

注入式鋼管フォアパイリングの 補強効果に関する研究

北本幸義¹・伊達健介¹・山本拓治¹

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

E-mail: kitamoto@kajima.com

断層や破碎帯あるいは都市部の未固結地山といった地質条件の悪い場所に、山岳トンネル工法を適用する工事が増加している。このような施工条件では、切羽の安定性確保や地表面の沈下抑制を図ることが重要であり、補助工法の中でも先受工は大きな進歩を遂げてきた。そこで現在、施工技術の進歩に対応すべく、補強メカニズムに立脚した合理的な設計法の開発が求められている。本論文では、三次元的な円筒シェル解に着目し、施工条件的にも適用性が高いことから注入式鋼管フォアパイリングの評価手法として提案した。さらに、遠心模型実験によって円筒シェル解の適用性を検討し、先受け領域の変形特性を室内載荷実験により確認するとともに現場計測データとの比較から提案手法の妥当性を検証した。

Key Words : tunnel, forepiling, design method, theory of cylindrical shell, centrifuge model test, field observation

1. はじめに

近年、山岳トンネルを取巻く施工環境には急激な変化がみられ、都市化や大断面化が進むとともに、従来であればシールド工法で施工されたり計画線が変更されたりするような未固結地山でのトンネル掘削においても、経済性や断面形状に対する自由度などから、いわゆる山岳工法を採用する工事が増加している。これには各種補助工法の発達によるところが大きい。特に、薄い土被りの未固結地山に山岳工法を適用する場合、切羽の安定性確保や地表面沈下の抑制を図ることが不可欠であり、それらを目的とする先受け工法が果たしてきた役割は大きいといえる。

先受工の中で最も効果が高いといわれ、かつ適用事例も多いものとして注入式鋼管フォアパイリングが挙げられる。同工法は、地山中に鋼管を打設し鋼管内から地山中へ注入材を浸透させることで、鋼管と改良地山からなる補強領域（以下、先受け領域と定義）を形成し、切羽安定および地表面沈下に対抗するものである。そのメカニズムとして鋼管の曲げ剛性に起因した縦断方向の梁形成効果、アーチシェル形状の構造から誘起されるトンネル横断方向のアーチ形成効果、および先受け領域に作用する荷重を

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。ただし、実現象として三次元的な補強効果を評価する場合、特に前二者については、両者が融合されたメカニズムを考える必要があるといえる。しかしながら、現行の簡便な設計法では、鋼管による梁形成効果しか考慮されておらず、アーチ形成効果の評価に至っていないのが実状である。また、地山を改良するために鋼管から注入される薬液の効果が考慮されていないので、注入の必要性が設計に反映されないという不完全さを有しており、施工技術の進歩に伴いメカニズムに立脚した合理的な設計法の開発が求められている。

そこで、設計法はできるだけ簡便であるのが望ましいことから、トンネルを掘削したときの荷重状況を近似しうると考えられる円筒シェルの解析解に着目し、その適用を提案した。本論文では、注入式鋼管フォアパイリングに関する現行の設計手法を概観するとともに、上述した合理的な評価手法について説明を加え、遠心模型実験結果に基づいてその妥当性および実設計への適用性を検証する。さらに、円筒シェル供試体の載荷実験および現場施工における計測データから、先受け領域の変形特性を把握し合理的な注入式鋼管フォアパイリング設計の基礎資料を得るものである。

2. 従来の評価手法

トンネル標準示方書[山岳工法編]¹⁾によると、先受工とは補助工法の一つであり、具体的にはフォアボーリング、パイプルーフ、水平ジェットグラウト、長尺鋼管フォアパイリング、プレライニング等に相当する。本論文で評価対象とする注入式鋼管フォアパイリングは、上記の中で長尺鋼管フォアパイリングよりも広義であり、長尺鋼管に限定するものではない。以下では、まず先受工の地山補強効果に関する既往の研究や注入式鋼管フォアパイリングの設計法の現状について述べる。

(1) 既往の研究

先受工の地山補強効果(切羽安定性、地山変状抑制効果など)に関する研究については、これまでに数多くなされてきているが、ほとんどは先受工施工現場の計測結果報告に過ぎず、発生応力や変位などに与える先受工仕様(注入式鋼管フォアパイリングの場合、鋼管長、鋼管径、打設ピッチ等)や地山条件などの影響を検討した上で、その効果を定量的に体系化しようとする研究はさほど多くないといえる。

例えば、米山、田口ら²⁾は、先受け工法のうち、切羽前方に構築されたアーチシェル構造により支保効果を発揮するプレライニングに着目し、その補強メカニズム解明と設計法確立を目的として、変位抑制効果の検討や土圧評価など一連の研究を行っている。その中で、プレライニングが掘削区間の鉛直応力の解放を抑制することで補強効果を発揮し、その効果は周辺地盤との相互作用で生じる地山リングの剛性に依存するとしている。

小竹、岡ら³⁾は、先受工の持つ三次元的な地山補強効果に着目し、水平ジェットグラウト工法を対象に三次元FEM解析を行い、支保特性の検討や、発生応力状況から既往の簡易設計法との比較を行っている。

真下、真弓ら⁴⁾、⁵⁾は、薄い土被りの砂質地山トンネルを想定した1G場での模型掘削実験や遠心模型実験により、鋼管の打設条件が切羽安定性や変位抑制に与える影響について基礎的な研究を行っている。さらに、先受工に留まらず、ロックボルトや鏡ボルトの地山補強効果、覆工荷重などトンネル土圧の評価など、山岳トンネルの掘削時の安定性に関する研究を数多く行ってきている。

しかし、いずれの研究も、先受工仕様や地山条件が切羽安定性や地山変状抑制効果に与える影響を実験的あるいは解析的に評価するに留まり、その結果をもとに先受工の設計法に関する具体的な提案に至

っているものはない。

一方、先受工の施工実績は近年増加の一途にあり、特に長尺鋼管フォアパイリング工法については、切羽安定性確保や地表面沈下抑制に効果が大いといわれることから適用が増加している。特に昨今は、経済性や断面の自由度の高さなどから都市部やより地質条件の悪い箇所にも山岳トンネル工法が採用されることが多く、その傾向は今後も継続していくものと考えられる。先受工の適用範囲が拡大されつつある現在、補強メカニズムに基づいた合理的でかつ簡便な設計法の確立が望まれている。

