

都市NATMによる長田トンネルの施工

神戸第一建設部 山手工事事務所 関 本 宏
神戸第一建設部 山手工事事務所 森 岡 登
神戸第一建設部 工事第一課 佐 原 毅

要 旨

神戸市道高速道路2号線（神戸山手線）の長田トンネルは、住宅密集地直下の土かぶりの小さい、含水未固結地山を対象としており、都市NATMのトンネルとして、きわめて厳しい条件下の施工となっている。

NATMは、もともと山岳トンネルの工法として技術開発されたものであるもので、補助工法の効果、施工性、適用性などには、いまだ解決しなければならない多くの課題を残している。

そこで、長田トンネルでは、坑口から約170mを「試行区間」と位置付け、掘削に伴う地表面への影響抑制、切羽の安定を目的とした様々な補助工法を試行して、補助工法の効果などを確認、検証し、より合理的、効率的なトンネル施工を実施することとした。

本稿は、試行区間におけるトンネルの施工やその計測結果による地山物性や変位挙動の把握などによる補助工法の適用性、妥当性の評価、さらには、試行区間以降の一般区間へのフィードバックの考え方について、その概要を報告するものである。

キーワード：都市NATM、補助工法

はじめに

神戸市道高速道路2号線（神戸山手線）の長田トンネルは、住宅密集地である丘陵地下をNATMで施工する延長約960mの南北線分離の併設した2車線道路トンネルである。

トンネルの施工は、含水未固結地山を対象としているうえに、土かぶりの小さい住宅密集地直下を通過するというきわめて厳しい条件下であるため、特に地表面への影響抑制、切羽の安定を確保することが重要であり、補助工法として、先受け工や排水工が必要となる。

そこで、坑口から約170mを「試行区間」と位置づけ、様々な補助工法を試行して、補助工法の効果、施工性、適用性などを確認、検証し、より合

理的、効率的なトンネル施工を実施することとした。

本稿は、試行区間におけるトンネルの施工やその計測結果による地山物性や変位挙動の把握などによる補助工法の適用性、妥当性の評価、さらには、試行区間以降の一般区間へのフィードバックの考え方について、その概要を報告するものである。

1. トンネルの概要

トンネルの断面形状を図-1に示す。標準部は、一方向2車線道路の断面で、掘削幅13~14m、掘削断面積103~115m²である。出入路の分合流車線により、坑口から約90m区間は拡幅部となり、最大掘

