

◆特集：最近の地震災害と耐震技術◆

道路トンネルの地震被害の概要と課題

真下英人*

1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震においては、関越自動車道、国道17号、国道291号などの幹線道路、上越新幹線、上越線などの主要鉄道幹線に大きな被害が生じ、特に地震の被害を受けにくいと言われてきたトンネルで多くの被害が生じたのが特徴となっている。

本報文は、今回の地震により発生した道路トンネルの被害の概要とトンネルの地震対策を実施する上での今後の技術的課題について報告するものである。

2. 道路トンネルの被害状況

今回の地震により何らかの被害が発生した国道・県道の道路トンネルは、図-1に示す21トンネルである。被害があったトンネルのうち、補修・補強を必要とするトンネルは10本、被害が軽微で補修・補強を必要としないトンネルは11本であった。補修・補強を必要とするトンネル10本のうち8本が震央から約6km以内に分布しており、今回のトンネル被害は狭い範囲に限定的に発生している。また、トンネル工法別には矢板工法によるものが7本、NATMによるものが3本であった。今回の地震による被害の主なものとしては、覆工コンクリートのひび割れおよびそれに伴う覆工コンクリートの剥落または崩落、側壁部の押し出し、路面の隆起、側溝の変状などとなっている。

被害の発生箇所は、土被りが15~40mで過去の地震において被害が発生したトンネルと同様に坑

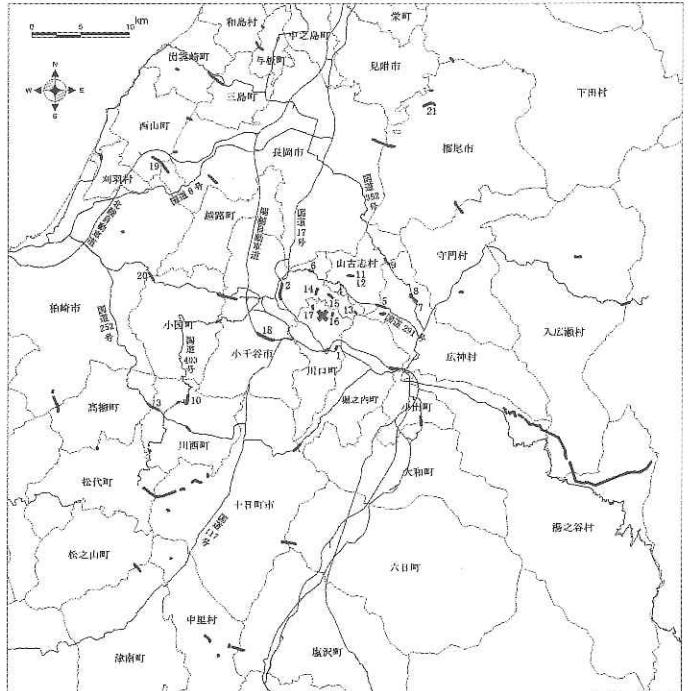


図-1 被害が発生したトンネル位置図

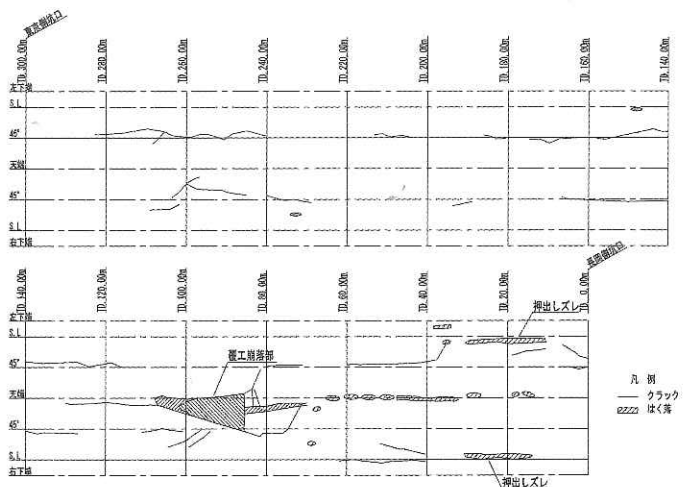


図-2 和南津トンネル変状展開図

Overview of Earthquake-Damaged Road Tunnels and Technical Issues to Improve Earthquake-Proof

