

## 大断面トンネル掘削における長尺先受け工法の 補助効果に関する研究

足立 紀尚・木村 亮・荒巻 智・林 憲裕

### IMPLEMENT EFFECT OF LONG DISTANCE PRE-LINING METHOD IN EXCAVATION OF LARGE CROSS-SECTION TUNNEL

By Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA, Satoshi ARAMAKI and Toshihiro HAYASHI

#### Synopsis

Long Distance Pre-lining Method is a such method that its purpose is to repress the surface settlement caused by tunnel excavation and stabilize the ground around tunnel. By introducing long distance fore-piles in arch shape above tunnel and grouting in the ground from the fore-piles, the ground is improved. In this paper, first, we investigated the present situation in the development of Long Distance Pre-lining Method. Then experiments of single tunnel excavation in model ground made of aluminum rods in 2-Dimension were carried out to investigate the Implement effect of Long Distance Pre-lining Method. By focusing on surface settlement and earth pressure on the tunnel lining, a series of model tests in different patterns were conducted. As a result, it is found that the arch-effect provided by fore-pile is very efficient in preventing surface settlement, and beam-effect along longitudinal direction can be expected.

#### 1. はじめに

近年、都市部において土かぶりの小さい砂質地山中に、山岳トンネル工法を適用してトンネルを掘削する例が多くなってきた<sup>1)</sup>。都市トンネルの地表面には構造物があるのが普通であり、また地中には、ライフライン等の地下埋設物がある。トンネルの施工に際しては、地表面および地中の周辺構造物に与える影響を最小限に抑さえ、しかも安全に行わなければならない。

その対策として種々の補助工法が考えられており、地表面沈下抑制を目的とした長尺先受け工法もその一つである。Fig. 1に示す長尺先受け工法は、トンネル上部にアーチ状に長尺のフォアパイルを施工し、フォアパイルからの注入により周辺地山を改良する工法である。本工法は掘削横断面に対しては「アーチ効果」を、また縦断面に対しては長尺パイルによる「はり効果」を期待し、地山の安定化を図ることを目的としている。

本論文では、まずはじめに大断面トンネルの長尺先受け工法の施工例として舞子トンネルを紹介する。さらに、フォアパイル、サイドパイルを用いた長尺先受け工の補助効果を明らかにするため実施した、単断面トンネルの2次元掘削シミュレーション実験結果を報告する。大断面トンネルの上部半断面掘削時における長尺先受け工法の補助効果に対して、地表面の沈下挙動およびトンネル覆工土圧に着目し、種々のパターンの模型実験でその効果を比較検討した。最後に実験から得られた知見と長尺先受け工法の今後の課題について述べる。

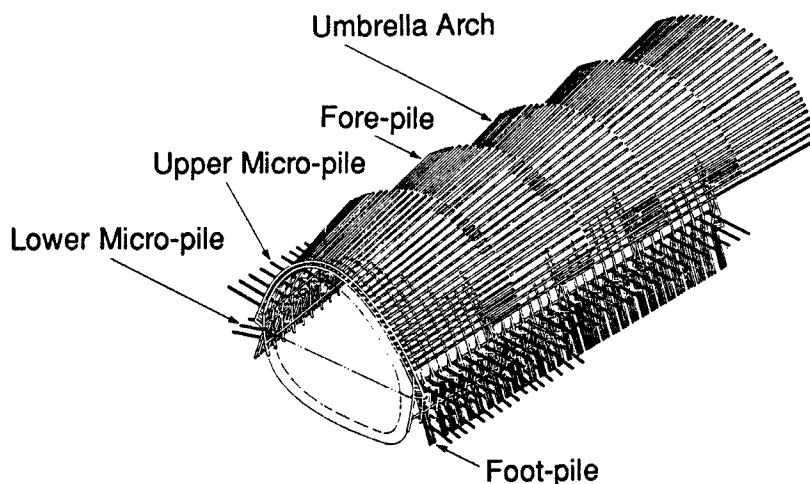


Fig. 1 Long Distance Pre-lining Method (Umbrella Method).

## 2. 大断面トンネル長尺先受け工法の施工例（舞子トンネル）

ここでは、大断面トンネルの先受け工として適用されつつある、トレビチューブ（長尺の鋼管フォアパイル）に代表される長尺フォアパイル工（一般にアンブレラ工法と呼ばれている）の施工例として、舞子トンネルを紹介する。

切羽安定と地表面沈下抑制を目的としたトレビチューブによる長尺先受け工法は、トンネル上部にアーチ状に長尺の鋼管フォアパイルを施工し、フォアパイルからの注入により周辺地山を改良する工法である。施工概要は、外径140～90 mm、肉厚10～7 mmの鋼管を、ロータリーパーカッション方式でトンネルのアーチに沿って打設し、この鋼管をグラウトパイプとして使い、 $30\text{kgf/cm}^2$ で注入（早強セメント）を行う。この鋼管と注入による改良体が一体となって先受け工となる。

上部半断面を掘削し支保工を設置し吹付コンクリートを施工した後、アーチ脚部の安定化のためにマイクロパイル（サイドパイル）とフットパイルを打設する。この工法は、我国で基本的な考え方が開発されたが、イタリアにおいてアンブレラ工法として体形化された。

アンブレラ工法は、アーチ状に入れた長尺先受け工と脚部の支持力によって地山を直接支持し、応力の再分配・ゆるみを極力抑え、変形・沈下を防止する工法といえる。その施工概念図と施工フローをそれぞれFig. 2、Fig. 3に示す。

