

土木研究所資料

斜面下におけるトンネル掘削に関する 実験報告書

昭和63年12月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

「Copyright © (1988) by P.W.R.I.

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

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

斜面下におけるトンネル掘削に関する実験報告書

トンネル研究室 室長 水谷 敏 則
研究員 真 下 英 人
研究員 石 村 利 明

要 旨

本報告書は、土被りが小さく、地表面が傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合の地山の挙動および傾斜地山における押え盛土の効果を明らかにするために行った模型実験結果をとりまとめたものである。

本検討より、トンネル周辺地山の挙動は土被り、斜面の傾斜角の影響を大きく受けること、押え盛土が効果を発揮するには一定の形状が必要なこと等が明らかとなった。

キーワード：トンネル，土被り，斜面，押え盛土

目 次

第1章 緒論	1
第2章 斜面下におけるトンネル掘削模型実験	2
2.1 概 説	2
2.2 実験方法	3
2.3 実験結果および考察	10
2.4 まとめ	44
第3章 盛土の効果に関する模型実験	46
3.1 概 説	46
3.2 実験方法	47
3.3 実験結果および考察	48
3.4 まとめ	66
第4章 結 論	67

第1章 緒 論

近年、ルート選定の制約などから地山条件の悪い場所での山岳トンネルの建設が増加する傾向にある。特に、トンネル坑口部においては土被りが小さく、地表面が傾斜しているなどの地形的条件、あるいは非常に軟質な崖錘、強風化層等が堆積しているなどの地質的条件が悪い場合が多い。このような条件の場所にトンネルを掘削した場合には、大規模な地表面沈下、斜面変状を伴うような地山の変形が発生し易く、また、トンネルの支保構造に対しても偏土圧が作用することがあるため、工事が難航する例が少なくない。こうした問題に対して現場では個別に各種の補助工法を施しながらトンネルを掘削することが多いが、必ずしも必要かつ十分であるとはいえないのが現状であり、地山条件の悪い場所での合理的なトンネルの設計・施工法の確立が望まれている。トンネルを掘削する場合の基本的な考えは、地山を出来る限り緩ませないで安定した地山状態のもとでトンネルを掘削することにあるが、地表面が傾斜している場合や土被りが小さい場合のトンネル周辺の地山挙動が明確に把握されていないため、補助工法の効果のメカニズムが明らかにされず、効率の良い使用がなされていない場合が多いように見受けられる。

本報告は、以上のような観点から、土被りおよび地表面の傾斜角がトンネル掘削に伴うトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を模型実験により検討し、さらに、土被りが小さく、地表面が傾斜した条件下でのトンネル建設に当って補助工法として採用される機会が多い押え盛土の効果を模型実験により明らかにし、結果をとりまとめたものである。

第2章 斜面下におけるトンネル掘削模型実験

2.1 概説

地表面が水平な砂質地山にトンネルを掘削した場合、トンネルの支保構造に作用する土圧は全土被り土圧よりも小さくなることは周知の事実であり、この現象を理論的に解明した研究としてTerzaghiの理論¹⁾があり、また、模型実験により解明した研究として、小野・眞井²⁾、村山・松岡³⁾⁴⁾らの研究が挙げられる。これらの研究によれば、トンネルを掘削した場合、トンネルに変形を許して行くとトンネル周辺の地山内にはアーチ形状の不連続面が現われ、不連続面で囲まれた領域の土塊がトンネルの支保構造に土圧として作用するものと考えることができる。

地表面が傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合にも、このような不連続面が現われることが予想され、不連続面の形状によってはトンネルの支保構造に作用する土圧の作用方向が山側から谷側に向かうことになり、トンネルに偏土圧が作用することになるものと考えられる。このことは、近年都市部周辺の傾斜した砂質地山のトンネル工事において、支保が不十分でトンネルに過度の変形を許したためにトンネル周辺の地山が斜めにすべり落ちたという報告例があることから容易に推察される。しかし、傾斜地山にトンネルを掘削した場合に、地山がどのような挙動をするかについて具体的に検討した研究例は少なく、概念的に理解されているにとどまっているのが実状である。近年、地盤解析手法の一つである有限要素法(F.E.M)のトンネル解析への適用が盛んに行われており、F.E.Mのこのような問題への適用も一つの手段になり得るものと考えられる。しかし、F.E.Mの適用に当っては傾斜地山の初期応力状態の設定に問題が多く残されていること、また、砂質地山ではトンネル掘削に伴って地山に不連続面が発生するが、連続体を前提としているF.E.M解析ではこのような不連続面の発生が表わし難い等の問題があり、傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合の地山の挙動をF.E.Mにより解析することは現段階では難しいものと判断される。

そこで、本章では傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合の地山の挙動を二次元模型実験により調べ、特に、土被り、斜面の傾斜角が地山の挙動に及ぼす影響を検討することとした。なお、実際のトンネル現場ではトンネル切羽の進行に伴う縦断方向の影響があるため、厳密には三次元の模型実験を行うことが望ましいと思われる。しかし、切羽の進行に伴う影響は、地山応力の解放率の問題として取り扱うことが可能であり、また、切羽通過後の最終的な地山状態は二次元ひずみ状態となることから本研究では実験は現象が単純に扱える二次元状態で行うこととした。なお、模型実験を行う場合には相似則が問題となるが、本研究では相似則は考慮せず、模型を一つの実現象として捉えて定性的な情報を得ることを目的とした。

2.2 実験方法

2.2.1 実験概要

トンネル掘削は、図-2.1に示すように掘削前にトンネル掘削断面に作用していた内圧 P_0 (掘削予定領域の土塊が地山に反力として作用する力) が、トンネルの掘削により P_i にまで減少する現象と捉えることができ、内圧 P_i とその時に発生するトンネル変形量 δ との関係を概念的に示せば図-2.2のようになり、ここに示されるような曲線を地山特性曲線といっている。ここで、素掘りトンネルの場合は $P_i=0$ であり、吹付コンクリート、ロックボルトなどの支保部材が存在する場合にはその支保効果により $P_0 > P_i > 0$ となる。ただし、実際には切羽が存在するため、切羽の支保効果により瞬時にして P_0 が P_i にまで減少するのではなく、切羽の進行に伴ない徐々に P_i にまで減少して行く (三次元問題)。

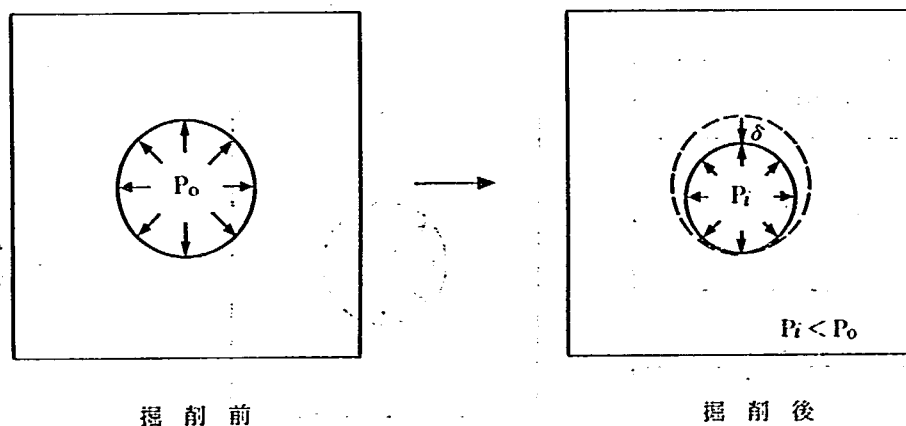


図-2.1 トンネル掘削の概念図

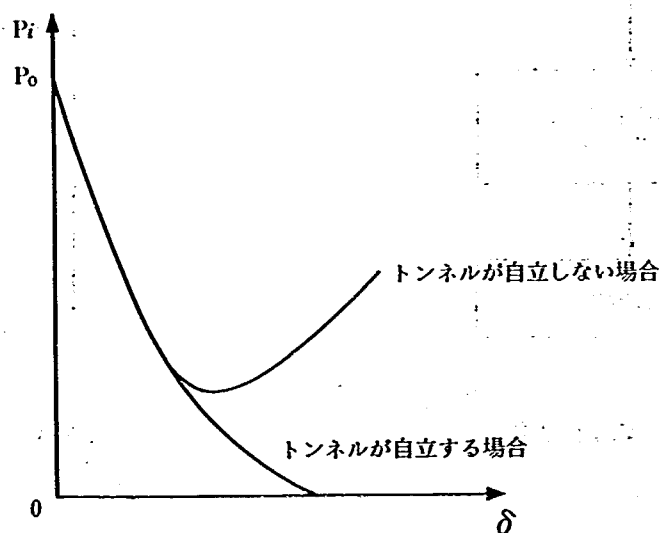


図-2.2 トンネル掘削における内圧 P_i とトンネル変形量 δ との関係

本研究では、トンネル掘削が以上のようなトンネル掘削断面に作用していた内圧 P_0 が減少する現象であることに着目し、内圧の変化またはトンネルの変形に伴う地山の挙動を調べる二次元の模型実験を行うこととした。実験の工程を図-2.3に示すが、実験は地山作製時に空気圧により膨張させたゴムチューブを地山に予め埋め込んでおき、地山作製終了後、ゴムチューブの内圧を減圧することによりゴムチューブを収縮（変形）させてトンネル掘削をシミュレートし、トンネル掘削に伴う地山の挙動を調べることにした。なお、本実験ではゴムチューブを膨張させて使用しているためゴムチューブには張力が発生しており、地山に作用する圧力 P_{out} （前記の P_0 に相当）は図-2.4に示すようにゴムチューブに作用する空気圧 P_{in} とゴムチューブの張力 σ_t に相当する圧力との差になる。

したがって、空気圧 P_{in} とゴムチューブの張力 σ_t が測定できれば、地山に作用する圧力 P_{out} を求

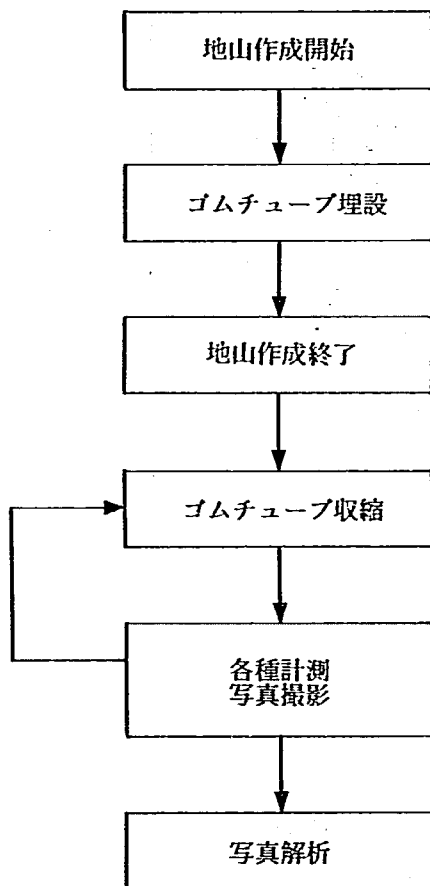


図-2.3 実験工程図

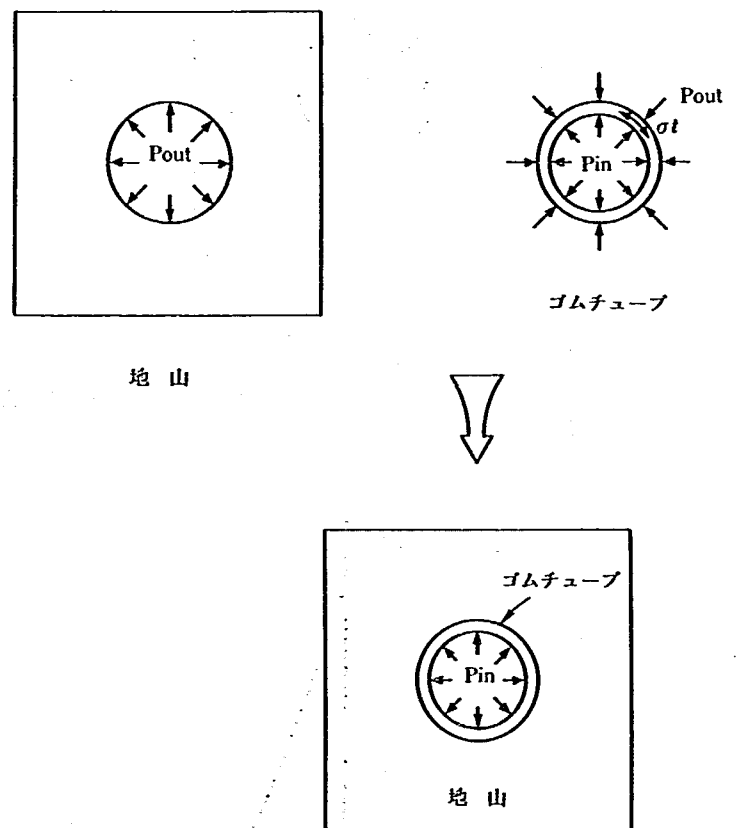


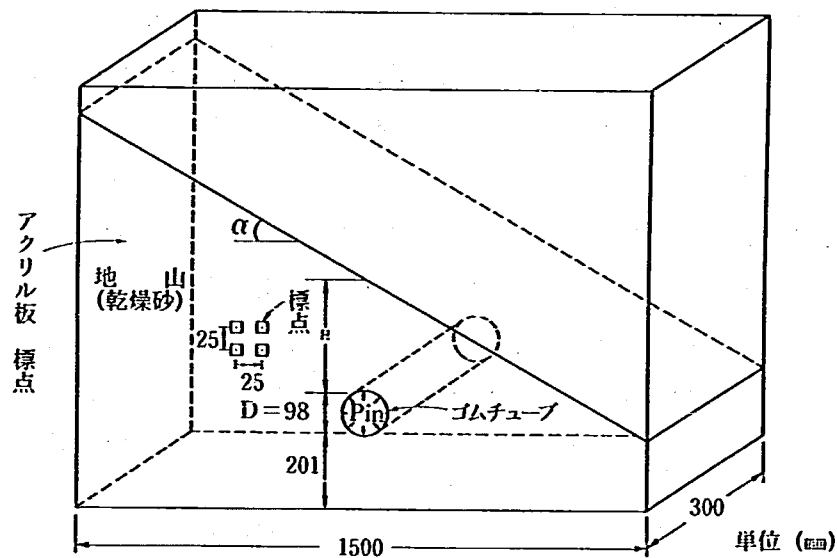
図-2.4 模型実験概念図

めることが可能となり、地山特性曲線が得られることになる。しかし、本実験のような1Gの重力場では地山に作用する圧力 P_{out} の絶対量が小さく、また、ゴムチューブの剛性が大きいとゴムチューブの張力 σ_t が P_{out} よりも相対的に大きくなり、結果として本実験ではトンネル掘削に伴うわずかな P_{out} (地山特性曲線の縦軸に相当する内圧 P_i) の変化を正確に測定することはできなかった。

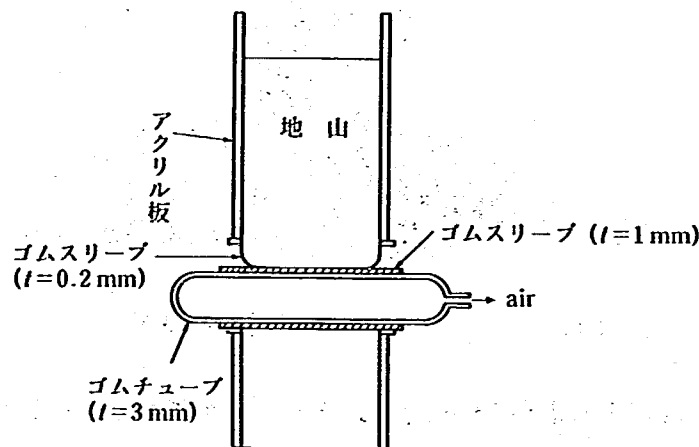
したがって、本研究ではすべて地山特性曲線の横軸に相当するトンネル変形量 δ を一つの指標と考え、トンネル (ゴムチューブ) の変形量とトンネル周辺の地山挙動との関係から検討を加えることとした。

2. 2. 2 実験装置

実験に使用した実験装置の概要を図-2. 5, 写真-2. 1に示す。実験には幅 150 cm, 高さが可



(a) 全体図



(b) 側面図

図-2.5 実験装置の概要

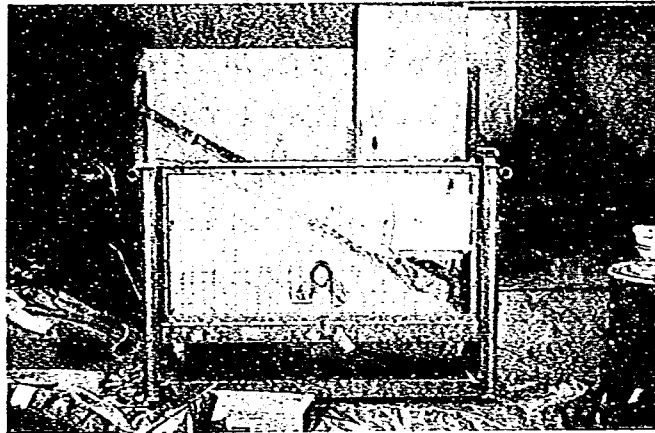


写真2. 1 実験装置概要図

変で前面が透明なアクリル板（ただし、地山と接しない側のアクリル板の表面には計測のための直線が $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ の格子状に刻まれている）からなる砂箱と、厚さ 3 mm 、内径が 60 mm の円筒状のゴムチューブを使用した。実験は前述したように空気圧により内径 90 mm にまで膨張させたゴムチューブを地山に予め埋め込んでおき、ゴムチューブの空気圧を減圧させてゴムチューブを収縮させる手法をとっているが、膨張収縮時のゴムチューブの変形が一様になるようにゴムチューブの外側にはさらに厚さ 1 mm のゴムスリーブをトンネル全長にわたって被せた。したがって、初期状態におけるトンネルの外径 D は 98 mm となる。また、実験の地山材料として後述するように粒状体である乾燥砂を使用しているため、ゴムチューブの収縮に伴い地山材料がアクリル板とゴムチューブの隙間から流出する可能性がある。そこで実験では、この流出を防ぐ目的で、図-2. 5、写真-2. 2に示すように伸縮自在の厚さ 0.2 mm のゴムスリーブをアクリル板とゴムチューブとの間に取り付けた。

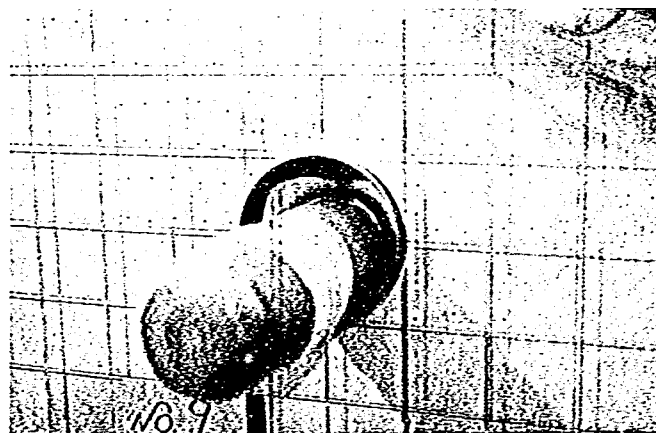


写真2. 2 ゴムチューブ端部の処理状況

実験に使用した装置は以上のような砂箱とゴムチューブが基本となるが、その他の装置として内径 60 mm のゴムチューブを 90 mm にまで膨張させるための窒素ガスボンベ、地山作製用の試料容器、さらには後述する各種計測装置を使用した。また、アクリル板壁面と地山間の摩擦をできるだけ軽減させるため、各ケースとも実験前にはアクリル板をテフロンスプレーによりテフロン加工した。

2. 2. 3 地山材料

地山材料には地質状態が悪い場合を想定して気乾状態にある豊浦標準砂を使用した。豊浦標準砂の物理的性質を表-2. 1に、粒度曲線を図-2. 6に、三軸圧縮試験から得られた応力～ひずみ関係を図-2. 7にそれぞれ示した。応力～ひずみ関係からわかるように、地山が三軸状態で破壊するときの軸ひずみは拘束圧によって異なるが、概ね5～8%の軸ひずみのときにピークを示す。

表-2. 1 豊浦標準砂の物理的性質

単位体積重量 γ	1.49 gf/cm ³
含水比 w	0.2 %
間隙比 e	0.77
比重 G_s	2.64
粘着力 c_d^*	0.03 kgf/cm ²
内部摩擦角 ϕ_d^*	36.6°

* 三軸圧縮試験より求めた

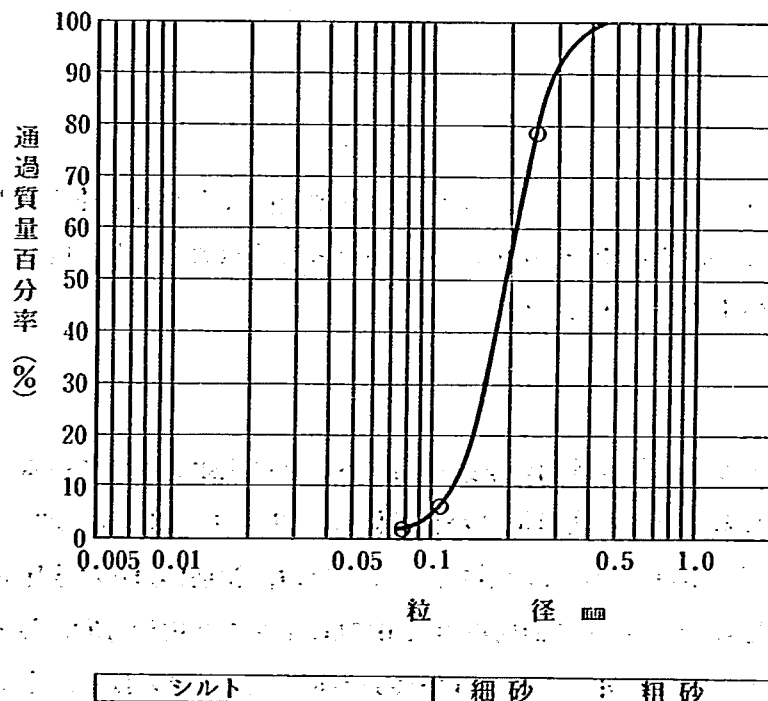


図-2.6 豊浦標準砂の粒度曲線

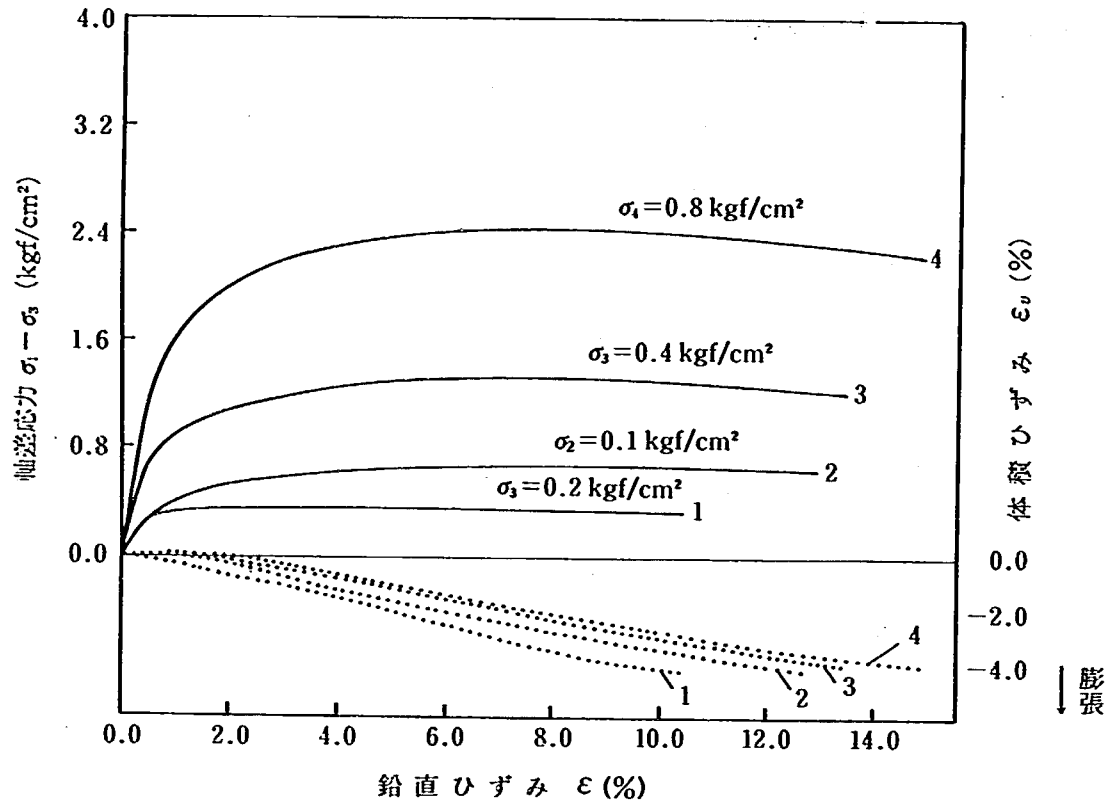


図-2.7 三軸圧縮試験から得られた軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係

2. 2. 4 地山形状

地山形状は図-2. 5におけるトンネルクラウンから地表面までの距離 H （土被り）を10, 20, 30 cmと変化させ、また、斜面の傾斜角 α も 0° , 15° , 30° と変化させた。なお、地山は落下高さを一定にして試料容器から砂を落下させて作成した。

2. 2. 5 計測項目

本実験ではトンネルの変形に伴う地山の挙動を調べることに主眼を置いている。そこで、本実験では図-2. 8で定義されるトンネル変形量 δ が目標値($\delta=3, 8, 13, 18, 23, 25$ mm)になった時に変形を休止させ、下記の項目について計測を行った。なお、初期応力が静水圧状態にある地山に円形トンネルを掘削した場合、トンネル壁面周辺の地山には、トンネル円周方向に最大主ひずみ ϵ_θ が発生し、その大きさはトンネル変形量 δ とトンネル外径 D を用いて $\epsilon_\theta=\delta/D$ で求まる。前述したように、本実験で使用した地山材料は三軸状態では軸ひずみ $\epsilon=5\sim8\%$ の時にピークを示すため、 $\delta=5\sim8$ mm以降の変形段階ではトンネル壁面周辺の地山はピーク以降の挙動を示すものと考えられる。また、本実験ではトンネルに過度の変形を許した場合の最終的な破壊状況も明らかにするため、トンネル変形量が $\delta=25$ mmまでの実験を行うこととした。

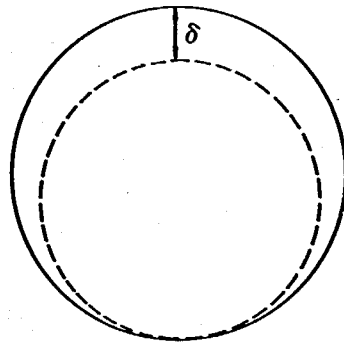


図-2.8 トンネル変形量 δ の定義

1) トンネル変形量 δ

トンネルが変形している間のトンネル変形量 δ はスケールにより管理したが、変形を休止させた段階でトンネル端部の外周長を測定し、トンネル変形量 δ を算出した。なお、以上のような方法によりトンネル変形量 δ を求めたところ、幾つかのケースでは δ に目標値とのずれが生じたが、その値は高々1 mmであった。

2) 地表面沈下量

写真-2.3に示すように、地山の地表面にトンネル軸直角方向に間隔約5 cm毎にカンチレバー式の変位計（共和電業k.k.製 容量50 mm）を設置し、トンネル横断方向の地表面沈下量を計測した。

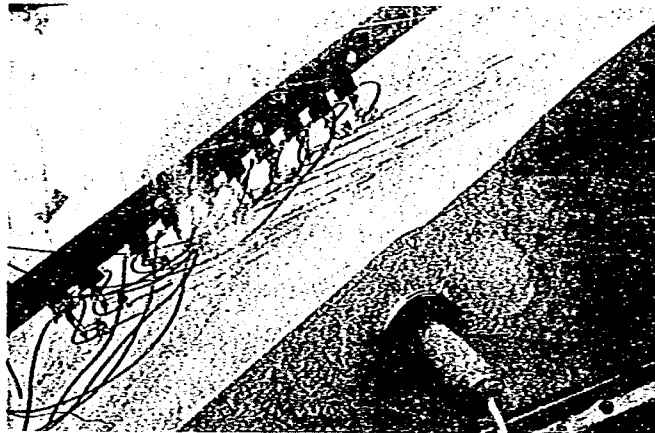


写真2.3 変位計設置状況

3) 地中変位量

写真-2.4に示すようにアクリル板に接して地中に標点（厚さ3.5 mmで7 mm四方の白いテフロン板の中央に黒点を印したものを）を約2.5×2.5 cmの格子状に埋め込んでおき、各トンネル変形段階における標点の動きを写真に撮り、標点の変位量を写真から求めた。変位を求めるための写真を撮影する場合、使用するカメラはできる限りレンズ歪の影響が少ないものが望ましいため、本実験では文献5)を参考にして、一眼レフカメラ（NIKON F 3）に接写用レンズ（MICRO NIKON R 55 mm F2.8）を装着したものを計測用カメラとして使用した。写真から地中変位を求めるに当たっては写真測量における単写真を用いた測定方法（偏歪の修正方法、詳細はAppendix 1参照）を利用して、デジタイザー（グラフテックk.k.製 KD 4030 読取誤差±0.5 mm）およびマイクロコンピュー

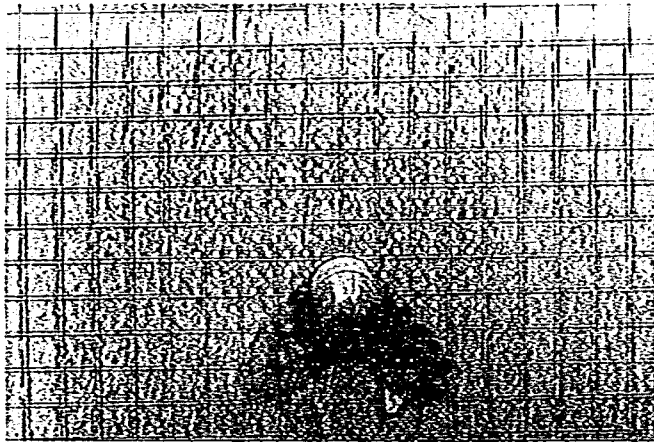


写真2. 4 標点の設置状況

タ (PC-9801 E) により写真上での変位を実変位に換算して求めた。

2. 3 実験結果および考察

2. 3. 1 地表面沈下

地表面が水平な地山の下にトンネルを掘削した場合のトンネル横断方向の地表面沈下曲線は正規分布曲線で近似できることはよく知られているが、地表面が傾斜している地山にトンネルを掘削した場合については計測例が少なく、理論的にもどのような形状になるのかあまりよく知られていない。本研究では前述したように相似則を考慮していないため、定量的には実験結果を現場に当てはめることはできないが、定性的には地表面が傾斜している場合の地表面沈下曲線の形状について、ある程度の知見が得られるものと考えられる。

