

中尺鋼管先受け (MGF) 工法の開発と適用結果

Development of the MGF Method and Application to Tunnels in Shallow Ground with Little Cohesion

伊 達 健 介 山 本 拓 治
北 本 幸 義 後 藤 直 人

要 約

近年、都市トンネルなど土被りが浅く未固結な地山を掘削対象とするトンネルにNATM工法を採用することが増加している。そのうえ、大断面化、高速化のニーズは高まるばかりで、先受け工をはじめとする各種補助工法の開発や高度化が求められている。筆者らは、先受け工の補強メカニズムの解明、それに基づいた新工法及び設計法の開発を目的として研究を進めている。これまでに、改良ゾーン厚さに着目した三次元的な大型模型載荷実験を実施し、その結果に基づき、代表的な先受け工であるAGF工法よりも改良ゾーンを厚くした中尺鋼管先受け工法（以下、MGF工法）を開発、その変形抑制効果に関する優位性を現場計測結果により確認している。さらに、両者について円筒シェル理論による評価を行い、設計法への適用性について検証した。本論文では、大型模型載荷実験、MGF工法の適用実績、円筒シェル理論による変形評価手法の適用性検討について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 大型模型載荷実験
- III. 中尺鋼管先受け (MGF) 工法の施工実績
- IV. 円筒シェル理論による評価
- V. おわりに

I. はじめに

近年、経済性、断面の自由度性などの理由により、NATM工法が都市部における未固結地山のトンネル掘削に採用されることが多くなっている。これは、各種補助工法などの発達によるところが大きく、特に切羽安定性向上や地表面沈下抑制に効果があるといわれている先受け工の果たしてきた役割は大きい。しかし、今後の建設計画に鑑みると、トンネルはさらに大断面化や構造の複雑化、高速化等の要求が突きつけられており、先受け工についてもニーズに対応すべく開発を進めていくことが重要である。

今回、先受け工の改良ゾーン厚さに着目した大型模型載荷実験を実施し、その結果から、従来工法よりも変形抑制効果が大きく、同時にコストダウン、工期短縮、安全性向上が図られる中尺先受け (MGF) 工法を提案した。さらに、その優位性を現場計測結果により確認し、円筒シェル理論による評価を試みた。

II. 大型模型載荷実験

1. 実験概要

これまで先受け工の補強効果を評価した実験は数多く見られるが、鋼管および改良体を作製し、さらにその三次元的な挙動について検討したものは少ない。そこで、筆者らは鋼管の打設方法に着目し、先受け工を改良ゾーン（シェル厚）で評価することを目的に、2つ

の先受けモデルに関する大型模型載荷実験を実施した。モデルは幾何学的縮尺を 1/20 とし、最も沈下が生じる次鋼管打設直前の状態を想定し載荷を行うこととした¹⁾。

Fig.1 に実験概要図として、実験土槽縦断面図および各材料の摘要を示す。

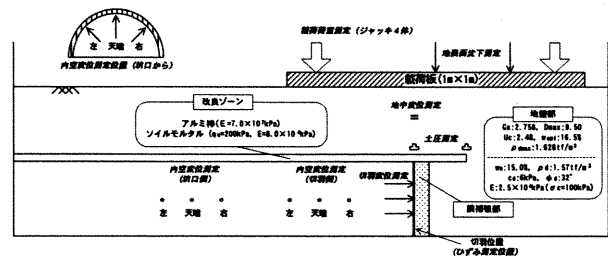


Fig.1 Summary of Modeling Test

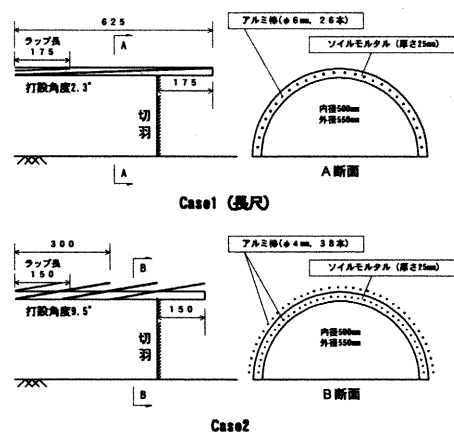


Fig.2 Cases of Modeling Test

キーワード：山岳トンネル、先受け工法

2. 実験ケース

実験は、Fig. 2 に示すとおり、鋼管モデルとして中実のアルミ棒を用い、打設方法を変えた2ケースについて実施した。Case 1 は従来の長尺先受けを対象としており、Case 2 はそれよりも小口径で打設角の大きいパターンを想定している。Case 2 におけるトンネル軸方向の単位長さ当たりのアルミ量は Case 1 の約半分となっている。