現在本工法は、Fig. 4に示す明石海峡大橋の接続トンネルである舞子トンネルに適用されている。舞子トンネルは、Fig. 5に示すように2本の平行した3車線断面道路トンネルで、延長3,251 m、標準部の上下線中心間隔は50 mである。掘削断面積は $144\text{m}^2$ であり、日本でも有数の大断面トンネルである。トンネルの通過する地域は、市街化されており、大部分は墓園やゴルフ場の下部に計画されているが、土かぶりが小さく、直上に重要構造物がある区間もある。なお土かぶりは、最大でも50 m程度で、対象とする地山の地質は、約30%が六甲花崗岩で、残りは未固結の砂礫層である大阪層群となっている。

アンブレラ工法は、土かぶりが小さく、なおかつ明石海峡大橋のアバット部（1A）に近いために、双設トンネル間隔が近接している舞子台地区に適用される。Fig. 6に示すように舞子台地区の特長として、地質は大阪層群砂礫層が中心で、土かぶりが10 m～20 mと小さく、さらに、地表部は第一種住居専用地域であり、建造物および埋設物が分布している。ただし、地下水面はトンネルより低い位置にある。

舞子トンネル舞子台地区のアンブレラ工法に関しては、その選定前に各種先受け工法の比較が行われた。

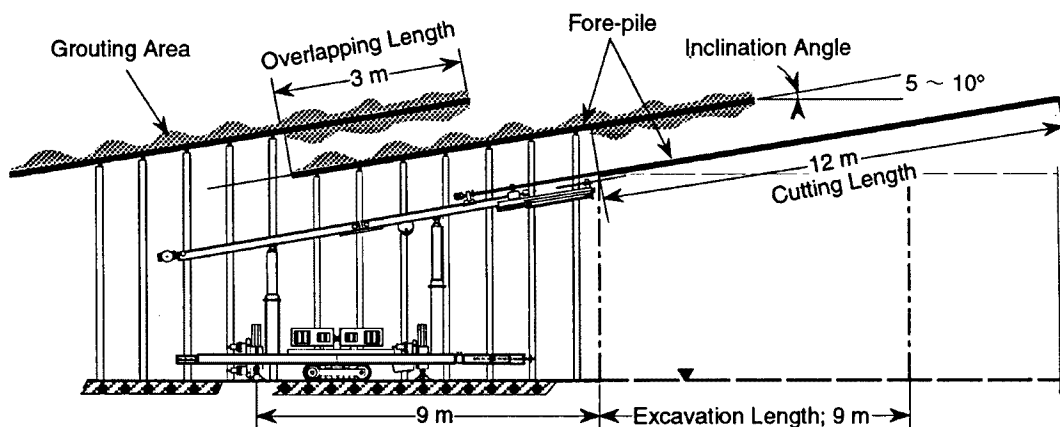


Fig. 2 Construction method of fore-piles.

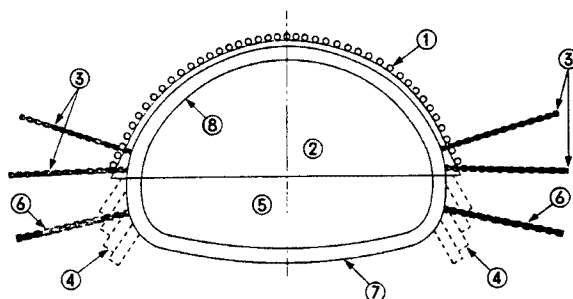
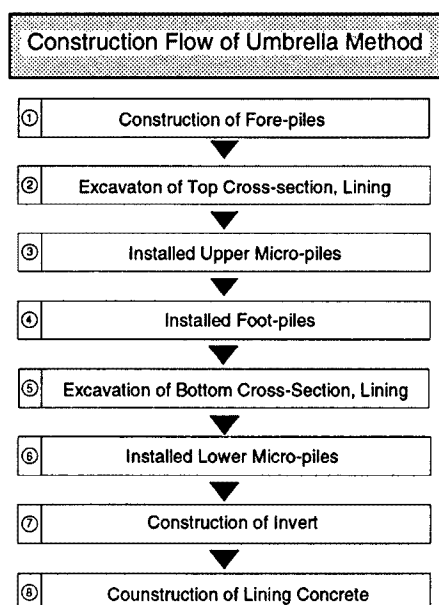


Fig. 3 Construction flow of Umbrella Method.

ただし施工時の条件は、土かぶりの小さい(10~20 m)大坂層群砂礫層の中を、掘削断面積約  $150 \text{ m}^2$  の大断面トンネルを双設で施工し、1) トンネル切羽の安定、2) 天端の崩落防止、3) 地表面沈下の抑制を行わなければならないことにある。また先受け工法は地表面の構造物の状態から、坑内から施工できる先受け工法に絞って、主に地表面沈下抑制対策工法という観点から比較された。

長尺先受け工法であるアンブレラ工法が、

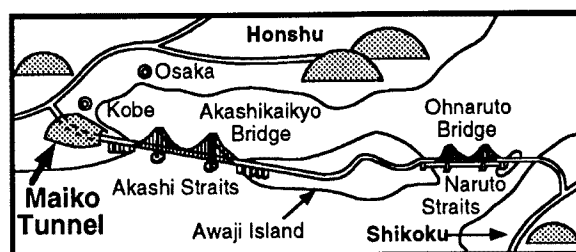


Fig. 4 Location of Maiko Tunnel.

