

軟弱地盤におけるRCセグメント覆工の設計用荷重 DESIGN LOAD FOR RC SEGMENT LINING IN SOFT GROUND

矢萩秀一¹⁾・藤木育雄¹⁾・村松 泰²⁾・鈴木久尚³⁾

Syuichi YAHAGI, Ikuo FUJIKI, Yasushi MURAMATSU, and Hisanao SUZUKI

The conventional design of shield tunnel lining deals with load setting and a structural model separately for the sake of convenience because of their extremely complicated mutual interaction. Therefore, this design does not cover construction load conditions addressed by recent advances in construction engineering.

This paper rearranges and proposes load conditions appropriate to the calculation results from the load-structural system model (finite element model), which incorporates the construction process, through comparison of such results with the in-situ measurements on the Kinshicho - Oshiage section.

Key Words: design load, RC segment, finite element method, in-situ measurements

1. はじめに

シールドトンネルの覆工の設計には、従来から慣用計算法、修正慣用計算法、およびはりーばねモデルが広く用いられてきた。そして、これらの計算に使用される土圧は、多くの場合、全土被り土圧かテルツァーギの方法に代表される緩み土圧であった。このような計算モデルと土圧の考え方は、シールドトンネルの施工過程を無視して、完成した覆工に土圧が作用することを想定したものである。

しかし、最近のシールド工法では、テールボイドへ同時あるいは即時に裏込め注入を行う結果、地山の乱れは非常に小さく、そのためにシールド施工後も地山は弾性体に近い状態を保つと考えることができる。地山が弾性体に近いものであるとすると、シールド掘進に伴う地山応力の解放に対して地山も抵抗し、結果として覆工に作用する荷重は、従来から使用されてきた設定荷重とは異なるものと考えられる。このことは、覆工に発生する応力・変形が覆工と地盤との相互作用の結果であるとすれば、覆工の挙動は周辺地盤の変形特性との関係から定義され、覆工の設計に用いる荷重もトンネル断面形状や大きさ、曲げ剛性、および地盤の強度や変形特性等がパラメータとして考慮すべであると考えられる。

そこで本文では、現場計測結果をもとに施工過程を考慮した有限要素モデルによって、まずモデル計算を行い、さらに、モデルケースの計算に用いたパラメータを変化させて、パラメータ毎の計算結果に及ぼす感度分析を行う。そして、この結果を基に慣用計算モデルに使用する設計荷重の設定方法を提案し、この設計用荷重の適用性を確認するための営団地下鉄 11 号線本所シールド工事における現場実測値との比較を示すものである。

1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部

2) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 13号線渋谷工事事務所

3) フェロー パシフィックコンサルタンツ(株)トンネル部

2. 有限要素法モデルによる計算

(1) 計算モデル¹⁾

本解析に用いる有限要素モデルは、地山を弾性の二次元(平面ひずみ)の有限要素、覆工を弾性のはり要素でモデル化して、施工時荷重(裏込め注入圧)を考慮を考慮したシールド工の施工過程に沿って計算を行い、覆工と地山の挙動を計算により明らかにしようとするもので、次の特徴がある。

- ①裏込め材は地山要素と覆工のはり要素の間に挿入する棒要素で表現する。ただし、裏込め材の材令に伴う硬化を考慮し裏込め注入時および完成時でその剛性を変化させる。
 - ②計算は施工過程を考慮するものとし、縦断方向の影響は解放率 α で代表させることとした($\alpha=16\%$ とする)。
- なお、この有限要素モデルは、覆工の応力および変形を予測できる解析モデルとして、その有用性が確認されている。

(2) 計算条件

セグメントの設計用土圧を決定するパラメータとして以下のものを考える。

- ①トンネル断面構造に関するもの ……覆工の剛性、トンネル断面の大きさ
- ②地盤に関するもの ……地盤の変形特性
- ③土被り厚
- ④施工に関するもの ……裏込め注入圧力

上記のパラメータを全部同時に変動させると、計算ケースが非常に多くなるので、最初に基本ケースを設定して、そのパラメータを表-1に示すように1個ずつ変えることとした。

以下に、パラメータの設定に関する基本的な考え方を示す。

a) 基本(ケースN)

各パラメータの変動を考慮して、基本ケース[N]は標準的なモデルとした。

すなわち、土被りが2D(D:掘削外径)の地盤に対して変形係数として $E_s=10,000$ kN/m²の粘性土地盤を標準として、鉄筋コンクリート製(RC)平板セグメントを用いて掘進することを想定する。

b) 覆工剛性(ケース[L])

