

中尺鋼管フォアパイリングの開発と有効性評価

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

近年、都市域をはじめとする土かぶりの薄い未固結地山において、経済性や断面形状の面からいわゆる山岳トンネル工法を採用する工事例が増加している。このような施工環境下では、切羽の安定や地表面の沈下防止を図る補助工法が不可欠であり、従来、長尺鋼管フォアパイリングが多く採用されてきた。しかし、コストやサイクルタイムに関する問題点も存在していることから、長さが約半分の鋼管を用いて打設間隔や打設角度などに工夫を加え、長尺の場合と同等以上の補強効果とコスト縮減、工期短縮を可能とする中尺鋼管フォアパイリングを開発した。本論文では、中尺鋼管フォアパイリングの地山補強効果に関する室内模型実験による検証結果と、実現場に適用した施工事例およびその計測結果について報告する。

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

1. はじめに

近年、山岳トンネルを取り巻く施工環境には、都市化や大断面化をはじめとして急激な変化がみられ、従来であればシールド工法で施工されるような土砂、未固結地山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。そのため、あらゆる土質に対応できる効率的で経済的な補助工法の適用が求められている。

トンネル工事の掘削対象となる地山が土砂、未固結、風化帯、破碎帯で、切羽面の安定を保てないあるいは地表面に有害な沈下の発生する恐れが認められるような場合、地山を安定させる技術の一つとして先受工がある。これは、切羽面の外周に沿って前方へ放射状にパイプ等を打設するもので、長さ3~5mのロックボルト類を打設して薬液やモルタルを注入するフォアポーリングと、長さ12m余の長尺鋼管を打設・注入する長尺鋼管フォアパイリングが代表的な工法として挙げられる。しかしながら、フォアポーリングと長尺鋼管フォアパイリングの中間に位置づけられる工法は意外と少ないのが実状といえる。また、長尺鋼管フォアパイリングはフォアポーリングに比べて、補強効果が大きいものの費用も比較的高いので、コストパフォーマンスのよい先受工技術の開発が望まれている。

山岳トンネル工事の安全施工・工期短縮・コスト縮減を目指すには、既存技術と比較して補強効果、経済性の両面に優れた工法の適用が不可欠である。そこで、フォア

アポーリングと長尺鋼管フォアパイリングの中間的な工法に着目し、長尺鋼管フォアパイリングで採用されている鋼管よりも小口径で、長さが半分程度の中尺の汎用ガス管をドリル用ジャンボによって打設する中尺鋼管フォアパイリングを開発した。本論文では、中尺鋼管フォアパイリングの概要について述べるとともに、実験結果や現場計測結果に基づき、その有効性や合理性について検証・考察するものである。

2. 先受工技術の概要

(1) 従来の先受工技術

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に位置づけられ、主に切羽安定対策、地表面沈下対策および近接構造物対策に用いられるとある。具体的には、フォアポーリング、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、プレライニングが先受工に相当する。天端の安定に対してはフォアポーリングが比較的好く用いられるが、地表面沈下対策にはフォアポーリングを除く工法が用いられると示されている。標準示方書が示すとおり、補助工法の適用にあたっては、地山条件、立地条件、施工性などを総合的に判断して選定がなされており、その結果としてフォアポーリングで地山のゆるみや変形を抑制できない場合には、長尺鋼管フォアパイリングを採用するケースが多い。なお、土かぶりの小さい坑口部で地上に道路や建物

がある場合等には、パイプーフ工法が多く用いられている²⁾。

長尺鋼管フォアパイリングは、地表面沈下対策としての効果も大きいといわれるが、12m余の鋼管を打設した後、鋼管内から地山へ注入を行うため、補助工法の工程が全体工期に大きな影響を与えるとともに、コストが増大するという問題点がある。さらに、当初の長尺鋼管フォアパイリングは、大型の専用機械を利用して施工する工法であったため、コストや工期に関する問題が顕在化していた。そこで、トンネル工事で用いられることの多い汎用のドリル用ジャンボによって長尺鋼管フォアパイリングを施工できるAGF工法が開発され、専用機械が不要であることから、適用件数も増加の一途をたどってきた。さらに、ビットの工夫（拡径・縮小、回収方法）、鋼管接続の簡易化、断面の無拡幅化、鋼管の小口径化などの高度化を行うことで、AGF工法を起源とした各種の長尺鋼管フォアパイリングが開発および適用されてきている³⁾。

しかし、AGF工法といえども、基本的に長尺鋼管を採用しているために孔曲がりが多く鋼管が打設困難になることもあり、打設されても所定の位置にセットされない等といったトラブルが存在する⁴⁾。また、長尺鋼管フォアパイリングは通常φ100mm以上の比較的大口径の鋼管が採用されるため、転石や破砕帯の影響を受けやすく、長尺ゆえに注入材が均等に注入されず効果的な地山補強にならないことも指摘されている⁴⁾⁵⁾。また、コストと工期の問題は軽減されたものの大きく改善された訳ではない。さらに、ドリル用ジャンボで施工するということは、鋼管の接続作業による工期ロスが発生することを意味し、高所作業に伴う安全面の問題も新たに顕在化してくる。

その結果、先受工に関しては、品質および安全性を保持しつつ、コスト縮減および工期短縮可能な工法が強く求められているというのが現状である。

(2) 中尺鋼管フォアパイリングの概要

そこで、筆者らは、転石や破砕帯の影響を避け、孔曲ガリを防止するため、一般に長尺鋼管フォアパイリングで用いられる鋼管の約半分長さで、より小口径の中尺鋼管を採用することとした⁶⁾。その結果、孔曲ガリに起因した鋼管の挿入不備やビットの回収不能も回避でき、1本当たりの削孔時間が短縮され、さらに鋼管の継足し作業も不要となるので、シフト長3mの場合、施工サイクルタイムは1断面につき692分であった。これは、長尺の場合（2,664分）と同じシフト長として換算すると2,076分に相当し、施工の急速化を可能としている。なお、コスト縮減を目的として、中尺鋼管には汎用のφ76.3mmのガス管を採用している。図-1と表-1に、中尺鋼

