鉛直方向からの外力が作用する山岳トンネルの 耐震性に関する実験的考察

河田 皓介1·日下 敦2·砂金 伸治3

¹正会員 株式会社 オリエンタルコンサルタンツ 関西支店 (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-18) (元国立研究開発法人土木研究所道路技術研究グループ)

E-mail:kawata@oriconsul.com

²正会員 国立研究開発法人 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:kusaka@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 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:n-isago@pwri.go.jp

山岳トンネルの地震被害のメカニズムに関する解明は進められているが、トンネルに作用する外力の想 定が困難などの理由により、設計法の確立には至っていない.山岳トンネルにおいて行われる耐震対策は、 過去の経験から坑口部や不良地山部、また、変状が確認された場合に対する変状対策として実施している 事例が多い.特に、変状対策の実施後は健全性がある程度確保されるものの、これらの対策が地震時の挙 動や効果に及ぼす影響に関する検証は数少ない.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、対策を模擬した山岳トンネルの模型を用いて載荷実験をおこ なった.その結果、インバートの増設やロックボルト、シートによる内面補強工、単鉄筋による補強した 場合に対して、鉛直方向外力が作用した場合の基本的な力学的な挙動および効果等を明らかにした.

Key Words : Mountain tunnel, Countermeasure against deformed tunnel, Laboratory loadingl 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 と考えられているが、2004年の新潟県中越地震等の過去 に発生した地震において、覆工の崩落等の発生にともな い、補修や補強といった対策工が必要となる被害が報告 されている例もある¹⁾. これらの様な山岳トンネルの被 害を軽減するために、地震時のトンネル挙動や覆工に被 害が生じるメカニズムを解明するための研究²⁾や耐震対 策に関する研究^{3,4}が行われている.しかしながら、地 震時に山岳トンネルが受ける外力(荷重)等を想定する ことが困難であることなどの理由により、構造計算を伴 うような明確な耐震設計法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、山岳トンネルに被害が生じた条件には、小土被り、不良地山、施工不良や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.山岳トンネルの地震への対策として、新設においては、地震を含めた坑口部の安全性を高めるために、道路トンネルでは、経験的に単鉄筋が配置されている.また、既設

トンネルにおいて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^{5,9}.特に既設トンネ ルに対する耐震対策は,外力による変状対策を行ってい く対応が主になると考えられるが,これらの対策の地震 発生時に発揮される効果等について検証されている例は 少ない.

本研究では、新設および既設の山岳トンネルにおいて 実施される対策工を設置した覆工の挙動、対策工の効果 とそのメカニズムを解明するため、覆工と周辺の地山を 模擬した模型を用いて、地震時等の外力を静的な荷重と 想定して、トンネルの鉛直方向から荷重を作用させた載 荷実験を実施した結果について報告する.なお、水平方 向から荷重を作用させた実験結果については過去に報告 している³.

2. 模型実験の概要

(1) 実験装置

本研究では(国研)土木研究所が所有する写真-1 に示

す装置を使用した. この装置は四方を鋼製のフレームで 囲まれた土槽である. 鋼製フレームの三方は鋼材で固定 し、一方に油圧ジャッキを設置して載荷を行うことでフ レーム(以降、載荷板とする)がジャッキの軸方向に可 動するものである.また、土槽上部に蓋をすることで、 トンネルの縦断方向の変位は概ね拘束され、平面ひずみ 状態となる.土槽内部の寸法は横D=1.2m、縦H=1.2m、 深さ 0.3 mである.また、油圧ジャッキ1本あたりの載 荷可能な荷重の上限は約 400 kN で、一方向に設置可能 な油圧ジャッキは 3本である.そのため、一試験あたり の最大載荷荷重は約 1200 kN である.

(2) 実験模型

実験模型は図-1に示すように、山岳トンネルの覆工を 模擬した模型(以降,覆工とする)を土槽中心に設置し、 その周囲を地山を模擬した模型(以降,地山とする)を 設置することにより作製した.覆工の材料はプレーンモ ルタルを用い、目標とする一軸圧縮強度は18 N/mm²とし た.また、地山は貧配合モルタルを用い、目標とする一 軸圧縮強度は軟岩程度を想定し、0.5 N/mm²とした.各 材料の配合を表-1に示す.なお、実験時における覆工と 地山の品質は各模型を作製した材料を用いて別途管理供 試体を作製し、実験当日に所定の一軸圧縮強度以上が発 現していることを確認した.