覆工は表-2に示す3種類を想定した。基本ケース[N]のRCセグメントの厚さは、複線断面で40cmとした。また、ヤング係数 E_s は39kN/mm²とした。

表-2 計算で想定した覆工の種類と曲げ剛性

ケース	覆工の種類	曲げ剛性 EI (kN/m ²)
L-1	合成セグメント	500,000
N	RCセグメント	200,000
L-2	ダクトイルセグメント	50,000

c) 地盤の変形係数(ケース[E])

地盤の変形係数の影響をみるために、粘性土の基本ケース[N]に対しても中位の比較的良好な地盤を想定し、これに対してケース[E-1]では硬質粘性土地盤を、ケース[E-2]では軟弱粘性土地盤として設定する。なお、土の単位体積重量は粘性土として17kN/m³とした。

表-3 裏込め注入圧(kN/m²)

ケース	裏込め注入圧 p_d
B-1	100
B-2	150
N	250
B-2	350

d) 施工時荷重(裏込め注入圧)

覆工と地盤との相互作用において施工時荷重として影響が大きいと考えられる裏込め注入について、トンネル天端で $p_d=250$ kN/m²の裏込め注入圧を基本ケース[N]として、表-3に示す4ケースを設定する。

表-1 検討ケース

計算ケース		覆工剛性の影響 覆工の剛性 EI (kN/m ²)	地盤条件(静止土圧係数、変形係数)			土被りの厚さの影響 土被り厚 H (m)	裏込め注入圧力の影響 裏込め注入圧 p_d (kg/cm ²)
			静止土圧係数 K_0	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν		
1	標準 N	200,000	0.8	10,000	0.48	20	2.5
2	L-1	500,000					
3	L-2	50,000					
4	E-1			30,000			
5	E-2			5,000			
6	H-1					10	
7	H-2					40	
8	B-1					20	1.0
9	B-2						1.5
10	B-3						3.5

(3) 計算結果の分析

各パラメータの覆工断面力に与える影響として、覆工剛性および土被り厚が大きくなるに従い、発生曲げモーメントは大きくなる傾向にある。特に土被りの影響が大きく、断面力算出上の支配的要素となると考えられる。トンネル周辺地盤の変位は、変形係数に依存することから変形係数が小さい場合、覆工に発生する曲げモーメントは大きくなるが、軸力については曲げモーメントの変動と比較してそれほど顕著ではない。裏込め注入圧については、注入圧を増加させても曲げモーメントはほぼ一定となり裏込め注入圧の影響は受けないが、軸力は裏込め注入圧の影響を受けて若干増加する傾向となる。

以上より、以上の計算より、覆工の設計荷重に大きな影響を与える要因としては、覆工の剛性、地盤の変形係数、土被り厚を考えれば、合理的な荷重の計算式が得られることがわかった。

3. 有限要素法モデルの計算結果に近似する応力を与える荷重

(1) 荷重作用状態の設定

ここでは、FEM解析結果から得られたセグメントリングに発生する断面力を基に、慣用計算法に用いる主荷重のうち鉛直および水平土圧、上載荷重の影響および地盤反力等の設定方法を提案する。荷重の作用状態は図-1に示す荷重を想定する。

地盤反力 w_4 の形状は、従来の慣用計算法とは異なるFEM解析結果との整合性を考慮したものである。また、自重はFEM計算結果から無視できると考えた。

したがって、ここでは図-1に示す w_1 , w_2 , w_3 , w_4 の荷重を設定するものとする。

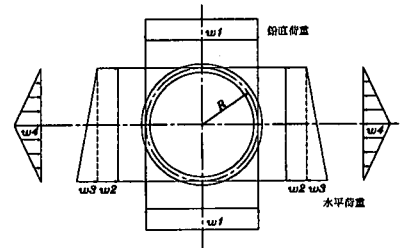


図-1 荷重状態の設定

(2) FEM解析から得られた断面力に一致する各荷重の計算

FEM解析から得られたセグメントリングに発生する断面力のうち、曲げモーメント (M_T , M_S , M_B) および軸力 (N_S) を基に、これらの計算結果に一致する各荷重を算定する。

