

地山支保力と施工過程を考慮した シールドトンネルの一設計法

A DESIGN METHOD FOR SHIELD TUNNEL CONSIDERING THE GROUND SUPPORT AND THE CONSTRUCTION PROCESS

杉嶋敏夫¹⁾ ・ 足立紀尚²⁾

Toshio SUGISHIMA and Toshihisa ADACHI

The theoretical analysis model expressed by elastic theory given in this paper has a good performance to simulate actual tunnel behaviors, earth pressure acting on a tunnel and section forces derived from the lining, especially in the tunnel built in relatively solid ground.

This analysis model is composed of ground and lining, in addition, the conception of a stress release ratio is introduced to it. The stress release ratio quantitatively indicates stress release before the lining works in a process of a shield construction and actively evaluates ground support. By this analysis, the clue is obtained to elucidation of earth pressure of shield tunnel and ground-lining interaction, which have not been clear.

Key Words : shield tunnel, theoretical analysis, earth pressure, lining, stress release ratio

1. はじめに

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、構造形式が定まれば設計土圧は得られるという考え方があり、構造系と荷重系を独立したものとして扱う仕方は開削トンネルにおいては受け入れやすい概念である。また、従来の国内のシールドトンネルの設計法ではこれと同様の取り扱いを行っている。しかし、トンネルの場合には Fenner-Pacher Curve¹⁾ に示される地山と支保工・覆工の支保力発揮特性のように、同一の地山であっても支保工・覆工の剛性やその建て込み時期を含む施工方法により地盤応力、すなわち覆工への作用土圧が変化する。したがって、トンネルの設計は支保工・覆工と地盤の連成問題として取り扱われるべきであり、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、その理想解と土圧や覆工断面力の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。

先の研究²⁾では、2次元FEMに覆工要素を組み込んだ解析モデルを構築した。この解析モデルを用い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類することにより、地盤と覆工に関する諸現象を再現できることを示した。得られた知見はつぎのように要約することができる。

- ① 施工過程における地盤挙動に関する経験的事実と理論的考察によれば、土圧現象を解明するうえで覆工が耐荷可能な状態に達する以前の地盤の応力解放過程を積極的に評価する必要性が認められる。なお、耐荷可能な状態とは、裏込め注入までの一連の施工が完了した状態をいう。
- ② 応力解放率を、覆工が耐荷可能な状態に達す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た。これを導入し掘削前後の応力収支を合わせた2次元線形弾性解析により、比較的硬質な粘

1) 正会員 工博 中央復建コンサルタンツ(株) 東京本社

2) フェロー 工博 京都大学 大学院 工学研究科 土木工学専攻

性土地盤におけるトンネルでは、地盤変位、作用土圧および覆工断面力の規模を統一的に再現できる。

③この応力解放率の値は地山の剛性とシールド施工制御状況に依存しており、施工制御が地山の反応に応じて実施されることを考慮すると、剛性等地山特性に基づいて分類できる可能性がある。

本論文では、上記の知見に基づき、提案された解析モデルの構造を別の角度から検証するとともに、現象の再現上重要な解析パラメータとなると考えられる応力解放率を実践的な設計用値として利用するために複数の計測データに基づいて定量的に評価することを試みる。なお、これまで応力解放率という用語は、概念的には共通であっても詳細には多様な用いられ方をされているので、ここでは上記定義の内容を初期地山分担率と称して区別することとする。

2. 地山と覆工の応力分担

(1) シールド施工過程と地山特性曲線

いま評価しようとする断面にシールドが接近し通過するとき、密閉式シールドでは泥水圧・泥土圧あるいはシールドマシン鋼殻による支保効果が発揮される。この支保効果が発揮される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注入がなされ覆工が耐荷可能な状態に至る。この間に、掘削に起因する応力解放はすでに発生しており、それは施工現場で観察される地盤変位²⁾等から明らかである。応力収支の観点からは、この地盤変位に相応の解放応力は地盤中に再配分され地盤が負担していると考えられる。図-1は、このことを線形弾性の地盤を仮定した地山特性曲線を用いて概念的に表している。なお、ここでは縦軸に覆工反力、横軸に内空変位をとっている。

