

外力が作用するトンネルの健全度に関する解析的考察

(独)土木研究所 正会員 ○砂金 伸治, 角湯 克典, 真下 英人

1. はじめに

道路トンネルの維持管理にあたっては、各種の基準類^{1)~2)}に基づいて点検や調査等が実施されている。点検や調査を通じてトンネルにひび割れ、うき・はく離、はく落、そして巻厚不足といった変状や構造的欠陥が発見された場合、対策の必要性やその実施時期の判断を行うことになる。しかし、その判断は過去の経験や実績に基づいた定性的な評価により行われることが多い。今後、財源等が制約されるもとの、効率的に道路トンネルの維持管理を実施するためには、トンネルの変状の発生状況等に関する情報を的確に得る必要があるとともに、その情報から工学的な根拠に基づいて、発生原因をなるべく正確に推定し、適切な対策を実施することが重要である。そのためには、変状の状況を客観的に判断したうえで、トンネルの健全度を定量的に評価できる手法の確立が望まれる。

本報では、トンネルに外力が作用する場合に発生する覆工のひび割れに着目し、ひび割れ幅と既存の基準類に基づく判定区分との比較を通じて、健全度の評価法について検討した結果について述べる。

2. 研究方法

ひび割れ幅の算定はひび割れの進展を考慮できる有限要素解析³⁾により行った。なお、ひび割れ幅については覆工に関する実大実験⁴⁾で得られたひび割れ幅と解析によって得られた結果で比較的良好な相関を示していることを確認している。図-1 にコンクリートの圧縮側と引張側の材料特性を示す。圧縮側の特性はコンクリート標準示方書を参考にひずみが0.002までは2次曲線、以降0.0035までは応力が一定でひずみが増加すると仮定した。

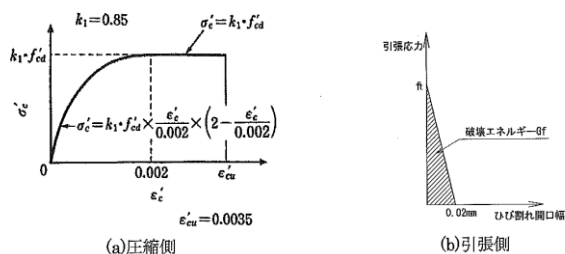


図-1 コンクリートの材料特性

引張側の特性はひび割れの発生までは線形弾性体、発生後は引張軟化曲線で定義される引張応力とひび割れ開口幅の関係に基づいて挙動するものとした。なお、本解析では局所的にひずみが集中し、見かけの引張ひずみが増大しても圧縮ひずみがある断面で0.0035に達するまでを解析の対象とした。

図-2 に解析対象とした断面図を示す。解析はNATMによって施工されたトンネルに対して地山等級がCIとDIIの場合を想定し、それぞれで地山の変形係数が2000または500MPaと仮定したうえで地盤反力係数を算定して地盤反力ばね定数を求めた。なお、地盤反力ばねは引張の剛性を0とし、全周に同一のばね定数で配した。図-3 に解析に使用した荷重の形態を示す。荷重は緩み土圧を想定した分布荷重とし、荷重が載荷される範囲として図-3 に示すように天端を中心とした角度 $\alpha=30, 90, 180$ 度の3通りを想定した。解析ではひび割れ帯モデルを使用しており、引張の限界に達した複数の要素でひび割れが発生することになるため、解析によって得られるひび割れ幅は要素の大きさに依存する。しかし、実際のプレーンコンクリートを使用した覆工に外力が作用する状況では、ひび割れはある程度の段階までは1本に集中して発生することが多いと想定される⁴⁾。よって、ひび割れ幅の算定にあたっては、該当する区間の近傍の各要素に発生したひび割れ幅をまとめた合計の幅として評価した。ひび割れ幅の比較はひび割れの進行性の有無が確認できない場合、かつひび割れの長さが10m以上となる判定

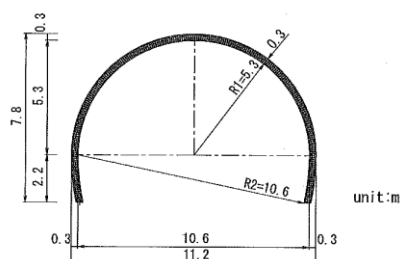


図-2 解析対象断面

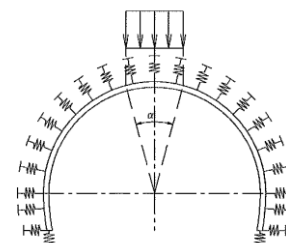


図-3 荷重の形態

表-1 ひび割れ幅と判定区分

ひび割れ幅	判定区分
5mm以上	3A~2A
3~5mm	2A
~3mm	A~B

キーワード：トンネル、変状、ひび割れ、健全度、数値解析

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 TEL: 029-879-6791

の目安¹⁾を参考に、表-1 に示した値と比較した。なお、本検討では荷重形態からひび割れ幅は天端内縁で最も大きくなることを確認して分析を行っている。

3. 研究結果

図-4 に解析により得られた荷重変位曲線を示す。なお、図中の塗りつぶしの点が圧縮ひずみが 0.002 の状態である。地山等級によって最大荷重および変位の発生する傾向が異なるが、地山の密度を $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ と想定した場合は、荷重が $200\text{kN}/\text{m}^2$ が土荷重高さに換算して 8m となり、地山等級が DII の場合はこの程度で圧縮ひずみが 0.002 程度に達することになる。

