

覆工のひびわれを考慮したトンネル縦断方向の剛性と応答に関する研究
STUDIES ON THE STIFFNESS AND RESPONSE
OF TUNNEL IN THE LONGITUDINAL DIRECTION
CONSIDERING A CRACKED LINING

田中努¹⁾、鈴木猛康²⁾

Tsutomu TANAKA¹, Takeyasu SUZUKI²

1) エイト日本技術開発、保全・耐震・防災事業部 技師長

¹ Member, Chief engineer, Eight-Japan Engineering Consultants Inc.

e-mail : tanaka-tsu@ej-hds.co.jp

2) 山梨大学医学工学総合研究部 社会システム工学系、教授 工博

² Member, Professor, University of Yamanashi, Dr. Eng.

e-mail : takeyasu@yamanashi.ac.jp

ABSTRACT: The changes in axial stiffness of cracked tunnel lining examined, by FEM of smeared crack model. From the strain relationship of ground and tunnel, based on a response deformation method, the tunnel lining state is suspected. Through these, we will be able to control the lining strain during an earthquake.

キーワード: トンネル、縦断方向、耐震設計、覆工のひびわれ、剛性

1. はじめに

トンネル縦断方向の耐震性は、地下水位下に構築される都市トンネルには重要な性能である。特に水底に構築される沈埋トンネルでは、浸水は致命傷となるため、函体間の継手剛性をコントロールして、変位吸収により函体の軸方向力を軽減させると共に、変位を制限して止水性を確保する。そのため函体の横断面の主筋に対する配力筋や鋼殻の鋼板をトンネル縦断方向の抵抗部材として耐震性を確保している^{1) 2)}。逆に、シールドトンネルでは、1m程度の間隔でリング継手が存在するため、リング継手の剛性がセグメントに比べて小さい場合には、セグメント幅分の地盤ひずみがリング継手に集中すると考えられ、リング継手の止水性と金具の安全性を確保している^{3) 4)}。

一方、開削トンネルは、基本的にはコンクリートを連続して打設する継手のない構造であり、古くは、トンネル縦断方向の耐震性を確保するために、軸方向鉄筋の量を増加させる耐震対策が行われた。地盤急変部を通過する場合は、延長20m程度毎のコンクリートの施工目地に可撓性を持たせ、変位制限により止水性を確保しつつ、トンネル軸方向の断面力を軽減させた上で、不足分をトンネル軸方向鉄筋で抵抗する対策が取られた⁵⁾。しかし近年、トンネル幅より短い5mや10mの間隔で伸縮目地を設け、トンネル躯体の軸方向鉄筋量は、横断面の配力筋のままに押さえる方法もとられている。

いずれの耐震対策も、継手や目地によるひずみの吸収に期待して、トンネル縦断方向の鉄筋量を抑える方法であり、特に近年の開削トンネルにおいては、躯体コンクリートのひびわれ発生を押さえるところまで、積極的に目地によるひずみ吸収に期待する設計が行われる。

しかしながら、目地や継手に1cmオーダーの開きを生じるには、継手や目地の周囲の地盤に地割れが生じるか地盤とトンネル躯体との間に滑りが生じる必要がある。鈴木は、シールドトンネルのリング継

手の変位吸収性能について調べ、継手周囲の地盤拘束により継手剛性が構造で決まる剛性より高まることを示している⁶⁾。したがって、継手や目地の変位吸収が、現行の設計で期待するほどでない場合は、トンネル躯体に設計以上の力が作用することになる。

本研究では、トンネル躯体にひびわれが生じた場合でも、そのひびわれによる躯体剛性の変化を評価し、応答を正しく把握し、継手や目地の変位吸収に頼り過ぎない自由度の高い設計を目指し、地盤ひずみとトンネル覆工の関係を概算する方法を示した。

2. ひびわれによる剛性変化の評価

2.1 対象モデル

開削工法による4車線の道路トンネルをモデルに取り上げる。一般的なトンネル断面は、おおよそ図1の事例のようである。トンネル軸方向の鉄筋は、横断面の主筋の配力筋として主筋の1/5強の鉄筋量が決められるので、断面形状・寸法や土かぶり、横断方向の耐震設計結果で左右される。

