

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

Study on the earth pressure acting on shield segments in soft clay.

真下 英人*・石村 利明*・酒寄 建之**

Hideto MASHIMO, Toshiaki ISHIMURA, Kenji SAKAYORI

This paper discusses the earth pressure acting on shield segments in soft clay with the results of field measurements data and numerical analyses. The data employed in this study were obtained at the sites of Sumidagawa Shield Tunnel and Tonan-Kansen Shield Tunnel, which were constructed in the soft alluvial clay at the depth of 13~29m from the ground surface. This study will be great use as a guide for designing the shield tunnels of similar cases.

Keywords; shield segments, earth pressure, soft clay

1. はじめに

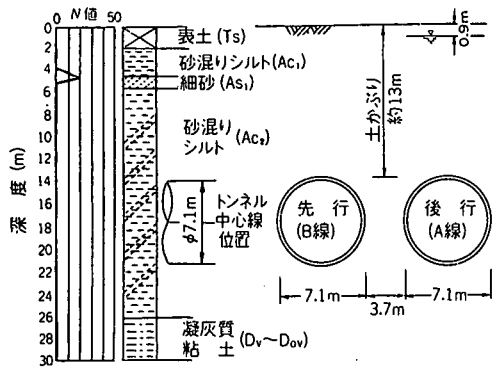
現在のシールドトンネルの覆工の一般的な設計法は、設計荷重を設定し構造計算を行いセグメントの材質・断面寸法を決定している。設計荷重が実態と合っていない場合は過小、あるいは過大なセグメント設計になる可能性がある。特に粘性土地盤中のシールドトンネルに作用する土圧は、不明確な点も多く、合理的な設計を行うためにはトンネルに作用する土圧を十分な精度で把握する必要がある。本研究は、軟弱粘性土中に施工された土被りの異なる隅田川シールド、東南幹線シールドの2件のシールドトンネルの現場計測^{1) 2)}を行い、計測で得られたセグメントの曲げモーメントと荷重分布を仮定した骨組み構造解析(梁-バネモデル)から得られる曲げモーメント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の組み合わせを求め、シールドトンネルに作用する土圧の推定を行ったものである。

2. 計測トンネルの概要

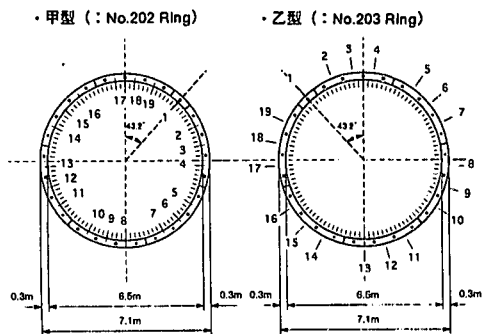
2.1 隅田川シールド

隅田川シールドは、図-1に示すように外径7.1mの2本のシールドトンネルが間隔3.7mで双設するトンネルであり、計測は土被り約13mの地点で実施した。トンネルで使用されたセグメントは、桁高30cm、幅100cmの7分割のRCセグメントであり、組立状況は図-2に示すとおりである。また、現場計測付近の地質はN値がほぼゼロに近い有楽町層の軟弱な沖積粘性土である。施工順序は2本のトンネルが対面して掘進し、計測地点をまず先行トンネルが通過した後、後行トンネルが通過した。掘削はいずれも泥水加圧式により施工された。

* 正会員 建設省土木研究所 ** 正会員 成和コンサルタント(株) (前建設省土木研究所交流研究員)

