

山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：角湯克典，日下敦

【要旨】

これまで山岳トンネルは、経験的に地震の被害を受けにくいと言われてきたが、兵庫県南部地震や新潟県中越地震では、比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害が発生したトンネルが見られた。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を解明し、耐震対策が必要となるトンネル条件と効果的な耐震対策を確立する必要がある。

本研究では、既往の山岳トンネルの地震被害データの分析を行い、地震被害が発生するメカニズムを解明して被害モードをパターン化するとともに、耐震対策についての考え方を提案した。

キーワード：山岳トンネル，地震被害，数値解析，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^{1)~4)}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。

そのような状況のなか、1995年1月の兵庫県南部地震⁵⁾や2004年10月の新潟県中越地震^{6),7)}では、数は限られるものの耐震対策が必要とされてこなかった箇所においても比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害を受けた山岳トンネルがあった。これは、地震の大きさ、地山条件、トンネルの構造等によっては、山岳トンネル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を明らかにし、耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその設計法を確立する必要がある。

本研究では、既往の山岳トンネルの地震被害データの分析を行い、地震被害が発生するメカニズムを検討して被害モードをパターン化するとともに、耐震対策について検討を行った。

2. 地震被害の事例分析とパターン化

過去の地震により被災した山岳道路トンネルの被害状況と被害発生要因に関する調査・分析を行った。その結果、山岳トンネルの地震による被害は、

- ・断層破砕帯など、著しく地山の悪い区間
- ・活断層と交差する等、地震で動いた断層近傍
- ・地震発生以前に既に変状が発生していた区間（背面空洞を含む）
- ・坑口部
- ・斜面災害や地すべり等の他の災害の影響を受けたもの

といった、これまでも地震の被害を受けやすいと指摘されていた条件において被害が発生した事例が多数を占めることが分かった。一方で、新潟県中越地震では、木沢トンネル（写真-1）や和南津トンネル（写真-2）等において、上述の条件に合致しないと思われる箇所でも覆工の崩落をともなう比較的規模の大きな被害が発生した。

これらの被害状況について、新潟県中越地震後の



写真-1 木沢トンネルの地震被害



写真-2 和南津トンネル天端部の変状

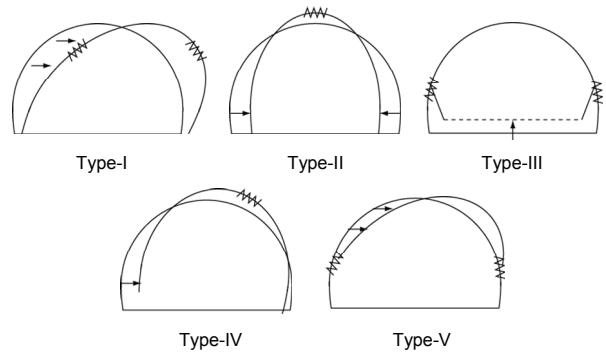


図-1 トンネルの地震被害モード

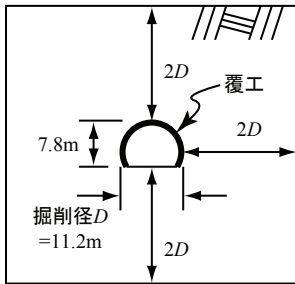


図-2 解析モデルの概要

表-1 解析条件と解析ケース

ケース	想定する変形モード	強制変位量 δ (mm)	覆工物性値				地山物性値		
			要素	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	厚さ (cm)	背面空洞 ^{※1}	要素	弾性係数 (MPa)
ケース1	せん断	105 ^{※2}	はり	22,000	0.20	30	—	150	0.35
ケース2							—	上半30	
ケース3	水平圧縮	112 ^{※2}					—	下半500 ^{※3}	
ケース4	鉛直圧縮	105 ^{※2}					有	150	
ケース5							—	150	

