

中尺鋼管先受け工法の有効性評価

Effect on Ground Settlement Restraint of MGF (Multi-Ground-Forepiling) Method

伊達健介* 北本幸義* 山本拓治* 太田秀樹**

Kensuke DATE, Yukiyooshi Kitamoto, Takuji Yamamoto, Hideki Ota

Recently, NATM has been adopted as the method of tunneling under the shallow ground with little cohesion. Therefore, it is now expected to develop or improve the supporting methods, especially fore-piling in tunnel boring. Authors have already developed new supporting method (MGF method) and introduced it into a construction site with the result that the effect on the ground settlement restraint of was improved.

In this paper, first, the outline of our entire research was mentioned. Second, the outline and merits of MGF method and the results of its field tests were briefly mentioned. Third, centrifuge modeling tests (: CMT) focused on the thickness of fore-piling were carried out in order to evaluate the characteristics of ground settlement and confirm the superiority of MGF method. Lastly, theory of cylinder-shells, proposed by authors as the evaluation method for new design criteria, was applied to the verification of the results of CMT and on-site tests.

Key Words: NATM, fore piling, centrifuge, theory of cylinder-shells

1. はじめに

近年、経済性や断面の自由度の高さなどの理由により、都市部での未固結地山においても山岳トンネル工法を採用した工事が多くなっているが、今後はさらに大断面化、より施工条件の悪いなかでの施工へと進みつつあり、より効果的に変形を抑制するような補助工法（先受け等）の開発を進めていくことが重要である。また、施工技術が進歩を遂げている一方、設計法に関しては確立した合理的な手法があるとは言い難く、補強メカニズムに基づいた簡便な設計法の開発が望まれている。

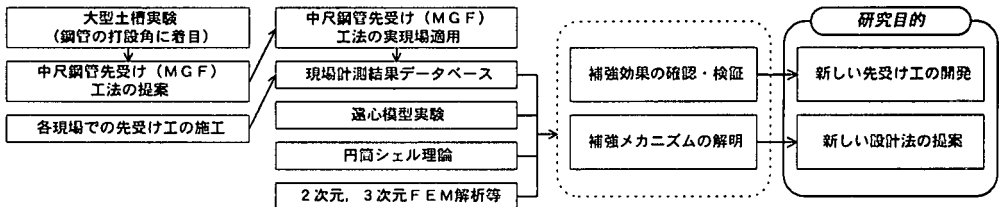


図-1 研究フロー

そこで、筆者らは、図-1に示すとおり、従来の長尺鋼管先受け工法よりも変形抑制効果の大きい新しい先受け工の開発および補強メカニズムに基づいた新しい設計法の提案を目的として、これまでに研究を進めてきた。今回は、中尺鋼管先受け工法の補強効果確認のため遠心模型実験を実施し、その結果および現場計測結果について簡便な設計手法として提案した円筒シェル理論による評価を行ったのでそれらについて報告する。

* 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

** 正会員 東京工業大学 工学部開発システム工学科

2. MGF工法およびその適用結果

中尺鋼管先受け工法（以下、MGF工法）^{1) 2) 3)} は、従来のフォアポーリングとフォアパイリングの中間に位置し、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。図－2にAGF区間とMGF区間の鋼管配置断面図（横断面図、縦断面図）を、表－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。これは、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）を利用して、コスト削減と急速施工を可能にすると同時に、従来工法と同等以上の沈下抑制効果が期待されるもので、大型模型載荷実験⁴⁾ による確認も行っている。

