

洪積粘性土中のシールドトンネルに作用する荷重に関する一考察

石村利明* 真下英人** 角湯克典***

1. はじめに

都市交通の効率化、渋滞緩和対策の一つとして、今後、大都市圏における大深度地下での道路トンネル建設が見込まれている。しかし、大深度下におけるシールドトンネルの覆工設計においては、作用土圧に関する現場計測データが少なく、設計荷重などの設定方法が確立されていない。また、大深度下では、トンネルに作用する荷重が土圧よりも水圧が主となり、軸力が卓越するため、従来の土水圧を対象にした設計ではセグメントが薄肉になる傾向がある。一方で、ジャッキ推力や裏込め注入などの影響が大きくなるため、セグメントの設計にあたってはこうした施工時荷重の影響の程度も把握しておく必要がある。

今後、大深度地下に建設されるトンネルの建設コスト削減を図るためには、セグメントがシールド掘進時に受ける施工時荷重を把握するとともに、土圧・水圧などの作用荷重を明らかにする必要がある。そこで、大深度地下と同様の硬質な地盤を対象として、洪積粘性土（土丹）を通過するシールドトンネルで実施した現場計測結果を分析し、トンネルに作用する荷重の評価を行った。

2. 洪積粘性土中のトンネルへの作用土水圧

洪積粘性土を通過するシールドトンネルの覆工に設置した土圧計、水圧計および鉄筋応力計から得られた現場計測結果について、覆工組立時から覆工に作用する荷重が一定となる時期に至るまでを時系列に整理し、シールドトンネル覆工に作用する荷重を検討した。分析を実施したシールドトンネルの諸元を表-1に示す。

覆工には、表-2に示すように各施工段階において i) 自重、ii) *テール内荷重、裏込め注入圧等の施工時荷重、iii) 水圧等の荷重が作用していると考えられる。計測結果の挙動については、それぞれのトンネルにおいて傾向は大きな差異が見ら

れなかったもので主にAトンネルの計測結果をもとに考察する。

2.1 Aトンネルにおける現場計測状況

Aトンネルは図-1に示す洪積粘性土層（N値＞50）を通過する土被り約52m（約4D、D：覆工外径）の位置に構築される。計測は、計測リングⅠ（以下、1980Rと表記）および計測リングⅡ（以下、1981Rと表記）の2リングで実施している。1980Rで土圧、水圧、鉄筋応力度を、1981Rで土圧、鉄筋応力度を計測している。

2.1.1 セグメント組立からテール脱出後の変化

計測リングの位置とシールドマシンの位置関係は図-2に示すとおりであり、シールドマシン内には2リング分のセグメントリングが留まる。1980Rから2リング先のセグメント（1982R）掘進時にテールシール反力、*テールシールグリス圧（以下、テール内荷重と表記）、ジャッキ推力等が作用する。Aトンネルにおける1981R組立後約40時間経過までの土圧の計測結果を図-3に示す。土圧の経時変化より、1981Rが概ねテール内に存在

表-1 現場計測シールドトンネルの諸元

トンネル名	A	B
シールド外径(m)	13.05	6.36
シールド形式	泥水加圧式	泥水加圧式
土被りH(m)	52.1	34.4
土被りH/D	4.0	5.4
地下水位(管頂より)(m)	44.9	30.3
掘削部の主な地質	洪積粘性土層	洪積粘性土層
セグメントの種類	平板型	平板型
	RCセグメント	RCセグメント
セグメント外径D(m)	12.83	6.20
セグメント内径(m)	11.83	5.70
セグメント厚さ(m)	0.50	0.25
セグメント幅(m)	1.2	1.3
セグメント分割数	9	6
セグメントの組み方	2リング千鳥	2リング千鳥
継手形式(セグメント継手)	ボルト・金物結合	突き合わせ継手
継手形式(リング継手)	ピン継手	ピン継手
計測開始時期	セグメント組立開始から	セグメント組立開始から
計測初期値	セグメント組立前	セグメント組立前
計測リング数・計測項目	2リングⅠ：土圧計、水圧計、鉄筋計(切羽側、坑口側)、Ⅱ：土圧計、鉄筋計	2リングⅠ：土圧計、水圧計、鉄筋計、Ⅱ：土圧計、鉄筋計

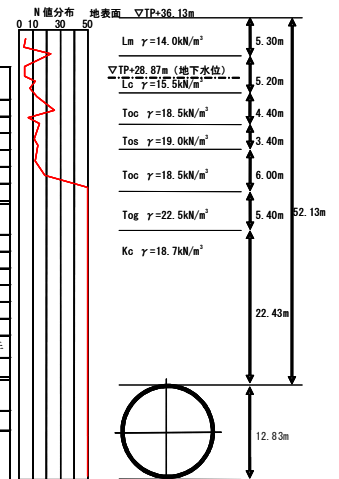


図-1 現場計測トンネルの位置と地盤条件

表-2 各施工段階において想定される荷重

各施工段階	計測リングに作用する想定荷重
①組立完了時	自重
②テール脱出前	自重、施工時荷重（テール内荷重、ジャッキ推力等）
③テール脱出直後	自重、施工時荷重（裏込め注入圧等）、施工時荷重の残留分（テール内荷重、ジャッキ推力等）、水圧
④長期安定時	自重、施工時荷重の残留分（テール内荷重、ジャッキ推力、裏込め注入圧等）、水圧、土圧

