

特集：土工・舗装・トンネルにおける維持管理の取組み

山岳トンネルにおける耐震対策工の効果に関する実験的考察

河田 皓介・砂金 伸治・日下 敦・真下 英人

1. はじめに

主として岩盤内に構築される山岳トンネルは地震に対して比較的強い構造物であると考えられている。しかし、2004年の新潟県中越地震などの地震において、覆工が崩落し、大規模な補修・補強が必要となるような被害が生じる事例が見られた¹⁾。これらを受けて、山岳トンネルと地震に関する研究は進められているものの²⁾、山岳トンネルが地震時に受ける荷重を規定することが困難であるなどの理由により、明確な耐震設計の確立には至っていないのが現状である。

過去の地震において被災したトンネルは、坑口部等の低土被り部や断層破碎帯などの地山が劣化しているなど、特殊な条件が介在し、変状が発生している場合が多い。既設トンネルにおいて通常は、定期点検等により変状を発見した場合にその状況や発生原因を把握し、得られた条件に見合う変状対策を実施している。この対策は耐震対策としての効果も期待される³⁾が、本来は変状が生じた覆工の健全性を確保するものであり、地震に対する効果について検証されている例は少ない。

本研究では山岳トンネル覆工の健全性を確保するために用いられている対策が耐震性の向上にどの程度寄与するのか、その効果とメカニズムを解明するため、山岳トンネルを模擬した模型を用いて載荷実験を実施した。本稿において、その結果を報告する。

2. 模型実験の概要

2.1 実験装置および実験模型

本実験には（独）土木研究所が所有する写真-1に示す実験装置を用いた。この装置は土槽部分の四方を鉄製のフレームで囲まれ、3方向を鋼材で固定、1方向に載荷用の油圧ジャッキを設置しフレーム（載荷盤）が可動することで土槽の一面を一様に載荷できるものである。設置可能なジャッキは一面あ

たり3本で、1本あたりの最大荷重は約400kN（一面あたりの合計は約1200kN）である。また、土層上部に蓋をすることで、模型深さ方向の変位は概ね拘束される。

図-1に実験模型の概要を示す。模型は地山を貧配合モルタル、覆工をプレーンモルタルにより作製した。また、模型の目標一軸圧縮強度は地山を0.5N/mm²、覆工を18N/mm²とした。覆工模型は2車線道路トンネルの約1/20の大きさとした。

2.2 計測項目および方法

本実験では載荷時のジャッキと載荷盤の間に生じる荷重（載荷荷重）および、覆工模型内空部の変位（水平変位）、周方向のひずみ（覆工模型アーチ部26点（15°間隔の裏表）とインバート部6点（45°間隔の裏表）を計測した。また、可能な範囲で覆工模型内面のひび割れ状況を観察・記録した。

2.3 地震の被害モードを再現した載荷方向の検討

図-2に過去の地震後の調査で得られたトンネルの被害形態を示す。Type-Iはせん断変形、Type-IIは水平圧縮、Type-IIIは鉛直圧縮による変位が作用し



写真-1 実験装置の全景

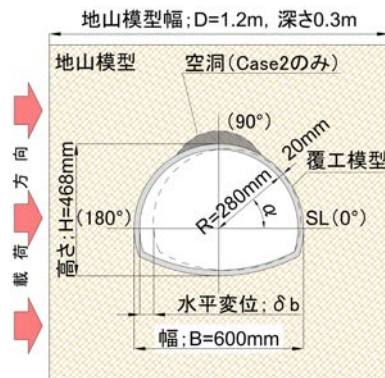


図-1 模型実験概要

Experimental study on the effects of the countermeasures against earthquakes for rock tunnels

た場合に生じるものとされている⁴⁾。また、山岳トンネルにおいて計測された地震時の覆工のひずみはトンネルが水平圧縮や鉛直圧縮に起因する変形モードを示す傾向が得られている⁵⁾。ここで、天端に圧力が生じるType-IIは被害が大きくなりやすいと考えられるため、本実験では模型に対して水平方向(左側)から荷重を行った。

2.4 実験ケース

表-1に実験ケースの一覧を示す。本実験では一般的なケースに加え、山岳トンネルにおいて耐震性向上の効果が期待されるインバート、不良地山において地震発生時の被害が懸念される覆工天端部の裏側に生じている空洞(地山との接触がなく、反力が取れない場合)、および坑口部において地震等への対策として用いられている単鉄筋補強を模擬した。

