3.2 山岳トンネルの耐震対策の選定手法に関する研究

研究予算:運営費交付金(一般勘定) 研究期間:平23~平27 担当チーム:道路技術研究グループ(トンネル) 研究担当者:砂金伸治,日下敦

【要旨】

山岳トンネルは一般に過去の経験から地震に強い構造物と考えられているが、新潟県中越地震では、これまで 耐震対策が不要とされてきた区間においても、覆工の崩落を伴うような比較的規模の大きい被害が発生した.こ のような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生 のメカニズムや、耐震対策が必要となるトンネルの条件を明らかにするとともに、効果的な耐震対策の選定手法 を確立する必要がある.本年度は、昨年度に続き、山岳トンネルの耐震対策の選定に関する検討として、地山に 特殊条件が介在する場合や、耐震対策を実施したトンネルに地震時に想定される外力が作用した際のトンネルの 挙動について模型実験により検討した.続いて、山岳トンネルで要求されると考えられる耐震性能に応じた限界 状態について、安全性、供用性、修復性の観点から整理した.

キーワード:山岳トンネル,地震被害,耐震対策,模型実験

1. はじめに

主として岩盤に掘削される山岳トンネルにおいては, 過去の地震ではトンネル構造に大きな損傷を受けるの は非常に限定的な条件であり,一般に地震に強い構造 物とされてきた.他方、断層破砕帯等の極端に地山の 悪い箇所や不安定な斜面内、トンネル自体が既に変状 を生じていた箇所、坑口部等では、比較的地震の被害 を受けやすいことが知られているものの、その被害発 生メカニズムについては不明確な部分が多く, 坑口部 等において経験的に覆工の補強等の対策を行っている のが現状である^{例えば1)}. そのような状況のなか、2004 年新潟県中越地震では、上述の条件に当てはまらない 箇所においても、数は限られるものの比較的規模の大 きな覆工の崩落を伴う被害を受けた山岳トンネルがあ った 2), 3) これは、地震の規模や地山条件、トンネル の構造等によっては、山岳トンネルにおいても地震に よる被害を受ける可能性があることを示唆している. このような被害を最小限にするための耐震対策を合理 的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被 害発生のメカニズムや耐震対策が必要となるトンネル の条件を明らかにするとともに、効果的な耐震対策の 選定手法を確立する必要がある.

本年度は、山岳トンネルの耐震対策の選定に関して、 耐震対策の効果を検討するため、地震被害が想定され る特殊条件が介在する場合や、耐震対策を実施したト ンネルに地震時に想定される外力が作用した際の挙動 について模型実験により検討した.続いて,昨年度検 討した,山岳トンネルで要求されると考えられる耐震 性能に応じた限界状態について,安全性,供用性,修 復性の観点から整理した.

2. 研究の方法

2.1 耐震対策の効果に関するメカニズムの解明

2.1.1 耐震対策の効果に関する模型実験

(1) 実験概要

耐震対策が効果を発揮するメカニズムを解明するための基礎資料を得ることを目的に模型実験を行った.

実験は地震での影響が懸念される地山に存在する特殊条件や,新設・既設時に設置するものと考えられる 対策工を設置した山岳トンネルを模擬した模型を作製 し,地震時の外力が作用した場合の変形モードを与え る静的な載荷実験を行った.

写真-1に実験装置を示す.実験装置は土槽,鋼製フレーム(載荷方向側は可動壁),油圧ジャッキ 3 本からなり,土槽の幅は内側で一辺 1.2 m 四方で,深さは 0.3 m である.

図-1 に実験模型の概要を示す. 覆工模型は2車線道 路トンネルの約 1/20 のものをプレーンモルタルによ り作製した.また,地山模型は貧配合モルタルにより 作製した.実験時は作製した覆工模型を土槽の中心に 設置し,周辺を地山模型で埋めることにより地山内の 山岳トンネルを模擬した. 模型の目標一軸圧縮強度は 覆工模型が 18 N/mm², 地山模型は 0.5 N/mm² とした.

載荷は覆工模型の天端部に圧縮破壊が発生すると考 えられるトンネル横断面に対して水平圧縮となる変形 モード^カとなるような,覆工模型の左側水平方向から 荷重制御により行った.また,載荷終了の判断は覆工 模型が破壊(天端部の覆工の崩落を破壊と判断),もし くは油圧ジャッキが最大荷重に到達するまでとした. ここで,油圧ジャッキは1本当たり,約400kN載荷能 力を有し,最大約1200kNの載荷が可能である.

