

# 長尺鋼管フォアパイリング (AGF工法) の設計法の提案

武内秀木<sup>1</sup>・御手洗良夫<sup>2</sup>・鈴木雅行<sup>3</sup>・松重宗徳<sup>4</sup>・中川浩二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 農修 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

<sup>2</sup>正会員 (株)熊谷組 土木技術推進室(〒162-0857 東京都新宿区津久戸町2-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 (株)間組 土木本部トコ統括部(〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>4</sup>正会員 工修 山口大学大学院学生(当時, 現在 〒441-1115 豊橋市石巻本町字東野17-10)

<sup>5</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

山岳工法によって不良地山にトンネルを施工する場合、切羽の安定性確保や地表面沈下防止を目的に補助工法として長尺鋼管フォアパイリングが用いられることが多い。一方、長尺鋼管フォアパイリングは現場では補助工法としての評価は高いものの、効果のメカニズムは未だ説明されておらず、したがって設計法も確立されるには至っていない。本論文は、長尺鋼管フォアパイリングの一種であるAGF工法 (All Ground Fasten Method) の鋼管の断面設計法について提案しその適用性について考察するものである。提案する鋼管断面設計法の計算モデルには弾性支承上梁モデルを用い、設計荷重の形状や支保工パネの設定方法を工夫した。その適用性はAGF工法が施工された4トンネルの現場計測データによって検討した。

*Key Words: tunnel auxiliary method, umbrella pipe, surface settlement*

## 1. まえがき

わが国においてトンネルの補助工法として長尺鋼管フォアパイリングが採用されたのは、1992年1月に施工された国道7号二ツ井西トンネル工事以降である。その後、使用実績は急速に増加し、長尺鋼管フォアパイリングは土木学会 トンネル標準示方書 [山岳工法編] に新たな補助工法のひとつとして追加されるに至っている<sup>1)</sup>。これまで国内で施工実績の多い長尺鋼管フォアパイリング工法には、わが国で開発されたAGF工法(通常のドリルジャンボで施工される鋼管継ぎ足しによる先受工法)とイタリアで開発されたアンブレラ工法がある。AGF工法は、1992年以降年々施工実績が増加しており1997年11月末には245現場を数えている。また、これまでに5種類の改良型AGF工法が開発され、実現場で施工されている。毎年増加する施工実績が示すように、AGF工法を適用したトンネルでは切羽安定性確保や地表面沈下抑制について施工現場での評価は高いものがあり、それにともなって設計法確立の必要性が強く望まれている。効果のメカニズムに関し

ては施工状況の報告<sup>2)</sup>、現場計測データの解析<sup>3)</sup>および模型実験<sup>4)</sup>等の方法で考察されている。しかし現状では、トンネル掘削中のAGF鋼管の実挙動や鋼管に作用する荷重の大きさ・形状等については十分には明らかにされておらず、したがって工法独自の設計法も確立されるには至っていない。このような状況の中で、鋼管断面設計はこれまではパイプラー工法の断面設計法<sup>5)</sup>を転用するなど類似工法の設計法を参考に行われてきた。武内らは弾性支承上梁モデルの計算結果から一端固定梁モデルによる簡易計算が有効であることを示した<sup>6)</sup>。小原らは弾性支承上梁モデルに部分分布荷重を作用させる計算モデルが現場計測結果とよく合った例について報告している<sup>7)</sup>。また、上記の数値解析設計法とは別に、筆者ら(武内、御手洗)は、58現場417シフトのAGF工法施工実態調査に基づいた経験的設計法を提案した<sup>8)</sup>。このように、これまでいくつかの鋼管断面設計法が提案されてきたが、AGF工法の施工実績の多さにもかかわらず、複数の現場計測データによってその妥当性が検証され、しかも簡易に適用できる計算による設計法はみられないようである。

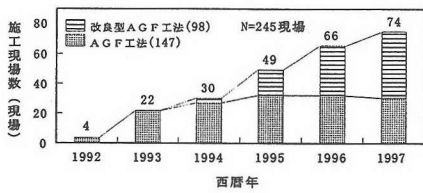
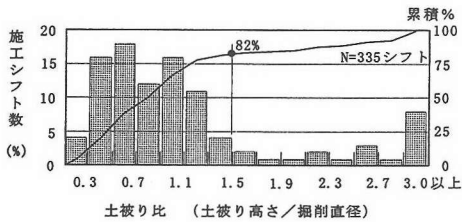
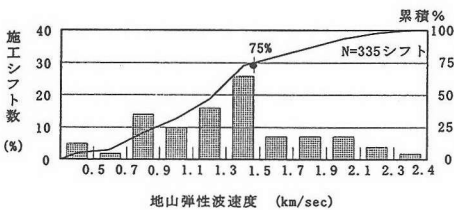


図-1 1992~1997年の施工現場数



(a) 土被り比別施工シフト数の割合



(b) 弾性波速度別施工シフト数の割合

図-2 AGF工法の適用地山

そこで本論文では、これまでに提案されてきた設計法や施工実態調査結果に関する成果を取りまとめ、筆者らの工夫を加えた方法を提案するとともに、簡便でかつ実用的な設計法を提案する。その方法は弾性支承上梁モデルを用いて荷重の作用形状や支保工パネの設定方法に改良を加えた詳細設計法とその詳細設計法による計算結果に基づいた簡易設計法からなっている。設計荷重の大きさはAGF工法の施工実績に基づきテルツァギーのゆるみ土圧と関連させて設定する。提案設計法の妥当性は、AGF工法が坑口部で施工された4トンネルの現場計測データによって検証する。

## 2. 施工実績と現行設計法

### (1) 施工実績

#### a) 施工現場数と改良型AGF工法

図-1は1992年から1997年11月末までのAGF工法の施工現場数を示したものである。AGF工法全体では毎年前年を上回る施工現場で適用されているがその中では改良型AGF工法の増加が目立っている。

オリジナルのAGF工法では施工性や経済性の向上を目指して主にビット構造の改良がなされてきたがこれから派生した種々の改良型AGF工法があり、それぞれ次のような特徴がある。鋼管の直進性を高めるために鋼管を打撃でなく牽引で設置する方式としたもの、断面拡幅を不要とするために鋼管の補強効果よりも注入による地山改良効果を主眼としたもの、削孔時のトラブルを低減するために先頭鋼管に捨てビットを付けたもの、独自のビットを採用することにより長さ40m程度までの施工を可能としたもの、断面拡幅を不要するために弧状の鋼管を用いたものなどである。

