

# 特殊な設計条件における開削トンネルの構造解析手法

仲山 貴司\*      西山 和宜\*\*  
小林 克哉\*\*\*    西岡 英俊#

Structural Analysis Method of Cut and Cover Tunnels under Special Design Conditions

Takashi NAKAYAMA      Kazuki NISHIYAMA  
Katsuya KOBAYASHI    Hidetoshi NISHIOKA

In this paper, three structural analysis methods of such cut and cover tunnels under singular design conditions as a large scale tunnel, a tunnel in the banking and a U type-shaped tunnel are proposed. First, in order to improve the design method of large scale cut and cover tunnels, we propose a new method of calculating the subgrade reaction varying depending on the displacement level. Second, an economical design method of cut and cover tunnels to be constructed in the embankment is proposed based on a structural analysis of response displacement. Finally, the seismic design of a U-shaped structure based on earthquake earth pressure and that based on response displacement are made, and as a result, the differences between the two design methods are shown.

キーワード：開削トンネル，盛土，U型擁壁，地盤反力係数，耐震設計

## 1. はじめに

開削トンネルは、駅間に利用されるだけでなく、駅部や地上構造物との接続部分などにも利用される構造物であり、この場合の形状や地盤条件は駅間と異なることが多い。「鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）」<sup>1)</sup>（以下、開削標準）では、このような開削トンネルを「特殊な設計条件の開削トンネル」として取り扱い、一般的な開削トンネルの設計方法を補足するかたちで構造解析等の方法を示している。これらの手法の多くは「鉄道構造物等設計標準・同解説（抗土圧構造物）」<sup>2)</sup>の「カルバート」に記載されていた内容を踏襲したものであるが、一部は検討のうえ、2019年の開削標準の改訂に反映したものである。

本論文は、新たな構造解析手法を開削標準に反映するにあたって実施した検討をまとめるものである。具体的には、次の開削トンネルの構造解析手法について示す。

- ①大規模な開削トンネル
- ②盛土中に位置する開削トンネル
- ③特殊な形状を有する開削トンネル（U型形状）

以降において、「2. 変位レベル依存性を考慮した地盤

反力係数の補正方法」では、地盤反力係数の変位レベル依存性に着目した理論的考察から、大規模な開削トンネルの地盤反力係数の補正方法を提案するとともに、地盤反力係数の試算から補正効果について示す。また、「3. 盛土形状を考慮した地盤変位算定手法」では、盛土中に位置する開削トンネルの耐震設計について、盛土形状を考慮した地盤変位の算出方法を提案するとともに、これを用いた場合の断面力の低減効果を示す。さらに、「4. U型擁壁の耐震設計手法」では、地震時土圧と応答変位法によるU型構造の構造解析を通して、U型擁壁への応答変位法の適用性を検証した結果を示す。

## 2. 変位レベル依存性を考慮した地盤反力係数の補正方法

### 2.1 開削トンネルの地盤反力係数

開削トンネルの応答値の算定では、一般に、下床版下面の地盤をばねでモデル化する。また、このばね値の算定に用いる地盤反力係数 $k_v$ には、「鉄道構造物等設計標準（基礎構造物）」<sup>3)</sup>に準じた算定方法が用いられる。

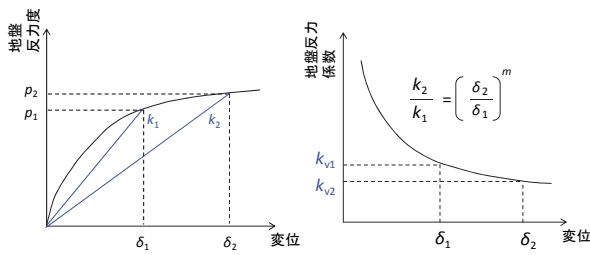
一般に、地盤を一様な半無限弾性体とした場合、地盤反力係数 $k_v$ は式(1)のように示され、載荷幅 $B$ の-1乗と比例関係となる。

$$k_v = \frac{E}{I_p(1-\nu^2)} B^{-1} \quad (1)$$

ここに、 $k_v$ ：地盤反力係数、 $E$ ：地盤の変形係数、 $I_p$ ：

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室  
\*\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室（現 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社）  
\*\*\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室（現 鹿島建設株式会社）  
# 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