3. 実験方法

先受け（アルミ棒＋ソイルモルタル）の作製については、トンネル掘削を想定してあらかじめ設置した半円柱体の内型枠上に所定の間隔で組立てたアルミ棒群を載せ、外型枠を設置してからソイルモルタルを流し込んだ。ここに、脚部沈下の影響を除去するために先受けを土槽底面に改良範囲 180 度で設置している。ソイルモルタルを養生した後外型枠を脱型し、先受けの左右、上部に薄層で砂を締固め、地盤を作製した。

次に、前述したとおり補強効果が最も小さい（切羽が最も不安定な）状況を対象として、次ステップの鋼管を打設する直前の状態まで（ラップ長分を残して）内型枠を撤去した。その後、切羽近傍に着目した状態を模擬するため、切羽付近を中心に油圧ジャッキで載荷を行った。ただし、後続の支保工については考慮せず、先受けのみをモデル化している。

実験中は、トンネルの内空変位、改良ゾーンのひずみ、切羽の水平変位、土圧、地中変位、地表面変位及び載荷荷重について計測を行っている。

4. 実験結果

Case 1 と Case 2 における載荷応力～切羽近傍の内空変位関係を、それぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。

これらによると変位はほぼ均等に生じており、先受け工内部では径方向に均等に変位（収縮）が生じていることがわかる。この傾向は、坑口側の計測断面においても同様である。

また、同図の弾性挙動を示している部分について着目すると、載荷応力 1N/mm^2 に対して、Case 1（長尺）では 18mm 、Case 2 では 12mm の変位が生じている。また、事前に実施したソイルモルタルのみの改良ゾーンに載荷した実験（「鋼管なし」と称する）結果では、 $21\text{mm}/\text{N/mm}^2$ となっていた（Fig. 5 参照）ことから、径方向変位は、Case 2, Case 1, 鋼管なしの順に小さくなっており、鋼管打設による変位抑制効果および、打設角の大きい Case 2 の方が内空変位を抑制していることが確認される。

5. 結論

鋼管の打設方法を変えた三次元的な大型模型載荷実験を Case 1（長尺）、Case 2（Case 1 より小口径、打設角大モデル）の2ケース、さらに鋼管なしの実験を1ケース行い、先受け工の変形特性及び変形抑制効果について比較検討を行った。その結果、脚部に沈下が生じない場合、載荷によって生じる先受けの径方向変位はほぼ均等であることがわかった。また、単位長さあたりのアルミ量を約半分に減じても、打設本数を多くし打設角を大きくすることにより、変形量は約 $2/3$ に抑えられることがわかった。

Ⅲ. 中尺鋼管先受け（MGF）工法の施工実績

1. MGF工法の概要

筆者らは、自立性の悪い地山を対象とするトンネル工事において

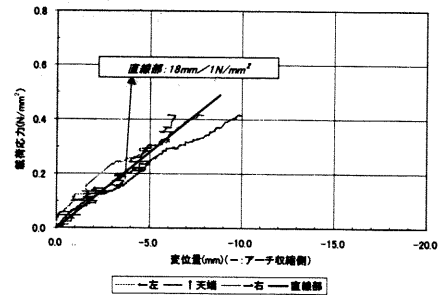


Fig. 3 Loading Stress~Displacement (Case 1)

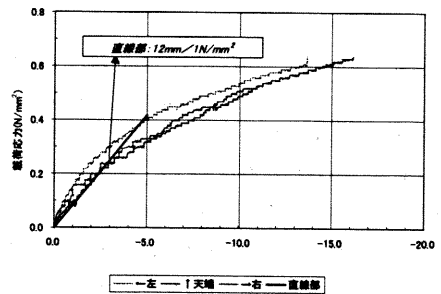


Fig. 4 Loading Stress~Displacement (Case 2)

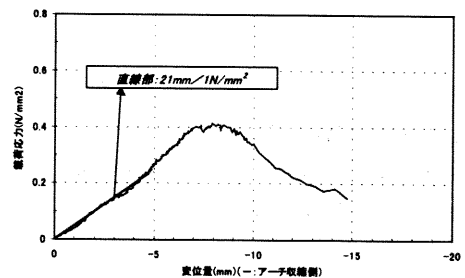


Fig. 5 Loading Stress~Displacement (Case "No Steel Pipes")

