

既設山岳トンネル坑口部の 地震時挙動に関する考察

松岡 輝¹・山西 雄大²・河田 皓介³・砂金 伸治⁴
西村 和夫⁵・八木 弘⁶・北村 元⁷

¹ 学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: matsuoka-akira@ed.tmu.ac.jp

² 正会員 相模鉄道(株) (〒220-0004 神奈川県横浜市西区北幸 2-9-14)
E-mail: yamayuutbn315vf@gmail.com

³ 正会員 東京都立大学 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: k_kawata@tmu.ac.jp

⁴ 正会員 東京都立大学 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

⁵ 正会員 東京都立大学 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: knishi@tmu.ac.jp

⁶ 正会員 中日本高速道路(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦 2-18-19)
E-mail: h.yagi.aa@c-nexco.co.jp

⁷ 正会員 中日本高速道路(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦 2-18-19)
E-mail: h.kitamura.aa@c-nexco.co.jp

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ため、その被害の傾向は不明確な部分が多く、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、検討を行う必要がある。本研究ではトンネル坑口部が有する条件として地山等級、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地層境、背面空洞やインバートの有無、巻厚不足などの条件に着目し、静的弾性解析と模型実験により坑口部の地震時挙動の再現を試み、トンネルへの影響を検討した。その結果、坑口部では斜面傾斜角や最小距離などの各条件がトンネルの挙動に影響を及ぼすことを確認した。

Key Words: mountain tunnel, slope, portal, earthquake, model test, numerical analysis

1. 序論

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、地質が不良であることが多いことから、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質の状況、地山の強度特性、土被り等の条件が各坑口で異なるため、その被害発生傾向は不明確な場合が多く、経験的に鉄筋による補強等を覆工に行い、供用しているのが現状である。しかし、近年では山岳ト

ンネルにおいても過大なひび割れや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対策の必要性が高まっている。この場合、より被害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、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、検討を行う必要がある。

本研究では、既設山岳トンネル坑口部における地質条件、斜面傾斜角、トンネルと斜面法線との最小距離(以下、最小距離)、トンネル断面内における地層境(以下、層境)、背面空洞の有無、インバートの有無、

巻厚不足などの地質的・地形的・トンネル構造的な各条件に着目し、地震時の坑口部の地震被害との関係を明らかにするため、FEMを用いた2次元静的弾性解析と2次元動的挙動を把握することが可能な簡易な模型実験により地震時挙動の再現を試み、トンネル構造へ及ぼす影響を検討した。

2. 解析概要

本研究における解析では既設山岳トンネル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。

(1) 解析モデル

解析に用いた物性値を表-1に示す。トンネル、地山とともに線形弾性体でモデル化し、平面ひずみ要素とした。

図-1に解析ステップを示す。既往研究¹⁾を参考に自重解析を行わず、地山とトンネルに外力として変位を与える手法を採用した。外力は、地震力を模擬するために斜面と右側境界にそれぞれ地山モデルに高さの0.2%に相当する水平変位（強制変位）を与えた。

また、本研究で採用したトンネルモデルは、NEXCO設計要領第3集を参考に作成した一般的な2車線道路トンネルであり、打継ぎ目の模擬等はない。掘削径Dは12.1m、覆工コンクリート厚は35cm、吹付けコンクリート厚は20cm、インバート厚は覆工コンクリート厚を考慮して55cmとした。また、坑口部で通常用いられている単鉄筋補強については、基礎的な検討を目的としているため模擬していない。

解析領域は、感度分析の結果から右側4D、下側3Dと設定した。また、解析で設定した境界条件を図-2に示す。解析結果に影響を与えられる斜面と右側境界の境界については、複数の条件を検討した結果、双方ともに自由と設定した。

解析ケースは、トンネル周辺の各条件について図-4に示した6パターンの検討を行った。検討に使用した斜面傾斜角は過去の建設事例を参考に0°～30°までとした。

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
	E	0.05	0.4
覆工・インバート・吹付けコンクリート		22	0.2

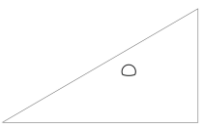
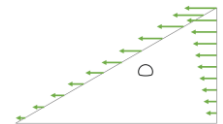
ステップ1	ステップ2
	
