

トンネル坑口部を有する未固結斜面の地盤応答解析

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○井澤 淳, 佐名川太亮, 仲秋秀祐, 野城一栄
(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 赤澤正彦, 芳賀康司, 森野達也

1. はじめに

山岳トンネルは安定した地山中に建設されるため地震時の安定性が高く、耐震設計は省略されるのが一般的である。しかし、未固結地山中や斜面中に坑口部が位置する場合、地山の变形に伴って覆工に大きな断面力・変形が生じ、過去の地震においても被害が報告されているため、耐震上の考慮も必要となる。本稿では、未固結斜面中のトンネル坑口部の耐震性検討のための、周辺地盤の応答値算定手法について述べる。

2. 未固結斜面中のトンネル坑口の応答値算定手法

トンネル坑口部の応答値算定には図1に示すようなFEM 応答変位法を用いた。これは、地盤応答解析と静的構造解析に分け、斜面をモデル化した2次元FEM 地盤応答解析において求めた変位分布を、静的構造解析における2次元FEM解析の境界変位として作用させることにより、トンネルの応答値を求めるものである。地中構造物に対して覆工などに非線形性を考慮した複雑なモデルを用いて動的解析を行うことは一般的に難しいが、本手法では構造解析を静的解析により行うため、覆工に複雑な構成モデルを適用することができる。また、骨組解析による応答変位法を円形や馬蹄形の覆工に適用する場合、地盤ばねおよび周面せん断力の設定が問題となるが、本手法ではFEM解析において地盤物性を適切に設定することでこれらを自動的に考慮出来る。なお、静的構造解析においては、常時設計で求めた覆工配筋を用い¹⁾、常時荷重により発生する断面力を初期荷重として与えたのちに、モデル化する周辺地盤の上下端の相対変位が最大となる時刻の地盤境界変位を地盤応答解析より求めて作用させる²⁾。本稿では、2次元FEM 地盤応答解析を用いた境界変位の算出について述べる。

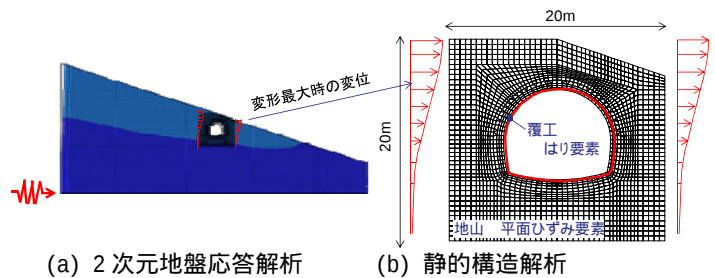
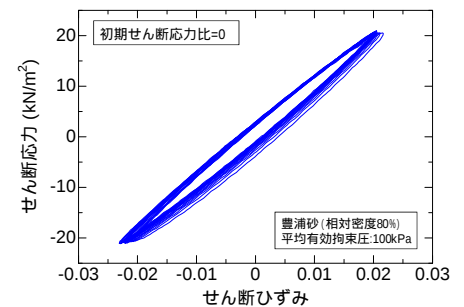


