

活褶曲地形と地震被害概要

東京大学生産技術研究所 小長井 一男

調査同行者：

東京大学生産技術研究所 小長井研究室

田村重四郎(東大名誉教授)、Jorgen JOHANSSON、沼田宗純、Amir A. SADR、片桐俊彦、Athanosios Zafeirakos、福永勇介、カカアニトゴツガ、阿部慶太、井筒 剛司

東京大学生産技術研究所 目黒研究室

中島奈緒美、中嶋朋子

1. 活褶曲地形

このあたりは活褶曲地形である(図 1.1(A), de Martonne, 1927 より)。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。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 1.2)、水田や養鯉池が広がり人の生活が営まれてきた。山古志を含むこの山地は上記のような地質的条件から融雪期の地すべりの多発地帯として知られており(図 1.3)、山古志村の痛ましい惨状は、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。また相次ぐ台風の襲来があったことも忘れてはならない。

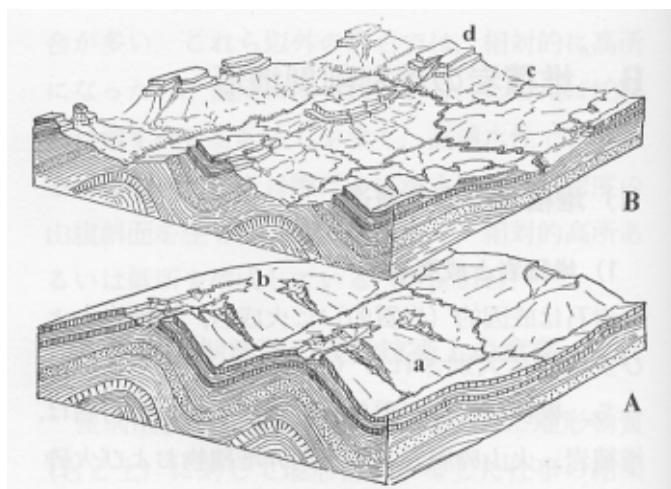


図 1.1 褶曲構造の差別的削剥 (de Martonne, 1927 の原図の一部)



図 1.2 山古志あたりの活褶曲地形(地質調査所 1:50,000 地質図幅より): 図は小千谷市、山古志村を結ぶ東西の切断面である。東山背斜軸のあたりの差別的削剥が特に著しく、ここに向かって滑り落ちた旧地すべり土塊上に山古志村が広がっている。

