

シールドトンネルにおけるレベル2信頼性設計の導入評価

中央大学 学生会員 ○福島 尚志 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

1990年以降、建築・土木分野でそれまでの基準であった仕様規定から性能設計への移行が進んだ。日本では、1995年に世界貿易機関WTO(World Trade Organization)のTBT(Technical Barriers to Trade)協定に批准し、国際標準を国内基準として用いることが義務付けられた。それに伴い、設計における国際標準であるISO2394:構造物の信頼性に関する一般原則¹⁾に基づき、2002年に国土交通省より「土木・建築にかかる設計の基本」²⁾が示された。そこでは、信頼性設計の考え方を基本とすることに加え、耐震設計における地震動のレベル分けや作用力の扱いについても明示された。これにより、2004年以降、鉄道構造物³⁾や港湾構造物⁴⁾などをはじめとする各構造物において設計指針の改定が進んだ。

一方で、トンネルにおいては、2016年に土木学会よりトンネル標準示方書[共通編]・同解説[シールド工法編]・同解説⁵⁾(以下、トンネル標準示方書)が改定され、部分係数法などを用いてばらつきを考慮したレベル1信頼性設計を導入された。既往研究でも地中送電用トンネルにおける限界状態設計法を用いた部分係数法による信頼性設計が行われている。⁶⁾しかし、地下構造物であるトンネルは地震などに対しても比較的安定性の高いものとして考えられ、レベル1までは導入されているが、レベル2やレベル3信頼性設計の導入は進んでいない。

一方で、同じ地下構造物であるボックスカルバートの信頼性設計の研究は盛んに行われており、レベル3信頼性設計を用いた研究事例もある。⁷⁾同じ地下構造物でより高次のレベルの信頼性設計を導入していることを踏まえると、トンネルにおいてもレベル2やレベル3信頼性設計を今後導入する必要があると考える。

2. 研究の目的

前項を踏まえて、本研究の目的は、トンネルにおける信頼性指標 β を用いたレベル2信頼性設計の導入の効果を検証することとする。また、本研究では、限界状態設計法を用いて設計を行うため、トンネルの工法の中でもトンネル標準示方書に限界状態設計法の記載があり、最も信頼性設計が導入されているシールドトンネルを対象とする。

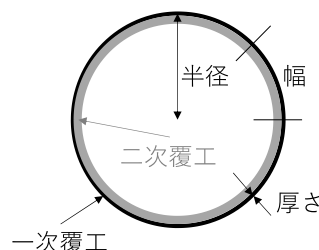


図-1 本研究で検討するシールドトンネルの概形

3. 対象とするシールドトンネル概要

本研究では、シールドトンネルで最も多く利用されている下水道トンネルを対象とする。概要を図-1に示す。今回は、鉄筋コンクリートによるセグメントを仮定して行う。鋼製や合成セグメントについては今後検討していく予定である。

下水道では二次覆工を施すことが一般的であるため、二次覆工を考慮した形とする。また、下水道に用いる場合のセグメントの半径は2~4mで施工実績があるため、簡単のため、2m, 3m, 4mでそれぞれにおいて計算を行う。セグメントの幅、厚さ(高さ)は鉄筋コンクリートセグメントの施工実績より幅と高さの比が3~8、高さと外径の比が3~8%になる値を用いる。また、トンネルの深さは大深度法より地表面から40mの位置に設置すると仮定するが、施工実績を参照し、40mより浅い位置、深い位置でも計算を行う予定である。

4. 耐力側の評価

本研究では、セグメントに鉄筋コンクリートを用いる。せん断耐力は、トンネル標準示方書より以下の式(1)、(2)を用いて、コンクリートのせん断耐力分担 V_{cd} [N]、せん断補強鋼材の耐力分担 V_{sd} [N]を算出し、合計したものとする。

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b \quad (1)$$

ここで、 β_d は有効高さによる係数、 β_p は面積、幅、有効高さによる係数、 β_n は曲げモーメントによる係数、 f_{vcd} は補正後の設計圧縮強度[N/mm²]、 b_w は腹部の幅[mm]、 d は有効高さ[mm]、 γ_b は部材係数である。

$$V_{sd} = A_w f_{vcd} z / S_s / \gamma_b \quad (2)$$

ここで、 A_w はせん断補強鋼材の総断面積[mm²]、 f_{wyd} は設計降伏強度[N/mm²]、 S_s は補強鋼材の配置間隔[mm]、 z は圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材

キーワード 信頼性設計, シールド工法, トンネル, 限界状態設計, 変位応答解析

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 TEL : 03-3817-1816

図心までの距離[mm]である。

曲げ耐力は、以下の式(3)を用いて計算する。

$$M_u = M_{cd} + M_{sd} + M'_{sd} \quad (3)$$

ここで、 M_{cu} 、 M_{su} 、 M'_{su} はそれぞれコンクリートの曲げ耐力、引張鉄筋の曲げ耐力、圧縮鉄筋の曲げ耐力である。それぞれの曲げ耐力は以下の式(4)、(5)、(6)を用いて算出する。

$$M_{cd} = \beta_c f_c A_c k x_0 \left(\frac{D}{2} - \frac{k x_0}{2} \right) \quad (4)$$

