

# 鋼管地盤強化工法によるシールドトンネル外周地盤の補強効果

藤原 紀夫 山下 幸夫  
村井 喜一 中楚 富士男  
(本社技術本部土木技術部) (本社土木本部土木部)

## Effect of Ground Reinforcement by Steel Pipes Around Tunnel in Soft Ground

Toshio Fujiwara Yukio Yamashita  
Kiichi Murai Fujio Nakaso

### Abstract

As a new approach for shield tunnelling techniques the ground around a tunnel was reinforced by using anchored steel pipes for the purpose of protection of buildings above the route of the tunnel. This reinforcement work is an application of the NATM technique. Deformation of the ground was prevented by installing pipes with strainers from the pilot tunnel, injecting grout from the pipes into the ground, and then consolidating the ground with the pipes and grout.

No harmful deformation was found at any of the buildings after shield driving, and the ground settlement of the reinforced area was decreased by 40 to 50 percent of that of nonreinforced sections. In this paper, an outline of the method of ground reinforcement by steel pipes and results of field measurements are described.

### 概 要

シールドトンネルにおける新しい試みとして、路線直上に位置するビルを防護する目的で、定着鋼管により地盤を補強する工事が実施された。この防護工事は NATM を応用したもので、パイロットトンネル坑内からストレナー加工した鋼管を設置し、定着剤の注入により地盤と一体化させて変形の防止を図ろうとするものである。

施工の結果、ビルには有害な変状は認められず、さらに地表面沈下などが無防護区間の40~50%に減少するなどの、顕著な補強効果が認められた。この報告では鋼管地盤強化工法の概要と、各種の動態計測結果について述べる。

## 1. まえがき

近年、都市部におけるシールド工事は、地上および地下構造物の輻湊化と立地条件の制約などから、施工環境が非常に厳しくなっている。特に土被りが小さくて地上に建物がある場合には、シールド掘進による地表面沈下とそれに伴う建物沈下が問題になることが多い。このような場合、従来から薬液注入工法による防護処置が施されてきた。ただしこの工法によると、土被りが小さいときには注入圧より逆に地盤の浮上がりが生じたり、また粘性土地盤では十分な地盤強化が図れないなどの問題点があった。そこで今回新しい試みとして、山岳トンネルで実施されている NATM を応用した、シールド外

周地盤の補強工法が採用された。

NATM はロックボルトと吹付けコンクリートを主な支保材とするトンネル施工法で、我国に導入されて以来、膨張性地山や軟岩のみならず土砂地盤にも適用され、有効性が認められている。今回実施した方法は、ロックボルトに替えてストレナー加工した特殊な定着鋼管を用いるもので、鋼管内部から定着材を注入することにより地盤と一体化させ、シールド掘進に伴う地盤の変形を拘束しようとするものである。

ここでは定着鋼管を用いた地盤の補強工法（以下、鋼管地盤強化工法と呼ぶ）と、その施工効果について述べる。

## 2. 工事概要

当該工事は地下鉄複線断面のシールド工事である。本シールドの施工に先がけて、すでにパイロットトンネルが完成しており、防護工事はこのパイロットトンネルを利用して坑内から実施された。

図一1～3に防護区域の平面図および断面図を示す。この付近の建物は比較的小規模であるが、その中のひとつに高さの割りに底面積の小さなビル（Sビル）があり、しかもシールド路線の直上に位置しているため、掘進の影響により有害な変状が生じることが懸念された。そのため、当ビルを対象として鋼管地盤強化工法による防護工事を実施することにした。防護区間は縦断方向13.5m、横断方向10.8mの範囲である。

地盤の補強に使用する定着鋼管は、図一3に示すように、トンネル壁面に垂直になるよう放射状に配置した。ただし、地上権設定の関係から側部の防護範囲がシールド外線より0.5mと狭いため、下側の4本については斜め前方に打設して定着長を少しでも長くとれるようにした。定着鋼管の仕様は次のとおりである。