特集：開削トンネルの設計技術



a) 地盤反力度と変位の関係 b) 地盤反力係数と変位の関係

図1 変位レベル依存性の模式図

形状係数,  $\nu$ : ポアソン比,  $B$ : 載荷幅

一方、地盤の載荷幅依存性<sup>4)</sup>(載荷幅が大きくなると地盤反力係数が低下する影響)は式(2)で表されることが知られている。ここで指数  $n$  は載荷幅依存性の程度を表す係数であり、式(1)の弾性論では -1 となるが、現地計測結果や平板載荷試験の結果から、設計実務においては -3/4 が用いられている<sup>5)</sup>。

$$k_v = k_{v30} (B_v/B_0)^n \quad (2)$$

ここに、 $k_v$ : 地盤反力係数,  $k_{v30}$ : 載荷幅 0.3m の平板載荷試験より得られる地盤反力係数,  $B_v$ : 換算載荷幅,  $B_0$ : 載荷幅 (=0.3m)

これらを踏まえ、開削トンネルの地盤反力係数には式(3)を用いている。なお、開削トンネルは一般に幅  $B$  に比べてトンネル軸方向に長い構造物であるが、載荷面を等価な面積の正方形とみなし、式(4)の換算載荷幅  $B_v$  を用いることでトンネル軸方向長さ  $L$  の影響を考慮している。

$$k_v = f_{rk} (1.7\alpha E_0 B_v^{-3/4}) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } B_v = \min(B, \sqrt{B \cdot L}) \quad (4)$$

ここに、 $k_v$ : 地盤反力係数,  $f_{rk}$ : 地盤抵抗係数,  $\alpha$ :  $E_0$  の算定方法および荷重条件に対する補正係数,  $E_0$ : 地盤の変形係数,  $B_v$ : 換算載荷幅,  $B$ : トンネル幅,  $L$ : トンネル軸方向の長さ

なお、式(2)に示した地盤の載荷幅依存性は、変位  $\delta$  が載荷幅  $B$  に比例し、 $\delta=rB$  ( $r$  は比例定数) となることを想定したものである<sup>5)</sup>。このため、トンネル幅  $B$  が大きくなると変位も相対的に大きく仮定していることとなり、地盤反力係数は小さく算出される。

2.2 大規模く体の地盤反力係数の補正方法

一般に開削トンネルは掘削土重量よりも軽量であること、トンネルく体の部材剛性はく体寸法に応じて相応に確保することなどから、変位はトンネル幅とともに大き

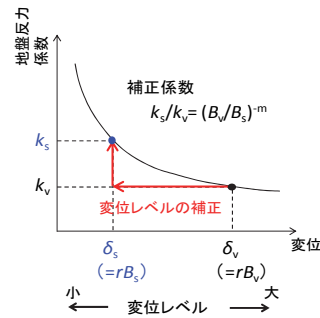


図2 地盤反力係数の補正の概念図

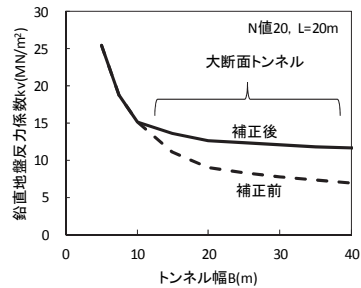


図3 鉛直地盤反力係数の補正例 ( $B_s=10\text{m}$ ,  $m=-1/2$ )

くなることはない。また、実際の地盤は比例関係ではなく、図1に示すような非線形の変位レベル依存性(変位レベルに応じて地盤反力係数の大きさが変化する性質)を有しており、式(5)のような指数関数で表されることが多い。指数  $m$  は変位レベル依存性の程度を表す係数であるが、杭の水平載荷試験等の結果から -1/2 程度とすることが示されている<sup>4)</sup>。

$$k_{v2}/k_{v1} = (\delta_2/\delta_1)^m \quad (5)$$

したがって、大規模く体の場合の地盤反力係数は、実際には式(3)で算定される値よりも大きいことが想定されることから補正方法を検討した。

図2に提案する補正方法の概要を示す。この補正方法では、基準となる変位を  $\delta_s$  とし、 $\delta_s$  よりも大きい変位  $\delta_v$  のときの地盤反力係数  $k_v$  については、 $\delta_s$  付近の地盤反力係数  $k_s$  を用いて修正する。この補正係数は変位レベル依存性の関係式である式(5)を基に算定する。式(2)の変位は載荷幅と比例関係としていることから、変位  $\delta_s$  および  $\delta_v$  は補正の基準となるトンネル幅  $B_s$  および換算載荷幅  $B_v$  によって、式(6)のように表すことができる。これを式(5)に代入すると、補正係数  $k_s/k_v$  は式(7)となる。

