

裏込め注入がシールドトンネルと周辺地盤に与える影響

Effects of Back-fill Grouting on Shield Tunnel and surrounding ground

小山幸則*・清水 満*・佐藤 豊**・岡本達也***・梶原健次郎+

Yukinori KOYAMA, Mitsuru SHIMIZU, Yutaka SATO, Tatsuya OKAMOTO and Kenjiro KAJIWARA

Back-fill grouting model tests have been carried out and the behavior of back-fill grouting of shield driven tunnel is discussed in this paper. Back-fill grouting of shield driven tunnel is significant for not only surrounding ground but also acting load on tunnel. Ground displacement and acting pressure on the tunnel model were measured during back-fill grouting. Some durability tests for grout material have also been done. The differences of the injection pressure and stiffness of surrounding ground varied the acting pressure on the tunnel model and ground displacement.

Key words: shield tunnel, back-fill grouting, model test

1. はじめに

シールドトンネルの裏込め注入は地盤注入と同様、注入状況や注入効果の確認を視覚的に行うことが事実上不可能で、未知の部分が非常に多い工法である。本論文では、シールドトンネルの裏込め注入がトンネルや周辺地盤に与える影響を明らかにするため、模型地盤中にトンネル模型管を設置し、裏込め注入時にトンネルに作用する圧力およびトンネル模型管上部の地盤変位を計測した結果について述べる。

また、シールドトンネルに使用する裏込め注入材の耐久性に関しては定まった試験方法が確立されておらず、はっきりした評価ができないのが実状であるが、一般に耐久性の向上は、固結強度が高く固結物からのアルカリ溶脱が少ない注入材料を選定することにより可能であると考えられている。そこで、本論文では、裏込め注入材のアルカリ溶脱状況およびそれによる固結強度への影響についての実験結果についても述べる。

2. 安定性試験

裏込め注入材を固化させた供試体（ $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ ）を水中養生し、定期的に養生水（水道水；8 l ）の取り替えを行い、その都度、養生水のpH値を測定し、これとアルカリ分の溶脱とが関連するものと考えた。また、一軸圧縮強度を28日後およびアルカリ分の溶脱が落ち着いた時点に測定した。試験に使用した裏込め注入材は、2液型可塑性のセメント・非エア系グラウト（可塑性B）¹⁾とLWおよび1液型のCB（セメントベントナイト）とセメントペーストの4種類とした。使用材料の配合を表-1に示す。

2.1 アルカリ溶脱状況

アルカリ溶脱の経時変化を図-1に示す。また、対数近似した結果を図-2に示す。全期間を通じて緩やか

* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所トンネル研究室

** 正会員 東日本旅客鉄道(株)東京工事事務所

*** 正会員 (株)熊谷組技術本部土木技術部

+ 正会員 (株)熊谷組東京支店

表－1 裏込め注入材の配合

① 注入材B (1.00㎡当たり)				
A 液				B 液
セメント	ウレタン	安定剤	水	珪酸ソーダ
240 kg	32 kg	4.4 g	831 g	74 g

② LW (1.00㎡当たり)			
A 液		B 液	
セメント	水	水ガラス	水
200 kg	437 g	250 kg	250 kg

③ CB (1.00㎡当たり)		
セメント	ベントナイト	水
500 kg	80 kg	810 g

④ セメントペースト (1.00㎡当たり)	
セメント	水
1153 kg	634 g

(W/C=55%)

