

# 地山形状を考慮した応答変位法による 山岳トンネル坑口部の地震時影響の詳細評価法

野城 一栄\* 井澤 淳\*\* 伊藤 直樹\*

Detailed Evaluation Method of Seismic Impact on Mountain Tunnel Entrance  
Using Response Displacement Method Considering Shepe of Ground

Kazuhide YASHIRO Jun IZAWA Naoki ITO

A detailed method for evaluating seismic impacts on mountain tunnel entrances was proposed, using response displacement method and static FEM structural analysis. The validity of the proposed method was confirmed by comparing the ground strain around a tunnel with the result of the ground response analysis. For the mountain tunnel entrance, the ground response analysis was performed by changing the gradient of the slope above the tunnel and the ground conditions to evaluate the influence of the slope, and restorability was checked using the proposed method. As a result, it was found that as the slope angle increases, the bending moment increases at the corners of some structures, and that changes in thickness and main steel bar of members might be necessary.

キーワード：山岳トンネル，覆工，坑口部，耐震設計法

## 1. はじめに

山岳トンネルの小土被り部，坑口部は土圧などの作用を想定して覆工およびインバートは鉄筋コンクリート（RC）構造が採用される。ここで，山岳トンネルは，地山に囲まれたアーチ形状の構造物であり，ぜい性的な破壊を生じにくい。よって，小土被り部，坑口部や都市部に施工される場合でも，更新世や新第三紀鮮新世の地山であっても固結が進んだ地山では，地震時の変形が小さく，地震の影響は大きくないものと考えられる。ただし，偏圧斜面中に位置する場合においては，左右が不均等となる地形条件に起因して，地震時に大きなせん断変形が生じる可能性があり，地山条件や構造条件によっては，地震の影響を適切に設定して設計応答値を算定し，性能照査を行う必要がある。

本論文は，坑口部のRC山岳トンネル覆工の横断方向の耐震設計法として，地盤応答解析と静的FEM構造解析を組み合わせた分離型モデルによる方法を示すとともに，その妥当性を検証した結果や，本手法により山岳トンネル坑口部覆工の地震時の影響を評価した結果の例について述べる。

## 2. 提案した手法の概要

アーチ形状の地中構造物である山岳トンネルにおいて

耐震設計を行う場合は，静的解析法により応答値を算定して行うことが多い。横断方向の解析法としては，図1で示したような，覆工およびインバートをはりで，地盤との相互作用を地盤ばねで表現した分離型モデルを用いた応答変位法が用いられる。図2(a)で示したような整形地盤に位置するトンネルの場合は，一次元の地盤応答解析を行い，地盤変位，周面せん断力，慣性力を求めることが考えられる。ここで，アーチ状の構造物の場合は，上記作用の設定は一般に煩雑となり，例えば，変位についてはトンネル接線方向，法線方向の成分ごとに分離したうえで作用させる等の方法が用いられている<sup>1)</sup>。加えて，図2(b)で示したような不整形地盤（斜面）に位置するトンネルの場合は，トンネルの左右の地盤の応答変位が異なることから，整形地盤の場合と比べて地震による影響が大きくなると考えられるが，前述したような方法では，設計実務において地盤変位，周面せん断力，慣性力の設定方法が困難となることも考えられる。この問題に対応するため，筆者らは，二次元地盤応答解析と二次元FEM構造解析を組み合わせた，分離型モデルによる手法を提案した。

本手法の概念図を図3に示す。斜面中のトンネル坑口部に対し，斜面を想定して比較的広い範囲をモデル化した二次元地盤応答解析によりトンネル周囲の地盤の応答変位を求め，せん断変形最大時の変位をトンネル周辺を詳細にモデル化した構造解析モデルに境界変位として入力してトンネルの応答値を算出するというものである。