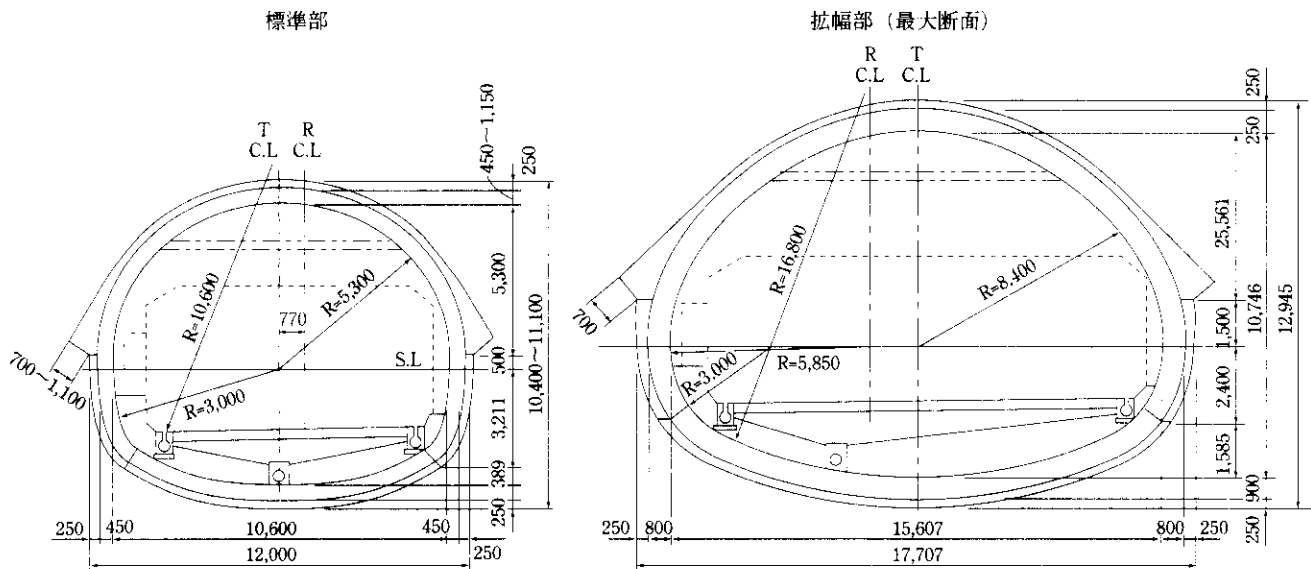


図-1 トンネルの断面状況

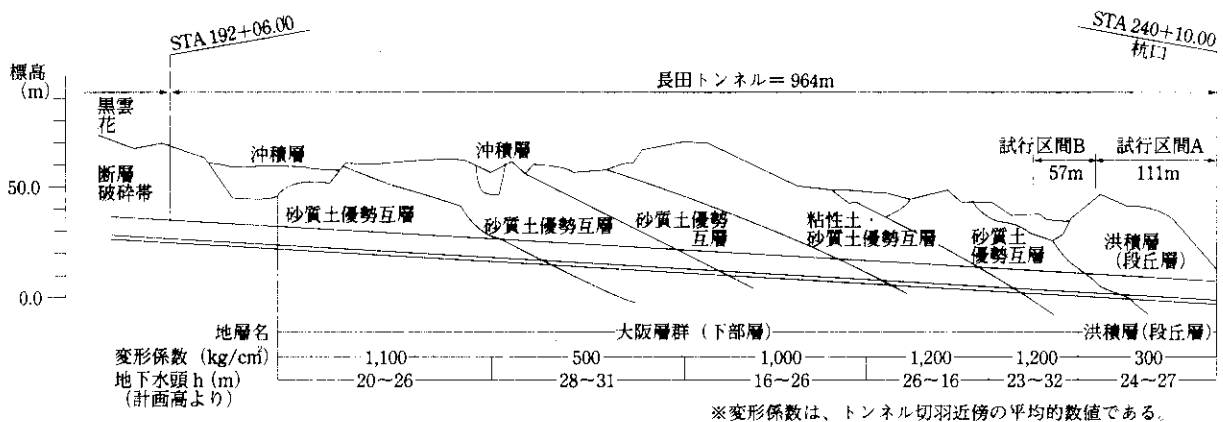


図-2 地質縦断図 (南行)

削幅19m、掘削断面積186m²の大断面である。

南行、北行トンネルは、約20mの離隔で併設し、道路計画高さで約7mの縦断差で南行が低い位置にある。

工事は、工区南端に南北線兼用の立坑 (深さ15~20m) を設け、湧水対策から、道路計画高さの低い南行を先行させて掘進している。

なお、トンネルは、周辺民家での井戸水利用状況から、将来的に地下水位を回復させるために、全周に防水シートを布設する防水型トンネルとしている。

2. 地形、地質条件

地質縦断図を図-2に示す。トンネルは、標高10~80mのなだらかな丘陵地下を北西~南東方向に縦断する線形で計画されている。地表部は、過去の沢地形の埋立て造成などにより、ほとんどが住宅地となっており、ガス管などの埋設管が多い。土かぶり厚は、坑口付近の極端に小さい区間 (3~6m) を除いても、15~48m (平均約30m) と小さい。

地質は、礫質土、砂質土、粘性土の互層からなる第四紀の大坂層群下部層および更新世後期の段丘層、沖積層、盛土層から構成される。トンネル

の掘削対象となる地質は、坑口から約140m区間が段丘層、それ以降の区間が大阪層群となる。

段丘層は、特に固結度が小さく、変形係数 $E=300\text{kgf/cm}^2$ 程度である。大阪層群は、変形係数 $E=500\sim 1200\text{kgf/cm}^2$ 程度で、粘性土は、比較的固結度が大きい。大阪層群の地層の走向、傾斜は、南～南西に約 20° で傾斜しており、トンネル切羽に対して流れ盤となっている。沖積層は、N値1～10、変形係数 $E=100\text{kgf/cm}^2$ 以下と軟弱であり、層厚は、5～10m程度である。

地下水の状況は、礫質土、砂質土が多量の地下

水を貯留する滞水層となっており、トンネル計画高より16～32m上部に地下水位面が存在する。地山の透水係数は、 $10^{-3}\sim 10^{-5}\text{cm/sec}$ 程度であるが、事前の切羽湧水予測では、 $100\sim 1300\text{l/min}$ の多量湧水の発生が予測されている。