実験時の計測・観察は可動壁に作用する載荷荷重(以後、荷重とする)と変位、覆工模型内部 SL の位置の 水平変位(以後、水平内空変位とする)と覆工模型の 内面・外面における周方向のひずみに加え、目視可能 な範囲で覆工模型内面におけるひび割れの状況の観察 を行った.

(2) 実験ケース

表-1 に実験ケースを示す.本実験では地震時に影響 が懸念される特殊条件と、昨年度抽出した新設・既設 時の耐震対策として効果を発揮する可能性があると考 えられる6ケースについて実施した.

Case1 は特殊条件として天端に背面空洞を設けたも のとし、90°位置から左右30°ずつ60°の範囲、すな わち覆工模型右側 SL 位置を 0°とした座標で考えた場 合,60°から120°の範囲を空洞にすることで模擬した. Case2 はインバートの効果を検討するため、インバー トが存在しないものとし、脚部は鋼板を設置し水平方 向の移動が可能となるようにした. Case3 は基本ケー スとして、背面空洞がなく、インバートを設置し、対 策工を実施しないものとした. Case4 は単鉄筋を模擬 し、 φ1 mm の針金が 10 mm 間隔で編みこまれた金網 を、トンネル模型の厚さ 20 mm の中間部、すなわち被 り10mmの位置に配置した. Case5 はロックボルトを 模擬し, ↓ 3 mm で長さ 15 mm の真鍮棒を周方向 15° ピッチでトンネル模型の奥行高さ 100 mm と 200 mm の2列に配置することで模擬した. Case6 は内面補強 を模擬し,目付 50 g/mm²の炭素繊維シートをアーチ部 (上述の座標における, -15°から195°の周方向)に 接着した.

2.2 新設・既設トンネルに対して要求される限界状態 の検討

道路トンネルは道路ネットワークの一部を構成する 構造物であり、地震時における要求性能も他の構造物 と同様の耐震性能を要求されるものと考えられる.し かしながら、上述のとおり山岳トンネルはこれまでに





受けた地震被害に関する事例が乏しい.昨年度は耐震 性能に伴う限界状態と安全性,供用性,修復性につい て整理したが,耐震対策の適用性を検討することを踏 まえ,想定される地震に対するトンネル毎の目標とす る耐震性能に応じた限界状態について検討を行った.

3. 研究の結果

3.1 耐震対策の効果に関するメカニズムの解明

3.1.1 耐震対策の効果に関する模型実験

図-2 に背面空洞が存在する場合の実験結果を示す. また、図-3 は新設トンネルを対象としたインバートお よび単鉄筋による対策を実施した場合の結果を示す. 図-4 は既設トンネルを対象としたロックボルトおよ び内面補強による対策を実施した場合の結果を示す. 各図中の(a) は荷重と水平内空変位の関係を示す. (b) は、一定の荷重時におけるトンネル周方向の内面と外 面のひずみ分布図を示す. このひずみ分布の値は覆工 の変形モードを検証するため、分布状況がわかる荷重 時のものを抽出した. 図-2 は 50 kN とし、図-3 および 図-4 は 300 kN とした. (c) はトンネル模型のアーチ部 における内面側のひび割れ展開図を示す. ひび割れ箇

	特殊条件および対策工				実験模型の材料特性							
No.	特殊条件	対策工	材料および設置範囲		地山		トン	ネル		対策		
					圧縮	圧縮	引張	ヤング	ポア	の		
					強度	強度	強度	係数	ソン	対象		
					(MPa)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	比			
1	背面空洞			アーチ部 60°~120°	0.434	26.5	2.53	15.7	0.18			
2	インバート 無				0.455	24.1	2.27	15.3	0.20			
3*		(インバ ート)			0.486	23.8	1.93	14.3	0.17	新設 (既設)		
4		単鉄筋	金網 (థ1mm) 10mm 間隔	全周 被り 10mm	0.478	18.1	1.94	13.0	0.19	新設		
5		ロック ボルト	真鍮棒 (ø3mm)	アーチ部 15 [°] 間隔 2 列	0.458	21.8	1.84	14.9	0.19	既設		
6		内面補強	炭素繊維シー ト(50g/m ²)	アーチ部 内側	0.478	24.2	2.12	15.8	0.19	既設		

表-1 実験ケース

※; Case3 は Case1 と比較し,背面空洞の影響を検証する.