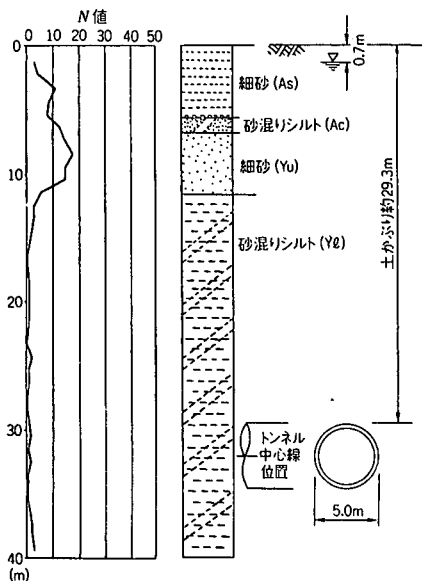


図－１ 隅田川シールドの概要

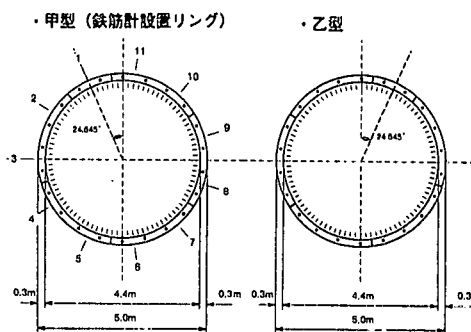


※図中の番号は（断面力）計測断面の位置を示す

図－２ セグメントの組立状況



図－３ 東南幹線シールドの概要



※図中の番号は（断面力）計測断面の位置を示す

図－４ セグメントの組立状況

２．２ 東南幹線シールド

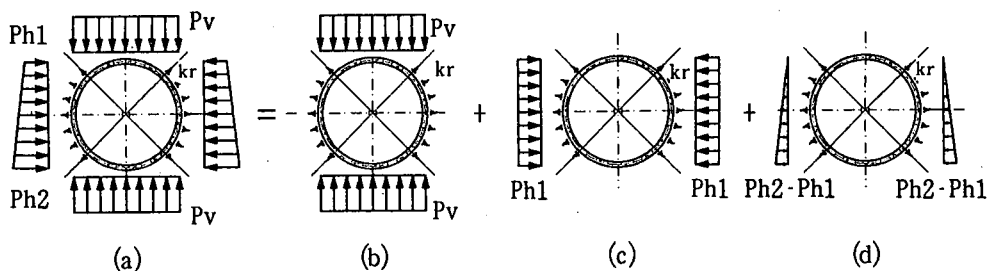
東南幹線シールドは、図－３に示すように外径5.0mの単設のシールドトンネルであり、計測は土被り約29.3mの地点で実施した。トンネルで使用されたセグメントは、桁高30cm、幅90cmの6分割のRCセグメントであり、組立状況を図－４に示す。現場計測付近の地質は、N値が1～2の有楽町層の軟弱な沖積粘性土である。また、掘削は泥水加圧式により施工された。

３．解析方法

セグメントの円周方向の主鉄筋に設置した鉄筋計のひずみ測定値から求めた曲げモーメントの計測値を算定し、以下に示す方法によりシールドトンネルに作用する土圧の評価を行った。なお、曲げモーメントの計測値は、計測データが収束したと考えられる最終時（隅田川シールドは3ヶ月後、東南幹線シールドは43ヶ月後）を用いた。なお、隅田川シールドは、併設シールドの影響を含んだ曲げモーメントとなっている。

３．１ 算定方法

図－５に示すような慣用設計法で用いられる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_{cl} は



ここに P_v : 鉛直土圧,
 P_{h1} : 上部水平土圧 ($= (P_v + h/2 \cdot \gamma_t) \cdot \lambda$)
 P_{h2} : 下部水平土圧 ($= (P_{h1} + 2 R_c \cdot \gamma_t \cdot \lambda)$)

図-5 荷重モデル

次のように求められる。ただし、側部の抵抗土圧についてはトンネルの中心から上下 45° の方向の範囲にリングの法線方向に地盤反力係数 k を有する地盤バネにより与えるものとし、地盤バネ定数 k は予め一定の値を与える。また、セグメント自重については計測結果から求められている曲げモーメントはセグメント組立直後を初期としており、セグメント自重の影響が含まれていないことから考慮していない。

$$M_c = P_v \cdot M_P + \lambda \cdot (P_v + h/2 \cdot \gamma_t) \cdot M_r + \lambda \cdot 2 R_c \cdot \gamma_t \cdot M_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに P_v : 鉛直土圧
 λ : 側方土圧係数
 γ_t : 土の単位体積重量
 h : セグメント厚さ
 R_c : セグメントの中心半径
 M_P : 図-5 (b) で $P_v = 1$ 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-5 (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-5 (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

式 (1) で求められる M_c 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。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m (M_c^* i - M_{ci}(P_v, \lambda))^2 \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $M_c^* i$ 、 M_{ci} は、断面に発生する曲げモーメントの計測値及び式 (1) から求まる計算値を表し、 m は計測断面数を表す。式 (2) の解法としては数理計画法における直線探索法が利用できるため、ここでは土木研究所所有のプログラムライブラリー「MSL II」に納められている最適化問題プログラム (Powell 法) を使用した。