$$\begin{cases} \delta_1 = \delta_s = rB_s \\ \delta_2 = \delta_v = rB_v \end{cases} \quad (6)$$

$$k_s/k_v = (rB_v/rB_s)^{-m} = (B_v/B_s)^{-m} \quad (7)$$

### 2.3 地盤反力係数の補正による効果

$\delta_s$  は本来、開削トンネル構築時の現場計測結果等から設定するのがよいが、開削トンネルの場合、計測事例が希少であることから、変位  $\delta_s$  は1層2径間の複線トンネルを一般的な寸法の開削トンネルと考え、補正の基準となるトンネル幅  $B_s$  に10mを仮定する。

$N$  値を20、トンネル軸方向の長さ  $L$  を20mと設定し、トンネル幅に応じた補正前と補正後の地盤反力係数を比較した結果を図3に示す。この結果から、トンネル幅が10m未満の場合には補正前後で地盤反力係数は同値であるが、トンネル幅が10m以上の場合には地盤反力係数の低下が小さくなる。トンネル幅40mの場合であれば、地盤反力係数は1.7倍程度向上する。以上のように、提案する方法を用いることで、大規模な開削トンネルにおいても地盤反力係数の低下は小さくなり、く体に発生する断面力を抑制する効果があることがわかる。

## 3. 盛土形状を考慮した地盤変位算定手法

### 3.1 開削トンネルの地震時の地盤変位

一般に、開削トンネルの地震時の挙動は周辺地盤に追従すると考えられることから、応答値の算定においては、地盤変位を対象構造物に地盤ばねを介して外力（以下、地盤変位荷重）として作用させる応答変位法を用いることが多い。また、この場合、水平成層の一樣地盤と仮定して地盤変位を算定し、この変位量から地盤変位荷重を算出している。

盛土中に位置する開削トンネルにおいても、図4に示すようにトンネル横断方向には盛土が連続して存在し、地震時の挙動は周辺地盤に追従すると仮定できることから、地盤変位の算定では水平成層の一樣地盤と仮定して、応答変位法により応答値を算定することが多い。ただし、盛土はトンネル縦断方向には連続しておらず盛土幅で有限であり、地震時の挙動は、水平成層の一樣地盤とは異なり、盛土形状による影響があることが推定される。

### 3.2 盛土形状を考慮した地盤変位の算定手法

盛土形状による影響を詳細に評価するには、本来であれば、有限要素法などを用いた3次元応答解析によることが理想的であるが、作業が煩雑となり実務的ではないため、本論文では1次元応答解析を用いる手法を提案する。図5に提案するモデルの概要を示す。このモデルは、一般的に用いる1次元応答解析と同様に、奥行き（ここではトンネル横断方向）は単位幅あたりでモデル化するが、異なる点として、高さ方向の要素分割に応じて盛土形状を考慮した質量  $M_i$  および初期せん断剛性  $G_i$  を与えている。

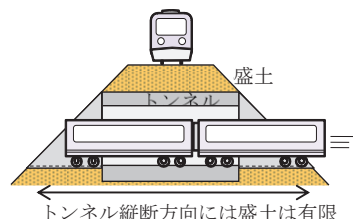
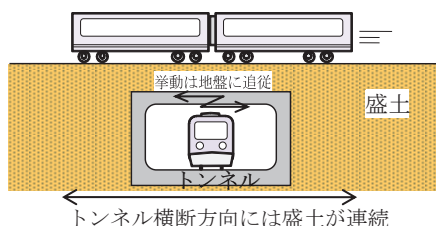


