

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

焼田 真司* 津野 究* 仲山 貴司*
小宮 一仁** 赤木 寛一***

Prediction Method of Deformation of Shield Tunnels due to Consolidation

Shinji YAKITA Kiwamu TSUNO Takashi NAKAYAMA
Kazuhito KOMIYA Hirokazu AKAGI

In order to predict the deformation of shield tunnels, this paper investigates the calculation method of long term tunnel deformation due to consolidation. Although it is required to take into account the non-linear behavior caused by the generation of cracks within the tunnel lining, it is difficult to apply the sophisticated segment-ring model to tunnel lining because of large calculation time and memory. Therefore, this paper proposes the empirical modeling method of the reduction of stiffness due to the generation and the enlargement of cracks and combines it with the soil-water-coupling analysis of tunnel deformation.

キーワード：軟弱地盤，圧密，シールドトンネル，変形予測，ひび割れ，有限要素法

1. はじめに

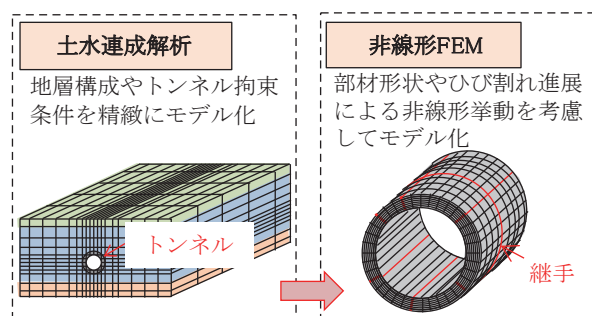
シールド工法は、都市部でトンネルを建設する場合の標準的な工法として広く用いられてきた。しかし、その優れた施工性から軟弱地盤中にトンネルを建設する場合にも適用されるため、周辺地盤の圧密沈下が原因で覆工に変形やひび割れが発生する事例が報告されている^{1)~3)}。

このような圧密沈下に起因するシールドトンネルの変形は、長期間にわたるものの、比較的緩慢に進行することから、ただちに措置が必要となるものではない。しかし、ひび割れが発生したトンネルは、覆工のリング剛性の低下によって変形がより進行しやすい状態に置かれるものの、トンネルの変形挙動については未解明の点が多く、長期的な挙動を精度よく予測する手法の確立が維持管理の実務面からも求められている。

トンネルの変形挙動を予測する方法には、地盤との相互作用を評価する土水連成解析を用いるのが有効とされている。土水連成解析では、広域的な解析モデルが作成でき、地層構成などを表現できるという利点がある。しかし、計算コストなどの制約から、トンネルは地盤のメッシュサイズに合わせ簡素にモデル化した線形弾性体で表現される場合が多い。

一方、ひび割れ挙動については、有限要素法で材料の非線形性を表現する非線形 FEM が既に確立されており、トンネルに対しても適用されている。非線形 FEM では、セグメントの形状やひび割れ軟化挙動を考慮するため、詳細な解析モデルを作成しているが、土水連成解析とは逆に、地盤は線形ばねで簡素にモデル化される場合が多い。このため、土水連成解析を用いてトンネル挙動を求める際に、覆工のひび割れによる精緻な非線形挙動を同時に考慮することは計算時間やコストの増加につながる。

そこで、著者らは、土水連成解析と非線形 FEM の両者の利点が活用できるよう、土水連成解析でトンネルの内空変位を求め、これを入力値とした非線形 FEM で覆工の詳細なひび割れの進展過程を求める方法について検討してきた⁴⁾ (図 1)。そして、模型実験の結果から、覆工のひび割れ発生によるリング剛性の低下を簡便に評価



土水連成解析で得られた内空変位を非線形FEMに入力

図 1 土水連成解析と非線形 FEM を組合せた手法の概要

* 構造物技術研究部 トンネル研究室
** 千葉工業大学
*** 早稲田大学理工学術院

特集：構造物技術

する手法を提案した。さらに、これを土水連成解析に組み込んだ予測手法を用いて、覆工のひび割れと内空変位について、既設トンネルにおける実測結果との比較から本手法の妥当性について検証した結果を報告する。

