

長尺先受け工法の設計、施工法に関する提案 Suggestion on the design and construction methodology of umbrella method

青野 宏*・亀山 寿仁*・原田 浩史**・松田 昭**・青木 俊彦**
Hiroshi AONO, Toshihito KAMEYAMA, Hiroshi HARADA, Akira MATUDA, and Toshihiko AOKI

“Pre-reinforcement behind the face” using long steel pipes and consolidations, known as umbrella method, is a technique which has been widely used in the last few years, since the tunnel has to be constructed nearby urban area where the environment protection is severely restricted. Although the fact, we have had few data regarding the method and haven’t grasped the real effect of it yet.

This paper presents some notes of TREVITUB method, one of the umbrella method, by adapting it to the small overburden and loose soil tunnel construction. Moreover, focusing on the behavior of the steel pipes, the authors discuss about surcharge on the pipes and the design model of the method.

Keywords: umbrella method, TREVITUB method, small overburden excavation,
loose soil excavation, face stabilizing method

1. はじめに

舞子トンネルは、掘削断面積が 150 m^2 に及ぶ全長 3.3 km の片側3車線の双設道路トンネルである。4工区のひとつである北工区においては、未固結地山の施工となるため切羽の安定性を考慮して主に中壁分割工法(CD工法: Center Diaphragm)を用いたが、4～7mの低土被りとなる中学校グラウンド直下の200m区間(図-1)では、近接する学校舎に及ぼす影響を考慮して、長尺先受け工法(トレビチューブ工法)を採用した(図-2)。

設計の面からは、長尺先受け工法には梁としての効果と鋼管とグラウトによるアーチ形成の効果が期待されている。その効果については、室内模型実験¹⁾、有限要素法による解析^{2) 3)}、現場計測結果^{4) 5) 6)}により報告されているが、アーチとしての評価方法や作用荷重の取り扱い等明らかにされていない点が多く、確立



写真-1 トレビチューブ専用削孔機

* 正会員 本州四国連絡橋公団 舞子工事事務所

**正会員 大成建設(株) 神戸支店 舞子トンネル作業所

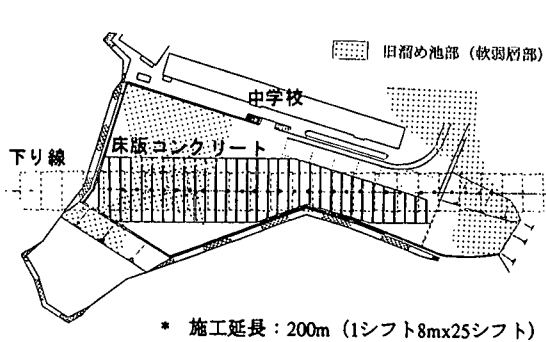


図-1 トレビチューブ区間平面図

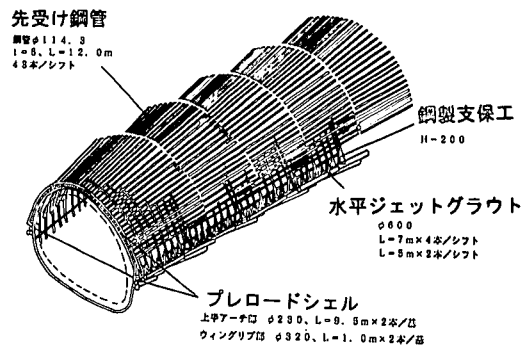


図-2 トレビチューブ工法概念図

された設計方法が存在しないのが現状である。通常、鋼管の設計はパイプルーフの慣用設計方法（以後 慣用法）に準じて行なわれており、先受け効果については有限要素法やシールドで用いられる簡易設計法（村山の理論）が用いられている。

施工の面からは、使用する機械等の差異により、AGF工法等様々な工法がある。今回採用したトレビチューブ工法は専用削孔機械（写真-1）を用いる点で他の工法に比べ、①長尺鋼管（12m）を継手なしで施工可能、②デジタルセンサにて打設角度等が確実に設定可能、③削孔能力（トルク）が高い（アンカドリルの3～4倍、2ブームジャンボの20倍）、の特徴を有する。このため、連続する区間を施工する際には、打設精度および施工サイクルの面で優れており、工程的メリットが大きい工法である。

