

岩盤構造物の性能評価における課題

－ 山岳トンネルの地震被害と耐震性 －

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues on the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern - Seismic Damages and Aseismicity of Mountain Tunnel -

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：これまで地中深い岩盤内に建設された山岳トンネルは、地震に対して安全であると漠然と信じられていた。実際、山岳トンネルの構造的安定性の検討は、岩盤掘削時の解放応力や緩んだ地山の自重などの静的荷重に対して行われ、地震に対する安定性の検討は、明らかに地震の影響を受けることが想定される特殊条件のトンネルや、地下発電所や石油・LPG貯蔵のための大規模地下空洞などにおいてのみ行われてきた。しかし近年の被害地震では、地表や浅層地盤での構造物の被害に比較するとその数は少ないものの、岩盤中のトンネルにも地震動や地震時断層変位による顕著な被害が報告されている。社会基盤構造物として重要な役割を担っている山岳トンネルは、一旦被害を生じると構造物それ自身の復旧に多くの時間と労力を必要とすることは勿論、それ以上の様々な影響を社会に及ぼすことになる。ここでは山岳トンネルの耐震性について現状を示し、今後の課題について議論する。

キーワード：山岳トンネル，地震被害，耐震性評価

Abstract: Mountain tunnels constructed in the deep rock mass have been vaguely believed to be safe for earthquakes up to now. Actually, the structural stability of mountain tunnel has been examined by considering the static loads such as excavation released stress and load due to excavation disturbed zone. Stability of tunnels against earthquakes has been examined for the large-scale underground caverns for underground power plant and oil or LPG storage facilities, and also for the tunnel with special conditions where the damage by earthquake is clearly supposed. However in the recent destructive earthquakes, significant damages of mountain tunnels caused by seismic vibration and earthquake fault displacement have been reported. Once the mountain tunnel which plays an important role as a social infrastructure structure causes earthquake damages, it will exert a large influence on the social activity as well as it requires a lot of time and effort in its own restoration. In this paper, the present situation of aseismicity of mountain tunnels is summarized and the problem to be solved is discussed.

Keywords: mountain tunnel, earthquake damage, aseismicity evaluation

1. はじめに

一般に、岩盤中に建設される山岳トンネルは地

震に対し、

- ・岩盤中の地震動は、表層の軟弱地盤での増幅がないため小さい

・岩盤内の構造物は地表構造物のように固有の振動をせず周辺岩盤と同一の動きをするなどの理由から強いとされてきた。したがって一般的な山岳トンネルでは耐震性の検討が行われることはなかった。しかし、近年の被害地震では以下にその事例を示すような地震被害が生じ、トンネルそのものの被害もさることながら社会基盤構造物としての機能損失に伴う社会的損失の影響が大きいことから、岩盤中のトンネルについてもどのような地震に対しどこまでその構造的安定性を保つことが出来るのか、あるいは被害を受けるとしてどの程度の被害なのか、など具体的な耐震性の評価について明確にすることの重要性が認識されて始めた。

ここでは山岳トンネルの耐震性評価の現状を概括した上で地震被害を紹介し、地震による山岳トンネルの被害メカニズムに関するこれまでの検討状況を示した上で今後の検討課題を示す。

2. 山岳トンネルの耐震性評価の現状

トンネルには様々な用途のものがあり社会基盤構造物として重要な役割を担っている。これらは、その工法によって次の3種類に分類される。(各々の工法については末尾の参考を参照)

- ①山岳トンネル
- ②シールドトンネル
- ③開削トンネル

これらのトンネルの耐震性評価の現状を以下に示す。

我が国の様々な構造物に対する耐震性の検討は1923年の関東大震災を経験し、開始されている。関東大震災は1923年9月1日、神奈川県相模湾北西沖80km(北緯35.1度、東経139.5度)を震源とするマグニチュード7.9の大正関東地震による神奈

川県・東京府を中心とした千葉県・茨城県から静岡県東部にわたる内陸と沿岸の広い範囲における甚大な被害をいう。これは東日本大震災以前において、我が国最大の自然災害であった。そして、この地震を契機に1924年市街地建築物法に世界初の耐震規定(震度0.1)が盛り込まれることになる。

この後、鳥取地震(1943年9月10日, M7.4), 東南海地震(1944年12月7日, M8.0), 三河地震(1945年1月13日, M7.1), 南海地震(1946年12月21日, M8.1)など多くの人的被害を伴う地震を経験するが、戦争中のため被害の実態が公表されることもなく耐震性評価に生かされることもなかった。

終戦後、1948年6月28日の福井地震(M7.1)の被害(死者41名、負傷者453名、家屋全壊802棟)を受けて震度法に対する反省と動的解析の必要性が議論され、1950年には建築基準法(震度0.2, 長期と短期の区別)が制定された。その後1964年6月16日新潟地震(M7.5), 1968年7月9日十勝沖地震(M7.9), 1978年6月12日宮城県沖地震(M7.4)を経験し、1981年には建築基準法の改正が行われた。ここでは動的設計法の考え方を反映し、建築物の振動特性に応じた地震力を設定し耐震計算を行う新耐震設計法が示された。

さらに1983年5月26日、日本海中部地震(M7.7), 1993年7月12日北海道南西沖地震(M7.8), 1995年1月17日兵庫県南部地震(M7.2)などを経験し、2000年に建築基準法が再度改訂され、性能設計法が導入された。

一方、この間、トンネルにおける耐震性はほとんど論じられることはなかった。トンネル分野における耐震技術への対応状況を土木学会トンネル標準指方書から見てみると、初めて耐震性について記載されたのは平成8(1996)年版の山岳トンネ

ル、シールドトンネル、開削トンネルの各示方書において、1995年兵庫県南部地震のトンネル構造物の被害を受けて耐震設計の重要性を明らかにした上でさらなる検討を行うとしている。

ただその後の展開については3種類のトンネル間で大きな違いがある。まず開削トンネルについては、1998年にトンネルライブラリー第9号として「開削トンネルの耐震設計」が出版され、具体的な考え方、検討方法が示された。そして2006年制定のトンネル標準示方書においては、開削トンネルとともにシールドトンネルについても耐震設計の具体的な記述がなされ、実務における耐震検討が一般的なものとなったと言える。2007年にはトンネルライブラリー第19号として「シールドトンネルの耐震検討」が出版され、耐震検討の詳細が明らかにされている。

このように開削トンネル、シールドトンネル、都市部山岳工法トンネル（都市部において沖積層などの軟弱地盤中に山岳工法によって掘削される土被りの浅いトンネル）については、耐震設計法として応答変位法、応答震度法、動的応答解析などを用いて定量的に評価する方法が示されているが、山岳トンネルについては、最新の2016年トンネル標準示方書・山岳工法においても耐震性に触れている部分はわずかであり、地震被害を受けやすいとされている

