

新潟県中越地震による鉄道トンネルの被害

Damage of railway tunnel due to The Mid Niigata prefecture earthquake

清水 満¹・末松 史朗¹・鈴木 尊¹・安東 豊弘²・栗栖 基彰³

Mituru Shimizu, Shiro Suematu, Takashi Suzuki, Toyohiro Ando and Motoaki Kurisu

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

E-mail: suzukitakashi@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道(株) 設備部 構造物管理G (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

³正会員 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 土木技術部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3)

In The Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, big damage occurred in the railway structure. The extensive damage from the storm occurred in the tunnel that had been assumed to be strong in the earthquake especially so far. The feature of the damage is enumerated that the damage part is the vicinity of the center of the tunnel. The damage situation was investigated in detail. As a result, in the feature of this tunnel damages, there are near the epicenter, the large magnitude, the problem of geological, and the problem in tunnel structure.

Key Words : earthquake, damage of railway tunnel, restoration

1. はじめに

2004年10月23日17時56分頃に発生したM6.8の新潟県中越地震は、鉄道構造物や道路構造物に甚大な被害をもたらした。鉄道では、上越新幹線をはじめ上

越線、信越本線、飯山線において、列車運行が不可能となる程の被害が発生し、高架橋、橋梁、盛土の他に、従来、地震には強い構造物と言われていたトンネルにも様々な被害が発生した。被災したトンネル数は21に及んだが、2004年12月27日までに在来線トンネル（上越線小千谷・越後滝谷間の榎峠トンネルは2005年3月25日）が運転再開し、上越新幹線は12月28日に運転再開を果たした。

本稿では、特に被害の大きかった上越新幹線魚沼トンネル、妙見トンネルおよび上越線の和南津トンネルの被害状況と復旧方法について述べるとともに、今回の地震被害の特徴、そして詳細調査等から想定した被害原因について報告する。

2. 鉄道トンネルの被害状況

(1) 被害概況

被害は、覆工コンクリートの剥離・剥落といった小規模なものから、軌道隆起や覆工コンクリートの崩落といった大規模なものまで、多岐にわたっていた。図-1に被害を受けたトンネルの位置図を示す。

