

長尺先受け工の設計手法に関する提案と その変位抑制効果について

A PROPOSAL FOR A DESIGN OF TUNNEL SUPPORT USING REINFORCED PROTECTIVE UMBRELLA METHOD AND ITS RESTRAINT EFFECT ON TUNNEL DISPLACEMENT

瀧 治雄¹⁾・岩野 政浩²⁾

Haruo TAKI, Masahiro IWANO

This paper describes a new design method for the reinforced protective umbrella method. In this design method, structural analyses have been carried out by using three-dimensional beam and shell combined model, which consist of not only primary support : steel support and shotcrete, but also auxiliary support : long steel pipe and surrounding grouting. In these analyses, the estimated incremental load is applied to the excavated area behind of tunnel face in top heading and is moved according to the progress of tunnel face. By multiplying the incremental displacements, the total displacements are obtained. Then we discuss the effects of umbrella method for displacement control, according to the analysis results based on this design method.

Key Words : Tunnel, Design, Umbrella method, three-dimensional analysis

1. はじめに

最近では、多種多様な補助工法が積極的に採用され、不良地山でありながらも安定性を確保しつつ大きな加背割のままで掘削することが可能となり、トンネル施工の大断面化、高速化という要求が満足されつつある。各種補助工法のうち、長尺先受け工（注入式長尺鋼管フォアパイリング）は、トンネル掘削に先立って、切羽前方地山に鋼管を打設すると同時に、セメントミルクや薬液等を圧力注入し、天端の安定を高める工法である。また、トンネル外周を注入改良することにより、アーチ状の改良体が形成されることも期待される。

ここで、長尺先受け工は、地山の先行変位の抑止、地山のゆるみ防止、施工の安全性確保等を目的として採用され、その施工実績¹⁾の増加が示すように、トンネル現場における長尺先受け工の評価には高いものがある。しかしながら、その構造設計に関しては、a) パイプルーフ工法の慣用設計法²⁾の準用、b) 弾性床土梁モデルによる鋼管断面設計³⁾、c) 類似の施工事例に基づく経験的設計法⁴⁾等が提案されているものの、一つの設計手法で、長尺先受け工の全ての諸元を決定することは困難である。

このように、長尺先受け工の設計手法は未だに確立されていないのが現状であり、その諸元を統一的、かつ合理的に決定可能な設計手法の開発が求められている。そこで、本論文においては、長尺先受け工の設計手法を新たに提案するとともに、この設計手法に基づいて、長尺先受け工の各諸元を変化させたケーススタディを実施し、長尺先受け工の変位抑制効果について検討した。

1) 正会員 工修 大成建設(株)土木本部土木設計第一部

2) 正会員 Ph.D. 大成建設(株)土木本部土木設計第一部

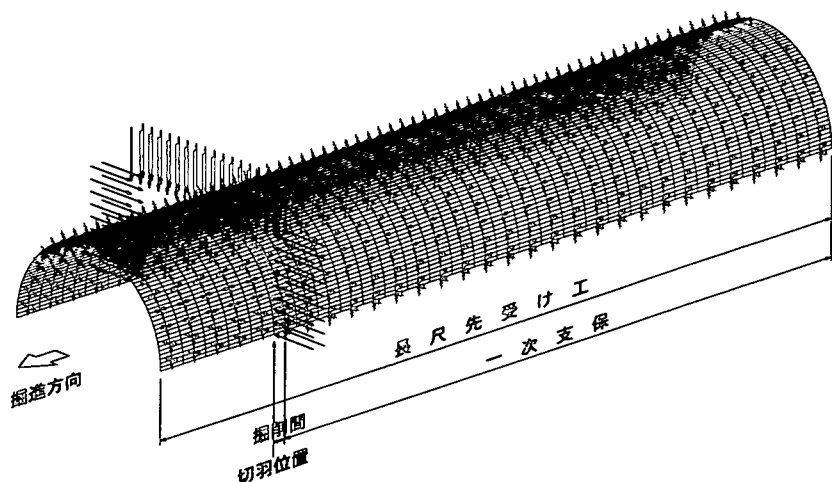
なお、ここで提案する設計手法は、地形条件として低土被り、地質条件として未固結地山を想定したものである。つまり、このような状況下においては、地山の支保効果はさほど期待できず、トンネル掘削に伴う作用荷重は、主として支保部材により分担されることを前提としている。