先行変位抑制, 切羽安定を含めて対策工としての効果の信頼性から, 最も有効な対策工と判断された。このアンブレラ工法は, 前述したように先受け工と脚部の支持力によって地山を直接支持し, 応力の再配分・ゆるみを極力抑え, 変形・沈下を防止する工法であるが, 地山の状況に応じて注入併用パイプルーフ工法(トレビチューブ工法)→水平ジェットグラウト工法<sup>2)</sup>(ロディンジェット工法)→鋼管補強水平ジェットグラウト工法(トレビジェット工法)のような使い分けが可能である。このアンブレラ工法のうち, 直径 50 mm 程度の礫を含み, N 値 50 以上である大阪層群砂礫層への適用性を考えた場合, トレビチューブ工法が最もこの地質に適しているといえる。施工的にも, トレビマシンには 2 台の打設機が搭載されているため施工速度は速く, 対策工実施のための切羽進行の停止期間が短い。

舞子トンネルの加背割りは, 上部先進半断面掘削工法を採用している。現在, 約 10 ステップ目のフォアパイルを打設しているが, フォアパイルからの注入方式に若干の改良を加えたものの, 順調に施工されており, 上部半断面掘削時の天端沈下量は 20 mm 以下である。ただし, フェノール反応によるフォアパイル周辺地山の注入領域の確認によると, 改良体は必ずしも連続しているわけではなく, 施工状況から判断すると鋼管と改良体が一体となり十分なアーチ効果が発揮されているとはいいがたい。

### 3. 長尺先受け工法に関する模型実験概要

筆者ら<sup>3)4)</sup>は現在までに, アルミ棒積層体を地山材料に用いて模型実験を行い, 土かぶりの小さい土砂地山トンネル掘削時の力学挙動を検討してきた。そこで, フォアパイル, サイドパイルを用いた長尺先受け工の補助効果を明らかにするため, 単断面トンネルの 2 次元掘削シミュレーション実験を実施した。

#### 3.1 実験方法

本実験の地盤材料には, 従来どおり長さ 5 cm, 直径 1.6 mm および 3 mm のアルミ棒を重量比 3 : 2 で混合した, アルミ棒積層体 ( $\gamma = 2.1 \text{ gf/cm}^3$ ,  $\phi = 30^\circ$ ,  $c = 0 \text{ kg/cm}^2$ ) を用いた<sup>3)4)</sup>。このアルミ棒を Fig.7 に示す実験装置の左右の仕切り壁面間に積み上げて地山を形成する。仕切り壁面間距離は約 140 cm で, これはトンネル縦径  $D = 16.8 \text{ cm}$  の約 8 倍で, トンネル周辺地山に対する壁面の影響はないことを実験前に確認している。

本実験に用いたトンネル掘削のシミュレーション装置を Fig.8 に示す。この装置は, ハンドルを回転させることで径を半径方向に一様に縮めることができ, これによりトンネル掘削をシミュレートする。トンネル断面は Fig.9 に示すように縦径  $D = 16.8 \text{ cm}$ , 横径 21.5 cm で, 舞子トンネルと相似形(実トンネルの 1/74.4)である。またトンネル掘削装置の外周は均等に 22 等分され, それぞれはアルミ板 (6 cm × 2 cm) に板ばね (厚さ 1 mm のステンレス製) をはさんだ土圧計として機能する。1, 4 等の番号は土圧計の番号

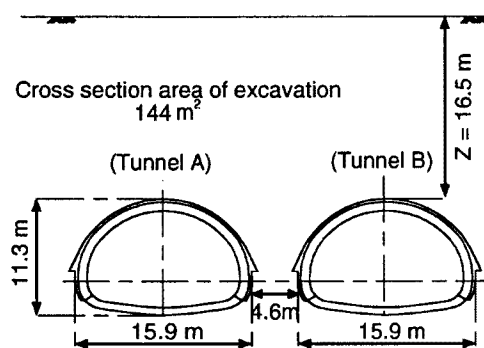


Fig. 5 Typical cross section of Maiko Tunnel (Maiko-dai).

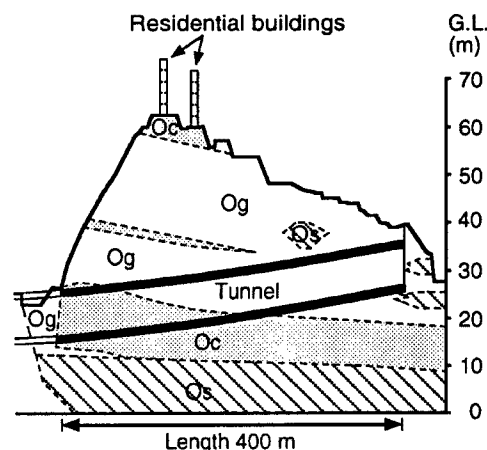


Fig. 6 Partial soil profile of Maiko Tunnel (Maiko-dai).

である。すなわち、各面に垂直な土圧は、板ばねの両端に張った曲げゲージのひずみにより求まる。またトンネル収縮時に、アルミ棒が土圧計の間から落ち込まないように、アルミ板には特殊な加工が施されている。実験前にトンネル収縮量と土圧との関係をキャリブレーションしている。

フォアパイルには、Fig. 10(a)に示す直径1.0 cmのアルミ棒を用いた。ただしフォアパイルの固定のために、両端には直径0.5 cm、長さ33 cmの棒が設置されている。フォアパイルの周面には、摩擦をもたせる意味で両面テープが巻いてある。実際の縮尺でフォアパイルを設計すると、直径は1.5 mmとなり、地山材料であるアルミ棒の径より小さくなるが、注入による周辺地山の改良をも考慮して直径1 cmとした。アルミ棒を積み際、フォアパイルのアーチを正確に設置するために、Fig. 11に示すガイドを掘削装置の両端に取り付けた(Photo 1参照)。