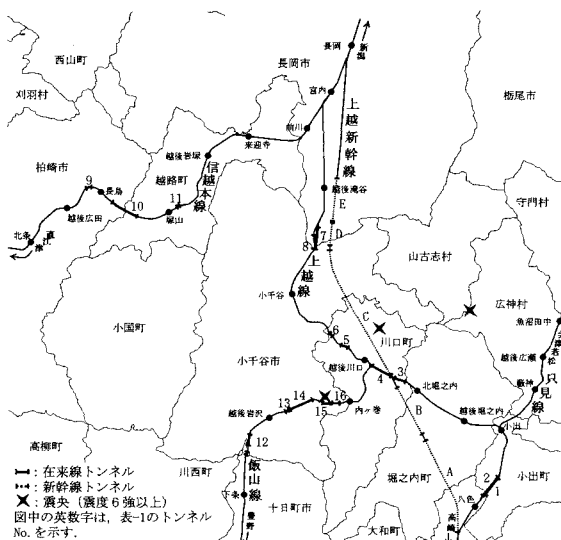


図-1 新潟県中越地震による被害トンネル位置図

表-1 被害トンネルの基本データと被害状況

No.	被害程度	トンネル名	線名	駅間		単複別	長さ (m)	覆工 (t=cm)	地質	被害状況
				自	至					
A	C	浦佐	上越新幹線	浦佐	長岡	複線	6,087	C (70~90)	砂礫、凝灰角礫岩、礫岩	中央通路側壁ひび割れ
B	B	堀之内	上越新幹線	浦佐	長岡	複線	3,300	C (70~90)	礫岩、砂岩	打継目部の剥落、ひび割れ、側壁食い違い
C	A	魚沼	上越新幹線	浦佐	長岡	複線	8,624	C (50~90)	シルト岩、泥岩、砂岩	アーチ部の崩落、打継目部の剥落、ひび割れ、軌道隆起
D	A	妙見	上越新幹線	浦佐	長岡	複線	1,459	C (70~90)	シルト岩	アーチクラウン部の圧さ、打継目部の剥落、ひび割れ、軌道隆起
E	B	滝谷	上越新幹線	浦佐	長岡	複線	2,673	C (70~90)	シルト岩、砂岩、砂礫	アーチクラウン部の圧さ、打継目部の剥落、ひび割れ
1	B	福山	上越線	八色	小出	単線	1,350	CB (39~91)	軟岩	ひび割れ、剥落
2	B	新福山	上越線	八色	小出	単線	1,463	C (45,60)	軟岩	アーチクラウン部の圧さおよびせん断ずれ、ひび割れ
3	A	和南津	上越線	北堀之内	越後川口	複線	725	C (50,60)	砂岩	アーチクラウン部の圧さ、アーチ部の崩落、打継目部の剥落、ひび割れ、トンネル坑口部のずれ
4	B	中山	上越線	北堀之内	越後川口	複線	1,205	C (50)	頁岩、砂岩	打継目部の剥落、アーチ肩部のひび割れ
5	B	牛ヶ島	上越線	越後川口	小千谷	複線	432	C (50)	砂岩、頁岩	打継目部の剥落、トンネル坑口部のずれおよび面壁の亀裂
6	A	天王	上越線	越後川口	小千谷	単線	285	C (45,60)	砂岩、頁岩	トンネル上部斜面崩壊に伴う側壁の亀裂、打継目部の剥落、ひび割れ、トンネル坑口部面壁のひび割れ
7	A	新榎峠	上越線	小千谷	越後滝谷	単線	1,372	C (30~50)	頁岩、砂岩	アーチクラウン部の圧さ、ひび割れ、側壁部の押出し
8	B	榎峠	上越線	小千谷	越後滝谷	単線	641	CB (23~56)	頁岩、砂岩	斜面崩壊に伴うトンネル坑口部の損傷、ひび割れ、剥落
9	C	鼻田	信越本線	越後広田	長島	複線	330	C (60)	頁岩、砂岩	剥離
10	B	塚山	信越本線	長島	塚山	複線	1,766	C (50,60)	頁岩、砂岩	アーチクラウン部の圧さ、打継目部の剥離、ひび割れ
11	B	東山	信越本線	塚山	越後岩塚	複線	166	C (60)	泥岩、細砂	打継目部の剥離、ひび割れ
12	C	岩山	飯山線	下条	越後岩沢	単線	652	CB (39~56)	砂岩	剥落
13	B	岩沢	飯山線	越後岩沢	内ヶ巻	単線	203	CB (39~47)	シルト岩	アーチ肩部の軽微な圧さ、補修用吹付けコンクリートの剥落
14	B	妙高山	飯山線	越後岩沢	内ヶ巻	単線	1,465	CB (23~91)	水成岩	アーチクラウン部の軽微な圧さ、剥落
15	B	高場山	飯山線	越後岩沢	内ヶ巻	単線	500	C (45~60)	軟岩	アーチクラウン部の圧さ、ひび割れ、打継目部の剥離、トンネル坑口部のずれ
16	B	内ヶ巻	飯山線	越後岩沢	内ヶ巻	単線	425	CB (47~87)	泥岩	アーチ肩部の軽微な圧さ、ひび割れ

・被害程度 A: 大規模な補強、補修を必要とした被害 B: 補修を必要とした被害 C: 補強、補修を必要としなかった軽微な被害
・覆工 C: コンクリート, CB: コンクリートブロック

表-1は、これら被害を受けたトンネルの基本データと被害の概要を示したものである。

(2) 魚沼トンネルおよび妙見トンネルの概要と被害状況

a) 魚沼トンネルおよび妙見トンネルの概要

上越新幹線魚沼トンネルと妙見トンネルが位置している地質は、新第三紀中新世および鮮新世の層の堆積岩が中心である。このうち魚沼トンネルの被害箇所は鮮新世西山層のシルト岩層と中新世椎谷層の泥岩・砂岩互層部であり、妙見トンネルの被害箇所は鮮新世灰爪層のシルト岩層である。

この区間のトンネルは1972~1979年頃に矢板工法で施工されており、掘削工法は地山条件に応じて底設導坑先進工法、側壁導坑先進工法により建設されている。

覆工巻厚は、岩種別に50cm、70cmを標準としているが、地山条件によっては90cm以上の区間もある。また、この区間のトンネルは全てインバートコンクリートが施工されており、その厚さは覆工と同様に

