

# 応力解放率の概念を導入した シールドトンネルの一設計法

中村 浩<sup>1</sup>・山崎 糸治<sup>1</sup>・中廣 俊幸<sup>2</sup>・杉嶋 敏夫<sup>3</sup>・大西 豊<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都市交通局建設室 (〒604-8804 京都市中京区壬生坊城町48)

<sup>2</sup>正会員 中央復建コンサルタント㈱第二設計部 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-8-29)

<sup>3</sup>正会員 佐藤工業(株)土木本部設計部門 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>4</sup>正会員 佐藤工業(株)大阪支店土木部門 (〒541-0041 大阪市中央区北浜1-1-6)

シールドトンネルの掘削を地盤と覆工の連成問題ととらえ、2次元線形弾性FEMに覆工要素を組み込んだ解析モデルを構築した。解析では掘削に伴う応力の再配分の過程を覆工が耐荷する以前と以後の二つの状態に分け、覆工が耐荷する以前の応力解放の割合を応力解放率として与えることにより表現した。

この応力解放率は地山特性と施工要因により特定されることを示すとともに、4本の単円シールドが上下左右に近接する併設トンネルに対して解析を実施した。先行トンネル自身の作用土圧、覆工断面力および後続トンネルの掘削に伴うこれらの変動量について解析値と現場計測結果を比較することにより検証し、シールドトンネルの設計手法としての有効性を示した。

**Key Words :** shield tunnel, earth pressure, design, numerical analysis, stress release ratio

## 1. 序 論

シールドトンネルの設計には従来から全土被り圧や緩み土圧といった塑性平衡状態を想定した設計土圧が用いられている。ところが、作用土圧や覆工部材応力の詳細な計測が実施されるようになって、比較的硬質な地盤において上記の仮定が実状と一致しないことが分かってきた。一般に構造物を設計する場合、土質条件と構造形式が定まれば設計土圧は得られるという概念が強い。しかし、トンネルの場合にはFenner-Pacher Curve<sup>1)</sup>に典型的に示されるように、支保工・覆工と地盤の連成問題として取り扱われるべきであり、同一の地盤であっても支保工・覆工の剛性やその建て込み時期を含む施工方法の相違により地盤応力、したがって覆工への作用土圧が変化する。このことはシールドトンネルについても基本的には共通の概念であると考えられる。

本研究の目的は、上記の認識に基づいた地盤と覆工の連成解析モデルを構築し、その理想解と現場計測結果の比較による検証を経てシールドトンネルの設計法を提示することである。

京都地下鉄における4本の単線トンネルが上下左右に併設されるシールド工事において、特徴的な地盤変位、土圧、覆工断面力などの計測データが得られた。地盤挙動の特徴は、横方向併設では地表面沈下が1本毎の変位を重ね合わせたような変形性状で

あるのに対し、上下併設の場合に後続シールドである上部のトンネルが掘削されたときの相対沈下量が非常に小さい、あるいは微少ながら相対的に隆起を生じる場合があることである。先の論文<sup>2)</sup>ではこの地盤変位を、2次元線形弾性FEMを用いて、覆工をはり要素でモデル化し、応力解放の過程を覆工が耐荷する以前と以後の二つの状態に分けて解析し、掘削により生じた不釣り合い力のすべてを解放し応力の収支を合わせた。この方法により各トンネル施工段階の多様な変位のモードと量を統一性のある解析パラメータによって再現できたが、このことは解析モデルが力学的な合理性を備えていることを示唆するものであると考えられる。

変形性状を議論する場合に、一般に弾性解の近似度は高いとはいえないが、応力分布に限れば弾性解の与える結果は相当信頼性があり、弾性解析が地盤の力学的挙動を解明する有力な手段であることは否定できない。当該の地盤がある程度弾性を仮定しうる場合に、解析モデルが力学的合理性を有し各物理値が適切に設定されれば変形性状と地盤応力あるいは覆工断面力の整合を求めることができる。本論文ではこの観点に立ち上記の地盤変形解析における覆工の周辺地盤応力と覆工断面力を調べ、現場計測結果と比較することにより地盤と覆工の連成解析モデルとしての妥当性を検証する。また、解析パラメータとなる応力解放率の概念の導入の必要性と工学的

意義を示すことにより具体的なシールドトンネルの設計法として提示する。

## 2. 地山特性とシールドトンネル

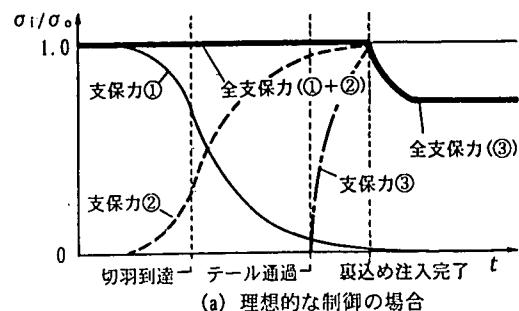
素掘りの状態を経て支保を建て込むとき、トンネルの力学的見地からは、素掘りの状態で解放された残りの応力は支保と地山で負担することになる。本論の解析は、シールドトンネルが一般に対象とする地盤についても基本的にはこの考え方方が適用できるという観点に立っている。

木村<sup>3)</sup>は、比較的良好な地盤条件下でシールド工法と山岳工法が混在することに着目し、これら異なる設計施工理念に基づくトンネルを統一的に説明できるはずであるとして地山特性曲線を用いて考察している。ここでは同様の方法によりシールドトンネルの構築過程の説明を試みるが、先に支保効果の観点から施工条件を整理する。