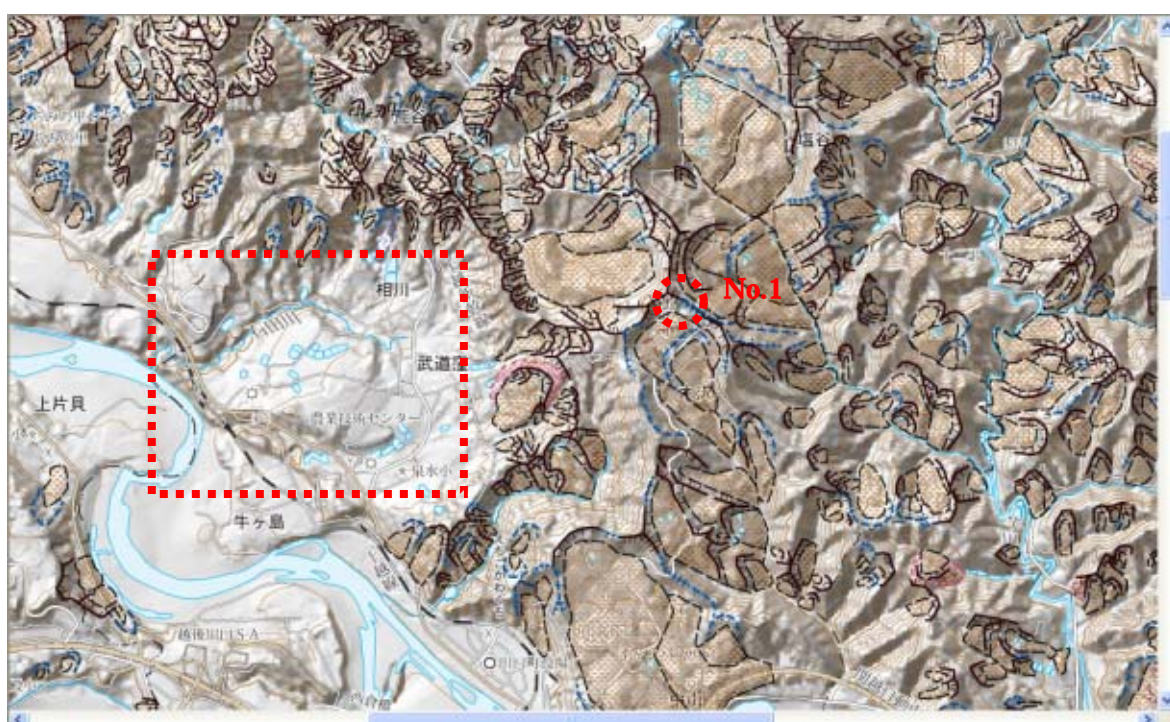


図 1.3 地すべり地形分布図(防災科学技術研究所): 図中のハッチ部分が地すべりによって移動した斜面であり、地震発生以前からこのあたりが名だたる地すべり地域として知られていたことがわかる。この地域の地滑り発生の 30~40%が融雪期に生じている。破線の矩形内は信濃川の潜入蛇行が発達し蛇行切断が起こって取り残された旧河道である。

被災地域で人口集中の大きい信濃川, 魚野川沿いはこのような差別的削剥地形を流下することで大きく蛇行し, それが次第に山を穿って成長し(穿入蛇行), やがてこれが切断されて, 蛇行していた河床が馬蹄形の平地として取り残される(図 1.3 の破線の矩形内)。それでも地盤は隆起を続けるので, この馬蹄形の平地の川に接する部分は穿たれ段丘状の崖地を形成する。一方、これらの河川は川幅が広く、攻撃側に大きく湾曲した水路より短い滑走部側の水路が主流路として低下し“早瀬切断”が起これば、攻撃部側はやがて早瀬切断