地山条件に応じて30~50cmとなっている。

路盤はスラブ軌道構造のため、全区間25cm厚さの路盤鉄筋コンクリートがインバートコンクリート上に施工されている。

b) 魚沼トンネルの被害状況

魚沼トンネルでは、トンネル中間部の3箇所で大規模な被害が発生したが、このうち195k080m付近の被害が最も大きく、覆工コンクリートアーチ部の崩落（延長約5m）、覆工コンクリートのひびわれ、側壁の押出し、路盤コンクリートの隆起（約250mm）、インバートコンクリートのひびわれ等の被害が発生した（図-2、図-3）。



図-2 魚沼トンネル全体被害状況

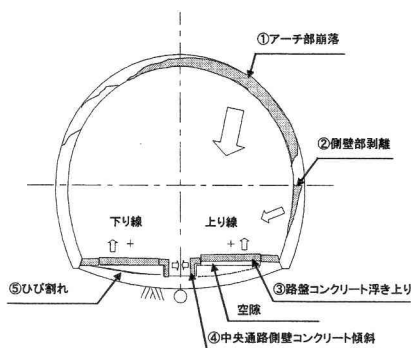


図-3 魚沼トンネル被害状況 (195k080m付近)

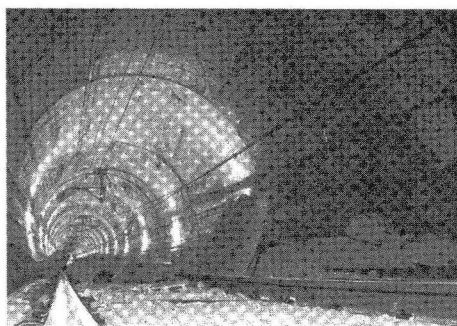


写真-1 魚沼トンネル被害状況

路盤コンクリートの隆起に伴う軌道隆起は、この区間ばかりでなく、195k500m（約100m）、198k700m（約50m）の区間でも発生していた。

195k080m付近の覆工アーチ部コンクリート崩落は、下り線側のアーチ部を中心に発生しており、この区間の一部は鋼製支保工や木矢板が露出したものの、地山の崩落は生じなかった。なお、崩落コンクリート塊の最大長は1辺2m近くのものもあった（写真-1）。

c) 妙見トンネルの被害

妙見トンネルでは、202k500m付近において、クラウン部に大規模な圧ざ（約50m）とこれに伴う覆工コンクリートの剥落が発生し、この圧ざ区間にはアーチ部にトンネル軸方向および斜め方向の多数の

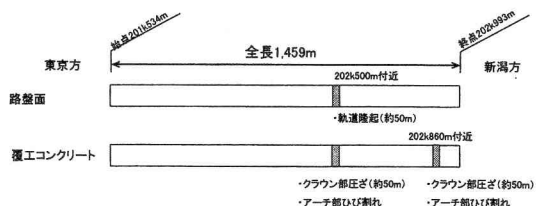


図-4 妙見トンネルの全体被害状況

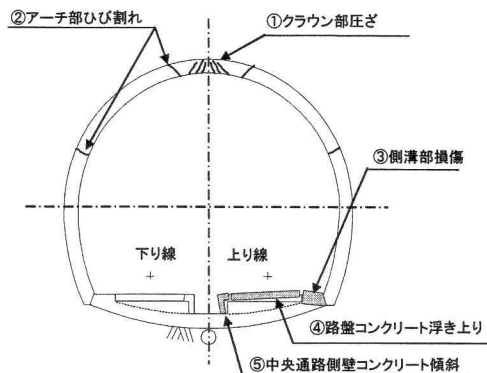


図-5 妙見トンネル被害状況 (202km500m 付近)



