

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

Study on the load of shield tunnel constructed in the diluvial clay

真下英人¹・左近嘉正²・石村利明³

Hideto MASHIMO, Yoshimasa SAKON and Toshiaki ISHIMURA

¹正会員 工博 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: mashimo@pwri.go.jp

²工修 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

³正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

This paper is the study on the load of shield tunnel, which has been constructed in the diluvial clay. Earth pressure, water pressure and stress of reinforcing steel bar have been measured in chronological order after the segments equipped with gauges were constructed. The results of the measurement are as follows. i) Earth pressure does not act on the shield tunnel, ii) Ground reaction acts on the top surface of the shield tunnel by the buoyancy, and iii) Some amount of execution load remain on the shield tunnel.

Key Words: shield tunnel, diluvial clay, earth pressure, execution load, and frame analysis

1. はじめに

大深度における洪積粘性土層のような良質地盤に建設されるシールドトンネルの覆工に作用する土圧については、現場計測データが少ない状況であり、現在のシールドトンネルの覆工設計では、鉛直土圧荷重として、緩み土圧等を用いている。今後、大深度の良質地盤での地下道路等の大断面シールドトンネルの建設が計画される中で、シールドトンネル覆工に作用する土圧を正しく評価することは経済的かつ効率的な覆工の設計につながるものであると考えられる。

本報告では、洪積粘性土層（土丹層）を通過するシールドトンネル（外径 $D=6.2\text{m}$ 、土被り約 35m ）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る計測結果について、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ものである。

2. シールドトンネル計測概要

(1) シールドトンネル概要

現場計測を実施したAトンネルの計測リング位置および地盤条件を図-1に示す。トンネル土被りは、約 35m （約 $5.5D$ ）であり、シールドトンネルが通過する土層は、上総層群の泥岩層から成り立っており、 N 値 50 以上の安定した地盤である。

シールドトンネルの掘削方式は密閉型の泥水加圧式シールドである。また、セグメントの構造・形式は、桁高 250mm 、幅 $1,300\text{mm}$ の6分割の鉄筋コンクリートセグメントである。シールドトンネル諸元を表-1に示す。

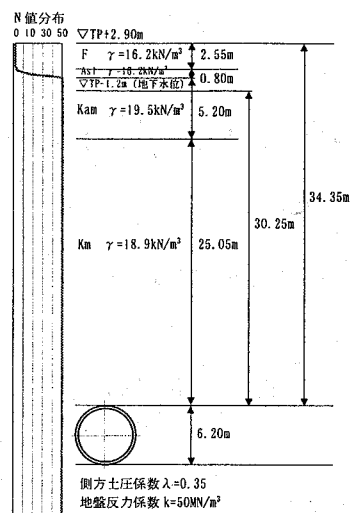


図-1 トンネル位置と地盤条件

表-1 シールドトンネル諸元

シールド外径(mm)	6360
シールド形式	泥水加圧式
土被りH(m)	34.4
土被り比H/D	5.5
地下水位(m) (トンネル頂部より)	30.3
トンネル上部の主な地質	洪積粘性土
掘削部の主な地質	洪積粘性土
セグメントの種類	平板型RCセグメント
セグメント外径D(mm)	6200
セグメント内径(mm)	5700
セグメント厚さ(mm)	250
セグメント幅(mm)	1300
セグメント分割数	6分割
セグメントの組み方	2リング千鳥組み
継手形式(セグメント継手)	突合わせ継手
継手形式(リング継手)	ピン継手

(2) 計測点および計測項目

現場計測は、計測リングⅠ（以下、325Rと表記）、および計測リングⅡ（以下、326Rと表記）の2リングで実施し、325Rで土圧、水圧、鉄筋応力度を計測し、326Rで鉄筋応力度を計測した。326Rの鉄筋応力度は325Rの鉄筋応力度と同様の結果を示すことから、本報告では、325Rの計測結果について述べる。

① 土圧計

セグメント背面にパッド式土圧計を45°ピッチに8箇所設置した。計測は、セグメントの各ピース組立前から開始した。

② 水圧計

天地左右90°ピッチに4箇所設置した。325Rから10リング（335R）組立後に計器を設置して計測を開始した。

③ 円周方向鉄筋応力時計

K型セグメントについては1箇所、K型セグメント以外については周方向に2箇所ずつの計11箇所に対し、外側鉄筋および内側鉄筋に鉄筋応力度計を設置した。計測はセグメントの各ピース組立前から開始した。

