

改良型注入式鋼管先受工法における鋼管の曲げ挙動について

BENDING BEHAVIOR OF STEEL PIPE IN IMPROVEMENT TYPE GROUTING STEEL PIPE FOREPILING

小原勝巳*・川端康夫**・筒井雅行***・石黒真一****・荻田雅弘*****

Katsumi OBARA, Yasuo KAWABATA, Masayuki TSUTSUI, Shinichi ISHIGURO and Masahiro OGITA

Various studies is done effect for product of grouting steel pipe forepiling. But, for it being difficult to assume behavior of ground of face front at design stage, establishment of effective design technique is late in practical use by present situation. In this report, it is described the improvement type grouting steel pipe forepiling that was developed for the purpose of not enlarging face and supporting with members of equal size. And some consideration is described with measurement results about bending behavior of the steel pipe which is the subject of the forepiling.

Keywords : NATM, grouting steel pipe forepiling, design technique

1. まえがき

注入式鋼管先受工法は、比較的長尺(10m以上)の鋼管を切羽より前方に打設し、その周囲の地山を注入により改良する先受工法の一つであり、一般的なドリルジャンボを用い大がかりな設備を必要としないことから適用件数が増加している。本工法の作用効果については種々研究が行われてきたが、切羽前方の地山の挙動を設計段階で想定することが難しいこともあり、実務面で有効な設計手法の確立が遅れているのが現状である。本報告で対象とする改良型注入式鋼管先受工法は、切羽の拡幅を行わずに同一寸法の支保を施工できるように従来の工法を改善したものであり、先受けの主体をなす鋼管の曲げ挙動について計測例から考察を行う。

2. 施工法の概要

図-1に本工法の施工概念図を示す。本工法は、土砂地山から亀裂に富んだ岩盤までの広範囲な脆弱地山を施工の対象とし、山岳トンネルで通常用いられるドリルジャンボを使用して、切羽前面より鋼管を打設し、その周辺を注入材で改良することで、切羽前方地山を先受けする工法であり、地表面沈下の抑制、

* 飛島建設(株)土木本部技術部

** 飛島建設(株)技術本部土木技術開発部

*** 飛島建設(株)技術本部技術研究所

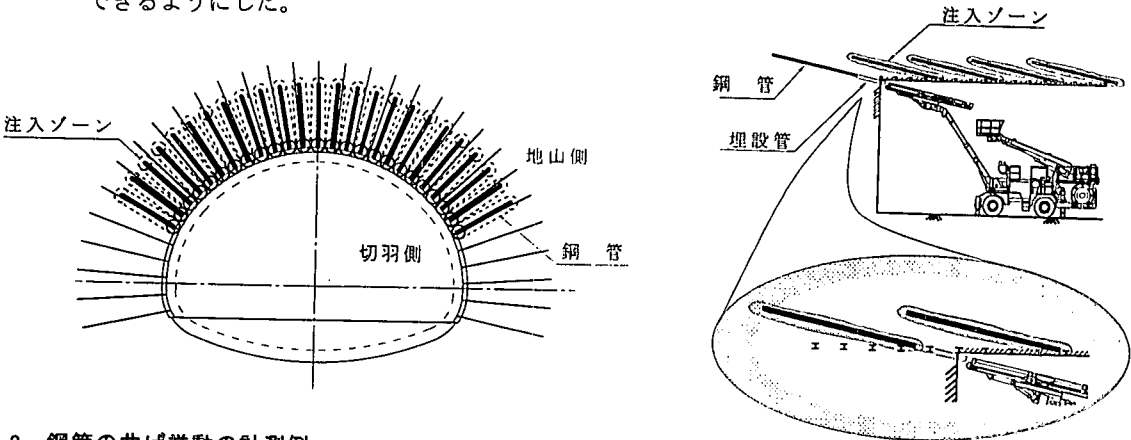
**** 飛島・青木建設共同企業体

***** 飛島・金森建設共同企業体

切羽の安定を目的とした全地質対応型の長尺先受工法である。本工法は、先受工の施工に際し、断面の拡幅を必要としないことを最大の特徴としている。

本工法に類した既往の先受工法として、AGF工法、トレビチューブ工法、ロジソジェット工法、パイプルーフ工法等が挙げられる。これら既往の工法と比較した場合の本工法の特長を以下に示す。

