

7.3．道路トンネル被害

過去の多くの地震被害事例はトンネルなどの地下構造物が周辺地盤の動きに追従して変形し被害に至ることを語っている．中越地震を特徴づけるものは地盤災害であり，この意味でこの地域で起こった斜面崩壊とそのメカニズム，そしてトンネルとの位置関係を確認しておくことは重要である．このあたりは活褶曲地形である（図7.6(A)）．上に向かって湾曲しているいわゆる背斜軸では堆積岩が張力を受けもろくなり，一方で下に湾曲する向斜軸では圧縮を受け硬くなる．このためこの地盤が隆起し続けると，一般にもろい部分（背斜軸）が差別的に削剥され，もともと尾根だった背斜軸が谷になり，向斜軸が尾根になる逆転地形が現れる．

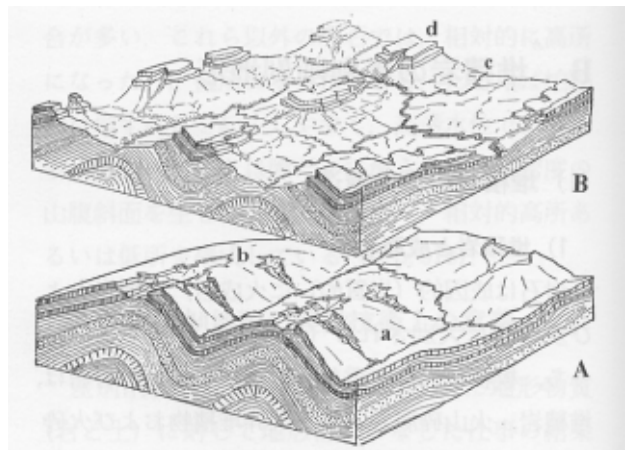


図7.6 褶曲構造の差別的削剥（de Martonne, 1927の原図の一部）

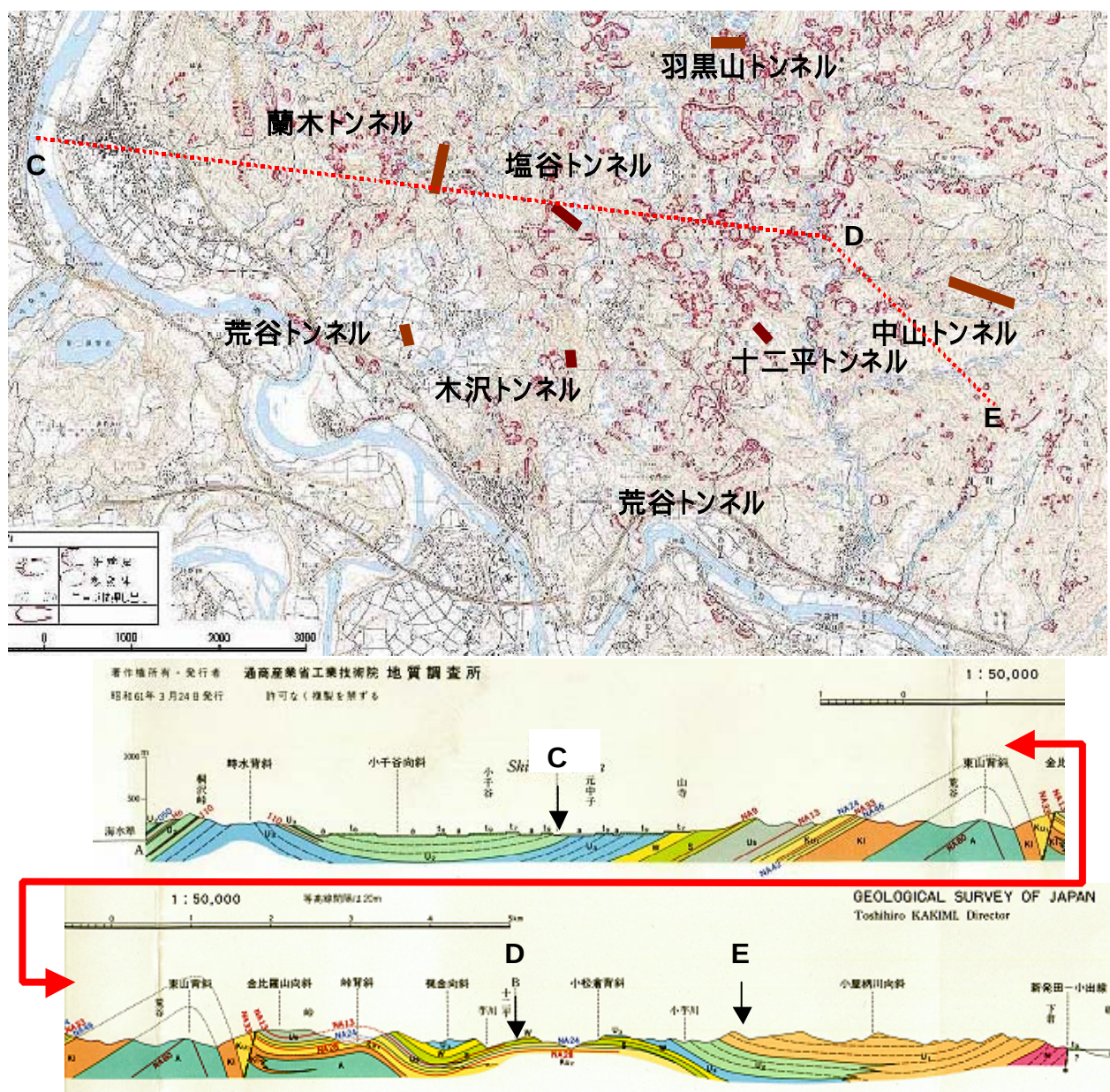


図7.6 航空写真判読による斜面崩壊地の分布と道路トンネルの位置：

しかし中越地域にある丘陵地は地質的に若く，図のAの状態を保っている場所も多い．大規模な河川閉塞の起こった芋川沿いの東竹沢の斜面崩壊，信濃川沿いの真皿，妙見，横渡の斜面崩壊はAに特徴的な流れ盤型の崩壊である．一方で背斜軸の差別的削剥の進んだ状況も地形図から読み取れる．山古志村は東山背斜に沿う削剥で形成された谷に落ち込んだ古い地すべり土塊地の上に広がっている．