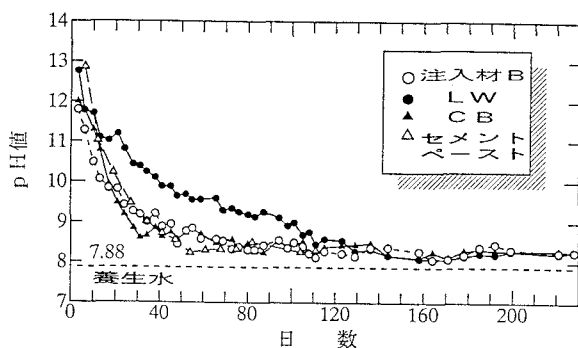
に溶脱が進んだLWに対し、注入材BとCBは前半速やかに、後半緩やかに溶脱した。アルカリ溶脱が落着くのに要した日数は、LWは約5か月、可塑状B、CBは約3か月、セメントペーストは約2か月であった。養生中の供試体の状況は、アルカリ溶脱により全体的に柔らかくなっており、特にアルカリ溶脱量の多いLWは、養生日数が進むと供試体端部の劣化が顕著に現れた。アルカリ溶脱が安定した状態での可塑状Bの供試体は、表層に約5mm厚さの淡白色のゾーンが存在しており、この部分が最も溶脱の進んだ箇所と考えられる。水中養生中に溶脱されるアルカリ成分としては、水ガラスやベントナイト中の未反応のNa⁺およびセメント中の未反応のCa²⁺が考えられるが、Na⁺は、Ca²⁺に比べ水と混合すると水酸化ナトリウムとなり水に溶解しやすい性質をもっている。このため、養生水中のアルカリ溶脱に最も寄与する成分は、水ガラス中のNa⁺であると考えられる。したがって、水ガラスの使用量の多いLWが最も溶脱量が多くなっている。可塑状Bは水ガラスを使用しないCBと経時変化が近似しており、可塑状の裏込め注入材に使用する水ガラスの未反応分の多くは、数カ月後には溶脱されきってしまうようである。

2.2 一軸圧縮強度

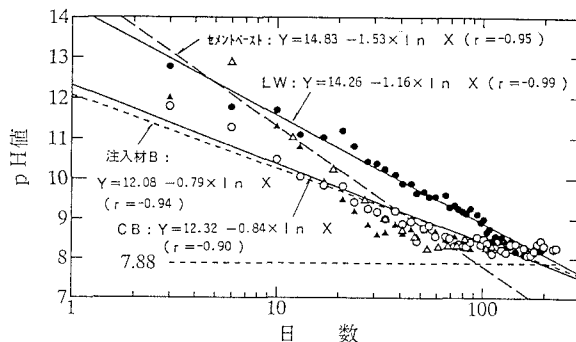
一軸圧縮強度試験結果を図－3に示す。2液型の可塑状BとLWの強度低下が生じた。これは、裏込め注入材中の未反応のアルカリ分の溶脱により、強度が低下したものと考えられる。特に溶脱の多かったLWの強度低下が顕著である。水ガラスを含有していないCBやセメントペーストは、強度低下を生じていない。

2.3 安定性試験のまとめ

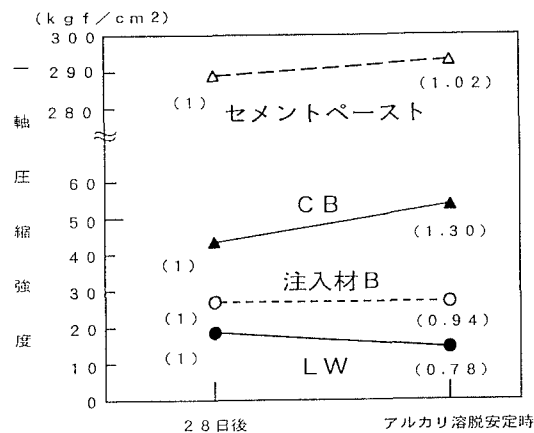
実験結果より、裏込め注入材中の未反応のアルカリ成分の溶脱が裏込め注入材の強度低下の要因となっていると考えられ、この溶脱は注入材の硬化発現が進むほど少なくなることがわかった。したがって、裏込め注



図－1 アルカリ溶脱の経時変化



図－2 アルカリ溶脱の経時変化(対数近似)



注) () は、28日強度を1とした場合の強度比である。
アルカリ溶脱安定時の強度は、セメントペーストは111日後、その他は228日後である。

図－3 一軸圧縮強度試験結果

3. 土槽模型実験

実験装置は、実験地盤を作成する大型実験土槽（幅4.0m、高さ3.0m、奥行き3.0m）、シールドトンネルの裏込め注入の施工を模擬するための内筒管（外径 ϕ 1000mm、厚さ10mm；セグメントリングに相当）および外筒管（外径 ϕ 1060mm；シールドに相当）、裏込め注入装置などから構成されている。外筒管端部には、引き抜きジャッキが取り付けられてあり、厚さ30mmのテールボイドを生じる構造となっている。また、土槽中央部には仕切り板を設置し、左右で2ケースの実験を行えるようにした。実験装置を図-4に示す。

