

③-3 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、トンネルの耐震対策として考えられる対策を取り上げ、整理するとともに、耐震対策を実施したトンネルに地震による外力の作用を想定した際の効果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。また、耐震対策を選定するフローを作成するために必要と考えられる項目を整理した。

キーワード：山岳トンネル，地震被害，耐震対策，限界状態，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、断層破碎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する検討として、まず、耐震対策の効果メカニズムを検討するため、道路トンネルにおいて耐震対策として考

えられる対策を取り上げ、整理した。さらに、耐震対策を模擬した模型実験により、地震を想定した外力が作用した際の対策の効果について検討した。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。さらに、耐震対策を選定するフローを作成するために必要と考えられる項目および今後実施すべき課題を整理した。

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 効果的な耐震対策の抽出

山岳トンネルにおいては地震時に作用する外力を規定することが難しく、その耐震設計手法は確立されていないのが現状である。一方で、道路トンネルにおける耐震対策は既設トンネルの外力に対する変状対策を基本として実施されている事例もある^{4), 5)}。しかし、これらの対策は地震時の外力の作用に対する効果やメカニズムが解明されていない状況で採用されている。そのため、本章では耐震対策の効果とメカニズムの解明を行うため、既往の文献により、耐震対策として考えられている対策を抽出するとともに、既往の変状対策にて行われている手法を取り上げ、整理した。

2.1.2 耐震対策の効果に関する模型実験

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的な資料として、前述の方法で整理した耐震対策として考えられる手法を模擬した模型を作成し、地震時の外力の作用を想定した荷重を載荷し、その効果を確認する実験を実施した。

実験は写真-1 に示す二次元載荷試験装置を使用し、外力が作用した場合の対策工を施したトンネルの挙動を検討した。実験において使用した土槽は幅 1.2m 四方であり、高さは 0.3m である。

模型は図-1 に示すように土槽内に 2 車線道路トンネルの約 1/20 のモルタル製の覆工・インバートを模擬したトンネル模型を設置し、その外側に貧配合モルタルによる地山模型を作製した。トンネル模型は 18N/mm²、地山模型は 0.5N/mm² を目標一軸圧縮強度として作製した。

載荷は、覆工の天端部に圧縮破壊が発生すると考えられる地山の水平圧縮変形⁷⁾を想定し、トンネル模型左側から荷重制御により行った。また、載荷終了の判断はトンネル模型が崩壊、もしくは載荷用の油圧ジャッキが最大荷重に到達するまでとした。

表-1 に実験ケースを示す。ここで、背面空洞ありのケースは天端部分から左右 30° ずつの 60° の範囲、すなわちトンネル模型右側 SL 位置を 0° とした座標で考えた場合、60° から 120° の範囲にかけて奥行 5cm の範囲を空洞にすることで模擬した。また、単鉄筋はφ 1mm の針金が 10mm 間隔で編みこまれた金網を、トンネル模型の厚さ 20mm の中間部、すなわち被り 10mm の位置に配置することで模擬した。さらに、ロックボルトはφ 3mm で長さ 15mm の真鍮棒を周方向 15° ピッチでトンネル模型の奥行高さ 100mm と 200mm の 2 列に配置することで模擬した。内面補強は目付 50g/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）に接着することで模擬した。

本実験においては、可動壁に作用する荷重（載荷荷

重）と変位、トンネル模型内の変位と内・外部における周方向のひずみに加え、目視が可能な範囲で内面のひび割れの状況を観察・計測し記録した。

2.2 新設および既設トンネルにおいて要求される耐震対策に応じた限界状態の提案

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。そこで、要求される耐震性能や、それに対応した限界状態等に関する検討として、昨年度は道路橋示方書等⁸⁾に記載されている耐震性能に関する記述を参考に、山岳トンネル