3. 模型実験の結果

3.1 ひずみ分布の傾向

図-3に荷重荷重が約100kN時点における覆工模型に発生したひずみ分布図を示す。

Case1は天端(75° から120°)で内側が圧縮の値(マイナス)、外側が引張の値(プラス)を示した。また、側壁(0° から45°、150°、180°)では内側が引張、外側が圧縮の値を示した。インバートがないため、0° と180° より下側のひずみ計測結果はない。Case2の側壁部はCase1と類似の傾向を示すが、天端部とインバート部(-45° から225°)は内側と外側がともに圧縮の値を示した。

これらの結果から、まず、水平方向からの荷重によって、2.3に示した天端部に圧力が発生するひずみ分布が得られ、Type-IIの被害モードをある程度再現できると考えられる。次に、Case1とCase2を比較すると、インバートがないCase1は天端部において内側が圧縮、外側が引張となり、天端部に曲げが発生する状態になっていた。一方、インバートを設けたCase2は天端部とインバート中央部で軸圧縮の状態になっていた。このため、水平方向からの荷重が作用する場合にインバートの効果により環状構造となることで天端は軸力が発生する状態となるため、耐力の向上が期待できると考えられる。

Case3の結果では、側壁部は概ねCase2と類似の傾向を示した。しかし、空洞により覆工と地山の接触がなくなる端部の60°と120°部において、内側が引張、外側が圧縮の値を示した。この60°から120°

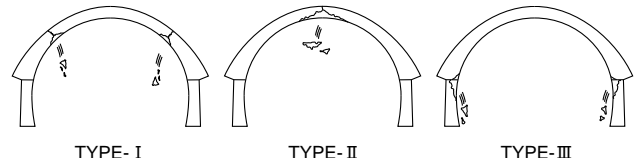


図-2 山岳トンネルの地震による被害モード

表-1 実験ケースの一覧

No.	材料特性				対策工・特殊条件	
	地山	覆工			インバート	その他条件等
	圧縮強度 (N//mm2)	圧縮強度 (N//mm2)	変形係数 (kN/mm2)	引張強度 (N//mm2)		
1	0.455	24.1	15.3	2.27	なし	なし
2	0.486	23.8	14.3	1.93	あり	なし
3	0.434	26.5	15.7	2.53	あり	空洞あり
4	0.478	18.1	13.0	1.94	あり	単鉄筋あり

※Case1は覆工模型脚部に鉄板を配置し、水平方向へ自由に変形できるものとした
 ※Case4の単鉄筋はΦ1mmの針金を10mmピッチで編込んだ金網を使用

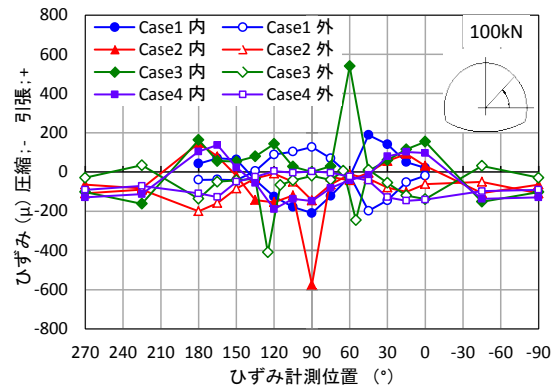


図-3 ひずみ分布図

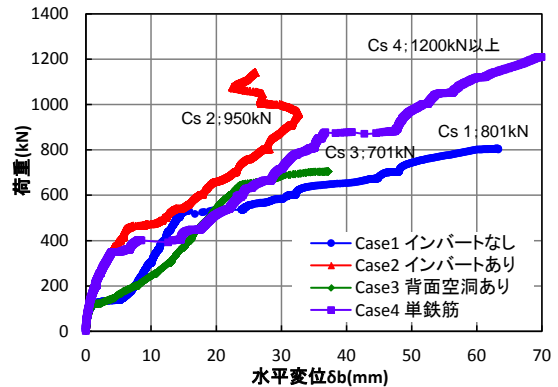


図-4 荷重と水平変位の関係

の範囲は地山の接触がないため、覆工は反力が得られずに同位置を端部として地山側に大きく変形したと考えられる。この結果から、空洞が存在する場合は変形が大きくなりやすいと考えられる。

