

変状対策工を適用した山岳トンネルの耐震性に関する実験的考察

河田 皓介¹・砂金 伸治²・日下 敦²・真下 英人²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:kawata55@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)

山岳トンネルの地震被害のメカニズムについての解明は進められているが、トンネルに作用する外力の想定が困難であることなどの理由により、耐震設計の確立には至っていない。既設トンネルの耐震対策を行う際には、過去の地震被害の経験から不良地山や施工不良等により変状が確認された場合の変状対策として実施している事例がある。トンネルの変状対策を実施するとトンネルの健全性はある程度確保されるものの、地震に対する効果の検証は行われていない。本研究では山岳トンネルにおいて耐震対策として用いられる対策の効果と挙動を明らかにするため、対策を実施した山岳トンネルの模型を用いて載荷実験を行った。その結果、インバートの増設や単鉄筋による補強、裏込め注入、ロックボルト、内面補強工等について外力が作用した場合に一定の効果が得られることを明らかにした。

Key Words : mountain tunnel, seismic damage, countermeasure against deformed tunnel, model test

1. はじめに

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、1995年の兵庫県南部地震や2004年の新潟県中越地震などの過去に発生した地震では覆工が崩落するなど、補修や補強といった対策工が必要となる被害が報告されている^{1) 2)}。これらの結果を受けて、山岳トンネルにおける地震時の挙動や被害が生じるメカニズムを解明するための研究^{3) 4)}や耐震対策に関する研究^{5) 6)}が行われている。しかしながら、山岳トンネルが地震時に受ける外力を想定することは困難であることなどの理由により、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、小土盛りや不良地山、施工不良、覆工の劣化が激しいなどの特殊な条件が介在している場合が多い⁷⁾。また、既設トンネルの耐震対策を実施する場合には点検等により特殊条件やそれに伴う変状の発生やその状況を把握し、得られた条件に見合う変状対策を基本に実施されている^{7) 8)}。これらで実施された対策は変状が生じた覆工の健全性を確保するものであり、地震に対する効果等については検証されている例は少ない。

本研究では山岳トンネルにおける変状対策工のうち耐

震性の向上が期待できると考えられる対策を実施した場合の効果とその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た載荷実験を実施した。本稿において、その結果を報告する。

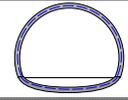
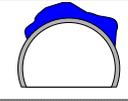
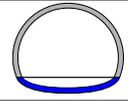
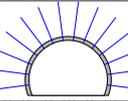
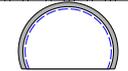
2. 変状対策工の耐震性に関する考え方

表-1に本実験で対象とした耐震性の向上を目的として使用する対策工の考え方と適用条件の例を整理した。ここでの対策工は新設・既設トンネルで一般的に実施されていると考えられる変状対策⁹⁾について耐震性向上の効果が期待できると考えられるものを抽出した。

耐震対策を実施するにあたって、既設の山岳トンネルの場合、限られた内部空間や公共性を踏まえると、種々の制約があると考えられる。また、新設の山岳トンネルの場合、鉄筋やインバートなど耐力の増加が見込める対策が可能である。

ここで、トンネルの変状対策は主に次の3つの効果が期待されている⁹⁾。「1) 地圧などに抵抗するために、トンネル構造の耐力を向上させる、2) 覆工に変状が発生した場合でもはく落等を防止する、3) 漏水を防止する」。これらの効果で1) と2) は地震により覆工に外

表-1 対策の考え方と適用条件の例

対策工	対策の考え方	適用条件の例	概要図
鉄筋補強	1)トンネル構造の耐力向上 3)覆工のはく落等の防止	・新設および既設トンネルにおいてトンネル構造の耐力向上およびはく落防止を求める場合 ※既設トンネルでは大規模な覆工の打ち替えが必要	
裏込め注入	1)トンネル構造の耐力向上	・既設トンネルにおいて、地山と覆工の間に空隙があり、地山が良好でない場合 ※矢板工法のトンネルに多い	
インバート新設	2)トンネル構造の耐力向上	・新設および既設トンネルにおいてトンネル構造の耐力向上およびはく落防止を求める場合 ・側壁の押しや盤ぶくれ等の変状があった場合 ※既設トンネルでは大規模な工事が必要となる。	
ロックボルト打設	1)トンネル構造の耐力向上 2)トンネルと地山の一体化 3)覆工のはく落等の防止	・既設トンネルにおいて、地山が劣化している場合や施工中に崩落があった、押しや盤ぶくれがあるなど、トンネル構造の耐力向上およびはく落防止を求める場合	
内面補強	3)覆工のはく落等の防止	・ロックボルトの引き抜き耐力が得られない場合や広範囲ではく落する可能性が高い場合	