写真-1 実験状況

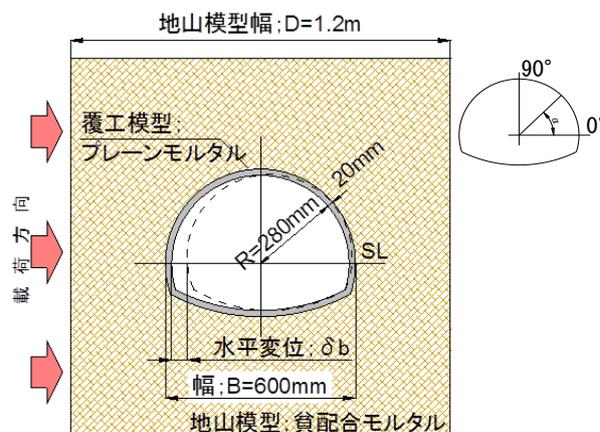


図-1 実験概要

表-1 実験ケース

Case	対策工	仕様	規格	強度(N/mm ²)	
				地山	トンネル
1	インバートなし ^{*1}	---	---	0.455	24.1
2	インバートあり・背面空洞なし ^{*1, 2}	モルタル	厚さ 20mm	0.486	23.8
3	背面空洞あり ^{*1}	---	60° ~ 120° の範囲	0.434	26.5
4	単鉄筋 ^{*2}	金網	φ 1mm × P10mm (被り 10mm)	0.478	18.1
5	ロックボルト ^{*2}	真鍮棒	φ 3mm × L15mm × P15° × 2 列	0.458	21.8
6	内面補強 ^{*2}	炭素繊維シート	目付 50g/m ²	0.478	24.2

*1; Case2 は Case1 に対して、インバートの有無を、Case3 に対して背面空洞の有無を比較する。

*2; Case4-6 はインバートありを基本としているため、Case2 を標準ケースとする。

の耐震対策について検討する上で要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それに応じた限界状態を整理した。本年度はこの限界状態に対して、考えられる安全性、供用性、修復性の観点から検討を行った。

2.3 新設および既設の山岳トンネルにおいて要求される耐震性能ごとの耐震対策の選定手法の提案

実際に山岳トンネルに耐震対策を実施する場合は、その対策を選定する手法が必要となる。そこで、耐震対策が必要となる路線やトンネルの抽出、および実際に実施する対策を選定するフローがあれば、スムーズかつ合理的に耐震対策を実施することができる。しかし、現時点では山岳トンネルにおいて、地震による被害のメカニズムが不明確なことや、外力の設定が難しいことは前述の通りである。そこで、耐震対策を検討するフローを作成するために必要と考えられる項目を整理するとともに、次年度以降に詳細な検討を行うための課題を抽出した。

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 効果的な耐震対策の抽出

表-2 に新設トンネルの補強対策、および既設トンネルの変状対策工を参考に整理した耐震対策工として考えられる内容を示す。

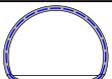
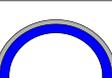
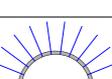
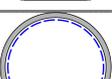
鉄筋による補強は覆工を鉄筋コンクリート構造にするもので、現在、坑口部において、地震やその他の事象に対しての包括的な対策として、覆工を単鉄筋で補

強するパターンが標準となっている。そのため、耐震対策のために鉄筋による補強を行うにあたっては外力の作用を想定するとともに、適用範囲の議論を踏まえ、新設トンネルに対して坑口以外の区間において実施する場合は考えられる。その場合の対策の考え方は、地震による外力の作用に対して、耐力の向上やひび割れの発生や進展の抑制に加え、覆工コンクリートの崩落やはく落を防止する効果が期待されると考えられる。また、既設トンネルにおいて、鉄筋により補強する場合には、同様の効果を期待することが可能となると考えられるが、鉄筋量や覆工厚を決定する際の荷重の設定が難しいこと、また、既設の覆工を撤去し、打ち替える必要があるため、施工が大規模になることが課題となる。

裏込め注入は背面空洞の存在が認められたトンネルに対して、空洞部にモルタルやウレタン等を充填するもので、主として既設の矢板工法により施工されたトンネルに対して実施する場合は考えられる。対策の考え方としては、空洞が存在する場合における、地震による外力の作用に対して、覆工が地山からの反力が取れず、空洞側に変形することによって、変状が生じやすくなることに対して、背面空洞を充填することで地山とトンネルを一体化し、構造全体の安定化を図る効果が期待される。

インバートは新設トンネルでは地山の悪い部分において標準的に実施されており、また、変状対策としては既設トンネルの側圧による押し出しや、盤ぶくれに対する対策として実施する場合は考えられる。対策の考

