

土 木 研 究 所 資 料

トンネル周辺地盤の挙動とトンネル地圧に
関 する 模 型 実 験 報 告 書

昭和 5 8 年 1 月

建 設 省 土 木 研 究 所

道 路 部 ト ン ネ ル 研 究 室

Copyright © 1983 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

頁	行	誤	正
111	5 (2式)	$W_{I,10}$	$W_{I,20}$
	12	10掘	20掘
	17	第10回目	第20回目
	"	$W_{I,10}$	$W_{I,20}$
	18	$W_{I,10} = W_{I,0} - 10 (\Delta W_R + \dots)$	$W_{I,20} = W_{I,0} - 20 (\Delta W_R + \dots)$
	19	$10 \times (\Delta W_R + \dots)$	$20 \times (\Delta W_R + \dots)$
	20	$10 \times (\Delta W + \dots)$	$20 \times (\Delta W_R + \dots)$
	24	$3 \times \sigma_L \times S_L \times d_L$	$\sum \sigma_L \times S_L \times d_L \times \frac{1}{2}$
112	8	累積変位	累積変位の 1/20
	17	累積変位	累積変位の 1/20
113	17	$\frac{\sigma_v^2}{E_v} \times V_v$	$\frac{1}{2} \times \frac{\sigma_v^2}{E_v} \times V_v$
	30 (8式)	$R_E = 1 - \frac{W_{I,10}}{W_{I,0}} =$	$R_E = 1 - \frac{W_{I,20}}{W_{I,0}} =$
114	12	$3 \times \sigma_L \times S_L \times d_L$	$\sum \sigma_L \times S_L \times d_L \times \frac{1}{2}$
	13	$3 \times \frac{5.5+7.1}{2} \times 4 \times \frac{6 \times 18 + 31}{3} \times \frac{1}{1000}$	$4 \times (5.5 \times 0 + 5.3 \times 5 + 6.8 \times 30) \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{2}$
	14	$3 \times 6.3 \times 4 \times 0.018$	削 除
	15	$= 1.36 \text{ t} \cdot \text{m}$	$= 0.46 \text{ t} \cdot \text{m}$
	17	$\frac{1}{2} \times 6.3 \times 0.1 \times 0.045$	$\frac{1}{2} \times 6.3 \times 0.1 \times 0.045 \times \frac{1}{20}$
115	1	$= 0.014 \text{ t} \cdot \text{m}$	$= 0.0007 \text{ t} \cdot \text{m}$
	3	$\frac{1}{2} (6.3 + 5) \times 0.13 \times 0.038$	$\frac{1}{2} \times (6.3 + 5) \times 0.13 \times 0.038 \times \frac{1}{20}$
	4	$= 0.028 \text{ t} \cdot \text{m}$	$= 0.0014 \text{ t} \cdot \text{m}$
	8	$\frac{(6.3)^2}{216} \times 0.01$	$\frac{(6.3)^2}{216} \times 0.01 \times \frac{1}{2}$
	9	$0.002 \text{ t} \cdot \text{m}$	$0.001 \text{ t} \cdot \text{m}$
	11	$10 \times (\Delta W_R +$	$20 \times (\Delta W_R +$
	12	$10 \times (0.014 + 0.028 + 0.002)$	$20 \times (0.0007 + 0.0014 + 0.001)$
	13	$= 0.44 \text{ t} \cdot \text{m}$	$= 0.062 \text{ t} \cdot \text{m}$
	14	$R_E = \frac{10(\Delta W_R + 2 \Delta W_V)}{136} = \frac{0.44}{136} \approx 32\%$	$R_E = \frac{20(\Delta W_R + 2 \Delta W_V)}{W_{H,0}} = \frac{0.082}{0.46} = 18\%$
	23	32%	18%
116	3	20~30%	20%前後
	8	$\sum_{XYZ} S_L \times \sigma_L \times d_L$	$\frac{1}{2} \times \sum_{XYZ} S_L \times \sigma_L \times d_L$
	9	$4 \times (5.1 \times 0.0086 + \dots)$	$\frac{1}{2} \times 4 \times (5.1 \times 0.0086 + \dots)$
	10	$0.34 \text{ t} \cdot \text{m}$	$0.17 \text{ t} \cdot \text{m}$
	11	$\dots \times 0.0002 \text{ m}$	$\dots \times 0.0002 \times \frac{1}{20} \text{ m}$
	12	$= 0.00006 \text{ t} \cdot \text{m}$	$= 0.000003 \text{ t} \cdot \text{m}$
	13	$\times 0.0002 \text{ m}$	$\times 0.0002 \times \frac{1}{20} \text{ m}$
	14	$0.00009 \text{ t} \cdot \text{m}$	$0.0000045 \text{ t} \cdot \text{m}$
	15	$\frac{(6.0)^2}{820} \times 0.01 = 0.0004$	$\frac{1}{2} \times \frac{(6.0)^2}{820} \times 0.01 = 0.0002$
	17	$10 \times (\Delta W_R$	$20 (\Delta W_R$
	18	$10 \times (0.00006 + 0.00009 + 0.0004)$	$20 (0.000003 + 0.0000045 + 0.0002)$
	19	0.0055	0.0041
	20	$\frac{70 \times (\Delta W_R + 2 \Delta W_V)}{W_{H,0}} = \frac{0.0055}{0.34} = 1.6\%$	$\frac{20 (\Delta W_R + 2 \Delta W_V)}{W_{H,0}} = \frac{0.0041}{0.17} = 2.4\%$

ま え が き

本報告書は、土木研究所トンネル研究室が、トンネル周辺地盤の挙動とトンネル地圧に関して昭和52年～昭和56年に実施した模型実験等の結果および解析をまとめたものである。

トンネルを構造物としてみた場合、その設計法は以下の3通りの方法が考えられる。

- (1) 施工実績例に基づく設計
- (2) 解析的な手法による設計
- (3) 施工時における計測に基づく設計

現在のトンネルの施工はほとんど施工実績例に基づく設計法によっている。この方法では一般に安全は確保されるが、経済的に適正であるか否かは疑問である。すなわちトンネル設計者は自から設計したトンネルが安全であると期待できるが、その安全率を知ることができない。より合理的と考えられる設計法(2)があまり用いられないのは、主としてトンネル構造物に作用する地山からの荷重が明らかでないためである。このためトンネルに作用する荷重をもとめることを、今回の一連のトンネル模型実験の最終目標とした。

本資料が広く利用され、より合理的なトンネル設計手法を確立するために参考となることをねがうものである。

昭和57年8月

土木研究所 トンネル研究室

水 谷 敏 則

猪 熊 明

石 村 利 明

目 次

用語の定義と解説

I 序 論	1
1. 相似則	2
2. トンネル施工における力学的エネルギー収支	7
3. 模型実験の方法と実験例	10
II 土かぶりの小さいトンネルの模型実験 (その1)	19
1. 概 説	20
2. 実験方法	20
3. 相似則	25
4. 実験結果	27
5. 相似則に対する再検討	34
6. 現場への適応	40
7. 結 論	41
III 土かぶりの小さいトンネルの模型実験 (その2)	43
1. 概 説	44
2. 実験方法	44
3. 相似則	47
4. 実験結果	48
5. 考 察	51
IV 急傾斜地におけるトンネルの模型実験	53
1. 概 説	54
2. 実験方法	54
3. 実験結果	60
4. まとめ	68
V 土かぶりの大きいトンネルの模型実験 (その1)	69
1. 概 説	70
2. 実験方法	70

3. 相似則	84
4. 実験結果	87
5. 考 察	107
VI 結 論	121
1. 相似則	122
2. トンネル地圧	123
3. 地中変位	123
4. 応力再配分	124
5. トンネル地圧に関する指標	124
6. 切羽の自立に関する指標	126
7. トンネル施工における力学的エネルギー収支	127
8. 急傾斜地におけるトンネル	127
資 料	
II 土かぶりの小さいトンネルの模型実験 (その1)	129
III 土かぶりの小さいトンネルの模型実験 (その2)	179
IV 急傾斜地におけるトンネルの模型実験	193
V 土かぶりの大きいトンネルの模型実験 (その1)	199

用語の定義と解説

- (1) トンネル地圧：地山からトンネル構造物に作用する荷重を任意の縦断方向 1 m 長さあたり合計し、その値をトンネル横断方向の幅で除して応力次元に平均化した値。トンネル土圧と同義語。
- (2) ゆるみ地圧：トンネル地圧の 1 種。基本的には節理等の力学的不連続面で囲まれた岩塊が地山から分離しそれ自身に作用する重力によってトンネル構造物におよぼす地圧である。土かぶりがトンネル代表径の 2 倍以上で土かぶり高がトンネル地圧にほとんど影響を及ぼさなければ、ゆるみ地圧と考えてよい。こうした地圧を解析するには地質に応じて不連続性岩盤の力学や粒状体の力学を用いる。弾性、塑性という概念は連続体の考え方であるから、厳密にはゆるみ地圧を考察するには適さない。
- (3) 押し出し性地圧：トンネル地圧の 1 種。トンネル周辺の応力再配分の過程で地山が降伏または破壊するため、初期地山応力の 1 部が直接トンネル構造物に作用する場合の地圧である。こうした地圧の解析には連続体の力学的である粘弾塑性解析を用いてよい。これと同義語に「真の地圧」がある。類義語に膨張性地圧がある。膨張性地圧は、地山がトンネル内空に押し出してくる場合の地圧を指すが、また、そうした現象が見られる際地山自体の体積膨張が原因と考えられる場合にのみ、その地圧を指すこともある。ここでは、実際の現象が不明確であるため、こうした膨張性地圧もふくめて押し出し性地圧を考えることにする。
- (4) 土圧換算地山高さ：岩の単位体積重量を 2.7 t/m^3 として土圧(地圧)をこの値で除して相当地圧高さに換算したものである。

I. 序 論

1. 相似則

1.1 概説^{1), 2)}

模型実験の目的は、模型によって元の物理現象を再現し、それによって、元の物理現象に関する何らかの情報を得ようというところにある。したがって、あらゆる物理現象が模型実験に適しているわけではない。例えば、着目しているある変数が数量化できないような現象であったり、数量化できてもそれらの変数の間に何らの因果関係も存在しない場合などでは、模型実験は使えない。

また、物理現象自体は模型実験に適するものであっても、数量化された変数の間の物理法則がわからない場合、模型を現象へ相似させることは困難である。ただし、この場合は、先に述べたような現象自体に内在する問題ではないから、現象の物理法則を調べることによって、模型を現象に相似させることができる。この場合、物理法則を完全に明らかにする必要はなく、その存在とそれに関与する変数が明らかになればよい。

模型実験を行う際、もし次元解析で相似則を考えるならば、測定する物理量は「線型な尺度で計測できるものでなければならない³⁾。線型な尺度をもたない物理量、例えばMohの硬度（石ぼく＝1～ダイヤモンド＝10）などは、次元解析との対象としては適当でない。

模型（model）が元の現象（これから原型と呼ぶ、prototype）の予測手段として有効であるためには、模型と原型との間になんらかの相似性（similarity）がなければならず、この相似性を支配する法則を相似則という。したがって、相似則は元の現象を支配する物理法則と表裏一体の関係にある。

相似則の数式表示には一般に次の2通りの方法がある。

① 模型と原型との比で表示する。

p, q を任意の物理量とし、模型を（suffix-m）原型を（suffix-P）で表わす。

$$\alpha = \frac{P_{1m}}{P_{1p}} = \frac{P_{2m}}{P_{2p}}, \quad \beta = \frac{q_{1m}}{q_{1p}} = \frac{q_{2m}}{q_{2p}}$$

α, β は縮率（相似比、相似率、縮尺率等）と呼ばれる。 α, β はひずみ応力などの物理量ごとに定められる。 $\alpha, \beta \dots$ は、物理量ごとに自由に定められるものではなく、物理量相互の依存関係に従って、相互に従属している。まったく自由に定めることのできる縮率の数は、各種の物理量の基本となる物理量の数だけである。一般の力学解析ではM, L, T系, F, L, T系などを用いるのでその数は3個である。

② パイナンバー（無次元量、 π と呼ばれる）で表示する。

パイナンバーとは、模型なら模型という1つの現象の内での同次元の物理量の比である。したがって、当然無次元となる。

$$\pi_m = \frac{P_{1m}}{P_{2m}}, \quad \pi_p = \frac{P_{1p}}{P_{2p}}$$

となる。ある現象に関して厳密に相似則を満足するためには、その現象に関与するすべての物理量のパイ

ナンバーを一致させねばならないが、一般にはそれは困難なことが多い。

相似則に対する配慮はすべての模型実験で必要なことであり、かつ重要である。相似則が明らかでない場合には、模型実験をやるに先立って新しく導いてやる必要がある。新しく相似則を確立するには、相似則の設計、相似則の緩和、相似則の確認という手順をとることが多い。

(1) 相似則の設計

相似則の導き方は、現在のところ下記の3つの方法が知られている^{1), 2)}

- ① Buckingham の π 定理と次元解析を用いる方法
- ② 力の比を用いる方法
- ③ 支配方程式を用いる方法

(2) 相似則の緩和²⁾

単に多くのパイナンバーを列挙するだけでは模型の材料に対する要求が多くなって、適当な材料を見出すことが困難となる。こうした場合には何らかの方法で相似則を緩和してやらねばならない。

相似則を緩和するには以下のような方法がある。

- ① 2 次的な物理現象に関するパイナンバーを無視する
- ② 現象を時間的、空間的に分割する
- ③ ミクロな現象の集積した結果が問題となる場合には、ミクロな現象の法則を無視し、その集積した結果を巨視的な法則で表わす。たとえば、砂の現象を扱う場合、砂の粒径を相似するのではなく内部摩擦角という1つの物理量であらわす。

実際の問題では、こうした相似則の緩和が必要な場合がほとんどである。したがって、相似則のパイナンバーの数をどのように減らすかは、模型実験の良否に大いに関わってくる。

(3) 相似則の確認

上記のようにして導いた相似則は、単に机上の計算であって、それが正しい相似則か否か、すなわち、その相似則を満足した場合、確かに元の現象が模型で再現できているか否かは保証のかぎりではない。

これを確認するためには、模型実験の結果を原型での計測結果と比較しなければならない。こうした目的で行う模型実験を確認実験 (pilot experiments) という。

1.2 トンネルの力学に関する相似則

(1) 相似則の設計

トンネルの力学に関する模型実験では、その地山が岩盤であることが多いため、岩盤力学に関する従来の相似則が参考になる。

過去の模型実験では E. Fumagalli (1968) の⁴⁾ 提案が参考になる。彼の提案はその後の模型実験に多く用いられている (1-3 参照)。以下に彼の提案を記す。

① 静的な問題

静的な問題では、2 個の独立な物理量がある。それらを

$$\text{長さ: } \lambda = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{応力: } \zeta = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2)としている。Lは座標値, 変位, 長さなど長さの次元をもつものすべてをあらわす。 σ は応力, 変形係数, 強度など応力の次元をもつものすべてをあらわす。これから誘導される相似比として, たとえば,

$$\text{単位体積重量: } \rho = \frac{\gamma_p}{\gamma_m} = \frac{\sigma_p L_p^{-1}}{\sigma_m L_m^{-1}} = \zeta \lambda^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{集 中 荷 重: } \psi = \frac{P_p}{P_m} = \frac{\sigma_p L_p^2}{\sigma_m L_m^2} = \zeta \lambda^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで, もし変形と強度をともに相似させるとすると, 変形係数と例えば1軸圧縮強度の相似比をともに ζ としなければならない。しかし, こうした条件を満たす材料をさがすのは実際には簡単ではない。

② 動的な問題

もし, 時間の効果が問題となるなら独立な物理量はさらに1個増える。このためパイナンバーも1個増やす必要がある。これを

$$\text{加速度 } G = \frac{g_p}{g_m} = \frac{L_p T_p^{-2}}{L_m T_m^{-2}} = \lambda t^{-2} \dots\dots\dots (5)$$

とする。重力加速度は模型と原型で同じ場合が多いので $G=1$ とすると,

$$t = \lambda^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

(2) 相似則の緩和

以上のような相似則の設計に対して, 主として上記のような相似則をすべて満足する実験地山材料がないという理由によって, 相似則の緩和を行う。

相似則の緩和は, 2次的な物理現象に関するパイナンバーを無視するという方法による。ここで何が2次的な物理現象であるかを判定するために, その現象のメカニズムについて考察する必要がある。

(a) 静的問題

トンネルの地圧は大別して, ゆるみと押し出し性に分けられる。ゆるみは概念的には元の地山との分離面を生じた岩塊が重力により支保に外力をおよぼす結果発生する地圧である(図-1)。塑性地圧は元の地山と一体的であるが初期地圧により地山が降伏し, トンネル内空へ大きく変位するため発生する。図-1の地山の σ (応力)- ϵ (ひずみ)曲線および支保圧とConvergenceとの関係は参考文献5), 6), 7)から推定したものである。解放エネルギー量とConvergenceの関係は文献7)を参考にした。図-1に示すようにゆるみ地圧と押し出し性地圧ではConvergenceに対する支保圧の変化が非常に異な

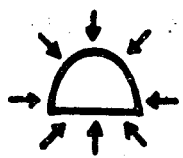
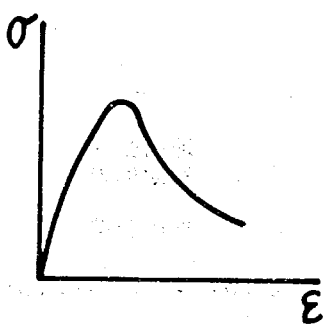
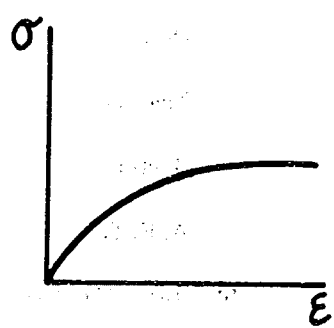
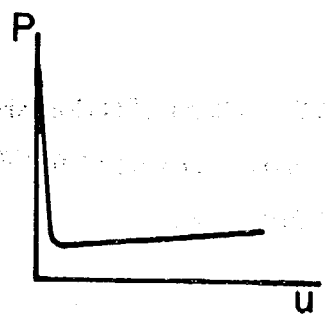
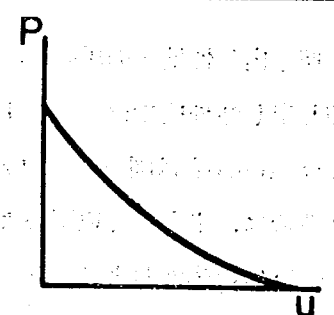
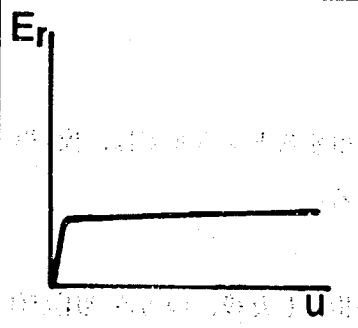
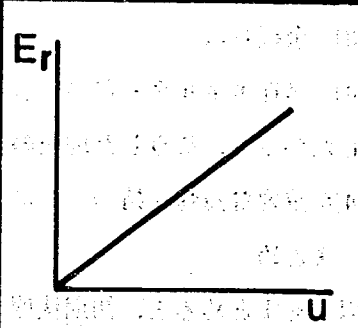
	ゆるみ地圧	押し出し性地圧
(a) 現象		
(b) 一般的な初期地圧下での地山の代表的な σ (応力) - ϵ (ひずみ) 曲線		
(c) 支保圧 P と鉛直方向 Convergence U (側方はゆるませないものとする)		
(d) 解放エネルギー量 E_r と Convergence U		

図-1 トンネル地圧概念

るので、模型実験の相似則を考えるさいにも、区別して考える必要がある。

(i) ゆるみ地圧の場合

トンネル地圧の多くはゆるみ地圧と考えられる。それは、地山が押し出してくるという現象はわずかのトンネルでみられるにすぎないからである。この場合、図にあるように支保圧はConvergenceがある一定以上の値になるとゆるやかに増加するにすぎない。したがって、こうした場合は支保圧に関する模型実験でも地山の変形性、支保の剛性などはあまり問題にならないと言える。

表－１に従来の代表的なトンネル地山分類のInputとOutputの内容を示す。そのInput項の多くは地山強度である。このことから、従来の経験則ではトンネル地圧に最も大きい影響を与えるのは地山強度であると考えられていることがわかる。したがって、模型実験でも地山強度は重要な要因と考えてよい。

表－１ トンネル地山分類

分 類 名	出 典	Input 事 項	Output 事 項
Terzaghi	8)	地山強度	トンネル地圧
Deer	9)	” (RQD)	支 保 量
Bieniawski	10)	”	”
Barton	11)	(地山強度 初期応力)	”
A. F. T. E. S.	12)	地山強度	”

※ 上記の地山強度は節理、湧水等に関する情報も含んだ包括的な概念である。

(ii) 押し出し性地圧の場合

押し出し性地圧では、図－１にあるように支保圧はConvergenceによって大幅に変化する。支保圧とConvergenceとは図－１(c)の関係があり、一方より他方が１義的に定まると考えられる。この両者を規定するのは、主として以下のような要因である。

- (1) 支保の剛性および強度
- (2) 支保の施工時期
- (3) 余掘り量
- (4) 潜在エネルギー量の大きさ

したがって、こうした地圧の作用するトンネルでは、模型実験においても地山の強度と同時に上記(1)～(4)が重要な意味を持つことになる。

(iii) まとめ

以上をまとめると、初期状態を相似した後、ゆるみ地圧が作用すると考えられる場合には地山の強度特性に注目し、押し出し性土圧が作用すると思われる場合には地山強度、ゆるみ量に注目して、相似則を組立てるのが妥当であると思われる。したがって、技術的、経済的にやむを得ない場合には、それ以外の要因を無視する場合もある。

(b) 動的な問題

時間効果を考える場合にはさらに次の要因を考える。すなわち a (加速度) t (時間), η (クリープに関する係数) である。

ここで問題なのはクリープに関する係数 η である。クリープにはクリープひずみが時間とともに小さくなる遷移クリープと、クリープひずみが時間とともに線型に増大する定常クリープとがある。トンネルの力学解析によく用いられるフォークトモデルによるクリープ式は

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right\} \dots\dots\dots (7)$$

であるが、この式では遷移クリープは表現できるが定常クリープを表現することはできない。定常クリープの表示式はひずみが時間に比例する。遷移クリープにしてもフォークトモデル以外に、対数関数やべき関数モデルなどが提案されており、その整合性についてはいまだ研究途上である。

したがって、定常クリープを問題にするのか遷移クリープを問題にするのかでクリープに関する係数は異なってくる。

また、クリープ定数自体は試験方法、試験条件によって変化すると考えられるが、クリープ試験手法もいまだに確定されたものがない。また、現位置におけるクリープの計測例は数が少ない。

さらに、岩盤のクリープの長間の尺度は、通常トンネル施工の時間的尺度より長い場合が多いこと、クリープの変形が弾塑性変形よりずっと小さい場合が多いことなどを考えると、特に時間的な挙動を問題にする場合以外は動的な要素に関する相似を無視してもよいと思われる。

2. トンネル施工における力学的エネルギー収支

トンネルの力学的模型実験を考える際、その現象面をエネルギーの観点から見ていくことは重要だと思われるので以下にその概略を記す。

まず初期条件として掘削領域を含む直方体の地山供試体を考える。直方体の面は主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ に直角とする。簡単のため $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を σ で代表させる(図-2)。

この状態に対して、系1として掘削状況を再現するため、掘削面に初期応力と同じ大きさで符号が反対の応力 σ' (掘削相当外力) を作用させる。この際の掘削面の変位を u' 供試体表面の変位を v' とする(図-3)。

系2として供試体の载荷以前の状況を再現するため、初期応力 σ を除荷するための応力 σ'' を掘削面と供試体表面に作用させる。この時の掘削面の変位は u'' とする(図4)。供試体表面の変位は、不明のまま「?」とする。

上記の系1と系2に対して相反作用の定理を適用する。エネルギーの流出側を+, 流入側を-として、応力変位を整理すると、

	応力		変位	
	掘削面	供試体面	掘削面	供試体面
系1	σ'	0	u'	$-v'$
系2	σ''	σ''	$-u''$	?

daを掘削面積成分とし、dAを供試体表面積成分として相反作用の定理を用いると

$$-\int_a \sigma' u'' da = \int_a \sigma'' u' da - \int_A \sigma'' v' dA \dots\dots\dots (8)$$

となる。

ここで以下のようなエネルギーを考える(図-5)。

W_H = 供試体外側の載荷板が変位することによって地山へ流入するエネルギー

W_I = 掘削によって誘発される内部ひずみエネルギー

W_V = 掘削によってとり除かれる地山に含まれる、初期地圧によるひずみエネルギー

W_K = 地山が掘削される際に解放されるエネルギー

Love の定理 (ある任意の力の下でつりあい状態にある物体の全ひずみエネルギーは、その力が、ひずみのない状態からつりあい状態に達するまでの変位を通して行う仕事量の $\frac{1}{2}$ である) を考えると、(8)式は

$$-2W_V = W_R - W_H \dots\dots\dots (9)$$

となる。

解放エネルギー W_R は支保圧と地山強度によって変化するが、(9)式の W_R は解放エネルギーの最大値を示す。地山が弾性体の場合、Loveの定理によって解放エネルギーは最大値の $\frac{1}{2}$ すなわち $\frac{1}{2}W_R$ となり、その残りは内部ひずみエネルギー W_I として地山内に残留する。すなわち(9)式は

$$-2W_V = (\frac{1}{2}W_R + W_I) - W_H \dots\dots\dots (10)$$

となる。

地山が弾性体でない場合には、 $\frac{1}{2}W_R$ よりも大きいエネルギーが解放されと考えられる。

解放エネルギーを変数としてとらえて一般的に W_R と記することになると(10)式より、

$$W_I = W_H - (W_R + 2W_V) \dots\dots\dots (11)$$

となる。

(11)式の右辺第1項は流入エネルギー、第2項は流出エネルギー、左辺は内部(残留ひずみ)エネルギーを示す。図-5を参考に一掘進長あたりのエネルギー収支を考えると(11)式は

$$\Delta W_I = \Delta W_H - (\Delta W_R + 2\Delta W_V) \dots\dots\dots (12)$$

となる。

ここで Δ は、ある掘進長におけるエネルギー収支を示す。

n をある掘進長の段階を、 $n-1$ を1つ前の掘進長の段階を示すことにすると(11)式は

$$W_{I,n} - W_{I,n-1} = \Delta W_H - (\Delta W_R + 2\Delta W_V) \dots\dots\dots (12)'$$

となる。

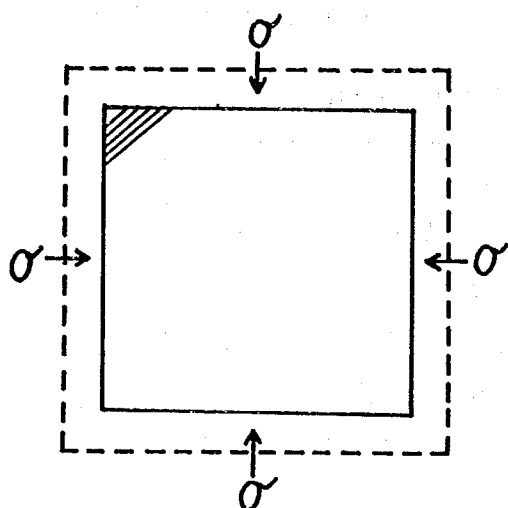


図-2 初期条件

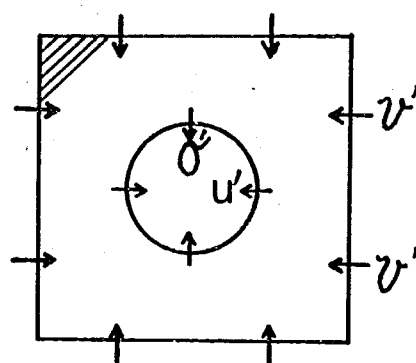


図-3 系1の応力と変位

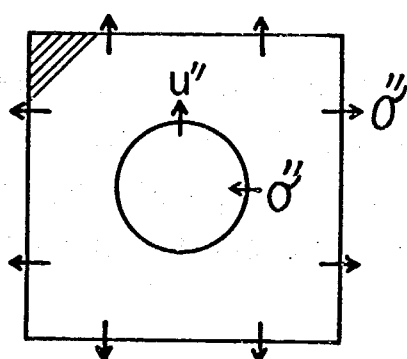


図-4 系2の応力と変位

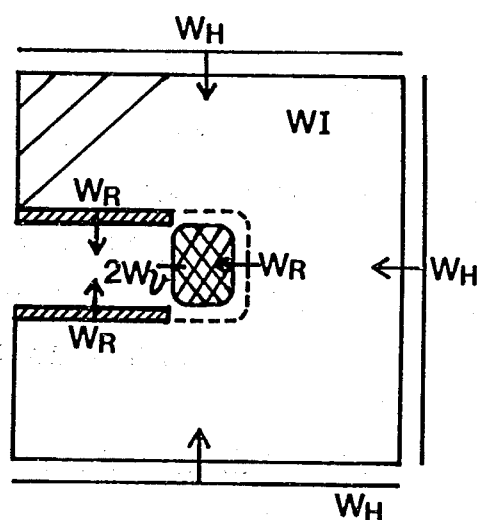


図-5 各種エネルギー

初期条件を解析対象の各条件に合うように定めて(12')式を逐次適用すれば、任意の掘削段階の内部ひずみエネルギーを求めることができる。模型実験の場合、事前に地山内部に設置した土圧計により内部ひずみエネルギーを計算することができ、逐次的に求めた内部ひずみエネルギーと比較し、相互の妥当性を検討できる。

実際の軟弱な地山におけるトンネル切羽付近のエネルギー収支を考えると $\Delta W_H = 0$ として、概念的には(12')式より下記のように変化すると考えられる。

$$W_{I, n-1} = (\Delta W_R + 2 \Delta W_V) + W_{I, n} \dots\dots\dots (13)$$

すなわち、(内部ひずみエネルギー量) = (掘削、変形により解放エネルギー量)
+ (内部残留ひずみエネルギー量)

現実に問題となるのは解放エネルギー量と内部残留ひずみエネルギー量の配分であり、その配分を決めるのは、地山の強度と支保圧である。そして地山の強度と支保圧は解放エネルギー量を通して互いに影響し合う。

地山の強度と支保圧は、一方を一定にしておくと、他方と解放エネルギーの関係は表-2のようになる。実際の地山では相方とも一定ではない。このことがトンネル地圧の解析を困難なものとしている。

表-2 解放エネルギーと地山強度、支保圧

・地 山 強 度 大$\longleftrightarrow$小 ・解放エネルギー 小$\longleftrightarrow$大 （ 内空変位 小$\longleftrightarrow$大 - 地山降伏領域 小$\longleftrightarrow$大 a) 支保圧一定	・支 保 圧 大$\longleftrightarrow$小 ・解放エネルギー 小$\longleftrightarrow$大 （ 内空変位 小$\longleftrightarrow$大 - 地山降伏領域 小$\longleftrightarrow$大 b) 地山強度一定
--	---

3. 模型実験の方法と実験例

3.1 実験方法

トンネルの力学に関する模型実験手法の概略について述べる。

すでに開発されている実験手法は、いろいろな観点から分類することができる(図-6)。実験を行う技術者は、これらの観点から各種実験手法を実験目的に応じて適当に選択することができる。この選択にあたっては、当然実験に要する費用についても配慮せねばならないため、常に最も良い条件の実験ができるとは限らない。費用の面から次善のより安い実験を行わざるを得ない場合には、その実験の限界を考えておく必要がある。

実験の長所・短所を簡単に記すと以下ようになる。

(1) 次元に関する分類

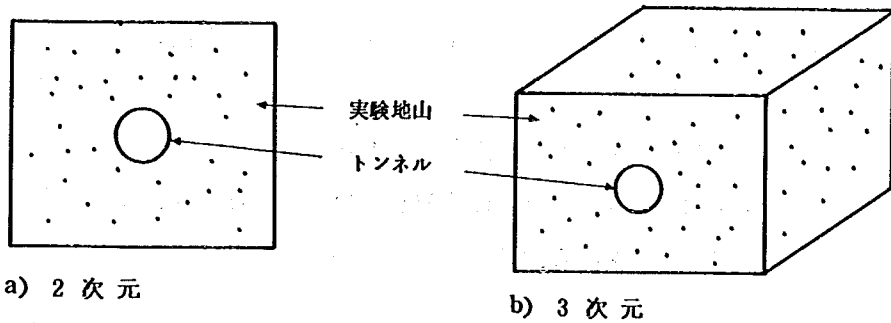
2次元実験は、3次元実験に比較すると手軽に行え、かつ応力履歴を考えなければ切羽から十分離れた2次元応力状態を近似することができる。反面、模型地山を平面ひずみ状態に保つための両面の拘束の影響を受けることが問題となる。

(2) 初期地圧に関する分類

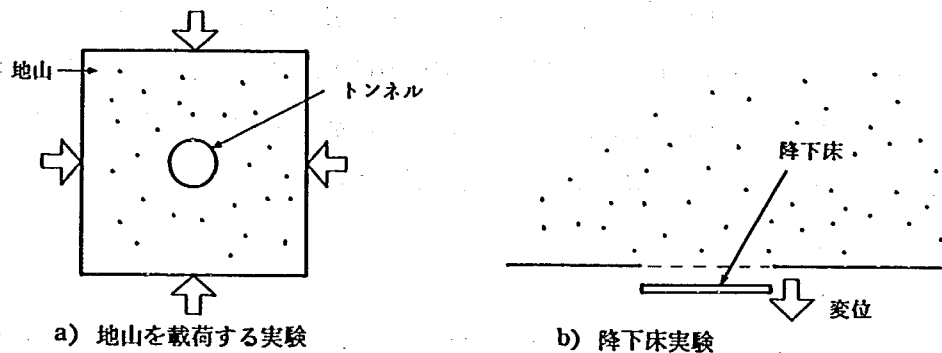
実験地山を外部より載荷する実験方式による場合、実験の対象となる現場に応じてどの程度の載荷圧とするか決定しなければならないが、ある特定の現場に適用しようとする際には、載荷圧の決定が困難なことが多い。載荷しない場合には、自重のみでは十分な初期地圧と得られないことが多く、相似則を考えた場合、重くてかつ弱い実験地山材料を用いる必要がある。一般に土かぶりの深い地山を対象とする実験では、載荷する場合が多い。

(3) 重力加速度に関する分類

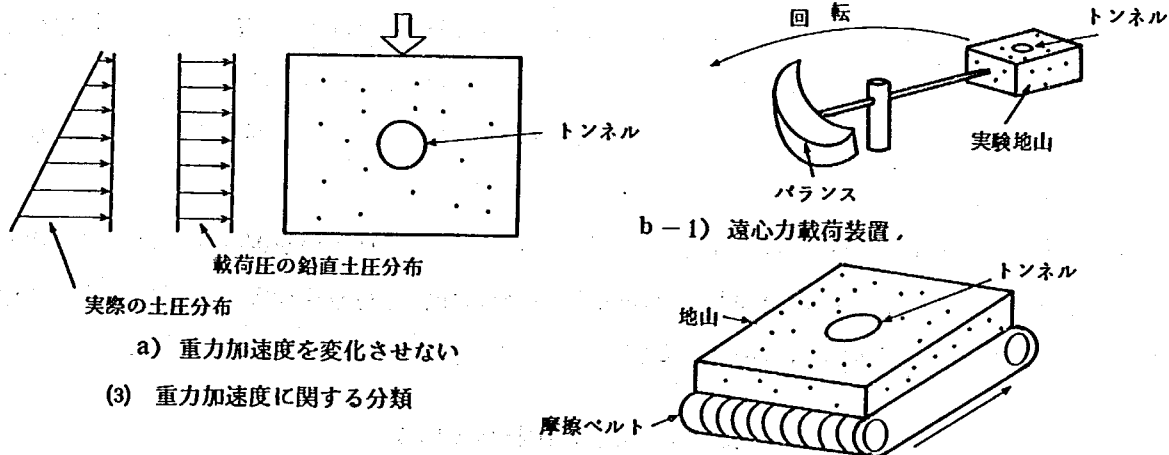
重力加速度を変化させない場合、応力の絶対値と初期応力分布の両方を現場と一致させることは困難である。応力の絶対値を現場と合わせようと、地山を載荷すれば応力分布が合わなくなる。遠心力装置を利用すれば、そうした事はないが、装置そのものが高価である。底面摩擦モデルでは、摩擦力によって重力



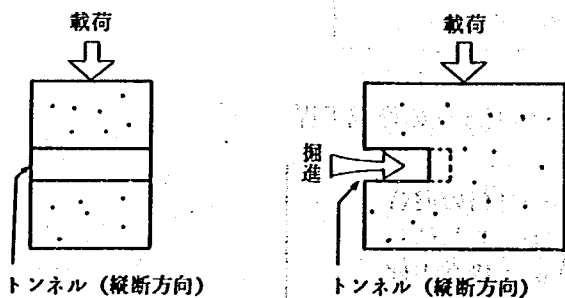
(1) 次元に関する分類



(2) 初期地圧に関する分類



(3) 重力加速度に関する分類



(4) 掘削過程の相似に関する分類

図-6 実験手法の分類

加速度と似た効果を出すことができるが破壊後も平面ひずみを保つのが困難である。

(4) 掘削—応力解放に関する分類

従来の実験では、掘削過程を相似するものは少なかったが、最近、これを相似する実験が出てきている。これにより地山の応力履歴が相似でき、それに伴う材料の反応（強度劣化、圧密など）を相似できるため、とくに切羽付近の応力—ひずみ状態を調査するのに適している。

3.2 実験地山材料

実験地山材料の構成は、一般には表—3のように3種類ある。表—3で骨材とは、砂、砂利、砕砂、碎石などの非粘着性の硬質材料をいい、主として材料の摩擦角の増大に寄与している。これに対して、粘着材には、セメント、ベントナイト、粘土、石膏、ゼラチン、ゴム、水ガラスなどがあり、主として材料の粘着力成分を形成する。粘着力の形成には、次の2通りの過程が考えられる。

- (1) 物理的な粘着力
- (2) 化学変化による粘着力

ここで、物理的な粘着力とは、材料の化学変化を伴わない変化にもとづいて発生した粘着力で1度実験に使用した材料を繰返し使用することが可能である。

これらの材料を、一般には表—4のように3段階の材料作成行程に従って、模型材料を作る。ここで打設は、材料の流動性に応じて流し込むか、盛りあげるかする。打設後の処理としては、特別の外力をくわえず時間のみを経過させ自重による排水、締固め効果、乾燥等で強度増加を計る方法（養生）と、ランマー、バイブレーター等の衝撃外力で短期間に締固める方法（締固め）載荷板等で長時間に渡って排水しながら締固める方法（圧密）がある。

材料と作成方法との組合せを考える。骨材のみを用いる場合とか、粘着材を混入する場合でも物理的な粘着力を期待する場合には、打設後の処理として締固め、または圧密を行う事が多い。逆に、化学変化による粘着力を見込む場合には、養生を行う場合が多い。

表—3 実験地山材料の構成

- | |
|------------|
| (1) 骨材+粘着材 |
| (2) 粘着材のみ |
| (3) 骨材のみ |

表—4 標準的な模型地盤の作成工程

- | | |
|-----------------|----------|
| (1) 打設前処理—材料の混合 | |
| (2) 打設—— | { ① 流し込み |
| | { ② 盛り上げ |
| (3) 打設後処理—— | { ① 養生 |
| 整形 | { ② 締固め |
| 硬化 | { ③ 圧密 |

3.3 模型実験例

トンネルの力学的な問題に関する模型実験について調べた結果を表—5、表—6に示す。国内・外で特徴が異なるので、以下にその特徴を述べる。

(1) 外国の模型実験例

外国の模型実験例を調べてみてまず第1に気付くことはトンネルの力学的模型実験はあまり数多くは行われてはいないという事である。この原因として、(1)相似則を完全に満足させる実験地山材料を作製できない(2)トンネルが細表い構造物であるため模型実験に必要な情報を入手できにくいなどが考えられる。このような場合、抽象化をよぎなくされるため模型実験の結果を直接には現場に適用できにくいものとなっている。表—4に掲げた11編の外国文献の中で直接に現場に適用できると思われるのは1編だけである(№11)。

相似則に関しては、考慮していないというものが4編ある。相似則を考慮していないため、模型実験結果を一般化することが難しい。また、そのため実験により解明されることが、抽象的、定性的な域を脱しない。模型実験をする際には、まず実験目的を具体的かつ明瞭に設定し、その目的に応じた相似則を必ずたててから、その確認実験を行ったのち、量産実験を行うべきである。

相似則に関する論文としては、1957年にRochaが詳しい解析を行っている。その後1967年にFumagalliがそれをよりわかりやすい形にまとめており、それを1976年Goodmanらが踏襲している。こうした大きな流れがあり、Fumagalliの相似則はかなり一般的に認められていると考えてよい。ただし机上論での解析が多く、実際に模型実験に応用し現場計測と比較したという報告はあまりない。さらに時間に関する相似則、不連続面等に関する相似則については、諸外国においても今後の課題となっている。

実験地山材料はかなりの強度を持つ場合が多く、それを載荷して実験を行う。実験装置は2次元のものが多く、模型寸法もラベセビッツの実験以外は、トンネル代表径が6 cm～22.5cmで比較的小さい。

(2) 国内の模型実験例

日本国内の模型実験は、外国と比較して相対的に数多く行われている。論文等で発表されたもののうち、幾つかを表—6に示す。模型実験が持つ問題点は外国とかわらないが、一方では基礎的な研究としてまた他方ではNATM関連の研究として行われている。

相似則は考慮していないものが、半数に達している。外国文献と同様、相似則に対する考慮はあまり行われていない。したがって、このことによる不都合は、外国の模型実験と同様に日本の実験にも見られる。すなわち模型実験の結果を一般化するのが困難であったり、実験結果から得る結論が抽象的かつ定性的な域にとどまっているように思われる。

相似則を考慮している論文では、各の独自に相似則を設定しているものもあるが、結果的には外国の模型実験例で示される相似則と似たようなものになっている。時間に関する相似則が適用できていないこと、実際に現場へ直接応用できるような結論が得られている論文が少ないことなども外国と同様である。

実験地山材料として特徴的なことは乾燥砂が多く用いられていることである。これは実験の簡便さ、歴史的に蓄積がある、などが原因と考えられる。これと表裏の関係で実験装置は載荷装置を有しない降下床式の

表-5

No.	発表年	氏 名	所 属	相 似 則	材 料	装 置	計 測	特 徴	解 明 点	文献
1	1957	Rocha	Director Laboratorio National de Engenharia Civil (Portugal)	相似に関する論文 ○弾性……… E_m/E_p ○非弾性… 重力を無視する場合 …同一材料を使う 重力を考慮する場合 … $\xi \cdot \lambda_p$ ○破壊規準……… C, τ, ϕ	実験は行 っていない	実験は行 っていない	計測は行 っていない	左のようにタイプ別に相似則を決 定した。	模型実験、相似則に関す る古典的論文。	13)
2	1966	L.Obert, W.J.Duval	U.S.Bureau of Mines (U.S.A.)	$\frac{\sigma}{\gamma L}, \frac{E}{E_p}, \frac{F}{EL^2}, V$ etc	岩石 合成材料	2次元載 荷 遠心力 Rock Bolt	種々	次元解析による相似則の検討 変形特性と強度特性をともに相似 させようとしている。	若干のバインダーを提 案している。 実用は難しい。	14)
3	1967	Zienkiewicz 編 Fumagalli 著	Istituto Spe. Modelli. (Italy)	$\xi = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}, \rho = \frac{\gamma_p}{\gamma_m}, \lambda = \frac{L_p}{L_m}$ $\xi = \lambda \rho, \tau = \lambda^{1/2}$ Rocha の考えを基礎としている	種々、割 目につい ても考慮 する (366 P)	ゴム-3 次元 トンネル -2次元 の実験例	種々	総合的に相似則、材料、ダムの実 験例について述べている。トンネ ルの実験例は少ないとしている。 変形と強度特性をわけて考える。	比較的実験的な内容とな っている。	4)
4	1969	Rabcewicz	Professor, Groz (Austria)	考慮していない	コンクリ ート覆工 砂、粘土、 砂利	2次元載 荷 D=100 cm	変位 トンネル 地圧 載荷圧	相似則は考慮していないが、実験 目的が覆工巻厚という幾何相似に 関してであり強度に関係していな いある程度普遍性がある。	厚肉覆工がよいか、薄肉 覆工がよいかについて結 論づける。	15)
5	1973	Goodman Heuze	Univ. Calif. Barkley) (U.S.A.)	考慮していない	岩石、砂、水、 セメント筋埋 を有する岩盤 を考えている (実験材料、 物性について は詳しい)	2次元載 荷 D=22.5 cm	変位 載荷圧	模型実験と数値計算を比較する。 現場についてはふれていない。 不連続面と Rock Bolt について解 析を集中している。	Rock Bolt の効果は実験 でも計算でもあまり認め ることはできない。	16)
6	1975	Korbin Brekke	Univ. Calif. Barkley (U.S.A.)	Fumagalli と同じ (次元解析は一応やる。変形特性 と強度特性を同時に考慮する)	砂+Wax (膨張性 地山を対 象として いる)	3次元 D=12cm	変位	斜め Rock Bolt の効果について解析 を集中している。材料は均一で不 連続面はない。変位を計測してい るが、土圧は計測していない。	Rock Bolt の効果がよく でている。変位の範囲も 明らかにする。	17)
7	1976	Goodman	Univ. Calif. Barkley (U.S.A.)	Fumagalli と同じだが全部合わせる のは無理だとしている 弾性と塑性で区別して考える	種々	2次元の例 (載荷ではなく ベルトでひ きずる) 3次元の例	種々	不連続性に注目した簡易模型と実 用に供する物理模型について述べ てある。3次元的な実験は困難で ある。	不連続性を有する簡易モ デルの方は問題の所在を 知るのに有効である。	18)
8	1977	Atkinson	Cambridge Univ. (U.K.)	考慮していない	砂、粘土	2次元 遠心力載 荷 D=6 cm	変位	模型実験どうしの比較をしており 現場、数値計算との比較は行ってい ない。砂質地山、粘土質地山で地 山のひずみが違っている。	砂質土と粘性土で変位状 況が異なっているのが明 らかとなる。	19)
9	1978	Müller Sauer	Professor, Consulting Enginner (Austria)	考慮していない	実験は行 っている が材料に ついては 書いてい ない	3次元	地山中の 土圧	3次元の実験で切羽付近の応力状 態と時間効果について明らかにし ようとしている。 相似則について考慮していないが 普遍化は無理である。	切羽付近の地山中の応力 状態を解明している。	20)
10	1978	Kennedy	Oregon State Univ. (U.S.A.)	幾何相似のみ考慮して他は考慮し ていない	モルタル セメント	2次元載 荷 D=16cm	変位 載荷圧	金属覆工を使用する、覆工厚を変 えた場合コンバージェンス-載荷 圧曲線がどう変化するかを解明し ようとする。	覆工が厚い方がコンバー ジェンスは小さい結果を 得る。	21)
11	1979	J.D.Morton K.H.King	Consulting Enginner (Canada)	幾何相似とまさつ角のみ注意する	コンクリ ート覆工 砂、粘土 砂利	2次元載 荷 D=10cm	変位	トンネル掘削が杭基礎に与える影 響をもとめようとしており、杭の 御壊位置が実験よりもとまる。 相似則があいまいなため一般化は 無理である。	現場の問題にある程度の 解答を与えた。	22)

※ここで σ = 応力、 γ = 単位体積重量、 L = 長さ、 ξ, ρ, λ = 応力、単位体積重量、長さに関する模型
と実物の比。p は実物を m は模型を示す。

表-6

No.	発表年	発表機関	相 似 則	材 料	装 置	計 測	特 徴	解 明 点	文献
1	1938	北海道大学	考慮していない	乾燥砂	2次元 降下床 D=20cm	降下変位 降下床土圧	計測は特に精密におこなわれた。 ゆるみ土圧計算式を提案し実験との比較を行っている。	ゆるみ土圧に関する基礎的な情報を与える。	5)
2	1976	国 有 鉄 道	$\zeta = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 1, \lambda = \frac{L_p}{L_m}$	地山 砂 覆工 モルタル	2次元 載荷 D=100cm	内空変位 周辺土圧 覆工ひずみ 破壊状況	巻厚、形状、覆工背面の状態などの条件が異なったときのトンネル覆工の強度を比較するため、周辺地山を含めた模型実験を行った。	薄肉覆工の優位性を明らかにした。覆工背面の空隙の有無による覆工の強度差を明らかにした。	23)
3	1978	都 立 大	考慮していない	乾燥砂	2次元 降下床 D=18cm	降下変位 トンネル土圧	ロックボルトの作用効果に焦点をしばって実験値と計算値を比較している。	ロックボルトの作用について説明しているが、実験材料相似則等から考えて適用範囲が限られている。	24)
4	1978	東 北 大 三 井 建 設	$\zeta = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}, \rho = \frac{\gamma_p}{\gamma_m}, \lambda = \frac{L_p}{L_m}$ $\zeta = \lambda, t = \lambda^{1/2}$ (Fumagalliと同じである)	石こう 石灰粉 水	2次元 降下床 D=18cm	載荷圧 地山変位	層理を考慮し、2次元ではあるが掘削して実験を行っている。現場への適用、計算との比較は記述されていない。	層理を有する地山におけるトンネル掘削の際の地山変位を明らかにした。	25)
5	1979	国 有 鉄 道	$\zeta = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 1, \lambda = \frac{L_p}{L_m}$	モルタル	3次元 載荷 D=10cm	内空変位 破壊状況 載荷圧	ロックボルト工、ライニング、索掘りのトンネルを3次元的装置によって、破壊に至るまで載荷する。	3次元的な載荷状況下の破壊状況を観察している。特に地山物性によって破壊形態が異なることがわかる。	26)
6	1979	鹿 島 建 設	考慮していない	ベントナイト モルタル	2次元 載荷 D=40cm	内空変位 トンネル地圧 地山内圧力 ロックボルト 軸力	ロックボルト、薄油ライニングに焦点をしばって実験をしている。実験材料の物性、壁面摩擦の除去、計測等に注意を払っている。	ロックボルト等の効果が明らかにされ、ラプセビッチの計算式による値と比較している。	27)
7	1980	建 設 省	$\lambda = \frac{L_p}{L_m}, c/\gamma L, \tan \phi$	乾燥砂 含水比2%砂	3次元 降下床 掘削 D=12cm	トンネル地圧 地山中応力 中応力	3次元模型実験によって切羽付近の地中応力状態を調べる。載荷しないため、強度の小さい地山材料を使用している。現場との比較を行っている。	切羽付近の地中応力状態を明らかにした。	28)
8	1981	国 有 鉄 道	考慮していない	標準砂	2次元、降下床 D=6cm	地中 地表 沈下量	地質条件(砂詰めの粗、密)、土被り、トンネルの降下量をいろいろ変えて沈下の測定を行った。	トンネル掘削に伴う地表沈下の形状とゆるみの伝播機構について究明した。	29)
9	1981	国 有 鉄 道	考慮していない $\zeta = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 1$	フライアッシュ モルタル	2次元 D=60cm	トンネル変状 地中変位 地中ひずみ 覆工ひずみ 載荷板変位	ロックボルトのトンネル補強効果をボルト長、本数を変化させて調べる。	ロックボルトの効果が明らかとなり各種解析モデル、数値解析モデルと比較する。	未発表

ものが多い。不連続面を有する地盤に対する模型実験はあまり行われていないが、今後この方面への展開が見込まれる。

参考文献

- 1) 香川崇章, 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論集No275, pp69~77, 1978.7.
- 2) 江守とシューリング, 模型実験の理論と応用, 技報堂
- 3) Edward, S. Taylor, Dimensional analysis for engineers, 1974, Clarendon press • Oxford.
- 4) Zienkiewicz編, Fumagalli著, Rock Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons
- 5) 小野真井, 乾燥砂層における垂直土圧, 土木学会誌, Vol.24, No 5
- 6) 仲野良紀, 軟岩をめぐる諸問題, 土と基礎, No 7, 1980
- 7) Jeager and Cook, Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman and Hall, London, pp470~486, 1979
- 8) Terzaghi, Rock Defects and Loads on Tunnel Support, Rock Tunneling with Steel Supports, eds. R. V. Proctor and T. White, Commercial Shearing Co., Youngstown, Ohio, 1946, pp 15~99.
- 9) Deere, D. U., Technical Dscription of Rock Cores for Engineering Purposes, Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol 1, No 1, 1964, pp 17~22.
- 10) Bieniawski, Z.T. : Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, Proc, 3rd Int. Cong. Rock Mech., Vol. 2, Part A, pp. 27~32, 1974.
- 11) Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Supports, Rock Mechanics, Vol 6, No4, 1974, pp 183~236.
- 12) AFTES, Tunnels et Ouvrages Souter. Rains, pp.2~9, Sept. 1976.
- 13) Rocha, The Possibility of Solving Soil Mechanics Problems by the Use of Models, I.C. on S.M.F.E. 1957
- 14) Obert et al, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons
- 15) Rabcewicz, Stability of Tunnels under Rock Load, Water Power, June, July. Aug. 1969
- 16) Goodman et al, Finite Element and Physical Model Studies of Tunnel Reinforcement in Rock, 15th American Ro. Me. Sy 1973
- 17) Korbin et al, Model Study of Spiling Reinforcemdnts in Underground Opening, Technical Report MRD275
- 18) Goodman, Methods of Geological Engineeing in Discontinuous Rocks, West Publishing Company
- 19) Atkinson, Subsidence above shallow Tunnels in Soft Ground, A.S.C.E, April 1977
- 20) Müller et al. Dreidimensionale Spannungsumlagerungsprozesse im Bereich der Ortsbrust

1981, Rock Mech. Suppl, 7

- 21) Kennedy et al, Model Tests for Plastic Response of Lined Tunnels, A.S.C.E. April 1978
- 22) Morton et al, Tunnelling '79 Sympo
- 23) 白井他, 地山その相互作用を考慮したトンネル模型実験(その1~3), 鉄道技術研究速報, 75~59, 75~127, 76~128
- 24) 山本, ロックボトルの作用効果について土木学会論文報告集 No227 1978. 9
- 25) 小林他, 坑道開さくに伴う岩盤移動に関する2軸模型実験, 第11回岩盤力学シンポジウム
- 26) 白井, 川上, トンネルにおけるライニング及びロックボルトの効果に関する模型実験, 鉄道技術研究資料, 1979.
- 27) NATA研究開発グループ, NATAに関する研究(その2), 鹿島建設技研年報, No27
- 28) 猪熊, 石村, トンネル切羽付近の応力状態に関する模型実験, 第13回岩盤力学シンポジウム
- 29) 島田, 土被りの浅い鉄道山岳トンネルにおける地表沈下の形状及び発生機構に関する研究, 鉄道技術研究報告 1981. 2

II. 土かぶりの小さいトンネルの 模型実験（その1）

1. 概 説

近年 NATM (New Austrian Tunnelling Method) の普及に伴い現場計測技術の発達、F. E. M. 解析、弾塑性理論等の解析手法の進展などがあり合理的なトンネルの設計手法を求める動きがでてきている。本論文は、そうした動きの1つとして、トンネルの合理的な設計手法の開発に資するためトンネル掘削後のトンネルに作用する外力およびトンネル付近の地山中の応力状態を3次元模型実験によって明らかにしようとしたものである。

トンネルの静力学模型実験に関しては確立された相似則はまだない。したがって今回の模型実験では相似則を検証するため、現場計測と模型実験の結果の比較を行った。将来的には、坑口付近に地すべりの危険があるトンネルとか大断面の双設トンネルといった特別の問題をもつトンネルの設計へ模型実験を適用することは十分考えられる。しかし、通常のトンネル設計には、F. E. M. 解析や Terzaghi の土圧式などがその簡便さのため有効だと思われるので、そうした解析と模型実験結果との比較も行った。

本研究では主として応力解析を行っているが、これは変位解析が重要でないという意味ではなく、模型のように縮小された場では微小な変位を計測することが困難であるためである。現場においては、逆に変位計測の方が容易なため変位の計測例が多いわけである。しかし、本論文で示したような応力再配分について概念的な認識を得ることは現場の技術者にとっても有益なことと思う。

本論文では、2. で従来のトンネル力学の模型実験手法と今回用いた3次元模型実験手法を述べ、3. で相似則を導入した。4. で実験結果を述べ応力再配分の機構を明らかにした。5. および 6. で実験結果を Terzaghi の土圧公式や現場計測と比較し、相似則の再検討を行い、7. で結論をまとめた。

実験装置の制約から、解析の対象とするのは土かぶりの浅いトンネルに限定した。地山は岩盤と土質地盤の双方を解析の対象とできるが、トンネル地圧が明確な形で発生する方が実験としては都合がよいので、結果的には軟岩もしくは土質地盤のトンネルを模型実験の解析の対象とすることになった。

トンネルとその周辺地山を解析の対象とする場合応力の大部は圧縮応力であるから、本論文ではすべて圧縮応力を正とすることにする。

2. 実験方法

2.1 従来の模型実験

従来のトンネル土圧に関する模型実験はそのほとんどが2次元模型実験であった。これには図-1(a)のように地山の初期応力を主として地山材料の重量によって発生させ床の一部を降下させる降下床実験のタイプ^{1), 2)}と(b)のように外力を載荷することによって初期応力を得るタイプ³⁾とがある。

(a)の場合、地山中の初期応力分布は現場と似てくるが地山材料の重さが制約条件となって小さい初期応力しか得られない。このため、地山材料は強度のごく小さいものにしないと無支保でも安定してトンネル地圧が発生しないことになる。このため、(a)タイプは多くの場合乾燥砂を地山材料とするが、乾燥砂は粘着力が

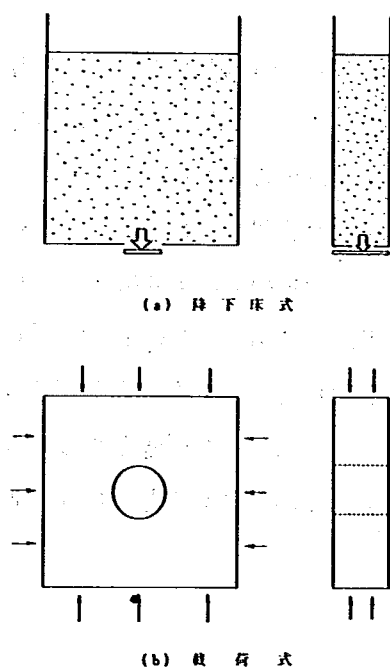


図-1 2次元模型実験の概略図

ない特殊な材料であり、実際とは現象そのものが異なる可能性がある。
(b)タイプの場合、外力を増すことによって大きい初期地山応力を得ることができる。このため、地山材料としては土はもちろんモルタル、岩石、コンクリート等が用いられ、その意味での(a)タイプよりも実際の現象に合致すると考えることができる。しかし、具体的にある現場に適用しようとする、どのくらいの外力を課せばよいか、が不明確である。

また、前述したように(a)、(b)ともに2次元の実験であり、トンネルの切羽付近の応力状態や切羽の安定問題に関しては参考にならない。また、切羽における無支保区間長などの施工状況についても実験に反映することができない。さらに2次元的な実験を平面ひずみ状態で行う場合、トンネル軸方向の変位を拘束する必要があるが、拘束のため、拘束面から地山が摩擦力を受けトンネルが地山から受ける地圧が小さくなる場合がある。3次元の実験では模型トンネルの寸法と土槽の寸法を調整するだけで、この問題は解決できる。すなわち模型トンネルに比較して土槽を十分大きく設計してやればよい。

2.2 実験地山材料

本実験では、2種類の実験地山材料を用いた。そのうち第1の実験地山材料は、乾燥砂である。乾燥砂の強度物性試験は非圧密非排水3軸圧縮試験を行い内部摩擦角 41° 、粘着力 $0\text{gf}/\text{cm}^2(0\text{kPa})$ を得た。単位体積重量は $1.75\text{gf}/\text{cm}^3(17.2\text{N}/\text{m}^3)$ であった。粒径加積曲線を図-2に示す。乾燥砂の場合、すでに述べたように、粘着力のない特殊な材料であるため現象が実際と異なる可能性がある。

そこで本実験ではごく微量の粘着力を有する地山材料を第2の実験地山材料として作製した。これは上記の乾燥砂に適量の水を加え、所定の含水比にし、水のサクション効果によりごくわずかの見掛けの粘着力を発生させたものである。本実験では含水比を2%として実験地山材料を作製した。その地山材料を乾燥砂に対して普通砂とよぶことにする。普通砂の強度物性の試験として、非圧密非排水3軸圧縮試験および1面せん断試験を行った。前者から内部摩擦角 41.7° 、粘着力 $0\text{gf}/\text{cm}^2(0\text{kPa})$ 、後者から内部摩擦角 40° 、粘着力 $16\text{gf}/\text{cm}^2(1.57\text{kPa})$ 以下という結果を得た。粘着力が非常に小さい値であるため、通常の試験で正確な値を求めることは困難であった。そのため別に特別の物性実験として、普通砂の降下床実験を行い、降下床幅と普通砂の崩落高との関係から粘着力 $6\text{gf}/\text{cm}^2(0.59\text{kPa})$ という値を得た。これらのことを総合して普通砂の強度物性は、内部摩擦角 40° 、粘着力 $10\text{gf}/\text{cm}^2(0.98\text{kPa})$ とした。また単位体積重量は、 $1.7\text{gf}/\text{cm}^3(16.7\text{N}/\text{m}^3)$ であった。

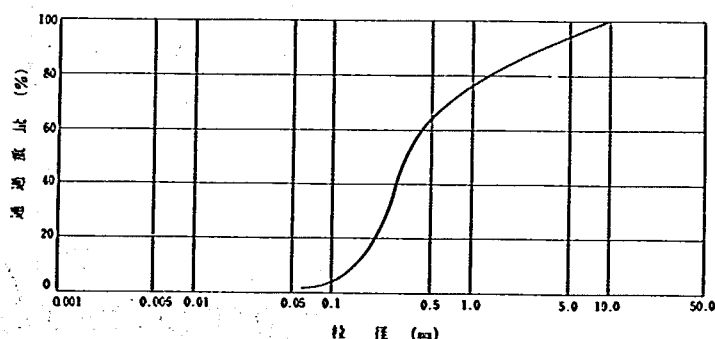


図-2 実験地山材料の粒径加積曲線

2.3 実験装置

実験は、概略的には土槽中の地山の中を実際にトンネルを掘削してゆき、トンネルが地山から受ける外力およびトンネル周辺の水平面に働く地山中の鉛直主応力を計測するというものである。実験装置は乾燥砂と普通砂で異なる。乾燥砂は切羽が自立せず通常の方法ではトンネル掘削ができないからである。

乾燥砂の場合切羽面において地山が自立しないため、トンネルの掘削には特別の装置を必要とした。これを図-3に示す。実験手法に従って説明すると、まず土槽床面の受圧板(図-3(a))の上に1列にトンネル覆工(図-3(b))を置く。トンネル覆工はかまぼこを短く切ったような鋼製半円筒である。その上から「トンネル・カバー」と称する覆工より少し大きい径の鋼製半円筒カバー(図-3(c))を設置する。そうしておいて、カバーの上に地山材料としての乾燥砂を所定の高さまで盛る。次にトンネルカバーを側壁を通して引き抜く(図-3)。引き抜いたとき、砂がトンネル・カバーからトンネル覆工まで落下することをもってトンネル掘削とみなすのである。

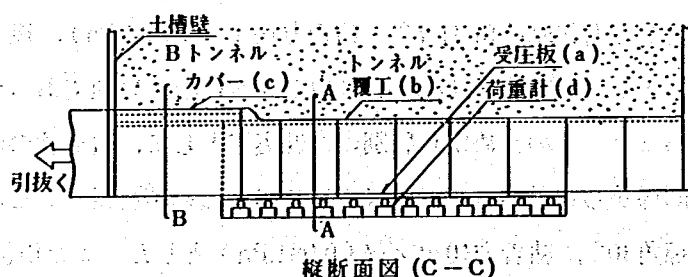
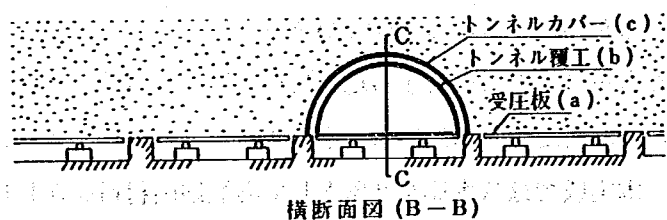
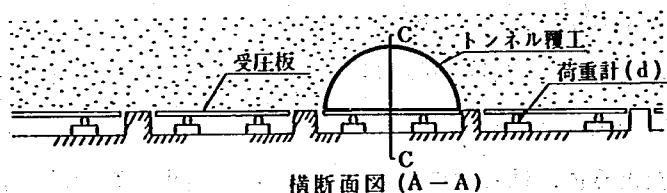
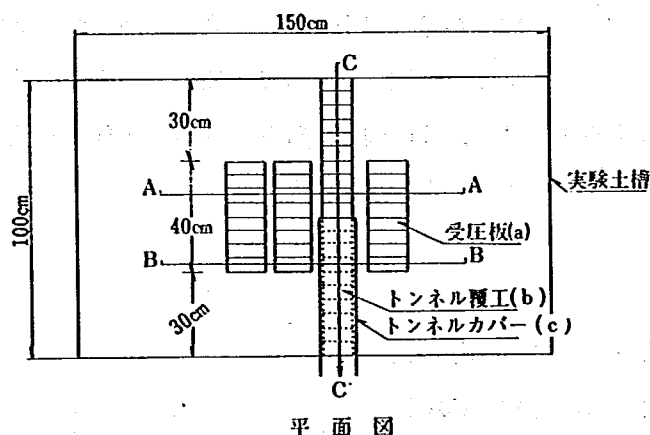


図-3 乾燥砂用実験装置

普通砂の場合はより簡単であった。粘着力があるためトンネル切羽が自立し、実際のトンネル施工のように掘削できた。すなわちピックで単位掘進長だけ掘削した後トンネル覆工を推進工法のように押し込むのである（図-4, 5）。この方法だとトンネル切羽における掘削面と支保工建込み断面との間の無支保区間をも相似できる。

応力の測定には精度上の問題から、土圧計を用いずに小型荷重計（共和電業、LM-A型）を用いた。小型荷重計は土槽床面の溝に設置する（図-3, 4(d)）。地山小型荷重計に土圧を伝えるために荷重計の上に受圧板（図-3, 4(a)）。を置き、荷重計の読みと受圧板の面積とから土槽床が地山から受ける応力を算出する。トンネル覆工に作用する外力は、トンネル覆工を受圧板の上に設置することにより、トンネル覆工→受圧板→小型荷重計と力が伝達されて計測される。

模型実験の有効性を検証するには、最終的には現場における計測値によらねばならない。しかし、現場計測はそう簡単に行えるものではないので、その代わりに大きさの異なる模型を作り、それぞれの実験結果を

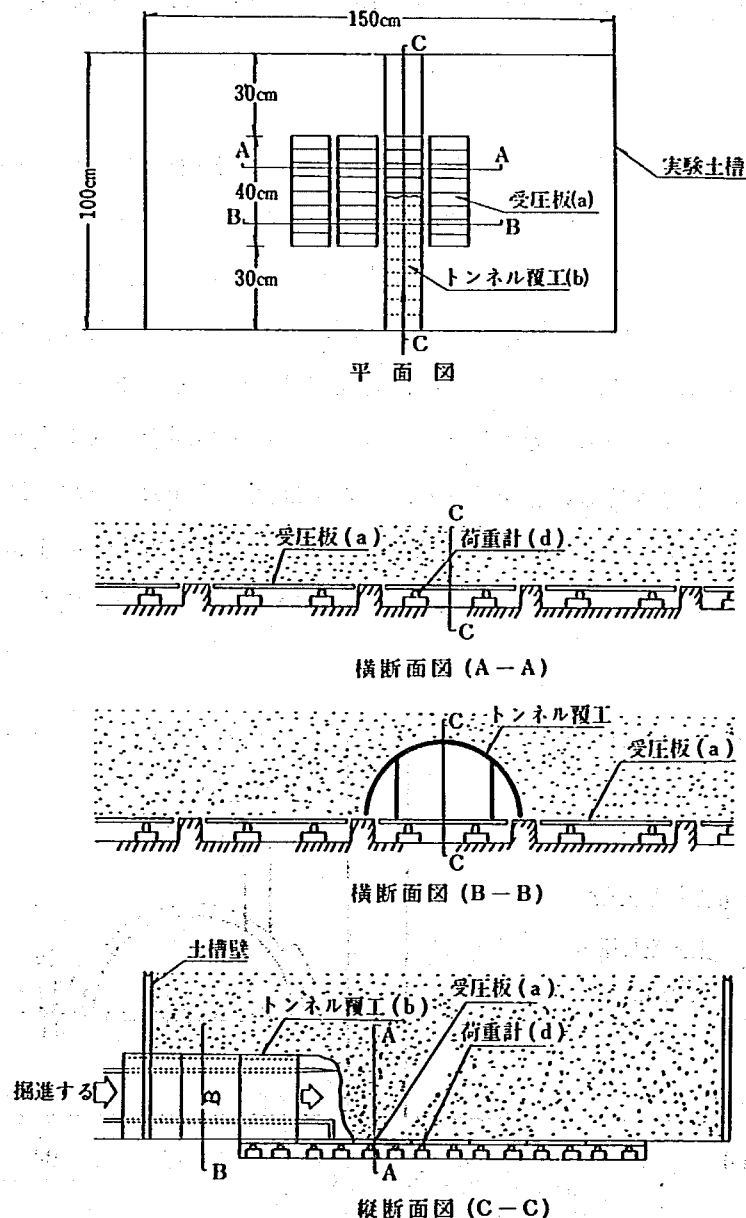


図-4 普通砂模型実験装置



図-5 普通砂模型実験におけるトンネルの掘削

比較するという方法がとられている⁴⁾。こうした考えにそって本実験ではトンネル掘削断面の外径を、12.7 cmと26.4 cmの2種類とし、それぞれについて乾燥砂実験、普通砂実験を行った。

トンネルが地山から受ける外力は地山をどれほどゆるませるかによって変化すると考えられている。このため本実験では地山のゆるみ量とゆるみ域がトンネル土圧にどんな影響を与えるかを調べた。普通砂実験でゆるみ量、ゆるみ域を定量的に正確に変化させるのは容易ではないので、ゆるみ量に関する実験は乾燥砂模型実験についてのみ行った。乾燥砂実験であればトンネル・カバーの断面形状を変えることによって容易にゆるみ量、ゆるみ域ともに変化させることができる。たとえば図-6 (a)のような天端上部に凸部があるトンネル・カバーを用いることによりトンネル天端に余掘りができるような施工法をまねることができる。図-6 (b)のように両側壁部に凸部あるトンネル・カバーを用いることにより、両側壁部を余掘りした場合が相似できる。

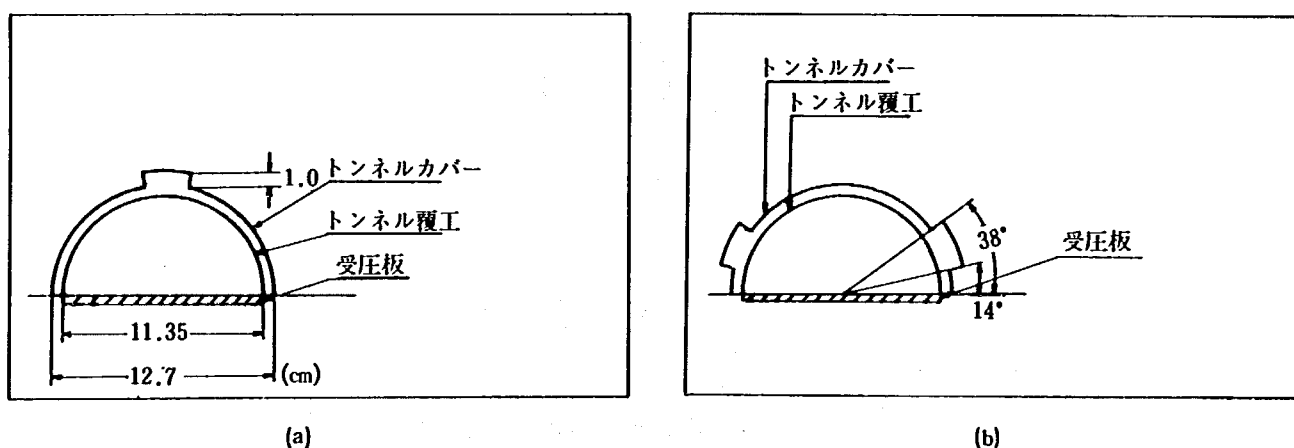


図-6 乾燥砂模型実験における異形トンネル・カバー

2.4 実験ケース数

通常のゆるみ量を想定した模型実験としては、乾燥砂実験と普通砂実験の2種類を行った。両者とも大きさの異なる2種類の模型を用い、土かぶり高をパラメーターとして乾燥砂実験8ケース、普通砂実験9ケース、計17ケース行った(表-3参照)。

ゆるみ量を変化させた実験は乾燥砂実験のみ行った。局所的にゆるみを発生させるために特殊なトンネル・カバーを用いた実験は、2ケース行った。

3. 相似則

模型が現場の予測手段として有効であるためには、模型と現場との間になんらかの相似性がなければならぬ。もちろん実際にはこうした相似性が必ずしも存在しない場合がある。相似性の存在を確認するには数多くの模型実験と現場計測との比較が必要である。現在のところトンネル力学に関する模型実験の分野では相似性の存在自体が明らかにされていないので、とりあえずここでは相似性が存在することを仮定する。相似則を明らかにするにはいくつかの方法があるが⁵⁾、ここでは次元解析を用いる。

次元解析を行うにはまず現象に関与している互いに独立な物理量を明らかにしなければならない。トンネルの力学現象は図-7にそって、次のように述べることができる。

トンネルを掘削する以前の地山中の任意の点は静力学的に一つの平衡状態にある。この場合の応力状態を1次応力状態(初期応力状態)という。この中にトンネルを掘削した場合、トンネル周囲の地山には応力状態の変化が起こる。この結果、地山は変形または破壊を起こし、新しい応力の平衡状態に入ろうとする。この動きは、一般的にはトンネル切羽の前後で起こるもので、応力再配分という。応力再配分の結果、地山とトンネルは新しい応力の平衡状態に達するので、これを2次応力状態という。

図-7に示される要因をすべて考慮して模型実験を行うことは、実験手法の技術水準からいって困難である。そこで次のような仮定を設けて建設現場のモデル化を行った。

(仮定1) 地質構造は等方均一で地表面は水平とする。

(仮定2) トンネルは地下水面より高い位置と考え、地下湧水はないものとする。

(仮定3) 風化劣化の程度、割目の状況等は、岩盤内で平均化され強度で代表され得るものとする。

(仮定4) トンネル・インバート部と同一水平面の地山は鉛直方向には沈下しないものとする。Cordingらの現場計測⁶⁾によると、このような鉛直変位は比較的小さいため、通常のゆるみ土圧を受けるトンネルに関しては、この仮定によってそれほど解析の対象となるトンネルを限定することにはならない。

(仮定5) 膨張性地圧は解析の対象としない。

(仮定6) 支保工の剛性に関する要因は、Fenner Pacher Curve を考慮に入れて、最終的に地山のゆるみ量 d に集約されるものとする。

以上のような仮定の結果、解析の対象とするのはゆるみ地圧と称されるごく一般的に発生するトンネル圧ということになる。ゆるみ地圧はミクロ的にみてなんらかの破壊現象を伴うものと考えられるから、地山はマクロ的にみて降伏することが予想される。こうした場合、地山の变形係数と強度定数をともに妥当な縮

率でスケールするのは非常に困難だから、相似性をよくするためには、弾性係数、ポアソン比よりも、地山の内部摩擦角、粘着力をスケールするのが妥当である。したがってモデル化の結果として現象に關与する物理量は表-1の8個とする。次元として F (力)- L (長さ)システムを選ぶ。

Buckinghamの π 定理により必要な無次元量の数は、 $8 - 2 = 6$ 個である。それらの無次元量を、次元解析により表-2のように定めた。

実際には表-2のパイナンバーが同じようにトンネル地圧に影響を与えるわけではなく、影響度の強いパイナンバーと弱いパイナンバーがある。そうした性質について知っていれば、今後の模型実験では影響度の強いパイナンバーに特に注意を払って模型と現場で合わせてやればよいことになる。

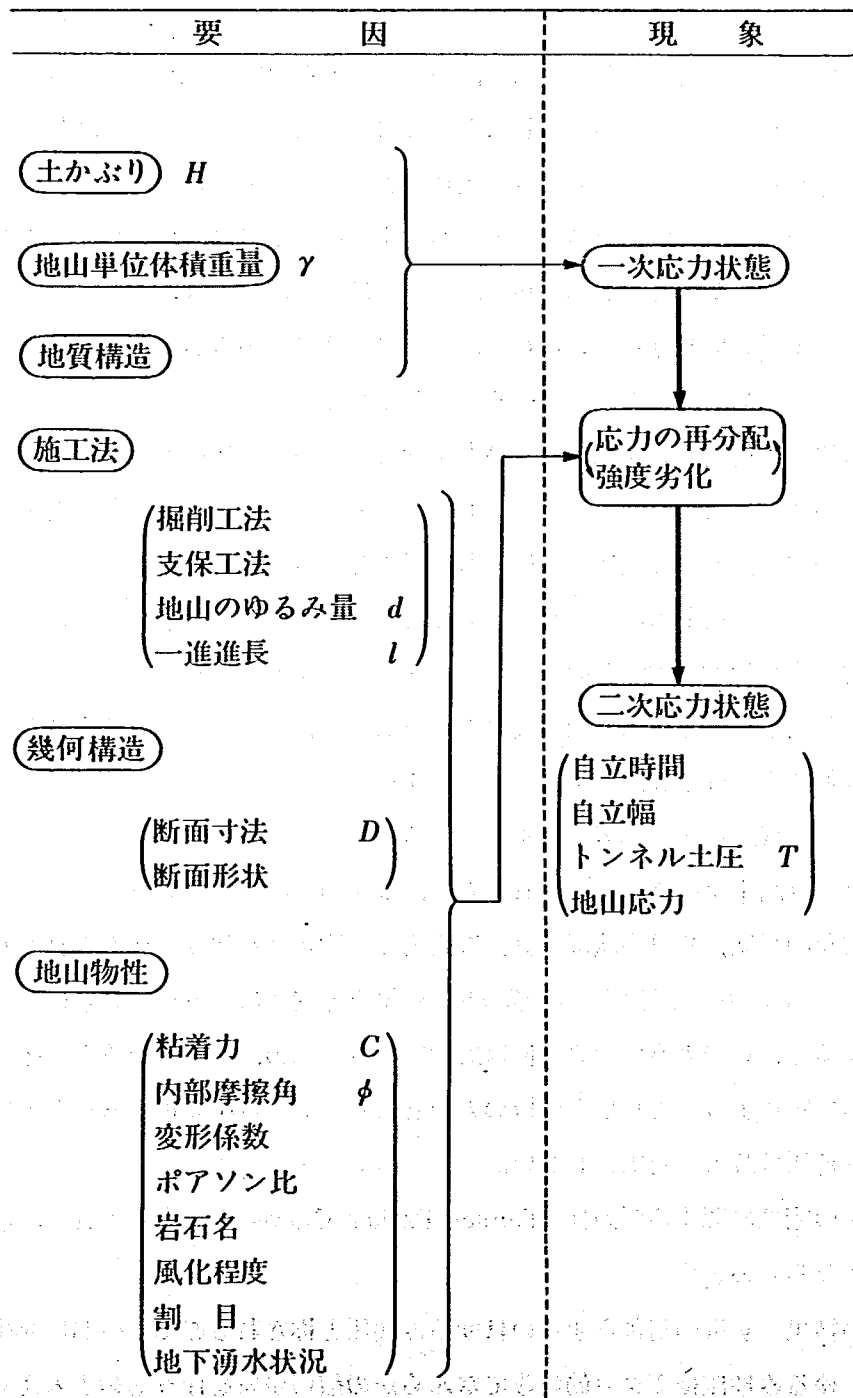


図-7 トンネルの力学現象とその要因

表-1 次元解析

基本物理量 関与している物理量	F (力)	L (長さ)
H (土 か ぶり 高)	0	1
D (ト ン ネ ル 直 径)	0	1
d (地 山 変 位 量)	0	1
l (一 掘 進 長)	0	1
r (地 山 単 位 体 積 重 量)	1	-3
C (粘 着 力)	1	-2
ϕ (内 部 摩 擦 角)	0	0
T (地山応力, トンネル地圧)	1	-2

表-2 主要パイナナンバー (記号については表-1 参照)

幾 何 パ イ ナ ン バ ー	π_1	H/D
強 度 パ イ ナ ン バ ー	π_2	C/rL (L = D or H)
	π_3	$\tan \phi$
変 位 パ イ ナ ン バ ー	π_4	d/D
掘 進 長 パ イ ナ ン バ ー	π_5	l/D
地 圧 パ イ ナ ン バ ー	π_6	T/rL (L = D or H)

4. 実験結果

以下に、インバートと同一水平面における地山中の鉛直応力の実測結果について述べる。応力の測定方法は2.3に述べた。2.3に記した方法で計測した応力は地中応力でなく土槽床の反力であるが、今回の実験の場合3.の(仮定4)がほぼ満足されると考えられるので、この反力を地中応力とみなすことにする。また2次元弾性計算によれば、この部分の応力の主軸は鉛直であるから、上記の鉛直応力はほぼ主応力と考えてよい。

4.1 トンネル切羽付近の応力状態

図-8から図-17に切羽付近の地山中の鉛直主応力の等高線を示す。応力は各点における初期応力を1としてそれに対する比をとって表わしてある。図-8~13は普通砂、図-14~17は乾燥砂の模型実験である。乾燥砂実験では実験装置の制約により切羽前方の地山の応力は計測されていない。

普通砂模型実験では、トンネル周辺の地山応力は応力解放により解放面付近で応力が低下する場合と応力解放面付近で地山応力が最大になる場合とがある。図-8,9にその代表例を示す。図-8は土かぶりが $H/D=0.5$

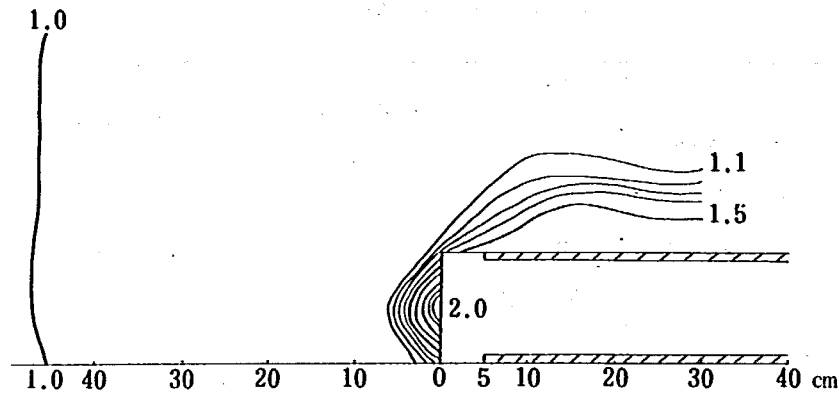


図-8 地山の鉛直応力分布の平面図 (普通砂, $D = 12.7 \text{ cm}$, $H/D = 0.5$, 全断面工法)

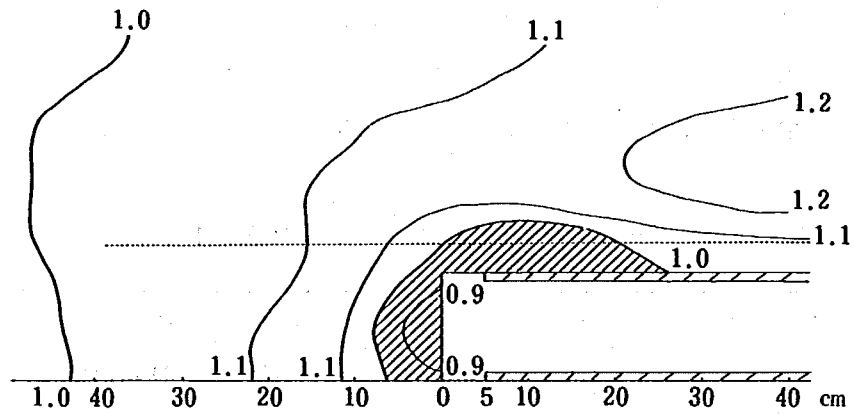


図-9 地山の鉛直応力分布の平面図 (普通砂, $D = 12.7 \text{ cm}$, $H/D = 3$, 全断面工法)

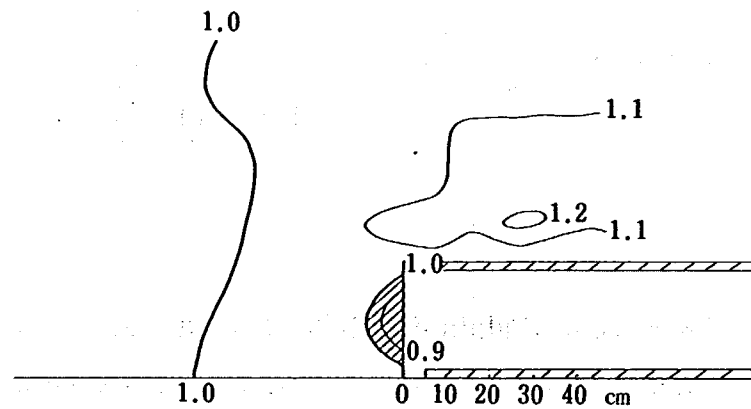


図-10 地山の鉛直応力分布の平面図 (普通砂, $D = 26.4 \text{ cm}$, $H/D = 1$, 全断面工法)

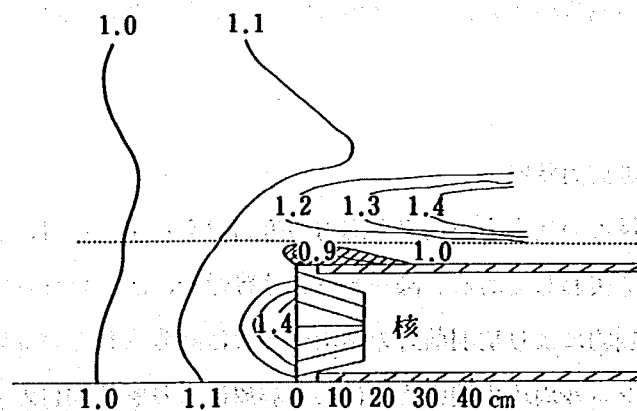


図-11 地山の鉛直応力分布の平面図 (普通砂, $D = 26.4 \text{ cm}$, $H/D = 1$, リングカット工法)

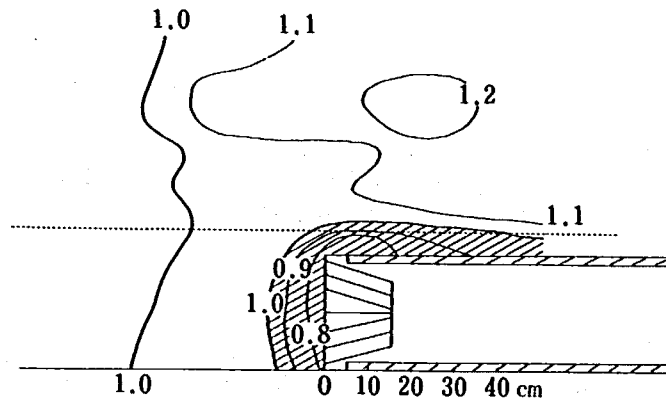


図-12 地山の鉛直応力分布の平面図（普通砂， $D = 26.4 \text{ cm}$ ， $H/D = 2$ ，リングカット工法）

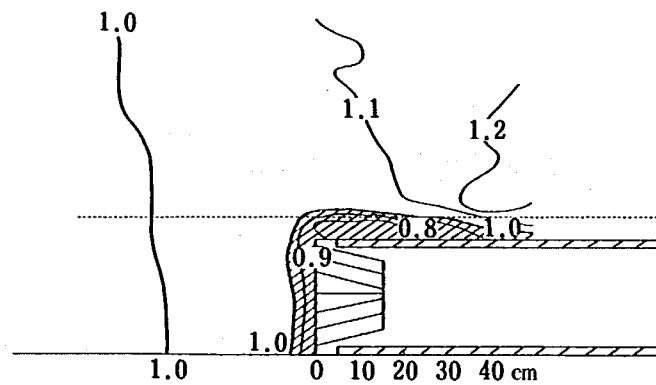


図-13 地山の鉛直応力分布の平面図（普通砂， $D = 26.4 \text{ cm}$ ， $H/D = 3$ ，リングカット工法）

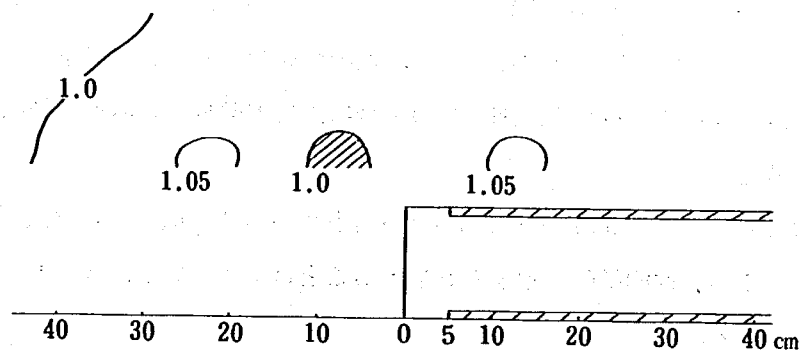


図-14 地山の鉛直応力分布の平面図（乾燥砂， $D = 12.7 \text{ cm}$ ， $H/D = 0.5$ ）

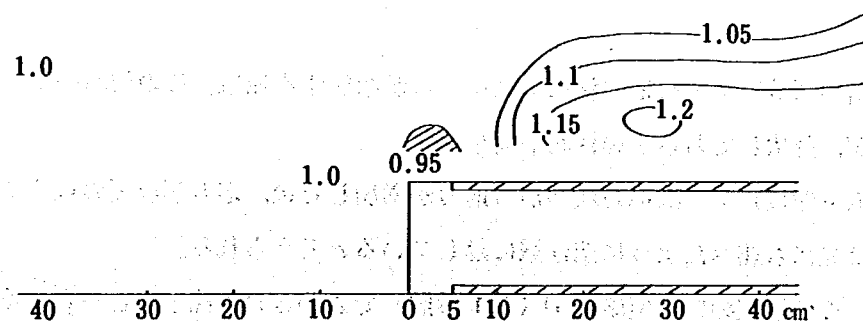


図-15 地山の鉛直応力分布の平面図（乾燥砂， $D = 12.7 \text{ cm}$ ， $H/D = 2$ ）

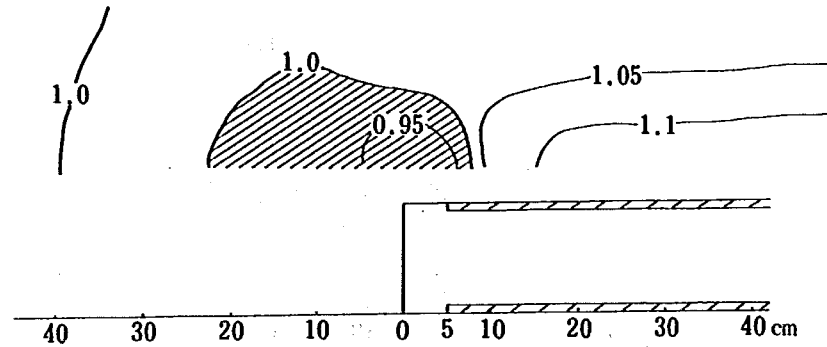


図-16 地山の鉛直応力分布の平面図（乾燥砂， $D = 12.7 \text{ cm}$ ， $H/D = 2$ ，天端余掘り）

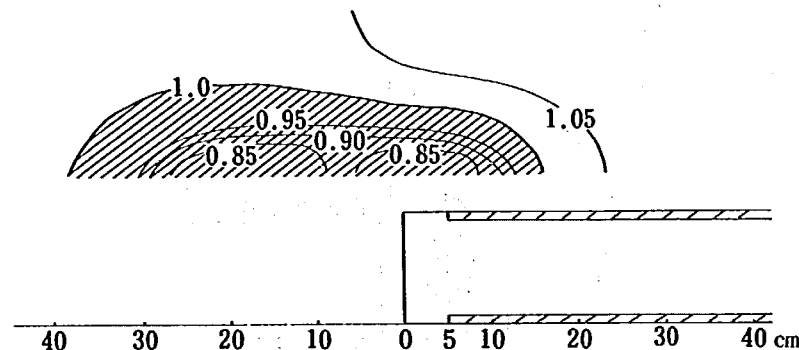


図-17 地山鉛直応力分布の平面図（乾燥砂， $D = 12.7 \text{ cm}$ ， $H/D = 2$ ，側壁余掘り）

であり，地山応力は応力解放面付近で最大となる。これに対して図-9のように $H/D = 3.0$ で土かぶりを大きくすると，応力解放面付近で地山応力は低下する。もし，地山が完全弾性体として挙動したとすると，応力解放面で最大鉛直応力を示すはずであるから，図-9の場合は，応力解放面の直近で地山は降伏して，塑性領域が形成されていると考えられる。

図-8の場合受圧板の面積（ $5 \times 5 \text{ cm}$ の正方形）よりも小さい塑性領域が応力解放面直近に発生している可能性があり，すぐに地山が弾性的挙動を示すと判断することはできないが，図-9のケースより塑性領域が小さいことは明らかである。

一般にいてトンネルの応力解放にさいして地山が降伏する場合，その切羽付近の応力状態は概略的には図-18のようになり，切羽付近は4つの領域に分けられる。それは次のような領域である。

領域Ⅰ（初期応力領域）：1次応力状態（初期応力状態）の領域。この領域はトンネル掘削の影響を受けない。

領域Ⅱ（応力増加領域）：1次応力状態により応力が増加する領域。この領域の地山はトンネル掘削の影響を受けているが，降伏しておらず弾性的挙動を示す。

領域Ⅲ（応力低下領域）：1次応力状態から応力が増加した後，応力解放面の近くで応力が低下する領域。この領域の地山は先にも述べたように塑性域に達していると考えられる。

実験によると，この領域の幅は概略式(7)（5.1参照）で表わされる沈下幅と一致する（図-9,図-11~13に式(7)による沈下幅を点線で示す）。領域が切羽奥にどの程度広がっているかは施工法によって異なってお

り、図-9は通常の全断面掘削工法であるため、奥行きはトンネル径ほどあるが、図-11~13はリングカット工法によったため比較的小さい。このように、この領域の奥行きに関しては確定できないが、幅と比較して奥行きが不釣り合いに広い範囲にわたるとは考えにくい。したがって膨張性地山でなければ応力低下領域は、切羽からトンネル径ほどを考えておけばよい。

領域Ⅳ（応力再増加領域）：領域Ⅱ、Ⅲを経過した地山が覆工から側圧を受ける3軸圧縮状態になり、再び鉛直応力が増加する領域。

トンネルに非常に近い部分の地山はトンネルの進行に応じて上記の領域Ⅰ~Ⅳをすべて覆歴するためその鉛直応力の変化は図-19のようになる。こうした応力変化は概略的には Müller らの報告と一致している。Müller らは文献7) で図-18のような応力再配分を一般的な現象だとしている。しかし応力再配分は地山強度が強ければ図-8のような弾性的挙動も考えられるので、図-18の応力再配分が一般的に発生すると考えるのには無理がある。一般化をするには、3.で述べたような相似則に対する配慮が必要であろう。

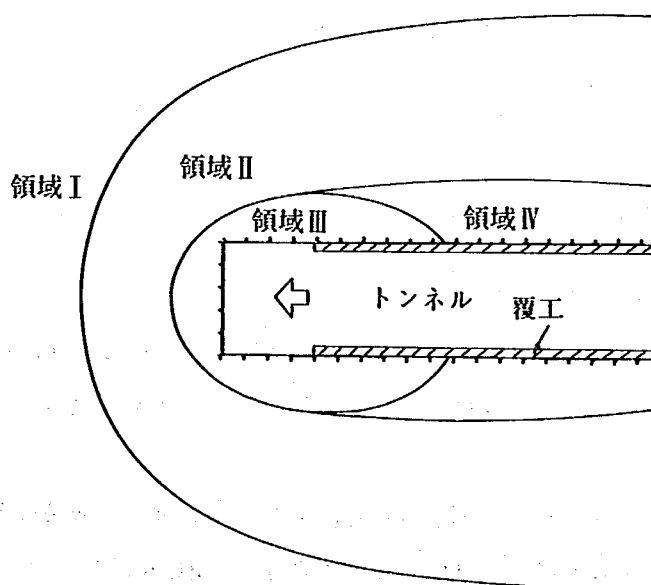


図-18 切羽付近の鉛直地山応力状態の概略平面図

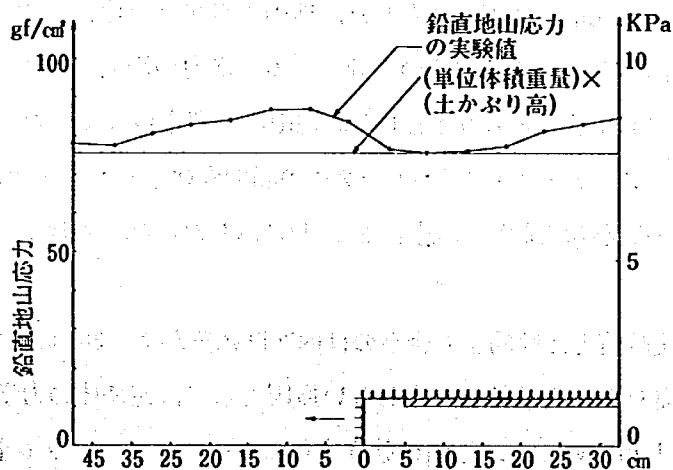


図-19 トンネル進行に伴う鉛直地山応力の変化（トンネル進行方向、普通砂、 $D=12.7\text{ cm}$ 、 $H/D=3.0$ ）

4.2 トンネル周辺の鉛直地山応力に関する実験結果と2次元弾塑性有限要素法による計算結果との比較

今回の実験は3次元的なものであるが、切羽から十分離れた横断面内では2次元的な解析が適用できると考えられる。このため、こうした横断面を対象とした2次元の弾塑性有限要素解析を行い、実験結果と比較した。

プログラムは Drucker-Prager の降伏条件に基づく弾塑性解析である。Drucker-Prager の降伏条件は、式(1)による⁸⁾。

$$F = \alpha J_1 - \sqrt{J_2} + K = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、圧縮応力を正として、 J_1 は1次の応力不変量

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad \dots\dots\dots (2)$$

J_2 は偏差応力の2次不変量

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad \dots\dots (3)$$

を表わす。式(1)の α と K は、次式によって定まる定数である。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K = \frac{6 C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

応力-ひずみ関係は、ハードニング、ソフトニングともに考慮できる Tri-linear な近似で表わされる。剛性マトリックスは反復法で計算され、各計算サイクルで割線変形係数を変化させる⁹⁾。なおこのプログラムではダイレイタンスは考慮できない。

今回は、図-20のようなメッシュ分割で計算を行った。トンネル周縁の境界条件として、計測されたトンネル地圧に相当する応力をトンネル半径方向外向きに作用させた。地山の物性として、単位体積重量は 1.7 gf/cm^3 (16.7 kN/m^3)、応力-ひずみ関係は降伏後わずかにひずみ硬化を示すような Tri-linear のハードニングとし、部分線形近似における変形係数は応力レベルの小さい方からそれぞれ 5000 gf/cm^2 (490 kPa)、 50 gf/cm^2 (4.9 kPa)、 0.05 gf/cm^2 (4.9 Pa)とした。地山のポアソン比は一般の岩盤の場合 0.3 前後である。しかし、今回の実験地山のようにゆるぎめの土砂であると応力の増大に応じて体積収縮することが考えられるため、ポアソン比は少し小さくとり 0.2 とした。地山の強度定数は粘着力を 10 gf/cm^2 (0.98 kPa)一定として、内部摩擦角をパラメーターとして、 $40^\circ \sim 20^\circ$ の間で変化させた。土かぶり $H/D = 3.0$ の場合の土槽床板が受ける鉛直応力の実験値と計算値を図-21、22に示した。図-21はトンネル径 $D = 26.4 \text{ cm}$ 、図-22は $D = 12.7 \text{ cm}$ である。

図-21 ($D = 26.4 \text{ cm}$)で実験値と比較的よく合うのは内部摩擦角が $\phi = 30^\circ$ の場合である。材料物性試験で得られた $\phi = 40^\circ$ より下げなければ実験値と一致しない原因として、連続体の力学を基礎とする F. E. M. では実際の地山の性質を表わし得ないこと、地山の強度劣化についてもプログラム上考慮していないこと、ダイレイタンスの影響を考慮していないこと、によるものと考えられる。図-22に関しても計算上実験値

と比較的よく合うのは $\phi = 20 \sim 25^\circ$ であり、プログラムに inputs する地山強度を材料物性試験で得られた値よりかなり下げないと実験値とは一致しなかった。しかし応力分布の傾向は、両者ともにある程度表わし得た。

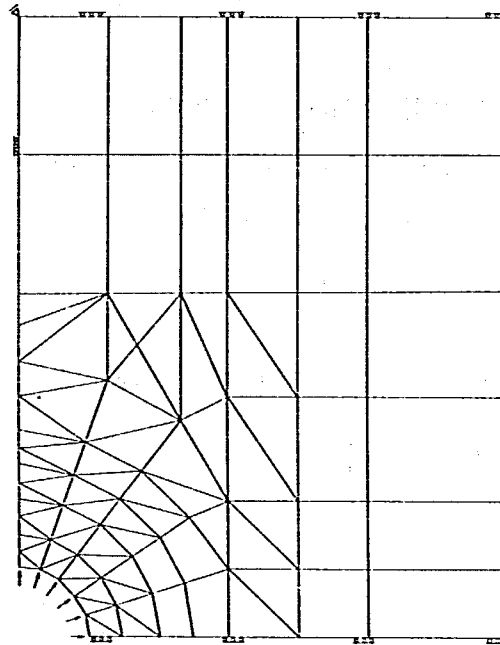


図-20 要素分割図

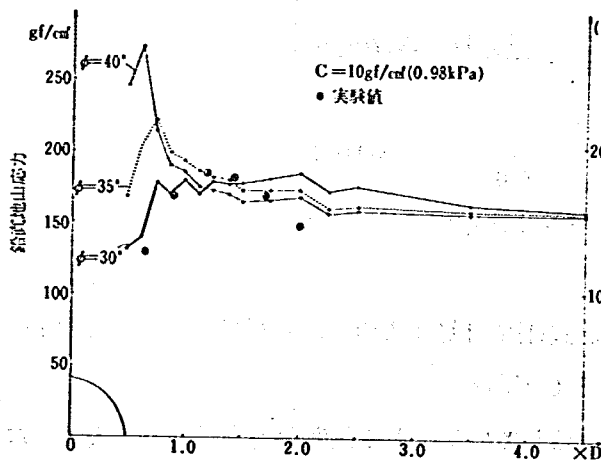


図-21 鉛直地山応力の計算値と実験値
(普通砂, $D = 26.4$ cm, $H/D = 3$)

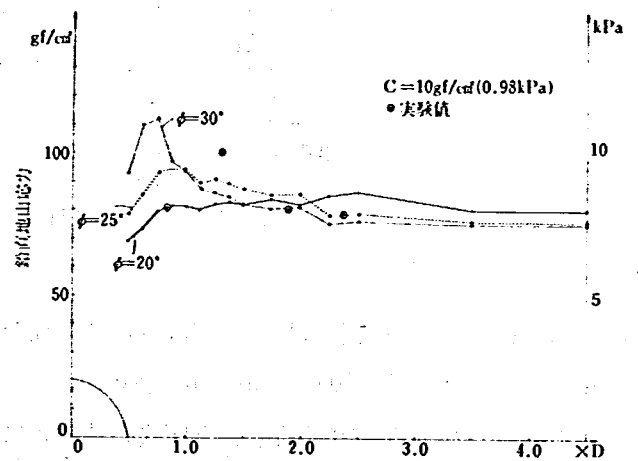


図-22 鉛直地山応力の計算値と実験値
(普通砂, $D = 12.7$ cm, $H/D = 3$)

5. 相似則に対する再検討

標準的なゆるみ量の乾燥砂と普通砂の模型実験の実験結果を表-3に示す。また、異形断面のトンネルカパーを用い、ゆるみ量を変化させた乾燥砂実験の結果を表-5に示す。

5.1 土かぶり高とトンネル地圧との関係 (H/D vs. T/rD)

表-3の実験結果のうち、土かぶり高 (H/D) に対してトンネル土圧 (T/rD) がどのように変化するかについて整理した。それを図-23に示す。図-23で実線で示されるのは Terzaghi のトンネル土圧の公式

$$T = \frac{Br - 2C}{2\lambda \tan \phi} (1 - e^{-2\lambda(H/D)\tan \phi}) \dots\dots\dots (6)$$

を用いて算出したトンネル土圧である。ただし、 r 、 D 、 C 、 ϕ は表-1を参照。

$$B = D \left\{ 1 + \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \right\} \dots\dots\dots (7)$$

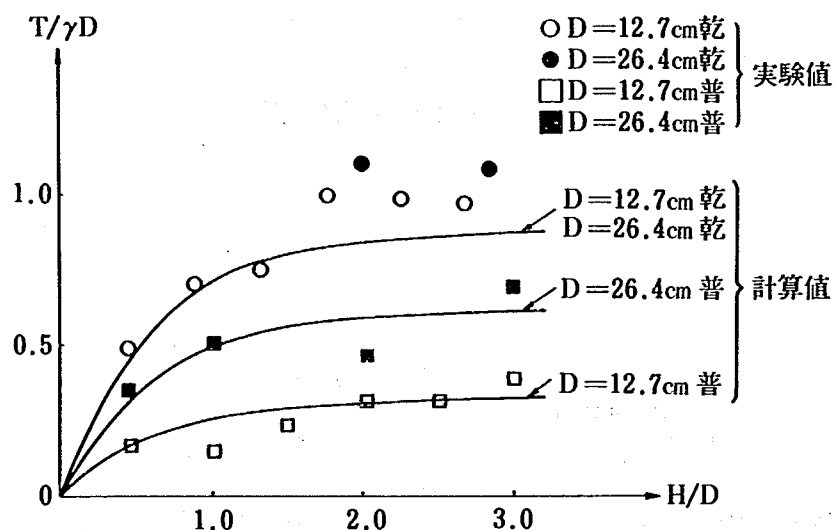


図-23 土かぶり高 (H/D) とトンネル地圧 (T/rD)

図中で「乾」は乾燥砂実験を示し、「普」は普通砂実験を示す。式(1)で計算するのに、乾燥砂は $C = 0 \text{ gf/cm}^2$ 、 $\phi = 40^\circ$ 、普通砂は $C = 10 \text{ gf/cm}^2$ (0.98 kPa)、 $\phi = 40^\circ$ としてある。

図から明らかなように実験結果と土圧式の計算値はよく一致している。ある程度以上土かぶりが大きくなると、アーチ作用のためトンネル地圧はある一定値に近づく。トンネル地圧 T の絶対値は表-3に示してあるが、全土かぶり荷重と比較して、ほぼ等しいのは乾燥砂が浅い場合 ($H/D = 0.5$) のみであって、他はアーチ作用または地山がゆるみに抵抗する作用のため全土かぶり荷重よりは小さい。

実験手法上の観点からいえば、ある程度深いトンネルのゆるみ地圧だけを考える場合には土かぶり高パイナンバーを無視できるが、 $H/D < 2$ のような浅いトンネルの場合には土かぶり高パイナンバーには注意を払わねばならない。

表-3 実験結果 (記号については表-1 参照)

(a) $D = 12.7 \text{ cm}$ の場合

		乾燥砂模型実験						普通砂模型実験					
π_1	H/D	0.4	0.9	1.3	1.8	2.2	2.7	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
π_2	C/rD	0.0						0.46					
π_2	C/rH	0.0						0.92	0.46	0.31	0.23	0.18	0.15
π_3	$\tan \phi$	0.87						0.84					
π_6	T/rD	0.50	0.71	0.76	1.03	0.99	0.98	0.17	0.16	0.25		0.31	0.30
ϕ	$^\circ$	41						40					
C	$\text{gf/cm}^2(\text{kPa})$	0.0 (0.0)						10.0 (0.98)					
r	$\text{gf/cm}^3(\text{N/m}^3)$	1.75 (17.2)						1.70 (16.7)					
H	cm	5.7	11.4	17.1	22.8	28.5	34.2	6.4	12.7	19.1	25.4	31.8	38.1
D	cm	12.7						12.7					
T	gf/cm^2	11.1	15.8	16.8	22.9	22.0	21.7	3.6	3.4	5.3		6.7	6.4
	(kPa)	(1.09)	(1.55)	(1.65)	(2.24)	(2.16)	(2.13)	(0.35)	(0.33)	(0.52)		(0.66)	(0.63)

(b) $D = 26.4 \text{ cm}$ の場合

		乾燥砂模型実験						普通砂模型実験					
π_1	H/D	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.9	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
π_2	C/rD	0.0						0.22					
π_2	C/rH	0.0						0.45	0.22	0.15	0.11	0.09	0.07
π_3	$\tan \phi$	0.87						0.84					
π_6	T/rD				1.10		1.09	0.24	0.51		0.45		0.70
ϕ	$^\circ$	41						40					
C	$\text{gf/cm}^2(\text{kPa})$	0.0 (0.0)						10.0 (0.98)					
r	$\text{gf/cm}^3(\text{N/m}^3)$	1.75 (17.2)						1.70 (16.7)					
H	cm	13.2	26.4	39.6	52.8	66.0	75.8	13.2	26.4	39.6	52.8	66.0	79.2
D	cm	26.4						26.4					
T	gf/cm^2				51.0		50.2	10.6	23.1		20.1		31.4
	(kPa)				(5.00)		(4.92)	(1.04)	(2.26)		(2.05)		(3.08)

$\lambda = 1$

5.2 地山の粘着力とトンネル地圧との関係 ($C/\gamma D$ or $C/\gamma H$ vs. $T/\gamma D$)

表-3の実験結果を、粘着力パイナンバー $C/\gamma D$ 、 $C/\gamma H$ とトンネル地圧パイナンバー $T/\gamma D$ について整理した結果を図-24、25に示す。

