

# 地下水面下に掘削される土被りの浅い砂質地山 トンネルのモデル実験と逆解析

小嶋啓介\*・足立紀尚\*\*・荒井克彦\*\*\*

地下水面下に掘削される土被りの浅い砂質地山トンネルを対象とし、アルミ棒積層体と応力制御型のトンネル模型を用いた室内模型実験を行い、地下水位が地山の变形挙動と安定性に及ぼす影響を検討した。さらに、掘削工程ごとの計測変位から、地盤の不連続的な変形、強度および透水特性を表す諸定数を推定する逆解析法を定式化し、モデル地盤と模型実験に適用した結果、少数の観測変位から信頼性の高い逆解析が可能であることを確認した。

**Keywords** : tunnel, model test, groundwater level, FEM, joint element, back-analysis

## 1. 序 論

近年ジオフロントという言葉が注目をあび、大深度部を含めた地下空間の有効活用の必要性が増加している。都市部における未固結砂や軟弱粘土層からなる地盤において、土被りの浅いトンネルを掘削する場合には、地表面および近接構造物への影響を最小限に抑えた施工を行う必要があるため、シールド工法や開削工法が一般に採用されてきている。しかしながら、施工法の発達ならびにコスト削減要求から、都市トンネルにおいてもNATMが採用されるケースも増加してきている。NATMを採用する場合に限らず、土被りの浅い都市トンネルにおいては、その施工にともなう破壊に対する安全性ならびに変位・変形量の、より厳密な管理が要求されるため、現場計測や有限要素法解析が日常的に実施されてきている。一方、地下水の存在は地山の安定性および作業能率に多大な影響を及ぼし、その処理は最重要課題の一つであるが、通常のトンネル掘削に際しては、地下水位は十分下げることが前提としている。しかしながら、大量の地下水の汲み上げによる地盤沈下、汲み上げた地下水の処理などの問題のために、地下水位を十分下げられない事例も増加傾向にあると考えられる。

地下水の存在する砂質地山において、土被りの浅いトンネルを安全に、かつ周辺地山に及ぼす影響を最小限に抑えた掘削を行うためには、トンネル掘削時の周辺地山の力学挙動を把握し、その挙動を的確にシミュレートできる解析手法を導出するとともに、現地盤の大域的な構成特性を代表した構成パラメータを決定し、現場観測情

報を最大限に利用した施工管理法を導入する必要がある。

地下水が存在しない砂質地山トンネルを対象とした研究として、村山・松岡<sup>1)</sup>はアルミ棒積層体で地山をモデル化した降下床実験を行い、地山内の緩み域およびすべり面の発生形態の考察を行っている。さらに足立ら<sup>2)</sup>は、アルミ棒積層体内に設置した直径可変型のトンネル模型を用いた模型実験を行うとともに、実験結果を表現し得る解析法として、地山を連続体要素と潜在的なすべり面の方向に配置したジョイント要素でモデル化する手法が有効であることなどを明らかにしている。一方、トンネル掘削問題を対象とし、間隙水の影響を考慮したモデル実験に関する研究は、ほとんどが<sup>3), 4)</sup>粘性土地盤を対象としている。

本研究では上述の諸問題に対処する基礎的データを与えることを目的とし、はじめに未固結地山をアルミ棒積層体でモデル化し、初期応力を逐次減少させることによってトンネル掘削をシミュレートする室内模型実験を行い、地下水位がトンネル掘削時の地山の变形挙動と安定性に及ぼす影響を検討する。さらに、地下水面下に掘削される砂質地山トンネルを対象とした解析法として、ジョイント要素を導入した多次元圧密解析法を定式化するとともに、その逆解析手法を導出し、仮想モデル地盤および模型実験に対する適用性の検討を行った結果を報告する。

## 2. 実験方法および実験結果

### (1) 実験装置と実験方法

実験装置の概要を図-1に示すが、地山材料としては都市トンネルなどで遭遇する機会の多い粒径のそろった砂質地山を想定し、アルミ棒積層体を採用した。これは、村山・松岡が用いたものと同様の材料であり、長さが5 cm で直径が1.6 mm と3.0 mm のアルミ棒を重量比で

\*正会員 工博 徳島大学助手 工学部建設工学科  
(〒770 徳島市南常三島町2-1)