写真-2 妙見トンネル被害状況

ひびわれが発生した。また、この区間の一部下り線側路盤コンクリートが隆起し、インバートコンクリートの一部損傷が生じた。（図-4、5、写真-2）

また、202k860m付近においても同様にクラウン部に大規模な圧ざ（約50m）とアーチ部にひびわれ

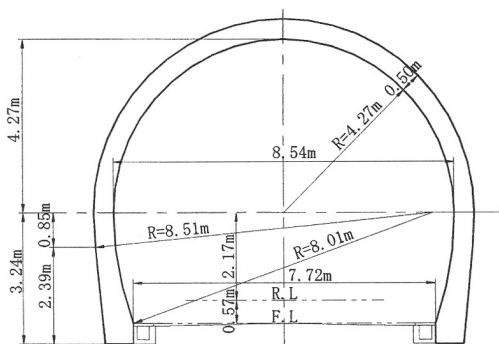


図-6 和南津トンネル断面図

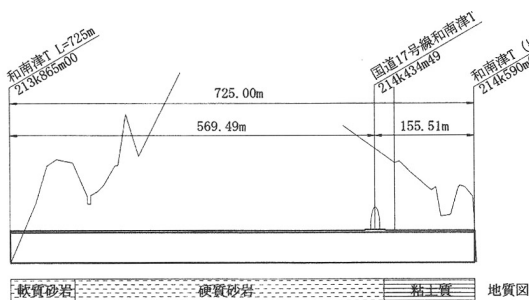


図-7 和南津トンネル縦断面図

が生じたが、202k500mのような路盤隆起は発生していない。

(3) 上越線と南津トンネルの概要と被害状況

a) 和南津トンネルの概要

上越線と南津トンネルは、北堀之内・越後川口間に位置するトンネルで、1964年～1966年にかけて上越線の複線化に伴い建設された延長725mの複線断面トンネルである（図-6）。地質は砂岩が主体であるが、終点側坑口付近は粘土質の地山となっている（図-7）。施工は、在来工法であり、底設導坑先進上部半断面工法により掘削されており、支保工は150H、175H、覆工はコンクリート造で巻厚は50cmを標準としている。なお、このトンネルは、今回の地震により被害を受けた国道17号線と南津トンネルと坑口より約570mの位置で交差している。

b) 和南津トンネルの被害

和南津トンネルでは、ほぼ全線にわたりひびわれの発生、ひびわれからの漏水、アーチ・側壁打ち継目部の剥離・剥落が生じた。被害のうち最大のものは、坑口から500m付近で発生し、約40m区間にわたりアーチ部の覆工コンクリートが断続的に崩落しており一部背面地山が露出している箇所があった。また、この区間を中心に延長50mに渡りクラウン部に圧さが生じていた。（写真-3、写真-4）



写真-3 アーチ・側壁打ち継目部の剥落

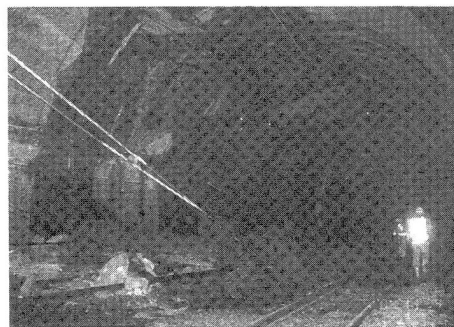


写真-4 アーチ部の崩落

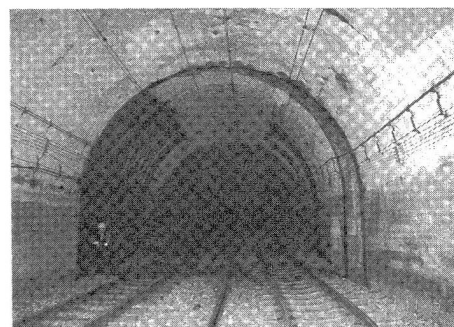


写真-5 坑口部雪覆いのズレ

また、トンネル入口のコンクリート製の雪覆いが線路方向および線路直角方向に約40cmずれるなどの被害も発生した。（写真-5）

3. トンネルの復旧方法

(1) 調査

復旧に際しては、軌道中心線測量、縦断測量および断面測定等の詳細調査を実施した。また、路盤コンクリートの浮き上がり箇所では、インバート自体の健全性あるいはその下の地山との密着状況等の確認を目的に、20mピッチでボーリング調査を行った。その結果、地山とインバートが密着している状況が

確認され、インバート自体の変状は深刻ではないことが判明した。

(2) 復旧方針および復旧方法

地震発生直後より復旧に向けた調査を開始し、余震により調査が難航したものの早期に被害状況に応じた復旧・補強方法の方針を策定し、この方針を現場に周知させた（図-8）。このため、現場においては被害パターンに応じた復旧計画を現場担当者が即座に判断でき、担当者の裁量で詳細な施工方法を決定することができることとなった。なお、魚沼トンネル、妙見トンネル、和南津トンネルといった大きな被害箇所については、個別に復旧方法を検討した。

a) 魚沼トンネルの復旧方法

魚沼トンネルの復旧工事は、覆工部の復旧工事と路盤部の復旧工事に大きく分けられた。

覆工コンクリートの復旧は、不安定なコンクリートをはつり落とした後、ロックボルトを打設し（ $L=3.0\text{m}$, D29, 自穿孔ボルト）、高強度吹付けコンクリートとひびわれ注入による現状復旧を行った。