325Rは2006年8月11日に組み立てられ、組み立て直後から約1年に渡って計測が実施された。325Rの計測器設置位置は図-2のとおりである。

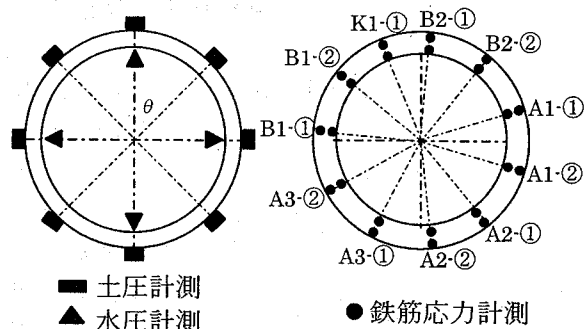


図-2 325R計測器設置位置

(3) 施工時荷重作用時の計測リングの位置

セグメントリングとシールドマシンの位置関係を図-3に示す。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収まる。325R組立から1リング先のセグメント（326R）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。

また、裏込注入はセグメント注入孔からの即時注入方式を採用しており、325R組立から2リング先のセグメント（327R）掘進時に裏込注入圧が作用する。

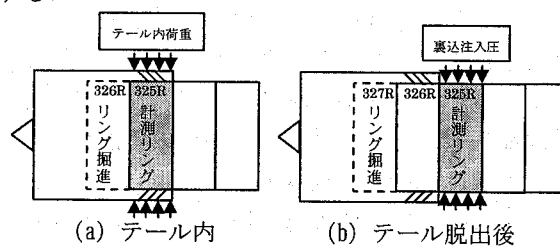


図-3 施工時荷重作用時の計測リングの位置

3. シールドトンネル計測結果

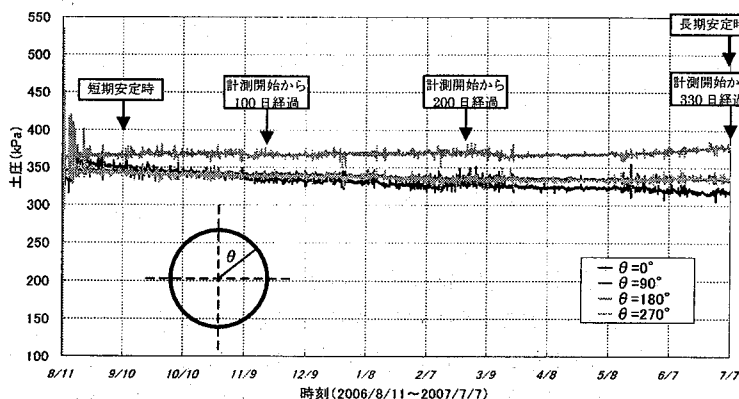
(1) 土圧・水圧計測結果

a) 土圧計測結果

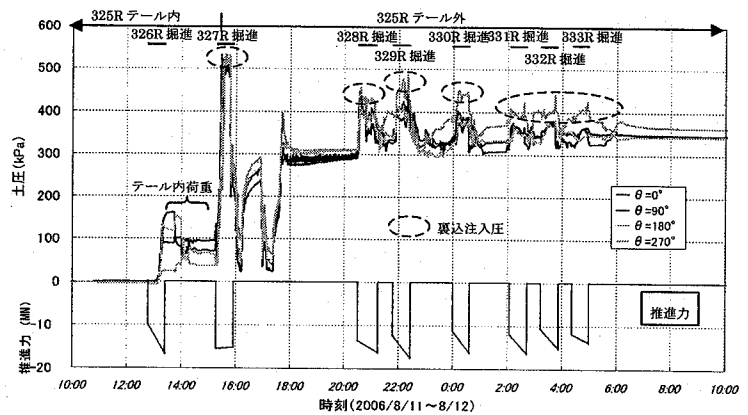
パッド式土圧計の長期経時変化を図-4 (a) に示す。土圧計の計測値は、土圧の他にテール内荷重、裏込注入圧等の施工時荷重および水圧の作用分を

