

土木研究所資料

シールドトンネル掘削時の地盤変状に関する 現場計測報告書

平成11年3月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

Copyright © 1999 by P.W.R.I.

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

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

シールドトンネル掘削時の地盤変状に関する 現場計測報告書

道路部トンネル研究室	室長	真下 英人
	主任研究員	石村 利明
	交流研究員*	藤井 邦男
		真弓 英大

要旨

本報告書は、シールドトンネル掘削による周辺地盤の影響を把握するため、数現場で実施された地盤変状計測結果を取りまとめるとともに、有限要素法を用いて地盤変状を予測する場合の解析条件の設定方法について検討したものである。

キーワード：シールドトンネル、現場計測、地盤変状、応力解放率

*交流研究員在職期間（平成10年4月1日から11年3月31日）

まえがき

本報告書は、シールドトンネルの掘削によって生じる周辺地盤の変状予測を行うため、実際の施工時の地盤変状計測結果の取りまとめを行うとともに、有限要素法を用いて地盤変状を予測する場合の解析条件の設定方法について検討を行ったものである。対象としたトンネルは、これまで、建設省土木研究所および各関係機関がシールドトンネル施工時に現場計測を実施したトンネルであり、軟弱な沖積粘性土層中、沖積砂礫質土層中、洪積砂礫土層中に施工された計5本のシールドトンネルである。

本報告書が、合理的なシールドトンネルの設計のための参考となることを願うものである。

平成11年3月

トンネル研究室

室長	真下 英人
主任研究員	石村 利明
交流研究員	藤井 邦男
	真弓 英大

目次

第1章 はじめに	1
第2章 シールドトンネル掘削時の周辺地盤の挙動に関する現場計測	2
2.1 現場計測の概要	2
2.1.1 計測目的	2
2.1.2 計測トンネルの概要	2
2.2 Aシールド	3
2.3 Bシールド	17
2.4 Cシールド	27
2.5 Dシールド	45
2.6 Eシールド	55
2.7 考察およびまとめ	73
第3章 数値解析によるシールドトンネルの掘削時の周辺地盤の挙動の検討	77
3.1 概説	77
3.2 トンネル掘削時の地盤変状予測方法	77
3.2.1 解析の手順	77
3.2.2 解析モデル選定	78
3.2.3 解析領域設定	78
3.2.4 地盤のモデル化	80
3.2.5 初期応力解析	82
3.2.6 トンネル掘削解析	82
3.3 Aシールド	85
3.4 Bシールド	92
3.5 Cシールド	97
3.6 Dシールド	112
3.7 Eシールド	120
3.8 考察およびまとめ	141
第4章 結論	144

参考文献

謝辞

第1章 はじめに

近年、大都市部およびその周辺の土地利用状況は、地表部においては既に飽和状態にあるといっても過言ではなく、今後の社会資本整備にあたっては地下空間の利用が益々図られるものと考えられる。また、近年では既設構造物との近接した条件での施工、いわゆる近接施工が多くなっており、これらの既設構造物に対する影響を考慮した設計、施工が求められるなどトンネル建設をとりまく諸条件が非常に厳しくなっている。

こうした状況にあってシールド工法は、開削工法や山岳工法などの他の工法に比べて地表面沈下や周辺構造物および環境に与える影響などの環境保全面、シールドによる切羽保護などによる施工時の安全面などで有利な工法として都市部での地下空間建設工法の代表的な工法として適用される機会が増えることと予想される。

しかしながら、シールド工法は他の工法に比べて地表面沈下や周辺構造物および環境に与える影響などの環境保全面で有利とはいえ、トンネル掘削によって周辺地盤の変状を全く生じさせないことは極めて困難であり、これまでの実績からも何らかの変状が発生しているのが一般的である。したがって、トンネル掘削によって周辺地盤の挙動へどの程度影響するのかについて、事前に精度よく予測することが必要である。これまで周辺地盤の挙動を事前に予測する方法が幾つか提案されているが、さらに十分な精度で周辺地盤の挙動を把握できる手法の提案が望まれている。

このため、本報告書においては、過去に実施した幾つかのシールドトンネル掘削時の地盤変状計測結果について取りまとめるとともに、それらの結果を用いて地盤変状予測方法について検討を行ったものである。

第2章 シールドトンネル掘削時の周辺地盤の挙動に関する現場計測

2.1 現場計測の概要

2.1.1 計測目的

近年、都市部およびその周辺では特にトンネル施工時の周辺環境の保全が重要な課題となっている。シールド工法は、山岳工法等の他の工法に比べて周辺環境に与える影響の少ない工法として考えられており、今後、都市部においてトンネル建設工法の一つとして益々採用されるものと考えられる。しかし、これまでの実績から、シールド工法によるトンネル掘削によっても周辺地盤の変状として何らかの影響を与えていることが分かっている。今後の都市部における地下の幅輦した空間をシールド掘削を行う場合には、事前にトンネル掘削によって生じる地盤変状を予測することが重要であるが、事前の地盤変状の予測手法は確立されたものがなく、また、その大きさはトンネル掘削径、地盤条件、土被り等により異なってくるものと考えられる。本章では、トンネル掘削によって生じる地盤変状の大きさを予測するための参考資料として、これまでのシールドトンネルの施工時に実施した地盤変状計測結果の整理を行った。

2.1.2 計測トンネルの概要

本章で整理を行った周辺地盤の現場計測は、以下に示す5本のシールドトンネルを対象とした。なお、現場計測結果は、軟弱地盤の圧密沈下までを対象としたものではなく、主としてシールドトンネルの施工に伴う即時的な沈下を対象とした。各現場計測実施トンネルの特徴を下記に示す。表-2.1に主な諸条件を示す。

- ①Aシールド；軟弱な沖積粘性土中に双設で施工された土被り1.8D（D；トンネル直径）程度の条件
- ②Bシールド；軟弱な沖積粘性土中の単設で施工された土被り6D程度の条件
- ③Cシールド；沖積砂礫土層および洪積粘性土層を単設で施工された土被り2D～3D程度で近接構造物がある条件
- ④Dシールド；沖積粘性土および洪積砂質土層中を2本のシールドトンネルと近接した条件で施工された土被り1D～2D程度の条件
- ⑤Eシールド；沖積粘性土および洪積砂礫土層中を2本のシールドトンネルと近接した条件で土被り2.5D～5D程度の条件

表-2.1 計測トンネル一覧表

トンネル名	トンネル直径 D	土被り H	土被り比 H/D	主な地質	シールド 形式	特記事項
Aシールド	7.1m	13m	1.8	沖積粘性土	泥水	2本の双設トンネル
Bシールド	5.0m	29.3m	5.9	沖積粘性土	泥水	土被りが大きい条件
Cシールド	7.8m	14.5～25.5m	1.9～3.3	沖積砂礫土層 洪積粘性土層	泥土 気泡	近接構造物
Dシールド	7.85m	8.27～24.55m	1.1～3.1	沖積粘性土 洪積砂質土	泥水	近接構造物
Eシールド	7.1m	17.43～35.5m	2.5～5.0	沖積粘性土 洪積砂質土	泥水	近接構造物

2.2 Aシールド

2.2.1 計測トンネルの概要

(1) トンネルの概要

本現場計測トンネルは、河底を横断するシールドで、延長777m、セグメント外径7.1m（セグメント桁高30cm、幅100cmの7分割のRCセグメント）、セグメントの離隔距離3.7mの単線並列の併設シールドトンネルである。図-2.1 および図-2.2 に概要図を示す。

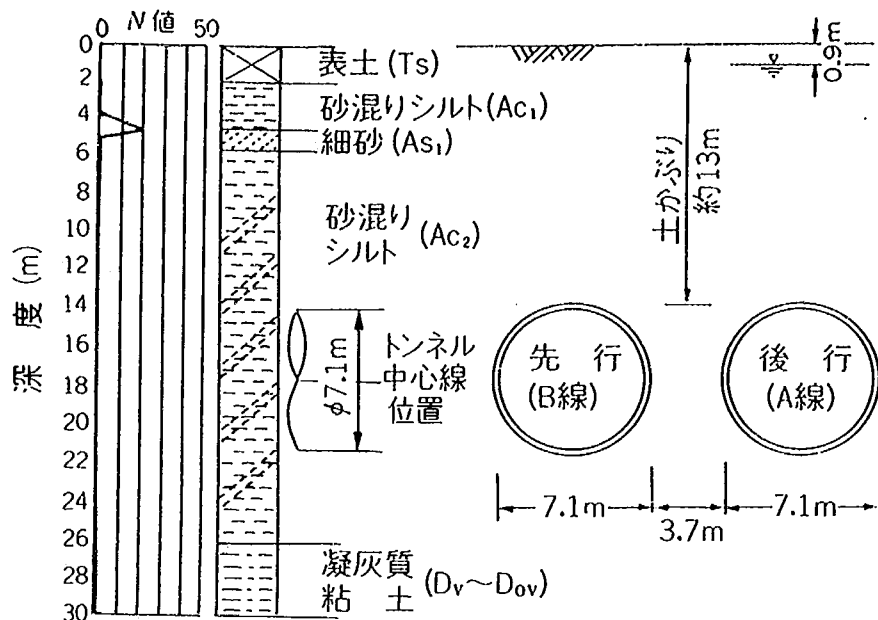


図-2.1 Aトンネルの概念図

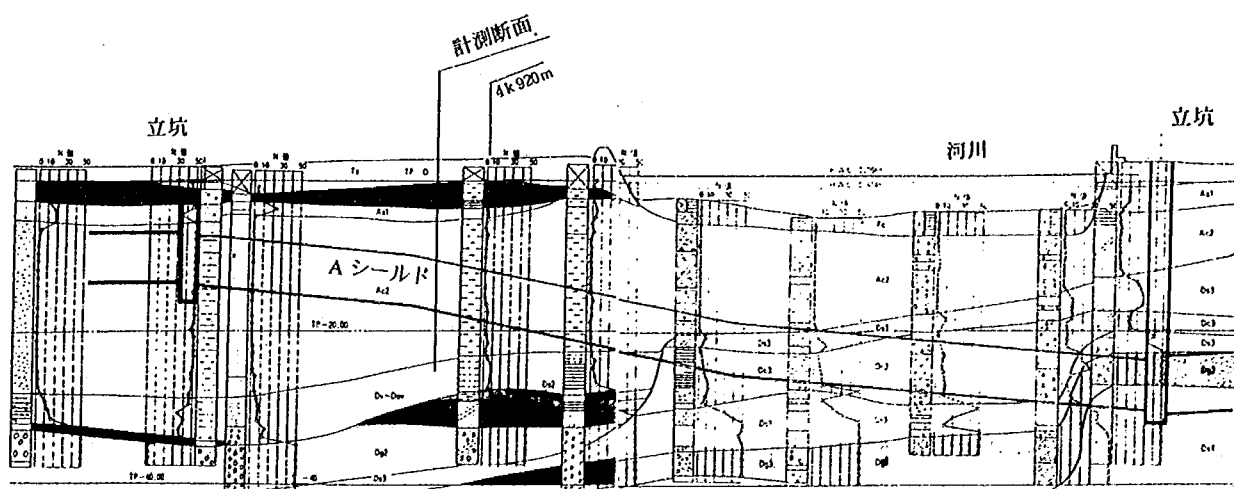


図-2.2 Aトンネルの縦断図

(2) 地質状況

現場計測を実施したシールドトンネルの周辺の地質は、TP-27m付近までは沖積層の粘性土層が分布し、これより以下は、洪積層の埋没ローム、埋没段丘礫層、砂質土層等が分布している。シールドトンネルが通過する地質および上部の地質は、N値がほぼゼロに近い軟弱な沖積粘性土である。

(3) 地盤変状の計測

地盤変状の計測は、図-2.3に示すように土被り約13mの地点で1断面について実施しており、層別沈下計、固定式傾斜計、水盛り沈下計により測定した。地盤変状の計測断面は図-2.4に示すようにシールドの進行方向の横断面に対して約35度傾いた測線となっている。

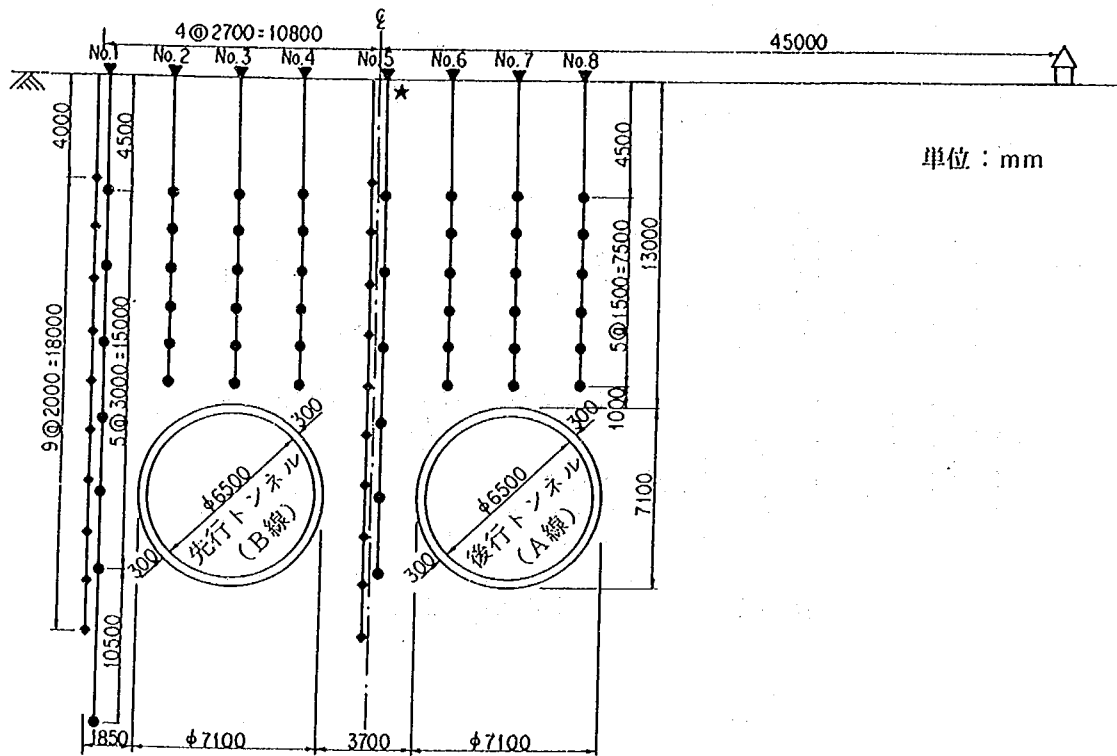


図-2.3 Aトンネルの計測断面における計測機器の配置

2. 2. 1 計測結果

(1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の変化

図-2.3で示した層別沈下計の計測データについてトンネル直径Dで無次元化した切羽の進行との関係で整理したものを図-2.6 (I)～(8)に示す。なお、変位の方法はプラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下を表している。以下に示すグラフの変位の方法はすべて同様に整理した。

図より、切羽の進行に伴う地盤変状の変化は、切羽前方1～2D程度から沈下し始め、切羽後方約2D程度まで急激な沈下が生じ、その後切羽の進行とともに沈下が収束する傾向にある。20D付近の切羽位置で各沈下量に隆起現象が生じているのは、後行トンネル(Aトンネル)の切羽が計測断面を通過することによる影響が現れているものである。したがって、図中の切羽位置で20D付近手前までの沈下の傾向は、他のこれまで計測された地盤挙動と同様な傾向を示したものとなっている。すなわち、切羽前方の沈下は、シールド掘削による切羽圧力の解放による地山の緩み、掘削に伴う周辺地山の乱れなどによる挙動が考えられ、また、切羽後方の主な沈下は、シールド機とセグメントの外径の違いから生じるテールボイドによる周辺地盤への緩みによるものが大きく影響しているものと考えられる。本シールドトンネルは、先に示したように先行シールドが通過後、比較的早い時期に後行シールドが通過したため、19D～20D付近で一旦隆起する現象が見られたが、この要因としては、後行シールドから実施する裏込め注入により、シールドの外側へ地盤を押し広げる作用によるものと考えられる。

(2) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

単設シールドトンネルの施工が周辺地盤の挙動にどの程度影響を及ぼすかを検討するため、最終沈下量を後行トンネルの影響を受けていないものと考えられる切羽通過後約15Dの位置として考えた場合の横断面の沈下分布を図-2.7に示す。図より、先行トンネルの掘削による影響は、トンネル中心位置付近の計測線N0.2～4の層別沈下が最も大きく、トンネル側方に遠ざかるにしたがって小さくなるのが分かる。これより、先行トンネルの掘削による地盤変状は、傾向的にはトンネル下端からほぼ45°の傾きで地表面へ延ばした影響範囲で比較的沈下量が大きくなっている。

(3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

地表面・地中沈下が切羽進行に伴って最終沈下量に対してどの程度変化するかについて、図-2.7に示した切羽から15D後方の位置での沈下量を基準として表したグラフを図-2.8 (I)～(8)に示す。また、最終沈下量、切羽位置での沈下量および最終沈下量との比の一覧表を表-2.2に示す。この図および表によれば、最終沈下量を切羽後方約15Dと考えると、トンネル周辺の沈下計測データから、トンネル周辺においては切羽が到達する以前に最終沈下量の約2割が沈下していることが分かる。

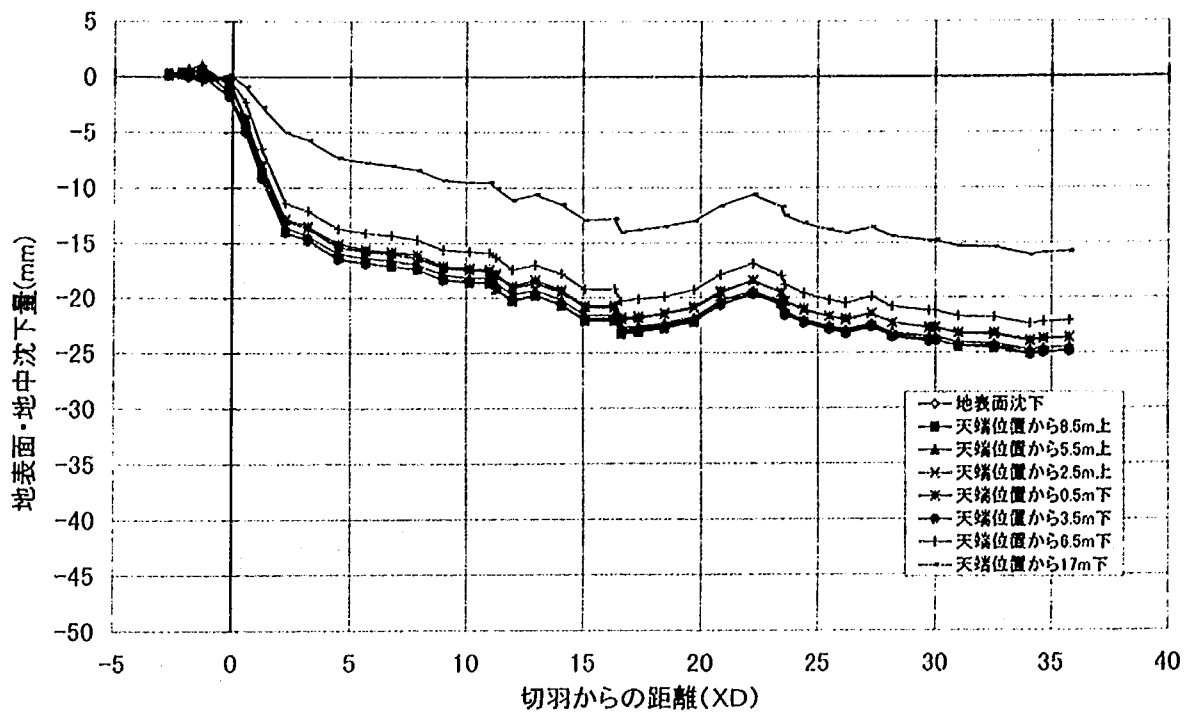


図-2.6 (1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0. 1)

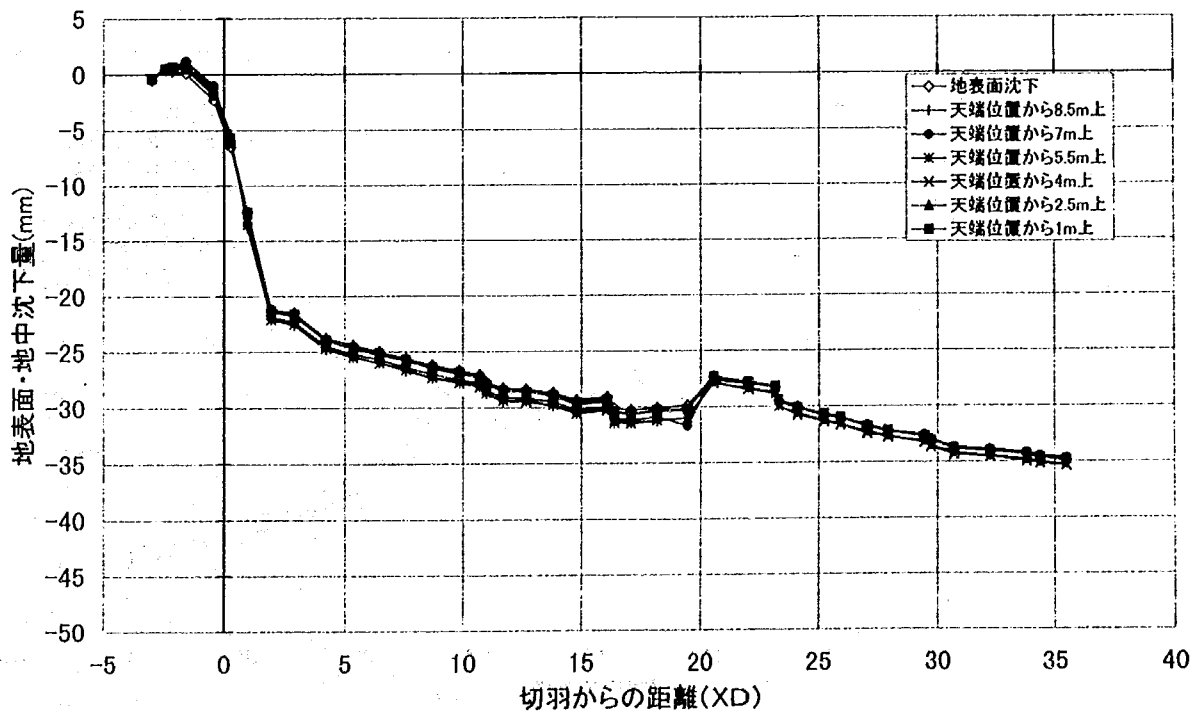


図-2.6 (2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0. 2)

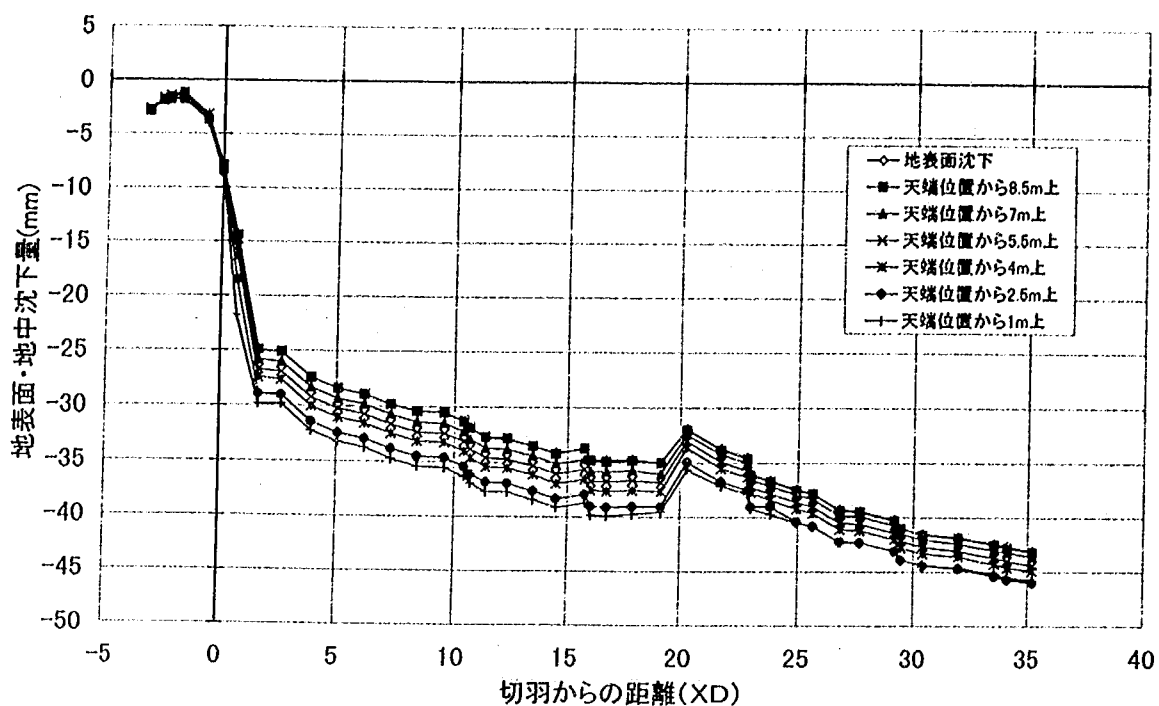


図-2.6 (3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0.3)

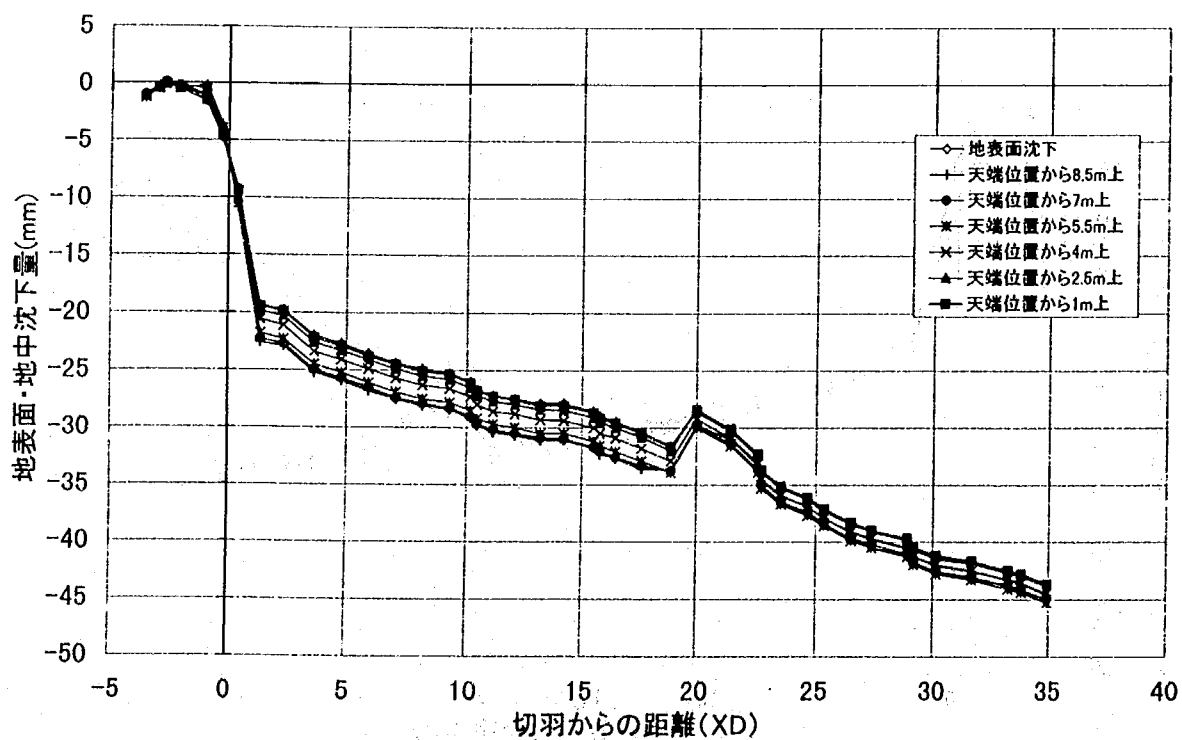


図-2.6 (4) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0.4)

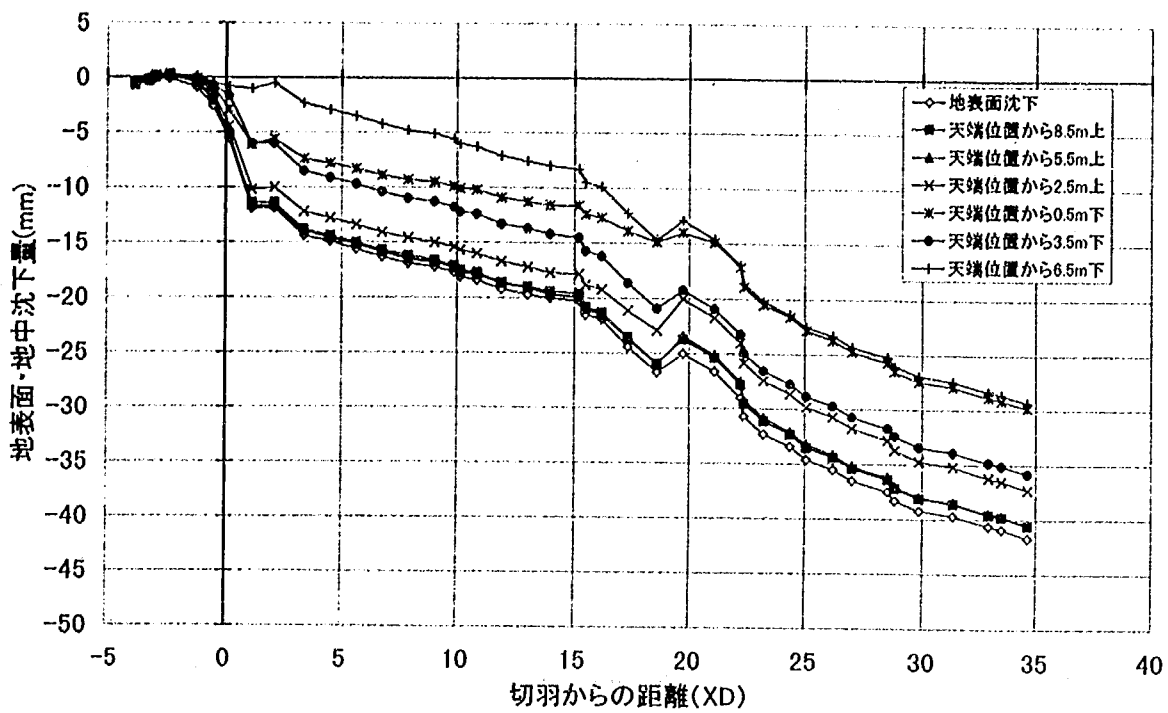


図-2.6 (5) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0.5)

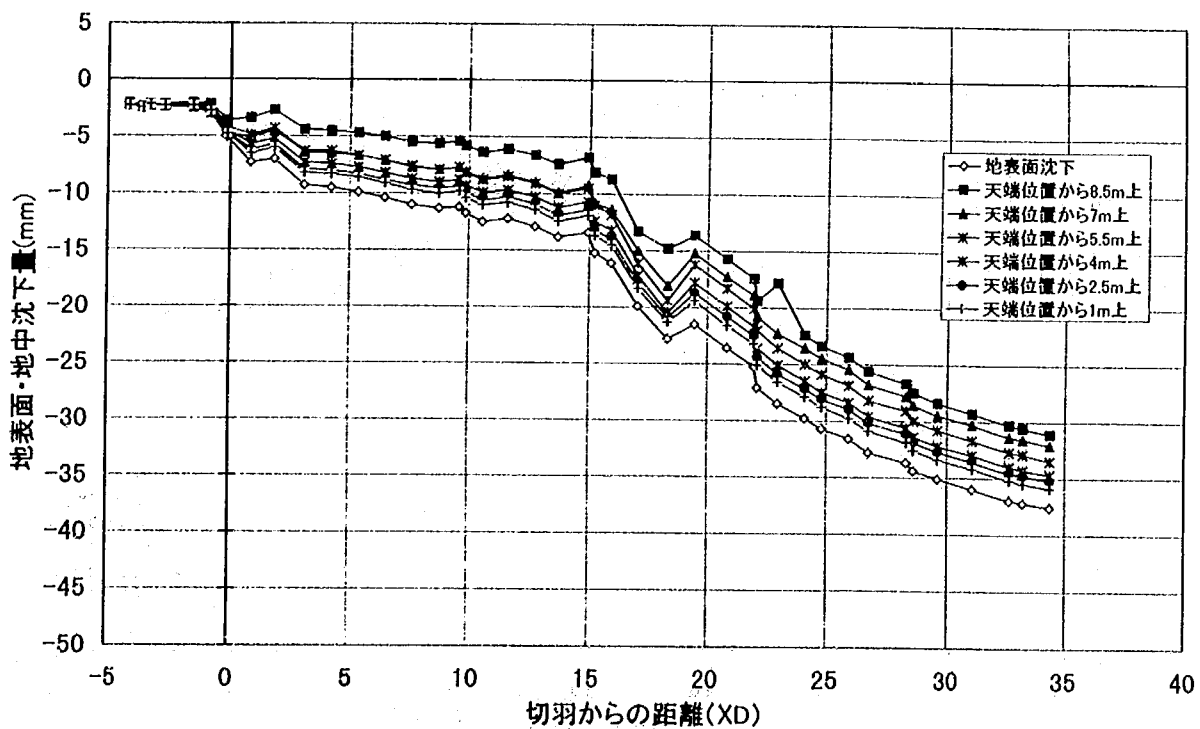


図-2.6 (6) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0.6)

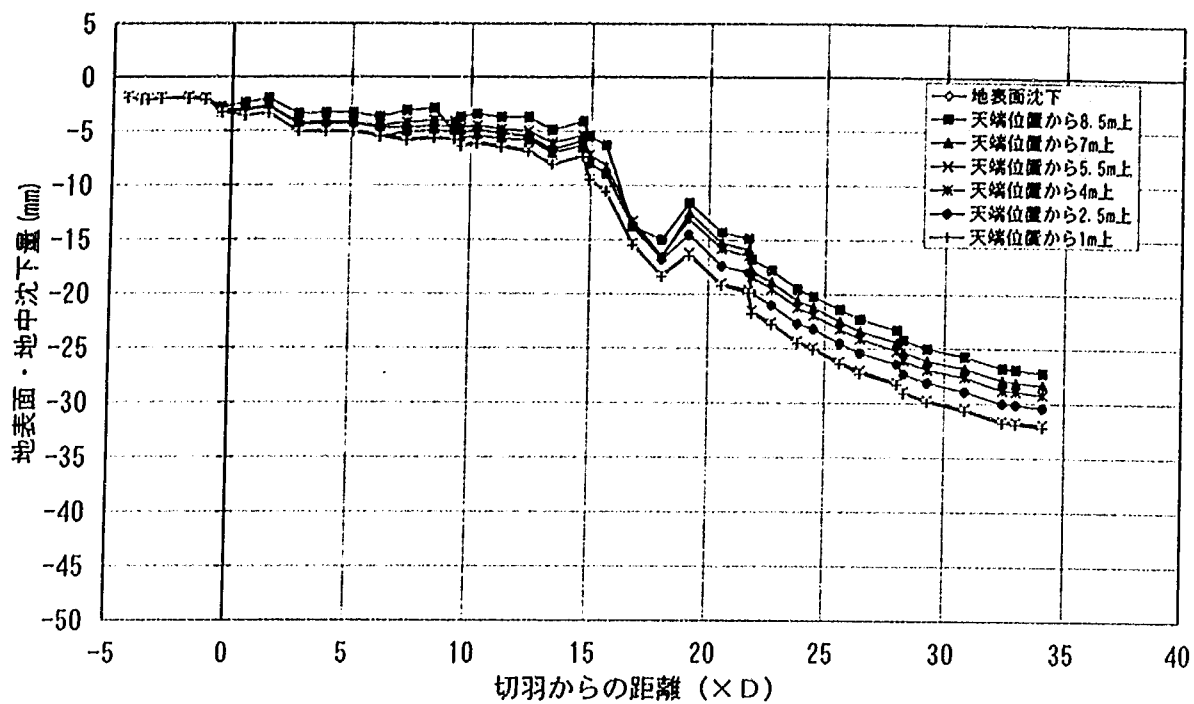


図-2.6 (7) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0. 7)

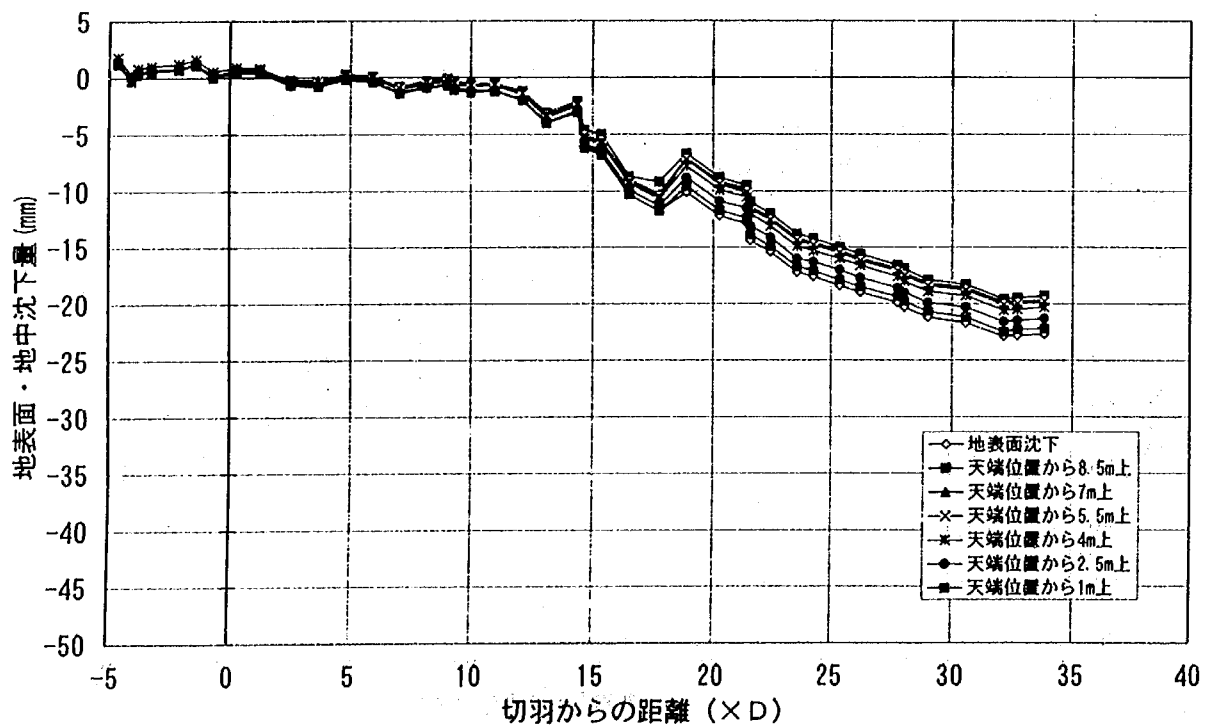


図-2.6 (8) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (N0. 8)

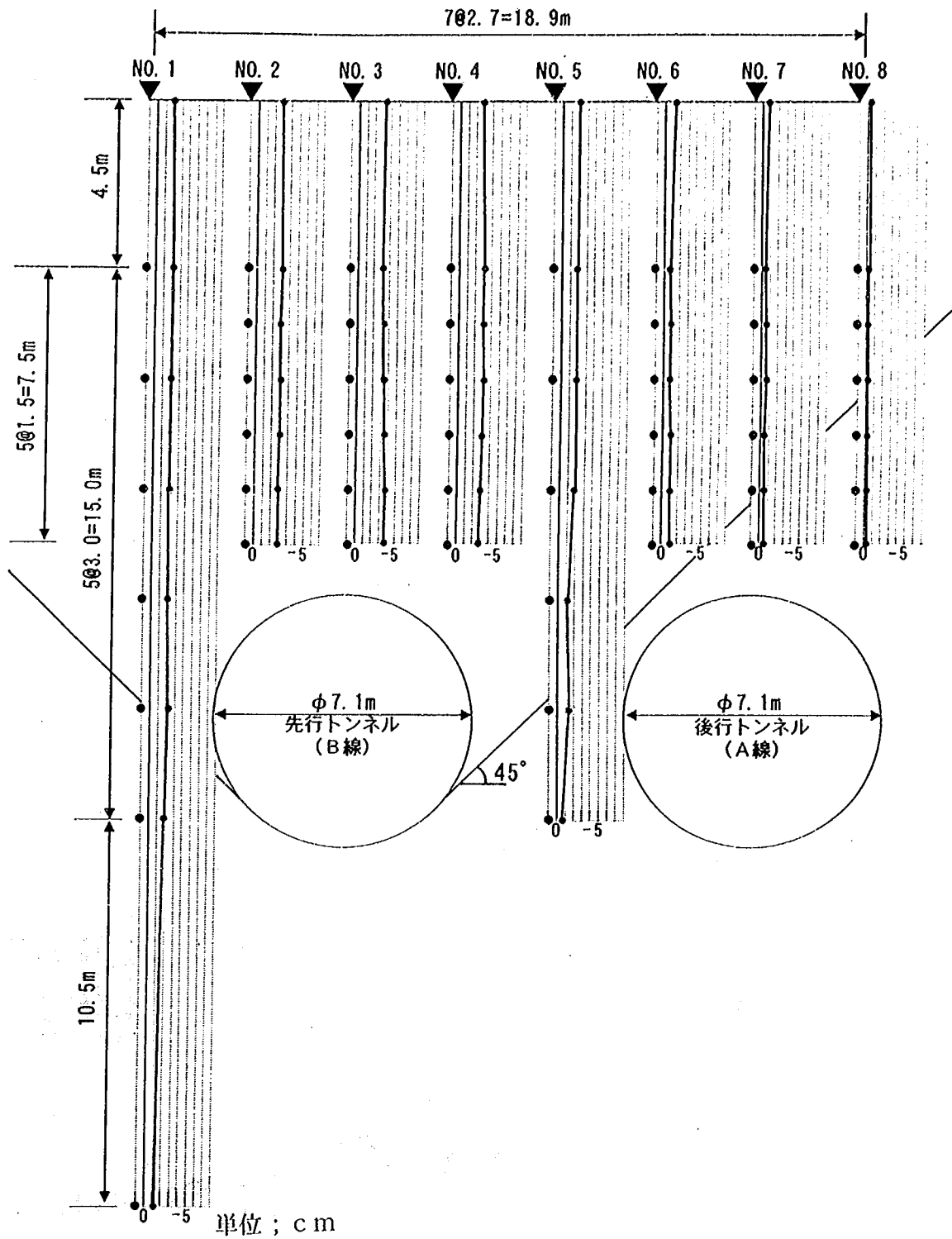


図-2.7 地表面・地中沈下量の最終沈下量 (切羽位置15D)

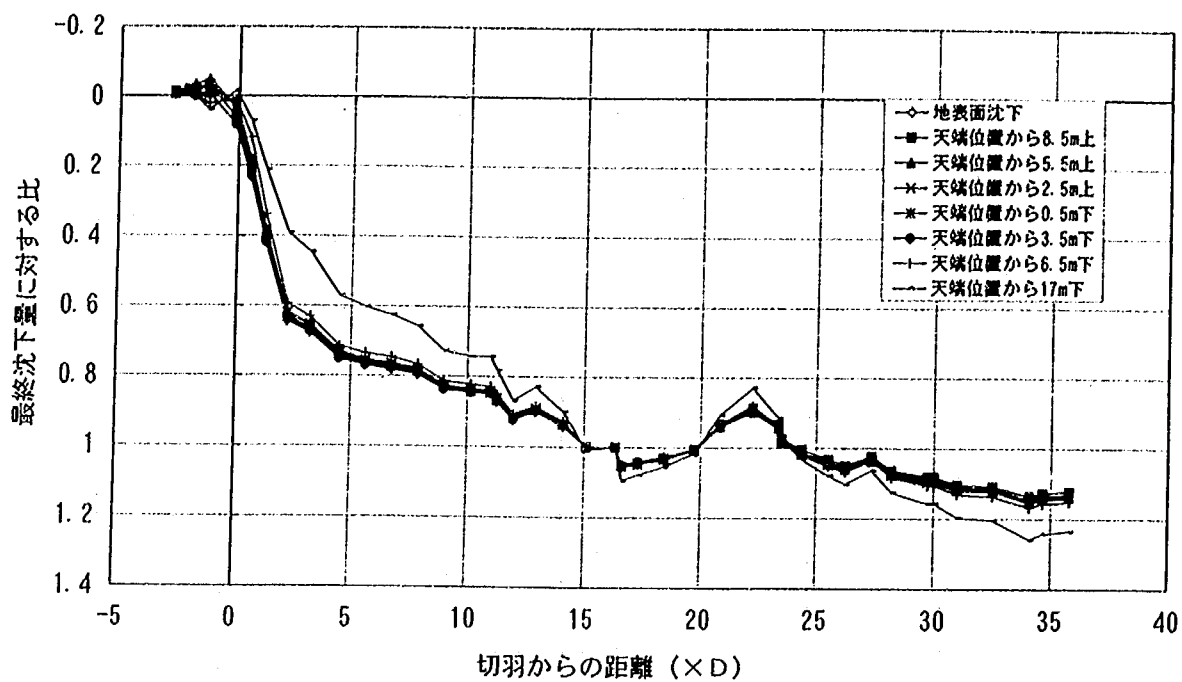


図-2.8 (1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0.1)

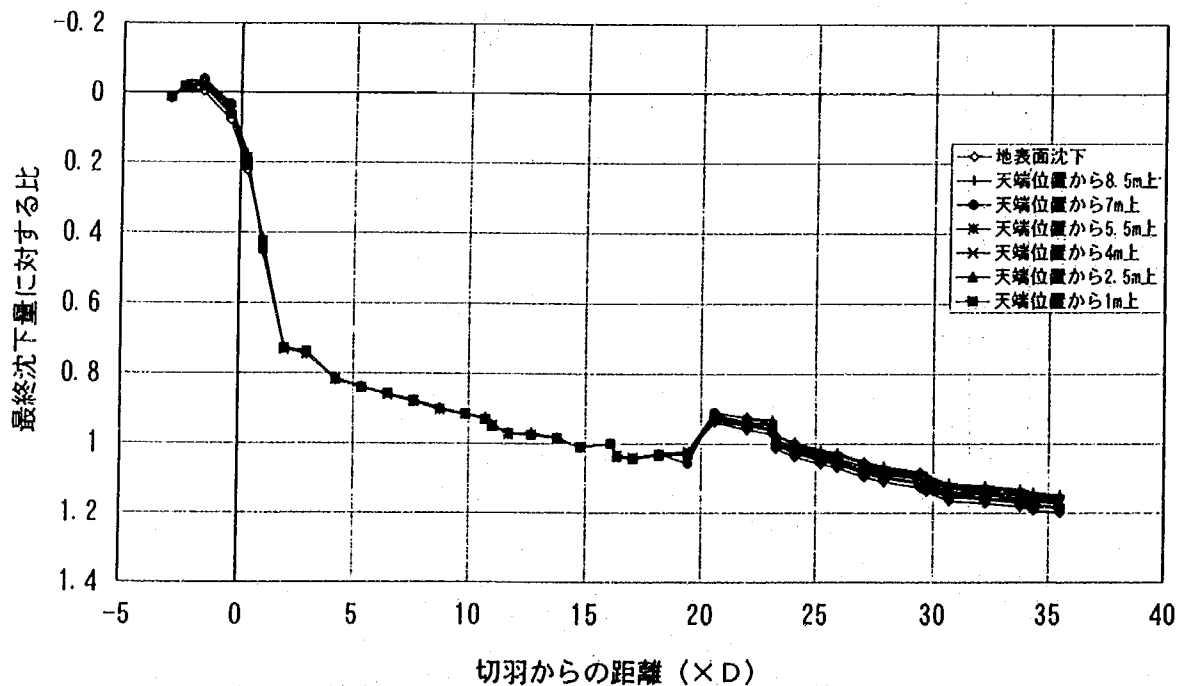
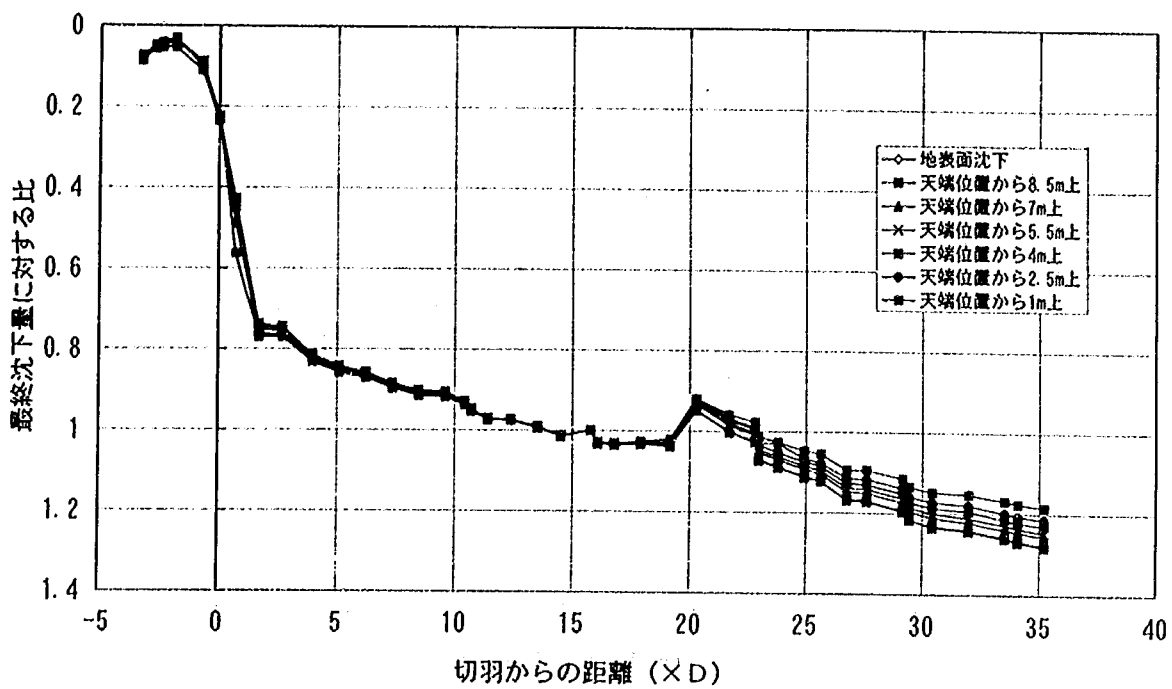
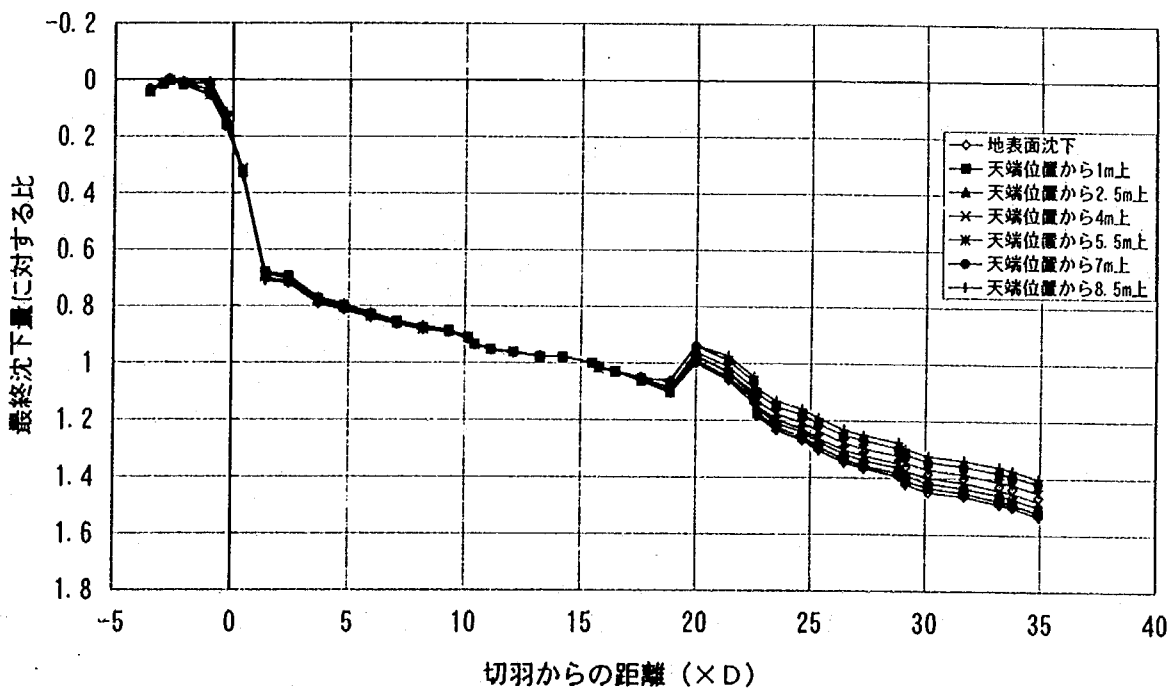


図-2.8 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0.2)



図一 2. 8 (3) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0. 3)



図一 2. 8 (4) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0. 4)

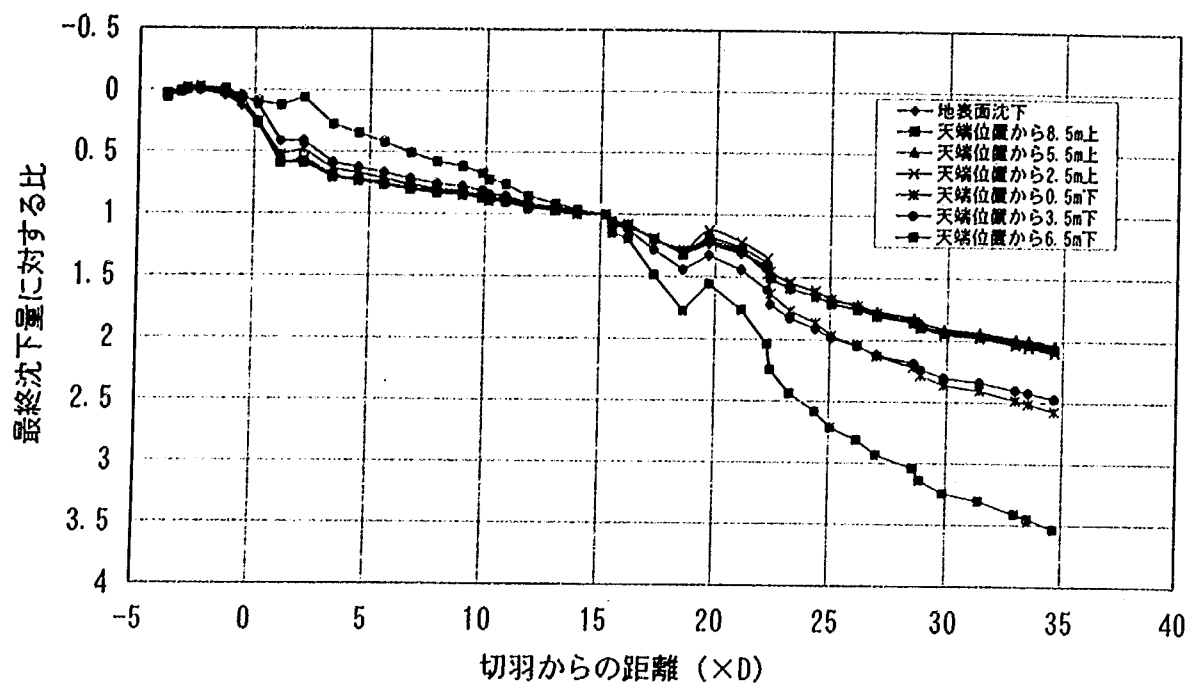


図-2.8 (5) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0.5)

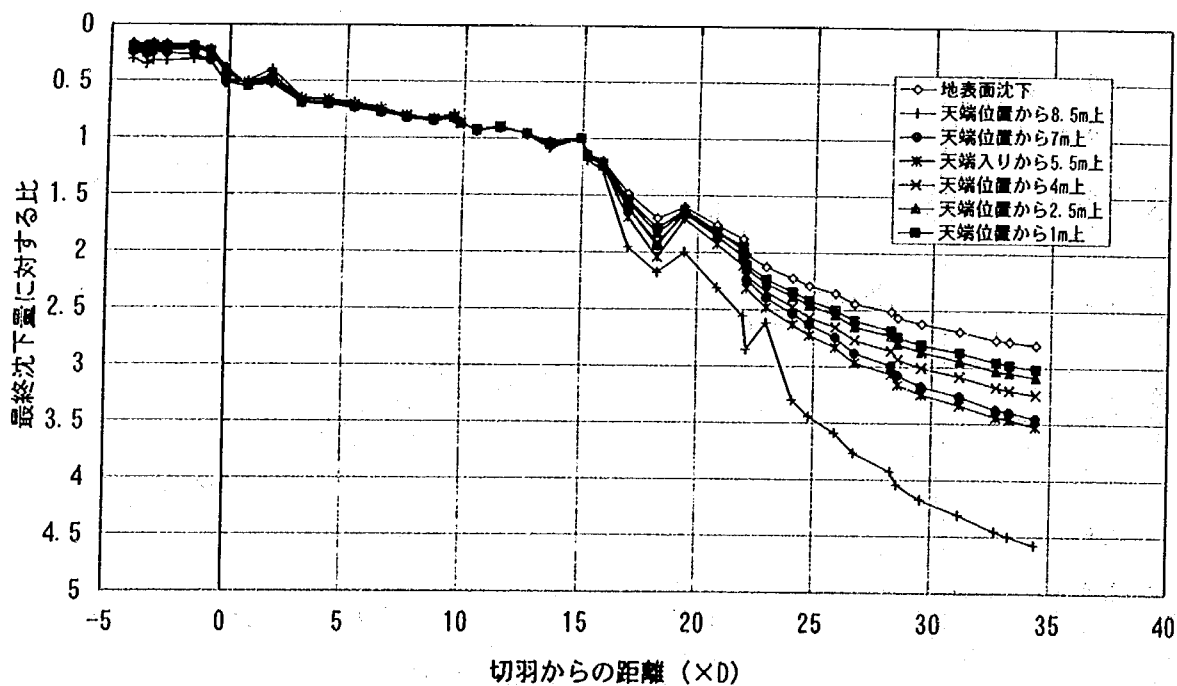


図-2.8 (6) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0.6)

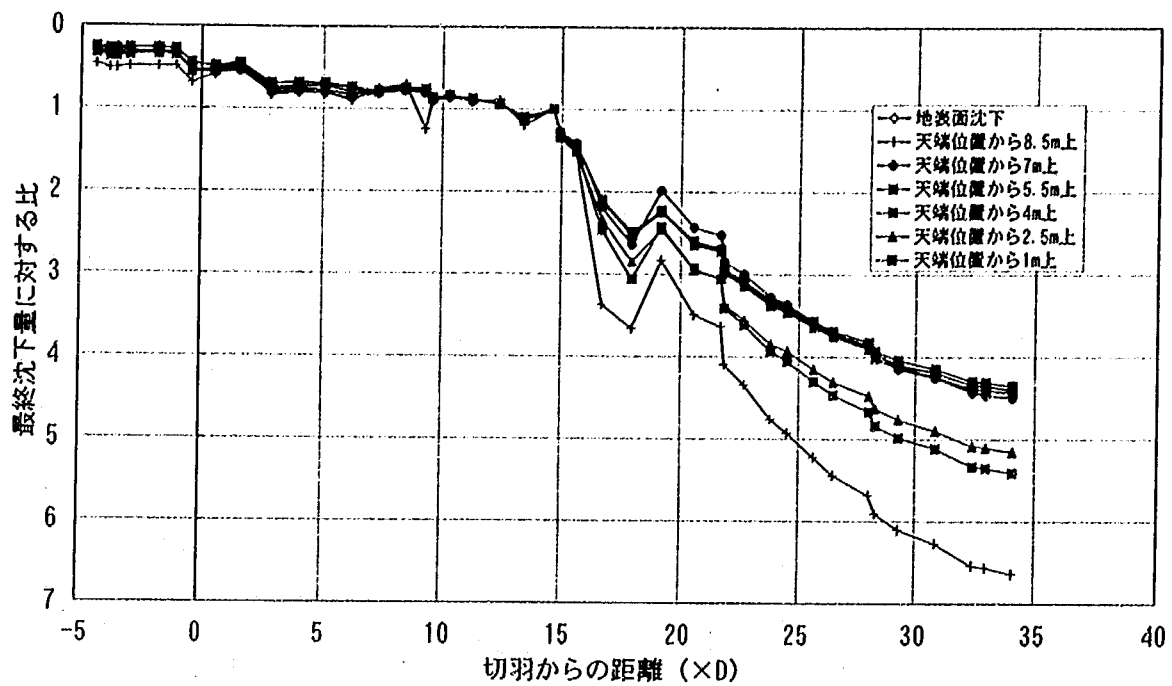


図-2.8 (7) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0. 7)

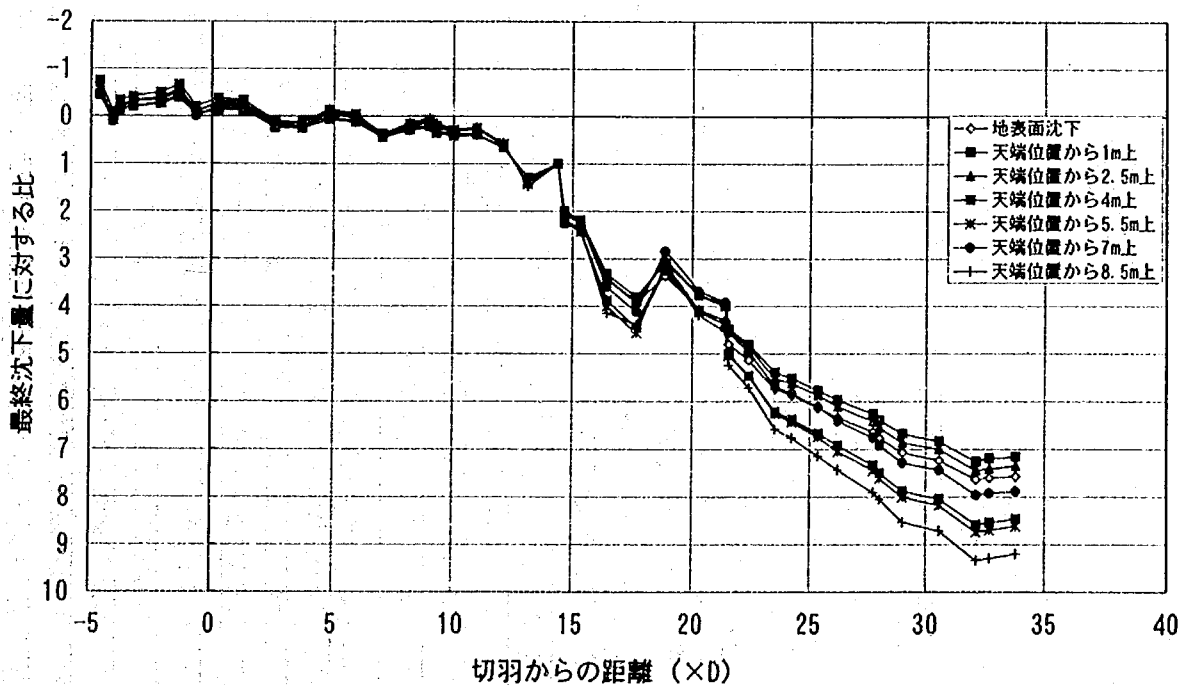


図-2.8 (8) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (N0. 8)

表-2.2 Aシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表

Aシールド 鉛直変位計測データ(最終沈下量) (mm)

NO.	切羽からの距離(m)	切羽からの距離(×D)	地表面沈下	天端位置から8.5m上	天端位置から5.5m上	天端位置から2.5m上	天端位置から0.5m下	天端位置から3.5m下	天端位置から6.5m下	天端位置から17m下
NO.1	116	16.338	-21.9	-22.1	-21.6	-20.9	-20.7	-22.0	-19.2	-12.8
NO.2	114	16.056	-29.1	-30.3	-30.0	-30.3	-30.2	-29.5	-29.3	
NO.3	112	15.775	-33.7	-33.7	-34.7	-35.6	-36.5	-37.9	-38.7	
NO.4	110	15.493	-28.6	-31.8	-31.7	-31.2	-30.0	-29.1	-28.7	
NO.5	108	15.211	-20.3	-19.6	-19.9	-17.8	-11.6	-14.5	-8.3	
NO.6	106	14.930	-13.4	-6.8	-9.3	-9.5	-10.7	-11.4	-11.9	
NO.7	104	14.648	-7.30	-4.10	-6.30	-7.20	-5.40	-5.90	-7.40	
NO.8	102	14.366	-3.00	-2.10	-2.50	-2.30	-2.40	-2.90	-3.10	

Aシールド 鉛直変位計測データ(切羽位置沈下量) (mm)

NO.	切羽からの距離(m)	切羽からの距離(×D)	地表面沈下	天端位置から8.5m上	天端位置から5.5m上	天端位置から2.5m上	天端位置から0.5m下	天端位置から3.5m下	天端位置から6.5m下	天端位置から17m下
NO.1	4	0.563	-5.1	-4.7	-4.1	-4.0	-3.7	-5.0	-2.3	-0.9
NO.2	2	0.282	-6.5	-5.3	-5.6	-6.2	-6.3	-5.9	-6.2	
NO.3	0	0.000	-8.0	-7.9	-7.8	-7.9	-8.1	-8.6	-8.7	
NO.4	3	0.423	-9.5	-10.9	-10.4	-10.1	-9.4	-9.2	-9.4	
NO.5	1	0.141	-5.6	-5.2	-5.2	-4.4	-2.9	-1.7	-0.8	
NO.6	6	0.845	-7.3	-3.4	-5.1	-4.9	-5.7	-6.2	-6.5	
NO.7	4	0.563	-3.60	-2.40	-3.60	-3.50	-3.00	-3.10	-3.60	
NO.8	2	0.282	0.40	0.60	0.50	0.60	0.90	0.50	0.40	

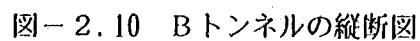
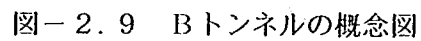
Aシールド 鉛直変位計測データ(切羽通過時最終沈下量との比)

NO.	切羽からの距離(m)	切羽からの距離(×D)	地表面沈下	天端位置から8.5m上	天端位置から5.5m上	天端位置から2.5m上	天端位置から0.5m下	天端位置から3.5m下	天端位置から6.5m下	天端位置から17m下
NO.1	4	0.563	0.233	0.213	0.190	0.191	0.179	0.227	0.120	0.070
NO.2	2	0.282	0.223	0.175	0.187	0.205	0.209	0.200	0.212	
NO.3	0	0.000	0.237	0.234	0.225	0.222	0.222	0.227	0.225	
NO.4	3	0.423	0.332	0.343	0.328	0.324	0.313	0.316	0.328	
NO.5	1	0.141	0.276	0.265	0.261	0.247	0.250	0.117	0.096	
NO.6	6	0.845	0.545	0.500	0.548	0.516	0.533	0.544	0.546	
NO.7	4	0.563	0.493	0.585	0.571	0.486	0.556	0.525	0.486	
NO.8	2	0.282	-0.133	-0.286	-0.200	-0.261	-0.375	-0.172	-0.129	

変位の方向; プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

2.3.1 計測トンネルの概要

本現場計測は、河底を横断する延長922m、セグメント外径5.0m（セグメント桁高30cm、幅90cmの6分割のRセグメント）の単設シールドトンネルである。図-2.9および図-2.10に概要図を示す。



(2) 地質状況

トンネルが位置する地形・地質状況は軟弱な粘性土が溺れ谷形状となって沖積層が厚く堆積している。シールドトンネルが位置する付近の地質は、AP-30m付近の深さで、土質はすべて下部有楽町層であり、N値で1～2の軟弱なシルト層となっている。また、地表上部付近にN値が10～20程度の細砂が存在するものの、主にN値がほぼゼロの軟弱土層となっている。下部有楽町層は、細粒分が大半であり透水性が非常に低く、室内透水試験による透水係数は 10^{-7} オーダーの不透水層である。また、トンネル周辺の粒土分布は粘土分55%、シルト分45%、砂分0.3%で自然含水比は約80%、液性限界・塑性限界はそれぞれ約90%、約40%である。単位堆積重量は、全体として均一であり約 1.5 gf/cm^3 の値を示している。

(3) 地盤変状の計測

地盤変状の計測は、図-2.11 (1)～(2)に示すよう土被り約30mの地点の2つの計測断面で、いずれの計測断面においても層別沈下計による鉛直方向の沈下量について実施した。

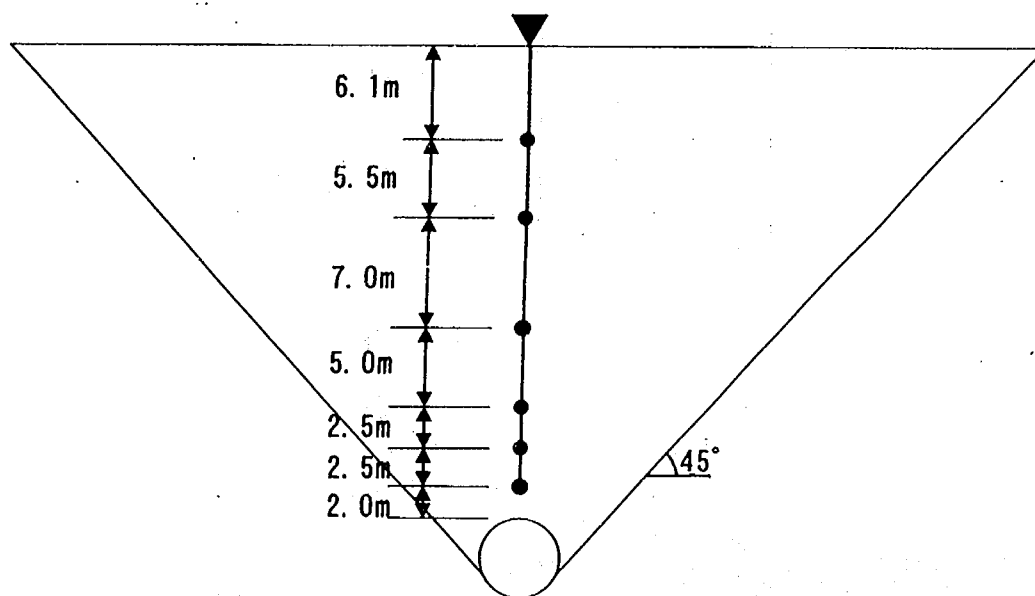
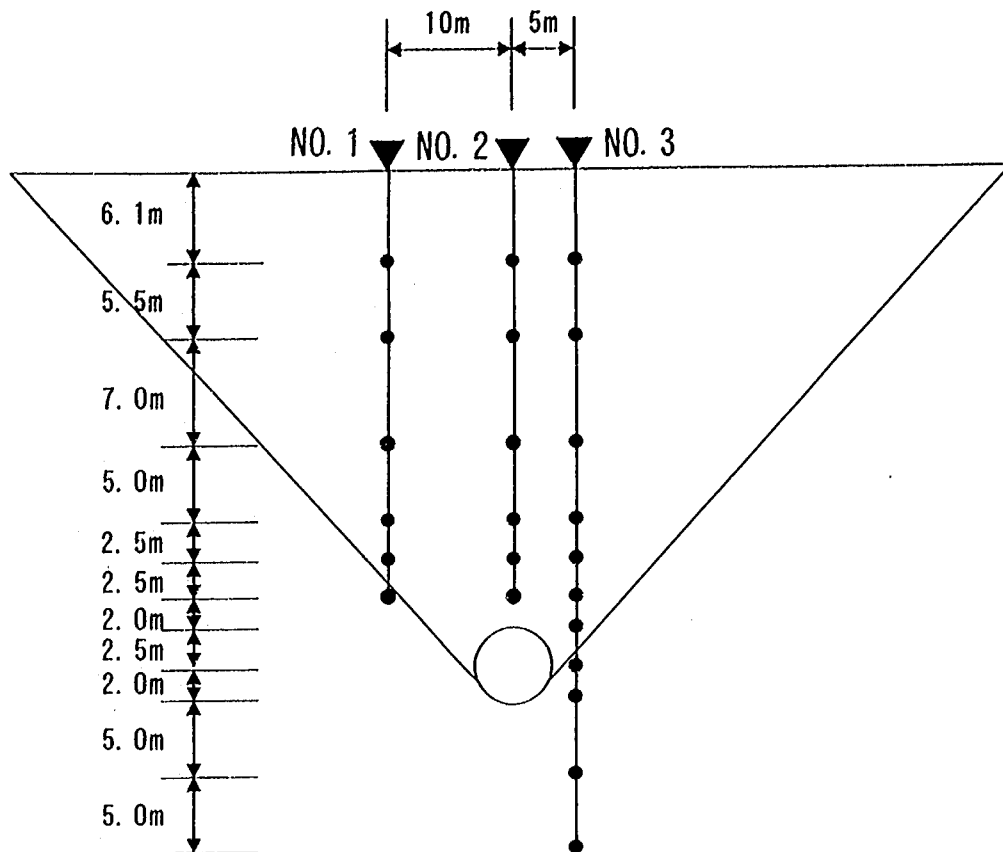


図-2.11 (1) Bトンネルの計測断面の概要 (左岸)



図一 2.11 (2) Bトンネルの計測断面の概要 (右岸)

(4) 掘削方式と施工概要

シールドトンネルの掘削は、密閉型の泥水加圧式シールドであり、施工に用いたシールド機の概要図を図-2.12に示す。シールド外径とセグメント外径とのテールボイドは7cmであり、裏込め注入は、同時裏込め注入方式となっている。なお、工事の進捗は、1日あたり7m程度の掘進スピードであった。

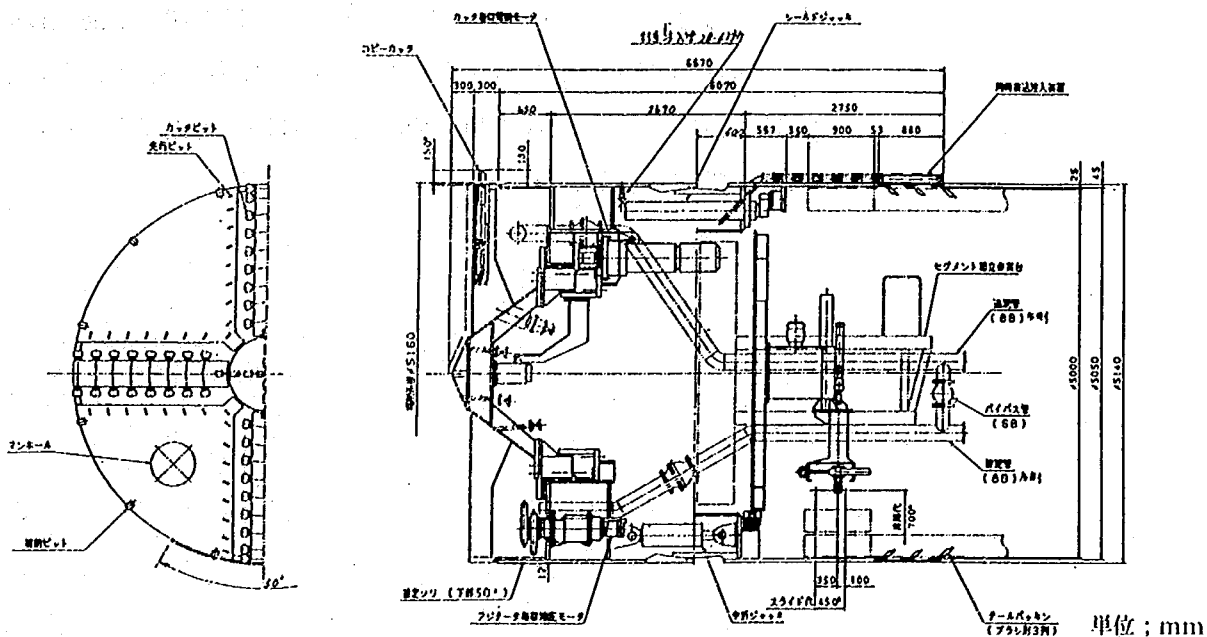


図-2.12 Bトンネルで使したシールド機の概要

2.3.2 計測結果

(1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の変化

層別沈下計の計測データを切羽の進行で整理したものを図-2.13(1)～(4)に示す。図から、トンネル掘削による地盤変状の値は非常に小さく、最大の沈下量でも右岸の計測断面のシールドの天端位置から直上2.0mの位置で約5mm程度となっている。右岸の計測断面のグラフで見ると、切羽距離と地盤変状との関係は、切羽前方の約1D付近から沈下し始め、天端位置から2m上の計測位置で切羽後方約1.5Dで一旦隆起して再度沈下している。これは、テールボイド内に注入する裏込め注入による影響によるものと考えられる。また、天端位置から7m上程度までの計測位置で切羽後方約4D付近まで変動があり、最終的な沈下量も大きいことが分かる。一方、天端位置から12m上の計測位置は、ほぼ同様な沈下傾向を示し切羽後方2D付近で沈下が収束の傾向にある。したがって、施工条件によって異なるものと考えられるが、一つの目安として本トンネルのような軟弱な粘性土地盤の条件下における即時沈下の傾向は、切羽前方1D付近からトンネル周辺地盤への沈下影響が現れ始め、裏込め注入等によって隆起現象を生じるものの切羽後方約4D付近で収まることが分かった。また、最終的な沈下量の大きさは、トンネルの天端から約1.4D上程度までは比較的大きいものの、それ以上の位置から地表面までの沈下量は、ほぼ同程度で沈下量も小さいことが分かった。

(2) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

トンネルの横断方向の地表面・地中沈下量の分布を図-2.14(1)～(2)に示す。ここで、図中に示した分布図の計測データは、図-2.13に示した最終の沈下量である。図より、沈下量はトンネル中心で最も大きく、トンネル側方へ離れるに従って小さくなる傾向を示す。また、横断方向への影響は、トンネル側方部の沈下量が若干大きい値を示すが、トンネル下端から45°の傾きで延ばした影響範囲程度であることが分かる。