管フォアパイリングと従来の長尺鋼管フォアパイリングを比較した概要図と比較表を示す。

打設角度については、鋼管と注入による改良地山で形成される改良範囲（以下、先受け領域と定義）の厚層化を目的として、従来の5°前後よりも大きく15°前後とした。ただし、打設長が短いため、余掘り量は逆に減少している。仰角を大きくした背景には、解放応力に効果的に対抗できるよう、応力方向に沿って設置される斜めボルト的な効果を期待しているという側面もある。打設ピッチについては、比較的密な砂質地山において長尺鋼管フォアパイリングを採用した際に懸念される鋼管間からの地山抜落ちの防止を目的として、また均質な先受け領域の形成を目指して、長尺鋼管フォアパイリングで採用されている450mmや600mmよりも密な300mmに設定している。

中尺鋼管フォアパイリングの削孔に使用したビットは、図-2に示すとおりパイロット部と特殊形状のリーマ一部が一体となっている。パイロット部は、孔曲ガリを防止するため鋼管の中央に位置し、後方のリーマ一部は、鋼管外径よりも若干大きい掘削断面を確保するとともに、鋼管内へ挿入できるよう片側に突出し、所定の削孔長に

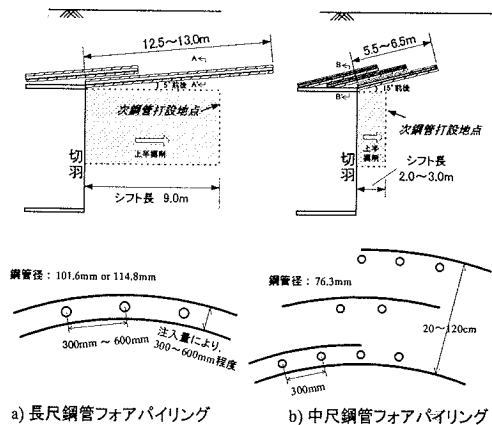


図-1 工法概要図

表-1 工法の仕様比較

項目	長尺鋼管 フォアパイリング	中尺鋼管 フォアパイリング
鋼管長	12.5~13.0m	5.5~6.5m
鋼管径	101.6mm, 114.3mmが主流	76.3mm
打設角度	5°前後	15°前後
シフト長	9.0mが主流	2.0~3.0m
打設ピッチ	300mm~600mm	基本的に300mm
使用機械	専用機械, ドリル用ジャンボ (AGFの場合)	ドリル用ジャンボ

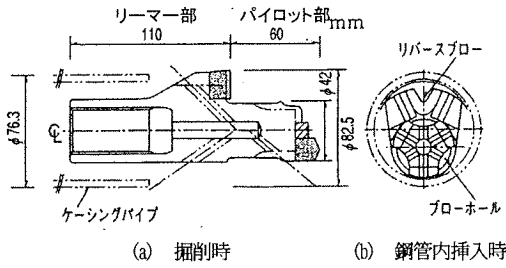


図-2 ビット形状

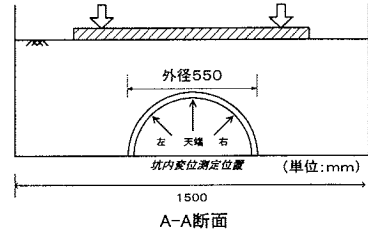
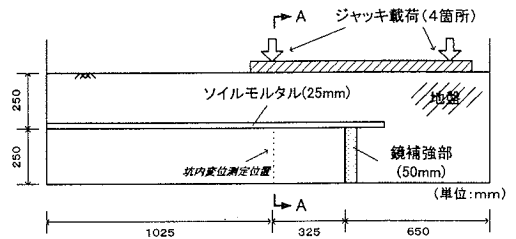


図-3 実験概要図

表-2 中尺鋼管フォアパイリングの利点

効果	要因
品質向上	<ul style="list-style-type: none"> 先受け領域の厚層化による地表面沈下の抑制 中尺鋼管, 特殊ビットによる孔曲がり防止に伴う鋼管挿入不備の回避
コスト縮減	<ul style="list-style-type: none"> 安価な中尺鋼管, 特殊ビットの採用 鋼管やビットの回収率向上 余掘り量の減少
工期短縮	<ul style="list-style-type: none"> 中尺化による鋼管接続作業の不要 小口径化により転石, 破砕帯での削孔の作業性向上
安全性向上	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管を密に打設することで鋼管間からの土砂の抜落ちを防止 鋼管接続作業の不要により高所作業の低減

表-3 実験材料の物性

モデル対象	使用材料	材料物性
地盤	山砂	$G_s=2.758, D_{max}=9.5\text{mm}, U_c=2.48,$ $w=15.0\%, \rho_s=1.57\text{g/cm}^3$ $(w_{qr}=16.5\%, \rho_{hmax}=1.63\text{g/cm}^3)$ $c_s=6\text{kN/m}^2, \phi_s=32^\circ$ 変形係数 $E=25\text{MN/m}^2$ ($\alpha=100\text{kN/m}^2$)
鋼管	中実刃棒	弾性係数 $E=7.2 \times 10^4 \text{MN/m}^2$
改良地山	ソイルモルタル	厚さ $t=25\text{mm}$ $q_u=200\text{kN/m}^2, E_{st}=80\text{MN/m}^2$

到達した後鋼管内壁に沿ってビットを回収することができる。さらに、練り粉のスムーズな排出が可能となるよう、刃の間にも練り粉排出用の溝とリバースブローと呼ばれる水孔がある。単純な形状のため、二重管先受け工法における従来の拡翼ビットに比べて安価であり、外径を小さくしているため、長尺鋼管フォアパイリングで時間がかかっていた硬質な転石が混入した地山や破砕帯でもスムーズに削孔できる。

以上のように、中尺鋼管フォアパイリングは鋼管仕様、その打設仕様およびビットの工夫を行うことで、品質、安全性の面はもとより、材料費の低減とサイクルタイムの向上(20%程度)により、長尺鋼管フォアパイリングに比べて10%程度のコスト縮減を図ることができた。表-2に、ここまで記した中尺鋼管フォアパイリングの利点をまとめる⁹⁾。なお、汎用の中尺鋼管を用いるため、当初、曲げ抵抗の低下や先受け長さの不足が懸念されたが、後述するとおり、工法の特徴を考慮した実験結果や動態観測結果によって解決し、先受け領域のモデル化に適用した円筒シェル理論からその効果を裏付けている。