含んだ値となっている。325R組立後、施工時荷重の影響により土圧計測値の変動が大きい、その後変動は小さくなり、土圧がほぼ一定値を示すようになる。ここでは、施工時荷重の影響による土圧の変動がなくなり、土圧計測値がほぼ一定の値を示す325R組立後30日経過時点を短期安定時とし、325R組立から330日経過時を長期安定時として、今後の検討を行った。また、325R組立後12時間経過までの土圧計測結果を図-4 (b) に示す。325Rがテール内に存在するときはテール内荷重が、計測リングがテールから脱出後は裏込注入圧が作用している。裏込注入圧は、裏込注入が行われるトンネル掘進中に上昇し、掘進停止後に掘進前の状態に戻る。裏込注入圧の影響は、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、土圧計の値は、徐々に低下し、一定値に収束する。なお、327R掘進直後に土圧計の値が急激に下がっているが、この時には泥水圧が大きく変動する現象が発生しており、その影響によるものと考えられる。

土圧計と水圧計の計測結果の推移を図-5に示す。 $\theta=90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の覆工側部および下方では土圧計測値は、比較的早くに一定値に収束しており、その値は水圧計測値とほぼ同じ値となっている。一方、 $\theta=0^\circ, 45^\circ$ の覆工上方では土圧計測値が一定値に収束するまでに時間がかかっているが、水圧計測値に近づく方向に推移している。ただし、長期安定時においても土圧計測値は水圧計測値よりも大きな値を示しており、これは後述するように地盤反力がトンネル上方に作用しているためであると考えられる。なお、 $\theta=45^\circ, 135^\circ$ での水圧については、計測値がないため後述する $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ の位置での計測結果から得られる回帰式を用いて求めた値である。



(a) 325R 組立後 330 日経過までの土圧の変化



(b) 325R組立後12時間経過までの土圧の変化

図-4 土圧計の計測結果

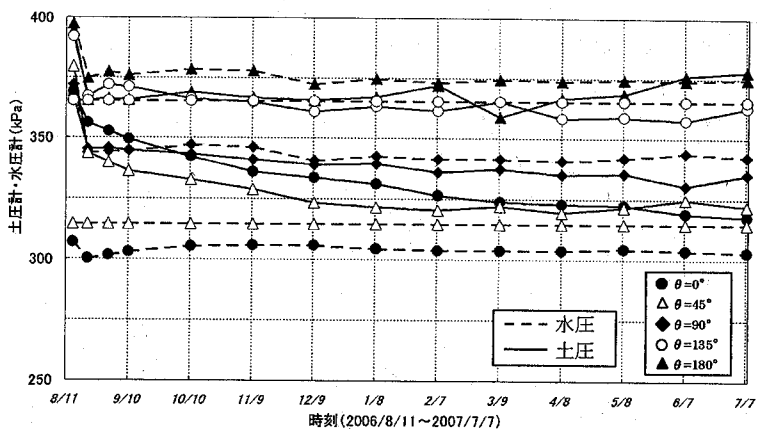


図-5 土圧計と水圧計の推移

b) 水圧計測結果

水圧計の値は、計測開始直後は裏込注入圧の影響を受けて大きな値を示すが、その後は概ね一定値を示して安定している。水圧計の位置（深度）と計測結果から、回帰分析を用いて深度方向の水圧分布を推定すると図-6のとおりである。図よりトンネルに作用している水圧は、天端で304kPa、近似式の傾きは $11.6 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ であり、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することが確認できる。

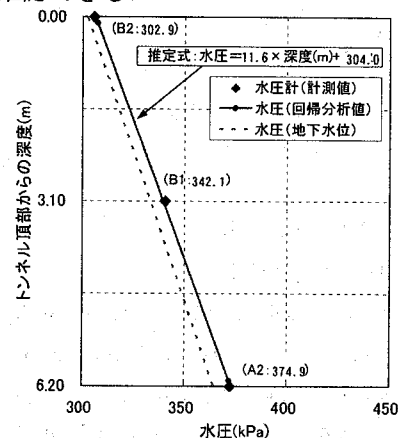


図-6 水圧分布

c) 長期安定時における荷重状態

長期安定時においては、覆工下方では土圧と水圧の計測値がほぼ同じ値となり、覆工上方では土圧計測値の方が若干大きくなるが、水圧計測値に収束するように推移している。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、自重と水圧を作用させた荷重モデルを考え、骨組み構造解析によりトンネル上方に作用する地盤反力を検討した。骨組み構造解析は後述する2リングはりばねモデルを用いた。

天端での圧力を表-2に示す。天端での変位量と地盤反力係数から天端に作用する圧力を求めると、土圧計の値から水圧計の値を差し引いた値に近い値となっており、地盤反力がトンネル上方に作用していることが確認できる。