2. 土水連成解析と非線形 FEM を組み合わせた変状解析

2.1 土水連成解析による長期変形挙動の算定

(1) 検証対象のシールドトンネル

対象としたトンネルは、延長 1,470m、外径 6900mm、覆工は、主に中子形の RC セグメントを使用しており、1987 年に竣工している。トンネルが存在する箇所地質は図 2 の縦断面図に示すとおり、層厚 9.8m の透水層の下に層厚 20～30m の軟弱な沖積粘性土層があり、この沖積層にトンネルは位置する。また、既往の測定結果⁵⁾によると、トンネル周辺地域は、1965 年頃まで揚水による地下水位の大きな低下に伴い、圧密沈下が生じたこと、また、その後の諸規制によって、以降、地下水位は回復傾向に転じ、地表面沈下はほぼ収束しているが、トンネルが位置する沖積層は依然として収縮傾向にあることが報告されている。このことから、対象トンネルは、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される。

一方、供用後から定期的実施された内空変位測定結果から、トンネルは、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る。また、建設時に施工時荷重などによるひび割れは確認されていなかったが、記録が残されている限りでは、供用開始から 20 年後には、天端付近の主桁部に、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る。

(2) 解析モデルと解析方法

解析に用いた有限要素法解析モデルを図 3 に示す。トンネルは剛性一様の線形弾性体とし、地盤は近傍で実施された試験値と設計値に基づき設定した。また、維持管理の実務で必要となるトンネル内空変位量の経時変化を求めことに主眼を置き、トンネルが位置する沖積粘性

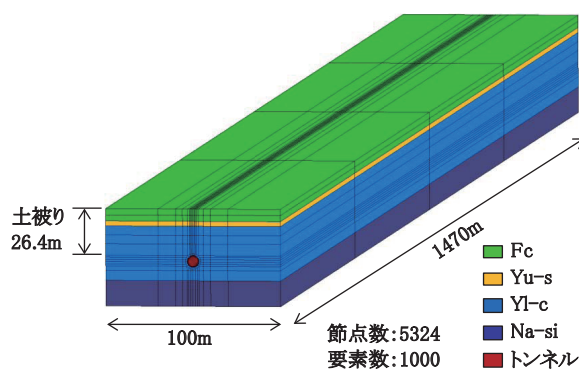


図 3 解析モデル

土層のみを経時的な挙動をする圧密層とし、土被りは、内空変位計測断面位置における 26.4m で一定とした。

縦断方向の解析範囲は、発進および到達立坑間の 1,470m とし、横断方向は、側方境界における過剰間隙水圧の変動がトンネルの影響を受けないように十分な 100m とした。境界における変位拘束条件については、地盤は底面の鉛直方向、側面の水平方向を固定とし、トンネルは両端の立坑部で鉛直、水平方向を固定とした。また、境界における排水条件は、地表面と底面を排水、側方境界とトンネル外周面を非排水とした。

対象トンネルが位置する沖積粘性土層は、前述のように地下水位の変動履歴に起因する圧密現象が発生している。そこで、解析モデルの地表面に等分布荷重を載荷することで過剰間隙水圧を発生させ、その消散による圧密沈下と内空変位を求めた。なお、この等分布荷重の大きさは、内空変位量の経時変化とフィッティングさせて求めることとした。

(3) 実測の内空変位量と解析結果の比較

図 4 は、等分布荷重を 150kPa としたときの内空変位量の解析結果と実測値を比較したものである。圧密沈下は鉛直方向の地盤変形であることから、この影響は内空変位のうち鉛直変位量に顕著に反映されると考えると、解析で得られた鉛直変位量の収束値が約 7mm で実測値とよく適合していることがわかる。

しかし、透水係数が大きく地下水位変動に追従する層は沖積粘性土層で浅い 9.8m であることを考えると、地下水位変動に起因して想定できる等分布荷重は、最大でも 100kPa 程度である。すなわち、実測値に適合した鉛直方向のトンネル内空変位量の収束値を得るためには、これを上回る 150kPa の等分布荷重を作用させたこととなる。解析モデルでは、セグメント継手における剛性低下を考慮しているものの、土水連成解析では、地下水位変動以外の影響による割合が、少なくとも 1/3 (50kPa) と大きくなった。一方で、既往の事例では地下水位変動による圧密が主原因とされており、この割合については解析精度の向上が課題として残された。