\*\*正会員 Ph.D. 工博 京都大学教授 工学部交通土木工  
学教室

\*\*\*正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科

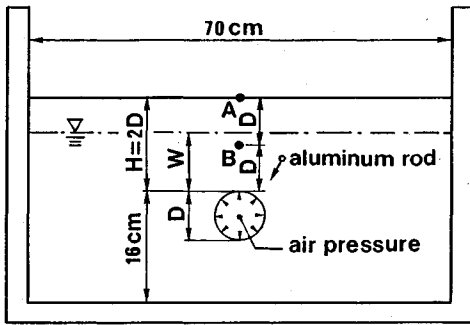


図-1 トンネル掘削のモデル実験装置の概要

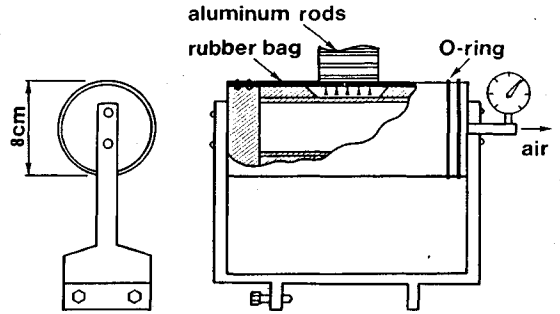


図-2 トンネル掘削のシミュレーション装置

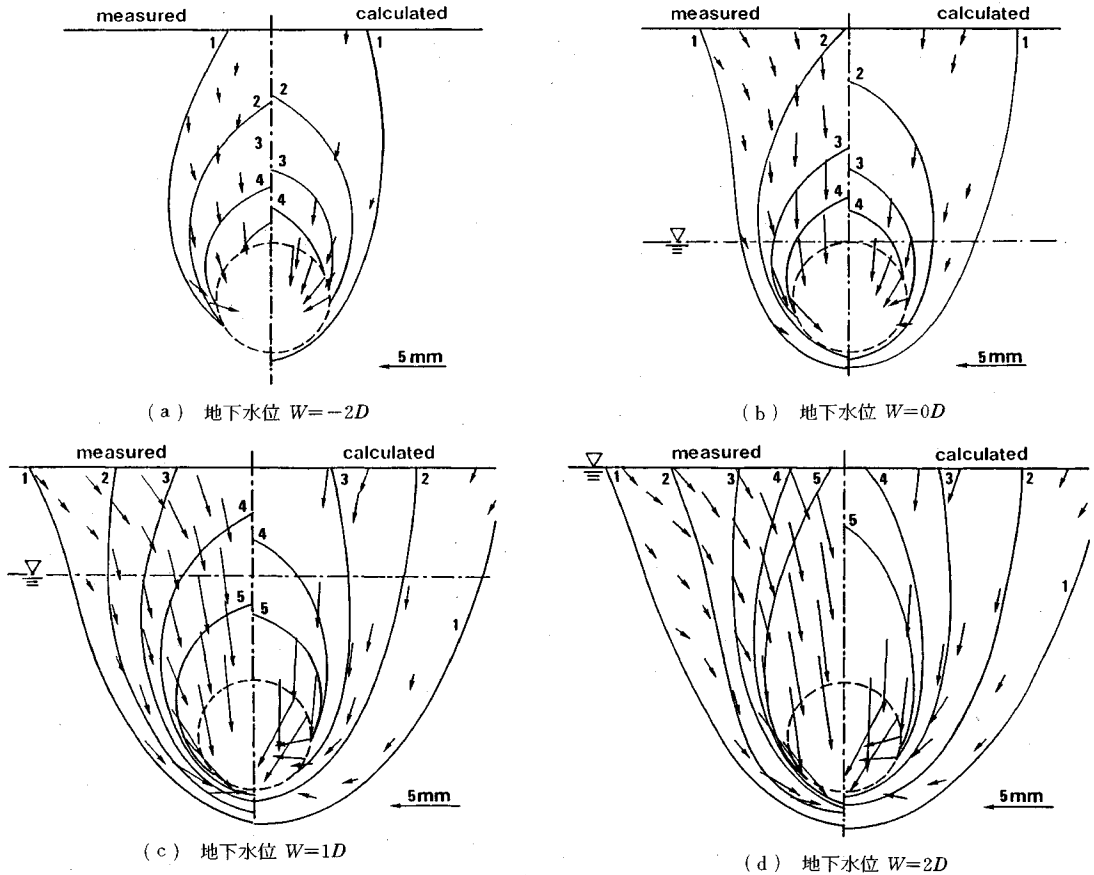
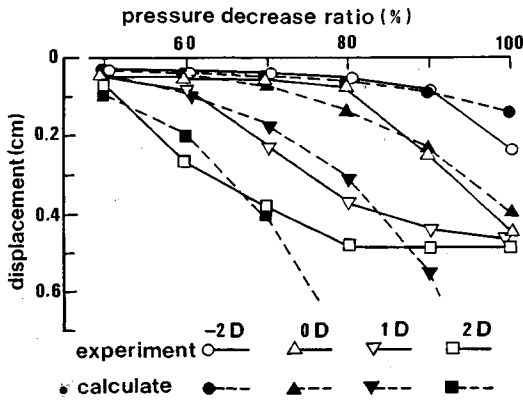


図-3 地山内の変位ベクトルと等変位線

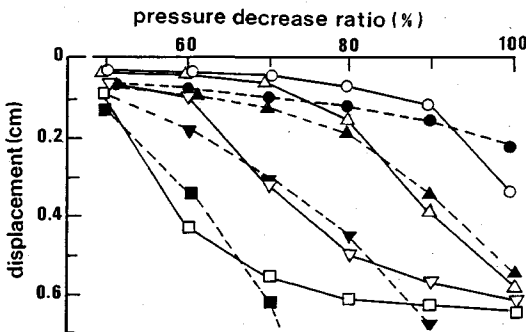
3 : 2 で混合し、端面を揃えて所定の土被り深さまで最密（初期間隙比  $e_0 = 0.24$ ）に積み上げたものである。図-2 はトンネル掘削のシミュレーション装置の概要であり、アルミ棒と接する部分がくびれた金属円筒の外側を取り囲む厚さ 0.6 mm のゴム膜内に初期土被り圧力に等しい空気圧を作用させておき、圧力を徐々に減らすことによってトンネル掘削をシミュレートするものである。なお、初期土被り圧は、密詰めアルミ棒積層体の二軸試験<sup>5)</sup>ならびに模型実験における応力測定結果から

求められた静止土圧係数  $K_0 = 0.5$  を用いて算出した平均全応力として設定した。

模型実験は以下に示す手順で行った。①トンネル模型を図-1 の位置に設置する。②トンネル模型の内圧をアルミ棒の積み上げ深さごとの土被り圧に調整しながら、所定の土被りにまで積み上げ標点を設置する。③トンネル模型の内圧を調整しながら、水を所定の地下水位まで下面から導入する。④初期状態の写真を撮影し、トンネル模型の内圧を初期土被り圧（全応力）の 50%、60%、