以上の検討より、長期安定時ではトンネルには自重および水圧が作用し、土圧は作用していないものと考えられる。

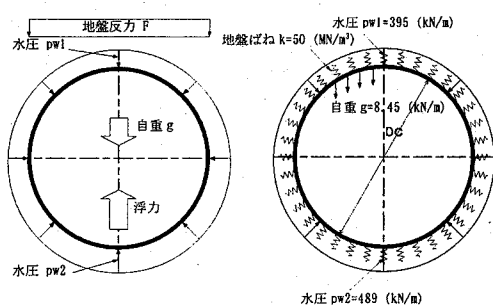


図-7 トンネルの荷重状態および計算モデル

表-2 解析結果

	解析値	計測値
k (MN/m³)	50	—
変位量 δ (mm)	0.57	—
天端圧力 p (kN/m²)	28.5	13.5

天端圧力 p ;

解析値 $p = k \text{ (MN/m}^3\text{)} \times \delta \text{ (mm)} / 1000$

計測値 $p = \text{(土圧計の値)} - \text{(水圧計の値)}$

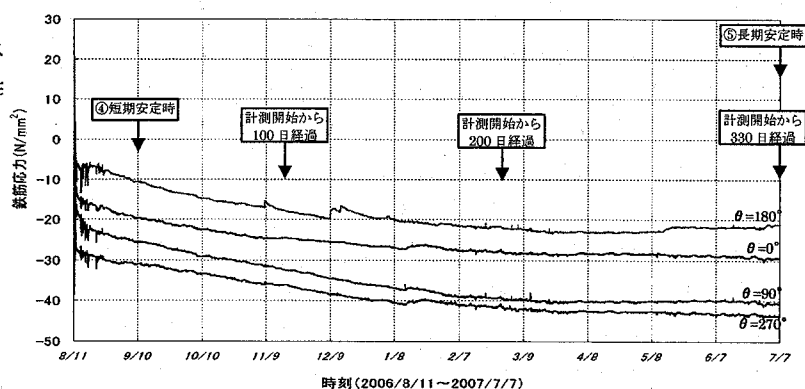
(2) 鉄筋応力度計測結果

a) 鉄筋応力度の経時変化

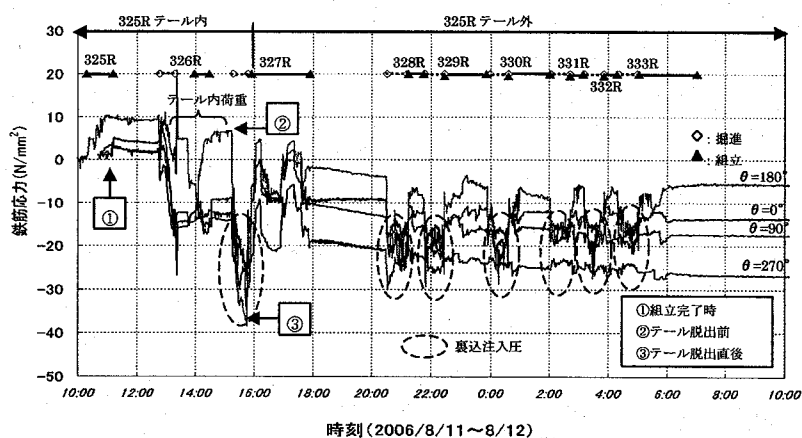
325Rの鉄筋応力度の長期経時変化を図-8 (a) に示す。鉄筋応力度は負の方向が圧縮応力度を示している。325R組立後は施工時荷重により鉄筋応力度に変動が生じるが、その後、施工時荷重が作用し

なくなると変動が小さくなる。また、鉄筋応力度の変動の大きい325R組立後12時間経過までの鉄筋応力度の変化を図-8 (b) に示す。トンネル掘進中に応力度の変化が大きく、テール内ではテール内荷重が作用しており、テールを脱出してから、裏込注入による影響で圧縮応力度が増加している。裏込注入圧の影響はテールを脱出した直後が最も大きく掘進が進むに従って、変動は小さくなっている。

施工時荷重による鉄筋応力度の変動は短期安定時までになくなり、その後は圧縮応力度が増加する方向に緩やかに推移している。前述したように短期安定時にはすでに静水圧が作用しており、新たな荷重は載荷されていないと考えられることから、短期安定時以降の鉄筋圧縮応力度の増加は、乾燥および温度変化によるコンクリートの収縮の影響であると考えられる。