口部付近で規模の大きな被害が発生したトンネルが見られたが、トンネルの中間部で規模の大きな被害が発生したトンネルも見られたことが特徴となっている。

3. 被害の特徴

比較的規模の大きな被害が発生した5つの道路トンネルについて被害の特徴を以下に示す。

3.1 和南津トンネル

和南津トンネル(図-1中の番号1)は、矢板工法により建設された延長300m、全幅9mの2車線道路トンネルで昭和40年に竣工した。掘削工法としては底設導坑先進上部半断面工法が採用され、覆工厚は500~900mmである。トンネル周辺の地質はシルト質砂岩により構成されており、トンネルは最大土被り40m程度の段丘地形を通過している。

地震により発生した変状の展開図を図-2に示すが、主な被害としては終点側(長岡側)坑口か

ら20~110mの区間で天端部において縦断方向に圧ざあるいはせん断破壊によると思われる覆工コンクリートの剥落が発生し、特に、終点側坑口から90~107m区間では天端部において幅約2~6mのコンクリート塊が崩落した(図-3、写真-1参照)。また、終点側坑口から10~30m間においては両側壁(特に山側)が5~15cm内空側に押し出すとともに、側壁部とアーチ部の水平打ち継ぎ目付近において圧縮破壊によるコンクリートの剥落(図-4、写真-2参照)が発生した他、ほぼ全線(特に山側)で側溝の変形破損が発生した。なお、終点側坑口部では、坑門壁においてコンクリート打ち継ぎ目に目開きや段差が生じたほか川側の上部ブロック(幅8m、高さ2m)が川側へ約20cm、坑外長岡側へ12cm移動し、坑口部のもたれ擁壁も5~10cm移動した。

3.2 木沢トンネル

木沢トンネル(図-1中の番号16)は、延長305m、全幅9.0mの道路トンネルで平成3年に竣工した。

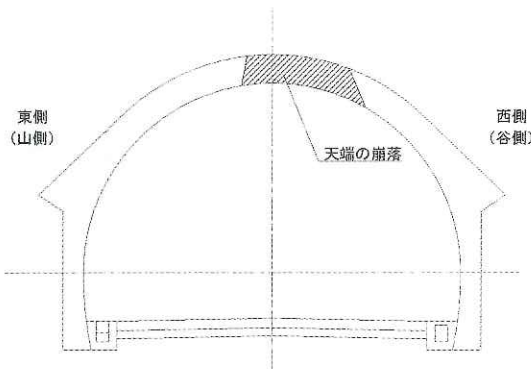


図-3 和南津トンネル被害状況図
(終点側坑口から100m付近)

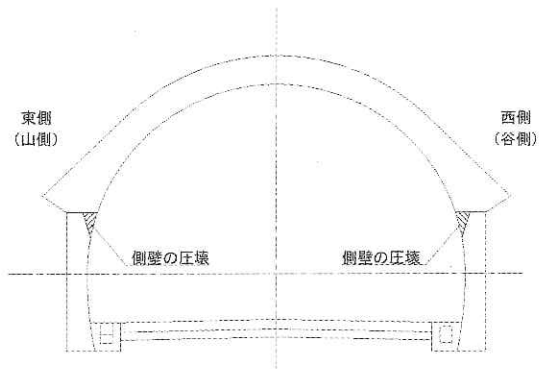


図-4 和南津トンネル被害状況図
(終点側坑口から20m付近)

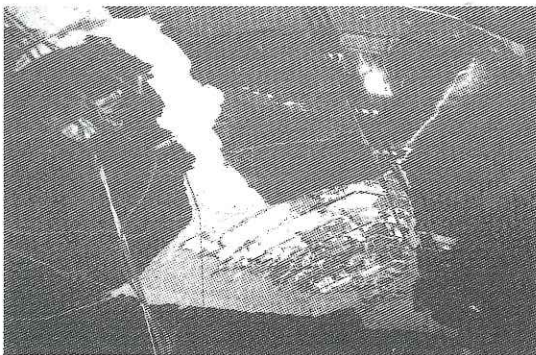


写真-1 和南津トンネルの被害状況
(天端の崩落)