(2) 設計法の現状

現在、実際に用いられる注入式鋼管フォアパイリングの設計法は種々提案されているが、主に、①パイプルーフ工法の設計法、②弾性支承上梁モデルによる設計法、③二次元FEMを用いた設計法、④三次元FEMやBEMなどを用いた設計法、⑤経験的手法による設計法などが代表例として挙げられる⁶⁾。

このうち、①の考えは、切羽奥に仮想固定点を有する梁として鋼管をモデル化し、Terzaghiによるゆるみ土圧の約50%が等分布荷重で載荷される状態を想定するもので、鋼管に生じる曲げモーメントが許容応力以内かどうかを判断するという照査を行う場合が多く、断面設計を簡易に行えることが特長である。②も同様の利点を持つ。そのため、実際の設計では鋼管の断面設計には①や②を用い、地表面沈下などに対しては③を用いるといった組み合わせもよくみられる。また、切羽安定には対数らせんですべり面を仮定する村山の式⁷⁾を用いたり、鋼管打設条件の妥当性を示すため⑤を用いたり、施工状況に応じて工夫を加え多面的なアプローチを行っている場合も少なくない。なお、①~④のように何らかの計算手法を用いる定量的な設計法においても、土圧評価、先受け領域の剛性、応力解放率など経験的に決定している場合が少なくなく、これは、注入式鋼管フォアパイリングの地山補強メカニズムが未解明で、かつ合理的で簡便な設計手法がないことに起因しているものと考えられる。

上述した現状に鑑み、これまでも合理的な設計手法を確立するための研究が行われてきた。例えば、蛭子、浅野ら⁸⁾は、ひずみ計測をもとにした鋼管の挙動予測から、切羽進行に伴い鋼管の軸方向に圧縮応力が集中することに地山補強のメカニズムがあり、切羽安定や変位抑制に対する効果は、鋼管および地山改良体による地山補強から発揮されるとしている。また、地山補強効果を等価弾性係数で評価し、円形トンネル解析解と軸対象FEMをもとに設定した初

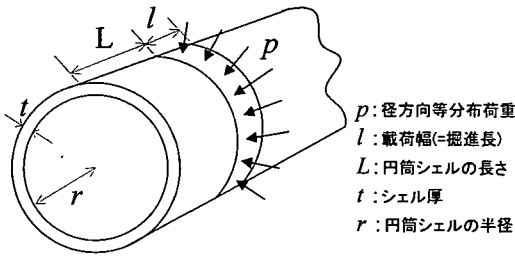


図-1 円筒シェルによる先受け領域のモデル化

期地圧解放曲線を組み合わせた簡易設計法を提案している。トンネル縦断方向の任意位置における変位を算出できる点、鋼管配置の影響を評価できる点などが特長であるが、軸方向圧縮のメカニズムと等価弾性係数評価の関係が不明確であり、妥当性評価のために必要な現場適用には至っていないといえる。

一方、武内、御手洗ら⁹⁾は、AGF工法の現場計測結果を分析し、掘削に伴う鋼管挙動や切羽通過前後の変位傾向に評価を加え、弾性支承上梁モデルをもとにした詳細設計法およびそれをもとにした簡易設計法を提案している。特に、実際の鋼管挙動を分析することで、設計荷重や支保工パネ値の設定などにより合理性を持たせたことなどが注目される。

しかし、いずれも二次元的な評価に留まっていることから、筆者らは、注入式鋼管フォアパイリングを対象に、その補強メカニズムの解明およびそれに基づく簡便な設計法の提案を目的とした研究を実施してきた。研究にあたって、既往の設計では無視されたり改良仕様に關係なく経験的に設定されている地山改良体の補強効果を積極的に評価し、鋼管と一体化した先受け領域として捉えたこと、同様に既往の設計では無視あるいは分離されがちな先受けの三次元的効果を合理的に取り入れたことなどが特長として挙げられる。

3. 先受け領域のモデル化

(1) 施工状況および荷重状態

鋼管を用いる通常先受工では、切羽から地山中へアーチ状に鋼管を打設した後、鋼管内から薬液注入による改良を実施して切羽前方の連続一体化が図られる。そのため、先受け領域は、鋼管と改良地山からなる複合体としてのシェル構造を形成すると考えられる。

そこで、先受け領域を円筒シェル体でモデル化し、トンネル掘削については円筒シェル体に掘削範囲の全土被り荷重を作用させることで模擬した(図-1参

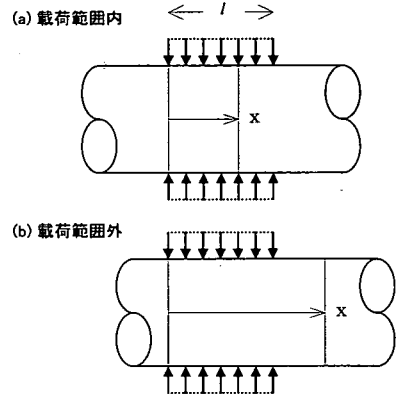


図-2 変位の算定位置と荷重範囲の関係

照)。地盤との相互作用については積極的に評価することが理想であるが、地盤パネなどの設定において多くの不確定な要素が存在すること、結果として安全側になることなどから、前述のとおりシェル体に全土被り荷重を作用させることとした。このとき、当該掘削領域のみに土被り荷重を作用させれば、ステップあたりの作用範囲は小さくなるものの、荷重強さは最大となるので、変形評価に対して安全側を与える。

(2) 円筒シェルの解析解

円筒シェル解は、一端に作用する荷重の影響が他端に及ぶか否かによって、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になる。ここに、 $\beta = \{3(1-\nu^2)/r^2t^3\}^{1/4}$ である(ν :ポアソン比、 r :円筒シェルの半径、 t :シェル厚)。通常の先受け領域の仕様として $r=5\text{m}$ 、 $t=0.3\text{m}$ 程度を考慮すれば、長いシェルとみなしうるには $L \geq 3.0\text{m}$ ($\nu=0.3$ のとき $\beta=1.05$)が必要となるが、注入式鋼管フォアパイリングでは、一般に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支障はないといえる。