力が作用した場合に地震荷重に耐えることや覆工に変状が発生した場合でも崩落を防止するなど、トンネルの耐震性向上の効果としても期待できると考えられる。

3. 模型実験の概要

(1) 実験装置

写真-1に実験装置の全景を示す。実験装置は（独）土木研究所所有する二次元載荷試験装置を使用した。この装置は内部の土層部分が幅D=1.2m、高さH=1.2m、深さ0.3mである。四方を鉄製のフレームで囲み、3方向を鋼材で固定、1方向に載荷用のジャッキを設置しフレーム（載荷盤）がジャッキの軸方向に可動するものである。また、1方向に設置可能な油圧ジャッキは3本で、1本あたりの載荷荷重の上限は約400kNで最大載荷荷重は約1200kNである。土層上部にふたをすることで、覆工模型縦断方向の変位は概ね拘束される。

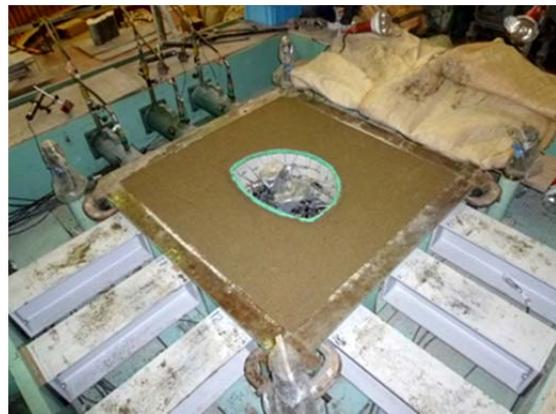


写真-1 実験装置の全景

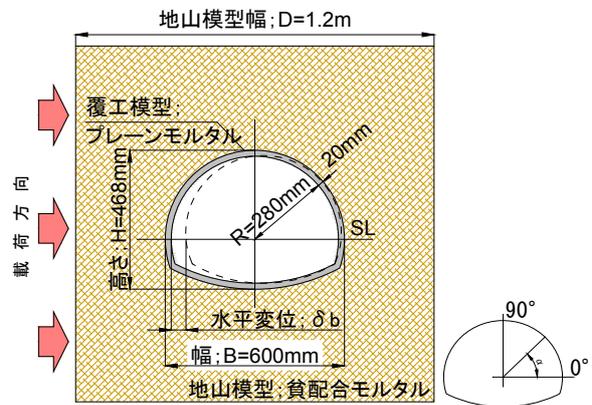


図-1 模型実験概要

表-2 貧配合モルタル配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m³)		
	セメント	水	砂
1.918	55	105.5	1000

表-3 プレーンモルタル配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m³)			
	セメント	水	砂	混和剤 (AE減水材)
66.8	352	235	1575	3.52

(2) 実験模型

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、また、覆工をプレーンモルタルにより作製した。表-2に貧配合モルタルの配合、表-3にプレーンモルタルの配合を示す。地山と覆工供試体は各模型を作製した材料により別途管理供試体を作製し、所定の強度以上を確認した段階で実験を行った。これらの目標強度は一軸圧縮強度で地山を0.5N/mm²、覆工を18N/mm²とした。

地山模型の変形特性は過去の実験結果¹⁰⁾と同等のものを用いた。これは、変位が0mmから約3mmの範囲までは見かけの変形係数が約250MPa、約3mmから25mmで約130MPaとなり、およそ50%小さくなるものである。

覆工模型の大きさや形状は2車線道路トンネル相当の約1/20の大きさとし、アーチ部は単心円とした。なお、

側壁とインバート接続部の増厚は行っていない。

作製した覆工模型を土層中央に設置し、その周囲を地山模型により埋めることで実験用の供試体を作製した。

(3) 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）および載荷部のフレームの変位（地山変位）、覆工模型内空部の変位（水平変位）、覆工模型アーチ部13点（15° 間隔の裏表で26点）とインバート部3点（45° 間隔の裏表6点）の周方向のひずみを計測した。加えて、可能な範囲で覆工模型内面のひびわれ状況を観察し記録した。

(4) 地震の被害モードを再現した載荷方向の検討

図-2にこれまでの地震で生じた山岳トンネルの被害形態を示す。これは過去の被害調査結果によって分類されたものである¹¹⁾。これらの被害形態は数値解析により、Type-Iはせん断、Type-IIは水平圧縮、Type-IIIは鉛直圧縮するような変位が作用した場合に生じる結果が得られている¹¹⁾。また、山岳トンネルで行われた地震時の動的計測によれば、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覆工のひずみ分布が得られている¹²⁾。

以上に示した実際の被害形態において、Type-IIのような、天端に圧ぎが生じる変形モードでは被害が大きくなりやすいと考えられる。そのため、本実験では覆工模型に対して水平方向（左側）から載荷するものとした。また、載荷終了の判断は覆工模型が破壊に至るか油圧ジャッキの載荷能力の上限に達した場合とした。

(5) 実験ケース

表-4に実験ケースの一覧を示す。本実験では新設・既設トンネルで一般的に実施されていると考えられる変状対策⁹⁾について耐震性向上の効果が期待できると考えられるものを抽出した。以降に各ケースの詳細を示す。

