

大断面トンネルの上部半断面掘削時における 長尺先受工法の補助効果に関する模型実験

京都大学工学部 正会員 足立 紀尚, 木村 亮
 京都大学大学院 学生会員 荒巻 智
 北海道開発庁 正会員 林 憲裕

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。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。トンネルの施工の際には、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工法（アンブレラ工法と呼ばれている。図-1参照。）もその一つである。長尺先受工法は、トンネル上部にアーチ状に長尺のフォアパイル（直径11.4cm、肉厚6mmの鋼管）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。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。また、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。

以上述べたように、アンブレラ工法は、アーチ状に入れた長尺先受工と脚部の支持力によって地山を直接

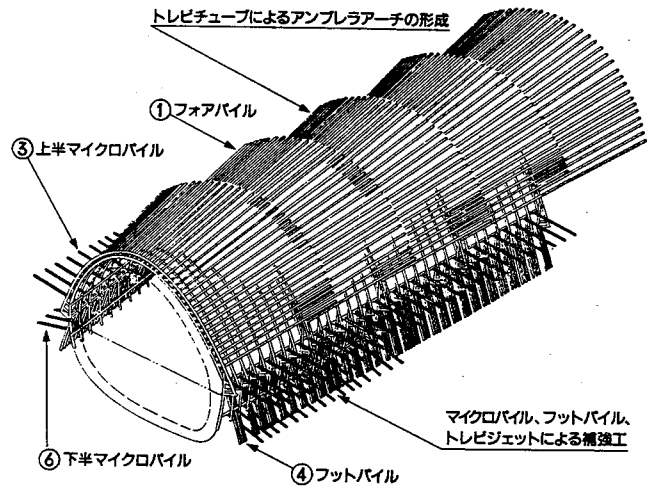


図-1 アンブレラ工法概念図

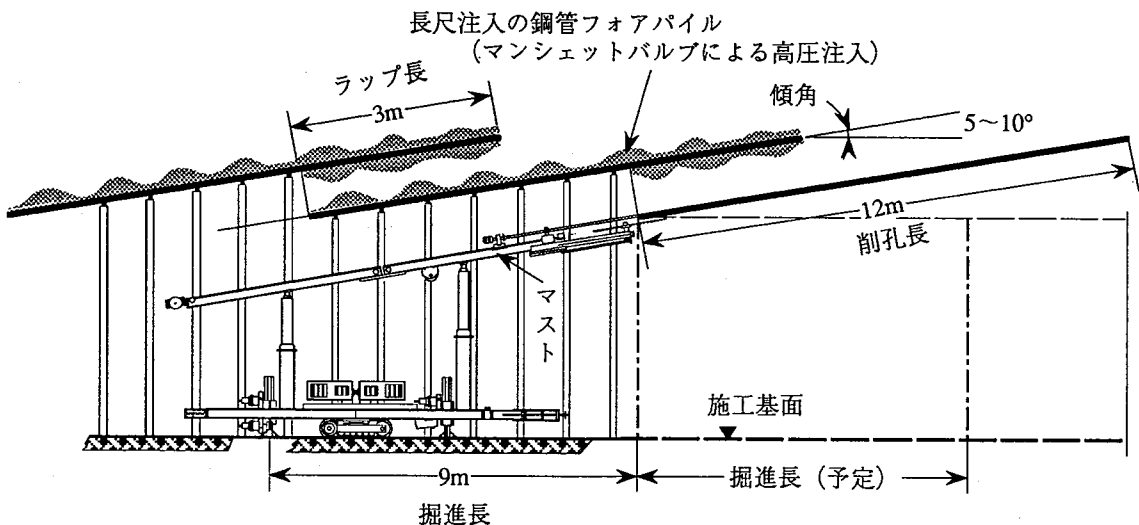


図-2 アンブレラ工法施工概念図

Model Tests on Supporting Effect of Longer Pre-lining Method in Excavating Top Cross-section of Large Tunnel

by Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA, Satoshi ARAMAKI (Kyoto Univ.)
 and Toshihiro HAYASHI (Hokkaido Development Agency)