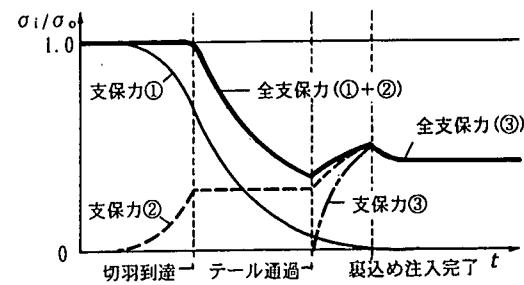
シールドトンネルでは、いま着目している断面にシールドが接近する過程から応力解放が生じる。このとき泥水圧あるいは泥土圧の支保効果が発揮される。この状態はシールドテールまで続き、テールボイドの発生時に裏込め注入がなされ覆工が耐荷する状態に至る。

図-1は地盤を弾性体と仮定し発揮される各種の支保効果の概念を示す。縦軸は支保力  $\sigma_i$  を初期地圧  $\sigma_0$  で無次元化しており、横軸は時間を表す。支保力①は切羽の3次元効果であり、形状要因によって決定される曲線で、着目する断面に対して切羽が十分に遠くなると0となる。この曲線形状は、たとえばBaudendistel<sup>4)</sup>の切羽の支保効果に関する解析的研究をもとに描いている。支保力②は泥水圧あるいは泥土圧および裏込め注入圧による支保効果である。支保力③は覆工が地山に及ぼす力で、裏込め注入の施工とともに導入される状況を示す。なお、支保力③は覆工側からみれば覆工反力に相当する。

図-1(a)は切羽圧力および裏込め注入が理想的に制御された場合で、支保力②のように支保力①の不足を補えば裏込め注入完了時点で地山の応力解放はなく変位も生じない。このとき覆工が耐荷可能な状態にあれば、裏込め注入圧の消散とともに、全解放応力に対して地山剛性と覆工剛性に応じた分担割合で覆工の支保力が発揮される。しかし、実際の施工では図-1(b)の支保力②のように、切羽の接近過程では仮に理想に近い切羽圧力制御をしたとしても、シールド通過中はほぼ一定の支保力となるので、支保力①と合わせた全支保力(①+②)は図のような状況で発揮されると考えられる。覆工が耐荷可能な状態になるとき応力解放は既に進んでいるので、残り



(a) 理想的な制御の場合



(b) 実施工の場合

図-1 支保力の作用過程

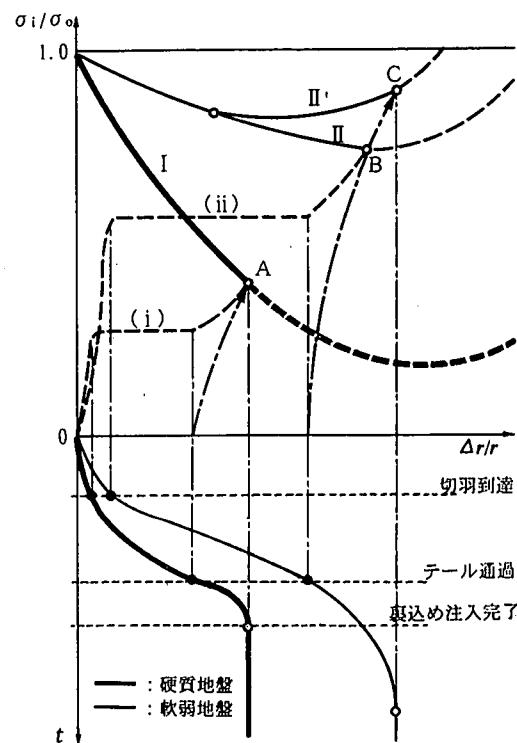


図-2 地山特性曲線

の解放応力に対して覆工の支保力が発揮される。このとき覆工が図-1(a)と同様の剛性を有する場合は、その支保能力が十分に発揮されていないことになる。

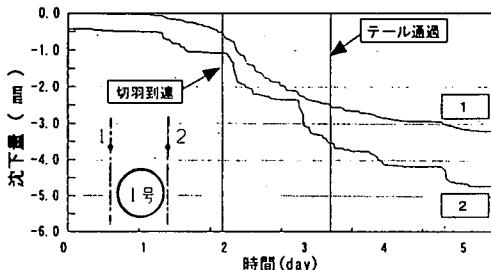


図-3 地盤鉛直変位の経時変化

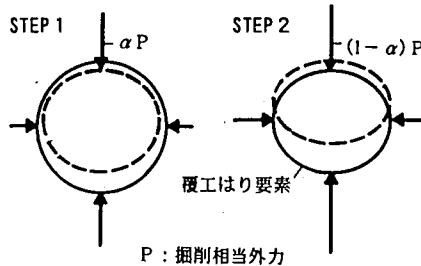


図-4 解析ステップ

図-2において横軸は掘削面の変形量  $\Delta r$  とトンネル半径  $r$  の比、上段の縦軸は覆工の支保力  $\sigma_i$  と初期地圧  $\sigma_0$  の比であり、地山特性曲線は覆工の支保力を変化させた場合の平衡点を結んだ曲線である。下段の縦軸は時間で、曲線は施工過程に応じた内空変位の経時変化を表す。

曲線Ⅰは洪積地盤あるいは軟岩を想定した硬質地盤の地山特性曲線である。内空変位の経時変化性状は図-1(b)の全支保力の経時変化に対応させており、図-3に示す現場実測値とも同一の性状である。なお、現場実測値は次章で解析対象とする工事のトンネル天端近傍地盤の鉛直変位である。覆工支保力の形成過程(i)は図-1(b)の支保力②と対応させている。

曲線Ⅱは沖積地盤を想定した軟弱地盤の地山特性曲線である。同一の施工過程を経た場合にB点で平衡状態に達するが、地山物性が劣化すればC点で安定し、初期地圧に近い覆工支保力が発揮されることになり、さらに荷重は上昇過程にあり不安定である。