(a) 点A (トンネル中心軸上の地表面)



(b) 点B (クラウンより1D上方)

図-4 初期応力の解放率と沈下量の関係

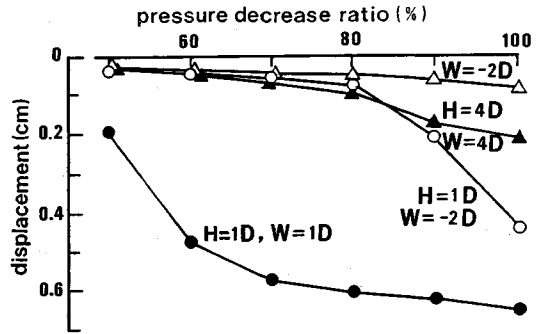


図-5 初期応力の解放率と地表面沈下量の関係

すように、地下水位が上昇するに従い、大きな変形を示す領域はトンネル周辺から上方に急激に拡大し、地下水が地表面に一致する  $W=2D$  の場合には、 $\delta=4\text{ mm}$  の領域は地表面にまで達していることが明らかである。また、地下水の存在しない場合にはトンネルの下部付近の地山の変形量は小さいが、地下水位が高くなるにつれてトンネルインバート方向への変位成分が大きくなる傾向も認められる。

図-4はトンネル模型の初期圧力の解放率と、図-1に示す地山内のAおよびBの2地点の沈下量の関係を示している。ここで、点Aはトンネル中心軸上の地表面の標点を、点Bはトンネルクラウンから1D上方の標点を観測したものである。同図における○は地下水が存在しない場合、△は地下水位0D、▽は1Dそして□は2Dの場合に対応しており、各印はそれぞれについて3回行った実験の平均値を示している。また、観測沈下量が応力解放率の大きな段階において一定値に収束しているのは、トンネル模型の半径方向の最大変形量が8mm程度に制約されているためである。これらの図より、どちらの地点においても地下水の上昇とともに応力解放率の小さい段階から大きな変形が出現するようになることが認められる。このことは、同図の関係の傾きである変形速度に注目した場合、変形速度の急増する応力解放率は、 $W=-2D$ では90~100%であるのに対し、 $W=0D$ では80~90%、 $W=1D$ では60~70%、 $W=2D$ では50~60%と小さくなっていることから確認できる。

図-5は土被りHが1Dと4Dに対し、地下水が存在しない場合 ( $W=-2D$ ) と地下水が地表面に一致する場合に対する図-4と同様の実験結果であり、初期応力の解放率とトンネル中心軸上の地表面の点Aの沈下量の関係を示している。図-4および図-5から、地下水位が地山の安定性に及ぼす影響は、土被りが深い場合にも認められ、その傾向は地山のアーチ効果が期待できない土被りの浅い地山ほど顕著となることが明らかである。

70%、80%、90%、95%および100%解放した各時点で写真を撮影する。⑤拡大した写真から標点の位置をデジタルタイザを用いて読み取り、必要な情報ごとに整理する。

(2) 実験結果

模型実験は、土被り深さ、地下水位、覆工およびロックボルトからなる支保工条件などを種々変化させて行ったが、本論文では支保を用いない同一土被り深さにおいて地下水条件を変化させた実験結果のみを考察する。すなわち、土被り深さHをトンネル直径Dの2倍である土被り  $H=2D$  に統一し、地下水位Wをトンネルクラウン深さを基準として、上方に2D (地下水位が地表面に一致)、1D、0Dおよび-2D (水が存在しない場合) の4種類に設定した場合の実験結果を中心に示す。

図-3の左側は各地下水位において、トンネル模型の初期圧力を90%減少させた段階における地山内の変位ベクトルと変形量 $\delta$ のコンターを示している。同図(a)の地下水が存在しない場合には、変形量の比較的大きな領域、たとえば $\delta=4\text{ mm}$ の領域(トンネル半径方向のひずみが約10%以上に相当)はトンネル直上の限定した範囲でしか認められないのに対し、(b)~(d)に示

### 3. 逆解析手法の定式化

本研究では、地下水の存在する未固結地山に、土被りの浅いトンネルが掘削される問題を中心に扱うが、そのような問題を適切に評価するためには、地山内に生じる不連続的な変形挙動と間隙水の存在にともなう影響を同時に表現できる解析手法を定式化する必要がある。

不連続的な変形挙動を表現することを目的とした数値解析法としては、Goodmanらのジョイント要素解析<sup>6)</sup>、川井の剛体ばねモデル<sup>7)</sup>、Cundallの個別要素法<sup>8)</sup>など多数の方法が提案されている。足立ら<sup>9)</sup>は、未固結地山中にトンネルが掘削される問題に対し、地山を連続体要素とジョイント要素でモデル化し、ジョイント要素を地山内の潜在的なすべり面の方向に配置することにより、不連続的な地山挙動を良好にシミュレート可能であることを確認している。一方地下水の存在は、単位体積重量の変化による自重の変化、有効応力の変化にともなう地山強度の変化、間隙水の時間遅れをとともなう流れの効果、などの重要な問題を内包しており、その評価のためには間隙水圧の消散過程を追跡できる連成解析が必要である。しかしながら、剛体ばねモデルならびに個別要素法などの場合には、間隙水の運動を導入することは必ずしも容易ではないと考えられる。以上の議論よりここでは、二次元圧密有限要素法解析にジョイント要素を導入した解析手法を採用する。