Case1はインバートがないトンネル構造を模擬した。脚部には鋼板を配置することで水平方向からの載荷に対して抵抗しない構造とした。Case2（後述）と比較することでインバートの有無について考察を行う。

Case2はインバートあり、背面空洞なし、対策工を実施しない構造とした。

Case3は背面空洞を模擬した構造とした。ここで背面空洞は天端部分から左右30°ずつの60°の範囲、すなわち、図-1に示したトンネル模型右側のSL位置を0°とした座標で考えた場合、60°から120°の範囲にかけて天端部の最大高さ5cmの範囲に型枠を設け、地山模型を入れないことで空洞を模擬した。Case2と比較することで背面空洞の影響に関する考察を行う。

Case4は坑口部などに採用される単鉄筋を模擬した構造とした。鉄筋は径φ1mmの針金を10mm間隔で格子状に編みこまれた市販の金網を用いた。配置は覆工模型の厚さ20mmの中間部、すなわち被り10mmの位置の天端、側壁インバート全周とした。本来であれば、実構造物と同様に引張が作用する内空側に設置すべきと考えられるが、覆工模型の厚さが20mmであるため、模型作製の精度の制約から困難であった。

Case5は覆工内面側からのロックボルト打設を模擬した構造とした。ボルトは真鍮棒（径φ3mm、長さL=15mm）を用い、周方向30°ピッチで1断面あたり9本配置した。さらに、奥行方向の100mm、200mmの位置に2列で配置した。

Case6は繊維シートによる内面補強工を模擬した。繊維シートは実際に使用される炭素繊維シートを用い、実験用に開発された目付50g/mm²のものを用いた。設置位置はアーチから側壁部（-15°から195°）の内側に繊維の軸が覆工模型の周方向と同じになるように接着した。

Case4～Case6はCase2と比較することで、対策工の効果について考察を行う。

4. 模型実験の結果

(1) ひずみ分布の傾向

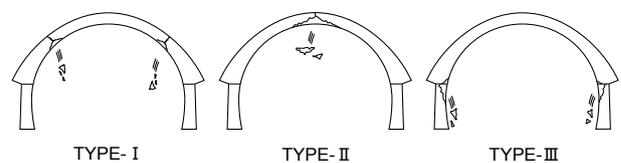


図-2 山岳トンネルの地震による被害モード

表-4 実験ケース一覧

Case No.	材料特性					対策等の仕様			
	地山	覆工				インバートの有無	特殊条件	対策	備考
圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	変形係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)					
1	0.455	24.1	15.3	0.20	2.27	なし	なし	なし	-
2	0.486	23.8	14.3	0.17	1.93	あり	なし	なし	-
3	0.434	26.5	15.7	0.18	2.53	あり	背面空洞	なし	60° から120°
4	0.478	18.1	13.0	0.19	1.94	あり	なし	単鉄筋	金網φ1mm×10mm(全周)
5	0.458	21.8	14.9	0.19	1.84	あり	なし	ロックボルト	φ3mm×L15mm×15°ピッチ×2列
6	0.478	24.2	15.8	0.19	2.12	あり	なし	繊維シート	目付50g/m ² (-15°から195°)

図-3に覆工模型に発生したひずみ分布図を示す。各対策の分布傾向を比較するため、対策工ごとに示す。ここで、(a)、(b)は載荷荷重が約100kN、(c)は約300kN時点の値を示す。

図-3 (a)より、本実験の載荷方法で、3. (4)に示す天端部に被害が生じる形態を再現できているかを確認する。Case1より天端部（75° から120° の範囲）で内側が圧縮（マイナスの値）、外側が引張（プラスの値）を示している。また、側壁部（0° から45°、150° 180°）では内側が引張、外側が圧縮となっている。さらに、Case2では側壁部はCase1と同様の傾向を示すが、天端部は全圧縮となっている。加えて内側の圧縮ひずみの値が外側に比べ大きくなっている。これらのひずみ分布の傾向は日下らの示す解析結果¹¹⁾とおおむね一致しており、3.に示した被害モードをある程度再現できると考えられる。この結果を踏まえ、以降に対策工毎の結果を示す。