#### b) 適用地山

図-2はオリジナルのAGF工法が適用された現場のうち、57現場335シフトの土被り比と地山弾性波速度の分布状況を示したものである<sup>8)</sup>。ここで、土被り比はトンネル土被り高さを掘削直径で割った値である。(a)によると335シフトのうち82%は1.5D(Dはトンネル掘削直径)以下の低土被り区間で適用されている。これはAGF工法が特に土被りの小さい坑口部や沢部の切羽安定対策や地表面沈下対策として採用される場合が多いことを示している。(b)によるとAGF工法はすべて2.4km/s以下の弾性波速度の地山で適用されており、なかでも1.5km/s以下の地山が全体の75%を占めている。このようにAGF工法は主として土被りが小さく弾性波速度の小さい地山で適用されている。今後、トンネル立地条件の制約等から土被りが小さく軟弱な地山にトンネルが施工されることが多くなると考えられることから、AGF工法はトンネルの補助工法として、ますます重要性が高まってくるものと推察される。

### (2) 現行設計法とその問題点

#### a) 現行設計法

AGF工法の代表的な設計法としては、主として次に示す①~④の方法がある。

- ①パイプルーフの設計法に準ずる方法
- ②弾性支承上梁モデルによる方法
- ③3次元FEM解析による方法
- ④類似例による方法

①~③は解析的設計法で、④は実績データに基づいた経験的設計法と分類できる。AGF鋼管の断面設計は、AGF工法がパイプルーフと地山注入の機能を併せ持っていると考えられる点から、斎藤によって提案されたパイプルーフの設計法<sup>9)</sup>に準じて行われる場合がある<sup>9)</sup>。この場合、設計荷重はパイプルーフの場合と同様にテルツァギーのゆるみ土圧式から求められる理論値の40~50%を採用している。

弾性支承上梁モデルによる方法では、通常、鋼管は支保工と未掘削地山で弾性支承された連続梁としてモデル化される<sup>10)</sup>。また鋼管に作用する荷重はテルツァギーのゆるみ土圧値に一定の低減係数を乗じた値が実測値とよくあった例が報告されている<sup>11)</sup>。荷重形状は等分布または等変分布形状が一般的に用いられる。3次元FEM解析による方法は、鋼管に生じる曲げモーメントや軸力など断面力を求めることができるとともに、AGF工法による地山変位抑制効果を求めることが可能である<sup>12)</sup>。類似例による方法は、類似地山条件での注入式フォアポーリングやAGF工法の実施例を参考に鋼管断面、打設長さおよび打設間隔などを定める方法である。この方法の中には、設計条件として適用目的と適用地山の地山種別や物性を与えることによってAGF工法の標準的な設計諸元が得られるようになっているものもある<sup>9)</sup>。

#### b) 現行設計法の問題点

筆者らの経験では、実施されたAGF鋼管は支保工の変形や支保工脚部の沈下等によって切羽最寄りの支保工部では沈下し、地山条件によってその奥行き深さは異なるが、切羽前方地山内でも相当区間にわたって沈下する場合が多い<sup>13)</sup>。また鋼管に生ずる曲げモーメントの最大値は素掘り部または支保工部である既掘削区間で生じ、しかも正值となることが多い<sup>14)</sup>。解析による設計法として示したパイプルーフの設計計算モデルでは、切羽最寄りの支保工部は単純支承であり、切羽前方地山の仮想支点は固定支承となっている。また荷重形状は通常、等分布荷重を適用する。したがって鋼管に生ずる曲げモーメントの最大値は必ず固定端に負の値として生じ、変位や曲げモーメントの傾向は上述したAGF鋼管の実際の挙動とは異なる。また弾性支承上梁モデルによる方法は、鋼管のたわみや曲げモーメントの実挙動にどのようにでも近似できる可能性はあるが、一方で支保工パネ値や作用荷重の設定が課題である。さらに3次元FEM解析による方法は、AGF工法の効果表現するには適した方法で、設計の有力な手段ではあるが、解析時間や多大な費用が掛かるなどの問題点がある。以上のように、現行設計法では、計算モデルや荷重形状の設定が原因で変位や曲げモーメントの傾向が実際と異なったり、また計算に手間と費用がかかりすぎるなどの問題点がある。しかし、これらの設計法のうち鋼管挙動の再現性や計算の簡便性の面から、弾性支承上梁モデルがより適切であると推察される。そこで次節では現場計測結果および施工実態調査結果に基づき、支保工パネ値や設計荷重の設定方法に改良を加えた弾性支承上

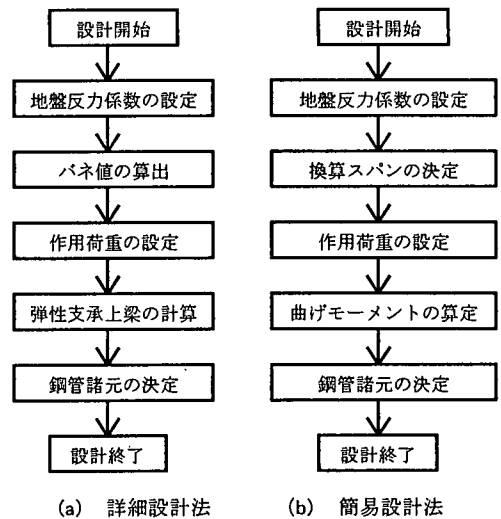


図-3 設計手順

梁モデルによる詳細設計法を提案する。さらに詳細設計法による計算結果を活用した簡易設計法を提案する。

### 3. 設計法の提案

#### (1) 設計方針

AGF鋼管の断面設計法は、第一に、トンネル掘削に伴うAGF鋼管のたわみや曲げモーメントの傾向を実挙動とほぼ近似できる可能性がある弾性支承上梁モデルによる詳細設計法、第二に、計算図表と手計算で容易にAGF鋼管の断面設計ができることを目的とした簡易設計法について提案する。筆者らは、以前2車線道路トンネルを対象に鋼管断面の簡易計算方法を提案した<sup>9)</sup>。しかし当時はAGF工法の施工実績や現場計測データが少なく、支保工パネの設定方法や荷重の形状に関して、必ずしも十分に構築できなかった。ここに提案する設計法は、その方法をもとに支保工パネや荷重形状について現場での計測結果を参考にして改良を加えたものである。図-3は提案する設計法の設計手順を示している。詳細設計法では、先ず地質調査報告書などからトンネル周辺の地山の地盤反力係数を求める。この地盤反力係数と支保工諸元から地山パネ値と支保工パネ値を求める。続いてテルツァギーのゆるみ土圧式を参考にして設計荷重を算出する。これらの入力データを利用して弾性支承上梁モデルで鋼管の断面力を計算し、鋼管の寸法諸元を決定する。一方、簡易設計法では地盤反力係数を使って計算図表から詳細設計法による計算結果に基づいた換算スパンを求める。次に換算スパンと設計荷重から一端固定梁モデル