、従来工法と同等以上の沈下抑制効果が期待でき、同時にコスト削減と急速施工を可能とする、汎用トンネルジャンボと一体化特殊親子ビット（以下特殊ビット）を利用したMGF工法を開発した^{2), 3)}。同工法は、従来のフォアボーリングとフォアパイリングの間に位置し、長尺先受け工法よりも小口径で中尺の鋼管を、より大きい角度で打設するといった特徴を有している。

鉄道トンネル現場において、新工法であるMGF工法と従来技術であるAGF工法の両者を適用し、比較検討を行ったので、以下に記す。

(1) 現場状況

MGF工法を適用したトンネルは、新生代第四紀の洪積世に属する段丘裾部を貫くトンネルであり、土被り 10m 以下の区間が 200m 程度連続している。地質は、有機質土、砂質シルト、砂礫などからなるいわゆる崖錐堆積物、段丘堆積物がほとんどを占め（Fig. 6 参照）、地表面沈下、切羽崩落、脚部沈下など土砂トンネル特有の課題が存在した。これらの問題に対処するため、当初は施工実績の多いAGF工法を採用し、安全に施工を行っていたが、その後より合理的な施工を目指して、新しく開発したMGF工法による先受け工法を適用した。

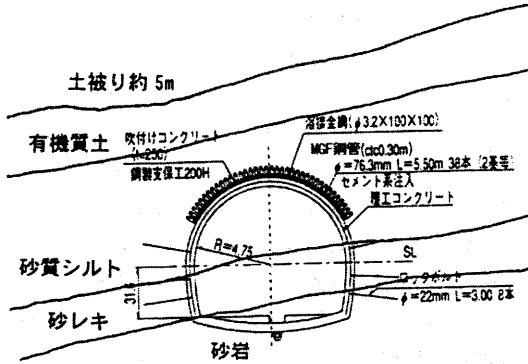


Fig. 6 Geological Section

(2) AGF工法との比較

Fig. 7 にAGF区間とMGF区間の鋼管配置断面図 (横断面, 縦断面) を示す。AGF区間は長さ12.5m 外径114.8mmの鋼管をシフト長9m ピッチ450mm, MGF区間は長さ5.5m 外径76.3mmの中尺鋼管をシフト長2m ピッチ300mmにて施工を行った。AGF区間の仕様はこれまでの施工実績にほぼ合致するものである。MGF区間の鋼管配置については、通常のAGF工法の設計と同様に、パイプルーの設計法を用いて設定した。結果として、トンネル軸方向の単位長さ当たりの鋼管材はMGF工法の方が3割程度多くなっているが、懸念されるコストおよび工期 (サイクルタイム) についても優位性を有していることが確認されている。

Table 1 にMGF工法導入により期待される効果およびそれを達成するための手段について示す。なお、各手段については代表的なものについて記しており、それらがもたらす効果は相互に関連していることはいうまでもない。

2. 計測結果

Fig. 6 に示すように、土被りが4~6mで、地質もほぼ同一 (地表から有機質土が1.5m程度、その下は砂質シルト) の施工区間 (L=50m, 計測断面それぞれ3断面) においてAGF工法とMGF工法の計測結果を比較した。なお、この断面では下半盤に岩盤が出現しており、脚部の沈下はほとんど生じていない。

Table 2 は、上下半掘削時の平均変位量の発生比率を示す。AGF区間の地表面沈下量は平均48mm, MGF区間では平均15mmとなり、AGF区間はMGF区間の3倍の地表面沈下が発生している。天端沈下量はほぼ同じ値、内空変位は両工法ともほとんど発生していない。また、天端沈下、内空変位の発生比率は両区間ともほぼ同一比6 (上半) : 4 (下半) となるのに対し、地表面沈下の発生比率は、AGF区間が9:1, MGF区間が8:2となり若干の相違が見られる。

Fig. 8 は、切羽接近、通過に伴う先行変位率、掘削影響範囲を推定するために、上半掘削時における両区間の切羽進行曲線を切羽 (上半) 進行要素ごとに分析した結果である。なお、縦軸は上半掘削後の収束値を100%とした変位率を表す。これによると、掘削影響範囲は、AGF区間で10m (-1.0D) ~ +15m (+1.5D), MGF区間で-5m (-0.5D) ~ +20m (+2.0D) となっており、MGFの方が沈下開始が遅く収束も遅い結果となっている。一方、切羽到達前の先行変位率は、AGF区間で約60%, MGF区間で約25%となっており、MGF工法では先行変位を大きく抑えられていることがわかる。