3. 試行区間の計画

試行区間の検討フローを図-3に示す。

試行区間は、土地利用状況、地形、地質条件ならびにトンネル断面形状を踏まえて、さらに区分

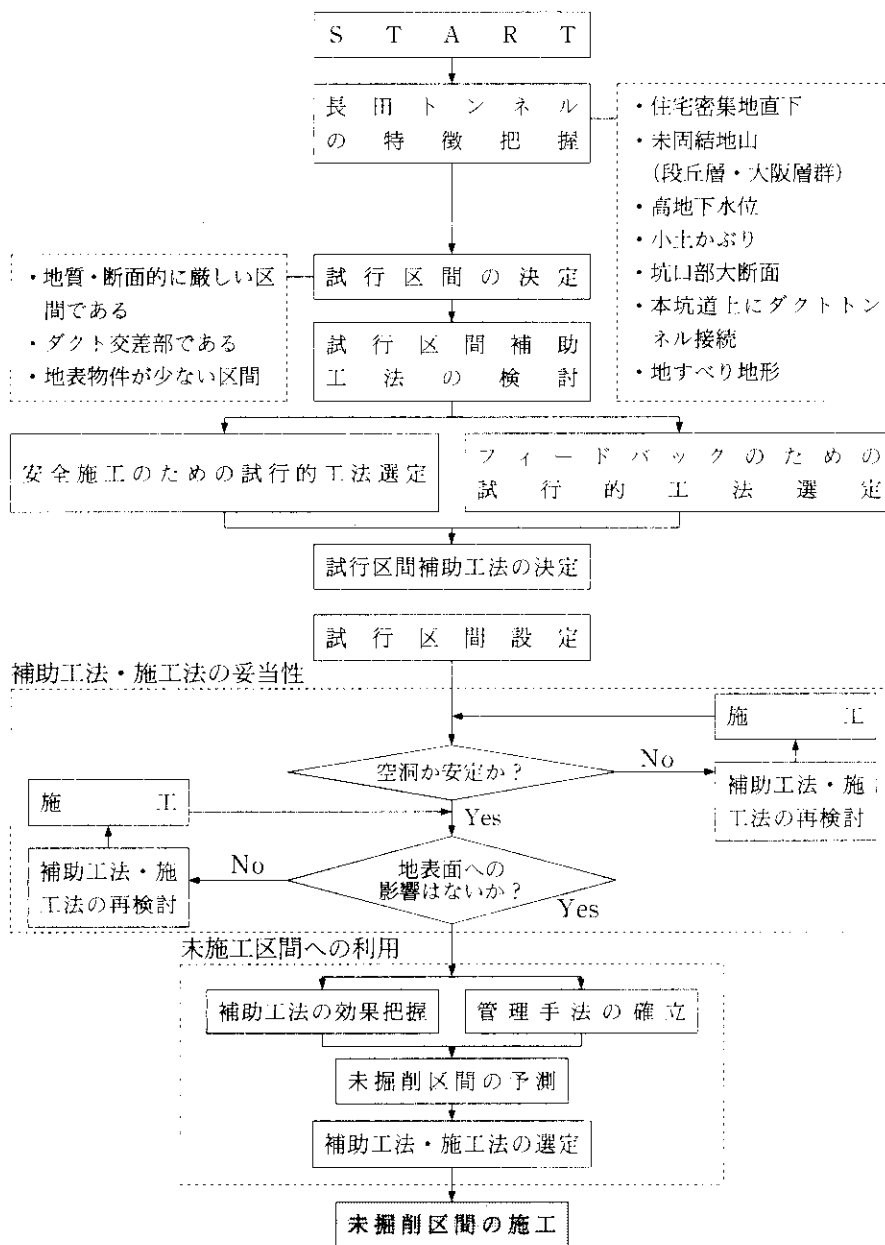


図-3 試行区間の検討フロー

し、試行区間AおよびBとした。試行区間の後半部であるB区間は、標準断面形状で大阪層群を掘削対象とした一般区間の典型となるものであるため、試行区間Aで選定した工法の検証区間と位置付けた。

工法検討に際しては、上半先進ベンチカット工法を前提に、地表面への影響抑制、切羽の安定を確保すべく、長尺先受け工などを用いた剛な支保構造の採用ならびに脚部の補強、さらには、上半仮閉合による早期の断面閉合を基本とした。

試行区間の補助工法の選定にあたっては、土かぶりの小さい、含水未固結地山におけるトンネル施工時の地山挙動を想定し、類似のトンネルの施工実績などより、表-1に示す補助工法の組合わせを検討した。

表-1 補助工法とその目的

| | 補助工法 | 目的 |
|-----|-----------|---|
| 上半 | 注入式長尺先受け工 | ・切羽前方での先行沈下を含む沈下抑制 ・天端および鏡地山の安定性向上 |
| | プレロードシェル工 | ・先受工効果の向上（鋼製支保工による先受け工作用荷重の早期支保） ・支保工効果の早期発見 |
| | 脚部補強工 | ・支保工脚部地山の地耐力向上（共下がり現象の防止） |
| | 鏡補強工 | ・鏡地山の安定性向上 |
| 下半 | 側壁補強工 | ・側壁地山の安定性向上 |
| その他 | 水抜き工 | ・切羽湧水の抑制 |

4. 試行区間の補助工法

試行区間の補助工法の具体的な選定工法を図-4、図-5に示す。

4-1 長尺先受け工

長尺先受け工は、工法の汎用性、作業時の地表面への環境影響、削孔能力、削孔精度、経済性などを勘案して、補助工法の専用機による注入式長尺先受け工（トレビチューブ工）とした。

先受け工の打設形状、打設範囲、鋼管径、打設間隔、打設長などは、類似のトンネルの施工実績やパイプルーフ工法の設計手法を参考にしたが、

試行区間では、鋼管径、注入材の種類、打設長、先受け長を比較検討することとした。

一部区間に鋼管補強高圧噴射式長尺先受け工（トレビジェット工）を選定したのは、換気立坑接続部の特殊性とトレビチューブ工との比較検討のためである。

4-2 支保工補強工

鋼製支保工による支保効果を早期に確実に確保するために、支保工建込み直後に地山にプレロードを作用させ、先受け鋼管を確実に支持できるプレロードシェル工を採用した。

4-3 脚部補強工

テルツァギーの緩み土圧を基に、天端と脚部の支持力と沈下量を検討すると、天端と脚部の共下がり現象が予測されたので、脚部補強工事として実績のあるジェットグラウト工とウレタン注人工を比較検討した。