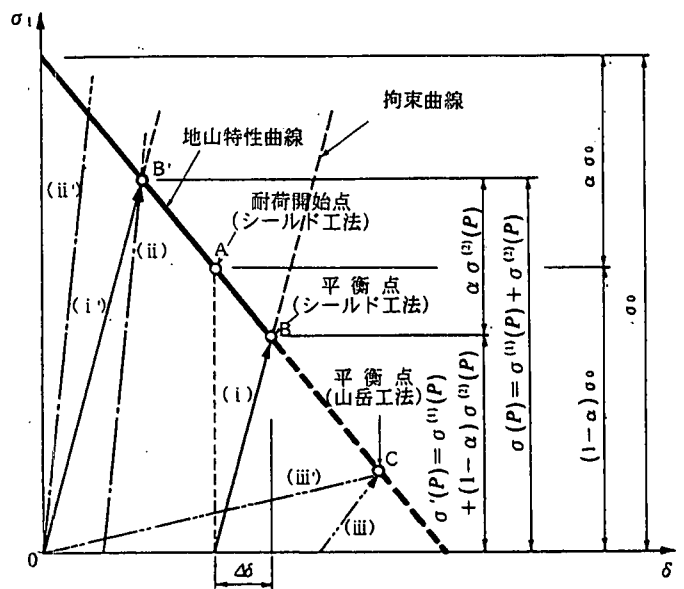
切羽圧力や裏込め注入などの施工の制御の結果、地山の応力解放が地山特性曲線上でA点に相当する状態のとき覆工が耐荷可能な状態となり、覆工が拘束曲線(i)に従った耐荷挙動をしたとするとB点で地山と覆工が平衡状態に達する。

いま、同様の荷重-変位関係を有する覆工を地山の応力解放が始まる初期段階に建て込むと、覆工の耐荷挙動は(i)と平行な拘束曲線(i')に従い、

地山と覆工はB'点で平衡状態に達する。

このとき、覆工はB点の場合より相当大きな解放応力を負担し、内空変位を小さく抑えることになる。しかし実際には覆工が耐荷状態に至る以前に応力の一部は既に解放されているので、この考え方は現実的な再現方法ではない。また、この方法によれば、応力解放が進んで地山が先に負担している応力まで分担できる覆工を設計することになり、過大な設計となる。逆に、厳しい地盤変位の制限があったり、塑性化を早期に阻止するなどの理由からB'点で平衡状態に保つ必要がある場合には、改善した相応の施工制御を実施して覆工が耐荷可能となるタイミングを早め、拘束曲線(ii)のような耐荷挙動を発揮するより剛性の高い覆工を建て込む必要がある。

同一の地山特性曲線で表される地山に対



σ_i : 覆工反力, σ_0 : 初期地圧, P : 全掘削相当外力

図-1 地山特性曲線と初期地山分担率

して、たとえば山岳トンネルの支保のようにシールドトンネルの覆工よりもかなり柔な覆工を建て込む場合を考える。山岳トンネルの施工方法、支保建て込みのタイミングの必然として支保が拘束曲線 (iii) のような耐荷挙動を発揮し C 点で平衡状態に至ることを想定するとき、この挙動を再現するためには支保は拘束曲線 (iii) の荷重-変位関係を実現する諸元を備えていなければならない。C 点を目指して支保部材を設計するとき、地山と支保の連成解析モデルにおいて応力解放が始まる時点からの全掘削応力を対象とした場合には (iii) の荷重-変位関係を有するより剛性の低い部材を計算することになり、仮に支保が耐荷可能となるタイミングの想定が正しければ、きわめて危険な設計を行うことになる。

順調で妥当な施工制御のもとで覆工が耐荷可能な状態になる以前の応力解放が A 点となるのであれば、平衡状態の B 点に対応して所要の耐力を有する覆工を設計することが合理的である。このときの設計上の照査内容としては、たとえば $\Delta \delta$ で与えられる内空変位とトンネルの使用限界との関係、B 点に対応する地山の応力状態が地山強度との関係において要請される安全性を満たしているかなどのことである。簡単のため、図では地山を弾性体と仮定し線形の変形特性を示しているが、実際の地山の応力-ひずみ関係が評価できれば、A 点および B 点を特定すること、すなわち初期地山分担率を評価し覆工の剛性ならびに耐力を設計することは覆工部材を決定することと併せて構造部材たる地山の安定性を定量的に評価することである。