#### (1) 多次元圧密の基礎方程式

本論文では、未固結地山を三角形および四角形の連続体要素とジョイント要素でモデル化するが、連続体要素に対しては、赤井・田村の圧密解析法<sup>10)</sup>を三角形要素も扱えるように修正した解析手法<sup>11)</sup>が適用できる。この方法は、いわゆる Christian 系の手法に属する方法であり、間隙水圧(全水頭)を要素の重心で評価し、時間積分に後退差分を用いて精度と安定性の向上を図った方法である。連続体要素の圧密問題に対して拡張された要素剛性方程式は次式で示される。

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} K_e, B_v \\ B_v^T, \alpha \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \gamma_w h|_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ \Sigma \alpha_i \gamma_w h_i|_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \Delta f + B_v \gamma_w h_i|_t \\ 0 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 $K_e$ :要素剛性マトリックス、 $u$ :要素の節点変位ベクトル、 $h$ :要素の全水頭、 $B_v$ :節点変位から要素の体積ひずみを計算するベクトル、 $\alpha$ 、 $\alpha_i$ :隣接要素間の間隙水の移動を規定する係数、 $f$ :節点荷重ベクトル、 $\gamma_w$ :間隙水の単位体積重量、 $i$ :隣接要素番号、 $t$ 、 $t+\Delta t$ :計算時間、 $\Delta$ :増分をそれぞれ示している。

一方、多次元圧密解析にジョイント要素を導入する際に、ジョイント要素は砂質地山内のすべり面を表現して

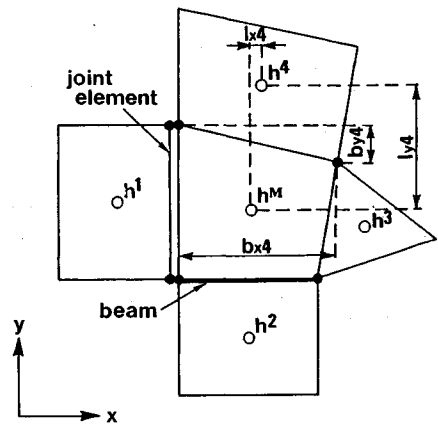


図-6 要素 M の隣接要素と水面 h の代表位置

いることを考慮し、以下のような仮定を設けた。①間隙水の移動は連続体要素間のみで行われ、ジョイント要素の存在は間隙水の移動に影響を及ぼさない。②ジョイント要素の初期応力を計算するとき以外はジョイント要素は間隙水圧を負担しない。図-6は任意の連続体要素 M とその隣接要素を示しているが、間隙水圧の連続条件を考える場合、要素 M の隣接要素は連続体要素 1 から 4 であり、ジョイント要素や梁要素は隣接要素とは考えない。これらの仮定により、ジョイント要素に対しては、次式で表されるつり合条件から誘導された要素剛性方程式のみが成立することになる。

$$[K_{ej}] \{\Delta u\} = \{\Delta f\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $K_{ej}$ :ジョイント要素の要素剛性マトリックスを示している。

#### (2) ジョイント要素の構成モデル

従来より、ジョイント要素のせん断方向の構成モデルとしては、Mohr-Coulomb の規準に基づく弾-完全塑性型モデルが多く利用されてきた。しかしながら、構成パラメータの逆解析を安定して行うためには、物性定数に鈍感な応力量で規定された降伏関数と流れ則から導かれる構成モデルを用いるよりも、物性定数に敏感な変形性を表す量で陽な形で表されているモデルを用いる方が望ましい<sup>12)</sup>と考えられる。

図-7はアルミ積層層体に対する二軸試験結果について、横軸にせん断ひずみ ( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ) を、縦軸にせん断ひずみをせん断応力比  $(\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma'_m$  で除した値をとって整理した結果である。同図における○印は種々の拘束応力  $\sigma'_m = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$  に対する実験値を平均したものであり、上下の線は分散を示しているが、この図には明確な直線関係が認められる。このことは周知のごとく、せん断応力比-せん断ひずみ関係が双曲線で表されることを意味し、この図の切片と傾きの逆数は、双曲線の初期勾配と漸近値を示している。以上のことから、本研究にお

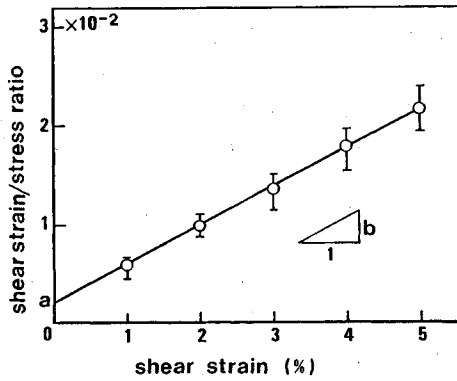


図-7 アルミ棒積層体の二軸試験結果

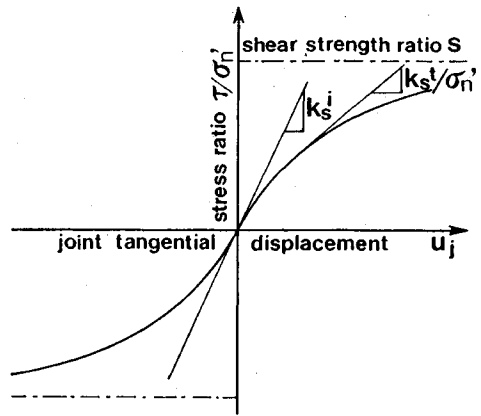


図-8 ジョイントのせん断方向の構成モデル

いては図-8に示すように、ジョイントせん断変位  $u_j$  をパラメータとする双曲線型のモデルを採用する。このモデルでは、有限要素法で増分法を適用するための接線せん断剛性係数  $k_s^i$  は次式で表される。