脚部補強工の補強範囲などの仕様は、脚部を現地山と改良地山の複合地盤と仮定して設定した。ジェットグラウト工の場合は、改良体径60cm×2本、ウレタン注人工の場合は、支保工設置盤から厚さ1mの注入改良が必要であった。

4-4 鏡補強工

切羽の安定には、前方地山のすべり面を対数らせん曲線で近似して切羽の上留め圧力を算定する「村山の考え方」から、砂質土の場合、35~40tf/m程度の鏡押え力が必要なことから、長尺鏡ボルト工と鏡ジェット工を選定した。

鏡補強工の打設本数などの仕様は、鏡ボルトの引抜き抵抗力、鏡ジェットの改良体せん断強度を基に設定した。鏡ボルトの場合は、2.5~3.0m²当たり1本程度、鏡ジェットの場合は、改良体径60cmで1断面当たり5~7本程度が必要であった。

4-5 下半側壁補強工

下半側壁地山の安定には、脚部地山の地耐力不足やFEM解析での局所安全率が1.0以下になることから、側壁ジェット工やウレタン注人工が必要となった。

側壁補強工の改良範囲などの仕様は、下半側壁地山のくさび土塊の安定性を改良体のせん断強度

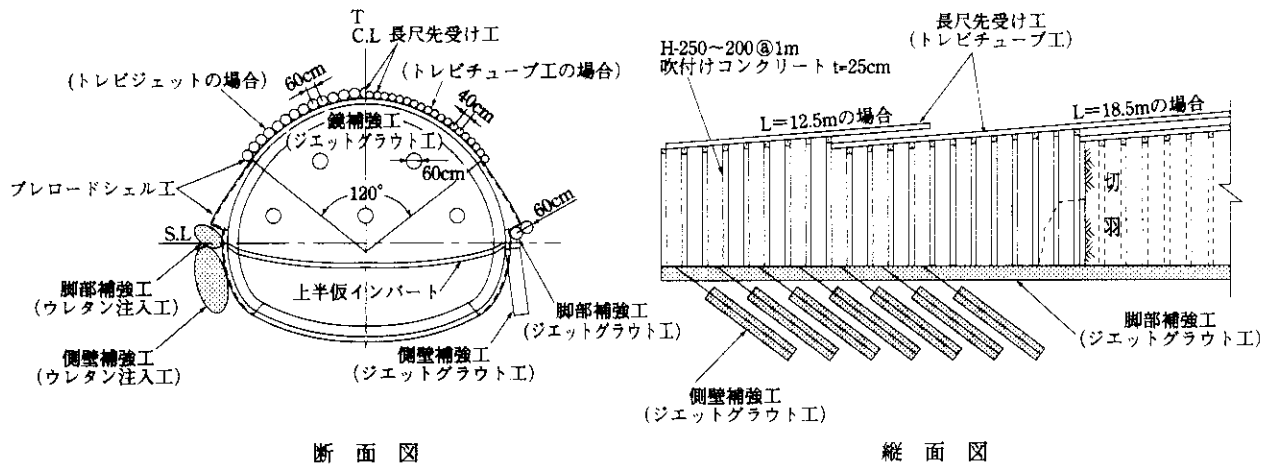


図-4 補助工法

(平面図)

| | | | |
|----------------------|-----|----------------|-----|
| 換気立坑 | | 坑口 No.240+10.0 | |
| 60m | 24m | 34m | 32m |
| 標準断面 | | 拡幅断面 | |
| 試行区間B (民家影響区間) L=60m | | 試行区間A L=111m | |

