

振動方向が山岳トンネル坑口部の挙動に及ぼす影響に関する実験的考察

東京都立大学 ○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 中島康介

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、斜面の傾斜角や地山の物性値、土被り等の条件が坑口毎に異なるため、その被害の傾向は不明確な部分が多く、現在、新設されている山岳トンネルにおいては、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、トンネルに対する耐震対策の必要性が高まっている。この場合、より地震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、そのためには、トンネル坑口部に関して地震被害を受ける可能性が高い条件について検討を行う必要がある。

本研究では、地震の坑口斜面に対する振動方向の影響に着目し、斜面傾斜の向きを変更し、左右の変形モードを変化させた静的な模型実験により坑口部の地震時挙動の基礎的な再現を試み、覆工模型の破壊挙動を検討した。

2. 実験方法

本研究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、トンネル模型、ウレタンフォームを用いて実験を行う。

2. 1 実験装置及び実験材料

図-1 に実験装置の概要を示す。本実験装置は载荷棒を回転させることで変位を与え、土槽を長方形から平行四辺形へと変形させることでせん断変形を模擬地山及びトンネル模型に与えることができる。

模擬地山はアルミ棒積層体を用いて作製した。アルミ棒は 1.6mm と 3.0mm の 2 種類の直径のものを混合したもので実験の再現性が高く、一般の砂の内部摩擦角に近いことから採用した。

トンネル模型は真円形とし、寸法は直径 100mm、奥行き 100mm、厚さ 5mm である。模型の材料は塗壁材及び豊浦砂、水を重量混合比 1:8:4 で混合したものを使用した。

2. 2 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模型を設置した。その後に斜面傾斜角及び土被りが実験条件を満足するようにアルミ棒を充填した。斜面傾斜角が大きくなると模擬地山が自立せず滑り崩れてしまうため、実験装置の枠内の空洞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斜面の崩壊を防止した。その後、载荷棒を 30 秒おきに一回転させ、1mm の強制変位を与えた。変位は最大で 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。実験中は、画像解析用カメラでトンネル模型を撮影するとともに、目視によりひび割れを観察し記録した。実験後は、画像解析によってトンネル模型に書き入れた各標点の変位量と任意の 2 点間距離を計測した。

実験ケースは、斜面傾斜角が 0° 、 15° 、 30° を対象として、土被りは 1.0D を対象として、斜面方向は強制変位の载荷方向を基準として図-2 のように正と逆の方向に対して角度を正負で定義し、全 5 ケースの実験を実施した。

キーワード 山岳トンネル、坑口部、斜面、地震、模型実験

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)

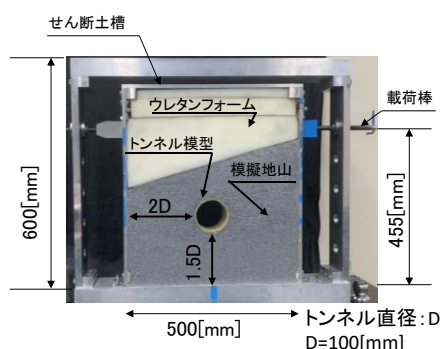


図-1 実験装置の概要

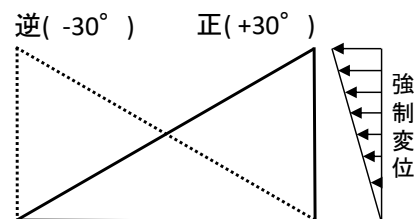


図-2 斜面方向の概要

2. 3 検討項目

本研究では、初期ひび割れ発生時点の与変位、ひび割れ発生位置、断面変形量の3項目を検討した。初期ひび割れ発生時点の与変位は、模型内側のひび割れを観測した時点のものを示し、測点2,6の近辺で観測した2箇所の平均値として表す。ひび割れ発生位置は、せん断変形過程において模型にひび割れが発生した位置を記録した。また、**図-3**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、距離の変化量を断面変形量とした。断面変形量は全ケースで計測可能な与変位60mm時点での値を用いて比較を行った。

