

欠陥を有するトンネルの耐震性能の明確化と欠陥対策工の設計方法の提案

横浜国立大学 ○崔 瑛 1*
京都大学 岸田 潔 2**

トンネル	ゆるみ領域	空洞
欠陥	劣化	耐震性

研究の目的

高度成長に矢板工法により施工されたトンネルにおいては、当時のコンクリート打設技術や施工管理方法等に起因して、天端部に巻厚不足や背面空洞、ゆるみ領域が存在することが報告されている。さらに、供用から数年～数十年経過したトンネルにおいて、周辺地山の強度の低によって、覆工の剥落や盤ぶくれ等が発生する事例がしばしば報告されている。このような欠陥を有するトンネル（以下、欠陥トンネル）は、地震時にトンネル覆工の構造耐力が低下し、崩壊に至る恐れがあり、その耐震性能の見直しと対策工の実施等課題が山積している。このような欠陥トンネルに対し、現場ではトンネルの裏側から薬液を注入するなど対策を講じているが、その効果の力学的な意味合いは明確ではない。以上の背景より本研究では、トンネルの裏に空洞もしくはゆるみ領域といった劣化領域が存在する場合、その劣化領域がトンネルの地震時挙動について検討した。さらに、補修をモデル化した模型実験を行い、局所的な地盤補強がトンネルの地震時挙動に及ぼす影響について調べた。

研究の内容

本研究では主に、二次元アルミ積層振動台装置を開発し、欠陥トンネルの常時・地震時挙動について検討した。具体的には、劣化領域の強度や位置がトンネル周辺地盤の変形やトンネルへの土圧分布に及ぼす影響、さらに補修によるトンネルの力学状態の変化について調べた。

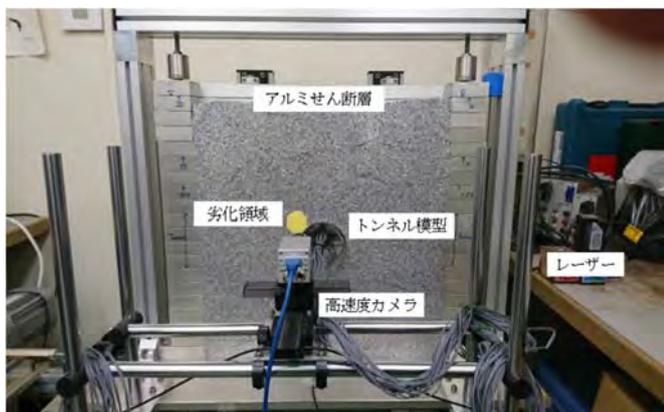


図1 二次元アルミ積層振動台装置

模型実験の概要

図1に本研究で開発した実験装置はせん断槽と振動台に分けられる。せん断槽は全20段のコの字型のアルミブロックにより構成されている。各ブロックは高さ25mm、幅500mmで、コの字型の断面になっており、凹の部分にアルミ積層体を作製することができる。各ブロックの間には、リニアフラットローラを設置しており、各アルミブロックは自由に水平移動することができる。さらに背面にはローラを設置したことにより、各せん断ブロックのスムーズな水平移動を確保するとともに、振動によるせん断槽の転倒も防止することができる。なお、最上層のブロックはボールベアリングより上への変位を抑え、各せん断層の無用のズレを抑えた。なお、振動台は変位および周波数を変更することができ、本研究では最大約100galの加速度が得られるように変位制御を行った。

本実験では、長さ50mmの円形断面のアルミ棒を積み上げて、2次元平面ひずみ状態のアルミ積層体を模型地盤として作製する。アルミ棒は、1.6mmおよび3.0mmの2種類を重量比3:2で混合し、粒形加積曲線が豊浦砂とほぼ相似である。一方劣化地盤は現地盤に比べて低い強度や剛性を有すると仮定し、アルミ積層地盤より剛性の低いスポンジを成型し、所定形状の劣化領域を再現した。

(図2) 本実験では一律に、加速度の振幅100gal、周波数1Hzのsin波になるように、振動台の変位を制御した。

振動を与える直前から、高速度カメラ(KATO KOKEN, k7-USB)による地盤の変位状況の撮影、トンネル覆工に発生するひずみ、振動台の変位及び加速度、地盤最上部におけるせん断槽の変位の計測を行った。なお、覆工に発生するひずみは、トンネル天端、左右肩部、左右スプリング、左脚部の計7か所の表裏で計測しており、覆工に発生する軸力と曲げモーメントを計算した。