**芯材補強アンブレラ工法
施行フロー**

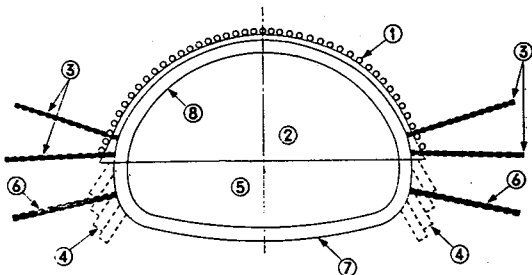
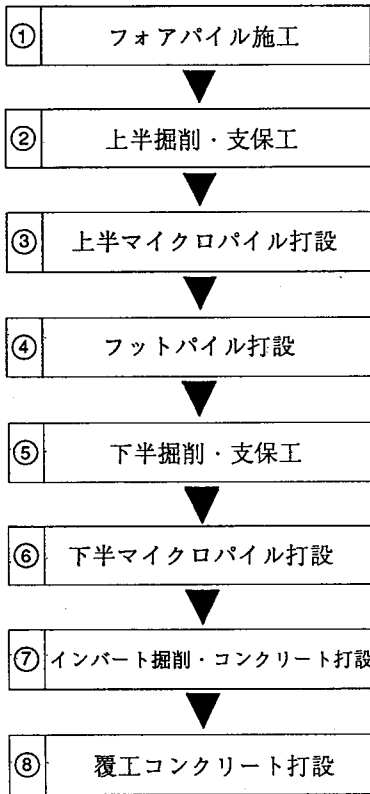


図-3 アンブレラ工法施工フロー

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図-2、図-3に示す。

現在本工法は、図-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、図-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3,251m、標準部の上下線中心間隔は50mである。掘削断面積は144m²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50m程度で、対象とする地山の地質は約30%

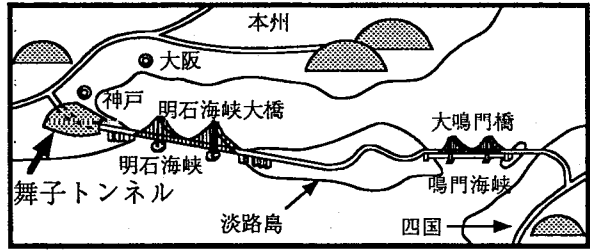


図-4 舞子トンネル

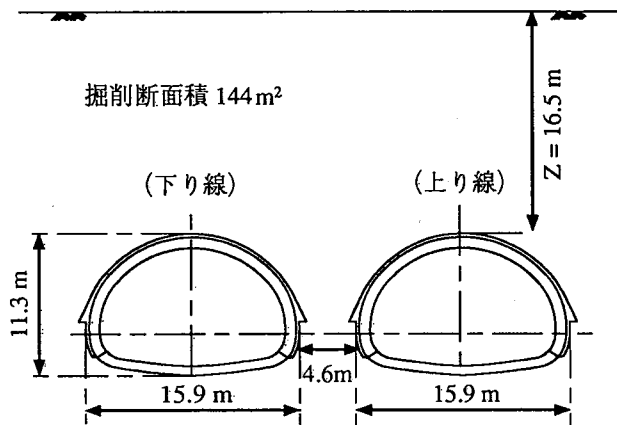


図-5 舞子トンネル断面図 (舞子台部)

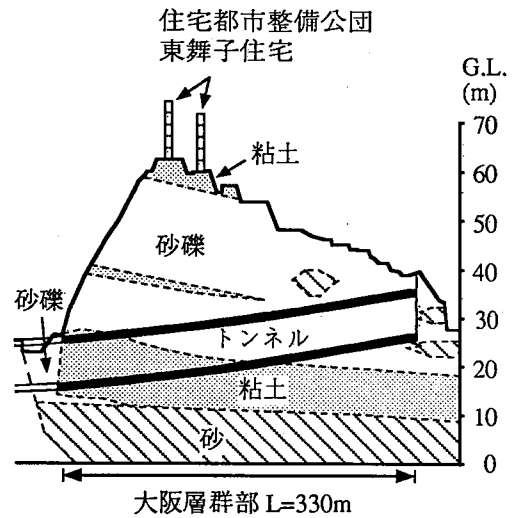


図-6 舞子台部の地質図

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。図-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10m~20m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。

