

# 土槽実験によるトンネル切羽の挙動 及び安定性の評価

有川 究<sup>1</sup>・櫻井 春輔<sup>2</sup>・西岳 茂<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 三菱重工業株式会社 高砂研究所 (〒676-8686 高砂市荒井町新浜2丁目1番1号)

<sup>2</sup>正会員 工博 Ph.D 神戸大学 工学部建設科 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町1丁目1番)

<sup>3</sup>正会員 工博 三菱重工業株式会社 神戸造船所 (〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番1号)

トンネルを合理的に施工する工法として、先受と加背割りとを併用した新しいトンネル施工法について、トンネル切羽の挙動や安定性への影響の評価を試みた。本論では、要素実験や数値解析で得られた結果を検証、補間するとともに、実際の地盤中での効果や影響を定量的に評価するため、大型の土槽を用いて、トンネル切羽近傍地盤の3次元挙動を把握する実験を実施した。その結果、切羽応力の解放に伴う地盤の3次元変形特性を把握すると共に、切羽安定に必要な限界支持力等を推定できること確認した。また、筆者らが過去に要素実験を実施した切羽形状による切羽安定性の比較を行い、先受や加背割りが切羽安定に効果的であることを確認した。

**Key Words:** natm, tunnel, cutting face, laboratory test, three dimensional diformation

## 1. まえがき

都市部の未固結地盤におけるトンネルを合理的に施工するために、図-1に示すような、先受工と先行的に地盤に挿入する貫入デッキを併用した工法（以後本工法と呼ぶ）を提案中である。

本工法の最大の利点は、切羽における下半先進掘削とインパットコンクリートの打設が上半掘削以前に下部で安全にできることにある。掘削により解放された下半空間で、インパットコンクリートの早期打設と掘削断面の早期閉合により、トンネル上部領域のゆるみを最小にすることが可能で、結果として切羽の安定性の向上と、地表面の沈下を抑制することができることとなる。

また、本工法は、貫入デッキを切羽から先行地盤に挿入することにより、機械的に加背割りを行うことが可能で、従来の加背割り工法のように、支保部材の設置と解体などが不要となるので、経済的な工法であるばかりでなく、施工の高速性が狙える工法である。施工の高速化は、地盤を開放している時間の短縮が可能で、切羽の安定性追求に不可欠な要素でもある。

筆者らは、過去にX線可視化による圧力制御方法

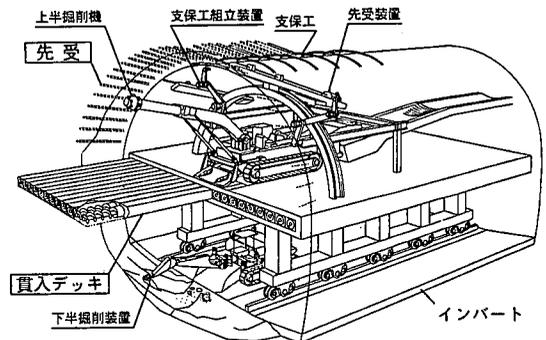


図-1 先受工と貫入デッキを併用した工法概念

を採用したモデル実験を実施し、本工法がベンチカット工法や先受工法と比較して、切羽が安定な状態から不安定な状態となる遷移区間で地盤中に発生する限界ひずみ値は同等であることを確認した<sup>2)</sup>。また、切羽を安定状態に維持できる最低圧力（限界支持力）についても同等であり、切羽の安定性能は、他の工法と同等であることを確認した。更に、全断面掘削モデルと比べると、格段に切羽の安定性に優れる工法であることも確認した<sup>2)</sup>。

以上の結果は、本工法による下半先進掘削においても、従来と同等の切羽安定管理に基づく施工を実施すれば、切羽安定に関する問題はなく、工法的に実現可能であることを示唆していると考えられる。

本研究では、要素実験において他の工法と比べて同等の切羽の安定性能を得ることを確認した本工法について、要素実験や数値解析の結果を検証、補間するとともに、実際の地盤中での効果や影響を定量的に評価するため、大型土槽を用いて、モデル地盤を製作して約1/10のスケールで実験を実施し、切羽限界支持力、地盤の変形挙動やひずみの発達状況等を調べることにより、切羽の安定性能を確認した。

## 2. 開発の目標

### (1) 開発の背景

今回提案中の工法は、都市部の未固結地盤におけるトンネルの合理的施工を目指して開発を行っている。シールド工法は、現在、都市部において、浅い土被りにおけるトンネル掘削工法として広く採用され、多くの成果を上げている。しかしながら、シールド工法はNATMに比較してインシャルコストが高いため、NATMを採用することも多くなっている。

更に、道路トンネルクラスの断面となると、全断面掘削のシールド工法採用の場合、シールド機械のコストが高価である上、機械の製作期間が2～3年と長く、また立坑建設にも莫大な費用と工期がかかる。これらは全体工期に与える影響が大きく、工事全体の採算性が極度に悪化するため、全断面シールド工法が採用される可能性は極めて少ないといえる。

近年、低コスト化を狙ったシールド工法による道路トンネル構築の新たなアプローチも検討されつつあるが、NATM分野での施工の合理化も検討すべき重要な課題である。

NATMの掘進速度はシールド工法に比較すると遅いが、機械設備は軽装備であり、短期間に着工でき、トンネル発進基地設備も小規模ですむなど、利点も多い。一方、切羽の安定性の確保のため、掘削断面を小分割化し掘進するため、支保部材の設置や撤去に時間を要するとともに、不経済となることも多い。さらに、切羽を解放して掘削するため、地下水対策として補助工法や地表沈下対策のための補助工法の費用が非常に高く、工事費用を押し上げてしまっている。NATMで施工した場合、シールド工法と工事終了後の清算金額とは差が少ないことも、調査結果で明確となっている。このように、従来のNATMのままでは、合理的なトンネル施工を実現するにはまだ多くの課題が残されていると言わざるを得ない。