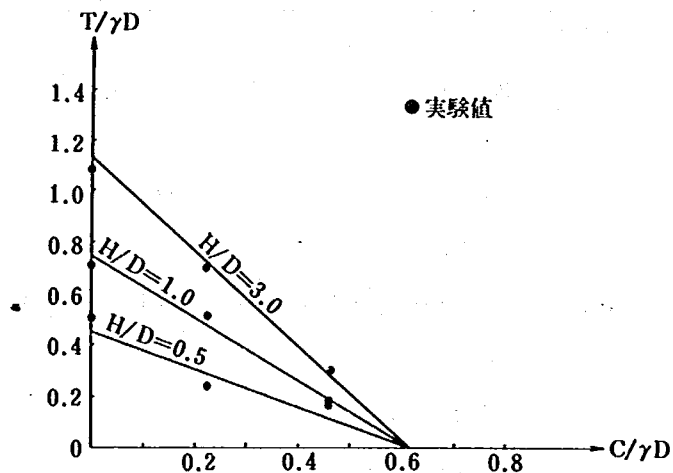
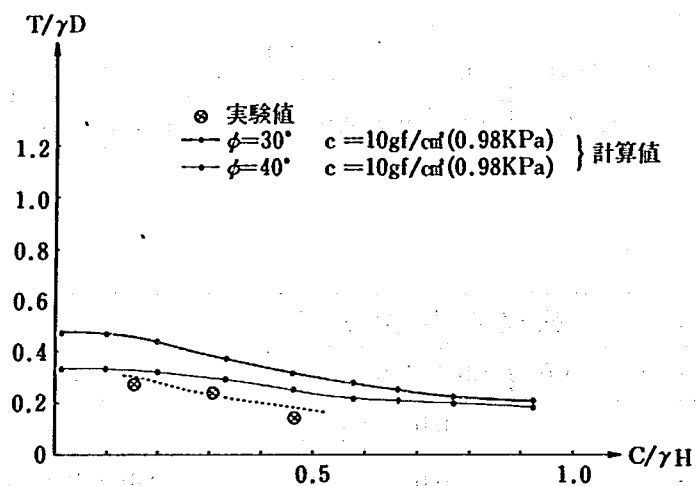
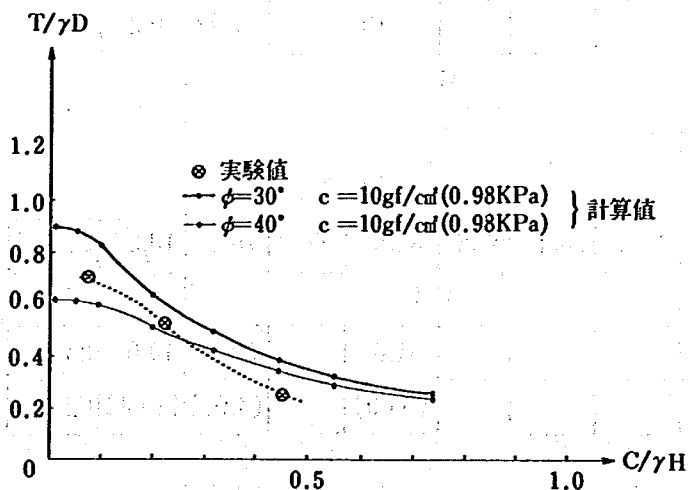


図-24 地山の粘着力 ($C/\gamma D$) とトンネル地圧 ($T/\gamma D$)



(a) $D = 12.7$ cm の場合



(b) $D = 26.4$ cm の場合

図-25 地山の粘着力 ($C/\gamma H$) とトンネル地圧 ($T/\gamma D$)

図-24より C/rD と T/rD は、ほぼ線形な関係にあることがわかる。それらは近似的に次のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} H/D = 3.0 \text{ の場合 } (T/rD) = -1.84 (C/rD) + 1.16 \\ H/D = \quad \quad \quad (T/rD) = -1.21 (C/rD) + 0.75 \\ H/D = 0.5 \quad \quad (T/rD) = -0.71 (C/rD) + 0.45 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

Terzaghi の土圧公式(6)を書き直すと

$$(T/rD) = -\frac{1 - e^{-\lambda(2H/D)\tan\phi}}{\lambda \tan\phi} (C/rD) + \frac{1.47 (1 - e^{-\lambda(2H/D)\tan\phi})}{2 \lambda \tan\phi} \dots\dots\dots (6')$$

となり、 T/rD と C/rD が線形な関係にあるという点では実験と一致する。(6')と(8)から算出される摩擦角を表-4に示す。ばらつきはみられるが、ほぼ $\phi = 30^\circ \sim 40^\circ$ の間に入る。

表-4 実験結果より求めた内部摩擦角

	傾きより算出	T/rD 軸切より算出
$H/D = 3$ の実験	28°	32°
$H/D = 1$ の実験	29°	37°
$H/D = 0.5$ の実験	36°	46°

C/rH と T/rD との関係を図-25に示す。図中に普通砂の実験結果 ($\cdots \otimes \cdots$) と Terzaghi 土圧公式による計算結果を示す。計算は $\phi = 30^\circ$ と $\phi = 40^\circ$ について行い双方を併記したが、実験結果は2つの計算結果から大きくは違わない。

地山の粘着力パイナンバーの重要性は、図-24, 25で C/rD (or C/rH) の値が変化すると T/rD もそれに応じて変わることからもわかる。したがって、こうしたゆるみ地圧を対象とするトンネル模型実験では粘着力パイナンバーは無視できないパイナンバーであるといえる。トンネル地圧を推定するのに、 C/rD と C/rH のどちらがよいパイナンバーであるかは地山条件によって異なるのであるが、トンネル地圧とパイナンバーとの関係が線形であること、アーチ作用が発生すると土かぶり高のトンネル地圧への影響がほとんどなくなること、などから、浅い土かぶりのゆるみ地圧を考える場合には C/rD を用いるのがよいであろう。

5.3 地山の内部摩擦角とトンネル土圧の関係 ($\tan\phi$ vs. T/rD)

表-3より乾燥砂と普通砂の実験を比較すると地山の内部摩擦角がほぼ等しいにもかかわらず、トンネル地圧 T/rD は大幅に異なっていることがわかる。これは次のような原因によるものと思われる。浅いトンネルでは初期地山応力が小さいため、すべり面に働く垂直応力も小さく摩擦力に基因するせん断強度もそれに依りて小さくなる。しかるに粘着力に基因するせん断強度はその場の応力状態にかかわらず一定であるから、浅いトンネルの場合地山がすべりに抵抗するには摩擦力よりも粘着力に負うところが大きい。その結果トン

ネル地圧は摩擦角の大小よりも粘着力の大小に大きく左右される。そのため上記のような現象が現われたものと考えられる。したがって、本実験のような浅いトンネルの模型実験では、摩擦角のパイナンバーはそれほど重要なパイナンバーとはならないことになる。

5.4 地山のゆるみと量トンネル土圧の関係 (d/D vs. $T/\gamma D$)

ゆるみ量とゆるみ域がトンネル地圧にどんな影響を与えるかを調べるため乾燥砂による模型実験を行った。実験方法については2.3で述べたとおりである。いま仮りに、ゆるみ量を変化させるための異形トンネルカバーに応じて実験をA, B, Cと呼ぶ。Aは余掘りのない場合、Bは天端に余掘りがある場合で図-6(a)の装置を用いる、Cは両側壁部に余掘りがある場合で図-6(b)の装置を用いることを示すことにする。実験結果を表-5にまとめた。それを d/D について整理したものが図-26である。実験A~Cのトンネル周辺の地山応力分布は図-15~17に示す。

表-5 実験結果 (記号については表-1 参照)

形 状	H cm	D cm	d mm	T gf/cm ² (kPa)	H/D	d/D %	T/ γ D
A 	22.8	12.7	6.75	22.9(2.24)	1.8	5.3	1.03
B 	22.8	12.7	7.97	20.8(2.04)	1.8	6.3	0.94
C 	22.8	12.7	9.19	24.9(2.44)	1.8	7.2	1.12

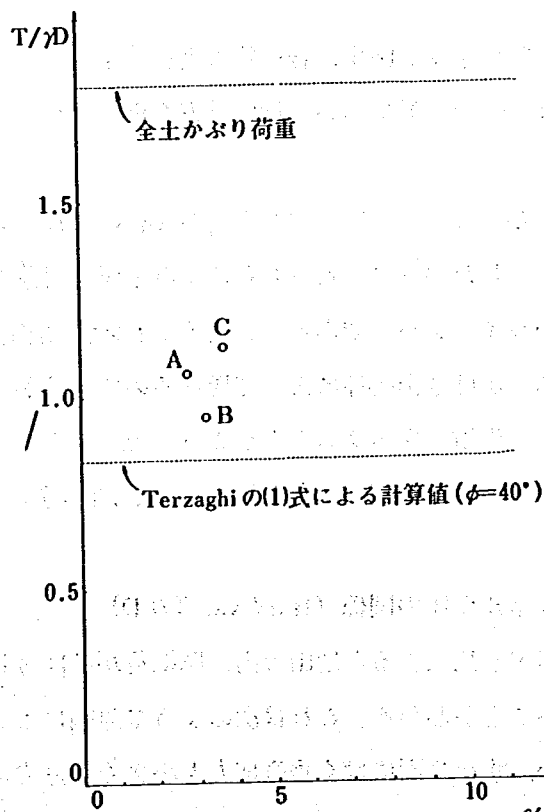


図-26 ゆるみ量 (d/D) とトンネル地圧 ($T/\gamma D$)

実験A, B, Cを比較すると、トンネル地圧は相対的にはCが最大で以下A, Bの順である。実験Cのトンネル地圧が大きいのは、実験Cでは周辺の地山応力は初期地山応力に比較して5%ほどしか増加しておらず(実験A, Bでは10~20%ほど増加している)実験A, Bほど地山でトンネル地圧を負担することができなかったためであろう(図-15~17)。逆に実験A, Bのように周辺の地山鉛直応力が大きくなる場合、トンネル地圧は小さくなる。これは、トンネル地圧を周辺の地山で軽減させようとするNATMの考え方とも一致する。

しかし、概略的にいって実験A, B, Cともに式(1)による計算値と大きく異なるわけではない。また他の研究によっても、トンネル地圧はゆるみ量 d/D が3%を超えれば、 d/D にあまり影響されないことが明らかにされている^{1), 2)}ことなどから、本実験のように d/D が5%を超えるほどゆるむ場合には、ゆるみ量 d/D はそれほど重要なパイナナンバーとは考えられない。

5.5 切羽の安定性に影響する要因

表-1より切羽の自立を阻害する要因としては H , D , l , r が考えられる。一方切羽を自立させる要因としては5.2, 5.3で述べた理由により C が最も重要な要因として考えられる。要因数が5個であるから次元解析により3つの独立なパイナナンバーが得られる。それらは C/H , C/D , C/l または H/D , l/D , C/D などいく通りかの組が考えられる。

H , D , l の中では D が最も切羽の自立に影響すると考えられるから、その強度パイナナンバー C/D に特に注意して判定する必要がある。そこで、幾何相似(H/D , l/D)と地山強度パイナナンバー(C/D)とに分けて考えることにする。

普通砂の模型実験ではトンネルの直径を変えて、大小2種類の場合を行った(C/D はそれぞれ0.22, 0.47)。実験によると $C/D=0.47$ の場合(トンネル径の小さい場合)全断面掘削で切羽は自立して掘削できたが $C/D=0.22$ の場合(トンネル径の大きい場合)切羽が自立せずリングカット工法にしなければならなかった。したがって $C/D=0.3$ 前後を湧水がない場合に関する切羽の安定性の臨界値とみることができる。ただこの値は、まだ実験例が少ないこと、模型実験・現場の双方で地山の強度定数を把握することが困難であることなどから、現場に適用するには今後の研究に待つところが多い。

l/D はトンネル径の大きい実験で0.19, トンネル径の小さい実験で0.39であるが、現場においては通常 $l/D=0.1$ 前後と考えられるから、幾何形状からいえば模型実験は双方とも現場よりも長い無支保区間をとっていることになる。

H/D は今回の実験では切羽の安定性にきわだった影響を与えなかった。切羽前面に局所的空洞を形成するような崩壊は H/D にかかわらず発生した。

上記のようにトンネル直径が大きい模型実験では切羽が自立しなかったため、今回の実験ではすべてリングカット工法によって掘進した。リングカットの長所は核によって切羽面が拘束圧を受けるためであるが、この点を模型実験によって確認した。リングカット工法と全断面掘削工法との切羽周辺の地山鉛直応力分布を図-10, 11に示すが、リングカット工法においては切羽前面の地山中の応力低下が全断面工法に比較して小さいことがわかる。

6. 現場への適用

模型実験を実用的な目的に使う前に、模型で確かに現場の予測ができるかということを確認しておかねばならない。それには模型実験の結果と現場計測の結果を比較する以外に方法はない⁵⁾。そこで本実験と条件が似ているトンネルの現場計測例から2つの実測例を選んで実験結果と比較してみた。実測例は東京電力株式会社の新潟県道付替工事、刈羽トンネル¹⁰⁾と建設省、道路公団の京葉道路、国道16号線、貝塚トンネル¹¹⁾の2例を選んだ。

今回の実験では浅いトンネルの特にトンネル地圧に注目してその値を予測しようという実験であるから、5. 1～4 で述べたような理由で、土かぶり高パイナンス π_1 と粘着力パイナンス π_2 を他に優先した。つまり、 π_1 、 π_2 が現場の値と近い模型実験を比較の対象とすることにした。こうした考え方からまとめたのが表-6である。

表-6 現場と模型実験の比較 (記号については表-1 参照)

		現 場	模 型 実 験		現 場	模 型 実 験	
		(貝 塚 トンネル)	乾 燥 砂	普 通 砂	(刈 羽 トンネル)	乾 燥 砂	普 通 砂
π_1	H/D	0.41	0.4	0.5	0.98	0.9	1.0
π_2	C/rD	0.33	0.0	0.46	0.0	0.0	0.46
π_2	C/rH	0.81	0.0	0.92	0.0	0.0	0.46
π_3	$\tan \phi$	0.49	0.87	0.84	0.58	0.87	0.84
π_6	T/rD	0.21	0.5	0.17	0.61	0.71	0.16
ϕ	°	26	41	40	30	41	40
C	gf/cm ² (kPa)	650 (63.7)	0.0 (0.0)	10 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	10 (0.98)
r	gf/cm ³ (N/m ³)	1.6 (15.7)	1.75 (17.2)	1.7 (16.7)	1.6 (15.7)	1.75 (17.2)	1.7 (16.7)
H	cm	500	5.7	6.4	1,200	11.4	12.7
D	cm	1,220	12.7	12.7	1,226	12.7	12.7
T	gf/cm ² (kPa)	410 (40.2)	11.1 (1.09)	3.6 (0.35)	1,200 (118)	15.8 (1.55)	3.4 (0.33)

貝塚トンネルの地山は関東ローム層を主とする粘性で地山の粘着力の働きによってトンネル地圧は全土かぶり荷重よりかなり小さい。模型実験でも粘着力のまったくない乾燥砂よりもごくわずかの粘着力を有する普通砂のトンネル地圧とよく合っている。一方、刈羽トンネルは砂質地山であるため、普通砂実験より乾燥砂実験とよく一致する。

したがって、ゆるみ地圧のみを考える浅いトンネルの模型実験の手法について次のことがいえる。すなわち、まず粘着力パイナンスが現場と一致するような地山材料を作製し、それを土かぶり高パイナンスを一致させるように打設する。こうすれば、ある程度トンネル地圧が推定できる模型実験を行えることになる。

7. 結論

本研究は、従来の2次的な模型実験に代えて、3次元的な実験を行い、トンネルが受ける外力、トンネル周辺の地山中の応力状態を調べたものである。これにより明らかにできたおもな点は以下のとおりである。

(1) 土槽内の実験地山中に実際にトンネルを掘削していく3次元の実験手法を開発し、適当な実験地山材料を使用すればトンネル土圧の解明に有効な方法であることを示した。

(2) 降伏後の地山挙動を問題とするトンネル土圧模型実験に関する相似側を次元解析により導いた。

(3) 比較的浅いトンネルでゆるみ地圧のみを考慮すればいいような模型実験ではトンネル地圧を予測するには、 H/D 、 $C/\gamma D$ が重要な相似則パイナンバーであることが、確認された。

(4) 上記のようなトンネルにおける切羽の安定に関しては、 $C/\gamma D$ 、 l/D が重要なパイナンバーと思われた（記号については表-1参照）。

(5) リングカット工法のような施工法も切羽の安定に大きい影響を及ぼすことが、切羽周辺の地山中の応力状態を明らかにすることにより確認された。

(6) トンネル周辺の地山中の応力状態を模型実験によって明らかにし、切羽付近の地山中の応力状態に対して、領域区分を行い、その特徴を記した。これによって応力再配分の機構を概念的に明らかにした。

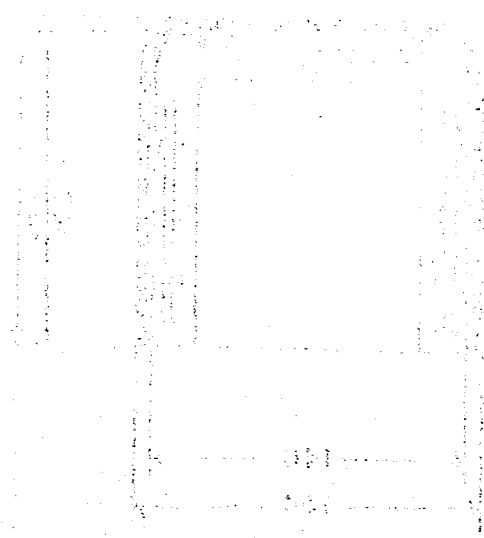
(7) 切羽から離れた地点での2次応力状態について、2次元有限要素法により計算を行い、実験結果と比較し、傾向の合うことを示した。

参考文献

- 1) 小野・真井：乾燥砂層における垂直土圧，土木学会誌，24巻5号，PP. 437～495，1938.
- 2) 村山・松岡：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第187号，PP. 95～108，1971.
- 3) 平松・岡：Memoris of the Faculty of Engineering, Kyoto Univ., 21-2，1959.
- 4) 江守・シューリング：模型実験の理論と応用，技報堂，P. 5，1973.
- 5) 文献4)，PP. 28～32.
- 6) Cording：Methods for geotechnical observation and instrumentation in tunneling, NSF GI-33644X, P. 90，1975.
- 7) Müller, L. et al.：Dreidimensionale Spannung sumlagerung-sprozesse im Bereich der Ortsbrust, Rock Mechanics, Suppl. 7, 1978.
- 8) Zienkiewicz, O. C.：基礎工学におけるマトリックス有限要素法，培風館，P. 390.
- 9) 川本・林：地盤工学における有限要素解析，培風館，P. 102，1978.
- 10) 上山ほか：砂山をトンネルで貫く，トンネルと地下，Vol. 11, No. 4, PP. 37～47，1980.
- 11) 春山ほか：パイプルーフによる4連めがねトンネルの計測，トンネルと地下，Vol. 11, No. 9, PP. 17～26，1980.

1992, 2000, 97

III. 土かぶりの小さいトンネルの 模型実験（その2）



1. 概説

今回の実験はトンネルの地山の力学的性質および、施工法が、トンネル切羽付近の応力再配分にどのように影響を与えるか調べることを目的としている。実験装置及び実験方法は、原理的には「Ⅱ・土かぶりの小さいトンネルの模型実験（その１）」で用いた引抜き式の３次元乾燥砂模型実験装置（Ⅱ、図３）と同じである。ただし今回はトンネル形状は４角形で、土かぶり高は $H/D = 1.27$ に統一した。

今回の実験によって、内部摩擦角がほとんど 0° である地山での応力再配分の状況やロックボルト工を施工した場合のトンネル地圧などについても、ある程度明らかにできた。

2. 実験

トンネル掘削の模型実験は、次のようなやり方をした。まず土槽の中にあらかじめトンネルの永久覆工に相当する鋼製のトンネル模型（図１）を置いておく。その上に“トンネル・カバー”と称する鋼製カバー（図１）を、差し入れる（図２）。その上から地山に相当する土砂などを盛り、土かぶりが所定の高さになった後、トンネル・カバーを引き抜くのである。これによって地山は、トンネルとトンネルカバーの隙間（約 7 mm ）だけ自由な変位が許される。そのため、応力の再配分がおこるので、このトンネルカバーの引き抜きを現実のトンネル掘削とみなすのである（図３）。

応力の再配分を支配する要因として、現在のところ一般には、トンネル寸法、施工法、地山の力学的性質が考えられているが、今回は後二者をパラメーターとした。

この模型実験には、次のような２つの基本的な問題点がある。

- (1) トンネルカバーに土を盛っただけで、一次応力状態を再現し得ているか
- (2) 土槽の底板が、変位しない

これらの問題点については、工学的な仮定として取り扱うこととする。

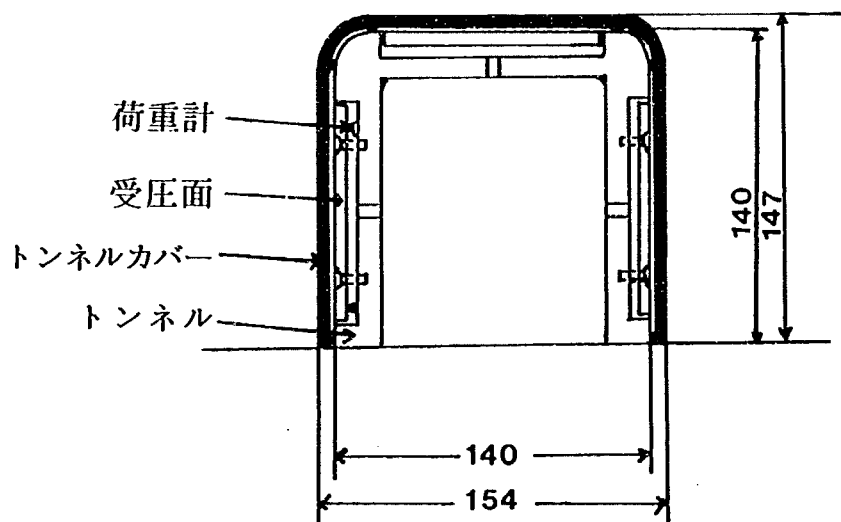


図-1 基本実験装置

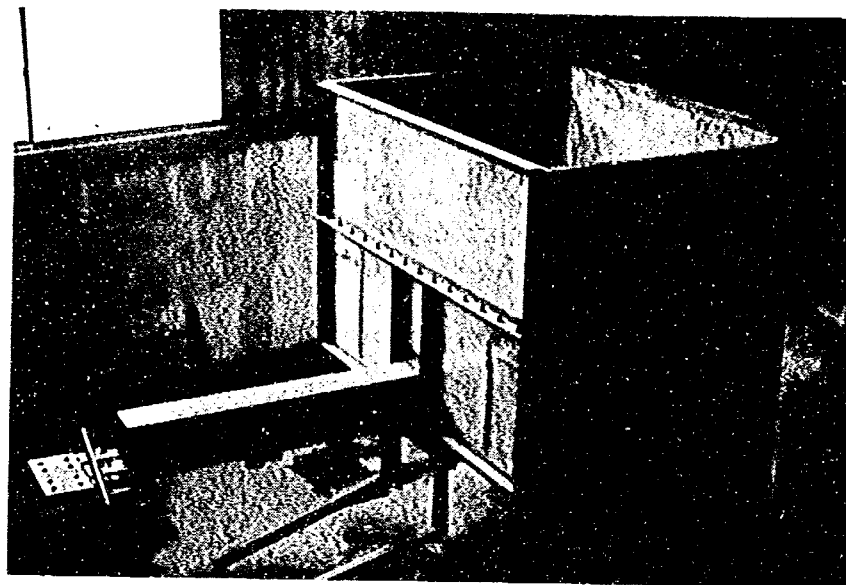


図-2 実験装置全体図

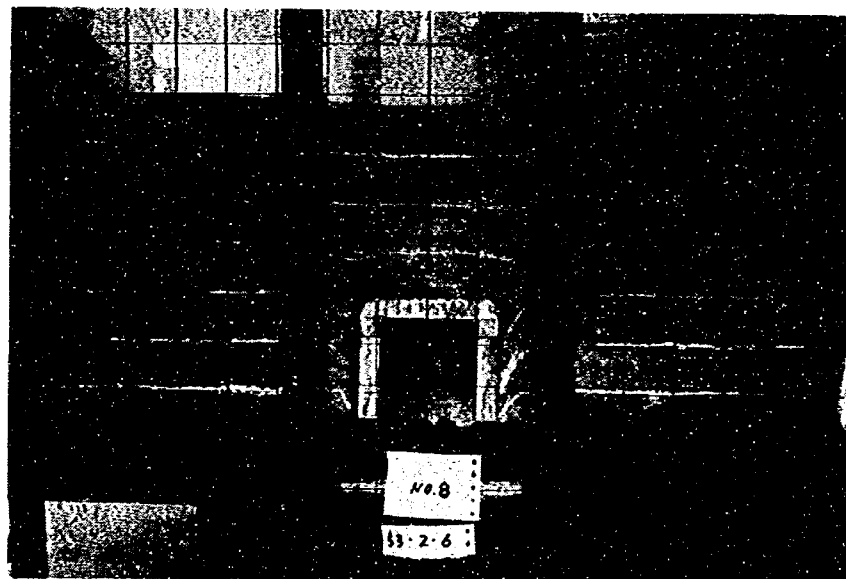


図-3 トンネルカバー引き抜き後の正面図

2.1 実験装置

トンネルの寸法は、140 幅×140 高×1000 長mm で、天端と両側壁に計12コの土圧計 100 × 100 mm を埋めこんだ。トンネルカバーの寸法は、ほぼ 154 幅×147 高×1200 長mmである。天端におけるゆるみは、トンネル径（ここではトンネル幅を意見する）の約9%である。土槽の寸法は、約900 幅×1000 長mmで、土かぶりは土槽底板から350 mmに統一した。トンネル周辺土圧を計測するのに、 ϕ 100 × 20 高mm の土圧計を用いたが、設置位置は、特記しないかぎり、土圧計の中心がトンネル側壁より65mm離れた所に位置するようにした。

2.2 模型実験での施工法

さまざまな施工法を相似させるために、上記の基本のトンネル模型を含め、下に示すような3種類の施工法の模型実験を行った。

- (1) 基本のトンネル模型実験：(図-4(a))
- (2) 落戸実験：トンネルカバー両側壁の外側にブロックを置き、天端の地山のみに変位を許した。側方地山が強固な場合に相当する。(図-4(b))
- (3) ロックボルト工法実験：トンネルカバーの外側に、ロックボルトの模型(150長×25間隔mm)とビニールシートをかぶせて、トンネルカバーを引き抜き計測を行った。(図-4(c))

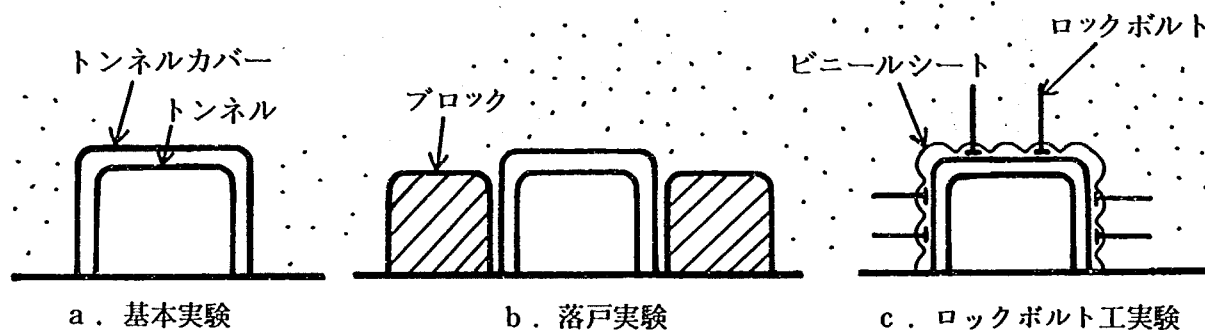


図-4 トンネル施工法のパターン

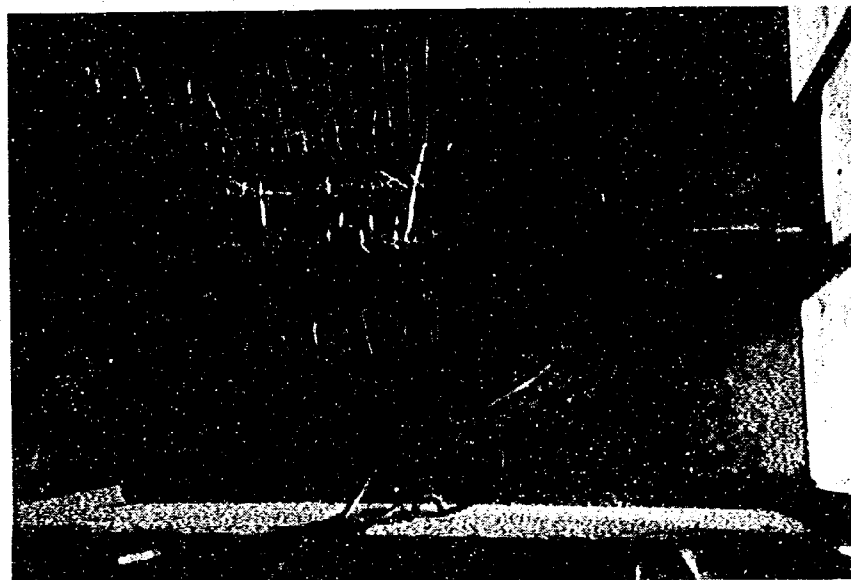


図-5 ロックボルト工法の模型実験装置

2.3 実験地山材料

模擬地山の材料として、完全乾燥砂、かたくり、かんでん、ゼラチン土(乾燥砂を定量の水とゼラチンで固めたもの)の4種を用いた。それらの物性を表-1に示す。

2.4 実験組合せ

実験のケース数を、表-2に示す。トンネル地圧、周辺地圧ともに明らかに測定がおかしいと思われるも

のは除いた。

表-1 模擬地山材料の物性

材 料		完 全 乾 燥 砂	か た く り	か ん て ん	ゼ ラ チ ン 土
変 形 特 性		弾性担し引張強度 = 0	粘 弾 塑 性	粘 弾 塑 性	弾 塑 性
破壊 特性	ϕ ま さ つ 角 (°)	41	0	$\phi > 0 (?)$	$\phi > 0$
	C 粘着力 (g / cm ²)	0	0.036	C > 0	C > 0
単 位 体 積 重 量 (g / cm ³)		1.75	1.03	0.96	2.1

表-2 実験ケース数

地山材料 施工法	砂	か た く り	か ん て ん	ゼ ラ チ ン 土
ト ン ネ ル 模 型	5 *1	1	1	1
ロ ッ ク ボ ル ト 工 法	1 *2	0	0	0
落 戸 実 験	1	0	0	0

*1 では内 2 ケースで広範囲の周辺地圧を測定し、*2 においてはこれ以外にビニールシートなしの実験を行ったが効果がなかったので解析対象から除外した。

2.5 土かぶり高

土かぶりは土槽底板から 350 mm とした。トンネル・カバー寸法は 154 mm であるから、いわゆる土かぶり高は 196 mm である。

2.6 ゆるみ量

基本実験の場合トンネルとトンネル・カバーの形状から判断するとトンネル周囲平均して 7 mm のゆるみが見込まれる(図 1)。実際のゆるみの状況は図 3 のような沈下曲線で示される。すなわち、側壁部のトンネルカバーとトンネルとの間の空間部では、地山粒子が重力により鉛直に落下し、地山全体としては特に側壁部上方部の地山が大きくゆるんだ。この部分のゆるみは、天端中央部の地山のゆるみよりも大きいと考えられる。

3. 相似則

相似則に対する考え方は「Ⅱ・土かぶりの小さいトンネルの模型実験(その 1)」の 3. で述べた内容と同じ内容とした。パイナンバーの値を表-3 に示す。表中 H = 土かぶり高、D = トンネル径、 γ = 単位体積重量、 d = ゆるみ量とする。

地圧パイナンバーについては、 $\gamma \times H$ で基準化した値を 4. 実験結果で述べる。

表-3 相似則パイナンバーの値

実験ケース パイナンバー		完全乾燥砂	かたくり	かんてん	ゼラチン土
π_1	H/D	1.27	1.27	1.27	1.27
π_2	C/rD	0	0.002	*)	*)
π_3	$\tan \phi$	0.86	0	*)	*)
π_4	d/D	4%	4%	4%	*)

*) 0 ではないと思われるが、はっきり計測できなかった。

4. 実験結果

4.1 トンネル地圧とトンネル周辺地圧

トンネル地圧と周辺地圧の実測値は、当然位置の関数となるが、トンネル進行方向の変化を模式的に示すと図-6 のようになる。ここで周辺地圧とは、 ℓ = 土圧計からトンネル進行方向へおろした垂線上の土圧計の中心とトンネル側壁との距離、 D = トンネル径として $\ell/D = 0.46$ の所の土圧を意味する。

実験によれば、トンネル地圧は、切羽から後方に至るまでほとんど変化しないので、これを T とする。一方周辺 圧の方は、1 次応力と考えられる P_{pre} から、切羽前方の地中で最大応力 P_{max} をとり、ほぼ切羽地点で最小値 P_{min} となり、さらに後方で 2 次応力状態 P_{post} と変化する。また相方とも、地圧の基準値として、 r (土の単位体積重量) $\times H$ (土かぶり高) を用いる。

土かぶりに対してトンネル高さが無視できないため、 $r \times H$ は当然トンネル地圧と周辺地圧で異なる。

またトンネル周辺地圧が、最大 (最小) となる所と切羽の距離を、 L_{max} (L_{min}) とし、正負は図-6 のように定める。

上記の P_{suffix} や L_{suffix} という実測値を、 $r \times H$ や D でわってやり基準化した値をまとめたのが表-4 である。落戸及びかたくりの実験では、周辺地圧は、図-6 のような動きを示さず、不規則なものであった。

地圧の計測は一般にばらつきが大きいので、その信頼性は計測の測点が多いほど増す。表中下段に測点数を示し、その参考にした。

表-4 を図化したものを、図7~12に示す。ここでかたくり、かんてんについては、 $P_{pre} = r \times H$ として基準化した。これは、これらの実験で水を多量に使ったため、土圧計の P_{pre} の指示値の絶対値が信頼できないものとなったためである。 P_{pre} 以降の P_{pre} との差応力の測定値が正しいことは、更正により確認した。

図8. 9. 12で初期地圧 P_{pre} が基準地圧 $r \times H$ よりも大きいのは、地圧計測上の難しさを示すものであるが、砂の場合には主としてそのしまり具合によって単位体積重量が変化することが、地圧の実測値がばらつく原因であると考えられる。ゼラチン土の実験では、さらに土圧計と地山の接解状況、防水状況等も原因していると思われる。

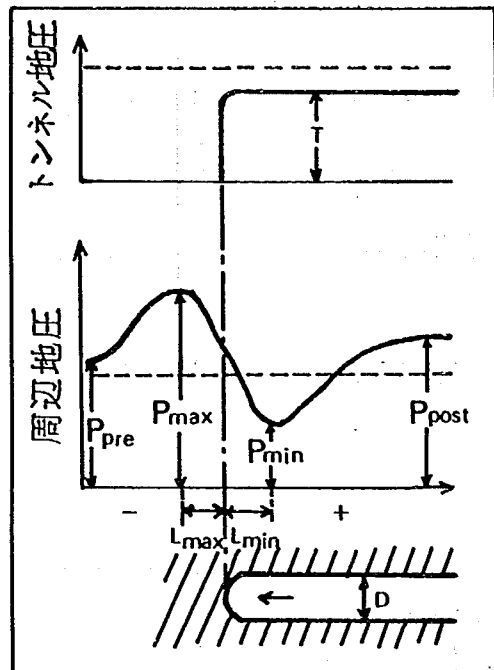


図-6 土圧の位置関数の模式図

表-4 基準化した土圧の値

実験 パラメーター	地山材料パラメーター	完 全 乾 燥 砂			かんてん	かたくり	ゼラチン土
	施工法パラメーター	トンネル	落 戸	ロックボルト	トンネル	トンネル	トンネル
トンネル土圧	$T/\gamma \cdot H$	1.14	0.87	0.80	0.91	0.91	0.00
トンネル 周辺土圧	$P_{max}/\gamma \cdot H$	1.06	*)	1.44	1.10	*)	1.94
	$P_{min}/\gamma \cdot H$	0.83		1.05	1.04		1.15
	$P_{pre}/\gamma \cdot H$	0.97		1.25	1.00		1.50
	$P_{post}/\gamma \cdot H$	1.02		1.22	1.06~1.17		1.34
	L_{max}/D	-0.83		-0.45	-0.22		-1.25
	L_{min}/D	+0.06		+0.67	+0.67		+1.75
基準土圧	$\gamma \cdot H$ (トンネル土圧/周辺土圧) g/cm ²	35/57.8	35/30.6	35/57.8	19.2/31.7	19.6/34.0	42/69.3
計測測点数	トンネル土圧/周辺土圧	15/6	2/3	2/2	2/1	4/4	4/4

(注) *) においては土圧の変化が図-6のようにならずあまり変化がなかった。

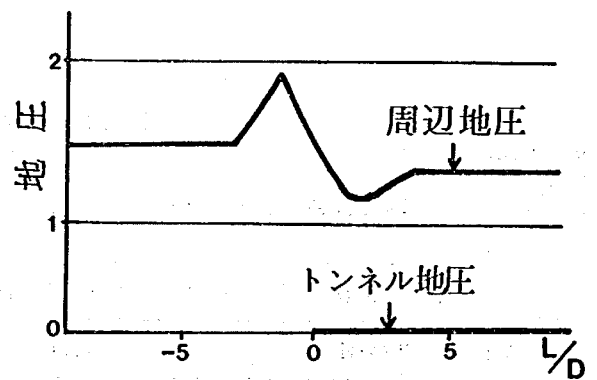
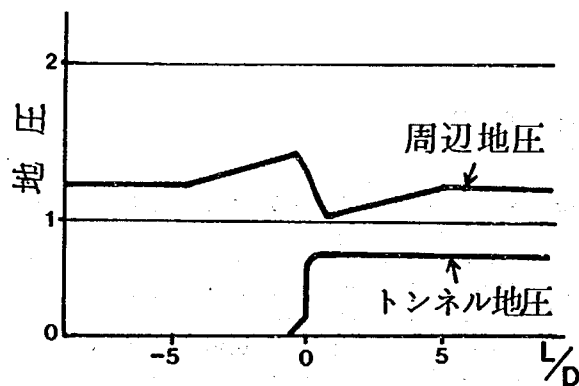
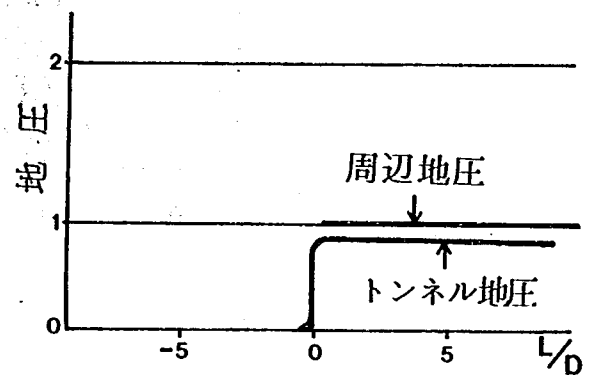
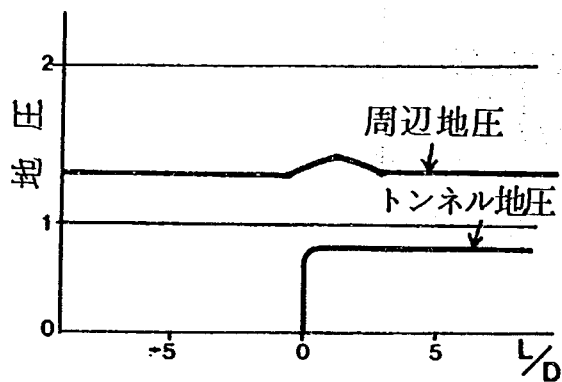
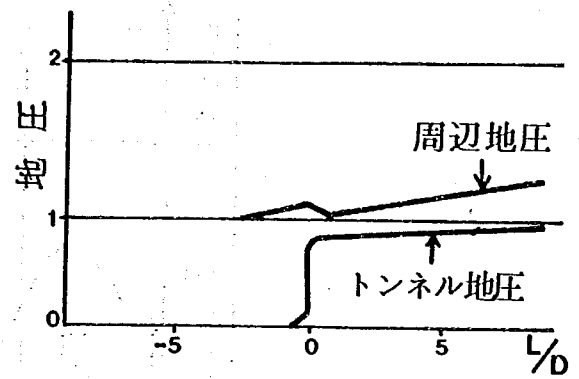
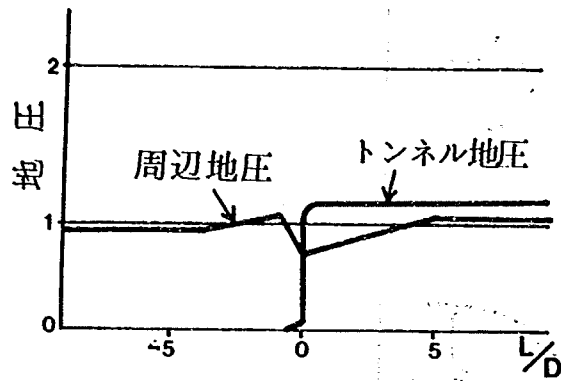


図-7 (左上) 砂のトンネル模型実験

図-8 (左中) 砂の落戸実験

図-9 (左下) 砂のロックボルト工模型実験

図-10 (右上) かんてんのトンネル模型実験

図-11 (右中) かたくりのトンネル模型実験

図-12 (右下) ゼラチン土トンネル模型実験

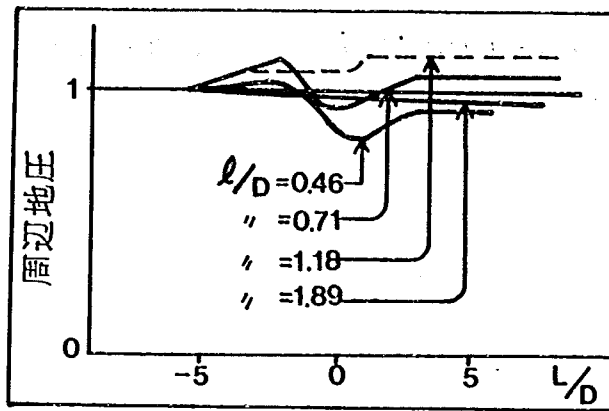


図-13 広域周辺地圧

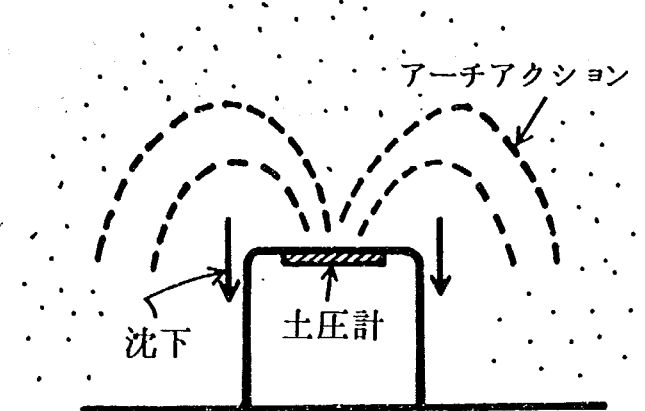


図-14 逆アーチアクション

4.2 広域周辺土圧

トンネル周辺のより広い地域についての地中応力の状態を乾燥砂実験のうち2つの実験ケースで調べてみた。 $\ell/D = 0.46, 0.71, 1.18, 1.89$ の地点の土圧が計測された(ℓ, D は4.1参照)。計測数が少なかつたため実験ケース間のバラツキが大きかったので P_{pre} をもとに基準化を行った。定性的には、両ケースとも同じ傾向を示した。そのうち1ケースを図-13に示す。

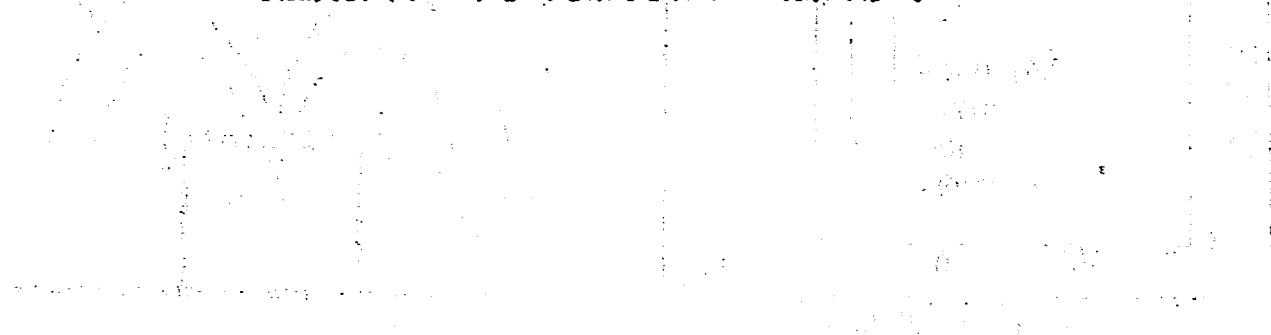
5 考察

土かぶり γ が $1.4D$ 程度の浅いトンネルにおいて、今回の実験で次のようなことが推定できる。

- (1) $C > 0, \phi = 0$ で流動の性質をもつかたくり(潜在的塑性領域がこれに相当すると思われる)は、ほぼ静水圧状態を示し、アーチアクションを生じなかった。(かたくりの実験より)
- (2) $\phi > 0$ の場合、アーチアクションが生じる。この現象を平均的に記述すると、掘削直前の地山、すなわち切羽から $1D$ ぐらい奥の地山で、鉛直方向地中応力は最大となり、切羽のすぐ横から $1D$ ぐらい後で最小となる。
- (3) 完全乾燥砂の実験でトンネル地圧が基準応力 $r \times H$ より大きくなるのは、トンネル側壁部周辺がゆるんだため、アーチ・アクションが逆にトンネルに不利なように作用したためと思われる(図14)。
- (4) ロックボルト工の模型実験や、側壁のゆるみの少ない落戸の模型実験では、トンネル地圧が基準応力 $r \times H$ より小さい。これによって、ロックボルトを用いるかまたは側壁をゆるませない施工法がある程度有効な施工法であることがわかる。
- (5) ゼラチン土の場合、切羽が自立し地山変位量が小さかったため、トンネル土圧は0となる。周辺土圧の最大値 P_{max} は他の実験と比較するとかなり大きい($P_{max}/P_{pre} = 1.29$)。
- (6) 図13よりトンネル周辺の広域地圧分布がわかる。側壁からの距離が $\ell/D = 0.46 \sim 0.71$ (記号については4.1参照)では、切羽が進行するにつれて地山中鉛直応力は初め増加し切羽が近づくにつれ減少し、切羽付近で再度増加に転じ、代表径の3倍程度の所で増加が止まり一定値となる。

これに対して、 $\ell/D = 1.18$ では切羽の進行に対して、地中鉛直応力は切羽付近まで単調増加しその

後一定になる。 $l/D = 1.89$ では、地中鉛直応力はあまり変化しない。こうしたことは、「Ⅱ・土かぶりの小さいトンネルの模型実験（その1）」でも確認されている現象である。



このように、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力は、最初は急激に増加し、その後急激に減少し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。

このように、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力は、最初は急激に増加し、その後急激に減少し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。

このように、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力は、最初は急激に増加し、その後急激に減少し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。

このように、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力は、最初は急激に増加し、その後急激に減少し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。

このように、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力は、最初は急激に増加し、その後急激に減少し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。この現象は、トンネルの長さが増えるにつれて、地中鉛直応力の分布が、最初は急激に変化し、その後急激に安定し、最後に一定になる。

IV. 急傾斜地におけるトンネルの模型実験

IV. 急傾斜地におけるトンネルの模型実験

1. 概説

トンネルを計画する際には、地形、地質の調査を行うのはもちろん断層の有無等も調査したうえで計画されるのが一般的であるが、最近では土地の利用度が高くなっているため、地形、地質の悪い場所にトンネルを建設せざるを得ないケースも少なくない。

当然のことながら、地質の悪い場所へ建設されるトンネルは、いくつもの問題を引き起こすことになる。

道路トンネル、鉄道トンネルに限らず、山岳トンネルを施工する際に問題となるのは、トンネルに作用する地圧の他に坑口等で特に問題となっている地すべりである。

やむを得ず地すべり地帯を何らかの形で通過、または地すべり地帯の周辺を通過するようなトンネルが計画されれば、施工する際には地すべり地帯に対してトンネルが影響を与えることになる。

トンネルが地すべり地帯を通過、または周辺を通過する場合には、トンネルの掘削の影響等によりそれまで安定していた地すべり地帯は不安定となり地すべり発生の可能性が高まる。一端、地すべりが発生するとトンネル構造物への損害はもちろん、他に与える損害も大きい。本研究は、トンネルの掘削と地すべりの関係について模型実験により明らかにしようとしたものである。

2. 実験方法

2.1 模型実験の概要

トンネルが地すべり地帯を通過する場合に考えられるパターンは、大きく分けて地すべり運動方向と平行に掘削されるケースと、地すべり運動方向とトンネルとが交わるケースとに分けられる。さらに、地すべり地帯とトンネルの位置関係から分類すると、地すべり地帯の引張部にトンネルが通過する場合と圧縮部にトンネルが通過する場合とに分けられる。以上のように、トンネルが地すべり地帯のどの部分に位置するかによって地すべり地帯へ与える影響度が異なっている。

今回の模型実験では、地すべり地帯をあらかじめ作製しておきトンネル掘削によって地すべりがどのように発生し、どのように影響を与えるかを3次元模型実験により調べた。模型実験はⅡで示した3次元模型実験で使った土槽（巾1.5 m、奥行1.0 m、高さ1.1 m）を用いて行った。地すべりが発生するまでのトンネル周辺の応力状態の変化、地表面の沈下等の変化を明らかにするために、今まで実際に発生した地すべり形態を考慮して行ったが、その概略図を図1に示す。今回行った模型実験ではすべり面をあらかじめ作成し、すべり地域（模型実験では地すべり地帯に相当する部分をすべり地域と呼ぶこととする。図-1参照）に強度の低い地山材料を用いて地山を作製したのちトンネルを掘削した。実験装置の制約上、すべり地域の運動方向に対して直交する場合のみを考え、斜面の傾きを45°とした。すなわち、45°の斜面上にすべり面を持つ地山内にトンネルを掘削していき、一掘進長(10cm)掘削した後にトンネル覆工を押し込む方法をとった。掘削はピックによる手掘りであり、掘削方法は全断面掘削工法とした。

計測はトンネル周辺の地山応力状態、地山中応力とすべり地域表面に設置した変位計による沈下につい

て行った。トンネル周辺の地山応力状態はⅡの実験装置で使用した計測方法をとった。すなわち、受圧板と称する鋼板を介して板下の荷重計によりトンネル土圧、周辺の鉛直地山応力を測定した。また、直径10cmの土圧計により地山中の応力を測定した。(図2)

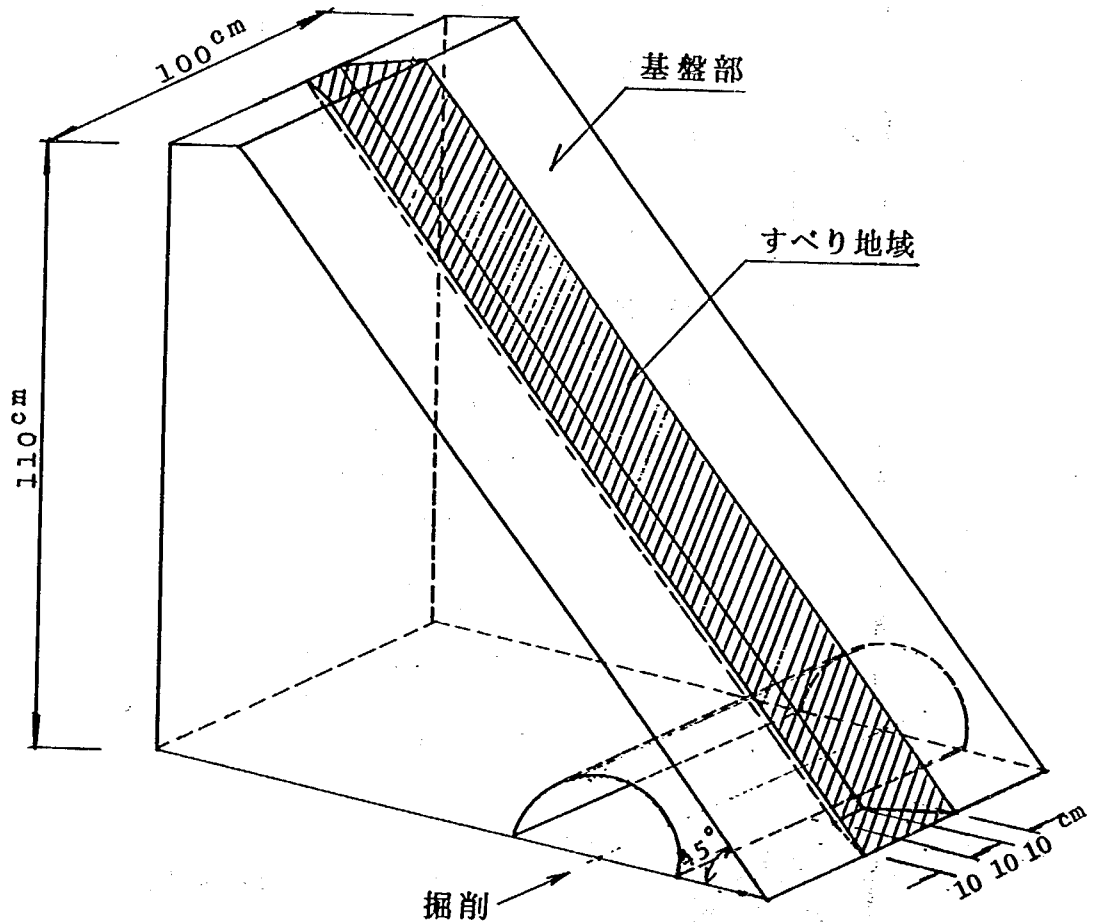


図-1 急傾斜地におけるトンネル模型実験の模式図

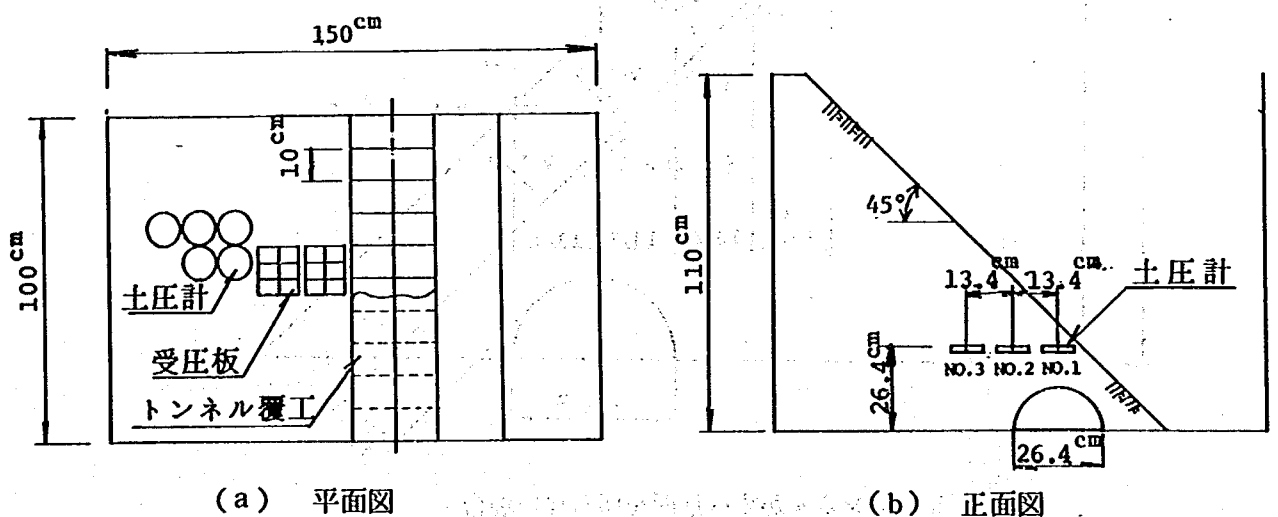
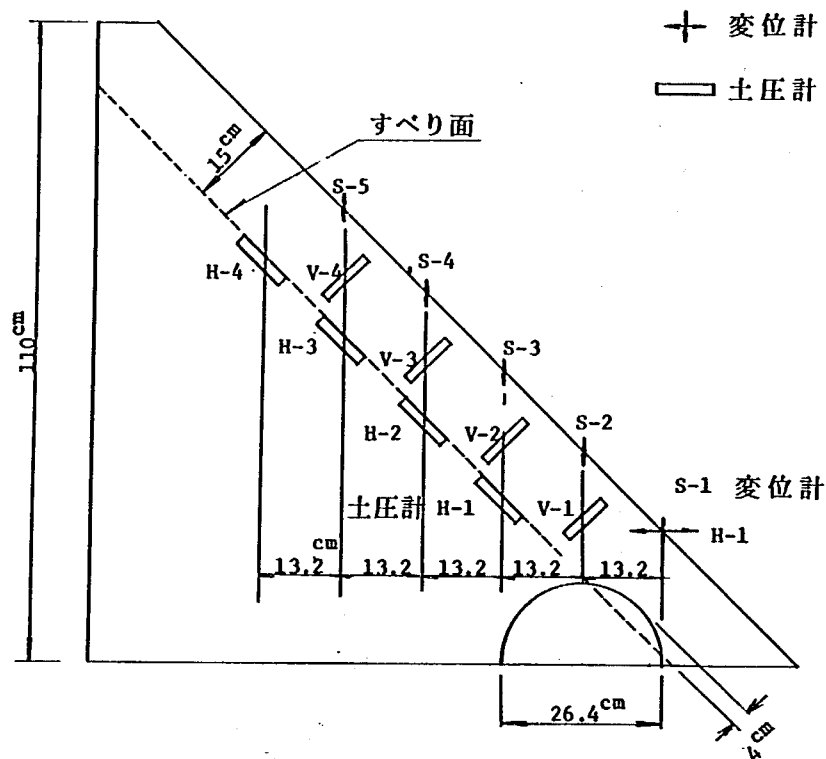
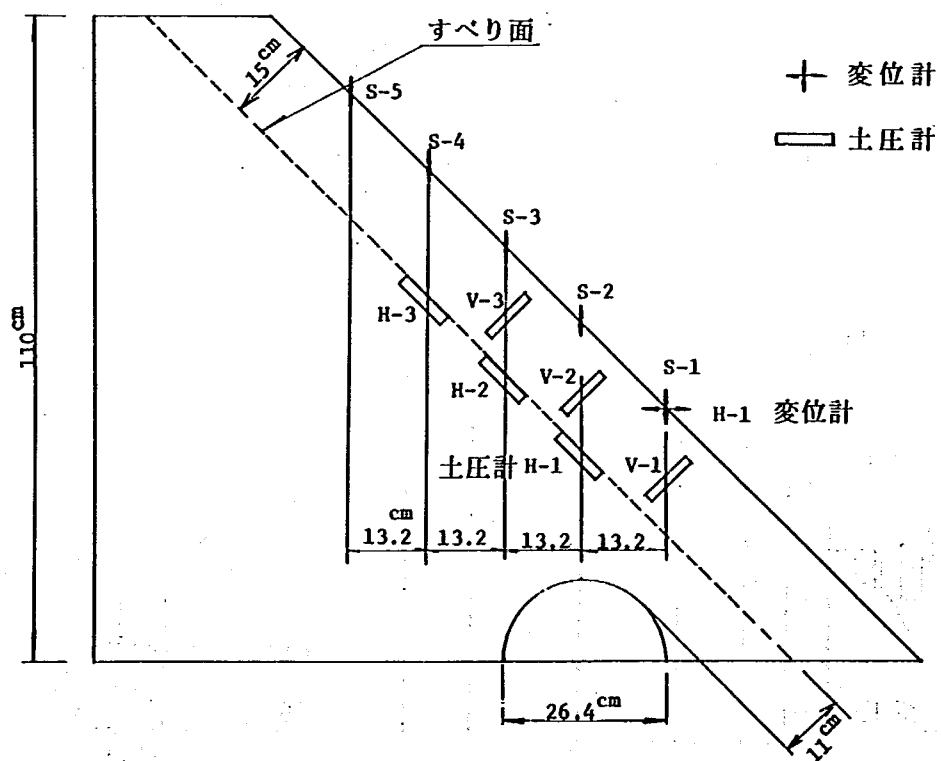


図-2 基盤部の計測方法

また、すべり地域における応力変化と沈下量測定方法を、図3（a），（b）に示す。すべり面に対して垂直に切った時のすべり地域断面図を図4に示す。



(a) トンネルがすべり面を切る場合



(b) トンネルがすべり面を切らない場合

図-3 すべり地域の計測方法

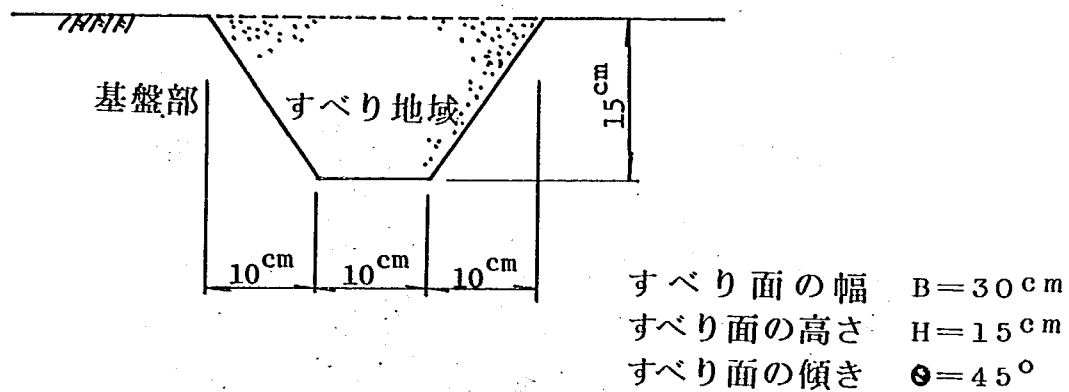


図-4 すべり地域の断面図

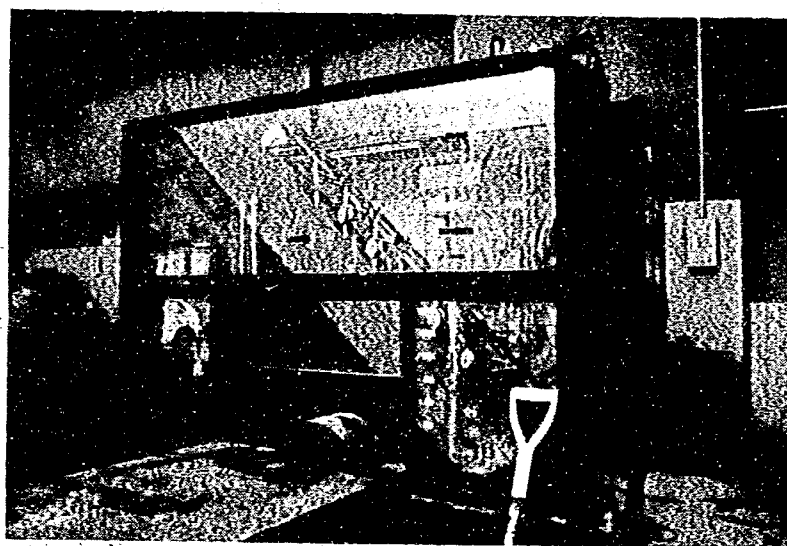


写真1 実験装置全体

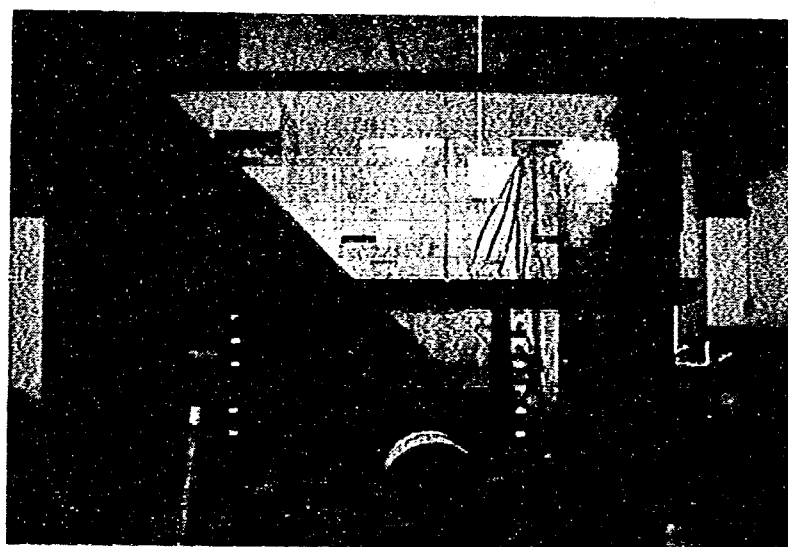


写真2 実験装置 (正面)

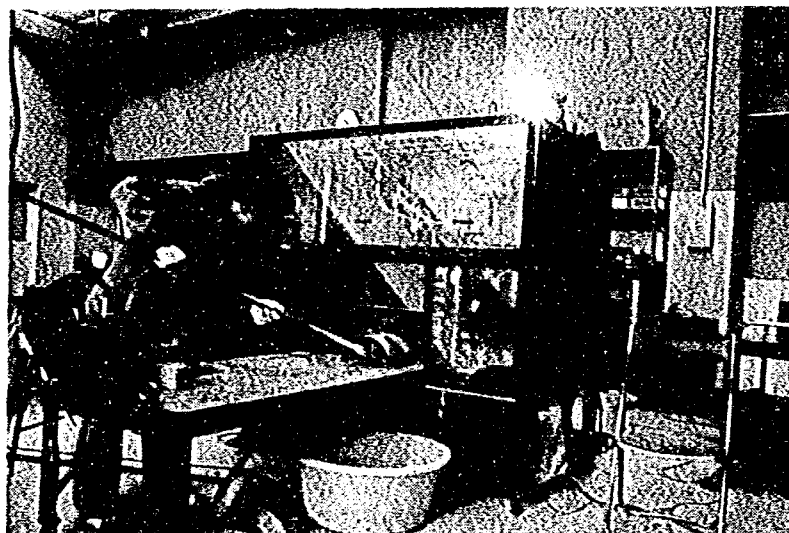


写真3 ピックにより掘削

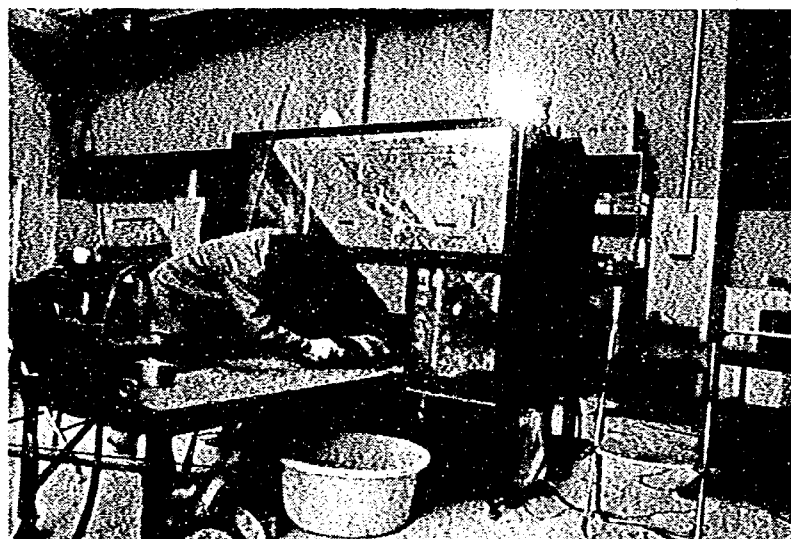


写真4 ずりの排出

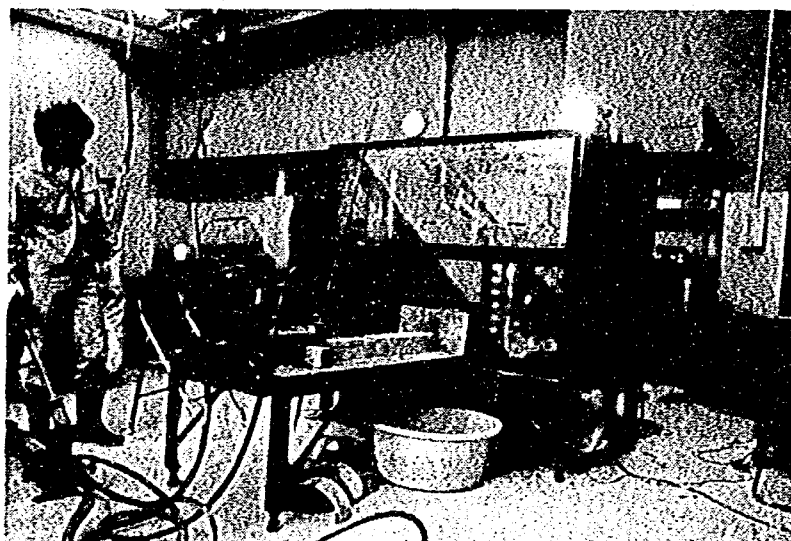


写真5 ジャッキによりトンネル覆工の押込み

2.2 実験地山材料

実験に使用した材料は、基盤部とすべり地域で強度の違うようにした。基盤部についての材料は、川砂を主体として石こう、水を混合させ、ある程度の強度を有した材料として使用した。その配合は重量比で表1に示すとおりであり、一軸圧縮試験結果より1日後の圧縮強度が約0.15 kg/cm²である。実験は材料配合後、1日後に行った。

表-1 基盤部の地山材料配合

砂	石こう	水
1	0.03	0.1

また、すべり地域の材料には、実験ケースにより異なるが、基盤部と同一の材料、Ⅱの3次元模型実験で使用した普通砂（乾燥砂に水を加え含水比2%としたもの）、また、乾燥砂を含水比7%にした材料の3種類の材料を使用した。この3種類の材料で最も強度の低い材料は普通砂の含水比2%であり、その地山物性値は内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ 、粘着力 $C = 10 \text{ gf/cm}^2$ 、単位体積重量 $\gamma = 1.70 \text{ gf/cm}^3$ である。この材料は斜面 45° を持ったすべり地域に盛土できる最も低い強度に近い材料である。実際、各所で発生している地すべりは、すべり面を境として地すべり地帯を構成している材料は強度の低い場合が多い。

2.3 実験ケース数

実験は、基盤部の材料を変化させずにすべり地域の材料と、トンネルと地すべり地域との位置を変えた実験を行った。実験ケースについてまとめたものを表2に示す。

表-2 実験ケース

実験No.	実験地山材料		すべり地域とトンネルとの位置	計測方法
	基盤部	すべり地域		
1	砂：石こう：水 (1 : 0.03 : 0.1)	基盤部と同一	すべり地域とトンネルが直交して切る。	図3 (a) による
2	"	普通砂 7%	"	"
3	"	普通砂 2%	"	"
4	"	普通砂 2%	すべり地域下をトンネルが直交する。	図3 (b) による

3. 実験結果

3.1 トンネル掘削による地すべり地域への影響

図3 (a), (b) で示したように土圧計 (すべり面に対して平行に3個所, すべり面に対して垂直に2個所) によりトンネル掘削によって生じるすべり地域の地山中応力の変化を図5 (1)~(4)に示す。図中のH-1~4はすべり面に対して平行に設置した土圧計であり, V-1~4はすべり面に対して垂直に設置した土圧計である。結果として全ケースともすべり地域はすべることはなかったが, 図5に示す実験結果から推察するとすべる直前にまで至ったことが言える。

トンネルがすべり面を切る場合と切らない場合のすべり地域内の応力変化について比較すると, すべり面に平行な土圧値は両者共に変化はなかった。すべり面に垂直に設置した土圧値は, すべり面をトンネルが切る場合は切羽前方より急激に応力が低下しているが, すべり面をトンネルが切らずにすべり地域下を通過する場合は切羽前後の応力変化はみられない。

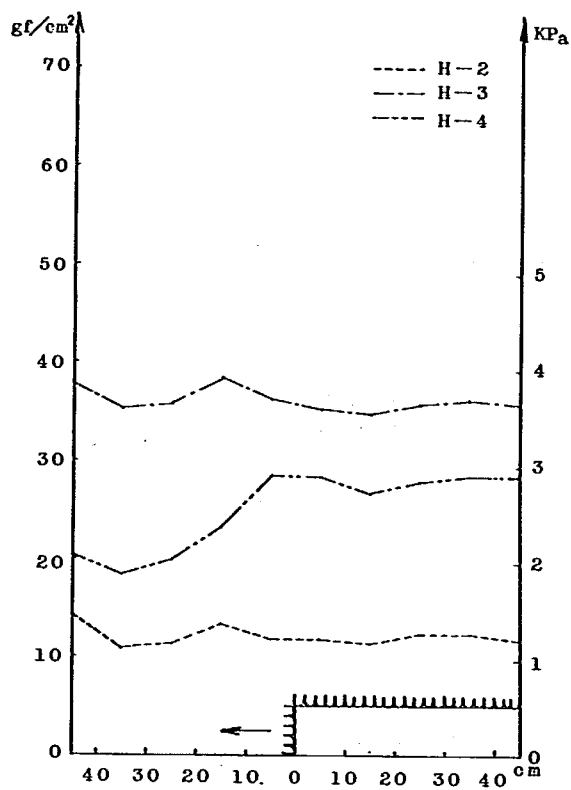
通常地すべりの安定計算ではすべり面上の応力だけが問題とされるが, 上記のような実験結果は, 安定計算のさい, すべり面上の応力だけでなく, すべり地域内の応力についても考慮する必要があることを示唆している。

今回の実験では比較的強度のある材料を基盤部に使用したため, 初期応力状態から応力の再配分によって部分的に地山が劣化, 破壊したとしても塑性域には達せず, 地山のゆるみを抑制したため図5の結果となったと考えられる。実験No.4では, トンネル掘削によってすべり地域にはほとんど影響を及ぼさなかった。

実験No.3において, すべり地域にトンネル切羽が位置した時に陥没が生じる結果となった。陥没はトンネル中心線付近を中心としてすべり地域に直径約20 cm程度であった。この時の陥没前後における切羽付近の地山応力の変化を図6に示す。横軸はトンネル中心からの距離を示し, 縦軸には陥没前後の地山応力の比を表わす。図6によれば, 本実験での陥没による影響範囲はせいぜい1.2 Dくらいまでである。

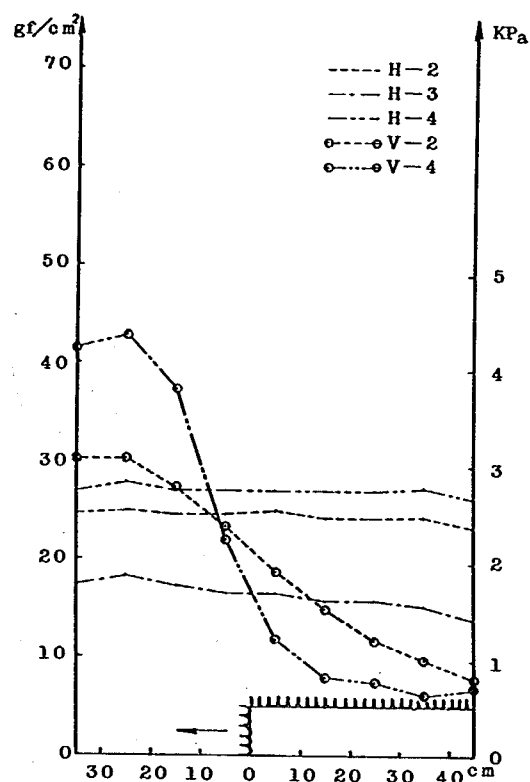
3.2 トンネル切羽付近の応力状態

実験装置底部の荷重計, 土圧計によりトンネル切羽付近の地山応力について図7 (1)~(4)に示す。これは初期地圧を1として各掘削段階ごとに計測された応力の比で表わしたものをまとめた図である。図中でトンネル中心線より離れるにしたがって鉛直地山応力の絶対値は高くなる (45° 斜面中にトンネル掘削するため)。図7より, 実験のほとんどがトンネル切羽後方の側壁部で初期地山応力に比較して増加している。また切羽前方の地山応力のほとんどが切羽直前で増加していることがわかる。これは, 掘削によって地山が弾性的挙動を示していると考えられる。本実験で使用された基盤部の材料は比較的強い材料であり塑性域にまでならなかったこのからも言える。また, トンネル地圧についても土かぶり高が少なかったこと及び上記の理由から, ほとんど変化が生じなかった。



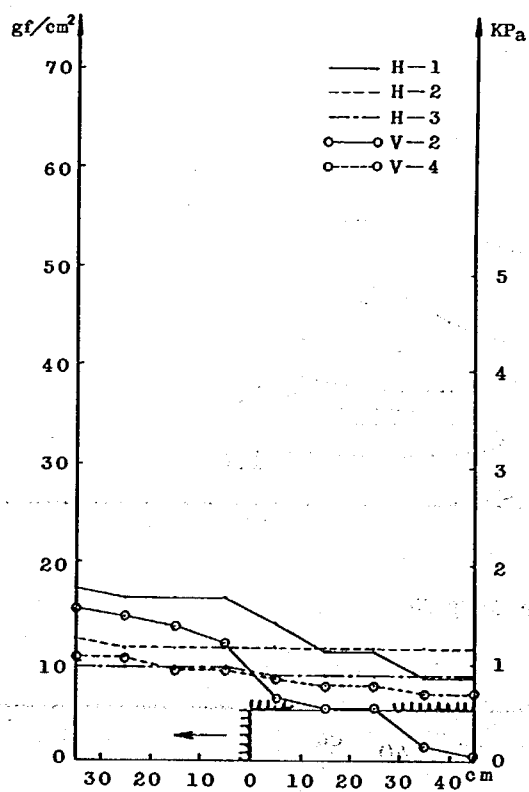
実験 No 1

図-5 (1) すべり地域での応力



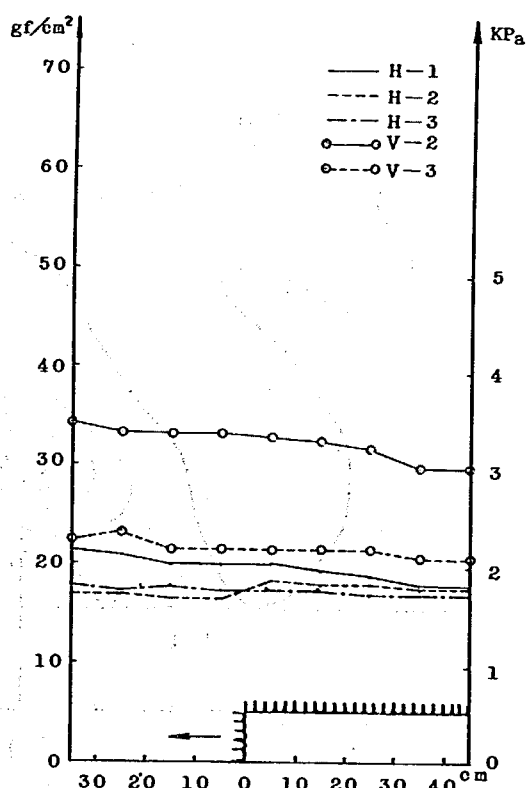
実験 No 2

図-5 (2) すべり地域での応力



実験 No 3

図-5 (3) すべり地域での応力



実験 No 4

図-5 (4) すべり地域での応力

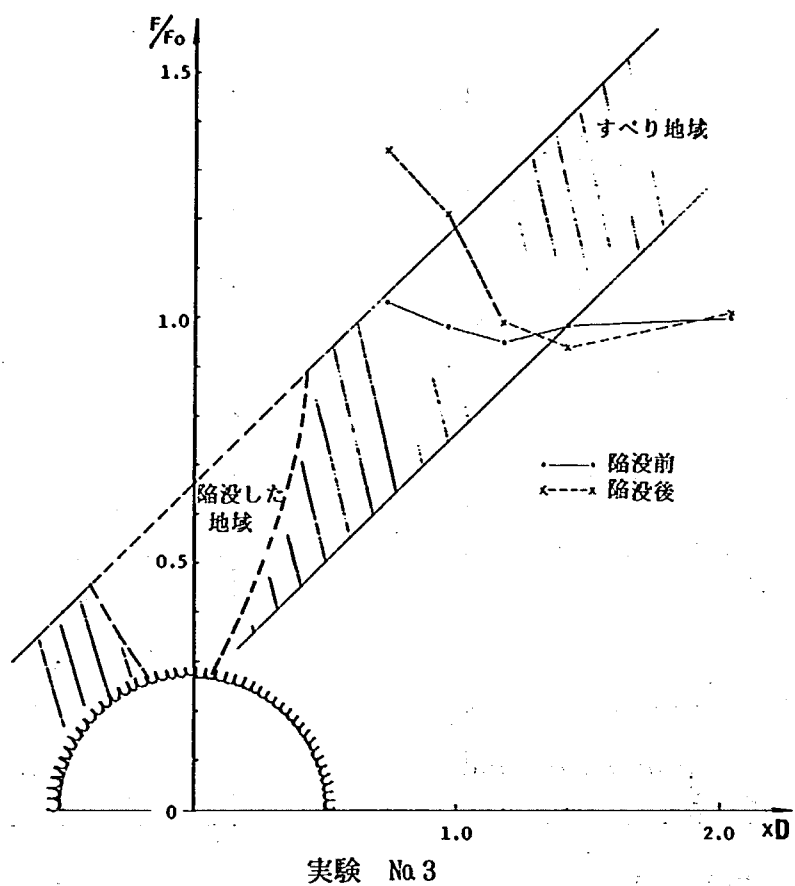
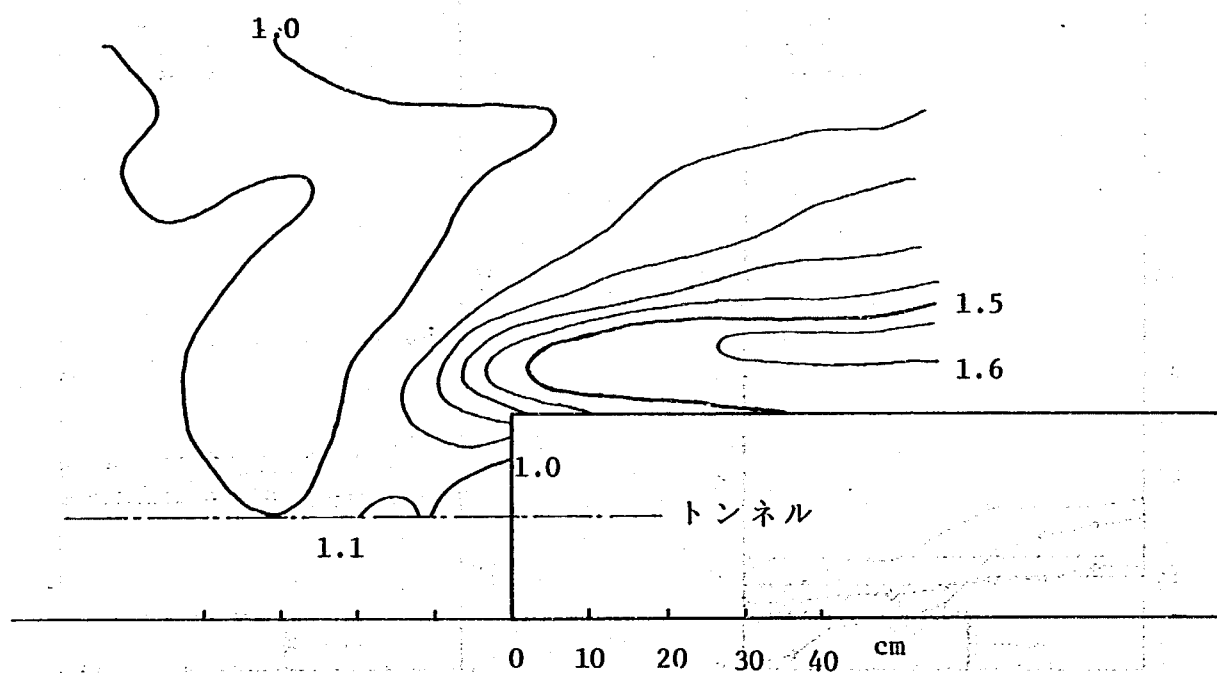
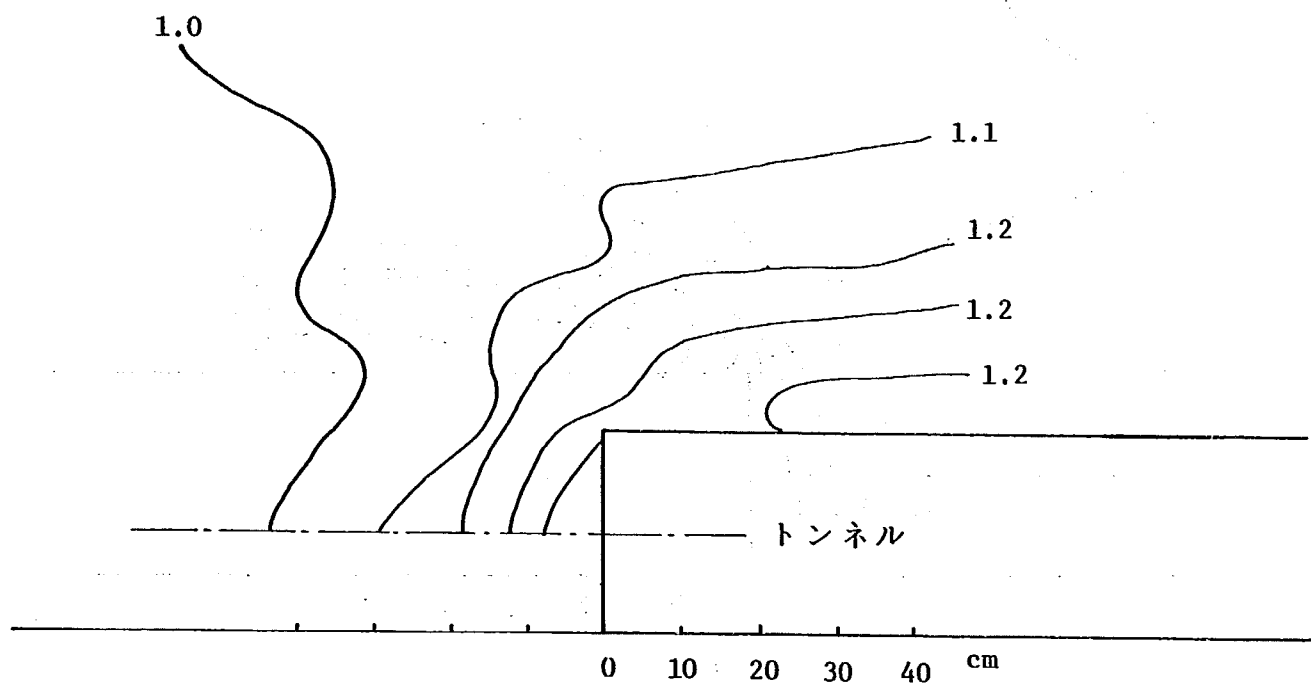


図-6 陥没前後における切羽付近の応力変化



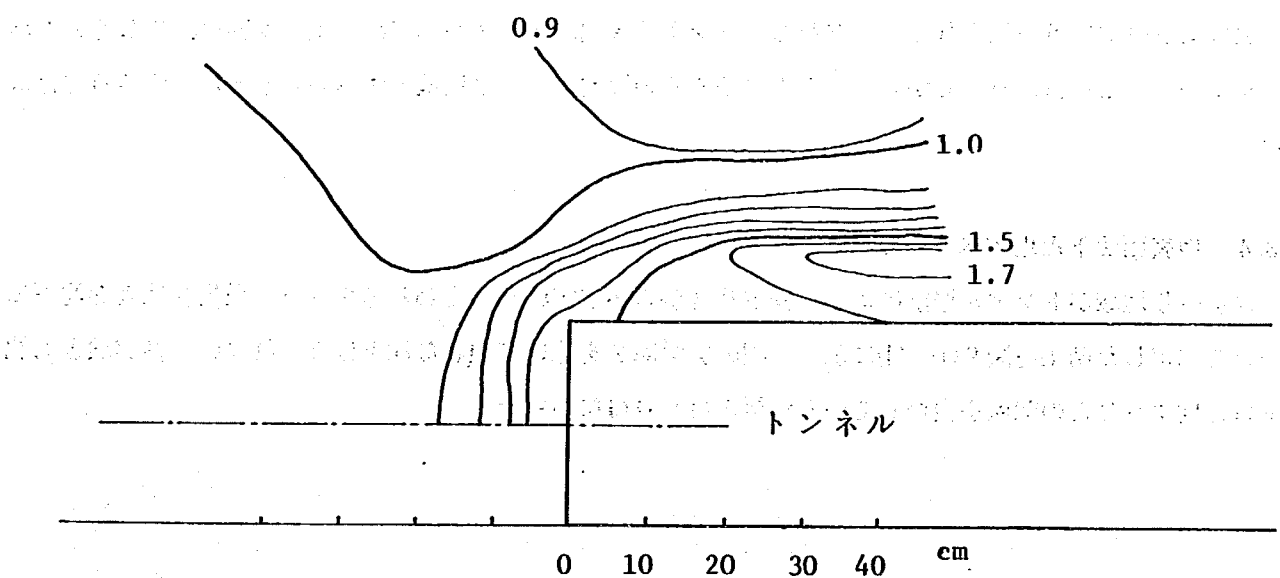
実験 No 1

図-7 (1) 地山の鉛直応力分布の平面図



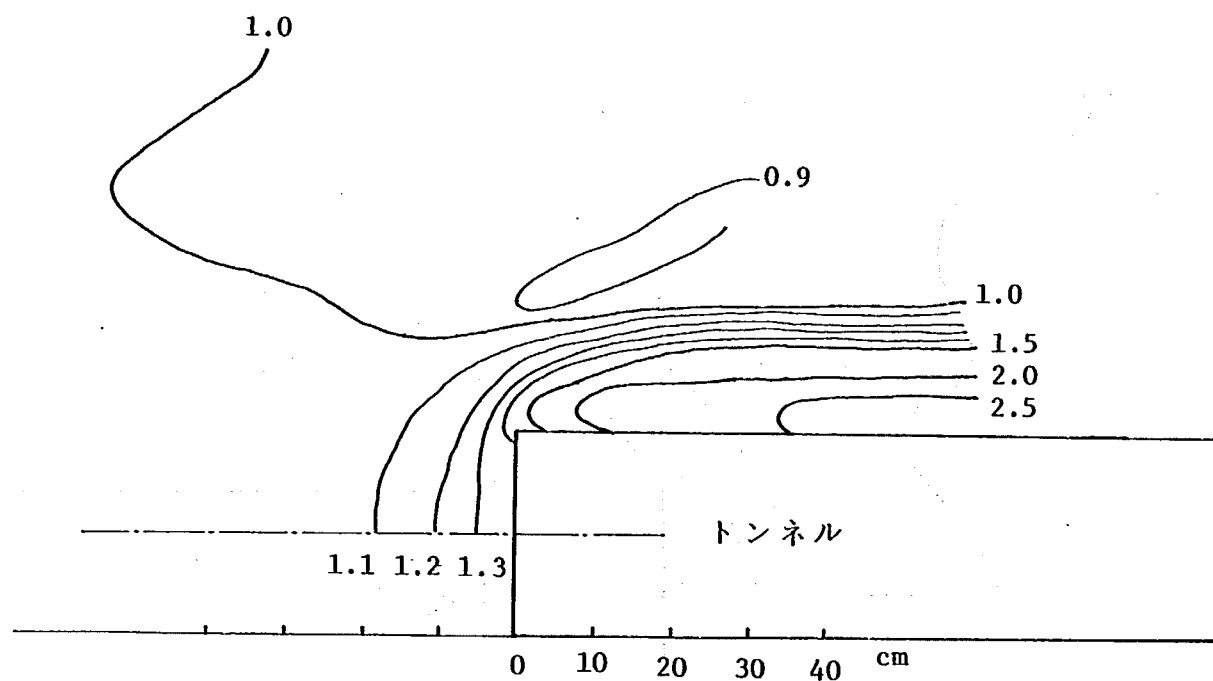
実験 No. 2

図-7 (2) 地山の鉛直応力分布の平面図



実験 No. 3

図-7 (3) 地山の鉛直応力分布の平面図



実験 No 4

図-7 (4) 地山の鉛直応力分布の平面図

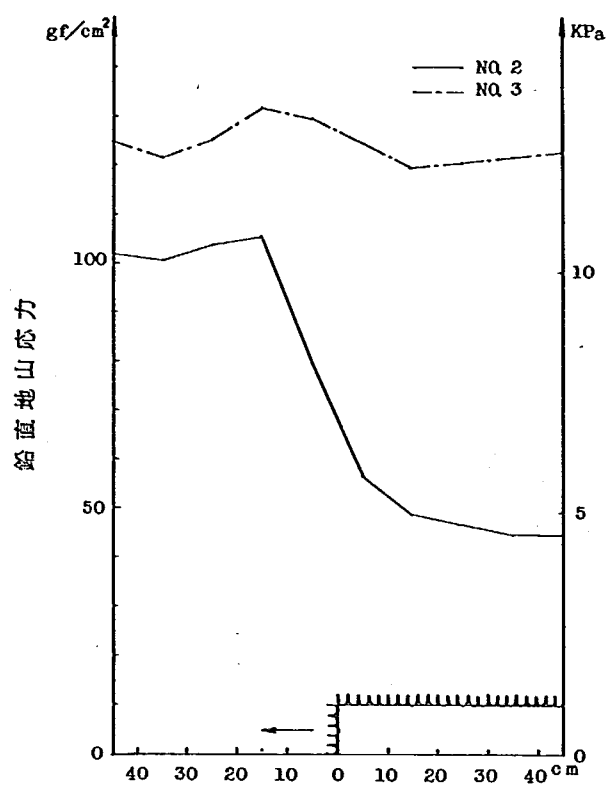
3.3 トンネル掘削による地中応力の変化

トンネル天端より上方 $D/2$ の距離の位置に配置した土圧計により計測された結果を図8(1)~(4)に示す。図中のNoは土圧計番号であり数字が大きくなるに従って、 $D/2$ ずつトンネル中心からの距離は遠ざかる。

(図2 (b) 参照)。図より、どの実験においてもトンネル切羽が進行することによってNo 1, No 2の土圧値は切羽直前で低い値となる。すなわち、トンネル天端、トンネル側壁部直上の範囲は、少なくともゆるんでいることが言える。しかしこの地山のゆるみの程度はすべり地域をすべらせるほどのゆるみではない。

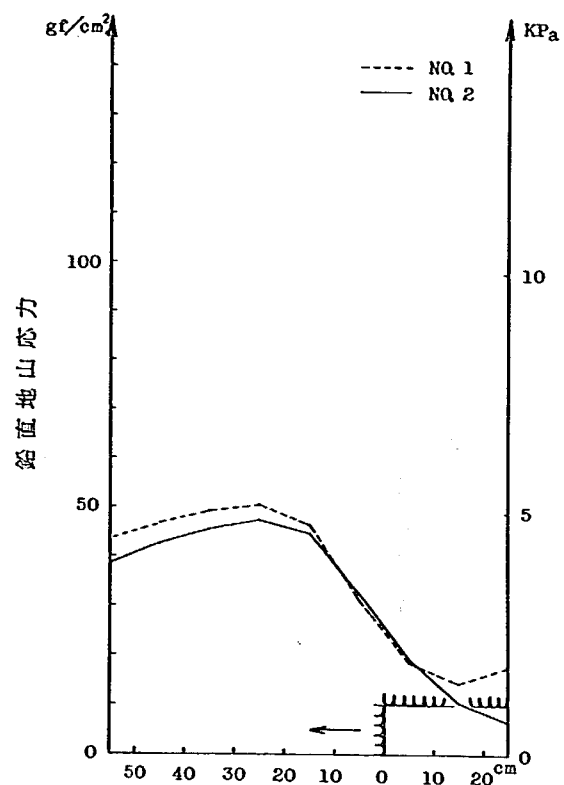
3.4 地表面沈下と地すべりの関係

地すべり地域がトンネル掘削によって安定状態から不安定状態へ変わる地すべりの徴候を地表面沈下について測定した結果を図9(1)~(4)に示す。図の実験No 2を除いて顕著な沈下はみられない。各実験とも沈下量と地すべりとの関係を表わしている資料とはなり得なかった。



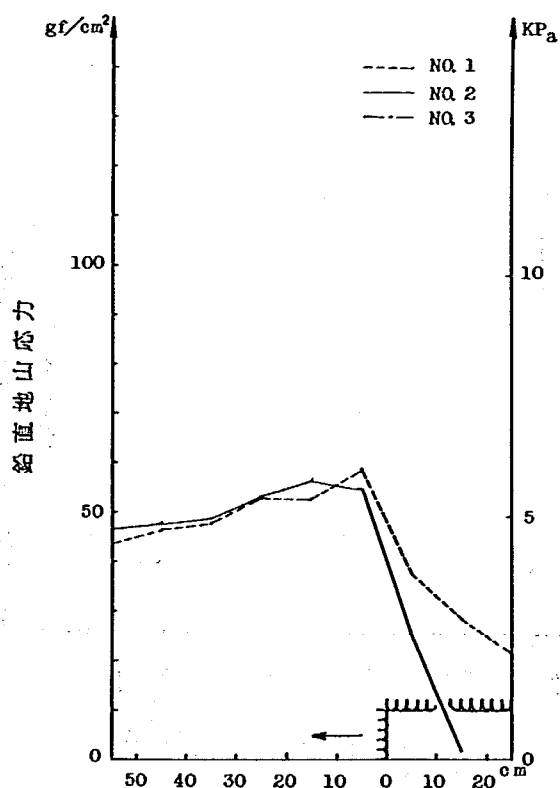
実験 No. 1

図-8 (1) 地中応力の変化



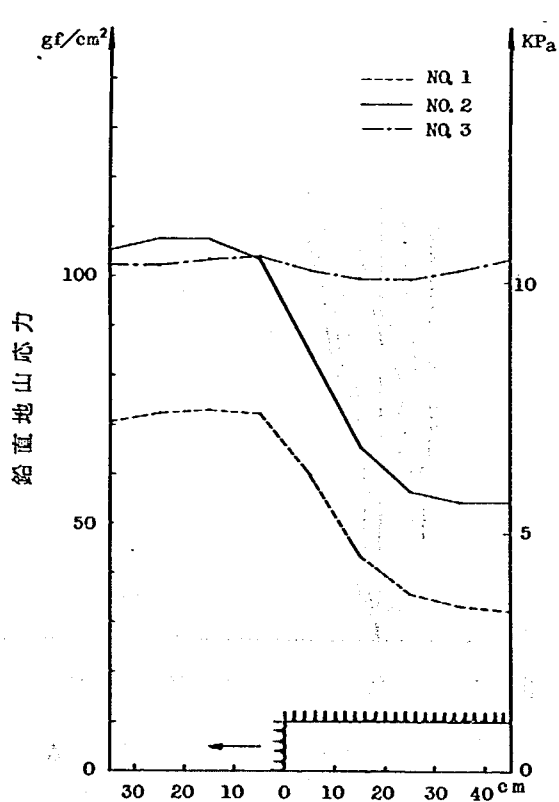
実験 No. 2

図-8 (2) 地中応力の変化



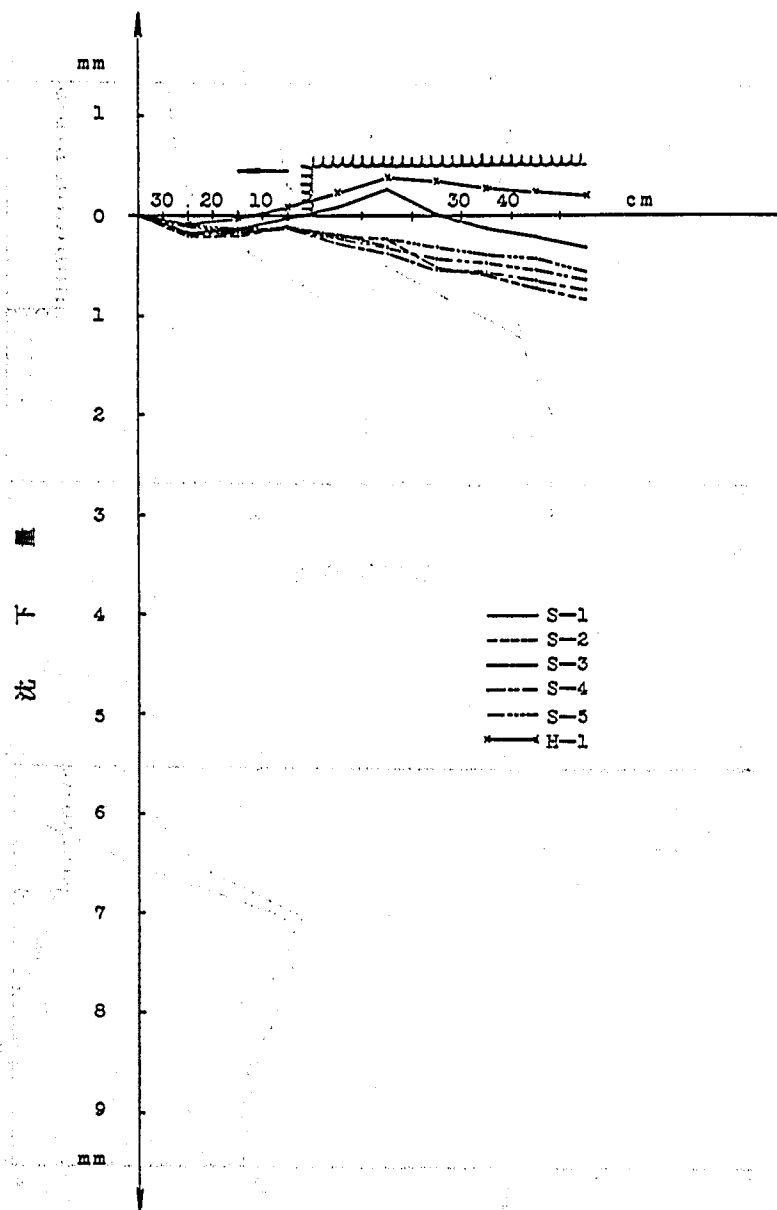
実験 No. 3

図-8 (3) 地中応力の変化



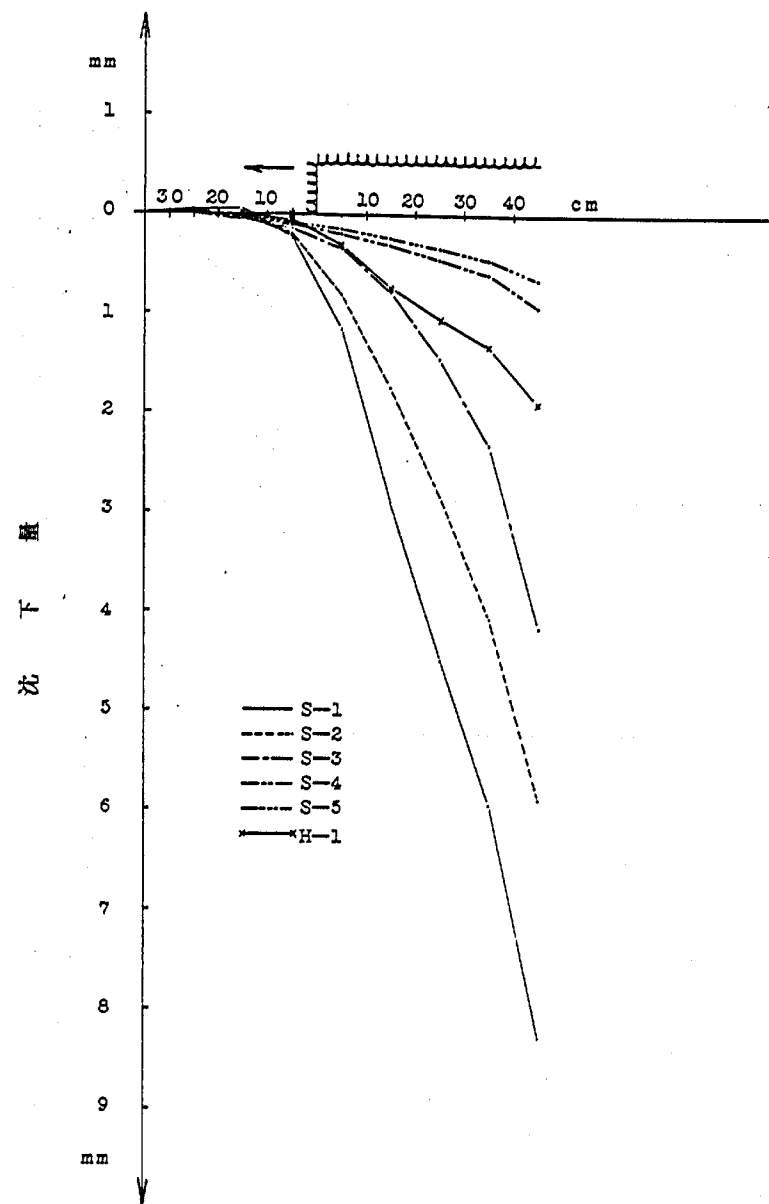
実験 No. 4

図-8 (4) 地中応力の変化



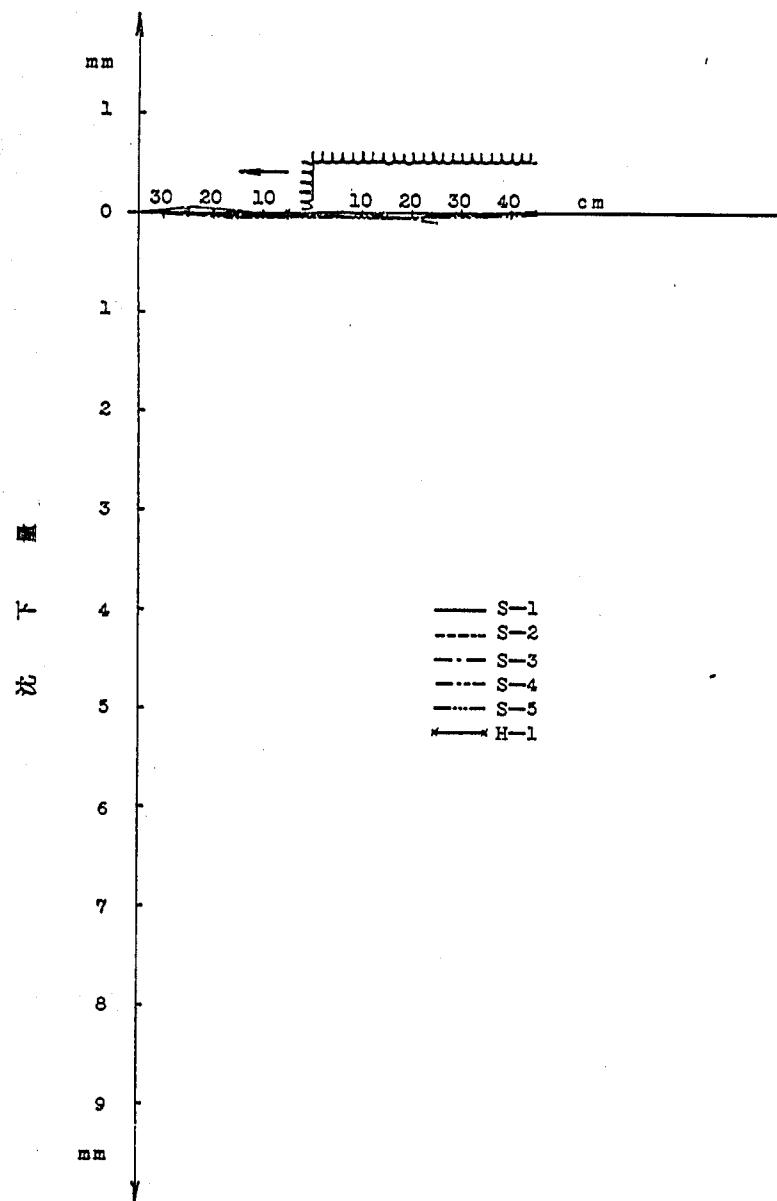
実験 No. 1

図-9 (1) すべり地域表面での沈下量



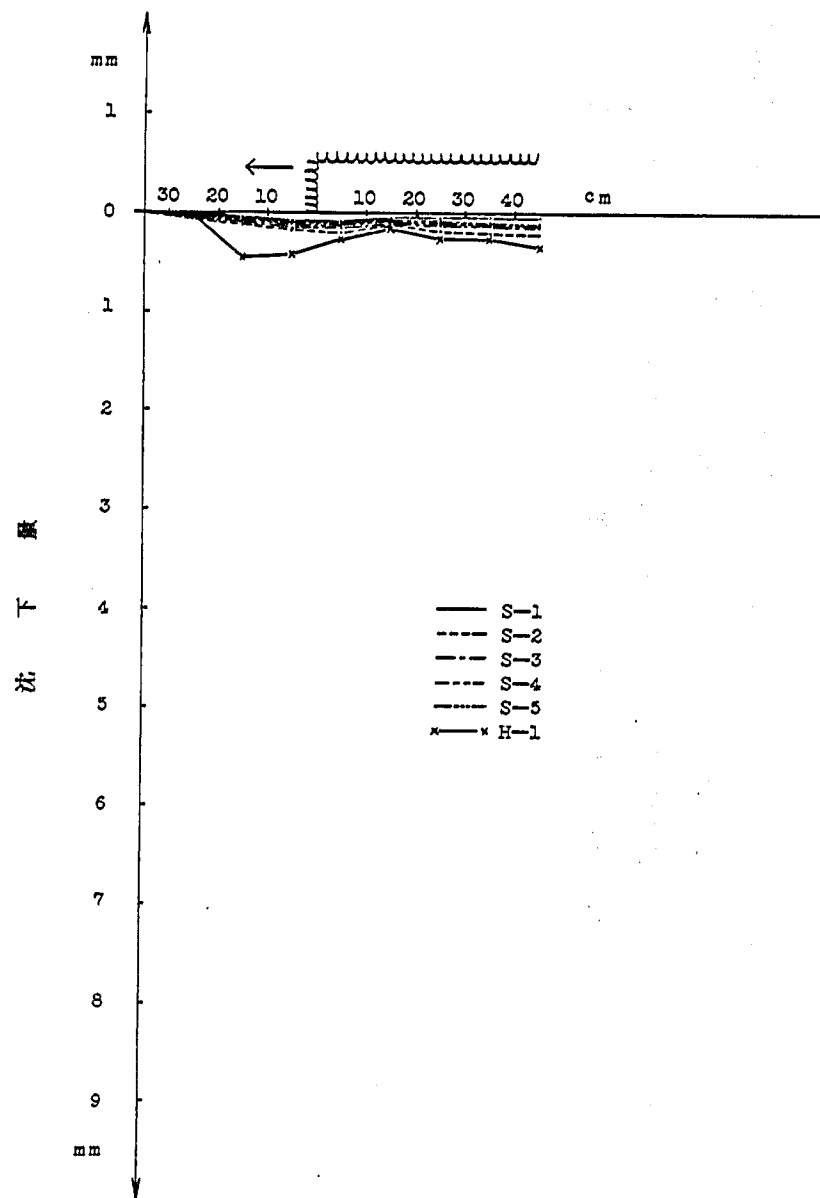
実験 No. 2

図-9 (2) すべり地域表面での沈下量



実験 No. 3

図-9(3) すべり地域表面での沈下量



実験 No. 4

図-9(4) すべり地域表面での沈下量

4. まとめ

急傾斜地におけるトンネルの模型実験により、地すべり地帯にトンネルが施工される場合、安定計算をする上ですべり面に働く応力だけでなく、すべり地域内の応力が問題となることが明らかにされた。斜面トンネルに対する模型実験については、実験回数が少なくトンネルと地すべりの関係を正確に把握することができなかったもので、今後、実験回数、実験ケースを重ねてこれらの関係を明らかにすることが望まれる。