地山要素とトンネル要素の定義	外力载荷

図-1 解析ステップ

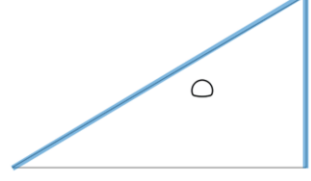
	
右側境界	自由
斜面	自由
備考	地山が拘束なく動く場合を想定

図-2 境界条件

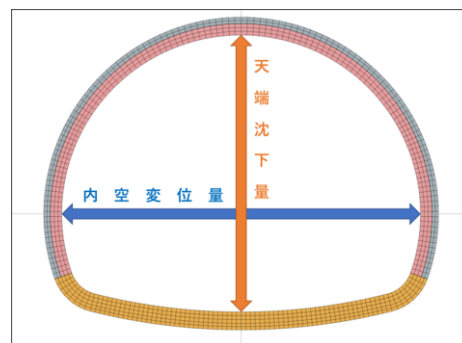


図-3 天端沈下量・内空変位量

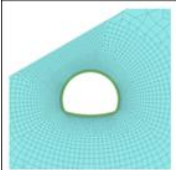
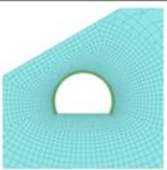
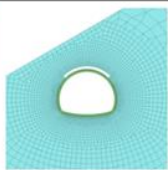
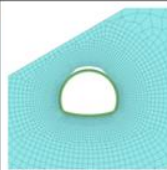
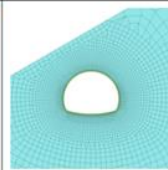
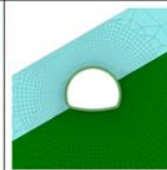
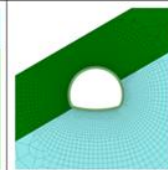
健全	①インバートなし	②背面空洞1	③背面空洞2	④巻厚不足	⑤層境	⑥層境逆転
						
トンネル・地山ともに健全	インバートなし	天端中心より左右45°の範囲に空洞あり	背面空洞1と同条件。空洞の形状を変更	上半・インバート共に厚さ55cm→35cmに変更	上層:E地山、下層:C2地山 ※層境は斜面と並行	上層:C2地山、下層:E地山 ※層境は斜面と並行

図-4 解析ケース

また、土被りのパラメータとなるトンネルと斜面法線との最小距離については $0.5D$ 、 $1D$ 、 $3D$ (D ：トンネル掘削径) の 3 パターンで比較を行った。

(2) 分析項目

本報告では、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、解析結果は図-3 に示す天端沈下量と内空変位量について算定した。天端沈下量とは、トンネルセンターライン上のトンネル内側の節点の測線長の変化量で定義し、内空変位量はトンネルスプリングライン上のトンネル覆工内側の測線長の変化量で定義している。また本研究では天端沈下量・内空変位量ともに、正の値であれば拡大、負の値であれば縮小を意味している。

3. 実験概要

本実験では単純せん断変形を与えることのできる実験装置及び模擬地山、トンネル覆工模型、ウレタンフォームを用いて 2 次元的な挙動を把握することが可能な静的模型実験を行った。

(1) 実験装置

実験装置の概要を図-5 に示す。本装置は長方形に固定された外枠と、外枠側板の 2 か所に取り付けられた载荷棒、内枠から構成されている。外枠の四隅及び内枠天板の端部は直角に固定されている。内枠は底部で外枠と、また内枠天板と内枠側板は蝶番で固定されており、载荷棒は土槽底面から高さ 455mm の外枠側板に取り付けられていて 1 回転で内枠側板を 1mm 強制変位させることができる。载荷棒を押しこむことで変位を与え、長方形から平行四辺形へと変形させることで単純せん断変形を模擬地山およびトンネル模型に与えることを考えた。模擬地山を設置するせん断土槽の寸法は幅 500mm × 高さ 560mm × 奥行き 100mm である。トンネル覆工模型は図-5 に示すように土槽底面から $1.5D$ 、土槽側板から $2D$ (D ：トンネル径) の位置に設置し実験を行った。

(2) 実験材料

表-2 に模擬地山の諸元を示す。模擬地山は 2 種類の直径のアルミ棒を混合したものを用いて作製した。アルミ棒の特徴は、それ自体の材料で自立するため、前後面を壁体で支える必要がなく、試料と前後の壁面間の摩擦が皆無であること、アルミ棒の比重や内部摩擦角が一般の砂に類似していること、扱いやすく繰り返し使用しても物性変化がほとんどないと考えられるため再現性が高いことなどが挙げられる。

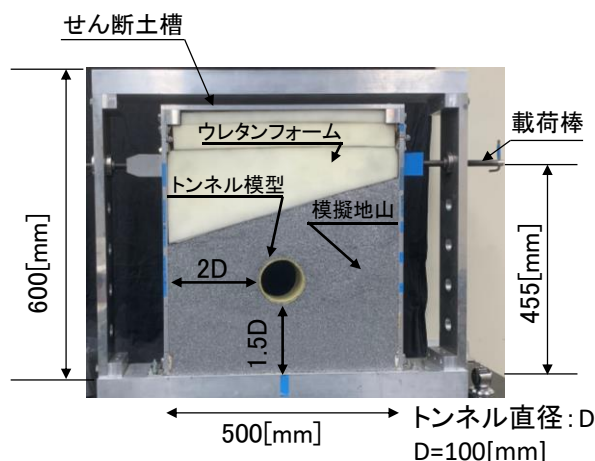


図-5 実験装置概要

表-2 模擬地山の諸元

材質	アルミ合金
長さ (mm)	100
直径 (mm)	1.6 : 3.0
重量混合比	3 : 2
単位体積重量 (kN/m^3)	21.4
粘着力 (kN/m^2)	0
内部摩擦角 ($^{\circ}$)	30