2. 提案する設計手法

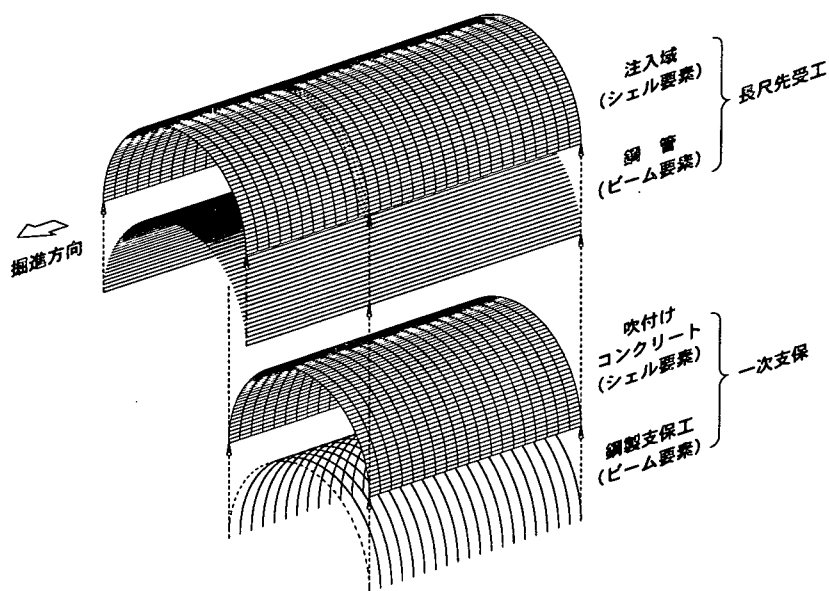
図一 1 に、今回提案する設計手法において使用するモデルを示す。ここでは、トンネル上半掘削において、長尺先受け工を補助工法として併用する場合を想定している。同図に示すように、三次元モデルを作成したが、これは、長尺先受け工が有する三次元構造を忠実にモデル化することが、その横断・縦断面における諸元を決定するうえで、最も直接的であることによる。さらには、二次元解析では、長尺先受け工の作用効果としてうたわれている、梁効果、及びシェル効果の両者を同時に評価することができないことによる。また、

モデル化においては、図一 2 に示すように、長尺先受け工だけでなく、吹付けコンクリート及び鋼製支保工の一次支保部材もあわせてモデル化している。ここで、鋼管と注入域よりなる長尺先受け工の要素は、モデル全長にわたり付加されているが、吹付けコンクリートと鋼製支保工よりなる一次支保の要素は、掘削間後方のみ付加されている。

本モデルにおいては、長尺先受け工の諸元を考慮して、横断・縦断方向の要素分割を行うことにより、その諸元を忠実にモデル化することが可能である。ただし、モデル作成における繁雑さを避けるため、長尺先



図一 1 モデル図



図一 2 支保部材のモデル化

受け工の打設角度は水平とした。ここで、長尺先受け工のラップについては、長尺先受け工を1打設長毎にモデル化し、所定のラップ長に基づいて、要素を二重に付加することにより評価しているが、実際には離隔を持って存在するところを、同位置に重ねることになるため、長尺先受け工の剛性を過大評価している可能性がある。

また、支保部材と地山の相互作用については、モデルに地盤バネを付加することにより評価している。付加する地盤バネは、直バネ1成分、せん断バネ2成分、計3成分である。ここで、モデル上想定された切羽位置の前方においては、内空側、地山側の両方向に作用する直バネを付加しているのに対し、切羽位置後方においては、地山側に変形が生じた場合のみ作用する直バネを付加している。さらに、一次支保の脚部にも、鉛直バネ1成分、水平バネ2成分、計3成分のバネを付加している。

