

地下鉄開削トンネルの凍結融解沈下による縦断方向の変状量の推定方法に関する研究

伊藤 聡¹・小西 真治²・阿南 健一³・赤木 寛一⁴

¹ 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）
E-mail:sato.itou@tokyometro.jp

² 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）

³ 正会員 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部（〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12）

⁴ フェロー 早稲田大学 理工学術院（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1-58-205）

東京地下鉄株式会社で保有している地下鉄開削トンネルの縦断方向の一部に沈下を伴う変状が確認されている。この変状は、施工時の凍結工法の融解時の沈下の影響が大きいと考えられている。しかし、施工時からの詳細な変状記録データがないため、健全性評価を定量的に行うための構造計算が出来ないことが問題となっていた。そこで、近年製品化された X 線回折法による鋼材の応力計測装置を用いて、現有応力を測定し、その値から現状の鉄筋ひずみ量を算定した。その結果、中立軸が、ひび割れを考慮した従来の検討方法による値よりも下部に位置することがわかった。すなわち、耐荷性能上は健全側に判断出来る事になる。これは、トンネル縦断方向に軸力、いわゆる見掛けの軸力が加わっているためと考えられ、そのメカニズムを検討した。また、経年 8 年以降から計測されたトンネルの沈下データと前述のひずみ分布データから凍結融解時の沈下量を推定した。これらの手法により、施工時からのトンネル縦断方向の変状量の推定方法を示した。さらに、本研究の沈下量推定結果を用いて、トンネル構造を詳細にモデル化した構造計算を行い、トンネルのひび割れ状況を再現することが出来た。これにより、トンネル縦断方向の耐荷性能を照査する方法も示した。

Key Words: maintenance, cut and cover tunnel, longitudinal direction displacement, X-ray stress measurement

1. 研究目的

地下構造のトンネルには様々な要因により変状が生じ、適切な維持管理が必要とされている。地下鉄構造の維持管理や工事などの作業は、鉄道の運行が終了している夜間が主となり、最長でも 1 日 3 時間程度に限定されることから、工事期間が長く、工費も高くなる傾向にある。このため、トンネルの変状に対しては、健全性を精度良く評価し、軽構造となる対策を実施することが望まれる。

トンネルの健全性を評価するためには、トンネルの変位や沈下、ひび割れ状況の調査などが実施されている。しかし、既設の構造では、構造の建設直後からの計測が実施されていない場合が多いことから、変状が構造の構築直後などに発生しているような場合の健全性の評価を困難にしている。次に、構造物の応力状態の評価に、ひび割れ

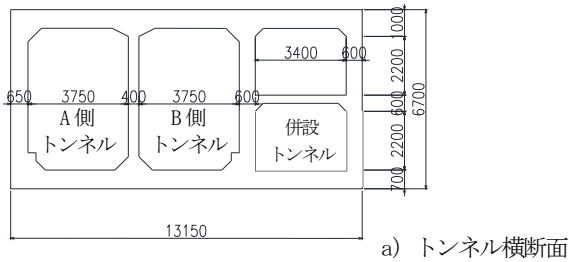
幅などから評価することも考えられるが、ひび割れは温度収縮や補修などの影響も大きく受けるため、精度の高い評価を行うことは困難となっている。

そこで、本研究では、変状が生じている既設トンネルを検討事例とし、X 線回折法により測定した鉄筋の現有応力から鉄筋ひずみ量を算定し、トンネル高さ方向のひずみ分布を求めた結果と、経年 8 年以降から計測されたトンネルの沈下データから凍結融解時の沈下量を推定する方法、その結果からトンネル縦断方向の健全性を評価する方法を研究した。

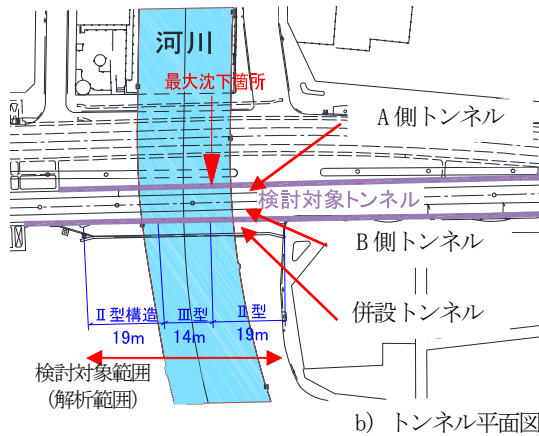
2. 検討対象トンネルの概要

(1) 検討対象トンネルの概要

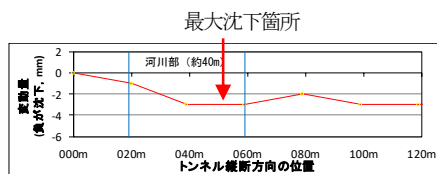
検討対象としたトンネルの概要を図-1 に示す。トンネ



a) トンネル横断面



b) トンネル平面図



c) トンネル変位の計測結果
(竣工 8 年後から 12 年間の変動)

図-1 検討対象トンネルの概要

ルは経年 38 年程度で、沈下が見られる河川横断面部を対象とした。対象としたトンネルは、地下鉄の 1 層 2 径間に 2 層 1 径間のトンネルが併設する鉄筋コンクリート構造となっている。

トンネルの構造寸法は、併設トンネルを含めた全体の幅が 13.15m、高さが 6.7m となっている。地下鉄部には中壁があり、待避口が一定間隔で設置されている。

検討対象としたトンネルの長さは約 50m、図-2 に示すようにトンネルは土かぶり約 14m でトンネル周辺の地盤は砂礫やシルト混り砂層が主体で、トンネルの上部や下方に粘性土が一部見られる。

(2) 検討対象トンネルの変状状況

検討対象のトンネルでは、竣工の 8 年後から定期的に水準測量が行われており、初回の計測を基準とすると竣工 20 年後（初回計測から 12 年度）に図-1 に示すように河川横断面箇所の中央付近を中心とした沈下を確認された。沈下は、図-3 に示すように数年継続する傾向が見られたが、近年は沈下が収束する傾向となっている。

竣工時から 33 年後に調査されたトンネル内のひび割れ

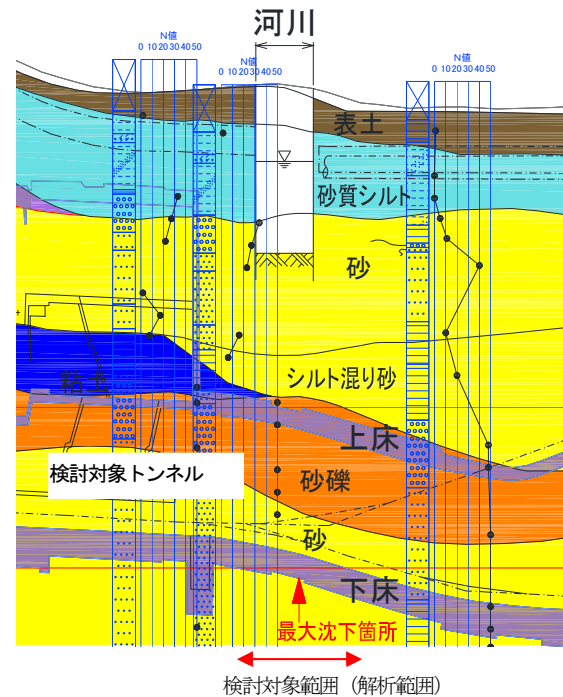


図-2 検討対象トンネルの縦断面図

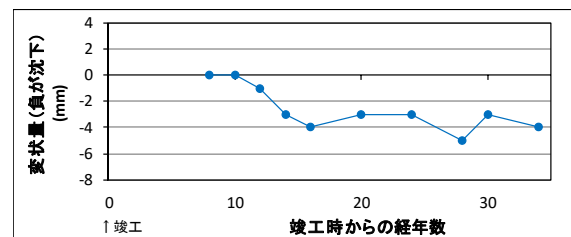


図-3 最大沈下箇所の経時変化

状況を図-4 に示す。これより、河川部を中心に沈下が発生しているのに対して、河川部両岸付近にせん断と見られる斜め方向ひび割れが発生し、河川部にトンネル横断面方向のひび割れが多く見られる。トンネル横断面方向のひび割れのうち、トンネル下端付近から発生しているひび割れ幅が大きくなる傾向が見られることから、文献 1)と同様にトンネル構造に沈下に伴う曲げが作用していることが想定されていた。