サイドパイルとしては、Fig. 10(b)のような形状のアルミ板を用いた。サイドパイルも直径11.4 cm、肉厚8.6 mmの鋼管であるために、奥行き5 cmすべてに面状に設置するのではなく、切欠きを入れることによって一部分ではアルミ棒が接するようにした。またフォアパイルのアーチ荷重を受けるウイングリブ(実際は支保工に設置されている)の模型をFig. 10(c)に示す。

実験手順を以下に説明する。

- 1) ガイド (Fig. 11) を掘削装置の両側に取り付ける。
- 2) サイドパイル、ウイングリブを設置しながらアルミ棒を積み上げる。
- 3) フォアパイルをガイドの溝にはめながら (Photo 1), アルミ棒を所定の土かぶりまで積み上げる (Photo 2)。
- 4) ガイドをはずし、フォアパイルの心棒を抜く。
- 5) レーザー変位計 (Fig. 12) を取付ける。
- 6) ハンドルを回転させることによりトンネル径を収縮させ、各トンネル半径収縮量ごとに土圧計の値を記録する。それと同時にレーザー変位計を用いて地表面沈下量を測定する。

ここで、5) のレーザー変位計は、実験装置上部に設置し、駆動シャフトとガイドシャフトを通して左右にレーザー変位計が移動し、その移動量を水平移動量検出センサーで読み取るものである<sup>5)</sup>。

### 3.2 実験の種類

本実験は、すでに全断面掘削を対象にして土かぶり  $Z = 1.0D \sim 2.0D$  で実施し、参考文献6)に報告している。

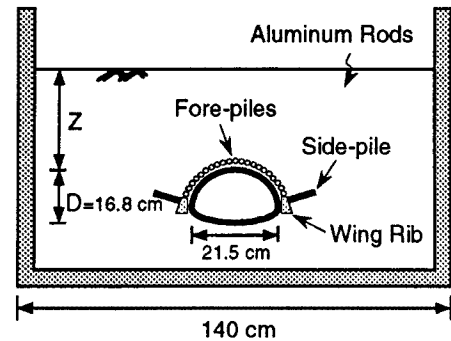


Fig. 7 Test apparatus.

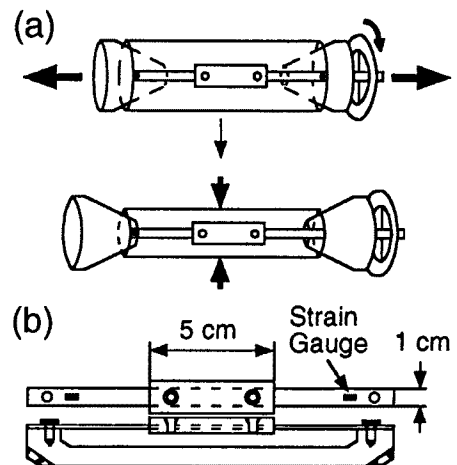


Fig. 8 Schematic illustration of diameter reducible device used to simulate tunnel excavation and earth pressure gauge.

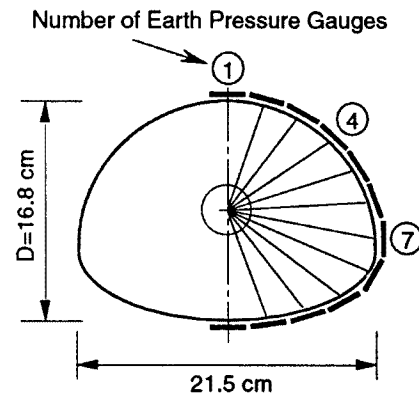


Fig. 9 Geometry of tunnel and arrangement of earth pressure gauges.

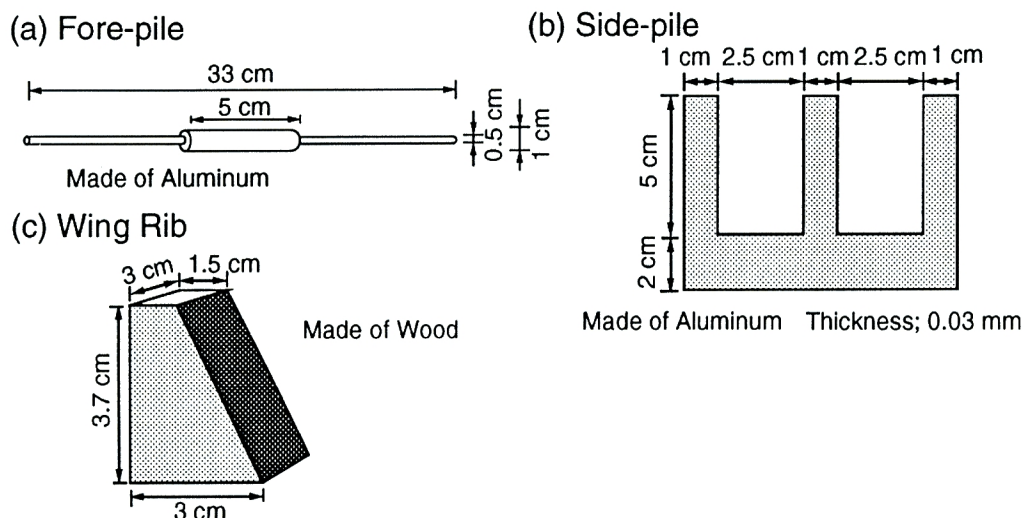


Fig. 10 Models of fore-pile, side-pile and wing rib.

