

シールドトンネル掘進に伴う施工時荷重による セグメント挙動計測について

DETERMINATION OF THE BEHAVIOR OF SEGMENTS AFFECTED BY LOCAL LOADS DUE TO SHIELD PROPULSION

笠井 靖浩*、藤井 綱男*、北村 昌文**、園 昭博***

Yasuhiro KASAI, Tsunao FUJII, Masafumi KITAMURA and Akihiro DAN

The widening of segments is one of decisive factors in improving the performance and economy of shield tunneling. However, in some actual cases of shield tunneling where widened segments are being adopted, cracking or ring joint failure has been confirmed. The cause of such damage, which is assumed to be moments induced by jacking operation, or arching effects produced between the tail of a shield machine and segments, yet remains to be elucidated. In view of the situation, the behavior of a tunnel along its length and the stress state of a segment ring during curved tunneling were determined through field measurement, and the mechanism of the development of local loads due to shield propulsion was estimated by numerical analysis.

key words: field measurement, curved tunneling, local load due to shield propulsion, axial and ring behavior, numerical analysis

1. まえがき

都市部における地中線洞道等の建設では、交通事情や環境条件等の制約を受けることから、シールド工法が頻繁に用いられている。また、市街地に地中線洞道を構築する場合には公道下に計画・施工される場合が多く、その線形は当然道路線形に支配されるため、急曲線施工を余儀なくされるケースが近年増大している。

一方、施工性あるいは経済性の向上を目的として、幅の広いセグメント（拡幅セグメント）の適用実績が近年増加しているが、曲線施工においてセグメントのひびわれ発生やリング継手の破損などの損傷事例が確認されている。これらの発生原因として、施工時荷重の実態が不明確ではあるものの、曲線施工の際に発生するジャッキモーメントおよびマシンテールとセグメントとのせり等が考えられ、セグメントの幅が広くなる程顕著になる傾向がある。そこで、曲線施工時のセグメントの破損状況を評価する必要があることから、今回現場計測を実施することにより、推進時におけるトンネルの挙動を把握した。

本報告は、トンネル線形の曲率半径の異なる施工区間において、トンネル長手方向（以下、軸方向と呼ぶ）の挙動およびセグメントリング（以下、周方向と呼ぶ）の応力状態について現場計測を実施し、得られた結果と数値解析による結果を比較し評価を行っている。

* 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所 船橋工事事務所

** 正会員 前田建設工業株式会社

*** 正会員 日本シールドエンジニアリング株式会社 計測技術部

2. 現場および計測概要

現場計測する本シールドトンネルは、土被りが20m程度でN値=50の洪積成田砂層（一部にN値=20程度の粘性土が介在）に構築する、曲線部の多い（全延長の50%強）洞道（図-1）である。

本計測は、推力あるいはシールド機テール部とセグメントの接触等による施工時荷重の実態を把握するため、表-1に示すように、軸方向挙動および周方向の応力状態について計測を実施した。計測リングの配置および計測機器の設置位置を図-2、図-3に示す。なお、軸方向計測については、セグメントタイプおよび掘進状態によっては計測結果に影響を与える可能性があることから、ほぼ同一条件の連続する20リングで計測を行った。

