

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 都市トンネルの 長期変形を予測する

都市トンネルの主流となっているシールドトンネルは、周りを土に囲まれた円形の構造物であり、外力に対して強い安定した構造物であると言えます。しかし、軟らかい粘性土地盤にあるトンネルの中には、僅かながらも少しずつ変形が進むような例があります。このようなシールドトンネルの長期的な変形挙動は未解明な点も多いのですが、これを精度良く予測することを目的に、解析により検討した取組みを紹介します。



**津野 究**  
Kiwamu Tsuno  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
主任研究員  
[専門分野]トンネル維持管理、都市トンネル設計・建設、地下鉄振動



**焼田 真司**  
Shinji Yakita  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
室長  
[専門分野]トンネル維持管理、都市トンネル設計・建設



**仲山 貴司**  
Takashi Nakayama  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
副主任研究員  
[専門分野]トンネル維持管理、都市トンネル設計・建設

## シールドトンネルの長期変形

シールドトンネル(図1)(☞参照)は、軟らかい地盤の中にも構築できることや、地上にある道路交通や建物への影響を最小限に抑制できることから、都市部につくられるトンネルの主流となっています。

周辺地盤の圧密などにより僅かながらも少しずつ変形が進む例がありますが<sup>1)</sup>、その場合、図2のように横潰れ傾向を示すことが多く、天端部にひび割れが複数発生する場合があります。ただし、ひび割れの幅は0.1~0.3mm程度と微細であり、近くで見ないと

なかなか認識できません。また、1~数年で1mmくらいの緩慢な進行である場合がほとんどであり、すぐさま対策が必要というものではありません。しかし、このような変形をしているトンネルの近くで掘削工事や

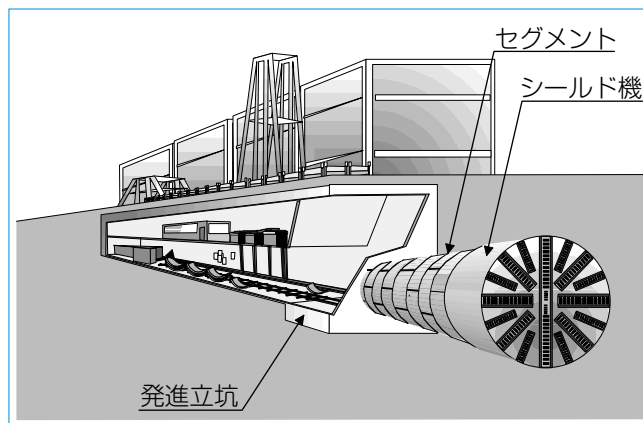


図1 シールドトンネルの施工

### ☞ シールドトンネル

シールドと呼ばれる「茶筒」を水平に据え、その内部の土を掘りながら、その後方でセグメントと呼ばれるプレキャストパネルをリング状に組み立ててつくるトンネル。フランス人技師ブルネルが、木材を食べながらその後ろを殻で固める舟食虫の姿をヒントに発明した工法で、1825年から工事が開始されたロンドンのテムズ川の河底トンネルで初めて実用化されました。我が国では、1950年代以降都市トンネルの主力工法の1つとなり、1970年代以降、圧気を必要としない密閉型シールドの開発に伴い、安全性・施工性の向上とともに急速に普及しました。