(3) 検討対象トンネルの変状要因

検討対象トンネルは、河川横断面箇所を施工するため、補助工法として、大規模な凍結工法を用いている。凍結工法は、凍結時に土中の水分が体積膨張することで隆起し、解凍時は体積収縮して沈下する傾向が見られる²⁾。凍結融解に伴う隆起や沈下は、粘性土地盤で大きく、砂質土地盤で小さくなる傾向にある。

施工時の計測では、粘性土層の上部（図-2 の砂質シルト層より上部）に位置する既設の橋台上部で、凍結開始から終了時までの隆起が 228～352mm と大きな量が計測されていた（解凍時の計測は未実施）。

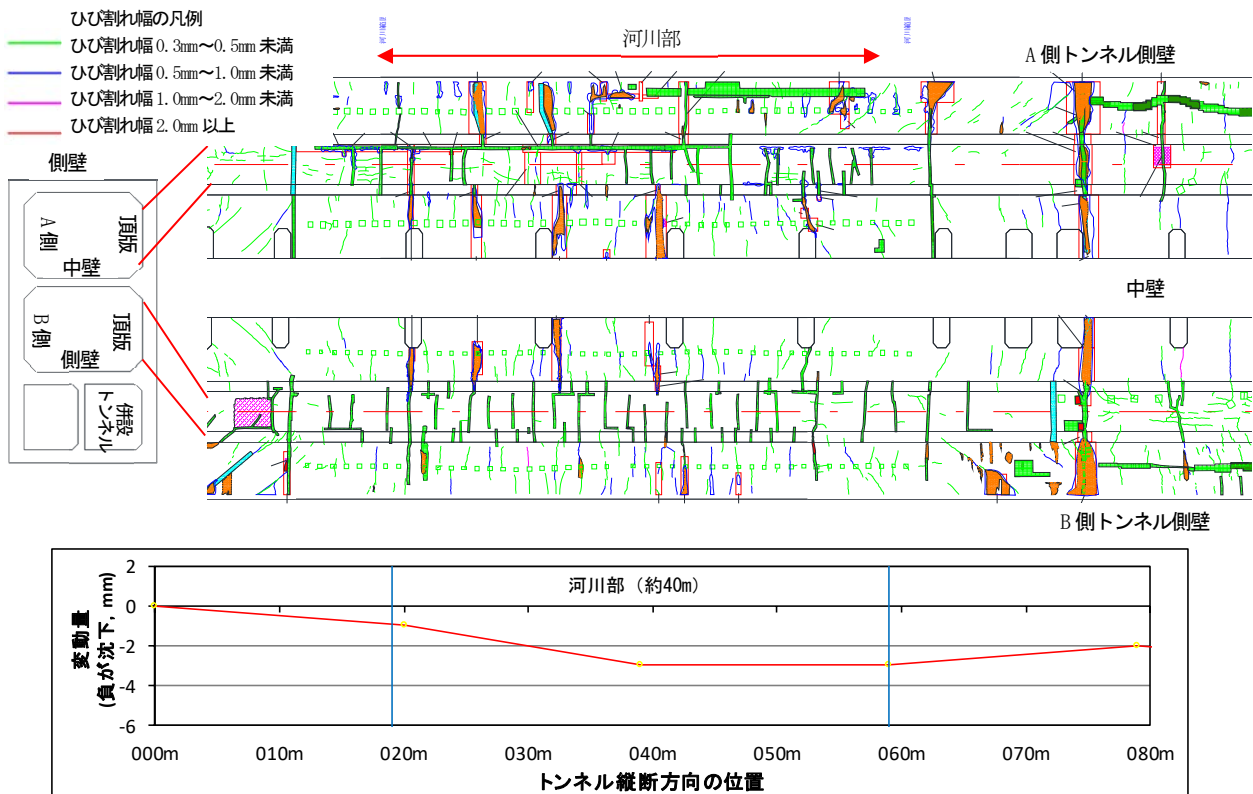


図4 トンネル内面のひび割れ状況（調査時期：竣工時から経年33年）

一方で、検討対象トンネルは主に砂地盤に建設されているが、凍結範囲の一部には粘性土が若干含まれていた。また、地盤が凍結した状態で構築されていることから、先の橋台での計測値より小さいと考えられるが、相応の解凍に伴う沈下が発生したと想定される。

また、細粒分を含み適度に透水性が悪い地盤では、凍結面近隣の未凍結地盤内で凍結面への吸水により間隙水圧の低下が起こり、脱水压密が発生する³⁾。粘性土地盤の圧密は、影響が長期にわたる傾向にある。

これらのことから、検討対象トンネルは、以下のようなメカニズムで沈下が生じたと考えられる。

- ・凍結工法により地盤が隆起した状態で、トンネル構造が構築される。
- ・凍結箇所の解凍により、トンネル構造に沈下が発生。
- ・細粒分を含む地層において脱水压密が発生。沈下が長期にわたり継続。
- ・近年は圧密が収束し、沈下はほとんど見られない。

3. トンネル縦断方向の変状状況の検討

(1) トンネル縦断方向の変状状況の検討方法

検討対象のトンネルの変状は、施工時の凍結工法が要因と考えられる。一方、トンネルの沈下の計測は、軌道管

理が主目的であり、地下鉄の供用後に計測が開始される。このため、初回の計測が竣工後から数年後となる場合もあり、構造物の完成時から供用後まで継続した計測が行われることが少なく、凍結箇所の解凍による沈下など、トンネル構造構築時からの変状量が不明であった。

トンネル構造の変状に伴う応力状態などを精度よく評価するためには、トンネル構築時からのトンネル縦断方向の沈下量を精度よく推定することが重要となる。

トンネルの沈下量が大きくなると、トンネル縦断方向の曲げ曲率も増加することになる。このため、沈下が大きい箇所ではトンネル高さ方向のひずみ分布を調査し、先のトンネル縦断方向の変状時のメカニズムを考慮し、トンネル構造の構築時からの沈下量を設定する方法を検討した。

トンネル縦断方向の沈下の分布は、竣工の8年後から26年間の計測結果を用い、沈下分布全体を同じ比率で増減させ、トンネル高さ方向のひずみ分布から得られるトンネル縦断方向の曲率と整合する沈下量として推定することにした。ここで、水準測量の沈下分布を用いたのは、沈下分布の範囲が凍結範囲の河川箇所と整合していること、沈下は解凍が終了した後の数年間にわたり継続する傾向にあり解凍に伴う脱水压密³⁾の影響と考えられること、脱水压密による沈下量は解凍に伴う沈下と相関があると考えられることからである。なお、沈下分布が不明な