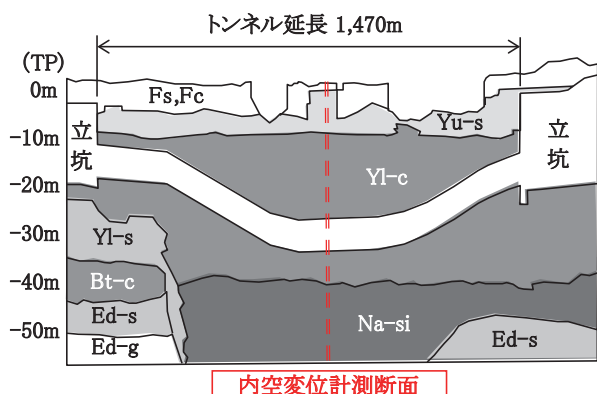


図 2 地質縦断面図

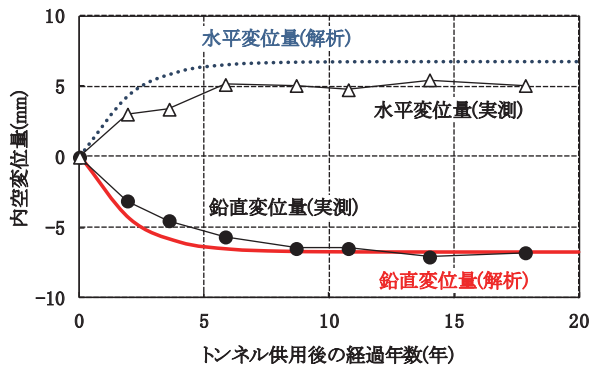


図4 内空変位量の経時変化（等分布荷重 150kPa）

2.2 非線形 FEM による覆工のひび割れ進展過程の算定

(1) 解析モデルと解析方法

前述の土水連成解析で得られたトンネル内空変位量を利用して、セグメント1リングのひび割れ進展過程を求めた。用いた非線形 FEM の解析モデルを図5に示す。コンクリートを8節点立体要素、鉄筋を2節点棒要素でモデル化し、両者の間に付着を考慮したばねを設置することにより、コンクリートと鉄筋の付着を考慮した⁶⁾。隣接するセグメント同士の接触や継手ボルトもばね要素を用いてモデル化した。セグメント外周の境界には、沖積粘性土層の弾性係数に基づき設定した地盤ばねを配置した。

解析に用いたセグメントを構成するコンクリート、鉄筋のヤング係数およびポアソン比は、セグメントの設計値を基に設定した。コンクリートについては、引張側は、引張軟化特性⁷⁾を導入して非線形性を考慮し、圧縮側は降伏基準にモール・クーロン則を用いる完全弾塑性を考慮した構成式を用いた。ひび割れは、最大主応力が引張強度より大きくなる位置で最大主応力作用方向の直角方向に発生するものとし、引張強度を超過した後に応力はすぐにゼロとせず、式(1)で定義する指数関数に従うものとした。

$$E_s = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = -c \cdot \sigma_{cr} \exp\{-c(\varepsilon - \varepsilon_{cr})\} \quad (1)$$

ここに、 E_s ：引張軟化係数、 c ：残留特性係数、 σ_{cr} ：ひび割れ発生応力、 ε ：ひずみ、 ε_{cr} ：ひび割れ発生ひずみ



図5 解析モデル（非線形 FEM）

また、隣接するセグメント間のコンクリート同士が接触しないように法線方向のばねを設け、ばね定数はコンクリートのヤング係数を考慮したノンテンションばねを、継手ボルトのばね値は線形ばねを設定した。なお、式(1)中の残留特性係数 c 、 σ_{cr} 、 ε_{cr} 、コンクリートと鉄筋間のばね値は、既往の研究⁶⁾と設計値をもとに設定した。

(2) 解析結果

土水連成解析で求めた等分布荷重 150kPa 時のトンネル全周の内空変位分布の鉛直成分を入力値として、トンネル供用後に発生した周辺地盤の圧密沈下に起因する覆工のひび割れ進展過程を求めた。

この解析で得られたひび割れを生じるひずみ量からの増分(式(1)中の $(\varepsilon - \varepsilon_{cr})$)で定義されるクラッキングひずみのコンターの一例を図6に示す。このクラッキングひずみが発生している箇所が、覆工のひび割れ発生箇所に対応している。クラッキングひずみは、供用後1.5年目に天端内空側の主桁と縦リブの接合部の四隅で発生し、以降は同じ位置のひずみ量が増加するとともに主桁全体に広がった。最終的なクラッキングひずみの分布は、対象トンネルで観察された発生状況とほぼ一致している。