せん断強度を有する材料であれば、特性曲線の概念は一般に当てはまると考えられ、地山特性を個々に評価することにより、シールドトンネルの構築過程についても上記のように説明できる。特性曲線は地山特性、覆工剛性により決定され、覆工支保力が特性曲線のどこに取り付くかは工法、時間等の施工要因により決定される。したがって、シールドトンネルの設計は、これらのパラメータを評価することに帰着するが、このとき、覆工が建て込まれる以前にすでに応力が解放されている過程をどのような形式で設計に取り入れるかが課題となる。

### 3. 地盤-覆工連成解析

#### (1) 解析の目的と方法

解析の目的是シールドトンネルの覆工断面力を求め覆工の設計手法を検討することであるが、そのとき地盤の応力や変位との整合を求め力学的な合理性を確保する。

解析の方法は、先の論文<sup>2)</sup>で示した地盤変形解析と同一のもので、2次元線形弾性FEMを用い、以下の方法による。

前章で述べた覆工が建て込まれる以前に解放される掘削相当外力の全掘削相当外力に対する比を応力解放率  $\alpha$  で表現する。まず、STEP 0で土の自重に基づき地盤の初期応力を算定し、STEP 1で掘削条件を与えて掘削相当外力を算定する。このとき、図-4のように素掘り状態で応力解放率  $\alpha$  に相当する掘削相当外力を解放する。最後に、STEP 2で覆工をはり要素で附加し残りの応力解放率  $(1 - \alpha)$  相当の掘削相当外力を解放し、目的の覆工断面力、地盤応力および地盤変位を求める。

FEMの解析領域について、特に地盤変形を解析する場合に、適切なひずみ領域を確保することが重要である。他の要件との調整上解析領域を決定する場合は別として、算定する変位に有効な影響を与えるひずみが生じる範囲は解析領域に含む必要があると考えられる。Yamaguchi<sup>6)</sup>は、地山の自重を考慮したトンネル周辺の地盤応力の厳密解を示している。これからひずみを求め、掘削前に生じている初期ひずみを除いたトンネル半径方向の式を示すと式(1)のようである。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_r = & \frac{1+\nu}{E} \left[ \frac{\gamma h}{2} (1+k) \frac{a^2}{r^2} \right. \\ & - \frac{\gamma a}{4} (3+k-2\nu-2k\nu) \frac{a}{r} \cos\theta \\ & + \frac{\gamma h}{2} (1-k) \left\{ (1-\nu) \frac{4a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right\} \cos 2\theta \\ & \left. - \frac{\gamma a}{4} (1-k) \left\{ (5-4\nu) \frac{a^3}{r^3} - \frac{4a^5}{r^5} \right\} \cos 3\theta \right] \quad (1) \end{aligned}$$

式(1)は、トンネル中心を原点とする極座標で表示しており、 $\nu$ 、 $k$ 、 $E$ 、 $\gamma$ はそれぞれ地盤のポアソン比、側圧係数、変形係数、単位体積重量、 $h$ はトンネル中心の土被り、 $a$ はトンネル半径である。

図-5は、式(1)より求めた各土被りを有するトン

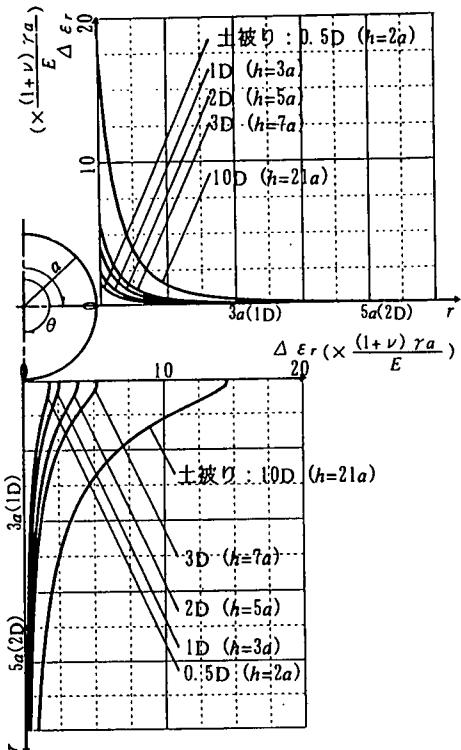


図-5 トンネル半径方向ひずみ

ネル（直径D）の下方および側方の半径方向のひずみである。これよりトンネル下方、側方ともに変位の大半はトンネルから2Dの領域で生じることが分かり、FEMの解析領域についてもこれを根拠に定めることとする。

## (2) 応力解放率の定義

本解析において、応力解放率は既述のとおり、覆工が建て込まれる以前に解放される掘削相当外力の全掘削相当外力に対する比と定義し式(2)のように表す。

$$\alpha = \frac{P - P_L}{P} = 1 - \frac{P_L}{P} \quad (2)$$

ここで、Pは全掘削相当外力、 $P_L$ は覆工が耐荷状態にある段階で解放される掘削相当外力である。

本解析と基本的に同義の地盤と覆工の連成問題の厳密解としては、松本・西岡<sup>6)</sup>や、木山ほか<sup>7)</sup>の2次元弹性解が存在する。

松本・西岡はシールドトンネルの掘削問題における地盤応力を覆工反力を考慮して式(3)のように表している。

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rr}^{(1)} + \sigma_{rr}^{(2)} \quad (3a)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}^{(1)} + \sigma_{\theta\theta}^{(2)} \quad (3b)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}^{(1)} + \tau_{r\theta}^{(2)} \quad (3c)$$

ここで、それぞれ右辺の第1項は素掘り状態に保ったときに地山に発生する応力であり、右辺第2項は覆工によって地山に作用する応力である。なお、右辺第1項は Yamaguchi が示したトンネルの弾性解と同じものである。