(3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

最終沈下量で正規化したグラフを図-3.15(1)～(4)に示す。ここで、最終沈下量を切羽が通過後約11Dの時とした。また、最終沈下量、切羽位置での沈下量および最終沈下量との比の一覧表を表-2.3に示す。これによると、天端位置からトンネル直上の沈下計から、最終沈下量を切羽後方約11Dの時点で考えると、切羽が通過する以前に最終沈下量の約1割が沈下していることが分かる。

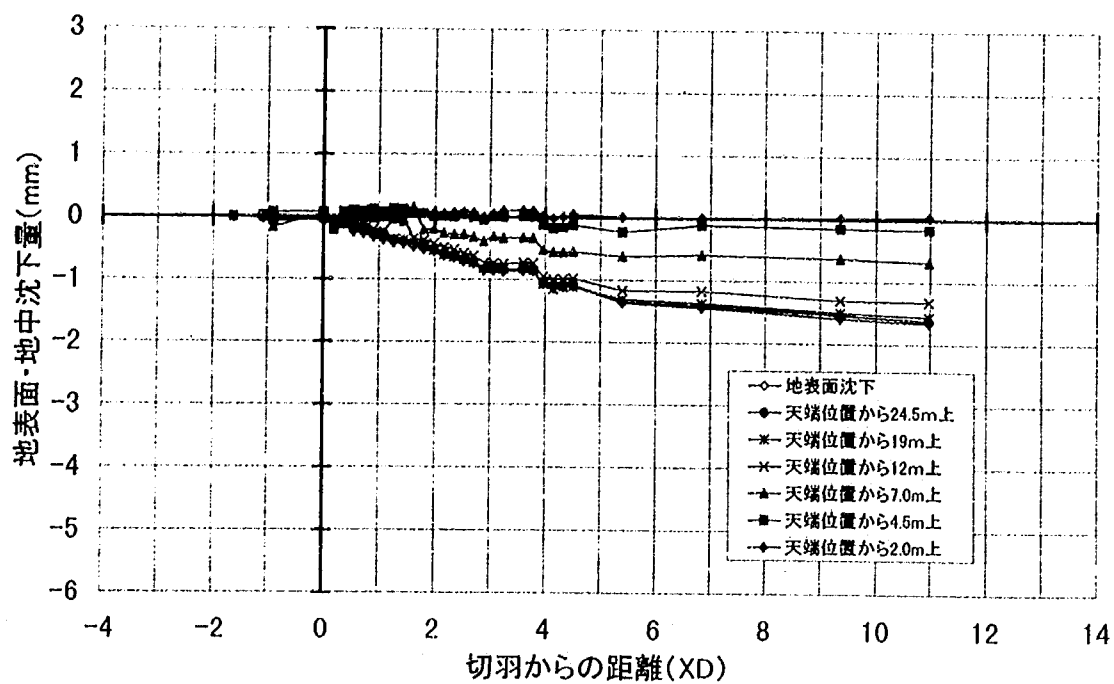


図- 2. 13 (1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (右岸N0. 1)

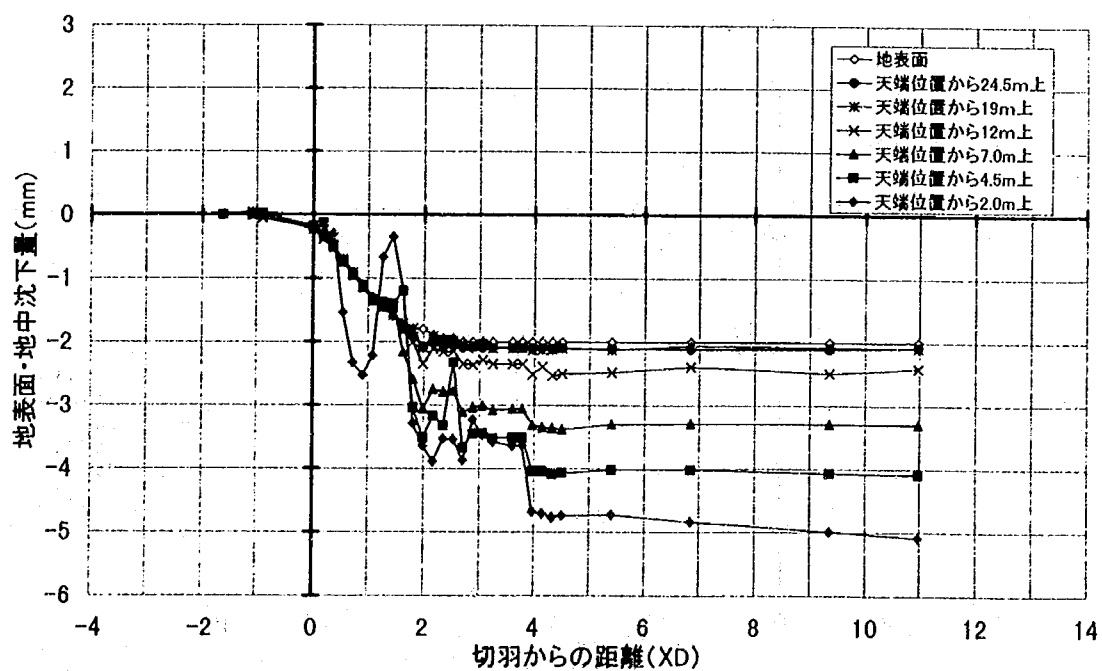


図- 2. 13 (2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (右岸N0. 2)

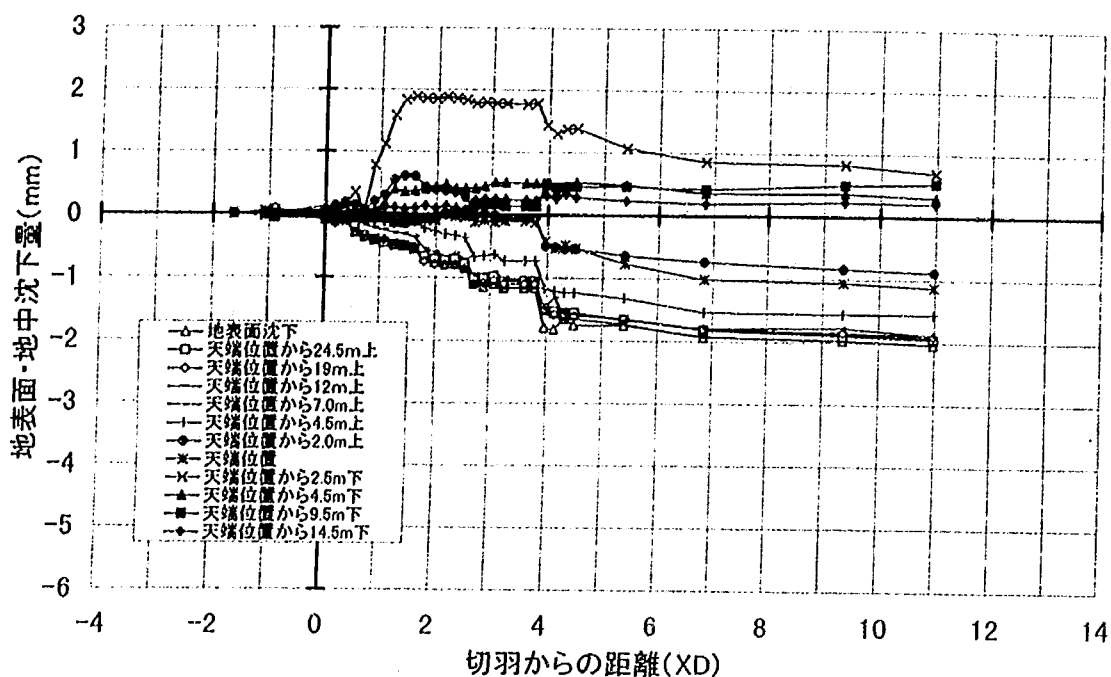


図-2.13 (3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (右岸N0.3)

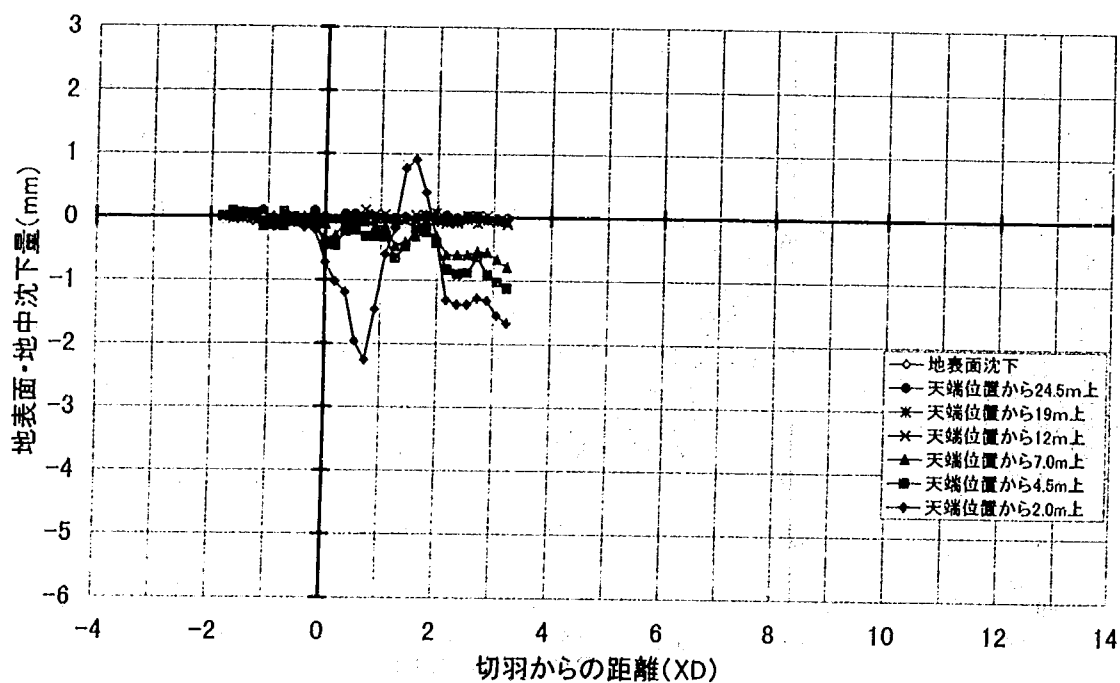


図-2.13 (4) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (左岸)

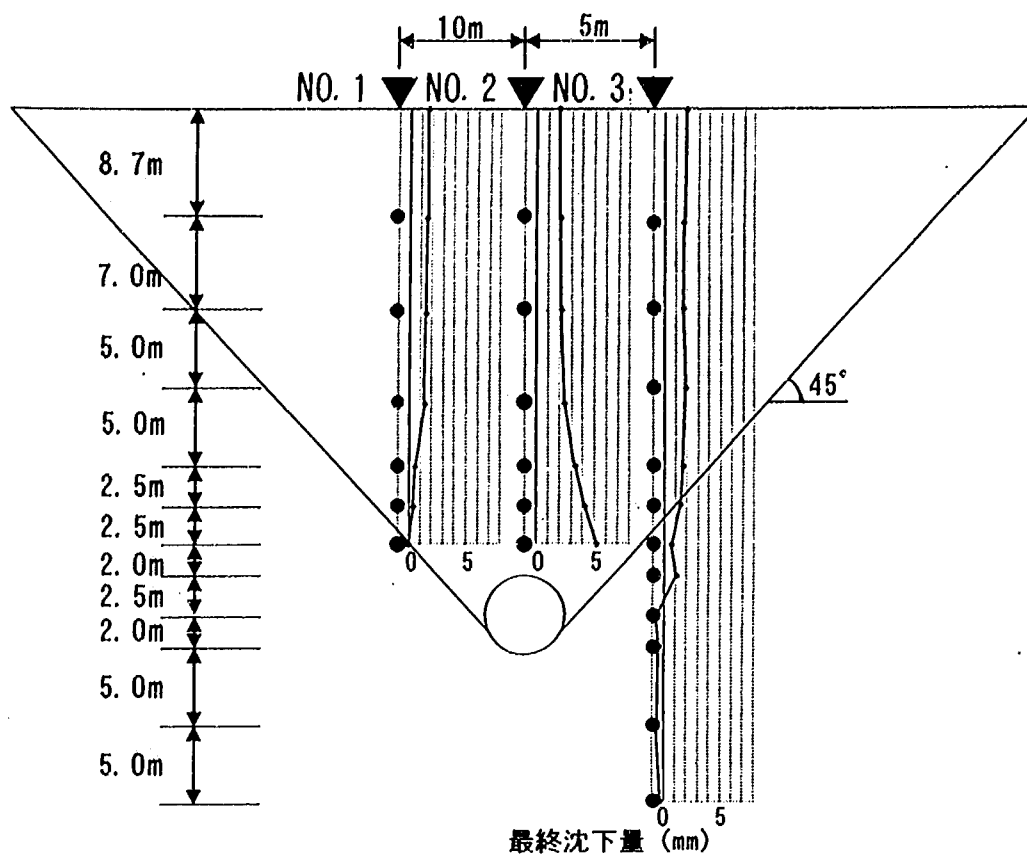


図-2.14 (1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量 (右岸；切羽位置11D)

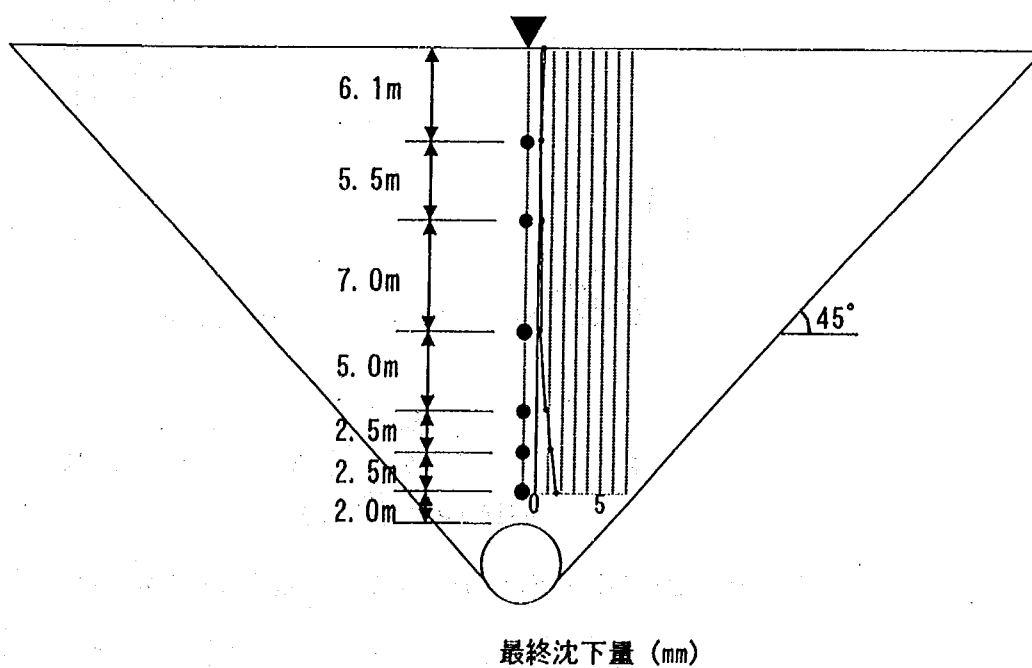


図-2.14 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量 (左岸；切羽位置3D)

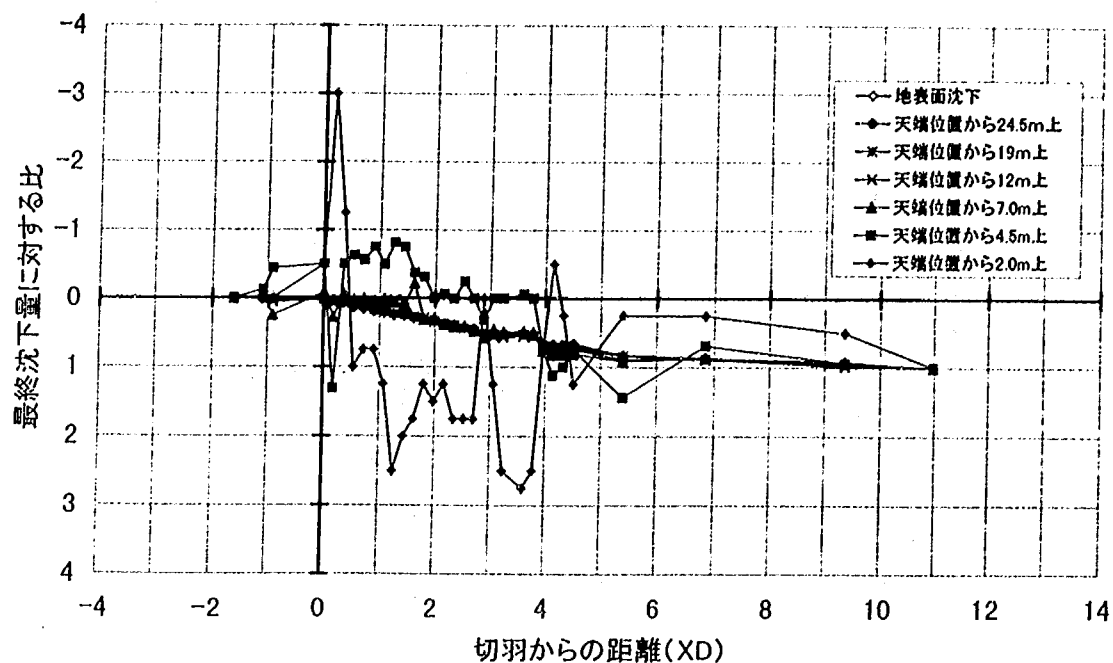


図- 2. 15 (1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (右岸N0. 1)

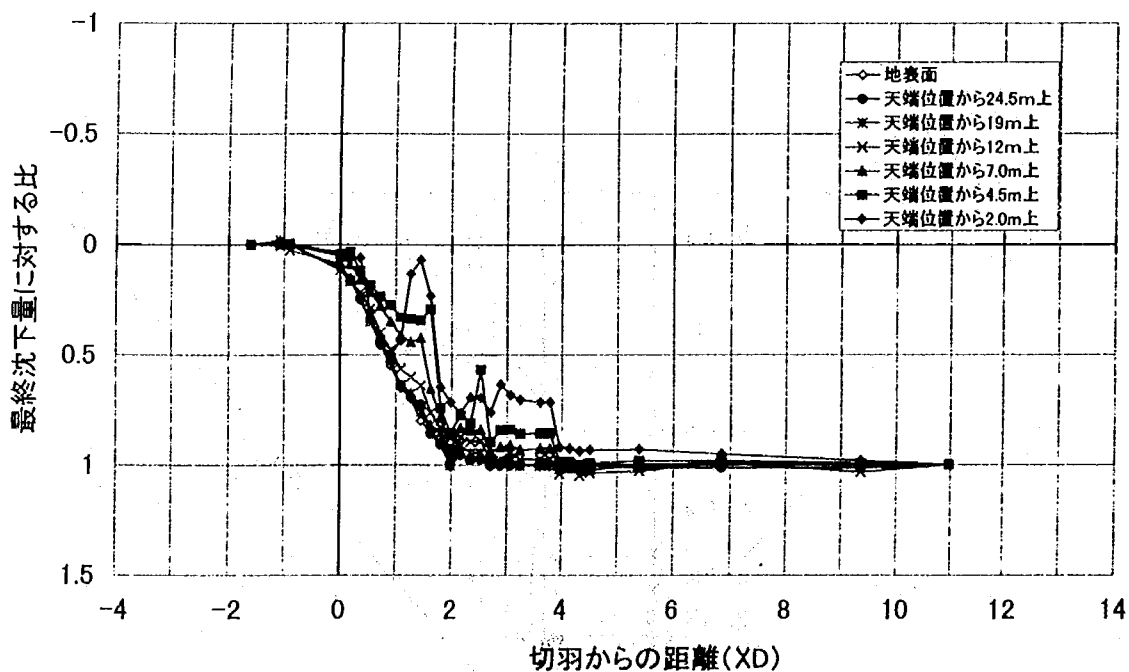


図- 2. 15 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (右岸N0. 2)

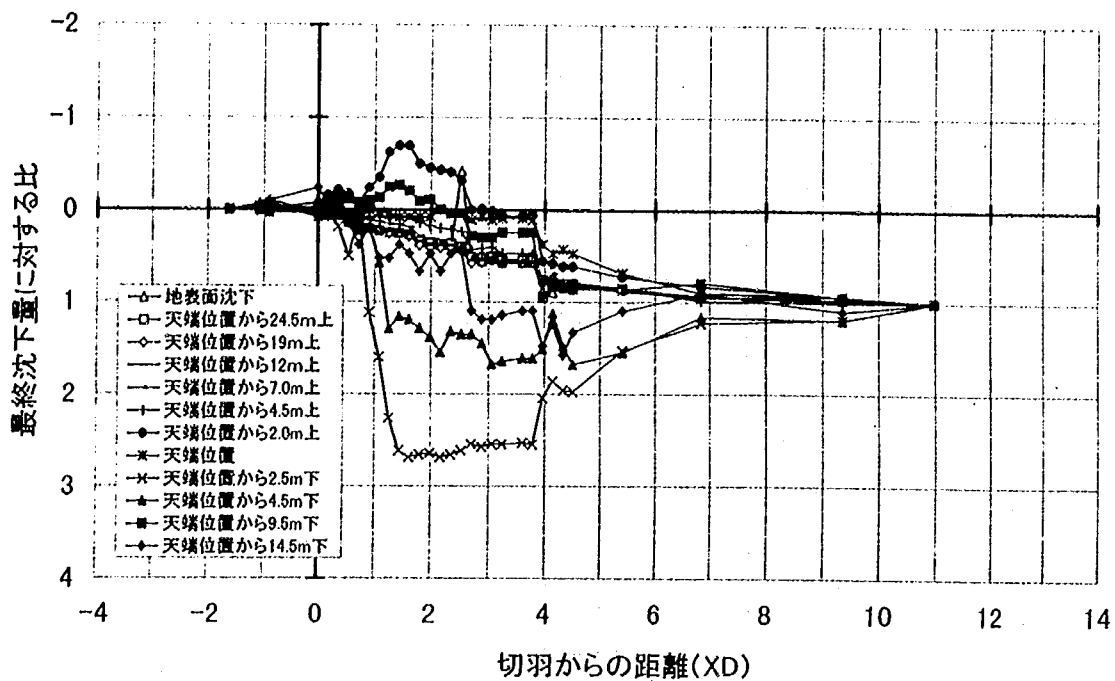


図- 2. 15 (3) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (右岸N0. 3)

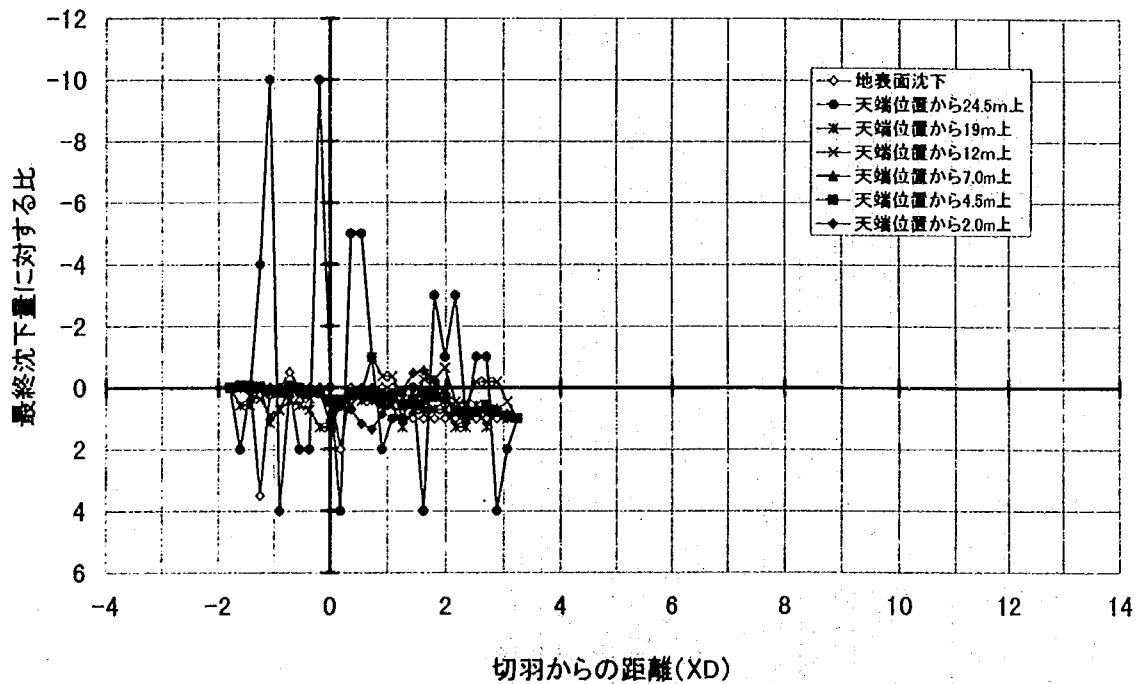


図- 2. 15 (4) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (左岸)

表-2.3 Bシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表

Bシールド(右岸・左岸) 鉛直変位計測データ(最終沈下量) (mm)

右岸(N0.2)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	5.49	10.98	-2.00	-2.08	-2.09	-2.41	-3.30	-4.09	-5.08						
右岸(N0.1)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	5.49	10.98	-1.65	-1.62	-1.56	-1.32	-0.68	-0.16	0.04						
右岸(N0.3)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上	天端位置	天端位置から2.5m下	天端位置から4.5m下	天端位置から9.5m下	天端位置から14.5m下		
	5.49	10.98	-2.03	-1.94	-1.90	-2.02	-1.89	-1.55	-0.88	-1.12	0.20	0.21	0.53	0.21	
左岸	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	16.2	32.4	-0.02	-0.01	-0.07	-0.11	-0.79	-1.12	-1.67						

Bシールド(右岸・左岸) 鉛直変位計測データ(切羽位置沈下量) (mm)

右岸(N0.2)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	0	0	-0.20	-0.21	-0.24	-0.21	-0.17	-0.18	-0.18						
右岸(N0.1)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	0	0	-0.07	-0.06	-0.01	-0.03	0.05	0.08	-0.02						
右岸(N0.3)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上	天端位置	天端位置から2.5m下	天端位置から4.5m下	天端位置から9.5m下	天端位置から14.5m下		
	0	0	-0.07	-0.10	-0.10	-0.06	0.05	0.12	0.06	-0.01	0.06	0.01	0.00	-0.04	
左岸	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	0	0	0.00	0.00	-0.09	-0.13	-0.35	-0.44	-0.72						

Bシールド(右岸・左岸) 鉛直変位計測データ(切羽位置通過時最終沈下量との比)

右岸(N0.2)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	0	0	0.100	0.101	0.115	0.087	0.052	0.044	0.035						
右岸(N0.1)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	0	0	0.042	0.037	0.006	0.023	-0.074	-0.500	-0.500						
右岸(N0.3)	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上	天端位置	天端位置から2.5m下	天端位置から4.5m下	天端位置から9.5m下	天端位置から14.5m下		
	0	0	0.034	0.052	0.053	0.030	-0.026	-0.077	-0.068	0.009	0.086	0.032	0.000	-0.238	
左岸	切羽からの距離(m)	切羽からの距離×D(地表面)	天端位置から24.5m上	天端位置から19m上	天端位置から12m上	天端位置から7.0m上	天端位置から4.5m上	天端位置から2.0m上							
	0	0	0.000	0.000	1.286	1.182	0.443	0.393	0.431						

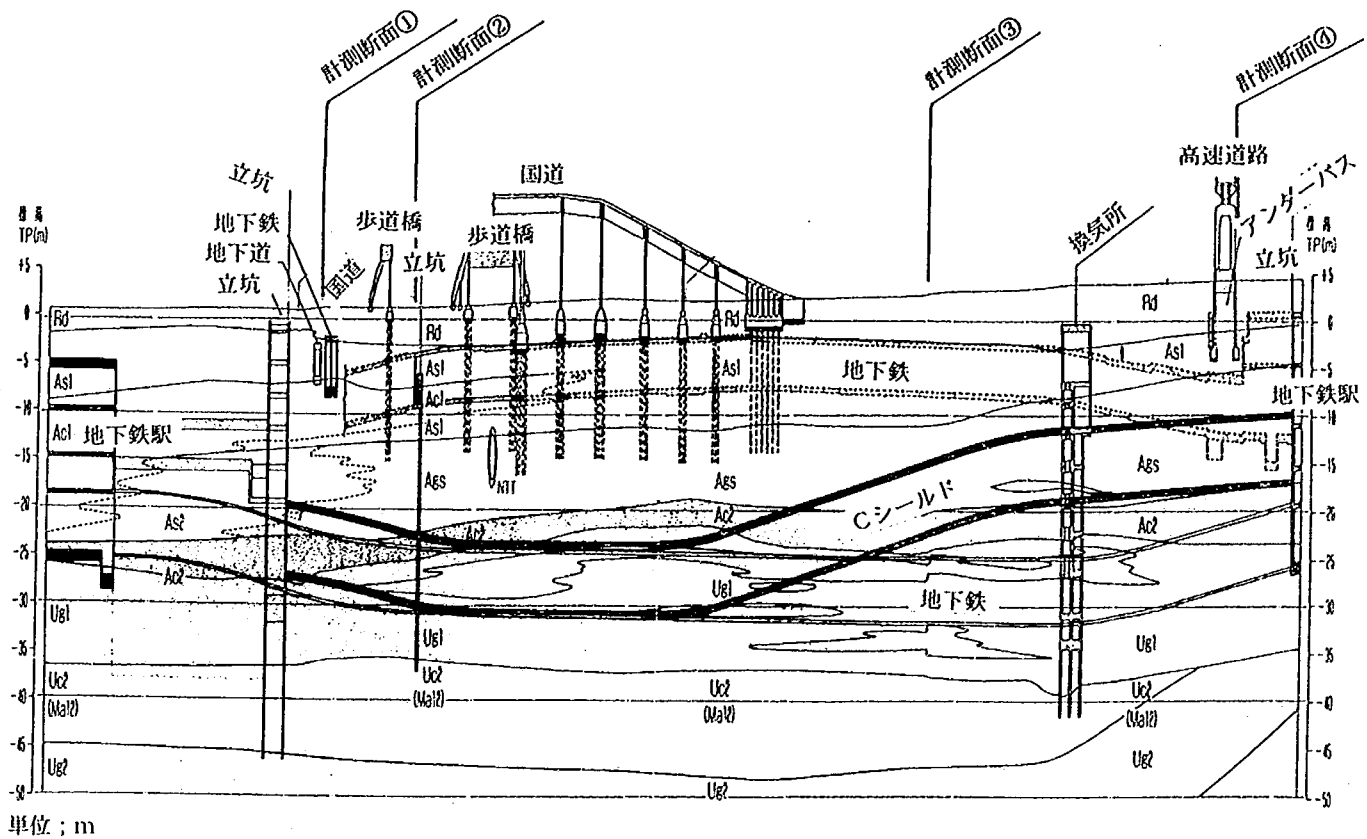
変位の方向: プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

2.4 Cシールド

2.4.1 計測トンネルの概要

(1) トンネルの概要

本現場計測トンネルは、大阪市内の国道直下に位置するシールドで、セグメント外径7.8m（セグメント桁高35cm、幅100cm）、延長920mの最大土被り約25.5mのシールドトンネルである。本工事の特徴は、交通量の多い国道直下での工事となるとともに、本トンネルに近接して地下鉄および地下鉄の連絡線の構造物などが存在する。図－2.16に概要図を示す。



凡例 [Rd] 盛土 沖積層 [As] 砂質土 [Ac] 粘性土 [Ag] 砂礫土 洪積層 [UG] 砂礫土 [Uc] 粘性土

図－2.16 Cトンネルの概要図

(2) 地質狀況

地質は、水量豊富な地層となっており、地表部から表土、N値が10～40程度の沖積第一砂質土層が3～10mの層厚、その下部にN値が1～5の層厚約6～7mの沖積第一粘性土、さらにN値30以上の層厚9～10mの沖積第二砂質土層、N値30以上の層厚7～9mの沖積砂礫土層、その下部にN値5～13の層厚3～5mの沖積第二粘性土層、N値50～60程度の洪積第一礫質土層が存在する。シールドトンネルは、発進立坑から100m区間は沖積砂質土層と沖積粘性土層の複合土層であり、中間の450m程度までは沖積粘性土層と洪積砂礫層の複合土層、後半の470m区間は沖積砂礫土層と沖積粘性土層の複合土層を通過する。

(3) 地盤変状の計測

地盤変状の計測は、図－2.17(1)～(4)に示すように計測断面①～④の4箇所における計測断面を設けて実施しており、主な計測は層別沈下計である。計測断面①は、土被り21.5m、計測断面②は、土被り25.2m、計測断面③は、土被り19.0m、計測断面④は、土被り15.27mでそれぞれ実施した。

(4) 掘削方式と施工概要

シールドトンネルの掘削は、泥土加圧式シールドであり、施工に用いたシールド機の概要図を図-2.18に示す。本トンネルでは、トンネル外径とシールド機外径の差からテールボイドは8.5cmであり、裏込め注入は、同時裏込め注入方式となっている。また、工事の進捗は、工事全体の平均で1日あたり6～7m程度の掘進スピードであった。

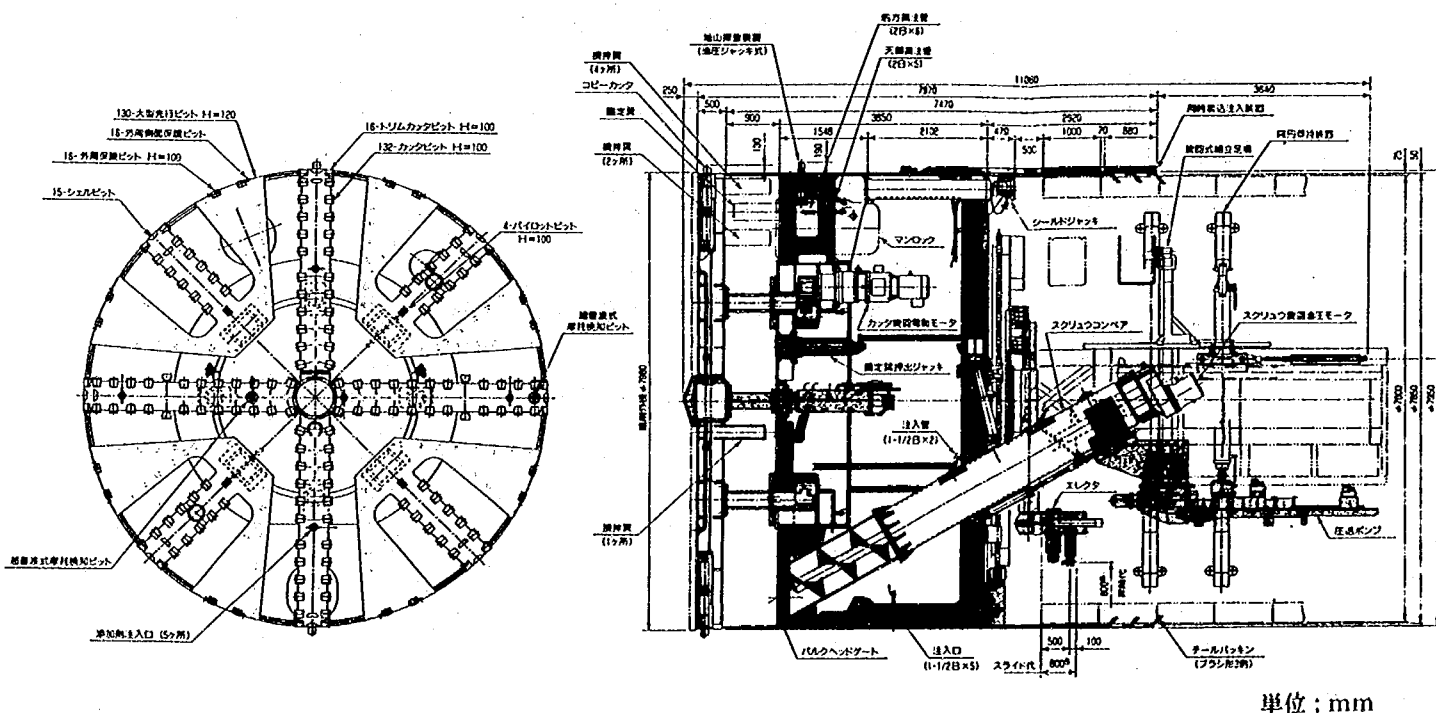


図-2.18 Cトンネルで使用したシールド機の概要図

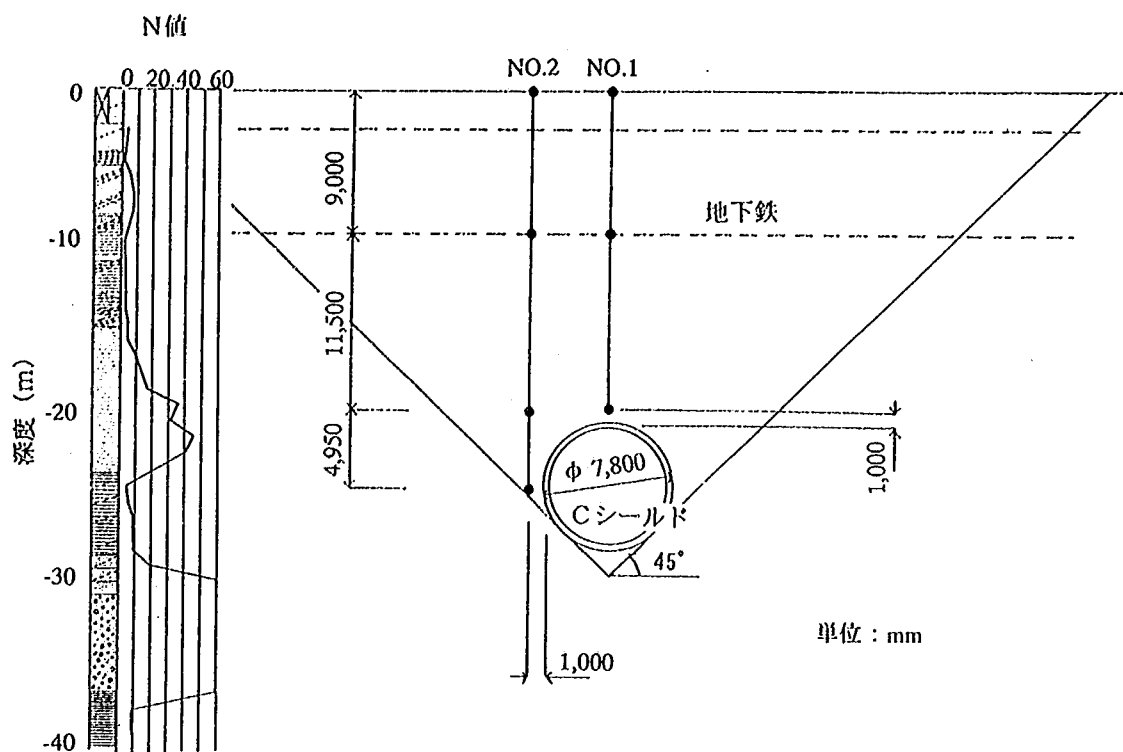


図-2.17(1) Cトンネルの計測断面における計測機器の配置 (計測断面①)

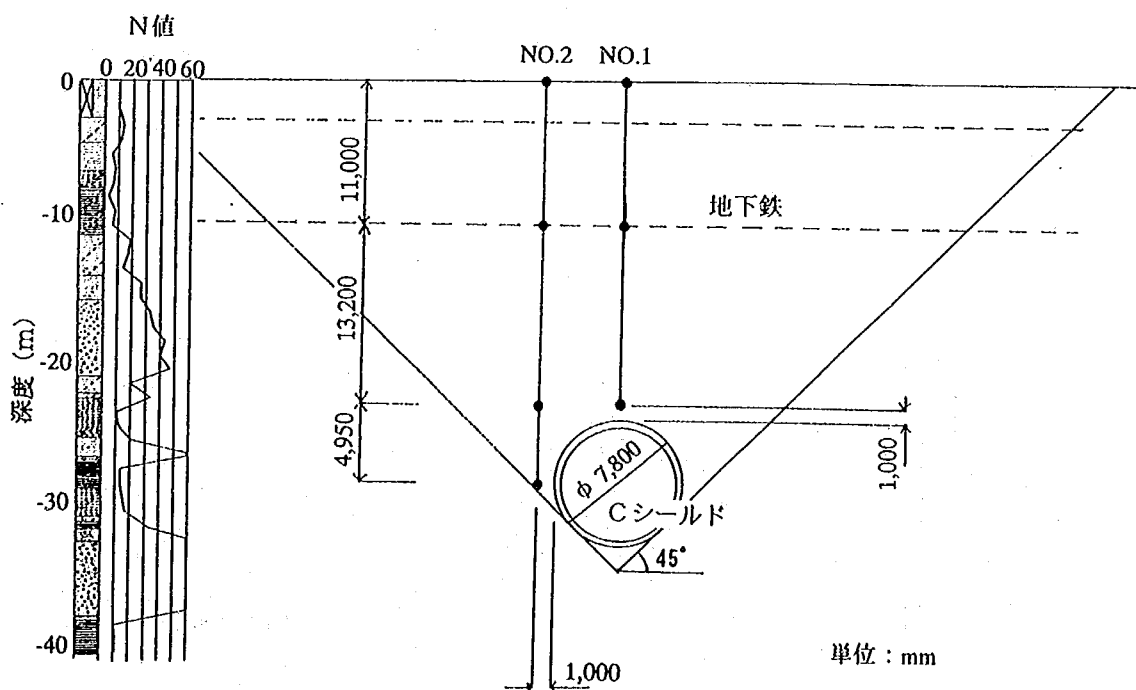


図-2.17(2) Cトンネルの計測断面における計測機器の配置 (計測断面②)

2.4.2 計測結果

(1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の変化

切羽の進行に伴う地表面・地中沈下量の計測データを図－2.19 (I)～(9)に示す。図から、トンネル掘削による地盤変状は、非常に小さいことが分かる。最大値は、計測断面①で天端位置から直上2.0mで6.5mm、計測断面②で天端位置から直上1.0mで約9mmとなっている。本計測断面①②は、それぞれトンネル天端から12～14m上部に既設構造物として地下鉄が存在しており、地下鉄下面付近の計測点と地表面沈下がほぼ同様な沈下量となっており、地下鉄および上部の地山が全体的に沈下していることが分かる。また、計測断面③は天端位置から直上1.0mで約5.2mm、計測断面④で天端位置から直上1.0mで約5.2mmの沈下量となっている。切羽距離と地盤変状の関係は、概ね切羽前方の約1.5D付近付近から変化が現れ始め、若干の隆起傾向を示した後に切羽後方約4Dでほぼ収束傾向にある。なお、切羽前方1D付近からの隆起は、シールド施工時の切羽の圧力管理、掘削土量の掘削管理などの掘進管理状況により生じたものと考えられる。

(2) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

トンネルの横断方向の地表面・地中沈下量の分布を図－2.20 (I)～(4)に示す。ここで、図中に示した分布図の計測データは、図－2.19に示した最終の沈下量である。図より、沈下量は他の計測結果と同様な傾向で、トンネル中心で最も大きく、トンネル側方へ離れるに従って小さくなる傾向を示す。また、横断方向への影響は、トンネル下端から45°の傾きで延ばした影響範囲内で比較的大きな沈下があることが分かる。

(3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

最終沈下量で正規化したグラフを図－2.21 (I)～(9)に示す。ここで、最終沈下量を切羽が通過後約7Dの時とした。また、最終沈下量、切羽位置での沈下量および最終沈下量との比の一覧を表－2.4に示す。これによると、天端位置からトンネル直上の沈下計から、最終沈下量を切羽後方約7Dの時点で考えると、切羽が通過する以前に最終沈下量の約1～2割が沈下していることが分かる。

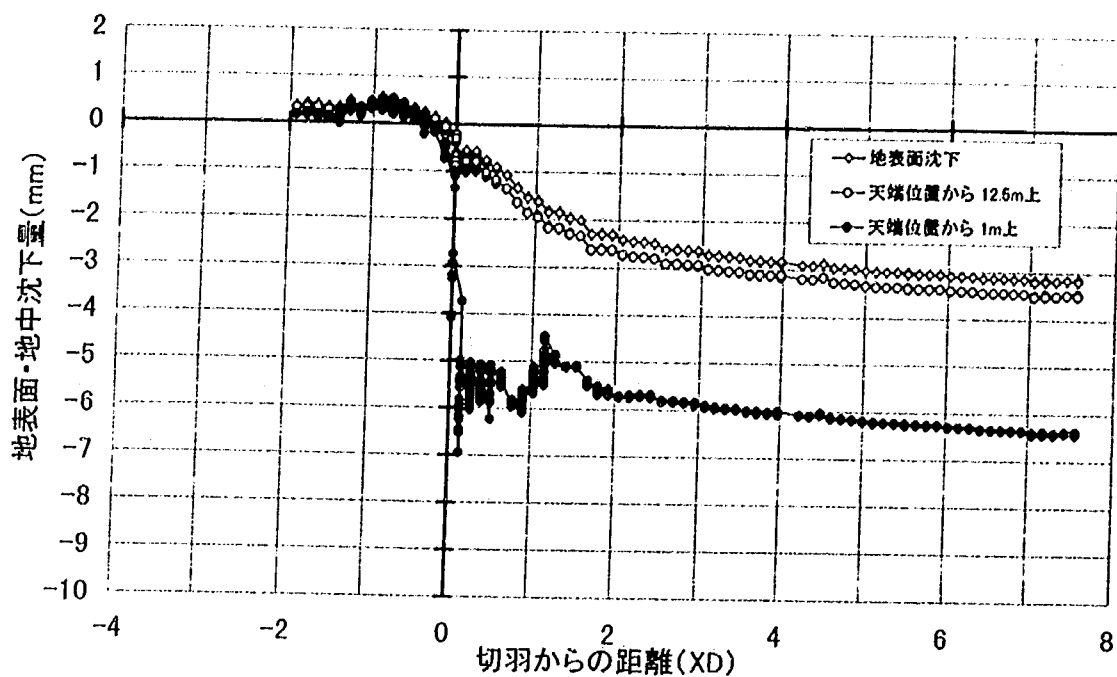


図-2.19(1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面①N0.1)

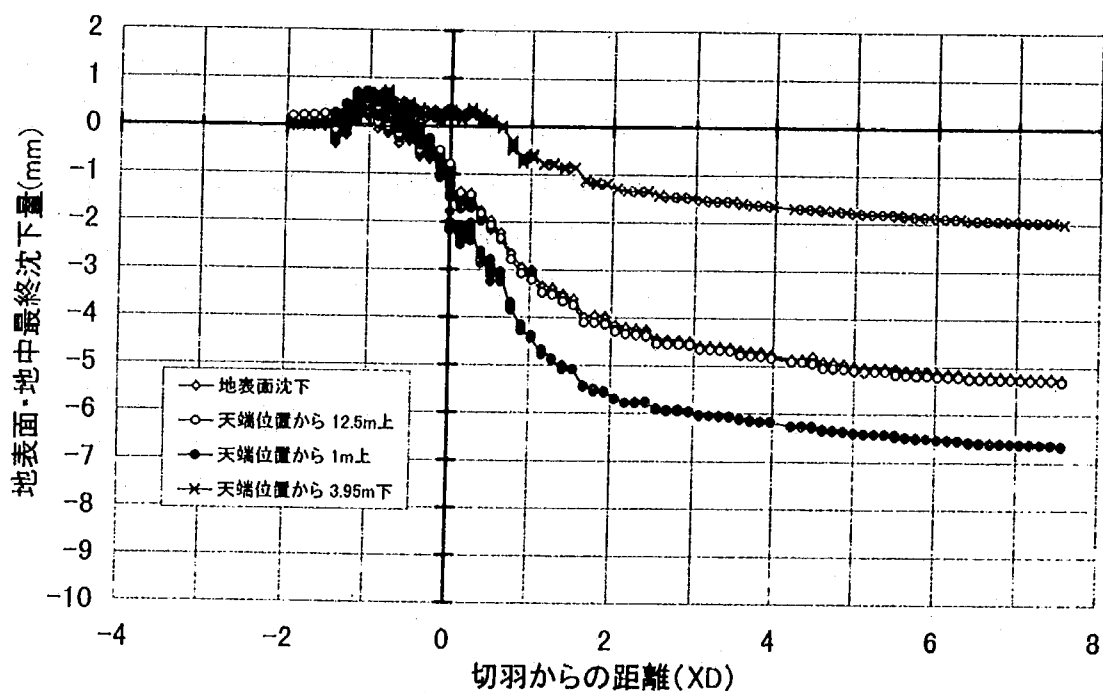


図-2.19(2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面①N0.2)

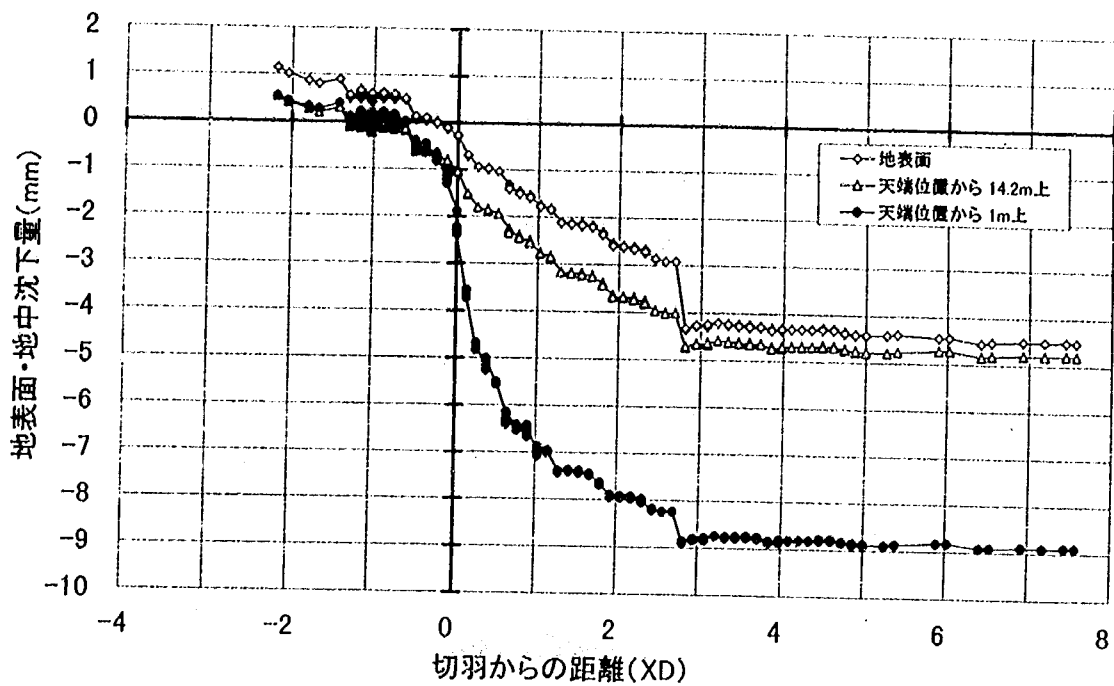


図- 2. 19 (3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面②N0. 1)

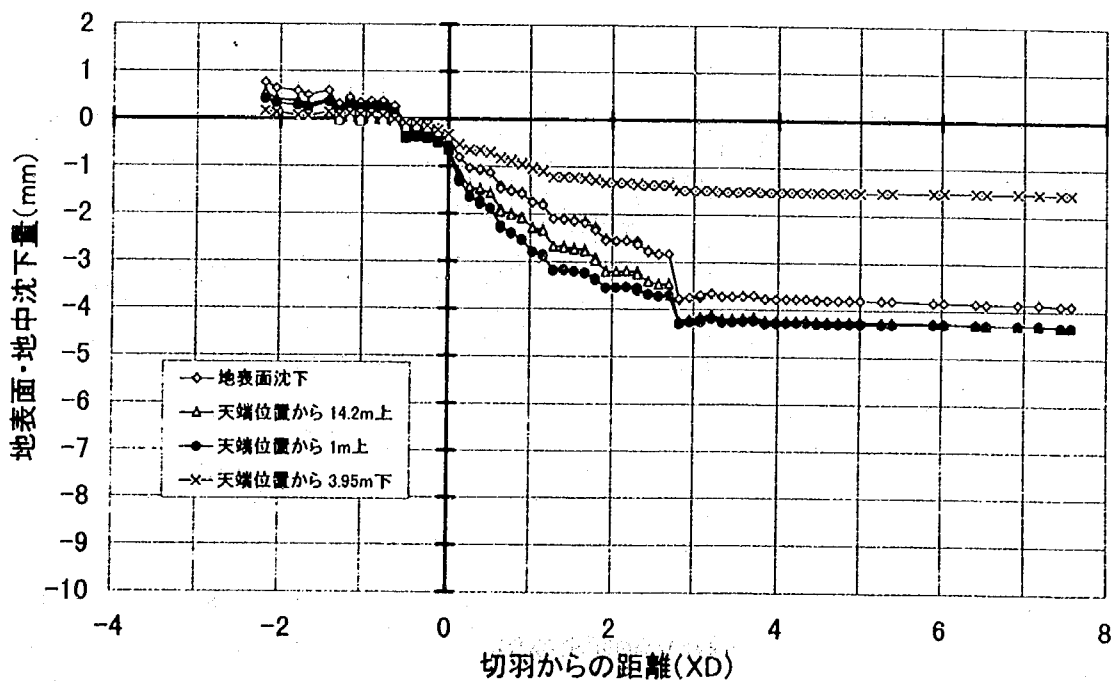


図- 2. 19 (4) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面②N0. 2)

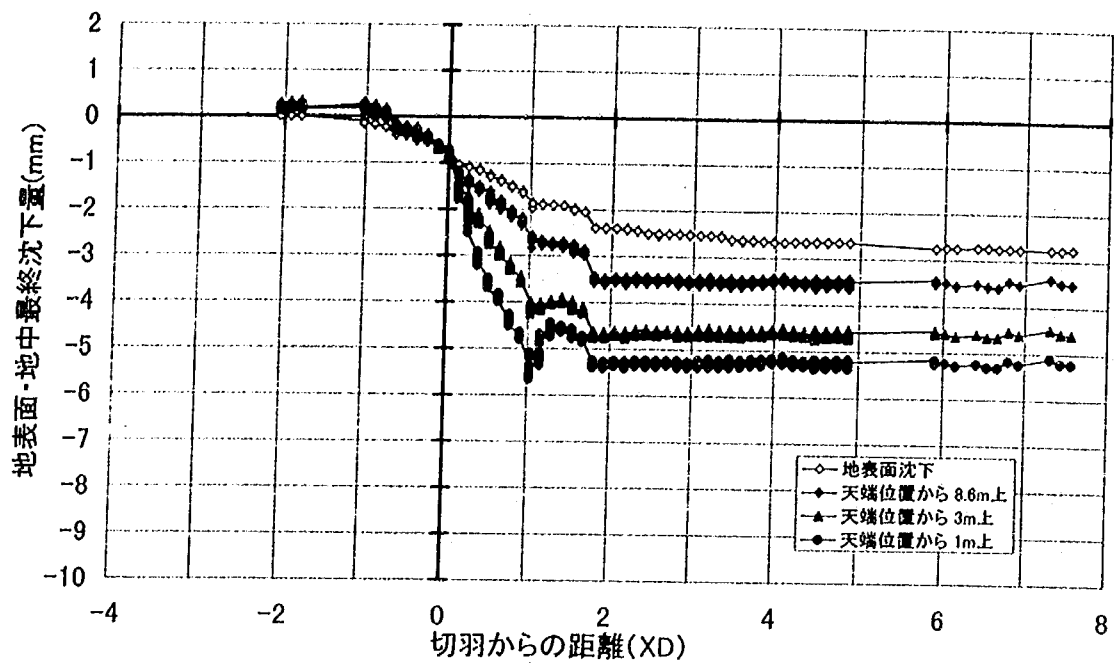


図-2.19(5) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面③NO.1)

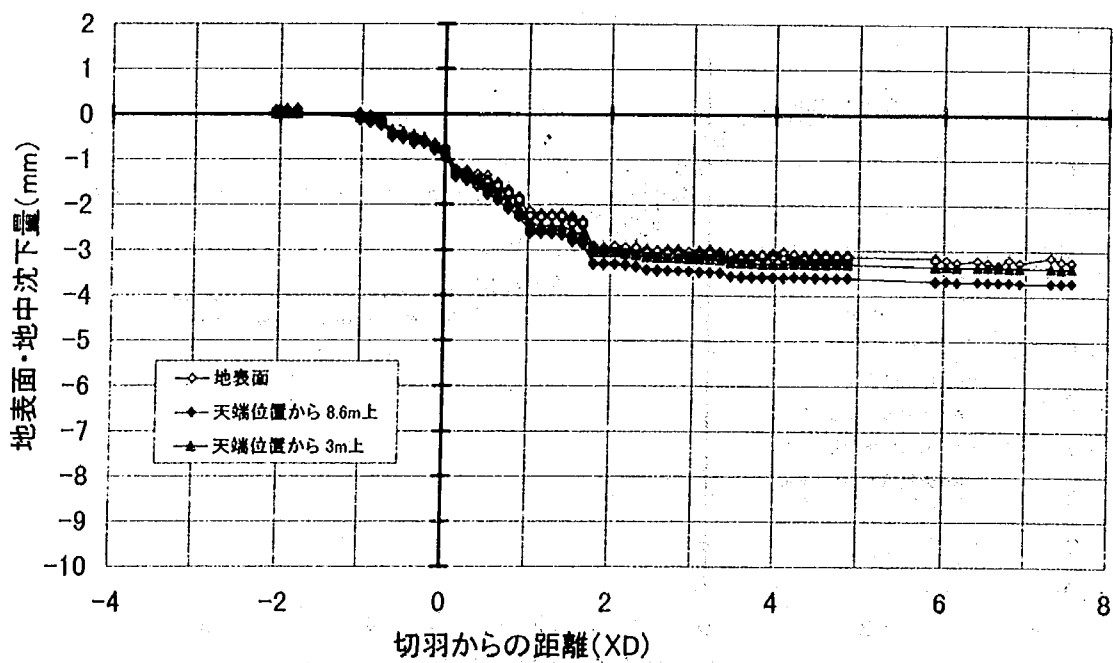
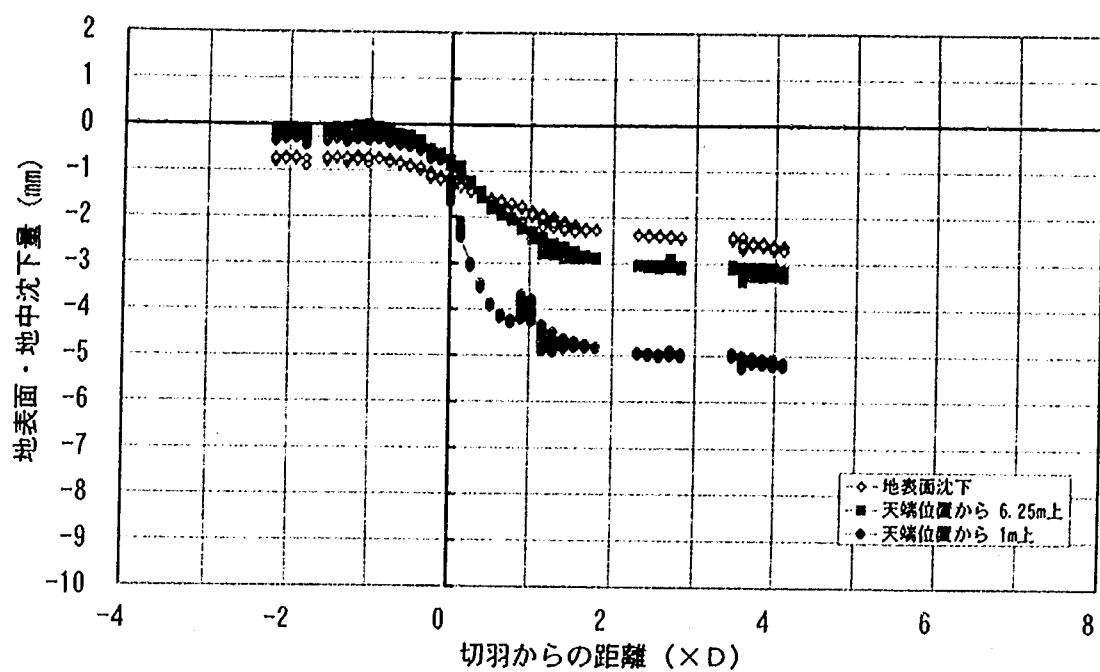
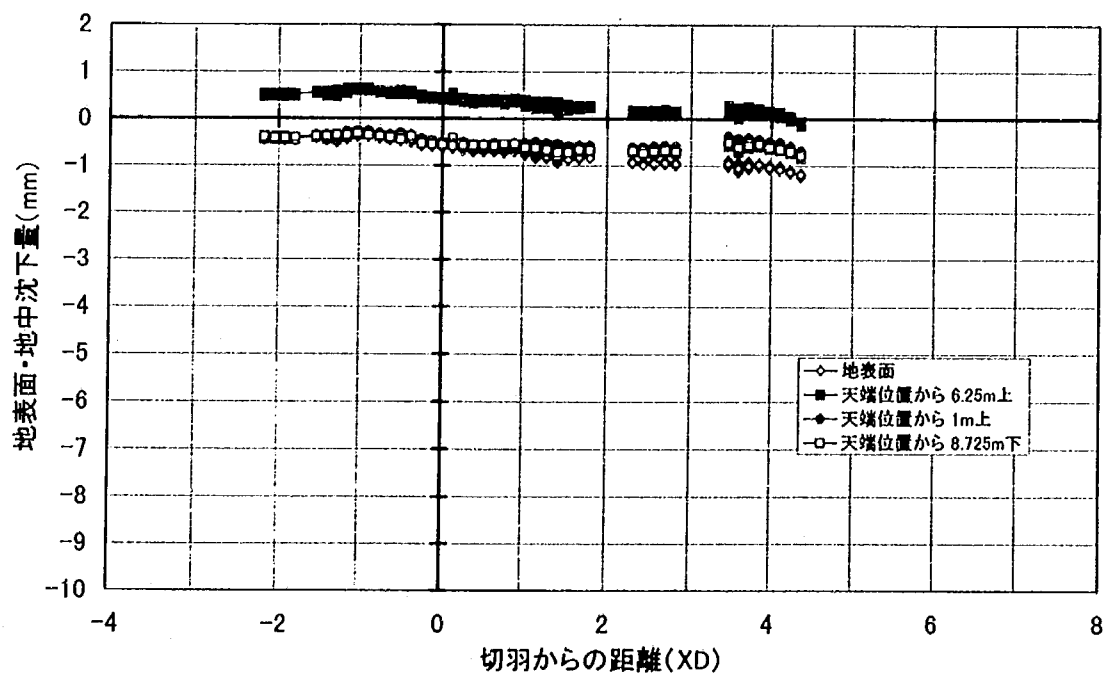


図-2.19(6) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面③NO.2)



図－2.19 (7) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面④N0.1)



図－2.19 (8) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面④N0.2)

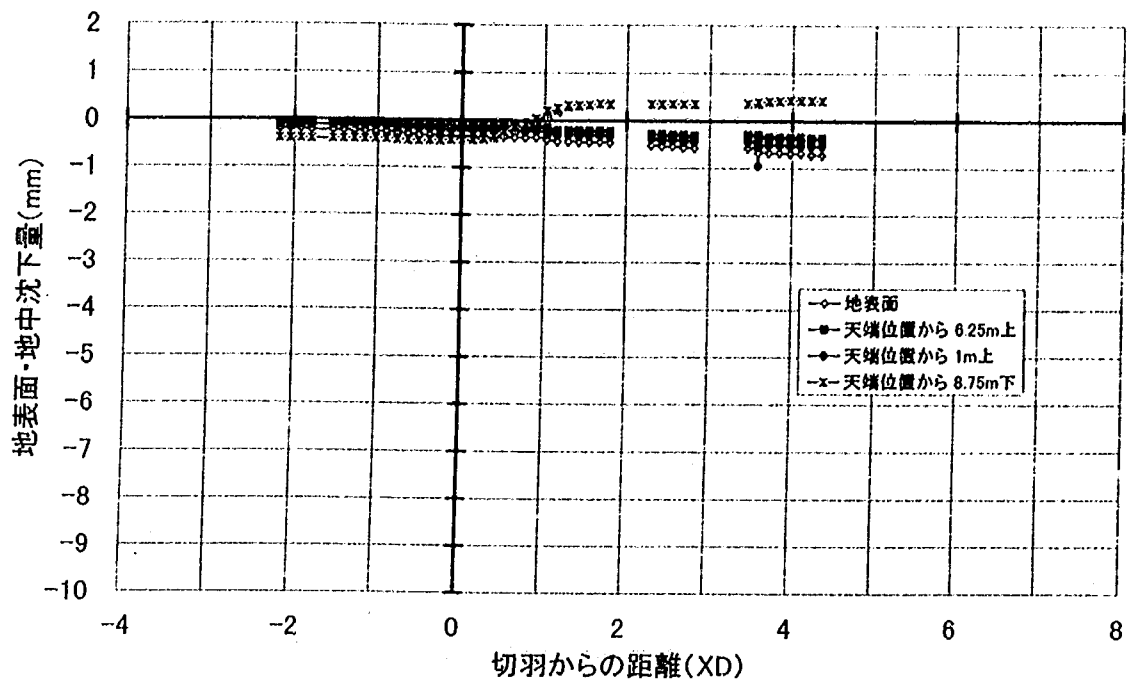


図-2.19(9) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面④N0.3)

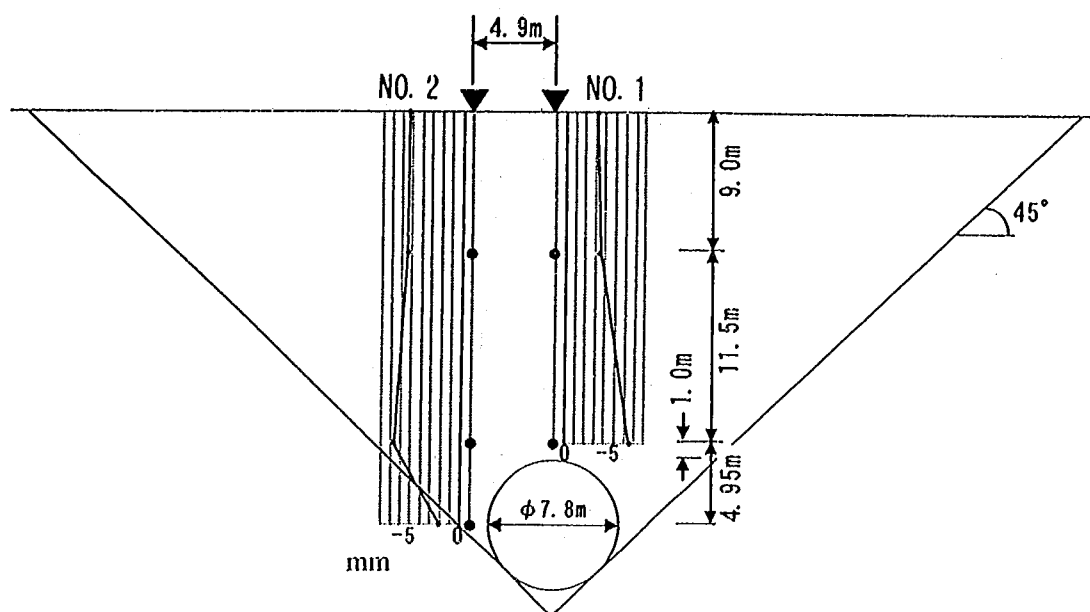


図-2.20 (1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量 (計測断面①; 切羽位置約7D)

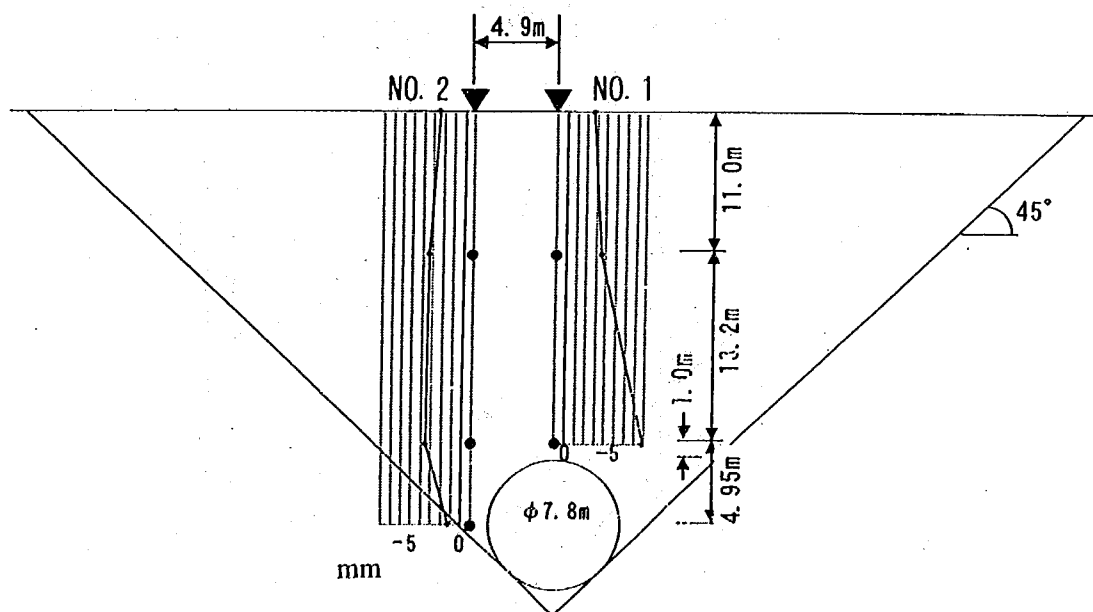
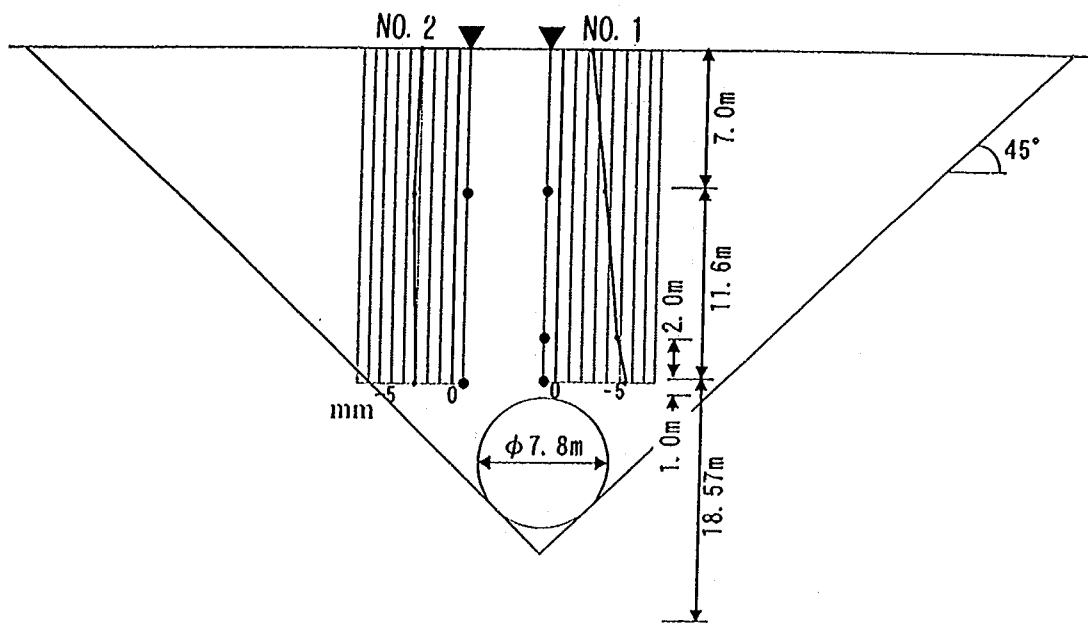
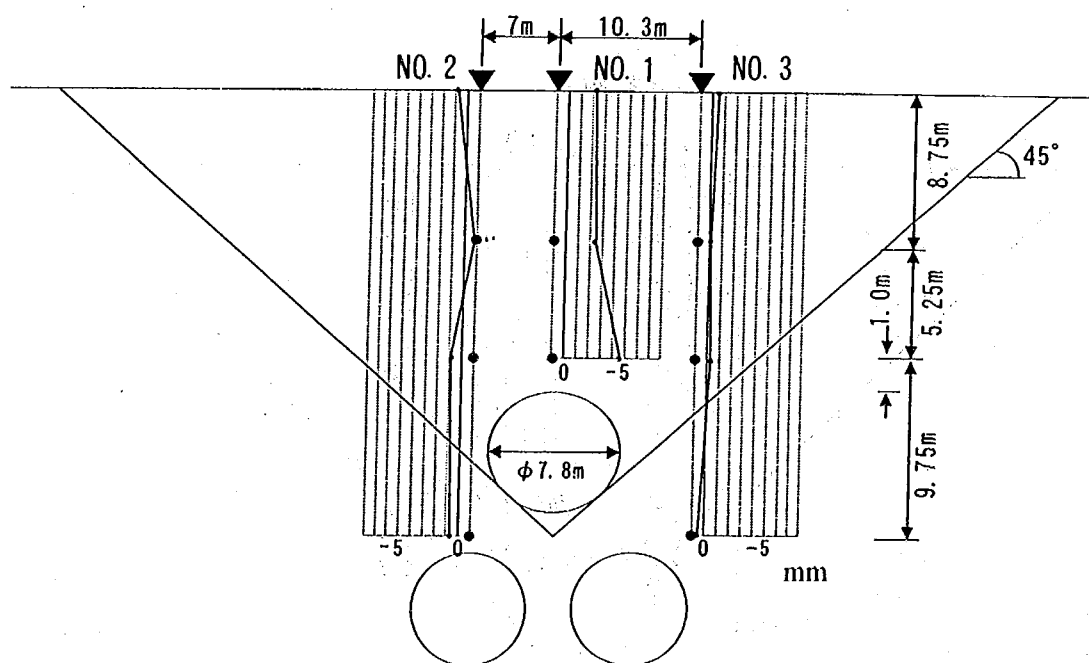


図-2.20 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量 (計測断面②; 切羽位置約7D)



図－ 2. 20 (3) 地表面・地中沈下量の最終沈下量（計測断面③；切羽位置約7D）



図－ 2. 20 (4) 地表面・地中沈下量の最終沈下量（計測断面④；切羽位置約5D）

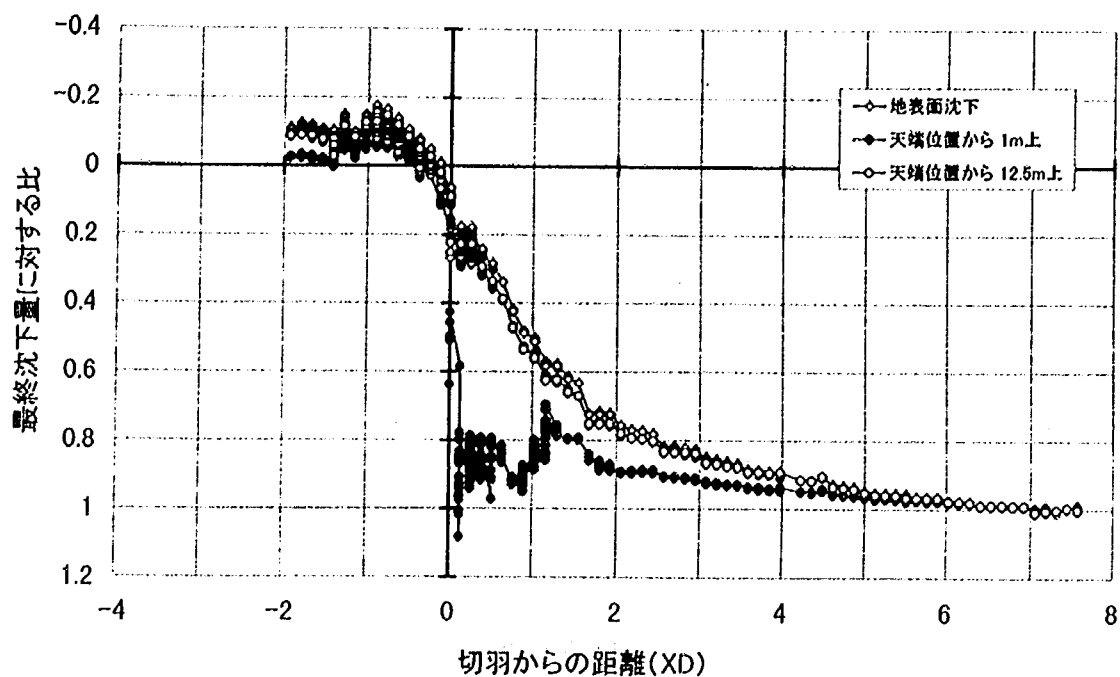


図-2.21(1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面①N0. 1)

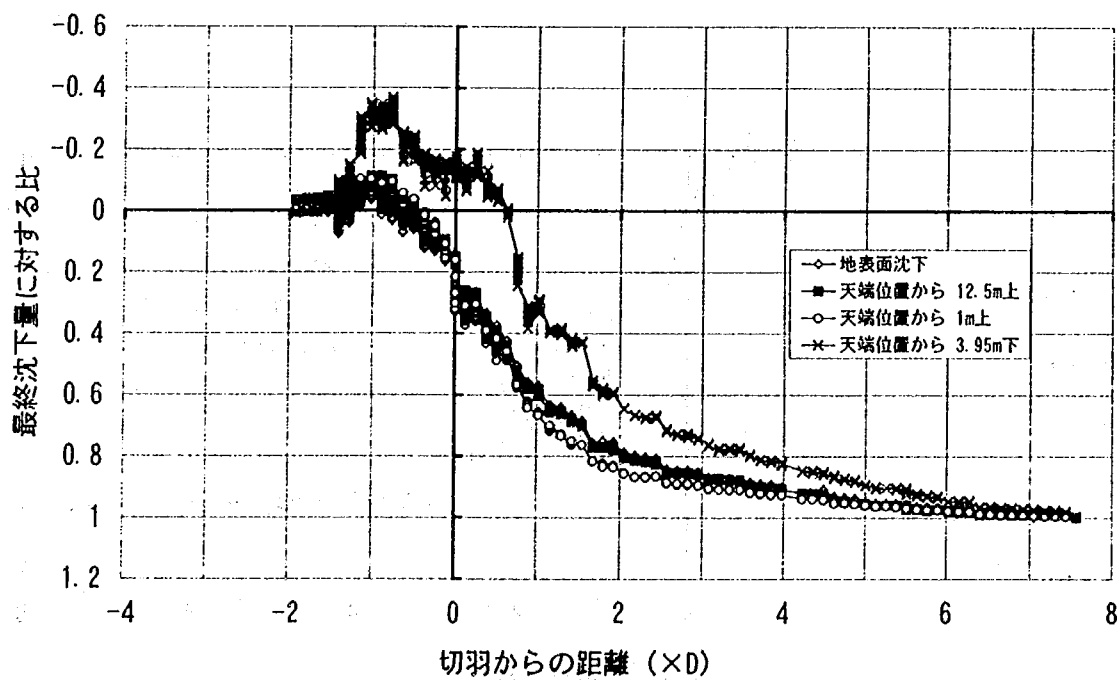


図-2.21(2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面①N0. 2)

