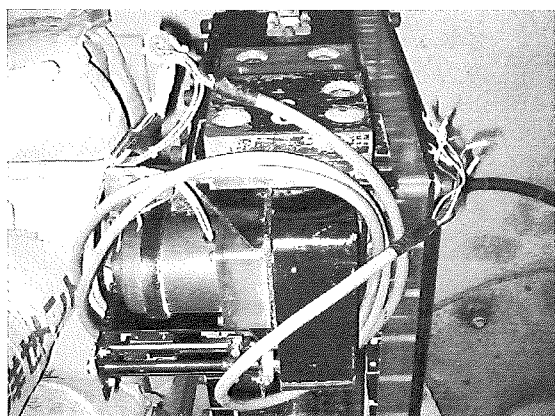
参考表 1.2 回轉数

回轉半径	遠心力加速度	角速度	回轉腕回轉数
2.17	5	4.752	0.76
	10	6.720	1.07
	15	8.231	1.31
	20	9.504	1.51
	25	10.626	1.69
	30	11.640	1.85
	35	12.572	2.00
	40	13.440	2.14
	45	14.256	2.27
	50	15.027	2.39
	55	15.748	2.51
	60	16.461	2.62
	65	17.133	2.73
	70	17.780	2.83
	75	18.404	2.93
	80	19.008	3.03

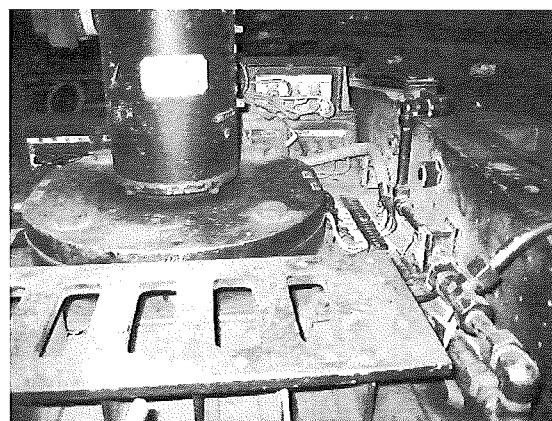
1.3 実験装置の概要

実験土槽は鋼製で内寸が $140 \times 500 \times 400\text{mm}$ ，うち試料投入部分は $140 \times 395 \times 400\text{mm}$ となっている．前面には厚さ 60mm の着脱可能透明の亚克力板がボルトにより装着されており，ここから内部の様子を観察できる．

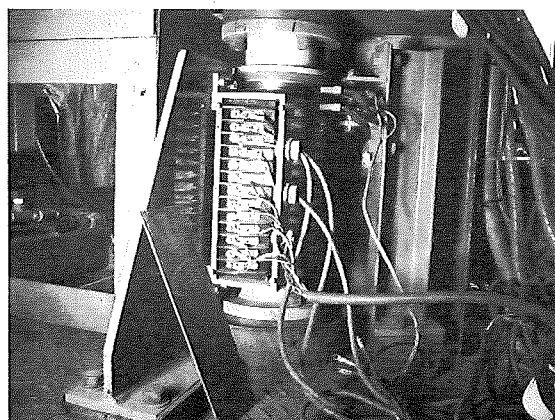
土槽内には覆工モデルと押さえ具（ともに亚克力製）からなるトンネル掘削模型が設置されている．押さえ具は土槽上部に設置した電動モータからチェーン駆動によりスライドする構造になっており，トンネル縦断方向に 90mm 程度のスライドが可能である．これを覆工から突き出した状態で試料の投入・締固めを行って模型地山を作製し，遠心力载荷中に覆工内に引き込むことによって掘削による応力解放を再現するものである．電動モーターの電源は，モーターからのコード（参考写真 1.1）をアームの回転軸付近にある端子（参考写真 1.2）に接続し，スリッピング（参考写真 1.3）を介して制御用ボックス（参考写真 1.4）から AC100V を得る．遠心力载荷中の連続写真を撮影する場合は，アーム回転軸に取付けてある光反射センサー（参考写真 1.5）が反応するか確認する．载荷準備が整えば制御盤（参考写真 1.6）にある回転腕回転数の値を参考表 1.2 を参照しながら所定の遠心力加速度になるように調整つまみにて载荷を行う．