本稿では、現場計測結果に基づいて慣用法の適用性について考察を行い、長尺先受け工法に併用された補助工法の効果を検討しその必要性について提案を行うものである。

2. 地形地質条件

トレビチューブ区間は、地形的に70～120mの標高を有する丘陵地で、谷部と尾根部が入り組んだ地形を呈しており、馬蹄形の急崖、溜め池が連続しているのが特徴である。中学校は、この谷部に位置し、一部溜め池を埋め戻して造成されている。対象地層は、主にシルト分が多くN値10～20程度の洪積砂礫層（以後 一般部）が占めるが、旧溜め池部にはN値10以下の沖せき層（以後 軟弱層部）が分布する。

3. 施工法

3.1 工法の特徴

近接する学校舎への影響を抑制する上で、①鋼管打設時の周辺地山の乱れの排除や最小化、②掘削直後の初期の緩み域の進行の抑制、③支保工脚部の接地圧の低減および脚部地山強度の増加、④下半掘削時の効果的な荷重分散、が重要な課題となった。

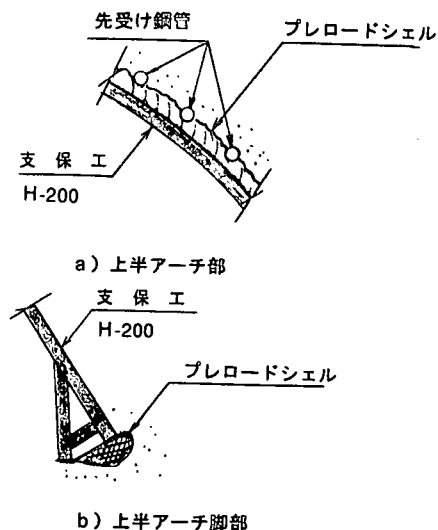
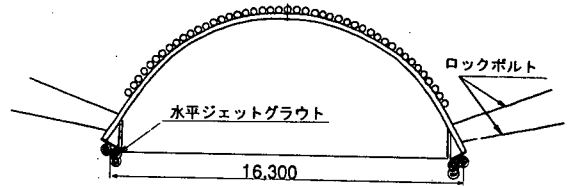


図-3 プレロードシェル工法概念図

これらに対しては、使用機械の改良や工法の工夫により下記の補助工法や方式を併用した。

- ① ダブルロータリー方式の採用
- ② プレロードシェル工法（図-3）の採用
- ③ 水平ジェットグラウトによる上半アーチ脚部地山補強
- ④ ウイングリップ支保工の採用

特に、脚部地山補強については、その工法によっては全体サイクルに影響を大きく与えるため、ここではトレビチューブの専用削孔機を改良し、切羽掘削に先行して鋼管打設時に切羽前方8 m区間の脚部地山補強を可能とした。



3・2 施工法

主な工法について、以下にその目的と施工方法を記す（図-4～6）。

（a）長尺先受け工法

長尺先受け工法は、掘削に先行して切羽前方に鋼管を打設し、鋼管内および地山をグラウトすることにより、トンネル周囲に連続した補強アーチゾーンを形成する工法である。これによって、先行変位（緩み）を抑制するとともに、切羽付近の応力集中を避け切羽前方の健全な地山や切羽後方の既設支保工に荷重を分配することを目的とす