a) インパートの有無による傾向

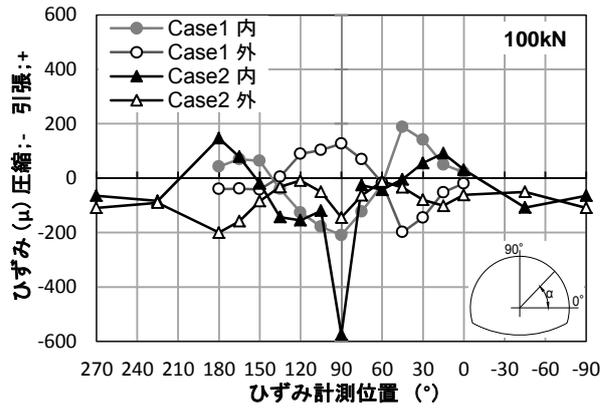
図-3 (a)の結果から、Case1は側壁部が覆工の内側に押し出され、天端部に曲げが生じていると考えられる。また、Case2はCase1と同様に側壁部は押し出しは見られるが、インパートの存在により環状構造となり、天端部とインパート中央部で軸力が卓越するため、天端部での曲げが小さくなり、軸圧縮の状態になると考えられる。そのため、Case1のようなインパートのない構造では水平方向からの荷重が作用することにより、天端部の曲げ圧縮による圧ぎで天端部の内側にひびわれやはく離・はく落等が生じる可能性がある。対して、Case2のようなインパートを有する場合には天端とインパート部において軸圧縮状態となるため、曲げによる破壊が生じるCase1に比べ耐力の向上が期待できると考えられる。

b) 背面空洞の有無による傾向

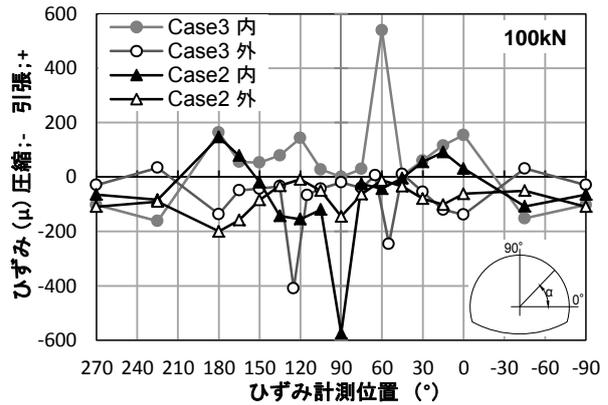
図-3 (b)からCase3は0° から60° と120° から180° の側壁部において、内側が引張、外側が圧縮の値を示している。しかし、背面空洞が存在し、覆工模型と地山が接触しなくなる60° と120° において、内側が引張、外側が圧縮される傾向を示している。これは、同位置を境に天端部が空洞内に大きく変形しているためと考えられ、背面空洞が存在する場合は水平方向からの荷重が作用することにより、空洞側に変形しやすくなると考えられる。

c) 対策工の有無による傾向

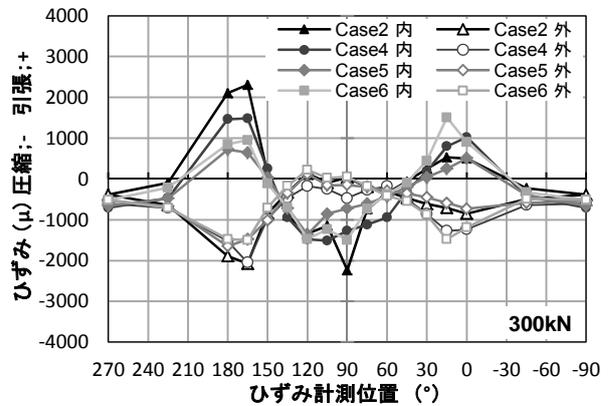
図-3 (c)より、ひずみ分布の傾向はすべてのケースにおいて、0° から30°、150° から180° の側壁部で内側が引張、外側が圧縮の値を示している。また、45° から135° の天端部では内側と外側がともに圧縮の値を示しており、その値は外側が内側に比べ小さい。さらに225° から45° のインパート部では全圧縮を示している。この結果から、インパートを有するCase2、Case4、Case5、Case6は類似したひずみ分布の傾向を示している。こ



(a) インパートの有無



(b) 背面空洞の有無



(c) 対策工の有無

図-3 ひずみ分布図

で、Case4の165° の外側とCase2 ;の90° の内側では、ひずみの値がコンクリートに圧ぎ発生すると考えられている圧縮ひずみ-2000μを超えている。また、側壁部では0° ~15° と165° ~180° の内側では引張ひびわれ発生すると考えられる200μを超えている。これらのケースでは荷重が300kNの時点で覆工模型に圧ぎに伴うひびわれなどの変状が発生していると考えられる。

(2) 載荷荷重と模型変位の関係

図-4に各ケースにおける載荷荷重と覆工模型内部（0° から180° 間）の水平変位の関係を示す。水平変位はプ

ラスの値が覆工模型が内側に縮小する方向である。

a) インバートの有無による影響

図-4(a)より Case1は荷重約150kNと約500kN時点で、Case2は荷重約450kN時点で荷重と変位の曲線の傾きに変化が生じている。これらの現象を載荷過程におけるトンネルの変状状況から検証する。