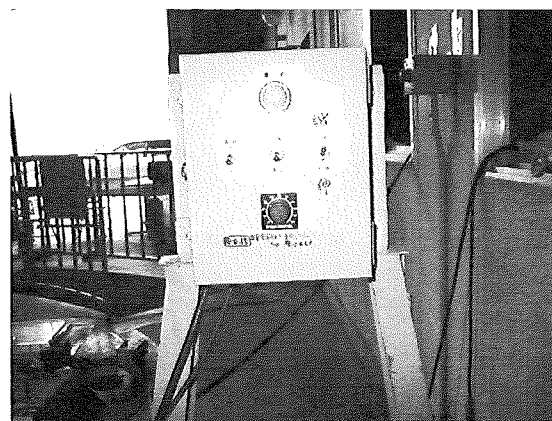
参考写真 1.1 電源コード



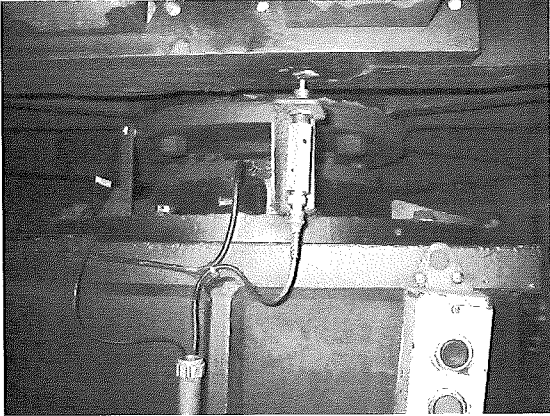
参考写真 1.2 スリッピング端子



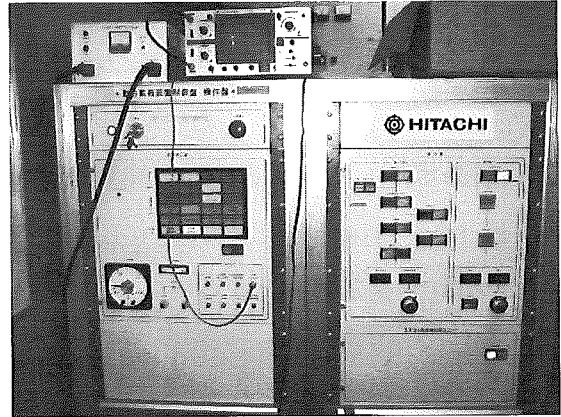
参考写真 1.3 スリッピング上端子



参考写真 1.4 制御ボックス



参考写真 1.5 光反射センサー



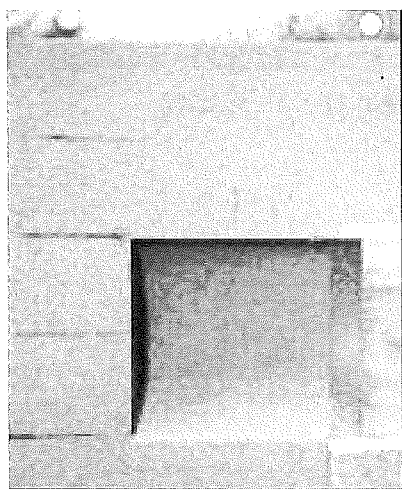
参考写真 1.6 制御盤

参考資料 2. 崩落時の状況写真

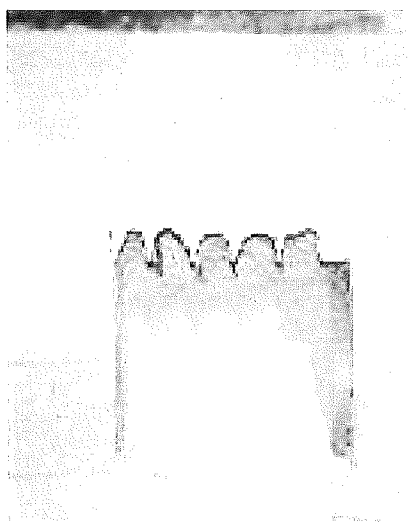
ここでは、2章で行った斜めボルトの効果に関する実験、3章で行った先受け工の効果に関する実験、それぞれで得られた崩落図について、その根拠となる崩落状況写真を示す。