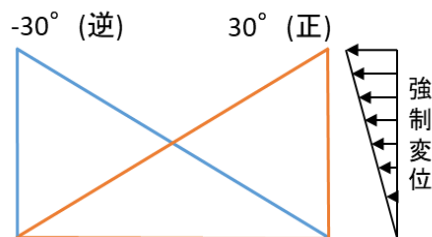


図-6 斜面方向の模式図

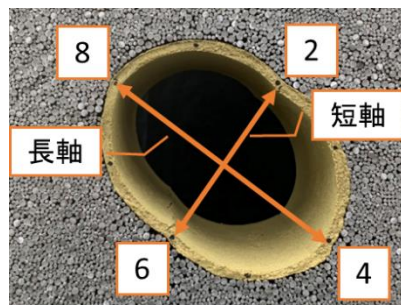


図-7 断面変形量の計測点

トンネル覆工模型は破壊挙動を確認することが目的であるため低強度材料でなければならない。当研究室の既往研究²⁾から、塗壁材に豊浦砂を混合した材料によってトンネル覆工模型を作製しており、これを参考に、本研究では塗壁材、豊浦砂、水を重量混合比 $1:8:4$ で混合したものを使用して模型作製を行う。形状は真円形で寸

法は直径 100mm, 奥行き 100mm, 厚さ 5mm である。

また, 本実験では斜面傾斜角を有する坑口部を再現するため, 実験装置枠内をアルミ棒で充填せず地山を作製した。斜面傾斜角が増加すると模擬地山が自立せず滑り崩れる可能性があるため, 実験装置枠内の空いている部分に予め加工されたウレタンフォームを嵌め合わせることで変形に伴う模擬地山における斜面の崩壊を防止した。

(3) 実験手順

アルミ棒を土槽底板から 150mm の高さまで充填し, 標点を書き入れたトンネル覆工模型を設置した。その後斜面傾斜角及び最小距離が実験条件を満足するようにアルミ棒を充填し, 実験装置枠内の空いている部分に予め加工されたウレタンフォームを嵌め合わせた。その後, 載荷棒を 30 秒おきに一回転させ, 1mm の強制変位を与えるごとに画像解析用カメラで撮影し, トンネル覆工模型の変状を観察した。変位は最大 64mm まで与え, 途中で模型が崩壊した場合はその時点で実験を終了した。実験後はトンネル覆工模型にある標点を天端から時計回りに 45 度間隔で測点 1~8 と設定し, 画像解析によって各測点変位と任意の 2 点間距離を計測した。

実験ケースは, 斜面傾斜角が 0 度, 15 度, 30 度を対象として, 最小距離は 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.5D を対象として各条件の影響を確認するために 12 ケースの実験を行った。また, 振動方向の影響を検討するために 15 度-1.0D, 30 度-1.0D では斜面方向を逆にした 2 ケースの実験を行った。斜面方向は図-6 に示すように載荷棒側に上昇するものを斜面正方向とし, 下降するものを斜面逆方向とする。

(4) 計測項目

実験では模型のひび割れ発生位置・時点および断面変形量を計測した。内側のひび割れは目視により観察し, 外側のひび割れは模型の断面部を観察して位置を判定した。また, 実験後は模型断面に書いた標点を画像解析によって追尾し変位量を計測した。

実験結果で比較を行う際に用いるひび割れ発生時点は, 模型内側のひび割れを観測した時点での与変位で示し, 具体的には測点 2 および測点 6 の近辺でひび割れを観測した際に得られる与変位を平均して表す。また, 断面変形量は図-7 に示すように左右 45 度方向の 2 点間距離をそれぞれ短軸, 長軸として, その変化量で表し, 模型の破壊が発生せず計測可能な与変位 50mm 時点の値を用いて行った。

4. 解析結果

(1) 斜面傾斜角による影響

初めに斜面傾斜角の違いが天端沈下量に与える影響を検討した。図-8 に最小距離 0.5D の場合, 図-9 に最小距離 3D の場合の斜面傾斜角に対する天端沈下量の関係を示す。図-8 から, 基本的には斜面傾斜角が増加するにつれ, 天端沈下量が負の方向に大きくなること, 層境を有する⑤および⑥のケースの場合には, 天端沈下量の絶対量が大きくなること, ケース⑥層境逆転のケースはトンネルの変形モードが逆になり, 斜面傾斜角が増加するにつれ, 天端沈下量が正の方向に大きくなることが分かる。また図-8 と図-9 を比較すると, 基本的には最小距離が増加すると, 斜面傾斜角が増加し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こと, 層境を有する⑤および⑥以外のケースでは天端沈下量が抑制されること, ケース⑥の層境逆転のケースでは天端沈下量の絶対量が突出して大きくなることが分かる。

