

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。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、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³⁾(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。⁴⁾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対象とする。本来、シールドトンネルはセグメントをA, B, Kと配置や用途を考慮して設定を行うが、今回は計算の簡略化のため、全てのセグメントを同一の形式として設定する。

下水道に用いる場合のセグメントの外径は2~4mで施工実績があるため、中央値である3mを採用する。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、高さとお径の比が3~8%であるため、こちらも中央値としてそれぞれ5, 5%を採用し、それぞれ高さ0.18m、幅0.9mとする。また、トンネルの深さは、対象地域

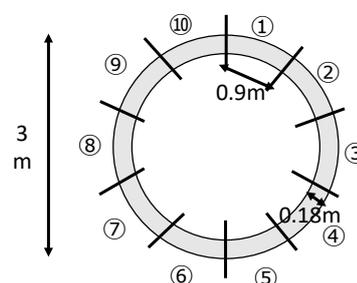


図-1 本研究で検討するシールドトンネルの概形

の地層の位置を参考に5.5mとした。

4. 耐力側の評価

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分 V_{cd} [N], せん断補強鋼材の耐力分担分 V_{sd} [N]を算出し、合計したものとする。

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

ここで、 β_d は有効高さ、 β_p は面積、幅、有効高さ、 β_n は曲げモーメント、それぞれに応じた係数、 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。

$$V_{sd} = \frac{1}{\gamma_b} \left(\frac{A_w f_{vyd} z}{S_s} \right) \quad (2)$$

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、引張鉄筋、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。

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

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

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

ここで、 β_c は強度係数、 $f_{c(s)}$ はコンクリート、鉄筋の圧縮強度[N/mm²], $A_{c(s)}$ (A'_s)はコンクリート、鉄筋の断面積[mm²], k は剛性、 x_0 は中立軸位置[mm], D は鉄筋半径[mm], d は有効高さ[mm]である。

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

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・水平土圧に加えて、変動作用である地震力の3つである。

鉛直・水平土圧は一般的な計算方法で算出する。地震力は、地下構造物の耐震設計によく用いられる応答変位法であるはり-ばねモデルを用いて考慮する。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に地盤ばね定数を乗ずることで水平方向荷重として構造物に作用させる手法である。以下、農林水産省の土地改良事業計画設計指針「耐震設計」⁵⁾を参考に計算式を設定した。まず、応答変位を求める計算式は以下の式(7)に示す通りである。

$$u_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (7)$$

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_G 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 S_v は、Kik-net から対象地域における過去18年間の基盤地震記録を利用し、導出する。表層地盤の固有周期 T_G は、以下の式(8)で算出する。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (8)$$

ここで、 H_i は対象層の厚さ[m]、 V_{si} は平均せん断波速度[m/s]である。以上より応答変位を導出する。それを用いて、式(9)から地震時の水平荷重を算出する。

$$P(z) = K_H \{u_h(z) - u_h(z_B)\} \quad (9)$$

ここで、 $u_h(z_B)$ は基盤面の水平方向変位、 K_H は地盤ばね定数[kN/m³]であり、対象地域のボーリングデータのN値を用いて算出する。

6. 信頼性指標 β の算出

耐力、作用力それぞれでモンテカルロシミュレーション(以下、MCS)を用いて、作用力が耐力を超える確率、つまり限界状態超過確率を算出し、信頼性指標を導出する。その際、耐力、作用力におけるばらつきを考慮するために、耐力側(コンクリート)は正規分布、作用力側(地震力)は応答速度 S_v が対数正規分布に従うと仮定し、MCSを10000回試行する。また、N値についても、計測誤差を考慮するため、信頼性設計に基づく土木構造物の性能照査ガイドライン⁶⁾を用いて変動係数を設定している。

以上より算出された限界状態超過確率を用いて、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(10)で算出される。

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \quad (10)$$

ここで、 P_f は限界状態超過確率である。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。

7. 計算結果

概要の通り、セグメントを統一して計算を行う。本来、図-1に示す10セグメントで計算を行うが、左右

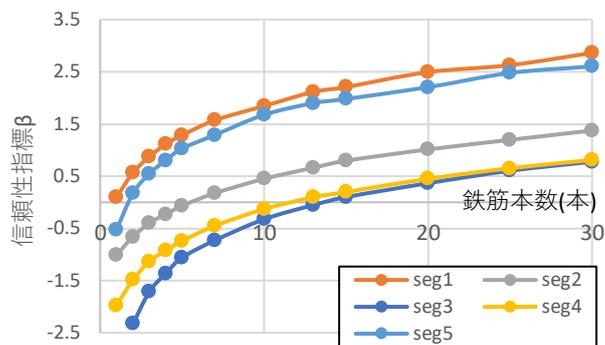


図-2 曲げにおける信頼性指標

対称であるため、1から5番までのセグメントのみ計算している。

せん断、曲げそれぞれで計算を行ったが、ここでは曲げにおける信頼性指標のみを図表として掲載する。曲げの信頼性指標は、深さに依存して信頼性が低下している。これは、基盤面に近づくほど、深さに対して変位の変化量が大きくなるのが原因であると考えられる。一方で、5番のセグメントがそうした傾向にない。これは5番のセグメントが分担する深さが小さいことによるものであると考えられる。一方で、せん断における信頼性指標については、深くなるにつれ、信頼性指標が大きくなる傾向を示した。これは、曲げと同様、深さに変位が依存するためであると考えられる。

8. おわりに

今後の展望を以下に示す。

現状の応答変位における解析は単一層に対してのみの解析であり、複数層の地盤における解析をできていない。そのため、基盤面付近での変位に影響が出ていると考える。今後は、一次元応答解析プログラムであるSHAKEなどを用いて複数層の地盤での解析を行うことで計算結果の違いを確認する。また、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) 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
- 4) 吉本正浩, 阿南健一ら: 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
- 5) 農林水産省: 土地改良事業計画設計指針「耐震設計」, 2015年2月
- 6) 土木学会: 信頼性設計法に基づく土木構造物の性能照査ガイドライン, 2018年10月