- ①土被りの小さい坑口付近
- ②断層破碎帯や地質の急変部
- ③土砂地山中に施工される場合

について、基本的な知見は述べられているものの具体的にどう条件を設定し、どう設計すればいいのかについては触れられていない。

これは、山岳トンネルの耐震性を具体的に検討するために必要な知見がまだ十分ではないためと考えられる。

3 山岳トンネルの地震被害

3.1 関東大震災

関東大震災におけるトンネル被害については、「震央から約 120km の範囲内にあった国有鉄道の 149 トンネル（建設中を含む）のうち、93 トンネルで補修が必要となった。激しい被害を受けたのは、熱海線（現在の東海道線）小田原－真鶴間で、11 トンネルのうち 7 トンネルが大破するなどの被害を生じた。地滑りや斜面崩落により坑口付近の崩落や埋没を生じたが、坑口から離れた場所でも亀裂や横断面の変形を生じている。深刻な被害を生じたのは、根ノ上山トンネル（熱海線：早川－根府川間）、与瀬トンネル（中央線：相模湖－藤野間）、南無谷トンネル（現在の内房線：岩井－富浦間）。」（ウィキペディアから）と報告されている。

以下に土木学会のデジタルアーカイブ（土木学会 HP）から関東地震によるトンネル被害写真を示す。

図 1 は、寒ノ目山トンネルの被災した坑口の状況を示している。坑口部斜面の崩壊により列車の機関車が埋没している。しかし、石積みで作られ

写真 第 百 五 十



国有鉄道 熱海線根府川真鶴間國府津起點 7 哩 76 鎧 50 節寒ノ目山隧道國府津方坑口の崩壊列車は上り旅客第 160 列車なり

図 1 熱海線真鶴－根府川間の寒ノ目山トンネルの坑口斜面崩壊（土木学会 HP）。－上り第 116 列車の牽引機関車が埋没した。

た坑門はしっかりその形状を保っており、構造的被害を受けていないように見える。すなわちこの

トンネル被害は、坑口部の構造的被害ではなく、坑口部の斜面が地震により崩壊し、坑口部が埋まってしまったものと考えられる。

これに対し深刻な被害とされる根ノ上山トンネル、南無谷トンネルでは図2、図3に見るように坑内で大規模な崩落が生じている。この被害形態は、後述する在来工法トンネルで見られる地山崩壊を伴うトンネル被害と同じである。

一方、同様に深刻な被害とされる与瀬トンネルに関しては、崩壊したトンネルの復旧工事として開削工事が行われている写真が掲載されている

(図4)。土被りの浅いトンネルのかかなりの区間にわたって大規模な崩落が生じたと思われる。



図2 熱海線早川―根府川間の根ノ上山トンネル坑内の崩落 (土木学会 HP)。



図3 北條線(現在の内房線)岩井―富浦間の南無谷トンネル坑内崩落 (土木学会 HP)。



図4 中央本線奥瀬上野原間の与瀬トンネル陥落部掘削工事 (土木学会 HP)。

3.2 1930年北伊豆地震

北伊豆地震は、1930年(昭和5年)11月26日早朝に静岡県伊豆半島北部・函南町丹那盆地付近を震源として発生した、直下型の地震である。マグニチュード7.3で、北伊豆地震断層系の丹那断層などの活動により生じたとされている。

地震後の調査で多くの断層が明らかになったがその中で最大の丹那断層は長さ約35kmで上下に2.4mずれ、北へ2.7m移動したと報告されている。この断層は、東海道本線(現・御殿場線)の新線(現・東海道本線)用に建設中の丹那トンネルと交差しており、図5に示すように大きなずれにより導坑断面は完全に閉塞されている。これは断層変位によるトンネル被害の典型である。この断層のずれにより、本来直線で計画されていた丹那トンネルは、断層の前後で掘り直しされたため、わずかながらS字を描いて完成したそうである。

ちなみに現在の東海道新幹線の新丹那トンネルも丹那トンネルと同様、丹那断層と交差しているが、何らかの対策が講じられているという話は聞いたことがない。

ただし、この丹那断層を含む北伊豆断層群は、神奈川県内の主要な活断層の一つとされているものの、地震調査研究推進本部の発表資料によれば、30年以内の地震発生確率はほぼ0%となっており、北伊豆断層群の地震には心配する必要はないのかもしれない。



図5 1930年 北伊豆地震における断層変位による丹那トンネル導坑内の喰い違い（神戸大学付属図書館新聞記事文庫）。

3.3 伊豆大島近海の地震

1978（昭和53）年1月14日12時ころ、中部地方および、関東地方の全般と近畿、中国、東北各地方、四国および北海道の一部で地震を感じた。この地震の震源地は伊豆大島近海で、マグニチュード7の直下型地震であった。

この伊豆大島近海の地震によって伊豆半島東海岸沿いの多数のトンネルに被害が生じた。今田（1978）は、道路トンネルで最も大きな被害（落盤と坑口部崩壊）を受けた城東トンネル付近の断面を示し、斜面とトンネルの位置関係による被害の違いについて言及している。

図6に示すようにこの断面には3本のトンネルが掘られているが、斜面に最も近い（約20m）城東トンネルの被害が最も大きく、坑口部の斜面崩壊、延長13mに及ぶ落盤を生じている。次いで斜面に近いトモロトンネル（約51m）では両坑口付近60

mほどの区間で多数のクラックを生じるとともに、側壁の押出し、アーチコンクリートの一部脱落を生じているが、崩落は生じていない。そして3本のトンネルの中で最も深い位置（約65m）にある伊豆急行の黒根トンネルでは途中断層が横断しているものの大きな被害を生じていない。

今田は、この城東トンネル崩落部の覆工支保の規模が2重ブロックライニング+20cmのコンクリート内巻き（5cmのレール支保工入り）と他より耐荷重が大きいことから、この区間はトンネル掘削時に地山がゆるみ、覆工に荷重が作用していたのではないかと指摘している。

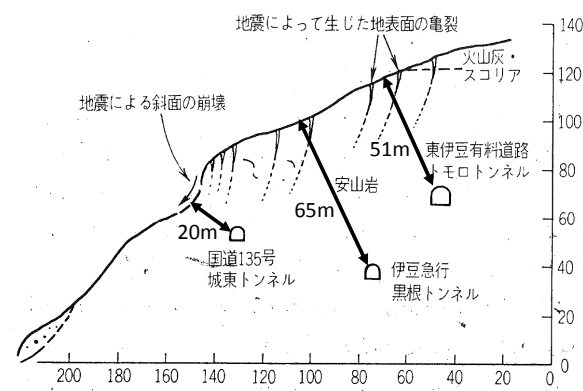


図-6 城東トンネル付近の横断面図

図6 伊豆大島近海地震によるトンネル被害例（今田、1978の図に加筆）。

3.4 1993年能登半島沖地震

1993年2月7日22時27分、能登半島北方沖を震源とするマグニチュード6.6の地震が発生した。輪島で震度5、金沢、富山で震度4を観測し、北陸を中心に東北から中国地方までの広い範囲で揺れを感じた。輪島での震度5は観測史上初めてであり、金沢の震度4は1948年の福井地震以来であった。震源地に近い珠洲市では場所によって震度6に達していたと推定され、神社の裏山の崩土による本殿・拝殿の倒壊のほか、住宅の損壊22棟、木ノ浦トンネルの崩落など道路被害141箇所が生じたと報告