材 質：STM-R80（ストレナ加工）  
直 径；外径40.5mm、内径31.0mm  
打設本数；縦断方向15断面（0.9mピッチ）

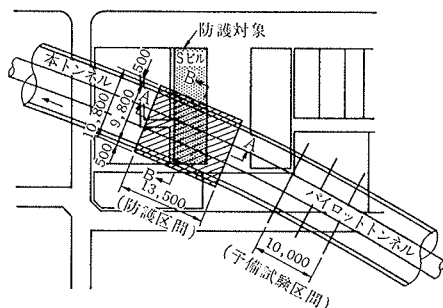
1断面当り12本、合計180本  
定 着 長；4.5m（標準）

図一4に定着鋼管の施工要領図を示す。施工は次の順序に従って実施した。①定着鋼管とボーリングロッドを組み合わせ所定の深度まで穿孔する。②内管を回収したあと瞬結性の定着材を注入して、定着鋼管を固定すると同時に穿孔で乱れた周辺地盤を修復する。③シールド通過予定位置の外側で定着鋼管を切り離し、ロッドを回収して空洞充填を行なう。

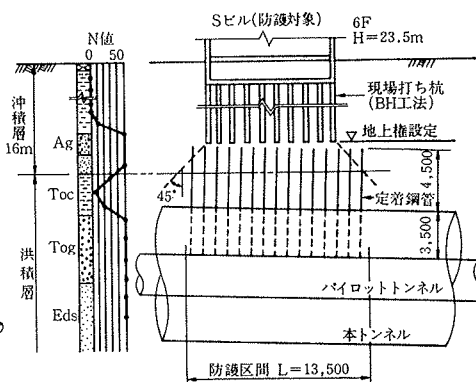
なお、定着鋼管は長尺物とする方が好ましいが、パイロットトンネル坑内からの施工となるため作業空間に制約がある。そのため両端ネジ加工した0.5mの短管を、穿孔時に継ぎ足しながら設置した。また定着材の選定などについては、防護区間の手前に予備試験区間を設け、そこでの試験結果を参考にして最終的に決定することにした。

## 3. 予備試験

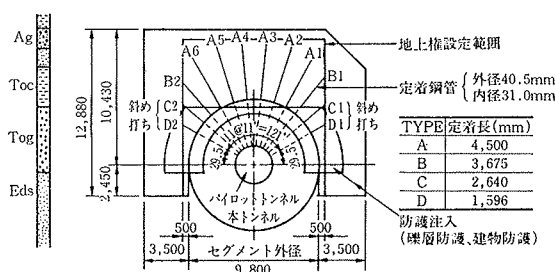
### 3.1. 予備試験の目的および試験内容



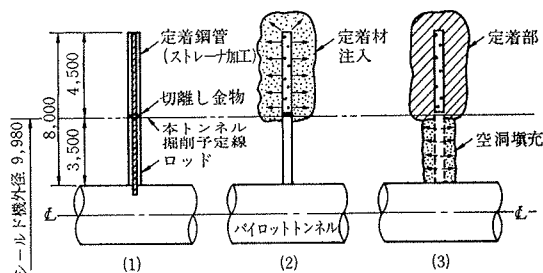
図一1 平面図



図一2 縦断面図（A～A断面）



図一3 横断面図（B～B断面）



図一4 施工要領図

予備試験は定着鋼管の引抜き耐力を確認すること、注入効果の高い定着材を選定することを目的として、防護工事の施工に先立って実施するものである。

定着材は①施工性が良好で硬化時間が短いこと、②硬化後の固結強度が大きいこと、③地盤への浸透性が良く地盤の修復性が期待できること、などの条件を備えていなければならない。ここでは一般に広く使用されている瞬結性の注入剤の中から3種類を選び、試験を行なうこととした。試験内容は次のとおりである。