従来、筆者ら¹²⁾は、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、本論文では、フォアパイル、サイドパイル、ウイングリップを用いた長尺先受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。上記の舞子トンネルを想定し、大断面トンネルの上部半断面掘削時における長尺先受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。

2. 実験概要

2-1 実験方法

本実験の地盤材料には、従来どおり長さ5cm、直径1.6mmおよび3mm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。このアルミ棒を図-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140cm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図-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樣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。トンネル断面は図-9に示すように縦径 $D=16.8\text{cm}$ 、横径21.5cm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(6cm×2cm)に板ばね(厚さ1mm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、図-10(a)に示す直径1.0cm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0.5cm、長さ33cm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

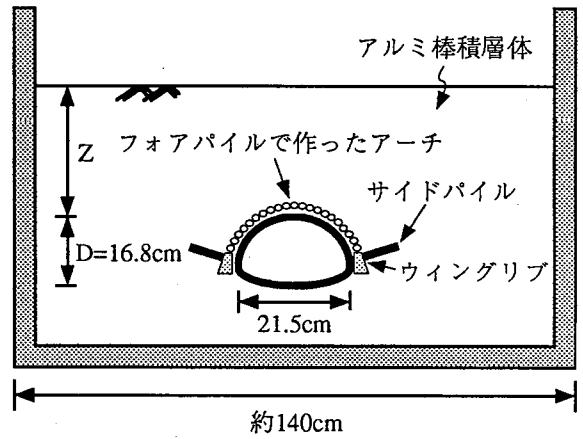


図-7 実験装置

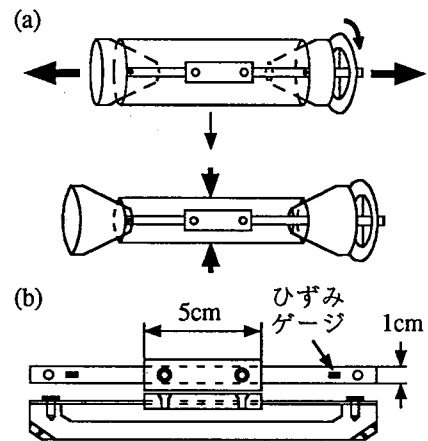


図-8 トンネル掘削シミュレーション装置

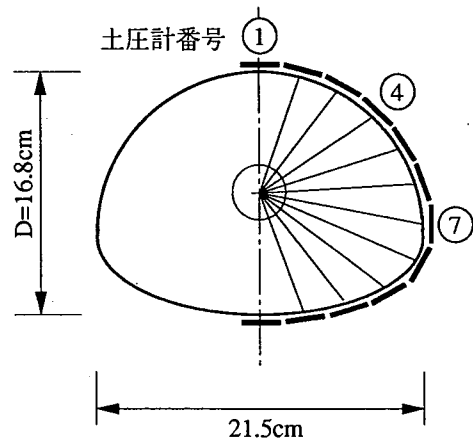
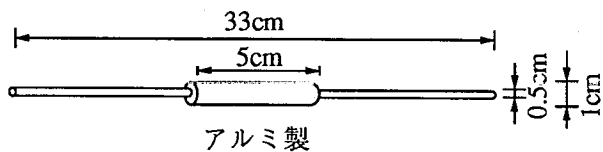


図-9 相似断面トンネル掘削装置と土圧計の配置

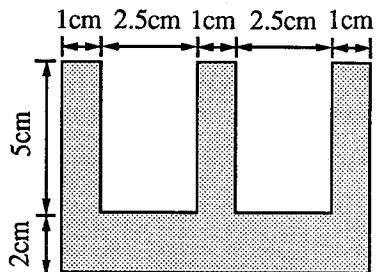
テープが巻いてある。実際の縮尺でフォアパイルを設計すると、直径は1.5mmとなり、地山材料であるアルミ棒の径より小さくなるが、注入による周辺地山の改