| 測点 | No. 232 | No. 233 | No. 234 | No. 235 | No. 236 | No. 237 | No. 238 | No. 239 | No. 240 |
|----------|---------------------------------|-----------|--|--|---|---|---|---------|---------|
| 土かぶり (m) | 27~25~34 | | | 34~36 | 36~26 | 26~14 | 14~6 | | |
| 地質状況 | 盛土・沖積層, 段丘層, 大阪層群 Og・Os・Oc (切羽) | | | 段丘層 Dg, Ds, Dc | | | | | |
| 補助工法 | 上 | 先受工 | トレビチューブ工 L=18.5m, φ=139.8mm ピッチ40cm, 34本/断面, 12m/シフト | トレビチューブ工 L=18.5m, φ=139.8mm ピッチ40cm, 34本/断面, 12m/シフト | トレビジェット工 L=12.5m, φ=114.3mm ピッチ60cm, 27本/断面 8m/シフト | トレビチューブ工 L=12.5m, ピッチ40cm, 44本/断面, 8m/シフト | パイプ工 L=25.0m, φ=609.6mm ピッチ75cm, 26本/断面 | | |
| | | ウレタン注入 | ウレタン注入 | セメントミルク注入 | セメントミルク2次注入 | ウレタン注入 | セメントミルク注入 | | |
| | 半 | 支保工補強 | プレロードシェル工 | | プレロードシェル工 | | | | |
| | 脚部補強 | 脚部ジェット工 | 脚部ジェット工 | 脚部ウレタン注入工 | 脚部ジェット工 | | | | |
| | 鏡補強 | (施工状況で判断) | (施工状況で判断) | 鏡ジェット工 | (施工状況で判断) | 長尺鏡ボルト工 | | | |
| 下半 | 側壁補強 | (施工状況で判断) | | (側壁ウレタン注入工) | | 側壁ウレタン注入工 | 側壁ジェット工 | | |
| 目的 | ・試行区間A結果のフィードバックによる実証 | | ・トレビチューブ L18.5mの 施工性確認 ・先受け長による 効果比較 | ・トレビジェットの効果, 施工性, 適用性の確認 ・脚部ウレタンの効果, 施工性, 適用性の確認 ・脚部ジェットとの比較 ・鏡ジェットの効果, 施工性, 適用性の確認 | ・トレビチューブの効果, 施工性, 適用性の確認 ・トレビチューブ鋼管径, 注入材の比較 ・側壁ウレタンの効果, 施工性, 適用性の確認 ・側壁ジェットとの比較 | ・脚部ジェットの効果, 施工性, 適用性の確認 ・長尺鏡ボルトの効果, 施工性, 適用性の確認 ・側壁ジェットの効果, 施工性, 適用性の確認 | プレロードシェル工の効果確認 | | |

図-5 試行区間の補助工法 (南行)

を用いて算定し、トンネル延長方向2mに1本の割合とした。

4-6 地下水対策工

湧水対策は、公団事業用地内の試行区間Aにおいては、地表からのディープウェルによる排水工

とし、それ以降の区間は、地表からの施工が困難なため、坑内からの先進水抜きボーリング工を基本とした。

5. 補助工法の評価

補助工法の評価にあたっては、天端、脚部沈下などの坑内A計測と、地表面沈下測定を主体に、計測Bとして、支保工応力、地中変位や地下水位、水圧などを測定した。また、切羽前方の地山挙動の把握のために、坑口からの先行沈下計測や先受け鋼管のたわみ測定を実施した。

なお、試行区間は、土かぶりやトンネル断面形状が変化するため、特に先受け工の評価などでは、トンネルの地表面沈下を予測するリマノフの理論解やFEM解析結果を利用して、計測データを同一条件下で換算比較した。

5-1 長尺先受け工

トレビチューブ工における先受け鋼管の径、注入材の違いによる鋼管たわみ量と上半切羽の進行関係を図-6に示す。φ114mmセメントミルクの場合は、たわみが凹形状でたわみ量が最大で24mm発生したが、鋼管の曲げ剛性が約3倍大きいφ139mmウレタンの場合は、比較的平坦なたわみ形状でたわみ量も半分程度に抑えられ、切羽前方の先行変位の抑制に顕著な差がでた。

トンネル天端上方に設置した先行沈下計による天端部の増分沈下量と上半切羽の距離関係を図-7に示す。増分沈下量が最大となる切羽通過時の沈下量は2~4mmと小さいが、相対的に比較す