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

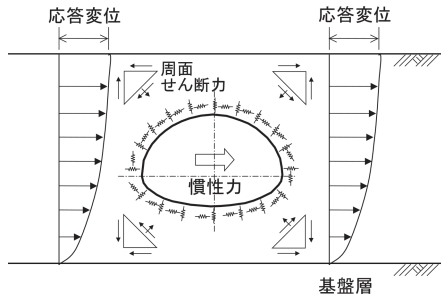
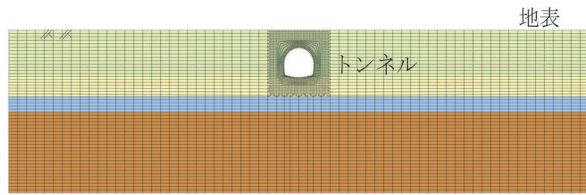
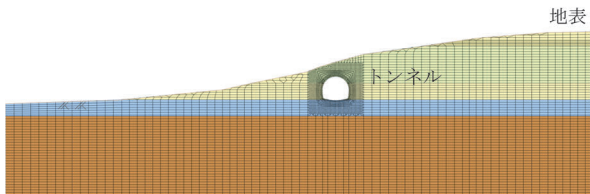


図1 はりばねモデルによる応答変位法の概念図



(a) 整形地盤



(b) 不整形地盤 (斜面)

図2 トンネルの坑口部の模式図

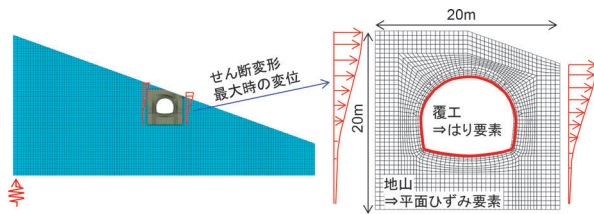


図3 地盤応答解析と静的FEM構造解析による方法<sup>2)</sup>

表1 検証条件

条件	項目	入力値
地盤	土被り	0.5D (D: トンネル幅)
	斜面角	3 通り (0°, 10°, 20°)
	N 値	30
	単位体積重量	$\gamma=18 \text{ kN/m}^3$
	せん断弾性波速度 $V_s$	$V_s=248.6 \text{ m/s}$
	内部摩擦角 $\phi$	36.2°
	粘着力 $c$	10 kPa
	ポアソン比 $\nu$	0.25
構造	コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}$	24 MPa
	巻厚	アーチ 45 cm インバート 70 cm

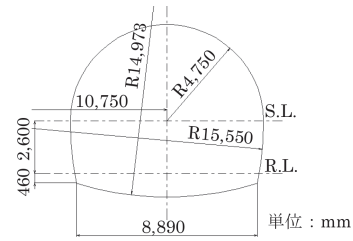


図4 解析に用いた断面

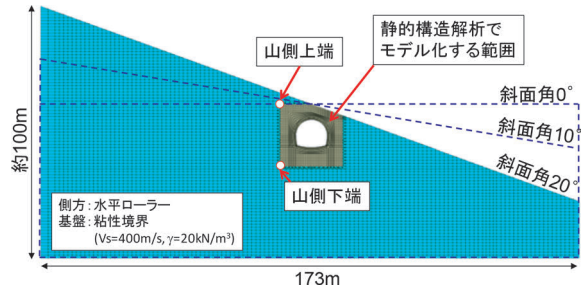


図5 解析モデル (斜面角 20° の例)<sup>2)</sup>

### 3. 提案手法の検証<sup>2) 3)</sup>

#### 3.1 検証の概要

提案手法は、地盤応答解析と静的FEM構造解析を分離しているため、静的構造解析においては、地盤応答解析におけるトンネル周辺地盤のひずみ状態を正しく反映できている必要がある。本章では、上記の検証を行った。

表1に検証条件を示す。トンネル坑口部を想定し、小土被り未固結地山とし、地表面には傾斜がある条件とした。図4に解析に用いた断面、図5に解析モデルの例を示す。トンネル位置の土被りは0.5Dとし、基底からトンネル下面までの距離は各斜面角で同一とした。