Case1は荷重134kN時に45°と150°の両肩部においてひびわれが発生し、177kNの時に発生したひびわれが伸び始める現象が見られた。また、約350kNにおいて、90°と105°付近で発生したひびわれが500kN～530kNの時点で圧ざによると考えられるひびわれの周辺にはく離が見られた。Case2は荷重193kN時に載荷方向（180°側）の側壁とインバートの接続部でひびわれが発生した。その後、載荷とともに同部でひびわれの伸びが見られ、荷重約450kN～470kNの時点でズレが生じた。Case1では天端部の圧ざ、Case2では側壁とインバートの接続部におけるひびわれ部のズレが荷重と変位の曲線の傾きの変化に現れていると考えられる。

最大荷重（破壊時の荷重）についてはCase1は約800kN時点で90°で発生したひびわれ部において覆工が完全に分離したため、破壊したと判断した（破壊形態の詳細は3.に示す）。また、Case2は約950kNにおいて90°部で圧縮により覆工の一部が崩落したため、破壊したと判断した。その後、載荷を続け、ジャッキの最大荷重の約1200kNまで載荷したが、水平変位が広がる傾向が見られた。これは950kNの破壊と同時に発生していた横断方向のひびわれ部で生じたズレによるものと考えられる。

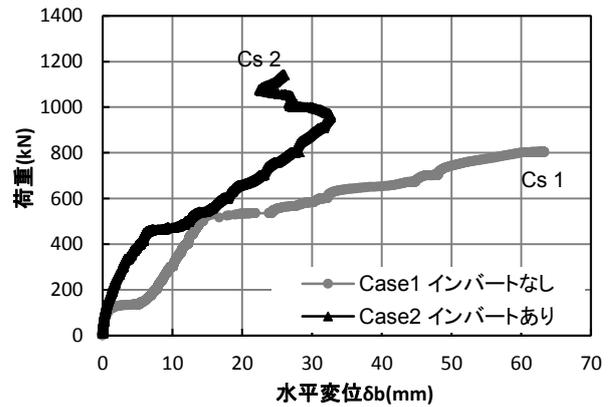
b) 背面空洞の有無による影響

図-4(b)より、Case3は荷重が約170kNと約650kNの時点で荷重と変位の曲線の傾きが変化している。荷重約70kNから80kNにおいて60°と120°部で曲げによるひびわれが発生し、167kN時点で90°にも曲げによるひびわれが発生した。これは60°から120°の範囲に設けた背面空洞により、水平方向からの載荷に対して背面の地山からの反力が得られないため、60°と120°を端部とし天端部が地山側に盛り上がるような現象が生じたためと考えられる。また、580kNから両側の側壁とインバートの接続部にひびわれが発生し、載荷するごとにその伸びが見られた。さらに、約650kNのところ180°付近の横断方向のひびわれの開口を確認した。これら側壁からインバート接続部に発生したズレやひびわれの進行（伸び、開口など）が要因と考えられる。

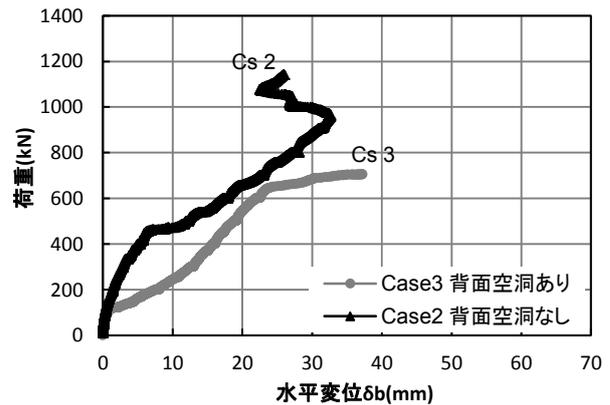
最大荷重は約700kN時点で120°付近に発生していたひびわれが曲げにより完全に分離したため破壊と判断した。

c) 対策工の有無による影響

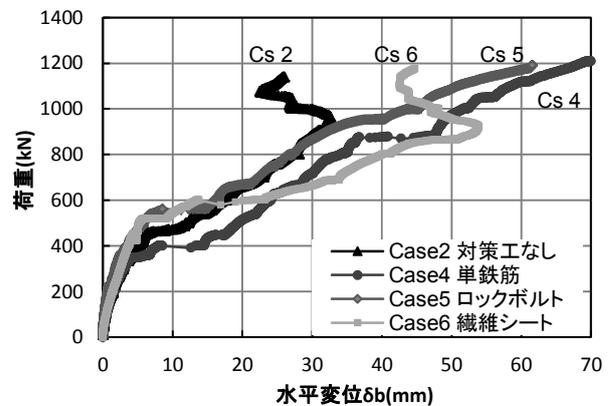
図-4(c)より、これまでのケースと同様にCase4は約350kN、Case5は約550kN、Case6は約500kNの荷重においてグラフの傾きが変化している。