ると、φ139mmウレタンやトレビジェットの場合は、φ114mmセメントミルクの場合の50~60%の沈下量に抑制できた。

φ139mmウレタン、鋼管長18.5m(ラップ長6.5m)の先受け工の1m掘進時の鋼管たわみの増分

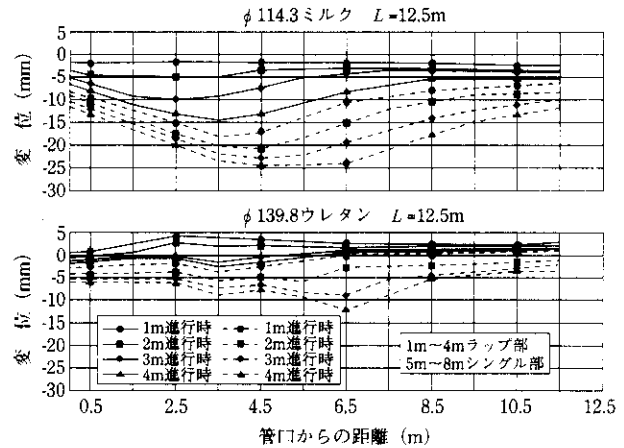


図-6 鋼管たわみ量～上半切羽進行関係図

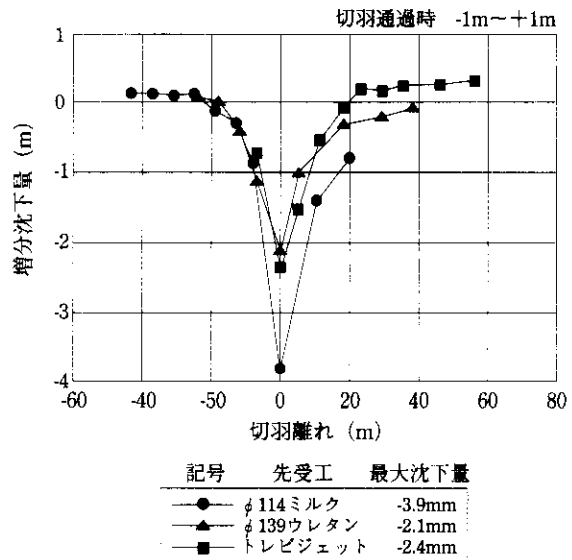


図-7 天端部増分沈下量～上半切羽距離関係図

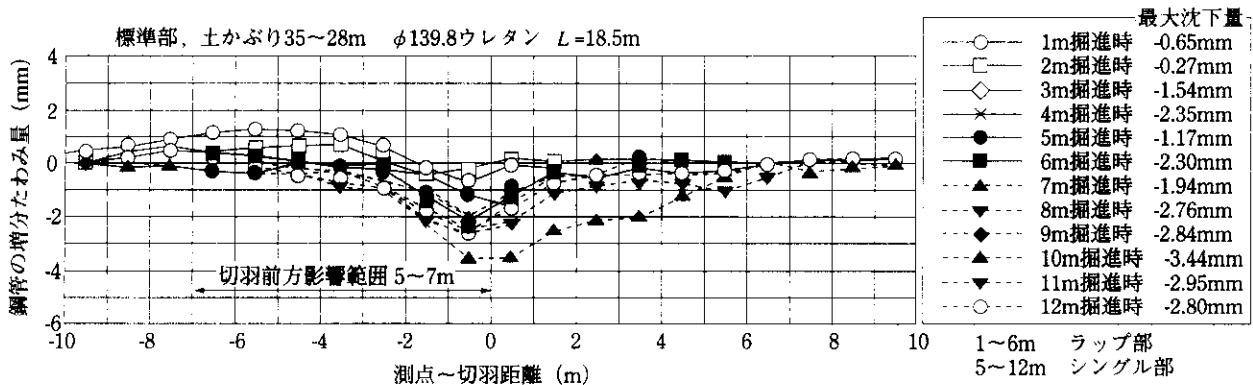


図-8 1m掘進時の鋼管たわみ増分量～上半切羽距離関係図

表- 2 地山改良体の力学試験結果

| | | 圧縮強さ (kgf/cm ²) | 弾性係数 (kgf/cm ²) | 粘着力 (kgf/cm ²) | 内部摩擦 角 (°) |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 現地山 段丘層 | 礫質土 (1~3以下) | 平均 300~400 | | 0.0 | 30 |
| | 砂質土 (1~3以下) | | | 0.0 | 25 |
| | 粘性土 (2~4) | | | 1.0 | 0 |
| ウレタン改良 (礫質土) | 72~102 (平均 86) | 5968~8448 (平均 6705) | 18.8 | 32 | |
| ジェット改良体 (礫混じり砂質土) | σ ₂ 54~92 (平均 69) | 11092~15327 (平均 13803) | 8.8 | 46 | |

段丘層の弾性係数は孔内水平載荷試験結果より

量と上半切羽の距離関係を図- 8 に示す。最大の増分沈下量は、切羽通過時に発生し、鋼管のラップ部を掘進している時の沈下量がシングル部に比べて小さい傾向にある。また、切羽前方の掘削影響は、前方5~7m付近から発生していた。鋼管長12.5m (ラップ長4.5m) の場合とも比較したが、各掘削段階での先受け工の余長が大きいこともあって、鋼管長18.5mの場合の方が切羽前方の先行変位の抑制に効果があった。

先受け工の効果には、鋼管の剛性だけでなく、鋼管周辺の注入材による地山改良による効果も加わっていると考えられる。そこで、試行区間における先受け工施工後の地山改良体について力学試験を行った。その結果を表- 2 に示す。礫質土や礫混じり砂質土層から試料を採取したが、現地山に対して強度、変形特性およびせん断定数とも大幅に向上していた。先受け工は、この地山改良体と鋼管の一体化によって、沈下抑制や天端の安定性確保に寄与していると考えられる。

このような試行区間における先受け工の鋼管径、注入材の種類、打設長、先受け長などの比較検討を踏まえて、先受け工の沈下抑制効果の相対評価を以下のように効果率で総括した。

<先受け工の仕様>

φ114mmセメントミルク：φ139mmセメントミルク：φ114mmウレタン：φ139mmウレタン：トレビジェット=100：110：121~131：131~138：128