A Study on the Load of Shield Tunnel Constructed in the Hard Ground

*土木用語解説：テール、テールブラシ、テールシールグリス

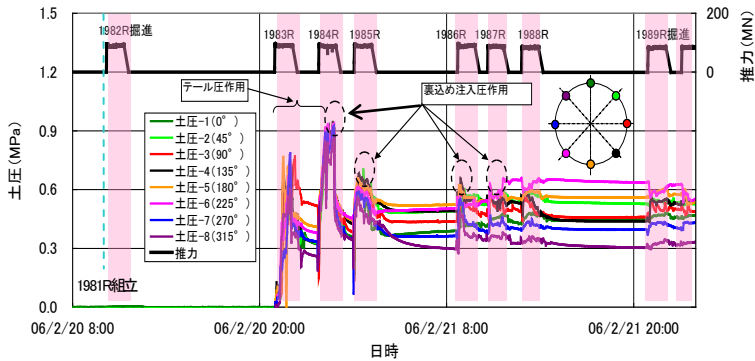
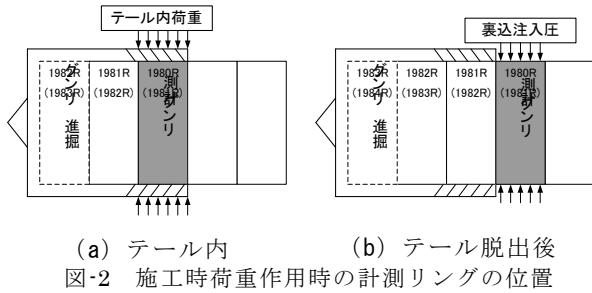
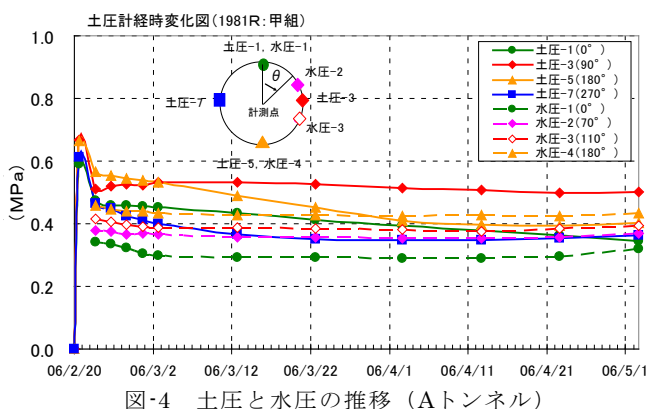


図-3 1981R組立後約40時間経過までの土圧の経時変化
 するときにはテール内荷重が、計測リングがテールから脱出した後は裏込め注入圧が作用している。テールから脱出した後の土圧は、裏込め注入が行われるセグメント掘進中に上昇し、掘進停止後に掘進前の状態に戻る。裏込め注入の影響は、計測リングに裏込め注入が行われる1984R掘削時のテール脱出直後が最も大きく、徐々にその影響が小さくなり、土圧の変動がわずかとなる。その後、土圧の値は、徐々に低下し、一定値に収束する。なお、鉄筋応力度の経時変化は、土圧と同様に掘進時に大きな変化を示したが、その変動は土圧の変化に比べて小さかった。

2.1.2 長期安定時に作用する土水圧

計測リング組立から約2.5ヶ月経過時（以下、長期安定時と表記）までの土圧と水圧の計測結果の推移を図-4に示す。土圧は、計測当初に大きな変動の後、ある一定値に近づく傾向を示した。計測当初の変動は、テール内荷重や裏込め注入によ



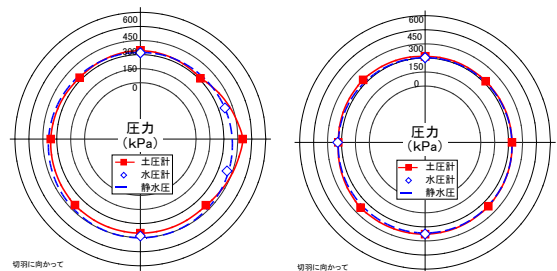
る施工時荷重による一時的な影響を受けているものと考えられる。土水圧の推移は、水圧は比較的早い時期に一定値に収束し、土圧は時間とともに徐々に低下している。土圧および水圧の計測値の関係を見ると、計測センサーの位置が一致していない箇所もあるが、 $\theta=90^\circ$ （側壁部）を除いて天

端を含めて、他の計測点は長期安定時の土圧は水圧に近づく方向に推移している。 $\theta=90^\circ$ の土圧が低下せずに計測当初から変化がないのは裏込め注入圧等の何らかの影響を受けたものと考えられる。なお、水圧の計測結果をもとに、深度方向の水圧分布を回帰分析によって推定した結果、計測値が地下水位から求められる静水圧分布と概ね一致した。