図7.10は山古志村のある東山山地で空中レーザー測量によって判読された斜面崩壊地の分布（八木，山崎，守岩，2004）に道路トンネルの位置を重ねたものである．図中のCDEの破線は地質調査所1:50,000地質図幅「小千谷」にある地質縦断図で活褶曲の状況とトンネルの存在する位置関係が概ね把握できる．安定している岩塊を通過している塩谷トンネル，中山トンネル，蘭木トンネルはほぼ健全な状態で残されているが，中にはルート上、地すべり土塊を縫うもの（羽黒山トンネル、木沢トンネル、荒谷トンネル）があり、これらは覆工の損傷などの被害を受けている．これらのトンネル被害を引き起こしたと考える斜面の移動体の動きは比較的小さく，例えば木沢トンネル覆工コンクリートの損傷の原因となった斜面崩壊の動きは航空写真で必ずしも十分に判読できていない．以下にこの木沢トンネルの被害状況を概説する．

(1) 木沢トンネルの被害

木沢の集落そのものが二子山（三角点標高433.5m）南麓の旧地すべり地形上に広がる．周辺地質は地質調査所の1：50,000地質図幅によれば双子山およびその東南東500mにある386mの三角点（図7.10）あたりに白岩層の露出があり，その他はこれを覆う鮮新世の牛ヶ首層である．砂岩・泥岩互層で図7.11（図7.10中に撮影位置、撮影方角表示）のあたりでは2m近い青灰色の細砂の層を挟んでいる．

図7.12は木沢トンネル南坑口より北側の旧地すべり滑落崖上で見られた亀裂である．降雨のためかなり埋まっているが、1mに達する深さがある．後述するトンネル内部南側で引張を受けた部分（後述の被害(a)）と対応するものとも推察される．