本設計手法においては、上述の構造モデルを用いて、三次元構造解析（応力・変形解析）を実施する。ここで、図-1に示すように、鉛直方向、及び水平方向の荷重をモデルに作用させるが、そのトンネル縦断方向における作用範囲を掘削間のみに限定している。したがって、この荷重に対して計算される変位、及び応力は、一間掘削に伴う増分値となる。さらに、トンネル施工における逐次掘削過程を再現するために、荷重作用範囲を掘進方向に一間毎順次移動させ、その都度構造解析を実施し、変位、応力の増分値を求めることとする。このようにして得られる一間毎の変位、応力の増分値を、切羽進行に応じて重ね合わせることで、任意の切羽位置における変位、応力を求めることとする。

3. 計算例

本設計手法を長尺先受け工の設計検討に適用した具体例を図-3に示す。ここで、モデルに作用させる荷重については、テルツァーギの緩み土圧算定式から鉛直方向の荷重を決定している。さらに、水平方向の荷重は、鉛直方向の荷重に側圧係数を乗じることにより決定している。また、長尺先受け工の諸元として、鋼管径 $\phi 139.8$ 、円周方向ピッチ $\phi 30\text{cm}$ 、打設範囲 180° 、打設長 15.75m 、ラップ長 5.25m を想定している。なお、1シフト長は 10.5m （ $=1.05\text{m}/\text{間} \times 10$ 間）である。したがって、1シフト10間の掘削において、1間目～5間目まではラップ区間内、6間目～10間目まではラップ区間外で実施されることとなる。