(2) 初期地山分担率

初期地山分担率 α を、既述の定義に従い式 (1) のように表現する。

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

ここに、 P は全掘削相当外力、 P_L は覆工が建て込まれ耐荷可能状態で解放される掘削相当外力である。

いま、応力解放が始まる時から覆工が存在し耐荷可能な状態にあるとして、トンネル掘削時の地盤応力 σ を掘削相当外力 P の関数として式 (2) のように表す。ここに、 $\sigma^{(1)}$ 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、 $\sigma^{(2)}$ は覆工から地山に向かって作用する応力、すなわち覆工の施工により改善される地山の応力である。

$$\sigma(P) = \sigma^{(1)}(P) + \sigma^{(2)}(P) \quad (2)$$

次に、覆工が耐荷以前の応力解放過程の存在を考慮した場合の地山応力を σ' として、初期地山分担率 α の概念を導入して式 (2) を書き換えると、いま地山を弾性体と仮定する場合に、解放される掘削相当外力と地山応力は線形関係にあるので、式 (3) のようである。

$$\begin{aligned} \sigma'(P) &= \sigma^{(1)}(\alpha P) + \sigma^{(1)}((1-\alpha)P) + \sigma^{(2)}((1-\alpha)P) \\ &= \alpha \sigma^{(1)}(P) + (1-\alpha) \{ \sigma^{(1)}(P) + \sigma^{(2)}(P) \} \\ &= \sigma^{(1)}(P) + (1-\alpha) \sigma^{(2)}(P) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで用いた掘削相当外力は、総量において図-1における初期地圧に相当し、地山と覆工の掘削応力の分担割合を規定する。

3. 弾性理論解による地山と覆工の連成挙動の評価

地山と覆工を連成させた 2 次元弾性理論解を用い、地山と覆工の剛性の相互関係が、周辺地盤応力、覆工土圧（覆工反力）および覆工断面力の発生状況に及ぼす影響の基本的な特性を定量的に評価し把握する。

有限要素法は地層構成や地形などの形状要因あるいは材料特性を要素単位でモデル化でき、実際的な問題を解析するうえで有効である。ただし、解析結果を認識するうえではきわめて実験的で経験的なアプローチを必要とする側面を持つ。一方、理論解析は相当理想化された問題にしか適用できないが、式の各項の計算結果への影響を把握することが容易であり、物理的な意義の直接的な認識が可能である。

ここで用いようとしているトンネルの弾性理論解は、Airy の応力関数を用いて導かれ、従来から円形トンネルにおける基礎的な応力分布を把握するために一般的に用いられてきたものと同一のものである。

掘削に伴う地山および覆工の応力を評価するにあたり、トンネル周辺地山を無限弾性体と仮定し、図-2に示すように、トンネルは円形とし覆工は厚さが一様な円管とする。地山の境界条件としては、トンネルから十分に離れた位置で鉛直方向にはトンネル天端の土被り圧に等しい $-\gamma H$ 、水平方向には $-k\gamma H$ の側圧が一樣に作用しているとする。本研究では、地山と覆工の間における二つの境界条件、すなわち、せん断応力が伝達されない場合と、完全に伝達され変位も互いに拘束される場合について式を誘導し比較検討した。その結果、土圧や断面力などの現象面から、どちらが妥当であるかを特定できていないが、裏込注入の存在とその施工過程などを考慮して後者の条件が適切であると判断した。本論では両者の比較論は省略し、地山と覆工間でせん断応力が伝達されるとする境界条件の場合を取り上げ推論する。

以下に、地山の応力解と覆工の断面力解のみを示す。地山の応力解は式 (2) および (3) の表記と対応して地山を素掘り状態に保ったときの応力と、覆工を施すことにより覆工から地山に向かって作用する応力に分けて示す。なお、 $s = -\gamma H$ であり、 ν_0 、 E_0 はそれぞれ平面応力状態でのポアソン比、変形係数で、添字 G 、 L はそれぞれ地山、覆工を示す。