また、Case2と比較しインバートの効果を検証する. Case2 以外はインバートを有する.

Case1 背面空洞

Case4 単鉄筋





Case5 ロックボルト <u>ロックボルト</u> 90° 180° 0 SL







所は100kN毎に色分けした線により表現している.

金網

SI

(1) 背面空洞の影響

. 180°

図-2(a) より, Casel は荷重約 100 kN で荷重と変位 の曲線の傾きが変化している.また,荷重約 650 kN で 再度,傾きの変化が見られる. Case3 は荷重約 450 kN で傾きの変化が見られる.覆工模型が破壊したことを 判断した荷重は Case1 は 701 kN であり, Case3 は 950kN であった. 図-2(b) より Case1 は 60°と 120°を境に 60°~ 120°の範囲においてひずみ値の正負が逆転しており, 内側が圧縮(マイナスの値),外側が引張(プラスの値) の状態となり,90°で大きな曲げが発生し,それ以外 の側壁部は内側が引張,外側が圧縮となる変形モード となっている.一方で,Case3 は側壁部では内側引張, 外側圧縮となっているが,60°から 150°の範囲は内 側と外側がともに圧縮される変形モードとなっている.

図-2(c) より Case1 は荷重が約70~100 kN の間に、 約 60°, 120°の位置に縦断方向にひび割れが発生し た. その後,約160~180kNの荷重で約90度の位置 にひび割れが発生した.これは、実験模型内の空洞が 存在する範囲で地山側に変形したためと考えられ、こ れらのひび割れの発生により, 覆工模型の剛性が低下 し図-2(a)に示す荷重と変位の曲線の傾きに変化が生 じたものと考えられる. また,荷重が 600 kN ~ 700 kNの間に120°付近のひび割れが進展することで破壊 が生じた. Case3 は荷重が約 190kN の箇所で右側のイ ンバート接続部にひび割れが発生した. さらに, 荷重 約 300 kN ~400kN で 90°付近にひび割れが発生し, 荷重約 450 kN において両側の側壁とインバートの接 続部でひび割れ部にせん断破壊時にみられるズレが生 じた.その後,950kNを超えた段階で天端部の覆工が はく落し破壊した.

以上の結果から,天端に背面空洞が存在する場合は, 天端周辺の地盤反力が確保出来ず,水平方向からの外 力の作用した場合に覆工模型が地山側に変形しやすく なり,曲げによるひび割れ等が発生し,構造が不安定 化する可能性があると考えられる.

(2) 新設トンネルを対象とした対策を実施した結果

図-3(a)より, Case2 は荷重約 150 kN と約 500 kN 時, Case3 は荷重約 450 kN で Case4 は荷重約 350 kN で荷 重と水平内空変位の曲線の傾きが変化している.また, 供試体が破壊したことを判断した際の荷重は Case2 は 約 800 kN, Case3 は約 950 kN であったが, Case4 は荷 重 1200 kN まで載荷した場合でも天端部の崩落を伴う 破壊が発生しなかった.

図-3(b)より、インバートを有する Case3 と Case4 のひずみ分布状況はおおむね一致しており、側壁部 0 ~30°と150~180°の範囲の内側で引張、外側で圧縮 の値が発生しており、60°~120°の範囲では内側と 外側がともに圧縮となっている.一方でインバートの ないCase2は30°と150°の位置において内側で引張、 外側で圧縮の値が発生しているが、90°~120°の範 囲では、内側は圧縮、外側が引張のひずみが発生して おり、肩部と天端部で曲げが発生する変形モードとな っている.このことから、インバートが無い場合は天 端において曲げが生じるがインバートを設置すること で天端部に発生する応力は軸圧縮が卓越する変形モー ドに変化すると考えられる.

図-3(c)より, Case2は100~200kNにおいて45°, 135°の肩部付近でひび割れが発生しており,300~ 500kNの範囲で天端部にひび割れが発生している.こ



図-2 背面空洞がある場合の結果

れらのひび割れが発生した際の荷重は図-3(a) に示す, 荷重と水平変位の傾きの変化と一致しており,ひび割 れの発生により,覆工模型の構造全体の剛性が低下し たためと考えられる.約800kNで60°から115°の範 囲の覆工模型が崩落し破壊した. Case4 は荷重100kN までに 35°, 60°付近でひび割れが発生した.また, 200 ~ 400 kN の間に側壁とインバート接続部でひび 割れが発生し,荷重約 350 kN あたりで同部分のひび割 れ箇所でせん断破壊時にみられるズレが生じた.この ズレが生じた際の荷重は図-3(a)に示す荷重と水平内 空変位の曲線の傾きの変化と一致している.この現象 は(1)に記載した Case3 と類似している.また Case4 で発生したひび割れは Case3 に比べ少ない.これは鉄 筋を模擬した金網によりひび割れが抑制されたものと 考えられる.載荷後に天端部のひび割れ周辺(図中の 斜線部)で,厚さ数 mm 程度のはく離は生じたが,覆 工が分離するような破壊は生じなかった.