同図(a)は、1間目掘削～10間目掘削まで、それぞれの掘削間に荷重を作用させた時の天端沈下増分を、トンネル縦断方向の分布状況を、

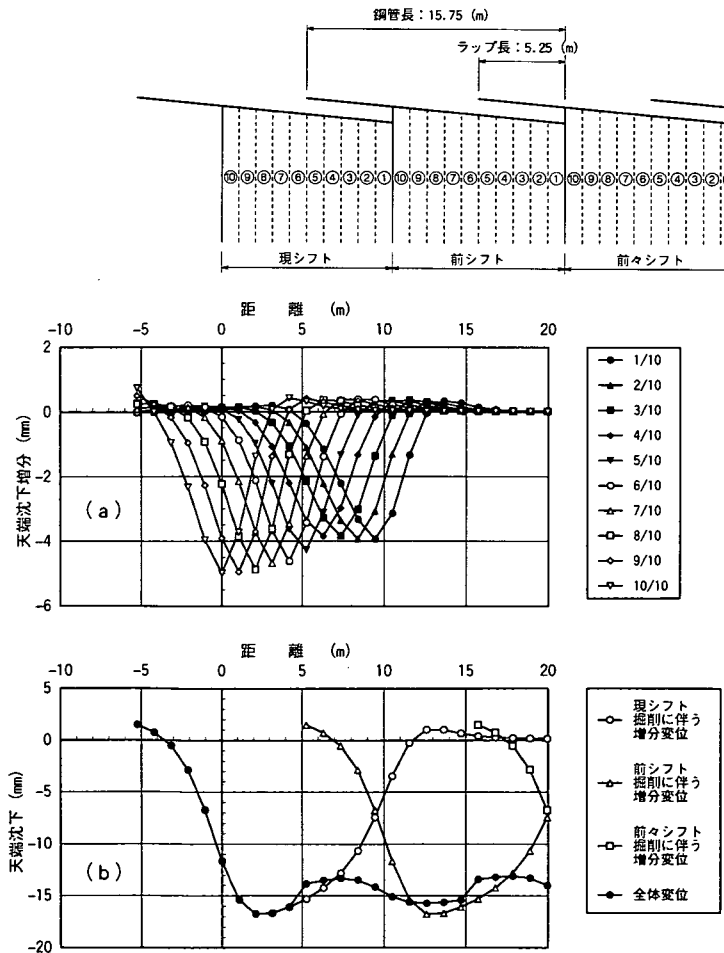


図-3 計算結果の重ね合わせ

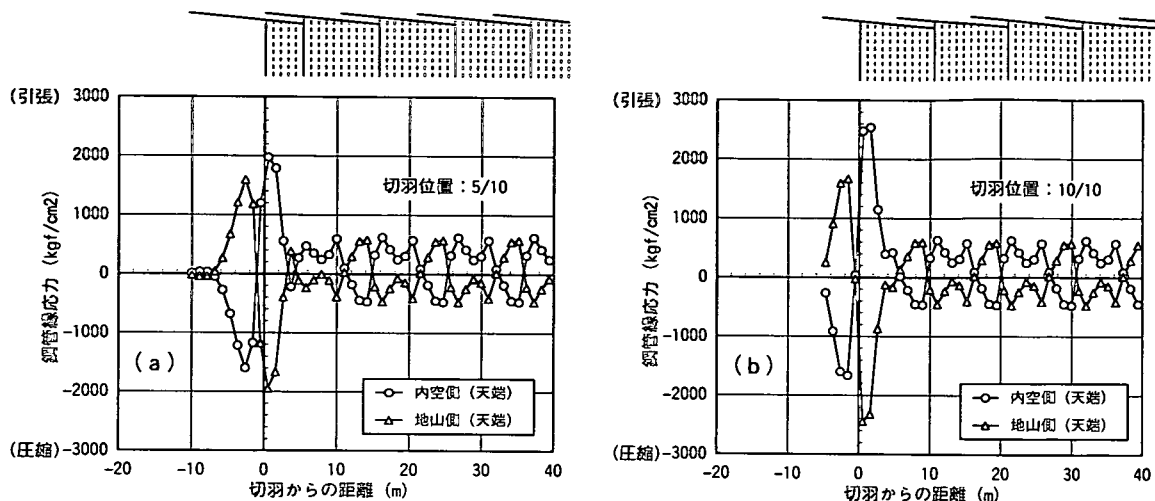


図-4 長尺先受け工鋼管縁応力分布

として示したものである。これより、ラップ区間内とラップ区間で天端沈下増分の発生状況が異なるだけでなく、同じラップ区間内（あるいはラップ区間で）においても、その発生状況が掘削間毎に異なることがわかる。この1間目掘削～10間目掘削までの各々の天端沈下増分を重ね合わせたものが、同図(b)の○プロットとなる。この○プロットで示す天端沈下は、1シフト掘削に伴う増分値であり、これと同じ天端沈下増分が、前シフト、前々シフトでも発生していることとなる。したがって、最終的な全体変位は、この1シフト掘削に伴う天端沈下増分を順次重ね合わせるにより得られ、●プロットで示す分布状況となる。この分布状況は、ラップ区間有無の影響を受けていることがわかる。

さらに、図-4に、長尺先受け工鋼管縁応力の分布を示す。ここで、(a)図は、1シフト10間中の5間目（ラップ区間内）の掘削時、(b)図は、10間目（ラップ区間で）の掘削時における分布を示している。同図より、鋼管応力は切羽前後において大きく変動するが、ラップ区間で掘削時に発生する応力（内空側：最大2,542kgf/cm²、地山側：最大-2,441kgf/cm²）に比較して、ラップ区間内での掘削時に発生する応力（内空側：最大1,978kgf/cm²、地山側：最大-1,942kgf/cm²）は約80%程度と小さいことがわかる。

4. ケーススタディ

ここでは、前述した設計手法に基づいて、長尺先受け工の各諸元を変化させたケーススタディを実施し、天端・脚部沈下及び脚部水平変位に関する計算結果から、低土被りの未固結地山（地山自身の支保効果が期待できない場合）における長尺先受け工の変位抑制効果について考察を加えることとする。