されている。

この木ノ浦トンネルの被害形態について紹介する。

図7は金沢地方気象台が地震の翌日2/8に行った被害調査時の木ノ浦トンネル崩落箇所である（気象庁，1995）。一方，図8は金沢大学による被害調査で示された木ノ浦トンネルの崩壊状況（2/11）（1993年2月7日能登半島沖地震被害状況報告），図9は復旧に関する国田らによる報告で示された崩壊地点の断面図（国田，1993）である。これらを見ると地震発生直後の2/7の崩壊土砂の幅は5m程度，高さはトンネル断面高さの1/2程度であるが，2日後の2/9には大きく広がり，2/11には図8の写真に示されるようにトンネル天端に達するまでに崩壊規模が拡大している。

トンネル天端覆工の崩落による開口部も断面図を見ると2/7から2/11にかけて拡大しており，地震直後に生じたゆるみ領域が時間（あるいは余震：2/7 22:40, 23:07, 2/8 0:09にいずれも震度1, 2/8 2:06震度3, 12:38震度1など2/9までに8回の余震が発生）とともに拡大していったことが判る。

木ノ浦トンネルは昭和40年に完成しており，在来工法で施工されたと推定される。在来工法ではその工法特性上トンネル施工時に覆工天端部背

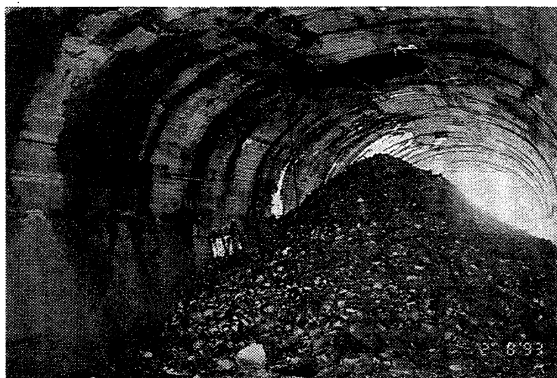


図7 金沢地方気象台が2/8に行った被害調査時の木ノ浦トンネル崩落状況（気象庁，1995）。

面に空洞が残されることが多く，また掘削時にある程度の地山変位を許容するため地山にゆるみ領域が生じる可能性がある。

このような場合の地震によるトンネル崩壊シナリオは以下のように考えられる。

地震により地山のひずみ（応力）が増加し，トンネル掘削時にすでに生じていたゆるみ領域が拡大する。一方，トンネル覆工天端部に空洞が存在



図8 木ノ浦トンネル崩落状況（1993年2月7日能登半島沖地震被害状況報告）。

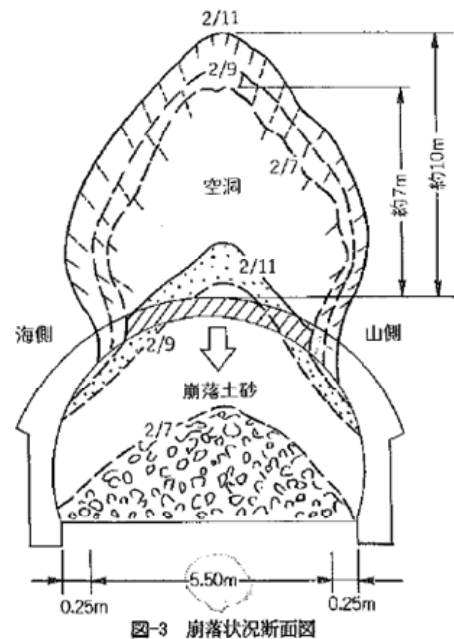


図9 木ノ浦トンネル崩落の推移（国田，1993）。

していたため地震時の地山変形に対し覆工耐力が十分発揮されず、覆工に多くの亀裂を生じる。

そしてこの部分にゆるみ領域からの崩落土砂が荷重として作用することにより覆工は崩壊する。その後、ゆるみ領域が安定形状に達するまで、あるいは余震の影響がなくなるまで崩壊が継続する。このように木ノ浦トンネルの地震被害は、在来工法によるトンネル特有の天端空洞の存在と脆弱な地山条件が相まって生じたと考えられる。

3.5 2004年新潟県中越地震

2004年10月23日、新潟県小千谷市川口町付近を震源とするマグニチュード6.8の新潟県中越地震が発生し、震度7を記録した川口町や全村避難となった旧山古志村（長岡市と合併）をはじめ、各地の様々な構造物、施設に甚大な被害を生じた。

この地震の震源域付近は山岳地域であり、様々な用途をもった多くの山岳トンネルが建設されている。このためそれまでの地震では顕著ではなかった山岳トンネルの地震被害が数多く生じた。

以下に、いくつかのトンネルの被害状況を示す。

土木学会（土木学会トンネル工学委員会，2005）や長岡技術科学大学による地震被害調査によれば、JR東日本の上越新幹線のトンネルでは、浦佐—長岡間にある堀の内トンネル（全長3.3km）、魚沼トンネル（全長8.624km）、妙見トンネル（全長1.459km）、滝谷トンネル（全長2.673km）の4トンネル全てで被害を受けた。この内、堀の内トンネルと滝谷トンネルは一部のコンクリート落下のみであった。これに対し妙見トンネルでは、コンクリート落下の他中央通路に亀裂が入るなどの被害が生じた。また魚沼トンネルでは図10に示すようにアーチ・側壁コンクリートの崩落、路盤コンクリート・軌道スラブの浮き上がり、中央通路の損傷などの大きな被害が生じた。

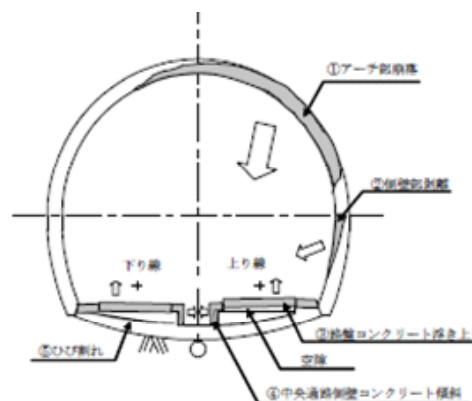


図 3-3 魚沼トンネル被害状況（195k080m 付近）



写真-1 魚沼トンネル被害状況

図 10 中越地震による鉄道トンネル被害例（土木学会トンネル工学委員会）。



図 11 国道 17 号川口町和南津トンネルコンクリートの剥落（H16.10.24 撮影，国土交通省北陸地方整備局道路部による）。

一方道路トンネルでは、国道17号の和南津トンネルが、図11に示すような覆工コンクリートの一部崩落という大きな被災を受けたが、詳細な調査

の結果大規模な補修は必要なく、供用しながらの復旧が可能と判断され、支保工の設置と吹付コンクリートにより補修が行われた。これらの被害写真を見る限り、覆工は崩落しているものの、その個所の覆工背面地山は安定しており、覆工背面地山の崩壊は生じていない。すなわち、このようなトンネル被害は地震時の大きな地山変位に対して覆工コンクリートが耐えられなかったことによって生じたと考えられる。