<鋼管径>

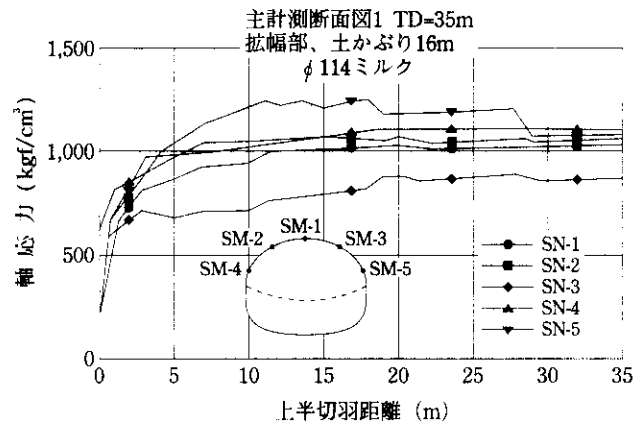


図- 9 鋼製支保工軸応力～上半切羽距離関係図

φ114mm：φ139mm=100：110

<注入材の種類>

セメントミルク：ウレタン=100：120

5-2 支保工補強工

鋼製支保工の軸応力と上半切羽の距離関係を図- 9 に示す。軸応力は、支保工建込み後の早い段階 (上半1m進行時) で約600kgf/cm²発生しており、上半収束値の60%を超える大きな値であった。また、この段階での天端の沈下量は、約2mmであり、掘削後の沈下量の10%程度であった。

これは、先受け工に作用している切羽前方および切羽開放時の荷重が、プレロードシェル工を介して、鋼製支保工に確実に伝達されているとともに、早期に支保による内圧効果が発生しているものと考えられる。プレロードシェル工は、本来の支保効果の向上だけでなく、先受け効果にも寄与しているといえる。

5-3 脚部補強工

脚部補強工の現地平板載荷試験結果を図-10に示す。脚部ジェット工やウレタン注入工による補強で、脚部の地山の極限支持力は、現地山の1.4~2倍に向上している。また、地盤反力係数は、脚部の作用荷重150~250 t f/m²に対して、現地山の約4倍に向上している。

脚部の沈下量と天端の沈下量の関係を図-11に示す。天端沈下量に対する脚部沈下量の比率は、0.5~0.8の範囲にあり、当初予測された未固結地山における共下がり現象は、抑制されている。

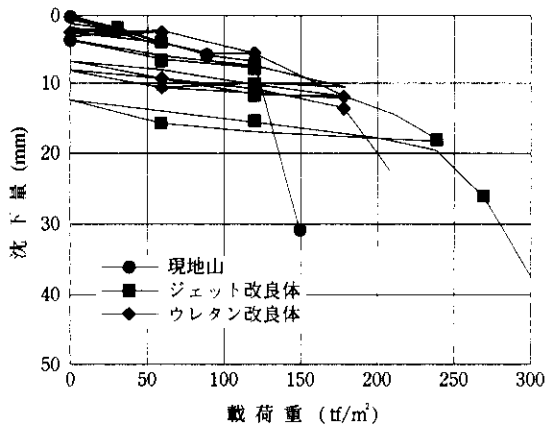


図-10 脚部補強工の平板載荷試験結果

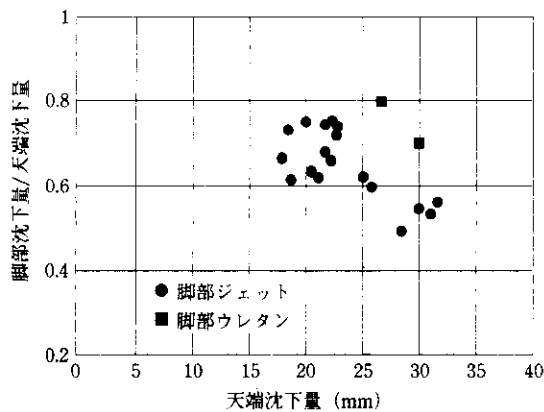


図-11 脚部沈下量～天端沈下量

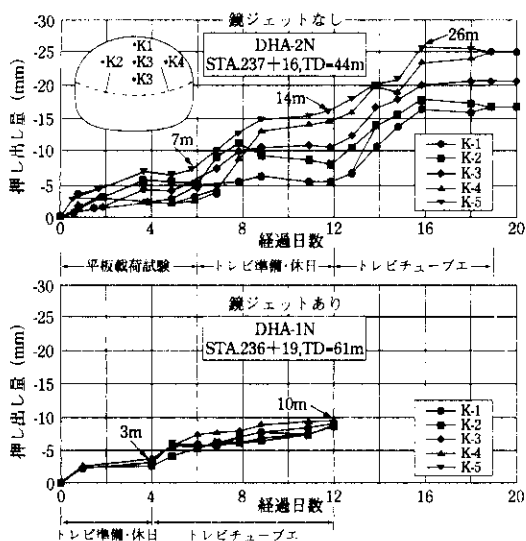


図-12 切羽押し出し量

5-4 鏡補強工

鏡補強工の有無による切羽の押し出し量の測定結果を図-12に示す。押し出し量が60%程度に抑制されるとともに、切羽全面に均一化している。

砂質土や礫質土の場合、湧水や見かけの粘着力

の低下（排水工法による含水比の低下）に伴う崩落、崩壊現象が予測されるが、試行区間においては、鏡ジェット工で抑止できている。

5-5 地下水対策工

切羽湧水は、試行区間Aのディープウェル区間で最大で20~30 l/min程度であったが、それ以降の区間で、局所的に150 l/min発生した。地下水は、大阪層群の礫質土や砂質土に多く貯留されているようだが、地層が切羽に対して流れ目であることから、上半、下半切羽からの斜め下向きのバキュームを併用した水抜きボーリングが有効であった。