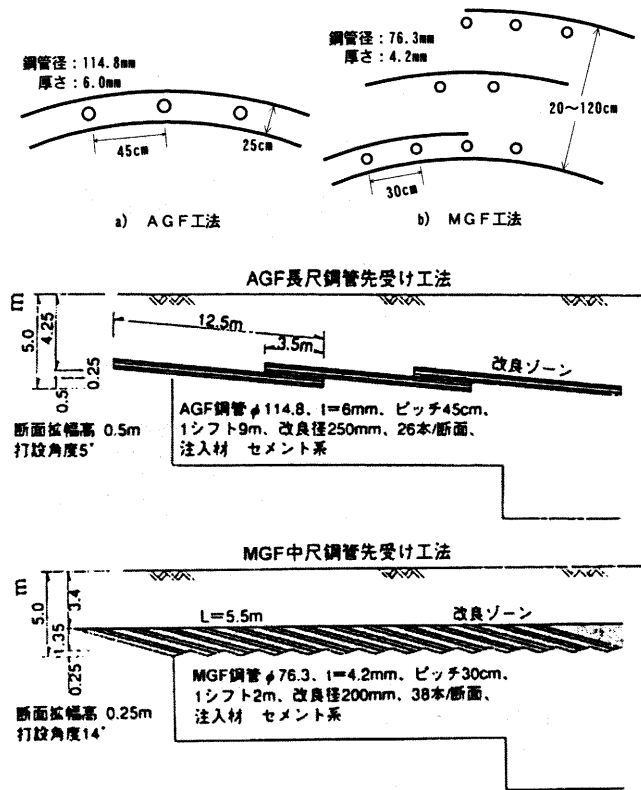


Fig. 7 Section of Steel Pipes- Arrangement

Table 1 Merits of MGF Method

効果	達成するための手段
コストダウン	- より安価な汎用ガス管の採用 - より安価な特殊ビットの採用 - 中尺化によるロッド、ビットの回収率アップ
工期短縮	- 中尺化によるロッド接続作業の省略化 - 中尺化および特殊ビット採用による孔曲がり防止がもたらす鋼管挿入不備の減少 - 小口径化による転石、破砕帯での作業性向上
安全性向上	接続作業省略による高所作業の軽減
トラブル防止	- 改良ゾーンの厚層化による沈下抑制 - 中尺化および特殊ビット採用による孔曲がり防止がもたらす鋼管挿入不備の減少 - 中尺化によるロッド、ビットの回収率アップ

Table 2 Displacement Ratio

		AGF区間		MGF区間	
		mm	%	mm	%
地表沈下	上半	43.1	89	12.4	81
	下半	48.3	11	15.4	19
天端沈下	上半	12.0	59	11.2	59
	下半	20.5	41	19.0	41
内空変位	上半	1.3	57	3.4	64
	下半	2.3	43	5.3	36

また、MGF工法を対象に実施したB計測結果からは、先受け鋼管に作用した曲げ応力の大きさに対し、鋼製支保工へ作用した軸力および曲げモーメントが非常に小さい値であったこと、先受け鋼管に作用した曲げモーメントは支保工位置に応じてジグザグに分布することなどが確認された。

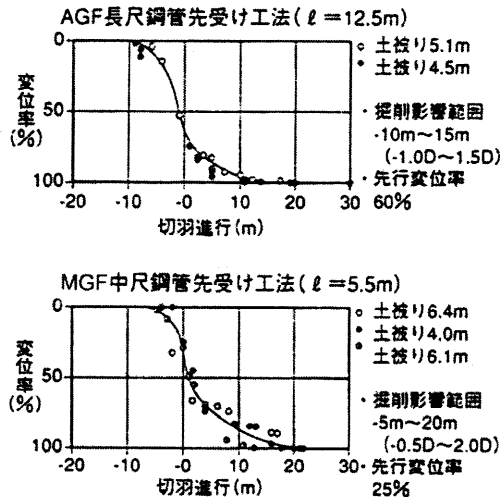


Fig.8 Settlement Ratio Curve

3. 結 論

MGF工法の適用実績から以下のことがわかった。

- ・MGF工法は、安価なビット、鋼管の採用により大幅なコストダウンを図ることが可能である。
- ・MGF工法は、中尺化によるロッド接続作業の省略化、小口径による施工性の向上や適用地盤の拡大などにより、施工の急速化（工期の短縮）が可能となった。同時に高所作業や接続作業に伴う危険性や苦渋性も軽減された。
- ・MGF工法では、改良ゾーンをAGF工法よりも厚く施工することにより、全断面掘削後の地表面沈下量がAGF区間の1/3に抑制できることがわかった。先行変位率についてもAGF区間で60%、MGF区間で25%と大きく抑えられていることがわかった。
- ・掘削影響範囲については、MGF区間の方が、沈下開始が遅く、収束も遅いことがわかった。