素掘り状態に保ったときに発生する応力 $\sigma^{(0)}$ は、

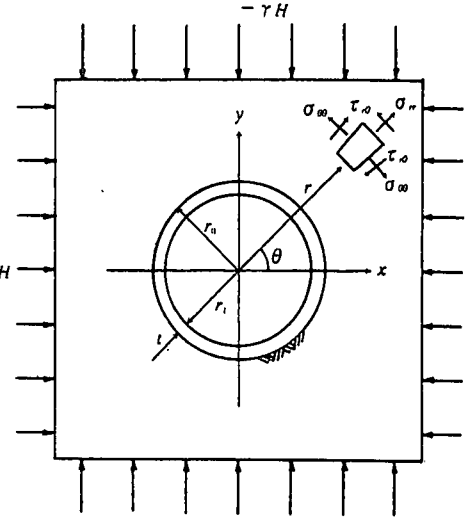
$$\begin{aligned}\sigma_r^{(0)}(r, \theta) &= -\frac{1}{2}s(1+k) \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}s(1-k) \left(1 - 4\frac{r_0^2}{r^2} + 3\frac{r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta^{(0)}(r, \theta) &= -\frac{1}{2}s(1+k) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}s(1-k) \left(1 + 3\frac{r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta}^{(0)}(r, \theta) &= -\frac{1}{2}s(1-k) \left(1 + 2\frac{r_0^2}{r^2} - 3\frac{r_0^4}{r^4}\right) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (4)$$

覆工から地山に向かって作用し覆工の施工によって改善される地山の応力 $\sigma^{(1)}$ は、

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(2)}(r, \theta) &= \frac{1}{2}s(1+k)(1+\nu_0^G) \frac{R^2-1}{Q_0} \frac{r_0^2}{r^2} \\ &\quad - \frac{1}{2}s(1-k)(\nu_0^G-3) \frac{R^2-1}{Q_1} \frac{r_0^2}{r^2} \left[\left(3\frac{r_0^2}{r^2} - 4\right) (R^2-1)^3 (\nu_0^G+1-e\nu_0^L-e) - 4 \left\{ 3(R^2+1) \frac{r_0^2}{r^2} - 4 \right\} e \right] \cos 2\theta \\ \sigma_\theta^{(2)}(r, \theta) &= -\frac{1}{2}s(1+k)(1+\nu_0^G) \frac{R^2-1}{Q_0} \\ &\quad + \frac{3}{2}s(1-k)(\nu_0^G-3) \frac{(R^2-1) \{ (R^2-1)^3 (\nu_0^G+1-e\nu_0^L-e) - 4(R^2+1)e \}}{Q_1} \frac{r_0^4}{r^4} \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta}^{(2)}(r, \theta) &= -\frac{1}{2}s(1-k)(\nu_0^G-3) \frac{R^2-1}{Q_1} \frac{r_0^2}{r^2} \left[\left(3\frac{r_0^2}{r^2} - 2\right) (R^2-1)^3 (\nu_0^G+1-e\nu_0^L-e) - 4 \left\{ 3(R^2+1) \frac{r_0^2}{r^2} - 2 \right\} e \right] \sin 2\theta\end{aligned}\quad (5)$$

ただし、 $R = r_1/r_0$ としている。

単位幅当たりの軸力および曲げモーメントはそれぞれ以下のように与えられる。



γH : トンネル天端の土被り圧, k : 側圧係数

図-2 解析モデル

$$N(\theta) = \left[b_0' \frac{1}{r} + 2c_0' r + \left(2a_2' r + 4b_2' r^2 - 2c_2' \frac{1}{r^3} \right) \cos 2\theta \right]_{r_1}^{r_0}$$

$$M(\theta) = \left[-b_0' \ln r + c_0' r^2 + \left(a_2' r^2 + 3b_2' r^4 - 3c_2' \frac{1}{r^2} \right) \cos 2\theta - \frac{N(\theta)}{2(r_0 - r_1)} r^2 \right]_{r_1}^{r_0} \quad (6)$$

ここに,

$$b_0' = \frac{1}{2} s(1+k)(1+\nu_0^e) r_0^2 \frac{R^2}{Q_0}, \quad c_0' = -\frac{3}{4} s(1+k)(1+\nu_0^e) \frac{1}{Q_0}$$

$$a_2' = \frac{1}{4} s(1-k)(\nu_0^e - 3) \frac{(4R^6 - 3R^4 - 1)(\nu_0^e + 1 - e\nu_0^L - e) - 4e}{Q_2}$$

$$b_2' = -\frac{1}{2} s(1-k)(\nu_0^e - 3) \frac{1}{r_0^2} \frac{R^2(R^2 - 1)(\nu_0^e + 1 - e\nu_0^L - e)}{Q_2}$$

$$c_2' = \frac{1}{4} s(1-k)(\nu_0^e - 3) r_0^4 \frac{R^4\{(R^4 - 1)(\nu_0^e + 1 - e\nu_0^L - e) - 4e\}}{Q_2}$$