6. 一般区間の補助工法

一般区間の工事管理フローを図-13に示す。

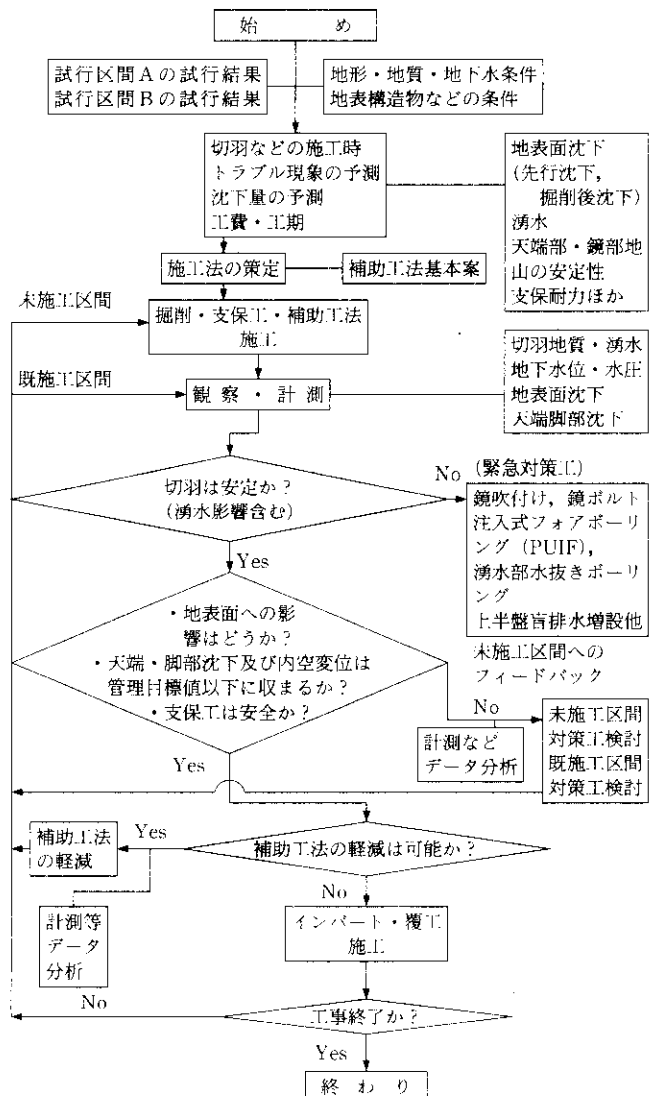


図-13 一般区間の工事管理フロー

補助工法の基本案は、当該地山の地形、地質、土かぶり、地下水条件や地表物件の制約条件と湧水状況、切羽、天端、脚部の安定性を基に、試行区間の各種補助工法の試行結果による地表面への影響予測を勘案して策定したものである。

特に、地表面への影響予測は、試行区間での計測結果や試験結果をフィードバックさせた特性曲線法およびフレーム計算モデル法によるもので、地山の変形係数、土かぶり、補助工法の仕様や組み合わせなどのパラメータスタディによる定量的な沈下予測である。

さらに、トンネル掘進の着手後においては、切羽観察、掘削状況、地表面沈下測定、内空変位計測などにより、トンネル構造の安定性を常に確認するとともに、以降の区間の補助工法の増減を踏まえて分析、検討し、より合理的、効率的な補助工法を選定することとしている。

地下水対策工は、当面、地表からのディープウェル工が困難な区間であるので、トンネル坑内の上半、下半切羽からの斜め下向きのバキューム併用水抜きボーリングを基本として、対象とする滞水層の層厚、水位低下の必要量、地山の透水係数、地下水量ならびに水抜き能力などを勘案して、水抜きボーリングの延長、本数などを決めることとしている。

あとがき

長田トンネルは、都市部の極めて厳しい条件下で、山岳トンネル工法であるNATMで施工している。都市NATMは、舞子トンネルを初め、国内でも実績を重ねつつあるが、補助工法の効果、施工性、適用性などには、いまだ解決しなければならない多くの課題を残している。

今回、試行区間の施工で得られた貴重な知見を基に、補助工法の効果を定量的に評価するなどして、より合理的、効率的なトンネルの施工を進めることとしたが、今後も引き続いて同様の取り組みを実施して、都市NATMの技術進歩の一助にしたいと考えている。

最後に、本工事の計画、設計、施工に関しては、「トンネル地盤技術委員会」において、活発な議論と貴重な御意見をいただいた。委員長の櫻井春輔神戸大学名誉教授、作業部会長の谷本親伯大阪大学教授をはじめとする関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中尾、関本、居相、西野：住宅密集地下・含水未固結地山を掘る、トンネルと地下、1999.2.
- 2) 福島啓一：わかりやすいトンネルの力学、土木工学社。
- 3) (社)日本トンネル技術協会：構造物等に近接した山岳トンネルの設計施工に関する研究報告書、平成4年3月。