3. 大型模型載荷実験による検証

(1) 実験概要

工法仕様の違いによる補強効果の違いを検討し、中尺鋼管フォアパイリングの優位性を確認するため、大型土槽を用いた先受工モデルの載荷実験を実施した⁹⁾。図-3に実験概要図を示す。模型は幾何学的縮尺を1/20とし、最も沈下が生じると想定される次鋼管打設直前の状態を対象としている。地盤は表-3に示すとおり、含水比15.0%の山砂を締固めて作製した(切羽の崩落を防ぐため、鏡補強部として一軸圧縮強さ100kN/m²のセメント混入砂を使用)。注入によって改良される地山を模擬したソイルモルタルの一軸圧縮強さは200kN/m²を採用し、配合と養生日数を調整して実験に供した。ソイルモルタルの厚さについては、支配的な影響を及ぼすことのないよう全ケースとも25mmに固定し、鋼管モデルの打設方法による影響の検討を主眼とした。載荷は4本のジャッキを用いて行い、Case 2, 3の載荷中には、図-3に示すA-A断面位置において、天端部と肩部2箇所計3箇所ですれ

表-4 実験ケース

		Case 1	Case 2	Case 3
対象モデル		鋼管なし	長尺鋼管 7φが 1φが	中尺鋼管 7φが 1φが
ソイルモルタル厚		25mm		
アルミ棒	径	なし	6mm	4mm
	長さ		626mm	324mm
	打設角度		23°	95°
	打設本数		26本	38本
	打設範囲		180°	180°
	ラップ長		175mm	150mm

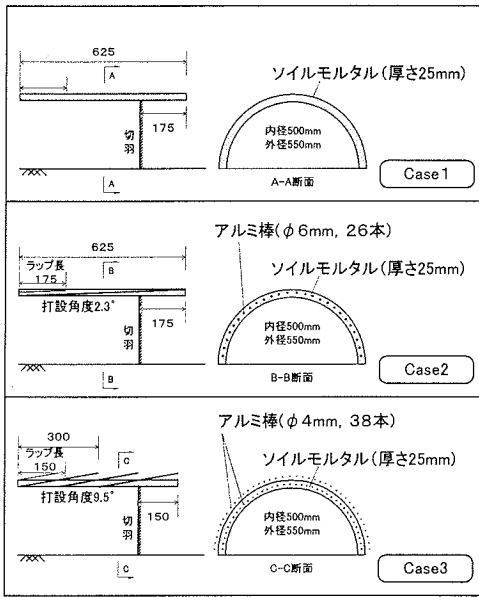


図-4 各ケースの概要図

一φ変位計による坑内変位計測を実施した。

(2) 実験ケース

本実験では、表-4に示すとおり、Case 1として鋼管モデルのないケースを実施し、Case 2およびCase 3として、長尺鋼管フォアパイリングおよび中尺鋼管フォアパイリングの先受工モデルを用いた。これまでも先受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それぞれモデル化し、その三次元的な挙動について検討したものは少ないといえる。図-4に、全ケースの縦断面および横断面の概要図を示す。鋼管モデルとしては中実のアルミ棒を用いており、Case 3におけるトンネル軸方向の単位長さあたりのアルミ量はCase 2の約94%に抑えられている。

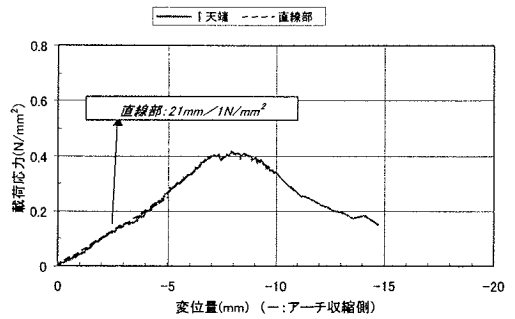


図-5 荷重応力と坑内変位の関係 (Case 1)

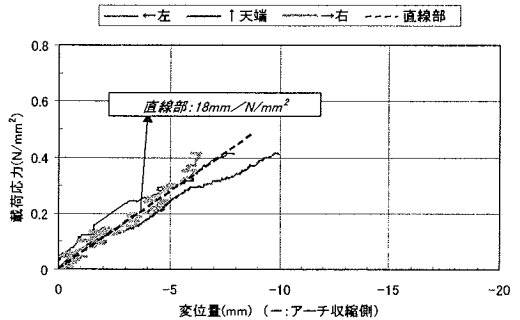


図-6 荷重応力と坑内変位の関係 (Case 2)

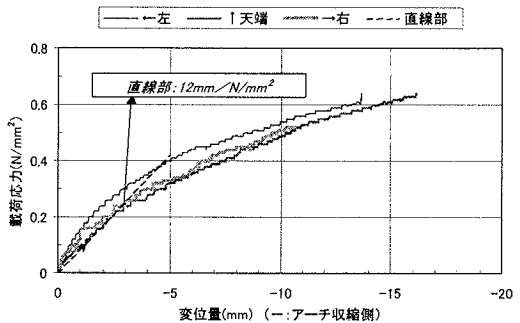


図-7 荷重応力と坑内変位の関係 (Case 3)

(3) 実験結果

Case 1, Case 2およびCase 3における荷重応力～坑内変位の関係を、それぞれ図-5、図-6および図-7に示す。坑内変位とは、ここでは天端部と肩部2箇所計3箇所測定された径方向変位を意味する。

まず、図-6、図-7において、坑内変位は3箇所ほぼ均等に生じていることから、先受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。また、同図の弾性挙動を示している部分(図中の直線部)について着目すると、荷重応力1N/mm²に対して、Case 1, 2, 3において、それぞれ21mm, 18mm, 12mmとなり、Case 1>

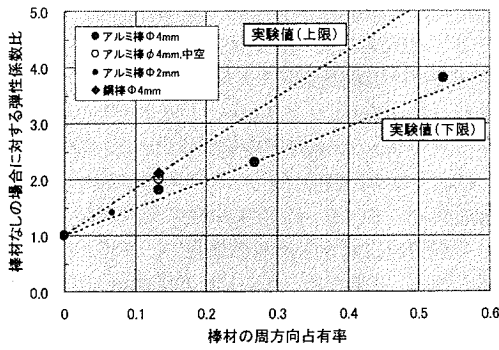


図-8 先受け領域における弾性係数の増加傾向

Case 2>Case 3という結果になっている。これらから、鋼管モデル打設により変位抑制効果が増大していること、より小口径の鋼管モデルをより大きい仰角で多数打設したことにより変位抑制効果が増大したことがわかる。