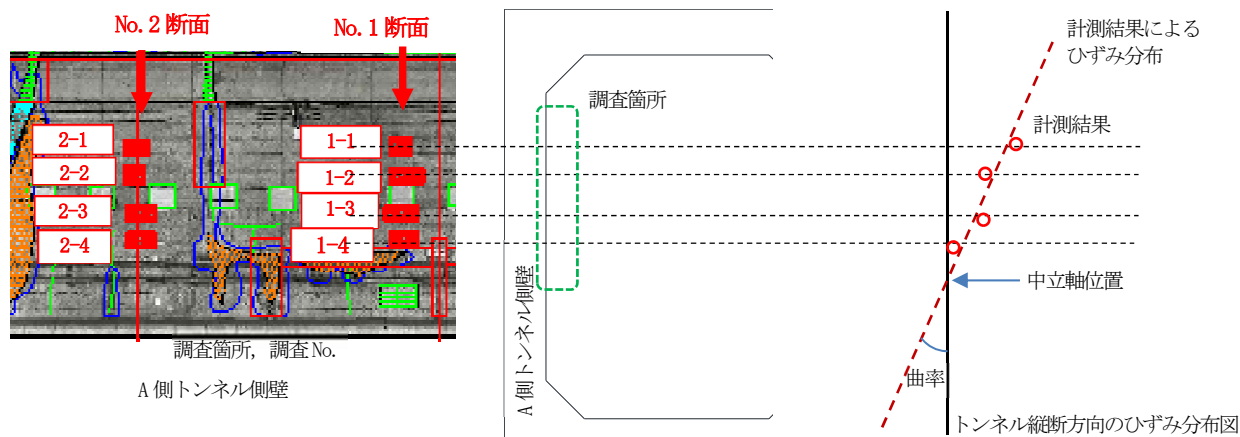


図-5 X線回折法による鉄筋応力度の計測箇所とひずみ分布のイメージ

場合でも、後述の調査断面を多く設定すれば、得られると考えられる。

(2) 変状状況の調査の方法

トンネル高さ方向のひずみ分布を調査する方法として、トンネル縦断方向のコンクリートや鉄筋のひずみを計測することが考えられる。

このうち、本検討では、乾燥収縮などにより計測値のばらつきなどが生じると想定されるコンクリートは対象とせず、鉄筋のひずみの計測を行うこととした。

既設構造の鉄筋ひずみの計測方法としては、鉄筋にひずみゲージを貼り付けて切断し、応力を解放させた時のひずみの変動量を計測する「応力解放法」があげられる。しかし、鉄筋を切断することから、切断箇所の修復が必要などの課題が多く、費用や時間も必要となる。一方、ひずみ分布を得るためには、データ数が多いことが望ましい。

そこで、本検討では、鋼材の残留応力計測手法である、X線回折法のうち、 $\cos \alpha$ 法を適用し、計測装置の小型化と計測時間の短縮を可能とした計測装置（ μ -X360：パルステック工業（株）製）を用いて鉄筋の応力度計測を行った⁴⁾。

応力度計測は揺動法を適用し、以下の手順で実施した。

1) 調査箇所の選定

トンネル縦断方向に対しては、沈下の分布から、最大の沈下箇所でも曲率も大きくなる箇所、最大沈下箇所から少し離れた箇所でも曲率が多少小さくなると想定される2カ所を選定した。

トンネル高さ方向に対しては、図-5に示すように鉄筋のひずみ分布が得られるように、おおむね等間隔となるようにそれぞれの調査箇所で4本の鉄筋を対象として選定した。なお、X線回折法は、降伏応力度を超過し塑性化した鉄筋についても、発生応力度を計測することができる。しかし、本検討では、トンネル高さ方向のひずみ分布から、曲げ曲率や中立軸位置を評価する必要がある。応力



図-6 X線回折法による計測状況

度からひずみに換算するため、降伏応力度以下になると想定される鉄筋を調査対象として選定した。

2) 調査箇所のはつりだし

鉄筋の応力度を計測するため、かぶりコンクリートをはつりだし鉄筋を露出させた。

はつり範囲は、X線回折法の計測機器を設置するため、高さ200mm×幅380mm程度の範囲とした。はつり深さは、鉄筋とコンクリートの付着の影響を最小限とするため、計測可能な程度に鉄筋表面が露出するまでとした。

3) 計測箇所の研磨

X線回折法による計測を行うため計測箇所を平滑に研磨し、研磨による加工付加応力を除去するため電解研磨を行った。電解研磨とは鉄筋に微弱な電流を通電し電解研磨液により鉄筋表面を溶かして研磨する方法である。

4) X線回折法による計測（図-6参照）

X線回折法の計測装置を計測箇所に固定し、計測を行った。計測に用いるX線強度は強くないため、計測時（数分程度）に関係者が計測箇所から2m以上離れることで計測可能となっている。