段丘として隆起する。そして段丘崖沿いに鉄道や道路が敷設されている部分で被害が集中している(図1.4)。

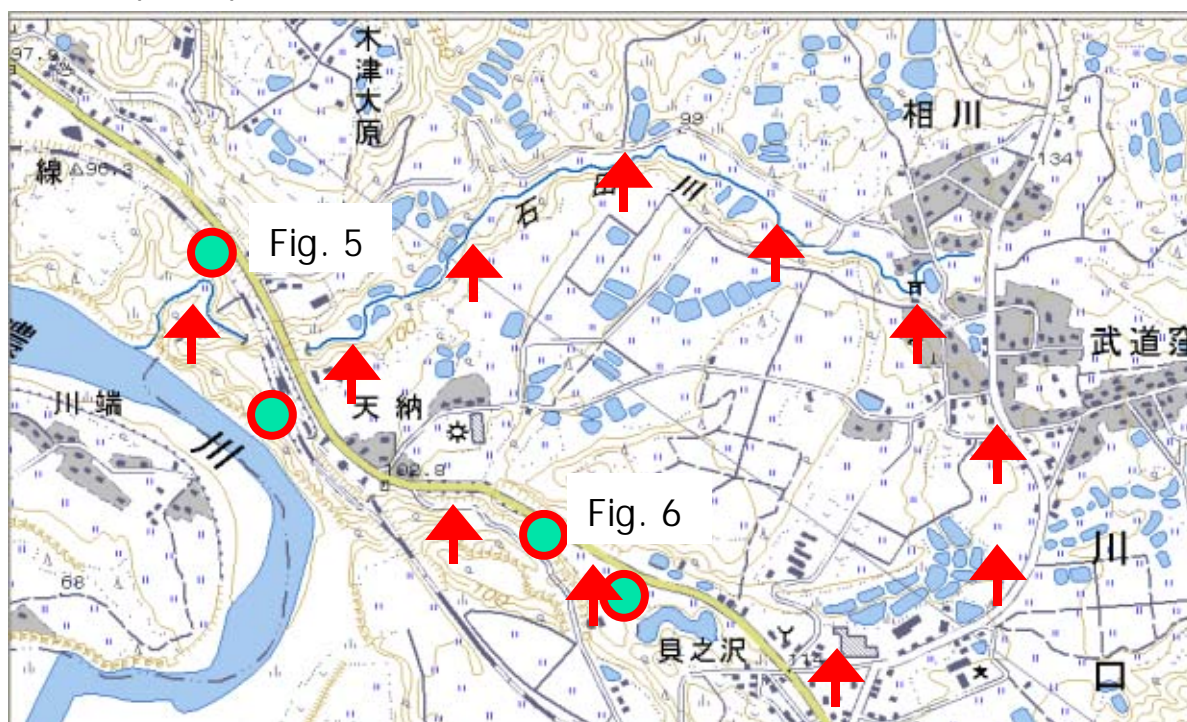


図1.4 蛇行切断によって残された旧河道(図中)と段丘崖に沿って発生した斜面崩壊(印。著者らの踏査(10月26日)で確認されたもの):



図1.5 図1.4中のFig.1.5地点: JR上越線、並行して走る国道17号線盛土部がその下の段丘崖の未固結砂礫層とともに崩落したもの。法先部のコンクリート擁壁も下の地盤ごと移動している(図面準備中)。



図 1.6 図 1.4 中の Fig.1. 6 地点：旧河床の円礫を含む層が崩壊したもの。

小千谷市付近にもこのような馬蹄形の旧河道痕が認められる。市内中央にある船岡山は馬蹄形の旧河道に囲まれた切断丘で、旧市街地がこの船岡山を取り囲んでいる。そして新興住宅地はさらにその外側の旧河道に載っている。

2. 斜面崩壊の形態

前節でも述べたように、この地域が活褶曲地帯であるため、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。

2.1 平板状の滑り

図 2.1 は小千谷市の東、裏柄周辺の地形図である。図中の rockfall #1 は鮮新世の白岩層(シルト質砂岩と思われる)の崩落(写真 2.1)である。崩落した岩の一部は節理に沿って割れたもので酸化鉄の黄～赤褐色を呈しているが、かなりの破壊面は青灰色で破壊面そのものが新鮮であることを示している。この崩落がどの深さまで達しているか、そこで何が起こったのかは今後の調査に俟たなければならない。しかしこれより南の rockfall #2(写真 2.2)は明らかに平板状の滑りであり、その滑り面は滑らかな平面である。図 2.1 の地形図の等高線は西側に緩い勾配を持つケスタ(Questa)地形の特徴を示しており、すべり面はその緩斜面の勾配とほぼ平行である。滑った土(岩)塊は信濃川に流れ込む野辺川(早瀬切断でかつての信濃川の名残川となったと思われる部分)を埋め、周辺の水田が冠水した。