これら応力は掘削相当外力の関数であるので、たとえば式(3a)は式(4)のように表示できる。

$$\sigma_{rr}(P) = \sigma_{rr}^{(1)}(P) + \sigma_{rr}^{(2)}(P) \quad (4)$$

この表記を借りて本解析における応力解放率の概念を示すと、掘削相当外力と応力は線形関係にあるの式(5)のようである。

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}'(P) &= \sigma_{rr}^{(1)}(\alpha P) + \sigma_{rr}^{(2)}((1-\alpha)P) + \sigma_{rr}^{(2)}((1-\alpha)P) \\ &= \alpha \sigma_{rr}^{(1)}(P) + (1-\alpha) \{ \sigma_{rr}^{(1)}(P) + \sigma_{rr}^{(2)}(P) \} \\ &= \sigma_{rr}^{(1)}(P) + (1-\alpha) \sigma_{rr}^{(2)}(P) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{rr}'$ は素掘り過程を考慮したときの地盤応力である。これを $\alpha$ について整理すると式(6)となり、地盤応力について応力解放率 $\alpha$ は、素掘り過程を考慮しない場合と考慮する場合の地盤応力の差の素掘り過程を考慮しない場合に覆工が地山に対して作用すべき応力に対する比を表すことになる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sigma_{rr}^{(1)}(P) + \sigma_{rr}^{(2)}(P) - \sigma_{rr}'(P)}{\sigma_{rr}^{(2)}(P)} \\ &= \frac{\sigma_{rr}(P) - \sigma_{rr}'(P)}{\sigma_{rr}^{(2)}(P)} \end{aligned} \quad (6)$$

## (3) 4本併設シールドの解析

実際の工事に対して本解析法を適用し、覆工土圧、断面力、地盤変位の解析結果と実測値を比較することにより解析法の妥当性を検証する。なお、工事は4本の単円シールドが併設されるので、先行トンネルに対する後続トンネルの掘削の影響についても一連の計算の中で解析する。

### a) 工事と土質の概要

工事は単線鉄道シールド（泥土圧式シールド、シールド外径：5,840mm）が4本近接して設置される。図-6は解析の対象とする断面で、各トンネルは図示の順に施工された。この断面では先行の1号トンネルについて覆工土圧、部材応力など、地盤について鉛直と水平の変位を計測した。なお、計測の内容については文献8)に詳しいので参照されたい。

土質は、地表面から約7mまでは沖積層、以深は洪積層で、洪積層は全般にN値が20以上の硬質な粘性土である。1号、2号トンネルのクラウン上部にある洪積砂礫（Dgm）には、細粒分が17~46%含まれバインダーを形成しており、巨視的には粘性土として挙動すると考えられる。

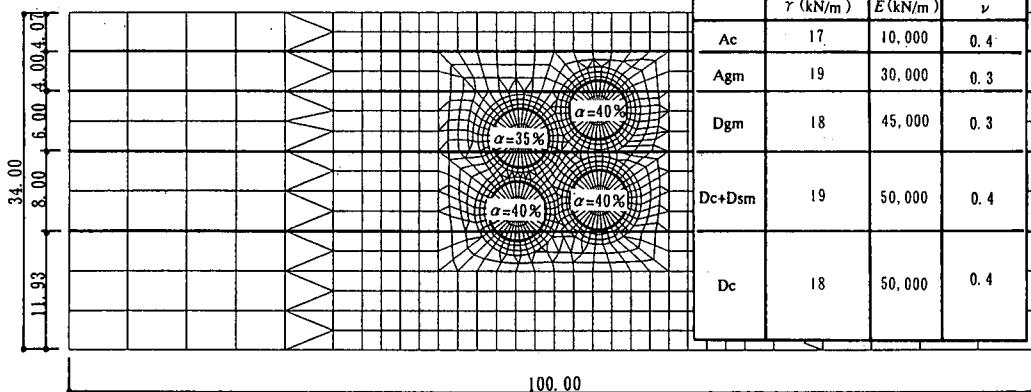


図-7 解析モデル

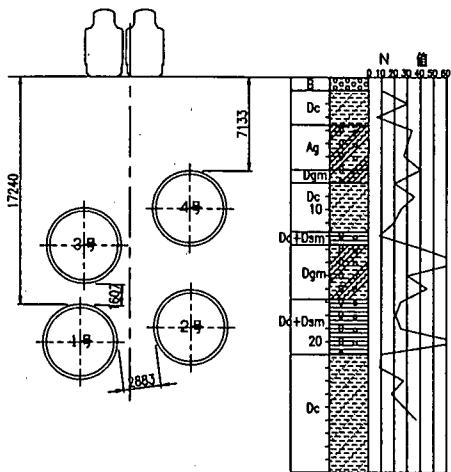


図-6 解析断面(計測A断面)

### b) 解析モデル

解析モデルを図-7に示す。図には次項で示す解析結果を与えた各トンネルの素掘り状態での応力解放率と地盤物性値を併せて示す。

各トンネルについて素掘り状態と覆工を建て込んだ状態の2ステップで解析し、解析ステップ数は初期応力の計算ステップを含めて全9ステップである。

### c) 解析結果と実測値

図-7に示した諸値のうち、応力解放率と地盤の変形係数は地表面変位の実測値とのフィッティングの試行により決定した。これらの値は先の論文における地盤変形解析と同一である。ただし、下部2層のボアソン比のみ $\nu=0.3$ から $\nu=0.4$ に変更している。これは覆工断面力、特に軸力の解析値と実測値の整合性を高めるための修正である。