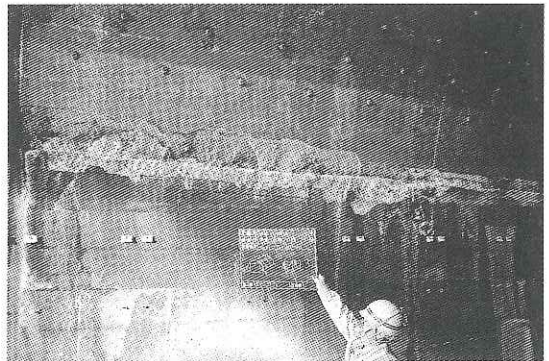


写真-2 和南津トンネルの被害状況
(側壁の押し出し)

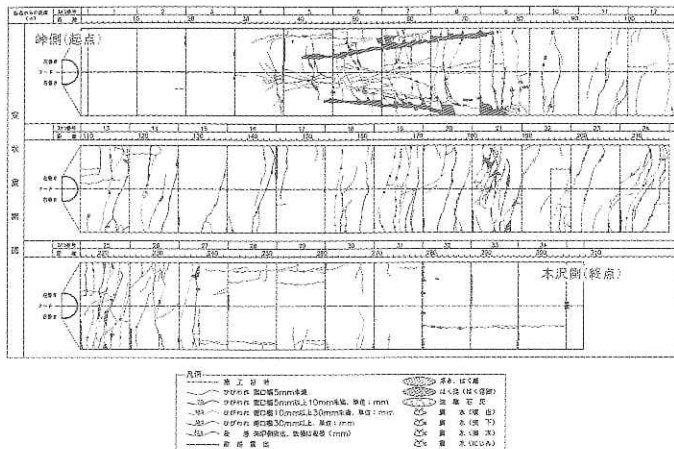


図-5 木沢トンネル変状展開図

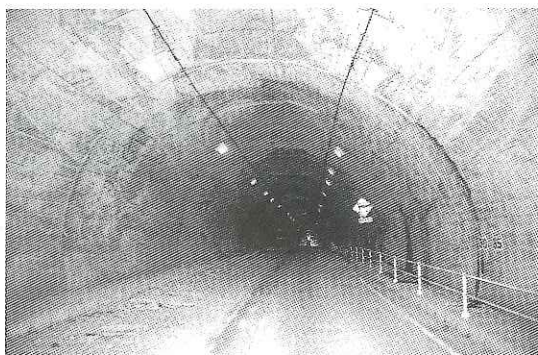


写真-3 木沢トンネルの被害状況
(側壁部からアーチ部のひび割れ)



写真-4 木沢トンネルの被害状況
(横断方向のひび割れ)



写真-5 木沢トンネルの被害状況
(舗装版のひび割れ)

施工方法はNATM、掘削工法は上半先進ベンチカット工法である。覆工厚はアーチ部300～700mm、側壁450～700mm、インバート500mmである。トンネルの土被りは、大半の区間で30m弱程度であり、終点側（木沢側）坑口部の36m区間は明かり巻き施工となっている。

地震により発生した変状の展開図を図-5に示すが、ひび割れや変位の状況から、木沢トンネルの変状形態は次の3パターンに大別できる。

起点側（峠側）坑口から30～80mの区間は、最も変状をきたした区間で、側壁からアーチ部にかけて山側と谷側の両側に大規模な連続したひび割れが発生した。また、ひび割れ上部の半断面が谷側に変位し、山側側壁部では大きな剥落が生じ、トンネルが破壊した状態であった（写真-3参照）。大規模なひび割れの他にも、アーチ部や側壁部に縦断方向および横断方向の多くのひび割れが発生した他、舗装目地が開口し、最大150mmに及ぶ

ものもあった。

起点側坑口から80～240mの区間では、横断方向のひび割れが数多く発生し（写真-4参照）、特に起点より180m付近、220m付近及び240m付近

では開口幅の大きいひび割れが密集し、ひび割れが閉合して剥離した状態であった。また、舗装目地はほとんどの箇所で開催しており、最大150mmを超える箇所もあった（写真-5参照）。

