

正断層・逆断層変位を受ける山岳トンネルの損傷メカニズム—遠心模型実験による検討— Damage Mechanisms of Mountain Tunnels Subjected to Normal and Reverse Fault Displacement: A Centrifuge Model Study

○鴨井 泰人・曾 冠雄・澤村 康生・岸田 潔
○Yasuhiro KAMOI, Guanxiong ZENG, Yasuo SAWAMURA, Kiyoshi KISHIDA

In this study, the mechanical response of mountain tunnels under active fault displacement was revealed through centrifuge model experiments using an apparatus capable of simulating both normal and reverse fault displacement. Experiments confirmed distinct differences in response mechanisms. In reverse faults, compressive strain was detected in the axial direction throughout the model, and earth pressure acted over a wide area. In contrast, normal faults induced axial tensile strain, with earth pressure concentrated near the fault plane. These findings revealed that the difference in mechanical response was due to the difference in earth pressure distribution.

1. 研究背景と目的

日本は山岳トンネルの数や総延長で世界有数の規模を誇る一方で、多数の活断層が密集する国でもあり、断層帯を横切って建設されたトンネルは少なくない。交差している断層に変位が生じた際は、トンネルが損傷することが報告されており¹⁾、こうした被害を低減するためには、トンネルが断層変位を受けた際の挙動を明らかにすることが必要である。既往の研究で、正断層と逆断層ではトンネルが示す力学的応答が異なり、正断層では引張損傷が断層近傍で発生する一方、逆断層では圧縮損傷が広範囲で生じるという報告があるが²⁾、そのメカニズムは明らかとなっていない。そこで本研究では、正断層及び逆断層の変位を受けるトンネル挙動を模型実験で再現し、損傷メカニズムを解明することを目的に遠心模型実験を行った。

2. 実験装置

本研究では、京都大学防災研究所所有の遠心載荷装置を利用し、遠心模型実験を行った。使用した実験装置の概要を図1に示す。以下、寸法はすべて模型スケールで記す。本実験装置は、壁面の一部がL字型の可動枠で構成された土槽部分と、可動枠を動かす載荷機構により構成されている。載荷機構には、水平方向と鉛直方向にそれぞれ2つのモーターを設置し、モーターの回転を変換して可動枠に変位を与えることで断層変位を再現した。また、トンネルと断層の交差位置を明確にする目的で、断層面を直線状に再現するための断層ガイドを作製し、模型の挙動に影響を与えないよ

う図1の斜線に示す位置に設置した。

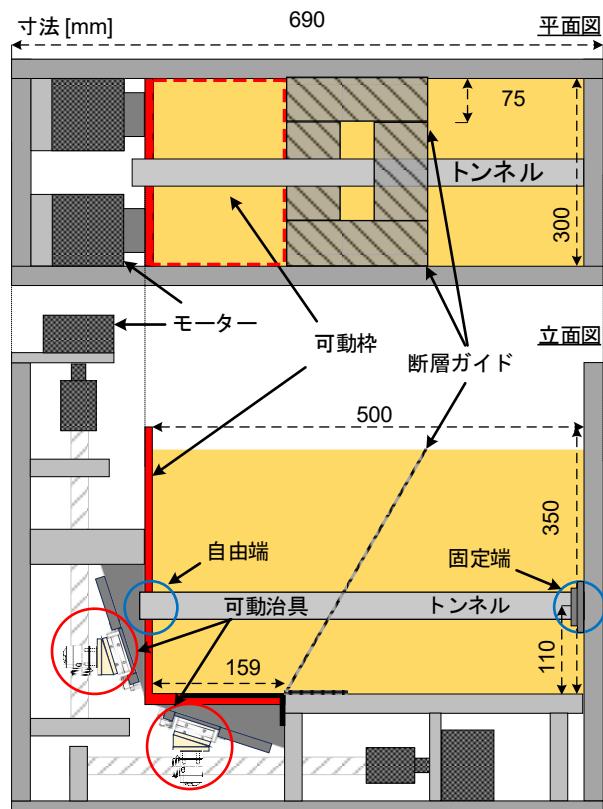


図1 実験装置の模式図

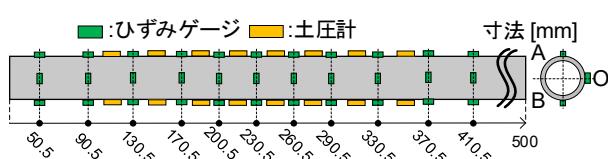


図2 トンネル模型の模式図

実験模型について、模型地盤には乾燥豊浦砂を使用し、相対密度 80%を目標に突き固め法によって作製した。また、底面から 110mm の位置にアクリル製のトンネル模型（外径 30mm、厚さ 2mm, $E = 2.7 \text{ GPa}$ ）を設置した。この模型は、地盤との相対剛性が実物のものと一致するように選定した。トンネル模型には図 2 のようにひずみゲージと土圧計を貼り付けた。