ただし,

$$Q_0 = R^2\{e(1+\nu_0^L) - (1+\nu_0^e)\} + e(1-\nu_0^L) + 1 + \nu_0^e$$

$$Q_2 = (R^2 - 1)K_1 K_2 - 4e(R^2 - 1)K_1 + 4eR^2(R^6 - 1)K_2 - 16e^2 R^2$$

$$e = E_0^e / E_0^L, \quad K_1 = \nu_0^e - 3 - e\nu_0^L - e, \quad K_2 = \nu_0^e + 1 - e\nu_0^L - e$$

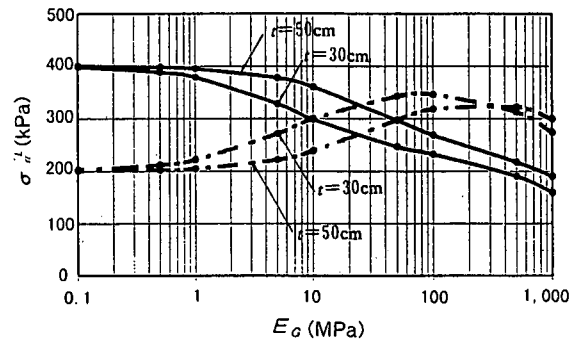
以上は平面応力状態の値であり, 変形係数ならびにポアソン比について以下の変換を行うことにより平面ひずみ状態の値を得る.

$$E_0 = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad \nu_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$$

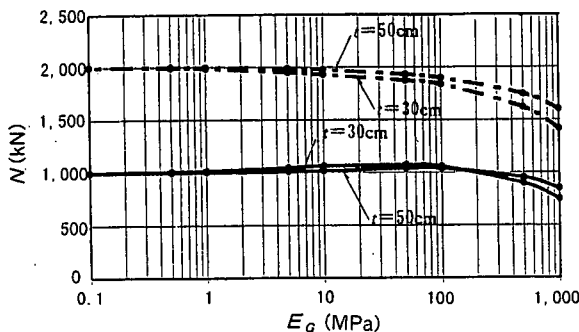
(1) 土圧, 覆工断面力の発生特性

図-3(a)は, 地山の変形係数を変化させたときの覆工反力の発生状況を示す. 条件はトンネル外径を $D = 10\text{m}$, 地山の初期応力を鉛直応力で $\sigma_v = 400\text{kPa}$ とし, 側圧係数は $k = 0.5$ にとっている. 地山の変形係数が大きくなるにしたがって覆工反力はトンネル天端で減少し, 側部で増加する.

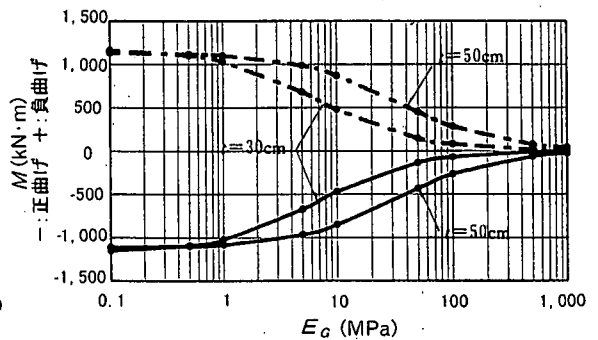
図-3(b), 図-3(c)は, 同じ条件下のトンネルについて, 地山の変形係数と覆工断面力の関係を示している. 軸力はおおよそ $E_0 = 10\text{MPa}$ 以下では一定であり, 覆工厚による違いも微小である. $E_0 = 100\text{MPa}$ を超えて相



(a) 地山の変形係数と覆工反力の関係



(b) 地山の変形係数と覆工の軸力



(c) 地山の変形係数と覆工の曲げモーメント

— : トンネル天端 ($\theta = 90^\circ$) - - - : トンネル側部 ($\theta = 0^\circ$)
 $s = \gamma H = 400\text{kPa}$, $\nu_0 = 1/3$, $k = 0.5$, $E_L = 3.0 \times 10^4\text{MPa}$, $\nu_L = 0.17$