4.1 計算条件

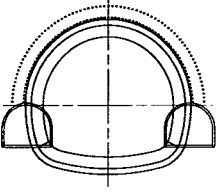
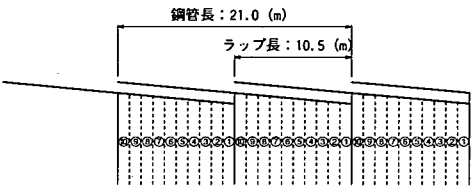
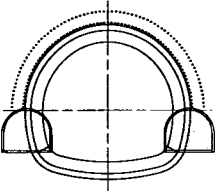
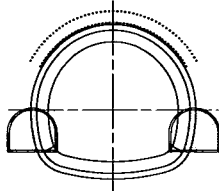
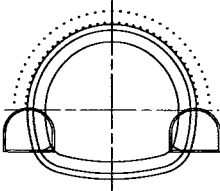
表-1に計算用物性値を、表-2にケーススタディにおける検討項目の一覧を示す。ここでは、長尺先受け工の諸元のうち、鋼管径、打設範囲、及び周方向ピッチを検討項目として、各諸元を変化させた計算を実施する。なお、このケーススタディにおいては、長尺先受け工のラップ長と1シフト長を等しく設定しており、すべての掘削間がラップ区間内となる。したがって、計算においては、どの掘削間においても等しい変位・応力増分が発生するものと仮定し、1シフト中の10間目のみを計算し、その時の増分値を重ね合わせることとした。

ところで、本設計手法においては、荷重作用位置には長尺先受け工のみが存在し、鋼製支保工及び吹付け

表－１ 物性値

		弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	備 考
長尺先受け工	鋼 管 (ビーム要素)	2,100,000	0.3	表2 参照
	注 入 域 (シェル要素)	500	0.3	t=30 cm
一 次 支 保	鋼 製 支 保 工 (ビーム要素)	2,100,000	0.3	H-250
	吹付けコンクリート (シェル要素)	40,000	0.2	t=30 cm
地 山	(バネ要素)	500	—	地盤反力係数算出

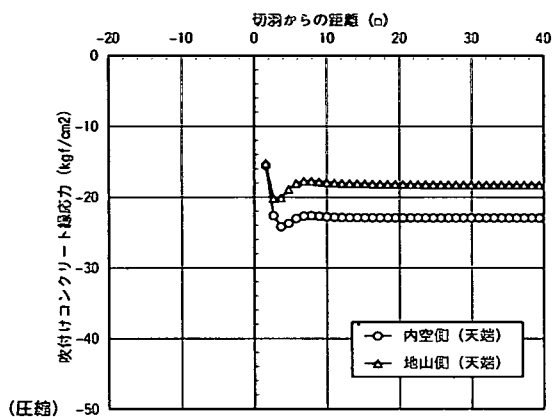
表－２ 検討項目

検討項目	(基本ケース)	打 設 長 及 び ラ ッ プ 長		
断面図				
鋼管径(肉厚)	φ 139.8(6.6)			
打設範囲	180°			
周方向ピッチ	φ300			
検討項目	鋼 管 径	打 設 範 囲	周方向ピッチ	
断面図				
鋼管径(肉厚)	φ 114.3(6.0)	φ 139.8(6.6)	φ 139.8(6.6)	
打設範囲	180°	120°	180°	
周方向ピッチ	φ300	φ300	φ600	