3.2 覆工モデル

セグメント覆工は、セグメントをボルトにより組み立てたプレハブ構造であるため、式 (1) の M_P 、 M_r 、 M_t を求めるに際しては、セグメント覆工のモデル化が必要となる。本計算に用いた覆工モデルは、図-6 に示すようにセグメントを直線梁、セグメントのピース間継手を回転バネ定数 k_θ の回転バネに、リング間継手をせん断バネ定数 k_s の接線方向と半径方向のせん断バネにモデル化した梁-バネモデルを使用した。本計算に用

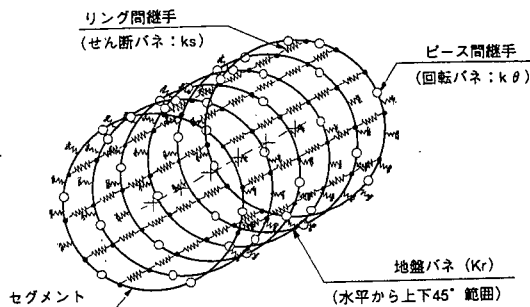


図-6 覆工モデル図

いたバネ定数は、隅田川シールドは同シールドトンネルのセグメントを用いて実施した載荷実験結果³⁾を参考にせん断バネ定数、回転バネ定数を定め、東南幹線シールドは、せん断バネ定数に隅田川トンネルの実験値を、回転バネ定数は、村上・小泉によるバネ算定モデル^{4) 5)}を参考に表－１に示す値を用いた。東南幹線シールドのリング間継手のせん断バネ定数を隅田川シールドと同値を採用した理由は、せん断バネ定数を決定する要因であるボルト径、継手板の仕様、ボルトの初期締め付け力がほぼ同様であることによる。計算に用いた各セグメントの仕様を表－２に示す。セグメントの断面二次モーメントは、一般にセグメントの断面力を計算する際に用いられる鉄筋を無視した全断面有効の場合の値を用いた。

3. 3 計算条件

計算に用いた地盤条件図を図－７に示す。計算に必要な地盤反力係数の値については、現在、シールドトンネルの設計に用いられているトンネル標準示方書（シールド編）・同解説⁶⁾などを参考として、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などを考慮し、地盤反力係数として0及び0.5kgf/cm³を与えることとし、具体的には地盤バネが分担するセグメント（梁）の長さBrに地盤反力係数krを乗じて地盤バネ定数Krとして与えた。また、式（１）によればP_v、λは唯一解として求まることとなるが、本研究では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の組み合わせを式（２）から求めた。

4. 解析結果

4. 1 隅田川シールド

図－８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、側方土圧係数と鉛直土圧との関係を示す。これより、地盤反力係数が0、0.5kgf/cm³では同一の側方土圧係数でも鉛直土圧が異なることが分かる。すなわち、地盤反力が少なからず期待できる場合は計測値の断面力に近い断面力を与える時の鉛直土圧が大きく、側方土圧係数が0.65の時には地盤反力係数の違いにより約4.5tf/m²程度の差が生じている。側方土圧係数についても大きいほど計測値の断面力に近い断面力を示す鉛直土圧が大きくなる傾向にあり、地盤の特性を表わす両係数をどのように評価するによって計測断面力に近い断面力を与える鉛直土圧は大きく変化することが分かる。

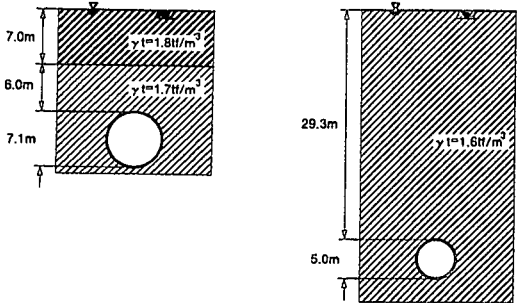
表－１ 計算に用いた継手バネの値

継手の位置とバネ定数		隅田川シールド	東南幹線シールド
ピース間継手 ¹⁾ (回転バネ定数k _θ) tf・m/rad	正曲げ	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 ²⁾ (せん断バネ定数k _s) tf/m		2.0×10 ⁵	