#### 3.2 地盤応答解析

まず、二次元地盤応答解析を実施した。覆工は隅角部のRC部材の  $M\sim\phi$  関係における原点と最大耐力点を結んだ等価曲げ剛性程度 ( $EI=3000\text{kNm}^2$ ) を有する弾性梁要素でモデル化した。ここで、地盤のモデルには、地盤の非線形性に GHE-S モデル<sup>4)</sup> を用いるとともに斜面下でも適切に解析を実施できるように多重せん断ばねモデル<sup>5)</sup> を適用した。GHE-S モデルの非線形パラメータには標準パラメータを用いている。このモデルを用いて地盤応答解析を行った。ここで、地盤の非線形性のパラメータは次の Step により設定した。

- Step1: トンネルをモデル化しない状態の自重解析より、拘束圧依存を考慮した初期せん断剛性を求める。
- Step2: トンネルをモデル化した状態で初期応力解析を再度実施し周辺地盤および覆工の初期応力状態を求める。
- Step3: Step2で求めた応力状態のみを各要素に与え、耐震標準<sup>6)</sup>に示すスペクトルII (G1地盤)を粘性境

界 ( $V_s=400\text{m/s}$ ) を介して入力する。ここで、地震波の向きは、解析モデルが斜面を有する非対称モデルのため、応答値が大きくなる向きとする。

周辺地盤の山側上端、下端に着目し、上下端の相対変位が最大になる時点（以下、最大変形角時）の周辺地盤およびトンネルの変位分布を図6に示す。周辺地盤およびトンネルはせん断変形しながら斜面下方に変位している。また、斜面角が大きいほどせん断変形も大きくなり、斜面の影響が現れていることがわかる。

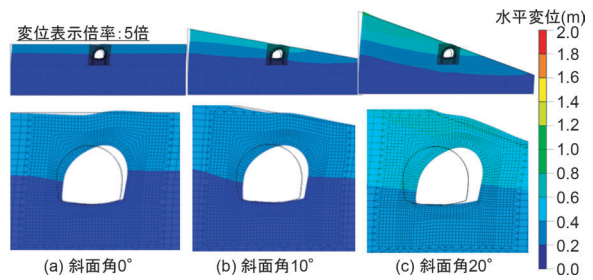
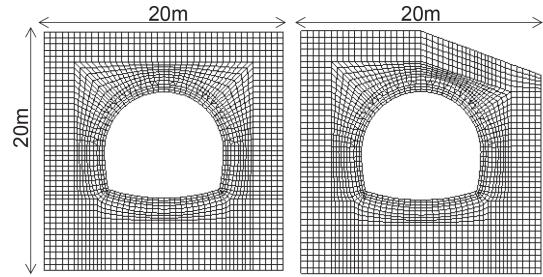


図6 周辺地盤およびトンネルの変位分布<sup>2)</sup>

### 3.3 静的FEM構造解析

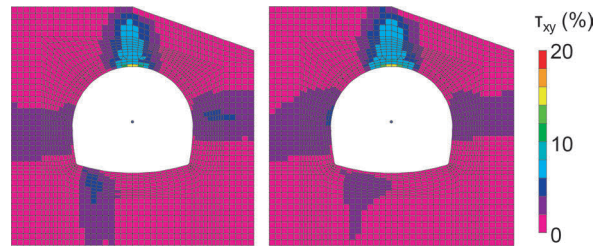
次に、図7に示すようにトンネルを含む20m×20mの範囲をモデル化して静的FEM構造解析を行った。地盤の弾性係数は、地盤応答解析における最大変形角時に生じているせん断ひずみに対応するせん断剛性とポアソン比から換算して各要素に与えた。覆工は非線形パイリニアモデルによりモデル化し、骨組解析により行った地震時以外の設計で求まる断面力を初期値として与えた。このモデルに対し、地盤応答解析により得られた地盤変位を境界に作用させた。