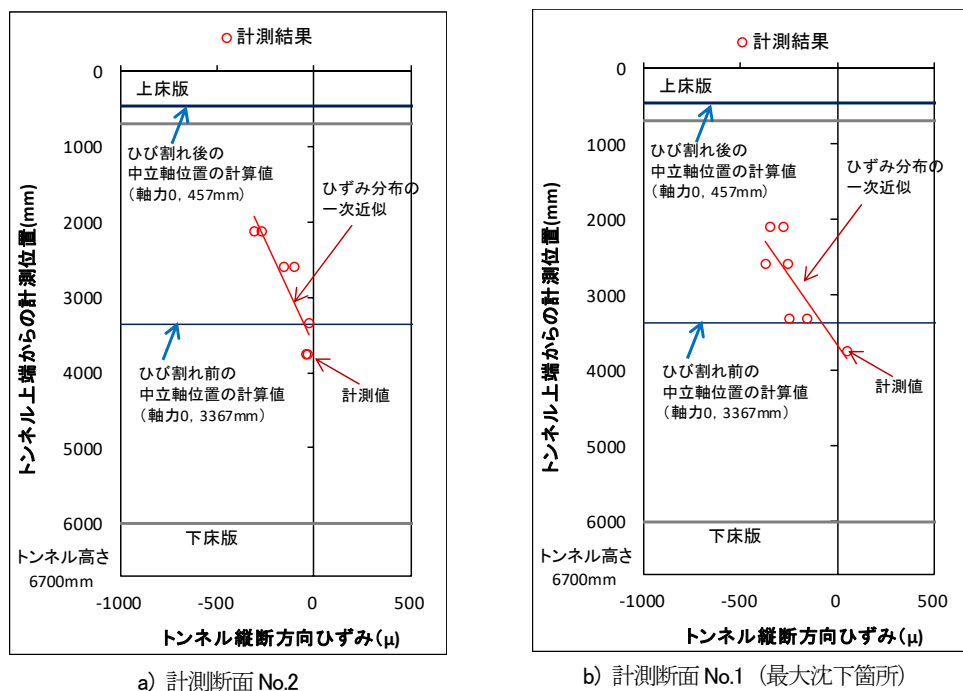


図-7 X線回折法による計測値（応力度をひずみに換算）とトンネル高さ方向位置との関係

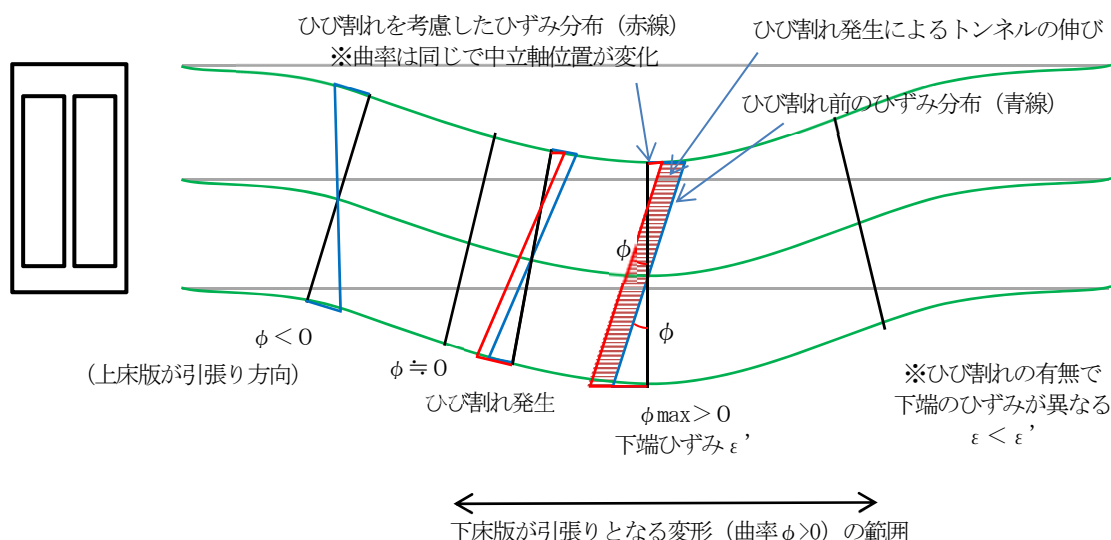


図-8 沈下によるひび割れが発生した場合のトンネル高さ方向のひずみ分布のイメージ

5) 調査箇所の復旧

調査箇所を復旧し調査を終了した。

これらの調査は、20日間程度を要した。このうち、約10数日がコンクリートのはつりと調査箇所の復旧であり、計測箇所の研磨が3～4日、X線回折法による計測が3～4日であった。1日の調査時間が3時間以下と制約される地下鉄トンネルにおいても、十分に適用することが可能であることも確認できた。

(3) 鉄筋ひずみの調査結果

X線回折法による計測結果は、応力で出力される。このため、応力度を鉄筋のヤング係数（200kN/mm²）で除し

てひずみに換算し、トンネル高さ方向位置との関係で整理したのが図-7である。

計測結果にはばらつきが見られる。これは、X線回折法の計測精度が鋼材の結晶の大きさなどに影響を受けるためと考えられる。計測値を近似した一次式の勾配の逆数が計測箇所の部材の曲率となる。また、近似した一次式の切片（ひずみが0となる高さ）が中立軸位置となる。

調査箇所はトンネルの沈下によるとみられる曲げひび割れが多くみられている。このため、トンネル横断面をコンクリートの引張り力を無視する鉄筋コンクリート断面として中立軸位置を算定するとトンネル上端付近の457mmとなり、計測結果と大きな相違がみられる結果と

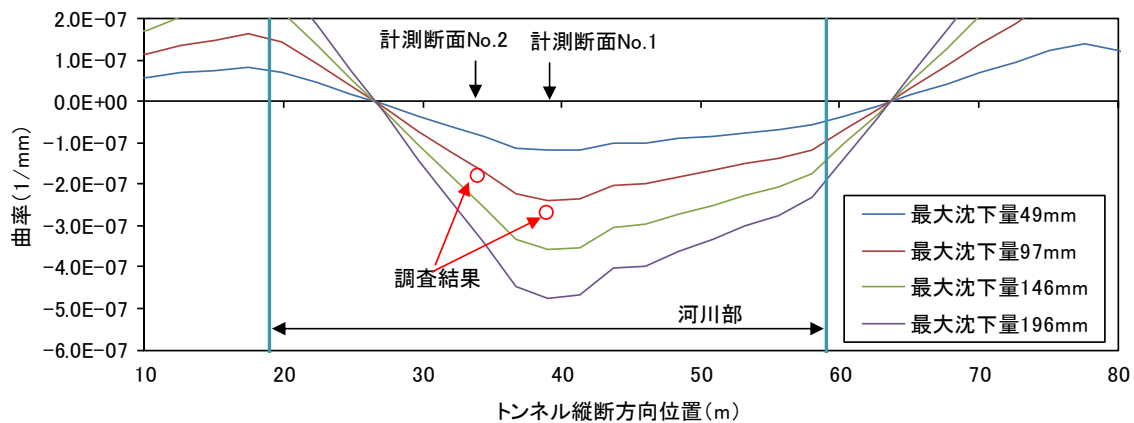


図-9 トンネル沈下分布を沈下量に応じて比率で変えたトンネルの曲率と調査結果による部材曲率の関係

なった。

(4) トンネル縦断方向の変状によるトンネル構造の挙動

トンネル高さ方向のひずみ分布の調査結果から、トンネル縦断方向の曲げによる中立軸位置が、従来のトンネル縦断方向の軸力の影響を考慮しない場合より下方になる結果となった。ひずみの勾配から推測するトンネル下端付近のひずみは、コンクリートのひび割れひずみ 70μ を大きく超過し、さらに既設構造の下端付近にも大きなひび割れが確認されている。

この結果から、中立軸が下方になるトンネル縦断方向の沈下に伴うトンネル挙動は、以下に示すメカニズムによると考えられる(図-8)。

a) ひび割れを考慮しない場合

トンネル縦断方向の一部に沈下が発生すると、トンネル縦断方向に曲げが発生する。トンネルのひび割れを考慮しない場合は、コンクリートの圧縮と引張りが同じ弾性係数の全断面有効の曲げ剛性となる。この場合、トンネル高さ方向のひずみ分布は図-8の青線のような状態となる。

b) ひび割れを考慮した場合

トンネル縦断方向の沈下量が大きくなると、トンネル縦断方向の曲げも大きくなり、トンネル下部付近がコンクリートの引張強度を超過し、曲げひび割れが発生する。曲げひび割れが発生した箇所のコンクリートは引張り力を分担せず、トンネル縦断方向に配置された鉄筋が引張り力を分担する状態となる。コンクリートの引張りを無視した鉄筋コンクリート構造として応力度計算を行うと、トンネル高さ方向のひずみ分布は図-8の赤線となり、中立軸位置がひび割れを考慮しない場合に比べ、トンネル上方位置となる。

c) ひび割れの有無によるトンネル縦断方向の伸縮

ひび割れを考慮しない場合、曲げに伴う中立軸位置はトンネル高さ方向の中央付近となり、トンネル上部と下

部のひずみ量も等価となり、トンネル縦断方向に対してトンネルの伸縮は生じない。

一方、ひび割れを考慮しない状態(図-8の青線)に対して、ひび割れを考慮した状態(図-8の赤線)は、ひび割れを考慮しない状態に対して、ひずみがトンネル高さ方向全体で引張り側に伸びることとなる(図-8の赤の網掛け箇所)。

d) トンネル縦断方向の拘束の影響

トンネル縦断方向の曲げに対して、ひび割れを考慮すると、トンネル軸方向に伸びる挙動を示す。しかし、トンネルは縦断方向に連続した構造となり、さらに周囲には地盤があるため、トンネルは縦断方向の伸縮が拘束された構造となっている。このため、沈下箇所の両側のトンネルにひび割れ発生によるトンネル縦断方向の伸びが拘束されることとなる。

伸びが拘束されることから、トンネルは縦断方向に圧縮軸力が作用しているような状態となる。このため、トンネル高さ方向のひずみ分布が、全体的に圧縮側となり、中立軸位置もトンネル高さ方向の中央付近に近づく。

ひび割れ発生の有無により、トンネル縦断方向の拘束に伴い生じる力を、「見かけの軸力」と呼ぶこととする。

(5) トンネルの沈下量の検討

トンネル縦断方向の拘束の影響を定量的に検討し、沈下量の推定方法を検討した。トンネルの沈下量は、計測されている沈下分布を基本とし、沈下分布全体を比例倍させた沈下量による部材曲率分布と調査結果の曲率が整合する量として設定した。