※1) 背面空洞は、天端部 $\pm 30^\circ$ 部分において、覆工と地山の節点間における力の伝達を0とすることでモデル化

※2) 解析領域全体の地山の平均ひずみ0.2%に相当

※3) SLより上部の地山を30、SLより下部の地山を500として設定

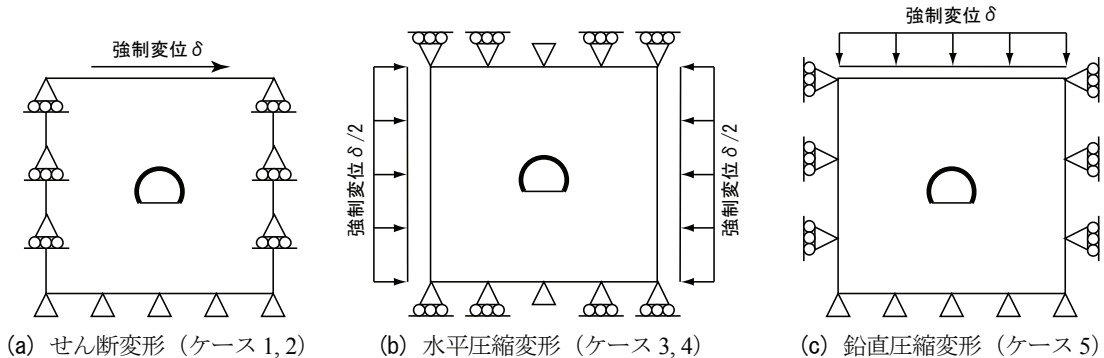


図-3 想定する変形モードと解析における荷重・境界条件

現地調査や、文献等による変状状況の分析を行った結果、被害モードは図-1に示すように以下の5タイプに大別されることが分かった⁸⁾。

- I) 左右の両肩部に曲げによる圧縮破壊（圧ざ）または曲げ引張りひ割れが発生する Type-I
- II) 天端部に圧ざまたは全断面圧縮によるせん断破壊（圧壊）が発生する Type-II
- III) 側壁部（特に矢板工法の側壁天端）に圧壊が発生する Type-III
- IV) 片側の肩部に圧ざが発生する Type-IV
- V) 肩部から側壁部にかけて縦断方向に比較的大規模の大きなひび割れが発生する Type-V

なお、地震によるトンネルの被害は、地すべりや斜面崩壊に巻き込まれた事例や、地震で動いた断層

と交差していた事例を除けば、地山の安定性が明らかに失われている事例はほとんどなく、覆工に被害が集中している。

3. 地震被害発生メカニズム

3.1 トンネルの被害モード

上述の被害の発生メカニズムを検討するため、まず、静的な線形弾性解析を行った。解析モデルの概要は図-2および表-1のとおりであり、本検討で想定した地山の変形モードは図-3に示す3パターンである。すなわち、ケース1および2では、地震によるS波の鉛直入射や偏圧等によりトンネルが全体的にせん断変形を生じる変形モード(図-3(a))を想定し、そのうちケース2では剛性の大きく異なる地質の境

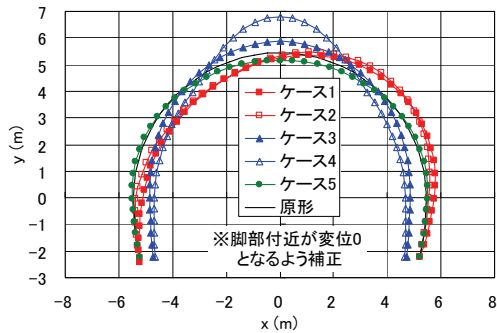
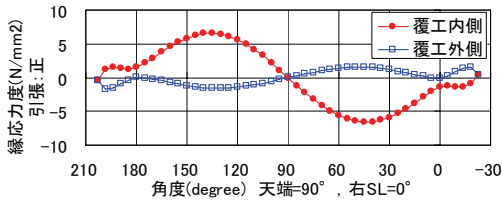
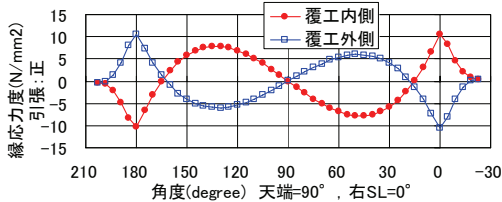


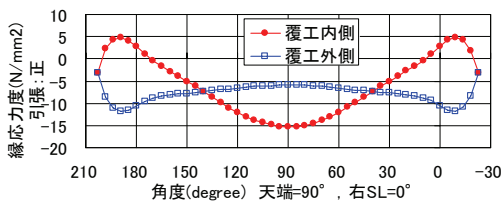
図-4 静的解析による変形モード (変位 30 倍)