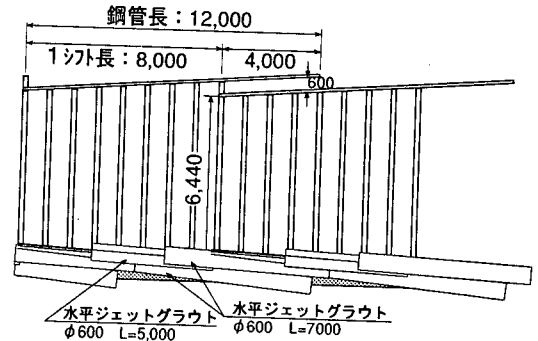


図-4 長尺先受け工法 施工パターン

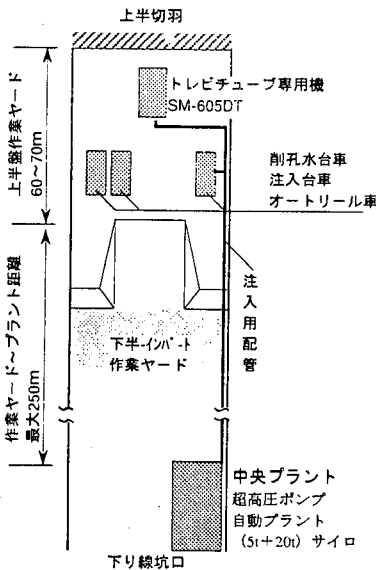


図-5 施工設備配置図

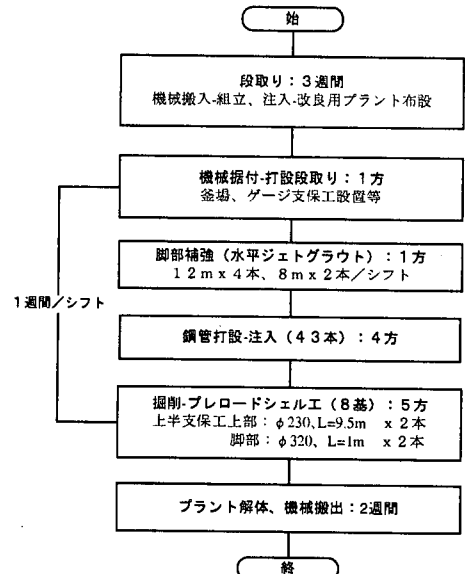


図-6 施工手順

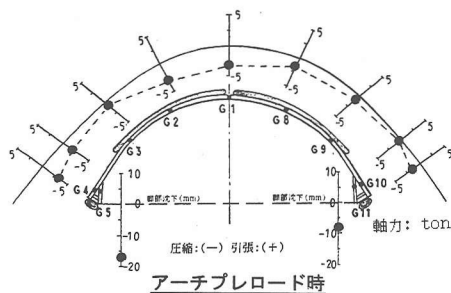
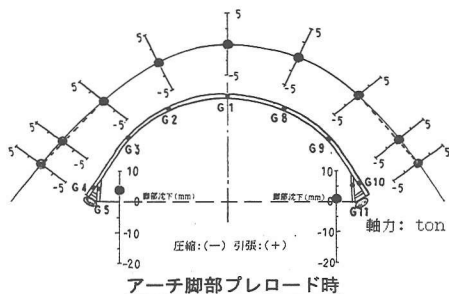


図-7 プレロードシェル施工時の支保工挙動

る。1シフト長は、削孔機械の能力、精度等で制限を受けるが、ここでは施工実績に加え、下半およびインパートの掘削を含めた全体施工サイクルを考慮して、1シフトあたりの掘進長を8m、切羽の安定性の検討より鋼管ラップ長を4mとした。鋼管配置は、施工実績に基づき上半盤センターからおよそ120度の扇形配置(43本@400mm)とした。なお、長尺先受け鋼管内グラウトおよび脚部地山補強のための水平ジェットグラウトについては、坑口に中央プラント(サイロ、超高压ポンプ、自動プラント)を配して、切羽に必要なに応じて圧送するシステムをとった。削孔方式には、ダブルロータリー方式を採用した。同方式では、インナーロードと鋼管が独立に回転やスライドすることが可能であり、これによってスライムや削孔水の内返しを図った。

(b) プレロードシェル工法

プレロードシェル工法は、予め鋼製支保工に脱水性の布ホースを設置し、支保工建て込みと同時にその布ホース内に比較的ゲルタイムの速い(60分)無収縮モルタルを充填する工法である。これにより、掘削直後の吹付コンクリート硬化までの間の初期の時点での地山の緩みを抑制することを目的としている。注入は、支保工脚部下を先行することによって支保工上部のプレロードのために脚部に反力盤を形成し、引続き支保工上部を行ない確実な支保工と地山の接地を図った。