さて、トンネル近傍の初期応力を均一と考え、長いシェルの円周に沿って径方向等分布荷重 p を作用させたとき、荷重作用線における径方向変位 w_x は、

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

によって与えられる(E :弾性係数)。さらに、円筒上のある幅 l (掘進長に相当)に沿って分布する荷重状態については、式(1)を用いた積分からで表される¹⁰⁾ 式(2)、(3)はそれぞれ図-2中の(a)、(b)に

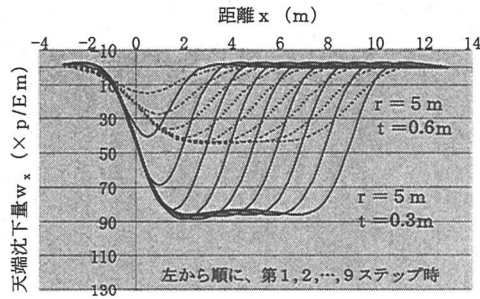


図-3 円筒シェル解による先受け領域の天端沈下

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

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

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

対応). なお, 両式は $x=l$ において式(4)のとおり一致する. 実施工においては, 掘進長 l だけの範囲に土被り荷重が作用したときの天端沈下を w_x と想定し, 掘削ステップごとに生じる w_x を重ね合わせれば, 天端沈下の累積が求められる.

$l=1\text{m}$ ずつで9mまでステップ掘削すると, 図-3に示すような累積の天端沈下が得られる. ここに, 各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相当する. $t=0.3$ の場合, 各ステップにおける増分の最大値は $40.7p/E$, 累積の最大値は第4ステップにおいて $88.5p/E$ でありそれ以降収束する. 同様に $t=0.6\text{m}$ では, 増分の最大値が $14.9p/E$, 累積の最大値は第5ステップで $44.4p/E$ となり, 両者の比は, 増分, 累積においてそれぞれ2.7, 2.0である. 増分比は掘進長に応じてシェル厚の影響を受けるが, シェル厚が大きいと変位が収束するまでのステップ数が多くなり累積比は結果的にシェル厚の比に一致してくる.

4. 遠心模型実験による補強メカニズム評価

3. では鋼管と改良地山からなる先受け領域がシェルを形成するとして, モデル化を行った. 合理的な設計法確立のためには, 仮定したモデル化の妥当性を確認しなければならない. そこで, 遠心模型実験を用いて, 掘削に伴い先受け領域に発生する曲げモーメント分布などからモデル化の妥当性を検証し, 実施工を模擬した実験から, その適用性について検討を加えた.

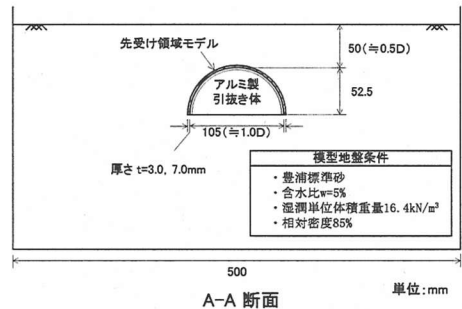
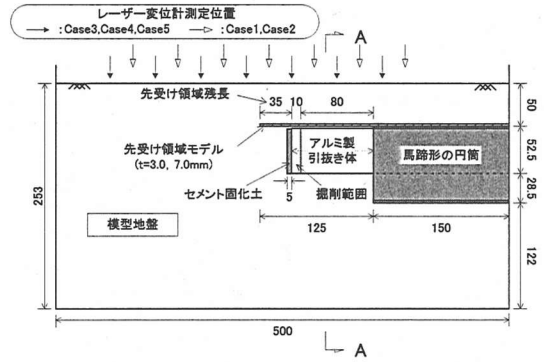


図-4 トンネル掘削模型

(1) 実験概要

図-4 にトンネル掘削実験装置の概要図を示す. まず, 先受け領域を円筒の一部でモデル化し, アクリル樹脂 (比重 0.94) を用いて均質となるよう成形を行った. 同樹脂は, 硬化後において弾性係数 $E=100\text{MN/m}^2$ となり, 材齢による変化をほとんど示さない. また, 掘削に伴う脚部沈下が顕著に生じることのないよう, 先受け領域モデルの片端を鋼製筒の上に設置し, 不動条件とした.

対象地盤については, 自立性の低い砂質土を模擬することとし, 不飽和状態 (含水比 $w=5\%$) の豊浦標準砂を用いて相対密度 $D_r=85\%$ (湿潤単位体積重量 $\gamma=16.4\text{kN/m}^3$) となるよう締固めた. 変形係数 E_{50} については, 不飽和三軸圧縮試験の結果から, 天端部で約 15MN/m^2 , 脚部で約 20MN/m^2 となっている. また, トンネルの切羽奥には掘削時の切羽安定を目的として厚さ 5mm のセメント固化土 ($E_{50}=3.4\text{GPa}$) を設置した. なお, 土被りについては, 先受けが施工される都市トンネルの現状に鑑み $0.5D (=50\text{mm})$ を採用した.