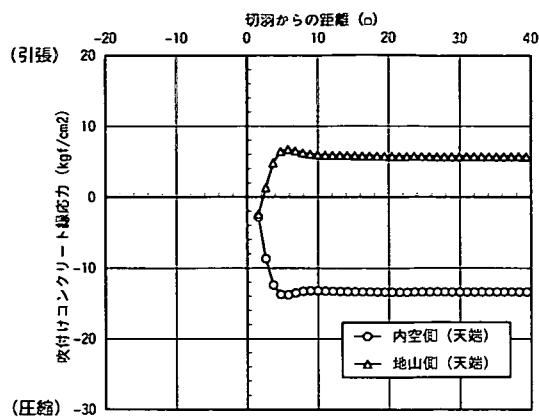
コンクリートの一次支保部材は、荷重作用位置の後方に付加される。ここで、鋼製支保工は荷重作用位置により近接しているため、その荷重分担は吹付けコンクリートに比較して卓越することとなる。この時の計算結果は、一般的に得られる計測値からかけ離れたものとなり、鋼製支保工の応力を過大評価、吹付けコンクリートの応力を過小評価してしまう。これは、実施工において、吹付けコンクリートは、施工直後から地山に密着した支保部材となるのに対し、建込み直後の鋼製支保工は、当たりが十分に取れず、ある程度の地山変形が生じた後に荷重を分担し始めることに起因するものと考えられる。このように、荷重作用位置直近に位置する、第一基目の鋼製支保工の剛性をフルに発揮させることは、実施工に比較して過剰となるので、本計算においては、この第一基目の鋼製支保工の剛性を無視することとした。

４．２ 計算結果

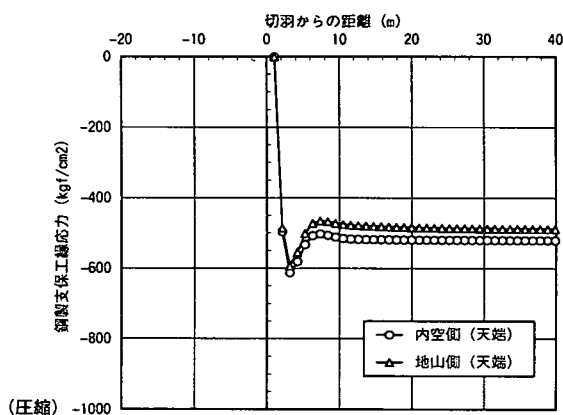
図－５に、基本ケースの計算結果として、吹付けコンクリートの周方向・軸方向縁応力 ((a), (b) 図)、鋼製支保工縁応力 ((c) 図)、及び長尺先受け工鋼管の縁応力 ((d) 図) を、トンネル縦断方向分布として示す。ここで、各縁応力は、トンネル天端における値であり、引張応力を正、圧縮応力を負として定義している。