慣用計算法で用いられる断面力の計算式を基に、これからセグメントリングの各点の断面力は(1)式から得られる。この4つの断面力から未知量を w_1 , w_2 , w_3 , w_4 とする4元連立方式を解いて求める。

$$\begin{aligned} N_S &= w_1 R \\ M_T &= (0.25w_1 - 0.25w_2 - 0.1042w_3 - 0.1552w_4)R^2 \\ M_S &= (-0.25w_1 + 0.25w_2 + 0.125w_3 + 0.1781w_4)R^2 \\ M_B &= (0.25w_1 - 0.25w_2 - 0.1458w_3 - 0.1552w_4)R^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 N_S はセグメントリングのSL (スプリングライン) 部の軸力、 M_T , M_S , M_B は、それぞれセグメントリングの上端、SL部および下端の曲げモーメントである。

これらをマトリクス表示をすると、(2)式となる。

$$\begin{Bmatrix} N_S/R \\ M_T/R^2 \\ M_S/R^2 \\ M_B/R^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & -0.25 & -0.1042 & -0.1552 \\ -0.25 & 0.25 & 0.125 & 0.1781 \\ 0.25 & -0.25 & -0.1458 & -0.1552 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

これを簡単に $\{S\} = [A]\{W\}$ とする。ここに、 $\{S\}$ は断面力に関するベクトル、 $[A]$ は係数マトリクス、 $\{W\}$ は荷重ベクトルである。未知量の荷重ベクトル $\{W\}$ は、 $\{W\} = [A]^{-1}\{S\}$ として求めることができる。

表-4に荷重の計算結果の例として標準ケース[N]の場合を示す。これによると w_3 の影響は小さく無視で

きることがわかる。また、水平荷重 w_2 の鉛直荷重 w_1 の比は概ね 0.8 程度である。地盤反力荷重 w_4 の水平荷重に対する影響はそれほど大きくはないことなどが計算結果からわかる。その他のケースについても同様なことがいえる。

表-4 荷重の計算結果 (kN/m²)

ケース N	N _s	1,876.3	w_1	397.09
	M _T	154.9	w_2	332.66
	M _S	-124.8	w_3	-1.63
	M _B	156.3	w_4	60.19

N_s, M_T, M_S, M_B は、覆工に発生する断面力

(3) 完成直後の設計荷重の設定

前項の計算結果から水平三角形荷重 w_3 の影響が小さいため、これを無視し新たに図-2 に示す荷重作用状態を考えることとする。

したがって、ここで設定する荷重は w_1 , w_2 , w_4 である。

a) 鉛直荷重

設計に用いる鉛直荷重は、基本ケース [N] の FEM 解析結果から得られた水平部に発生する軸力を基に、鉛直荷重は(3)式により求める

$$w_1 = \gamma_i (1 - \alpha)(H + z) \quad (3)$$

ここに、 w_1 は鉛直荷重、 α は応力解放率、 H は土被り厚、 z は換算高さである。

ここで、 z を上式から求めこれをトンネル直径で除して無次

元化すると $z = 0.83D$ となる。これを式 (3) に代入して鉛直荷重の算定式を整理すると(4)式を得る。

$$w_1 = \gamma_i (1 - \alpha)(H + 0.83D) \quad (4)$$

ここに、 D : トンネル直径 (セグメント軸線)

b) 水平荷重

水平荷重 w_2 , w_4 の荷重算定式を誘導するため、有限要素法から得られた断面力 M_θ (正の最大曲げモーメント)、 M_S (負の最大曲げモーメント) をもとに算定する。

水平荷重 w_2 を鉛直荷重 w_1 の関数として(5)式で表すこととする。

$$w_2 = \beta_0 w_1 \quad (5)$$

ここに、 w_2 は水平荷重、 β_0 は水平荷重の鉛直荷重に対する影響係数、 w_1 は鉛直荷重である。

また、 w_4 は地盤反力に相当する荷重であるが、表-5 に w_4 を計算した結果を示す。これによると w_4 は覆工の剛性、地盤の変形係数、土被りなどによる影響が小さく一定の値を示すため、 w_4 は 62kN/m² の定数として与えることとする。

影響係数 β_0 は、表-5 によると地盤反力荷重の場合と同様に覆工の剛性、地盤の変形係数、土被りなどによる影響が小さく、 $\beta_0 = 0.84$ と一定の値になった。