覆工の寸法と形状の詳細は図-1に示した通りである. 覆工の寸法は2車線道路トンネル相当の約1/20とし,形 状はアーチから側壁まで単心円とした.なお,インバー トを有する場合の側壁とインバートの接続部はすり付け や増厚等をおこなっていない.

地山を模擬した材料の変形特性は、変位が0 mmから 約3 mmの範囲までは見かけの変形係数が約250 MPa、約 3 mmから25 mmの範囲では約130MPaとなり、およそ50% 小さくなる特性を有している.この結果は、土槽内に地 山模型のみを設置し、本研究で実施した載荷と同様の載 荷を行った実験結果より得られたものである⁷.

(3) 載荷方法

これまでの研究において、トンネル軸方向に対して水 平方向から載荷した場合の覆工の強度について検討を行 っている³.これは、過去の地震によって山岳トンネル に水平圧縮変形が生じたと考えられる被害形態を模擬し た一つのパターンを模擬したものである.本研究では、 先の研究³に続き、トンネルに鉛直圧縮変形が生じたと 考えられる場合について検討するため、覆工の横断面に 対して図-1に示すように、鉛直方向(上方向)から載荷



写真-1 実験模型の概要



表-1 模型材料の配合

_	模型	W/C	単位量 (kg/m ³)						
		(%)	セメント	水	砂	混和剤			
	覆工	66.8	352	235	1575	3.52			
1	地山	191.8	55	105.5	1000				

		対策工		地山		覆工模型			
Case	ン イド	概要	仕様	ー軸圧縮 強度 (MPa)	変形 係数 (GPa)	ー軸圧縮 強度 (MPa)	変形 係数 (GPa)	ポアソン 比	割裂引張 強度 (MPa)
1	有	なし		0.43	0.115	24.7	15.0	0.19	2.0
2	兼	なし		0.44	0.127	23.8	15.0	0.19	2.4
3	有	ロックボルト	真鍮棒 ¢3mm, L150mm 22.5 [°] ピッチ,2断 面	0.57	0.074	21.1	14.4	0.19	2.0
4	有	内面補強 (炭素繊維シート)	目付量50g/m2 覆工内面 -15°~195°	0.47	0.088	32.3	17.3	0.20	2.9
5	有	補強鉄筋	金網 φ1mm, 10mmピッ チ.覆工模型中心	0.44	0.040	18.8	12.5	0.19	1.6

表-2 実験ケース一覧



図-3 載荷荷重と変位の関係

するものとした.ここで、載荷はステップ毎に徐々に荷 重を増加させていく静的な載荷とした.載荷終了の判断 は覆工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.

(4) 実験ケース

表-2に実験ケースの一覧を示す.本実験で検討の対象 とした対策工は既設トンネルにおいて外力対策⁸として 用いられるものであるインバート,ロックボルト,内面 補強(炭素繊維シート)に加え,新設の道路トンネルに おいて坑口部で用いられる単鉄筋を設置する構造とした.

Caselは基本ケースとし、インバートが設置されている構造を模擬したものである.

Case2はインバートの効果を確認するため、インバートを設けない構造を模擬したものである。脚部には地山との安定性を図るために鋼板を配置した.なお、Case2以外はインバートの設置を基本とした.

Case3は覆工の内面側からのロックボルトを打設する 場合を模擬したものである. ロックボルトは径 \$ 3mm, 長さL=15mmの真鍮棒を用いることで模擬した. 設置位 置は, 22.5°ピッチで1断面あたり周方向に9本配置した. さらに,奥行方向は300mmのうち100mm, 200mmの位置 の2断面で配置した.

Case4は繊維シートによる内面補強工を模擬したもの である.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 50gm²のものを用いた. 設置位置はアーチから側壁部の覆工内側に繊維の軸が覆 工の周方向と同じになるように全面で接着した.