試験方法；引抜き試験（合計9本について実施）

定 着 材；懸濁型水ガラス系注入材  
親水性ポリウレタン系注入材  
溶液型水ガラス系注入材の3種類

定着鋼管；各定着材とも3本施工。そのうち懸濁型水ガラス系注入材2本、溶液型水ガラス系注入材1本の定着鋼管にはひずみ計を取り付ける。

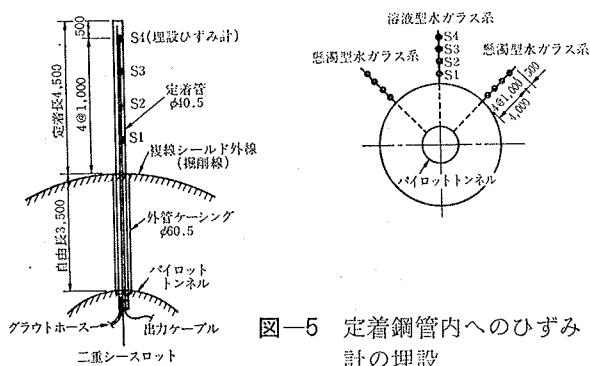


図-5 定着鋼管内へのひずみ計の埋設

測定項目；各载荷段階の荷重と定着鋼管頭部の変位量，定着鋼管のひずみ

図-5 に定着鋼管内へのひずみ計の埋設方法を示す。ここでは定着鋼管に直接ひずみ計を取り付けることができなかったため，超早強性のジェットセメントペーストを注入して鋼管内の所定の位置に固定した。またパイロットトンネル外縁からシールド掘削線までの区間は，あらかじめ口径の大きなケーシングで地山と定着鋼管の縁切りを行ない，本工事と同じ条件となるようにした。

### 3.2. 試験結果

3.2.1. 定着鋼管の引抜き耐力 図-6 に引抜き試験の結果を示す。懸濁型および溶液型水ガラス系注入材では中央に施工した定着鋼管 (No. 2) を除き，すべて 20 t 以上の引抜き耐力が得られている。この引抜き耐力は，定着鋼管の材料引張り強さがジョイントの影響を考慮して約 21 t であることを考えると，十分な値であると判断できる。これに対しポリウレタン系注入材の場合は，はるかに小さな引抜き耐力しか得られていない。

なお 3 種類の定着材とも，中央の定着鋼管が左右のものよりも引抜き耐力が小さくなっているが，これは先端部分が砂礫層のため注入圧が上がらず，アンカーとしての固定，定着が十分でなかったためと思われる。また懸濁型水ガラス系注入材については，先行して実施したポリウレタン系注入材が定着管内に廻り込んでいることが確認された。そのため実工事にあたっては，特に砂礫層部分への注入方法に工夫が必要である。

3.2.2. 定着鋼管のひずみ分布 地盤内での定着の状況をより詳しく把握するため，引抜き荷重の増加に伴う定着鋼管のひずみ測定を実施した。ただし，ここで行った方法は定着鋼管に直接ひずみ計を取り付けたものではな

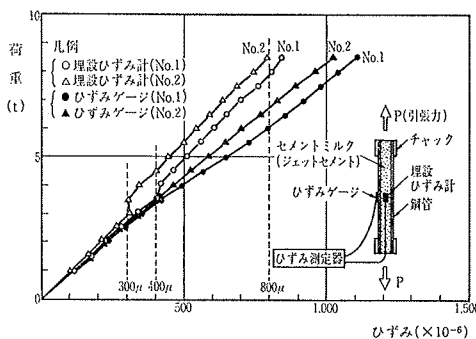


図-7 埋設ひずみ計の検証

く，セメントペースト内に埋設したものである。したがって間接的な測定により，定着鋼管のひずみをどれだけの精度で測定できるのかを，あらかじめ検証しておく必要がある。

図-7 はアムスラー試験機により行なった検証試験の結果である。工事で使用する材料と同じものを使い，鋼管の表面に貼り付けたひずみゲージと，鋼管内にセメントペーストで埋設したひずみ計との対比を行なった。その結果，ひずみが 300  $\mu$  程度まで両者は良く一致するが，300~800  $\mu$  では鋼管とセメントペーストの境界でスベリが生じ，埋設ひずみ計では実際に鋼管に発生するひずみの 80% 程度の測定値になることが分かった。言い換えると，80% の精度で測定可能ということになる。

次に実際の引抜き試験により測定された結果について述べる。図-8 は定着材として懸濁型水ガラス系注入材を用いた場合の定着鋼管のひずみ分布を示したものである。自由端でのひずみは，鋼管とセメントペーストとの複合剛性と，载荷重から求めた。埋設ひずみ計による測定値は S1 で最大 681  $\mu$  であるが，他の位置ではすべて 300  $\mu$  よりも小さく，前述した検証試験の結果から判断して，十分信頼のおけるひずみ分布を測定できているものと思われる。またひずみ分布から計算した鋼管の伸びは，鋼管頭部で実測した変形量とも比較的良好一致している。

