



シールドトンネルに施工時荷重が及ぼす影響

研究

小山 幸 則* 小 西 真 治**
P. S. Jovanovic*** 橋 本 正****

1. は じ め に

大深度や急曲線施工あるいはセグメントの幅広化や薄肉化といったシールドトンネルの多様化に伴い、セグメントの設計に「シールドトンネル施工時荷重の影響」を取り上げる必要が出てきている。そこでわが国の、①施工時荷重の計測例、②施工時荷重によるセグメントの挙動予測例、③今後の設計の方向、について検討した。また、①今後のトンネル設計のあり方、②計測のあり方、③計測結果の設計へのフィードバックのあり方、について考察した¹⁾。さらに、施工時荷重の影響に関する研究について外国(オランダ)の例を紹介する²⁾。

2. シールドトンネル設計の動向

2-1 セグメントの設計について

セグメントに要求される性能は、以下のものである。

- ① 長期的に作用する土圧や水圧を支持してトンネル空間を維持する。
- ② トンネル内への地下水の流入をふせぐ。
- ③ 上記の機能について、耐久性がある。
- ④ シールドジャッキの反力受けとして十分な剛性と強度を持つ。
- ⑤ 裏込め注入などの一次的な荷重に対して十分な強度を持つ。
- ⑥ 組み立てが容易で、組み立て誤差が少ない。

セグメントの設計は、トンネルの使用目的などを考慮してセグメント形式を選定するところから始まる。次に、トンネルとして長期的に安定であるようにセグメント諸元を決定する。このセグメントについて、地震時や施工時の状態を考慮した一時的な荷重に対する安全性を確認

し、最後にセグメントの止水機能などの細目を決定する。このように、通常、セグメントの設計は、長期的に作用する土圧や水圧などの荷重に対して行うことが主体となる。

2-2 セグメントの設計モデル³⁾

長期的な荷重に対する設計は、セグメント覆工の構造モデルと、トンネルと地盤との相互作用のモデルがあるが、ここでは後者のモデルについて述べる。

トンネルと地盤の相互作用モデルには、慣用モデルと全周ばねモデルがある。慣用モデルは図-1に示すような分布形状を持つ土圧と水圧を作用させ、セグメントの変形量に応じた大きさの三角形分布の地盤反力を考える。全周ばねモデル(図-2)は地盤反力を側方のみでなく、トンネル全周に考慮する。地盤反力の大きさは、トンネルの変形量に応じたものと考えて、トンネル全周に地盤ばねを配置する。どちらのモデルにおいても地盤条件、トンネルの大きさ、深さが決まれば、一定の土圧と水圧が

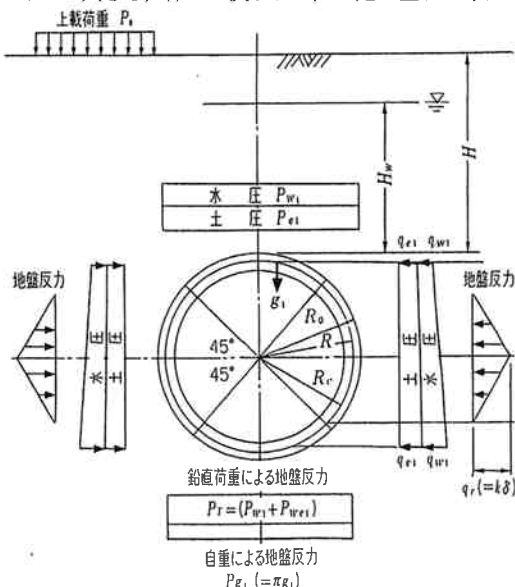


図-1 慣用モデル¹⁾

* (財)鉄道総合技術研究所企画室企画室長

** 構造物技術研究部トンネル研究室長

*** Holland Railconsult, International Consultancy Director

**** (財)地域地盤環境研究所特別研究室長

作用すると考え、荷重の作用により生じるトンネルの変形や変位に応じた地盤反力を作用させる

3. 計測事例⁴⁾

3-1 計測事例

実際のトンネルで、どのような土圧や水圧が作用しているか計測事例を調べた。この計測された土圧は、主動的に作用する土圧と地盤反力の両方を含んでいるが、これらを区別することは不可能である。ここでは、これらを一括してみる。

図-3はトンネル頂部に硬質粘性土層があり、その下に締まった砂層が分布している地盤中のトンネルでの計測事例である。砂層中の地下水位は、トンネル頂部から約10m上にある。トンネルは泥水式シールドで施工されている。計測値は、施工後6か月後のもので、変化がなくなった時点のものである。トンネル全周にわたって水圧が土圧より少し大きい。土圧計が裏込め材に覆われて若干感度低下を起こしているとしても、有効土圧(=全土圧-水圧)は小さな値しか作用していないと考えられる。

図-4に沖積粘性土層中のトンネルで計測された土圧の円周方向土圧(全土圧)と、有効土圧の経時変化を示す。この例においても、有効土圧は全土圧10%以下の小さな値となっている。

図-5は沖積礫層中のトンネルで計測された土圧と水圧の円周方向の分布である。トンネル施工後6か月を経過した時点のもので、有効応力の値は水圧に比べてきわめて小さくなっている。