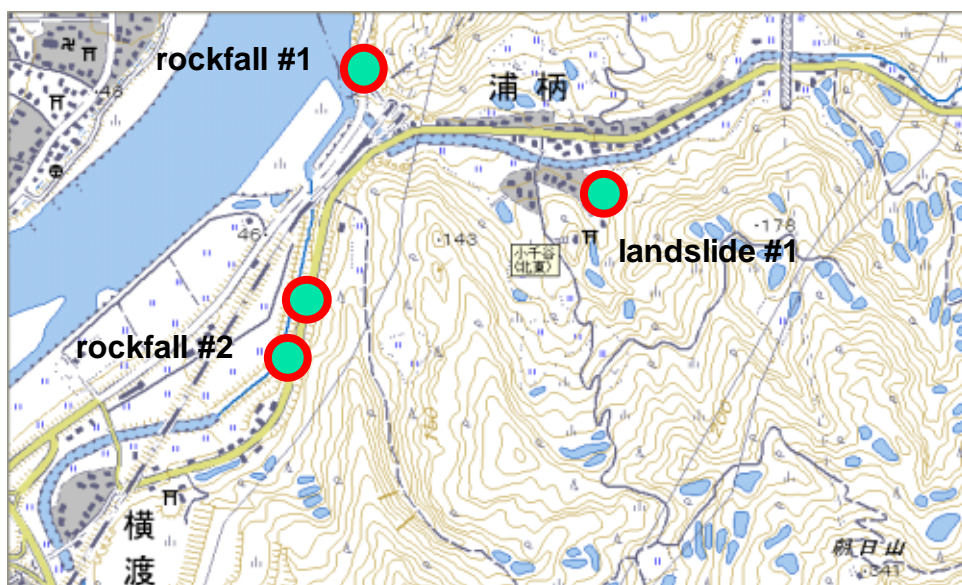


図 2.1 浦柄周辺の地形図 (国土地理院 1:25,000 地形図の一部)



写真 2.1 白岩層の崩落：岩の破断面の多くが新鮮な青灰色を呈しており、岩崩れが深いところまで達しているように推測される。



写真 2.2 平板状のすべり (図 2.1 中の rockfall #2)



写真 2.3 朝日川を右側から閉塞した地すべり土塊と水を堰き止めた家屋



写真 2.4 浦柄の街中を流下する濁水: 人物が立っている部分で圧座した舗装が流れを写真手前側に曲げている。

2.2 既存地すべり移動体の再滑動による河川の堰き止め

図 2.1 中の landslide #1 の地点では浦柄の街の南側斜面が滑り朝日川を閉塞した(写真 2.3)。この斜面は防災科学技術研究所の地すべり地形分布図データベースによれば地すべり移動体として認定されており、これが地震動で再滑動したものと思われる。滑った土塊はさらに朝日川北岸にある民家に接触し、結果としてこの民家の東背面に朝日川の水が湛水された。水は民家の半地下の窓を抜け(写真 2.3)さらに民家背後を廻って浦柄の中心を東西に走る国道 291 号を川のように流れ下った(写真 2.4)。

2.3 土石流の流下速度の推定(塩谷トンネル北西坑口)

塩谷トンネル北西坑口あたりは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(写真 2.5)。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(写真 2.6)。壁面の痕跡から泥流の厚みがおよそ 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。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)。



写真 2.5 塩谷トンネル北西坑口あたりの土石流痕跡

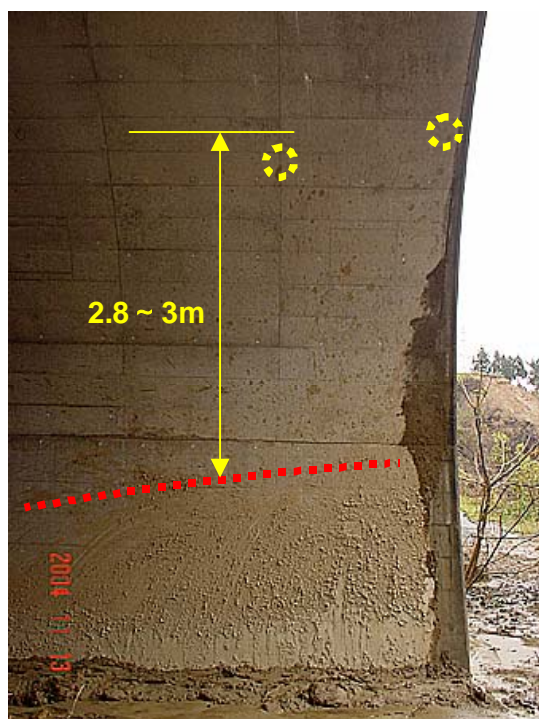


写真 2.6 塩谷トンネル坑口に残る泥はね (黄色の円)