本論文では、土かぶり  $Z=1.5D$  の上部半断面掘削の実験について報告する。実験の種類を **Fig. 13** に示す。トンネル半径収縮量  $\delta_T$  を最大 2 mm とし、収縮量 1 mm までは 0.1 mm ごとに、それ以降は 0.2 mm ごとに覆工に作用する土圧を計測する。

パターン A は、補助工法なしの全断面掘削を想定した実験である。パターン B は、スプリングライン以下を板で遮断し、上部半断面掘削を想定したものである。パターン C, D は、**Fig. 14** に示すように、フォアパイル（直径 1 cm）をアーチ状に、パイル間隔なしで、トンネル中心角  $140^\circ$  の範囲に設置したものである。その際に、フォアパイルのアーチの足元に伝わる土圧を土圧計で測定する。なお、パターン C は、パイル両端を固定せずに自由な状態（**Photo 2** 参照）にしており、パターン D は、パイル両端を **Fig. 11** に示したガイドで固定したものである。すなわち、パターン C はトンネル縦断方向の「はり効果」を考慮していないが、パターン D は「はり効果」を考慮している実験といえる。最後に、パターン E は、さらにサイドパイルをウイングリブに固定して実施した実験である。

#### 4. 実験結果と考察

本実験で得られた結果に対して、各々のパターンの実験の比較を行いながら、考察を加える。

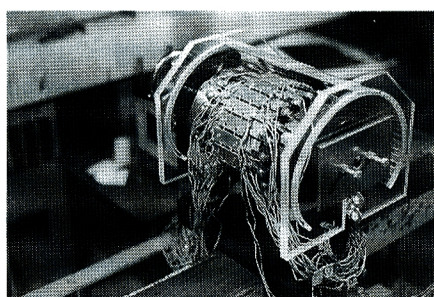


Photo 1 Tunnel excavation device and guide for fore-piles.

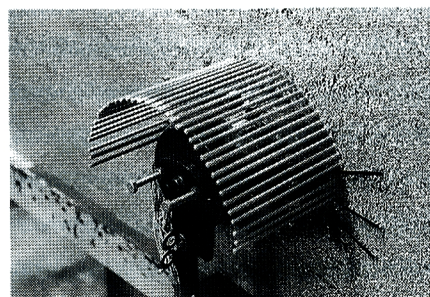


Photo 2 Model test in setup condition.

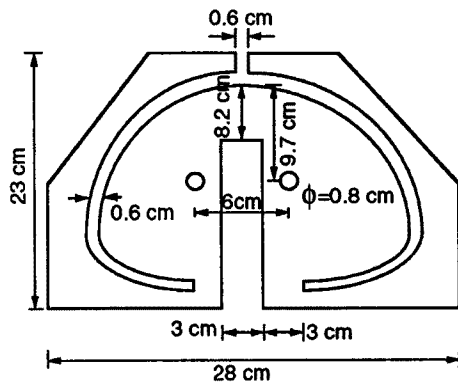


Fig. 11 Guide to install fore-piles.

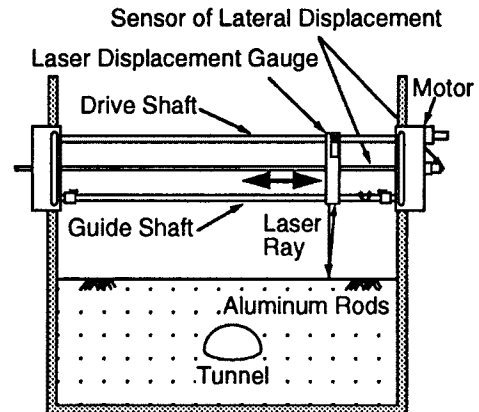


Fig. 12 Measuring system of surface settlement by laser displacement gauge.

#### 4.1 全断面掘削と上半掘削との比較

Fig. 15(a)(b)は、それぞれ土圧計番号1, 4に作用する土圧を初期理論かぶり圧 $\gamma Z$ で基準化して、縦軸にプロットし、トンネル半径収縮量 $\delta_T$ を横軸にプロットしたものである。これらの図より上部半断面掘削を行う方が掘削が進むにつれて、土圧がより大きく減少していくことが分かる。これは、全断面掘削(○印)と上部半断面掘削(□印)とを比較すると、後者の方が少ない支保で掘削が可能であることを示している。この理由は、上部半断面掘削(パターンB)では、スプリングラインより下の部分が仕切り板によって遮られて、アルミ棒積層体の移動が制限されたため、ゆるみ領域があまり発達せず、安定な状態を保っていたと考えられる。

Fig. 16, Fig. 17は、レーザー変位計で計測した地表面沈下量を縦軸に、トンネル中心軸からの水平距離 $H$ をトンネル縦径 $D$ で基準化した値を横軸にプロットしたものである。Fig. 16(a)は、トンネル半径収縮量 $\delta_T = 2 \text{ mm}$ 時に、パターンAで計測された値をそのままプロットしたものである。Fig. 16(b)は、Fig. 16(a)で得られた沈下形状にスムージングをかけたものである。Fig. 16(a)のようにデータをそのまま表示すると、他のパターンと比較しにくいので、Fig. 17(a)(b)は、トンネル半径収縮量 $\delta_T = 1, 2 \text{ mm}$ の結果にスムージングをか

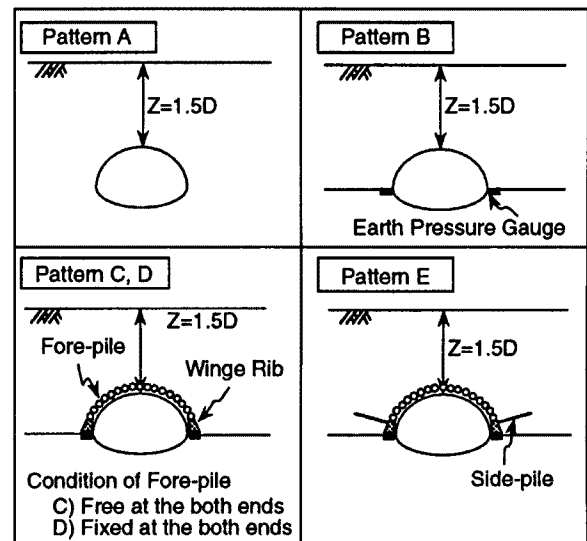


Fig. 13 Patterns of model tests.