(a) 斜面角0° (b) 斜面角20°

図7 静的FEM構造解析のモデル<sup>2)</sup>

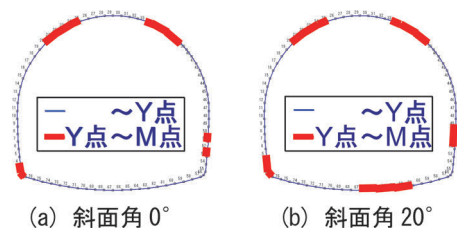
トンネルの周りの地盤のせん断ひずみ分布を図8に示す。図より、地盤のひずみはトンネル上部、側部と左下隅角部付近で卓越しており、地盤応答解析と静的FEM構造解析とで良く一致した。これより、提案手法により、トンネルの覆工およびインバートの変形を、正しく再現できることを確認した。



(a) 地盤応答解析 (b) 静的FEM構造解析

図8 せん断ひずみ分布比較（斜面角20°の例）<sup>3)</sup>

最大変形角時におけるトンネルの曲げ損傷の発生状況を図9に示す。曲げが大きくなる左下隅角部、アーチ左右肩部、インバートでY点に達し鉄筋の降伏が生じたが、M点に到達する要素はなく、地震時も巻厚や主鉄筋の変更は必要がない結果であった。以上から、本手法により小土被り部・坑口部の耐震照査が可能であることを確認した。



(a) 斜面角0° (b) 斜面角20°

図9 覆工およびインバートの曲げ損傷の発生状況<sup>3)</sup>

## 4. 斜面中のトンネル坑口部の耐震設計<sup>7)</sup>

本章では、実トンネルに近い条件に対し、提案した地盤応答解析と静的FEM構造解析を組み合わせる手法により、斜面角と地盤条件を変化させてトンネル坑口部の耐震設計を行い、それらの影響について検討した。

### 4.1 検討の概要

表2に解析ケースを示す。トンネル坑口部を想定して小土被り未固結地山とし、地表面には傾斜がある条件とした。トンネルの断面を図10に示す。(a)は図4と同様である。(b)は側壁～インバート間の隅角部に擦り付け曲線を持つ構造で、都市部の山岳工法トンネルなどで見られる構造である。なお、この断面は、結果的に良好

な耐震性能が確認されたため、解析ケースはこれらのうちの一部のケースとした。トンネル位置の土被りは0.5Dとし、地形は、小土被り未固結地山トンネルにおける施工実績を基に設定した。図11に、工事誌より調べた小土被り未固結地山のトンネルの坑口部の地盤のN値（トンネル位置の代表的な値）、斜面角の事例を示す。斜面角は20°以下の事例が多く、20°を超える事例は数例のみとなっている。地盤条件はボーリング調査結果を参考に設定した。設定した地形条件、地盤条件、 $V_s$ 分布の一例を図12に示す。地盤の解析入力値は $V_s$ より基

表2 解析ケース

ケース	構造	斜面角	N値	隅角部巻厚 (耐震設計後)	隅角部配筋 (耐震設計後)
ケース1	1	整形	20	50cm	D25@125
ケース2	1		70	50cm	D25@125
ケース3	1	10°	30	50cm	D25@125
ケース4	1	20°	40	50cm	D29@125
ケース5	1	30°	70	60cm	D32@125
ケース6	2	整形	20	50cm	D16@125
ケース7	2		10°	30	50cm
ケース8	2	20°	40	50cm	D16@125
ケース9	2	30°	70	50cm	D16@125