Case5は坑口部などに採用される単鉄筋を模擬したものである.単鉄筋は市販の金網を用いて模擬することと

し、径 φ Immの針金が10mm間隔で格子状に編みこまれ たものを使用した.金網の設置位置は覆工の厚さ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.本来は、実構造物と同様に引張が作 用する内空側に設置すべきであるが、覆工の厚さが 20mmであるため、模型作製の精度の制約から内側に寄 せて配置せずに覆工の中央部に配置した.

(5) 実験時の計測項目および方法

本実験では外力の増加に伴う覆工の挙動を検討するため、載荷時のジャッキと載荷盤の間に生じる荷重(載荷荷重)および覆工内部の変位(鉛直90°~-270°,水平0°~-180°),覆工内外面のひずみ(アーチ、側壁では15°間隔、インバートでは45°間隔)を計測した.加えて、覆工の破壊形態を確認するため、実験中に可能な範囲で覆工内面のひび割れ状況を観察し記録した.

3. 模型実験の結果

(1) 覆工の挙動

図-3に載荷荷重と覆工の変位を示す.図-3より,全てのCaseにおいて,ある一定の荷重までは載荷(荷重の増加)にともなって,水平変位および鉛直変位は増加している.特に,鉛直変位が覆工の内側方向に増加(断面が拡大)するのに対して,水平変位は外側方向に増加(断面が拡大)している.これは,覆工横断面に対して上方向からの載荷のため,覆工が上から潰されるような変形であることを再現していると考えられる.



図-4 覆工内,外面のひずみ分布

なお、図-3中の各グラフで丸印を付した荷重を着目点 とし、以降、特に着目点における現象を基本として考察 を行う.着目点は覆工の破壊形態を確認するため、原則 として荷重変位曲線の傾きが急変する1つ手前の載荷ス テップにおける覆工内外面のひずみ分布に着目し、選定 したものである.

図-3(a)よりCaselにおいては、荷重が約500 kNで鉛直変 位は急激に増加し、水平変位は内空側に急変している. 図-3(b)~(e)より、他のCaseについてもCaselと同様にCase2 は約260 kN、Case3は約610 kN、Case4は約800 kN、Case5は 約430 kNにおいて、荷重変位曲線の急変が見られる.こ の傾向はこれまでの研究³と同様に、覆工に圧縮破壊等、 なんらかの影響が大きい破壊が生じたことにより発生し たものと考えられる.ただし、Case4の場合は他のCase と荷重変位曲線の形態が異なる.Case4以外は、荷重変 位曲線の急変後も荷重の増加とともに変位も増加してい る一方、Case4は変化後に荷重は急激には増加せず、と くに天端変位が概ね線形増加しており、最後に急激な破 壊が生じたものと考えられる.なお、本研究では、荷重 変位曲線の急変後から曲線の傾きが生じているこの急変 時を「構造的な破壊」として検討を行った.

この結果から、Case2に示したインバートが無い構造 は他のCaseに比較して小さい荷重で曲線に変化が生じて おり、インバートの設置は構造全体の耐力の向上につな がる可能性があると考えられる.また、表-2に示すとお りCase3は、一軸圧縮強度がCase1よりも小さいが、Case1 に比べ構造的な破壊が生じた時の荷重は大きく、トンネ ル構造の耐力向上がわずかにみられると言える.また、 Case4は構造的な破壊が生じた時点の荷重はCase1に比べ6 割程度増加し、極端に大きいものの、一軸圧縮強度も5 割程度大きく、荷重変位曲線の破壊後の形態も他のCase と異なるため、トンネル構造の耐力向上については顕著 には見られない可能性が高い.さらに、Case5は一軸圧 縮強度はCase1に比べ3割程度小さく、破壊時の荷重も2 割程度小さいため、トンネル構造の耐力向上の効果は顕 著には見られないと考えられる.ただし、これらの結果 は、覆工や地山の強度等を含めた実験の精度上のばらつ きもあると考えられるため、今後、数値解析等による検 証が必要である.