Case4の結果からひずみの分布はCase2とおおむね類似しており、単鉄筋の補強による変形モードの大きな変化はないと考えられる。

3.2 荷重と水平変位の関係

図-4に荷重荷重と水平変位(覆工内部の0° から180° 間)の関係を示す。水平変位は内側への変位をプラスとした。

図-4より、Case1は荷重約150kNと約500kN、

Case2は約450kN、Case3は約170kNと約650kN、Case4は約350kN時において荷重と変位の曲線の傾きが変化している。これは特定の箇所において、ひび割れが発生し、それが進行することによって覆工全体の剛性が変化したことによるものと考えられる。各実験ケースにおいて、該当する荷重で以下の現象が発生していた。

Case1は荷重134kNで両肩部の45°と150°に生じたひび割れが177kNから進行した。また、約350kNで天端付近の90°と105°に発生したひび割れ周辺に500kN～530kNで曲げ圧縮による圧ぎが発生し、はく離が生じた。Case2は193kNで載荷方向側の側壁とインバートの接続部でひび割れが発生し、約450kN～470kNでせん断のようなズレが生じた。Case3は約70kNから80kNで60°と120°部で曲げによるひび割れが発生・進行し、167kNで90°にも曲げによるひび割れが発生した。Case4は361kNでCase2と同様に側壁とインバートの接続部においてせん断のようなズレが生じた。さらに、876kNにおいて0°側の側壁とインバートの接続部においても類似のズレが生じた。

図-4に示す値は、破壊判断時の荷重である。ここで、覆工模型の破壊の判断は載荷時に、天端周辺で生じた軸圧縮によるせん断破壊や曲げによるや圧ぎによって、覆工模型が分離し崩落するなど、トンネルとしての形状を維持できなくなった段階とした。各ケースの破壊の判断は次の時点とした。

Case1は約800kNで90°に発生したひび割れ部の曲げによる圧ぎにより完全に分離した。Case2は約950kNにおいて90°部で、圧縮により覆工の一部がせん断と考えられるズレにより崩落した。Case3は約700kNで120°付近に発生していたひび割れが曲げによる圧ぎによって完全に分離した。Case4はジャッキの最大荷重である約1200kNまで載荷したが破壊には至らなかったため、1200kN以上の破壊荷重を有していると考えられる。

以上の破壊時の荷重を比較すると、Case2に比べ、Case1とCase3は小さく、Case4は大きい。この結果から、Case1とCase2よりインバートの設置は耐力向上の効果が期待できると考えられる。また、Case2とCase3より空洞が存在する場合は耐力の低下が考えられる。さらに、Case2とCase4より単鉄筋による補強は耐力向上の効果が期待できると考えられる。

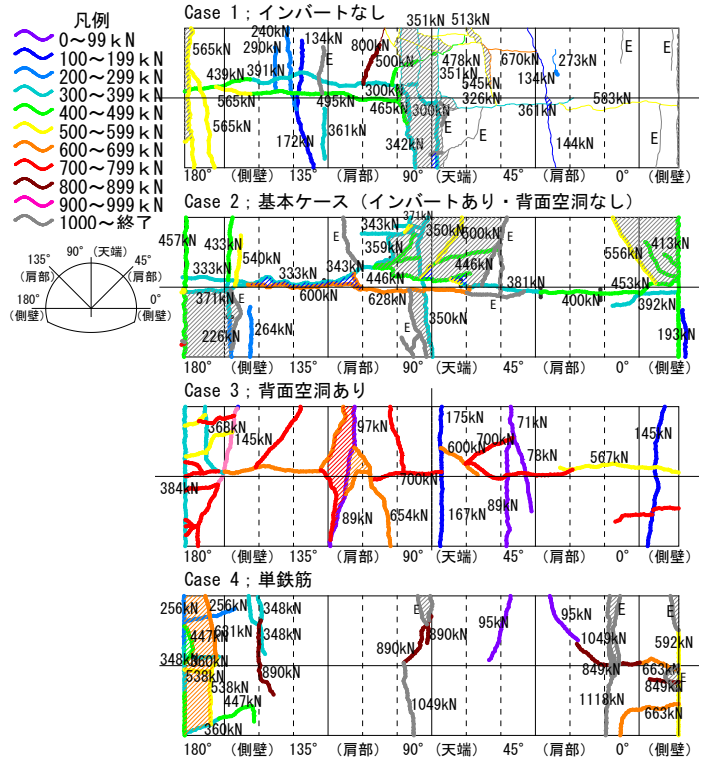


図-5 覆工模型のひび割れ展開図

3.3 模型のひび割れの状況

図-5に各ケースの載荷過程において記録した覆工模型のアーチから側壁部内面側のひび割れ展開図を示す。100kN毎にひび割れを色分けし、破壊後の崩落または、はく落した箇所を斜線で示す。載荷は展開図の左側から行っている。