ここでは、基礎的な挙動を確認するため、図1のトンネルの底版の部分モデル（厚さ120cm×幅20cm）を用い、鉄筋量をD16～D32-ctc200（鉄筋比 $p=0.17\% \sim 0.66\%$ ）に変えた6ケースのモデルで検討した。

なお、コンクリートの設計基準強度 f_{ck} は 30 N/mm^2 （弾性係数 E は 28 kN/mm^2 ）、鉄筋の降伏強度 f_y は 345 N/mm^2 とした。

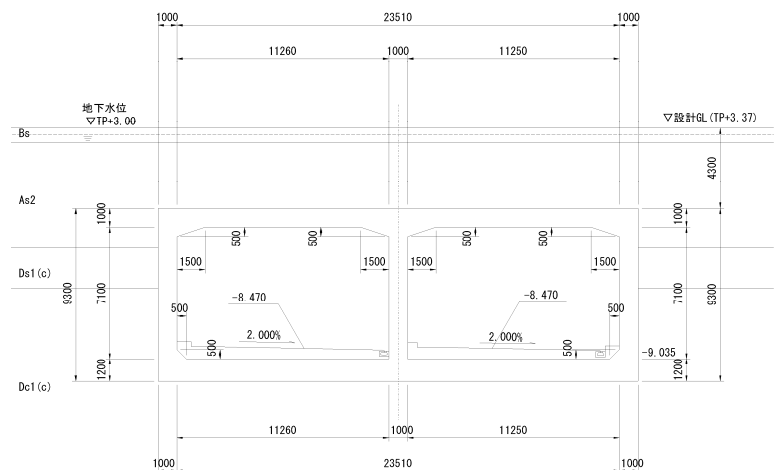


図1 トンネルモデル断面

2.2 トンネル覆工のひびわれによる剛性変化の評価方法

トンネルが大きな軸方向引張力あるいはひずみを受けてひびわれが生じると、ひびわれ部の鉄筋とコンクリートの付着が切れて徐々に抜け出し、剛性が低下していく。筆者の1人は過去に、棒部材の引張試験に基づく付着特性の検討や付着モデルを用いて他の繰返し載荷実験の再現を試みた^{7) 8)}。しかし、その後、通常の設計に用いられる鉄筋とコンクリートとの付着モデルが必ずしも確立していないことから、ここでは、コンクリートのテンションステイフネスと鉄筋の平均応力～平均ひずみに基づく鉄筋コンクリートの剛性変化の評価方法と言われるプログラムWCOMDを用いて検討した^{9) 10)}。

棒状の部材端を静的に引っ張り、ひずみ増加に対して発生する反力を求めた。

2.3 ひびわれによる剛性の変化

計算したトンネルの軸引張ひずみと平均応力度の関係を図2に示す。

覆工のひずみが徐々に増加していく場合を考えると、約0.008%の軸ひずみでコンクリートにひびわれが発生し、ひびわれの進

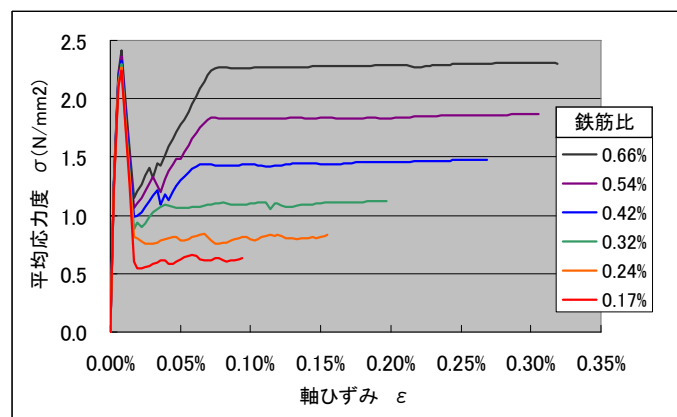


図2 トンネルの応力～ひずみ関係

展に伴い、急激に反力が落ちるが、徐々に鉄筋の反力が増し、降伏耐力で一定となる様子が現れている。鉄筋の降伏ひずみが小さいが、コンクリートのテンションステイフネスと鉄筋の平均応力～平均ひずみに基づく解析の特徴であろう。つまり、ひびわれ部の鉄筋はコンクリートとの付着が徐々に切れながら自由長を延ばして伸びて行くが、ひびわれから離れた付着の効いている部分では伸びないので、鉄筋が降伏する平均ひずみは小さくなる。鉄筋比 p が0.17%と0.24%のケースでは、降伏点が明らかでない。