新潟県中越地震による数多くのトンネル被害のうち、特徴的なものに和南津トンネル、木沢トンネルと蕨神発電所水路トンネルがある。

和南津トンネルには、先に示した道路トンネルの他に鉄道トンネルがあり、上下に至近距離で交差している。2本のトンネルとも大規模な補強・補修を必要とする大きな被害を生じている。しかし、その被害は先に示したような一般的な在来工法トンネルでの地震被害と同様で、天端コンクリートの剥落、アーチと側壁接合部のはらみ出し・圧壊などであり、至近距離での交差トンネルであることが影響していると思われる被害は生じていない。

これに対し次に示す木沢トンネルでは、南北方向を向いた全長305mのトンネルの北側坑口から35mの区間を除いた全線にわたって大小様々なクラックが生じている（土木学会トンネル工学委員会，2005；真下，2005；土木学会，2005）。特に被害の大きいところでは図12に示すように側壁が大きく崩落している。このような被害形態は珍しく、しかもトンネルがNATMによって施工されていることから、その被害のメカニズムについて詳細な検討が行われている（土木学会トンネル工学委員会，2005；森・土屋，2005）。

木沢トンネルは、トンネル軸線の測定の結果、北側ではトンネル軸線直角（東南東）方向に、反対の南側ではトンネル軸（南南東）方向に大きく

変位している。すなわちこのトンネルは北側坑口から80mの地点から南側は南南東方向からの大きな側圧を受けるとともに、同時に南側坑口からトンネル軸線方向に引っ張られている。その相対的な引張り量は約1mにも達している。このような木沢トンネルの被害について、森・土屋（2005）は「地すべり性の地塊移動」が、小長井ら（2010）は「地盤のすべり」が原因と推定している。

木沢トンネルの土被りは最大でも22m程度であり、地すべりなどの影響を受けやすい条件にあったと考えられる。

一方水路トンネルでは、地山の崩壊を伴う被害が報告されている。そのトンネル被害は、トンネル全長4.91kmの内、水路開始地点から862m付近で生じており、この地点での特有の覆工条件（背面空洞）や地山条件（ゆるみ領域の発生）によるものと考えられる。



図12 木沢トンネル被害状況（土木学会，2005）。

3.6 その他の地震

新潟県中越沖地震は、2007年7月16日に発生した新潟県中越地方沖を震源とするマグニチュード6.8の地震である。中越地方では2004年（平成16年）の新潟県中越地震以来のマグニチュード6以上および震度5弱以上を観測した地震となった。

マグニチュードは新潟県中越地震と同じであるが、被災地域にあった道路、鉄道、水路などのトンネルの被害は少なかった。土木学会トンネル工学委員会の調査報告書（土木学会トンネル工学委員会）によれば、調査対象とした20のトンネルの内、大規模な補強・補修を必要としたトンネルは4、それ以外で補修・補強を必要としたトンネルは1、補修・補強を必要としなかった軽微な被害が1であった。これらのトンネルはいずれも在来工法で施工されており、補修・補強を必要としたトンネルの主な被害は、覆工コンクリートの剥落、圧ざ、せん断ひび割れ、引張ひび割れ、側壁コンクリートの損傷、打継ぎ目の食違いや目開き等であった（図13）。

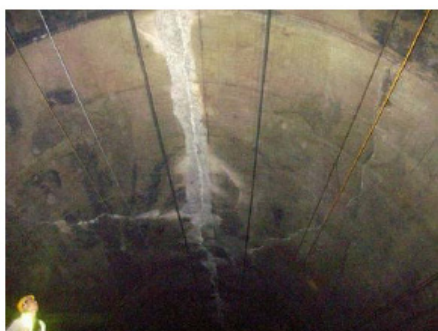


写真 3-1 第一米山トンネル（天端）
（覆工コンクリートの圧ざおよびせん断ひび割れ状況）



写真 3-3 第一米山トンネル
（側壁コンクリート損傷状況）

図13 第一米山トンネル被害状況（土木学会トンネル工学委員会，2008）。

岩手・宮城内陸地震は、2008年6月14日岩手県と宮城県の県境の栗駒山北東部を震源とするマグニチュード7.2の逆断層を震源機構とする地震である。活火山の栗駒山を中心とするこの地域は、様々な火山性堆積物より構成されている。このため地震により大規模地すべり、土石流を含む地盤変状とそれに起因する河道閉塞、道路閉塞などの被害、祭時大橋の崩壊などの構造物被害が生じた。

土木学会では震央からおおよそ15km以内に位置する6トンネルについて調査を行ったが、顕著な被害を受けたものは震央から12kmに位置する新玉山トンネルのみであった（土木学会トンネル工学委員会，2009）。

新玉山トンネルは、宮城県栗原市内の一般県道築館栗駒公園線の栗駒ダムの南方に位置する延長1,220mのトンネルであり1999年3月にNATM工法（機械掘削）により竣工した。山岳丘陵地をほぼ東西方向に貫く道路トンネルで土被りは最大で110mである。地震により覆工と道路・歩道面に被害を受けたが、その程度はそれ程重いものではない。

中でも断面方向に多くのクラックが生じた区間は、破碎帯区間に位置し、かつインバート施工区間と未施工区間の境界部であったと報告されている。すなわち地山の脆弱部と構造剛性がトンネル軸方向に変化していることが影響してクラックが多くなったものと推定できる。

熊本地震は、2016年4月14日のマグニチュード6.5、最大震度7の地震に始まった。その発生パターンはこれまでの地震にないもので、2度の震度7を含め11月3日時点までに実に4155回にも及ぶ震度1以上の地震が時と所を変え継続して発生した。そして死者75名、負傷者1806名の他、熊本城をはじめとする多くの構造物に多大な被害を及ぼした（2016年7月7日現在、消防庁による）。

そして、この地震においても震源断層近くの山岳トンネルの被害が生じている。熊本地震を引き起こした断層の一つである布田川断層帯からおおよそ 0.5～1.5km の距離にある俵山トンネルは、全長 2,057m 上下各 1 車線の道路トンネルである。このトンネルでは図 14 に示すように覆工コンクリートの大規模な崩落が発生している。

またこの俵山トンネルから北東に 1.5km ほど離れた南阿蘇鉄道の被害については熊本日日新聞が以下のように報じている。まず全長 130m ほどの犀角山トンネルは、坑口付近で断層とほぼ直交しているが、坑口部で大きく左にトンネル全体が移動している。また全長 900m ほどの戸下トンネルでは、壁面に多数の亀裂が生じているものの大規模な崩落等は生じていない。



図14 俵山トンネルの被害状況（熊本県HPより）。

4. 地震被害のメカニズムの検討

第3章で示したような最近の様々な地震における山岳トンネルの被害、中でも新潟県中越地震における鉄道、道路、水路など様々な用途のトンネルにおける数多くの被害は、それまで漠然と信じられてきた「山岳トンネルは耐震性に富む」が必ずしもそうではないという事実をトンネル技術者に突き付けた。そしてこれを機に、山岳トンネル