次に斜面傾斜角の違いが内空変位量に与える影響を検討した。図-10 に最小距離 0.5D の場合, 図-11 に最小距離 3D の場合の斜面傾斜角に対する内空変位量の関係を示す。図-10 より, 層境を有する⑤および⑥以外のケースでは, 斜面傾斜角が増加するにつれ, 内空変位量が正の方向に大きくなることが分かる。また, 図-8 と図-10 の結果と併せて考えると, 最小距離が比較的小さく地質が均質である場合には, 天端沈下量が負, 内空変位量が正となるトンネルの変形は単純な上から圧縮されるような形態であり, 斜面傾斜角が急であるほどトンネルの変形量が大きくなることが考えられる。また, 層境を有する⑤および⑥のケースでは, 斜面傾斜角 20° ~30° までの範囲で特に内空変位量の絶対量が大きくなっていることが分かる。しかし, 5° ~15° の範囲で斜面傾斜角の増加に応じて内空変位量も増えるような規則性が成り立っていないことが分かる。この性質は天端沈下量に着目した場合でも同様の結果が見られたが, 内空変位量について着目した場合の方がより顕著である。また, 図-10 と図-11 を比較すると, 基本的には最小距離が増加するにつれ, 内空変位量の絶対量が抑制されることが分かる。しかし層境を有する⑤および⑥のケースでは, 斜面傾斜角が急であれば内空変位量が大きくなるような規則性が成り立たなくなり, 斜面傾斜角が小さい場合であっても内空変位量が大きくなっていることが分かる。このことから, 斜面傾斜角が小さく, かつ最小距離が大きく(≒土被りが大きい場合), 層境が存在する場合にトンネルには横断方向に対して水平に圧縮されるような変形となっている可能性があると考えられる。