また, トンネル掘削については, 支保設置から次の支保設置までの上半掘削を想定し, 図-4 に示すアルミ製の半円筒を, $50G$ の遠心場において 20mm/min で 10mm (トンネル径の約 $1/10$) まで引抜くこと

表-1 実験ケース

ケース名	先受け領域 厚さ	先受け領域 残長*	シェル化 範囲	先受け領域 横断面模式図
Case1	t=7.0mm	35mm	180°	
Case2	t=3.0mm	35mm	180°	
Case3	t=3.0mm	95mm	180°	
Case4	t=3.0mm	35mm	120°	
Case5	t=3.0mm	35mm	180°	

*切羽前方に設置されているトンネル軸方向における先受け領域の長さ 断面は模型寸法

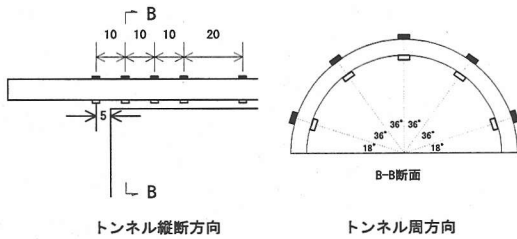


図-5 ひずみゲージ設置位置(Case1)

により模擬した。上半掘削に伴う地表面沈下分布については、切羽横断方向及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。なお、実験ケースは表-1に示すとおり、先受け残長、打設範囲などをパラメータに合計5ケース実施した。各パラメータの設定値については後述する。

(2) シェル状構造体が受ける荷重分布の評価

Case1については、シェル状の先受け領域が、トンネル掘削に伴い、周方向等分布荷重を受けるというモデル化の妥当性確認を目的にしている。評価対象は、トンネル掘削時に生じる先受け領域モデルの曲げモーメントおよび軸ひずみで、それぞれ図-5のようにトンネル縦断および横断方向に設置したひずみゲージの計測結果から算定された。また、同ケースでは基本の10mm掘削からさらに20mmを2ステップで掘削し、先受け領域が掘削に伴い受けるモーメント分布の変化についても評価を行った。なお、先受け領域厚さは、ゲージ貼付による厚みの影響を受けないよう t=7mm とし、先受け領域残長については、後述するように最も不安定な状態を想定し35mmに設定した。

まず、掘削に伴うモーメント分布の変化について述べる。図-6は、上半を(i)0~10mm, (ii)10~20mm, (iii)20~30mmの3ステップで掘削したとき

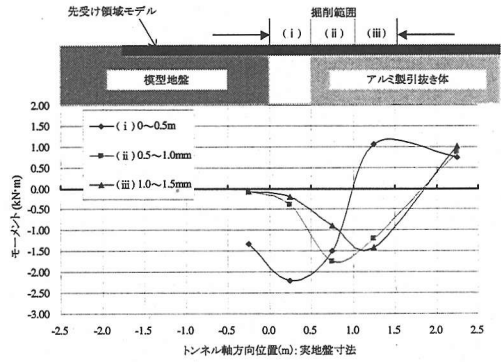


図-6 曲げモーメント増分の推移(Case1)

のひずみ測定結果に基づいて算定したトンネル縦断方向のモーメント増分を示している。ここに、モーメント値は実地盤相当に換算している。これによると、掘削に応じてモーメント分布が移動していること、各ステップともに掘削範囲の中央で最大モーメントを示していることが確認できる。

なお、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 に沿って分布するとき、トンネル縦断方向のモーメント M_x に関しては、0 < x ≤ l, x > l それぞれの範囲において、

$$M_x = p \{ e^{-\beta x} \sin \beta x - e^{-\beta(l-x)} \sin \beta(l-x) \} / (4\beta^2) \quad (5)$$

$$M_x = p \{ e^{-\beta x} \sin \beta x - e^{-\beta(x-l)} \sin \beta(x-l) \} / (4\beta^2) \quad (6)$$

のように示され、トンネル横断方向の軸力 N_φ に関しては、

$$N_\phi = Etw_x / r \quad (7)$$

のように示される¹¹⁾。

そこで、式(5), (6)を用いて0~10mm掘削時のトンネル縦断方向のモーメント分布を計算し、実験値との比較を行った。このとき、径方向等分布荷重 p については、天端部における全土被り圧を採用し、 $p = \gamma \cdot H$ (γ : 湿潤単位体積重量, H: 実地盤換算時の土被り高さ) から41kPaと算定した。その結果を図-7に示す。また、同図中には、注入式鋼管フォアパイリングの設計計算手法として一般的に用いられる梁構造解析(2で述べた手法①に相当)による検討結果もあわせて記している。ここに、図-7中に記した梁長さの定義を図-8に示す。ただし、最後に打設した鋼製支保工から切羽奥に設けた仮想支点までの距離で設定される通常の梁長さ b=1.87m の場合に

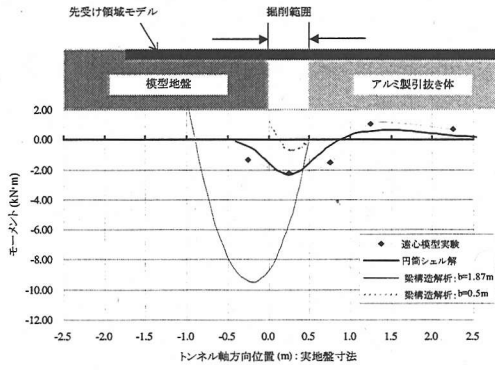


図-7 シェル解と梁構造解析の曲げモーメント比較

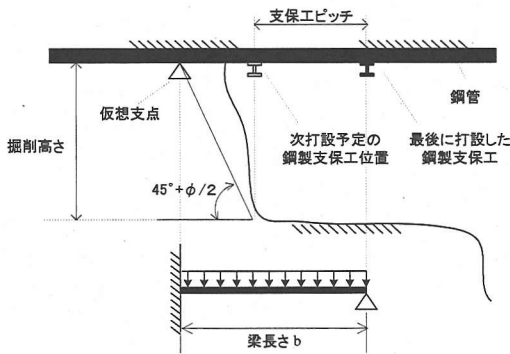


図-8 梁構造解析における梁長さの定義

加え、円筒シェル理論を適用する際の荷重範囲として設定した 0.5m (図-8 では支保工ピッチに相当) で b を評価するケースについても検討を行った。同図から、シェル理論をもとに計算した結果は実験結果とよく一致しているのに対し、設計手法として用いられることの多い一次元的な梁構造解析では、実験結果との一致度は低いということがわかる。

最後に、式(7)を用いて、トンネル横断方向の軸ひずみ分布を計算し、実験値との比較を行った。その結果を図-9に示す。実験値についてはモーメント分布と同様、0~10mm掘削したときを対象にしており、その中間地点である5mmの位置のトンネル横断方向に配置したひずみゲージの計測結果をもとにしている。同図から、先受け領域モデルが均等な荷重応力を受ける円筒シェルの挙動をほぼ呈しているものと考えられる。