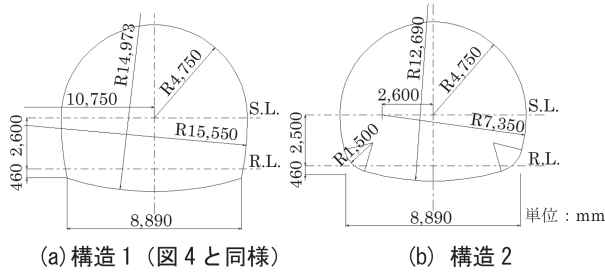


図10 解析に用いた断面

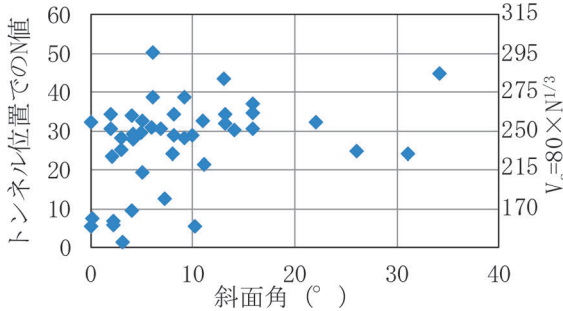


図11 小土被り土砂地山トンネルの斜面角とN値(代表値)の調査結果

礎標準に準拠して算定した。

#### 4.2 地盤応答解析

まず、二次元地盤応答解析を行った。解析の方法は3.2節と同様である。覆工は隅角部のRC部材のM~φ関係における原点と最大耐力点を結んだ等価剛性程度(EI=3000kNm<sup>2</sup>)を有する弾性梁要素でモデル化した。地盤のモデルにはGHE-Sモデルおよび多重せん断ばねモデルを用いた。地盤の非線形性のパラメータも3.2節のStepと同様の方法で設定した。また、復旧性に関する性能照査を行うため、耐震標準に示すスペクトルII地震動を入力地震動とした。

最大変形角時の周辺地盤およびトンネルの変形を図13に、トンネルせん断変形率δ/hを図14に示す。周辺地山とともに、トンネルはせん断変形しながら斜面下方に変位した。網羅的に解析できているわけではないものの、トンネルのせん断変形率δ/hは、整形の場合は、N