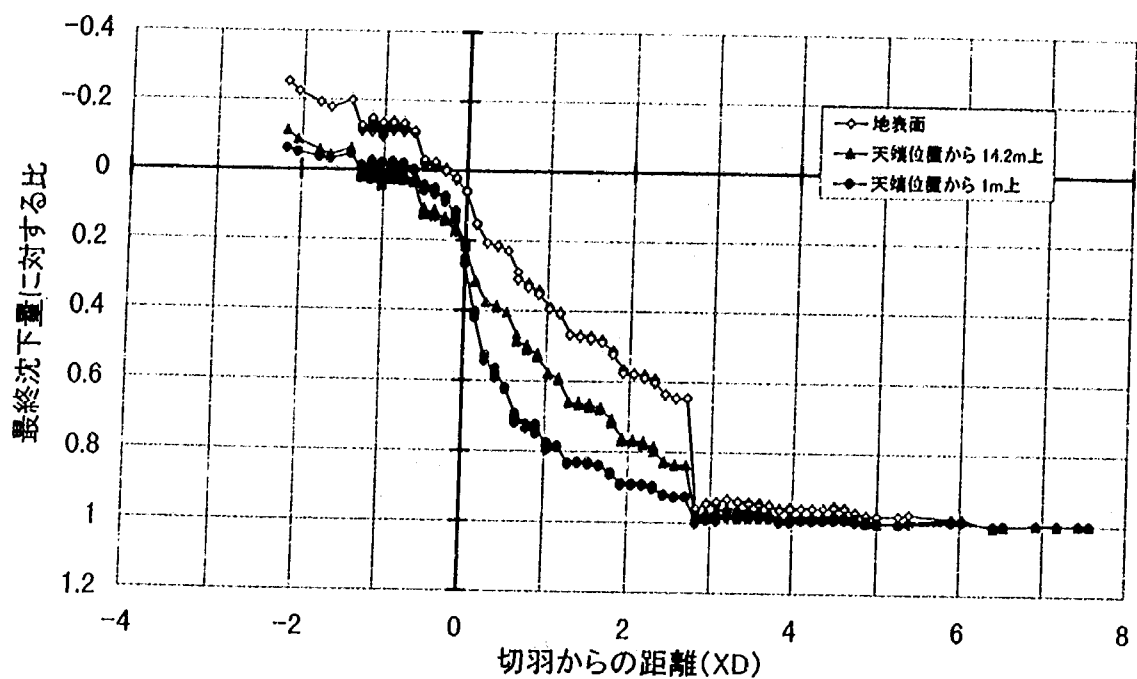


図- 2. 21 (3) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面②N0. 1)

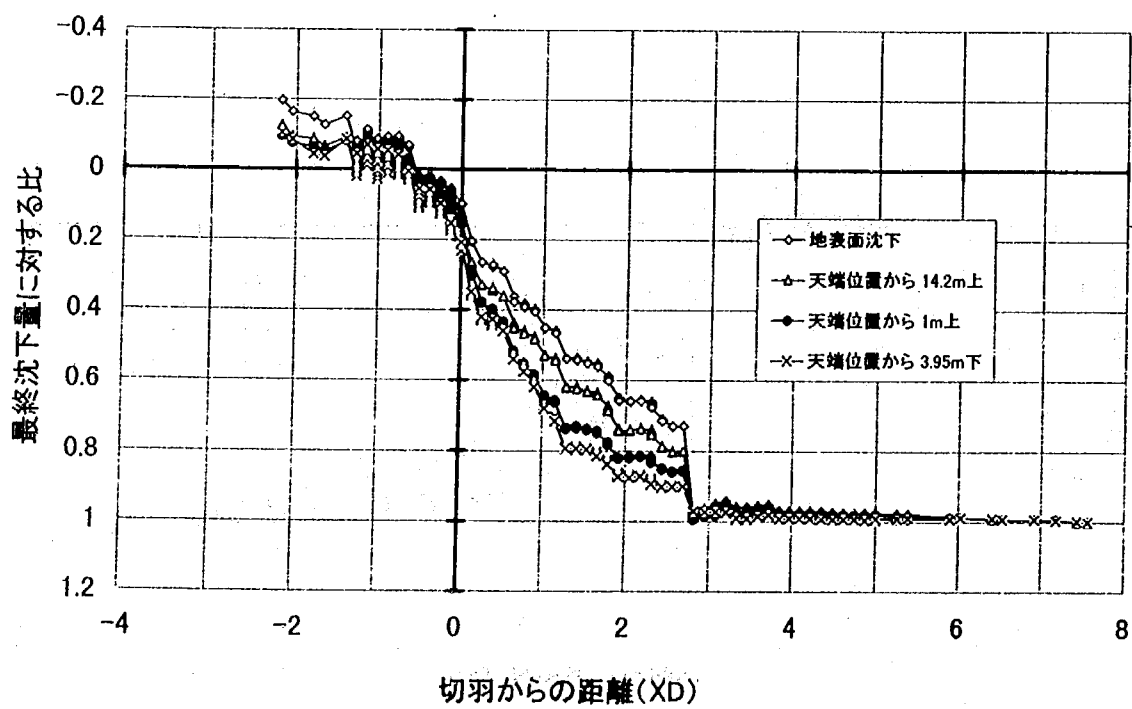
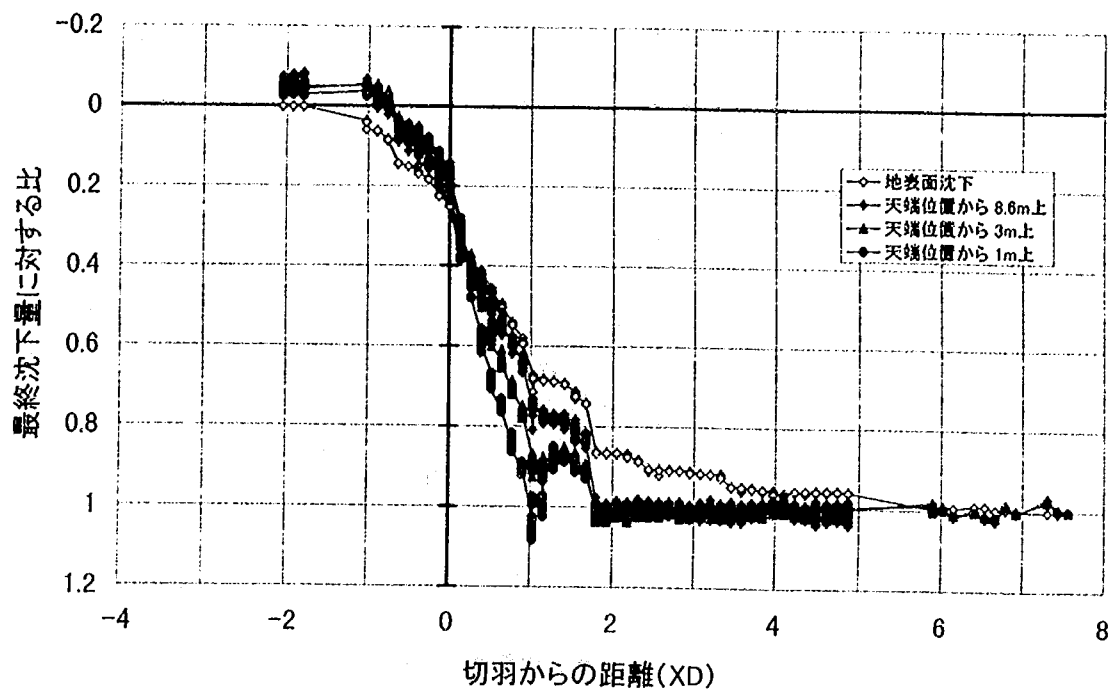
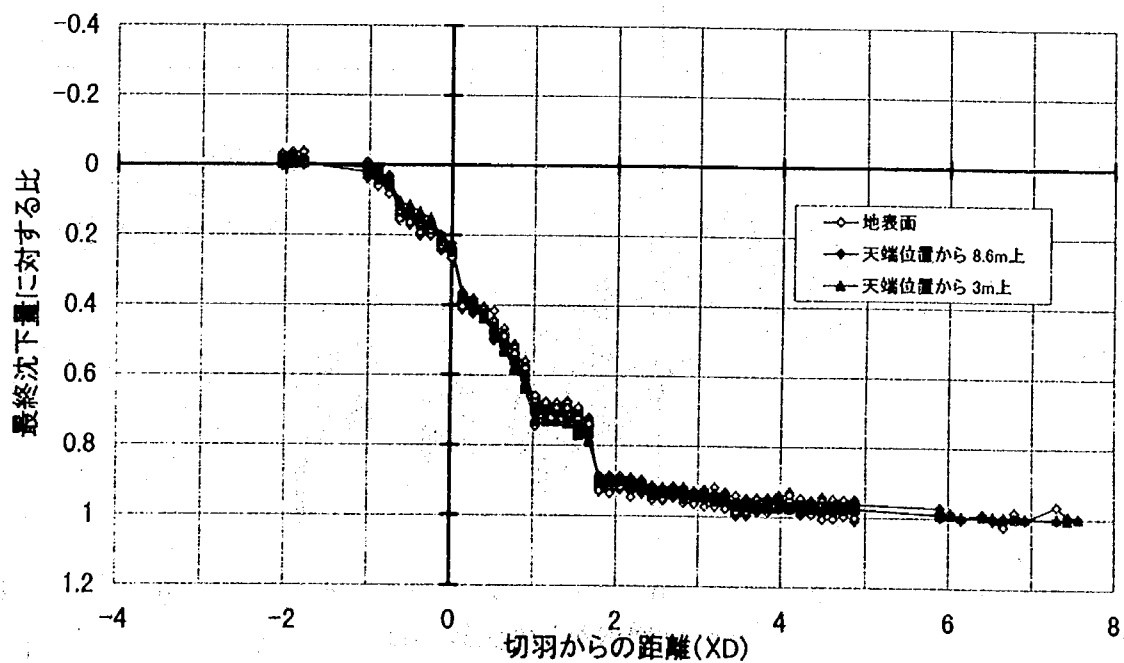


図- 2. 21 (4) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面②N0. 2)



図－2.21(4) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比（計測断面③N0.1）



図－2.21(5) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比（計測断面③N0.2）

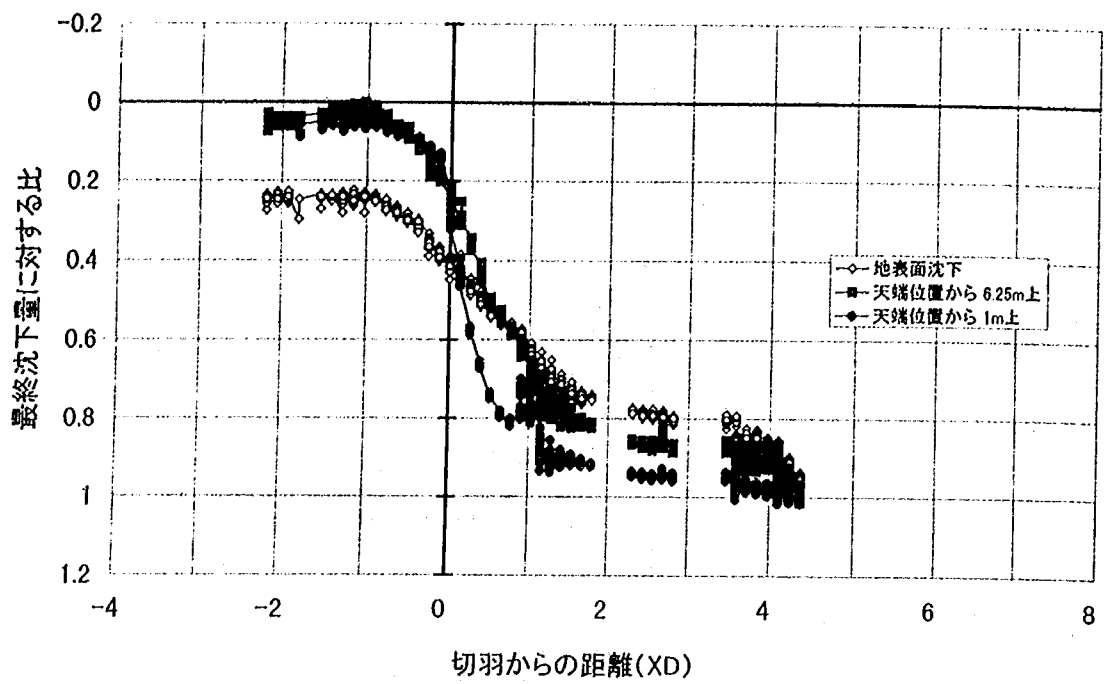


図-2.21 (6) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面④N0. 1)

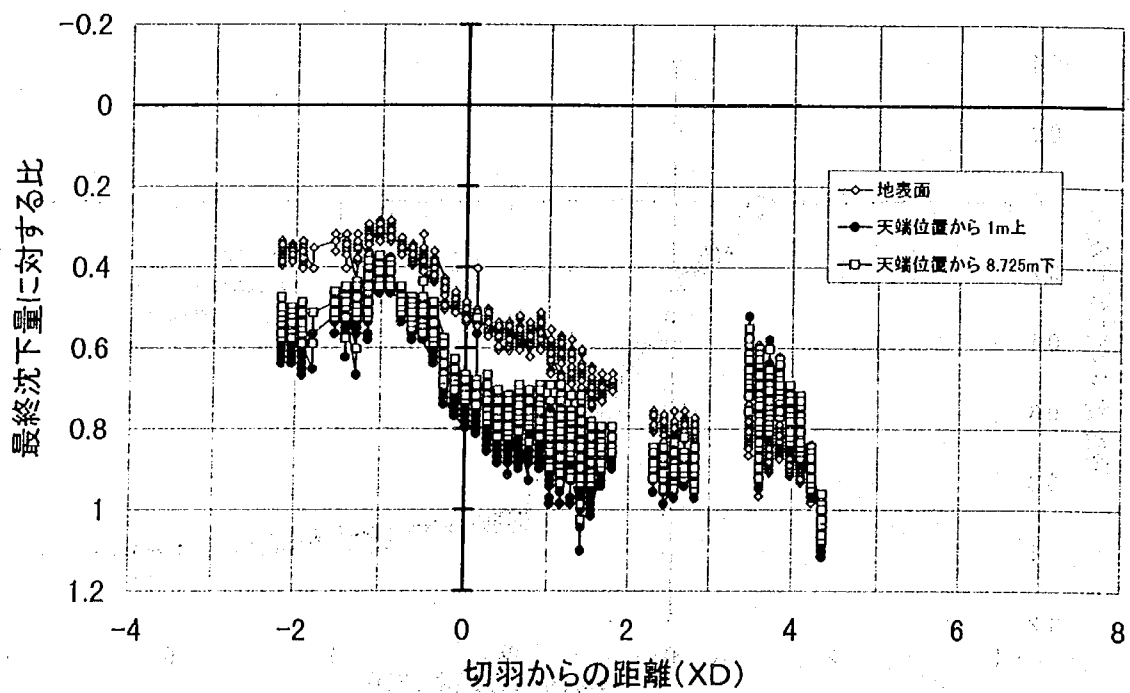


図-2.21 (7) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面④N0. 2)

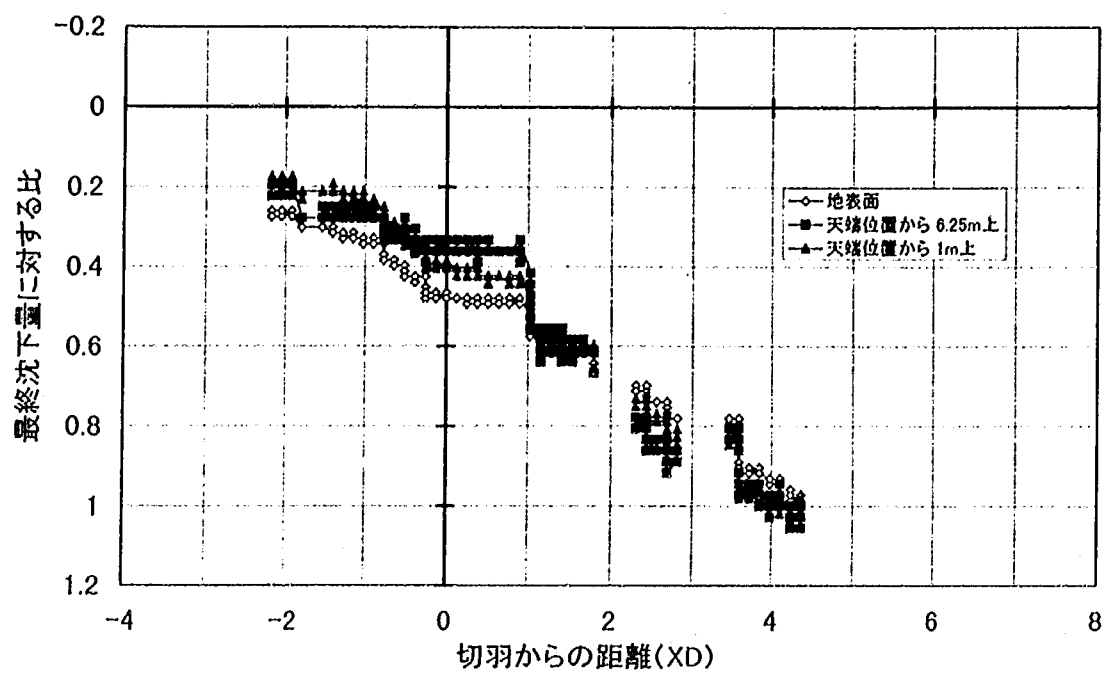


図-2.21(9) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面④N0.3)

表-2.4 Cシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表

Cシールド鉛直変位計測データ(最終沈下量)(mm)

計測断面	日付	切羽位置(リング)	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から12.5m上	天端位置から1m上	
①	96/06/29-09:22	75	7.56	NO.1	-3.17	-3.48	-8.41	
				NO.2	-5.28	-5.31	-8.67	天端位置から3.95m下
計測断面	日付	リング	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から14.2m上	天端位置から1m上	
②	96/08/24-11:00	199	7.56	NO.1	-4.51	-4.79	-8.89	
				NO.2	-3.89	-4.33	-4.34	天端位置から3.95m下
計測断面	日付	リング	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から8.6m上	天端位置から3m上	天端位置から1m上
③	96/10/18-21:00	630	7.56	NO.1	-2.78	-3.50	-4.59	-5.22
				NO.2	-3.25	-3.70	-3.38	
計測断面	日付	切羽位置(リング)	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から8.25m上	天端位置から1m上	
④	96/12/02-15:00	910	4.36	NO.1	-3.04	-3.53	-5.26	
				NO.2	-1.19	-0.07	-0.69	天端位置から8.75m下
				NO.3	-0.73	-0.36	-0.52	-0.78
								0.43

Cシールド鉛直変位計測データ(切羽位置沈下量)(mm)

計測断面	日付	切羽位置(リング)	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から12.5m上	天端位置から1m上	
①	96/06/20-16:20	16	0.00	NO.1	-0.27	-0.39	-1.08	
				NO.2	-0.97	-0.94	-1.21	天端位置から3.95m下
計測断面	日付	リング	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から14.2m上	天端位置から1m上	
②	96/08/08-16:16	140	0.00	NO.1	-0.29	-1.03	-1.88	
				NO.2	-0.39	-0.65	-0.60	天端位置から3.95m下
計測断面	日付	リング	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から8.6m上	天端位置から3m上	天端位置から1m上
③	96/10/11-03:03	571	0.00	NO.1	-0.68	-0.82	-0.87	-0.89
				NO.2	-0.85	-0.90	-0.77	
計測断面	日付	切羽位置(リング)	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から6.25m上	天端位置から1m上	
④	96/11/21-11:14	876	0.00	NO.1	-1.22	-0.85	-1.21	
				NO.2	-0.62	0.40	-0.55	天端位置から8.75m下
				NO.3	-0.34	-0.12	-0.21	-0.56
								-0.41

Cシールド鉛直変位計測データ(切羽位置通過時最終沈下量との比)

計測断面	日付	切羽位置(リング)	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から12.5m上	天端位置から1m上	
①	96/06/20-16:20	16	0.00	NO.1	0.085	0.112	0.165	
				NO.2	0.184	0.177	0.182	天端位置から3.95m下
計測断面	日付	リング	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から14.2m上	天端位置から1m上	
②	96/08/08-16:16	140	0.00	NO.1	0.065	0.216	0.212	
				NO.2	0.100	0.151	0.138	天端位置から3.95m下
計測断面	日付	リング	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から8.6m上	天端位置から3m上	天端位置から1m上
③	96/10/11-03:03	571	0.00	NO.1	0.246	0.235	0.190	0.233
				NO.2	0.261	0.244	0.228	
計測断面	日付	切羽位置(リング)	切羽からの距離(×D)	NO.1	地表面	天端位置から6.25m上	天端位置から1m上	
④	96/11/21-11:14	876	0.00	NO.1	0.401	0.241	0.230	
				NO.2	0.521	-5.714	0.797	天端位置から8.75m下
				NO.3	0.460	0.333	0.404	0.718
								-0.953

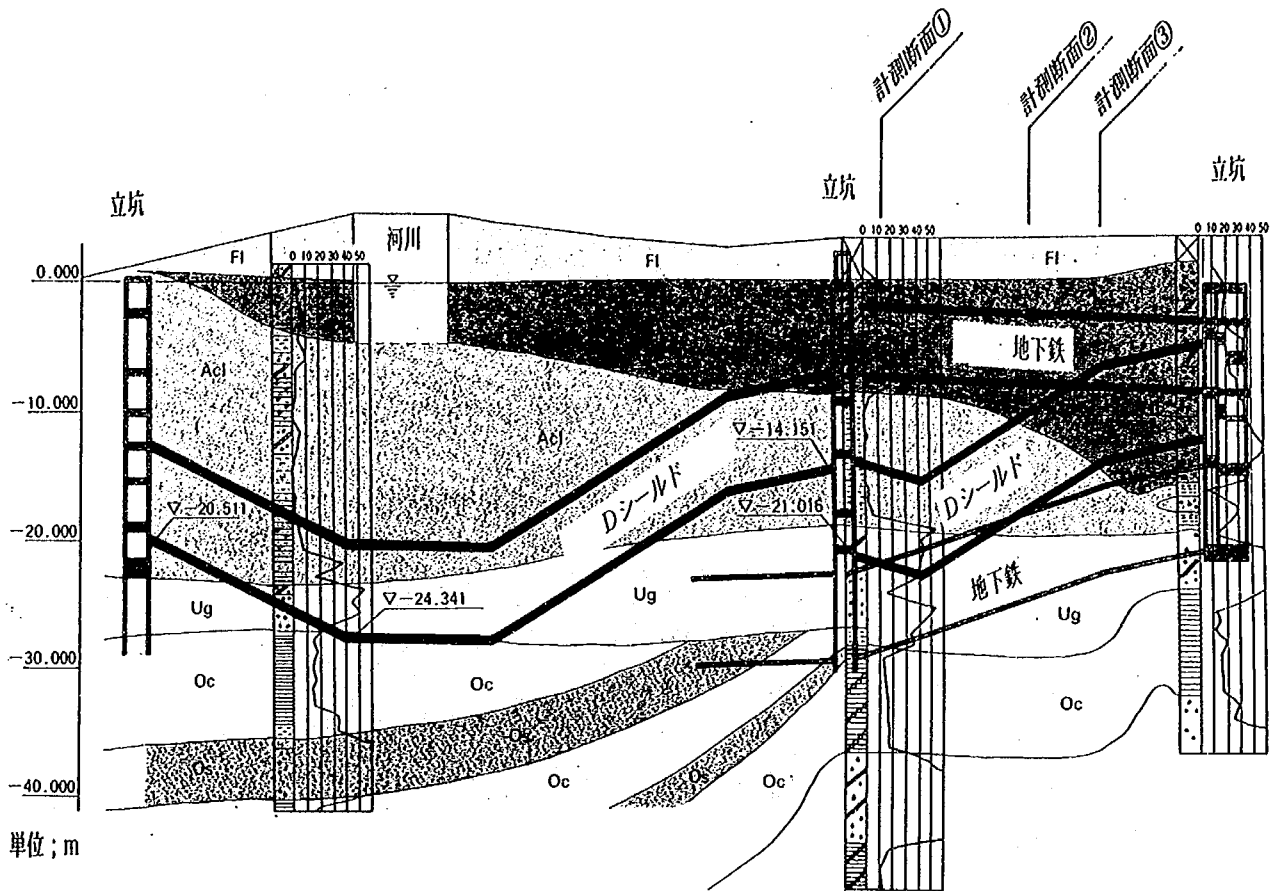
変位の方向; プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

2.5 Dシールド

2.5.1 計測トンネルの概要

(1) トンネルの概要

本現場計測トンネルは、国道直下に位置するシールドで、セグメント外径7.85m（セグメント桁高32.5cm）、延長1,020mの土被り8.27～24.55mのシールドトンネルである。本工事の特徴は、交通量の多い国道直下での工事となるとともに、本トンネルに近接して地下鉄などの重要構造物の存在、一級河川を横断するなどがある。図－2.22に概要図を示す。



図－2.22 Dトンネルの概要図

(2) 地質状況

地質は、地表部に表土として0.5～2.5m程度の層厚があり、その下部にN値が20～30程度の沖積砂層で中～粗砂が主体一部粘性土との互層となっている。その下部にN値0～5程度の極めて軟弱な沖積粘性土がある。その下部にN値35以上の締まった洪積砂礫層が存在する。シールドトンネルは、沖積砂層、沖積粘性土、洪積砂礫層を通過する。

(3) 地盤変状の計測

地盤変状の計測は、図-2.23(1)～(3)に示すように計測断面①～③の3箇所における計測断面を設けて実施しており、主な計測は層別沈下計および傾斜計による水平変位である。計測断面①は、トンネル天端から7.376m上部およびトンネル両側部下部に地下鉄構造物が近接している。また、計測断面②③は、トンネルの斜め上部に地下鉄トンネル縦断方向に併設し、トンネル両側部下部にも地下鉄が近接している。

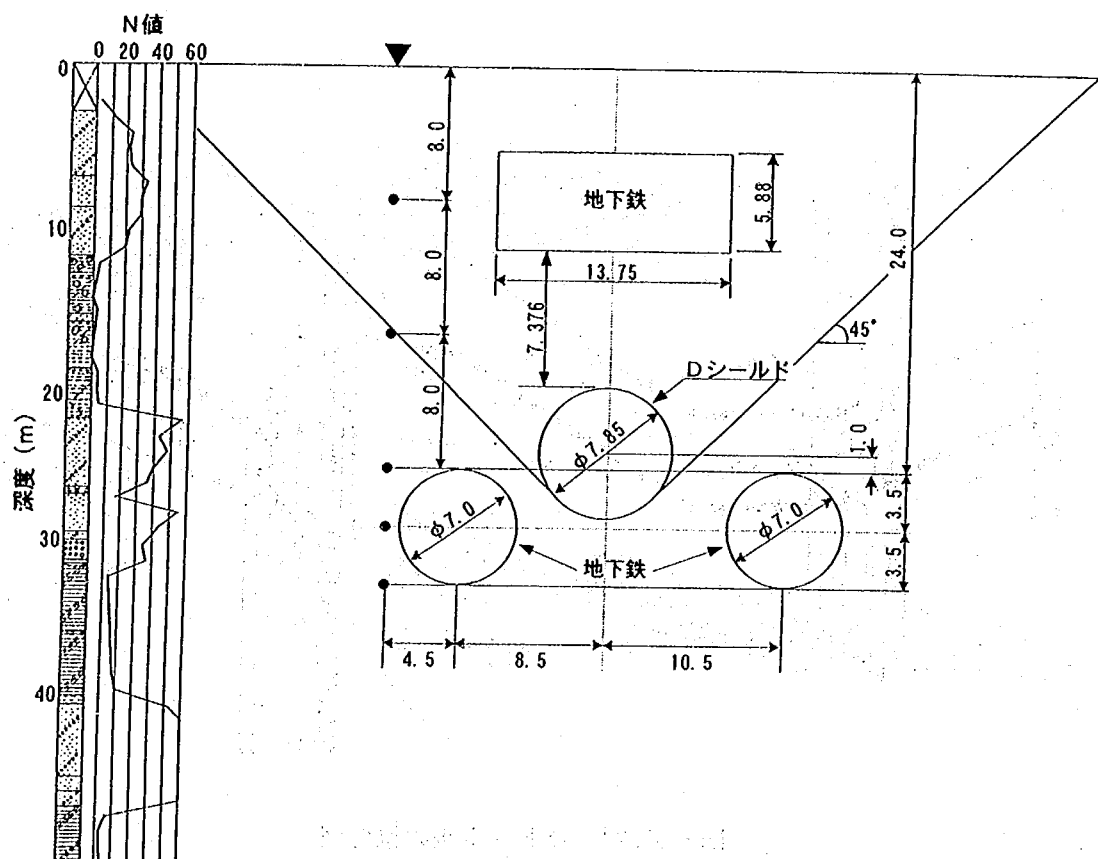


図-2.23(1) Dトンネルにおける計測断面における計測機器の位置 (計測断面①)

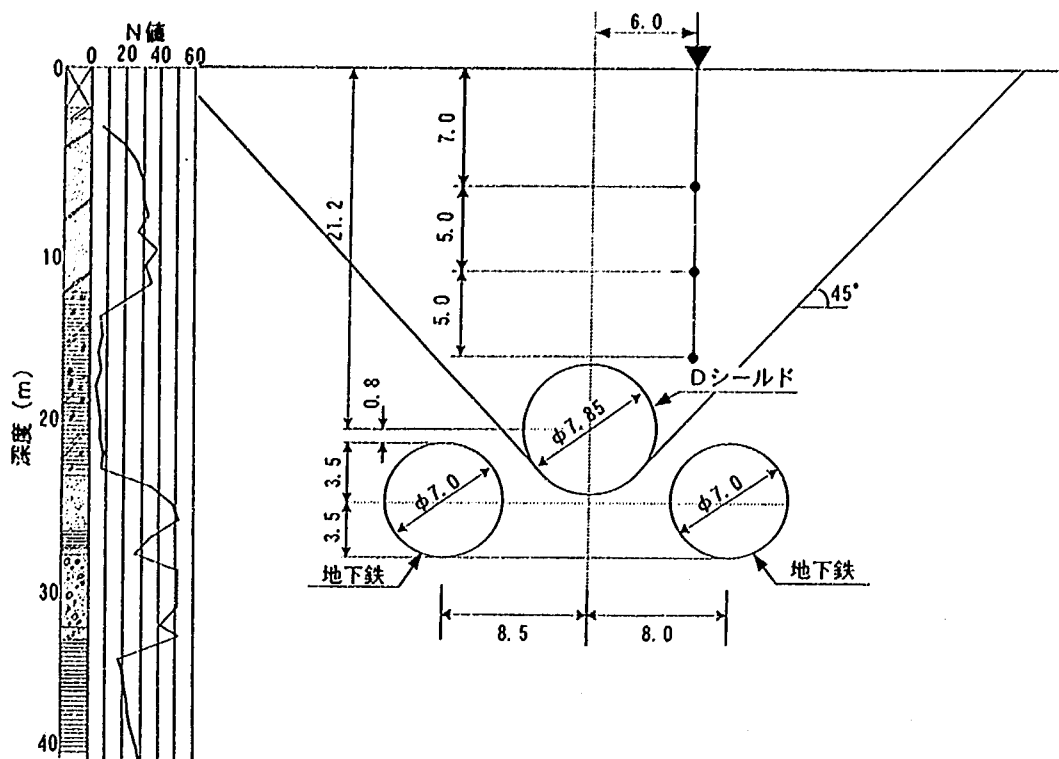


図- 2. 23 (2) Dトンネルにおける計測断面における計測機器の位置 (計測断面②)

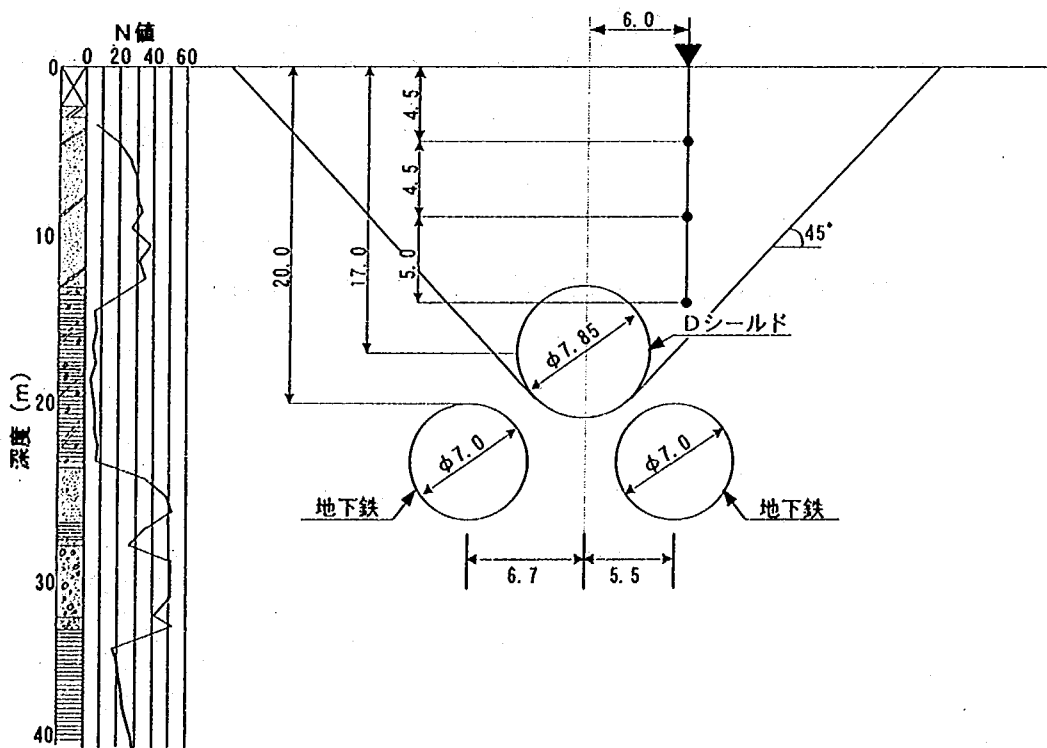
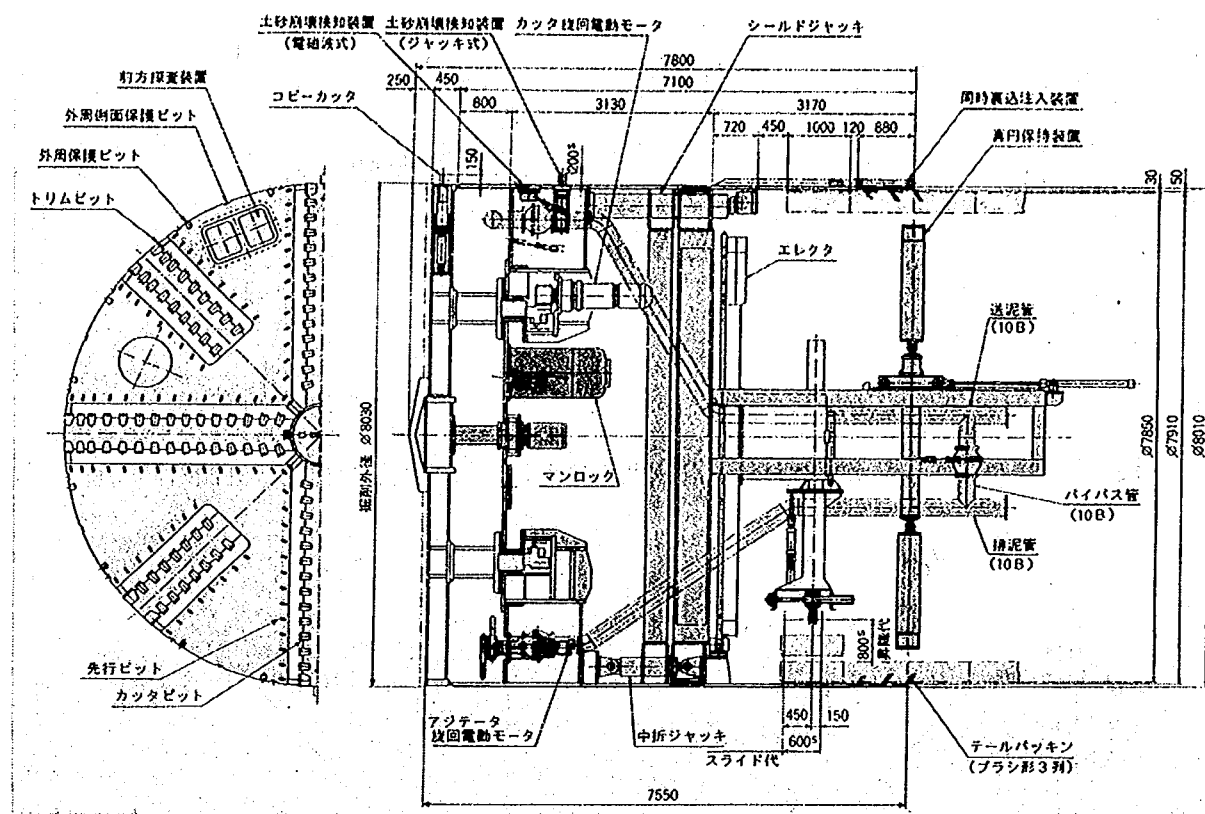


図- 2. 23 (3) Dトンネルにおける計測断面における計測機器の位置 (計測断面③)

(4) 掘削方式と施工概要

シールドトンネルの掘削は、泥土加圧式シールドであり、施工に用いたシールド機の概要図を図-2.24に示す。本トンネルでは、トンネル外径とシールド機外径の差からテールボイドは8.0cmであり、裏込め注入は、同時裏込め注入方式となっている。また、工事の進捗は、1日あたり5～7m程度の掘進スピードであった。



単位 ; mm

図-2.24 Dトンネルで使用したシールド機の概要図

2.5.2 計測結果

(1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の変化

切羽の進行に伴う地表面・地中沈下計の計測データの変化を図－2.25 (1)～(3)に示す。本シールドでの計測が、トンネルの直上で計測された結果ではないこと、既設の構造物の存在による影響などによって、シールドトンネル掘削に伴う地盤変状が全体的に小さい値となっている。

計測断面①は、土被り約19mの箇所での計測であり、シールドの進行に伴い、切羽前方約2から3D程度から変化が現れ、若干の隆起現象が現れている。その後、徐々に沈下が進み、地表面で、最大沈下量として約3mmが生じている。なお、切羽からの距離が約2D付近で一部のデータが急激に変化しているのは、シールド掘進が数日間停止した状態となったためであり、停止中にシールド掘進以外の要因より沈下が生じたためであると考えられる。

計測断面②は、土被り約17mの箇所での計測であり、トンネル計測断面では、トンネル天端付近から地表面付近までの沈下はほぼ同様な値となっており、トンネル掘削によって周辺地盤が全体的に変位したものと考えられる。

計測断面③は、土被り約13mの箇所での計測であり、沈下量の値は異なるものの、トンネル天端位置から上の各計測地点の沈下傾向は、計測断面②と同様にほぼ同様な値を示し、トンネル上部の周辺地盤は全体的に沈下していることが分かる。したがって、本トンネルでの地質条件のような場合で、周辺地盤の沈下は約17m程度までの比較的浅い土被りの条件では、トンネル天端付近から地表面付近までほぼ同様な沈下を示すものと考えられる。

(2) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

トンネルの横断方向の地表面・地中沈下量の分布を図－2.26 (1)～(3)に示す。ここで、図中に示した分布図の計測データは、図－2.25に示した最終の沈下量である。図より、沈下量は他の計測結果と同様な傾向で、トンネル中心で最も大きく、トンネル側方へ離れるに従って小さくなる傾向を示す。また、横断方向への影響は、トンネル下端から45°の傾きで延ばした影響範囲内で比較的大きな沈下があることが分かる。

(3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

最終沈下量で正規化したグラフを図－2.27 (1)～(2)に示す。なお、計測断面③は、切羽通過時の沈下量がないため、作成していない。ここで、最終沈下量は、図－2.26の最終時の値であり、計測断面①で約36D、計測断面②で約21D時の値である。また、最終沈下量、切羽位置での沈下量および最終沈下量との比の一覧表を表－2.5に示す。これによると、計測断面①、②でそれぞれ切羽が通過する以前に最大で最終沈下量の約2.5割が沈下していることが分かる。

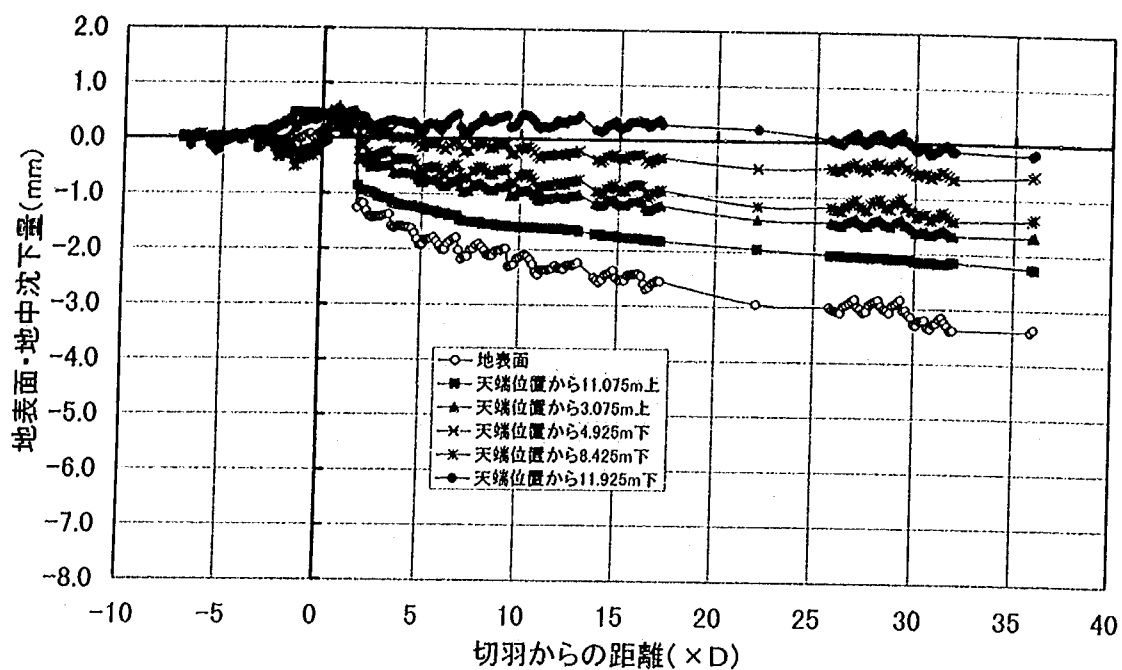


図-2.25 (1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面①)

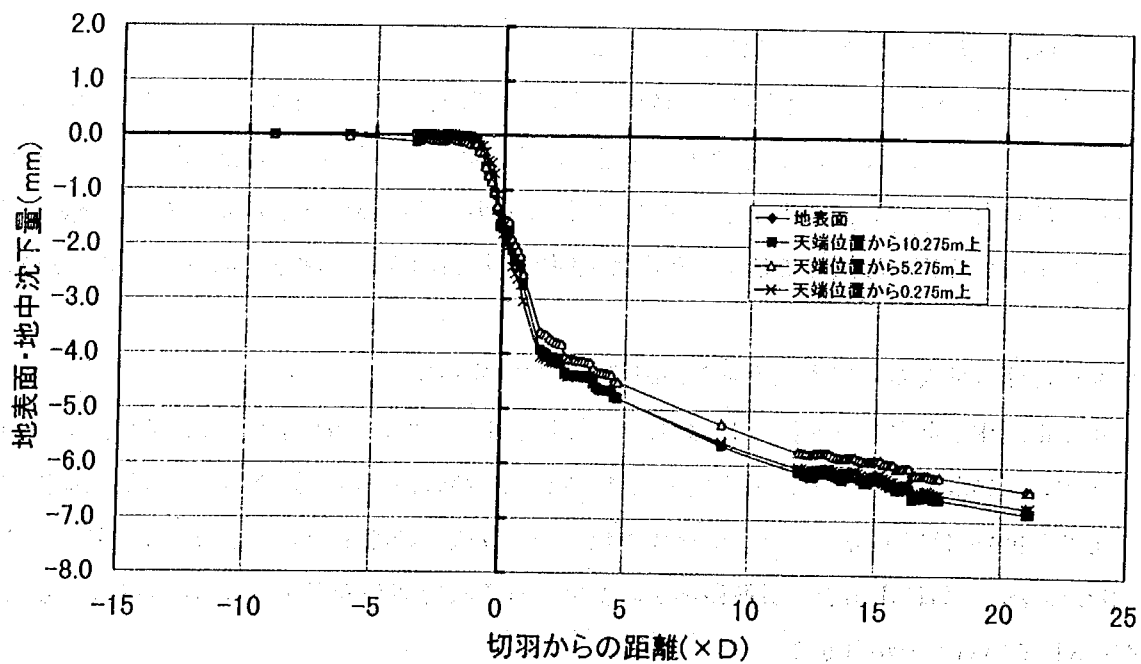


図-2.25 (2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面②)

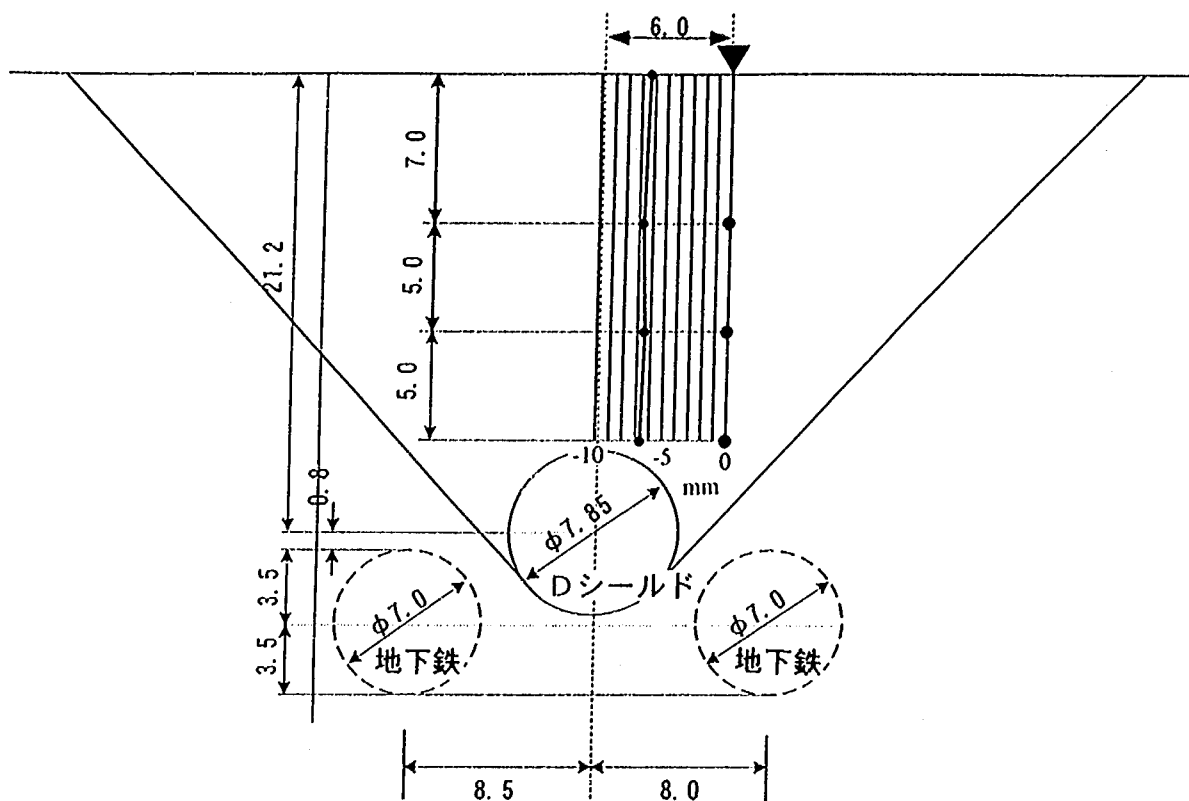


図- 2. 26 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量（計測断面②；切羽位置約21D）

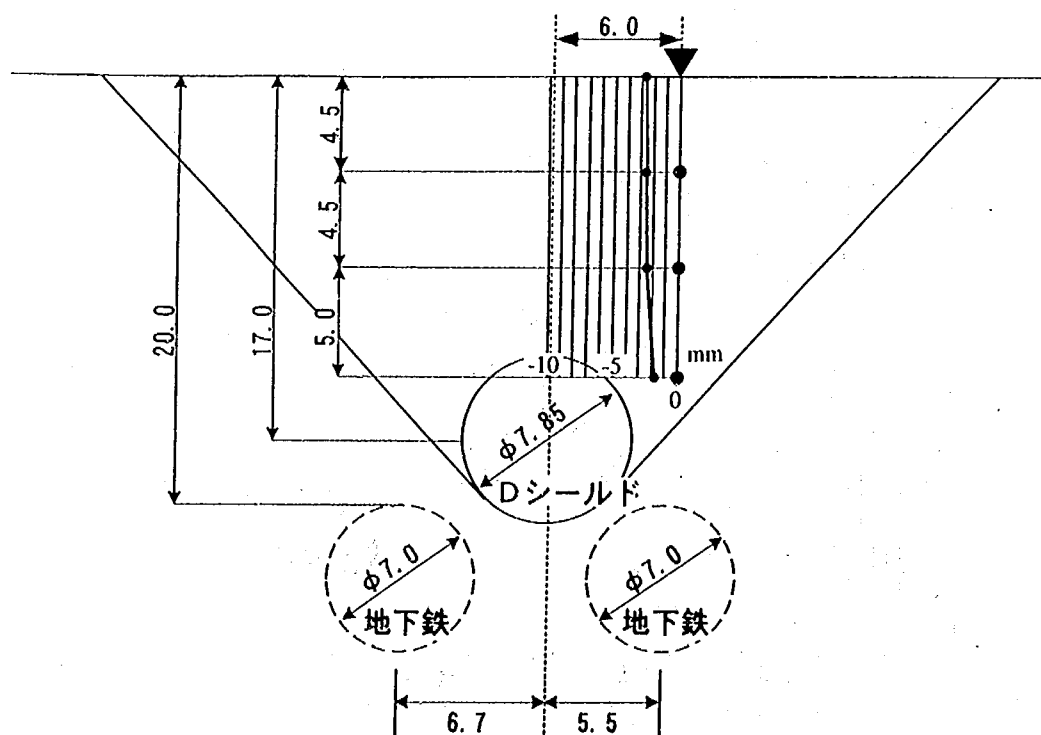


図- 2. 26 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量（計測断面③；切羽位置約13D）

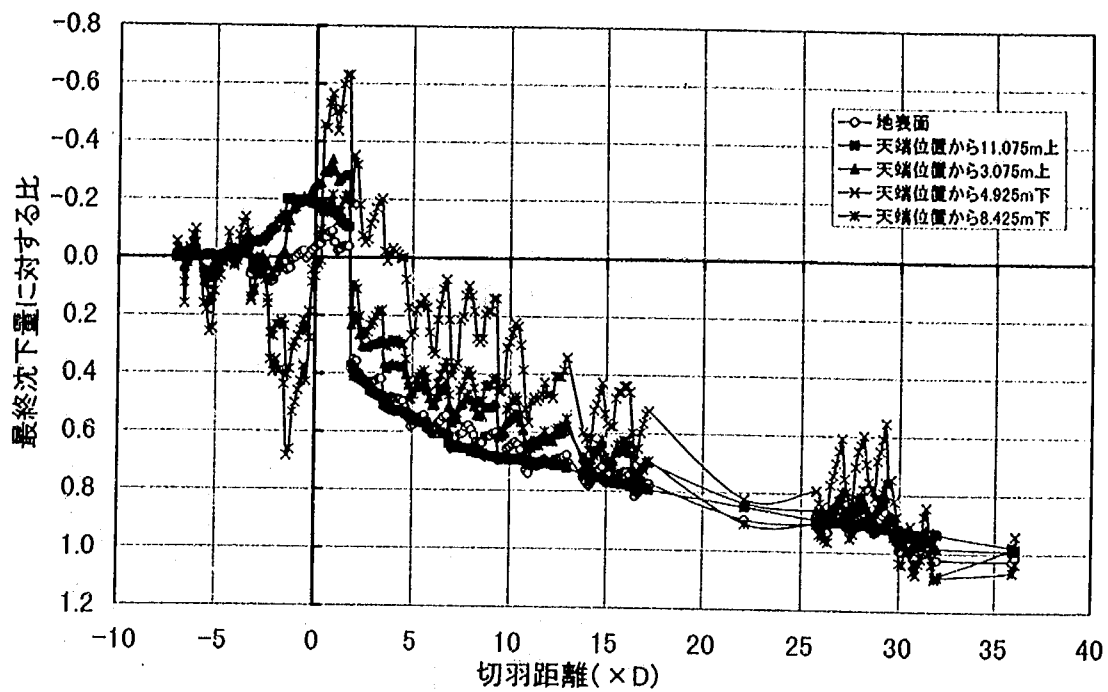


図-2.27 (1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面①)

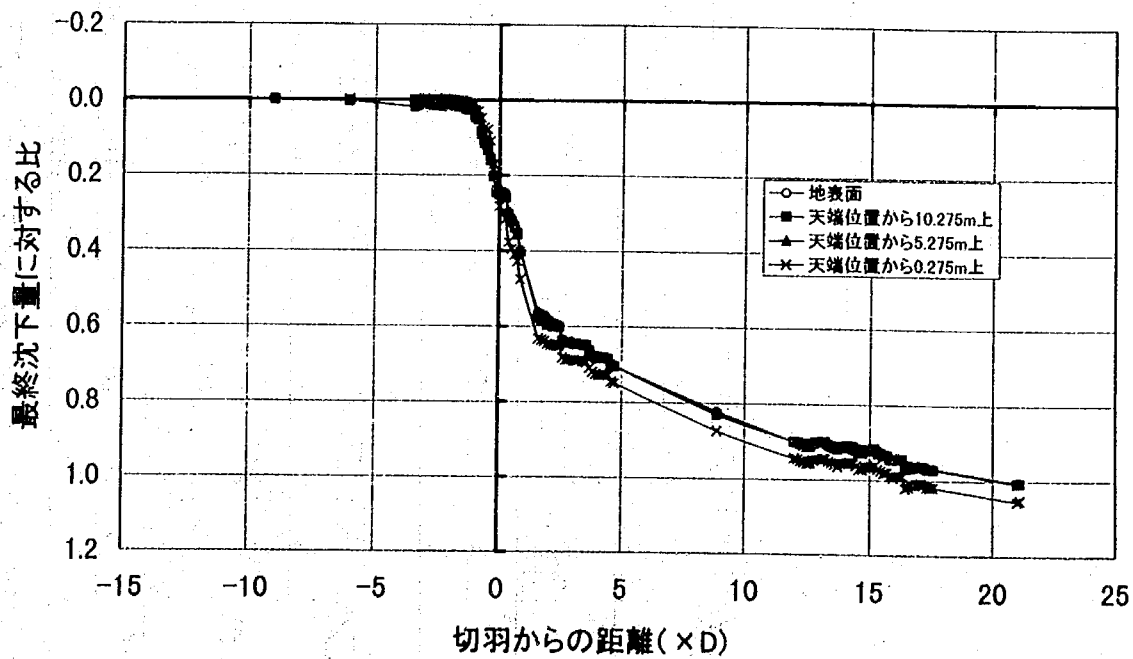


図-2.27 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面②)

表-2.5 Dシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表

Dシールド鉛直変位計測データ(最終沈下量)(mm)

計測断面①	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から11.075m上	S-3 天端位置から3.075m上	S-4 天端位置から4.925m下	S-5 天端位置から8.425m下	S-6 天端位置から11.925m下
	1996/04/16	22:15:00	-3.34	-2.26	-1.67	-0.56	-1.34	-0.17
	切羽からの距離256m(36.06D)							
計測断面②	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から10.275m上	S-3 天端位置から5.275m上	S-4 天端位置から0.275m上		
	1996/04/16	22:20:00	-6.43	-6.84	-6.43	-6.74		
	切羽からの距離171m(21.11D)							
計測断面③	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から8.575m上	S-3 天端位置から4.075m上	S-4 天端位置から0.925m下		
	1996/04/16	22:25:00	-2.94	-2.61	-2.48	-1.68		
	切羽からの距離89m(12.54D)							

Dシールド鉛直変位計測データ(切羽位置沈下量)(mm)

計測断面①	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から11.075m上	S-3 天端位置から3.075m上	S-4 天端位置から4.925m下	S-5 天端位置から8.425m下	S-6 天端位置から11.925m下
	1996/02/17	00:15:00	0.12	0.42	0.42	-0.01	-0.08	-0.1
	切羽からの距離0m							
計測断面②	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から10.275m上	S-3 天端位置から5.275m上	S-4 天端位置から0.275m上		
	1996/03/15	11:20:00	-1.56	-1.71	-1.56	-1.81		
	切羽からの距離0m							
計測断面③	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から8.575m上	S-3 天端位置から4.075m上	S-4 天端位置から0.925m下		
切羽通過時データなし								

Dシールド鉛直変位計測データ(切羽位置通過時最終沈下量との比)

計測断面①	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から11.075m上	S-3 天端位置から3.075m上	S-4 天端位置から4.925m下	S-5 天端位置から8.425m下	S-6 天端位置から11.925m下
	1996/02/17	00:15:00	-0.034	-0.187	-0.253	0.011	0.062	0.7
	切羽からの距離0m							
計測断面②	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から10.275m上	S-3 天端位置から5.275m上	S-4 天端位置から0.275m上		
	1996/03/15	11:20:00	0.242	0.250	0.242	0.268		
	切羽からの距離0m							
計測断面③	日付	時刻	S-1 地表面	S-2 天端位置から8.575m上	S-3 天端位置から4.075m上	S-4 天端位置から0.925m下		
切羽通過時データなし								

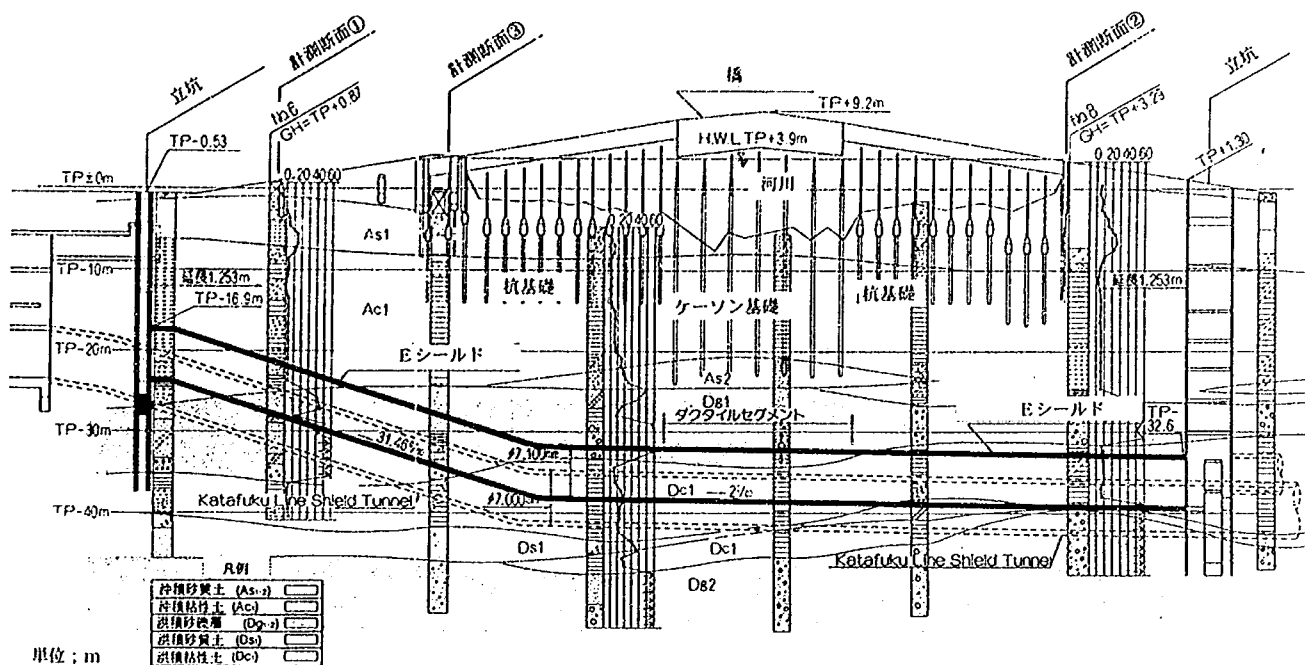
変位の方向; プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

2.6 Eシールド

2.6.1 計測トンネルの概要

(1) トンネルの概要

本現場計測トンネルは、国道直下に位置するシールドで、セグメント外径7.1m（セグメント桁高35cm）、延長1,256mであり、最大土被り34mのシールドトンネルである。本工事の特徴は、本トンネルに近接して地下鉄の構造物があるとともに、工事区間の約60%を河川の横過部分となっている。図－2.28に概要図を示す。



図－2.28 Eトンネルの概要図

(4) 地質状況

地質は、地表部から表土、その下部に層厚が4～10m程度のN値が5～10程度の沖積砂礫層、その下部に層厚12～20mのN値が0～5程度の沖積粘性土層、さらに層厚0.5～3m程度のN値が5～25程度の沖積砂質土層、その下部に層厚5～10m程度のN値が40～50程度の洪積砂礫層、層厚7～12m程度のN値が5～20程度の洪積粘性土層、層厚0.4～4m程度のN値が26～60程度の洪積砂質土層、層厚10m程度のN値が60以上の洪積砂礫層の順で位置する。シールドトンネルは、沖積粘性土層、洪積砂礫土層、洪積粘性土層を通過する。

(3) 地盤変状の計測

地盤変状の計測は、図-2.29(1)～(3)に示すように計測断面①～③の3箇所の計測断面を設けて実施しており、主な計測は層別沈下計による変位である。計測断面①は、土被り約21.3mの位置で本トンネルの両側斜め下部に離隔約2～3mで地下鉄構造物が位置している。また、計測断面②③も、それぞれ土被り約35.5m、約30.5mで計測断面①と同様に本トンネルの両側斜め下部に離隔2mで地下鉄構造物が位置している。

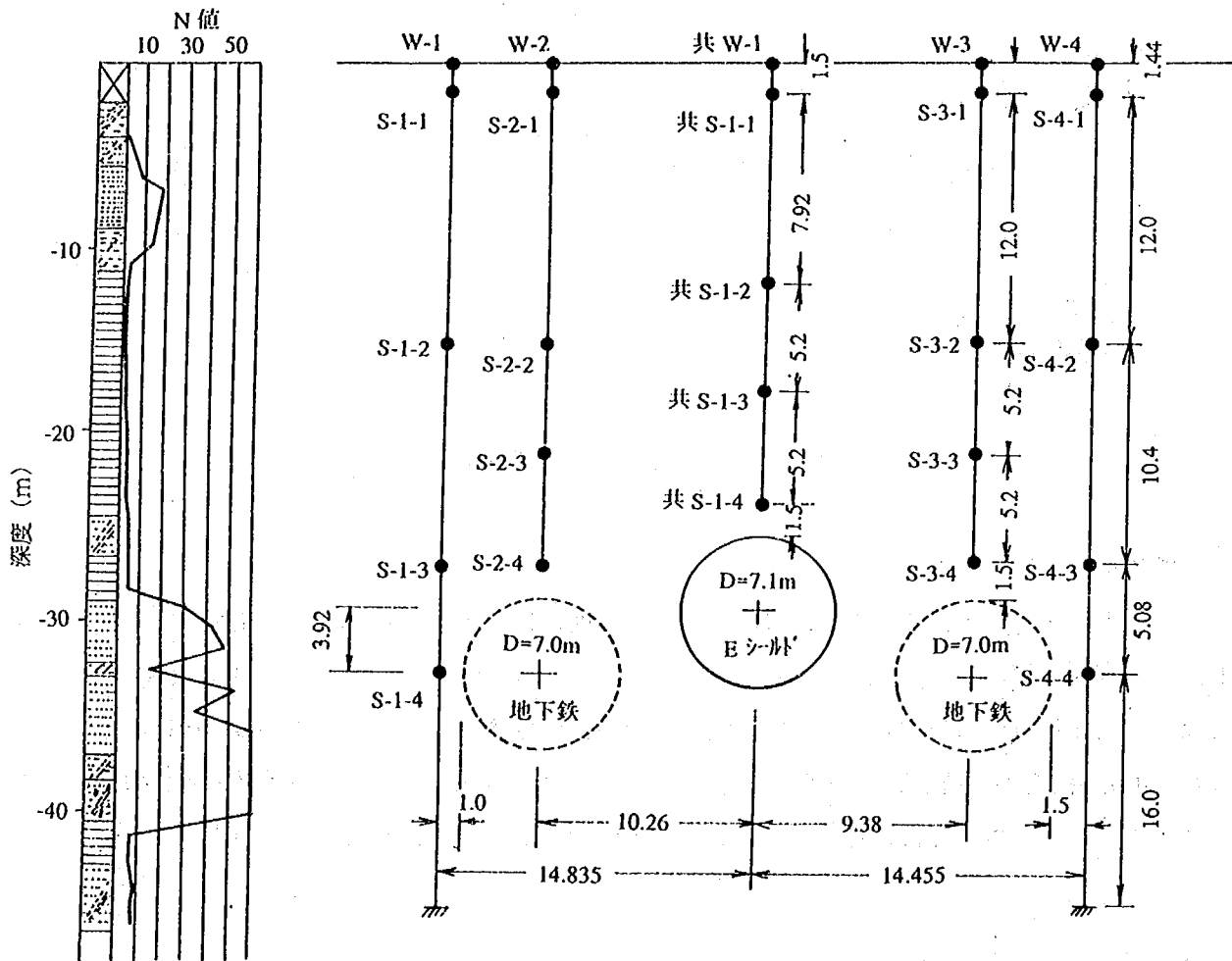


図-2.29(1) Eトンネルにおける計測断面における計測機器の位置 (計測断面①)

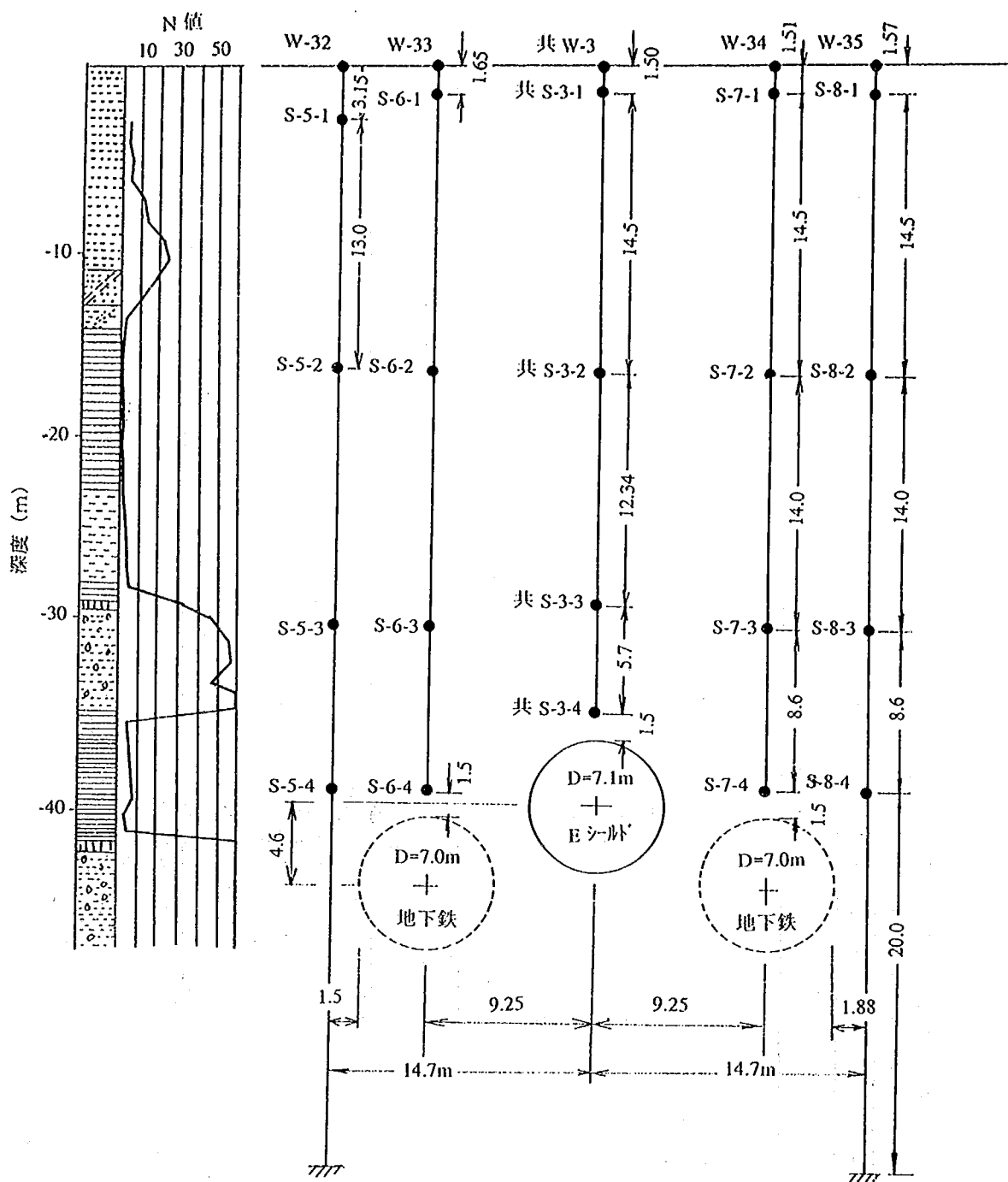


図-2.29 (2) Eトンネルにおける計測断面における計測機器の位置 (計測断面②)

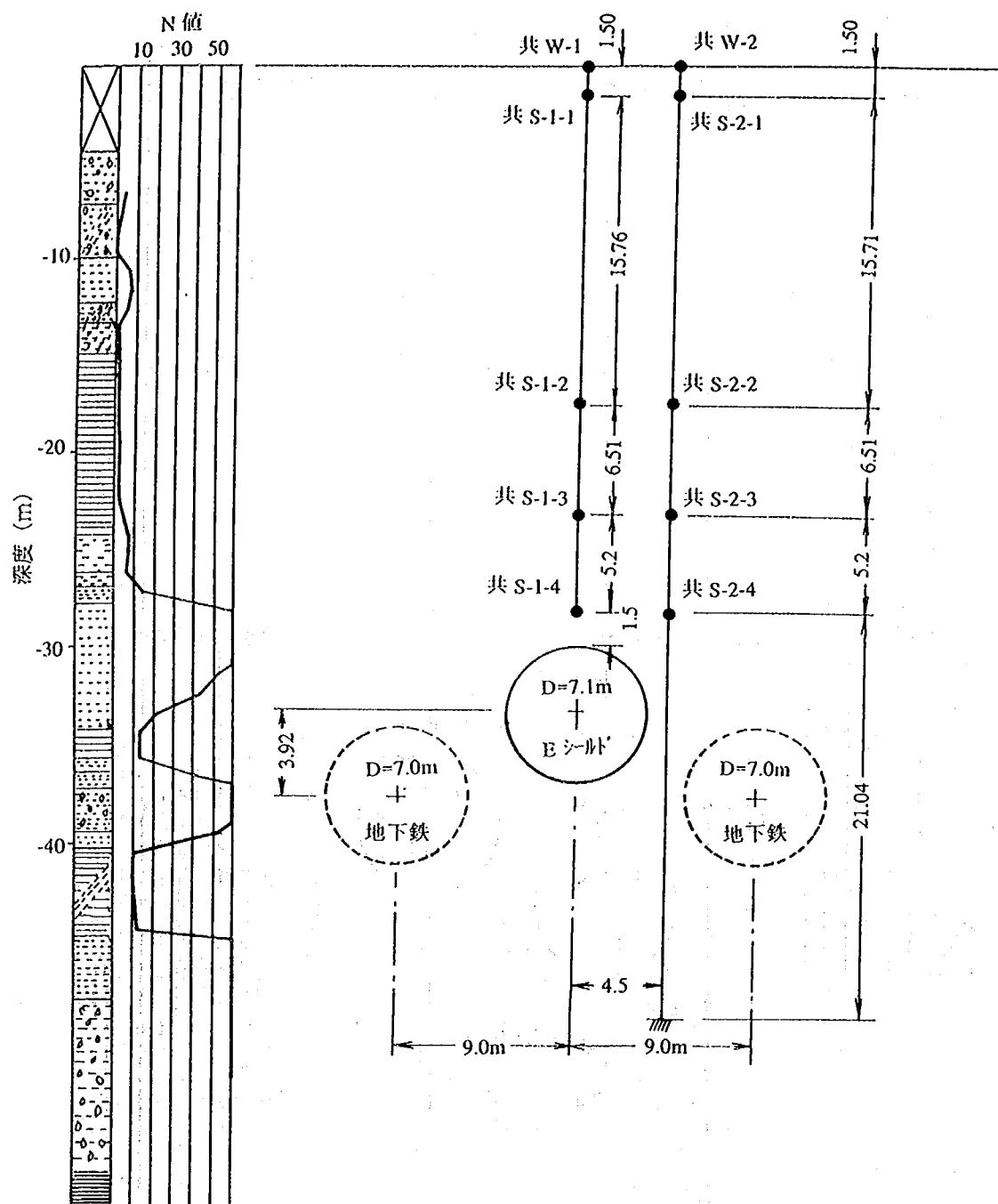


図-2.29 (3) Eトンネルにおける計測断面における計測機器の位置 (計測断面③)

(4) 掘削方式と施工概要

シールドトンネルの掘削は、泥水加圧式シールドであり、施工に用いたシールド機の概要図を図-2.30に示す。本トンネルでは、トンネル外径とシールド機外径の差からテールボイドは7.5cmであり、裏込め注入は同時裏込め注入方式となっている。また、工事の進捗は、1日あたり5~7m程度の進捗であった。

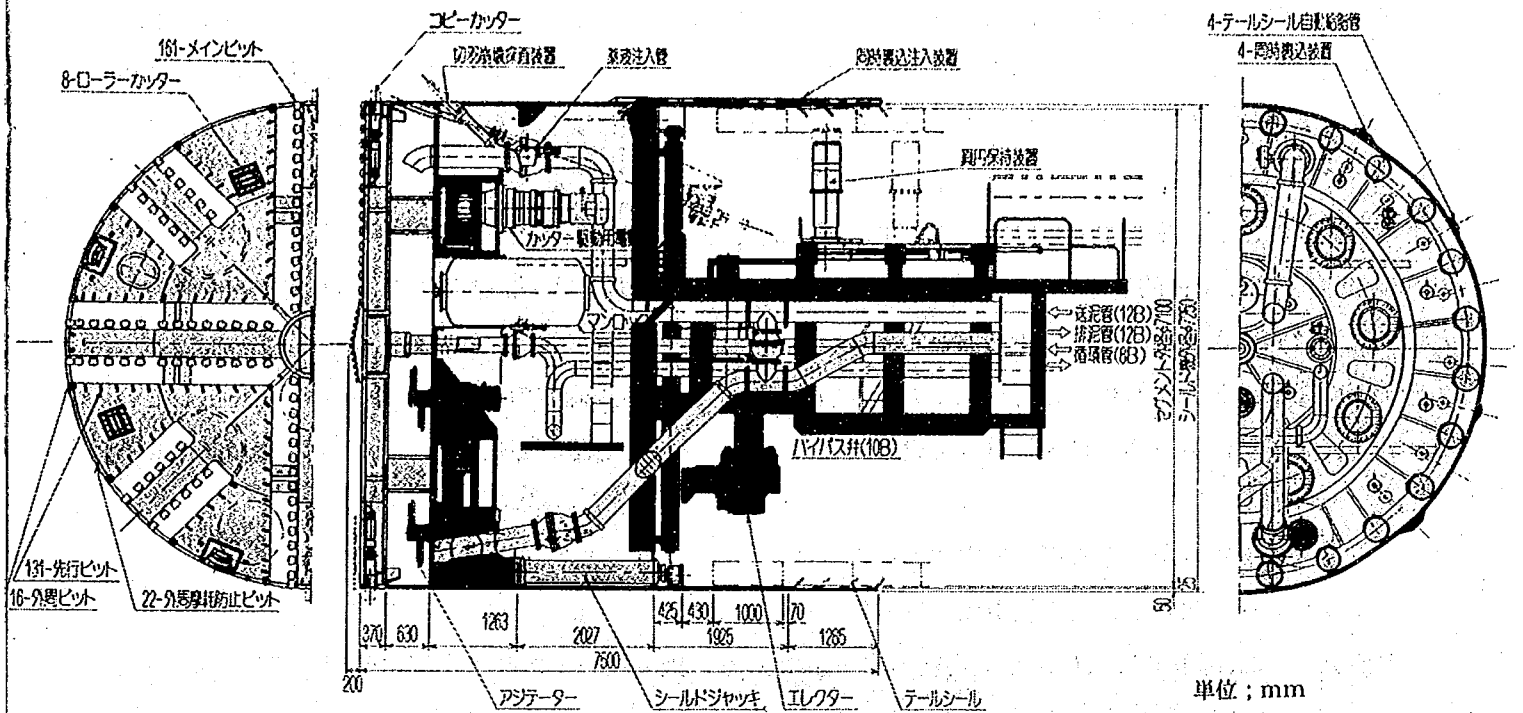


図-2.30 Eトンネルで使用したシールド機の概要図

2.6.2 計測結果

(1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の変化

切羽の進行に伴う地表面・地中沈下量の計測データの変化を整理したものを図-2.31(1)～(7)に示す。図からシールドトンネル掘削に伴う地盤変状は、大きな沈下を生じていないことが分かる。切羽前方でのデータが少ないが、トンネルの進行に伴い沈下が生じ始めるのは切羽位置から前方に約5D程度から生じるものと考えられる。