2.1 斜めボルトに関する実験の崩落状況

2章「図2.5の崩落図」の根拠となる写真を参考表 2.1に示す。なお、ここで示すケース記号は、図2.5の(a)～(p)と共通とする。



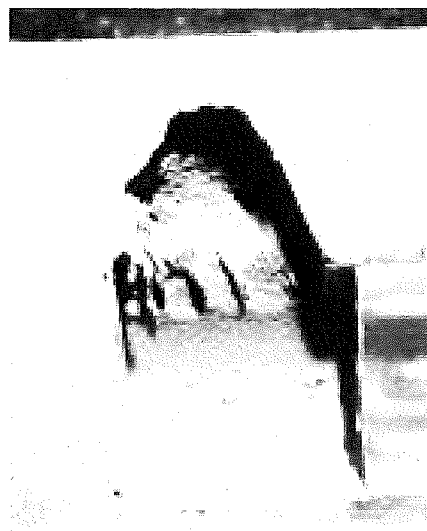
(a)



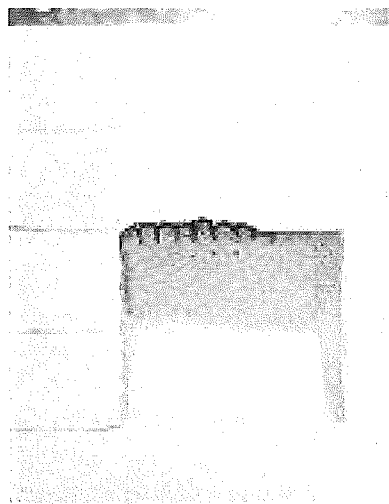
(b)



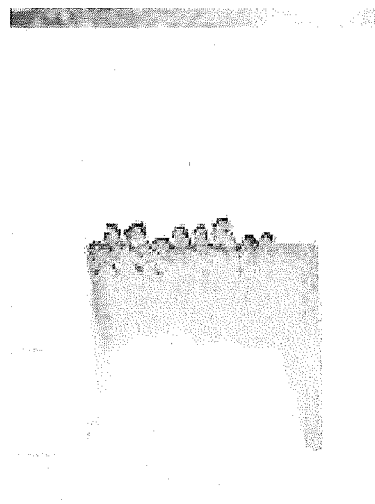
(c)



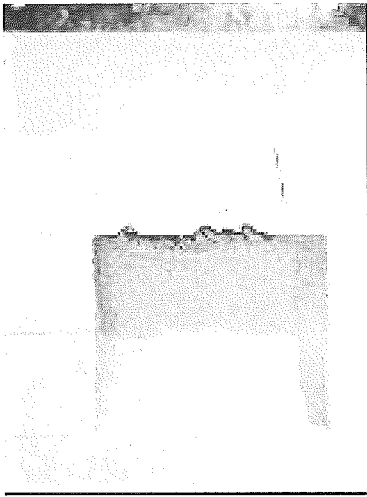
(d)



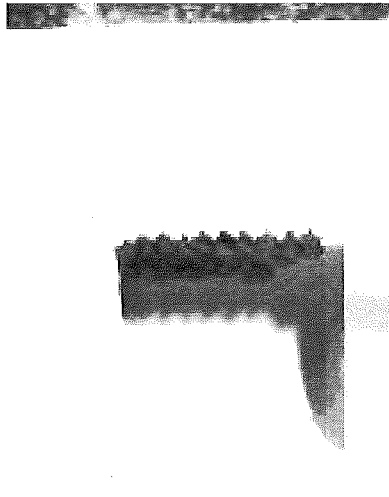
(e)