表-2 考えられる耐震対策工

対策工	対策の考え方	適用条件の例	概要図
①鉄筋による補強	・トンネル構造の耐力向上 ・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 ※ただし、既設トンネルに実施する場合は大規模な覆工の打ち替えが必要となる。	
②裏込め注入工	・地山とトンネル構造の一体化	・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 ※矢板工法で施工されたトンネルに多い	
③インバート新設	・トンネル構造の耐力向上 ・盤ぶくれの抑制	・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 ・側壁の押し出しや盤ぶくれ等の変状があった場合 ※ただし、既設トンネルに実施する場合は大規模な覆工の打ち替えが必要となる。	
④内巻補強	・トンネル構造の耐力向上 ・はく落等の防止	・既設トンネルにおいて、覆工が老朽化等により相応に劣化しているなど、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 ※内側に覆工規模のコンクリートを打設するため、建築限界に余裕が必要	
⑤ロックボルト打設	・地山とトンネル構造の一体化 ・トンネル構造の耐力向上 ・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、押し出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	
⑥内面補強	・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	

え方としては、地震による外力の作用に対して、環状の構造とし、トンネル構造の安定化を図ることで、トンネル全体の耐力を向上させる効果が期待される。ただし、既設トンネルにおいて、インバートを設置する場合には、舗装等を含めた施工を行う必要があるため、施工が大規模となることが課題である。

内巻補強は、既設の覆工の内側にコンクリート等を施工する工法であり、既設トンネルにおいて、覆工の劣化に対する補強工として実施する場合は考えられる。対策の考え方としては既設の覆工の内側に新たな覆工を巻くことによって、トンネル構造の耐力の向上と既設覆工において、変状により発生したはく落等を防止する効果が期待される。ただし、建築限界に対する内空断面の余裕の確保が必要である。

ロックボルトの打設は、覆工内側から地山に向かってロックボルトを打設する工法で、主として、既設トンネルにおいて、地山の劣化による変状や押し出し性の地山、盤ぶくれがある場合に実施することが考えられる。対策の考え方としては健全な地山まで打設することで、覆工に内圧を与えることによる、トンネル構造の耐力向上の効果や閉じたひび割れ部のはく落防止等の効果が期待される。

内面補強は覆工内側に繊維シート、または鋼板等を接着する工法であり、変状部が広範囲に渡る場合やロックボルトの引抜き耐力が得られない場合等に実施されることが考えられる。対策の考え方としては地震に

より、はく落等の可能性のある覆工をシートの付着力と引張耐力で抑えることによるはく落防止の効果が期待される。

3.1.2 耐震対策の効果に関する模型実験

模型実験の結果を図-2、図-3、図-4に取りまとめた。図-2は載荷荷重と覆工模型の水平変位の関係を示す。また、図-3は一定の載荷荷重の時のトンネル周方向のひずみ分布図を示す。ひずみ分布図作成時における荷重は、(a)および(b)は100kN、(c)は300kN時点のひずみを抽出した。図-4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。ひび割れ箇所は100kN毎に色分けした線により表現している。

(1) インバートの効果

図-2(a)からCase1においては荷重約150kNと約500kN時、Case2においては荷重約450kNで水平変位が急激に増加し、グラフの傾きに変化が生じている。これは、実験時におけるトンネル内側の観察状況から、Case1は荷重約150kN時で、45°および150°の位置において、500kN時で、90°の位置において、Case2は、荷重約450kN時に180°から脚部の位置において、発生したひび割れが要因と考えられる。また、Case1は約800kNにおいて、天端部の圧ぎが発生したため、破壊と判断し、載荷を停止し、Case2はジャッキの最大荷重の約1200kNにおいても破壊しなかったが、載荷後、90°周辺において、地山まで達する、トンネル模型(モルタル)の崩落を確認した。

