

VI-214

粘性土地盤中のシールドトンネルの作用土圧に関する研究

成和コンサルタント 正会員 酒寄 建之
建設省土木研究所 正会員 真下 英人
建設省土木研究所 正会員 石村 利明

1. はじめに

現在のシールドトンネル覆工の一般的な設計法は、図-1に示すような設計荷重を設定し構造計算を行いセグメントの材質・断面寸法を決定する。荷重が実態と合っていない場合は過小、あるいは過大なセグメント設計になる可能性があるため、シールドトンネルの現場計測を実施して実態にあった土圧の評価方法を確立する必要がある。本研究は、軟弱地盤中に施工されるシールドトンネル2件（隅田川シールド、東南幹線シールド）の現場計測結果^{1),2)}を解析し覆工への作用土圧の評価を行ったものである。解析方法は荷重の分布形状を仮定し、鉛直土圧および側方土圧係数を変数として骨組構造解析（はり・ばねモデル）によりシールド覆工に発生する曲げモーメントを計算し、計測値と計算値との誤差が最小になるような、鉛直土圧および側方土圧係数を求めた。

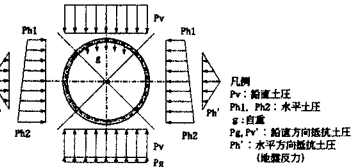


図-1 設計荷重

2. 解析方法

図-2は計測を行ったトンネルの位置図を、図-3は計測された曲げモーメント（計測データが収束したと考えられる時の値。自重の影響は含まず、隅田川シールドは併設シールドの影響を含む）の分布図を示す。両トンネルとも周辺地盤は有楽町層の軟弱な粘性土であり、隅田川シールドのN値はほぼゼロ、東南幹線シールドのN値は1~2である。

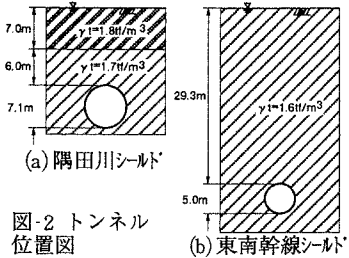


図-2 トンネル位置図

作用土圧は次のようにして算定した。まず、図-4に示す慣用設計法の荷重モデルを考えると、覆工に発生する曲げモーメント M_e は次のように求められる。

$$M_e = P_v \cdot M_0 + \lambda (P_v + h/2 \cdot \gamma t) \cdot M_r + \lambda \cdot 2R_c \cdot \gamma t \cdot M_t \quad \cdots (1)$$

ここに、 M_0 ：図-4(b)で $P_{h1}=1$ の鉛直荷重が覆工に作用したときに発生する曲げモーメント

M_r ：図-4(c)で $P_{h1}=1$ の水平荷重が覆工に作用したときに発生する曲げモーメント

M_t ：図-4(d)で $P_{h2}-P_{h1}=1$ の三角形分布荷重が覆工に作用したときに発生する曲げモーメント

である。

また、側部の抵抗土圧はトンネルの中心から上下45°の範囲にリングの法線方向の地盤バネにより与えることとし、地盤反力係数 k_r の値は、示方書³⁾を参考として、本トンネルの周辺地盤が「軟らかい粘性土」、「非常に軟らかい粘性土」に相当する地盤であることを考慮し、0および0.5kgf/cm³を与えた。式-(1)で求められる M_e は、鉛直荷重 P_v 、側方土圧係数 λ の関数となるため、 P_v 、 λ は次に示す誤差関数を最小にする最適解として求めることができる。

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n |M_{ei}^* - M_{ei}(P_v, \lambda)|^2 \Rightarrow \min \quad \cdots (2)$$

ここで、 M_{ei}^* 、 M_{ei} は、断面に発生する曲げモーメントの計測値および式-(1)から求める計算値を表し、 m は計測断面数を表わす。式-(2)の解法としては数値計画法における直線探索法が利用できるため、ここではプログラムライブラリー「MSL II」中の最適化問題プログラム（Powell法）を使用した。実際の

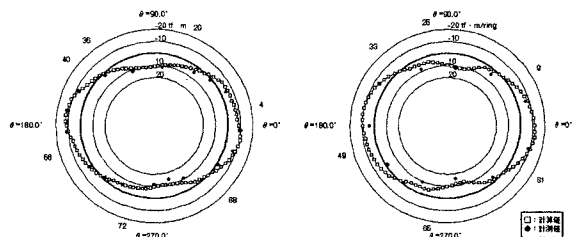
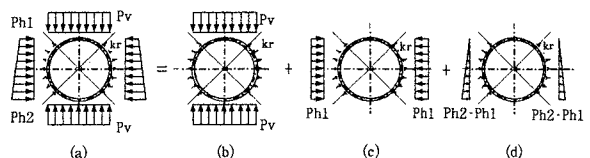


図-3 曲げモーメント分布図



ここに、 P_v ：鉛直土圧
 $Ph1$ ：上部水平土圧（ $= (P_v + h/2 \cdot \gamma t) \cdot \lambda$ ）
 $Ph2$ ：下部水平土圧（ $= Ph1 + 2 \cdot R_c \cdot \gamma t \cdot \lambda$ ）

図-4 荷重モデル

計算は λ を0.50～0.70までの範囲を示すパラメータとして、各 λ に対する P_v を式(2)から求めた。

3. 覆工モデル

解析に用いた覆工モデルは一般的な千鳥組解析モデルとし、セグメントを直線梁、ピース間継手を回転バネ定数 k_r の回転バネに、リング間継手をせん断バネ定数 k_s の接線および半径方向のせん断バネにモデル化した。ばね定数は、隅田川シールドは実験値⁴⁾を参考にし、東南幹線シールドはせん断ばね定数に隅田川シールドの実験値を、回転ばね定数は村上・小泉によるばね算定モデル^{5),6)}を参考に定めた。表-1に覆工モデルの諸元を示す。