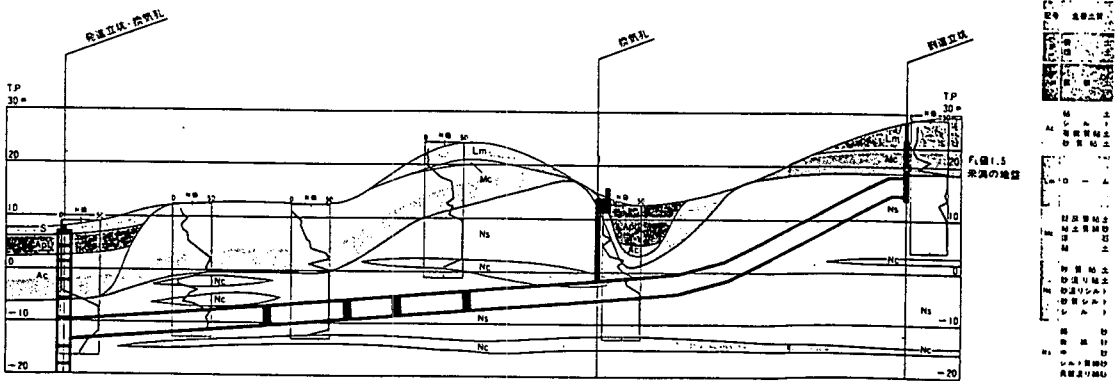
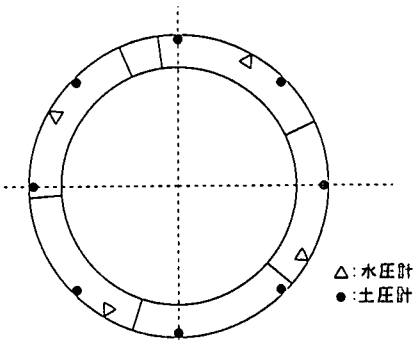


図-1 地質概要

表-1 計測項目と目的

	計 測 機 器	測 定 項 目	計測区間
軸 方 向	軸方向鉄筋計	トンネル軸方向応力	R150m
	継目変位計	リング間継目変位	R 35m
	土 圧 計	シールド機テールとセグメントの接触	R100m
周 方 向	円周方向鉄筋計	セグメントリングに生じる応力	R100m
	土圧計、水圧計	セグメントリングに作用する荷重	直線部



(a) 土・水圧計

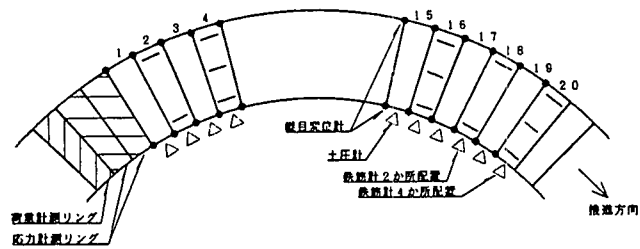
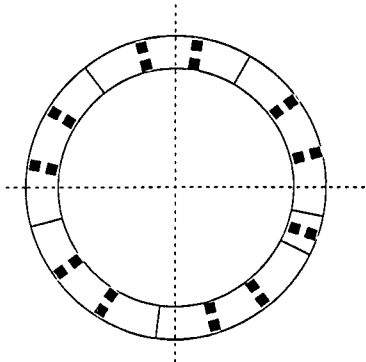


図-2 計測リングの配置



(b) 鉄筋計

図-3 計器設置概要

3. 計測結果および考察

本節では、トンネル長手方向の計測結果をもとに算出した各ばね定数を用いて数値解析を実施し、計測結果と解析結果を比較することで、解析モデルを評価することにした。

3・1. トンネル軸方向計測

計測結果をもとに、セグメント本体ならびに継手部の剛性を考慮したトンネル全体の剛性を評価し、また、土圧計から得られたデータより、施工時荷重を含めた外荷重をトンネル長手方向解析手法¹¹にて算定する。なお本計測結果は、計測区間に推力の影響を及ぼした推進中のデータについてまとめ、平均化して示した。

本解析に用いたモデルは、実施工区間を考慮して解析モデル長を50mとし、一様等価剛性の梁とする。解析モデルを図-4に、解析入力条件を表-2に示す。なお、解析に用いる地盤ばねを入力するにあたり、①テール内の未拘束範囲、②裏込め注入材の未硬化範囲、③裏込め注入材の完全硬化範囲、により地盤バネが変化することから、ばね定数の適用範囲をこれら3つに分けて同図中に示したように入力している。作用外力については、実施工データより各推進リングでの値を算出し、これらの平均値を使用した。

図-5に1推進における軸力の伝播状況をトンネル線形の曲率半径別に示す。これによると推進距離3~5m程度で減衰状況にばらつきがみられる区間と、それ以降の主減衰が生じている区間に区分できる。この原因としては、トンネル周辺地山の拘束状態が異なり、掘進距離3~5m程度の区間では裏込め材が周辺の地山強度にまで硬化していないためにトンネル拘束が不十分であり、またそれ以降では裏込め材が周辺の地山強度にまで達しているためにトンネルを十分に拘束しているためと考えられる。解析結果との整合性については、特に主減衰区間において良好であるといえる。