以上の結果から,新設トンネルへの対策としてイン バートを設置することで覆工全体が環状構造となり, 水平方向からの荷重に対して天端部に発生する曲げの 発生が抑制されるため,トンネル構造全体の応力状態 としては比較的有利になっており,耐力向上の効果が 期待できる可能性があると考えられる.ただし,イン バートを有する構造は側壁とインバート接続部におい て,応力集中と考えられる破壊が発生するため,同部 の構造が耐力に影響する可能性がある.ただし,実験 の性質上,ひずみの計測等が行えていないため,数値 解析等による検証が必要である.

単鉄筋による補強はトンネル構造全体としての耐力 が向上すると考えられる.また,ひび割れを抑制する ことにより大規模なはく離やはく落を抑制できる可能 性がある.

(3) 既設トンネルを対象とした対策を実施した結果

図-4(a)からCase3, Case5, 6については荷重約300kN ~600kNにおいて、荷重と水平内空変位の曲線の傾き が変化している.また、供試体が破壊した際の荷重は Case3 が約950 kN, Case6 は約880kN で Case5 は 荷重1200 kN まで載荷した場合でも天端部の崩落を伴 う破壊は発生していない.

図-4(b)より, Case3, Case5, Case6 ひび割れ分布状 況はおおむね一致しており, 既設トンネルへの対策を 想定したロックボルトもしくは内面補強を実施したこ とによる変形モードの変化は見られない.

図-4(c)より, Case3 は約 460kN において, Case5 は 約 560kN, Case6 は約 520kN の荷重に達した際に, 側 壁とインバート接続部にかけて, ひび割れが発生し同 部にせん断破壊時にみられるズレが生じた. これは, 図-4(a)に示す傾きの変化と一致しており, (2)のイン バートによる対策を実施した結果と類似している. Case5 は約 230kN で 180°付近のボルト部から周方向の



ひび割れが発生した.また,天端部では縦断方向のひ び割れは生じず,大規模な覆工の崩落は見られなかっ たが,せん断破壊によると考えられる周方向のひび割 れが発生した.載荷終了後,天端と 150°付近の斜線 部で模型厚さの 5~10mm 程度の深さのはく落が発生 した. Case6 は内面にシートを接着していたため,載 荷中のひび割れは確認できなかったが,約 850kN で天 端部のシートにうきが生じ,約 880kN でシートが一部 破断した.実験終了後,天端付近にせん断によると考 えられる周方向のひび割れによる 5mm 程度のズレを 確認した.このズレが発生していた部分周辺において 覆工模型とシートの付着がはがれていたが,覆工模型 の崩落等はみられなかった.

以上の結果から,既設トンネルへの対策としてロッ クボルトを設置することはトンネル構造全体としての 耐力向上や覆工の崩落を抑制する効果が得られる可能 性がある.しかし,実験時の早い段階でロックボルト 周辺からひび割れが見られたことにより,ロックボル トを打設した箇所が弱部となりひび割れ等を発生させ る可能性も考えられるため,今後の検討課題である.

内面補強はトンネル構造全体の耐力向上の効果は得 られないものの、シートの付着により崩落やはく落発 生を抑制できる可能性がある.

(4) 実験結果のまとめ

模型実験により地震時を模擬した水平方向からの外 力が作用した場合の山岳トンネルの挙動について,背 面空洞が存在する場合の覆工の破壊メカニズムの解明 および,新設・既設トンネルにおいて対策を実施した 場合の対策効果を確認した.