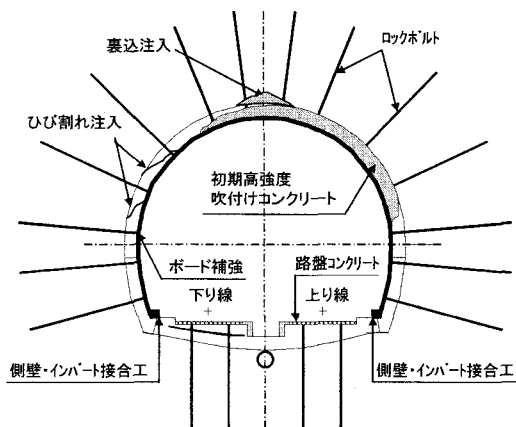


図-9 魚沼トンネルの復旧イメージ(195k080m 付近)

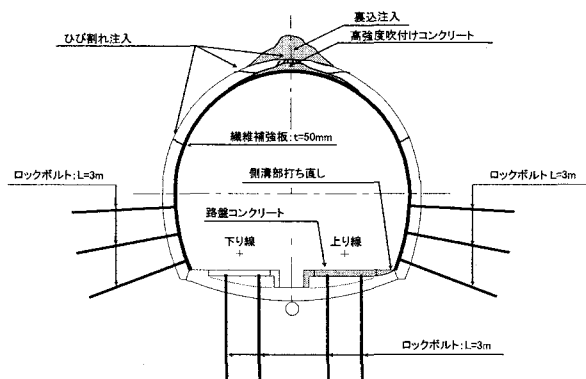


図-10 妙見トンネルの復旧イメージ(202k500m 付近)

その後、厚さ6mmのセメントボードを覆工全周にわたり配置し、ボードと既設覆工の隙間に無収縮モルタルを打設、最終的に厚さ50mmの内面補強板として強化工事を行った。

路盤部の復旧では、軌道スラブ撤去後インバートコンクリートのひびわれ部へモルタルおよびセメントミルク注入を行った。次に、測量結果を踏まえ必要な箇所は路盤鉄筋コンクリートの取り壊しおよびインバートコンクリートの切削を行った。さらにインバートコンクリートの一体化とインバートコンクリートと地山の一体化を目的に、路盤部の鉛直方向ロックボルトを施工した。その後、路盤鉄筋コンクリートを打設したが、隆起量に応じて厚さを調整することで、限界支障に対応した（図-9）。

なお、覆工コンクリート部の作業終了後、インバートと覆工コンクリートの結合度を高めるために、インバート・側壁接合工を実施した。

b) 妙見トンネルの復旧方法

202km500mの大規模な圧さ発生区間では、路盤部の損傷が小さいことからトンネル覆工の復旧工事を先行することとした。

覆工コンクリートの復旧は、圧さ箇所のひびわれ注入、吹付けコンクリート、アーチ部のひびわれ注入により原形復旧を行い、さらに覆工内面全周を繊維補強板（50mm厚）で覆い、側壁部にロックボルト（ $L=3.0\text{m}$, D29, 自穿孔ボルト, ctc1.0m）を施工した。また、復旧工事の最終段階でトンネルクラウン部の裏込め注入を実施した。

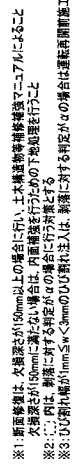
路盤コンクリート隆起箇所は、覆工部の主体工事終了後に路盤部のはつり、インバートコンクリートのひびわれ注入、路盤部ロックボルト打設、路盤コンクリートの打ち替えを行った。（図-10）

c) 和南津トンネルの復旧

覆工コンクリートの崩落箇所付近は、被害が大きかった上半断面の覆工コンクリートを延長48mにわたり撤去し、新たに覆工コンクリートを打ち替えることとした。この方法は、まず既設のコンクリートを撤去し、既設支保工の内側に新たな支保工を建て込み、吹付けコンクリート、ロックボルト、防水シートを順次施工した後に、スライドセントルを用いて覆工コンクリートを打設した。（図-11）