検討事例では、沈下傾向が収束したと見られる経年20年で計測された沈下量の分布をスプライン関数で近似し、最大沈下量を49mm, 97mm, 146mm, 196mmとして、全体の沈下量の分布を算定した。次に算定した沈下量の分布から、曲げ曲率を算定し、トンネル縦断方向位置と曲げ曲率の関係として整理した。この結果に鉄筋ひずみの調

査結果から得られた部材曲率をトンネル縦断方向位置に追記した結果が図-9 である。ここで、最大沈下量のうち 49mm は、地盤凍結完了時に計測された地表面の隆起量からトンネル位置に相当する凍上量を試算した結果に相当する値である。

この結果、最大沈下量が 97mm の場合に、部材曲率と調査結果が整合する傾向となった。

これより、検討事例における、トンネル構築時からの最大沈下量は、97mm と推定した。

推定した沈下量は凍上量から推定される沈下量の 2 倍程度となっている。粘性土分を含む地盤は、凍結地盤の融解時に脱水圧密が生じることから、凍上量より解凍による沈下量が大きくなる傾向にある。このため、推定した沈下量は、凍上量の計測値からも妥当な値と考えられる。

(6) トンネル縦断方向の見かけの軸力の検討

設定した沈下量および沈下分布を用い、先に示したトンネル縦断方向の見かけの軸力を算定すると以下のようになる。

1) トンネル縦断方向の検討対象範囲の設定

トンネル縦断方向の沈下で曲げひび割れが発生し、トンネル縦断方向に拘束されている範囲を、沈下が大きくなる図-2 に示したトンネル構造(Ⅲ型)の 14.0m とする。対象範囲を骨組みモデルで解析すると、対象構造はすべてひび割れ曲げ耐力を超過し、曲げひび割れが発生する条件となっている。

2) 中立軸位置およびひずみ分布の算定

ひび割れの有無によるトンネル高さ方向の中立軸位置とひずみ分布を算定する。ひび割れがない場合は引張り力を受けるコンクリートも考慮したトンネル横断面方向の全断面を有効とした断面、ひび割れがある場合は引張り力を受けるコンクリートを無視しトンネル縦断方向の鉄筋を主鉄筋としたトンネル横断面方向の鉄筋コンクリート断面として行う。

中立軸位置は、ひび割れがない場合は 3367mm、ひび割れがある場合は 457mm と大きく異なる。

ひずみ分布は、これらの中立軸位置と、図-9 の曲率から次式で算定される。

$$\varepsilon_x = \phi(y_i - x) \quad (1)$$

ここで、 ε_x : トンネル高さ x の位置のひずみ、 ϕ : 部材曲率、 y_i : 中立軸位置、 x : ひずみを算定するトンネル高さ方向位置

3) ひび割れにより拘束されるひずみの算定

拘束されるひずみは、ひび割れの有無によりトンネル縦断方向の伸び量の差異から算定する。

トンネル縦断方向の伸びは、先のトンネル高さ方向のひずみ分布から、トンネル下端のひずみを算定し、トンネル縦断方向の長さを乗じることで算定する。

検討事例では、ひび割れを考慮しない場合が 10.3mm、ひび割れを考慮した場合が 19.2mm となった。この伸び量の差を検討対象範囲の長さで除すると 637.5μ となる。これが、沈下によりひび割れが発生することで、トンネル縦断方向に拘束される量となる。

4) 中立軸位置の算定

トンネル縦断方向に伸びが拘束されると、トンネル高さ方向のひずみ分布は全体的に小さくなる。そこで、中立軸位置は、トンネル下端のひずみが拘束無しに対して、拘束されることで小さくなるとして算定する。

検討事例では、拘束を考慮して算定したトンネル下端のひずみ (1008.5μ) と調査結果から得られている部材の曲率 ($2.6 \times 10^{-7}(1/\text{mm})$) から算定した結果、中立軸位置がトンネル上端から 2883.1mm の位置となった。

この結果は、見かけの軸力を考慮しない場合(ひび割れがある場合の計算値 457mm) と大きく異なり、計測結果のひずみが 0 となる位置に近い。これより、前述の沈下量の推定や見かけの軸力の発生メカニズムの妥当性が検証されたと考えられる。

5) 見かけの軸力の算定

算定した中立軸位置と部材曲率を用いて、トンネル横断面の鉄筋コンクリート断面に対して軸力を算定すると 195MN となった。

4. トンネルの耐荷性能の評価

(1) 耐荷性能の評価方法

耐荷性能の評価は、トンネル構造や変状をモデル化した構造計算を行い、トンネルの要求性能から限界値を設定し、それを満足するかどうかの照査を行った。

a) 構造計算のモデル

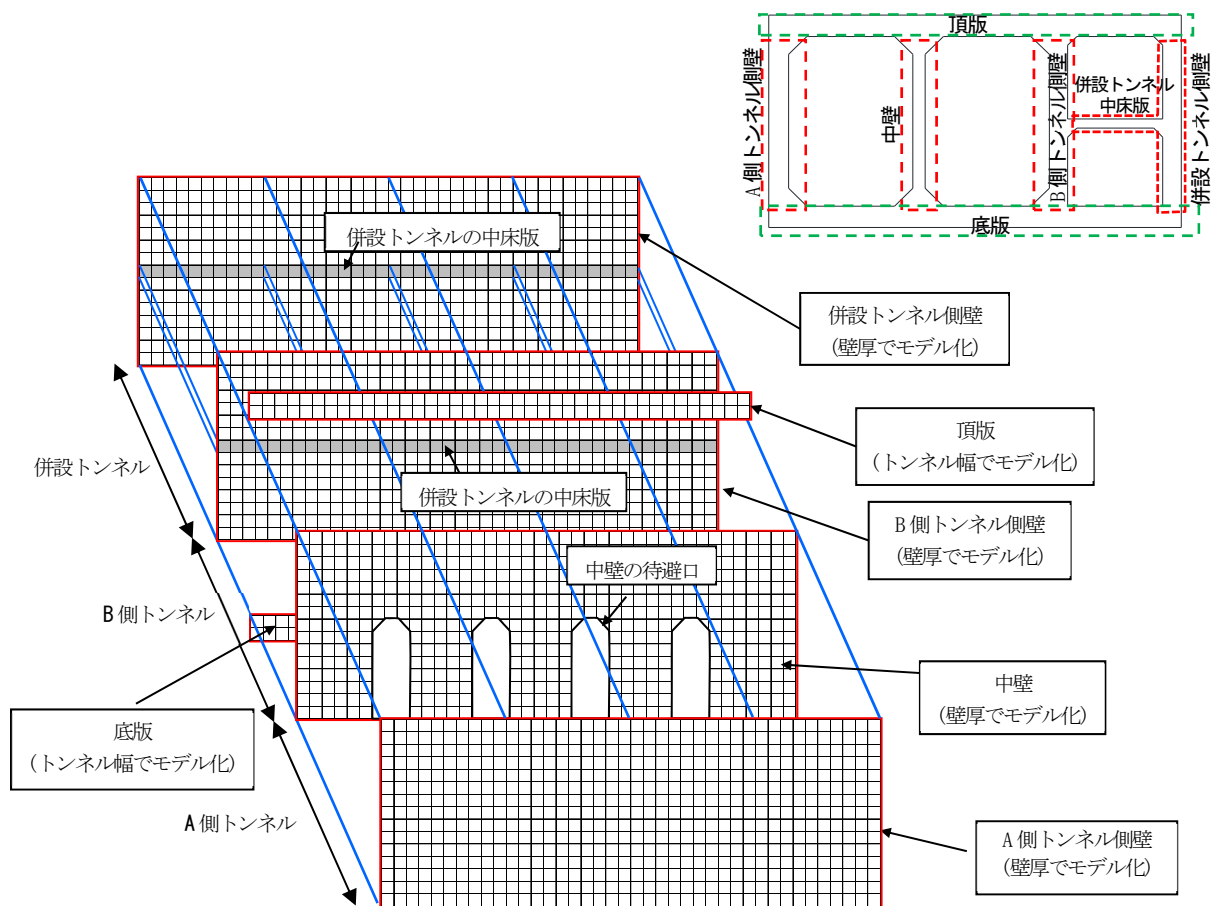
本研究では、トンネル構造の挙動を精度よく再現するため、非線形領域まで再現出来る 2 次元の鉄筋コンクリート構造計算コードである WCOMD^{5),6),7)}を用いた。3 次元モデルによる検討も考えられるが計算量が膨大になることなどから、疑似 3 次元モデルを採用した。