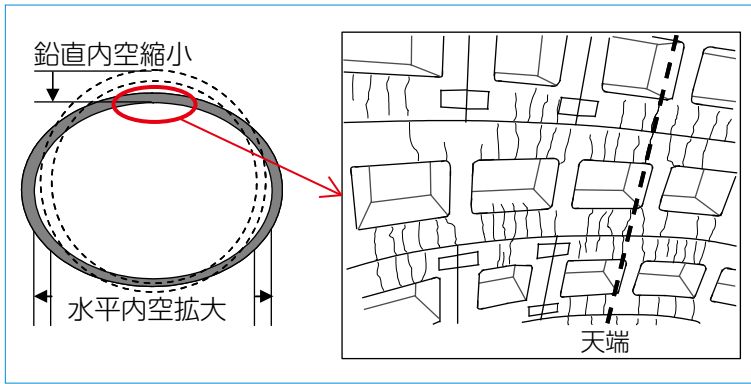


図2 変形およびひび割れの発生例

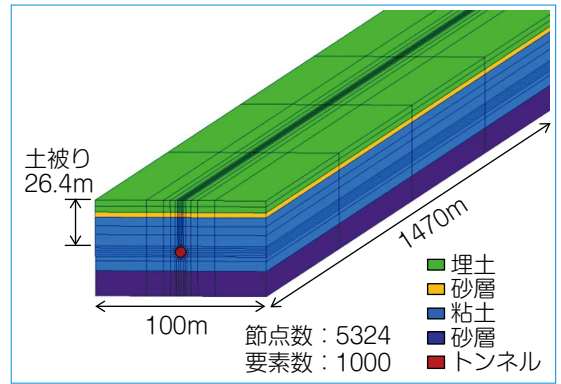


図3 土水連成解析のモデル

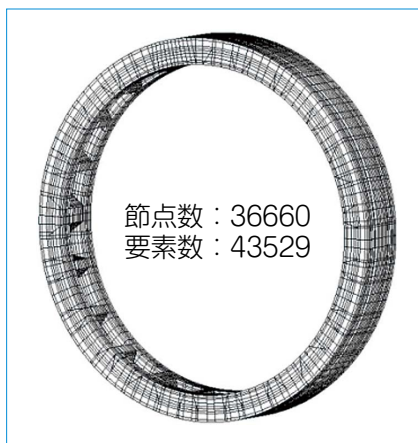


図4 セグメントリングのモデル

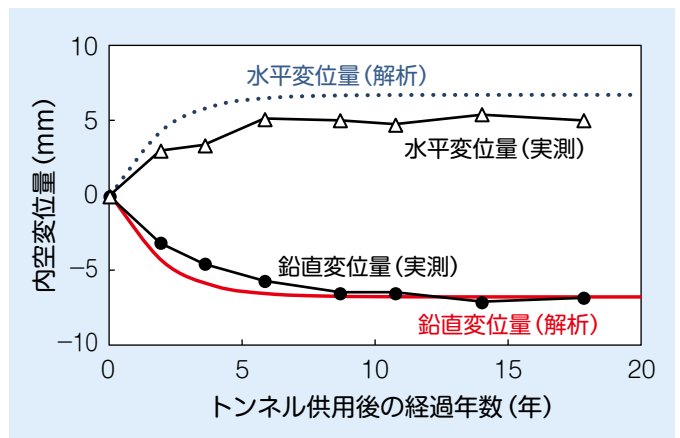


図5 土水連成解析より得られた内空変位量の経時変化

建物の建設が行われる場合、土の圧密を促進させてしまい、変形やひび割れが急に進行する可能性もあることから、十分な注意が必要となります。

### 土水連成解析を用いた変状予測

ここでは、単線シールドトンネルを対象に変状を予測した検討例<sup>2)</sup>について紹介します。このトンネルは、供用後から定期的な実施されている内空変位測定の結果から、鉛直方向に縮小し、水平方向に拡大する傾向にあることが確認されていました。また、建設時にひび割れが発生した記録はありませんでしたが、供用開始から20年後には、天端付近にトンネル軸方向の微細なひび割れが分散して発生していることが

確認されています。

このトンネルが、供用後に沖積層の圧密沈下の影響を受けているものと想定して、解析による検討を行いました。地盤の圧密は、土の挙動に加えて地下水位の低下も含めた水の移動に深く関連します。そこで、図3のようなモデルを作成して土水連成解析を行い、トンネルの変形の推移を求めました<sup>2)</sup>。なお、この解析では、地表面に等分布荷重を載荷して過剰間隙水圧を発生させ、その消散により疑似的に圧密沈下を発生させました。