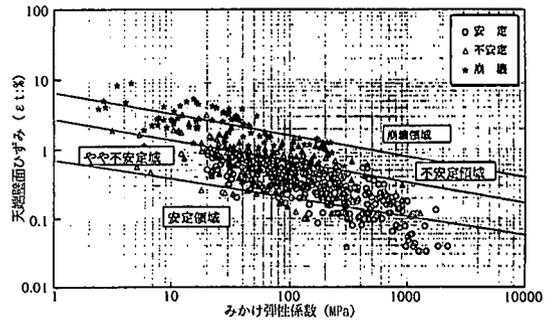


図-2 みかけ弾性係数と天端ひずみの関係<sup>3)</sup>

今回提案している先受と加背割りの併用工法は、従来NATMの課題である切羽の安定性確保と施工速度の向上に対して解決の糸口を与えるものである。

本工法は、下半先行掘削によりインパートコンクリートの早期打設が可能であり、したがって、上半掘削においてその支保工の脚部の沈下を抑止することができるので、沈下抑制に対して有効である。また、掘削断面の早期閉合も可能であり、地盤のゆるみを早い段階で抑止することも沈下の最小化にとって有利な要素である。

### (2) 切羽安定性能の目標

本工法は、下記の施工条件を開発対象にしている。

#### <地盤条件>

- ・ N値 : 10 以上
- ・ 一軸圧縮強度 : 0.1 ~ 1.0 MPa
- ・ 変形係数 : 10 ~ 100 MPa
- ・ 最大礫径 : 150mm 未満
- ・ 細粒分含有率 : 5% 以上

#### <施工条件>

- ・ 目標月進 : 100 m 以上
- ・ 平均日進 : 5 m 程度
- ・ 土被り : 1 D 以上
- ・ カーブ半径 :  $\geq 150$  m 程度

上記の条件において、切羽の安定が計れることを目標とする。実験においては、各種の実験モデルにおいて、圧力制御エアバックの圧力を暫時減圧して、切羽が崩壊するまで実験を実施する。このとき、圧力と地中変位の観察結果より、切羽が不安定状態に推移する点を見だし、設定した切羽の安定性能が得られているかを確認する。

目標とする切羽の安定性能は、最新の調査データを分析した結果(図-2)<sup>3)</sup>によるものとする。同図は、地山の変形係数と天端に生ずるひずみとの関係を与えているので、実験地盤の物理定数から、許容されるひずみを求める。後述するように、実験地盤の弾性係数は、実験時の地盤の変形結果と弾性解析結果との比較により設定した。

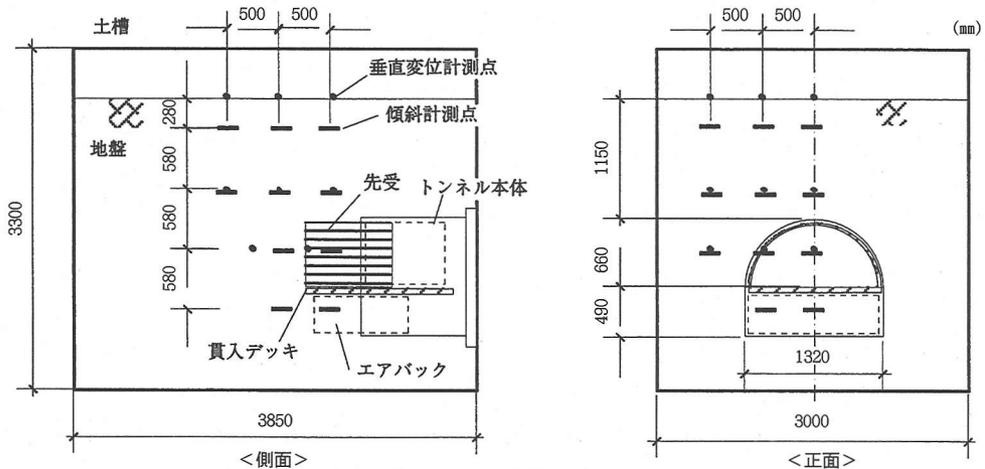


図-3 土槽実験概念

### 3. 実験概要

#### (1) 試験装置

本実験の概要を、図-3に示す。今回の実験では、道路トンネルを想定し、実機寸法の1/10のモデル実験を行った。各モデルの詳細は以下の通りである。

##### a) 実験土槽

本実験で用いる装置は、幅3.0m、奥行き3.85m、高さ3.3mの土槽（容量38m<sup>3</sup>）で、土被り1D（D：トンネル外径）の位置にD=1.15m程度のトンネル模型の設置が可能な構造である。

##### b) トンネル模型

トンネル模型は、本体、先受、貫入デッキの構成要素からなる。各構成要素を組み合わせた状態のトンネル模型を写真-1に示す。

今回の実験では、先受および貫入デッキを用いた下半先行掘進と全断面掘削との相違点を把握することが主目的であるため、共通モデルである本体は剛な鋼鉄の馬蹄形とし、土槽に剛結する。

他の構成要素は原則として実機で使用するものと同じ材質とし、その寸法は本体モデルの縮尺比である実機の約1/10に合わせた。このとき、先受は、φ10mmの中空鋼管をトンネル本体にボルトで固定した。また、先受の仰角は、実際の施工と比較して、崩壊が生じやすい様に、トンネル軸と平行にした。貫入デッキはφ50mmの鋼管を溶接し平板状にしたものを、実機同様にトンネル本体の底面から脚を介して固定した。