(4) 実験結果に関する考察

まず、荷重によって生じる先受けの径方向変位がほぼ均等であったことから、アルミ棒とソイルモルタルによるシェル状の先受け領域が形成され、同領域が周方向に均等荷重を受けていたと考えられる。したがって、先受工の補強効果の評価モデルとして、円筒シェル状の構造物が外圧を均等に受けている状態が適当であると考えられる。ただし、円筒シェルモデルの適用にあたっては、先受け領域の坑内方向への変位に対する弾性係数 E および先受け領域厚さ t の絶対的評価が必要となるため、さらなる実験と現場施工データの積上げが求められる。一方、縦断方向の中間的な断面を対象としてソイルモルタルの中心軸に関する曲げ剛性 EI を算定すると、どの横断面においてもアルミ棒が二段に配置されている中尺鋼管フォアパイリングは、長尺鋼管フォアパイリングに比べて遙かに大きな値を示す(単位幅あたりの EI は、中尺、長尺の場合でそれぞれ $28.5\text{kNm}^2/\text{m}$ 、 $0.3\text{kNm}^2/\text{m}$)にもかかわらず、径方向の単位応力あたりの変位増分に関するCase 2/Case 3の値が1.5であることから、曲げ剛性に着目した評価は先受工の変形に対する説明として困難なことがわかる。すなわち、トンネル縦断面に着目した弾性支承上の梁などで先端沈下を評価する一般的な手法には限界があることを示している。

また、Case 3の方がCase 2よりも径方向変位を抑制できたことから、従来のフォアパイリングよりも小口径の鋼管をより大きい仰角で密に打設した方が坑内変位を抑制できるものと考えられる。ここで、棒材の配置間隔を変えた円筒シェル供試体に対する荷重試験⁹⁾によれば、先受け領域の弾性係数は、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)の

影響を受け、縦軸を改良地山の弾性係数との比としたとき、図-8のように示される。今回におけるアルミ棒の周方向占有率はCase 2, Case 3でそれぞれ0.19, 0.18とほぼ同等であり、先受け領域の弾性係数の増加率については同程度と考えられることから、Case 3での補強効果増大は、打設角が大きくなったために先受け領域が厚層化した結果によることが大きいと考えられる。

4. 遠心模型実験による補強メカニズム評価

3. では鋼管の打設方法の違いによる先受け領域の補強効果への影響を検討するため、大型の模型荷重実験を行い、中尺鋼管フォアパイリングの有効性を示すことができた。

そこで、ここではより実際のトンネル掘削に近い応力状態と掘削方法で、長尺鋼管フォアパイリングと中尺鋼管フォアパイリングの補強効果の差異とその発生メカニズムについて検討を行った。

(1) 実験概要

まず、実際に近い応力状態を再現できることから遠心模型実験を採用した。図-9に遠心模型実験で使用したトンネル掘削実験装置の概要図を示す。先受工については、3. の結果に基づき、先受け領域全体を均質なシェ

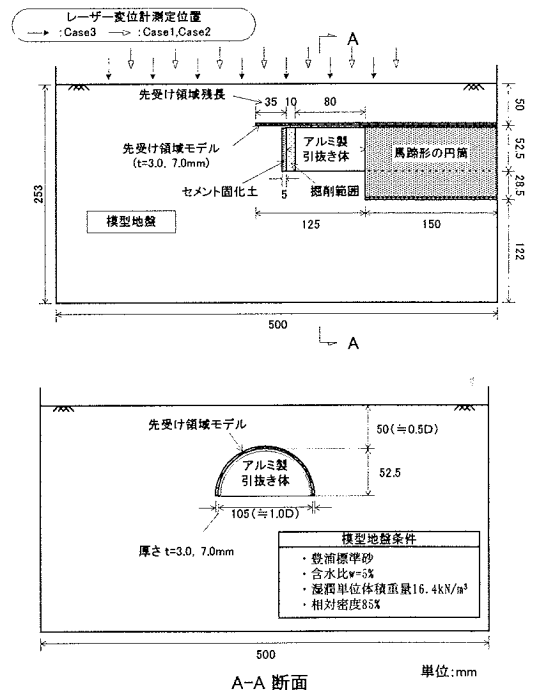


図-9 トンネル掘削模型

ル状の材料でモデル化する¹⁹こととした。また、同時に中尺鋼管フォアパイリングにおける補強効果の増大は、前述したとおり弾性係数の増加よりもむしろ先受け領域の厚層化によるものが大きいと推測されたことから、両工法の先受け領域モデルは同一材料で作製することとし、厚さを変えることで両工法の差異を表現した。実際には、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特殊なアクリル樹脂（比重 0.94）を用いて均質となるよう成形を行った。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。土被りは、先受けが施工される都市トンネルの現状に鑑み 0.5D 程度（ $=50\text{mm}$ ）を採用し、変形係数 E_{30} 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。なお、トンネルの切羽奥には掘削時の切羽安定を目的として、作業性から設定した厚さ 5mm のセメント固化土（ $E_{30}=3.4\text{GN/m}^2$ ）を先受け領域モデルに接しないよう設置した。

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-9 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、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。

(2) 実験ケース

実際の長尺鋼管フォアパイリングでは、切羽奥に残置される鋼管のトンネル軸沿いの長さ（以下、先受け領域残長と記す）は、掘進とともに変化する。大型土槽実験では補強効果の比較のため、両工法ともに最も不安定すなわち先受け領域残長が最短の状態をモデル化した²⁰が、工法の比較のためには長尺鋼管フォアパイリングの安定

表-5 実験ケース

ケース名	先受け領域厚さ	先受け領域残長	先受け領域 横断面模式図
Case1	$t=3.0\text{mm}$	35mm	
Case2	$t=3.0\text{mm}$	95mm	
Case3	$t=7.0\text{mm}$	35mm	

表内は模型寸法

状態における補強効果も評価する必要がある。

そこで本実験では、表-5 に示すとおり、先受け領域厚さと先受け領域残長をパラメータに合計 3 ケースの実験を行った。Case 1 および Case 2 はそれぞれ、長尺鋼管フォアパイリングの最も不安定な状態および安定な状態を、Case 3 は中尺鋼管フォアパイリングの最も不安定な状態を想定している。両工法ともに、最も不安定な状態は、次鋼管を打設する直前の場合で、先受け残長は約 3.5m となる。そのため、Case 1 および Case 3 では、先受け残長を模型寸法で 35mm とした。また、長尺鋼管フォアパイリングにおいて最も安定な状態は打設直後であるが、切羽奥の手前側約 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、Case 2 では先受け残長を 95mm に設定した。