図—2. 9は土被り H とトンネル外径 D との比 H/D が約1の時の地表面沈下曲線を写真から読み取ったものであり、トンネル変形量 δ はいずれもほぼ8, 18, 25 mmの時の結果である。ただし、図—2. 9はアクリル板壁面で観察された地表面沈下曲線であり、現実にはアクリル板と地山間の摩擦が残るため、定量的には砂箱中央に発生する地表面沈下曲線(図—2. 10~12参照)とは異なるものとなっている。

地表面が水平な場合($\alpha = 0^\circ$)についてはこれまでの報告例と同様の正規分布曲線に近い形状となっているが、地表面が傾斜した場合にはこの形状は大きく歪んだものとなることがわかる。すなわち、最大沈下量を与える地点はトンネル中心より谷側へ移行し、沈下領域は山側が大きく増大し谷側が減少する傾向が観察される。特に、 α が 30° にもなると山側においてはトンネル半径の5倍程度の領域にまで地表面沈下が現れるのに対して、谷側においては地表面沈下が現れる領域はトンネルの半径程度となり、山側と谷側では大きな差が認められる。なお、 $H/D \approx 2, 3$ の場合については、 $H/D \approx 1$ の場合に比較して発生する地表面沈下量ははるかに小さいため、写真から地表面沈下曲線を得ることはできなかった。しかし、後述する変位計から求まる地表面沈下曲線によれば、地表面が傾斜することによる地表面沈下曲線の形状の変化は $H/D \approx 1$ の場合と定性的には一致するものと判断される。

次に地表面に設置した変位計から得られた地表面沈下曲線を図—2. 10~12に示す。前述したように変位計は約5 cm間隔で設置されているため、最大沈下量を与える地点が計測地点に含まれない場

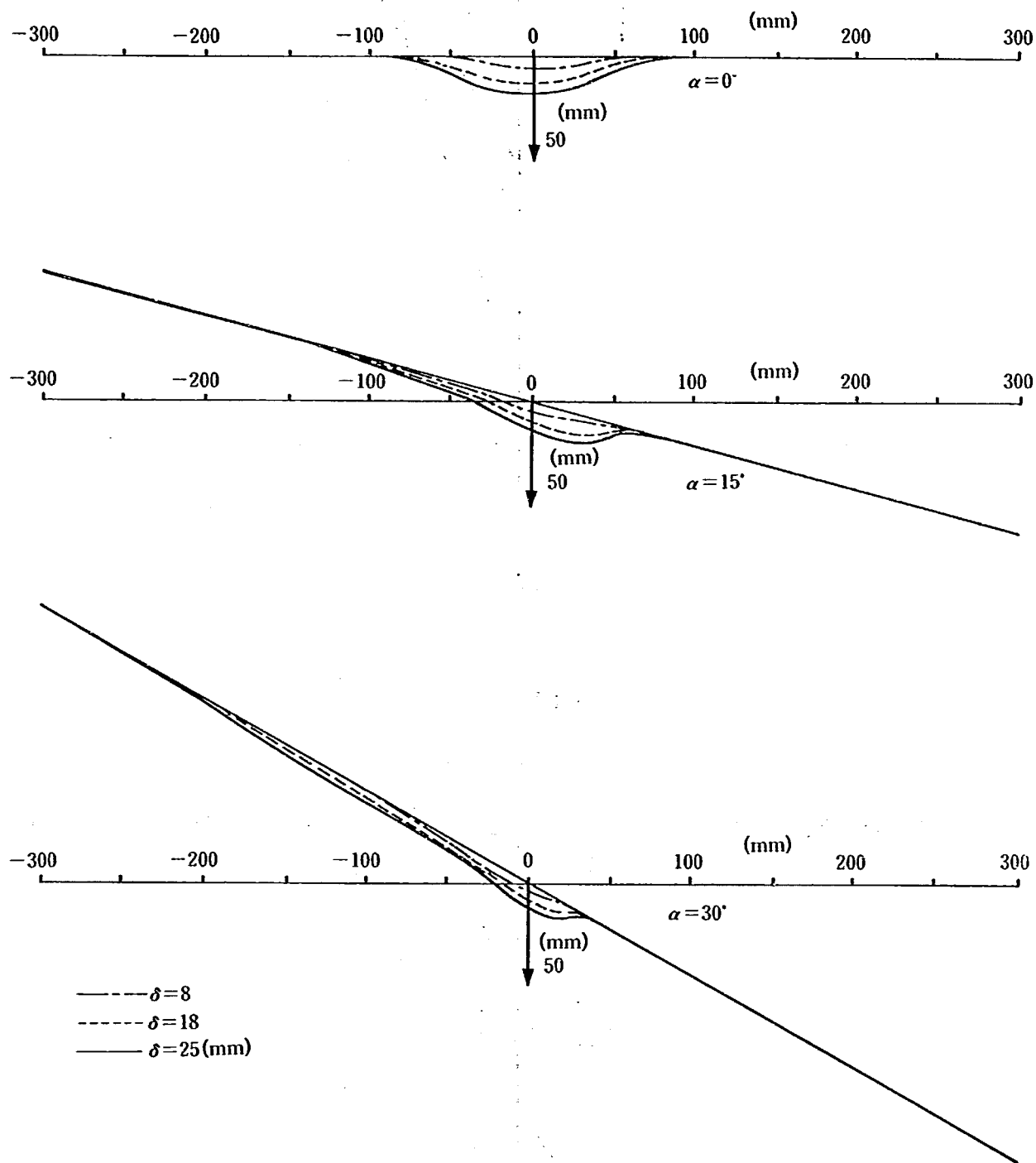


図-2. 9 写真から得られた地表面沈下曲線 ($H/D=1$)

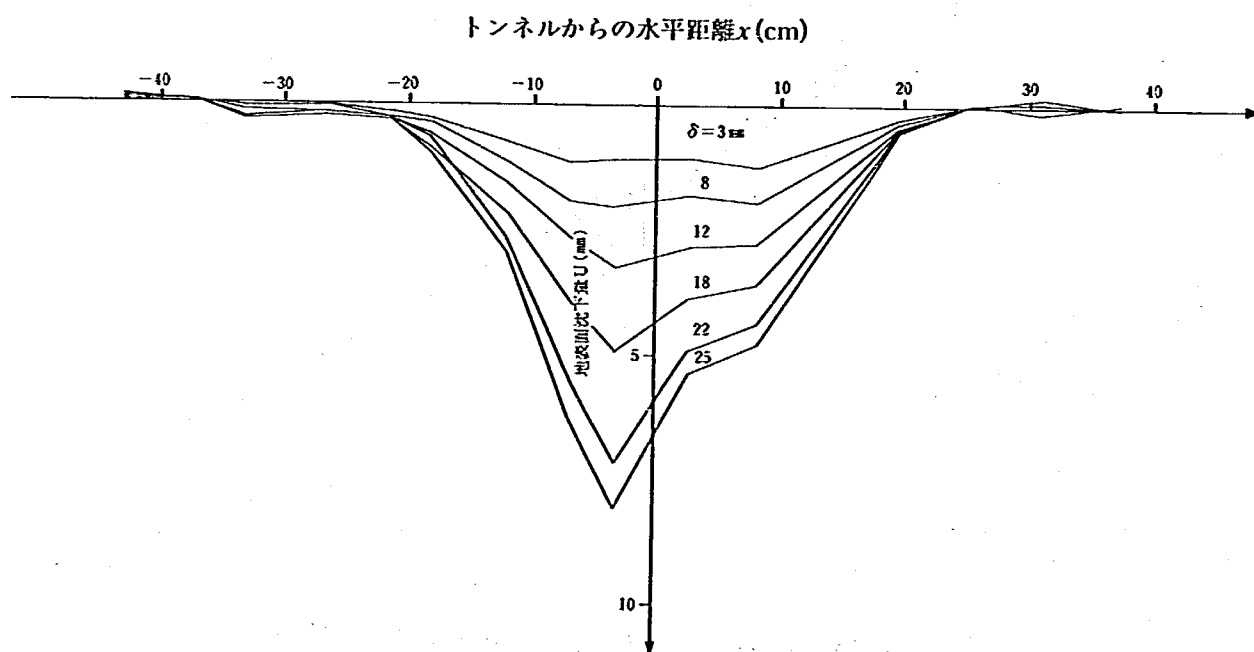
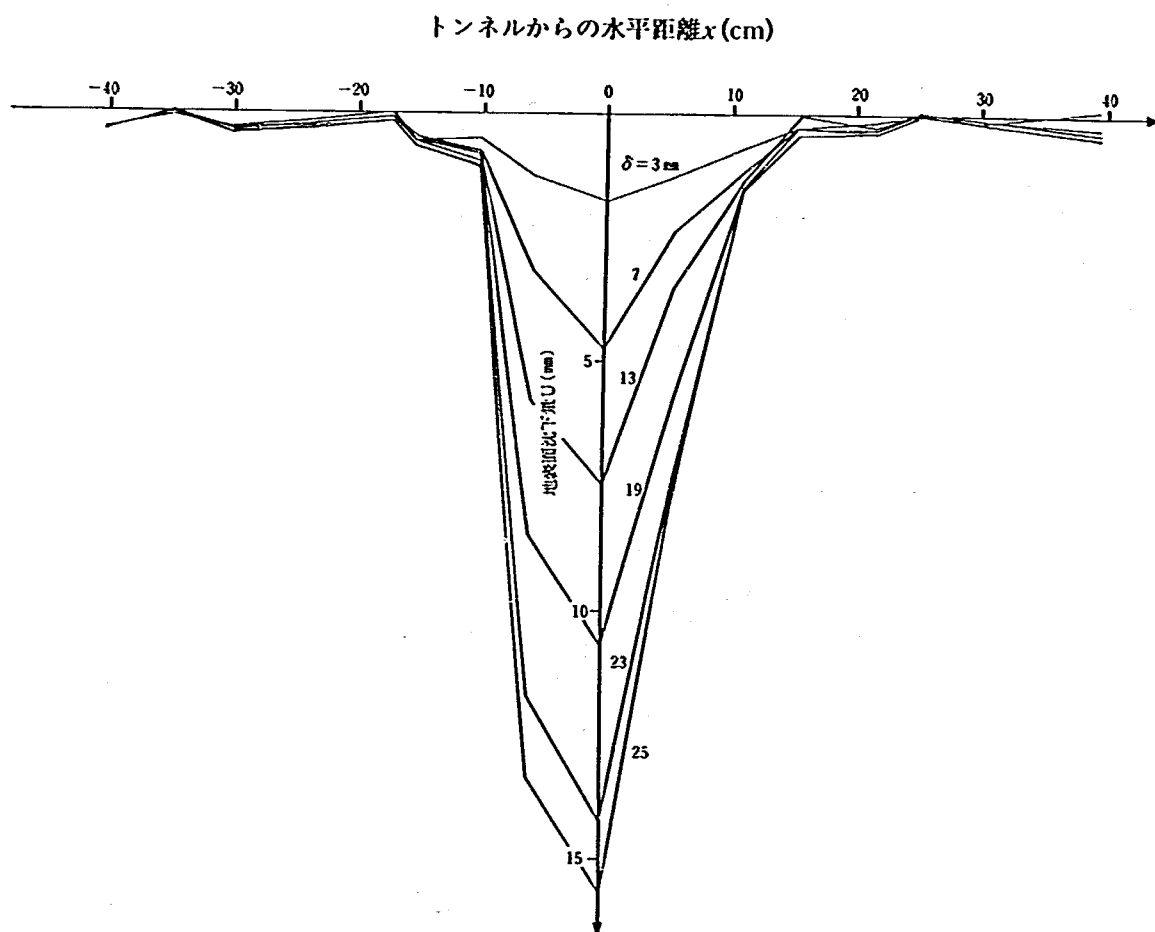


図-2・10(1) 変位計から得られた地表面沈下曲線($\alpha=0^\circ$)

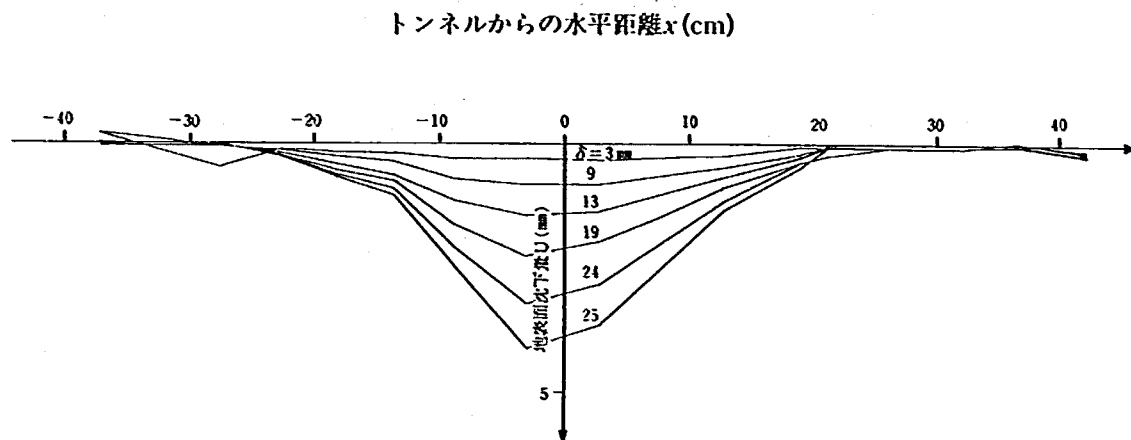
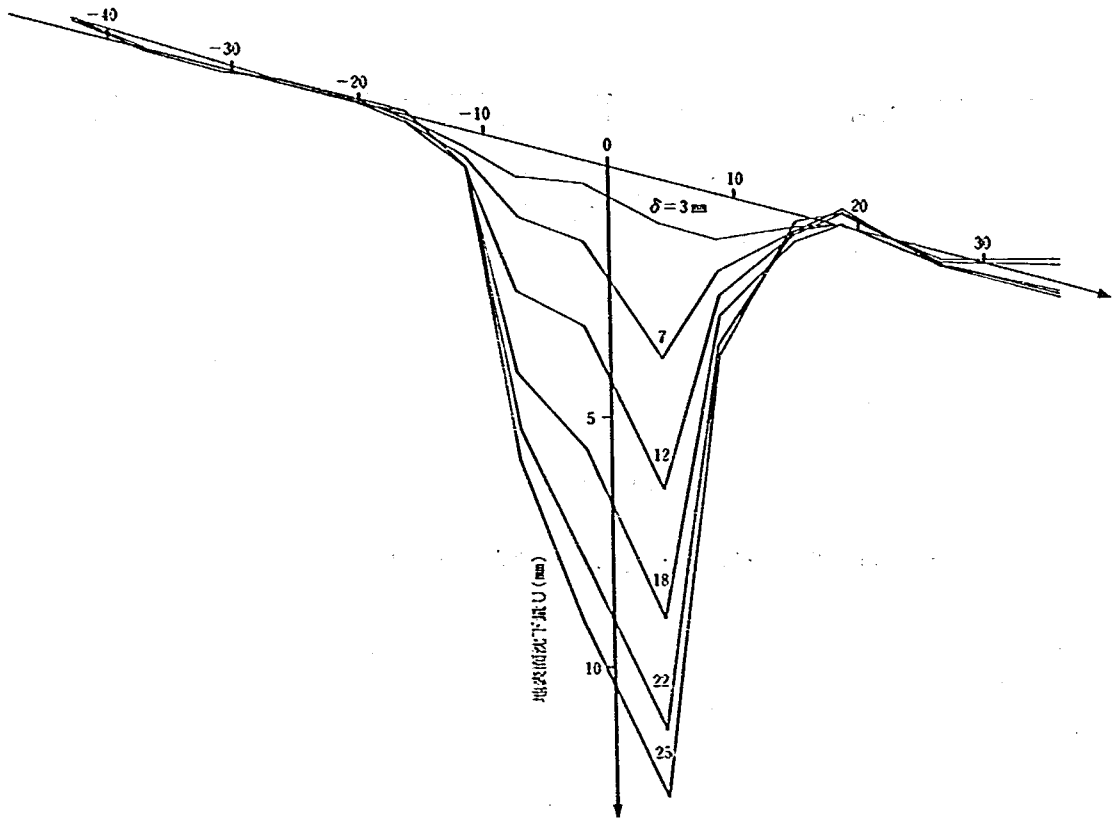


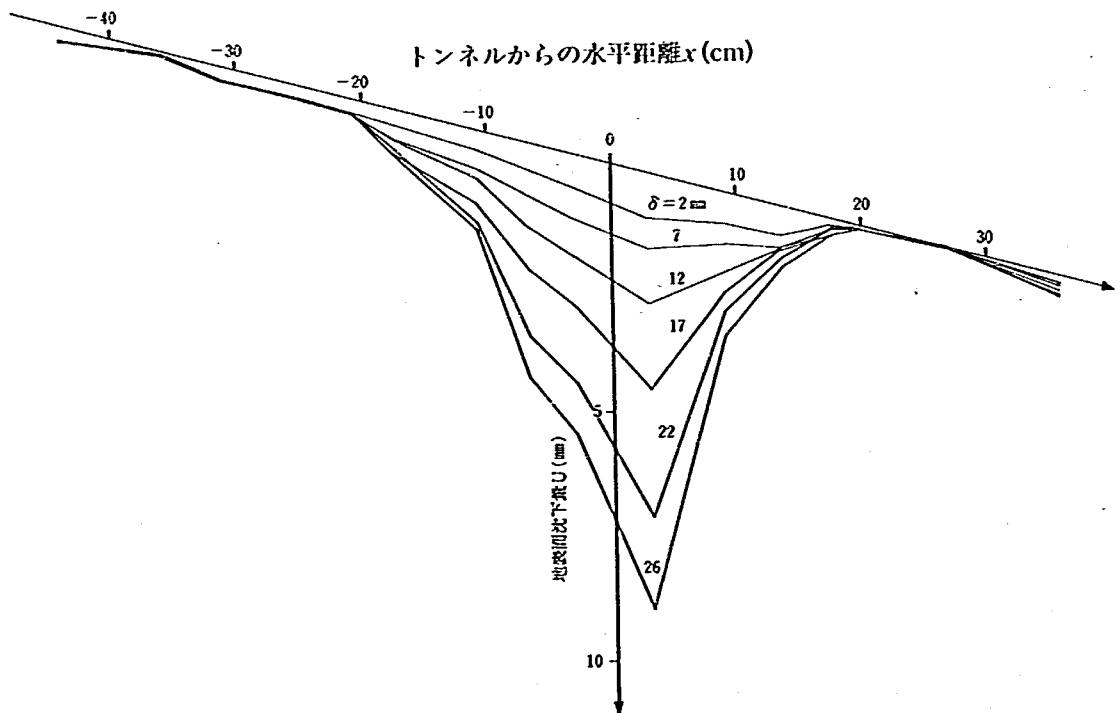
図-2・10(2) 変位計から得られた地表面沈下曲線($\alpha=0^\circ$)

トンネルからの水平距離 x (cm)



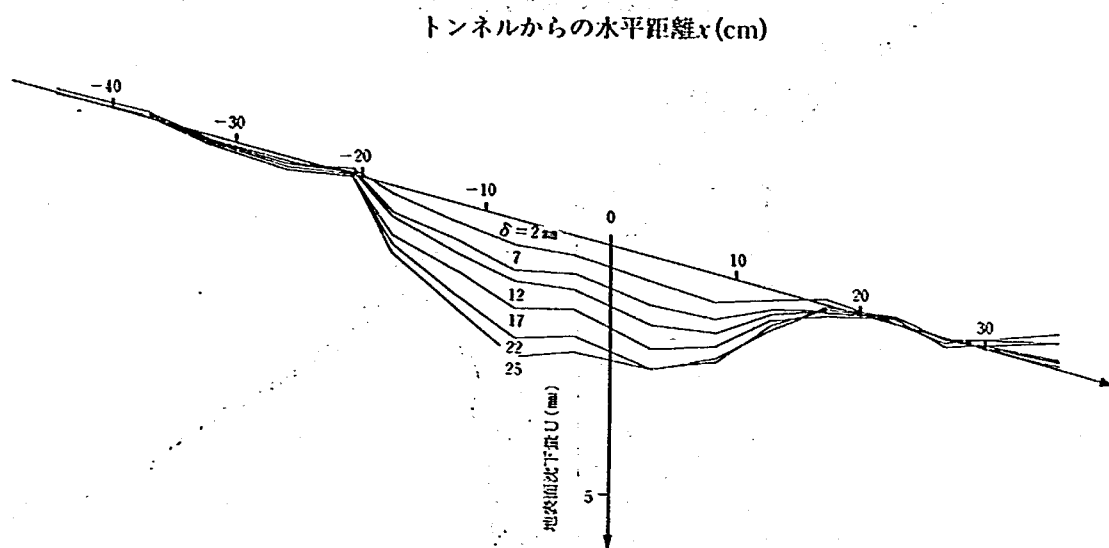
(a) $H/D \approx 1$

トンネルからの水平距離 x (cm)



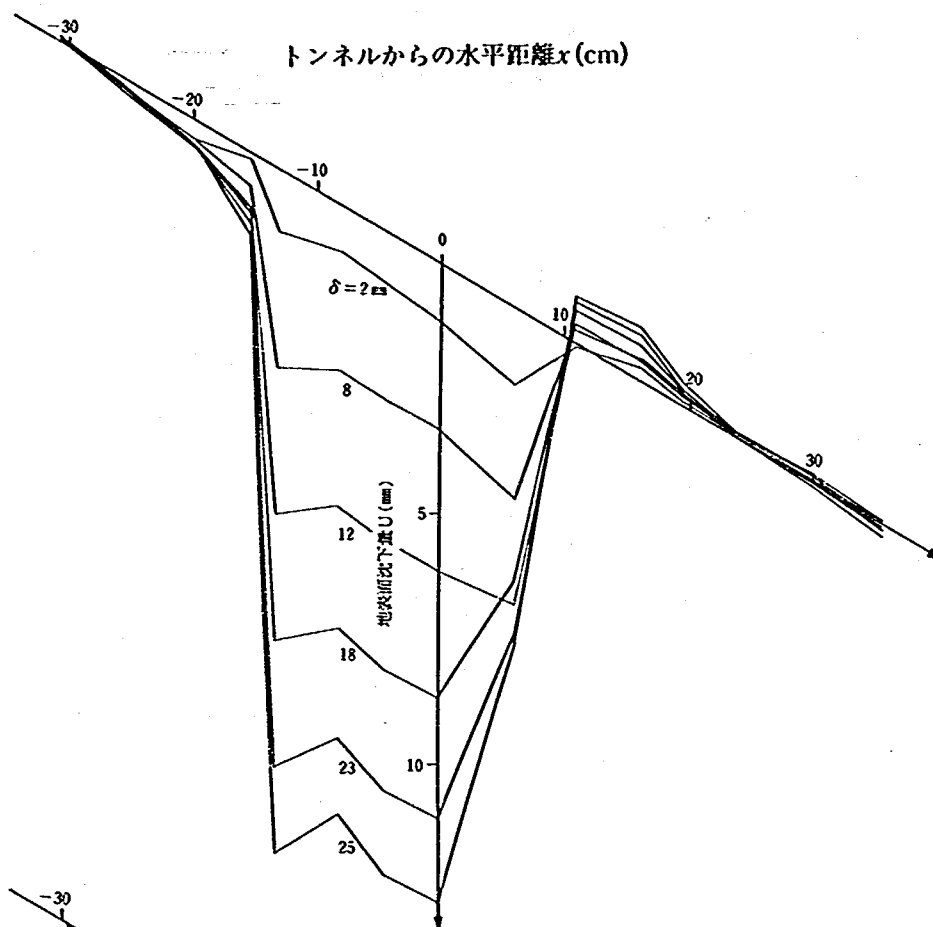
(b) $H/D \approx 2$

図-2・11 (1) 変位計から得られた地表面沈下曲線 ($\alpha = 15^\circ$)

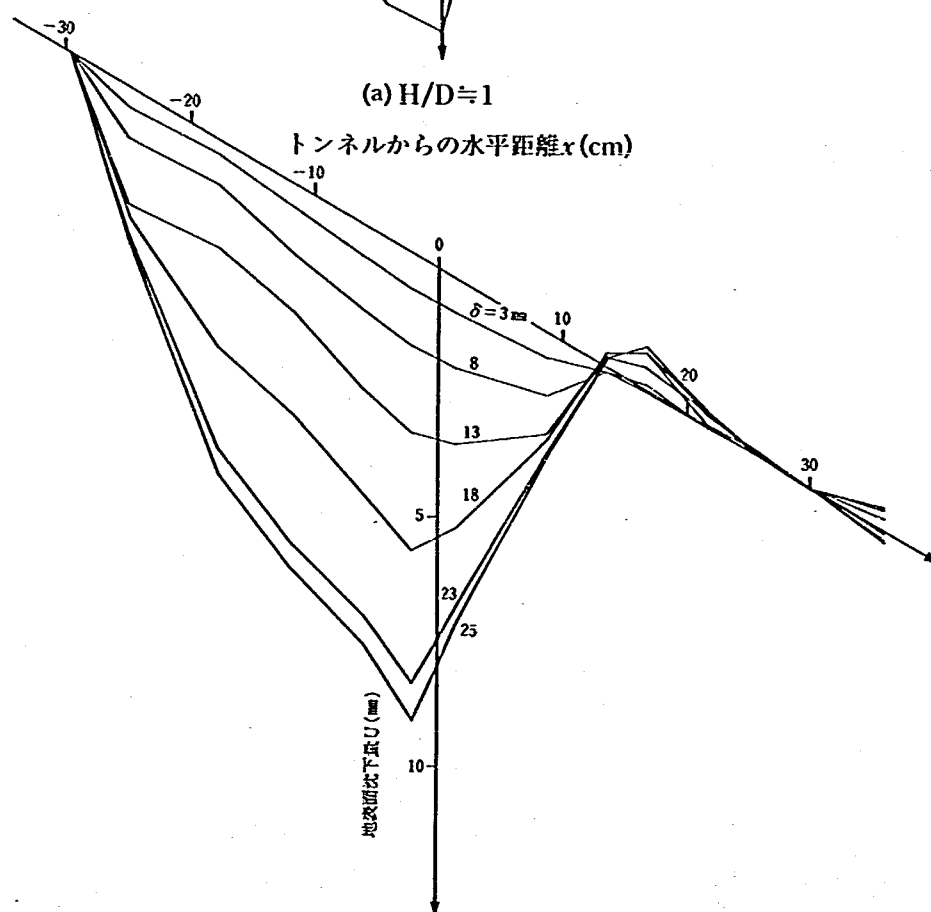


(c) $H/D \approx 3$

図-2・11 (2) 変位計から得られた地表面沈下曲線 ($\alpha = 15^\circ$)

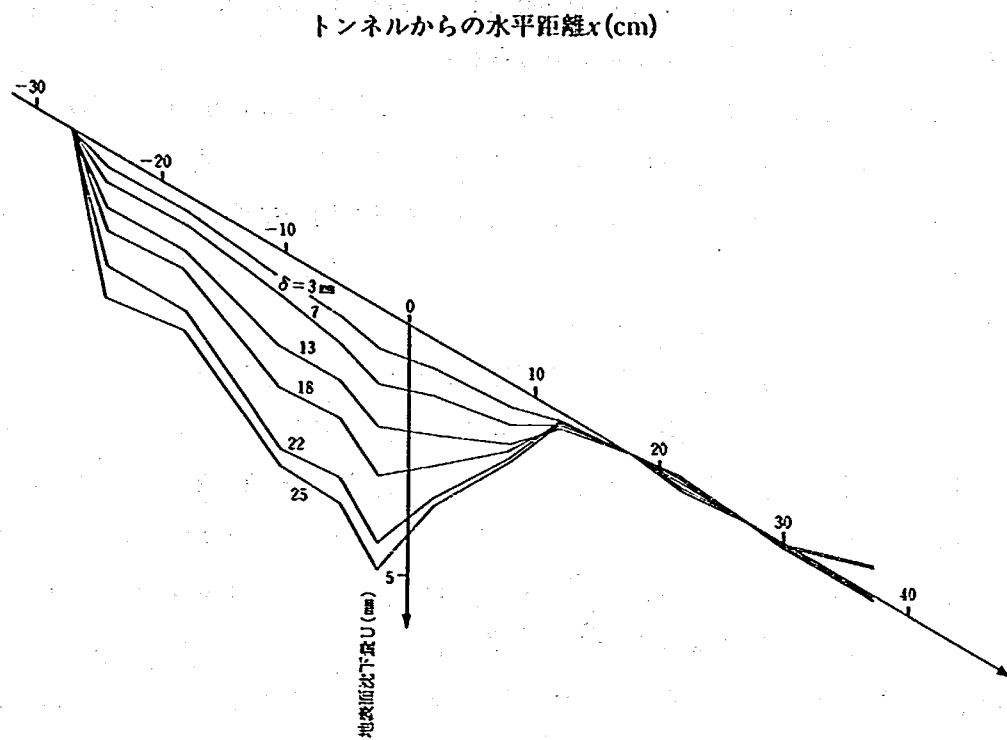


(a) $H/D \approx 1$



(b) $H/D \approx 2$

図-2・12(1) 変位計から得られた地表面沈下曲線 ($\alpha = 30^\circ$)



(c) $H/D \approx 3$

図-2.12(2) 変位計から得られた地表面沈下曲線($\alpha=30^\circ$)

合があり、また、変位計の構造上、大変位での測定値については精度の問題が若干残るが、これらの図から地表面沈下量に関して次のような知見が得られる。

土被りが地表面沈下量に及ぼす影響に関しては、トンネルの変形量 δ が同一であれば地表面沈下量は土被りが大きい程小さくなることがわかる。ここでトンネル変形量 δ を天端の沈下量と考えれば、土被りの大きいトンネルと小さいトンネルとで天端の沈下量を同一に抑えれば、地表面沈下量は土被りが大きいトンネル程小さいと考えることができる。このことは、地表面が水平な場合だけでなく、地表面が傾斜している場合にも当てはまる。