##### c) エアバック

トンネル模型内部には、エアバックが設置でき、後方から空気圧の制御が可能な構造となっている。エアバックは、側方土圧に対してある程度の強度を有

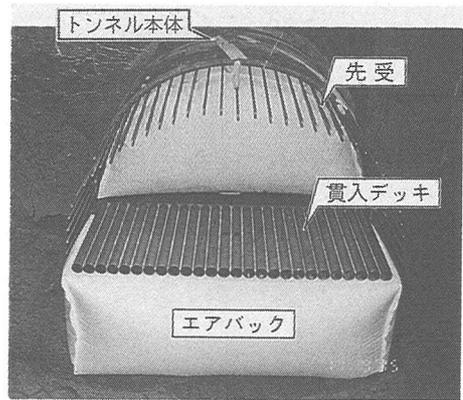


写真-1 トンネル模型とエアバック設置状況

し、剛性が小さい材料として、厚さ0.25mmの塩化ビニールを選定した。

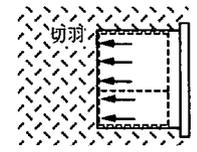
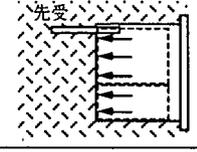
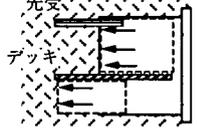
エアバックの形状は、上半断面用に半径0.66m×長さ約1mの半円柱を、下半断面用に0.485×1.32m×長さ約1mの立方体を作製し、各半断面分の空間を分担する。全断面では2体を重ねた状態で、上下半の掘削状況が異なる場合には重なりをずらした状態で、それぞれセットして使用した。エアバックの設置状況を写真-1に示す。

#### (2) 実験パラメータ

本実験では以下の掘削形式を対象にして比較実験を行う。

- ・全断面掘削工法：切羽まで全断面掘削が進行する状態
- ・先受工法：先受設置後、先受の根本まで全断面掘削が進行する状態
- ・本工法：先受及び貫入デッキ設置後、トンネル上

表-1 実験モデルケース

番号	モデル	施工段階
1	全断面 	切羽まで全断面掘進が進行
2	先受 	先受の根本まで全断面掘進が進行
3	下半掘進 	先受根本までの上半掘進とデッキ下部の下半先行掘進が同時進行

半は先受の根本まで、トンネル下半はデッキの下部が先行掘進される状態

ここで、本工法の施工段階としては、最大の特徴である、インバート部の早期掘削、閉合が可能である下半先進掘削時のモデルとし、先受と貫入デッキの併用工法の効果を確認した。具体的な実験パラメータの組合せは、表-1の通りである。尚、本実験では、エアバックの圧力を低減させることで、掘削の進行に伴う切羽応力の解放を模擬した。

(3) 実験手順

本実験では、以下の手順で実験を実施した。

a) 地盤の作製

土槽内にトンネルモデルの本体を設置後、土砂を0.3m厚さごとに撒き出し、散水しながら平坦に敷均す。これを所定の高さまで繰り返す。このとき、所定の深さ及び間隔で地中変位計を設置すると共に、地表面にも変位計を設置した。

b) 実験開始

上半及び下半のエアバック圧力を同時に減ずることで掘進による応力の解放を模擬した。このとき、変位計や土圧計などの計測値を連続的に計測した。

c) 実験終了

エアバックの圧力が大気圧になるまで計測を実施した後、含水量、密度及びコーン貫入試験により地盤データを採取した。

(4) 地盤の特性

a) 地盤材料

本実験では、模型実験における相似則や地盤条件の再現性、均質性を満足する砂系材料として以下の理由から硅砂5号を選定した。

表-2 密度、含水比データ

計測位置 (深さm)	平均湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均含水比 (%)
0.6	1.52	9.6
1.2	1.57	10.2
1.8	1.62	11.5

表-3 地盤物性

項目	物性	試験結果
密度	土粒子密度 g/cm <sup>3</sup>	2.653
	最小間隙比	0.637
	最大間隙比	0.989
粒度	50% 粒径 mm	0.34
	均等係数 U <sub>c</sub>	2.45
	最大粒径 mm	2.00~4.75
強度	粘着力 c MPa	0.6
	内部摩擦角 °	24.4
弾性	弾性係数 E50 MPa	4.0~3.2
	拘束圧0.5~2.0 MPa	

- ・粒度管理がなされており、均等係数が小さい。
- ・過去に同様の実験を実施しており、基本データが把握されている。
- ・容易に入手可能であり材料のバラツキが少ない。

b) 地盤条件

今回の模型実験では、実地盤での切羽安定性を評価することが目的であり、掘削に伴う地盤変位が生じやすく、地中内への計測器の設置が容易な、軟質地盤を作製した。今回作製した実験地盤で計測された特性を以下に記す。