4. 解析結果

(1) 隅田川シールド

図-5に計測された値に最も近い断面力を与える地盤反力係数 k_r 、側方土圧係数 λ と鉛直土圧 P_v との関係を示す。図中の「中位の粘性土」、「軟らかい粘性土」、「非常に軟らかい粘性土」は示方書³⁾で示されている λ の取り方を示す。これより、鉛直土圧 P_v の値は k_r 、 λ の値により異なり、 k_r 、 λ をどのように評価するかにより計測断面力に近い断面力を与える P_v は大きく変化することが分かる。いま、対象地盤は N 値がほぼゼロであることから、示方書でいうところの $N < 2$ の範囲の $k_r = 0 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $\lambda = 0.65 \sim 0.75$ に相当し、また、全土被り荷重が鉛直土圧の上限値であることを考慮すると、トンネルにはほぼ全土被りに近い荷重が作用しているものと判断される。ちなみに、全土被り荷重が覆工に作用している場合を考えると、計算値は $k_r = 0 \text{ kgf/cm}^3$ の時は $\lambda = 0.67$ で計測値の断面力に近くなり、 $k_r = 0 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $\lambda = 0.67$ の時の計算値は図-3(a)に示すようになる。

(2) 東南幹線シールド

図-6に計測された値に最も近い断面力を与える k_r 、 λ と P_v との関係を示す。隅田川シールドと同様、 k_r 、 λ をどのように評価するかにより計測断面力に近い断面力を与える P_v は大きく変化するが、対象地盤は $N < 2$ の範囲の $k_r = 0 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $\lambda = 0.65 \sim 0.75$ もしくは $2 \leq N < 4$ の範囲の $k_r = 0 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $\lambda = 0.55 \sim 0.65$ に相当し、また、全土被り荷重が土圧の上限値であることを考慮すると、トンネルにはほぼ全土被りに近い荷重が作用しているものと判断される。ちなみに、全土被り荷重が覆工に作用している場合を考えると、計算値は $k_r = 0 \text{ kgf/cm}^3$ の時は $\lambda = 0.603$ 、 $k_r = 0.5 \text{ kgf/cm}^3$ の時は $\lambda = 0.561$ で計測値の断面力に近くなり、 $k_r = 0 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $\lambda = 0.603$ の時の計算値は図-3(b)に示すようになる。

5. まとめ

現場計測結果に慣用計算法の荷重モデル（土水一体）を当てはめた場合、軟弱な沖積粘性土（ N 値2以下）のシールドトンネルの天端に作用する鉛直土圧 P_v （土水圧）の大きさは、ほぼ全土被り荷重となる結果が得られた。

〔参考文献〕

- 1) 水谷敏則、真下英人、猪熊 明ほか「軟弱地盤中のシールドトンネルの現場計測」、土木研究所資料、第2893号、1989/12
- 2) 真下英人、石村利明、酒寄建之ほか「シールドトンネルの作用土圧に関する現場計測報告書」、土木研究所資料、第3428号、1996/3
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド編）・同解説、1988
- 4) 「東京湾横断道路の構造・施設設計に関する調査研究」、土木研究所報告第184号、1991/3
- 5) 村上博智、小泉淳「シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について」、土木学会論文報告集、第296号、1980/4
- 6) 小泉淳、村上博智、西野健三「シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について」、土木学会論文報告集第394号／Ⅲ-9、1988/6

表-1 覆工モデル諸元表

項目	記号	単位	隅田川シールド	東南幹線シールド
中心半径	R_c		3.4	2.35
厚さ	h		0.3	0.3
幅	B		1.0	0.9
断面積	A	m^2	0.3	0.27
断面二次モーメント	I	m^4	0.00225	0.002025
変形係数	E_c	tf/m^2	$3.9 \times 10^8 (*1)$	$3.5 \times 10^8 (*2)$
ポアソン比	ν		0.167	
ピース間継手(*3)	正曲げ	k_r	1.5×10^4	7.0×10^3
	負曲げ		1.0×10^4	1.0×10^4
リング間継手(*4)	k_s	tf/m	2.0×10^5	

*1：実験値、*2：設計値、*3：隅田川シールドは実験値、東南幹線シールドは計算値、*4：実験値

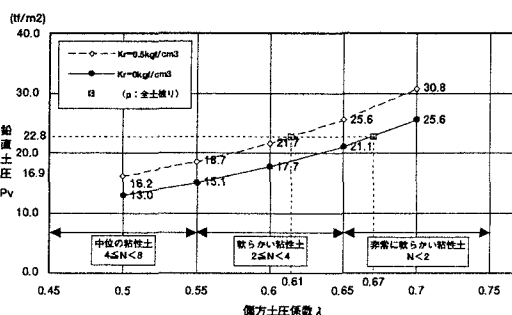


図-5 隅田川シールドの地盤定数と鉛直土圧の関係

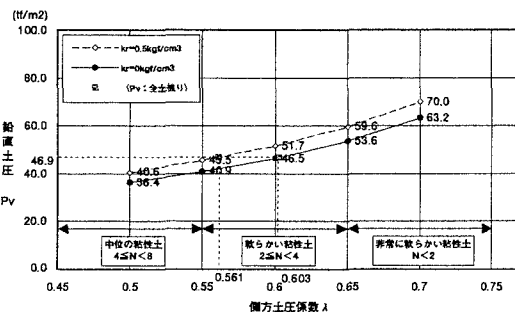


図-6 東南幹線シールドの地盤定数と鉛直土圧の関係