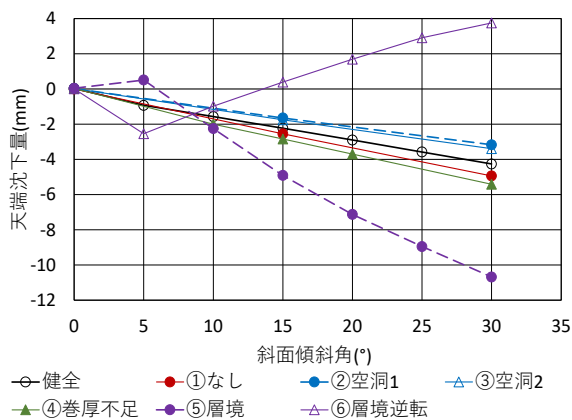


図-8 天端沈下量 最小距離0.5D

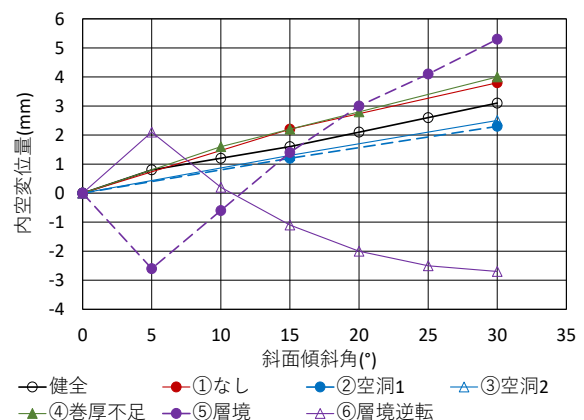


図-10 内空変位量 最小距離0.5D

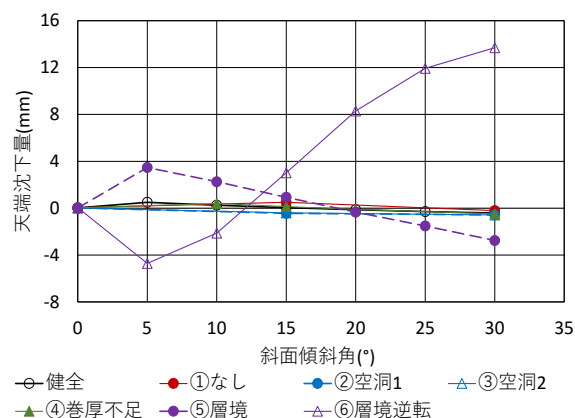


図-9 天端沈下量 最小距離3D

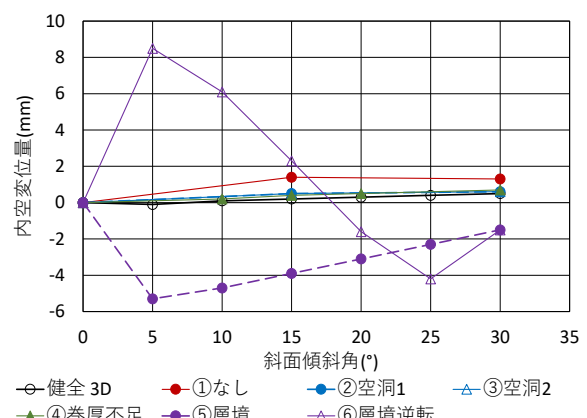


図-11 内空変位量 最小距離3D

(2) 最小距離による影響

図-12 に斜面傾斜角 15° の場合、図-13 に 30° の場合の最小距離に対する天端沈下量の関係を示す。図-12 より、基本的には最小距離が減少するにつれ、天端沈下量が負の方向に大きくなる事が分かる。ただし、層境を有する⑤および⑥のケースでは最小距離の変化による天端沈下量への影響が大きくなり、一概に最小距離が小さいほど天端沈下量の絶対量が大きくなるとは言えないことが分かる。また、⑥層境逆転のケースではその他のケースと比較して、最小距離の大小によるトンネルの天端沈下量に与える影響の傾向が異なり、最小距離が増加するにつれ、天端沈下量が正の方向に大きくなる傾向があることが分かる。また、図-13 より斜面傾斜角が増加するにつれ、いずれのケースでも天端沈下量の絶対量が大きくなっていることが分かる。その他、図-12 と同様に基本的には最小距離が小さい場合に、天端沈下量が負の方向に大きくなり、⑥の層境逆転のケースのみ、他ケースと比較してトンネルの変形モードが逆となり、最小距離が大きい場合に天端沈下量が正の方向に大きくなっていることが分かる。

次に最小距離の違いが内空変位量に与える影響を検討した。図-14 に斜面傾斜角 15° の場合、図-15 に 30° の場合の最小距離に対する内空変位量の関係を示す。図-

14 より、層境を有する⑤および⑥以外のケースでは、最小距離が減少するにつれ、天端沈下量が正の方向に大きくなる傾向にあることが分かる。また健全なケースの場合、最小距離 3D のとき、内空変位量は極めて小さくなり、特殊条件がなく地質が均質である場合は、最小距離（≒土被り）が大きいほど、トンネルの地震時の外力に対する安定性が高まる傾向にあると考えられる。また、層境を有する⑤および⑥のケースの場合、最小距離の変化が内空変位量に与える影響が大きくなり、一概に最小距離が小さいほど内空変位量が大きくなるような単純な規則性が成り立っていないことが分かる。特に⑤のケースでは、最小距離が 2D の場合に内空変位量がほとんど発生しないが、3D の場合には突出して大きくなり、最小距離の変化により結果が大きくなる傾向があることが分かる。また、⑥層境逆転のケースでは、全体として内空変位量の絶対量が大きくなり、最小距離が大きくなるにつれ、内空変位量の絶対量がその他のケースと比較して大きくなっている。

図-15 より、層境を有する⑤および⑥以外のケースでは、図-14 と同様に最小距離が小さい場合、内空変位量が正の方向に大きくなる傾向がある。しかし⑤のケースでは、最小距離が 0.5D や 1D などの特に小さい場合には、内空変位量は正の値で比較的大きくなる傾向にある