(a) 325R組立後330日経過までの鉄筋応力度の変化



(b) 325R組立後12時間経過までの鉄筋応力度の変化

図-8 325R鉄筋応力度の変化

b) 各施工段階の断面力の算出

各施工段階において、覆工には i) 自重, ii) テール内荷重, 裏込注入圧等の施工時荷重, iii) 水圧等の荷重が作用している。自重は組立完了以

降、水圧はテール脱出後以降、覆工に直接作用しているが、施工時荷重については、テール内およびテール脱出直後は、覆工に直接作用しているが、短期安定時以降も、その影響が施工時荷重の残留分として覆工に作用することが考えられる。

ここでは、i)～iii)の荷重の影響が大きく現れている施工段階に着目し、鉄筋応力度を用いて覆工に作用する断面力を算出した。表-3に着目した施工段階およびその時に計測リングに作用すると想定される荷重を示す。

表-3 着目した施工段階と想定荷重

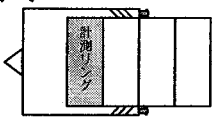
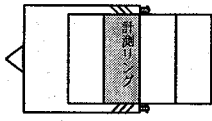
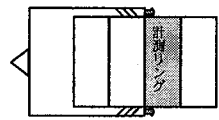
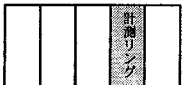
着目した施工段階	計測リングに作用する 想定荷重
①組立完了時 	自重
②テール脱出前 	自重、施工時荷重（テール内荷重、ジャッキ推力等）
③テール脱出直後 	自重、施工時荷重（裏込め注入圧等）、施工時荷重の残留分（テール内荷重、ジャッキ推力等）、水圧
④短期・長期安定時 	自重、施工時荷重の残留分（テール内荷重、ジャッキ推力、裏込め注入圧等）、水圧

図-9に各施工段階における曲げモーメントの分布を示す。本検討では、曲げモーメントを検討対象とし、軸力の評価を検討対象外とした。軸力の評価の際には、乾燥や温度による収縮が鉄筋応力度に及ぼす影響を取り除いて検討する必要があるが、乾燥や温度による収縮の影響の程度を設定するのが難しいと判断したからである。一方、曲げモーメントについては、外側鉄筋応力度と内側鉄筋応力度の差により算出されるため、外側と内側での収縮の影響が同じであれば、乾燥や温度による圧縮応力度の発生は曲げモーメント算出に影響しない。

各施工段階での曲げモーメントを見ると、組立完了時からテール脱出直後にかけて曲げモーメントが増加している。また、テール脱出直後から短期・長期安定時にかけては曲げモーメントの分布

に大きな差がなく、テール脱出以降もテール内荷重や裏込め注入圧等の施工時荷重の影響が残留していると考えられる。なお、短期安定時に比べて長期安定時での曲げモーメントが若干増加しているのは、乾燥および温度変化によるコンクリートの収縮の影響に外側と内側で差が発生したことによるものであると考えられる。