3-2 トンネルに作用する土圧に影響を及ぼす要因

セグメントに作用する土圧は、初期の地中応力状態からトンネル掘削によりトンネル直近の土のひずみがどのように変化するかによって異なる。すなわち、以下に示すような要因によると考えられる。

- ① トンネル切羽などの掘削面の支持状態(泥水圧、泥水の品質、泥土圧、泥土の流動性)
- ② 掘進時のシールドの姿勢
- ③ 裏込め注入(注入量、注入圧、注入のタイミング)

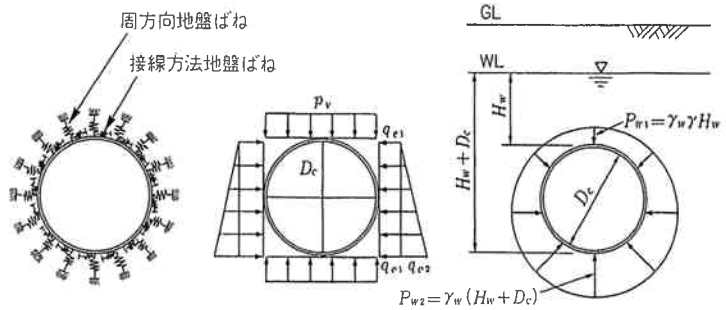


図-2 全周ばねモデル⁴⁾

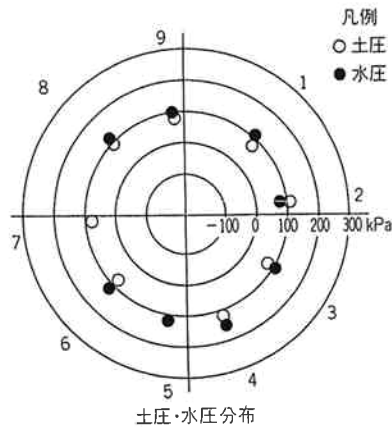
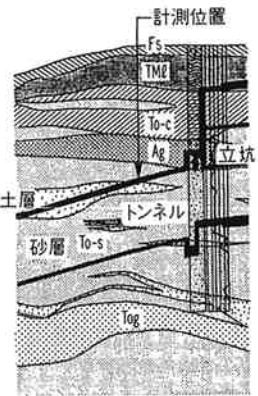
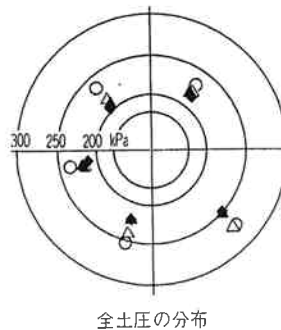


