

既設山岳トンネル坑口部の地震時挙動に関する解析的考察

東京都立大学 ○山西雄大 松岡輝 河田皓介 砂金伸治 西村和夫
中日本高速道路株式会社 八木弘 北村元 吉田泰規

1. はじめに

山岳トンネルは一般に安定した地山内に建設されることから、地震時の安定性が高い構造物とされている。しかし、坑口部については土被りが小さく、地質が不良な場合が多いことから、地山の変形に伴う地震被害を受けやすいことが知られている。また、坑口部斜面の傾斜角や地山の変形係数、土被り等の条件が各坑口で異なることから、その被害メカニズムは不明確な部分が多い。一方で、地震被害に対してより強い影響を与えると考えられる、トンネル坑口部が有する条件に関しては、条件が多岐にわたることに加え、定量的な判断が困難である場合が多い。本研究では既設山岳トンネル坑口部の地山等級、斜面傾斜角、トンネルと斜面法線との最小距離、トンネル断面内における層境の有無、背面空洞の有無、インバートの有無、巻厚不足などの地質的・地形的・トンネル構造的な各条件に着目し、地震時のトンネルに与える影響について検討した。

2. 研究手法

本研究では坑口部の地震時挙動に関する基礎的な特性の把握を行うことに主眼を置くため、2次元FEMを用いた静的弾性解析を行った。解析物性値を表1に示す。また既往研究¹⁾を参考に、解析ステップは図1に示した2ステップとし、地震外力として解析モデル全体に0.2%のせん断ひずみを与える強制変位を、斜面と右側境界に作用させる手法を用いた。トンネルの形状は一般的な2車線道路トンネルを模擬して掘削径11mとし、インバート厚は55cmとした。また坑口部で通常用いられている単鉄筋補強は解析の簡略化のため模擬していない。また解析領域は、右側4D、下側3Dと設定した。解析ケースとして、トンネル周辺の各条件を図2に示した6パターンについて検討を行った。また検討に使用した斜面傾斜角は0°～30°までとし、トンネルと斜面との最小距離は0.5D、1D、3D(D：トンネル掘削径)の3パターンで比較を行った。

表 1 解析物性値

		弾性係数 (GPa)	ポアソン比
地山等級	C2	1.0	0.30
	D1	0.5	0.35
	D2	0.15	0.35
	E	0.05	0.4
覆工・インバート・ 吹き付けコンクリート		22	0.2

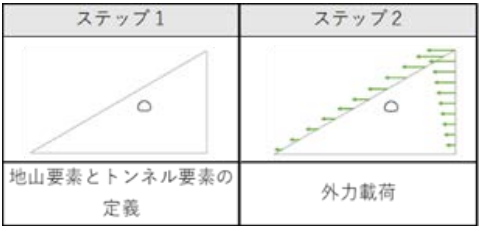


図 1 解析ステップ

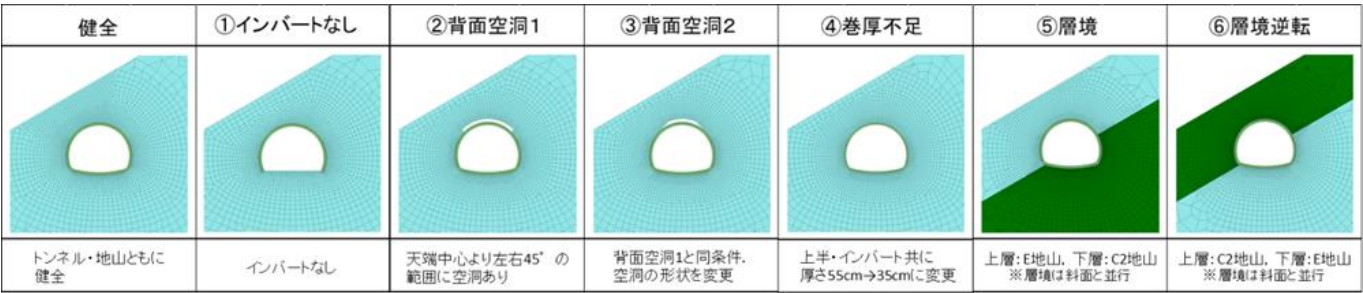


図 2 健全なモデルと解析ケース (6パターン)

3. 解析結果

本概要では、E地山の物性値を用いて解析を行った場合の結果を示す。また、結果の比較に関しては、各条件による影響が最も顕著に表れたと考えられる天端沈下量（正/負はそれぞれ断面の拡大/縮小）の結果について述べる。

3.1 斜面傾斜角による影響

はじめに斜面傾斜角の違いが挙動に与える影響を検討した。図3に最小距離0.5D、図4に最小距離3Dの場合の結果を示す。

キーワード 数値解析, 山岳トンネル, 坑口部, 斜面, 地震

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)

図 3 より、基本的に斜面傾斜角が急になるほど天端沈下量が大きくなること、また、層境逆転の場合のみトンネルの変形モードが逆になること、および層境を有する場合に、特に天端沈下量が大きくなる事が分かる。また図 3 と図 4 を合わせて考えると、最小距離、換言すれば土かぶりが本研究の範囲で大きくなると、基本的には斜面傾斜角が急であっても天端沈下量の増加に対する影響が顕著ではなくなる事、層境を有するモデル以外では天端沈下量が抑制されること、層境逆転の場合には天端沈下量が突出して大きくなる事が分かる。