<現位置コーン指数 qc >

深さ0.7m付近で0.56MPa程度であるが、深さ2m付近では約0.78MPaとなる。

<密度、水分量>

3カ所の深さでのRadio Isotope式水分密度計測及び炉乾燥計測を実施した。結果の一覧を、表-2に表す。

<地盤物性>

上記の土質データを基に、同一状態での土質試験を実施した。代表的な地盤物性を表-3に表す。尚、三軸圧縮試験(CD)時の初期土質条件は、以下の通りである。

- ・初期湿潤密度 : 1.54 g/cm<sup>3</sup>
- ・初期含水比 : 10.4 %

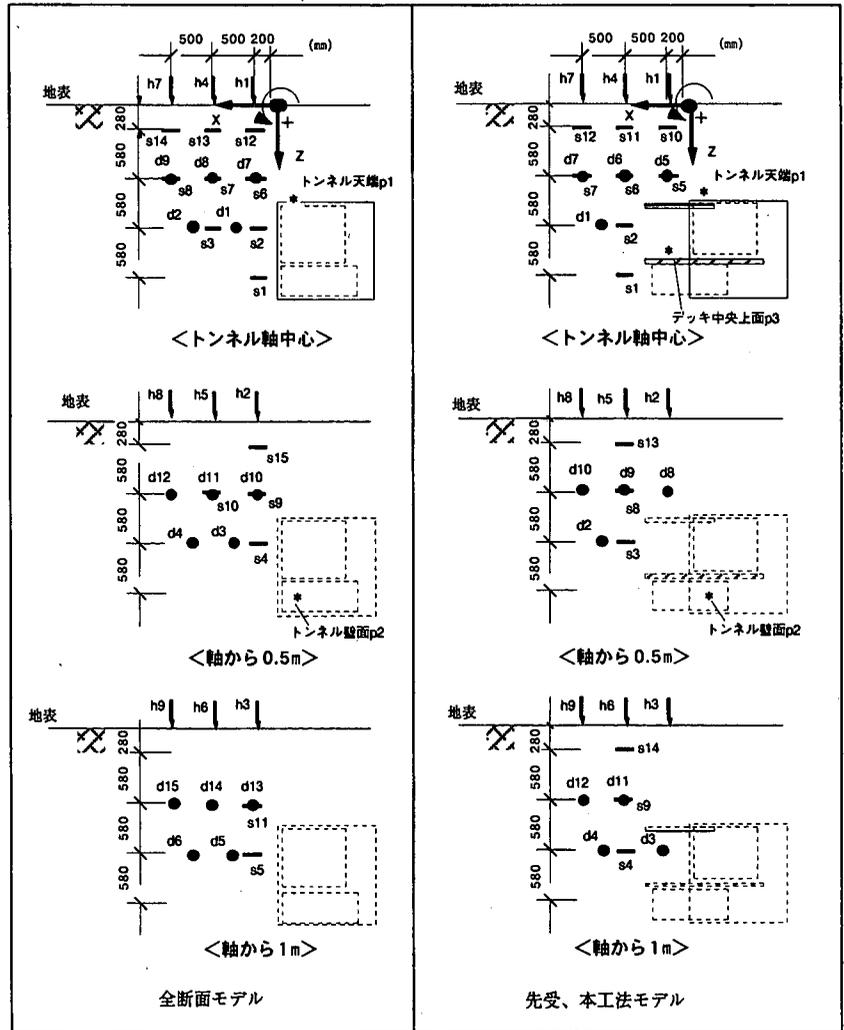
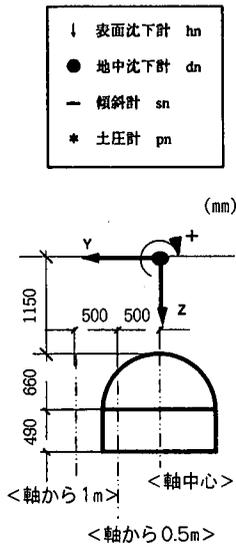


図-4 計測位置

(4) 計測データと処理方法

a) 計測項目

本実験で計測した項目は表-4に示す通りであり、計測位置を図-4に示す。

地中変位の計測では、一辺100mmの亚克力平板を地中に埋設した。平板には、剛性の大きいワイヤを取付け、ワイヤ端部を地表面まで延長し、地表面上にて、地中ワイヤ長をカンチレバー式の変位計で計測した。また、地中に複数個の傾斜計を埋設し、水平方向の移動や傾きを計測した。

b) データ処理

計測データは、データロガーを経由してオンラインでパソコンに連続的に取り込まれる。今回の計測では以下の設定で、各データを取得した。

表-4 計測項目

項目	個数	計測器
エアバック圧力	エアバック空気圧	デジタル圧力計
機体作用力	トンネル外壁(天板, 側壁) 貫入デッキ上面	壁面土圧計
機体たわみ量	先受内外周(0, 45, 90°) 貫入デッキ上下面	ひずみゲージ
地表面変位量	切羽前方地表 (軸方向3×横方向3)	ストローク変位計
地中変位量	切羽前方の地中 (軸2~3×横3×深2)	平板+ワイヤ →カンチレバー式 変位計
地中傾斜量	切羽前方の地中 (軸2~3×横3×深3~4)	傾斜計