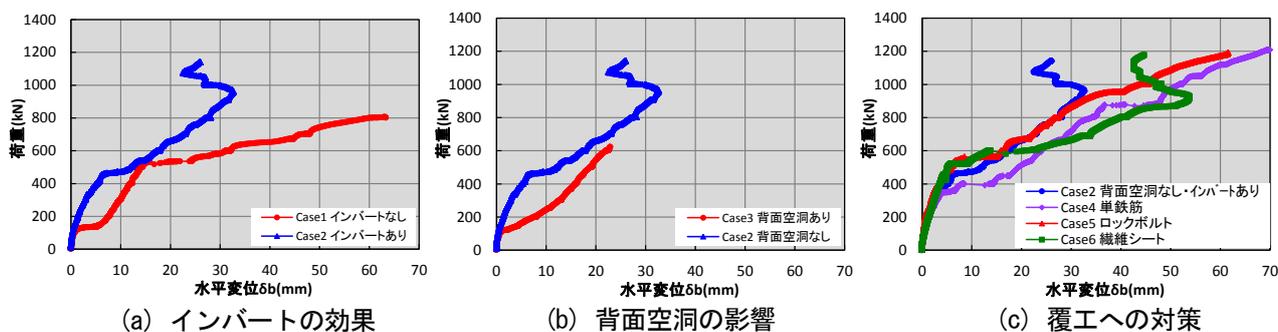


図-2 載荷荷重と水平変位の関係

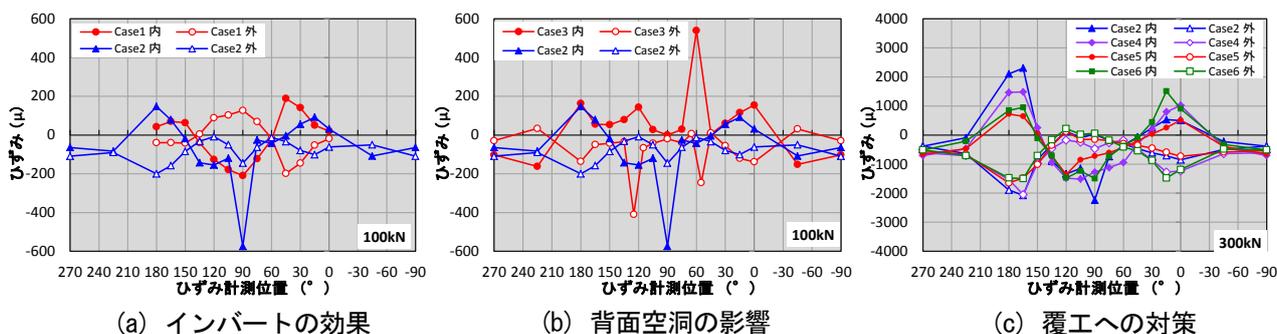


図-3 ひずみ分布

図-3(a)から Case1 においては、ひずみが 45° の内側、および 90° の外側において、また、 150° の内側において、ひずみ値にピークが見られ、ひび割れが発生することが想定される。Case2 においては、 15° 、および 180° の位置において、ひずみ値にピークが見られ、ひび割れが発生することが想定される。一方、 90° 付近は内側と外側両方が圧縮のひずみ値を示す、全圧縮の状態になっている。このように、Case1 と Case2 の変形モードが若干異なる。

図-4 における、トンネル内面側のひび割れの発生状況と、載荷時における観察の状況から、Case1 は荷重が約 $140\sim 170\text{kN}$ 時に、 30° から 45° および 135° から 150° の位置にかけてひび割れが発生しており、上述のひずみの傾向と比較的合致する。また、約 $300\sim 500\text{kN}$ において、 90° 付近において、縦断方向のひび割れが発生している。また、Case2 は荷重が約 $400\sim 450\text{kN}$ 時に、インバートとの付け根付近（特に載荷方向である左側）の位置においてひび割れが発生している。これは、前述した変位の急激な増加位置やひずみ分布のピークの位置と一致している。さらに、Case1 および Case2 はともに、図の斜線部において、トンネル模型（モルタル）が地山に達する程度に抜けるような崩落が生じた。ここで、Case1 においては、 45° 付近のひび割れ部が折れ曲がっており、崩落部で模型が2つに分離し、Case2 は地山に貫通する崩落は図の上側の斜線部のみで、2つに分離はしていない。

この結果から、Case1 は Case2 と比較して、インバートがないため、構造体として変形が生じやすく、破壊に至る荷重が小さくなったと考えられる。

以上の結果から、本実験で行った条件下においては、インバートの設置により水平方向からの外力の作用に対して変形が抑制され、トンネル構造全体の耐力が向上する効果が得られる可能性がある。

