

新潟県中越地震における 木沢トンネルの被害とそのメカニズム

森 伸一郎¹・土谷 基大²

¹愛媛大学工学部環境建設工学科 助教授
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: mori@dpc.ehime-u.ac.jp

²愛媛大学大学院環境建設工学専攻 大学院生
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: m_tsutiya19@hotmail.com

2004年10月23日に新潟県中越地方においてマグニチュード6.8の直下型地震が発生し、道路トンネルである木沢トンネルは重大な被害を受けた。著者らは地震直後に詳細な被害調査を行ない、観察、測量、亀裂幅測定のほか亀裂展開図作成などを行った。その結果、トンネルコンクリートの亀裂には、(1)円周方向の亀裂、(2)円周斜め方向亀裂、(3)北側坑口付近の35 mに渡るトンネル軸と極めて低角度に交わる巨大亀裂の3つのパターンがあることを明らかにした。さらに、引張亀裂の分布、曲げ亀裂による水平方向のトンネル軸変形、トンネル断面の変形などの観点から定量的な分析を行い、その結果と周辺の活褶曲地形を併せてこれらの3つの亀裂に対して被害のメカニズムを議論した。最終的に地すべり性の地山の挙動が主な要因である可能性が極めて高いことを示した。

Key Words : earthquake damage, tunnel, landslide, cracking, tectonical bend

1. はじめに

2004年10月23日の新潟県中越地震（マグニチュード6.8）の際に、道路トンネルである木沢トンネルは、数多くの亀裂と断面の大変形を伴う重大な被害が生じた。本論文では、木沢トンネルの被害状況を明らかにするとともに被害原因を議論する。

トンネルは構造物全体が地山に囲まれているため、地震時における挙動は地山の挙動に支配される。そのため、一般に、周辺地山が安定していれば、耐震性に富む構造物であると考えられてきた。

トンネルに関する既往の研究には、吉川¹⁾が1923年関東大震災から1978年伊豆大島近海地震の7地震について鉄道トンネルの被害をまとめたものがある。それから抜粋すると、[1] 特殊条件の介在により、[2] 経年が長いほど、[3] 震度が大きいほど、被害が大きくなるとまとめている。特に土被りが厚い（50 m以上の）場合は[1] が不可欠であるとのことである。特殊条件として、既変状、材質不良、覆工未完成、不安定地形・地質、周辺地山の変位を挙げている。トンネル被害が多発した1923年の関東大震災では、被害の大きかったトンネルの被害要因は、坑口付近の地すべりや斜面崩壊によるものである²⁾。ま

た、1978年伊豆大島近海地震では稲取トンネルをはじめとして13本のトンネルが直下もしくは近傍に地震断層が位置していたために被害を被っている^{3) 4)}。最近では、1995年兵庫県南部地震において補修・補強を要する被害を被ったトンネルが約10本確認されている⁵⁾。これらの被害の特徴は断層粘土あるいは断層破碎帯において生じていることである。

トンネルの被害は、崩壊、変形、欠落（剥落）、剥離、亀裂などの形態がある。1923年関東大震災の際のトンネルはレンガ造も多い。内房線南無谷トンネルは馬蹄形のトンネルが変位するとともに、側方の内空が大きく縮まり上に伸び上がったように変形して、地すべりによる偏圧が原因と考えられている。しかしながら、近代のトンネルでは上記の2地震による被害が代表的で、重大な被害は多くない。最近の標準工法であるNATM工法で構築されたもので地震被害を受けたものは少ない。コンクリートのトンネルに限れば、被害はアーチクラウンの圧挫をはじめ、施工目地の開口、アーチコンクリートの剥落などが代表的な被害形態である。

今回の木沢トンネルの被害は、被害形態が珍しいものであること、詳細な観察と調査に基づいていること、現代工法による山岳トンネルであることが特

徴である。

また、本地震によって国道17号線の和南津トンネルや上越新幹線の魚沼トンネルが被害を被り、長期に渡り主要交通に障害が生じた。被害の程度は一般に公表された限定的な情報や、復旧期間の長さから考えると軽微なものであったとは言えない。トンネルはライフラインの重要な構成要素であり、トンネルの被害はライフラインの途絶を意味するため、非常に重要な問題である。これらの基幹交通路におけるトンネルの重要性とは異なり、中山間地における道路トンネルについても交通の完全途絶や集落の孤立という問題に直結するため、別の観点から極めて重要である。このことから、木沢トンネルの被害状況の把握とそれらの被害メカニズムを解明することは、今後のトンネルの耐震性評価や耐震設計基準の見直しという観点からも重要である。