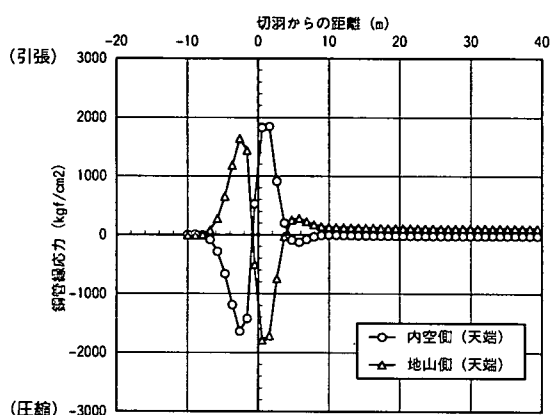
(a) 吹付けコンクリート周方向縁応力



(b) 吹付けコンクリート軸方向縁応力



(c) 鋼製支保工縁応力



(d) 長尺先受け工鋼管縁応力

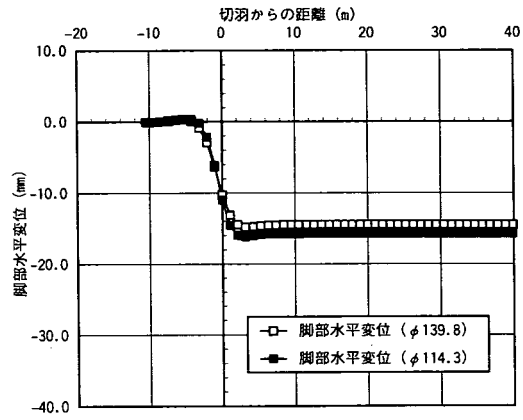
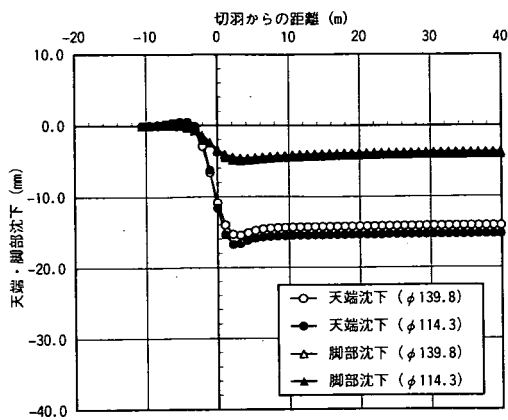
図-5 支保部材縁応力

同図より、吹付けコンクリート周方向縁応力、及び鋼製支保工縁応力は、内空側、地山側ともに圧縮応力となるのに対し、吹付けコンクリートの軸方向地山側縁応力は引張応力となる。また、長尺先受け工鋼管の縁応力は、切羽前後において大きく変動し、その応力値は耐力に対する余裕度が少ない。これらの応力は、三次元解析を実施することにより初めて明らかになるものであり、トンネル横断面に対する二次元解析では評価できない応力である。

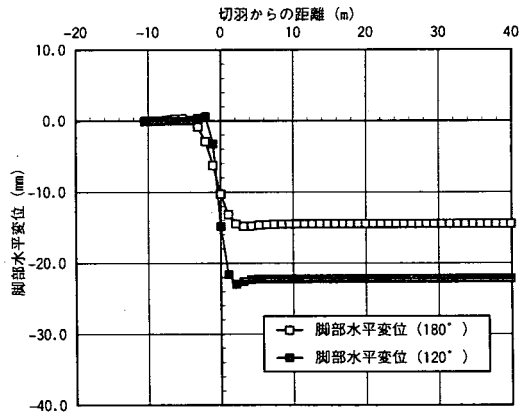
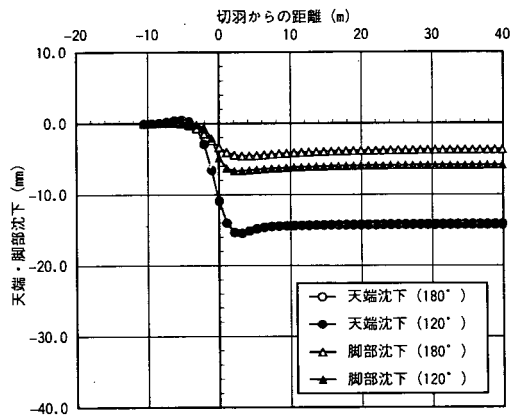
図-6 には、基本ケースに対して、長尺先受け工の鋼管径、打設範囲、及び周方向ピッチを変化させた場合の計算結果を示す。ここで、同図は、天端・脚部沈下及び脚部水平変位のトンネル縦断方向分布を示したものであり、トンネル内空側への変形を負として定義している。

同図より、鋼管径、及び円周方向ピッチの相違が天端沈下及ばす影響は、高々1~2mm程度に過ぎないことがわかる。また、打設範囲の相違は、脚部沈下、脚部水平変位には影響を及ぼすものの、天端沈下にはほとんど影響を及ぼしていない。