図4 盛土中に位置するトンネル

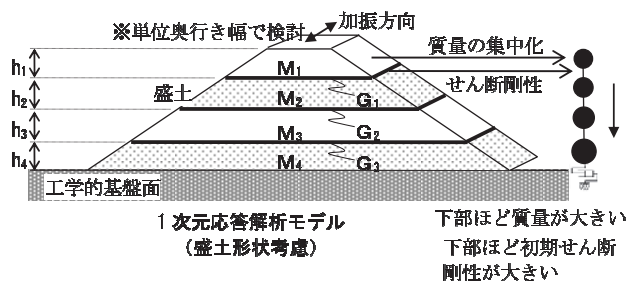


図5 盛土形状を考慮した1次元応答解析モデル

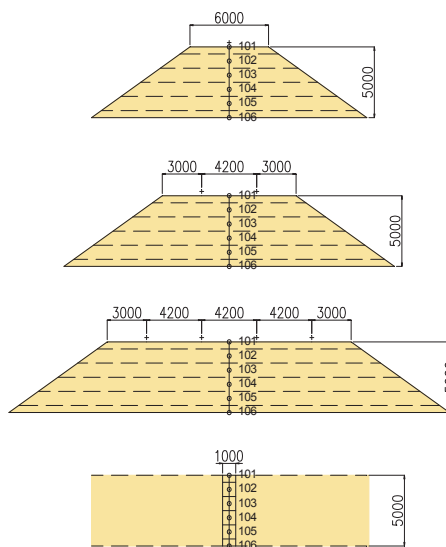


図6 検討断面（盛土高さ h=5m）

### 3.3 地盤変位の補正による効果

#### 3.3.1 地盤変位量の試算

提案した応答解析手法を用いて地盤変位を試算した。検討断面は在来線の単線、複線、複々線とし、盛土高さ5mおよび10mの2パターンとした。図6に盛土高さ5mの検討断面を示す。盛土材料は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）<sup>6)</sup>」の土質2の設計用値を用いた。また、盛土材料の動的変形特性はR-Oモデル

特集：開削トンネルの設計技術

とし、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）<sup>7)</sup>」付属資料 12-1 に示される  $G/G_0 \sim \gamma$  関係、 $h \sim \gamma$  関係にフィッティングさせて作成した(図7)。また、比較のため、従来の手法である盛土形状を考慮しない一様地盤の計算も実施した。

図8に応答変位量と盛土高さの関係を示す。盛土高さによらず同様の傾向を示しており、単線、複線、複々線断面で一様地盤に対し、概ね40%、50%、60%程度の応答変位量となるのがわかる。また、盛土天端幅において差が最も大きく、盛土下端幅との比率が縮まるほど、一様地盤の結果に近づいていく傾向であることがわかる。

3.3.2 地震時断面力分布の比較

地盤変位の試算結果を踏まえ、従来の一様地盤と仮定して算定した地盤変位荷重を作用させたケース（Case1）と、地盤変位荷重をその50%としたケース（Case2）の試算を行い、断面力分布を比較した。検討は、幅3.6m×高さ2.6mの一般的な断面形状を想定して、死荷重、常時土水圧、慣性力、列車荷重および地盤変位荷重を作用させて計算を行った。

解析結果の一例として、曲げモーメント分布を図9に示す。地盤変位荷重が50%となることで、トンネルの変形が抑制され、隅角部の断面力が約75%程度に低減することがわかる。このことから、提案する手法を用いることで、く体に発生する断面力を抑制する効果が得られることがわかる。

4. U型擁壁の耐震設計手法

4.1 U型擁壁の耐震設計

前述したように、鉄道構造物の耐震設計において、開削トンネルのような地下構造物では応答変位法、L型擁壁のような抗土圧構造物では地震時主働土圧が用いられる。これら2つに違いがあるのは、地震時に地盤から構造物に作用する外力（土圧）の大きさが関連する。また、この大きさには、地盤に対する構造物の固定度（安定度）が影響しており、固定度が高いほど作用外力が大きくなることが実験で確認されている<sup>8)</sup>。

地下から地上部への接続区間に設置されるU型擁壁については、開削トンネルと同様に両側を地盤で拘束されているものの、上床版によって側壁が固定されていない。そのため、U型擁壁の固定度（安定度）は、開削トンネルより低く、L型擁壁よりも高いと予想され、背面地盤は開削トンネルよりも塑性化（主働化）しやすいと考えられる。このことからU型擁壁の地震時挙動は、図10に示すように開削トンネルとL型擁壁の中間的なものになると予想されるが、定量的に評価した事例がないのが現状であった。そこで、応答変位法と地震時土圧