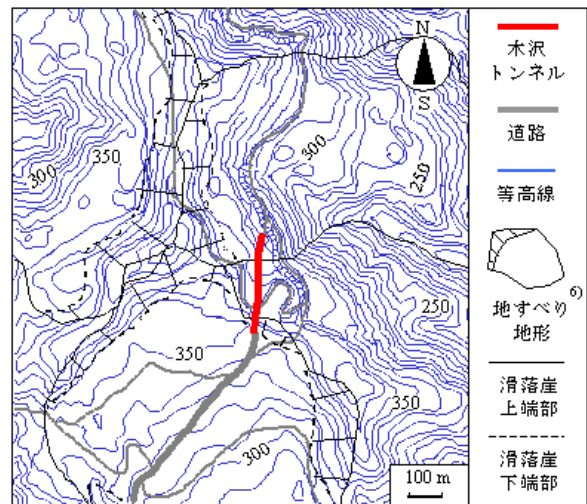


図-1 木沢トンネルの位置

2. トンネルの概要と被害調査方法

木沢トンネルは、南北に延びる道路トンネルであり、延長 305 m で、内空幅 9.05 m、高さ 5.90 m の断面を有しており、覆工厚は 30 ~ 50 cm である。上半先進ベンチカット工法 (NATM 工法) で掘削されたトンネルで、1991 年 11 月に竣工している。この地域では、北北東-南南西方向の多くの褶曲地形が発達しており、木沢トンネルは背斜軸と向斜軸の中間に位置している。また、この地域の地質構成は第三紀の半固結の堆積岩 (砂岩、泥岩など) からなり、地すべり多発地帯として知られている。図-1 に木沢トンネルの位置とその周辺の地形図を示す。これより、木沢トンネルの南側と北側の両坑口周辺がそれぞれ南西方向と東方向に移動する地すべり地塊⁶⁾の上端部を貫通していることがわかる。

現地調査は2004年10月30日と11月12日に実施した。一度目の調査は被害の概要を知るのが目的であったが、二度目の調査では、亀裂の幅と長さの計測やスケッチ描画、トンネル軸方向距離計測、トンネル被害観察、写真撮影など、6人で入念に行った。亀裂分布の描画は、トンネルを軸方向に展開した図面上に、トンネルコンクリート内面に生じた亀裂 (亀裂の開口幅 (1 mm 以上) や亀裂長さなどを測定した) を記載したもので、トンネル変状を把握する手段とした。このように描いたトンネル内面の亀裂・変状図を亀裂展開図と言う。図-2に本調査において描いた木沢トンネル全長にわたる亀裂展開図を示す。

本論文における亀裂展開図は、トンネル内面を上

側に展開して見るように描かれているので、トンネル内面が下になるようにした展開図を上方より見下ろした透視図とは異なることに注意が必要である。

3. トンネル被害の状況

木沢トンネルでは図-2 からわかるように、被害程度の差はあるものの、被害はトンネル全体に及んでいることがわかる。吉川¹⁾によれば、特殊条件が介在しない限り土被りが 50 m 以上ある場合、トンネルは被害を生じないという知見を示しているが、木沢トンネルでは最大でもその土被り厚は約 22 m 程度であり、50 m 未満であるというトンネルの被災しやすい条件の一つに適合する。

図-2 に示した木沢トンネルの亀裂展開図から、その形態は 4 パターンに分類できることがわかる。すなわち、(1) 北側坑口から 95 ~ 230 m 区間と 40 ~ 80 m の区間における円周方向よりわずかに斜めに傾いた亀裂、(2) 南側坑口から 75 m の区間における円周方向の亀裂、(3) ほぼ同じ区間における側壁の軸方向亀裂、(4) 北側坑口から 35 ~ 75 m 区間におけるトンネル両側壁の軸方向に低角度に斜めに生じた巨大な亀裂である。これら 4 パターンの亀裂が生じる区間に関する被害状況を以下に記す。

(1) 斜め円周方向亀裂

図-3 ~ 図-5 に木沢トンネルの 100 m 区間ごとの内面亀裂展開図を示す。北側坑口から 95 ~ 230 m の区

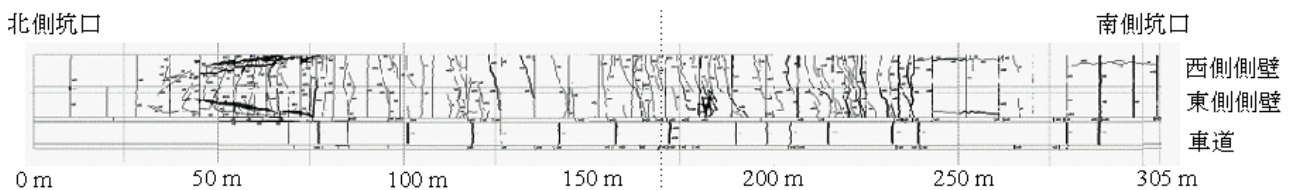


図-2 木沢トンネル内部面亀裂展開図 (延長 305 m)