また、先受け領域厚さについては、次章で述べる現場施工事例に基づき、長尺鋼管フォアパイリングでは 300mm（図-1 では下限値的な位置づけ）、中尺鋼管フォアパイリングでは平均的な状態として 700mm を想定する（図-1 の横断面において、鋼管が 2 段となっている状態を標準的に考える）こととした。本実験ではそれらをもとに、Case 1, Case 2 において $t=3\text{mm}$ 、Case 3 では $t=7\text{mm}$ とした。

(3) 実験結果

図-10 に計 3 ケースの地表面沈下分布を示す。同図から、3 ケースともに掘削範囲の中心付近で最大沈下量を示しており、傾向としては酷似している。一方、最大沈下量については、Case 1 および Case 2 はほぼ同程度であり、Case 3 において最大沈下量が最も抑制されていることがわかる。これらから、先受け領域残長を必要以上に長くすることは、さほど地表面沈下の抑制には効果がないこと、また先受け領域厚さを厚くすることが地表面沈

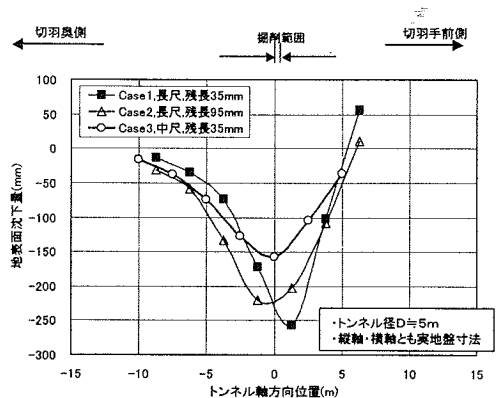


図-10 地表面沈下分布

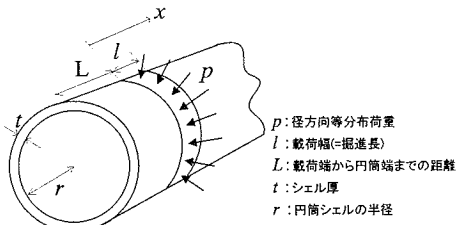


図-11 円筒シェルによる先受け領域のモデル化

下の抑制に貢献できることを示している。

(4) 先受け領域残長に関する考察

先受け領域の挙動を表現するのに適用した円筒シェル解⁹⁾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。図-11に示すように、載荷端から円筒端までの距離 L が $L \geq \pi/\beta$ を満たす場合、長いシェルと判定され問題は簡単になる。このとき、

$$\beta = \left(\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 t^2} \right)^{1/4} \quad (1)$$

であり、 ν : ポアソン比、 r : 円筒シェルの半径、 t : シェル厚(先受け領域厚さ)である。例えば、Case1の場合、 $\pi/\beta = 32.1\text{mm}$ となり先受け残長 $L = 35\text{mm}$ より小さいという条件を満足しており、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。

これは、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、変形抑制効果は大きな相違を生じないということを示している可能性が考えられる。つまり、 $L \geq \pi/\beta$ 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がないと考えられ、今回の実験結果においてCase1およびCase2ではほぼ同一の傾向と値を示したことを裏付ける。これらから、Case1およびCase2のモデル化の対象である長尺鋼管フォアパイリングにおいて、ラップ長が通常3.5mという値が採用されていることは、妥当な設定と評価することができる。また、中尺では、長尺に比較して文字通り鋼管長は短いものの、3.5m以上の先受け領域残長を確保しつつ、掘削域内において常に2段の鋼管が打設されているという状態を維持しているため、上述したような考え方からも、鋼管の短さに起因した影響は比較的小さいものと考えられる。

(5) 地表面沈下量に関する考察

図-11に示す円筒シェルモデルにおいて、円筒上のある幅 l (掘進長に相当) にわたって分布する荷重状態に

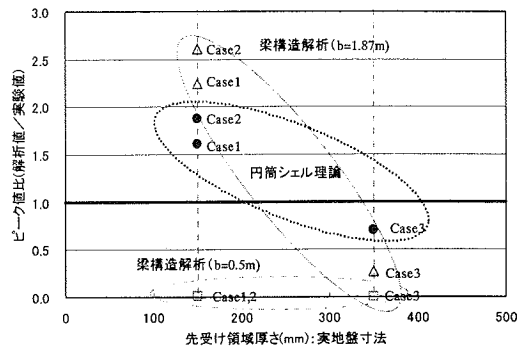


図-12 地表面沈下量の各解析手法による評価

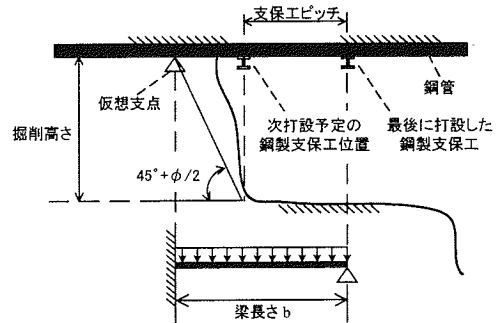


図-13 梁構造解析における梁長さの定義

対する径方向変位 w_x は、式(2)、式(3)のように表される⁹⁾。

$0 \leq x < l$ の場合、

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

$x \geq l$ の場合、

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

また、載荷範囲における径方向変位の最大値 w_{max} は $x=l/2$ のときであり、式(2)から以下のように示される。

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

ここで、式(4)を用いて径方向変位の最大値 w_{max} を算出し、実験における地表面沈下量の最大値との比較を行った。その結果を図-12に示す。同図では、横軸に先受け領域厚さ(実地盤相当)を、縦軸に解析値と実験値の比(以下、ピーク値比とする)をとっている。

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、 $p = \gamma H$ (γ : 湿潤単位体積

重量, H : 実地盤換算時の土被り高さ) から 41kN/m^2 と設定している。 載荷範囲 l については 1 掘削長である 0.5m (模型寸法: 10mm) を採用した。 ポアソン比については要素試験結果に基づき 0.49 とした。 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による検討結果もあわせて記している。 図-12中に記した梁長さ b の定義は図-13に示すとおりである。 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 $b=1.87\text{m}$ の場合に加え, 円筒シェル理論を適用する際の載荷範囲として設定した 0.5m (図-13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。