V. 土かぶりの大きいトンネルの 模型実験 (その1.)

1. 概説

トンネルを掘進中に、膨張性地山に遭遇すると、標準的な支保型式では、過大な変形をよぎなくされるかまた崩壊してしまう。こうした場合、次のようなことが問題となる。すなわち、(1)どの程度の支保を建増すか、(2)どの程度の地山の押し出しを見込めばよいか、(3)地山の押し出しはいつ止まるか、または、どうやれば止められるか、などである。これらの問題に対して解答を出すにはまず膨張性地山の機構、特に、(1)切羽付近での応力解放に伴う周辺地山内の応力の変化、(2)トンネル地圧、地山押し出し量、周辺地山の降伏領域などの関係を明らかにする必要がある、こうした点を調査することを本実験の主たる目的とする。このため、トンネル掘進の3次元模型実験を行うこととしたが3次元実験手法には、(1)トンネル切羽付近の応力再配分の状況を把握できる。(2)トンネル施工の状況をより現実によく相似できる、などの利点がある。

膨張性地圧の作用する形態は、地山の潜在内部エネルギーと地山の強度、変形特性と関係していると考えられるので、これらについても調査する。膨張性を判定する指標の1つに地山強度比がある。地山強度比は一般に次式で与えられる。

$$\text{地山強度比} = \frac{q_u}{r \cdot H}$$

ここで q_u = 地山の1軸圧縮強度、 r = 地山の単位、体積重量、 H = 土かぶり高である。この指標では、地山強度特性を1軸圧縮強度で代表させている。しかし、文献I—4) P 373では土かぶりの大きい潜在エネルギーの大きい場合、内部摩擦角の方が1軸圧縮強度よりもより重要な強度特性と考えている。そこで、地山強度比が同じで内部摩擦角の異なる2種類の地山について、トンネル模型実験を行い、地山の内部摩擦角の違いによって、トンネル地圧、切羽周辺の応力状態がどのように変化するかについても調べることにした。

2. 実験方法

2.1 実験装置

(1) 模擬地山載荷試験装置

模擬地山載荷試験装置は、図—1に示すように、X軸加圧力およびY軸加圧力が600t、Z軸加圧力が500tで、各方向のストロークが300mmのものである。

(2) 覆工板押込み装置

覆工板押込み装置は、図—2に示すように、押込みストロークが1200mm、押し込み速度が25～100 mm/minの範囲で可変できるものである。

(3) 覆工板

覆工板は、図—3に示すように、(a)先端にエッジのついた覆工板(1個)、(b)普通の覆工板(8個)(c)荷重計が組み込める構造になっている覆工板(2個)の3種類がある。各覆工板の断面は直径50cmの半円形であり、長さは20cmで、材質はステンレス製である。

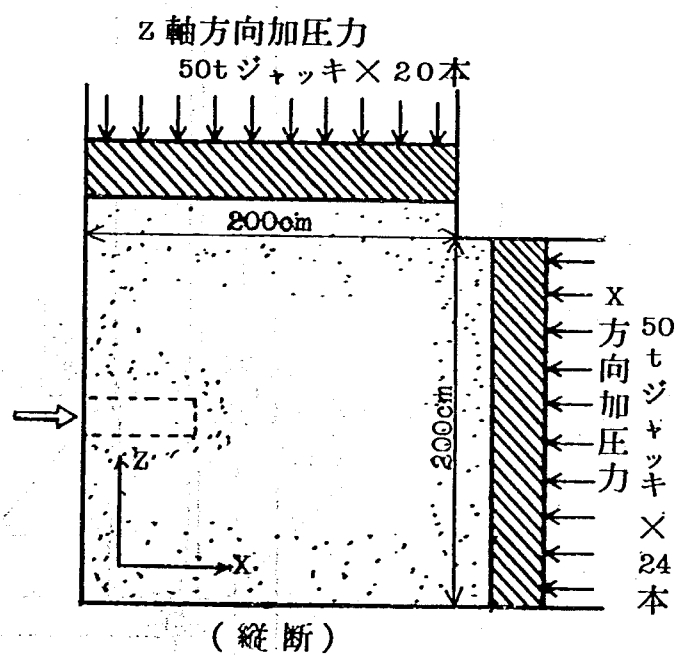
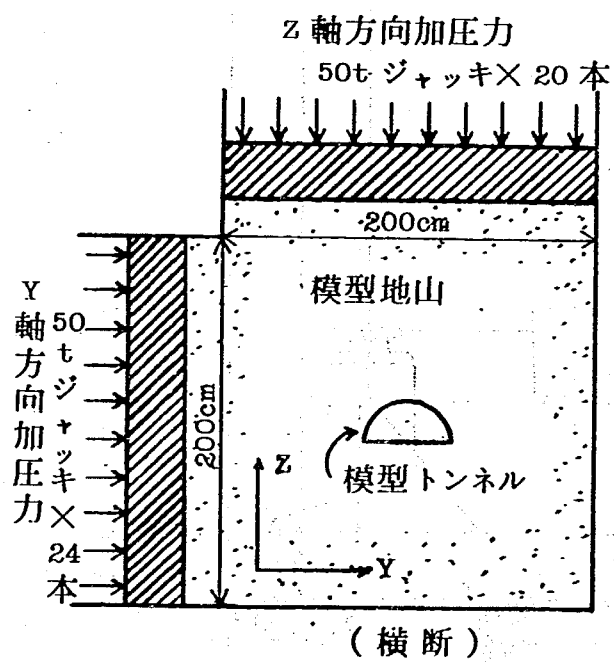
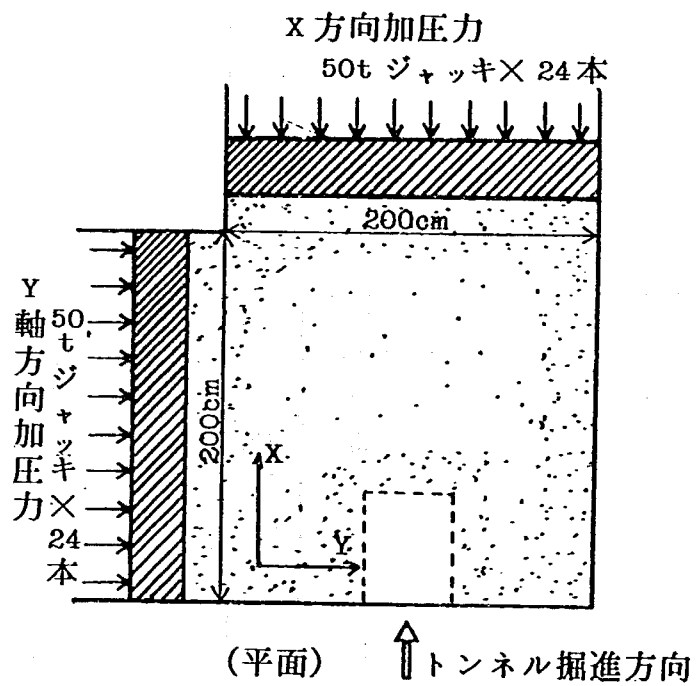
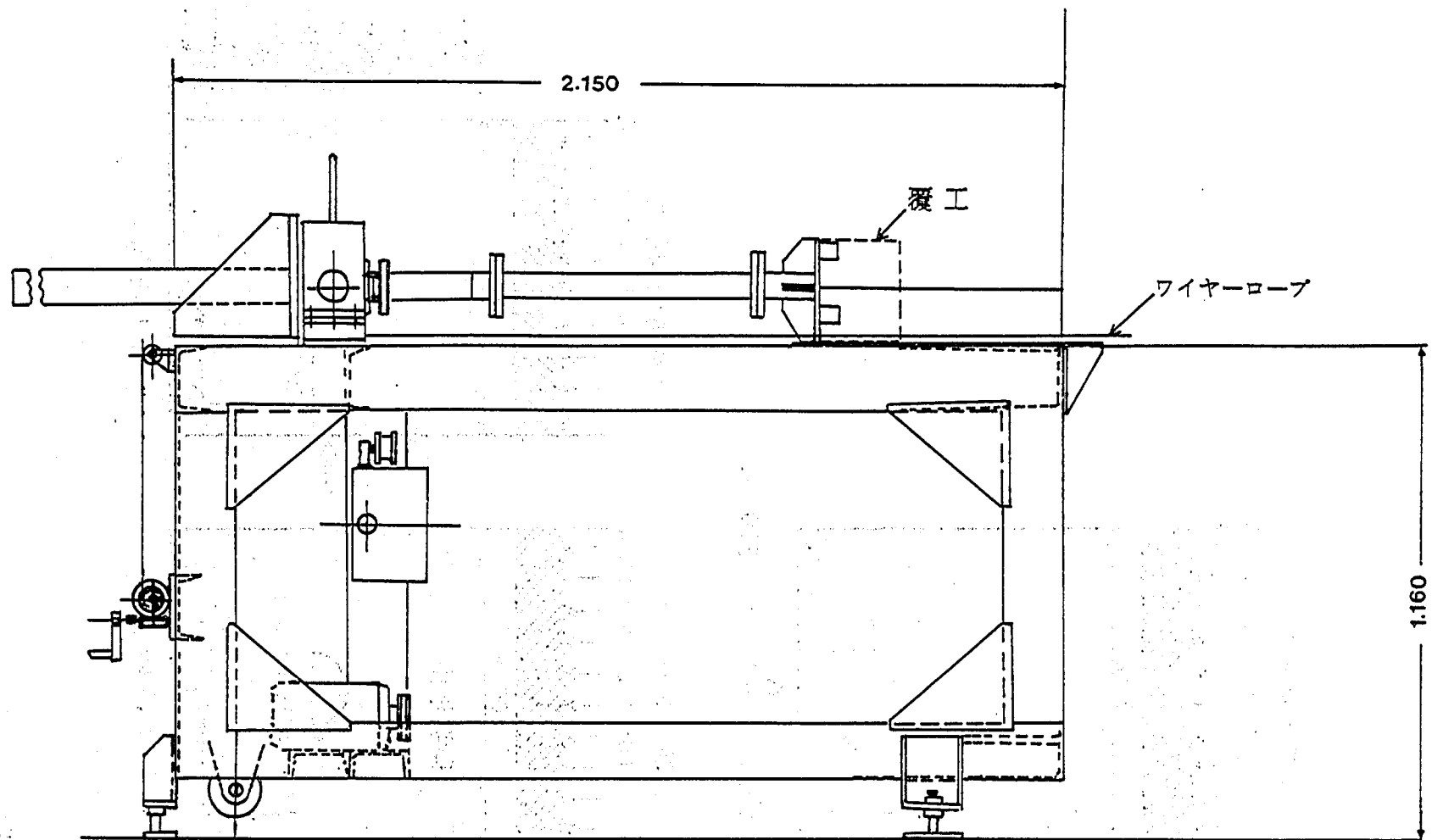
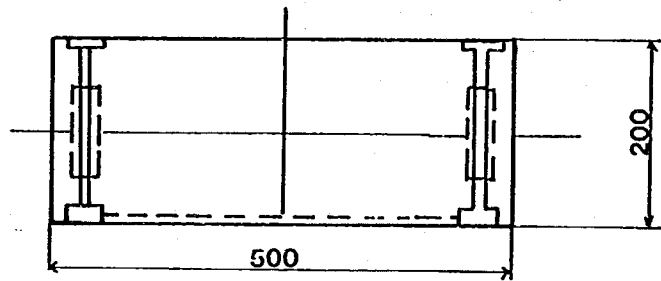
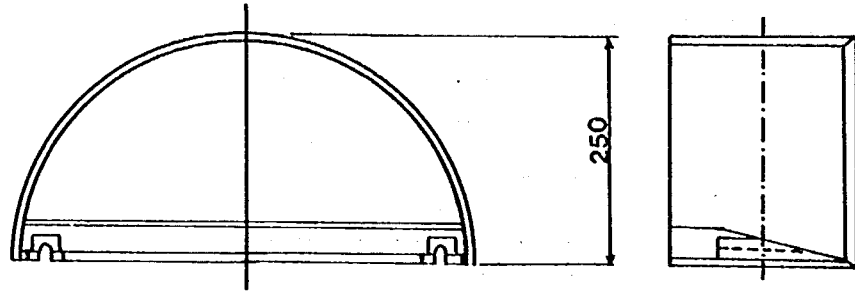


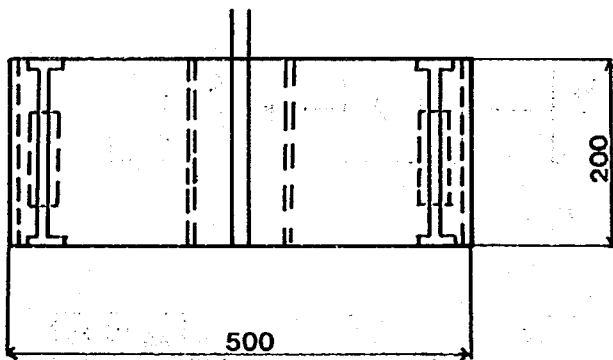
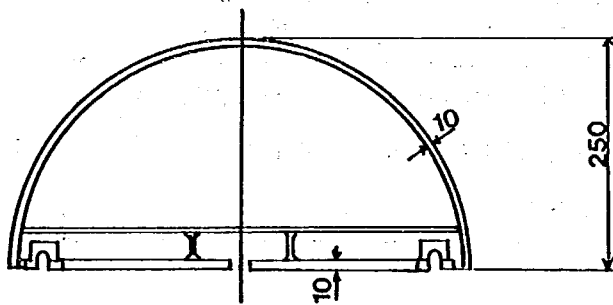
図-1 模擬地山載荷試験装置の模式図 (縮尺1/40)



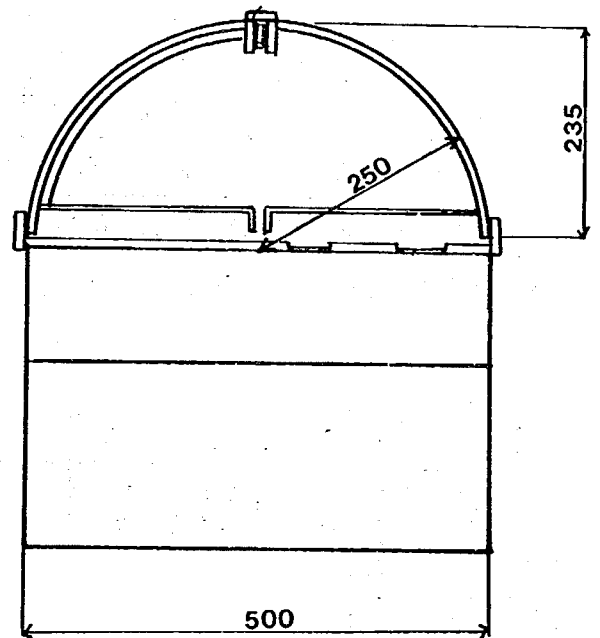
図一2 覆工板押込み装置



a) 掘進先端の覆工模型トンネル



b) 模型トンネル覆工

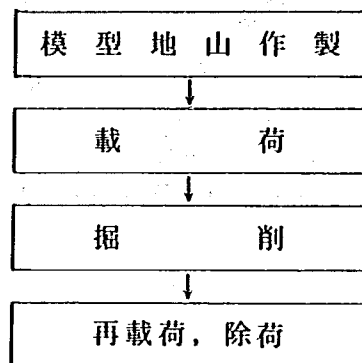


c) 模型トンネル測定用覆工

図—3 覆工板

2.2 実験工程

実験は、図－4 に示すような手順で行った。



図－4 実験の手順

(1) 模型地山の作製

模型地山は、予備実験の結果にもとづいて図－5 に示すような手順で作製した。地山材料の配合、および締固め基準は表－1 のとおりである。

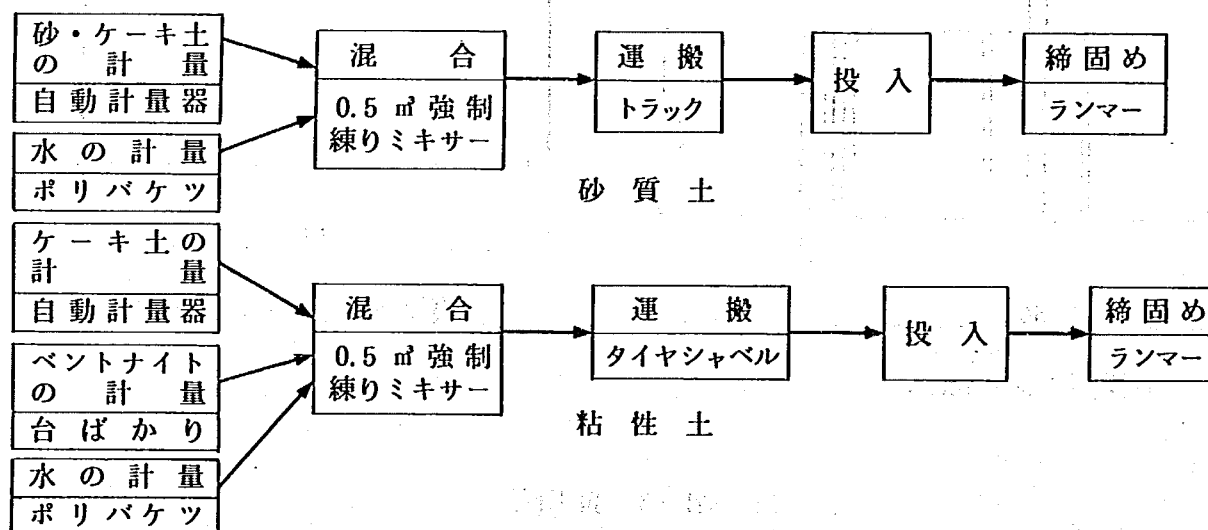
表－1 (その1) 地山材料の配合

粘性土	砂質土
ケーキ比 900 g ※	砂 700 g ※
ベントナイト 100 g ※	ケーキ土 300 g ※
水 228 g	水 14.3 g
含水比 26.79 %	含水比 7.85 %

表－1 (その2) 締固め基準

粘性土	砂質土
一層(約10 cm)を0.5回(ベニヤ板使用)	一層(約10 cm)を12回

※ 自然含水比状態での重量、ケーキ土とはシルト状の破碎岩粉のことである



図－5 模型地山の作製の手順

(2) 載 荷

実験計画の段階では、荷重ピッチ、荷重段階、荷重速度等の载荷パターンを規定したが、载荷装置の能力的な問題から、計画どおり実施できなかった。これは、载荷装置の能力が数百 t と大きく、今回の実験では、24 t までの载荷であるため、载荷装置の微調整が困難であり、また、油圧ジャッキ荷重計測装置も精度が悪かったためである。

したがって、今回の実験では、なるべく等方载荷になるように努め、土圧計に表示される応力により、所定の基準応力 0.6 kg/cm^2 まで载荷した。

所定の応力まで载荷した後、载荷板変位および模型地山中の応力が一定になるまで、载荷装置を一定荷重に保持した。

(3) 掘 削

(a) 掘削方法

トンネル掘削は、ピックによる手掘り方式で行い、ずり出しは、粘性土では、シャベルでかき出し、砂質土では、電気掃除機で吸引して行った。トンネル掘削の状態は、図-8 に示すとおりである。

(b) 掘削サイクル

トンネル掘削は、粘性土・砂質土とも、掘削サイクルの影響を調べる目的で、図-6 に示すように A、B 区間に分けて実施した。1 サイクル当りの掘削長は、10 cm として、A および B 区間の掘削サイクルパターンは、図-7 および表-2 に示すとおりである。

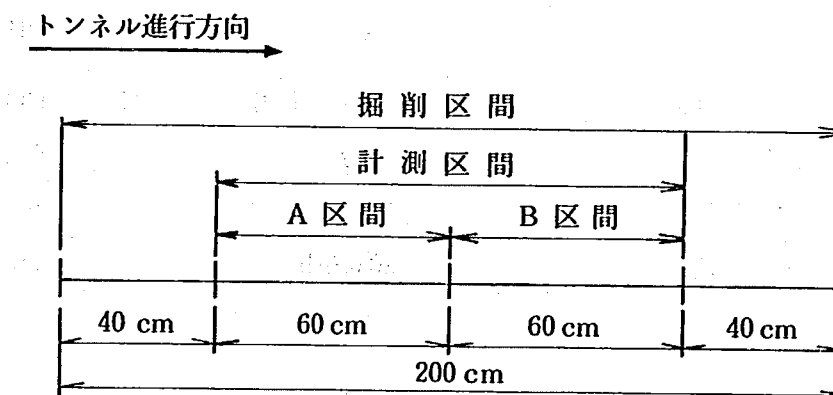
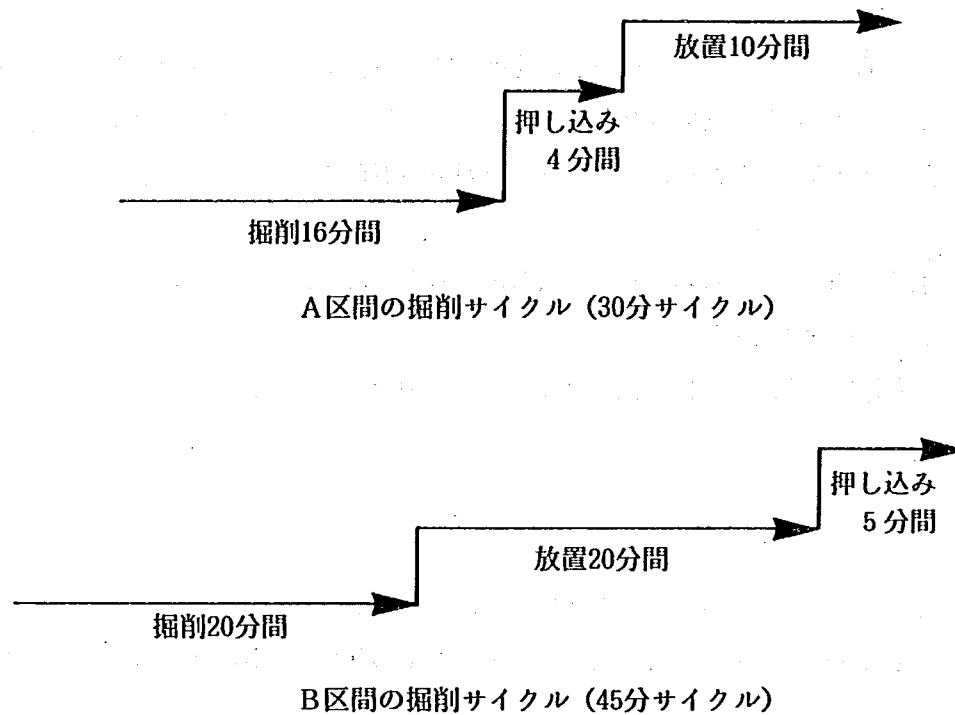


図-6 A・B計測区間の範囲

(4) 再载荷および除荷

掘削実験終了後、基準応力とトンネル地圧との対応を調べるために、鉛直方向 (Z 方向) および水平方向 (Y 方向) の载荷、および除荷を繰り返した。



図一7 掘削サイクル

表一2 掘削サイクル

掘削区間 項 目	(A)	(B)
掘削サイクルの適用回	5 ～ 10 回目の掘削	11 ～ 16 回目の掘削
1 サイクルの時 間	30 分	45 分
1 サイクルの掘削長	10 cm	10 cm
進 行 速 度	20 cm/h	13.3 cm/h

2.3 測定項目と方法

今回の模型実験における測定では、測定方向を直交座標系で図一9に示すように定める。

すなわち、

トンネルの縦断方向（進行方向）：X軸の方向

トンネルの横断方向（水平方向）：Y軸の方向

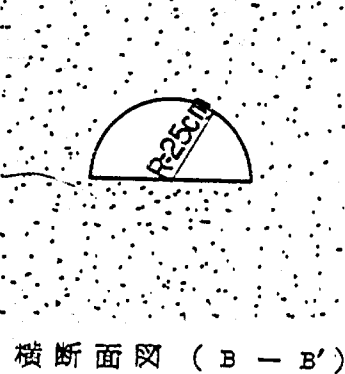
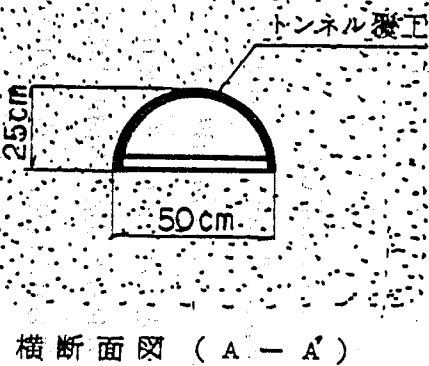
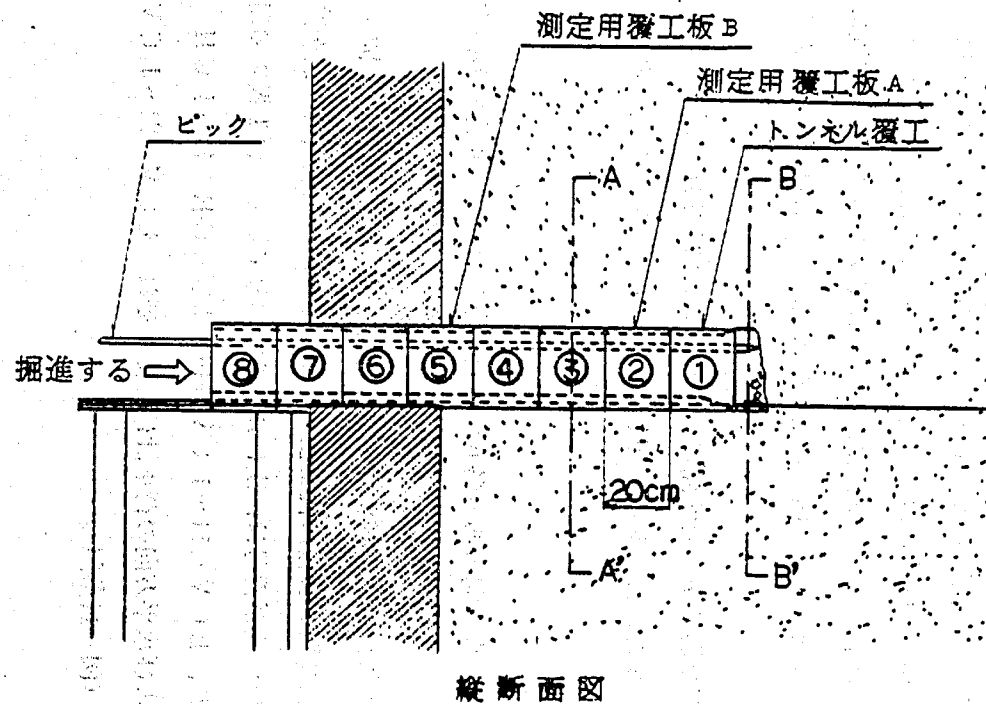
トンネルの鉛直方向：Z軸の方向

とする。

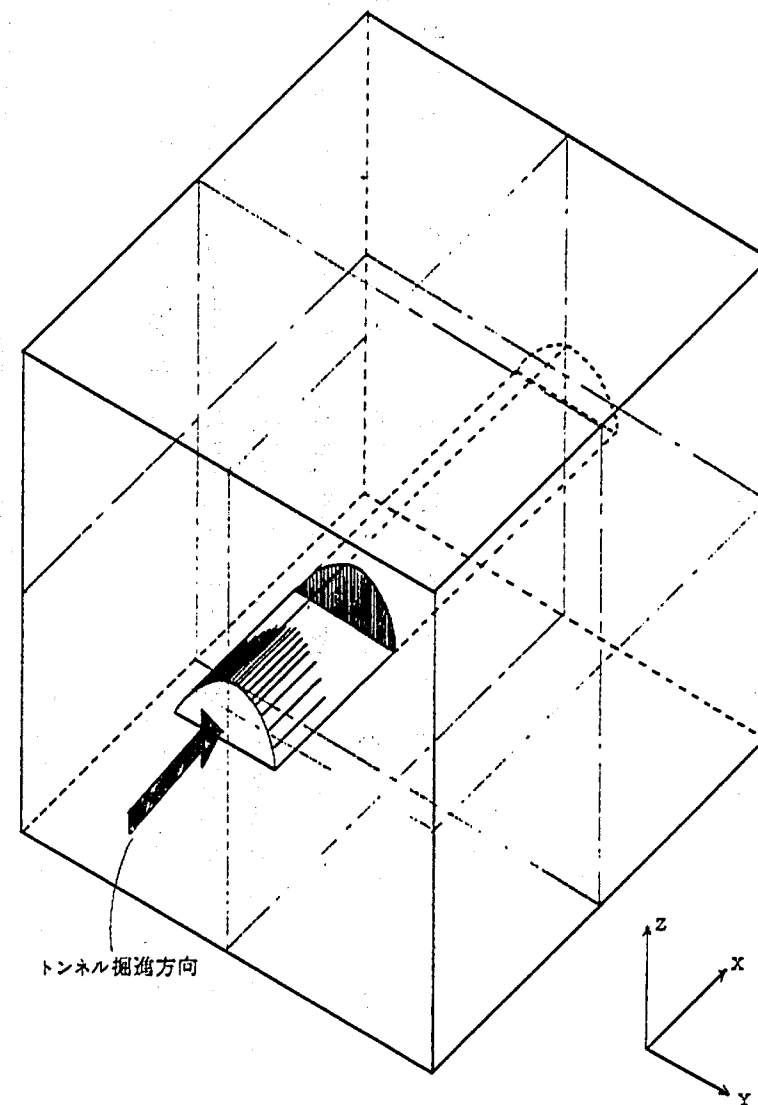
(1) 測定項目

測定項目は次のとおりである。

(a) 基準応力およびトンネル周辺応力



図一八 掘削中のトンネルの模式図



図一九 供試体の方向を示す図

(b) トンネル地圧（覆工に作用する荷重）

(c) 地山変位

(d) 載荷板変位

(2) 測定器の配置および数量

(a) 土圧計

(i) 基準応力測定用土圧計

基準応力測定用土圧計は、図—10に示すように配置した。すなわち、Y方向の基準応力は、P—1およびP—2で測定し、Z方向の基準応力は、P—3およびP—4で測定した。また、粘性土（CASE—1）では、P—4の近傍でY方向の基準応力を、砂質土（CASE—2）では、P—4の近傍でX方向の基準応力を、それぞれP—5で測定した。

基準応力測定用土圧計のうち、P—1～P—4の土圧計の設置方法は、土圧計の厚さの影響を軽減するために、セッコウで土圧計のまわりに直径約30cmの円錐台状の“つば”をつけて、壁面に接着した。

(ii) トンネル周辺応力分布測定用土圧計

測定断面として、図—10に示すように、A断面およびB断面を設けて、トンネル周辺応力測定用土圧計を配置した。

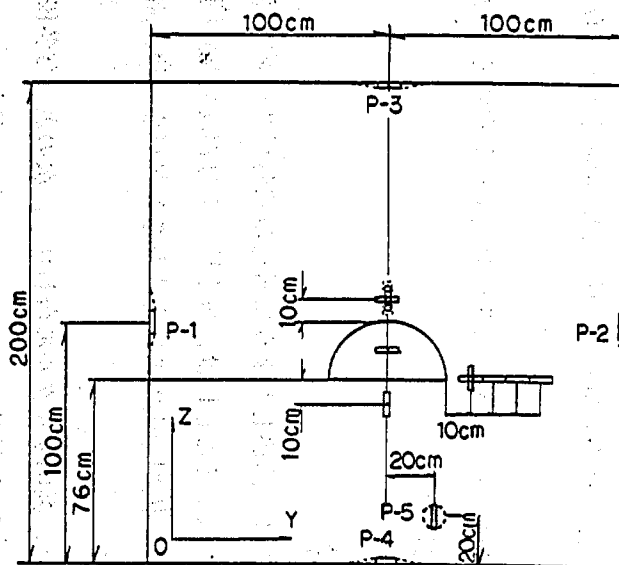
A断面とB断面の土圧計の配置は、ほとんど同じなので、B断面における配置を説明し、A断面については、B断面と異なる所について述べる。土圧計B—1～B—4では、トンネル法線方向の応力分布を測定する目的で、覆工の端から10cm間隔に水平方向に設置し、Z軸方向の応力を測定した。B—5はトンネルの上方に、B—7はトンネルの下方に、それぞれ覆工から10cmの位置に設置し、Y軸方向の応力を測定した。B—6はトンネル内となる部分に設置し、Z軸方向の応力を測定した。

以上が、A断面とB断面の土圧計の設置であるが、A断面については、上記の土圧計以外に、Y軸方向の応力を測定する向きにA—1'を、また、A—5に近傍して、Z軸方向の応力を測定する向きにA—5'を配置した。

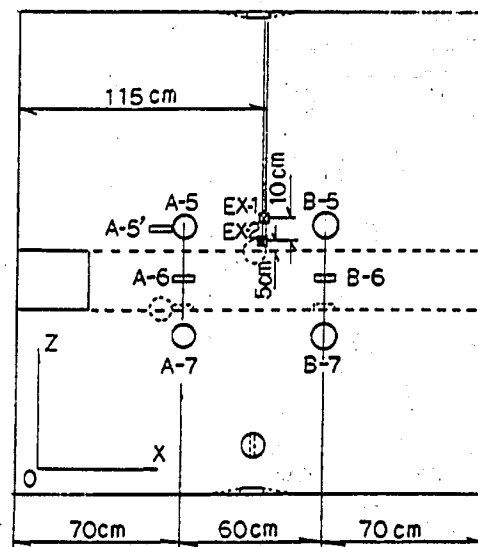
(b) トンネル地圧（覆工に作用する荷重）

トンネル地圧は、図—11に示すように、覆工板の間にある各6個の鉛直方向および水平方向の荷重計によって測定した。

測定用覆工板は2組あり、図—8に示すように切羽進行方向に対して第2番目と第5番目に配置した。ここで、測定用覆工板は、第2番目および第5番目の覆工板を、それぞれ、覆工板Aおよび覆工板Bとした。また、それぞれの荷重計の記号および番号は、次に述べるとおりである。覆工板Aの鉛直方向および水平方向の荷重計は、それぞれ、LCV—11～LCV—16およびLCH—11～LCH—16であり、同様に、覆工板Bの鉛直方向および水平方向の荷重計は、それぞれ、LCV—21～LCV—26およびLCH—21～LCH—26とした（図—11参照）。



測定目的 (数量)	測定器の 記号番号	測定断面	測定応力の方向	トンネル断面に 対する応力方向	備 考
基準応力 の測定 (5個)	P-1	—	Y軸方向	—	
	P-2		"	—	
	P-3		Z軸方向	—	
	P-4		"	—	
	P-5		Y軸方向(X軸方向)	—	CASE-2ではX軸方向
堀削に伴 う応力変 化の測定 (16個)	A-1	断面A	Z軸方向	法線方向	
	A-2		"	"	
	A-3		"	"	
	A-4		"	"	
	A-5		Y軸方向	"	
	A-6		Z軸方向	—	トンネルの内部
	A-7		Y軸方向	法線方向	
	A-1'		"	半径方向	
	A-5'	Z軸方向	"	CASE-2ではなし	
	B-1	断面B	Z軸方向	法線方向	
	B-2		"	"	
	B-3		"	"	
	B-4		"	"	
	B-5		Y軸方向	"	
	B-6		Z軸方向	—	トンネルの内部
	B-7		Y軸方向	法線方向	



 土圧計
 (矢印は応力の測定方向)
 変位計

図一10 測定器の配置図

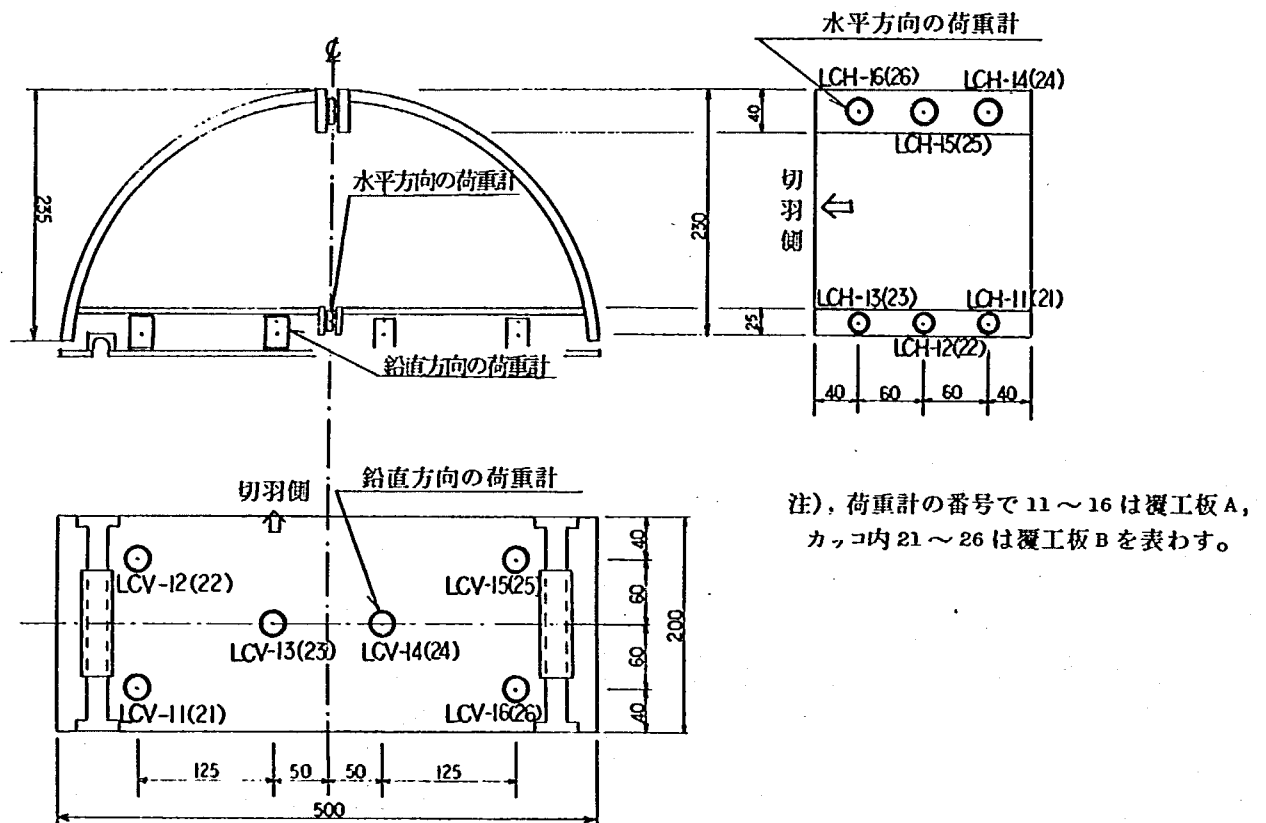


図-11 覆工板荷重計の配置図

(c) 地山変位計

地山変位計は、図-10に示すように、トンネルセンター上の中間地点に、トンネルの天端から15cm および 5 cm 上方の位置に設置し、それぞれをEX-1, EX-2とし、Z軸方向の地山変位を測定した。また、地山変位計は、図-12に示すような形状および大きさをしたものである。

(d) 変位計

変位計は、ジャッキ側載荷板の変位を測定する目的で、載荷板の4隅に計12本を図-13に示すように取り付けた。

(3) 測定頻度

(a) 載荷時

載荷時は、前述したように所定の載荷パターンで実施できなかったため、油圧ジャッキにより載荷荷重を増減するときには、数十秒～1分程度の測定間隔で実施し、荷重を一定に保持した後は、載荷板の変位、模型地山内の応力状況をみながら、適宜測定間隔を決定した。

(b) 掘削時

測定は、掘削サイクルに合わせて、次のような各段階で行った。

- ① 掘削開始時
- ② 掘削完了時
- ③ 押し込み開始直前

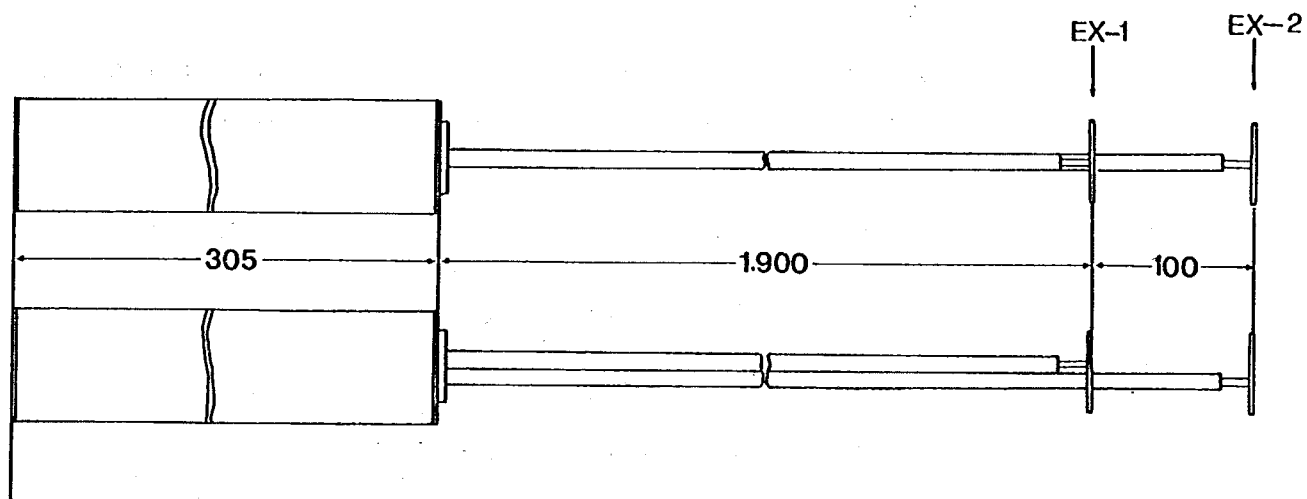


図-12 地山変位計

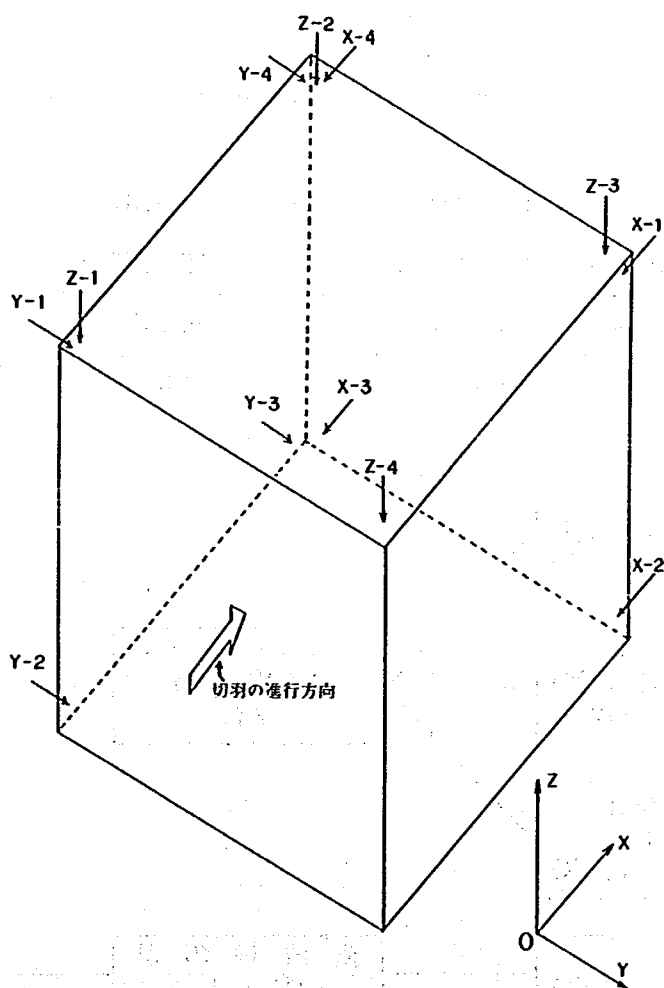


図-13 載荷板変位計の配置図

なお、各段階で、0分、1分、3分、5分、10分後等の間隔で測定した。

(c) 再載荷・除荷時

載荷時に準じた方法で行った。

なお、今回の測定では、ひずみ測定器のイニシャルを載荷直前にとったため、実際の応力は測定応

(4) 力に地山高さ分による応力 ($rH = 0.19\text{kg/cm}^2$) を加えたものであるから注意を要する。

使用測定器

使用測定器は、表-3の使用測定器一覧表に、測定系統は、図-14に示すとおりである。

表-3 使用測定器一覧表

項 目	測 定 器	型 式	測定範囲	メーカー	数量	備 考
基準応力及び トンネル周辺 の 応 力	土 圧 計	BE-1KA	~ 1 kg/cm ²	共和電業	18	
		BE-2KC	~ 2 kg/cm ²	共和電業	3	A-4, A-1', A-5 に使用
トンネル地圧	荷 重 計	SKC-500	~ 500 kg	シンコー	12	鉛 直 用
		LM-A	~ 100 kg	共和電業	12	水 平 用
地 山 変 位	変 位 計	1000HR	~ 50 mm	東京測器	2	
載 荷 板 変 位	変 位 計	SDP-50BS	~ 50 mm	東京測器	12	X-2, Z-1, Z-2, Z-3, Z-4に1/200を使用, 他は1/100
測 定	ひ ず み 計	TS-256DC	—	東京測器	1	
	スイッチボックス	ASW-324	—	東京測器	2	
	直 流 増 幅 器	DT-1H	—	東京測器	2	
	ペンレコーダ	B-34	—	理科電器	1	3 ペン

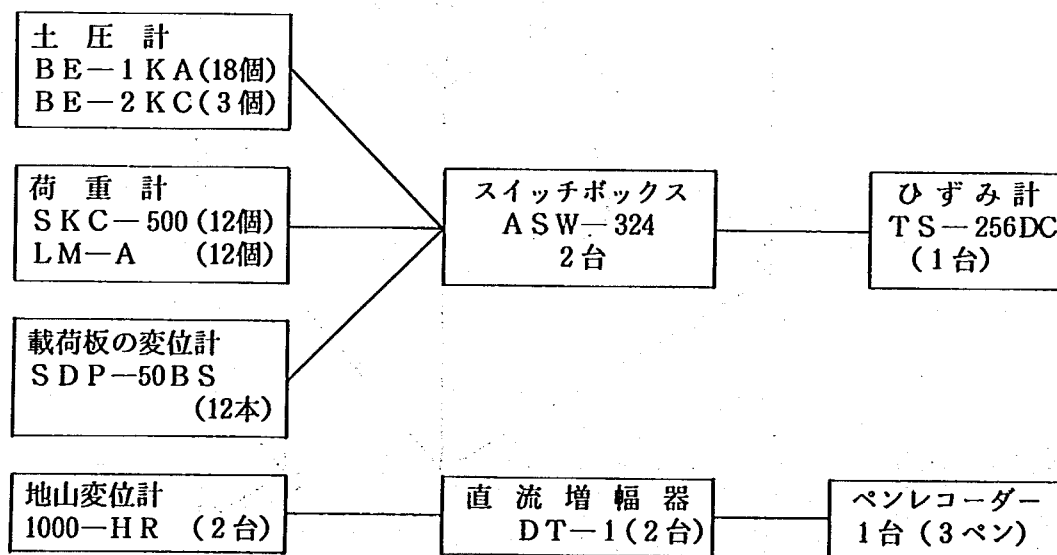


図-14 測定系統図

2.4 地山材料の土質試験結果

模型地山材料の土質試験結果は、表—4に示すとおりである。

表—4 土質試験結果一覧表

項 目			種 類	粘 性 土	砂 質 土	
粒 度 特 性	レキ分 2000 μ 以上		%	0.0	0.0	
	砂 分 74 ~ 2000 μ		%	29.1	78.6	
	シルト分 (5 ~ 74 μ)		%	46.7	13.2	
	粘土分 (5 μ 以下)		%	24.2	8.2	
	最大粒径		mm	2.0	2.0	
	均等係数 U_c			—	27.9	
	曲率係数 U_c^1			—	8.19	
コンソシテ性	液性限界 W_L		%	40.80		
	塑性限界 w_p		%	16.34		
	塑性指数 I_p			24.46		
分 類	三角座標分類 (粒度)			F (細粒土)	S F (砂質土)	
	日本統一土質分類			C L (粘質土)		
土 粒 子 の 比 重 G_s				2.706	2.708	
自 然 状 態	含 水 比 w		%	29.33	9.64	
	湿潤単位体積重量 r_t		g/cm ³	1.87	1.88	
	間 ゲ キ 比 e			0.88	0.58	
	飽 和 度 S_r		%	91.0	44.9	
力 学 特 性	一軸圧縮験	一軸圧縮強さ q_u	kg/cm ²	0.212	0.274	
		変形係数 E_{50}	kg/cm ²	6.5	49.2	
		鋭 敏 比 St				
	三軸圧縮験	※試験の条件			UU	UU
		粘 着 力 C	kg/cm ²	0.105	0.117	
		セン断抵抗角 ϕ	度	3.1	46.8	
	クリープ験	クリープ常数	α	0.93×10^{-2}	1.1×10^{-3}	
		クリープ常数	β	$2.0 \times 10^{-2} (1/50)$	$2.4 \times 10^{-2} (1/42)$	

備考 クリープ試験においては $\epsilon = \alpha (1 - e^{-\beta t})$ を用いた。

3. 相似則

3.1 相似則上の問題点

相似則については、「Ⅱ. 土かぶりの小さいトンネルの模型実験（その1）」と同様の考え方で定める。土かぶりの小さいトンネル模型実験では仮定1～6を設定した。今回はこの内、仮定4（トンネル・インバートと同一水平面における地山は鉛直方向には沈下しない）、仮定5（膨張性地圧は解析の対象としない）は除く。

上記の土かぶりの小さい模型実験では、次元解析は、表－5のような考え方でを行い、その結果パイナナンバーは表－6のように定めた。この相似則で問題となるのは、(1)膨張性地山の粘性に関する要因が考慮されていないこと、(2)地山と覆工の剛性に関する要因が考慮されていないことの2点である。この点については、以下のように考えた。

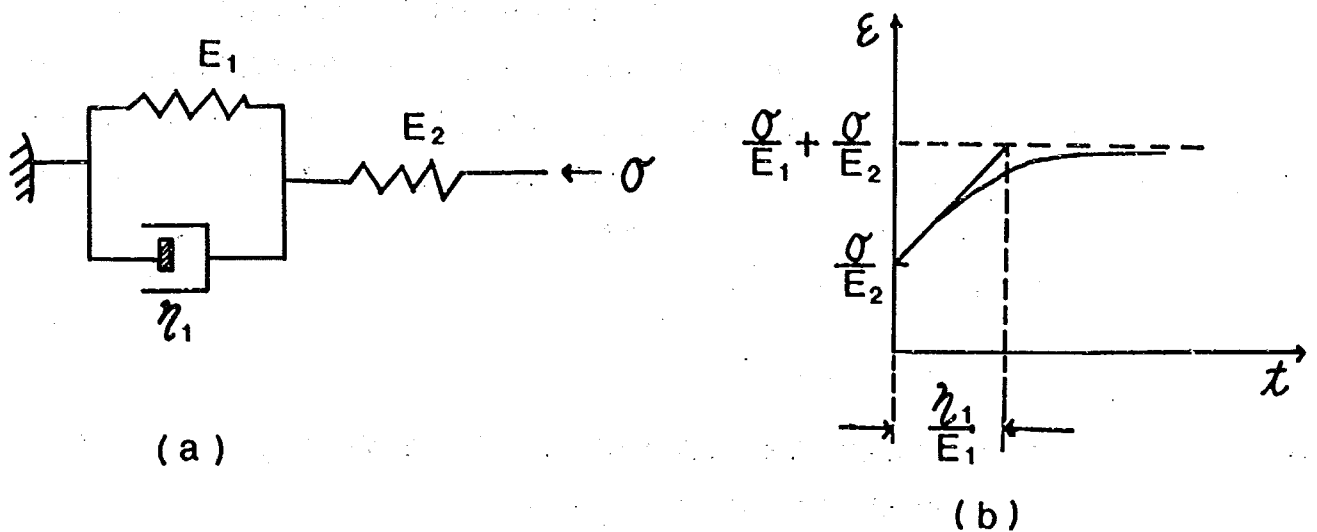
まず、地山の粘性に関して、地山の粘性を3要素Voigt Modelで表現するとする。 ϵ_1 と ϵ_2 が各々図－15のsuffixの部分のひずみを表わすとする、応力ひずみ時間の関係は次式のようになる。

表－5 次元解析

基本物理量 関与している物理量	F (力)	L (長さ)
H (土かぶり高)	0	1
D (トンネル直径)	0	1
d (地山変位量)	0	1
ℓ (一掘進長)	0	1
r (地山単位体積重量)	1	－3
C (粘着力)	1	－2
ϕ (内部摩擦角)	0	0
T (地山応力, トンネル土圧)	1	－2

表－6 主要パイナナンバー（記号については表－1 参照）

幾 向パイナナンバー	π_1	H/D
強 度パイナナンバー	π_2	C/r L (L=D or H)
	π_3	$\tan \phi$
変 位パイナナンバー	π_4	d/D
掘進長パイナナンバー	π_5	ℓ/D
土 圧パイナナンバー	π_6	T/r L (L=D or H)



図—15 3要素Voigt Model

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \eta_1 \dot{\epsilon}_1 + E_1 \epsilon_1, \quad \sigma = E_2 \epsilon_2 \\ \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-t/t_1}) \dots\dots\dots (2)$$

$$t_1 = \eta_1 / E_1 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E_1 : 2要素Vogt Modelの弾性係数

E_2 : 直列に組込んだ弾性係数

η_1 : 粘性係数

σ : 応力

粘性に関する重要な要因としては、図—15(b)を参考にして

$t_1 = \eta_1 / E_1$ と t_2 (1掘削時間) の比 π_{2-1}

$\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$ と $\frac{1}{E_2}$ の比 π_{2-2}

ℓ (1掘削長) と D (トンネル径) の比 π_5

などが考えられる。

以上の比について、粘性を相似させるという点から考えてみる。粘性を相似させる目的には以下のような事が考えられる。

① 地山のコンバージェンス、地中変位を模型実験の相似の対象とする場合、変位の経時的变化を逐時合わせるか、最終的な変位の収束値を相似するようにするか、しなければならない。この場合、変位の継時的变化を相似させるのであれば、 π_{2-1} 、 π_{2-2} の両方の値を相似させねばならない。最終的な収束変位を相似させようとする場合には、 $(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2})$ の逆数を弾性係数とする地山を用いた静的な模型実験を行えばよい。

地山内の応力の分布とかトンネル地圧の経時変化を模型実験の相似の対象とする場合を考える。この場合も応力の経時変化を相似させる方法と応力の最終収束値を相似させるやり方が考えられる。現在の技術水準では応力の経時変化を現場で計測するのが困難であり、計測例も少ないことから、現段階では応力の最終収束値を相似するのが妥当であると考えられる。この場合には、地山変位によるエネルギー解放が、原型と模型で同じになるようにしなければならない（1—2 参照）。

エネルギー解放状況を相似するには、エネルギー比

$$\frac{W_R + 2W_v}{W_I} \dots\dots\dots \pi_{2-3}$$

を相似させる必要がある。ここで W_R は、掘進する際の解放エネルギー、 $2W_v$ は排土した土量に含まれるひずみエネルギー、 W_I は掘進前の内部ひずみエネルギーである。

ただし、 $W_I = \sigma_0 V$

$$W_R = \int a \sigma_0 u da$$

$$2W_v = \sigma_0 V_v$$

ここに、 σ_0 ：地山中応力

σ_n ：載荷圧

V ：その応力値が代表する地山量

u ：コンバージェンス

a ：トンネル掘削面積

V_v ：掘削土量

これらのエネルギーについて考えてみる。 W_I は地山の初期応力に関する要因であるから、相似則の $\pi_1 = H/D$ で規定される。 $2W_v$ は掘削土量中のひずみエネルギーであるから、排土量と地中応力によって規定される。初期の地中応力は相似であると仮定すると、 $2W_v$ は $\pi_5 = \ell/D$ によって規定される。 W_R も同様に、初期の地中応力が相似であるとする、コンバージェンスによって規定されるから $\pi_4 = d/D$ を合わせればよいことになる。

今回の実験では、地山変位についてはその経時変化を相似させようとは考えていない。地山変位の最終収束値を相似させることは、エネルギー解放を相似させるに等しい。これによって、今回の実験の主たる対象としたトンネル地圧、地中応力についても相似させることができる。そして、上記のように表—6 の π_1 、 π_4 、 π_5 を合わせることは、エネルギー解放を相似するのにほぼ十分条件になっていると考えられる。よって、相似則は表—6 でよいことになる。

地山と覆工の剛性を相似させるか否かについても、上記の地山の粘性と同様の考え方ができる。相似人の対象を変位と応力に分けて考える。変位については最終収束値を、応力についてはエネルギー解放を相似させるようにする。このためには、相方ともに、最終収束変位を相似させればよい。最終収束変位を規定する要素としては、1—1.2—(2)で記したように剛性の比だけではない。もし支保構造物の変形を相似するのでなければ、剛性の比を合わせることは必ずしも最終収束変位を相似させる必要条件ではない。すなわち、他の条件を変化させて最終収束変位を相似すればよい。

つまり最終変位を d として、 $\pi_4 = d/D$ を満足させればよいことになる。

以上の結果、結論として表-6のパイナンバーをすべて満足させれば膨張性地圧が発生する場合にも十分有効な模型実験になると考えられる。

4. 実験結果

4.1 載荷時の実験結果

載荷時における載荷板変位および基準応力の最終的な経時変化は、グラフ化して、以下に示す。

載荷板変位の経時変化図 (粘性土) 図-16

基準応力の経時変化図 (粘性土) 図-17

載荷板変位の経時変化図 (砂質土) 図-18

基準応力の経時変化図 (砂質土) 図-19

ただし、載荷途中の調整時期についてはあまり重要でないため省略し、載荷完了前約60分間についてのみ示した。なお、変位と応力の時間は相互に対応している。

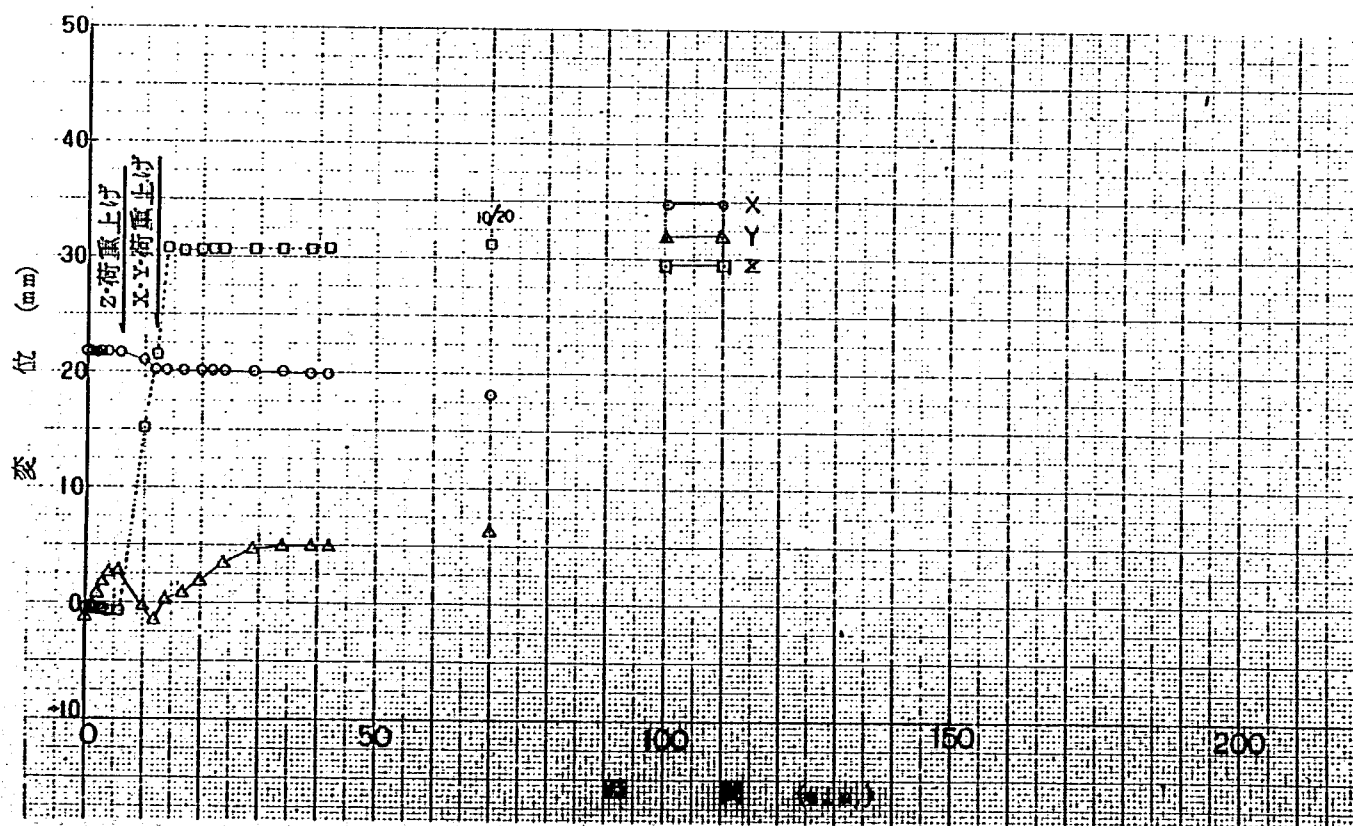


図-16 載荷板変位の経時変化図 (粘性土)

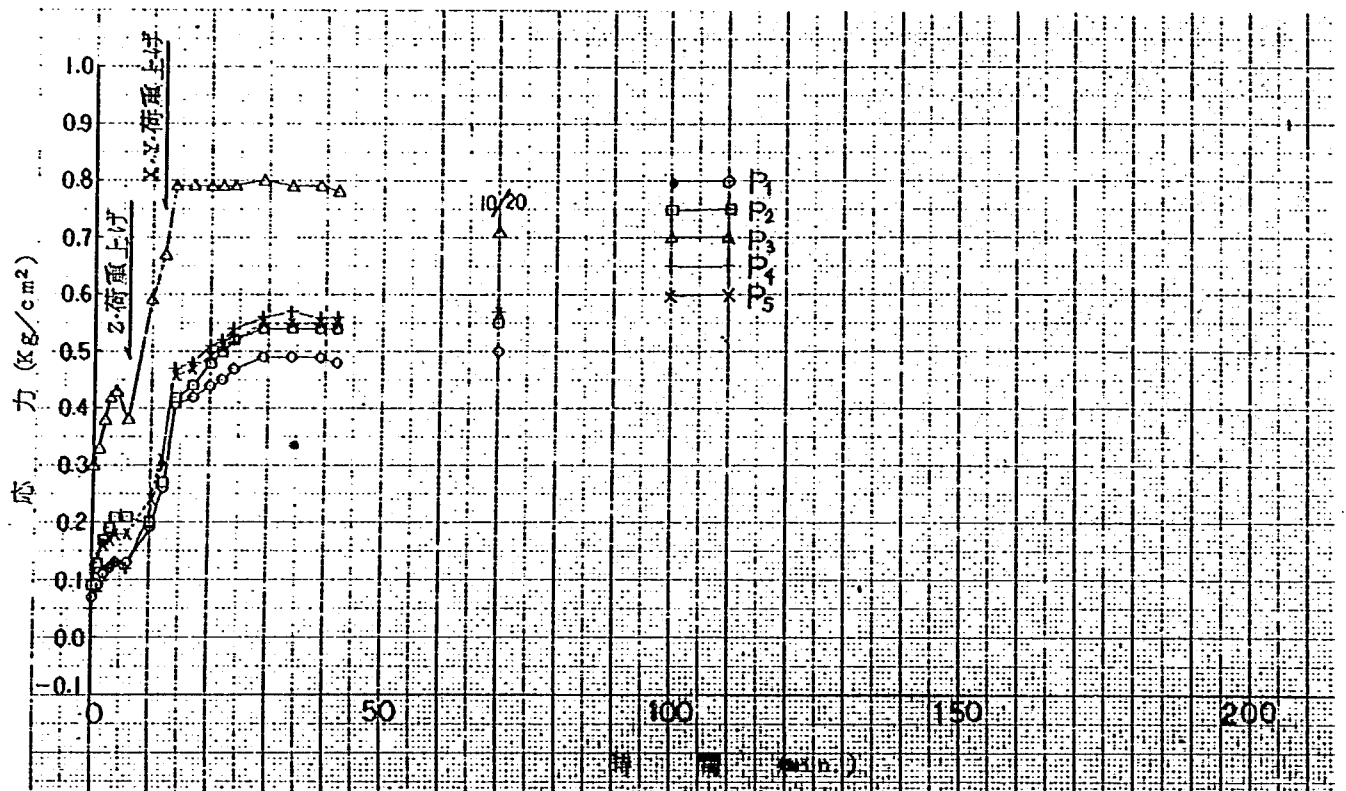


図-17 基準応力の経時変化図 (粘性土)

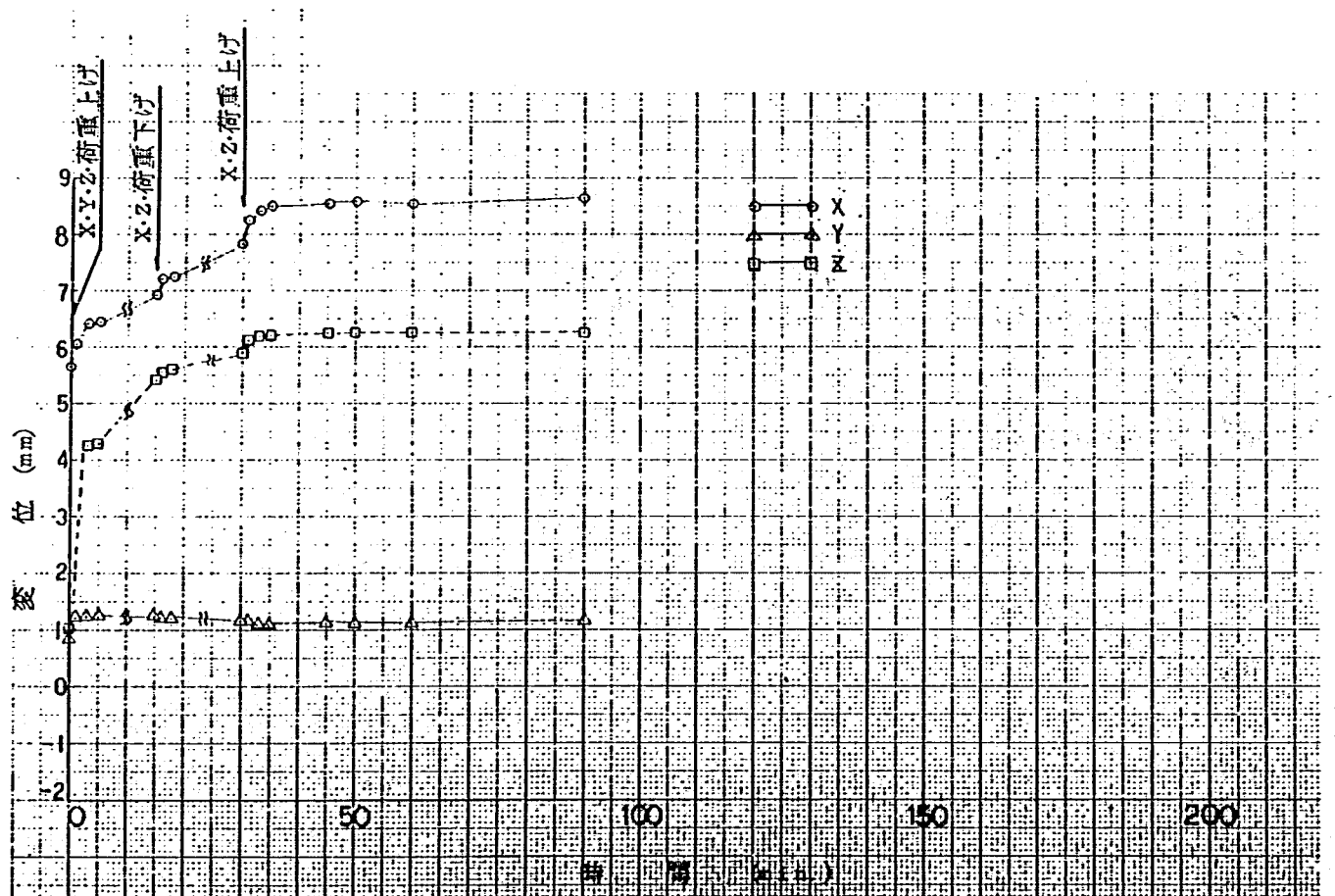


図-18 載荷板変位の経時変化図 (砂質土)

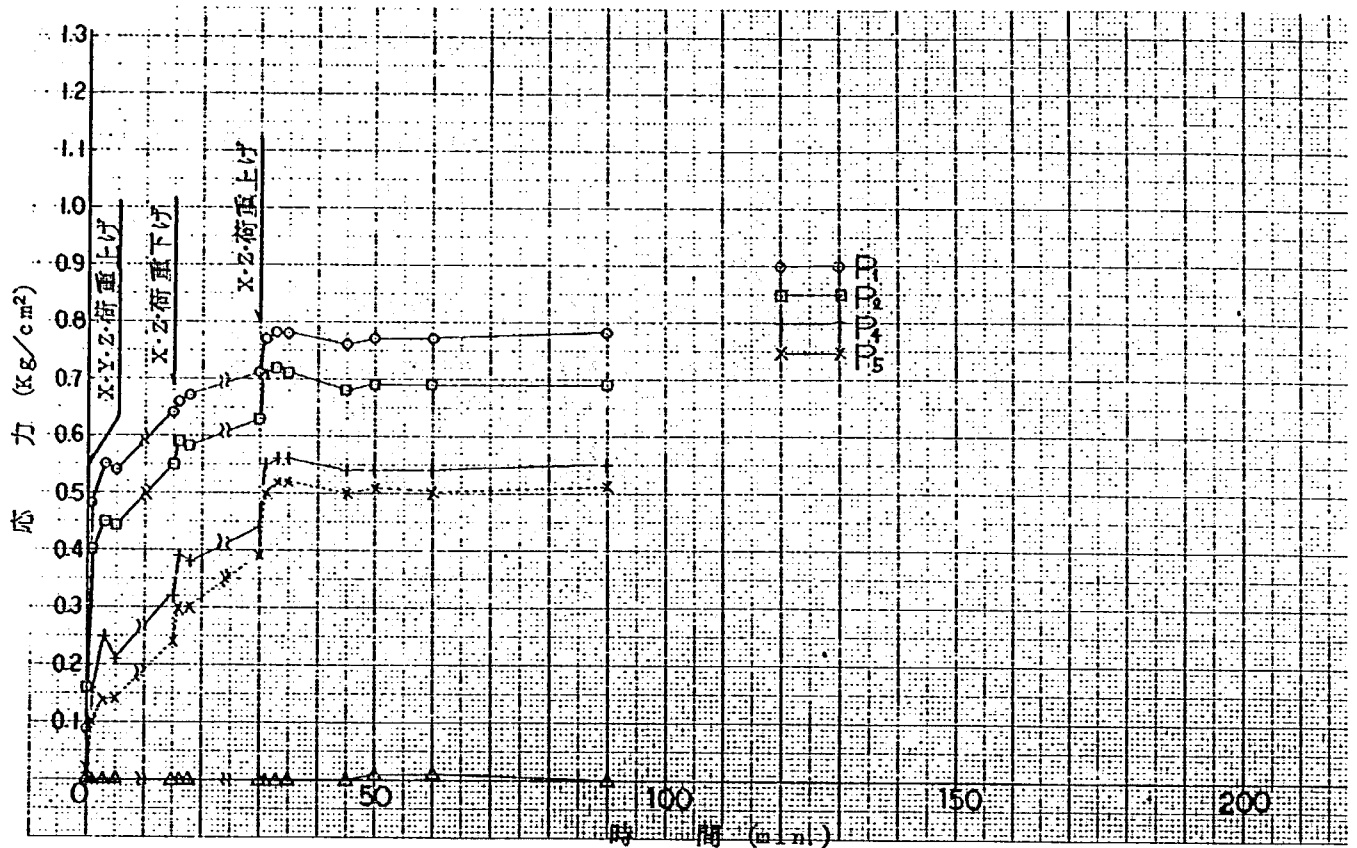


図-19 基準応力の経時変化図 (砂質土)

4.2 掘削における実験結果

掘削時におけるデータは、各掘削サイクル中の掘削開始時の測定値を用いて、トンネル掘削の進行と関連づけるように、次のように整理した。まず、トンネル周辺応力および地山変位は、図-20に示すように、測定器が設置されている位置を原点として、トンネル切羽がある位置での測定値をその切羽の位置にプロットした。したがって、トンネル掘削の進行によるトンネル周辺応力の変化をみる場合、図上では、原点にトンネル切羽があるとして、原点に対して反対の方向からトンネルが掘削されたと考えてみればよいことになる。

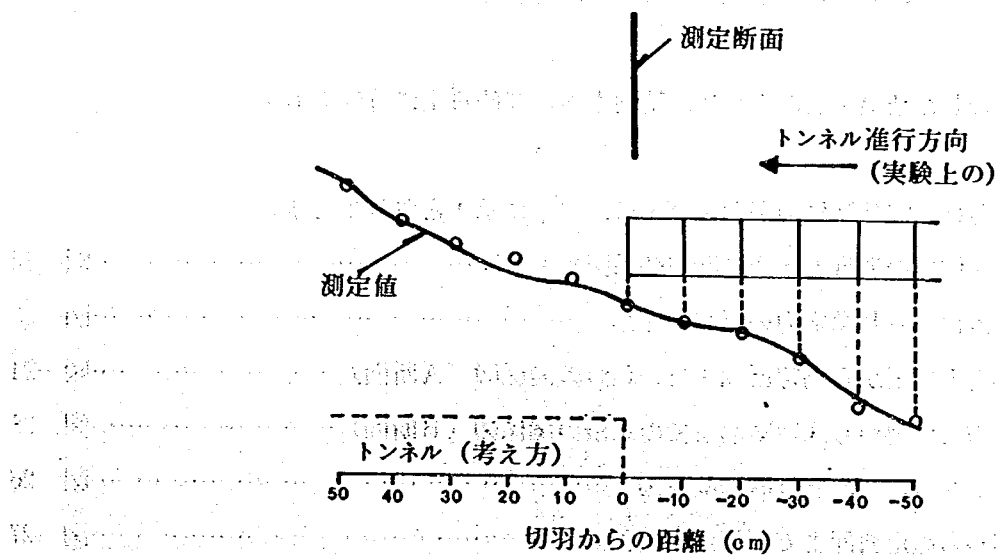


図-20 測定値の図化の方法 (トンネル周辺応力および地山変位)

また、トンネル地圧については、前述したように測定用覆工板が第2番と第5番にあるが、図-21に示すように、各測定用覆工板が模型地山中に10cm（覆工板の半分）が入った位置を原点として、グラフ化した。なお、トンネル地圧は、鉛直・水平方向の荷重計をそれぞれ合計し、それぞれの断面積で除した値とした。

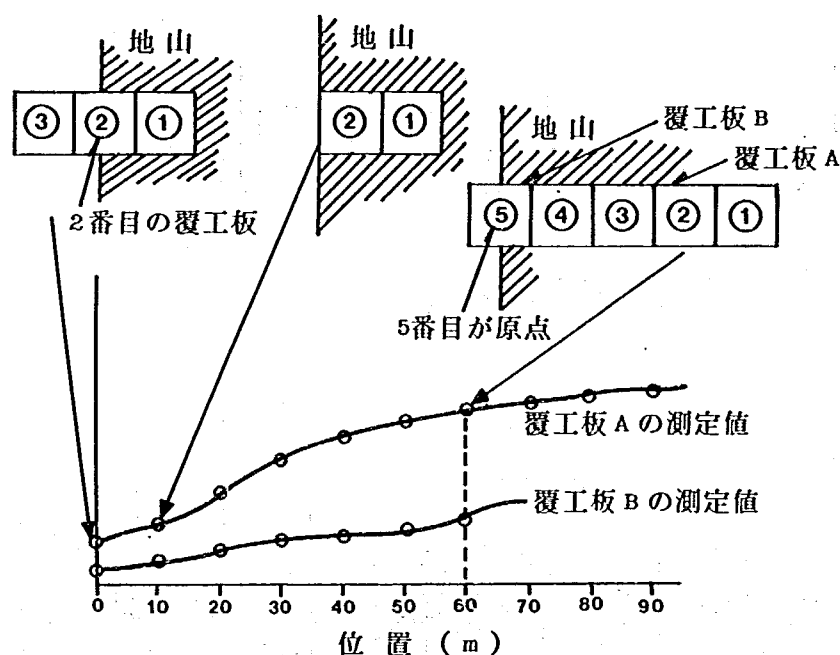


図-21 トンネル土圧の図化の方法

さらに、地山変位の変化状況を見るために、掘削サイクル中で、次に述べる各段階での地山変位量をそれに要した時間で除して、地山変位速度として表わした。

- ① 掘削開始から掘削完了まで
- ② 掘削完了から押し込み前まで
- ③ 押し込み前から掘削開始まで

これらについて、前述のように、切羽との距離の関係として示した。ただし、②および③の場合は、切羽が①よりも10cm 進行しているのと同じ掘削回であっても、切羽との距離は10cm 進行した位置に示している。

以上の方法によって整理した結果を次のように、粘性土および砂質土に分けて示す。

(1) 粘性土

粘性土の掘削時における実験結果の図および表は、以下に示すとおりである。

- 進行表（トンネル掘削の進行と所要時間の関係図）……………図-22
- トンネル切羽位置による基準応力の経時変化図……………図-23
- トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図（A断面）……………図-24
- トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図（B断面）……………図-25
- 覆工板A・Bのトンネル地圧と位置の関係図……………図-26
- 地山変位と切羽から測定断面までの距離の関係図……………図-27
- 地山変位速度（掘削開始から掘削完了まで）と切羽から測定断面までの距離の関係図……………図-28

地山変位速度（掘削完了から押込み前まで）と切羽から測定断面までの距離の関係図……図-29

地山変位速度（押込み前から掘削開始まで）と切羽から測定断面までの距離の関係図……図-30

トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化図 ……………図-31

粘性土実験では、実験工程の関係から、全延長の $\frac{1}{2}$ 掘進した時点で深夜のため作業を中断し、翌朝からまた掘進を始めた。この中断の間に地山中応力は一様に増大している（図-23～図-25）。この原因は載荷装置の載荷圧が何らかの理由で設定圧より増大したためと考えられる。このことは、トンネルの掘進が地山に与える影響とは切り離して考慮すべきである。

(2) 砂質土

砂質土の掘削においては、押し込み装置が押し込み能力不足のため、時間がかかり、掘削サイクルどおり実施できない部分があり、11回目以降の掘削では、油圧ジャッキを用いて押し込みを行った。また、18回目の押し込みのときに押し込み装置が破壊し、18回目掘削で押し込みは中止したが、掘削は最後まで実施した。

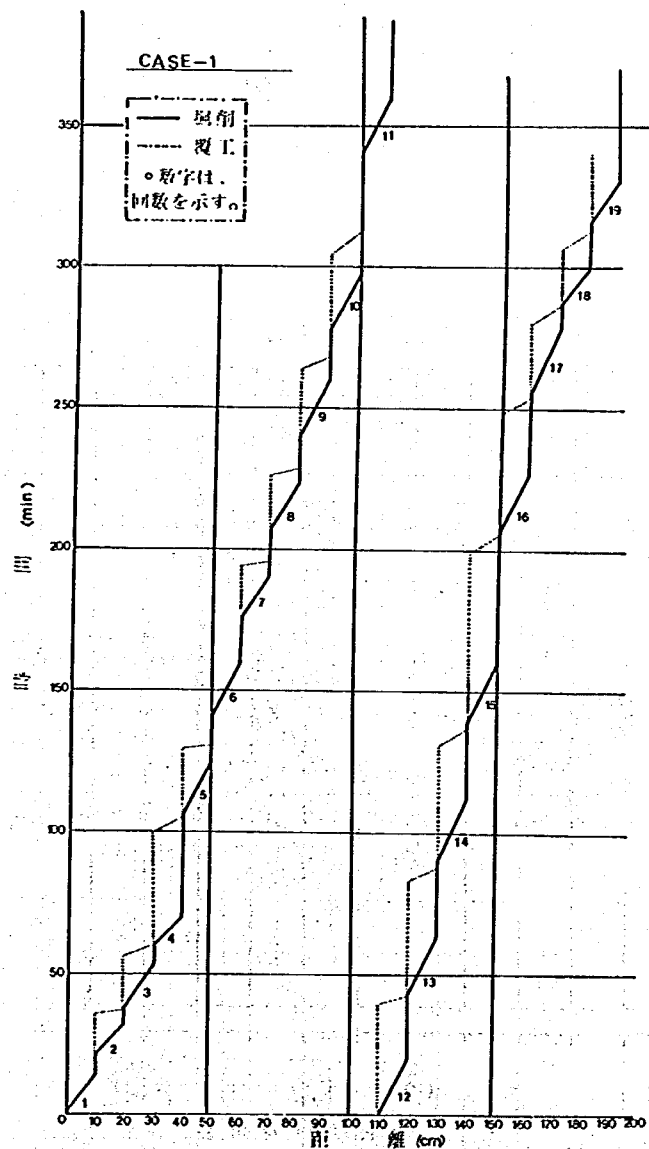


図-22 進行表（トンネル掘削の進行と所要時間の関係図）

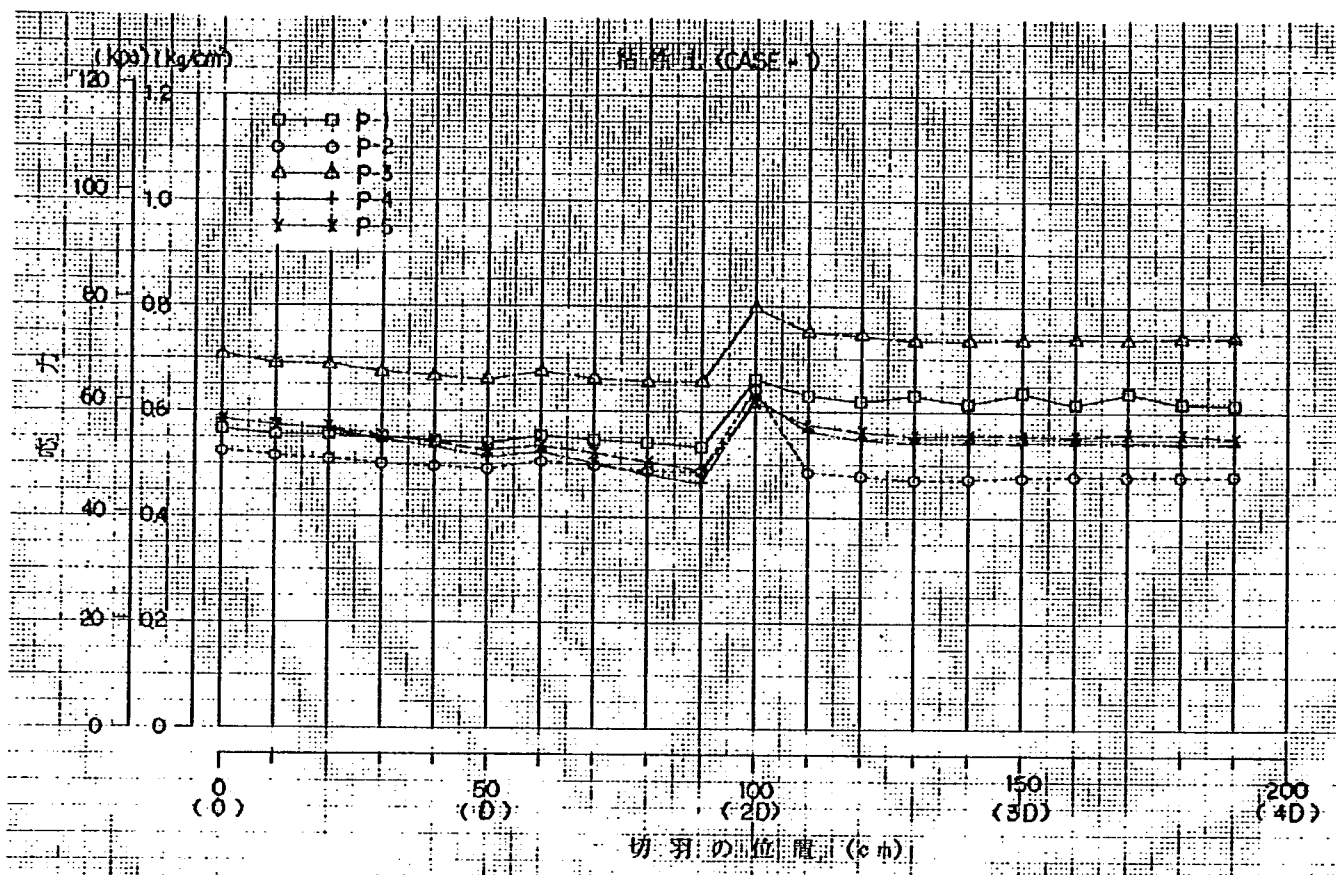


図-23 トンネル切羽位置による基準応力の経時変化図

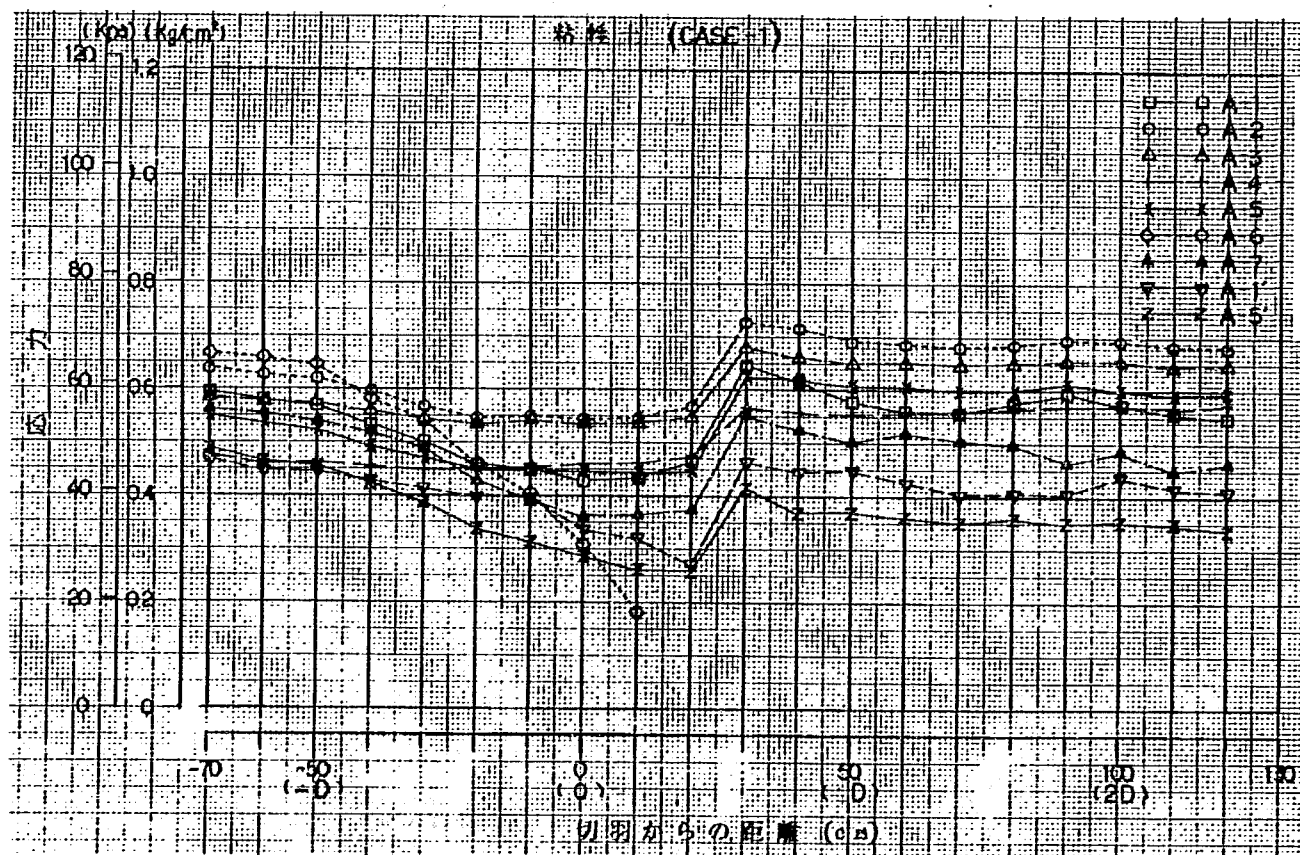


図-24 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図 (A断面)

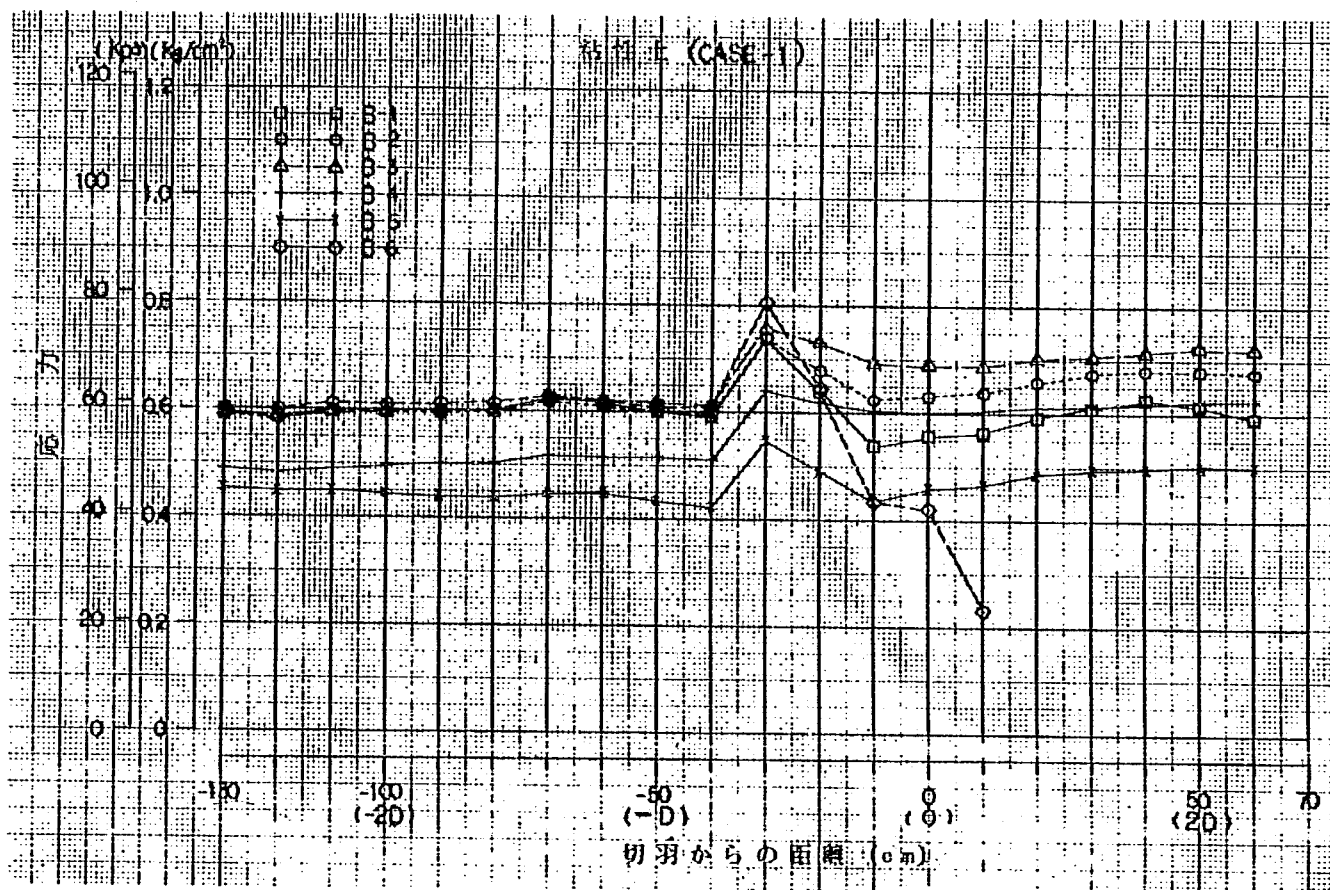


図-25 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図 (B断面)

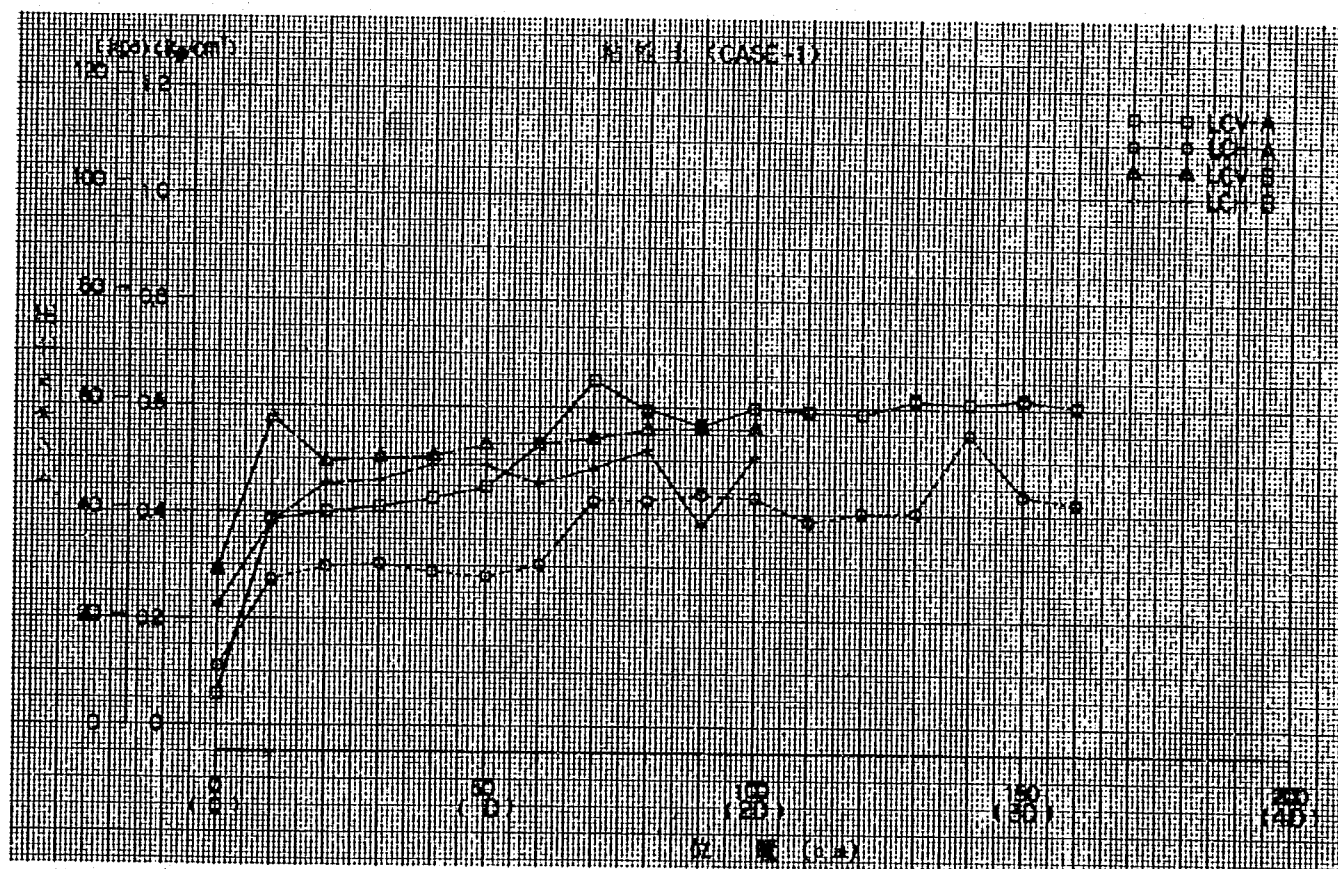


図-26 覆工板 A・B のトンネル土圧と位置の関係図

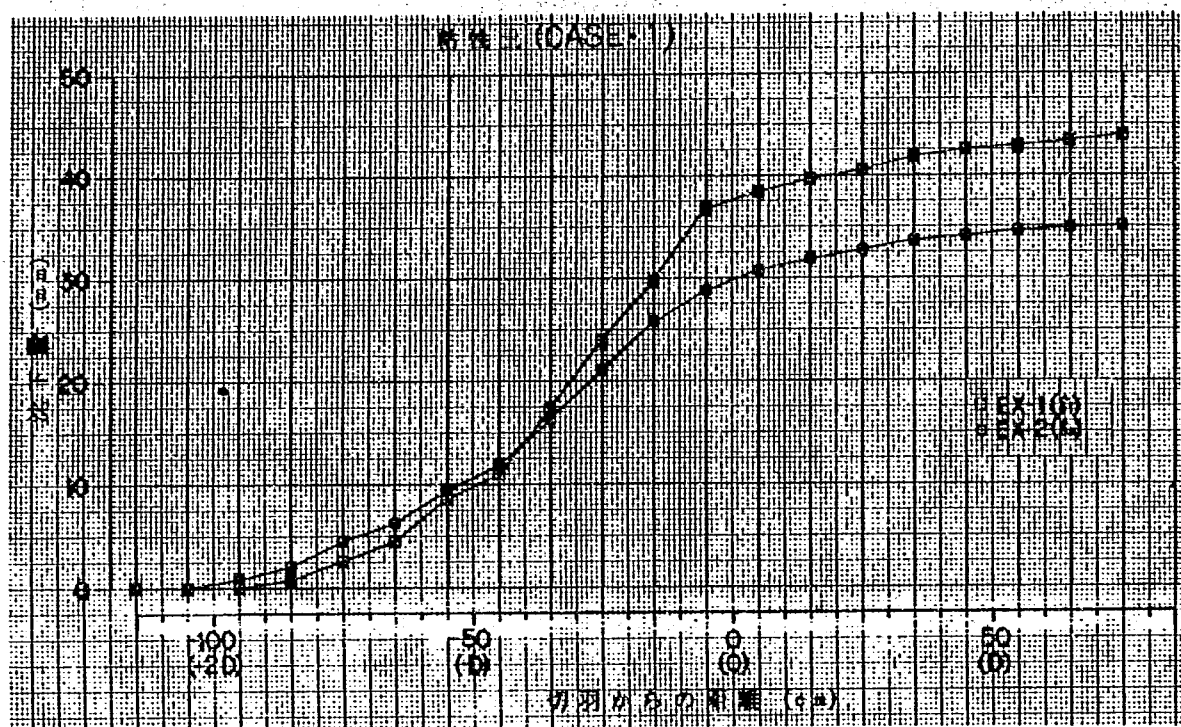


図-27 地山変位と切羽から測定断面までの距離の関係図

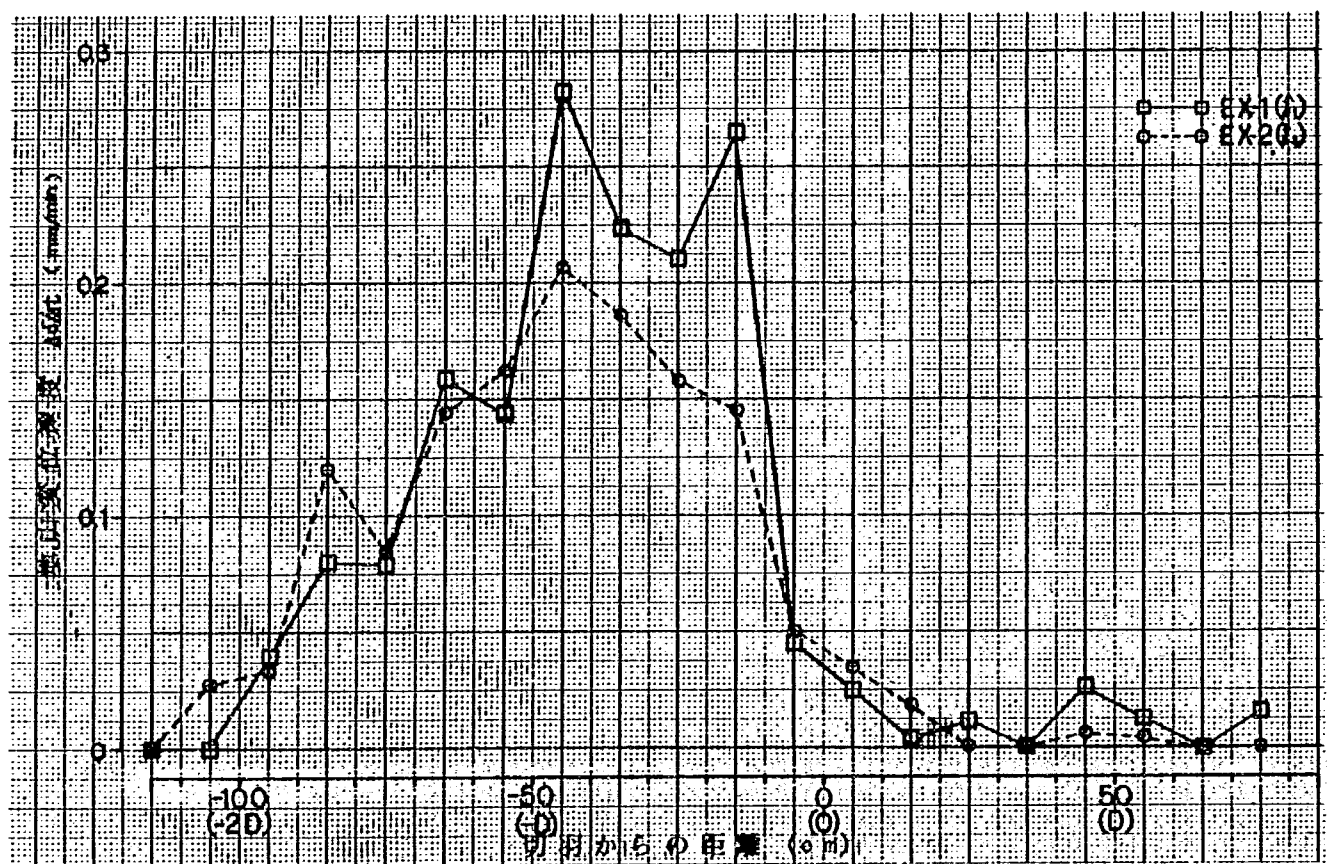


図-28 地山変位速度 (掘削開始から掘削完了まで) と切羽から測定断面までの距離の関係図

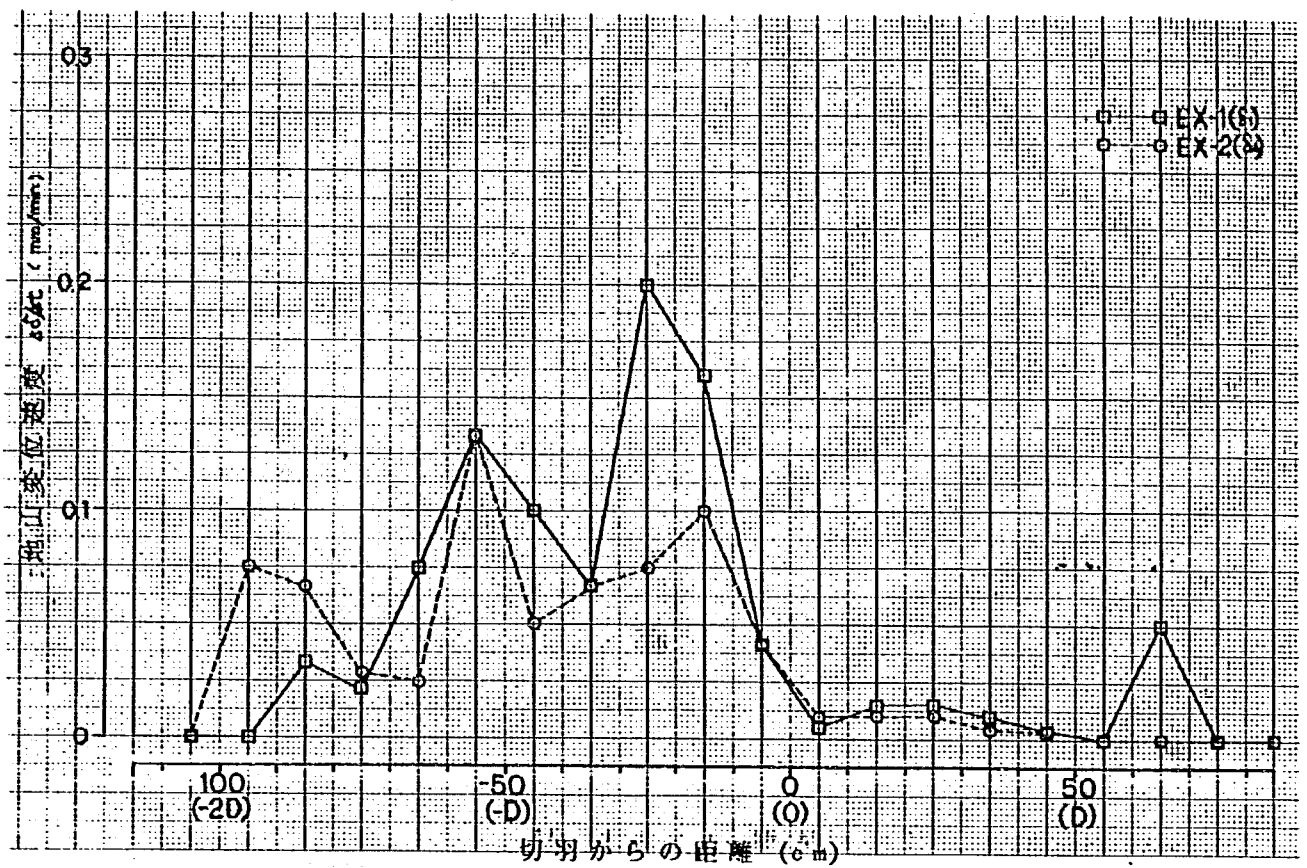


図-29 地山変位速度（掘削完了から押込み前まで）と切羽から測定断面までの距離の関係図

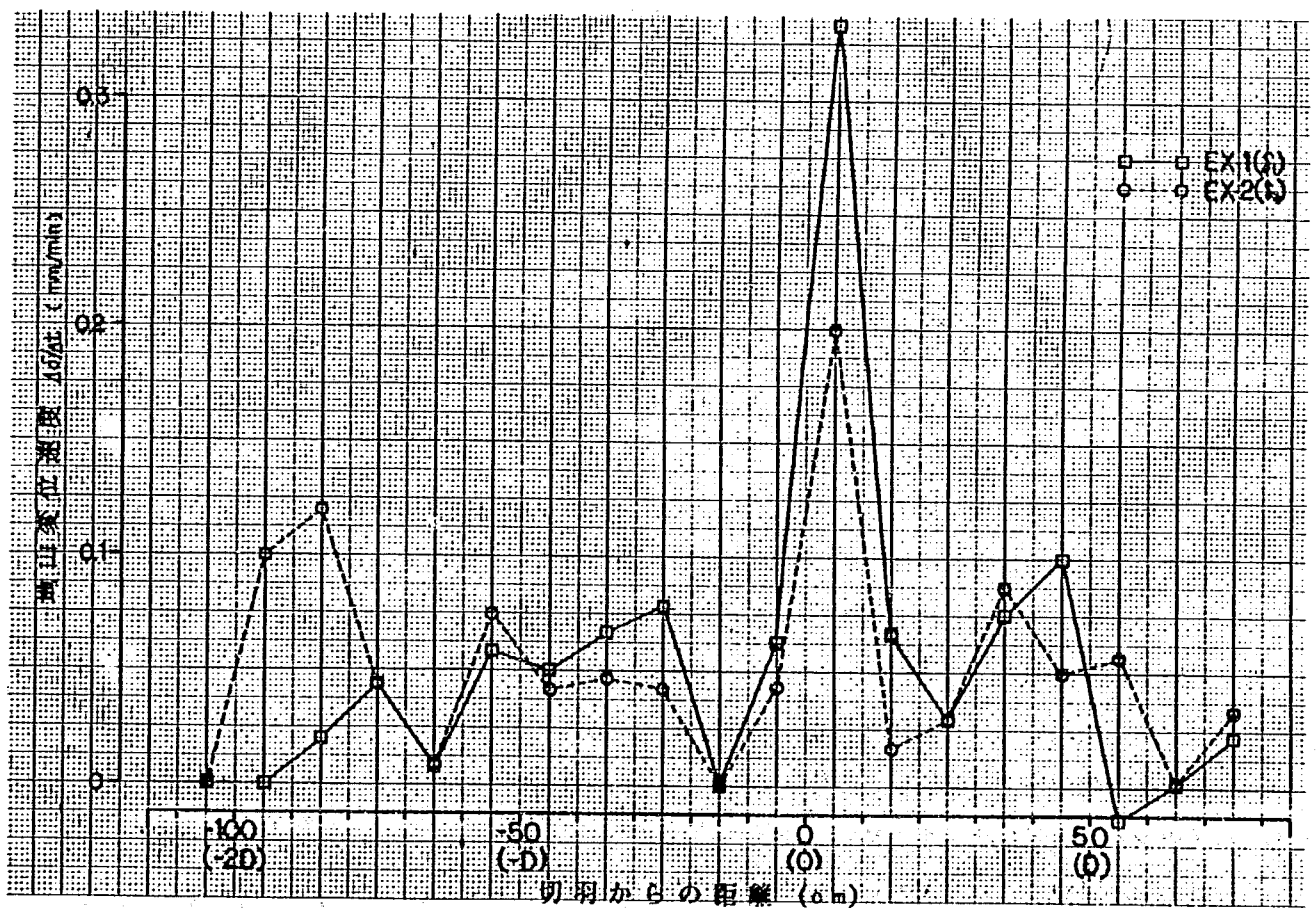
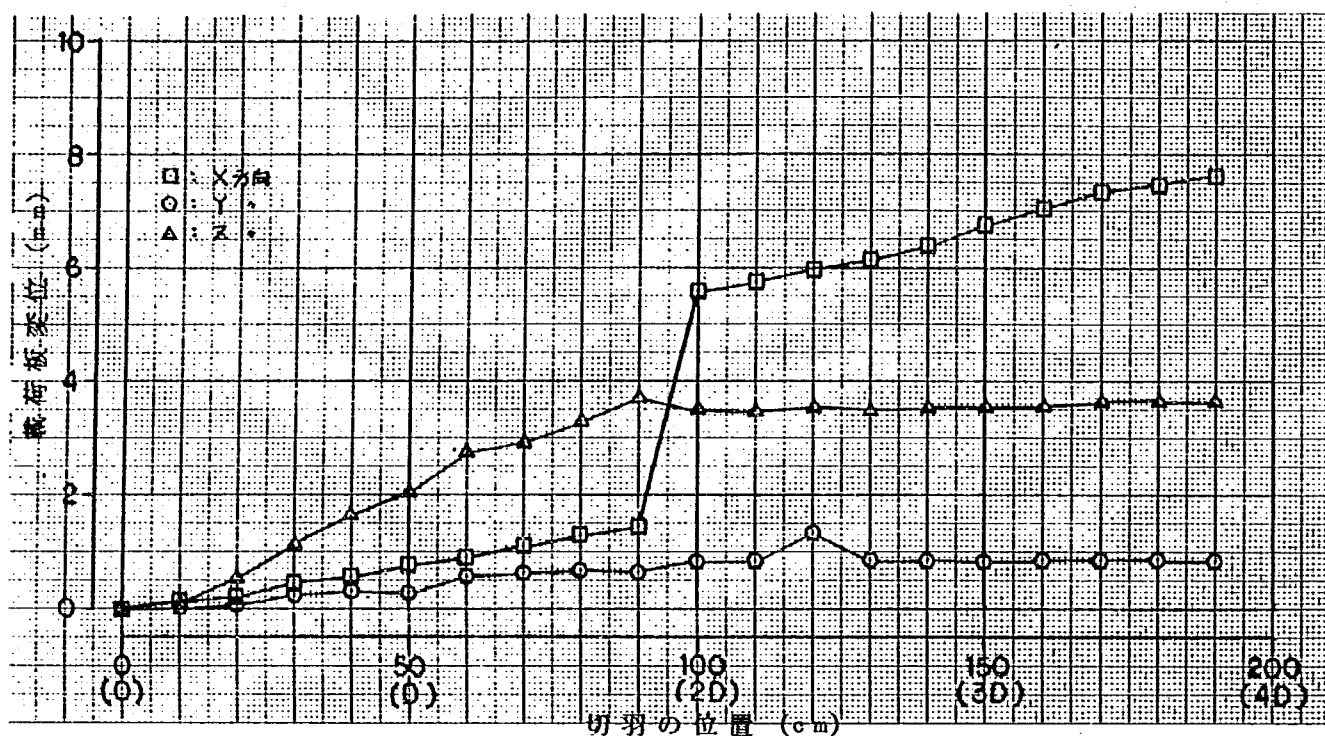