- ①断面の拡幅を必要とせず、支保工の内側から施工できる。その際、特殊埋設管（以下埋設管：材質は、塩化ビニールまたは強化樹脂）で鋼管を鋼製支保工上端部まで打込み、埋設管を壊しながら掘進することで、掘削時間の短縮、経済性向上を図った。
- ②鋼管打設は、鋼管末端を打撃押圧する方式を基本とし、礫地盤、亀裂・破砕性岩盤や打設時に孔壁が乱れ鋼管が拘束を受ける地山では、鋼管先端をビットシステムが牽引する方式とすることで、鋼管の挿入を容易にし、多様な地山条件での施工を可能にした。
- ③鋼管接続部をテープ式とし、接続部の固定に油圧クランプを用い、施工の効率化を図った。
- ④正転で拡径し、反転で縮小する特殊ビットを用いることで、破損・残置等のトラブルも少なく、土砂から亀裂性・破砕性岩盤まで多様な地山のさく孔を可能にした。
- ⑤注入材料、注入方法は、地山の種類、状態に応じ、幅広い選択肢の中から、信頼できるものを選定できるようにした。



3. 鋼管の曲げ挙動の計測例

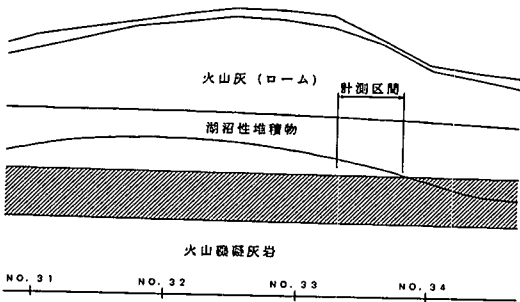
3.1 木崎トンネル

図－1 改良型注入式鋼管先受工の施工概念図

(a) 地形・地質

施工箇所地質は、第三紀鮮新世の未固結ではあるがよく締まった火砕流堆積物を基盤とし、その上部に土石流堆積物、湖沼性堆積物、火山灰等が分布する。土被りは10～25mと薄く、天端が基盤層の上面を出入りする状態であり、風化等の影響で軟弱な箇所も多く、潜在亀裂が発達する箇所も見られた。

図－2に計測断面付近の地質縦断面図を、また、表－1に土質試験の結果を示す。



図－2 地質縦断面図

表－1 土質試験結果

項目	記号	単位	試験結果
湿潤密度	ρ_t	g/cm^3	1.868
自然含水比	W_n	%	17.6
間隙比	e		0.57
飽和度	S_r	%	77.4
粒度	礫分	%	5.4
	砂分	%	67.6
	シルト分	%	24.4
	粘土分	%	2.6
最大粒径		mm	9.5
均等係数	U_c		9.33
一軸圧縮強さ	q_u	kgf/cm^2	2.05
三軸試験 粘着力	c	kgf/cm^2	0.38
UU 内部摩擦角	ϕ	°	44.9

(b) 施工の概要

当該トンネルで実施した注入式鋼管先受工法の施工縦断面図および施工断面図を図-3に、また施工仕様を表-2に示す。注入材はシリカレジン（平均注入量250kg/本）を基本とし、ルーズな砂質シルトでは高強度溶液型薬液を用いた。