ここで、 β_c は強度係数、 f_c はコンクリートの圧縮強度[N/mm²]、 A_c はコンクリート断面積[mm²]、 k は剛性、 x_0 は中立軸位置[mm]、 D は鉄筋半径[mm]である。

$$M_{sd} = f_s A_s \left(d - \frac{D}{2} \right) \quad (5)$$

$$M'_{sd} = f_s A'_s \left(\frac{D}{2} - d' \right) \quad (6)$$

ここで、 f_s は引張鉄筋の降伏強度[N/mm²]、 A_s (A'_s)は引張(圧縮)鉄筋の面積[mm²]、 D は鉄筋半径[mm]、 d (d')は有効高さ[mm]である。

5. 作用力側の評価

本研究で扱う作用力は、常時作用力である鉛直・水平土圧、水圧、自重、上載荷重に加えて、変動作用である地震力を考慮した6つの作用力について算出する。

まず、鉛直・水平土圧は以下の式(7)、(8)で算出する。

$$\sigma_v = h \gamma_t \quad (7)$$

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v = K_0 h \gamma_t \quad (8)$$

ここで、 h は地表面からの深さ[m]、 γ_t は土の単位体積重量[kN/m³]、 K_0 は側方土圧係数である。側方土圧係数は、地盤条件によって変化する。また、この式は地下水面がトンネルよりも低い場合、つまり土と水が分離している状態を仮定しているが、土と水が一体となった場合についても算出し、比較検討を行う。土と水を一体として考える場合は、水圧を静水圧分布と仮定し、側方土圧係数を地盤条件に合わせて、変化させることで鉛直・水平土圧を算出する。

次に、自重は以下の式(9)で算出する。

$$W_1 = \frac{W_1}{2\pi R_c} \quad (9)$$

ここで、 W_1 は一次覆工の自重[kN]、 R_c は一次覆工の図心半径[mm]である。

次に、上載荷重はトンネルの上に道路がある場合など周辺状況により変動が大きいので、10[kN/m²]と仮定する。ただし、適用地域を決定する際には正確な値を用いることとする。

最後に、地震力について、トンネル標準示方書ではシールドトンネルが比較的深い地盤に位置し、継手により変形に追従しやすいことから省略しても良いと記載がある。しかし、過去の地震においてシールドトンネルの被災があること⁸⁾、信頼性設計は、地震などの影響も評価できることから本研究においては地震力も作用力として考慮する。具体的な手法は地下構造物の耐震設計によく用いられる変位応答法を用いる。さらに、変位応答法の中でもはり-ばねモデルを用いる。これについては次項で詳しく説明する。

6. 変位応答法

本研究で用いる変位応答法のはり-ばねモデルとは、構造物の周辺地盤をばねでモデル化を行い、地震力による地盤の応答変位を慣性力として構造物に作用させる手法である。まず、応答変位を求める計算式は以下の式(10)に示す通りである。

$$u_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_s \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (10)$$

ここで、 $u_h(z)$ は深度 z における水平方向変位[m]、 S_v は応答速度[m/s]、 T_s は表層地盤の固有周期[s]、 H は表層地盤の層厚[m]である。

これを用いて、トンネルにかかる慣性力を計算し、地震における作用力を算出する。

7. 信頼性指標 β の算出

前項までで算出した耐力側と作用力側の値を用いて、モンテカルロシミュレーションを行い、信頼性指標 β を算出する。ここで、信頼性指標 β は以下の式(11)で算出される。

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}} \quad (11)$$

ここで、 μ_R は耐力側の平均値、 μ_S は作用力側の平均値、 σ_R^2 は耐力側の分散、 σ_S^2 は作用力側の分散である。これを用いて、 β の値によるそれぞれの設計コスト、安全性の両者のバランスを比較する。

10. おわりに

計算を現在行っているため、結果については当日示す。その上で、今後の展望を以下にまとめる。

地盤条件、セグメントの形状による信頼性指標 β の違いをまとめ、レベル1、レベル2信頼性設計の比較を行う。今後は、信頼性設計の導入がなされていない開削工法、山岳工法などでも検討し、工法による違いや信頼性設計を用いることの妥当性を検証していく。

参考文献・出典

- 1) International Organization for Standardization : ISO2394 : 2015-General principles on reliability for structures, 2015 年
- 2) 国土交通省 : 「土木・建築にかかる設計の基本」, 2002 年
- 3) 鉄道総合研究所 : 鉄道構造物等設計基準・同解説 (コンクリート構造物) 2004 年
- 4) 港湾空港技術研究所 : 性能設計と信頼性設計について, 2005 年 10 月
- 5) 土木学会 : トンネル標準示方書[共通編]・同解説[シールド工法編]・同解説, 2016 年
- 6) 吉本正浩, 阿南健一 : 地中送電用シールドトンネルの性能規定と限界状態設計法による照査, 土木学会論文集 No. 764/III-67, 255-274, 2004 年 6 月
- 7) 畑明仁 : 地盤物性の不確実性を考慮した地中構造物の損傷確率評価法に関する研究, 京都大学, 2015 年
- 8) 谷茂, 斉藤正幸ら : 中越沖地震におけるシールドトンネルの被災事例, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, 56-57, 2010 年 1 月