$$k_s^i = \frac{k_s^i s^2}{(s + k_s^i |u_j|)^2} \sigma_n^i \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $k_s^i$ : 初期せん断剛性係数、 $s$ : せん断強度比 ( $s = \tan \phi'$ )、 $|u_j|$ : ジョイントせん断変位の絶対値、 $\sigma_n^i$ : ジョイント要素の垂直応力をそれぞれ示している。一方、ジョイント要素の垂直方向の応力-ひずみ関係は、圧縮方向には剛体、引っ張り方向には強度を持たないと近似する。以上より、ジョイント要素の応力-ひずみ関係を決定する物性定数は、初期せん断剛性係数  $k_s^i$  とせん断強度比  $s$  の2個となる。

(3) 逆解析問題の定式化

上述した不連続変形挙動を表現できる有限要素圧密解析法は、連続体要素、梁要素、トラス要素およびジョイント要素を用いることが可能であるが、これらのうち、梁およびトラス要素は人工材料であるため、その物性定数は既知とし、連続体要素は線形弾性と仮定する。現場観測情報として変位を選択する場合、地盤物性定数の逆解析問題は、トンネル掘削工程ごとに対象地盤のいくつかの地点で計測された計測変位と、解析変位の誤差の二乗和を最小とする連続体要素の弾性係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、透水係数  $k$ 、ならびにジョイント要素の初期剛性係数  $k_s^i$ 、せん断強度比  $s$  を探索する最適化問題として次のように定式化される。

$$\text{目的関数: } J = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_d} (u_n^i - U_n^i)^2 \rightarrow \text{minimum} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{制約条件: } \left\{ \begin{array}{l} E > 0.0, 0.0 < \nu < 0.5, k > 0.0 \\ k_s^i > 0.0, s > 0.0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $U_n^i$ : 計測時刻  $t$ 、観測節点  $n$  における観測変位、

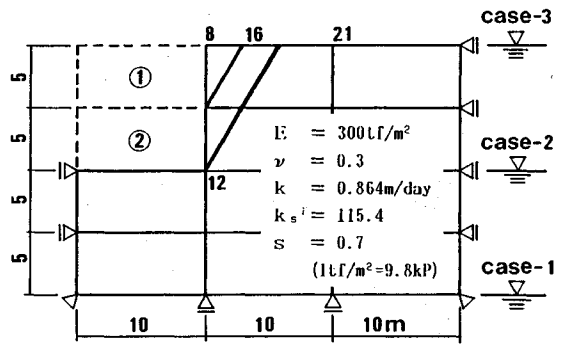


図-9 モデル地盤の要素分割および変位の観測位置

$u_n^i$ :  $U_n^i$  に対応する計算変位、 $N_t$ : 解析ステップ数、 $N_d$ : 変位の観測機器の個数を示している。最適物性定数の探索手法としては、共役方向法に分類され、目的関数の各物性定数による微分を数値的に計算して利用する Powell 法<sup>13)</sup>を用いたが、その詳細は省略する。

4. 逆解析手法の適用結果

(1) 仮想モデル地盤に対する適用結果

定式化された逆解析手法の物性定数の推定精度などを確認するために、モデル地盤に対する適用性を検討する。すなわち、事前に物性定数を設定したモデル地盤に対し、有限要素法解析を行い、求められた計算変位のうち、いくつかの節点での値を観測変位として逆解析を行い、推定された物性定数と、計算に用いた物性定数の値とを比較することにより、各物性定数の推定精度の検証を行う。

適用対象は3種類の地下水位を持つ砂質地盤に対する根切り工事を想定したものであり、有限要素分割図、変位の観測地点を図-9に示すが、潜在的なすべり面の一部である同図の太線で示した位置にジョイント要素を配置している。また、想定した地下水位は図-9に示す3種類であり、ケース1は地下水が存在しない場合、ケー

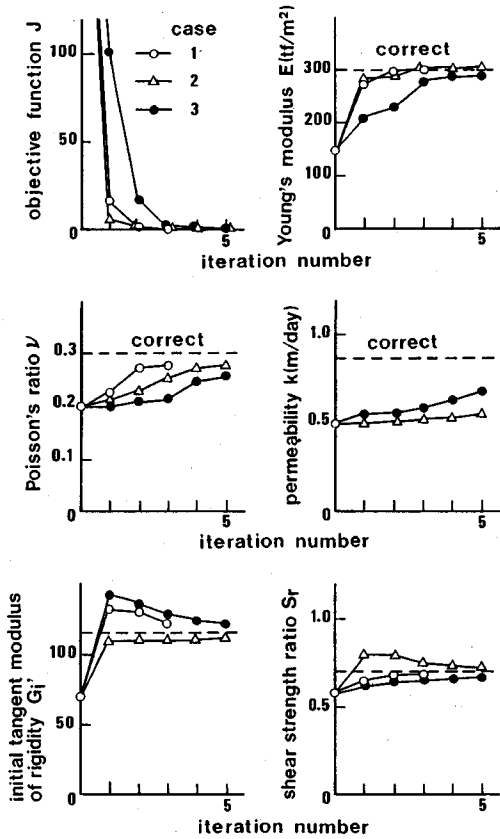


図-10 モデル地盤の逆解析結果 (1 tf/m<sup>2</sup>=9.8 kPa)