(f)



(g)



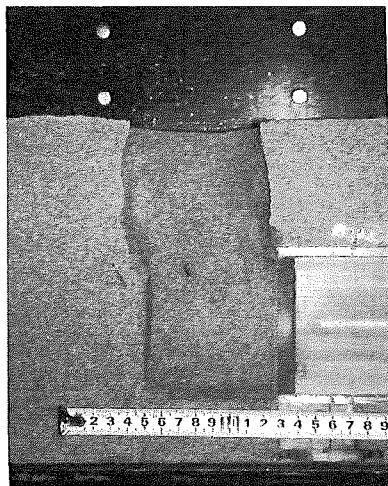
(h)



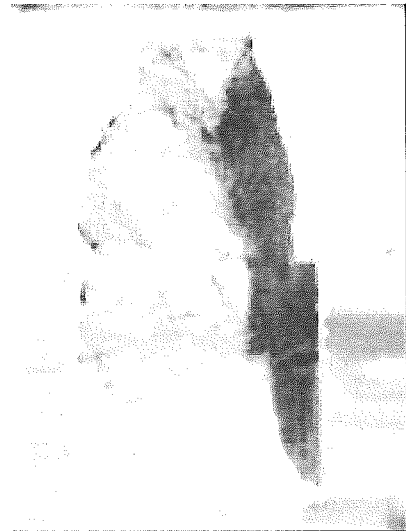
(i)



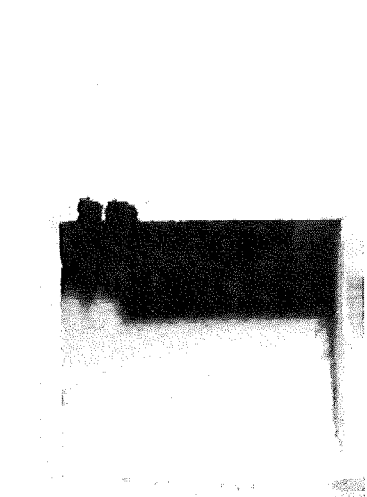
(j)



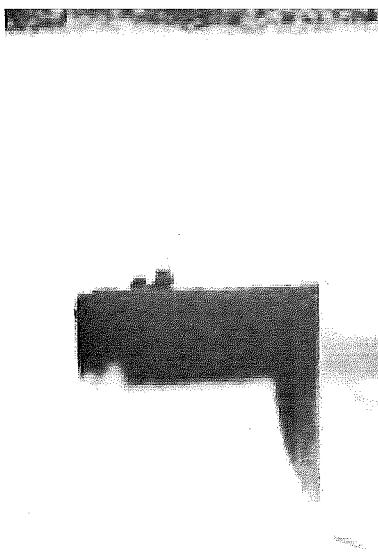
(k)



(l)



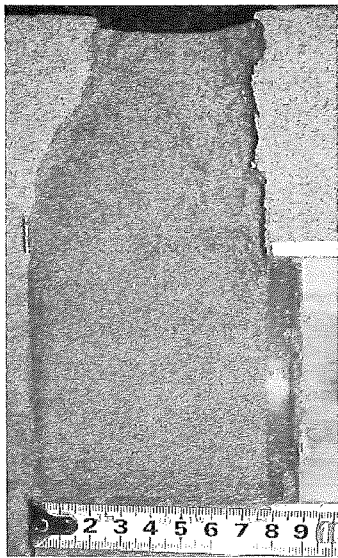
(m)



(n)



(o)



(p)

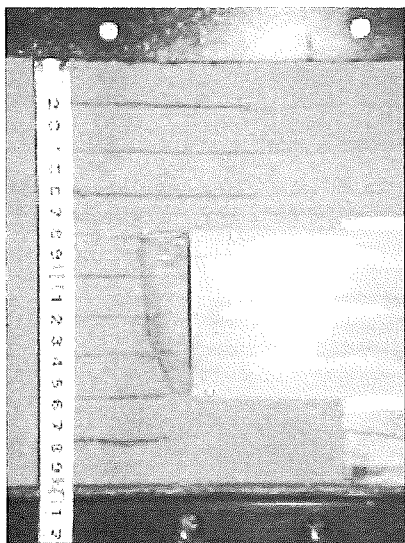


(q)