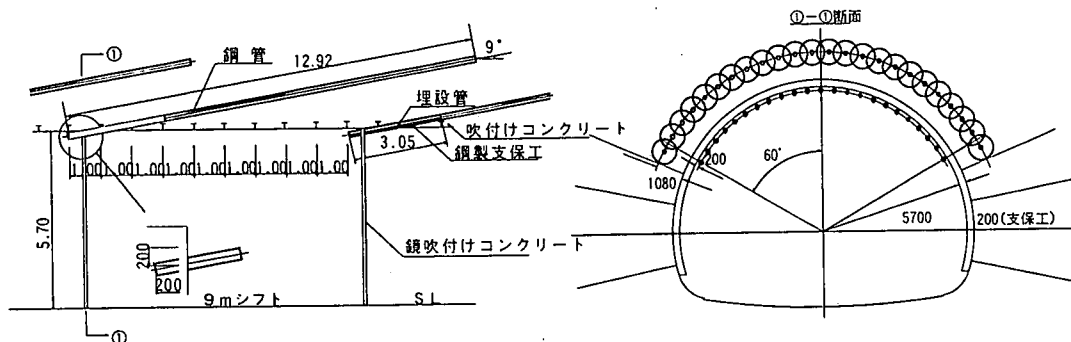


図-3 施工断面図

(c) 計測器の配置

計測器は、鋼管の曲げ挙動により先受け工の効果を確認するために、天端に打設した先受工の鋼管内に曲げひずみ計（φ50mmのパイプにひずみゲージを取付けたもの）を設置した。その他、周辺地山の挙動を得るために、鋼製支保工の軸力、吹付けコンクリート応力、ロックボルト軸力、地中変位等を測定した。

図-4に鋼管の曲げひずみ計の配置図を示す。

表-2 施工仕様

項目	施工仕様
打設長	12.92m
鋼管長	9.87m
注入長	9.87mまたは12.92m (埋設管部分からの注入した場合)
シフト長	9.0m
打設本数	21.5本(21本と22本の千鳥打設)
打設範囲	120°
打設角度	9°
注入材料	シリカレジン(平均注入量250kg/本) 薬液(平均注入量950kg/本)

(d) 鋼管の曲げ挙動

図-5に、切羽の進行に伴う鋼管の曲げ挙動を示す。ただし、本工法は鋼管の口元が地山内部にあり絶対変位を測定することが困難であったため、先端部のたわみ、たわみ角を0と仮定して図化している。鋼管の変形は切羽の位置によって次のように変化する。

- ①切羽が鋼管の手前端部に近づくると深部によって支持される片持ち梁として働く。
- ②鋼管の手前端部に到達するとその傾向がより明瞭となる。
- ③切羽が鋼管直下に入ると鋼管中央部が下に凸の形状となる。
- ④切羽がさらに先端部に近づくると全体の曲げモードが前方に向かって移動する。

また、曲げ挙動には次のような特徴が見られた。

- ①鋼管の変位は、切羽から45°（6m程度）の範囲に生じる。
- ②切羽から2～3mの位置に変曲点があり、ゆるみ荷重の作用範囲と切羽前方の仮想支点の範囲の境界を示すものと考えられる。

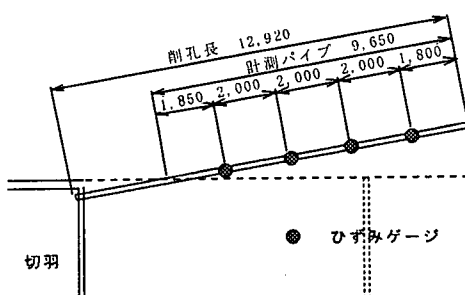


図-4 曲げひずみ計配置図

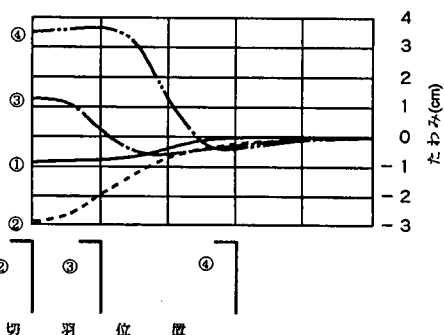


図-5 鋼管の曲げ挙動

3・2 高の峰トンネル

(a) 地形・地質

トンネルの地質は泥岩および巨礫を含む砂礫層であり、坑口部では人頭大の玉石が多数混入する崩積土がこれらを被覆する。崩積土のマトリックスは軟弱なシルトであり、玉石は一軸圧縮強度が1000kgf/cm²程度で最大径で1m以上のものを含む。坑口斜面はトンネルとほぼ直交する40°の斜面となっている。また、本トンネルは二期線の施工であり、断面内に避難坑を含んでいる。