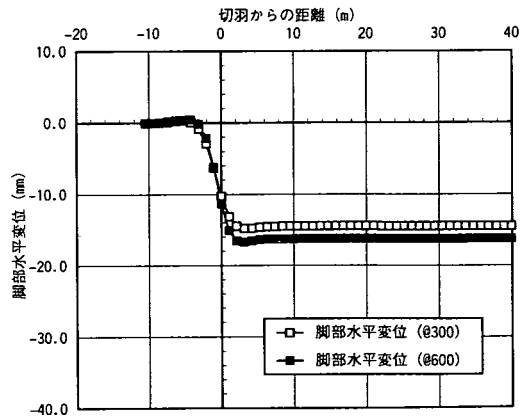
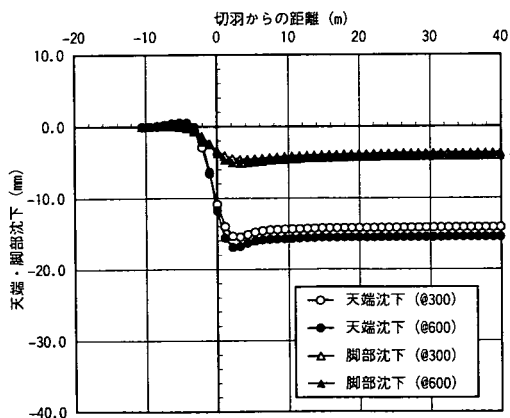
長尺先受け工のモデル化にあたっては、長尺先受け工の構成要素として、鋼管ならびに注入域を考慮している。ここで設定した条件では、トンネル縦断方向に配置される鋼管の剛性に比較して、シェル構造である



(a) 鋼管径による相違



(b) 打設範囲による相違



(c) 円周方向ピッチによる相違

図-6 変位分布

注入域の剛性が低いため、長尺先受け工の作用効果としては、シェル効果よりも縦断方向の梁としての効果が卓越することとなる。

また、提案した設計手法は、低土被り、未固結地山を前提としたものであり、地山の支保効果はさほど期待できないことから、地山と支保の相互作用については、当初から地盤反力としての考慮のみに留めている。このような観点からすれば、地山変位は、支保剛性の大小に直接支配されるものとなるが、本設計手法に基づいたケーススタディより、長尺先受け工のトンネル縦断方向における剛性の増加は、変位抑制に対してさほど効果的ではない。

都市 NATM における長尺先受け工に、変位抑制、一次支保部材の発生応力緩和等、補助工法以上の積極的な支保部材としての役割を期待するのであれば、トンネル縦断方向の梁としての作用効果だけでは不十分であり、注入により発揮されるシェル効果（あるいはアーチ効果）が十分な剛性を有するものとなるように設計する必要がある。

5. おわりに

本論文では、長尺先受け工の設計手法を新たに提案するとともに、その設計手法に基づいて、長尺先受け工の各諸元に関するケーススタディを実施した。

その結果、ここで設定した条件下においては、長尺先受け工の変位抑制効果は、十分には認められなかった。ただし、この結果は、地形・地質条件からは地山の支保効果が期待できず、さらには、長尺先受け工の作用効果としてシェル効果が期待できないような場合を対象として得られたものである。また、ここで示した設計手法は、長尺先受け工の構造設計に重きを置いたものであり、本設計手法では、長尺先受け工が有する、地山のゆるみ防止、天端崩落防止、及び切羽の安定性向上等の作用効果は直接的には評価できない。つまり、施工条件、ならびに、長尺先受け工に求める作用効果に応じて、種々の設計手法を適切に選択することが必要と思われる。

今後、計測結果との比較検討により、本設計手法の妥当性の検証ならびに改良を行い、上記の内容を踏まえた上で、体系的な設計手法の確立をめざす所存である。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会設計WG：アンブレラ工法の設計 技術資料、1996.11
- 2) 土木学会：山岳トンネルの補助工法、トンネル・ライブラリー第5号、1994.3
- 3) 松重宗徳、中川浩二、武内秀木、河上清和：鋼管長尺先受工法の鋼管断面の簡易設計法に関する研究、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第6部、pp.188-189、1995.9
- 4) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会AGF-WG設計SWG：注入式長尺先受工法（AGF工法）実態調査に基づく設計パターン（案）－施工実態調査結果とその分析－、1997