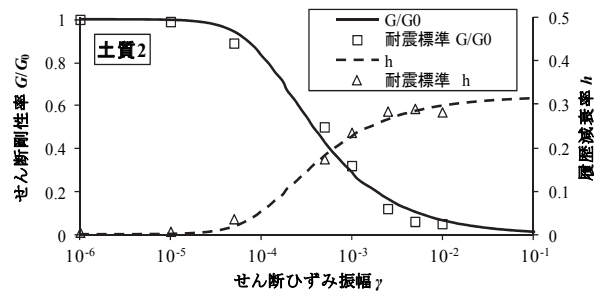


図7 盛土材料の  $G/G_0 \sim \gamma$  関係、 $h \sim \gamma$  関係

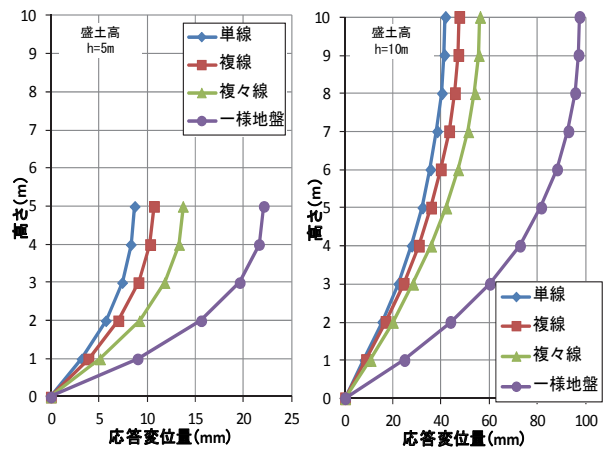


図8 盛土の地盤変位の比較

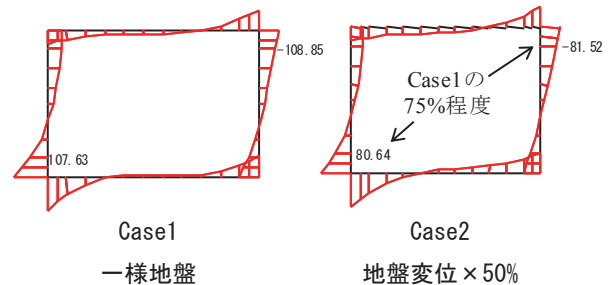


図9 断面力比較 単位：kN・m

を用いた試設計を行い両者の比較を行った。

なお、これまでの実務設計においては、U型擁壁は、「①地下に構築されることが多い」、「②背面が自然地盤であることが多い」、「③開削トンネルとの設計手法の連続性」を考慮し、応答変位法が用いられることが多い。

4.2 検討条件

表1に検討に用いた地盤条件を示す。地盤はN値5の砂質土一様地盤とし、せん断弾性波速度  $V_s$  はN値より推定した。

図11に検討概要図を示す。発生断面力の比較は、L1地震時およびMw7.0程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合を想定したL2地震（スペクトルII）<sup>7)</sup> に対して行った。

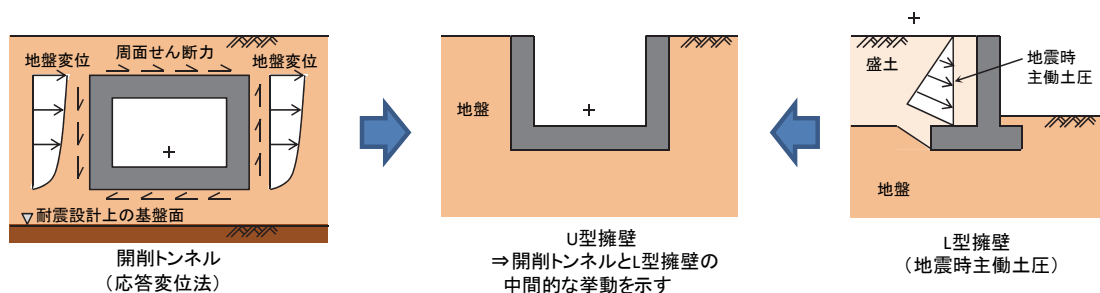


図10 想定されるU型擁壁の地震時挙動

表1 地盤条件

	耐震設計上の 基盤面	単位体積 重量 $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	N 値	せん断弾性 波速度 $V_s$ m/s	地盤の固有 周期 $T_g$ s	地盤変位		地盤 種別	内部摩擦角		
						L1	L2		$\phi_{peak}$ 度	$\phi_{res}$ 度	
case1	①	19	5	137	0.117	地表面変位	0.7	48.2	G2	40	30
						相対変位※	0.7	48.2			
case2	②				0.584	地表面変位	20.7	241.2	G4		
						相対変位※	1.0	11.8			