実験土槽内の砂地盤中にトンネル模型管を設置した後、地盤上部から載荷用水袋により 1.5kgf/cm^2 の鉛直方向に載荷した状態で外筒管を引き抜きながら、テールボイド(30mm)に裏込め注入を行い、そのときに発生するトンネル模型管の圧力と、模型管上部の地盤の鉛直変位を計測した。実験ケースは、表-2に示すように、実験地盤、注入圧を変化させた4ケースと、注入を行わずに外筒管を引き抜く(以降空引きと呼ぶ)実験の計5ケースを行った。また、これとは別に、地山と内筒管が直接接触する状態を作り出すために、内筒管のみを土槽に埋め込み、裏込め注入せずに載荷をした実験を行っており、合計で6ケースの実験を行っている。

圖-4 模型土槽實驗裝置

トンネル模型管に作用する圧力の計測には、トンネル半径方向、接線方向の圧力が計測できる2方向土圧計(図-5)を1断面12個用いて動ひずみ計測を行い、周辺地盤の

表-2 模型実験ケース

ケース	実験地盤	注入材	引抜時の 上載荷重 kgf/cm ²	注入圧 kgf/cm ²
1	密地盤	2液型, 可塑状, 非エア一, セメント系	1.5	2.0
2				1.0
3				2.0
4	緩地盤	なし(空隙)	—	1.0
5				—
6				なし(地山)

変位計測には、トンネル模型のクラウンから25cmおよび50cmの上方に模型地盤の地中変位を計測するため地中変位計を設置し計測を行った。

3.3 裏込め注入時にトンネル模型管に作用する圧力

図-6から図-9にトンネル模型管で計測された半径方向圧力の分布を、注入圧力に対する応答度(半径方向圧力/注入圧力)で表現した分布図を示す。ここで注入圧力は、A液とB液の混合直後の注入管における圧力計のゲージ圧である。

密地盤においては、載荷重よりも小さな低圧注入では注入圧力にほぼ等しい均等な分布形状となっているが、載荷重より大きな高圧注入では右スプリング部およびインバート左部において注入圧力のおよそ1.5倍近い大きな値となり、偏圧状態が残った分布形状となっている。緩地盤においては、低圧注入時には、クラウン左およびインバート左において載荷重と同程度の圧力に相当する1.5に近い値を示し、クラウン右および右スプリングにおいて注入圧力よりも小さな0.6~0.7程度の値となり、不均一な分布形状となった。高圧注入では、クラウン付近はやや大きな値となるものの、他の測点は注入圧とほぼ同程度の比較的均一な分布形状であった。

以上のように密地盤においては低圧注入が均等な分布形状になるのに対し、高圧注入では偏圧状態が残留するようである。これは密地盤では地盤の剛性と自立性が高いことから、載荷重より小さな低圧注入ではボイド部において、トンネル周辺地盤が注入圧力とバランスして緩んだため注入圧が均一に分布し、高圧注入では過大な注入圧を作用させたため、地山を乱し、不均一な圧力分布形状となったものと考えることができる。一方、緩地盤においては、高圧注入が均等な分布形状になるのに対し、低圧注入では不均一な分布形状となった。これは緩地盤は地盤の剛性と自立性が低いことから、外筒管の引き抜きによりトンネル周辺の地盤がさらに緩み、低圧注入ではこの緩みによる地盤の不均一さがそのまま分布したものと考えられ、高圧注

表-3 実験地盤の特性

地 盤	密 地 盤		緩 地 盤	
注入圧 (kgf/cm ²)	高圧(2.0)	低圧(1.0)	高圧(2.0)	低圧(2.0)
乾燥密度(gf/cm ³)	1.629	1.594	1.490	1.479
含水比 (%)	3.46	3.43	5.02	5.27
内部まざつ角(度)	32.9	32.5	31.1	31.1
締固め度(%)※	98.15	96.00	89.76	89.05