図-5 に天端内縁に発生するひび割れ幅と荷重の関係を示す。地山等級が DII では圧縮ひずみが 0.002 に達する時点でひび割れ幅が $3\sim 5\text{mm}$ 程度に達し、表-1 に示した判定区分では 2A 相当と評価されることを示している。地山等級が CI では荷重によって傾向が異なるものの、 $\alpha=30$ 度の場合でひずみが 0.002 に達する時点で判定区分が 2A 相当になる。しかし、 $\alpha=90$ 度や 180 度といった載荷範囲が大きい緩み土圧が作用する場合は、ひび割れ幅が小さくても大きい圧縮ひずみが発生している場合もある。このようなケースは地山が良好であり、過大な外力が作用する可能性は低い、健全度を判断するためには地山等級を考慮に入れるのが望ましく、また、ひび割れ幅に加え、圧ざやせん断ひび割れの発生、覆工の変形や移動等の発生の有無についての判断も合わせて必要になると考えられる。

図-6 にトンネルの健全度を定量的に評価した試算例を示す。試算は評価点を荷重が 0 の状態を 100 点、トンネルの任意の点で圧縮ひずみが 0.0035 に達する荷重が作用する状態を 0 点とし、その間は作用している荷重に対して点数を線形配分することにより行った。このような算定によって得られる評価点はトンネルの残存耐力を与える目安になると考えられる。図-6 より一部を除いて評価点が概ね $20\sim 40$ 点程度以下となる場合、判定区分が 2A または 3A となる結果が得られた。このような方法により比較的簡易に健全度を定量的に評価できる可能性があるが、一部の条件では評価点が低い場合でも判定区分が A または B 相当にとどまっている場合も見られたことから、ひび割れ幅以外の情報も踏まえた定量的な評価を行う必要があると考えられる。

4. おわりに

トンネルに外力が作用する場合に発生するひび割れと健全度の評価に関する検討を行い、ひび割れ幅に着目することでトンネルの健全度を定量的に評価できる可能性を示した。今後はトンネルの構造や作用する荷重の形態を考慮し、ひび割れ幅に着目した場合に健全度を定量的に評価できる条件や適用範囲を検討するとともに、変形速度や他の現象による影響を考慮に入れ、健全度の定量化に関する検討を引き続き行う予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，平成 5 年 11 月
- 2) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領(案)，平成 14 年 4 月
- 3) 真下ら：トンネル覆工の耐荷力と設計に関する研究報告書，土木研究所資料第 3961 号，平成 17 年 3 月
- 4) 真下ら：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究，土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 3, pp. 311-326, 2008

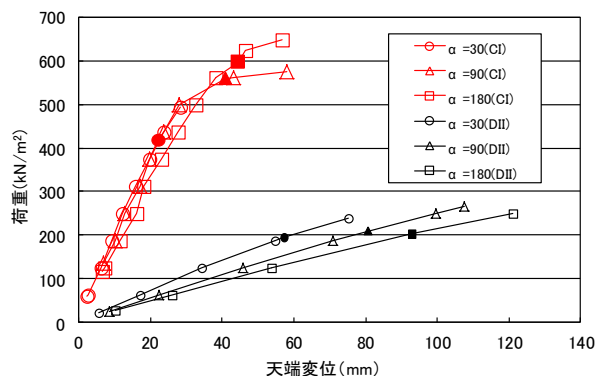


図-4 荷重変位曲線

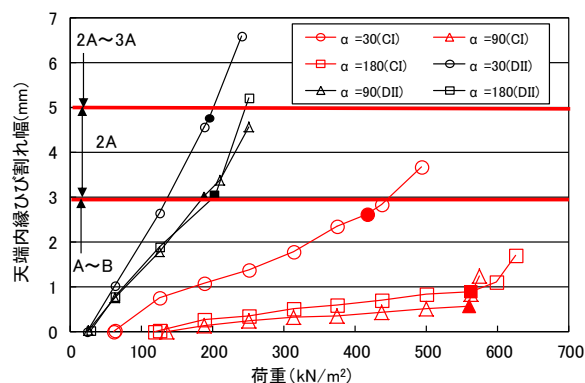


図-5 ひび割れ幅と荷重の関係

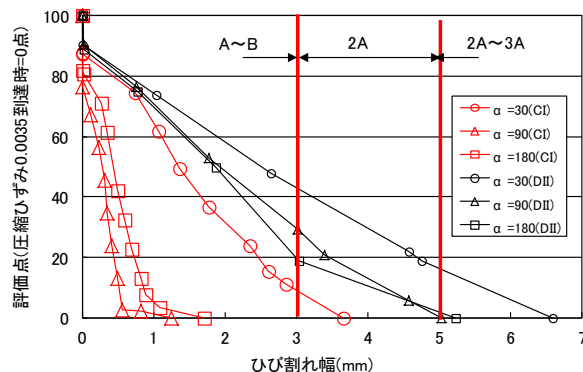


図-6 定量的な評価点の試算例