計測断面①は、トンネル中心の計測線の沈下が最も大きく、天端位置から約1.5m上から約20mまでの計測点で約11～14mmとなっている。トンネルの側方位置での沈下量は、1測線(S-02)についての沈下挙動が全体的に隆起しているなど不安定な現象が生じている。その他の計測線に関しては、トンネルから離れるに従って、小さくなる傾向にある。

計測断面②は、トンネル中心の計測線の沈下が他の計測線に比べて最も大きい値を示したものの、最大でも約6mm程度であり全体的に小さい沈下量となっている。本計測断面では、土被りが約35mと比較的大きいことから沈下量も小さくなった結果であると考えられる。

計測断面③は、トンネル中心の計測線で大きい値を示し、トンネル側方の計測線で小さめの値を示している。また、沈下量はトンネルの天端付近で最も大きく、トンネルから離れるに従って小さくなる傾向にある。

(2) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

トンネルの横断方向の地表面・地中沈下量の分布を図-2.32(1)～(3)に示す。ここで、図中に示した分布図の計測データは、図-2.31に示した最終の沈下量である。図より、沈下量は一部のデータで隆起するなど、現象として、不安定な挙動を示すが、それらの結果を除いて考えると、トンネル中心で最も大きく、トンネル側方へ離れるに従って小さくなる傾向を示していることが分かる。

(3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

最終沈下量で正規化したグラフを図-2.33(1)～(7)に示す。なお、また、最終沈下量、切羽位置での沈下量および最終沈下量との比の一覧表を表-2.6に示す。これより、各計測断面のトンネル中心部のトンネル天端の最も近い計測点の最終沈下量に対する比は、計測断面①～③で、それぞれ0.068、0.158、0.288であり、最終沈下量の約7%～30%の沈下が切羽通過時に生じていることが分かる。

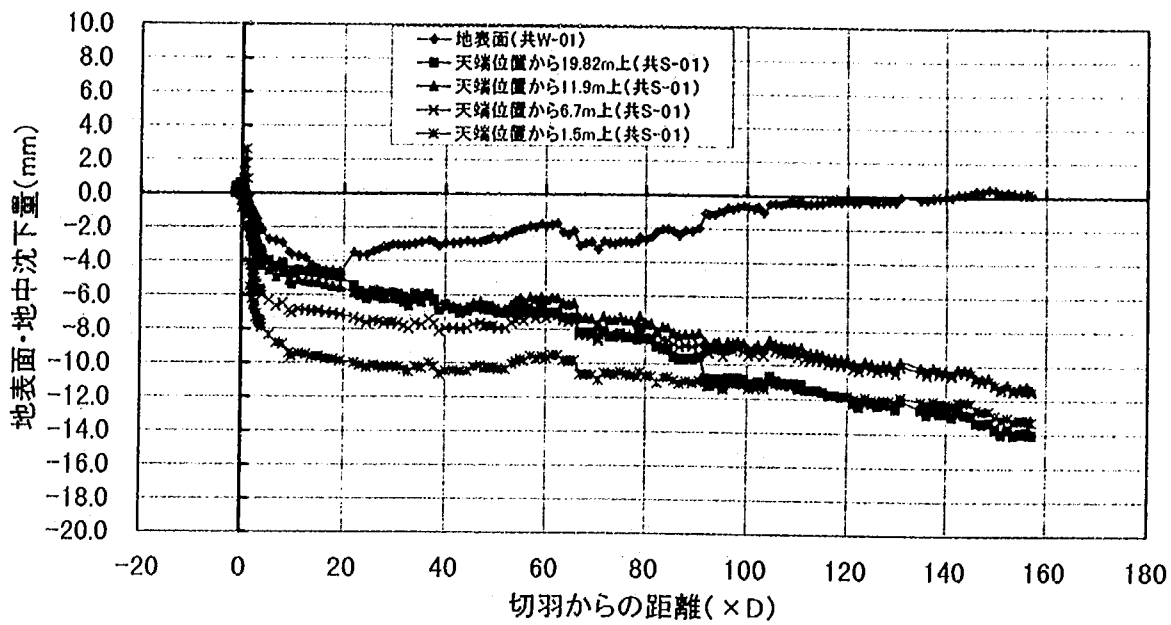


図- 2.31 (1) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面①; 共W-1, 共S-1)

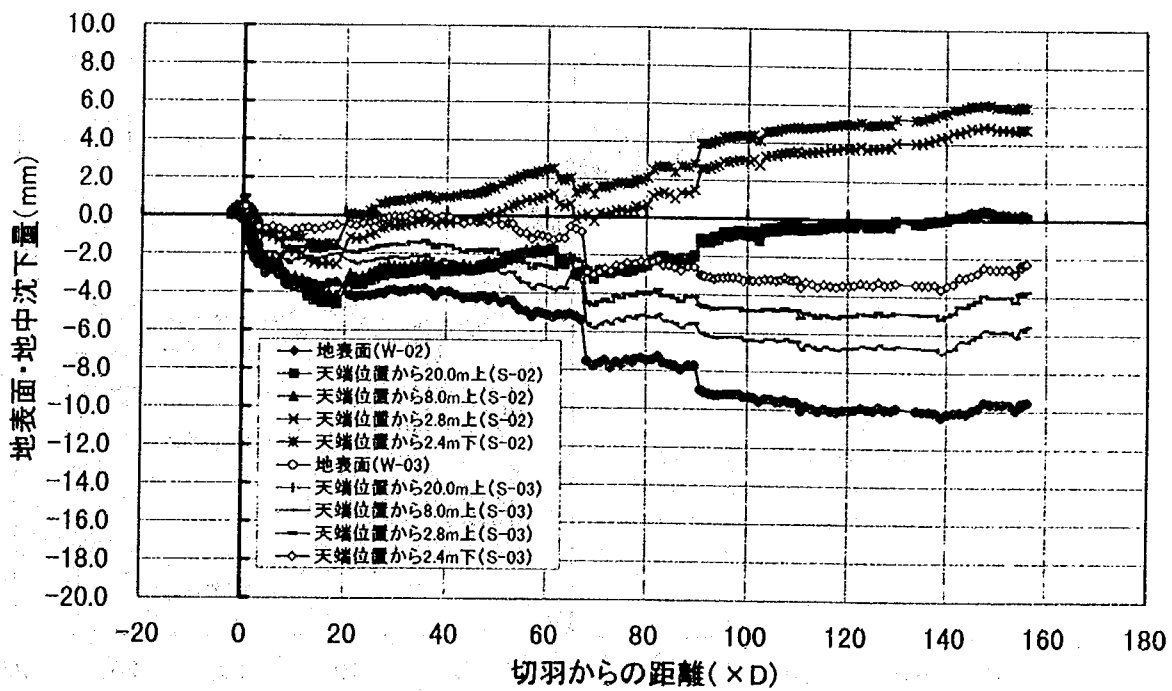


図- 2.31 (2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面①; W-2, S-2, W-3, S-3)

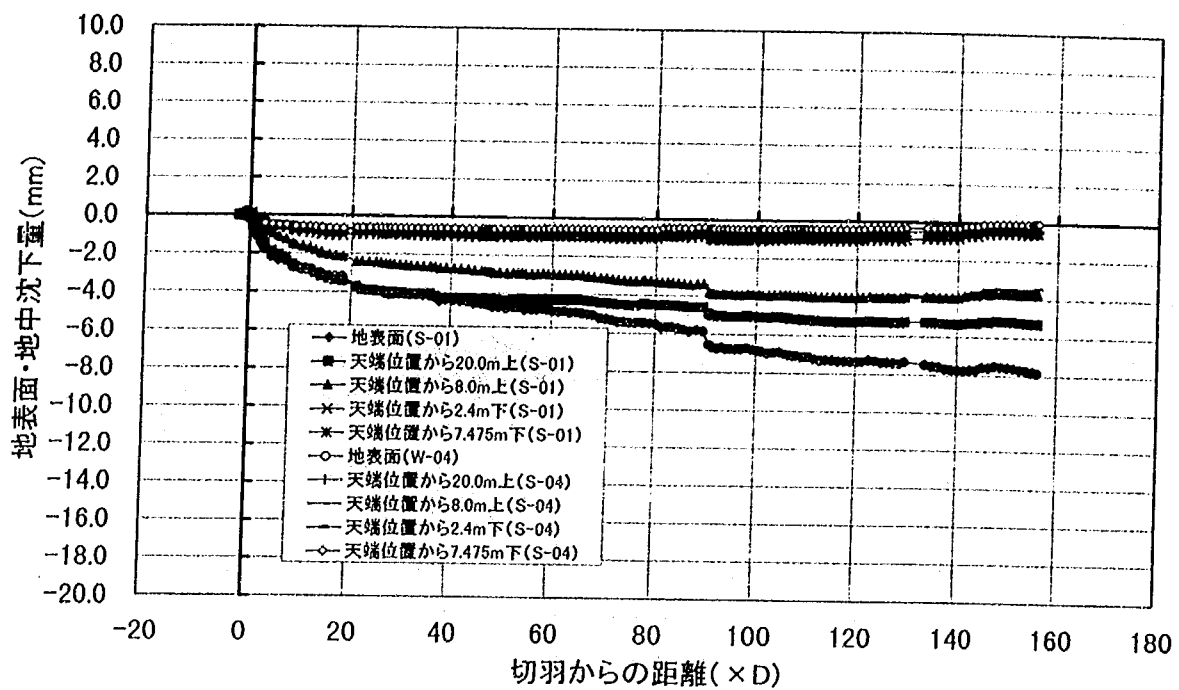


図-2.31 (3) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面①; S-1, W-4, S-4)

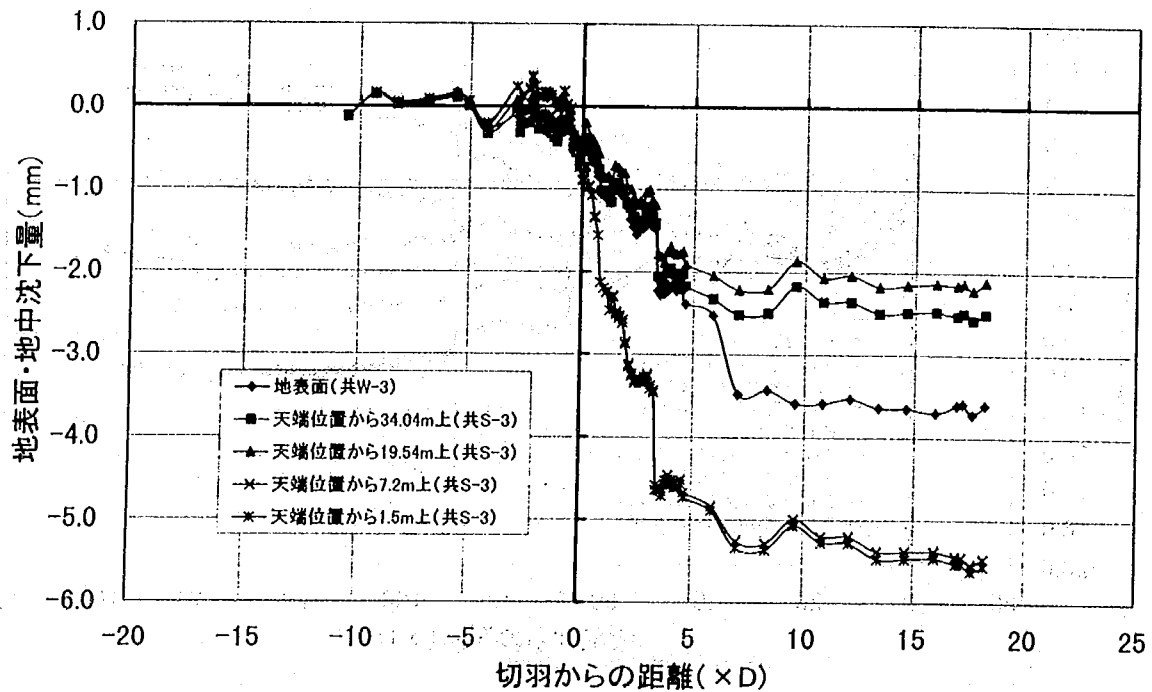


図-2.31 (4) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面②; 共W-3, 共S-3)

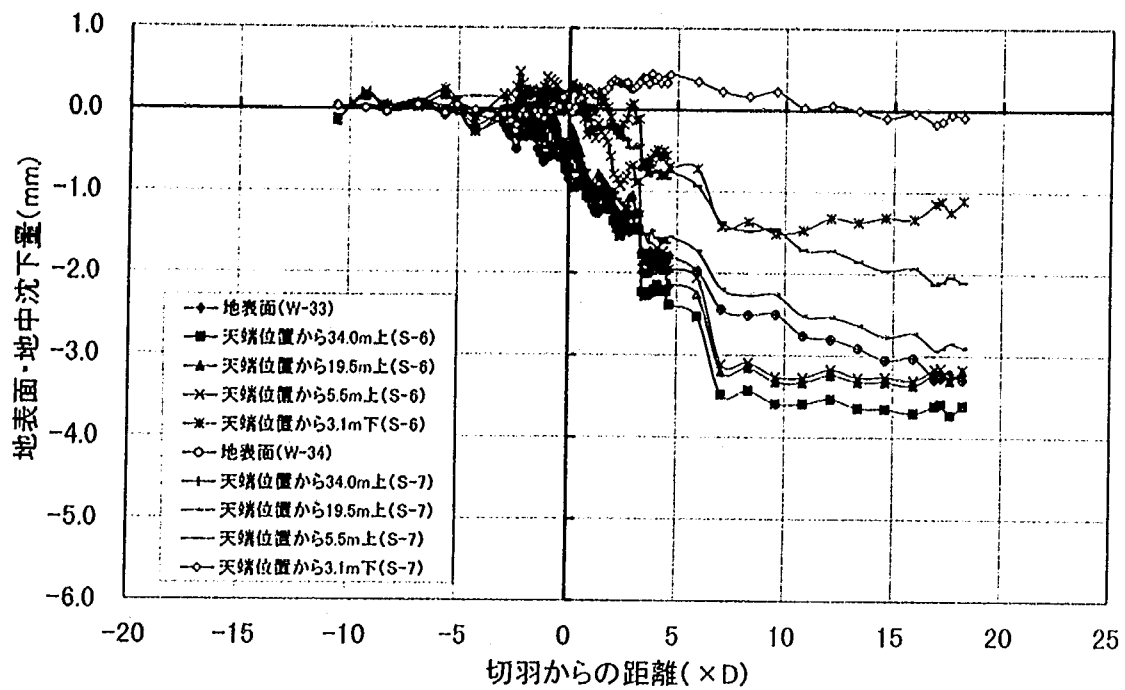


図-2.31(5) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面②; W-33, S-6, W-34, S-7)

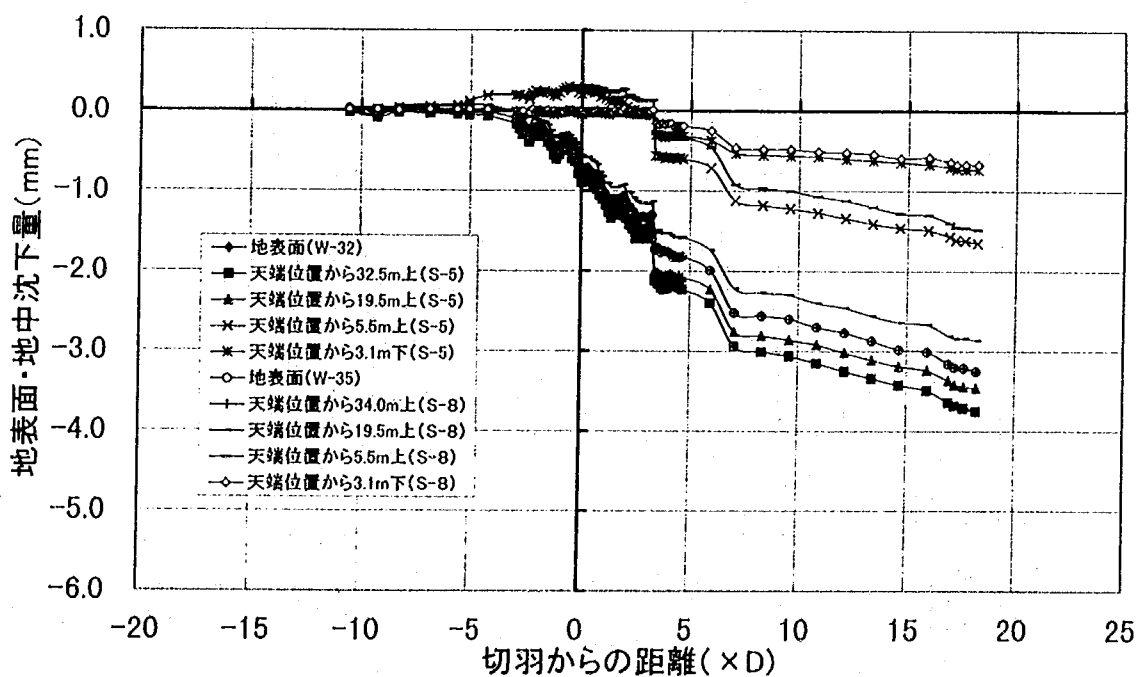
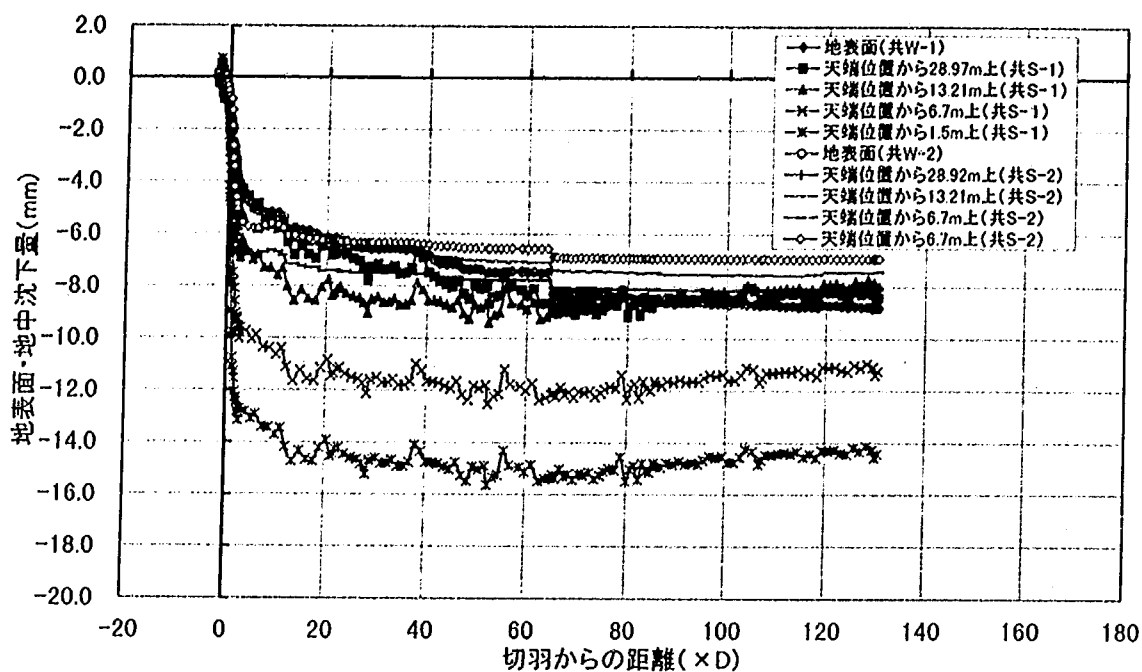
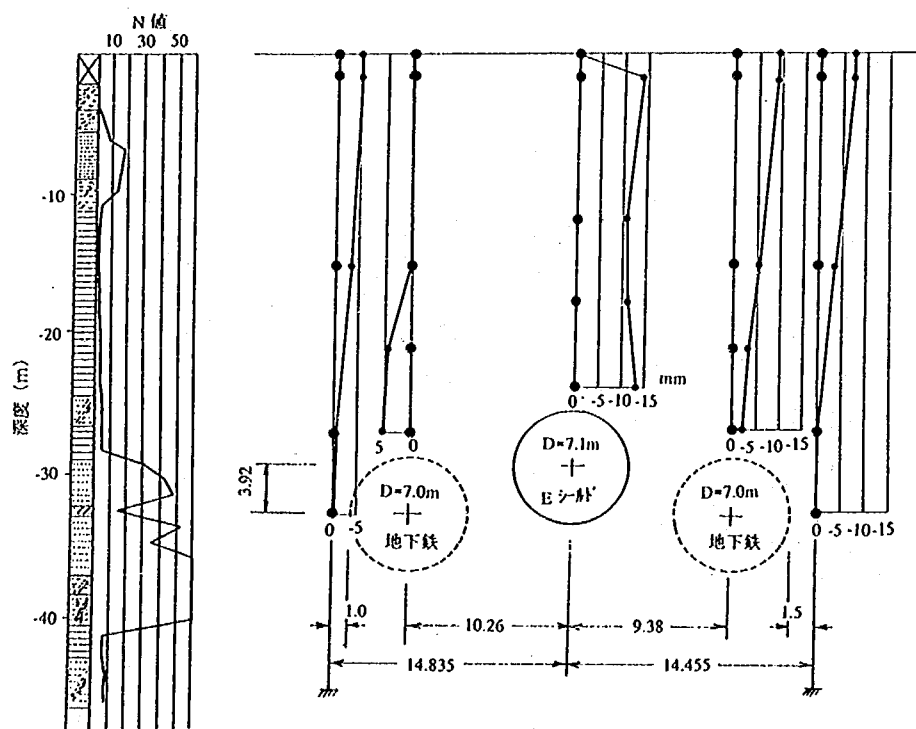


図-2.31(6) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量 (計測断面②; W-32, S-5, W-35, S-8)



図－ 2. 31 (7) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量（計測断面③; 共W-1, 共S-1, 共W-2, 共S-2）



図－ 2. 32 (I) 地表面・地中沈下量の最終沈下量（計測断面①；切羽位置約160D後方）

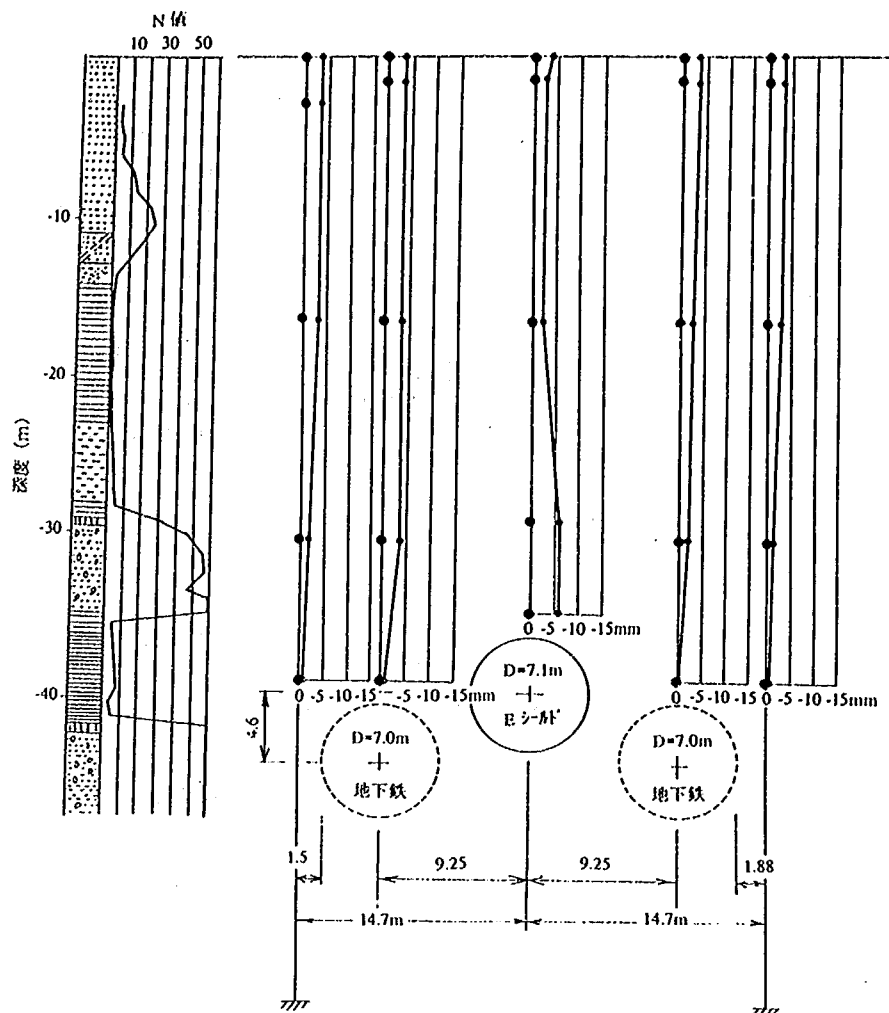


図-2.32(2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量(計測断面②; 切羽位置約130D後方)

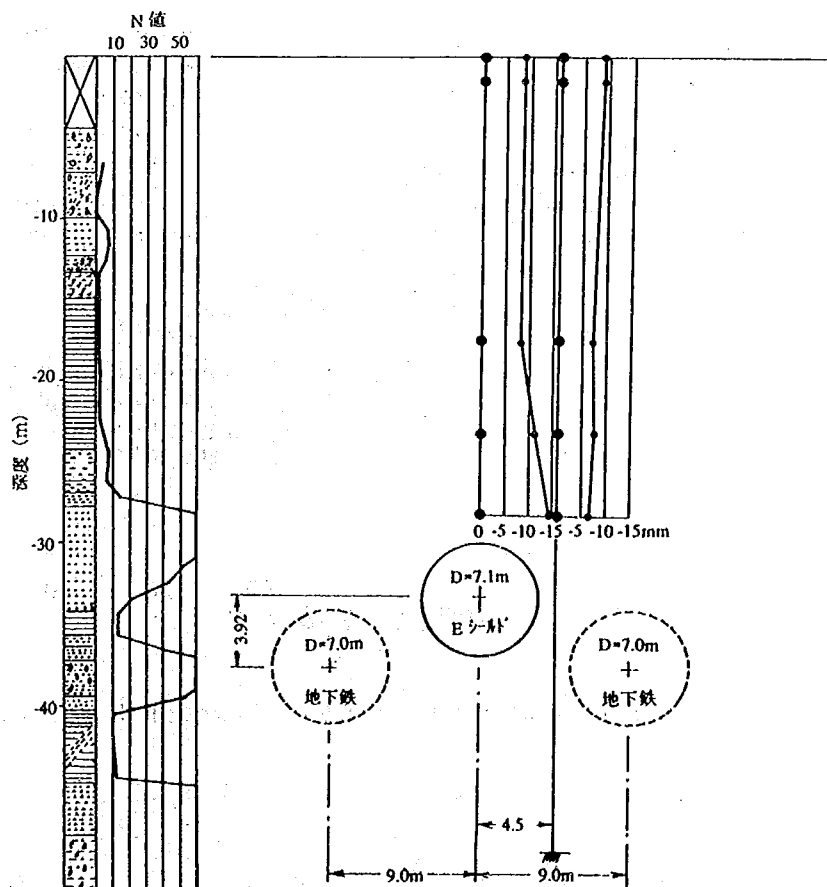


図-2.32(3) 地表面・地中沈下量の最終沈下量(計測断面③; 切羽位置約18D後方)

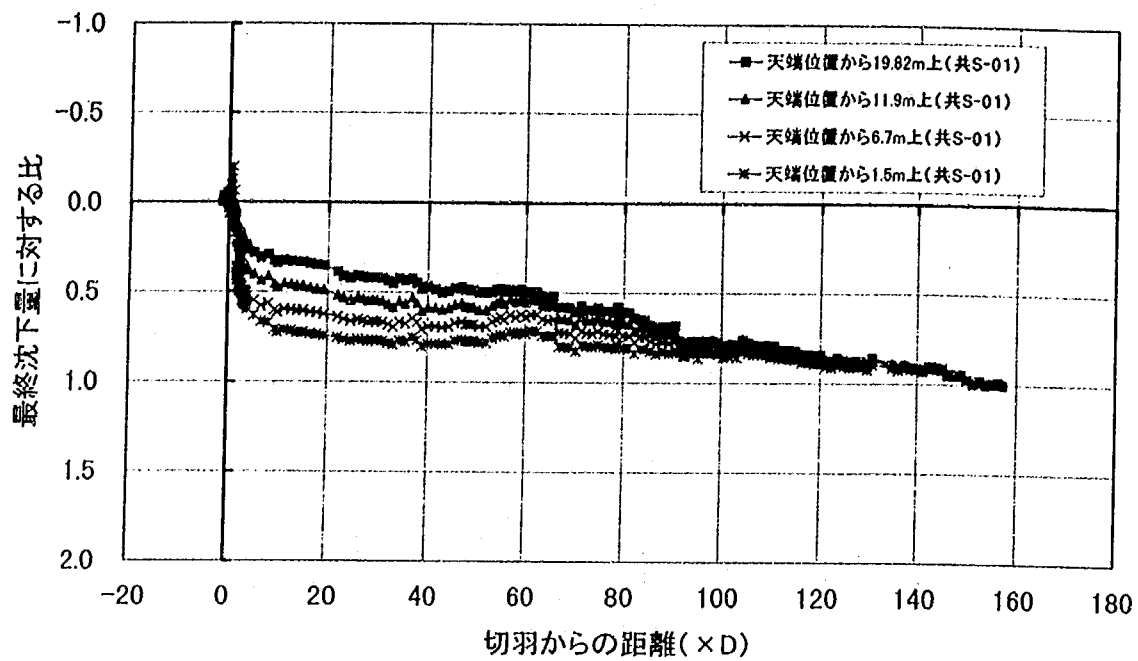


図- 2. 33 (1) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面①; 共W-1, 共S-1)

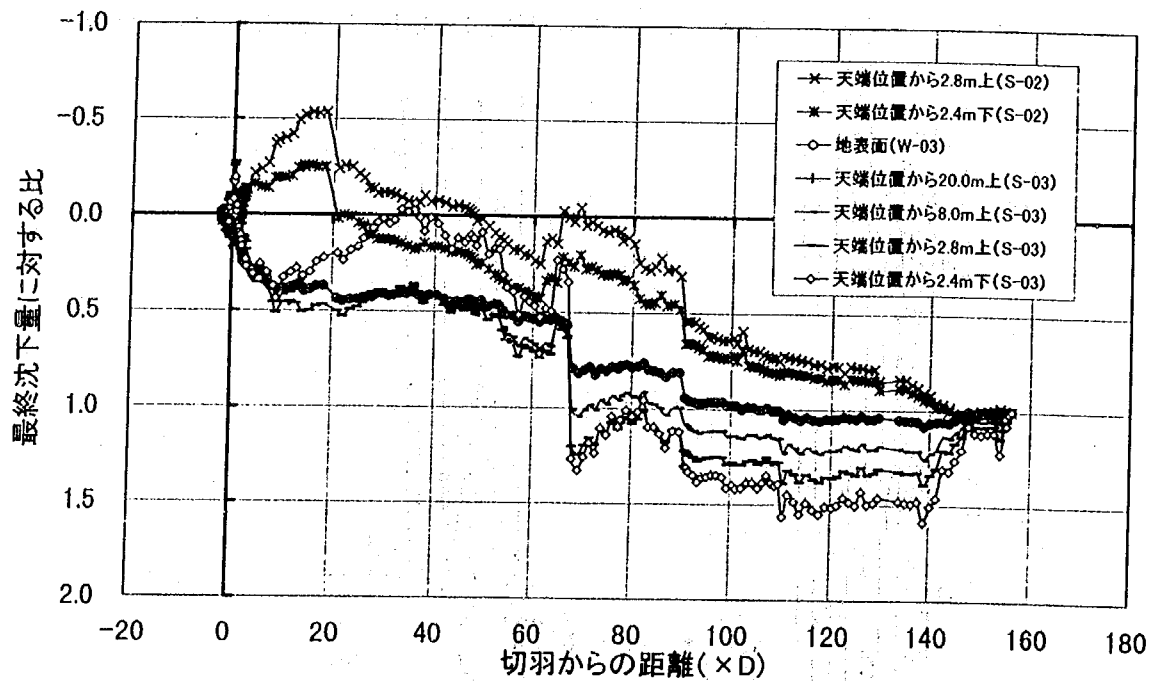


図- 2. 33 (2) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面①; W-2, S-2, W-3, S-3)

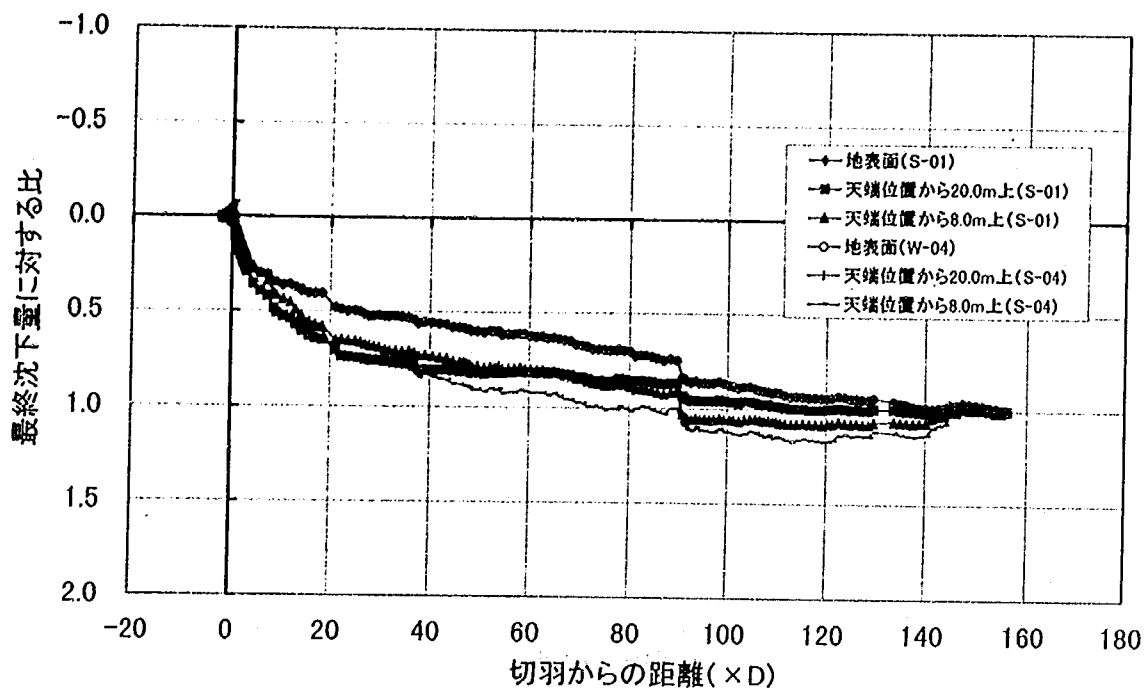


図- 2. 33 (3) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面①; S-1, W-4, S-4)

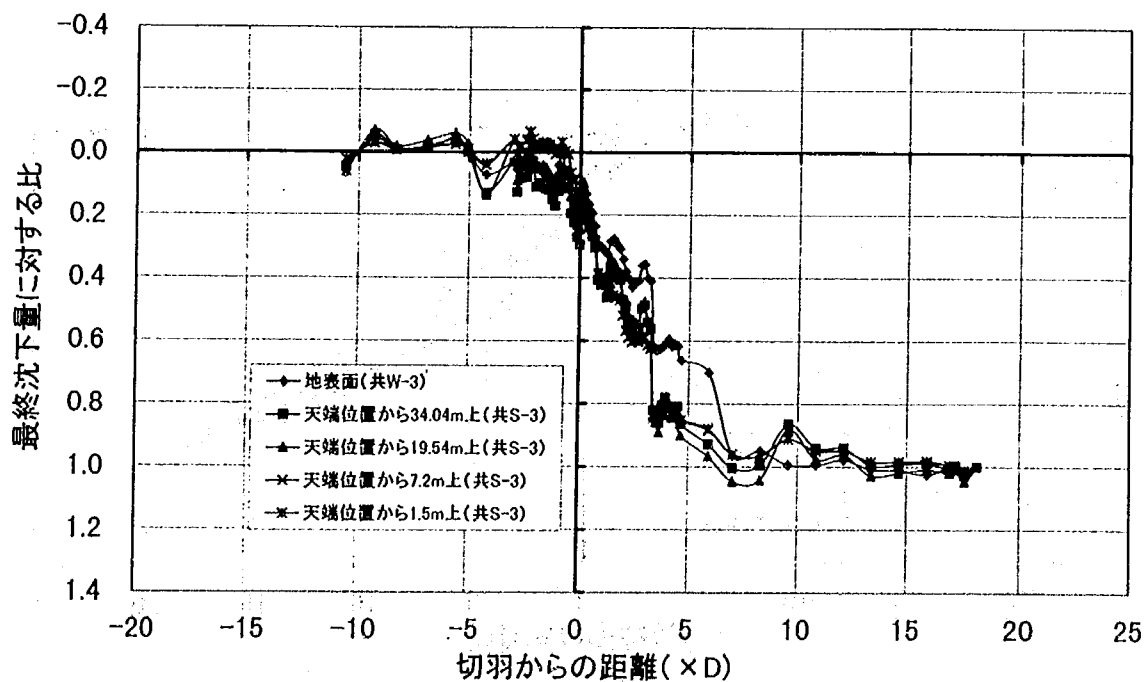
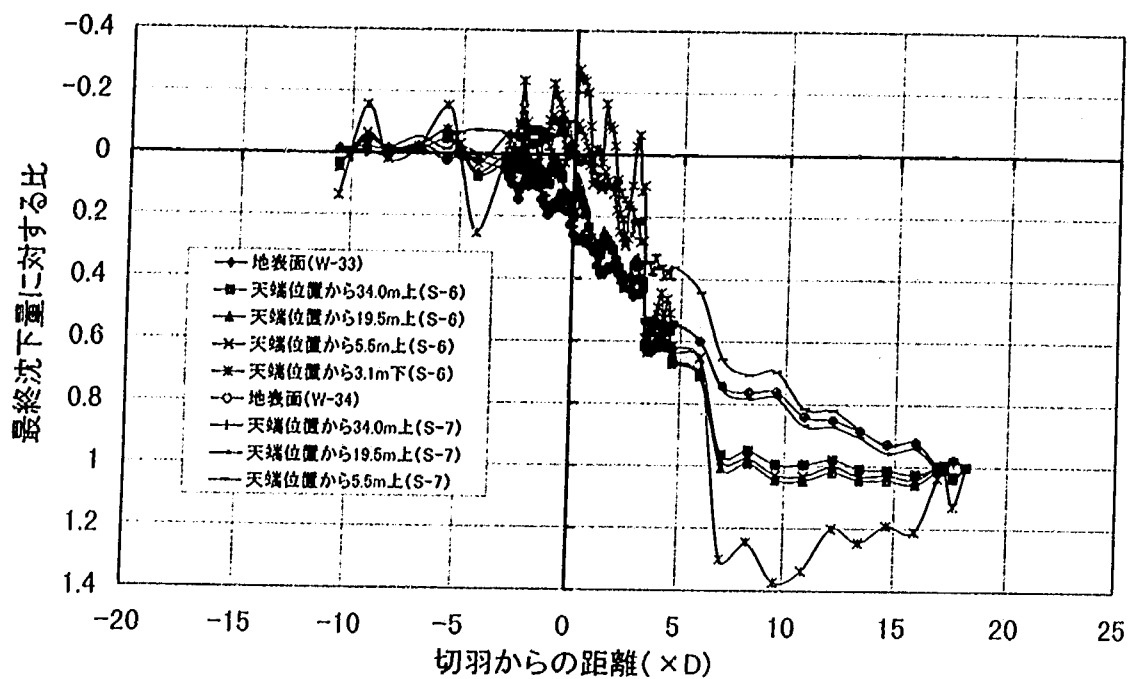
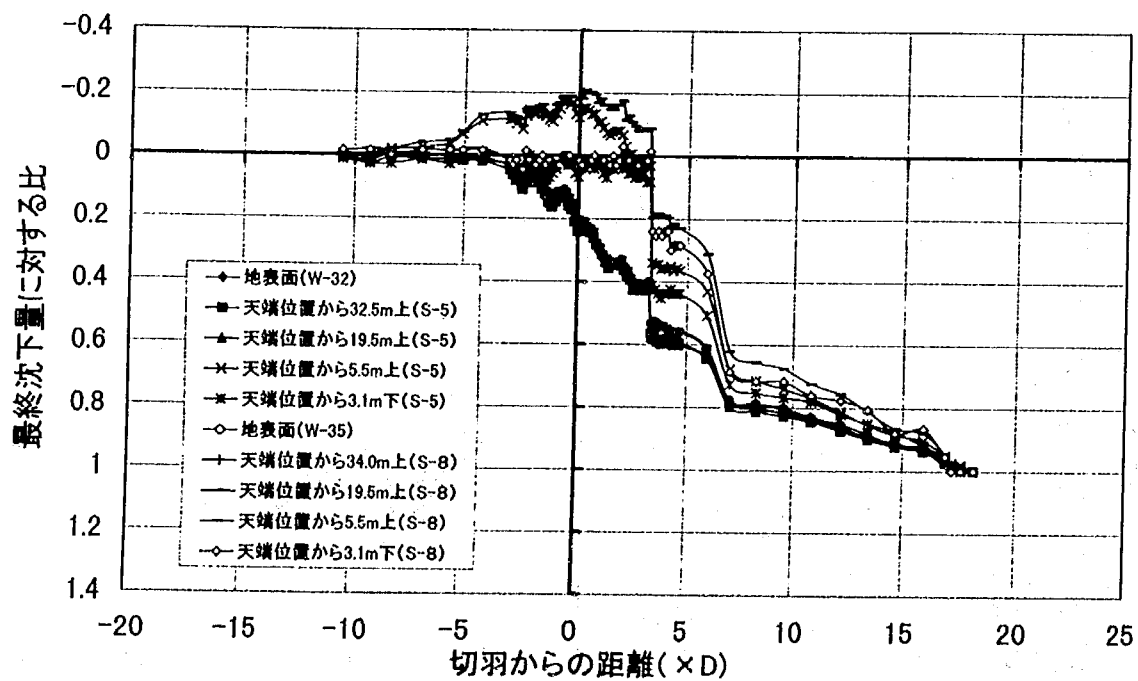


図- 2. 33 (4) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面②; 共W-3, 共S-3)



図一 2.33 (5) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面②; W-33, S-6, W-34, S-7)



図一 2.33 (6) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面②; W-32, S-5, W-35, S-8)

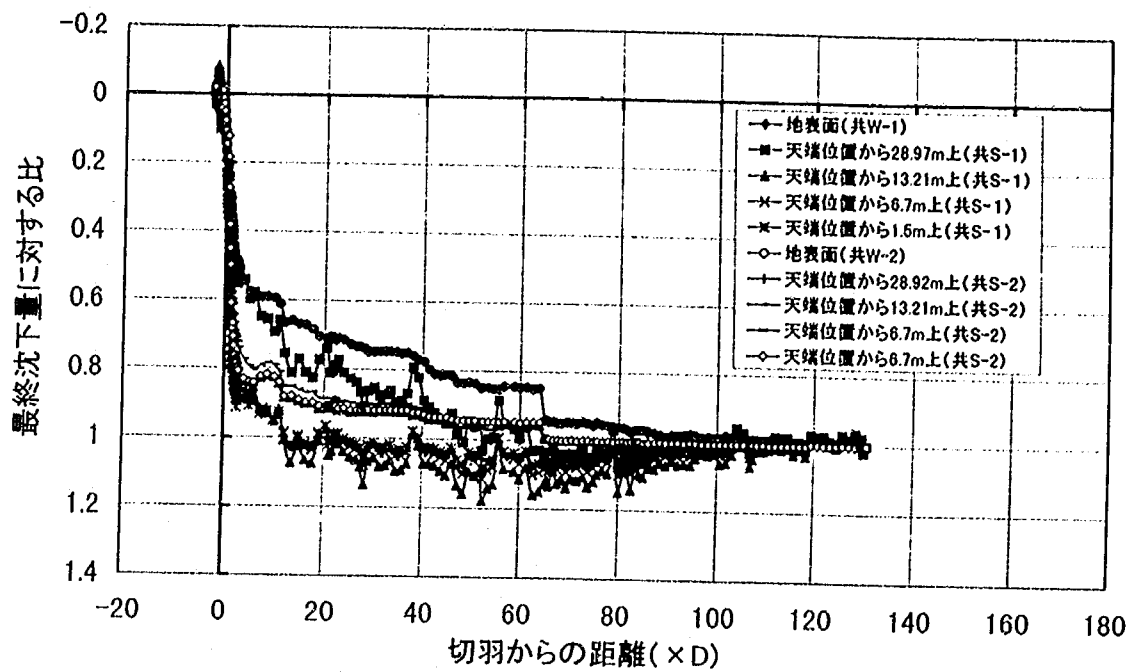


図-2.33(7) 地表面・地中沈下量の最終沈下量との比 (計測断面③; 共W-1, 共S-1, 共W-2, 共S-2)

表-2.6(1) Eシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表(最終沈下量)

Eシールドの鉛直変位計測データ (計測断面①の最終沈下量)

日付	時間	W-01	S-01-1	S-01-2	S-01-3	S-01-4
1996/5/20	12:00	地表面(S-01)	天端位置から20.0m上(S-01)	天端位置から8.0m上(S-01)	天端位置から2.4m下(S-01)	天端位置から7.475m下(S-01)
		-5.25	-5.25	-3.70	-0.53	-0.23
	切羽との距離1109m (156.20D)	W-02	S-02-1	S-02-2	S-02-3	S-02-4
		地表面(W-02)	天端位置から20.0m上(S-02)	天端位置から8.0m上(S-02)	天端位置から2.8m上(S-02)	天端位置から2.4m下(S-02)
		0.16	0.16	0.30	4.80	5.94
		W-03	S-03-1	S-03-2	S-03-3	S-03-4
		地表面(W-03)	天端位置から20.0m上(S-03)	天端位置から8.0m上(S-03)	天端位置から2.8m上(S-03)	天端位置から2.4m下(S-03)
		-9.57	-9.57	-5.61	-3.77	-2.32
		W-04	S-04-1	S-04-2	S-04-3	S-04-4
		地表面(W-04)	天端位置から20.0m上(S-04)	天端位置から8.0m上(S-04)	天端位置から2.4m下(S-04)	天端位置から7.475m下(S-04)
		-7.82	-7.82	-3.45	-0.46	-0.03
		共W-01	共S-01-1	共S-01-2	共S-01-3	共S-01-4
		地表面(共W-01)	天端位置から19.82m上(共S-01)	天端位置から11.9m上(共S-01)	天端位置から6.7m上(共S-01)	天端位置から1.5m上(共S-01)
		0.16	-14.01	-11.30	-11.45	-13.24

Eシールドの鉛直変位計測データ (計測断面②の最終沈下量)

日付	時間	W-32	S-5-1	S-5-2	S-5-3	S-5-4
1996/5/20	9:00	地表面(W-32)	天端位置から32.5m上(S-5)	天端位置から19.5m上(S-5)	天端位置から5.5m上(S-5)	天端位置から3.1m下(S-5)
		-3.75	-3.75	-3.46	-1.65	-0.73
	切羽との距離129m (18.17D)	W-33	S-6-1	S-6-2	S-6-3	S-6-4
		地表面(W-33)	天端位置から34.0m上(S-6)	天端位置から19.5m上(S-6)	天端位置から5.5m上(S-6)	天端位置から3.1m下(S-6)
		-3.61	-3.61	-3.18	-3.17	-1.10
		W-34	S-7-1	S-7-2	S-7-3	S-7-4
		地表面(W-34)	天端位置から34.0m上(S-7)	天端位置から19.5m上(S-7)	天端位置から5.5m上(S-7)	天端位置から3.1m下(S-7)
		-3.29	-3.29	-2.90	-2.10	-0.08
		W-35	S-8-1	S-8-2	S-8-3	S-8-4
		地表面(W-35)	天端位置から34.0m上(S-8)	天端位置から19.5m上(S-8)	天端位置から5.5m上(S-8)	天端位置から3.1m下(S-8)
		-3.25	-3.25	-2.86	-1.48	-0.67
		共W-3	共S-3-1	共S-3-2	共S-3-3	共S-3-4
		地表面(共W-3)	天端位置から34.04m上(共S-3)	天端位置から19.54m上(共S-3)	天端位置から7.2m上(共S-3)	天端位置から1.5m上(共S-3)
		-3.61	-2.51	-2.12	-5.47	-5.56

Eシールドの鉛直変位計測データ (計測断面③の最終沈下量)

日付	時間	共W-1	共S-1-1	共S-1-2	共S-1-3	共S-1-4
1996/5/20	9:00	地表面(共W-1)	天端位置から28.97m上(共S-1)	天端位置から13.21m上(共S-1)	天端位置から6.7m上(共S-1)	天端位置から1.5m上(共S-1)
		-8.55	-8.55	-8.12	-11.39	-14.56
	切羽との距離886m (124.79D)	共W-2	共S-2-1	共S-2-2	共S-2-3	共S-2-4
		地表面(共W-2)	天端位置から28.92m上(共S-2)	天端位置から13.21m上(共S-2)	天端位置から6.7m上(共S-2)	天端位置から6.7m上(共S-2)
		-8.80	-8.80	-7.41	-8.02	-6.91

変位の方向; プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

表-2.6(2) Eシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表(切羽位置沈下量)

Eシールドの鉛直変位計測データ(計測断面①の切羽位置沈下量)

日付	時間	W-01	S-01-1	S-01-2	S-01-3	S-01-4
1995/9/9	22:50	地表面(S-01)	天端位置から20.0m上(S-01)	天端位置から8.0m上(S-01)	天端位置から2.4m下(S-01)	天端位置から7.475m下(S-01)
		-0.19	-0.19	-0.08	-0.12	-0.09
		W-02	S-02-1	S-02-2	S-02-3	S-02-4
		地表面(W-02)	天端位置から20.0m上(S-02)	天端位置から8.0m上(S-02)	天端位置から2.8m上(S-02)	天端位置から2.4m下(S-02)
		-0.06	-0.06	0.37	0.70	0.17
		W-03	S-03-1	S-03-2	S-03-3	S-03-4
		地表面(W-03)	天端位置から20.0m上(S-03)	天端位置から8.0m上(S-03)	天端位置から2.8m上(S-03)	天端位置から2.4m下(S-03)
		-0.15	-0.15	0.19	0.65	0.18
1995/9/9	1:40	W-04	S-04-1	S-04-2	S-04-3	S-04-4
		地表面(W-04)	天端位置から20.0m上(S-04)	天端位置から8.0m上(S-04)	天端位置から2.4m下(S-04)	天端位置から7.475m下(S-04)
		0.05	0.05	0.18	0.06	-0.12
		共W-01	共S-01-1	共S-01-2	共S-01-3	共S-01-4
		地表面(共W-01)	天端位置から19.82m上(共S-01)	天端位置から11.9m上(共S-01)	天端位置から6.7m上(共S-01)	天端位置から1.5m上(共S-01)
		0.28	0.35	0.47	0.61	-0.90

Eシールドの鉛直変位計測データ(計測断面②の切羽位置沈下量)

日付	時間	W-32	S-5-1	S-5-2	S-5-3	S-5-4
1996/4/25	14:01	地表面(W-32)	天端位置から32.5m上(S-5)	天端位置から19.5m上(S-5)	天端位置から5.5m上(S-5)	天端位置から3.1m下(S-5)
		-0.90	-0.90	-0.74	0.20	-0.05
		W-33	S-6-1	S-6-2	S-6-3	S-6-4
		地表面(W-33)	天端位置から34.0m上(S-6)	天端位置から19.5m上(S-6)	天端位置から5.5m上(S-6)	天端位置から3.1m下(S-6)
		-0.73	-0.73	-0.56	-0.01	0.02
		W-34	S-7-1	S-7-2	S-7-3	S-7-4
		地表面(W-34)	天端位置から34.0m上(S-7)	天端位置から19.5m上(S-7)	天端位置から5.5m上(S-7)	天端位置から3.1m下(S-7)
		-0.85	-0.85	-0.68	-0.01	0.04
		W-35	S-8-1	S-8-2	S-8-3	S-8-4
		地表面(W-35)	天端位置から34.0m上(S-8)	天端位置から19.5m上(S-8)	天端位置から5.5m上(S-8)	天端位置から3.1m下(S-8)
		-0.72	-0.72	-0.56	0.28	-0.01
		共W-3	共S-3-1	共S-3-2	共S-3-3	共S-3-4
		地表面(共W-3)	天端位置から34.04m上(共S-3)	天端位置から19.54m上(共S-3)	天端位置から7.2m上(共S-3)	天端位置から1.5m上(共S-3)
		-0.73	-0.74	-0.52	-0.90	-0.88

Eシールドの鉛直変位計測データ(計測断面③の切羽位置沈下量)

日付	時間	共W-1	共S-1-1	共S-1-2	共S-1-3	共S-1-4
1995/10/19	19:45	地表面(共W-1)	天端位置から28.97m上(共S-1)	天端位置から13.21m上(共S-1)	天端位置から6.7m上(共S-1)	天端位置から1.5m上(共S-1)
		-1.95	-1.95	-2.47	-2.87	-4.19
		共W-2	共S-2-1	共S-2-2	共S-2-3	共S-2-4
		地表面(共W-2)	天端位置から28.92m上(共S-2)	天端位置から13.21m上(共S-2)	天端位置から6.7m上(共S-2)	天端位置から6.7m上(共S-2)
		-1.48	-1.48	-1.41	-1.22	-1.00

変位の方向: プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

表-2.6(3) Eシールドの変位計測データの最終沈下量・切羽位置での沈下量一覧表(切羽位置通過時最終沈下量との比)

Eシールドの鉛直変位計測データ(計測断面①の切羽位置通過時最終沈下量との比)

日付	時間	W-01	S-01-1	S-01-2	S-01-3	S-01-4
1995/9/9	22:50	切羽との距離0m	地表面(S-01)	天端位置から20.0m上(S-01)	天端位置から8.0m上(S-01)	天端位置から2.4m下(S-01)
			0.036	0.036	0.022	0.226
		W-02	S-02-1	S-02-2	S-02-3	S-02-4
		地表面(W-02)	天端位置から20.0m上(S-02)	天端位置から8.0m上(S-02)	天端位置から2.8m上(S-02)	天端位置から2.4m下(S-02)
			-0.375	-0.375	1.233	0.146
		W-03	S-03-1	S-03-2	S-03-3	S-03-4
		地表面(W-03)	天端位置から20.0m上(S-03)	天端位置から8.0m上(S-03)	天端位置から2.8m上(S-03)	天端位置から2.4m下(S-03)
			0.016	0.016	-0.034	-0.172
		W-04	S-04-1	S-04-2	S-04-3	S-04-4
		地表面(W-04)	天端位置から20.0m上(S-04)	天端位置から8.0m上(S-04)	天端位置から2.4m下(S-04)	天端位置から7.475m下(S-04)
			-0.006	-0.006	-0.052	-0.130
1995/9/9	1:40	切羽との距離1m	共W-01	共S-01-1	共S-01-2	共S-01-3
			地表面(共W-01)	天端位置から19.82m上(共S-01)	天端位置から11.9m上(共S-01)	天端位置から6.7m上(共S-01)
			1.750	-0.025	-0.042	-0.053
						0.068

Eシールドの鉛直変位計測データ(計測断面②の切羽位置通過時最終沈下量との比)

日付	時間	W-32	S-5-1	S-5-2	S-5-3	S-5-4
1996/4/25	14:01	切羽との距離0m	地表面(W-32)	天端位置から32.5m上(S-5)	天端位置から19.5m上(S-5)	天端位置から5.5m上(S-5)
			0.240	0.240	0.214	-0.121
		W-33	S-6-1	S-6-2	S-6-3	S-6-4
		地表面(W-33)	天端位置から34.0m上(S-6)	天端位置から19.5m上(S-6)	天端位置から5.5m上(S-6)	天端位置から3.1m下(S-6)
			0.202	0.202	0.176	0.003
		W-34	S-7-1	S-7-2	S-7-3	S-7-4
		地表面(W-34)	天端位置から34.0m上(S-7)	天端位置から19.5m上(S-7)	天端位置から5.5m上(S-7)	天端位置から3.1m下(S-7)
			0.258	0.258	0.234	0.005
		W-35	S-8-1	S-8-2	S-8-3	S-8-4
		地表面(W-35)	天端位置から34.0m上(S-8)	天端位置から19.5m上(S-8)	天端位置から5.5m上(S-8)	天端位置から3.1m下(S-8)
			0.222	0.222	0.196	-0.189
		共W-3	共S-3-1	共S-3-2	共S-3-3	共S-3-4
		地表面(共W-3)	天端位置から34.04m上(共S-3)	天端位置から19.54m上(共S-3)	天端位置から7.2m上(共S-3)	天端位置から1.5m上(共S-3)
			0.202	0.295	0.245	0.165
						0.158

Eシールドの鉛直変位計測データ(計測断面③の切羽位置通過時最終沈下量との比)

日付	時間	共W-1	共S-1-1	共S-1-2	共S-1-3	共S-1-4
1995/10/19	19:45	切羽との距離0m	地表面(共W-1)	天端位置から28.97m上(共S-1)	天端位置から13.21m上(共S-1)	天端位置から6.7m上(共S-1)
			0.228	0.228	0.304	0.252
		共W-2	共S-2-1	共S-2-2	共S-2-3	共S-2-4
		地表面(共W-2)	天端位置から28.92m上(共S-2)	天端位置から13.21m上(共S-2)	天端位置から6.7m上(共S-2)	天端位置から6.7m上(共S-2)
			0.168	0.168	0.190	0.152
						0.145

変位の方向:プラス(+)が隆起、マイナス(-)が沈下

2.7 考察およびまとめ

5本のシールドトンネルにおける現場計測結果から、トンネル周辺地盤の沈下挙動結果から以下のことが分かった。

(1) トンネル直上の地表面・地中沈下量の挙動

①地盤条件が沖積粘性土を主体とする場合

図-2.34(1)に地盤条件が沖積粘性土を主体とする場合のシールド直上の地表面・地中沈下の沈下量と土被り比の関係を示す。本トンネルの計測結果から、シールドトンネルの上部の地盤が沖積粘性土が主体となる条件では、シールドトンネル掘削時のトンネル直上の地盤の沈下挙動は、土被り比が深い場合の方が沈下量が小さい傾向にあり、土被り比が6程度の条件で地盤の沈下量が最大で5mm程度と非常に小さい値を示した。

図-2.34(2)に地盤条件が沖積粘性土を主体とする場合のシールド直上地盤の沈下量の分布図を示す。トンネル直上の沈下量の挙動は、土被り比3程度までは地表面の沈下量が比較的大きく、トンネル天端付近の沈下量とそれほど大きな差はないことから、トンネル上部の地盤が全体的に沈下する共下がりの挙動を示す傾向であることが分かった。それに対して、土被り比が6程度の場合はトンネル天端に近い沈下量が最も大きく、トンネルから遠ざかるにしたがって小さくなる傾向にあり、このような条件下では比較的弾性的な沈下挙動を示していることが分かった。

②地盤条件が沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合

図-2.35(1)に地盤条件が沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合のシールド直上地盤（ただし、Dシールドは計測が1測線のみでシールド直上ではないため参考値として取り扱った。）の沈下量と土被り比の関係を示す。本トンネルの計測結果から、沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合のシールド直上の沈下量は、いずれも土被り比にあまり関係なく約10mm以下と非常に小さいことが分かった。また、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合においても、シールドトンネルを掘削する場合の周辺地盤の沈下挙動は、土被り比にはあまり関係なく数mmから15mm程度と非常に小さいことが分かった。

図-2.35(2)にシールド直上地盤の沈下量の分布図を示す。これから、Cシールドの計測断面①、②およびEシールドの計測断面②、③は地表面（図中で各データの最上部の点）付近の沈下量と地表面からそれぞれ約10m下部および約20m下部の沈下量とがほぼ同様な値を示していることが分かる。これは、Cシールドはトンネル上部に地下鉄の既設構造物が存在し、杭基礎下端の位置が地表面から約10mにあることから、地表面から約10m程度までの地盤および杭基礎とがほぼ一体として沈下したものと判断できる。また、Eシールドについては、トンネル上部に橋脚の杭基礎が存在し、その構造物下端の位置が地表面から約20mにあることから、地表面から約20m程度までの地盤および構造物とがほぼ一体として沈下したものと判断できる。したがって、トンネル上部に既設構造物が存在するような条件下では、その構造物とその上部の地盤とが一体となって共下がりの沈下挙動する傾向があることが分かった。

(2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の挙動

5本のシールドトンネルの沈下挙動は、これまで計測された地盤挙動と同様な傾向を示した。すなわち、切羽前方の沈下は、シールド掘削による切羽圧力の解放による地山の緩み、掘削に伴う周辺地山の乱れなどによる挙動が考えられ、また、切羽後方の主な沈下は、シールド機とセグメントの外径の違いから生じるテールボイドによる周辺地盤への緩みによるものが大きく影響しているものと考えられた。なお、施工状況によっては、トンネル近傍の計測地点では裏込め注入が要因と考えられる隆起現象も見られた。

地盤条件が沖積粘性土を主体とする場合の切羽の進行に伴う地盤変状の変化は、切羽前方1～2D程度から沈下し始め、切羽後方約2D程度まで急激な沈下が生じ、その後切羽の進行とともに沈下が収束する傾向にあった。施工条件によって異なるものと考えられるが、一つの目安として本トンネルのような軟弱な沖積粘性土地盤の条件下における沈下挙動は、切羽前方1～2D付近からトンネル周辺地盤への沈下影響が現れ始め、裏込め注入等によって隆起現象を生じるものの切羽後方約20D付近で収まることが分かった。

地盤条件が沖積砂質土および沖積粘性土を主体とする互層地盤、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合の場合の切羽の進行に伴う地盤変状の変化は、概ね切羽前方の約5D～1.5D付近から変化が現れ始め、若干の隆起傾向を示した後に切羽後方約4D～30D程度の間で収束傾向にあることが分かった。

(3) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

トンネルの掘削による影響は、5本のシールドトンネルの現場計測結果とも同様な傾向であった。すなわち、トンネル中心位置付近の沈下量が最も大きく、トンネル側方に遠ざかるにしたがって小さくなることが分かった。トンネルの掘削による地盤変状は、傾向的にはトンネル下端からほぼ45°の傾きで地表面へ延ばした範囲に概ね収まることが分かった。

(4) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比は、地盤条件が沖積粘性土を主体とする場合では、切羽が到達する以前に最終沈下量の約1～2割以内程度の沈下をしていることが分かった。また、地盤条件が沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合の場合では、切羽が到達する以前に最終沈下量の約1～3割が沈下していることが分かった。

これらの結果は、山岳トンネルの場合の約3～4割の値と比較すると若干小さい値となった。これは、山岳トンネル工法では切羽を開放しながらの掘削、支保の建込みを行う工法に対し、シールド工法がシールド機により切羽を解放せずに掘削、セグメントの建込みを行う工法であることより、周辺地盤の挙動が小さい結果となったためであると同時にトンネル切羽面による地山応力の解放、無支保の状態が存在しないなどの工法の違いによるものと考えられる。

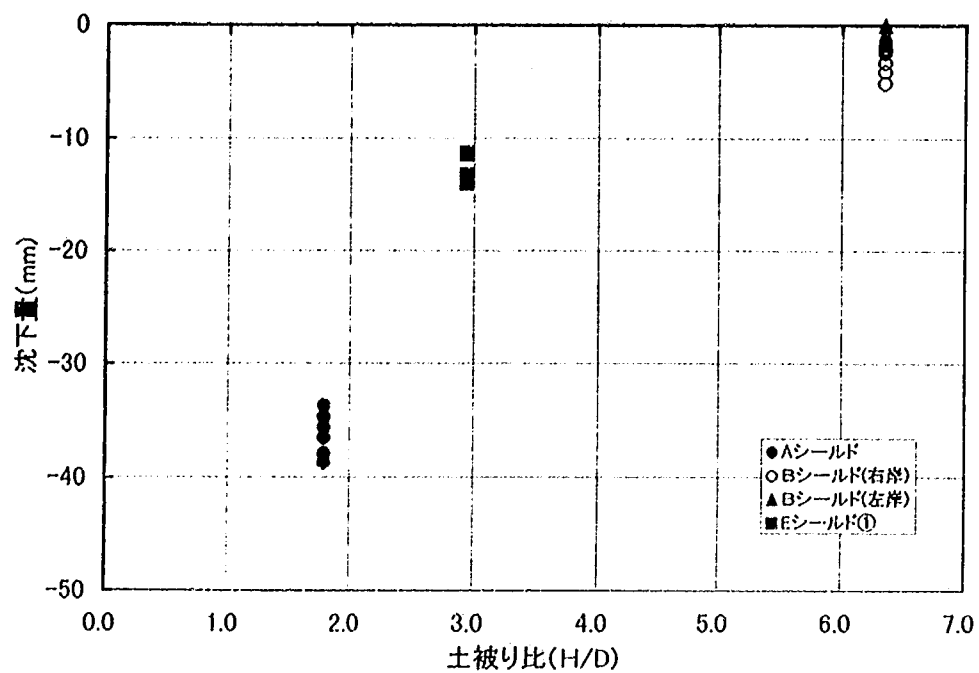


図- 2. 34 (1) シールド直上地盤の沈下量と土被り比の関係 (沖積粘性土)

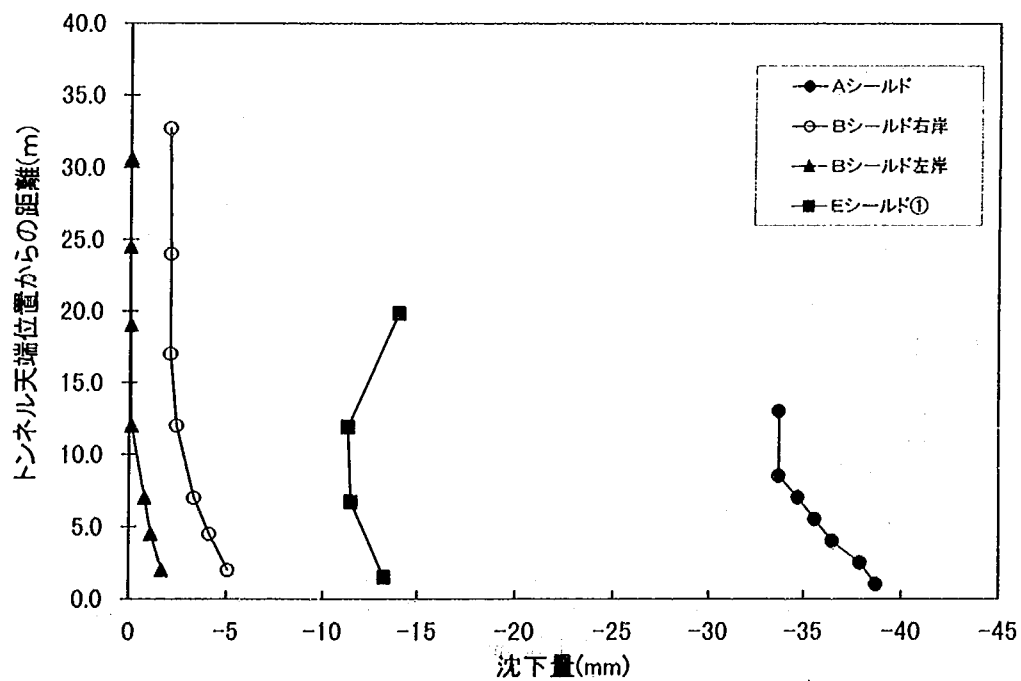


図- 2. 34 (2) シールド直上地盤の沈下量の分布図 (沖積粘性土)

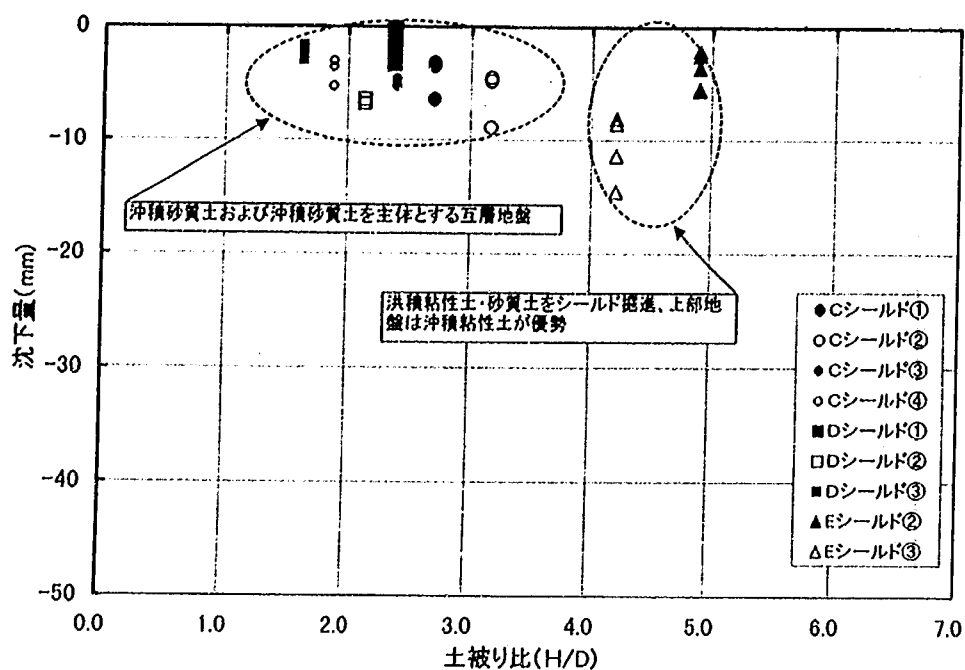


図-2.35 (1) シールド直上地盤の沈下量と土被り比の関係
(沖積砂質土層および洪積粘性土層、洪積砂質土層)

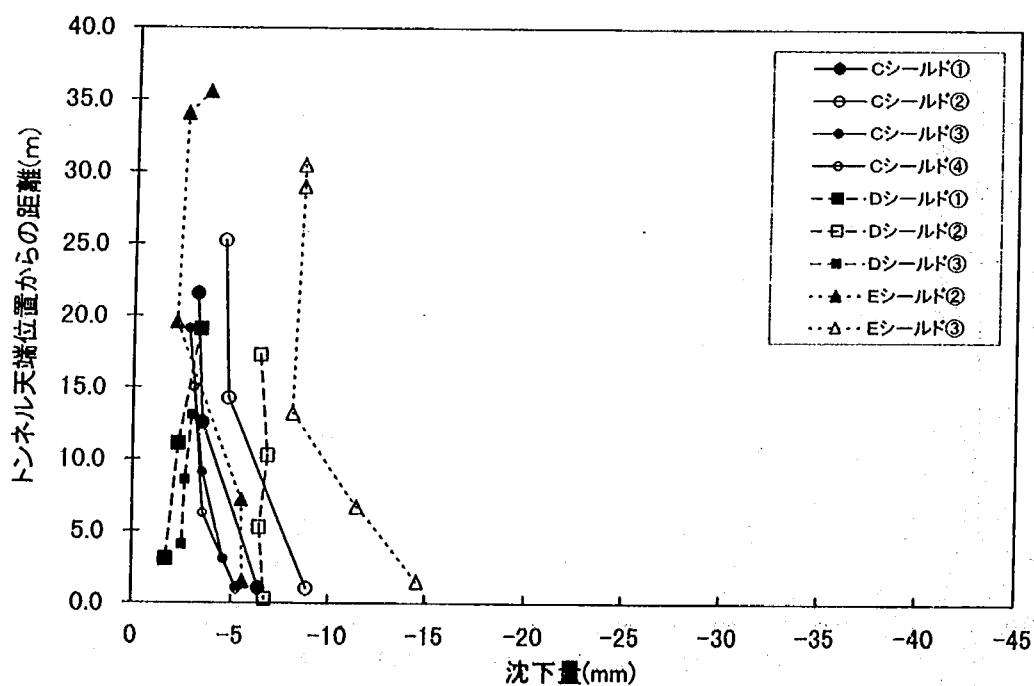


図-2.35 (2) シールド直上地盤の沈下量の分布図
(沖積砂質土層および洪積粘性土層、洪積砂質土層)

第3章 数値解析によるシールドトンネルの掘削時の周辺地盤の挙動の検討

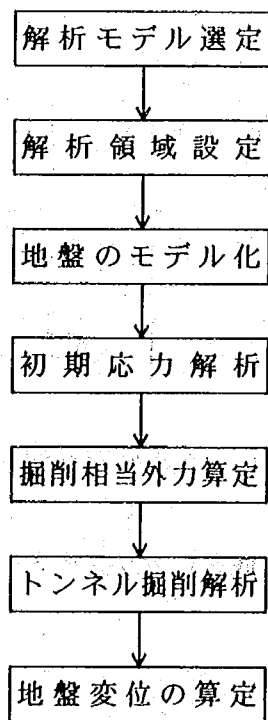
3.1 概説

近年、都市におけるシールドトンネルは、地中構造物の輻輳化とともに既設構造物に近接して施工しなければならないなど、これまで以上に厳しい現場条件下での施工を余儀なくされるケースが多くなった。このため、シールド工事を行ううえで地盤変状防止は今後とも避けて通ることのできない重要課題といえる。よって、地盤変状現象を把握し、その程度を予測することは工事を進めるうえできわめて重要なことである。地盤変状を予測する手法としては、有限要素法などの数値解析的な解析手法によるものが現在主力となっており、有限要素法によって地盤変状を解析するには、解析モデル、入力物性値、応力解放率などの解析条件を適切に設定する必要がある。しかし、これらの解析条件は、それぞれの現場状況に応じて独自の判断により設定されており、統一された考え方により決められていないのが現状である。本章では、前章で報告された現場計測結果を対象とした有限要素法による数値解析を行い、より実務的な地盤変状予測手法の確立を目的とした解析条件の合理的な設定方法を検討する。

3.2 トンネル掘削時の地盤変状予測方法

3.2.1 解析の手順

地盤変状解析は、以下の手順によって解析されるものとする。



図－3.1 地盤変状解析の手順

3.2.2 解析モデル選定

シールド掘進に伴う地盤変状の予測解析は古くから行われており、各種の方法が提案されてきたが、現在ではさまざまな施工条件を加味することができる有限要素法による解析が主流となっている。

実際のシールド掘進による地盤変状は三次元的な現象であるから、三次元モデルで取り扱われることが望ましく数値解析技術が高度化するに従い徐々に研究成果が見られるようになってきてはいるが、本検討においては実務的な適用を考慮し、二次元平面ひずみモデルを用いるものとする。

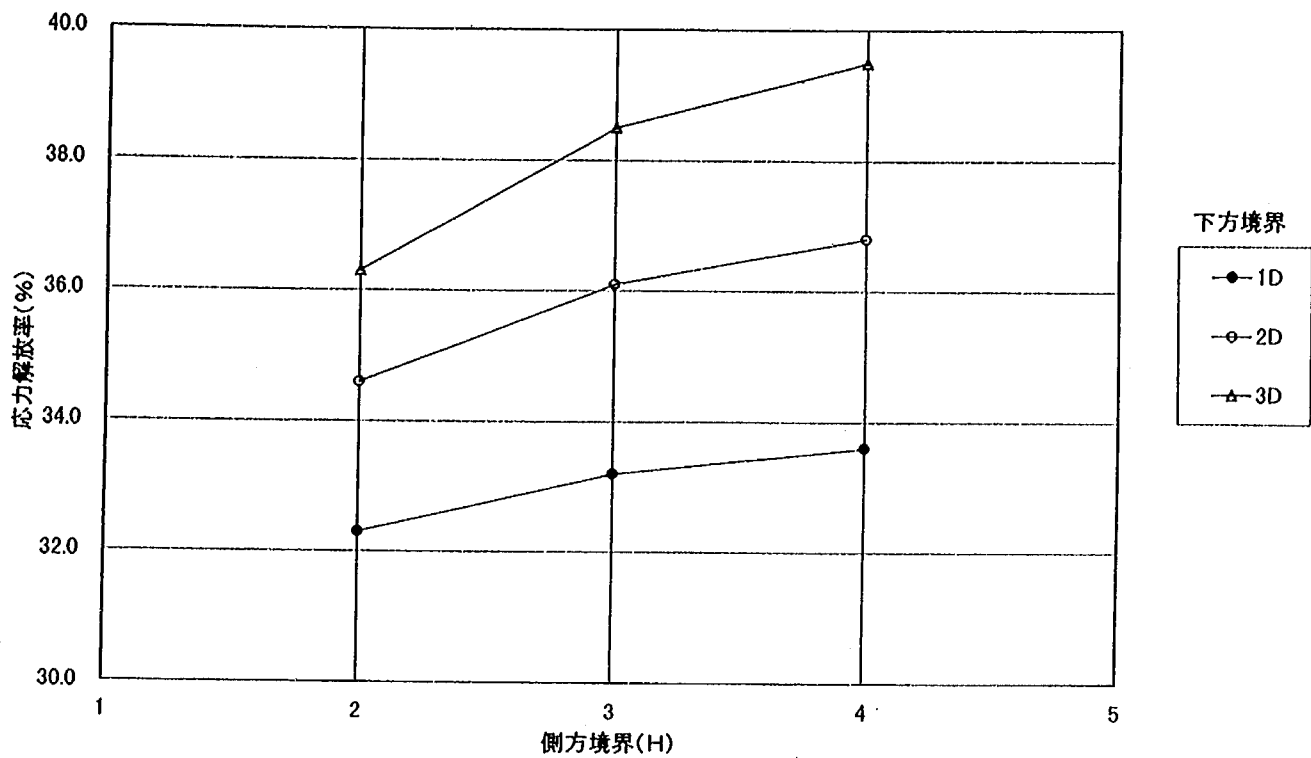
3.2.3 解析領域設定

図-3.2(1)、(2)は後述するAシールドの有限要素法解析（応力解放率解析法による2ステップまでの解析（従来方式）、p.81参照）において、解析領域の設定による実測変位に対応する応力解放率への影響度を検討したものである。ここでは、トンネル側壁面から側方境界までの距離を2H（H：土被り）、3H、4H、トンネル底から下方境界までの距離を1D（D：トンネル直径）、2D、3Dと変化させた場合の影響について検討を行った。表-3.1(1)、(2)に示すように解析領域の設定によってシールド直上部の地表面では32.3～39.5%、シールド天端1m上では17.3～19.0%の応力解放率となり、解析領域の設定が地表面沈下予測に与える影響が大きいことが分かる。また、側方境界と下方境界では下方境界までの距離の設定が解析結果に与える影響が大きい。