図-6に、坑口部の地質縦断面図を示す。

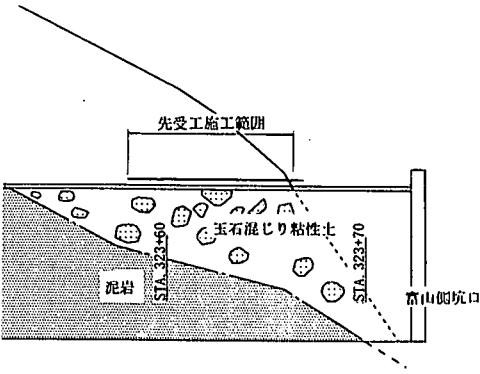


図-6 坑口部地質縦断面図

(b) 施工の概要

施工箇所が坑口部であり、鋼管はトンネル掘削面外周部にトンネルと平行に施工している。施工縦断面図および施工横断面図を、図-7に示す。また、施工仕様は表-3のとおりである。

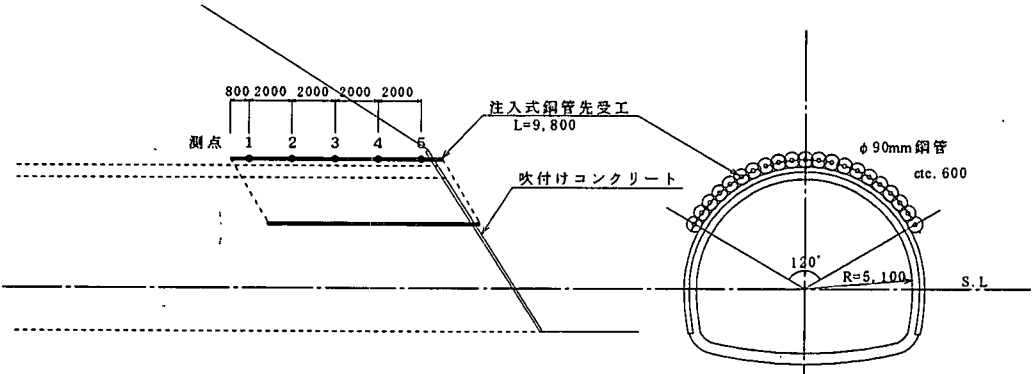


図-7 施工断面図

(c) 計測器の配置

天端に打設した鋼管内部に曲げひずみ計（φ40mmのパイプにひずみゲージを取付けたもの）を設置し鋼管の曲げ挙動を測定した。図-7に鋼管の曲げひずみ計の配置図を示す。

(d) 鋼管の曲げ挙動

鋼管の曲げ応力度の経時変化を図-8に、また、切羽の進行と鋼管の曲げ変形の関係を図-9に示す。なお、図は先と同様に鋼管の先端部のたわみ、たわみ角を0と仮定して描いたものである。