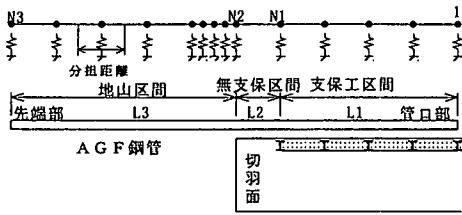


図-4 計算モデル

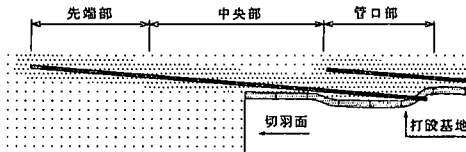
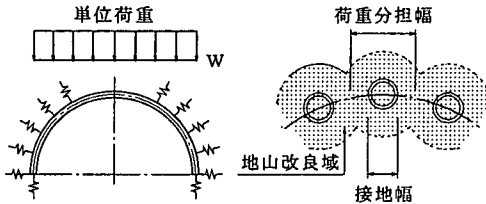


図-5 鋼管と切羽位置の関係



(a) 支保工パネ (b) 地山パネ

図-6 支保工パネと地山パネ

に等分布荷重が作用したときの正の最大曲げモーメントを求め、鋼管の必要断面を計算する。詳細設計法は断面算定だけでなく、たわみや曲げモーメントの形状および支保工や地盤の反力の状況などを詳細に求める場合に使用し、簡易設計法は断面算定だけを簡便に行なうときに使用することを目的としている。なお、2車線道路トンネル程度の大きさのトンネルを対象として、詳細設計法によって鋼管断面と最大たわみ量を図表から簡便に求めるためにノモグラムを作成する。このときの対象地山は地山弾性波速度値がおよそ3km/s以下でトンネル掘削幅は11~15m、鋼管サイズは施工頻度の多い $\phi 101.6 \times 4.2\text{mm}$ と $\phi 114.3 \times 6\text{mm}$ とした。

## (2) 詳細設計法

### a) 計算モデル

詳細設計法による鋼管断面力の計算は図-4に示したような弾性支承上梁モデルによって行う。このとき鋼管は支保工区間および地山区間でパネ支承されているものとしてモデル化するが、支保工パネは鋼管たわみの実挙動状況から、管口部と切羽近傍では

パネ定数を変化させたモデルを考える。

### ① 設計対象鋼管と切羽位置

設計対象鋼管は、作用荷重が最大と思われるトンネル中央天端部の鋼管とする。解析モデルでの切羽位置は、代表的位置として図-5に示すように鋼管中央部の中程直下にある場合を対象とする。この理由は、管口部直下では通常対象鋼管の直上には前シフトの鋼管が残っており、また厚い吹付けコンクリートの打設基地の存在により、対象鋼管のたわみが小さく押さえられることによる。また先端部直下では、次シフトの鋼管が先受部材の役割を果たしているため、当該鋼管の設計対象断面としない。また最終シフトの鋼管先端部では打設基地や次シフトの鋼管はないが、通常良好な地山まで根入れされているので大きなたわみとはならないため、ここでは設計対象断面として取り扱わない。

### ② 支保工パネと地山パネ

鋼管は、管口部では直接打設基地の吹付けコンクリートや鋼製支保工で支持されている。トンネル掘削時にはこの部分の吹付けコンクリートの材令は他の部分よりも長く、したがって強度も発現している。一方、切羽直近の吹付けコンクリートは若材令であり強度の発現も小さい。筆者らの計測結果によると、切羽が鋼管中央部直下にある場合、鋼管沈下量は管口部では少なく、切羽鏡面付近が最も大きくなっている<sup>3)</sup>。そこで切羽直近の支保工パネとしては鋼製支保工だけが有効に働くと考え、管口部の支保工パネとしては、鋼製支保工と吹付けコンクリートの両方が有効に働くと仮定する。また管口部と切羽直近の支保工パネの強さは直線的に変化させる。すなわち支保工部の支点パネ定数は、図-6(a)に示すように、吹付けコンクリートと鋼製支保工の合成断面または鋼製支保工だけからなる計算モデルに単位荷重を作用させ、その時の荷重と天端部での沈下量の関係から求める。支保工の地山側への変位や沈下は周辺地山で拘束されており、地山の拘束の程度によって沈下量が異なるので、鋼管の設計に際しては、地盤反力係数毎に荷重と沈下量の関係を求め、それぞれの支保工パネを設定しなければならない。AGF工法ではほとんどの場合、図-5に示したように鋼管は鋼製支保工で直接支持されているのではなく、鋼管と支保工の間に注入によって改良された地山を介し、支保工で間接的に支持されている。この点から、既掘削部の支承条件として支保工と鋼管の間に地山パネ部を加味することが考えられるが、通常AGF工法が施工されるような地盤条件（例えば道路公団の地山等級でDⅡより低位の地山）の場合、支保工パネの方が地盤パネよりも小さくなるので、鋼管の

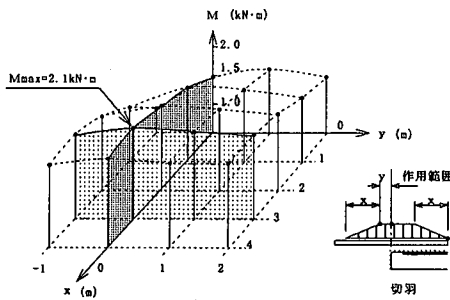


図-7 作用荷重の範囲・形状

たわみ値は主に支保工パネで支配されることになる。したがって、弾性支承上梁モデルの既掘削部分のパネは支保工パネとする。地山部の支点パネは地盤反力係数に支点の接地面積を乗ずることによって求める。ただし、接地面積は図-6(b)に示す鋼管径と図-4に示す当該支点の分担距離の積とする。

### b) 設計荷重

設計荷重は、先ず鋼管に対する地山荷重の作用方向を検討し、次に鋼管に生じる曲げモーメントが最も大きくなるような作用荷重の分布形状を求める。さらにこれまでの施工実績から設計荷重の大きさを設定する。

#### ① 荷重の作用方向

AGF鋼管に作用する荷重は、上方からの土圧と切羽前方からの地山押し出しによる土圧に分離して考えることができる。一方、AGF鋼管は一定の差し角をもって施工されることが多いので、地山押し出しによる軸方向力をさらに受け易い構造となっている。ただし鋼管に生じる応力は、その荷重が鋼管軸直角方向から作用した場合が最も大きくなることは明らかである。また、押し出し荷重によって鋼管が座屈したという例は、筆者らの知る限りにおいて報告されていない。そこで荷重作用方向としては鋼管に直角に作用した場合を対象とする。ただし押し出し荷重が特別に大きいと考えられる場合は、別途考慮しなければならない。

#### ② 荷重の縦断方向形状

AGF鋼管に作用する荷重は鋼管打設後に増加する地山荷重である。地山荷重は管口部では事前の掘削によってある程度開放されているので、トンネル掘削に伴う増分荷重は小さいが、鋼管中央部付近では作用荷重は徐々に大きくなり、鋼管先端部では切羽前方地山の存在により再び徐々に小さくなる。また2.(2)b)で述べたように鋼管に生ずる曲げモーメントの最大値は素掘り区間または支保工区間で生じ、しかも正值が最大値となることが多い。荷重の形状