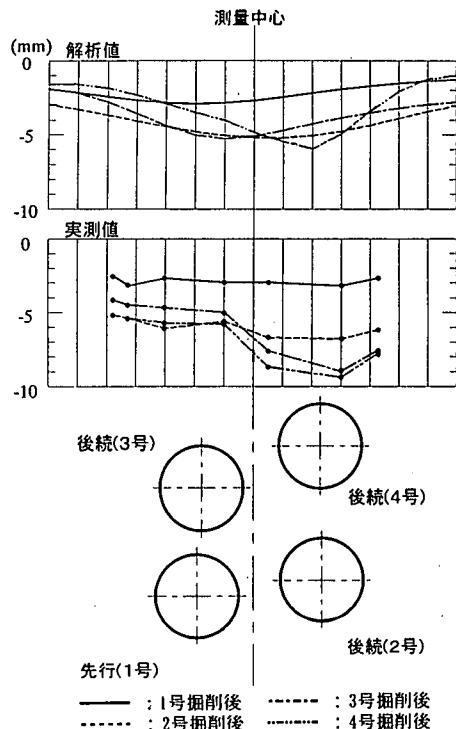


図-8 地表面変位

図-8に地表面変位の解析値と実測値を示す。当該断面の地盤挙動の特徴を記すと、横方向併設の1号と2号トンネルの掘削のとき地表面変位は1本毎の変位を重ね合わせたような性状であるが、1号の上に3号が、2号の上に4号が掘削されたときの相対沈下量は非常に小さく、3号の掘削では一部に相対隆起を伴っている。

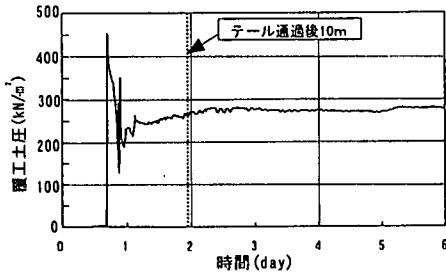


図-9 初期の覆工土圧経時変化

この上下併設時の特徴的な変位は、解析上応力解放率の操作により再現可能であり<sup>2)</sup>、その施工段階で地表面変位が沈下から隆起に転じる境界の値を求め決定した。この応力解放率のもとで変位量は主として地盤の変形係数を適切に設定することで再現できる。結果として、多様な地盤変形性状を各トンネルについて同等の応力解放率を用いることにより表現できた。

図-9はトンネル天端に設置した土圧計の覆工建て込み以降の経時変化で、初期において増加を示し、テール通過から10m程シールドが進んだ時点で安定する。これは3次元的に切羽の影響がなくなり応力の再配分が完了する過程、あるいは応力緩和として説明される現象などが生じていると想定される。覆工土圧、覆工断面力の解析値と実測値の比較に当たってはこの安定した時点の値を採用する。

覆工土圧と覆工断面力の解析値と実測値を図-10に示す。覆工土圧の解析値は覆工周囲の平面ひずみ要素のトンネル半径方向応力である。

2号掘削前の覆工土圧の分布形状は解析値と実測値で若干異なる。実測値では鉛直土圧が側方土圧よりも大きい分布形であるのに対し、解析値では等方的な分布形を示す。併設の影響としての変動値は2号の掘削時に量的に異なるものの全般によく一致している。

軸力は、絶対値、変動値ともに各施工段階でよく一致している。

曲げモーメントの絶対値は、3号掘削後および4号掘削後において、正と負の発生位置が解析値と実測値で異なる。これは覆工を剛性一様なリングとしている解析に対し、実際には継手が存在し曲げに対して不連続となっているなどのことが考えられる。ただし、2号掘削前においては比較的よく一致し、変動値の発生モードも各施工段階で一致していることから基本的には再現可能であると考えられる。

以上のように覆工土圧、断面力について分布形の点では解析値と実測値の間に若干の相違があり、フ

ィッティングという観点からは解析モデルおよび地盤物性値の細部について修正する必要がある。しかし、軸力の整合性から判断すると応力の再配分の過程についてはよく再現している。また、後続トンネルの掘削を同一の解析法で再現することにより、その先行トンネルに対する影響も表現し得ることから、地盤と覆工の連成モデルとして力学的な合理性が確保されていると考える。