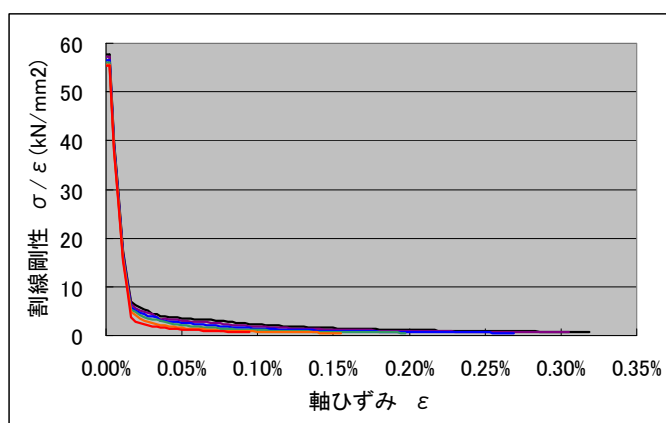


図3 トンネルのひずみと剛性の関係

計算したトンネルの軸引張ひずみと割線

剛性の関係を図3に示す。割線剛性は、そのひずみにおける覆工剛性を等価線形で表すときの剛性である。割線剛性は、覆工にひびわれが生じると、鉄筋の反力が大きくなるまで急激に低下する。元々鉄筋比が少ないので、どのケースも初期剛性の1/10程度になり、概ね同様の割線剛性を示す。

3. トンネル縦断方向の剛性と地震応答の関係

ここでは、地中構造物の縦断方向の地震時挙動を表す基本的な方法である応答変位法¹⁾¹⁾を用いて、トンネル周辺地盤のひずみに応じて覆工状態が決まる状況を示す。

3.1 静的応答変位法の利用

応答変位法による縦断方向の設計では、地震時の地盤変位分布を正弦波状と仮定し、トンネルを弾性床土上の梁として応答を求める。地盤変位の分布を正弦波状と仮定することにより理論解を求めることができ、その地盤変位の波長 L とトンネル剛性 EA または EI と地盤ばね k との比である剛比係数 λ に基づく、地盤ひずみ ε のトンネルへの伝達率 α を知ることができる。

応答変位法の設計で仮定する正弦波状の地盤変位分布は、着目点の1種類の地盤条件に対して定まるため、地震時にトンネル全長に渡ってある1組みの変位振幅と波長の正弦波状の地盤変位分布が生じることを前提にするものではない。

一方、動的解析による縦断方向の設計では、トンネルに沿う地盤条件の変化を、FEMモデルや多質点モデルで表し、トンネルに沿う時刻歴の地盤変位分布を算定し、弾性支承上の梁にモデル化したトンネルに与えて、応答を求める。したがって、トンネルに沿って地盤条件が急変する場所では、地盤ひずみが大きくなりトンネルの断面力も大きくなるが、あまり変化がない場所では、地盤ひずみが小さくなり、トンネルに生じる断面力も小さくなる。

地盤条件急変部では、その急変部分で大きな相対変位が生じるが、その部分の地盤の変位分布が正弦波状であると仮定することは一次近似値としては十分であろう。図4のように、地盤条件急変部の区間長を半波長 $L/2$ 、両端の変位差を両振幅 2δ とする正弦波(または余弦波)に近いと仮定すれば、トンネル軸方向の地盤ひずみは、 $\varepsilon g = 2\pi\delta/L$ で得られる。つまり、応答変位法により、動的解析で求める地盤条件急変部のトンネルの応答を概算することができる。