3. 変形する地盤と土木構造物被害(木沢トンネル:図1.3中No.1の赤円)

地すべり地を縫う道路は必然的に大きな被害を受けている。一方トンネルはこれらが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、蘭木トンネル)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(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。また強烈な地盤中の圧縮場に置かれたトンネルの被害と推定されるものに、JR上越新幹線魚沼トンネル、JR上越線南津トンネルがある。ここでは地すべり地帯を通過するトンネル被害の一例として木沢トンネルを挙げる。

3.1 木沢トンネル周辺の地形および地質

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地質図幅によれば鮮新世の牛ヶ首層に分類されている。砂岩・泥岩互層で写真3.1(図3.1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。

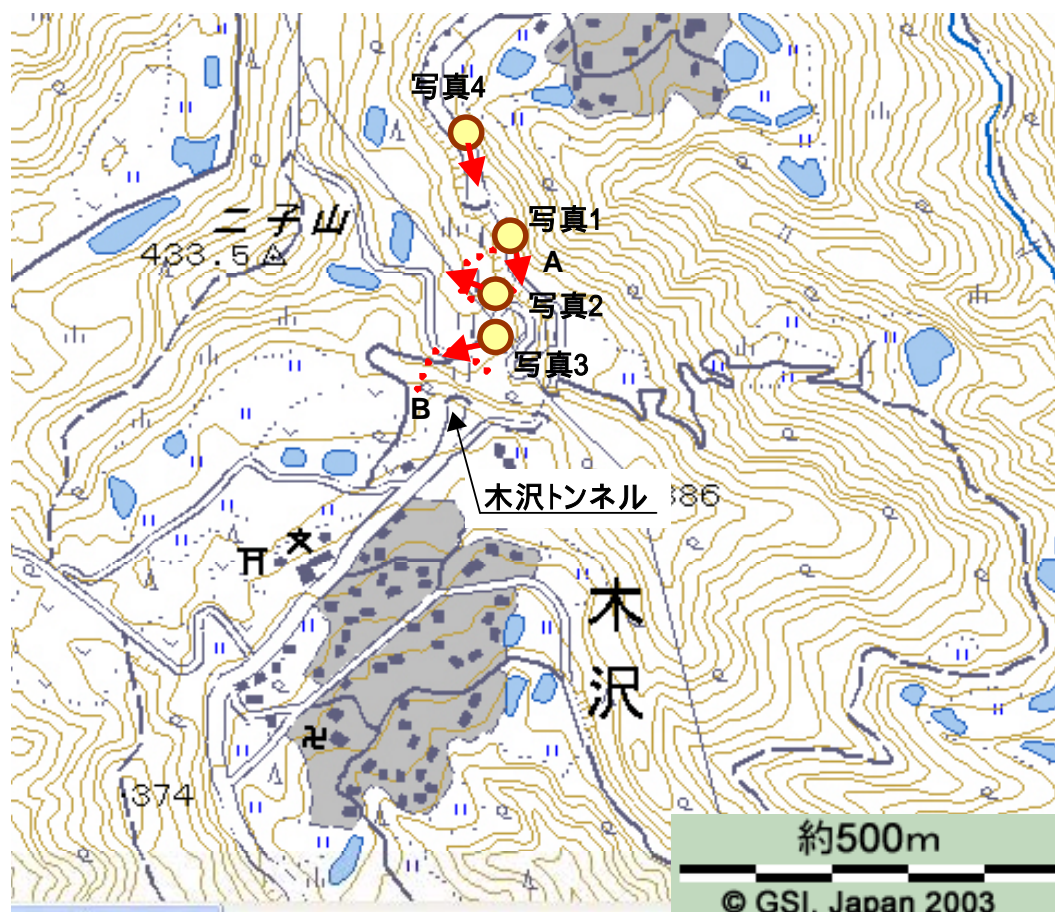


図3.1 木沢トンネル周辺地形図(国土地理院1:25,000地形図に加筆):丸印()が写真撮影箇所。また付随する矢印は撮影方向。