地表面が傾斜することが地表面沈下量に及ぼす影響については、前述したように地表面が傾斜した場合には地表面沈下曲線が歪むため図—2. 10~12からは評価を加えにくい。そこで、変位計から得られる地表面沈下曲線中の最大沈下量に注目して検討を加える。表—2. 2は、トンネル変形量が δ の時に変位計から得られた地表面最大沈下量 U_{smax} とトンネル変形量 δ との比率 U_{smax}/δ を各実験ケースに対して示したものである。表からわかるように U_{smax}/δ の値は多少のばらつきがあるものの、土被りが同一であるならば傾斜角 α の値にかかわらずほぼ一定となる。このことは、トンネル変形量 δ を天端の沈下量と考えるならば、地表面が傾斜した地山にトンネルを掘削した場合に発生する地表面最大沈下量と天端沈下量との比率は、土被りが同一の地表面が水平な地山にトンネルを掘削した場合に発生する地表面最大沈下量と天端沈下量との比率と同一になることを意味する。水平な地山にトンネルを掘削した場合の地表面沈下曲線、天端沈下量に関してはこれまで比較的多くの情報が得られており、ここで得られる知見は地表面が傾斜した地山にトンネルを掘削する場合の施工管理を行う上で、一つの有益な情報を与えるものと思われる。

表—2. 2 地表面最大沈下量 U_{smax} とトンネル変形量 δ との比率 U_{smax}/δ

H/D	$\delta_{(mm)}^*$ $\alpha(^{\circ})$	3	8	13	18	23	25
1	0	0.51	0.63	0.56	0.56	0.60	0.61
1	15	0.43	0.55	0.54	0.51	0.52	0.50
1	30	0.55	0.52	0.56	0.52	0.53	0.54
2	0	0.43	0.26	0.27	0.28	0.32	0.32
2	15	0.57	0.23	0.22	0.26	0.31	0.34
2	30	0.23	0.23	0.27	0.33	0.37	0.38
3	0	0.26	0.16	0.15	0.15	0.16	0.17
3	15	0.25	0.14	0.11	0.11	0.11	0.11
3	30	0.31	0.21	0.20	0.19	0.21	0.21

* 目標値を示した

2. 3. 2 地中の変位分布および主ひずみ分布

1) 斜面の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ のケース

図—2. 13~15 は斜面の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ で土被りが異なる3つのケースについて、トンネルの変形に伴う地中変位分布および主ひずみ分布の変化をトンネルの各変形量毎に示したものである。ただし、図中には実験中に地山に埋もれて十分トレースができなかった標点の一部含まれている。なお、主ひずみ分布は標点により形成される三角形要素内でのひずみが一定であるとの仮定のもとで、得られた変位から主ひずみの方向と大きさを求め（変位からひずみへの変換方法については Appendix 2 参照）、示したものである。

土被り H とトンネル外径 D との比 H/D が約1の場合は、トンネルの各変形段階で地中変位が発生する領域（変位領域）は、トンネル両側壁よりほぼ鉛直に地表面にまで伸ばした2本の直線に囲まれた領域となっている。また、地表面近くに発生する変位量はトンネル変形量が比較的小さい段階からトンネル直上に発生する変位量と近い値を示しており、トンネル直上に発生する地山の变形が地表面近くまで直接伝達されていることがわかる。

主ひずみ分布については、 $\delta = 7 \text{ mm}$ の段階ではひずみが集中した領域が現れており、以降の変形段階ではひずみの集中領域はトンネル両側壁からほぼ鉛直に地表面にまで伸びる2本の線状となって現れてくる。これらひずみの集中した線状領域では地山が破壊してすべりが発生しているものと考えられ、変位の不連続面となる。したがって、トンネルの支保構造（ゴムチューブ）に対しては、2本の線状領域に囲まれた部分の土塊が土圧として作用することになり、 $H/D \approx 1$ の場合はトンネルに過大な変形を許すと、全土被りに相当する土塊がトンネルに作用することになる。

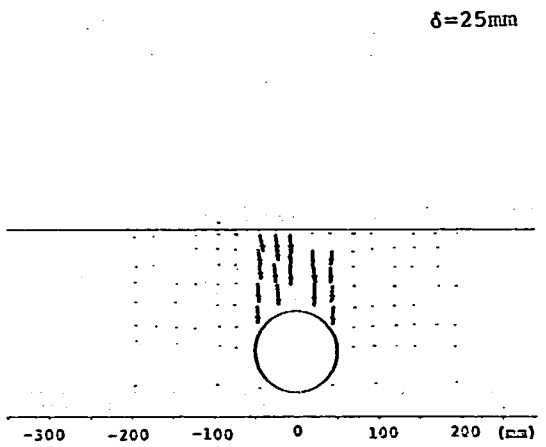
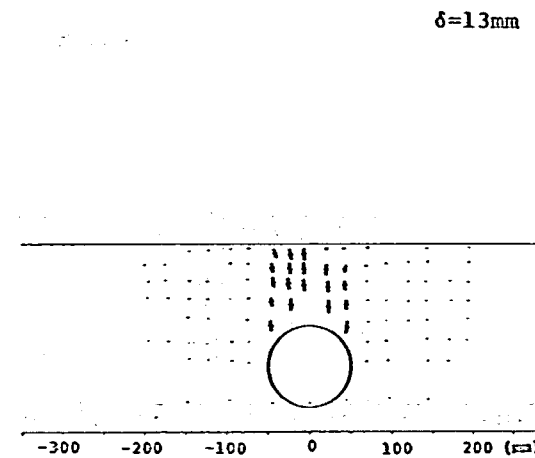
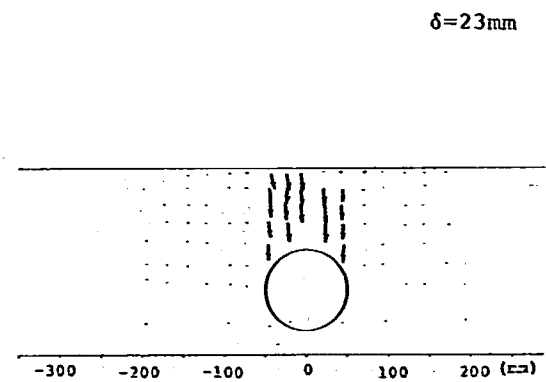
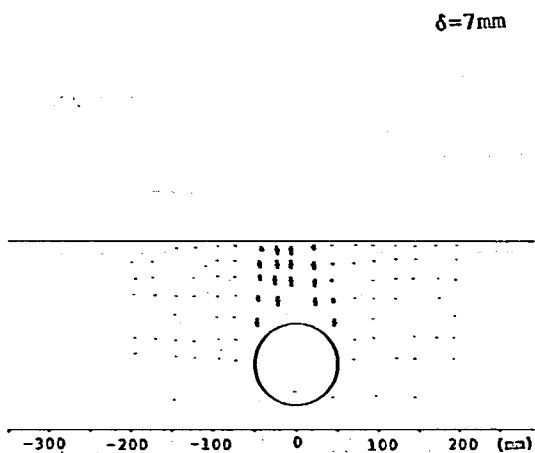
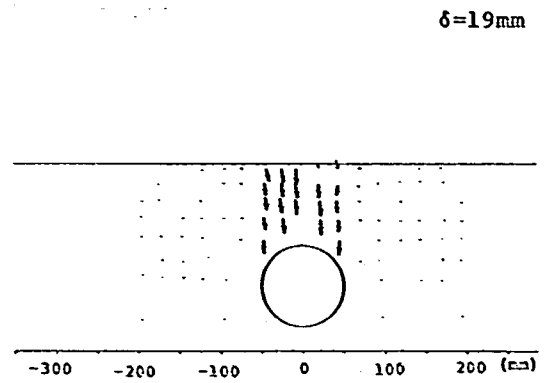
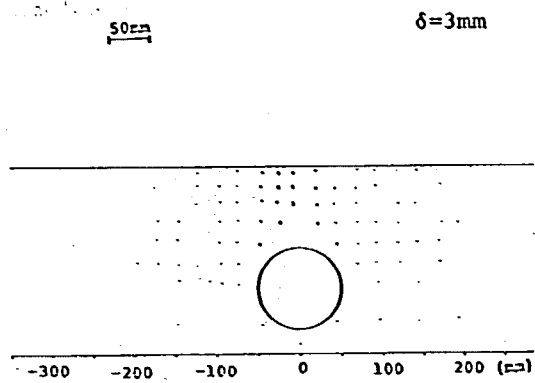
$H/D \approx 2$ の場合は、 $\delta = 8 \text{ mm}$ 程度の段階までは地表面近くに発生する変位量は非常に小さく、トンネル直上に発生する変形量のうち、地表面にまで伝達される量はごくわずかであることがわかる。 $\delta = 12 \text{ mm}$ 以降の段階では地表面近くにも変位が発生するのが認められるが、各変形の段階で地表面近くに発生する変位量はトンネル直上に発生する変位量に比較するとかなり小さくなっており、 $H/D \approx 1$ の場合のようにトンネル直上に発生する変形のすべてが地表面まで伝達されてはいない。

変位領域は、トンネル直上の部分については $H/D \approx 1$ の場合と同様、トンネル両側壁よりほぼ鉛直に伸ばした2本の直線に囲まれた領域に変位が発生しているが、トンネル変形量が大きくなってその影響が地表面近くにまで及ぶようになると、地表面近くには $H/D \approx 1$ の場合よりもやや広範囲の領域にわたって変位が発生するようになる。

主ひずみ分布については $\delta = 8 \text{ mm}$ の段階でひずみが集中した領域が認められるが、これらの領域は地表面までは達しておらず、地中で先端が閉じるアーチ形状を形成している。したがって、トンネルの変形量が小さい段階ではトンネルの支保構造に全土被りに相当する土塊が作用することにはならず、アーチに囲まれた部分の土塊が作用することになる。しかし、その後トンネルの変形量が増大した場合にはひずみが集中するアーチ形状の領域は徐々に拡大して地表面まで達するようになる。このような段階ではトンネルの支保構造には全土被りに相当する土圧が作用することになり、トンネルに過大な変形を許すことは望ましくないと言える。

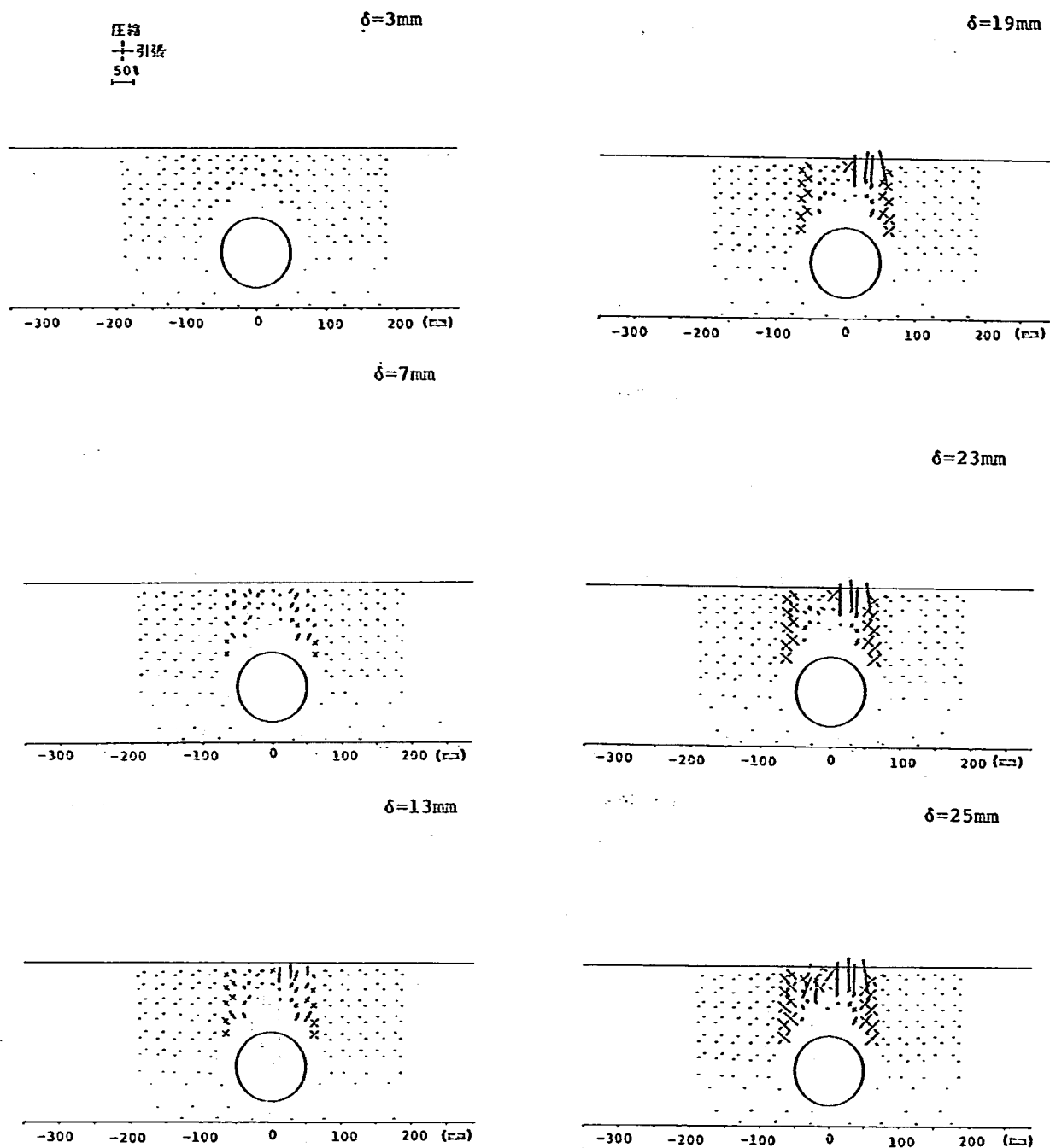
$H/D \approx 3$ の場合は、トンネル変形量が小さい段階では $H/D \approx 2$ の場合と同様に地表面近くの地山はほとんど変位が発生しておらず、トンネルの変形量が増大して地表面近くの地山に変位が発生した場合でもその絶対量はトンネル直上の変位量に比較するとはるかに小さくなっている。ただしトンネルの変形量が増加した段階で、地表面近くに発生する変位領域の大きさは $H/D \approx 2$ の場合よりもさらに拡大したものとなっており、トンネルに過大な変形を許した場合の影響範囲は土被りが大きいほど広がるものと考えられる。

主ひずみ分布については $\delta = 9$ mm 程度の段階でひずみの集中した領域が認められるが、 $H/D \approx 2$ の場合と同様、その形状は地中で先端が閉じるアーチ形状となっている。また、このアーチ形状の領域はトンネル変形量の増大とともに徐々に拡大して最終的には地表面にまで到達することになるが、地表面に達するまでに要するトンネル変形量 δ は $H/D \approx 2$ の場合に比べてさらに大きくなっている。



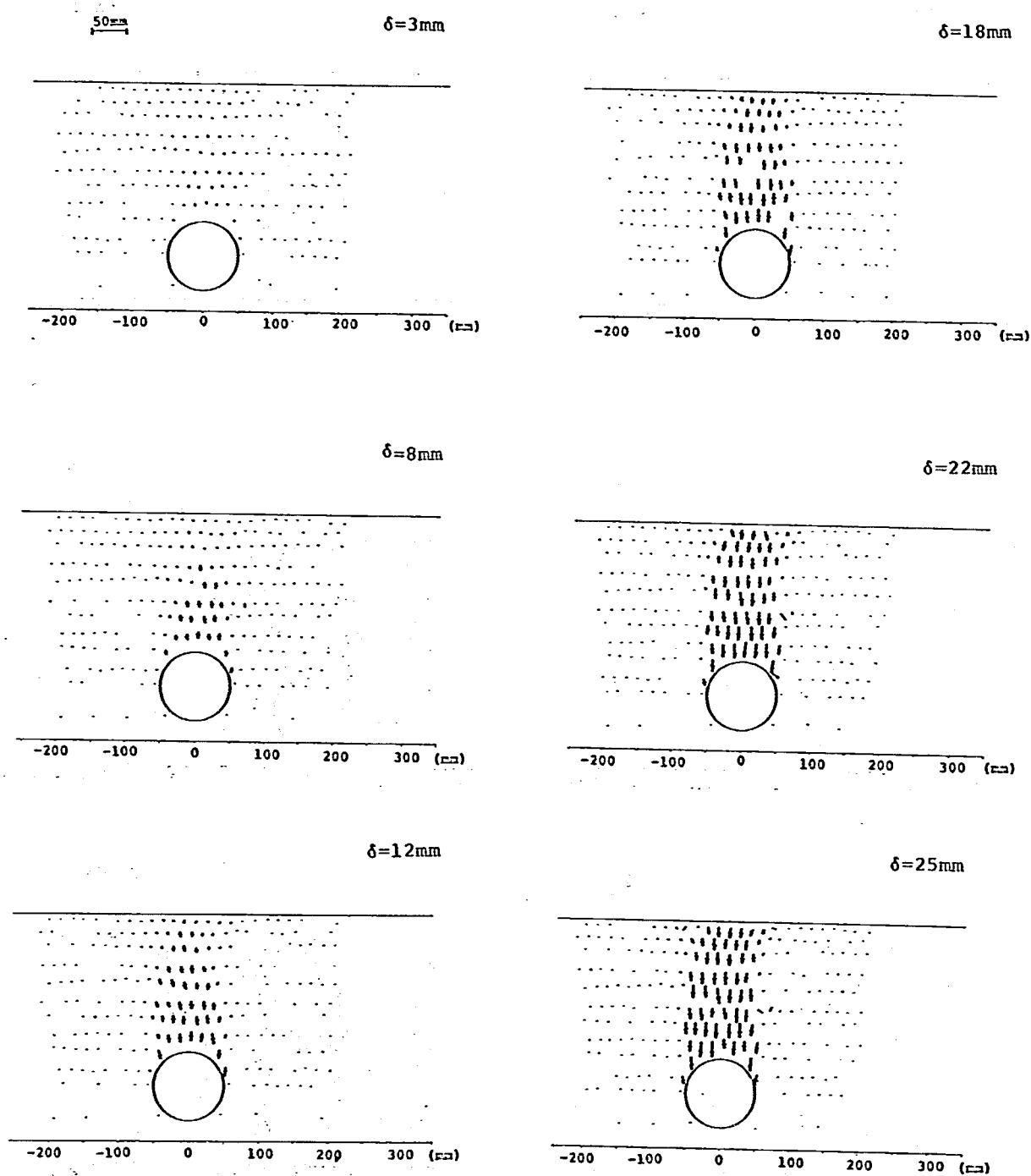
(a)変位分布

図-2. 13(1) $\alpha=0^\circ$; $H/D \approx 1$ の実験結果



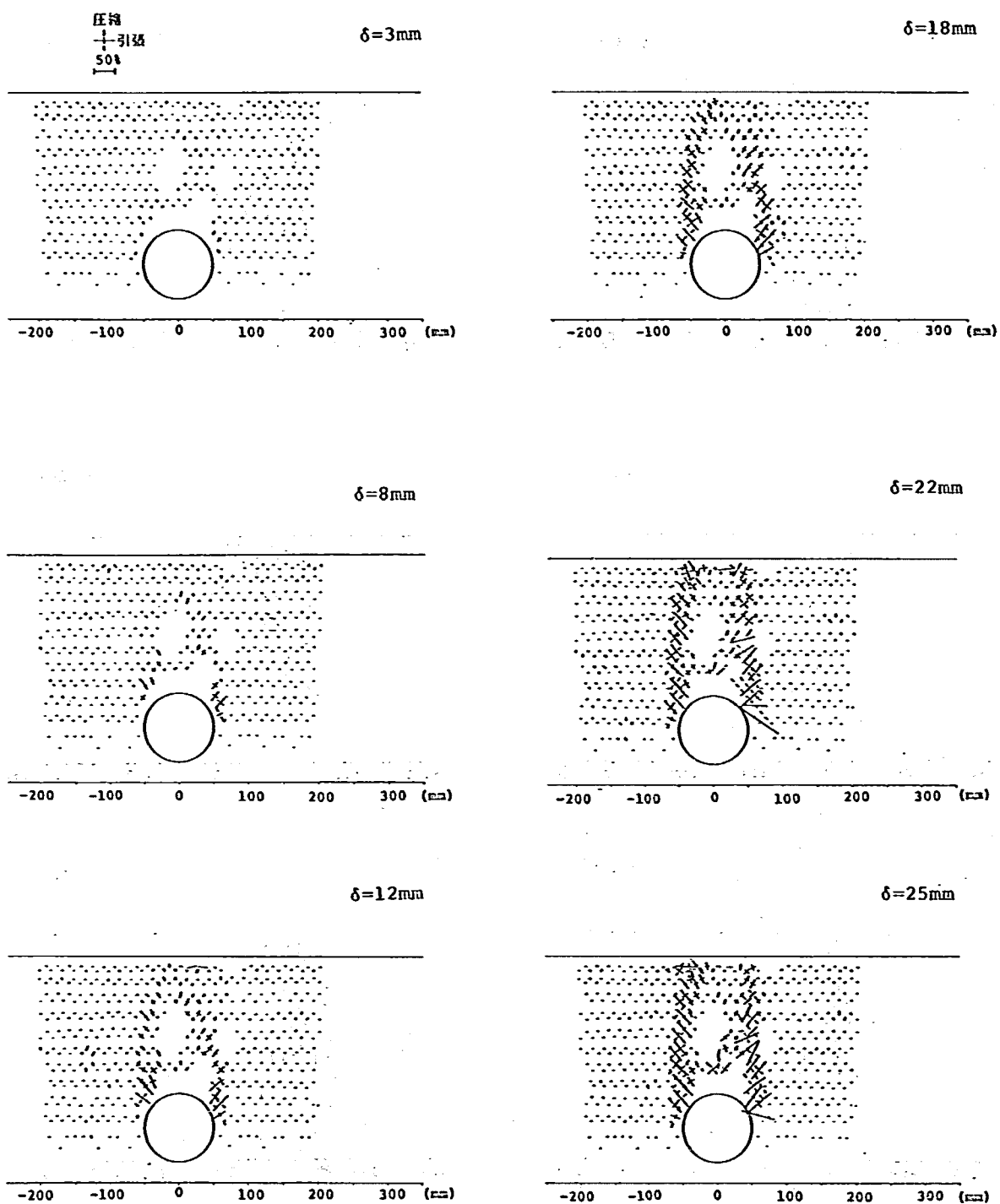
(b) 主ひずみ分布

図-2. 13(2) $\alpha=0^\circ$, $H/D \approx 1$ の実験結果



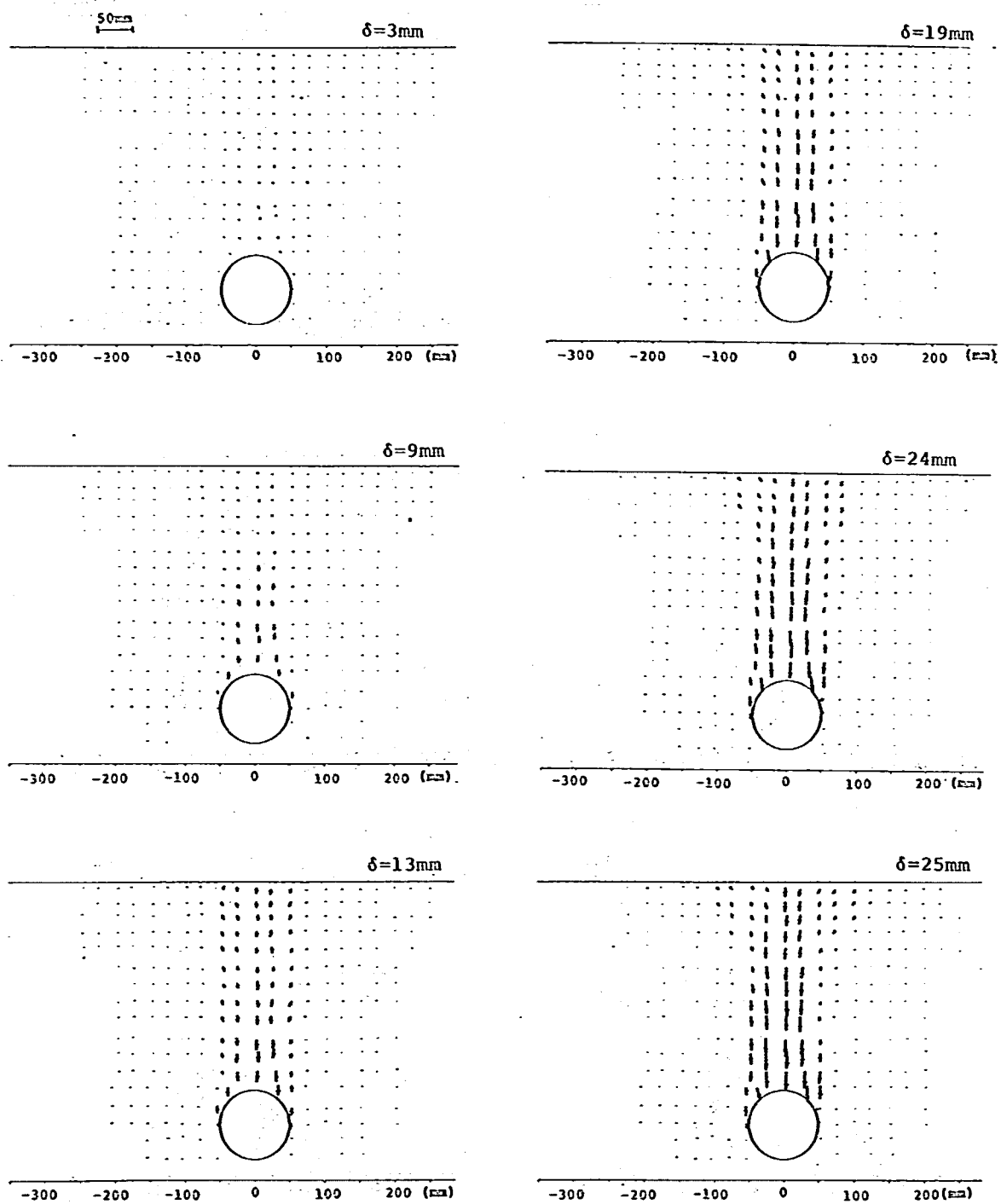
(a)変位分布

図-2. 14(1) $\alpha = 0^\circ$, $H/D \approx 2$ の実験結果



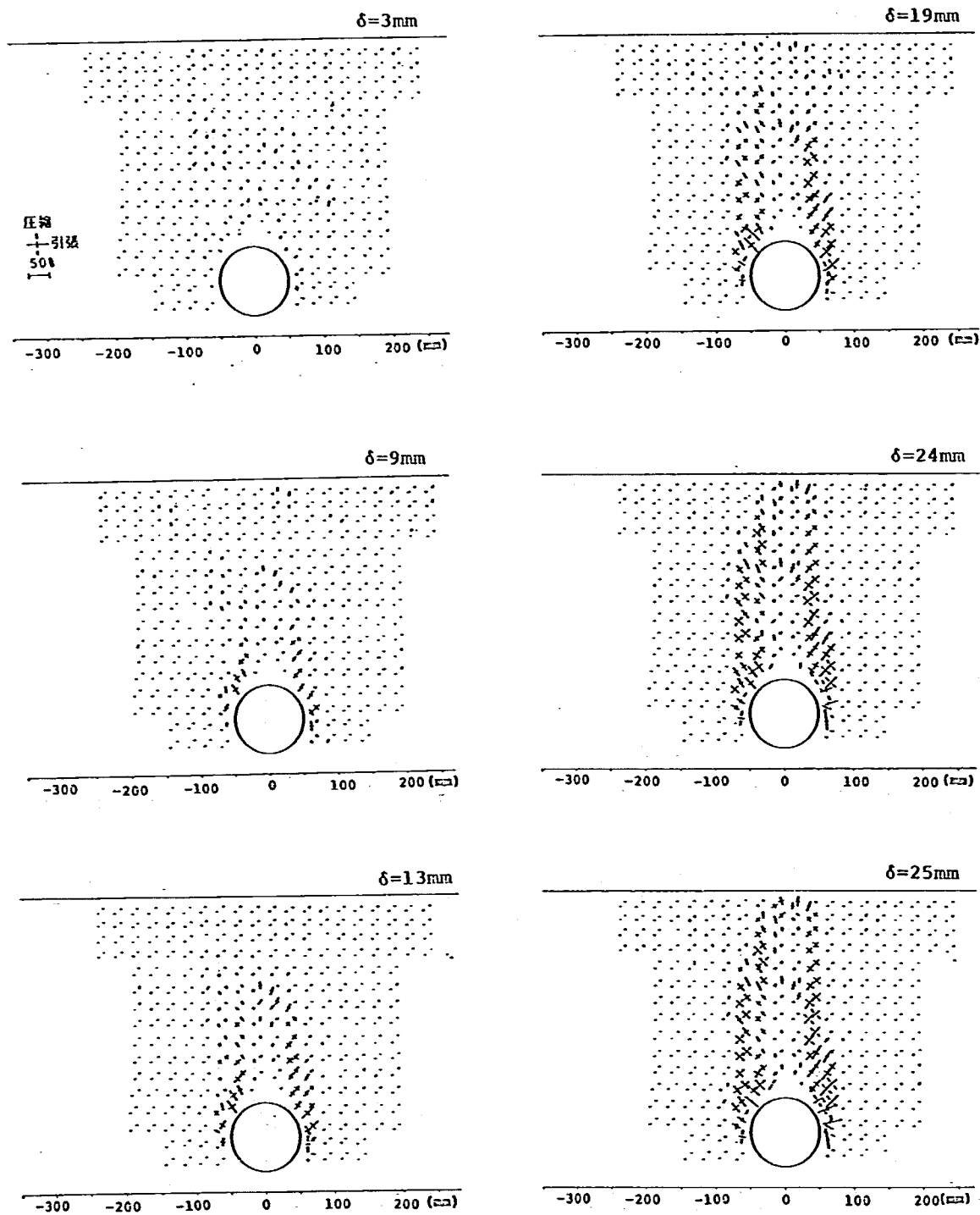
(b) 主ひずみ分布

図-2. 14(2) $\alpha=0^\circ$, $H/D \approx 2$ の実験結果



(a)変位分布

図-2. 15(1) $\alpha = 0^\circ$, $H/D \approx 3$ の実験結果



(b)主ひずみ分布

図-2. 15(2) $\alpha = 0^\circ$; $H/D \approx 3$ の実験結果

2) 斜面の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ のケース

図-2.16~18 は斜面の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ で土被りが異なる3つのケースについて、トンネルの変形に伴う地中変位分布、主ひずみ分布の変化を各トンネルの変形量毎に示したものである。