(a) インバートの有無



(b) 背面空洞の有無



(c) 対策工の有無

図-4 載荷荷重と模型水平変位の関係

Case1で見られた載荷方向（180°側）の側壁とインバートの接続部で発生したズレがCase4は361kN、Case5は562kN、Case6は600kN時点で生じた。また、Case4については876kNにおいて載荷方向と反対側（0°側）の側壁とインバートの接続部においてもズレが生じた。ここで、側壁とインバートの接続部のズレが発生する荷重がCase4は他のケースに比べ2～3割程度小さい。これは、Case4の覆工模型に使用したモルタルの強度が他の模型よりも2～3割程度小さいことによる可能性があると考えられる。これらの現象から、側壁とインバートの接続部のひびわれの発生や、ズレなどの現象は水平方向からの

荷重による応力集中が要因と考えられ、これにより構造が不安定となることで、荷重と変位の曲線が変化したと考えられる。

最大荷重についてはCase4はジャッキの最大荷重である約1200kNまで載荷した場合でもせん断により覆工模型の天端部において分離するような破壊には至らなかった。Case5は約800kNで天端部の一部の覆工がはく落したものの、約1200kNまで載荷した場合でもトンネルの形状を保持しており破壊には至らなかった。Case6は881kNの段階で、繊維シートに周方向の亀裂が生じ、Case2と類似した天端部のせん断によると考えられるズレが生じ破壊と判断した。また、水平変位が広がるような現象を確認し、その要因としてCase2と同様に横断方向のひびわれによるズレと考えられる。

d) 破壊時荷重の比較

図-5に各ケースにおける破壊判断時の荷重を示す。

Case2を基本とすると、Case1、Case3、Case6は破壊時の荷重が小さくなった。また、Case4、Case5は載荷能力の上限に達したため、グラフに示す値よりも大きな破壊時の荷重になると考えられる。

このことから、Case1とCase2よりインバートの設置はトンネルを環状構造とすることで軸力構造となり、耐力の向上につながると考えられる。また、Case2とCase3より背面空洞が存在しない場合は地山からの反力を得られるため、構造としての耐力向上につながると考えられる。また、Case2とCase4からCase6より単鉄筋およびロックボルトによる補強は耐力の向上につながると考えられる。ただし、ロックボルトの補強の対策に関してはボルトの寸法やピッチなどの相似則等の関係も考えられるため、今後、数値解析等による精査を行う必要があると考えている。さらに、繊維シートによる内面補強は耐力の向上にはつながらないと考えられる。

(3) 模型のひびわれおよび破壊時の状況

図-6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われ展開図を示す。ひびわれは100kNごとに色分けしたものを記録している。また、斜線部は覆工模型の一部または地山まで到達するようなはく落または崩落により分離した範囲を示している。ここで、覆工模型の破壊の判定は載荷時に、天端周辺で生じた軸圧縮や曲げによるせん断や圧ぎで、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。

a) インバートの有無による影響

Case1より荷重134kNにおいて45°、150°の肩部に初期のひびわれが発生した。その後、約350kNの時点で90°と105°の天端部に圧ぎによるものと考えられるひびわれが発生した。その後、約500kNに到達した時点で

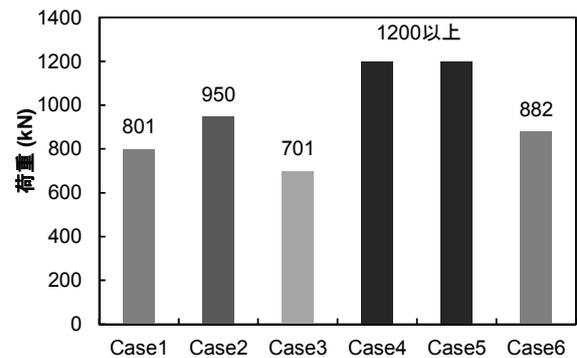


図-5 破壊時判定時の荷重

天端部のひびわれ周辺にはく離が見られた。また、約550kNの時点で180°から195°の側壁部において曲げひびわれが発生し、天端部で発生したひびわれ周辺にさらなるはく離が見られた。この荷重は、(2) a) で示した、荷重変位曲線の傾きが変化する点と一致しているため、天端部の圧ぎにより、覆工模型の剛性が低下したと考えられる。最後に800kNの時点で105°に発生したひびわれ部が完全に分離し、90°から105°の範囲の覆工模型が崩落したため、破壊したと判断した。

Case2より荷重193kN時に0°側の側壁とインバートの接続部において、初期ひびわれが発生した。また、350kN時には90°にひびわれが発生し、457kN時には側壁とインバートの接続部にズレが発生した。この荷重は、(2) a) に示す荷重変位の曲線の傾きが変化した点と一致する。さらに、500kN時点で天端部に発生していたひびわれにはく離が生じた。最後に950kN時点で90°において圧縮によるせん断破壊によって60°から105°の一部で地山に到達する覆工模型の崩落が見られたため、破壊と判断した。同時に、模型中心部で横断方向に発生しているひびわれにより模型が分離し、以後荷重変位曲線に示す変位が広がる傾向を示した。この横断方向のひびわれはせん断破壊の結果として表れているものと考えられ、耐力には影響していないと考えられるが、実験上の制約も考えられるため、異なる条件等の結果を参考に検証を行う必要があると考えている。

