

7. トンネル被害

7.1 はじめに

中越地震では、活褶曲地帯を蛇行して流れる魚野川、信濃川沿いの国道 17 号線、117 号線、関越自動車道路、上越新幹線、上越線などの主要幹線に多大な被害が集中した。上越新幹線は、幸い死者、負傷者を出すには至らなかったが、新幹線開業以来初めての脱線事故が起こり、また魚野川橋梁の橋脚の鉄筋段落とし部でコンクリートの損壊が発生するなどの被害が報告されている。一方道路に目を転ずると、地震発生後の 23 日夜半までに国土交通省北陸地方整備局は直轄の国道 13 箇所を通行止めとした（その後 4 箇所が追加）。この他補助国道 59 箇所、県道 157 箇所など全面通行止となった箇所は総計 233 に達している。以後、応急復旧工事が急がれたが、強い余震が相次ぎ、27 日 10:40 広神村を震源とする余震（最大震度 6 弱）では例えば国道 8 号長岡市宮本で路面が陥没するなどし、新たな通行規制を余儀なくされた。公共交通手段が十分でなく移動を自動車に依存した地域では、各所で道路が寸断されたために、地震直後に多くの村落が孤立した。孤立した集落数は小千谷 27、十日町市 9、長岡市 4 など総計 61 に達している。唯一の交通手段がたたれたことで、避難そのものが困難になったのみならず、その後の救援物資の搬入やライフラインの復旧も大きく遅れることに繋がった（国土交通省北陸地方整備局、2004）。

こうした状況で一般に地盤が大きく動かない限り耐震性が高いとされるトンネルにも被害が生じている。鉄道トンネルでは新幹線魚沼トンネル、上越線南津トンネルなどで圧縮場におかれたと思われるトンネル覆工コンクリートの破壊が生じている。道路トンネルでは、比較的安定している砂岩や泥岩中を通っているもの（塩谷トンネル、中山トンネル）はほぼ健全な状態で残されるか、軽微な亀裂が認められる程度（蘭木トンネル）であるが、中にはルート上、地すべり土塊を縫わざるを得ないもの（羽黒山トンネル、木沢トンネル）があり、これらは覆工の損傷などの被害を受けている。本章ではこれらのトンネルの被害状況を、周辺の地盤の状況と併せて紹介する。

7.2 鉄道トンネル

(1) 上越新幹線のトンネル

J R 東日本によれば上越新幹線のトンネルは、浦佐―長岡間にある堀の内トンネル($l=3.3\text{km}$)、魚沼トン



(a) 上り線側覆工コンクリートの剥落



(b) 路盤コンクリート・軌道スラブの浮き上がり

図 7.2 上越新幹線魚沼トンネル東京側坑口より 2.4km 地点の被害状況

ネル($l=8.624\text{km}$)、妙見トンネル($l=1.459\text{km}$)、滝谷トンネル($l=2.673\text{km}$)の 4 トンネル全てで多少の被害を受けている。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り、妙見トンネル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を受けた。魚沼トンネルはアーチ・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、中央通路の損傷とともっとも大きな被害を受けた。

この内、魚沼トンネル東京方坑口から 2.4km 付近の被害について報告する。最大の損傷は、上り線側覆工コンクリートの剥落（図 7.1(a)）で、一辺 1m 前後の大きなブロックも見られる。アーチ部の大きな剥落はトロリー線付近までかかっており、支保工の H 型鋼や繋ぎボルトの間をすり抜けてコンクリート片が脱落しており、背面地山とおぼしきものも見られる。この箇所より 6-7m 東京寄りで上り線の路盤コンクリート・軌道スラブの浮き上がり（図 7.1(b)）が見られた。下り線の浮き上がり箇所はさらに 4-5m 東京寄りである。



図 7.2 上越新幹線魚沼トンネル東京側坑口より 2.403km 地点での中央通路底面の損傷

一方、上述の崩落箇所から 20-30m 新潟寄りのところでは、中央通路底面にトンネル直角軸に対して $50-60^\circ$ のひび割れ(図 7.2)が入り、その延長線上で路盤コンクリートにも変状が生じている。そこから東京方を見通すと、中央通路の側壁が 2-3cm 程度右側にずれている。つまり、この辺りでトンネルが「ハ」の字状に僅かながら西側に押し出されたように見える。