地山、鋼管との接地については、上半部注入時の支保工の挙動より確認される(図-7:アーチプレロード時)。その効果についてはCD区間とトレビチューブ区間の吹付コンクリートと鋼製支保工の荷重分担率の差異からも認められる(図-8)。

(c) 水平ジェットグラウト

水平ジェットグラウトは、上半掘削に先行して支保工脚部地山を補強することを目的としている。同工法の採用にあたっては、試験施工を実施し、施工性および地表面沈下に対する抑制効果を確認した上で、造成径(写真-2)、噴射圧、各シフト当りの必要本数、配合を決定した。配置については、拡大支保工のウイングリブ位置を考慮して、各々の削孔長、改良長、打設角度等を変えて片側3本、計

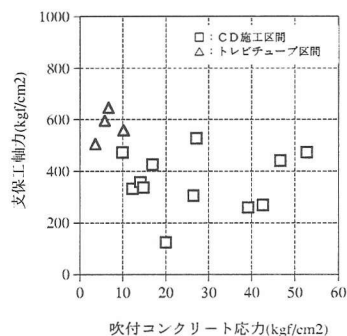


図-8 支保の荷重分担率

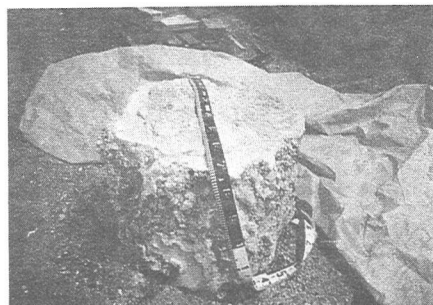


写真-2 水平ジェットグラウトの造成体

6本/シフトとした。なお、噴射圧は35.0 kgf/cm²と定め、設計造成径はφ600とした。

計測結果より、支保工脚部地山の見かけの地盤反力係数（支保工脚部軸力/脚部沈下量）を求めれば、CD区間では10～30 kgf/cm³となっており平板載荷試験結果（20 kgf/cm³）にほぼ符合した結果を示しているが、トレビチューブ区間においては、40～70 kgf/cm³の値が得られている（図-9）。また、下半掘削時の増分沈下の割合は、およそ全沈下量の30%程度であり、CD区間の40～50%に比べ小さくなっており、脚部補強の効果が認められる（図-10）。

4. 工法の効果に関する考察

4・1 沈下傾向

(a) 一般部の弾性的な沈下分布

一般部においては、切羽の自立性も良く、一次閉合までの累積地表面沈下は30 mm以内に収まっており、校舎（最大沈下量0.5 mm）には影響は認められなかった（図-11）。地表面沈下の横断方向の分布は、天端直上から離れるに従い急激に小さくなっており、設計緩み域（Terzaghiの式： $4.5 + \phi/2$ ）に対してその範囲は80%以下となった。トンネル掘削に伴う先行変位率は20～30%程度で、切羽通過後概ね1Dで沈下は収束に至っている（図-12）。これらは、事前に実施された断面2次元弾性FEM解析結果（長尺先受け効果は地盤剛性を高めることで評価した）に符合した傾向で、トンネル周辺地山の挙動は巨視的に弾性範囲内にあり、緩み域の拡大等は発生しなかったと考えられる（図-13）。

(b) 軟弱層部の沈下傾向

軟弱層部は、地下水が存在し、掘削にともない切羽が手前に押し出してくるような状態にあり、一次閉合までの累積沈下量は120 mmを越えた。地表面沈下の影響範囲は、切羽前方に0.75 Dと一般部に比べ大きくなった。これは、内部摩擦角を考慮しない緩み域（Terzaghiの式）にほぼ一致する。また、各シフト掘削ごとの増分沈下分布の重ね書き（図-14）からは、軟弱層部においては一般部に比べ切羽前方の沈下モードが大きくなっていることが認められる。掘削に伴う先行変位は、長尺先受け鋼管の削孔による増分沈下量36 mm（全先行沈下量の45%）を含め80 mmに達した。