(3) 考察

土水連成解析と非線形 FEM を組み合わせた解析を実施した結果、非線形 FEM については、実測結果にほぼ対応した覆工のひび割れ発生状況を得ることができた。しかし、土水連成解析については、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った。

この原因のひとつとして、古いトンネルでは残存する施工や地盤に関する記録が少なく、トンネルや地盤の初期応力などの解析に反映できる情報が不足しているという問題がある。しかし一方で、解析手法の観点からすれば、非線形 FEM で得られた覆工のクラッキングひずみが供用後間もない1.5年目から生じていることから、経

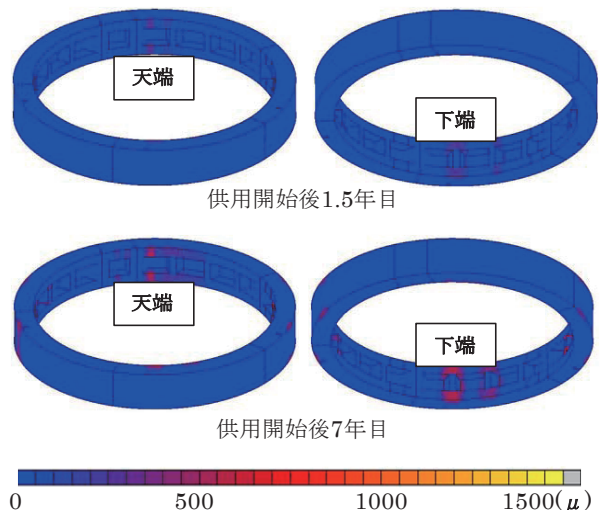


図6 クラッキングひずみ

特集：構造物技術

時的なトンネル内空変位に及ぼすひび割れによる覆工の剛性低下の影響も大きい可能性があり、ひび割れ発生後の剛性低下を土水連成解析で考慮できれば、より実測値に近い解析結果が得られる可能性も残されているものと考えられる。

3. ひび割れによる剛性低下モデルの検討

前述したように、土水連成解析は広域的なモデル化を行うため、覆工の局所的なモデル化を必要とする非線形FEMの材料非線形の理論をそのまま適用すると計算時間やコストに関する問題がある。

そこで、セグメント継手における剛性低下をリング全体の曲げ剛性の低下で表現する修正慣用計算法にならって、覆工のひび割れ発生、進展による剛性低下の影響をリング様の剛性低下で評価することを目的として、下記に示すリング外圧試験から実験的に検討した。

3.1 リング外圧試験

(1) 試験方法

リング外圧試験は、図7に示すように、コンクリートリング供試体の先端部外周側に鉛直集中荷重を載荷し、荷重と載荷点-支持点間の内空変位(鉛直変位量)の関係を測定した。

使用したリング供試体は、外径360mm、肉厚30mmの下水道用鉄筋コンクリート管で、この管から幅100mm程度で切り出したものである。このコンクリート管3本からそれぞれ6本の供試体を切り出し、3本はそのまま(以下、未載荷供試体)、残りの3本は別途載荷試験を行い、ひび割れを発生させてから(以下、載荷供試体)リング外圧試験を実施した。

(2) 試験結果

表1にリング外圧試験結果を示す。ここでは、荷重-変位関係がほぼ直線とみなしうる範囲の上限であるピーク荷重の1/3相当の荷重強度を変位量で除した値をリング剛性とし、未載荷供試体と載荷供試体のリング剛性の比率を剛性低下率 α とした。また、載荷供試体に発生しているひび割れのうち、内外面の幅方向にほぼ貫通して