※ 側壁天端と下床版位置における地盤の相対変位差を示す

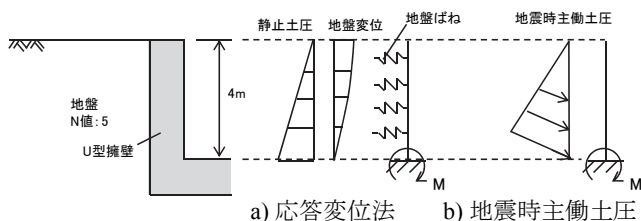


図11 検討概要図

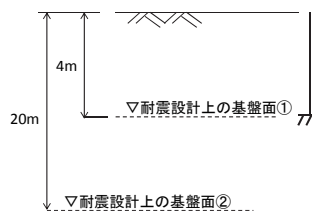


図12 検討に用いた耐震設計上の基盤

U型擁壁は、開削トンネルとは違い、上床版と側壁天端が接合されていないことから、応答変位法で想定されている地盤と構造物との力のつり合いが開削トンネルとは異なり、周面せん断力の扱いが不明確である。一方で側壁の曲げ挙動に着目した場合、周面せん断力の影響は小さいと考えられる。このことから、本論文では図11に示すように側壁のみを片持ち梁としてモデル化し、側壁の曲げ変形に着目して断面力を算定することとした。側壁高さは設計事例から4mとした。なお、本論文では部材の変形特性を線形として扱った。

応答変位法では耐震設計上の基盤面に近い位置に構造物が設置された場合、側壁天端と下床版位置における地盤の相対変位差が大きくなり、断面力が大きくなると想定される。このため、U型擁壁の設置深さを提案し、図12に示すように耐震設計上の基盤面が浅い場合(case1: ① GL-4m, 側壁下端位置)と深い場合(case2: ② GL-20m)の2ケースを検討対象とした。

また、地盤ばねについては、簡易に地盤のせん断ひずみによる剛性低下を考慮した等価線形モデルとして扱う場合と、受働抵抗土圧を上限としたバイリニア型の非線形モデルを用いる場合があり、これら2つを用いた。

一方、地震時主動土圧については、背面地盤のひずみ局所化およびひずみ軟化挙動を考慮した試行楔法(修正物部岡部法<sup>7)</sup>)を用いることとし、三角形分布と仮定して算定した。

### 4.3 検討結果

図13および図14に検討結果を示す。これらによれば耐震設計上の基盤面の位置に関わらず、応答変位法の方が地震時主動土圧から計算される値よりも曲げモーメントが大きくなるのがわかる。これは地盤の塑性化を考慮していないためと考えられる。このことは、地盤の非線形化の影響が顕著となるL2地震時の検討においてバイリニア型の非線形地盤ばねを用いた場合、地盤の塑性化を考慮している地震時主動土圧からの計算値と同程度の曲げモーメントとなることから確認できる。このことから、U型擁壁の構造解析手法については応答変位法を用いることで安全側の評価となることがわかる。