図-3 土圧, 覆工断面力の発生特性

当に固い地盤になると変形係数の値の違いに応じて変化が生じる。曲げモーメントは地山の変形係数が $E_0 = 1\text{MPa}$ 以下ときわめて小さいとき正、負ともに一定の大きな値に収束し、逆に変形係数が大きいと 0 に近づく。また、シールドトンネルが対象とする地盤に一般的な変形係数 $E_0 = 1 \sim 100\text{MPa}$ の範囲では地山の剛性に依存して大きく変化し、変形係数が大きいほど小さくなる。同様の変形係数の範囲で軸力はあまり変化しないので、覆工の所要の断面性能は曲げモーメントによって決定されることになる。換言すれば、設計上、地山の剛性を正しく見積もることが非常に重要となる。

以上のように、現場で土圧計を用いて計測される覆工土圧が、設計上で仮定する全土被り圧に比してかなり小さいなどの事実について、このような地山と覆工を連成させた弾性解によって定量的に再現できる可能性があることが確認された。また、変形係数で評価した地山剛性と部材厚で評価した覆工剛性のいずれもが現象の支配要因であり、特に従来のシールドトンネルが対象とする地山と覆工の特性の範囲においてその相違が覆工反力や覆工断面力に敏感に現れることが理解される。

(2) 地山特性と覆工剛性関係の定量的評価

地山と覆工の相互作用の結果として、覆工の諸元を一定として地山の変形係数を变化させた場合、地山の変形係数を一定として覆工の部材厚を变化させた場合のいずれにおいても、覆工反力、覆工断面力は大きく異なるものになることが把握された。このことを一般的かつ定量的に表現するために、図-4では、地山の変形係数と覆工の弾性係数の比 $e = E_0/E_L$ を地山の剛性を表すパラメータとして、シールドトンネルにおける地山特性曲線相当の関係を与えている。なお、縦軸は覆工反力を初期応力で除して無次元化し、横軸は半径方向変位をトンネル半径で除して地盤の半径方向ひずみとして示している。

覆工として平板型コンクリートセグメントを想定し、弾性係数を $E_L = 3.0 \times 10^4 \text{MPa}$ にとれば、地盤の変形係数は、たとえば $e = 10^{-3}$ は $E_0 = 30\text{MPa}$ に対応し、図中に示す e の範囲は一般に都市トンネルが対象とする地盤として現実的なものであり、軟弱な地盤から相当に硬質な地盤までを網羅している。

特性曲線は覆工厚 t の掘削半径 r_0 に対する比 $T = t/r_0$ を与えることにより得られる掘削面の変位と覆工反力で与えられる点を連ねた曲線であり、その点より下が覆工が負担する応力に相当し、その点と $\sigma_{rr}/(-\gamma H) = 1$ の間が地山が負担する応力に相当することを表す。このように、地山と覆工のトンネル掘削による解放応力の分担割合としての覆工反力と内空変位の関係が具体的な覆工剛性との関係において与えられた。特性曲線上に示す(・)は変位-応力関係を具体的に求めた点を示し、変位成分 $u_r/r_0/(-\gamma H)$ の大きい方から $T = t/r_0 = 0, 0.006, 0.01, 0.02, 0.06, 0.10, 0.14, 0.20$ に対する値である。

地山特性曲線は、ここでは変形係数とポアソン比で表される地山の特性が定まれば唯一得られる。ひとつの特性曲線についてある覆工反力-変位の関係を与える覆工の剛性もまた唯一存在する。図では覆工の拘束曲線を、 $T = 0.02$ (たとえば、 $r_0 = 5\text{m}$ のトンネルに対し覆工厚 $t = 10\text{cm}$) と $T = 0.06$ (同、 $t = 30\text{cm}$) の場合について明示しているが、これから明らかなように、同一の剛性を有する覆工であっても地山特性が異なればその拘束曲線の勾配は異なる。これは覆工単体の荷重-変位関係がひとつの覆工について唯一存在することに対し、