構造計算は、以下のように実施した。

- ・トンネル構造は、図-10 に示すように、トンネル構造を頂版、底板、側壁、中壁などの要素を同一平面上に配置し、一部の節点を共有させるなどのオーバーラッピング要素⁸⁾としてモデルした。なお、トンネル縦断方向の評価として止水板等の目地処理などの影響も考えられるが、比較的古い検討対象としたトンネルではそのような措置は行われていなかった。

- ・見かけの軸力の影響を比較するため、見かけの軸力の考慮の有無の 2 ケースを実施した。

- ・トンネル構造の形状は構造図などから待避口を含めて



※頂版下部の節点と側壁, 中壁, 併設トンネル側壁の節点を共有.
 ※底版上部の節点と側壁, 中壁, 併設トンネル側壁の節点を共有.
 ※併設トンネルの中床版は, B側トンネル側壁と併設トンネル側壁の節点を共有し, 中床版の幅を含めた厚さでモデル化.

図-10 擬似3次元によるトンネル縦断方向のモデル化のイメージ

表-1 構造計算に用いた材料特性		
材料種類	項目	物性値
コンクリート	圧縮強度	21N/mm ²
	引張強度	1.75N/mm ²
	ポアソン比	0.2
	ヤング係数	25kN/mm ²
鉄筋	降伏強度	295N/mm ²
	ヤング係数	200kN/mm ²

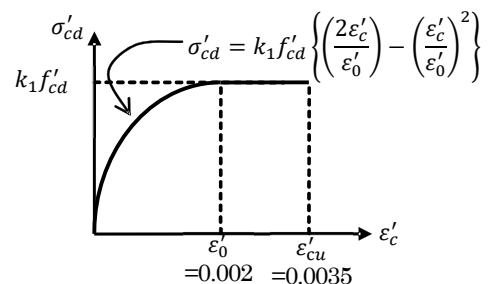


図-11 終局曲げ耐力算定時のコンクリートの応力とひずみの関係¹⁰⁾

再現した。

- ・鉄筋コンクリート構造は, WCOMD の分散ひび割れモデルによる構成則⁹⁾を適用した。
- ・構造計算は, 2ステップにより実施した。ステップ1で土被り荷重, トンネル構造自重, 見かけの軸力を与える。ステップ2で設定した沈下量をトンネル下端に強制変位として与えた。
- ・見かけの軸力は, トンネル縦断方向の剛性が異なる頂版や底版, 側壁などに対して, ひび割れに伴う拘束ひずみを均一に作用させるため, トンネル左右から見かけの軸

力に相当する強制変位として与えた。構造計算に用いた材料特性を表-1に示す。

b) 照査項目および限界値

トンネルの要求性能としては, 安全性, 使用性, 復旧性が挙げられる⁹⁾。照査は, これらの要求性能を満足する照査項目に対して行うことが必要となる。本論文では, 安全性を確保するための耐荷性能に着目し, 最も沈下が大きい箇所の変位に対する応力度やひずみを精度良く再現し, 照査する方法について検討を行った。