定着区間のひずみは大部分がシールド外縁より 2 m 以

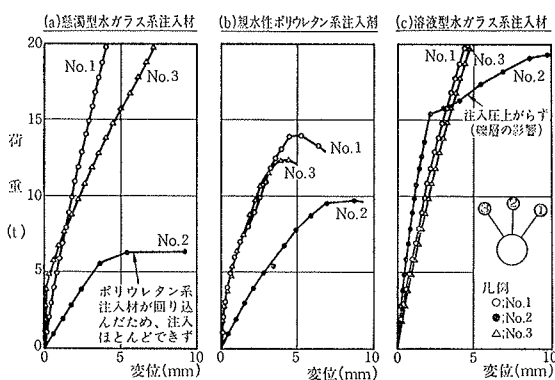


図-6 引抜き試験の結果

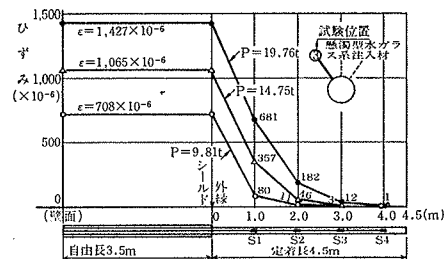


図-8 定着鋼管のひずみ分布

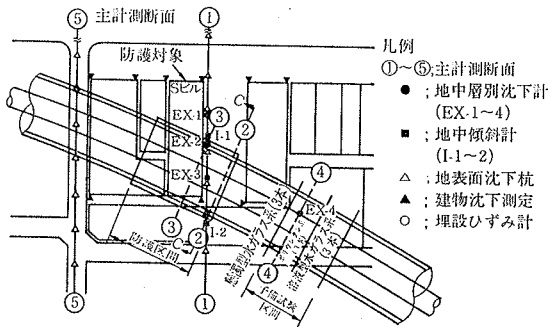


図-9 計器配置図

内で発生している。これは定着鋼管が地盤と一体化して引抜き荷重によく抵抗していることを意味するものであり、鋼管地盤強化工法の有効性を示唆している。また定着長は4.5mで十分であると判断できる。

引抜き試験に関する以上の結果を総合的に判断して、実際の防護工事には定着材として懸濁型水ガラス系注入材を使用することが決定された。

#### 4. シールド掘進における計測計画

シールド掘進中の計測は、地盤と建物の挙動を監視し防護工の効果を把握することを目的とするものである。ここでは図-9に示すように、五つの主計測断面を設けて、それぞれ次のような各種の計測を実施する。

(1) 地中鉛直変位 地中層別沈下計による測定を行なう。設置本数は全部で4本で、このうち3本は第1主計測断面に配置し、他の1本は防護区間との比較を行なう目的で第4主計測断面に配置する。測定深度は各層別沈下計ともGL-7m, -12m, -17mの3点である。

(2) 地中水平変位 挿入式地中傾斜計による測定を行なう。設置本数は2本とし、第1主計測断面のシールド両側にセグメント外縁からそれぞれ1m離れた位置に設置する。測定深度は地表面からGL-28mの範囲である。

(3) 地表面沈下 第1, 第5主計測断面で測定する。測点はシールド中心から左右30m区間に、それぞれ5mピッチで設ける。

(4) 建物の沈下 シールド工事の影響が生じると思われる建物を対象に定点沈下測定を行なう。

(5) 定着鋼管のひずみ 定着鋼管の内部にひずみ計を埋設し、地盤の変状に伴って発生する定着鋼管のひずみを測定する。測定位置は第2および第3主計測断面で、図-9に示すように、それぞれ1断面当たり6点のひずみ計を取り付ける。