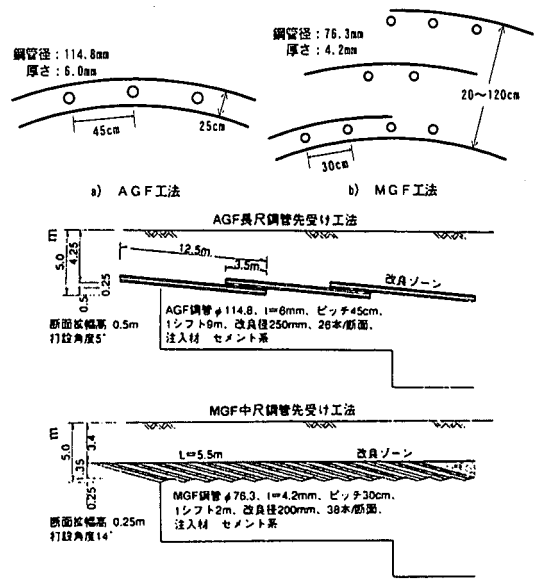
鉄道トンネル現場において、MGF工法と従来技術であるAGF工法の両者を適用し、比較検討を行ったところ、表－2に示すとおり、上下半掘削時の地表面沈下量はAGF区間において平均 48mm、MGF区間では平均 15mm という結果が得られた。すなわち、AGF区間はMGF区間の3倍の地表面沈下が発生しており、ほぼ同一条件下においてMGF工法による地表面沈下抑制効果が確認された。

表－1 MGF工法の利点

効果	達成するための手段
コストダウン	・汎用トンネルジャンボによる施工 ・安価な小口径中尺鋼管（ガス管など）の採用 ・中尺化によるロッド・ビット回収不能の回避
品質向上	・改良ゾーン厚層化による切羽安定性の向上および地表面沈下の抑制 ・鋼管の密な打設による地山崩落の防止 ・余掘り量減少によるトンネルの安定性向上
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スムーズな打設、ロッド・ビット回収不能の回避 ・小口径化による転石、破砕帯での作業性向上
安全性向上	・ロッド接続作業省略化による高所作業の軽減

表－2 地表面沈下量

	AGF区間	MGF区間
	mm	mm
上半	43.1	12.4
下半	48.3	15.4



図－2 先受け工横断面図および縦断面図

3. 遠心模型実験による評価

実施工におけるMGF工法の地表面沈下抑制効果は、汎用鋼管を密に打設することによる改良ゾーンのシェル形状化、また打設角を大きくすることによる改良ゾーンの厚層化によるところが大きいと考えられる。そこで、シェルが形成された改良ゾーンの厚層化による沈下抑制効果を確認するため、計3ケースの遠心模型実験を実施した。

(1) モデル化の概要

まず前提条件として、現場状況（脚部は比較的剛な砂礫・砂岩層）を考慮し、脚部沈下の影響を極力抑えることとする。また、支保設置から次の支保設置までの上半掘削を想定した地表面沈下の比較検討を行うこととする。

先受けについては、鋼管と改良体が一体化していることとし、変形係数が100MPaである樹脂をシェル状に成形した。また、トンネル径が10m程度のトンネル工事における一般的な先受け残長（掘削後に切羽側の地山に残っている先受け長さ）に基づき、図－3に示すとおり35mmの先受け残長を設定した。なお、先受けの共下がりを防ぐため、遠心場でもほとんどたわみを生じない鉄製の馬蹄形の筒上に設置した。改良ゾーン厚さについては後述する。