(3) 先受け領域残長の影響評価

3.(2)において、シェル状の先受け領域に対するモデル化の妥当性が検証された。しかし、実際の注入式鋼管フォアパイリングではCase1で想定した先

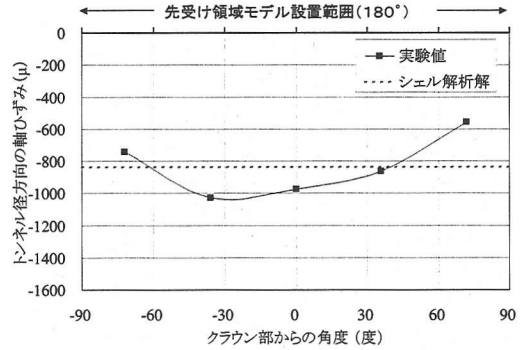


図-9 軸ひずみにおける実験値と円筒シェル解の比較

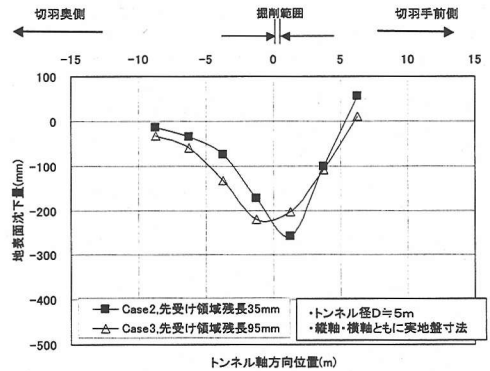


図-10 先受け領域残長の影響評価

受け領域残長の条件と異なる状況が多様に存在する。注入式鋼管フォアパイリングでは、切羽奥の先受け領域残長(鋼管の残長と一致すると仮定)は掘進とともに変化し、次段階打設直前で最短の約 3.5m となり、最も不安定な状態となる。

一方、最も安定な状態は打設直後であるが、切羽手前側約 3.5m 分は前段階で打設された鋼管と二重に設置されているので、長尺鋼管が 12.5~13.0m であることを考えると、当該段階のみの先受け領域残長は 9.0~9.5m となる。そこで、Case2 では最も危険な状態として 35mm に、Case3 は比較対象として 95mm に設定した。

図-10に両ケースの地表面沈下分布を比較した結果を示す。横軸にトンネル縦断方向の位置をとっている。同図から、両ケースとも最大沈下量は同程度であることがわかる。最大沈下量を示す地点については、両者とも掘削範囲付近に位置しており、全体としてはほぼ同じ傾向および沈下量といえる。

前述したとおり、 $L \geq \pi/\beta$ (L : 荷重端から円筒端までの距離) の条件を満たせば、円筒の一端に作用する荷重の影響が他端に及ばない長いシェルに分類されるが、Case2では $\pi/\beta=3.2\text{m}$ となり $L(=3.5\text{m})$

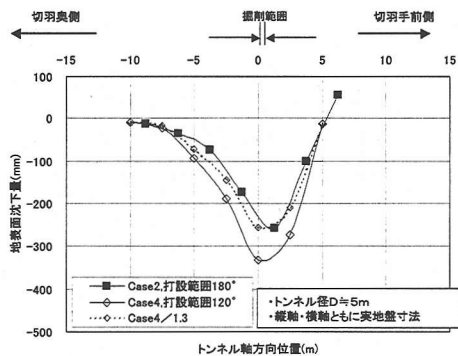


図-11 打設範囲の影響評価

より小さいという条件を満足している。すなわち、先受け領域残長が長いシェルの条件を満足している限りにおいて、変形抑制効果はトンネル縦断方向でさほど大きな相違を生じないという可能性が大きい。したがって、 $L \geq \pi/\beta$ の範囲では、切羽安定が保たれているとした場合、変形抑制効果にほとんど差異はなく、注入式鋼管フォアパイリングにおけるラップ長3.5mという値は適切な設定であると評価される。

(4) 打設範囲の影響評価

ここまでは、先受け領域を脚部付近まで改良、すなわち打設範囲が180°の場合について検討してきたが、実際の施工では120°に打設する範囲の方が多いといえる。そこで、Case4では、Case2を比較対象として打設範囲のみ120°に変更(他条件は全て同一)した。

図-11に両ケースの地表面沈下分布を比較した結果を示す。図-10と同様、横軸にはトンネル縦断方向の位置を示している。同図から、最大沈下量については、Case4(120°)の方が、Case2(180°)に比べて3割程度大きく発生しているのがわかる。ただし、最大沈下量を示す位置や沈下量分布については、図中に示したCase4の値を単純に1.3で除した結果と非常に酷似していることがわかる。したがって、打設範囲が120°の場合も、シェル解に適切な係数をかける単純な方法で、その挙動が評価可能であると考える。

(5) シェル形成度の影響評価

これまでの検討では、鋼管と改良地山による先受け領域がシェルの一部であり、またシェルとして機能すると仮定してきた。あるいは、先受け領域がシェルとして機能してこそ地山補強効果を発揮するゆえ、施工上シェルとして機能する構造体が達成されることを前提に設計法を確立していくべきであると