※ 締固め度＝地盤乾燥密度／最大乾燥密度

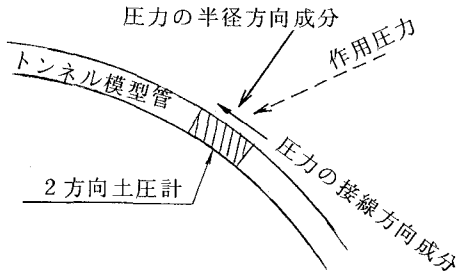


図-5 土圧計の概略図

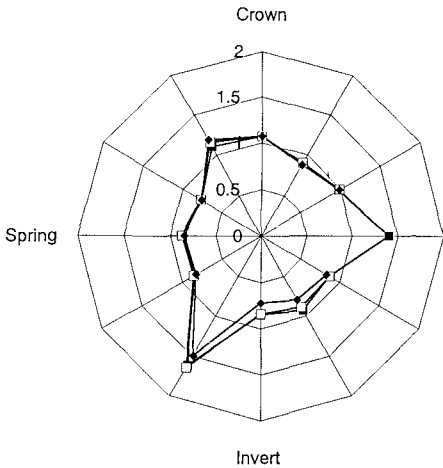


図-6 半径方向応答度(ケース1)

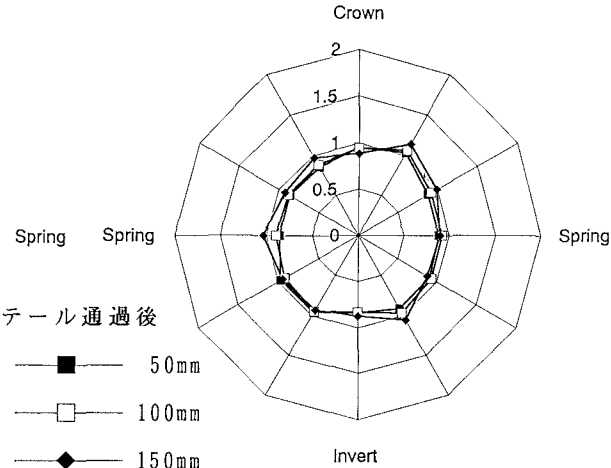
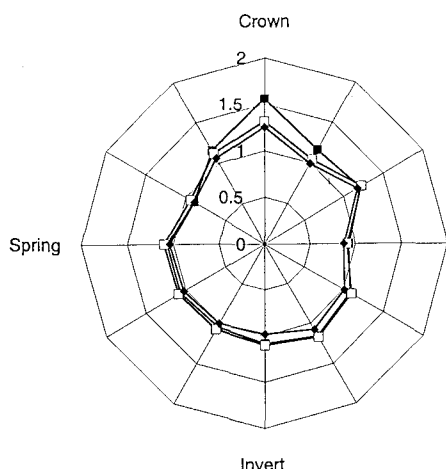
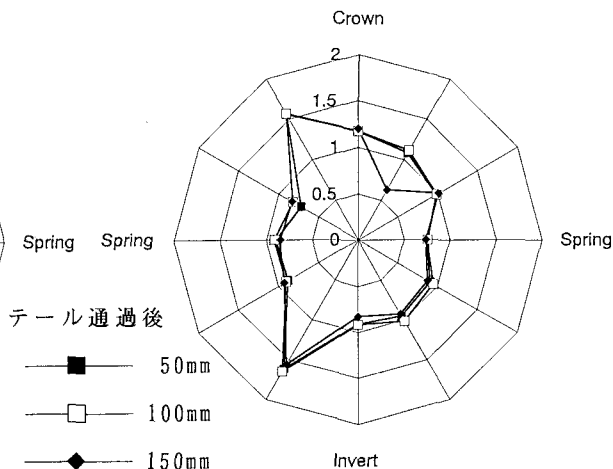


図-7 半径方向応答度(ケース2)