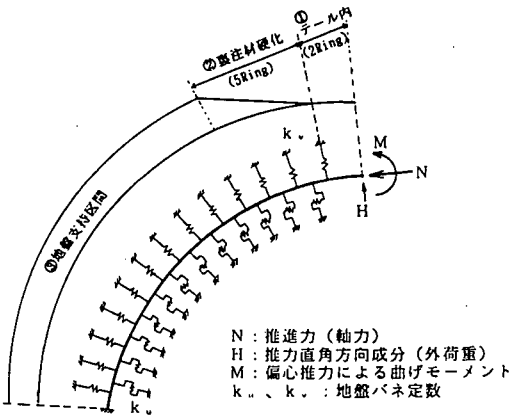


図-4 軸方向解析モデル

表-2 軸方向構造解析入力条件

項 目	R150m	R35m	R100m
軸 力 (tf)	281.4	321.4	612.2
曲げモーメント (tf/m)	143.7	97.6	78.0
軸直角方向荷重 (tf)	7.5	15.0	10.0
地盤ばね			
k_v (tf/m ²)	23300		
k_u (tf/m ²)	73300		

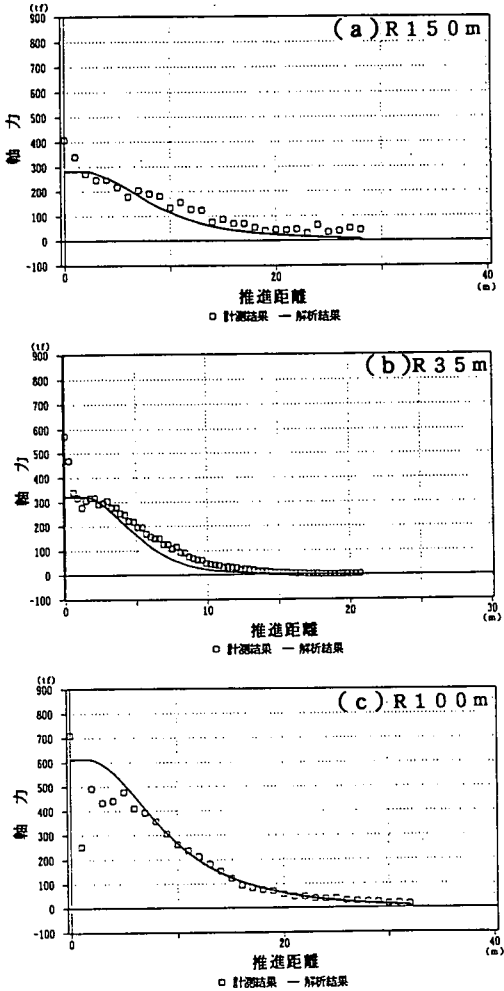


図-5 軸力伝播状況

次に、図-6に示す曲げモーメントの分布状況をみると、曲げモーメント最大値は計測区間毎で異なるものの、最大曲げモーメントの発生地点は、各施工区間ともに推進位置から5~7m後方であることがわかる。このような曲げモーメントの最大値が推進位置以降に生ずるためには、推進位置での初期曲げモーメントの影響ではなく、推力方向とトンネル軸心とのずれおよびトンネル軸直角方向成分が必要となる。ここで、軸直角方向荷重を入力条件とした本解析結果との整合性が認められることから、トンネル推進時に曲線外側方向への荷重が作用している可能性は高いものと考ええる。