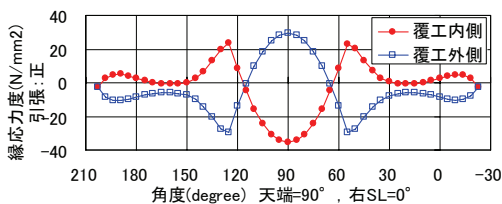
(a) ケース 1



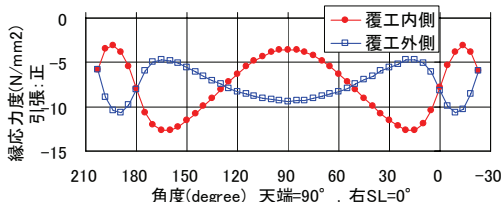
(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) ケース 4



(e) ケース 5

図-5 覆工の縁応力

界部に位置しているトンネルをモデル化した。ケース 3 および 4 は、地震による P 波の鉛直入射または地山のダイレイタンスによる押し出し等により、水平方向に圧縮される変形モード (図-3(b)) を想定

し、そのうちケース 4 では天端部の背面空洞をモデル化した。ケース 5 は、ケース 3 と同様の要因で鉛直方向に圧縮される変形モード (図-3(c)) をモデル化した。なお、本解析においてはインバートおよび支保工はモデル化していない。

本解析により得られた各ケースの変形モードを図-4 に、覆工の縁応力 (曲げモーメントおよび軸力によるもの) を図-5 に示す。

ケース 1 では、トンネルが全体的にせん断変形を生じ、肩部に曲げ応力が集中した。このような変形モードが、地震により左右方向へ繰り返して発生すれば、両肩部に圧さあるいは曲げ引張りひび割れが発生するものと考えられる。また、偏圧の影響等によって片側へのせん断変形が卓越する場合は、片側の肩部に圧さが発生するものと考えられる。

ケース 2 は、地山が軟質な上半においてせん断変形を生じるとともに、地質の境界部において曲げ応力が集中した。剛性の大きく異なる地質の境界部では、地山に大きなせん断ひずみが発生するため、覆工にも応力が集中するものと考えられる。

ケース 3 および 4 では、トンネル内空が縮小するとともに、天端が上方へ変位する変形モードとなった。天端の応力に着目すると、背面空洞が無いケース 3 では全圧縮、背面空洞が有るケース 4 では曲げ圧縮が卓越しているが、いずれも天端部に応力が集中した。

ケース 5 ではトンネルが上下方向に潰される変形モードとなり、側部内側の圧縮が卓越した。

以上の解析結果を踏まえると、図-1 に示した被害モードは、以下のメカニズムにより発生したものと考えられる。

Type-I は、下方から S 波が入射することで、トンネル全体がせん断変形して肩部に大きな曲げモーメントが発生し、それが繰り返されることで両肩部に圧さあるいは曲げ引張りひび割れが生じたものと考えられる。

Type-II は、地山が水平方向に圧縮されることで、覆工天端部に応力が集中したものと考えられる。その場合の天端部の応力状態は、天端部に背面空洞が無ければ軸圧縮が卓越し、背面空洞があれば曲げモーメントが卓越する傾向にある。

Type-III は、上方からの押し出しまたは下方からの突き上げにより、鉛直方向に圧縮されることで、覆工側部に圧縮応力が集中したものと考えられる。

Type-IV は、Type-I と類似するが、偏圧等の影響

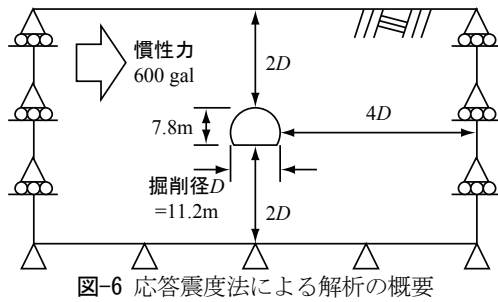


図-6 応答震度法による解析の概要

表-2 応答震度法による解析ケースと条件

	慣性力 (gal)	覆工物性値				地山物性値				
		要素	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	厚さ (cm)	密度 (g/cm ³)	要素	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)
ケースA	600	はり	22,000	0.20	30	2.3	平面ひずみ	150	0.35	2.3
ケースB					30			500		
ケースC					60			150		