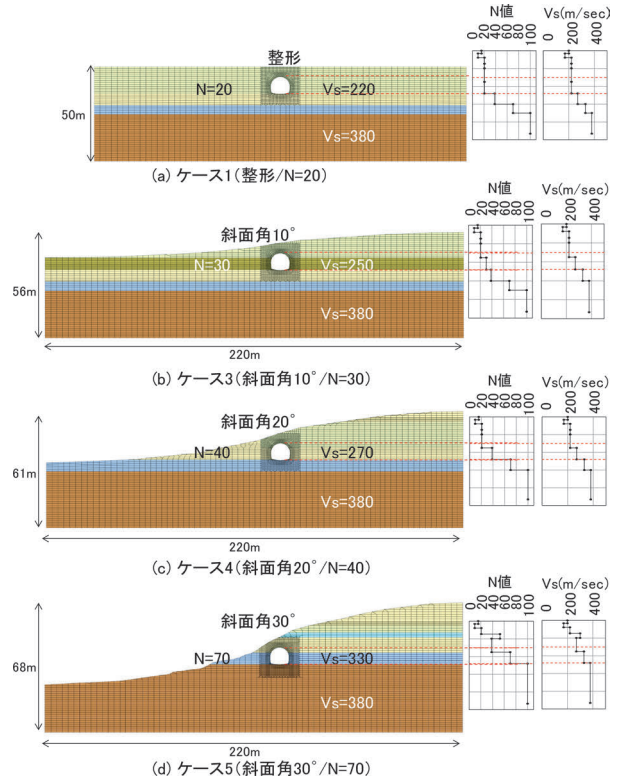


図12 地形・地盤条件(N値, Vs)の例

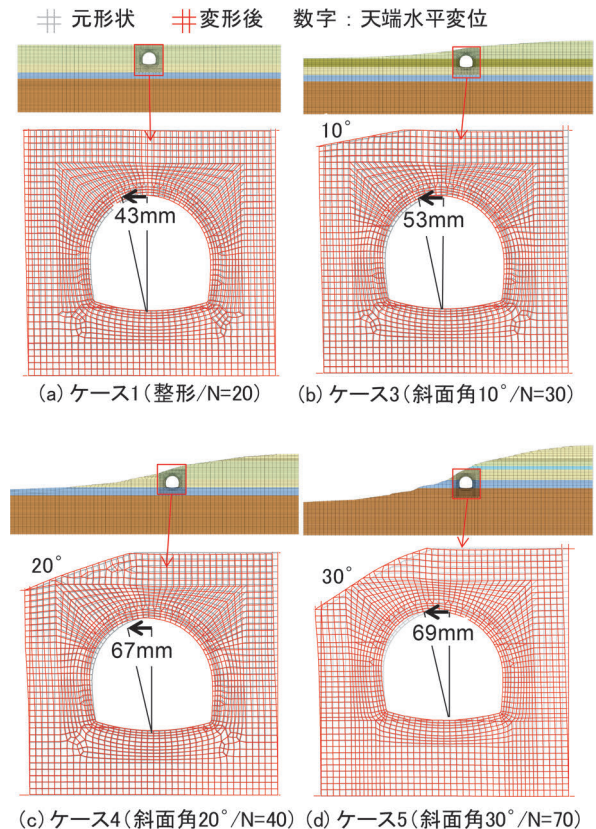


図13 周辺地盤およびトンネルの変形の一例

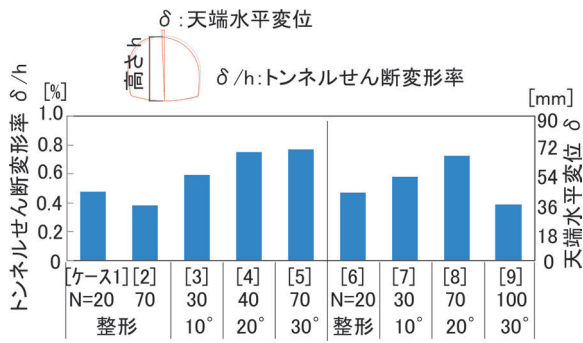


図 14 地盤応答解析の結果（せん断変形率）

値が大きくなるに従い小さくなる傾向であったのに対し、不整形の場合は、 $N$  値が大きくなるに伴い変形が小さくなる傾向よりも、斜面角が大きくなるに伴い変形が大きくなる傾向のほうが強く表れる傾向となっている。

### 4.3 静的 FEM 構造解析

次に、トンネルを含む  $20\text{m} \times 20\text{m}$  の範囲をモデル化して静的 FEM 構造解析を行った。解析の方法は 3.3 節と同様である。地盤の弾性係数は、地盤応答解析における最大変形角時に生じているせん断ひずみに対応するせん断剛性とポアソン比から換算して各要素に与えた。覆工は非線形バイリニアモデルによりモデル化し、骨組解析により行った地震時以外の設計で求まる断面力を初期値として与えた。このモデルに対し、地盤応答解析により得られた地盤変位を境界に作用させた。

地震時断面力分布として、覆工およびインバートの曲げモーメント図の一例を図 15、図 16 に示す。図より、曲げモーメントはアーチ左右肩部と右下隅角部で大きくなる傾向となっている。特に隅角部は、構造 1（側壁～インバート間の隅角部に擦り付け曲線を有さない構造）ではかなり大きなピークが生じている。一方で、構造 2（隅角部に擦り付け曲線を有する構造）は構造 1 と比べて曲げモーメントが大幅に低減されていることがわかる。

曲げモーメントが卓越して大きい隅角部に着目して、応答値（部材の  $M \sim \phi$  関係）について復旧性（損傷）について、RC 部材としての照査を行った。照査は表 3 に示す、山岳トンネルの要求性能と部材の損傷レベルの例に基づいて行なった。

図 17 に照査結果のまとめを示す。整形で、 $N$  値が大きなケースでは、条件によっては鉄筋の降伏まで至らず、地震の影響が小さいことがわかる。不整形の場合は、 $N$  値よりも斜面角のほうが感度が高い傾向があり、構造 1 の場合、斜面角  $20^\circ$  より大きい場合と、 $N$  値が 20 より小さい場合は、巻厚や主筋の変更が必要という結果となった。また、構造 2 の場合は、斜面角や  $N$  値にかかわらず、地震時以外の設計で決定した巻厚・主筋の変更