表-3 施工仕様

項目	施工仕様
打設長	9.8m
鋼管長	9.87m
注入長	9.8m
打設本数	21本
打設範囲	120°
注入材料	シリカレジン

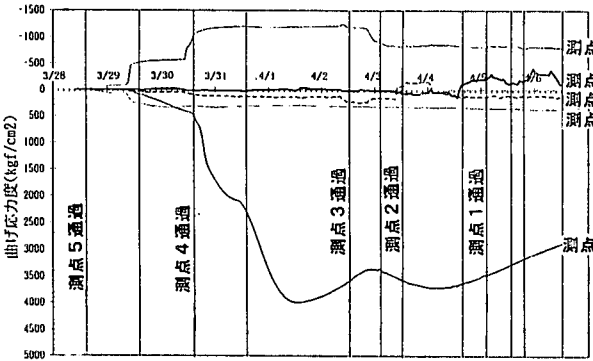


図-8 曲げ応力経時変化図

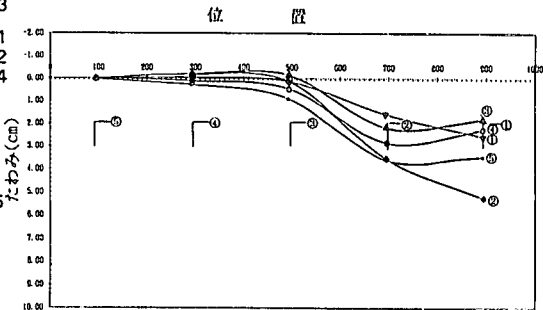


図-9 鋼管の曲げ挙動と切羽位置の関係

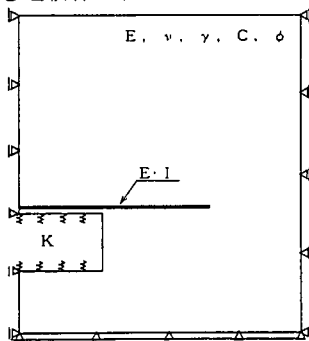
曲げ変形は以下のように進行する。

- ①切羽掘削開始時には、手前側がたわみ片持ち梁として作用する。その時の影響範囲は切羽前方およそ4mの位置である。
 - ②切羽がさらに進行し鋼管の中央部に近づくと、鋼管手前側よりも切羽直上部でたわみは大きくなり、下に凸の曲げ形状となる。
 - ③さらに切羽が進行しても曲げモードに大きな変化はないが次第に先端部にまでたわみが生じていく。
- 上記の挙動において、中間部で曲げが大きく先端側の変位が比較的小さいのは、坑口斜面の表層部とやや深部の地山の安定性の相違による可能性が考えられる。

4. 地山による拘束に関する考察

注入式鋼管先受工法の設計・研究においては、従来、有限要素法等による連続体としてのモデルや、地山の拘束をバネに置き換えた平面骨組モデルが用いられている。切羽前方の鋼管の挙動に関してはこれらのモデルの違いにより影響範囲や鋼管に生じる曲げモーメントに大きな差異が生じる。二次元縦断面方向のモデル化の例を図-10に示す。

①連続体モデル



②平面骨組モデル

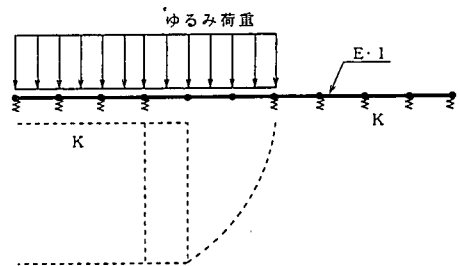


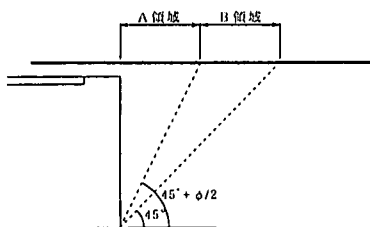
図-10 鋼管の軸方向の挙動に関するモデル化の例

切羽前方の変形に着目すると、①のモデルによる解析の場合、変形は比較的広い領域に生じ、その大きさは主に地山の弾性係数によって支配される。実際に、未固結地山である木崎トンネルの場合に先行変位が踏前より45°を超える6m以上離れた位置にまで発生しているのは、このような連続体としての挙動が表れているものと推定できる。一方、粘着力の乏しい地山、例えば砂質地盤や亀裂性の岩盤においては、②のモデルのようなゆりみ荷重による変形が卓越するものと思われる。しかし、実際には両者の複合した変形が発生するため、地山性状や期待しうる注入の効果によって解析モデルを選択する必要があると考えられる。実際に設計を行う上で、①のモデルを選択した場合、掘削箇所のゆりみの評価が難しく、現状では先受けの効果を設計に反映しきれない問題点がある。一方、②のモデルについては、解析自体が容易で実務上有効な手法ではあるが、荷重とバネの設定方法が確立されておらず、実際の変形と解析結果が一致しない問題点がある。①については実験、解析の両面からのアプローチを実施しているが、ここでは、現状の設計実務面におけるパラメータの検証を行うことを目的として、②のモデルを用いて、ゆりみ荷重に加えて、木崎トンネルの計測結果に見られる連続体的な変位を考慮した検討を行う。