図－８ 半径方向応答度（ケース３）



図－９ 半径方向応答度（ケース４）

入では緩んだ地盤に高い内圧を作用させ、地盤の剛性を高めることになり、高い注入圧にほぼ等しい液圧のような均一な分布形状になったものと考えられる。

なお、接線方向圧力は、いずれの実験においても、トンネル模型にほとんど生じなかった。これは、可塑状の裏込め注入材を用いたため、裏込め材料が硬化する前に周辺地盤の応力再配分が終了してしまうためであると考えられる。

3.4 裏込め注入の有無による影響

3.4.1 空引き実験（ケース５）との比較

裏込め注入を行わず、あるいは不十分に充填されたためにトンネル周辺に空隙が存在した場合には、トンネル周辺地盤の崩壊等によりトンネルに不均一な荷重（偏圧）が作用することが考えられる。このような裏込め注入の有無の影響を調べるため、注入終了後に上部の載荷重を 0.5kgf/cm^2 ピッチで 2.5kgf/cm^2 まで増加させ、その時に生じた半径方向圧力を計測した。その結果を図－10、図－11に示す。

空引き（ケース５）では載荷の初期段階から作用圧力のばらつきが大きく、内筒管に偏圧が作用していることが分かる。一方、裏込め注入を行った実験（ケース４）では、上部荷重の増加によっても内筒管各点の圧力の大きさは近似しており、土圧の均等化という観点から裏込め注入の効果が確認できた。

3.4.2 トンネルと地盤が密着している実験（ケース６）との比較

地盤反力を地盤ばねで表現して設計を行う場合、トンネル周辺地盤の力学的特性を考慮して、この地盤ばねを半径方向、接線方向の２方向に対して有効であるとして設計を行うことがある。しかしながら、実際にはセグメントと地盤の間には裏込め注入材が存在しており、この存在がセグメントに作用する土圧に少なからず影響を与えていると考えられる。そこで、裏込め注入を行ったケースと、トンネル模型と地盤が直接接しているケース（ケース６）²⁾において荷重を作用させ、その時にトンネル模型に作用する圧力を計測した結果を図－12と図－13に示す。

裏込め注入を行ったケースにおいては、半径方向の土圧が地盤に密着しているケースに対して平均で約50%程度しか計測されず、また、接線方向圧力においては、約10%程度となっており、ほとんど作用していないことが分かる。これは、模型管と裏込め注入材が重ねばりのような構造となって土圧に抵抗したこと、模型管と裏込め注入材の界面で微小な滑りが生じたためと考えられる。

今回の実験ではトンネル直径 1.0m に対してテールボイドが 30mm であり、実際のトンネルに比べてテールボイドの厚さが大きいことから、この実験結果が直ちに実トンネルの挙動と一致するとは言えないが、裏込め注入材の注入後においても接線方向圧力の低減効果はあるのではないかと想定できる。