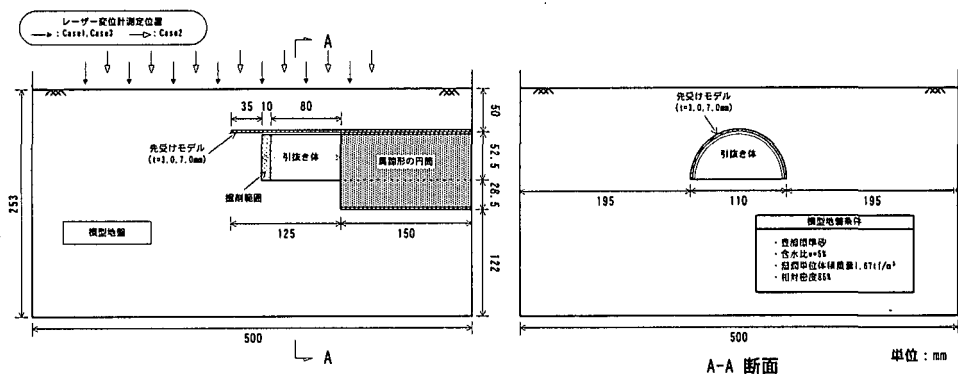


図-3 トンネル掘削実験装置概要図

トンネル掘削については、図-3に示すアルミ製の半円筒を遠心場(50G)で引抜くことにより模擬し、掘削長は10mm(トンネル径の約1/10)とした。また、同引抜き体は引抜き後において剛な上半支保工を模擬するものである。

(2) 実験概要

図-3に示すトンネル掘削実験装置概要図において、土槽は内寸で底面 $500 \times 500\text{mm}$ 、高さ 400mm となっており、 500×400 の片側面に鉄製の馬蹄形の筒(厚さ $t=2.5\text{mm}$)が剛結されている。同筒内には、二つのアルミ製の引抜き体が内蔵され、上側が $\phi 100\text{mm}$ の半円形の上半モデル、下側がほぼ半楕円形円筒である下半モデルとなっている。引抜き速度は遠心場(50G)において 20mm/min とした。模擬地盤は不飽和状態(含水比 $w=5\%$)の豊浦標準砂を用い、相対密度 $D_r=85\%$ (単位体積重量 $\gamma_t=16.7\text{kN/m}^3$)となるよう締固めた。土被りは、MGF工法を適用した現場条件および先受けが施工される都市トンネルの現状に鑑み $0.5D$ を採用することとし、馬蹄形の筒上端から 50mm の位置に設定した。先受けおよびトンネル掘削のモデル化については前述のとおりである。なお、先受けと引抜き体の間隙には、引抜き前に先受けが変化せずまた引抜きと同時に掘削されるよう、密詰め($D_r \approx 100\%$)の標準砂を充填した。

上半掘削に伴う地表面沈下分布については、図-3に示すとおり、切羽横断方向およびトンネル縦断方向に複数個設置したレーザー変位計により測定した。

(3) 実験ケース

表-3に実験ケースを示す。まず、シェル化された改良体の厚層化の影響を検討するため、実施工に基づいた改良ゾーン厚さをパラメータとしている(図-2参照)。また、シェル化された範囲すなわち実施工における鋼管の打設範囲が、沈下特性に与える影響さらには後述するシェル理論への適用性を検討するため、これについてもパラメータとし、適用実績に基づき、 120° 、 180° と設定した。

表-3 遠心模型実験ケース

ケース名	改良ゾーン厚さ	打設範囲	先受け範囲横断模式図
Case1	$t=3.0\text{mm}$	180°	
Case2		120°	
Case3	$t=7.0\text{mm}$	180°	