検討対象のトンネルは, トンネル縦断方向の一部が沈

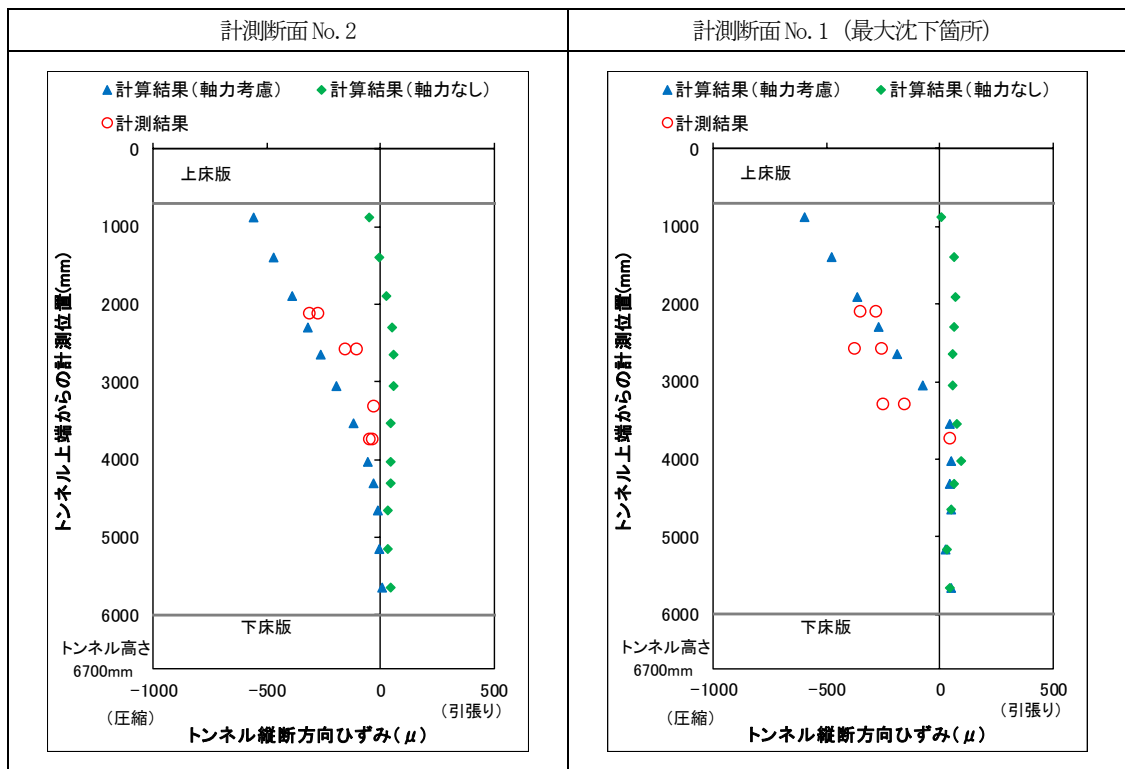


図-12 鉄筋ひずみの調査結果と構造計算結果の比較

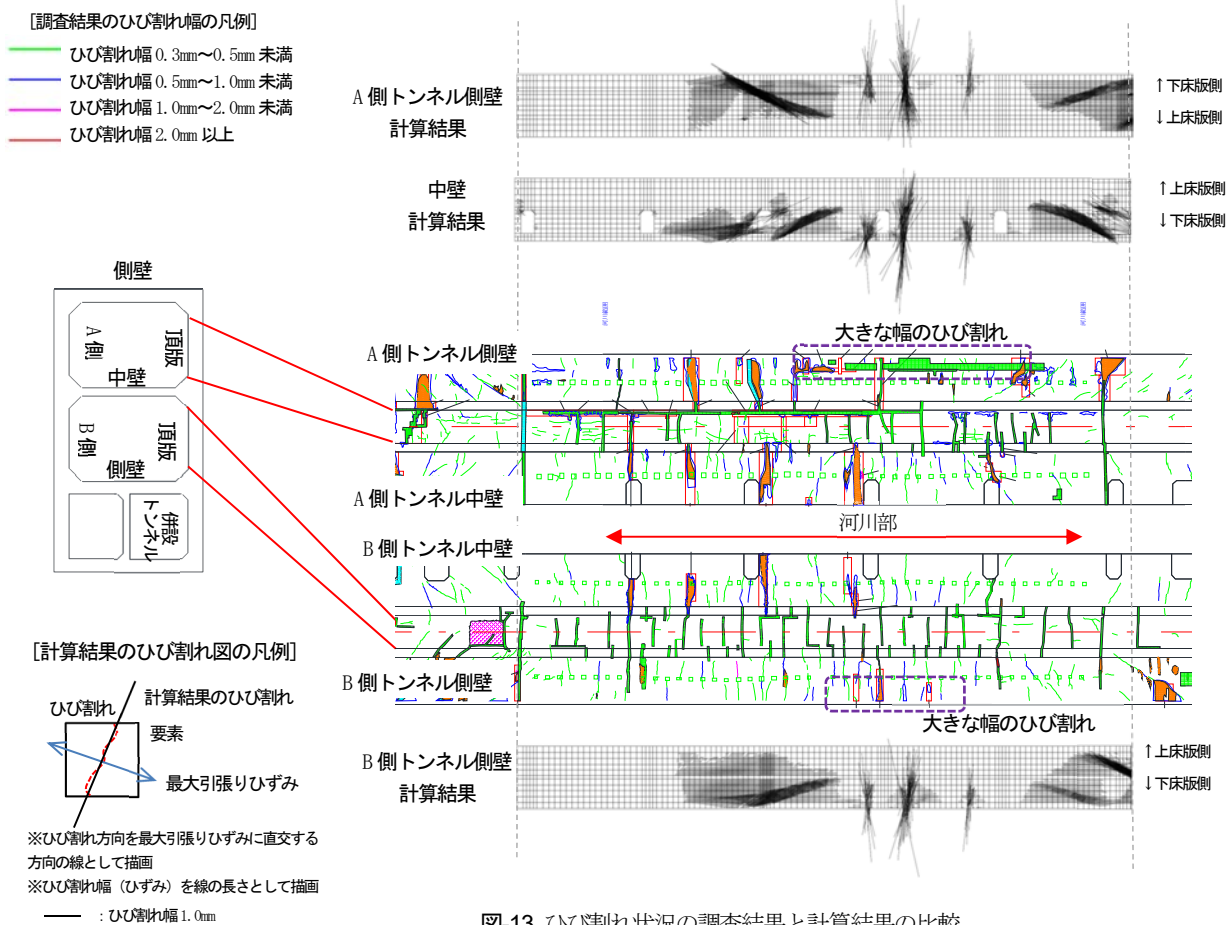


図-13 ひび割れ状況の調査結果と計算結果の比較

下する変状となっている。トンネルは地盤に支持されていることから、鉄筋が降伏応力度を超過しても急激に沈下等の変状が進行することはない。しかし、終局曲げ耐力

に近づくと、コンクリートの圧縮ひずみが増大し、コンクリートのはく落などが生じ地下鉄の運行の障害となることが考えられる。

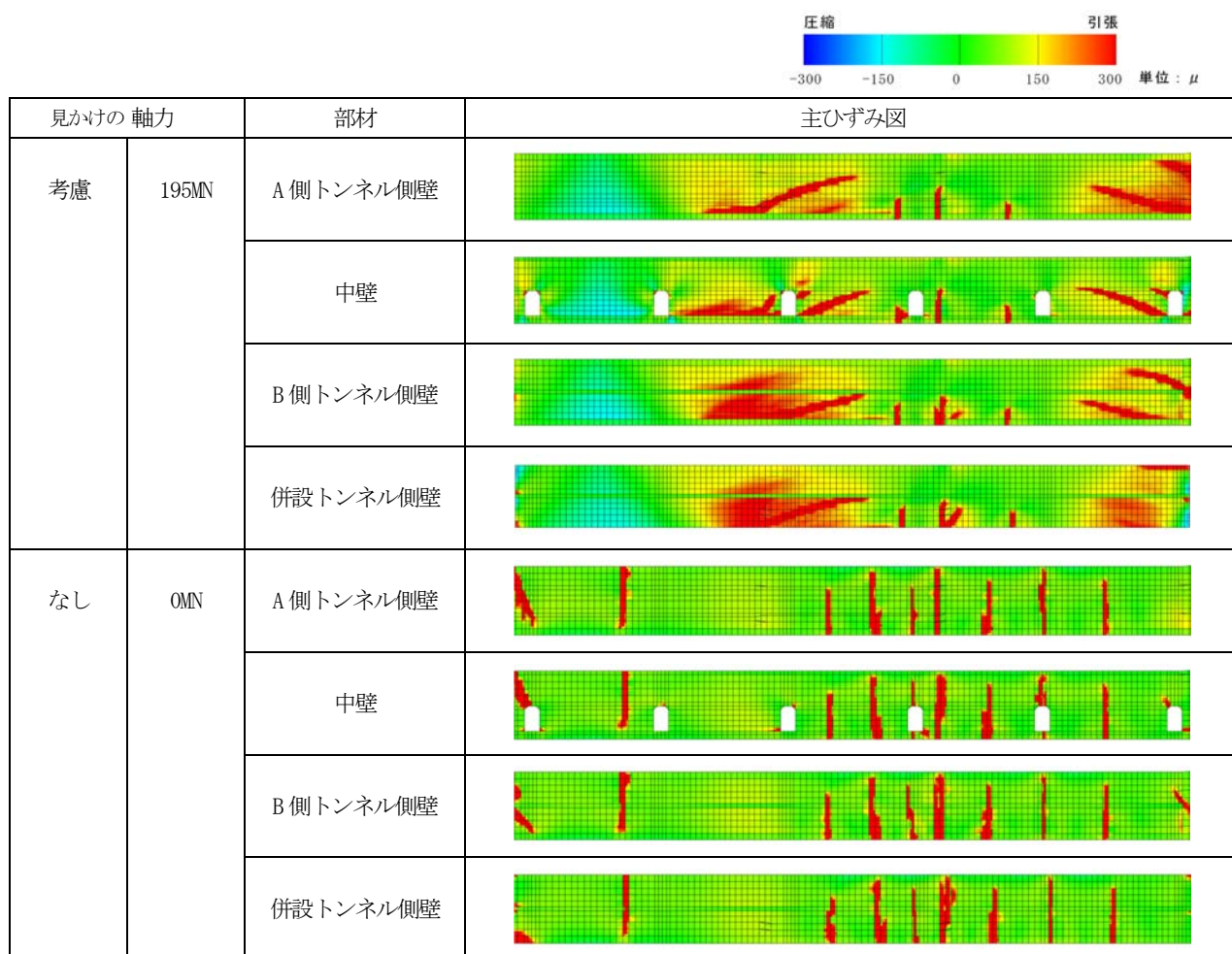


図-14 構造計算の結果：最大主ひずみのコンター図

これより、曲げの照査の限界値は、コンクリートの圧縮ひずみに対して設定した。

終局曲げ耐力の算定時のコンクリートの材料特性は図-11¹⁰のように、圧縮ひずみが 2000μ を超えると急増する。このため、圧縮ひずみの限界値は 2000μ とした。

