

山岳トンネルにおける変状対策工の耐震効果に関する実験的検討

東京都立大学 ○福島実奈歩 松岡輝 河田皓介 砂金伸治

国立研究開発法人土木研究所 目下敦

1. はじめに

山岳トンネルは一般に地震に対して比較的強い構造物とされてきたものの、近年発生した新潟県中越地震や熊本地震などにおいては、数は限られるものの覆工の崩落等の大規模な被害が発生している。しかしながら、地震動や地山の性状は不確実性に富むためその被害規模を予想することは容易でなく、現在新設されている通常の道路トンネルにおいては、経験的に覆工に単鉄筋による補強を行うのみに留まっている。一方、既設トンネルにおいては、いわゆる変状対策として行われる炭素繊維シートを用いた内面補強工やロックボルトによる覆工の補強が行われているものの、それらの補強に耐震対策としてどの程度定量的な効果が期待できるのかは不明確であり、それゆえ、山岳トンネルにおける耐震対策はいまだ確立されていないのが現状である。

本研究では、山岳トンネルにおいて一般的に用いられている変状対策工を耐震対策工として適用する場合の効果を概略的に把握するため、山岳トンネルならびに変状対策工を模擬した二次元静的載荷実験を実施し、地震による外力を想定した載荷条件下において変状対策工がトンネル構造へおよぼす影響について検討した。

2. 実験概要

実験装置を図-1、実験模型の概要を図-2に示す。本実験は、鋼製の壁で囲まれた土槽の1辺から油圧ジャッキにより静的な荷重を与えるものである。載荷方向は過去の地震被害事例¹⁾を参考に鉛直方向とした。土槽の大きさは縦・横1.2m、深さ0.3mであり、土槽内には地山および覆工模型を設置した。油圧ジャッキ1台の載荷能力は400kNである(1辺に3台設置するため合計1200kN)。土槽には鋼製の蓋を設置し、平面ひずみ状態と想定した。

地山および覆工模型の配合条件を表-1 に示す。模型の大きさは日本の 2 車線道路トンネルの 1/20 程度を想定した。地山模型には貧配合モルタルを使用し、目標の一軸圧縮強度を 0.5MPa、覆工模型にはプレーンモルタルを使用し、目標の一軸圧縮強度を 18MPa とした。計測項目はジャッキの載荷荷重、覆工内部の変位、周方向ひずみとし、ひび割れや破壊状況を目視で観察した。

実験ケースおよび実験条件ならびに結果を表-2に示す。本研究では、対策工なしと3種類の対策工（単鉄筋、ロックボルト、炭素繊維シート）を想定した。単鉄筋は、覆工中央10mmの位置に直径1mm、10mm間隔の金網を設置した。ロックボルトは、直径3mm、長さ150mmの真鍮棒を軸方向に2層で設置し、アーチから側壁部にかけて周方向に計9本、22.5°ピッチで配置した。シートは、目付50g/m²の炭素繊維シートをアーチから側壁部の全面に接着した。

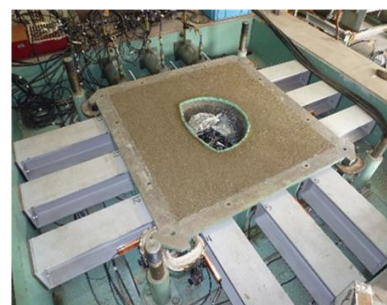


図-1 実験装置

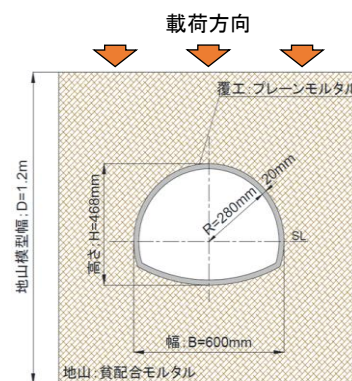


図-2 実験模型の概要

表-1 地山および覆工の配合条件

実験模型	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	砂	AE 減水剤
地山 (貧配合モルタル)	191.8	105.5	55	1000	—
覆工 (プレーンモルタル)	66.8	235	352	1575	3.52

キーワード 山岳トンネル, 地震, 耐震対策, 変状対策, 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)