IV. 円筒シェル理論による評価

1. 先受け工の設計

自立性が低く地質の悪い箇所や都市部などにおいてNATMによる施工例が増えてきたことから、先受け工をはじめとする補助工法が積極的に採用され、土木学会標準示方書[山岳工法編]・同解説(平成8年改訂版)には、水平ジェットグラウトや長尺鋼管フォアパイリングなど最新の工法が追加されてきた。

その一方で、代表的な補助工法である先受け工の設計手法については、多くの研究や提案はあるものの、パイプルー工法以外は特に確立されたものはないようである。そこで実際の設計では、類似工法・当該工法の施工実績に基づいて行われることが多い。ただし、都市トンネルなど詳細な検討を必要とする場合は計算を行い設計を行っているが、複雑で煩雑な数値計算が必要なため三次元的な評価は実務レベルでは行われておらず、トンネル横断・縦断方向を分離し、それぞれ二次元的に評価している場合がほとんどである。

先受け工は一般的に、アーチシェル形状の構造から誘起されるアーチ形成効果（トンネル横断方向）、鋼管の曲げ剛性に起因した梁形

成効果（トンネル縦断方向）および先受けに作用する荷重を切羽後方の支保工を介して脚部地山に伝達する支持効果があるといわれているが、先受け効果を三次元的に捉えた場合、特に前二者については両者が複合されたメカニズムとして評価する必要がある。しかし、上記のとおり現状の設計については、補強メカニズムを合理的に（三次元的に）評価しうる簡易手法の確立には至っていないといえる。そこで、筆者らはその確立を目的として、まず先受けによる改良ゾーン厚さ（シェル効果）に着目し、脚部沈下の影響を分離可能な場合を前提として、改良ゾーンを円筒シェルで評価する手法を試みた⁴⁾。その概要や適用性について報告する。

2. 大型模型載荷実験の検証

(1) 鋼管なし

前述のとおり、径方向に均等に変位が生じていたことから、均等な外圧を受ける円筒シェル理論の適用を試みる。今回は $t/R < 1/10$ であることから、薄肉円筒とみてよい。なお、外圧を受ける薄肉円筒の強度を支配するのは応力そのものよりもコラプスなどと呼ばれる弾性不安定現象であるといわれているが、今回は均等に変形が生じていることから適用については問題ないものと思われる。さて、円筒シェルに径方向等分布荷重 p_0 が作用したとき、径方向変位 u は $u = -p_0 \cdot R^2 / E \cdot t$ (E : 弾性係数, R : 平均半径, t : シェル厚さ; Fig.9 参照) によって表される。同式を用いて、水平分布荷重 1N/mm^2 をシェルの周方向に換算し、ソイルモルタルの剛性を $E=200\text{ N/mm}^2$ とし、トンネル内周における径方向変位を算定したところ径方向への収縮量は 22mm となり、実験結果 21mm にほぼ合致した。これは脚部に比較的強固な地盤の存在するトンネルに施工された先受け工については円筒シェル理論適用の可能性が大きいことを示唆している。

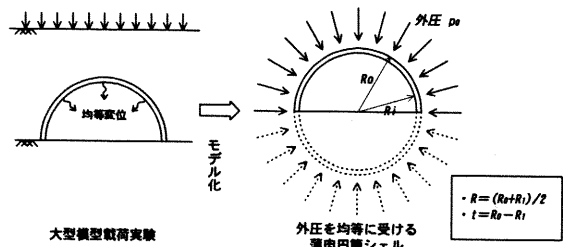


Fig.9 Theory of Shells

(2) Case 1, Case 2

Case 1(長尺)については、鋼管なしの場合と改良厚さ t が等しいと見なせるため、剛性 E について計算すると、径方向変位の比 1.2 ($\approx 21/18$) から、 $E=230\text{ N/mm}^2$ となる。これは、ソイルモルタルの剛性 $E=200\text{ N/mm}^2$ の 1.15 倍である。

一方、Case 2については、鋼管打設による剛性増加が比較的小さかったこと、Case 1に比べて周方向の単位長さあたりのアルミ量もほとんど増減していないことから、剛性 E に関してはCase 1と同様の $E=230\text{ N/mm}^2$ とし、擬似的な改良厚さとなるシェル厚 t についてフィッティングを試みた。その結果、Case 1, 2の径方向変位の比 1.5 ($\approx 18/12$) から、 $t=37.5\text{mm}$ となり、これは鋼管と内空面に挟まれた領域を改良ゾーンと仮定したときの平均改良ゾーン厚さに一致した。(Fig.10 参照)。