図-12 から, 梁構造解析については, 通常の設定による梁長さでは, 先受け領域厚さによりピーク値比が大きく変動しており, 先受け領域の変形特性を評価できているとは言い難い。 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, 解析上ほとんど変形が生じず, ピーク値比は 0 付近に集中しており, 変形特性の評価には到っていない。 一方, 円筒シェル理論を用いた場合のピーク値比は, 梁構造解析に比較して, より 1.0 付近に集中しており, より妥当な評価方法であると判断できる。

これらから, 先受け領域が一体化して施工された場合は, 円筒シェル理論による評価が単純な梁構造解析よりも適切であることが確認できたといえる。 また, 先受け領域の厚層化により地表面沈下抑制効果が増大することが理論的にも説明できたといえる。 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, 1.0 を挟んで上下に分布している。 これらの原因として, 前述のとおり円筒シェル理論は本来先受け領域の天端沈下を表すものであること, 実験における先受け領域が完全な円筒ではないこと, 実験では先受け領域内に地山が残存し完全な空洞ではないこと, などが挙げられる。 今後, 様々な先受工の条件に応じた, 円筒シェル理論における各種パラメータの設定方法を検討する必要がある。

5. 中尺鋼管フォアパイリングの現場適用

4. において, 実地盤の応力条件下でも中尺鋼管フォアパイリングの地表面沈下抑制効果に関する優位性を確認したが, ここでは実施工への適用結果について述べる。 適用現場においては, 地表面沈下について比較検討を行うため, 地質状況に大きな変化がないトンネル掘削区間において, 長尺鋼管フォアパイリングおよび中尺鋼管フォアパイリングの両工法による施工を行った。

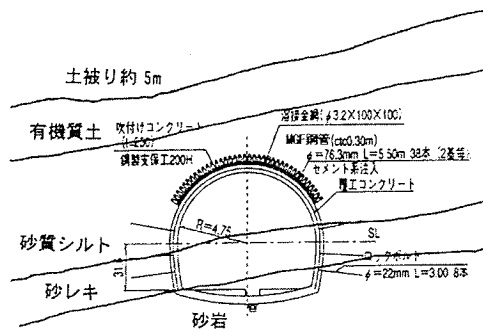


図-14 土質断面図

表-6 各工法の鋼管仕様

	長尺鋼管 フォアパイリング	中尺鋼管 フォアパイリング
鋼管長	125m	55m
鋼管径	$\phi 114.8\text{mm}$	$\phi 76.3\text{mm}$
鋼管厚	6.0mm	4.2mm
打設角度	5°	14°
打設ピッチ	450mm	300mm
本数/断面	26本	38本
1 シフト長	9m	2m
打設範囲	120°	

(1) 現場状況

今回, 両工法を適用した現場は, 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, 適用区間は, 土被り 10m 以下の区間が 200m 程度連続している箇所である。 同区間は, 図-14に示したとおり, 地表から有機質土が 1.5m 程度, その下層に砂質シルト (単位体積重量 = 17kN/m^3 , 粘着力 = 15kN/m^2 , 内部摩擦角 = 25°) が, さらに下層には砂礫などから構成されるいわゆる崖錐堆積物や段丘堆積物が分布しており, 未固結地山でのトンネル掘削に特有な切羽崩落や地表面沈下の課題が存在していた。 一方, スプリングライン付近から下方, すなわちトンネル脚部には堅固な砂岩層が占めており, 脚部沈下に関する懸念はほとんどない状況であった。

当初は, 当該区間に対して長尺鋼管フォアパイリング (以下, 長尺) が計画されていたが, より合理的な先受工の適用を目指して, 一部区間において, 汎用の小口径・中尺鋼管を用いる中尺鋼管フォアパイリング (以下, 中尺) が, 表-6に示す仕様で適用された (鋼管の打設範囲はともに 120°) 。

(2) A計測結果

土かぶりが 5m 程度で地質もほぼ同一の施工区間における上・下半掘削時の各平均変位量を表-7に示す。 長尺区間において下半掘削時に平均 48.3mm の地表面沈下が

表-7 発生変位一覧

項目		長尺区間		中尺区間	
		mm	%	mm	%
地表面沈下	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

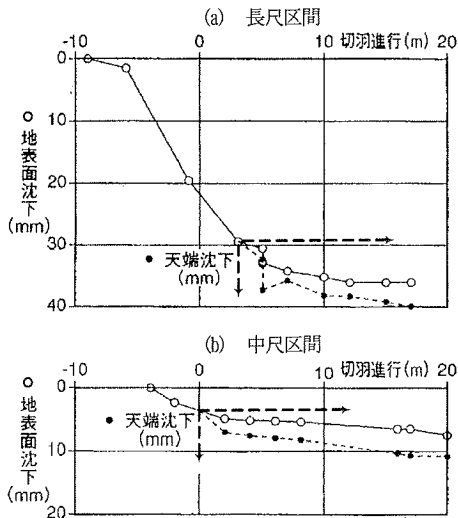


図-15 地表面沈下と天端沈下の関係

発生しているのに対し、中尺区間では平均15.4mmであり1/3程度に抑制されている、ただし、天端沈下はほぼ同じ値、内空変位は両者ともほとんど発生していない。また、天端沈下、内空変位の上半掘削による発生比率は、それぞれ両区間ともにほぼ6:4であるが、地表面沈下については長尺で9:1、中尺で8:2と若干の相違がみられた。

両区間の天端沈下はほぼ同一であるにもかかわらず、地表面沈下に大きな差異が生じているが、これは、上半切羽の接近・通過に伴う地表面沈下と天端沈下の関係(図-15参照)からわかるとおり、切羽到達以前に発生する先行沈下に起因している。中尺区間での先行沈下は、長尺区間の1/4~1/5程度に抑えられている。この結果は、土槽実験や遠心模型実験において確認されてきた中尺における先受け領域の厚層化が現場施工においても達成されたことを意味するものと思われる。また、中尺区間では、先受け領域残長が長尺区間よりも常に大きくなることはないが、4(4)で述べたとおり、この点が不利に作用する現象は生じていない。その結果、中尺では地山が