本論文では、応答変位法を用いて、トンネル覆工のひびわれによる剛性変化に伴っ

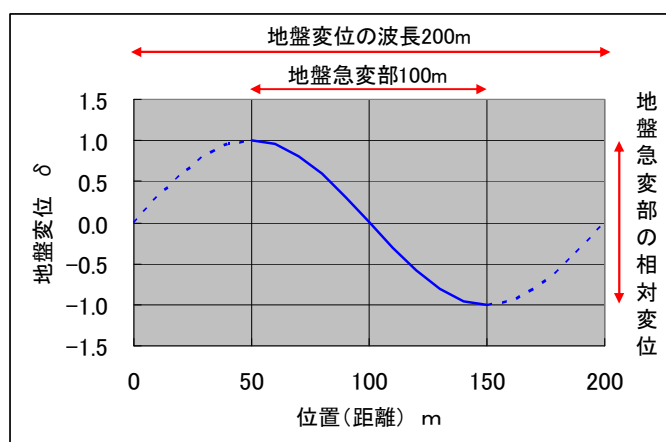


図4 トンネルのひずみと剛性の関係

て、地盤からトンネルに伝達するひずみの状況を調べる。なお、地盤急変部の範囲を100mと仮定し、地盤変位の波長Lを200mとして計算する。

3.2 地盤ひずみと覆工状態の関係

上記3.1の考え方で応答変位法の関係式を利用すると、トンネル軸方向の地盤ひずみ ϵ_g と覆工ひずみ ϵ_t の関係は、次のようになる。

$$\text{トンネルのひずみ} : \epsilon_t = \alpha \epsilon_g \quad (1)$$

$$\text{ひずみの伝達率} : \alpha = 1 / \{1 + (2\pi / \lambda L)^2\} \quad (2)$$

$$\text{剛比係数} : \lambda = \text{SQRT} (k/EA) \quad (3)$$

ここで、

$$\text{地盤変位の波長} : L = 200 \text{ (m)} \text{ (前述3.1より)}$$

$$\text{地盤のばね} : k = 1.5G \text{ (水道指針}^{1,2}) \text{ より)}$$

$$\text{地盤の弾性係数} : G = \gamma / g \times V_s^2 \approx 50000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{地盤の単位体積重量} : \gamma = 19 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\text{重力加速度} : g = 9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$\text{地盤のせん断波速度} : V_s = 160 \text{ (m/s)}$$

$$\text{トンネルの剛性} : EA = 3.2 \times 10^9 \text{ (kN)} \text{ (図1のモデルを想定)}$$

上記の式および条件と図2を基に、トンネル軸方向の地盤ひずみ ϵ_g と覆工ひずみ ϵ_t の関係を求めると、図5が得られる。

図5は、横軸に地盤ひずみ ϵ_g 、縦軸にトンネルひずみ ϵ_t を示す。つまり図中の線は、式(1)を表すことになる。ひずみの伝達率は1以下のため、「地盤ひずみ=トンネルひずみ」の線より右側に存在する。図中の鉄筋比大は0.66%、鉄筋比小は0.24%で、図2に対応している。

鉄筋比の大小で、同じ地盤ひずみに対してトンネルひずみが大きく変わるが、およそ図中のA～Cの状態になる。Aは覆工コンクリートにひびが無く引張抵抗をする範囲で、地盤ひずみが増加してもトンネルひずみがあまり増加しない様子が現れている。

Bはひびわれ部の鉄筋が伸びつつ抵抗する範囲、Cは鉄筋が降伏し地盤ひずみの増加と同じだけトンネルひずみが増加する範囲（「地盤ひずみ=トンネルひずみ」の線と同じ傾きの範囲）である。

この図は、図2のトンネルひずみを地盤ひずみと関係づけて示したため、トンネル覆工にひびわれが生じると、トンネル覆工の剛性が低下し伝達率が大きくなり、「トンネルひずみ=地盤ひずみ」の関係に近づくため、AとCの範囲の間で図の左にシフトしている。地震時に、地盤ひずみが増加していく状態を考えると、図5のAの範囲の右端でトンネル覆工にひびわれが発生すると、矢印のように急激にトンネル覆工のひずみが増加することが推測される。