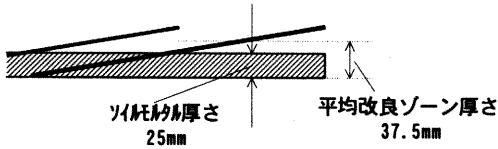


Fig. 10 Thickness of Improved Zone

一般的に天端沈下などは縦断方向を弾性支承上の梁などで二次元的に評価することが多いが、Case 1, 2 の径方向変位の比 1.5 は曲げ剛性 EI の比からは説明が困難であり、均等な外圧を受けるシェルでの評価が妥当であると考えられる。このとき、内空方向への合成剛性 E および改良ゾーン厚さ t の絶対的評価が重要となる。また、鋼管打設による剛性増加はトンネル軸方向の合成剛性では表現できず、鋼管打設方法による増加率を把握することが重要であるとわかった。また、鋼管の打設角を大きくすることにより、改良ゾーンは厚くなり、その厚さは鋼管と内空面に挟まれた領域を改良ゾーンと仮定したときの平均改良ゾーン厚さにほぼ一致することがわかった。

3. 現場計測結果の検証

(1) 円筒シェルの解析解

円筒シェル理論による評価では、一端に作用する荷重の影響が他端に及ぶかどうかによって短いシェルと長いシェルとに区別される。円筒シェルの長さ L が π/β よりも大きい場合、長いシェルと判定され問題は簡単となる。ここに、 $\beta = \{3(1-\nu^2)\}^{1/4} / (r \cdot t)^{1/2}$ である (ν : ポアソン比, r : 円筒シェルの半径, t : その板厚)。今、長いシェルの円周に沿って径方向等分布荷重 p が作用 (Fig. 11 参照) したとき、荷重作用線における径方向変位 w_x は

$$w_x = pr^2 \beta e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x) / (2Et) \quad \cdots (1)$$

によって与えられる (E : 弾性係数) が、円筒のある幅 l に沿って分布する荷重状態 (Fig. 12 参照) については、(1) 式を用いた重ね合わせ (積分) から

$$w_x = pr^2 \{2 - e^{-\beta x} \cos \beta x - e^{-\beta(l-x)} \cos \beta(l-x)\} / (2Et) \quad \cdots (2)$$

$$w_x = pr^2 \{e^{-\beta(x-l)} \cos \beta(x-l) - e^{-\beta x} \cos \beta x\} / (2Et) \quad \cdots (3)$$

で表される (2), (3) 式はそれぞれ図中 (a), (b) に対応。なお、(2), (3) 式は $x=l$ において (4) 式のとおり一致する。

$$w_{x=l} = pr^2 (1 - e^{-\beta l} \cos \beta l) / (2Et) \quad \cdots (4)$$

(2) 解析条件と現場条件の対比

(2), (3) 式による w_x は、円筒シェル上に幅 l で荷重を行った場合の径方向変位を表すが、実施工に対しては、各掘削ステップにおいて掘進長 l だけの範囲に土かぶり荷重が作用したときの天端沈下を想定する。ステップごとに生じる天端沈下を重ね合わせれば、累積の天端沈下が求められる (ただし、弾性論から E , t などのシェル物性に变化がなければ、多ステップの瞬時掘削としても逐次掘削の重ね合わせ結果に一致する)。

次に、長いシェルとみなしうるには、たとえば $r=5\text{m}$ の場合、 $t=0.25\text{m}$ において $L \geq 2.7\text{m}$ ($\nu=0.3$ のとき $\beta=1.150$) が必要である。ここに $t=0.25\text{m}$ は、Fig. 13 に示すとおり長さ 12.5m の AGF 工法 (打設角度 5°) を想定したもので、通常 3.5m 程度のラップ長が残されることから、長いシェルの場合を適用することに計算上大きな問題はないといえる。なお、解析におけるシェル形状が

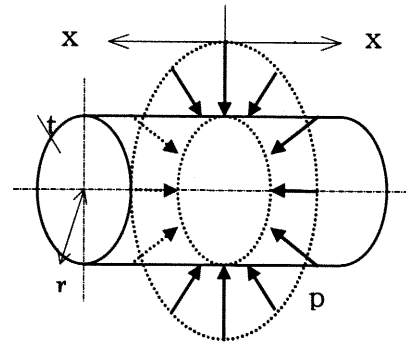


Fig. 11 Circular Loading

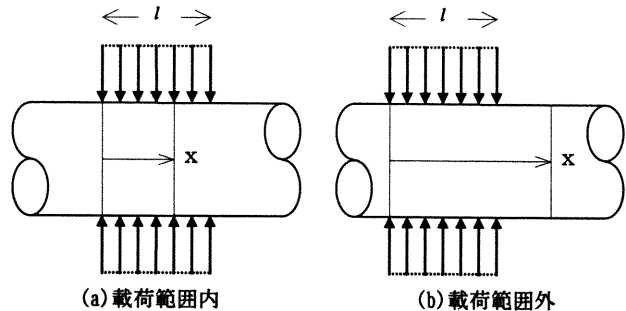


Fig. 12 Circular Loading (Width: l)