における地震被害のメカニズムに関する多くの研究が行われた。

土木学会図書館の検索システムで論文集と委員会論文集の中から「山岳トンネル」、「地震」のキーワードで検索すると、1985～2016 年の間で 74 件がヒットする。その内、地震とは明らかに無関係な内容のものと図書を除いた 65 件の発表年代と件数を調べると下表のようになる。

1989 年までの 6 件は、すべて山岳トンネルにおける地震観測に関するもので、地震被害を対象とした論文は 1995 年（兵庫県南部地震）以降となっている。そして 2004 年の新潟県中越地震以降一挙に増えていることが一目瞭然である。

表 1 土木学会論文集における山岳トンネルと地震に関わる論文の発表推移。

期間	件数	期間	件数
1985～1989	6	2005～2009	21
1990～1994	0	2010～2014	19
1995～1999	2	2015～2016.2	8
2000～2004	9		

以下に、そうした論文の中から地震被害のメカニズムに関連する主なものを紹介する。

朝倉ら（2000）は、1995 年の兵庫県南部地震における山岳トンネルの被害を受けて、山岳トンネルの地震被害に関する基本的な知見を得る目的で、関東地震（1923 年）から兵庫県南部地震（1995 年）までの山岳トンネルに被害を及ぼした 17 の地震について分析を行い、こうした山岳トンネルの被災は次の 3 パターンに分類できるとしている。

- ①坑門、坑口部の被害（図 15 では小土被り区間）
- ②不良地山区間の被害
- ③断層のずれによる被害

その上でそれぞれのパターンについて被害のメカニズムを解析的手法あるいは模型実験により検

討し、それぞれ地震時の水平震度、地盤のせん断変形、強制変位によりある程度再現できるとした。また②の不良地山区間の被害では、地震力だけでなく地山のゆるみによる常時荷重や天端背面空洞の存在が影響していることを指摘した。

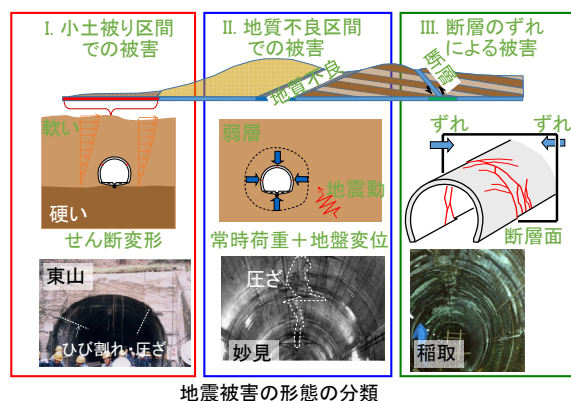


図 15 山岳トンネルの地震被害パターン(野城, 2014)。

その後の2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震による山岳トンネルの被災を受けて、野城ら(2009)は山岳トンネルの地震による構造的被害について調査し被害のメカニズムについて検討している。調査対象とした地震と被災地内の山岳トンネルの被災状況は表2に示す通りである。

表において大被害とは大規模な補強・補修を必要としたもの、中被害とは補修・補強を必要としたもの、小被害とは補修・補強を必要としなかった軽微なものである。

この表からそれぞれの地震によるトンネルの被

災率を求めると、大被害と中被害を合わせた、すなわち補修・補強を必要としたトンネルの割合は関東地震では25%、関東地震以外の地震の平均は18%、小被害まで合わせた何らかの被害を生じたものでは関東地震の63%に対し、関東地震以外の平均は30%であり、関東地震における被災率が他と比べて格段に高いことが判る。

ただし、関東地震当時のトンネル覆工はそのほとんどが煉瓦積みであり、在来工法(矢板工法)やNATMが主体の伊豆大島近海地震以降のトンネルのコンクリート製覆工とは構造・材質が異なっていることに留意する必要がある。

表2に示した被災トンネルのうち大被害は、図15に示した地震による山岳トンネルの3つの被害パターンの内IIの不良地山区間の被害が過半を占めることから、野城らはそのメカニズムについて図16に示すような静的載荷装置を用いて実験的研究を行っている(野城ら, 2007)。

その結果、覆工背面の空洞の存在により変状が生じやすくなること、インバートによりトンネル全体の剛性を向上させ内空変位や盤膨れを抑制できることなどを明らかにしている。

一方、道路トンネルについては、山本ら(2008)が新潟県中越地震において大きな被害を生じた木沢トンネルと和南津トンネルについてそのメカニズムを明らかにすべく数値解析による検討を行っている。

そして、先の被害事例で示したトンネル全体の

表2 山岳トンネルにおける地震被害(野城ら, 2009)。

地震名	M	最大震度	被災地内のトンネル数					備考
			大被害	中被害	小被害	無被害	合計	
関東	7.9	6	25	12	56	55	148	鉄道のみ
伊豆	7	5	2	4	3	22	31	鉄道のみ
兵庫	7.3	7	12	—	18	80	110	鉄道以外も含む
中越	6.8	7	11	14	24	89	138	鉄道以外も含む
中越沖	6.8	6強	4	1	1	14	20	鉄道以外も含む
合計			54	31	102	260	447	

変状が顕著であった木沢トンネルの北側坑口近傍のトンネル両側壁に生じた大規模な亀裂については、トンネル断面内で変化する地質と山から谷へ向かう慣性力によりおおよそ説明できるとしている。その解析結果の例を図 17 に示す。

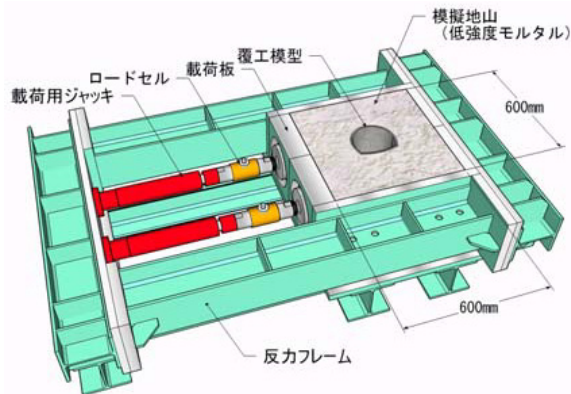


図 16 模型実験装置例 (野城ら, 2007)。

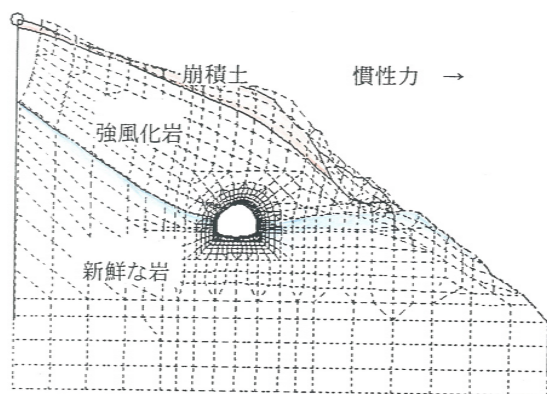


図 17 木沢トンネルの応答震度法による解析結果 (山本ら, 2008)。

また、和南津トンネルについては天端部が 2～6m 幅で崩落するという特徴的な被害を説明することを試みている。しかし水平方向の慣性力による応答震度法ではこの破壊モードは再現できず、地盤の非線形性を考慮した動的解析を行っている。その結果、動的解析の効果によって天端部にも大きな曲げが発生すること、トンネル周辺地山にトンネル内空に向かう残留変位が蓄積し、天端部に