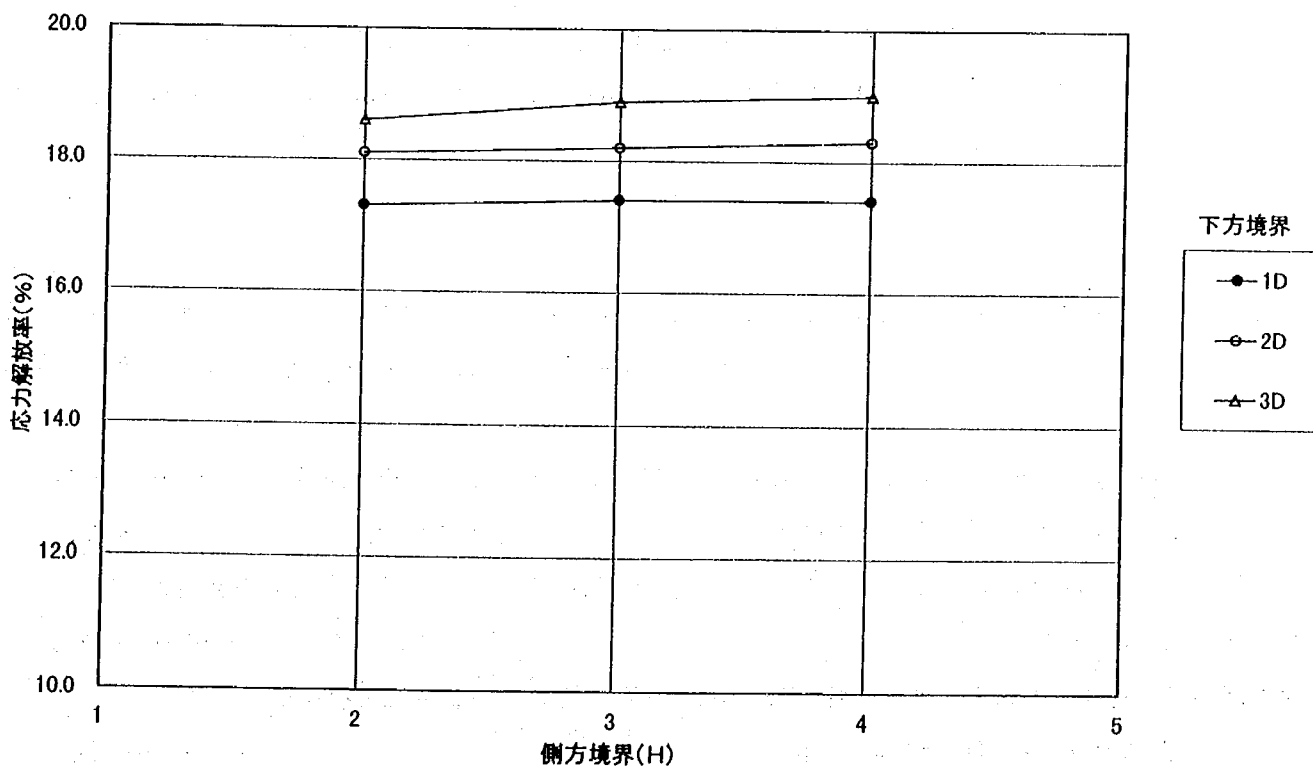
表-3.1 解析領域による応力解放率

(1) 地表面 (単位：%)				(2) シールド天端位置1m上 (単位：%)			
側方境界 下方境界	2H	3H	4H	側方境界 下方境界	2H	3H	4H
1D	32.3	33.2	33.6	1D	17.3	17.4	17.4
2D	34.6	36.1	36.8	2D	18.1	18.2	18.3
3D	36.3	38.5	39.5	3D	18.6	18.9	19.0

以上の結果および「トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)」³⁾（建設省土木研究所資料3232号、平成6年2月）での実測値と有限要素法解析による検討等により、後述する各シールドにおける解析においては、トンネル側壁面から側方境界までの距離は2H、トンネル底から下方境界までの距離は1Dとして解析領域の設定を行った。



図－ 3. 1 (1) 解析領域と応力解放率の関係（Aシールド 直上部地表面）



図－ 3. 1 (2) 解析領域と応力解放率の関係（Aシールド シールド天端 1 m上）

3.2.4 地盤のモデル化

(1) 応力～ひずみモデル

解析に用いる地山の応力～ひずみモデルは、地山の特性を的確に評価できるものが望ましいが、入力に用いる地山物性値等については不確定要素もあるため、本検討においてはパラメーターの少ない線形弾性モデルを用いるものとした。

(2) 要素分割

解析に用いる地山の有限要素としては、要素内のひずみを一定とした三角形要素、複雑な形状に適應性の高いアイソパラメトリック四辺形要素などがある。本検討ではアイソパラメトリック四辺形8節点要素を用いた。

要素分割する際には、一般的に応力勾配が大きいトンネル周辺部を密に分割するとともに、地層の区分を分割された要素の物性値の違いにより表せるように分割する。

なお、厚い軟弱層などのように同一地層が深度方向に厚く分布する場合には、変形係数の拘束圧依存性を考慮するため、深度方向に適度に分割することもある。

(3) 地山物性値

地山物性値の設定は、①試験による、②類似工事の逆解析によるなどの方法があるが、現状では必ずしも統一された考え方により決められていない。統一的に定められない最も大きな理由は、シールドやセグメントとの境界での地盤の挙動、裏込め注入による地盤変位の抑制効果などが十分に解明されていないためである。しかし、シールドの施工により発生する地盤変位をすべての要因を一括した応力解放率と表現して解析を行う上では地盤物性値と応力解放率は対で考える必要があり、応力解放率の定量的な評価を行うためにも地山物性値の統一的な設定方法が必要である。

1) 変形係数

有限要素法に用いる地山の変形係数は、ボーリング孔内水平載荷試験、サンプルコアの一軸・三軸圧縮試験、または、標準貫入試験のN値などから設定することが多い。本検討では以下のように変形係数を設定するものとした。

$$(\text{砂質土}) \quad E = 7 N \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (0.68 N \text{ MN/m}^2) \quad (N : \text{標準貫入試験値}) \quad \cdots \cdots (3.1)$$

$$(\text{粘性土}) \quad E = 210 C \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (C : \text{粘着力}) \quad \cdots \cdots (3.2)$$

粘性土地盤における粘着力Cの設定については、基本的に土質試験で得られた一軸圧縮強度 q_u から

$$C = q_u / 2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \cdots \cdots (3.3)$$

の関係を用いて算定するものとするが、 q_u が得られていない場合においてはN値を用いて、

$$q_u = N / 8 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (12.25 \text{ kN/m}^2) \quad \cdots \cdots (3.4)$$

の関係から算定する。ただし砂質粘土においては砂質粒子によって q_u が小さくなるため(3.4)式の適用はできないことがある。

また、非常に軟らかいところでは

$$q_u = (1 \sim 2.5) \text{ N/8 (kgf/cm}^2\text{)} \quad (12.25 \sim 30.64 \text{ kN/m}^2) \quad (\text{ただし } N < 5) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

非常に硬いところでは

$$q_u = (0.5 \sim 1) \text{ N/8 (kgf/cm}^2\text{)} \quad (6.12 \sim 12.25 \text{ kN/m}^2) \quad (\text{ただし } N > 15) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

となる傾向にあるとの報告⁴⁾もあることから取り扱いについては注意が必要である。

また、軟弱な粘性土地盤ではN値がほぼ一定でも変形係数（一軸圧縮強度）の深度依存性が認められることがある。

粘性土の変形係数は上記以外に、応力～ひずみ曲線において、圧縮強さの2分の1の点での割線変形係数 E_{50} や原位置でのボーリング孔内水平載荷試験による変形係数 E_p があるが、各測定法によって異なった値を示す。

ここでは統一的な解析条件を定めるという意味からも粘性土の変形係数は(3.2)式により設定するものとした。

2) 単位体積重量

解析に用いる地盤の単位体積重量は、土質試験結果によるものとする。ただし、試験結果が得られていないものについては、下表を参考に設定する。

表－3. 2 土の単位体積重量⁵⁾ (tf/m³)

	密なもの	ゆるいもの
礫 質 土	2. 0	1. 8
砂 質 土	1. 9	1. 7
粘 性 土	1. 8	1. 4

3) ポアソン比

ポアソン比を求める方法は、弾性波速度、超音波速度によるものがあるが、これらはすべて動的なものであり、本検討のような静的解析に必要なポアソン比 ν を求める一般的な手法はない。そこで、本解析では各種地盤に対する一般的な値として以下の値を用いるものとする。

(砂質土) $\nu = 0.3 \sim 0.4$

(粘性土) $\nu = 0.35 \sim 0.4$

(礫質土) $\nu = 0.3$

3.2.5 初期応力解析

トンネル掘削による各種影響を予測するためには、掘削前の応力（初期地山応力）状態の適切な設定が重要である。特に、解析手法のうち応力解放率を用いた手法では、掘削相当外力の設定においてトンネルの初期応力から得られた等価節点力が重要な構成要因となっている。

本解析では、一般に採用されている方式と同様に、土被り圧と側方土圧係数を用いた応力計算により初期応力状態を設定する。

ここで、側方土圧係数 K は $K = \nu / (1 - \nu)$ でポアソン比のみから決定されるものとする。

3.2.6 トンネル掘削解析

トンネル掘削解析においてトンネルの掘削の模擬はトンネル掘削予定面に掘削相当外力を作用させることにより行っている。掘削相当外力は初期応力解析で得られた地盤応力に対し、地盤変位におよぼす要因すべてを一括した応力解放率 α を用いて以下のように算定する。

$$P = \alpha \cdot P_0 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

ここに、

P : 地盤変位に寄与する掘削相当外力

P_0 : 掘削前の地盤応力（初期応力解析で算出）

α : 応力解放率（％）

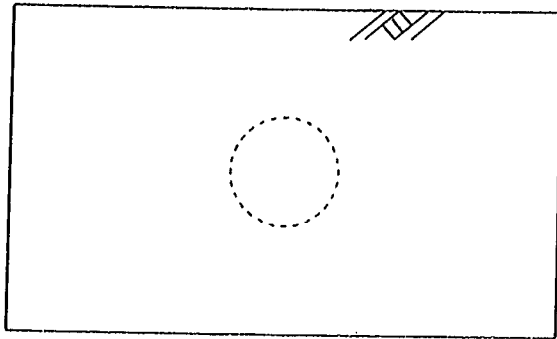
従来の解析では以上の2ステップ（1ステップ：初期応力解析→2ステップ：応力解放）によって地盤変位の算定を行っていたが、本解析ではさらに応力の収支を考慮し、2ステップ目で掘削時に α ％の応力解放をさせた後、次のステップ3で裏込め注入材とセグメントの設置を行い、残りの $(100 - \alpha)$ ％の応力を載荷応力として裏込め注入材に作用させた時の地盤変位の算出も行った。

裏込め注入材と覆工のモデル化については、裏込め注入材を面要素、覆工は梁要素として取り扱った。

さらに、ステップ3の解析ではセグメントに天端部とインバート部の掘削相当外力の差が浮力として作用し、場合によってはセグメントが浮き上がり地盤変位を的確に表現できなくなる。こうした浮き上がりによる地盤変位は現実には観測・報告されていないことから、こうした変位は地盤の受動土圧によって抵抗を受けると考えて、側壁部の鉛直変位を拘束する場合(fix)と拘束しない場合(free)の計算を行い比較検討を行った。図-3.2に応力解放率解析法でのステップ解析の手順を示す。

また、参考として「トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)」³⁾(建設省土木研究所資料3232号、平成6年2月)で提案されている、裏込め注入解析法でも解析を行い(0.02MPaと0.12MPaの2ケース)、応力解放方式との比較をした。図-3.3に裏込め注入解析法でのステップ解析の手順を示す。

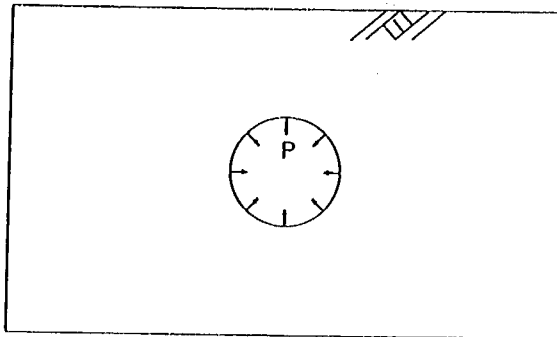
以下3.3～3.7において各シールドでの解析結果を報告するが、本検討は地質状況、シールド径、土被り等の相違により現場計測で得られた実測値に対する応力解放率 α がどのように変化するかを比較検討するため、近接構造物はモデル化の対象とはせず地盤のみのモデルによって検討した。



(STEP 1) 初期応力解析

P_0 : 地山の初期応力

※ここで算出される変位は初期化する



(STEP 2) 応力解放 α %

$$P = \alpha \cdot P_0$$

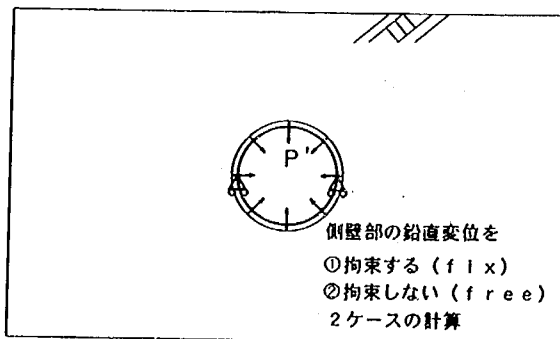
ここに、

P : 地盤変位に寄与する掘削相当外力

P_0 : 掘削前の地盤応力

α : 応力解放率 (%)

$\delta 1$: 変位



(STEP 3) 応力解放 $(100 - \alpha)$ %

裏込め注入材を面要素

セグメントを梁要素で入力

$$P' = P_0 - P$$

ここに、

P' : 載荷応力

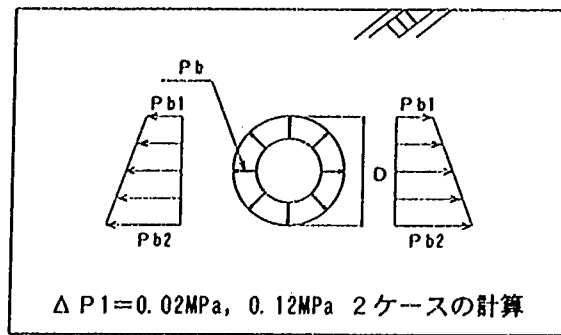
P_0 : 掘削前の地盤応力

P : 地盤変位に寄与する掘削相当外力

$\delta 2$: 変位

算定変位 : $\delta 1 + \delta 2$

図-3.2 ステップ解析の手順 (応力解放率解析法)



(STEP 1) 裏込め注入解析

100%応力解放した掘削面に
裏込め注入圧(外力)を作用させる。

ただし、裏込め注入圧は液圧分布で
与える。

$$\Delta P1 = \sigma_0 - P_b$$

$$P_b (\text{天端}) = P_{b1} = \sigma_v - \Delta P1$$

$$P_b (\text{底板}) = P_{b2} = P_{b1} + \gamma_1 D$$

ここに、

$\Delta P1$: 掘削相当外力

P_b : 裏込め注入圧

σ_0 : 初期地山応力

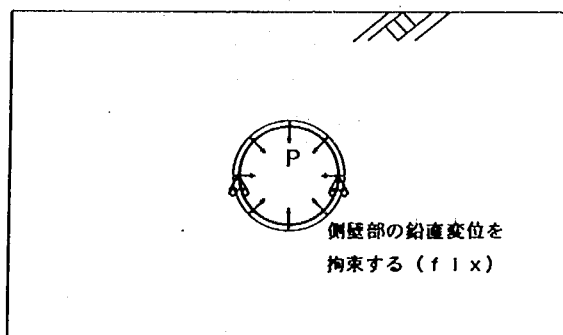
σ_v : トンネル作用土圧

γ_1 : 裏込め材の密度

D : トンネル直径

$\delta 1$: 変位

+



(STEP 2) 平面梁要素解析

裏込め注入材を面要素

セグメントを梁要素で入力

P : 掘削相当外力は

全土被り圧を作用させる

$\delta 2$: 変位

$$\text{算定変位: } \delta 1 + \delta 2$$

図-3.3 ステップ解析の手順 (裏込め注入解析法)

本シールドは単線並列の併設トンネルであるが、ここでは先行シールド施工時（単設時）についての解析とする。

(1) 解析領域

鋼削(マシ)外径: 7.250mm → 土被り: 12.925m (=H: 解析領域用)
 セグメント外径: 7.100mm → (土被り: 13.000m)

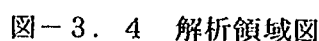


図-3.5に土質柱状図、表-3.3に土質試験結果一覧表、表-3.4に地盤物性値の入力諸定数を示す。



試料採取深度 (cm)		6.15~6.45	10.09~10.85	15.60~15.80	20.00~20.80	27.00~27.8
粘 土 特 性	牌分 (2000 μ m以上) %	4.3	0	1	1	0
	砂分 (74~2000 μ m) %	4.8	5	2.4	1.3	2.7
	シルト分 (5~74 μ m) %	5	4.9	4.2	5.0	3.8
	粘土分 (5 μ 以下) %	4	4.6	3.3	3.6	3.5
	最大粒径 mm	25.4	0.25	4.76	4.76	2.00
均等係数 U_c		28.6	-	-	-	-
	曲率係数 U_c'	0.6	-	-	-	-
	コンシ ン ス テ シ タ ビ リ ティ					
液性限界 W_L %	-	43.7	47.7	64.1	87.3	
塑性限界 W_p %	-	29.9	32.6	38.1	60.6	
塑性指数 I_p %	-	13.8	15.1	26.0	26.7	
土粒子の比重 G_s		2.78	2.70	2.69	2.66	2.51
自 然 状 態	含水比 W_w %	16.5	54.6	59.8	65.7	101.2
	湿密度 ρ_t g/cd	2.21	1.69	1.67	1.62	1.42
	孔隙比 e	0.47	1.47	1.58	1.72	2.56
	飽和度 S_r %	99	101	102	101	93
一軸圧縮試験	一軸圧縮強度 $\gamma_{kgf/cd}$	-	0.59~0.46	0.87~0.86	0.82~1.02	1.77~0.76
	破断ひずみ ϵ %	-	62~7.3	63~6.8	55~5.7	4.4~3.7
三軸圧縮試験	変形係数 $E_{kgf/cd}$	-	128~10.5	229~22.6	21.6~25.5	51.9~29.2
	試験の条件 注)	-	CU	CU	CU	CU
圧密試験	粘着力 $C_{kgf/cd}$	-	0	0	0	0
	せん断抵抗角 ϕ 度	-	24	24	22	27
	圧密臨界応力 $P_{kgf/cd}$	-	1.22	1.23	2.00	-
	圧縮係数 C_c	-	0.58	0.37	0.68	-
透水試験 (水水位法) K_{10}		1.30	2.51	2.20	2.71	
(m/sec)	-	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	

注) CU: 圧密乾燥水試料

表-3. 4 地盤物性値の入力諸定数

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) q_u^*		(参考) E_{90}^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)	(kgf/cm ²)	(MN/m ²)
Ac1	1.80	35	3.43	0.40	—	—	—	—
Ac2-1	1.70	55	5.39	0.40	0.46~0.59	45.1~57.8	10.5~12.8	1.02~1.25
Ac2-2	1.70	90	8.82	0.40	0.82~1.02	80.4~100.0	21.6~25.5	2.11~2.50
Ac2-3	1.70	130	12.74	0.40	0.76~1.77	74.5~173.5	29.2~51.9	2.86~5.08

*土質試験結果

(3) 構造物の物性値

裏込め注入材、セグメントの物性値は以下の通りとする。

1) 裏込め注入材

単位体積重量 : $\gamma = 1.30 \text{ tf/m}^3$ 弾性係数 : $E = 2.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$
(19.61 MN/m²)ポアソン比 : $\nu = 0.30$

2) セグメント

弾性係数 : $E = 3.9 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
(3.82 $\times 10^4$ MN/m²)ポアソン比 : $\nu = 0.17$ 断面積 : $A = 3.0 \times 10 \text{ cm}^2$ 断面二次モーメント : $I = 2.25 \times 10^3 \text{ cm}^4$

3.3.2 解析結果

(1) 着目点での応力解放率

図-3. 6に示す2点を着目点とし、解放率と沈下量の関係を図-3. 7(1)、(2)に示す。

応力解放率解析法において、従来の場合(ステップ2まで)と応力の収支を考慮した場合(ステップ3まで)の実測値に対応する応力解放率 α を表-3. 4に示す。着目点①(シールド直上地表面)の方が着目点②(シールド天端1m上)より実測値に対する応力解放率 α が大きくなっている。

また、STEP 3方式②(セグメント側壁部拘束しない)のステップ2(掘削)からステップ3(覆工設置)において浮き上がり現象が生じている。

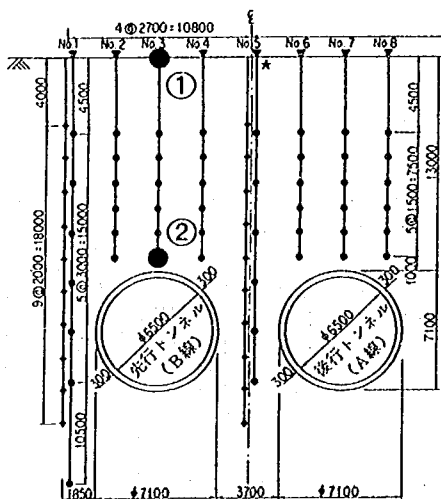


図-3. 6 着目点位置

表-3. 4 実測値に対する応力解放率 α

着目点 解析方式	① (シールド直上地表面)	② (シールド天端1m上)
STEP 2 (従来) 方式	32.3%	17.3%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	29.7%	13.8%
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	36.9%	20.9%

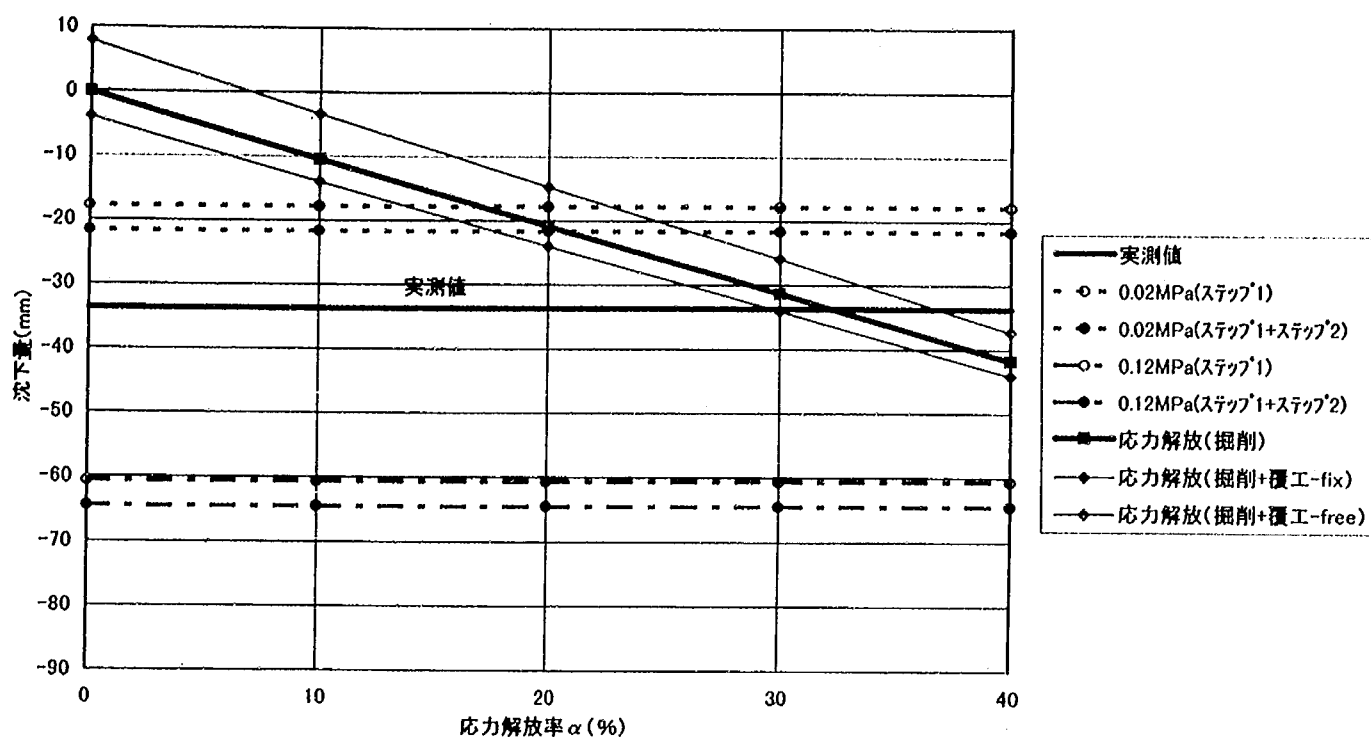


図- 3. 7 (1) 解放率と沈下量の関係 (着目点①)

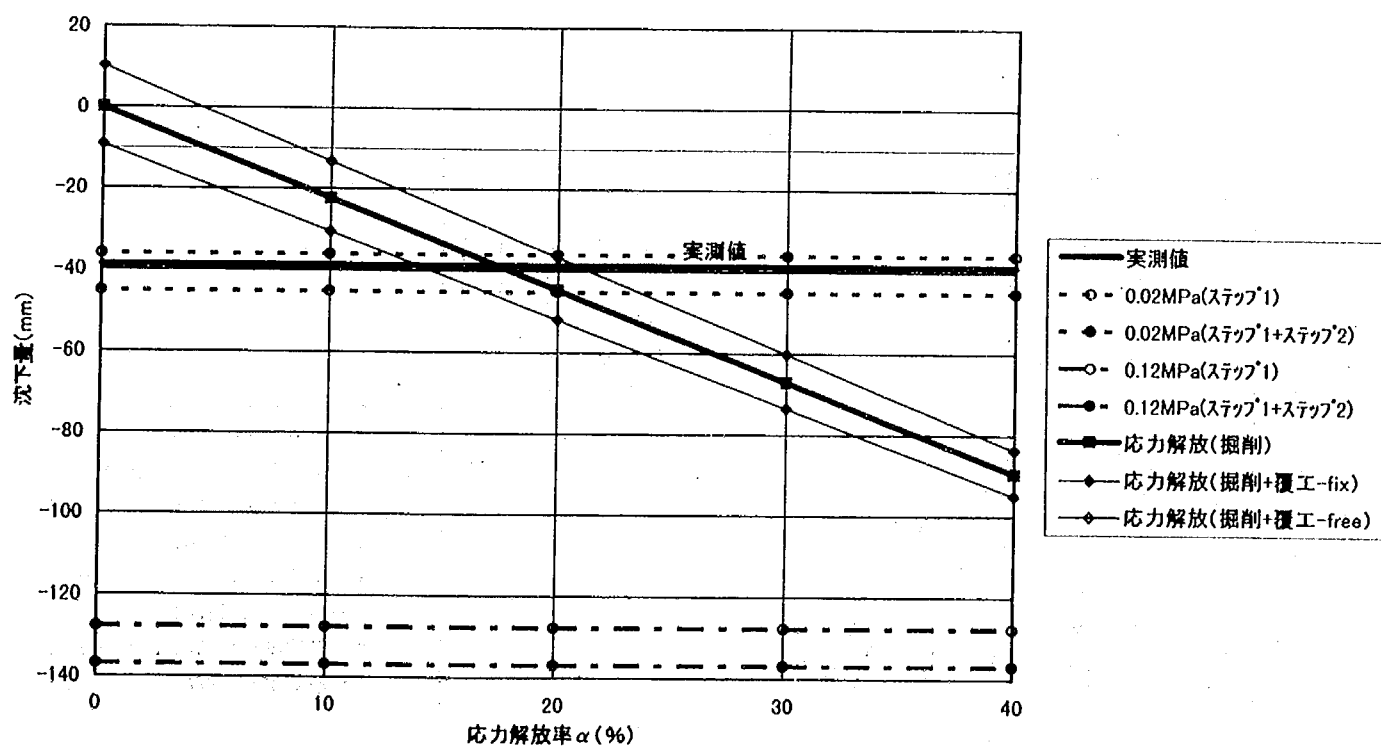


図- 3. 7 (2) 解放率と沈下量の関係 (着目点②)

(2) 層別沈下量

各計測位置 (No. 1~No. 8) における層別沈下量の計測および解析結果を図-3. 8 (1)~(8)に示す。

計測値からはどの計測地点においても地表面からシールド天端 1 m 上まで共下り的な挙動となっていることから、線形弾性モデルとしてのシミュレートが困難であった。

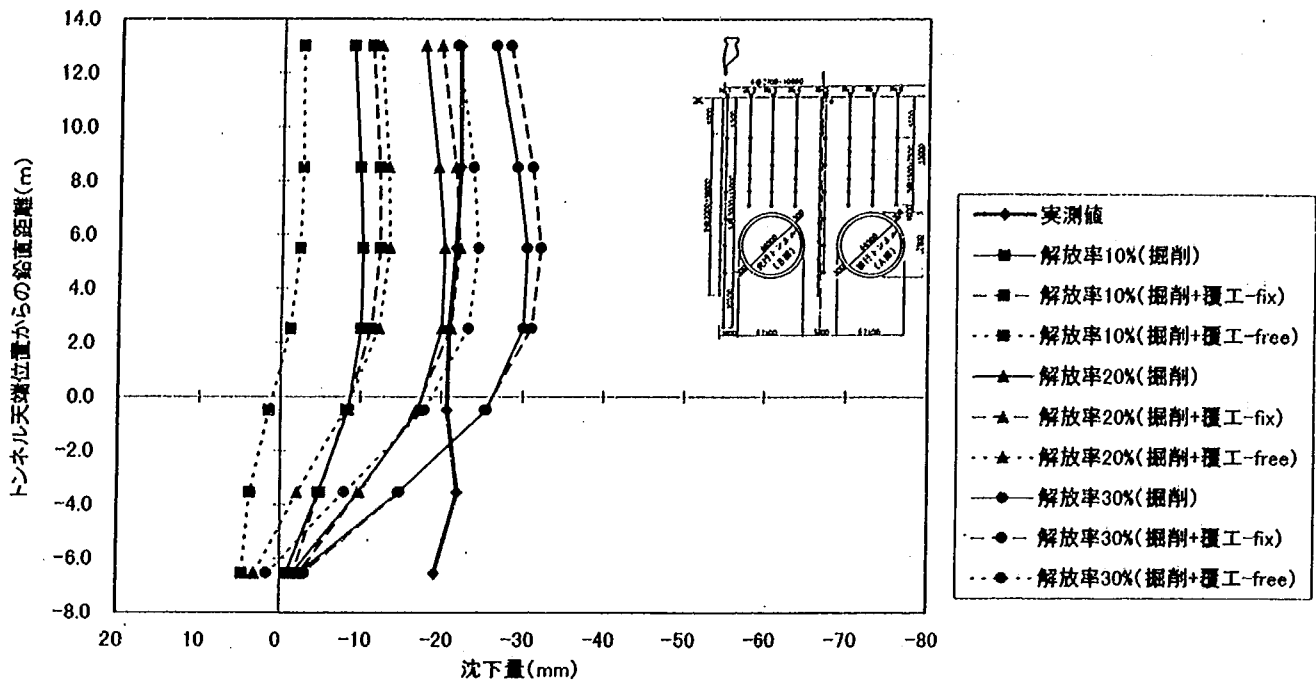


図-3. 8 (1) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 1)

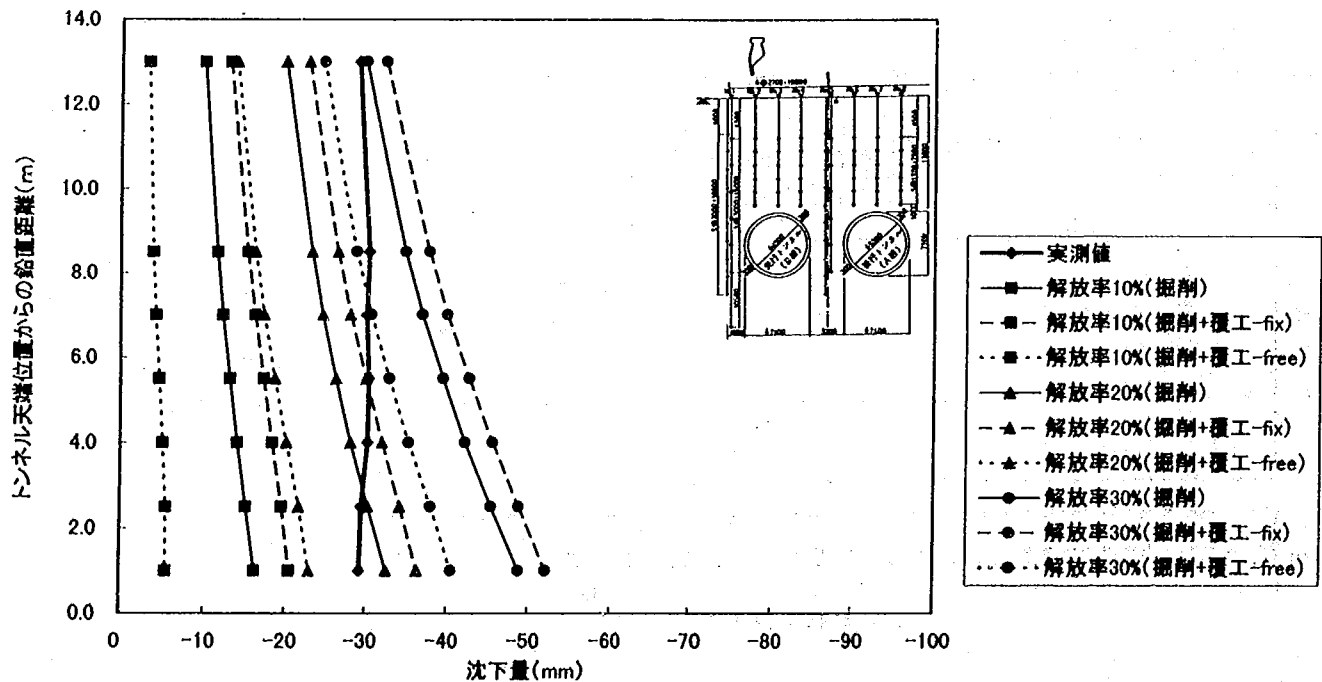


図-3. 8 (2) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 2)

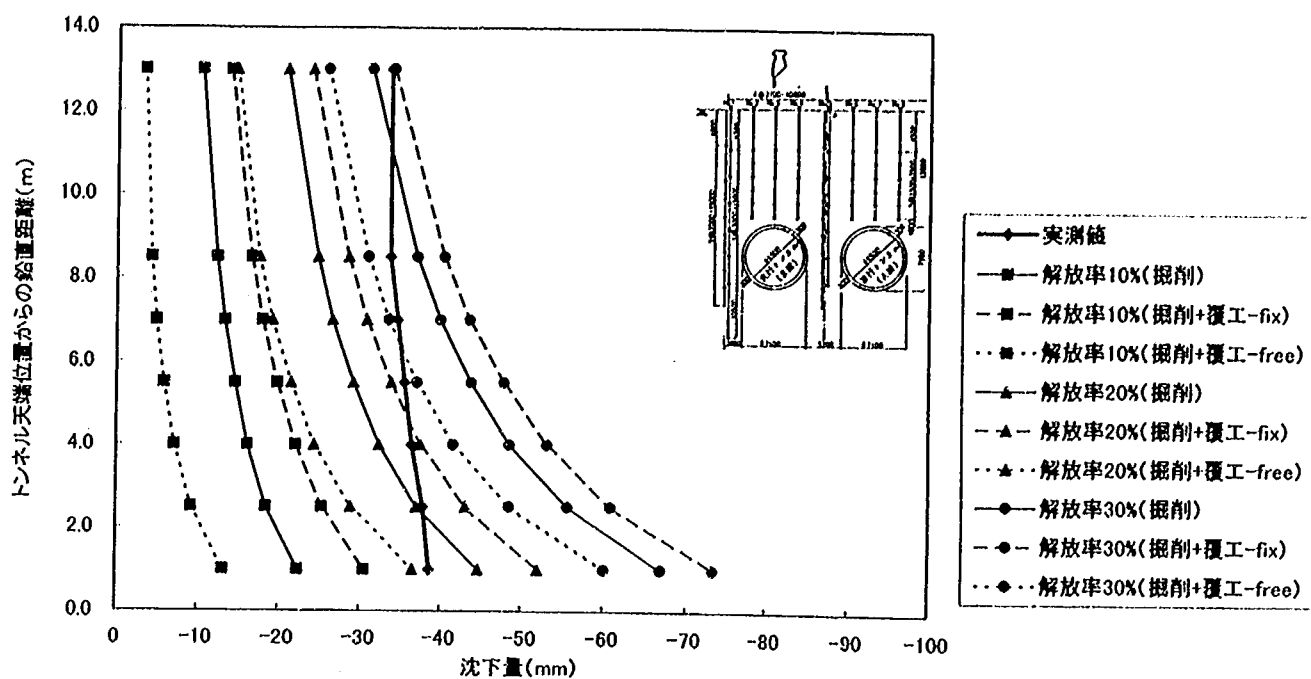


図-3. 8 (3) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 3)

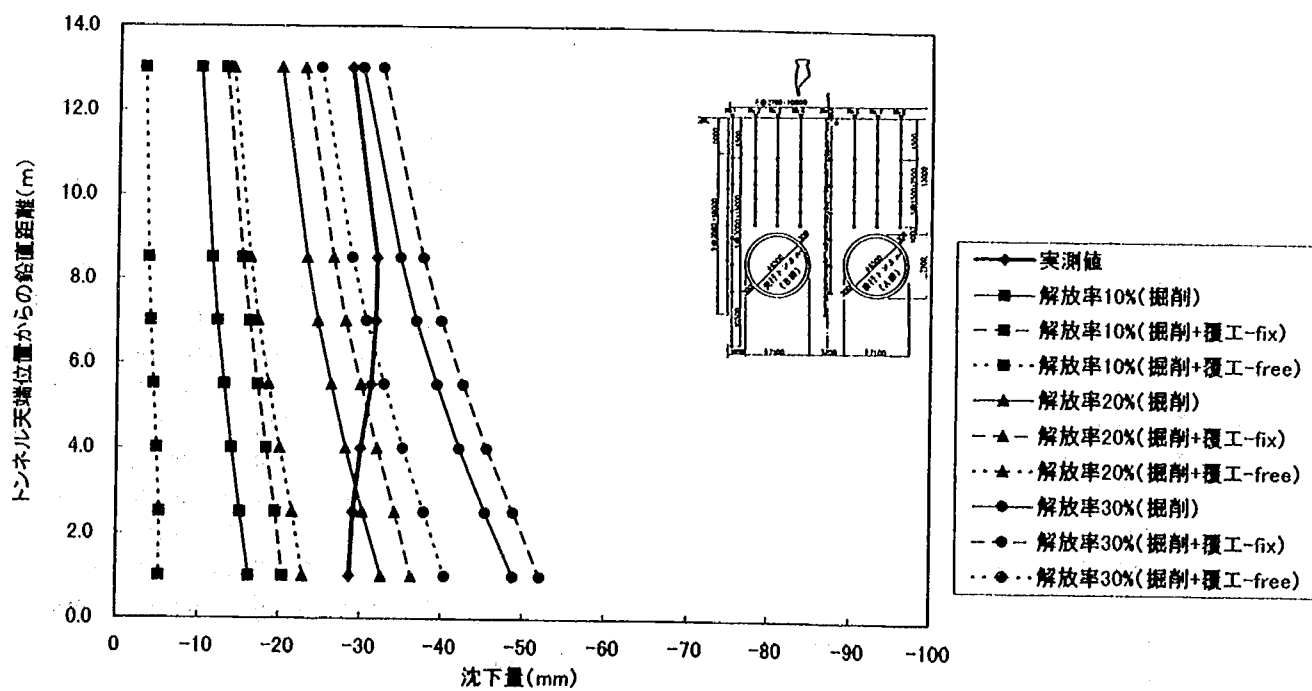


図-3. 8 (4) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 4)

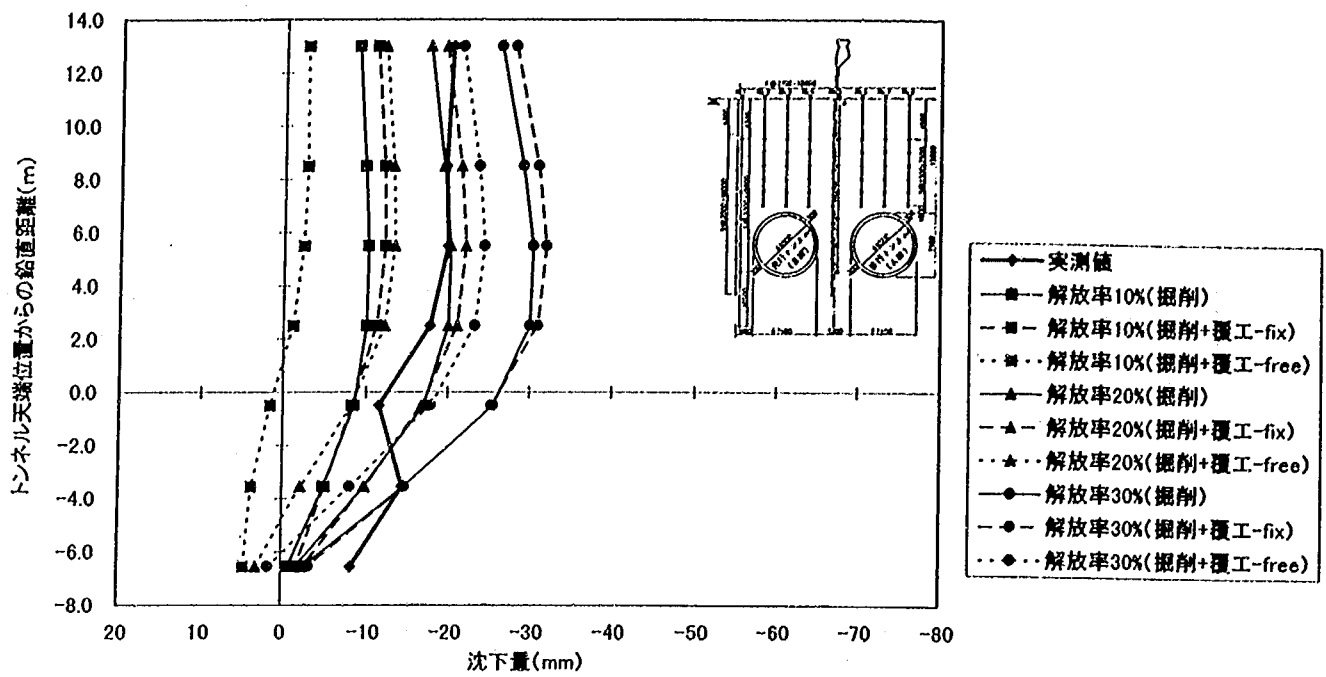


図-3. 8 (5) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 5)

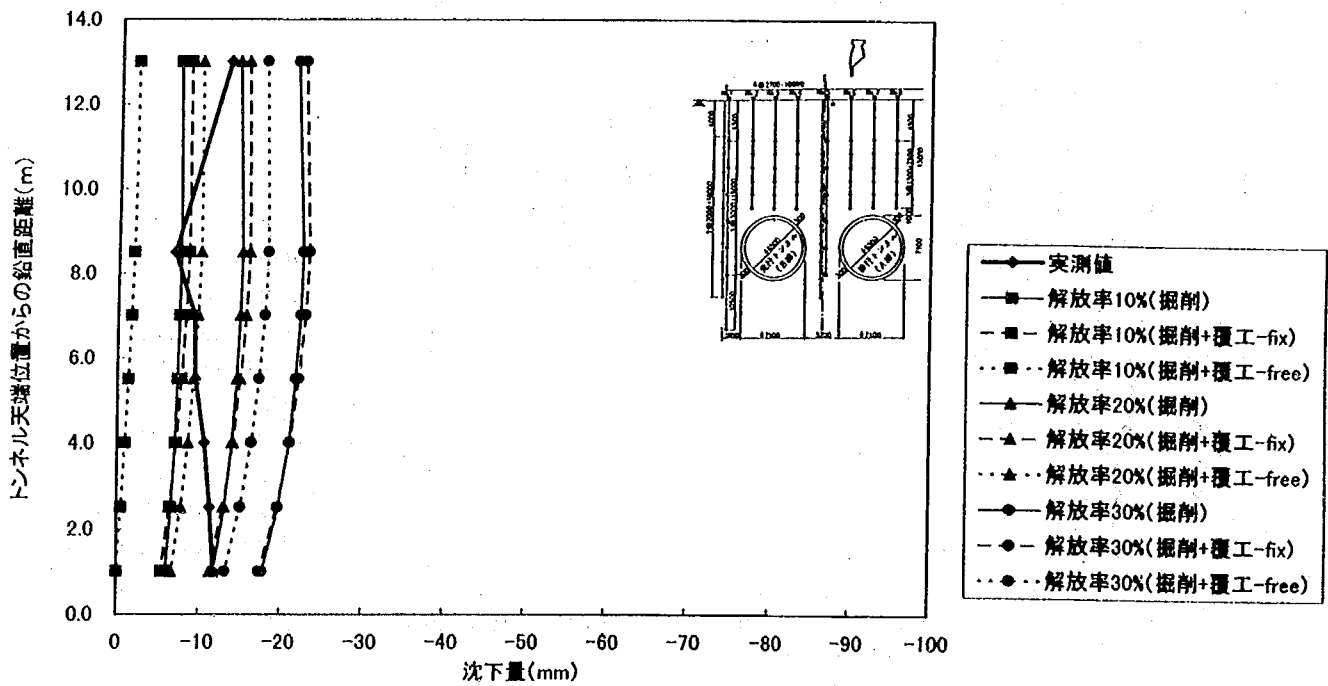


図-3. 8 (6) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 6)

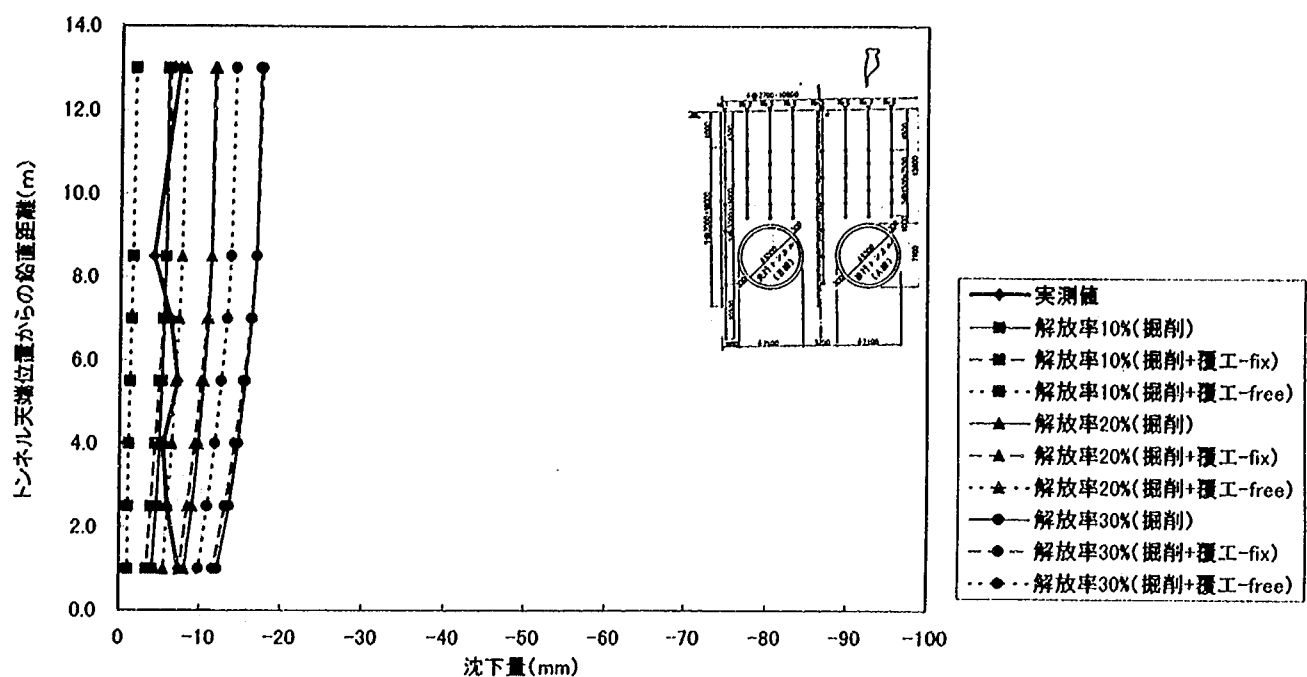


図-3.8(7) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 7)

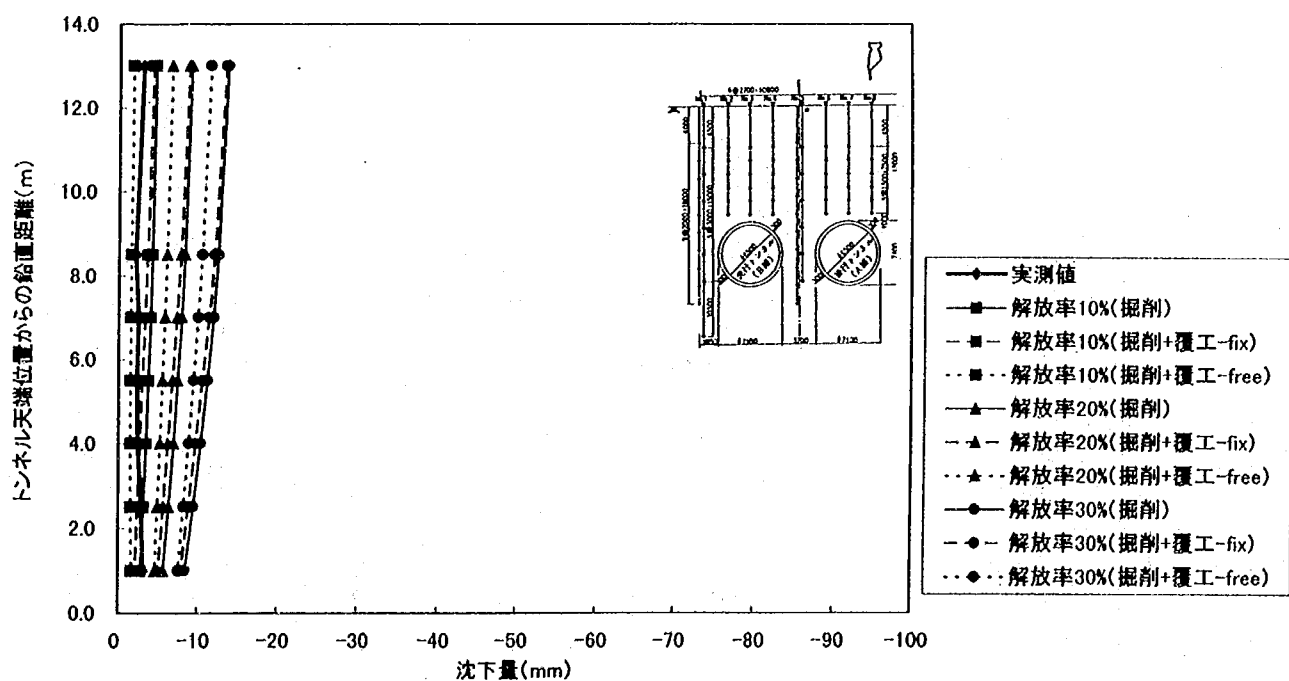


図-3.8(8) 層別沈下量の計測および解析結果 (No. 8)

3.4 Bシールド

3.4.1 解析条件設定

(1) 解析領域

図-3.9に解析領域図を示す。

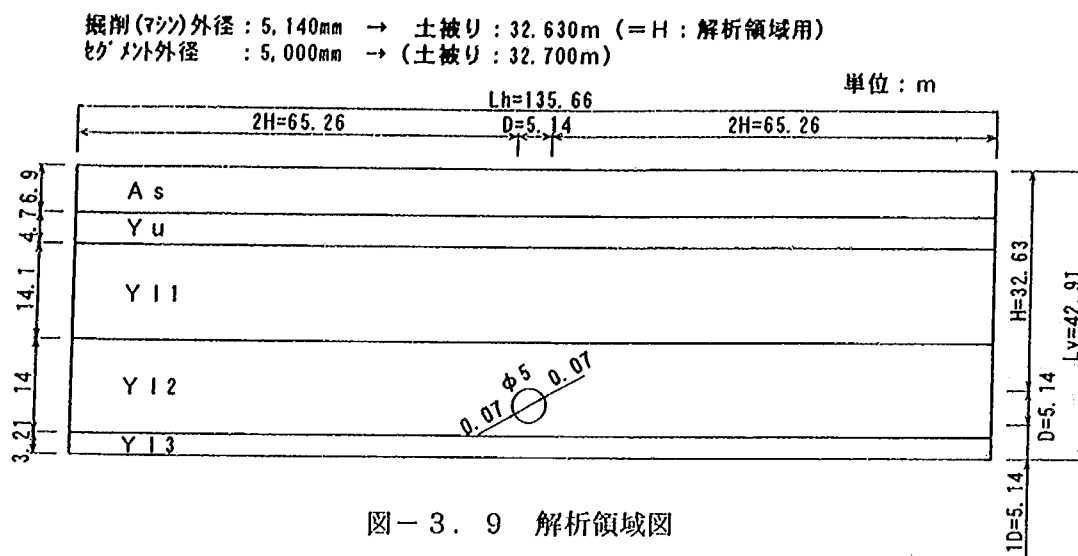


図-3.9 解析領域図

(2) 地盤定数

図-3.10に土質柱状図、表-3.5に土質試験結果一覧表を示す。

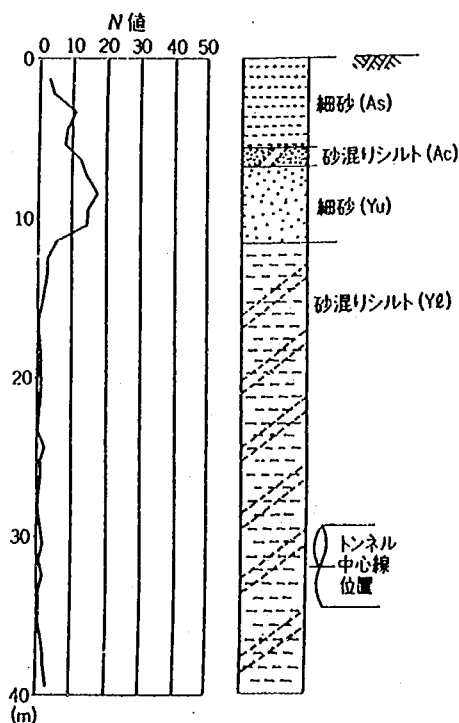


表-3.5 土質試験結果一覧表²⁾

試料採取深度 (m)		10.15~10.45m	20.00~20.85m	30.00~30.85m	35.00~35.75m
粒度特性	礫分(2000 μ m以上) %	0.6	0.0	0.0	0.0
	砂分(74~2000 μ m) %	33.2	0.6	0.3	0.4
	シルト分(5~74 μ m) %	48.5	39.2	44.7	37.2
	粘土分(5 μ m以下) %	17.7	60.2	55.0	62.4
	最大粒径 mm	4.76	0.84	0.84	0.42
	液性限界 W_L %	39.9	88.5	87.0	96.4
コンソメ特性	塑性限界 W_P %	27.0	42.7	39.9	46.0
	塑性指数 I_P	12.9	45.8	47.1	50.4
	土粒子の比重 G_s	2.690	2.666	2.701	2.700
自然状態	含水比 w_a %	40.2	77.8	80.7	90.2
	湿潤密度 ρ_s g/cm ³	—	1.515	1.498	1.489
	間隙比 e	—	2.129	2.258	2.448
	飽和度 S_r %	—	97.39	96.57	99.51
一軸圧縮試験 q_u kgf/cm ²		—	1.170	1.426	1.367
透水係数 K_{1s} cm/s		—	3.65×10^{-7}	4.31×10^{-7}	2.19×10^{-7}

図-3.10 土質柱状図

シールド掘進土層中に幅広く堆積する砂混りシルト(Y1)は原位置での孔内水平載荷試験より表-3.6に示す変形係数 E_p を得ている。

また、当現場におけるボーリング資料から上記Y1層の一軸圧縮強度 q_u と震度 Z の関係は、図-3.11に示す通り、

$$q_u = 0.20 + 0.040 Z \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (19.61 + 3.92 Z \quad \text{kN/m}^2) \dots\dots\dots (3.8)$$

と求められている。

本解析では3. 2. 3地盤のモデル化で述べたように、粘性土の弾性係数は $E = 210C$ とするため、ここでは解析領域内の砂混りシルト層（Y1層）を3分割し、GL-19m、30m、40m地点での q_u を(3.8)式より求め、 $C = q_u/2$ の関係から弾性係数 E を決定した。表-3. 7に地盤物性値の入力諸定数を示す。

表-3. 6 原位置での変形係数

震度：Z (m)	孔内水平荷試験結果：E _p	
	(kgf/cm ²)	(MN/m ²)
19.0	51.4	5.04
30.0	81.8	8.02

表-3. 7 地盤物性値の入力諸定数

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) q_u^*		(参考) E_p^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)	(kgf/cm ²)	(MN/m ²)
A s	1.80	56	5.49	0.35	—	—	—	—
Y u	1.80	98	9.61	0.35	—	—	41.7	4.08
Y 1 1	1.55	100.8	9.88	0.40	1.170	114.7	51.4	5.04
Y 1 2	1.55	147	14.41	0.40	1.367~1.426	134.0~139.8	81.8	8.02
Y 1 3	1.55	189	18.53	0.40	—	—	—	—

* 土質試験結果

(3) 構造物の物性値

裏込め注入材、セグメントの物性値は以下の通りとする。

1) 裏込め注入材

単位体積重量： $\gamma = 1.30 \text{ tf/m}^3$

弾性係数： $E = 2.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$
(19.61 MN/m²)

ポアソン比： $\nu = 0.30$

2) セグメント

弾性係数： $E = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
(3.43 $\times 10^4$ MN/m²)

ポアソン比： $\nu = 0.17$

断面積： $A = 3.0 \times 10 \text{ cm}^2$

断面二次モーメント： $I = 2.25 \times 10^3 \text{ cm}^4$

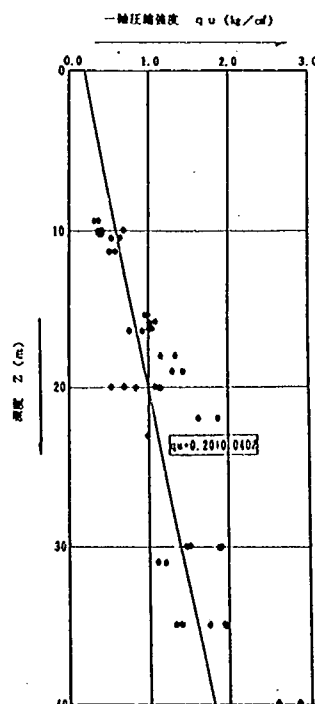


図-3. 11 一軸圧縮強度 q_u と震度 Z の関係

3.4.2 解析結果

(1) 着目点での応力解放率

図-3.12に示す2点を着目点とし、解放率と沈下量の関係を図-3.13(1)、(2)に示す。

応力解放率解析法において、従来の場合（ステップ2まで）と応力の収支を考慮した場合（ステップ3まで）の実測値に対応する応力解放率 α を表-3.8に示す。

Bシールドの地質状況はAシールドと同様に軟弱な粘性土層であるが、着目点の実測値に対する応力解放率 α はシールド直上地表でAシールドの1/6程度の値となっている。

STEP 3方式①（セグメント側壁部拘束する）における着目点②については応力解放率がマイナスとなり、掘削による応力の解放が表現できていない。

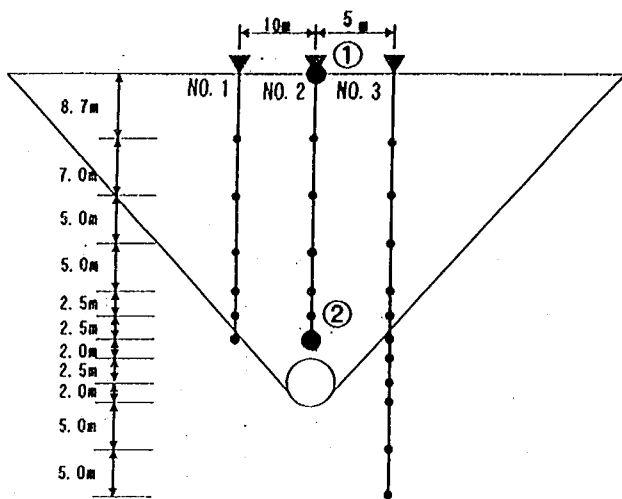


図-3.12 着目点位置

表-3.8 実測値に対する応力解放率 α

着目点 解析方式	① (シールド直上地表)	② (シールド天端2m上)
STEP 2 (従来) 方式	5.6%	4.2%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	2.6%	(-0.1%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	5.5%	2.8%

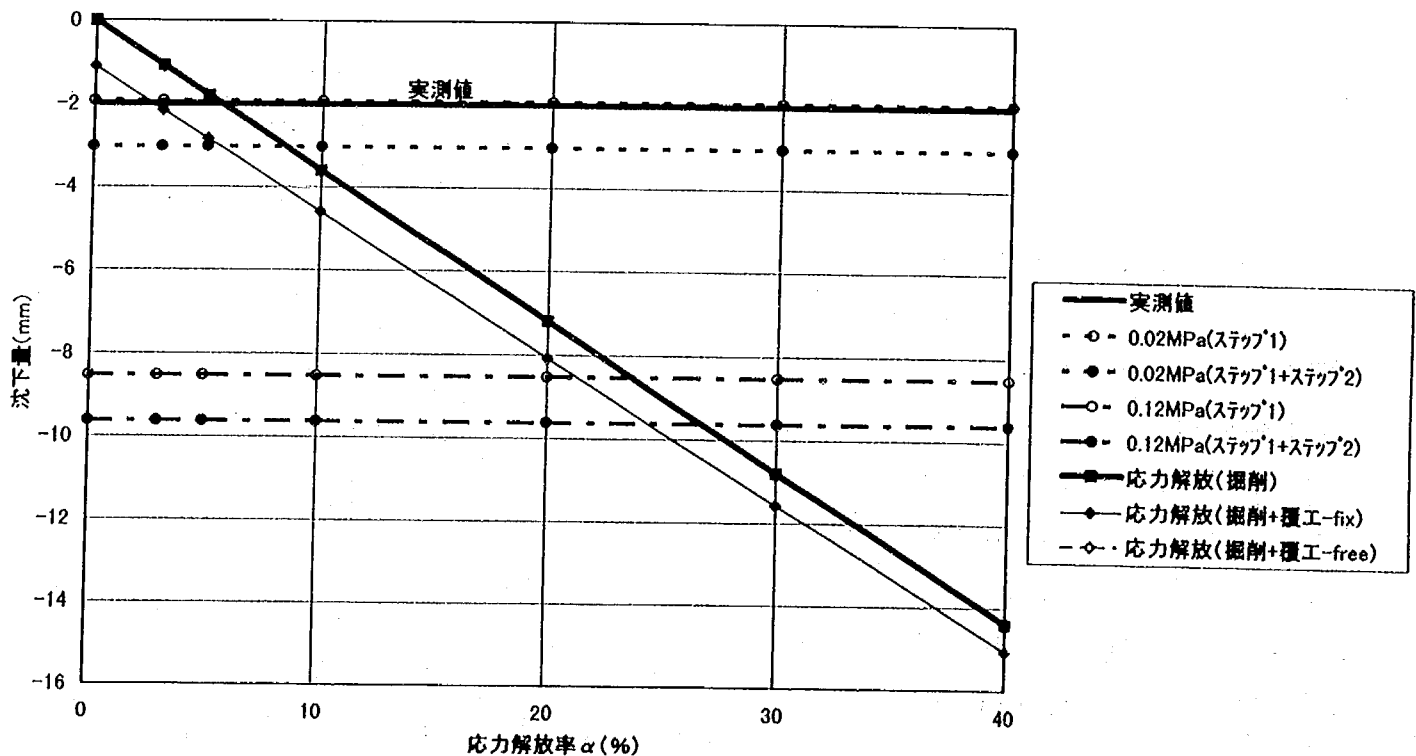
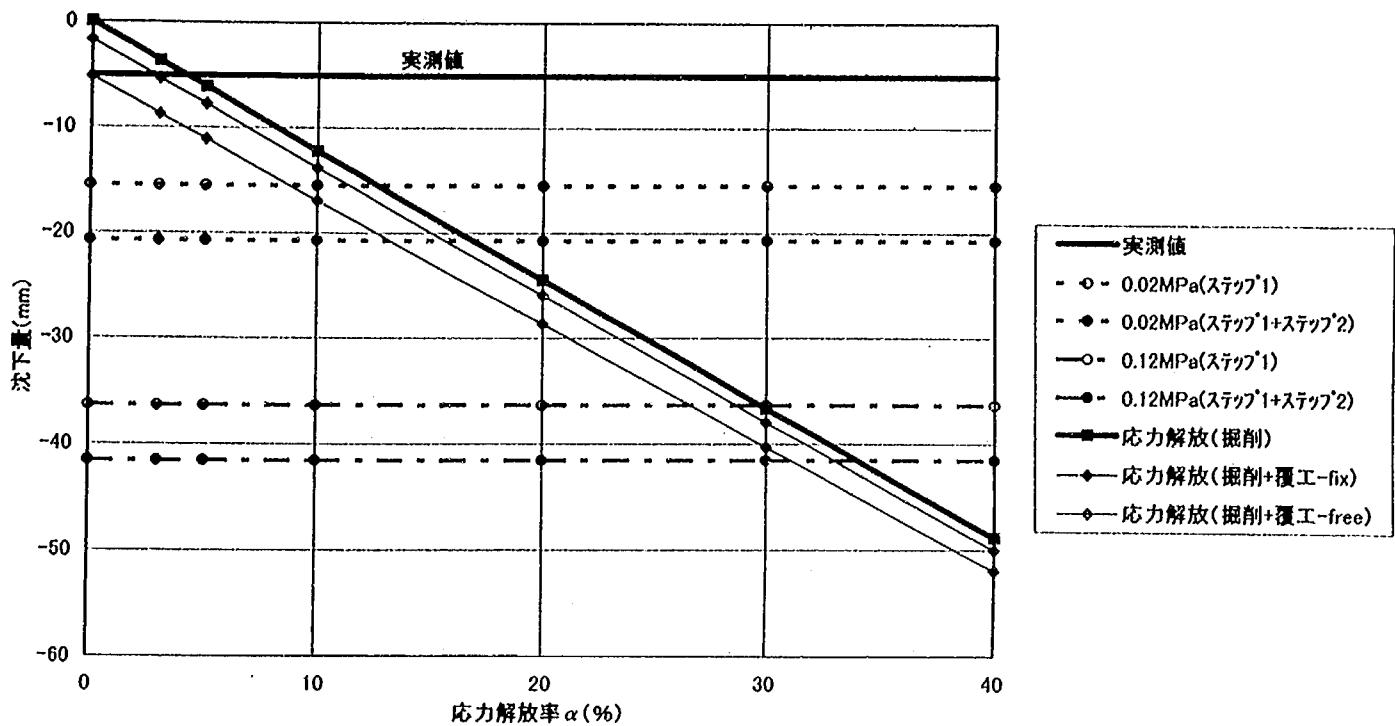


図-3.13(1) 解放率と沈下量の関係（着目点①）

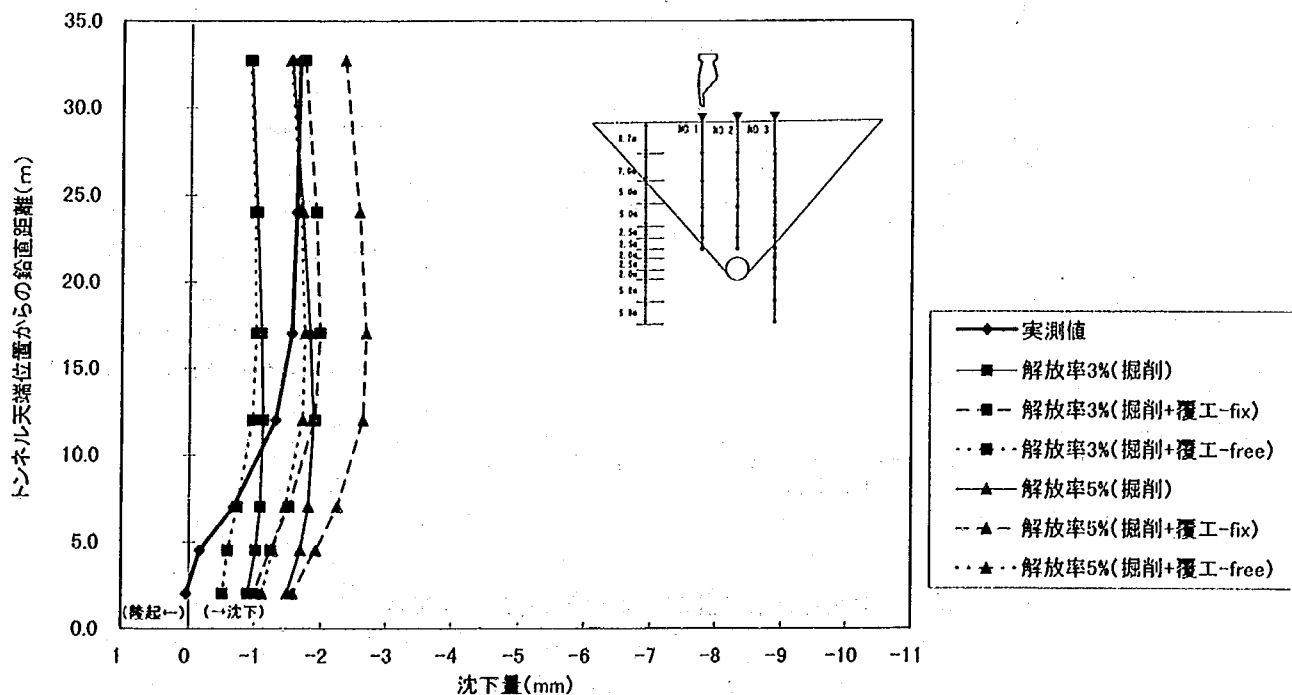


図－3.13(2) 解放率と沈下量の関係（着目点②）

(2) 層別沈下量

各計測位置（No. 1～No. 3）における層別沈下量の計測および解析結果を図－3.14(1)～(3)に示す。

計測位置No. 1, 3については多少ばらつきが見られるが、No. 2（シールド直上）については概ね実測値の沈下形状をシミュレートできている。これよりシールド直上部の地盤については比較的弾性的な挙動であったと考えられる。



図－3.14(1) 層別沈下量の計測および解析結果（No. 1）

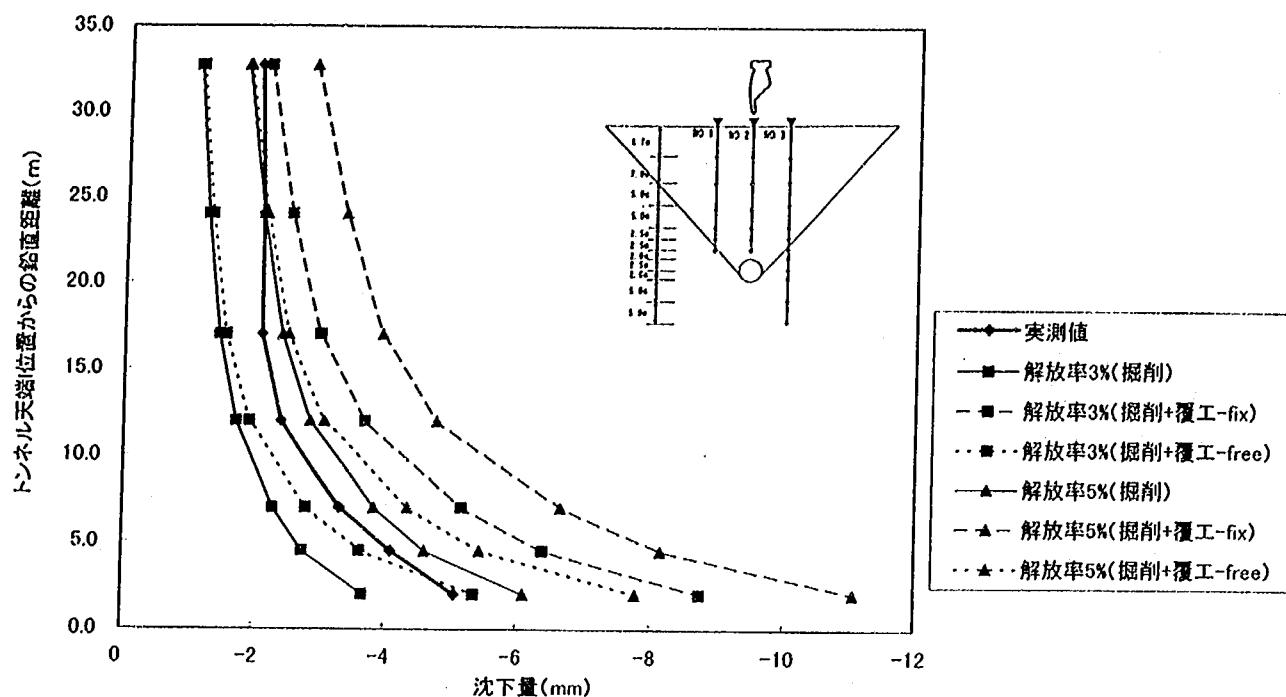


図-3. 14(2) 層別沈下量の計測および解析結果 (N o. 2)

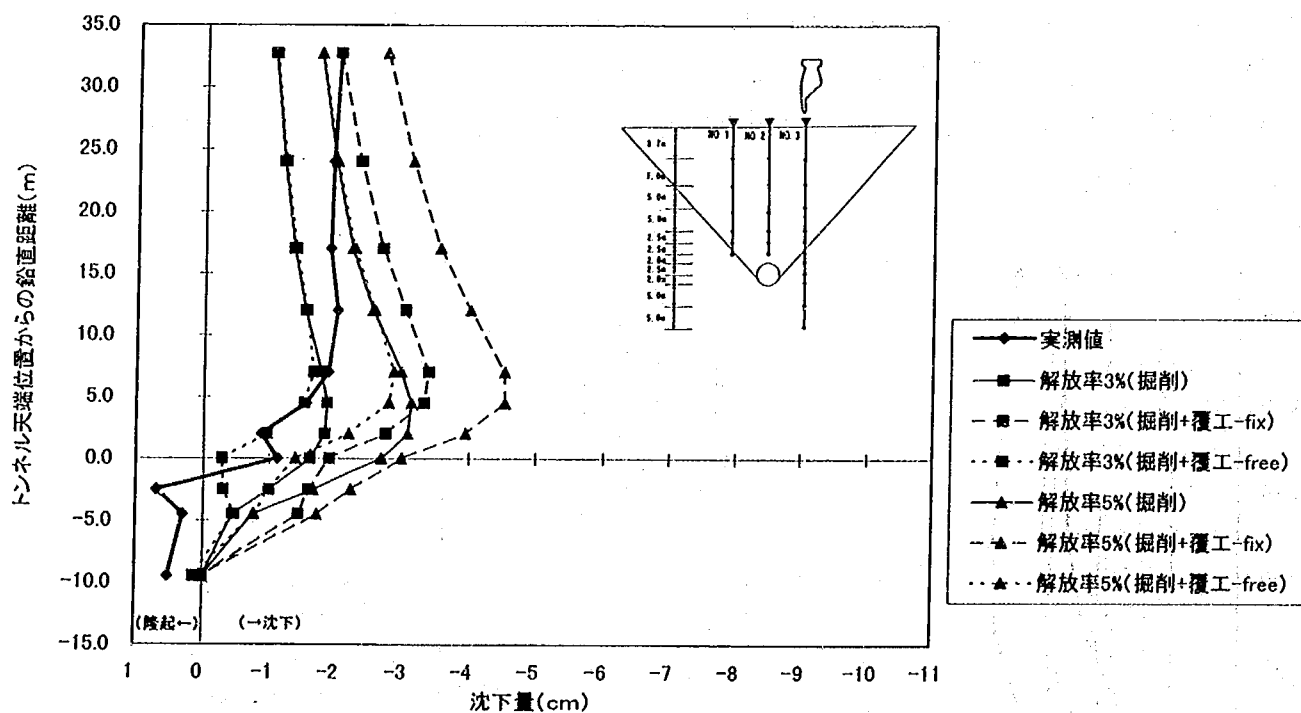


図-3. 14(3) 層別沈下量の計測および解析結果 (N o. 3)