としては、これらのことを考慮し切羽付近で頂部を持つ台形荷重を仮定する。台形荷重の形状と作用位置は、本設計法の目的が鋼管断面設計という面から、鋼管に生じる正の曲げモーメントが最大になるように試算によって求める。図-7は管口部での荷重をゼロとし、台形の等変分布幅  $x$  と切羽鏡面から台形の肩部までの距離  $y$  を変化させた場合の正の曲げモーメントの計算結果を示したものである。試算に使った鋼管は  $\phi 101.6 \times 4.2\text{mm}$  で長さは  $10\text{m}$ 、打設間隔は  $45\text{cm}$  である。荷重は頂部で単位荷重 ( $1\text{tf}/\text{m}^2 (\approx 9.8\text{ kN}/\text{m}^2)$ ) を持つ台形荷重である。この結果、 $x=3\text{m}$ 、 $y=0\text{m}$  の場合に正の曲げモーメントは最大値を示した。そこで荷重の形状は、管口部での荷重がゼロで、切羽に向かって  $3\text{m}$  間は直線的に増加し、その後切羽鏡面までの  $2\text{m}$  間は等分布荷重とする。さらに切羽鏡面から地山奥に向かって  $3\text{m}$  間は直線的に減少し、地山奥側でゼロになる台形荷重とする。先端部  $2\text{m}$  間は荷重なしとなる。

#### ③ 荷重の大きさ

現行設計法では、設計荷重はテルツァギーのゆるみ土圧または土被りの小さい場合は全土荷重から算出されることが多い。一方、AGF工法では地山改良するので上記の値よりは小さくなることが考えられる。ここでは施工実態調査結果<sup>8)</sup>等を使って、鋼管の曲げ耐力からAGF鋼管設計に使用する荷重の大きさを提案する。図-8は施工実態調査結果の得られた58トンネルのうち、地山条件と鋼管諸元が明かな17トンネルについてテルツァギーのゆるみ土圧と鋼管の許容最大曲げモーメントから求めた作用荷重の関係を示したものである。テルツァギーのゆるみ土圧算出に必要な地山強度定数は地質調査結果等から設定した。最大作用荷重は弾性支承上梁モデルを使って計算した断面力と鋼管の許容応力度から推算した。このとき鋼管の許容応力度は  $2,400\text{kgf}/\text{cm}^2 (\approx 235\text{MPa})$  とした。両者の相関式は粘性土と砂質土だけについて求めた。礫質土と風化岩については地山強度のばらつきが大きく強度定数の設定精度が低いと考えられるので相関データからは除外した。また同一トンネルで数シフトを同一のパターンで施工した場合は、データとしてはゆるみ土圧が最も大きくなる場合だけを採用した。両者の相関式は、テルツァギーのゆるみ土圧を  $T (\text{kN}/\text{m}^2)$ 、作用荷重を  $w (\text{kN}/\text{m}^2)$  としたとき、 $w=0.3T+18$  (相関係数  $r=0.84$ ) となった。これより粘性土および砂質土の場合、AGF鋼管の設計荷重はテルツァギーのゆるみ土圧から求め、その関係式としては式(1)とする。礫質土および風化岩の場合は、地山強度のばらつきが大きいためここでは提案しない。

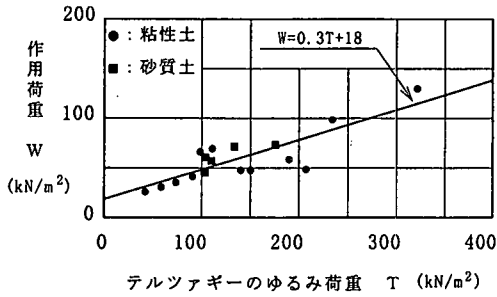


図-8 テルツァギーのゆるみ土圧と作用荷重

$$w = 0.3T + 18 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1)$$

### (3) 簡易設計法

簡易設計法は、詳細設計法による設計結果を図表と手計算から簡易に求められるようにしたものである。簡易設計法の計算モデルは、図-9に示したようにパイプルーフの簡易設計法として一般的に馴染みのある一端固定他端単純支承モデルとした。簡易設計法によって断面計算をするためには、計算スパンと荷重が必要となるが、この計算スパンは詳細設計法による荷重(w)とその計算結果である曲げモーメント(M)から式(2)を用いて逆算し、換算スパンと記述する。ここで式(2)のMは図-9に示した簡易設計計算モデルに等分布荷重が作用したときの正の最大曲げモーメントである。

$$M = \frac{9 \cdot w \cdot L^2}{128} \quad (2)$$

図-10は掘削直径11mの場合の地盤反力係数と詳細設計法で求めた曲げモーメント値から式(2)を使って求めた換算スパンとの関係である。他の掘削直径については後述する表-1から目安をつけることができる。換算スパンの算出は図-11に示す詳細設計計算モデルの試算に用いたトンネルと同一の条件で行ったものである。簡易計算モデルを使って設計計算をする場合、地質調査結果等からテルツァギーのゆるみ土圧と地盤反力係数が推定できれば、図-8と図-10から設計荷重と換算スパンを求めることによって式(2)を使って鋼管断面の簡易設計計算ができる。

### (4) 計算図表

ここでは、詳細設計によって鋼管断面と最大沈下量だけを簡易に求めることを目的に、掘削直径11~15mの2車線道路トンネル程度の上断面に対する詳細設計の計算図表を示す。