写真 3.1 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 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。したがって受盤型の崩壊か。人物の後ろに谷地形（黄色矢印）上部に旧地滑り跡（図 3.1 の破線 A。後述の写真 3.3）。



写真 3.2 写真 3.1 の谷地形の上部：矢印の位置は旧滑り土塊の上端か？ 手前畑地に亀裂の開口。



写真 3.3 木沢集落の北側、旧地すべり滑落崖上の状況：図 1 の B の亀裂。

写真 3.3 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、1 m 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(2)）と対応するものとも推察される。

3.2 トンネル覆工の被害

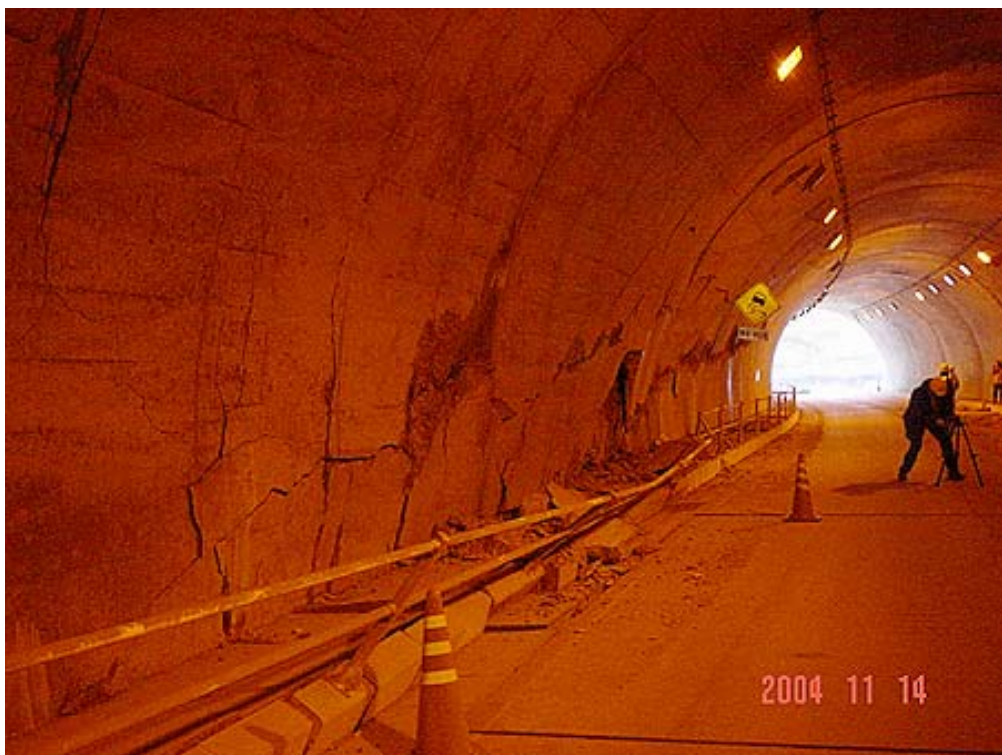
木沢トンネル坑内の被害は北口坑口から(1) 30～80m 区間および(2) 100～307m の区間に分類できる。坑道の総延長が 305m* となっているのでトンネルのほぼ全区間に渡り亀裂が見られることになるが、(1)と(2)はその性格が大きく異なる。