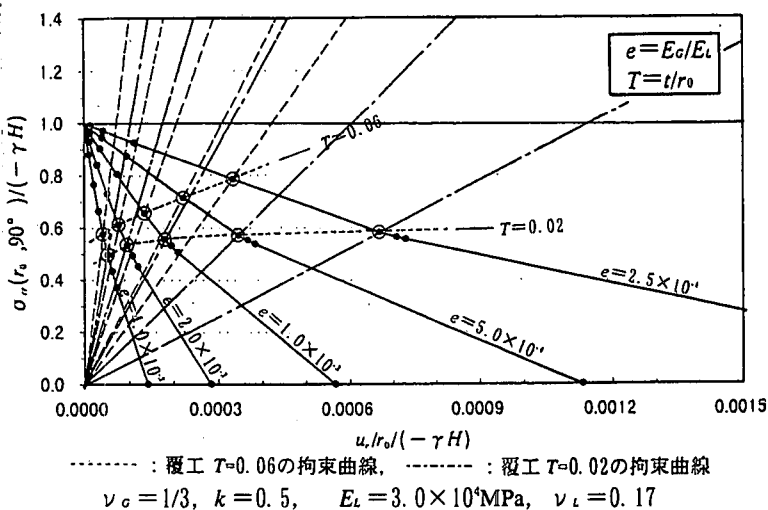


図-4 トンネル天端位置の覆工反力-変位関係

地山と連成させた場合には地山の支保力がその剛性に依じて発揮されていることにほかならない。

これらの地山特性曲線が表現することがらと国内の従来のシールドトンネルの設計法の間には矛盾が存在する。従来の設計法では覆工構造モデルに外荷重としての土圧を載荷する方法をとるが、この土圧は地盤条件から判断し全土被り圧やゆるみ土圧として設定される。このとき覆工にはその剛性とは無関係に同一の荷重が作用することになる。一方、地山特性曲線と覆工の拘束曲線の関係に従うとき、土圧（覆工反力）を決定すれば、その挙動を実現する覆工剛性は唯一存在し、覆工剛性を変えれば土圧が変化する。ここで求めた地山特性と覆工剛性の関係が実際のシールドトンネルの力学特性の基本的な部分を表現するものであるとき、従来の設計法において不明な土圧現象を解明する重要な手掛かりとなる。

4. 初期地山分担率の概念を導入した地盤-覆工連成解析

(1) 解析モデル

前章で示した2次元弾性理論解は、地山と覆工の剛性の相互関係と地山と覆工の境界面での応力伝達条件への依存性を考慮して地山・覆工の応力および覆工断面力を厳密に与えるものである。しかし、現実的なシールドトンネルの力学挙動を再現するためには地山と覆工の特性を考慮するだけでは不十分であり、先に考察したとおり、施工要因による影響を考慮する必要がある。

ここでは、このシールドトンネルに固有の応力解放過程を再現する解析パラメータとして初期地山分担率の概念を導入して、前章で示した弾性理論解を修正する。

地山の応力は、式(4)で示される素掘り状態を保持したときの応力 $\sigma^{(1)}$ と、式(5)で示される覆工から地山に向かって作用し覆工の施工によって改善される応力 $\sigma^{(2)}$ に対して、式(3)の形で表される。

覆工の断面力についても同様であり式(6)で示される軸力と曲げモーメントを、それぞれ $N^{(2)}(\theta)$ および $M^{(2)}(\theta)$ と書き換えると、次のように表すことができる。

$$N(\theta) = (1 - \alpha)N^{(2)}(\theta) \quad , \quad M(\theta) = (1 - \alpha)M^{(2)}(\theta) \quad (7)$$

(2) 初期地山分担率の同定

初期地山分担率の値は、理想条件下の、たとえば本論で示した2次元弾性理論解により求められる地山応力、覆工反力あるいは覆工の断面力と現場で計測観察されるそれら諸値との比較により評価されるべきである。

覆工土圧や部材応力の現場計測は近年しばしば実施されるようになっているが、必ずしもその件数は多く

なく、しかも土圧と部材応力の両方を計測している事例はきわめて少ない。ここでは、覆工土圧の計測データが報告されている7文献15事例のうち、覆工諸元について知り得た5文献^{3)~7)}10事例について、地山剛性と初期地山分担率の関係を調べた。地山剛性の指標としては共通して得られている N 値を用いることとした。なお、事例はすべて粘性土地盤におけるものであり、トンネル周辺地盤の N 値は3~20で一般に中位から堅いと分類される地山である。方法としては、まず弾性理論解によって初期地山分担率 $\alpha = 0$ 、すなわち掘削に伴う応力解放が始まる時点において覆工が耐荷可能な状態にあると仮定したときの覆工反力を求める。