#### a) 計算モデル

AGF鋼管を施工する地山は、土砂から軟岩まで

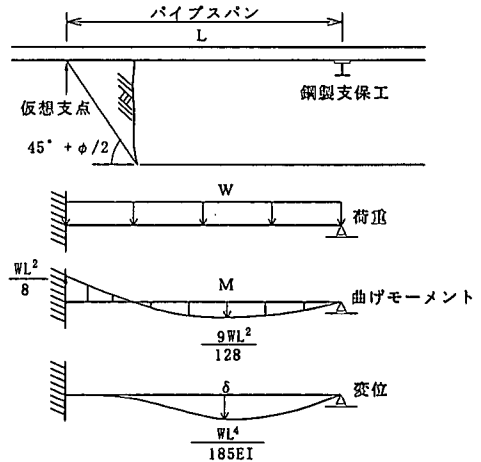


図-9 パイプルーフ鋼管の断面計算モデル

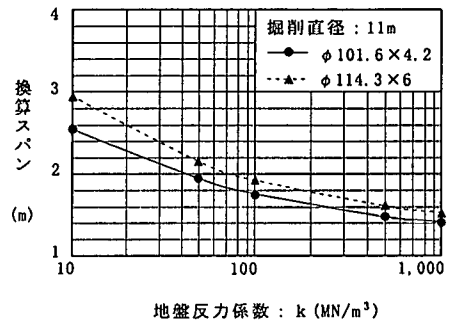


図-10 地盤反力係数と換算スパンの関係

多岐にわたることが想定されるが図-2に示したように地山弾性波速度値で見た実績値は3km/sec程度以下である。そこで、計算図表は後述の式(3)、(4)に示すように、地山弾性波速度値に換算しておおよそ3km/sec程度以下に相当する1~100kgf/cm³(≒9.8~980MN/m³)の地盤反力係数の地山を対象とした。図-11は試算に用いた支保工断面と計算モデルの寸法を示したものである。吹付けコンクリートの厚さは25cm、鋼製支保工のサイズはH-200×200×8×12であり、建て込み間隔は1mである。AGF鋼管の打設間隔は45cmである。AGF鋼管の支持条件としては支保工設置区間は4m、索振り区間は1m、地山区間は5mとした。10mの鋼管長は、AGF工法で最もよく用いられる鋼管長12.5m<sup>8)</sup>よりはやや短い。しかし松重らの研究<sup>9)</sup>によると、ラップ長が3m以上あれば切羽位置は最大たわみ量や最大曲げモーメントにはほとんど影響を与えないことが分かっているので、このモデルによる計算結果は長さ12.5mのAGF鋼

表-1 試算結果

直径 (m)	鋼管径×鋼管厚 (mm)		φ 101.6×4.2					φ 114.3×6				
	地盤反力係数 (MN/m <sup>3</sup> )		10	50	100	500	1000	10	50	100	500	1000
11	支保工パネ	SS (kN/m)	189	838	1490	4010	5100	189	838	1490	4010	5100
		SS+SC (kN/m)	191	878	1610	5040	6860	191	878	1610	5040	6860
	最大沈下量 (cm)	2.07	0.58	0.35	0.14	0.11	1.79	0.51	0.31	0.13	0.10	
	最大曲げモーメント (kN・m)	2.08	1.18	0.97	0.69	0.62	2.75	1.47	1.18	0.82	0.73	
	換算スパン (m)	2.56	1.93	1.75	1.48	1.40	2.95	2.15	1.93	1.61	1.52	
	許容荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	34.7	61.2	74.5	105	117	45.8	85.7	107	154	173	
12	支保工パネ	SS (kN/m)	178	776	1363	3462	4091	178	776	1363	3462	4091
		SS+SC (kN/m)	181	818	1500	4500	5625	181	818	1500	4500	5625
	最大沈下量 (cm)	2.21	0.61	0.37	0.16	0.13	1.90	0.54	0.33	0.14	0.11	
	最大曲げモーメント (kN・m)	2.20	1.19	0.99	0.71	0.65	2.91	1.50	1.20	0.84	0.76	
	換算スパン (m)	2.64	1.94	1.77	1.50	1.43	3.03	2.18	1.95	1.63	1.55	
	許容荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	32.8	60.7	73.0	102	111	43.3	84.0	105	150	166	
13	支保工パネ	SS (kN/m)	164	714	1216	3000	3750	164	714	1216	3000	3750
		SS+SC (kN/m)	167	750	1364	3750	5000	167	750	1364	3750	5000
	最大沈下量 (cm)	2.31	0.65	0.40	0.18	0.14	1.99	0.58	0.36	0.15	0.12	
	最大曲げモーメント (kN・m)	2.20	1.21	1.01	0.72	0.65	2.95	1.52	1.24	0.85	0.77	
	換算スパン (m)	2.64	1.96	1.79	1.51	1.43	3.05	2.19	1.98	1.64	1.56	
	許容荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	32.8	59.7	71.5	100	111	42.7	82.9	102	148	164	
14	支保工パネ	SS (kN/m)	152	652	1125	2647	3462	152	652	1125	2647	3462
		SS+SC (kN/m)	154	692	1250	3462	4500	154	692	1250	3462	4500
	最大沈下量 (cm)	2.36	0.70	0.43	0.19	0.15	2.04	0.62	0.38	0.17	0.13	
	最大曲げモーメント (kN・m)	2.15	1.25	1.02	0.74	0.66	2.89	1.58	1.26	0.88	0.78	
	換算スパン (m)	2.61	1.99	1.80	1.53	1.44	3.02	2.24	2.00	1.67	1.57	
	許容荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	33.6	57.8	70.8	97.6	109	43.6	79.7	100	143	162	
15	支保工パネ	SS (kN/m)	141	600	1023	2368	2813	141	600	1023	2368	2813
		SS+SC (kN/m)	144	652	1154	3000	4091	144	652	1154	3000	4091
	最大沈下量 (cm)	2.46	0.73	0.45	0.21	0.17	2.12	0.65	0.40	0.18	0.15	
	最大曲げモーメント (kN・m)	2.16	1.26	1.04	0.75	0.69	2.92	1.60	1.28	0.90	0.82	
	換算スパン (m)	2.61	2.00	1.81	1.54	1.48	3.04	2.25	2.01	1.69	1.61	
	許容荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	33.4	57.3	69.5	96.3	105	43.2	78.8	98.4	140	154	

※ ss : 鋼製支保工, sc : 吹付けコンクリート

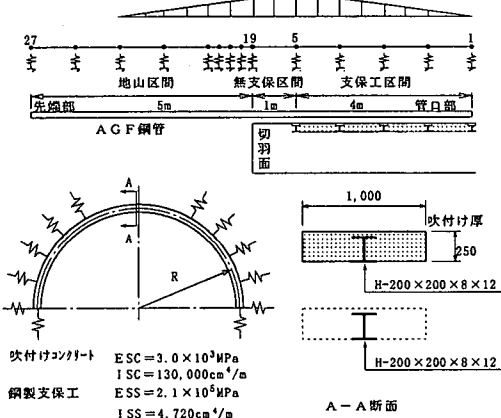


図-11 試算モデル

管には十分適用できるものと考えられる。図-11で、支点1~5トンネルの支保工部のパネ支承、19~27は地山パネ支承、その中間は掘削部で支承なしの区間である。

b) 試算結果

詳細設計による試算結果を表-1に示した。各項目についてその傾向を見るために掘削直径11mの場合について図-12~15に示した。他の掘削直径について

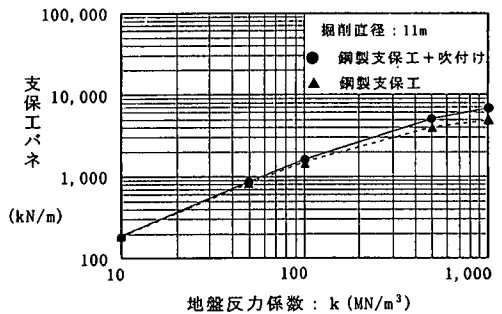


図-12 支保工パネ値の計算結果

ては表-1から目安をつけることができる。ここで設計荷重の大きさと形状は頂部で1tf/m<sup>2</sup>(≒9.8kN/m<sup>2</sup>)の台形荷重である。この計算は変位法による任意平面骨組構造解析によるものである。これらの図表を利用することにより詳細設計を概ねトレースできる。