(a) フォアパイル



アルミ製

(b) サイドパイル



アルミ製 厚さ0.03mm

(c) ウィングリップ

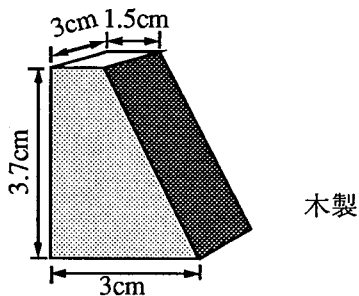


図-10 (a) フォアパイル, (b) サイドパイルおよび (c) ウィングリップの模型

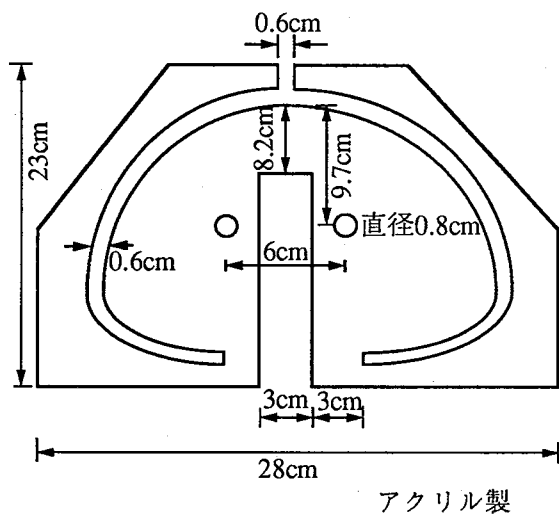


図-11 フォアパイル設置用ガイド

良をも考慮して直径1cmとした。アルミ棒を積む際、フォアパイルのアーチを正確に設置するために、図-11に示すガイドを掘削装置の両端に取り付けた（写真

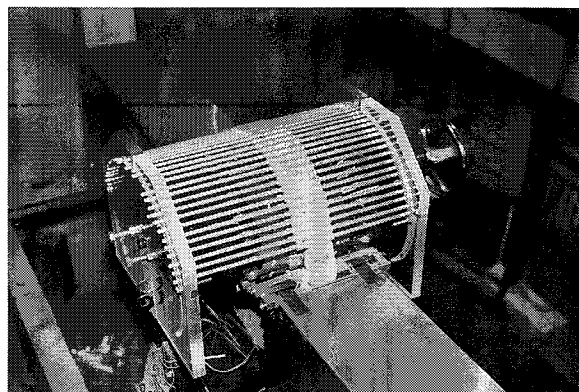


写真-1 ガイドを取り付けた掘削シミュレーション装置

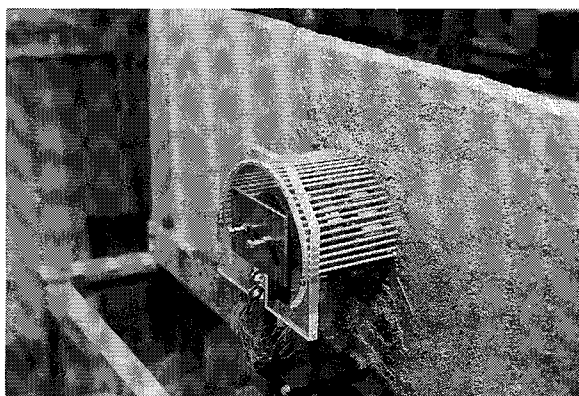


写真-2 積み上げ後の実験装置

-1 参照)。

サイドパイルとしては、図-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11.4cm、肉厚8.6mmの鋼管であるために、奥行き5cm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ィングリップ（実際は支保工に設置されている）の模型を図-10(c)に示す。