破壊形態としてCase1はインバートがないため側壁部の押出しにより天端部に曲げが生じ、同部の圧ぎが生じたものと考えられる。また、Case2はインバートを設置したことによりトンネル全体が環状構造となり、天端部の軸圧縮によるせん断破壊が生じたものと考えられる。

b) 背面空洞の有無による影響

Case3は約70kNから80kNの時点で60°と120°の肩部に曲げ引張によるひびわれが発生している。また、100kNの時点で60°と120°のひびわれが開口し、167kNで天端部にひびわれが発生している。これは水平方向からの載荷に対して、覆工模型が上方に変形することに対して、背面空洞を設けた60°から120°の範囲で地山からの反

力が得られず、変形が進み、曲げが生じたことによるものと考えられる。この荷重は(2) b) に示したように、荷重と変位の曲線の傾きが変化し始めた点と一致する。

Case2では90° に発生したひびわれは軸圧縮であると考えられるため、Case3のひびわ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時点で上部が完全に分離し、ズレが発生したため破壊と判断した。

c) 対策工の有無による影響

Case4は95kNで60° と30° 付近でひびわれが発生した。Case5は235kN時点で180° から135° のロックボルト周辺部でひびわれが発生した。Case6はアーチ、側壁部はシーートの影響で荷重途中のひびわれの観察はできていないが最終的なひびわれおよび破壊形態は確認した。ここで、Case4は235kN、Case5は400kN、Case6は520kN時点で側壁とインバートの接続部にひびわれにズレが生じた。この荷重は、(2) c) に示したとおり、荷重と変位曲線の傾きが変化し始めた点と一致する。

破壊形態として、Case4およびCase5は最大荷重まで載荷を行ったが、Case2のような覆工模型の天端部において、せん断破壊が生じるような大規模な破壊には至らなかった。Case4では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、天端は圧ぎによるひびわれや数mm程度のはく離が発生した。Case4は他のケースに比べ15° から165° の間のひびわれが少なく、ひびわれが抑制されている。Case5はロックボルトをまたいで横断方向のひびわれが多数発生していたが、Case2のようなひびわれによる大規模なせん断破壊による覆工模型の崩落はみられなかった。さらに、天端部では、圧ぎによる縦方向のひびわれは見られず、ロックボルト周辺のひびわれの閉合により覆工模型厚の1/3から2/3程度の深さのはく離が生じた。Case6はひびわれの発生や進展の状況は確認できなかったが、荷重850kNを超えた時点でシートに浮きが生じ、881kNの時点でシートが破断した。この時点で、Case2に見られたような圧縮によるせん断破壊により天端部の覆工にズレが生じており、破壊と判断した。また、荷重変位曲線もCase2と類似し水平変位が広がる傾向を示した。この破壊形態は、Case2と類似していた。その後、ジャッキの最大荷重まで載荷を行ったが、天端部と側壁部で覆工模型のズレを確認したが、シートとモルタルが付着していることにより覆工模型の崩落は見られなかった。