図-30 地山変位速度（押込み前から掘削開始まで）と切羽から測定断面までの距離の関係図



図—31 トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化図

実験結果の図および表は、以下に示すとおりである。

- 進行表（トンネル掘削の進行と所要時間の関係図）……………図—32
- トンネル切羽位置による基準応力の経時変化図……………図—33
- トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図（A断面）……………図—34
- トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図（B断面）……………図—35
- 覆工板A・Bのトンネル土圧と位置の関係図……………図—36
- 地山変位と切羽から測定断面までの距離の関係図……………図—37
- トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化図……………図—38

(3) 切羽付近の地山中鉛直応力の等高線図

トンネル切羽付近の地中応力の分布を、掘削開始前の地中応力との比によって以上の図に示す。ただし、粘性土の実験では実験中に原因不明の載荷圧の増大が見られたので、この影響を除くため応力の増分を差引いて表示することにする。この補正值は、100cmの位置でY方向応力 0.14kgf/cm^2 、Z方向応力 0.15kgf/cm^2 である。

- トンネル周辺応力（初期値との比）の等圧線図、粘性土……………図—39
- トンネル周辺応力（初期値との比）の等圧線図、砂質土……………図—40

(4) パイナンバー表示によるまとめ

掘削実験の結果を、パイナンバー表示にして表—7に示す。

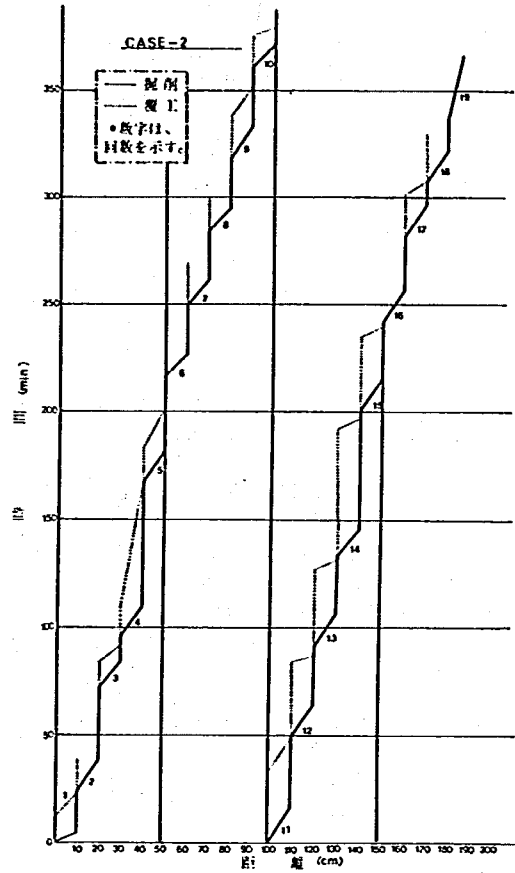


図-32 進行表 (トンネル掘削の進行と所要時間の関係図)

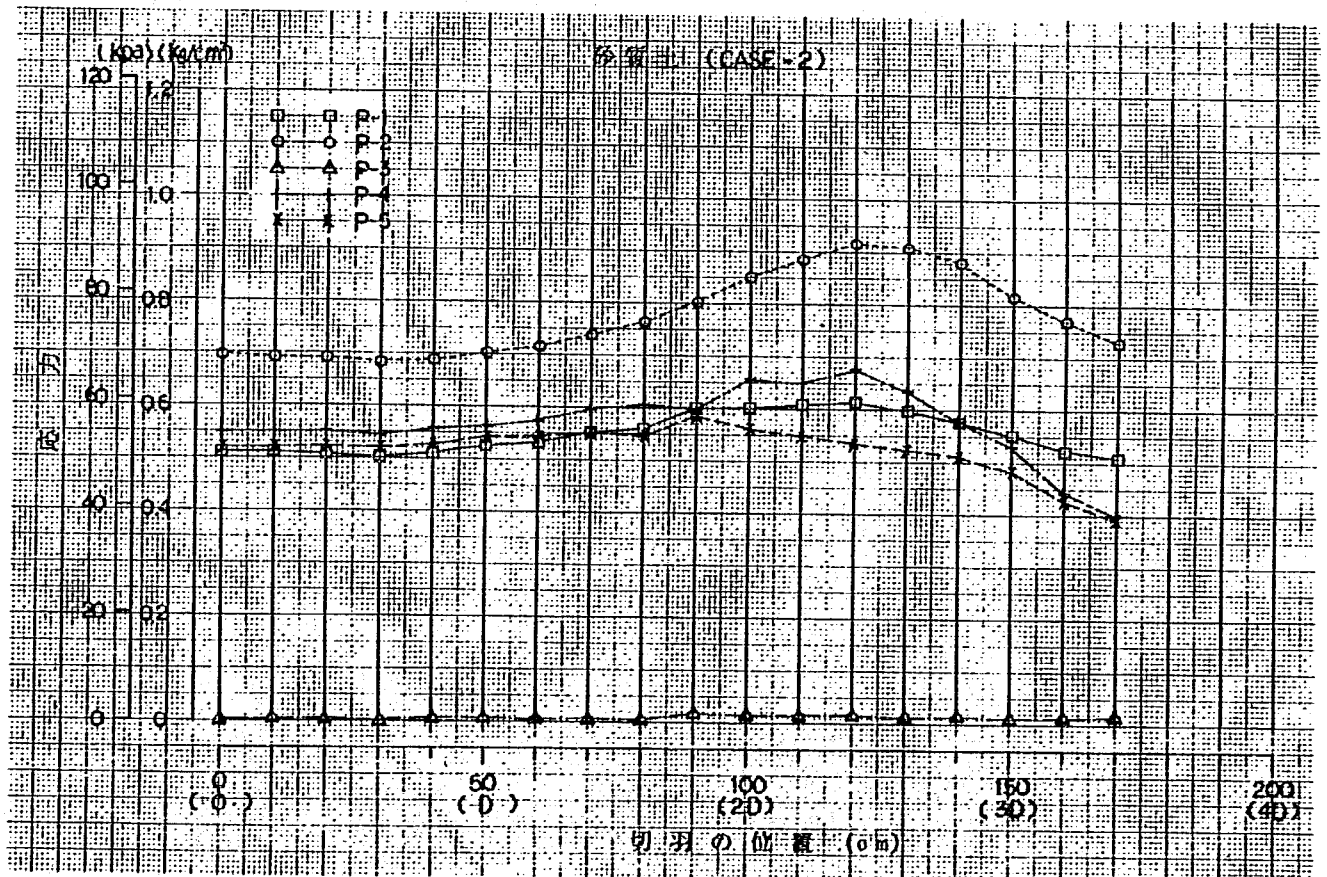


図-33 トンネル切羽位置による基準応力の経時変化図

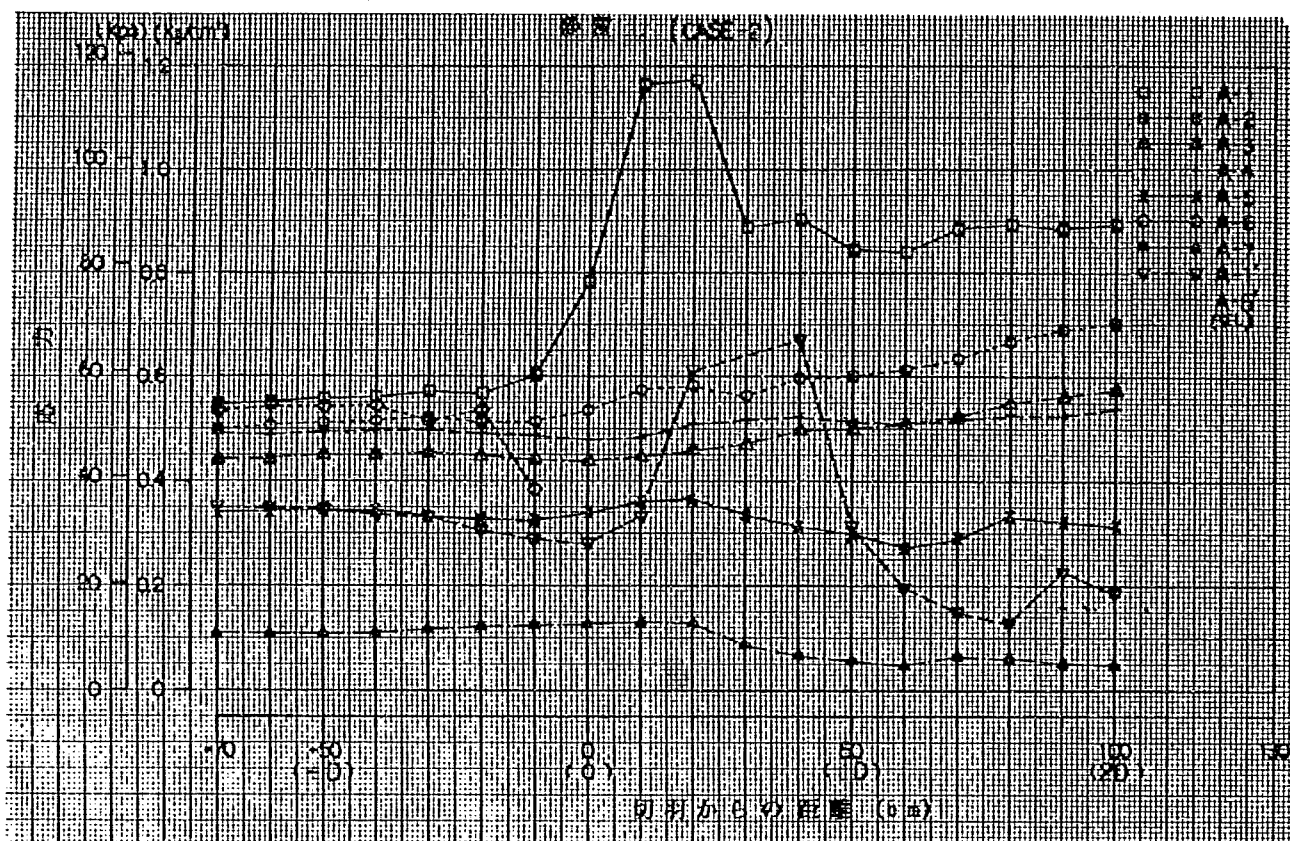


図-34 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図 (A断面)

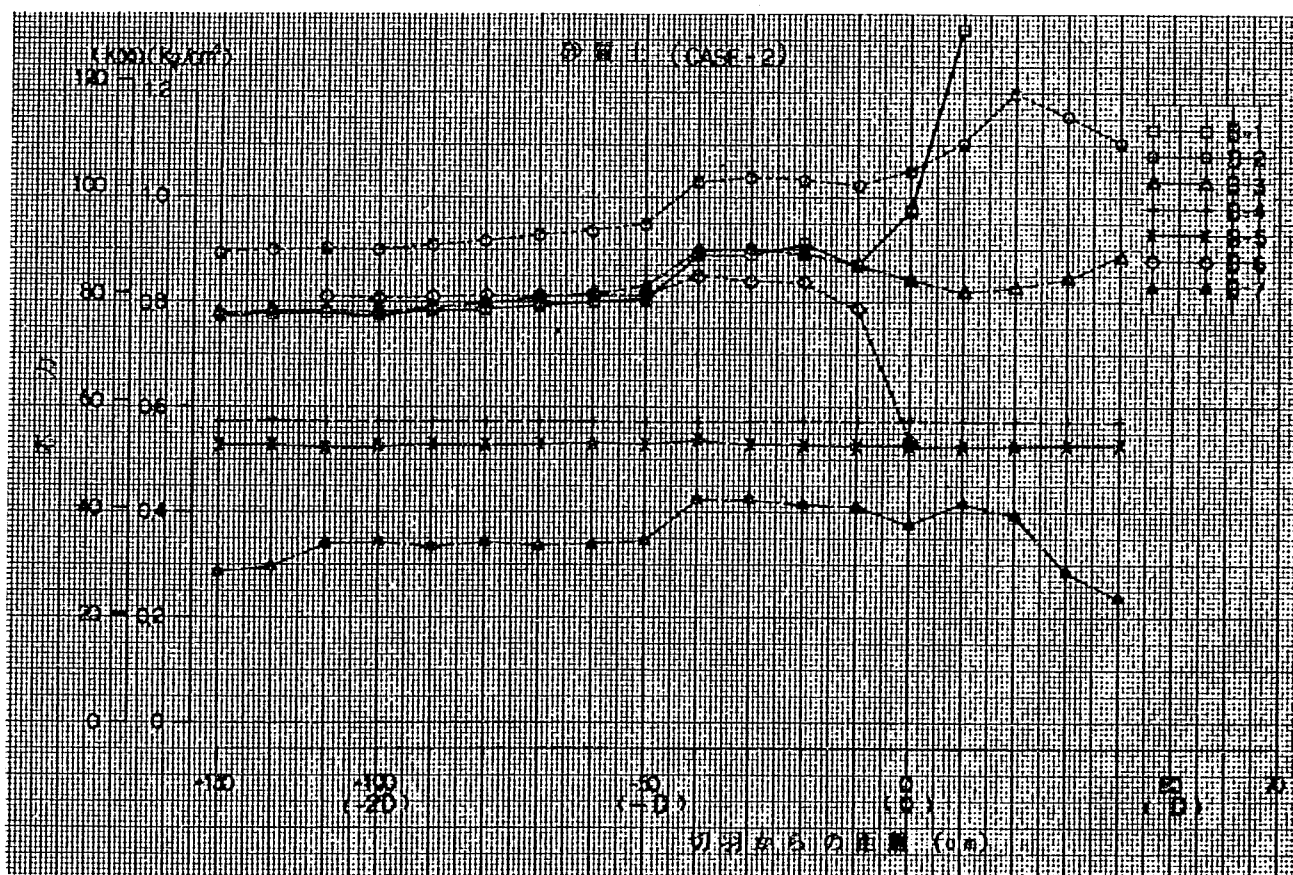


図-35 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係図 (B断面)

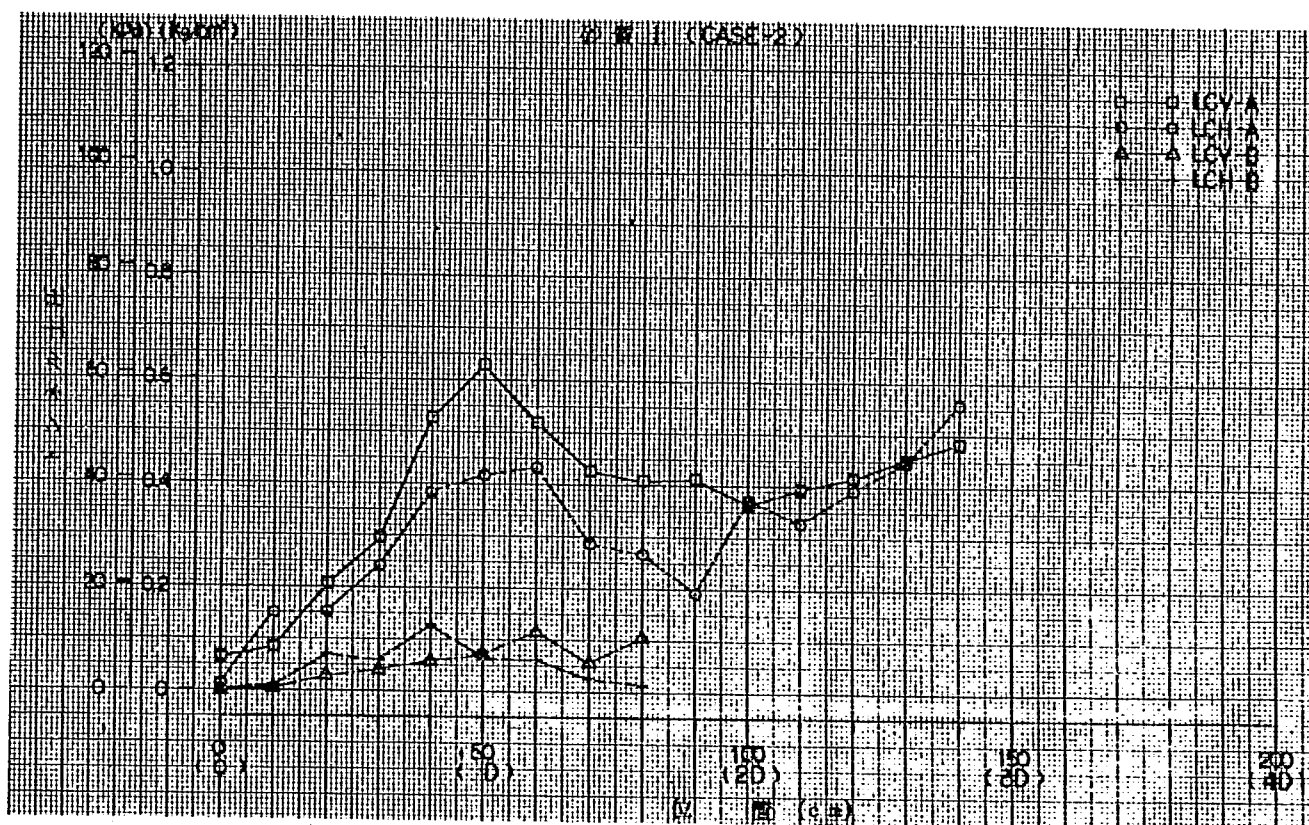


図-36 覆工板A・Bのトンネル土圧と位置の関係図

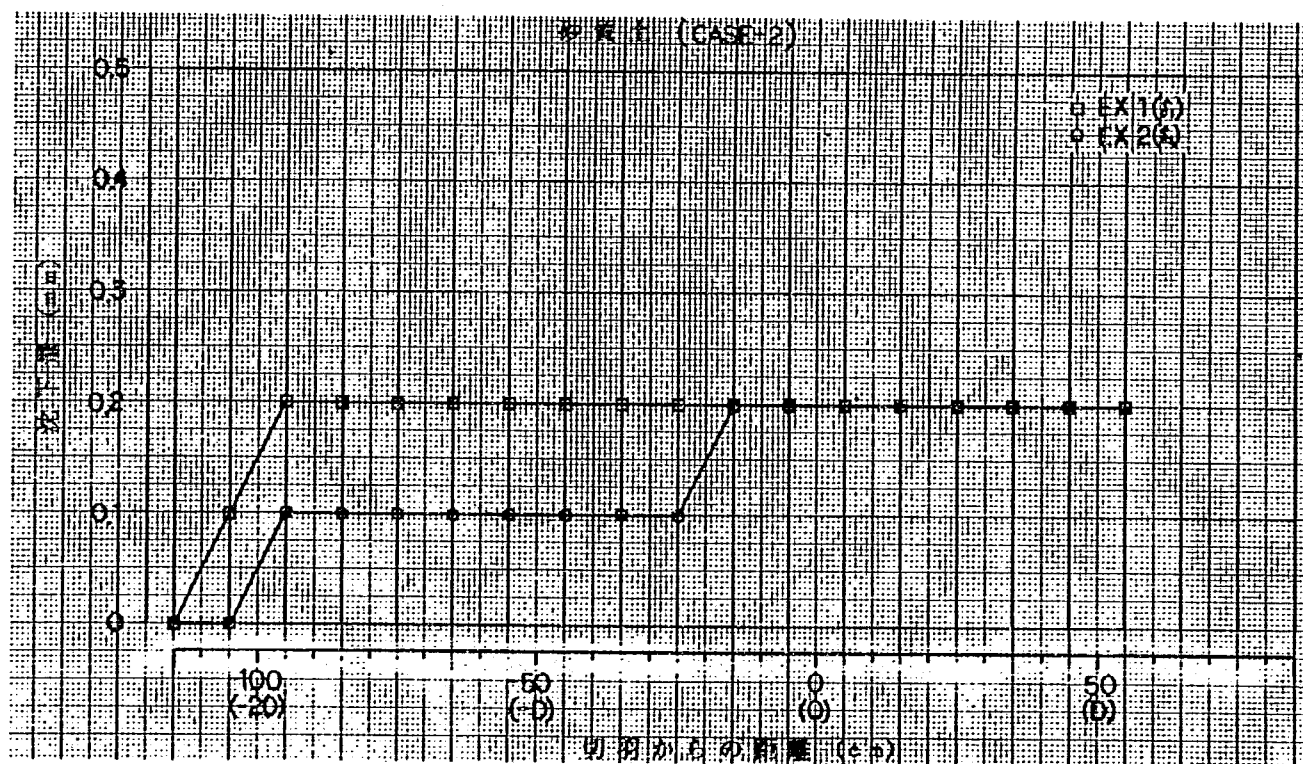


図-37 地山変位と切羽から測定断面までの距離の関係図

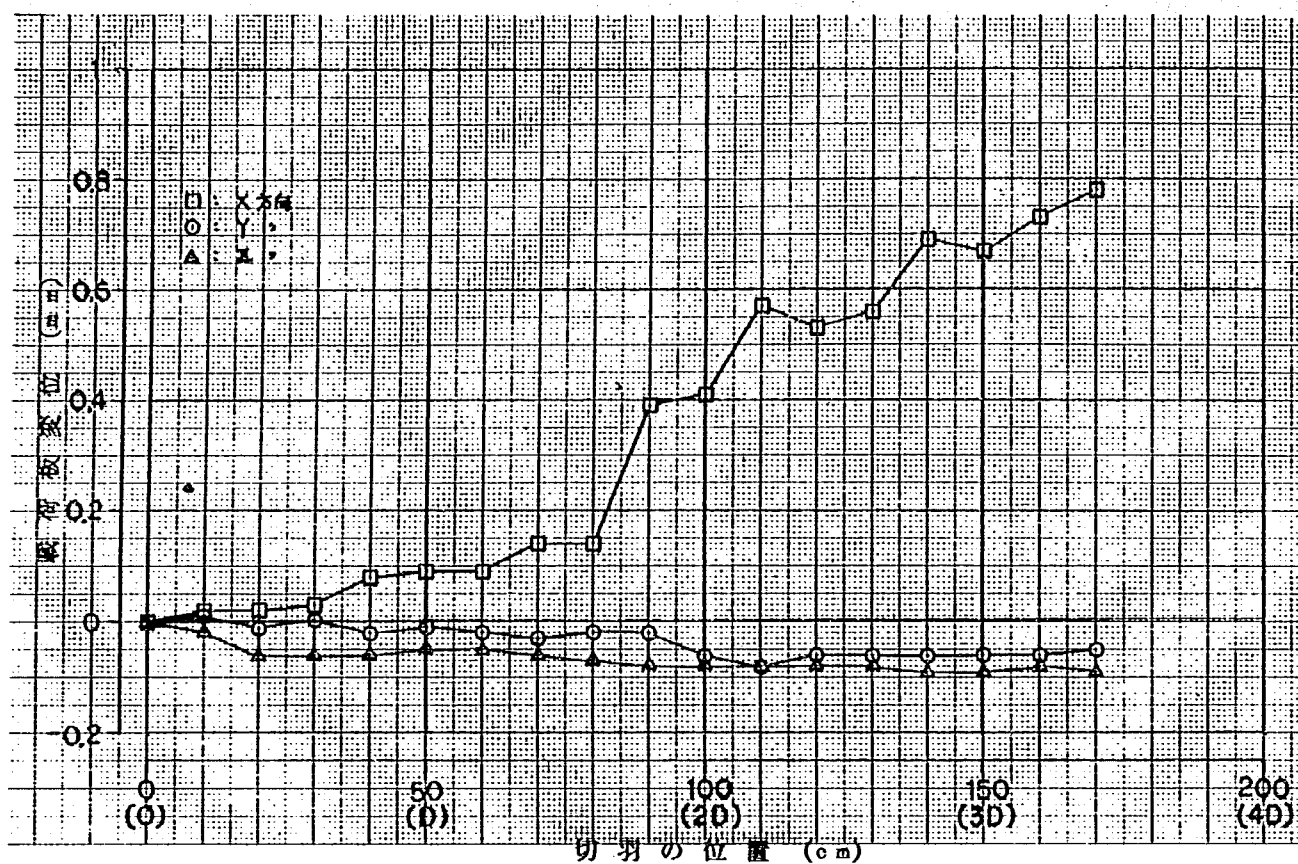


図-38 トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化図

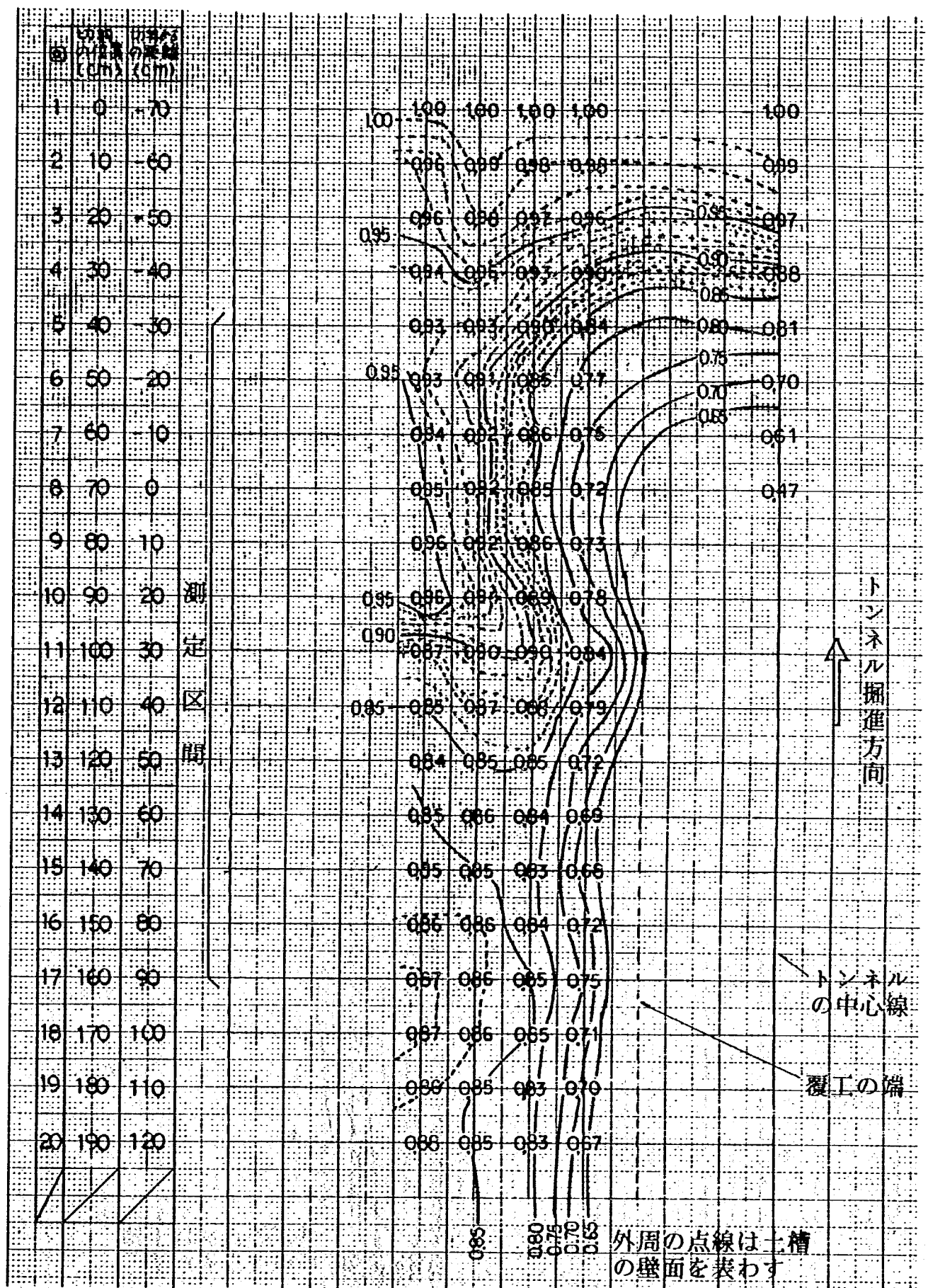


図-39 トンネル周辺応力（初期値との比）の等圧線図，粘性土（A断面）

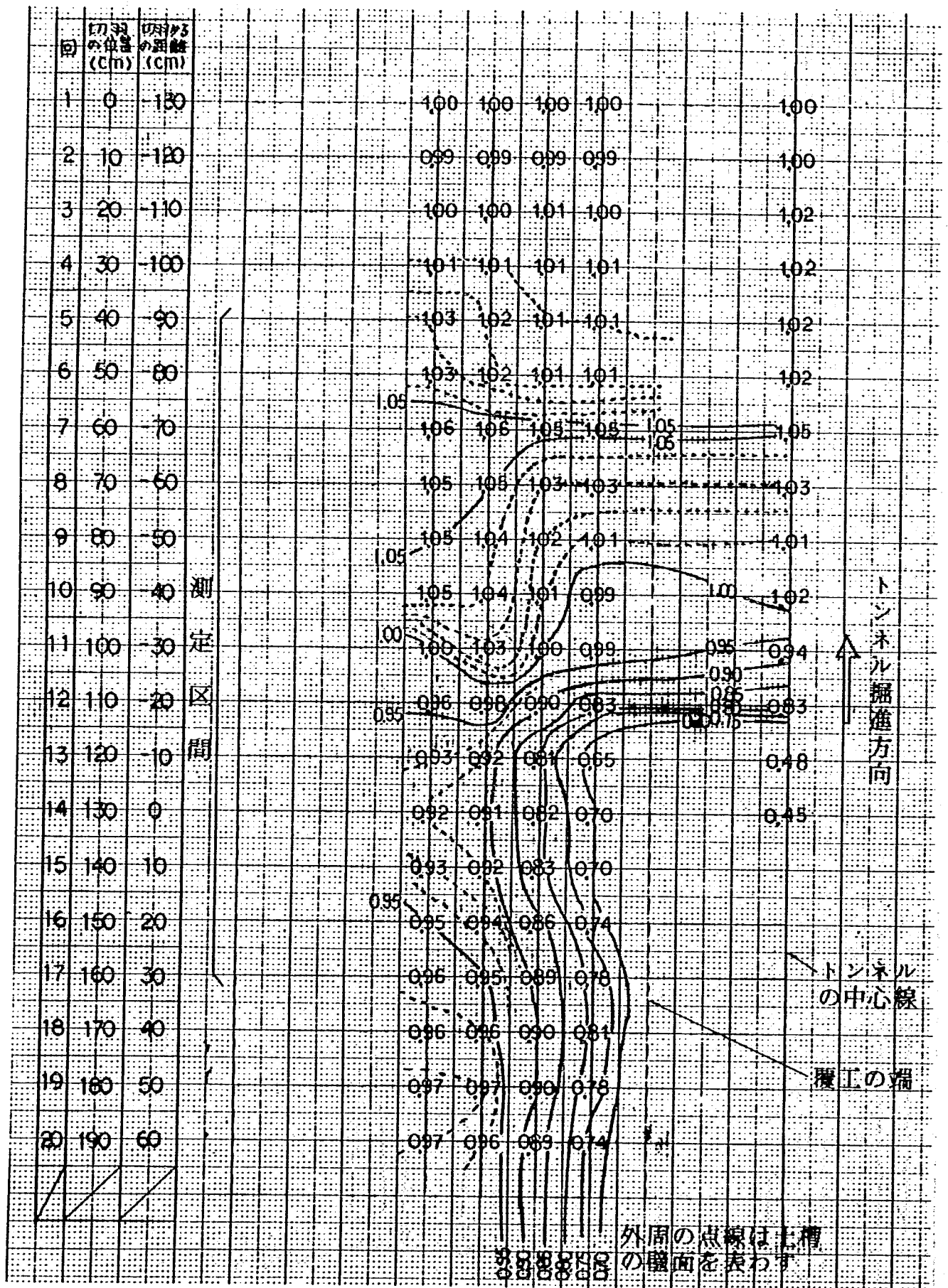


図-39 トンネル周辺応力（初期値との比）の等圧線図，粘性土（B断面）

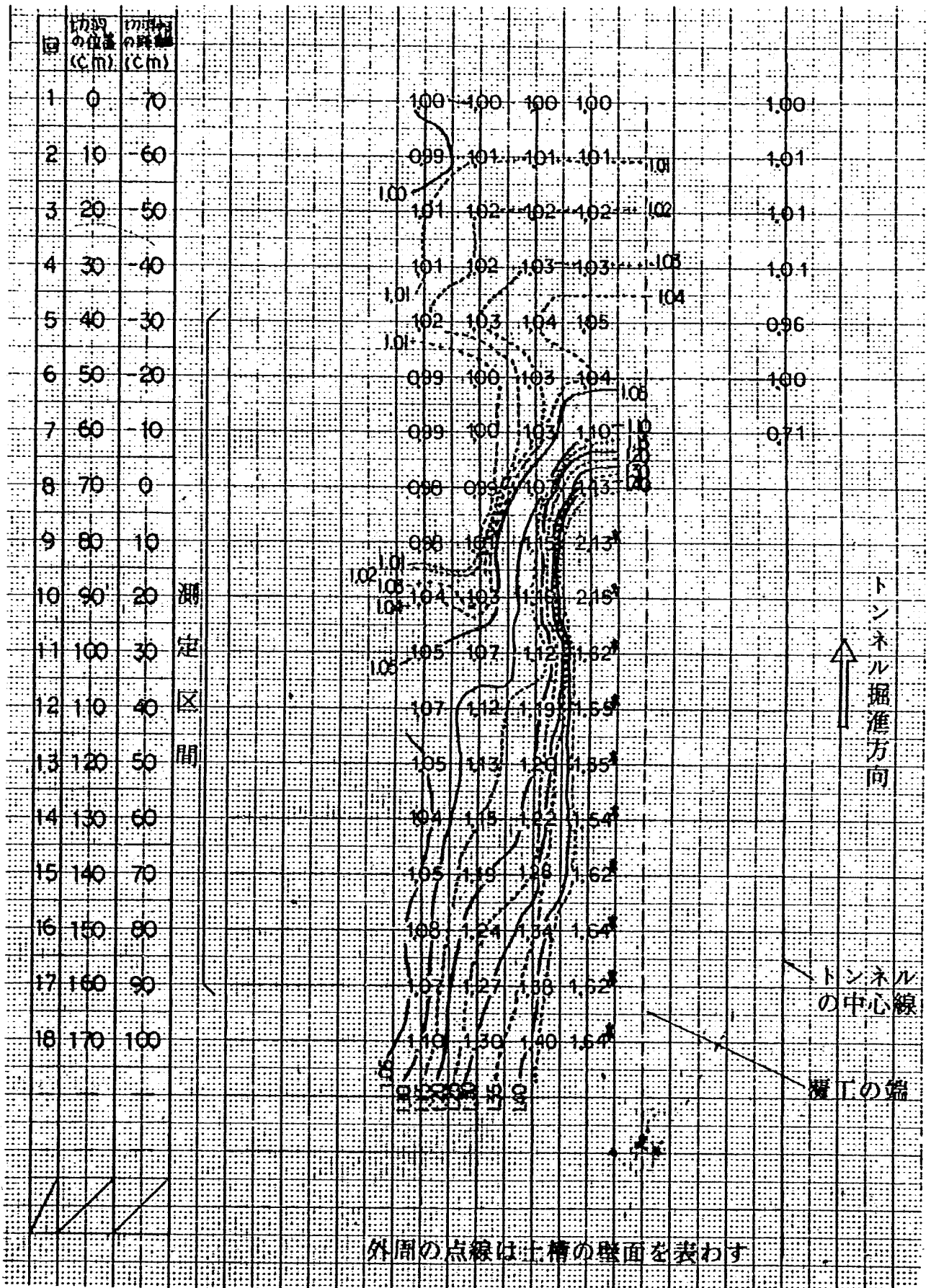


図-40 トンネル周辺応力（初期値との比）の等圧線図，砂質土（A断面）

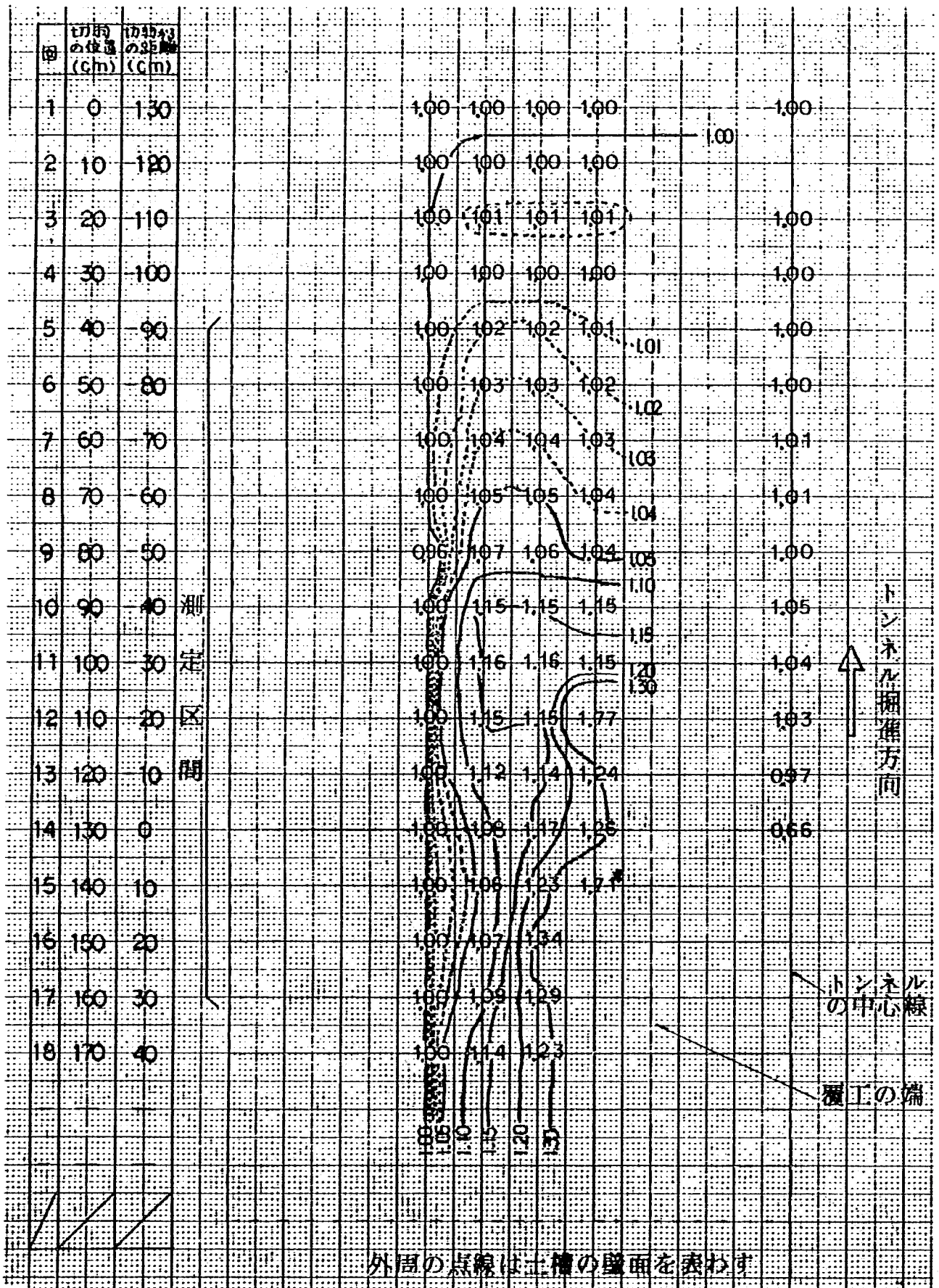


図-40 トンネル周辺応力（初期値との比）の等圧線図，砂質土（B断面）

表一7 掘削時の実験結果から得られたパイナンバー一覧表

パイナンバー	記号	粘性土	研質土	
π_1	H/D	8.40	8.44	
π_2	C/r H	0.13	0.15	
	C/r D	1.12	1.24	
π_3	$\tan \phi$	0.05	1.06	
π_4	d/D	0.09	0.0004	
π_5	ℓ/d	0.2	0.2	
π_6	T/r H	0.64	0.13	
	T/r D	5.35	1.06	
参 考	qu/r H	0.270	0.345	
H	cm	420	422	土かぶり高 h = 99cm とする
C	g/cm ²	105	117	
r	g/cm ³	1.87	1.88	
D	cm	50	50	
ϕ	°	3.1	46.8	
d	cm	0.45	0.02	
ℓ	cm	10	10	
η ※	kg・min/cm ²	1.470	12.222	一軸クリープ試験から $\eta = E_2 / \beta = \sigma_0 / (\alpha - \beta)$
T	kg/cm ²	0.5	0.1	覆工板 B の値
qu	kg/cm ²	0.212	0.274	
E ₁	kg/cm ²	6.5	49.2	一軸圧縮試験から
E ₂ ※	kg/cm ²	29.4	291	一軸クリープ試験から $E_2 = \sigma_0 / \alpha$, $\sigma_0 = 0.273 \text{ kg/cm}^2$ (粘性土), $\sigma_0 = 0.320 \text{ kg/cm}^2$ (砂質土)

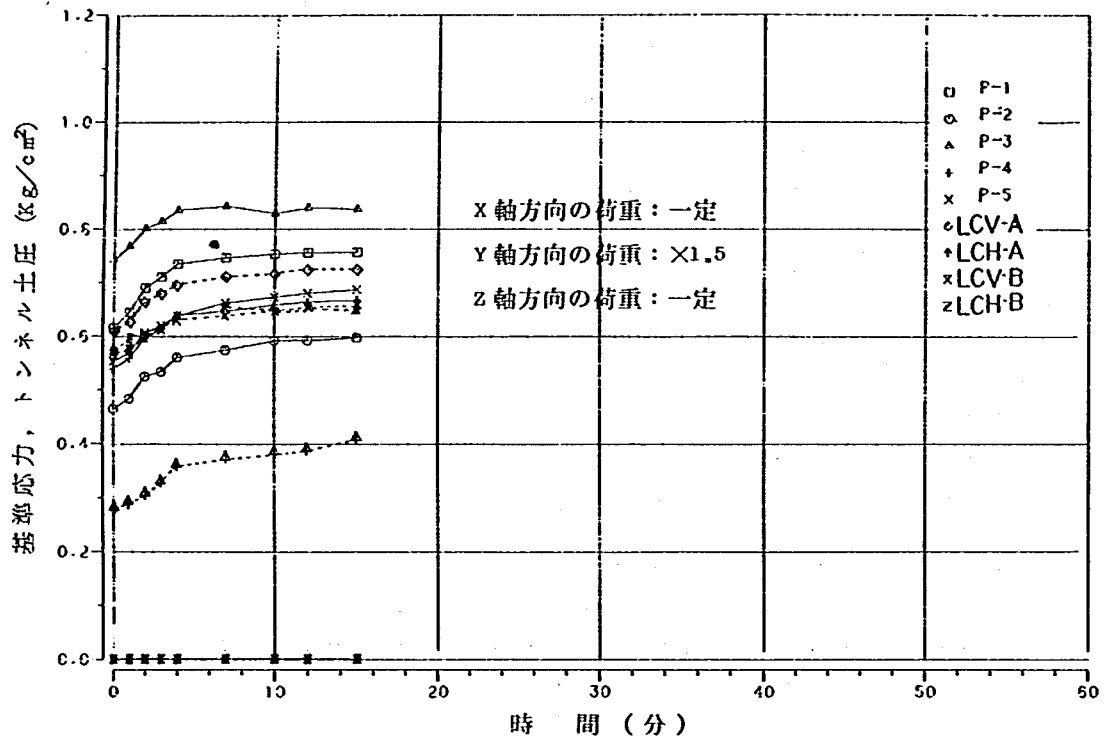
※ ただし、粘性土： $\alpha = 9.30 \times 10^{-3}$, $\beta = 2.00 \times 10^{-2}$ (1/min)；砂質土： $\alpha = 1.10 \times 10^{-3}$, $\beta = 2.40 \times 10^{-2}$ (1/min)

4.3 再載荷および除荷時の実験結果

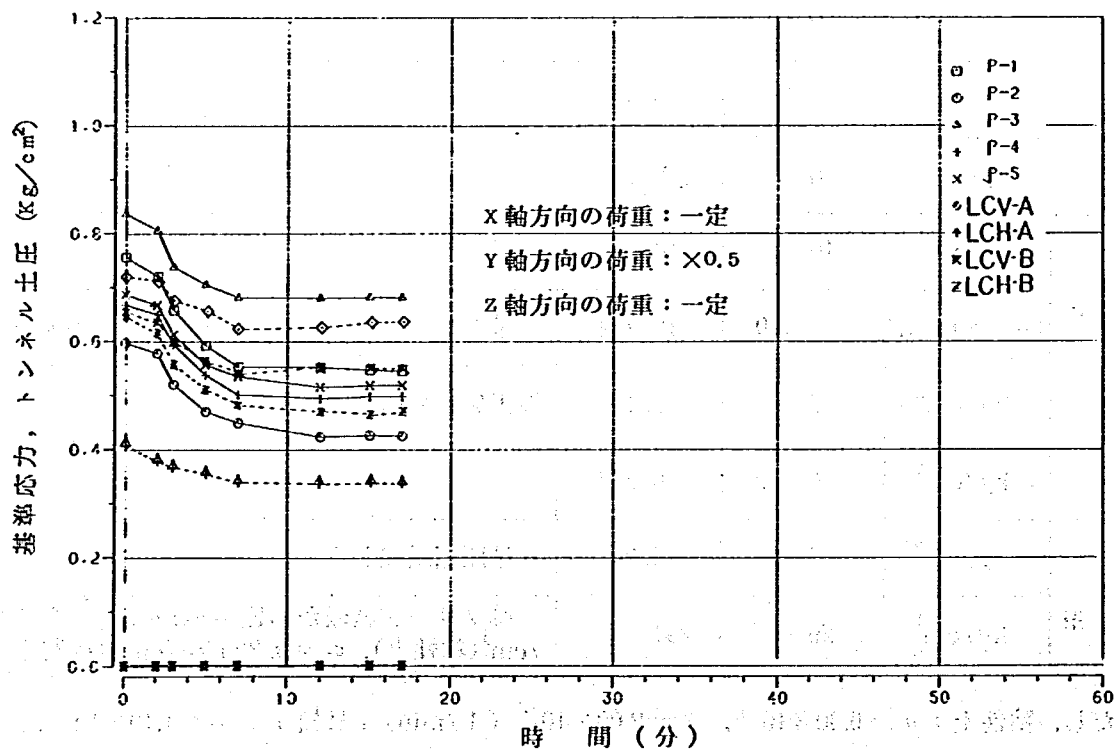
実験の結果から、得られる基準応力とトンネル地圧との関係図を次に示す。

粘性土の基準応力とトンネル地圧の関係図……………図—41, 図—42

砂質土の基準応力とトンネル地圧の関係図……………図—43



図—41 粘性土の基準応力とトンネル地圧の関係図 (その 1)



図—42 粘性土の基準応力とトンネル地圧の関係図 (その 2)

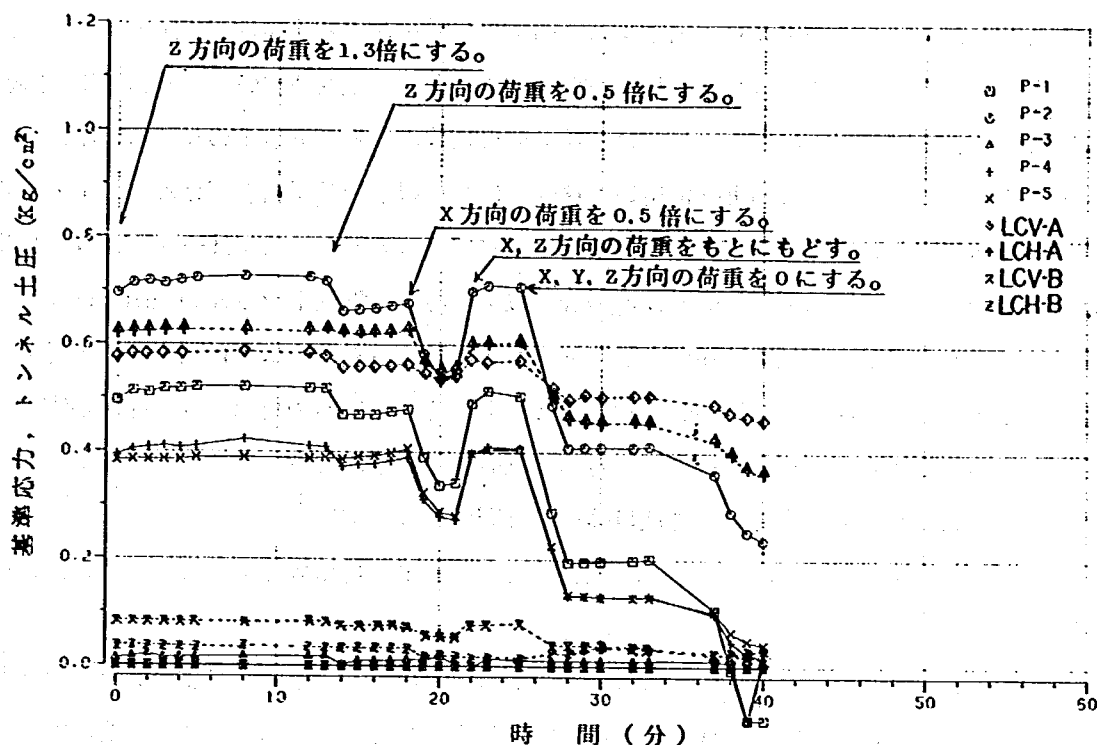


図-43 砂質土の基準応力とトンネル地圧の関係図

5. 考察

5.1 現場へ適用する際の問題点

今回の模型実験を現場へ適用するには、相似則パイナンバーを実験と現場で比較する必要がある。その際、特に問題となるのは、①相似則パイナンバーを比較する際、現場における地山強度（粘着力、内部摩擦角）をどのように評価するか、②実験における推進工法という特殊な施工法がどのような影響を与えるかについて相似則上考慮していないという点である。この順に述べる。

今回の実験では、土かぶりはかなり大きいから内部摩擦角によって現場と模型実験とを比較するのがよい。粘性土の内部角は 3.1° であるが、これに相当するような現場での岩盤は一般の文献には報告されていない。一般に発表されているものとしては、道路トンネルの地山分類でEにあたるものでも、内部摩擦角は 15° 程度あるとしている¹⁾。しかし以下に述べるような理由で現場における地山強度は実際よりも強く見積られている可能性が大きい。まず第1に現場での地山性状の把握の難しさがある。軟岩の場合、まず試験用のコアを採取するのが困難である。そのため、いきおいコア採取の可能な比較的硬い岩石の試験結果が、岩盤の物性値と見なされる危険がある。また試験の供試体の寸法についても注意する必要がある。今回模型実験の物性試験に用いた供試体寸法は直径5 cm 高さ10 cm の円柱であるから、これに相当する現場における供試体寸法は直径1 m 高さ2 m の円柱になる。したがって、もし現場において実験と同じ寸法の供試体で物性試験ををするとするならば、供試体が大きくなるため、不連続面等を含むことになり、強度は低下するはずである。

こうしたことから、内部摩擦角 3.1° に相当する地山が現場で存在する可能性は否定できない。しかし、上記のような条件をすべて満足する現場における地山強度の試験を行うことはできない。そのため直接内部摩擦角で比較するのは困難である。したがって、それにかわる粒度分析試験による 2μ 以下の粒子含有率によって現場との相関を考えることにする²⁾。今回実験に用いた粘性土は 2μ 以下の粒子含有率は20%である。これは頸城トンネル第1工区の膨張の少ない泥岩³⁾、塩沢トンネル君帰横坑の泥岩(169K180m)⁴⁾、などに相当する。頸城トンネルの地山では1軸圧縮強度が $80\sim 75\text{kg/cm}^2$ 以下であり、塩沢トンネルの地山では弾性波速度が 2.1km/s である。これらから、地山分類では道路トンネル分類でDもしくはEに相当すると考えられる。

砂質土は内部摩擦 46.8° であり、これは地山分類ではAにあたる¹⁾。硬岩の場合、コア採取が困難であるということはないから、この点では現場で採取した岩石の試験結果が地山強度として信用できる。供試体寸法の問題は残るが、きれつがないとすると、寸法自体はそう問題にならない¹⁾。

模型実験での推進工法の影響については、現在のところ定量的には確認できないので、定性的な考え方のみを述べる。

まず推進力による覆工ひずみが推進後に残留するか否かは以下のようにして調査した。金属製覆工にストレインゲージをはり、推進時と推進していない時でひずみがどのように変化するかを計測した。その結果、推進力を停止させると同時に覆工のひずみはなくなり、推進力による残留ひずみは認められなかった。

次にトンネル掘削面の凹凸と、覆工の移動の影響を考えてみる。切羽付近においては、掘削がやり難いことから、一般には余掘りよりも掘削断面に突出してくる地山が問題となることが多い(図-44(a))。この場合には、トンネル地圧は現場における地圧より大きくなる側にある。切羽より手前の覆工部分における地山との接解状況の影響は、一概には言えない。図-44(b)に示すような(A)、(B)の覆工エレメント間に段差がある場合、地山が流動的に動けば、その段差の存在はトンネル地圧に対して中立的に働く。例えば、図-44(b)の(B)の覆工で上からの荷重は増加するであろうが、下からの荷重は減るはずである。その結果、覆工(B)は下へ移動して覆工(A)と同じトンネル地圧におちつくことになる。もし地山が流動的に動かない場合、(A)と(B)ではトンネル地圧は異なるし、さらに移動前と後で異なると思われる。

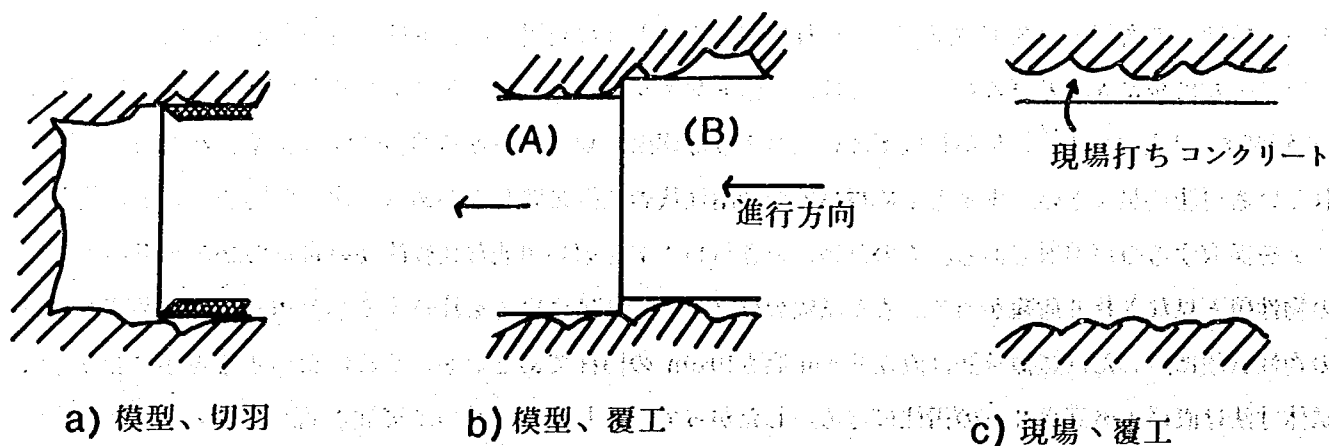


図-44 模型の推進工法と現場における施工法

今回の実験では、粘性土ではトンネル地圧は覆工間ではほとんど差がなく移動によっても大きい変化がないため、施工法による影響はあまりないと考えられる。砂質土の実験では、トンネル地圧は覆工間で大きく異なる。また移動前後でも異なるため、図-44(b)のような状態になっていると考えられる。このため、砂質土実験のトンネル地圧は、図-36で小さい方の地圧をトンネル地圧として考えることとした。

5.2 切羽付近の鉛直地山応力状態

切羽付近の鉛直地山応力状態は、概略「Ⅱ. 土かぶりの小さい模型実験（その1）」の4.1で述べた応力再配分図と一致する。すなわち粘性土の方は、切羽付近で地山が降伏するので4つの応力の領域に分けられるが、砂質土の方は降伏せず2つの応力の領域に分けられるだけである。（図-45）

粘性土実験での塑性領域は、切羽からほぼ縦断奥行にトンネル直径、横断方向でも片側にトンネル直径ほどの領域である。

砂質土の場合、応力状態では縦断方向ではやはりトンネル直径程度、横断方向では片側でトンネル直径よりやや小さい範囲で、応力の増加がみられた。

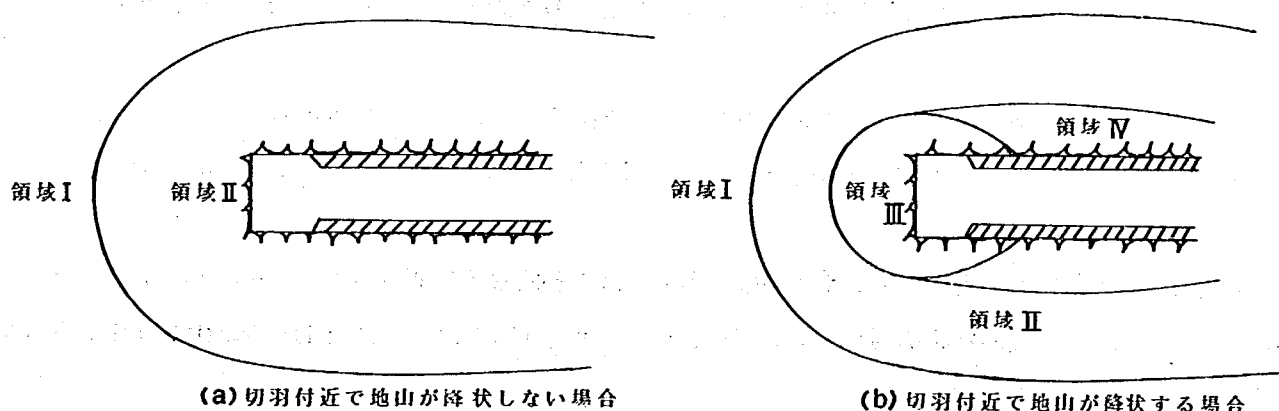


図-45 切羽付近の鉛直地山応力状態の概略平面図

5.3 相似則に対する再検討

土かぶりが大きい場合のトンネル地圧の実験の相似則について表-6の $\pi_1 \sim \pi_6$ の相似則パイナナンバーを採用した。実験結果を用いて、その相似則パイナナンバーについて再検討を加える。

表-7により地山の強度パイナナンバー $\pi_2 = C/rD$ （もしくは C/rH , qu/rH ）がほぼ同じ値であるにもかかわらず、トンネル地圧現象のパイナナンバー $\pi_4 = d/D$, $\pi_6 = T/rD$ （もしくは T/rH ）は大きく異なっている。これは、もう1つの地山強度パイナナンバー $\pi_3 = \tan \phi$ が異なっているためである。このことから、土かぶりの大きいトンネル地圧を相似対象とする実験において $\pi_3 = \tan \phi$ は重要なパイナナンバーであると言える。

ただし、 π_2 が π_6 におよぼす影響を確認するには、今回の実験だけでは不足で、 $\pi_3 = \tan \phi$ を一定にして π_2 を変化させて、その時、 π_6 がどのように変わるかを実験、計測しなければならない。

Egger の解析解によると地山強度比 qu/rH は、トンネル地圧 T/rL や変位量 d/D に顕著な影響⁶⁾を与える。しかし、文献 I—4) P 373 にもある通り、深いトンネルの場合、地山内では地山がすべりに抵抗するには粘着力よりも内部摩擦角に負うところが大きい (II, 5—3) とする考え方もある。また、神藤ら⁷⁾によれば、土かぶりの大きい円型素掘りトンネルの模型実験で地山強度比 qu/rH が大きい場合でも内部摩擦角 $\tan \phi$ が小さければ、より大きい地山変位が観測されている。逆に内部摩擦角が大きい場合、地山強度比が小さくても Egger の解析解よりもずっと小さい地山変位量しか計測されていない。こうしたことから $\pi_2 = C/rL$ や qu/rH は、膨張性地山のトンネル地圧や変位量に対して影響は及ぼすが、2 義的なものであって、1 義的には $\pi_3 = \tan \phi$ によって膨張性地山の性状が決まるものと考えられる。

$\pi_1 = H/D$ は、今回の実験では変化させていない。しかし、膨張性地山の発生原因の 1 つに初期の地山潜在エネルギーが大きいことがあるというのは一般的に認められていることであるから、重要な相似則パイナンバーと考えてよい。

$\pi_4 = d/D$ は 5.4 で述べるようにエネルギー収支との関連からトンネル地圧 $\pi_6 = T/rD$ に大きい影響を与えらると思われる。II で $\pi_4 = d/D$ を無視したが、この場合は地山が粒状体でトンネルの上方部分の地山が完全に他の地山と分離し、かつ $\pi_4 = d/D$ を大きくしても他の地山部がゆるまないという条件が満たされていたからである。地山がかなり変形した後も連続体として考えてよい場合には、 $\pi_4 = d/D$ は重要な要因と考えられる。

$\pi_5 = \ell/D$ は、トンネル地圧とともに切羽の安定問題と関係している。トンネル地圧に関しては、 π_5 は $\pi_4 = d/D$ を通して $\pi_6 = T/rL$ に影響を与えていると考えられるので、 $\pi_4 = d/D$ を相似則パイナンバーとして考慮すればよいと思われる。

結論的には、土かぶりの大きいトンネルの模型実験では 1 義的な相似則パイナンバーは $\pi_1 = H/D$, $\pi_3 = \tan \phi$, $\pi_4 = d/D$, 2 義的な相似則パイナンバーとして、 $\pi_2 = C/rL$, ($L = H$ or D) や地山強度比 qu/rH が重要であると考えられる。

5.4 模型実験における力学的エネルギー収支

(1) 収支の計算式

エネルギー収支の概要については I—2 で述べた。模型実験を対象としてエネルギー収支の計算を行ってみる。

ただ計算をするだけでは計算結果の信頼性に問題が残るので 2 通りの異なる方法でエネルギー解放率 R_E (掘進前のトンネル周辺地山中の内部ひずみエネルギーに対するトンネル掘進によって解放された全エネルギーの割合) をもとめ、その値を比較することによって、測定結果や計算結果の検証を行うことにする。

2 通りの方法の内第 1 は、初期状態における内部エネルギー、 $W_{I,0}$ から逐次トンネル掘進による流出エネルギー、 $\Sigma (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$ を除いてやり、最終段階の内部残留エネルギー、 $W_{I,0}$ をもとめる。

エネルギー解放率 R_E は、以下のようにになる。

$$R_E = \frac{\Sigma(\Delta W_R + 2 \Delta W_v)}{W_{I,0}} \dots\dots\dots (1)$$

第2の方法とは土槽に埋められている土圧計の計測値より直接内部残留エネルギー、 $W_{I,10}$ をもとめる。

この方法ではエネルギー解放率 R_E は次のようになる。

$$R_E = \frac{W_{I,0} - W_{I,10}}{W_{I,0}} = 1 - \frac{W_{I,10}}{W_{I,0}} \dots\dots\dots (2)$$

(a) 初期内部エネルギーより逐次流出エネルギーを用いてエネルギー解放率をもとめる方法
式1—(12')より

$$W_{I,n} = W_{I,n-1} + \Delta W_H - (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$$

初期载荷においては、载荷による流入エネルギーがそのまま内部エネルギーになるから

$$W_{I,0} = W_{H,0}$$

実験中载荷板はほとんど動かないから流入エネルギー W_H は0とした。また1掘進長あたりの流出エネルギーは毎回ほぼ同じであるとして、その平均値を $(\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$ とする。今回行った10掘進ステップまでのエネルギー収支は以下のようになる。

$$\text{第1回目の掘進} \quad W_{I,1} = W_{I,0} - (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$$

$$\text{第2回目の掘進} \quad W_{I,2} = W_{I,1} - (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$$

$$+ \text{第10回目の掘進} \quad W_{I,10} = W_{I,9} - (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$$

$$\text{全工程} \quad W_{I,10} = W_{I,0} - 10 (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$$

したがって、解放エネルギーの累計は $10 \times (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)$ となりエネルギー解放率 R_E は

$$R_E = \frac{10 \times (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)}{W_{I,0}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

ここで $W_{H,0}$, ΔW_R , $2 \Delta W_v$ を具体的に算出する式を以下の(i)~(iii)に示す。

(i) W_H

$$W_{H,0} = \sigma_L V_L = 3 \times \sigma_L \times S_L \times d_L \dots\dots\dots (4)$$

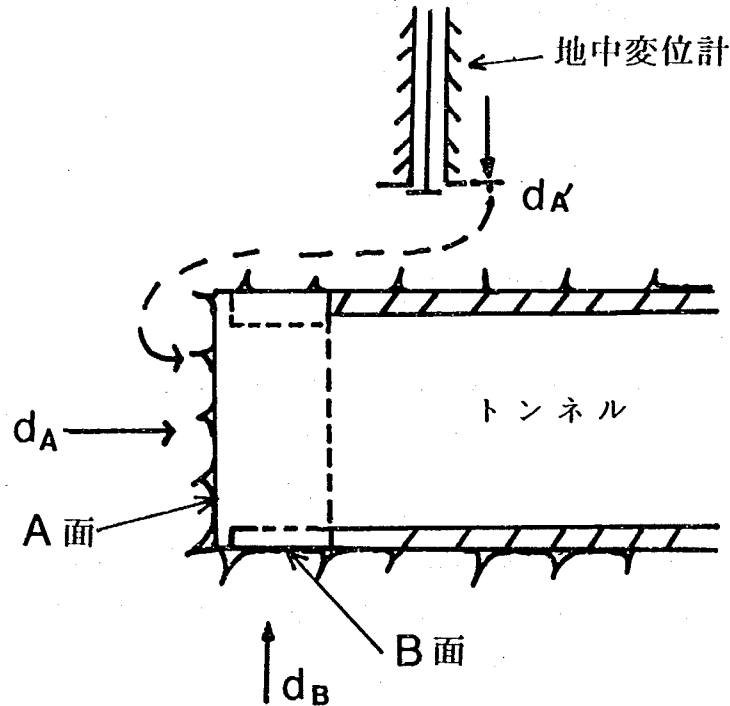
ここで、 σ_L : 载荷板の载荷圧

S_L : 载荷面積

d_L : 载荷板の平均押出量

(ii) ΔW_R

掘進によって解放されるエネルギーはトンネル切羽正面（A面）と側面（B面）で分けて考える（図—46）。



図—46 地中変位

A面は地山変位は拘束されないから

$$\Delta W_{R,A} = \frac{1}{2} \times \sigma_A \times S_A \times d_A \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 σ_A : 初期地山応力

S_A : トンネル横断面の面積

d_A : 掘削面における初期状態から掘削されるまでの累積変位

ここで項の最初の「 $\frac{1}{2}$ 」は σ_A が初期地山応力から最終的に0になるため、それを考慮した係数である。厳密に「 $\frac{1}{2}$ 」が適用できるのは弾性体の場合であるが、今回は押し出し量 d_A がほぼ一定になった状態をもって、これに近い状況になったとみなす。

B面は地山変位が拘束されるから

$$\Delta W_{R,B} = \frac{1}{2} \times (\sigma_B + \sigma_S) \times S_B \times d_B \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 σ_B : 初期地山応力

σ_S : 地山が覆工へ与える地圧

S_B : トンネル側面の面積

d_B : 掘削面における初期状態から覆工が打設されるまでの累積変位

とする。

ここで問題となるのは地山の押し出し変位 d_A , d_B である。

A面, B面とも地山の押し出し変位は, 地中変位計で計測された値を用いる。地中変位計は横断方向変位を計測しているから少なくともB面についてはほぼ近い値を示していると考えられる。縦断方向変位も横断方向変位とはほぼ等しいと仮定して, A面の地山変位も地中変位計による計測値を採用する。

ただし, d_B は支保工が非常に剛なため覆工打設後も変位するとは考えにくいので図—27において, d_B は切羽までの沈下量に等しいと考える。これに対し, d_A は覆工打設後も変位すると考えられる。

覆工打設後の変位は図—46で d'_A の点線のような地山変位を仮定して, 図—27で切羽後方の累積沈下量に等しいと考える。結局, d_A については地中変位計による計測値の全沈下量を, d_B については切羽がその地点に到達するまでの沈下量を, その変位として採用する。

こうした内空変位に関する仮定は, 解析にあたってできれば避けたいものであるが, 今回の実験では他に内空変位に関する情報がないのでやむを得ず上記のような仮定を設けた。したがって, エネルギー収支に関する議論は概略的な傾向を示すという以上の意味を持たない。

(iii) $2 \Delta W_v$

$$2 \Delta W_v = \frac{\sigma_v^2}{E_v} \times V_v \dots\dots\dots (7)$$

ここで, σ_v : 初期地山応力

E_v : 体積弾性係数

V_v : 1掘進長あたりの排土量

(b) 土槽中に設置された土圧計の計測値から最終内部エネルギーをもとめてエネルギー解放率をもとめる方法

土槽中に設置された土圧計は, その土圧計周辺の地山のエネルギーを代表して表わしている。土圧計が代表する地山の範囲は図—47で点線をしるした円筒部分の地山とする。これは, 土槽内の地圧分布は軸対称であるという仮定のもとづくものである。土槽は立方体形状をしているから, 図—2のハッチで示すように4隅にこうした円筒部分に属さない領域が残る。この部分の地圧は実験前後で変化しないと仮定する。

こうした考え方をもとにエネルギーの解放率を計算する。実験前の地山応力を σ_{pre} , 実験後の最終地山応力を σ_{post} とすると, エネルギー解放率は(2)式より

$$R_E = 1 - \frac{W_{I,10}}{W_{I,0}} = 1 - \frac{\frac{1}{2}(\sigma_{post}^2/E_v) \times \pi \ell \{(r+S)^2 - r^2\} + \frac{1}{2}(\sigma_{post}^2/E_v) \times B(B^2 - \pi r_{max}^2)}{\frac{1}{2}(\sigma_{pre}^2/E_v) \times \pi \ell \{(r+S)^2 - r^2\} + \frac{1}{2}(\sigma_{pre}^2/E_v) \times B(B^2 - \pi r_{max}^2)} \dots\dots\dots (8)$$

ここで, ℓ , r , S , B は図—47参照

E_v は体積弾性係数

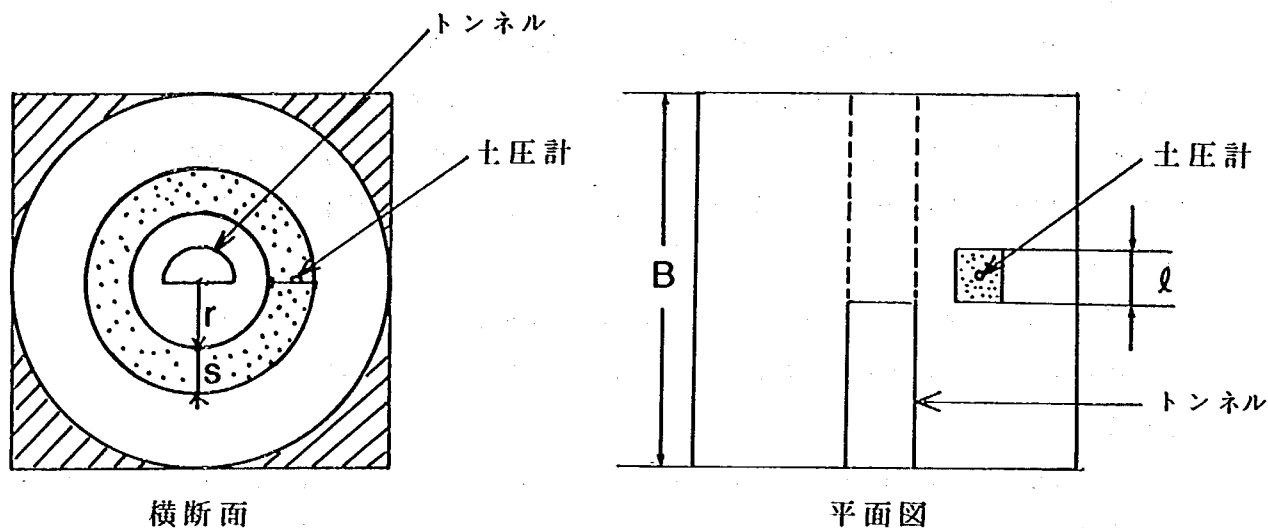


図-47 土圧計が代表する領域

今回の実験では、トンネルを貫通させたので貫通後の最終地山応力を考え、2次元計算を行う。すなわち、図-47の l の長さとして土槽の1辺の全長 B を採用する。その結果、

$$R_E = 1 - \frac{\sum \sigma_{\text{post}}^2 \times \pi \{ (r+S)^2 - r^2 \} + \sigma_{\text{post}}^2 \times (B^2 - \pi r^2 \text{max})}{\sum \sigma_{\text{pre}}^2 \times \pi \{ (r+S)^2 - r^2 \} + \sigma_{\text{pre}}^2 \times (B^2 - \pi r^2 \text{max})} \quad \text{..... (9)}$$

当初の初期地山中応力は土槽全体ではほぼ均一であるから、

$$R_E = 1 - \frac{\sum \sigma_{\text{post}}^2 \times \pi \{ (r+S)^2 - r^2 \} + \sigma_{\text{post}}^2 \times (B^2 - \pi r^2 \text{max})}{\sigma_{\text{pre}}^2 \times B^2} \quad \text{..... (10)}$$

図-47の4角のハッチ部の地山応力は実験前後で変化しないと考えているから、右辺の第2項の分子の第2項中の σ_{post} は σ_{pre} に等しいから

$$R_E = 1 - \frac{\sum (\sigma_{\text{post}}/\sigma_{\text{pre}})^2 \times \pi \{ (r+S)^2 - r^2 \} + (B^2 - \pi r^2 \text{max})}{B^2} \quad \text{..... (11)}$$

(2) 実験への適用例

(a) 粘性土の模型実験の場合

(1) (a)の方法によってエネルギー解放率をもとめる

(4)式より、 $W_{H,0} = 3 \times \sigma_L \times S_L \times d_L$

$$= 3 \times \frac{5.5 + 7.1}{2} \text{ t/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 \times \frac{6 + 18 + 31}{3} \times \frac{1}{1000} \text{ m}$$

$$= 3 \times 6.3 \text{ t/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 \times 0.018 \text{ m}$$

$$= 1.36 \text{ t} \cdot \text{m}$$

(5)式より、 $4W_{R,A} = \frac{1}{2} \times \sigma_A \times S_A \times d_A$

$$= \frac{1}{2} \times 6.3 \text{ t/m}^2 \times 0.1 \text{ m}^2 \times 0.045 \text{ m}$$

$$= 0.014 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$\begin{aligned} (6) \text{式より, } \Delta W_{R, B} &= \frac{1}{2} \times (\sigma_B + \sigma_S) \times S_B \times d_B \\ &= \frac{1}{2} \times (6.3 \text{ t/m}^2 + 5 \text{ t/m}^2) \times 0.13 \text{ m}^2 \times 0.038 \text{ m} \\ &= 0.028 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{ただし, } S_A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \frac{1}{2} = 0.1 \text{ m}^2$$

$$S_B = \pi \times D \times \ell / 2 + \ell \times D = 0.13 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} (7) \text{式より, } 2 \Delta W_V &= \frac{\sigma_V^2}{E_V} \times V_V \\ &= \frac{(6.3 \text{ t/m}^2)^2}{216 \text{ t/m}^2} \times 0.01 \text{ m}^3 \\ &= 0.002 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{ただし, } E_V = \frac{E_1}{3(1-2\nu)} = \frac{65 \text{ t/m}^2}{3(1-2 \times 0.45)} = 216 \text{ t/m}^2 \quad (E_1 \text{ は表-7 参照, } \nu \text{ はポアソン比})$$

$$\begin{aligned} \text{したがって累計解放エネルギーは, } 10 \times (\Delta W_R + 2 \Delta W_V) \\ &= 10 \times (0.014 + 0.028 + 0.002) \text{ t} \cdot \text{m} \\ &= 0.44 \text{ t} \cdot \text{m} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

$$(3) \text{式より, エネルギー解放率は, } R_E = \frac{10(\Delta W_R + 2 \Delta W_V)}{1.36 \text{ t} \cdot \text{m}} = \frac{0.44 \text{ t} \cdot \text{m}}{1.36 \text{ t} \cdot \text{m}} = 32\%$$

これに対して(1)の(b)の方法によってエネルギー解放率をもとめる。(σ post/σ pre)の比の値は図-40の切羽より120cmの値を採用する。

$$\begin{aligned} (11) \text{式より, } R_E &= 1 - \frac{\sum (\sigma_{\text{post}}/\sigma_{\text{pre}})^2 \times \pi \{ (r+S)^2 - r^2 \} + (B^2 - \pi r^2 \max)}{B^2} \\ &= 1 - \frac{\pi \{ (1^2 - 0.85^2) \times 1.0^2 + (0.85^2 - 0.7^2) \times 0.9^2 + (0.7^2 - 0.6^2) \times 0.88^2 + (0.6^2 - 0.5^2) \times 0.85^2 + (0.5^2 - 0.4^2) \times 0.83^2 + (0.4^2 - 0.25^2) \times 0.67^2 \} + (2^2 - \pi \times 1^2)}{2^2} \\ &= 1 - \frac{3.14 \times 0.75 + 0.86}{4} \\ &= 0.20 \\ &= 20\% \end{aligned}$$

(1)の(a)の方法によるエネルギー解放率が32%であったことを考えると比較的合致していると言える。実際の施工現場におけるエネルギー解放率がどの程度のものか知ることができないので、この値の適否を判断することはできない。しかし、模型実験の土槽の大きさにあたるトンネル掘削により影響を

うける領域はある程度かぎられた領域と考えられるから、この領域を仮定すれば現場におけるエネルギー解放率をもとめることができる。今回の実験によると、 $H/D=8.4$ ， $\tan \phi=0.05$ ， $d/D=0.09$ $T/H=0.64$ という条件の膨張性地山のトンネルでは、エネルギー解放率は概略20～30%になった。今回の実験では剛な覆工が用いられているから、通常の膨張性地山ではそれ以上のエネルギー解放率が見込まれる。

(b) 砂質土の模型実験の場合

(1)の(a)の方法によってエネルギー解放率をもとめる。

$$\begin{aligned} (4) \text{式より, } W_{H,0} &= \sum_{XYZ} S_L \times \sigma_L \times d_L \\ &= 4 \text{ m}^2 \times (5.1 \text{ t/m}^2 \times 0.0086 \text{ m} + 7.5 \text{ t/m}^2 \times 0.0011 \text{ m} + 5.5 \text{ t/m}^2 \times 0.0062 \text{ m}) \\ &= 0.34 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (5) \text{式より, } \Delta W_{R,A} &= \frac{1}{2} \times \frac{5.1 + 7.5 + 5.5}{3} \text{ t/m}^2 \times 0.1 \text{ m}^2 \times 0.0002 \text{ m} \\ &= 0.00006 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (6) \text{式より, } \Delta W_{R,B} &= \frac{1}{2} (6.0 \text{ t/m}^2 + 1 \text{ t/m}^2) \times 0.13 \text{ m}^2 \times 0.0002 \text{ m} \\ &= 0.00009 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$(7) \text{式より, } 2 \Delta W_v = \frac{(6.0 \text{ t/m}^2)^2}{820 \text{ t/m}^2} \times 0.01 \text{ m}^3 = 0.0004 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$\text{ただし, } E_v = \frac{E_1}{3(1-2\nu)} = \frac{492 \text{ t/m}^2}{3(1-2 \times 0.4)} = 820 \text{ t/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{したがって累計解放エネルギーは, } 10 \times (\Delta W_R + 2 \Delta W_v) \\ &= 10 \times (0.00006 + 0.00009 + 0.0004) \text{ t} \cdot \text{m} \\ &= 0.0055 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{よってエネルギー解放率は } R_E = \frac{70 \times (\Delta W_R + 2 \Delta W_v)}{W_{H,0}} = \frac{0.0055}{0.34} \Rightarrow 1.6 \%$$

これに対して、(1)の(b)の方法によってエネルギー解放率をもとめると

$$(11) \text{式より, } R_E = 1 - \frac{\sum (\sigma_{\text{post}} / \sigma_{\text{pre}})^2 \times \pi \{ (r+S)^2 - r^2 \} + (B^2 - \pi r^2 \max)}{B^2}$$

ここで、 $\sigma_{\text{post}} / \sigma_{\text{pre}}$ の比の値として、図-41 (A断面)の切羽からの距離70cmの位置における値を採用する。その理由は、切羽から80cm以降で急に地山中の応力が大きくなっているが、これは切羽の通過による影響というよりも、剛な覆工を推進する際、覆工と地山が接触した結果、地山内の応力が大きくなったと考えられるからである。

$$\text{よって, } R_E = 1 - \frac{\pi \{ (1^2 - 0.7^2) \times 1^2 + (0.7^2 - 0.6^2) \times 1.05^2 + (0.6^2 - 0.5^2) \times 1.19^2 + (0.5^2 - 0.25^2) \}}{2^2}$$

$$\times 1.26^2) + (2^2 - \pi \times 1^2)$$

$$= 1 - \frac{3.14 \times 1.11 + 0.86}{4}$$

$$= 1 - 1.09$$

$$= -0.09 = -9\%$$

上式のように、エネルギー解放率が負の値となりトンネル掘削後の方が掘削前よりエネルギーが大きいという計測結果になる。この原因は種々あると考えられる。まず第1に、先に述べたようにトンネルを推進する際、覆工が地山と接触するため地山に外力が作用し、その結果、地山内の内部ひずみエネルギーが増大することが考えられる。また地山の变形係数が大きいことから土圧計の受圧面での接触状況等で応力集中が発生した可能性もある。一般に、堅固な地山はエネルギー解放率は非常に小さくエネルギー解放の考え方はあまり有効でないと思われる。

5.5 トンネル地圧と地中変位

(1) トンネル地圧

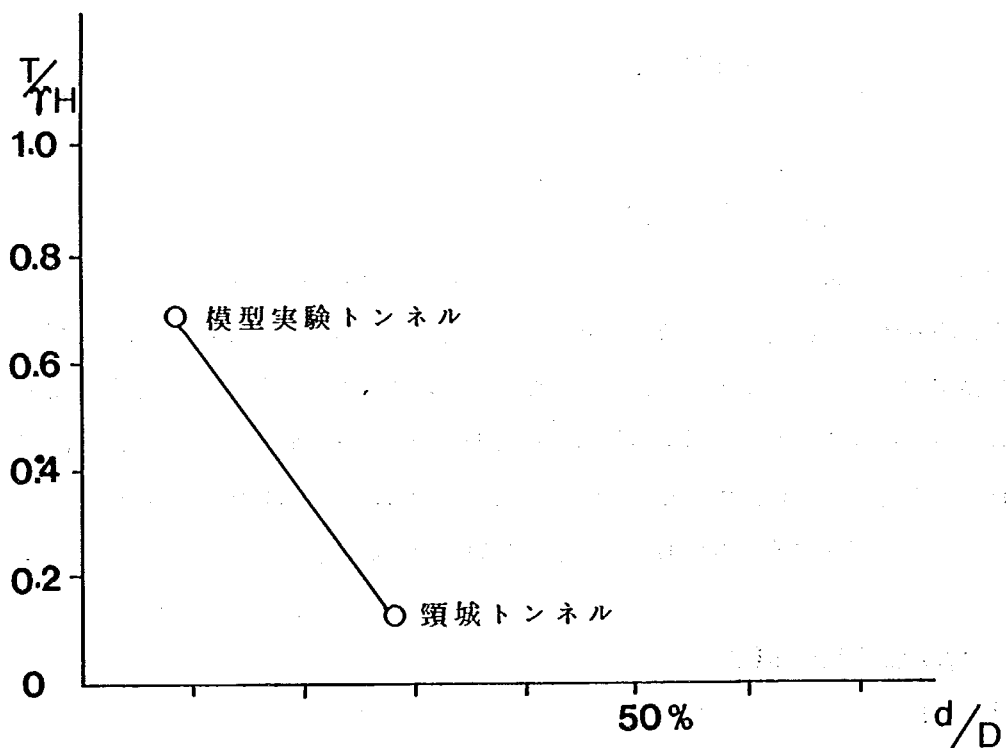
トンネルが構造物として受ける荷重は、ゆるみ地圧と押し出し性地圧（真の地圧、膨張性地圧を含む）に分けられる。今回の場合、粘性土実験では押し出し性地圧が作用したと思われる。押し出し性地圧は初期地圧の影響を大きく受けるので無次元化する際、 T/rH （記号については表—5を参照）を用いる。しかし、ゆるみ地圧は、ゆるみ領域の大きさに関係しておりトンネル径の影響を大きく受けるので、無次元化する際、 T/rD （記号については表—5を参照）を用いるのが妥当である。

(a) 粘性土実験

粘性土実験でのトンネル地圧は表—7に示すように $T/rH = 0.64$ であった。これは過去における計測データと比較するとかなり大きい（文献2によれば 2μ 以下の粒子含有率が20%程度では $T/rH = 0.1$ 前後である）。この原因として最も大きいものは、模型実験の覆工の剛性が現場におけるそれより地山との相対値でかなり大きいことがあげられる。模型実験の場合、切羽通過前後の地山変位量はそれぞれトンネル径の8%と1%であるが、現場においては例えば、頸城トンネル第1工区の導坑では盤ぶくれ量がトンネル径の約18%がある³⁾。切羽より奥での地山変位を模型実験と同様の9%とすると合計27%で、模型実験の2.7倍の変位量となる。したがって変位量をもっと大きくとればトンネル地圧は小さくなる可能性がある。参考までにこれを単純にグラフにのせると図—48のようになる。これによると、地山変位によって急にトンネル地圧は減ずることになる。ただし、他にもトンネル地圧が一致しない原因は考えられる。別の原因として現場、実験ともに地圧計測の精度の問題、現場における初期地圧の推定の問題がある。

(b) 砂質土実験

砂質土実験においては、トンネル地圧はゆるみ地圧と考えて T/rD を用いるのがよい。表—7より $T/rD = 1.06$ であった。これは「Ⅱ. 土かぶりの小さいトンネルの模型実験（その1）」からすると



図—48 特性曲線

かなり大きい値である。これは5.1で述べた施工法の影響であると考えられる。こうした影響がなければトンネル地圧はもっと小さくなると考えられる。

(2) 地中変位

地中変位は、粘性土の場合、切羽より奥2D（Dはトンネル径）程度で、すでに変位は始まっている。しかし、その変位量は大きくはないので、地山の変位がトンネル径の1%に達する地点は、2D前後と考えてよい（地山分類でD～E程度、弾性波速度で2 km/s 前後、土圧換算地山高さがトンネル径の8～9倍程度の場合）。トンネル切羽前方で直径の2倍ほどのところから変位が始まって、トンネル直径ほどの地点までで全変位量の約1/3が変位している。ただし、この変位計測は切羽前方でトンネル径の2倍以遠の領域については調べていない。したがって、この地点以遠でも変位はおこっていると考えられるが、変位の傾きから見てそれほど大きい値ではないであろうと推定される。これらから、ロックボルトの長さについて考えてみる。ロックボルトは、地山の変位の地点ごとの差を利用した支保であるから、その長さや本数を決めるのには、力学的な降伏領域よりも変位の状況による方がよい。変位からみれば、奥行方向ではロックボルトの長さはほぼD～2D（Dはトンネル径）程度の長さが最大値として妥当であるということになる。塑性領域の広がりや横断方向についても同様であるので、上記の考え方は横断方向にあてはまると思われる（5.2参照）。

砂質土実験の方では、切羽の通過にかかわらず0.2 mm ($d/D=0.04\%$) しか変位していないので、計測器の精度を考えると地山はほとんど変位していないと考えられる。また、変位は応力変化にかかわらず一定値となっている。先ほどと同じように変位の状況からロックボルト工について判

断すれば、地山相互間での変位に差がないのであるから、ロックボルトは、ほとんど不必要であるということになる。現実には硬岩地山の場合不連続面にそって変位することが考えられるので、ロックボルト工の要、不要を簡単には決められない。しかし不連続面がほとんどない硬岩地山の場合、上記のような結論になる。

参考文献

- 1) 道路公団試験所技術資料 606, 岩盤に関する調査試験法と力学定数
- 2) 青砥宏, 膨圧トンネルの土圧予測, 大成建設技研報, No.13
- 3) 朝倉, 膨張盤ぶくれ地帯のトンネル施工例, 土木施工, Vol.9, No.9
- 4) 服部, 松村, 塩沢トンネルの施工, 土木施工, Vol.15, No.13
- 5) 土木学会, トンネル標準示方書(山岳編)
- 6) Egger, P., トンネル支保工に及ぼす破壊後の岩盤の影響, 海峡連絡鉄道の技術に関する文献資料の調査研究報告書, 日本トンネル技術協会 1978
- 7) 神藤, 他, 土かぶりの大きい円型素掘りトンネルの3次元模型実験, 前田建設技研報, Vol.23, 1982

VI. 結 論

トンネルを構造物としてみた場合、その設計法は以下の3通りの方法が考えられる¹⁾。

- (1) 施工実績例に基づく設計
- (2) 解析的な手法による設計
- (3) 施工時における計測に基づく設計

現在のトンネル施工は、そのほとんどが施工実績例に基づく設計法によっている。この方法によれば、一般に安全は確保されるが、経済的な設計であるか否かを知ることは困難である。すなわち、トンネル設計者は自から設計したトンネルが安全であると期待できるが、その安全率の程度を知ることができない。一方、より合理的と考えられる設計法(2)が、あまり用いられないのは、主としてトンネル構造物に作用する地山からの荷重が十分には明らかな点にある。このため、今回の一連のトンネル模型実験は、トンネルに作用する荷重をもとめることをその最終目標とした。これら一連の調査は、まず模型実験の信頼性を確保するための相似則の検討を初めとして、以下のように実施した。

1. 相似則

模型実験の相似則は、実験目的、実験対象によって異なる。トンネル地圧、周辺地山・応力等を相似することを目的として実験を行う場合には、II-3で述べた $\pi_1=H/D$ 、 $\pi_2=C/rL$ 、 $\pi_3=\tan\phi$ 、 $\pi_4=d/D$ 、 $\pi_5=l/D$ 、 $\pi_6=T/rL$ を相似則のピナナンバーとするのが实际的である。ただし、これらのピナナンバーの内にも優先度があり、それは土かぶりが大きい小さいかで異なってくる。

(1) 土かぶりの小さいトンネルの場合

土かぶりが小さい場合には、実験の設定条件としては、 $\pi_1=H/D$ 、 $\pi_2=C/rD$ を合わせることが重要である。すなわち、これらのピナナンバーの大きさが異なると、トンネル地圧も大きく異なってくる。ただし $\pi_1=H/D$ の方は、 H/D が2.0より大きくなるとほとんど影響力を持たなくなる。しかるに、 $\pi_2=C/rD$ はその影響力は変わらない。これは、トンネルに作用する地圧がいわゆるゆるみ地圧に限定されるためである。土かぶりの小さい場合の実験の相似則の信頼性は、現場計測結果と比較することによって確認した。(II参照)。

(2) 土かぶりの大きいトンネルの場合

土かぶりが大きい場合には、実験の設定条件としては1義的には $\pi_1=H/D$ 、 $\pi_3=\tan\phi$ 、 $\pi_4=d/D$ を合わせることが必要である。上記の3つのピナナンバーは同等に重要であって、これらのうちどれを欠いても、トンネル地圧を正しく予測できない。さらに2義的な相似則ピナナンバーとして、 $\pi_2=C/rL$ ($L=H\text{or}D$)や qu/rH が考えられる。

土かぶりが大きく地山の内部摩擦角が小さい場合、トンネルに作用する地圧は押し出し性地圧と考えられる。押し出し性地圧が作用する場合の相似則については、現場計測と比較するという確認を行っていない。これは、主として現場計測の側に原因がある。例えば、現場では正しい初期地圧は測定できないことが多いし、切羽より奥の地山変位も、計測するのは困難である。上記の相似則は、現在までの施工実績の検討、模型実験相互の比較によって得たものである(V参照)。

土かぶりの大きい場合、地山とトンネル支保構造の変形係数は、確かにトンネル地圧に大きい影響をおよぼす。しかし、これは変形係数によって $\pi_1=d/D$ が変化し、トンネル掘削によって解放されるエネルギー量が異なるためである。模型を製作する立場から言えば、実験地山材料の強度定数と変形係数をともに相似させるのはきわめて困難である。したがって、相似則としては $\pi_1=d/D$ を考慮して、変形係数については π_1 を通して調整するようにした方がより实际的である。

2. トンネル地圧

トンネル地圧は、大別してゆるみ地圧と塑性地圧がある。今回の実験では、Ⅱ、Ⅲの土かぶりの小さいトンネルの模型実験ではゆるみ地圧が働いており、Ⅳの土かぶりの大きいトンネルの模型実験の粘性土実験では塑性地圧が作用したものと考えられる。

(1) ゆるみ地圧

ゆるみ地圧は、結果的にTerzaghiのトンネルの土圧公式とよく一致した。すなわち、 $H/D=2.0$ より以上の土かぶりでは、トンネル地圧はほとんど増加しなかった。ゆるみ地圧は、水がなければ土かぶりにかかわらず、最大でも $T/rD=1.0$ （乾燥砂実験）であった。乾燥砂実験は、Terzaghiの支保工に作用する岩荷重の表²⁾のクラス6「完全に破砕されているが、化学的には侵されていないもの」に相当すると考えられる。しかるに、クラス6の岩荷重高さは $1.10(B+H) \times 1/2$ （ここで B , H は各のトンネル掘削断面の幅と高さ、地下水位以上にある場合として50%荷重を減ずる）であるから、Terzaghiの岩荷重の表ともよく一致している。

(2) 押し出し性地圧

粘性土模型実験では、 $H/D=8.4$, $\tan \phi=0.05$, $d/D=0.09$ で $T/rH=0.64$, すなわち初期地山応力の64%がトンネルに地圧として作用した。一般に押し出し性地圧が作用する場合、初期地山応力の2~100%という広い範囲のトンネル地圧が作用する可能性がある。しかも、 d/D という施工条件によってトンネル地圧が変化するのでトンネル地圧を事前に知ることはきわめて困難である。

一般的には、第3紀泥岩で道路トンネル地山分類のDであれば、土かぶりが50m以上あれば一応押し出し性地圧の可能性を疑ってよい。場合によってはC分類の地山でも押し出し性地圧が作用することができる。

押し出し性地圧が発生すると予測されるような場合、変形余裕量をどう設定するかも重要な問題である。変形を許すと地山の持つ内部ひずみエネルギーが開放されて、最終的にはトンネル地圧は小さくなる。しかし、過度な変形は所要内空を侵すことになるのみならず、20mm/日以上の内空変位が発生した場合には、地山内に分離面が生じて崩落の危険があることも報告されている³⁾。上記の限界以内であれば、適正な変形余裕を見積って経済的な設計に努めるべきである。

3. 地中変位

地中変位は、Ⅴの土かぶりの大きいトンネルの模型実験において計測されている。砂質土実験（内部摩擦

角による評価で道路トンネル地山分類Aにあたる)では、 $H/D = 8.44$ に対して $d/D = 0.04\%$ で、ほとんど地中変位のないことが明らかとなった。ただし、岩の節理等不連続面はないものとする。粘性土実験(道路トンネル地山分類のD～Eにあたる)では、 $H/D = 8.40$ の場合、切羽奥2Dあたりからトンネル径の1%程度の変位が始まり、切羽前、後で各の8%、1%、計9%の地山変位が計測された。ただし、切羽通過後の変位が小さいのは、模型実験で非常に剛性の大きい覆工を用いているためである。

現場でのコンバージェンスは切羽通過後から測定し始めるので、実験値と比較するには現場のコンバージェンス値を何割か割増させる必要がある。現場でのコンバージェンス値は一般に大きくばらついており、NATMの場合では、きわめて変位の大きい軟岩でトンネル径の10%、通常の軟岩で1%であるが、硬岩では比較的少なく0.1%程度である。これにさらに上記に述べた割増を行うが、また、在来工法の場合一般にNATMより変位が大きくなると考えられるから、さらにそれに関する割増が必要である。したがって、地中変位の点から言えば、今回の模型実験は概ね砂質土実験はきわめて強い硬岩に、粘性土実験は押し出し性の軟岩に相当するものと考えられる。

4. 応力再配分

トンネルの切羽付近で支保構造物を施工する場合、応力再配分は、次の2種類に分けられる。第1は、切羽において地山が降伏しない場合であり、第2は、切羽において地山が降伏する場合である。前者には2つの応力領域があり、後者には4つの応力領域がある(V-5.2参照)。

5. トンネル地圧に関する指標

トンネルを掘削した時、地圧に関する現象はいろいろな形態で現われる。こうした地圧現象を予測するための指標について以下に述べる。

地圧現象を予測するための指標は、対象とする地山によって異なるため、地山をその強度指標によって概略表-1のように3つに分類する。最下段には、道路トンネル便覧⁴⁾にある地山分類A～Eに対応すると考えられるものを示した。土質地盤(砂質及び粘性地盤)と岩盤との区分は、1軸圧縮強度で概ね100kg/cm²～200kg/cm²前後とする。砂質地盤と粘性地盤の区分は、内部摩擦角で前者が概ね30°以上、後者が概ね20°以下とする。

今回の模型実験では、粘性地盤については土かぶりの大きい場合の実験を行い、また、砂質地盤については土かぶりの大きい場合と小さい場合の両者を行った。岩盤については実験を行っていないが、結果的には土かぶりの大きい砂質地盤の実験での地山挙動は、岩盤のそれに近いものであった。

その結果、砂質地盤では土かぶりの小さい場合も大きい場合も、押し出し性地圧は発生しなかったが粘性地盤では土かぶりの大きい場合には、押し出し性地圧が発生した。粘性地盤では土かぶりの小さい場合は実験していないが、地山の粘着力に比較してもなお初期地圧が小さいほどかぶりが小さければ、押し出し性地圧が作用するとは考えられない。こういう場合には、ゆるみ地圧が作用するものと思われる。ここでいう、

岩盤では、砂質地盤より類推して押し出し性地圧は発生しないものと考えられる。

以上の結果と、Ⅱ～Ⅴで述べた模型実験の結果を考慮して、地圧に関する指標をまとめると表-2のようになる。

表-1 地山区分

	砂 質 地 盤	粘 性 地 盤 { 正規圧密粘土 軟岩の1部	岩 盤
C	小 (排水条件)	小～中 (非排水条件)	大 (排水及は非排水条件)
ϕ	大 (排水条件)	小 (非排水条件)	大 (排水及は非排水条件)
道路トンネル 地 山 分 類	C,D,E	C,D,E	A,B,C

表-2 地圧に関する指標

	地 圧 に 関 す る 指 標	作用する地圧
岩 盤	不連続面	ゆるみ地圧
粘 性 地 盤	H/D , $\tan \phi_u$, d/D , 不連続面, (C_u/rL)	ゆるみ地圧 押し出し性地圧
砂 質 地 盤	C_d/rD	ゆるみ地圧

ただし、 $H/D > 2$, $H < 500\text{m}$ の場合でトンネルは地下水面より上にあるものとする。

指標で()内は2義的なものとする。ここで、

H =土かぶり高, D =トンネル径, C =粘着力, ϕ =内部摩擦角, r =単位体積重量,

d =ゆるみ量を示す。不連続面は節理, 破砕帯等不連続なものすべてを含む抱括的概念である。またsuffix u は非排水条件, d は排水条件を示す。

粘性地盤は、地圧の指標に関しては最も複雑であり、事実、初期地山応力とトンネル地圧との比が2～100%という広範囲にばらつくのは、粘性地盤においてである。このような地盤においては、初期地山応力が直接トンネルに作用する場合があるから H/D が問題となり、また、エネルギー解放の考え方から d/D も問題となる。

ある地山において押し出し性地圧が発生するか、ゆるみ地圧にとどまるかを判定することは、きわめて重要な作業である。表-2によれば、その判定は1義的には H/D と $\tan \phi_u$ との相対的な大小関係で決定される。ここで、地山の内部摩擦角 ϕ_u について考えてみる。

いま地山を図-1のロック材のようなものとする、内部摩擦角とは(b)または(c)に示すようなせん断破壊に対する抵抗力と考えられる。ここに、(b)はせん断時に構成粒子そのものが破壊する場合であり、(c)は粒子は破壊せず回転、移動することによって地山全体としてはせん断破壊する場合である。(b)のように、構成

粒子自体の強度が弱い場合には、地山全体としては内部摩擦角は低下する。従来の地山強度比は岩石の1軸圧縮強度を用いているが、岩石の強弱によって岩盤の内部摩擦角の大小を判定するという考え方によっていのであれば、表-2に示すように有効な指標と言える。しかし、岩盤の1軸圧縮強度を用いて地山強度比を考えるならば、「V、土かぶりの大きいトンネルの模型実験（その1）」で述べたように、地山強度比のみで押し出し性地圧に関する判定はできない。

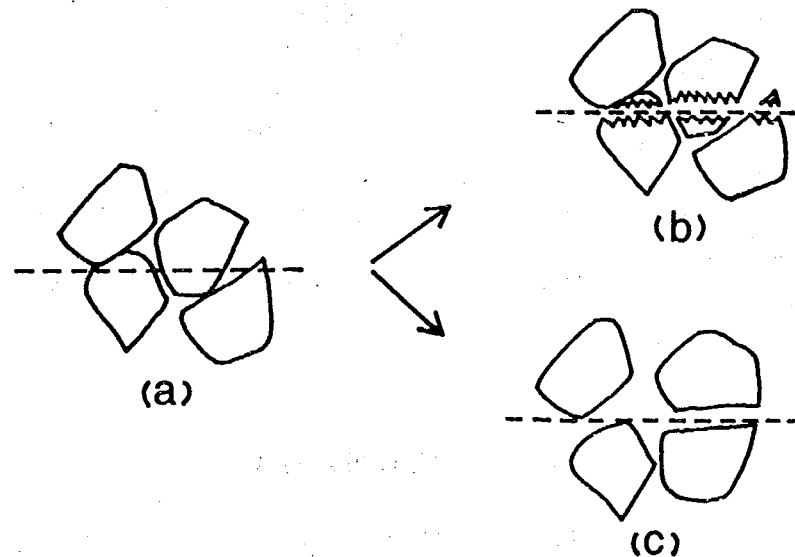


図-1 せん断破壊

さらに、内部摩擦角に関連する要因として、 2μ 以下の粒子の含有率などが考えられる。また単位体積重量、自然含水比なども押し出し性地圧の判定に有効だと言われている。

表-2で砂質地盤の場合、地圧の判定は C_d/rD によることができる。ここで、地山の粘着力 C_d について考えてみると、 C_d は排水条件の3軸試験でもとめた粘着力である。したがって、試験を行う時、砂は水で飽和されているわけであるが、現場においては必ずしも飽和状態であるとはかぎらず、砂が不飽和状態であると、サクシオン効果でみかけの粘着力を生じる。こうしたみかけの粘着力は設計上は応々無視されるが、施工段階においては上載荷重による圧密と相まって、切羽の自立に少なからず貢献する。この点は、「II、土かぶりの小さいトンネルの模型実験（その1）」にも応用されている。現場においては、均等係数のみならず含水比を測定して施工管理を行う必要がある。

6. 切羽の自立に関する指標

今回の実験では湧水や不連続面がないとした場合、砂質地盤で $C_d/rD=0.3$ が切羽の自立性に関する1つの判定基準となった。切羽の自立の問題については、さらにゆるみ量 d/D と不連続面が問題になる。また地下水面より低い砂質地盤にトンネルを掘進する場合、事前に排水工を施していなければ切羽面で湧水が多量に発生する場合がある。こうした場合、切羽面は完全に排水された条件とはいえないので、非排水試験による粘着力 C_u で切羽の自立性を判定する必要があるが、岩盤についても同様である。

7. トンネル施工における力学的エネルギー収支

トンネル掘削によって、地山の内部ひずみエネルギーの1部が解放されることになるが、これを図式的に示すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} (\text{内部ひずみエネルギー量}) = & (\text{掘削, 変形により解放されるエネルギー量}) \\ & + (\text{内部残留ひずみエネルギー量}) \end{aligned}$$

解放エネルギーと残留ひずみエネルギーとの配分は、地山の強度と支保圧によって決まり、逆に言えば、地山の強度と支保圧は解放エネルギー量を通して互いに影響し合う。

Vの実験例によれば、粘性土実験ではエネルギー解放率は20～30%、砂質土実験では2%程度であった。

8. 急傾斜地におけるトンネル

地すべり地帯にトンネルが施工される場合、通常の地すべりの安定計算ではすべり面上の応力だけが問題とされるが、模型実験によれば、安定計算のさいすべり面上の応力だけでなく、すべり地域内の応力についても考慮する必要があることが明らかとなった (IV. 参照)。

参 考 文 献

- 1) Z.T. Bieniawski, Tunnel Design by Rock Mass Classifications, technical report GL-79-19, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- 2) Terzaghi, K, Introduction to Tunnel Geology, Rock Tunneling with Steel Supports, 1946
- 3) 佐々木 他, 超膨張性地山区間と湧水区間におけるNATM, トンネルと地下, Vol.13, No.5, 1982
- 4) 道路トンネル便覧, 道路協会, 1975
- 5) 青砥宏, 膨圧トンネルの土圧予測, 大成建設技研報No.13
- 6) 三笠 他, Cとφを考える, 土と基礎, Vol.23, No.4

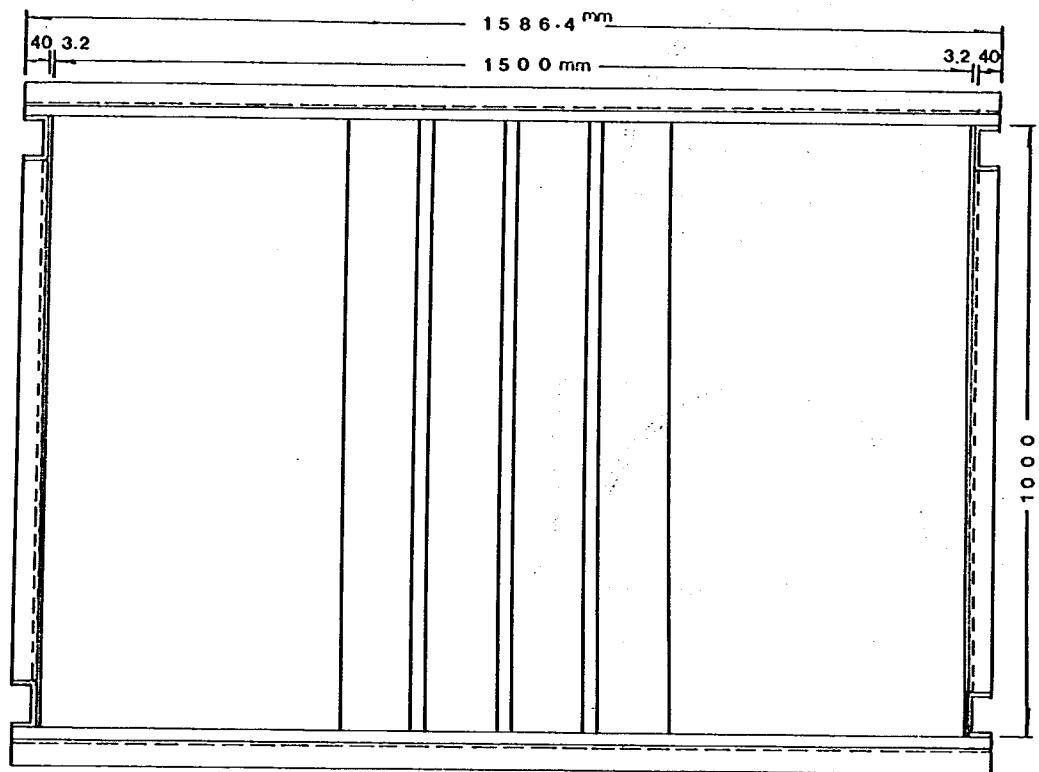
II. 土かぶりの小さいトンネルの 模型実験（その1）

IIの実験は、掘削相似ではトンネルカバーの引抜き方式（乾燥砂実験）と掘削推進方式（普通砂実験）の2種類がある。トンネル直径はD, 2D, 3D（Dは約12~13cm）の3種類がある。トンネル直径ごとに実験ケース数をまとめると、D=25ケース（表-1）、2D=12ケース（表-2）、3D=4ケース（表-3）計41ケースである。