図-3 砂層での計測結果⁴⁾



土質縦断面図



全土圧の分布

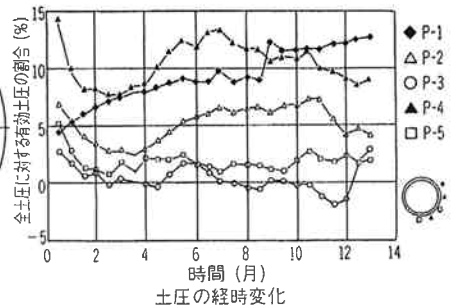


図-4 粘性土層での計測結果⁴⁾

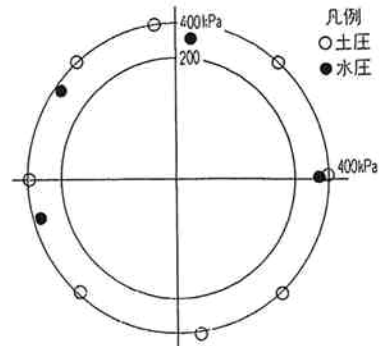


図-5 礫層での計測結果⁴⁾

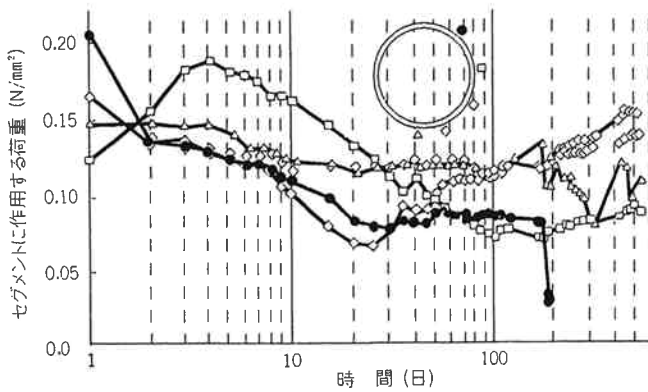


図-6 セグメントに加わる荷重の変化¹⁾

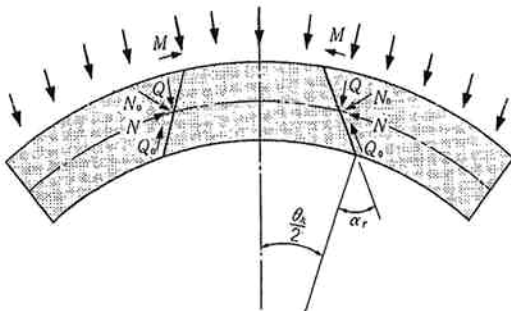


図-7 Kセグメントの抜け出しに対する検討¹⁾

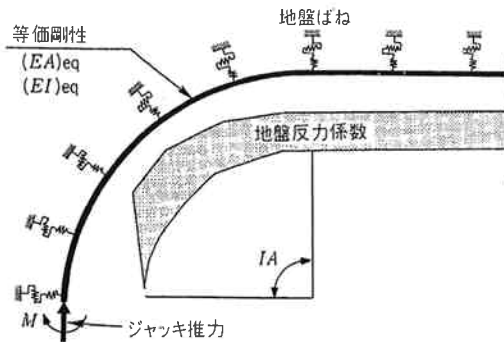


図-8 急曲線部施工時の検討¹⁾

しかし、現場計測事例(図-3～5)では、水圧のみが作用する場合も多く、セグメントと地盤との間に存在する裏込め注入材のリングが大きな影響を及ぼしていると考えられる。今後これに着目した研究が必要である。

3-3 セグメント覆工に作用する土圧の変化

セグメントの設計は、長期的に作用する土圧や水圧に対して行われているが、必ずしも設計で考えているような分布や大きさではなく、解明すべき課題も沢山ある。一方、セグメントは、長期的な安定に至る前にも十分な剛性と強度が必要である。実際のトンネルでセグメント覆工に作用する荷重がどのように変化するかをみると、図-6の例に示すような状態となる。

セグメント覆工に作用する荷重は、組み立てられたセグメントリングがテール内にあるときから、シールドの進行で地山中に出て10日後程度に間に最大値を示す。長期的な荷重は、これよりも小さくなっている。したがって、施工時から施工後間もない一時的な状態に対するチェックが必要である。

3-4 裏込め注入圧に対する設計モデル

日本のセグメントの設計では、施工時荷重について次の3項目のチェックを行うことが規定されている。

- ① 裏込め注入について、半径方向挿入型Kセグメントの抜け出し傾向に対する検討(図-7)。
- ② ジャッキ推力について、セグメントの図心と推力の中心のずれが生じることにに対する検討
- ③ 急曲線部施工時に生じるトンネル軸方向の曲げと圧縮に対する検討(図-8)

4. セグメントの損傷要因

4-1 セグメントの損傷要因

セグメントの要求性能のうち、土圧・水圧や裏込め注入圧の保持などについて述べてきた。次に、セグメントが保持すべき性能のうち、長期的な耐久性に大きく影響するセグメントの損傷がどのように生じるかを整理する。コンクリートセグメントが損傷し、その耐久性に問題を生じた例を整理すると以下ようになる。

- ① ジャッキ推力に起因するクラック
- ② トンネル周辺地盤の圧密沈下によるクラック
- ③ トンネル周辺工事による土圧の変化やトンネルの変形によるクラック

これらのうち、③は事例も少なく、基本的にはセグメント設計の問題ではない。②は軟弱粘性土地盤中のトンネルで発生することがあり、周辺地盤の圧密を考慮した設計法が設計マニュアル⁹⁾に示されている。

これに対し、①のジャッキ推力による損傷は、数多く発生し、そのメカニズムも多様である。ところが、セグメントの設計では十分に考慮されていないのが現状である。

4-2 ジャッキ推力によるセグメントの損傷

ジャッキ推力によるセグメントの損傷について概観する。まず、セグメントの平面性、真円性に起因して発生する損傷については、以下のようなものがある。

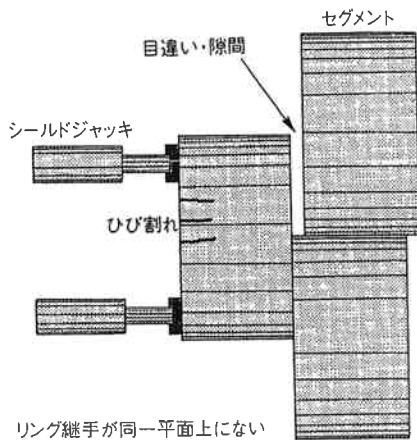
- ① リングの継手面が同一平面上に形成されていないと、セグメントに大きな曲げモーメントが発生し、トンネル背面にまで至るクラックが生じる(図-9)。
- ② 隣接するリングの中心がずれたり、Kセグメント

などの一部のセグメントがトンネル内空側に落ち込んだりした場合に、トンネル内側、あるいは、隣接するセグメントの地山側のコーナー部にクラックが生じる(図-10)。

- ③ 継手面が傾斜して隣接セグメントの継手面にあたり、コーナー部がかかる(図-11)。これは、幅の大きなKセグメントで生じやすい。

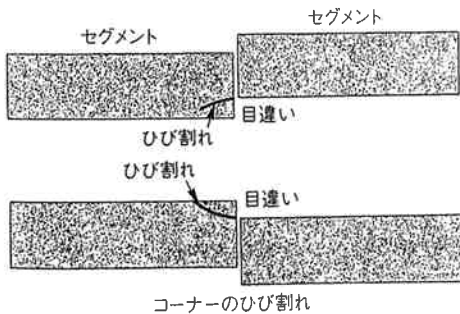
これらの、損傷は、セグメントの組み立て精度が悪く、平面性、真円性を確保できないために生じる。