3.5 Cシールド

3.5.1 解析条件設定

(1) 解析領域

図-3.15(1)～(4)に各計測地点における解析領域図を示す。

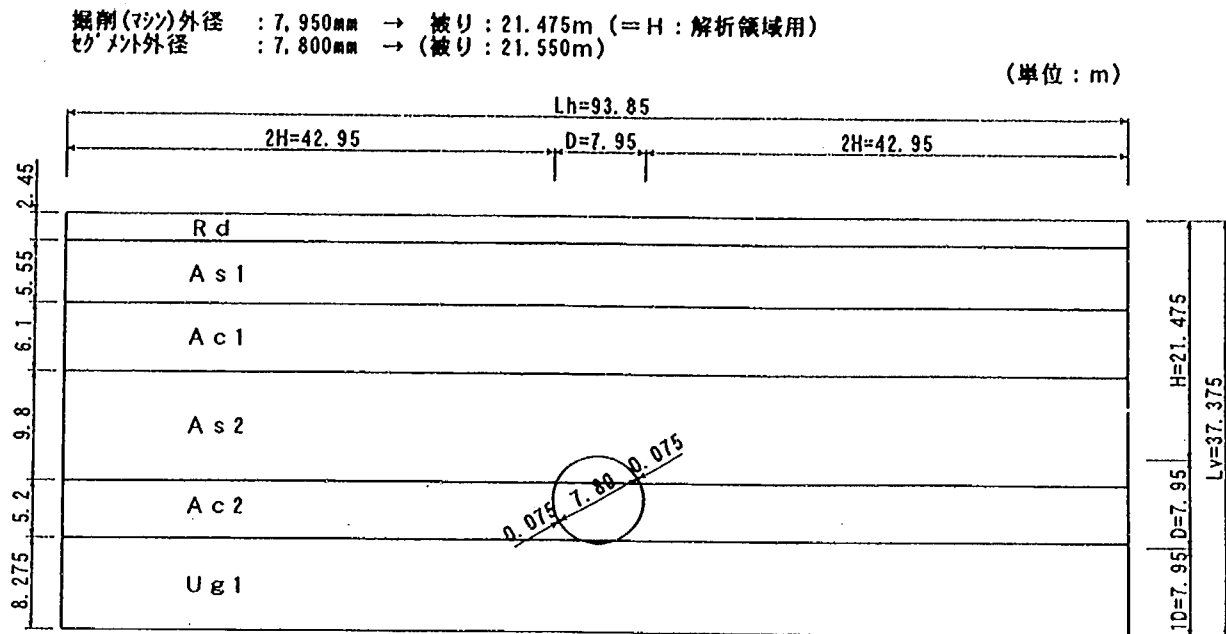


図-3.15(1) 解析領域図 (計測断面①)

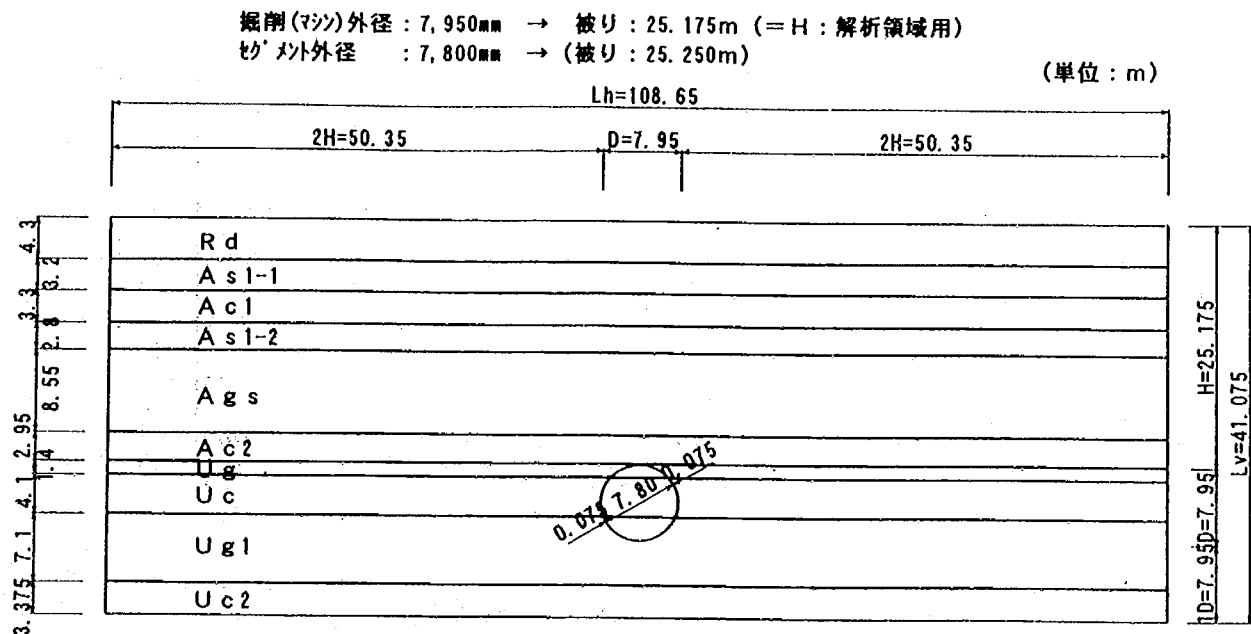


図-3.15(2) 解析領域図 (計測断面②)

掘削(マシ)外径 : 7,950mm → 被り : 19.025m (=H : 解析領域用)
 セグメント外径 : 7,800mm → (被り : 19.100m)

(単位 : m)

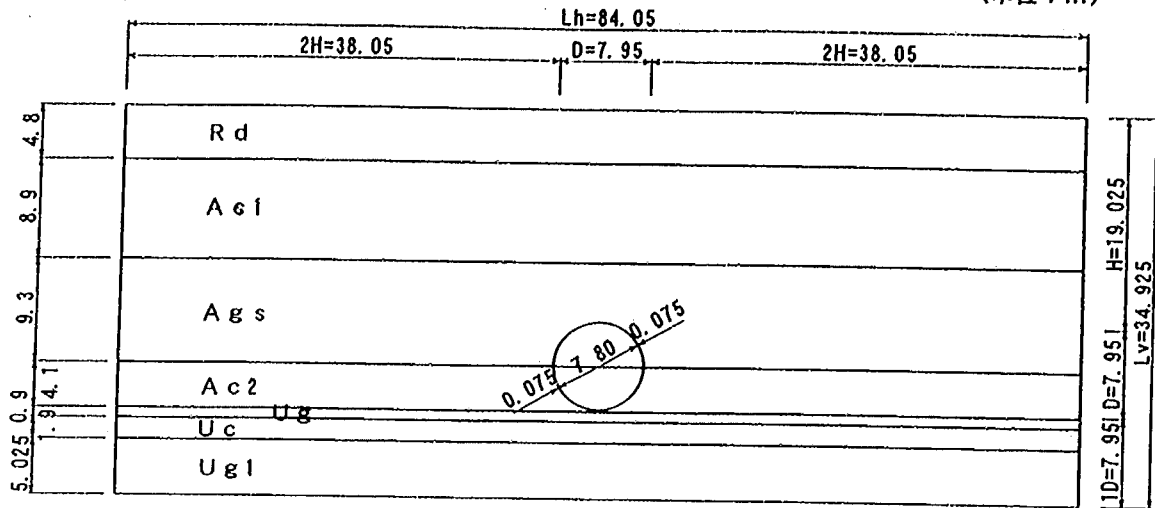


図-3.15(3) 解析領域図(計測断面③)

掘削(マシ)外径 : 7,950mm → 被り : 14.925m (=H : 解析領域用)
 セグメント外径 : 7,800mm → (被り : 15.000m)

(単位 : m)

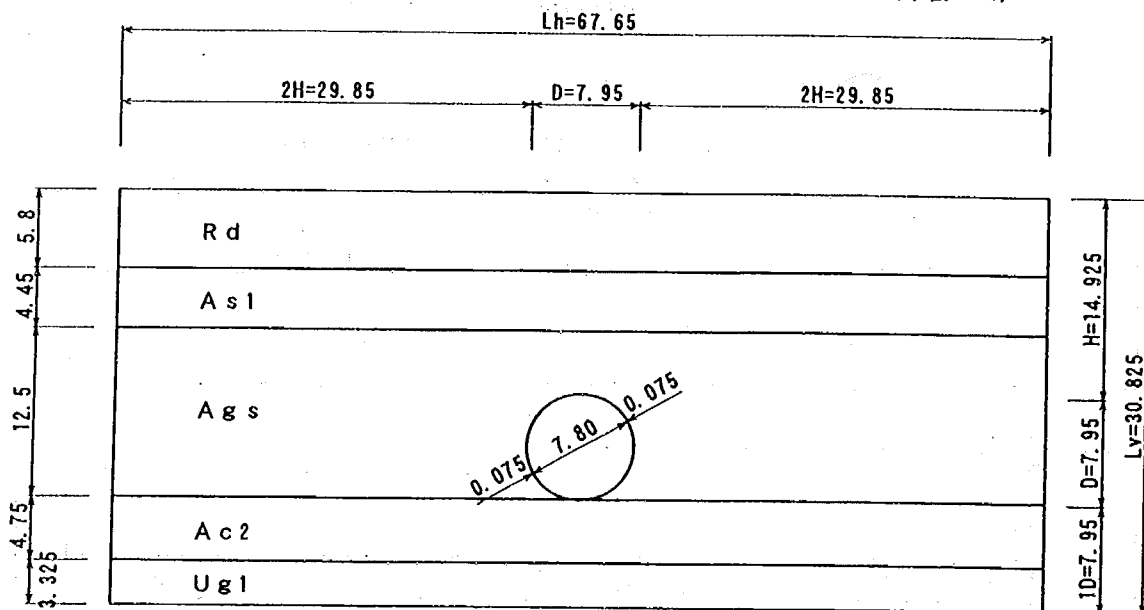


図-3.15(4) 解析領域図(計測断面④)

(2) 地盤定数

図-3.16(1)～(4)に各計測位置での土質柱状図、表-3.9に土質試験結果一覧表を示す。

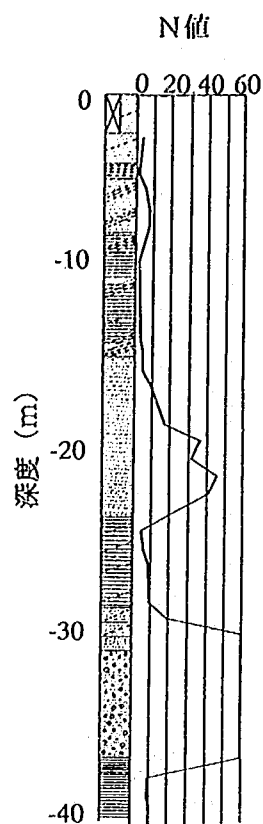


図-3.16(1) 土質柱状図 (計測断面①)

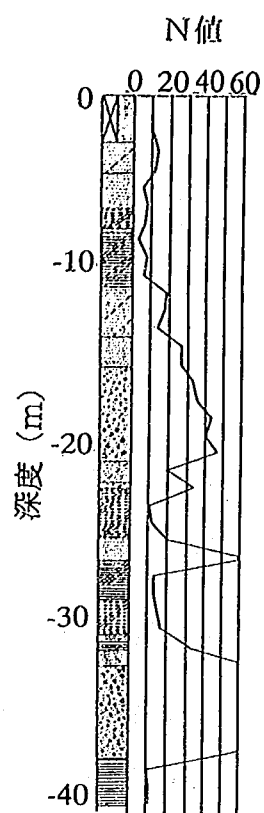


図-3.16(2) 土質柱状図 (計測断面②)

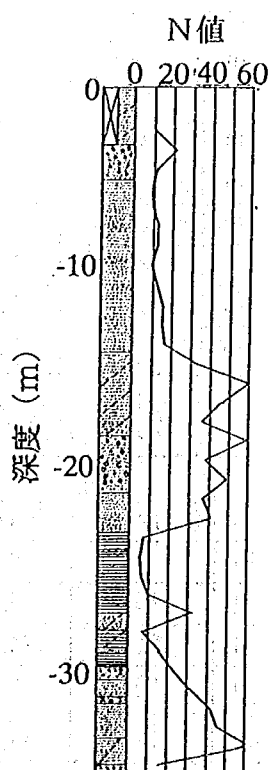


図-3.16(3) 土質柱状図 (計測断面③)

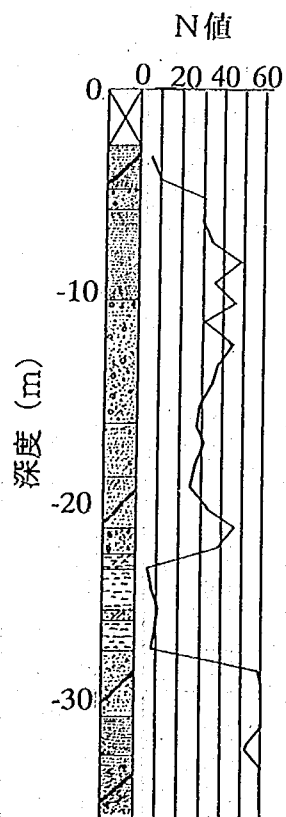


図-3.16(4) 土質柱状図 (計測断面④)

表-3.9 土質試験結果一覧表

孔番	No.5-1						No.2		No.4	
	Ac1	Ac1	As2	As2	Ug1	Ug1	Ug1	Ug1	Ug1	Ug1
地層区分										
試料番号	1	2	3	4	5	6	1	1	2	
(深さ)	10.00m 10.80m	11.00m 11.80m	21.15m 21.45m	22.15m 22.45m	29.15m 29.45m	30.15m 30.31m	33.15m 33.32m	30.15m 30.45m	34.15m 34.45m	
一般	湿潤密度 ρ_w (g/cm ³)	1.715	1.762							
	乾密度 ρ_s (g/cm ³)	1.153	1.223							
	土中の密度 ρ_c (g/cm ³)	2.656	2.654	2.651	2.652	2.673	2.663			
	自然含水比 w_n (%)	48.7	44.1	16.7	16.9	22.6	11.0	10.7	11.3	11.7
	孔隙比 e	1.304	1.171							
	飽和度 S_r (%)	99.3	99.9							
粒度	粒径 0.075mm %	0	0	4	5	0	31	30	54	18
	粒径 0.075 ~ 0.425mm %	5	25	87	84	75	64	61	40	71
	粒径 0.425 ~ 0.850mm %	51	47			13				
	粒径 0.850 ~ 2.0mm %	44	28	10	11		5	9	6	11
	均等係数 U_c	—	—	6.7	7.7	55.9	9.4	9.9	21.2	11.7
	曲率係数 U_c	—	—	2.10	1.40	13.10	1.60	1.90	1.00	2.00
コンシステンス	液性限界 w_L (%)	59.0	55.5							
	塑性限界 w_p (%)	26.4	25.7							
	塑性指数 I_p	32.6	29.8							
分類	分類名	B-1	B-1	サト土	サト土	サト土	サト土	サト土	サト土	サト土
	分類記号	(C11)	(C11)	(S-M)	(S-M)	(S-M)	(S-M)	(S-M)	(S-M)	(S-M)
一圧軸縮	一圧軸縮 q_u (kgf/cm ²)	0.880	1.112							
圧縮		0.967	1.192							
		1.041	1.142							
圧密	圧縮指数 C_c	0.506	0.507							
	圧縮率 p_c (kgf/cm ²)	1.85	2.38							

地盤物性値の入力諸定数を表-3.10(1)~(4)に示す。

表-3.10(1) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面①)

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) qu^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)
Rd	1.80	35	3.43	0.35	—	—
As1	1.80	35	3.43	0.35	—	—
Ac1	1.70	110	10.78	0.40	0.880~1.192	86.2~116.8
As2	1.90	161	15.78	0.35	—	—
Ac2	1.80	110	10.78	0.40	—	—
Ug1	2.00	420	41.18	0.30	—	—

*土質試験結果

表-3.10(2) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面②)

	γ (g/cm ³)	E		ν
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)	
Rd	1.80	84	8.23	0.35
As1-1	1.80	49	4.80	0.35
Ac1	1.70	79	7.74	0.40
As1-2	1.80	119	11.66	0.35
Ag s	1.90	238	23.33	0.35
Ac2	1.80	144	14.12	0.40
Ug	2.00	420	41.18	0.30
Uc	1.80	210	20.59	0.35
Ug1	2.00	420	41.18	0.30
Uc2	1.80	144	14.12	0.35

表-3.10(3) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面③)

	γ (g/cm ³)	E		ν
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)	
Rd	1.80	105	10.29	0.35
As1	1.80	84	8.23	0.35
Ag s	1.90	308	30.20	0.35
Ac2	1.80	92	9.02	0.40
Ug	2.00	224	21.96	0.35
Uc	1.80	144	14.12	0.35
Ug1	2.00	280	27.45	0.30

表-3.10(2) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面④)

	γ (g/cm ³)	E		ν
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)	
Rd	1.80	63	6.17	0.35
As1	1.80	259	25.39	0.35
Ag s	1.90	245	24.02	0.35
Ac2	1.80	105	10.29	0.40
Ug1	2.00	420	41.18	0.30

(3) 構造物の物性値

裏込め注入材、セグメントの物性値は以下の通りとする。

1) 裏込め注入材

単位体積重量 : $\gamma = 1.30 \text{ tf/m}^3$
 弾性係数 : $E = 2.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$
 (19.61 MN/m²)
 ポアソン比 : $\nu = 0.30$

2) セグメント

弾性係数 : $E = 3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
 (3.23 $\times 10^4$ MN/m²)
 ポアソン比 : $\nu = 0.17$
 断面積 : $A = 3.5 \times 10 \text{ cm}^2$
 断面二次モーメント : $I = 3.573 \times 10^3 \text{ cm}^4$

3.5.2 解析結果

(1) 着目点での応力解放率

図-3.17(1)~(4)に示す各2点を着目点とし、解放率と沈下量を図-3.18(1)~(8)に示す。

応力解放率解析法において、従来の場合(ステップ2まで)と応力の収支を考慮した場合(ステップ3まで)の実測値に対応する応力解放率 α を表-3.11(1)~(4)に示す。

STEP 2(従来)方式については各断面とも10%以下の応力解放率であった。

STEP 3方式②(セグメント側壁部拘束しない)についても概ね10%前後の応力解放率であった。

STEP 3方式①(セグメント側壁部拘束する)については各断面とも応力解放率がマイナスとなり、掘削による応力の解放が表現できていない。

また、参考として行った裏込め注入解析法では解析値の方が実測値よりも過大な沈下量を与える結果であった。

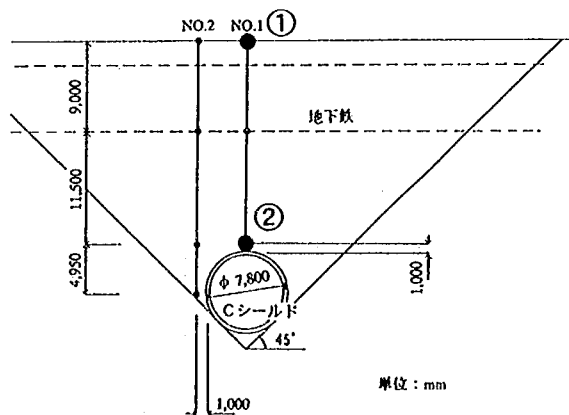


表-3.11(1) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面①)

着目点 解析方式	① (シールド直上地表面)	② (シールド天端1m上)
STEP 2 (従来) 方式	3.8%	3.3%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	(-0.9%)	(-3.2%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	3.5%	0.8%

図-3.17(1) 着目点位置(計測断面①)

表-3.11(2) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面②)

着目点 解析方式	① (シールド'直上地表面)	② (シールド'天端1m上)
STEP 2 (従来) 方式	8.7%	5.9%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	(-1.3%)	(-6.3%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	7.6%	0.3%

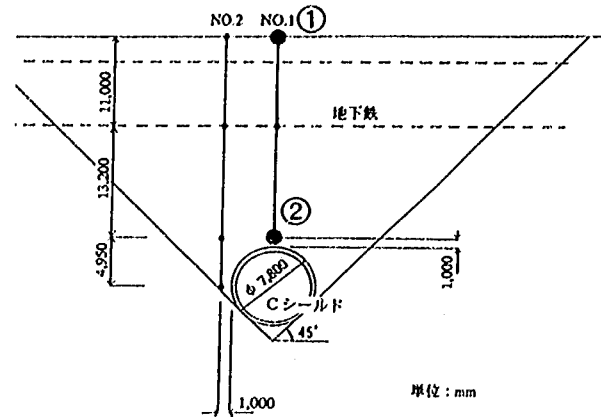


図-3.17(2) 着目点位置 (計測断面②)

表-3.11(3) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面③)

着目点 解析方式	① (シールド'直上地表面)	② (シールド'天端1m上)
STEP 2 (従来) 方式	4.1%	4.1%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	(-3.1%)	(-6.4%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	9.0%	5.1%

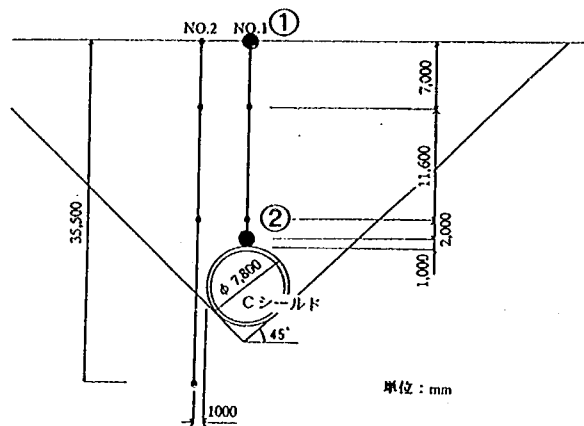


図-3.17(3) 着目点位置 (計測断面③)

表-3.11(4) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面④)

着目点 解析方式	① (シールド'直上地表面)	② (シールド'天端1m上)
STEP 2 (従来) 方式	6.2%	5.8%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	(-6.3%)	(-8.5%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	13.7%	8.8%

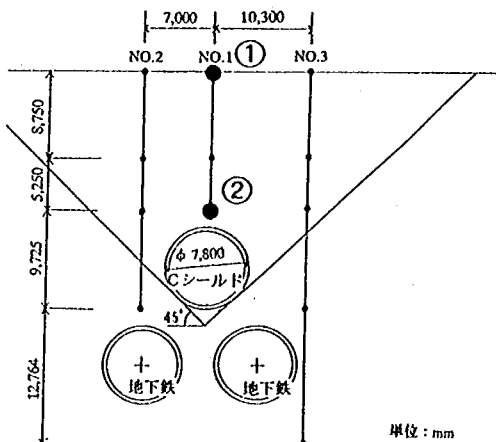
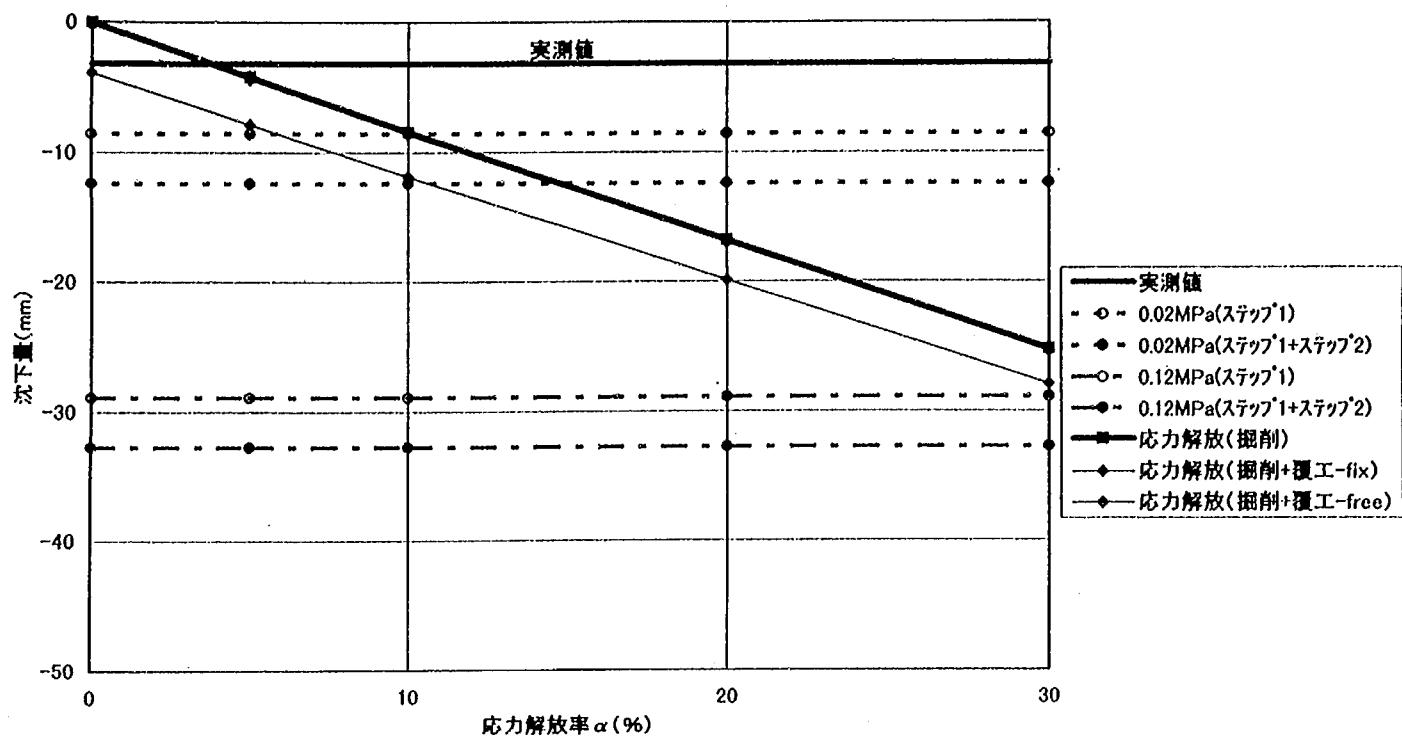
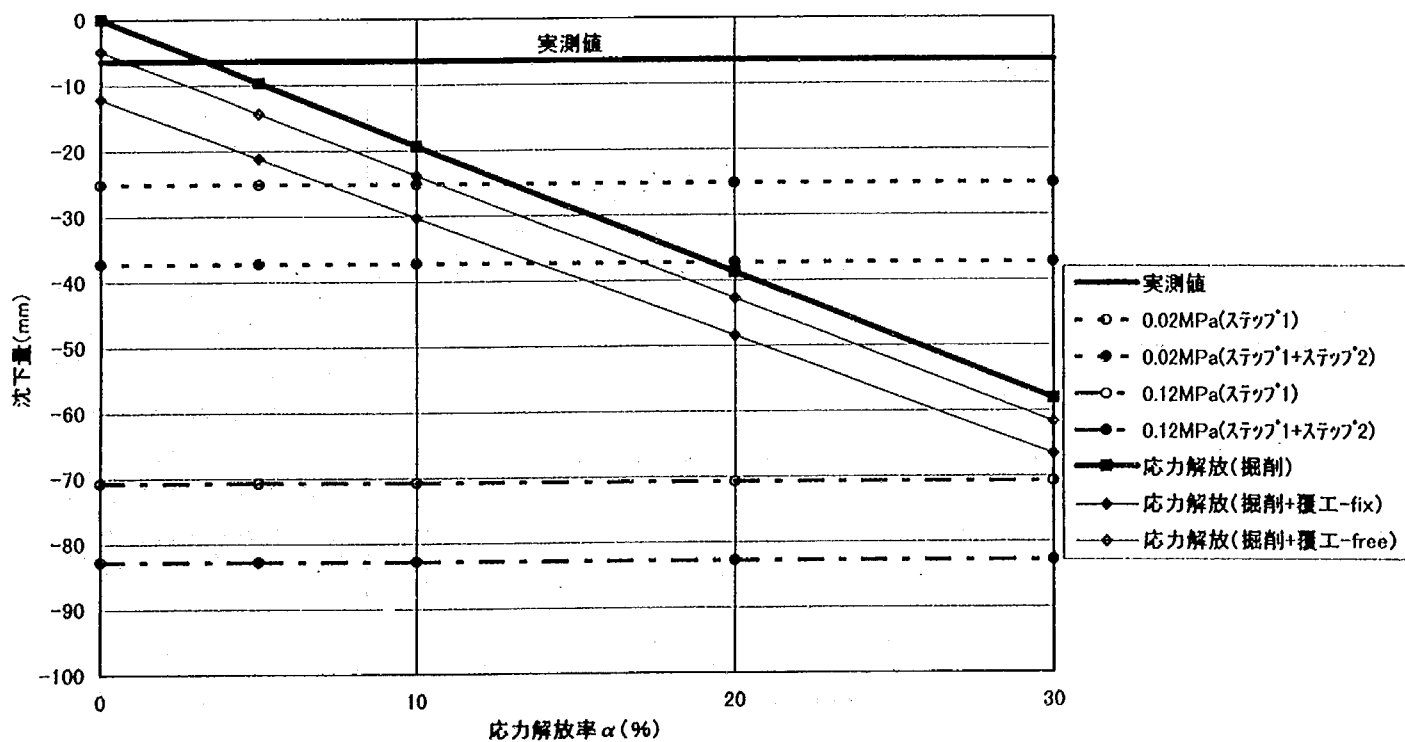


図-3.17(4) 着目点位置 (計測断面④)



図－3.18(1) 解放率と沈下量の関係（計測断面①；着目点①）



図－3.18(2) 解放率と沈下量の関係（計測断面①；着目点②）

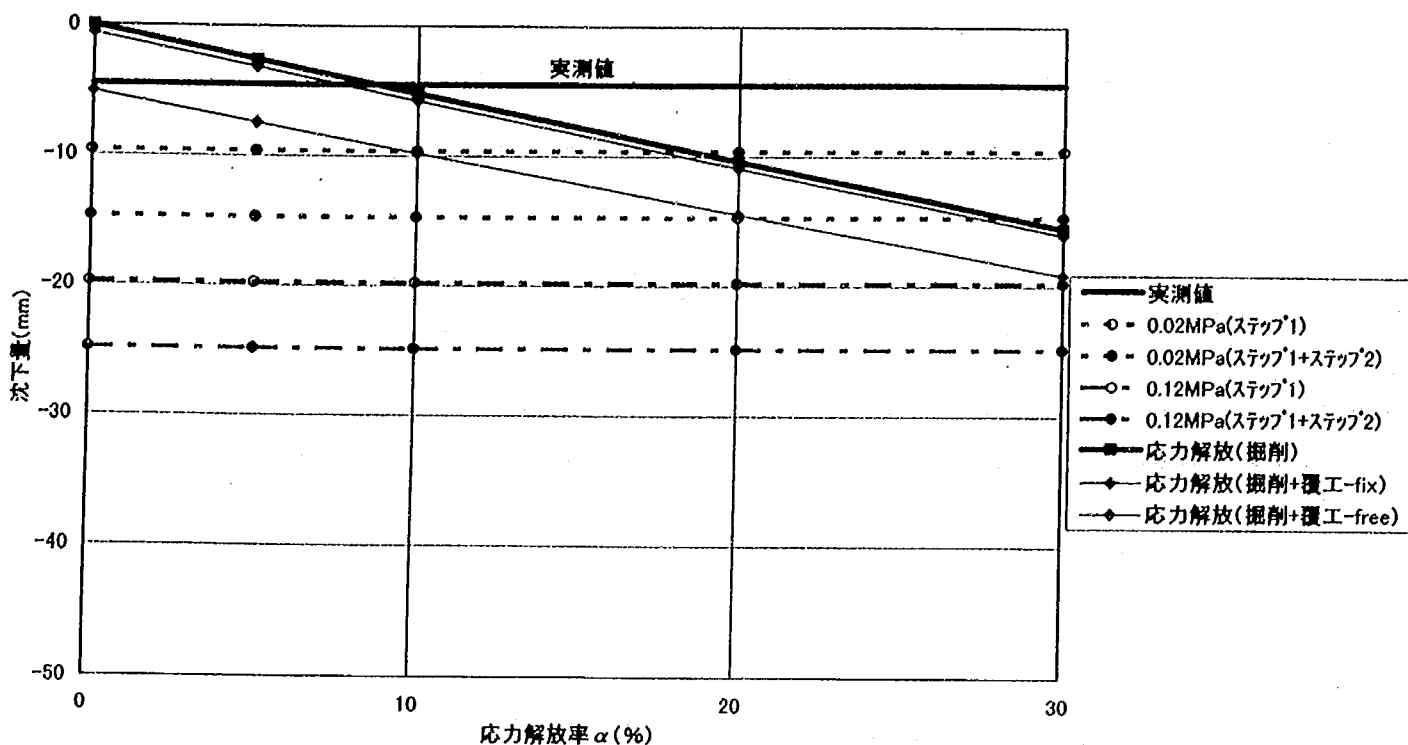


図-3.18(3) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点①)

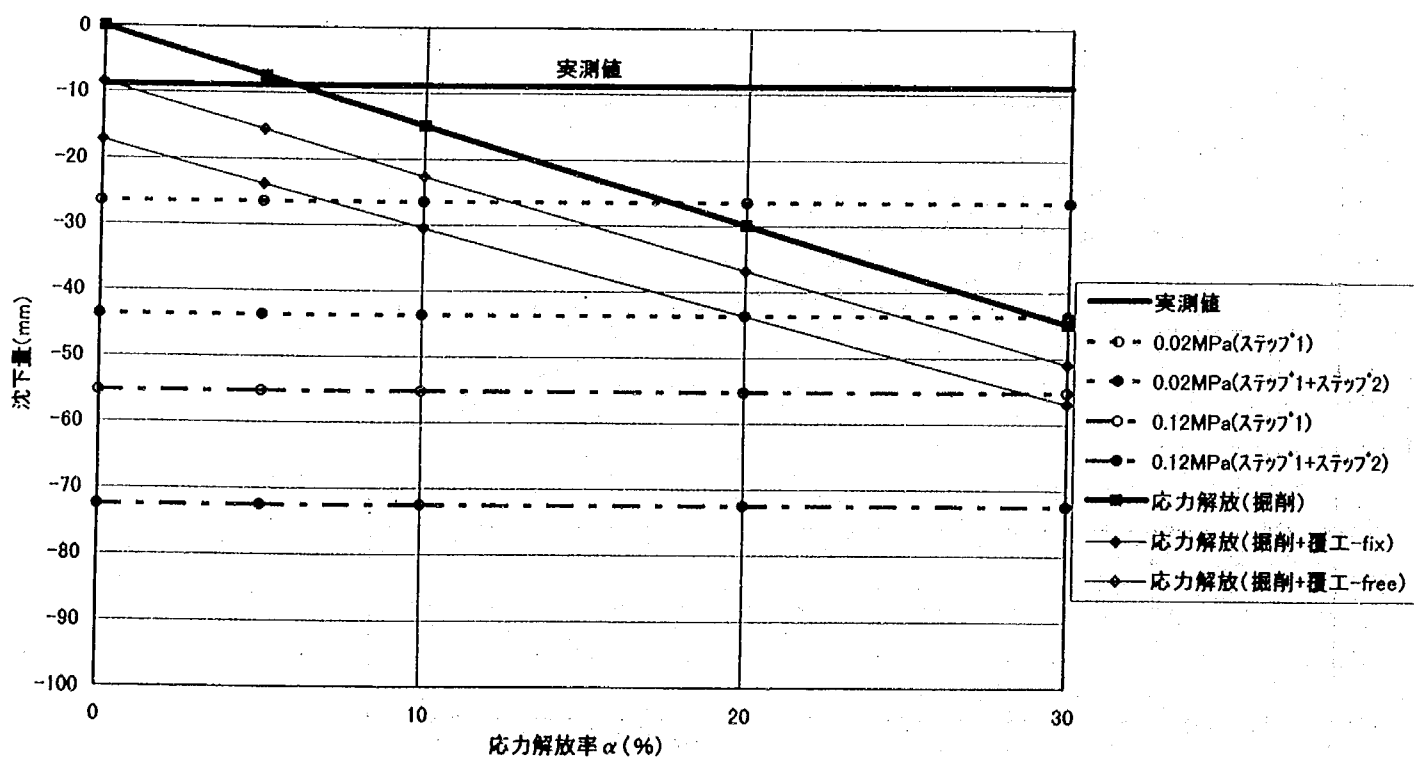


図-3.18(4) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点②)

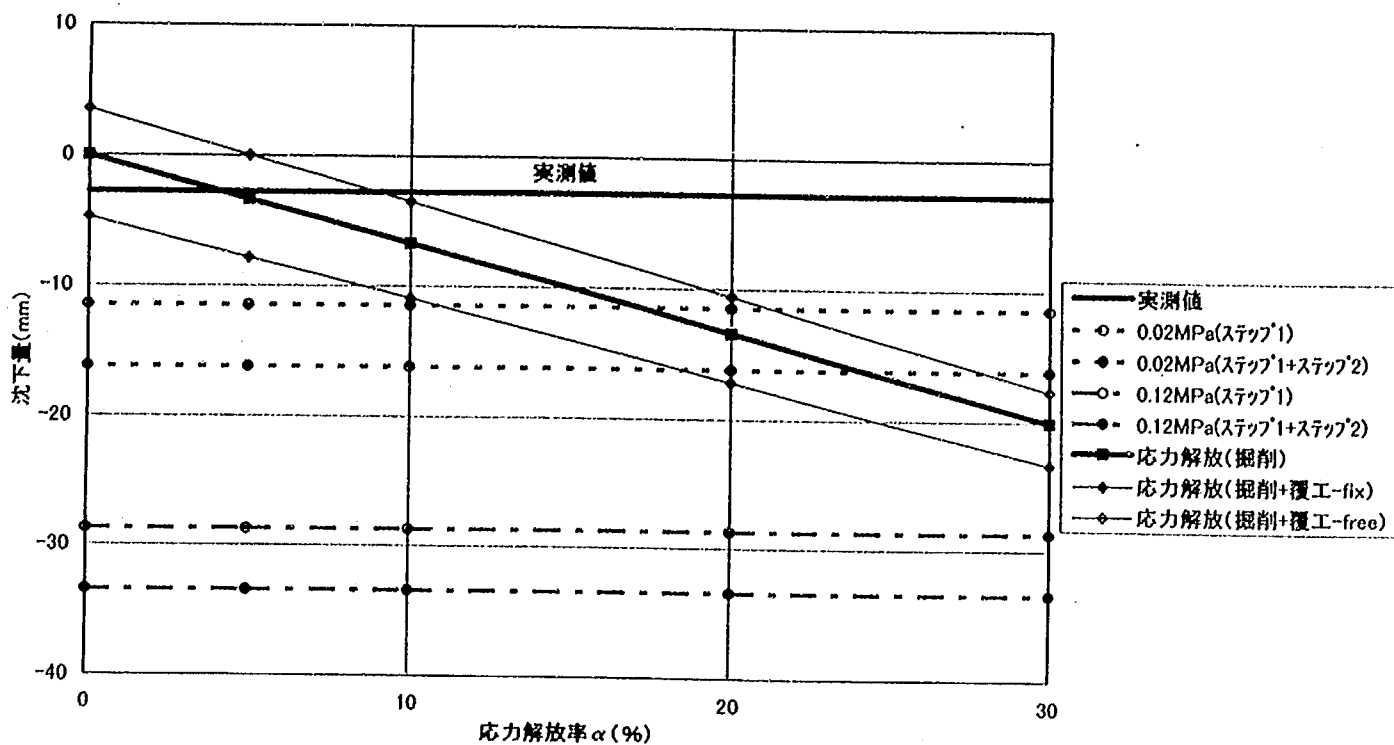


図-3.18(5) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点①)

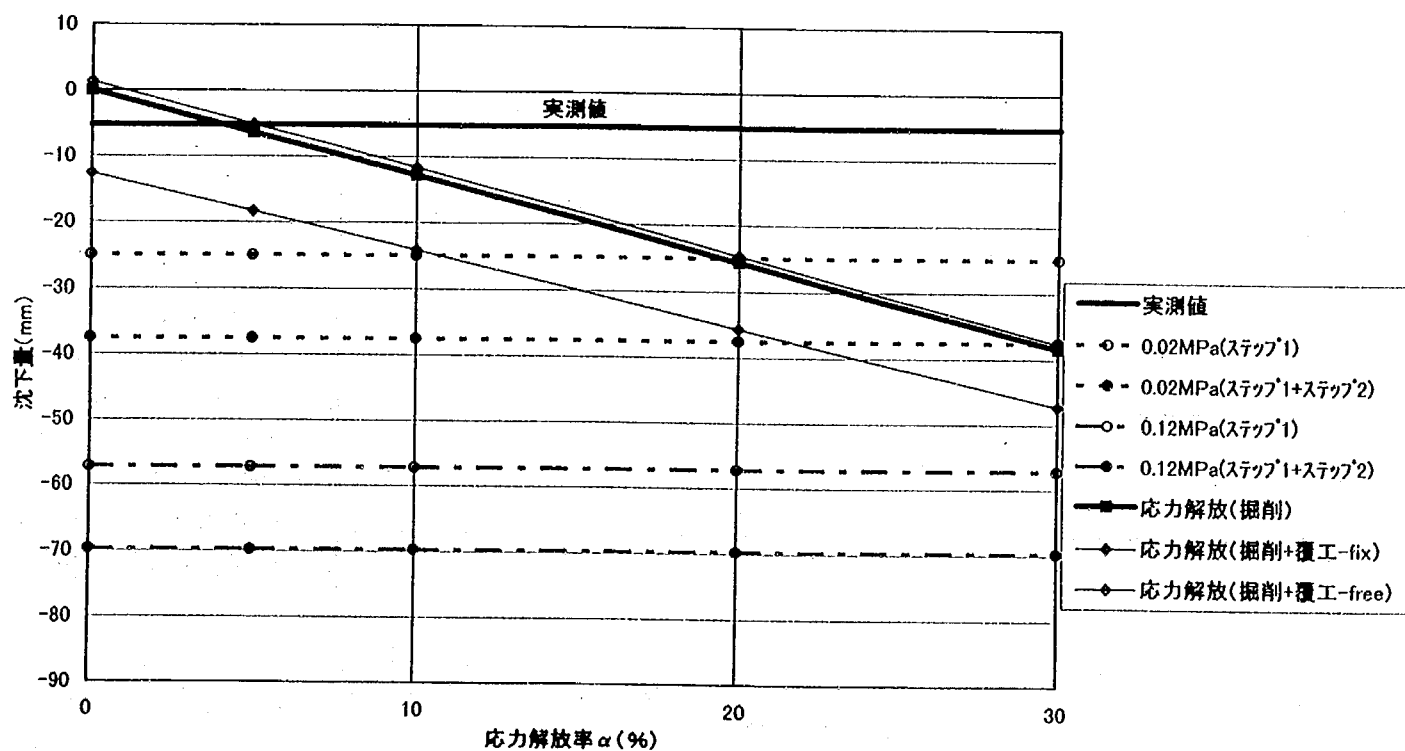


図-3.18(6) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点②)

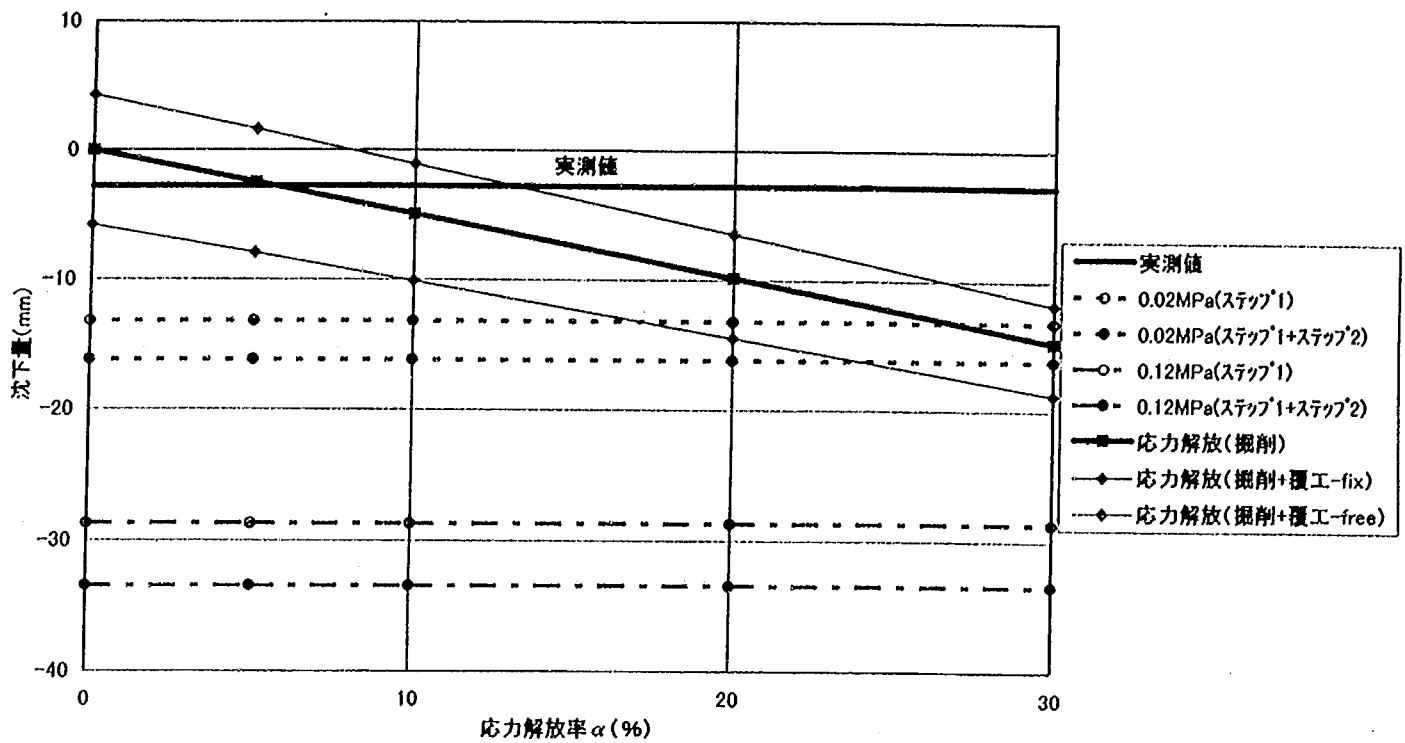


図- 3. 18 (7) 解放率と沈下量の関係 (計測断面④；着目点①)

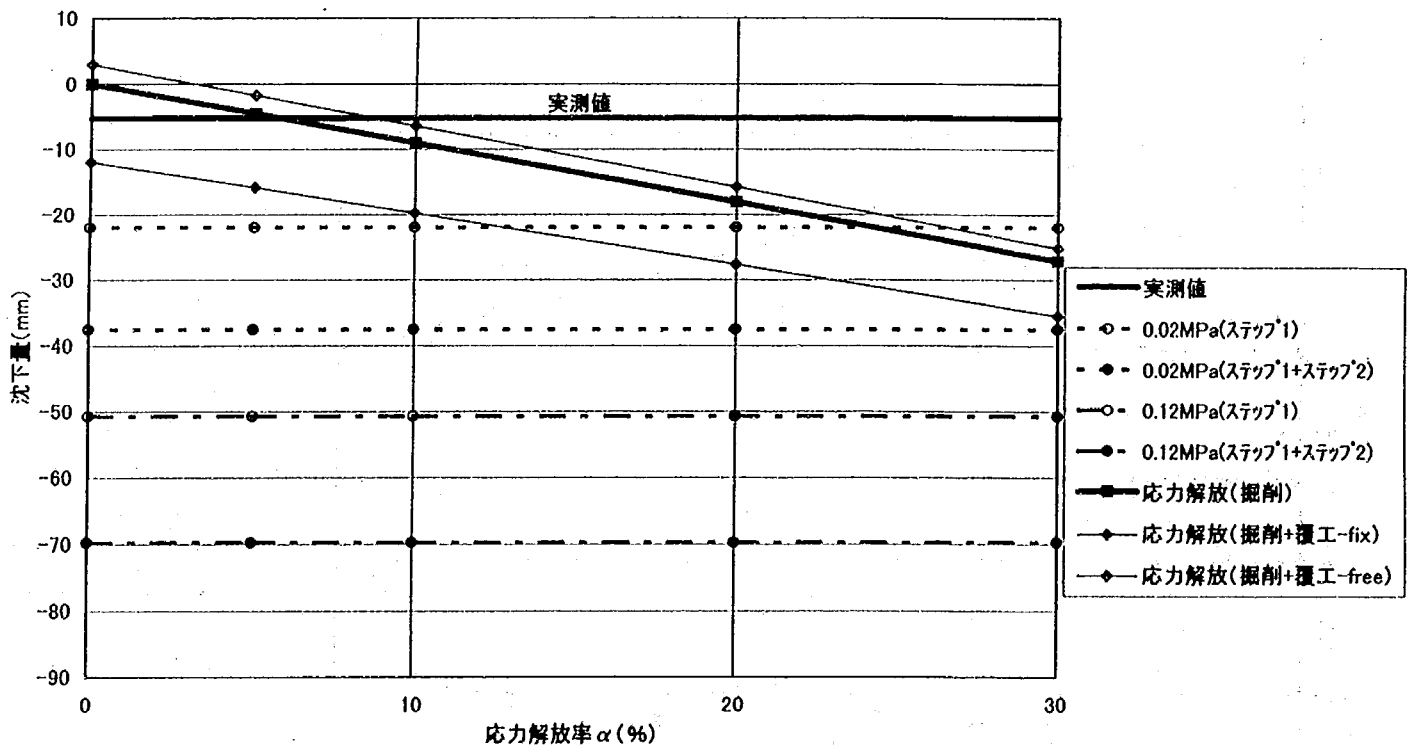


図- 3. 18 (8) 解放率と沈下量の関係 (計測断面④；着目点②)

(2) 層別沈下量

各計測断面の測定位置における層別沈下量の計測および解析結果を図-3. 19(1)~(9)に示す。

各断面とも10%以下の応力解放率で概ね沈下形状をシミュレートできている。よって、本シールドでの地盤変状は弾性的な挙動であったと考えられる。

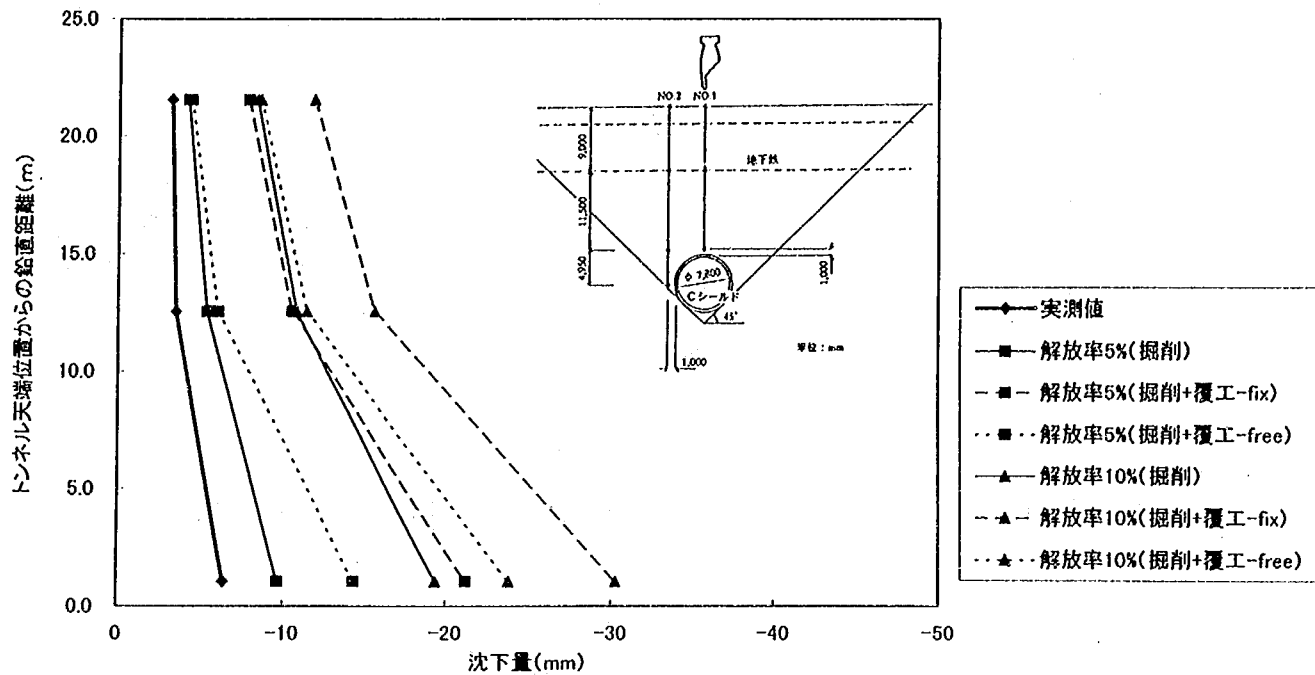


図-3. 19(1) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面①; N o. 1)

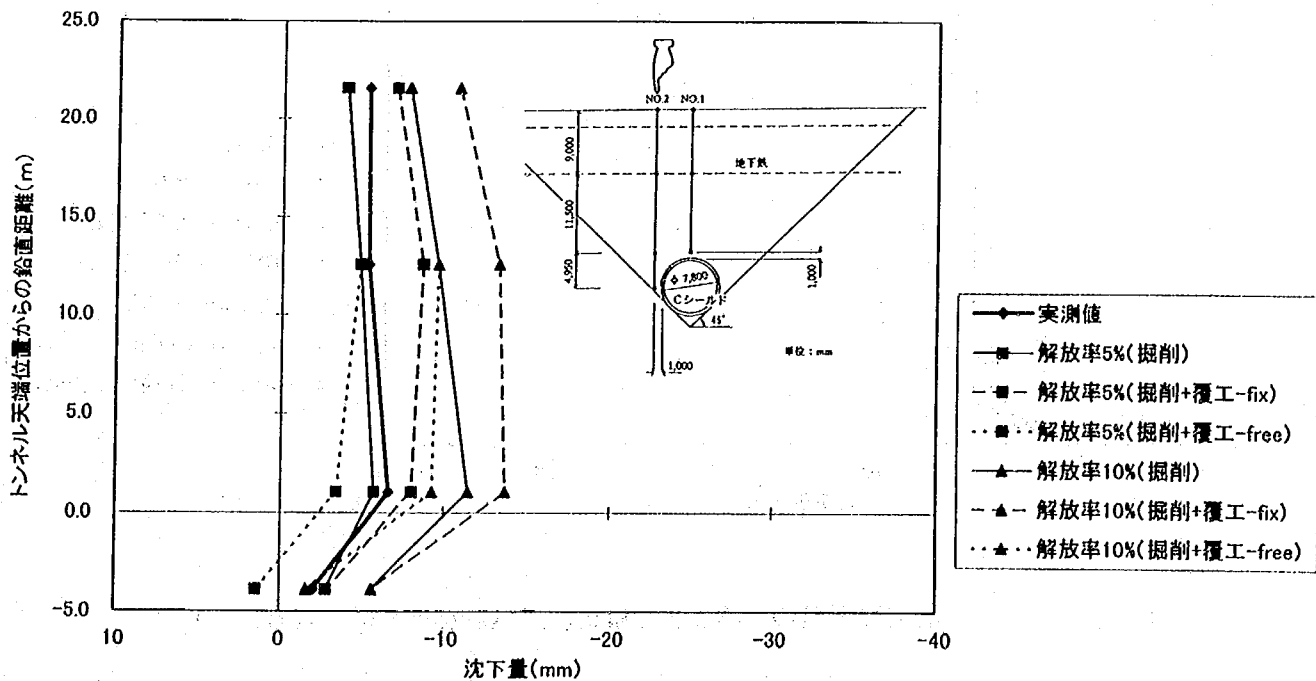


図-3. 19(2) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面①; N o. 2)

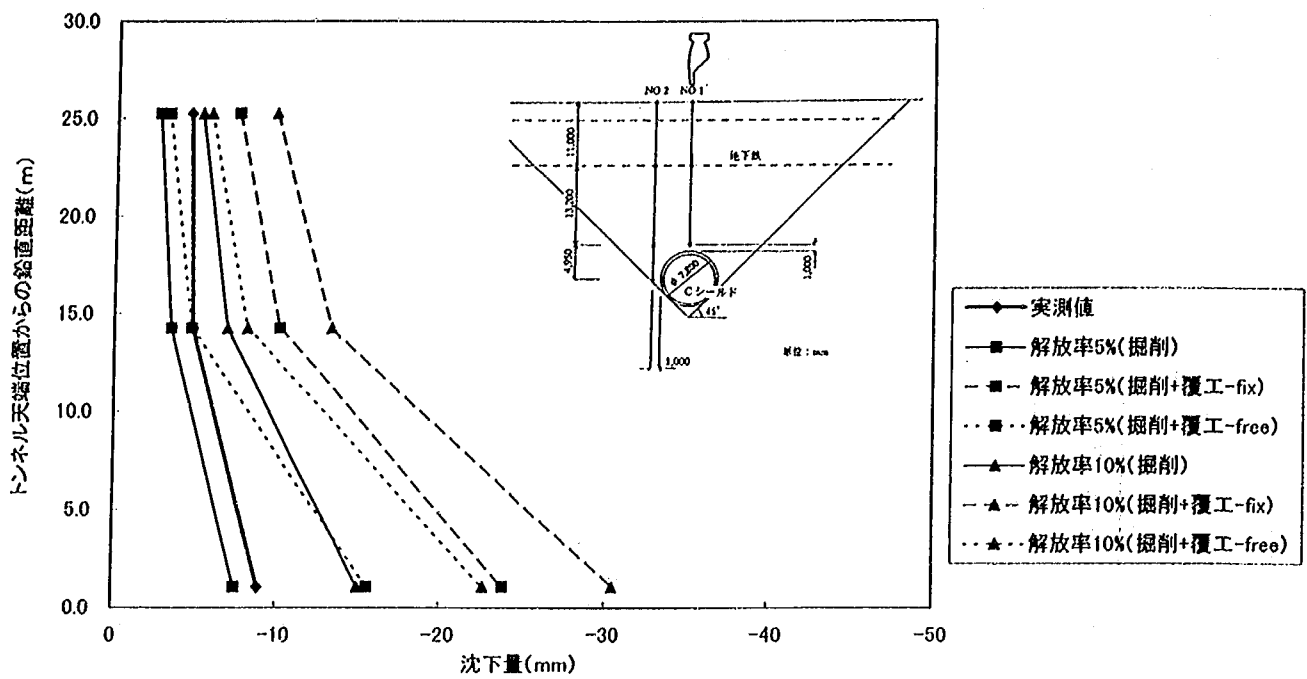


図-3.19(3) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; No. 1)

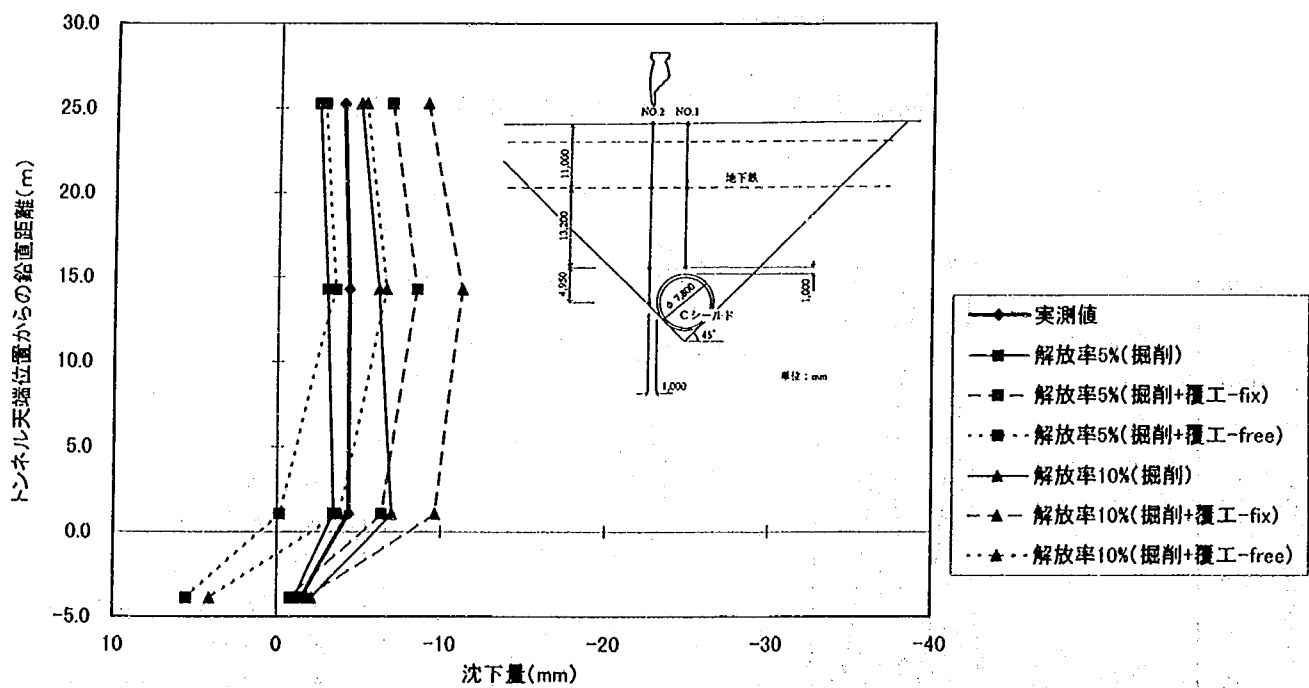


図-3.19(4) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; No. 2)

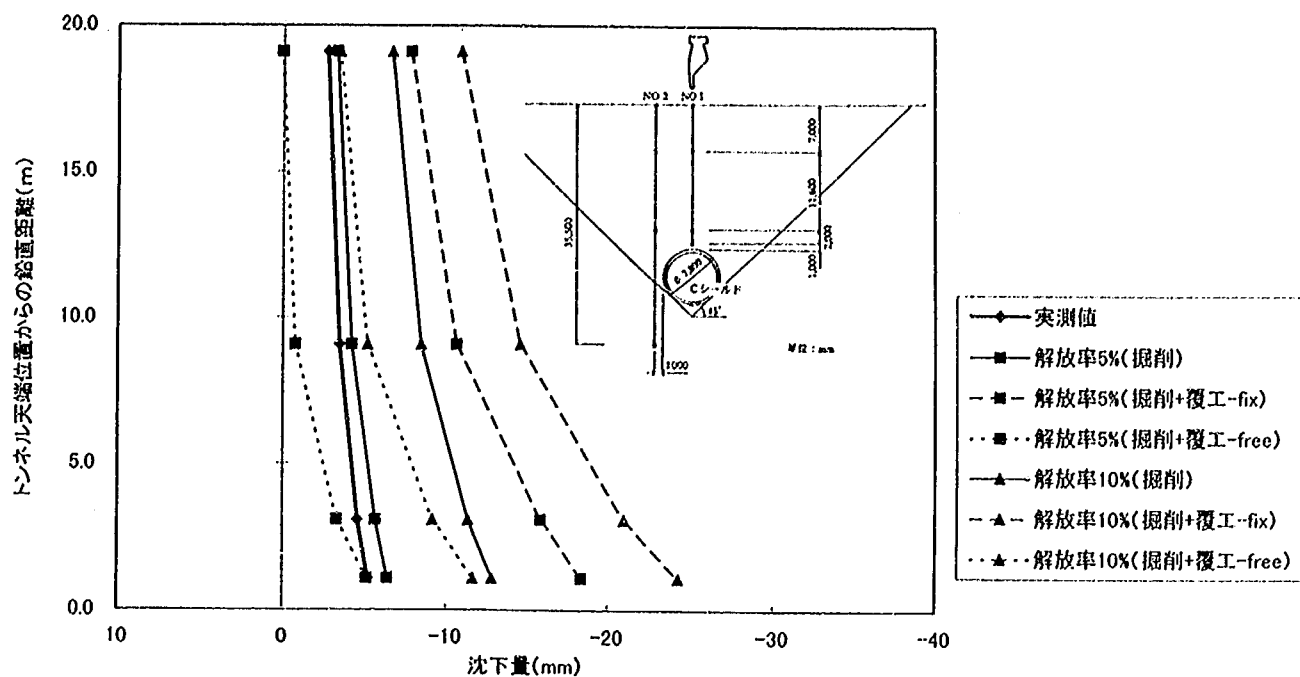


図-3. 19(5) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面③; N o. 1)

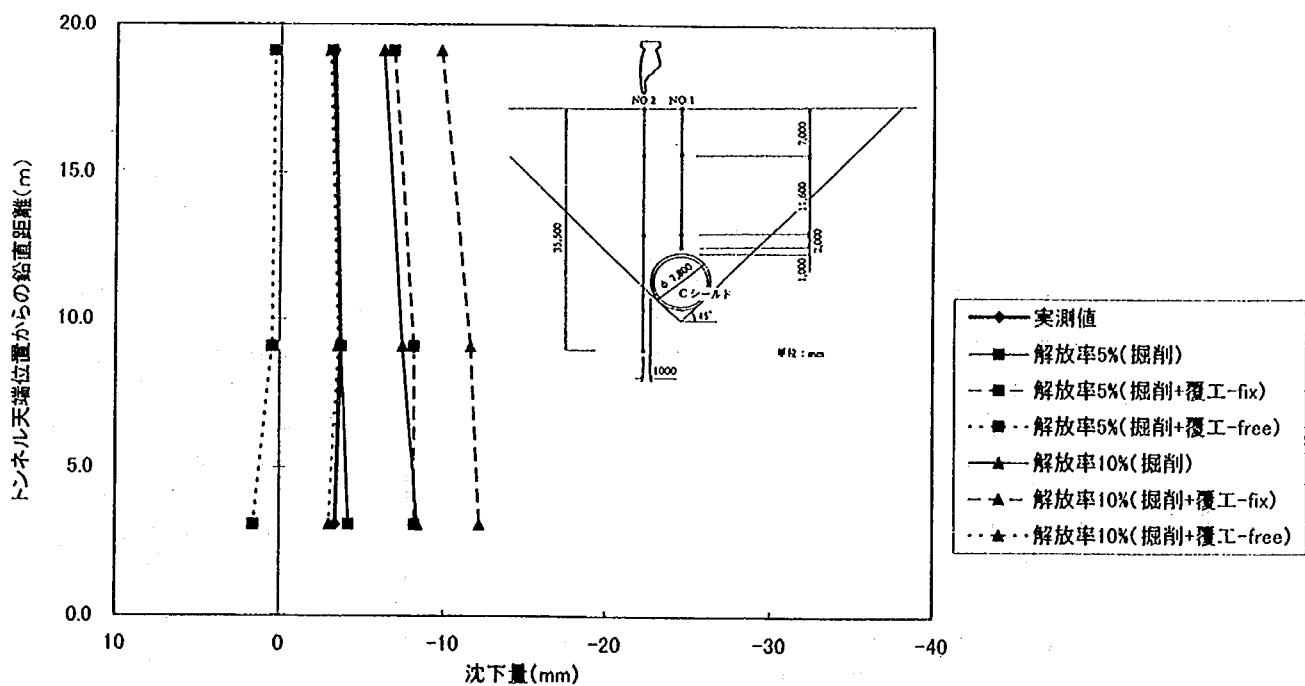


図-3. 19(6) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面③; N o. 2)

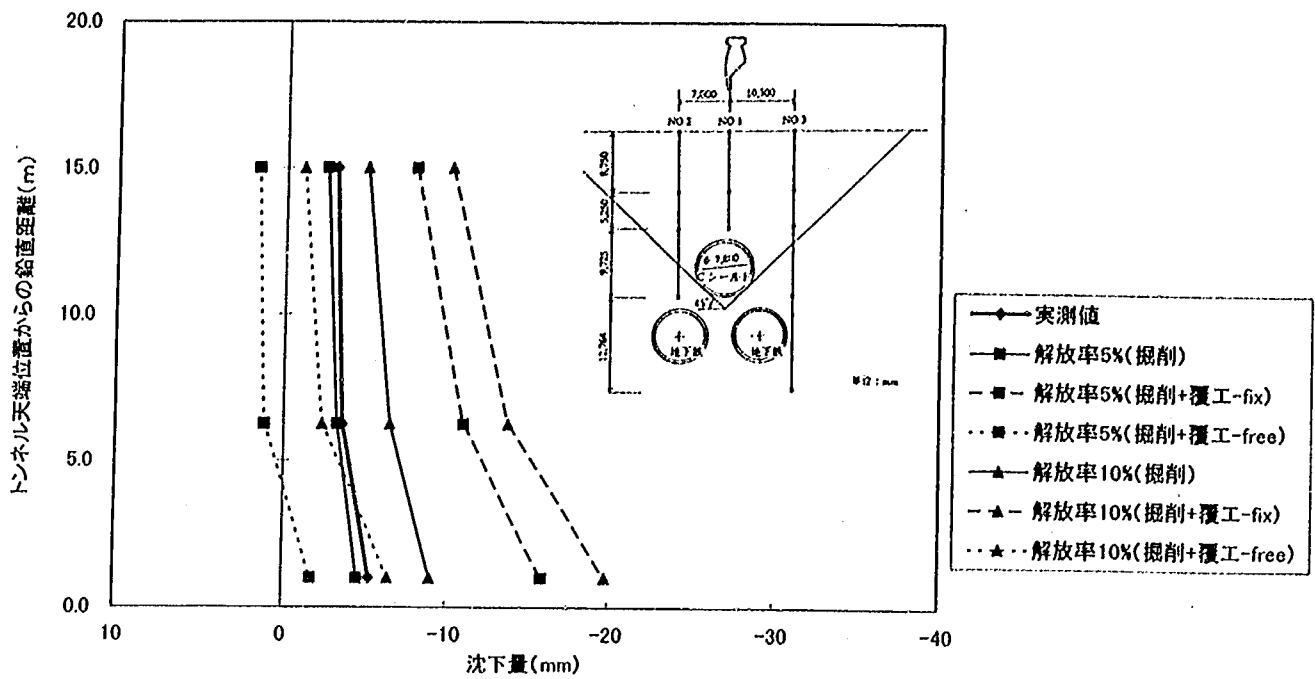


図-3.19(7) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面④; No. 1)

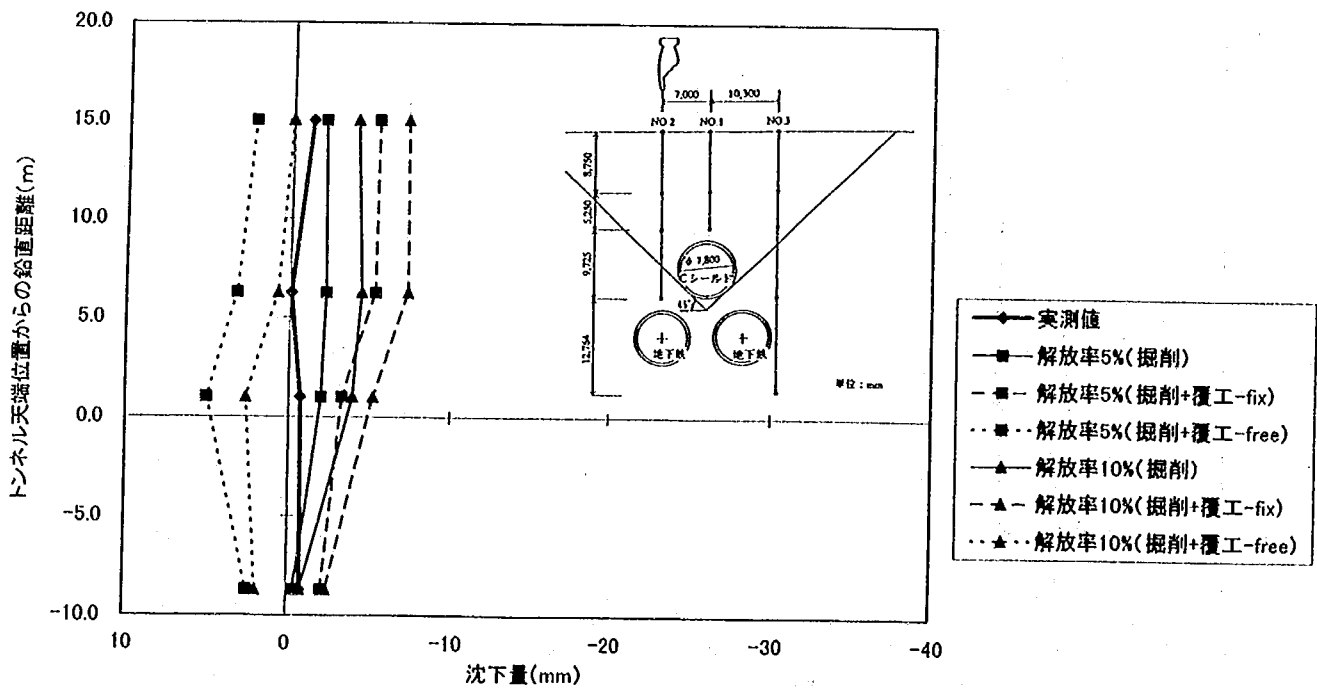


図-3.19(8) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面④; No. 2)

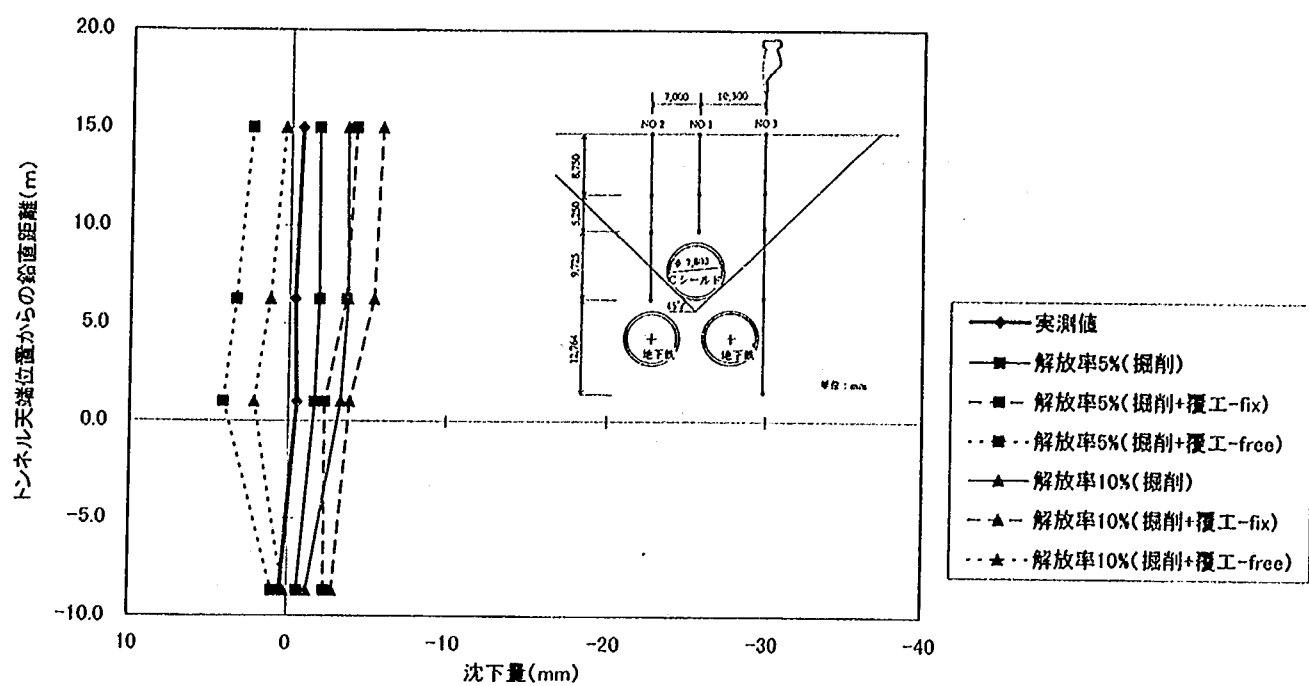


図-3. 19(9) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面④; No. 3)

3.6 Dシールド

3.6.1 解析条件設定

(1) 解析領域

図-3.20(1)～(3)に各計測地点における解析領域図を示す。

掘削(マシ)外径 : 8,010mm → 被り : 18.995m (=H : 解析領域用)
 シールド外径 : 7,850mm → (被り : 19.075m)

(単位 : m)

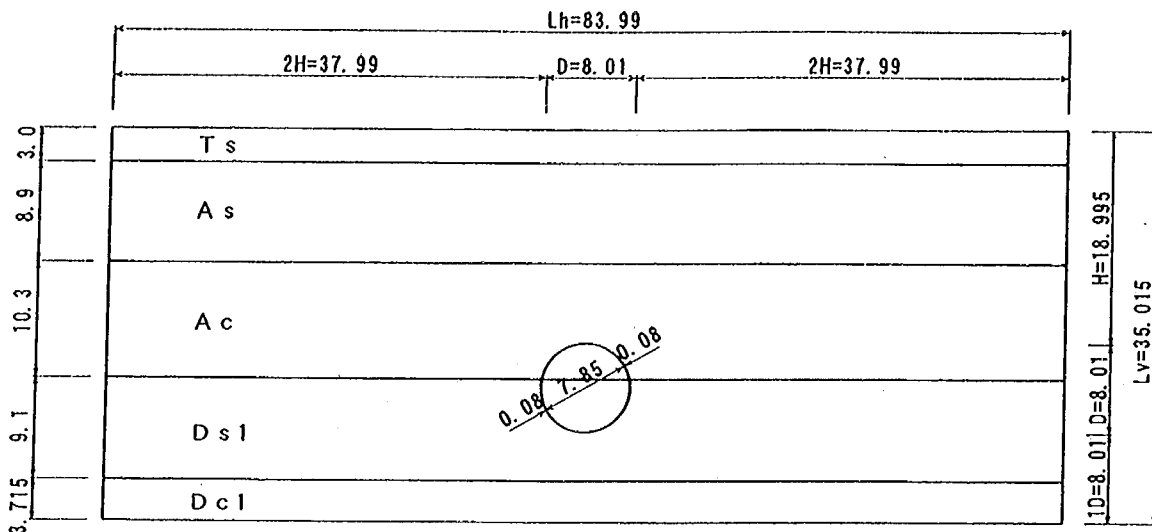


図-3.20(1) 解析領域図 (計測断面①)

掘削(マシ)外径 : 8,010mm → 被り : 17.195m (=H : 解析領域用)
 シールド外径 : 7,850mm → (被り : 17.275m)

(単位 : m)