次に、セグメントとシールド機テールとの接触状態を把握するために、セグメントがテールから離脱する際に作用する荷重について計測した結果を図-7に示す。これによると、施工時荷重の発生が顕著な場合とそうでない場合に分類できる。ただし、本施工ではテールクリアランス計を設置することでこれを常時管理しており、施工結果からはテールクリアランスが確保されていることを確認している。この施工時荷重の発生原因として、シールドマシンとセグメントとの幾何学的な位置関係によって、曲線内側部のテールクリアランスが小さくなる一方、裏込め材がテールパッキンへ流入し、それが固結したことによってテールクリアランスがさらに小さくなっているために、曲線外側方向への押しつけ力がセグメントに作用したものと考えられる。この圧力増分値を軸直角方向荷重とすると、 $R=150\text{m}$ では 1.1kgf/cm^2 程度、また $R=100\text{m}$ では 1.6kgf/cm^2 程度発生していることから、曲率半径が小さくなるにしたがい軸直角方向荷重は増加するものと考えられる。

3・2. トンネル周方向応力計測

セグメントリングに発生する応力状態を把握するために、 $R=100\text{m}$ 曲線部においてセグメント組立直後より計測を開始した。この結果、図-8に示すように、セグメントがテールから離脱する直前では曲線内側スプリングラインの応力状態は内縁側圧縮状態となっているものの、テール離脱後は内縁側引張り状態に変化していることから、施工時荷重の影響を受けている可能性