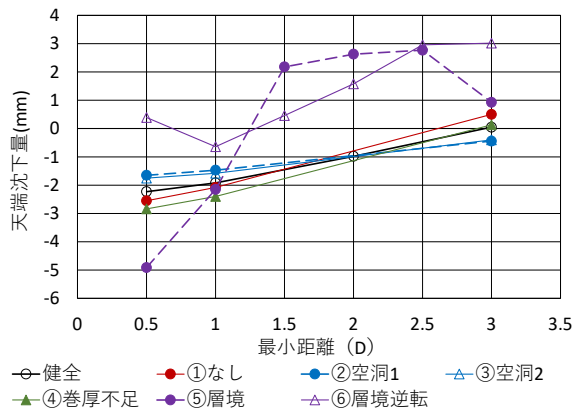


図-12 天端沈下量 斜面傾斜角 15°

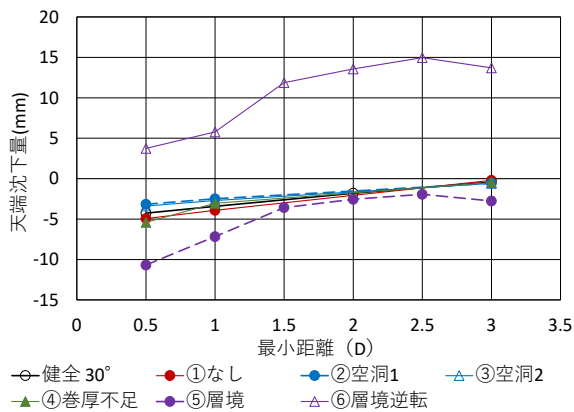


図-13 天端沈下量 斜面傾斜角 30°

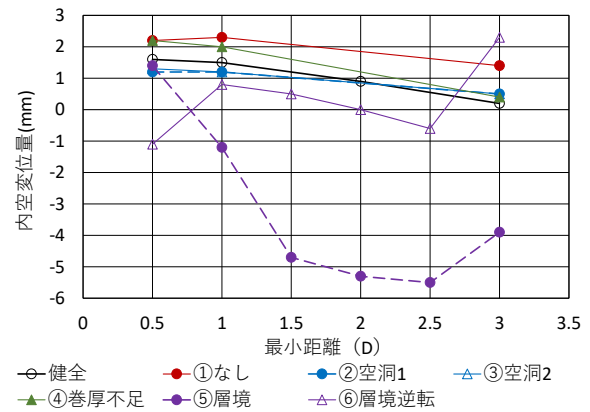


図-14 内空変位量 斜面傾斜角 15°

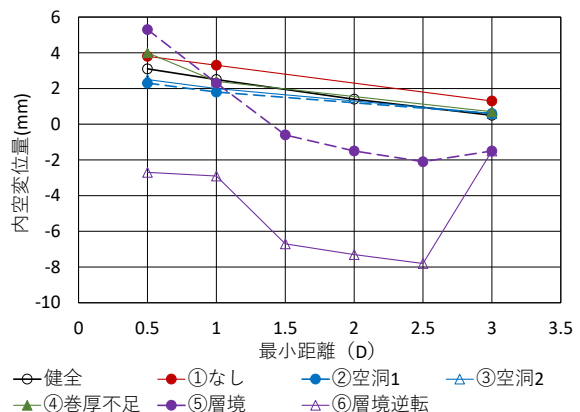


図-15 内空変位量 斜面傾斜角 30°

表-3 感度分析結果 (15° ~30°)

対策優先度	健全との比較 (倍率)	解析ケース	注意項目
1	22.73	⑥層境逆転-3D-30°	角度 (急)
2	7.80	⑤層境-3D-30°	角度 (急)
3	2.93	⑤層境-0.5D-30°	最小距離 (浅)
4	2.83	⑥層境逆転-0.5D-30°	角度 (急)
5	2.74	⑤層境-0.5D-15°	最小距離 (浅)
6	2.09	⑤層境-0.5D-30°	最小距離 (浅)
7	1.67	⑥層境逆転-0.5D-30°	角度 (急)
8	1.55	①インバートなし-0.5D-15°	最小距離 (浅)
9	1.51	⑥層境逆転-3D-30°	角度 (急)
10	1.34	①インバートなし-0.5D-15°	最小距離 (浅)
11	1.31	④巻厚不足-0.5D-15°	最小距離 (浅)
12	1.28	④巻厚不足-3D-30°	角度 (急)
13	1.27	④巻厚不足-0.5D-30°	角度 (急)
14	1.22	①インバートなし-0.5D-30°	最小距離 (浅)
15	1.18	①インバートなし-0.5D-30°	角度 (急)
16	1.15	④巻厚不足-0.5D-30°	最小距離 (浅)
17	0.81	③背面空洞2-0.5D-30°	角度 (急)
18	0.75	②背面空洞1-0.5D-30°	角度 (急)
19	0.72	③背面空洞2-0.5D-30°	最小距離 (浅)
20	0.66	②背面空洞1-0.5D-30°	最小距離 (浅)
21	0.60	③背面空洞2-3D-15°	最小距離 (浅)
22	0.53	②背面空洞1-0.5D-15°	最小距離 (浅)
23	0.38	③背面空洞2-3D-30°	角度 (急)
24	0.28	②背面空洞1-3D-30°	角度 (急)

が、1.5Dの場合には最も内空変位量の絶対量が小さくなり、それ以上の最小距離となると負の値で比較的大きな内空変位量となっていることが分かる。また、⑥のケースでは、いずれの最小距離の場合でも内空変位量は負の値であり、特に最小距離 1.5D~2.5D で値が大きくなり、3D の場合に最も値が小さくなっている。したがって最

小距離が小さいほど内空変位量が大きくなるような単純な規則性が成り立っていないことが分かる。

(3) 感度分析結果

本節では、図-8,9,12,13 に示した斜面傾斜角および最小距離と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、地山もトンネルも健全な場合と比較して、①~⑥のケースの場合、斜面傾斜角が増加した際（または最小距離が減少した際）に天端沈下量がどの程度増加するのか、倍率を用いて傾向を把握することが出来ると考えられる。なお表-3は、回帰直線の変数の選択域を15° ~30° までとした。これは、層境を有する⑤および⑥のケースにおいて、斜面傾斜角に注目した場合に 0° ~10° までの範囲で発生した結果のばらつきによる誤差を取り除いた結果について比較することにある。また、図-12および図-13の⑥層境逆転のケースでは、他のケースと異なり、最小距離が大きくなるにつれて天端沈下量が正の方向に大きくなっていたことから、本節の感度分析結果には含めていない。

表-3 より、斜面傾斜角が増加するにつれ、また、最小距離が減少するにつれて天端沈下量は大きくなるが、この両者の影響を比較すると、斜面傾斜角の変化による影響がより顕著になると考えられる。また、層境を有して

いる場合は天端沈下量が大きくなることも分かる。さらに、層境逆転のケースで最小距離が大きい場合は天端沈下量が特に大きくなることが分かった。さらに、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天端沈下量が大きくなることが分かる。また、単純な倍率の比較から考えると、層境逆転＞層境＞インバートなし＞巻厚不足＞健全＞背面空洞の順で地震対策を講じることが望ましいとも考えられる。しかし、本結果からは健全な場合より背面空洞を有する場合の方が、地震時の天端沈下量が小さくなるという結果となっており、この点については別のアプローチで検討を行う必要があると考えられる。