によって片側からの押し出しが卓越し、片方の肩部にのみ圧ぎが発生したものと考えられる。

Type-V は、Type-I とほぼ同様のメカニズムと考えられるが、剛性の大きく異なる地質の境界部にトンネルが位置したために、地層境界部の覆工に応力が集中したものと考えられる。

なお、地山が上述の変形モードとなるメカニズムを検討するため、新潟県中越地震の震央近傍の地中で観測された地震波を入力した地盤の一次元動的応答解析を別途実施した。その結果、地山はせん断変形が卓越するモードとなり、Type-I、IV および V は地震波 (S 波) による地山の変形により説明できることが分かった。しかし、Type-II および III で想定した鉛直および水平方向の変形はせん断変形に比べて小さかったため、覆工に変状が発生するほどの変形が地山に発生する主因は明らかとなっていない。このような地山の変形モードとなる要因としては、地山のダイレイタンスーによる押し出しや、P 波の鉛直入射等が可能性として挙げられるが、今後検討する必要があると考えられる。

3.2 地山と覆工の剛性比の影響

前節の検討により、地震によって被害を受けたトンネル覆工の変形モードが明らかとなった。そこで、地山の変形メカニズムまで比較的明確になった Type-I の被害モードを対象に、実現象をよりの確に再現できると考えられる応答震度法を用いて、地山と覆工の剛性が地震被害に及ぼす影響を検討した。

解析の概要を図-6 および表-2 に示す。地震力は、地山の覆工それぞれに水平方向の慣性力 600 gal を作用させることで模擬した。解析はケース A を基本ケースとし、地山剛性を増加させたケース B、覆工を増厚して覆工の剛性を増加させたケース C で実施

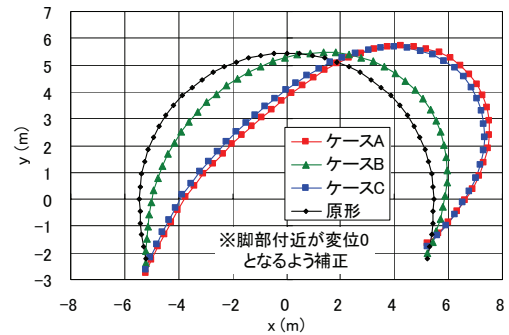


図-7 応答震度法による変形図 (変位 40 倍)

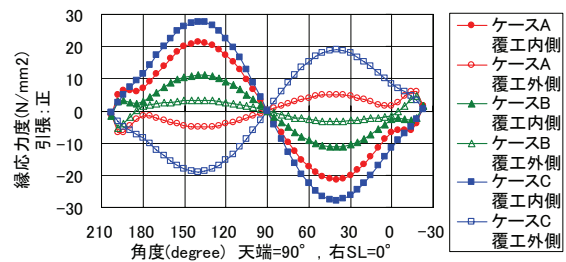


図-8 応答震度法による覆工の縁応力

した。

解析により得られた覆工の変形図を図-7 に示す。地山剛性が等しいケース A とケース C はほぼ同等の変形となっていることから、トンネルの挙動は地山の変形にほぼ支配されていることが分かる。このことは、覆工厚を 30 cm から 60 cm に増した程度では、地山の地震時の変形を抑制する効果はほとんどないことを示唆していると考えられる。また、地山の剛性が大きいため地山に発生するひずみも小さいと考えられるケース B の覆工の変形は小さくなっており、トンネルの地震時の挙動は地山の剛性にほぼ支配されているものと考えられる。

図-8 は、覆工に発生した縁応力を示したものである。ケース B はケース A と比較すると、変形も小さいため発生する応力も小さいものとなった。また、ケース C は、ケース A とほぼ同等の変形であるが、覆工の剛性が大きいため大きな応力が発生した。また、覆工剛性の地山剛性に対する比を考えると、ケース C > ケース A > ケース B の順であり、地山に対する覆工の剛性が大きいほど最大応力も大きくなっていることが分かる。