実験手順を以下に説明する。

- 1) ガイド（図-11）を掘削装置の両側に取り付ける。
- 2) サイドパイル、ウィングリップ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（写真-1）、アルミ棒を所定の土かぶりまで積み上げる（写真-2）。
- 3) ガイドをはずし、フォアパイルの心棒を抜く。
- 4) レーザー変位計（図-12）を取付ける。
- 5) 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

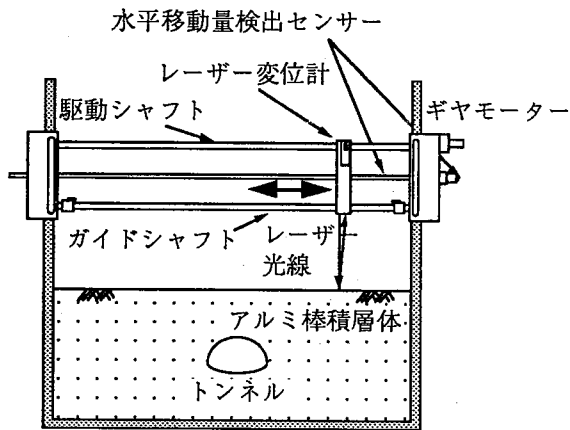


図-12 レーザー変位計を用いた地表面沈下計測システム

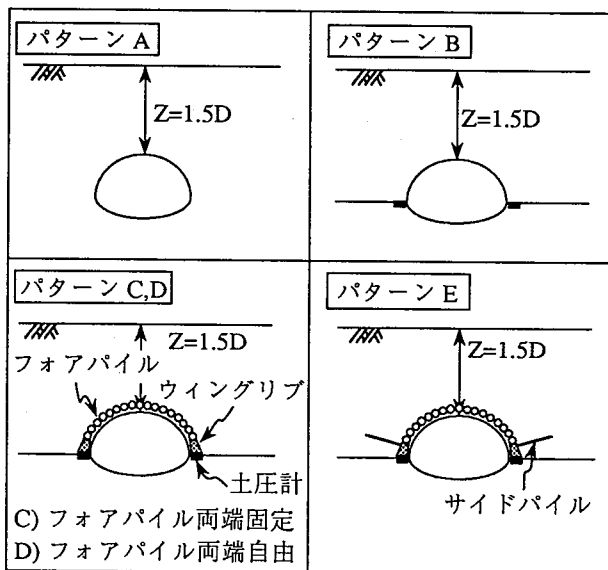


図-13 実験の種類

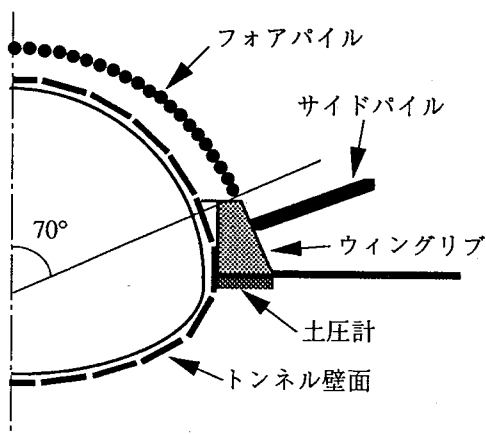


図-14 フォアパイル、サイドパイル、ウイングリブの配置

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、4)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³⁾。

2-2 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4)に報告している。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。実験の種類を図-13に示す。トンネル半径収縮量 δ_T を最大2mmとし、収縮量1mmまでは0.1mmごとに、それ以降は0.2mm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、図-14に示すように、フォアパイル(直径1cm)をアーチ状に、パイル間隔なしで、トンネル中心角 140° 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にしており、パターンDは、パイル両端を図-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。

3. 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ないながら、考察を加える。

3-1 全断面掘削と上半掘削との比較

図-15(a)(b)は、それぞれ土圧計番号1, 4に作用する土圧をかぶり γZ で基準化して、縦軸にプロットし、トンネル半径収縮量 δ_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な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、全断面掘削と上半掘削とを比較すると、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、パターンBでは、