(c) 天端および脚部沈下傾向

トレビチューブ区間における

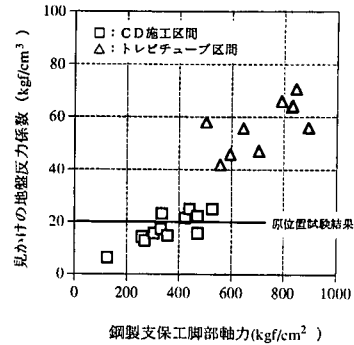


図-9 支保工脚部地山のみかけの地盤反力係数

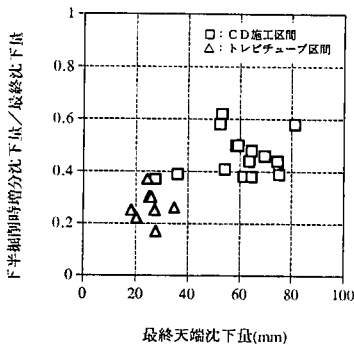


図-10 下半掘削時の影響

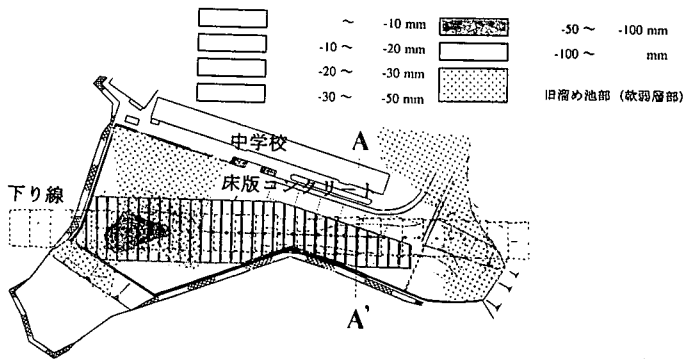


図-11 地表面沈下分布図

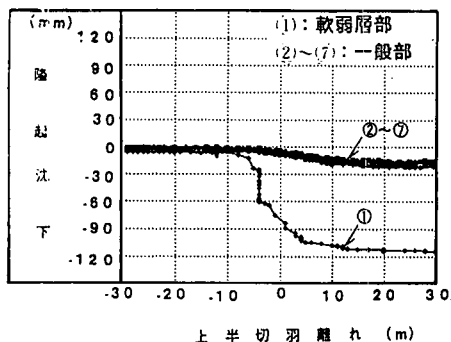


図-1 2 切羽離れと地表面沈下の関係

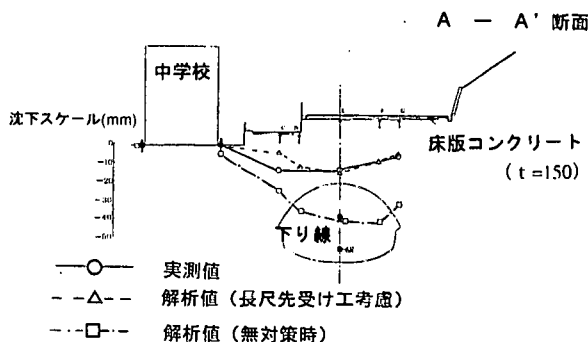


図-1 3 解析値との比較

脚部沈下量は天端沈下のおよそ60～80%占めており、その沈下のほとんどが脚部に発生している(図-15)。この傾向は、CD区間においても認められており、対象が比較的均質な土砂地山で局所的な荷重が発生しにくいこと、断面剛性の大きな支保工を使用していることに起因すると考えられる。

4・2 長尺先受け鋼管の挙動

(a) 切羽近傍での鋼管の挙動

切羽近傍において、掘削時に急激な曲げモーメントの発生が認められた。その後支保工建て込み、二次吹付け、ロックボルト打設においては、大きな増分は認められなかった。次の切羽掘削時には曲げモーメントが反転傾向を示しており、鋼管が連続梁として作用していることがうかがえた。各切羽掘削にともなう曲げモーメントの増分分布の重ね書き(図-16)より、切羽前後方およそ5m範囲外では増分曲げモーメントの発生が認められないことがわかる。この曲げモーメントについては、鋼管がラップする区間に比べラップしない区間が大きくなっている傾向にあるが、曲げモーメント分布の範囲やモードには有意な差異が認められない。また、一般部に比べ軟弱層部の曲げモーメントの方が大きい傾向にあることがわかる。