これらの結果は、地震によるトンネルの変形は地山の挙動にほぼ支配され、覆工の剛性が大きいほど地山の変形に追従できず覆工に大きな応力が発生することを示唆しているものと考えられる。

4. 対策の考え方

地震によるトンネルの被害を低減させるためには、覆工の大規模な崩落による利用者の被害を防止することが重要となる。その対策としては、普段の維持管理において、覆工に変状が発見された場合には補修・補強を実施することにより、地山や覆工の安定性を向上させることが重要であると考えられるが、これらの対策に加えて、トンネルの構造を変えて地震時に覆工に発生する応力を低減させる方法や、地震により覆工に変状が発生した場合に大規模な覆工の崩落を防止する方法も有効であると考えられる。

4.1 トンネル構造における対策

トンネル構造を変えて覆工に発生する応力を低減させるには、大まかに3種類の対策が考えられる。すなわち、インバートの設置によりトンネルをリング状としてより安定な構造にする方法、覆工の剛性を増加させて変形を抑制する方法、覆工の剛性を低減させて地山の変形に追従させる方法である。しかし、前章までの検討により、覆工の剛性を増加させると、地山の変形に覆工が追従できず、むしろ覆工に発生する応力は大きくなることが分かった。ここでは、インバートを設置してトンネルをリング構造とした場合と、覆工の応力集中部にピン構造を配置して柔構造とした場合の効果について検討した。

(1) インバートの設置

静的な荷重が覆工に作用する場合に、トンネル構造を安定化するための最も基本的な対策は、インバートの設置によりトンネル構造をリング状にすることである。しかし、動的な荷重が作用する場合の挙動については明らかになっていない。ここでは、模型振動実験によりインバートの効果を検討した。

実験⁹⁾は、図-9に示すように、せん断土槽中に約1/70スケールの山岳トンネルを模擬した供試体を作製し、下面からトンネル横断水平方向の4 Hz 正弦波を入力する事により実施した。実験を行ったケースにおける覆工模型の構造を図-10に、実験実施時の覆工材料の物性値を表-3に示す。

図-11は、入射波の加速度振幅と、土槽天端の水平変位の最大値および最小値の関係を示したものである。この図から、両ケースとも地山の挙動は同様であるが、加速度振幅350 galを超えたあたりから変位が急激に増大し、地山のひずみレベルが増大していることが分かる。

図-12は、入射波の加速度振幅と、トンネル内空変位の最大値・最小値を示したものである。ケース

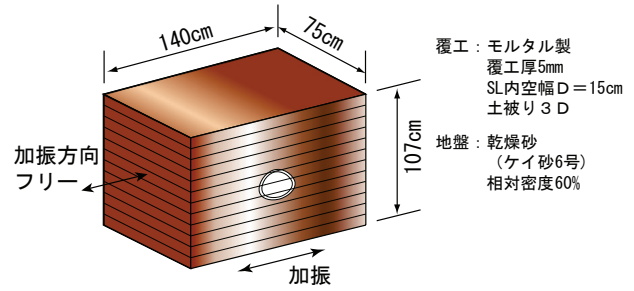


図-9 振動実験の概要

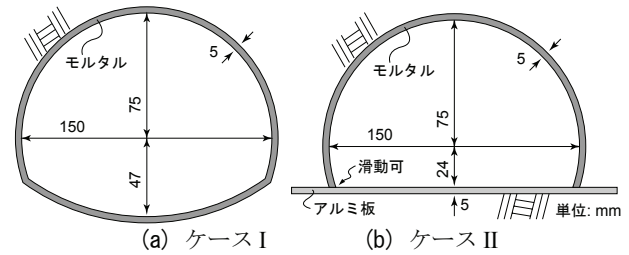


図-10 覆工模型の寸法

表-3 覆工模型材料の物性値

ケース	覆工模型の構造	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
I	インバート有り	52.12	2.47	28.11	0.26
II	インバート無し	50.20	2.39	20.34	0.24