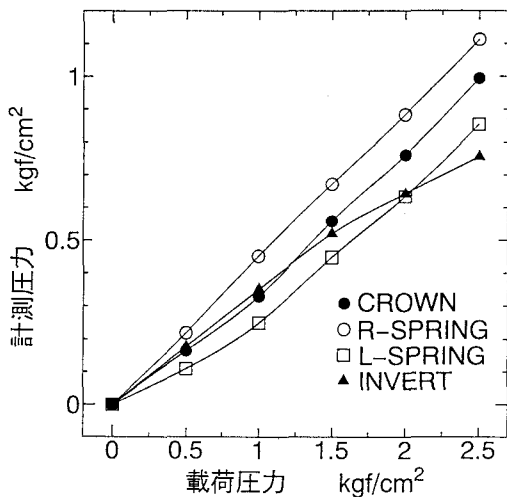


図-10 半径方向圧力の増加（ケース4）

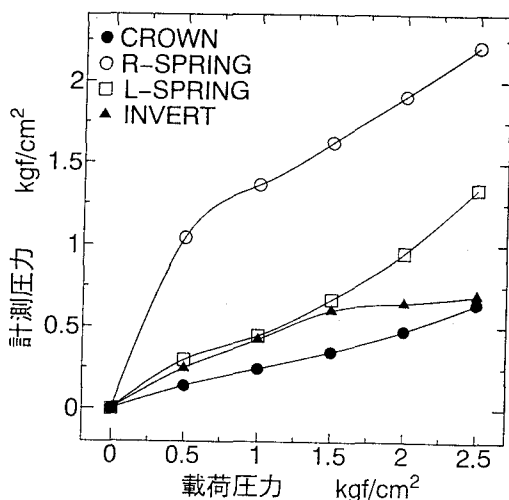


図-11 半径方向圧力の増加（ケース5）

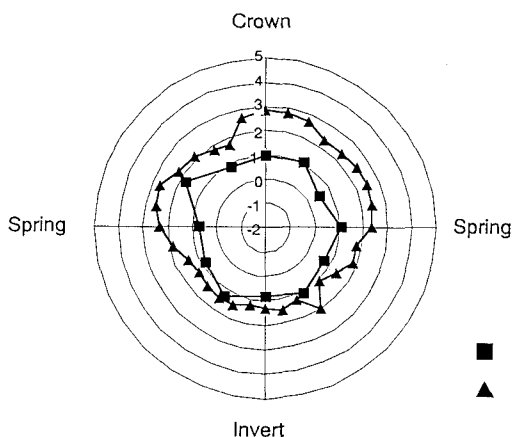


図-12 半径方向圧力の比較（ケース4,6）

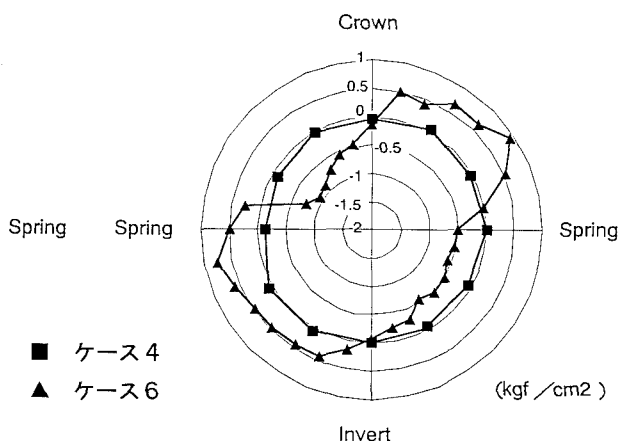


図-13 接線方向圧力の比較（ケース4,6）

3.5 トンネル模型管上部の地盤変位

周辺地盤の挙動は、地中変位計により測定した。地中変位計の構造は、ベース部材であるネオプレンゴム板の両面に和紙を粘着し、その上に20cm間隔でペーパーゲージを貼付した後、カバーゴムで覆ったものである。地中変位計は、トンネル模型のクラウンから25cm（下側）および50cm（上側）の位置に設置した。また、地中変位計両端に地中絶対変位計を設置した。図-14に地中変位計の設置位置を示す。

地盤変位が明瞭に現れた下側の変位を図-15に示し、中央部の変位の経時変化を図-16に示す。また、地中変位計設置位置の直下をテールシールが通過した時の地中変位計中央部の変位と注入圧の関係を図-17に示す。

計測断面通過前は、密地盤、緩地盤ともに高圧では隆起傾向を、低圧では沈下傾向を示しているが、密地盤においては注入圧力による変位量は少なく、緩地盤では注入圧力による変位量の差が大きい。また、計測断面通過時は、密地盤の高圧の場合以外は沈下を示し、計測断面通過後は、密地盤の高圧では隆起を生じ、その他は沈下を生じる結果となった。なお、地中変位量は密地盤に比べ緩地盤の方が大きく、沈下量は低圧に比べ高圧の方が小さかった。緩地盤では、空引き、低圧、高圧の順に変位（沈下）が大きくなった。

このように、トンネル模型（セグメント）の直上では、密地盤においては上載荷重以上の注入圧（高圧）と上載荷重以下の注入圧（低圧）による隆起量と沈下量の差は小さく、緩地盤においては注入圧力による先行隆

起量と先行沈下量の差が大きく、テール通過後では同程度の大きさの沈下を生じるなど、注入圧力による周辺地盤への影響は、地盤の状況（硬軟）によって大きく異なるものと考えられ、注入圧の適切な設定が重要である。なお、緩地盤の場合は、注入率との関連も含めて考える必要がある³⁾。また、特に裏込め注入を行わなかった空引きのケースでは上部地盤の沈下が顕著に現れ、地盤変位に対する裏込め注入の有効性を示す結果となっている。