6. おわりに

本研究では山岳トンネルにおける変状対策工のうち耐震性の向上が期待できると考えられる対策を実施した場合の効果とそのメカニズムを解明するため、山岳トンネ

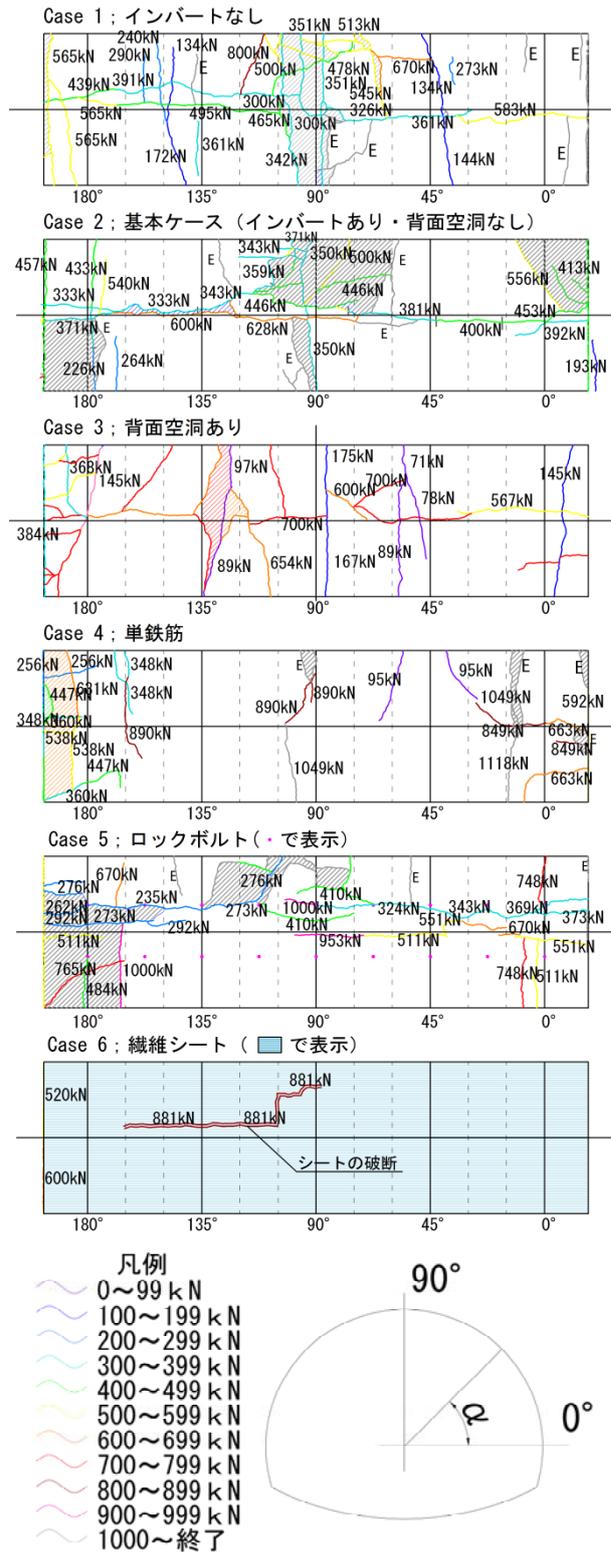


図-6 載荷荷重と模型水平変位の関係

ルを模擬した模型をによる載荷実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1)インバートを設置することで地震時の変形モードである水平方向からの外力の作用に対して、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。
- 2)インバートを有するトンネルはアーチ部の耐力向上の

効果は得られると考えられるが、側壁部とインバートの接続部分において生じる破壊と耐力が関連づけられる。

- 3)天端部に背面空洞のあるトンネルでは地震時の変形モードである水平方向からの外力の作用に対して、地山からの反力を得られないため、トンネル構造の耐力が小さくなる可能性がある。
- 4)単鉄筋による補強は地震時の変形モードである水平方向からの外力の作用に対して、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わ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。
- 5)ロックボルトによる補強は地震時の変形モードである水平方向からの外力の作用に対して、ひびわれを抑制する効果は見られないものの、崩落を抑制できる可能性がある。また、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が、耐力の向上についてはボルトの寸法や打設ピッチなどの相似則の影響も考えられるため、今後の詳細な検証が必要である。
- 6)繊維シートはトンネル構造の耐力向上の効果は得られないものの、シートと覆工の付着により、はく落等を抑制できる可能性がある。

最後に、これらの実験結果は実際の対策工との諸元や寸法の違い等がある。そのため、今後、これらの結果を踏まえたさらなる検討の必要がある。加えて地震時を想定した動的な影響を含めた実験および数値解析による詳細なメカニズム等の検証を行い、地震等の外力が作用する場合の対策工について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告, pp.77-90, 土木学会, 1997.
- 2) 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.
- 3) 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
- 4) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄: 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.27-38, 2000
- 5) 野城一栄, 小島芳之, 宮林秀次, 西藤潤, 朝倉俊弘, 竹林次朗: 地質不良区間における新設山岳トンネル用地震対策工の適用性, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.1062-1080, 2009
- 6) 宮林秀次, 高橋源太郎, 深沢成年, 小島芳之, 朝倉俊弘: 小土被りトンネルにおける耐震対策工に関する基礎的研究, トンネル工学報告集, 第18巻, pp.165-172, 2008
- 7) (社)日本道路協会: 道路震災対策便落(震前対策編), 丸善, pp.117-123, pp.184-189, 2006.
- 8) 既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル(案), (財)鉄道総合技術研究所, 2010
- 9) 道路トンネル変状対策マニュアル(案), 独立行政法人土木研究所, pp.16-18, 2003
- 10) 砂金伸治, 真下英人, 日下敦, 柔構造を保有するトンネルの挙動に関する考察, トンネル工学報告集, No.22, pp.41-48, 2012
- 11) 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.
- 12) 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.

(2013.9.2 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE RESISTANCE OF MOUNTAIN TUNNEL USING COUNTERMEASURES AGAINST DEFORMATION

Kosuke KAWATA, Nobuharu ISAGO and Atsushi KUSAKA, Hideto MASHIMO

Mechanism of tunnel damages from earthquakes has been examined recently. The rational countermeasures, however, are not fully established, partly because of the complexities of actual interactions between lining, ground and earthquake. In some cases, a currently-used countermeasure against tunnel deformation is adopted to enhance the tunnel load-bearing capacity or to prevent concrete chunks from dropping from the lining in case of earthquakes based on empirical knowledge. However, the effects of those conventional countermeasures have not been clarified completely. In this study, laboratory loading tests are conducted to examine the effects of those countermeasures against earthquakes. As a result, some effects of countermeasures such as installation of invert, steel bars in the lining, rock bolts and inner reinforcement sheets are confirmed.