本実験では遠心加速度 50G のもと、断層角 60°の断層を再現し、鉛直方向の変位が 16mm となるよう載荷した。

3. 実験結果と考察

図 3 には模型上下に貼り付けたひずみゲージより算出した、軸ひずみと曲げひずみの分布を示す。ここで、軸ひずみは軸方向の伸びを正、曲げひずみは模型の上面が圧縮され下面が伸張する変形を正とした。軸ひずみに着目すると、逆断層では圧縮ひずみが発生する一方で、正断層では引張ひずみが作用することが確認できる。次に曲げひずみに着目すると、逆断層では断層との交差部においてほとんど 0 の値を示し、断層面から離れた地点で最大値を示す一方、正断層では断層との交差部で最大値を示した。

図 4 には側方ひずみと土圧の分布を示す。側方ひずみとは模型の側面に発生する鉛直方向のひずみで、値が大きいほど断面が橢円のように変形していることを示す。側方ひずみに着目すると、正断層では断層面周辺でピークを示す一方、逆断層では断層面から離れた地点で 2 つのピークを示した。これらのひずみの分布の違いは先行研究の報告²⁾を支持する結果となった。

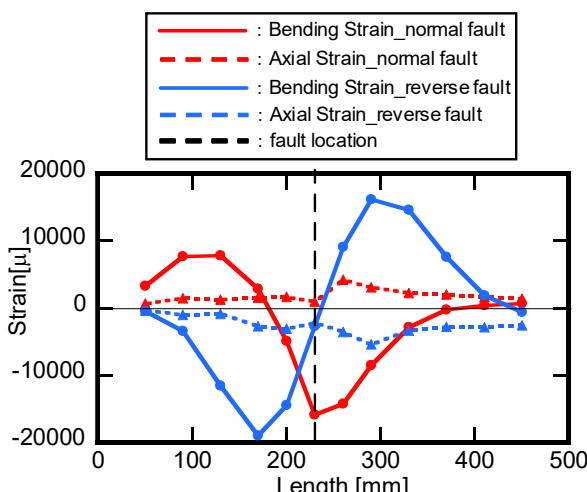


図 3 軸ひずみと曲げひずみの分布

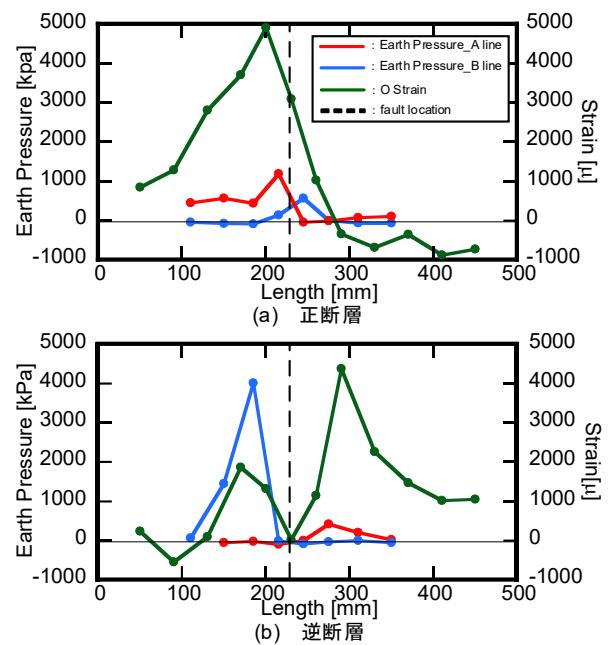


図 4 側方ひずみと作用した土圧の分布

土圧の分布に着目すると、正断層では最大値が断層面周辺で現れ、狭い範囲に土圧が集中している。一方で逆断層では、断層面から離れた地点で最大値が現れ、広い範囲で土圧が作用することが示された。これらの結果から、ひずみの分布は土圧の分布に連動しており、トンネルの変形の違いは、土圧の分布が異なるためであることが確認された。

4. まとめ

本研究では、断層変位を受けるトンネルの損傷メカニズムを解明するため遠心模型実験を実施した。実験で計測した各種ひずみの分布は先行研究の結果²⁾と一致するものとなった。また、トンネルの損傷に違いが生じる原因是、作用する土圧の分布が異なるためであることが明らかになった。これらの結果は、断層の種類に応じた対策を施す必要性を示唆しており、さらなる研究により、どのような対策が効果的か議論する必要がある。

5. 参考文献

- 1) 小野田耕治、楠山豊治、吉川恵也: 伊豆大島近海地震による被害 (1) 鉄道トンネルの例、トンネルと地下, 9(6), pp.9-16, 1978.
- 2) Zhong, Z., Wang, Z., Zhao, M., and Du, X.: Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement, Tunneling and Underground Space Technology, 104, 103527, 2020.