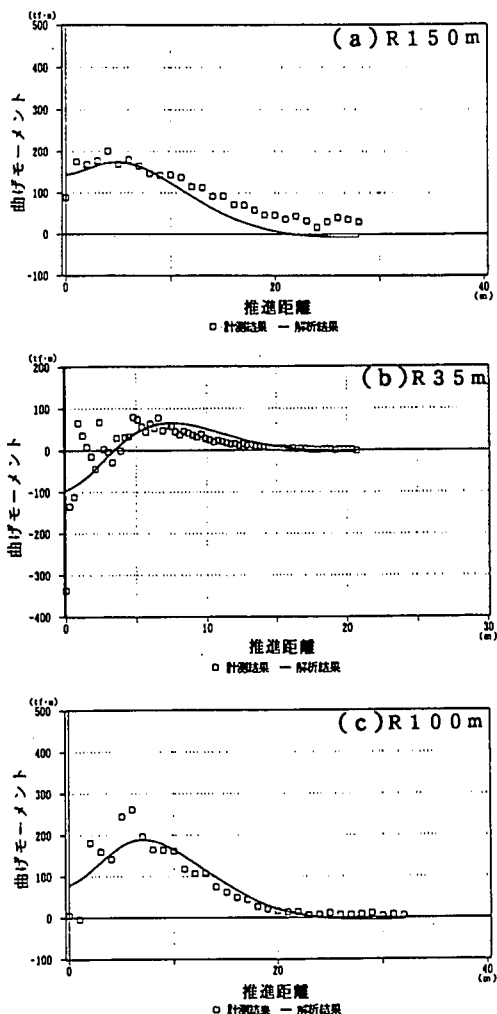


図-6 曲げモーメント発生状況

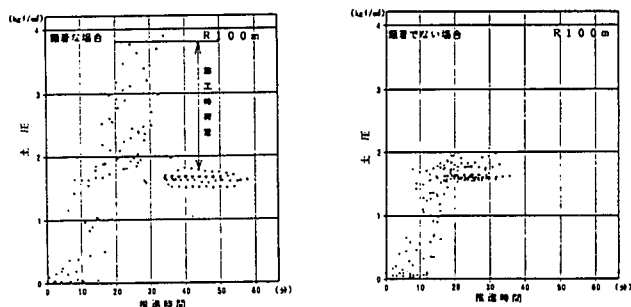


図-7 軸直角方向荷重計測結果

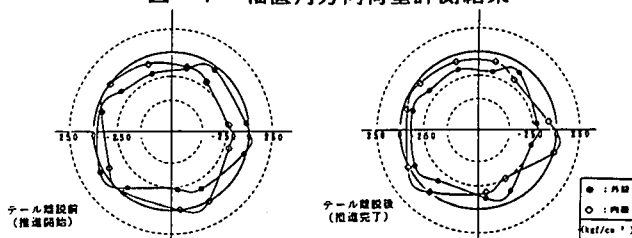


図-8 テール離脱時の鉄筋応力度分布図

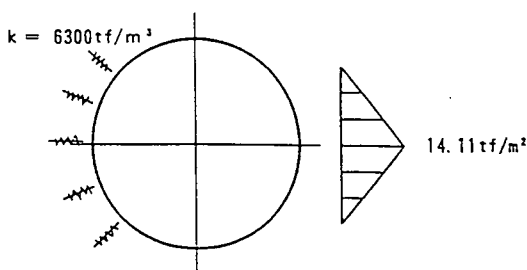


図-9 1リング構造解析モデル

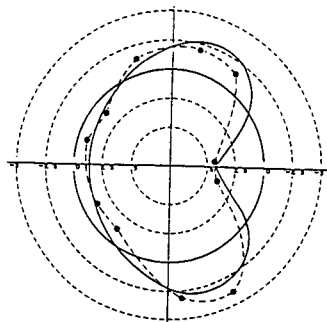


図-10 曲げモーメント分布状況

が高いことが判明した。そこで、セグメントがテールから離脱する時点の1推進に着目し、推進開始前を初期値として応力状態が逆転した時点の曲げモーメント分布状態を表現するための解析モデルを設定し、施工時荷重の作用形態を解析により推定することにする。ただし、本解析は施工時荷重の推定を行うことを目的としていることから、解析条件の簡便化のために土・水圧は荷重入力条件に含めず、軸方向解析より得られた外荷重のみ作用させている。なお、解析モデルは図-9に示すような一様剛性リングモデルで実施した。

解析結果を図-10に示す。この結果、曲線内側スプリングラインにおいて最大曲げモーメント(4.4tf)が発生している。この理由として、本計測区間は、 $R=100\text{m}$ で実施しているため、曲線内側のテールクリアランスが小さくなる一方、テール内への裏込め注入材の流入による目詰まり等によって、幾何学的にテールクリアランスが確保されていても、直線施工区間に比し押しつけ力の発生する可能性が高くなるものとする。

なお、計測結果と解析結果と比較すると概ね整合性がとれていることから、本解析に用いた諸定数はほぼ妥当であると思われる。

4. 施工時荷重推定解析

周方向計測により施工時荷重の作用形態が明らかとなったが、テールクリアランス計を設置することでテールクリアランスを確保したにもかかわらず、 $R=100\text{m}$ 部において、曲線外側スプリングライン付近に継手板を介して水平方向のひびわれが発生していることが確認された。しかし、計測結果では曲線内側に施工時荷重が作用していることや、計測区間でひびわれの発生が確認されなかったことから、計測結果とひびわれ発生との因果関係を把握することができない。そこで、これまで一様剛性な1リングモデルにより行ってきた解析を、図-11に示すような2リングモデルに変更し、 $\{i\}$ リングの曲線内側に外荷重を作用させた場合に $\{i+1\}$ リングに発生する応力状態を検討することで、ひびわれの発生形態を推定することにした。

解析条件として、 $\{i\}$ リングに発生する施工時荷重(11.46tf/m^2)に相当する反力が、テール部と $\{i+1\}$ リングとの接触位置に作用するものと仮定して、ばね定数を実測の荷重-変位の関係より求めた値(1500tf/m^2)に設定した。その他の入力条件としては、周方向構造解析と同値を用い、リング継手ばね定数については、既研究³⁾を参考に設定している。解析モデルを図-12に示す。

なお、解析結果を評価するための判定基準としてコンクリート強度算定式²⁾を用い、以下の様に設定した。

$$\begin{aligned} \text{引張強度} & \cdots \cdots f_{tk} = 0.5 \cdot f'_{ck}{}^{2/3} = 28.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} & (f'_{ck}: \text{設計強度 (420kgf/cm}^2\text{)}) \\ \text{曲げ強度} & \cdots \cdots f_{bk} = 0.9 \cdot f'_{ck}{}^{2/3} = 50.5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \\ \text{判定基準} & \begin{cases} \sigma_1 < f_{tk} & \cdots \cdots \text{ひびわれの発生は極めて低い} \\ f_{tk} < \sigma_1 < f_{bk} & \cdots \cdots \text{ひびわれの発生は中位} \\ f_{bk} < \sigma_1 & \cdots \cdots \text{ひびわれの発生は極めて高い} \end{cases} \end{aligned}$$