写真 3.4 木沢トンネル北側坑口：写真に付した黄色破線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写真2に対応する。

(1)の破壊の主要な形態は、覆工側壁に生じた孕みだし(西側：写真 3.5a, b)と圧壊(東側：写真 3.6)である。損壊箇所は写真 4 に黄色い破線で示した部分である。西側は大きい部分で 50cm 程度の孕みだしがあり、一方東側側壁は逆に 40cm 程度トンネルの外側(地山側)に向かって大きく曲げられており、圧壊はその結果として生じている。

*トンネルの長さは 307m と計測された。これは後述のようにトンネルが引き伸ばされた結果も寄与していると考えられる。



(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

写真 3.5 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。



写真 3.6 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。

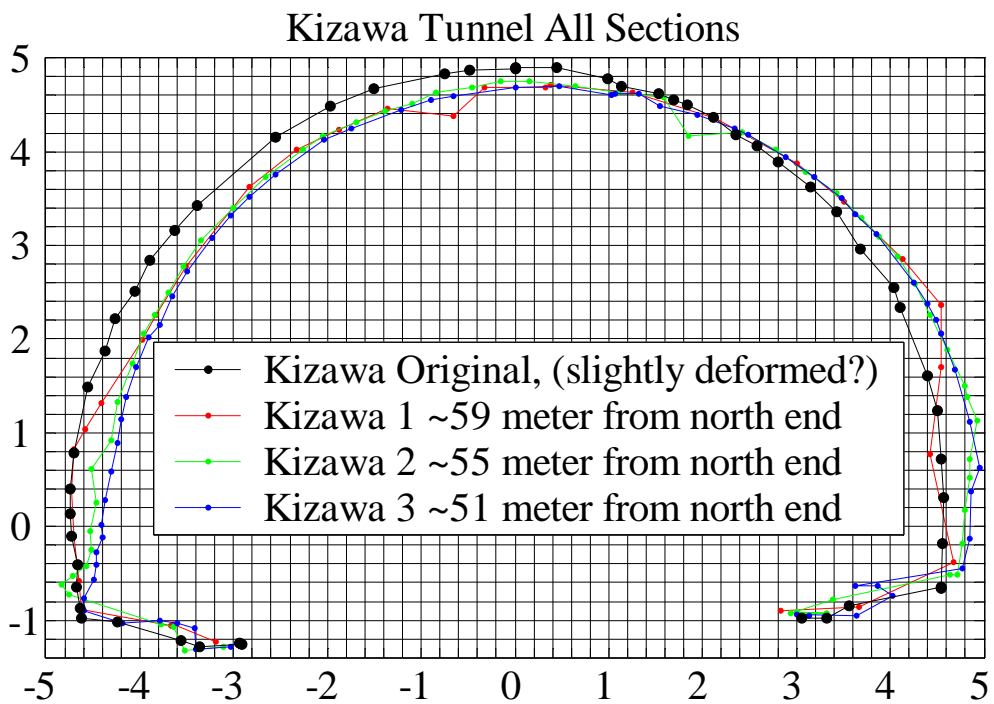


図 3.2 木沢トンネル断面変形

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 3.2)。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、また前述の写真 3.1, 3.2 に示す地すべり地の位置が概ねこの損壊部分と極めて近いことから、地すべり土塊の移動によってこの部分のトンネルが強く押されたものと推定される。

一方(2)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(写真 3.7)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 3.3 である。開口亀裂はトンネル南側で多く、これは先に写真 3.3 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。

またこの区間では高低差にも若干の変化が現れている(図 3.4)。



写真 3.7 木沢トンネル内床版の亀裂開口(北側坑口より 230m)