次に、テール部での拘束やジャッキ载荷の偏りに起因するものを示す。



リング継手が同一平面上でない

図-9 目違い・隙間によるひび割れ¹⁾



コーナーのひび割れ

図-10 目違いによるひび割れ(縦断面)¹⁾

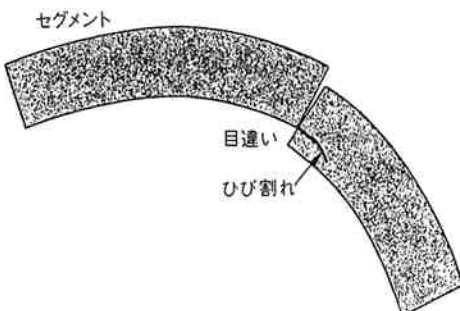


図-11 目違いによるひび割れ(横断面)¹⁾

- ① セグメントリングの中心とシールドの中心のずれや、シールドの方向とトンネルの方向の傾きなどにより、テールクリアランスが十分に確保できず、トンネル軸方向に曲げモーメントが生じてクラックが発生する(図-12)。また、テールとセグメントの間の摩擦力により、トンネル軸方向に大きな引っ張り荷重が作用してクラックが生じる。この現象は、セグメントの組み立てが悪く、扁平な形状になるとさらに助長される。
- ② テールの拘束は、裏込め注入材がテールに浸入して固結することによっても生じる。この場合は、とくに摩擦が大きくなり、ジャッキ推力も通常の場合より大きくなるので、影響度が大きくなる(図-13)。
- ③ ジャッキ推力の载荷中心が、セグメントの中心とずれることにより、セグメントの軸方向の曲げモーメントが発生してセグメントの損傷が生じる(図-14)。
- ④ シールドジャッキシューとセグメントの相対的な位置関係によって損傷が発生する。ジャッキシューがセグメントの継手面に傾斜してあたることにより、

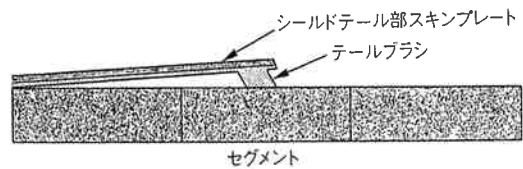


図-12 テール部のセグメントとシールドのせりによるひび割れ¹⁾

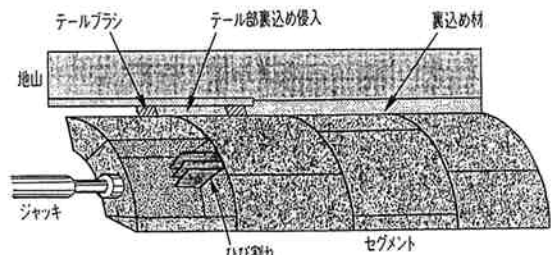


図-13 テール部裏込め侵入による摩擦増大とジャッキ推力によるひび割れ¹⁾

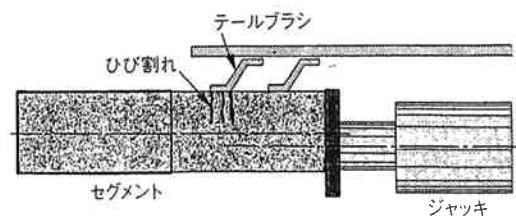


図-14 ジャッキ推力の偏心によるひび割れ発生¹⁾

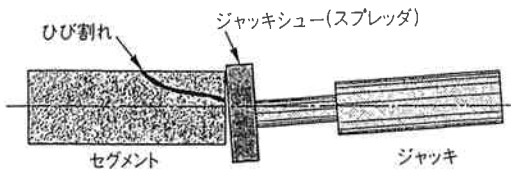


図-15 ジャッキシュアの不良によるひび割れ発生^リ

セグメントが損傷する(図-15)。このような損傷は、急曲線の施工でジャッキシュアに屈曲性がない場合に生じることもある。また、多くの場合、ジャッキシュアの据え付けと調整が不十分な場合に生じているが、セグメントリングの平面性がよくない場合にも生じる可能性がある。

これらの損傷の原因となっているテールシールドの拘束、ジャッキ載荷の偏りは、主としてシールドの姿勢制御やシールドトンネルの線形管理に起因する。

5. オランダでの研究

5-1 オランダでの施工時荷重の研究

最近、オランダではシールドトンネルの建設が急速に増えている。まだ、日本と比べて、絶対量、経験は少ないが、合理的な設計手法、維持管理方法を確立するため、リソースを集約して効率よく研究が進められている。ここでは、施工時荷重を設計に取り入れるために、オランダで行われている研究を紹介する^{24,25)}。