次のステップとして、図4のようなセグメントリングのモデルを作成し、土水連成解析で得られたトンネルの変形量を入力して非線形FEM解析

を行うことにより、発生する応力やひび割れの位置を求めました。シールドトンネルは、工場で作られたセグメントを組み立てて構築し、継手部をボルトなどで締結するような複雑な構造となっています。そこで、継手部にはばねを仮定してその挙動を表現しました。また、ひび割れを精緻に予測するために、鉄筋を棒要素でモデル化してコンクリートとの付着を考慮したばねを仮定する<sup>3)</sup>とともに、コンクリートの引張側は引張軟化特性を導入して非線形性を考慮し、圧縮側は完全弾塑性性を考慮した構成式を用いました。

図5は、土水連成解析で求めた内空変位量と実測結果を比較したのですが、両者は概ね対応しています。また、

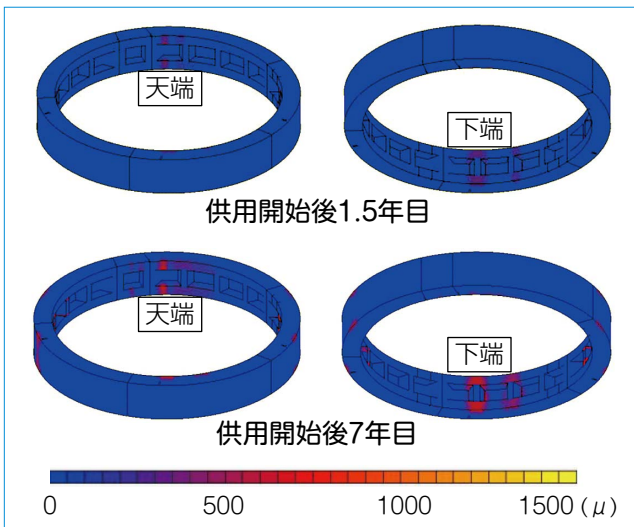


図6 解析より得られたクラッキングひずみ

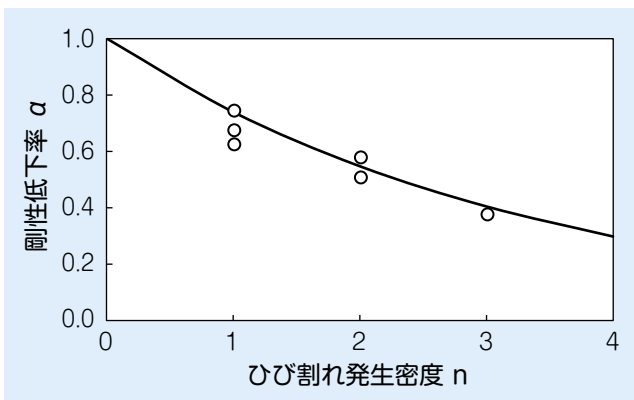


図8 ひび割れ発生密度－剛性低下率の関係

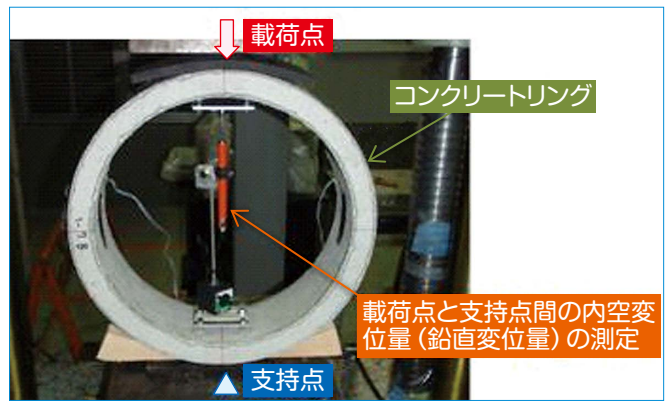


図7 リング外圧試験

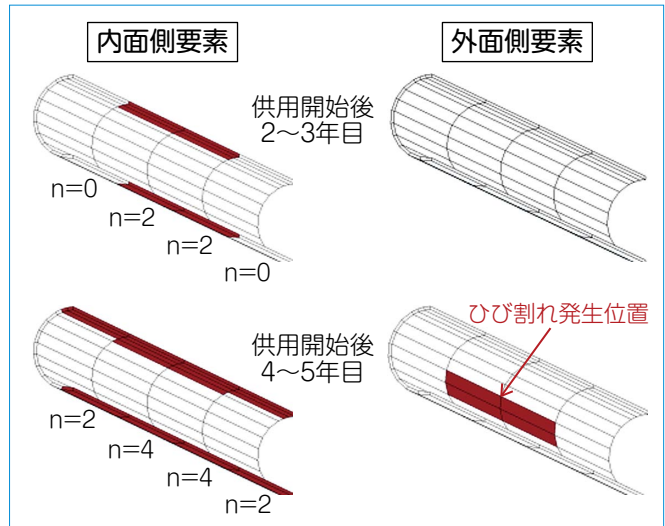


図9 ひび割れの発生位置

図6は、非線形解析で得られたクラッキングひずみを示していますが、ひずみの大きい箇所と実際にひび割れが発生している箇所がほぼ一致していることが確認できました。

その一方、地表面には、地層構成や地下水位変動から想定される以上の等分布荷重を作用させる必要があるという課題も明らかになりました。

### ひび割れによる剛性低下モデル

ここで紹介したような解析を実務に活用するためには、地質ボーリング調査などで得られる地層構成や地下水位変動から等分布荷重を設定し、トンネルの変形が予測できることが求められます。一方、ひび割れが発生したり進展することにより、セグメントリングの剛性が低下しますが、さきほどの解