参考表 2.1 斜めボルト実験での崩落状況写真

2.2 先受け工に関する実験の崩落状況

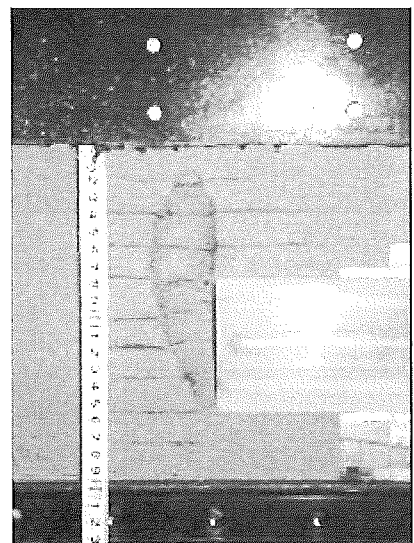
3章「図3.5の崩落図」の根拠となる写真を参考表 2.2に示す。なお、ここで示すケース記号は、図3.5の(a)～(w)と共通とする。



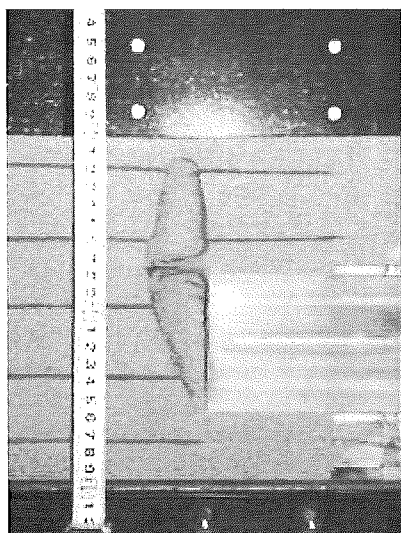
(a)



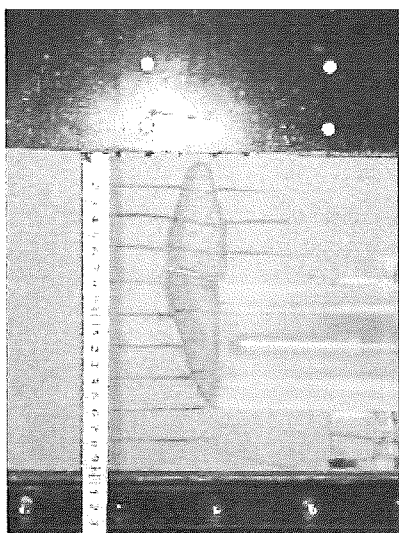
(b)



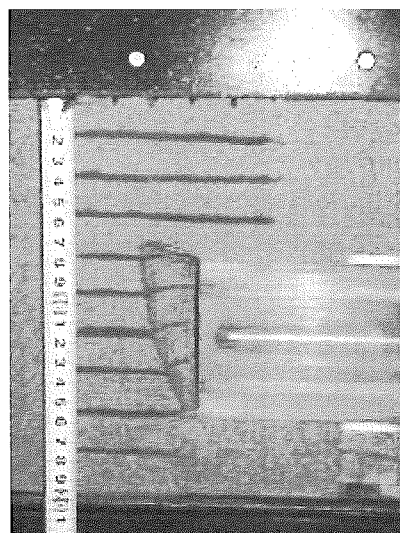
(c)



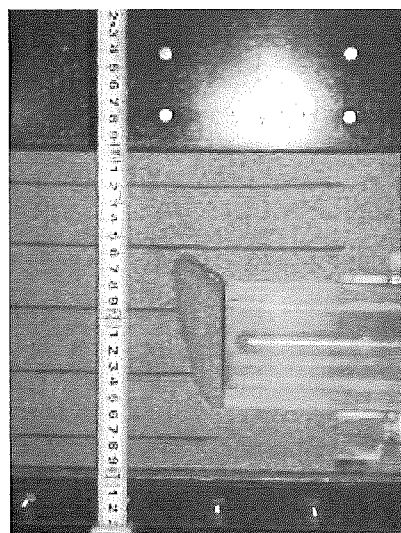
(d)