平面骨組解析のモデルについては次の仮定を行った。

- ①切羽前方の地山の拘束を、切羽踏前から45°+φ/2までの範囲をゆりみ領域（A領域）、45°までを連続体的な変形領域（B領域）として分けて考える（図-11）。

③ B領域については、ゆるみ荷重は作用しないが掘削の影響により地山自体の沈下が生じる範囲であり、鋼管を強制的に変形させる状態となっているが、地山の沈下量は地山の弾性係数と相関を持つと考えられることから、これに相当するバネを作用させることで評価する。また、その際に作用する荷重は最大値をA領域のゆるみ荷重とする三角形分布と仮定する。



以上の仮定に基づき、図－１２に示す鋼管のモデル化を行い、木崎トンネルの計測結果（図－５の③の切羽前方の曲線）を用い、たわみ形状をバネ値を変化させることによってシミュレーションすると、図－１３のようになる。このバネ値は地盤反力係数と直接的には関係ないが、計測例を増やして整理すれば地山の弾性係数や粘着力等と相関性を示すものと考えられる。

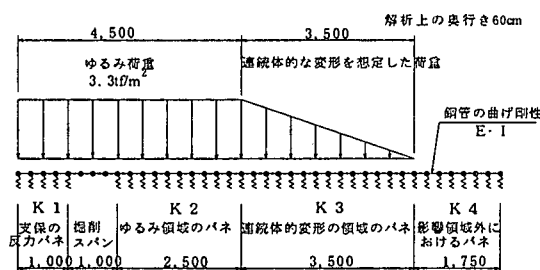
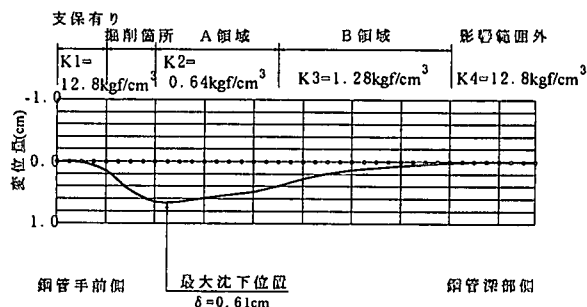


図-12 解析モデル



5. まとめ

改良型注入式鋼管先受工法において、鋼管の曲げ挙動の計測例から、以下のことが分かった。

- ①鋼管は切羽の移動に伴い支持（仮想支点）条件が変化する。すなわち、切羽が鋼管より手前側に位置する間は地山深部側に支点があり、片持ち梁として働く。また、鋼管の直下に切羽が入ると既に施工された支保によって手前側端部が支持され、鋼管の中央部付近にたわみが生じる。
- ②鋼管の変形は、切羽の前方最大 8 m 付近にまで生じており、地山の連続体的な変形にも影響されていると考えられる。また、切羽より 2～3 m 離れた位置に、ゆるみ荷重の作用する範囲と鏡前方の仮想支点の境界と想定される鋼管の変曲点が認められる。
- ③設計解析のためのモデル化の一手法として鋼管を弾性支承上の梁とする平面骨組モデルがあるが、従来のゆるみ荷重だけでなく、切羽前方の連続体的な変位についてもバネ支承で評価する方法が考えられる。ただし、計測例も少なくさらに検討が必要である。
- ④坑口部に施工した例では、鋼管の変形が地形的な要素や地質構成の変化により影響を受けやすく、設計上、これらを考慮する必要があるものと思われる。

6. 参考文献

- 1) 駒村, 杉浦, 小原, 川端: 低土かぶり土砂地山における改良型の注入式鋼管先受工法の適用 (その 2. 計測結果と効果の評価), 第 51 回土木学会年次学術講演会