$H/D \equiv 1$ の場合は、トンネルの各変形段階で地中変位が発生する領域は、トンネル直上についてはトンネル両側壁よりほぼ鉛直に伸ばした2本の直線に囲まれた領域となっており、地表面が水平な場合 ($\alpha=0^\circ$) と明確な差は認められない。しかし、地表面付近の地山の動きに着目すると、トンネル山側では $\alpha=0^\circ$ の場合よりも若干広い領域にわたって地山が変位しているのが認められる。また、変位ベクトルの方向も、トンネル山側の領域では若干山側から谷側へ向かっており、変位ベクトルの方向が鉛直方向であった $\alpha=0^\circ$ の場合とで差が認められる。変位量については各変形段階とも地表面近くで発生する変位量とトンネル直上に発生する変位量とは比較的近い値を示しており、 $\alpha=0^\circ$ の場合と同様トンネル直上に発生する変形が地表面近くまで直接伝達されているのが認められる。

主ひずみ分布については $\delta=7\text{ mm}$ の段階でひずみが集中した領域が現われており、トンネル谷側には側壁からほぼ鉛直に伸びて地表面にまで達する線状の領域が形成されているのが認められる。トンネル山側にもひずみが集中する領域が認められるがその形状は $\delta=7\text{ mm}$ の段階ではあまり明確になっていない。その後、トンネル変形量の増加とともにトンネル山側に発生するひずみの集中領域が明確に現れてくるが、その形状はトンネル側壁よりほぼ鉛直に伸びて地表面近くで山側に傾斜したものとなっており、地表面が傾斜していることの影響が現れている。

$H/D \equiv 2$ の場合は、 $\delta=7\text{ mm}$ の段階で地中変位が発生する領域はトンネル両側壁よりほぼ鉛直に伸ばした2本の直線に囲まれた領域となっているが、地表面近くの地山にはほとんど変位が認められない。 $\delta=12\text{ mm}$ 以降の段階では地表面近くの地山にも変位が認められるようになり、トンネル山側については $H/D \equiv 2$ で地表面が水平な場合 ($\alpha=0^\circ$) あるいは $\alpha=15^\circ$ で $H/D \equiv 1$ の場合よりも広範囲の領域にわたって変位が発生しているのが認められる。変位ベクトルの方向についてはトンネル直上ではすべて鉛直方向となっているが、地表面付近のトンネル山側に発生する変位の方向は山側から谷側へ向かっており、地表面が傾斜していることの影響が現れている。

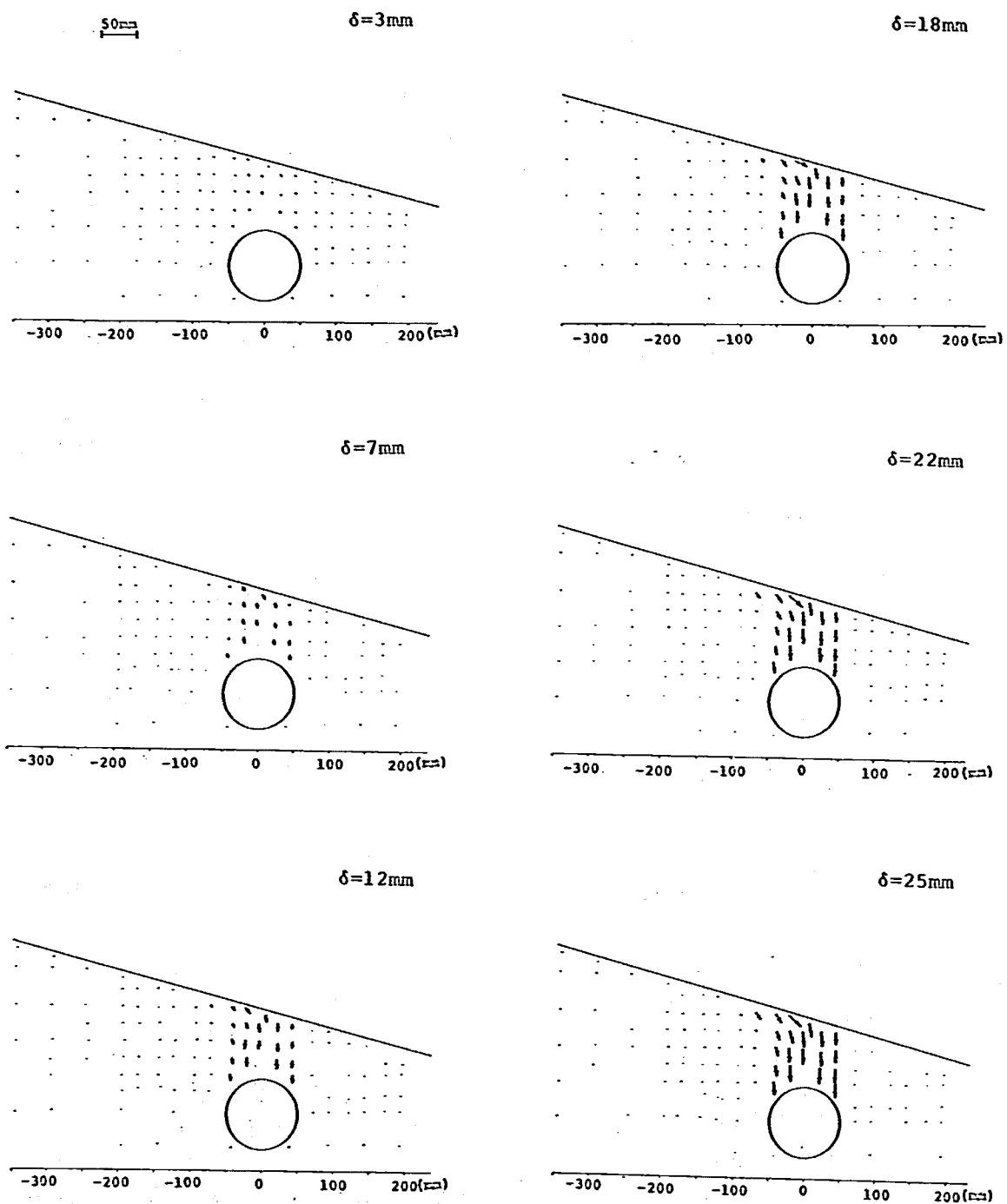
主ひずみ分布については $\delta=7\text{ mm}$ の段階で集中した領域が認められるようになるが、その形状は $\alpha=0^\circ$ の場合と同様地中で先端が閉じたアーチ形状となっている。その後の変形段階でも基本的にはひずみが集中する領域はアーチ形状を形成しており、 $\delta=22\text{ mm}$ 程度の段階でアーチの先端が地表面にまで達するようになる。ただし、トンネル山側地表面付近に発生するひずみの集中領域の形状は $\delta=22\text{ mm}$ の段階からは、山側に傾斜して地表面にまで達する線状となっており、地表面が傾斜していることの影響が認められる。

$H/D \equiv 3$ の場合は、トンネルの変形量が小さい段階では $H/D \equiv 2$ の場合と同様地表面付近の地山の変位量は小さく、明らかな変位が認められるのはトンネル両側壁よりもほぼ鉛直に伸ばした2本の直線に囲まれるトンネル直上の領域に限定されている。

トンネルの変形量が大きい段階では地表面近くの地山にも変位の発生が認められるようになり、変位領域の大きさは $H/D \equiv 3$ で地表面が水平な場合 ($\alpha=0^\circ$) あるいは $\alpha=15^\circ$ で $H/D \equiv 2$ の場合よ

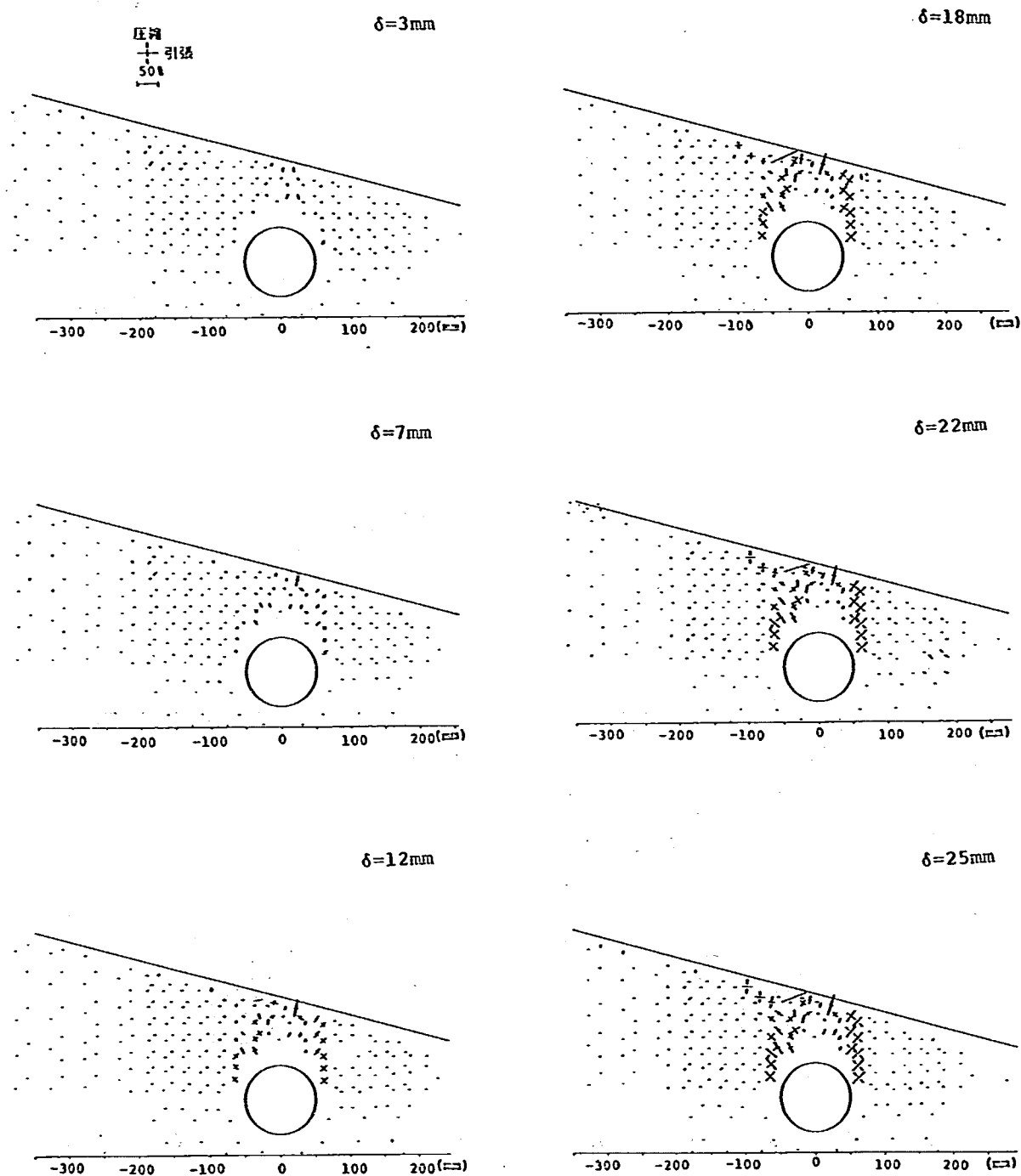
りも若干拡大している。ただし、地表面付近の地山の変位量はトンネル変形量が同一の $H/D \approx 2$ の場合に比較するとはるかに小さくなっている。変位ベクトルの向きについては全変位領域にわたってほぼ鉛直に向かっており、地表面が傾斜していることの影響は明確には認められない。したがって、 $H/D \approx 3$ の場合は、地表面が傾斜していることの影響が、トンネルの変形量が大きくなった段階で地表面近くに発生する変位領域の大きさに若干現れるものの、全体的な挙動は地表面が水平な場合との間に明確な差は認められないと言える。

このことは主ひずみ分布からも明らかである。すなわち、ひずみの集中領域の形状はトンネル両側壁面からほぼ鉛直に伸びる2本の直線が地中で閉じるアーチ形状となっており、トンネルの変形量が増加してもアーチの先端が伸びるもののアーチ形状は保たれており、 $H/D \approx 1$ あるいは $H/D \approx 2$ の場合に見られたような地表面にまで達する傾斜した線状とはならない。



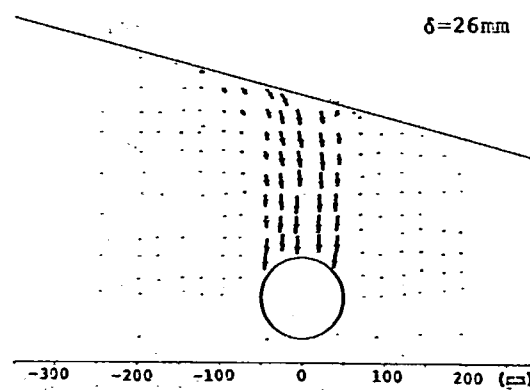
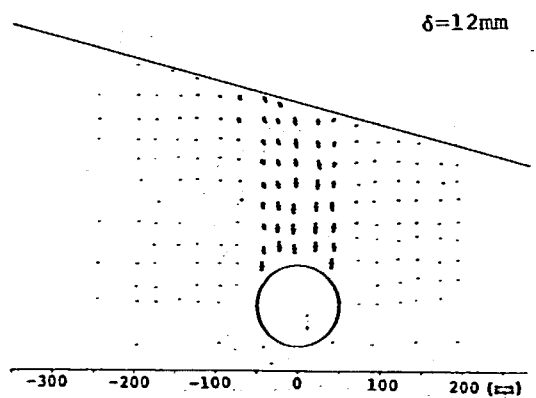
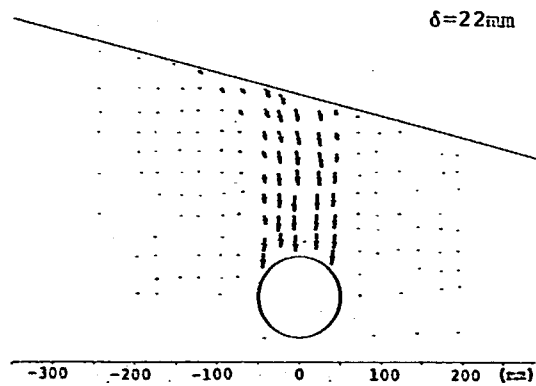
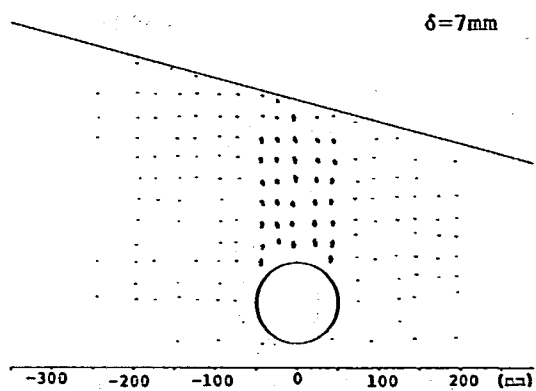
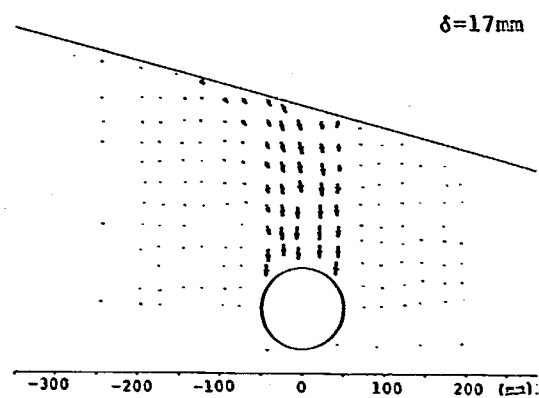
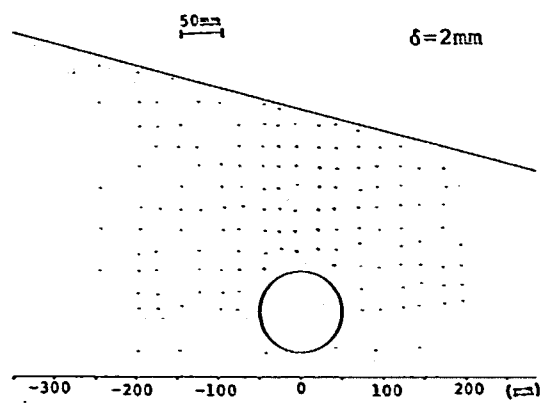
(a)変位分布

図一 2. 16(1) $\alpha=15^\circ$, $H/D \approx 1$ の実験結果



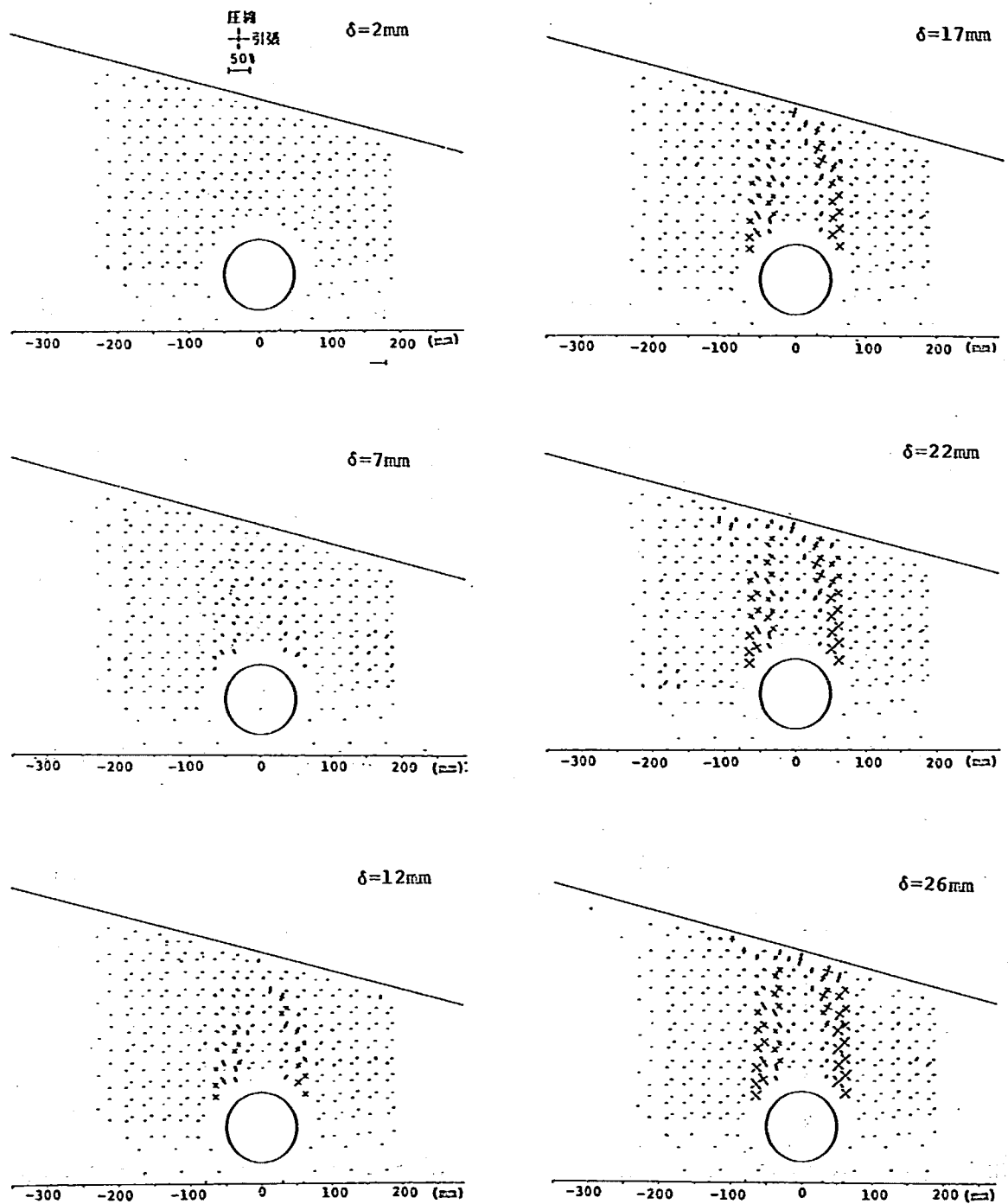
(b)主ひずみ分布

図-2. 16 (2) $\alpha = 15^\circ$, $H/D \approx 1$ の実験結果



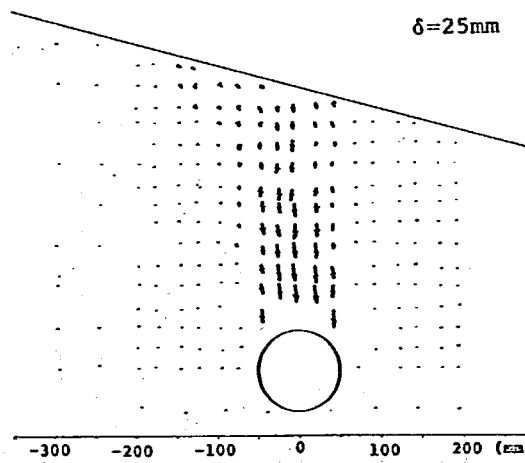
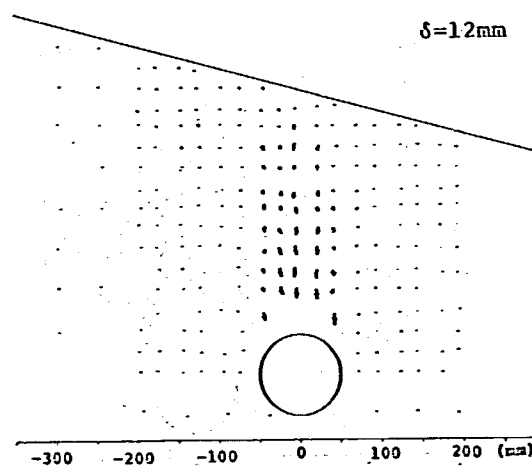
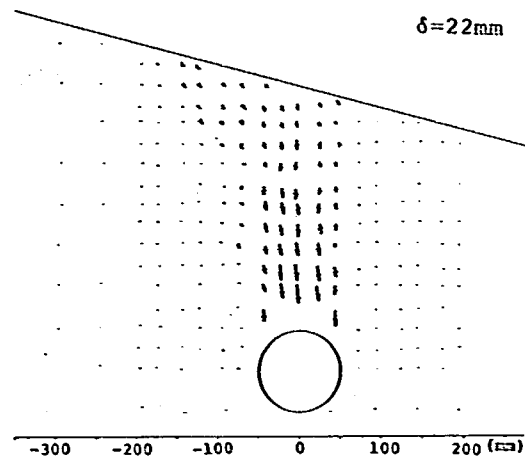
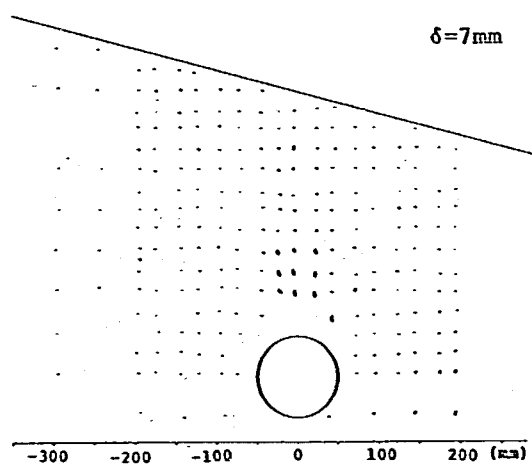
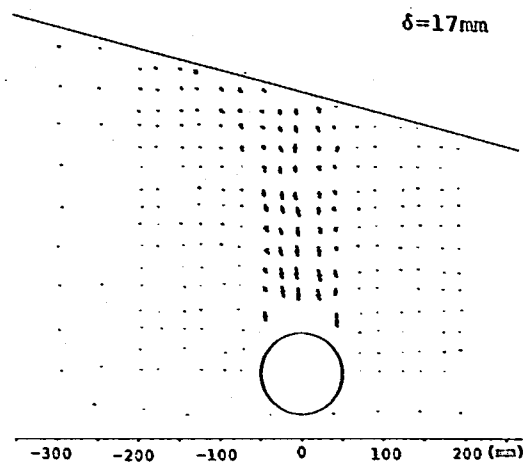
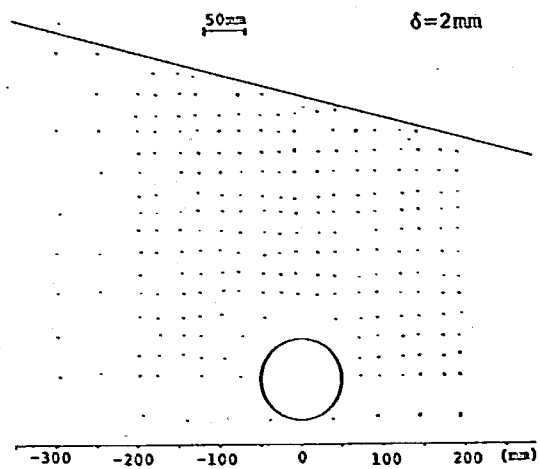
(a)変位分布

図-2: 17(1) $\alpha=15^\circ$, $H/D \approx 2$ の実験結果



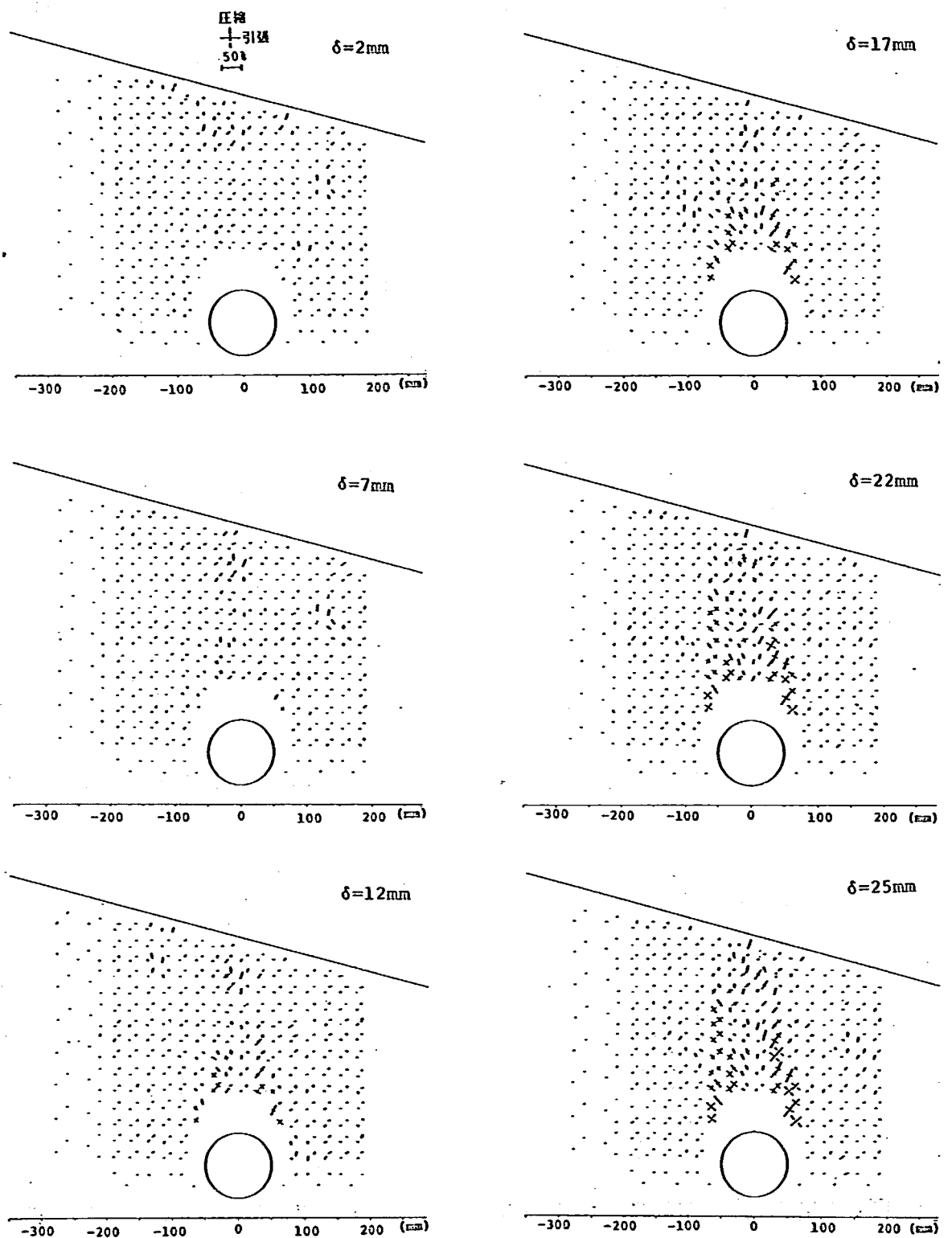
(b) 主ひずみ分布

図-2. 17(2) $\alpha = 15^\circ$, $H/D \approx 2$ の実験結果



(a)変位分布

図-2. 18(1) $\alpha = 15^\circ$, $H/D \approx 3$ の実験結果



(b)主ひずみ分布

図-2. 18(2) $\alpha=15^\circ$, $H/D \approx 3$ の実験結果

3) 斜面の傾斜角 $\alpha=30^\circ$ のケース

図—2. 19~21 は斜面の傾斜角 $\alpha=30^\circ$ で土被りが異なる 3 つのケースについて、トンネルの変形に伴う地中変位分布、主ひずみ分布の変化をトンネルの各変形量毎に示したものである。