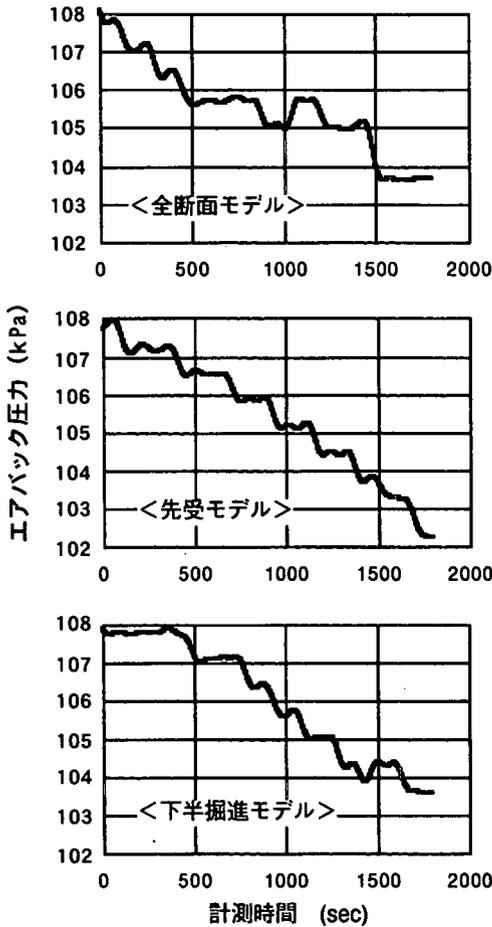


図-5 エアバック圧力曲線

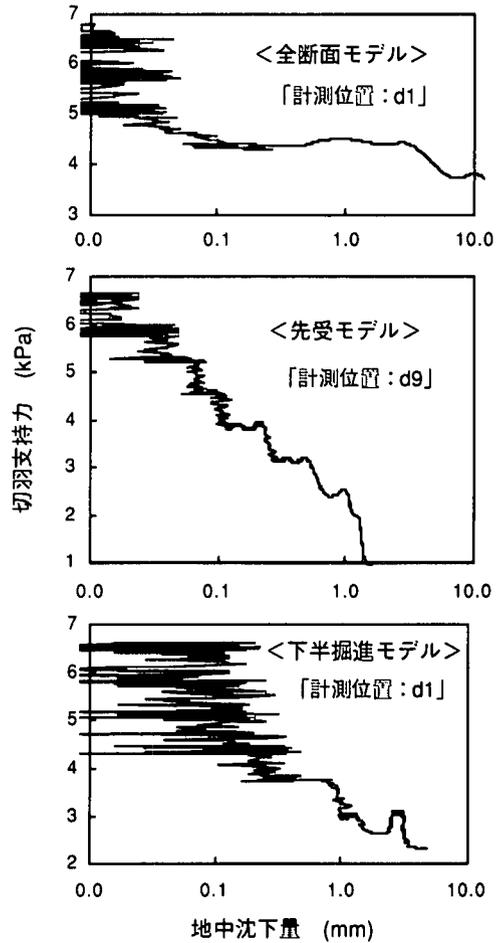


図-6 地中最大変位量と切羽解放応力との関係

- ・サンプリング時間 : 0.02 sec
- ・最大計測時間 : 1,800sec
- ・最大サンプリング数 : 90,000

得られた時系列の生データには、以下の処理を行い、S/N比の向上を図った。

- ・データ取り込みミスによる特異データの事前チェックと除去
- ・ローパスフィルターによる高周波ノイズの除去
- ・10～100データ毎のアベレージング

## 5. 実験結果と考察

### (1) エアバック圧力と地盤変形

各モデルのエアバック圧力の減少を図-5に示す。また、最大変形が生じた計測位置での、切羽支持力と地中変位との関係を図-6に示す。ここで、切羽支持力とは、エアバックの圧力から実験時の大気圧力(101.3kPa)を除いた値である。これらの結果より以下

のことが解る。

- ・減圧初期の段階においては、断続的な増圧が生じる傾向がある。これは地盤の断続的な微小変形に対し、エアバック圧力が瞬時上昇したことによる。
- ・全断面モデルでは105.7kPa程度で、圧力保持した状態となり、その後急激な圧力の減少及び増加が生じる。一方、先受と貫入デッキの併用モデルでは同様の現象が104.0kPa程度で生じているが、先受モデルでは、顕著な傾向を示していない。
- ・このような圧力変動特性が生じたときには、崩壊を伴う大きな変形や傾斜が発生している。全断面と先受と貫入デッキの併用モデルでは、上記の圧力で何らかの崩壊を生じるが、先受モデルでは顕著な崩壊現象が生じない。

以上のエアバック圧力と地中変位との関係を整理して表-5に表す。

表-5 エアバック圧力と変形挙動

モデル	エアバック圧力 (kPa)	切羽支持力 (kPa)	切羽近傍地中変位(mm)	備考
全断面	105.8 以上	4.5 以上	~0.5	なだらか変形
	105.7	4.4	~10.0以上	全崩壊開始
先受	104.5 以上	3.2 以上	~0.5	なだらか変形
	103.9	2.6	1.0	変形進展
	102.3	1.0	1.5	安定
下半掘進	105.1 以上	3.8 以上	~0.5	なだらか変形
	104.1	2.8	1.5	変形進展
	103.6	2.3	3.5~5.0	肌落ち

(2) 地中変位とひずみ分布

次に、得られた時系列データを、実際の地盤変形と対応付けるために、以下の処理を行った。

- ・地中及び地表面の変位計測データを移動量の絶対値とする。
- ・移動方向は、変位の計測位置付近の傾斜計の傾き方向を深さ方向及び水平2方向に分配する。

ただし、変位量が数mmの微小変形の範囲では、傾斜角度は0.1°以内と非常に小さく、深さ方向の変形量が支配的である。

全断面のエアバック圧力の減少に伴う地中及び地表変位量の変化を、図-7に示す。また同様に、先受モデル及び先受と貫入デッキの併用モデルの地中及び地表変位量の変化を、図-8及び図-9にそれぞれ示す。これらの図は、全断面モデルの崩壊前及び崩壊直前の圧力での、トンネル軸縦断面および横断面の結果を示している。また、これらの結果をもとに、計測点で囲まれた領域のひずみ量を計算した。

これらの結果より以下のことがいえる。

a) 全断面モデル

- ・トンネル切羽の天盤部直上近傍においては、切羽から地表面までの地盤が一体となった状態で変形が生じる。
- ・切羽の応力解放とともに、沈下領域の幅が大きくなり、トンネル下端を起点とした漏斗状の変形領域が切羽直上方向に進展し、切羽前方約0.5D (D:トンネル直径)の円弧状領域に沈下が生じる。
- ・横方向については、トンネル中心軸を中心に、変形領域が広がり沈下影響領域は、前方、側方ともに1~1.5D程度であるが、トンネルから外れると地表面に多少の変形が生じる程度である。
- ・圧力が105.7MPa程度で大変形が開始する。このときのひずみを計算すると、その最大値は1,000μ程度であり、切羽前方0.5Dの地点を中心に円