Case1は荷重約350kNで天端部の90°と105°に曲げ圧縮によるものと考えられるひび割れが発生した。その後、約500kNに到達した時点で天端部のひび割れ周辺にはく離が見られた。また、約550kNで180°から195°の側壁部において曲げひび割れが発生し、天端部で発生したひび割れ周辺にさらなるはく離が見られた。最後に800kNで105°に発生したひび割れ部が完全に分離し、0°から105°の覆工模型が崩落した。

Case2は荷重193kNで0°側の側壁とインバートの接続部において、初期ひび割れが発生し、350kN時には90°にひび割れが発生した。その後、457kNにはインバート接続部のひび割れ部で側壁が内側に押し出されるようにズレが生じた。さらに、500kN時点で90°部に発生していたひび割れ部にはく離が発生した。最後に950kNで90°部に全圧縮によるせん断破壊によって60°から105°の範囲の一部で地山に到達する覆工模型の崩落が見られた。同時に、模型中心部で横断方向に発生しているひび

割れにより模型が分離した。Case1～3に見られる横断方向のひび割れはせん断破壊の結果として表れているもので、実験上の制約が要因として挙げられる。ただし、耐力には影響がないと考えられる。

Case3は約70kNから80kNで60°と120°の肩部に曲げ引張によるものと考えられる初期のひび割れが発生し、100kNで60°と120°のひび割れが開口した。また、167kNで曲げ圧縮によるものと考えられる天端部のひび割れが発生した。ここで、Case2の90°付近に発生したひび割れは軸圧縮であると考えられるため、Case3のひび割れの発生傾向は異なると考えられる。また、荷重654kNの時点で120°部にはく離が発生しはじめ、700kN時点で同部が完全に分離し、破壊した。

Case4は95kNで60°と30°付近で初期のひび割れが発生した。ここで、Case4は235kNで側壁とインバートの接続部にひび割れにズレが生じた。0°と180°の側壁部でインバート接続部のズレに起因した覆工模型のはく離が見られ、天端は圧ざによるひび割れや数mm程度のはく離が発生した。また、Case4は他のケースに比べ15°から165°の間のひび割れは少なく、鉄筋によりひび割れが分散したことによるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では山岳トンネルの変状対策が耐震対策として期待できる効果を模型実験により検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 地震時に天端部で被害が大きくなると考えられる水平方向からの外力が作用すると天端部に曲げが生じるが、インバートを設置することで環状構造（天端とインバート部が軸力構造）となり、トンネル構造全体の耐力向上が期待できる可能性がある。

- 2) インバートの設置はアーチ部の耐力向上が期待できるが、側壁とインバート接続部分に生じる破壊が耐力に影響を及ぼす可能性がある。
- 3) 水平方向からの外力が作用する場合に、天端部に空洞があると、地山からの反力が得られず、トンネル構造の耐力をうまく発揮できないため、変状が生じる可能性がある。
- 4) 単鉄筋による補強は水平方向からの外力の作用に対し、トンネル構造の耐力向上の効果が得られる可能性がある。また、覆工に発生するひび割れを抑制することで、大規模なはく離、はく落の発生を抑制できる可能性がある。

以上の結果を踏まえ、現時点では実対策工との相似側や、実際の地震のような動的な挙動の影響等について明らかになっていない部分があるため、今後、実験や数値解析等を行い効果的な対策工を提案するために研究を進めたいと考えている。

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、第36巻、第11号、pp.55～63、2007。
- 2) 日下敦、真下英人、水川雅之、森本智：地震による山岳トンネルの被害発生メカニズムに関する基礎的研究、トンネル工学報告集、No.18、pp.15～21、2008。
- 3) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策）、丸善、pp.117～123、pp.184～189、2006。
- 4) 日下敦、真下英人、砂金伸治、角湯克典：山岳トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察、トンネル工学報告集、No.20、pp.1～8、2010。
- 5) 日下敦、真下英人、砂金伸治、角湯克典：山岳トンネルの地震挙動に関する計測、トンネル工学報告集、No.21、pp.147～151、2011。

河田 皓介



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グルー
プトンネルチーム 専門研
究員
Kosuke KAWATA

砂金 伸治



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グルー
プトンネルチーム 上席研
究員、博(工)
Dr. Nobuharu ISAGO

日下 敦



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グルー
プトンネルチーム 研究員
Atsushi KUSAKA

真下 英人



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グルー
プ長、博(工)
Dr. Hideto MASHIMO