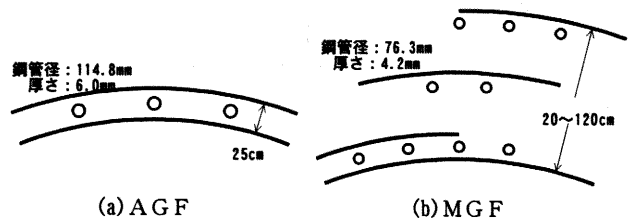


Fig. 13 Section of Fore-piling

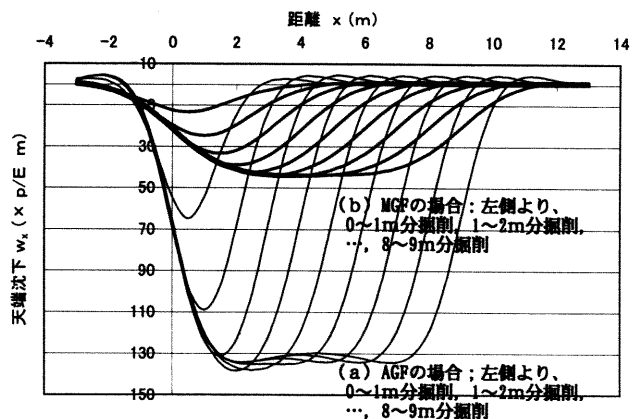


Fig. 14 Crown Settlement Analyzed by Theory of Shells

完全円筒であるのに対し、実際の先受けでは上半部分 (一般に $120^\circ \sim 180^\circ$) しか構築されないが、先受けが適用されるような低土被りのトンネルでは天端における鉛直土圧とスプリングライン付近の水平土圧が同等であると見なせるので、このモデル化による施工状況の近似はある程度可能なものと考えられる。

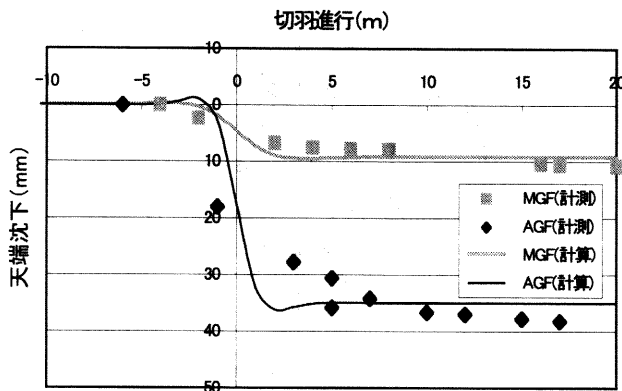


Fig.15 Fitting to Measured Settlement Curve

(3) 計算結果と考察

(2), (3)式を用いて先受けの天端沈下(9mまで $l=1\text{m}$ ずつで逐次掘削したときの累積値)を算定すると, Fig.14に示すような結果が得られる。同図中(a), (b)はそれぞれ, AGF(長尺先受け, $r=5.7\text{m}$, $t=0.25\text{m}$), MGF(中尺先受け, $r=5.4\text{m}$, $t=0.7\text{m}$)を想定しており, 各掘削ステップでの増分値は, 第1ステップ時の分布形状を掘進長分だけ移動したものに一致する。なお, MGFの改良ゾーン厚さ($t=0.7\text{m}$)に関しては, 大型模型載荷実験のCase2の改良ゾーン厚さの算定結果に基づき設定した。同理論によると, 切羽が到達するまでに発生する天端沈下の先行率はほぼ50%となる。

AGFの場合, 各ステップにおける増分の最大値は $64.8\text{p}/E$, 累積の最大値は第3ステップにおいて $138.3\text{p}/E$ となりそれ以降ほぼ収束する。同様にMGFでは, 増分の最大値が $13.4\text{p}/E$, 累積の最大値は第6ステップで $44.4\text{p}/E$ であり, 剛性 E がほぼ同等であるとした場合, AGFとMGFの比は増分, 累積でそれぞれ4.8, 3.1となる。MGFではAGFに比較して, 各ステップにおける増分値はかなり小さいが, 累積値については, 収束するまでのステップ数が多くなり結果的にシェル厚の比に一致(r が同一の場合)してくる。これは現場計測結果において, MGF区間の沈下収束がAGF区間に比べて遅かったことと一致する。なお, 沈下開始については逆にMGF区間がAGF区間よりも遅れているが, これは改良厚さよりもシフト長の影響が大きかったことによるものと思われる。