5-2 観測と現場計測からの知見

オランダおよび関係諸外国のシールドトンネル工事(主に鉄道、道路トンネル)の観測および現場計測結果から分析が進められている。

観測結果から得られた知見は、以下のものである。

- ① すべての工事で施工中にセグメントの損傷が発生している。
- ② グラウトの作用荷重と土荷重でシールド後方のセグメントリングに変形が起きる。これらのリングはシールド内のセグメントリングと接続しているため、軸方向でいわゆる「垂れ下がりが」発生する。
- ③ 地山中の変形したリング形状に合わせる形で、新しいセグメントリングがシールド内で組み立てられる。
- ④ セグメントの組み立て時、シールドジャッキは一部引き戻されるが、このとき、すでに組み立てられたセグメントが動き、リングジョイントが平滑でなくなる。これにより、以前に組み立てられたセグメントに応力集中が起こり、クラックが発生する。
- ⑤ セグメントの組み立ては常に完全というわけではなく、しばしば、Kセグメントの組み立てスペースの余裕が多すぎる場合や、足りない場合がある。必

要以上に余裕がある場合はセグメントが内側へ入り込み、逆の場合は、せりから外側へ動く。

- ⑥ 精度の高い測定にもとづく掘進制御やセグメント組み立てシステムでトンネルの品質が向上する。
- ⑦ 裏込め注入は覆工の変形の原因となる。グラウトのコンシステンシー、硬化時間、注入方法などの組み合わせによりトンネル覆工周りの注入圧の分布に偏りが起き覆工が変形する。

また、現地計測結果から以下の知見を得ている。

- ① セグメントに発生する応力は、施工時の方が完成後よりも大きい。
- ② 変形のほとんどはセグメント組み立て時とその直後のいわゆる施工時に発生する。
- ③ ジャッキ推力はシールド後方の覆工の変形とコンクリートセグメント内の応力に大きな影響を与える。
- ④ 応力分布はトンネル横断面方向で均一とはならない。とくにKセグメントの近傍で不均一になる。

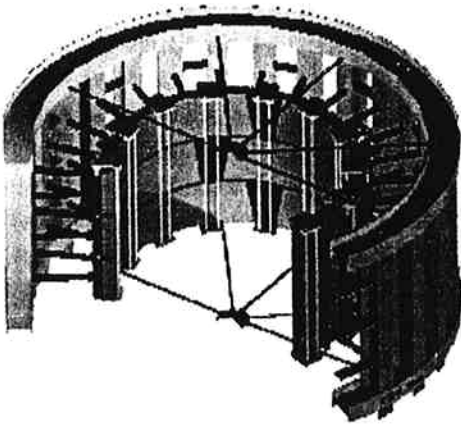
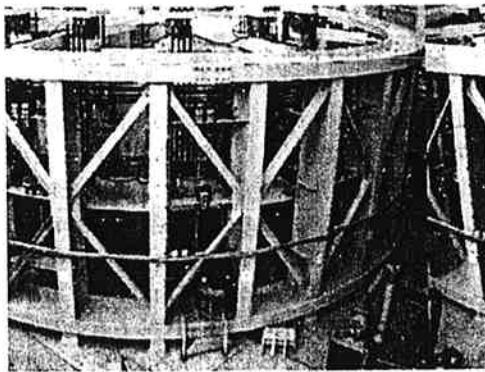
以上の観察と計測から、トンネルの品質について施工段階の影響は無視できないことは明らかである。完成後の覆工の動きを適切に評価するために、施工時から供用に至る間のすべての現象とその影響を把握しておくことは大切である。施工によって発生したエネルギーが構造物の変形やクラックの発生によって消散する、あるいは極端に少なくなるといった仮定が用いられることから、組み立て時の荷重は、ほとんどの事例において考慮されていない。しかし、重要なことは、発生した変形やクラックが覆工の非線形挙動や耐久性に強い影響を与え、このことがトンネルのライフサイクルコストに関して重要であることを理解しておくことである。

5-3 実物大室内実験

5-3-1 実験設備

RC覆工の実物大試験(図-16、写真-1)は、覆工挙動の計測データを収集するため、デルフト工科大学で実施された。ロッテルダムのボルトレックトンネル用に作られたRCセグメント3リングを組み立て、実際の条件と同じように周方向と軸方向に荷重を加えた。この実験の主な目的は以下の点を解明することであった。

- ① セグメントや継手の複雑な形状がシールドジャッキの局所的な影響との組み合わせにおいて完成後の覆工の動きに与える影響。
- ② シールド内でのリングの組み立て順序、シールドジャッキからの荷重、その後作用する半径方向の荷重が覆工内応力分布に及ぼす影響。
- ③ 完全なリング形状からの局所的な変形が覆工内の応力に与える影響。
- ④ Kセグメントがタイトに組まれているかルーズで

図-16 室内実験装置のイメージ図²⁾写真-1 室内実験装置²⁾

あるかといったことが与える影響。

- ⑤ シールドの方向制御が覆工の動きやリングのインターアクションに与える影響。

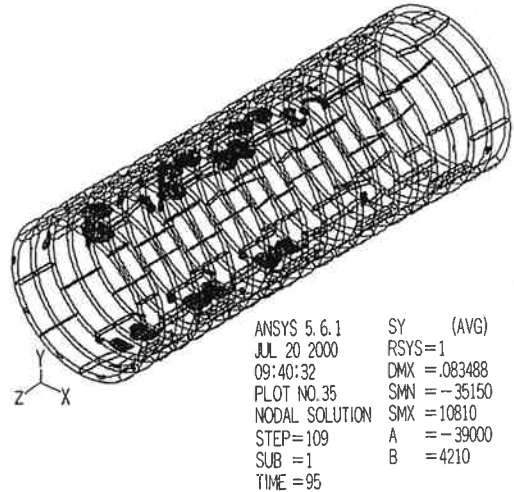
5-3-2 実験の事前解析

実験での覆工の動きについては、3次元FEMモデル(図-17)等で事前に解析された。実験が実工事の条件を考慮して行われていることから、解析の結論も実際の覆工の動きにかなり近いと考えられる(図-18~23)。