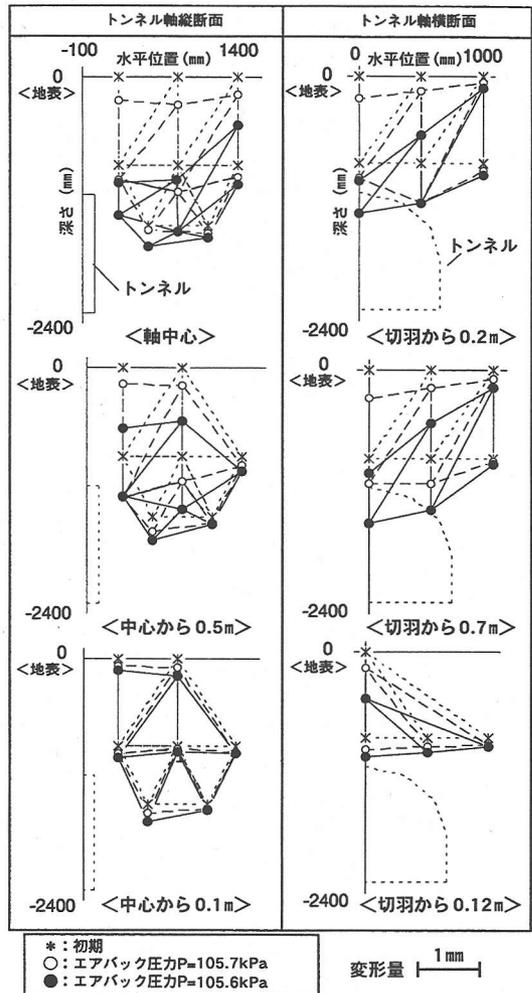


図-7 全断面モデル地盤変形状況



写真-2 全断面モデルの最終崩壊状況

形の沈下形態が生じる。

- ・その後、105.0kPa程度で地表面に達する漏斗状の最終崩壊が生じ、写真-2に示す様に、地表面に1D程度の楕円形状の穴が生ずる。

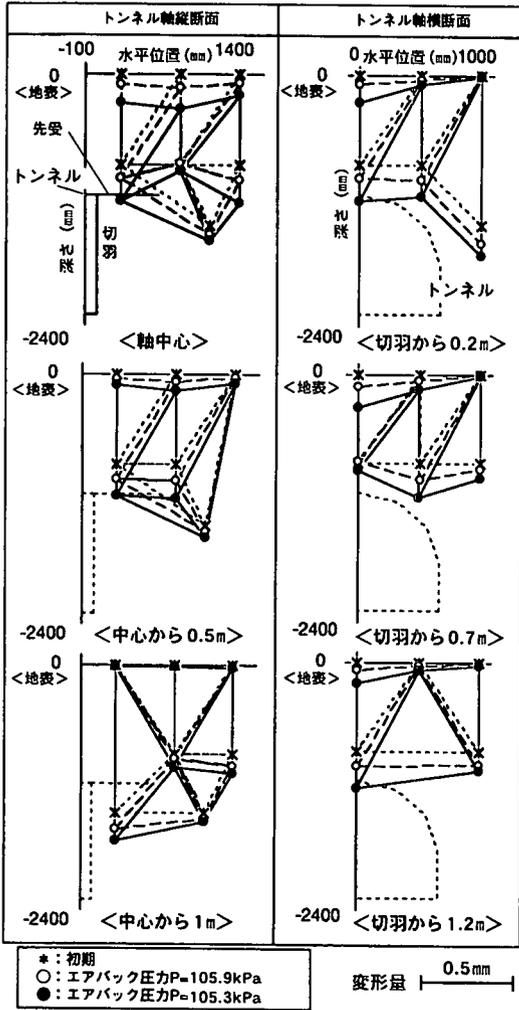


図-8 先受モデル地盤変形状況

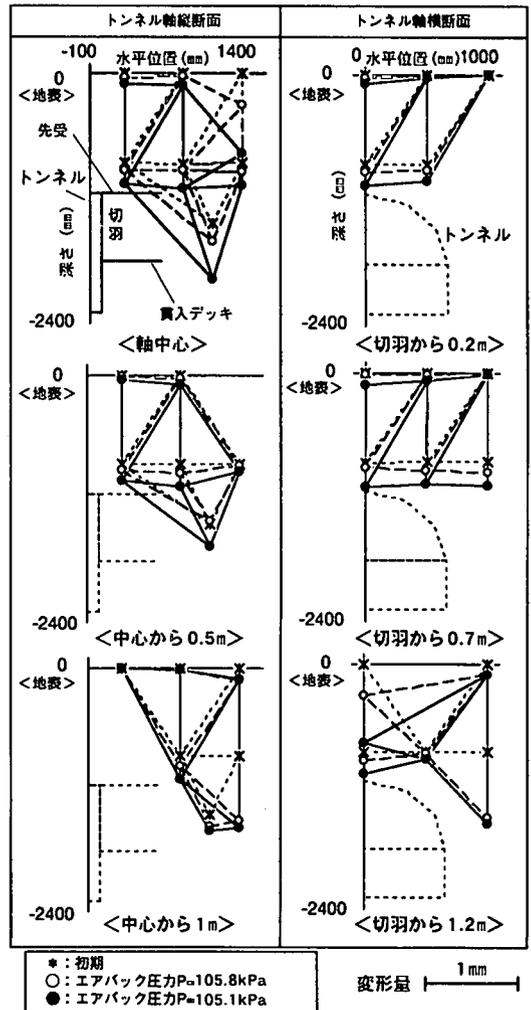


図-9 下半掘進モデル地盤変形状況

## b) 先受モデル

- ・絶対値は小さいが、先受前方に漏斗状の変形が生じている。
- ・また、先受側部の変形が中心軸以上に大きい。これは、先受下部の側面が解放されているためである。ただし、一定量の変形後は、進展せず顕在化しなくなる。
- ・変形は先受直上にも生じている。これは先受材が土圧によってたわむことによって生じる。実際、先受には大きな曲げひずみが生じており、実験後には大きな曲げ変形が観測された。
- ・変形量の絶対値が小さく、圧力が105.0kPa程度で一度比較的大きな変形が生じるが、大崩壊には至らない。先受下の地盤が、側方土圧に対抗してバランスしているためと考えられる。
- ・先受モデルは、掘削前の状態のモデルであるた