表-2 実験ケースおよび実験条件ならびに結果

No.	対策工	材料	材料特性				曲線変化点 の荷重 (kN)
			地山	覆工			
			UCS (MPa)	UCS (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	
#1	なし	ー	0.431	24.7	15.0	0.19	500
#2	単鉄筋	金網	0.444	18.8	12.5	0.19	430
#3	ロックボルト	真鍮	0.566	21.1	14.4	0.19	610
#4	シート	炭素繊維	0.465	32.3	17.3	0.20	800

3. 実験結果

鉛直内空変位ならびに水平内空変位と載荷荷重の関係を示した荷重変位曲線を図-3 に示す。なお、内空変位の正は断面の縮小を示している。

単鉄筋の場合は、構造の挙動が変化したと考えられる曲線の変化点（以下、曲線変化点と称する）の荷重が対策工なしよりも小さい。ただし、覆工模型の一軸圧縮強度が他のケースと比較して 3 割程度小さいことも考えられるため、結果の解釈には注意が必要である。また、載荷方向の最終変位は対策工なしよりも大きいですが、これは外力により変状は発生したものの、単鉄筋を模擬した材料の拘束により構造が完全な崩壊まで至らなかったことを示唆していると考えられる。

ロックボルトの場合は、曲線変化点の荷重が対策工なしよりも反対に大きいことから、ロックボルトの設置によっては構造の挙動が変化するような変状の発生を遅らせることができる可能性があると考えられる。また、鉛直・水平内空変位ともに最終変位が他のケースと比較して大きいですが、これは前述と同様、外力により変状は発生したものの、ロックボルトの縫付け・吊下げ効果があることで完全な崩壊まで至らなかったことを示唆していると考えられる。

シートの場合は、単鉄筋やロックボルトの場合と挙動がやや異なり、初期の挙動では他のケースと比較して変形が抑制されている。これは発生するひび割れがシートにより抑制され、引張に対しての抵抗が増加したためであると考えられる。一方、曲線変化点以降に変位が急激に増加しており、これはある一定の引張力によりシートが破断またははく離し、構造としての変形が急激に進行したためと推測される。しかしながら、曲線変化点以降でも荷重が急激に減少していないことから、シートの設置状況によっては他のケースと比較して崩落までの猶予を期待でき、実際の破壊に至るまでの変形自体の余裕を確保できる可能性がある、すなわち耐震対策としての効果を一定程度は期待できる可能性があると考えられる。なお、直接覆工の変状を目視できないことには注意を要し、また、構造の挙動が変化するような変状の発生を遅らせる効果に関するメカニズムの解明にはさらなる検討が必要である。

以上より、単鉄筋、ロックボルト、シートはいずれも引張部材であるため、コンクリートの圧縮破壊そのものを抑制することは難しいものの、鉛直載荷時の天端内側のように引張が作用する局所的な箇所においてのみ、覆工の破壊や崩落を一時的に遅らせることができる可能性があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、山岳トンネルで一般的に用いられる変状対策工を模擬した模型実験を実施し、地震時の外力を想定した載荷条件下において変状対策工がトンネル構造へおよぼす影響について検討した。その結果、これら変状対策工には、例えば、構造の挙動が変化するような変状の発生を遅らせる効果や、覆工の崩落時の挙動におよぼす効果が見られ、耐震対策としての効果も期待できる可能性があることが示唆された。今後はこれらの対策工のより詳細な効果や効果的な適用を踏まえた構造の力学的挙動に関してさらなる検討が必要である。

参考文献

1) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害，トンネルと地下，Vol.36，No.11，pp.55-63，2005.

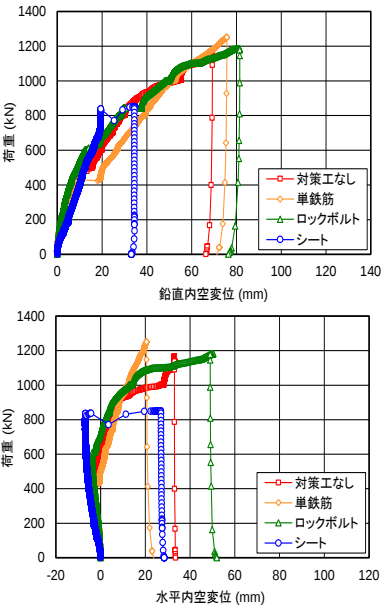


図-3 荷重変位曲線