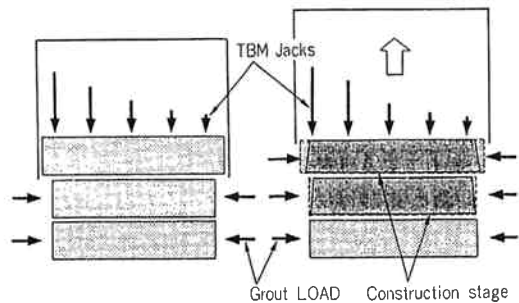
- ① 組み立て過程が、完成後に発生する増加応力の原因となる。
- ② 組み立て中に発生する変形は、ほとんどの場合その後も継続し、次の段階にも残る。
- ③ 許容値を超えた組み立て誤差は応力集中の原因となり、損傷を引き起こす。
- ④ セグメントのトンネル横断面方向での応力分布は不均一である。とくに、Kセグメントの近くでは不均一となる。主な原因は隣接するリングとのインターアクションである。リングのインターアクションは、リング間の継手の軸力と継手の粗さで決まる。新しいセグメントピースを設置する場合、ジャッキの解

Tangential stresses (kN/m²)

$b=2m, l=0, d=14.5m, F=104MN, M=-80MNm, \text{grout-sail}$



JS, HSL-BK, E:E38.000, Ebm:38500, Ebs:13000, Gr:536, rb1, re20, fb1, fe18

図-17 3次元FEMモデル²⁾図-18 実験での組み立てのシミュレーション²⁾

放は部分的にリングのインターアクションの低下を起し各リング内で変形の違いが発生する。完全な剛性一様リングと仮定して解析した場合、応力のピークが発生することはない。しかし、すべての継手接合が完全だと保証されることはない(組み立て精度)ため、これは、現実の問題と異なると考えられる。

- ⑤ 横断面積の減少によりセグメント表面のジョイント近くの応力が少なくなる(図-24, 25)。
- ⑥ トンネルの剛性は、軸方向のジョイントにより極端に減少する。さらに、軟らかい地盤中のトンネルでは、曲げモーメントに対する限界剛性について考慮しなければならない。

5-3-3 実験結果の評価

図-23に示したように、トンネル法線方向に作用する荷重の平均的な計測値は2,000kNであり、事前解析結果と近い値であった。興味深いのは、Kセグメントの近くで、この荷重が一部分落ち込んでいることである。