4. まとめ

模型砂地盤中にシールドトンネルを模した模型を設置し、裏込め注入を行った結果、地盤の特性に適合した裏込め注入圧の設定が、地盤変

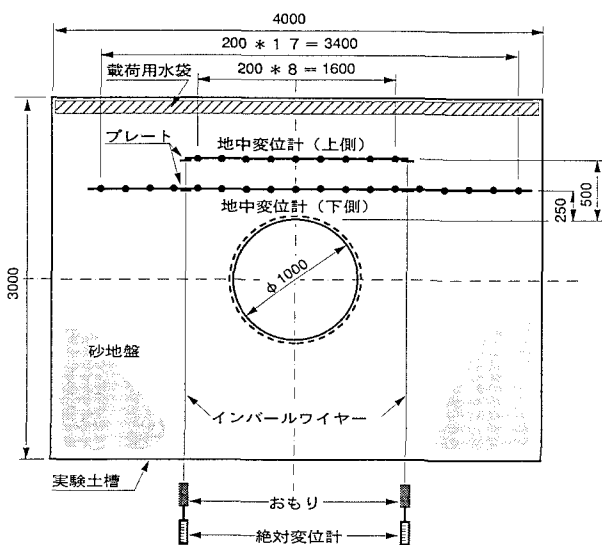


図-14 地中変位計の設置位置

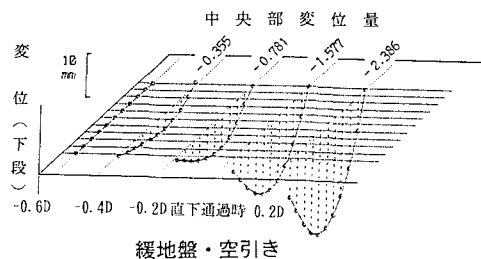
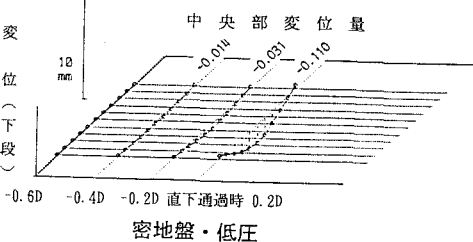
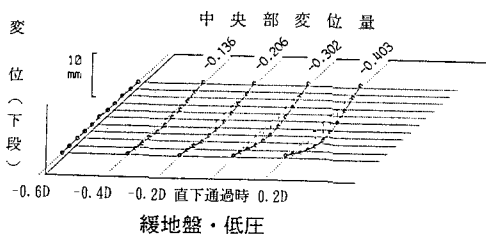
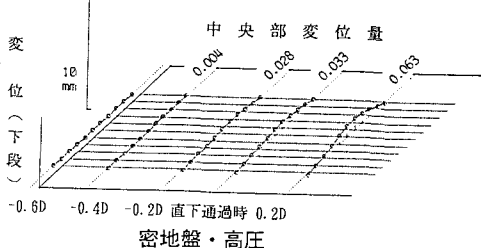
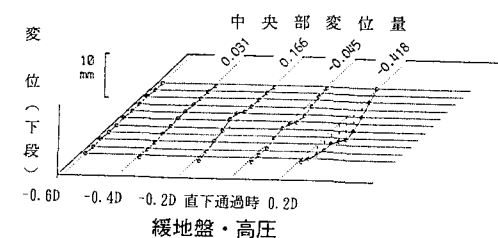


図-15 地盤の相対変位（下段）

位の抑制，トンネルに作用する荷重の均一化にとって重要であることが確認された．砂地盤についてこれらの知見をまとめれば以下になる．

1) シールドの掘進によって地盤の崩壊が生じないような密な地盤では，比較的低圧の注入でも地表面沈下を抑えることが可能であった．この場合，逆に必要以上の高圧での注入を行うと，トンネルに偏圧を作用させてしまう結果となり，また，無視できない地盤隆起を生じさせる可能性があり，周辺地盤，トンネル双方にとって望ましい結果をもたらさない．