解析結果を図-13に示す。これより、両リングとも発生応力度が引張り強度と曲げ強度の範囲にあることから、ひびわれが発生する可能性としては高いと考えられる。しかし、 $\{i+1\}$ リングと $\{i\}$ リングでの発生応

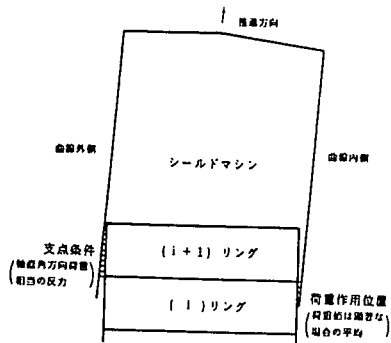


図-1.1 施工時荷重発生概念

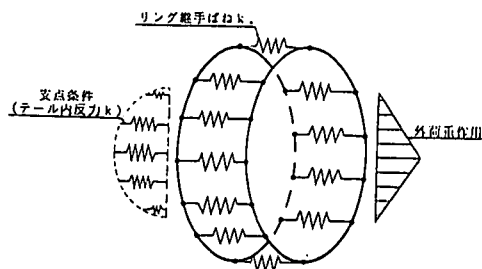
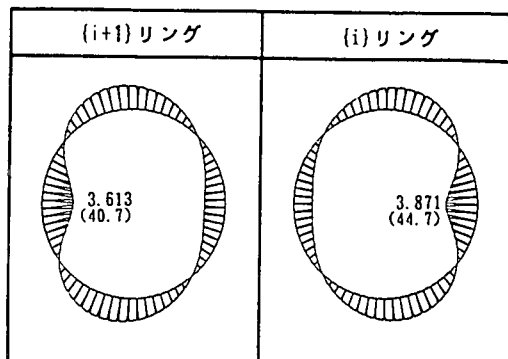


図-1.2 2リング構造解析モデル

力度を比較した場合、 $\{i\}$ リングのほうが若干ながら大きな値となっており、実際のひびわれ発生位置との整合がとれない。この理由として、 $R=100\text{m}$ 部の推進力は他の工区に比し過大であるため、必然的に偏荷重も過大となっていることや、両テーパセグメントを使用しているために目違いが発生しやすく、せん断力の発生によってリング間継手に応力が集中する等が考えられる。ただし、ひびわれの発生形態を推定するためには結果に有意差が認められないことから、ひびわれ発生形態の特定はできなかった。

図-1.3 2リング解析結果



数値は曲げモーメント ($\text{tf}\cdot\text{m}$)
括弧内は発生応力 (kgf/cm^2)

5. おわりに

これまで不明確であった、曲線部において推進時に発生する施工時荷重の実態を、現場計測を実施することで把握し、得られたデータを曲げモーメントの分布状態に着目して分析を行った。この結果、推進時のトンネル挙動あるいは施工時荷重について、計測および解析結果より曲率半径が小さくなるにつれ、曲げモーメントの発生が顕著であり、また、マシンテール部とセグメントの接触が発生していなくても軸直角方向荷重が発生するがわかった。このことから、急曲線施工においては、リング間継手やリング継手ボルト等の損傷を防止するためにも、片押しにより発生する偏心荷重の影響に留意し、セグメントの組立精度や推進時のテールクリアランスについて十分に管理するとともに、裏込め材をテールバックシンへ流入するのを防止する必要がある。

しかし、曲線外側の継手部付近に発生したひびわれと施工時荷重との関連性については、有意となる結果が得られなかったことや、本計測結果を用いて、今後さらに適用が増加すると予想される拡張セグメントへの展開も試みたが、施工状況が支配的となる本計測結果では表現することができなかった。これらについては、曲線施工においてリング間に発生するせん断力を定量的に把握するなど解明すべき点があり、今後の課題としたい。

6. 参考文献

- 例えば、小泉・村上・石田・高松：急曲線施工用セグメントの設計法について，土木学会論文集No. 448, pp111-120, 1992.6.
- 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」，1991.
- 西野・近藤・吉田：RCセグメント継手部の構造モデル化に関する試験とその考察，構造工学論文集 Vol. 31A, 1985.3.