また、覆工の剛性、地盤の変形係数、土被りなどのケースについては表-5 に示した補正係数 β_1 をそれぞれの各パラメータを含んだ計算式に書き表すことにする。これらの補正係数は各パラメータに対して急激な変化を示すことはないと考えられるので、各パラメータあるいはパラメータの常用対数に関する一次式で近似させることを考えて、グラフにプロットして検討した結果、次式に示すようにケース [L] およびケース [E] は、常用対数に関する一次式、ケース [H] は各パラメータに関する一次式で近似できることがわかった。なお、(6)式の勾配はパラメータの最大変動幅から求め、切片は基本ケースの値を採るように決定した (図-3 参照)。

$$\textcircled{1} \text{ 覆工の曲げ剛性の影響 : ケース [L] } \quad \beta_L = -0.09 \log EI + 1.48 \quad (6.a)$$

$$\textcircled{2} \text{ 地盤の変形係数の影響 : ケース [E] } \quad \beta_E = 0.064 \log E + 0.74 \quad (6.b)$$

$$\textcircled{3} \text{ 土被りの影響 : ケース [H] } \quad \beta_H = 0.015 \frac{H + 0.88D}{D} + 0.95 \quad (6.c)$$

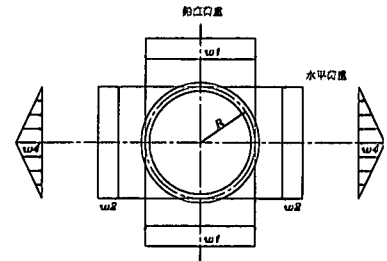


図-2 想定した荷重作用状態

表-5 計算結果一覧

	M_0	M_S	w_4	w_1	w_2	w_2/w_1	β_i
L-2	69.6	-38.5	61.2	403.7	352.6	0.87	1.05
N	154.7	-123.5	61.4	403.7	337.2	0.84	1.00
L-1	221.5	-187.5	66.9	403.7	325.1	0.81	0.96
E-2	186.9	-154.6	63.6	403.7	331.4	0.82	0.98
N						0.84	1.00
E-1	94.7	-64.7	59.0	403.7	348.1	0.86	1.03
H-1	57.5	-23.1	67.7	260.9	212.0	0.81	0.97
N						0.84	1.00
H-2	336.9	-304.7	63.4	689.3	589.8	0.86	1.02

(1) w_4 は 62kN/m^2 とする。(2) β_i は、標準ケース [N] の w_1/w_2 を $\beta=1.00$ として、各パラメータの比率を算出したものである。

$$w_2 = \beta_0 \beta_L \beta_E \beta_H w_1 \quad (7)$$

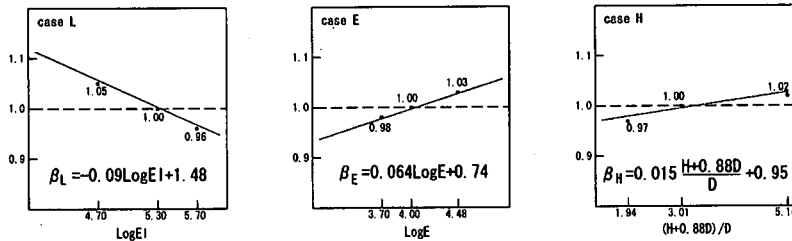
ここに、 w_2 : 水平荷重 β_0 : 水平荷重の鉛直荷重に対する影響係数 β_L : 覆工剛性に関する補正係数 β_E : 地山の変形係数に関する補正係数 β_H : 土被り高さに関する補正係数

図-3 各パラメータの影響

4. 本所シールド現場での測定値による検証と考察

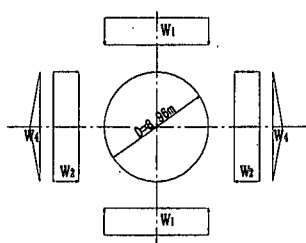
前項で得られた設計用荷重算定式の適用性をみるため、本所シールド現場の実測値²⁾と比較する。現場でのセグメントに発生する断面力の測定は、鉄筋に取り付けたひずみ計を基にしている。

当現場は、軟弱な粘性土地盤であるためトンネル完成後に地山の乱れによる圧密沈下が生じ、覆工の断面力が増加している。ここでは、これらの影響が顕著に現れない初期掘進完了後（2週間後）および3ヶ月後の比較的短期の断面力について比較する。