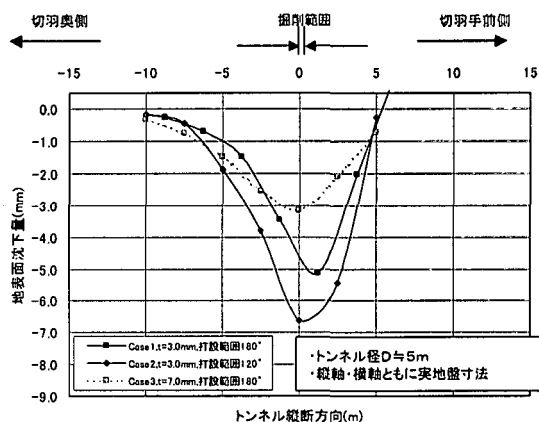


図-4 遠心模型実験結果

(4) 実験結果

図-4に実験結果を示す。同図は前述のとおり、遠心場(50G)において引抜き体を10mm掘削したときに発生したトンネル縦断方向の地表面沈下量分布を示す。

この結果から、 $t=3.0\text{mm}$ に比べて $t=7.0\text{mm}$ の時の沈下量は掘削範囲付近で特に小さく抑制されており、実施工の計測結果の傾向に一致する。ただし、切羽奥側に着目すると、 $t=7.0\text{mm}$ の沈下量の方が大きくなる場合があり、剛な先受けを連続性を持たせて施工した場合、比較的早い段階で先行沈下が発生したり、後続沈下の収束が遅れたりする可能性があることを示唆しているものと思われる。また、打設範囲に着目すると、 180° 打設した場合は、 120° の場合より沈下抑制効果が大きいことが確認され、一般的な傾向に一致するものである。

4. 円筒シェル理論による評価

(1) 円筒シェル理論の概要

筆者らは、先受けによる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を目的として、三次元的な変形特性を評価することが可能な円筒シェル理論に着目し、検討を進めてきた。円筒シェル理論によれば、径方向等分布荷重 p が長い円筒シェルのある幅 l に沿って分布する(以下、筒状载荷と定義)とき、 $0 < x < l$ の範囲において、径方向変位 w_x は式(1)のように表せる⁵⁾。

$$w_x = p r^2 \{ 2 - e^{-\beta x} \cos \beta x - e^{-\beta(l-x)} \cos \beta(l-x) \} / (2 E t) \quad \dots (1)$$

このとき、 r :円筒シェルの半径、 t :その板厚、 E :弾性係数、 $\beta = \{ 3(1-\nu^2)/r^2 t^2 \}^{0.25}$ 、 ν :ポアソン比
従って、载荷範囲における径方向変位の最大値 $w_{\max}$ は、式(1)を用いて以下のように表せる。

$$w_{\max} = p r^2 \{ 1 - e^{-\beta(l/2)} \cos \beta(l/2) \} / (E t) \quad \dots (2)$$

(2) 遠心模型実験結果の評価

式(2)を用いて、実験実施時における径方向変位の最大値 $w_{\max}$ について算定を行い、実験結果との比較を行った。算定は1G場に換算して行い、各設定条件のうち、径方向等分布荷重 p についてはクラウン部における全土被り荷重を採用し、载荷範囲 l については1掘削長である0.5m(模型地盤寸法:10mm)を採用することとした。ポアソン比については0.3とした。

比較検討した結果を、図-5に示す。横軸に改良ゾーン厚さ(模型地盤寸法)を、縦軸に径方向変位の最大値 $w_{\max}$ における解析値と実験値の比(以下、ピーク値比)をとっている。また、同図中には、先受け工の設計計算手法として一般的に用いられる骨組構造解析(パイプルーの計算)による検討結果もあわせて記している。なお、図-5中に記した梁長さの定義を図-6に示す。ただし今回は、梁長さを円筒シェル理論による算定時に設定した载荷範囲 l とする場合(梁長さ0.5m)についても検討を行うこととする。

図-5から、円筒シェル理論を用いた場合のピーク値比は、改良ゾーン厚さによらず1.0付近に集中しており、概ね変形特性を評価していることがわかる。一方、パイプルーの計算については、梁長さの設定により計算値が大きく変動し、通常の設定による梁長さでは解析上ほとんど変形が生じずピーク値比は0.0付近に集中している。また、梁長さを円筒シェル理論の掘削範囲と同一に設定しても、改良ゾーン厚さによりピーク値比が大きく変動し