木沢トンネル坑内の被害は北口坑口から(a) 30～80m区間および(b) 100～307mの区間に分類できる．(a)と(b)はその性格が大きく異なる．坑道の総延長が305mであるのでトンネルのほぼ全区間に渡り亀裂が見られることになる．



図7.10 木沢トンネル周辺地形図（国土地理院1:25,000地形図に加筆）：丸印（○）が写真撮影箇所。また付随する矢印は撮影方向。



図7.11 木沢トンネルに沿う東側斜面の状況：南南東を向いての撮影。人物（木沢トンネル北側坑口より62m南）手前の滑落面の露出した砂層の厚さはおよそ2m。地層の傾斜はほぼ南西方向に15～20°程度と見られるので、実際の層厚もほぼ同じ程度と思われる。人物の後ろに谷地形（黄色矢印）上部に旧地滑り跡（図7.10の破線A。後述の図7.13）。



図7.12 図7.11の谷地形の上部：黄矢印の位置は旧滑り土塊の上端（推定）。手前畑地に亀裂の開口（橙矢印）。



図7.13 木沢集落の北側、旧地すべり滑落崖上の状況：図7.10のBの亀裂



図7.14 木沢トンネル北側坑口：坑口から30～80m区間の覆工側壁部に損傷が見られる。トンネル背後の樹木に被覆された尾根の後ろがその距離に対応する。



(a) 北側坑口に向かったの撮影



(b) 南側坑口に向かったの撮影

図7.15 西側側壁の孕みだしに伴う損壊：側壁は大きい部分で40～50cmほどトンネル内部に孕みだしている。



図7.16 東側側壁の圧壊：東側の壁は地山側に40cmほど押し出している。

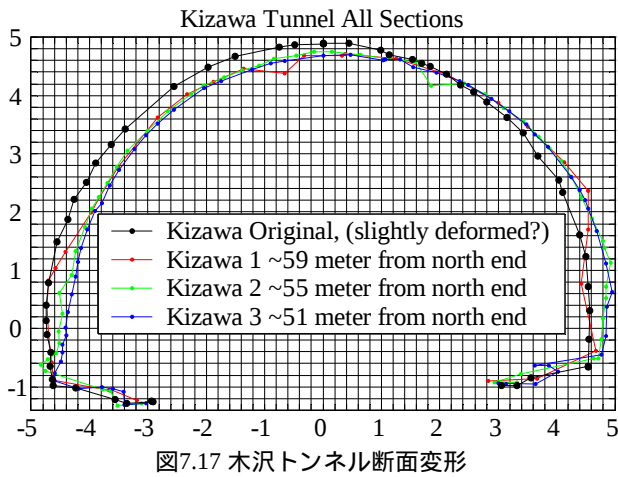


図7.17 木沢トンネル断面変形



図7.18 木沢トンネル内床版の亀裂開口（北側坑口より230m）

総延長より計測された長さがやや長いのは、後述のようにトンネルが引き伸ばされたことも影響していると考えられる。木沢トンネルの北側坑口より51m, 55m, 59mの覆工損傷の最も著しい3地点でトンネル内空断面（北を臨む）のレーザー計測を行った（図7.17）。参考のため明瞭な破損の認められなかった北側坑口より100m地点での内空断面を同図に黒丸（●）で示している。トンネルが東に向かって大きく変形しているのは明らかであり、また前述の図7.11, 7.12に示す位置が概ねこの損壊部分と近いことから、この辺りの地盤が滑りトンネル覆工を強く押し込んだものと推定される。

一方(b)の破壊の主要な形態は、トンネル軸方向の伸張であり、これはトンネル覆工や床版の横断亀裂（図7.18）や継ぎ目の開口の形で現れている。主要な開口を北側坑口よりの距離に対して示したものが図7.19である。開口亀裂はトンネル南側で多く、これは先に図7.13で示した地表の状況と整合的である。計測された開口のみの総和は89cmに達する。