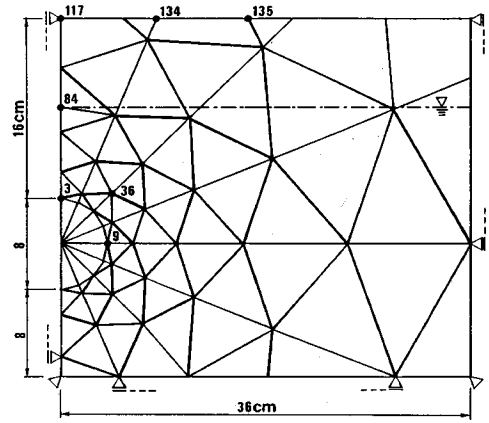


図-11 モデル実験の要素分割および変位の観測位置

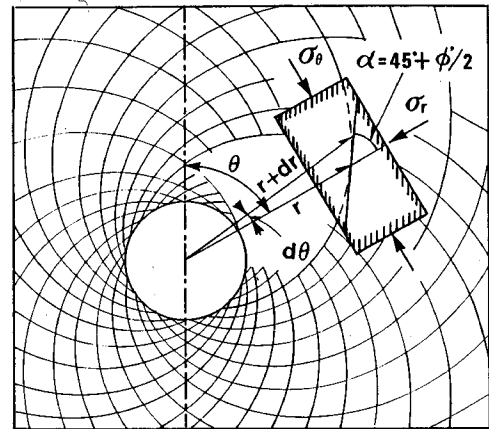


図-12 潜在的なすべり面の方向

ス 2 は地下水が掘削底面に一致する場合、ケース 3 は地下水が地表面に一致する場合に対応しており、地下水位の上昇とともに初期有効拘束圧が減少する事になる。根切り工事は、要素①および②が 5 日ごとに掘削されるものとし、各要素の初期全応力を 33% ずつ 3 段階で解放することによってシミュレートした。図-9 に併記した地盤物性定数を用いた解析結果のうち、同図に番号を示す節点の変位を観測値として逆解析を行った。地下水位の異なる 3 ケースの逆解析結果をそれぞれ図-10 に併記するが、連続体要素の弾性係数およびジョイント要素の初期剛性係数とせん断強度比は精度良く推定されているものの、連続体要素の透水係数は初期値からほとんど変化していない。また、透水係数が正確に推定できていないにもかかわらず、観測変位と計算変位の誤差である目的関数はほとんどゼロに収束している。このような結果が得られたのは、本適用例では透水係数が 0.864 m/day と掘削速度に比較して相対的に大きいために、透水係数が多少変化しても、過剰間隙水圧がほとんど消散した状態を推移し、観測変位に透水係数がほとんど反映されていないためと考えられる。なおここでは示さないが、図-9 に示す変位の観測位置のうち、地表面に位

置する節点 8, 16, 21 のみの変位を与えて逆解析を行った場合にも同様の結果が得られている。

## (2) 模型実験に対する適用結果

図-11 はアルミ棒積層体によるトンネル掘削のモデル実験を対象とした有限要素分割図であるが、太い線で示されるジョイント要素は、潜在的なすべり面が図-12 に示す極座標  $(r, \theta)$  を用いて、次式で表されるものとして<sup>12)</sup>配置したものである。

$$r = R \exp((1 - \sin \phi') / \cos \phi') \theta \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $R$  : 円形トンネルの半径、 $\phi'$  : 地山の内部摩擦角を示す。式 (6) は図-12 に示すように、トンネル壁面において半径方向に対して  $\pi/4 + \phi'/2$  で交わり、地山内に対数渦巻状に進展する無数の潜在的なすべり面を表すが、その一部を図-11 のジョイント要素としてモデル化している。なお式 (6) は、地山材料が Mohr-Coulomb の破壊規準に従い、かつ初期応力状態が等方的な地山に円形トンネルを掘削した場合のすべり面の方向を示しており、模型実験の応力状態を対象としたものではない。実際のトンネル掘削は、上記の条件が

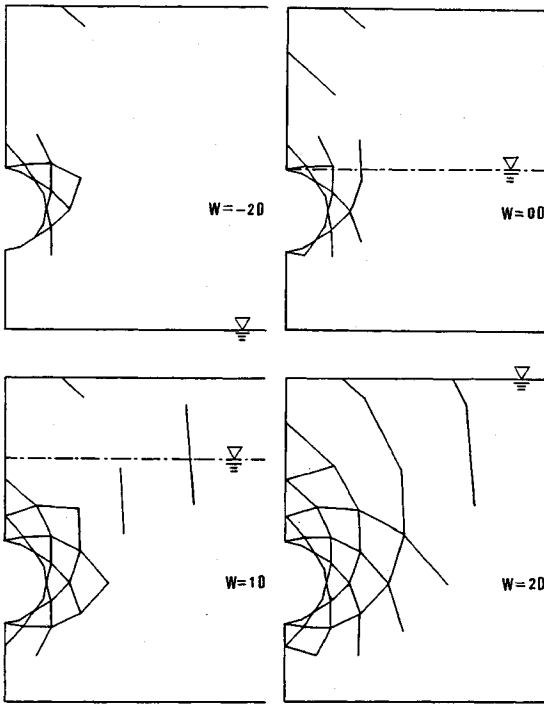


図-13 降伏したジョイント要素の分布

完全に満足することはないが、掘削段階ごとの応力状態を考慮してジョイントの配置方向を更新することが困難であること、模型実験の応力状態は上記の仮定に比較的近いと考えられることなどから、ここではジョイント要素を式(6)に従って配置した。