#### 4. 応力解放率の工学的意義

##### (1) シールドトンネルの解析における

###### 応力解放率の適用例

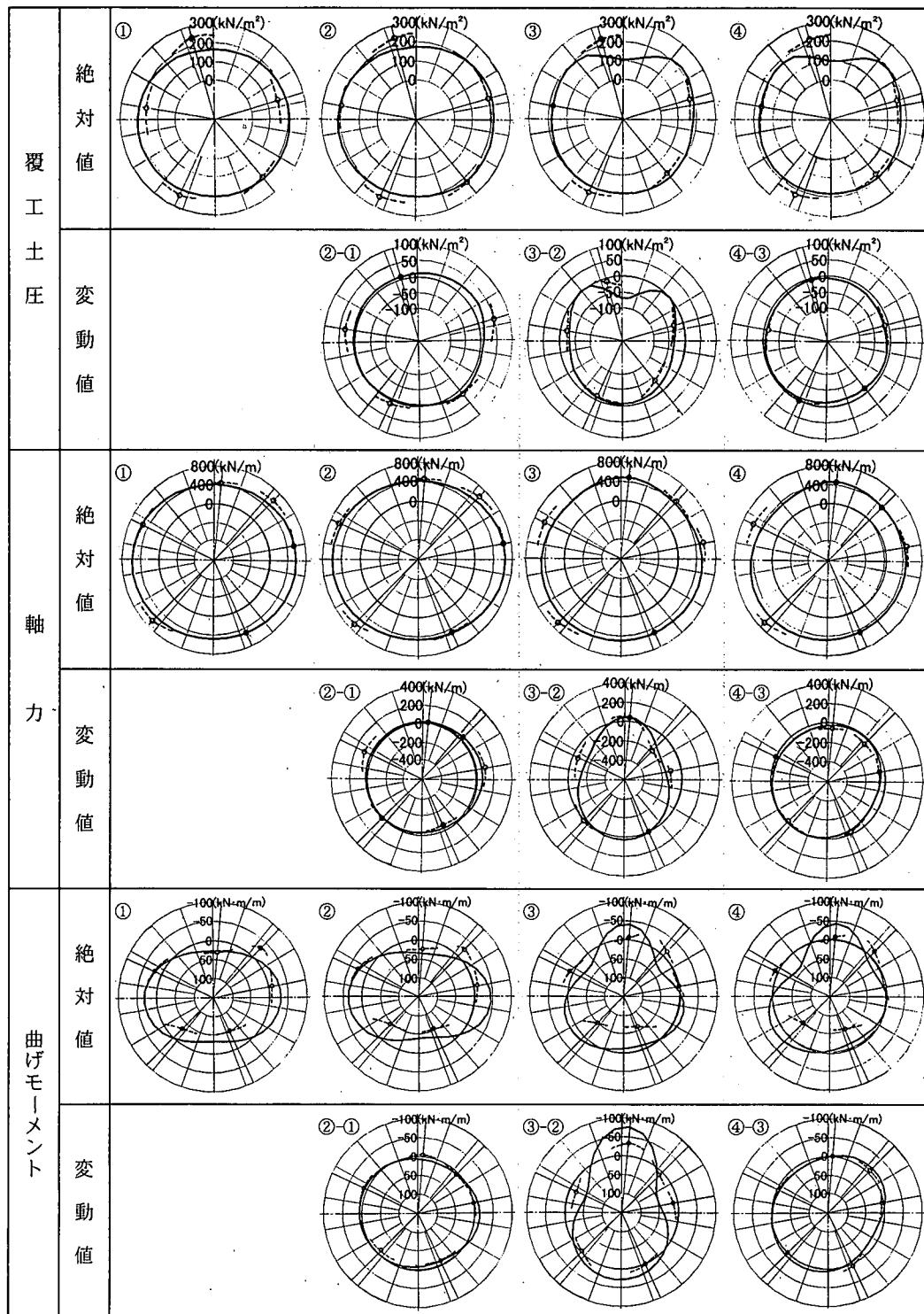
シールドトンネルに関して応力解放率は、その掘削に伴う地盤変形解析においてしばしば用いられる。いわゆる素掘り解析<sup>9)</sup>では、FEMを用いてある応力解放率に相当する掘削相当外力を掘削面に与えて地盤変位を算定するが、用いるべき応力解放率の値は多くの地表沈下等の実測値との比較を経てある程度絞り込まれている。施工要因をもう少し具体的に考慮した解析法としては、地圧と泥水圧の差圧を解放応力としてFEMにより解析し、計算結果に補正係数を乗じて地盤変位を求める方法がある<sup>10)</sup>。この補正係数も同様に経験的に定められており、トンネル構築過程で生じた解放されるべき全不釣り合い力に掛かる係数という意味で前者の応力解放率と同義である。これらの解析法は地盤変位を予測するうえで実用的な方法として確立してきたものと考えられるが、いずれも地盤変位を表現するための節点作用力の比較論であり、地盤応力や覆工断面力との関係については示されず力学的な意味は不明である。

覆工土圧を応力解放率という観点から整理した事例として橋本ほか<sup>11)</sup>の研究がある。土圧計による覆工土圧測定結果をもとに、式(7)のように応力解放率を、初期地圧  $\sigma_0$  と作用土圧（覆工反力）  $\sigma_i$  の差の初期地圧に対する比と定義しその値を示している。

$$\alpha = \frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0} = 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \quad (7)$$

式(2)に示した本論の応力解放率は掘削相当外力で定義され、右辺第2項の分子は覆工が耐荷する過程で地山と覆工が協力して分担する掘削相当外力である。一方、式(7)の右辺第2項の分子は覆工が分担する応力であり、概念としては、覆工耐荷過程における地山の応力分担を含むか否かの相違がある。ただし、地山特性と覆工土圧の大きさの関連を調べるうえでは定性的に同一のものである。

橋本ほかは、洪積粘性土の応力解放率として  $\alpha = 約40\%$ 、沖積粘性土では  $\alpha = 約20\%$  としており、応力解放率の値は硬質地盤の方が軟弱地盤より大きい



①：2号トンネル掘削前，②：2号掘削後，③：3号掘削後，④：4号掘削後

——：解析値，---○---：実測値

図-10 1号トンネルの覆工土圧と断面力

ことを示している。図-2に示した軟弱地盤と硬質地盤の特性曲線から、式(7)で与えられる応力解放率は軟弱地盤になるほど小さくなることが理解され、本論における見解と矛盾しない。

## (2) 応力解放率の決定要因

地盤変位あるいは覆工土圧および断面力を解析上再現する応力解放率が、地山特性と具体的な施工要因によって決定されるとき、その工学的な意義が明確となる。

以下に地山と施工条件の相違が覆工土圧に及ぼす影響について事例を示す。

前章において解析の対象とした工事では、解析結果を示した断面(A断面)のほかに同様の計測を実施した断面(B断面)があり、両断面の1号トンネルの覆工土圧に有意な差がみられた。図-11に示すように、B断面ではA断面に対してトンネル全周にわたって小さくなっている。

図-12にB断面の概要を示す。A断面(図-6)と比較して、土被りはほぼ同等であり、地盤条件についてトンネル周辺の土質は洪積粘性土(Dc+Dsm)、クラウンより上部は洪積砂礫(Dgm)と共通であるが、B断面では洪積砂礫の層厚が厚い。この地層構成の相違によると考えられるが、1号トンネル掘削時の地表面沈下量はB断面の方が小さく<sup>2)</sup>、影響範囲の地盤剛性は相対的にB断面の方が大きいと考えられる。

図-13に両断面の覆工土圧ならびに施工データとしてチャンバー内土圧と裏込注入圧(注入ポンプ圧)の経時変化を示す。覆工土圧は覆工天端に設置された土圧計の値を示している。