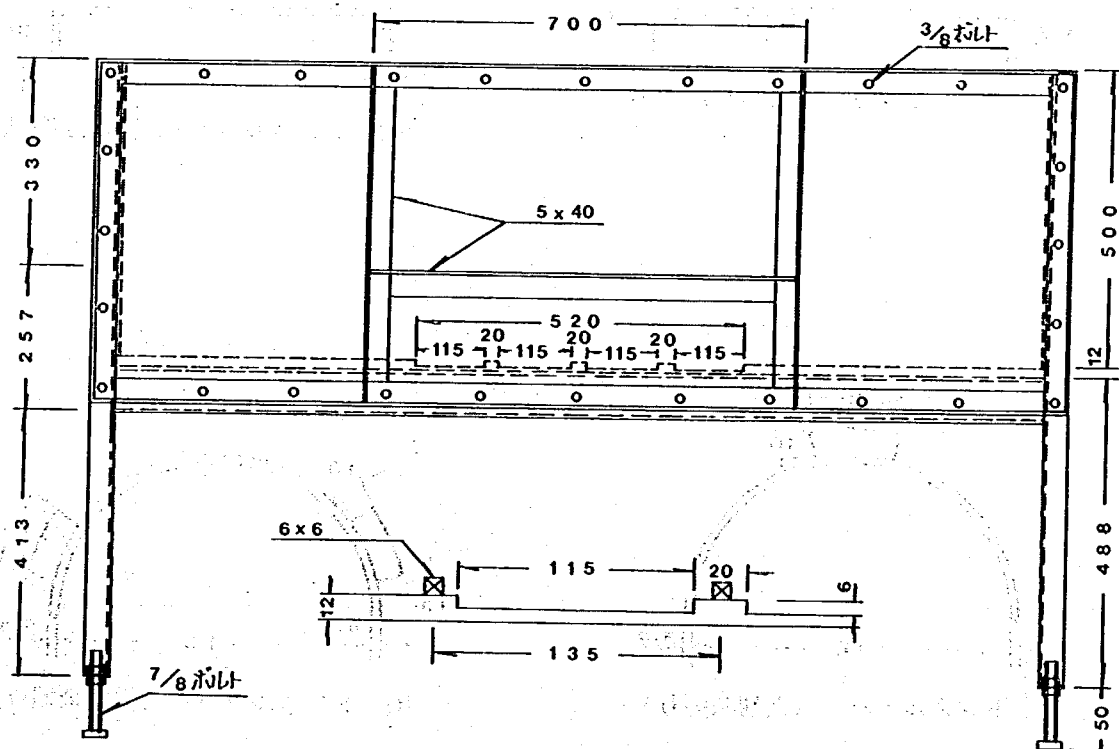
なお、表の構成はトンネル切羽の相対位置で各土圧計の値を示してある。

表-1

トンネル土圧模型実験一覧表 その1（直径D）												
実験No（実験形式）	H/D	H (cm)	D (cm)	r (gf/cm)	ϕ (°)	$\tan \phi$	C (gf/cm)	C/rD	C/rH	T (gf/cm)	T/rD	T/rH
D-1(乾燥砂)	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	22.45	1.010	0.563
D-2(")	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	23.31	1.049	0.584
D-3(")	0.449	5.7	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	13.72	0.617	1.375
D-4(")	0.449	5.7	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	9.73	0.438	0.975
D-5(")	0.898	11.4	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	15.79	0.710	0.791
D-6(")	2.693	34.2	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	21.71	0.977	0.363
D-7(普通砂・落し戸)	1.795	22.8	12.7	—	—	—	—	—	—	0	0	0
D-8(乾燥砂 )	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	24.90	1.120	0.624
D-9(" )	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	21.69	0.976	0.544
D-10(" 落し戸小)	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	24.79	1.115	0.621
D-11(" )	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	20.77	0.935	0.521
D-12(" 落し戸大)	1.795	22.8	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	27.28	1.227	0.684
D-13(普通砂・落し戸)	1.795	22.8	12.7	—	—	—	—	—	—	0	0	0
D-14(乾燥砂)	1.346	17.1	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	16.77	0.755	0.560
D-15(")	2.244	28.5	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	21.98	0.989	0.441
D-16(")	3.591	45.6	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	18.78	0.845	0.235
D-17(")	3.142	39.9	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	18.69	0.841	0.268
D-18(")	3.142	39.9	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	22.04	0.992	0.316
D-19(")	0.449	5.7	12.7	1.75	41	0.869	0	0	0	9.87	0.444	0.989
D-20(普通砂)	2.000	25.4	12.7	1.70	40	0.839	10.0	0.463	0.232	2.85	0.132	0.066
D-21(")	0.500	6.4	12.7	1.70	40	0.839	10.0	0.463	0.919	3.56	0.165	0.327
D-22(")	1.500	19.1	12.7	1.70	40	0.839	10.0	0.463	0.308	5.30	0.245	0.163
D-23(")	3.000	38.1	12.7	1.70	40	0.839	10.0	0.463	0.154	6.40	0.296	0.099
D-24(")	2.500	31.8	12.7	1.70	40	0.839	10.0	0.463	0.185	6.71	0.311	0.124
D-25(")	1.000	12.7	12.7	1.70	40	0.839	10.0	0.463	0.463	3.37	0.156	0.156

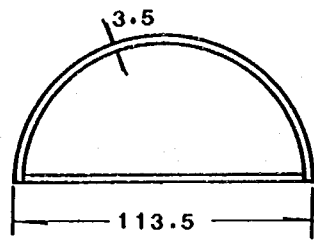


(a) 平面図

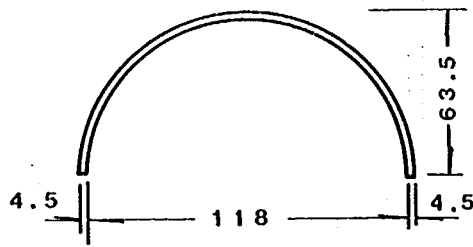


(b) 正面図

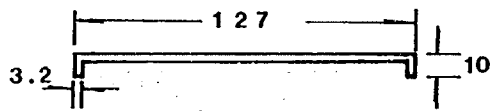
図-1 実験装置全体図



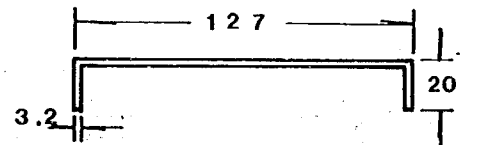
(a) トンネル模型



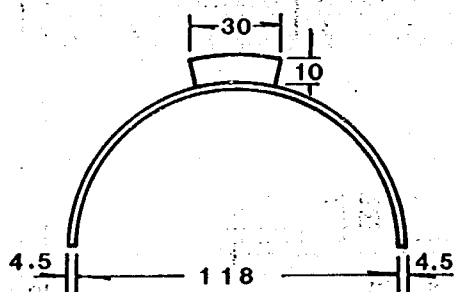
(b) トンネルカバー



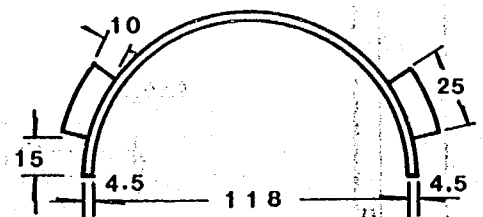
(c) トンネルカバー (落し戸・小)



(d) トンネルカバー (落し戸・大)



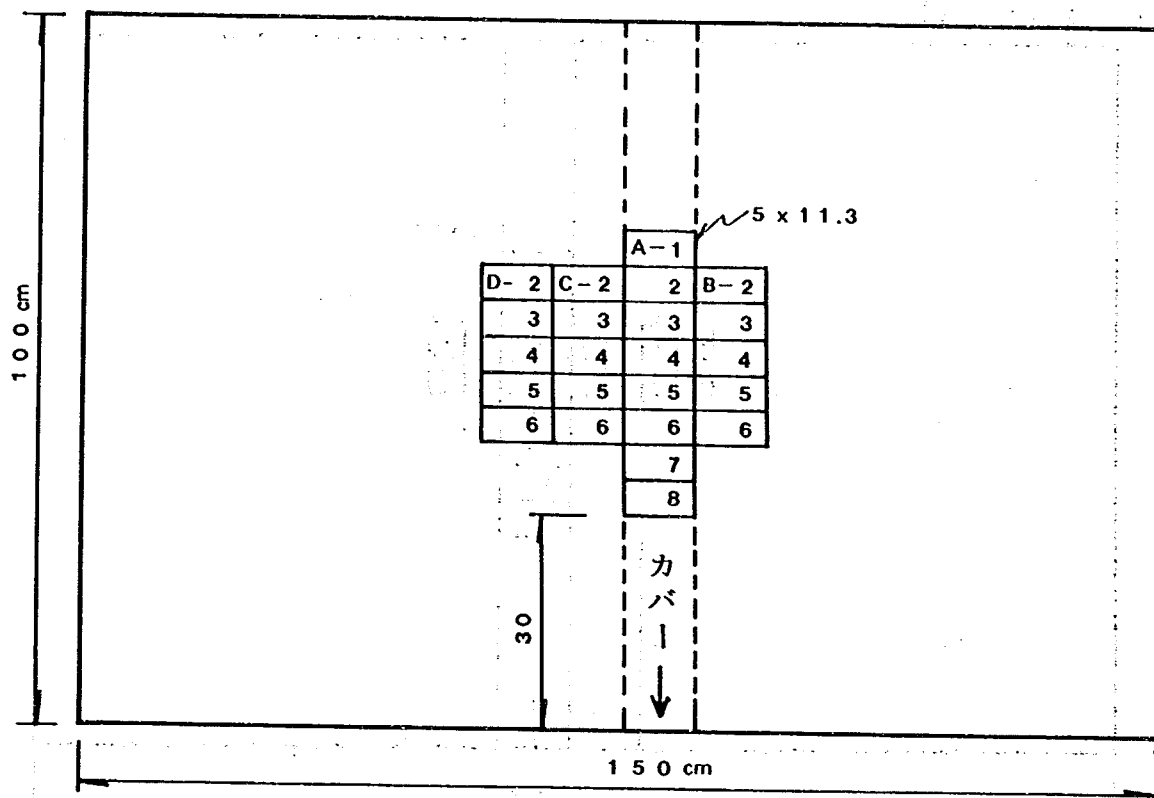
(e) トンネルカバー (天端余掘り)



(f) トンネルカバー (側壁余掘り)

図-2 トンネル模型の寸法 (直径Dの場合)

計測パターン A



計測パターン B

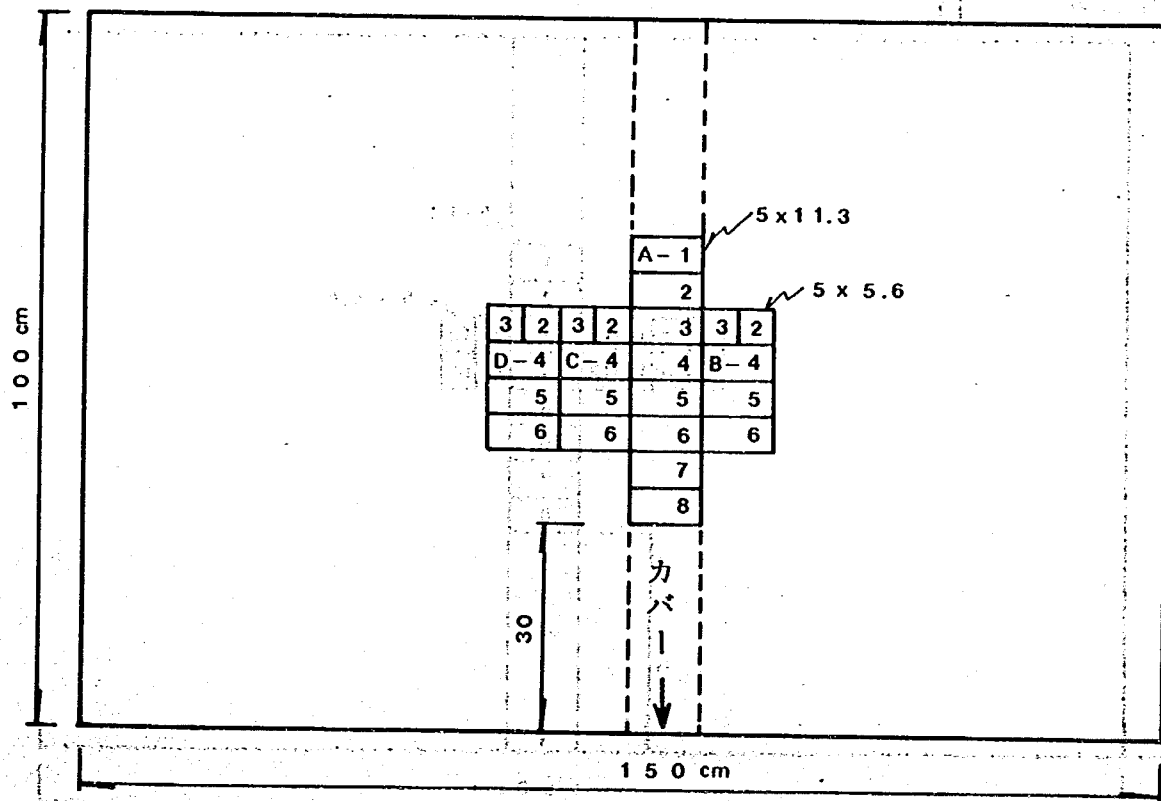
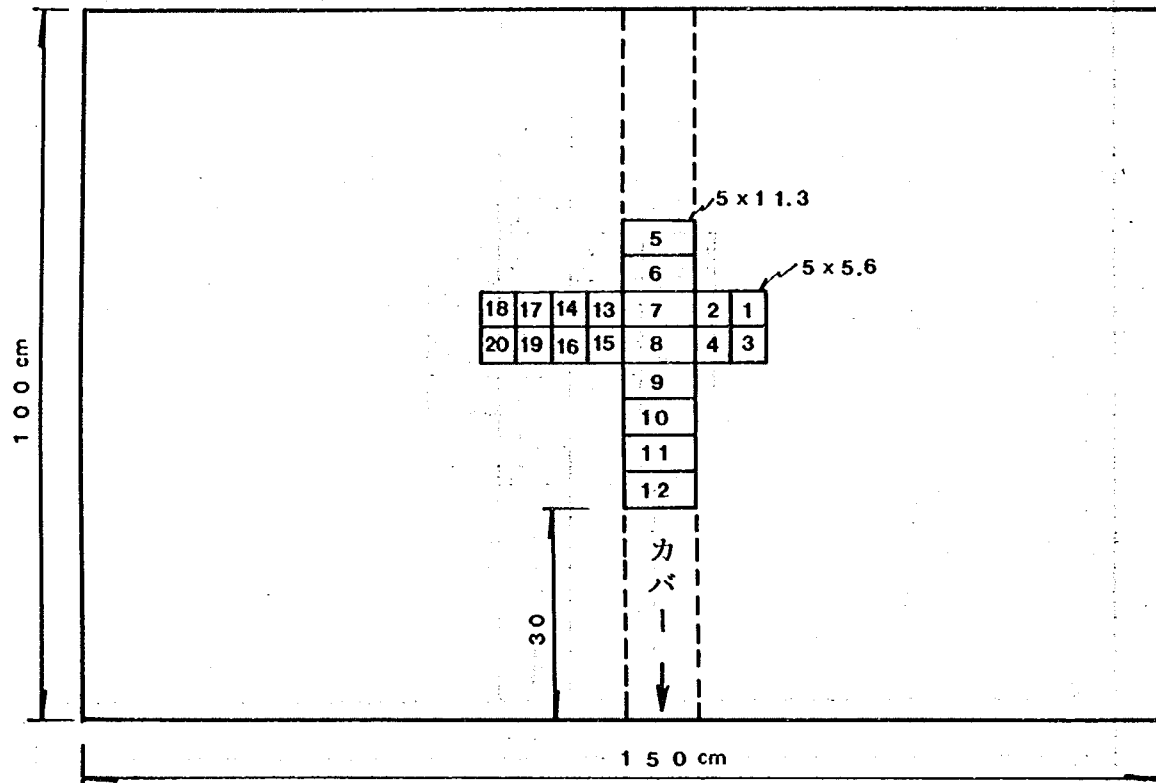


図-3-(1) 計測パターン (直径D)

計測パターン C



計測パターン D

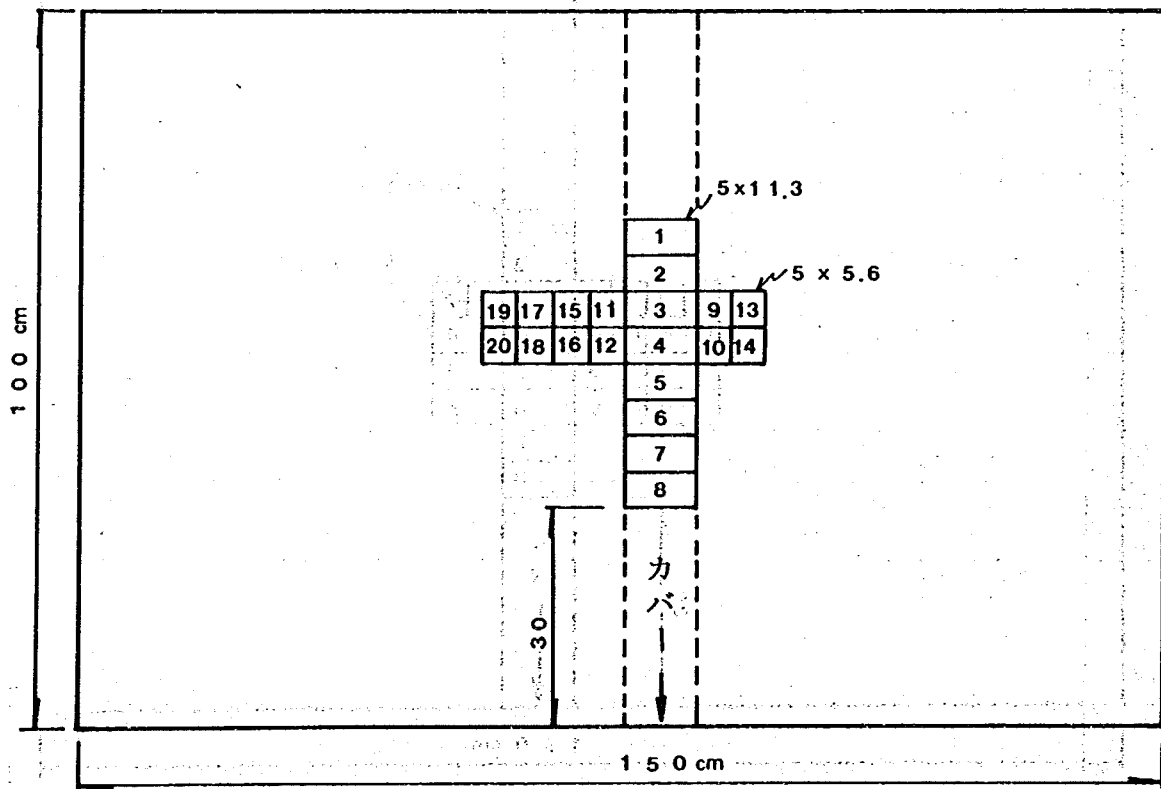


図-3-(2) 計測パターン (直径D)

D-1 (乾燥砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0.5				
	-62.5							107.5					
	-57.5						5.9		-0.4				
	-52.5					-0.4		107.3					-36.0
	-47.5				6.3		5.8		0			-48.7	
	-42.5			-77.4		-0.4		107.1			-26.6		-39.7
	-37.5		1.4		6.2		5.7		7.9	-55.6		-53.1	
	-32.5	4.1		-77.4		-0.5		113.6	8.1		-31.1		-45.2
	-27.5		1.2		6.1		11.1	106.1	8.2	-63.8		-59.2	
	-22.5	3.8		-77.8		1.2	11.7	101.1	8.2		-34.2		-43.9
切羽	-17.5		1.2		2.6	-5.6	8.4	101.3	7.3	-67.8		-57.1	-43.0
	-12.5	3.9		-86.2	-0.7	-2.8	7.5	93.7	5.1		-33.1	-59.3	-44.4
	-7.5		-0.6	-5.0	-2.9	-11.5	12.6	96.9	-6.1	-69.1	-36.3	-60.3	-47.4
	-2.5	-60.8	-64.9	-43.9	-37.1	-44.9	-2.3	39.9	-30.8	-68.7	-34.7	-60.3	-47.3
	+2.5	-11.5	-11.7	-11.7	-7.3	-7.6	-8.0	-15.3	-9.0	-65.8	-34.2	-60.0	-49.6
	+7.5	-21.3	-21.6	-18.3	-13.8	-13.8	-9.3	-20.8		-68.6	-36.3	-61.9	-50.5
	+12.5	-25.4	-24.0	-23.3	-16.0	-17.9	-11.1		-16.6	-71.4	-38.9	-64.7	-54.3
	+17.5	-26.6	-25.9	-25.1	-18.6	-18.9		-27.0		-73.4	-40.3	-67.2	-55.9
	+22.5	-28.1	-26.4	-25.0	-19.6		-13.8		-16.3	-73.9	-40.8	-68.2	
	+27.5	-28.9	-25.8	-26.0		-19.0		-27.1		-74.7	-40.9		-56.6
掘削後	+32.5	-28.8	-26.8		-19.8		-15.7		-18.1	-74.8		-68.0	
	+37.5	-29.3		-26.3		-19.6		-28.4			-40.5		-56.3
	+42.5		-26.6		-20.6		-16.0			-74.6		-67.7	
	+47.5	-28.5		-26.3		-17.9					-40.0		-55.8
	+52.5		-26.3		-20.0					-74.4		-67.5	
	+57.5	-27.9		-25.7							-39.6		
	+62.5		-25.9							-74.3			
	+67.5	-27.6											
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-38.6					-26.1					-40.3	
	-52.5					-45.7					-47.4		
	-47.5	-40.4			-33.7		-27.4			-49.8		-42.3	
	-42.5			-43.5		-47.4			-40.4		-49.2		
	-37.5	-45.6	-52.2		-38.6		-28.4	-45.9		-51.4		-42.0	
	-32.5			-47.8		-52.8			-41.9		-49.3		
	-27.5	-45.7	-59.3		-42.6		-26.2	-47.4		-51.6		-41.2	
	-22.5	-44.8		-51.4		-49.5	-27.2		-41.0		-48.6	-41.5	
切羽	-17.5	-44.2	-64.7		-42.6	-51.2	-29.6	-48.0		-51.0	-48.9	-42.1	
	-12.5	-45.8		-53.3	-43.4	-53.1	-30.0		-40.6	-51.2	-48.6	-42.1	
	-7.5	-48.5	-65.4	-55.1	-46.0	-54.2	-31.7	-48.8	-40.7	-50.7	-48.8	-42.0	
	-2.5	-47.7	-64.2	-55.0	-44.7	-54.0	-31.9	-49.2	-41.3	-51.0	-48.8	-42.1	
	+2.5	-43.7	-62.5	-56.6	-43.6	-52.6	-29.7	-49.1	-41.7	-51.0	-48.8	-42.0	
	+7.5	-47.5	-65.7	-59.3	-46.5	-54.2	-32.7	-49.4	-41.5	-51.0	-48.7	-42.0	
	+12.5	-50.2	-68.7	-62.9	-48.9	-58.8	-34.4	-49.4	-41.5	-51.0	-48.6	-41.7	
	+17.5		-71.1	-64.4	-50.7	-60.2		-49.0	-41.0	-50.6	-48.5		
	+22.5	-52.4	-72.0	-65.6	-50.9		-36.5	-48.9	-40.3	-50.5		-41.0	
	+27.5		-72.5	-65.5		-61.1		-48.9	-40.1		-47.8		
掘削後	+32.5	-52.5	-72.3		-50.5		-35.7	-48.8		-49.7		-40.8	
	+37.5			-65.1		-60.2			-39.7		-47.8		
	+42.5	-52.0	-72.0		-49.7		-35.0	-48.5		-49.6		-40.7	
	+47.5			-64.8		-59.5			-39.4		-47.8		
	+52.5		-71.8		-50.1			-48.5		-49.5			
	+57.5			-64.7					-39.2				
	+62.5		-71.8					-48.5					
	+67.5												
計画パターン ; A													
備考													

D-2 (乾燥砂)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0				
	-62.5							-0.17					
	-57.5						0		0.23				
	-52.5					-0.17		0					-37.77
	-47.5				-0.18		0.18		1.61			-37.57	
	-42.5					0.52		-0.42			-42.22		-45.51
	-37.5		0.40		0.13		0.46		1.84	-48.61		-46.17	
	-32.5	0.04				2.07		3.00	1.24		-52.82		-48.39
	-27.5		0.18		0.04		2.19	2.11	3.64	-55.69		-48.51	
	-22.5	0.02				66.39	3.01	4.78	3.55		-54.67		-49.76
切羽	-17.5		-0.09		-3.12	0	1.00	5.54	5.72	-52.62		-49.70	-47.12
	-12.5	-0.44			-1.84	-4.75	2.60	1.73	1.98		-53.66	-45.82	-45.75
	-7.5		-3.51		-1.93	-9.12	-2.23	3.47	2.12	-53.26	-53.03	-48.38	-49.00
	-2.5	-4.51	3.12		-10.31	-15.30	-3.60	-4.44	-6.04	-52.97	-51.38	-43.97	-45.51
	+2.5	-6.82	-12.64		8.51	-7.26	-4.28	-7.06	-7.88	-49.78	-46.44	-42.64	-41.69
	+7.5	-8.94	-19.40		-19.49	-15.17	-12.35	-14.63		-56.54	-53.08	-47.05	-46.22
	+12.5	-20.09	-25.00		-19.93	-21.57	-16.41		-18.94	-61.56	-56.90	-50.76	-50.51
	+17.5	-21.51	-27.30		-27.04	-24.38		-20.42		-63.99	-58.81	-52.66	-52.83
	+22.5	-23.41	-27.39	-27.31	-28.18		-19.92		-19.45	-64.86	-59.59	-53.71	
	+27.5	-22.71	-27.00	-27.86		-27.19		-20.21		-64.93	-59.80		-54.57
掘削後	+32.5	-20.58	-27.17		-21.37		-20.10		-20.83	-64.91		-53.89	
	+37.5	-19.78		-26.54		-27.10		-20.42			-59.49		-54.06
	+42.5		-26.10		-27.17		-21.01			-64.52		-53.54	
	+47.5	-19.92		-26.63		-26.62					-59.29		-54.34
	+52.5		-26.10		-26.90					-64.36		-53.89	
	+57.5	-20.32		-26.86							-59.33		
	+62.5		-26.77							-64.45			
	+67.5	-20.63											
土圧計の番号		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-42.37					-46.72					-42.26	
	-52.5					-38.57					-43.45		
	-47.5	-51.27			-44.68		-51.79			-46.20		-44.07	
	-42.5			-41.91		-45.60			-46.85		-45.22		
	-37.5	-54.86	-50.63		-51.13		-54.51	-57.23		-48.01		-44.00	
	-32.5			-49.82		-47.62			-48.64		-44.69		
	-27.5	-55.55	-56.46		-52.33		-54.82	-58.93		-47.27		-42.63	
	-22.5	-55.64		-49.48		-45.83	-51.94		-48.68		-43.54	-42.43	
切羽	-17.5	-51.81	-54.65		-50.52	-45.00	-52.27	-59.42		-46.78	-43.70	-42.75	
	-12.5	-50.83		-47.98	-49.21	-45.46	-51.98		-49.07	-47.45	-44.03	-43.29	
	-7.5	-53.38	-55.51	-49.77	-51.61	-47.11	-54.24	-60.26	-49.57	-47.68	-44.40	-44.25	
	-2.5	-59.59	-54.72	-49.06	-51.57	-49.50	-55.53	-60.88	-49.78	-47.94	-45.07	-45.01	
	+2.5	-46.47	-53.22	-46.59	-50.26	-45.32	-49.81	-61.34	-50.05	-48.79	-45.56	-45.79	
	+7.5	-50.77	-58.63	-51.96	-54.32	-48.63	-55.51	-61.63	-50.46	-48.97	-46.00	-46.80	
	+12.5	-55.57	-64.28	-56.14	-57.77	-53.45	-59.24	-61.74	-50.47	-49.37	-46.24	-47.09	
	+17.5		-66.77	-58.23	-60.17	-55.66		-61.56	-50.49	-49.10	-46.07		
	+22.5	-61.33	-67.73	-59.21	-61.04		-62.77	-61.47	-50.15	-48.79		-46.26	
	+27.5		-67.73	-59.32		-56.89		-61.05	-49.82		-45.25		
掘削後	+32.5	-61.64	-67.54		-56.50		-62.74	-60.68		-47.99		-45.69	
	+37.5			-58.98		-56.44		-49.30			-44.96		
	+42.5	-61.58	-67.24		-20.72		-62.43	-60.33		-47.63		-45.74	
	+47.5			-58.72		-56.34		-49.18			-45.03		
	+52.5		-67.06		-23.34			-60.13		-45.03			
	+57.5			-58.74				-49.30					
	+62.5		-67.16					-60.43					
	+67.5												
計測パターン: A													
備考													

D-3 (乾燥砂)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								-0.37				
	-62.5							-2.33					
	-57.5						1.45		-0.16				
	-52.5					0.23		-2.17					-17.90
	-47.5				0.35		1.90		-0.21			-17.59	
	-42.5					0.28		-2.25		-22.01			-19.26
	-37.5		1.29		-0.59		1.90		-0.37	-23.56		-19.11	
	-32.5	-1.16				0.75		-2.17	-0.32		-23.89		-20.35
	-27.5		1.55		-0.59		2.61	-2.09	-0.48	-25.39		-20.19	
	-22.5	-1.28				-0.40	-1.30	-1.94	-0.26		-24.59		-19.99
切羽	-17.5		1.81		0.53	0.51	2.71	-1.78	-0.48	-24.57		-18.53	-19.13
	-12.5	0.46			-1.00	1.78	2.51	-1.39	-0.37		-21.03	-16.88	-18.53
	-7.5		6.55		-0.53	1.96	2.91	-1.01	-0.16	-21.81	-19.82	-16.92	-16.08
	-2.5	4.55	4.22		0.11	1.44	3.01	-0.62	-1.81	-23.47	-22.17	-16.92	-17.22
	+2.5	2.27	-4.14		-9.11	1.09	-3.86	-15.54	-3.25	-24.82	-22.08	-17.05	-17.67
	+7.5	-6.12	-15.61		-20.42	-6.69	-9.19	-23.00		-25.28	-23.06	-18.04	-19.40
	+12.5	-7.23	-17.60		-22.08	-5.02	-9.69		-14.85	-25.12	-23.12	-18.53	-19.81
	+17.5	-7.23	-16.13		-21.72	-4.73		-23.54		-24.89	-22.94	-18.35	-19.58
	+22.5	-7.11	-15.70		-21.01		-9.19		-16.29	-24.96	-22.87	-18.31	
	+27.5	-7.35	-14.49			-4.27		-23.23		-24.94	-22.84		-19.35
掘削後	+32.5	-7.29	-14.15		-20.24		-9.29		-16.61	-24.91		-18.31	
	+37.5	-7.11				-4.32		-23.31			-22.84		-19.31
	+42.5		-14.84		-20.48		-9.19			-24.89		-18.21	
	+47.5	-7.35				-4.15					-22.87		-19.17
	+52.5		-14.92		-20.54					-24.84		-18.08	
	+57.5	-7.64									-22.78		
	+62.5		-14.41							-24.69			
	+67.5	-7.8											
土圧計の番号		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-25.78					-25.44					-19.24	
	-52.5					-19.01					-20.30		
	-47.5	-26.98			-19.35		-23.78			-18.00		-19.64	
	-42.5			-19.67		-19.38			-20.41		-21.33		
	-37.5	-27.40	-20.55		-19.75		-23.79	-20.78		-18.35		-19.57	
	-32.5			-21.08		-19.51			-21.23		-21.29		
	-27.5	-28.89	-22.70		-18.95		-21.74	-20.71		-18.13		-19.30	
	-22.5	-28.24		-19.30		-17.15	-17.03		-21.25		-21.64	-18.99	
切羽	-17.5	-27.91	-20.39		-15.72	-17.47	-22.92	-20.81		-18.66	-21.44	-18.90	
	-12.5	-23.69		-17.45	-16.87	-18.15	-21.32		-21.69	-18.44	-21.23	-19.26	
	-7.5	-22.54	-19.41	-17.35	-17.71	-16.65	-21.46	-21.04	-21.55	-18.17	-21.38	-19.26	
	-2.5	-24.54	-20.67	-19.58	-17.98	-18.74	-22.21	-20.96	-21.27	-18.53	-21.14	-19.46	
	+2.5	-25.02	-22.62	-20.23	-19.44	-19.19	-23.39	-20.74	-21.32	-18.04	-21.16	-19.48	
	+7.5	-27.04	-23.36	-21.74	-20.50	-20.60	-25.43	-20.78	-21.13	-18.00	-21.09	-19.48	
	+12.5	-27.62	-23.43	-21.86	-20.55	-20.79	-25.37	-20.62	-21.09	-17.95	-20.92	-19.19	
	+17.5		-23.26	-21.69	-20.37	-20.60		-20.62	-21.06	-17.73	-20.89		
	+22.5	-27.42	-23.16	-21.54	-20.28		-25.01	-20.58	-20.99	-17.60		-19.10	
	+27.5		-23.09	-21.47		-20.47		-20.58	-20.93		-20.87		
掘削後	+32.5	-27.37	-23.08		-20.24		-24.94	-20.62		-17.73		-19.12	
	+37.5			-21.51		-20.42			-20.90		-20.87		
	+42.5	-27.18	-23.08		-20.32		-24.92	-20.53		-17.82		-19.14	
	+47.5			-21.53		-20.29			-20.90		-20.81		
	+52.5		-23.14		-20.19			-20.60		-17.68			
	+57.5			-21.44					-20.90				
	+62.5		-23.03					-20.51					
	+67.5												
備考		計測パターン : A											

D-4 (乾燥砂)

土圧計の位置		トシネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								-0.06				
	-62.5							0.12					
	-57.5						0.61		-0.56				
	-52.5					0.46		0.18					-19.40
	-47.5				0.49		1.00		1.44			-18.58	
	-42.5			0.29		0.84		1.65			-19.57		-17.90
	-37.5		0.79		1.04		0.78		1.06	-20.68		-19.32	
	-32.5	-0.89		1.84		-0.08		1.34	1.62		-20.19		-18.52
	-27.5		10.33		0		0.55	2.01	1.31	-21.35		-20.11	
	-22.5	-1.14		8.52		0.15	6.31	2.56	-4.06		-20.35		-18.88
	-17.5		12.43		-0.38	-0.15	7.26	3.66	-2.06	-20.86		-20.07	-18.68
	-12.5	-4.19		7.65	3.17	-0.38	7.87	4.64	-1.25		-19.64	-19.65	-18.00
掘削後	-7.5		5.52	4.84	7.09	-0.92	6.65	5.06	-2.69	-20.72	-19.27	-19.14	-17.13
	-2.5	-23.33	-17.51	-18.97	-9.77	0	2.55	-0.12	-8.06	-20.80	-19.59	-18.86	-18.37
	+2.5	-11.48	-9.02	-6.29	-10.64	1.30	-0.94	-3.23	-8.18	-20.82	-19.49	-19.09	-18.31
	+7.5	-13.06	-14.71	-6.19	-13.21	-0.92	-6.20	-5.55		-21.09	-19.48	-19.42	-18.68
	+12.5	-11.86	-14.36	-6.78	-12.50	-1.69	-5.04		-14.55	-20.94	-19.87	-19.60	-18.88
	+17.5	-13.76	-14.27	-6.29	-11.90	-1.76		-6.95		-20.89	-19.89	-19.69	-18.62
	+22.5	-13.76	-14.27	-7.55	-11.68		-5.37		-15.55	-20.93	-19.98	-19.56	
	+27.5	-13.95	-14.36	-6.39		-2.61		-7.38		-21.00	-19.92		-18.57
	+32.5	-13.82	-14.36		-11.57		-5.26		-13.74	-20.98		-19.46	
	+37.5	-13.70		-26.42		-2.68		-7.26			-19.89		-18.62
	+42.5		-14.27		-11.41		-5.21			-21.00		-19.46	
	+47.5	-13.44		-6.39		-3.14					-19.89		-18.57
掘削後	+52.5		-14.27		-11.41					-20.98		-19.56	
	+57.5	-13.51		-60.88							-19.91		
	+62.5		-14.19							-21.00			
	+67.5	-13.38											
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-20.58					-19.92					-17.48	
	-52.5					-19.61					-18.84		
	-47.5	-21.15			-18.77		-20.70			-19.59		-17.35	
	-42.5			-19.34		-21.08			-18.56		-18.67		
	-37.5	-20.72	-20.07		-20.28		-21.07	-20.50		-19.59		-17.48	
	-32.5			-20.89		-21.54			-18.48		-18.62		
	-27.5	-21.82	-20.94		-21.25		-20.86	-20.52		-19.55		-17.62	
	-22.5	-21.67		-20.91		-20.39	-19.27		-18.46		-18.75	-17.72	
	-17.5	-21.32	-20.94		-19.74	-19.19	-19.69	-20.50		-19.64	-18.85	-17.75	
	-12.5	-19.44		-20.16	-18.68	-19.88	-18.92		-18.55	-19.82	-18.75	-17.87	
掘削後	-7.5	-20.30	-20.84	-18.89	-19.61	-19.29	-19.34	-20.38	-18.67	-19.64	-18.76	-17.85	
	-2.5	-20.39	-20.12	-20.02	-19.52	-19.70	-19.85	-20.50	-18.49	-19.59	-18.69	-17.85	
	+2.5	-20.37	-20.43	-20.05	-19.70	-19.70	-19.81	-20.43	-18.44	-19.55	-18.67	-17.85	
	+7.5	-20.82	-21.06	-20.50	-20.14	-19.93	-20.21	-20.38	-18.40	-19.55	-18.64	-17.82	
	+12.5	-20.82	-20.90	-20.41	-20.06	-19.79	-20.13	-20.47	-18.46	-19.55	-18.67	-17.82	
	+17.5		-16.33	-20.39	-19.97	-19.79		-20.61	-18.44	-19.68	-18.62		
	+22.5	-20.68	-20.82	-20.34	-19.97		-20.06	-20.57	-18.49	-19.50		-17.80	
	+27.5		-20.85	-20.36		-19.79		-20.63	-18.46		-18.57		
	+32.5	-20.65	-20.87		-19.88		-20.06	-20.59		-19.55		-17.80	
	+37.5			-20.34		-19.79			-18.46		-18.57		
	+42.5	-20.68	-20.90		-19.88		-20.11	-20.55		-19.59		-17.87	
	+47.5			-20.34		-19.88			-18.46		-18.60		
	+52.5		-20.94		-19.92			-20.61		-19.64			
	+57.5			-20.38					-18.49				
	+62.5		-20.95					-20.61					
	+67.5												
備考		計測パターン : A											

D-5 (乾燥砂)

土圧計のNo.		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)				
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5	
掘削前	-67.5								-0.22					
	-62.5							0.04						
	-57.5						0.00		-0.13					
	-52.5					0.16		-0.13						-26.53
	-47.5				-0.48	0.00		-0.04				-28.07		
	-42.5			0.12	-0.04			0.04			-30.16			-26.69
	-37.5	-0.44	-0.04		-0.35	0.31		-0.04	-32.76		-28.94			
	-32.5		0.08		0.04		0.09	-0.09		-31.88		-29.06		
	-27.5	-0.49	-0.04		-0.08	0.40	0.00	-0.41	-35.11		-31.53			
	-22.5		0.38		-0.16	0.40	0.09	-0.27		-33.76		-28.39		
切羽	-17.5	0.26		0.00	-0.29	0.75	0.04	0.31	-33.77		-29.73		-27.72	
	-12.5	-0.17	0.73	-0.13	0.37	1.42	-1.65	1.18		-30.07	-29.29	-26.12		
	-7.5	-0.40	0.43	-0.84	-0.66	0.84	-2.29	-1.18	-31.02	-30.00	-28.60	-28.08		
	-2.5	-6.55	-2.37	-3.84	-2.30	-0.24	0.84	-2.23	-32.40	-31.50	-31.14	-28.39		
	+2.5	-7.36	-7.25	-8.00	-7.03	-6.21	-2.35	-6.28	-32.33	-30.79	-29.34	-26.95		
	+7.5	-15.03	-17.64	-14.57	-16.01	-14.83	-10.09	-16.75	-35.92	-33.33	-32.56	-30.15		
	+12.5	-17.68	-19.11	-16.30	-18.80	-16.66	-11.77		-16.51	-36.93	-35.08	-33.83	-32.37	
	+17.5	-18.08	-18.93	-16.08	-17.16	-15.91		-17.48	-36.81	-34.88	-34.22	-32.37		
	+22.5	-17.99	-18.31	-16.52	-16.19		-10.44		-16.14	-36.56	-34.78	-34.02		
	+27.5	-17.99	-18.17	-16.04		-15.37		-17.16	-36.47	-34.64		-31.64		
掘削後	+32.5	-18.22	-17.86		-16.14		-10.09		-15.82	-36.40		-33.58		
	+37.5	-17.86		-15.61		-15.45		-17.16			-34.43		-31.75	
	+42.5		-17.82		-16.41		-10.17			-36.24		-33.73		
	+47.5	-17.90		-35.20		-15.37								
	+52.5		-17.82		-16.41					-36.22		-33.97		
	+57.5	-17.99		-36.93							-34.73			
	+62.5		-17.73							-36.47				
	+67.5	-18.17												
土圧計のNo.		周辺地山応力 (g/cm ²)												
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6		
掘削前	-67.5													
	-62.5													
	-57.5	-34.37					-26.79					-28.63		
	-52.5					-28.50					-28.84			
	-47.5	-33.07			-27.80		-28.72			-28.39		-30.18		
	-42.5			-28.14		-30.76		-27.98		-28.77				
	-37.5	-34.59	-31.14		-28.74		-29.36	-31.38		-29.19		-30.41		
	-32.5		-29.90		-31.57			-28.62		-28.31				
	-27.5	-35.51	-32.55		-29.14		-27.41	-32.70		-28.43		-30.00		
	-22.5	-35.70		-28.77		-27.97	-25.86		-28.64		-28.88	-30.08		
切羽	-17.5	-33.45	-30.57		-25.20	-26.68	-24.70	-32.90		-29.15	-28.88	-30.08		
	-12.5	-32.21		-25.11	-24.31	-26.53	-25.15		-28.89	-29.23	-28.89	-30.08		
	-7.5	-30.91	-29.31	-25.61	-25.92	-28.55	-25.97	-32.61	-28.80	-29.10	-28.62	-30.16		
	-2.5	-32.76	-31.44	-28.68	-28.38	-31.43	-28.74	-32.45	-28.50	-28.66	-28.64	-30.18		
	+2.5	-31.08	-31.31	-28.32	-27.31	-32.96	-26.53	-32.11	-28.14	-28.74	-28.62	-29.85		
	+7.5	-33.73	-34.76	-30.10	-29.59	-32.44	-29.67	-31.91	-28.16	-28.74	-28.38	-29.70		
	+12.5	-35.75	-35.65	-31.32	-30.76		-30.61	-31.99	-28.16	-28.61	-28.20	-29.57		
	+17.5		-35.55	-31.17	-30.67	-31.81		-31.95	-28.05	-28.48	-28.18			
	+22.5	-35.98	-35.16	-31.08	-30.31		-30.11	-31.86	-27.94	-28.52		-29.47		
	+27.5		-35.09	-30.90		-31.72		-31.79	-27.98		-28.05			
掘削後	+32.5	-35.94	-34.98		-30.08		-29.92	-31.82		-28.57		-29.34		
	+37.5			-30.78		-31.86		-27.96		-27.98				
	+42.5	-36.31	-34.92		-30.13		-30.04	-31.97		-28.39		-29.29		
	+47.5			-30.80					-27.91		-27.89			
	+52.5		-34.97		-30.35			-31.86		-28.30				
	+57.5			-31.07					-27.77					
	+62.5		-35.27					-31.86						
	+67.5													
計画パターン: A														
備考														

D-6 (乾燥砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (m)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0.04				
	-62.5							-0.33					
	-57.5						0.04		0.04				
	-52.5					-0.08		-0.25					-27.40
	-47.5				-0.08		0.26		0.04			-47.54	
	-42.5			-0.04		-0.17		0.12			-50.37		-56.25
	-37.5		0.04		-0.17		0.52		-3.56	-64.56		-60.45	
	-32.5	0.09		0.00		0.17		4.27	-4.19		-61.80		-60.42
	-27.5		0.12		0.26		2.07	5.16	-4.19	-74.46		-62.14	
	-22.5	-0.23		0.39		4.26	1.23	5.49	-4.19		-63.61		-63.43
切羽	-17.5		0.59		4.55	4.56	3.61	5.92	-3.47	-76.52		-65.95	-63.53
	-12.5	-0.28		-3.79	3.85	5.72	2.60	3.76	-3.65		-65.78	-65.01	-62.70
	-7.5		-7.70	-6.58	-1.21	5.50	2.55	1.60	-3.51	-80.89	-34.52	-64.07	-66.10
	-2.5	-10.27	-13.07	-7.68	-7.49	-12.08	1.23	-0.80	-25.66	-73.80	-59.06	-58.08	-60.03
	+2.5	-15.26	-8.68	-2.91	-11.18	-6.14	0.17	-3.68	-13.80	-70.51	-57.36	-57.98	-56.59
	+7.5	-23.18	-16.48	-16.78	-18.42	-11.57	-3.79	-14.67		-74.28	-60.74	-60.41	-61.49
	+12.5	-27.75	-19.76	-21.60	-22.54	-13.32	-5.42		-23.86	-79.40	-64.31	-65.25	-66.48
	+17.5	-29.03	-21.51	-24.21	-24.18	-11.18		-20.55		-82.60	-67.45	-68.07	-69.68
	+22.5	-29.73	-22.61	-25.58	-25.57		-5.81		-25.57	-85.14	-69.20	-70.30	
	+27.5	-29.97	-22.95	-27.48		-15.24		-21.82		-86.38	-70.57		-72.69
掘削後	+32.5	-29.69	-24.02		-25.31		-5.90		-26.52	-87.53		-72.33	
	+37.5	-29.03		-27.26		-15.07		-22.50			-71.67		-74.10
	+42.5		-23.55		-25.14		-6.12			-88.19		-72.92	
	+47.5	-28.74		-27.12		-14.98					-71.88		-74.34
	+52.5		-23.34		-25.14					-88.17		-73.07	
	+57.5	-28.46		-26.86							-71.93		
	+62.5		-23.34							-88.25			
	+67.5	-28.23											
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (m)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-40.59					-52.84					-67.49	
	-52.5					-51.90					-65.18		
	-47.5	-56.60			-60.32		-61.66			-68.05		-70.61	
	-42.5			-63.47		-62.54			-68.05		-68.80		
	-37.5	-61.76	-68.88		-70.74		-66.50	-73.86		-72.22		-71.17	
	-32.5			-74.14		-65.09			-71.86		-69.03		
	-27.5	-64.74	-78.19		-72.39		-69.03	-78.39		-72.26		-72.74	
	-22.5	-64.72		-73.05		-68.65	-67.43		-72.38		-71.12	-73.52	
切羽	-17.5	-63.66	-78.14		-78.29	-67.91	-69.47	-80.18		-75.76	-71.92	-74.69	
	-12.5	-64.46		-80.01	-78.90	-70.46	-70.94		-76.04	-76.56	-72.55	-75.78	
	-7.5	-66.65	-81.56	-79.07	-78.98	-73.15	-70.89	-84.20	-76.49	-76.61	-73.03	-75.86	
	-2.5	-60.75	-72.84	-67.66	-69.13	-64.67	-63.90	-84.52	-76.47	-76.79	-72.96	-75.60	
	+2.5	-58.99	-69.05	-64.91	-63.49	-61.34	-62.35	-84.97	-76.85	-76.74	-72.75	-75.57	
	+7.5	-62.30	-72.38	-67.21	-65.05	-62.68	-64.69	-85.83	-77.07	-76.88	-72.75	-75.94	
	+12.5	-67.17	-77.21	-70.94	-68.48	-65.83	-68.05	-86.40	-77.39	-76.97	-73.03	-76.56	
	+17.5		-80.88	-74.07	-71.30	-68.75		-86.92	-77.63	-77.37	-73.43		
	+22.5	-72.14	-83.32	-76.20	-73.43		-72.74	-87.25	-77.99	-77.78		-77.49	
	+27.5		-84.74	-77.85		-71.76		-87.77	-78.40		-74.20		
掘削後	+32.5	-74.30	-85.96		-75.25		-75.33	-88.02		-78.45		-78.26	
	+37.5			-78.97		-73.47			-78.64		-74.55		
	+42.5	-75.03	-86.40		-76.08		-76.34	-87.96		-78.40		-78.02	
	+47.5			-79.23		-74.07			-78.42		-74.29		
	+52.5		-86.31		-76.60			-87.68		-78.13			
	+57.5			-79.50					-78.15				
	+62.5		-86.40					-87.19					
	+67.5												
計画パターン：A													
備考													

D-7 (普通砂・落し戸)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5	-0.40											
	-62.5		-0.17							-46.31			
	-57.5	-0.13									-44.14		
	-52.5		-0.08		-0.26					-52.15		-50.29	
	-47.5	-0.13				-0.30					-48.62		-64.88
	-42.5		0.08		-0.13		-0.17			-54.82		-57.49	
	-37.5	-0.04				-0.22		-0.04			-50.40		-78.92
	-32.5	-0.22	0.13		0.00		-0.08		-0.30	-55.61		-57.02	
	-27.5	-0.22	0.00			-0.08				-53.72	-54.19		-79.60
	-22.5	-0.31	0.00		-0.04		0.00		-0.17	-54.08	-53.68	-57.96	
切羽	-17.5	-0.08	-0.04		-0.13	-0.04		-0.08		-56.07	-51.06	-58.47	-78.51
	-12.5	-0.22	0.04		-0.13	-0.13	0.00		0.08	-58.25	-50.54	-59.32	-78.25
	-7.5	-0.04	0.00		-0.21	-0.13	0.00	-0.04		-60.70	-53.73	-54.29	-79.29
	-2.5	-0.08	0.04		-0.21	-0.08	-0.04	-0.08	0.08	-62.17	-57.98	-52.41	-76.90
	+2.5	-0.31	0.00		-0.17	-0.08	-0.08	-0.04	0.04	-63.29	-60.58	-57.77	-69.36
	+7.5		-0.13		-0.17	-0.08	-0.08	-0.13	0.00	-64.00	-62.35	-62.05	-69.93
	+12.5	-0.13			-0.17	-0.13	-0.08	-0.08	0.00		-63.23	-65.05	-76.32
	+17.5		-0.04		-0.30	-0.17	-0.17	-0.04	0.00	-63.95		-67.17	-81.06
	+22.5	-0.13				-0.22	-0.08	-0.08	0.04		-63.77		-84.33
	+27.5		-0.08		-0.17		-0.13	-0.13	-0.04	-63.66		-68.20	
掘削後	+32.5	-0.04				-0.17		-0.17	-0.04		-63.59		-86.62
	+37.5		0.00		-0.26		-0.08		-0.04	-63.79		-68.63	
	+42.5					-0.22		-0.13			-63.91		-87.40
	+47.5				-0.17		-0.13		-0.04			-69.05	
	+52.5					-0.17		-0.17					-88.44
	+57.5						-0.13		-0.08				
	+62.5							-0.13					
	+67.5								-0.04				
土圧計の番号		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5		-40.05					-41.34					
	-57.5			-41.98					-38.10				
	-52.5		-51.74		-45.25			-46.11		-42.83			
	-47.5			-55.24		-50.52			-41.07		-36.99		
	-42.5	-52.43	-51.50		-58.91		-40.27	-47.56		-43.63		-49.03	
	-37.5			-53.31		-69.18			-41.72		-37.15		
	-32.5	-72.54	-49.49		-56.87		-61.47	-48.93		-43.50		-57.41	
	-27.5		-47.15	-52.65		-68.30		-49.82	-42.75		-36.67		
	-22.5	-75.59	-48.98	-54.53	-53.75		-61.95	-50.78	-43.55	-43.72		-58.00	
切羽	-17.5		-53.90	-52.61	-54.62	-63.08		-51.53	-44.29	-44.52	-36.79		
	-12.5	-73.18	-57.81	-54.64	-55.57	-63.45	-59.21	-52.21	-44.80	-44.91	-36.93	-58.68	
	-7.5	-72.54	-61.21	-59.36	-54.40	-63.45	-58.19	-52.87	-45.53	-45.14	-37.18	-58.91	
	-2.5	-72.85	-62.76	-64.39	-55.22	-65.62	-55.98	-53.29	-46.14	-45.58	-37.15	-59.12	
	+2.5	-70.50	-63.93	-67.32	-60.51	-62.71	-55.82	-53.43	-46.78	-46.25	-37.68	-59.35	
	+7.5	-69.61	-64.67	-69.38	-64.63	-63.63	-57.34	-53.78	-47.26	-46.91	-38.17	-60.11	
	+12.5	-64.81		-70.71	-67.45	-69.13	-55.34		-47.38	-47.22	-38.58	-61.21	
	+17.5	-64.20	-64.89		-69.22	-73.42	-56.86	-53.41		47.26	-39.08	-61.85	
	+22.5	-68.70		-71.15		-76.10	-61.78		-46.98		-39.15	-62.31	
	+27.5	-72.94	-64.86		-69.87		-65.63	-53.29		-47.04		62.69	
掘削後	+32.5			-71.23		-77.40			-46.71		-39.02		
	+37.5	-75.92	-65.08		-69.92		-68.11	-53.17		-46.78		-62.77	
	+42.5			-71.19		-77.35			-46.37		-38.76		
	+47.5	-77.37			-69.87		-68.80			-46.20		-62.46	
	+52.5					-77.07					-38.30		
	+57.5	-78.23					-68.81					-61.52	
	+62.5												
	+67.5												
計算パターン; A													
備考													

D-8 (乾燥砂)

土匠計の番号、 切羽からの距離 (cm)		トンネル土匠 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)				
		A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7	A - 8	B - 2	B - 3	B - 4	B - 5	
掘削前	-67.5								-0.26					
	-62.5							-0.97						
	-57.5						-0.04		-0.62					
	-52.5					-0.04		0.00					-47.84	
	-47.5				-0.17		0.13		0.13			-37.22		
	-42.5			0.13		-0.02		0.08			-35.48		-52.64	
	-37.5		0.04		-0.04		0.40		0.13	-52.50		-42.25		
	-32.5	-0.43		0.39		0.13		0.25	1.51		-37.59		-51.80	
	-27.5		-0.39		0.04		0.40	-0.89	1.20	-52.57		-39.99		
	-22.5	-0.48		0.56		-0.13	0.31	2.54	-0.53		-34.73		-43.04	
切羽	-17.5		0.04		-0.34	0.83	0.72	0.59	-0.08	-45.72		-29.78	-42.01	
	-12.5	-0.26		0.56	-2.56	-5.42	-0.22	-0.50	0.48		-32.55	-30.01	-44.21	
	-7.5		0.48	0.26	0.34	1.10	0.00	0.59	0.40	-43.07	-38.21	-34.77	-45.31	
	-2.5	-5.89	-1.33	-16.94	-0.52	0.35	-3.38	0.08	0.26	-42.89	-39.00	-34.08	-41.42	
	+2.5	-7.21	-6.42	-4.83	-6.00	-6.83	-5.23	-5.35	-5.73	-47.49	-40.05	-34.35	-42.14	
	+7.5	-13.14	-21.37	-16.15	-17.66	-20.27	-20.16	-17.84		-52.19	-44.43	-38.42	-44.34	
	+12.5	-15.65	-28.33	-21.16	-21.49	-25.38	-25.07		-21.86	-57.72	-49.26	-42.11	-50.69	
	+17.5	-17.67	-30.81	-25.13	-23.14	-27.68		-23.96		-60.69	-51.35	-44.70	-54.26	
	+22.5	-18.24	-31.52	-24.52	-23.70		-27.73		-23.82	-61.66	-51.99	-46.22		
	+27.5	-18.68	-31.79	-25.52		-29.31		-25.79		-61.73	-52.21		-56.34	
掘削後	+32.5	-18.99	-31.74		-22.75		-27.92		-22.75	-61.73		-46.45		
	+37.5	-18.99		-24.73		-29.57		-25.52			-51.85		-56.01	
	+42.5		-31.12		-22.83		-25.52			-60.64		-46.78		
	+47.5	-18.20		-24.34		-28.20					-51.65		-55.23	
	+52.5		-31.39		-22.79					-60.92		-46.36		
	+57.5	-18.64		-25.00							-51.59			
	+62.5		-31.17							-60.94				
	+67.5	-18.16												
土匠計の番号、 切羽からの距離 (cm)		周辺地山応力 (g/cm ²)												
		B - 6	C - 2	C - 3	C - 4	C - 5	C - 6	D - 2	D - 3	D - 4	D - 5	D - 6		
掘削前	-67.5													
	-62.5													
	-57.5	-51.66					-40.27					-40.69		
	-52.5					-36.85					-41.64			
	-47.5	-54.32			-40.66		-45.02			-42.18		-40.60		
	-42.5			-39.49		-41.01			-46.39		-41.77			
	-37.5	-54.39	-49.87		-44.98		-44.68	-49.61		-43.46		-40.43		
	-32.5			-43.89		-41.15		-47.95		-41.57				
	-27.5	-47.00	-52.17		-44.24		-41.38	-50.00		-43.50		-40.38		
	-22.5	-46.43		-41.10		-37.04	-41.89		-47.60		-41.48	-40.69		
切羽	-17.5	-44.79	-46.37		-39.03	-37.37	-39.26	-49.28		-42.97	-41.90	-42.39		
	-12.5	-47.05		-37.87	-39.50	-37.13	-39.95		-47.35	-43.54	-43.36	-43.51		
	-7.5	-48.79	-45.75	-38.03	-37.50	-36.99	-39.51	-49.38	-47.83	-44.91	-44.44	-43.89		
	-2.5	-46.17	-48.92	-40.41	-40.47	-39.78	-42.39	-49.91	-48.59	-46.36	-45.10	-44.63		
	+2.5	-46.66	-53.39	-44.15	-44.24	-42.99	-44.73	-50.20	-49.57	-47.11	-45.54	-45.10		
	+7.5	-49.74	-59.38	-48.02	-48.33	-45.54	-48.27	-50.79	-50.35	-47.60	-45.85	-45.84		
	+12.5	-54.25	-63.96	-51.66	-51.21	-49.61	-52.75	-51.08	-50.46	-47.11	-46.11	-46.13		
	+17.5		-65.52	-52.99	-53.67	-52.40		-50.95	-50.34	-47.73	-45.98			
	+22.5	-58.79	-65.95	-53.79	-54.60		-56.23	-50.81	-50.27	-47.11		-45.56		
	+27.5		-66.07	-53.75		-52.96		-50.72	-49.98		-45.32			
掘削後	+32.5	-59.11	-65.78		-54.28		-55.86	-50.55		-46.76		-45.46		
	+37.5			-53.18		-52.11			-49.52		-45.36			
	+42.5	-58.77	-65.32		-54.09		-55.50	-49.94		-46.94		-44.58		
	+47.5			-52.94		-51.64			-49.82		-44.88			
	+52.5		-65.32		-54.00			-50.42		-46.54				
	+57.5			-52.83					-49.71					
	+62.5		-65.25					-50.27						
	+67.5													
計画パターン ; A														
備考														

D-9 (乾燥砂)

土圧計の番号 切羽からの距離 (cm)		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0.48				
	-62.5							-0.68					
	-57.5						-0.61		-0.88				
	-52.5					-0.77		-0.72					-38.69
	-47.5				-0.77		-0.48		-0.22			-52.83	
	-42.5			-0.66		-0.81		-0.63		-33.05			-48.26
	-37.5		-0.70		-0.07		-0.21		-0.31	-54.60		-67.15	
	-32.5	-1.52		-0.44		-0.60		-0.76	-0.75	-40.70			-49.62
	-27.5		-0.74		-0.56		0.21	-0.98	-0.44	-60.79		-68.49	
	-22.5	-0.70		-0.35		-0.94	-0.52	-0.63	-0.26	-42.38			-43.92
切羽	-17.5		-0.39		-0.82	-1.24	-0.04	-0.85	-0.17	-61.89		-55.52	-48.73
	-12.5	-0.86		0.44	-0.95	-0.73	-0.21	0.00	-0.26	-38.89	-66.85	-44.97	
	-7.5		0.21	0.08	-1.12	-0.43	-1.67	-0.34	-0.08	-57.51	-43.22	-64.11	-48.42
	-2.5	0.76	-0.35	0.98	-1.46	-0.51	1.62	0.25	1.15	-57.06	-39.32	-61.30	-43.24
	+2.5	-5.12	-5.33	-4.01	-6.86	-3.31	-4.88	-5.41	-4.52	-52.48	-38.12	-56.86	-40.31
	+7.5	0.81	-17.76	-36.67	-17.23	-13.81	-12.13	-15.99		-55.46	-39.99	-59.31	-42.87
	+12.5	-20.38	-23.19	-44.26	-22.89	-16.87	-15.74		-19.46	-60.15	-43.86	-64.52	-46.95
	+17.5	-22.81	-25.46	-76.29	-24.62	-18.98		-23.45		-63.09	-46.32	-67.61	-49.99
	+22.5	-23.72	-26.30	-24.11	-25.65		-17.19		-21.15	-64.44	-47.52	-68.96	
	+27.5	-23.78	-26.52	-24.65		-19.58		-24.56		-64.76	-47.82		-50.77
掘削後	+32.5	-23.88	-26.60		-25.18		-17.06		-20.17	-64.82		-68.67	
	+37.5	-23.88		-23.40		-19.62		-23.58			-47.37		-50.46
	+42.5		-25.95		-24.62		-16.35			-64.26		-68.26	
	+47.5	-23.32		-22.91		-19.28					-47.29		-50.30
	+52.5		-25.46		-24.10					-64.09		-67.73	
	+57.5	-22.86		-101.0							-47.37		
	+62.5		-25.38							-63.88			
	+67.5	-22.96											
土圧計の番号 切羽からの距離 (cm)		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-43.91					-44.13					-42.75	
	-52.5					-32.31					-45.74		
	-47.5	-53.01			-39.87		-47.17			-45.81		-43.97	
	-42.5			-43.27		-38.17			-47.09		-47.11		
	-37.5	-55.52	-55.16		-45.53		-50.33	-56.27		-48.29		-44.63	
	-32.5			-50.87		-41.58			-49.73		-47.37		
	-27.5	-51.10	-64.52		-47.76		-47.19	-59.26		-48.62		-44.58	
	-22.5	-55.28		-52.24		-38.03	-49.26		-49.87		-47.11	-44.63	
切羽	-17.5	-53.28	-64.99		-44.60	-39.83	-45.31	-59.17		-48.20	-47.05	-44.21	
	-12.5	-54.37		-50.10	-46.55	-38.55	-48.52		-51.42	-48.71	-46.98	-45.00	
	-7.5	-54.71	-65.81	-53.26	-49.06	-43.00	-50.53	-59.06	-50.25	-48.76	-47.74	-45.60	
	-2.5	-49.32	-63.60	-52.30	-47.80	-43.14	-49.58	-60.18	-50.46	-49.88	-48.07	-46.17	
	+2.5	-46.99	-54.48	-45.28	-42.05	-37.51	-45.26	-60.43	-51.20	-49.98	-48.27	-46.73	
	+7.5	-49.25	-58.57	-47.33	-43.53	-40.02	-47.86	-61.12	-51.31	-50.17	-48.31	-46.95	
	+12.5	-53.39	-63.34	-50.71	-47.94	-44.14	-52.86	-61.01	-51.24	-49.84	-48.07	-47.19	
	+17.5		-66.45	-53.61	-50.59	-47.54		-60.49	-50.70	-49.13	-47.40		
	+22.5	-56.16	-67.82	-54.62	-52.30		-56.23	-59.70	-50.11	-48.06		-46.80	
	+27.5		-67.84	-55.24		-48.25		-58.97	-48.99		-46.89		
掘削後	+32.5	-56.24	-67.73		-51.79		-55.81	-57.73		-47.59		-46.21	
	+37.5			-54.65		-47.40			-48.79		-46.59		
	+42.5	-55.98	-67.18		-51.42		-55.04	-57.59		-47.59		-45.97	
	+47.5			-54.36		-46.79			-48.87		-46.52		
	+52.5		-66.99		-51.28			-57.53		-47.68			
	+57.5			-54.38					-48.88				
	+62.5		-67.11					-57.62					
	+67.5												
備考		計測パターン : A											

D-10 (乾燥砂・落し戸小)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)	(cm)	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								-0.31				
	-62.5							1.05					
	-57.5						-0.51		2.22				
	-52.5					-0.04		-2.30					-50.59
	-47.5				-0.70		1.17		2.27			-47.86	
	-42.5			-0.35		0.00		-2.06			-39.83		-53.64
	-37.5		-0.04		-1.01		0.75		2.31	-54.97		-53.67	
	-32.5	-0.13		0.26		0.85		-2.06	2.22		-46.75		-61.58
	-27.5		-0.94		-1.15		0.56	-2.26	2.13	-63.52		-59.10	
	-22.5	-2.56		0.00		0.73	0.42	-2.21	2.18		-51.33		-64.58
切羽	-17.5		-0.31		-1.01	0.21	0.51	-2.26	2.13	-69.54		-62.94	-66.67
	-12.5	-1.76		-0.17	-1.15	0.21	0.47	-2.50	2.13		-54.90	-65.06	-67.92
	-7.5		-0.31	-0.04	-1.24	0.04	1.03	-2.64	2.18	-71.62	-55.89	-64.24	-68.47
	-2.5	-1.45	0.09	-1.56	-2.03	-2.27	-0.09	-4.71	-1.22	-66.91	-50.17	-60.06	-62.83
	+2.5	-8.98	-6.54	-5.98	-6.28	-6.99	-6.49	-8.22	-6.13	-63.12	-48.16	-56.51	-58.03
	+7.5	-19.77	-17.74	-17.50	-17.62	-17.47	-18.96	-20.44		-65.26	-50.33	-58.33	-58.48
	+12.5	-23.84	-22.53	-22.06	-22.05	-20.99	-22.26		-24.17	-68.50	-53.28	-61.12	-60.98
	+17.5	-26.36	-24.52	-24.07	-23.42	-22.63		-16.93		-70.83	-55.28	-62.99	-62.73
	+22.5	-27.38	-25.56	-24.83	-24.31		-26.73		-26.08	-72.27	-56.15	-64.15	
	+27.5	-27.82	-25.92	-25.41		-23.96		-19.67		-72.61	-56.42		-64.43
掘削後	+32.5	-27.73	-25.96		-24.80		-26.92		-26.03	-68.72		-64.53	
	+37.5	-27.60		-25.28		-24.09		-20.01			-56.13		-64.68
	+42.5		-25.42		-24.58		-26.64			-72.02		-64.10	
	+47.5	-27.02		-25.05		-23.96					-55.87		-64.43
	+52.5		-25.42		-24.44					-71.70		-63.91	
	+57.5	-26.98		-24.96							-55.69		
	+62.5		-25.10							-71.51			
	+67.5	-27.16											
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)	(cm)	B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-48.08					-45.96					-47.76	
	-52.5					-39.61					-45.14		
	-47.5	-51.61			-44.05		-45.98			-42.40		-46.53	
	-42.5			-45.56		-40.63			-47.41		-44.27		
	-37.5	-57.92	-57.59		-42.71		-52.72	-55.78		-41.71		-46.53	
	-32.5			-46.58		-47.01			-47.11		-44.31		
	-27.5	-59.90	-60.46		-49.90		-53.56	-55.85		-41.76		-46.51	
	-22.5	-60.97		-51.84		-48.27	-53.90		-47.22		-44.46	-46.51	
切羽	-17.5	-61.67	-65.10		-52.78	-49.33	-52.97	-56.21		-42.03	-44.36	-46.51	
	-12.5	-62.92		-54.54	-54.37	-50.15	-53.93		-47.45	-42.03	-44.57	-46.58	
	-7.5	-62.26	-67.89	-54.41	-53.50	-51.12	-54.11	-56.93	-47.63	-42.54	-44.73	-46.79	
	-2.5	-58.25	-65.75	-53.73	-52.93	-48.90	-55.18	-57.44	-48.07	-42.96	-45.10	-47.26	
	+2.5	-53.66	-65.91	-53.75	-51.25	-49.43	-56.22	-58.04	-48.50	-43.47	-45.58	-47.85	
	+7.5	-54.89	-67.80	-55.06	-54.61	-52.96	-58.73	-58.55	-48.84	-43.93	-45.73	-48.32	
	+12.5	-56.77	-71.02	-58.52	-58.54	-55.47	-60.96	-58.51	-48.87	-43.75	-45.86	-48.16	
	+17.5		-73.64	-60.89	-59.84	-56.88		-58.34	-48.59	-43.65	-45.62		
	+22.5	-59.17	-75.12	-61.55	-60.65		-63.19	-57.89	-48.43	-43.38		-47.78	
	+27.5		-75.51	-61.80		-57.60		-57.68	-48.25		-45.23		
掘削後	+32.5	-59.97	-75.34		-60.70		-63.29	-57.61		-42.87		-47.40	
	+37.5			-61.52		-57.22			-48.00		-44.99		
	+42.5	-59.84	-74.88		-60.51		-62.91	-57.32		-42.64		-46.91	
	+47.5			-61.45		-56.83			-47.91		-44.70		
	+52.5		-74.77		-60.41			-57.17		-42.40			
	+57.5			-61.45					-47.77				
	+62.5		-74.81					-57.06					
	+67.5												
計測パターン : A													
備考													

D-11 (乾燥砂)

土圧計算の要領		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								-0.09				
	-62.5							0.04					
	-57.5						0.08		-0.04				
	-52.5					0.00		-0.04					-48.58
	-47.5				-41.32		0.17		0.18			-50.69	
	-42.5			0.09		-0.04		0.12			-47.21		-48.53
	-37.5		0.04		-0.04		0.44		6.48	-59.69		-51.30	
	-32.5	0.22		0.09		0.26		6.24	6.48		-50.54		-49.47
	-27.5		-0.04		0.30		4.94	3.92	5.98	-61.69		-51.72	
	-22.5	0.00		0.32		7.29	4.23	5.12	3.79		-49.54		-47.70
切羽	-17.5		0.31		6.11	5.77	4.63	5.77	4.93	-59.22		-49.79	-46.33
	-12.5	0.48		6.56	5.72	3.51	3.61	5.25	3.37		-50.32	-49.46	-47.60
	-7.5		-41.61	-4.60	4.84	-1.17	-8.20	-0.51	0.18	-59.96	-49.95	-50.83	-49.17
	+2.5	-22.50	-40.27	-30.99	-29.80	-46.30	-11.60	0.34	-38.31	-56.50	-47.37	-48.33	-42.20
	+7.5	-2.55	-15.17	-3.07	-5.72	-3.94	-9.92	-7.75	-27.53	-54.26	-44.97	-46.50	-43.48
	+12.5	-6.13	-22.47	-15.91	-10.96	-8.63	-13.41	-9.13		-58.63	-47.83	-51.21	-47.55
	+17.5	-18.18	-26.74	-22.70	-16.99	-13.75	-18.66		-17.76	-63.10	-51.95	-54.59	-51.43
	+22.5	-20.16	-30.61	-27.77	-18.31	-14.10		-14.65		-66.17	-53.99	-56.90	-53.49
	+27.5	-21.18	-32.48	-26.80	-18.05		-19.77		-20.41	-67.29	-54.83	-57.84	
	+32.5	-21.09	-32.44	-26.89		-14.23		-15.64		-67.36	-54.79		-55.01
掘削後	+37.5	-20.65	-32.39		-18.31		-19.32		-20.59	-66.90		-58.12	
	+42.5	-20.65		-27.96		-13.93		-15.72			-54.41		-55.06
	+47.5		-32.48		-18.13		-18.93			-66.47		-57.89	
	+52.5	-19.94		-27.22		-13.41					-54.34		-54.92
	+57.5		-32.08		-17.74					-66.32		-57.89	
	+62.5	-19.81		-27.50							-54.34		
	+67.5		-32.35							-66.32			
		-19.94											
土圧計算の要領		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-49.91					-47.30					-46.30	
	-52.5					-41.32					-47.18		
	-47.5	-48.99			-41.92	-50.35				-41.29		-46.00	
	-42.5			-43.01	-46.03			-46.45		-47.17			
	-37.5	-50.79	-50.08		-46.34	-46.93	-52.07		-42.06		-45.22		
	-32.5			-48.78	-42.36		-47.04		-6.55				
	-27.5	-49.55	-55.59		-42.15	-45.97	-52.97		-41.47		-44.46		
	-22.5	-48.27		-44.20	-42.31	-46.22		-46.74		-46.01	-44.57		
切羽	-17.5	-48.50	-52.83		-43.50	-43.49	-48.59	-53.02		-41.65	-46.39	-44.71	
	-12.5	-49.53		-47.00	-45.60	-45.65	-49.30		-47.11	-42.29	-46.39	-45.15	
	-7.5	-48.25	-54.25	-47.67	-46.20	-47.44	-47.59	-53.23	-47.43	-42.24	-46.89	-45.08	
	-2.5	-47.44	-52.47	-45.33	-44.01	-42.36	-49.30	-53.94	-47.69	-42.92	-46.95	-45.77	
	+2.5	-45.90	-48.52	-41.27	-39.69	-40.38	-44.26	-54.50	-48.31	-43.24	-47.72	-46.37	
	+7.5	-48.53	-53.36	-44.31	-43.46	-44.15	-49.04	-55.16	-48.69	-43.96	-48.44	-47.73	
	+12.5	-51.37	-57.49	-48.51	-47.50	-48.62	-53.57	-55.34	-48.99	-44.37	-49.06	-48.59	
	+17.5	-60.48	-51.10	-50.48	-52.19		-55.14	-48.78	-44.33	-49.01			
	+22.5	-54.59	-61.90	-52.54	-52.06		-58.12	-54.61	-48.45	-43.87		-47.96	
	+27.5		-62.40	-52.84		-54.12		-54.15	-48.13		-48.25		
掘削後	+32.5	-55.15	-62.11		-51.97		-58.43	-53.86		-43.42		-47.50	
	+37.5			-52.54		-53.89			-47.81		-47.98		
	+42.5	-55.03	-61.68		-52.02		-57.96	-53.39		-43.33		-47.27	
	+47.5			-52.59		-53.32			-47.79		-47.90		
	+52.5		-61.71		-51.88			-53.23		-43.37			
	+57.5			-52.56					-47.81				
	+62.5	-61.68						-53.25					
	+67.5												
計算パターン : A													
備考													

D-12 (乾燥砂・落し戸大)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)				
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5	
掘削前	-67.5								0.13					
	-62.5							0.00						
	-57.5						0.08		1.69					
	-52.5					-0.08		-1.26					-38.26	
	-47.5				-0.22		0.08		1.69			-44.94		
	-42.5			0.00		-0.08		-0.91			-47.12		-34.30	
	-37.5		-0.13		-0.08		0.31		1.73	-57.96		-42.39		
	-32.5	0.17		-0.22		0.04		-0.65	1.60		-43.62		-34.05	
	-27.5		0.35		0.04		0.40	-0.82	1.51	-55.12		-42.19		
	-22.5	-2.63		-0.08		0.21	0.17	-0.82	1.69		-43.60		-33.40	
切羽	-17.5		0.49		0.17	0.04	-0.04	-0.60	1.69	-57.11		-42.19	-36.30	
	-12.5	-2.09		0.08	0.00	0.21	0.26	-0.65	1.55		-44.98	-46.38	-38.26	
	-7.5		0.58	0.13	-0.17	-0.04	0.04	-0.69	1.46	-58.27	-47.39	-47.78	-40.82	
	-2.5	-1.96	0.04	-0.22	-0.08	0.21	0.08	-1.08	1.55	-57.11	-45.92	-46.48	-39.66	
	+2.5	-11.77	-8.68	-9.46	-8.73	-8.86	-7.79	-10.45	-8.60	-55.89	-45.31	-45.43	-40.72	
	+7.5	-22.97	-20.59	-19.95	-19.50	-20.73	-18.58	-20.51		-59.47	-47.54	-48.38	-48.28	
	+12.5	-28.28	-24.98	-24.41	-24.22	-25.19	-23.14		-23.80	-62.94	-51.06	-52.42	-48.44	
	+17.5	-30.38	-27.13	-26.49	-25.94	-26.80		-25.74		-65.43	-53.72	-55.06	-50.70	
	+22.5	-31.27	-28.11	-27.33	-26.78		-25.38		-26.59	-67.15	-55.12	-56.26		
	+27.5	-31.40	-28.25	-27.73		-27.81		-26.61		-67.48	-55.35		-51.45	
掘削後	+32.5	-31.22	-28.20		-26.78		-25.52		-26.73	-67.35		-56.01		
	+37.5	-31.13		-27.24		-27.81		-26.52			-55.06		-51.10	
	+42.5		-27.80		-26.56		-25.29			-67.02		-55.76		
	+47.5	-30.82		-104.5		-27.67					-54.87		-50.85	
	+52.5		-27.67		-26.47					-66.85		-55.61		
	+57.5	-30.69		-104.4							-54.72			
	+62.5		-27.67							-66.73				
	+67.5	-30.64												
土圧計の番号		周辺地山応力 (g/cm ²)												
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6		
掘削前	-67.5													
	-62.5													
	-57.5	-43.47					-46.12					-42.82		
	-52.5					-40.52					-44.26			
	-47.5	-38.93			-36.39		-39.44			-37.34		-41.29		
	-42.5			-40.57		-34.85			-41.54		-43.15			
	-37.5	-38.70	-47.56		-33.12		-40.19	-49.71		-36.85		-41.01		
	-32.5			-36.22		-35.37			-41.13		-43.02			
	-27.5	-37.63	-43.01		-33.16		-36.95	-49.09		-36.85		-40.12		
	-22.5	-38.98		-36.10		-32.32	-37.61		-41.24		-42.36	-39.89		
切羽	-17.5	-39.07	-44.52		-33.39	-35.42	-38.93	-49.31		-36.39	-42.36	-39.85		
	-12.5	-42.42		-37.93	-37.21	-37.76	-42.80		-41.31	-36.80	-42.53	-40.08		
	-7.5	-45.38	-48.37	-43.06	-39.35	-42.43	-46.15	-49.87	-41.84	-37.30	-43.17	-40.36		
	-2.5	-45.05	-50.31	-43.76	-40.49	-41.57	-45.17	-50.94	-42.31	-37.98	-43.60	-41.45		
	+2.5	-45.06	-50.82	-45.56	-41.62	-44.72	-47.39	-51.63	-42.79	-38.38	-44.22	-42.47		
	+7.5	-48.96	-56.03	-49.83	-46.81	-50.58	-52.27	-51.88	-42.92	-38.65	-44.54	-42.96		
	+12.5	-52.50	-60.24	-54.02	-50.86	-54.35	-56.43	-51.79	-42.79	-38.56	-44.33	-42.66		
	+17.5		-62.99	-56.45	-52.68	-56.73		-51.41	-42.54	-38.16	-43.83			
	+22.5	-55.02	-64.12	-57.16	-53.41		-58.35	-51.12	-42.33	-37.75		-42.12		
	+27.5		-64.05	-57.10		-56.73		-50.96	-42.11		-43.60			
掘削後	+32.5	-54.99	-63.69		-52.77		-58.84	-50.63		-37.71		-41.54		
	+37.5			-56.59		-56.83			-42.09		-43.12			
	+42.5	-54.65	-63.36		-52.82		-58.40	-50.60		-37.39		-41.38		
	+47.5			-56.50		-56.45			-41.92		-42.97			
	+52.5		-63.16		-52.59			-50.34		-37.34				
	+57.5			-56.39					-41.88					
	+62.5		-63.11					-50.31						
	+67.5													
計画パターン: A														
備考														

D-13 (普通砂・落し戸)

土圧計のNo.		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山土圧 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5	-0.61											
	-62.5		0.23										
	-57.5	-0.61		-0.42						-46.44	-37.32		
	-52.5		0.19		-0.35							-45.18	
	-47.5	-0.34		-0.52	-0.21					-49.54	-43.90		-42.31
	-42.5		0.03		-0.34	-0.26						-51.20	
	-37.5	-0.16		-0.21	-0.12		-0.30			-49.36	-41.78		-47.21
	-32.5	-0.07	0.00		-0.21	-0.30		-0.49				-50.81	
	-27.5	-0.07	-0.18	-0.13		-0.04	-0.30			-48.73	-34.15		-47.39
	-22.5	-0.21	-0.26	-0.22	-0.21		-0.08	-1.11		-48.33	-32.21	-48.27	
切羽	-17.5	-0.20	-0.40	-0.34	-0.30	0.04		-0.18		-51.14	-32.53	-46.23	-46.33
	-12.5	-0.12	-0.40	-0.56	-0.21	0.00	-0.04		-0.91	-52.07	-38.25	-46.99	-44.87
	-7.5	-0.02	-0.26	-0.48	-0.48	-0.04	-0.12	-0.13		-52.85	-44.35	-44.71	-44.52
	-2.5	-0.11	-0.22	-0.39	-0.39	-0.39	-0.12	-0.22	-0.27	-54.13	-47.50	-47.98	-43.90
	+2.5	-0.07	-0.26	-0.39	-0.35	-0.30	-0.39	-0.22	-0.73	-55.16	-49.42	-51.78	-40.90
	+7.5		-0.31	-0.52	-0.70	-0.26	-0.30	-0.39	-0.67	-55.73	-50.82	-54.17	-43.46
	+12.5	0.05		-0.48	-0.30	-0.39	-0.17	-0.31	-0.36	-56.23	-51.17	-55.90	-48.09
	+17.5		-0.17		-0.30	-0.39	-0.17	-0.18	-0.26			-56.71	-50.83
	+22.5	0.05		-0.30		-0.34	-0.26	-0.26	-0.36	-56.40	-51.06		-52.06
	+27.5		-0.13		-0.30		-0.26	-0.30	-0.57			-57.11	
掘削後	+32.5	0.19		-0.12		-0.21		-0.30	-0.04	-56.25	-50.73		-52.81
	+37.5		-0.17		-0.12		-0.13		-0.43			-57.41	
	+42.5			-0.34		-0.17	-0.09			-56.28	-50.69		-53.21
	+47.5				-0.17		-0.08	-0.30				-57.59	
	+52.5					-0.21		-0.09					-53.52
	+57.5						-0.13		-0.35				
	+62.5							-0.09					
	+67.5							-0.43					
土圧計のNo.		周辺地山土圧 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5		-43.08	-45.24				-41.25	-42.56				
	-52.5				-40.77					-40.30			
	-47.5		-57.21	-60.08		-38.70		-42.83	-44.11		-40.24		
	-42.5	-44.84			-49.56		-37.40			-41.83		-33.51	
	-37.5		-45.69	-54.52		-46.65		-41.55	-44.64		-41.22		
	-32.5	-48.92			-46.34		-43.09			-41.70		-34.62	
	-27.5		-43.65	-53.30		-45.99		-41.37	-44.65		-41.32		
	-22.5	-50.41	-43.08	-54.44	-42.66		-44.20	-42.86	-44.58	-40.74		-34.67	
切羽	-17.5		-41.14	-59.29	-42.56	-41.20		-44.32	-44.56	-41.28	-39.98		
	-12.5	-48.69	-49.46	-63.28	-43.32	-41.70	-40.74	-45.20	-43.92	-42.21	-40.00	-33.46	
	-7.5	-47.68	-57.45	-65.64	-41.91	-42.98	-38.74	-45.92	-44.02	-42.64	-40.77	-33.12	
	-2.5	-46.48	-62.17	-67.75	-46.04	-43.32	-40.31	-46.67	-43.99	-42.77	-41.27	-33.43	
	+2.5	-36.10	-65.07	-69.20	-51.41	-41.96	-40.09	-47.12	-43.88	-43.04	-41.58	-33.96	
	+7.5	-43.74	-67.24	-69.66	-54.96	-45.51	-39.78	-47.11	-43.21	-43.43	-41.84	-34.50	
	+12.5	-42.77	-68.30	-70.04	-57.34	-51.29	-38.80	-47.04	-43.21	-43.21	-42.26	-34.82	
	+17.5	-45.00			-58.78	-55.23	-43.58			-43.48	-42.23	-35.40	
	+22.5	-51.03	-68.93	-70.04		-56.91	-50.31	-46.69	-43.03		-42.62	-35.83	
	+27.5	-53.79			-59.85		-53.39			-43.35		-36.41	
掘削後	+32.5		-69.24	-69.47		-58.66		-46.28	-42.89		-42.82		
	+37.5	-56.29			-60.12		-56.53			-43.22		-36.86	
	+42.5		-69.34	-69.05		-59.13		-46.14	-42.79		-42.84		
	+47.5	-57.16			-60.23		-57.62			-43.13		-37.00	
	+52.5					-59.42					-42.69		
	+57.5	-57.75					-58.05					-36.85	
	+62.5												
	+67.5												
計測パターン ; B													
備考													

D-14 (乾燥砂)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0.09				
	-62.5							0.04					
	-57.5						0.12		0.22				
	-52.5					0.04		1.01					-33.40
	-47.5				0.09		0.32		-0.01			-34.46	
	-42.5			0.25		-0.16		0.66		-40.80	-43.13		
	-37.5		-0.26		0.88		1.40		-1.03			-37.05	-36.80
	-32.5	1.71		-0.82		1.92		-1.16	-2.19	-44.61	-47.31		-39.84
	-27.5		0.34		-0.23		-1.27	0.41	-4.99			-39.46	
	-22.5	3.32		1.48		2.17	-2.06	2.97	-6.65	-44.52	-49.01		-39.35
切羽	-17.5		0.29		-2.69	0.24	-0.09	4.00	-2.58			-37.74	-33.62
	-12.5	0.77		1.81	-2.69	-0.54	-1.23	4.01	-1.14	-46.18	-46.99	-34.22	-33.62
	-7.5		-0.72	0.02	-2.69	1.25	-1.28	4.68	-0.41	-46.18	-44.05	-39.11	-39.05
	-2.5	3.21	-0.95	-1.31	-0.94	1.35	1.76	-3.14	-6.04	-48.18	-35.69	-34.46	-34.46
	+2.5	-2.82	-5.99	-1.88	-5.34	-5.64	-1.08	-4.00	-6.25	-51.14	-34.30	-32.27	-32.25
	+7.5	-9.71	-19.07	-11.04	-11.03	-17.25	-5.40	-12.61		-53.53	-41.75	-36.11	-36.13
	+12.5	-14.09	-25.22	-15.26	-12.98	-20.06	-7.69		-16.08	-56.05	-47.95	-40.48	-39.35
	+17.5	-14.69	-26.84	-16.65	-12.66	-21.42		-19.36		-56.41	-51.46	-42.02	-40.77
	+22.5	-14.48	-27.01	-16.80	-12.52		-8.60		-17.11	-55.26	-52.06	-41.92	
	+27.5	-14.72	-26.74	-16.41		-21.07		-19.63		-54.40	-51.71		-40.50
掘削後	+32.5	-14.34	-26.25		-11.95		-8.38		-18.05			-41.14	
	+37.5	-13.90		-15.87		-20.93		-19.43		-53.01	-51.46		-40.15
	+42.5		-25.85		-12.45		-8.25					-40.91	
	+47.5	-13.63		-15.88		-20.67				-52.86	-51.35		-40.11
	+52.5		-25.50		-12.54							-40.86	
	+57.5	-13.72		-15.92						-52.40	-51.42		
	+62.5												
	+67.5												
土圧計の番号		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-50.15					-53.72					-45.75	
	-52.5					-33.66					-34.89		
	-47.5												
	-42.5	-54.26			-36.75		-53.13			-27.23		-45.12	
	-37.5		-53.42	-51.43		-38.13		-50.09	-40.11		-35.57		
	-32.5	-58.79			-39.94		-58.11			-28.43		-44.96	
	-27.5		-54.84	-58.78		-41.71		-50.13	-42.34		-35.40		
	-22.5	-58.18			-41.78		-53.46			-28.07		-45.04	
切羽	-17.5	-55.98	-53.20	-59.11		-34.66	-53.57	-49.59	-41.66		-35.21	-44.82	
	-12.5	-52.24			-36.08	-34.80	-53.32			-28.33	-35.07	-44.89	
	-7.5	-51.81	-51.99	-55.76	-36.91	-35.41	-50.12	-49.36	-41.92	-28.11	-35.08	-44.83	
	-2.5	-54.55	-51.81	-58.16	-40.46	-38.13	-55.52	-49.96	-41.42	-28.15	-35.07	-44.56	
	+2.5	-51.04	-47.81	-60.68	-39.60	-38.57	-54.42	-51.24	-41.63	-28.07	-34.94	-44.58	
	+7.5	-47.76	-41.24	-62.70	-35.83	-34.09	-50.19	-51.62	-41.49	-27.94	-35.01	-45.02	
	+12.5	-51.83	-46.68	-65.46	-39.02	-39.30	-54.26	-51.92	-41.07	-27.85	-35.27	-45.07	
	+17.5	-55.99	-51.28	-67.70	-42.95	-42.90	-58.83	-51.41	-40.89	-27.81	-35.12	-44.98	
	+22.5		-53.80	-69.73	-44.33	-44.24		-50.92	-40.86	-27.72	-34.97		
	+27.5	-59.11	-54.49	-69.16	-44.23		-61.96	-50.41	-40.71	-27.72		-44.29	
掘削後	+32.5		-54.24	-68.34		-44.00		-50.34	-40.68		-34.59		
	+37.5	-58.48			-43.67		-61.44		-40.56	-27.59		-44.22	
	+42.5		-53.94	-67.59		-43.38		-49.81	-40.56		-34.52		
	+47.5	-57.97			-43.42		-61.30			-27.63		-44.01	
	+52.5		-53.85	-67.31		-43.31		-49.45	-40.53		-34.50		
	+57.5				-43.52					-27.64			
	+62.5		-54.31	-67.52				-49.56	-40.60				
	+67.5												
計画パターン: B													
備考													

D-15 (乾燥砂)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								-0.03				
	-62.5							-0.12					
	-57.5						0.08		-0.03				
	-52.5					0.00		0.21					-36.58
	-47.5				0.09		0.26		0.01			-42.89	
	-42.5			0.12		0.22		0.03		-57.73	-49.54		-41.61
	-37.5		0.18		0.49		0.26		-0.11			-51.10	
	-32.5	-0.67		0.39		0.13		-0.33	0.76	-65.17	-57.84		-43.46
	-27.5		0.31		0.18		1.25	-0.64	-0.64			-51.13	
	-22.5	-0.36		0.30		-0.01	4.36	-0.41	-1.13	-62.98	-55.92		-42.13
切羽	-17.5		0.22		-0.38	-0.26	3.82	-0.10	-0.23			-48.06	-41.08
	-12.5	0.64		3.67	-4.13	-1.54	3.51	-2.99	-0.54	-64.94	-54.75	-50.29	-41.69
	-7.5		-13.21	1.39	2.26	-3.75	1.74	-3.44	-0.47	-65.89	-57.27	-52.42	-45.97
	-2.5	4.19	-14.87	-1.31	0.38	0.41	1.10	1.11	-2.23	-64.47	-44.61	-43.87	-37.72
	+2.5	-7.29	-15.06	-6.35	-5.55	-6.61	-5.57	-1.38	-3.28	-64.12	-37.42	-39.51	-34.24
	+7.5	-15.40	-23.99	-17.44	-15.34	-17.45	-14.88	-6.93		-63.76	-45.04	-41.79	-36.80
	+12.5	-20.00	-27.55	-23.61	-18.58	-22.51	-18.83		-14.78	-66.34	-50.64	-45.34	-40.06
	+17.5	-21.86	-29.11	-25.92	-21.14	-22.68		-10.67		-69.33	-54.61	-48.29	-42.36
	+22.5	-22.26	-29.92	-26.71	-21.67		-20.80		-18.82	-71.32	-56.45	-49.89	
	+27.5	-22.97	-30.24	-26.59		-24.08		-11.20		-72.17	-57.20		-44.78
掘削後	+32.5	-22.96	-30.24		-22.72		-20.61		-19.02			-51.53	
	+37.5	-22.75		-26.81		-24.39		-10.98		-72.81	-58.01		-45.40
	+42.5		-29.98		-23.29		-19.67					-51.62	
	+47.5	-22.44		-26.90		-24.17				-72.52	-57.87		-45.05
	+52.5		-29.67		-23.55							-51.21	
	+57.5	-22.39		-26.61						-72.09	-57.66		
	+62.5		-29.46										
	+67.5	-22.40											
土圧計の番号		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-60.88					-65.51					-70.99	
	-52.5					-39.87					-53.35		
	-47.5	-68.88			-41.17		-68.91			-41.51		-74.49	
	-42.5		-45.93	-57.71		-43.39		-52.63	-62.45		-57.40		
	-37.5	-72.09			-44.04		-73.11			-45.94		-75.19	
	-32.5		-45.79	-65.01		-47.29		-55.82	-68.36		-57.64		
	-27.5	-71.85			-46.41		-73.79			-45.73		-74.44	
	-22.5	-70.36	-49.74	-69.20		-46.86	-73.76	-56.72	-67.55		-56.90	-74.32	
切羽	-17.5	-67.28			-48.48	-49.13	-74.48			-45.29	-56.92	-74.24	
	-12.5	-68.53	-58.27	-71.15	-50.27	-51.33	-78.43	-57.12	-66.79	-45.43	-57.08	-74.66	
	-7.5	-71.16	-59.81	-75.06	-52.80	-54.02	-80.01	-58.46	-67.11	-45.66	-57.52	-75.61	
	-2.5	-62.94	-48.27	-76.26	-47.48	-46.49	-69.40	-60.29	-67.54	-45.77	-58.46	-76.40	
	+2.5	-56.15	-42.81	-77.83	-44.93	-43.76	-66.39	-62.10	-68.01	-46.27	-59.26	-77.47	
	+7.5	-60.12	-49.19	-81.18	-48.46	-48.63	-73.12	-63.54	-68.62	-46.55	-60.09	-79.18	
	+12.5	-64.88	-54.95	-85.25	-52.89	-53.58	-78.30	-64.41	-68.62	-46.57	-60.93	-80.67	
	+17.5		-59.00	-89.05	-55.76	-56.88		-65.05	-68.05	-46.44	-61.44		
	+22.5	-71.13	-61.14	-91.05	-56.81		-83.84	-64.89	-67.41	-46.57		-81.13	
	+27.5		-61.78	-91.15		-58.46		-64.68	-67.52		-61.05		
掘削後	+32.5	-73.27			-57.98		-85.06			-45.81		-80.90	
	+37.5		-63.48	-91.33		-58.83		-63.48	-66.51		-60.70		
	+42.5	-73.25			-57.95		-85.33			-45.68		-80.12	
	+47.5		-62.99	-90.90		-58.21		-62.99	-66.33		-60.13		
	+52.5				-57.60					-45.37			
	+57.5		-62.64	-90.58				-62.64	-66.00				
	+62.5												
	+67.5												
計算パターン ; B													
備考													

D-16 (乾燥砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								1.09				
	-62.5							-1.11					
	-57.5						0.62		0.33				
	-52.5					0.59		-0.21					-41.47
	-47.5				-0.25		1.64		1.20			-62.97	
	-42.5			0.82		1.56		0.24		-96.33	-60.04		-56.92
	-37.5		0.40		-0.04		4.74		2.03			-80.97	
	-32.5	-0.15		2.10		1.56		1.44	-0.23	-115.7	-87.29		-57.18
	-27.5		2.43		-0.30		0.50	2.07	1.00			-79.42	
	-22.5	0.31		1.32		1.72	-0.97	2.12	1.29	-114.6	-85.38		-55.64
切羽	-17.5		2.54		3.37	2.03	0.74	1.74	0.87			-78.57	-56.17
	-12.5	-1.96		0.88	2.54	0.96	1.12	1.97	1.14	-122.0	-85.02	-79.37	-57.23
	-7.5		1.81	0.71	0.81	0.35	0.64	2.36	1.44	-118.1	-76.13	-81.20	-59.79
	-2.5	1.25	-4.33	0.53	-1.37	-0.12	1.66	2.32	-2.04	-110.7	-53.34	-67.86	-48.67
	+2.5	-8.00	-3.72	-4.14	-4.29	-3.31	-1.57	-1.31	-3.63	-102.8	-40.22	-57.68	-40.50
	+7.5	-15.85	-14.55	-13.23	-13.73	-10.63	-6.12	-7.52		-96.56	-44.37	-55.94	-41.08
	+12.5	-20.25	-19.99	-18.32	-17.80	-13.57	-8.73		-13.99	-97.08	-51.78	-59.71	-44.87
	+17.5	-21.84	-22.96	-21.17	-18.86	-14.93		-10.85		-100.1	-57.77	-63.48	-47.78
	+22.5	-22.87	-24.65	-22.74	-19.62		-10.36		-15.59	-103.1	-61.38	-66.23	
	+27.5	-23.19	-25.75	-24.05		-16.06		-11.62		-105.6	-63.62		-51.09
掘削後	+32.5	-23.03	-26.14		-20.11		-10.69		-16.06			-70.19	
	+37.5	-22.84		-25.27		-16.54		-12.13		-108.6	-66.67		-53.21
	+42.5		-26.57		-20.34		-11.60					-72.36	
	+47.5	-21.63		-25.92		-16.66				-110.6	-68.12		-54.40
	+52.5		-26.11		-20.78							-73.90	
	+57.5	-20.90		-26.52						-112.0	-69.04		
	+62.5		-26.10										
	+67.5	-20.41											
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	0.14					0.17					0.15	
	-52.5					-45.73					0.22		
	-47.5	0.12			-57.51		0.17			-65.33		0.15	
	-42.5		-95.55	-93.83		-60.76		-101.1	-106.5		0.20		
	-37.5	0.14			-73.51		0.28			-69.51		0.17	
	-32.5		-117.0	-113.8		-60.25		-108.2	-115.4		0.18		
	-27.5	0.12			-73.67		0.16			-70.37		0.15	
	-22.5	0.12	-117.3	-116.8		-62.06	0.14	-110.5	-117.6		0.18	0.12	
切羽	-17.5	0.10			-83.26	-64.92	0.12			-71.03	0.20	0.12	
	-12.5	0.10	-124.7	-116.8	-85.43	-65.06	0.14	-113.7	-119.2	-70.74	0.16	0.10	
	-7.5	0.10	-119.0	-113.1	-88.38	-71.43	0.16	-113.7	-118.1	-70.34	0.16	0.12	
	-2.5	0.12	-96.28	-110.0	-77.57	-62.90	0.14	-113.2	-117.2	-69.99	0.18	0.12	
	+2.5	0.10	-81.54	-107.6	-64.90	-52.46	0.14	-113.5	-117.0	-69.68	0.18	0.10	
	+7.5	0.10	-86.78	-105.5	-66.56	-54.65	0.15	-113.4	-116.8	-69.60	0.20	0.14	
	+12.5	0.14	-95.69	-108.4	-71.46	-60.42	0.16	-114.2	-116.9	-69.83	0.18	0.14	
	+17.5		-101.8	-111.8	-75.57	-64.89		-114.9	-117.0	-69.83	0.18		
	+22.5	0.16	-105.7	-114.9	-78.32		0.19	-115.0	-117.1	-70.05		0.17	
	+27.5		-108.1	-117.0		-69.69		-115.1	-117.3		0.22		
掘削後	+32.5	0.12			-81.36		0.17			-70.40		0.15	
	+37.5		-110.9	-119.6		-71.43		-115.6	-117.8		0.20		
	+42.5	0.14			-82.48		0.17			-71.42		0.15	
	+47.5		-111.5	-120.6		-72.52		-116.2	-118.6		0.20		
	+52.5				-83.38					-72.09			
	+57.5		-120.0	-121.3				-116.6	-118.9				
	+62.5												
	+67.5												
計算パターン : B													
備考													

D-17 (乾燥砂)

土圧計の位置 切羽からの距離 (cm)		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								-0.18				
	-62.5							-0.75					
	-57.5						0.40		-0.09				
	-52.5					-0.17		-0.37					-40.24
	-47.5				-0.66		0.18		-0.27			-57.54	
	-42.5			-0.31		-0.34		-0.11		-103.8	-39.37		-43.64
	-37.5		0.26		-0.13		0.04		3.34			-66.50	
	-32.5	-0.17		-0.18		-0.21		-1.86	2.58	-115.3	-47.35		-47.34
	-27.5		-0.12		-0.09		3.42	-0.36	0.87			-68.67	
	-22.5	-0.22		-0.16		-0.79	4.59	-1.47	1.41	-116.1	-50.61		-47.43
切羽	-17.5		0.01		0.69	0.66	6.56	-2.14	0.75			-68.13	-47.08
	-12.5	-0.14		-0.59	-3.24	-1.53	5.91	-0.70	-0.85	-119.8	-52.06	-68.88	-68.44
	-7.5		-2.10	-21.18	-7.82	-0.57	5.05	2.33	0.10	-119.3	-50.96	-72.65	-53.87
	-2.5	0.45	-6.20	-0.45	-6.75	-9.79	-1.09	0.52	-10.62	-112.6	-34.69	-64.42	-47.96
	+2.5	0.79	-6.92	-0.15	-9.77	-3.61	-3.12	-4.64	-4.94	-108.3	-23.46	-55.90	-38.25
	+7.5	-5.43	-16.04	-7.12	-17.08	-14.48	-8.65	-11.71		-106.3	-29.48	-56.19	-40.33
	+12.5	-8.57	-19.77	-10.66	-22.64	-18.26	-11.89		-20.49	-107.4	-36.54	-59.68	-44.69
	+17.5	-12.70	-21.58	-12.29	-24.27	-19.27		-17.35		-109.9	-41.78	-63.29	-47.65
	+22.5	-13.86	-22.19	-13.52	-25.19		-13.16		-21.92	-112.2	-45.22	-65.93	
	+27.5	-14.28	-22.55	-13.83		-20.99		-17.97		-114.2	-47.38		-51.31
掘削後	+32.5	-14.44	-22.73		-26.25		-13.11		-19.51			-69.13	
	+37.5	-14.33		-14.23		-20.82		-18.38		-117.1	-50.01		-52.90
	+42.5		-23.26		-26.03		-13.25					-70.02	
	+47.5	-13.47		-14.14		-22.46				-117.5	-50.29		-53.30
	+52.5		-23.04		-26.20							-70.07	
	+57.5	-13.28		-14.27						-117.3	-50.11		
	+62.5		-22.87										
	+67.5	-12.55											
土圧計の位置 切羽からの距離 (cm)		周辺地山応力 (g/cm ²)											
		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-0.05					-0.01					-0.01	
	-52.5					-39.45					-0.01		
	-47.5	-0.03			-63.02		0.00			-60.79		-0.01	
	-42.5		-88.88	-85.80		-47.60		-85.76	-79.71		0.01		
	-37.5	-0.03			-75.87		0.02			-63.50		-0.01	
	-32.5		-108.6	-89.21		-54.69		-88.25	-84.90		0.00		
	-27.5	0.00			-83.50		0.02			-64.66		-0.01	
	-22.5	0.00	-119.6	-95.72		-51.91	0.02	-92.25	-86.90		0.01	-0.01	
切羽	-17.5	-0.03			-83.81	-54.82	0.00			-64.83	0.00	-0.01	
	-12.5	-0.05	-117.4	-93.69	-84.69	-56.27	-0.01	-93.23	-87.75	-64.78	0.00	-0.05	
	-7.5	0.01	-117.5	-95.05	-88.35	-58.82	0.07	-93.71	-87.86	-64.83	-0.03	0.03	
	-2.5	0.00	-98.61	-92.90	-78.01	-55.75	0.07	-94.13	-88.15	-65.27	0.05	0.03	
	+2.5	-0.01	-81.78	-89.68	-67.32	-43.44	0.02	-94.74	-88.65	-62.85	0.07	-0.00	
	+7.5	-0.03	-88.91	-92.48	-67.48	-45.08	0.00	-91.97	-78.22	-62.85	0.01	-0.00	
	+12.5	-0.03	-96.28	-94.42	-72.85	-50.95	0.02	-92.66	-78.63	-63.08	0.00	-0.01	
	+17.5		-102.3	-97.34	-76.61	0.01		-93.40	-78.95	-63.25	0.01		
	+22.5	0.01	-105.1	-99.14	-78.86		0.05	-93.47	-79.22	-63.34		0.01	
	+27.5		-106.8	-100.6		-59.29		-93.59	-79.43		0.03		
掘削後	+32.5	0.00			-81.45		0.05			-63.78		0.01	
	+37.5		-108.5	-102.7		-59.90		-93.97	-79.74		0.05		
	+42.5	0.01			-81.76		0.05			-64.09		0.03	
	+47.5		-108.2	-102.8		-59.91		-93.92	-79.98		0.07		
	+52.5				-81.67					-64.05			
	+57.5		-107.8	-102.8				-93.95	-79.98				
	+62.5												
	+67.5												
計画パターン ; B													
備考													

D-18 (乾燥砂)

土圧計の番号		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0.04				
	-62.5							-1.50					
	-57.5						0.04		0.01				
	-52.5					-0.16		-0.53					-57.53
	-47.5				0.04		0.45		0.17			-57.44	
	-42.5			0.00		-0.41		-0.21		-93.11	-34.37		-65.21
	-37.5		-0.30		-0.48		0.36		0.09			-65.68	
	-32.5	-0.03		0.38		0.13		-0.17	-0.78	-104.2	-39.33		-67.11
	-27.5		0.15		0.31		-0.27	0.24	-1.62			-67.15	
	-22.5	0.65		0.12		-1.51	-1.49	-1.39	-1.17	-106.9	-39.90		-67.29
切羽	-17.5		0.13		1.94	2.14	-2.25	-0.32	-1.48			-69.42	-68.87
	-12.5	0.35		1.10	-2.49	-0.18	-3.45	1.28	-1.23	-115.6	-41.57	-71.81	-70.86
	-7.5		-4.86	0.39	-1.36	1.27	-3.05	-0.06	0.47	-117.7	-42.03	-75.94	-74.17
	-2.5	-2.37	-13.83	-10.65	-3.68	-3.40	-10.89	-1.77	-9.26	-110.2	-35.54	-70.88	-69.58
	+2.5	-3.58	-9.80	-5.50	-3.25	-5.18	-7.53	-2.36	-4.19	-102.8	-25.66	-58.57	-60.54
	+7.5	-15.49	-19.14	-16.52	-16.20	-15.20	-10.75	-11.52		-100.3	-26.12	-54.59	-58.68
	+12.5	-20.47	-24.41	-23.56	-19.46	-21.42	-12.81		-10.69	-103.1	-31.43	-58.75	-62.21
	+17.5	-23.70	-27.50	-25.48	-20.51	-24.05		-18.03		-107.0	-35.15	-63.56	-65.30
	+22.5	-24.74	-27.64	-26.79	-20.87		-11.92		-14.29	-110.6	-37.32	-66.58	
	+27.5	-24.56	-28.00	-27.44		-26.43		-22.66		-112.8	-38.59		-68.21
掘削後	+32.5	-24.87	-28.04		-20.57		-12.91		-14.54			-69.19	
	+37.5	-25.10		-28.14		-27.79		-21.98		-114.5	-39.69		-70.86
	+42.5		-28.26		-21.17		-12.57					-71.90	
	+47.5	-24.87		-28.06		-27.87				-116.5	-40.47		-71.57
	+52.5		-27.85		-20.74							-72.20	
	+57.5	-23.78		-27.89						-116.2	-40.47		
	+62.5		-27.49										
	+67.5	-23.25											
土圧計の番号		周辺地山圧力 (g/cm ²)											
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-0.03					0.00					-0.00	
	-52.5					-48.91					-0.00		
	-47.5	-0.03			-59.42		-0.01			-76.55		-0.00	
	-42.5		-86.99	-68.35		-50.27		-78.08	-68.49		0.00		
	-37.5	0.01			-66.04		0.05			79.55		0.01	
	-32.5		-99.78	-69.02		-52.42		-82.49	-74.64		0.03		
	-27.5	0.00			-68.46		0.01			80.82		0.01	
	-22.5	0.01	-100.2	71.87		-49.45	0.01	-85.58	-76.88		0.05	0.01	
切羽	-17.5	-0.03			-70.12	-52.07	-0.01			-82.19	0.01	-0.00	
	-12.5	-0.03	-104.7	-82.70	-73.87	-57.11	0.00	-88.79	-78.89	-82.57	0.00	-0.01	
	-7.5	-0.01	-103.8	-85.34	-79.56	-59.41	0.00	-89.39	-78.73	-83.04	-0.01	-0.00	
	-2.5	0.00	-87.23	-82.75	-70.96	-54.64	0.01	-89.59	-78.46	-82.90	0.00	-0.00	
	+2.5	0.00	-67.07	-77.99	-57.14	-44.87	0.03	-89.42	-78.29	-82.82	0.00	0.01	
	+7.5	0.01	-70.39	-78.09	-56.86	-45.22	0.03	-89.91	-78.64	-83.37	0.01	0.03	
	+12.5	0.01	-78.68	-80.93	-61.25	-49.90	0.03	-91.33	-79.31	-84.49	0.03	-0.00	
	+17.5		-84.02	-84.24	-65.36	-53.39		-92.61	-80.14	-85.25	0.01		
	+22.5	0.07	-87.58	-87.01	-67.95		0.08	-93.34	-80.70	-85.97		0.05	
	+27.5		-89.56	-88.87		-56.15		-94.13	-81.26		0.05		
掘削後	+32.5	0.01			-70.22		0.08			-87.36		0.05	
	+37.5		-91.09	-90.48		-59.00		-94.86	-81.96		0.05		
	+42.5	0.03			-72.35		0.07			-87.36		0.03	
	+47.5		-92.33	91.85		-59.58		-95.07	-81.71		0.07		
	+52.5				-72.75					-87.36			
	+57.5		-92.40	-92.03				-94.65	-81.54				
	+62.5												
	+67.5												
計測パターン : B													
備考													