$H/D \equiv 1$ の場合は、トンネルの各変形段階で発生する変位領域は $\alpha=0^\circ$ あるいは 15° の場合とは大きく異なったものとなっている。すなわち、トンネル直上付近でもトンネル山側側壁より山側の領域には変位が発生しているのが認められ、地表面付近ではトンネル山側側壁より約 $1.5D$ 程度までの広範囲の領域にわたって変位が発生するのに対して、トンネル谷側側壁より谷側の領域ではほとんど変位の発生が認められない。また、変位ベクトルの方向も、すべて山側から谷側へ向かっており、地表面が傾斜していることの影響が大きく現れている。変位量については各変形段階ともトンネル直上付近と地表面付近では比較的近い値を示しており、 $\alpha=0^\circ$ 、 15° の場合と同様トンネル直上に発生する変形が地表面付近にまで直接伝達されているのが認められる。

主ひずみ分布は、 $\delta=8\text{ mm}$ の段階でひずみが集中した領域が現れており、その形状はトンネル山側側壁付近から山側に向って地表面にまで達する線状と、トンネル谷側側壁付近から山側に向って地表面にまで到達する線状となっている。また、トンネル変形量の増加とともにこれらひずみが集中した領域ではひずみが増加するのが認められるものの、その形状は変化せず、各変形段階においては谷側に発生するひずみ量の方が山側に発生するひずみ量よりも大きいのが特徴となっている。これらひずみが集中する領域においては地山が破壊してすべりが発生しているものと考えられるから、2本の線状領域に囲まれた部分の土塊がトンネル方向に変位することにより、トンネルの支保構造には偏土圧が作用することになる。このように、土被りが小さく、地表面が比較的大きな角度で傾斜した地山にトンネルを掘削する場合には、トンネルに過大な変形を許すと偏土圧が発生する恐れがあり、注意を要する。

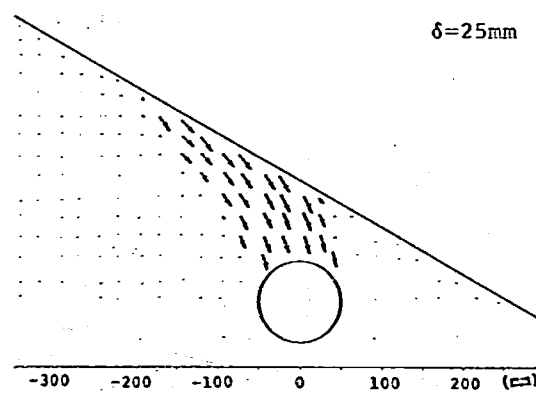
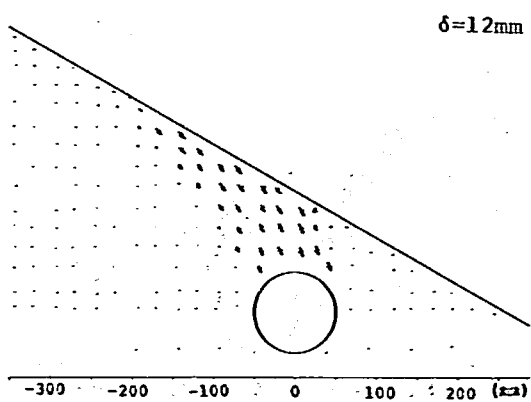
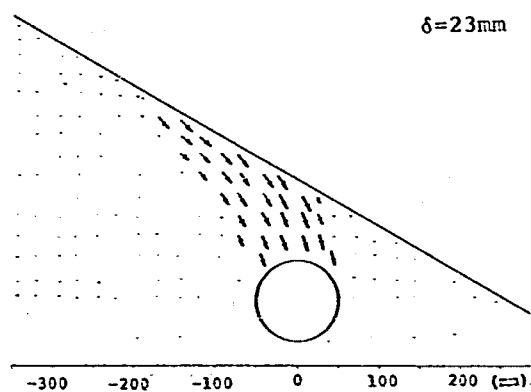
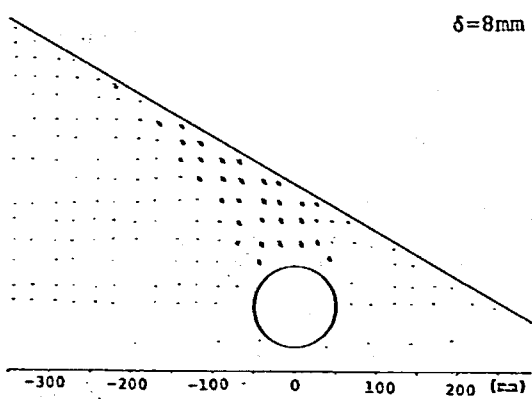
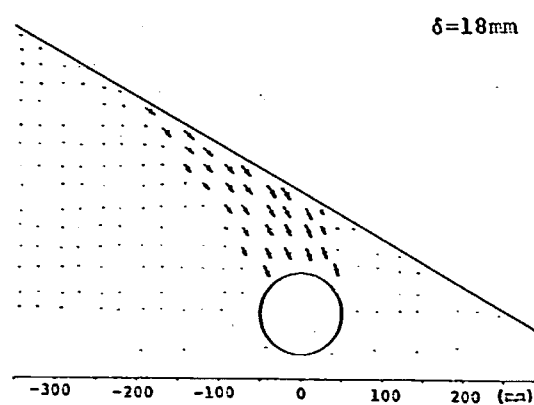
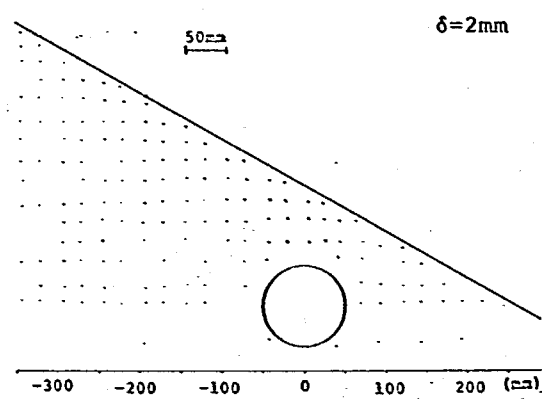
$H/D \equiv 2$ の場合は、 $\delta=13\text{ mm}$ の段階でトンネル直上山側の領域に変位が発生するのが認められるが、トンネルクラウンから土被り $1D$ 程度の深さまでの範囲における変位領域は $H/D \equiv 1$ の場合に比較すると小さい。しかし、トンネル直上土被り $1D$ 程度の深さからトンネル山側の地表面にかけてはかなりの広範囲にわたって変位領域が発生しており、地表面付近においてはトンネル山側側壁から山側 $2D$ までの範囲にトンネル掘削の影響が現れている。トンネル谷側については谷側側壁より谷側には変位領域の発生は認められず、トンネル掘削の影響はほとんど認められない。

主ひずみ分布については、 $\delta=8\text{ mm}$ の段階ではトンネル谷側に側壁から地表面にまで達する線状のひずみの集中領域が認められるが、トンネル山側に発生するひずみの集中領域はトンネル周辺に限定されている。前述したように、 $H/D \equiv 1$ の場合には、 $\delta=8\text{ mm}$ の段階で既にトンネル山側と谷側に側壁から地表面まで至る線状のひずみの集中領域が現れていることから、すべりが発生し始めるまでのトンネル変形量は土被りが大きい程大きくなると言える。しかし、 $\delta=13\text{ mm}$ の段階になると、トンネル山側にも線状の集中領域が現れるようになり、さらにトンネルに変形を許して行くと、これらひずみの集中領域は地表面にまで達する線状となる。したがって、 $H/D \equiv 2$ の場合も、トンネルに過大な変形を許すとすべりが発生してトンネルの支保構造に偏土圧が作用することになるが、作用方

向は $H/D \approx 1$ の場合に比較するとやや鉛直に近い方向となっている。

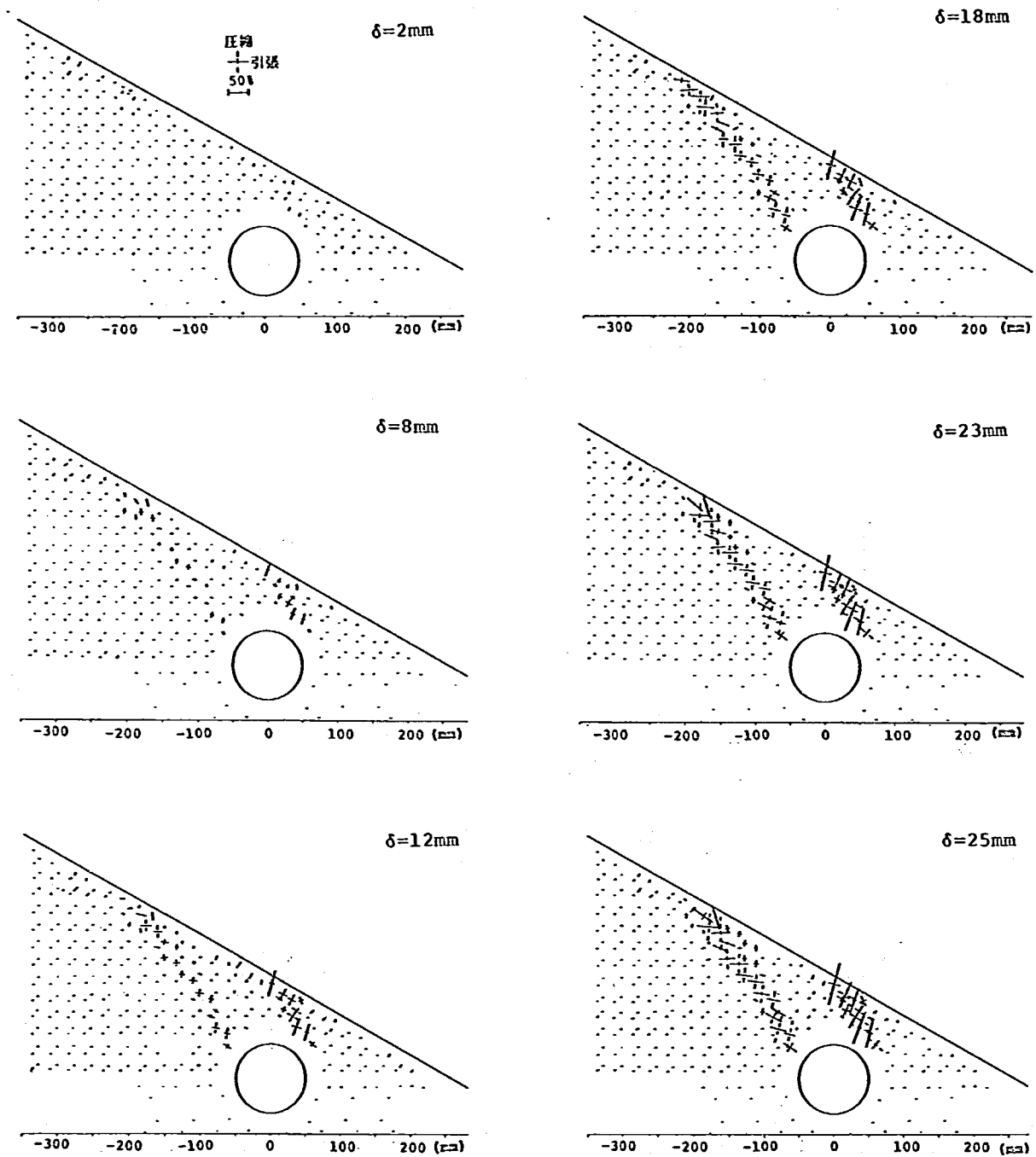
$H/D \approx 3$ の場合は、トンネルクラウンから土被り $1.5 D$ 程度の深さまでの範囲における変位領域は、トンネル両側壁からほぼ鉛直に伸ばした 2 本の直線に囲まれた領域となっており、また変位ベクトルの方向もほぼ鉛直に向かう等地面が傾斜していることの影響はほとんど認められない。しかし、トンネル直上土被り $1.5 D$ 程度の深さからトンネル山側の地表面にかけては比較的広範囲にわたっての領域に変位が発生しており、地表面付近ではトンネル山側側壁から山側 $2 D$ までの範囲にトンネル掘削の影響が及んでいる。また、これらの領域における変位ベクトルの方向は山側から谷側へ向っており、土被りが浅い領域における地山の挙動は地表面が傾斜していることの影響を受けていることがわかる。

主ひずみ分布は、 $\delta = 7 \text{ mm}$ の段階からトンネル周辺にひずみの集中した領域が認められるようになるが、 $H/D \approx 1$ あるいは 2 の場合のような線状の領域は形成されていない。 $\delta = 13 \text{ mm}$ 以降の段階では、トンネル変形量の増加とともにひずみの集中する領域が線状となって現れてくるが、 $\delta = 25 \text{ mm}$ の段階で明確に認められるひずみの集中領域の形状はトンネル両側壁からほぼ鉛直に伸びた 2 本の直線が地表面近くで閉じるアーチ形状となっており、これは $\alpha = 0^\circ$ の場合と比較的似た形状である。したがって、地表面が傾斜している場合でも土被りが大きくなれば地山の挙動は地表面が水平な場合とほぼ同様なものとなり、偏土圧がトンネルの支保構造に作用する可能性も小さくなるものと判断される。なお、図—2.22 は、地表面の傾斜角 $\alpha = 30^\circ$ の場合に発生するひずみの集中領域の形状の変化を土被りとともに示したものであるが、この図からも土被りが大きい程偏土圧が発生しにくいことがよく理解される。



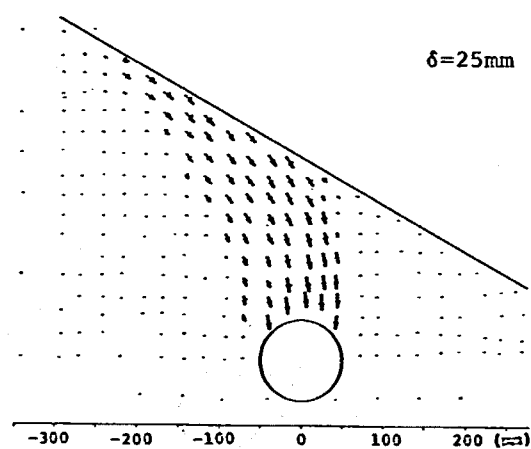
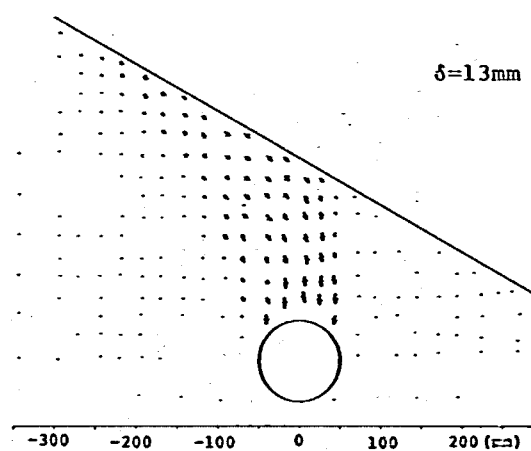
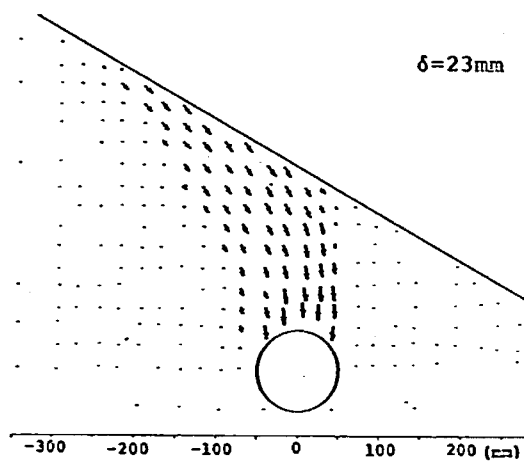
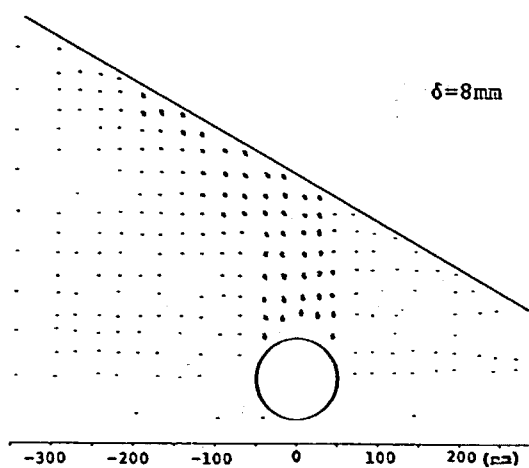
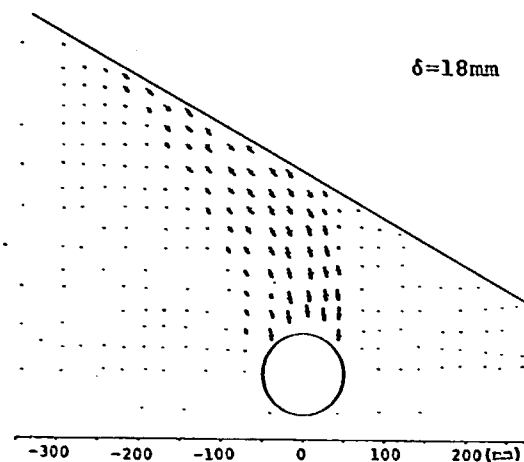
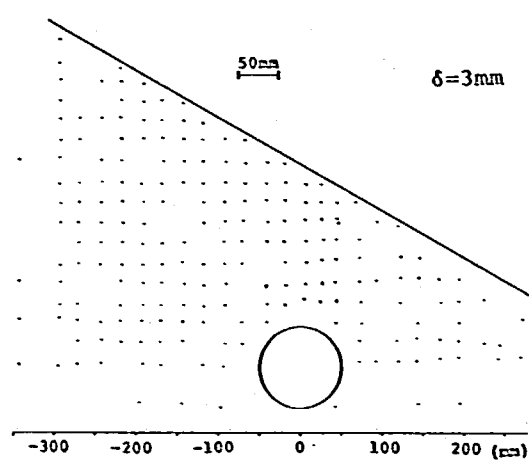
(a)変位分布

図-2. 19(1) $\alpha = 30^\circ$, $H/D \approx 1$ の実験結果



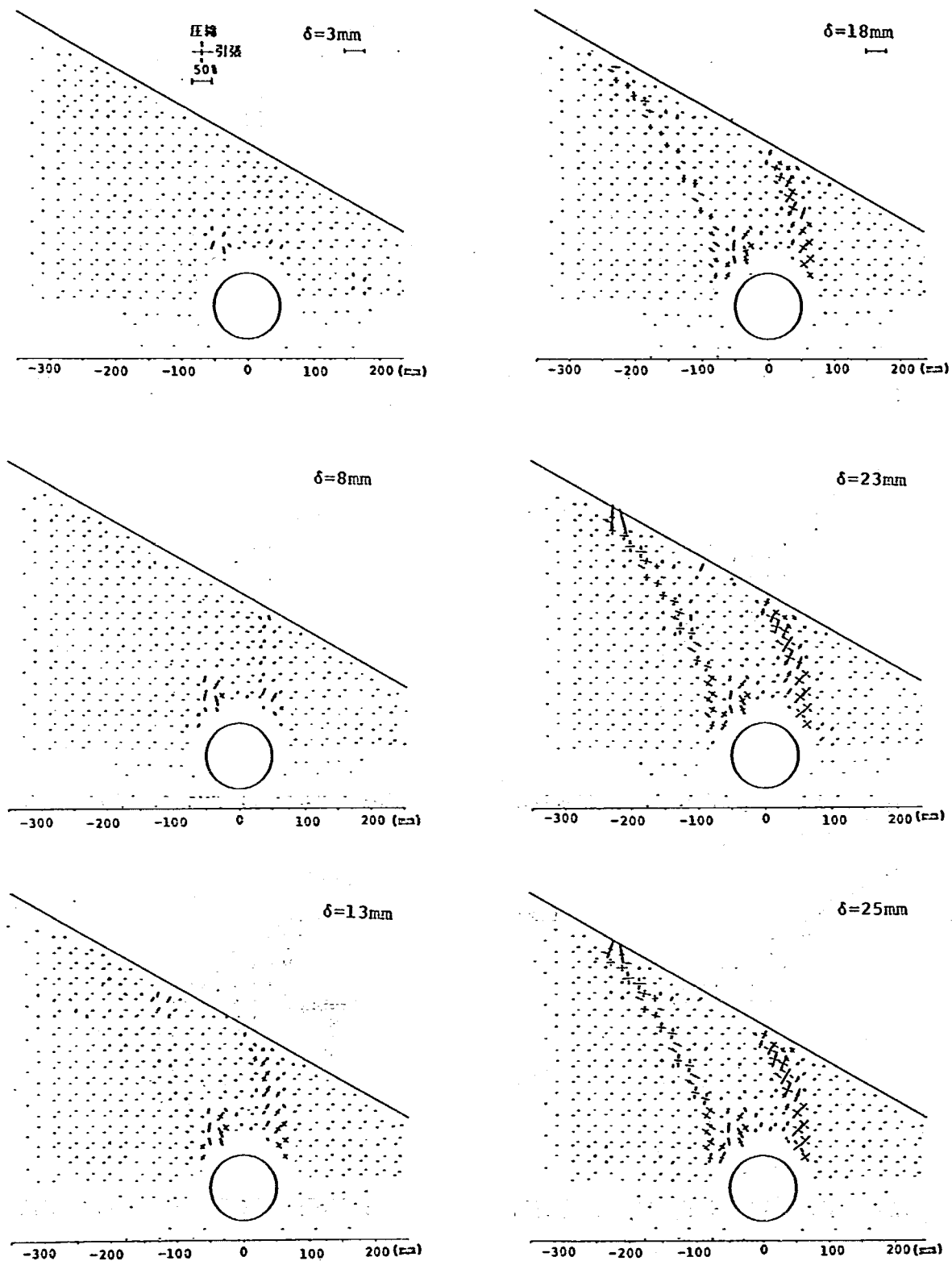
(b)主ひずみ分布

図-2. 19(2) $\alpha=30^\circ$, $H/D=1$ の実験結果



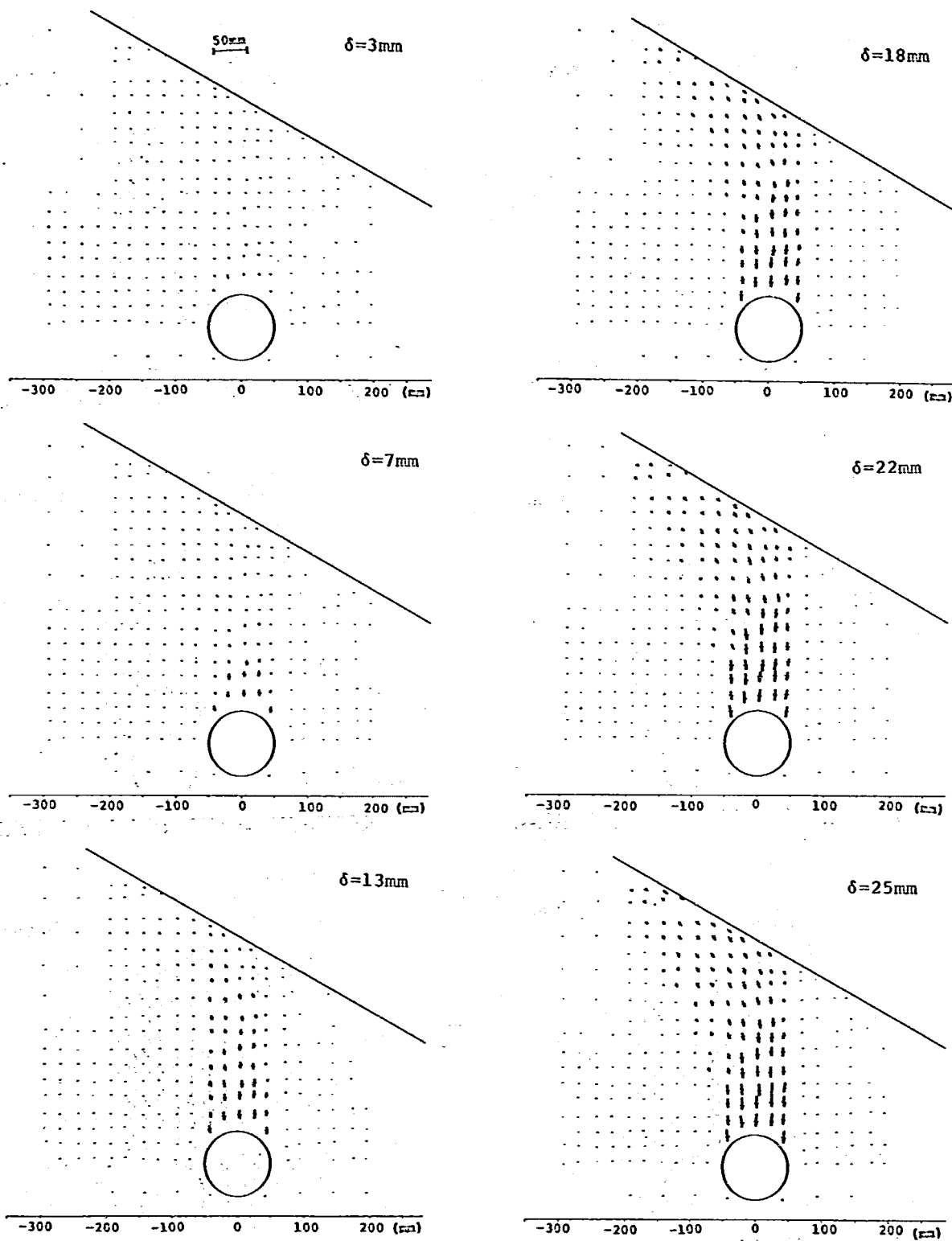
(a)変位分布

図-2. 20(1) $\alpha = 30^\circ$, $H/D \approx 2$ の実験結果



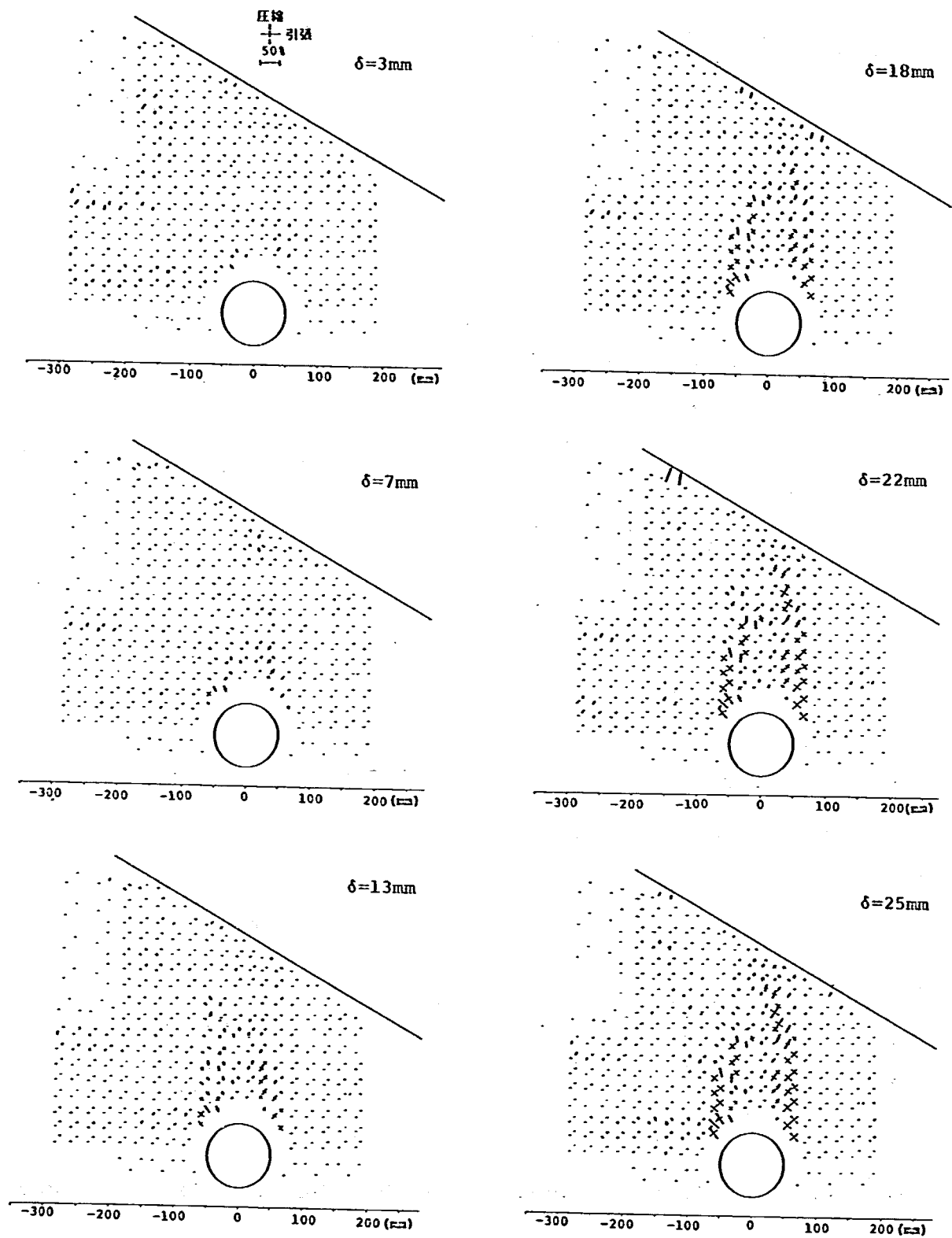
(b)主ひずみ分布

図-2. 20 (2) $\alpha=30^\circ$, $H/D \approx 2$ の実験結果



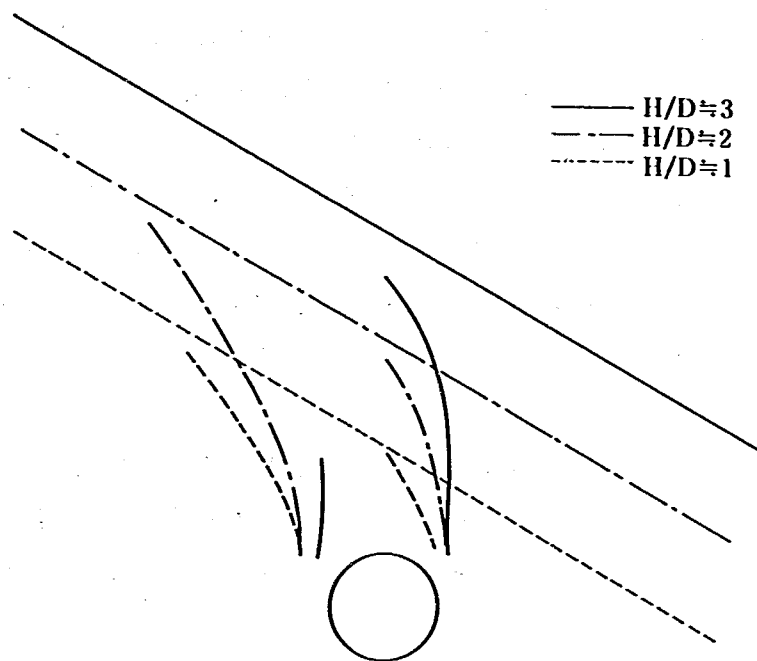
(a)変位分布

図-2: 21 (1) $\alpha = 30^\circ$, $H/D \div 3$ の実験結果



(b)主ひずみ分布

図-2. 21 (2) $\alpha=30^\circ$, $H/D \approx 3$ の実験結果



図—2. 22 土被りがひずみの集中領域の形状に及ぼす影響

2. 4 まとめ

砂質地山にトンネルを掘削した場合に発生する地表面沈下曲線の形状は、地表面が水平な場合には正規分布曲線に近い形状となるが、地表面が傾斜している場合は、最大沈下量を与える地点がトンネル中心よりも谷側へ移行するとともに沈下領域は山側が大きく増大し、谷側が減少する。また、土被りが地表面沈下量に及ぼす影響は地表面の傾斜角にかかわらず、トンネル変形量が同一であれば土被りが大きい程地表面沈下量は小さくなる。さらに、地表面最大沈下量とトンネル変形量との比率は、土被りが同一であれば地表面の傾斜角の値にかかわらず、ほぼ一定の値を示す。