次に, 前述の現場計測結果についてフィッティングを試みる。前述のとおり, 両工法の比較区間では脚部沈下の発生がほとんどないため, 計測結果を単純に比較可能である。そこで, Fig.14に基づき, 現場計測結果に対比させた結果をFig.15に示す。AGFでは末広がりの影響によって横軸の合致度はやや低いものの, 縦軸の天端沈下については両者の比がうまく表現されていることがわかる。ただし, $p=\gamma z=75\text{kN}/\text{m}^2$ (単位体積重量 $\gamma=15\text{kN}/\text{m}^3$, 土被り $r=5\text{m}$)として逆算した E は約 $300\text{N}/\text{mm}^2$ であり, 一般に $1,000\text{N}/\text{mm}^2$ 程度といわれる改良ゾーンの合成剛性よりも小さくなっている。これは, 計算上一体化された円筒シェルを前提としているのに対し, 実際の先受けでは打設角度が $120\sim 180^\circ$ であることや, 薬液の注入状態によって先受けが理想的な形状の形成に至っていないことなどが原因であると考えられる。

4. 結 論

- ・脚部沈下の影響が除去できる場合, 天端沈下の切羽進行曲線は円筒シェルによる評価が可能であり, また剛性 E および改良ゾーン厚さ t の評価が重要となる。
- ・円筒シェル理論によると, 先行変位率はほぼ50%となる。
- ・円筒シェル理論によると, 改良ゾーンの厚さが厚いほど影響範囲は大きくなり, これは前述の現場計測結果と一致する。
- ・鋼管配置による増加率の違いを把握することが重要である。
- ・鋼管の打設角を大きくすることにより, 改良ゾーン厚さは厚くなり, 沈下抑制効果が上昇する。
- ・現場における先受け剛性を逆算した結果は, 一般的な先受けの剛性より小さく, 打設範囲や出来形の不具合などが原因として考えられる。

V. おわりに

大型模型載荷実験結果に基づき, 沈下抑制効果と同時に工期短縮, コストダウンおよび安全性向上を図れるMGF工法を開発し, トンネル現場への適用を行った。また, 実験結果および現場計測結果について円筒シェル理論による評価を行った。

MGF工法については, AGF工法に比べて小口径の中尺鋼管を用い打設角を大きくすることにより, 先行変位量を大きく抑制できることがわかった。MGF工法の利点については, Ⅲ章を参照いただきたい。なお, 同工事では, 別区間において, MGF工法を鋼管長 6.5m , シフト長 3m の仕様にて適用し, さらにコストダウンを実現させている。

円筒シェル理論は, 先受けの三次元的な補強メカニズムに基づいた評価法であり, 脚部沈下の影響が除去できる場合, 非常に精度よく沈下量の評価が行えることがわかった。

今後の課題は以下のとおりである。

- ・打設範囲, 周・半径方向の改良体の出来形, 鋼管配置などが剛性 E および改良ゾーン厚さ t へ及ぼす影響の把握
- ・未掘削地山および建込んだ支保工の影響把握
- ・脚部沈下の影響分離の可否に関する検討

ただし, 脚部沈下の影響分離を検討する以前に, 先受けの補強効果を発揮させるためには脚部沈下をできるだけ生じさせないようにすることの方が重要であり, 「地質に応じた脚部沈下軽減工法の開発」が次なる最重要課題であると思われる。また, 同開発が実現した場合は, 単純に円筒シェル理論を適用可能なケースが増加するといえよう。

参考文献

- 1) 伊達, 北本, 山本, 後藤, 太田; トンネル先受けの挙動及び変形抑制効果, 第55回年次学術講演会講演概要集(2000)。
- 2) 山本, 北本, 伊達, 岡本; 中尺鋼管による先受け工法の適用結果, 第9回トンネル工学研究論文報告集(1999), pp.167~172。
- 3) 山本, 牟田, 佐藤, 小林; 小土被り土砂トンネルに適用したMGF工法の施工実績, 第55回年次学術講演会講演概要集(2000)。
- 4) 北本, 伊達, 山本, 日比谷, 太田; トンネルの先受けに関する簡易評価手法, 第35回地盤工学研究発表会講演集(2000)。