

既設山岳トンネル坑口部における地震時挙動の解析的検討

東京都立大学 〇松岡輝 福島実奈歩 河田皓介 砂金伸治
中日本高速道路株式会社 北村元 中島康介 海瀬忍

1. はじめに

山岳トンネルは一般に地震時の安定性が高い構造物とされているが、坑口部は土被りが小さく、地質が不良であることが多いことから、地山の変形に伴う地震の影響を受けやすいことが知られている。一方で、斜面の傾斜角や地質の状況、地山の強度特性、土被り等の条件が坑口毎で異なるため、その影響度は不明確な場合が多く、現在、新設される一般的な山岳トンネルでは覆工に単鉄筋を配置する等の補強が経験的に行われていることにとどまっている。しかし、近年では山岳トンネルにおいても覆工の崩落を伴う比較的大規模な地震被害が発生しており、トンネルに対する地震の影響に対する検討の必要性が高まっている。この場合、より影響が生じやすいと考えられるトンネルから優先して補強等を行うことが合理的であり、そのためには、坑口部に関して地震の影響を受ける可能性がより高い条件に対して、検討を行う必要がある。

本研究では、既設の山岳トンネル坑口部における斜面傾斜角、土被り、地質、トンネル断面内の地質境界（以下、層境）、背面空洞の有無、インバートの有無、巻厚不足などの地形・地質、トンネル構造の各条件と、坑口部における地震の影響度の関係を明らかにするため、数値解析により、地震時挙動の再現を試み、各条件が地震時のトンネル構造へ及ぼす影響を検討した。

2. 解析手法

解析は、2次元の静的弾性 FEM とし、図-1 に示すようにトンネル覆工及び地山を平面ひずみ要素でモデル化した。トンネルは一般的な 2 車線高速道路トンネルを模擬した形状とし、覆工厚は 55cm である。打継ぎ目及び坑口部で通常用いられている単鉄筋補強は基礎的な検討を目的とするため模擬していない。また、地震外力として水平方向の慣性力 0.4G(392gal)を载荷させた。解析ケースは坑口部を想定し、斜面傾斜角が 0° ～30°，土被りは 0.5D ～2.0D を対象とし、地山等級は坑口部を想定した E～DI を対象とした。

分析項目は、覆工の内側、外側に生じる縁応力を基本とした。

また、トンネル構造・地山条件の影響を確認するため、表-2 に示す解析条件を設定した。健全なケースと比較を行うため、インバートを設置しないものを 1 ケース、背面空洞を端部の形状を変えて 2 ケース、トンネル覆工の巻厚を不足させたものを 1 ケース、層境が地質を逆転させたものを含めて 2 ケース、計 6 ケースを設けた。

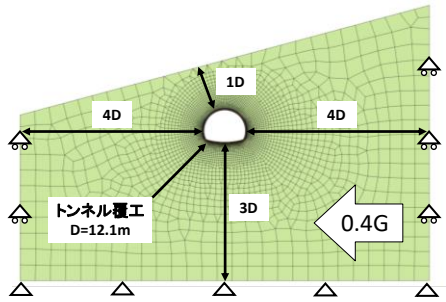


図-1 解析モデル

表-1 解析物性値

		弾性係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
地山等級	C II	1000	0.30	22.5
	D I	500	0.35	21.6
	D II	150	0.35	20.6
	E	50	0.40	19.6
覆工・インバート・吹付けコンクリート		22000	0.20	23.0

表-2 トンネル構造・地山条件

健全	インバートなし	背面空洞1	背面空洞2	巻厚不足	層境	逆転層境
トンネル・地山ともに健全	インバートなし	天端から左右45°の範囲に空洞あり	背面空洞1と同様で端部形状を変更	天端から左右45°で覆工厚が減少	上層:E 下層:CII	上層:CII 下層:E
※層境は斜面と並行						

キーワード 山岳トンネル、坑口部、斜面、地震、数値解析

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL:042-677-1111（代表）

3. 解析結果

初めに、斜面傾斜角による影響を検討する。図-3に斜面傾斜角とトンネル覆工に生じる縁応力の関係を示す。斜面傾斜角が増加するにつれ、覆工に生じる応力が大きく、覆工の肩部に曲げ応力が集中する。また、 0° と 15° では応力の差が小さく、 15° と 30° では斜面傾斜角の影響による応力の差が大きい。したがって、トンネル坑口部が位置する可能性の高い斜面傾斜角 $0^\circ \sim 30^\circ$ の間において斜面傾斜角が増加するにつれ、地震時の影響が大きくなる可能性があると考えられる。

次に、土被りによる影響を検討する。図-4に土被りとトンネル覆工に生じる縁応力の関係を示す。土被りが増加するにつれ、覆工に生じる応力が大きく、覆工の肩部に曲げ応力が集中する。また、土被りの増加に対する応力の差は一定である。したがって、トンネル坑口部が位置する土被り $0.5D \sim 2.0D$ の間において同一の地質が連続する場合、トンネル坑口部は土被りが増加するにつれ、地震時の影響が大きくなる可能性があると考えられる。