次に、図-4に着目点における覆工内・外面のひずみ分 布図を示す。着目点の選定は上述したとおりである。

図-4 (a)より、Case1の基本ケースでは90°を除き、75~ 120°の内側でおおむねプラスの値(引張),外側でマ イナスの値(圧縮)となっている. また, 90°の外側で は-3000 μを超えており、曲げ圧縮による圧ざが生じて いると考えられる. 内側のひずみは、 図に示したステッ プ以前のステップではプラスのひずみが発生していたが, ひび割れが発生したため、マイナスの値となっている. これらのことから、天端部では曲げが発生していると考 えられる. 一方で、0°から45°、135°から180°付近 ではひずみの値はおおむねマイナスの値を示し、全圧縮 となっていると考えられる. さらに、0°から45°の内 側ではコンクリートの圧縮破壊の目安である-2000μに 近いひずみが発生しており, 側壁部において, 圧縮破壊 が生じる可能性がある. インバート部の-45°, 225°で は内側がプラスの値,外側がマイナスの値となり,イン バート中心(270°)を挟んで両側に曲げが生じている と考えられる.



図-5 覆工内面のひび割れ観察結果

以上の結果をまとめると、基本ケースの覆工の挙動は、 鉛直方向からの荷重によって天端、インバート部に曲げ、 側壁では圧縮が生じるような破壊形態となっている.本 実験の方法によって地震時の山岳トンネルの被害形態の 一つである側壁部の圧縮破壊³が再現できる可能性があ ると考えられる.

図4 (b)より、Case2のインバートの無い場合には90°付 近のひずみは、内側で引張、外側で圧縮となっている. この傾向はCase1と類似である.また、0°や180°付近 では、内側が圧縮、外側が引張となっている.このとき、 0°付近のひずみは、内側が-2000 μを超え圧ざが、外側 が1000 μ以上で曲げによる引張ひび割れが生じている可 能性がある.この傾向はCase1とは異なるが、インバー トがないことにより、覆工の横方向の挙動に対する拘束 がないため、横方向からの地山の押し出しにより側壁部 で曲げが生じたと考えられる.

図-4 (c)より、Case3においても90°付近では内側が引張, 外側が圧縮のひずみが発生しており、天端周辺は曲げが 発生している.また、0°から75°、135°から180°の 側壁周辺は内側、外側に圧縮のひずみが発生している. 加えて、-2000 μ 近い、もしくはそれ以上の圧縮ひずみ が発生しており、圧ざが生じる可能性がある.さらに、 荷重変位曲線の急変部での荷重は異なるものの、天端、 側壁、インバートにおいて、Case1と類似した分布とな っている.ただし、Case1に比べ天端外側のひずみは小



写真-2 Case4 シートはく離状況

さく、側壁の圧縮ひずみの発生はCaselに比べ顕著であると考えられる.

図-4 (d)より、Case4の構造的な破壊が生じた際の時のひ ずみは値が大きく、設置していたひずみゲージの許容値 を超過していたため、正常な値を示していなかった可能 性があることから、Case4の着目点は、実験時に接着し たシートのはく離を最初に確認した、荷重約430 kN時点 とした.これは、シートの設置によって覆工のひび割れ 等は確認できないが、シートのはく離を発生させるよう な変状が発生した場合、トンネル構造に影響を及ぼす可 能性があると推測したためである.図より、90°付近で 内側が引張、外側が圧縮のひずみが発生しており、天端 周辺は曲げが発生している.また、0°から60°、150° から180°の側壁周辺は内側、外側に圧縮のひずみが発 生している.さらに、インバート部では-45°や225°に おいて曲げが発生しており、天端、側壁、インバートにおいて、Caselと類似したひずみ分布となっている.加えて、180°側の側壁部では-3000 µ以上のひずみが発生しており、圧ざが発生している可能性がある.なお、Case4に関しては覆工の圧縮強度が他のCaseより高めであるため、単純な比較は困難であるが、ひずみ分布がCaselと類似している一方、荷重変位曲線の関係はCaselとはやや異なっている.