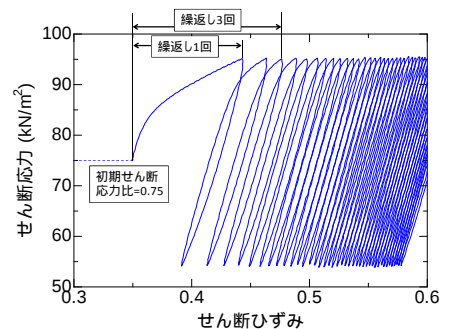
図1 FEM 応答変位法の概念図

3. トンネル坑口を有する未固結斜面の地震応答解析

2次元FEM 地盤応答解析では、地盤の構成則に鉄道構造物の耐震設計で標準的に用いられるGHE-Sモデルを用いた³⁾。ここで、斜面中にトンネルのような空洞が存在する場合、ひずみや変位分布が不連続になる場合があるため、多重せん断ばねモデル⁴⁾を導入することでこの問題を解消している。また、斜面中のように初期せん断が作用する未固結の地盤に繰返しせん断応力が作用すると、初期せん断の作用する方向へせん断ひずみが累積する傾向がある。図2に豊浦砂(相対密度80%)を用いた中空ねじりせん断試験において、初期せん断応力比0および0.75としてせん断応力比0.2(20kPa)の繰返しせん断を与えた場合のせん断応力-せん断ひずみ関係を示すが、初期せん断を加えた場合、その方向へひずみが累積するのが分かる。このような変形の累積はトンネルの応答に影響するため、地盤応答解析において適切に評価する必要がある。しかしながら、この効果を含めた解析を行うには、詳細な弾塑性モデルを用いるか、GHE-Sモデルのようなせん断ばね系の構成モデルの履歴則を改良する必要があるが、実務において考慮するのは困難である。そこで、通常のGHE-Sモデルを用いた地盤応答解析を行い、得られた変位分布を割り増して静的構造解析において作用



(a) 初期せん断応力比=0



(b) 初期せん断応力比=0.75

図2 初期せん断を与えた繰返し中空ねじり試験結果の例

キーワード 山岳トンネル, 未固結地山, FEM 応答変位法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 Tel: 042-573-7394

させることとした。今回は、断層直下型の地震波を正弦波に換算した場合の等価な繰返し回数が3回程度と考え、図2(b)に示すように繰返し回数3回目と1回目のせん断ひずみ増加率を様々な初期せん断応力比について求めた。その結果から、割り増し係数1.2を用いることとした。

4. トンネル坑口部を有する未固結斜面の地盤応答解析

上記の手法を用いて0, 10, 20°斜面の試計算を行った。地盤はN値30の砂地盤を想定し、鉄道構造物等設計標準・基礎構造物⁵⁾に従って $\gamma_t=18 \text{ kN/m}^3$, $V_s=248.6 \text{ m/s}$, $\phi=36.2$ 度とした。また、粘着力を一律10kPa与えた。覆工は隅角部のRC部材の応力ひずみ関係における原点と最大耐力点を結んだ等価剛性程度($EI=3000 \text{ kNm}^2$)を有する弾性梁要素でモデル化した。斜面角度20°のモデルを図3に示すが、各ケースで基盤からトンネル下面までの距離と覆工直上の土被り(0.5D)が一致するように作成した。なお、静的解析においてモデル化する周辺地盤領域は、トンネル径の2倍となる20m×20mの区間としている。このモデルを用いて、以下のステップで応答解析を行った。：トンネル部を地盤で満たした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。：トンネル部を考慮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。：求めた応力状態のみを各要素に与え、鉄道構造物等設計標準・耐震設計に示すスペクトルII(G1地盤)⁵⁾を入力する。図4に周辺地盤の山側上端、下端の水平変位の時刻歴を示す。斜面角度0°の場合