起点側坑口から240～305m区間（終点側坑口部）は、横断方向のひび割れは少なく、アーチ部や側壁部に縦断方向の連続したひび割れが発生した。舗装目地の開口も認められるが一部の箇所を除いて開口幅は比較的小さかった。



写真-6 荒谷トンネルの被害状況
(斜め方向ひび割れ)

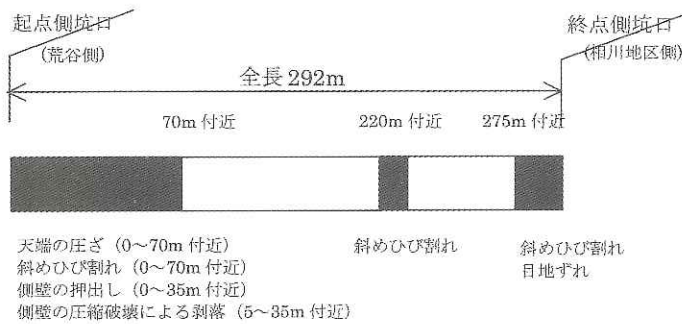


図-6 荒谷トンネルの全体被害状況図

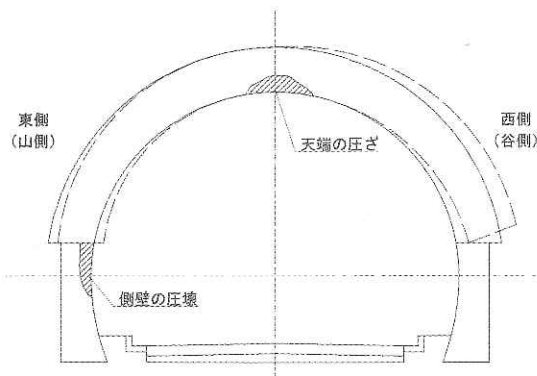


図-7 荒谷トンネル被害状況図
(起点側坑口付近)

3.3 荒谷トンネル

荒谷トンネル（図-1中の番号17）は、延長292m、全幅7.6mの道路トンネルで、昭和52年に竣工した。施工方法は矢板工法、掘削工法は底設導坑先進掘削工法である。覆工厚はアーチ部600mm、側壁600mmである。トンネルの土被りは最大45m程度で両坑口に向かいなだらかに減少している。荒谷トンネルの全体被害状況を図-6に示すが、被害は両坑口付近に集中して発生した。

起点側（荒谷側）坑口から0～70m区間では、アーチ部から側壁部にかけて多数の斜め方向ひび割れ（写真-6）、あるいは天端部に圧ぎと思われる剥落が発生した（図-7、写真-7参照）。

また、側壁部の押し出しあるいは側壁部とアーチ部の水平打ち継ぎ目付近における圧縮破壊によるコンクリートの剥落が発生（図-7、写真-7参照）した他、横断目地部においても水平横方向に段差が確認された。さらに、舗装面にも複数のひび割れが発生した。

終点側（相川地区側）坑口部では、アーチ部や側壁部に多数の斜め方向や横断方向のひび割れが発生した。また、アーチ部と側壁間の目地部において、水平横方向にずれが発生し、横断目地部においても水平横方向に段差や目地開きが確認された。

3.4 羽黒トンネル

羽黒トンネル（図-1中の番号11）は、延長506m、全幅5.5mの道路トンネルで、昭和42年に竣工した。施工方法は矢板工法、掘削工法は側壁導坑先進工法である。覆工構造は巻厚450mm

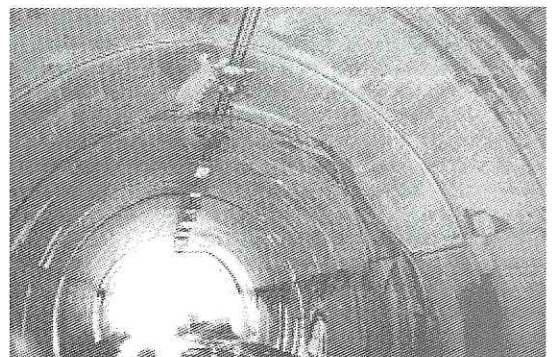


写真-7 荒谷トンネルの被害状況
(天端の圧ぎ、側壁部の圧壊)