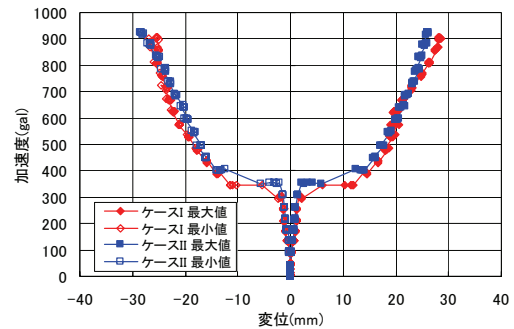
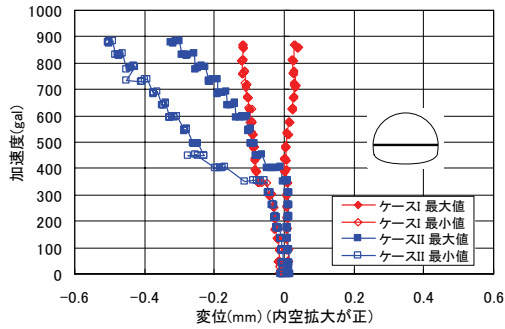


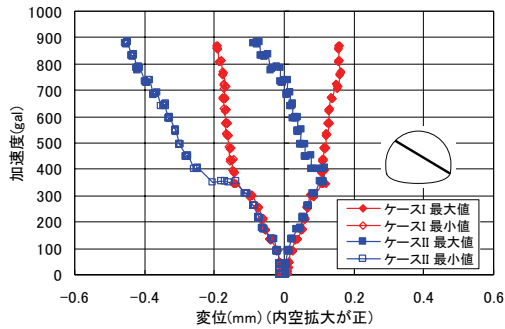
図-11 底面加速度とせん断土槽最上段の変位

I は、水平方向の伸縮と比較して斜め方向の伸縮が大きく、トンネル全体がせん断変形を受けるモードが卓越していると考えられる。地山の変形挙動が大きく変わる400 gal以降は、若干内空が縮小する方向へ変形モードがシフトしているものの、覆工の変形モードはほとんど変化していない。一方、ケースIIは、300 gal以下ではケースIと同様の変形モードを示したが、400 gal以降では、3測線全てで内空が縮小する方向への変形モードとなった。また、本稿では示していないが、加速度振幅800 gal付近では、ケースIIの肩部のひずみレベルはケースIのものの2倍程度となった。

これらの結果から、地山のひずみレベルが小さい場合は、インバートの有無に関わらず、水平方向の



(a) 水平測線



(b) 斜め測線

図-12 底面加速度とトンネル内空変位の関係

地震動に対して同様の挙動を示し、全体的なせん断変形モードが卓越することが分かった。ところが、地山のひずみレベルが大きくなるにつれて内空が縮小する方向の外力が覆工に作用すると、インバートが無い場合は抵抗できず大きな変形を生じ、それにとまってひずみレベルも増大することが分かった。

(2) 覆工の柔構造化

本検討では、覆工に柔構造の一例としてピン構造を設置した場合について検討した。解析モデルは3.2節で示したケース A と同様である。ただし、ケース A*は、ケース A で大きな応力が発生した肩部 45° および 135° にピン構造を設置した。

図-13、14 は、それぞれ解析により得られた変形図と縁応力図である。変形モードは両ケースともほぼ同様であり、覆工の挙動は地山の挙動にほぼ支配されていることが分かる。覆工の縁応力をケース A と比較すると、ケース A*では最大縁応力が減少している。この結果から、地山条件等にもよると思われるが、トンネルの耐震性を向上させるためには、覆工を柔にし、地山の変形に対して追従できる構造とすることが有利な場合があるものと考えられる。

4.2 崩落防止対策

トンネルの構造を変えない場合は、覆工に破壊が発生しても、構造全体が直ちに崩れ落ちるのを防ぐ

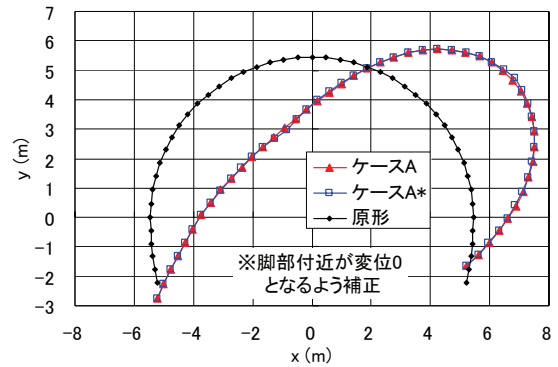


図-13 柔構造を採用した覆工の変形 (変位 40 倍)