上越新幹線工事誌（日本鉄道建設公団，昭和 59 年 3 月）によれば，トンネルの中央部付近に背斜軸があり，起点方・終点方に向かって $40^\circ \sim 20^\circ$ の範囲で地層の傾斜が緩くなっているとあり，上記の地点では第 3 紀鮮新世西山層（泥岩優勢の砂岩互層およびシルト岩）が出現している。ほぼトンネル直下に震源があり，震源断層（逆断層）が横切っていることから，覆工コンクリートの大規模な崩落や路盤コンクリートの浮き上がりはトンネル軸方向の圧縮による圧座が原因と考えられる。（国土地理院によれば，中越地震により旧大和町で 10cm・柏崎市で 5cm 震源断層の方向に移動しているのので，魚沼トンネルでの震源断層を挟んでの圧縮ひずみはさらに大きくなったものと考えられる）



(a) 崩落した岩で閉塞された下り線坑口（左）と上り線坑口：左背面に崩落した白岩層の崖



(b)

図 7.3 上越線榎トンネル東京側坑口

(2) 上越線のトンネル

上越線では，榎峠トンネル・和南津トンネルを初めとして，堀の内～越後滝谷間のトンネルが被害を受けた。榎峠トンネルは，長岡市の南部にあり下り線専用の単線トンネルである。妙見の大規模斜面崩壊の南端にあり，崩壊岩塊の一部が東京方坑口をほぼ塞いでいる(図 7.3(a))。岩塊は坑口から数m先まで積もっている(図 7.3(b))。この部分だけ除去しても上方から別の岩塊が落ちてくる可能性が高く，斜面防護対策が必要である。

天王トンネルは，川口町の北部天納地区にあり上り線専用の単線馬蹄形トンネルである。

下り線は上野方には雪覆いが在るが，長岡方は斜面上に盛土をして，線路を通したものと思われる。信濃川の攻撃地形になっており，下部は岩の崖になっている。地震により斜面崩壊が発生し，上り線トンネルを支えている地盤の一部も崩落した(図 7.4(a))。その結果，坑門や覆工コンクリートにクラックが入りコンクリートが剥落した(写真 7.4(b))。



(a) 斜面崩壊で吊り下がったレール



(b) 天納トンネル内部の被害状況（左および上の写真）

図 7.4 天納付近の上越線被害



(a) 坑口の袖壁の被害



(b) ブロックと袖壁コンクリート間の隙間
図 7.5 牛ヶ島トンネルの被害

牛ヶ島トンネルは、川口町の川口と牛ヶ島の境界にある。上野方坑口は小さな斜面から少し突き出しており、その上を県道421号線が通っている。地震により坑口の袖壁が前にせり出す(図7.5(a))とともに、トンネル本体の坑口ブロックも前方に傾斜または移動し奥のブロックとの間に隙間(図7.5(b))ができ、トンネル上部の土砂が落下し県道は中央部から半分が陥没すると共に穴が開いた。



国土地理院 2万5千分1地形図名:千手 を使用

図 7.6 トンネル位置図

(3) 北越急行ほくほく線十日町トンネル上部地盤の陥没

北越急行（ほくほく線）は、新潟県六日町（むいかまち）と犀潟（さいがた）を結ぶ路線であり、十日町市の十日町駅から南南西に延びた路線は、駅から約300mの地点から約1.7kmのトンネル区間が始まり、緩やかに曲がっておよそ西に向きを変えて地上部となる。被害を受けた部分の地形は信濃川の河岸段丘に相当し、地盤では砂礫が卓越する。図7.6にトンネル付近の地図を示す。トンネルは、十日町市丑丸山町から美雪町（みゆきちょう）、川治（かわじ）、北新田（きたしんでん）、城之古（たてのこし）の地下を通る。新聞（読売新聞11月21日）によれば、いずれの地区でもトンネル直上部で陥没被害が生じ、「トンネル上の住宅33軒のうち、少なくとも19軒が傾き、住宅の基礎部分にひびが入るなどした。」とのことである（全数を調査していないので現時点では数は述べてない）。

このトンネルはRC造であり、1973年3月から約2年をかけて開削工法により建設された。開削は、親杭横矢板工法によっており、親杭はアースオーガーで削孔後、ベントナイトで孔壁保護し、横矢板の背面は、セメントミルクバックを詰めて空隙を残さない方法が採用された。