で逆巻工法により築造された。地質は、施工時の記録によれば準硬岩程度の頁岩となっているがその後の調査で風化泥岩の存在が確認されており、トンネルの土被りは最大で100m程度である。

羽黒トンネルの全体被害状況を図-8に示すが、被害は両坑口付近に集中して発生した。起点側（西側）坑口部では、トンネル南側の斜面崩壊に伴い坑門工にひび割れや目開き、段差などの大規模な変状が発生した。また、天端部に幅1.5m程度の連続した圧ぎが発生、アーチ肩部や側壁目地部では長さ十数mに及ぶ縦断方向のひび割れが発生し、コンクリート片の剥落がいたるところで発生した。中間部では坑口部より被害は少ないものの、アーチ部肩部に長さ数m程度の縦断方向のひび割れが発生し、側壁部では目地モルタルのはらみ出しや剥落が発生した。さらに舗装版においてもひび割れや目開きが確認され、連続的に50～100mm程度隆起した（写真-8参照）。終点側（東側）坑口部でも、トンネル背面の斜面崩壊で坑門工にひび割れや目開き、段差などの大規模な変状が発生した。また、アーチ肩部に十数m程度の縦断方向ひび割れが確認され、側壁部では目地モルタルのはらみ出しや剥落が見られた。さらに、舗装版においてもひび割れが密集し、500mm程度の隆起が確認された。

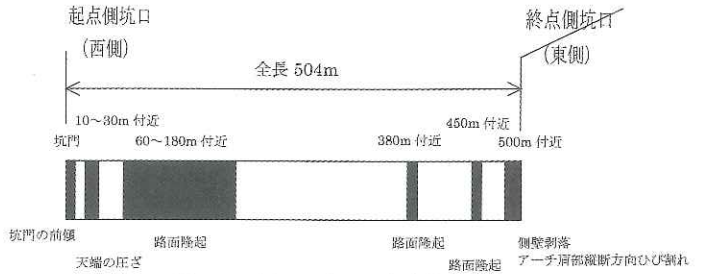


図-8 羽黒トンネルの全体被害状況図

年に竣工した。施工方法は矢板工法、掘削工法は上部半断面先進掘削工法である。覆工厚は600～800mmで、トンネルの最大土被りは40m弱程度である。

十二平トンネルの全体被害状況を図-9に示す。起点側（北側）坑口部付近は、他の区間に比べて変状は少なく、左アーチ部に縦断方向のひび割れが見られる程度であった。

起点側（北側）坑口から70～90mの区間では、著しい変状が見られ、谷側のアーチ肩部に縦断方向の圧ぎが見られるとともに、天端部においてはせん断と思われるひび割れが亀甲状に入っており、山側側壁部には大きな剥落も発生した（図-10、写真-9参照）。また、舗装版に大きな開口も見ら