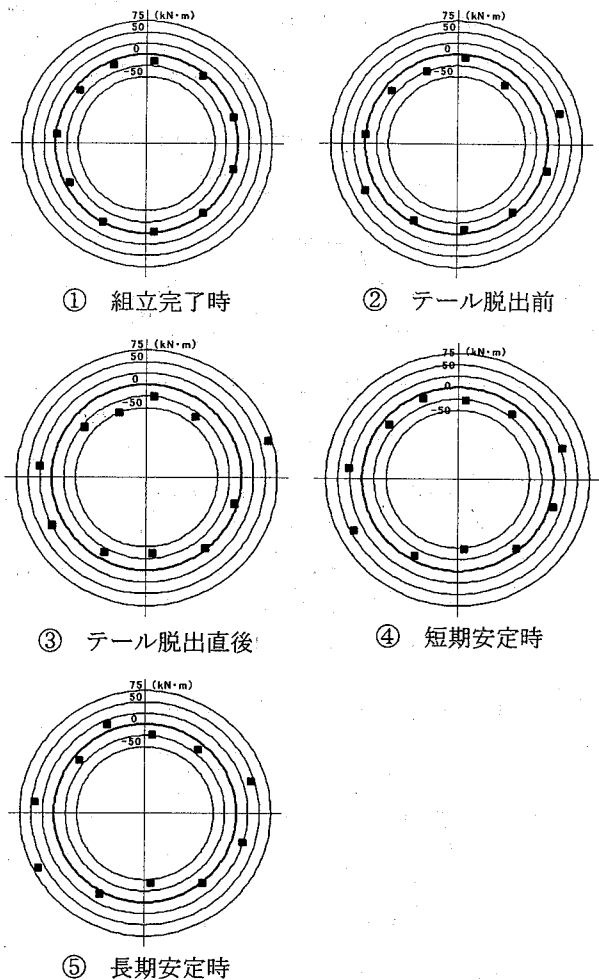


図-9 各施工段階での曲げモーメント分布

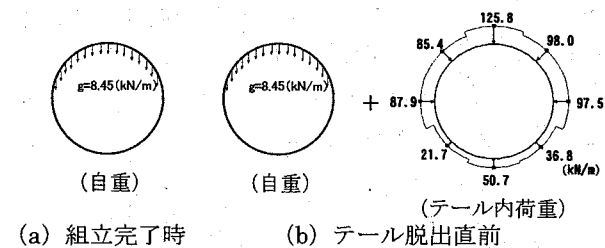
4. 覆工の設計に考慮する荷重の検討

(1) 覆工に作用する荷重の検討

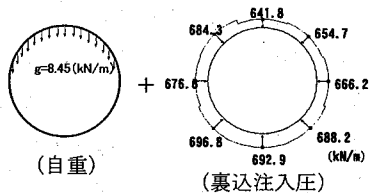
各施工段階で覆工に作用する荷重について、各施工段階で想定される荷重を載荷させて骨組み構造解析により断面力を算出し、計測値から求めた断面力との比較を行った。各施工段階における荷重検討モデルを図-10に示す。

テール脱出直前およびテール脱出直後に作用する施工時荷重として、掘進時に発生するジャッキ推力等もあるが、ここでは、土圧計測値から得られたテール内荷重、裏込め注入圧を用いた。また、

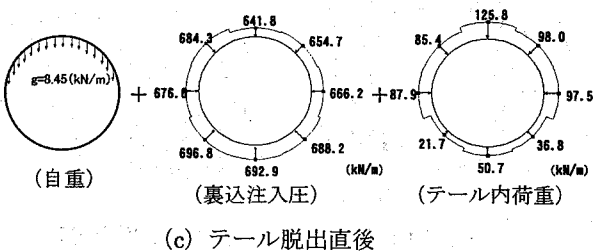
施工時荷重の残留分については、直接評価することができないため、施工時荷重と同じテール内荷重、裏込注入圧を用いた。



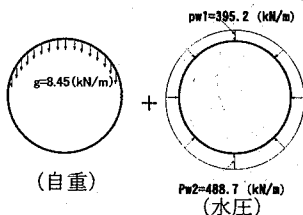
① 施工時荷重の残留分を考慮しない場合



② 施工時荷重の残留分を考慮する場合

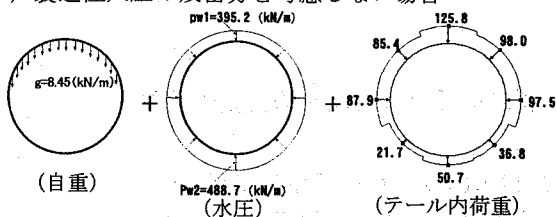


① 施工時荷重の残留分を考慮しない場合



② 施工時荷重の残留分を考慮する場合

i) 裏込注入圧の残留分を考慮しない場合



ii) 裏込注入圧の残留分を考慮する場合

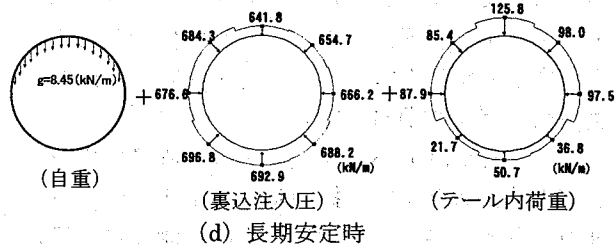


図-10 各施工段階における荷重検討モデル

(2) 骨組み構造解析モデル

骨組み構造解析による検討は、図-11に示す2リングはりばねモデルを用いた。設計定数は、Aトンネル設計計算書を参考にした。解析に用いた設計定数を表-4に示す。せん断ばね定数は実大供試体を用いたリング間せん断試験結果により求められた値を用い、回転ばね定数は、突合せ構造を持つ継ぎ手の解析に一般に用いられているLeonhardtの提唱したBetongelenkeの理論値¹⁾を用いた。また、地盤反力係数および側方土圧係数は「トンネル標準示方書（シールド工法・同解説）」における値（固結した粘性土の値）²⁾を用いた。ただし、組立完了時およびテール脱出前は覆工が地盤中にならないため、地盤反力係数を1/2に低減した値 ($k=25\text{MN/m}^3$) を用いた。