覆工に作用する荷重を図-4に示す。また、この設定荷重による断面力と実測値の比較を図-5に示す

図-5から、曲げモーメントの発生状況は、実測値の最大値が正曲げ約 310kNm （上端）、負曲げで約 -151kNm （SL部）となっているのに対して、計算値では正曲げ、負曲げでそれぞれ 189kNm 、負曲げで -146kNm となっている。上端の実測との正曲げの分布は不連続的挙動を示しており、この部分を除いた下端部およびSL部では、曲げモーメントの値および発生分布が実測値とよく一致しており、提案した荷重が合理的であることがわかる。

また、軸力の実測値については、セグメント上端付近で最大約 $1,350\text{kN}$ 、SL部で約 $2,290\text{kN}$ 程度となっている。これに対して計算値は、上端および下端付近で $1,610\text{kN}$ となっており、SL部では $2,040\text{kN}$ となった。上端部で若干大きな値を示しているが、軸力分布をみるとその発生分布は概ね実測値と同じ傾向を示し、実用上は十分であることがわかる。



$$w_1 = \gamma (1 - \alpha) (H + 0.83D)$$

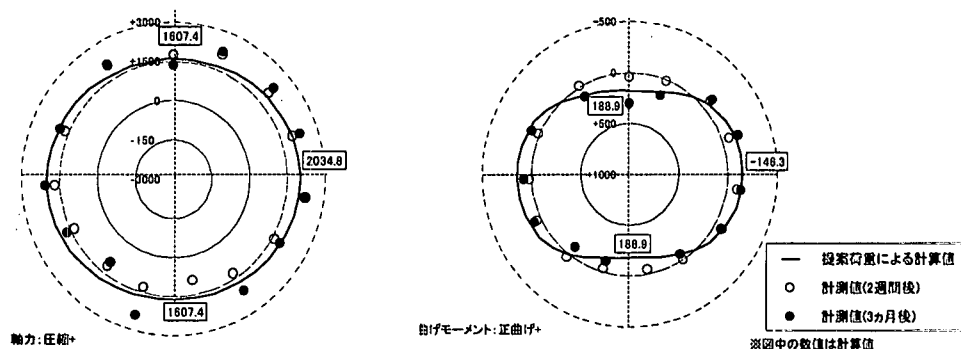
$$= 16.7 \times (1 - 0.16) \times (13.7 + 0.83 \times 8.96) = 296.5 \text{ kN/m}^2$$

$$w_2 = \beta_0 \beta_L \beta_E \beta_H w_1$$

$$= 0.84 \times 0.95 \times 1.015 \times 0.986 \times 296.5 = 236.8 \text{ kN/m}^2$$

$$w_4 = 62 \text{ kN/m}^2$$

図－４ 提案式により求めた荷重作用状態図



図－５ 実測値と計算値の比較

５．まとめ

慣用計算法モデルに与える荷重を求めるため、有限要素法を使用してパラメータの感度分析を行い、感度の高いパラメータを含む荷重算定式を提案した。そして提案した計算式の適用をみるため、現場実測値との比較を行った。これらの結果を踏まえ以下のことがいえる。

- ①鉛直荷重は、シールドトンネル直径の 0.83 倍の高さに、シールドトンネルの全土被りを加えた高さに相当する荷重を基本とし、それに $(1 - \alpha)$ を乗じて与えることができた。そして、この値は地盤条件やトンネルの構造条件に関係しないものとなった。
- ②覆工に作用する荷重に大きな影響を与える要因は、土被り厚、覆工剛性、地山強度および変形特性、およびトンネル断面の大きさであって、従来から設計に使用されている要因だけでは不足している。水平荷重は、等分布荷重と三角形荷重で与えることができ、それらは上記パラメータを含む比較的簡単な計算式で与えることができた。
- ③覆工剛性が高い場合は、覆工に作用する水平荷重は減少する傾向にある。これに対して地山の変形係数、土被りが大きくなるほど覆工に作用する荷重も増加する。なお、地盤反力に相当する三角形荷重は、従来の慣用計算法とは異なり、スプリング部で最大値をとり、上端と下端でゼロとなる分布とした。

上記のパラメータを含む慣用計算モデルに与える荷重の計算式を提案し、現場実測値と比較した結果、提案式を用いることにより覆工に発生する断面力を実用上十分な精度で説明できると考えられる。

参考文献

- 1) 大門・矢萩・中村・鈴木:施工時荷重が偏平シールドトンネル覆工の設計断面力に及ぼす影響、トンネル工学研究発表会論文・報告集 第 10 巻, 2000
- 2) 矢萩・藤木・村松・鈴木:軟弱地盤における R C セグメントの計測結果と考察、トンネル工学研究論文・報告集第 12 巻, 2002