大きく緩む前に支保工を打設でき、先行沈下が抑制されたのではないかと考えられる。今回のような緩い地山においては、削孔自体が周辺地盤を乱し沈下を引起す恐れもあるため、地表面沈下を抑制するには、切羽到達以前の先行沈下をいかに抑えるか、また、切羽到達後の支保手当を早期に行いいかに早く地山との密着性を高めるかが重要になる。中尺は、その特長によって上記条件を満たす要素を有することが確認された。

(3) B計測結果

中尺区間において、水平傾斜計を坑内より1mピッチ(全長12m)で埋設し、上半掘削に伴うトンネル天端近傍の地中沈下挙動を計測した。切羽位置が2, 4, 8mにおける地中沈下の分布を図-16に示すが、切羽進行ごとの分布状況の変化が明確に現れている。すなわち、切羽が進行するに伴い、図-17(切羽位置11m)に示すとおり先受け領域より上部の地山中間ゾーンが最も沈下する傾向にある。この中間ゾーンに比べて、先受け領域と地表付近の沈下量は小さく、先受け領域が一体となって上方の地中沈下に対抗していることがわかる。

図-18は、切羽が3m進行した位置における先受け鋼管の応力と鋼製支保工の断面力に関する測定結果である。先受け鋼管の曲げ応力は、上半の掘削進行に伴い、短いシフト長に起因した鋼製支保工のジグザグ的な建込み状況に沿う形で明確な凹凸の傾向が現れている。ここに、発生応力は許容値を超えるほど大きくなっているが、ジグザグな支保工の建込み位置を支点とするような応力の発生がみられることから、鋼管が改良地山と一体化し先受け領域の一部として補強効果が発揮されているといえ

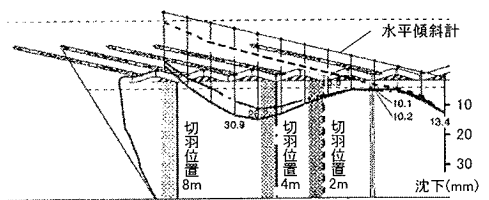


図-16 地中沈下分布の変化

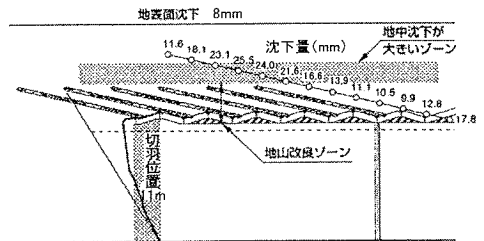


図-17 地中沈下状況

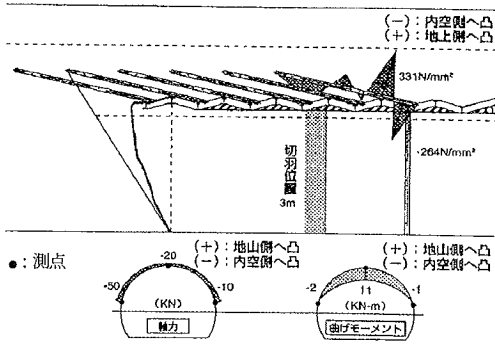


図-18 先受け鋼管の応力と鋼製支保工の断面力

る。一方、鋼製支保工の断面力では、軸力が最大でも切羽位置1mにおいて-130kN、曲げモーメントの最大値は11kNm（応力的には28MN/m²）程度しか発生せず、非常に小さい値であった。この現象は、密に配置された先受け鋼管が、注入によって地山と一体化したアーチ状の幅広い先受け領域を形成し、吹付けコンクリートや鋼製支保工とは別の支保効果を発揮するとともに、中尺の鋼管を短いシフト長で連続的にラップさせることから、掘削時に作用する荷重の低減や分散化も生じ、坑内支保部材への荷重分担が少なくなったためと考えられる。

(4) 天端沈下に対する考察

両工法の計測結果を評価した結果、中尺では鋼管と地山改良体が一体化し、先受け領域としての厚層化が達成されたと推測される。そこで、前述の円筒シェル理論によるアプローチから、現場計測結果の評価を行った。前述のとおり、両工法の比較区間では脚部沈下がほとんど発生していないため、計測結果を単純に比較可能である。

図-19に、切羽進行に伴う天端沈下の発生状況について、実測値（切羽通過後において天端沈下と地表面沈下がほぼ等しいので、切羽通過前では地表面沈下を天端沈下として代用）と、式(2)、式(3)を用いて算定した計算値を示す。同図中には、長尺、中尺両工法の結果を示しており、計算値は、1mずつで逐次掘削したときの切羽接近・通過に伴う累積値である。先受け領域については、図-1を参考に、注入量やシフト長を考慮して、長尺、中尺でそれぞれ、 $t=0.3\text{m}$ 、 $t=0.7\text{m}$ とした。半径については、鋼管打設時の掘削半径(5.3m)に1シフト掘進分の最大拡幅高(長尺0.8m、中尺0.3m)の半分を加えた値を平均的 r と考え、長尺、中尺でそれぞれ $r=5.7\text{m}$ 、 5.4m としている。また、上載荷重 p については、土被りが薄いことから、全土被り荷重が作用していることと仮定し、 $p=\gamma z=75\text{kN/m}^2$ （単位体積重量 $\gamma=15\text{kN/m}^3$ 、土被り $z=5\text{m}$ ）とした。

弾性係数 E については、前述の円筒シェル模型載荷実験結果⁹⁾（図-8参照）に基づいて設定した。すなわち、

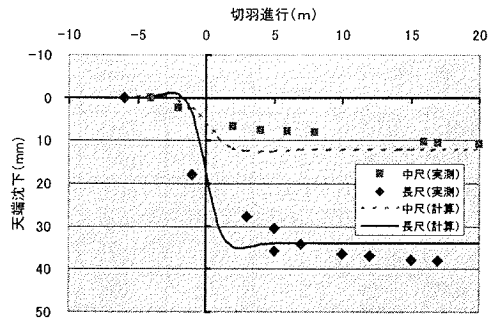


図-19 天端沈下における実測値と理論値の比較

今回の現場条件では、長尺、中尺両工法ともに鋼管の周方向占有率が0.25（それぞれ $\approx 114.8/450$ 、 $\approx 76.3/300$ ）となることから、鋼棒を用いた場合の結果（同図中の上線）を用いて3.1倍の弾性係数増加率を採用した。その結果、懸濁系注入材による事前試験から想定された改良地山の弾性係数100MN/m²に基づき、先受け領域の弾性係数として、 $E=100 \times 3.1 \approx 310\text{MN/m}^2$ を設定した。さらに、今回の施工では、鋼管の打設範囲が120°となっており、ある程度完全な円筒シェル体で近似しうる180°の場合に比較してシェル解析解の一致度は低い状況にある¹⁾。そこで、120°の打設範囲では180°の場合よりも変形量が増加する⁹⁾という実験結果を考慮して、3割増加の補正を行ったものが図-19に示す計算値である。