2) シールドの掘進によってシールド周辺の地盤が崩壊するような緩い地盤での裏込め注入は，このような地盤の崩壊に抵抗可能な比較的高い圧力での注入が必要となる．自立性のある地盤とは異なり，不十分な圧力での注入は，地表面沈下の増大を引き起こすばかりでなく，シールド周辺地盤の崩壊によって，トンネルにも不均一な荷重を作用させる原因となる．

3) 空引き実験との比較結果より，テールガイドに空隙が残るような不十分な裏込め注入が行われると，地表面沈下が増大するばかりでなくトンネルに不均一な荷重を作用させてしまうことを実験により確認した．

4) 裏込め注入が良好に行われたシールドトンネルでは設計時に前提としているような周辺地盤の土圧や地盤反力に比ベトン接線方向の圧力がかなり小さくなっていると考えられる．

5. あとがき

裏込め注入がトンネル及び周辺地盤に及ぼす影響は前述のとおり多様であるが，特に裏込め注入圧は大きな荷重となってセグメントに作用するため，セグメントの短期的な安全性を左右する可能性があると考えられる．本報告で，地盤の特性を考えた適切な注入圧の設定が必要であることや，裏込め注入による作用圧力の軽減効果（接線方向圧力で特に顕著に現れた）を示したが，今後さらに，注入時に発生する地盤変位などとの関連および裏込め注入の施工時荷重としての評価や，裏込め注入がトンネルの長期安定性に及ぼす影響についても検討を進めていきたい．

〔参考文献〕

- 1) 清水 満，岡野法之，岡本達也，梶原健次郎：シールドトンネルの裏込め注入に関する研究（その1）－基礎実験－，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集（Ⅲ－39），1993. 9
- 2) 小山幸則，清水 満，佐藤 豊：トンネルに作用する土圧に関する研究(1)－実験結果－ 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集（Ⅲ－51），1993. 9
- 3) 小山幸則，清水 満，佐藤 豊，岡本達也，梶原健次郎：シールドトンネルの裏込め注入実験 トンネル工学研究発表会論文・報告集 第3巻，1993. 11

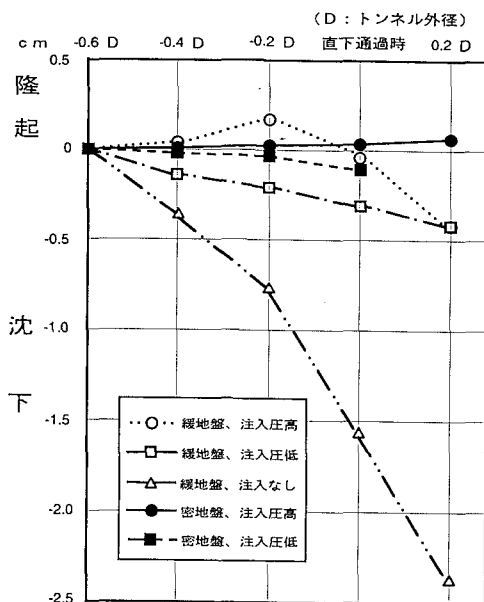


図-16 中央部変位の経時変化

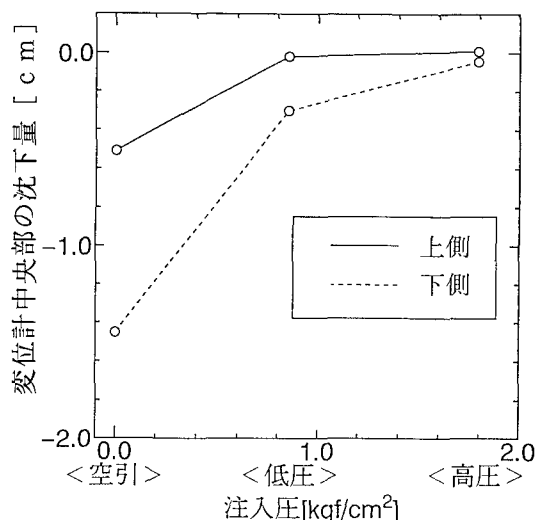


図-17 中央部の変位と注入圧の関係(緩地盤)