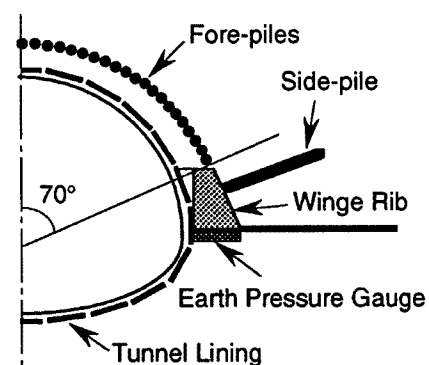


Fig. 14 Arrangement of fore-piles, side-pile and wing rib.

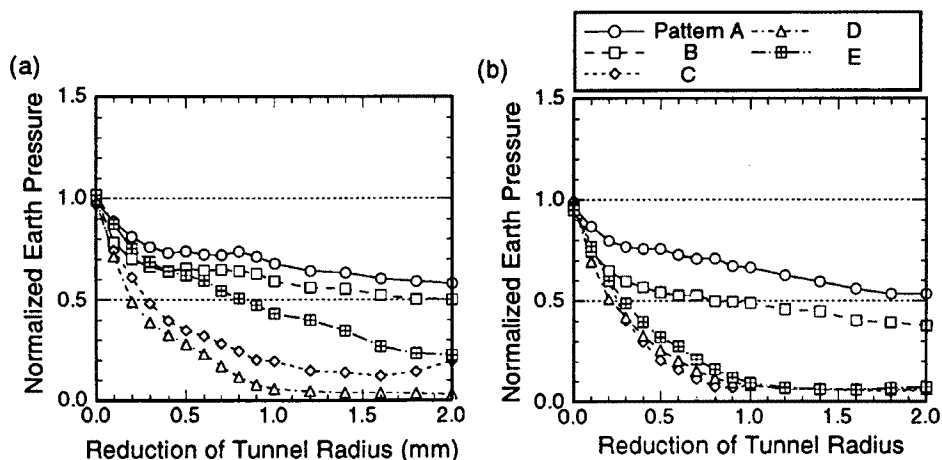


Fig. 15 Variation of normalized earth pressure with reduction of tunnel radius  $dT$ .

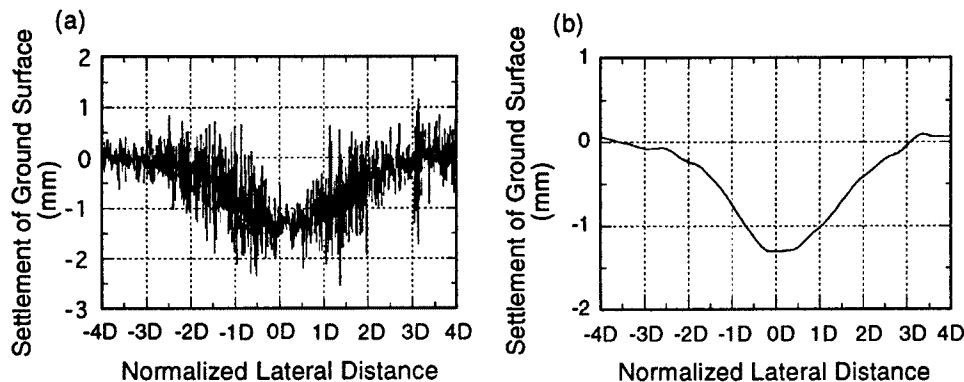


Fig. 16 Distribution of ground surface settlement (pattern A,  $dT=2$  mm),  
(a) with filtering, (b) without filtering.

けて表した。

**Fig. 17** より上部半断面掘削 (パターンB) の方が, トンネル直上付近では, 地表面沈下が全断面掘削の場合 (パターンA) より抑えられており, 沈下がおよぶ範囲もトンネル中心軸から水平方向に, パターンAで3.0D程度であるのに対し, 2.0Dほどである。したがって, 地表面沈下抑制に関しても上部半断面掘削が有利である。

#### 4.2 フォアパイルの効果

**Fig. 15** を見ると, パターンB (フォアパイルなし) よりパターンC (フォアパイルあり) の方が, 土圧が大幅に減少している。ここで注目すべき点は, トンネル半径収縮量が0.2 mmまでは少しの違いだが, それ以降, 両者に大きな差が生じているということである。つまり, 覆工土圧に関して, 期待されるフォアパイルのアーチ効果は, 収縮量0.2 mm以降に大きく現われるといえる。ここで, トンネル収縮量0.2 mmは, 実際のトンネル天端変位1.5 cmに相当する。

また**Fig. 17**によると, フォアパイルを用いた方 (パターンC) が, 地表面沈下の抑制に有効で, 補助工法を用いないパターンBと比較して約1/2となる。なお, パターンBの実験中に収縮量1 mmを越えた時から, フォアパイルのアーチとトンネル覆工の間の地山に空隙が観察された。この事実は, フォアパイルが