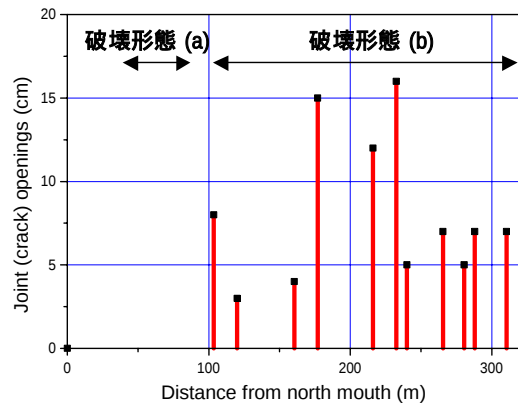


図7.19 継ぎ目あるいは亀裂の開口（破壊形態(b)）と木沢トンネル北側坑口からの距離

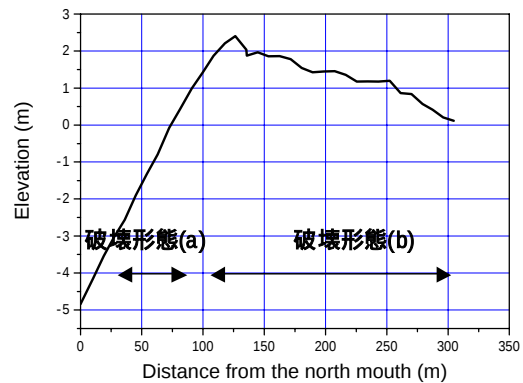


図7.20 トンネル軸線の高低差（南側坑口307mを基準）：125-300mの区間に不連続な高低差がある。

またこの区間では高低差にもわずかながら不連続な変化が現れていて、これも破壊形態(b)を引き起こした地盤の動きと関係すると思われる（図7.20）。

(2) 塩谷トンネル

塩谷トンネル北西坑口あたりは川口層の砂岩と泥岩の互層である。層面の傾斜が大きく（70°前後）また表層の風化の度合いも大きい。トンネルそのものは堆積岩の中にあって大きな損傷は見当たらない。トンネル坑口のすぐ北隣の澤に沿って土砂流動が発生した形跡がある（図7.21）。比高70mほどのあたりから平均25°の傾斜を流下してきたものと思われる。この土砂はトンネル坑口あたりの覆工南側側壁に当たって、大きく泥ハネを残している（図7.22）。壁面の痕跡から泥流の厚みがおおよそ1m、泥ハネが泥流上面よりさらに2.8～3.0mの高さに達している。



図 7.21 塩谷トンネル北西坑口あたりの土石流痕跡

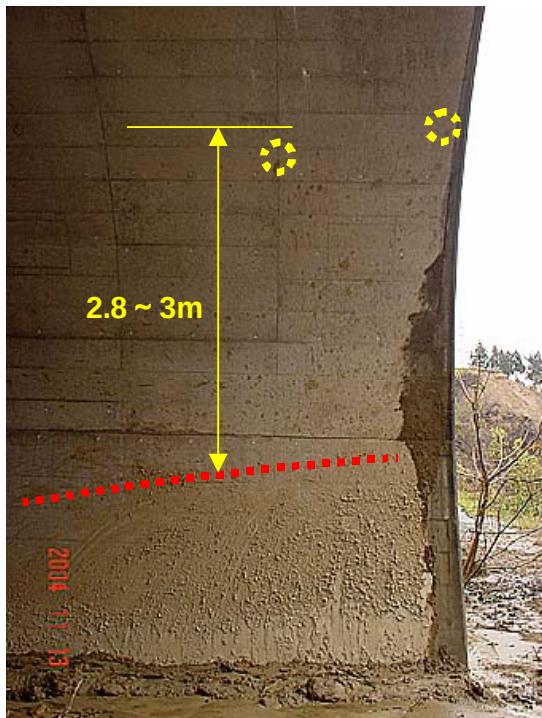


図7.22 塩谷トンネル坑口に残る泥はね（黄色の円）

質量 m ，速度 v の泥流が堅固なトンネル壁に衝突し，速度を0に落とす分，泥はねとして相対的に h にまでその高さを増したと仮定すると， $mv^2/2 = mgh$ と置いて， $v \cong 5.5m/s$ と推定できる．これは運動エネルギーが一気に位置エネルギーに変わる過程で大きなエネルギー損失がないとしたものであるから，泥流の端部での速度の最低値を与えると考えられる．また，中心部での流速はこれより速いものと考えられる．因みに2003年の宮城県沖地震での築館町の斜面崩壊では，運ばれた植生の分布状況から中心部の速度は両端に比べ2倍程度であったものと推定されている（Konagai, 2003）．