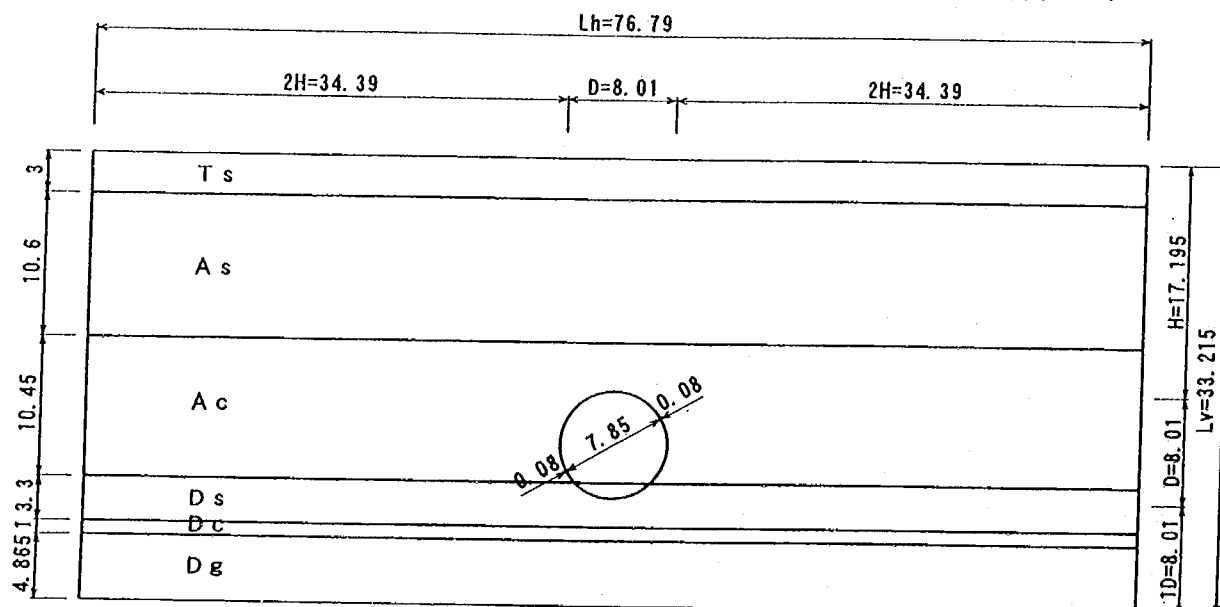


図-3.20(2) 解析領域図 (計測断面②)

掘削(マシン)外径 : 8,010mm → 被り : 12.995m (=H : 解析領域用)
 セグメント外径 : 7,850mm → (被り : 13.075m)

(単位 : m)

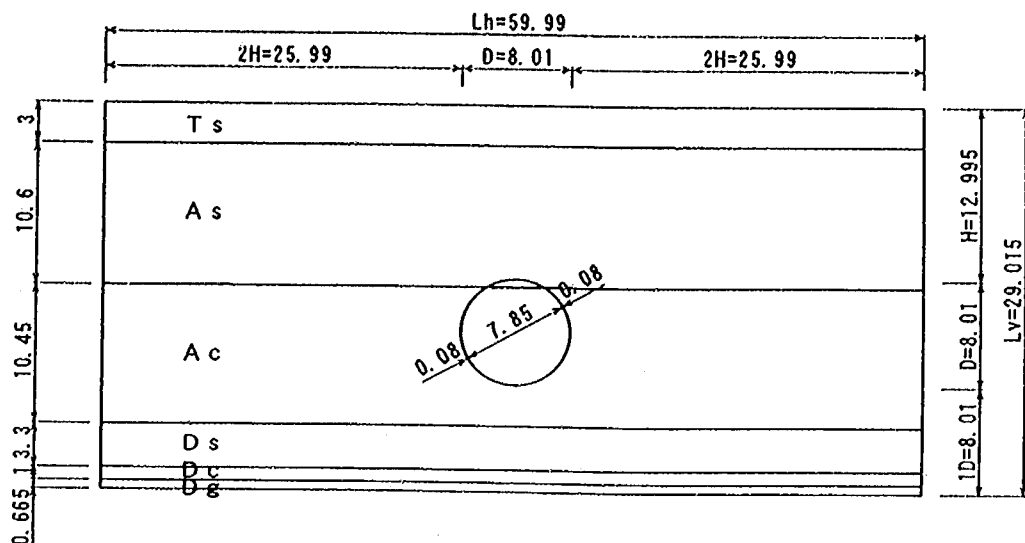


図-3.20(3) 解析領域図(計測断面③)

(2) 地盤定数

図-3.21(1)、(2)に各計測位置での土質柱状図、表-3.12に地盤物性値の入力諸定数を示す。

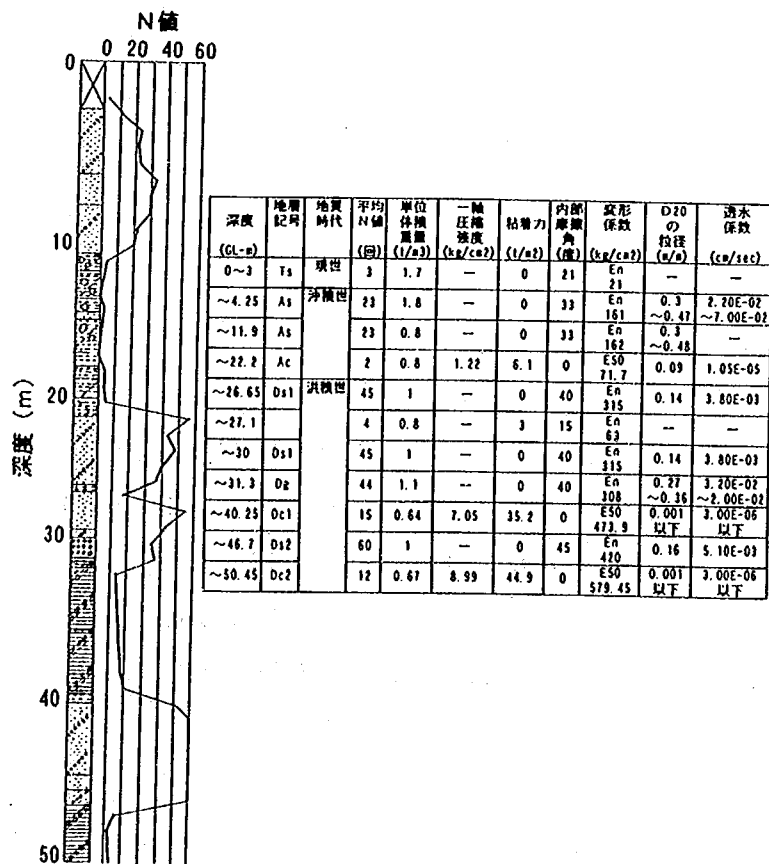


図-3.21(1) 土質柱状図(計測断面①)

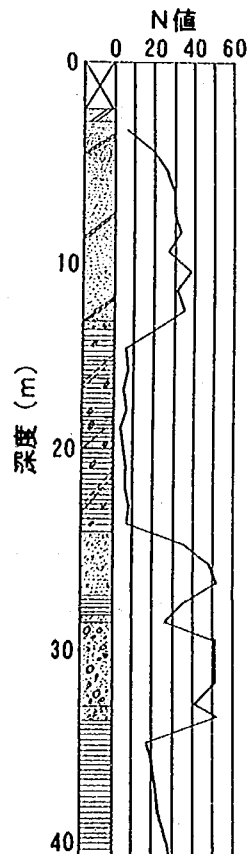


図-3.21(2) 土質柱状図(計測断面②、③)

表-3. 12(1) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面①)

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) q_u^*		(参考) E_{50}^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)	(kgf/cm ²)	(MN/m ²)
T s	1.70	21	2.05	0.35	—	—	—	—
A s	1.80	161	15.78	0.35	—	—	—	—
A c	1.80	128.1	12.56	0.40	1.22	119.6	71.7	7.03
D s l	2.00	315	30.89	0.30	—	—	—	—
D c l	1.64	739.2	72.49	0.35	7.05	691.3	473.9	46.47

*土質試験結果

表-3. 12(2) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面②)

	γ (g/cm ³)	E		ν
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)	
T s	1.70	35	3.43	0.35
A s	1.80	182	17.84	0.35
A c	1.80	126	12.35	0.40
D s	2.00	294	28.83	0.30
D c	1.80	315	30.89	0.35
D g	2.00	336	32.95	0.30

表-3. 12(3) 地盤物性値の入力諸定数
(計測断面③)

	γ (g/cm ³)	E		ν
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)	
T s	1.70	35	3.43	0.35
A s	1.80	182	17.84	0.35
A c	1.80	126	12.35	0.40
D s	2.00	294	28.83	0.30
D c	1.80	315	30.89	0.35
D g	2.00	336	32.95	0.30

(3) 構造物の物性値

裏込め注入材、セグメントの物性値は以下の通りとする。

1) 裏込め注入材

単位体積重量 : $\gamma = 1.30 \text{ tf/m}^3$

弾性係数 : $E = 2.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$
(19.61 MN/m²)

ポアソン比 : $\nu = 0.30$

2) セグメント

弾性係数 : $E = 3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
(3.23 $\times 10^4$ MN/m²)

ポアソン比 : $\nu = 0.17$

断面積 : $A = 3.25 \times 10 \text{ cm}^2$

断面二次モーメント : $I = 2.861 \times 10^3 \text{ cm}^4$

3.6.2 解析結果

(1) 着目点での応力解放率

図-3.22(1)～(3)に示す各1点を着目点とし、解放率と沈下量の関係を図-3.23(1)～(3)に示す。

応力解放率解析法において、従来の場合（ステップ2まで）と応力の収支を考慮した場合（ステップ3まで）の実測値に対応する応力解放率 α を表-3.13(1)～(3)に示す。

計測断面①、②については各方式とも概ね10%前後の応力解放率であった。

計測断面③については各方式での応力解放率のばらつきが見られ、STEP3方式①（セグメント側壁部拘束する）については応力解放率がマイナスとなり、掘削による応力の解放が表現できていない。

表-3.13(1) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面①)

解析方式 \ 着目点	① (シールド直上地表面)
STEP2(従来)方式	8.9%
STEP3方式① (セグメント側壁部拘束する)	4.9%
STEP3方式② (セグメント側壁部拘束しない)	9.2%

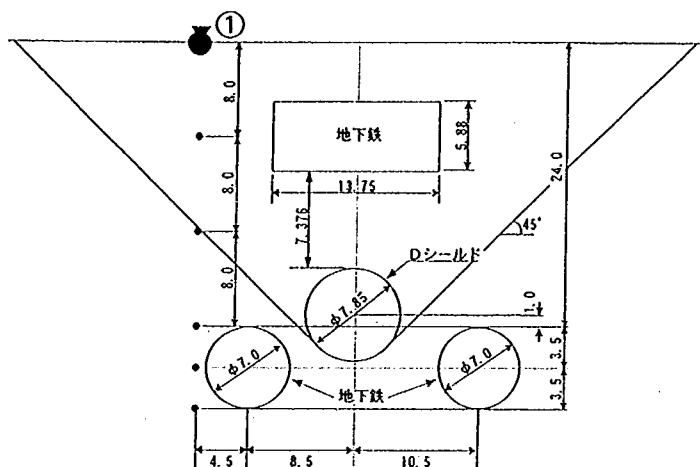


図-3.22(1) 着目点位置(計測断面①)

表-3.13(2) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面②)

解析方式 \ 着目点	① (シールド直上地表面)
STEP2(従来)方式	9.5%
STEP3方式① (セグメント側壁部拘束する)	5.1%
STEP3方式② (セグメント側壁部拘束しない)	12.2%

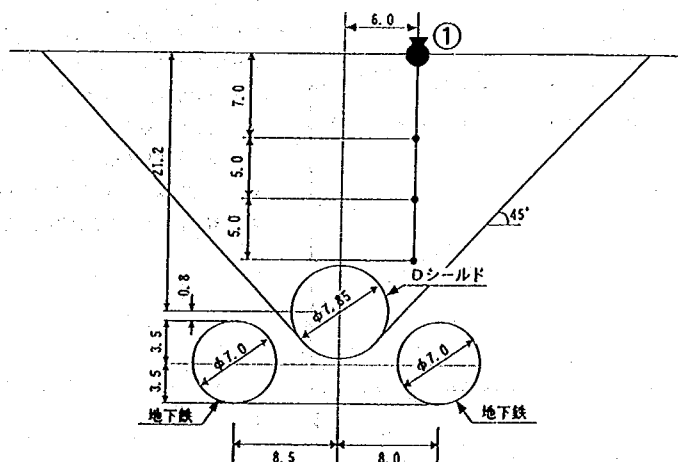
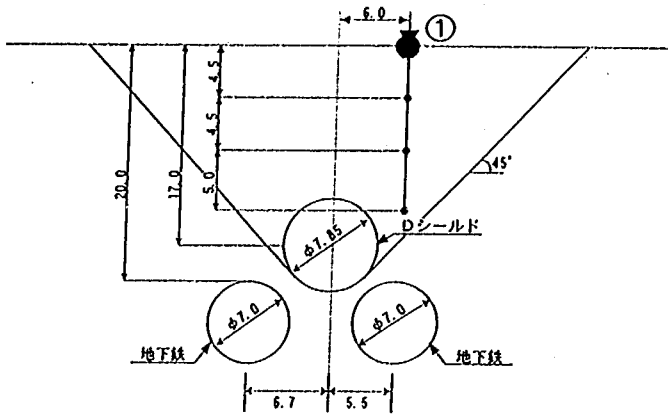


図-3.22(2) 着目点位置(計測断面②)

表-3. 13(3) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面③)



着目点 解析方式	① (シールド直上地表面)
STEP 2 (従来) 方式	4.8%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	(-0.1%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	13.2%

図-3. 22(3) 着目点位置 (計測断面③)

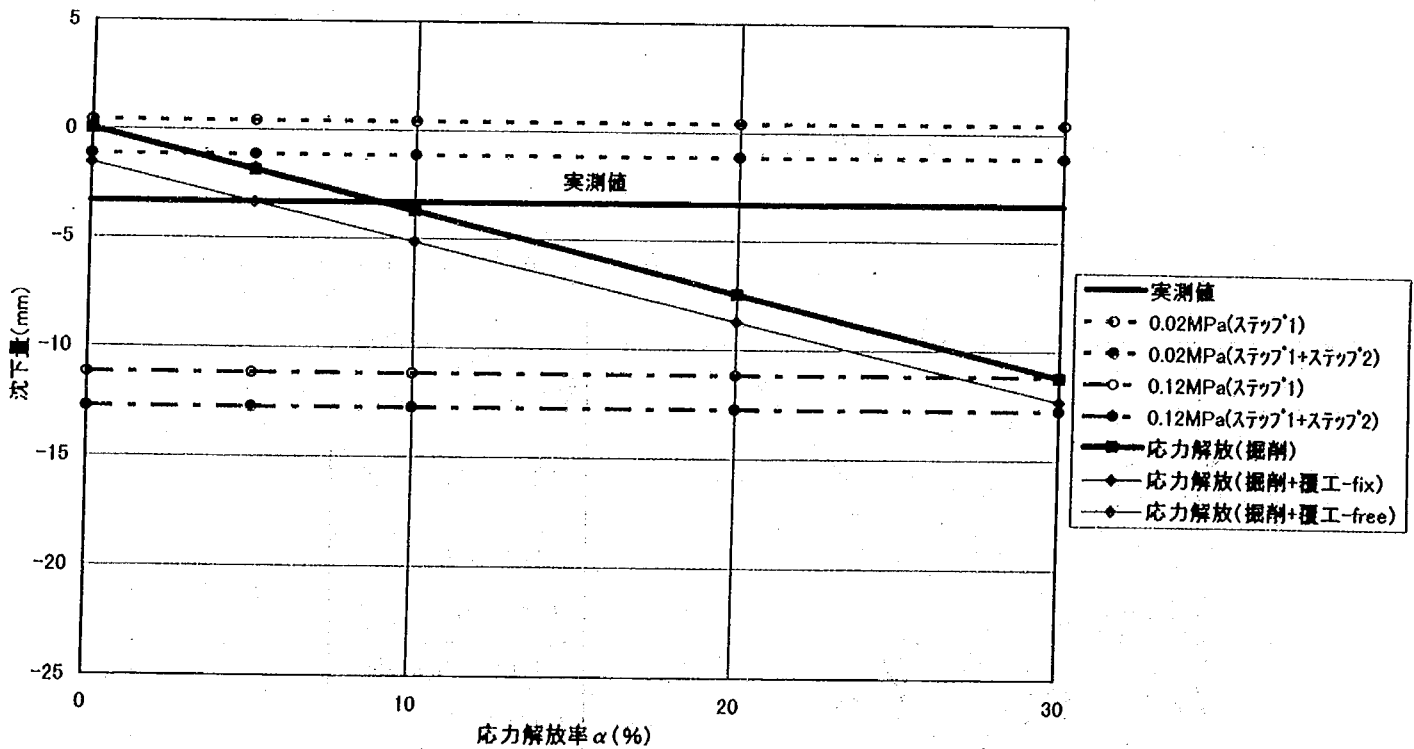


図-3. 23(1) 解放率と沈下量の関係 (計測断面①; 着目点①)

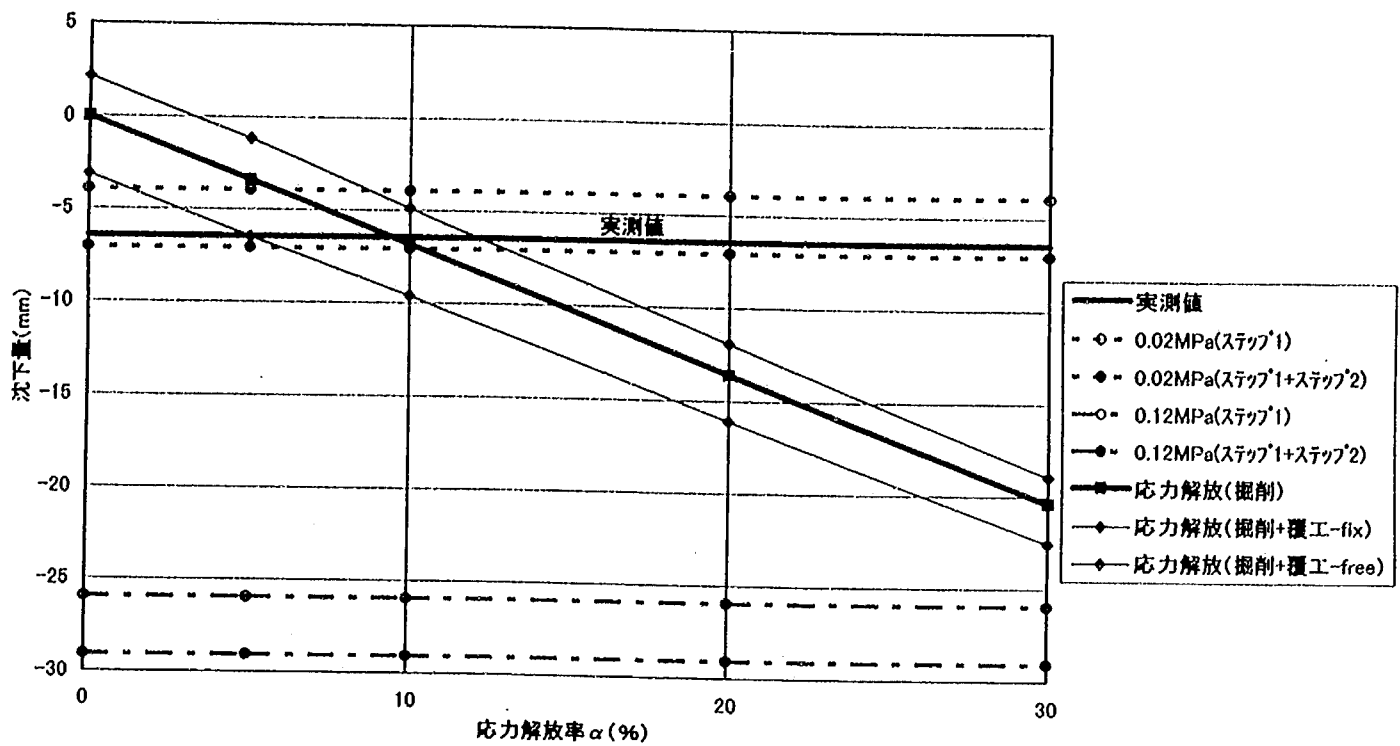


図-3.23(2) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点①)

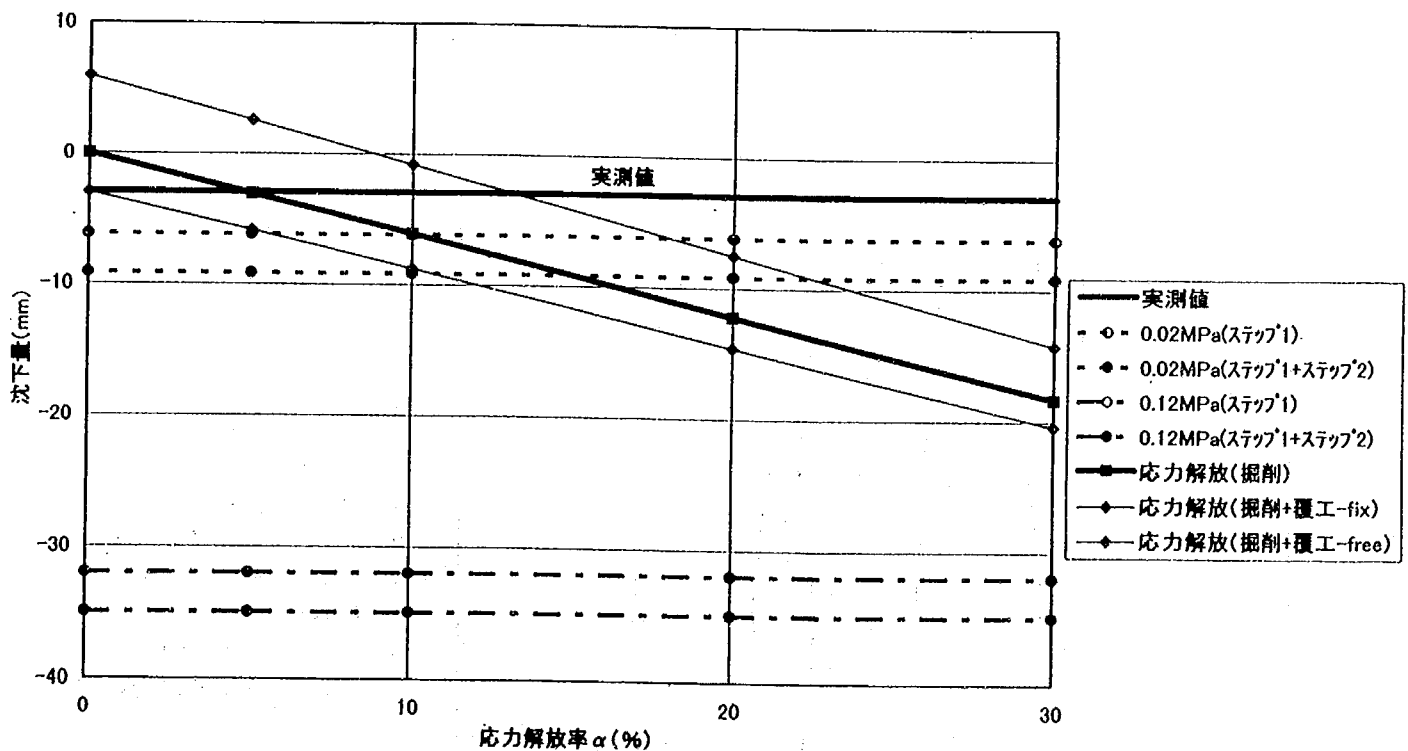


図-3.23(3) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点①)

(2) 層別沈下量

各計測断面における層別沈下量の計測および解析結果を図-3. 24(1)~(3)に示す。

各断面とも多少のばらつきは見られるが概ね沈下形状のシミュレートはできている。

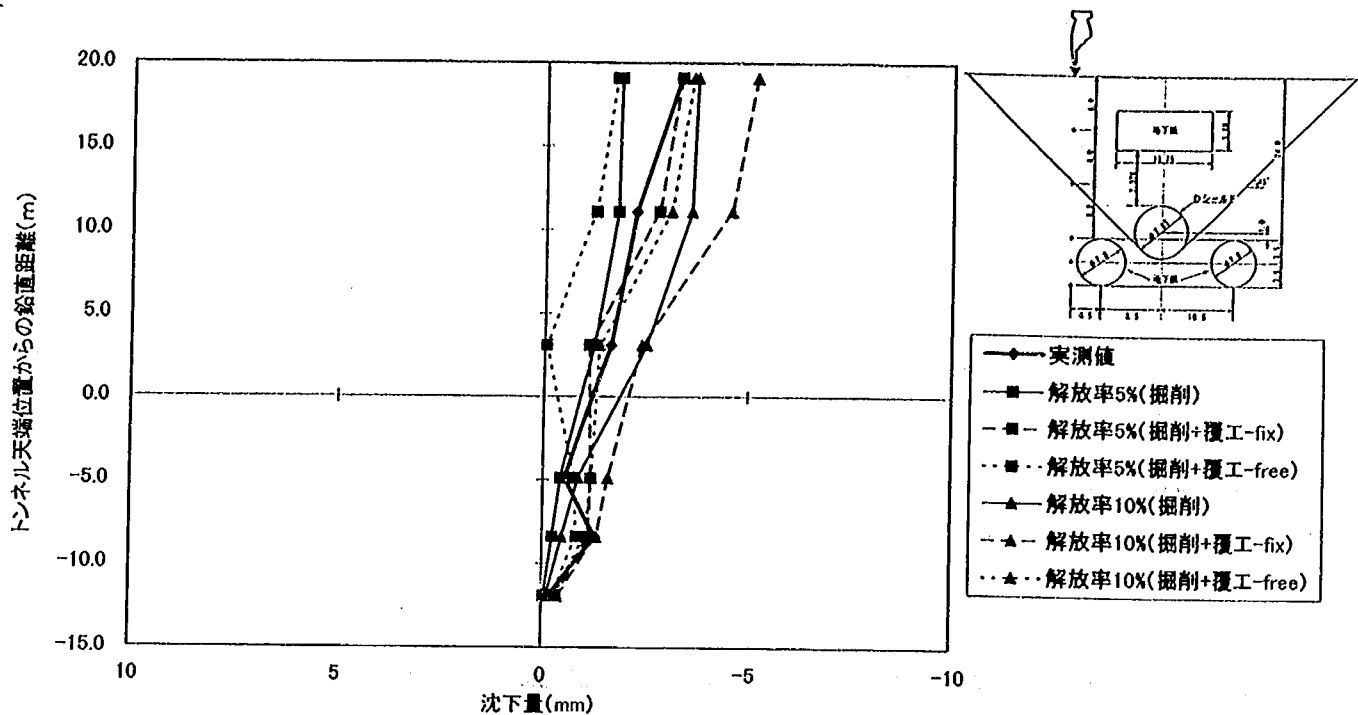


図-3. 24(1) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面①)

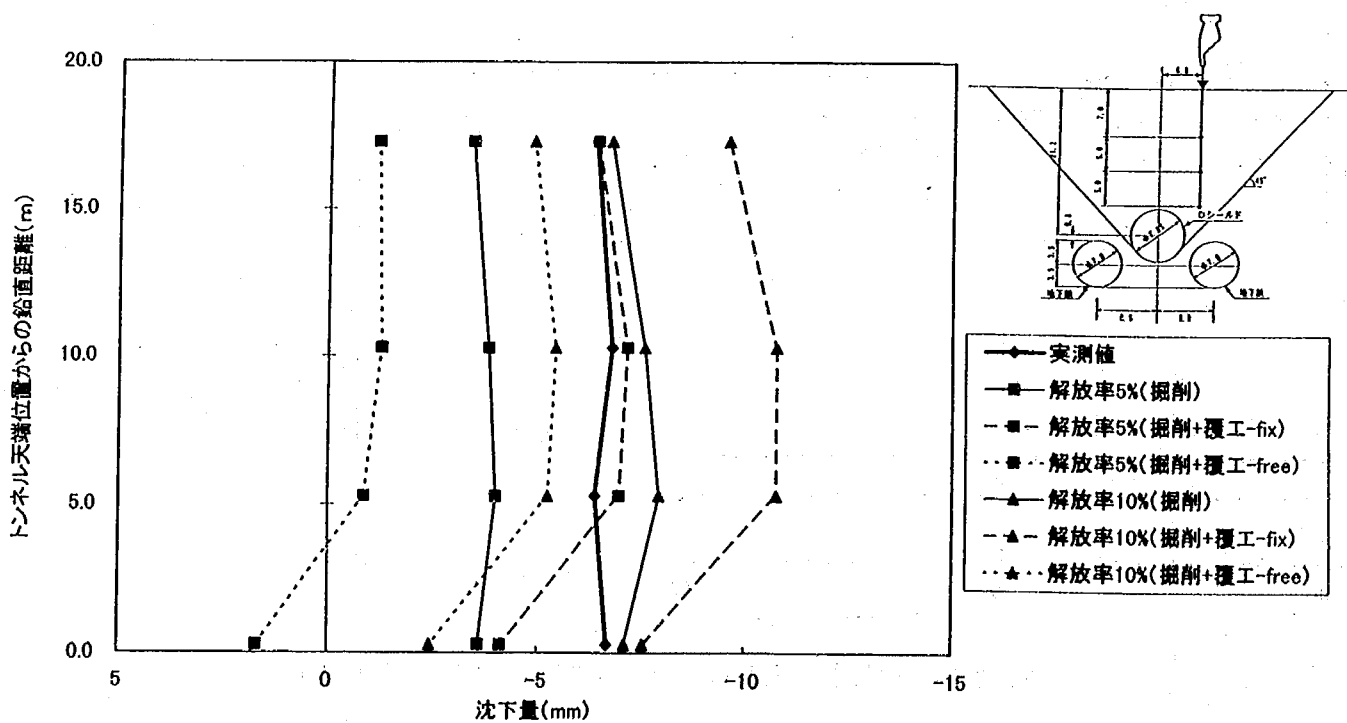


図-3. 24(2) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②)

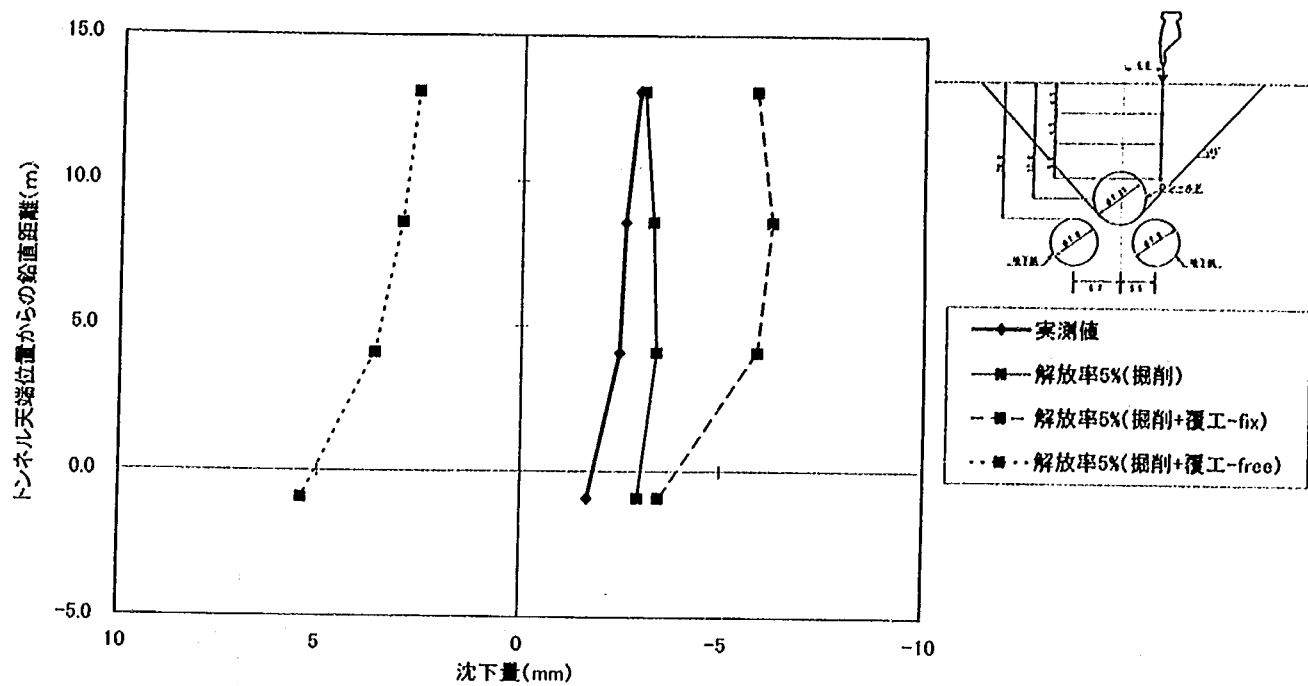


図-3. 24(3) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面③)

3.7 Eシールド

3.7.1 解析条件設定

(1) 解析領域

図-3.25(1)～(3)に各計測地点における解析領域図を示す。

掘削(マシン)外径 : 7,250mm → 被り : 21.32m (=H : 解析領域用)

セグメント外径 : 7,100mm → (被り : 21.395m)

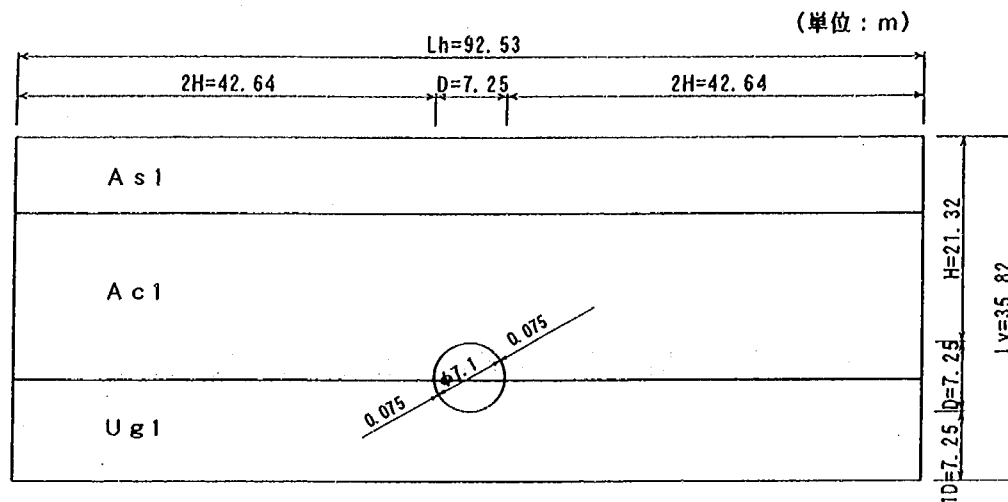


図-3.25(1) 解析領域図 (計測断面①)

掘削(マシン)外径 : 7,250mm → 被り : 35.54m (=H : 解析領域用)

セグメント外径 : 7,100mm → (被り : 35.615m)

(単位 : m)

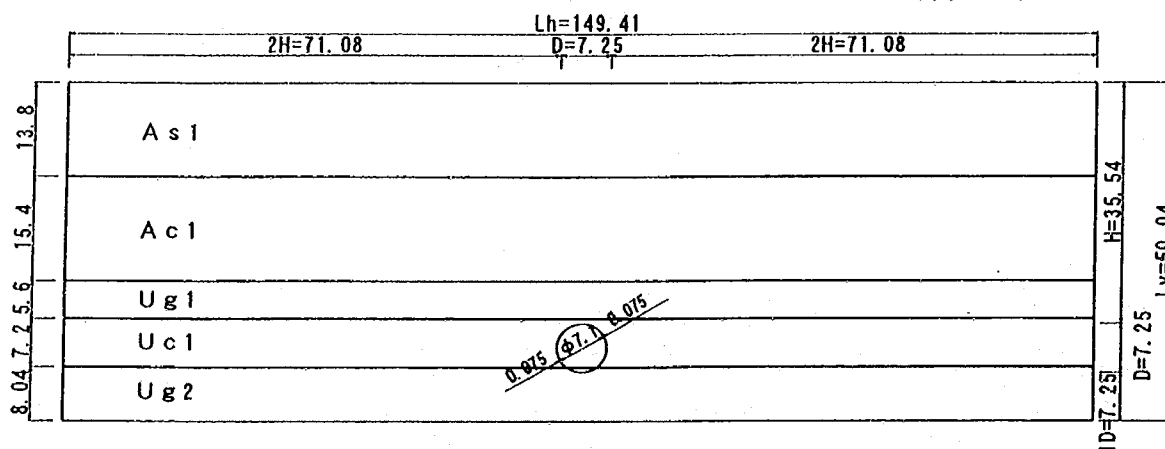


図-3.25(2) 解析領域図 (計測断面②)

掘削(マシ)外径 : 7,250mm → 被り : 30.47m (= H : 解析領域用)
 マシメント外径 : 7,100mm → (被り : 30.545m)

(単位 : m)

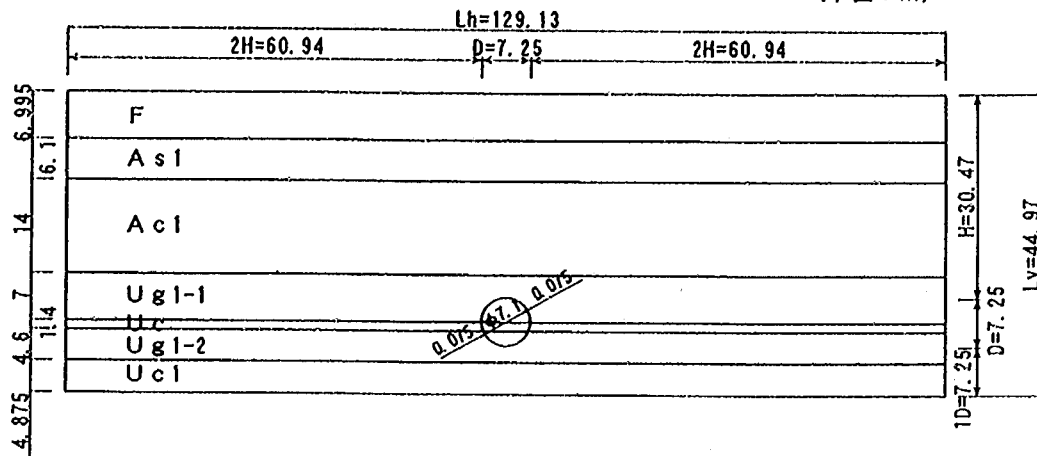


図-3.25(3) 解析領域図 (計測断面③)

(2) 地盤定数

図-3.26(1)～(3)に各計測位置での土質柱状図、表-3.14(1)～(3)に土質試験結果一覧表を示す。

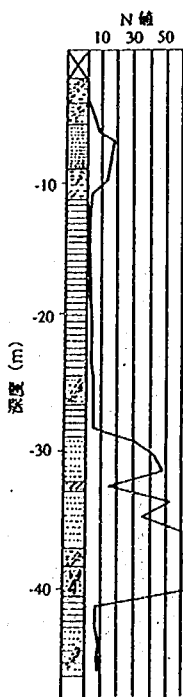


図-3.26(1) 土質柱状図
(計測断面①)

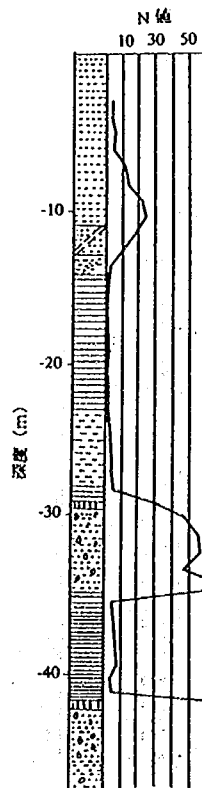


図-3.26(2) 土質柱状図
(計測断面②)

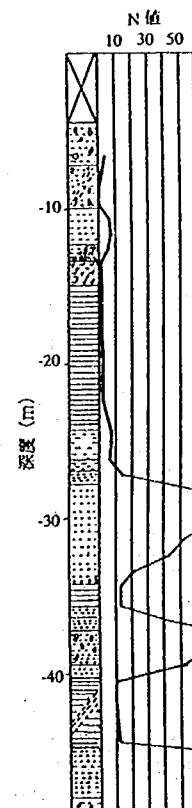


図-3.26(3) 土質柱状図
(計測断面③)

表-3. 14(1) 土質試験結果一覧表 (計測断面①)

地層名		比重 Gs	粒度構成 (%)				均等係数 U _c	含水比 W _a (%)	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _p (%)	コンシ シテ性 指数 I _p	密度 ρ _s (t/m ³)	日本統一 分類	一軸圧縮強さ q _v (kgf/cm ²)	粘着力 C _{uu} (kgf/cm ²)	せん断 抵抗角 φ _{uu} (度)	圧縮降 伏応力 P _c (tf/m ²)
			礫	砂	シルト	粘土											
As1	範囲	2.62 ~ 2.69	0 ~ 14	50 ~ 91	5 ~ 50		2 ~ 13	15 ~ 44	—	—	—	—	S-M	—	—	—	—
	平均値	2.66	3	80	16		6	29	—	—	—	—	S-M _g	—	—	—	—
Ac1	範囲	2.64 ~ 2.70	0	1 ~ 5	52 ~ 76	20 ~ 45	—	49 ~ 65	58 ~ 86	25 ~ 31	0.23 ~ 0.43	1.60 ~ 1.72	C-II	0.64 ~ 1.07	0.33 ~ 0.44	0	11 ~ 16
	平均値	2.67	0	3	64	33	—	56	71	29	0.34	1.66	C-II	0.86	0.39	0	13
	範囲	2.63 ~ 2.69	0 ~ 2	1 ~ 25	33 ~ 59	36 ~ 65	—	43 ~ 70	63 ~ 99	24 ~ 38	0.26 ~ 0.55	1.59 ~ 1.77	C-II	0.80 ~ 1.93	0.53 ~ 0.77	0	14 ~ 31
	平均値	2.66	0	4	44	52	—	62	87	31	0.44	1.64	C-II	1.34	0.65	0	21
	範囲	2.67 ~ 2.71	0	0 ~ 48	33 ~ 56	19 ~ 55	—	27 ~ 50	34 ~ 74	19 ~ 31	0.29 ~ 0.47	1.69 ~ 1.81	C-L	1.44 ~ 1.94	—	—	32 ~ 36
	平均値	2.68	0	23	48	29	—	37	49	22	0.42	1.75	C-II	1.73	—	—	34
As2	範囲	2.67 ~ 2.68	0 ~ 2	65	20 ~ 24	11 ~ 13	60 ~ 91	22 ~ 24	31 ~ 35	18 ~ 19	0.65 ~ 0.75	—	S-M	—	—	—	—
	平均値	2.68	1	65	22	12	76	23	33	19	0.70	—	S-M	—	—	—	—
Ug1	範囲	2.64 ~ 2.66	0 ~ 37	55 ~ 91	8 ~ 13		4 ~ 15	11 ~ 22	—	—	—	—	S-M	—	—	—	—
	平均値	2.65	8	81	11		8	18	—	—	—	—	S-M _g	—	—	—	—
	範囲	2.64 ~ 2.70	42 ~ 71	20 ~ 50	7 ~ 9		17 ~ 108	7 ~ 10	—	—	—	—	G-M	—	—	—	—
	平均値	2.69	58	34	8		60	9	—	—	—	—	S-M _g	—	—	—	—
Uc1	範囲	2.66 ~ 2.72	0 ~ 1	0 ~ 40	30 ~ 56	18 ~ 56	—	23 ~ 69	33 ~ 119	15 ~ 39	0.51 ~ 0.68	1.75 ~ 1.89	C-II	1.80 ~ 3.86	1.17 ~ 2.12	0	46 ~ 73
	平均値	2.69	0	14	47	39	—	40	65	24	0.59	1.82	C-L	2.83	1.65	0	60
Us1	範囲	2.64 ~ 2.69	1 ~ 8	64 ~ 85	11 ~ 35		5 ~ 60	15 ~ 26	—	—	—	—	S-M	—	—	—	—
	平均値	2.66	4	79	17		20	20	—	—	—	—	S-M	—	—	—	—
Ug2	範囲	2.63 ~ 2.66	36 ~ 54	37 ~ 55	7 ~ 9		19 ~ 46	8 ~ 10	—	—	—	—	G-M	—	—	—	—
	平均値	2.65	47	44	9		33	9	—	—	—	—	S-M _g	—	—	—	—
Uc2		2.66	0	5	64	31	—	33	52	20	0.59	—	C-II	—	—	—	—

表-3. 14(2) 土質試験結果一覧表 (計測断面②)

表-3. 14(3) 土質試験結果一覧表 (計測断面③)

試料番号		T-1	T-2	T-3	D-1	D-3
深さ m		14.00 ~ 14.70	18.00 ~ 18.80	22.00 ~ 22.80	36.00 ~ 36.50	37.30 ~ 38.10
粒度特性	礫分(2000μm以上) %	0	0	0	0	0
	砂分(74~2000μm) %	5	2	12	14	15
	シルト分(5~74μm) %	59	43	44	53	55
	粘土分(5μm以下) %	36	55	44	33	30
	最大粒径 mm	2.00	0.42	0.84	2.00	2.00
	均等係数 U _c	—	—	—	—	—
コンシシテ性	液性限界 w _L %	66.6	93.8	65.7	66.3	62.0
	塑性限界 w _p %	26.3	30.5	24.3	22.5	20.1
	塑性指数 I _p	40.3	63.3	41.4	43.8	41.9
	日本統一土質分類	C-II	C-II	C-II	C-II	C-II
土粒子の比重 G _s		2.641	2.645	2.681	2.677	2.694
自然状態	含水比 w _a %	51.8	47.8	63.2	49.0	39.9
	湿潤密度 ρ _s g/cm ³	1.696	1.729	1.628	1.728	1.808
	間隙比 e	1.364	1.258	1.651	1.312	1.085
	飽和度 S _r %	100.3	100.4	101.2	100.1	99.1
	一軸圧縮強さ q _v kgf/cm ²	0.992	1.061	1.42	1.70	2.71
一軸圧縮		0.901	1.110	1.43	1.55	2.39
				1.48	2.76	2.38
				3.33		
圧密	圧密降伏応力 p _c kgf/cm ²	2.16	2.26	3.10	4.60	4.65
	圧縮指数 C _c	0.423	0.89	0.85	0.75	0.59

試料番号		T-1	T-2	T-3	T-4	D-2
深さ m		10.00 ~ 10.80	13.00 ~ 13.80	16.00 ~ 16.80	19.00 ~ 19.80	38.00 ~ 38.80
粒度特性	礫分(2000μm以上) %	0	0	0	0	0
	砂分(74~2000μm) %	4	2	3	20	7
	シルト分(5~74μm) %	56	42	32	46	54
	粘土分(5μm以下) %	40	56	65	34	39
	最大粒径 mm	2.00	0.25	0.42	2.00	0.42
	均等係数 U _c	—	—	—	—	—
コンシシテ性	液性限界 w _L %	72.7	91.6	85.6	47.2	53.5
	塑性限界 w _p %	29.4	34.6	30.8	18.7	23.5
	塑性指数 I _p	43.3	57.0	54.8	28.5	30.0
	日本統一土質分類	C-II	C-II	C-II	C-II	C-II
土粒子の比重 G _s		2.662	2.674	2.646	2.686	2.687
自然状態	含水比 w _a %	54.3	66.1	64.8	39.3	37.4
	湿潤密度 ρ _s g/cm ³	1.667	1.592	1.609	1.813	1.836
	間隙比 e	1.464	1.790	1.710	1.064	1.011
	飽和度 S _r %	98.7	98.7	100.3	99.2	99.4
	一軸圧縮強さ q _v kgf/cm ²	0.795	0.908	1.335	1.778	3.57
一軸圧縮		0.711	0.872	1.300	1.460	3.02
		0.778	0.795	1.400	1.440	
		0.848				
圧密	圧密降伏応力 p _c kgf/cm ²	1.14	1.37	1.75	3.20	6.20
	圧縮指数 C _c	0.52	0.955	0.739	0.46	0.519

本シールドは計測断面②、③において、洪積粘性土層を通過する。

(3.2)式で粘性土の弾性係数は $E=210C$ に設定すると示したが、これは主として沖積粘性土を対象としたものであり、洪積粘性土の弾性係数については $E=480C$ という関係が得られている⁶⁾ことから、計測断面②、③では洪積粘性土の弾性係数を $E=210C$ と $E=480C$ との2ケースの場合の解析を行った。

表-3. 15(1)~(3)に各計測断面での地盤物性値の入力諸定数を示す。

表-3. 15(1) 地盤物性値の入力諸定数

(計測断面①)

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) q_u^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)
Asl	1.70	63	6.17	0.35	—	—
Ac1	1.70	105	10.29	0.40	0.64~1.94	62.9~190.2
Ugl	2.00	350	34.32	0.30	—	—

*土質試験結果

表-3. 15(2) 地盤物性値の入力諸定数

(計測断面②)

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) q_u^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)
Asl	1.70	77	7.55	0.35	—	—
Ac1	1.70	140	13.72	0.40	0.901~1.70	88.3~116.7
Ugl	2.00	364	35.69	0.30	—	—
Uc1	1.80	305 700	29.91 68.64	0.35	2.38~3.86	233.3~378.5
Ug2	2.00	420	41.18	0.30	—	—

*土質試験結果

表-3. 15(3) 地盤物性値の入力諸定数

(計測断面③)

	γ (g/cm ³)	E		ν	(参考) q_u^*	
		(kgf/cm ²)	(MN/m ²)		(kgf/cm ²)	(kN/m ²)
F	1.70	28	2.74	0.35	—	—
Asl	1.70	28	2.74	0.35	—	—
Ac1	1.70	115	11.27	0.40	0.711~1.778	69.7~174.3
Ugl-1	2.00	308	30.20	0.30	—	—
Uc	1.80	345 790	33.83 77.47	0.35	—	—
Ugl-2	2.00	357	35.00	0.30	—	—
Uc1	1.80	345 790	33.83 77.47	0.35	3.02~3.57	296.1~350.0

*土質試験結果

(3) 構造物の物性値

裏込め注入材、セグメントの物性値は以下の通りとする。

1) 裏込め注入材

単位体積重量 : $\gamma=1.30 \text{ tf/m}^3$

弾性係数 : $E=2.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$

(19.61 MN/m²)

ポアソン比 : $\nu=0.30$

2) セグメント

弾性係数 : $E=3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

(3.23 $\times 10^4$ MN/m²)

ポアソン比 : $\nu=0.17$

断面積 : $A=3.5 \times 10 \text{ cm}^2$

断面二次モーメント : $I=3.573 \times 10^3 \text{ cm}^4$

3.7.2 解析結果

(1) 着目点での応力解放率

図-3.27(1)～(3)に示す各2点を着目点とし、解放率と沈下量の関係を図-3.28(1)～(10)に示す。

応力解放率解析法において、従来の場合(ステップ2まで)と応力の収支を考慮した場合(ステップ3まで)の実測値に対応する応力解放率 α を表-3.16(1)～(3)に示す。

計測断面①の地表面については実測値が+0.16mmと隆起した値であったため応力解放率がマイナスとなっているが、これは地中変位から考えて(表-2.6(1)および図-3.29(1)参照)異常点と考えられる。

計測断面②では洪積粘性土の弾性係数の設定($E=210C$ または $E=480C$)によって、洪積粘性土はシールド近傍のみの分布状況(図-3.25(2)参照)であるが、地表面沈下に対しての応力解放率はSTEP2(従来)方式では $E=210C$ で $\alpha=10.3\%$ 、 $E=480C$ で $\alpha=17.8\%$ となっている。また、着目点②についてはSTEP3方式①、②とも応力解放率がマイナスとなり掘削による応力の解放を表現できていない。

計測断面③では洪積粘性土の分布がシールド下部および通過部では薄い層であるため、弾性係数の設定($E=210C$ または $E=480C$)による応力解放率への影響は比較的小さいものであった。

参考として行った裏込め注入解析法については各断面とも実測値よりも解析値の方が過大な沈下量を与える結果であった。

表-3.16(1) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面①)

着目点 解析方式	① (シールド直上地表面)	② (シールド天端1.5m上)
STEP 2 (従来) 方式	(-0.2%)	7.4%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	(-5.2%)	1.9%
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	(-0.5%)	5.5%

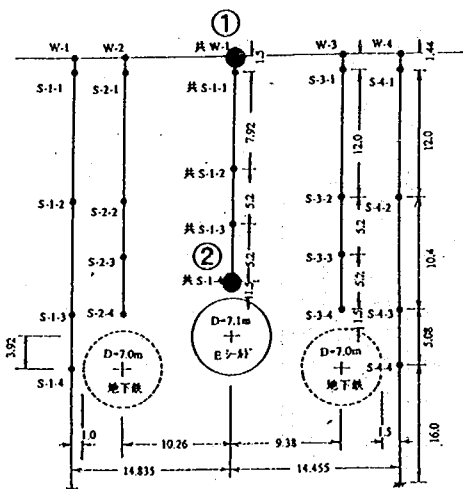


図-3.27(1) 着目点位置 (計測断面①)

表-3. 16(2) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面②)

着目点 解析方式	① (シ-ルト'直上地表面)		② (シ-ルト'天端1.5m上)	
	E=210C*	E=480C*	E=210C*	E=480C*
STEP 2 (従来) 方式	10.3%	17.8%	4.7%	6.8%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	1.4%	4.5%	(-8.1%)	(-9.9%)
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	4.2%	9.3%	(-5.5)%	(-6.0%)

* 洪積粘性土が対象。

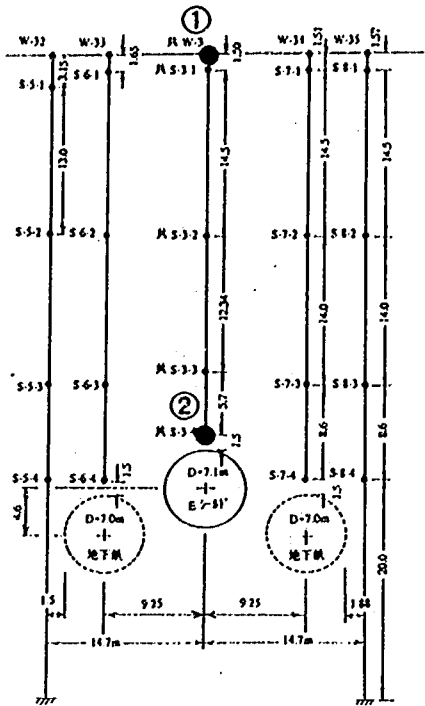


図-3. 27(2) 着目点位置 (計測断面②)

表-3. 16(3) 実測値に対する応力解放率 α
(計測断面③)

着目点 解析方式	① (シ-ルト'直上地表面)		② (シ-ルト'天端1.5m上)	
	E=210C*	E=480C*	E=210C*	E=480C*
STEP 2 (従来) 方式	22.1%	24.1%	10.7%	11.1%
STEP 3 方式 ① (セグメント側壁部拘束する)	13.2%	15.6%	(-0.8%)	0.4%
STEP 3 方式 ② (セグメント側壁部拘束しない)	16.6%	16.6%	2.1%	1.3%

* 洪積粘性土が対象。

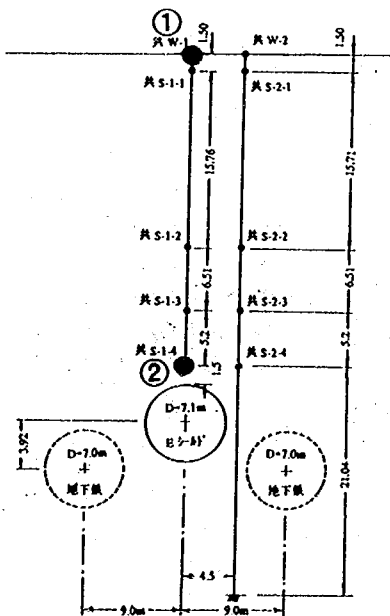
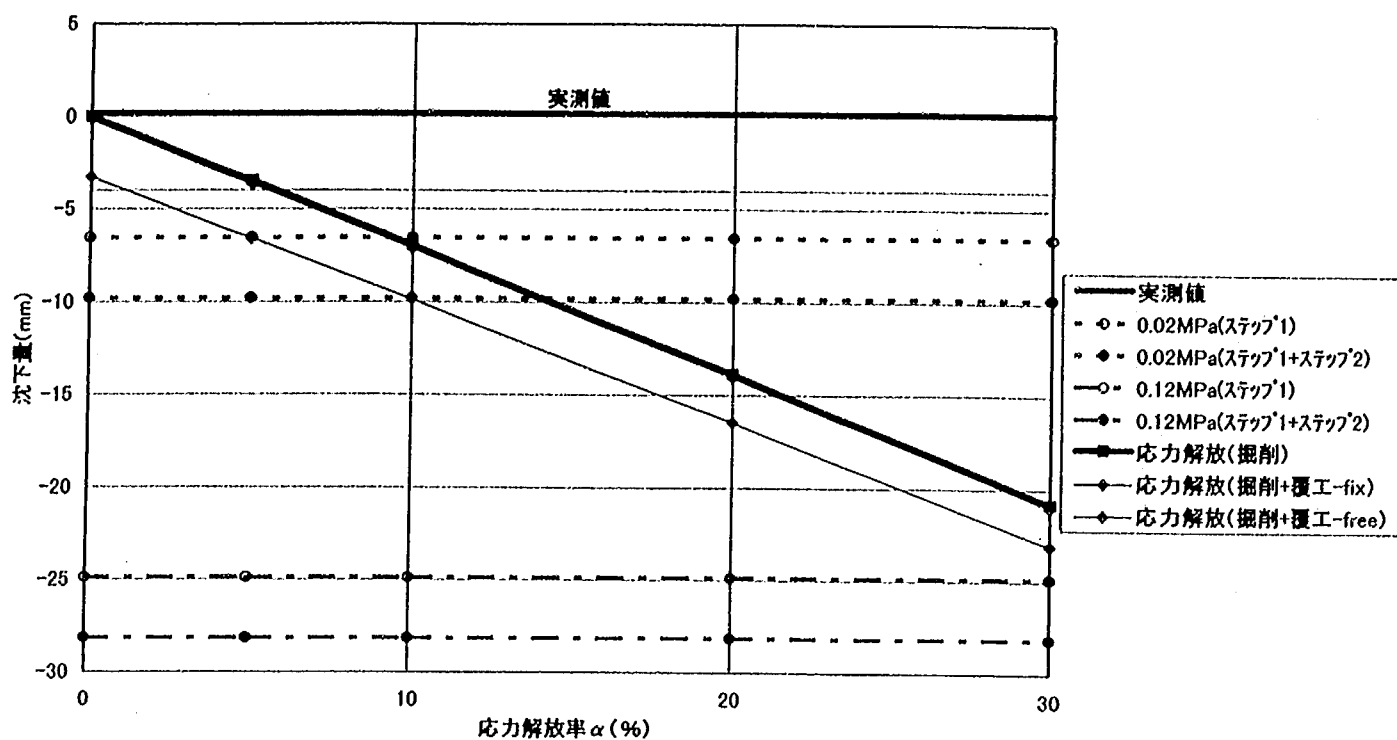
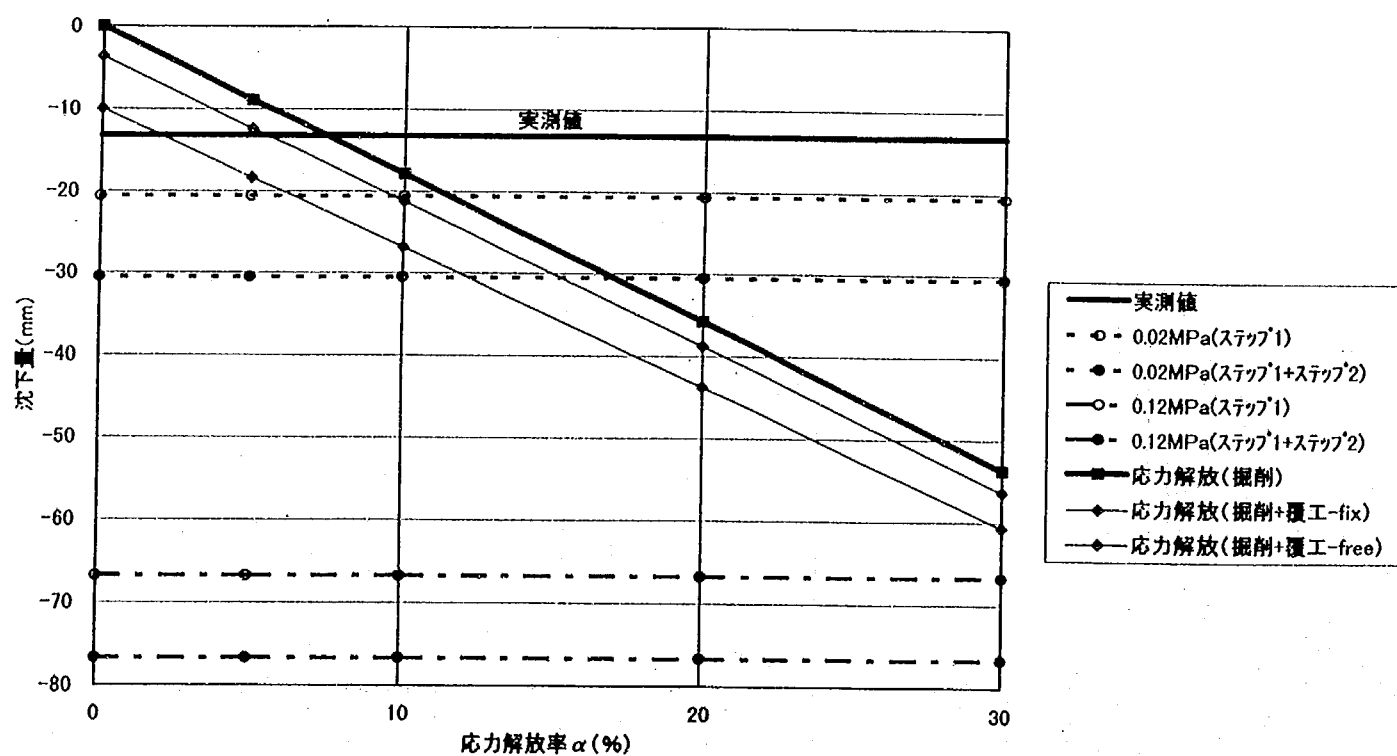


図-3. 27(3) 着目点位置 (計測断面③)



図－ 3. 28(1) 解放率と沈下量の関係（計測断面①；着目点①）



図－ 3. 28(2) 解放率と沈下量の関係（計測断面①；着目点②）

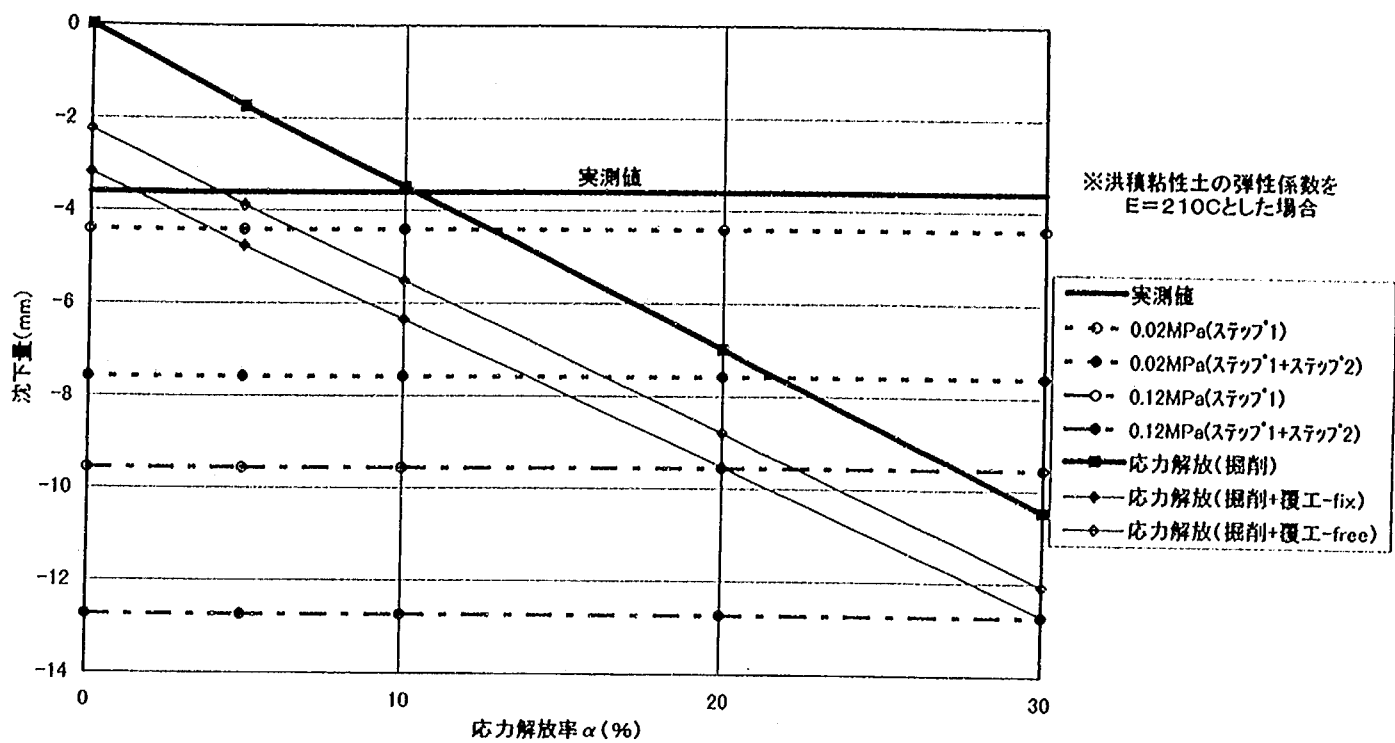


図-3.28(3) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点①; $E=210C$)

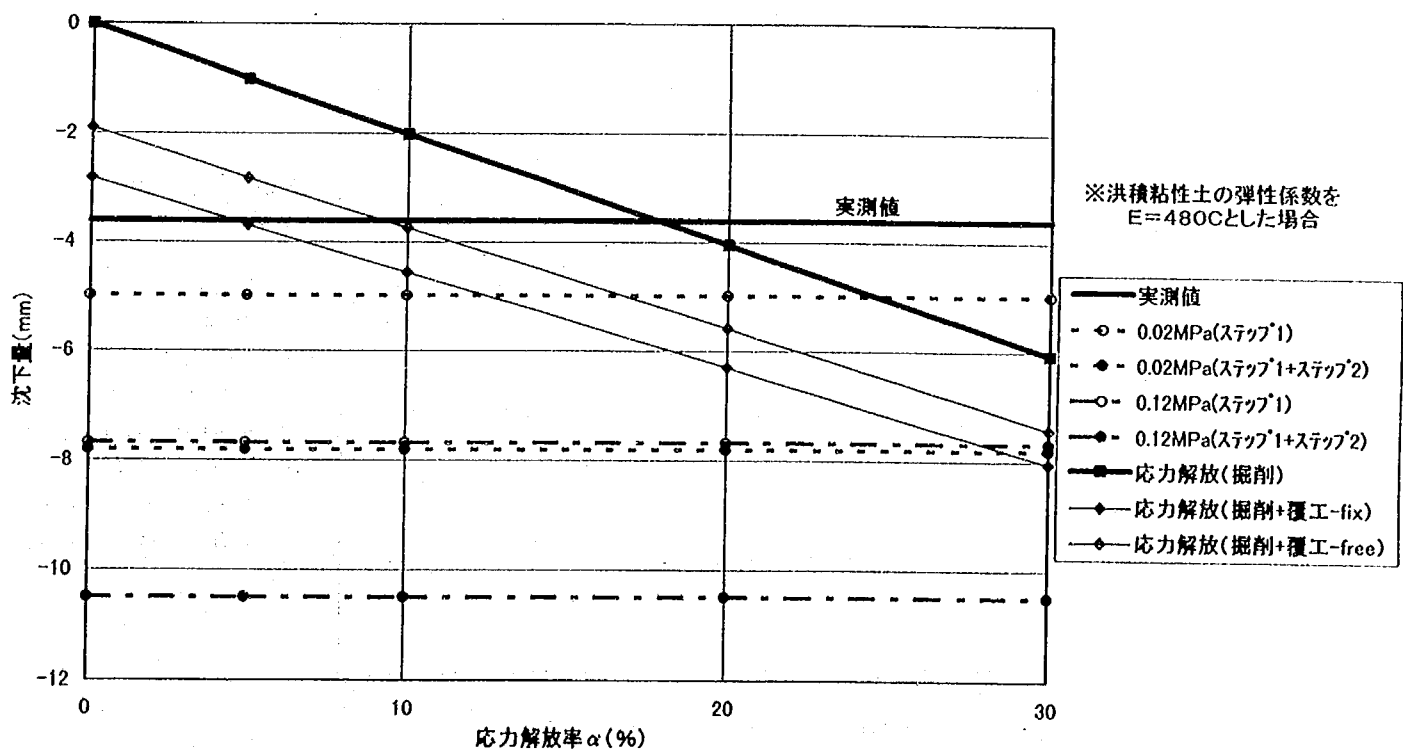


図-3.28(4) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点①; $E=480C$)

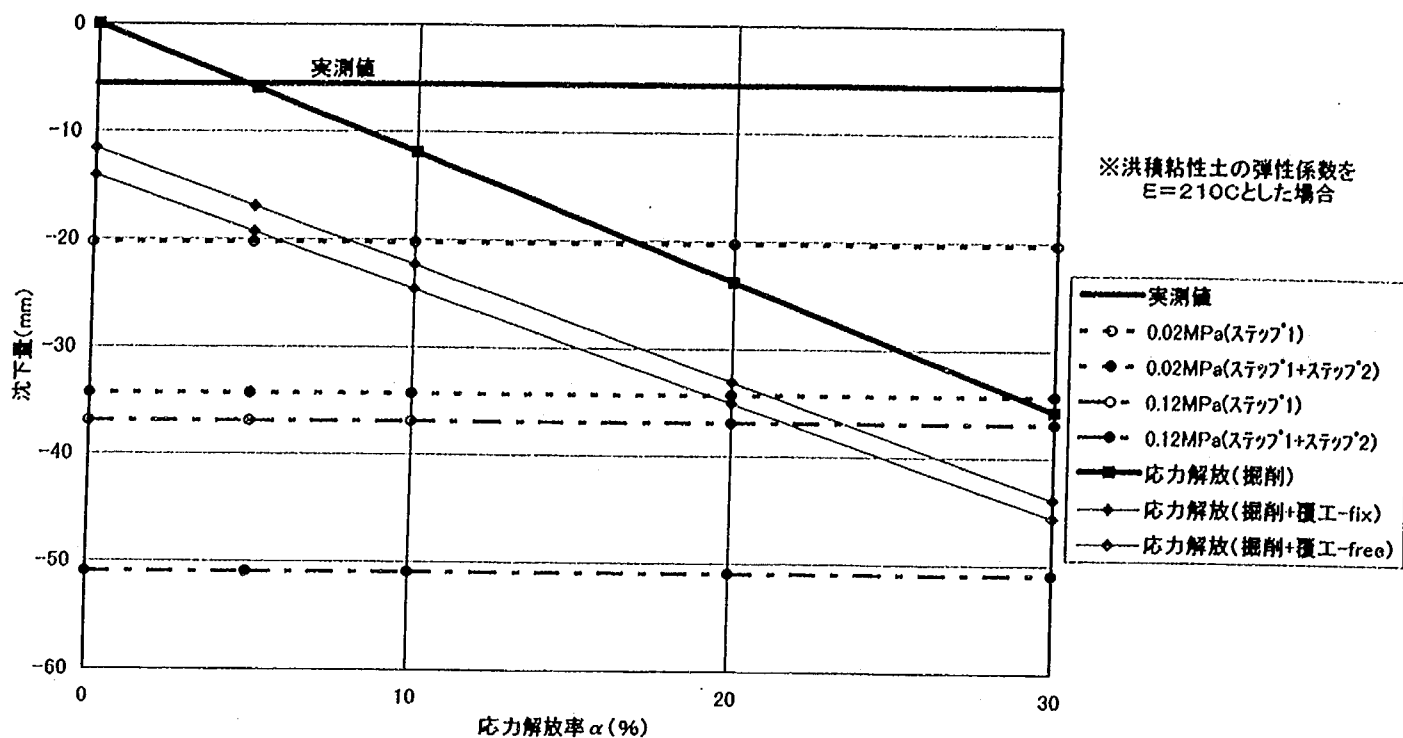


図-3.28(5) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点②; $E=210C$)

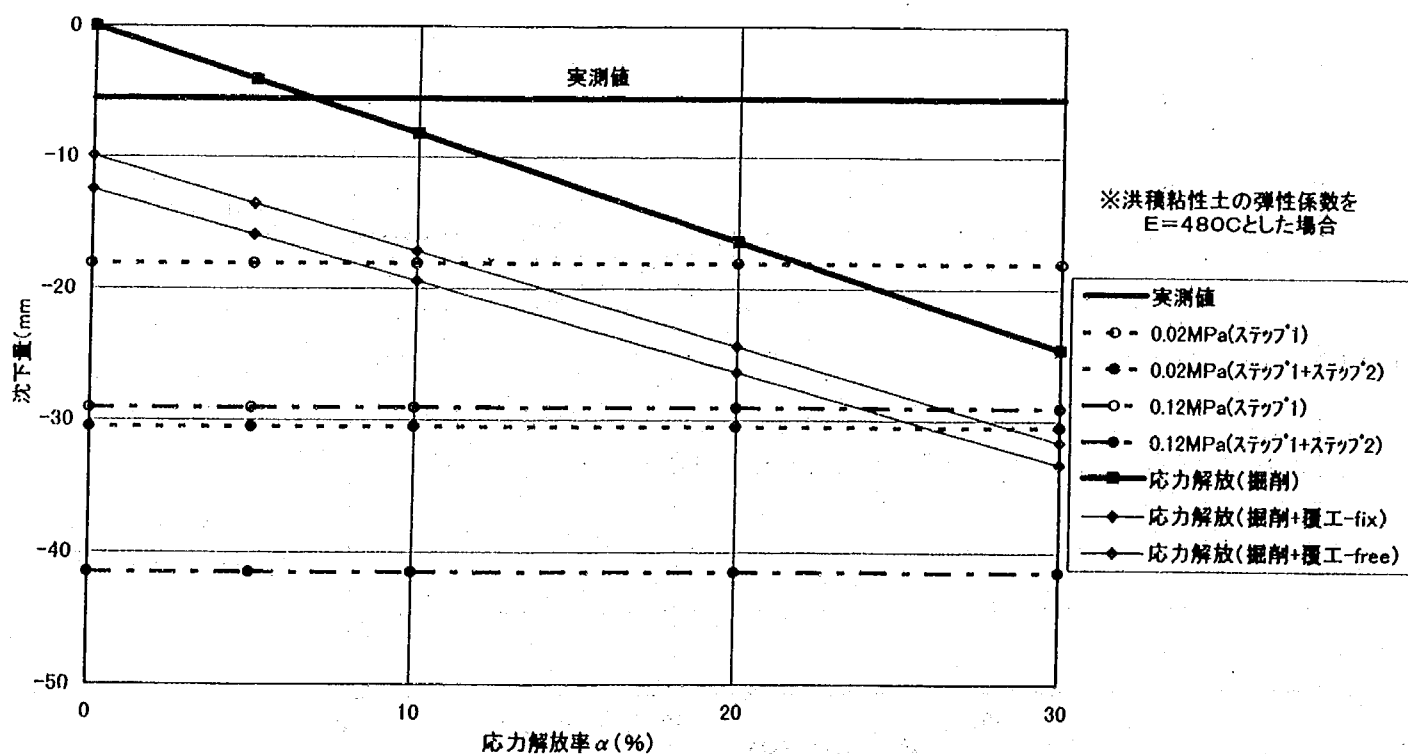


図-3.28(6) 解放率と沈下量の関係 (計測断面②; 着目点②; $E=480C$)

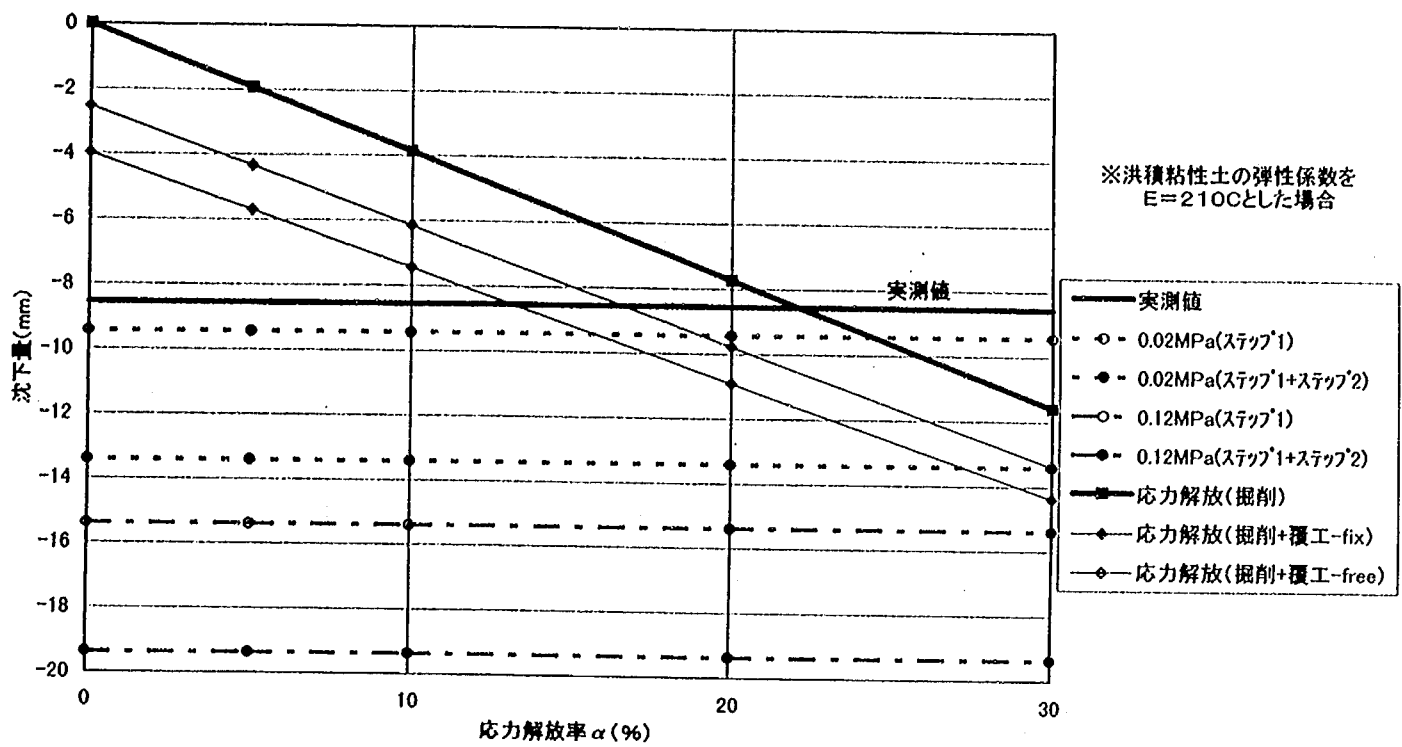


図-3.28(7) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点①; $E=210C$)