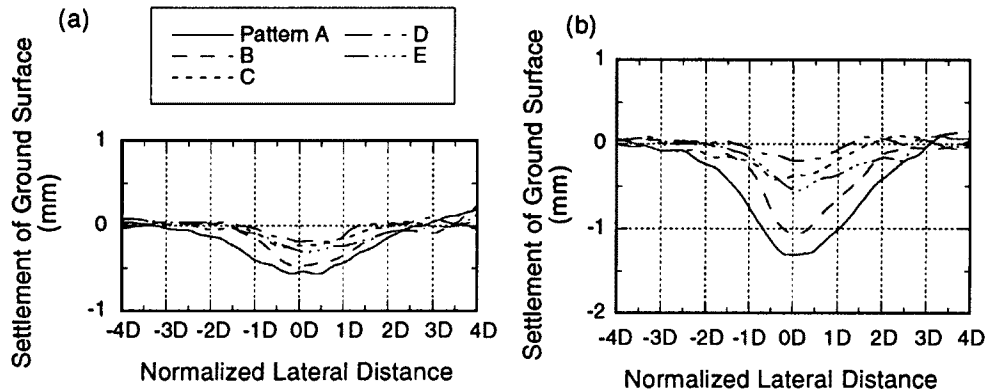


Fig. 17 Distribution of ground surface settlement,  
(a)  $dT=1$  mm, (b)  $dT=2$  mm.

形成するアーチが、掘削中フォアパイルより下部の地山と同じようなモードで変形するのではなく、その形を保ち続けていることを物語っている。このアーチのおかげで、地表面沈下抑制に効果的なのである。

#### 4.3 フォアパイル固定の効果

Fig. 15(b)を見ると、パターンC（両端自由）とパターンD（両端固定）で土圧計4はほとんど違いがないが、Fig. 15(a)では、土圧計1はパターンCよりパターンDの方が土圧が小さい。これはフォアパイルが固定されていることによる「はり効果」と考えられる。

Fig. 17より、天端直上の地表面沈下量は、パターンCよりパターンDの方が抑さえられており、約1/2になっている。また沈下の影響範囲についても、パターンCがトンネル中心軸より水平方向2.0Dにおよぶのに対し、パターンDでは、1.0D程度に収まっている。

Fig. 18は、フォアパイルのアーチの足元にかかる荷重を左縦軸に、右縦軸に図中の挿し絵に示す斜線領域の重量に対する百分率をとり、トンネル収縮量 $\delta_T$ を横軸にとったものである。これより、パターンC、Dのアーチ荷重は収縮量0 mm時に両者とも36%程度かかっているが、収縮が進むと徐々にアーチ荷重が増加し、パターンCでは最終的に収縮量2 mmでは、50%にまで増加した。一方、パターンDではアーチ荷重が42%とパターンCほどは増加しなかった。これもフォアパイルが固定されていることによると考えられる。

#### 4.4 サイドパイルの効果

Fig. 15より、フォアパイルが両端自由の場合、パターンC（サイドパイルなし）に対してパターンE（サイドパイルあり）の方が土圧が大きいことが読み取れる。またFig. 17の地表面沈下の結果からも、サイドパイルを設置した場合の効果を確認することはできない。実験の機構上、サイドパイルを入れるパターンEの場合、アルミ棒を積む際にどうしても地山が乱れる。またアルミ棒積層体がサイドパイルによって、その流動を限定されるため、うまくアーチが形成されず、アーチ効果が発揮できにくいとも考えられる。

以上実験結果からは、サイドパイルが覆工土圧

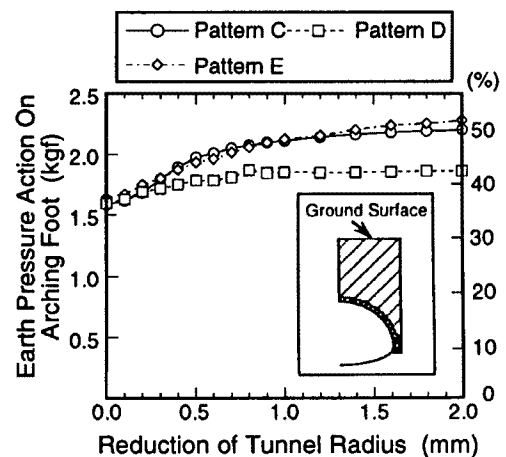


Fig. 18 Relation between earth pressure acting on arching foot and reduction of tunnel radius.

に与える影響は小さいといえる。しかしながら、実際の施工では、サイドパイルはせん断抵抗により地山内のすべりを抑制することが期待されているので、サイドパイル周辺地盤の変位挙動をさらなる実験によって確認する必要がある。

#### 4.5 各パターンの比較

ここでは、トンネル半径を初期状態から 0.2 mm まで縮めた時に着目して、各パターンの比較を行う。

トンネル半径を初期状態から 0.2 mm まで縮めた時の、トンネル半径収縮量に対するトンネル土圧の変化率を求める。その求め方は、Fig. 19 に示すように、図中の  $\tan \theta$  の絶対値を計算し、それを変化率とする。この値が大きいほど、収縮に伴う土圧の減少が大きいことを示し、補助工法の効果が大きいといえる。

Fig. 20 は、パターン A（全断面掘削）の変化率で他のパターンの変化率を基準化したものを縦軸に、各パターンを横軸に記したものである。これより、フォアパイルを固定した時に、土圧計番号 1（天端）では、パターン A の 2 倍、土圧計番号 4（トンネル肩部）では 2.8 倍ほど補助効果があり、最も有利である。しかし、フォアパイルとサイドパイルを併用した場合は、前節に示したように補助効果が現われていない。今後は、フォアパイルの設置間隔、サイドパイルの設置位置および土かぶりなど種々の条件を変化させて実験を行い、補助効果をより明らかにしていく予定である。