表－２ セグメントの仕様

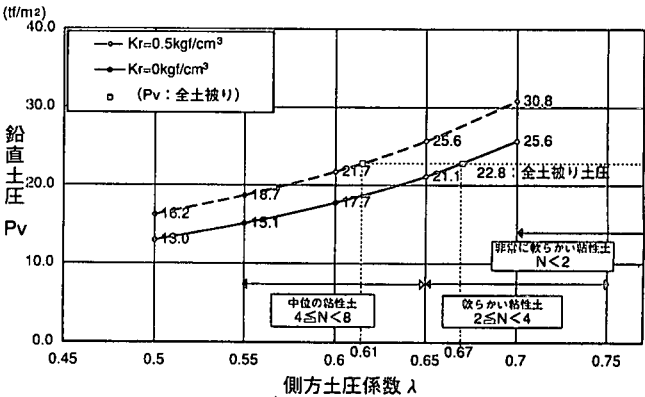
セグメント部位	隅田川シールド	東南幹線シールド
外径 R _a (m)	3.55	2.5
内径 R _i (m)	3.25	2.2
中心径 R _c (m)	3.4	2.35
厚さ h (m)	0.3	0.3
幅 B (m)	1.0	0.9
断面二次モーメント I (m ⁴)	0.00225	0.002025
弾性係数 E _c (tf/m ²)	3.9×10 ⁶	3.5×10 ⁶

※ I は全断面有効・鉄筋無視で計算、E_c は実験値。



(a)隅田川シールド (b)東南幹線シールド

図－７ 地盤条件図

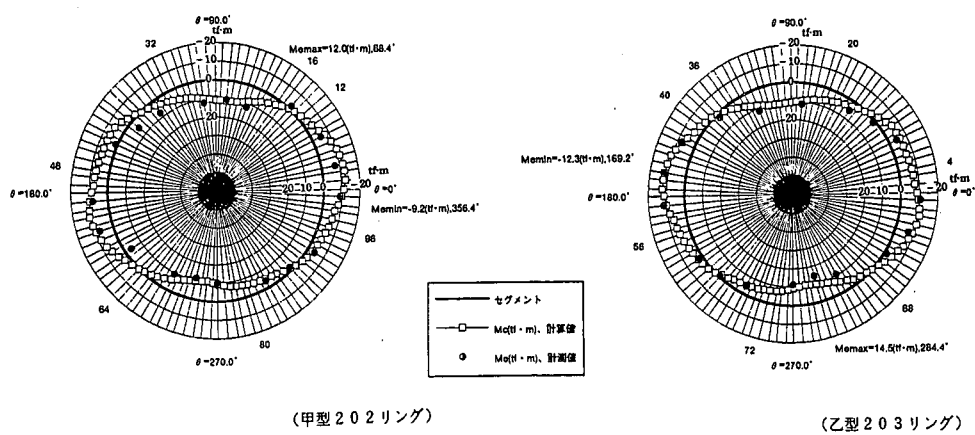


図－８ 隅田川シールドの地盤定数と鉛直土圧の関係

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、土木学会のトンネル標準示方書⁶⁾で示されている側方土圧係数の取り方を示す。

いま、対象地盤のN値がほぼゼロであること、全土被り土圧が鉛直土圧の上限値であることを考慮し、地盤反力が期待できない地盤 $k=0\text{kgf/cm}^3$ と仮定し、全土被り土圧がシールドトンネルに作用している場合を考えると、計測値の断面力との誤差が最も少ない側方土圧係数は0.67となる。この側方土圧係数は、上記示方書のN値がゼロに近い側方土圧係数の範囲の0.7以上と比較すると若干低い値となっているが、一般的に考えられている側方土圧係数の範囲内にはあるものと考えられる。ちなみに、地盤反力係数が 0kgf/cm^3 の場合に本トンネルの設計に用いた全土被り土圧で側方土圧係数が0.67の組み合わせの断面力分布を甲・乙のリング組み毎に図－9に示す。