D-19 (乾燥砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
掘削 高さの距離 (m)	(m)	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5
掘削前	-67.5								0.00				
	-62.5							0.07					
	-57.5						0.18		0.27				
	-52.5					-0.12		0.09					-19.67
	-47.5				0.17		0.71		0.18			-15.59	
	-42.5			0.16		0.08		-0.00		-26.82	-15.02		-18.84
	-37.5		-0.03		0.30		0.62		-0.14			-16.71	
	-32.5	0.23		0.52		0.26		1.56	0.91	-1.93			-19.10
	-27.5		0.52		0.26		1.56	0.91	-1.93			-19.71	
	-22.5	0.18		0.60		-0.32	2.10	1.50	-1.95	-25.28	-16.19		-18.88
切羽	-17.5		-0.11		1.15	0.97	1.09	1.39	-3.25			-16.96	-17.78
	-12.5	2.07		1.09	1.78	0.18	0.45	3.46	-2.12	-21.47	-10.84	-13.93	-15.17
	-7.5		-3.13	1.87	-1.71	0.60	-0.51	1.41	-3.56	-23.06	-12.86	-15.22	-16.72
	-2.5	-22.52	-10.95	-0.14	-4.98	0.17	-0.65	4.25	-2.51	-22.92	-13.04	-15.22	-16.37
	+2.5	-10.91	-6.00	-3.67	-4.94	-5.49	-7.43	1.59	-5.36	-27.76	-12.36	-15.79	-18.66
	+7.5	-15.91	-11.43	-9.87	-8.96	-9.79	-12.52	-4.26		-27.31	-14.81	-17.23	-19.81
	+12.5	-15.51	-11.70	-10.57	-9.01	-9.36	-12.07		-10.10	-25.76	-16.01	-17.74	-19.63
	+17.5	-15.60	-11.34	-10.53	-8.48	-9.01		-3.85		-25.76	-16.12	-17.53	-19.41
	+22.5	-15.47	-11.47	-10.09	-8.09		-11.71		-9.81	-25.73	-16.01	-17.40	
	+27.5	-15.56	-11.20	-9.74		-8.79		-4.00		-25.76	-16.01		-19.19
掘削後	+32.5	-15.48	-11.16		-8.00		-11.53		-10.73			-17.32	
	+37.5	-15.29		-9.61		-8.66		-4.44		-25.62	-15.98		-19.19
	+42.5		-11.11		-7.96		-11.44					-17.27	
	+47.5	-15.16		-9.57		-8.66				-25.62	-16.02		-19.32
	+52.5		-10.98		-8.00							-17.32	
	+57.5	-15.03		-9.57						-25.62	-16.05		
	+62.5		-11.02										
	+67.5	-15.12											
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
掘削 高さの距離 (m)	(m)	B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5	-26.24					-22.65					-23.69	
	-52.5					-12.90					-17.55		
	-47.5	-25.66			-21.68		-21.40			-17.54		-24.38	
	-42.5		-29.24	-24.82		-14.74		-21.02	-15.23		-17.53		
	-37.5	-26.17			-21.67		-22.03			-18.13		-24.33	
	-32.5		-27.65	-29.06		-15.57		-20.71	-15.23		-17.52		
	-27.5	-26.53			-22.60		-22.00			-18.00		-24.38	
	-22.5	-25.89	-24.05	-28.15		-14.89	-20.91	-21.34	-15.27		-17.65	-24.46	
切羽	-17.5	-24.00			-20.10	-13.97	-19.96			-18.09	-17.80	-24.60	
	-12.5	-22.91	-19.29	-23.93	-17.46	-11.54	-18.12	-21.51	-15.23	-18.17	-17.78	-24.56	
	-7.5	-22.40	-23.21	-25.32	-20.11	-13.30	-20.37	-21.51	-15.24	-18.08	-17.76	-24.31	
	-2.5	-23.78	-19.75	-27.44	-18.43	-14.66	-20.50	-21.52	-15.13	-17.99	-17.58	-24.27	
	+2.5	-23.37	-23.15	-30.14	-18.93	-14.98	-19.62	-21.35	-15.10	-17.68	-17.52	-24.38	
	+7.5	-25.37	-26.50	-29.76	-21.25	-16.35	-21.95	-21.30	-14.81	-17.77	-17.58	-24.29	
	+12.5	-25.57	-27.35	-28.54	-21.38	-16.37	-22.41	-21.34	-14.92	-17.81	-17.50	-24.22	
	+17.5		-27.16	-28.47	-21.07	-16.10		-21.19	-14.96	-17.73	-17.47		
	+22.5	-25.04	-26.93	-28.36	-20.98		-21.80	-21.16	-14.96	-17.90		-24.17	
	+27.5		-26.86	-28.36		-15.75		-21.09	-14.92		-17.39		
掘削後	+32.5	-24.98			-20.85		-21.73			-17.73		-24.13	
	+37.5		-26.80	-28.25		-15.66		-21.02	-14.85		-17.37		
	+42.5	-24.97			-20.76		-21.76			-17.77		-24.20	
	+47.5		-26.73	-28.22		-15.79		-20.98	-14.96		-17.39		
	+52.5				-20.76					-17.82			
	+57.5		-26.73	-28.25				-20.98	-14.96				
	+62.5												
	+67.5												
計測パターン : B													
備考													

D-20 (普通砂)

土圧計の目盛		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)				
切羽 からの距離 (cm)		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	B-2	B-3	B-4	B-5	
掘削前	-67.5													
	-62.5	-40.09												
	-57.5	-39.96	-38.31											
	-52.5	-39.92	-38.35	-39.62						-45.25	-40.38			
	-47.5	-39.87	-38.31	-39.57	-41.51					-45.25	-40.42	-41.50		
	-42.5	-39.64	-38.35	-39.57	-41.25	-38.10				-45.43	-40.56	-41.41	-34.15	
	-37.5	-39.47	-38.36	-39.62	-41.16	-37.66	-39.82			-45.43	-40.59	-41.46	-33.75	
	-32.5	-39.65	-38.27	-39.49	-41.25	-37.71	-39.42			-45.33	-40.56	-41.50	-33.93	
	-27.5	-40.00	-39.03	-39.92	-41.16	-37.84	-39.78		-36.47	-45.65	-40.87	-41.32	-33.93	
	-22.5	-41.32	-40.27	-41.45	-42.92	-38.28	-40.58		-38.65	-46.00	-41.61	-42.02	-33.97	
	-17.5	-44.02	-42.80	-43.91	-45.61	-41.83	-42.44		-39.56	-46.00	-41.61	-42.80	-35.38	
	-12.5	-45.65	-46.35	-47.46	-48.81	-45.86	-47.65		-43.72	-48.57	-45.50	-45.05	-36.96	
切羽	-7.5	-46.39	-44.34	-46.62	-46.17	-44.39	-47.69		-49.46	-50.74	-48.39	-46.95	-39.77	
	-2.5	-40.09	-43.40	-44.12	-31.34	-31.46	-27.47		-34.26	-52.89	-46.79	-48.41	-41.07	
	+2.5	-8.44	-13.42	-11.90	-24.46	-25.30	-11.35		-4.88	-54.61	-48.35	-49.26	-41.29	
	+7.5	0.49	-1.60	-0.78	-1.37	0	-0.25		-11.53	-55.68	-51.72	-49.45	-42.21	
	+12.5		-24.34	-0.19	-2.39	-14.54	-1.47		-8.56	-57.86	-53.67	-51.17	-43.31	
	+17.5			-1.32	-4.40	-7.25	0.25		-7.90	-59.11	-55.79	-51.85	-43.83	
	+22.5				-2.69	-5.36	-0.92		-10.50			-52.48	-44.01	
	+27.5					-1.12	-4.86		-2.69				-44.27	
	+32.5						-5.55		-1.59					
	+37.5								-5.11					
	+42.5								-26.99					
	+47.5													
掘削後	+52.5													
	+57.5													
	+62.5													
	+67.5													
土圧計の目盛		周辺地山応力 (g/cm ²)												
切羽 からの距離 (cm)		B-6	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-3	D-4	D-5				
掘削前	-67.5													
	-62.5													
	-57.5													
	-52.5		-44.94	-45.79				-38.15						
	-47.5		-44.65	-45.58	-37.32			-37.86	-36.76					
	-42.5		-44.81	-45.68	-37.01	-40.64		-38.04	-36.36	-39.55				
	-37.5	-38.98	12.70	-45.68	-37.00	-39.97	-40.27	-38.22	-36.58	-39.11				
	-32.5	-38.63	12.80	-45.65	-36.95	-40.06	-39.63	-38.08	-36.71	-39.33				
	-27.5	-39.11	12.76	-45.62	-36.88	-40.15	-39.96	-38.11	-36.49	-39.33				
	-22.5	-39.49	11.64	-46.27	-37.21	-40.24	-40.26	-38.04	-36.40	-39.22				
	-17.5	-40.25	9.78	-47.13	-38.39	-42.07	-41.01	-37.93	-36.48	-39.33				
	-12.5	-43.35	5.91	-49.57	-39.92	-44.82	-43.96	-38.01	-36.52	-39.51				
切羽	-7.5	-45.91	2.85	-52.43	-42.51	-47.14	-47.21	-38.26	-37.00	-39.73				
	-2.5	-48.27	3.72	-55.21	-43.79	-48.73	-48.40	-38.59	-37.53	-40.28				
	+2.5	-48.16	0.36	-58.40	-44.91	-50.70	-49.19	-38.98	-38.06	-40.81				
	+7.5	-50.46	-3.00	-59.89	-45.69	-50.48	-50.28	-39.30	-38.55	-41.24				
	+12.5	-51.98	-7.25	-61.96	-47.06	-52.11	-52.23	-39.41	-38.86	-41.57				
	+17.5	-52.60	-10.10	-63.53	-48.50	-53.22	-53.99	-39.45	-38.99	-41.70				
	+22.5	-52.98			-49.35	-54.14	-54.72		-39.12	-41.73				
	+27.5	-53.97				-54.43	-55.47		-41.82					
	+32.5	-54.05					-55.60							
	+37.5													
	+42.5													
掘削後	+47.5													
	+52.5													
	+57.5													
	+62.5													
	+67.5													
備考		計測パターン ; B												

D-21 (普通砂)

土圧計のNo.		トンネル土圧 (g/cm ²)										周辺地山応力 (g/cm ²)			
切削 からの距離 (cm)		5	6	7	8	9	10	11	12			1	2	3	4
掘削前	-67.5														
	-62.5	-28.05													
	-57.5	-27.61	-30.00												
	-52.5	-27.65	-29.60	-30.33											
	-47.5	-27.56	-29.83	-29.94	-30.65							-39.17	-34.20		
	-42.5	-27.38	-29.83	-30.16	-30.16	-24.09						-38.77	-33.91	-19.51	-15.96
	-37.5	-27.52	-29.87	-30.12	-30.34	-23.61	-28.64					-38.96	-34.02	-18.77	-15.60
	-32.5	-27.40	-29.91	-30.11	-30.26	-23.87	-29.64	-23.95				-38.95	-33.95	-18.87	-15.60
	-27.5	-27.26	-29.74	-30.11	-30.21	-23.70	-29.60	-24.15	-32.65			-39.10	-34.02	-18.60	-15.41
	-22.5	-26.90	-29.51	-29.33	-29.73	-23.65	-29.47	-24.58	-29.64			-39.10	-34.02	-18.12	-14.85
	-17.5	-24.47	-29.69	-29.11	-29.02	-22.68	-28.39	-25.02	-29.43			-38.70	-33.52	-18.22	-15.30
切羽	-12.5	-28.19	-26.79	-30.94	-30.11	-22.55	-26.75	-24.95	-28.51			-38.27	-32.92	-18.86	-15.68
	-7.5	-30.55	-33.91	-37.82	-33.28	-25.97	-27.01	-27.94	-33.78			-39.31	-34.69	-20.57	-18.75
	-2.5	-55.29	-54.62	-41.44	-56.60	-24.72	-38.30	-59.64	-43.10			-38.52	-32.86	-24.15	-22.89
	+2.5	-12.14	-17.47	-7.39	-6.68	-6.06	-11.27	-11.40	-13.66			-43.62	-37.76	-27.27	-25.41
	+7.5	-0.28	-2.46	-6.27	-2.03	0.15	-6.33	-6.02	-7.13			-45.25	-36.65	-32.21	-29.48
	+12.5		-8.42	-5.19	-3.86	-3.37	-5.55	-5.97	-10.00			-46.90	-41.35	-33.31	-30.43
	+17.5			-12.51	-5.69	-1.99	-1.14	-8.90	-4.49			-49.52	-49.71	-35.36	-34.55
	+22.5				-3.81	-15.54	-7.58	-11.60	-4.85			-49.80	-53.42	-36.37	-37.38
	+27.5					-1.33	-3.82	-7.30	-9.29					-35.65	-38.21
	+32.5						-9.02	-15.32	-13.62						
	+37.5							-15.06	-16.65						
	+42.5								-26.29						
掘削後	+47.5														
	+52.5														
	+57.5														
	+62.5														
	+67.5														
土圧計のNo.		周辺地山応力 (g/cm ²)													
切削 からの距離 (cm)		13	14	15	16	17	18	19	20						
掘削前	-67.5														
	-62.5														
	-57.5														
	-52.5	-32.86	-29.77			-27.00	-25.42								
	-47.5	-32.52	-29.48	-27.93	-29.88	-26.72	-25.09	-29.03	-30.31						
	-42.5	-32.77	-29.51	-27.46	-28.96	-26.90	-25.16	-28.69	-29.68						
	-37.5	-32.73	-29.47	-27.76	-29.15	-26.90	-25.17	-28.80	-29.75						
	-32.5	-32.84	-29.44	-27.67	-29.04	-27.01	-25.24	-28.76	-29.78						
	-27.5	-32.97	-29.55	-27.75	-29.13	-27.07	-25.28	-28.76	-29.71						
	-22.5	-32.49	-29.29	-28.10	-29.49	-27.05	-25.32	-28.80	-29.71						
	-17.5	-32.18	-29.26	-27.84	-29.02	-26.90	-25.28	-28.68	-29.75						
	-12.5	-32.29	-29.26	-29.64	-29.86	-26.79	-25.25	-28.57	-29.63						
切羽	-7.5	-30.08	-28.36	-33.59	-30.44	-26.90	-25.17	-28.49	-29.41						
	-2.5	-36.58	-32.28	-34.93	-30.89	-27.47	-25.09	-28.79	-29.30						
	+2.5	-36.30	-32.86	-43.49	-34.49	-28.05	-24.87	-29.50	-29.34						
	+7.5	-40.29	-34.68	-44.10	-35.24	-28.57	-24.95	-29.88	-29.04						
	+12.5	-43.39	-36.56	-48.80	-36.83	-28.93	-24.80	-30.33	-29.12						
	+17.5	-44.51	-36.94	-50.77	-37.31	-28.59	-24.95	-30.36	-28.94						
	+22.5			-51.30	-37.47			-30.40	-28.93						
	+27.5														
	+32.5														
	+37.5														
	+42.5														
	+47.5														
掘削後	+52.5														
	+57.5														
	+62.5														
	+67.5														
計画パターン ; C															
備考															

D-22 (普通砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
掘削前	-67.5												
	-62.5	-16.27											
	-57.5	-16.44	-17.65										
	-52.5		-17.82	-16.05						-17.33	-16.48		
	-47.5	-16.52		-16.14	-16.77					-17.58	-16.66	-15.13	-17.18
	-42.5		-18.09		-17.12	-11.81						-15.42	-17.37
	-37.5	-16.64		-16.40		-11.68	-26.70			-17.98	-17.02		
	-32.5	-16.73	-18.27		-17.83		-26.78	-9.82				-15.98	-17.55
	-27.5	-16.60	-18.31	-17.27		-11.47		-10.21	-15.88	-18.34	-17.38		
	-22.5	-16.64	-18.85	-17.48	-17.35		-26.96		-15.30	-18.52	-17.63	-16.51	-17.92
一切羽	-17.5	-16.59	-18.44	-18.05	-15.83	-12.29		-10.17		-18.67	-17.63	-16.99	-17.82
	-12.5	-14.71	-18.12	-16.38	-12.15	-11.98	-22.54		-16.44	-18.27	-15.79	-17.01	-16.32
	-7.5	-14.98	-18.26	-17.16	-12.87	-13.83	-23.76	-10.36		-18.34	-15.82	-15.79	-14.05
	-2.5	-31.90	-37.21	-33.98	-22.29	-26.32	-32.34	-23.64	-32.85	-17.64	-16.97	-16.72	-19.42
	+2.5	-7.48	-16.58	-10.45	-8.02	-13.23	-10.56	-11.27	-7.83	-19.79	-19.12	-16.87	-19.84
	+7.5	0.40	-9.66	-5.40	-9.20	-7.30	-7.19	-6.88	-3.69	-19.75	-21.66	-17.48	-23.42
	+12.5	-0.13	-11.12	-10.12	-2.14	-6.80	-2.68	-5.56	-3.98	-19.75	-25.44	-17.48	-25.42
	+17.5		-6.97	-9.24	-6.60	-0.97	-0.83	-8.82	-9.70	-19.27	-25.31	-16.83	-25.05
	+22.5			-8.86	-7.27	-9.42	-5.43	-18.99	-8.03	-19.23	-23.22	-16.75	-24.22
	+27.5				-5.91	-7.87	-11.65	-12.19	-12.24			-17.32	-22.56
掘削後	+32.5					-5.90	-12.94	-9.66	-12.30				
	+37.5						-6.62	-8.32	-20.40				
	+42.5							-6.67	-18.06				
	+47.5								-25.87				
	+52.5												
	+57.5												
	+62.5												
	+67.5												
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽からの距離 (cm)		13	14	15	16	17	18	19	20				
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5												
	-52.5	-16.51	-17.52			-17.21	-16.74						
	-47.5	-16.57	-17.62	-17.60	-16.68	-17.31	-16.96	-16.92	-15.43				
	-42.5			-17.70	-16.84			-17.07	-15.61				
	-37.5	-16.68	-17.84			-17.41	-17.22						
	-32.5			-18.32	-17.21			-17.37	-15.80				
	-27.5	-16.84	-18.05			-17.66	-17.44						
	-22.5	-17.05	-18.23	-18.76	-17.85	-17.66	-17.51	-17.60	-15.99				
一切羽	-17.5	-16.16	-18.16	-18.59	-18.13	-17.76	-17.59	-17.71	-15.96				
	-12.5	-15.96	-18.12	-15.81	-17.35	-17.69	-17.63	-17.71	-16.03				
	-7.5	-15.28	-17.76	-18.01	-17.84	-17.76	-17.63	-17.60	-15.81				
	-2.5	-18.56	-18.64	-24.62	-18.82	-17.75	-17.49	-17.37	-15.55				
	+2.5	-22.67	-19.25	-27.07	-18.91	-17.72	-17.56	-17.33	-15.48				
	+7.5	-25.06	-19.63	-28.85	-18.92	-17.68	-17.30	-17.33	-15.48				
	+12.5	-25.50	-19.40	-27.17	-19.28	-17.64	-17.16	-17.33	-15.38				
	+17.5	-24.35	-19.32	-26.79	-18.91	-17.74	-17.28	-17.40	-15.45				
	+22.5			-25.42	-19.28			-17.44	-15.49				
	+27.5												
掘削後	+32.5												
	+37.5												
	+42.5												
	+47.5												
	+52.5												
	+57.5												
	+62.5												
	+67.5												
計測パターン ; C													
備考													

D-23 (普通砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		5	6	7	8	9	10	11	12			1	2	3	4
掘削前	-67.5														
	-62.5	-35.75													
	-57.5	-35.90	-32.79												
	-52.5	-35.50	-32.97	-35.96											
	-47.5	-35.44	-32.56	-36.22	-36.24							-40.58	-43.95		
	-42.5		-32.65	-35.87	-35.97	-36.81						-41.17	-45.16	-40.84	-43.73
	-37.5	-35.35		-35.95	-35.53	-36.90	-43.92					-41.09	-44.95	-39.49	-42.29
	-32.5	-34.90	-32.96		-35.62	-36.73	-44.01	-33.89				-41.27	-45.02	-38.82	-41.11
	-27.5	-34.54	-32.96	-36.52		-37.21	-45.80	-35.23	-30.19					-38.98	-40.84
	-22.5	-35.68	-33.95	-37.39	-37.37		-47.22	-37.54	-32.37	-41.90	-45.81	-40.43	-42.50		
	-17.5	-35.27	-37.48	-40.58	-39.66	-40.86		-40.07	-32.20	-42.98	-48.21	-40.84	-43.77		
	-12.5	-38.87	-38.08	-45.93	-44.11	-45.83	-52.40		-34.05	-44.18	-52.07	-42.43	-47.24		
切羽	-7.5	-41.39	-44.99	-45.86	-46.58	-45.90	-53.15	-38.61		-44.79	-51.04	-43.94	-49.97		
	-2.5	-58.71	-46.43	-34.69	-50.98	-22.39	-41.66	-31.30	-32.90	-47.50	-56.78	-44.76	-44.91		
	+2.5	-0.45	-10.96	-11.95	-6.90	-13.69	-9.63	-8.44	-7.48	-48.47	-51.77	-45.93	-44.18		
	+7.5	-11.04	-2.87	-6.01	-1.12	-5.09	-5.16	-10.20	-1.45	-49.37	-48.18	-46.77	-43.32		
	+12.5	-2.19	-11.77	-4.22	-9.46	-19.94	-10.46	-13.09	-8.71	-49.68	-52.41	-47.73	-44.89		
	+17.5		-7.69	-5.93	-8.32	-3.14	-7.05	-17.65	-10.87	-48.62	-51.13	-47.72	-46.00		
	+22.5			-5.64	-5.13	-21.97	-14.26	-10.82	-50.75	-55.38	-47.89	-46.44			
	+27.5				-5.29	-13.08	-18.38	-8.89	-21.10			-49.05	-47.43		
	+32.5					-9.31	-15.31	-17.90	-14.04						
	+37.5						-12.72	-7.58	-9.49						
	+42.5							-11.16	-23.36						
	+47.5								-26.47						
掘削後	+52.5														
	+57.5														
	+62.5														
	+67.5														
土圧計の位置		周辺地山圧力 (g/cm ²)													
切羽からの距離 (cm)		13	14	15	16	17	18	19	20						
掘削前	-67.5														
	-62.5														
	-57.5														
	-52.5	-34.68	-33.99			-31.00	-38.26								
	-47.5	-34.93	-35.09	-38.29	-35.80	-31.58	-39.08	-34.29	-34.75						
	-42.5	-34.62	-35.03	-38.50	-35.50	-31.51	-39.12	-34.98	-34.53						
	-37.5	-34.66	-35.22	-38.05	-34.75	-31.61	-39.49	-34.94	-34.14						
	-32.5			-38.12	-34.74			-35.06	-34.05						
	-27.5	-34.67	-35.61			-31.68	-39.91								
	-22.5	-34.75	-35.74	-39.69	-35.30	-31.35	-39.85	-35.21	-33.71						
	-17.5	-35.79	-36.19	-41.57	-35.86	-31.03	-39.53	-35.14	-33.29						
	-12.5	-39.13	-38.10	-44.49	-37.00	-31.40	-39.61	-35.06	-32.85						
切羽	-7.5	-39.64	-38.78	-51.34	-40.68	-31.54	-39.43	-35.81	-33.12						
	-2.5	-47.45	-41.62	-50.68	-41.60	-32.12	-39.39	-35.96	-32.79						
	+2.5	-51.94	-43.35	-58.09	-44.98	-32.73	-39.51	-36.56	-32.65						
	+7.5	-57.41	-46.22	-58.64	-46.49	-33.38	-39.33	-37.05	-32.77						
	+12.5	-63.19	-49.01	-62.34	-49.03	-33.83	-38.90	-37.50	-32.30						
	+17.5	-62.63	-48.33	-63.73	-50.35	-33.80	-38.89	-37.57	-32.01						
	+22.5	-67.10	-51.13	-64.07	-49.98	-33.72	-38.31	-37.57	-32.05						
	+27.5			-66.37	-51.77			-37.12	-31.57						
	+32.5														
	+37.5														
	+42.5														
	+47.5														
掘削後	+52.5														
	+57.5														
	+62.5														
	+67.5														
計測パターン ; C															
備考															

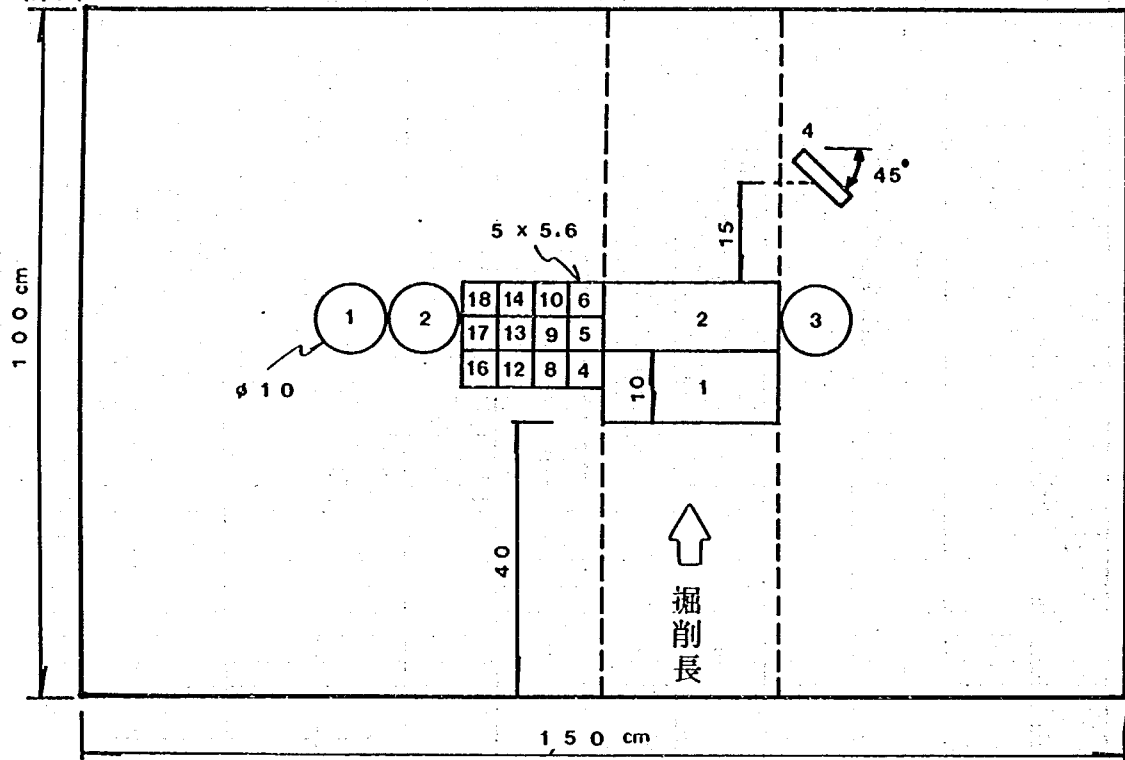
D-24 (普通砂)

土圧計算の要領		トンネル土圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽 からの距離 (cm)		5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
掘削前	-67.5												
	-62.5	-86.88											
	-57.5	-85.59	-74.38										
	-52.5		-73.59	-68.62						-75.09	-66.57		
	-47.5	-86.10		-68.35	-65.34					-75.82	-66.85	-71.51	-65.27
	-42.5		-74.70		-65.73	-60.75						-72.67	-65.82
	-37.5	-87.98		-70.23		-61.85	-61.86			-77.24	-68.53		
	-32.5	-88.54	-76.88		-67.98		-63.77	-72.90				-74.84	-68.29
	-27.5	-90.69	-77.81	-72.93		-64.35		-75.70	-61.83	-78.48	-69.75		
	-22.5	-93.06	-79.53	-73.94	-70.94		-66.26		-64.42	-79.21	-70.29	-75.42	-69.35
	-17.5	-94.50	-80.83	-76.05	-71.34	-67.55		-78.49		-80.30	-71.29	-76.54	-69.16
	-12.5	-95.02	-79.95	-77.57	-68.95	-66.17	-67.42		-63.48	-81.03	-72.35	-77.24	-70.70
一切羽	-7.5	-88.30	-75.62	-67.56	-62.70	-56.02	-59.60	-64.51		-81.65	-72.40	-77.83	-70.04
	-2.5	-46.43	-66.92	-57.36	-58.01	-53.47	-64.03	-74.95	-64.67	-82.26	-70.31	-78.41	-66.41
	+2.5	-16.12	-8.98	-13.30	-11.02	-9.07	-12.98	-13.14	-16.61	-80.22	-65.31	-79.03	-60.94
	+7.5	0.01	-1.49	-4.45	-7.82	-4.13	-5.10	-9.26	-7.25	-79.51	-65.01	-78.27	-60.21
	+12.5	0.78	-9.01	-7.95	-10.55	-0.95	-5.99	-7.24	-9.18	-81.02	-67.73	-78.93	-61.72
	+17.5	-2.68	-3.88	-4.26	-4.92	1.77	-4.56	-14.32	-23.34	-82.64	-68.45	-80.61	-61.88
	+22.5		-4.37	-7.42	-5.59	-33.43	-6.93	-12.55	-53.11	-85.68	-69.66	-81.72	-61.78
	+27.5			-3.96	-17.51	-13.15	-13.15	-41.01	-30.79	-86.76	-74.35	-85.20	-63.10
	+32.5				-19.83	-10.69	-3.73	-17.96	-8.46			-85.55	-67.57
	+37.5					-2.98	-30.28	-20.33	-47.95				
	+42.5						-31.67	-12.31	-69.44				
	+47.5							-16.29	-108.6				
掘削後	+52.5								-58.67				
	+57.5												
	+62.5												
	+67.5												
土圧計算の要領		周辺地山応力 (g/cm ²)											
切羽 からの距離 (cm)		13	14	15	16	17	18	19	20				
掘削前	-67.5												
	-62.5												
	-57.5												
	-52.5	-68.44	-81.29			-95.08	-71.28						
	-47.5	-67.62	-80.38	-77.21	-75.11	-94.83	-71.79	-70.26	-73.79				
	-42.5			-76.75	-74.36			-70.42	-74.42				
	-37.5	-68.89	-81.63			-96.24	-72.83						
	-32.5			-79.84	-77.24			-72.11	-75.79				
	-27.5	-71.67	-84.25			-97.96	-73.91						
	-22.5	-72.66	-85.24	-82.46	-79.96	-97.01	-74.72	-73.74	-76.89				
	-17.5	-74.87	-87.21	-83.36	-80.72	-100.4	-75.43	-74.73	-77.89				
	-12.5	-76.61	-88.71	-86.11	-82.98	-101.9	-76.17	-75.83	-78.51				
一切羽	-7.5	-76.19	-89.62	-86.41	-84.10	-102.6	-76.43	-76.81	-79.32				
	-2.5	-75.05	-91.81	-83.03	-84.12	-103.1	-76.26	-77.31	-79.69				
	+2.5	-70.18	-92.50	-76.19	-83.95	-104.7	-77.54	-77.45	-79.73				
	+7.5	-68.85	-93.80	-74.97	-84.02	-107.1	-79.31	-78.66	-80.83				
	+12.5	-72.76	-95.81	-75.50	-85.61	-108.5	-79.90	-80.24	-82.23				
	+17.5	-76.35	-99.78	-76.75	-86.65	-111.3	-80.90	-81.00	-82.86				
	+22.5	-78.16	-102.6	-80.79	-89.94	-113.6	-82.55	-82.66	-83.27				
	+27.5	-80.08	-104.6	-82.68	-92.65	-116.0	-83.40	-84.10	-84.30				
	+32.5			-84.56	-93.87			-85.38	-85.19				
	+37.5												
	+42.5												
	+47.5												
掘削後	+52.5												
	+57.5												
	+62.5												
	+67.5												
計算パターン ;		C											
備考													

D-25 (普通砂)

土圧計の位置		トンネル土圧 (g/cm ²)										周辺地山応力 (g/cm ²)			
切羽からの距離 (cm)		5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		
掘削前	-67.5														
	-62.5	-37.54													
	-57.5	-37.19	-47.23												
	-52.5		-46.39	-51.03						-7.83	-57.34				
	-47.5	-37.32		-50.32	-54.50					-9.06	-57.44	-53.40	-62.33		
	-42.5		-47.06		-54.40	-52.64						-54.83	-63.45		
	-37.5	-37.53		-51.50		-53.17	-56.43			-10.30	-58.65				
	-32.5	-38.06	-48.52		-56.30		-57.80	-54.78				-55.62	-65.41		
	-27.5	-39.08	-49.59	-53.43		-55.14		-56.90	-56.11	-11.57	-60.13				
	-22.5	-39.78	-50.56	-54.58	-58.73		-60.11		-58.63	-12.52	-61.09	-56.99	-66.53		
切羽	-17.5	-40.88	-51.18	-55.11	-59.39	-57.59		-58.97		-12.38	-61.69	-57.70	-66.90		
	-12.5	-38.67	-46.48	-55.60	-58.62	-58.16	-61.90		-59.61	-12.74	-62.60	-57.38	-65.77		
	-7.5	-37.44	-47.20	-39.04	-54.00	-47.69	-56.67	-50.68		-13.21	-55.75	-57.74	-64.99		
	-2.5	-26.58	-24.48	-28.90	-44.62	-39.99	-53.17	-34.07	-33.69	-13.98	-59.02	-57.57	-56.59		
	+2.5	-15.89	-11.63	-7.12	-3.87	-5.54	-8.38	-16.11	-12.92	-13.97	-57.00	-57.81	-55.87		
	+7.5	-9.00	-6.55	-3.89	-6.53	-11.32	-7.09	-4.35	-2.98	-13.97	-53.17	-59.37	-61.11		
	+12.5	-9.44	-6.90	-2.34	-9.74	-5.83	-3.30	-7.91	-13.36	-15.68	-57.33	-60.72	-59.10		
	+17.5	-10.06	-18.09	-9.46	-3.85	-4.90	-7.77	-4.43	-9.51	-16.87	-58.36	-62.46	-63.35		
	+22.5		-6.84	-7.53	-2.13	-6.54	-15.53	-24.62	-37.21	-18.31	-59.64	-63.31	-64.76		
	+27.5			-17.22	-16.83	-9.50	-10.96	-10.76	-25.77	-19.22	-64.20	-64.71	-64.63		
掘削後	+32.5				-13.16	-19.24	-35.64	-10.95	-1.86			-65.22	-70.21		
	+37.5					-18.42	-20.69	-15.06	-21.20						
	+42.5						-22.67	-27.36	-40.05						
	+47.5							-22.57	-72.00						
	+52.5									-56.24					
	+57.5														
	+62.5														
	+67.5														
土圧計の位置		周辺地山応力 (g/cm ²)													
切羽からの距離 (cm)		13	14	15	16	17	18	19	20						
掘削前	-67.5														
	-62.5														
	-57.5														
	-52.5	-59.82	-58.28			-55.93	-66.81								
	-47.5	-58.95	-57.49	-67.11	-66.07	-55.24	-66.45	-55.41	-57.04						
	-42.5			-66.34	-64.58			-54.73	-56.70						
	-37.5	-59.32	-57.60			-55.17	-66.78								
	-32.5			-68.29	-65.87			-55.15	-57.36						
	-27.5	-52.65	-75.55			-56.15	-68.03								
	-22.5	-62.33	-59.82	-77.93	-83.06	-56.98	-68.47	-56.74	-58.95						
切羽	-17.5	-63.33	-60.69	-72.39	-69.60	-57.96	-69.34	-57.69	-59.43						
	-12.5	-64.28	-61.24	-72.84	-70.62	-58.31	-70.04	-58.97	-60.50						
	-7.5	-61.64	-62.11	-72.44	-71.27	-59.28	-71.21	-59.17	-61.02						
	-2.5	-63.65	-62.80	-62.21	-71.92	-60.02	-71.30	-60.23	-62.01						
	+2.5	-60.96	-62.80	-66.01	-72.79	-60.49	-71.70	-60.83	-62.12						
	+7.5	-58.65	-62.01	-68.72	-73.61	-60.53	-71.86	-61.40	-62.30						
	+12.5	-62.83	-63.25	-70.24	-73.70	-61.10	-72.35	-61.55	-62.38						
	+17.5	-62.94	-64.10	-71.04	-74.71	-61.33	-72.89	-62.00	-62.45						
	+22.5	-63.53	-65.55	-71.68	-76.30	-62.08	-73.86	-62.75	-62.86						
	+27.5	-66.14	-66.50	-69.73	-77.03	-62.78	-74.12	-63.21	-63.73						
掘削後	+32.5			-72.38	-77.50			-63.55	-63.88						
	+37.5														
	+42.5														
	+47.5														
	+52.5														
	+57.5														
	+62.5														
	+67.5														
計測パターン: C															
備考															

計測パターン A



計測パターン B

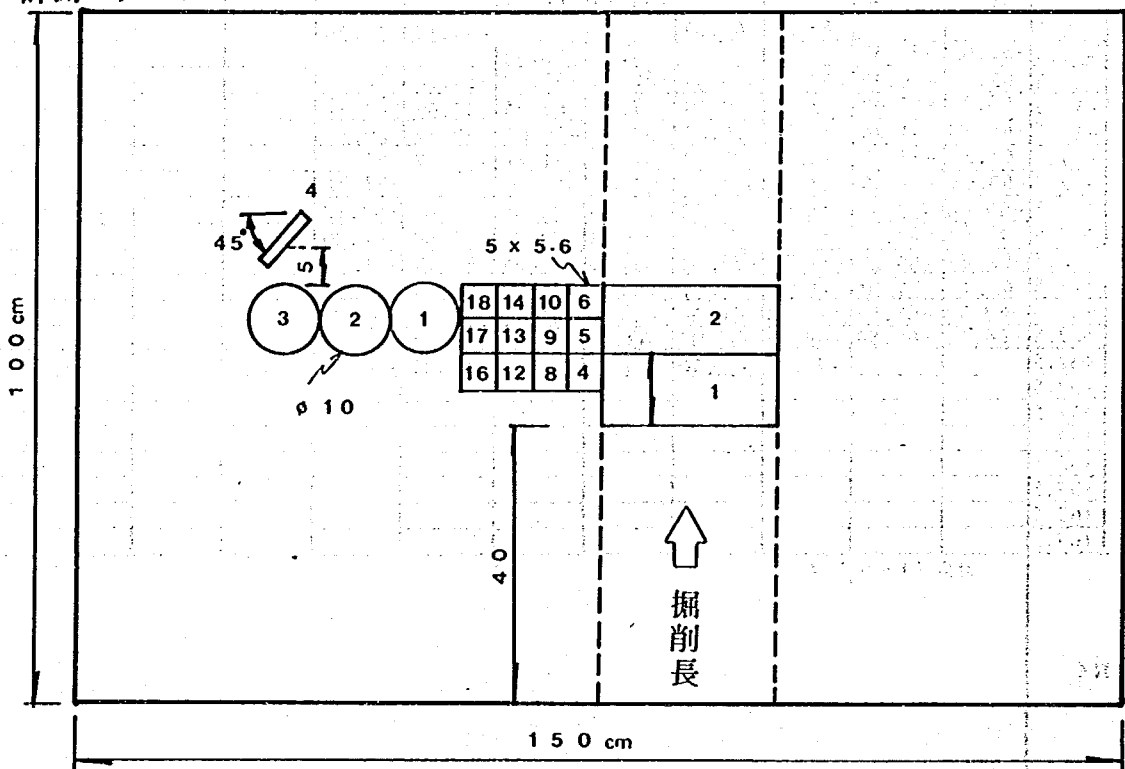


図-4 計測パターン (直径 2 D)

表-2

トンネル土圧模型実験一覧表 その1 (直径2D)												
実験No (実験形式)	H/D	H (cm)	D (cm)	r (gf/cm)	ϕ (°)	$\tan \phi$	C (gf/cm)	C/rD	C/rH	T (gf/cm)	T/rD	T/rH
2D-1 (普通砂)	1.000	26.4	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.223	22.97	0.512	0.512
2D-2 (")	1.000	26.4	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.223	20.69	0.461	0.461
2D-3 (")	0.500	13.2	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.446	10.59	0.240	0.472
2D-4 (")	2.000	52.8	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.111	13.44	0.299	0.150
2D-5 (乾燥砂)	2.000	52.8	26.4	1.75	41	0.869	0	0	0	45.96	0.995	0.497
2D-6 (普通砂)	3.000	79.2	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.074	36.57	0.815	0.272
2D-7 (乾燥砂)	2.871	75.8	26.4	1.75	41	0.869	0	0	0	45.19	0.978	0.341
2D-8 (普通砂)	2.000	52.8	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.111	11.11	0.248	0.124
2D-9 (")	1.000	26.4	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.223	25.55	0.569	0.569
2D-10 (")	3.000	79.2	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.074	26.20	0.584	0.195
2D-11 (")	2.000	52.8	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.111	13.77	0.307	0.153
2D-12 (")	2.000	52.8	26.4	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.111	19.40	0.432	0.216

2 D - 1 (普通砂)

掘削 高さの距離 (cm)		トンネル土圧 (g/cm ²)		周辺地山土圧 (g/cm ²)														周辺地山土圧 (十圧計) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0																				
	-52.5																		-36.82		
	-47.5					-50.84			-61.83			-53.19			-54.51						
	-45.0		-49.19													-84.37	-61.48	-61.00	-35.87		
	-42.5				-53.57			-61.27			-60.95				-47.38						
	-37.5			-53.59		-56.07	-49.20		-61.73	-73.06		-54.62	-60.22		-57.33						
	-35.0	-56.10	-53.07													-87.91	-66.27	-64.00	-40.12		
	-32.5				-57.59			-62.78			-64.53				-45.23						
	-27.5			-56.55		-57.54	-48.49		-63.83	-76.73		-54.71	-63.33		-57.42						
	-25.0	-60.94	-54.11													-87.91	-65.84	-65.00	-38.70		
	-22.5				-57.53			-63.47			-64.87				-44.73						
	-17.5			-59.89		-55.20	-50.46		-64.92	-76.55		-56.84	-64.02		-60.43						
	-15.0	-61.14	-51.11													-90.27	-67.14	-67.00	-49.09		
	-12.5				-53.35			-60.51			-66.24				-46.53						
	- 7.5			-51.22		-58.53	-49.74		-67.03	-77.44		-57.37	-66.28		-60.69						
- 5.0	-51.11	-34.89													-91.45	-68.45	-66.50	-43.42			
- 2.5				-55.94			-64.88			-67.69				-45.61							
切羽	+ 2.5			-58.38		-55.56	-53.31		-69.80	-79.20		-59.03	-66.01		-62.54						
	+ 5.0	-27.25	-27.53													-93.22	-70.20	-65.50			
	+ 7.5				-60.25			-64.68		-68.63				-46.14							
	+12.5			-53.88		-55.26	-52.09		-67.18	-79.12		-59.11	-66.57		-62.98						
	+15.0	-23.30	-15.26													-95.58	-72.81	-67.00			
	+17.5				-58.41			-64.92		-69.90				-46.25							
	+22.5			-55.00		-56.58			-80.45			-68.46									
	+25.0	-35.09																			
	+27.5																				
	+32.5																				
掘削後	+35.0																				
	+37.5																				
	+42.5																				
	+45.0																				
	+47.5																				
	+52.5																				
	+55.0																				
	備考	計測パターン A																			

2D-2 (普通砂)

切羽 からの距離 (cm)	トンネル土圧 (g/cm ²)		周辺地山圧力 (g/cm ²)														周辺地山圧力 (十圧計) (g/cm ²)			
	1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																			
	-55.0																			
	-52.5																	-51.92		
	-47.5					-56.37		-59.07			-63.38			-74.36						
	-45.0		-58.75												-74.34	-77.61	-65.50	-51.45		
	-42.5				-79.06			-69.47			-66.26			-49.90						
	-37.5			-55.17		-58.30	-51.47		-61.37	-65.32		-64.71	-63.28		-75.77					
	-35.0	-55.34	-60.74													-74.93	-77.17	-65.50	-53.34	
	-32.5				-81.13			-71.26			-67.88			-50.68						
	-27.5			-57.13		-61.86	-54.47		-63.36	-66.31		-66.21	-65.34		-77.02					
	-25.0	-58.26	-62.81													-74.34	-77.17	-65.00	-53.34	
	-22.5				-83.75			-73.21			-68.83			-51.30						
	-17.5			-58.31		-64.14	-55.48		-64.60	-67.82		-67.71	-65.58		-78.88					
	-15.0	-58.71	-65.24													-76.70	-78.92	-65.50	-55.70	
	-12.5				-85.98			-74.63			-70.87			-51.55						
	-7.5			-59.73		-63.86	-57.13		-66.83	-69.41		-69.30	-67.43		-80.48					
切羽	-5.0	-49.09	-49.17													-77.88	-79.79	-65.00	-54.75	
	-2.5				-78.21			-77.45			-72.92			-52.15						
	+2.5			-63.03		-63.82	-60.45		-70.48	-70.66		-71.59	-69.19		-82.42					
	+5.0	-17.58	-25.66													-80.83	-83.28	-66.00		
	+7.5				-83.62			-78.43			-75.82			-51.59						
	+12.5			-55.73		-62.17	-58.31		-71.71	-73.41		-73.09	-70.70		-82.88					
	+15.0	-9.30	-22.29													-81.42	-83.28	-65.50		
	+17.5				-75.05			-77.15			-76.59			-51.73						
	+22.5			-60.97			-62.55			-74.23			-71.22							
	掘削後	+25.0	-14.49																	
+27.5																				
+32.5																				
+35.0																				
+37.5																				
+42.5																				
+45.0																				
+47.5																				
+52.5																				
+55.0																				
備考	計測パターン A																			

2D-3 (普通砂)

切羽 からの距離 (cm)	掘削 位置のNo.	トンネル土圧 (g/cm)																周辺地山応力 (g/cm)				周辺地山応力 (土圧計) (g/cm)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4						
掘削前	-57.5																								
	-55.0																								
	-52.5																		-45.78						
	-47.5					-44.65			-46.62			-51.38			-50.33										
	-45.0		-33.26																						
	-42.5				-42.44			-38.34			-42.52			-30.16		-41.30	-50.58	-39.00	-47.20						
	-37.5			-30.07		-44.82	-36.52		-47.11	-46.68		-51.12	-44.29		-50.24										
	-35.0	-36.07	-32.86													-44.25	-51.01	-38.00	-46.73						
	-32.5				-42.19			-38.20			-41.92			-29.61											
	-27.5			-29.89		-47.32	-36.32		-48.70	-45.89		-51.81	-43.39		-50.86										
	-25.0	-35.20	-35.27													-48.97	-52.32	-38.00	-48.14						
	-22.5				-44.45			-38.64			-42.94			-28.88											
	-17.5			-32.66		-45.69	-37.87		-47.10	-47.73		-51.03	-44.56		-50.86										
	-15.0	-36.79	-33.55													-54.28	-60.60	-38.00	-48.14						
切羽	-12.5				-41.40			-34.77			-40.80			-28.07											
	-7.5			-33.26		-46.36	-36.16		-52.16	-44.89		-52.43	-43.05		-51.86										
	-5.0	-36.25	-33.91													-54.28	-62.35	-39.00	-49.50						
	-2.5				-42.98	-55.41		-41.04			-42.18			-28.04											
	+2.5			-36.92			-41.54		-57.27	-47.82		-52.62	-43.49		-52.20										
	+5.0	-35.38	-11.95													-56.05	-61.48	-39.00							
	+7.5				-54.56			-44.16			-42.43			-27.77											
	+12.5			-39.49		-56.68	-42.57		-64.78	-48.09		-54.97	-43.41		-52.39										
	+15.0	-29.15	-16.56													-56.05	-59.73	-33.14							
	+17.5				-59.05			-53.06			-44.56			-27.65											
	掘削後	+22.5			-48.65			-50.44			-49.67			-42.75											
		+25.0	-11.12																						
		+27.5																							
		+32.5																							
+35.0																									
+37.5																									
+42.5																									
+45.0																									
+47.5																									
+52.5																									
+55.0																									
備考		計測パターン A																							

2 D - 4 (普通砂)

掘削 からの距離 (m)	掘削のN.O.	トンネル土圧 (g/cm ²)		周辺地山圧力 (g/cm ²)														周辺地山圧力 (十圧計) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0																				
	-52.5																		-61.83		
	-47.5					-126.7			-128.6			-116.6			-98.18						
	-45.0		-129.9													-119.8	-129.1	-133.0	-61.36		
	-42.5				-85.67			-103.2			-125.4			-109.1							
	-37.5			-75.32		-132.2	-78.30		-134.0	-98.60		-119.8	-98.77		-100.4						
	-35.0	-89.98	-136.7													-123.3	-133.0	-137.0	-62.78		
	-32.5				-89.35			-107.6			-130.0			-111.0							
	-27.5			-80.61		-135.0	-82.36		136.4	-103.2		-121.1	-102.0		-100.8						
	-25.0	-95.61	-139.3													-122.7	-132.5	-136.5	-63.72		
	-22.5				-90.38			-108.5			-130.1			-111.2							
	-17.5			-81.95		-133.7	-84.25		-137.5	-104.6		-124.1	-101.8		-103.0						
	-15.0	-95.56	-130.1													-125.1	-133.9	-138.5	-63.72		
	-12.5				-82.67			-106.3			-130.3			-112.9							
	-7.5			-68.14		-110.1	-83.35		-137.5	-105.4		-119.7	-102.6		-103.0						
	-5.0	-87.49	-103.9													-126.9	-135.6	-140.0	-64.66		
切羽	-2.5				-82.93			-111.8			-132.0			-112.5							
	+2.5			-82.39		-108.3	-86.82		-142.2	-108.3		-120.1	-103.4		-102.9						
	+5.0	-23.04	-25.43													-126.9	-136.0	-140.5			
	+7.5				-82.73			-110.8			-130.5			-111.2							
	+12.5			-82.02		-106.8	-90.41		-134.7	-108.9		-120.9	-103.0		-104.1						
	+15.0	-12.99	-14.51													-128.9	-139.6	-142.0	-63.25		
	+17.5				-92.53			-112.6			-132.2			-112.5							
	+22.5			-91.54			-95.12			-112.1			-104.5								
	+25.0	-25.27																			
	+27.5																				
掘削後	+32.5					-105.9			-143.2			-123.2			-106.0						
	+35.0		-30.45													-130.4	-138.2	-142.0			
	+37.5				-97.21			-121.5			-136.1			-115.3							
	+42.5			-94.06			-100.1			-116.8			-106.3								
	+45.0	-8.27																			
	+47.5																				
	+52.5																				
	+55.0																				
	備考	計測パターン A																			

2D-5 (砂)

切羽 からの距離 (m)	掘削の 深さ (m)	トンネル土圧 (g/cm ²)		周辺地山応力 (g/cm ²)														周辺地山応力 (平均値) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0																				
	-52.5																		-64.66		
	-47.5					-133.4			-136.8			-143.0			-157.1						
	-45.0		-170.6													-145.1	-130.4	-125.5	-65.14		
	-42.5				-128.0			-137.3			-153.6			-134.2							
	-37.5			-133.2		-140.9	-123.8		-143.7	-135.1		-146.8	-131.1		-160.0						
	-35.0	-163.2	-179.3													-151.0	-136.9	-131.0	-67.50		
	-32.5				-135.6			-143.7			-158.9			-137.5							
	-27.5			-141.6		-144.9	-130.3		-148.3	-140.4		-148.8	-134.5		-160.7						
	-25.0	-172.0	-181.7													-152.8	-138.7	-131.5	-70.80		
	-22.5				-139.3			-147.5			-161.1			-138.8							
	-17.5			-143.9		-153.1	-133.1		-155.3	-142.0		-151.7	-136.4		-161.4						
	-15.0	-159.8	-165.0													-156.9	-142.6	-135.0	-74.58		
	-12.5				-142.9			-152.9			-163.4			-140.7							
	-7.5			-137.3		-175.2	-132.6		-166.2	-144.0		-155.9	-138.3		-163.6						
切羽	-5.0	-66.43	-70.75													-161.1	-146.5	-137.5	-76.46		
	-2.5				-145.5			-161.6			-166.9			-142.9							
	+2.5			-111.0		-153.6	-133.5		-167.7	-146.8		-158.7	-141.5		-166.3						
	+5.0	-14.77	-24.61													-167.0	-151.7	-141.5	-76.94		
	+7.5				-129.6			-161.7			-169.7			-145.9							
	+12.5			-100.2		-127.3	-134.8		-174.1	-150.6		-164.0	-145.8		-170.3						
	+15.0	-21.16	-27.30													-171.7	-156.1	-144.0			
	+17.5				-118.1			-168.0			-174.7			-149.5							
	+22.5			-105.6		-140.0	-141.7		-181.0	-155.2		-169.7	-150.9		-176.0						
	+25.0	-26.54	-48.52													-176.4	-159.6	-146.5			
掘削後	+27.5				-135.5			-173.9			-182.2			-155.1							
	+32.5			-117.9			-149.6			-163.0			-157.7								
	+35.0	-56.89																			
	+37.5																				
	+42.5																				
	+45.0																				
	+47.5																				
	+52.5																				
	+55.0																				
備考	計測パターン A																				

2D-6 (普通砂)

掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘削前		掘削後		備考	
掘					

2D-7 (乾燥砂)

掘削 カバ.の距離 (cm)		トンネル土圧 (g/cm ²)		周辺地山応力 (g/cm ²)														周辺地山応力 (付加計) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0	2.23																			
	-52.5			-67.24			-83.95			-83.40			-77.13								
	-47.5				-63.78			-86.24			-79.42			-74.06							
	-45.0	1.16	-0.56													-142.8	-134.7	-147.5			
	-42.5			-102.3		-70.16	-116.4		-90.38	-105.3		-90.65	-93.46		-105.3						
	-37.5				-99.19			-116.5			-93.75			-85.25							
	-35.0	2.69	-3.05													-151.6	-144.8	-156.5			
	-32.5			-112.8		-99.75	-124.3		-112.1	-108.5		-98.43	-96.81		-113.4						
	-27.5				-108.2				-125.0			-97.87			-89.69						
	-25.0	1.83	-2.08													-155.2	-146.9	-156.5	-62.78		
	-22.5			-116.6		-113.1	-124.2		-123.0	-109.9		-104.6	-98.64		-120.6						
	-17.5				-107.8				-123.1			-99.58			-92.81						
	-15.0	0.30	-0.51													-158.7	-148.2	-157.5	-73.16		
切羽	-12.5			-120.0		-112.3	-117.6		-122.3	-107.8		-108.2	-98.99		-126.2						
	-7.5				-111.5			-115.0			-99.16			-94.48							
	-5.0	2.03	-22.63													-161.7	-148.7	-157.5	-72.69		
	-2.5			-89.72		-102.5	-100.8		-122.2	-105.9		-112.4	-99.24		-130.8						
	+2.5				-82.72			-109.9			-100.5			-96.03							
	+5.0	-9.85	-19.23													-162.3	-147.8	-158.0	-72.69		
	+7.5			-97.62		-90.62	-111.8		-126.7	-113.7		-117.3	-101.5		-133.5						
	+12.5				-103.6			-130.4			-108.0			-98.02							
	+15.0	-22.94	-43.09													-161.1	-146.9	-158.0	-72.22		
	+17.5			-122.2		-108.8	-129.2		-142.5	-120.8		-123.4	-103.9		-134.2						
	+22.5				-120.7				-144.7			-113.0			-99.43						
	+25.0	-30.50	-55.47													-162.8	-147.4	-158.0	-71.27		
	+27.5			-129.3		-120.8	-134.4		-155.0	-123.3		-127.5	-106.4		-134.5						
	+32.5				-126.9				-148.1			-114.7			-101.2						
掘削後	+35.0	-41.56	-61.71													-161.7	-146.9	-158.0	-70.33		
	+37.5			-133.4		-125.2	-136.5		-158.7	-123.9		-129.2	-107.4		-136.7						
	+42.5				-130.9			-149.4			-115.3			-102.4							
	+45.0		-66.99													-164.6	-147.8	-158.0	-70.80		
	+47.5					-127.5			-161.2			-130.2			-138.6						
	+52.5																				
	+55.0																		-70.80		
	備考		計測パターン A																		

2D-8 (普通砂)

掘削 からの距離 (cm)	掘削の 深さ (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)		周辺地山圧力 (g/cm ²)														周辺地山圧力 (十圧計) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0																				
	-52.5																		-32.10		
	-47.5																				
	-45.0																				
	-42.5																				
	-37.5																				
	-35.0																				
	-32.5																				
	-27.5																				
	-25.0																				
	-22.5																				
	-17.5																				
	-15.0																				
	-12.5																				
	切羽	-7.5																			
-5.0																					
-2.5																					
+2.5																					
+5.0																					
+7.5																					
+12.5																					
+15.0																					
+17.5																					
+22.5																					
+25.0																					
+27.5																					
+32.5																					
+35.0																					
+37.5																					
掘削後		+42.5																			
	+45.0																				
	+47.5																				
	+52.5																				
	+55.0																				
	計測パターン B																				
	備考																				

2D-9 (普通砂)

切羽 方向の距離 (cm)	掘削の 深さ (cm)	トンネル圧 (g/cm)		周辺地山圧力 (g/cm)														周辺地山圧力 (付録計) (g/cm)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0																				
	-52.5																		-21.24		
	-47.5																				
	-45.0																				
	-42.5																				
	-37.5																				
	-35.0																				
	-32.5																				
	-27.5																				
	-25.0																				
	-22.5																				
	-17.5																				
一切羽	-15.0																				
	-12.5																				
	-7.5																				
	-5.0																				
	-2.5																				
	+2.5																				
	+5.0																				
	+7.5																				
	+12.5																				
	+15.0																				
	+17.5																				
	+22.5																				
	掘削後	+25.0																			
+27.5																					
+32.5																					
+35.0																					
+37.5																					
+42.5																					
+45.0																					
+47.5																					
+52.5																					
+55.0																					
備考		計測パターン B																			

2D-10 (普通砂)

掘削 からの距離 (m)	掘削のN.O.	トンネル土圧 (g/cm ²)		掘削地山応力 (g/cm ²)														周辺地山応力 (十圧計) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5																				
	-55.0																				
	-52.5																		-55.22		
	-47.5					-161.1			-157.5			-159.9			-164.8						
	-45.0		-136.6												-164.8						
	-42.5				-110.0			-107.9			-125.0				-114.8		-146.3	-125.1	-121.0	-56.17	
	-37.5			-137.1		-168.0	-106.9		-163.0	-133.0		-162.6	-113.8		-166.5						
	-35.0	-132.0	-145.0													-166.5					
	-32.5				-114.7			-111.7									-149.9	-128.2	-124.5	-57.11	
	-27.5			-143.3		-173.5	-110.8		-167.7	-136.9		-165.8	-117.0		-167.4						
	-25.0	-136.0	-143.2												-167.4						
	-22.5				-117.6			-114.4			-131.0				-118.9		-151.0	-129.9	-126.0	-57.58	
	-17.5			-144.1		-179.1	-111.1		-172.0	-137.3		-168.4	-117.4		-167.9						
	-15.0	-126.7	-138.9														-152.2	-131.2	-128.0	-59.00	
	-12.5				-123.0			-117.6			-134.2				-120.6						
	-7.5			-144.7		-173.2	-115.3		-174.9	-139.5		-174.5	-118.6		-171.5						
切羽	-5.0	-93.43	-81.30														-156.4	-134.3	-130.5	-60.42	
	-2.5				-105.0			-117.7			-138.4				-124.4						
	+2.5			-99.57		-142.3	-111.8		-169.6	-141.7		-179.5	-122.0		-175.4						
	+5.0	-14.62	-19.34														-159.9	-137.8	-132.5		
	+7.5				-82.12			-114.1			-142.0				-128.4						
掘削後	+12.5			-99.06			-112.8			-144.5			-124.9								
	+15.0	-16.49																		-63.25	
	+17.5																				
	+22.5					-123.7			-170.5								-167.6	-143.4	-137.5	-64.19	
	+25.0		-31.11								-183.5				-182.7						
	+27.5				-95.28			-124.0			-150.3			-138.0							
	+32.5			-117.2					-165.8	-154.2		-183.3	-133.5		-183.1						
	+35.0	-36.69	-54.20			-124.1	-125.5									-170.5	-144.8	-139.5			
	+37.5				-115.1			-132.4		-158.9	-153.1			-140.8							
	+42.5			-142.8																	
	+45.0	-30.04					-133.7						-136.2								
	+47.5																				
	+52.5																				
	+55.0																				
備考	計測パターン B																				

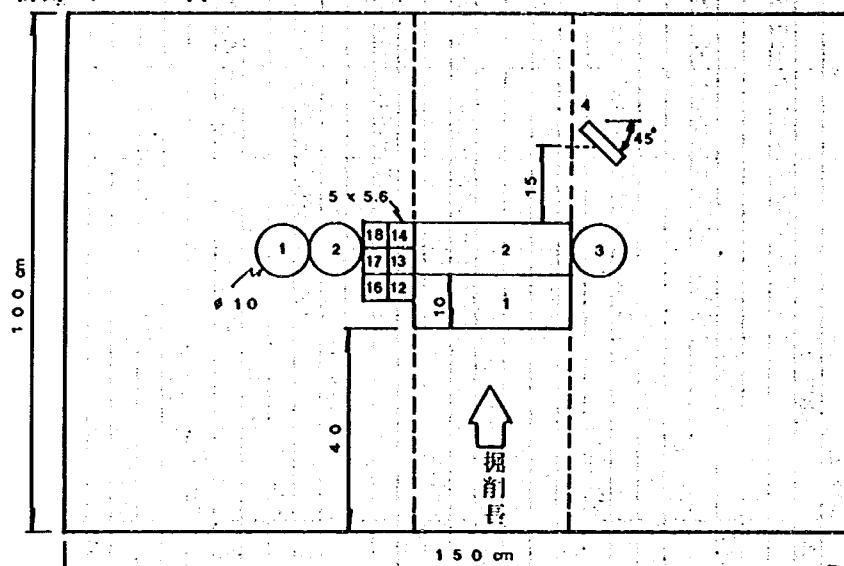
2D-11 (普通砂)

切羽 からの距離 (cm)	掘削のN.O.	トンネル土圧 (g/cm ²)		周辺地山圧力 (g/cm ²)												周辺地山圧力 (十圧計) (g/cm ²)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4
掘削前	-57.5																		
	-55.0																		-37.76
	-52.5																		
	-47.5					-110.6							-97.56		-105.2				
	-45.0		-54.76													-113.9	-95.92	-92.50	-43.96
	-42.5				-103.4			-89.89			-92.37			-104.7					
	-37.5			-107.3		-112.5	-93.20			-106.7		-98.19			-108.2				
	-35.0	-57.41	-57.59													-121.5	-102.9	-100.0	-43.42
	-32.5			-108.0				-92.09			-94.25			-116.8					
	-27.5			-111.3		-116.8	-96.37			-108.8		-98.36			-107.5				
	-25.0	-60.54	-59.75													-121.5	-102.9	-99.50	-44.37
	-22.5			-113.3				-95.31			-94.76			-115.2					
	-17.5			-117.8		-121.4	-101.1			-109.4		-100.5			-108.2				
	-15.0	-60.04	-57.66													-123.9	-105.5	-100.5	-44.84
	-12.5			-118.4				-100.3			-97.23			-115.6					
	-7.5			-116.3		-124.2	-105.5			-112.1		-103.9			-108.3				
切羽	-5.0	-43.02	-38.96													-122.7	-104.6	-102.0	-46.26
	-2.5			-116.9				-107.3			-100.3			-115.9					
	+2.5			-103.7		-117.0	-112.4			-112.9		-108.5			-109.5				
	+5.0	-13.69	-13.90													-126.9	-107.3	-103.0	-45.31
	+7.5			-119.6				-111.6			-103.2			-116.4					
	+12.5			-104.8		-112.9	-114.1			-115.2		-110.9			-109.5				
	+15.0	-15.23	-16.89													-123.9	-105.5	-102.5	-46.73
	+17.5			-112.1				-113.8			-104.8			-116.0					
	+22.5			-110.5		-115.5	-116.5			-117.3		-114.2			-112.9				
	+25.0	-12.91	-29.36													-127.4	-109.0	-104.5	
	+27.5			-116.6				-114.3			-107.4			-118.3					
	+32.5			-118.3		-115.1	-116.5			-119.1		-115.2			-114.8				
	+35.0	-13.74	-29.30													-126.3	-107.7	-102.5	
	+37.5			-126.2				-114.4			-108.2			-119.4					
	+42.5			-105.6		-109.0	-115.6			-119.9		-118.2			-117.4				
	+45.0	-13.64	-23.84													-128.6	-110.3	-105.0	
掘削後	+47.5			-114.5				-111.7			-110.5			-120.9					
	+52.5							-115.4			-122.1								
	+55.0	-14.03																	
計測パターン B																			

2D-12 (普通砂)

掘削 からの距離 (cm)	トンネル中心 (g/cm)	周辺地山圧力 (g/cm)																周辺地山圧力 (土圧計) (g/cm)			
		1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	1	2	3	4		
掘削前	-57.5					-98.37						-114.9			-105.7						
	-55.0		-65.45													-126.3	-101.2	-99.00	-51.92		
	-52.5				-101.7			-106.7			-104.2			-82.21							
	-47.5			-91.14		-100.5	-101.4			-121.8		-117.3	-96.78		-107.2						
	-45.0	-64.15	-66.86													-126.9	-102.9	-99.50	-51.92		
	-42.5				-103.9			-109.6			-106.4			-83.44							
	-37.5			-93.54		-102.8	-104.4			-124.4		-117.9	-98.80		-108.0						
	-35.0	-64.93	-68.02													-127.4	-102.9	-100.0	-53.81		
	-32.5				-106.0			-111.9			-107.2			-84.15							
	-27.5			-95.90		-104.8	-106.9			-125.7		-120.8	-99.41		-110.5						
	-25.0	-66.57	-70.40													-130.4	-105.5	-101.5	-53.81		
	-22.5				-107.6			-114.3			-109.5			-86.29							
	-17.5			-96.79		-105.8	-110.1			-128.5		-122.1	-102.2		-111.1						
	-15.0	-67.54	-67.41													-130.4	-106.0	-101.5	-54.28		
	-12.5				-106.4			-116.1			-110.1			-86.10							
	-7.5			-85.50		-91.42	-110.4			-129.5		-125.3	-102.0		-112.8						
切羽	-5.0	-45.94	-46.25													-131.0	-106.8	-102.0	-55.70		
	-2.5				-91.05			-114.4			-112.9			-87.69							
	+2.5			-82.19		-78.06	-111.8			-133.6		-127.2	-103.4		-117.4						
	+5.0	-44.32	-47.78													-135.1	-109.0	-104.5	-56.64		
	+7.5				-88.92			-112.1			-115.3			-91.67							
	+12.5			-76.38		-77.68	-110.2			-137.1		-128.4	-106.0		-118.2						
	+15.0	-17.59	-16.06													-136.3	-110.3	-105.5	-55.22		
	+17.5				-93.62			-111.6			-114.7			-91.70							
	+22.5			-87.14		-94.06	-110.2			-136.0		-126.4	-105.8		-118.9						
	+25.0	-31.54	-30.92													-136.3	-109.9	-106.5	-54.75		
掘削後	+27.5				-101.0			-113.6			-115.1			-92.29							
	+32.5			-94.81		-92.25	-114.4			-138.5		-125.3	-106.9		-118.6						
	+35.0	-23.89	-23.35													-135.1	-109.0	-105.0	-54.28		
	+37.5				-98.88			-114.0			-114.0			-93.19							
	+42.5			-91.04		-89.78	-113.2			-136.6		-126.2	-106.4		-120.0						
	+45.0	-20.12	-20.38													-136.3	-109.4	-106.0			
	+47.5				-109.9			-115.0			-116.3			-95.94							
	+52.5			-93.38			-115.1			-140.2			-108.6								
	+55.0	-20.61																			
	備考	計測パターン B																			

計測パターン A



計測パターン B

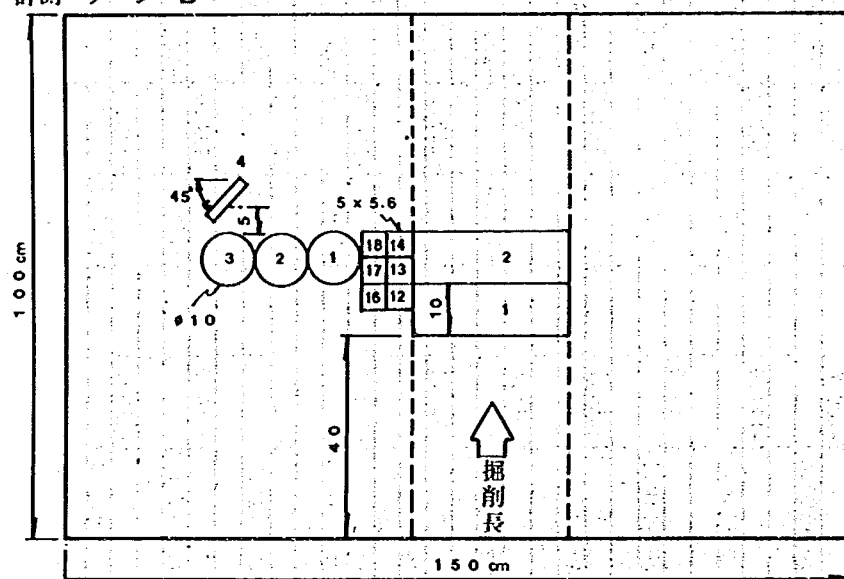


図-5 計測パターン (直径 3 D)

表-3

トンネル土圧模型実験一覧表 その1 (直径 3 D)												
実験No	H/D	H (cm)	D (cm)	r (gf/cm)	ϕ (°)	$\tan \phi$	C (gf/cm)	C/r D	C/r H	T (gf/cm)	T/r D	T/r H
3 D-1 (乾燥砂)	1.000	40.0	40.0	1.75	41	0.869	0	0	0	17.92	0.256	0.256
3 D-2 (普通砂)	1.000	40.0	40.0	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.223	5.30	0.078	0.078
3 D-3 (")	1.000	40.0	40.0	1.70	40	0.839	10.0	0.223	0.223	24.47	0.360	0.360
3 D-4 (乾燥砂)	1.875	75.0	40.0	1.75	41	0.869	0	0	0	21.01	0.300	0.160

3D-1 (乾燥砂)

掘削 からの距離 (cm)	掘削の 深さ (cm)	トンネル内 (g/cm ³)		周辺地山圧力 (g/cm ³)										周辺地山圧力 (合計) (g/cm ³)		
		1	2	12	13	14	16	17	18					1	2	3
掘削前	-57.5															
	-55.0	-0.49														
	-52.5			-29.57			-70.35									
	-47.5				-89.26			-84.94								
	-45.0	1.04	-0.36													
	-42.5			-36.72		-76.54	-76.84		-89.48					-109.7	-98.10	-97.50
	-37.5				-74.53			-97.15								
	-35.0	0.78	-0.73													
	-32.5			-37.18		-57.05	-78.02		-97.19					-127.4	-100.7	-95.50
	-27.5				-71.80			-98.82								
	-25.0	0.13	-3.23													
	-22.5			-33.56		-62.52	-78.43		-94.03					-126.9	-98.54	-94.00
	-17.5				-91.07			-89.93								
	-15.0	-0.52	-5.31											-122.1	-96.36	-93.00
	-12.5			-24.75		-76.42	-83.08		-90.70							-53.81
切羽	-7.5				-105.9			-84.44								
	-5.0	-3.20	-14.00													
	-2.5			-28.09		-47.67	-71.99		-105.7					-118.0	-92.43	-93.00
	+2.5				-58.47			-82.10								
	+5.0	-3.93	-6.97											-136.3	-103.8	-100.5
	+7.5			-28.85		-63.90	-61.98		-122.6							-50.50
	+12.5				-79.02			-88.32								
	+15.0	-13.95	-15.36													
	+17.5			-32.25		-76.69	-100.4		-122.6					-133.9	-104.2	-99.50
	+22.5				-120.3			-121.6								
掘削後	+25.0	-19.96	-24.31											-155.8	-109.4	-101.0
	+27.5			-93.22		-112.7	-110.3		-144.8							-51.92
	+32.5				-125.7			-129.0								
	+35.0		-25.87											-160.5	-110.3	-100.0
	+37.5					-114.6			-149.3							-54.28
	+42.5															
	+45.0															-54.95
	+47.5															
	+52.5															
	+55.0															
備考		計測パターン B														

3D-2 (普通砂)

切羽 からの距離 (cm)	掘削 からの距離 (cm)	トンネル土圧 (g/cm ²)	周辺地山応力 (g/cm ²)										周辺地山応力 (十圧計) (g/cm ²)			
			1	2	12	13	14	16	17	18			1	2	3	4
掘削前	-57.5															
	-55.0															
	-52.5															-48.14
	-47.5						-71.32			-73.00						
	-45.0		-70.37										-99.71	-95.05	-94.50	-50.03
	-42.5				-98.83				-102.3							
	-37.5			-25.78		-74.60	-96.55		-76.60							
	-35.0	-78.44	-74.36										-104.3	-98.97	-96.50	-51.45
	-32.5				-104.1				-106.4							
	-27.5			-28.40		-77.24	-99.72		-79.02							
	-25.0	-82.58	-76.33										-108.6	-102.0	-98.50	-50.98
	-22.5				-106.6				-109.1							
	-17.5			-33.69		-71.73	-98.25		-75.14							
	-15.0	-79.17	-63.27										-108.6	-102.9	-99.50	-51.92
	-12.5				-89.20				-99.26							
	-7.5			-15.47		-52.91	-84.29		-65.41							
切羽	-5.0	-63.11	-63.40										-113.3	-104.6	-100.5	-53.34
	-2.5				-69.46				-97.50							
	+2.5			-40.10		-56.77	-77.54		-71.17							
	+5.0	-53.14	-39.25										-116.2	-107.3		
	+7.5				-81.14				-104.8							
掘削後	+12.5			-25.32				-84.20								
	+15.0	-30.81														
	+17.5															
	+22.5															
	+25.0															
	+27.5															
	+32.5															
	+35.0															
	+37.5															
	+42.5															
	+45.0															
	+47.5															
備考	+52.5															
	+55.0															

3D-3 (普通砂)

切羽 部の 位置 (cm)	計測 点の No.	トンネル内 (g/cm)		周辺地山応力 (g/cm)										周辺地山応力 (十圧計) (g/cm)			
		1	2	12	13	14	16	17	18					1	2	3	4
掘削前	-57.5																
	-55.0	0.29															
	-52.5			-81.37			-101.7										
	-47.5				-66.31			-77.73									
	-45.0	0.36	1.04											-124.5	-143.9	-180.5	
	-42.5			-112.4		-61.53	-133.0		-156.7								
	-37.5				-97.87			-113.5									
	-35.0	-0.86	1.25											-151.0	-156.5	-194.5	-67.97
	-32.5			-111.1		-86.34	-138.4		-228.0								
	-27.5				-92.57			-115.1									
	-25.0	-0.44	1.22											-151.6	-159.1	-195.5	-82.13
	-22.5			-99.31		-89.88	-132.0		-61.31								
	-17.5				-96.91			-102.7									
	-15.0	-1.22	-0.52											-144.0	-158.3	-194.0	-81.66
切羽	-12.5			-115.4		-77.17	-119.0		-45.52								
	-7.5				-95.42			-95.29									
	-5.0	-4.76	-12.57											-148.7	-163.9	-202.0	-77.88
	-2.5			-64.70		-64.49	-109.8		-48.24								
	+2.5				-62.32			-90.09									
	+5.0	-7.44	-8.90											-151.0	-165.2	-203.5	-78.35
	+7.5			-71.32		-82.92	-107.9		-52.84								
	+12.5				-78.73			-99.24									
	+15.0	-12.62	-14.89											-155.2	-165.2	-203.5	-77.88
	+17.5			-102.2		-99.15	-136.1		-65.75								
	+22.5				-98.65			-117.1									
	+25.0	-20.17	-19.23											-168.2	-171.8	-205.5	-80.71
	+27.5			-112.4		-114.4	-147.8		-79.47								
	+32.5				-103.9			-122.2									
掘削後	+35.0		-21.84											-171.1	-174.8	-206.0	-83.54
	+37.5					-115.9			-81.14								
	+42.5																
	+45.0																
	+47.5																
	+52.5																
	+55.0																
備考	計測パターン B																

3D-4 (乾燥砂)

切羽 高さの区間 (cm)	掘削の深さ (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)		周辺地山圧力 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (合計) (g/cm ²)			
		1	2	12	13	14	16	17	18					1	2	3	4
掘削前	-57.5																
	-55.0																
	-52.5																-37.76
	-47.5					-94.13			-87.70								
	-45.0		-62.98											-97.35	-83.71	-83.00	-40.12
	-42.5				-80.95			-79.33									
	-37.5			-83.49		-98.72	-87.67		-92.04								
	-35.0	-64.15	-66.21											-102.7	-88.07	-86.00	-41.06
	-32.5				-86.26			-83.44									
	-27.5			-89.71		-99.32	-93.01		-92.92								
	-25.0	-68.19	-66.44											-104.4	-89.38	-87.00	-42.01
	-22.5				-87.19			-83.91									
	-17.5			-90.14		-99.23	-93.72		-93.18								
	-15.0	-64.52	-60.59											-106.2	-90.25	-88.00	-43.42
切羽	-12.5				-85.23			-84.55									
	-7.5			-76.98		-92.65	-92.84		-94.50								
	-5.0	-56.42	-47.94											-108.0	-92.00	-89.50	-44.37
	-2.5				-71.80			-85.27									
	+2.5			-70.08		-79.59	-94.83		-95.15								
	+5.0	-54.50	-34.77											-109.2	-93.74	-90.50	-45.78
	+7.5				-72.39			-81.28									
	+12.5			-74.02		-80.06	-87.70		-93.08								
	+15.0	-47.84	-38.21											-112.1	-95.48	-92.50	-47.20
	+17.5				-74.77			-81.55									
	+22.5			-81.88		-93.58	-90.00		-95.66								
	+25.0	-48.69	-46.12											-118.6	-98.10	-93.00	-49.09
	+27.5				-85.77			-87.41									
	+32.5			-92.96		-90.48	-102.1		-98.69								
掘削後	+35.0	-26.62	-25.77											-122.1	-101.6	-96.00	
	+37.5				-84.99			-88.60									
	+42.5			-82.30			-100.4										
	+45.0	-36.02															
	+47.5																
	+52.5																
	+55.0																
備考		計測パターン B															

III. 土かぶりの小さいトンネルの 模型実験 (その2)

Ⅲ. の実験はトンネル・カバーのひき抜きによってトンネル掘削を相似しようとした実験である。実験ケース数は全体で12ケースで表一1に示す。それらの計測結果をそれ以下の表に示す。圧縮応力を負であらわす。

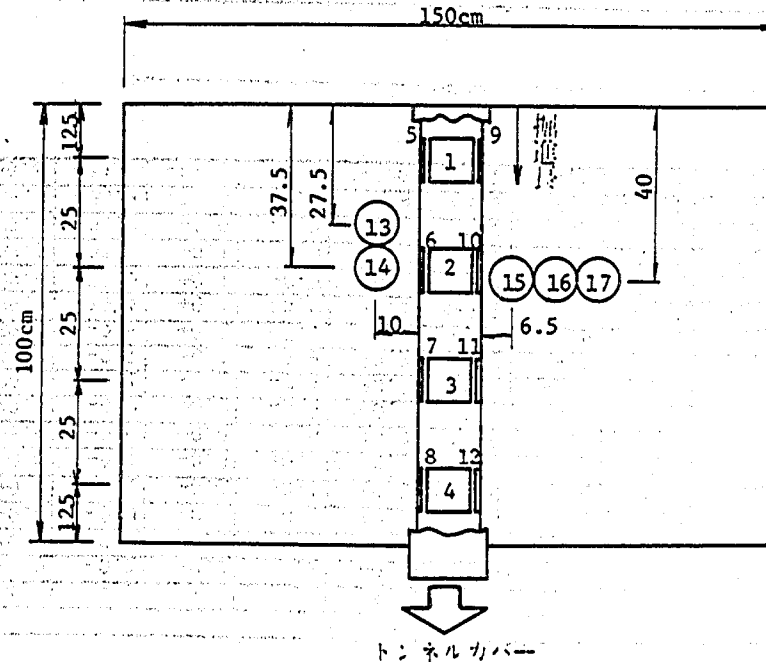
表一1 土かぶりの小さいトンネルの模型実験（その2、矩形トンネル）の実験ケース

実験番号	年一月一日	実 験 形 式
1	78-1-10	乾燥砂（カバー引抜き）
2	78-1-13	“（ “ ）
3	78-1-19	“（ “ ）
4	78-1-31	“（ “ ）
5	78-2-6	“（ “ ）
6	78-2-7	“（落し戸）
7	78-2-17	“（カバー引抜き）ロックボルト
8	78-3-8	カタクリ（カバー引抜き）
9	78-3-14	“（カバー引抜き）ロックボルト
10	78-4-7	カンテン（ “ ）
11	78-4-12	ゼラチン砂（カバー引抜き）
12	78-6-16	カンテン（カバー引抜き）

No.1 (乾燥砂)

掘削No	掘削深 (cm)	トンネル内圧 (kg/cm ²)										周辺地山圧力 (kg/cm ²)						
		1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1	6.25	-0.3	+0.2	+0.2	+0.1	+0.2	-0.1	-6.9	+0.0	-0.1	-0.1	-83.3	-72.85	-71.35	-62.94	-89.59		
2	12.50	-6.4	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	-0.3	-5.1	-0.0	-0.1	-0.3	-87.7	-76.35	-73.41	-65.75	-90.12		
3	18.75	-29.0	+0.2	+0.1	+0.1	+0.2	-0.3	-5.4	+0.0	-0.2	-0.3	-90.0	-82.83	-78.07	-68.00	-90.12		
4	25.00	-39.8	+0.0	+0.0	+0.1	+0.1	-0.3	-6.3	-0.2	-0.2	-0.3	-83.8	-81.84	-78.07	-68.56	-89.59		
5	31.25	-43.7	+0.2	+0.1	+0.1	-1.0	-0.3	-6.5	-1.2	-0.1	-0.3	-80.0	-76.85	-72.38	-69.69	-90.12		
6	37.50	-44.4	-3.7	+0.0	+0.1	-6.6	-0.4	-6.9	-15.6	-0.0	-0.4	-81.1	-71.36	-64.11	-69.69	-91.70		
7	43.75	-43.5	-21.3	+0.0	-0.0	-4.2	-0.3	-7.3	-6.7	-0.0	-0.4	-84.9	-70.86	-64.63	-71.37	-94.33		
8	50.00	-43.8	-30.7	+0.0	-0.0	-5.8	-0.3	-6.4	-7.1	-0.1	-0.4	-86.6	-72.36	-66.69	-70.81	-94.33		
9	56.25	-43.5	-36.7	+0.0	+0.0	-6.2	-0.5	-6.4	-7.3	-0.5	-0.5	-87.7	-75.88	-70.31	-71.37	-93.81		
10	62.50	-43.7	-37.3	-6.1	+0.2	-6.4	-0.4	-6.2	-6.9	-3.8	-0.7	-	-78.84	-73.93	-73.62	-93.81		
11	68.75	-44.3	-37.1	-20.2	+0.2	-7.2	-0.4	-5.7	-6.7	-3.6	-0.4	-	-79.34	-73.93	-74.18	-93.28		
12	75.00	-44.5	-36.9	-31.5	+0.1	-6.3	-0.4	-5.5	-6.8	-5.1	-0.0	-	-80.84	-74.97	-74.18	-92.23		
13	81.25	-44.7	-36.8	-36.8	+0.1	-7.9	-0.9	-5.7	-6.2	-5.3	-5.1	-	-80.34	-74.97	-73.06	-91.70		
14	87.50	-45.0	-36.7	-38.2	-4.1	-6.5	-5.2	-5.4	-6.6	-5.7	-1.5	-	-80.34	-74.97	-73.62	-91.17		
15	93.75	-45.2	-37.2	-38.1	-24.7	-5.1	-5.2	-6.3	-7.0	-5.8	-3.8	-	-79.34	-73.93	-72.50	-90.12		
16	100.00											-86.6	-79.34	-73.93	-73.06	-91.19		

計測概略図

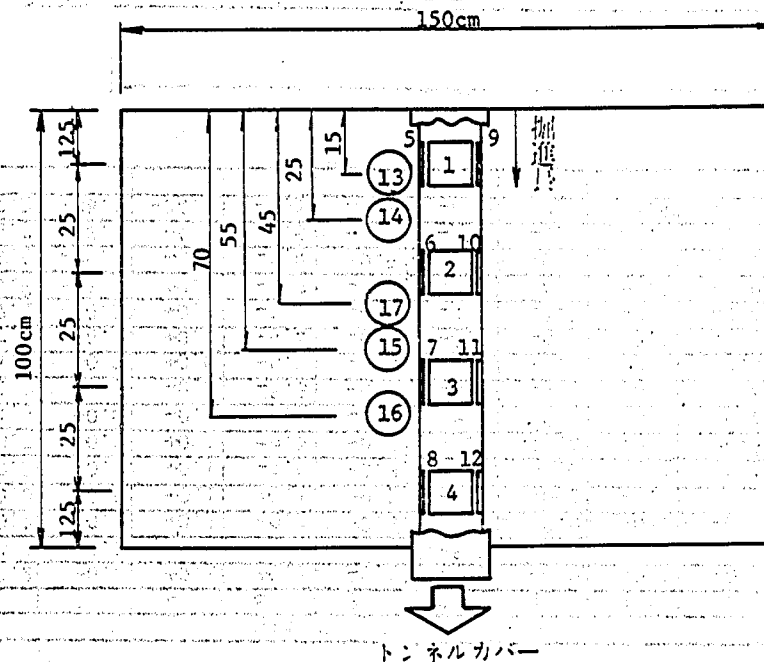


備考

No.2 (乾燥砂)

掘削No	掘削長 (cm)	トンネル中心 (g/cm)										周辺地山応力 (g/cm)						
		1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1	6.25	-0.0	+0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.6	-0.0	-0.1	-0.0	-58.1	-51.0	-71.4	-55.7	-53.5		
2	12.50	-7.0	+0.1	0.0	-0.1	-0.2	-0.0	-1.4	0.0	+0.1	0.0	-60.3	-52.5	-74.4	-55.7	-55.5		
3	18.75	-28.0	-0.0	-0.0	-0.1	-0.1	+0.0	-4.6	+0.0	+0.0	-0.0	-58.1	-55.5	-77.5	-55.7	-56.0		
4	25.00	-38.9	+0.0	-0.1	-0.1	+0.1	+0.0	-6.0	0.0	0.0	-0.1	-61.4	-45.0	-77.0	-56.3	-55.0		
5	31.25	-42.7	0.0	-0.1	-0.0	+0.1	+0.1	-6.5	-2.0	-0.1	-0.0	-64.2	-43.5	-79.5	-58.7	-59.4		
6	37.50	-41.4	-6.4	-0.0	+0.0	-2.6	+0.0	-6.6	-4.3	-0.0	0.0	-67.5	-49.0	-82.6	-70.3	-58.9		
7	43.75	-40.6	-29.5	-0.0	+0.0	-6.5	+0.1	-6.1	-4.0	-0.1	+0.0	-69.1	-53.5	-86.7	-69.7	-44.1		
8	50.00	-40.3	-36.7	-0.1	+0.1	-7.4	+0.2	-6.1	-4.4	-0.3	+0.3	-69.7	-55.0	-80.5	-67.3	-44.1		
9	56.25	-40.1	-41.2	-0.1	+0.1	-7.9	+0.2	-5.7	-4.6	-1.0	-0.4	-69.7	-56.5	-71.4	-70.3	-49.5		
10	62.50	-40.1	-39.8	-7.6	+0.1	-7.8	+0.2	-5.5	-4.6	-6.2	+0.4	-70.2	-57.5	-72.9	-69.1	-54.5		
11	68.75	-40.6	-39.9	-15.4	+0.1	-8.2	+0.1	-5.5	-4.5	-8.1	+0.4	-70.2	-56.5	-78.0	-55.1	-55.5		
12	75.00	-40.5	-39.6	-27.3	+0.1	-8.0	+0.1	-5.6	-4.5	-10.1	+0.4	-70.8	-56.5	-80.5	-55.1	-56.5		
13	81.25	-40.7	-39.5	-31.0	+0.1	-8.3	+0.1	-5.5	-4.4	-10.8	+0.3	-70.2	-56.0	-81.6	-58.7	-56.5		
14	87.50	-40.8	-39.5	-31.2	-4.0	-7.0	-0.6	-5.2	-4.5	-11.6	-6.5	-70.2	-56.0	-82.1	-68.5	-56.9		
15	93.75	-40.8	-39.5	-30.9	-18.3	-7.9	-1.6	-5.3	-4.4	-11.7	-2.7	-69.7	-56.0	-82.1	-69.7	-56.5		
16	100.00	-40.9	-39.6	-30.9	-18.2	-7.8	-1.6	-5.4	-4.5	-11.7	-2.8							

計測概略図

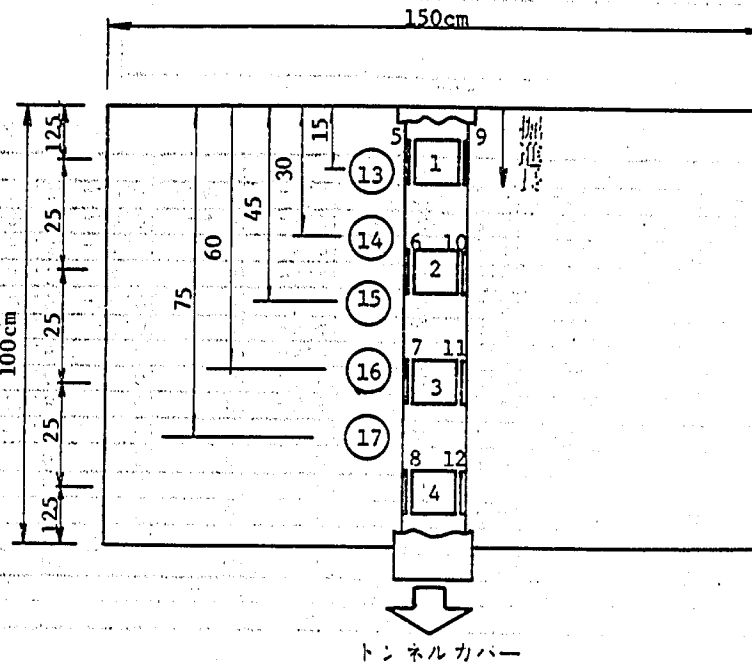


備考

No.3 (乾燥砂)

掘削面	掘削長 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (g/cm ²)						
		1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1	6.25	0	0	0	0	0	0	-0.6	0	0	0	-57.5	-58.5	-58.2	-57.5	-49.4		
2	12.50	-	0	0	0	0	0	-3.5	0	0	0	-53.1	-59.0	-58.2	-58.7	-49.4		
3	18.75	-30.4	0	0	0	0	0	-5.9	0	0	0	-52.5	-61.0	-58.8	-58.7	-47.8		
4	25.00	-40.7	0	0	0	0	0	-6.5	0	0	0	-55.3	-53.0	-59.8	-58.1	-47.3		
5	31.25	-45.4	0	0	0	0	0	-6.3	-34.8	0	0	-57.0	-49.5	-64.5	-58.1	-44.7		
6	37.50	-45.9	-	0	0	-2.5	0	-6.8	-79.0	0	0	-57.5	-53.0	-57.7	-61.8	-47.3		
7	43.75	-44.5	-23.8	0	0	-3.8	0	-6.5	-20.7	0	-0.4	-57.5	-56.0	-45.8	-63.6	-47.8		
8	50.00	-43.5	-37.5	0	0	-0.2	0	-6.2	-20.9	0	0	-58.1	-58.5	-49.9	-57.5	-49.9		
9	56.25	-43.4	-40.5	-	0	0	0	-6.4	-20.4	-10.9	0	-58.1	-59.0	-53.0	-55.5	-52.0		
10	62.50	-43.2	-41.4	-	0	-0.2	0	-6.1	-19.4	-21.4	0	-58.6	-59.5	-55.6	-57.3	-53.0		
11	68.75	-43.3	-40.2	-23.3	0.1	-0.3	0	-6.0	-18.8	-12.1	0	-58.6	-59.5	-56.2	-61.6	-41.6		
12	75.00	-43.0	-39.5	-36.2	0	-0.3	0	-5.9	-18.2	-13.1	-0.6	-58.6	-59.5	-56.7	-64.0	-43.2		
13	81.25	-42.9	-38.9	-40.3	-	-0.5	0	-6.1	-17.7	-13.9	-45.1	-58.6	-59.5	-56.2	-64.0	-46.8		
14	87.50	-42.7	-38.9	-40.9	-	-0.3	0	-5.8	-17.5	-14.4	-14.1	-58.6	-60.0	-57.2	-64.0	-48.4		
15	93.75	-42.8	-38.9	-39.9	-25.2	-0.4	0	-5.7	-17.0	-14.5	-23.8	-58.6	-60.0	-56.7	-64.6	-49.4		
16	100.00																	

計測概略図

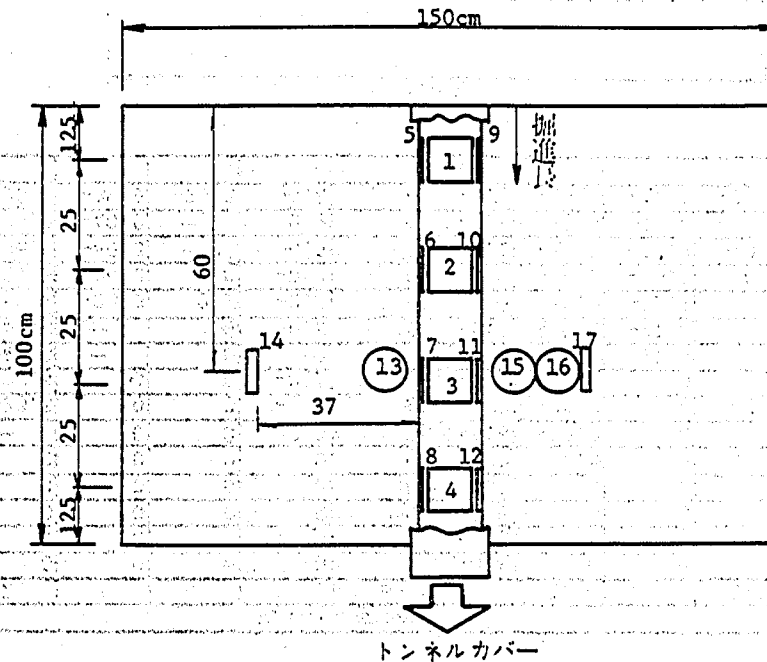


備考

No.4 (乾燥砂)

掘削No	掘削長 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (g/cm ²)						
		1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1	6.25	-0.3	0	0	0	0	0	-1.2	0	0	0	-42.1	-5.6	-51.1	-90.2	-20.2		
2	12.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3	18.75	-27.5	0	0	0	0	0	-1.0	0	0	0	-41.1	-6.1	-51.0	-97.3	-23.0		
4	25.00	-42.4	0	0	0	0	0	-2.9	0	0	0	-41.1	-6.6	-48.5	-99.0	-26.1		
5	31.25	-45.7	0	0	0	0	0	-3.0	-1.7	0	0	-40.0	-6.1	-47.0	-101.2	-29.0		
6	37.50	-44.2	-5.8	0	0	-1.4	0	-3.0	-2.1	0	0	-38.1	-5.6	-42.1	-99.0	-23.0		
7	43.75	-42.7	-25.8	0	0	-3.8	0	-3.1	-3.6	0	0	-34.0	-6.1	-39.0	-98.1	-22.1		
8	50.00	-42.2	-38.4	0	0	-5.6	0	-3.0	-5.5	0	0	-37.0	-5.6	-43.1	-97.3	-21.1		
9	56.25	-42.3	-42.6	0	0	-5.5	0	-3.3	-6.4	-0.4	0	-41.1	-5.6	-47.0	-100.1	-22.1		
10	62.50	-42.2	-41.1	-5.3	0	-5.4	0	-3.9	-7.3	-1.4	0	-42.0	-6.1	-48.0	-101.1	-21.1		
11	68.75	-42.3	-40.0	-26.0	0	-5.0	0	-3.5	-7.2	-4.8	0	-42.0	-6.6	-49.0	-101.1	-21.1		
12	75.00	-42.4	-39.3	-38.0	0	-5.6	0	-4.2	-7.3	-7.3	0	-42.0	-7.1	-49.0	-100.1	-20.2		
13	81.25	-42.3	-39.5	-41.1	0	-5.2	-0.2	-4.1	-6.9	-7.7	-1.5	-41.1	-7.7	-48.0	-101.1	-20.0		
14	87.50	-42.3	-39.5	-40.8	-4.2	-6.2	-7.8	-3.6	-6.0	-7.3	-5.0	-42.0	-7.1	-48.0	-100.1	-20.1		
15	93.75	-42.6	-39.7	-40.3	-26.0	-8.1	-5.3	-2.8	-5.7	-7.7	-2.5	-41.1	-7.1	-48.0	-101.1	-20.0		
16	100.00																	

計測概略図

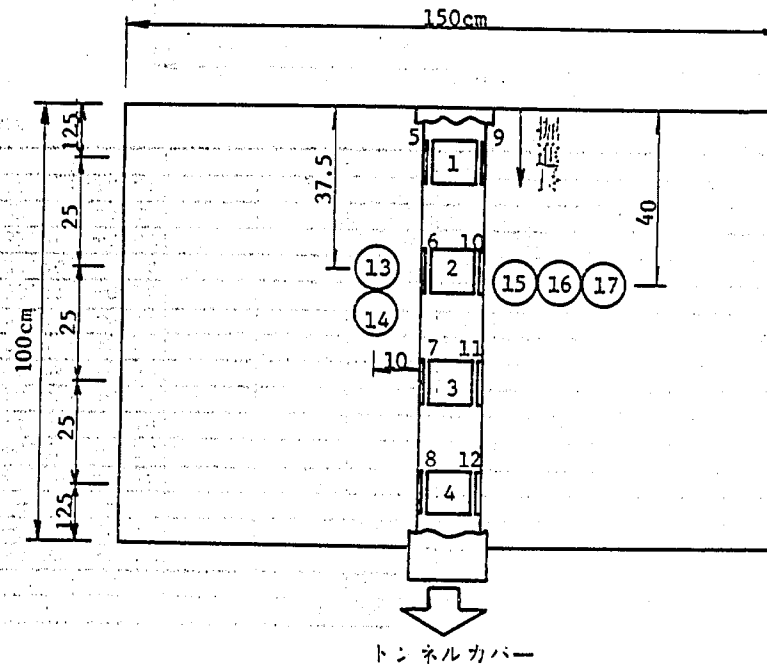


備考

№ 5 (乾燥砂)

掘削深 (cm)	掘削径 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (g/cm ²)						
		1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1	6.25	+0.1	+0.1	0	0	+0.1	+0.1	0	0	0	-0.1	-76.0	-63.1	-56.1	-67.0	-66.0		
2	12.50	-5.6	+0.2	+0.2	+0.1	+0.2	+0.2	-2.0	-43.5	+0.1	0	-82.1	-64.1	-54.1	-68.3	-66.0		
3	18.75	-24.0	+0.2	+0.1	+0.1	+0.2	+0.2	-4.3	-43.5	+0.1	0	-84.0	-67.0	-63.1	-72.0	-65.0		
4	25.00	-41.1	+0.3	+0.1	+0.2	+0.3	+0.3	-5.8	+43.6	+0.1	+0.1	-82.1	-64.3	-64.4	-72.4	-65.1		
5	31.25	-45.6	+0.3	+0.2	+0.1	+0.3	+0.3	-6.4	+43.5	+0.1	+0.1	—	—	—	—	—		
6	37.50	-44.7	-6.7	+0.3	+0.3	-0.6	+0.4	-6.4	+42.4	+0.1	+0.1	-71.0	-69.1	-57.4	-72.0	-65.1		
7	43.75	-42.9	-27.2	+0.2	+0.2	-4.6	+0.3	-6.1	+39.0	+0.1	+0.1	-68.0	-60.0	-50.0	-71.4	-65.0		
8	50.00	-42.7	-37.1	+0.2	+0.1	-4.9	+0.3	-5.7	+37.5	+0.1	0	-70.0	-57.1	-54.5	-73.5	-65.0		
9	56.25	-42.3	-42.2	+0.2	+0.1	-5.4	+0.3	-5.6	+37.5	+0.1	0	-74.1	-57.1	-58.0	-75.0	-65.0		
10	62.50	-42.3	-42.6	-5.4	+0.2	-6.0	+0.2	-5.3	+37.6	-1.2	0	-76.0	-61.3	-60.0	-76.1	-65.0		
11	68.75	-42.3	-41.2	-23.1	+0.2	-15.6	+0.3	-5.8	+37.2	-4.3	0	-76.4	-64.1	-61.0	-75.0	-64.3		
12	75.00	-42.1	-40.9	-36.2	+0.2	-5.1	+0.3	-5.3	+37.1	-6.4	0	-77.0	-65.2	-61.4	-75.0	-64.0		
13	81.25	-42.1	-40.6	-39.9	+0.2	-5.8	+0.3	-5.6	+37.4	-6.7	0	-77.0	-66.0	-62.0	-75.0	-64.0		
14	87.50	-42.1	-40.5	-41.3	-3.2	-5.1	-0.2	-5.4	+37.3	-7.1	-1.3	-77.0	-66.2	-62.0	-75.0	-64.0		
15	93.75	-42.2	-40.4	-40.3	-26.9	-4.8	-2.5	-5.3	+37.2	-7.2	-5.3	-77.0	-66.2	-61.4	-75.0	-63.2		
16	100.00																	

計測概略図

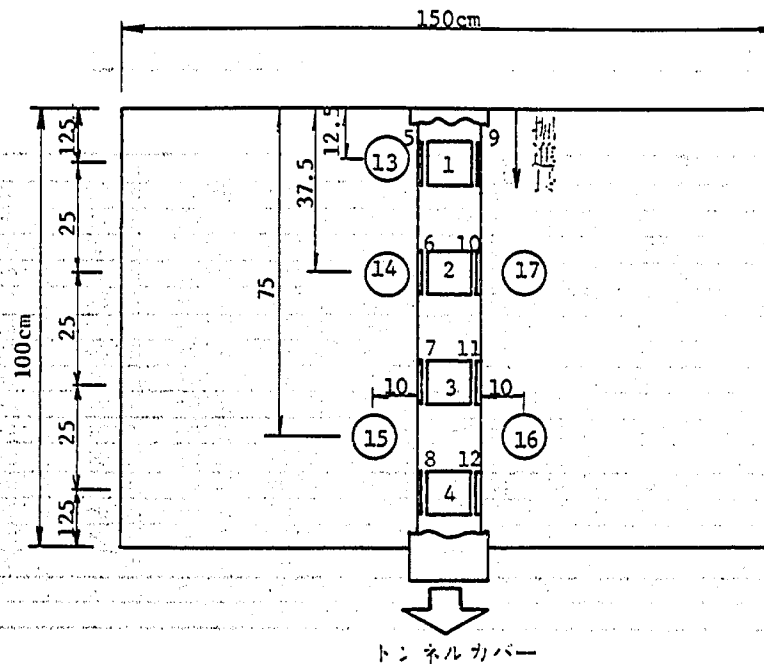


備考

No.6 (乾燥砂・落し戸)

掘削No	掘削長 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)								周辺地山応力 (g/cm ²)							
		1	2	4						13	14	15	16	17			
1	6.25	+0.23	+0.31	+0.17						-42.8	-42.2	-67.9	-61.5	-39.1			
2	12.50	-2.68	+0.25	+0.22						-43.9	-42.2	-71.1	-63.8	-38.6			
3	18.75	—	—	—						-44.4	-42.2	-72.8	-62.0	-39.1			
4	25.00	-24.97	+0.22	+0.19						-44.4	-42.2	-72.2	-59.7	-39.6			
5	31.25	-27.48	+0.25	+0.24						-44.4	-42.7	-74.4	-62.0	-39.6			
6	37.50	-29.21	-4.59	+0.19						-43.3	-44.3	-72.2	-62.6	-41.7			
7	43.75	-29.32	-14.62	+0.24						-42.8	-44.8	-75.5	-61.5	-43.3			
8	50.00	-29.04	-25.76	+0.27						-42.2	-45.3	-74.4	-61.5	-44.8			
9	56.25	-28.91	-33.11	+0.24						-42.2	-44.8	-76.6	-63.8	-45.3			
10	62.50	-28.94	-33.64	+0.31						-42.2	-43.3	-72.8	-61.5	-43.8			
11	68.75	-28.80	-33.11	+0.34						-41.7	-42.2	-74.4	-58.5	-42.7			
12	75.00	-28.84	-32.26	+0.24						-41.7	-42.2	-68.4	-53.8	-42.2			
13	81.25	-28.84	-32.26	+0.07						-41.7	-42.2	-68.4	-55.5	-42.2			
14	87.50	-28.84	-32.46	-3.47						-41.7	-41.7	-70.1	-57.9	-41.7			
15	93.75	-28.87	-32.21	-24.41						-41.2	-41.2	-72.8	-59.7	-41.2			
16	100.00																

計測概略図

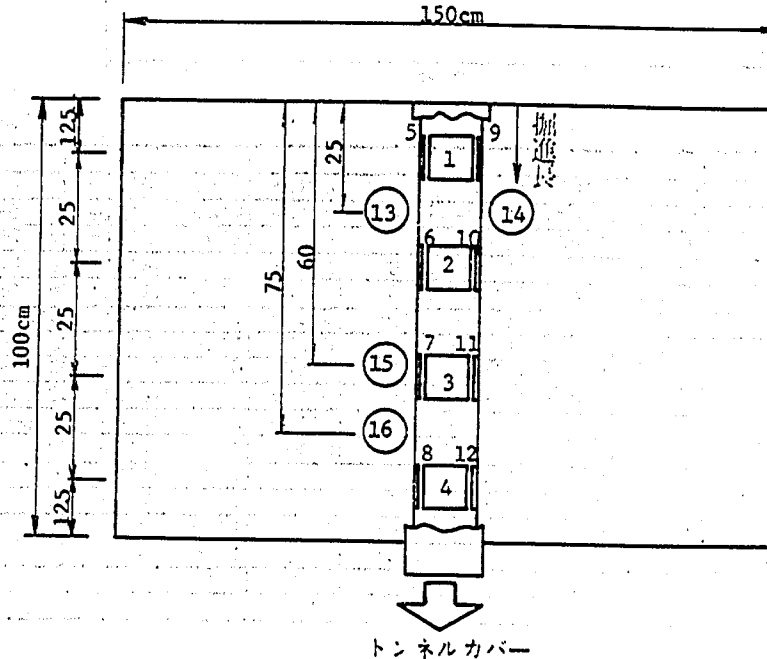


備考

№ 7 (乾燥砂・ロックボルト)

掘削深 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)												周辺地山圧力 (g/cm ²)							
	1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16						
1	6.25	-0.1	+0.0	-0.0	-0.1	+0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.2	0	-78.5	-65.6	-65.9	-62.9					
2	12.50	0	+0.1	+0.1	0	-0.1	-0.1	-0.5	-0.1	-0.1	-0.0	-84.5	-69.2	-69.3	-59.3					
3	18.75	-5.6	+0.1	+0.0	+0.0	-0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0	-91.5	-74.6	-76.8	-64.5					
4	25.00	-20.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	0	-0.1	0	-0.1	+0.0	-73.7	-70.5	-72.2	-57.7					
5	31.25	-28.4	+0.2	+0.1	+0.1	+0.1	-0.1	-0.3	+0.0	-0.1	+0.0	-63.9	-59.7	-70.5	-60.3					
6	37.50	-31.9	+0.1	+0.1	+0.1	-0.1	+0.1	-0.3	+0.0	-0.1	+0.0	-66.6	-67.9	-69.9	-57.2					
7	43.75	-31.5	-7.3	+0.2	+0.1	+0.1	-0.0	-0.3	0	-0.1	-0.1	-69.9	-63.7	-76.3	-62.9					
8	50.00	-30.8	-18.1	+0.1	+0.1	+0.0	+0.1	-0.2	-0.2	-0.1	+0.1	-71.5	-65.6	-88.4	-59.8					
9	56.25	-31.7	-23.8	+0.1	+0.1	+0.0	-0.0	-0.2	-0.3	-0.1	+0.0	-72.6	-66.5	-82.6	-64.5					
10	62.50	-31.7	-26.5	+0.1	+0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	+0.0	-73.1	-67.4	-58.9	-67.6					
11	68.75	-31.4	-26.2	-9.4	+0.1	+0.1	+0.1	-0.2	-0.3	-1.2	+0.0	-73.7	-67.8	-57.8	-66.6					
12	75.00	-31.1	-25.2	-28.9	+0.1	+0.0	0	-0.4	-0.3	-3.5	+0.0	-73.1	-67.4	-61.8	-55.6					
13	81.25	-30.6	-25.2	-40.7	+0.2	+0.1	+0.1	-0.2	-0.3	-5.3	+0.0	-73.1	-67.8	-65.9	-47.3					
14	87.50	-31.9	-24.9	-43.1	-0.0	+0.0	-0.0	-0.3	-0.3	-5.6	-0.1	-73.1	-67.8	-67.0	-49.9					
15	93.75	-31.1	-25.1	-40.9	-12.4	-0.1	+0.1	-0.3	-0.3	-5.6	-1.7									
16	100.00																			

計測概略図

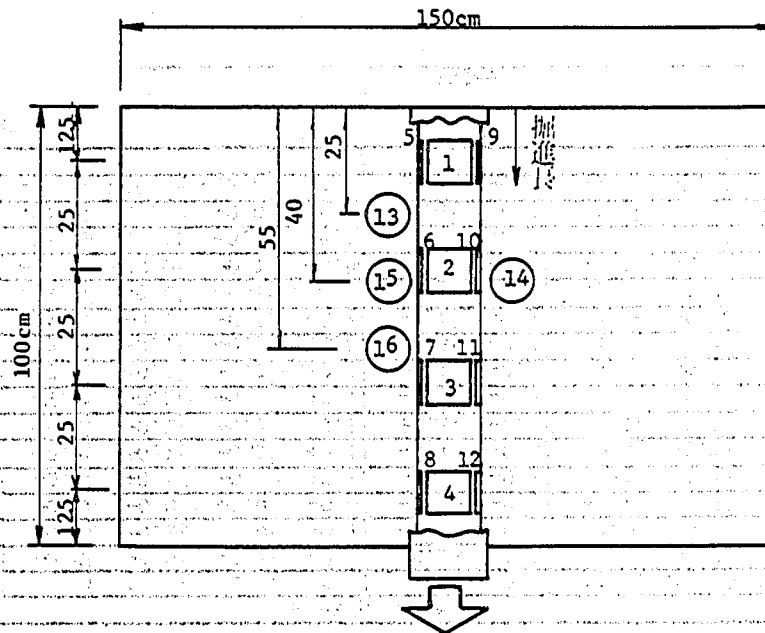


備考

No.8 (カタクリ)