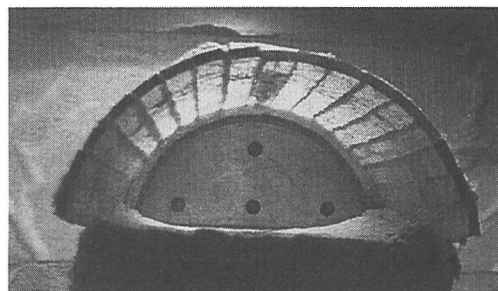


写真-1 切込みを入れた先受け領域モデル

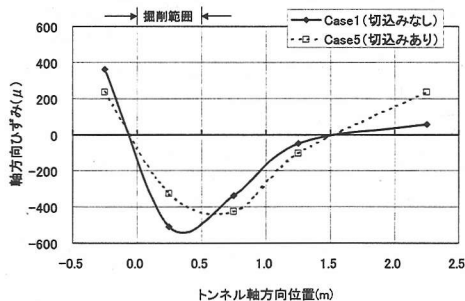


図-12 トンネル縦断方向の軸方向ひずみ分布

もいえる。しかし、不均質な地山や亀裂性の地山などでは、実際均質な改良体の施工が非常に困難であることは周知の事実でもある。

そこで、Case5では、現状の施工技術に対応するための検討として、表-1や写真-1に示すように、トンネル軸方向に数本の切込みを入れた不完全なシェルを用いて、掘削実験を実施した。切込みは半円筒のシェルの縦断方向に幅1mmで16箇所設置した。すなわち、トンネル横断周方向約170mmを17箇所に分断したことになる。また、地山の抜け落ちによる影響をなくするため、切込みを入れた先受け領域モデルの上面には樹脂性ラップをゆるく貼付した。なお、切込み以外の条件については、Case2と同一である。また、ひずみ分布の比較を目的に、クラウン部に位置する分割部には、ひずみゲージを縦断方向に図-5と同様の位置に設置した。

図-12にトンネル縦断方向の軸方向ひずみ分布を示す。同図から、切込みの有無にかかわらず、ほぼ同程度のひずみを生じていることがわかり、同実験で設定した切込み条件においては、シェルとしての機能を果たしているものと考えられる。すなわち、切込みがあるような不完全なシェル状の構造体であっても、それが微小であればシェル方向へ力が伝達され、全体的にシェル状改良体として機能し、円筒シェル理論によって評価可能であることを示している。

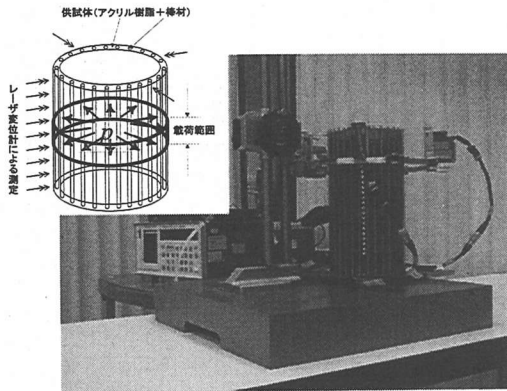


写真-2 供試体と実験装置

表-2 実験ケース

ケース	棒材質	直径(cm)	本数(本)
1	—	—	—
2	アルミ	0.4	16
3	アルミ	0.4	32
4	アルミ	0.4	64
5	中空アルミ	0.4	16
6	アルミ	0.2	16
7	鋼	0.4	16

5. 先受け領域の変形特性

4.において先受け領域のモデル化の妥当性が確認でき、注入式鋼管フォアパイリングに対する適用性も示された。しかし、注入式鋼管フォアパイリングの設計を行うためには、先受け領域としての剛性を評価することが必要である。そこで、金属棒とアクリル樹脂により複合体としての先受け領域モデルを作製し、載荷実験によってその変形特性を考察した。また、現場計測結果に基づき、実際の適用性について検討した。

(1) 実験概要

内径14.6cm、厚さ0.6cm、高さ30cmの型枠内に遠心模型実験で使用した種類と同一のアクリル樹脂を流し込み、薬液注入による改良地山を模擬して完全な円筒状の供試体を作製した(写真-2参照)。この際、表-2に示すような実験ケースに対して、注入式鋼管フォアパイリングの鋼管を想定した種々の棒材を供試体中にあらかじめ配置している。ここに、アルミ棒、鋼材の弾性係数 E はそれぞれ 7.2×10^4 、 $2.1 \times 10^5 \text{MN/m}^2$ であり、中空の棒材では内部にアクリル樹脂を充填している。また、アクリル樹脂の E は前述したとおり 100MN/m^2 である。

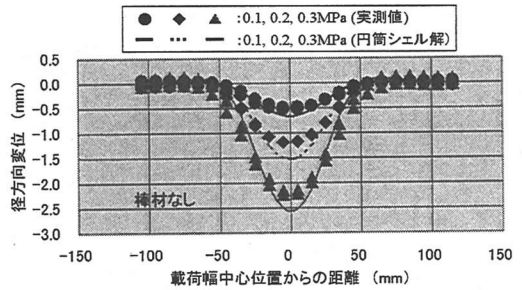


図-13 径方向変位分布 (ケース 1)

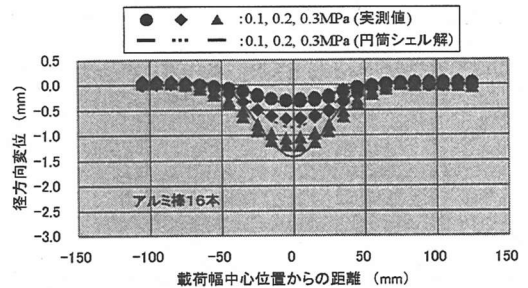


図-14 径方向変位分布 (ケース 2)

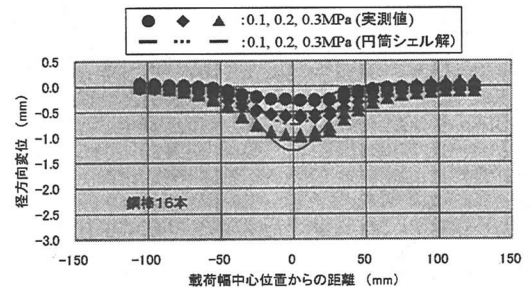


図-15 径方向変位分布 (ケース 7)

載荷にあたっては、供試体の中心高さで内側から5cm幅の範囲に空気圧が作用するような装置を組立てた。実際のトンネル掘削では先受け領域の外側から荷重が作用するものの、弾性論で評価する限り荷重の作用方向は特に問題ではなく、装置上も内側から載荷するほうが反力を得やすい。測定項目は、圧力計による載荷重と、直交する2方向においてレーザ変位計を用いた高さごとの径方向変位である。

(2) 実験結果と考察

棒材がないため供試体の弾性係数が既知 ($E=100 \text{MN/m}^2$) となるケース 1 について、載荷重 $p=0.1, 0.2, 0.3 \text{MPa}$ を作用させたときの実測の径方向変位を図-13に示すとともに、円筒シェル解を同図中に実