①支保工パネ

図-12は地盤反力係数と支保工パネ定数の関係を示したものである。支保工パネ定数は、図-6-(a)の計算モデルに等分布単位荷重をかけることによって求めた天端沈下量から算出した。図中、●は鋼製支保工と吹付けコンクリートの合成パネであり、○は鋼製支保工だけのパネ定数を示している。

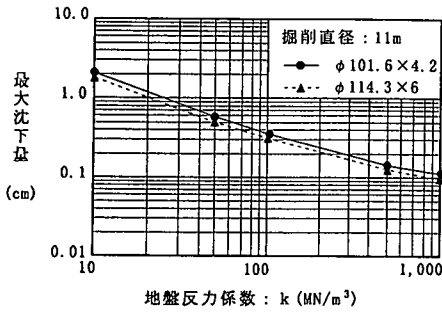


図-13 地盤反力係数と最大沈下量

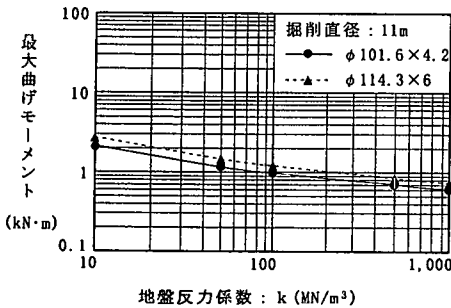


図-14 地盤反力係数と最大曲げモーメント

## ②鋼管の沈下量と曲げモーメント

AGF工法で使用されている鋼管外径はほとんどがφ101.6mmとφ114.3mmである<sup>8)</sup>が、これらの鋼管にはそれぞれ数種類の肉厚鋼管がある。ただし実際に使用されるのはφ101.6×4.2mmとφ114.3×6.0mmがほとんどなので試算は上記の両鋼管について行う。図-13, 14は地山の地盤反力係数と最大沈下量、最大曲げモーメントの関係を示したものである。AGF鋼管の打設間隔は標準的な間隔である45cmである。本計算では沈下量と曲げモーメントは荷重に比例するので、荷重と地盤反力係数が既知ならば、この図によって鋼管の最大沈下量と最大曲げモーメントを求めることができる。

## ③AGF鋼管の許容荷重

図-15は地盤反力係数と曲げ応力から決まる鋼管の許容荷重の関係を示したものである。本図によれば地盤反力係数が大きくなるにしたがって、地盤の拘束が強くなり許容荷重も大きくなる。地山の地盤反力係数が推定できれば、この図によって鋼管の最大許容荷重を求めることができる。この計算において、許容応力度は2,400kgf/cm<sup>2</sup>(≒235MPa)とした。

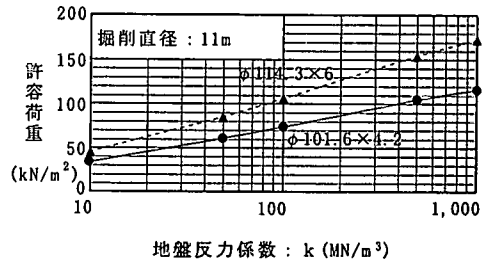


図-15 地盤反力係数と許容荷重

## 4. 提案設計法の検証

AGF鋼管のたわみ計測データが得られた4本のトンネル(以下、検証トンネルと記述する)によって提案設計法の検証を行う。詳細設計法の妥当性は①鋼管のたわみと曲げモーメントの発生状況と値、および②設計荷重について検証する。簡易設計法による結果は、その計算過程から詳細設計の結果と一致することは明らかなので検証は省略する。

### (1)検証トンネル

#### a)検証トンネルの概要と地質状況

検証トンネルでは、いずれも坑口部でAGF工法が施工されており、鋼管は支保工で直接支持されているのではなく、図-5のように鋼管と支保工の間に改良地山を介し間接的に支保工で支持されている。表-2は検証トンネルの地質条件とAGF鋼管の諸元等を示したものである。検証トンネルの土被りは2.3~10.4mと小さい。地盤反力係数(k)は地山弾性波速度(Vp)またはN値から式(3)、(4)を使って算出した。

$$k = 5.1 N^{0.65} \quad (3)^{10)}$$

$$V_p = 194.4 N^{0.323} \quad (4)^{10)}$$

切羽観察調査によれば、AGF工法施工区間の地山状況は、いずれのトンネルも圧縮強度は「50kgf/cm<sup>2</sup>(≒4.9MPa)未満でハンマーの刃先がくい込み」、風化変質状況は「土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結」、割れ目の頻度は概ね「5cm未満、破碎、当初より未固結」という状況である。湧水は「なし~滴水程度」で水による劣化は②トンネル以外は「ほとんど見られない」。このように検証トンネルの地山はいずれも土被りが小さく、軟質で、似かよった地質状況を有している。

#### b)鋼管のたわみと曲げモーメント

検証トンネルの鋼管のたわみは、トンネル中央天端部のAGF鋼管で計測されたもので、計測はヒズ



表-2 検証トンネル

番号	地質	弾性波速度 V <sub>p</sub> (km/sec)	N値	地盤反力係数 (MN/m <sup>3</sup> )	土被り (m)	掘削幅 (m)	鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	打設 間隔 (cm)	鋼管たわみ 測定方法
①	凝灰質砂岩・泥岩互層	0.65	16	31	2.3	12.0	101.6	4.2	30	ヒズ計
②	崩壊性堆積土砂	0.8	5	15	3.7	11.0	101.6	4.2	45	水平傾斜計
③	シルト・砂礫混合物	—	20	36	6.5	12.9	114.3	6.0	45	//
④-1	風化花崗岩(マ土)	0.6~1.0	15	30	3.5	14.9	114.3	6.0	45	//
④-3	風化花崗岩(マ土)	0.6~1.0	35	51	10.4	14.9	114.3	6.0	45	//