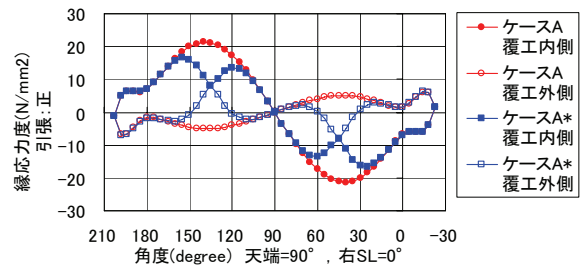


図-14 柔構造を採用した覆工の縁応力

ために覆工コンクリートのじん性を高めることや、覆工コンクリート塊の落下を防止することで、利用者の被害は低減されることが考えられる。これらの被害が発生する地山条件については明らかになっていないが、覆工における対策としては以下のものが考えられる。

- 1) 鋼繊維や単鉄筋による補強: コンクリート塊の落下を防ぐ効果に加え、覆工構造全体の耐力に到達した後の残存耐力を向上させる効果が期待できる場合があると考えられる。
- 2) 当て板工等による覆工保持: トンネルの内面から形鋼やパネル、繊維シート等を設置して覆工の一体化を図ることで、覆工コンクリート塊の落下を抑制する効果があると思われる。
- 3) ロックボルト打設による覆工保持: 地震時にボルトが破断しなければ、覆工を地山側に縫い付けることで、比較的規模の大きなコンクリート塊の落下を抑制する効果があるものと考えられる。

ただし、これらの対策の地震時における効果やそのメカニズムは必ずしも明らかにされていないため、今後検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、地震被害を受けた山岳トンネルの事

例分析や数値解析により被害発生メカニズムを解明するとともに、耐震対策の考え方を提案した。本研究の成果として以下のことが明らかとなった。

- (1) 山岳トンネルの地震被害は、地震により地山に主としてせん断変形、鉛直圧縮変形あるいは水平圧縮変形が発生することにより説明できるものと考えられる。また、これらの地山の変形モードと地山条件により、トンネルの被害モードは5パターンに大別できるものと考えられる。ただし、地山に鉛直圧縮変形と水平圧縮変形が発生するメカニズムについては明確になっていない。
- (2) 地震によるトンネルの変形は地山の挙動にほぼ支配され、覆工の剛性が大きいほど地山の変形に追従できず、覆工に大きな応力が発生する傾向があると考えられる。
- (3) トンネルの地震被害を低減させるためには、普段の維持管理において、変状の発生が発見された場合には補修・補強を行うことにより、地山や覆工の安定性を高めることが重要であるが、これらの対策に加えて、トンネルの構造を変えて地震時に覆工に発生する応力を低減させる方法や、地震により覆工に変状が発生した場合に大規模な覆工の崩落を防止する方法も有効であると考えられる。しかし、地震時におけるその効果やメカニズムは必ずしも明らかにされていないため、今後検討する必要がある。

今後は、地震時の地山の挙動についてさらなる検討を行い、各被害モードが発生する条件について検討するとともに、地山条件に適した耐震対策の選定方法について検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究所報告，No.1123，pp.1-43，1979.
- 2) 小野田耕治，楠山豊治，吉川恵也：伊豆大島近海地震による被害(1) 鉄道トンネルの例，トンネルと地下，第9巻，第6号，pp.7-12，1978.
- 3) 今田徹，川島一彦：第7編道路トンネルおよび道路橋の被害 土木研究所報告(1978年伊豆大島近海地震災害調査報告)，pp.106-119，1982.
- 4) 国田雅人，竹俣隆一，役田徹：能登半島沖地震による被災トンネルを復旧 大谷狼煙飯田線木の浦トンネル，トンネルと地下，第24巻，第11号，pp.7-13，1993.
- 5) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神淡路大震災調査報告 土木構造物の被害，1998.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 日下敦，砂金伸治，森本智，真下英人，角湯克典：模型振動実験による地震時におけるインバートの効果に関する一考察，トンネル工学報告集，No.19，pp.205-209，2009.