- ・天端部の覆工背面に空洞がある場合は、地震等による水平方向からの外力の作用に対して、地盤反力が 確保できないため、空洞がない場合に比ベトンネル 構造全体としての耐力が低下する可能性がある。
- 新設トンネルへの対策としてインバートを設置することで水平方向からの外力の作用に対して、トンネル構造全体としての耐力が向上する可能性がある.
 ただし、応力の集中と考えられるインバートの接続部分での破壊が全体の耐力に影響を及ぼす可能性があるため、今後の検討課題である.
- 新設トンネルへの対策として単鉄筋により補強することで水平方向からの外力の作用に対して、トンネル構造全体としての耐力が向上する可能性がある。
- ・単鉄筋による補強は覆工に発生するひび割れを抑制 し、はく離等の発生を抑制できる可能性がある.
- ・既設トンネルへの対策として、ロックボルトによる



補強をすることで水平方向からの外力の作用に対し, トンネル構造全体としての耐力が向上する可能性が ある.ただし,ロックボルト周辺からのひび割れ等 の発生が懸念されるため,今後の検討課題である.

・既設トンネルへの対策として、繊維シートによる内 面補強はトンネル構造全体としての耐力向上は得ら れないものの、シートの接着により、はく落の発生 を抑制できる可能性がある.

ただし、これらの実験結果は実際の対策との諸元や 寸法の違いなどの検証が必要であるとともに、実験の 結果から得られた課題に対しても検証が必要である.

3.2 新設・既設トンネルに対して要求される限界状態 の検討

昨年度整理した,耐震性能と限界状態について,供 用性,修復性において応急措置等により緊急車両の通 行が可能となる程度の機能回復が図れるよう定めるこ とを念頭に再度整理を行った.また,トンネル(路線) の重要度や想定する地震に応じた耐震性能(案)を仮 定し,それに応じた限界状態を整理した.これらは, 地震時にトンネルに作用する外力等が不明であるため, 今後の別途項目で検討した内容を踏まえた詳細な整理 が必要となる.

4. おわりに

本年度は、山岳トンネルの耐震対策の選定に関する 基礎的検討として、まず、昨年度整理した地震被害が 想定される背面空洞の影響についての確認、および新 設・既設時の耐震対策について地震時の荷重を想定し た効果の検証を模型実験により検討した.また、前年 度整理した山岳トンネルで要求されると考えられる耐 震性能に応じた限界状態について整理し、想定される 地震に対する耐震性能の分類を検討した.その結果、 得られた主な結論は以下のとおりである. 1)模型実験により地震を想定した水平方向からの外 力によって、背面空洞が存在する場合には一定の影響 があり、新設トンネルで考えられるインバート、およ び単鉄筋、既設トンネルで考えられるロックボルトと 内面補強工については一定の効果が得られることを確 認した.また、本実験は静的な実験でしかないため、 今後は動的な挙動を考慮した実験および数値解析も含 めた検証を行い、地震時を想定した外力が作用する場 合に問題となり得る地山の特殊条件の解明や、対策工 の提案に資する検討を行う必要があるなどの課題を確 認した.

2) 耐震性能に応じた限界状態について,供用性と修復 性について整理し,加えて想定される地震に対してト ンネルの重要度を踏まえ,考えられる耐震性能と,そ れに応じた限界状態を整理した.また,明確な分類を するうえでの課題を確認した.

参考文献

- (社)日本道路協会:道路トンネル技術基準(構造編)・同解 説,丸善,2003.
- 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, 2005.
- 清水満,齋藤貴,鈴木尊,朝倉俊弘:新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果,トンネルと地下,第38巻,第4号, pp.49-57,2007.
- (社)日本道路協会:道路震災対策便落(震前対策編), 丸善,2006.
- 5) (財)鉄道総合技術研究所:既設山岳トンネル地震対策・ 震災復旧マニュアル (案), 2010
- (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2002.
- 7) 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, Vol.20, pp.1-8, 2010.

RESEARCH ON SELECTION METHOD OF COUNTERMEASURES AGAINST EARTHQUAKE FOR MOUNTAIN TUNNEL

Budget : Grants for operating expenses General account Research Period : FY2011-2015 Research Team : Road Technology Research Group (Tunnel) Authors : ISAGO Nobuharu KUSAKA Atsushi

Abstract: Mountain tunnel has been empirically supposed to be a strong structure against earthquake, rather than other structures. However, a few tunnels were damaged with collapse of lining in recent large earthquakes in Japan. In order to minimize such damages under budget constraint, the effective countermeasures and the condition where the countermeasure is required should be established. This year, static loading tests were carried out to examine the effects of countermeasures against the loads assumed during earthquakes. Also, limit states corresponding to assumed seismic performance for mountain tunnel were revised in terms of tunnel safety, usability and repairability.

Keywords: Mountain tunnel, seismic damage, countermeasures against earthquake, model experiment, limit state