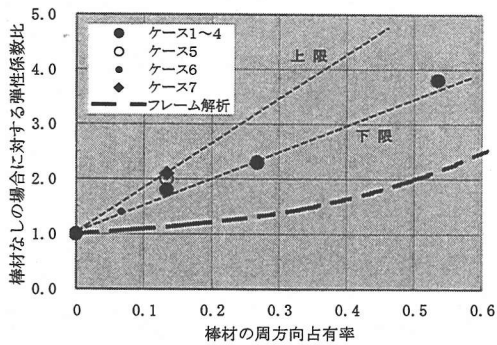


図-16 弾性係数の増加傾向

線によって付記する。ここに、実測値は、直交する2方向それぞれの平均を表示している。図からわかるとおり、円筒シェルの変形状態はほぼ均等であり、円筒シェル解は、最大値が若干大きくなるものの実測値との一致度は全体的に高いといえる。

次に、先受け領域の変形特性に及ぼす鋼管の影響度合いを評価すべく、棒材を配置したケースについて、径方向変位のカーブフィッティングから先受け領域としての弾性係数を同定した。アルミ棒、鋼棒が16本ずつ配置されたケース2、7の場合を図-14、15に示すが、それぞれ $E=180, 210\text{MN/m}^2$ と評価される。ここで円筒シェル解は、元来均一な材料に関して導かれたものであるため、実測の変位分布状況(変位の生じる影響範囲)との差異が若干大きくなっており、その傾向はアルミ棒よりも剛性の大きい鋼棒を配置したケース7で顕著となっている。

残りのケースについても同様に、複合体としての弾性係数を逆算し、アクリル樹脂の E に対する比として、実施工で支配的な要因となる棒材の周方向占有率(棒材の外径に本数を乗じた値と円筒シェルの中心周長の比)との関係で表したものが図-16である。棒材の周方向占有率が増加すれば弾性係数比も増大し、通常施工される長尺鋼管の占有率(0.25程度)に対して、当実験条件では先受け領域の弾性係数が改良地山の約2倍になると評価される。ただし、図-16に示す傾向は、均質な薬液注入によって連続一体化された先受け領域の形成を前提としているので、地山の改良が不十分であると、重厚な鋼管を用いても十分な補強効果を発揮しえない。注入式鋼管フォアパイリングでは、鋼管を密に打設したり薬液を均質に注入させたりして、連続一体化を図ることが肝要と考えられる。

なお、図-16中の太破線は、細分化した円周要素に、周方向占有率に応じてアクリル樹脂、棒材の弾

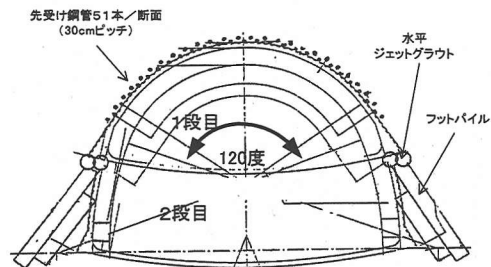


図-17 街道横断面における変状対策

表-3 パラメータの設定

項目	標準部	街道横断面部
土被り圧	$p = 0.15 \text{ MPa}$	
打設範囲	120°	
先受け領域厚さ	$t = 0.6 \text{ m}$	
改良地山の弾性係数	$E = 300 \text{ MPa}$	
掘削半径	$r = 7.35 \text{ m}$	
1ステップの掘削長	$l = 1.0 \text{ m}$	
鋼管ピッチ	60 cm	30 cm
周方向占有率	0.19	0.38
弾性係数の増加率	1.9~2.6	2.9~4.1

性係数を与えたフレーム解析による結果で、各ケースから算出される変位とケース1における算出変位との逆数比を縦軸の弾性係数比として表している(鋼、アルミによる差異はほとんどない)。フレーム解析は二次元的であるため、棒材の梁的な効果が反映されず、実験結果よりも周方向占有率の影響が過小となっている。また、FEM解析などで先受け領域全体の弾性係数を入力する際、先受け領域の横断方向の断面積内に占める鋼管の面積割合から弾性係数を合成して評価する場合があるが、ケース2を対象とした場合、 $8,500\text{MN/m}^2$ 程度となるのに対し、図-16によれば約 250MN/m^2 であり、かなり過大なることに注意を要する(横断方向の面積換算で弾性係数を評価することは、縦断(軸)方向の载荷を想定しており、形態的にも問題がある)。

(3) 現場計測結果による検討

都市域における大断面トンネル(最大掘削断面積 260m^2 を4段ベンチにて施工)の1段ベンチを掘削する際、既設の街道直下を横断する区間(街道横断

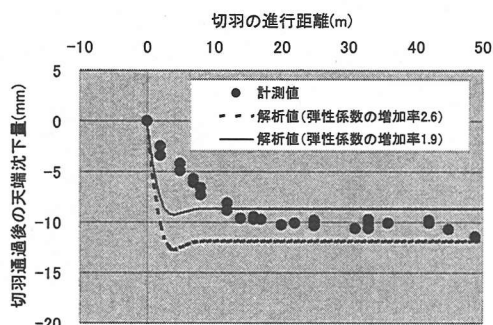


図-18 標準部における天端沈下傾向

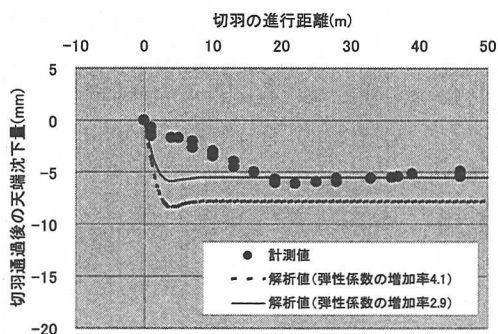


図-19 街道横断面部における天端沈下傾向

部)において、交通・埋設物状況などから標準部よりも十分な対策が必要となった。そのため、標準部で施工されていた長尺鋼管フォアパイリングによる鋼管の打設間隔を半分にする仕様が採用された(図-17参照)。ここでは、5.(2)にて検討した先受け領域の変形特性に基づき、標準部および街道横断面部における1段ベンチ掘削時の天端沈下量について検討を加える。