め、地中変位と同様に沈下量の絶対値は他のモデルに対して小さく、地表面で観測できる最終崩壊は発生しない。

## c) 下半掘進モデル

- ・切羽直上に比べて、切羽前方での変形が卓越する。これは、下半先進のためトンネル下端を起点とした、漏斗状の変形領域が生じるが、貫入デッキの影響で直上の変形が抑制されているためである。
- ・ただし、この切羽前方の変形は、貫入デッキにより掘削断面が分割されているため、応力の解放に伴う進展は小さく崩壊に至らない。
- ・横方向については、トンネル中心軸に対し、側方での変形が大きくなる。これは、貫入デッキの下部への側面からの回り込みによる。圧力105.7kPa程度で大変形を生じる。

- ・このとき下半側部の計測点では、局所的に2,000  $\mu$  程度のひずみが計算される。
- ・これらの変形は下半掘進壁面の肌落ちであり、104.0kPa程度で再度大きな変形を示すが、切羽全体の崩壊には至らない。
- ・この肌落ちは、X線可視化実験においても観測された現象であり、先受と貫入デッキを併用し断面を分割することにより全崩壊に対する防止できることを示唆すると共に、下半掘進時の壁面の早期閉合の必要性を示している。

### (3) 切羽支持力

全断面モデルのトンネル外壁面に設置した土圧計の計測結果を表-6に表す。ここで全土圧とは、地盤比重と土被り厚さとの積で算出される値である。

また、崩壊が開始した時あるいは地盤に1mm以上の変形が進行した時の切羽支持力と、上記の土圧計の計測結果より推定される水平方向土圧及び村山の理論<sup>4)</sup>から推定される土圧を表-7に整理して表した。

これらの結果より以下のことがいえる。

- ・1D程度の土被りのトンネルでは、実際の切羽への付加土圧は垂直土圧で全土圧の1/2程度であり、水平土圧は全土圧の1/6(17%)程度である。
- ・またこれらの値は、村山の理論から求められるゆるみ土圧の値に近く、アーチングによるものであることがわかる。

尚、過去に実施した1/100スケールのX線可視化実験においても全土圧の15%程度で崩壊が開始しており、本実験結果が妥当であることが確認できる。

各モデル毎に分析すると以下の様に、まとめることができる。

#### <全断面モデル>

- ・切羽支持力が切羽土圧相当になった時に変形が進行し、崩壊に至る。

#### <先受モデル>

- ・先受の曲げ剛性で地盤を支持するとともに、先受下部の土砂が水平土圧に対抗するため、切羽支持力は非常に小さい上、切羽支持力を完全に解放しても、全体崩壊に至らない。
- ・ここでは示さないが、先受到に設置したひずみゲージによって、1~3kPa程度の鉛直土圧を先受の曲げ剛性で保持していることが計測されている。
- ・すなわち、切羽支持力の大半を、先受の剛性に依存しているため、先受接合部の剛性や先端部の地盤の自立性などが重要な評価項目となる。

#### <下半掘進モデル>

表-6 土圧計計測結果

計測位置	計測土圧 (kPa)	土被り (m)	全土圧 (kPa)	計測土圧 / 全土圧
トンネル天盤	9.4	1.145	17.2	0.55
トンネル側面	4.8	2.015	30.2	0.16

表-7 切羽の支持力試験結果と推定土圧

モデル	変形進行時切羽支持力(kPa)	推定切羽土圧(kPa)	理論ゆるみ土圧(kPa)
全断面	4.4	4.1	3.6
先受	2.6	4.1	3.6
下半掘進	2.8	4.8 (下半)	1.2

- ・先受と貫入デッキ併用の下半先進モデルにおいては、掘削断面が低減するためゆるみ領域が小さくなり、作用土圧すなわち切羽支持力は低減する。
- ・しかし、村山の理論と比較すると大きな値となっている。これは、側方からの土圧が作用し、大きな変形に至っているためと考えられる。
- ・すなわち、前述したように、側方土圧を制御すれば、小さな支持力で地盤の変形、崩壊を防止することが可能であるといえる。

### (4) 地盤の限界歪値

今回の実験では、計測点の間隔が大きく、壁面周辺のひずみを詳細に評価することが困難である。よって、表-5に示された地中計測点の変位量と崩壊の関係から、切羽が安定から不安定へ遷移する地盤の限界歪み値について検討する。

変位量と崩壊の関係を、大きく分類すると、以下のように整理することができる。

- ・変位量0.5~1.0mm程度までは、なだらかな変形である。
  - ・変位量が1.0mmを過ぎると変形の進行が顕在化する。
  - ・変位量が3.0mmを過ぎると切羽の崩壊に至る。即ち、今回のモデルを切羽の安定性について評価すると以下のことがいえる。
  - ・1~3mm程度の変位量が生じた場合に、切羽の変形が進展し崩壊が開始する。
  - ・今回のモデルはトンネル径及び土被りとも約1mであり、0.1~0.3%のひずみに相当する。
- 一方、図-2に示す実地盤データとを比較するためには、実験地盤の見掛けの弾性係数を推定する必要がある。3章に述べたように物性試験は実施したが、実験時の切羽近傍の弾性係数は、実験計測結果より