掘削面	掘削長 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (g/cm ²)					
		1	2	3	4	6	8	9	10	11		13	14	15	16		
1	6.25	0	-0.1	0	+0.1	0	-0.1	0	-0.1	0		-34.0	-34.5	-38.0	-34.0		
2	12.50	+2.7	0	0	-0.1	0	-0.1	+12.7	0	0		-33.5	-35.0	-42.0	-34.0		
3	18.75	+16.9	0	+0.1	-0.1	0	-0.1	+30.0	0	0		-34.0	-35.0	-39.7	-34.0		
4	25.00	+17.8	0	+0.1	-0.1	0	0	+30.4	0	+0.1		-34.0	-35.0	-37.4	-33.5		
5	31.25	+18.0	0	+0.1	0	+4.3	-0.1	+30.1	0	+0.1		-35.1	-36.0	-33.4	-34.0		
6	37.50	+18.1	+8.2	+0.1	0	+21.7	-0.1	+30.1	+13.3	+0.1		-35.1	-36.0	-34.0	-34.0		
7	43.75	+18.1	+17.0	+0.2	0	+27.0	-0.2	+30.1	+28.1	+0.1		-34.6	-35.0	-30.5	-33.5		
8	50.00	+18.1	+17.2	+0.1	0	+27.2	-0.1	+30.1	+27.9	+0.1		-34.1	-35.0	-26.5	-33.0		
9	56.25	+18.2	+17.3	+0.3	+0.1	+27.3	-0.2	+30.1	+28.5	+0.2		-33.6	-34.0	-26.5	-31.9		
10	62.50	+18.2	+17.5	+8.2	+0.1	+27.5	-0.1	+30.1	+28.8	+14.7		-33.6	-34.5	-23.6	-31.9		
11	68.75	+18.2	+17.4	+16.8	+0.1	—	-0.1	+30.1	+29.5	+26.3		-33.6	-33.0	-23.6	-31.4		
12	75.00	+18.2	+17.3	+16.9	0	+27.7	-0.1	+30.1	+29.6	+27.2		-34.1	-33.0	-27.6	-31.9		
13	81.25	+18.3	+17.4	+16.8	+0.2	+27.8	+5.0	+30.2	+29.7	+28.6		-34.1	-33.0	-31.6	-31.9		
14	87.50	+18.2	+11.7	+17.0	+8.8	+27.8	+18.7	+30.1	+29.5	+28.5		-34.1	-33.0	-35.6	-32.4		
15	93.75	+18.2	+17.4	+17.0	+18.9	+28.2	+25.5	+30.1	+29.4	+28.9		-35.7	-33.0	-40.0	-32.4		
16	100.00																

計測概略図

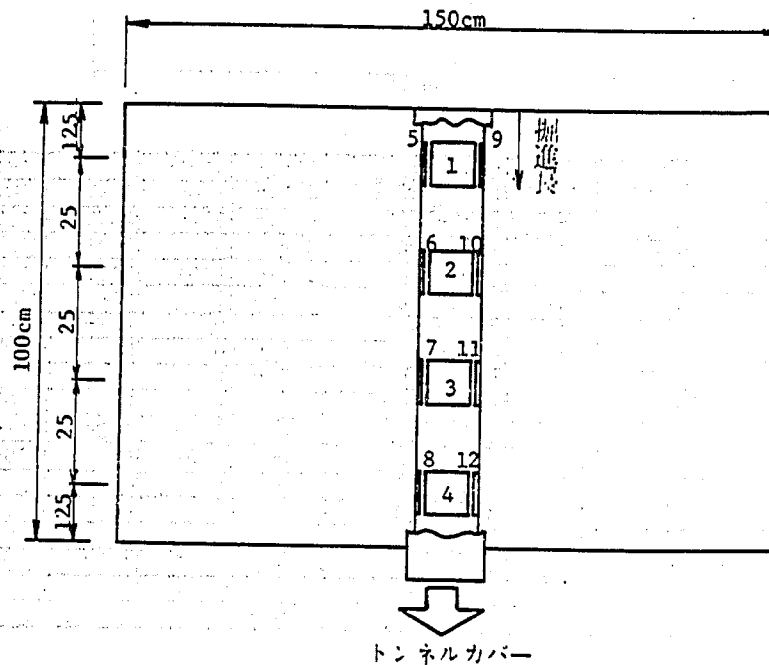


トンネルカバー

№9 (カタクリ・ロックボルト)

掘削長 (cm)	トンネル中心 (g/cm)												周辺地山応力 (g/cm)							
	1	2	3	4	6	8	9	10	11	12										
1	6.25	+0.4	0	+0.1	-0.1	+0.1	+0.1	0	+0.1	0	0									
2	12.50	-6.7	-0.4	-0.1	-0.1	-4.4	+0.1	+0.1	-10.4	0	+0.1									
3	18.75	-22.4	-0.3	-0.1	+1.2	-6.4	-0.1	-23.2	-0.2	0	0									
4	25.00	-25.7	+2.6	-0.7	+1.2	-17.2	+0.6	-22.7	-0.1	+0.1	+4.6									
5	31.25	-30.4	-0.6	-0.4	+1.2	-24.5	-1.6	-22.7	-7.7	-4.5	-4.5									
6	37.50	-23.0	-8.7	-0.1	+1.4	-22.2	-0.1	-24.5	-13.5	0	+0.2									
7	43.75	-23.0	-20.9	-0.3	+1.3	-28.5	-0.3	-24.6	-27.1	+0.1	+0.3									
8	50.00	-22.8	-21.0	-0.3	+1.4	-28.9	-0.8	-24.7	-27.0	+0.1	+0.2									
9	56.25	-22.9	-21.0	-0.5	+1.4	-19.3	-3.1	-24.8	-27.3	0	+0.2									
10	62.50	-22.8	-21.2	-10.8	+1.1	-28.6	-3.4	-24.8	-27.4	-11.3	+0.2									
11	68.75	-23.1	-21.3	-21.4	+1.3	-29.1	-5.0	-25.0	-27.3	-25.5	+0.1									
12	75.00	-23.1	-21.3	-22.1	+1.2	-28.9	-4.8	-24.9	-27.0	-26.6	+0.1									
13	81.25																			
14	87.50																			
15	93.75																			
16	100.00																			

計測概略図

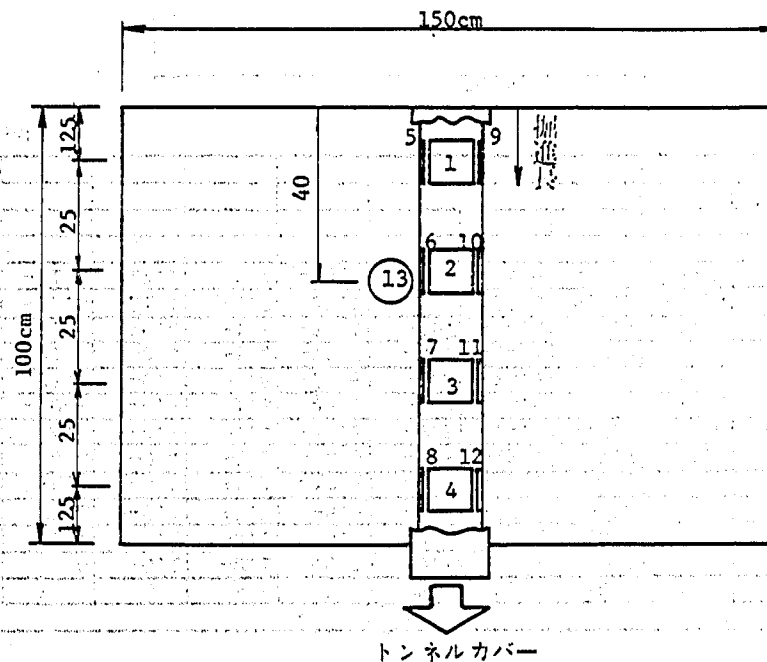


備考

No.10 (カンテン)

掘削No	掘削長 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)											周辺地山応力 (g/cm ²)						
		1	2	3	4	6	8	9	10	11	12	13							
1	6.25	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-18.4							
2	12.50	-1.6	+0.1	0	0	-0.1	+0.1	+0.1	+0.1	0	+0.1	-18.4							
3	18.75	-9.7	+0.1	0	0	0	0	-3.4	+0.1	0	+0.1	-18.4							
4	25.00	-15.8	0	0	0	-0.1	0	-11.1	0	0	0	-18.4							
5	31.25	-16.6	+0.1	0	+0.1	-0.2	0	-12.8	+0.1	0	0	-19.5							
6	37.50	-17.0	-1.6	+0.1	+0.1	-0.2	0	-13.4	+0.1	0	-0.1	-21.7							
7	43.75	-17.1	-10.5	0	+0.1	-5.5	0	-13.8	-3.1	0	0	-20.0							
8	50.00	-17.3	-15.6	0	0	-12.4	0	-14.0	-7.4	0	0	-19.5							
9	56.25	-17.4	-16.7	0	0	-15.1	0	-14.1	-8.3	0	+0.1	-20.6							
10	62.50	-17.6	-17.3	-1.2	0	-16.6	0	-14.4	-8.8	0	0	-21.7							
11	68.75	-17.6	-17.6	-8.4	0	-17.2	0	-14.5	-9.0	-1.9	-0.1	-22.2							
12	75.00	-17.7	-17.8	-13.6	+0.1	-17.7	0	-14.7	-9.3	-6.5	-0.3	-22.7							
13	81.25	-17.7	-17.8	-14.6	0	-18.2	0	-14.8	-9.5	-7.9	-0.4	-22.7							
14	87.50	-17.8	-17.9	-15.0	-1.5	-18.6	0	-14.8	-9.5	-8.3	-0.5	-23.3							
15	93.75	-18.1	-18.3	-15.5	-9.8	-18.7	-4.8	-15.3	-10.6	-10.5	-3.1	-23.3							
16	100.00	-18.1	-18.3	-15.4	-14.8	-19.1	-9.8	-15.3	-10.7	-11.0	-7.4	-23.8							

計測概略図

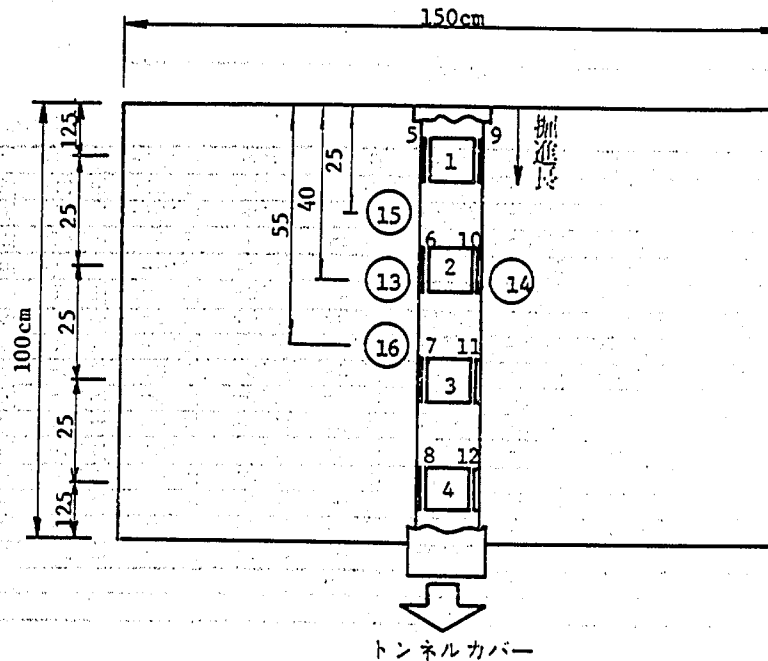


備考

No.11 (ゼラチン砂)

掘削深 (cm)	掘削長 (cm)	トンネル中心 (g/cm ³)								周辺地山圧力 (g/cm ³)							
		13	14	15	16					13	14	15	16				
1	6.25									-115.6	-85.1	-129.4	-86.0				
2	12.50									-101.2	-86.5	-134.6	-83.0				
3	18.75									-96.2	-101.6	-160.0	-86.5				
4	25.00									-105.7	-111.1	-147.9	-84.5				
5	31.25									-138.8	-96.9	-99.9	-78.0				
6	37.50									-154.3	-82.2	-93.6	-80.5				
7	43.75									-91.8	-75.2	-98.8	-97.5				
8	50.00									-81.9	-72.3	-104.0	-112.5				
9	56.25									-85.2	-71.8	-104.6	-97.0				
10	62.50									-90.2	-73.7	-107.5	-72.5				
11	68.75									-93.5	-74.7	-107.5	-76.5				
12	75.00									-94.6	-76.6	-109.8	-84.0				
13	81.25									-95.7	-76.6	-109.8	-88.0				
14	87.50									-96.2	-75.6	-108.6	-88.5				
15	93.75									-97.4	-76.6	-109.2	-89.0				
16	100.00									-97.4	-76.6	-109.2	-89.5				

計測概略図

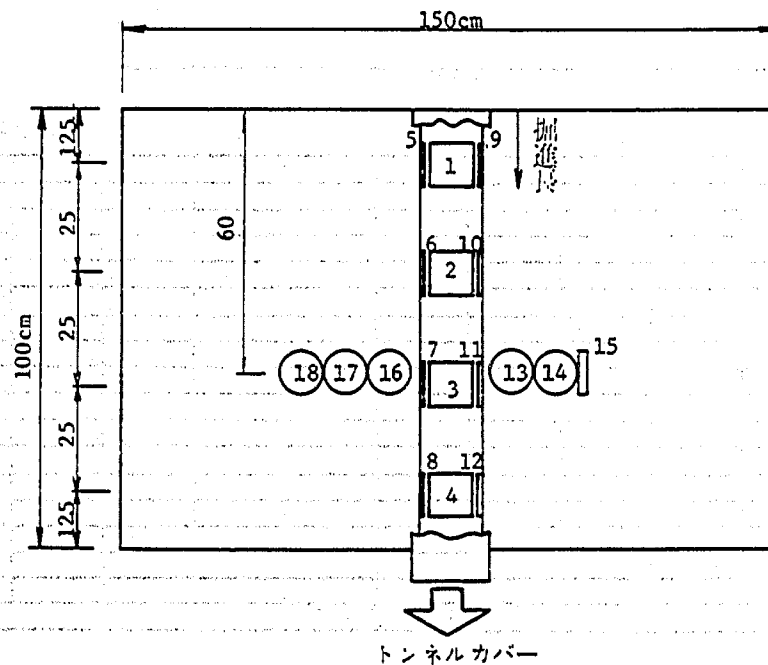


備考

No.12 (カンテン)

掘削面	掘削長 (cm)	トンネル内圧 (g/cm ²)										周辺地山圧力 (g/cm ²)					
		1	2	3	4	6	9	10	11			13	14	15	16	17	18
1	6.25	+0.4	+0.3	+0.3	+0.4	+0.4	-0.9	-0.2	+0.3			-36.9	-39.0	-28.2	-38.1	-38.0	-34.8
2	12.50	+0.2	+0.4	+0.4	+0.5	+0.5	-0.8	+0.5	+0.4			-36.4	-38.5	-27.7	-37.1	-37.6	-34.4
3	18.75	-4.6	+0.4	+0.5	+0.5	+0.5	-0.2	+0.7	+0.5			-36.9	-38.5	-27.2	-37.1	-37.6	-33.9
4	25.00	-10.3	+0.4	+0.4	+0.5	+0.5	-1.1	+0.7	+0.4			-37.3	-38.5	-27.2	-36.7	-37.1	-34.4
5	31.25	-11.9	+0.4	+0.5	+0.7	+0.5	-2.2	+0.7	+0.5			-36.9	-38.0	-26.7	-37.1	-37.1	-33.9
6	37.50	-12.2	+0.4	+0.5	+0.7	+0.5	-2.8	+0.5	+0.5			-37.3	-38.5	-26.7	-37.6	-37.1	-33.9
7	43.75	-12.3	-3.9	+0.5	+0.7	+0.5	-3.3	+0.7	+0.6			-38.3	-39.0	-26.7	-40.4	-38.0	-33.9
8	50.00	-12.4	-9.2	+0.5	+0.7	+0.5	-3.7	-0.4	+0.6			-39.2	-39.5	-26.7	-40.0	-37.6	-33.9
9	56.25	-12.4	-10.5	+0.5	+0.7	+0.4	-3.9	-1.6	+0.7			-40.2	-39.5	-26.7	-43.2	-38.0	-33.9
10	62.50	-12.5	-11.0	+0.5	+0.6	+0.4	-4.1	-2.4	+0.7			-39.2	-39.0	-26.7	-44.1	-38.5	-33.9
11	68.75	-12.6	-11.1	-2.5	+0.7	+0.5	-4.3	-2.7	+0.7			-40.7	-38.5	-26.2	-39.9	-37.6	-33.0
12	75.00	-12.6	-11.0	-8.2	+0.7	+0.4	-4.5	-3.0	+0.8			-42.1	-39.0	-26.7	-39.5	-37.1	-32.6
13	81.25	-12.7	-11.1	-9.6	+0.5	+0.5	-4.7	-3.3	+0.1			-43.0	-39.0	-27.2	-41.3	-38.0	-33.0
14	87.50	-12.7	-11.3	-10.1	+0.7	+0.4	-5.1	-3.5	-0.5			-43.5	-38.5	-26.7	-41.8	-37.6	-32.6
15	93.75	-12.9	-11.6	-10.7	-2.7	0	-5.6	-3.9	-1.2			-43.5	-39.0	-26.7	-40.4	-37.1	-32.6
16	100.00	-13.0	-11.8	-10.7	-8.0	-0.1	-5.8	-4.0	-1.5			-44.0	-39.0	-27.2	-40.9	-37.1	-33.0

計測経路図



備考

IV. 急傾斜地におけるトンネルの模型実験

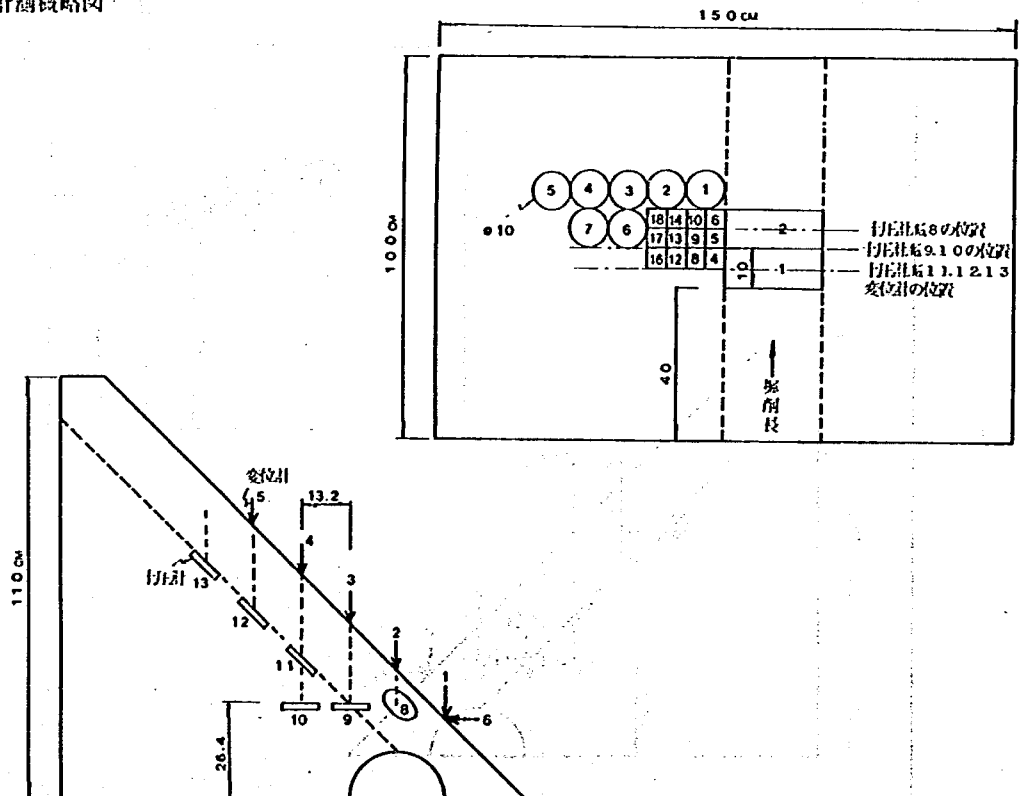
Ⅳの実験は、急傾斜でかつ地すべり領域を設定した地山にトンネルを掘進するという模型実験である。実験ケース数は4ケースである（表—1）。圧縮応力を負であらわす。

表—1 急傾斜地におけるトンネルの模型実験一覧表

実験No	年—月—日	地 山 材 料		すべり地域とトンネルとの位置
		基 盤 部	すべり地域	
Na 1	(80—12—5)	砂；石 ころ；水 (1 : 0.03 : 0.1)	基盤部と同一	すべり地域とトンネルが直交して切る。
Na 2	(80—12—19)	〃	普通砂 7%	〃
Na 3	(80—12—24)	〃	普通砂 2%	〃
Na 4	(80—12—26)	〃	普通砂 2%	すべり地域下をトンネルが直交。

掘削高 (cm)	掘削長 (cm)	トンネル圧 (g/cm ²)		周辺地山圧力 (g/cm ²)									
		1	2	4	5	6	8	9	12	14	16	17	18
1	10	-43.10	-38.65	-58.13	-110.9	-115.8	-64.50	-71.68	-74.99	-94.71	-74.98	-75.50	-115.5
2	20	-44.27	-38.78	-57.67	-109.2	-115.2	-63.75	-70.19	-72.25	-92.42	-72.12	-75.50	-112.4
3	30	-48.46	-41.33	-59.41	-110.6	-115.9	-65.75	-70.20	-72.42	-91.71	-72.65	-74.79	-111.9
4	40	-40.21	-46.82	-71.80	-125.4	-123.8	-74.58	-75.81	-77.91	-93.28	-75.02	-74.96	-112.8
5	50	-7.73	-39.95	-61.22	-156.5	-150.1	-89.40	-93.40	-83.48	-95.55	-75.76	-76.01	-111.9
6	60	-8.33	-3.46	-68.88	-167.3	-178.5	-97.61	-108.0	-90.56	-102.5	-78.55	-78.91	-113.8
7	70	-5.86	-9.27	-71.54	-166.9	-181.0	-98.47	-113.8	-96.95	-113.3	-83.29	-84.98	-121.8
8	80	-2.13	-0.18	-71.91	-168.5	-182.9	-97.49	-114.5	-99.17	-118.0	-86.84	-89.15	-128.7
9	90	-3.77	-1.64	-70.62	-168.1	-187.0	-97.18	-115.7	-100.1	-122.1	-88.61	-91.71	-133.1
10	100	-3.31	-0.75	-73.90	-171.7	-188.0	-98.88	-118.7	-101.7	-117.7	-89.48	-93.65	-137.3
掘削高 (cm)	掘削長 (cm)	周辺地山圧力 (打圧計) (g/cm ²)					地山中圧力 (g/cm ²)					すべり地域の	
		1	2	3	5	6	7	9	10			8	11
1	10	-119.7	-156.7	-190.9	-157.4	+130.8	-203.5	-101.9	-124.6			-4.18	-14.23
2	20	-116.6	-152.8	-186.1	-154.3	+128.1	-199.6	-100.4	-121.6			-0.46	-10.80
3	30	-119.7	-152.8	-187.5	-155.2	+127.2	-200.6	-103.8	-125.0			+0.93	-11.29
4	40	-126.1	-155.8	-190.5	-159.2	+129.5	-204.4	-105.3	-131.7			+0.46	-13.25
5	50	-134.7	-155.8	-189.5	-159.2	+134.1	-202.5	-79.43	-129.6			+0.93	-11.78
6	60	-153.3	-160.6	-191.4	-161.9	+133.6	-204.4	-56.53	-124.6			+2.79	-11.78
7	70	-154.2	-174.5	-197.8	-165.0	+125.8	-207.3	-48.73	-119.5			+3.25	-11.29
8	80	-157.4	-182.7	-205.6	-168.2	+123.5	-213.5	-46.78	-120.4			+0.46	-12.27
9	90	-161.5	-192.3	-211.9	-171.7	+121.2	-216.5	-44.34	-121.6			+1.86	-12.27
10	100	-163.3	-202.2	-220.7	-176.2	+107.9	-218.9	-44.34	-122.5			+3.25	-11.78
掘削高 (cm)	掘削長 (cm)	応力 (g/cm ²)		変位量 (mm)									
		12	13	1	2	3	4	5	6				
1	10	-37.54	-20.03	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00				
2	20	-35.22	-18.17	-0.17	-0.21	-0.18	-0.12	-0.11	-0.10				
3	30	-35.68	-19.56	-0.14	-0.20	-0.17	-0.14	-0.14	-0.02				
4	40	-38.46	-23.29	-0.03	-0.10	-0.11	-0.11	-0.14	+0.09				
5	50	-36.15	-28.41	+0.10	-0.20	-0.27	-0.21	-0.22	+0.24				
6	60	-35.22	-27.95	+0.26	-0.23	-0.35	-0.32	-0.30	+0.38				
7	70	-34.76	-26.55	+0.01	-0.50	-0.53	-0.42	-0.38	+0.35				
8	80	-35.68	-27.95	-0.11	-0.58	-0.55	-0.46	-0.41	+0.27				
9	90	-36.15	-28.41	-0.21	-0.71	-0.64	-0.54	-0.47	+0.24				
10	100	-35.68	-28.41	-0.32	-0.84	-0.74	-0.63	-0.56	+0.20				

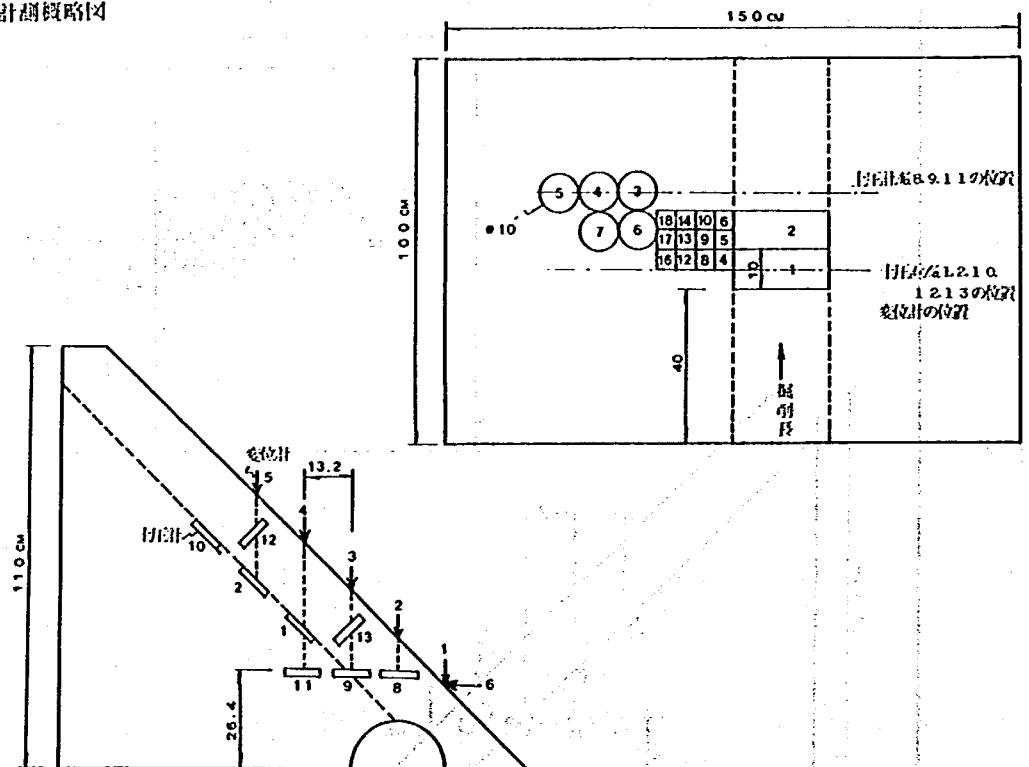
計測概略図



備考

掘削高 (cm)	掘削長 (cm)	トンネル圧 (g/cm ²)		周辺地山応力 (g/cm ²)									
		1	2	4	5	6	8	9	12	14	16	17	18
1	10	-29.30	-27.41	-42.65	-33.73	-50.75	-34.51	-28.69	-55.39	-67.04	-79.01	-82.92	-104.8
2	20	-31.23	-28.63	-43.29	-34.07	-50.26	-34.68	-29.00	-55.91	-67.73	-79.37	-83.11	-105.2
3	30	-34.43	-30.92	-43.62	-35.77	-51.57	-37.55	-30.85	-57.59	-68.78	-79.81	-83.03	-105.2
4	40	-32.01	-33.47	-51.17	-39.25	-53.94	-40.30	-32.66	-60.25	-71.34	-81.47	-84.52	-106.7
5	50	-4.03	-27.93	-51.61	-38.30	-61.28	-42.38	-35.60	-64.96	-76.19	-85.07	-88.14	-110.1
6	60	-6.53	-4.48	-48.95	-37.86	-61.60	-41.12	-34.89	-67.37	-80.71	-88.61	-92.99	-115.6
7	70	-9.14	-6.14	-52.55	-39.31	-59.17	-40.06	-33.72	-66.14	-81.96	-90.25	-95.93	-120.3
8	80	-9.00	-4.66	-53.58	-40.16	-60.70	-41.20	-34.18	-66.85	-83.38	-91.41	-97.43	-122.4
9	90	-9.97	-6.74	-52.18	-39.62	-63.48	-40.90	-33.47	-66.24	-83.57	-92.05	-98.59	-124.6
掘削高 (cm)	掘削長 (cm)	周辺地山応力 (g/cm ²)							地山中応力 (g/cm ²)			すべり地山の	
		3	5	6	7				8	9	11	1	2
1	10	-185.6	-219.3	-22.96	-180.8				-43.24	-38.50	-221.3	-24.49	-17.36
2	20	-186.6	-220.6	-25.71	-181.7				-46.95	-42.40	-223.8	-24.94	-18.23
3	30	-185.6	-220.6	-27.55	-181.2				-49.28	-45.32	-229.2	-24.49	-17.36
4	40	-188.0	-221.1	-29.38	-182.7				-50.67	-47.27	-235.5	-24.49	-16.49
5	50	-190.9	-223.3	-33.06	-184.6				-46.49	-44.83	-240.0	-24.94	-16.49
6	60	-196.3	-223.8	-40.40	-187.0				-31.15	-32.65	-239.0	-24.04	-15.62
7	70	-206.0	-227.3	-48.66	-186.1				-18.60	-19.49	-236.0	-24.04	-15.62
8	80	-210.9	-229.6	-55.55	-186.1				-14.41	-10.72	-236.0	-24.04	-15.19
9	90	-217.7	-231.8	-59.68	-191.4				-17.67	-6.82	-241.9	-23.13	-13.89
掘削高 (cm)	掘削長 (cm)	応力 (g/cm ²)				変位量 (mm)							
		10	12	13	1	2	3	4	5	6			
1	10	-26.94	-30.12	-41.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
2	20	-27.78	-30.12	-42.85	+0.04	+0.01	0.00	+0.02	0.00	+0.02			
3	30	-26.94	-27.34	-37.26	+0.04	-0.03	-0.05	-0.03	-0.05	0.00			
4	40	-26.94	-23.17	-21.89	-0.23	-0.23	-0.15	-0.12	-0.11	-0.08			
5	50	-26.94	-18.54	-11.65	-1.16	-0.81	-0.35	-0.20	-0.17	-0.32			
6	60	-26.94	-14.83	-7.92	-2.92	-1.76	-0.79	-0.31	-0.25	-0.76			
7	70	-26.94	-11.59	-7.45	-4.50	-2.85	-1.46	-0.46	-0.35	-1.07			
8	80	-27.36	-9.73	-6.06	-5.96	-4.09	-2.33	-0.60	-0.46	-1.34			
9	90	-26.10	-7.88	-6.99	-8.31	-5.91	-4.18	-0.94	-0.66	-1.93			

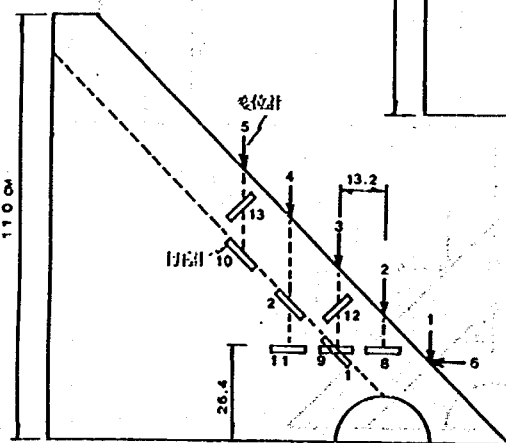
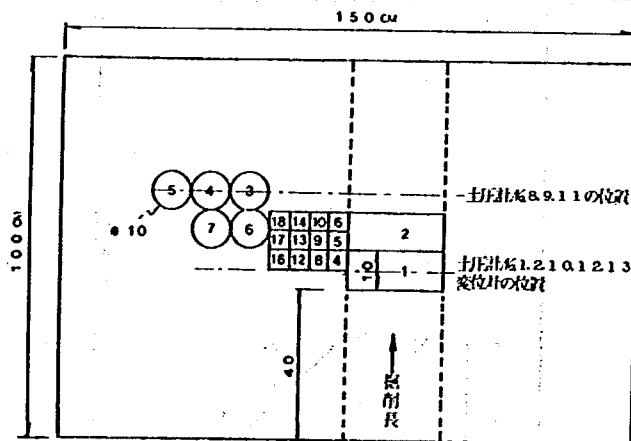
計画概略図



備考

掘削深 (cm)	掘削長 (cm)	周辺地山応力 (g/cm ²)											
		1	2	4	5	6	8	9	12	13	14	16	17
1	10	-47.71	-44.82	-59.77	-46.86	-50.95	-60.98	-48.16	-57.77	-64.57	-58.03	-47.28	-38.16
2	20	-48.72	-45.08	-60.17	-46.78	-50.98	-61.05	-48.37	-57.42	-64.57	-58.03	-47.01	-38.34
3	30	-52.16	-46.22	-60.07	-46.23	-50.89	-59.46	-47.34	-55.82	-63.28	-57.41	-46.04	-37.63
4	40	-61.71	-50.33	-66.35	-48.93	-53.20	-60.26	-47.06	-53.96	-61.74	-56.35	-44.73	-36.23
		-9.60	-60.54	-93.76	-63.61	-67.59	-75.60	-58.44	-57.02	-63.60	-56.76	-43.24	-34.93
5	50	-16.94	-63.03	-86.75	-56.59	-64.24	-76.10	-58.73	-57.03	-63.78	-57.03	-43.04	-35.01
6	60	-5.05	-32.35	-101.5	-61.91	-70.29	-86.86	-69.36	-59.04	-66.59	-59.11	-42.16	-34.14
7	70	-5.34	-12.13	-115.6	-68.08	-77.11	-102.9	-83.89	-61.58	-69.64	-60.31	-40.12	-31.52
8	80	-5.08	-10.10	-118.1	-66.23	-79.18	-103.8	-85.06	-60.52	-68.10	-58.71	-38.80	-29.86
9	90	-1.69	-5.47	-117.8	-65.45	-77.92	-103.6	-83.78	-62.03	-69.90	-60.66	-39.67	-31.17
掘削深 (cm)	掘削長 (cm)	周辺地山応力 (g/cm ²)											
		18	3	5	6	7				8	9	1	2
1	10	-54.81	-115.0	-8.52	+19.28	-36.25				-43.70	-46.29	-17.23	-12.15
2	20	-54.89	-114.5	-8.92	+28.01	-36.73				-46.03	-47.76	-16.33	-11.28
3	30	-54.45	-113.0	-8.52	+22.04	-35.76				-47.88	-48.73	-16.33	-11.28
4	40	-53.83	-112.0	-8.52	+22.96	-36.25				-52.53	-52.63	-16.33	-11.28
		-52.32	-107.2	-8.97	+24.79	-36.73				-55.32	-56.53	-13.61	-11.28
5	50	-51.97	-105.7	+8.07	+21.58	-35.28				-52.53	-56.04	-10.88	-11.28
6	60	-50.73	-104.2	-8.52	+25.71	-36.25				-58.58	-54.58	-10.88	-11.28
7	70	-47.46	-100.3	-9.25	+21.52	-34.43				-37.21	-25.10	-8.16	-11.28
8	80	-44.71	-98.88	-8.52	+24.79	-36.25				-27.89	-13.64	-8.16	-11.28
9	90	-46.31	-96.93	-8.52	+23.87	-36.25				-28.36	-1.95	-8.16	-11.28
掘削深 (cm)	掘削長 (cm)	応力 (g/cm ²)						変位量 (mm)					
		10	12	13	1	2	3	4	5	6			
1	10	-9.26	-15.29	-10.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
2	20	-9.26	-14.37	-10.25	+0.03	0.00	-0.02	-0.03	-0.01	+0.02			
3	30	-9.26	-13.44	-9.32	+0.01	-0.03	-0.03	-0.05	-0.04	-0.01			
4	40	-9.26	-11.59	-9.32	-0.07	0.00	-0.02	-0.05	-0.03	0.00			
		-8.42	-6.02	-8.38	-7.04	-27.37	+0.06	+0.02	-0.01	-3.53			
5	50	-8.42	-5.10	-7.45	-7.10	-27.43	+0.01	-0.05	-0.04	-3.53			
6	60	-8.42	-5.10	-7.45	-7.15	-27.43	-0.03	-0.03	-0.03	-3.53			
7	70	-8.42	-1.39	-7.45	-7.12	-27.40	-0.10	-0.02	-0.03	-3.50			
8	80	-8.42	-1.39	-6.52	-7.13	-27.47	-20.24	-0.02	-0.03	-3.52			
9	90	-8.42	-0.46	-6.52	-7.06	-27.42	-20.39	+0.02	-0.01	-3.48			

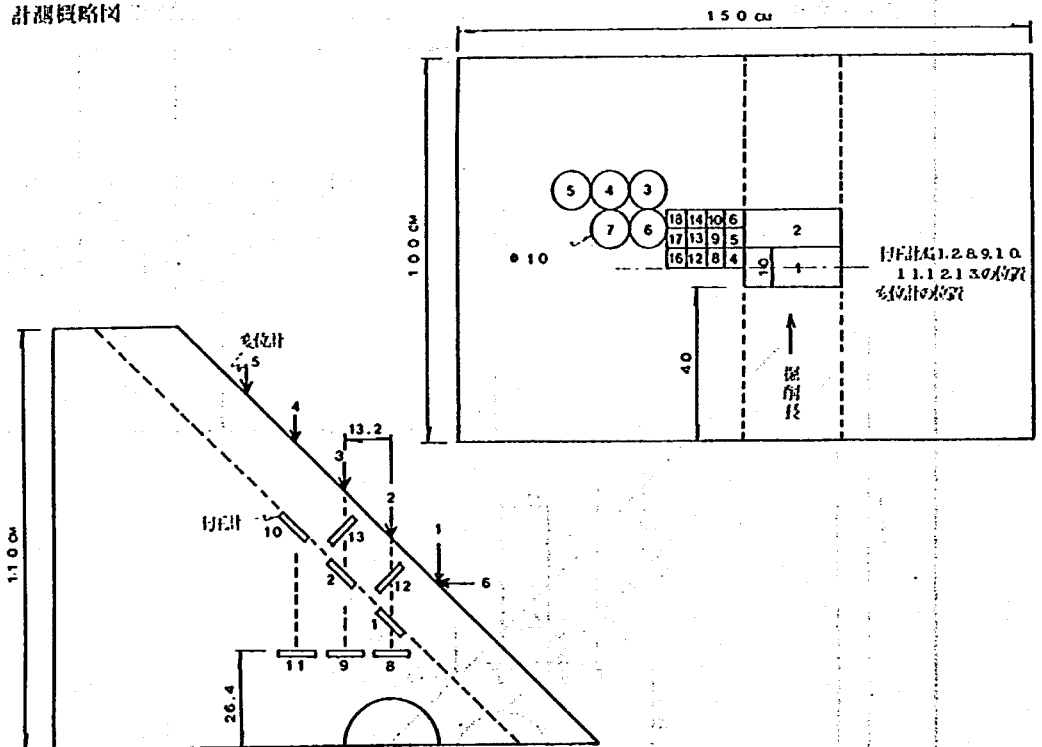
計劃概略圖



備考

掘削% (cm)	掘削長 (cm)	トンネル内 (g/cm)		周辺地山応力 (g/cm)									
		1	2	4	5	6	8	9	12	13	14	16	17
1	10	-48.62	-53.43	-65.18	-54.29	-71.77	-49.49	-49.05	-84.05	-71.43	-68.01	-43.09	-21.64
2	20	-49.40	-53.64	-65.57	-54.58	-71.87	-50.11	-49.37	-84.13	-71.69	-68.18	-42.36	-21.02
3	30	-53.22	-54.76	-66.76	-54.33	-72.22	-49.49	-48.31	-81.02	-70.06	-66.77	-40.96	-20.13
4	40	-59.34	-60.15	-74.31	-57.16	-75.41	-50.88	-48.31	-76.76	-67.24	-64.65	-38.57	-18.44
5	50	-11.50	-68.84	-103.1	-71.55	-91.55	-59.60	-54.82	-74.52	-65.26	-62.09	-36.37	-16.50
6	60	-7.42	-15.51	-137.8	-97.51	-121.8	-72.78	-68.54	-76.14	-65.31	-59.49	-33.65	-13.25
7	70	-7.96	-11.06	-152.4	-117.8	-146.0	-82.04	-79.74	-78.49	-67.34	-59.97	-32.42	-12.02
8	80	-9.74	-9.35	-161.5	-128.4	-166.3	-84.65	-83.03	-78.39	-67.16	-59.94	-31.10	-10.51
9	90	-6.53	-9.21	-163.7	-134.7	-176.6	-86.72	-85.19	-77.94	-66.47	-59.40	-30.13	-9.10
掘削% (cm)	掘削長 (cm)	周辺地山応力 (計測) (g/cm)							地山中応力 (g/cm)			すべり地域の	
		18	3	5	6	7			8	9	11	1	2
1	10	-43.63	-136.4	-99.54	-132.7	-113.6			-70.20	-105.3	-102.1	-21.31	-16.93
2	20	-43.09	-134.4	-99.54	+1.84	-112.1			-72.06	-107.7	-102.1	-20.86	-16.93
3	30	-42.12	-134.4	-99.54	+134.5	-111.6			-72.99	-107.7	-103.5	-19.95	-16.49
4	40	-40.61	-132.0	-98.20	-126.7	-110.2			-72.06	-103.3	-103.5	-19.95	-16.49
5	50	-98.92	-131.0	-98.65	-125.3	-110.7			-59.97	-84.30	-101.1	-19.95	-18.23
6	60	-35.80	-129.6	-99.54	+126.7	-111.2			-43.24	-65.79	-99.61	-19.05	-17.79
7	70	-33.75	-127.6	-100.9	-131.3	-111.2			-35.80	-56.53	-99.61	-18.59	-17.79
8	80	-32.06	-125.7	-100.9	+130.4	-110.7			-33.01	-54.09	-101.1	-17.69	-17.36
9	90	-30.46	-122.8	-100.4	+128.6	-109.7			-32.08	-54.09	-103.5	-17.69	-17.36
掘削% (cm)	掘削長 (cm)	応力 (g/cm)			変位量 (mm)								
		10	12	13	1	2	3	4	5	6			
1	10	-17.68	-34.29	-22.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
2	20	-17.26	-33.36	-23.29	-0.04	-0.09	-0.09	-0.06	-0.04	-0.03			
3	30	-17.68	-33.36	-21.43	-0.06	-0.13	-0.09	-0.08	-0.05	-0.45			
4	40	-17.26	-33.36	-21.43	-0.09	-0.18	-0.15	-0.13	-0.10	-0.43			
5	50	-17.26	-32.90	-21.43	-0.10	-0.21	-0.15	-0.13	-0.10	-0.27			
6	60	-17.26	-32.44	-21.43	-0.06	-0.14	-0.12	-0.11	-0.08	-0.16			
7	70	-16.84	-31.51	-21.43	-0.06	-0.19	-0.14	-0.11	-0.08	-0.27			
8	80	-16.84	-29.66	-20.50	-0.06	-0.21	-0.14	-0.13	-0.10	-0.27			
9	90	-16.84	-29.66	-20.50	-0.06	-0.22	-0.15	-0.14	-0.11	-0.35			

計測概略図



備考

V. 土かぶりの大きいトンネルの 模型実験（その1）

Vの実験は、寸法を大型化し地山を載荷した状況下でトンネル掘進実験を行った。実験ケース数は2ケースである。ここには以下の試験結果を記す。

実験地山材料試験結果

1 軸圧縮試験

3 軸圧縮試験

クリープ試験

土の分類

液性限界、塑性限界

粒度試験

比重試験

模型実験結果

各実験ケース（粘性土実験と砂質土実験）ごとに以下の項目を記す。

基準応力

トンネル周辺応力

トンネル地圧

地中変位

地中変位の経時変化

地中変位速度

載荷板変位の経時変化

粘性土実験ではトンネル周辺応力の補正を行った（V, 4, 2, (3)）。周辺地山応力は補正後の値をもとに初期値との比をとった。砂質土についても同様の処理をした。

トンネル周辺応力（粘性土実験、補正後）

トンネル周辺応力（初期値との比）

CASE—1 (粘性土) 一軸圧縮試験結果

試 料	供試体 No	一軸圧縮強度 q_u (kg/cm ²)	含 水 比 w (%)	湿潤単位 体 積 重 量 γ_t (g/cm ³)	乾 燥 密 度 γ_d (g/cm ³)	間 隙 比 e	飽 和 度 S_r (%)	変形係数 E_{50} (kg/cm ²)
粘 性 土 試 験 前	1	0.231	29.08	1.91	1.48	0.83	95.0	10.5
	2	0.165	29.85	1.83	1.41	0.92	87.8	6.6
	3	0.236	29.73	1.88	1.45	0.87	92.8	5.1
	平 均	0.211	29.55	1.87	1.45	0.87	91.9	7.4
粘 性 土 試 験 後	1	0.263	29.00	1.88	1.46	0.86	91.6	7.7
	2	0.168	29.33	1.84	1.42	0.90	88.0	2.7
	3	0.206	28.97	1.87	1.45	0.87	90.5	6.4
	平 均	0.212	29.10	1.87	1.45	0.88	90.0	5.6
粘 性 土 平 均		0.212	29.33	1.86	1.45	0.88	91.0	6.5

・土粒子の比重 $G_s = 2.706$

CASE—2 (砂質土) 一軸圧縮試験結果

試 料	供試体 No	一軸圧縮強度 q_u (kg/cm ²)	含 水 比 w (%)	湿潤単位 体 積 重 量 γ_t (g/cm ³)	乾 燥 密 度 γ_d (g/cm ³)	間 隙 比 e	飽 和 度 S_r (%)	変形係数 E_{50} (kg/cm ²)
砂 質 土 試 験 前	1	0.201	9.66	1.96	1.79	0.52	50.3	20.1
	2	0.211	9.64	1.87	1.71	0.59	44.2	35.2
	3	0.443	9.63	1.89	1.72	0.57	45.7	84.0
	4	0.287	9.32	1.87	1.71	0.58	43.3	89.7
	平 均	0.286	9.56	1.90	1.73	0.57	45.9	57.3
砂 質 土 試 験 後	1	0.258	9.86	1.92	1.75	0.55	48.6	13.3
	2	0.305	9.75	1.79	1.63	0.66	40.0	36.3
	3	0.211	9.59	1.84	1.68	0.61	42.4	65.9
	平 均	0.258	9.73	1.85	1.72	0.61	43.7	38.5
砂 質 土 平 均		0.274	9.64	1.88	1.71	0.58	44.9	49.2

・土粒子の比重 $G_s = 2.708$

	土 の 一 軸 圧 縮 試 験	報告用紙
--	------------------------	------

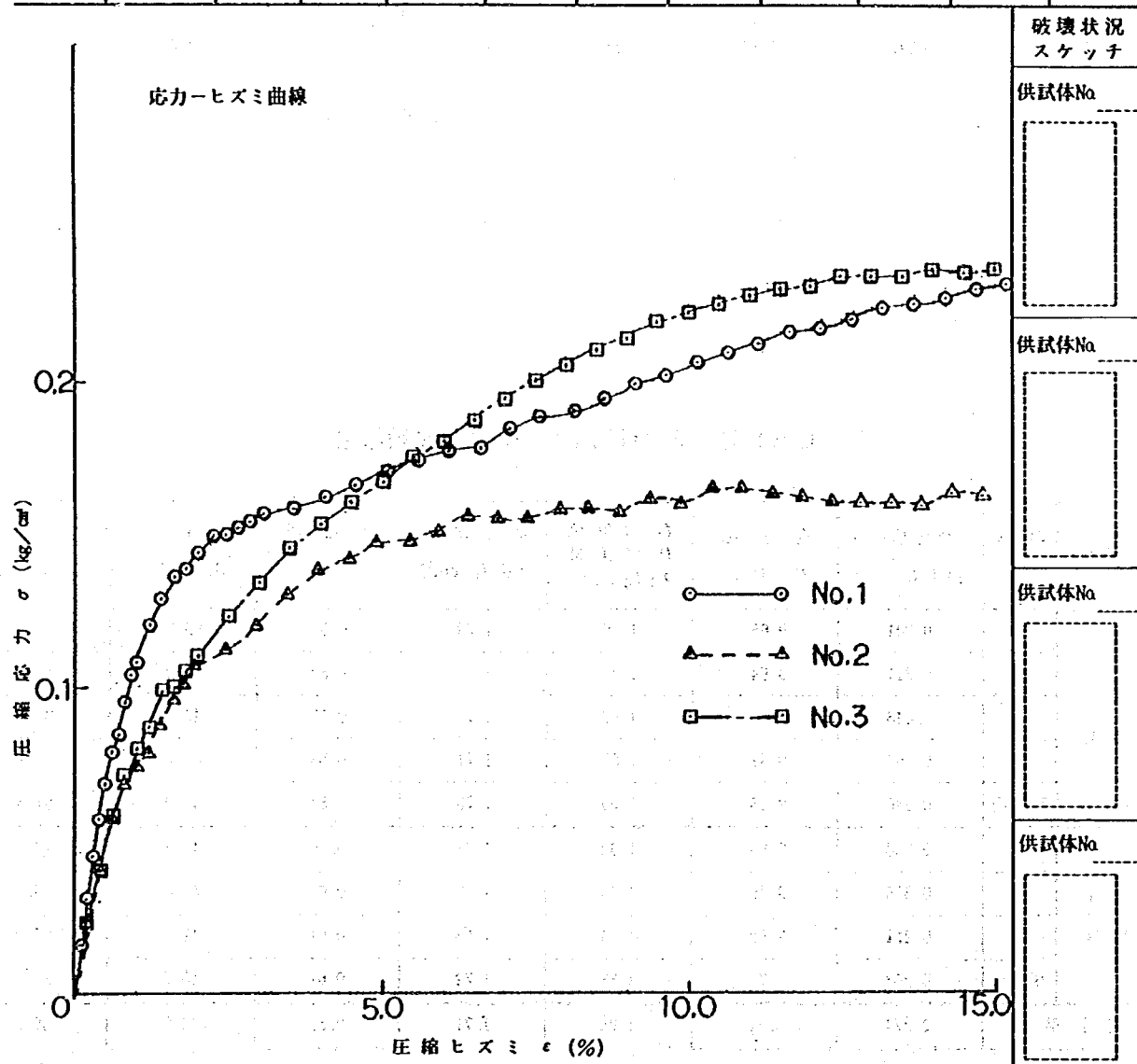
調査名・調査地点 粘性土・試験前 試験年月日 55年 10月 22日

試料番号・深さ: No (m ~ m) 試験者

土質名称 土粒子の比重 G_s 2.706 塑性指数 I_p

圧縮速さ 1.0 %/分 力計番号: No 力計容量 kg

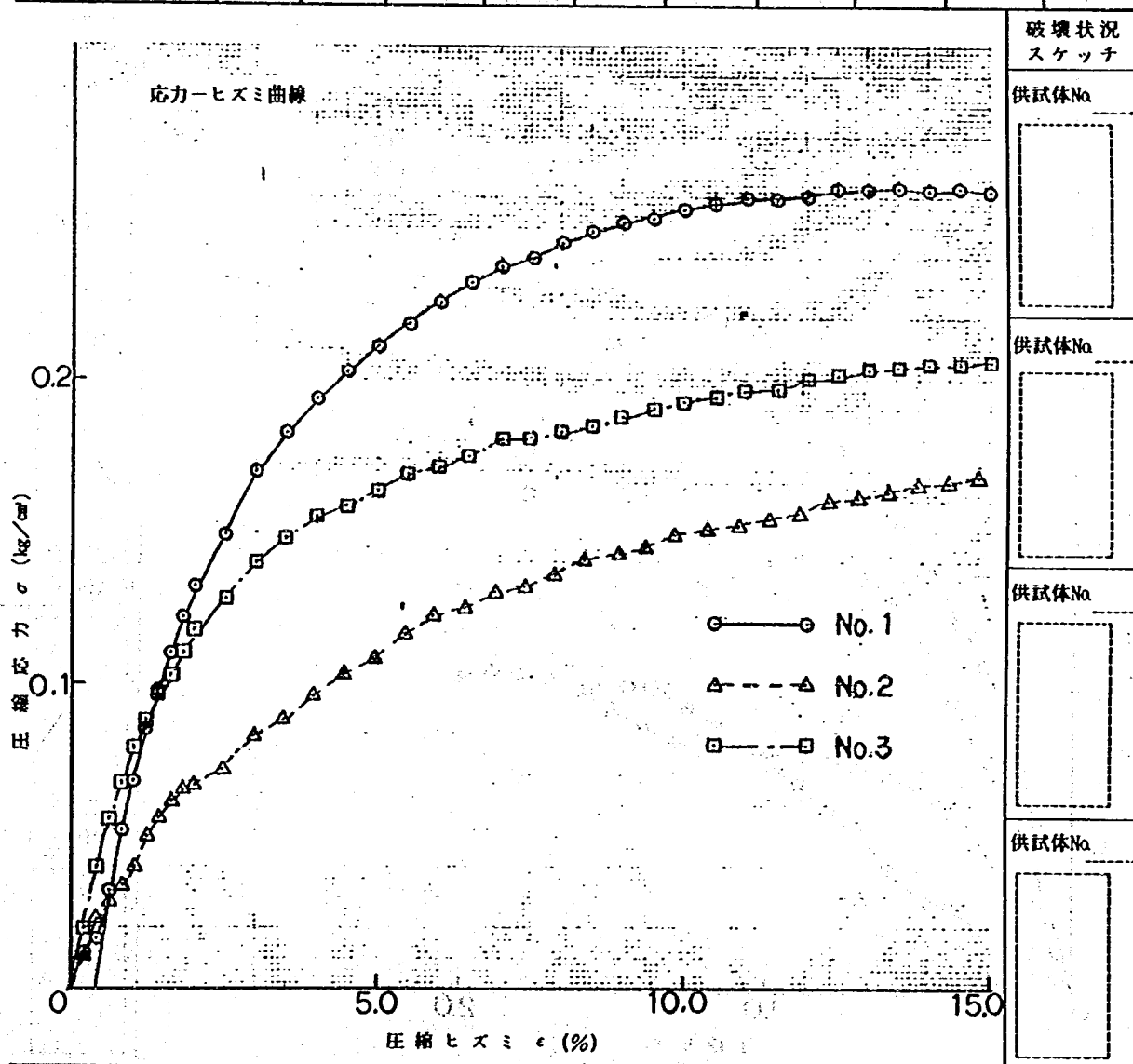
供試体 No	試料の 状態	供試体寸法(cm)		単位体積重量 γ (g/cm ³)	含水比 w (%)	間ゲキ比 e	飽和度 S_r (%)	圧縮強さ q_u (kg/cm ²)	破壊時のヒズミ(%)	変形係数 E_{50} (kg/cm ²)	鋭敏比 S_t
		高さ	直径								
1	不攪乱	9.861	5.034	1.91	29.08	0.83	95.0	0.231	15.21	10.5	
2	〃	10.157	5.070	1.83	29.85	0.92	87.8	0.165	10.34	6.6	
3	〃	9.985	5.047	1.88	29.73	0.87	92.8	0.236	15.02	5.1	



備考:

土 の 一 軸 圧 縮 試 験				報 告 用 紙	
調査名・調査地点		粘性土・試験後		試験年月日 55年 10月 23日	
試料番号・深さ: Na		(m ~ m)		試験者	
土質名称		土粒子の比重 G_s		塑性指数 I_p	
圧縮速さ 1.0 %/分		力計番号: Na		力計容量 kg	
2.706					

供試体 No	試料の 状 態	供試体寸法(cm)		単位体積重量 γ (g/cm ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	圧縮強さ q_u (kg/cm ²)	破壊時のヒズミ ϵ (%)	変形係数 E_{50} (kg/cm ²)	鋭敏比 S_t
		高 さ	直 径								
1	不攪乱	10.007	5.063	1.88	29.00	0.86	91.6	0.263	12.09	7.7	
2	〃	10.152	5.088	1.84	29.33	0.90	88.0	0.168	14.78	2.7	
3	〃	10.027	5.092	1.87	28.97	0.87	90.5	0.206	14.96	6.4	



備考:

	土 の 一 軸 圧 縮 試 験	報告用紙
--	------------------------	------

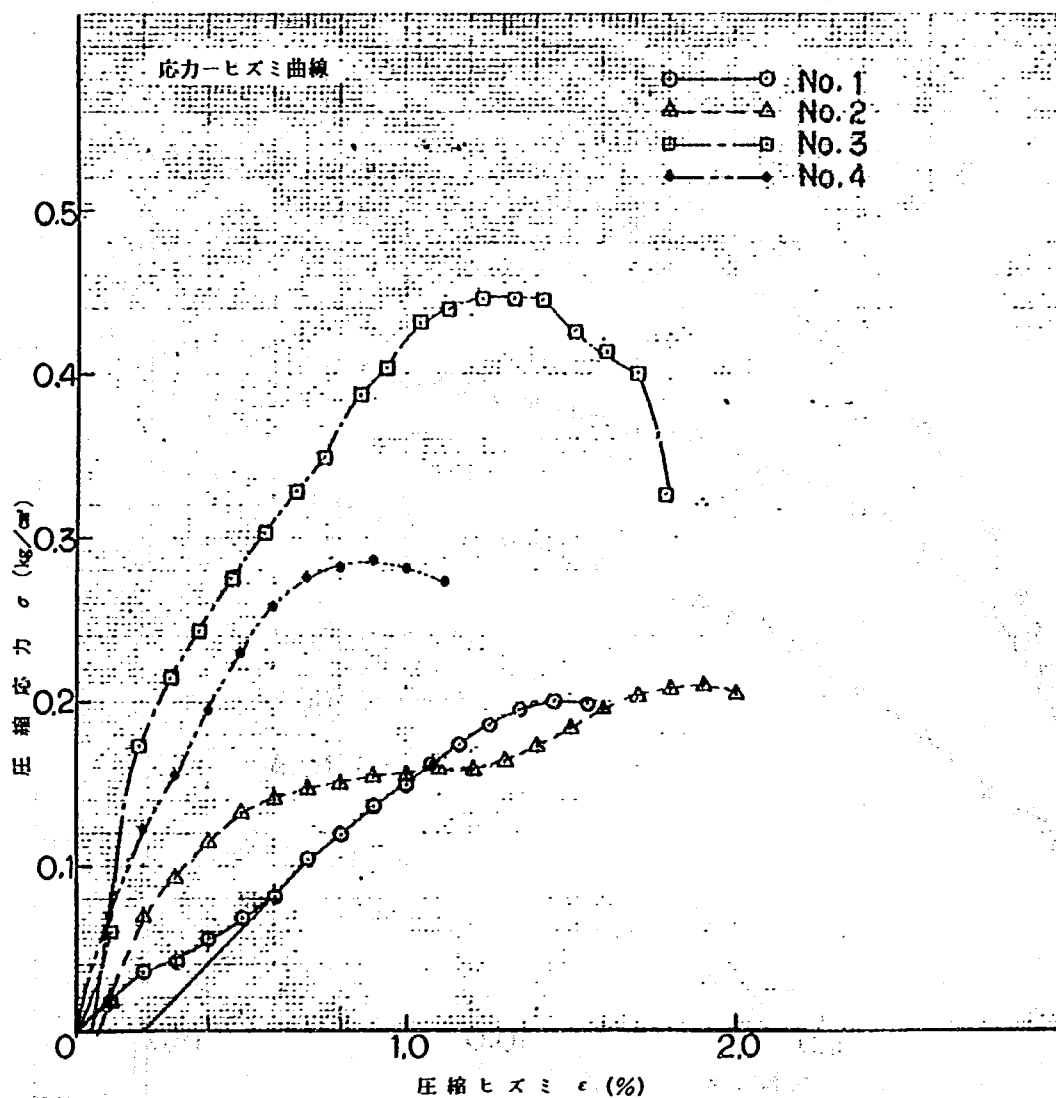
調査名・調査地点 砂質土・試験前 試験年月日 55年 11月 1日

試料番号・深さ: No (m ~ m) 試験者

土質名称 土粒子の比重 G_s 2.708 塑性指数 I_p

圧縮速さ 1.0 %/分 力計番号: No 力計容量 kg

供試体 No	試料の 状態	供試体寸法(cm)		単位体積重量 γ (g/cm ³)	含水比 w (%)	間ゲキ比 e	飽和度 S_r (%)	圧縮強さ q_u (kg/cm ²)	破壊時のヒズミ ϵ (%)	変形係数 E_{50} (kg/cm ²)	鋭敏比 S_t
1	不攪乱	10.337	4.957	1.96	9.66	0.52	50.3	0.201	1.25	20.1	
2	"	9.890	5.245	1.87	9.64	0.59	44.2	0.211	1.32	35.2	
3	"	10.590	5.196	1.89	9.63	0.57	45.7	0.443	1.19	84.0	
4	"	9.893	5.048	1.87	9.32	0.58	43.3	0.287	0.91	89.7	

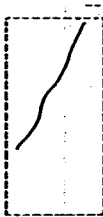


破壊状況
スケッチ

供試体No. 1



供試体No. 2



供試体No. 3



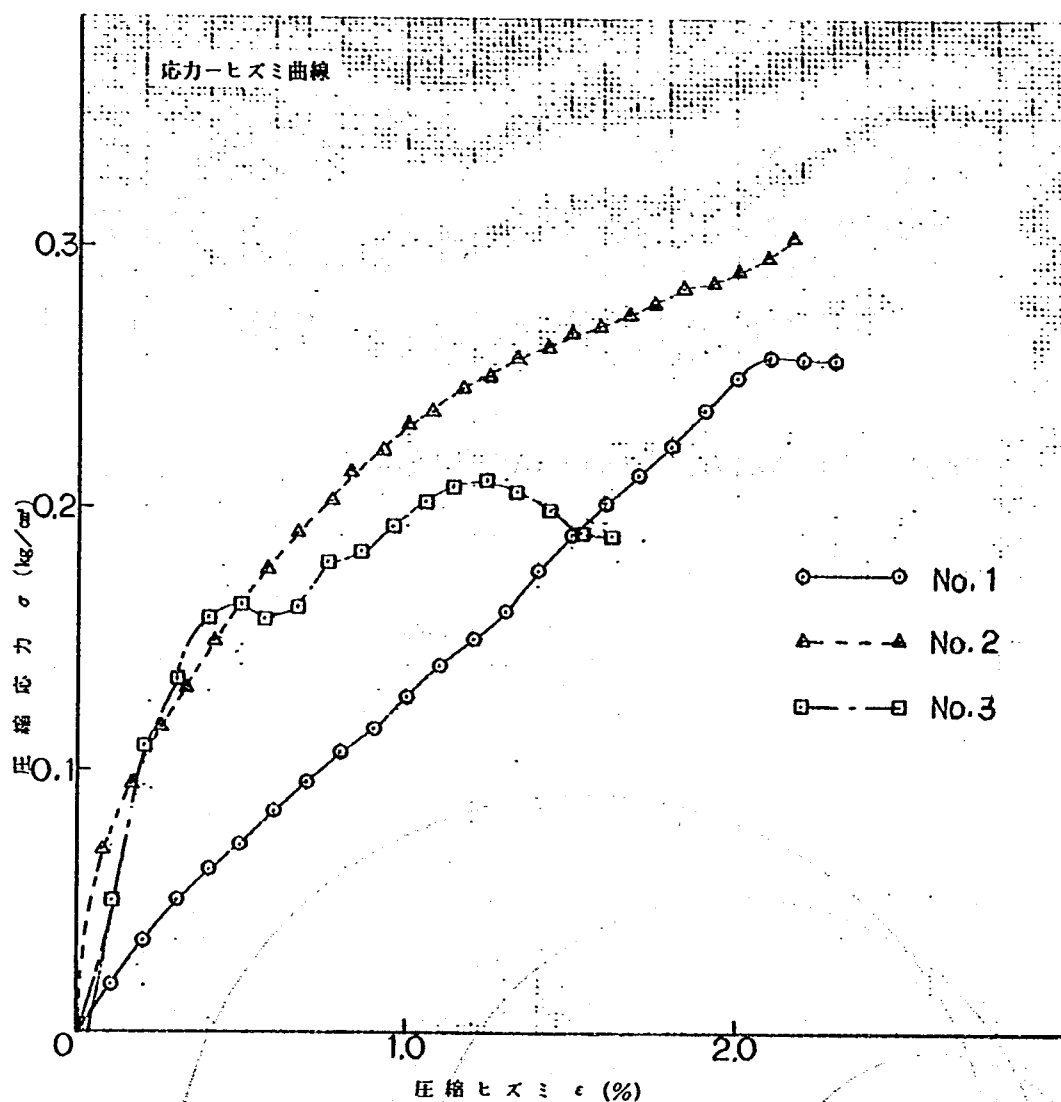
供試体No. 4



備考:

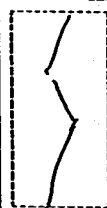
土 の 一 軸 圧 縮 試 験				報 告 用 紙	
調査名・調査地点		砂質土・試験後		試験年月日 55年 11月 2日	
試料番号・深さ: Na		(m ~ m)		試験者	
土質名称		土粒子の比重 G_s 2.708		塑性指数 I_p	
圧縮速さ 1.0 %/分		力計番号: Na		力計容量 kg	

供試体 No	試料の 状態	供試体寸法(cm)		単位体積重量 γ (g/cm ³)	含水比 w (%)	間ゲキ比 e	飽和度 S_r (%)	圧縮強さ q_u (kg/cm ²)	破壊時のヒズミ(%)	変形係数 E_{50} (kg/cm ²)	鋭敏比 S_t
1	不攪乱	9.733	5.023	1.92	9.86	0.55	48.6	0.258	2.16	13.3	
2	"	11.988	5.169	1.79	9.75	0.66	40.0	0.305	2.17	36.3	
3	"	10.500	5.717	1.84	9.59	0.61	42.4	0.211	1.20	65.9	

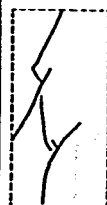


破壊状況
スケッチ

供試体No. 1



供試体No. 2



供試体No. 3



供試体No.



備考:

DOKEN TRI-AXIAL TEST NENSEIDO

CASE-1

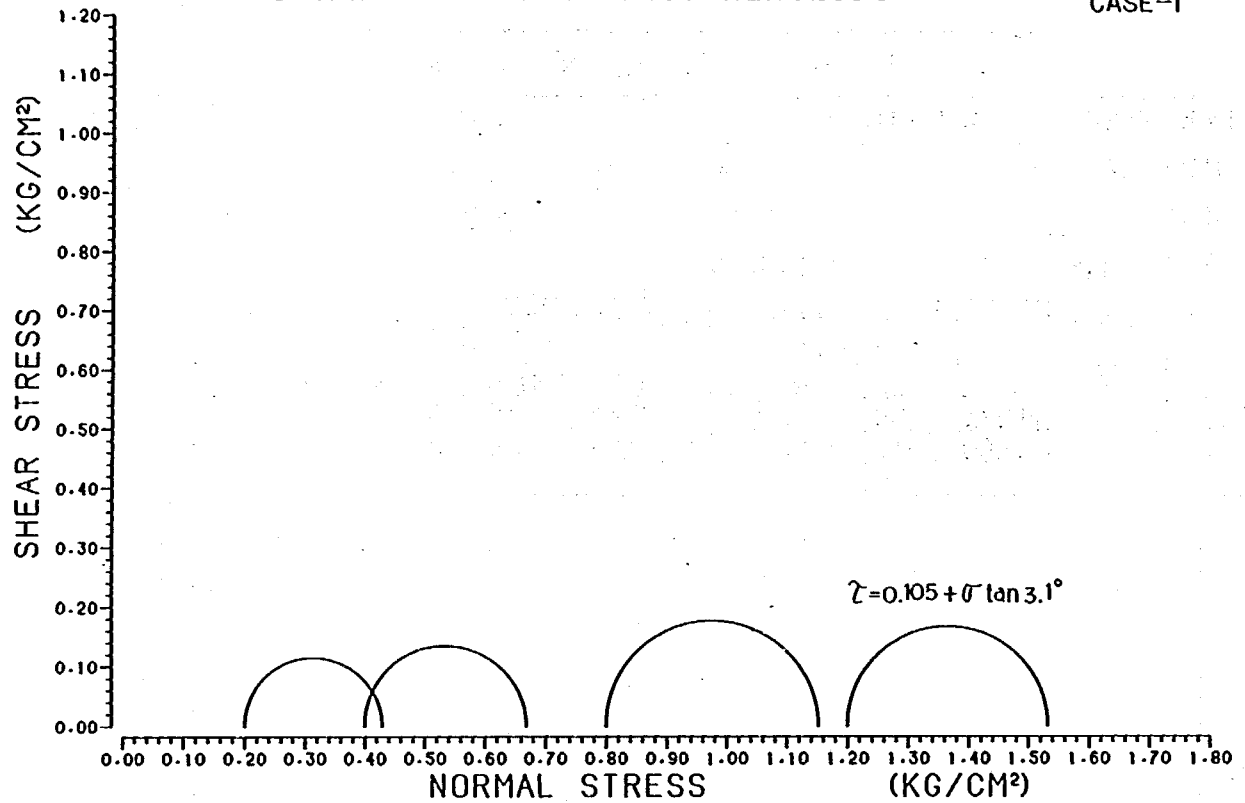


FIG. MOHR'S DIAGRAM CASE NO. 1

DOKEN TRI-AXIAL TEST SASHITSUDO

CASE-2

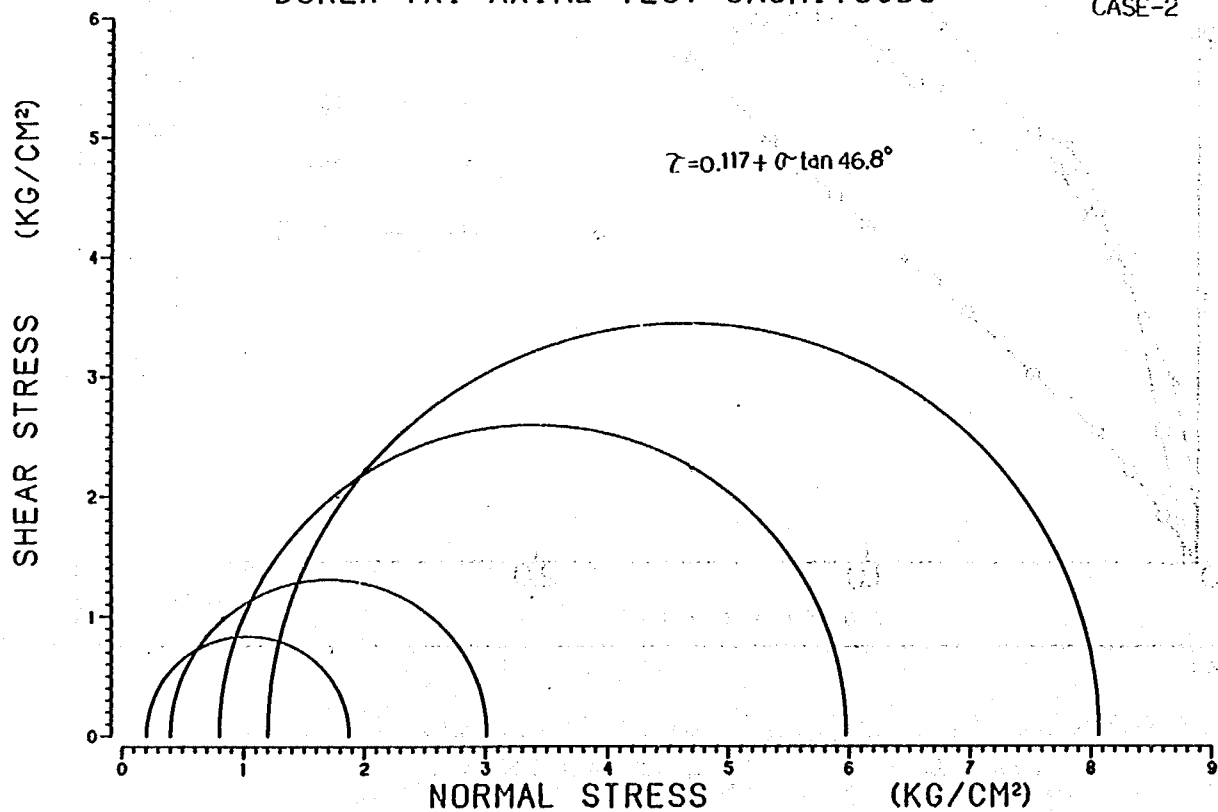


FIG. MOHR'S DIAGRAM CASE NO. 2

CASE NUMBER 1

SPECIMEN NUMBER

□-1 ○-2 ▲-3 +-4

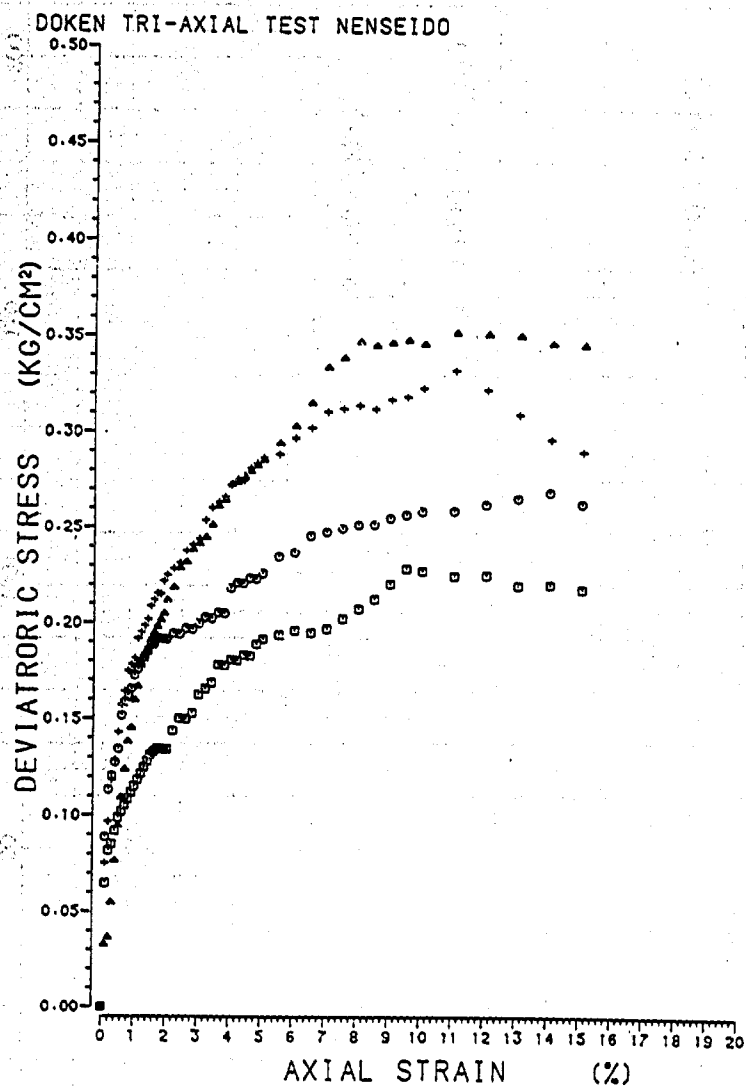


FIG. STRESS-STRAIN DIAGRAM

CASE NUMBER 2

SPECIMEN NUMBER

□-1 ○-2 ▲-3 +-4

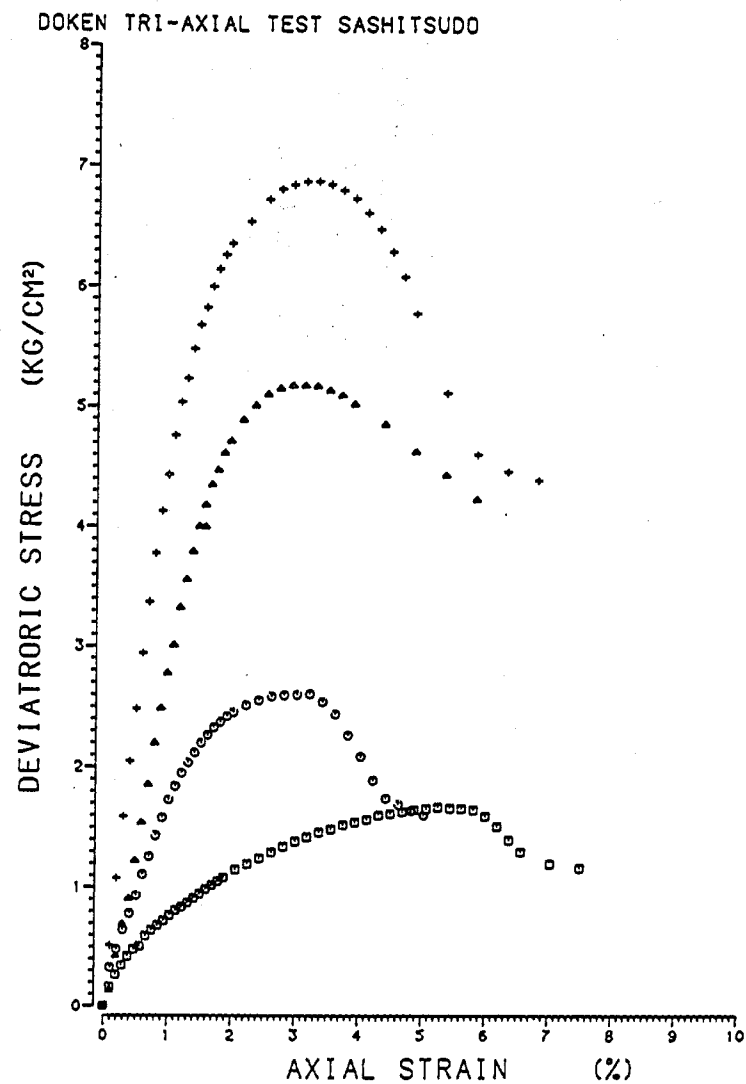
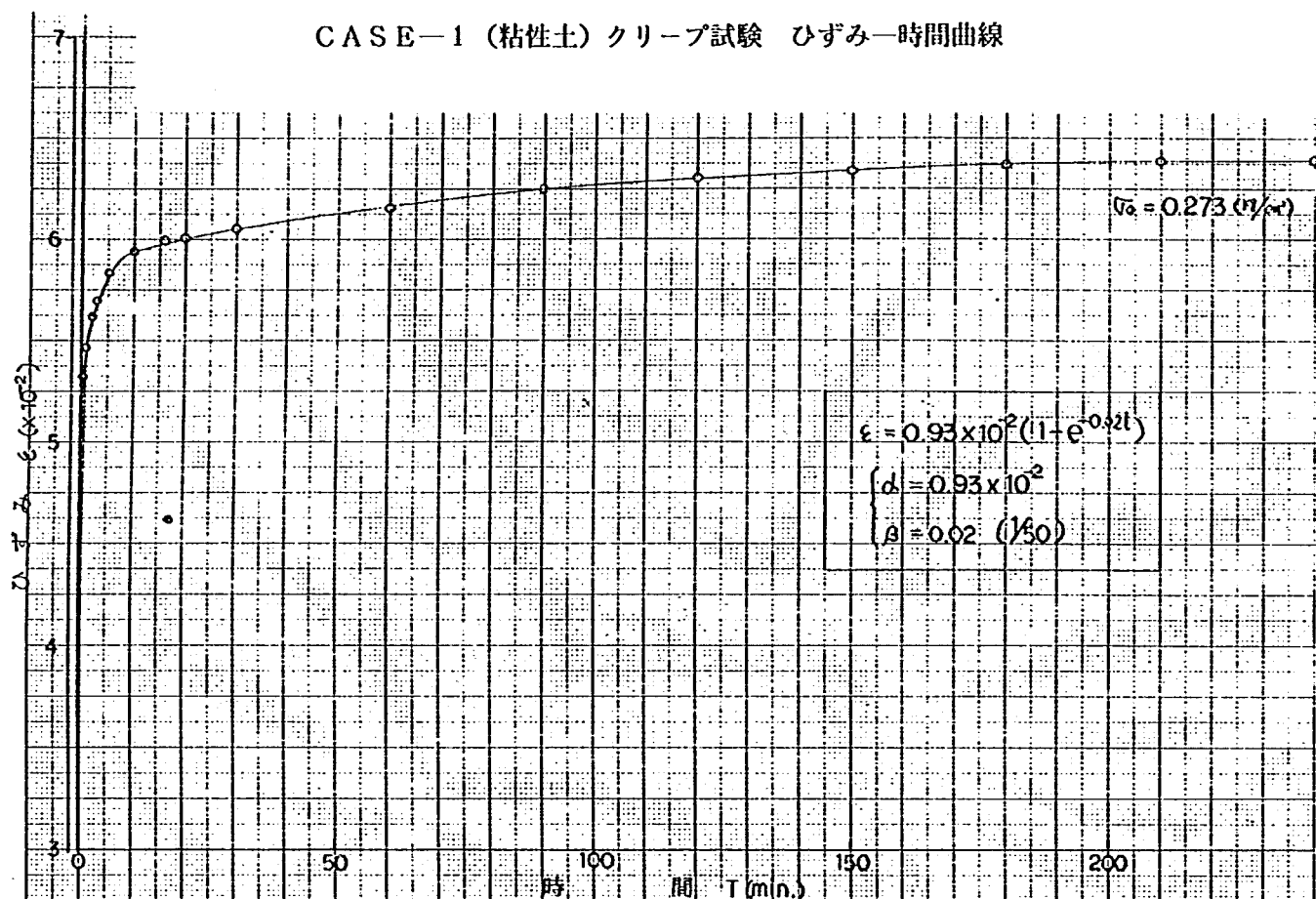
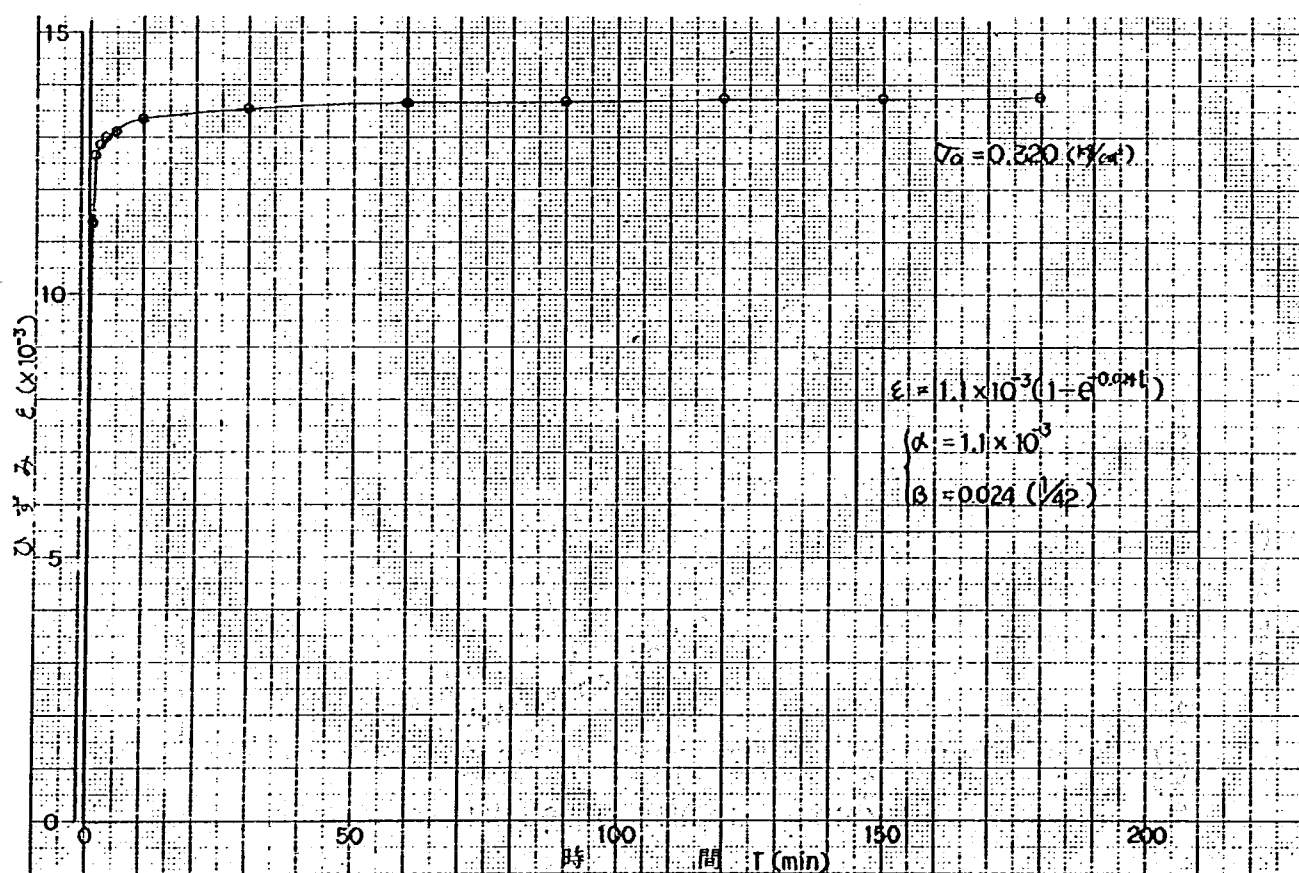


FIG. STRESS-STRAIN DIAGRAM

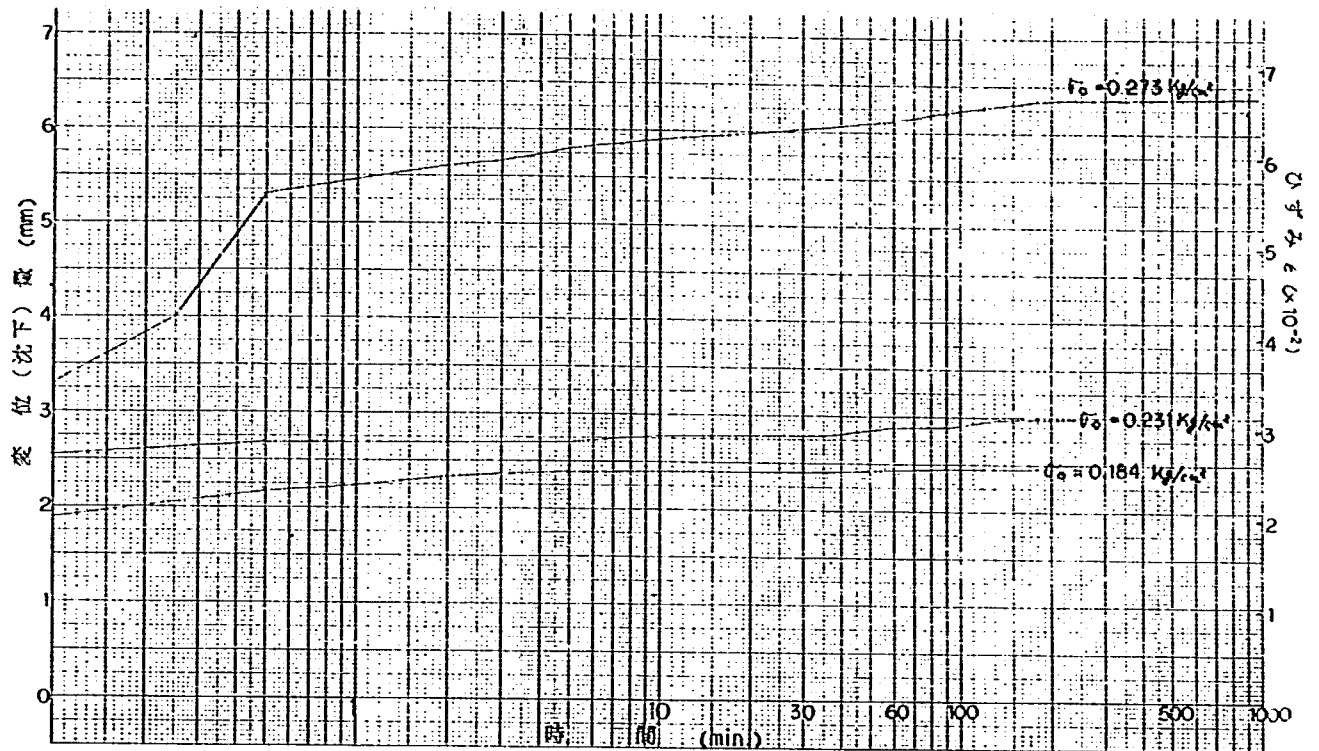
CASE-1 (粘性土) クリープ試験 ひずみ-時間曲線



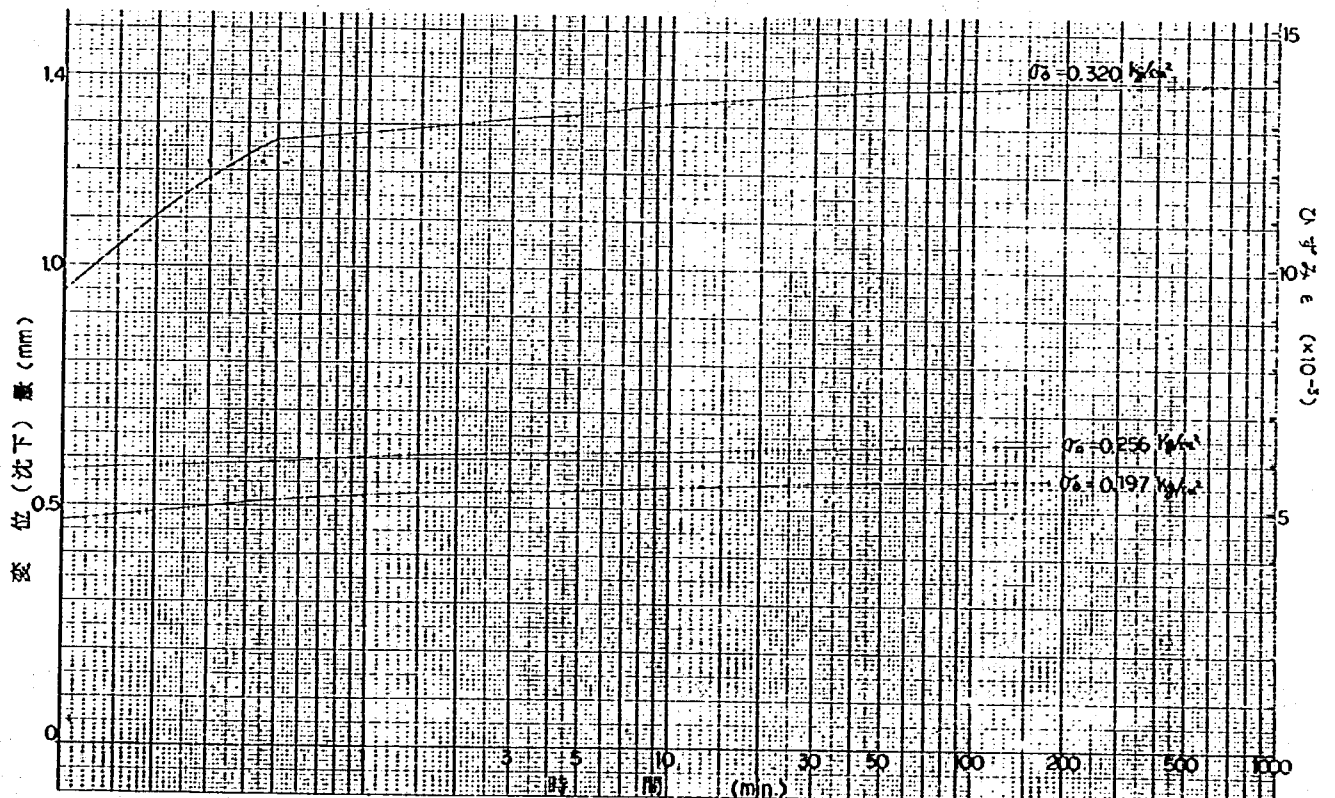
CASE-2 (砂質土) クリープ試験 ひずみ-時間曲線



CASE-1 (粘性土) クリープ試験 変位 (ひずみ) —時間曲線



CASE-2 (砂質土) クリープ試験 変位 (ひずみ) —時間曲線



	土 の 分 類	報 告 用 紙
--	---------	---------

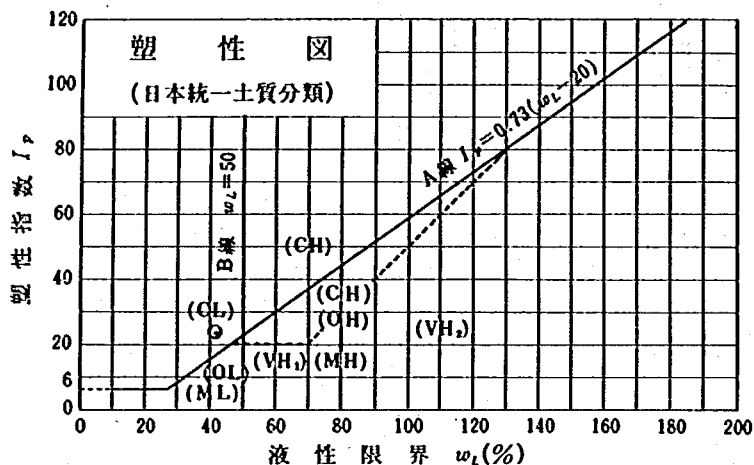
調査名・調査地点 土研・トンネル土圧模型実験

試験年月日 年 月 日

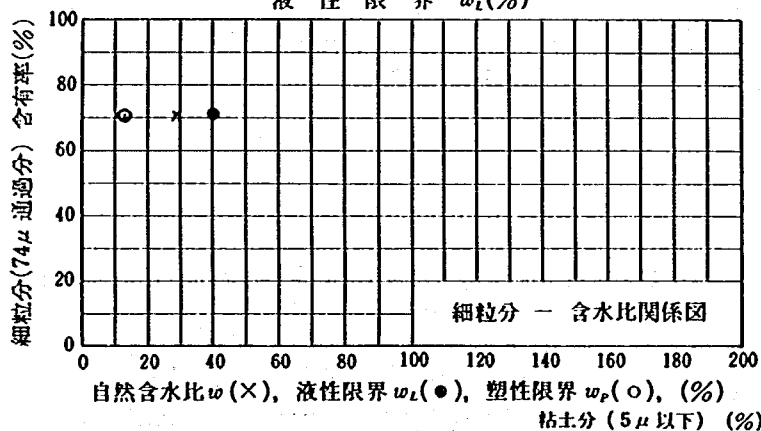
試料番号 粘性土・砂質土

試験者

粘性土

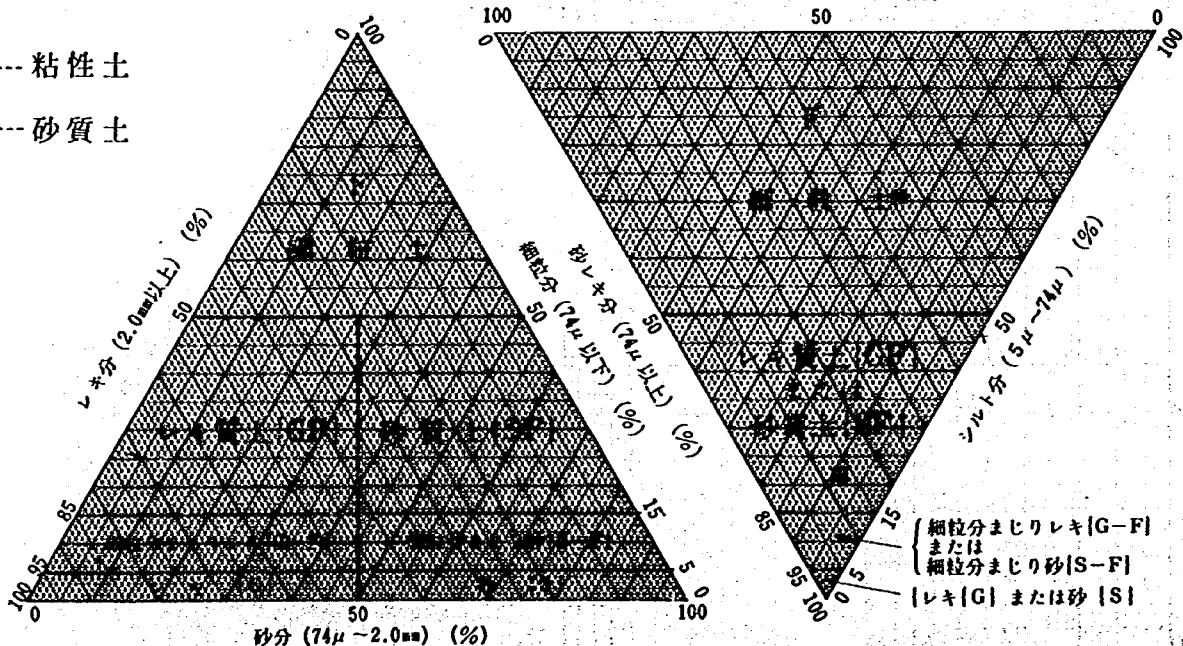


粘性土



○---粘性土

□---砂質土

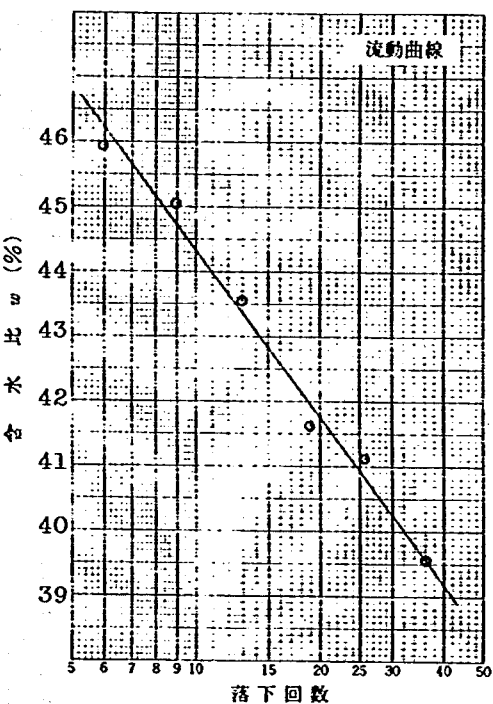


(a) フルイ分けによる粒度測定のみ行なった場合

(b) 比重浮ヒョウによる粒度測定も行なった場合

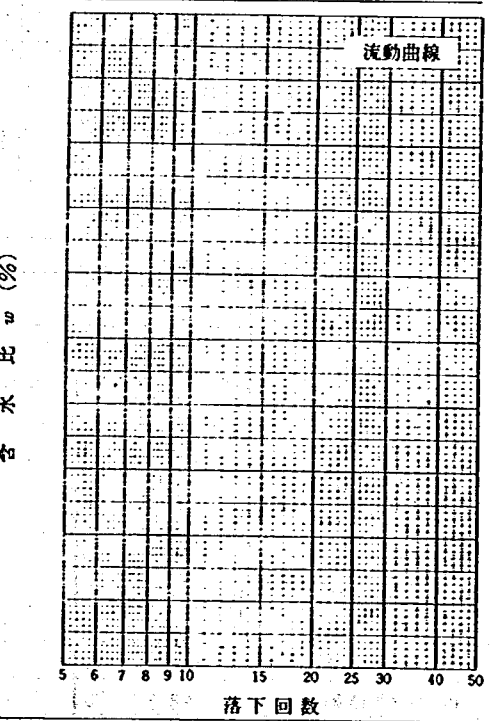
調査名・調査地点 土研 CASE-1 (粘性土) 試験年月日 55年 11月 日
 試験者

試料番号・深さ		No (m ~ m)	
液性限界試験			
落下回数	36	落下回数	26
No	70	No	74
m_s	66.90	m_s	68.25
m_l	56.05	m_l	56.41
m_c	28.64	m_c	27.60
m_w	10.85	m_w	11.84
w	39.58 %	w	41.10 %
落下回数	13	落下回数	9
No	45	No	28
m_s	48.49	m_s	52.98
m_l	39.54	m_l	42.30
m_c	19.00	m_c	18.61
m_w	8.95	m_w	10.68
w	43.57 %	w	45.08 %
落下回数	6	落下回数	6
No	81	No	49
m_s	75.85	m_s	50.12
m_l	62.03	m_l	40.63
m_c	28.82	m_c	19.96
m_w	13.82	m_w	9.49
w	41.61 %	w	45.91 %
塑性限界試験			
No	A-2	No	A-6
m_s	36.07	m_s	39.36
m_l	35.77	m_l	39.03
m_c	1.55	m_c	36.69
m_w	0.30	m_w	0.33
w	19.35 %	w	14.10 %
No	A-9	No	A-9
m_s	40.68	m_s	40.37
m_l	40.37	m_l	38.38
m_c	1.99	m_c	0.31
m_w	0.31	m_w	1.99
w	15.58 %	w	15.58 %
液性限界 w_L	40.80 %	塑性限界 w_p	16.34 %
塑性指数 I_p	24.46		



備考 試料の調製方法などを記入する。

試料番号・深さ		No (m ~ m)	
液性限界試験			
落下回数		落下回数	
No		No	
m_s		m_s	
m_l		m_l	
m_c		m_c	
m_w		m_w	
w	%	w	%
落下回数		落下回数	
No		No	
m_s		m_s	
m_l		m_l	
m_c		m_c	
m_w		m_w	
w	%	w	%
塑性限界試験			
No		No	
m_s		m_s	
m_l		m_l	
m_c		m_c	
m_w		m_w	
w	%	w	%
液性限界 w_L	%	塑性限界 w_p	%
塑性指数 I_p			



備考 試料の調製方法などを記入する。

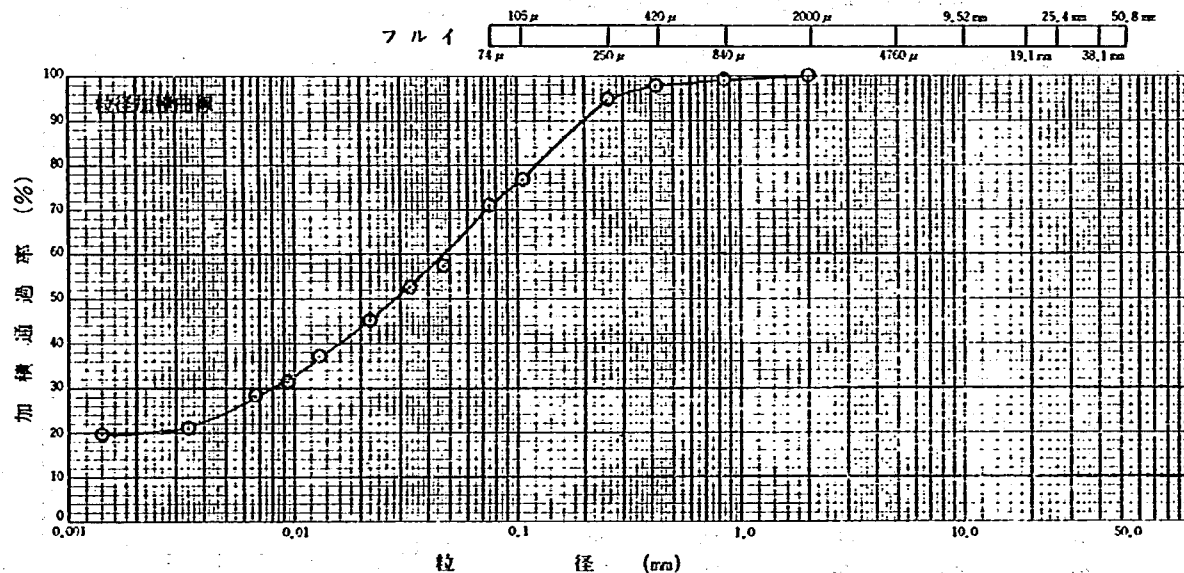
JIS A 1204	土の粒度試験結果	報告用紙
------------	----------	------

調査名・調査地点 土研 粘性土 試験年月日 年 月 日
試験者

粒徑加積曲線を図示するのに用いた粒徑とその粒徑より小さな土粒子重量の百分率との関係表

試料番号・深さ: Na		(m ~ m)										比重	2.706
フルイ	粒 径 mm	50.8	38.1	25.4	19.1	9.52	4.76	2.00	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
	重量百分率%							100.00	99.23	97.97	94.82	76.76	70.87
比 重	粒 径 mm	0.047	0.033	0.022	0.013	0.0093	0.0066	0.0034	0.0014				
	重量百分率%	57.67	52.57	45.44	37.29	31.18	28.12	20.99	19.97				

試料番号・深さ: Na		(m ~ m)										比重	
フルイ	粒 径 mm	50.8	38.1	25.4	19.1	9.52	4.76	2.00	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
	重量百分率%												
比 重	粒 径 mm												
	重量百分率%												



コロイド	粘 土	シルト	砂	レ	キ
0.001	0.005	0.074	2.0		

試 料 番 号 深	Na	Na	試 料 番 号 深	Na	Na
	m ~ m	m ~ m		m ~ m	m ~ m
4.76mm以上の粒子	0 %	%	最大粒 径	2.00 mm	mm
4.76 ~ 2 mmの粒子	0 %	%	60 % 粒 径	0.047 mm	mm
2 ~ 0.42 mmの粒子	2.0 %	%	30 % 粒 径	0.0078 mm	mm
0.42 ~ 0.074mmの粒子	27.1 %	%	10 % 粒 径	— mm	mm
0.074 ~ 0.005mmのシルト分	46.7 %	%	均 等 係 数	—	
0.005mm以下の粘土分	24.2 %	%	曲 率 係 数	—	
0.001mm以下のコロイド分	%	%	フルイを通過する 試料の分散性		
2000μフルイ通過重量百分率	100.0 %	%	粗な土粒子の形状 および堅さ		
420μフルイ通過重量百分率	98.0 %	%			
75μフルイ通過重量百分率	70.9 %	%			

JIS A 1204	土の粒度試験結果	報告用紙
------------	----------	------

調査名・調査地点 土研 砂質土 試験年月日 年 月 日

試験者

粒度加積曲線を図示するのに用いた粒径とその粒径より小さな土粒子重量の百分率との関係表

試料番号・深さ: Na

(m ~ m)

比重 2.708

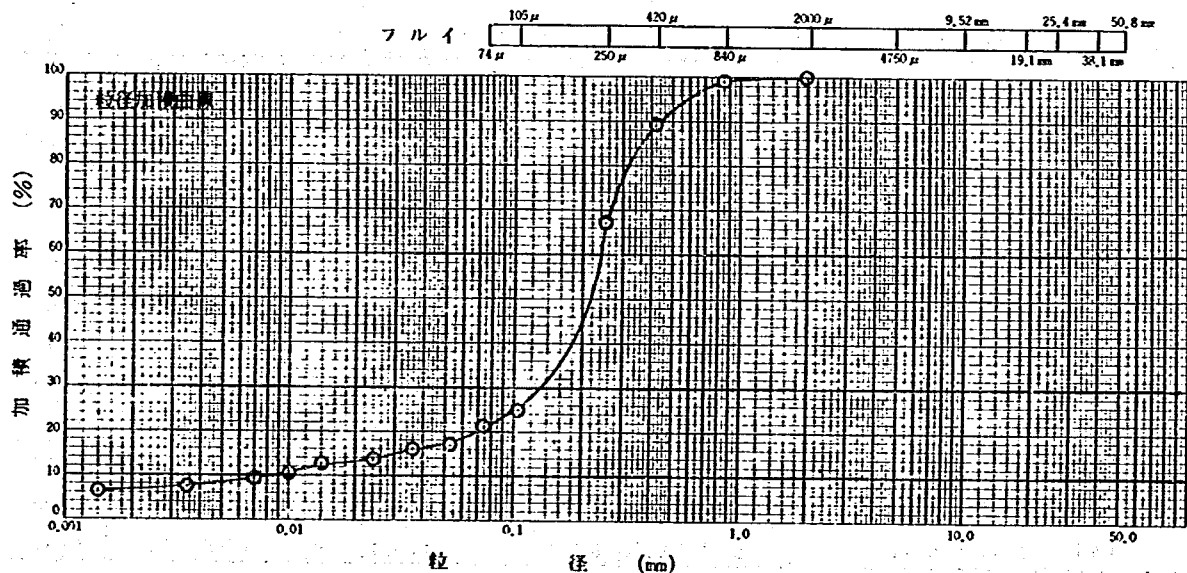
フルイ	粒径 mm	50.8	38.1	25.4	19.1	9.52	4.76	2.00	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
	重量百分率%							100.00	98.96	89.03	67.03	24.77	21.35
比	粒径 mm	0.053	0.038	0.024	0.014	0.0099	0.0070	0.0035	0.0014				
重	重量百分率%	17.19	16.09	13.89	12.78	10.59	9.48	7.27	6.17				

試料番号・深さ: Na

(m ~ m)

比重

フルイ	粒径 mm	50.8	38.1	25.4	19.1	9.52	4.76	2.00	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
	重量百分率%												
比	粒径 mm												
重	重量百分率%												



コロイド	粘 土	シルト	砂	レキ
0.001	0.005	0.074	2.0	

試料番号 深 度	Na	m ~ m	Na	m ~ m	試料番号 深 度	Na	m ~ m	Na	m ~ m
4.76mm以上の粒子	0	%		%	最大粒径	2.00	mm		mm
4.76~2mmの粒子	0	%		%	60%粒径	0.240	mm		mm
2~0.42mmの粒子	11.0	%		%	30%粒径	0.130	mm		mm
0.42~0.074mmの粒子	67.6	%		%	10%粒径	0.0086	mm		mm
0.074~0.005mmのシルト分	13.2	%		%	均等係数	27.9			
0.005mm以下の粘土分	8.2	%		%	曲率係数	8.19			
0.001mm以下のコロイド分		%		%	フルイを通過する				
2000μフルイ通過重量百分率	100.0	%		%	試料の分散性				
420μフルイ通過重量百分率	89.0	%		%	粗な土粒子の形状				
75μフルイ通過重量百分率	21.4	%		%	および堅さ				