(2) 背面空洞の有無

図-2(b) から Case3 においては、荷重約 140kN で変位の急激な変化による、グラフの傾きが生じており、(1)で示した Case2 と比較すると小さい荷重でひび割れによる変位が生じている。また、図-3(b) 及び図-4 から、背面空洞によりトンネル模型と地山との接点なくなる 60° と 120° の位置において、 100kN 以下の荷重でひずみの伸びと、ひび割れが生じている。また、天端部では曲げ圧縮による内側のひずみのマイナス方向の増加が見られ、側方からの載荷によりトンネル模型が突き上げられることで、背面空洞側にトンネルが変

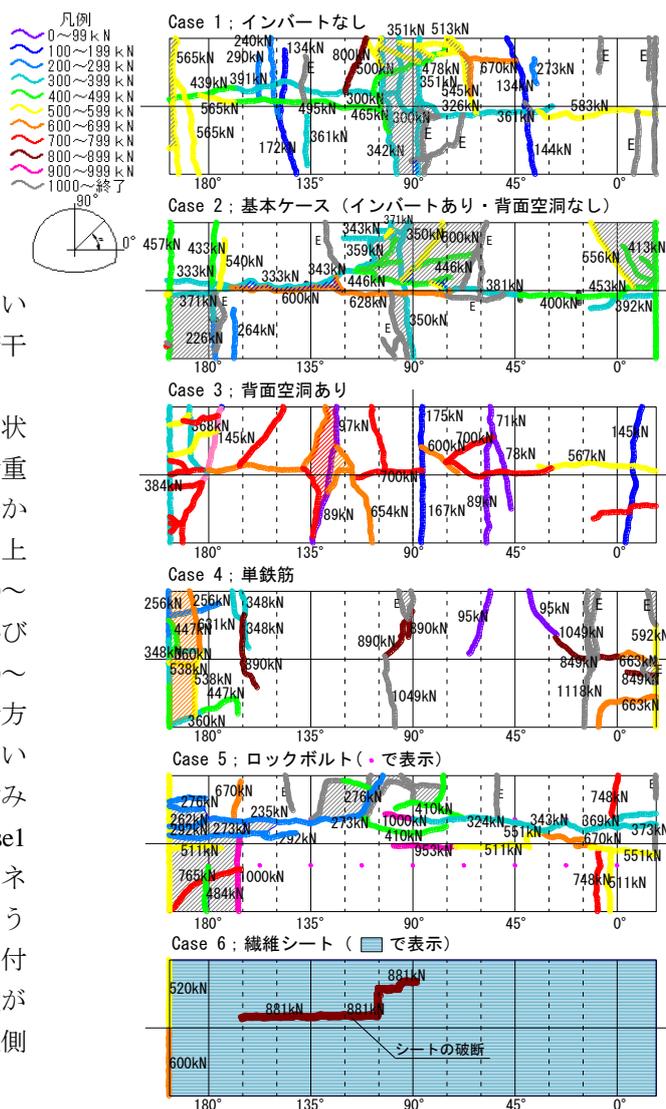


図-4 ひび割れ状況図（内面側）

形することにより、トンネル模型に変状が生じている。また、図-2 (b) から、Case3 は約 600kN において、 90° 、 120° 部において曲げによる圧縮破壊により破壊した。

以上の結果から、背面空洞がある場合は、水平方向からの外力の作用に対して、地盤反力が確保出来ず、構造が不安定化する可能性があると考えられる。

(3) 鉄筋、ロックボルト、内面補強の効果

図-2(c) から Case2, Case4~6 については荷重約 $300\text{kN}\sim 600\text{kN}$ の範囲で変位の急激な増加により、グラフの傾きが変化している。図-3(c) および図-4 の結果に加え、実験実施時における観察の結果から Case2 は約 460kN において、Case4 は約 350kN 、Case5 は約 560kN 、Case6 は約 520kN の荷重に達した際に、載荷方向の 180° からインバート接続部にかけて、ひび割れが発生したことにより構造が不安定になったことに