析では、これを考慮していませんでした。そのため、内空変位量を現実と合わせるために、地表面に想定よりも大きい荷重を与えざるを得なかったと考えました。

そこで筆者らは、ひび割れによる剛性低下に着目し、図7のようなリング外圧試験を行い、ひび割れの発生に伴うリング剛性の低下特性を調べました<sup>2)</sup>。ここでは、外径360mm、肉厚30mmの鉄筋コンクリート管から幅100mmのリングを切り出し、未載荷のものや、載荷試験によりひび割れを発生させたものを試験体としてリング外圧試験を行い、これをもとに図8のようなひび割れ発生密度と剛性低下率の関係を求めています。ここでは、シールドトンネルで見られる変形モードを考慮し、リングを載荷方向に対して応

力の引張、圧縮の異なる4つの領域(この実験では上下左右の90°)を設定したうえで、ひび割れが発生している領域の数をひび割れ発生密度 $n$  ( $0 \leq n \leq 4$ )と定義しました。

### 剛性低下モデルを組み入れた土水連成解析

セグメントリングの剛性低下モデルを土水連成解析に組み入れ、トンネルの変形やひび割れの発生を予測することを試みました<sup>2)</sup>。

解析では、地層構成や地下水位変動から想定される等分布荷重100kPaを作用させました。なお、ひび割れが発生したリングの応力-ひずみ関係に、ひび割れ発生と進展によるリング剛性の低下を考慮しています。

図9は、解析より得られたひび割れ

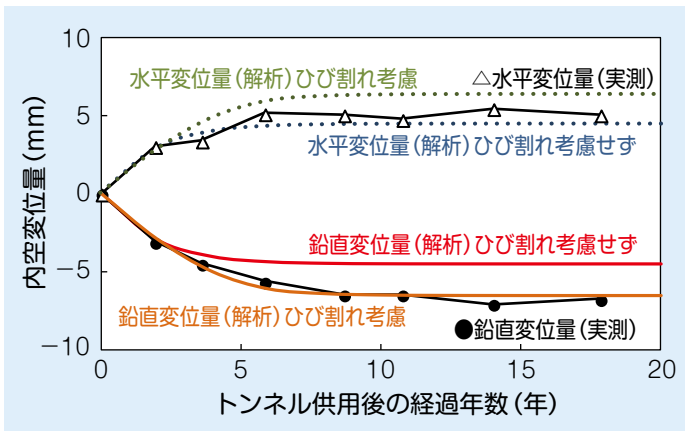


図10 ひび割れによる剛性低下を考慮した場合の内空変位の経時変化

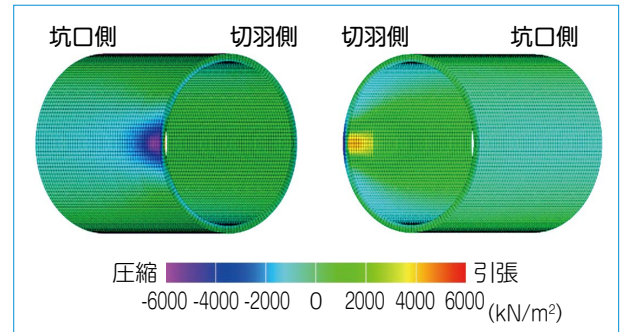


図12 施工時荷重に対する解析の例(周方向応力)