図4 (e)より、Case5では基本ケースと同様に90°付近の 内側で引張、外側で圧縮のひずみが発生している.また、 0°から45°、135°から180°の範囲ではおおむね内側、 外側ともに圧縮となっている.さらに、インバート部で は45°や225°において曲げが発生しており、天端、側 壁、インバートにおいて、Case1と類似したひずみ分布 となっている.加えて、0°と165°の側壁部では-2000 μ に近い圧縮ひずみが発生しており、圧ざが発生する可能 性がある.ただし、他のCaseと比べると、極端なひずみ は発生していない.これは金網を設置していることによ り、発生するひずみが覆工アーチ部全体に分散すること によって生じている可能性がある.

(2) 覆工の変状状態

図-5に実験中および実験終了後の覆工内面のひび割れ 観察結果を示す.

図-5 (a)より覆工奥行方向(縦方向)のひび割れを見る と、90°付近では約62kNでひび割れが生じている.こ のひび割れは、図-4(a)より、天端部の曲げ引張によるも のと考えられる.また、インバート部では-45°、225° 付近でひび割れが発生しており、図-4 (a)より曲げ引張に より生じたものと考えられる.この傾向はインバートを 設置した他のCasesでも同様である.

0°~45°, 135°~180°にいくつかのひび割れが生 じている.これは圧ざによるものと考えられる.しかし, これらのひび割れは図-3 (a)に示した,荷重変位曲線の急 変前もしくは後である.荷重変位曲線の急変部である約 500kN付近を見ると,側壁とインバートの接続部におい て,ひび割れが発生している.つまり,インバートを有 する構造の場合には,側壁とインバートの接続部での破 壊が覆工全体の耐力に影響を及ぼす可能性がある.ただ し,本実験では,特に覆工の増厚や脚部での擦り付け等 を行っていないことによって,応力が顕著に集中したた めに生じた可能性がある.

図-5 (b)より、90°、0°以下、180°以上の位置でひび 割れが発生している.これらは曲げによるひび割れと考 えられる.荷重変位曲線の急変部である260kN程度のひ び割れを見ると、脚部に近い位置のひび割れがあり、曲 げによる側壁のひび割れにより覆工構造に変化が見られ たと考えられる.

図-5 (c)より、覆工奥行方向(縦方向)のひび割れはほ とんど発生していないが、ロックボルトの位置から伸び るように、ひび割れが周方向に発生している.これは、 実験の性質上、ロックボルトの外側から荷重が作用して おり、ロックボルトを介して覆工に荷重が伝達され、ボ ルト周辺にひび割れが発生したものと考えられる. また, 載荷終了時にはひび割れが閉合した部分において、一部 の覆工にはく落が見られた.荷重変位曲線の急変部であ る610kN程度のひび割れを見ると、0°側の側壁とイン バートの接続部でのひび割れが該当する. この傾向は Case1と類似している.本来,対策工としてのロックボ ルトは覆工を地山に縫い付ける効果を期待するものと考 えられ、ロックボルト自体には主に引張の応力が発生す るものと考えられる.しかし、実験を再現した数値解析 結果から、ロックボルトに圧縮力が発生している結果が 得られている4. 本実験結果ではロックボルトの外側か ら地山を介して載荷されたため、ロックボルト周辺の覆 工にひび割れが生じたものと考えられ、この時にロック ボルトには圧縮力が生じているものと考えられる. この 現象は、地震時の荷重の作用状態によっては発生する可 能性があるため、今後実際のデータ等も踏まえてさらな る検証が必要である.

図-5 (d)は、覆工のひび割れがシートにより確認できな いため、シートの破れやはく離箇所を示している. 図よ り、最初に荷重約430kNにおいて、シートのはく離が見 られた箇所では覆工にひび割れが発生していた.また, 写真-2に示すように、載荷段階の途中経過は不明である が、載荷終了後には図に示したはく離部分において、覆 工を貫通するひび割れが確認されている.しかし、シー ト部分は密着しており, 覆工のはく落等はみられなかっ た. また, Case4の荷重変位曲線の急変はインバート部 の-45°付近のひび割れが急激に進行し、破壊すること で生じたと考えられる.これは、図-4(d)のひずみの発生 傾向から、アーチ、側壁等の変状の発生は他のケースと 類似であるものの、シートにより発生した変状の進行が 抑制されたことより、インバート部で急激に破壊が生じ た可能性がある.このことは、耐震対策としてシート等 で覆工を補強することが、他の弱部への破壊を誘導する 可能性もあることから、補強工単体で設計を行うだけで はなく、構造全体での設計を考える必要があると言える.