より変位の急激な増加が見られたと考えられる。

図-3(c)から Case2, Case4~6 を見ると荷重によるひずみの発生モードはおおむね一致しており、変形モードは類似していると考えられる。また、ひずみの最大値は荷重方向の 180°付近において、大きく発生していることがわかる。特に Case2, 4 においては荷重が 300kN の時点において、 -2000μ を超えるような圧縮ひずみが発生している。またこのとき、Case2 および Case4 においては、実験時の観察結果から荷重方向のインバートの付け根付近に発生していたひび割れ部が貫通したことによる模型のズレを確認した。しかし、他のケースについては、貫通によるズレ等によるひび割れの貫通の有無は不明であった。これは水平方向からの荷重によりインバート接続部周辺に応力が集中することで破壊が生じたためと考えられる。さらに、インバート付け根部において、ひび割れが発生した荷重は Case4 では他のケースに比べ 3~6 割程度小さい。これは、Case4 のトンネル模型の強度が Case2,5~6 と比較すると、2~3 割程度小さい(表-1)ことが要因として考えられるため、結果の解釈に注意が必要である。ここで、Case2, 6 は荷重が約 900kN において、変位が負側に広がり、以後、変位を正常に計測することができなかった。

最大荷重については、Case2 と Case6 はジャッキの最大荷重約 1200kN まで荷重したものの、天端部が圧ぎにより崩落したが、Case4 と Case5 については約 1200kN 時点においても、トンネル模型は破壊しておらず、荷重容量の制約がなければ、さらに荷重可能だったと考えられる。この結果から、耐力については Case2 および Case6 はほぼ同等であり、Case4 および Case5 はそれ以上の耐力を有していると考えられる。

図-4 から Case2 において荷重 200kN を過ぎた付近からひび割れが発生し、約 370kN で天端部に圧ぎが発生した。以後、せん断破壊によると考えられる横断方向のひび割れが発生した。荷重終了後、斜線部で地山模型に達する規模のトンネル模型の崩落が発生した。

Case4 においては約 250kN からインバート接続部の左側で部分的にひび割れが発生した後、約 890kN で天端部の圧ぎによるひび割れが発生したものの、Case3, 5 で見られるような、せん断破壊と考えられる横断方向のひび割れは発生しなかった。荷重終了後、斜線部で厚さ数 mm のはく落を確認した。

Case5 においては約 230kN で 180°付近のボルト部からひび割れが発生した。また、天端部で圧ぎは生じなかったが、せん断破壊によると考えられる横断方向の

ひび割れが発生した。荷重終了後、斜線部で模型厚さの 1/3~2/3 程度の深さのはく落が発生した。

Case6 においてはシートにより荷重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浮きが生じ、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。

以上の結果から、水平方向からの外力の作用に対して、単鉄筋を配置したケース、およびロックボルトにより補強したケースでは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、単鉄筋を配置したケースではひび割れを分散する効果があり、はく離、はく落の発生を抑制できる可能性がある。ロックボルトによる補強はひび割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。繊維シートの貼付は、はく落発生を抑制できる可能性があることが分かった。

さらに、水平方向からの外力の作用に対して、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している可能性があることが分かった。

(4) 実験結果のまとめ

本模型実験により、インバートの有無、および背面空洞の有無、単鉄筋補強、ロックボルト、内面補強による対策の効果を確認した。

- ・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、トンネル構造の耐力向上の効果が得られる可能性がある。
- ・背面空洞がある場合は、水平方向からの外力の作用に対して、地盤反力が確保出来ず、構造が不安定化する可能性がある。
- ・単鉄筋補強とロックボルトによる補強は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。
- ・単鉄筋補強により覆工コンクリートに発生するひび割れを分散する効果があり、加えて、はく離、はく落の発生を抑制できる可能性がある。
- ・ロックボルトによる補強はひび割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。
- ・繊維シートの貼付によりはく落発生を抑制できる可能性がある。
- ・水平方向からの外力の作用に対して、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している可能性がある。

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等があるため、今後、これらの結果を踏まえた検討の必要があるとともに、動的な影響を含めた実験および数値解析によるメカニズム等の検証を行い、耐震対策を含めた外力が作用する場合の対策工の提案を検討する必要がある。

3.2 新設および既設トンネルにおいて要求される耐震性能に応じた限界状態の提案

表-3 に整理した山岳トンネルにおいて要求されると考えられる耐震性能を仮定し、それに応じた限界状態、および安全性、供用性、修復性の考え方を示す。

ここで、耐震設計上の安全性とは地震によるトンネルの崩落やはく落によって第三者に被害を及ぼすことのないようにするための性能と考えられる。また、供用性は地震によってトンネルが本来有すべき通行機能や、避難路、救助・救急・医療・消火活動、および物資輸送路としての機能を維持できる性能と考えられる。さらに、修復性は地震によってトンネルに生じた損傷を修復できる性能と考えられる。