### 5. 動態計測結果とその考察

#### 5.1. 地表面および地中鉛直変位

図-10に防護区間と一般部を対比した横断方向の地表

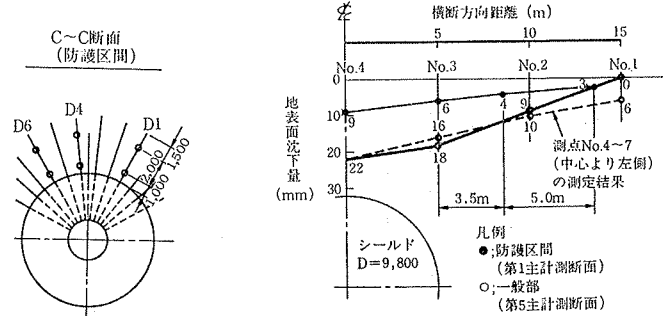


図-10 地表面沈下

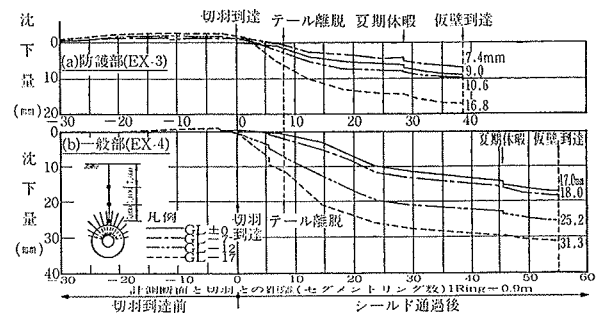


図-11 地中沈下の経時曲線

面沈下曲線を示す。鋼管地盤強化工法による防護効果がよく表わされており、シールド中心線では一般部が22mmの沈下量を生じているのに対して、防護区間では9mmと、41%程度の沈下に留まっている。

図-11は地中沈下の経時変化について、前図と同様に防護区間と一般部とを対比したものである。横軸は計器埋設位置とシールド切羽との離れを示しており、この距離が負号で表示されている場合は、切羽がまだ計測断面に到達していないことを意味している。全体的な傾向としては、切羽が到達する20リングほど手前より先行隆起が生じはじめ、約3リング手前から沈下側に移行する挙動を示している。最終的に沈下が収斂傾向を示すのは30~40リング後方である。地中沈下は当然シールドに近い深部になるほど大きくなっているが、ここでも防護工事の効果が顕著に表われている。なお防護区間では、先行隆起が30リングよりも更に前方で生じているが、これはシールド掘進の影響ではなく、近くで実施した鋼管補強工事の注入によるものと思われる。

#### 5.2. 地中水平変位

図-12に地中傾斜計(I-1)による横断方向と縦断方向の地中水平変位の測定結果を示す。切羽との位置関係は代表的な5点について表示した。

横断方向では切羽の20リング前方で地盤が圧縮される傾向にあり、シールド掘進に伴うこのような挙動が、前述した先行隆起を生じる原因となっている。3リング前方から地盤はシールド側に変位し、その後切羽の進行に

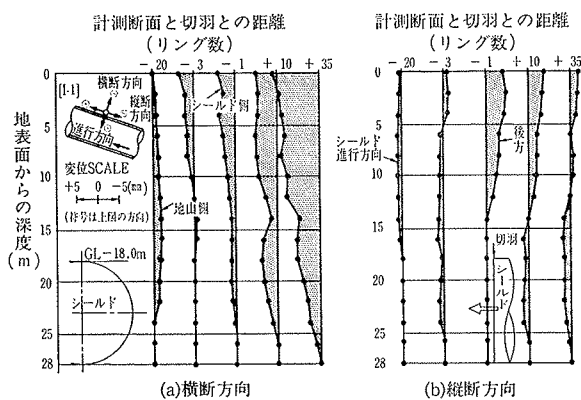


図-12 地中傾斜

伴って順次増加する挙動を示すが、これも鉛直変位の傾向と一致している。

縦断方向についても切羽が到達するまでは、横断方向で測定された結果と全く同じ挙動を示す。ただしシールドが通過した後は変位が逆に減少する傾向を示している。これは地盤が切羽に引張られるような動きをすることを意味している。

5.3. 定着鋼管のひずみの経時変化

シールド掘進に伴う地盤変状によって、定着鋼管にどのようなひずみ変化が生じるのかを測定し、防護効果の確認を行なった。ひずみ計の設置位置は、シールド外縁より1mと3mの位置である。