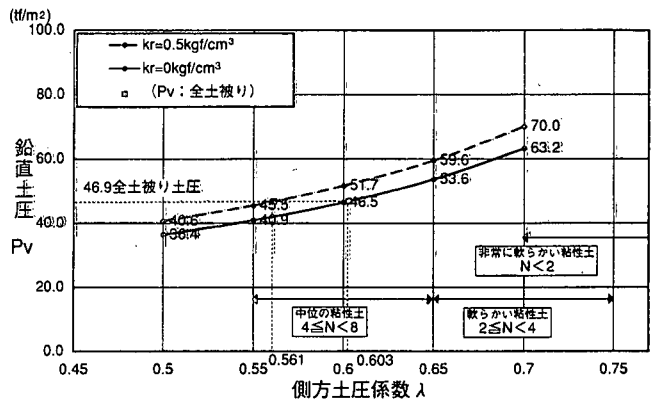
鉛直土圧に作用する荷重を全土被り土圧よりも小さく考えた場合、側方土圧係数はさらに下がることから、セグメントに設置した鉄筋計から算定される曲げモーメントによればトンネル天端にはほぼ全土被り土圧が作用しているものと判断される。



図－9 全土被り土圧が作用した時 ($\lambda=0.67, k=0\text{kgf/cm}^3$) の曲げモーメントと計測値

4.2 東南幹線シールド

図－10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・側方土圧係数と鉛直土圧との関係を示す。これより、隅田川シールドの結果と同様に地盤反力係数、側方土圧係数により鉛直土圧が大きく異なる結果となっており、側方土圧係数が0.70の時に地盤反力係数の違いにより約6.8 tf/m^2 程度の差が生じている。したがって、隅田川シールドと同様に地盤の特性を表わす両係数をどのように評価するかで推定される鉛直土圧が異なることが分かる。



図－10 東南幹線シールドの地盤定数と鉛直土圧の関係

いま、東南幹線シールドが沖積層の軟弱な粘性土地盤であることから、地盤反力係数が期待できない $k=0\text{kgf/cm}^3$ の地盤と仮定し、全土被り土圧が鉛直土圧の上限値とすると、計測値の断面力との誤差が最も少ない側方土圧係数は0.6となる。この側方土圧係数は、上記示方書のN値が2の場合の側方土圧係数の範囲の0.65～0.75と比較すると若干低い値となっているが、一般的に考えられている側方土圧係数の範囲内にはあるものと考えられる。ちなみに、地盤反力係数が 0kgf/cm^3 の場合に本トンネルの設計に用いた全土被り土圧で側方土圧係数が 0.6の組み合わせの断面力分布

を図-11に示す。

以上を考えると、鉄筋計から算定した曲げモーメントの値からは、現在の一般的な設計の考え方による土水一体による荷重設定で考えると側方土圧係数が若干低めの値となるもののトンネルにはほぼ全土被り土圧に近い土圧が作用しているものと考えられる。

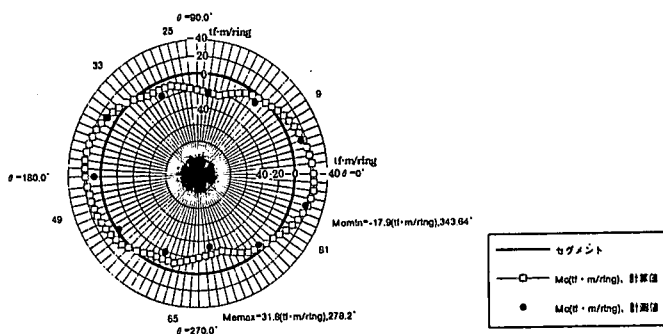


図-11 全土被り土圧が作用した時 ($\lambda=0.6$, $k=0\text{kgf/cm}^3$) の曲げモーメントと計測値

5. まとめ

粘性土地盤中のシールドトンネルに作用する土圧について、セグメント覆工に円周方向の鉄筋計を設置して現場計測を行った測定値を解析した結果、粘性土地盤中のシールドトンネルに作用する土圧を現在の一般的な設計の考え方による土水一体による荷重設定で考えた場合、土被りが比較的大きくなった場合でもトンネルにはほぼ全土被り土圧に近い荷重が作用していると考えられた。今後、こうした現場計測等を数多く実施し、トンネルに作用する土圧を明らかにすることが重要である。

【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年12月
- 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年3月
- 3) 「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年3月
- 4) 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年4月
- 5) 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年6月
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド編）・同解説、1996年7月