砂質地山にトンネルを掘削した場合のトンネル周辺地山の挙動については、トンネルに過大な変形を許すとトンネル周辺の地山に変位の不連続面が発生するようになるが、この不連続面の形状は地表面の傾斜角、土被りによって異なる。

地表面が水平な場合は、不連続面の形状はトンネル両側壁付近に端を発し、トンネル変形量の増加とともに鉛直方向に伸展する2本の線状となる。特に、土被りが小さい場合にはこの不連続面は地表面にまで達するようになり、トンネルから地表面までの不連続面に囲まれた領域の地山がすべり落ちることになる。

地表面が傾斜している場合は、傾斜角が同一であっても不連続面の形状は土被りによって異なる。土被りが小さい場合は、不連続面はトンネル谷側側壁から山側に向う線状と、トンネル山側側壁から山側に向う線状の2本が現れ、トンネル変形量の増加とともにこれら不連続面は地表面にまで達するようになる。したがって、土被りが小さい場合にはトンネルの支保構造に偏土圧が作用することになる。一方、土被りが大きい場合に発生する不連続面の形状は同一土被りの地表面が水平な場合に比較的近いものとなり、地表面が傾斜していても土被りが大きければ偏土圧が発生する可能性は小さくなる。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 1943
- 2) 小野諒兄, 眞井耕象 : 乾燥砂層に於ける垂直土圧, 土木学会誌, 第5号, 昭和13年5月
- 3) 村山朔郎・松岡 元 : 粒状土地盤の局部沈下現象について, 土木学会論文報告集, 第172号, 1969年12月
- 4) 村山朔郎・松岡 元 : 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第187号, 1971年3月
- 5) 村井俊治, 奥田勉, 中村秀至 : 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, 昭和56年7月
- 6) 日本写真測量学会 : 写真による三次元測定, 共立出版

第3章 盛土の効果に関する模型実験

3.1 概説

土被りが小さく、しかも地表面が傾斜している地山にトンネルを掘削した場合には、トンネル掘削に伴い地表面沈下、斜面崩壊、偏土圧などの悪影響が発生し易く、工事が難航する場合が多い。また、標準砂を使用した前章の模型実験結果によれば、土被りが小さく、地表面が傾斜した地山にトンネルを掘削した場合、トンネルに過大な変形を許すとトンネルの山側と谷側に側壁から地表面にまで至る2本の線状のひずみが集中した領域（変位の不連続面）が現れ、トンネルの支保構造に偏土圧が作用することが明らかとなっている。こうした問題について現場では個別に種々の対策工法が用いられるが、偏土圧対策として比較的多く使用される工法の一つに押え盛土が挙げられる。この工法は、図-3.1に示すようにトンネル周辺の地山に土を盛ることにより地山の形状を変化させ、傾斜していることの影響を取り除こうとするものであるが、その効果のメカニズムが明らかにされた報告例は少なく、また、どの範囲までの盛土を行うのが効果的であるかもあまり理解されていない。

以上のような観点から本章では前章と同様の模型実験を行うことにより、押え盛土の効果を明らかにするとともに、効果的な盛土の形状について検討を加えることとした。

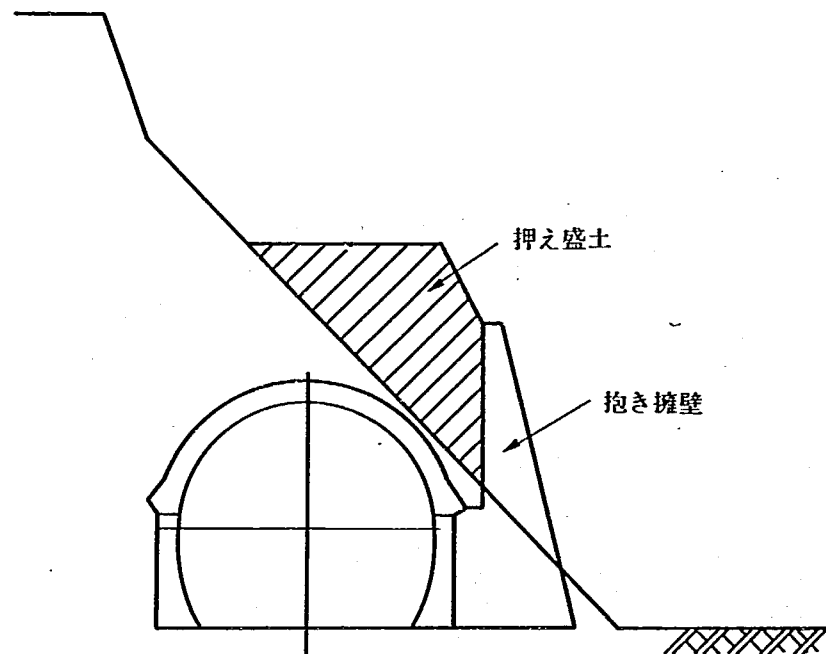


図-3.1 押え盛土工法

3. 2 実験方法

実験は基本的には前章と同様の方法により行った。すなわち、空気圧により膨張したゴムチューブを地山作製時に予め埋め込んで置き、地山作製完了後、ゴムチューブの空気圧を減少させることによりゴムチューブを収縮（変形）させてトンネル掘削をシミュレートし、地山に埋め込んだ標点の動きからトンネル掘削に伴う地山の挙動を観察するというものである（写真—3. 1）。

地山材料には前章と同様に気乾状態にある豊浦標準砂を使用し、前章の実験で最も偏土圧が発生し易いことが明らかとなった土被り比 $H/D \approx 1$ 、斜面の傾斜角 $\alpha = 30^\circ$ のケースに対して、図—3. 2 に示すような6通りの形状の押え盛土を作製した。押え盛土は、アクリル板から成る擁壁を実験砂箱の前面と後面のアクリル板に固定し、擁壁と斜面の間に地山材料を詰めて作製した。

計測項目は、トンネル変形量 δ と写真から得られる地中変位量とした。

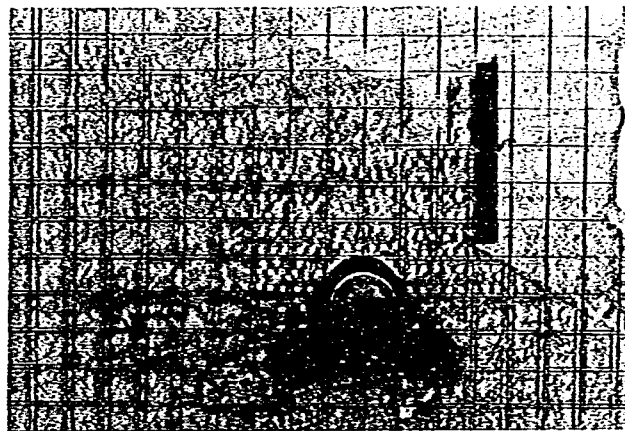
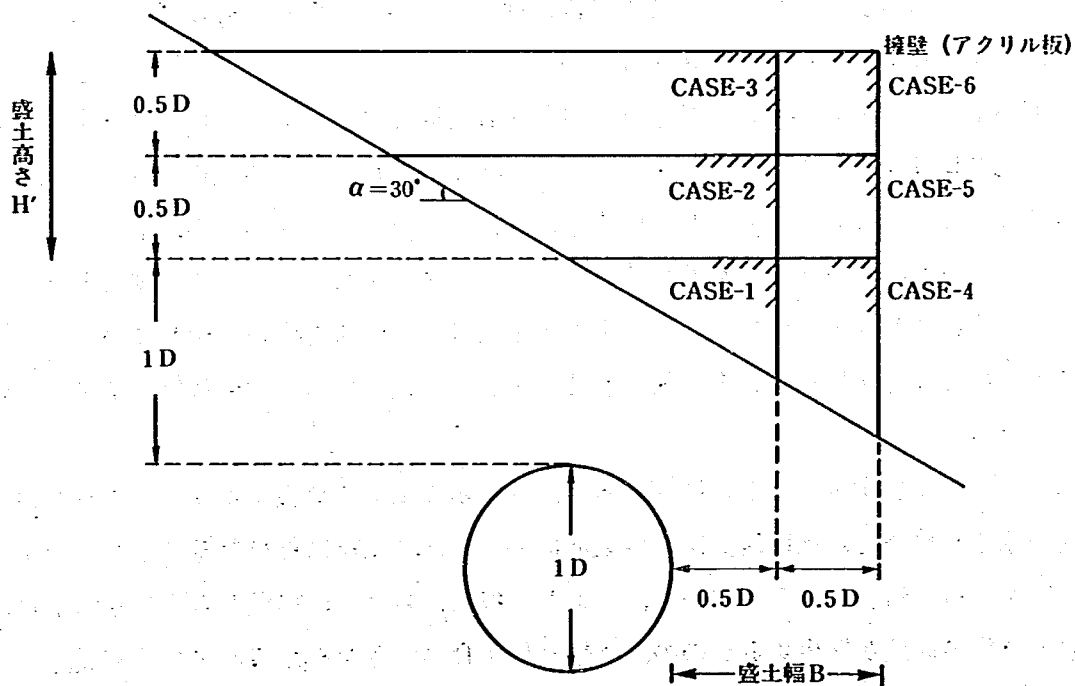


写真3. 1 押え盛土の作製状況図



図—3. 2 実験を行った押え盛土の形状

3. 3 実験結果および考察

1) 盛土の幅 $B=0.5D$ の場合

図-3. 3は前章で得られた押え盛土がないケース ($H/D \approx 1$, $\alpha=30^\circ$) の実験結果を改めて示したものであり、図-3. 4~6は、盛土の幅を $B=0.5D$ で一定として盛土の高さ H' を変化させた場合について、トンネルの変形に伴う地中変位分布、主ひずみ分布の変化をトンネル各変形量毎に示したものである。

$H'=0$ (CASE-1) の場合は、盛土がない場合に比較すると、トンネルの各変形段階でトンネル山側、特に地表面付近における変位領域の減少が認められ、変位ベクトル方向もやや鉛直に近い方向に変化しているのが認められる。

しかし、主ひずみ分布については、押え盛土がないケースと同様に、トンネル変形量の増加とともにトンネルの山側と谷側に側壁から地表面まで達する斜めの2本の線状の集中領域が発生するのが認められており、偏土圧の抑制効果はほとんど期待できない。ただし、偏土圧の作用方向はひずみの集中領域の形状から判断すると、盛土がない場合に比較して若干鉛直に近い方向に変化している。

$H'=0.5D$ (CASE-2) の場合は、盛土谷側の地表面付近の地山にやや不安定な動きが認められるものの、トンネルより山側の変位領域は盛土がない場合に比較すると大幅に減少しているのが認められており、変位領域の大きさは地表面が水平な場合とほぼ同等になっている。また、変位ベクトルの方向は盛土部地表面付近を除けばすべて鉛直に近い方向に変化しており、盛土の効果が現れている。

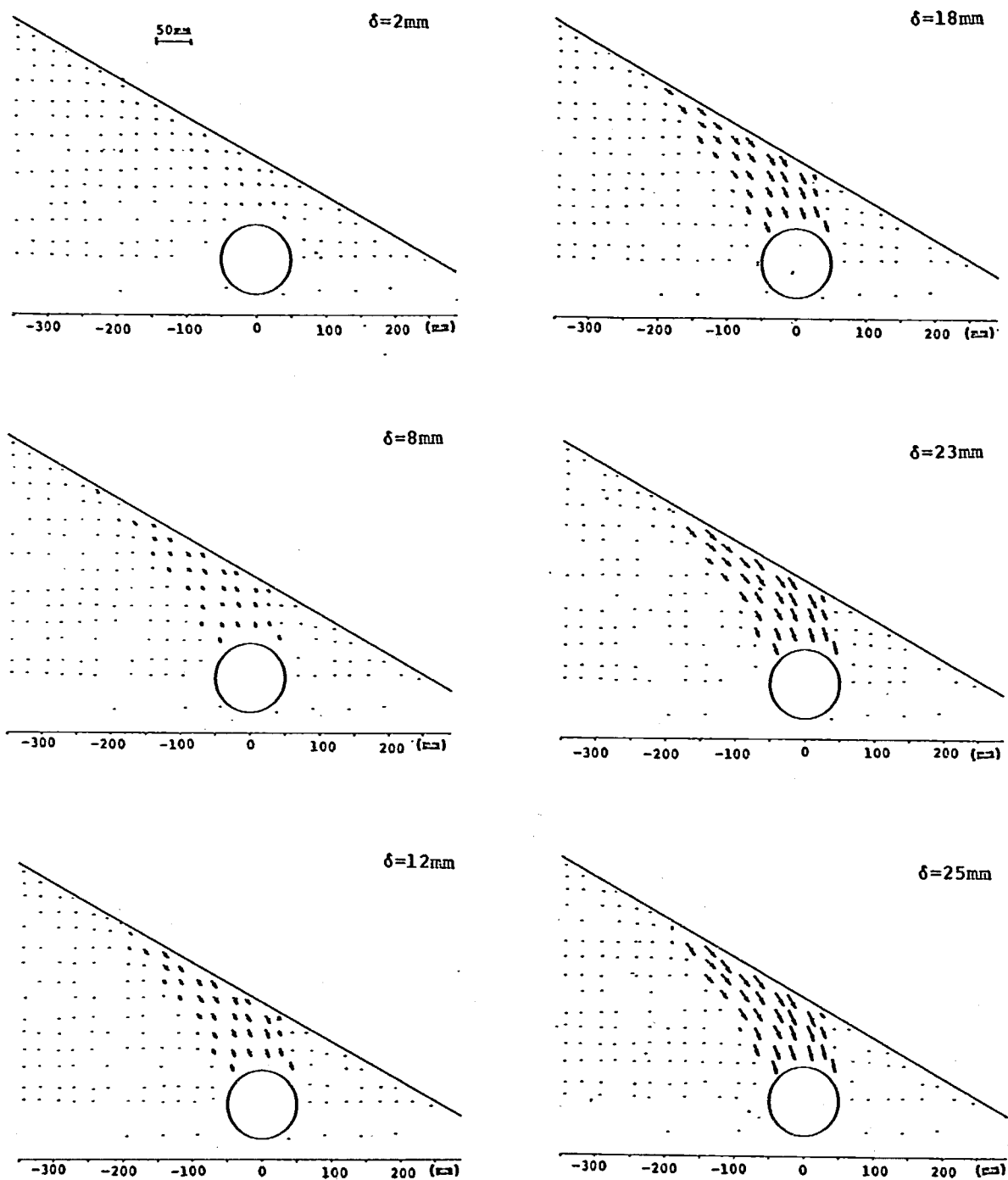
一方、主ひずみ分布については、トンネル変形量の増加とともにひずみの集中した領域が現れるようになるが、その形状は地表面が水平な場合と同様のトンネル両側壁からほぼ鉛直に伸びた線状となっており、偏土圧に対する抑制効果が現れている。

$H'=1D$ (CASE-3) の場合は、 $H'=0.5D$ の場合と同様に、トンネル山側に発生する変位領域は盛土がない場合に比較すると大幅に減少しているのが認められ、変位領域の大きさは地表面が水平な場合とほぼ同等になっている。しかし、盛土部の谷側においてはトンネルの変形量が小さい段階から変位が発生しており、トンネル変形量の増加とともに盛土が崩壊しているのが認められる。また、変位ベクトルの方向に注目すると、トンネル直上部の地山はほぼ鉛直方向に変位しているが、トンネルより谷側の盛土部では地山は山側から谷側へ変位しており、盛土部の地山が谷側へ流出していく様子がよく理解される。

一方、地山の動きを主ひずみ分布から観察すると、トンネル山側に発生するひずみの集中領域の形状は、地表面が水平な場合と同様に側壁から地表面に向ってほぼ鉛直に伸びた線状となるのが認められ、盛土の影響が顕著に現れている。しかし、トンネル谷側においては側壁から土被り約 $1D$ の深さの範囲にひずみの集中領域が発生するものの、土被り約 $1D$ の深さから地表面までの範囲では、ひずみの集中領域は現れず、盛土部の谷側の地山が一体として変位していることがわかる。

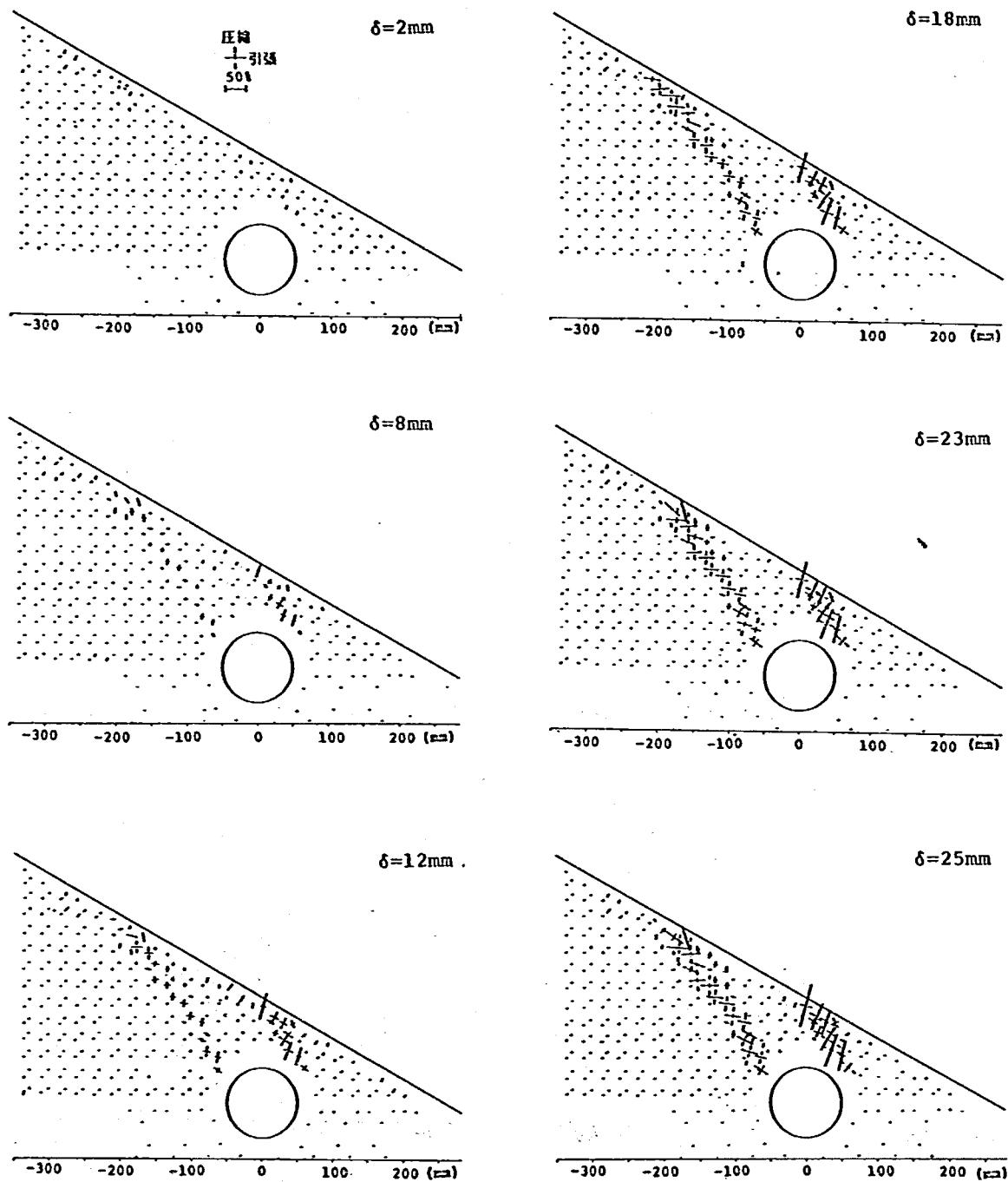
したがって、このケースでは盛土による効果がトンネル山側の地山挙動に対しては現れるものの、トンネル谷側部に対しては地山の崩壊を誘発する等の悪影響を及ぼすことになり、 $H'/D=0.5D$ の

場合よりも悪い結果となる。一般にトンネルを掘削した場合、土被りが大きい程地山は安定するものと考えられているが、このケースのように盛土の幅が不適切である場合には、土被りが大きくなることにより逆に地山が不安定となる場合もあるため注意を要する。



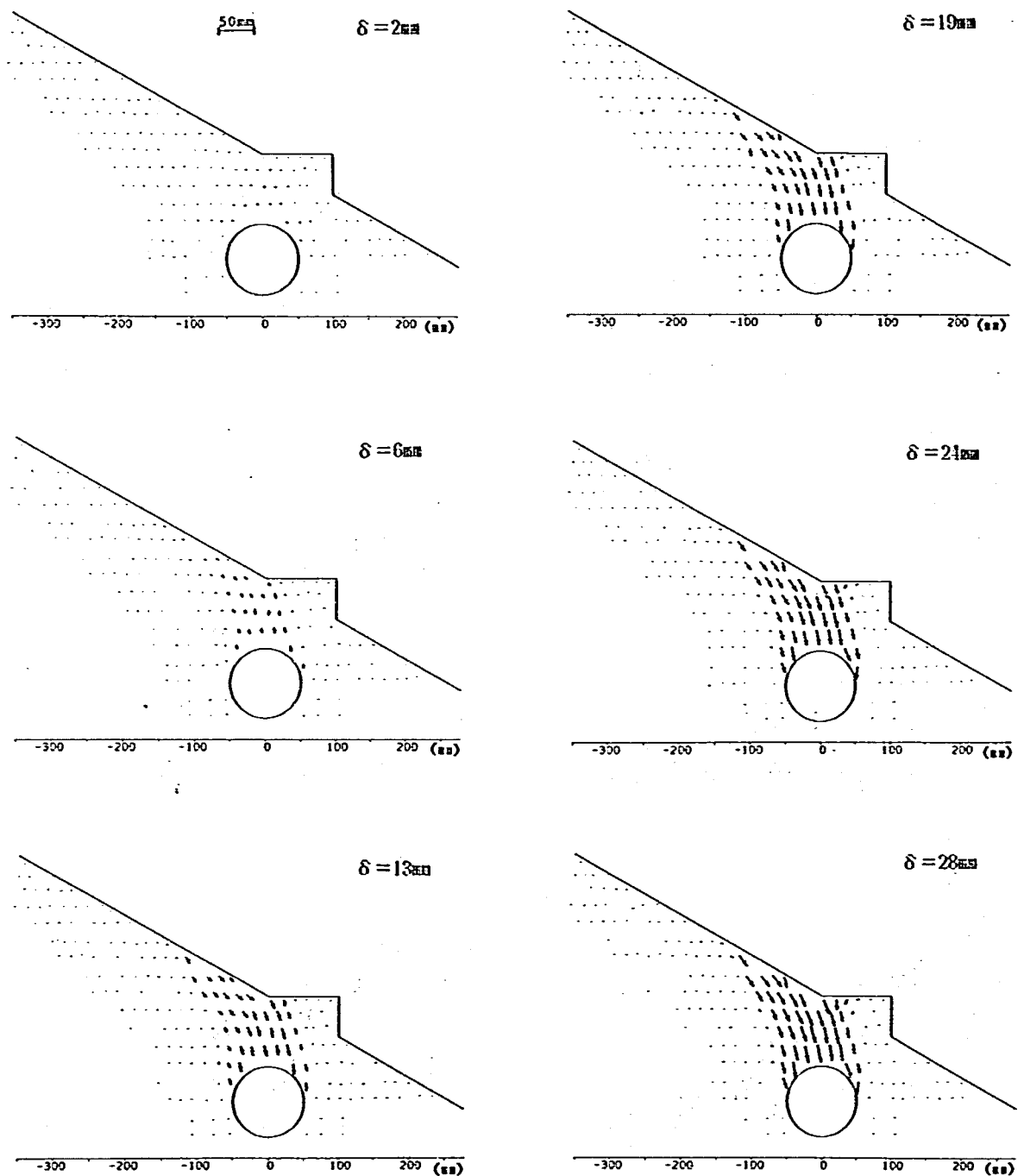
(a)変位分布

図—3. 3(1) 押え盛土がない場合の実験結果



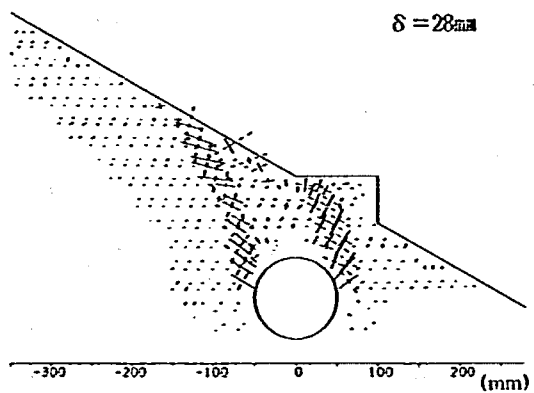
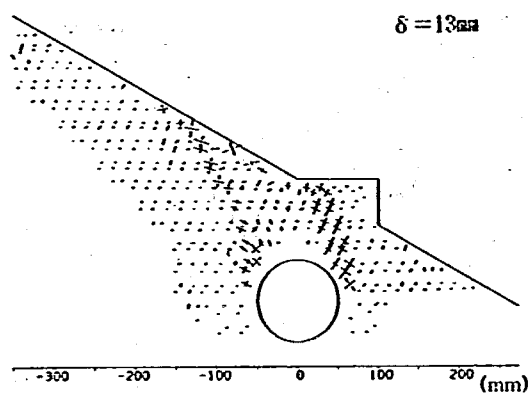
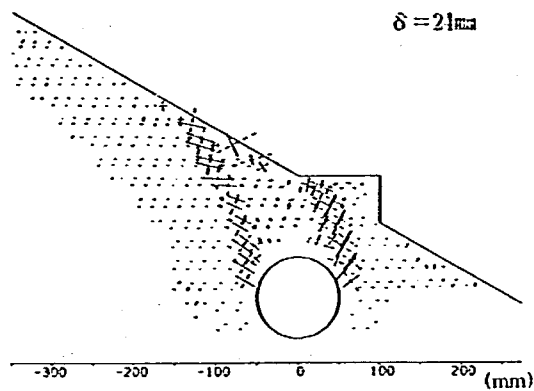
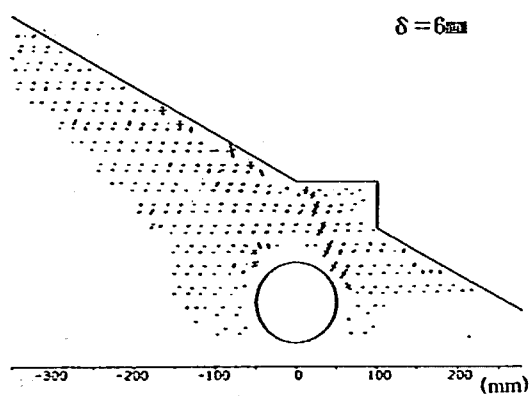
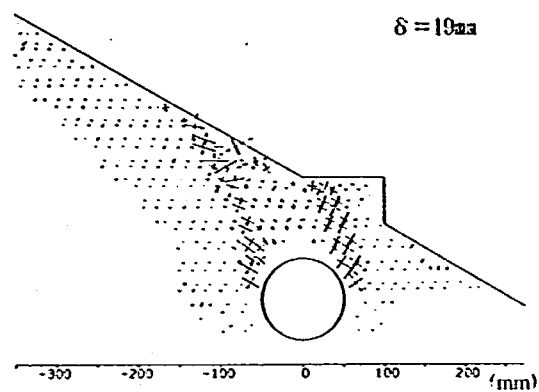
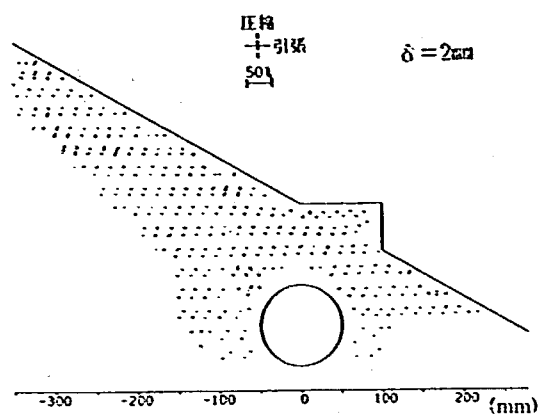
(b)主ひずみ分布