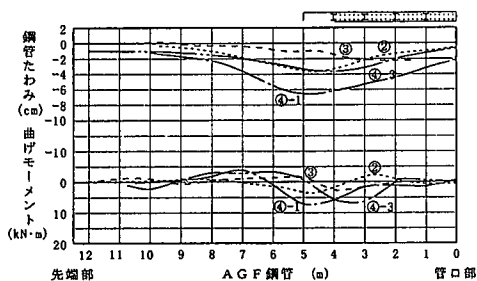


図-16 たわみと曲げモーメント

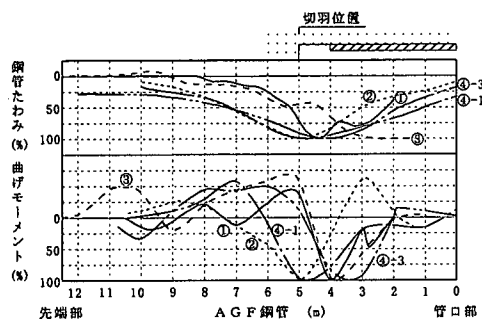


図-17 規準化したたわみと曲げモーメント

ミ計または孔内水平傾斜計を利用して行なわれた。孔内水平傾斜計は鋼管の区間傾斜角を計測し、その値からたわみ量を算出するものである。鋼管のたわみと曲げモーメント値は、水平傾斜計によって計測された区間傾斜角を3次のBスプライン関数で近似し、この関数を順次微分することによって求めた。図-16は切羽が鋼管端部の影響を受けない中央部直下すなわち当該鋼管の上に前シフトの鋼管がなく、下にも次シフトの鋼管がない区間にある場合の鋼管のたわみ量と曲げモーメントの一例を切羽位置をそろえて示したものである。図中の番号は表-2に示すトンネル番号である。ここで①トンネルは鋼管のたわみが小さく傾向が判別できないので図は省略した。④トンネルについては第1シフトと第3シフトで計測したので別々に示した。たわみおよび曲げモーメントとも切羽付近に最大値が生じている。図-17は

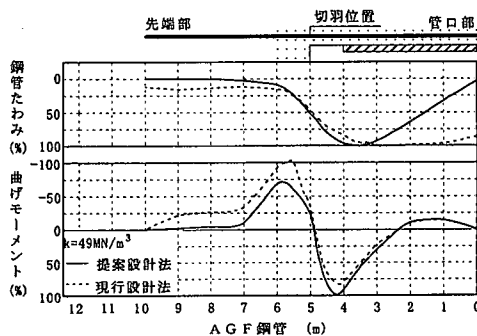


図-18 提案モデルによる計算結果

たわみと曲げモーメントの傾向を明確にするためにそれぞれ最大値を100%として表示したものである。本図によるとAGF鋼管に生じるたわみと曲げモーメントに関しては次のような特徴的なパターンがみられる。①たわみ量の最大値は鏡面または鏡面に最も近い支保工付近で生じている。②曲げモーメントの正の最大値は鏡面または鏡面に最も近い支保工部で生じている。③曲げモーメントの負の最大値は概ね前方地山内で生じている。④曲げモーメントは正の最大値の方が負の最大値よりも大きい傾向にある。

## (2) 詳細設計法の検証

### a) 計算モデルの検証

図-18は、地盤反力係数が検証トンネルとほぼ同様の5kgf/cm<sup>3</sup>(≒49MN/m<sup>3</sup>)のときの提案設計法と現行の弾性支承上梁モデルによる設計法によるたわみと曲げモーメントの計算結果を比較したものである。現行の弾性支承上梁モデルによる設計法は支保工は鋼製支保工と吹付けコンクリートの合成断面とし、荷重は全長に作用する等分布荷重としたものである。切羽位置はともに鋼管中央部直下にある場合である。傾向の比較を明快にするためにたわみ値、曲げモーメント値とも割合で示した。これによると、提案設計法では、鋼管のたわみおよび曲げモーメントの正の最大値はいずれも切羽に最も近い支保工付近で生じており、曲げモーメントの負の最大値は前方地山内で生じている。また、どの場合も曲げモー

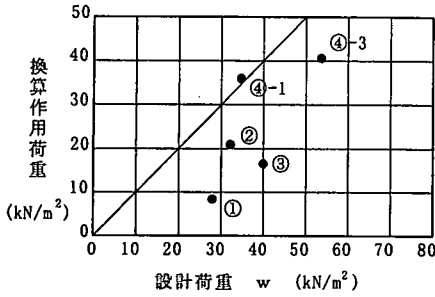


図-19 設計荷重と換算作用荷重

メントの絶対値では正の最大値の方が大きい傾向にある。これに対し、現行の弾性支承上梁モデルによる設計法では管口は沈下し、切羽前方地山中で負の最大曲げモーメントが発生する結果となっている。このように提案設計法では、たわみと曲げモーメントの傾向が現場計測値と比較的よくあっており、荷重の作用形状や支保工パネの設定方法に改良を加えた計算モデルによって鋼管に生ずるたわみや曲げモーメントを表すことができることを示している。

b) 設計荷重の検証

図-19は検証トンネルの設計荷重と換算作用荷重を比較したものである。設計荷重は地質調査報告書等から地山の強度を推測しテルツァギーのゆるみ土圧を求め、式(1)から計算した。換算作用荷重はたわみ計測値から求めた曲げモーメント $M_s$ と図-4の計算モデルに単位の設計荷重を作用させたときの曲げモーメント $M_o$ との比から換算したものである。地盤反力係数は、式(3)、(4)から算出した。支保工パネは検証トンネルの断面および支保パターン毎に3。(2)a)に示す方法で求めた。本図によると実測値から求めた換算作用荷重、すなわち鋼管に作用しているであろう荷重は、いずれも設計荷重の範囲内に収まっており、設計荷重の設定はほぼ適切ではないかと考えられる。①、③トンネルの換算作用荷重が設計荷重よりも大幅に小さいが、①トンネルはAGF工法施工の最初のトンネルであり、余裕を持った設計となっていたものである。③トンネルについてはシルトの中に直径3m程度の転石が多数混入している地盤であり、鋼管のたわみが転石により拘束されたことによる影響が出た結果ではないかと思われる。

c) たわみと曲げモーメントの検証

図-20は検証トンネルの設計たわみ量と実測たわみ量を比較したものである。設計たわみ量は図-4の計算モデルに設計荷重を作用させたときの最大たわみ量である。④-1トンネルは地山が軟弱で、掘削幅が約15mと大きい。また施工中の支保工脚部の沈下

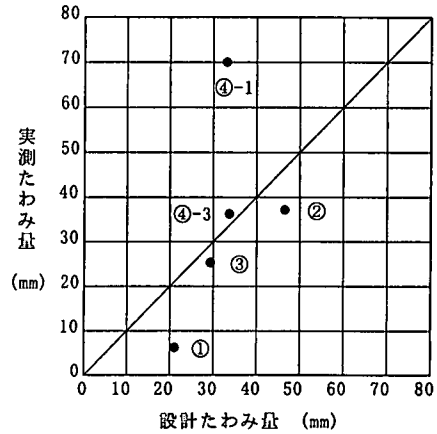


図-20 たわみ量の比較

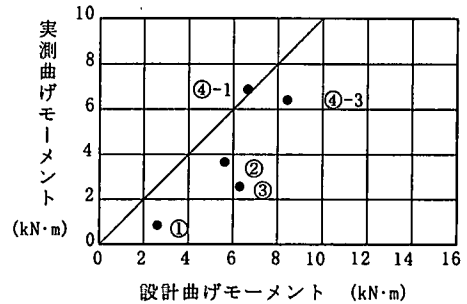


図-21 曲げモーメントの比較

が大きかったことが報告されている。実測たわみ量が大きくなったのは、図-16の④-1に示されているように、支保工の支持力が不足したため鋼管全体にわたってたわんだことが原因ではないかと思われる。また①トンネルは、たわみに限らず荷重や曲げモーメントに関しても余裕のある結果となっている。この原因としては地質が砂岩・泥岩互層で地山強度のばらつきが大きいと思われること、前述したようにAGF工法施工の最初のトンネルで余裕を持った設計となっていたこと等が考えられる。その他については実測たわみ量はいずれも設計たわみ量とほぼ等しくなっている。図-21は設計曲げモーメントと実測曲げモーメントを比較したものである。設計曲げモーメントは図-4の計算モデルに設計荷重を作用させたときの最大曲げモーメントである。本図によると荷重の場合と同様の傾向を示している。