JIS A 1204	土の粒度試験 (2000 μ フルイ通過部分)	報告用紙
------------	-----------------------------	------

調査名・調査地点 土研 粘性土 試験年月日 年 月 日

試料番号・深さ: Na (m ~ m) 試験者

(気乾試料+容器)重量= 383.22 g 土粒子の比重 G_s = 2.706
 容器 (Na 3) 重量= 282.90 g 塑性指数 I_p =
 気乾試料重量 W' = 100.32 g 分散剤 硫酸ナトリウム

$P_{2.0}$ = 100 %

($P_{2.0}$ は粒径2.0mmにおける加積通過率)

I. 気乾試料の含水比測定

Na 4-2		Na		Na		平均含水比 w = %
W_a 402.10	W_b 335.84	W_a	W_b	W_a	W_b	
W_c 335.84	W_d 107.40	W_c	W_d	W_c	W_d	
W_e 66.26	W_f 228.44	W_e	W_f	W_e	W_f	
w = 29.01 %		w = %		w = %		

試料が乾燥重量 $W_s = \frac{100 W'}{100 + w} = 77.76$ g

II. 比重浮ヒョウ試験

容器Na ノスリンダーNa 4 比重浮ヒョウNa 355

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
測定時刻	経過時間 t min	比重浮ヒョウ読み 小数部分のみ r' ②+C _m	測定時の水温 T °C	粒 径 D mm				補正加積通過率 %				
				L	L/t	$\sqrt{L/t}$	$\sqrt{\frac{30\eta}{980G_s - G_r}}$	D ⑦×⑧	F	$r' + F$	$\frac{P}{100 \times M}$	$P \times \frac{100}{100 + w} \times P_{2.0}$
9:31	0											
	1	0270	0275	20	12.00	12.00	3.46	0.01345	0.047	+0.0008	0.0283	57.67
	2	0245	0250	"	12.40	6.20	2.49	"	0.033	"	0.0258	52.57
	5	0210	0215	"	13.00	2.60	1.61	"	0.022	"	0.0223	45.44
	15	0170	0175	"	13.70	0.913	0.956	"	0.013	"	0.0183	37.29
	30	0140	0145	"	14.25	0.475	0.689	"	0.0093	"	0.0153	31.18
	60	0125	0130	"	14.50	0.242	0.492	"	0.0066	"	0.0138	28.12
	240	0090	0095	"	15.10	0.0629	0.251	"	0.0034	"	0.0103	20.99
	1440	0085	0090	"	15.20	0.0106	0.103	"	0.0014	"	0.0098	19.97

$\frac{100}{W_s/V} = 1286.0$

$\frac{G_s}{G_s - G_r} = 1.585$

$M = \frac{100}{W_s/V} \cdot \frac{G_s}{G_s - G_r} = 2037.7$

W_s/V : 懸濁液1ml当たりの乾燥試料重量

ノニスカス補正 C_m 0.0005

III. フルイ分け

フルイ	容器番号	(残留土+容器)重量 g	容器重量 g	残留土重量 g	残留率 %	加積残留率 %	加積通過率 % P %	補正加積通過率 % $P \times \frac{100}{100 + w} \times P_{2.0}$
840 μ	Na	391.15	391.09	0.06	0.77	0.77	99.23	99.23
420 μ	Na	453.73	452.75	0.98	1.26	2.03	97.97	97.97
250 μ	Na	388.89	386.25	2.45	3.15	5.18	94.82	94.82
105 μ	Na	379.29	365.25	14.04	18.06	23.24	76.76	76.76
74 μ	Na	360.89	356.31	4.58	5.86	29.13	70.87	70.87

備考

*印: W_s に対する重量百分率で表わす。

JIS A 1204	土の粒度試験 (2000 μ フルイ通過部分)	報告用紙
------------	-----------------------------	------

調査名・調査地点 土砂 砂質土 試験年月日 年 月 日

試料番号・深さ: Na (m ~ m) 試験者

(気乾試料+容器) 重量 = 360.53 g 土粒子の比重 $G_s = 2.708$
 容器 (Na 2) 重量 = 282.13 g 塑性指数 $I_p =$
 気乾試料重量 $W' = 78.40$ g 分散剤 硫酸ナトリウム

$P_{2.0} = 100$ %

($P_{2.0}$ は粒径2.0mmにおける加積通過率)

I. 気乾試料の含水比測定

Na 27	Na	Na	平均含水比
W_s 279.46	W_s 267.81	W_s	$w =$ %
W_b 267.81	W_c 139.49	W_b	
W_w 11.65	W_s 128.16	W_c	
$w = 9.09$ %	$w =$ %	$w =$ %	

試料が乾燥重量 $W_s = \frac{100 W'}{100 + w} = 71.87$ g

II. 比重浮ヒヨウ試験

容器Na ノスリンダーNa 1 比重浮ヒヨウNa 355

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
測定時刻	経過時間 t min	比重浮ヒヨウ読み 小数部分のみ ②+C _m	測定時の水温 °C	粒 径 D mm				補正加積通過率 %				
				L	L/t	$\sqrt{L/t}$	$\sqrt{\frac{30\eta}{G_s - G_f}}$	$\frac{D}{\sqrt{30\eta}} \times \text{⑦} \times \text{⑧}$	F	$r' + F$	$\frac{P}{\text{⑪} \times M}$	$P \times \frac{1}{\text{⑪} \times M} \times P_{2.0}$
9:24	0											
	1	0065	0070	20°	15.55	15.55	3.94	0.01344	0.053	+0.0008	0.0078	17.19
	2	0060	0065	"	15.65	7.83	2.80	"	0.038	"	0.0073	16.09
	5	0050	0055	"	15.85	3.17	1.78	"	0.024	"	0.0063	13.89
	15	0045	0050	"	15.90	1.06	1.03	"	0.014	"	0.0058	12.78
	30	0035	0040	"	16.10	0.537	0.733	"	0.0099	"	0.0048	10.59
	60	0030	0035	"	16.25	0.271	0.520	"	0.0070	"	0.0043	9.48
	240	0020	0025	"	16.35	0.0681	0.261	"	0.0035	"	0.0033	7.27
	1440	0015	0020	"	16.45	0.0114	0.107	"	0.0014	"	0.0028	6.17

$\frac{100}{W_s/V} = 1391.4$ $\frac{G_s}{G_s - G_f} = 1.584$ $M = \frac{100}{W_s/V} \cdot \frac{G_s}{G_s - G_f} = 2203.8$

W_s/V : 懸濁液 1ml 当たりの乾燥試料重量

メニスカス補正 $C_m = 0.0005$

III. フルイ分け

フルイ	容器番号	(残留土+容器)重量 g	容器重量 g	残留土重量 g	残留率 %	加積残留率 %	加積通過率 % P %	補正加積通過率 % $P \times \frac{1}{\text{⑪} \times M} \times P_{2.0}$
840 μ	Na	391.84	391.09	0.75	1.04	1.04	98.96	98.96
420 μ	Na	459.89	452.75	7.14	9.93	10.97	89.03	89.03
250 μ	Na	402.25	386.44	15.81	22.00	32.97	67.03	67.03
105 μ	Na	395.62	365.25	30.37	42.26	75.23	24.77	24.77
74 μ	Na	358.77	356.31	2.46	3.42	78.65	21.35	21.35

備考

*印: W_s に対する重量百分率で表わす。

JIS A 1202	土 粒 子 の 比 重 試 験	記 録 用 紙
------------	-----------------	---------

調査名・調査地点 土研 試験年月日 年 月 日
砂質土、粘性土 試験者

試 料 番 号 ・ 深 さ		Na 砂質土 (m ~ m)			Na 粘性土 (m ~ m)		
測 定 番 号		1	2	3	1	2	3
比 重 び ん の 番 号		31	37	43	82	88	98
(炉乾燥土 (又は湿潤土) + 蒸留水 + 比重びん) の質量 m_1 g		89.761	89.063	94.741	88.657	87.139	87.844
m_1 をはかったときの内容物の温度 T °C		20	20	20	20	20	20
比重びんに入れた 炉乾燥土質量 m_2 g	容 器 番 号	49-2	71	56-1	25	22	56
	(乾燥土+容器)の質量 g	82.994	82.328	86.236	80.070	79.180	78.707
	容 器 質 量 g	65.997	65.239	65.378	67.492	65.890	66.118
	m_2 g	16.997	17.089	20.858	12.578	13.290	12.589
T °Cにおける(蒸留水+比重びん)の換算質量 ^{注1)} m_3 g		79.043	78.280	81.575	80.726	78.760	79.895
$m_2 + (m_3 - m_1)$ g		6.279	6.306	7.692	4.647	4.911	4.640
T °Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/T°C) = \frac{m_2}{m_2 + (m_3 - m_1)}$		2.707	2.710	2.712	2.707	2.706	2.713
補 正 係 数 ^{注2)} K		0.9991	0.9991	0.9991	0.9991	0.9991	0.9991
15°Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/15°C) = K \cdot G_s(T°C/T°C)$		2.705	2.708	2.710	2.705	2.704	2.711
平 均 値		比 重 (T°C/15°C) = 2.708			比 重 (T°C/15°C) = 2.706		
T °Cにおける水の比重 ^{注2)} G_T							
4°Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/4°C) = G_T \cdot G_s(T°C/T°C)$							
平 均 値		比 重 (T°C/4°C) =			比 重 (T°C/4°C) =		
備 考							

試 料 番 号 ・ 深 さ		Na (m ~ m)			Na (m ~ m)		
測 定 番 号		1	2	3	1	2	3
比 重 び ん の 番 号							
(炉乾燥土 (又は湿潤土) + 蒸留水 + 比重びん) の質量 m_1 g							
m_1 をはかったときの内容物の温度 T °C							
比重びんに入れた 炉乾燥土質量 m_2 g	容 器 番 号						
	(乾燥土+容器)の質量 g						
	容 器 質 量 g						
	m_2 g						
T °Cにおける(蒸留水+比重びん)の換算質量 ^{注1)} m_3 g							
$m_2 + (m_3 - m_1)$ g							
T °Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/T°C) = \frac{m_2}{m_2 + (m_3 - m_1)}$							
補 正 係 数 ^{注2)} K							
15°Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/15°C) = K \cdot G_s(T°C/T°C)$							
平 均 値		比 重 (T°C/15°C) =			比 重 (T°C/15°C) =		
T °Cにおける水の比重 ^{注2)} G_T							
4°Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/4°C) = G_T \cdot G_s(T°C/T°C)$							
平 均 値		比 重 (T°C/4°C) =			比 重 (T°C/4°C) =		
備 考							

注1) 備え付けの比重びんの検定表より求める。注2) JISの表より求める。

表一 トンネル切羽位置による基準応力の経時変化表
粘性土 (CASE-1)

掘削回	距離または 位置 (cm)	P-1 (kg/cm ²)	P-2 (kg/cm ²)	P-3 (kg/cm ²)	P-4 (kg/cm ²)	P-5 (kg/cm ²)
1	0	0.567	0.526	0.706	0.584	0.583
2	10	0.556	0.517	0.690	0.574	0.574
3	20	0.557	0.511	0.688	0.567	0.569
4	30	0.550	0.501	0.673	0.548	0.554
5	40	0.544	0.497	0.666	0.532	0.541
6	50	0.539	0.491	0.658	0.515	0.528
7	60	0.555	0.506	0.673	0.526	0.533
8	70	0.547	0.497	0.661	0.504	0.522
9	80	0.539	0.487	0.653	0.482	0.506
10	90	0.533	0.484	0.653	0.467	0.490
11	100	0.661	0.641	0.794	0.624	0.618
12	110	0.630	0.484	0.749	0.563	0.573
13	120	0.619	0.478	0.743	0.550	0.562
14	130	0.631	0.471	0.734	0.544	0.556
15	140	0.615	0.473	0.736	0.544	0.558
16	150	0.636	0.477	0.737	0.544	0.557
17	160	0.617	0.479	0.740	0.545	0.557
18	170	0.637	0.479	0.739	0.544	0.559
19	180	0.618	0.480	0.742	0.543	0.559
20	190	0.617	0.480	0.742	0.543	0.555

表二 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係表
粘性土 (CASE-1) A断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	A-1 (kg/cm ²)	A-2 (kg/cm ²)	A-3 (kg/cm ²)	A-4 (kg/cm ²)	A-5 (kg/cm ²)	A-6 (kg/cm ²)	A-7 (kg/cm ²)	A-1' (kg/cm ²)	A-5' (kg/cm ²)
1	-70	0.594	0.640	0.586	0.483	0.552	0.667	0.561	0.467	0.486
2	-60	0.581	0.626	0.577	0.462	0.583	0.659	0.557	0.449	0.462
3	-50	0.568	0.621	0.576	0.465	0.523	0.646	0.542	0.446	0.454
4	-40	0.534	0.597	0.560	0.454	0.490	0.584	0.521	0.428	0.422
5	-30	0.501	0.569	0.544	0.449	0.469	0.541	0.489	0.414	0.385
6	-20	0.458	0.545	0.532	0.449	0.438	0.464	0.431	0.396	0.335
7	-10	0.447	0.550	0.541	0.454	0.444	0.405	0.391	0.396	0.314
8	0	0.428	0.544	0.536	0.459	0.443	0.310	0.362	0.335	0.282
9	10	0.434	0.548	0.538	0.462	0.441	0.182	0.368	0.319	0.261
10	20	0.464	0.570	0.548	0.465	0.448	—	0.374	0.269	0.256
11	30	0.647	0.727	0.678	0.567	0.627	—	0.553	0.465	0.412
12	40	0.615	0.714	0.660	0.557	0.619	—	0.525	0.444	0.367
13	50	0.577	0.693	0.649	0.554	0.608	—	0.504	0.449	0.367
14	60	0.559	0.688	0.652	0.557	0.604	—	0.519	0.425	0.359
15	70	0.554	0.681	0.648	0.560	0.599	—	0.504	0.404	0.351
16	80	0.575	0.686	0.650	0.565	0.559	—	0.495	0.404	0.359
17	90	0.592	0.693	0.654	0.568	0.615	—	0.462	0.406	0.352
18	100	0.572	0.693	0.654	0.570	0.601	—	0.484	0.436	0.351
19	110	0.556	0.683	0.645	0.565	0.593	—	0.449	0.417	0.348
20	120	0.547	0.683	0.648	0.573	0.596	—	0.461	0.409	0.338

表—3 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係表
粘性土 (CASE—1) B断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	B—1 (kg/cm ²)	B—2 (kg/cm ²)	B—3 (kg/cm ²)	B—4 (kg/cm ²)	B—5 (kg/cm ²)	B—6 (kg/cm ²)
1	— 130	0.594	0.590	0.591	0.490	0.452	0.601
2	— 120	0.587	0.584	0.586	0.485	0.448	0.600
3	— 110	0.596	0.595	0.593	0.491	0.450	0.613
4	— 90	0.600	0.594	0.597	0.497	0.448	0.611
5	— 80	0.600	0.595	0.601	0.502	0.442	0.613
6	— 70	0.601	0.598	0.603	0.503	0.439	0.615
7	— 60	0.625	0.618	0.625	0.518	0.447	0.629
8	— 50	0.614	0.609	0.621	0.514	0.446	0.618
9	— 40	0.601	0.599	0.615	0.515	0.432	0.608
10	— 30	0.590	0.593	0.613	0.512	0.422	0.611
11	— 20	0.735	0.738	0.759	0.641	0.548	0.805
12	— 10	0.639	0.679	0.729	0.621	0.489	0.647
13	0	0.537	0.625	0.692	0.604	0.433	0.435
14	10	0.556	0.631	0.689	0.602	0.458	0.420
15	20	0.563	0.639	0.690	0.604	0.466	0.232
16	30	0.592	0.658	0.703	0.613	0.485	—
17	40	0.612	0.673	0.708	0.617	0.493	—
18	50	0.627	0.680	0.714	0.620	0.496	—
19	60	0.614	0.679	0.722	0.624	0.502	—
20	70	0.591	0.674	0.719	0.625	0.500	—

表—4 覆工板Aのトンネル地圧と位置の関係表
粘性土 (CASE—1)

掘削回	距離または 位置 (cm)	LCV—A (kg/cm ²)	LCH—A (kg/cm ²)
1	—	—	—
2	—	—	—
3	(— 10)	0.061	0.046
4	(0)	0.057	0.111
5	10	0.386	0.275
6	20	0.401	0.297
7	30	0.411	0.304
8	40	0.427	0.287
9	50	0.449	0.281
10	60	0.529	0.304
11	70	0.650	0.425
12	80	0.595	0.426
13	90	0.567	0.437
14	100	0.601	0.430
15	110	0.593	0.386
16	120	0.589	0.403
17	130	0.614	0.406
18	140	0.609	0.552
19	150	0.617	0.438
20	160	0.607	0.422

表—5— 覆工板Bのトンネル地圧と位置の関係表
粘性土 (CASE—1)

掘削回	距離または 位置 (cm)	LCV—B (kg/cm ²)	LCH—B (kg/cm ²)
1	—	—	—
2	—	—	—
3	—	—	—
4	—	—	—
5	—	—	—
6	—	0.003	0.002
7	—	0.006	0.003
8	—	0.011	0.002
9	(—10)	0.027	0.014
10	(0)	0.292	0.225
11	10	0.577	0.382
12	20	0.493	0.455
13	30	0.502	0.460
14	40	0.506	0.489
15	50	0.528	0.491
16	60	0.528	0.454
17	70	0.540	0.483
18	80	0.557	0.522
19	90	0.560	0.377
20	100	0.561	0.506

表—6— 地山変位と切羽から測定断面までの距離の
関係表 粘性土 (CASE—1)

掘削回	距離または 位置 (cm)	EX—1 δ_1 (mm)	EX—2 δ_2 (mm)
1	—115	0.0	0.0
2	—105	0.0	0.0
3	—95	0.0	0.8
4	—85	0.8	2.1
5	—75	2.6	4.5
6	—65	4.5	6.3
7	—55	8.6	9.4
8	—45	11.0	11.9
9	—35	17.2	16.2
10	—25	23.8	21.0
11	—15	29.6	25.8
12	—5	36.4	28.9
13	5	38.4	30.7
14	15	39.6	31.7
15	25	40.5	32.8
16	35	41.7	33.7
17	45	42.4	34.1
18	55	42.7	34.6
19	65	43.2	34.8
20	75	43.4	35.1

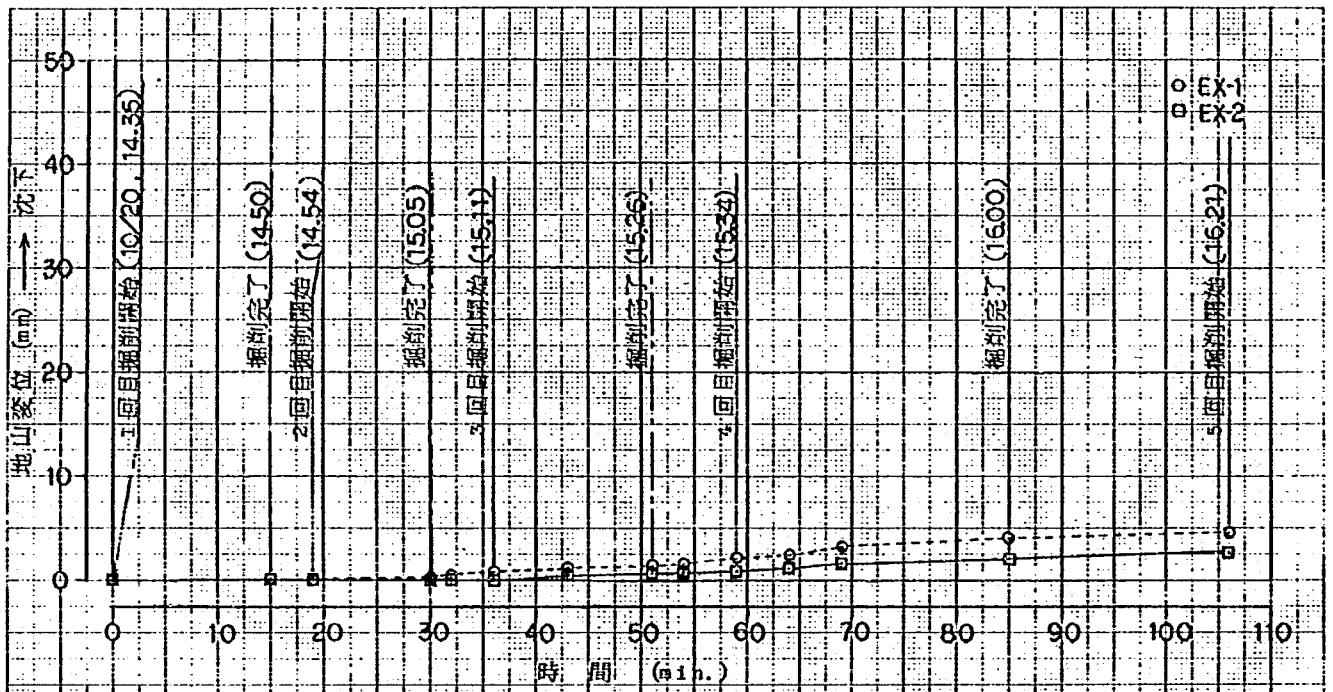


図-1 (その1) 地山変位の経時変化図 (1回目～4回目掘削)

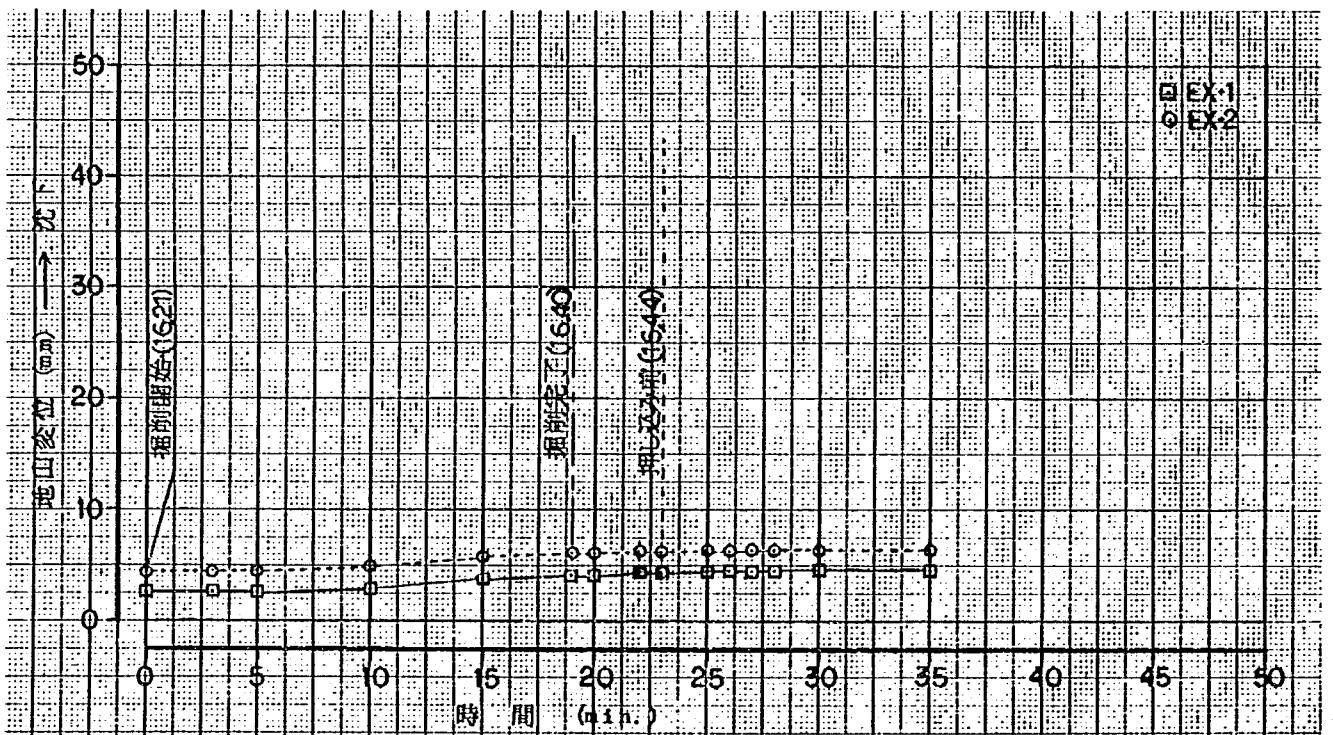


図-1 (その2) 地山変位の経時変化図 (5回目掘削)

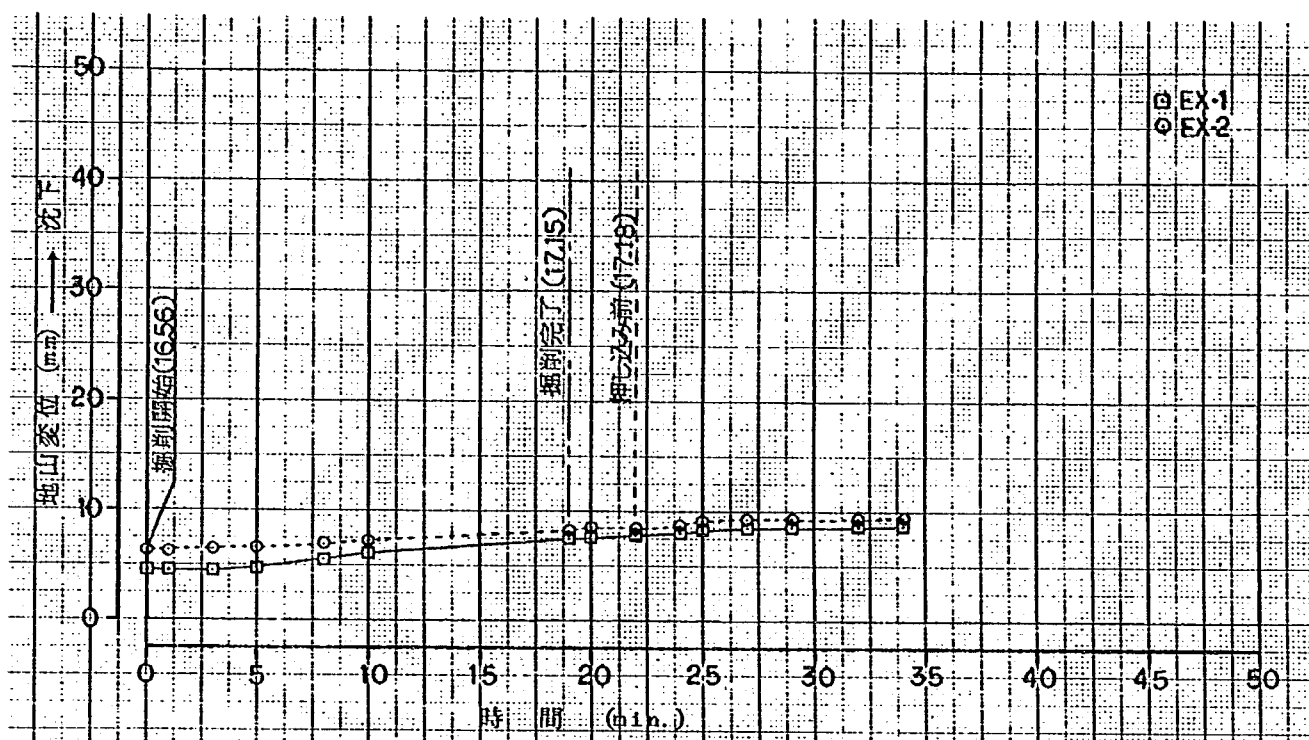


図-1 (その3) 地山変位の経時変化図 (6回目掘削)

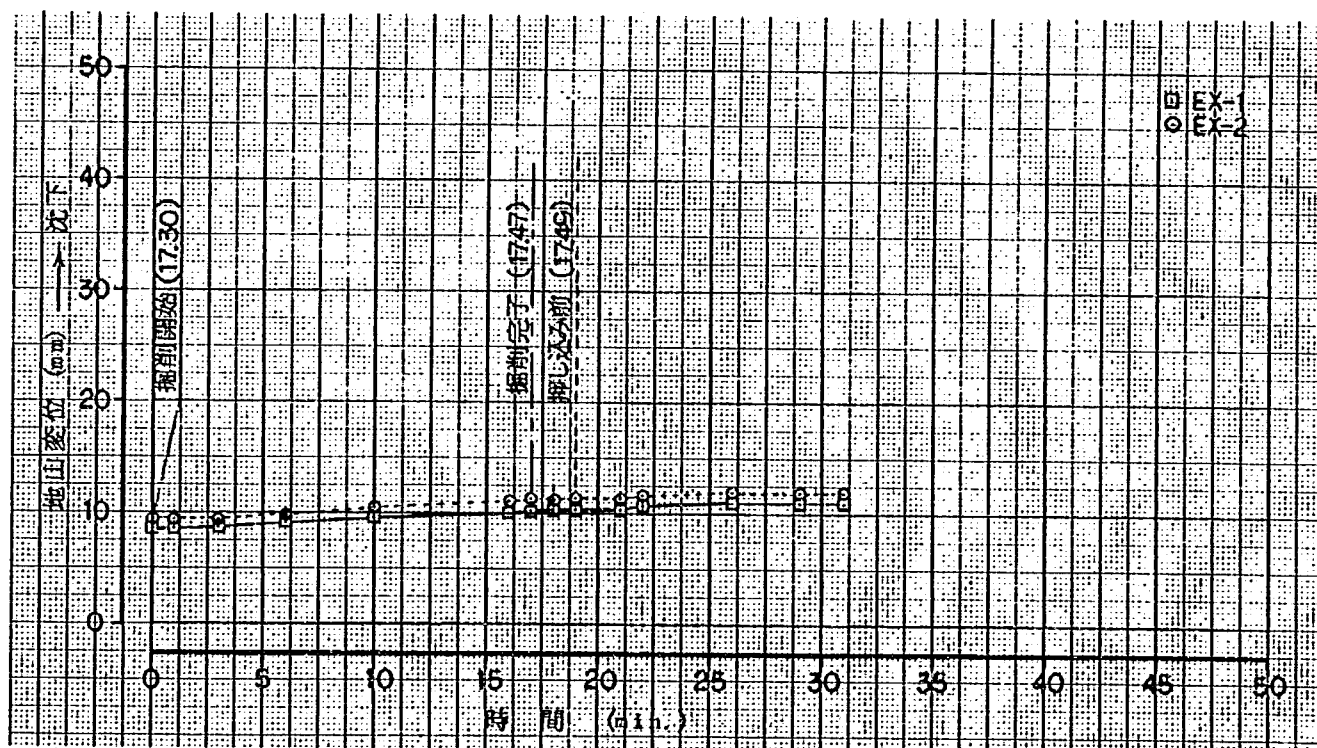
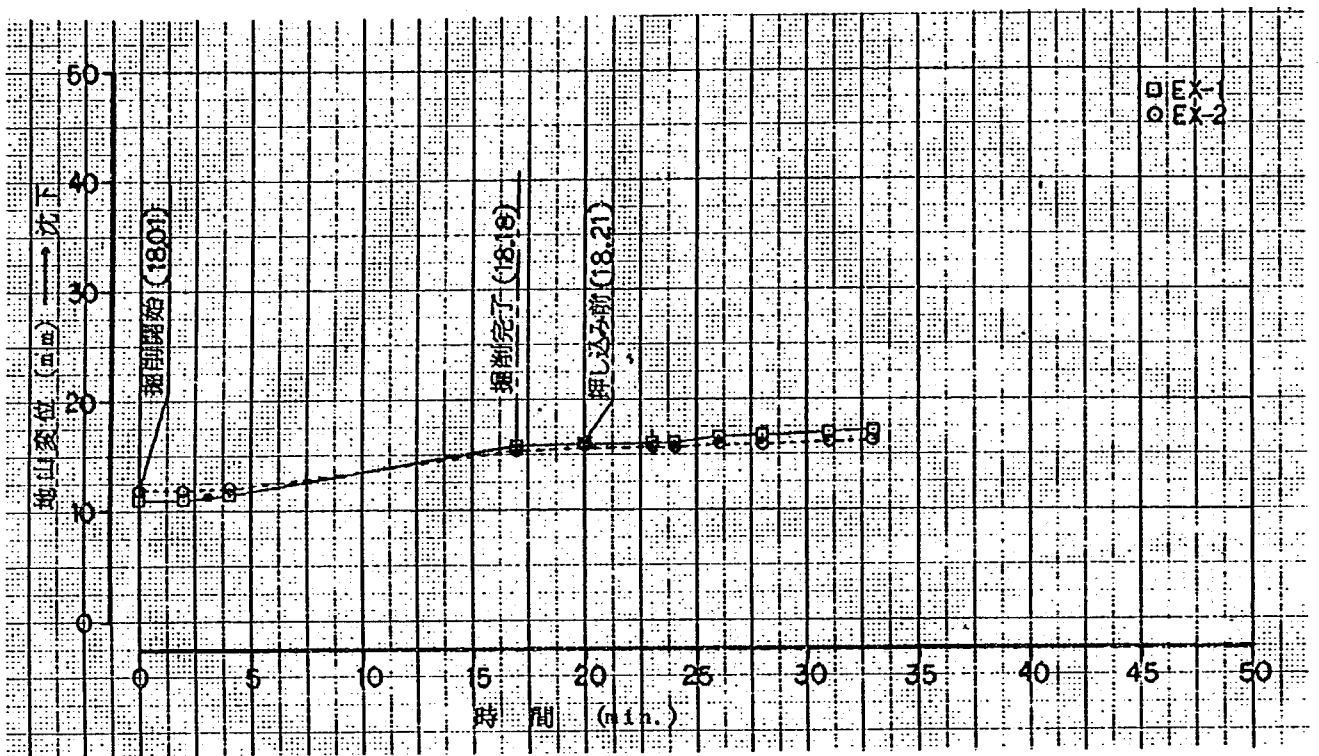
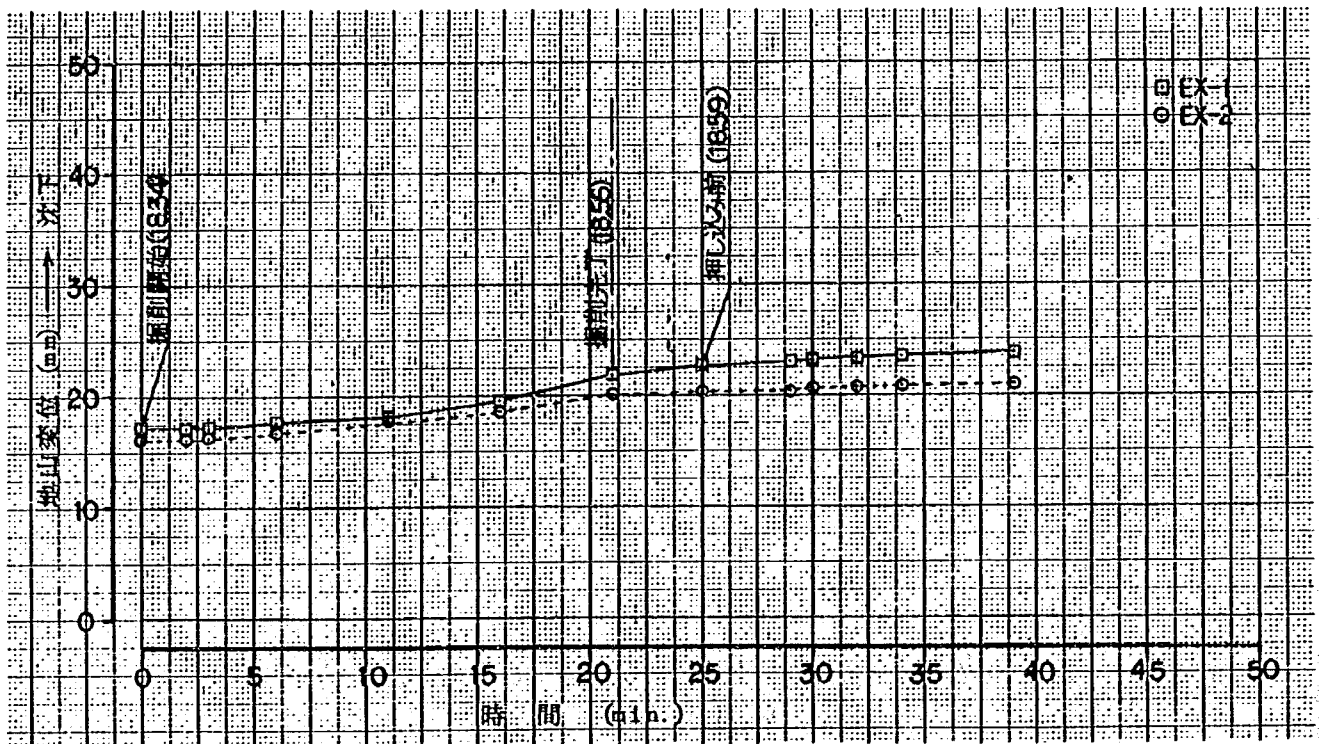


図-1 (その4) 地山変位の経時変化図 (7回目掘削)



図一1 (その5) 地山変位の経時変化図 (8回目掘削)



図一1 (その6) 地山変位の経時変化図 (9回目掘削)

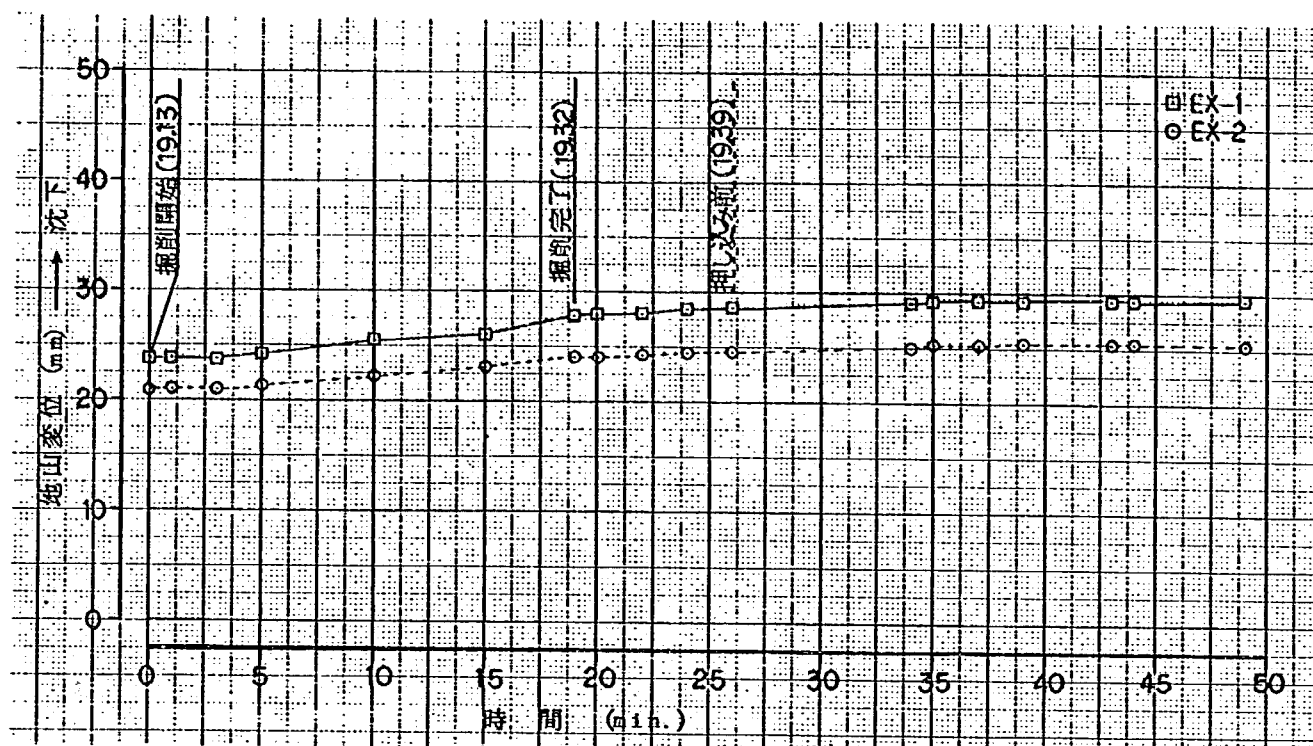


図-1 (その7) 地山変位の経時変化図 (10回目掘削)

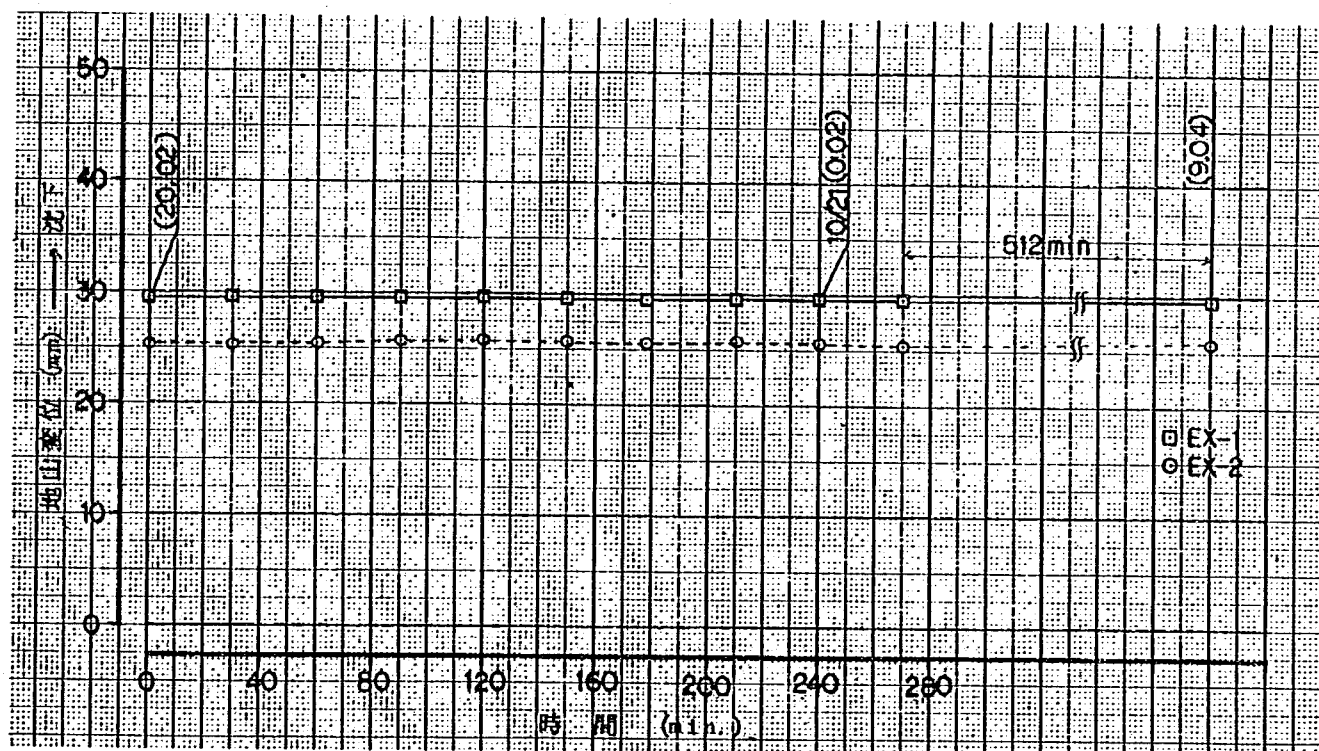


図-1 (その8) 地山変位の経時変化図 (10回目掘削の後)

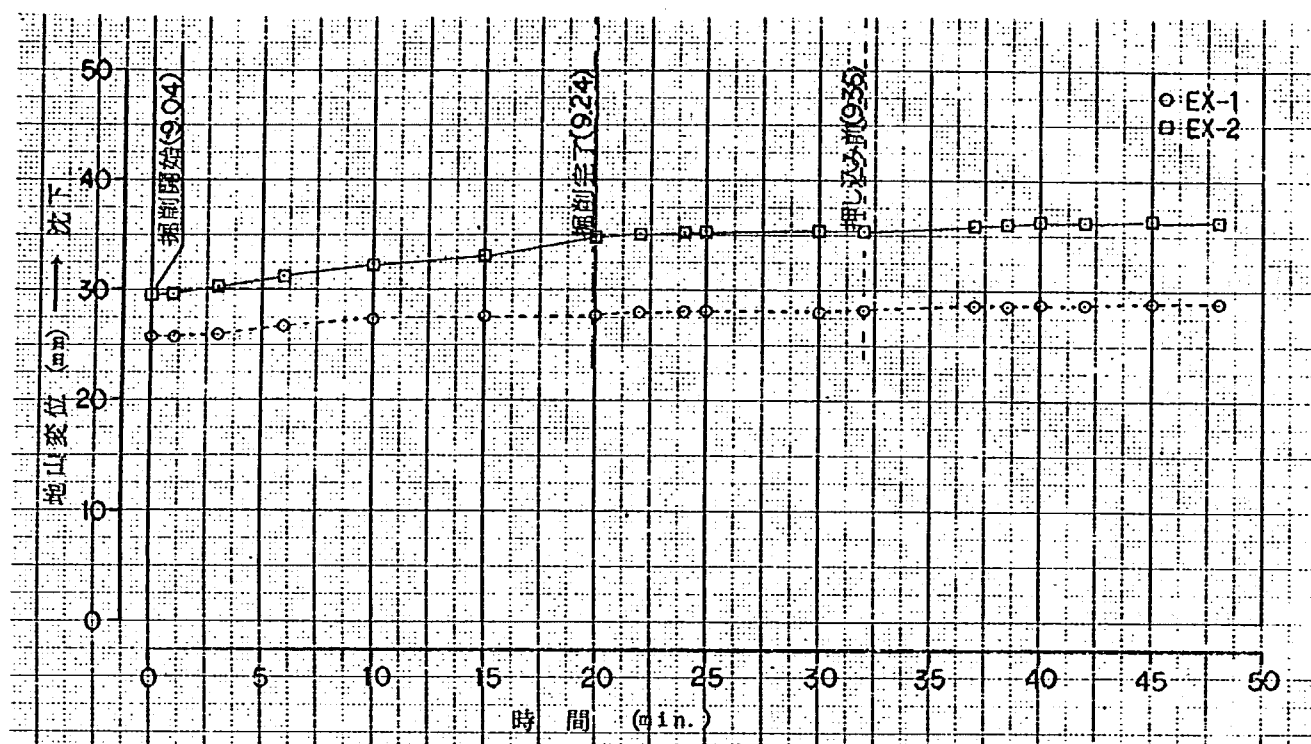


図-1 (その9) 地山変位の経時変化図 (11回目掘削)

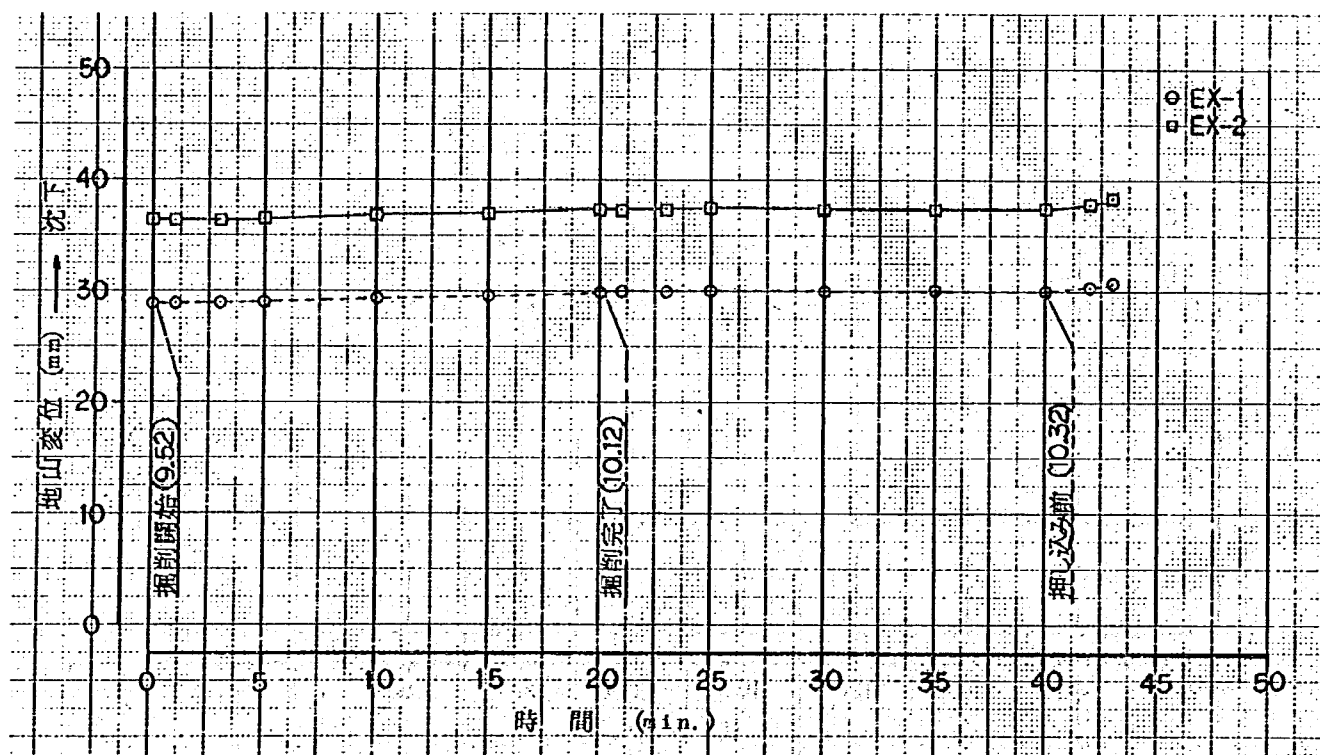
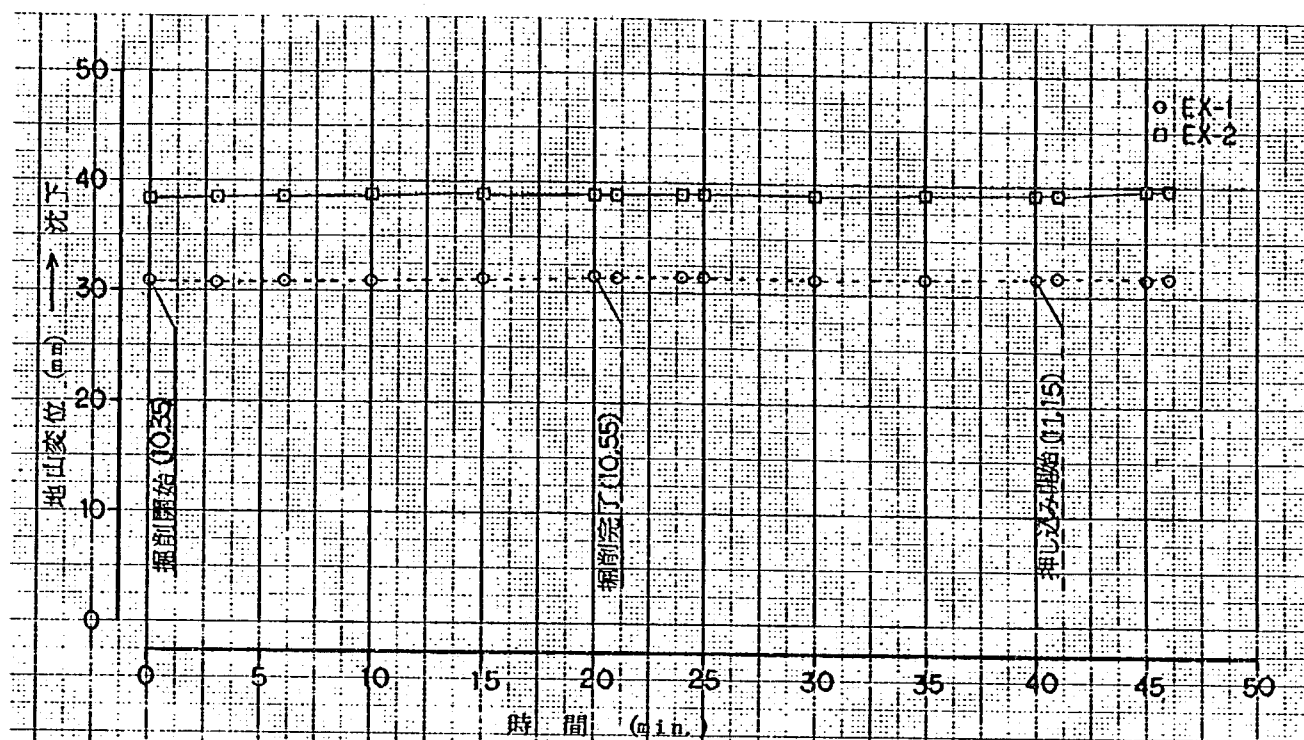
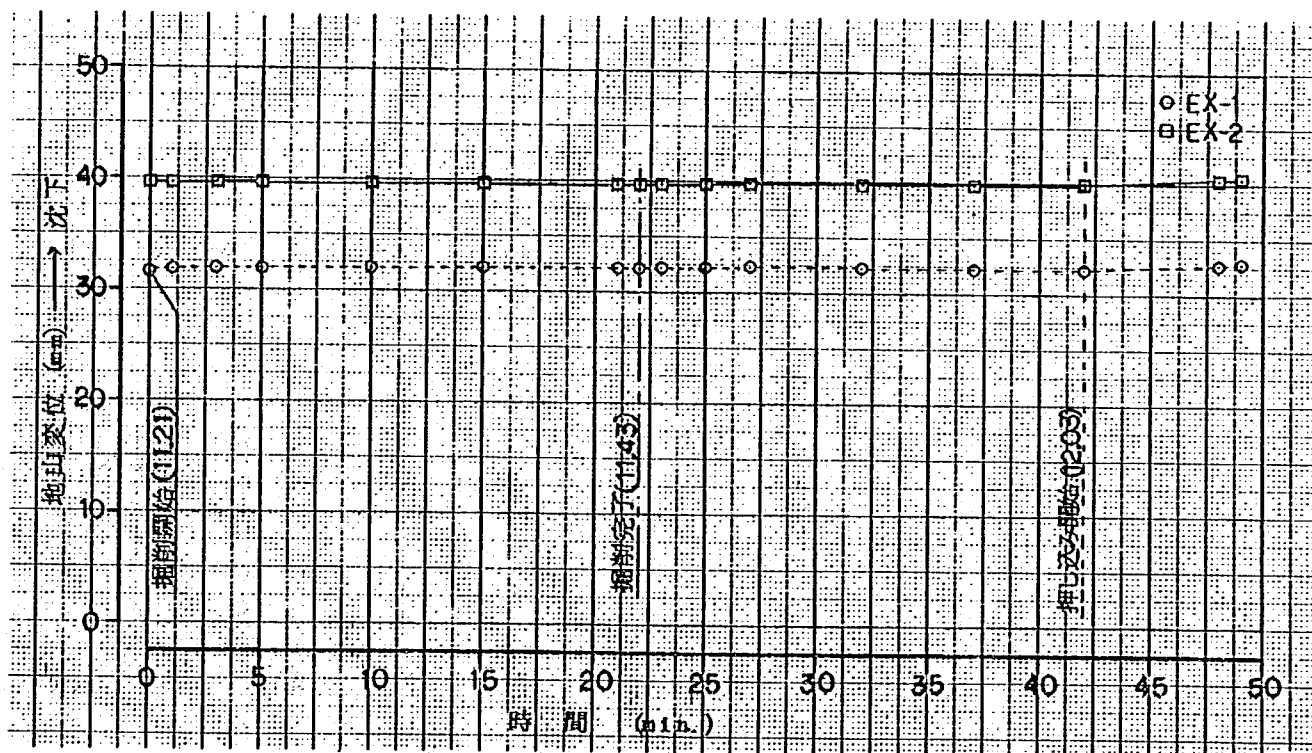


図-1 (その10) 地山変位の経時変化図 (12回目掘削)



図—1 (その11) 地山変位の経時変化図 (13回目掘削)



図—1 (その12) 地山変位の経時変化図 (14回目掘削)

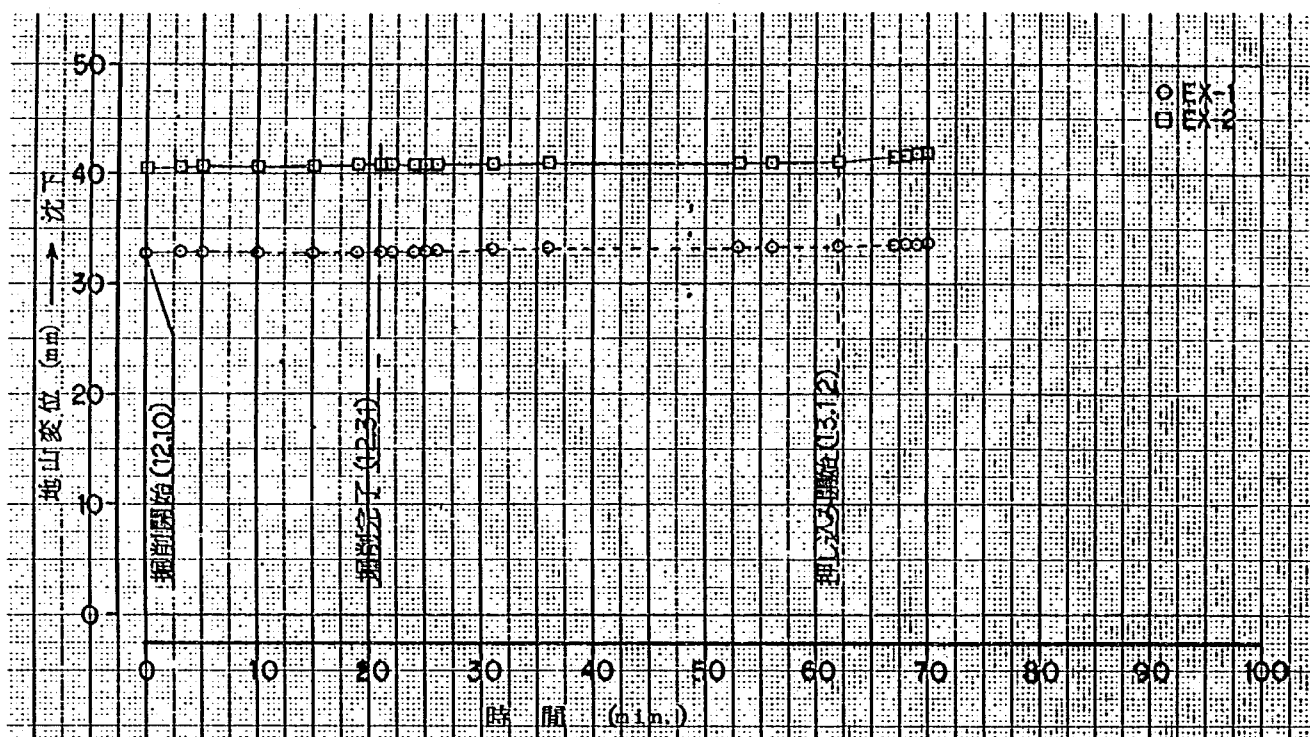


図-1 (その13) 地山変位の経時変化図 (15回目掘削)

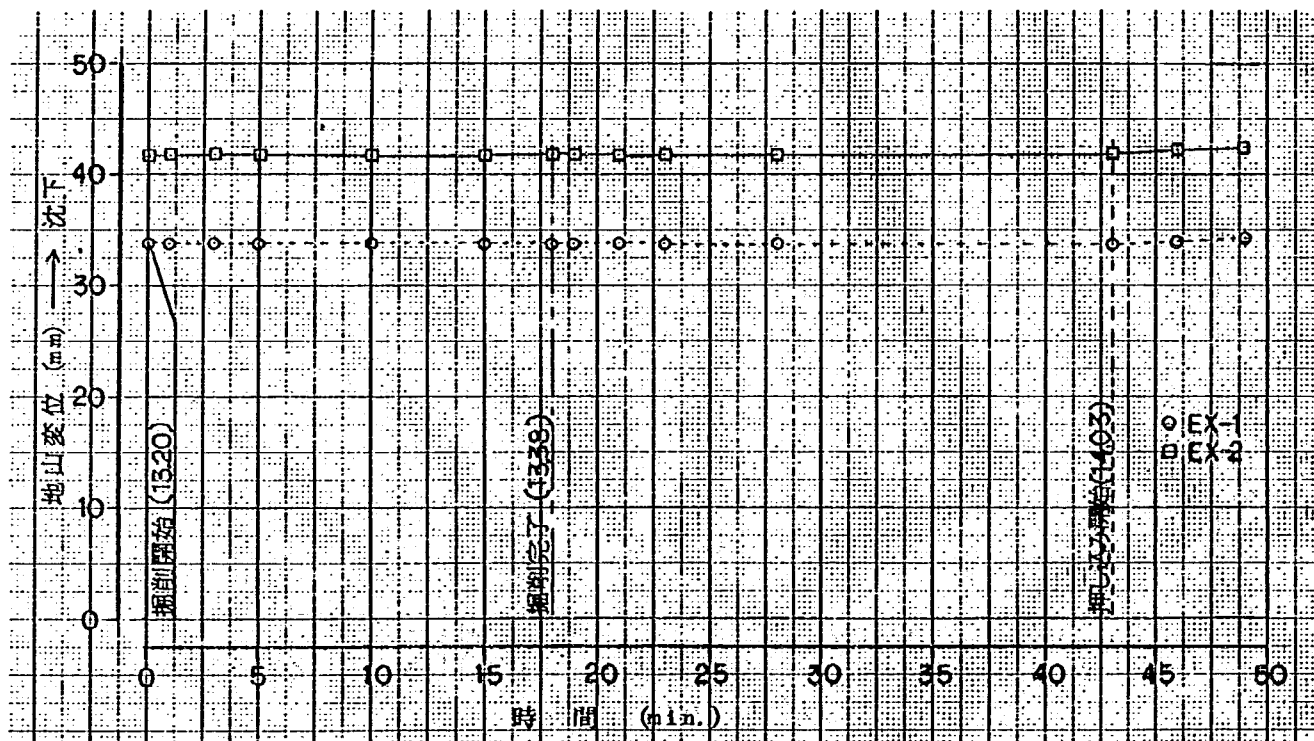
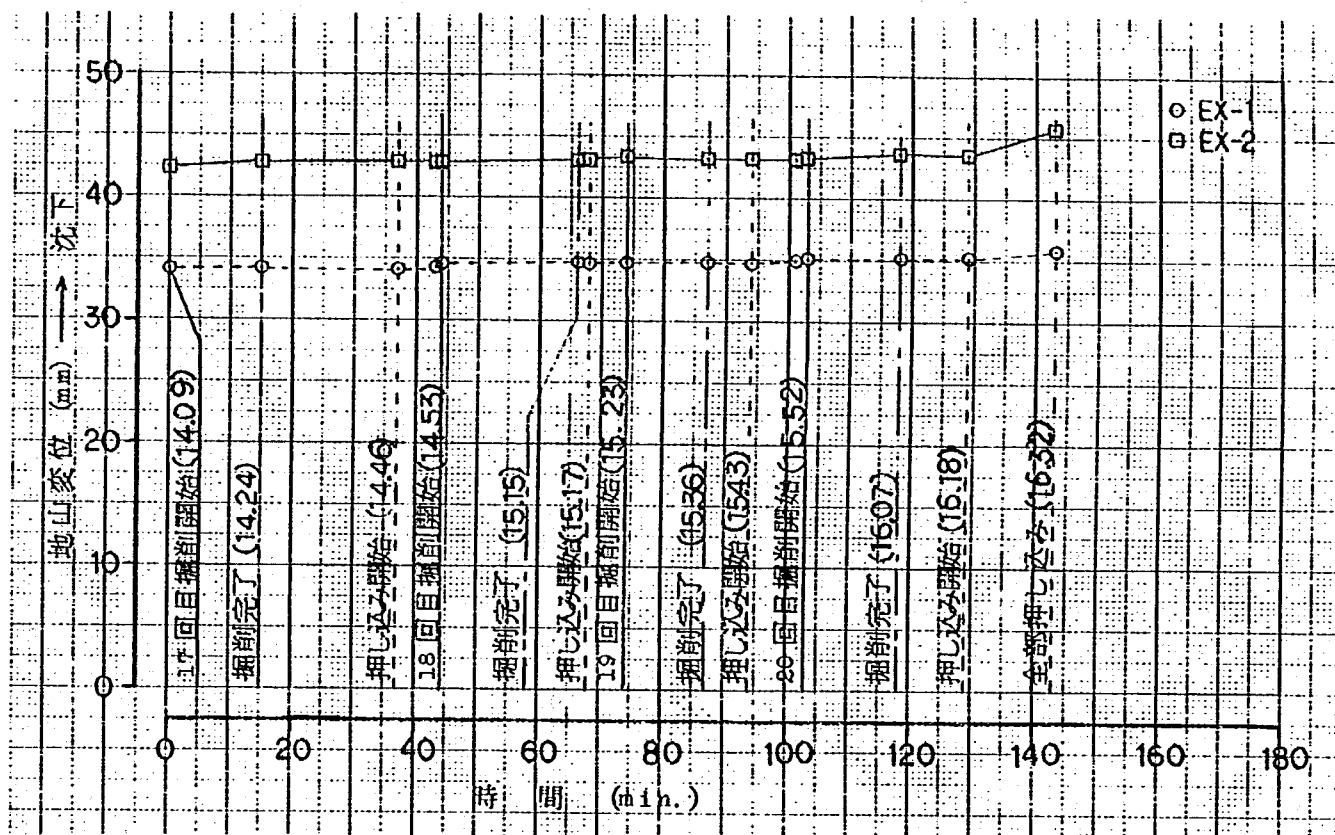


図-1 (その14) 地山変位の経時変化図 (16回目掘削)



図一 1 (その15) 地山変位の経時変化図 (17回目~20回目掘削)

表一 7 (その1) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/20 14.35	1 回目掘削開始	0.0	0.0
14.50	掘削完了	0.0	0.0
14.54	2 回目掘削開始	0.0	0.0
15.05	掘削完了	0.0	0.3
15.07	掘削後 2 分	0.0	0.5
15.11	3 回目掘削開始	0.0	0.8
15.18	掘削中	0.5	1.1
15.26	掘削完了	0.6	1.3
15.29	掘削後 3 分	0.7	1.5
15.34	4 回目掘削開始	0.8	2.1
15.39	掘削中	1.1	2.4
15.44	掘削完了	1.6	3.3
16.00	掘削後16分	2.1	4.0
16.21	5 回目掘削開始	2.6	4.5
16.22	掘削中 1 分	2.6	4.5
16.24	掘削中 3 分	2.6	4.5
16.26	掘削中 5 分	2.6	4.5
16.31	掘削中10分	2.9	4.9
16.36	掘削中15分	3.8	5.7
16.40	掘削完了	4.1	6.1
16.41	掘削後 1 分	4.2	6.1
16.43	掘削後 3 分	4.4	6.2
16.44	押し込み前	4.4	6.2
16.46	押し込み完了	4.4	6.2
16.47	押し込み後 1 分	4.5	6.2
16.48	2 分	4.5	6.3

表一 7 (その2) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/20 16.49	押し込み後 3 分	4.5	6.3
16.51	5 分	4.5	6.3
16.56	6 回目掘削開始	4.5	6.3
16.57	掘削中 1 分	4.5	6.4
16.59	掘削中 3 分	4.5	6.5
17.01	掘削中 5 分	4.8	6.6
17.04	掘削中 8 分	5.6	6.9
17.06	掘削中10分	6.1	7.2
17.15	掘削完了	7.5	8.1
17.16	掘削後	7.6	8.4
17.18	押し込み前	7.9	8.5
17.20	押し込み完了	8.0	8.6
17.21	押し込み後 1 分	8.3	9.1
17.23	押し込み後 3 分	8.5	9.3
17.25	押し込み後 5 分	8.5	9.3
17.28	押し込み後10分	8.6	9.3
17.30	7 回目掘削開始	8.6	9.4
17.31	掘削中 1 分	8.6	9.4
17.33	掘削中 3 分	8.7	9.4
17.36	掘削中 6 分	9.1	9.9
17.40	掘削中10分	9.5	10.5
17.46	掘削中16分	10.0	11.1
17.47	掘削完了	10.2	11.3
17.48	掘削後 1 分	10.3	11.3
17.49	押し込み前	10.4	11.4
17.51	押し込み完了	10.4	11.4

表-7 (その3) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/20 17.52	押し込み後1分	10.7	11.6
17.56	押し込み後5分	11.0	11.9
17.59	押し込み後8分	11.0	11.9
18.01	8回目掘削開始	11.0	11.9
18.03	掘削中2分	11.0	11.9
18.05	掘削中4分	11.5	12.0
18.18	掘削完了	15.8	15.4
18.21	押し込み前	16.0	15.6
18.24	押し込み完了	16.1	15.7
18.25	押し込み後1分	16.1	15.7
18.27	押し込み後3分	16.6	15.8
18.29	押し込み後5分	16.7	15.9
18.32	押し込み後8分	17.0	16.1
18.34	9回目掘削開始	17.2	16.2
18.36	掘削中2分	17.2	16.2
18.37	掘削中3分	17.2	16.3
18.40	掘削中6分	17.7	16.7
18.45	掘削中11分	18.1	17.7
18.50	掘削中16分	19.5	18.6
18.55	掘削完了	21.9	20.1
18.59	押し込み前	22.7	20.4
19.03	押し込み完了	23.0	20.4
19.04	押し込み後1分	23.1	20.6
19.06	押し込み後3分	23.3	20.7
19.08	押し込み後5分	23.5	20.8
19.13	10回目掘削開始	23.8	21.0

表-7 (その4) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/20 19.14	掘削中1分	23.8	21.0
19.16	掘削中3分	23.8	21.0
19.18	掘削中5分	24.2	21.3
19.23	掘削中10分	25.5	22.1
19.28	掘削中15分	26.1	23.1
19.32	掘削完了	27.8	24.0
19.33	掘削後1分	27.9	24.1
19.35	掘削後3分	28.0	24.2
19.37	掘削後5分	28.5	24.4
19.39	押し込み前	28.6	24.5
19.47	押し込み完了	29.0	25.0
19.48	押し込み後1分	29.3	25.3
19.50	押し込み後3分	29.3	25.3
19.52	押し込み後5分	29.4	25.4
19.56	押し込み後9分	29.4	25.4
19.57	押し込み後10分	29.4	25.4
20.02	第1日目(1回~10回)の掘削終了	29.4	25.4
20.32	"	29.5	25.4
21.02	"	29.6	25.5
21.32	"	29.6	25.7
22.02	"	29.6	25.8
22.32	"	29.6	25.7
23.00	"	29.6	25.6
23.32	"	29.6	25.7
10/21 0.02	"	29.5	25.6
0.32	"	29.6	25.5

表—7（その5）地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/21 9.04	11回目掘削開始	29.6	25.8
9.05	掘削中1分	29.6	25.8
9.07	掘削中3分	30.2	26.0
9.10	掘削中6分	31.3	26.7
9.14	掘削中10分	32.3	27.4
9.19	掘削中15分	33.1	27.6
9.24	掘削完了	34.9	27.7
9.26	掘削後2分	35.1	28.0
9.28	掘削後4分	35.2	28.1
9.29	掘削後5分	35.3	28.1
9.34	掘削後10分	35.4	28.1
9.36	押し込み前	35.4	28.2
9.41	押し込み完了	35.9	28.6
9.42	押し込み後1分	36.0	28.6
9.44	押し込み後3分	36.2	28.7
9.46	押し込み後5分	36.3	28.7
9.49	押し込み後8分	36.4	28.8
9.52	12回目掘削開始	36.4	28.9
9.53	掘削中1分	36.4	28.9
9.55	掘削中3分	36.5	29.0
9.57	掘削中5分	36.5	29.1
10.02	掘削中10分	36.8	29.4
10.07	掘削中15分	37.0	29.7
10.12	掘削完了	37.3	29.9
10.13	掘削後1分	37.4	30.0
10.15	掘削後3分	37.4	30.0

表—7（その6）地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/21 10.17	掘削後5分	37.4	30.0
10.22	掘削後10分	37.4	30.0
10.27	掘削後15分	37.4	30.1
10.32	押し込み前	37.4	30.1
10.34	押し込み完了	37.9	30.4
10.35	13回目掘削開始	38.4	30.7
10.36	掘削中1分	38.4	30.7
10.38	掘削中3分	38.5	30.8
10.41	掘削中6分	38.6	30.9
10.45	掘削中10分	38.7	31.0
10.50	掘削中15分	38.9	31.2
10.55	掘削完了	38.9	31.4
10.56	掘削後1分	38.9	31.4
10.59	掘削後4分	39.0	31.5
11.00	掘削後5分	39.0	31.5
11.05	掘削後10分	38.9	31.3
11.10	掘削後15分	39.2	31.5
11.15	押し込み開始	39.2	31.6
11.16	押し込み中	39.2	31.7
11.20	押し込み完了	39.6	31.7
11.21	14回目掘削開始	39.6	31.7
11.22	掘削中1分	39.6	31.8
11.24	掘削中3分	39.6	31.9
11.26	掘削中5分	39.7	31.9
11.31	掘削中10分	39.7	32.0
11.36	掘削中15分	39.7	32.1

表一7 (その7) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 $\delta 1$ (mm)	EX-2 地山変位 $\delta 2$ (mm)
10/21 11.42	掘削中21分	39.7	32.1
11.43	掘削完了	39.7	32.1
11.44	掘削後1分	39.8	32.2
11.46	掘削後3分	39.8	32.2
11.48	掘削後5分	39.9	32.3
11.53	掘削後10分	39.9	32.3
11.58	掘削後15分	39.9	32.3
12.03	押し込み開始	40.0	32.3
12.09	押し込み完了	40.4	32.7
12.10	15回目掘削開始	40.5	32.8
12.11	掘削中1分	40.6	32.9
12.13	掘削中3分	40.7	32.9
12.15	掘削中5分	40.7	32.9
12.20	掘削中10分	40.7	32.8
12.25	掘削中15分	40.7	32.8
12.29	掘削中19分	40.7	32.8
12.31	掘削完了	40.7	32.8
12.32	掘削後1分	40.7	32.8
12.34	掘削後3分	40.7	32.8
12.35	掘削後4分	40.7	32.9
12.36	掘削後5分	40.8	33.0
12.41	掘削後10分	40.9	33.1
12.46	掘削後15分	41.0	33.3
13.03	掘削後32分	41.0	33.3
13.06	掘削後35分	41.0	33.0
13.12	押し込み開始	41.1	33.0

表一7 (その8) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 $\delta 1$ (mm)	EX-2 地山変位 $\delta 2$ (mm)
10/21 13.17	押し込み完了	41.6	33.5
13.18	押し込み後1分	41.7	33.5
13.20	16回目掘削開始	41.7	33.7
13.21	掘削中1分	41.7	33.7
13.23	掘削中3分	41.7	33.7
13.25	掘削中5分	41.7	33.7
13.30	掘削中10分	41.7	33.7
13.35	掘削中15分	41.7	33.7
13.38	掘削完了	41.7	33.7
13.39	掘削後1分	41.7	33.7
13.41	掘削後3分	41.7	33.7
13.43	掘削後5分	41.8	33.7
13.48	掘削後10分	41.8	33.7
14.03	押し込み開始	41.8	33.8
14.06	押し込み完了	42.2	34.0
14.09	17回目掘削開始	42.4	34.1
14.24	掘削完了	42.8	34.2
14.46	押し込み開始	42.8	34.2
14.52	押し込み完了	42.8	34.4
14.53	18回目掘削開始	42.7	34.6
15.15	掘削完了	43.0	34.7
15.17	押し込み開始	43.1	34.7
15.23	19回目掘削開始	43.2	34.8
15.36	掘削完了	43.2	34.8
15.43	押し込み開始	43.2	34.8
15.50	押し込み完了	43.2	34.9

表一 7 (その 9) 地山変位の経時変化表

月日時分		EX-1 地山変位 δ_1 (mm)	EX-2 地山変位 δ_2 (mm)
10/21 15.52	20回目掘削開始	43.4	35.1
16.07	掘削完了	43.6	35.1
16.18	押し込み開始	43.6	35.1
16.32	全部押し込み	45.8	35.9

表一八（その１）地山変位速度と切羽から測定断面までの距離の関係表

月日時分		Δt (min)	δ_1 (mm)	$\Delta \delta_1$ (mm)	$\Delta \delta_1 / \Delta t$ (mm/min)	δ_2 (mm)	$\Delta \delta_2$ (mm)	$\Delta \delta_2 / \Delta t$ (mm/min)	ℓ (cm)
10/20 14.35	1回目掘削開始	—	0.0	—	—	0.0	—	—	—
14.50	掘削完了	15	0.0	0.0	0.0000	0.0	0.0	0.0000	— 115
14.52	押し込み前	2	0.0	0.0	0.0000	0.0	0.0	0.0000	— 105
14.54	2回目掘削開始	2	0.0	0.0	0.0000	0.0	0.0	0.0000	— 105
15.05	掘削完了	11	0.0	0.0	0.0000	0.3	0.3	0.0273	— 105
15.09	押し込み前	4	0.0	0.0	0.0000	0.6	0.3	0.0750	— 95
15.11	3回目掘削開始	2	0.0	0.0	0.0000	0.8	0.2	0.1000	— 95
15.26	掘削完了	15	0.6	0.6	0.0400	1.3	0.5	0.0333	— 95
15.29	押し込み前	3	0.7	0.1	0.0333	1.5	0.2	0.0666	— 85
15.34	4回目掘削開始	5	0.8	0.1	0.0200	2.1	0.6	0.1200	— 85
15.44	掘削完了	10	1.6	0.8	0.0800	3.3	1.2	0.1200	— 85
16.12	押し込み前	28	2.2	0.6	0.0214	4.1	0.8	0.0286	— 75
16.21	5回目掘削開始	9	2.6	0.4	0.0444	4.5	0.4	0.0444	— 75
16.40	掘削完了	19	4.1	1.5	0.0789	6.1	1.6	0.0842	— 75
16.44	押し込み前	4	4.4	0.3	0.0750	6.2	0.1	0.0250	— 65
16.56	6回目掘削開始	12	4.5	0.1	0.0083	6.3	0.1	0.0083	— 65
17.15	掘削完了	19	7.5	3.0	0.1579	8.1	1.8	0.0947	— 65
17.18	押し込み前	3	7.9	0.4	0.0333	8.5	0.4	0.1333	— 55
17.30	7回目掘削開始	12	8.6	0.7	0.0583	9.4	0.9	0.0750	— 55
17.47	掘削完了	17	10.2	1.6	0.0941	11.3	1.9	0.1118	— 55
17.49	押し込み前	2	10.4	0.2	0.1000	11.4	0.1	0.0500	— 45
18.01	8回目掘削開始	12	11.0	0.6	0.0500	11.9	0.5	0.0417	— 45
18.18	掘削完了	17	15.8	4.8	0.2824	15.4	3.5	0.2059	— 45
18.21	押し込み前	3	16.0	0.2	0.0667	15.6	0.2	0.0667	— 35
18.34	9回目掘削開始	13	17.2	1.2	0.0923	16.2	0.6	0.0461	— 35
18.55	掘削完了	21	21.9	4.7	0.2238	20.1	3.9	0.1857	— 35
18.59	押し込み前	4	22.7	0.8	0.2000	20.4	0.3	0.0750	— 25
19.13	10回目掘削開始	14	23.8	1.1	0.0786	21.0	0.6	0.04286	— 25
19.32	掘削完了	19	27.8	4.0	0.2105	24.0	3.0	0.1579	— 25
19.37	押し込み前	5	28.6	0.8	0.1600	24.5	0.5	0.1000	— 15
19.57		20	29.4	0.8	0.0400	25.4	0.9	0.0450	— 15

ただし、 Δt : 時間、 δ_1 : EX-1の変位、 δ_2 : EX-2の変位、 ℓ : 切羽からの距離、 $\Delta \delta_1 / \Delta t$ 、
 $\Delta \delta_2 / \Delta t$: EX-1、EX-2の地山変位速度

表一八（その二）地山変位速度と切羽から測定断面までの距離の関係表

月日時分		Δt (min)	δ_1 (mm)	$\Delta \delta_1$ (mm)	$\Delta \delta_1 / \Delta t$ (mm/min)	δ_2 (mm)	$\Delta \delta_2$ (mm)	$\Delta \delta_2 / \Delta t$ (mm/min)	ℓ (cm)
10/21 9.04	11回目掘削開始	—	29.6	—	—	25.8	—	—	—
9.24	掘削完了	20	34.9	5.3	0.2650	27.7	1.9	0.0950	— 15
9.36	押し込み前	12	35.4	0.5	0.0416	28.2	0.5	0.0416	— 5
9.52	12回目掘削開始	16	36.4	1.0	0.0625	28.9	0.7	0.04375	— 5
10.12	掘削完了	20	37.3	0.9	0.0450	29.9	1.0	0.0500	— 5
10.32	押し込み前	20	37.4	0.1	0.0050	30.1	0.2	0.0100	5
10.35	13回目掘削開始	3	38.4	1.0	0.3333	30.7	0.6	0.2000	5
10.55	掘削完了	20	38.9	0.5	0.0250	31.4	0.7	0.0350	5
11.15	押し込み開始	20	39.2	0.3	0.0150	31.6	0.2	0.0100	15
11.21	14回目掘削開始	6	39.6	0.4	0.0666	31.7	0.1	0.0166	15
11.43	掘削完了	22	39.7	0.1	0.0045	32.1	0.4	0.01818	15
12.03	押し込み開始	20	40.0	0.3	0.0150	32.3	0.2	0.0100	25
12.10	15回目掘削開始	17	40.5	0.5	0.0294	32.8	0.5	0.0294	25
12.31	掘削完了	21	40.7	0.2	0.0095	32.8	0.0	0.0000	25
13.12	押し込み開始	41	41.1	0.4	0.0098	33.0	0.2	0.0049	35
13.20	16回目掘削開始	8	41.7	0.6	0.0750	33.7	0.7	0.0875	35
13.38	掘削完了	18	41.7	0.0	0.0000	33.7	0.0	0.0000	35
14.03	押し込み開始	25	41.8	0.1	0.0040	33.8	0.1	0.0040	45
14.09	17回目掘削開始	6	42.4	0.6	0.1000	34.1	0.3	0.0500	45
14.24	掘削完了	15	42.8	0.4	0.0267	34.2	0.1	0.0067	45
14.46	押し込み開始	22	42.8	0.0	0.0000	34.2	0.0	0.0000	55
14.53	18回目掘削開始	7	42.7	— 0.1	0.0143	34.6	0.4	0.0571	55
15.15	掘削完了	22	43.0	0.3	0.0136	34.7	0.1	0.0045	55
15.17	押し込み開始	2	43.1	0.1	0.0500	34.7	0.0	0.0000	65
15.23	19回目掘削開始	5	43.2	0.1	0.0020	34.8	0.1	0.0020	65
15.36	掘削完了	13	43.2	0.0	0.0000	34.8	0.0	0.0000	65
15.43	押し込み開始	7	43.2	0.0	0.0000	34.8	0.0	0.0000	75
15.52	20回目掘削開始	9	43.4	0.2	0.0222	35.1	0.3	0.0333	75
16.07	掘削完了	15	43.6	0.2	0.0133	35.1	0.0	0.0000	75
16.18	押し込み開始	11	43.6	0.0	0.0000	35.1	0.0	0.0000	85
16.32	全部押し込み	14	45.8	0.2	0.0143	35.9	0.8	0.0571	85

ただし、 Δt ：時間、 δ_1 ：EX-1の変位、 δ_2 ：EX-2の変位、 ℓ ：切羽からの距離、 $\Delta \delta_1 / \Delta t$ 、 $\Delta \delta_2 / \Delta t$ ：EX-1、EX-2の地山変位速度

表—9（その1）トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化表 粘性土(CASE—1) X方向

掘削回	距離または位置 (cm)	X—1 (mm)	X—2 (mm)	X—3 (mm)	X—4 (mm)	平均 $\bar{X}$ (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	0.27	0.03	0.19	0.04	0.13
3	20	0.39	0.05	0.33	0.04	0.20
4	30	0.67	0.05	0.86	0.16	0.44
5	40	1.07	0.10	0.96	0.12	0.56
6	50	1.48	0.10	1.30	0.15	0.76
7	60	1.62	0.12	1.67	0.16	0.89
8	70	2.12	0.13	1.95	0.19	1.10
9	80	2.48	0.18	2.27	0.20	1.28
10	90	2.68	0.18	2.66	0.21	1.43
11	100	8.86	2.95	8.51	1.91	5.56
12	110	9.25	2.87	8.90	1.94	5.74
13	120	9.67	2.93	9.28	1.95	5.96
14	130	10.16	2.67	9.69	1.96	6.12
15	140	10.47	2.97	10.10	1.95	6.37
16	150	11.24	3.12	10.61	1.99	6.74
17	160	11.63	3.35	11.00	2.15	7.03
18	170	12.01	3.66	11.31	2.29	7.32
19	180	12.23	3.74	11.55	2.32	7.46
20	190	12.43	3.86	11.70	2.45	7.61

表—9（その2）トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化表 粘性土(CASE—1) Y方向

掘削回	距離または位置 (cm)	Y—1 (mm)	Y—2 (mm)	Y—3 (mm)	Y—4 (mm)	平均 $\bar{Y}$ (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	-0.01	0.03	0.02	0.00	0.01
3	20	0.17	0.07	-0.01	0.07	0.08
4	30	0.39	0.10	0.01	0.40	0.23
5	40	0.58	0.11	0.00	0.51	0.30
6	50	0.55	0.11	-0.01	0.49	0.29
7	60	1.11	0.16	0.02	1.01	0.58
8	70	1.23	0.18	0.02	1.10	0.63
9	80	1.26	0.26	0.03	1.16	0.68
10	90	1.20	0.20	0.08	1.15	0.66
11	100	1.64	0.23	0.02	1.44	0.83
12	110	1.63	0.23	0.01	1.45	0.83
13	120	1.60	0.26	0.02	3.44	1.33
14	130	1.62	0.19	0.08	1.51	0.85
15	140	1.61	0.18	0.07	1.46	0.83
16	150	1.61	0.22	0.02	1.43	0.82
17	160	1.60	0.21	0.11	1.51	0.86
18	170	1.59	0.19	0.12	1.53	0.86
19	180	1.60	0.23	0.18	1.47	0.87
20	190	1.58	0.16	0.09	1.48	0.83

表一 9 (その 3) トンネル切羽位置による載荷板変位の経時
変化表 粘性土 (CASE-1) Z 方向

掘削回	距離または 位置 (cm)	Z-1 (mm)	Z-2 (mm)	Z-3 (mm)	Z-4 (mm)	平均 Z (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	0.29	0.18	0.00	0.01	0.12
3	20	1.05	0.30	0.15	0.67	0.54
4	30	1.97	0.53	0.42	1.54	1.12
5	40	2.58	0.72	0.74	2.42	1.62
6	50	3.13	0.89	1.03	3.05	2.03
7	60	3.97	1.41	1.56	3.94	2.72
8	70	4.39	1.45	1.65	4.10	2.90
9	80	4.92	1.74	1.97	4.48	3.28
10	90	5.44	2.10	2.38	4.89	3.70
11	100	5.86	1.43	1.65	5.02	3.49
12	110	5.71	1.42	1.63	5.02	3.45
13	120	5.80	1.44	1.79	5.06	3.52
14	130	5.37	1.63	1.87	5.09	3.50
15	140	5.48	1.64	1.90	5.08	3.53
16	150	5.58	1.63	1.89	5.08	3.55
17	160	5.50	1.65	1.91	5.09	3.54
18	170	5.84	1.65	1.90	5.09	3.62
19	180	5.70	1.65	1.89	5.09	3.64
20	190	5.57	1.65	1.89	5.33	3.61

表一 10 トンネル切羽位置による基準応力の経時変化表
砂質土 (CASE-2)

掘削回	距離または 位置 (cm)	P-1 (kg/cm ²)	P-2 (kg/cm ²)	P-3 (kg/cm ²)	P-4 (kg/cm ²)	P-5 (kg/cm ²)
1	- 100	0.510	0.698	0.002	0.548	0.521
2	- 90	0.511	0.693	0.003	0.548	0.521
3	- 80	0.507	0.691	0.006	0.552	0.522
4	- 70	0.502	0.683	0.004	0.545	0.520
5	- 60	0.510	0.689	0.008	0.555	0.527
6	- 50	0.524	0.702	0.007	0.563	0.540
7	- 40	0.532	0.716	0.006	0.574	0.544
8	- 30	0.551	0.739	0.008	0.594	0.550
9	- 20	0.561	0.763	0.006	0.606	0.546
10	- 10	0.601	0.803	0.017	0.599	0.585
11	0	0.602	0.849	0.014	0.657	0.562
12	10	0.608	0.885	0.015	0.650	0.547
13	20	0.613	0.913	0.017	0.675	0.535
14	30	0.598	0.909	0.012	0.635	0.525
15	40	0.576	0.880	0.015	0.577	0.510
16	50	0.551	0.816	0.010	0.532	0.485
17	60	0.523	0.770	0.012	0.444	0.427
18	70	0.511	0.729	0.015	0.399	0.395
19						
20						

表-11. トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係表
砂質土 (CASE-2) A断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	A-1 (kg/cm ²)	A-2 (kg/cm ²)	A-3 (kg/cm ²)	A-4 (kg/cm ²)	A-5 (kg/cm ²)	A-6 (kg/cm ²)	A-7 (kg/cm ²)	A-1' (kg/cm ²)	A-5' (kg/cm ²)
1	-70	0.546	0.501	0.442	0.491	0.340	0.538	0.108	0.351	
2	-60	0.552	0.506	0.445	0.488	0.343	0.543	0.109	0.348	
3	-50	0.558	0.513	0.450	0.494	0.345	0.543	0.108	0.346	
4	-40	0.561	0.515	0.449	0.494	0.344	0.544	0.110	0.338	
5	-30	0.571	0.523	0.455	0.499	0.335	0.517	0.116	0.333	不
6	-20	0.568	0.516	0.449	0.491	0.327	0.537	0.122	0.306	良
7	-10	0.603	0.514	0.441	0.486	0.326	0.383	0.125	0.286	の
8	0	0.782	0.535	0.438	0.480	0.340	—	0.128	0.282	た
9	10	1.163	0.575	0.447	0.483	0.362	—	0.131	0.335	め
10	20	1.174	0.582	0.457	0.510	0.366	—	0.130	0.610	埋
11	30	0.886	0.561	0.472	0.517	0.335	—	0.087	—	設
12	40	0.903	0.598	0.495	0.523	0.312	—	0.068	0.671	し
13	50	0.845	0.601	0.501	0.515	0.296	—	0.057	0.312	て
14	60	0.839	0.613	0.508	0.510	0.272	—	0.048	0.198	い
15	70	0.885	0.623	0.524	0.517	0.290	—	0.065	0.148	な
16	80	0.893	0.669	0.549	0.528	0.334	—	0.060	0.127	い
17	90	0.885	0.690	0.561	0.525	0.322	—	0.050	0.227	
18	100	0.893	0.702	0.573	0.539	0.317	—	0.049	0.185	
19										
20										

表—12 トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係表
砂質土 (CASE—2) B断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	B—1 (kg/cm ²)	B—2 (kg/cm ²)	B—3 (kg/cm ²)	B—4 (kg/cm ²)	B—5 (kg/cm ²)	B—6 (kg/cm ²)	B—7 (kg/cm ²)
1	— 130	0.774	0.896	0.777	0.573	0.525	—	0.287
2	— 120	0.777	0.899	0.780	0.575	0.528	—	0.295
3	— 110	0.778	0.902	0.783	0.572	0.525	0.810	0.338
4	— 100	0.776	0.899	0.779	0.573	0.525	0.807	0.341
5	— 90	0.784	0.909	0.791	0.573	0.530	0.810	0.333
6	— 80	0.787	0.918	0.799	0.572	0.528	0.812	0.344
7	— 70	0.794	0.928	0.810	0.574	0.531	0.816	0.336
8	— 60	0.801	0.937	0.819	0.572	0.533	0.815	0.341
9	— 50	0.807	0.950	0.830	0.571	0.528	0.811	0.347
10	— 40	0.888	1.030	0.897	0.572	0.537	0.851	0.424
11	— 30	0.887	1.038	0.900	0.572	0.529	0.842	0.425
12	— 20	0.911	1.033	0.890	0.573	0.529	0.837	0.417
13	— 10	0.870	1.023	0.871	0.572	0.527	0.787	0.411
14	0	0.975	1.049	0.842	0.573	0.528	0.534	0.376
15	10	1.323	1.103	0.821	0.572	0.527	—	0.419
16	20	—	1.199	0.829	0.571	0.527	—	0.392
17	30	—	1.154	0.843	0.571	0.527	—	0.278
18	40	—	1.103	0.888	0.572	0.528	—	0.237
19								
20								

表—13 覆工板Aのトンネル土圧と位置の関係表
砂質土 (CASE—2)

掘削回	距離または 位置 (cm)	LCV—A (kg/cm ²)	LCH—A (kg/cm ²)
1	—	—	—
2	—	—	—
3	(— 10)	0.001	0.001
4	(0)	0.065	0.013
5	10	0.084	0.150
6	20	0.205	0.152
7	30	0.293	0.242
8	40	0.527	0.383
9	50	0.628	0.418
10	60	0.518	0.434
11	70	0.425	0.286
12	80	0.408	0.268
13	90	0.413	0.193
14	100	0.364	0.371
15	110	0.393	0.327
16	120	0.414	0.392
17	130	0.451	0.443
18	140	0.485	0.560
19			
20			

表—14 覆工板Bのトンネル土圧と位置の関係表
砂質土 (CASE-2)

掘削回	距離または 位置 (cm)	LCV-B (kg/cm ²)	LCH-B (kg/cm ²)
1	—	—	—
2	—	—	—
3	—	—	—
4	—	—	—
5	—	—	—
6	—	0.003	0.005
7	—	0.001	0.007
8	—	0.003	0.007
9	(-10)	0.004	0.007
10	(0)	0.000	0.002
11	10	0.005	0.009
12	20	0.029	0.069
13	30	0.041	0.061
14	40	0.057	0.126
15	50	0.070	0.062
16	60	0.117	0.062
17	70	0.056	0.025
18	80	0.105	0.013
19			
20			

表—15 地山変位と切羽から測定断面までの距離の関係表
砂質土 (CASE-2)

掘削回	距離または 位置 (cm)	EX-1 δ_1 (mm)	EX-2 δ_2 (mm)
1	— 115	0.0	0.0
2	— 105	0.1	0.1
3	— 95	0.2	0.1
4	— 85	0.2	0.1
5	— 75	0.2	0.1
6	— 65	0.2	0.1
7	— 55	0.2	0.1
8	— 45	0.2	0.1
9	— 35	0.2	0.1
10	— 25	0.2	0.1
11	— 15	0.2	0.2
12	— 5	0.2	0.2
13	5	0.2	0.2
14	15	0.2	0.2
15	25	0.2	0.2
16	35	0.2	0.2
17	45	0.2	0.2
18	55	0.2	0.2
19			
20			

表—16 (その1) トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化表 砂質土 (CASE—2) X方向

掘削回	距離または位置 (cm)	X—1 (mm)	X—2 (mm)	X—3 (mm)	X—4 (mm)	平均 $\bar{X}$ (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	0.01	—0.01	0.06	0.00	0.02
3	20	0.01	—0.01	0.09	—0.02	0.02
4	30	0.04	0.04	0.04	—0.03	0.03
5	40	0.07	0.11	0.10	0.04	0.08
6	50	0.10	0.06	0.19	—0.01	0.09
7	60	0.08	0.07	0.17	0.04	0.09
8	70	0.18	0.16	0.16	0.06	0.14
9	80	0.15	0.14	0.19	0.07	0.14
10	90	0.41	0.48	0.36	0.32	0.39
11	100	0.41	0.54	0.41	0.28	0.41
12	110	0.39	1.19	0.42	0.28	0.57
13	120	0.49	0.75	0.46	0.40	0.53
14	130	0.50	0.89	0.46	0.38	0.56
15	140	0.57	1.32	0.50	0.38	0.69
16	150	0.59	1.04	0.58	0.48	0.67
17	160	0.65	1.15	0.63	0.49	0.73
18	170	0.73	1.14	0.67	0.58	0.78
19	180					
20	190					

表—16 (その2) トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化表 砂質土 (CASE—2) Y方向

掘削回	距離または位置 (cm)	Y—1 (mm)	Y—2 (mm)	Y—3 (mm)	Y—4 (mm)	平均 $\bar{Y}$ (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	—0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	20	0.00	—0.02	—0.02	0.00	—0.01
4	30	—0.05	0.02	0.02	0.00	0.00
5	40	—0.01	—0.01	—0.01	—0.03	—0.02
6	50	0.00	—0.02	—0.02	0.02	—0.01
7	60	—0.01	—0.03	—0.03	0.01	—0.02
8	70	—0.01	—0.06	—0.06	0.02	—0.03
9	80	0.00	—0.04	—0.04	0.02	—0.02
10	90	—0.04	—0.02	—0.02	0.00	—0.02
11	100	—0.05	—0.06	—0.06	—0.07	—0.06
12	110	—0.06	—0.08	—0.08	—0.10	—0.08
13	120	—0.07	—0.05	—0.05	—0.07	—0.06
14	130	—0.08	—0.05	—0.05	—0.05	—0.06
15	140	—0.06	—0.04	—0.04	—0.09	—0.06
16	150	—0.07	—0.04	—0.04	—0.09	—0.06
17	160	—0.06	—0.05	—0.05	—0.09	—0.06
18	170	—0.06	—0.04	—0.04	—0.07	—0.05
19	180					
20	190					

表-16 (その3) トンネル切羽位置による載荷板変位の経時変化表 砂質土(CASE-2) Z方向

掘削回	距離または位置 (cm)	Z-1 (mm)	Z-2 (mm)	Z-3 (mm)	Z-4 (mm)	平均Z (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	0.00	0.00	-0.10	0.00	-0.02
3	20	-0.01	0.00	-0.24	0.01	-0.06
4	30	0.00	-0.01	-0.24	0.01	-0.06
5	40	0.00	0.00	-0.24	0.01	-0.06
6	50	0.01	0.02	-0.22	0.01	-0.05
7	60	0.01	0.01	-0.23	0.01	-0.05
8	70	0.01	-0.03	-0.23	0.01	-0.06
9	80	0.00	-0.03	-0.24	0.01	-0.07
10	90	0.00	-0.05	-0.23	-0.03	-0.08
11	100	-0.01	-0.05	-0.24	-0.03	-0.08
12	110	0.00	-0.05	-0.24	-0.02	-0.08
13	120	0.01	-0.05	-0.25	-0.02	-0.08
14	130	0.01	-0.06	-0.26	-0.02	-0.08
15	140	0.00	-0.07	-0.28	0.00	-0.09
16	150	0.00	-0.07	-0.27	0.00	-0.09
17	160	0.01	-0.06	-0.28	0.00	-0.08
18	170	0.00	-0.07	-0.28	0.01	-0.09
19	180					
20	190					

表-17 (その1) トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離の関係表 (補正後) 粘性土(CASE-1) A断面

掘削回	距離または位置 (cm)	A-1 (kg/cm ²)	A-2 (kg/cm ²)	A-3 (kg/cm ²)	A-4 (kg/cm ²)	A-5 (kg/cm ²)	A-6 (kg/cm ²)	A-7 (kg/cm ²)	A-1' (kg/cm ²)	A-5' (kg/cm ²)
1	-70	0.594	0.640	0.586	0.483	0.552	0.667	0.561	0.467	0.486
2	-60	0.581	0.626	0.577	0.462	0.538	0.659	0.557	0.449	0.462
3	-50	0.568	0.621	0.576	0.465	0.523	0.646	0.542	0.446	0.454
4	-40	0.534	0.597	0.560	0.454	0.490	0.584	0.521	0.428	0.422
5	-30	0.501	0.569	0.544	0.449	0.469	0.541	0.489	0.414	0.385
6	-20	0.458	0.545	0.532	0.449	0.438	0.464	0.431	0.396	0.335
7	-10	0.447	0.550	0.541	0.454	0.444	0.405	0.391	0.396	0.314
8	0	0.428	0.544	0.536	0.459	0.443	0.310	0.362	0.335	0.282
9	10	0.434	0.548	0.538	0.462	0.441	0.182	0.368	0.319	0.261
10	20	0.464	0.570	0.548	0.465	0.448	—	0.374	0.269	0.256
11	30	0.498	0.578	0.529	0.418	0.484	—	0.410	0.322	0.263
12	40	0.466	0.565	0.511	0.408	0.476	—	0.382	0.301	0.218
13	50	0.428	0.544	0.500	0.405	0.465	—	0.361	0.306	0.218
14	60	0.410	0.539	0.503	0.408	0.461	—	0.376	0.282	0.210
15	70	0.405	0.532	0.499	0.411	0.456	—	0.361	0.261	0.202
16	80	0.426	0.537	0.501	0.416	0.456	—	0.352	0.261	0.210
17	90	0.443	0.544	0.505	0.419	0.472	—	0.319	0.263	0.203
18	100	0.423	0.544	0.505	0.421	0.458	—	0.341	0.293	0.202
19	110	0.417	0.534	0.496	0.416	0.450	—	0.306	0.274	0.199
20	120	0.398	0.534	0.499	0.424	0.453	—	0.318	0.266	0.189

表—17 (その2) トンネル周辺応力と切羽から測定断面までの距離
関係表 (補正後) 粘性土 (CASE—1) B断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	B—1 (kg/cm ²)	B—2 (kg/cm ²)	B—3 (kg/cm ²)	B—4 (kg/cm ²)	B—5 (kg/cm ²)	B—6 (kg/cm ²)	B—7 (kg/cm ²)
1	— 130	0.594	0.590	0.591	0.490	0.452	0.601	—
2	— 120	0.587	0.584	0.586	0.485	0.448	0.600	—
3	— 110	0.596	0.595	0.593	0.491	0.450	0.613	—
4	— 100	0.600	0.594	0.597	0.497	0.448	0.611	—
5	— 90	0.600	0.595	0.601	0.502	0.442	0.613	—
6	— 80	0.601	0.598	0.603	0.503	0.439	0.615	—
7	— 70	0.625	0.618	0.625	0.518	0.447	0.629	—
8	— 60	0.614	0.609	0.621	0.514	0.446	0.618	—
9	— 50	0.601	0.599	0.615	0.515	0.432	0.608	—
10	— 40	0.590	0.593	0.613	0.512	0.422	0.611	—
11	— 30	0.586	0.589	0.610	0.492	0.405	0.565	—
12	— 20	0.490	0.530	0.580	0.472	0.346	0.498	—
13	— 10	0.388	0.476	0.543	0.455	0.290	0.286	—
14	0	0.417	0.482	0.540	0.453	0.315	0.271	—
15	10	0.414	0.490	0.541	0.455	0.323	0.083	—
16	20	0.443	0.509	0.554	0.464	0.342	—	—
17	30	0.463	0.524	0.559	0.468	0.350	—	—
18	40	0.478	0.531	0.565	0.471	0.353	—	—
19	50	0.465	0.530	0.573	0.475	0.359	—	—
20	60	0.442	0.525	0.570	0.476	0.357	—	—

表—18 トンネル周辺応力 (初期値との比) と切羽から測定断面までの距離の関
係表 粘性土 (CASE—1) A断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	A—1	A—2	A—3	A—4	A—5	A—6	A—7	A—1'	A—5'
1	— 70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	— 60	0.978	0.978	0.985	0.957	0.975	0.988	0.993	0.961	0.951
3	— 50	0.956	0.970	0.983	0.963	0.947	0.969	0.966	0.955	0.934
4	— 40	0.899	0.933	0.956	0.940	0.888	0.876	0.929	0.916	0.868
5	— 30	0.843	0.889	0.928	0.930	0.850	0.811	0.872	0.887	0.792
6	— 20	0.771	0.852	0.908	0.930	0.793	0.696	0.768	0.848	0.689
7	— 10	0.753	0.859	0.923	0.940	0.804	0.607	0.697	0.848	0.646
8	0	0.721	0.850	0.915	0.950	0.803	0.465	0.645	0.717	0.580
9	10	0.731	0.856	0.918	0.956	0.799	0.273	0.656	0.683	0.537
10	20	0.781	0.890	0.935	0.963	0.812	—	0.667	0.634	0.527
11	30	0.838	0.903	0.903	0.865	0.877	—	0.731	0.690	0.541
12	40	0.785	0.883	0.872	0.845	0.862	—	0.691	0.645	0.449
13	50	0.721	0.850	0.853	0.839	0.842	—	0.643	0.655	0.449
14	60	0.690	0.842	0.858	0.845	0.835	—	0.670	0.604	0.432
15	70	0.682	0.831	0.852	0.851	0.826	—	0.643	0.559	0.416
16	80	0.717	0.839	0.855	0.861	0.826	—	0.627	0.559	0.432
17	90	0.746	0.850	0.862	0.867	0.855	—	0.569	0.563	0.418
18	100	0.712	0.850	0.862	0.872	0.830	—	0.608	0.627	0.416
19	110	0.702	0.834	0.846	0.862	0.815	—	0.545	0.587	0.409
20	120	0.670	0.834	0.852	0.878	0.821	—	0.567	0.570	0.389

表一19 トンネル周辺応力（初期値との比）と切羽から測定断面までの距離の関係表 粘性土（CASE-1）B断面

掘削回	距離または位置 (cm)	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
1	-130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	—
2	-120	0.988	0.990	0.992	0.990	0.991	0.998	—
3	-110	1.003	1.008	1.003	1.002	0.956	1.020	—
4	-100	1.010	1.007	1.010	1.014	0.991	1.017	—
5	-90	1.010	1.008	1.017	1.024	0.978	1.020	—
6	-80	1.012	1.014	1.020	1.027	0.971	1.023	—
7	-70	1.052	1.047	1.058	1.057	0.989	1.047	—
8	-60	1.034	1.032	1.051	1.049	0.987	1.028	—
9	-50	1.012	1.015	1.041	1.051	0.956	1.012	—
10	-40	0.993	1.005	1.037	1.045	0.934	1.017	—
11	-30	0.987	0.998	1.032	1.004	0.896	0.940	—
12	-20	0.825	0.898	0.981	0.963	0.765	0.829	—
13	-10	0.653	0.807	0.919	0.929	0.642	0.476	—
14	0	0.702	0.817	0.914	0.924	0.697	0.451	—
15	10	0.697	0.831	0.915	0.929	0.715	0.138	—
16	20	0.744	0.863	0.937	0.947	0.757	—	—
17	30	0.779	0.888	0.946	0.955	0.774	—	—
18	40	0.805	0.900	0.956	0.961	0.781	—	—
19	50	0.783	0.898	0.970	0.969	0.794	—	—
20	60	0.744	0.890	0.964	0.971	0.790	—	—

表一20 トンネル周辺応力（初期値との比）と切羽から測定断面までの距離の関係表 砂質土（CASE-2）A断面

掘削回	距離または位置 (cm)	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-1'	A-5'
1	-70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	—
2	-60	1.010	1.010	1.007	0.994	1.009	1.009	1.009	0.991	—
3	-50	1.022	1.024	1.018	1.006	1.015	1.009	1.000	0.986	—
4	-40	1.027	1.028	1.016	1.006	1.012	1.011	1.019	0.963	—
5	-30	1.046	1.044	1.029	1.016	0.985	0.961	1.074	0.949	—
6	-20	1.040	1.030	1.016	1.000	0.962	0.998	1.130	0.872	—
7	-10	1.104	1.026	0.998	0.990	0.959	0.712	1.157	0.815	—
8	0	1.432	1.068	0.991	0.978	1.000	—	1.185	0.803	—
9	10	2.130*	1.148	1.011	0.984	1.065	—	1.213	0.945	—
10	20	2.150*	1.162	1.034	1.039	1.076	—	1.204	1.738*	—
11	30	1.623*	1.120	1.068	1.053	0.985	—	0.806	—	—
12	40	1.654*	1.194	1.120	1.065	0.918	—	0.630	1.912*	—
13	50	1.548*	1.200	1.133	1.049	0.871	—	0.528	0.889*	—
14	60	1.537*	1.224	1.149	1.039	0.800	—	0.444	0.546*	—
15	70	1.621*	1.261	1.186	1.053	0.853	—	0.602	0.422*	—
16	80	1.636*	1.335	1.242	1.075	0.982	—	0.555	0.362*	—
17	90	1.621*	1.377	1.269	1.069	0.947	—	0.463	0.647*	—
18	100	1.636*	1.401	1.296	1.098	0.932	—	0.454	0.527*	—
19										
20										

ただし、*印のついている値は、覆工板押込みによる影響を受けたと考えられる値である。

表一21 トンネル周辺応力（初期値との比）と切羽から測定断面までの距離の関係表
砂質土（CASE-2）B断面

掘削回	距離または 位置 (cm)	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
1	-130	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	—	1.000
2	-120	1.004	1.003	1.004	1.003	1.006	—	1.028
3	-110	1.005	1.007	1.008	0.998	1.000	1.000	1.178
4	-100	1.003	1.003	1.003	1.000	1.000	0.996	1.188
5	-90	1.013	1.015	1.018	1.000	1.010	1.000	1.160
6	-80	1.017	1.025	1.028	0.998	1.006	1.002	1.199
7	-70	1.026	1.036	1.042	1.002	1.011	1.007	1.171
8	-60	1.035	1.046	1.054	0.998	1.015	1.006	1.188
9	-50	1.043	1.060	1.068	0.957	1.006	1.001	1.209
10	-40	1.147	1.150	1.154	0.998	1.023	1.051	1.477
11	-30	1.146	1.158	1.158	0.998	1.008	1.040	1.481
12	-20	1.177	1.153	1.145	1.000	1.008	1.033	1.453
13	-10	1.124	1.142	1.121	0.998	1.004	0.972	1.432
14	0	1.260	1.171	1.084	1.000	1.006	0.659	1.310
15	10	1.709*	1.231	1.057	0.998	1.004	—	1.460
16	20	—	1.338	1.067	0.997	1.004	—	1.366
17	30	—	1.288	1.085	0.997	1.004	—	0.969
18	40	—	1.231	1.143	0.998	1.006	—	0.826
19								
20								

ただし、*印のついている値は、覆工板
込みによる影響を受けたと考えられる値
である。

トンネル周辺地盤の挙動とトンネル地圧に
関する模型実験報告書

土研資料第1870号
昭和58年1月(1983)

キーワード トンネル, 岩盤力学
押し出し性地圧
膨張性地圧, ゆるみ地圧(土圧)
応力再配分

水谷敏則
猪熊明
石村利明

要 旨 本報告は, トンネルが周辺地盤から受ける地圧お
よび周辺地盤の挙動に関して, 模型実験, 解析, 現場計
測との比較などを行った結果をまとめたものである。

郵便はがき

40円切手
をはって
下さい。

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所

トンネル研究室
御中

No. 13

No. 18

配布先氏名

配布先住所

一〇

○

土木研究所資料第1870号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

⑩

○