シールドトンネルに施工時荷重が及ぼす影響

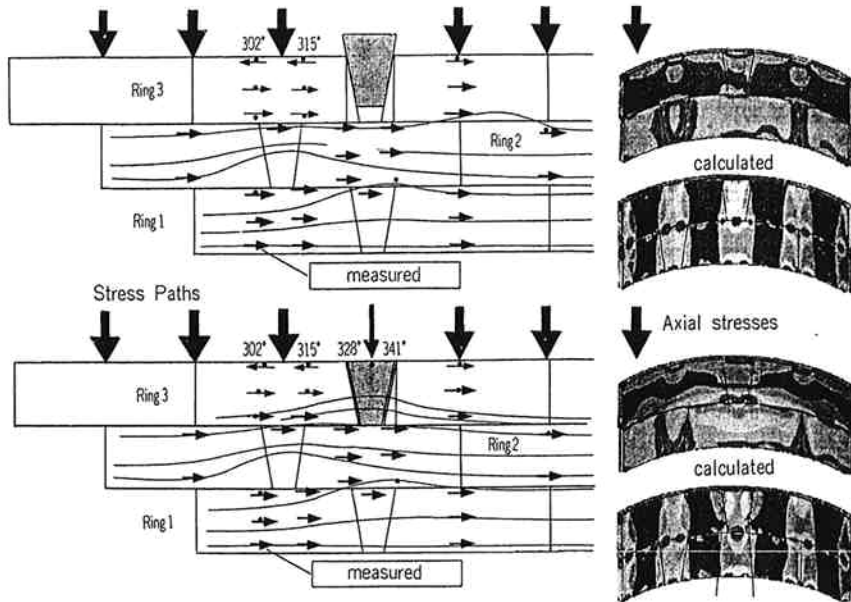


図-19 Kセグメント組み立て時の応力パスの解析値と計測値²⁾

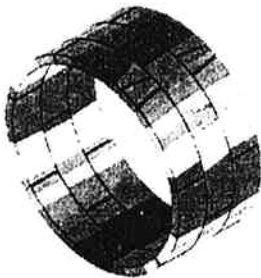


図-20 半径方向の変形²⁾
シールドの推力と隣接したセグメントの半径方向荷重が作用した後、次のセグメントが組み立てられた状態



図-21 変形方向の変形²⁾
Kセグメントのスペースに余裕がなく、むりやり押し込められた場合

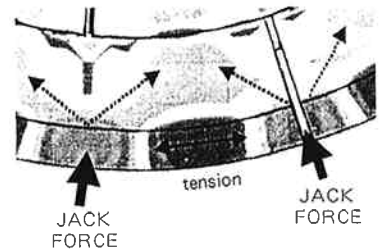


図-22 各ジャッキ力による引張²⁾

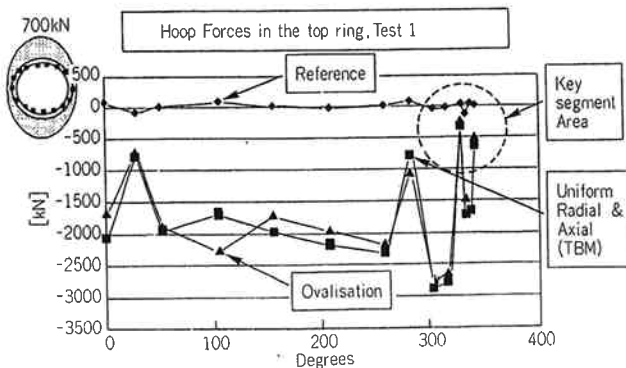


図-23 実験結果 TEST1: 供用段階 凡例²⁾

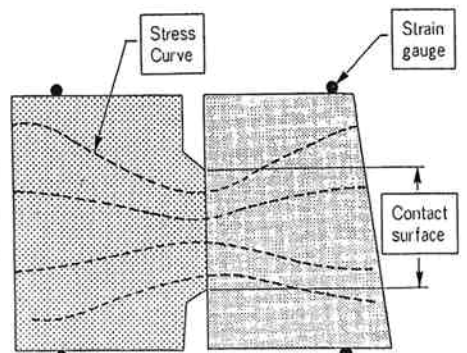


図-24 リング間継手の減少した断面²⁾

図-24, 25に示したKセグメント近傍の事前解析結果では継手接触面の減少により継手近くでの応力が減少しており、計測結果の特徴がジョイントの形状の影響である

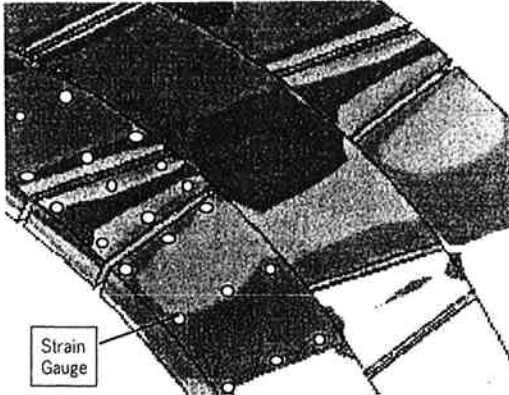
ことがわかる。

実験結果からの結論を以下に示す。

① 施工実験での供試体の変形は、すべて事前解析さ

れたものに近かった(図-26)。

- ② 応力分布はセグメントの端近くで不均一になる(平面ひずみでない)。とくに、Kセグメント近傍では不均一になる(図-27)。
- ③ セグメント法線方向作用力は、接触面の減少によって、継手の近くで低下する。
- ④ 曲げモーメント値も、事前解析のようにトンネル