この図から、長尺における切羽通過前後の実測値と計算値の一致度は若干低いが、両工法ともに最終沈下量については、実測値と計算値の合致度が非常に高いことがわかり、両工法の補強効果の差異がうまく表現されているといえよう。これは、両工法ともに、先受け領域がシェル状構造体として機能し、さらに中尺では、鋼管を密に打設することにより、横断方向はもとより縦断方向にも注入効果が十分に発揮され、信頼性の高い先受け領域の厚層化が達成されているためと考えられる。また、同時に施工状況を考慮した円筒シェル理論による評価が妥当であることを裏付けていると判断される。

従来、注入式鋼管フォアパイリングの設計手法は、鋼管の曲げ剛性に基づく梁効果のみに着目して計算しているのが実状であったが、今回の結果からは鋼管の梁効果のみならず、薬液注入を含めて形成される先受け領域全体がシェル構造として対抗する補強効果に着目することが重要であると推測される。

6. まとめ

山岳トンネル工事の安全施工、工期短縮、コスト縮

減を目指して、フォアポーリングと長尺鋼管フォアパイリングの中間的な工法に着目し、小口径で中尺の汎用ガス管を用いた中尺鋼管フォアパイリングを開発した。また、実験結果や現場計測結果に基づき、その有効性や合理性について検証・考察を加えた。以下に、本論文で得られた結論を示す。

- ・中尺鋼管フォアパイリングでは、ロッドの接続作業が不要となるため、施工スピードが向上するとともに、接続に伴う危険、苦渋作業が軽減される。また、ドリル用ジャンボでの削孔や、安価な一体型特殊親子ビット、安価な鋼管の使用などによって、中尺の先受工を経済的に施工することが可能である。
- ・鋼管の打設角度を大きく、打設ピッチを小さくすることにより、鋼管間からの肌落ちを防止するとともに、切羽前方の地山に強固な支保ゾーン（先受け領域）を形成することになる。大型模型載荷実験によって、小口径の鋼管を高角度で打設することによる先受け領域の厚層化を確認した。
- ・実際の掘削を模擬した遠心模型実験から、変位抑制効果に及ぼす先受け領域厚さの影響を検討し、円筒シェル理論を用いて、従来の梁構造による計算結果と比較した。その結果、一次的な評価手法である梁構造に比較して、三次元的な効果を表現し得る円筒シェル理論は、先受け領域の厚層化による変形抑制挙動をうまく説明できることがわかった。
- ・地質状況に大きな変化のない実施工トンネル掘削区間において、長尺、中尺鋼管フォアパイリングによる施工を行い、計測結果を比較した。中尺区間の地表面沈下は、長尺区間に比べて減少しており、地中変位や支保工の応力結果から、中尺区間における密な鋼管打設とそれに伴う確実な注入効果に基づく先受け領域の厚層化が推察されるが、両区間の地表面変位の傾向は、施工状況を考慮した円筒シェル理論によってうまく表現されることを確認した。
- ・遠心模型実験や現場計測結果から、先受け領域残長を必要以上に長くすることは変形抑制に対して効果の低いことを確認し、現行の先受工において一般的

に設定されるラップ長（3.5m）の妥当性を評価した。

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, p233, 1996.5.
- 2) 前出1)：p.244.
- 3) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会：注入式長尺先受工法（AGF工法）技術資料（四訂版）－AGF工法の考え方とその適用, p.11, 2002.11.
- 4) 嘉指登志也, 桑原和夫, 石黒真一, 築地功：小口径二重管先受け工法で巨礫混じり地山を掘る－北陸自動車道高の峰トンネル, トンネルと地下, pp.13-19, 第30巻, 5号, 1999.
- 5) 前出3)：pp.221-223.
- 6) 山本拓治, 北本幸義, 伊達健介, 岡本道孝：中尺鋼管による先受け工法の適用結果, トンネル工学研究論文報告集, 第9回, pp.167-172, 1999.11.
- 7) 伊達健介, 山本拓治, 北本幸義, 後藤直人：中尺鋼管先受け（MGF）工法の開発と適用結果, 鹿島技術研究所年報, Vol.48, pp.5-10, 2000.9.
- 8) 伊達健介, 北本幸義, 山本拓治, 後藤直人, 岡本道孝, 太田秀樹：トンネル先受けの挙動および変形抑制効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第55回, pp.190-191, 2000.9.
- 9) 北本幸義, 伊達健介, 山本拓治：注入式鋼管フォアパイリングの補強効果に関する研究, 土木学会論文集, No.736/III-63, pp.167-177, 2003.6.
- 10) 伊達健介, 山本拓治, 北本幸義, 太田秀樹：中尺鋼管先受け工法の有効性評価, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 第31回, pp.196-197, 2001.1.
- 11) Kitamoto, Y., Date, K., Yamamoto, T., Hibiya, K. and Ohta, H. : Development of MGF Method Based on the Evaluation of Forepiling Supporting Mechanism, IS-KYOTO 2001, pp.183-188, 2001.10-11.

(2003. 7. 28受付)

DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE FOREPILING METHOD WITH MIDDLE LENGTH PIPES

Yukiyoshi KITAMOTO, Kensuke DATE and Takuji YAMAMOTO

Recently, NATM method has been adopted in tunneling under shallow and unconsolidated ground. In order to stabilize the face and control the ground surface settlement, a variety of forepiling methods have been proposed. Above all, long-sized forepiling is evaluated as the effective one for its ability to reinforce the ground. However, this method is not economical, and has a bad influence on the total construction period. Therefore, authors proposed a new forepiling method using middle-sized forepiling as the more effective one, based on a series of laboratory tests. In this paper, the outline of this new method, the results of laboratory tests and its application to actual work are presented.