模型実験に対して逆解析法を適用する際の留意点を以下に示す。トンネル模型による応力の除去は、トンネル部分の要素の初期応力を10%ずつ10段階で除荷することによってシミュレートするが、モデル実験では応力を完全に除去する以前に地山は崩壊し、トンネル模型の許容変形量を超過するため、アルミ棒はトンネル模型内部の鋼円筒で支持され、以後の計算は意味の無いものとなる。したがって、トンネル模型周辺の標点が許容変形量に達する直前の応力解放段階を、有限要素解析における最終計算段階とした。

逆解析に際し、ポアソン比についてはその存在範囲が限られており、計算結果に与える影響も比較的小さいので既知とし、模型実験では過剰間隙水圧が消散した時点で観測を行っているため、透水係数についても十分大きな値に固定した。これにより、逆解析の対象となるのは、連続体要素の弾性係数  $E$ 、ならびにジョイント要素の初期剛性係数  $k_j$ 、せん断強度比  $s$  の3個となる。

図-11に番号を示す節点に対応する観測変位を与えて逆解析を行い、推定された物性定数による計算変位および等変位線を図-3の右側に示す。同図左側に示す実

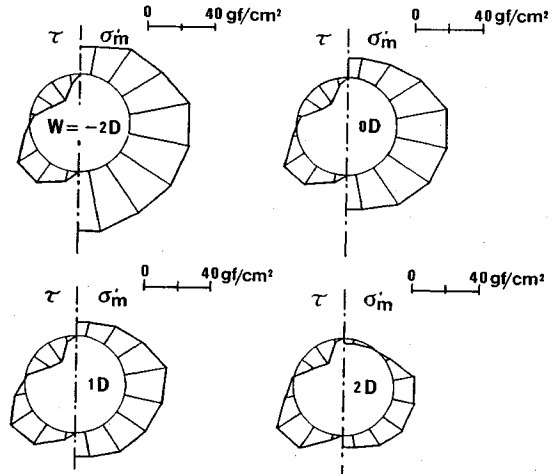


図-14 トンネル周辺の応力分布 (1 gf/cm²=98 P)

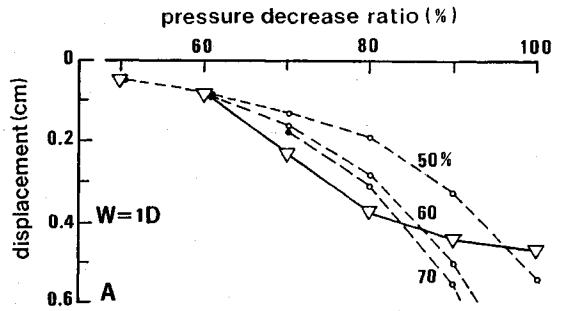


図-15 初期応力の解放率と地表面沈下量の関係の比較

験における標点と、有限要素法の節点の位置が異なることに注意して両者を比較した場合、トンネルスプリングライン付近において計算変位の水平方向成分が大きいのを除けば、変位ベクトル、等変位線の広がりなど解析値は実験結果を良好に再現し得ていると考えられる。また、図-4の点線は、逆解析された物性定数による応力解放率と点A,Bの変形量の関係を示している。実験では、トンネル模型の制約から応力解放率の大きな段階で変位が収束する傾向がみられるのに対し、計算変位は単調に増加し、応力解放率の大きな段階では両者は大きく異なることが分かる。しかしながら、実験値において変形速度が減少に移る応力解放段階までは、実験結果を比較的精度よく再現していることが認められる。

図-13は逆解析された物性定数を用いた解析の応力解放率80%において降伏域に達したジョイント要素を示している。なおここでは、ジョイント要素の降伏は、要素のせん断応力比  $\tau/\sigma_n$  がせん断強度比  $s$  の75%を超えた場合として定義している。地下水の存在しない場合には、降伏域に達した要素はトンネル周辺に限られているのに対し、地下水の上昇とともに、降伏したジョイント要素は互いに連結しながら増加し、地下水水位が地表

面に一致している場合には、地表面にまで達していることが分かる。一方、図-14は応力解放率80%時点において、トンネル壁面に隣接した連続体要素のせん断応力 $\tau$ と平均有効応力 $\sigma'_m$ の分布を示している。せん断応力は地下水位にかかわらずほぼ同様な分布形状であるのに対し、平均有効応力の分布は、地下水位に大きく依存し、地下水位が地表面に一致する2Dの場合には、トンネルクラウン部付近の要素の平均有効応力は負となり、液状化の様相を呈していることが分かる。このことは、地下水位の上昇とともに初期有効拘束圧は減少するのに対し、トンネル掘削にともなって解放する応力は全応力であるため、逆に増加傾向にあるためであると理解できる。

図-15は地下水位 $W=1D$ について、応力の解放率と地表面の点Aの沈下量の関係を示しているが、図中の点線は応力解放率50%、60%、70%の各段階までの観測変位を与えて逆解析された物性定数に基づく計算沈下量を示している。応力解放率50%までの逆解析結果と60%以上との結果では、実験結果の再現精度に隔たりが認められる。非線形構成パラメータを精度良く推定するためには、観測変位に地盤の非線形特性が内包されている必要があるが、応力解放率50%程度まででは、地山は比較的安定しており、観測値に非線形成分がほとんど含まれていないと考えられる。したがって、実際のトンネル掘削時に、次段階以降の掘削時における挙動を精度良く推定するためには、各掘削段階ごとの最新の観測データを用いて逆解析を行い、逆解析の信頼性を向上させていく必要があると考えられる。