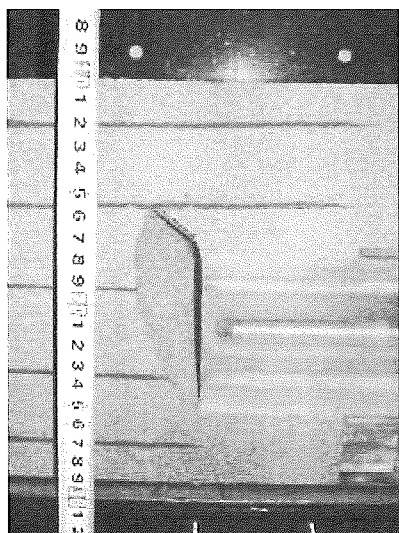
(e)



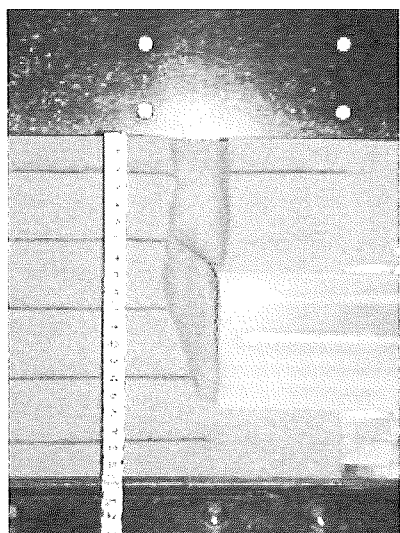
(f)



(g)



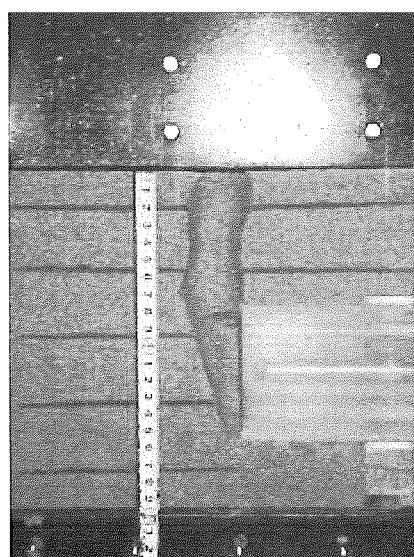
(h)



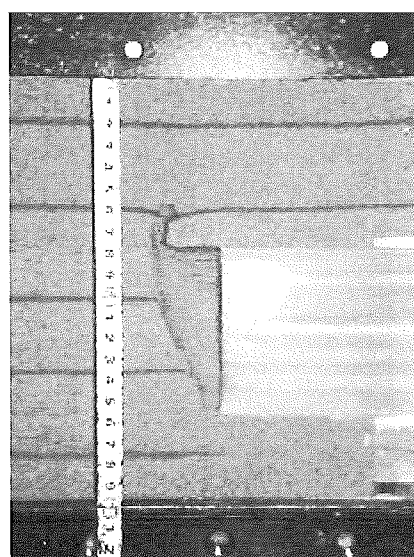
(i)



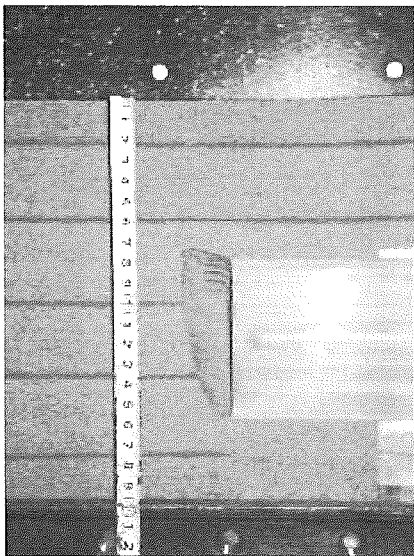
(j)