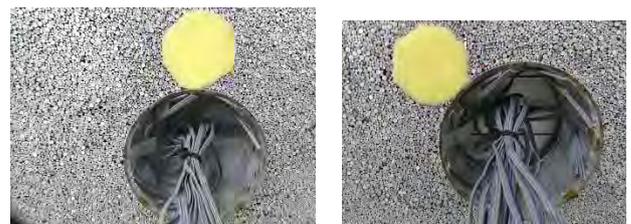


図2 トンネル覆工および劣化領域のイメージ

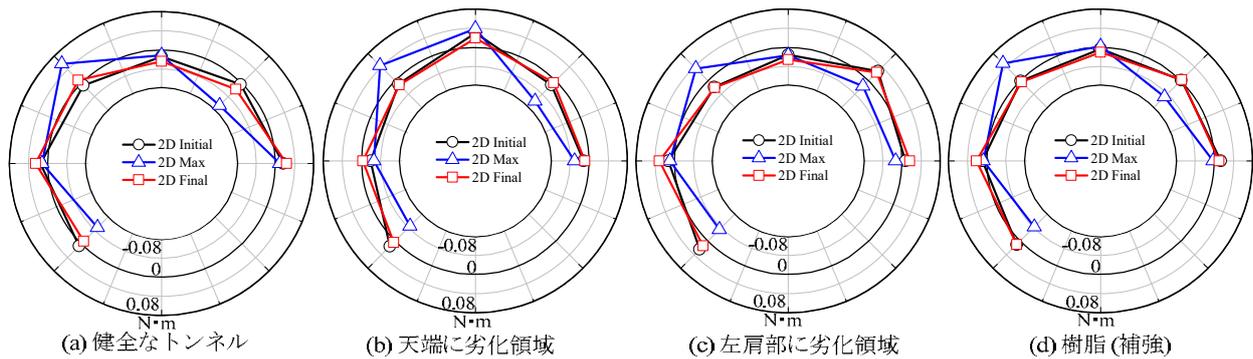


図3 劣化領域および補強による曲げモーメント分布の変化(土被り2D)

実験結果

本研究では、土被り、劣化領域の形状、位置、剛性、および補強の有無等をパラメータとし、それぞれの状態におけるトンネルの常時・地震時の挙動について検討した。図3に、土被り2D(Dはトンネル覆工の直径)の場合、劣化領域の位置や補強を施した場合の曲げモーメント分布を示す。以下の検討では、加振前、加振後10波目の最大加速度発生時、および加振終了後の曲げモーメントを用いて議論を進める

図3(a)は、劣化領域がなく健全なトンネルに発生する曲げモーメント分布である。加振前(Initial)および加振後(Final)は(以下平常時)上下に収縮、横に広まるような変形モードとなっている。加振時において、平常時における数倍の曲げモーメントが発生し、最大の曲げモーメントが左肩部に発生する結果が見られる。すなわち、通常トンネルに強いと言われるトンネルの場合も、地震時挙動をしっかりと検証する必要があることを示唆している。

図3(b)は、トンネルの天端上部に劣化領域が発生した場合、図3(c)はトンネル左肩部(センターラインから左45°)に発生した曲げモーメントを示す。平常時に発生する曲げモーメントに着目すると、劣化領域の発生により覆工の変形モードが大きく変化することが分かった。健全なトンネルは平常時に横方向に扁平に変形することに対し、天端上部に劣化地盤が発した場合は、覆工が上下に長く左右に縮み、縦長に変形することが分かった。これは劣化領域が天端部背面に存在することで上載土の重量が減少し、トンネル模型上部の拘束圧が小さくなったためと考えられる。一方、左肩部に劣化が発生した場合は、平常時においてもトンネルに大きい変圧が作用することが判明された。一方、地震時の挙動を比較すると同時刻を比較したことを反映し、いずれのケースにおいても、左肩部で大きい曲げモーメントが発生する。

本実験において、注入による改良領域は上述の劣化領域の模型を同じ寸法になるよう、ウレタン樹脂により成

型した。図-3(d)にその結果を示す。加振時の曲げモーメント分布は他のケースと同様に左肩部で最大の曲げモーメントを示し、トンネル模型は左側に傾いた状態で扁平している。初期状態の天端における曲げモーメントは、各土被りではほぼ0に近い値を示しており、他のケースに比べてトンネルの変形が非常に小さいことが分かる。これは、ウレタン樹脂が健全な地盤より剛であるために、トンネル周辺地盤の変形が小さく、結果として平常においてはトンネル覆工に発生する曲げモーメントが抑制されるためである。一方、地震時においてはほかのケースとほぼ同じ結果を示しており、さらに局所的な応力集中も確認できていない。

研究の成果、新知見

以下に、本研究で得られた知見を示す。

- ① 天端に劣化領域発生した場合、いずれの土被りにおいても健全なトンネルは横に扁平になるように変状することに対し、劣化領域がある場合は、縦長に変状する。
- ② 劣化領域が中心から離れた箇所が発生した場合は、トンネル覆工に変圧が作用し、それによってトンネルの平常時の安定性も大きく影響されることが分かった。
- ③ 剛な材料で劣化領域を補強した場合、トンネル周辺地盤は剛性が増大することによって周辺地盤の変状が抑制され、その結果トンネルの変状も抑制できる。

今後の予定

本研究の最終ゴールは、周辺地盤の劣化が予想されるトンネルに対し、その有効的な補強方法を提案することである。今後は次の内容で研究を進める。

- ① 劣化領域の形状、寸法、位置による影響を調べるため、模型実験を継続して実施する。
- ② 模型実験に対する有限要素解析を実施し、劣化領域による影響のメカニズムを明確にする。
- ③ 実現場のデータを収集した上、実現場に対して有限要素解析を実施し、②で導いたメカニズムの検証し、補強方法の提案を目指す。

*横浜国立大学 都市イノベーション研究院

**京都大学大学院工学研究科

* Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University

** Faculty of Engineering, Kyoto University