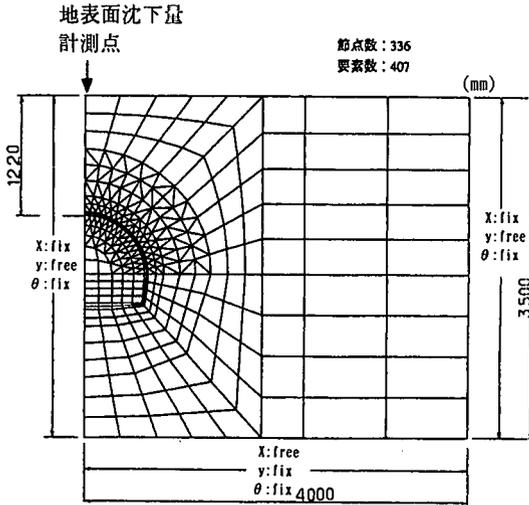


図-10 解析モデル

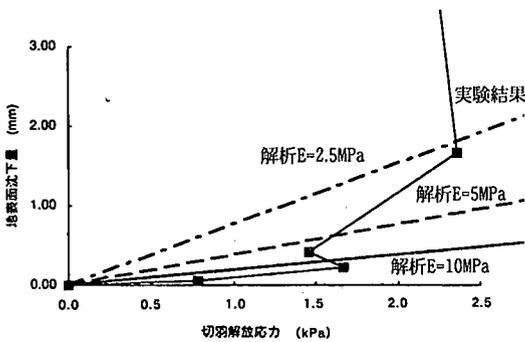


図-11 切羽解放応力と地表面沈下量の関係

推定の方が妥当である。ここでは、最も簡易な全断面モデルについて、図-10に示すトンネル横断面の2次元弾性有限要素解析を実施した。図-11に切羽解放応力とトンネル直上の地表面沈下量との関係について、計測結果と解析結果を示す。初期の変形特性が弾性係数であることより、実験地盤の弾性係数は10～20MPa程度であることが解る。

これらの結果から、実地盤データとを比較すると以下のことがいえる。

- ・今回の実験地盤の弾性係数10～20MPaを実地盤に当てはめると、約0.2～2.0%の天端壁面ひずみで切羽の自立性が損なわれる。
- ・一方、前述のように今回の実験での崩壊は、0.1～0.3%の切羽近傍ひずみを境に発生しており、本実験結果の妥当性および実地盤への適用性を確認することができる。
- ・以上の結果は、今回の実験地盤が比較的崩壊に至りやすい粒径の揃った砂地盤であることを考

慮すれば妥当な値であり、本実験結果の妥当性および実地盤への適用性を確認することができた。

### (5) モデルの相違

今回の実験モデルは、過去に実施したX線可視化実験の結果が、実地盤においても成立するか否かを確認するために選定した形態の異なる代表モデルである。よって、掘削段階が異なるため、今回の実験結果のみから、手法の比較を全て評価することは困難である。今回の実験から確認できた先受や貫入デッキの効果について検討する。

- ・先受については、掘削前であり、非常に安定した特性を示している。先受の打設によって、切羽支持力が向上し、切羽の崩壊が防止できることが解る。
- ・下半掘削モデルでは、先受で上半の切羽を安定させた上で、貫入デッキにより掘削断面を分割したことにより、切羽の安定性を確保できる。
- ・ただし側面や前方の肌落ちが発生するため、下半掘削後、早期のライニング打設及び閉合が必要である。

以上の結果は、過去に実施したX線可視化実験結果<sup>2)</sup>でも同様の結論が得られており、先受と貫入デッキを併用した工法が切羽の安定性確保に有効であり、下半先行掘進が可能であることを確認できる。

### 6. まとめ

実際の地盤材料を用いた実機の1/10スケールの土槽実験を実施し、地盤の変形特性やひずみ分布、切羽支持力等を評価することにより、以下の成果を得た。

- ・水平方向の土圧は、1D程度の浅い土被りにおいても全土圧の1/6以下であり、実際の機体作用力も小さくなるものと想定される。
- ・先受の打設によって、切羽の変形が低減すると共に、最終崩壊が防止できることを確認した。ただし、切羽支持力を確保するためには、先受の剛性が必要であり、前方地盤の自立力による支持も含めた評価が今後必要である。
- ・剛性の高い貫入デッキを併用して掘削断面を分割することにより、下半先行掘進しても切羽の全壊には至らなく、切羽の安定性に優れている。
- ・ただし、側面や前方の肌落ち、沈下が危惧されるため、これらの箇所には早期のライニング打設及び閉合が必要である。
- ・また、今回の実験結果は、過去に実施した要素

実験結果と一致すると共に、実現場データとも一致し、結果の妥当性と実用性を確認することができた。

ただし、これらの結果は、唯一の土質条件において確認された結果であり、実機の設計時には対象となる地盤条件を考慮した、補正や詳細検討が必要である。また、地盤の安定性確保とあわせて重要である地下水対策について具体的な施工手順や方法を検討していくことが必要である。

今後は、実際の工事を対象にした装置化の詳細検討及び地盤状態による影響評価などを実施し、実機の試作に展開していく予定である。

**謝辞：**本研究は、土木学会関西支部における「都市トンネルにおける合理的施工法に関する調査研究」委員会において、TMWG委員の皆様の貴重な助言と指導を得て推進した。

#### 参考文献

- 1) 櫻井春輔：シールドと山岳トンネル工法の境界を目指すトンネル工法の開発，土と基礎，May.1993.
- 2) 西岳茂，櫻井春輔，有川究：X線可視化実験による切羽の挙動に関する研究三次元歪解析によるアプローチ，土木学会論文集，第547号／Ⅲ-36，1996年9月
- 3) 櫻井春輔，足立紀尚共編；都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版，1988.
- 4) 村山朔朗，遠藤正明，橋場友則：機械化シールドの掘進性能に関する土質力学的考察，第1回土質工学研究発表会，1967.

(1997. 7. 3 受付)

## A STUDY ON TUNNEL FACE STABILIZATION BY TANK TEST

Kiwamu ARIKAWA, Shunsuke SAKURAI and Shigeru NISHITAKE

We had tried to estimate tunnel face stabilization about a new tunnel construction method using prelining and insert deck system. In this report, we carried out a large scale tank test for the purpose of confirming the phenomenon in the ground. As the result, we understood the three-dimensional ground deformation around the tunnel face, and the critical face supporting pressure for the stabilization. And also we confirmed that this method have an advantage in the face stabilization compared with conventional methods.