起点坑口部の雪覆いの復旧は、S.L.近傍をワイヤーソーにて切断し、2,000kN油圧ジャッキにて雪覆いの上半部のみを被災前の位置に移動させ、左右の側壁部のはつりおよび打ち足しを行い復旧した。

（写真-6）



※3:びり割れ幅が $1\text{mm} \leq w < 3\text{mm}$ のひび割れ注人は、剥落に対する判定は、剥落は運転再開後施工可とする

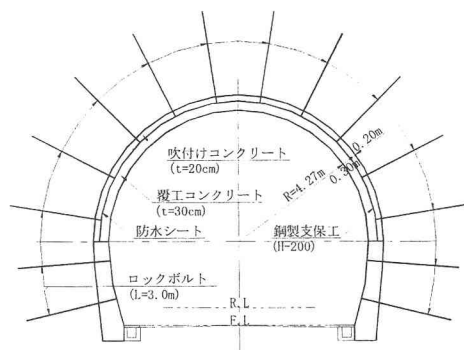


図-11 アーチ部崩落箇所の復旧概要

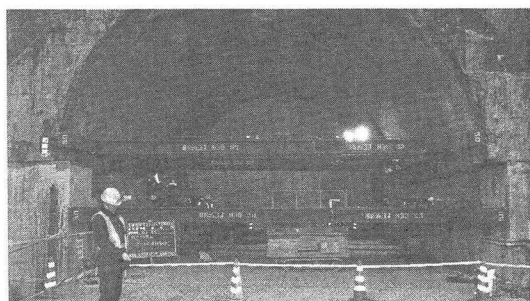


写真-6 アーチ移動完了状況

4. 今回のトンネル被害の特徴

過去の地震におけるトンネル被害¹⁾²⁾は、大きな被害のほとんどが坑口付近に集中しており、今回の地震でも堀ノ内トンネル、牛ヶ島トンネル、天王トンネル、新榎峠トンネル、榎峠トンネル、高場山トンネルの6トンネルは坑口付近の被害であった。しかしながら、今回の地震において復旧に2ヶ月程度要する大きな被害を受けたトンネルは、上越新幹線の魚沼トンネル、妙見トンネルおよび上越線の和南津トンネルであり、大きな被害は土被りのあるトンネルの中間部で点在して発生した。

また、今回被害を受けたトンネルには、覆工材料がコンクリート造のトンネルだけでなく、コンクリートブロック造のものも含まれていた。これらブロック造のものは、従来地震には弱いとされていたが³⁾、今回の被害からは、そのような状況は見受けられなかった。特に顕著なのは、上越線の福山トンネルである。このトンネルは、大正12年に建設された単線のコンクリートブロック造であり、現在上り線用となっている。今回の被害は一部でコンクリートブロックの剥離・剥落およびひび割れが発生した



写真-7 福山トンネル被害状況



写真-8 新福山トンネル被害状況

程度であった(写真-7)。これに対し、昭和38年に福山トンネルに隣接して建設された新福山トンネルはコンクリート造であり、今回の地震によりアーチクラウン部に50mに渡り圧ざが発生し、幅10mmを超えるひび割れも多数発生していた(写真-8)。なお、同様の事象は、上越線の榎峠トンネルと新榎峠トンネルでも見られた。これらのブロック造のトンネルは、その変形性能の高さから地震時の地山変形に追従し、大きな被害に至らなかったものと考えられる。

5. 被害原因の推定

今回のトンネル被害では、ひとつのトンネル内でも被害の有無があったり、隣接するトンネルでも被害の大小があったりと、発生状況が様々であった。そこで、復旧時に実施した詳細調査結果の分析および追加調査を実施し被害原因の推定を試みた。実施した追加調査は、覆工厚および覆工背面空洞調査、インパートコアボーリング、トンネル坑内からの地質ボーリング等である。