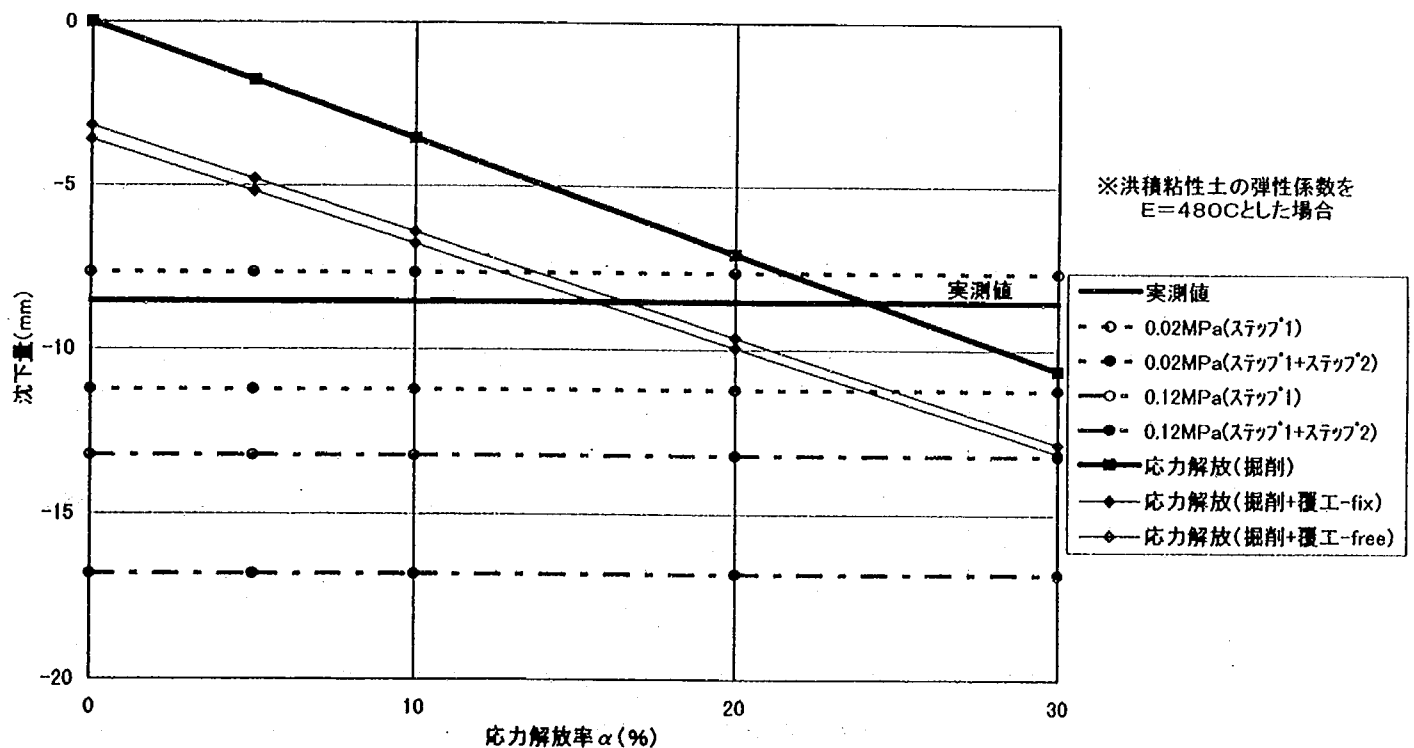


図-3.28(8) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点①; $E=480C$)

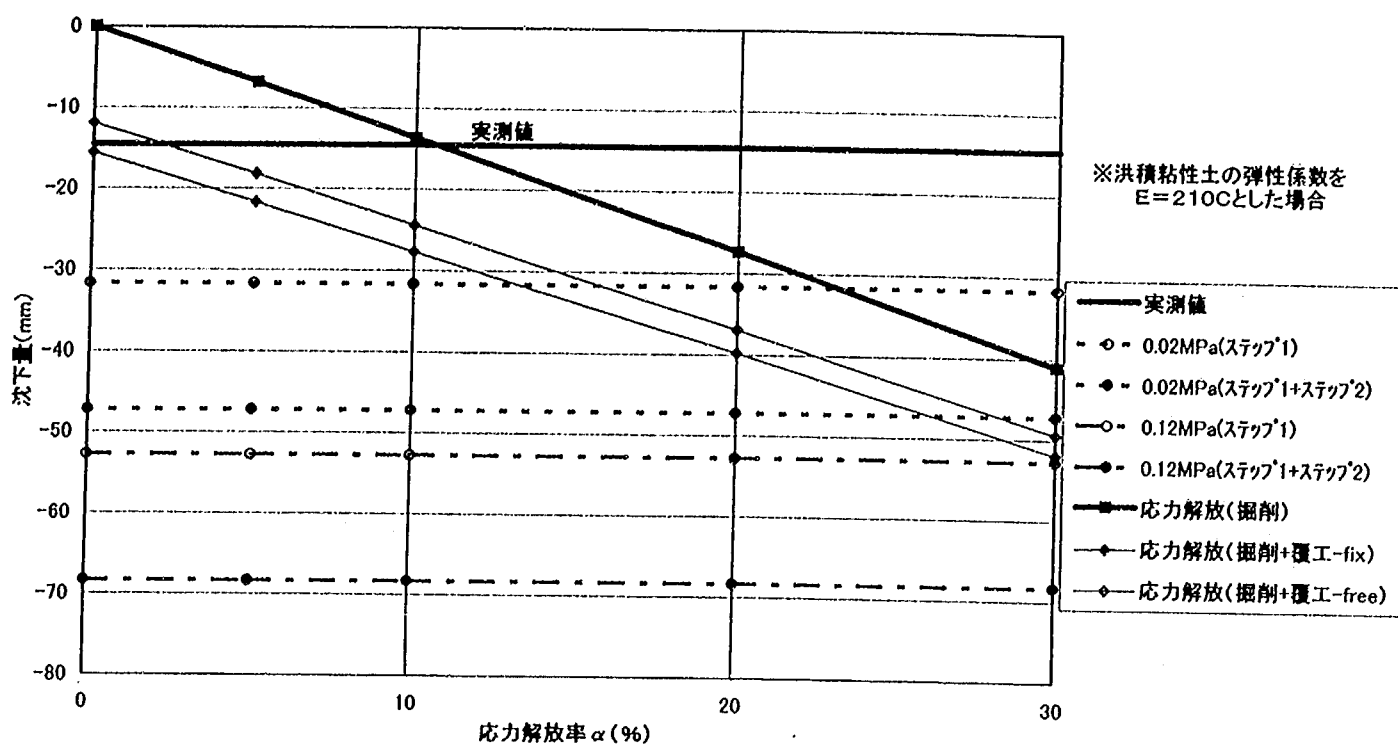


図-3.28(9) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点②; E=210C)

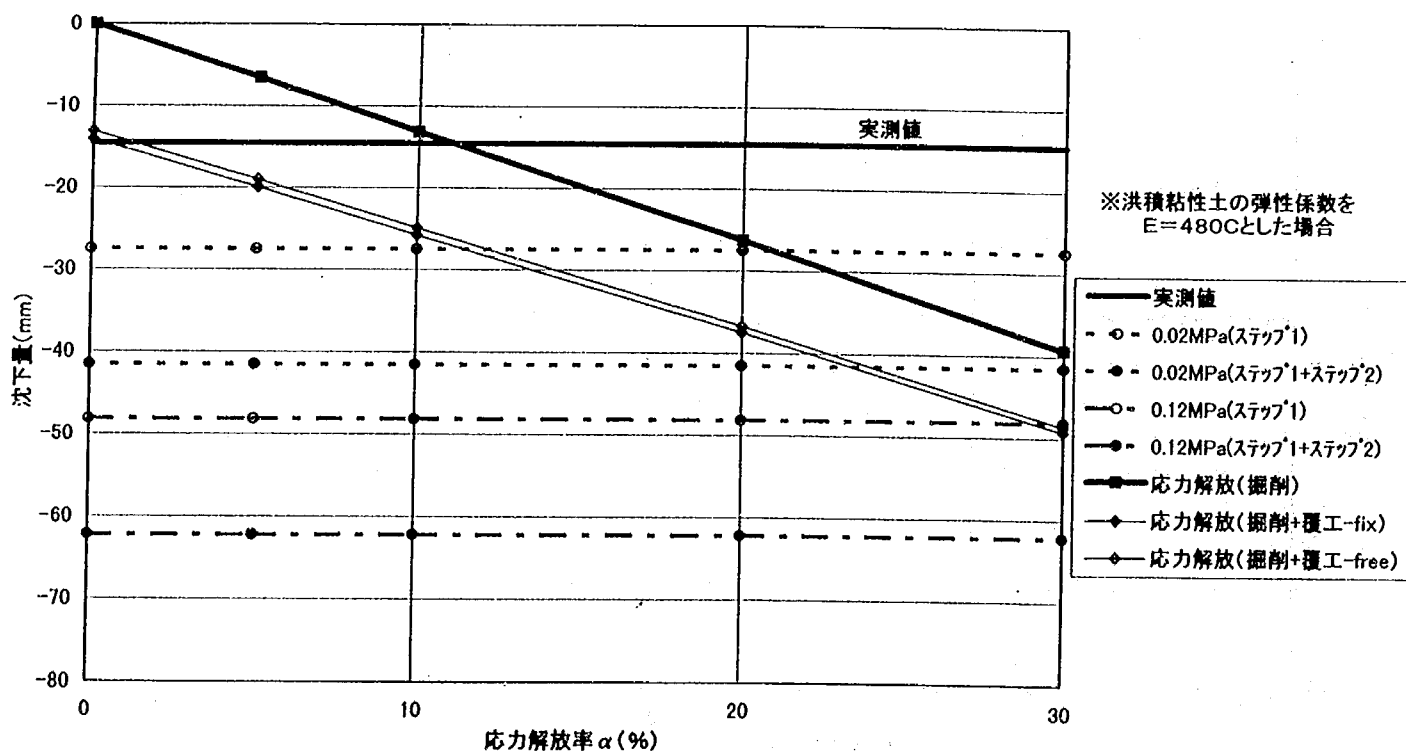


図-3.28(10) 解放率と沈下量の関係 (計測断面③; 着目点②; E=480C)

(2) 層別沈下量

各計測断面における層別沈下量の計測および解析結果を図-3、29(1)～(19)に示す。

計測断面①では地表面付近では $\alpha=20\%$ 前後の応力解放率、地中部では $\alpha=10\%$ 程度の応力解放率となっており、実測値における地表面付近の沈下量が地中部に対し比較的大きい傾向を示していることから弾性モデルでの沈下形状のシミュレートは多少困難であった。

計測断面②では計測断面①と同様に地表面付近の沈下実測値が地中沈下に対して大きい傾向であるが、洪積粘性土の弾性係数が $E=210C$ の場合 $\alpha=5\sim10\%$ 程度、 $E=480C$ の場合 $\alpha=10\sim20\%$ 程度の応力解放率で概ね沈下形状をとらえている。

計測断面③においても計測断面①、②と同様に地表面付近の沈下実測値が地中沈下に対して大きい傾向であるが、地中部については $\alpha=15\%$ 前後の応力解放率で概ね沈下形状をとらえている。

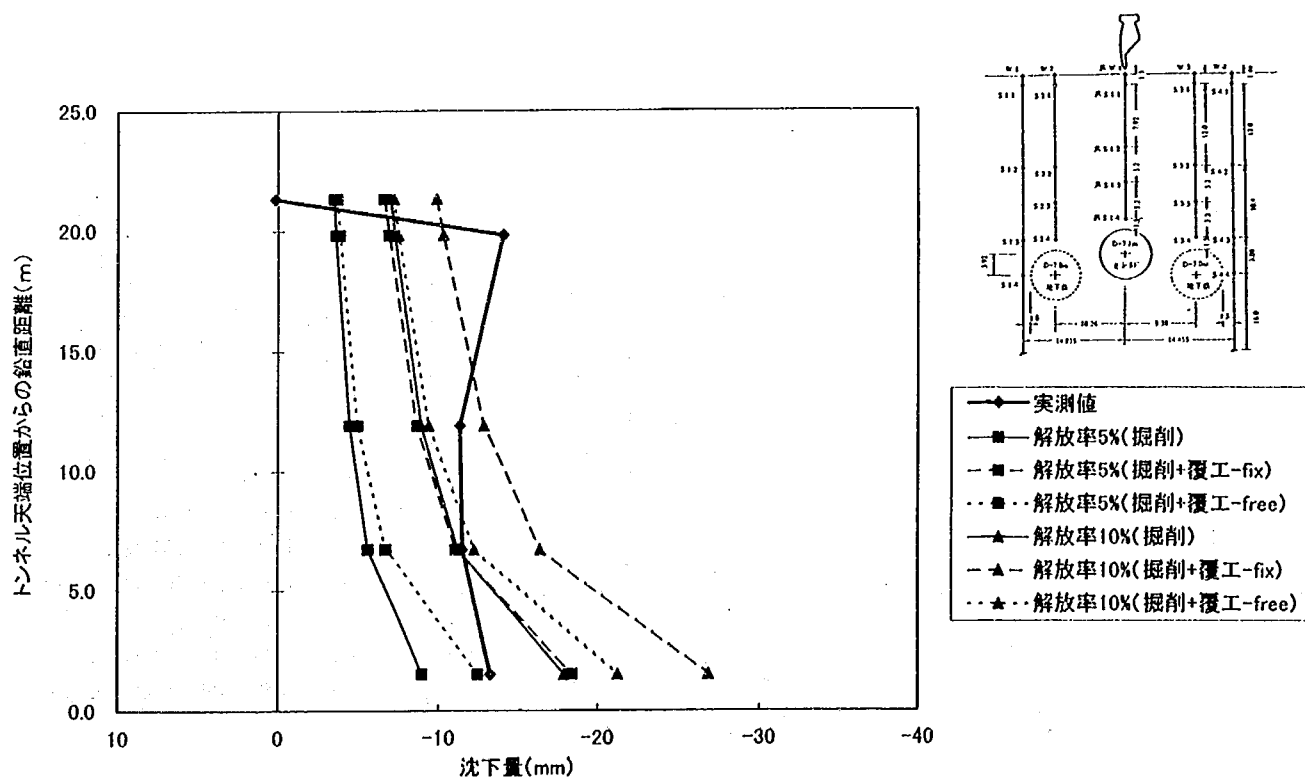


図-3. 29(1) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面①; 共W-1, 共S-1)

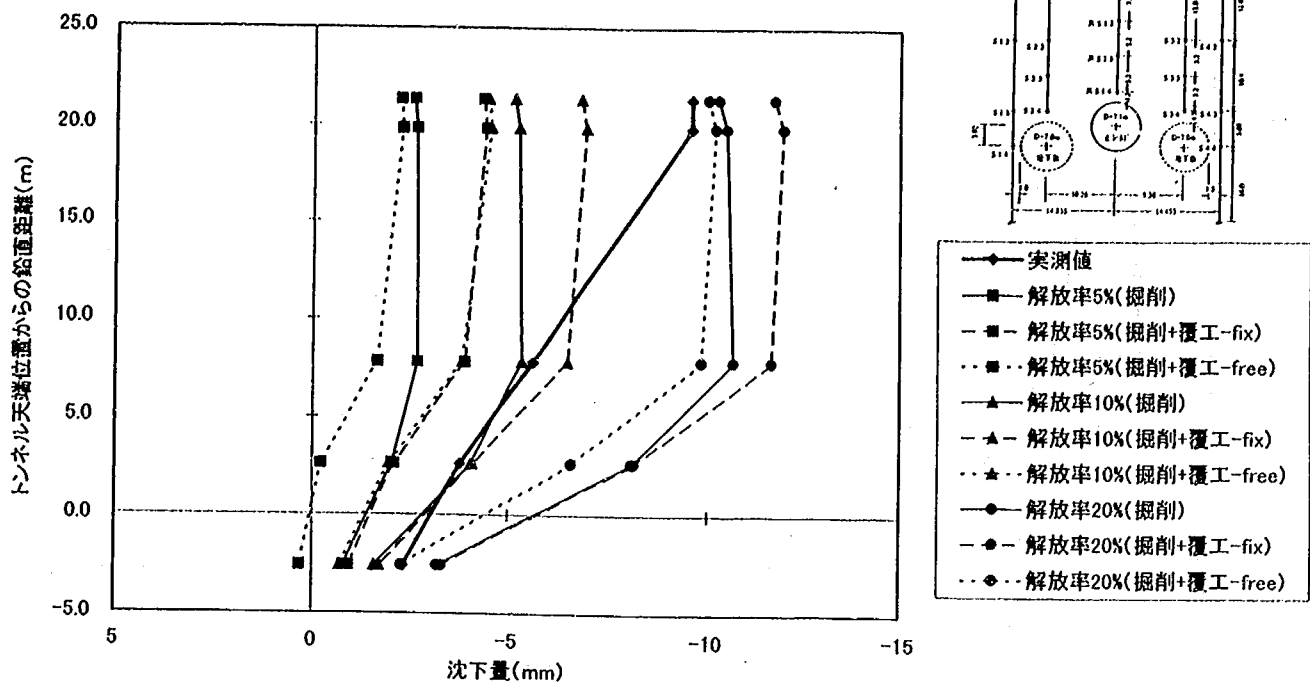


図-3. 29(4) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面① ; W-3, S-3)

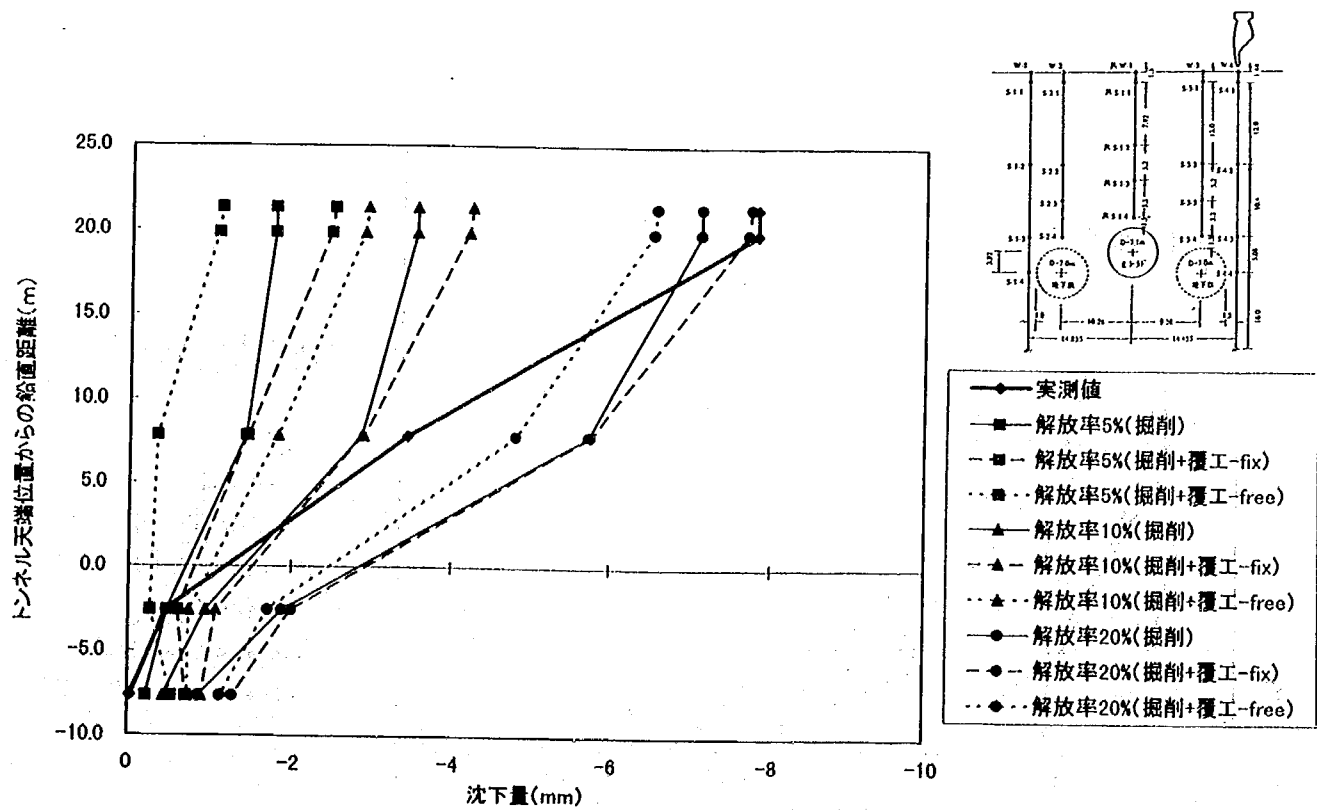


図-3. 29(5) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面① ; W-4, S-4)

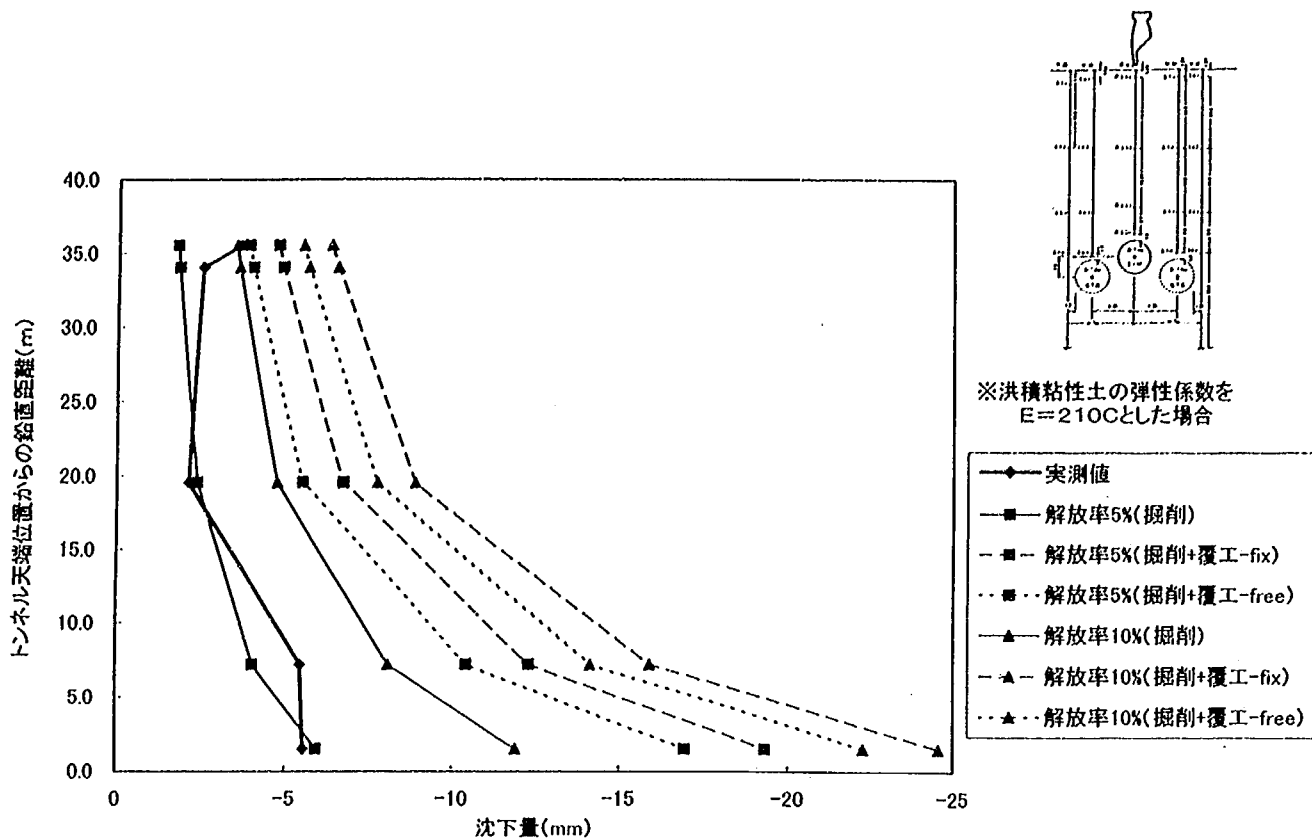


図- 3. 29(6) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; 共W-3, 共S-3; E=210C)

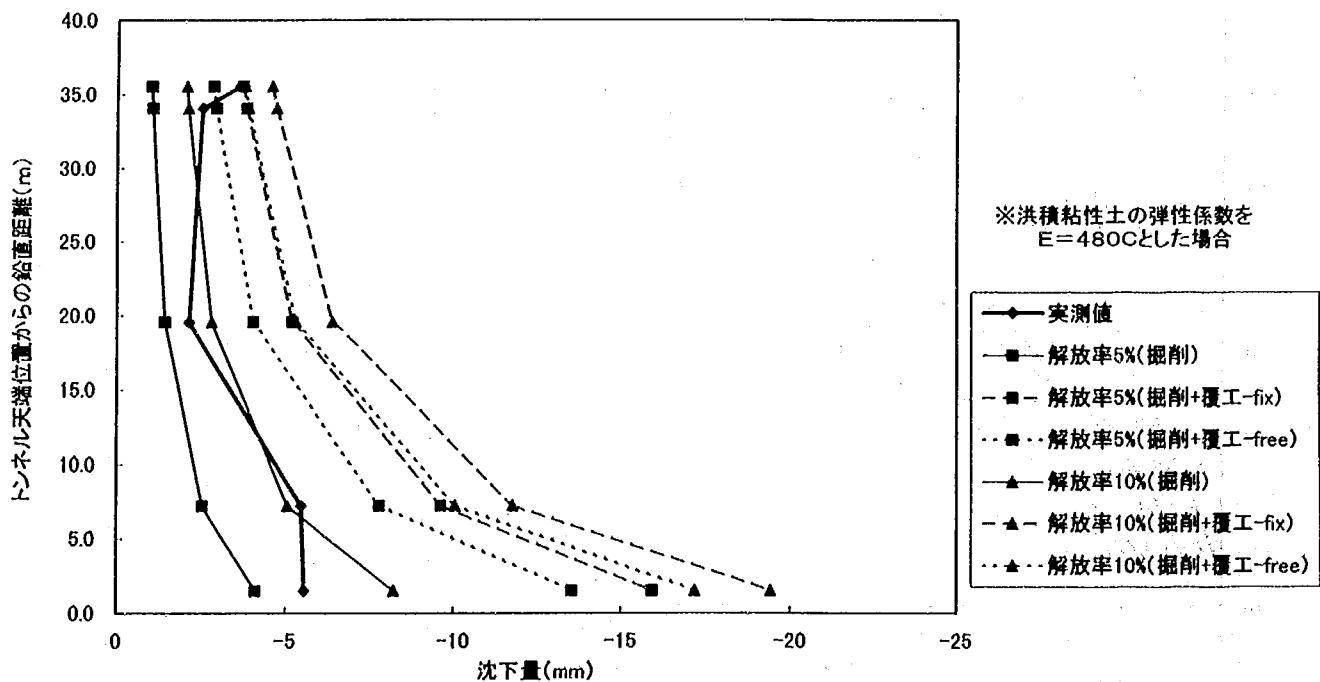


図- 3. 29(7) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; 共W-3, 共S-3; E=480C)

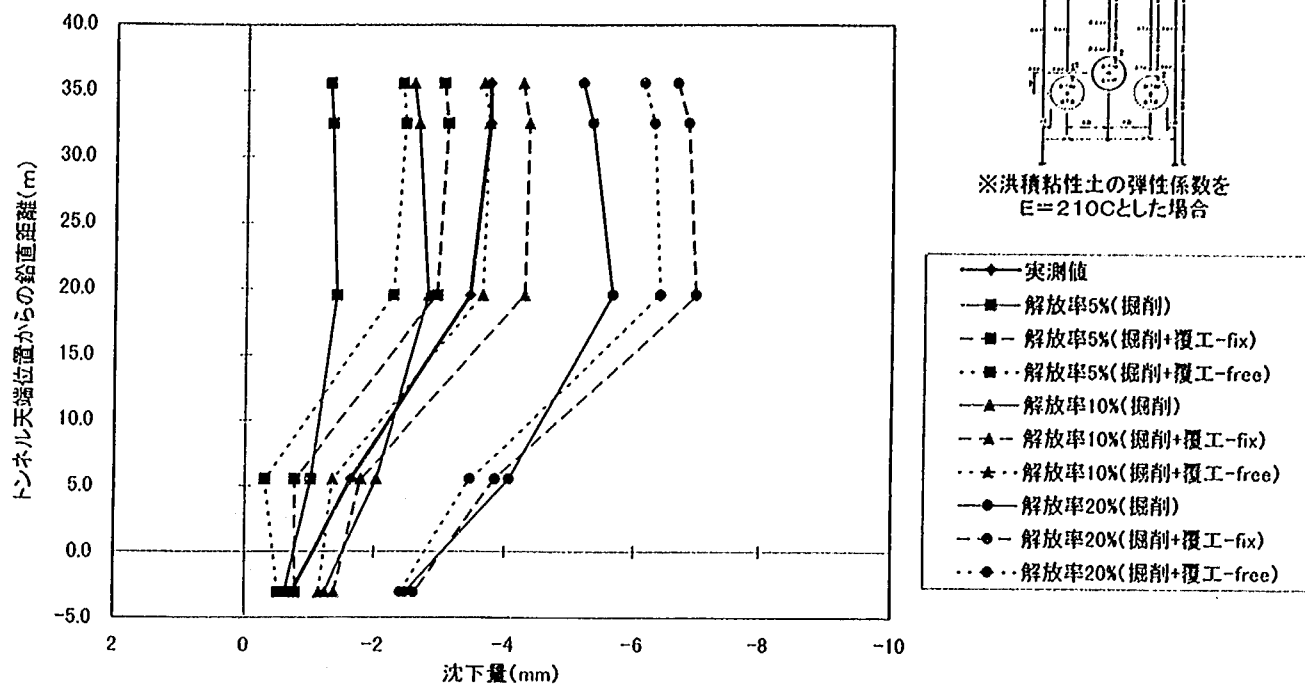


図-3. 29(8) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面②; W-32, S-5; E=210C)

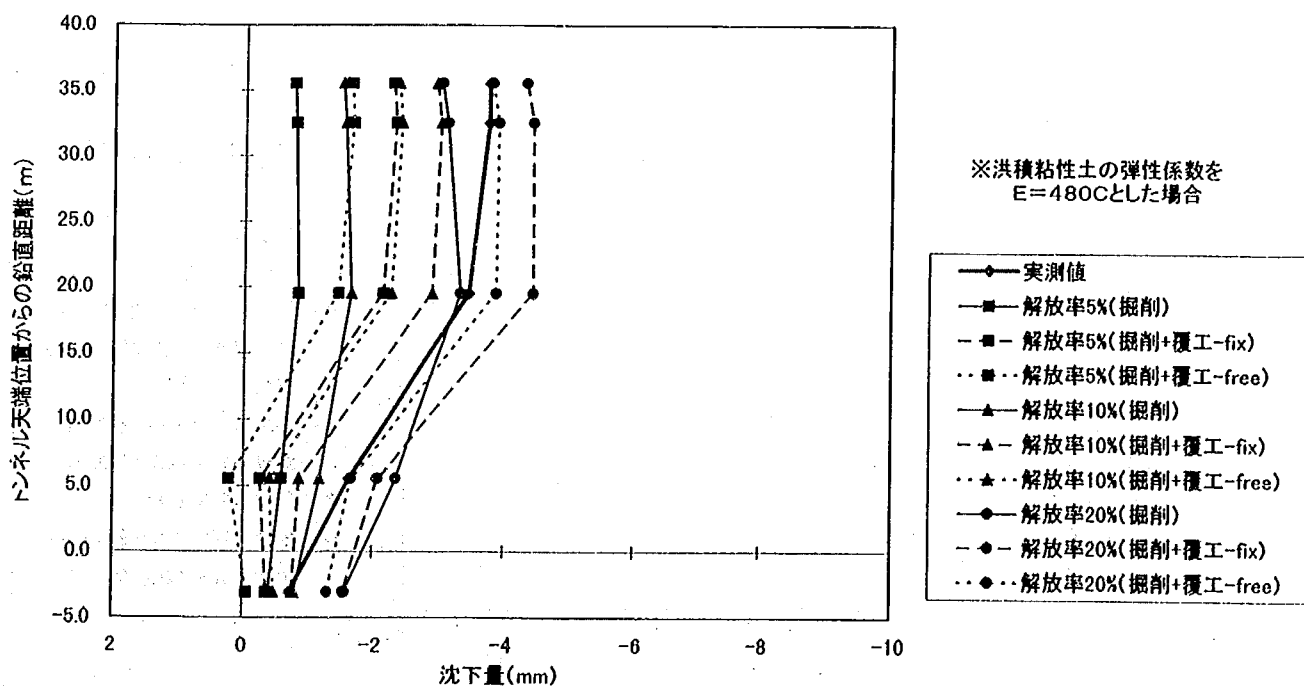


図-3. 29(9) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面②; W-32, S-5; E=480C)

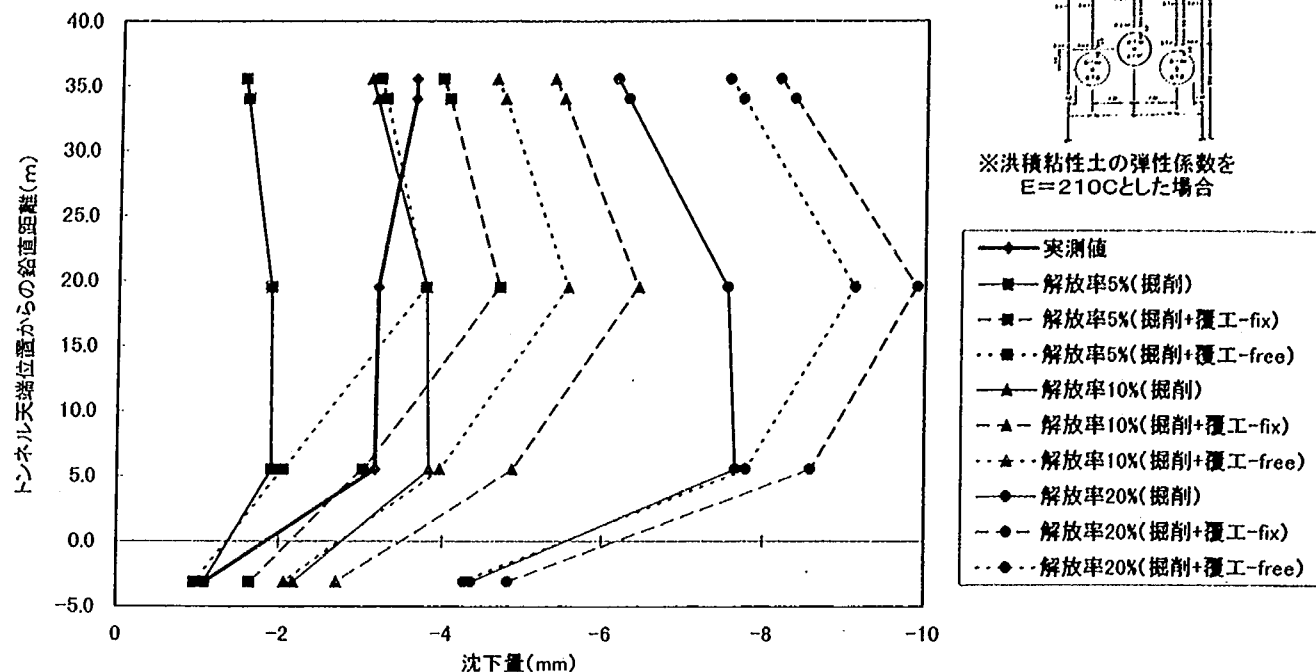


図-3. 29(10) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; W-33, S-6; $E=210C$)

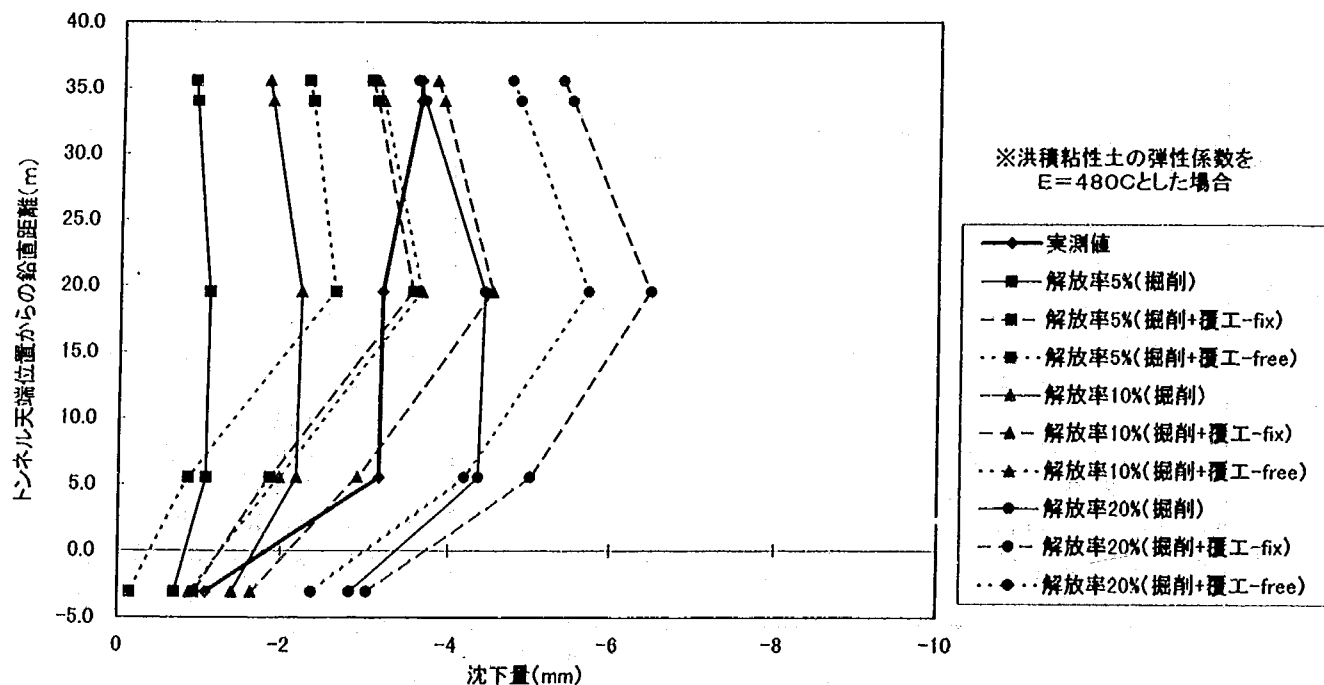


図-3. 29(11) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; W-33, S-6; $E=480C$)

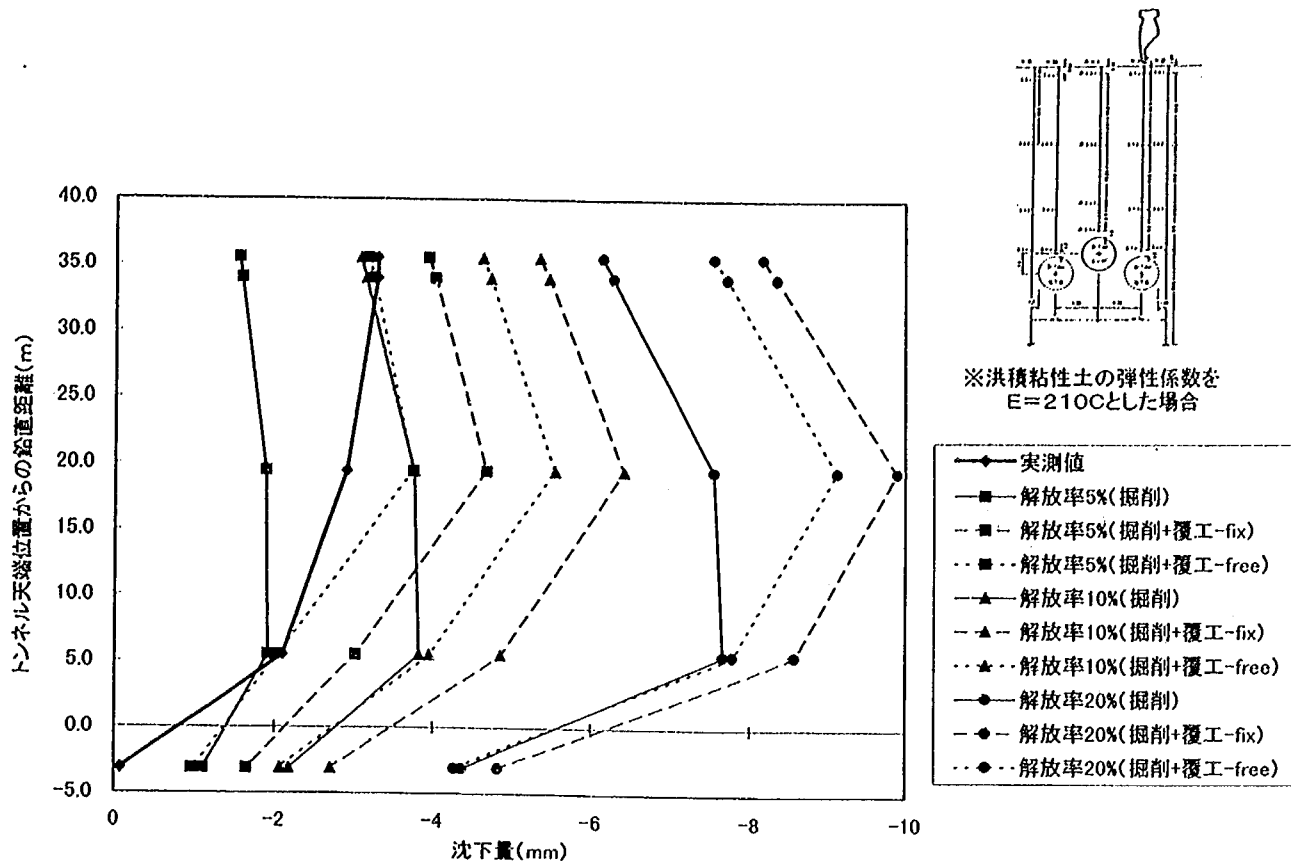


図-3. 29(12) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; W-34, S-7; E=2100)

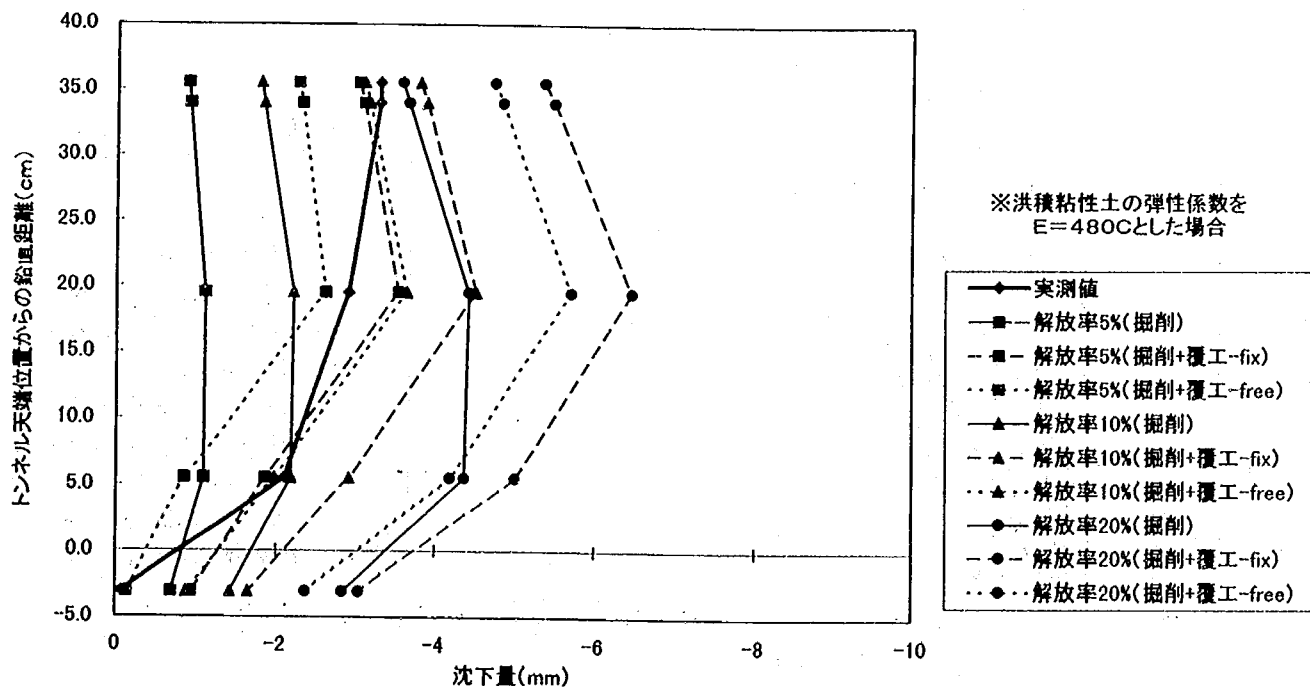


図-3. 29(13) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; W-34, S-7; E=4800)

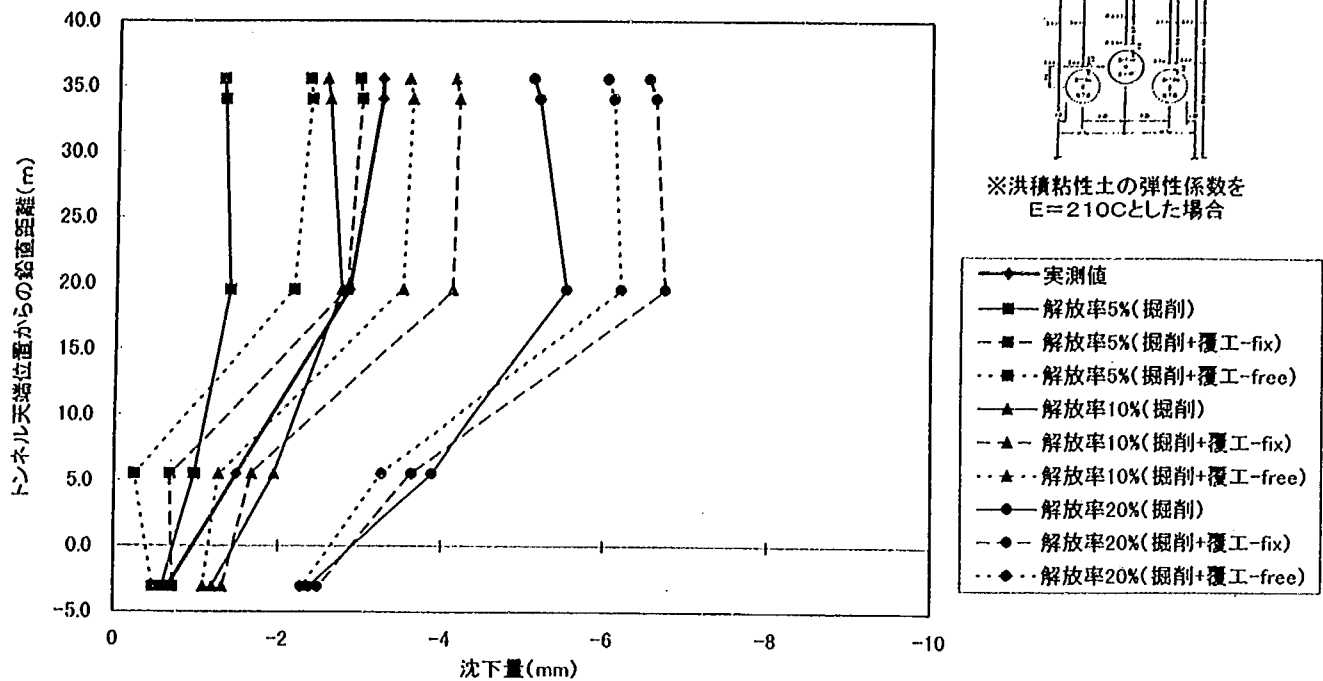


図-3. 29(14) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; W-35, S-8; E=210C)

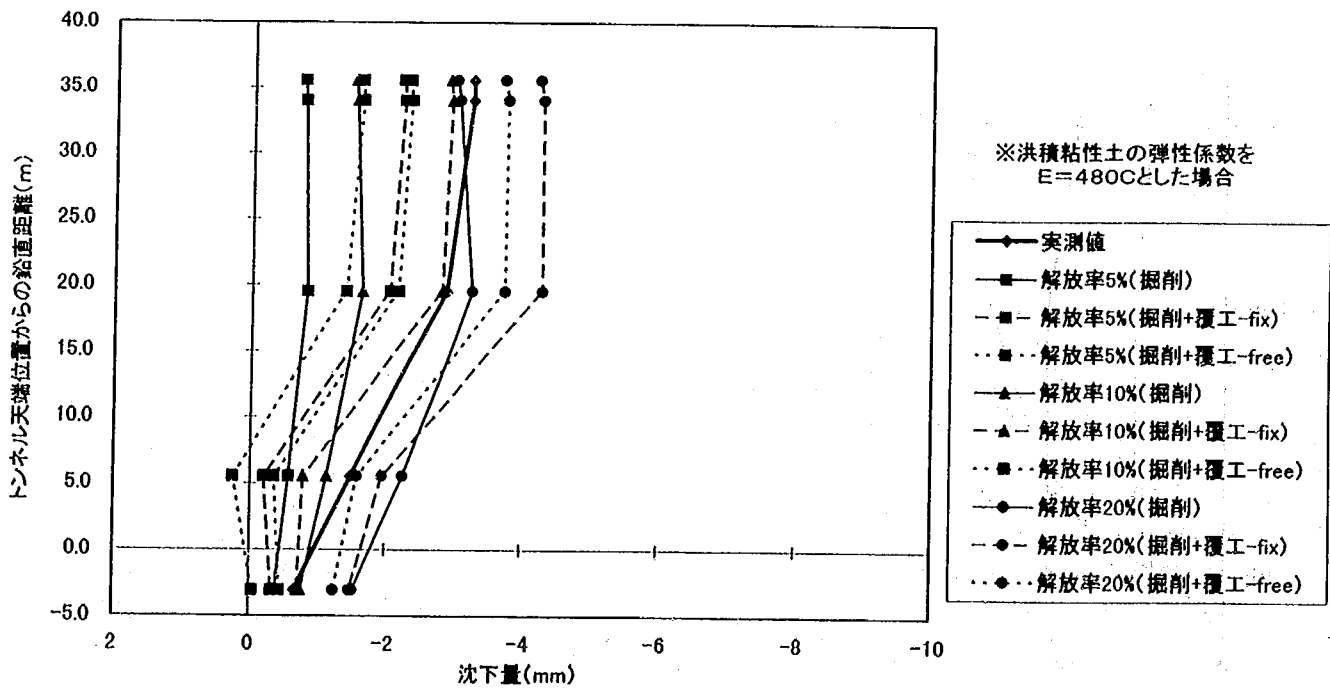
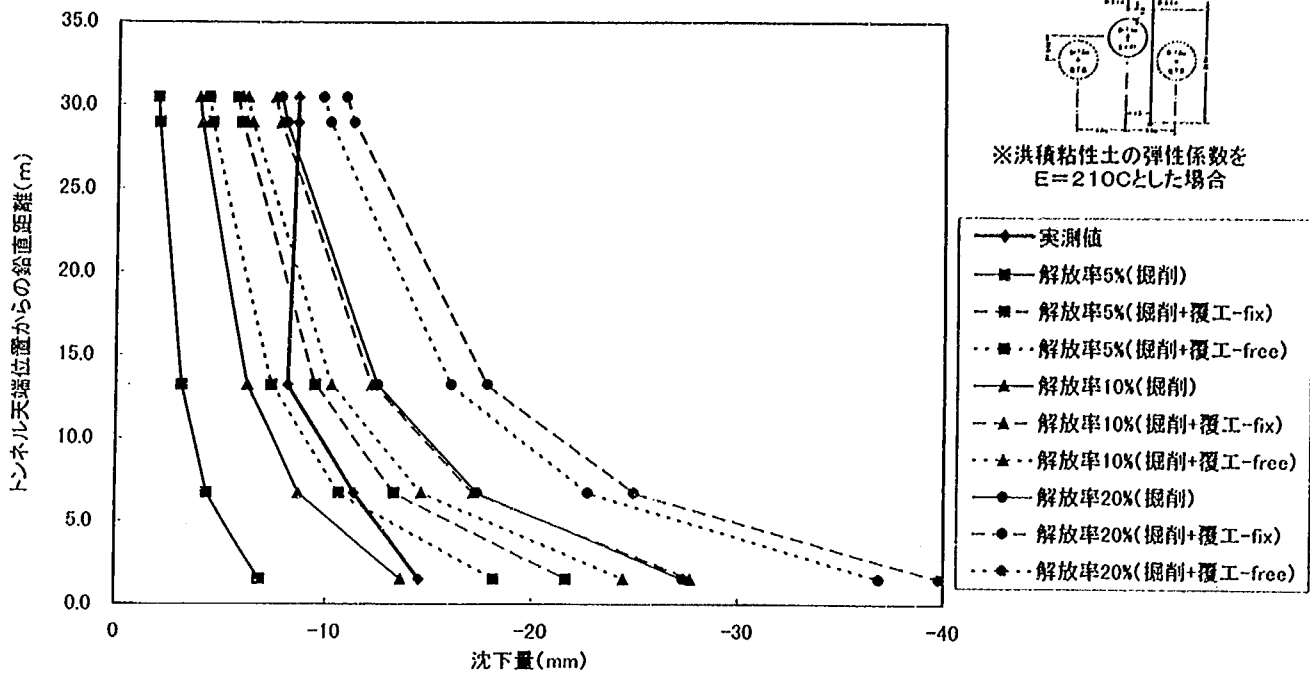
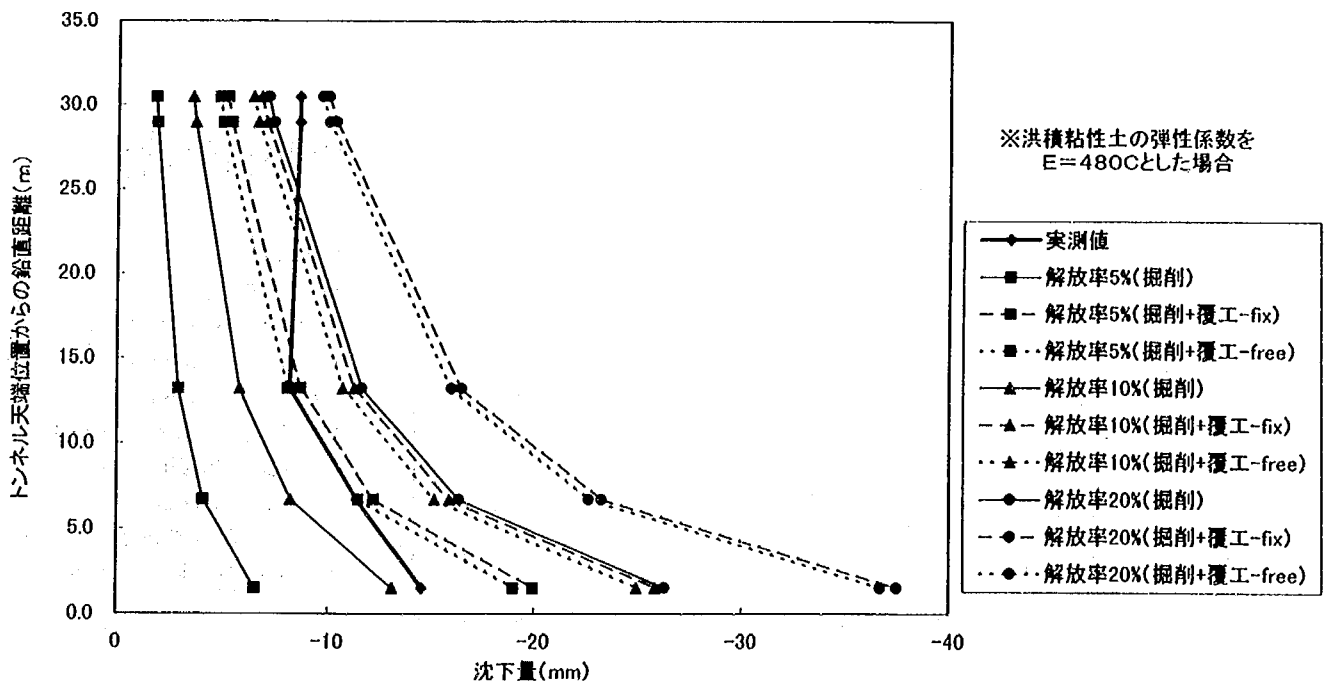


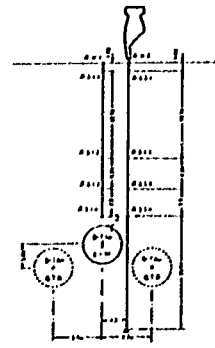
図-3. 29(15) 層別沈下量の計測および解析結果 (計測断面②; W-35, S-8; E=480C)



図－ 3. 29(16) 層別沈下量の計測および解析結果（計測断面③；共W-1，共S-1；E=210C）



図－ 3. 29(17) 層別沈下量の計測および解析結果（計測断面③；共W-1，共S-1；E=480C）



※洪積粘性土の弾性係数を
 $E=210C$ とした場合

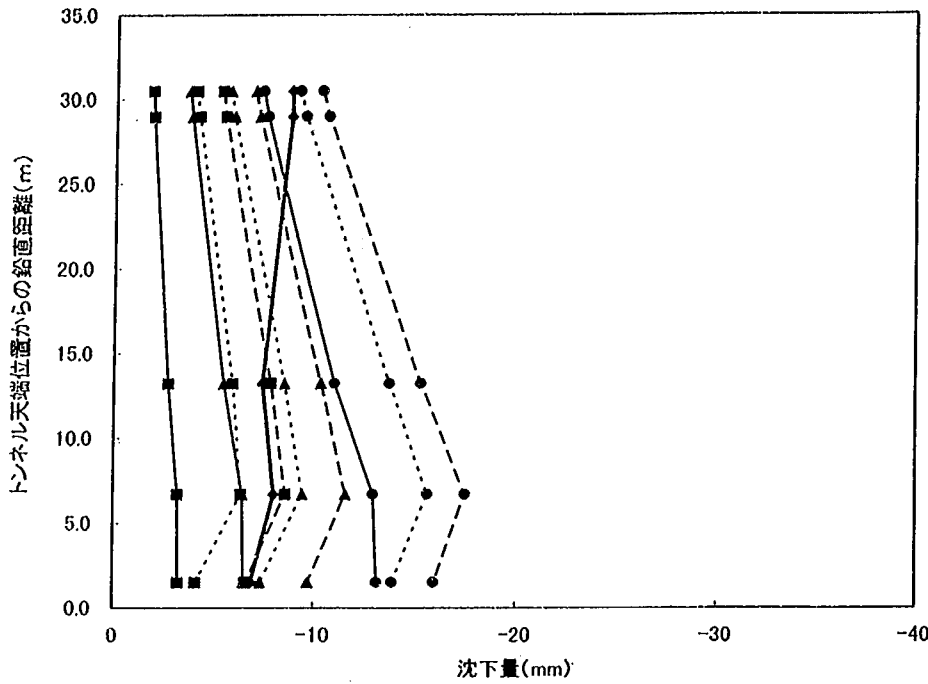


図-3. 29(18) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面③; 共W-2, 共S-2; $E=210C$)

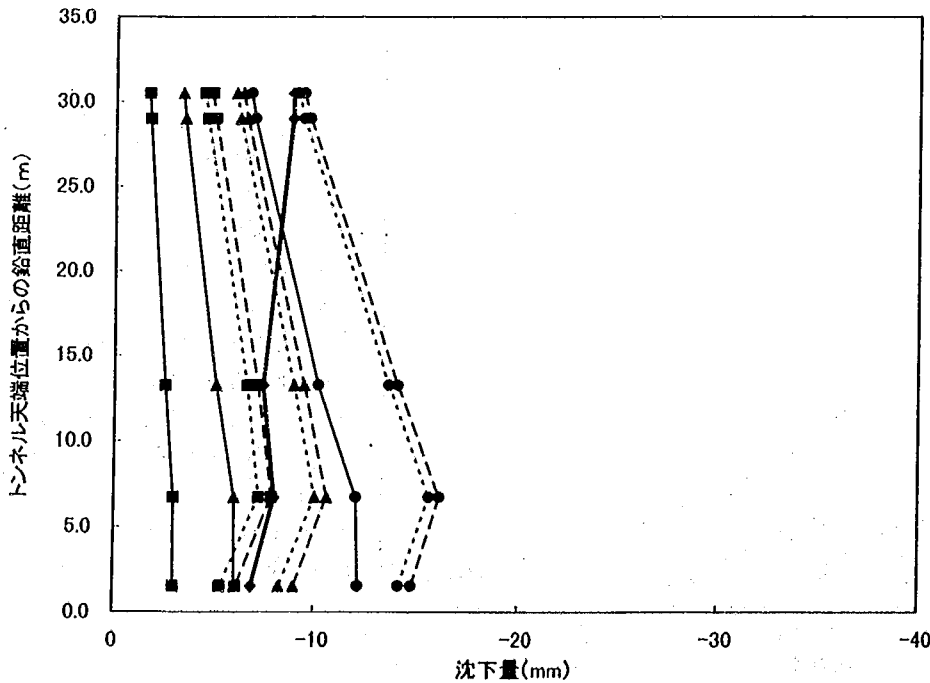


図-3. 29(19) 層別沈下量の計測および解析結果(計測断面③; 共W-2, 共S-2; $E=480C$)

3.8 考察およびまとめ

(1) 各解析法の比較

今回、応力解放率解析法については従来の方式（1ステップ：初期応力解析→2ステップ：応力解放）に加えて応力収支を考慮し、2ステップ目で掘削時に $\alpha\%$ の応力解放させた後、次のステップ3で裏込め注入材とセメントを設置し残りの $(100-\alpha)\%$ の応力を載荷応力として作用させた場合の解析を行い、現場計測で得られた実測値に対応する応力解放率 α を求めた。しかし、A～Eの各シールドでの土被りおよび土質条件等により、側壁部を拘束した場合には応力解放率 α がマイナスの値となるなど掘削による応力の解放を表現できなかつたり（Bシールド、Cシールド全断面、Dシールド計測断面③、Eシールド計測断面②、③）、拘束させない場合は浮き上がりの現象が生じる結果（Aシールド、Cシールド計測断面③、④、Dシールド全計測断面）となった。

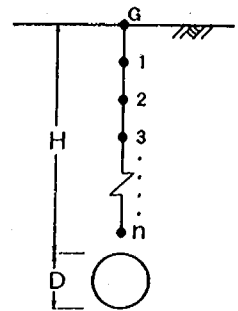
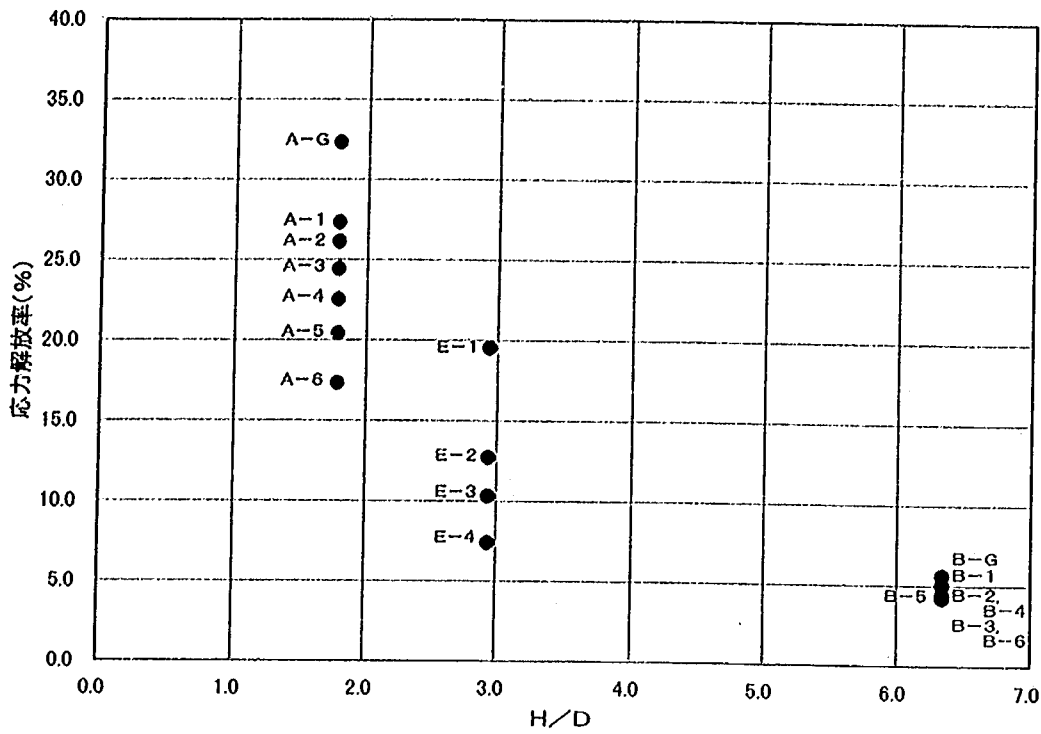
また、参考として行った裏込め注入解析法についてもマニュアルに示された目安値である0.02～0.12MPaの範囲の注入圧での解析結果は予測沈下量の算出幅が大きく（例えば、図-3.7(1)、(2)よりAシールドの着目点①（シールド直上地表面）では約40mm、着目点②（シールド天端1m上）では約90mm）、さらに解析値と実測値では解析結果の方が過大な沈下量を与える場合があった。（Bシールド、Cシールド全断面、Dシールド計測断面③、Eシールド全断面）

よって、ある程度の精度でシールド掘削による周辺地盤の変状予測を事前に行う場合には、従来の方式である地盤変位におよぼす要因すべてを一括した応力解放率 α を用いた2ステップまでの解析の実用性が高いと考えられる。ただし、その場合には、今回のように解析領域および地盤条件を統一的な考え方により定める必要がある。

(2) 地盤およびトンネル条件による応力解放率の考え方

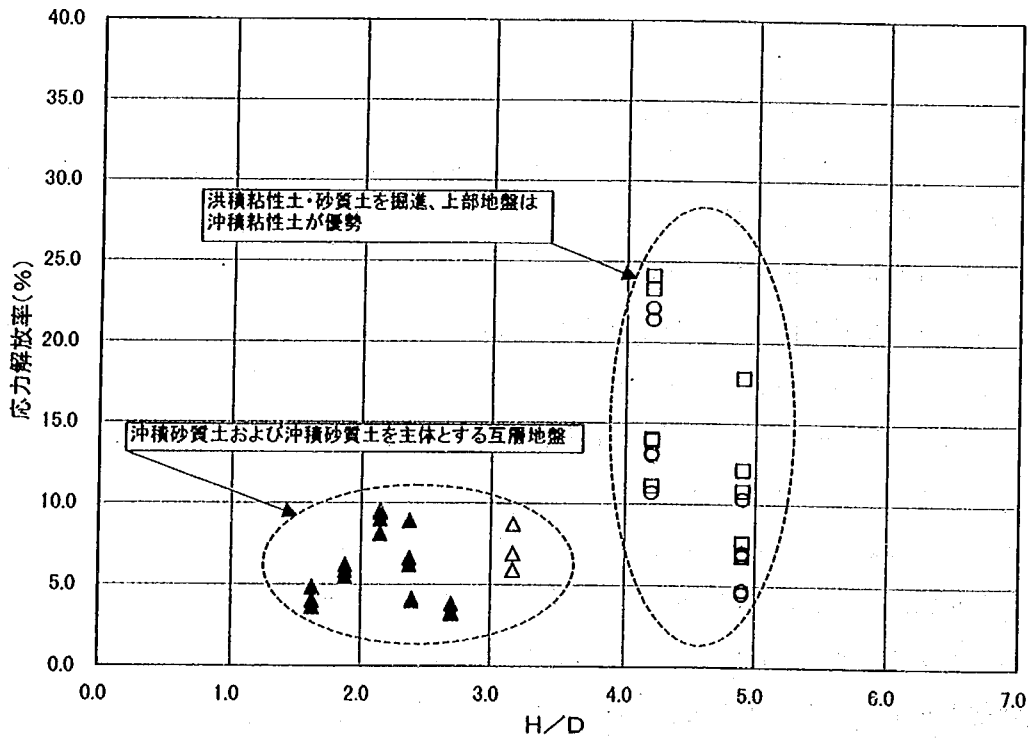
図-3.30(1)、(2)はA～Eシールドにおけるシールド直上地盤（ただし、Dシールドは計測が1測線のみでシールド直上ではないため参考として取り扱った。）の現場計測で得られた層別沈下量に対応する応力解放率（この応力解放率は、応力解放率解析法で2ステップまでの解析とした場合の値を考える。）と土被り比（ H/D （ H ：土被り厚、 D ：シールド外径））の関係を地盤条件の違いにより示したものである。この図より比較的軟弱な沖積粘性土層に対する応力解放率は土被り比（ H/D ）が大きいほど小さくなることが分かる。この傾向は、図-3.30(2)の洪積層をシールドが掘進する場合においても上部に沖積粘性土が比較的厚く存在するような条件では同様に考えられると思われる。さらに、土被り比が小さい場合は地表面近傍ほど応力解放率が大きく、シールド近傍では応力解放率が小さくなる。これは、地表面からシールド近傍まで共下り的な挙動を示すことが原因である。これに対し、土被り比が大きい場合は地表面とシールド近傍との応力解放率の差が小さいことから比較的弾性的な挙動であると考えられる。

沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤に対しては、応力解放率は10%以下の値を示している。また、Eシールドで検討した洪積粘性土の弾性係数の設定（ $E=210C$ または $E=480C$ ）については、洪積粘性土層がシールド近傍のみの分布状況であっても、地表面沈下を与える影響は応力解放率が $E=210C$ で10.3%、 $E=480C$ で17.8%（計測断面②）となっていることから、地盤変状予測解析を行う場合の洪積粘性土の弾性係数および応力解放率は、洪積粘性土の層厚、シールドとの位置関係等に十分注意し設定する必要がある。



(凡例)
 A-G 計測点 (上図参照)
 シールド名

図-3.30(1) シールド直上地盤における H/D と応力解放率の関係
 (沖積粘性土層)



(掘削部の土質区分)
 黒めり: 沖積層(粘性土, 砂質土, 粘性土・砂質土の互層)
 白めき: 洪積層(粘性土, 砂質土, 粘性土・砂質土の互層)

(シールド上部土層区分)
 ▲, △: 沖積砂質土層優勢
 ○, □: 沖積粘性土層優勢

(洪積粘性土の弾性係数)
 ○: $E=210C$
 □: $E=480C$

図-3.30(2) シールド直上地盤における H/D と応力解放率の関係
 (沖積砂質土層および洪積粘性土層, 洪積砂質土層)

さらに、洪積層を掘進するシールドが今回のように、シールド天端から沖積層と洪積層との境界部までの距離が1D程度の範囲に位置する条件においては、シールド上部土層が沖積粘性土優勢の場合の応力解放率が沖積砂質土優勢の場合に比べて大きくなった。

ただし、上述した応力解放率の傾向はシールド位置の深度がさらに大きくなった場合、変化することもあると考えられるため、これについては今後の検討が必要であると考えられる。

以上をまとめると、

1) シールド掘削による地盤変状の予測方法としては、応力解放率を用いた二次元弾性解析による方法の実用的が高い。

2) 応力解放率により地盤変状を予測解析する場合、統一的な解析領域および地盤条件等の設定のもとで応力解放率を設定する必要がある。

3) 応力解放率の設定においては対象とする地盤条件によって、以下のことを考慮する必要がある。

①比較的軟弱な沖積粘性土層の場合は土被り比(H/D)が大きいほど小さな値を設定する必要がある。

また、土被り比が大きい方が弾性的な挙動を示すと考えられる。

②沖積砂質土層および沖積砂質土層を主体とする互層の場合は応力解放率を10%程度と考えれば地盤変状の概ねの予測は可能である。

③シールドが洪積粘性土・砂質土層を掘進する場合で、上部土層が沖積粘性土優勢の場合の応力解放率は、沖積砂質土優勢の場合の応力解放率より大きい値を設定する必要がある。

第4章 結論

本報告書では、シールドトンネル掘削時の地盤変状に関して、5現場における地盤変状の計測結果の整理および有限要素法を用いた数値解析による事前予測方法について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 現場計測結果による地盤変状挙動

5本のシールドトンネルにおける現場計測結果から、トンネル周辺地盤の沈下挙動結果から以下のことが分かった。

(1) トンネル直上の地表面・地中沈下量の挙動

シールドトンネルの上部の地盤が沖積粘性土が主体となる条件では、シールドトンネル掘削時のトンネル直上の地表面・地中沈下の挙動は、土被り比が深い場合の方が沈下量が小さい。土被り比3程度までは地表面の沈下量とトンネル天端付近の沈下量とそれほど大きな差がなく、トンネル上部の地盤が全体的に沈下する共下がりの挙動を示す傾向となる。一方、土被り比が6程度の条件では地盤の沈下量が非常に小さく、比較的弾性的な沈下挙動を示す。

また、地盤条件が沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合では、シールドトンネルを掘削する場合の周辺地盤の沈下挙動は、土被り比にあまり関係なく非常に小さい。しかし、このような地盤でトンネル上部に既設構造物が存在するような条件下では、その構造物とその上部の周辺の地盤とが一体となって沈下する傾向がある。

(2) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の挙動

5本のシールドトンネルの沈下挙動は、これまで計測された地盤挙動と同様な傾向を示した。シールド掘進に伴う地表面・地中沈下の挙動は、切羽前方の沈下は、シールド掘削による切羽圧力の解放による地山の緩み、掘削に伴う周辺地山の乱れなどによる挙動が考えられ、また、切羽後方の主な沈下は、シールド機とセグメントの外径の違いから生じるテールボイドによる周辺地盤への緩みによるものが大きく影響しているものと考えられた。なお、施工状況によっては、トンネル近傍の計測地点では裏込め注入が要因と考えられる隆起現象も見られた。

(3) トンネル横断方向の地表面・地中沈下量の分布

シールド掘進による影響は、トンネル中心位置付近の沈下量が最も大きく、トンネル側方に遠ざかるにしたがって小さくなる。トンネルの掘削による地盤変状は、傾向的にはトンネル下端からほぼ45°の傾きで地表面へ延ばした範囲に概ね収まる。

(4) 切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比

切羽進行に伴う地表面・地中沈下量の最終沈下量に対する比は、地盤条件が沖積粘性土を主体とする場合では、切羽が到達する以前に最終沈下量の約1~2割以内程度の沈下をしている。また、地盤条件が沖積

砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合、洪積粘性土・洪積砂質土をシールドが掘進し、上部地盤は沖積粘性土が優勢の場合では、切羽が到達する以前に最終沈下量の約1～3割が沈下している。これらの結果は、山岳トンネルの場合の約3～4割の値と比較すると若干小さい値であり、この値の違いはトンネル工法の差によるものと考えられた。

2. 数値解析による地盤変状予測

(1) 地盤変状の予測解析方法

5箇所のシールドトンネルの現場計測結果から、シールドトンネル掘削時の地盤変状の予測方法について検討した結果、トンネル掘削面に掘削相当外力として初期地盤応力に応力解放率を乗じた値を作用させる2次元弾性解析により予測する方法が比較的簡便であり、実用性が高い。

(2) 解析領域および地盤定数の設定

上記の応力解放率による地盤変状を予測解析する場合、解析領域および地盤定数の設定により沈下挙動が異なることから、統一的な解析領域、地盤定数の設定のもとで応力解放率を設定することが必要である。

(3) 応力解放率の設定方法

2H (H; 土被り) の側方、1D (D; トンネル径) の下方を有する解析領域のもとで、本解析で用いたような統一的な考え方による地盤定数の設定を行った場合、応力解放率を設定する場合に以下のことを考慮することでシールド掘削時の地盤変状を概ね予測できる。

- ① 応力解放率は対象とする地盤条件およびトンネル条件によって異なり、比較的軟弱な沖積粘性土地盤においては、土被り比が大きいほど小さい値を設定する必要がある。この傾向は、洪積層をシールド掘削する場合で上部に沖積粘性土が比較的厚く存在するような条件でも同様と考えることができる。
- ② 対象とする地盤が沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合の応力解放率は、約10%程度として考えると地盤変状を概ね予測できる。
- ③ シールドが洪積粘性土・砂質土層を掘進する場合で、上部土層が沖積粘性土優勢の場合の応力解放率は、沖積砂質土優勢の場合の応力解放率より大きい値を設定する必要がある。

今後、シールドトンネルの施工時の地盤変状に関する現場計測結果に対して、本報告書で示したような統一的な解析条件で整理を行うことで、より確度の高い地盤変状予測が可能となるものと考えられる。また、近接構造物に対する影響評価についての検討が重要である。

参考文献

- 1) 水谷敏則、真下英人、猪熊 明ほか「軟弱地盤中のシールドトンネルの現場計測」、土木研究所資料第2839号、1989年12月
- 2) 真下英人、石村利明、酒寄建之ほか「シールドトンネルの作用土圧に関する現場計測報告書」、土木研究所資料第3428号、1996年3月
- 3) 猪熊 明、角湯克典「トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)」、土木研究所資料第3232号、1994年2月
- 4) 地盤工学会「土質基礎工学ライブラリー4 土質調査試験結果の解釈と適用例」、1979年
- 5) 日本道路協会「道路土工 擁壁・カルバート・仮設構造物工指針」、1987年
- 6) 西垣好彦「粘土のヤング率の歪レベルによる変化」、第26回土木学会年次学術講演概要集、1971年

謝辞

本報告書で用いた貴重な現場計測結果を提供していただいた関係各機関に対し、深甚の謝意を表します。