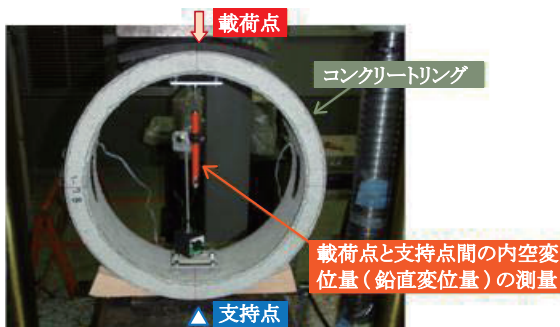


図7 リング外圧試験

表1 リング外圧試験結果

コンクリート管番号	リング剛性 (N/mm)		剛性低下率 α	軸方向ひび割れ数	
	未載荷 [※] 供試体	載荷供試体			
1	17400	Case 1-1	13900	0.80	0
		Case 1-2	11900	0.68	1
		Case 1-3	8900	0.51	2
2	10800	Case 2-1	10400	0.96	0
		Case 2-2	10000	0.93	0
		Case 2-3	4100	0.38	4
3	11700	Case 3-1	8800	0.75	1
		Case 3-2	7400	0.63	1
		Case 3-3	6800	0.58	2

※：3本の平均値

いるひび割れを軸方向ひび割れとして整理した。載荷供試体のうち、軸方向ひび割れに分類されるひび割れがない供試体の剛性低下率 α は最小で0.80、軸方向ひび割れが4本発生している供試体は0.38であった。この試験結果より、軸方向ひび割れ数の増加にともなってリング剛性は単調に低下することが確認できる。

3.2 ひび割れによる剛性低下モデルの誘導

リング外圧試験の結果から、ひび割れの発生、進展による影響をリング様の剛性低下で表現できる可能性が確認された。そこで、既往のシールドトンネルで見られる変形モードを考慮し、載荷方向に対してリング外面側および内面側における応力の引張、圧縮の分布が異なる4つの領域(上下左右の90°)を設定した。また、リング内外面で軸方向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 ($0 \leq n \leq 4$)とし、ひび割れ発生密度 n と剛性低下率の関係を整理した。この結果を図8に示す。

ここで、回帰式は、式(2)に示すように、ひび割れ発生密度 n の指数関数で定めることとし、ひび割れ発生密度 $n=0$ のとき剛性低下率1.0を通るように最小二乗法で定数 a を決定した。

$$\alpha = e^{an} \tag{2}$$

ここに、 α ：剛性低下率、 n ：ひび割れ発生密度、 a ：-0.3

また、式(2)を用い土水連成解析においてひび割れが発生したリングの応力-ひずみ関係を式(3)で表すこととし、ひび割れ発生と進展による剛性低下モデルとした。

$$\sigma = \alpha E_0 \varepsilon \tag{3}$$

ここに、 σ ：応力、 α ：剛性低下率、 E_0 ：弾性係数、 ε ：ひずみ

なお、ひび割れの発生はコンクリートや地盤材料のような粘着力と内部摩擦角を有する材料の破壊現象でモデル化するものとし、Drucker-Pragerの破壊基準を用いて判定するものとした。

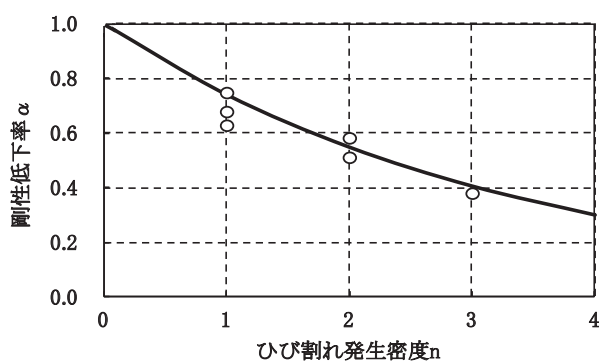


図8 ひび割れ発生密度－剛性低下率の関係

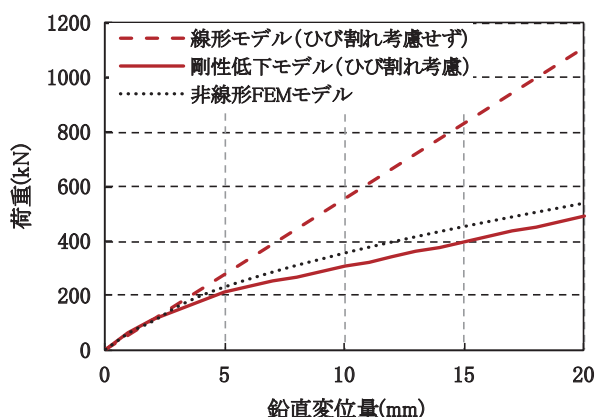


図10 解析結果（荷重－鉛直変位量）

3.3 剛性低下モデルと非線形 FEM との比較

(1) 解析方法

検証対象トンネルに、考案した剛性低下モデルと非線形 FEM のモデルを利用して、鉛直集中荷重を載荷した解析を行い、両手法で得られたひび割れの発生、進展状況を比較した。剛性低下モデルでは、式 (3) に基づき、ひび割れ発生密度に応じて弾性係数を一様に低下させた。