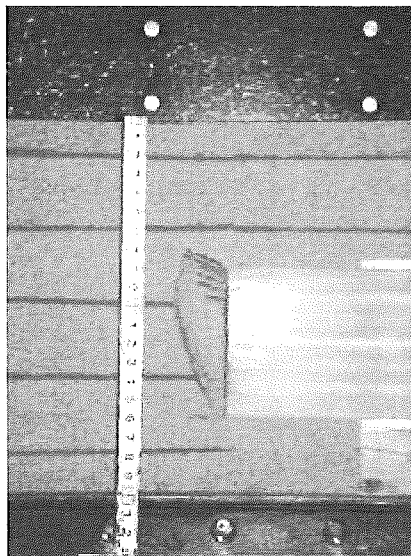
(k)



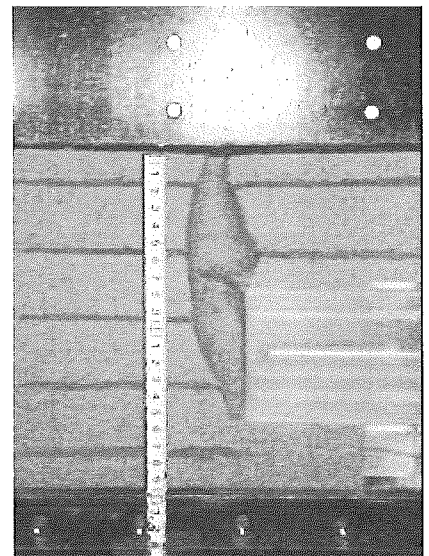
(l)



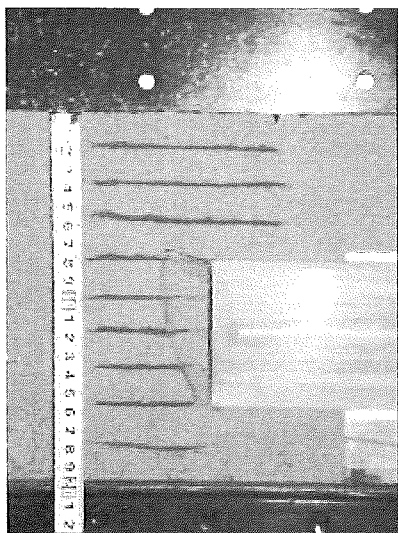
(m)



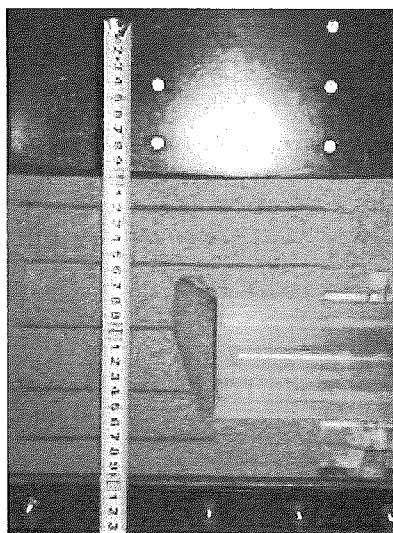
(n)



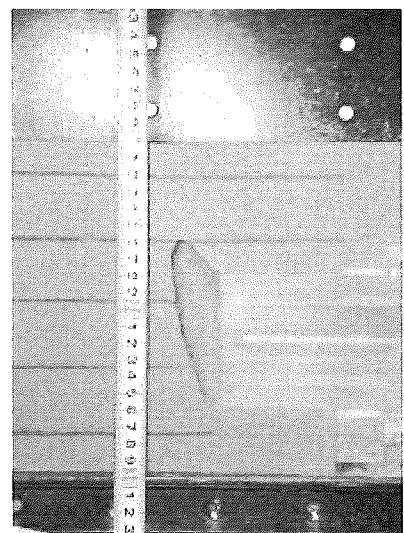
(o)