5. 実験結果

全 14 ケースの実験結果より、模型のひび割れは全ケースで共通して内側のひび割れは測点 2,6 の近辺から、外側のひび割れは測点 4,8 の近辺から発生した。また、ひび割れ発生時点や断面変形量には各ケースで差が生じた。30 度-0.75D のケースでは与変位 53mm で模型が崩壊したが、他の 11 ケースでは与変位 64mm でも模型の崩壊には至らなかった。

(1) 斜面傾斜角による影響

図-16、図-17 に斜面傾斜角に対するひび割れ発生時点の与変位および断面変形量の関係を示す。全ての最小距離において、坑口部と想定される 0 度～30 度の間では、斜面傾斜角が増加するにつれ、ひび割れ発生時点の与変

位が小さくなっており、作用する外力が小さい段階でひび割れが発生することが分かる。また、斜面傾斜角が増加するにつれ、断面変形量が大きくなっており、模型の変形量が増加することが分かる。このことから、トンネル坑口部が位置する可能性の高い斜面傾斜角 0 度～30 度の間においてトンネル坑口部は斜面傾斜角が増加するにつれて安全性が低下する可能性があり、斜面傾斜角の影響を考慮する必要があると考えられる。

(2) 最小距離による影響

図-18、図-19 に最小距離に対するひび割れ発生時点の与変位および断面変形量の関係を示す。全ての斜面傾斜角において、坑口部と想定される 0.5D～1.5D の間では、最小距離が増加するにつれ、ひび割れ発生時点の与変位が小さくなっており、作用する外力が小さい段階でひび割れが発生することが分かる。また 0 度、15 度では最小距離が増加するにつれ、断面変形量が大きくなっているが、30 度では短軸および長軸で 0.75D が最大値となり、0.75D～1.5D の間で断面変形量が小さくなっていることが分かる。これは実験において 0 度、15 度と異なり 30 度では模擬地山が自立しないことや、最小距離が増加することで地山にグラウンドアーチが形成されたことによる影響があることが考えられる。このことから、トンネル坑口部が位置する最小距離 0.5D～1.5D の間においてトンネル坑口部は最小距離の影響を受けて安全性が低下する可能性があることが本実験結果からも窺える。また、地山自体の安定性が地震時の挙動に影響を与えることが推測できるため、更なる検討が必要である。