今回の地震で甚大な被害を受けた位置は、いずれ

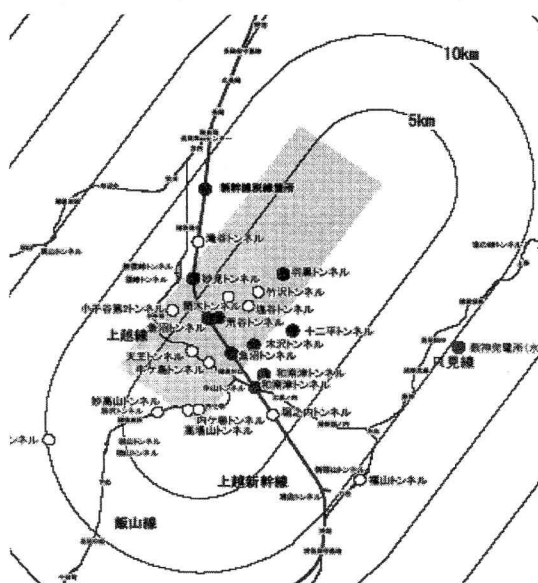


図-12 推定震源断層と被害位置図

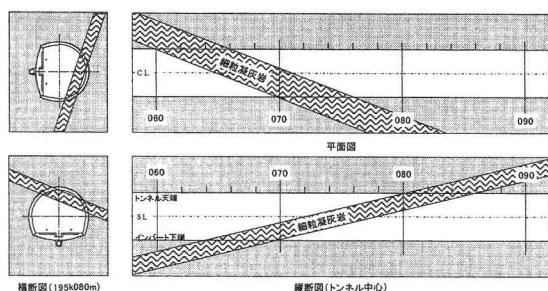


図-13 魚沼トンネル 195k080m 付近地質概要図

も震央から非常に近接しており、水平距離が約5km以内であった(図-12)。また、地震規模もM6.8と大きかった。つまり、今回トンネルが大きな被害を受けた条件として、①震央から近い、②地震規模が大きい、の2つがまずあげられる。更に、追加調査を行った結果から、次のようなことがわかった。

地質調査の結果からは、魚沼トンネルでは、全体には泥岩を主体とするものの、被害位置に沿うように細粒凝灰岩のクラック帯がトンネルを横断していることが確認された(図-13)。妙見トンネルでは、被災箇所直上の地上部において大規模な地滑りを確認しており、周囲に比べて地山が悪いことが想定された。和南津トンネルは特に固結度の低い低強度の地山が確認され、いずれも非常に弱い地質であったことが確認された。一方、被害の軽微なトンネルの地質はクラックも少なく、圧縮強度も大きなもので

あったことが確認された。

また、覆工背面空洞調査では、被害箇所の覆工クラウン部背面に空洞が存在していたことが確認できた。トンネル背面に空洞が存在すると、地山が大きく変形した際に覆工コンクリートに局所的な変形が生じ、破壊することが想定される。被害の軽微な区間にも背面空洞は存在したが、地質が良好であれば、地山の変形も小さく、覆工に生じる変形も少なかったものと想定される。

以上のように、今回の地震によりトンネルが被害を受けた原因としては、先の2つに加え詳細な調査により明らかになった、「地質上の問題」と「トンネル構造上の問題」が加わった場合と考えられる。

6. まとめ

今回の地震では、従来地震に強いとされていたトンネル構造物が甚大な被害を受けた。これにより、高架橋や橋梁のようにトンネルに関しても地震に対する対策を検討する必要があると考えられる。具体的な対策としては、今回被害調査を行った結果を十分吟味し、対策位置や対策内容を選定し、適切な箇所に適切な対策を行っていくこととなるが、これは今後の課題である。

なお、今回の上越新幹線の魚沼、妙見の両トンネルは、その先の滝谷トンネルと共にトンネル間に雪覆いが設置されているため、それら3トンネルが延長13kmもの1本のトンネルのような構造となっていた。従って、復旧工事の資機材の搬入には困難を極めることとなった。このような中、被災から約2ヶ月という短い期間で鉄道不通区間の運転再開を果たすことができたのは、工事関係者の真摯な努力によるものと考えている。

参考文献

- 1) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究報告，No.1123，1979
- 2) 朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡茂，大矢敏雄，野城一栄：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，pp.27-38，2000.9
- 3) 清水満，栗栖基彰，加藤正二：新潟県中越地震における鉄道トンネルの被害，トンネルと地下，417号，Vol.36，No.5，pp.37-44，2005.5
- 4) 清水満，鈴木尊，安東豊弘：新潟県中越地震の鉄道トンネル被害と復旧，土木技術，Vol.60，No.6，2005.6