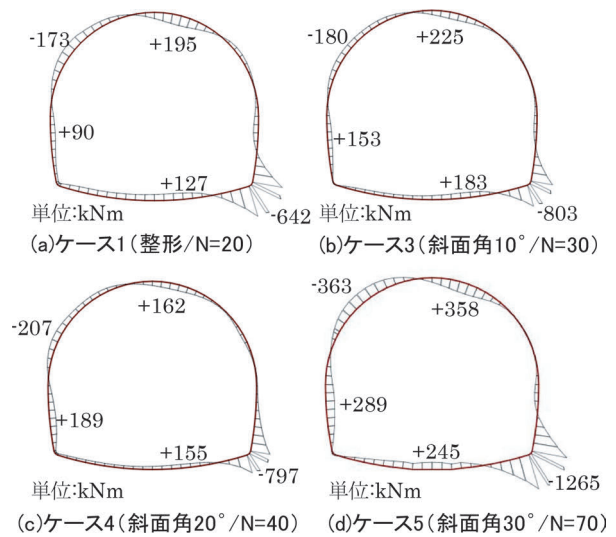


図 15 地震時断面力分布の比較（構造 1）

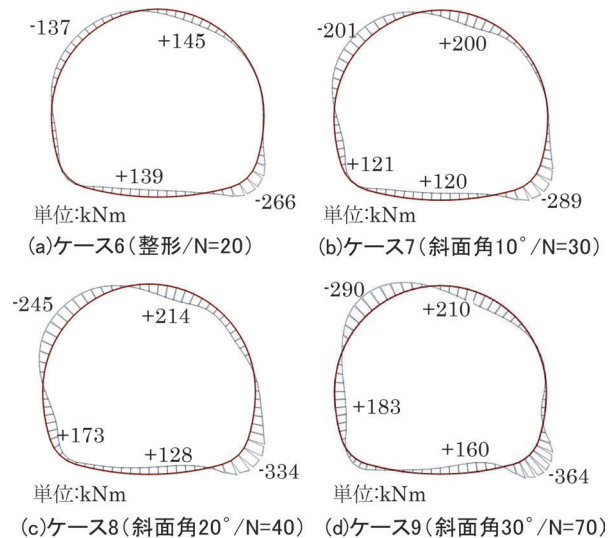


図 16 地震時断面力分布の比較（構造 2）

表 3 山岳トンネルの要求性能と部材の損傷レベルの例

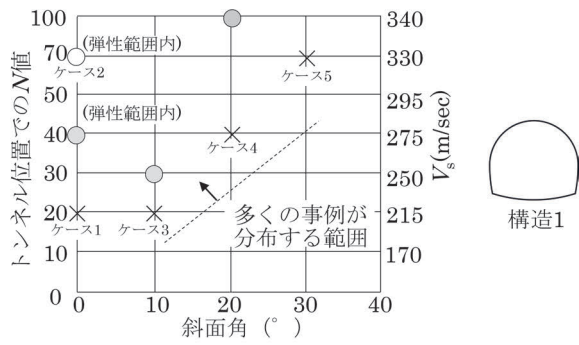
構造物の要求性能		復旧性
部材の損傷レベル	曲げ破壊形態	2（場合によっては補修が必要な損傷）
	せん断破壊形態	1（無損傷）

は必要ないという結果で、良好な耐震性が確認された。

### 4.4 一体モデルを用いた逐次解析との比較

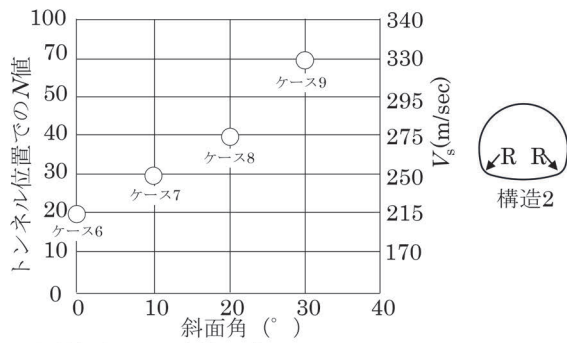
提案手法は、実務において解析の安定性を備えつつ部材の非線形性を考慮できる手法として有効と考えられるが、地震時の影響を詳細に評価する手法としては、本手法以外に、一体型モデルを用い、地盤の非線形性とトンネルの部材の非線形性曲げ特性の両方を逐次評価しつつ動的解析を行う手法が考えられる。