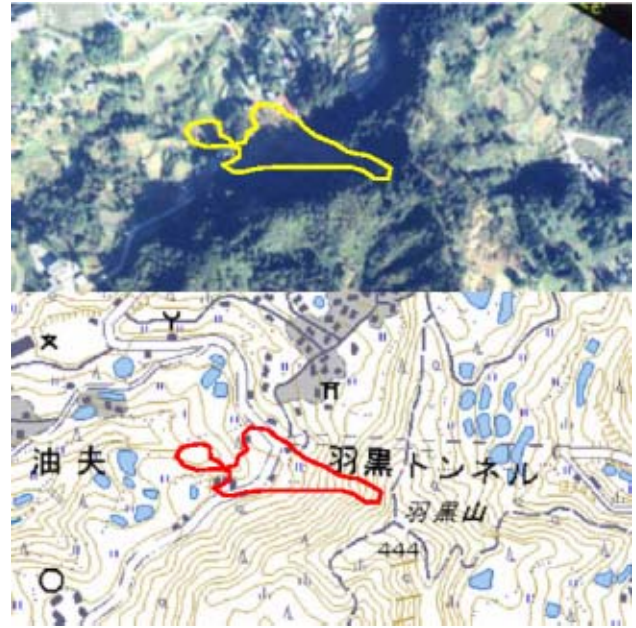


図7-23 羽黒山トンネルと周辺地盤の状況：羽黒トンネル周辺の空中写真と地形図トンネル西側坑口の南側斜面に大規模な斜面崩壊が認められ，崩壊土砂は斜面下端部より150m 遠方に達している．空中写真：国土地理院による撮影（インターネット公開），地形図：国土地理院2 万5 千分の1 地形図

(3) 羽黒山トンネル

主要地方道23 号「柏崎高浜堀之内線」の内，山古志村内の竹沢と種芋原を結ぶ東西に延びる羽黒トンネルでは，東西の坑口から数10m の範囲で，円周方向・軸方向・斜め方向の亀裂や側壁のはらみだし，舗装コンクリートのトンネル軸直角方向の座屈などやや深刻な被害が認められた．西側（山古志村桂谷）では大規模な斜面崩壊があり崩壊土砂は坑口まで達し，東側（山古志村大久保）では地すべりにより坑口上部の土砂が押し出され坑口を不完全に塞いだ．図7.23 に羽黒トンネル周辺の空中写真と地形図を示す．

羽黒トンネルは，長さ506.0m，内空幅5.60m，高さ5.20m の道路トンネルで，インバートコンクリートはなく，道路舗装厚が20cm である．山岳工法（側壁導坑先進工法）によるトンネルで，昭和42年10月に竣工している．

図7.24 に羽黒トンネル西側坑口付近南側側壁の被害状況を示す．側壁に円周方向と斜め方向の亀裂が生じるとともに，側壁が10cm 内側へはらみだし，コンクリート塊が剥落している．道路路面にコンクリート片が落下し，落下片はクラウン部直下と円周方向の亀裂の直下に集中しているのがわかる．



図7.24 羽黒トンネル西側坑口付近南側側壁の被害状況



図7.26 羽黒トンネル東側坑口付近の道路面および側壁コンクリートの被害状況



図7.25 西側坑口付近のアーチコンクリートの被害状況
(坑口からトンネル内部に向う)



図7.27 東側坑口付近のアーチコンクリートの被害状況
(トンネル内部から坑口に向う)