軸圧縮が発生することを確認している。

しかし、天端部に集中する破壊形態を再現することはできなかった。また、こうした数値解析に加え模型振動実験も実施しているが、破壊モードの再現には至らなかった。

このほかにも地震被害におけるトンネルとトンネル周辺岩盤との相互作用を明確にするために、様々な室内試験や数値解析が実施されている。

これらの論文では被害事例をパターン分けし、それぞれについて被災のメカニズムを検討している。しかしその手法は静的な荷重（あるいは強制変形）条件のもとでの数値解析や模型実験が多く、動的な検討は少ない。

一方で数少ない動的条件下での検討結果は、静的条件下では再現できないような地震動の影響を示しており、こうした動的効果が静的検討による被災のメカニズムや補強効果の検討結果と相反するような状況を生じさせないのかについてさらに検討する必要があると思われる。

さて、ここで参照した論文は最近の山岳トンネルの耐震性に関する研究の全てではないが、研究の現状をおおよそ示していると思われる。すなわち静的な解析や実験によって山岳トンネルの耐震性を支配している個々の因子の多くは説明できている。一方で、地山の非線形性や不整形地盤など動的効果が顕著に表れるものに関する検討は限られた条件について実施されたものしかなく、一般論として動的効果の影響を論じるまでには至っていない。

5. 地震被害と対策の検討

第 4 章で示したような地震による山岳トンネルの被害のメカニズムに関する検討結果と第 3 章に示した被害事例を合わせて考えると、山岳トンネ

ルの地震被害のパターンは図 18 のようにまとめられる。

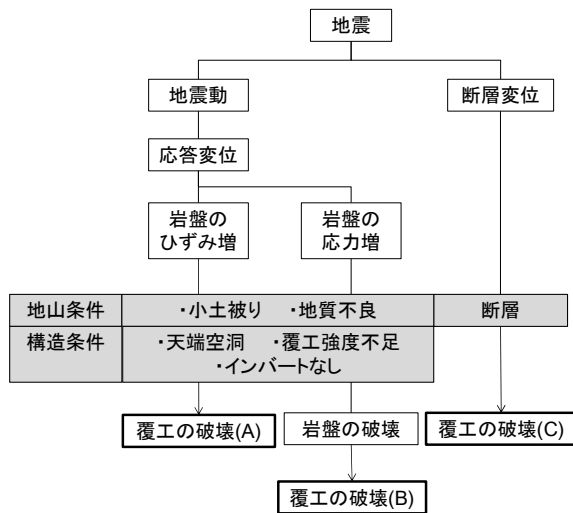


図18 地震動による山岳トンネルの被害のパターン。

まず地震動により岩盤のひずみが増す。この増分に対し覆工が追従できない場合、破壊が起こる（パターン A）。また応力増に対して岩盤強度が不足している、あるいはすでに施工時にゆみ領域

が生じていると岩盤の破壊領域が拡大し、大きな荷重となって覆工に作用する。そして覆工の耐力が不足する場合には破壊に至る（パターン B）。

またトンネルと交差する断層に大きなずれが生じる場合には、トンネルに強制変位が作用し、トンネル軸方向の剛性を持たない（設計上考慮していない）トンネル覆工は破壊する（パターン C）。

以上のような地震の影響に加えて図 15 で示したような地山条件や天端背面空洞、覆工の強度不足、インバートなしなどの構造条件が重なると被害の程度はより大きくなる。

一方、こうした地震被害の数値解析的あるいは実験的シミュレーションによる研究の過程で山岳トンネルの耐震対策も検討されている。表 3 は、角湯ら（2014）、野城ら（2008）；（2009a）；（2009b）や井澤ら（2014）が示す山岳トンネルの耐震対策工とその効果を参考に対策工の全体像を示したものである。

このように様々な対策工の効果が示されているが、注意しなければならないことは表の「適用条

表 3 山岳トンネルの耐震対策工。

対策工		適用		効果	適用条件他
		新設	既設		
①	覆工の補強	○	△	・トンネル構造の耐力向上 ・剥落防止	・既設トンネルの場合は大規模な工事となる ・鉄筋や繊維補強による強度増は効果的 ・覆工厚増による剛性増は応力増を招き不利となる場合がある
②	裏込め注入	△	○	・地山とトンネルの一体化による耐力向上	・矢板工法のトンネルに多いが、NATMIにおいても生じる可能性があり要注意
③	インバート	○	○	・トンネル構造の耐力向上 ・盤膨れの抑制	・既設トンネルの場合は大規模な工事となる ・剛性の増加により応力集中による圧座が生じ易くなる場合がある
④	内巻補強		○	・トンネル構造の耐力向上 ・剥落防止	・内空に余裕が必要
⑤	ロックボルト打設		○	・地山とトンネルの一体化 ・トンネル構造の耐力向上 ・剥落防止	・路盤への打設は盤膨れ抑制
⑥	内面補強		○	・剥落等の防止	
⑦	緩衝材	○		・トンネルの変形の低減	・覆工への地盤反力が有効に作用せず、変形モードによっては圧座しやすくなる
⑧	地盤注入	○	○	・地山の補強	

件他」の項にあるように、条件によっては対策工が逆効果になる可能性があることである。これは地震被害のシミュレーションが静的検討であれ動的検討であれ、限定されたあるいは理想化された外力条件、構造条件（トンネルおよび岩盤を含む）の下で行われているためと考えられる。この問題を解決するためには、解析的検討であれ、実験的検討であれ、これまでの地震被害に関する検討で想定した様々な要因の組み合わせの下で網羅的に行う必要がある。また、必ず静的検討と動的検討の両方を行う必要がある。

ここでこうした対策工と図 15 で示したトンネルの被害パターンについて考えてみる。

パターンA：地震動により周辺岩盤のひずみが増加し、そのひずみに追従できない覆工が損傷する。覆工のひび割れ、路盤の変状など多くのトンネルで見られる被災形態。

このひずみの増加は、トンネル周辺地山の剛性、土被り深さ、斜面の存在に大きな影響を受ける。またこのひずみの増加に対しトンネル本来の耐荷性能が発揮されるためには、トンネルが周辺地山と一体化している必要があり、この点、覆工天端背面の空洞の存在は大きく影響する。

このパターンに対しては、周辺岩盤の地震時ひずみに追従できるような高耐力の覆工（表の①、②、③、④）が効果を発揮する。またひずみの低減には⑦（地山のひずみは変わらないがトンネルのひずみは低減できる）、⑧（地山の剛性を上げることで地山のひずみを低減する）が対応する。