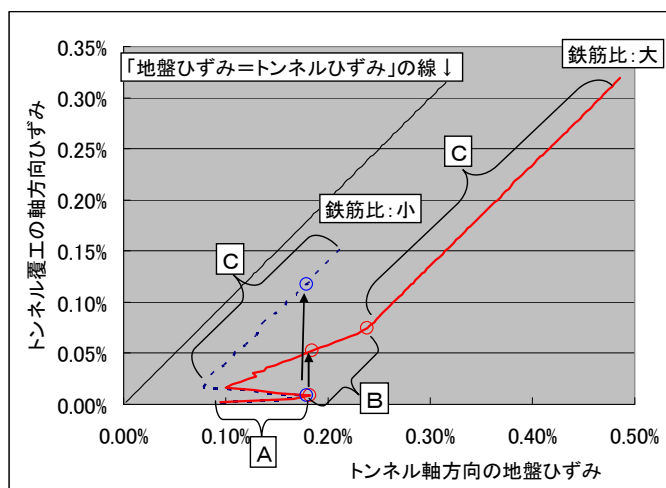


図5 地盤ひずみと覆工ひずみの関係

4. 耐震設計への反映

設計するトンネルの配筋に基づいて図5を作成すれば、想定される地震時地盤ひずみに対する覆工状態が推測できる。

トンネル覆工のひずみが大きい場合には、図5から、配筋を増やすとひびわれ後の覆工のひずみを小さく抑えられることがわかる。特に図5の鉄筋比が小さいケースのような状態では、ひびわれが発生した後、トンネル覆工のひずみが急激に増加するが、ひびわれ部の鉄筋が降伏するため、ひびわれが分散して発

生せず、1箇所のみひびわれが広がる危険性がある。

また、トンネル覆工のひずみが大きい場合には、トンネル軸方向に短い間隔で伸縮可能な目地を設ける方法もあるが、トンネル周囲に地割れが起きなくても目地で数cmの伸縮が可能か、あるいは将来にわたる漏水の心配は少ないかなど、総合的な判断が必要である。

一方、トンネル覆工のひずみが小さい場合で、ある程度以上の配筋が行われる場合は、動的解析による詳細な検討は必ずしも必要としないため、地盤条件や構造条件急変部に対してのみ詳細解析を行うのがよいと考えられる。

謝 辞

本研究のひびわれ部の剛性評価に関して、山梨大学医学工学総合研究部の斉藤成彦先生に、様々なご助言をいただきました。記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 清宮理、高橋正忠、園田恵一郎：沈埋トンネルの設計と施工、技報堂出版、2002年4月
- 2) 首都高速道路公団：東京港トンネル工事誌、土木学会、1977年3月、pp.463-558
- 3) 土木学会トンネル工学委員会技術小委員会シールドトンネルの耐震設計法検討部会：シールドトンネルの耐震検討、トンネルライブラリー第19号、平成19年12月、pp.145-181
- 4) 和佐勇次郎、吉田幸司、田中努：軟弱地盤中のシールドトンネルの地盤および覆工剛性急変部の耐震設計法、土木学会論文集、No.510/IV-26、1995年3月、pp.69-79
- 5) 中川誠志、式田直孝、田中努、大竹省吾：硬質地盤を通過する剛性の高いトンネルの地震時応答性状と耐震設計、土木学会論文集、No.516/VI-27、1995年6月、pp.41-51
- 6) 鈴木猛康：シールドトンネル軸方向の耐震性評価に関する考察、土木学会論文集、No.441/I-18、1992年1月、pp.137-146
- 7) 田中努、橘義則、大竹省吾：ひびわれ部の剛性を考慮したトンネル覆工の耐震設計法、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第3巻、1993年11月、pp.219-224
- 8) 塚田あゆみ、橘義則、田中努：ひびわれを考慮した地中構造物の軸引張剛性の評価法に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第7巻、1997年11月、pp.355-360
- 9) 岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991年5月
- 10) 株式会社フォーラムエイト：UC-win/COMD Ver.2電子マニュアル、2006年11月
- 11) (社)日本道路協会：共同溝設計指針、丸善、1986年3月、pp.52-80
- 12) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説2009年版、87-91