裏込注入は両断面においてほぼ同等の圧力で施工されている。裏込注入が施工されるとき、覆工土圧の経時変化にみられるように注入圧は覆工および地盤に有効に載荷される。ただし、それは瞬間的であり、後の覆工土圧の値に影響を与えてはいない。当該の地盤のように比較的硬質な地盤では、裏込注入が良好になされ充填される範囲では、注入圧などの要因は覆工土圧を決定するうえで支配的ではないようである。

チャンバー内土圧は、推力、掘進速度、排土量などの制御の結果として生じるものであり、切羽の支保効果に関する掘進管理の状況を代表する指標として示した。両断面においてチャンバー内土圧には有意な相違がある。チャンバー内土圧の設定は、施工計画段階の静止土圧相当の値を基礎としたが、実施工では地表面沈下の観察結果から判断しながら修正した。結果として沈下量は十分に小さな値に収まっているが、A断面では地上に営業中の路面電車があ

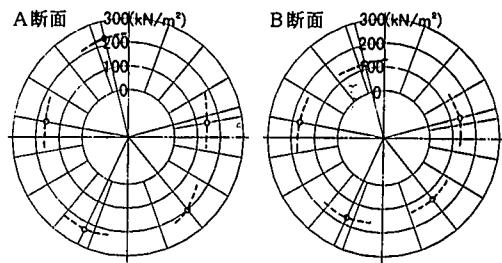


図-11 覆工土圧の実測値

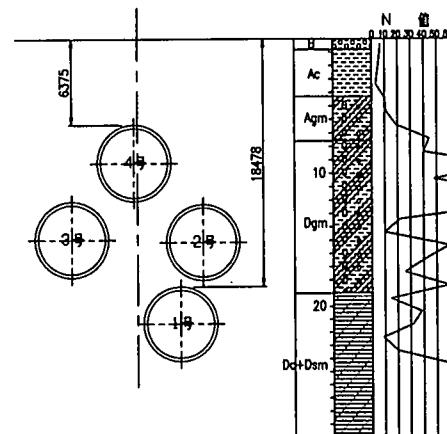


図-12 計測B断面

ることから高めに設定している。

着目する断面にシールドが接近する過程から応力解放が生じる。このとき、地盤を乱したり破壊させない適正な範囲では、切羽土圧は大きい方が支保効果が大きく、それは切羽通過後においても同様である。したがって、A断面とB断面の比較では、結果としてB断面の方が覆工が建て込まれる以前の応力解放を進行させたことになり、覆工土圧は小さくなつたと考えられる。

## (3) 応力解放率の同定

地山特性は、特性曲線がその地盤とトンネルについて唯一得られるように、地盤に固有のものである。覆工反力は、ひとつの特性曲線に対して覆工剛性と工法、時間等の施工要因が特定されれば得られる。

2章図-1の支保力の作用過程のように地盤を完全な弾性材料と仮定すれば、切羽圧力や裏込注入圧を大きくすることによって応力解放率を小さく誘導することができる。しかし、実際の地盤では過大な切羽圧力を保持した場合には地盤に先行隆起を生じさせたり擾乱する結果となり、また良好な掘進が確保できるとも考えられない。施工の制御は地盤からの反応に対して行われるべきものであり、自ずから適

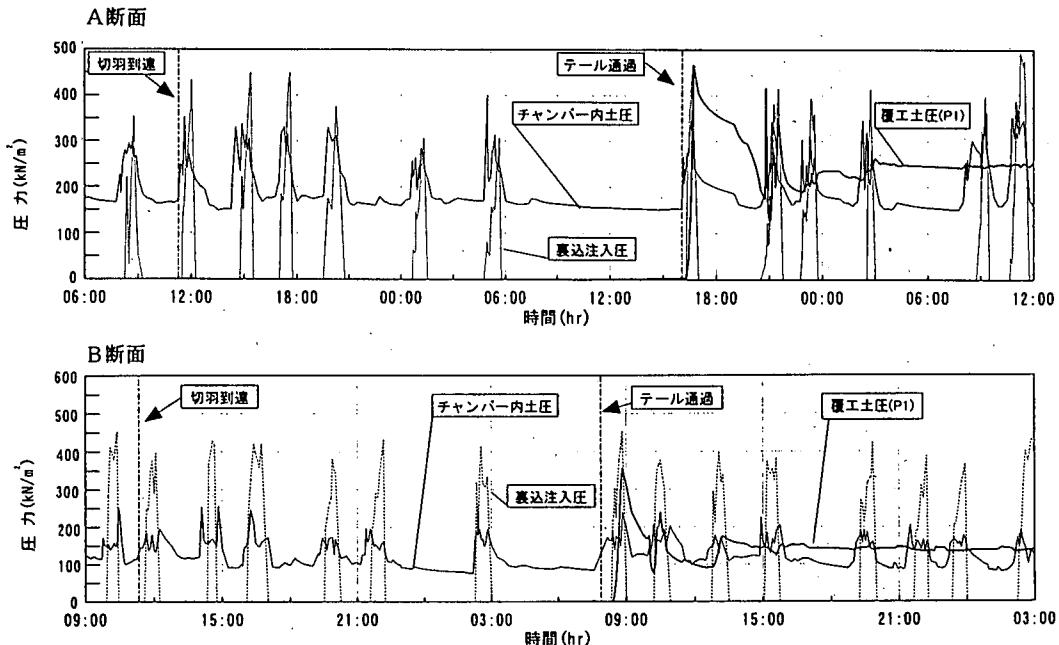


図-13 覆工土圧・チャンバー内土圧・裏込注入圧の経時変化

正な範囲が存在する。したがって、覆工が耐荷する以前の解放応力を規定する応力解放率の値の絶対的な大小は、施工の制御の結果として地山特性により定まるといえる。

切羽圧力や裏込注入に関する個々の要因を具体的にモデル化できることは理想的である。しかし、たとえば泥水圧や泥土圧の材料特性や載荷形態、さらに地盤の反応を明らかにし、現実的な解析結果を得ることは決して容易ではない。したがって、これまでの考察から、本論文で定義する応力解放率が主として地山特性により定まるのであれば、この概念を地盤と覆工の連成解に導入することにより明確な根拠をもった解が容易に得られることになる。