## 5. 結 論

地下水面下に掘削される土被りの浅い砂質地山トンネルを対象とし、アルミ棒積層体と応力制御型のトンネル掘削のシミュレーション装置を用いたモデル実験を行い、以下の知見を得た。

(1) トンネルモデルの初期応力の解放率が等しい場合、地下水位の上昇とともに、地山内に現れる変形量が增大するとともに、緩み域も拡大する。

(2) 地下水が存在しない場合には、トンネルモデルの初期応力を90%程度まで解放しても、トンネルが安定性を保持できるのに対し、地下水の上昇とともに、応力解放率の小さい段階で比較的大きな変形がみられ、地下水が地表面に一致する場合には、初期応力を60%程度解放した時点で、トンネルが崩壊に至ることが確かめられた。

アルミ棒積層体によるモデル実験のように、地山の透水性が大きい場合を含めて、地下水面下に掘削される砂質地山トンネルの不連続な変形挙動を表現し得る解析法として、多次元圧密解析法と未固結地山を連続体要素と、潜在的なすべり面の方向に配置したジョイント要素に

よってモデル化する解析法を融合した解析手法を定式化した。さらに、その融合解析法を用い、トンネル掘削時に観測される現場観測変位から、地山の変形係数、透水係数ならびに強度定数を同時に推定する逆解析法を定式化し、モデル地盤および実験結果に適用し、以下の知見を得た。

(3) 逆解析法を根切り工事を想定したモデル地盤に適用した結果、計測が容易な少数の地表面変位を与えることにより、連続体要素の弾性係数、ジョイントの初期剛性係数ならびに強度定数は正確な推定値が得られることが確認された。

(4) 地盤の透水性が観測時刻の間隔に比較して相対的に大きい場合には、透水係数を正確に推定することは困難である。

(5) モデル実験の計測データに対し、逆解析法を適用した結果、モデル地山の挙動を良好にシミュレートできる物性定数が逆解析可能であることが確認された。

今後は、地盤の透水性が比較的低く、過剰間隙水圧の消散過程の変位が観測される場合を含めて、実際の根切り工事、トンネルの施工に伴う動態観測変位に対し、本逆解析法を適用し、実地盤に対する適用性を確認するとともに、有効な利用法を検討していく方針である。

最後に、本論文の作成に際し、多大なる御指導と御助力を頂いた、徳島大学建設工学科澤田健吉教授ならびに解析を手伝って頂いた徳島県の森塚真氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 村山朔郎・松岡元：粒状土地盤の局部沈下現象について、土木学会論文報告集，No.172，pp.31～41，1969.
- 2) 足立紀尚・田村武・八嶋厚・上野洋：砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究，土木学会論文報告集，第358号／Ⅲ-3，pp.129～136，1985.
- 3) Takemura, J., Kimura, T. and Wong, S. F. : Undrained Stability of Two-Dimensional Unlined Tunnels in soft Soil, Proc. of JSCE, No.418 /Ⅲ-12, pp.267～277, 1990.
- 4) Atkinson, J. H. and Potts, D. M. : Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground, Journal of the Geo. Engg. Division, ASCE, Vol. No.GT4, pp.307～325, 1979.
- 5) 湯浅泰則：土砂トンネルの力学的挙動に関する研究，京都大学修士論文，1988.
- 6) Goodman, R. E. and St. John, C. : Finite Element Analysis for Discontinuous Rocks, Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Desai, C.S. and Christian, J. T., Eds., McGraw-Hill, New York, pp.148～175, 1977.
- 7) 川井忠彦：物理モデルによる連続体諸問題の解析，東京大学生産技術研究所セミナーテキスト，(コース57)，1980.
- 8) Cundall, P., A., Voegele, M. and Fairhurst, C. : Computerized Design of Rock Slopes Using Inter Active Graphics for the Input and Output of Geometrical Data, 16th U.S.Symposium of Rock Mech., pp.5～14, 1970.



- 9) Adachi, T., Kikuchi, T. and Kimura, H. : Behavior and Simulation of Soil Tunnel with Thin Cover, Proc., of the 6th Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, pp.3~12, 1988.
- 10) 赤井浩一・田村武：弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析，土木学会論文報告集，第269号， pp. 95~104, 1978.
- 11) 飯塚敦：軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究，京都大学博士論文， pp. 34~45, 1988.
- 12) Adachi, T. and Kojima, K. : Estimation of Design Parameters for Earth Tunnel, Proc., 12th ICSMFE, Vol.2, pp.771~774 1989.
- 13) Powell, M.J.D. : An efficient method for finding the minimum of function of several variables without calculating derivatives, Computer J., 7, No.3, pp.155~162, 1964. (1991.7.31 受付)

## MODEL TESTS AND BACK ANALYSIS OF SHALLOW SANDY GROUND TUNNEL WITH HIGH GROUNDWATER TABLE

Keisuke KOJIMA, Toshihisa ADACHI and Katsuhiko ARAI

To investigate the effect of underground water on the mechanical behavior of shallow sandy ground tunnel, laboratory model tests were carried out by using a pressure controllable tunneling device and the model ground by piling up aluminum rods with various groundwater level. Described was the numerical procedure to back-analyze the non-linear constitutive parameters and coefficient of permeability from the monitored displacement during tunnel excavation. It was verified with hypothetical case studies and the model tests, that the proposed procedure can be successfully estimate the constitutive parameters from the monitored movements at construction sites.