(b) 弾性床土上の梁モデル

3次元シェル要素を用いた有限要素解析結果からは、長尺鋼管の挙動はアーチ的な効果に比べ梁的な効果が支配的であり、梁モデルを用いた簡易計算手法のなかでは地山を弾性支承とした弾性床土上の梁モデルが3次元シェルを想定した挙動に最も近い結果になったことが報告されている⁷⁾。また、解析的には軸方向の応力分布を考えたときに、軸力、曲げモーメントともに切羽前方2～3mより奥では、顕著に発生しないことが報告⁷⁾されており、今回の計測結果はそれに符号している。ここでは、得られた計測結果および前述の知見より鋼管を弾性床土上の連

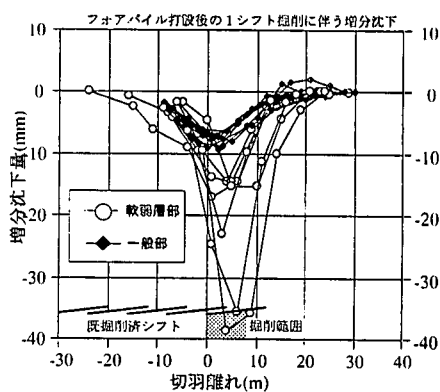


図-1 4 各シフト掘削時の増分沈下分布

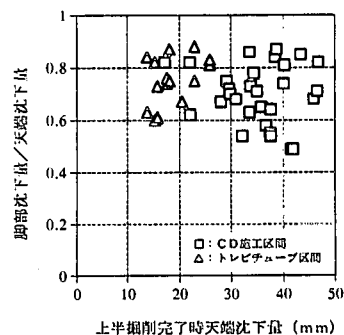


図-1 5 天端沈下と脚部沈下の関係

続梁モデルとしてモデル化を行った（図-17）。仮想支点（切羽前方にて鋼管が地山に支えられている地点：慣用法では掘削基盤から切羽前方に $4.5 + \phi/2$ の滑り線を想定しその線と鋼管が交差する点）の位置に関しては、計測結果に基づいて切羽前方で曲げモーメントが反転する位置とした。上載荷重については、計測結果および慣用法に基づき、最終支保工位置から仮想支点間に一様な分布荷重を与えた。

長尺先受け鋼管の梁としての機能に着目すれば、仮想支点の位置が、軟弱層部と一般部において異なっていることが認められる。地表面沈下の影響範囲は、Terzaghiの式や村山の理論に近い範囲で発生しているにもかかわらず、この仮想支点間までの距離は慣用法の $1/3$ 程度となっている。

上載荷重の大きさについては、図-17のモデルに基づいて、得られた曲げモーメントの最大値に相当するする荷重は求めた。得られた荷重は、土盛り荷重のおよそ45%であった。この上載荷重については、一般部と軟弱層部にて差異は認められなかった。

5. 施工実績

ダブルロータリー方式の採用に伴い、粘土層における鋼管内の閉塞のトラブルは発生しなかった。軟弱層部において削孔水の影響で沈下を促進した傾向は認められたものの、一般部においては鋼管内および削孔により生じた地山との隙間に充填された注入量はほぼ設計通りで、孔乱れが小さかったことが認められた。なお、粘土層における平均削孔速度は $0.1 \sim 0.2 \text{ m/分}$ で砂礫層を含む全体においてもおよそ 0.3 m/分 であった。

平均サイクルは1週間/シフトで、平均トンネル月進は 3.2 m/月 （下半およびインバート掘削を含めた全断面進行）であった。当工区における長尺先受けの削孔および注入サイクルの実績比較では、トレビチューブ工法を1とすると、鋼管継手方法の改善を行なったAGF-VSL工法は1.9（倍）、従来のAGF工法は2.5（倍）となった。