このとき覆工反力は、図-1で(i)の拘束曲線と対

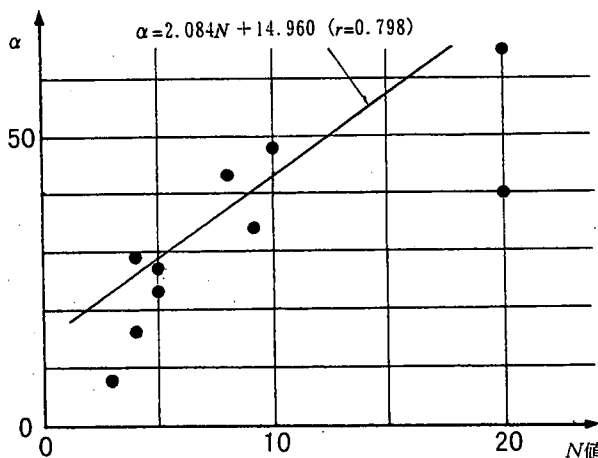


図-5 N 値と初期地山分担率 α の相関（粘性土地盤）

応し、地山条件を決定すれば唯一得られる。この覆工反力 σ_i を覆工天端付近に設置された土圧計の計測土圧と比較することにより初期地山分担率 α は得られる。断面力による場合も同様の考え方によるが、フィッティングは、覆工への導入圧力と直接的に対応する軸力を用いた。

なお、地盤の変形係数は先のFEMによる逆解析により地盤変形を合わせたときに得られた式(8)^{1),9)}により推定した。これは粘性土に対するものである。

$$E = 20N \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \approx 2N \text{ (MPa)} \quad (8)$$

算定した初期地山分担率とトンネル周辺地盤の N 値との関係を図-5に示す。標本数は少ないがあえて直線回帰を考慮すると、比較的強い相関があり、一般にシールドトンネルの設計を行ううえで有効な情報を提供すると考えられる。すなわち、 N 値が3~4以上の「中位」から「硬い」粘性土地盤では、地山と覆工の連成挙動は弾性理論解に従い、地山剛性が大きくなればなるほど初期地山分担率の値は大きくなるという特性を定量的に与えた。

5. まとめ

合理的なシールドトンネルの設計手法を構築するために必要な要件として、解析モデルが地山と覆工の構造的な相互作用関係を正しく表すこと、および施工過程に基づく応力の解放と地山と覆工の応力分担の状況を考慮することの二点を指摘した。

本論で解析の対象とした周辺地盤が「中位」から「堅い」と分類される粘性土地盤のトンネルでは、地山と覆工の相互作用を表す力学モデルとして地山と覆工を連成させた弾性理論解を用い、初期地山分担率と称して提案した覆工が耐荷可能となる以前に解放され地山が負担する応力の割合を適切に設定することにより、実際の土圧現象や覆工の発生断面力をよく再現できることが分かった。この初期地山分担率は地山剛性との間に強い相関をもって分類され、地山剛性が高くなるほどこの値は大きくなる。これはシールドの施工制御が基本的に地山特性に応じて実施されることと密接に関係していると考えられる。

大深度地下等、シールド工法の適用範囲のさらなる拡大に際し、比較的硬質な地盤を対象とする機会が増加し、覆工の耐荷機構や設計土圧をどのように評価するかが課題となる。本研究の成果はこれにひとつの回答を与えるものと考えられる。また、地山自身の支保力を合理的に評価することから、トンネル工法の選定に関し、NATMとの境界領域を工法の特性を考慮することにより矛盾なく説明することが可能となる。

参考文献

- 1) Rabcewicz, L. v. : Stability of tunnels under rock load (Part I), *Water Power*, pp. 225-229, 1969.
- 2) 中村 浩, 山崎糸治, 中廣俊幸, 杉嶋敏夫, 大西 豊: 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, 土木学会論文集, No. 638/Ⅲ-49, pp. 241-250, 1999. 12
- 3) 橋本 正, 豊田孝宏, 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.
- 4) 西野健三, 滝 英治, 齊藤正幸, 加藤教吉: シールドトンネルに作用する土圧の計測について, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, pp. 1004-1005, 1988. 10
- 5) 山口 巖, 山崎糸治, 福島健一, 小林 隆, 杉嶋敏夫: 併設シールドの影響予測解析と実際の挙動, トンネル工学研究 論文・報告集, 第5巻, pp. 39-46, 1995. 11
- 6) 有泉 毅, 岡留孝一, 長屋淳一: シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について, トンネル工学研究 論文・報告集, 第8巻, pp. 367-372, 1998. 11
- 7) 後藤 茂, 西村晋一, 本多章浩: 掘進直後のシールドセグメントに作用する土圧・水圧の計測, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, pp. 1010-1011, 1988. 10
- 8) 山口 巖, 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