(2) 耐荷性能の検討結果

a) 構造計算の結果

トンネル高さ方向のひずみ分布の調査箇所について、鉄筋ひずみの調査結果と構造計算のひずみ分布を比較したのが図-12 である。これより、見かけの軸力を考慮しない場合は、調査結果と計算結果の傾向が大きく異なる。一方、見かけの軸力を考慮すると、ひずみの分布やひずみが 0 となる中立軸位置の傾向が一致する。

ひび割れ状況について、調査結果と計算結果を比較したのが図-13 である。これより、実構造に発生している比較的大きなひび割れ（図の青のひび割れ、 0.5mm 以上）の状況を構造計算で再現していると見られる。構造計算では比較的小さいひび割れ（図の緑のひび割れ、幅 0.3mm 以上、 0.5mm 未満）は十分に再現できていない。これらは、ひび割れの状況などから、トンネルの変状に対応しな

い乾燥収縮などにより発生したと考えられる。

b) 耐荷性能の照査

構造計算の最大主ひずみのコンター図が図-14 である。これより、引張りは、 300μ を超える大きなひずみが多数発生し、ひび割れが発生している状況が確認できる。圧縮ひずみは、限界値とした 2000μ に対して十分な余裕があり、曲げ耐力を満足する結果となった。

この結果、検討対象トンネルには沈下や沈下に伴うひび割れが見られるものの、変状の進展は収束し、トンネル構造に必要とされる耐荷性能も満足した状態と評価した。

c) 照査方法の差異の比較

図-14 から見かけの軸力を考慮しない場合はトンネル下端から上端付近にかけて大きな最大主ひずみが発生するなど、見かけの軸力を考慮した場合と傾向が大きく異なっている。

鉄筋の引張りひずみとして、トンネル下端付近のトンネル縦断方向の引張りひずみの最大値を比較すると、見かけの軸力を考慮した場合が 5410μ 、見かけの軸力を考慮しない場合が 14050μ となっていた。これに対して、鉄筋の許容応力度 (180N/mm^2) に相当するひずみは 900μ 、降伏応力度 (295N/mm^2) に相当するひずみは 1475μ とな

っている。

これより、見かけの軸力を考慮しない場合は、鉄筋の破断も想定される過大な値となり、地盤に支持されているトンネルにおいても鉄筋が破断するとトンネルの急激な沈下や大きなひび割れが発生することによる多大の漏水などが危惧され、大規模な対策が必要になる。

見かけの軸力を考慮した場合でも、許容応力度を超過するため、許容応力度法による照査を行った場合は、大規模な対策が必要になると想定される。

しかし、見かけの軸力に加え、トンネルの状況に応じ、限界状態まで考慮した照査を行うことで、合理的な評価や対策の検討が可能になると考えられる。

ただし、限界値が、従来に比べ大きく異なることから、変形性能や耐荷性能にも十分な留意が必要となる。本研究の検討事例においては、構造計算結果から、軌道や建築限界などの変形に対する制限値に対して十分に余裕があることを確認している。一方、引張り鉄筋のひずみが非常に大きくなり、通常の設計では耐久性を満足しない様な変状が発生しているが、使用は出来る状態であると考えられる。そこで、この事例では、点検結果から、耐久性に支障があるひび割れに対しては、防錆などの対策を実施することにした。

5. 結論

本研究により以下の結果が得られた。

- ・トンネル縦断方向の一部が変位しひび割れが発生することで、トンネル縦断方向に見かけの軸力が発生するメカニズムを検討事例のトンネルの調査により確認した。
- ・既設構造の調査に近年製品化された X 線回折法の計測装置による計測を適用した。X 線回折法による計測は、鉄筋の切断を伴う応力解放法に比べ、計測が容易で、既設構造を損傷せずにトンネル高さ方向のひずみ分布を得ることが出来た。
- ・経年 8 年以降から計測されたトンネルの沈下データとトンネル高さ方向のひずみ分布データから凍結融解時の

沈下量を推定した。これにより、施工時直後のデータが不明となっている場合のトンネル縦断方向の変状量の推定方法を示すことが出来た

- ・本研究で示した沈下量の設定手法と見かけの軸力をモデル化することで、トンネルの挙動を精度良く再現することができることが分かった。このため、本研究結果は、耐荷性能を合理的に評価する方法として適用できると考えられる。

謝辞：(株)メトロレールファシリティーズ 渡邊氏には、本検討について貴重なデータの提供および数多くの助言をいただきました。X 線回折法による鉄筋応力度計測方法の適用にあたり東京電力パワーグリッド(株)工務部のご協力や助言をいただきました。また、東電設計(株)本田氏には構造解析などで多大の助力をいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河畑充弘, 小西真治, 江原文武, 亀井啓太, 阿南健一：地下鉄開削トンネルの変状に対する耐荷性能の評価, トンネル工学報告集, 第 27 巻, III-2, 2017.11.
- 2) 例えば, 加藤哲治：凍結工法による地盤改良工法, 基礎工 1988 年 6 月, pp.34-40, 1988.6.
- 3) 土木工学社：連載講座 地盤凍結工法入門(4), トンネルと地下 第 12 巻 4 号, pp.65-71, 1981.4.
- 4) 尾崎潤, 野末秀和, 阿南健一, 小椋明仁, 吉本正浩：RC セグメントの鉄筋応力計測への X 線回折法の適用に関する要素試験, トンネル工学報告集, 第 27 巻, II-8, 2017.11.
- 5) 岡村甫, 前川宏一：鉄筋コンクリート構造の非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5.
- 6) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例 (2018 年版), 2018.10.
- 7) 市川卓也, 大津仁史, 本田国保, 酒井俊郎：ひずみに着目したボックスカルバートの耐震性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.973-978, 2005.
- 8) (株)フォーラムエイト：UC-win/COMD Ver.2 操作ガイドンス, p.44, 2015.12.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編 トンネル), p.11, 2007.1.
- 10) 土木学会：2016 年制定 トンネル標準示方書・同解説 開削工法編, p.45, 2016.

STUDY ON DEFORMATION VOLUM AND SOUNDNESS EVALUATION METHODS IN LONGITUDINAL DIRECTION OF CUT AND COVER SUBWAY TUNNEL

Satoshi ITO, Shinji KONISHI, Kenichi ANAN and Hirokazu AKAGI

Tunnel deformation with settlement was found in part of the longitudinal direction of Tokyo Metro's cut and cover tunnel. The deformation is assumed to occur by settlement due to the melting process of frizzling method for construction. However, because there are no details deformation records from construction, structural calculation for quantitative estimation of the structure soundness could be carried out. For this reason, the existing stresses were

measured by rebar stress measurement method using X-ray and existing strains of rebars were calculated by the results. From the results, it was found that the position of neutral axis due to the measurement results is higher than the position due to calculation without considering cracks. Namely, load resistance power of the tunnel can be judged in sound side from the results. It's considered that adding axis force in the longitudinal direction of the tunnel, namely appearance axis force, contributes to the phenomenon. Then, the mechanism was investigated. In addition, settlement volume due to the melting process of frizzing method was estimated by settlement data measured from 20 years after construction and the strain distribution of the tunnel. By the method, the estimation method of deformation volume in the longitudinal direction of the tunnel was described in the paper. Moreover, the crack distribution could be simulated by the estimated settlement volume and structural calculation using the quasi three dimensional models and WCOMD, the two dimensional structural calculation code for a RC structure. From the results, the checking method for load resistance performance in the longitudinal direction of a tunnel was also proposed in the paper.