応力カーブとひずみゲージの位置

図-25 FEMによる事前解析結果での接触面と応力曲線の影響²⁾

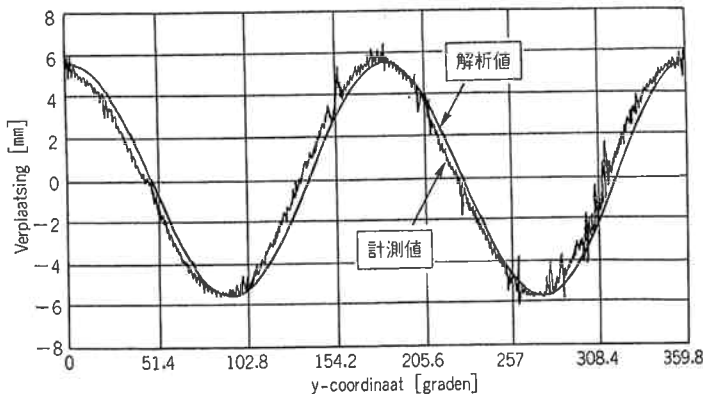


図-26 モデルでの値-変形²⁾

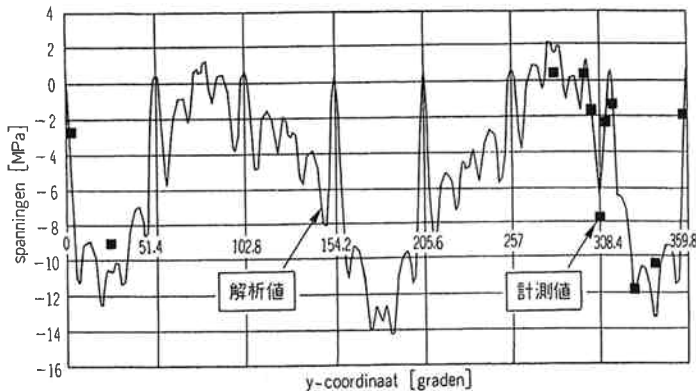


図-27 モデルでの値-応力²⁾

横断面で均一な分布にならない。

5-4 提 案

将来のトンネル設計のために、次の提案をする。

- ① 覆工の動きが荷重履歴に依存した複雑な3次元問題であることを考慮する。
- ② 組み立て手順は構造の安定要因が達成されるように注意する必要がある。組み立てられたリングは理想的な円形とならない場合がある。5mm程度の円周方向の変形でも重大な応力の増加をまねくため、セグメントの正確な組み立て方法が重要である。
- ③ Kセグメントの設計は重要である。くさび形状はおさまりがきついか緩いかで応力集中を引き起こす。Kセグメントの偏心が小さくなるようにおさめることが良いセグメントとKセグメントの設計である。
- ④ 荷重の作用順序は、覆工の応力分布に重大な影響を与えるものとして覆工構造設計の一部として考慮するべきである。
- ⑤ リングとセグメント継手の設計は、セグメント間の応力集中を防止することを考慮する。理想としては、継手設計は通常の組み立て不良を吸収できるようにする。

また、以下のものを開発していく必要がある。

- ① 例と実験で立証された設計思想
- ② セグメント組み立て精度の適切な許容値の設定
- ③ シールドの設計、ジャッキの位置、最大ジャッキ力のコントロール、適切な裏込め注入、切羽安定と地表面沈下などの適切な施工方法
- ④ 精度の高いモニタリングシステム

6. ま と め

施工時のセグメントの主な損傷要因には、次のものがある。

- ① セグメント組み立て精度
- ② シールドの姿勢制御
- ③ シールドの製作精度

これらは、いずれも設計段階で考慮するのみでは防ぐことが困難な場合が多い。このようなセグメントの損傷を防ぐには、以下に示すような対策が必要となる。

- ① 設計で、これらの誤差を適切に見積もり、補強を行う。
- ② 設計上の配慮を図書にまとめ、施工側に十分に理解を求める。

③ 施工時の限界について整理し、これを越えない施工管理を行う。

これらは、設計者と施工者が十分に協議し、情報を共有することで可能となるであろう。

施工時の損傷を防ぐには、設計と施工を一体として捕らえた検討が必要である。そのためにまず、施工時荷重の影響に関するデータを積極的に収集、ストックし分析していく必要がある。

7. お わ り に

長期的な荷重としての土圧と水圧については、簡単に記述しただけであるが、これらについても、地山を緩ませるといった施工が起因する場合が多いと考えられるので、施工を考慮した設計、設計を考慮した施工が重要であり、両者の融合が合理的な設計手法の確立のために必要である。

また、施工時荷重の影響が大きいと考えられる大深度でのトンネルの設計法や性能照査型設計あるいは限界状態設計法での施工時荷重の取り扱い方法についても今後検討していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Y. KOYAMA : Behaviors of segmental linings constructed by closed-type shield, Future trend of designing tunnels, IS-Kyoto 2001 Short Course Text, pp.115-127, 2001.
- 2) P. S. JOVANOBIĆ : Behaviors of segmental linings constructed by closed-type shield, Recommendations on Structural Analyses and Design of Tunnels in Soft soils, IS-Kyoto 2001 Short Course Text, pp.151-160, 2001.
- 3) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル編，丸善，1997.
- 4) Y. KOYAMA : Design Method of Shield Tunnel - Present Status and Subjects -, Proceedings of the International Symposium of Modern Tunneling Science and Technology (IS-Kyoto), Vol.1, pp.29-38, 2001.
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：シールドトンネル設計標準に関する手引き，(財)鉄道総合技術研究所，2001.
- 6) W. L. Leendertse, P. S. Jovanovic, C. B. M. Blom : Using 3D FEM models for predicting damage during assembling of shield driven tunnel lining of the Green Heart Tunnel, Proceedings of the International Symposium of Modern Tunneling Science and Technology (IS-Kyoto), Vol.2, pp.653-656, 2001.

【新刊のご案内】



ロックメカニクス

日本材料学会 編

A 5 判 265頁 本体価格 3,000円 技報堂出版

岩盤力学の基礎理論，岩盤の工学的特性，調査・計測および評価・解析手法に関する基本事項に加え，岩盤不連続性の評価・解析ならびに岩盤構造物設計についての最新の研究成果や新たな視点を交え，設計・施工への応用にも触れながら，ロックメカニクス(岩盤力学)の基本から応用までバランスのとれた解説を行っている。本書は，工学部学生および若手技術者向けのロックメカニクスの入門書であるが，ロックメカニクスに関連の深い周辺分野の技術者・研究者への解説書でもある。

- 第1章 ロックメカニクスとその応用
- 第2章 地殻の構成と地質調査
- 第3章 ロックメカニクスに必要な基礎理論
- 第4章 岩石の力学特性
- 第5章 岩盤の力学特性と評価
- 第6章 岩盤不連続性の評価と不連続性岩盤の力学

- 第7章 岩盤の水理特性
- 第8章 岩盤構造物の設計論
- 第9章 トンネル
- 第10章 地下空洞
- 第11章 大型構造物
- 第12章 岩盤斜面