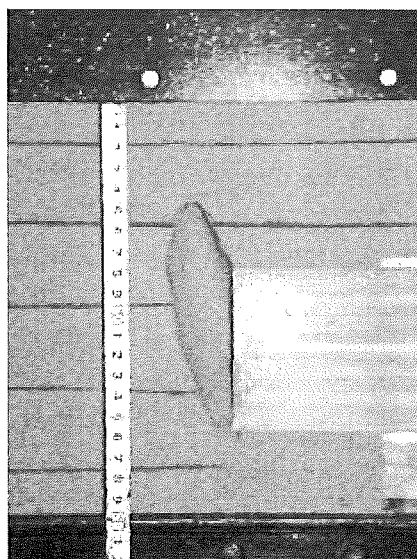
(p)



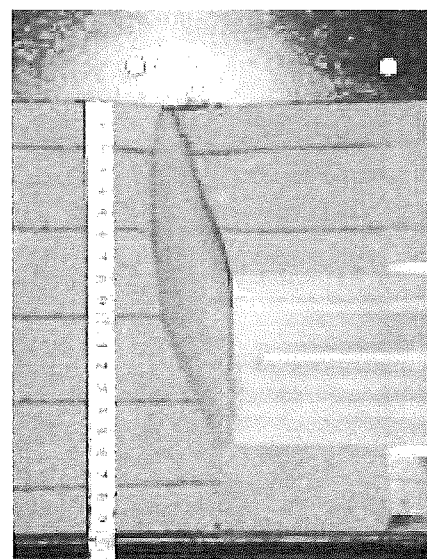
(q)



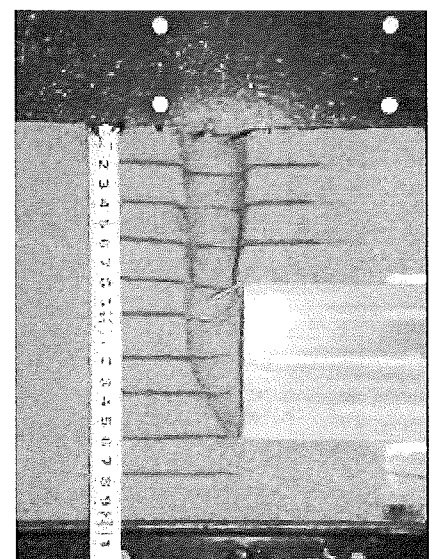
(r)



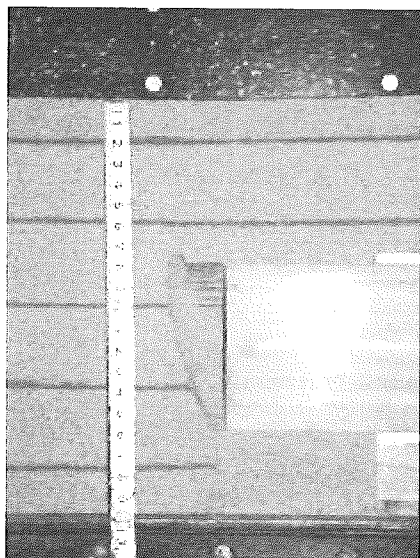
(s)



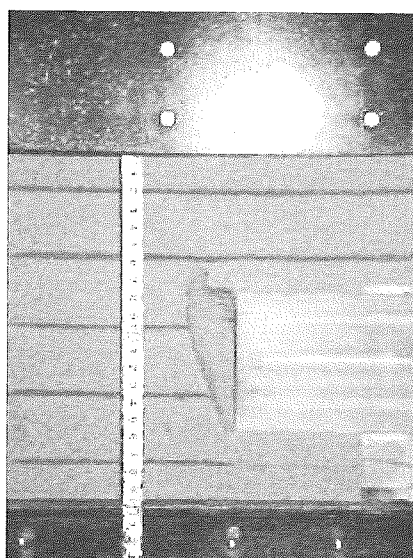
(t)



(u)



(v)



(w)

参考表 2.2 先受け工実験での崩落状況写真

