

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⁾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信頼性設計が導入された。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。

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。

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

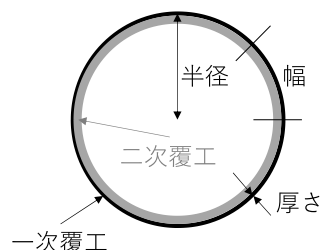


図-1 本研究で検討するシールドトンネルの概形
あるため、簡単のため、2m, 3m, 4mでそれぞれにおいて計算を行う。セグメントの幅、厚さ(高さ)は鉄筋コンクリートセグメントの施工実績より幅と高さの比が3~8、高さと外径の比が3~8%になる値を用いる。また、トンネルの深さは対象地域に応じて、変更する。

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。

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

ここで、 A_w はせん断補強鋼材の総断面積[mm²]、 f_{vyd} 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。

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

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

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

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、自重に加えて、変動作用である地震力を考慮した5つの作用力について算出する。

まず、鉛直・水平土圧は一般的な計算方法で算出する。次に、自重は以下の式(7)で算出する。

$$W_1 = \frac{W_1}{2\pi R_c} \quad (7)$$

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。

最後に、地震力は、地下構造物の耐震設計によく用いられる変位応答法であるはり-ばねモデルを用いて考慮する。

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(8)に示す通りである。

$$u_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_s \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (8)$$

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。また、応答速度は、K-net/Kik-netから対象地域における過去24年間の地震記録を利用し、導出する。

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う。耐力側(コンクリート)は正規分布、作用力側(地震力)は、対数正規分布に従うと仮定し、10000回試行する。以上より、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(9)で算出される。

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}} \quad (9)$$

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。

8. 計算結果

計算は、図-2に示す8箇所について行う。全ての箇所における計算を現在行っているため、ここでは計算の終了している③における計算結果を表-1に示す。③では、引張、圧縮鉄筋それぞれ3本ずつ入れることで、曲げ破壊が生じなくなった。一方で、せん断破壊については、表-1のように補強材を変化させ

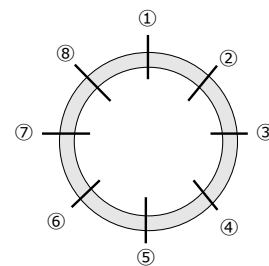


図-2 計算箇所

表-1 ③における信頼性指標

せん断補強材(本)	信頼性指標
20	1.63
25	1.90
30	2.09
35	2.26
40	2.42

ることで、信頼性指標が1.5～2.5の間で変化した。③の位置では、曲げよりもせん断が大きく影響するため、せん断補強材の本数がコストに関係する。また、①や⑤は逆に曲げが大きく影響するため、引張、圧縮鉄筋によるコストに関係する。これらを考慮して、コストとのバランスを考える必要がある。全国大会において結果を示す予定である。

9. おわりに

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