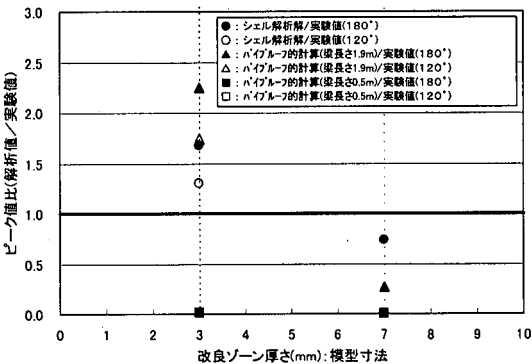


図-5 解析値と実験値の比較

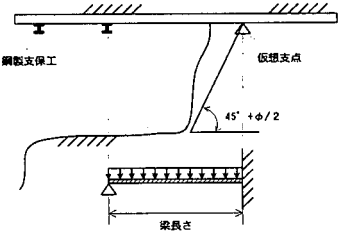


図-6 パイプルーの計算

ており、実験値を表現しているとは言い難い。ただし、円筒シェル理論による評価についても、完全に実験値と一致しているわけではなく、また打設範囲が同じ 180° の場合であっても、改良ゾーン厚さによりピーク値比が 1.0 を挟んで上下に分布したりしている。これらの原因としては、同評価が前述のとおり内空変位を本来表すものであること、改良ゾーンが完全な円筒ではないこと、先受けにより形成されたシェル内が完全な空洞ではないこと、などが挙げられる。今後、打設範囲のシェル形成度に与える影響などについて検討する必要がある。

(3) 現場施工結果の評価

(1) において脚部沈下をほとんど起こさない条件においては円筒シェル理論の適用がほぼ妥当であることが示された。そこで、2. で述べた実施工により得られた現場計測結果について円筒シェル理論による評価を試みる。現場計測結果としては、AGF、MGF 工法それぞれについて切羽距離と地表面沈下量の関係が得られているので、これをフィッティング対象とする。なお、円筒シェル理論によれば、1 掘削長分の沈下傾向を重ね合わせて評価することにより、比較的簡単に切羽距離と沈下量の関係が得られることがわかっている⁵⁾。設定した算定条件を表-4 に、現場計測結果と対比させた結果を図-7 に示す。AGF では末広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、未知数として逆算した変形係数 E は約 300N/mm^2 であり、一般に $1,000\text{N/mm}^2$ 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、前述のとおり打設範囲が $120\sim 180^\circ$ 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が原因であると考えられる。今後、鋼管と改良体が一体化した改良ゾーンについての一体化した剛性評価などについて検討を実施する必要がある。

表-4 算定条件一覧

	AGF	MGF	備考
ρ (kN/m ²)	7.5		$\rho = \gamma \times \text{全土被り}$ ($\gamma_1: 15\text{kN/m}^3$, 土被り: 5m)
ν	0.3		
r (m)	5.7	5.4	MGF は掘削径小
t (m)	0.25	0.70	図-2 参照

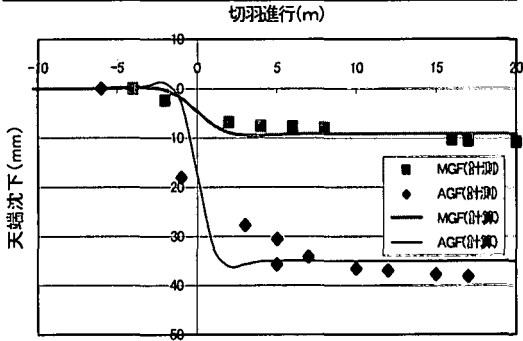


図-7 現場計測結果のフィッティング

5. まとめ

- ・遠心模型実験を実施し、改良ゾーンの厚層化による沈下抑制効果が確認できた。打設範囲の影響についても、一般的な施工実績に合致するものであった。
- ・遠心模型実験結果について円筒シェル理論による評価を行った結果、同手法は二次元的なパイプルーの計算よりもシェル状に先受けが施工された場合の地表面沈下特性を表現するのに妥当な手法であることがわかった。
- ・現場施工結果について円筒シェル理論により評価を行った結果、同手法は改良ゾーン厚さが地表面沈下に及ぼす影響を表現できることを再確認した。

参考文献

- 1) 山本, 西岡, 一條, 反り目: 中尺鋼管先受け工法の開発と適用結果について, 第 53 回年次学術講演会講演概要集(1998)
- 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) 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).
- 5) 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).