2.2 各トンネルに作用する長期安定時における土水圧

図-5にA、Bトンネルの長期安定時における土水圧分布を示す。図は計測データが収束した長期安定時のデータを用いて、水圧の結果をもとにトンネルに作用する静水圧を推定し、その結果と比較したものである。図より、一部のデータを除いて、いずれのトンネルにおいても土圧計から得られる値と推定した静水圧との差は小さい。

ここで、土圧が作用していないと考えた場合、長期安定時に覆工に作用している荷重が覆工自重および水圧であるとする、浮力に対して抵抗する荷重は自重のみであるため、自重-浮力 <0 となり、トンネル上方に地盤反力が生じると考えられる。そこで、各トンネルの天端の計測土水圧、浮力と自重の関係から計算される上側への圧力との関係を表-3に整理した。表より、各トンネルの(土圧-静水圧)の値と(浮力-自重)の値は比較的近似した値を示しており、いずれのトンネルも地盤反力がトンネル天端に作用しているものと考えられる。



(a) Aトンネル (b) Bトンネル
 図-5 長期安定時における土水圧分布

る時の断面力は、施工時荷重であるテール内荷重と仮想荷重を適切に評価することで算定できると考えられる。

3.2 長期安定時に作用する荷重

ここでは、想定荷重を載荷させたときの骨組み構造解析により算出した断面力（解析値）と鉄筋応力計測値から算出した断面力（計測値）の比較を行い、長期安定時における各トンネルに作用する荷重について評価する。

解析はテール内における施工時荷重と同様な方法とした。載荷荷重は、図-7で示した荷重モデルのテール内荷重を水圧に置き換えた荷重モデルを基本に、自重と水圧のほか、鉛直土圧 P_e の大きさとして、トンネル直径（ D ）に土の水中単位体積重量を乗じたものを基本に、その大きさを適宜変化させた。なお、地盤反力係数は二次元FEM解析による方法²⁾により求めた値（Aトンネル:20 MN/m³、Bトンネル:123 MN/m³）を用いた。

荷重モデルを仮想荷重として与えた時の骨組み構造解析により算出した断面力（解析値）と鉄筋応力計測値から算出した断面力（計測値）の比較を図-9に示す。これより、それぞれのトンネルにおいて異なるが、長期安定時の計測断面力に近似する解析条件は、静水圧だけでなく、仮想荷重と

して施工時荷重の残留分に相当する鉛直荷重を作用させた場合であることが分かる。

以上より、洪積粘性土（土丹）中におけるシールドトンネルの作用荷重の評価にあたっては、長期安定時においても施工時荷重の残留分による影響を考慮する必要があることが分かった。

4. まとめ

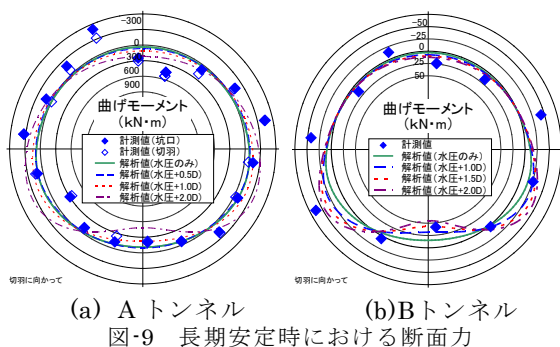
洪積粘性土（土丹）の硬質地盤中に建設されるトンネルにおける現場計測結果に基づいた分析により、以下のことが明らかとなった。

- ①水圧は静水圧が作用する。
- ②長期安定時にはトンネルに直接作用している荷重は、自重、水圧であり、土圧は作用していないか、作用しても非常に小さい。
- ③セグメントがテール内に位置している時の断面力は、施工時荷重であるテール内荷重と仮想荷重を適切に評価することで算定できる。
- ④長期安定時におけるシールドトンネルに作用する荷重の評価にあたっては、自重、水圧のほか、施工時荷重（テール内荷重、裏込め注入圧、ジャッキ推力等）の残留分の影響を考慮した荷重を考えることで、長期安定時におけるセグメント断面力を近似することができる。

今後は、現在のセグメント設計では考慮できていないシールド掘進・組立てに伴う施工時荷重の定量的な評価手法を検討することが課題となる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法編・同解説、p44、2006.7
- 2) 真下英人、左近嘉正、石村利明、岡田範彦：良質地盤におけるセグメント設計に用いる地盤反力係数に関する一考察、トンネル工学報告集、第16巻、pp295-302、2006.11



石村利明*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 主任研究員
Toshiaki ISHIMURA

真下英人**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所 道路技術研究グループ
グループ長（前独立行政法人土木
研究所つくば中央研究所道路技術
研究グループトンネルチーム
上席研究員）、工博
Dr.Hideto MASHIMO

角湯克典***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 上席研究員、工修
Katsunori KADOYU