また、図7.25 には西側坑口付近北側側壁の被害状況を示す。同じく側壁が最大で20cm 内側へはらみだしている。すなわち、坑口付近では最大で水平方向の内空が30cm 縮まっていることになる。側方からの土圧が増加したものと推察される。そこで、写真-3 に西側坑口付近のアーチコンクリートを坑口からトンネル内部に向かって撮影した様子を示す。トンネルクラウンよりやや南側にトンネル軸方向に幅10～20cm のコンクリートの剥落跡が認められる。これは圧座（トンネル内面側コンクリート縁の圧縮破壊）によるものである。このことから水平方向の内空の縮小が裏付けられる。圧座は数10m にわたって連続することから坑口付近は側方から荷重が作用したことがわかる。また、図7.25ではアーチコンクリートに円周方向の開口クラックと無数のコンクリート小片も卓越することから、軸方向に振動伸縮と残留伸張の力が作用したと考えられる。

一方、図7.26に羽黒トンネル東側坑口付近の道路面および側壁コンクリートの被害状況を示す。道路舗装が道路中央で座屈して大きく上方へせり上がっている（最大量50～70cm）。幾何学的には2.3～4.4cm 幅員が縮まったことになるが、側壁とコンクリートのなじみを考慮すると5～8cm 程度縮まったものと考えられる。これは、道路舗装にトンネル軸直角方向の大きな圧縮力が作用したことを意味する。舗装座屈部の奥には側壁が10cm 内側へはらみだしている区間があり、この推量を裏付けている。側壁コンクリートに円周方向の亀裂が見られる他、路面には大小のコンクリート片が剥落しているほか、大きなコンクリート塊が落下しているのが認められる。コンクリート片の剥落はクラウン部直下と円周方向の亀裂の直下に集中していた。図7.27 には東側坑口付近のアーチコンクリートをトンネル内部から坑口に向かって撮影した様子を示す。トンネルクラウンの左右にトンネル軸方向に幅約20～40cm のコンクリートの剥落跡（圧座による）が明瞭に認められる。



図7.28 羽黒トンネル西側坑口南寄り上部の斜面崩壊



図7.30 羽黒トンネル上部地山の峰部からやや西側斜面の側に見られた段差1.5m，総計開口幅1mの開口亀裂



図7.29 羽黒トンネル東側坑口上部の斜面崩壊と坑口での土砂堆積

このことは水平方向に圧縮されていることを裏付けている．このトンネル断面の水平方向の圧縮について東西の坑口を比較すると，その程度は，アーチコンクリートクラウン部の圧座，インバートの座屈変形ともに東側の方が重度である．このほか，アーチコンクリートに閉合クラックも多々見られ，一部には下方にずれて落ちそうなコンクリート塊もあった．

これらのトンネル断面の変状の原因を探るため，坑口部の周辺地盤の状況を見るときにも，トンネル上部の地山を踏査した．写真-6 は羽黒トンネル西側坑口南寄り上部の斜面崩壊の様子である．目測で，中央部幅60m，斜面長さ200m，傾斜30度，すべり面深さ15mであり，これにより推定崩壊土量18万 m^3 となる．崩壊土砂は斜面下端より最大約150m移動し，坑口部にも達していおり，坑口部は斜面崩壊土砂の影響を受けているものと考えられる．写真-7 はトンネル東側坑口周辺の状況である．上部地山の地すべりにより，トンネル上部地すべり土塊の先端部の土砂が坑口を塞いでいる．

さらに東側坑口よりトンネル上部地山を山の峰部に至るまで踏査したが，斜面中腹部に多数の小さな開口亀裂が見られたほか，トンネルと概ね直交する峰部には東西両方共に斜面崩壊部上方に峰に平行な亀裂と段差（数10cm から1.5m）が見られた．写真-8 に峰部からやや西側斜面（写真右側）の側には段差1.5m，総計開口幅1mの開口亀裂を示す．このことから，潜在的な地すべり斜面は移動しており，おそらくは深いすべり面が潜在しているものと考えられる．このような，開口亀裂は，空中写真では判読不可能であり，主要な施設に関わるこのような潜在的なすべりの危険箇所を探し出し，それらの挙動を監視していく必要がある．