提案手法の検証のため、整形地盤のケース 1 につい



耐震検討による主筋の変更 ○○：不要 ×：必要  
※○は別途逐次解析により検討した結果（参考）

(a) 構造 1



耐震検討による主筋の変更 ○：不要 ×：必要

(b) 構造 2

図 17 照査結果のまとめ

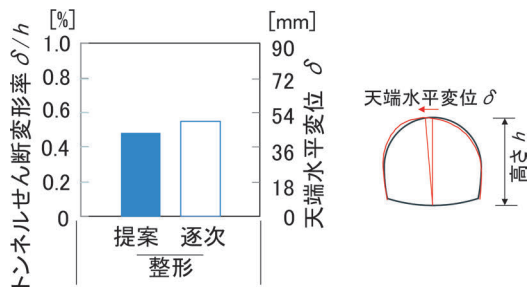


図 18 トンネルせん断変形率（ケース 1 の例）

て、一体モデルを用いた逐次解析を実施し、両者を比較した。図 18 に、トンネルのせん断変形率を比較する。図より両者には大きな差はみられないことがわかる。なお、逐次解析において、斜面角、 $N$  値の別の組み合わせについても追加して実施した。その結果も参考として記載した。

検証用として最後に実施した逐次動的解析は一貫性があり手法の妥当性の面からは理想であると考えられるが、斜面角が大きい場合など、地盤の非線形性が強い場合において、解析を収束させるのに時間を要するケースも見られた。実務においては、これらを理解したうえで適用する必要がある。

## 5. まとめ

本論文の結論を以下にまとめる

- (1) 山岳トンネル坑口部の横断方向の地震時影響の詳細な検討法として、地盤応答解析と静的 FEM 構造解析を組み合わせた分離型モデルによる方法を提案した。
- (2) トンネル周囲の地盤とトンネルをモデル化し、二次元地盤応答解析から得られた地盤剛性を要素に与え、また、地盤変位を境界に与えることにより、FEM 静的構造解析を行った。解析により得られた地盤のひずみを地盤応答解析の結果と比較したところ、両者は良い一致を示し、提案した解析手法の妥当性を確認した。
- (3) トンネル上部の斜面の勾配と地盤条件を変化させて地盤応答解析を行い斜面の影響を評価した。この結果、トンネル位置の  $N$  値が小さくなるに従い、また、斜面角が大きくなるに従い、トンネルのせん断変形は大きくなる傾向があることがわかった。
- (4) 提案した解析手法を用いて、復旧性（損傷）について性能照査を行なった。この結果、斜面角が大きくなると、地震時以外の設計で決定した巻厚や主筋の変更が必要という結果となった。また、隅角部に  $R$  を有する構造の場合は、斜面角にかかわらず、巻厚・主筋の変更は必要なく、良好な耐震性が確認された。本手法は、斜面化における山岳トンネル坑口部の耐震照査法として適用が可能なものと考えている。

## 文献

- 1) 土木学会 トンネル工学委員会 技術小委員会 シールドトンネルの耐震設計法検討部会編：トンネルライブラリー第 19 号 シールドトンネルの耐震検討，土木学会，2007
- 2) 井澤淳，佐名川太亮，仲秋秀祐，野城一栄，赤澤正彦，芳賀康司，森野達也：トンネル坑口部を有する未固結斜面の地盤応答解析，土木学会第 68 回年次学術講演会概要集，2013
- 3) 赤澤正彦，芳賀康司，陶山雄介，瀧山清美，野城一栄：斜面中の RC 山岳トンネル覆工の耐震性能に関する基礎的検討，土木学会第 68 回年次学術講演会概要集，2013
- 4) 野上雄太，室野剛隆：S 字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009
- 5) 和田章，広瀬景一：2 方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状，日本建築学会構造系論文報告集，第 399 巻，pp.37-47，1989
- 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 耐震設計，2012
- 7) 野城一栄，井澤淳，平田亮，陶山雄介，高野裕輔：斜面中のトンネル坑口部の地震時挙動に与える地層構成の影響に関する検討，土木学会第 69 回年次学術講演会概要集，2014