3.2 最小距離による影響

次に最小距離の違いが挙動に与える影響を検討した。図 5 に斜面傾斜角 15° 図 6 に斜面傾斜角 30° の場合の結果を示す。図 5 および図 6 より、基本的には最小距離が小さいほど天端沈下量が大きくなること、層境逆転の場合はその逆である事が分かる。図 6 からは、図 5 と比較して基本的には天端沈下量が大きくなること、層境逆転の場合のみトンネルの変形モードが逆になり、天端沈下量が大きくなる事が分かる。

3.3 結果の比較

図 3～6 に示した天端沈下量の関係から回帰直線を求め、得られた傾き量の比較を試みた。これにより、健全な地山と比較して、斜面傾斜角が増加した場合（または最小距離が減少した場合）に天端沈下量がどの程度大きくなるか傾向を把握することが出来ると考えられる。その結果、表 2 より、斜面傾斜角が急になるほど、また、最小距離が小さいほどトンネル変形量は大きくなる事が分かり、両者の場合を比較すると、斜面傾斜角が急である場合の影響が、より顕著になると考えられる。また層境を有している場合はトンネル変形量が大きくなる。さらに、層境逆転でかつ最小距離が大きい場合にはトンネル変形量が最も大きくなり、影響がより顕著になる。また、インバートを有していない場合はインバートを有している場合と比較して、トンネル変形量が大きくなる事が分かる。

4. まとめ

本研究では、既設山岳トンネル坑口部の各種条件による影響を検討したところ、限られた条件の範囲ではあるが、その影響が顕著に現れる条件を示した。しかし、背面空洞を有している場合の検討では、相対的に変位が少なくなる結果が得られた。また、地山強度が異なるモデル間の比較や、掘削法の違いによる影響、トンネル覆工の非線形性を考慮した解析等を行う必要があるとともに、模型実験との比較、模型実験で得られた変形量とトンネルの現場の変位量との関連性の把握、実際に作用する外力と地震の規模との関連性の検討、さらに耐震対策の考え方の導出等に関して、今後も検討が必要であると考えられる。

参考文献

1) 角湯克典・日下敦：山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究，平成 21 年度土木研究所成果報告書，
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-seika/2009/pdf/2009-28.pdf>, 2009. (参照 2021.1.25)

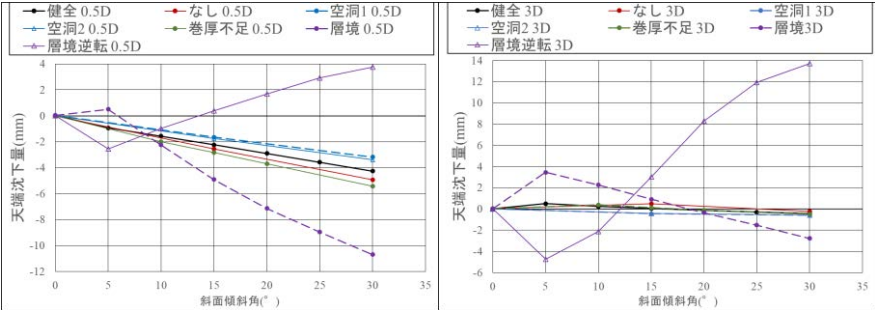


図 3 最小距離 0.5D

図 4 最小距離 3D

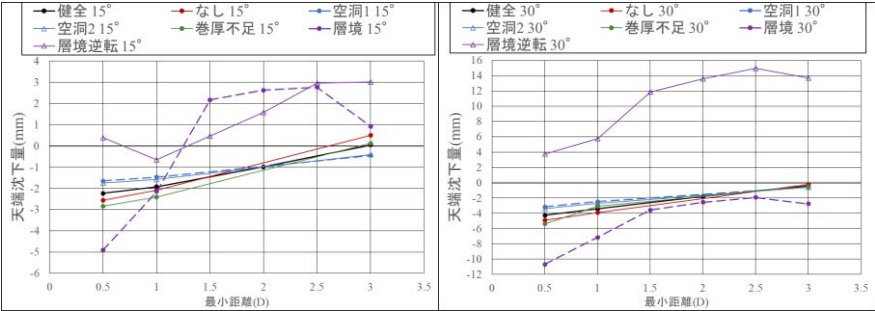


図 6 斜面傾斜角 15°

図 5 斜面傾斜角 30°

表 2 感度分析結果 (15° ～30°)

対策優先度	健全との比較 (倍率)	不良箇所	特色	注意項目
1	22.73	層境逆転	3D	角度 (急)
2	7.80	層境	3D	角度 (急)
3	2.93	層境逆転	30°	土被り (浅)
4	2.83	層境	0.5D	角度 (急)
5	2.74	層境	15°	土被り (浅)
6	2.09	層境	30°	土被り (浅)
7	1.67	層境逆転	0.5D	角度 (急)
8	1.55	層境逆転	15°	土被り (浅)
9	1.51	なし	3D	角度 (急)
10	1.34	なし	15°	土被り (浅)
11	1.31	不足	15°	土被り (浅)
12	1.28	不足	3D	角度 (急)
13	1.27	不足	0.5D	角度 (急)
14	1.22	なし	30°	土被り (浅)
15	1.18	なし	0.5D	角度 (急)
16	1.15	不足	30°	土被り (浅)
17	0.81	2空	0.5D	角度 (急)
18	0.75	1空	0.5D	角度 (急)
19	0.72	2空	30°	土被り (浅)
20	0.66	1空	30°	土被り (浅)
21	0.60	2空	15°	土被り (浅)
22	0.53	1空	15°	土被り (浅)
23	0.38	2空	3D	角度 (急)
24	0.28	1空	3D	角度 (急)