応力解放率の値を同定するためには、多数の覆工土圧や断面力の計測データを収集し地盤毎に整理すること、施工条件との関係を明確にするなどの作業が要求されるが、解析結果に示した応力解放率の値は、洪積粘性土におけるシールドトンネルに適用し得るひとつの実績と考える。

## 5. 結 論

シールドトンネルの設計法として、地盤と覆工の連成解析に応力解放率の概念を導入することで合理的かつ現実的な解を得られることを示した。

本論における応力解放率は、覆工が耐荷する以前

に解放される応力の全掘削相当外力に対する割合と定義した。この値は地山特性および切羽圧力、裏込注入などの施工条件により決定されるが、主要因は地山特性であると考えられる。すなわち、地盤変位の抑制や施工性の確保に関して、施工の制御は地山の反応に対して行われるので、地山特性に応じた制御の適正な範囲は自ずから存在する。

この解析手法を、4本の単円シールドが近接して設置される併設シールドの工事に適用した結果、着目した先行1号トンネルの覆工土圧、部材断面力および後続トンネルの掘削の影響としてのそれらの変動値が実測値とよく一致した。このとき同定された応力解放率は40%で、洪積粘性土におけるひとつの実績として示される。この解析の成果は、希少な工事例、すなわち、同時期に多数のシールドトンネルが多様な位置関係で近接した併設シールドで、地盤をある程度弾性体と仮定できることと無関係ではない。すなわち、先行トンネルと後続トンネルの相互作用の関係を同一の施工条件下で繰り返し確認できたこと、それを単純で明快な解析モデルを用いて再現できたことにより地盤の力学挙動の基本的な特性を把握できた。

地盤は、各々の地山特性に応じ、塑性化したり緩みを生じる、圧密が進行するなどの挙動を示す。本論における解析手法はこれらの現象を応力解放率を係数的に取り扱うことにより包括的に再現しようとするものではなく、ある初期応力状態にある地山に

トンネルを掘削したときの基礎的な応力の再配分を評価しようとするものである。したがって、この解析を基礎に個々の地山特性を考慮することにより、多様な地盤におけるシールドトンネルの設計が可能になると考へる。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、京都大学 足立紀尚教授には数々の助言をいただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Rabcewicz,L.V.:Stability of tunnels under rock load (Part I),*Water Power*,pp. 225-229,1969.
- 2) 山口 巍, 山崎糸治, 小林 隆, 松下惇次, 宮田弘之介, 杉嶋敏夫 : 4本併設シールドの地盤-トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究, 土木学会論文集, No. 561 / III-38, pp. 47-62, 1997.
- 3) 木村 宏 : 地山特性に視点を置いたシールドトンネルと山岳トンネルの統一的設計・施工の理念, 第27回土質工学研究発表会, pp. 2093-2096, 1992.
- 4) Baudendistel,M.:Zum Entwurf von Tunneln mit großem Ausbruchquerschnitt, *Rock Mechanics*, Suppl.8, pp. 75-100, 1979.
- 5) Yamaguchi, N. : On the stresses around a horizontal circular hole in gravitating elastic solid, 土木学会誌, Vol. 15, No. 4, 1929.
- 6) 松本嘉司, 西岡 隆 : トンネルの設計理論, pp. 159-172, 共立出版, 1992.
- 7) 木山英郎, 藤村 尚, 西村 強, 池添保雄 : 初期地盤の変形を考慮した円形ライニングの2次元弾性解 - 地山支保力の定量化へのアプローチ, 土木学会論文集, No. 589 / III-42, pp. 91-98, 1998. 3.
- 8) 山崎糸治, 福島健一, 小林 隆, 片岡 進 : 世界初の超近接4線移行シールドの施工 京都市地下鉄東西線, トンネルと地下, 第27巻2号, pp. 107-116, 1996.
- 9) たとえば, 川口大仁, 太田 增, 塩谷智弘 : 大阪地下鉄7号線・泥水式シールド掘進に伴う近接構造物の計測管理, 基礎工, pp. 115-121, 1989. 12.
- 10) たとえば, 中山 隆, 中村信義, 中島 信 : 泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集, 第397号 / VI-9, pp. 133-141, 1988.
- 11) 橋本 正, 稲田孝宏, 西沢勝巳, 塩谷智弘, 中廣俊幸, 新田耕司 : 粘性土地盤における実測値に基づくシールド掘削時の応力解放率について, 第31回地盤工学研究発表会, pp. 2191-2192, 1996.

(1999.1.21 受付)

## A DESIGN METHOD FOR SHIELD TUNNEL INTRODUCING THE CONCEPT OF STRESS RELEASE RATIO

Hiroshi NAKAMURA, Itoji YAMAZAKI, Toshiyuki NAKAHIRO,  
Toshio SUGISHIMA and Yutaka OONISHI

Excavation of shield tunnel was deemed as a combination problem of the ground condition and tunnel linings. A two-dimensional linear elastic FEM was used to incorporate lining-members in structuring an analytical model. The analysis separated the redistribution process of the loading due to excavation into two phases, viz. prior to the loading and after the loading to the linings. The rate of stress release prior to the loading is defined in the analysis as the stress release ratio.

It was shown that soil properties and construction factors determine the stress release ratio. The analysis was applied to four tunnels that run closely together. Verification was carried out by comparing the numerical analysis with monitored results on site with regard to such factors as the acting earth pressure and section stresses of a preceding tunnel itself and the variation of those factors in the course of the excavation of the succeeding tunnels.