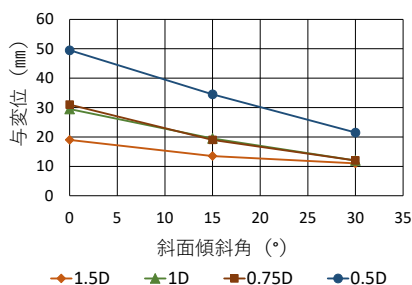


図-16 ひび割れ発生時点-斜面傾斜角

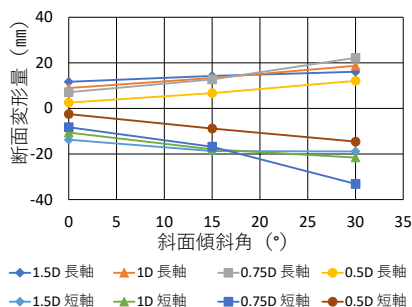


図-17 断面変形量-斜面傾斜角

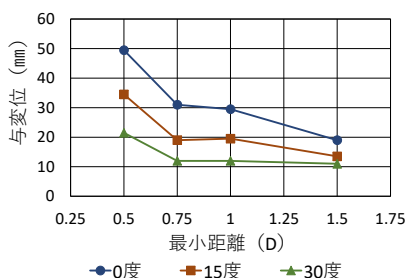


図-18 ひび割れ発生時点-最小距離

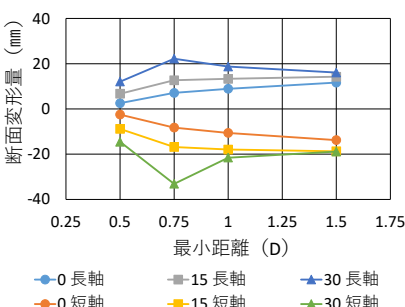


図-19 断面変形量-最小距離

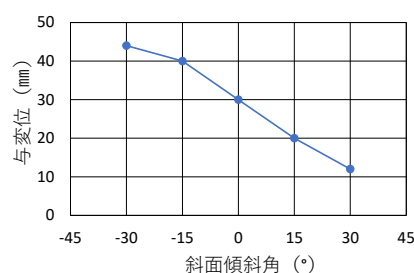


図-20 ひび割れ発生時点-振動方向

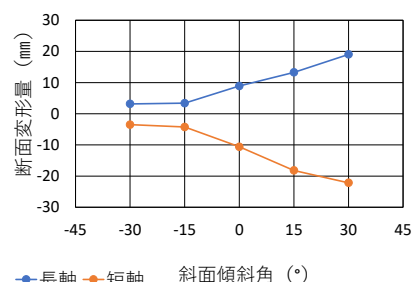


図-21 断面変形量-振動方向

(3) 振動方向による影響

図-20、図-21 に斜面傾斜角に対するひび割れ発生時点の与変位及び断面変形量の関係を示す。斜面逆方向のケースを含めた -30 度 ~ 30 度の間では、斜面傾斜角が増加するにつれ、ひび割れ発生時点の与変位が小さくなっており、作用する外力が小さい段階でひび割れが発生することが分かる。また、斜面傾斜角が増加するにつれ、断面変形量が大きくなっており、模型の変形量が増加することが分かる。このことから、坑口部のような小土被りで斜面傾斜角を有する非対称な地山では振動方向によってトンネルの挙動が変化し、斜面傾斜角が増加するにつれて、トンネル変形量の差が大きくなることが分かる。しかし、実験結果より模型はひび割れの発生とともに剛性が低下し挙動が大きく変化することに加え、地震動によりトンネル及び地山が正負交番の挙動をすることを考慮すると、正負交番載荷時には斜面正方向でひび割れが発生し変形が大きくなるため、斜面傾斜角が増加するにつれて安全性が低下する可能性があると考えられる。

6. 結論

本研究では、既設山岳トンネル坑口部における地質的・地形的・トンネル構造的な各条件に着目し、地震時の坑口部の地震被害との関係を明らかにするため、FEMを用いた2次元静的弾性解析と2次元動的な挙動を把握することが可能な簡易な模型実験により地震時挙動の再現を試み、トンネル構造へ及ぼす影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 解析結果より、同一の地山条件では斜面傾斜角が増加するにつれて天端沈下量および内空変位量が大きくなり、トンネルの変形が大きく現れやすくなる関係にある。また、層境が存在する場合は変形が大きくなり、層境が逆転する場合は変形モードが逆になることが解析的に明らかになった。
- 2) 解析結果より、最小距離が減少するにつれて天端沈下量および内空変位量が大きくなり、トンネルの変形が大きく現れやすくなる関係にあると考えられる。しかし、層境が存在する場合は最小距離の変化によるトンネルの変形量に与える影響の傾向が異なり、規則性があるとは言い難い。
- 3) 解析結果より、斜面傾斜角の増加および最小距離の減少に対する天端沈下量の変化率を比較すると、

斜面傾斜角の増加による影響がより顕著になる可能性があると考えられる。また層境を有している場合は健全な場合と比較して天端沈下量が大きくなることも分かった。さらに、層境逆転のケースで最小距離が大きい場合は天端沈下量が最も大きくなった。さらに、インバートを有していない場合も健全な場合と比較して天端沈下量が大きくなることが分かった。しかし、背面空洞を有するケースでは地震時の天端沈下量が小さくなる結果となり、解析手法も含めた更なる検討が必要である。

- 4) 実験結果より、トンネル坑口部が位置する可能性の高い斜面傾斜角 0 度 ~ 30 度の間において、トンネル坑口部は斜面傾斜角が増加するにつれて安全性が低下する可能性があり、斜面傾斜角の影響を考慮する必要があると考えられる。
- 5) 実験結果より、トンネル坑口部が位置する最小距離 $0.5D\sim 1.5D$ の間において、トンネル坑口部は最小距離の影響を受けて安全性が低下する可能性がある。
- 6) 実験結果より、模擬地山の自立性から地山自体の安定性が地震時の挙動に影響を及ぼすことが推測できるため、更なる検討が必要である。
- 7) 実験結果より、坑口部のような小土被りで斜面傾斜角を有する地山が非対称である場合、振動方向によってトンネル変形量に差が発生し、斜面傾斜角が増加するにつれてその傾向は顕著になると考えられる。

今後の課題としては地山強度や施工法、覆工の非線形性の影響を考慮した数値解析や、模型形状や地山状況を考慮した模型実験を行う必要があると考えられる。また、数値解析および模型実験の結果を比較し、トンネル軸方向の影響も考慮した3次元動的な挙動も含めた検討を行い、地震被害により強い影響を与える条件に関する検討を行う必要がある。

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，pp2-4，平成21年度土木研究所成果報告書，2009。
- 2) 森田倫先，砂金伸治，西村和夫：トンネル覆工の大変形破壊挙動に関する実験的考察，トンネル工学報告集 第30巻，I-40，2020。

(2021. 8. 6 受付)

STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR OF EXISTING MOUNTAIN TUNNEL PORTAL

Akira MATSUOKA, Yuta YAMANISHI, Kosuke KAWATA, Nobuharu ISAGO,
Kazuo NISHIMURA, Hiroshi YAGI, and Hajime KITAMURA

Mountain tunnel is generally considered stable during earthquake, however, it is known that the portal area is prone to seismic damage. Characteristics in portal such as the situation of slope, modulus of ground deformation, and the change of overburden in the area are different for each tunnel, and damage degree effected by them is unclear. In this study, we reproduced the seismic behavior of tunnel portal to investigate the effect considering some parameters above and situation of tunnel in portal by simple static model test and numerical analysis. As a result, the conditions such as the slope condition and minimum distance from slope was confirmed to much influence on the mechanical behavior at tunnel portal.