パターンB：地震動により周辺岩盤のひずみが増加し、岩盤が破壊する。破壊域の広がりによるゆるみ荷重の増加により覆工が破壊する。木ノ

浦トンネルなどで見られる被災形態

トンネル施工時に周辺地山に大きなゆるみ領域（塑性領域）が生じている場合、このゆるみ領域が新たな外力として地震によるひずみ増（応力増）を受けさらに拡大する。この拡大に伴う増分ゆるみ荷重が覆工に作用することによって地山とともに覆工が崩落する。特に覆工天端に背面空洞が存在する場合、地山はゆるみ易く、覆工耐力も低下するため覆工が破壊される可能性は高い。

このパターンに対しては、トンネル周辺岩盤のゆるみ域を拡大させないための地山とトンネル覆工の一体化（表の②、⑤）が効果を発揮する。一方、⑧はゆるみ領域そのものを改良し地震時のゆるみの拡大を抑制する。

パターンC：地震動によりトンネルと交差する断層に永久変位が生じ、これにより覆工が破壊する。丹那トンネルなどの被災事例。

トンネル施工中には大小さまざまな断層に遭遇する。これらが地震によって永久変位を生じる場合、トンネルに対しては強制変位として作用するため、トンネルの構造的被害は免れない。しかし、どの断層が動く可能性があるのか？どの程度動くのか？を知ることは難しい。

このパターンについては、トンネル周辺に干渉ゾーンを設け、地震時の断層の永久変位が直接トンネル構造に作用しないようにすることなどが考えられる。しかし、このような対策は地震時の断層変位が具体的に想定できない限りその効果は期待できず、現段階では山岳トンネルへの適用は難しいと思われる。

一方どのパターンの地震被害に対しても適応できるのが、万が一覆工に破壊が生じても2次被害の原因となる崩落が生じないようにする対策である。（表の①、④、⑥が対応）現在山岳トンネルの

一般部の多くは無筋コンクリートで施工されているが、この無筋コンクリートが地震外力に対してどの程度の耐力をもっているのかについては未だ明らかにされていない。したがって山岳トンネルの耐震化が必要な場合、新設トンネルでは覆工を鉄筋コンクリートや繊維補強コンクリートにする、既設トンネルの場合には内空補強や内面に補強膜を施工することによって覆工コンクリート天端部の崩落を抑制し、地震被害を低減できることが期待される。

6. 山岳トンネルの耐震性評価

以上述べてきたように地震による山岳トンネルの被害については、その事例に対する検討を行った結果、メカニズムもある程度解明され、それに対応する対策工も案として提示されている。しかしすべての山岳トンネルについて耐震対策を施すことは現実的ではない。では、実際に地震被害を受けた山岳トンネルと地震との関係はどうなっているのだろうか。

土木学会トンネル工学委員会は、これまでの地震で最も数多くの山岳トンネルが被災した新潟県中越地震について「新潟県中越地震特別小委員会」を設け、地震被害の全容をまとめた（土木学会トンネル工学委員会、2005）。そこには道路トンネ

ル、鉄道トンネル、導水路トンネルなど138のトンネルについて被害の状況が示されている。

138のトンネルの被害の程度とトンネル工法で分類すると表4のようになる。ここに被害程度大は、大規模な補強・補修を必要とした被害。被害程度中は、補修・補強を必要とした被害。被害程度小は、補修・補強を必要としなかった軽微な被害。被害程度無は、被害報告なしである。（注：表に示された被害トンネルの数は土木学会トンネル工学委員会（2005）によっている。この結果は被害状況に関する真下（2005）に示された結果と一部異なっている。）

全体の実に18%、25本のトンネルに補修・補強を必要とする被害が生じている。

トンネルの工法別で見ると被害程度大と中を合わせた割合は、矢板工法では22%もの割合になっているのに対し、NATMではわずか6%であり工法による被害率の差は明らかである。これはトンネルの建設年代による経年劣化の影響もあると思われるが、何よりも工法の違いにより覆工天端とその背面地山との間に空洞が残されることが少なくなったため、覆工の本来持っている耐荷力が発揮されずに崩壊する状況が生じにくくなったためと考えられる。

これらの調査対象となったトンネルと震源からの距離の関係を図19に示す。ここでは震源断層

表4 新潟県中越地震による山岳トンネル被害状況（土木学会トンネル工学委員会（2005）に基づく）。

被害 程度	トンネル数				割合		
	全体	矢板	NATM	開削	全体	矢板	NATM
大	11	10	1	0	8.0%	9.6%	3.0%
中	14	13	1	0	10.1%	12.5%	3.0%
小	24	17	6	1	17.4%	16.3%	18.2%
無	89	64	25	0	64.5%	61.5%	75.8%
計	138	104	33	1			

被害程度大：大規模な補強・補修を必要とした被害

被害程度中：補修・補強を必要とした被害

被害程度小：補修・補強を必要としなかった軽微な被害

被害程度無：被害報告なし

を特定した上で求める震源距離ではなく、震央距離で整理している。この図を見ると矢板工法によるトンネルでは、震央から 10km 以上離れていても大や中の被害が生じている。これに対して NATM のトンネルでは大きな被害が生じているのは、5 km 離れたトンネルまでであり、矢板工法のトンネルと NATM によるトンネルとでは耐震性に大きな差があることは明らかである。

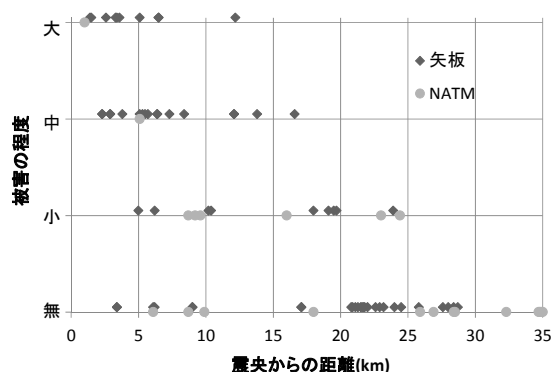


図 19 被害トンネルと震央からの距離の関係

一方、10km以下の距離でも小被害～無被害のものもあり、地震のマグニチュードと震源距離で決まる地震動の大きさに加え、個々のトンネルの地質、土被り、施工状況などの条件が山岳トンネルの耐震性を大きく左右していることが判る。

7. 今後の課題

想定される震源とどのような位置関係にあり、どのような構造的・地質的条件にあるかが判れば耐震性評価を行うことはできる。とはいえ具体的に山岳トンネルの耐震性を評価することは難しい。それは以下に示す理由による。

単純なことであるが、山岳トンネルの耐震性を具体的に評価するにあたっては、

- ・検討対象とするトンネルにおける外荷重としての地震動あるいは断層変位
- ・現在のトンネル構造の耐荷力（安全率）

の二つが判っている必要がある。

外荷重の内地震動については2.2で示したように、地震被害事例のシミュレーション等により、ある程度の想定は可能である。したがってこれまでに経験したのと同じ地震が発生するのであれば、トンネルを含む地山の変形＝ひずみ（鉛直、水平、せん断）量や慣性力の大きさを設定し、必要な対策を講じることはできる。しかし、深部岩盤中のトンネルとその周辺岩盤に生じる可能性のある地震動を想定する方法については確立されたものはなく、現時点では非常に難しい。またトンネルを横断する断層が地震によりずれるのかどうか、ずれるとしてその量はどれくらいなのかを想定することは不可能である。