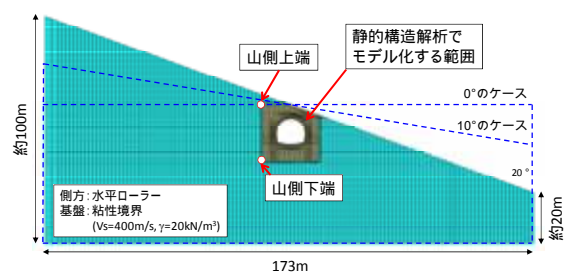


図3 FEM 応答変位法の概念図

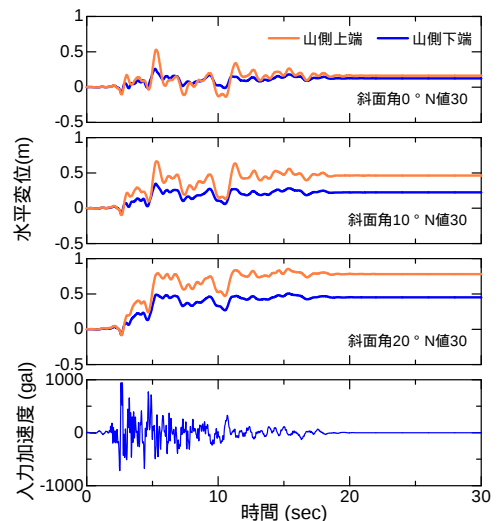


図4 周辺地盤上下端の変位時刻歴

は振動中の変位が卓越し、残留変形はほとんど残らない。一方、斜面角度を有する場合は振動中に最大変位を生じるものの、同等の残留変形が生じている。上下端の相対変位が最大になる時点の周辺地盤およびトンネル覆工の変位分布を図5に示すが、斜面角度が大きいほど覆工上下端の相対変位も大きくなっている。このように提案する手法により、トンネル坑口部を有する斜面の応答解析を適切に実施可能であると考えられる。静的構造解析では、相対変位最大時に生じている地盤のせん断ひずみに対応する地盤剛性を算出して各要素に与えるとともに、境界変位を1.2倍まで与える。これらの結果については、参考文献2)に示す。

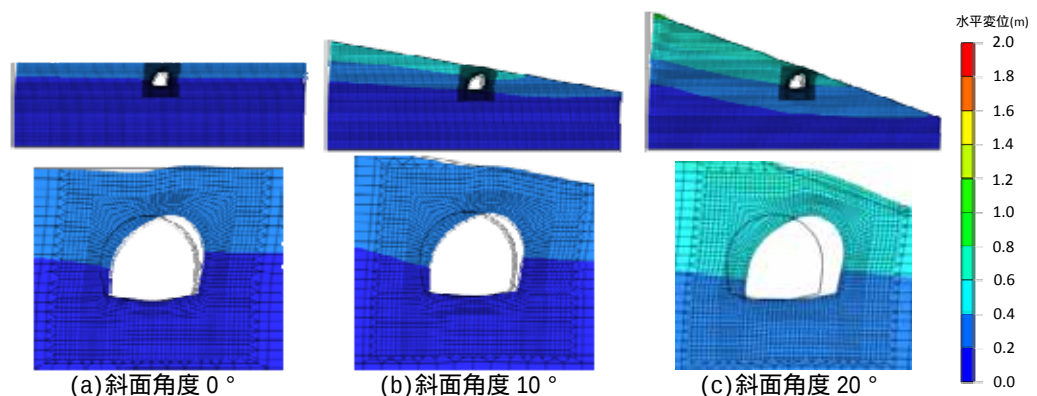


図5 上下端相対変位最大時の周辺地盤の変位分布(表示倍率5倍)

は振動中の変位が卓越し、残留変形はほとんど残らない。一方、斜面角度を有する場合は振動中に最大変位を生じるものの、同等の残留変形が生じている。上下端の相対変位が最大になる時点の周辺地盤およびトンネル覆工の変位分布を図5に示すが、斜面角度が大きいほど覆工上下端の相対変位も大きくなっている。このように提案する手法により、トンネル坑口部を有する斜面の応答解析を適切に実施可能であると考えられる。静的構造解析では、相対変位最大時に生じている地盤のせん断ひずみに対応する地盤剛性を算出して各要素に与えるとともに、境界変位を1.2倍まで与える。これらの結果については、参考文献2)に示す。

5. まとめ

本稿では未固結斜面中に存在するトンネル坑口部の耐震設計における周辺地盤の応答値算定手法を提案し、適切に応答値が算定できることを確認した。本検討では初期せん断の影響によるひずみの累積を豊浦砂の実験結果を元に1.2倍として設定したが、今後、より詳細な検討が必要である。

謝辞：初期せん断を与えた中空ねじりせん断試験の実施において、東京大学の古関潤一教授に助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献：1) 松尾ら、コンクリート強度増加による山岳トンネルRC覆工の薄肉化に関する研究、土木学会第68回年次学術講演会 2) 赤澤ら、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 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、鉄道総合技術研究所、2012. 4) 和田ら、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号、1989. 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物、鉄道総合技術研究所、2012.