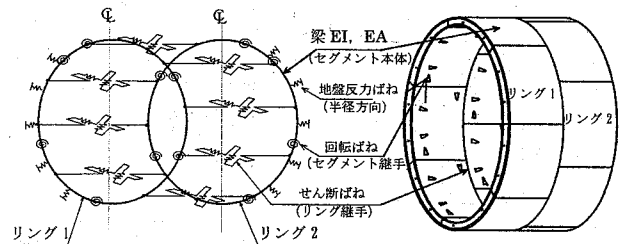


図-11 骨組み構造解析モデル

表-4 解析に用いた設計定数

せん断ばね定数 (kN/m)	28,000
回転ばね定数 (kN・m/rad)	Betongelenkeの理論式
地盤反力係数 (MN/m ³)	50 (組立完了時, テール脱出前は $k=25\text{MN/m}^3$ とする.)
側方土圧係数	0.35

表-5 回転ばね定数 (kN・m/rad)

荷重偏心率m	回転ばね定数
$m \leq 0.17$	264,000
$0.17 < m \leq 0.25$	223,000
$0.25 < m \leq 0.33$	136,000
$0.33 < m$	0

$$\text{荷重偏心率 } m = e/a = M / (N \cdot a)$$

Betongelenkeの理論では、回転ばね定数は図-12のように荷重偏心率mに応じて変化し非線形を示すが、計算簡略化のため4段階にモデル化し、各段階で線形計算を行った。

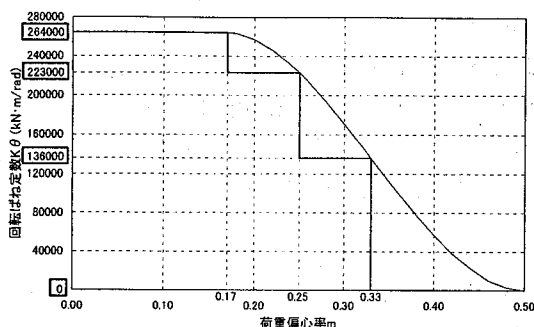
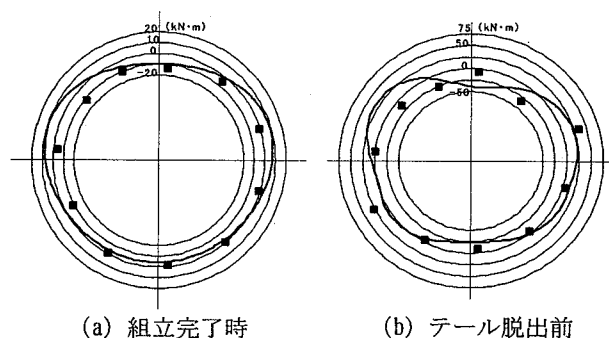