7.4 まとめ

過去の多くの地震被害事例はトンネルなどの地下構造物が周辺地盤の動きに追従して変形し被害に至ることを語っている．地中での大きな変形にいたるメカニズムとしては断層近傍地盤に大きなひずみが生じる場合と，斜面崩壊が考えられる．鉄道トンネルでは新幹線魚沼トンネル，上越線と南津トンネルなどで強い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、中山トンネルなど）は健全な状態で残されているが，中にはルート上、地すべり土塊を縫わざるを得ないもの（木沢トンネル，羽黒山トンネル）があり，これらは覆工の損傷などの被害を受けている．中越地震を特徴づけるものは地盤災害であり，この意味でこの地域で起こった斜面崩

壊とそのメカニズム，そしてトンネルとの位置関係を確認しておくことは重要である．中越地域にある丘陵地は活褶曲地形である．上に向かって湾曲しているいわゆる背斜軸では堆積岩が張力を受けもろくなり，一方で下に湾曲する向斜軸では圧縮を受け硬くなる．このためこの地盤が隆起し続けると，一般にもろい部分（背斜軸）が差別的に削剥され，もともと尾根だった背斜軸が谷になり，向斜軸が尾根になる逆転地形が現れる．山古志村の痛ましい惨状は，相次ぐ台風の襲来もあって，このような脆い斜面の崩壊が大規模に起こったものと考えられる．

ケスタ地形の緩斜面側では流れ盤崩壊、そして差別的削剥の進んだ急斜面側では受け盤型の崩壊が見られるが、地すべり地が再滑動したものの、地すべり土塊の末端部分が崩落したものなどその形態は千差万別である．

今回の地震では幸い大きな斜面崩壊で流されたり切断されたトンネルはなかったが、例えば木沢トンネルの覆工リングの損傷は、外から明瞭に判別しがたい地盤内部に伏在する損傷の存在を示しているものとして重要であろう．木沢トンネルの破壊形態は2種類(a), (b)に区分できる。(a)の破壊の主要な形態は、覆工側壁に生じた孕みだし（西側：図7.15a, b）と圧壊（東側：図7.16）である。(b)の破壊の主要な形態は、トンネル軸方向の伸張であり、これはトンネル覆工や床版の横断亀裂（図7.18）や継ぎ目の開口の形で現れている。両者とも地すべりの影響と解釈できる．

(a)の破壊形態は注意を要する。トンネルは横断面で荷重を支えるからである。トンネル周辺の地山と覆工の間に隙間がないものと想定すれば図7.17は局部的に10～数10%以上のせん断ひずみが地盤内に発生していることになる。木沢トンネルはその後矩形の鋼製フレーム（プロテクター）が建て込まれ、迅

速に応急措置がなされた．今後長雨から豪雪期、そして融雪期と困難な状況が続くため、長期的にトンネルの挙動を監視していくことが望まれる．

【付録1】第7章執筆者

海野隆哉（長岡技術科学大学） 7.2

小長井一男（東京大学生産技術研究所） 7.1, 7.3, 7.4

森伸一郎（愛媛大学） 7.2, 7.3

【付録2】謝辞

本調査に当たってJR東日本旅客鉄道株式会社，北越急行株式会社，新潟県土木部道路管理課，同土木監理課企画調整室からご協力と資料の提供をいただいた．ここに深甚なる謝意を表します．

【付録2】参考文献

- 1) Martonne E. de: A shorter physical geography (English Edition): London, Christophers, 338p, 1927.
- 2) 柳沢幸夫他：小千谷地域の地質、地域地質研究報告 1：50,000地質図幅、新潟(7) 50号，1986.
- 3) 防災科学技術研究所地すべり地形分布図データベース：
http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/jisuberi_top.html, 2004.
- 4) K. Konagai, Ito, H. and Johansson, J.: Features of Tsukidate landslide mass in the May 26, 2003, South-Sanriku Earthquake, 42nd Annual Convention of the Japan Landslide Society, Toyama, 2003.
- 5) 八木浩司，山崎孝成，守岩勉：2004年中越地震に伴う地すべり・崩壊分布図，日本地すべり学会ウェブサイト，
<http://japan.landslide-soc.org/> 2004.
- 6) 道路トンネル年鑑

(2004. 12. 16 受付)