さらに、地山等級による影響を検討する。図-5に地山等級とトンネル覆工に生じる縁応力の関係を示す。地質が悪くなるにつれ、覆工に生じる応力が大きく、覆工の肩部に曲げ応力が集中する。したがって、トンネル坑口部を想定した地山等級E~DIの間において、地質が悪くなるにつれ、地震時の影響が大きくなる可能性がある。

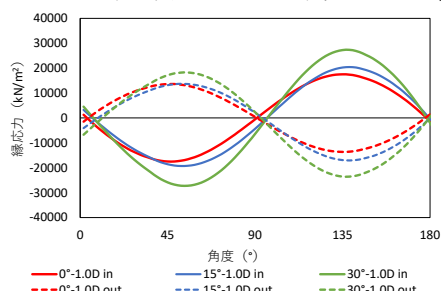


図-3 斜面傾斜角と縁応力の関係

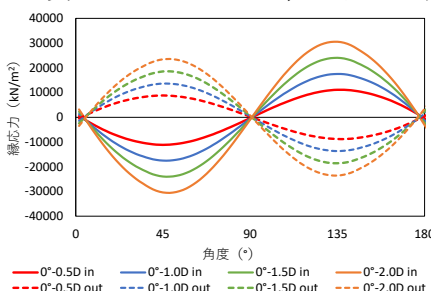


図-4 土被りと縁応力の関係

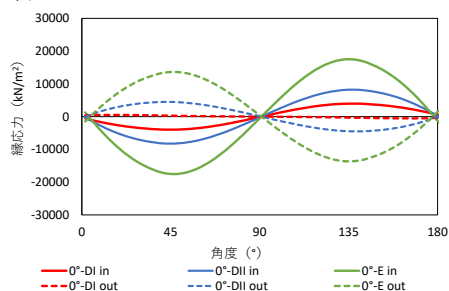


図-5 地山等級と縁応力の関係

最後に、トンネル構造・地山条件による影響を検討する。図-6にトンネル構造・地山条件とトンネル覆工に生じる縁応力の関係を示す。インバートを有しない場合、応力の極大値に大きな差は見られないが、肩部から側壁部にかけて応力が大きくなる。背面空洞を有する場合、背面空洞と地山の境界部において曲げ応力が集中する傾向が見られ、地山からの反力が小さい箇所では覆工の地山側と内空側の両側で応力が大きくなる。巻厚が不足する場合、肩部から天端部にかけて曲げ応力が集中する傾向が見られ、地山からの反力が得られないことに加え、覆工厚が薄い箇所では覆工の地山側と内空側の両側で応力が大きくなる。層境を有する場合、層境とトンネル断面の交差する位置において曲げ応力が集中する傾向が見られ、地山の剛性が変化する箇所では覆工の地山側と内空側の両側で応力が大きくなる。したがって、トンネル坑口部ではトンネル構造・地山条件を有する場合、地震時の影響が大きくなる可能性があり、応力が極大となる位置が変化する可能性があることも考えられる。

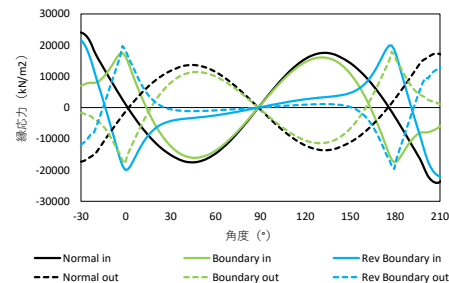
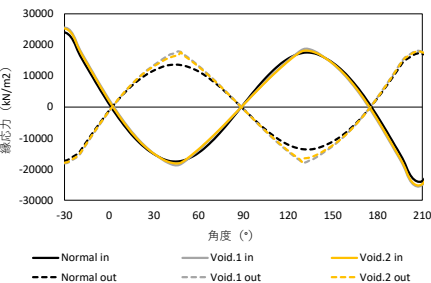
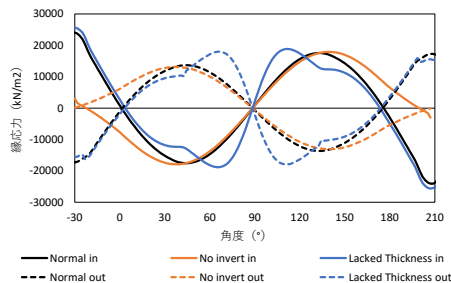


図-6 トンネル構造・地山条件と縁応力の関係

4. まとめ

本研究では、数値解析により既設の山岳トンネル坑口部の地震時挙動を再現し、斜面傾斜角や土被り、地山等級、トンネル構造・地山条件が地震時にトンネルへ及ぼす影響を検討した。解析結果より、斜面傾斜角や土被り、地山等級の影響によって応力の発生モードは変化せず、応力が大きくなることを確認した。また、トンネル構造や地山条件によって応力が大きくなることに加え、応力の発生モードも変化する可能性があることを確認した。今後は、優先度による対策工の検討やトンネル断面形状の影響、解析手法の整理等に関する検討が必要である。