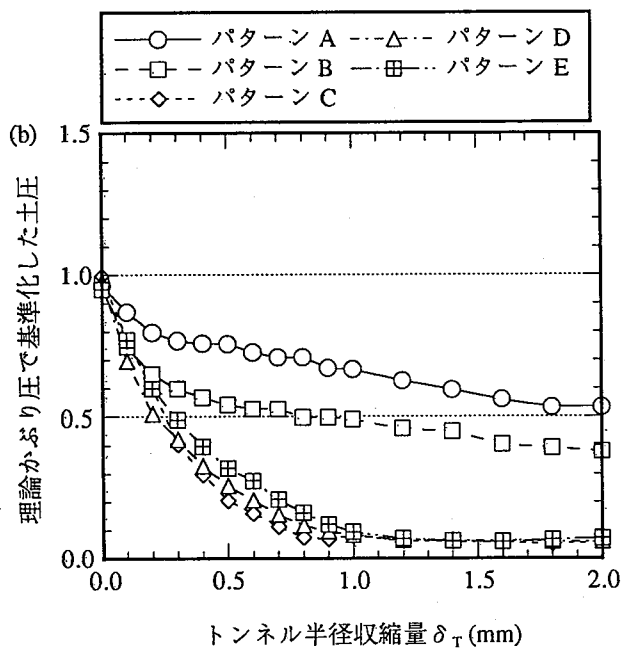
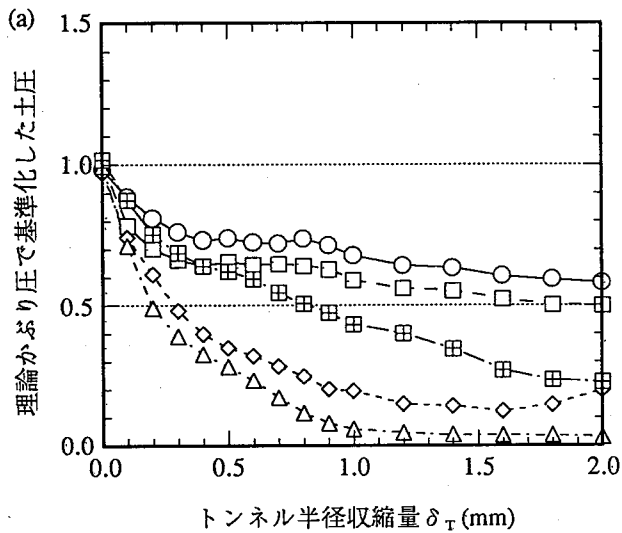


図-15 土圧とトンネル半径収縮量の関係
(a) 土圧計番号 1, (b) 土圧計番号 4

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。

図-16, 図-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。図-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。図-16(b)は、図-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。図

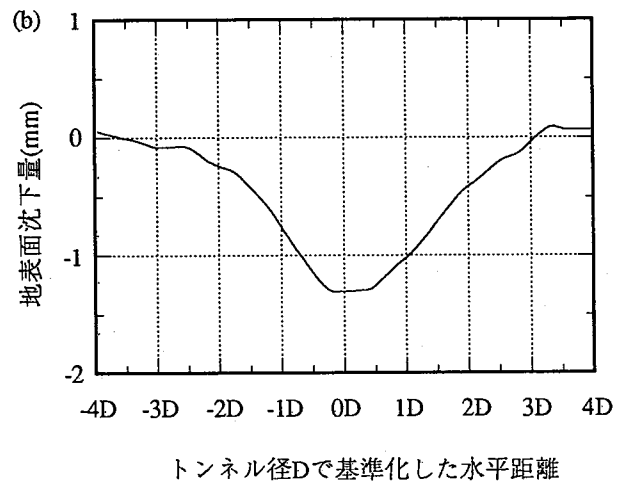
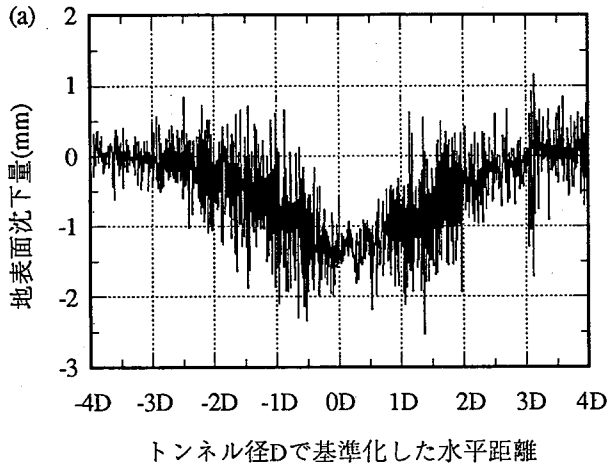