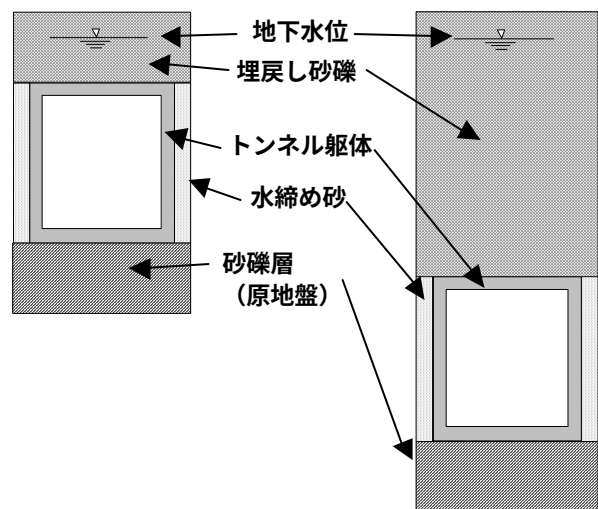


図7.7 トンネル断面（左：最浅部，右：最深部）

トンネル断面の寸法は、高さ6.83m、幅6.15m、上版厚0.55m、壁厚0.55m、下版厚0.60mであり、土被りは3mから11mである（図7.7）。親杭とトンネル外面との間は40-50cmであり、その間（トンネル側方）はトンネル上面までは砂で埋め戻し、水締めが施された。トンネル上面より上は掘削砂礫を埋め戻し、埋め戻し時には「何層かに分けながら」転圧された。したがって、掘削・埋め戻し共に入念に計画・施工がなされており、後に陥没などを引き起こ



図 7.8 帯状陥没部を跨ぐ傾斜した建物と陥没部内噴砂（十日町市美雪町 3 丁目）



図 7.9 帯状陥没部を跨ぎ向かい合って傾斜した 2 棟の家屋（十日町市美雪町 2 丁目）

可能性のある施工方法は採用されていない。トンネル下部砂礫層のN値は40～50であり、よく締まっている。地下水位はトンネル上面より1～2mにある。以上のことから、トンネル側方の砂は液状化しやすい状態にあったと考えられる。トンネル上部の埋め戻し砂礫も強い揺れに対しては液状化や揺すり込み沈下が生じる可能性はある。

範囲は限定されるが、現地調査により以下のことがわかった。美雪地区では、ほくほく線は JR 飯山線と近接しており、十日町駅から離れるほどにその間隔は大きくなっていくが、帯状陥没およびそれに伴う構造物被害は見事にトンネル直上部に限定的に生じている。図 7.8 に、帯状陥没部を跨ぐ傾斜した建物と陥没部内噴砂（十日町市美雪町 3 丁目）を示す。美雪町 3 丁目あたりは、トンネル上面の土の厚さは約 3m である。地形的には河岸段丘に相当し、地表面はほぼ平坦である。地地図でトンネルの通る部分の地表には、幅 10m 前後で深さ 10cm 程度の陥没が連続的に認められ、道路の帯状陥没、それに伴う陥没部両側に見られるトンネル軸に平行方向の亀裂、路面の変状、畑の帯状陥没と陥没部両端のトンネル軸に平行方向の亀裂、それらの地盤変状に伴う家屋・建物の傾斜・変形、土留め擁壁の変状、側溝の変状が認められた。図 7.9 には、帯状陥没部を跨ぎ向かい合って傾斜した 2 棟の家屋（十日町市美雪町 2 丁目）の様子を示す。陥没部で隣り合わせる家屋では向かい合うように傾

いている事例が複数見られた。なお、建物全体が帯状陥没部にある場合には傾斜はほとんど認められない。トンネルより上の埋め戻し部 3m で 10cm の沈下が生じたとすると圧縮率は約 3%である。なお、大きな地震の揺れは 3 度あったが、地元の人の話では、3 度目の揺れが大きく、このときに傾斜が生じたとのことである。北越急行によれば、独自地震計により地震観測がなされており、最大加速度は、1 度目（17:56）では 463Gal、2 度目（18:11）では 188Gal、3 度目（18:34）では 468Gal が観測されている。最大加速度が 1 度目と 3 度目がほぼ等しい。結論づけるには詳細な検討が必要であるが、1 度目の地震で軽度の液状化が生じていたところに、過剰間隙水圧が消散し終わらない内に 3 度目の揺れがあり、側方および上方の飽和地盤が液状化状態に至ったか、揺すり込み沈下が発生したものと考えられる。

美雪町3丁目の畑では、帯状陥没部分の内側で噴砂が認められ、畑の所有者の話では、地震後に噴き出し、流れ出た泥水は畝に堆積したとのことであった（図7.81）。噴砂は茶灰色の中砂～粗砂であり、耕作土の黒色の有機質土とは一見して区別が付く。付近の地盤柱状図や既往の土質試験データなどと照らし合わせる必要があるが、一般論として噴砂の粒度や色は埋め戻しによく用いられる砂に似ている。トンネル側方の埋め戻し部の砂の液状化が発生し、トンネル上方の埋め戻し砂礫の揺すり込み沈下により陥没した可能性が高い。このような形態のトンネル被害は極めて珍しい。