図-13に第2主計測断面で測定した、定着鋼管のひずみの経時変化を示す。シールド掘進による地盤の先行圧縮により、切羽の20リングほど前方より定着鋼管に圧縮ひずみが生じはじめ、シールドの接近につれて徐々に増加している。圧縮ひずみはシールド掘削線に近いほど大きい。ただし切羽が3リングまで近付いた時点で大きな変化が生じ、切羽到達の直前ではすべての定着鋼管に引張りひずみが測定されている。ひずみに関するこれらの動きは、地盤の変形挙動ともよく一致している。

一方、切羽が到達した時点から以降の動きについては次のようになる。

(1) シールド外縁より1mの位置 切羽到達直後にひずみが大きく変化する。しかしその後は変化がほとんどなく平衡状態を保っている。ひずみは一般に引張り側に变化するが、場合によってはNo.1(1)の測定結果に見られるように圧縮側になることもある。またすべての定着鋼管でシールドに近い方の引張りひずみが遠い方よりも小さくなっている。これはシールドスキンプレートによる変形の拘束が原因となっているものと思われる。第3主計測断面計測でも同じような傾向が認められた。

(2) シールド外縁より3mの位置 切羽到達の直後のひずみ変化は少ないが、テールが離脱する8リング後方まで徐々に変化し、それ以降は平衡状態になる。

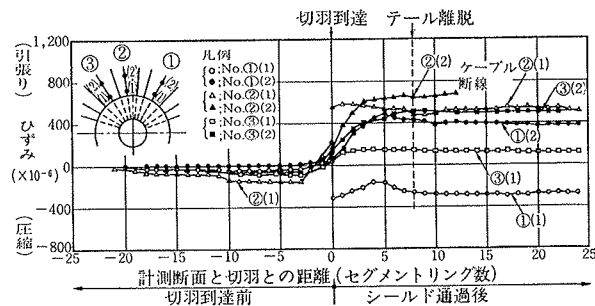


図-13 定着鋼管のひずみ経時変化

対 比 項 目		防護部①	一般部②	①/②
地表面沈下	測 点 No 1	(第1主計測断面) -3 mm	(第5主計測断面) -3 mm	1.00
	— No 2	-4	-9.5	0.42
	— No 3	-6	-17	0.35
	— No 4 (中心直上)	-9	-22	0.41
地中沈下	深 度 GL±0m	(地中沈下計EX-3) -9.0 mm	(地中沈下計EX-4) -17.0 mm	0.53
	— GL-7	-7.39	-18.04	0.41
	— GL-12	-10.62	-25.17	0.42
	— GL-17	-16.78	-31.33	0.54
建物沈下	建 物 最 終 沈 下	(Sビル) -5 mm	(隣接ビル) -15 mm	0.33
	— —	-5	-13	0.38

表-1 沈下量の対比

このように定着鋼管のひずみ変化が早期に収斂するのは、地盤と定着鋼管が一体化して、強化された補強ゾーンが形成されていることを示すものである。なお最大引張りひずみは第2主計測断面で691μ、第3主計測断面で1,046μが測定されているが、これを軸力に換算すると9.6~14.5tになる。予備試験から得られた引抜き耐力が20tであることを考慮すると、アンカーとしての機能は十分であったと判断できる。

6. まとめ

以上に述べてきた結果と建物沈下に関する測定結果をまとめて表-1に示す。建物沈下については、シールド路線と各々の建物との位置関係がすべて異っているため、厳密な意味での比較はできないが、ここでは条件が比較的同一であると見なせるシールド中心に近い位置を選んで表中に示した。

地表面沈下、地中沈下および建物沈下とも、防護区間の沈下量は一般部と比較して小さく、40~50%程度となっている。また工事完了時点でも防護の対象としたビルには有害な変状は発生していない。これは鋼管地盤強化工法による防護効果が、非常にすぐれていることを示すものである。

今後は都市トンネルでも、この種の防護工事が増加することが予想される。そのためにも筆者らは、今回実施した鋼管地盤強化工法の成果を足掛かりとして、より防護効果の高い施工法を開発して行きたいと考えている。