6. まとめ

以上の計測結果および施工実績から得られた知見を以下にまとめる。

設計においては、

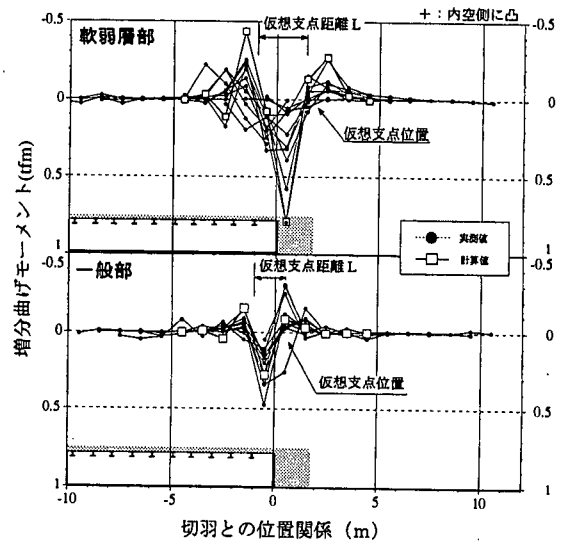


図-16 切羽離れと増分曲げモーメントの関係

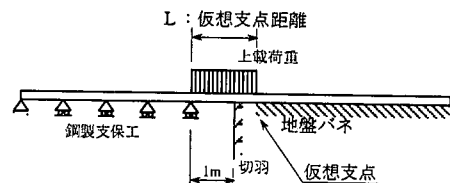


図-17 弾性床上の梁モデル

- (1) 長尺先受け鋼管が梁として挙動し、弾性床上の梁モデルで表現可能であることが確認された。軟弱層部においても仮想支点位置は従来の設計法の1/3程度で、荷重については全土被り荷重の45%程度となっており、今後のパイプルーム等の鋼管の設計条件に反映させることが可能と考えられる。

施工においては、

- (1) 計測結果よりN値20程度の地山では、事前に実施した断面2次元FEM解析結果とほぼ一致した沈下傾向が得られた。長尺先受けおよび脚部補強等補助工法の併用によって、周辺地山に大きな緩み域を発生させることなく概ね弾性挙動内に収めることが可能であった。
- (2) 施工実績よりダブルロータリー方式は、削孔時の周辺地山の乱れを極力抑制することが可能で、有効な施工法であることがわかった。ただし、軟弱層部においてはダブルロータリー方式を使用しても削孔時に沈下が増加した結果となっており、地表の条件によっては、他の補助工法の併用が必要と考えられる。
- (3) 計測結果よりプレロードシェル工法は、掘削初期に長尺先受け鋼管から支保工への荷重伝達を図ることができ、緩み域の抑制を行なう上で一般的なNATMにおいても有効な補助工法であると考えられる。
- (4) 計測結果より、長尺先受け工法により上半支保工の荷重分担が大きいことが確認された。また、水平ジェットグラウト等により支保工脚部地山の見かけの地盤反力係数が2~3倍に向上できたにもかかわらず、天端沈下のおよそ60~80%が脚部沈下であった。天端沈下のほとんどが脚部沈下であることから、沈下抑制のためには効率的な脚部の補強、荷重分担の低減方法が極めて重要であることがわかる。

7. おわりに

トンネルの都市化、大断面化が進むなかで、連続する区間においては、品質面、工程面においてトレビチューブ工法が提供するメリットが大きいことが確認された。ただし、トレビチューブ工法を採用するにあたっては、機械の搬入や組立が大掛りになる他、掘削時の段取り換えが必要になること、機械の大きさから採用可能なトンネル断面及び作業ヤード(60~70m程度)が限定されることを考慮せねばならない。

8. 参考文献

- 1) 足立他：トンネル掘削における長尺先受工法の補助効果に関する模型実験、第28回土質工学研究発表会
- 2) 高橋他：二次元縦断面解析による先受け工の検討、トンネル工学研究発表会、1994.11
- 3) 小竹他：シェル状先受工による沈下抑制効果、第29回土質工学研究発表会、1994.6
- 4) 肥後他：都市部における大断面トンネルの近接施工について、トンネル工学研究発表会、1993.11
- 5) 木嶋他：市街地の成田砂層をNATMで掘る、トンネルと地下、1989.2
- 6) 保岡：長尺先受けの計測結果と作用効果について、土木学会第49回年次学術講演会
- 7) ジェオフロンテ研究会：PJEP工法に関する検討報告書、1992