#### 5. おわりに

本研究では、土砂地盤中にかぶりの小さいトンネルを掘削する場合の、長尺先受け工法の補助効果を解明することを目的とし、半径方向に収縮可能なトンネル掘削シミュレーション装置を用いてモデル実験を実施した。その結果以下の知見を得た。

- 1) 全断面掘削時より上部半断面掘削の方が覆工土圧および地表面沈下が抑ええられる。
- 2) フォアパイルのアーチの効果は、トンネル壁面がある程度変形してから発揮され、地表面沈下も大幅に抑ええられる。
- 3) フォアパイルの両端を固定した方が、はり効果により地表面沈下を抑ええられる。
- 4) サイドパイルの有無による顕著な違いは、本実験では見られなかった。

模型実験の結果からは上記の知見が得られたが、大断面トンネル先受け工法の課題については以下のようにまとめられる。

一般に大断面トンネルを施工する場合、断面が大きいがゆえにトンネル掘削時の地山挙動を適切に把握し、地山条件に応じた掘削工法・補助工法を検討することが必要不可欠である<sup>7)</sup>。とくに試験施工を行い、その計測結果を活用して掘削工法・補助工法を決定する必要も生じる。大断面トンネル掘削時の重要なポイントは、以下のようにまとめられる。

- 1) 地山の強度を最大限に利用し、そのためには地山

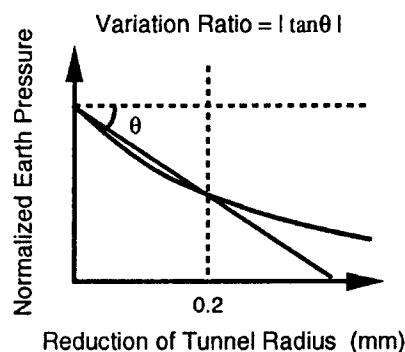


Fig. 19 Evaluation of variation ratio in earth pressure.

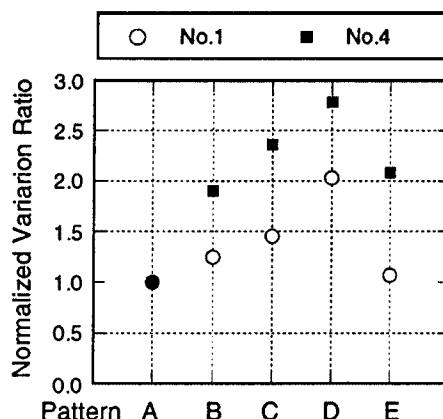


Fig. 20 Variation ratios in each pattern.

と支保の挙動を計測し、支保工・覆工と地山を一体とした支保パターンの評価を行う必要がある。

- 2) 土かぶりの小さい未固結地山は、切羽前方の地山を改良することが必要である。また吹付けコンクリートによる早期閉合によって、地山の強度低下を極力抑え、大きな断面のままで掘削することが望ましい。

以上、大断面トンネルの場合は、「慎重かつ大胆に」掘削する必要があると考えられる。何らかの補助工法は必要不可欠であるが、かぶりが小さい場合、地山によって先受け工法の適用性に違いはあるものの、重要なことはアンブレラ状になるべく長尺の先受けを行い、トンネル横断面のアーチ形状による地山と先受けの一体化を図ることが必要である。「先に受けているから大丈夫であろう」という安心感は捨て、あくまで慎重で丁寧な施工を行う必要がある。前述したように大断面トンネルにおいてこそ、なるべく大きな断面で加背割の大きい状態で掘削し、早期閉合による地山の安定を確保し、大胆に掘削することも経済性と技術革新の上で重要となろう。

トンネル掘削に関しては断面の大小を問わず、トンネル土圧や周辺地山の挙動等不明確な点が多い。先受け工法の効果は、3次元問題であり模型実験、数値解析で十分検討できているとはいいがたい。基礎的な研究の必要性はもとより、「現場でのトンネル掘削は真の現場実験である」という気概をもって、適切な計測を実施し、計測結果を次の施工機会に反映するべきである。長尺先受け工法等の施工例はまだ十分とはいえないが、今後かぶりの小さい都市部での大断面トンネル掘削時の標準補助工法となる可能性はある。

最後に、舞子トンネルに関する資料を提供していただいた、本四公団舞子工事事務所の関係各位と、レーザ変位計に関する助言をいただいた、名古屋工業大学中井照夫教授に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 桜井春輔・足立紀尚 共編：都市トンネルにおける NATM，鹿島出版会，1988.
- 2) ジェオフロンテ研究会編纂：山岳トンネルの新技术，土木工学社，1991.
- 3) 足立紀尚・木村 亮・山口直宏・長田文博：土砂地山における双設トンネル掘削時の挙動，京都大学防災研究所年報，第 32 号 B-2，1989，pp.183-192.
- 4) 足立紀尚・木村 亮・荒巻 智：かぶりの小さい土砂トンネルの遠心模型実験，第 4 回地盤工学シンポジウム論文集，土質工学会中部支部，1992，pp.87-94.
- 5) 中井照夫・河野伊知郎・橋本 正：壁体の変形履歴を考慮した土圧実験とその解析，第 4 回地盤工学シンポジウム論文集，土質工学会中部支部，1992，pp.49-54.
- 6) 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け工法の補助効果に関する模型実験，第 28 回土質工学研究発表会発表講演集，1993，pp.2309-2312.
- 7) 財団法人高速道路技術センター：都市部大断面トンネルに関する検討報告書，1991.