(2) 解析結果および考察

両手法で得られたひび割れ発生と進展状況の一例を図9に示す。剛性低下モデルでは、鉛直変位量 3mm の時点で、天端、下端の内面側にひび割れ発生と判定される要素が生じ ($n=2$)、変位量が 6mm になると左右の外側にもひび割れ要素が生じて、ひび割れ発生密度が $n=4$ となった。非線形 FEM と比較すると、定性的であるものの、ひび割れ発生密度は同様の結果を示しており、進展傾向についても概ね同様の結果が得られた。

また、剛性低下モデルと非線形 FEM で得られた荷重－鉛直変位量の関係を図10に示す。同図には、ひび割れによる剛性低下を考慮しない場合（以下、線形モデル）も併せて図示している。この結果、ひび割れを考慮しない線形モデルの場合には、非線形 FEM の結果と乖離しているが、ひび割れの発生と進展を考慮した剛性低下モデルを用いた場合には、非線形 FEM とほぼ同等の値が得られていることがわかる。

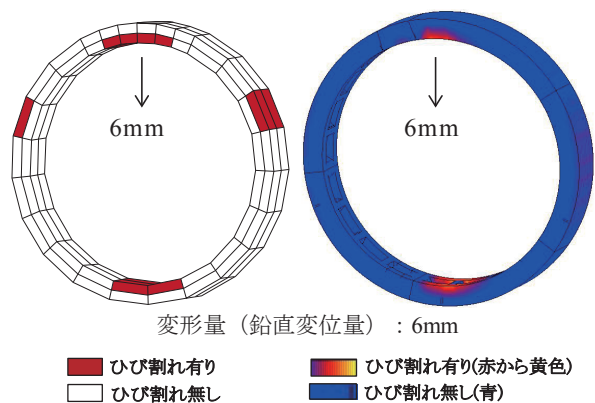


図9 ひび割れ発生状況

以上の結果から、提案した剛性低下モデルを用いた解析手法は、ひび割れの発生と進展については概略的な把握となるものの、荷重と内空変位量の関係から決まる覆工のリング剛性は非線形 FEM とほぼ同等の値が得られることが確認できた。

4. 剛性低下モデルを用いた土水連成解析

4.1 解析方法および解析結果

この剛性低下モデルを組み込んだ土水連成解析を検証対象のシールドトンネルに適用し、ひび割れ発生状況と内空変位量を算定した。ここでは、解析モデルの地表面に作用させた等分布荷重は、地層構成や地下水位変動から想定される値の 100kPa とした。