図—3. 3(2) 押え盛土がない場合の実験結果



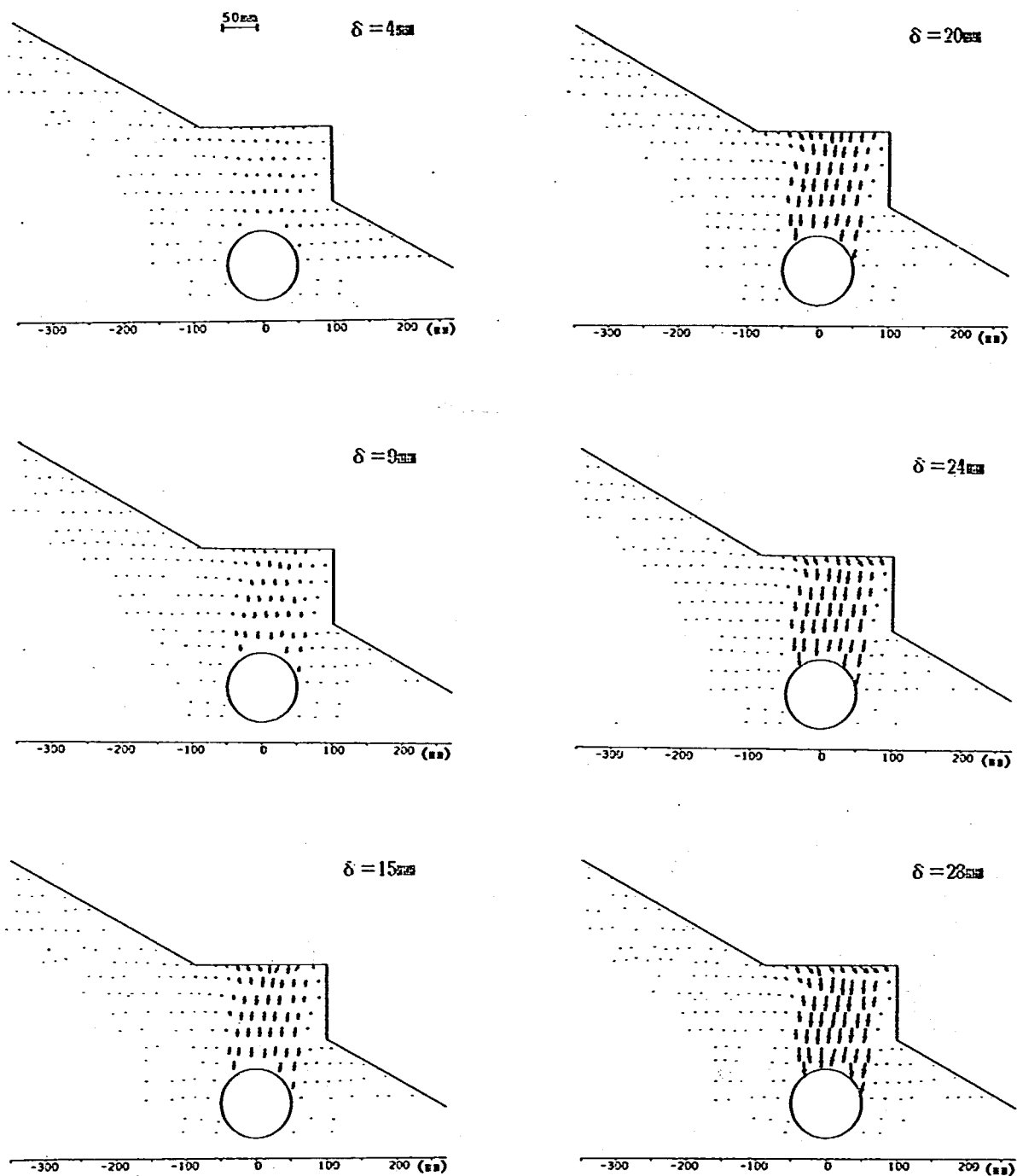
(a)変位分布

図-3. 4(1) $B=0.5D$, $H'=0$ の実験結果



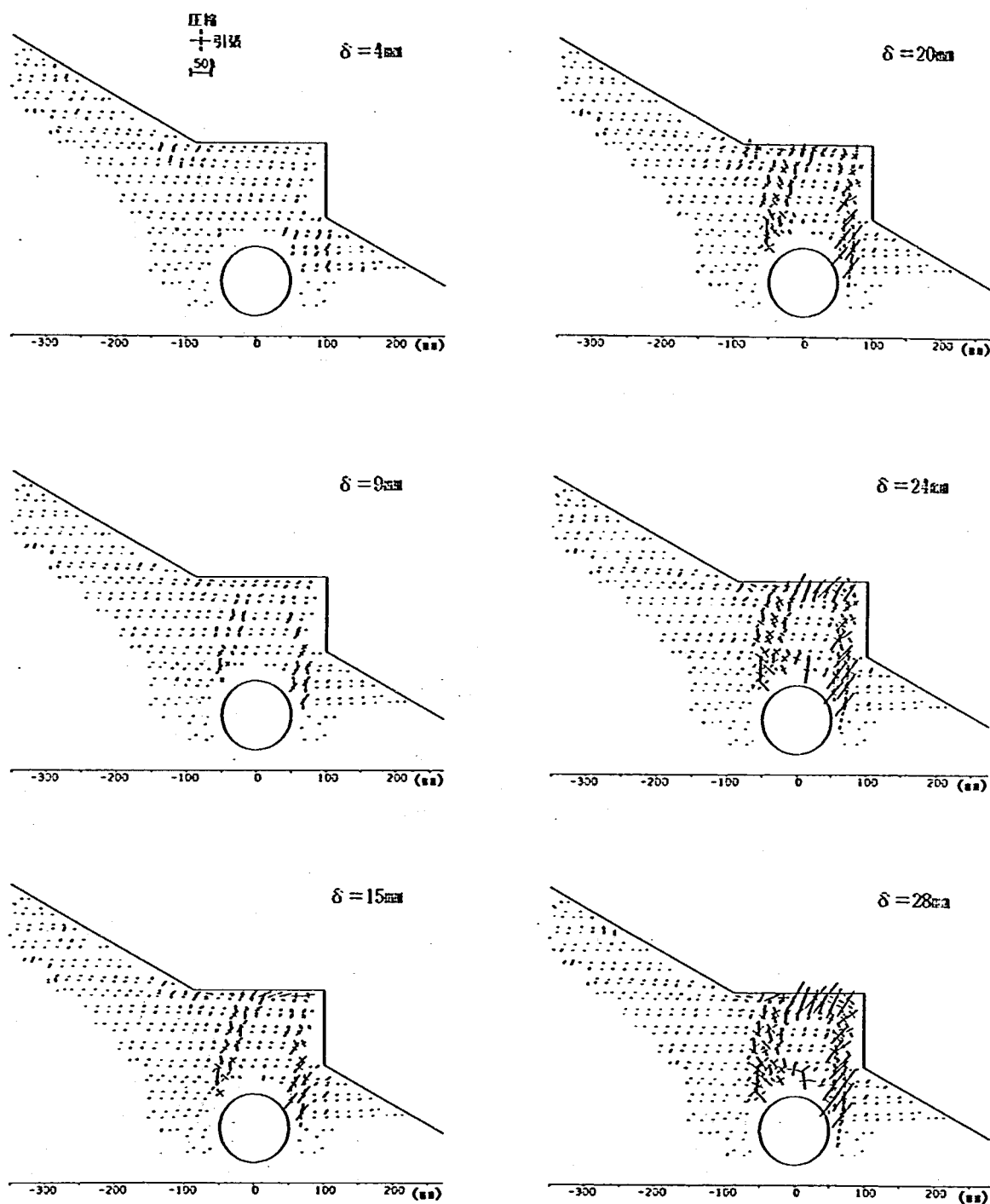
(b)主ひずみ分布

図-3. 4(2) $B=0.5D$, $H'=0$ の実験結果



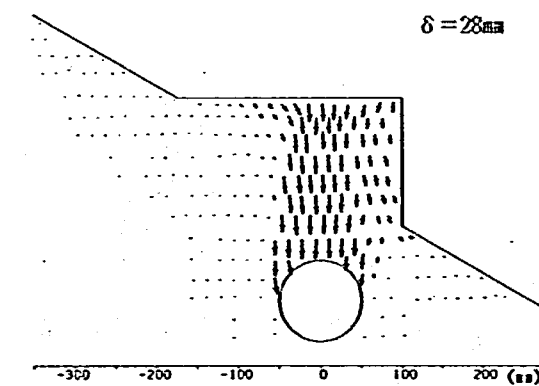
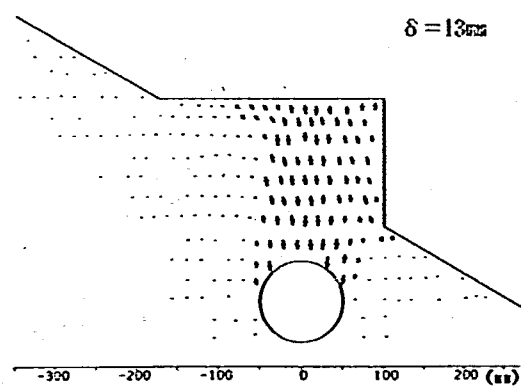
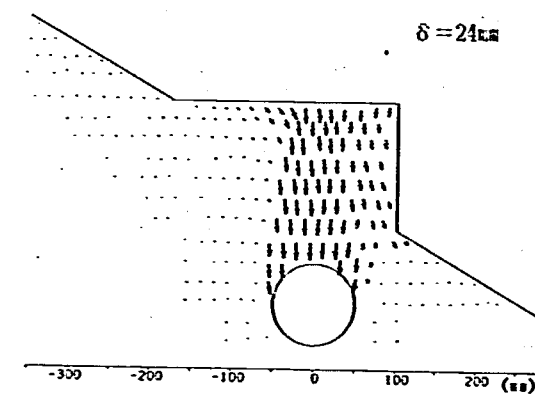
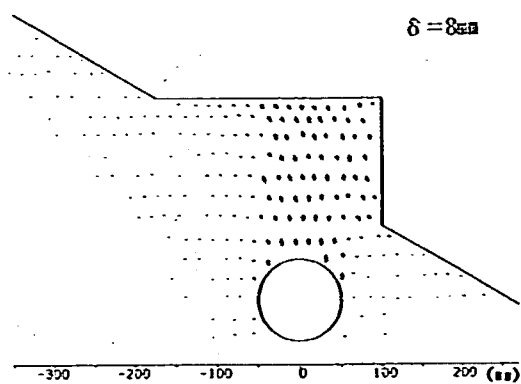
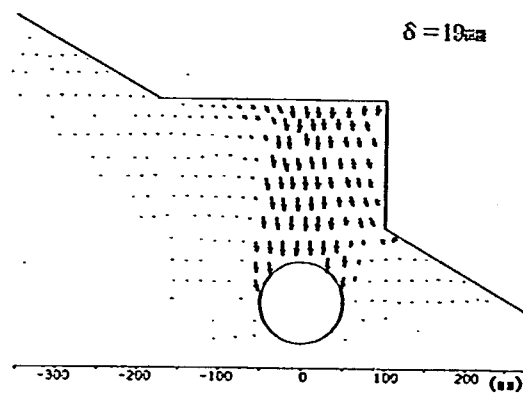
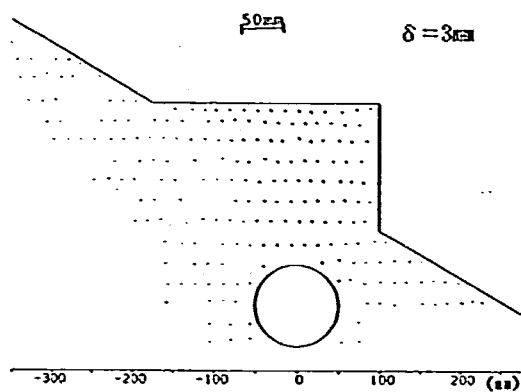
(a)変位分布

図-3. 5(1) $B=0.5D$, $H'=0.5D$ の実験結果



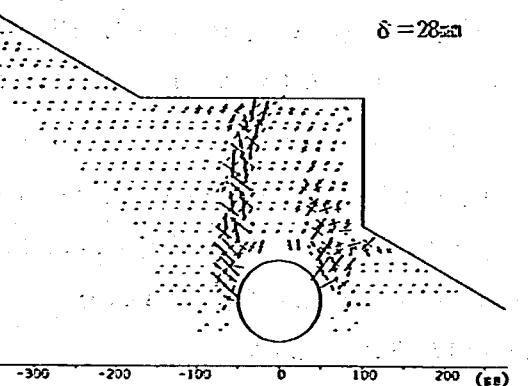
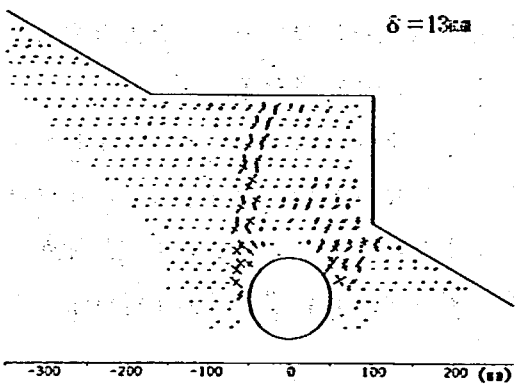
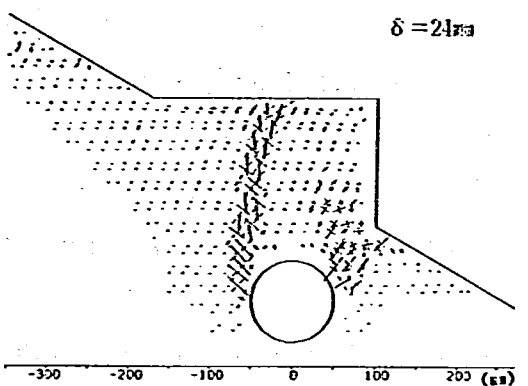
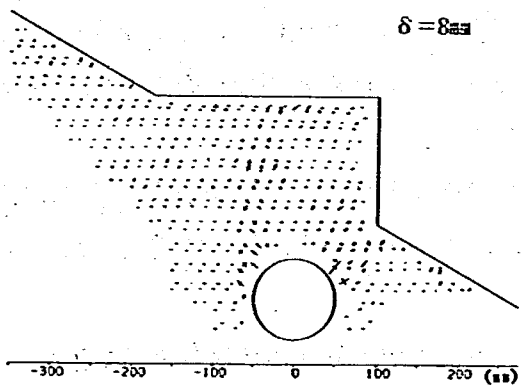
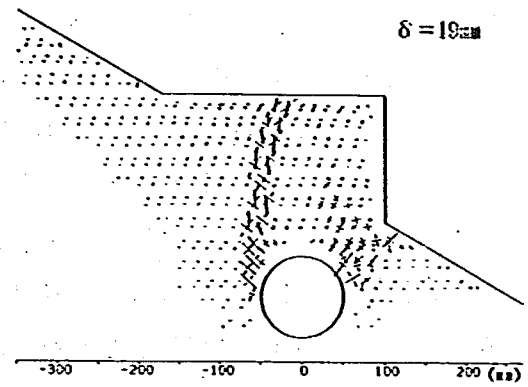
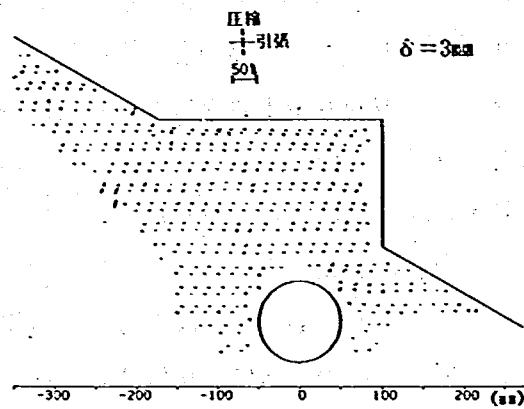
(b)主ひずみ分布

図-3.5(2) $B=0.5D$, $H'=0.5D$ の実験結果



(a)変位分布

図-3. 6(1) $B=0.5D$, $H'=1D$ の実験結果



(b) 主ひずみ分布

図-3. 6(2) $B=0.5D$, $H'=1D$ の実験結果

2) 盛土の幅 $B = 1 D$ の場合

図—3. 7～9 は盛土の幅を $B = 1 D$ で一定として、盛土の高さ H' を変化させた場合について、トンネルの変形に伴う地中変位分布、主ひずみ分布の変化をトンネルの各変形量毎に示したものである。

$H' = 0$ (CASE—4) の場合は、盛土がない場合に比較すると、トンネルの各変形段階でトンネル山側の変位領域が減少しているのが認められ、変位ベクトルの方向も若干鉛直に近い方向に変化している。ただし、 $B = 0.5 D$ の場合との比較では、変位領域の大きさ、変位ベクトルの方向ともに大きな変化は認められず、盛土の幅が大きくなることによる効果の増大はほとんど見られない。

主ひずみ分布も、トンネル山側と谷側に2本の線状の集中領域が発生しており、これらの形状は盛土がない場合に比較すると鉛直に近い方向に変化している。しかし、 $B = 0.5 D$ の場合との比較では、ひずみの集中領域が明確に現れるときのトンネル変形量、集中領域の形状に変化は認められない。したがって、トンネルクラウンより山側部に盛土を行わず、トンネルクラウンより谷側部の盛土範囲を広くすることによって押え盛土の効果の増大を期待することは得策でないと言える。

$H' = 0.5 D$ (CASE—5) の場合は、盛土がない場合に比較して山側変位領域が大幅に減少するとともに変位領域の形状は山側と谷側ではほぼ対称となり、地表面が水平な場合と同様の領域に変位が発生することになる。また、変位ベクトルの方向も鉛直に向っており、地表面が傾斜していたことの影響はほぼ解消されている。なお、 $B = 0.5 D$ の場合には盛土谷側部に一部不安定な挙動が観察されたが、 $B = 1.0 D$ の場合にはこれら不安定な挙動は認められず盛土自体は比較的安定した挙動を示している。

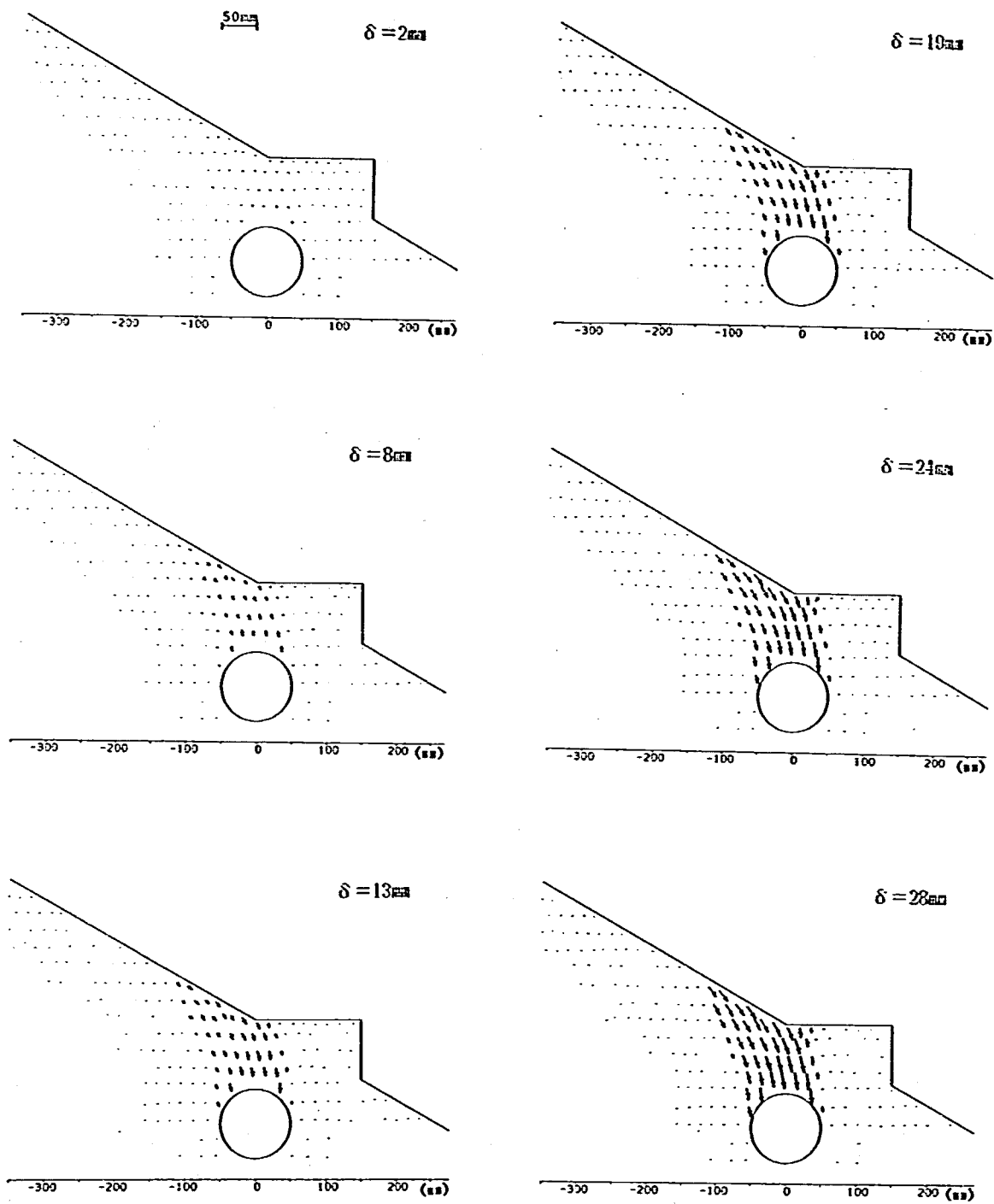
主ひずみ分布については、 $\delta = 8 \text{ mm}$ の段階からトンネル山側と谷側の側壁付近に集中領域が現れ始め、トンネル変形量の増加とともに線状領域を形成するようになるが、その形状は地表面が水平な場合と同様にトンネル両側壁からほぼ鉛直に地表面近くまで伸びるものとなっており、偏土圧の抑制効果が期待できる。また、 $B = 0.5 D$ の場合との比較では盛土谷側部にひずみがほとんど発生しない領域が現れており、地山全体として安定な挙動を示していることが理解される。

$H' = 1 D$ (CASE—6) の場合は、変位領域はトンネル両側壁からほぼ鉛直に伸ばした2本の直線に囲まれる領域となっており、前章で行った土被り比が2で地表面が水平な場合とほぼ同様の結果が得られている。トンネルの各変形段階で現れる変位ベクトルの方向、大きさも土被り比が2で地表面が水平な場合とほぼ同様の結果が得られており、また、 $B' = 0.5 D$ の場合は盛土谷側部に発生していた崩壊も消失している。

主ひずみ分布については、 $\delta = 8 \text{ mm}$ の段階でトンネル両側壁周辺にひずみの集中領域が現れており、これらひずみの集中領域はトンネル変形量の増加とともに鉛直方向に線状に伸展して地表面にまで達するようになる。また、 $B' = 0.5 D$ の場合には盛土谷側部にはひずみの集中領域が認められなかったが、本ケースでは明確な集中領域が認められるようになる。このようなひずみの発生パターンは土被り比が2で地表面が水平な場合と全く同様なものであり、本ケースの場合には偏土圧に対して非常に有効であることがわかる。

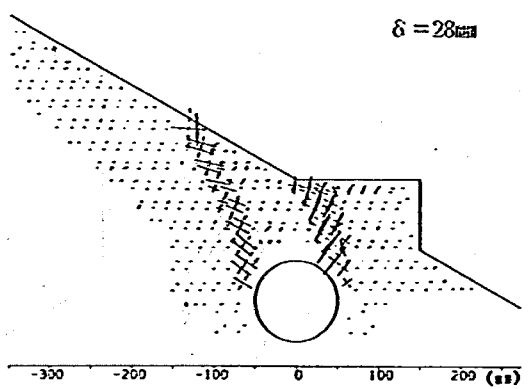
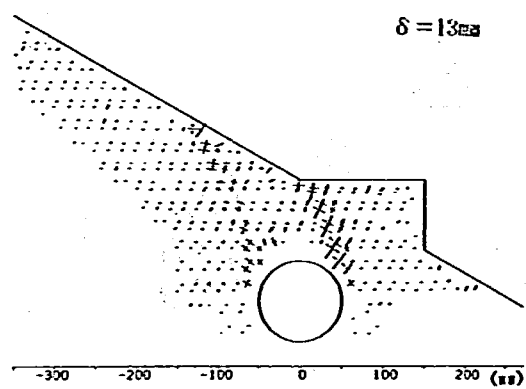
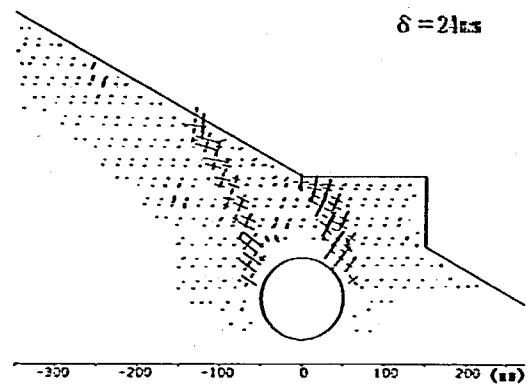
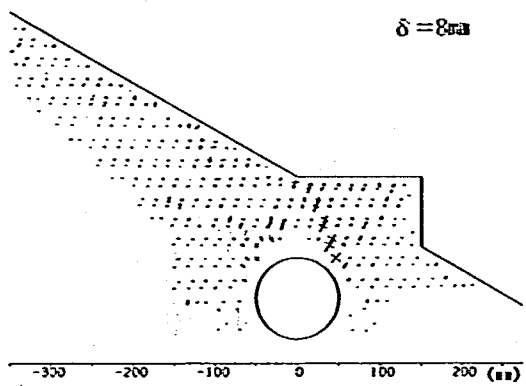
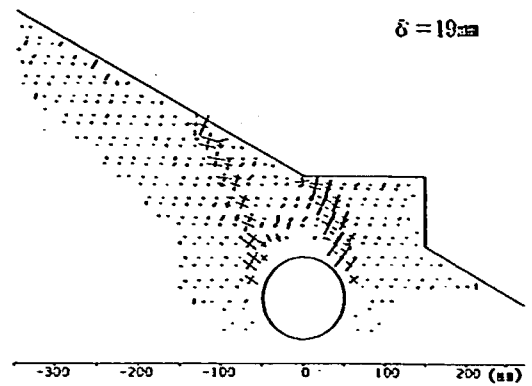
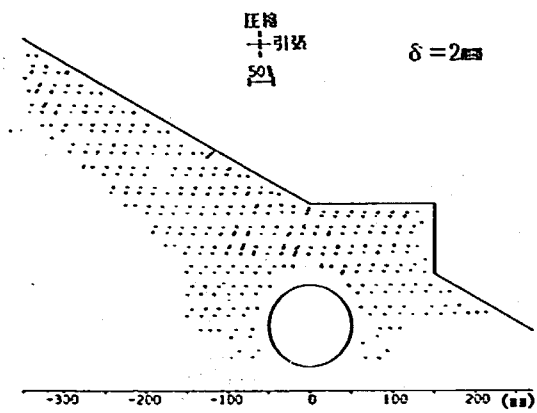
以上のことを総合すると、少なくともトンネル谷側側壁より谷側へ $1 D$ 離れた範囲まで押え盛土を

行えば地山が安定し、しかも、偏土圧に対する効果が期待できるものと考えられる。ただし、盛土の高さ H' については盛土幅が $1 D$ であれば、 $H'=0.5 D$ の場合と $H'=1 D$ の場合とでほぼ同等の結果が得られており、むやみに盛土高さを大きくすることは得策でないと言える。