なお、これまでの実務設計においても応答変位法を用いることが多く、本章の結果は、これらの妥当性を確認したものとなった。

特集：開削トンネルの設計技術

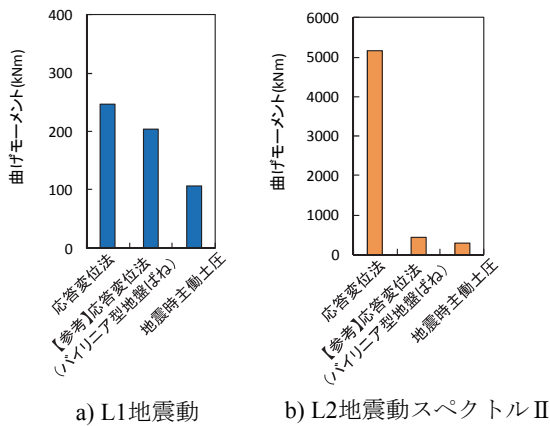


図 13 case1 における曲げモーメントの比較

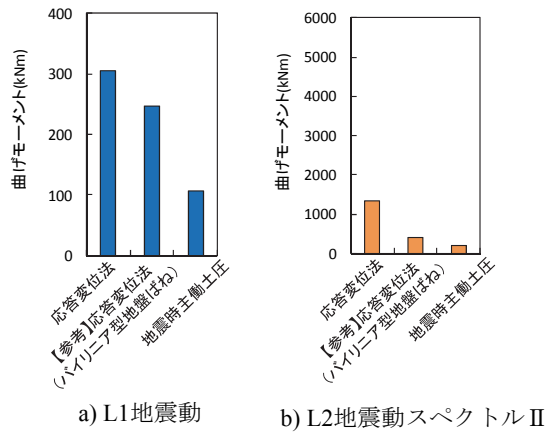


図 14 case2 における曲げモーメントの比較

5. おわりに

本論文では、新たに開削標準に反映した構造解析手法の主なものについて、検討内容を示すとともに、適用した場合の効果をもとめた。具体的には、次の開削トンネルの構造解析手法について示した。

- ①大規模な開削トンネル
- ②盛土中に位置する開削トンネル
- ③特殊な形状を有する開削トンネル (U 型形状)

本検討で得られた知見を以下に整理する。

- (1) トンネルく体が大規模になる場合について、変位レベル依存性を考慮した地盤反力係数の補正方法を提案した。また、提案した算出方法を用いて地盤反力係数を算出したところ、補正により地盤反力係数が

大きく算出されることを確認した。これを適用することにより、トンネルく体に発生する断面力を抑制できるものと考えられる。

- (2) 盛土中に開削トンネルが位置する場合について、盛土形状を考慮した地盤変位算定手法を提案した。一様地盤を仮定する従来の応答変位法と比較したところ、盛土形状を考慮した応答変位を評価することで、発生断面力を抑制できることを確認した。
- (3) U 型形状となる場合について、地震時主働土圧と応答変位法による構造解析を行い、両者の関係性を整理した。U 型構造の場合については、現在、実務で適用されている応答変位法を用いたほうが断面力は大きく算出される傾向にあり、応答変位法は安全側の評価となっていることを確認した。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、「鉄道構造物等設計標準 (開削トンネル) に関する委員会」において委員・幹事の方々に審議を重ねて頂いた。末筆ながら、感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 鉄道構造物等設計標準 (開削トンネル) に関する委員会：鉄道構造物等設計標準・同解説 (開削トンネル) 最終原案, 2016.3
- 2) 運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (抗土圧構造物), 1997
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物), 2016
- 4) 古閑潤一, 倉知禎直, 緒方辰男：地盤反力係数の寸法効果に及ぼす地盤変形特性の応力レベル依存性と非線形性の影響, 基礎工, Vol.33, No.12, pp.26-29, 2005
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物), 2012
- 6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (土構造物), 2008
- 7) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 2012
- 8) 渡辺健治, 館山勝：地震時土圧の大きさに及ぼす擁壁の支持条件の影響, 鉄道総研報告, Vol. 20, No.5, 2006

■ 2019年4月号（特集：開削トンネルの設計技術）の訂正

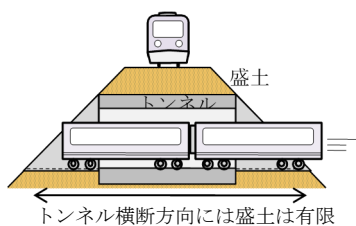
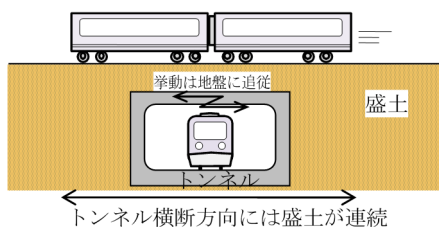
特集論文の図中に誤りがありました。

以下のように訂正させて頂き、お詫び申し上げます。

【訂正箇所】

P. 25 図4中の一部表記

【誤】



訂正箇所

図4 盛土中に位置するトンネル

【正】

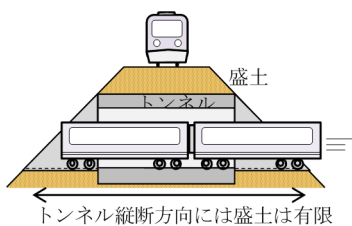
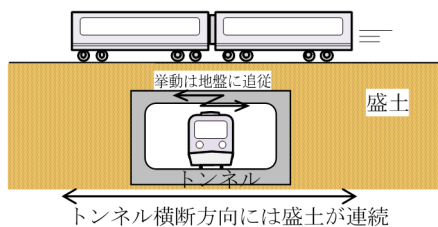


図4 盛土中に位置するトンネル