図-12 荷重偏心率と回転ばね定数の関係

(3) 解析結果

図-10で荷重モデルにより算出した断面力と計測値から算出した断面力の比較を図-13に示す。

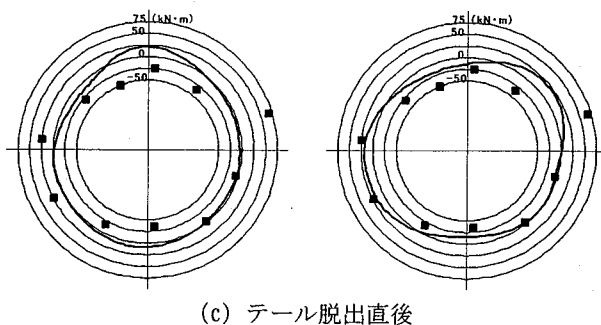


(a) 組立完了時

(b) テール脱出前

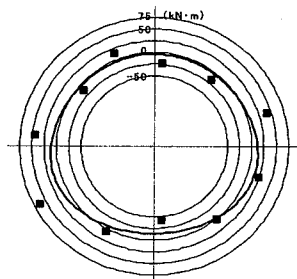
① 施工時荷重の残留分を考慮しない場合

② 施工時荷重の残留分を考慮する場合



(c) テール脱出直後

① 施工時荷重の残留分を考慮しない場合

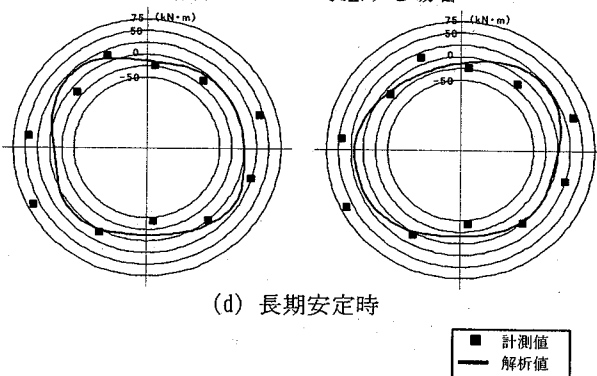


(d) 長期安定時

図-13 解析結果

② 施工時荷重の残留分を考慮する場合

i) 裏込注入圧の残留分を考慮しない場合 ii) 裏込注入圧の残留分を考慮する場合



組立完了時、テール脱出直前では、曲げモーメントについては計測値から求めた断面力に概ね近い分布となった。また、テール脱出直後および長期安定時では施工時荷重の残留分を考慮した方が、計測値から求めた断面力の分布により近くなった。これより長期安定時には、覆工に直接作用している荷重は自重と水圧であるが、施工時荷重の残留分による影響を考慮して断面力を評価する必要があると考えられる。

(4) 施工時荷重の残留分の評価

以上の検討より、施工時荷重が直接作用していないときにも、施工時荷重の残留分が影響することが分かった。長期安定時に覆工に直接作用しているのは自重と水圧のみであり、施工時荷重の残留分を設計荷重として評価することができれば、施工時荷重の残留分と自重および水圧を作用させて設計を行えばよいと考えられる。しかしながら、現時点では施工時荷重の残留分の評価が難しいため、ここでは、施工時荷重の残留分を土圧荷重に置き換えて断面力を評価することとし、長期安定時を対象に施工時荷重の残留分に相当する鉛直土圧荷重を検討した。本検討では、鉛直土圧荷重として、湿潤単位体積重量 ($\gamma = 18.9 \text{ kN/m}^3$) 換算で、 $0.5D$ (58.6 kN/m^2) および $1D$ (117.2 kN/m^2) に相当する土圧を考慮した。検討ケースおよび荷重モデル図を表-6、図-14に示す。

図-15に示す検討結果では、case-2での曲げモーメントの分布が計測値と近くなった。これより、 $1D$ 相当程度の鉛直土圧を考慮することで、施工時荷重の残留分の影響による断面力を評価することができると考えられる。

表-6 鉛直土圧検討ケース

	鉛直土圧 (kN/m^2)
case-1	58.6
case-2	117.2

【参考文献】

- 1) Fritz Leonhardt, Horst Reimann : *Betongelenke, DER BAUINGENIEUR*, Vol.41, pp49-56, 1966.2
- 2) 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

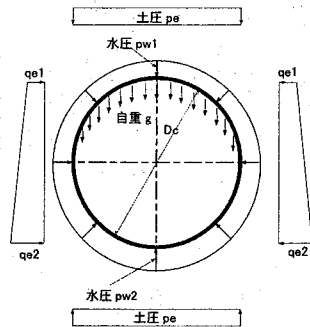


図-14 荷重モデル図

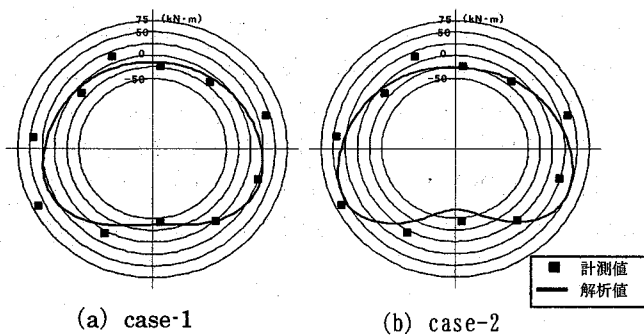


図-15 骨組み解析結果と断面力の比較

5. おわりに

本研究では、洪積粘性土層を通過するシールドトンネルの覆工に作用する荷重について検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- ① 土圧計および水圧計の計測結果から、長期安定時には、覆工に直接作用しているのは自重と水圧のみであり、覆工に土圧がほとんど作用しておらず、覆工上方には浮力による上向き荷重により地盤反力が作用している。
- ② テール内荷重や裏込注入圧等の施工時荷重は、これらの荷重が直接作用しない短期安定時以降もその影響が覆工の応力に残留すると考えられる。
- ③ 施工時荷重の残留分として、本ケースでは土圧換算で 1D 程度の鉛直土圧に相当する影響が残る結果となった。