図-5 (e)より、90°、0°165°付近においてひび割れが 発生している.しかし、これらのひび割れは荷重変位曲 線の急変前もしくは後である.荷重変位曲線の急変した 荷重約430kNでは側壁とインバートの接続部付近にひび 割れが生じており、Case1と同様に同部分の破壊により 生じたものと考えられる.本Caseは他のCaseに比べ発生 ているひび割れが少ない.これは、金網を配置している ことによりひび割れが分散したことによる影響が考えら えられる.このため,鉄筋のような鋼材を配置した場合 は、地震時において、かぶりコンクリートがはく離する 可能性はあるが、大規模なはく落を軽減できる可能性が ある.

4. おわりに

本研究では、新設および既設の山岳トンネルにおいて 実施される対策工を設置した覆工の挙動、対策工の効果 とそのメカニズムを解明するため、覆工と周辺の地山を 模擬した模型を用いて、地震時等の外力を静的な荷重と 想定して、トンネルの鉛直方向から作用させた静的な載 荷実験を行った.以下に得られた知見を示す.

- 本実験で実施した鉛直方向からの静的な載荷により、 山岳トンネルの地震被害時の変形モードの一つで ある、覆工の側壁部に圧縮が生じる変形を模擬す ることができる。
- 2) インバートの設置は、鉛直方向からの外力に対して、 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.ただし、インバートを有する構造は、側 壁とインバートの接続部分において生じる破壊が トンネル構造の耐力に影響を及ぼす可能性がある.
- 3) ロックボルトによる補強は鉛直方向からの外力に対して、トンネル構造の耐力の向上の効果が得られる可能性がある.ただし、耐力の向上についてはボルトの寸法や打設間隔等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.また、ロックボルトを介して覆工にひび割れ等の変状が発生する可能性があり、分離したブロックを縫付ける効果は期待されるものの、適用に際しては注意が必要である.
- 4)内面補強は鉛直方向からの外力に対して、トンネル 構造の耐力向上の効果は不明であるが、覆工のは く落等の発生を低減できる可能性がある.また、 シートによる覆工の内面補強は、他の弱部への破

壊を誘導する可能性もあることから、補強工単体 で設計を行うだけではなく、構造全体での設計を 考える必要がある.

5)鉄筋による補強は鉛直方向からの外力に対して、ト ンネル構造の耐力向上の効果不明であるが、覆工 に発生するひび割れの発生を低減することで、か ぶりコンクリートのはく離はあるものの、大規模 な、はく落等の発生を低減できる可能性がある.

最後に、これらの結果は実際の対策工との諸元や寸法 の違い等があり、必ずしも地震による外力を模擬したと は言い難い.今後、これらの結果を踏まえた数値解析等 を踏まえ、トンネル構造の耐力に寄与する可能性や実際 の耐震対策への適用について検討を行う予定である.

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,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
- 河田皓介,砂金伸治,日下敦,真下英人: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,トンネル工学報告集,No.23, pp.277-284, 2013
- 4) 日下敦,河田皓介,砂金伸治,真下英人:二次元静 的載荷実験の再現解析による山岳トンネルの耐震対 策工の効果に関する一考察,第43回岩盤力学に関す るシンポジウム講演集,No.17, pp.93-98, 2015.1
- 5) (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.
- 6) 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
- 7) 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, pp41-48, 2012
- 8) 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

(2015.8.7 受付)

VERTICAL STATIC LOADING TESTS FOR RISK MITIGATION MEASURES AGAINST EARTHQUAKE OF ROCK TUNNEL

Kosuke KAWATA, Nobuharu ISAGO and Atsushi KUSAKA

Mechanism of rock tunnel damages from earthquakes has been examined recently. 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, vertical static loading tests are carried out in laboratory. As a result, some effects of countermeasures such as steel bars in the lining, inner reinforcement sheets, rock bolts and installation of invert are confirmed.