図11は、対象トンネルのひび割れ発生状況を示したものである。まず、供用開始後2年目にトンネル縦断方

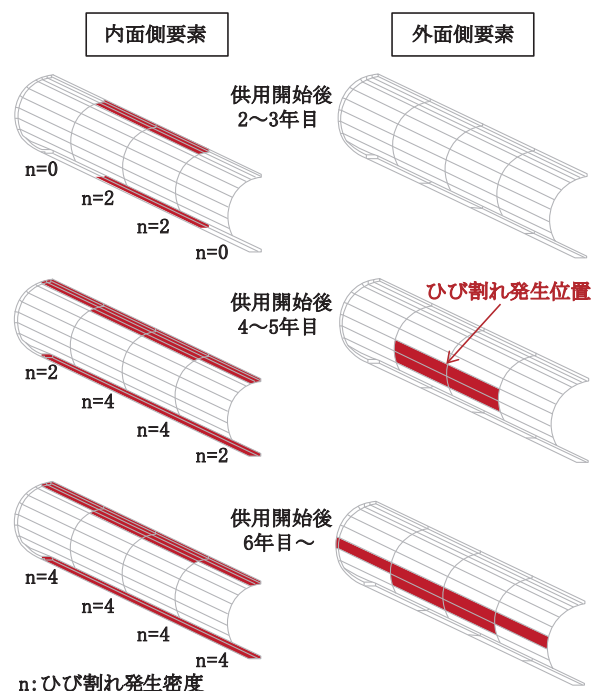


図11 ひび割れ発生位置およびひび割れ発生密度

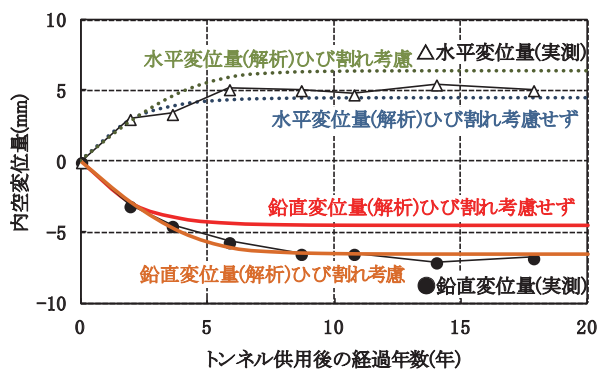


図 12 内空変位経時変化の実測値と解析値の比較

向中央部で天端、下端の内面側にひび割れが生じ、ひび割れ発生密度 n が 2 となった。その後、ひび割れが進展して、6 年目にはひび割れ発生密度 n が全て 4 となった。観察が可能な内面側については、概略的な把握であるものの、現場で確認されたひび割れと同様に天端内面に発生しており発生位置は一致している。

一方、図 12 は、図 4 の内空変位量と比較したものである。ひび割れによるリング剛性低下を考慮する場合と考慮しない場合を示している。ひび割れの発生と進展によるリング剛性低下を考慮することにより、とくに、圧密の影響が顕著に表れる鉛直方向変位については、収束値のみならずひび割れ進展に相当する経時的な内空変位量の変化についても解析値と実測結果が概ね合致していることがわかる。

4.2 考察

検証対象のシールドトンネルに、ひび割れに伴う剛性低下モデルを組み込んだ土水連成解析を適用した結果、地層構成や地下水位変動から想定される 100kPa の等分布荷重の荷重で生じるトンネルの鉛直方向変位量の解析結果は、実測値に適切に対応するものであった。また、トンネルのひび割れの発生位置についても概略的には実測値と対応する結果が得られた。

5. まとめ

本研究では、圧密沈下に起因するシールドトンネルの変形を予測する手法について、軟弱粘性土地盤中に建設されたシールドトンネルを対象として検討した。得られた成果を以下に示す。

1) 土水連成解析と非線形 FEM を組み合わせた解析によって、現場で観察されたひび割れと同様の発生結果を得ることが確認できた。しかし、土水連成解析で、

地層構成や地下水位変動から想定される以上の荷重を作用させる必要があるという課題が明らかになった。

2) リング外圧試験の結果から、ひび割れ発生密度を用いたリング剛性低下のモデル化手法を考案した。そして、この剛性低下モデルと非線形 FEM の比較解析を行い、両者は、ほぼ同様のひび割れ発生状況を得られることが確認できた。

3) 剛性低下モデルを組み込んだ土水連成解析によって、地層構成や地下水位変動から想定される荷重の荷重で生じる鉛直方向の内空変位量の解析結果は、実測値に適切に対応することが確認できた。また、トンネルのひび割れの発生位置についても概略的には実測値と対応する結果が得られることが確認できた。

謝辞

本研究で実施した非線形 FEM については同済大学の杜世開教授に多大なるご指導をいただいた。また、リング外圧試験については株式会社フジタの吉川和行氏にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) 齊藤正幸, 古田勝, 山本稔: 沖積層地盤に構築したシールドトンネルの変形に関する考察, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.4, pp.55-62, 1994
- 2) 古田勝, 野邑敏行: 地下鉄シールドトンネルの長期間における断面変形に関する考察, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.12, pp.207-212, 2007
- 3) 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
- 4) 焼田真司, 仲山貴司, 小西真治, 赤木寛一: シールドトンネルのひび割れ進展過程に関する一考察, 土木学会論文集 F1(トンネル工学) 特集号, Vol.67, No.3, pp.109-116, 2011
- 5) 東京都環境局: 東京都の地盤沈下と地下水の再検証について, 2011
- 6) 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
- 7) 吉川弘道, 西藤厚, 金刀督純: 引張強度の空間的変動を考慮したコンクリートの FEM 破壊シミュレーション, コンクリート工学論文集, Vol.7, pp.103-117, 1996