以上から、検証トンネルの換算作用荷重は、0.9～4.1tf/m<sup>2</sup>(≒8.8～40.2kN/m<sup>2</sup>)で荷重高さでは0.5～2m程度と推察される。また鋼管の実測曲げモーメントから計算した最大曲げ応力度は、④-1で生じ、

1320kgf/cm<sup>2</sup> (≒129MPa)程度で弾性範囲内であり、応力的には余裕がある。設計曲げモーメントから計算した曲げ応力度の最大値は②で生じ1860kgf/cm<sup>2</sup> (≒182MPa)程度である。

## 5. まとめ

AGF工法は切羽の安定性確保や地表面沈下防止のための補助工法としてしばしば用いられるにもかかわらず、設計法が確立されていない。そこで実用的な観点から2車線道路トンネル程度のトンネル断面に適用されるAGF鋼管の断面設計法を提案し、現場計測データに基づいてその適用性を検討し、その妥当性を確認した。設計法の検討に際して得られた知見を列挙すると以下の通りである。

- (1) 弾性支承上梁モデルを用いた詳細設計法を検証トンネルに適用した結果、AGF鋼管のたわみや曲げモーメントの計測結果の傾向をよく表すことができる。
- (2) AGF鋼管の設計荷重はテルツァギーのゆるみ土圧の関数として表すことができる。
- (3) AGF鋼管の限界許容荷重を適用地山の地盤反力係数との関係で求めることができた。
- (4) 詳細設計法を使ってトンネル掘削径11~15mのDⅢパターン断面相当を対象にした簡易設計法を提案した。

本論文では、弾性支承上梁モデルによるAGF鋼管の断面設計法を提案し、その適用性を4本の2車線道路トンネルの現場計測結果によって検証した。ただし検証を実施したデータは、いずれも土被りの小さい坑口部でAGF工法が適用されたもので、本設計法の一般部での適用性については今後検討する必要がある。とりわけ断層破砕帯や膨張性地山などの場合、湧水の影響や地山荷重の予測の困難さがあるので、計算のみによって鋼管断面を設計するのではなく、類似条件の施工事例等を参考にすべきである。現状では鋼管自体の挙動を詳細に計測したデータが絶対的に不足しているので、今後さらに計測データを集積・分析することによって作用荷重の形状や大きさを見直し、より確度の高い設計法とすることが求められる。

謝辞：本論文は建設省東北地方建設局、同北陸地方建設局、四国地方建設局および福井県の道路トンネルの現場計測データに基づいて作成したものである。現場計測データの使用を快諾して頂きました建設省土木研究所トンネル研究室真下英人室長はじめ関係

の皆様方に厚く御礼申し上げます。本研究はジェオフロンテ研究会のAGFワーキングの成果を利用して頂いた。同研究会の長友成樹会長、同研究会アンブレラ分科会AGFワーキングの皆様にも厚く御礼申し上げます。また本論文の作成にあたりご意見を頂きました清水剛一博士（山口大学助教授）に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準施工方書〔山岳工法編〕・同解説，p. 233，1996. 6.
- 2) 例えば，若狭良一，岡本祥太郎，河上清和：脆弱な流れ盤を長尺フォアパイプで施工，トンネルと地下，pp. 735~741，1992. 9.
- 3) 河原俊厚，柚木孝昭，多田哲夫，佐々木武，武内秀木：矢板工法から長尺先受工を併用した吹付け工法へ，北陸路，北陸道路研究会会報，pp. 34~42，1995. 12.
- 4) 足立紀尚，木村亮，荒巻智，林憲裕：トンネル掘削における長尺先受工法の補助効果に関する模型実験，土質工学会，第28回土質工学研究発表会（神戸），pp. 2309~2312，1993. 6.
- 5) 斉藤重治：トンネルにおけるパイプルーフ工法・地盤，理工図書刊，p. 56，1982. 11.
- 6) 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，pp. 188~189，1995. 9.
- 7) 小原勝巳，川端康夫，筒井雅行，石黒真一，荻田雅弘：改良型注入式鋼管先受工法における鋼管の曲げ挙動について，土木学会，トンネル工学研究論文・報告集第6巻，pp. 123~128，1996.
- 8) 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），1997.
- 9) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会AGF-WG：注入式長尺先受工法（AGF工法）技術資料（三訂版），pp. 31~33，1997.
- 10) 「注入式長尺先受け工法入門」連載講座小委員会：注入式長尺先受け工法入門（2），トンネルと地下，p. 75，1995. 4.
- 11) 青木俊彦，中里貫一：現場計測データに基づく長尺フォアパイプの挙動について，土木学会第51回年次学術講演会，pp. 124~125，1996. 9.
- 12) 御手洗良夫，西間木朗：AGF工法の効果に関する研究，土木学会，西日本岩盤力学シンポジウム，pp. 59~64，1995. 7.
- 13) 例えば，浅川敏似，後藤克人：強風化地山における大断面トンネルの施工，五洋建設株式会社，技術の友（土木編），No. 39，pp. 45~59，1998. 3.

- 14) 例えば, 安保秀範, 飯塚克治, 笹尾春夫, 山本博嗣, 村山秀幸: 強風化地山の坑口施工における注入式長尺フォアパイプの適用と計測, 土木学会第49年次学術講演会, pp. 301~302, 1994. 9.
- 15) 松重宗徳: 鋼管長尺先受工法における鋼管断面の簡易設計法に関する研究, 山口大学工学研究科修士論文, 1995.
- 16) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的性質, 第5回日本地震工学シンポジウム7「シーディングス」, 1975.

(1998. 7. 2受付)

## DESIGN CRITERIA FOR AGF-METHOD

Hideki TAKEUCHI, Yosio MITARASHI, Masayuki SUZUKI  
Munenori MATSUSIGE and Koji NAKAGAWA

During the construction of tunnels under poor soil conditions, the long-fore-piling method is often employed as an adjunct construction technique to stabilize the tunnel face and to prevent the ground settlement. This paper proposes criteria for designing the geometry of pile section employed by the AGF (All Ground Fasten) method which is one of the long-fore-piling methods. The applicability of the design criteria proposed in this paper is discussed by examining the measured data from four tunnels constructed by the AGF method.