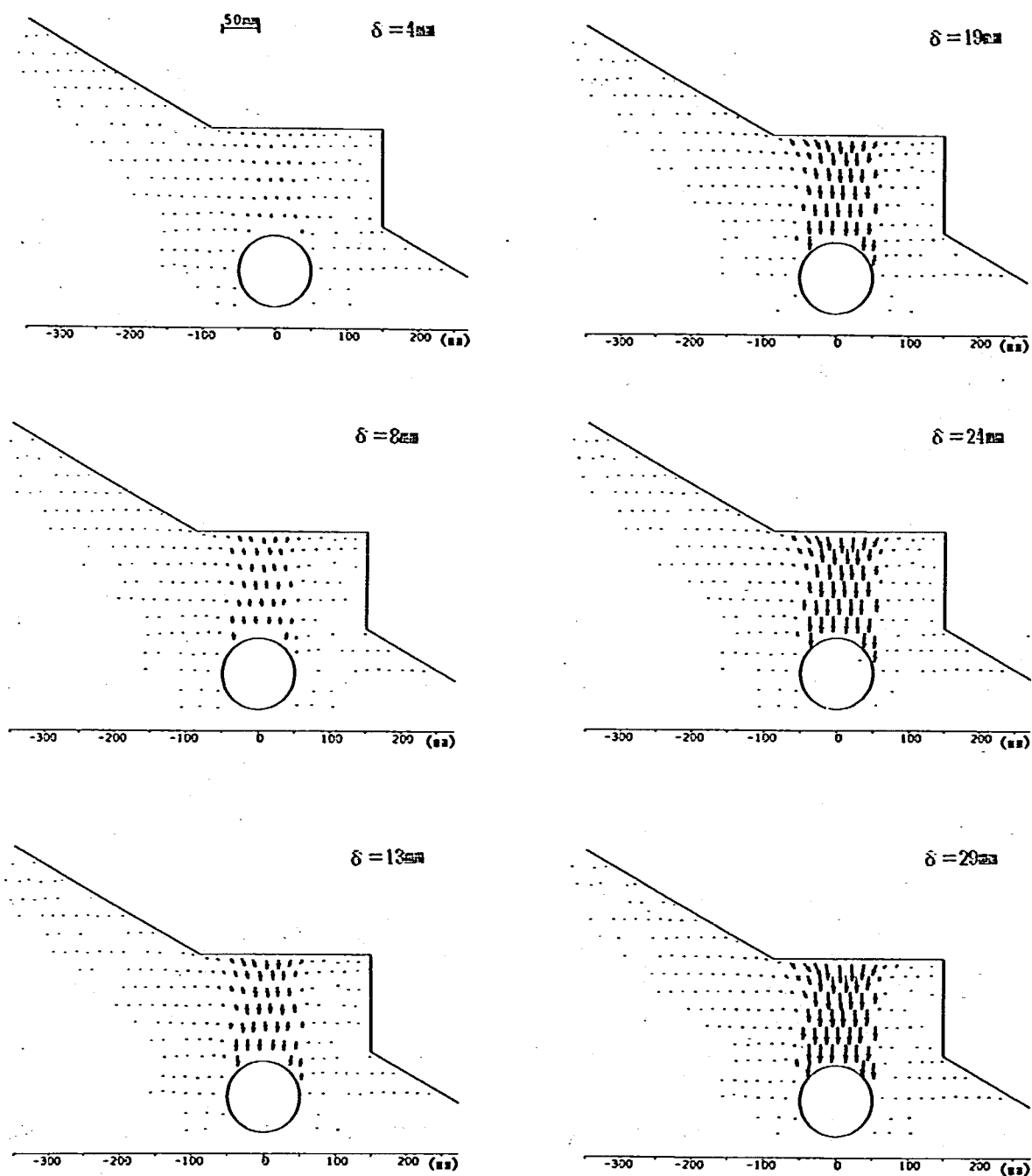
(a)変位分布

図-3. 7(1) $B=0.5D$, $H'=0$ の実験結果



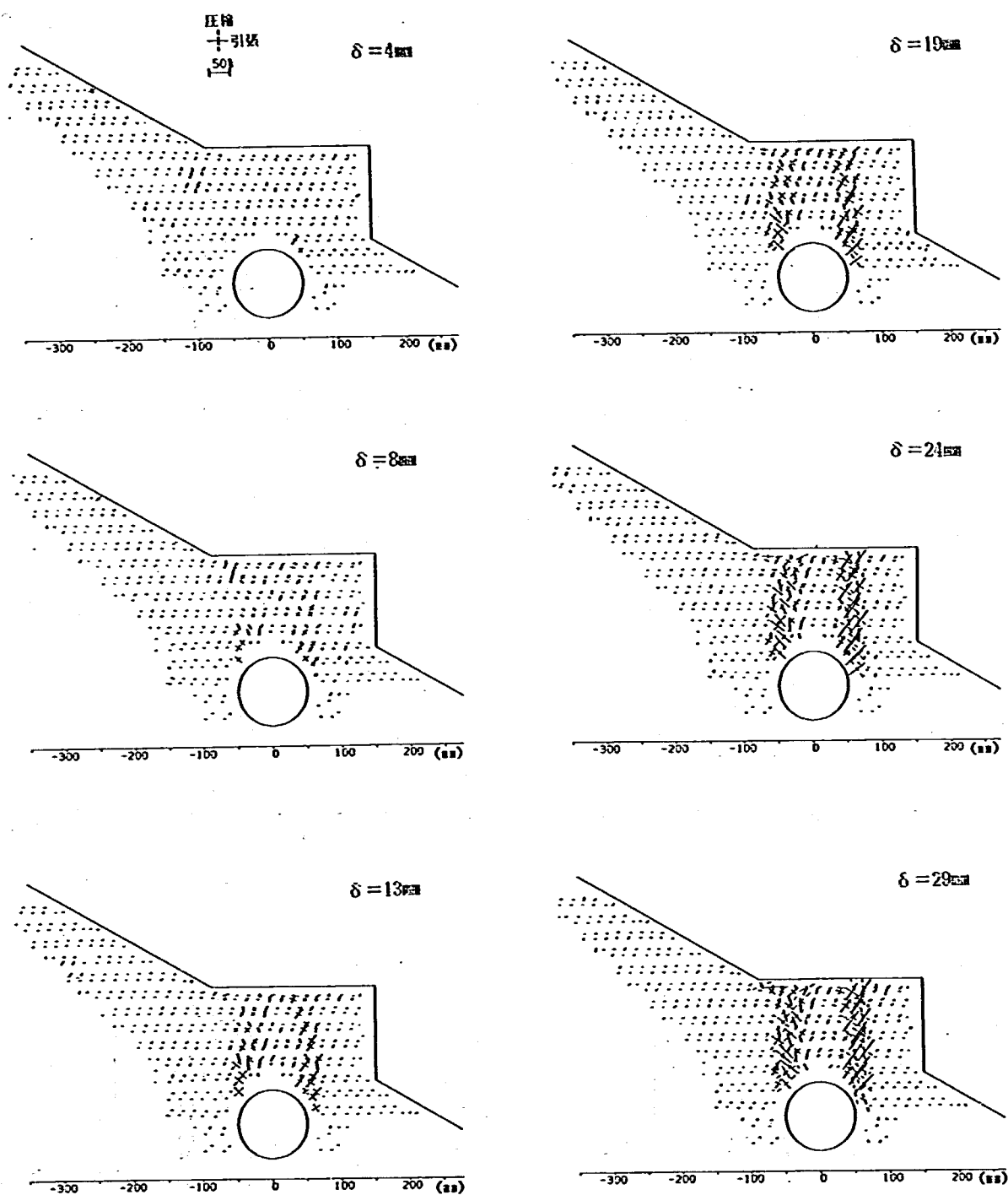
(b)主ひずみ分布

図-3. 7(2) $B=0.5D$, $H'=0$ の実験結果



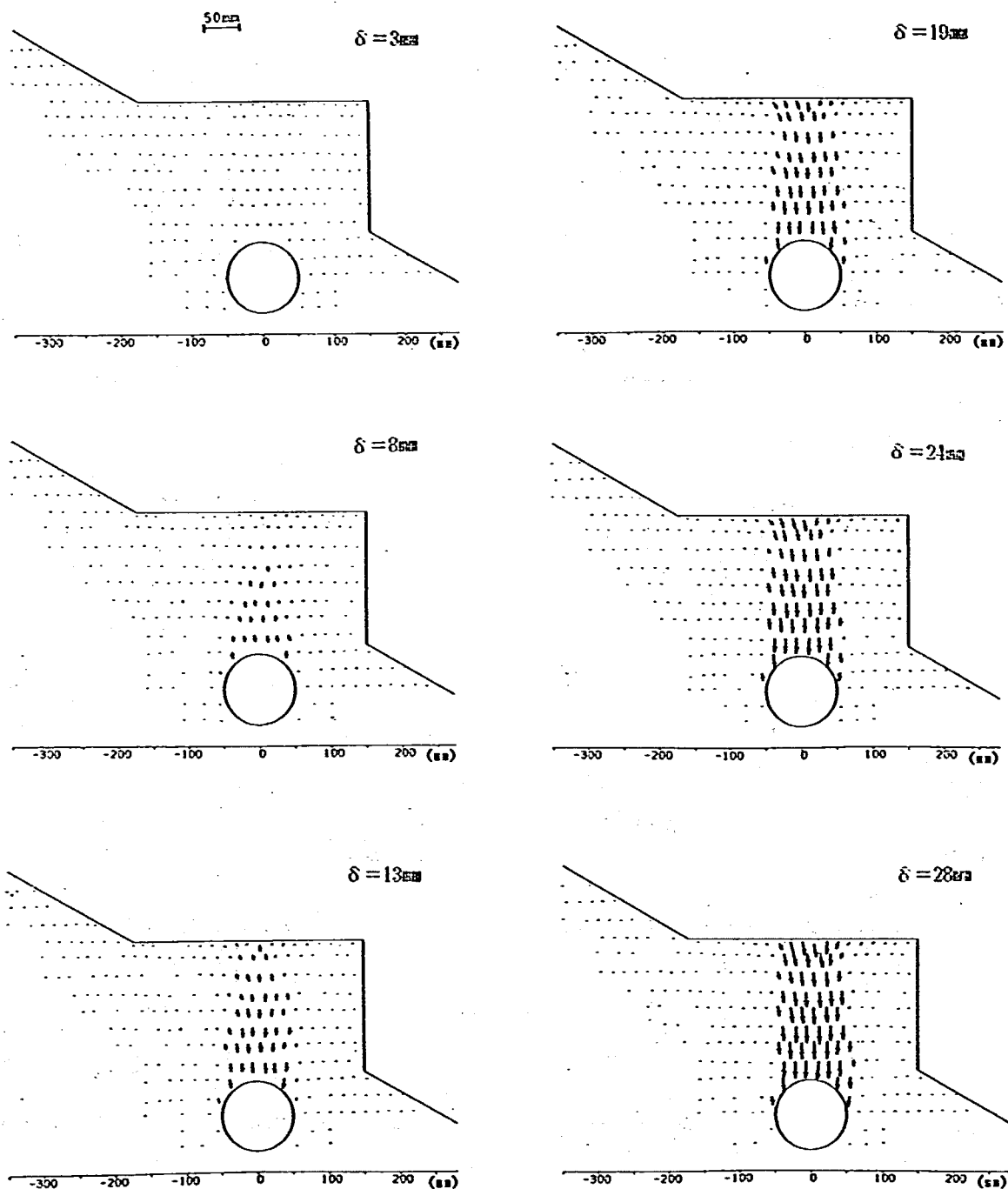
(a)変位分布

図-3. 8(1) $B=1D$, $H'=0.5D$ の実験結果



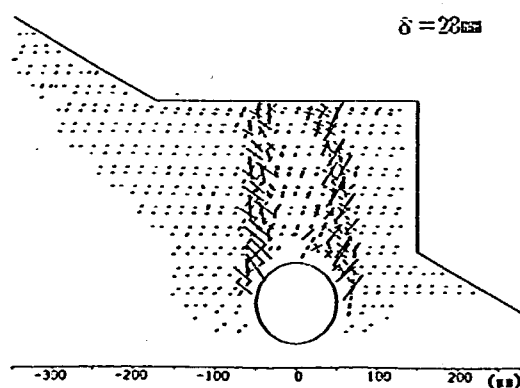
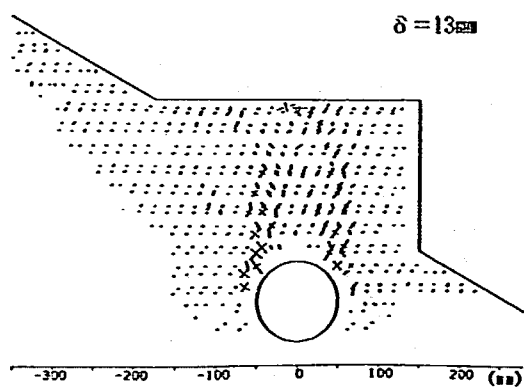
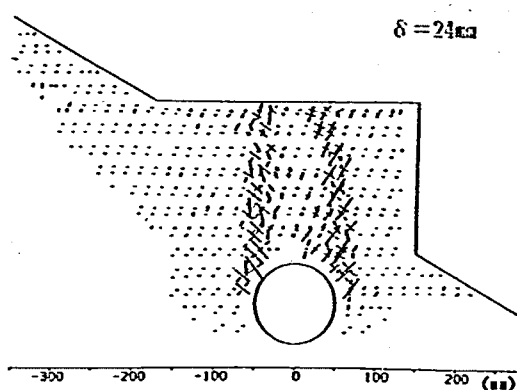
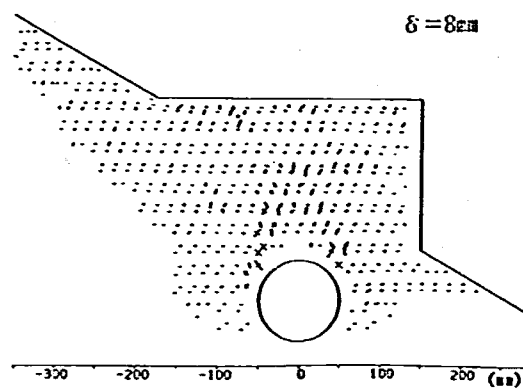
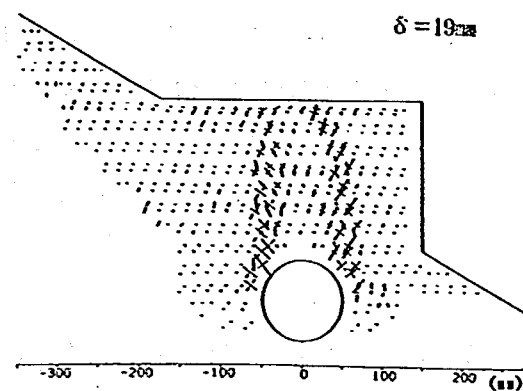
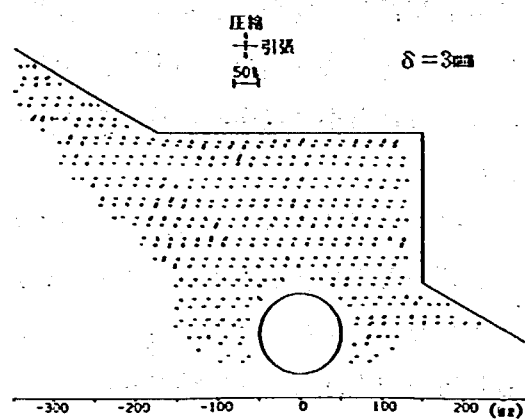
(b) 主ひずみ分布

図-3. 8(2) $B=1D$, $H'=0.5D$ の実験結果



(a)変位分布

図-3. 9(1) $B=1D$, $H'=1D$ の実験結果



(b)主ひずみ分布

図-3. 9(2) $B = 1D$, $H' = 1D$ の実験結果

3. 4 まとめ

土被りが小さく、地表面が傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合、トンネルに過大な変形を許すと傾斜した形状の変位の不連続面が地山に発生してトンネルの支保構造に偏土圧が作用するようになるが、トンネル周辺の地山に押え盛土を行うことによりこれら不連続面の形状は地表面が水平な場合と同様な形状に変化して、偏土圧の発生が抑制される。

ただし、押え盛土の効果は盛土の形状によって異なり、効果を期待するためには、少なくともトンネルクラウン直上よりも山側部分の領域にも盛土を行う必要がある。盛土の幅が不十分な場合には盛土自体が崩壊して危険な状態になるため、盛土の幅には十分な注意を払う必要がある。盛土の高さについては一定の高さがあれば盛土が高くなることによる効果の向上はあまり期待できない。

なお、本研究の実験対象ケースでは、押え盛土の幅についてはトンネル谷側の側壁から1D (Dはトンネル外径)、盛土の高さについてはトンネルクラウンから1.5D程度あれば十分な効果が期待できるという結果が得られた。

第4章 結 論

本研究では、坑口部のような地山条件が悪い場所における合理的なトンネルの設計・施工法を確立するための基礎的な資料を得ることを目的として、地山材料に豊浦標準砂を用いた模型実験を行い、土被りおよび地表面の傾斜角がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を調べるとともに、押え盛土の効果について定性的な検討を加えた。本研究での実験結果およびその検討結果をとりまとめると以下の知見が得られる。

1). 砂質地山にトンネルを掘削した場合に発生する地表面沈下曲線の形状は、地表面が水平な場合には正規分布曲線に近い形状を示すのに対し、地表面が傾斜している場合には最大沈下量を与える地点がトンネル中心よりも谷側へ移行するとともに、沈下領域は山側が大きく増大し、谷側が減少する。

2). 土被りが地表面沈下量に及ぼす影響は、地表面の傾斜角に関係なく、トンネル変形量が同一であれば土被りが大きい程沈下量は小さい。また、地表面最大沈下量とトンネル変形量との比率は土被りが同一であれば、地表面の傾斜角の値にかかわらずほぼ一定の値を示す。

3). 地表面が水平な砂質地山にトンネルを掘削した場合、トンネルに変形を許して行くと地山にはトンネル両側壁付近から鉛直方向に伸展する変位の不連続面が現れ、土被りが小さい場合にはこの不連続面は地表面にまで達するようになる。

4). 地表面が傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合、トンネルの変形に伴って地山に発生する不連続面の形状は土被りによって異なる。土被りが小さい場合には、トンネル谷側と山側の両側壁付近からそれぞれ山側地表面まで達する2本の傾斜した線状となり、トンネルの支保構造に偏土圧が作用することになる。土被りが大きい場合には、地表面が水平な同一土被りの場合とほぼ同様の形状となり、トンネルに偏土圧が作用する可能性は小さくなる。

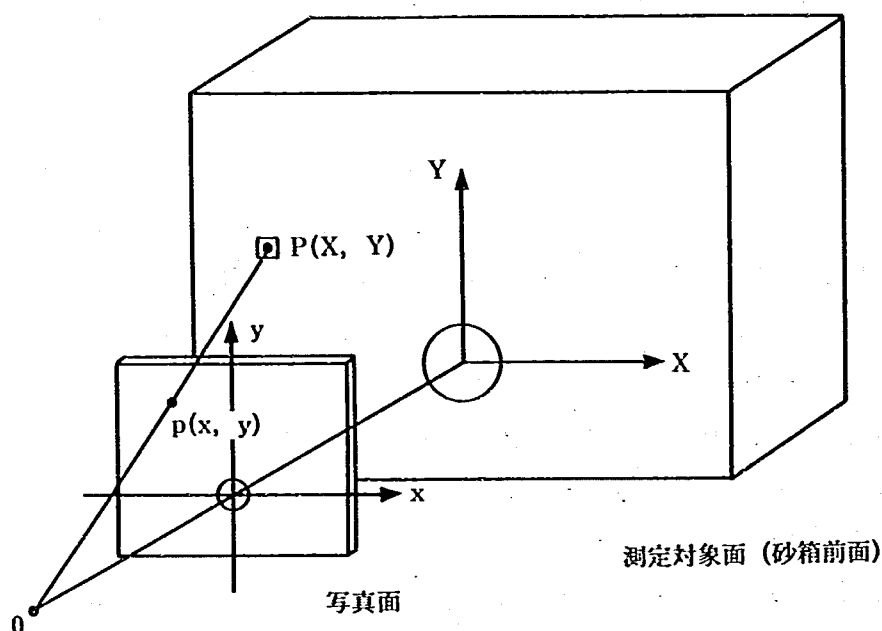
5). 土被りが小さく、地表面が傾斜した砂質地山に押え盛土を行った場合、盛土の形状が適切であればトンネルの変形に伴って地山に発生する不連続面の形状が変化して、偏土圧の発生が抑制される。今回の実験対象ケースでは、盛土の幅についてはトンネル谷側の側壁から1D程度、高さについてはトンネルクラウンから1.5D程度あれば十分な効果が認められた。

なお、今回の実験では相似則を考慮していないため、実験結果に対して定性的な検討を加えるにとどまった。今後は、相似則を考慮した実験を行うことにより、定量的な検討を加えるとともに、数値解析モデルを用いた検討を加える必要があるものと考えられる。また、今回の実験は内部摩擦角が支配的となる砂質地山を対象にしたものであるが、粘着力が支配的となる粘性地山でのトンネル掘削に伴う地山の挙動も今後明らかにして行く必要がある。

Appendix 1 単写真を用いた測定方法（偏歪の修正方法）

測定対象面（本実験では砂箱の前面）が平面となる場合、付図—1. 1に示すような測定対象面に設定される平面座標系 XY と写された写真面に設定される平面座標系 xy との間には、次式に示すような二次の射影変換式の適用が可能であることが射影幾何学の原理から証明されている。

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1}, \quad Y = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \quad \dots (1. 1)$$



付図—1. 1 写真の幾何学

上式には8個の未知係数 $b_1 \sim b_8$ が含まれるが、これらは4点以上の基準点の測定値の組 $(X_i, Y_i; x_i, y_i; i=1, n, n \geq 4)$ に対して最小二乗法をあてはめることにより求められる。未知係数 $b_1 \sim b_8$ が求まれば、デジタイザから読まれた写真中の任意の点 (x, y) は、式 (1. 1) により測定対象面での座標値 (X, Y) に変換することが可能となる。なお、未知係数 $b_1 \sim b_8$ を求めるには上述したように4点以上の基準点が必要となるが、本実験では本文中で述べたようにアクリル板には $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ の格子状に線が刻まれており、任意の格子の交点4点を必要に応じて基準点として選定した。また、 xy 座標系および XY 座標系の原点は任意にとることができるが、本実験では便宜上、変形前のトンネル中心を原点と考えた。

次に最小二乗法により未知数 $b_1 \sim b_8$ を求める手法を以下に示す。

式(1)の分母を払い、線形の観測式を求めると次式が得られる。

$$\begin{aligned} x_i b_1 + y_i b_2 + b_3 - x_i X_i b_7 - y_i Y_i b_8 &= X_i \\ x_i b_4 + y_i b_5 + b_6 - x_i Y_i b_7 - y_i Y_i b_8 &= Y_i \end{aligned} \quad \dots (1. 2)$$

いま b'_i を最確値とし、 n 組の測定値 $(X_i, Y_i; x_i, y_i; i=1, n, n \geq 4)$ が与えられたとすると、残差方程式は

$$\begin{array}{rcl}
x_1 b_1' + y_1 b_2' + b_3' & -x_1 X_1 b_7' - y_1 X_1 b_8' - X_1 & = v_1 \\
x_1 b_4' + y_1 b_5' + b_6' - x_1 Y_1 b_7' - y_1 Y_1 b_8' - Y_1 & = v_2 \\
x_2 b_1' + y_2 b_2' + b_3' & -x_2 X_2 b_7' - y_2 X_2 b_8' - X_2 & = v_3 \\
\vdots & & \\
x_n b_4' + y_n b_5' + b_6' - x_n Y_n b_7' - y_n Y_n b_8' - Y_n & = v_{2n}
\end{array} \quad \dots (1. 3)$$

となる。

したがって、最確値 b_i' は、 $\sum_{i=1}^{2n} v_i^2$ を最小ならしめる条件

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{2n} v_i^2}{\partial b_1'} = 0, \quad \frac{\partial \sum_{i=1}^{2n} v_i^2}{\partial b_2'} = 0 \quad \dots \quad \frac{\partial \sum_{i=1}^{2n} v_i^2}{\partial b_8'} = 0$$

から得られる正規方程式

$$\begin{array}{rcl}
\sum x_i b_1' & + \sum x_{ji} b_2' & + \sum x_i b_3' & - \sum x_i^2 X_i b_7' & - \sum x_{ji} X_i b_8' & = \sum x_i X_i \\
\sum x_{ji} b_1' & + \sum y_i b_2' & + \sum y_i b_3' & - \sum x_{ji} X_i b_7' & - \sum y_i^2 X_i b_8' & = \sum y_i X_i \\
\sum x_i b_1' & + \sum y_i b_2' & + \sum y_i b_3' & - \sum x_i X_i b_7' & - \sum y_i X_i b_8' & = \sum X_i \\
\sum x_i b_4' & + \sum x_{ji} b_5' & + \sum x_i b_6' & - \sum x_i^2 Y_i b_7' & - \sum x_{ji} Y_i b_8' & = \sum x_i Y_i \\
\sum x_{ji} b_4' & + \sum y_i b_5' & + \sum y_i b_6' & - \sum x_{ji} Y_i b_7' & - \sum y_i^2 Y_i b_8' & = \sum y_i Y_i \\
\sum x_i b_4' & + \sum y_i b_5' & + \sum y_i b_6' & - \sum x_i Y_i b_7' & - \sum y_i Y_i b_8' & = \sum Y_i \\
- \sum x_i^2 X_i b_1' & - \sum x_{ji} X_i b_2' & - \sum x_i X_i b_3' & - \sum x_i^2 Y_i b_4' & - \sum x_{ji} Y_i b_5' & - \sum x_i Y_i b_6' & + \sum (x_i^2 X_i^2 + x_i^2 Y_i^2) b_7' & + \sum (x_{ji} X_i^2 + x_{ji} Y_i^2) b_8' & = - \sum (x_i X_i^2 + x_i Y_i^2) \\
- \sum x_{ji} X_i b_1' & - \sum y_i^2 X_i b_2' & - \sum y_i X_i b_3' & - \sum x_{ji} Y_i b_4' & - \sum y_i^2 Y_i b_5' & - \sum y_i Y_i b_6' & + \sum (x_{ji} X_i^2 + x_{ji} Y_i^2) b_7' & + \sum (y_i^2 X_i^2 + y_i^2 Y_i^2) b_8' & = - \sum (y_i X_i^2 + y_i Y_i^2)
\end{array}$$

を解くことにより求まる。

Appendix 2 主ひずみの求め方

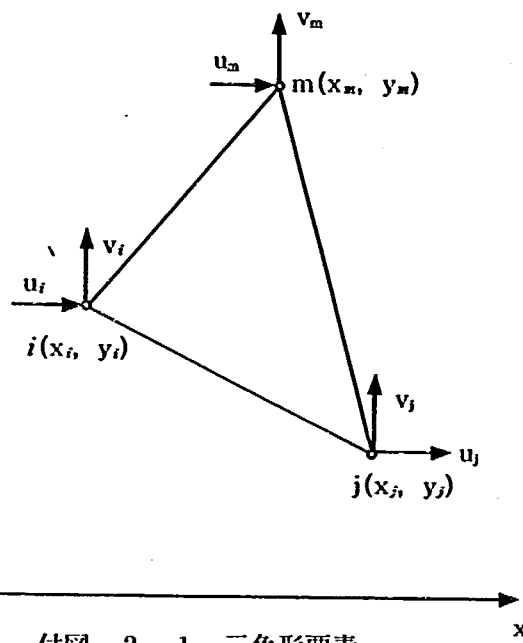
付図-2. 1に示すような三角形要素 ijm を考え、その要素内で任意の点 (x, y) における変位成分 u, v は

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

$$v = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y$$

… (2. 1)

で与えられるものと仮定する。



付図-2. 1 三角形要素

式 (2. 1) に節点 i, j, m における座標値 $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_m, y_m)$, 変位成分 $(u_i, v_i), (u_j, v_j), (u_m, v_m)$ を代入してmatrix表示すると,

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_m & y_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} \quad \dots (2. 2)$$

が得られる。したがって、変位の大きさを決める係数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は

$$\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} x_j y_m - x_m y_j & 0 & x_m y_i - x_i y_m & 0 & x_i y_j - x_j y_i & 0 \\ y_j - y_m & 0 & y_m - y_i & 0 & y_i - y_j & 0 \\ x_m - x_j & 0 & x_i - x_m & 0 & x_j - x_i & 0 \\ 0 & x_j y_m - x_m y_j & 0 & x_m y_i - x_i y_m & 0 & x_i y_j - x_j y_i \\ 0 & y_j - y_m & 0 & y_m - y_i & 0 & y_i - y_j \\ 0 & x_m - x_j & 0 & x_i - x_m & 0 & x_j - x_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \quad \dots (2. 3)$$

ただし、 A : 三角形要素 ijm の面積

により得られる。

一方、要素内のひずみ成分は次式

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x = \alpha_2$$

$$\varepsilon_y = \partial v / \partial y = \alpha_6$$

$$\gamma_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x = \alpha_3 + \alpha_5$$

… (2. 4)

で与えられるから式 (2. 3) を用いると、ひずみ成分は

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_j - y_m & 0 & y_m - y_i & 0 & y_i - y_j & 0 \\ 0 & x_m - x_j & 0 & x_i - x_m & 0 & x_j - x_i \\ x_m - x_j & y_j - y_m & x_i - x_m & y_m - y_i & x_j - x_i & y_i - y_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \quad \dots (2. 5)$$

となり、要素の節点座標および節点変位により与えられる。また、式 (2. 5) からわかるように、このように求まるひずみは要素内の位置に無関係となり、要素内の全域で一定のひずみを示すことになる。

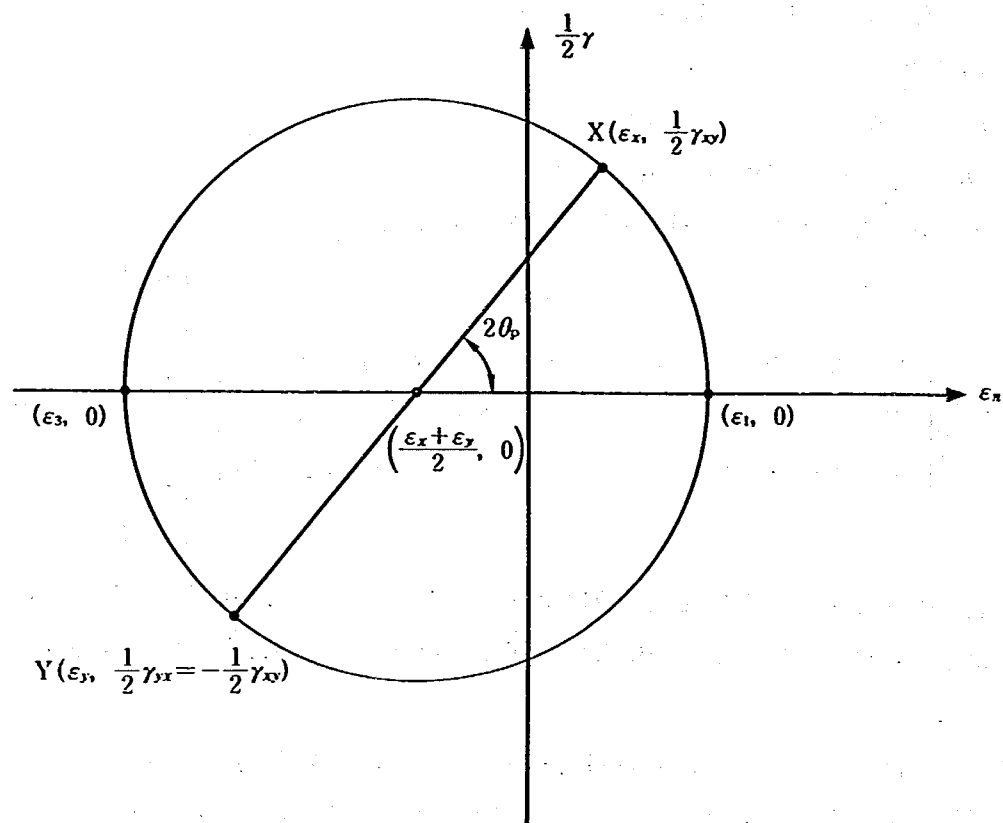
以上のような計算式により、x, y 方向の直ひずみ ε_x , ε_y および xy 軸に関するせん断ひずみ γ_{xy} が求まれば、付図-2. 2 に示すひずみのモールの円を用いて主ひずみの大きさ ε_1 , ε_3 および主ひずみの方向 θ_p が次式により得られる。

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

… (2. 6)

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \left(-\frac{\pi}{2} < 2\theta_p < \frac{\pi}{2} \right)$$



付図-2. 2 ひずみのモール円

斜面下におけるトンネル掘削
に関する実験報告書

ISSN 0386-5878
土研資料第2692号
昭和63年12月(1988年)
水谷敏則 真下英人
石村利明

要 旨

本報告書は、土被りが小さく、地表面が傾斜した砂質地山にトンネルを掘削した場合の地山の挙動および傾斜地山における押え盛土の効果を明らかにするために
行った模型実験結果をとりまとめたものである。

本検討より、トンネル周辺地山の挙動は土被り、斜面の傾斜角の影響を大きく
受けること、押え盛土が効果を発揮するには一定の形状が必要なこと等が明らか
となった。

キーワード：トンネル，土被り，斜面，押え盛土



郵便はがき

3 0 5 - □ □

て
下
手
を
は
っ
て
下
さい。

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 54

No. 54

配布先氏名

配布先住所



○

土木研究所資料第 2692 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 2692 号

○