一方、既設トンネルの現時点での耐荷力（安全率）を知ることも難しい。それは、これまでの山岳トンネルの設計・施工の中で完成時の性能評価を行ってこなかった、すなわち設計で要求しているものと施工結果を対比した上で完成されたトンネルの性能が評価されてこなかったことに問題がある。例えば背面空洞の存在、仕上がりの幾何条件（掘削面の不陸、覆工巻厚、鉄筋被り）、施工時に明らかとなった想定と異なる地質条件などは施工後に詳細に論じられることはなく、完成されたトンネルがその時点でどれくらいの安全性を持っているのかは判っていない。

このことに起因する問題点は、新幹線トンネルや道路トンネルにおける経年劣化したトンネルの覆工崩落事故等によって明らかになり、社会的問題となった。このため現在は各機関で定めた基準に従ってトンネルの調査が進められている。

もう一つの大きな問題に本来力学的機能が明確

になっていない無筋覆工コンクリートが覆工の主体となっていることがある。既存の山岳トンネルの覆工の大部分を占める無筋コンクリートを耐震性評価の中でどう評価し、どうモデル化するのかは山岳トンネルの耐震性検討を考えるにあたってまず解決すべき問題であるかもしれない。

このように山岳トンネルの耐震性を評価するに当たっては、まだ多くの課題を解決していく必要がある。とは言え既設トンネルの構造的あるいは地質の問題に起因する被害については適切な対策を講じる必要がある。

しかし、これまでに検討されてきた対策工の効果は、2.2 で示したように限られた条件下での数値解析や実験により検討されたもので、定性的な効果について理解できるものの、定量的な評価のためには未だ多くの解明すべき課題が残されている。したがって具体的な被害予測（耐震性評価）を行った上で実施すべき耐震性向上のための対策工、例えば、どの区間をどのような材質のどれ位の厚さのシートで補強するのか？などを決定することは現時点では難しい。

これを可能とするためには、何よりも建設された山岳トンネルの性能評価を行うための取り組みを始めることが重要である。その上でトンネルの地震時挙動に関する様々な観点からの解析的あるいは実験的研究を積み重ねるとともに、これまであまり実施されてこなかった岩盤の不連続性に着目したトンネルの地震時挙動を解明し、その評価法を確立する必要がある。

文献

朝倉俊弘・志波由紀夫・松岡 茂・大矢敏雄・野城一栄（2000）：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.

土木学会デジタルアーカイブ：http://library.jsce.or.jp/Image_DB/shinsai/kanto/jsce_report/jsce_report_02_04.html.

土木学会（2005）：平成16年新潟県中越地震第一次調査団調査速報，

土木学会トンネル工学委員会（2005）：新潟県中越地震特別小委員会報告書.

土木学会トンネル工学委員会（2008）：新潟県中越沖地震調査特別小委員会報告書.

土木学会トンネル工学委員会（2009）：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震報告書.

今田 徹（1978）：伊豆大島近海地震による被害（2），トンネルと地下，第9巻7号.

井澤淳・野城一栄・高野裕輔・陶山雄介・丸山修（2014）：トンネル坑口部の地震時挙動に与える地層構成および地盤改良の影響に関する解析的検討，土木学会第34回地震工学研究発表会講演論文集.

角湯克典・日下 敦（2014）：山岳トンネルの耐震対策の選定手法に関する研究，土木研究所研究成果報告書プロジェクト研究報告書.

気象庁（1995）：1993年2月7日能登半島沖の地震調査報告，験震時報第58巻，p97～114.

神戸大学附属図書館新聞記事文庫：http://www.lib.kobe-u.ac.jp/das/jsp/ja/ContentViewM.jsp?METAID=00102374&TYPE=PRINT_FILE&POS=8

国田雅人・竹俣隆一・役田 徹（1993）：能登半島沖地震による被災トンネルを復旧，トンネルと地下，第24巻11号.

真下英人（2005）：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11号.

森伸一郎・土屋基大（2005）：新潟県中越地震における木沢トンネルの被害とそのメカニ

ズム, 土木学会地震工学論文集, 第28巻182号.

野城一栄 (2014): 山岳トンネルの地盤変形による被害, 土木学会原子力土木委員会断層変位評価小委員会第三回講演会資料.

野城一栄・小島芳之・深沢成年・朝倉俊弘・竹村次朗 (2009a): 地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム, 土木学会論文集C, Vol.65, No.4.

野城一栄・小島芳之・宮林秀次・西藤潤・朝倉俊弘・竹村次朗 (2009b): 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.

野城一栄・嶋本敬介・小島芳之・宮林秀次・西藤潤 (2008): 小土被りトンネルの地震時挙動と対策工に関する基礎的研究, 土木学会トンネル工学報告集第18巻, I-18.

野城一栄・橘直毅・小島芳之・朝倉俊弘・野々村政一 (2007): 地震による変位を想定したトンネルの模型実験, 土木学会第62回年次学術講演会, 3-168.

小長井一男・藤田智弘・金井哲男・高津茂樹 (2010): 2004年10月23日新潟県中越地震による木沢トンネルの被害 活褶曲地帯における地震被害例, 土木学会2004年新潟県中越地震被害の教訓に基づく今後の課題・対策への提言.

山本哲也・庄司朋宏・荒鹿忠義・関雅樹・西山誠治 (2010): トンネルの耐震性についての解析的検討, 土木学会第63回年次学術講演会, 3-333, X.

1993年2月7日能登半島沖地震被害状況報告: <http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/ishiwata/Notoquake/notes/notes.htm>.

【参考】

山岳トンネル工法:

掘削したトンネル壁面 (これを切羽という) が短時間で自立するような地山条件で掘削後地山を支える支保工を施工して順次掘進を進めていく工法. 支保工として木製や鋼製の梁と矢板を用いるものを矢板工法 (在来工法), 吹付けコンクリートやロックボルトを用いできるだけ短時間の内に掘削面を覆うものをNATM (新オーストリアトンネル工法) という. 掘削には, 発破や機械を用いる. 道路や鉄道の山岳部のトンネルの多くがこの工法で施工されている.

シールド工法トンネル:

都市部の沖積層など掘削した切羽が自立しない, すなわちすぐ崩れてしまう軟弱な土砂地山に対し, 掘削面をシールドと呼ばれる鋼殻で支え, その中でセグメントというコンクリートや鋼製の覆工を組立て連続的に押出しながら掘進していく工法. シールドやセグメントに水密性を与えることにより地下水位以下でも掘削することが出来る. 都市部の地下鉄などがこの工法で施工されている.

開削工法トンネル:

地表から掘削を行い, 出来上がった空間にトンネル構造を構築した後, 埋め戻す工法. 地表面に近いトンネルや大規模な駅などの構築に用いられる.