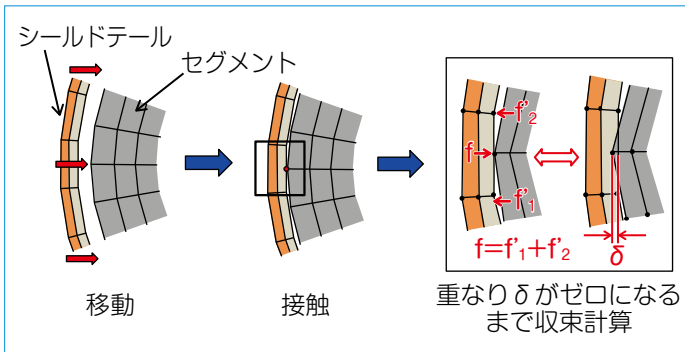


図11 二次元接触解析の概念図

の発生状況を示していますが、ひび割れ発生位置が非線形解析と整合していることを確認しました。また、内空変位の経時変化について実測と比較した結果を図10に示します。これより、内空変位の経時変化は実際の挙動と整合が取れていることが確認できました。また、この図には、ひび割れによる剛性の低下を考慮していない場合も併せて示していますが、リング剛性の低下を考慮することで解析精度が向上できていることが確認できました。

### 施工時荷重によるひび割れ

シールドトンネルに顕著なひび割れなどの変状が見られる場合は、その変状が進行するのかどうかを把握することが維持管理上重要になります。今回、緩慢ながらも長期的に進行する変形現象を取り上げましたが、実際はシールドトンネルで見られるひび割れのほと

んどは、建設時に発生したものです。建設時に発生したひび割れか、供用開始後にトンネルが変形して発生したものか見分けることが重要になってきます。

筆者らは、施工時に発生するひび割れについても、解析的な検討を行ってきました<sup>4)</sup>。シールドトンネルの施工時には、トンネルにジャッキ推力、裏込め注入圧、テールシールド圧といった様々な荷重が作用します。図11は、接触解析により、テール部でのシールド機とセグメントの間のクリアランスが小さくなることで作用する荷重を求める手法の概念図です。図12は、三次元FEMモデルに接触解析で求めた荷重を入力するとともに、ジャッキ推力や裏込め注入圧などを作用させ、施工時にトンネルに発生する応力をコンター図で示したものです。このように、解析により施工時荷重による影響を把握する方法も提案しています。

### おわりに

鉄道シールドトンネルの大部分は1970年代以降に建設されていること、外力に対して有利な円形であること、さらには設計時に作用する荷重を考慮して構造が決められていることから、山岳トンネルと比べても変形が問題になるケースがきわめて少ないと言えます。しかし、長期的にトンネルを使用していくためには、今回報告したような緩慢ながらも長期的に進行する変状にも着目し、挙動を予測し、適切に維持管理していくことが重要となります。

RRR

### 文献

- 1) 津野究, 三浦孝智, 石川幸宏, 山本努, 河畑充弘: 内空断面測定および変状展開図より把握したシールドトンネルの変形傾向, トンネル工学報告集, Vol.17, pp.257-261, 2007
- 2) 焼田真司, 津野究, 仲山貴司, 小宮一仁, 赤木寛一: 地盤の圧密沈下に起因するシールドトンネルの変形予測手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.23-28, 2014
- 3) 新井泰, 杜世開, 山本努, 渡辺忠朋: 非線形挙動を考慮した開削トンネルのひび割れ調査結果シミュレーション, トンネル工学論文集, Vol.15, pp.173-181, 2005
- 4) 木股浩孝, 仲山貴司, 津野究, 粥川幸司, 小西真治: シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討, 土木学会論文集F1, Vol.69, No.1, pp.73-88, 2013