3.3 新設および既設の山岳トンネルにおいて要求される耐震性能ごとの耐震対策の選定手法の提案

耐震対策の実施を検討するか否かを判断するためのフローとしては、①耐震対策を検討する必要があるかどうかを判断するためのフロー、①のフローにおいて、②新設トンネルもしくは③既設トンネルで耐震対策の検討が必要と判断された場合に、該当するトンネルに対して耐震対策が必要かどうかを判断するためのフローが考えられる。

①のフローに必要な項目としては、路線の重要度と代替ルートが確保できるかで判断することが考えられる。①において対策の検討が必要と判断されたトンネルに対しては新設か既設かにより実施する対策が異なる

ため、上述の通り②および③に分かれる。この、②および③のフローでは、特殊地山の有無や土被り、要求される耐震性能により判断するのが望ましいと考えられる。

これらのフローは重要路線や特殊地山によって決めて良いか、要求される耐震性能やそれらを決定する荷重等を整理することが重要であり、これらの項目を課題として解決する必要がある。

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、耐震対策を実施するうえで、考えられる対策工について検討した。続いて、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、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対する安全性、供用性、修復性について整理した。さらに、耐震対策を選定するフローを作成するために、必要と考えられる項目について検討した。その結果、得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 既設トンネルの変状対策で実施される対策工についてトンネルの耐震対策として考えられる手法を抽出し、対策の考え方と適用条件の例を整理した。
- 2) インバート、および単鉄筋、ロックボルトは耐震対策として、トンネル構造の耐力を向上することができる可能性があり、背面空洞の存在により、構造が不安定化する可能性がある。また、単鉄筋やロックボルト、内面補強は覆工コンクリートのはく落、崩落の防止に対して効果がある可能性があることがわかった。
- 3) 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毎の安全性、修復性、供用性の考え方を整理した。また、耐震対策を検討するフローを作

表-3 トンネルの耐震性能に応じた限界状態の整理

トンネルの耐震性能	概要	トンネルにおける限界状態の例	耐震設計上の安全性	耐震設計上の供用性	耐震設計上の修復性	
					短期	長期
耐震性能1； 地震によってトンネルとしての健全性を損なわない性能	地震後も変状がないか、あっても地震前と同様同じ機能を有し、補修・補強を必要としないか軽微な修復で済むこと	地震によって覆工コンクリートの応力が弾性挙動範囲内であるか、軽微な引張ひび割れが発生する程度にとどまる	崩落・はく落に対する安全性を確保する	地震前と同じトンネルとしての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2； 地震による損傷が限定的なものにとどまり、トンネルとしての機能の回復が速やかにい得る性能	地震により変状が発生し、対策を行わなければ将来、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があるもの、地震後もトンネルとしての機能を速やかに回復することができ、比較的容易な対策による補修・補強で済むこと	地震によって覆工コンクリートに曲げによる圧縮破壊が生じたとしても一か所にとどまり、構造全体の耐力としては余裕を残した状態	崩落・はく落に対する安全性を確保する	地震後トンネルとしての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能である。
耐震性能3； 地震による損傷がトンネルとして致命的とならず、構造全体が崩壊しない性能	地震により変状が発生し、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があり、トンネルとしての機能を回復するためには大掛かりな補修・補強等抜本的な対策が必要となるものの、トンネル構造としては崩壊していないこと	地震によって覆工コンクリートに曲げによる圧縮破壊が複数個所生じたとしても、構造全体が崩壊せず、トンネル空間は保持されている状態	崩落・はく落に対する安全性を確保する	---	---	---

成するために必要と考えられる項目を整理し、次年度以降に詳細な検討を行うための課題を抽出した。

参考文献

- 1) (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.
- 3) 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.
- 4) (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
- 6) (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. In this study, extraction of various seismic measures and model experiment simulating the force by earthquake were carried out to clarify the mechanism of the seismic damage and effect of countermeasures. Subsequently, three items related to safety and serviceability, repairability were examined about seismic performance in mountain tunnels. Finally methodology needed to determine the effective measures seismic were discussed.

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