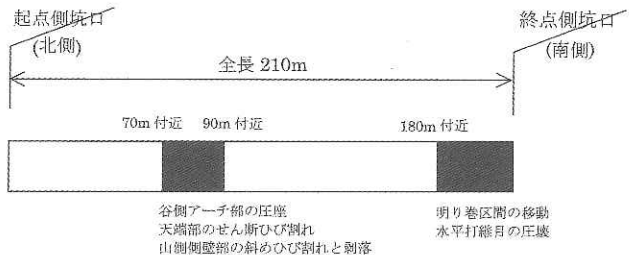


図-9 十二平トンネルの全体被害状況図



写真-8 羽黒トンネルの被害状況（舗装版の隆起）

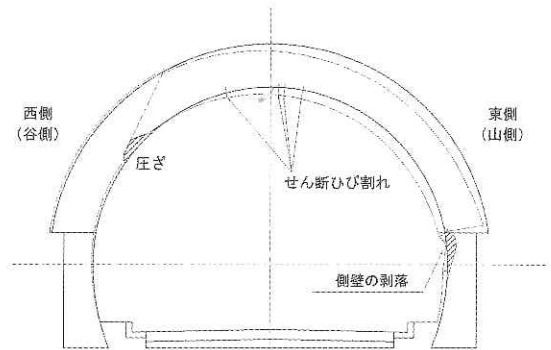


図-10 十二平トンネル被害状況図（起点側坑口から70～90m付近）

れ、山側の車線が約20mにわたり、50mm程度の浮き上がりが発生した。終点側坑口部においては、坑口より約20mの明かり巻き区間が折れるように谷側に移動するとともに、アーチ部と側壁部の水平打ち継ぎ目において圧縮破壊によるコンクリートの剥離が、アーチ部コンクリートあるいは側壁コンクリートに発生した。

4. トンネルの地震対策の現状と技術的課題

過去の震災事例の調査結果に基づく分析結果によれば、地震規模が大きく、地震断層面からの距離が近く、地形・地質条件やトンネル構造などに問題がある場合は山岳トンネルも地震の被害を受ける場合があることが報告されている。このため、これまでの地震対策もトンネル位置の選定に際して地形・地質条件に問題がある箇所を極力避けるとともに、坑口部やトンネルの施工時に断層や著しい地山の押し出しなどを確認した箇所など地形・地質条件に問題のある箇所においては、覆工コンクリートに鉄筋や鋼繊維補強コンクリートによる補強、インバートの設置による断面閉合などの対策を採用してきた。今回の地震により比較的規模の大きな被害を受けたトンネルも、旧地すべり地あるいは斜面崩壊地を通過する場合、断層や地質の不連続面を通過する場合、土被りが浅く偏圧地形を有する場合など地形・地質的に問題を有する場合が多いことが明らかとなっており、概ね過去の震災事例の分析結果から得られた知見の範囲内のものとなっている。しかし、発生した被害は、天端部における圧ぎ、側壁から肩部にかけた縦断方向のひび割れ、横断方向のひび割れ、

側壁部の押し出し、側壁部とアーチ部の打ち継ぎ目付近における圧壊、路面の隆起などトンネルによって異なった形態を示しており、また、同一トンネルでも区間によって被害の有無やその程度に差が見られるなど被害の発生には個々のトンネルの条件が大きく影響しており、被害の発生メカニズムはそれぞれ異なるものと考えられる。

トンネルの地震被害を最小に抑制するためには、トンネルの被害発生メカニズムと被害を受けやすいトンネルの条件を明らかにし、地震対策に的確に反映させる必要がある。しかしながら、上述したようにトンネルの地震による被害発生要因と対策が必要な箇所については、経験的に整理・分析がなされているものの、地震時におけるトンネルの挙動や被害発生メカニズムを定量的に評価できる手法は確立されておらず、地震時における被害を最小に抑制する対策法も確立されていないのが現状である。

今後は、被害が発生したトンネルの特徴を震源や断層との位置関係、地盤の変形、トンネル周辺の地質・地形、トンネル工法・構造などの観点から分析した上で、地震時におけるトンネルの挙動を再現できる数値解析モデルを開発し、大規模地震時の被害発生メカニズムを究明することにより、地震時の被害を最小に抑制する対策法を確立することが必要である。

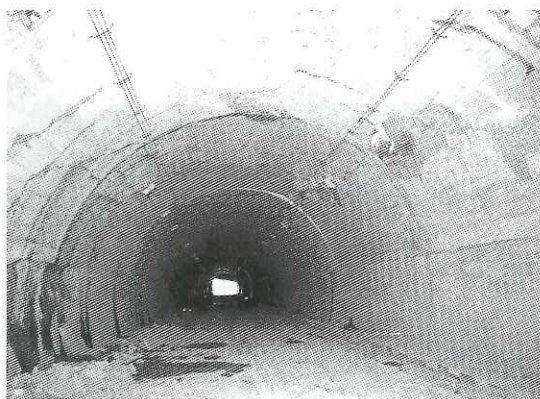


写真-9 十二平トンネルの被害状況
(アーチ肩部の圧ぎ、側壁部の剥落)

真下英人*



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループトンネルチーム 首席研究員、工博
Dr. Hideto MASHIMO