まず、鋼管の周方向占有率をはじめとする各パラメータを表-3のように設定した。弾性係数の増加率の範囲については、図-16の実験結果を単純に包含するよう設定している。これらのパラメータを式(2)、(3)に代入し、計測値と比較した結果が図-18、19である。計測値、解析値ともに切羽通過後の天端沈下発生状況を示している。なお、先受けの打設範囲は120°であるが、大断面のため1段ベンチの脚部付近にまで先受けが設けられており、脚部自体も水平ジェットグラウトによって補強されているので、施工条件的に円筒シェル解の適用性は高いと考えられる。

最終的な天端沈下量の計測値は、円筒シェル解から算定される範囲内に分布しており、鋼管の打設

条件による差異が表されている。ただし、標準部、街道横断面ともに、切羽通過直後における挙動については一致度が低くなっている。これは、5.(2)で記述したとおり均質を前提とする解析解に対して、実際先受け領域は不均質であること、掘削されるまで切羽前方の先受け領域の内側には地山が存在することなどの影響があるためと考えられる。これらの内容が反映されれば設計手法としてさらなる高度化が図られるが、鋼管の打設条件を考慮した先受け領域の弾性係数を円筒シェル解へ組み入れることによって、注入式鋼管フォアパイリングの変形抑制効果を表現できるということが示された。

6. まとめ

注入式鋼管フォアパイリングの補強効果の評価手法として施工条件的にも適用性の高い円筒シェル解を提案し、遠心模型実験からその妥当性および適用性を検討するとともに、載荷実験、現場計測データが先受け領域の変形特性に及ぼす影響を検討し、合理的な設計手法へ向けての基礎資料を得ることができた。以下に、本論文で得られた知見を記す。

- 円筒シェル解は、本来注入式鋼管フォアパイリングが有する三次元的な地山補強効果を簡易に表現できる手法であり、掘削段階に応じた変形特性も評価できるため、合理的な設計に適している。
 - トンネル掘削を模擬した遠心模型実験により、先受け領域に関して、円筒シェルによるモデル化が妥当であることが確認された。さらに“長いシェル”と判断される先受け領域残長を有する条件では、地山補強効果にほとんど差がないこと、打設範囲が120°の場合の地表面沈下に関しては、180°の場合における剛性を適切に低下させることで単純に評価できること、トンネル横断方向に連続性がなく完全にシェルとなっていない場合でも、ある範囲ではシェルとしての挙動を示すことがわかった。
 - 円筒供試体を用いた載荷実験により、先受け領域としての変形特性は、フレーム解析で評価するよりは変形し難く、断面換算で実施されている評価よりは変形し易いことがわかった。現場計測結果を、同実験より得られた評価に基づき検討したところ、ほぼ実験的評価が正しいことが確認された。なお、通常施工される注入式鋼管フォアパイリングにおいては、先受け領域の弾性係数が改良地山の約2倍になると予想される。
- 今回、注入式鋼管フォアパイリングの合理的な設計手法として提案した円筒シェル解についてその妥

当性が確認でき、実設計への適用性についても基本的な項目については確認ができた。今後は、実験的検討と現場計測データの分析を通じ、様々な注入式鋼管フォアパイリングの仕様に対して、円筒シェル解適用時の評価体系を確立するとともに、現場施工条件に応じて最適な注入式鋼管フォアパイリング、あるいはその他の先受工の仕様を提供することができるよう、研究を進めていく予定である。

謝辞：最後に、本研究の実施にあたり、東京工業大学・太田秀樹教授のご指導を賜りましたことを記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説, pp.233, 1996.5.
- 2) 米山秀樹, 田口善文, 笹尾春夫, 指田健次：プレライニングの先受け・支保機構に関する模型実験, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.109-120, 1998.3
- 3) 小竹望, 岡憲二郎, 山本芳生：高圧噴射攪拌工法による改良体の安定検討法に関する考察, 第27回土質工学研究発表会, pp.2065-2066, 1992.6.
- 4) 真弓英大, 真下英人, 石村利明：トンネル先受工の地盤変状抑制効果に関する模型実験, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, pp.138-139, 1998.10.
- 5) 真下英人, 猪熊明：トンネル切羽の安定性に関する遠心力模型実験, トンネル工学研究発表会, Vol.5, pp.117-122, 1995.11.
- 6) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法研究会：アンブレラ工法選定上の要点(改訂版), p.28, 1999.11.
- 7) 村山朔郎：機械化シールドの掘進機能に関する土質力学考察, 第1回土質工学研究発表会, 1966.
- 8) 蛭子清二, 浅野剛, 斉藤敏明：鋼管注入式トンネル先受け工法の簡易設計法の提案, 第11回岩の力学国内シンポジウム, F12, 2002.1.
- 9) 武内秀木, 御手洗良夫, 鈴木雅行, 松重宗徳, 中川浩二：長尺鋼管フォアパイリング(AGF工法)の設計法の提案, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.191-202, 1999.6.
- 10) 北本幸義, 伊達健介, 山本拓治, 日比谷啓介, 太田秀樹：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, pp.2079-2080, 2000.6.
- 11) Kitamoto, Y., Date, K., Yamamoto, T., Hibiya, K. and Ohta, H.: Evaluation of forepiling supporting mechanism based on the cylindrical shell theory, *ISRM Regional Symposium, EUROCK, 2001*, pp.579-584, 2001.6.

(2002. 5. 29受付)

SUPPORTING EFFECT OF TUNNEL FOREPILING WITH INJECTION

Yukiyoshi KITAMOTO, Kensuke DATE and Takuji YAMAMOTO

Recently, mountain tunneling method has been adopted in tunneling under worse geological conditions. In order to stabilize the face and control the ground surface settlement, a variety of supplementary construction methods have been presented, while their design criteria not steadily developed. In this paper, first of all, theory of cylindrical shell was proposed as the rational design method. Furthermore, its rationality was verified and its applicability to actual design was investigated by centrifuge model tests, cylindrical loading tests and measurement data in actual tunneling construction.