図-16 地表面沈下形状 (パターンA, $\delta_T = 2\text{mm}$)
(a) スムージングなし, (b) スムージングあり

図-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。図-17(a)(b)は、トンネル半径収縮量 $\delta_T = 1, 2\text{mm}$ の時の結果にスムージングをかけて表した。

図-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。よ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。

3-2 フォアパイルの効果

図-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0.2mm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。

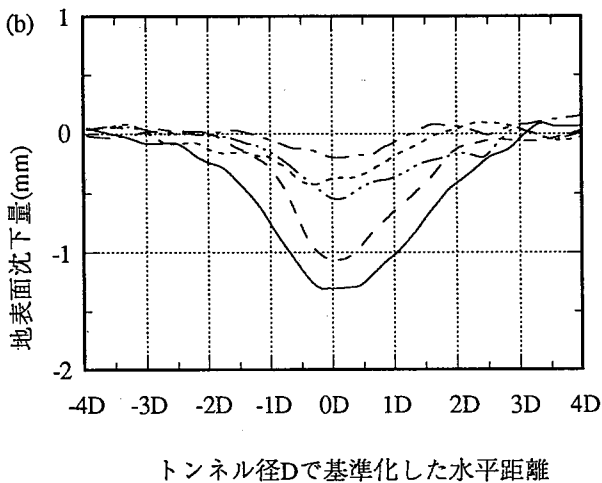
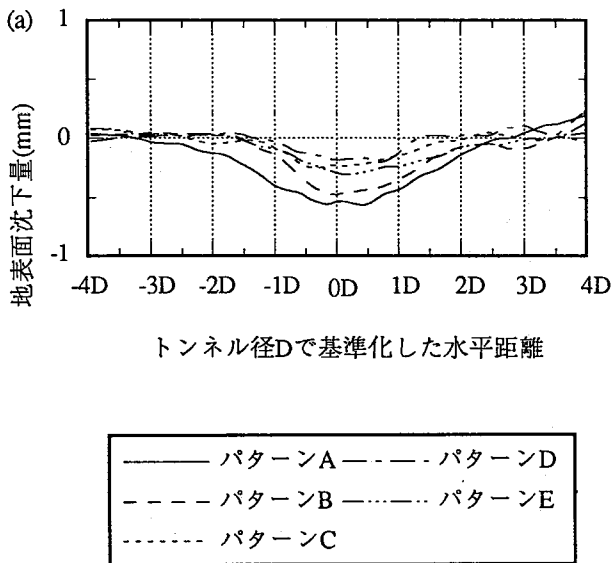


図-17 地表面沈下形状
(a) $\delta_T = 1\text{mm}$, (b) $\delta_T = 2\text{mm}$

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0.2mm以降に大きく現われるといえる。ここで、トンネル収縮量0.2mmは、実際のトンネル天端変位1.5cmに相当する。

また、図-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1mm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。