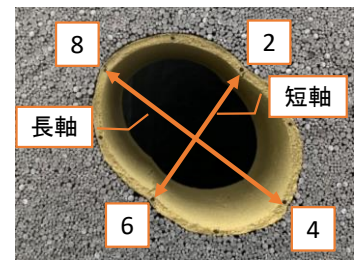


図-3 短軸，長軸の概要

3. 実験結果

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、初期ひび割れ発生時点の与変位や断面変形量には各ケースで差が生じた。また、全てのケースで64mmまで強制変位を与えても模型は崩壊に至らなかった。

3. 1 振動方向の影響による考察

図-4、**図-5**に斜面傾斜角に対する初期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。斜面正方向の $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の間では、斜面傾斜角が増加するにつれて、初期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。

対して、斜面逆方向の $-30^{\circ} \sim 0^{\circ}$ の間では、斜面傾斜角が負方向に増加、すなわち -30° に近づくにつれて、初期ひび割れ発生時点の与変位が大きくなり、作用する外力が大き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、断面変形量が小さくなっており、模型の変形量が減少することが分かる。

これは、斜面方向が正から逆になることによって模型が潰れる短軸方向に存在する地山が減少し、模型が押し出される長軸方向に存在する地山が増加したため、模型に作用する荷重が小さくなり変位が抑制されやすくなったと考えられる。

以上のことから、坑口部のような小土被りで斜面傾斜角を有する地山で、相応の斜面の崩壊が防止されている前提では、振動方向によって地山形状がトンネル構造へ与える影響が変化することが確認できる。

斜面傾斜角が増加しても、振動方向によりひび割れ発生位置は変化せず変形モードは同様だが、変形量の差が大きくなることを確認できる。斜面逆方向では斜面傾斜角が増加するにつれ、初期ひび割れ発生時点の与変位は大きくなり、断面変形量は小さくなるが、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、地震動によるトンネル及び地山の変形が正負交番であることを考慮すると、トンネル坑口部が位置する可能性の高い斜面傾斜角 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の間においてトンネル坑口部は斜面傾斜角が増加するにつれて地震時の安全性が低下する可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究では模型実験によりトンネル坑口部の地震時挙動を再現し、振動方向がトンネルへ与える影響について検討した。実験結果よりトンネル坑口部では、地震時挙動による地山及びトンネルの振動方向の変化によって模型の変形量やひずみに差異が生じることを確認し、斜面傾斜角が増加するにつれてトンネル坑口部は地震時の安全性が低下すると考えられる。今後の課題としては、ひび割れ発生後における逆方向の変形時や交番載荷時のトンネルの挙動や、トンネル軸方向の影響を考慮したより詳細な検討が必要であると考えられる。

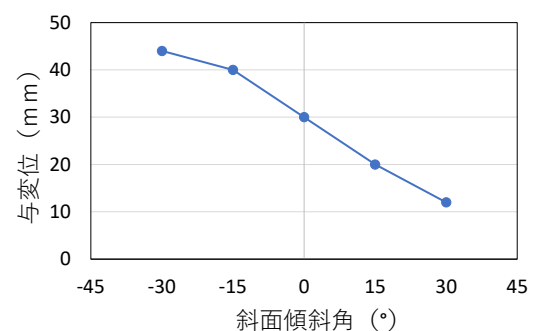


図-4 初期ひび割れ発生時点の与変位

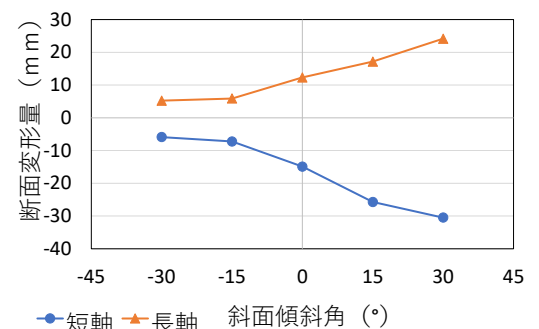


図-5 断面変形量