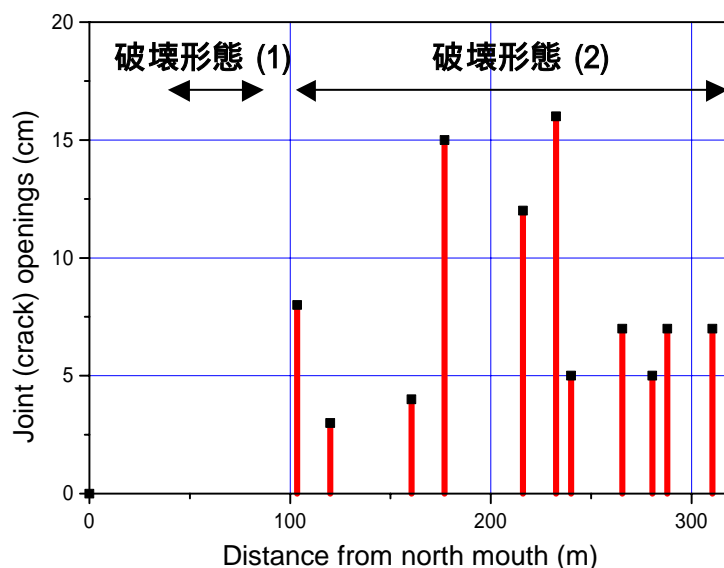


図 3.3 継ぎ目あるいは亀裂の開口（破壊形態(2)）と木沢トンネル北側坑口からの距離

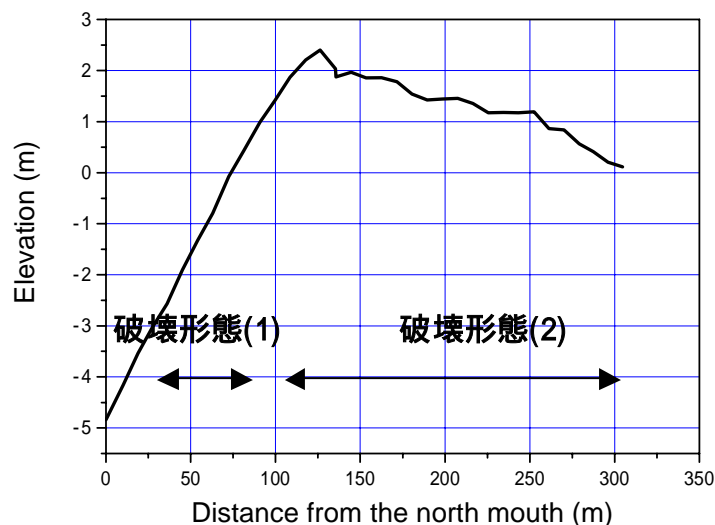


図 3.4 トンネル軸線の高低差（南側坑口 307m を基準）：125-300m の区間に不連続な高低差がある。

3.3 木沢トンネル被害のまとめ

- 1) 木沢トンネルの破壊形態は 2 種類に区分できる。(1)の破壊の主要な形態は、覆工側壁に生じた孕みだし（西側：写真 3.5a, b）と圧壊（東側：写真 3.6）である。(2)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（写真 7）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。
- 2) (1)の破壊形態は特に注意を要する。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間隙がないものと想定すれば図 3.2 は局部的に 10～数 10%以上にもおよぶせん断ひずみが地盤内に発生していることになる。今後の長雨から豪雪期、そして融雪期と困難な状況が続くため、迅速かつ十分な調査を踏まえたうえで、例えば不安定な土塊の除去、あるいは安定化、そしてトンネル内空の確保など十分な対応の検討が必要と考える。

参考文献：

Martonne E. de (1927) A shorter physical geography (English Edition): London, Christophers, 338p

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.

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://lswb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/jisuberi_top.html, 2004

K. Konagai, Ito, H. and Johansson, J. (2003): Features of Tsukidate landslide mass in the May 26, 2003, South-Sanriku Earthquake, 42nd Annual Convention of the Japan Landslide Society, Toyama.