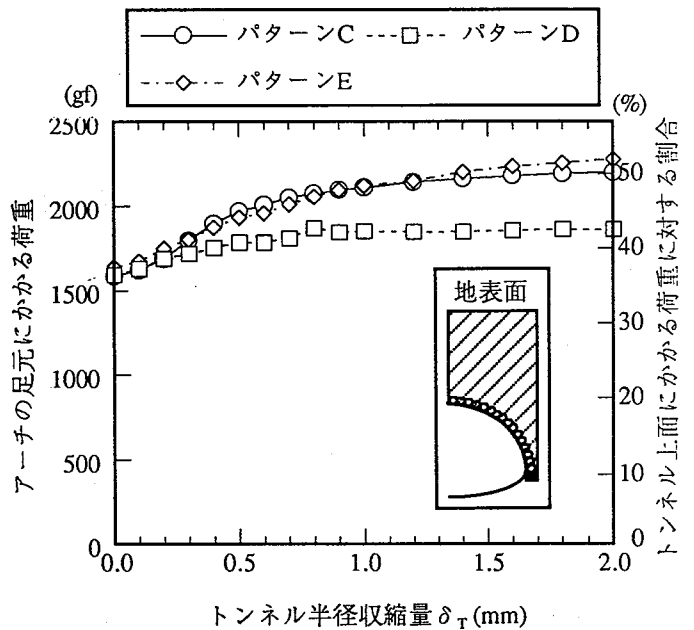


図-18 アーチ荷重とトンネル収縮量の関係

3-3 フォアパイル固定の効果

図-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、図-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。

図-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。

図-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 δ_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0mm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2mm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。

3-4 サイドパイルの効果

図-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。

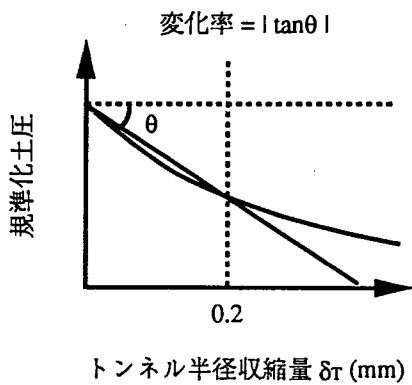


図-19 トンネル土圧の変化率の求め方

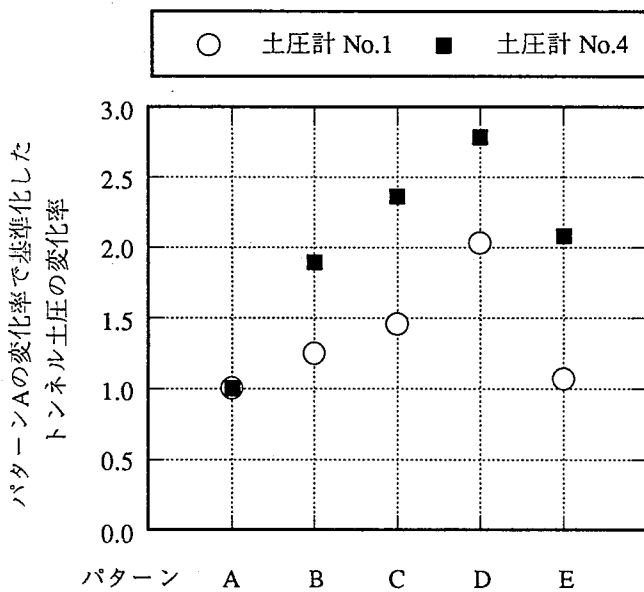


図-20 各パターン土圧の変化率

また、図-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。

3-5 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0.2mmまで縮めた時に着目して、各パターンの比較を行なう。

トンネル半径を初期状態から0.2mm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、図-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。この値が大きいくほど、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。

図-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、3-4に示したように補助効果が現われていない。

4. おわりに

本研究より以下の知見を得た。

- 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(トンネル周辺がある程度変形してから発揮される)によって、地表面沈下を抑ええられる。また、両端を固定すれば、はり効果によって大きな補助効果が発揮される。
- 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。

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します。

* 参考文献

- 1) 足立紀尚・木村亮・長田博文・山口直宏：土砂地山における双設トンネル掘削時の挙動，第24回土質工学研究発表会発表講演集，1989，pp.1695-1698.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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，第28回土質工学研究発表会発表講演集，1993印刷中。