写真-1 斜め円周方向の亀裂と亀裂周辺のコンクリート剥落（北口から180 m地点の東側側壁、矢印は亀裂の写真上両端を白矢印は剥落部を示す）

東西方向よりやや北側に傾いている。

(2) 円周方向亀裂

図-5に示した230～305 m（南側坑口から0～75 m）の区間では、覆工コンクリートそのものは他区間より亀裂は軽微なものの、施工目地に沿う全周にわたる比較的幅の広い（10～100 mm）円周方向開口亀裂が目立った。道路舗装にも40～140 mmの開口亀裂があり軸方向に伸びていることがわかる。

(3) 軸方向亀裂

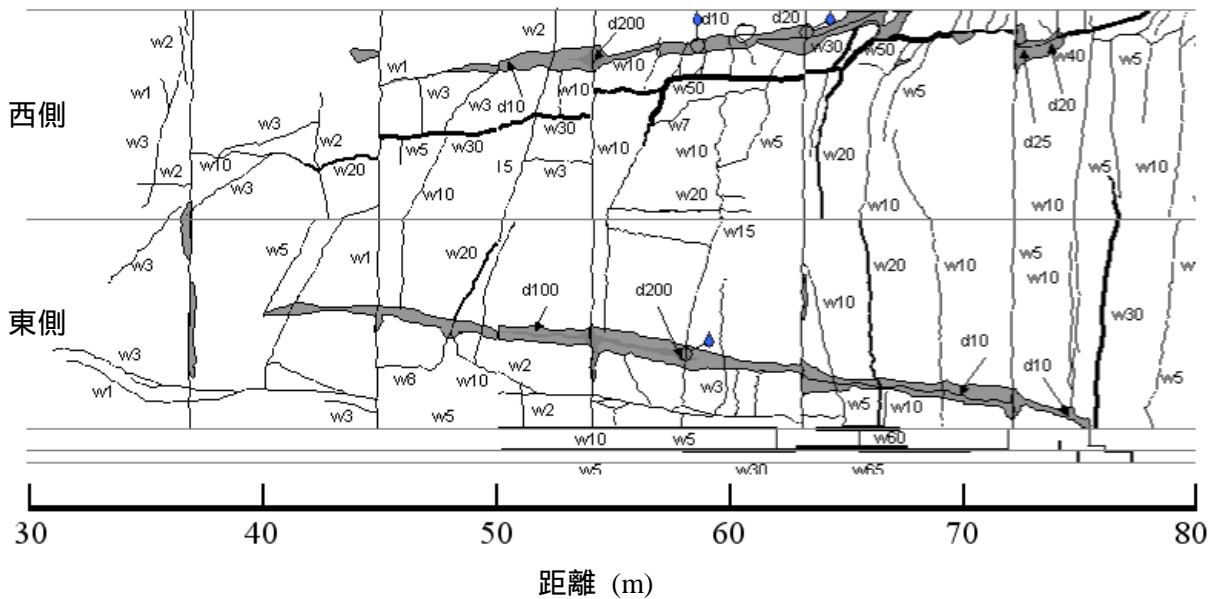
同じく、図-5に示した230～305 m（南側坑口から

0～75 m）の区間では、242～260 m区間の東西側壁280～305 m区間の西側側壁ではトンネル軸方向亀裂が見られた。軸方向亀裂には長いものでは50 mもあった。一般に側壁の軸方向亀裂は、亀裂の延長にわたりトンネル側壁に大きな力が作用したためであると考えられる。全体的に西側亀裂の方が長いこと、242～260 mの区間（南側坑口より62～45 m）で亀裂開口が10～20 mmもあり、しかも奥ほど西側が大きいのことから、南側坑口より75 mまでの区間ではトンネルの西側側壁に作用する土圧が大きかったことが推察される。

(4) トンネル軸に低角度をなす巨大亀裂

図-6に北側坑口から30～80 m区間の亀裂展開図を示す。前述のように円周方向よりわずかに右に傾いた亀裂や施工目地に沿う円周方向亀裂が見られるが、トンネル軸方向に低角度に発生した巨大な亀裂がひとときわ際だっている。この区間は木沢トンネルの被害の中でも重大で、断面内の大きな変形を伴っている。このような被害形態はこれまでに世界でも例がない。写真-2に80 m奥より北側坑口へ向けて撮影した様子を示す。巨大な亀裂が発生している箇所（A-A'～D-D'）において、トンネル軸と低角度（約約5.3度）を成す方向に幅20～100 cmにわたるコンクリート剥落（A-A'やD-D'）とその下部（A-A'）では側壁コンクリートのはらみ出しやコンクリート塊の剥落が見られる。コンクリート剥落（A-A'やD-D'）を伴う亀裂は圧挫（トンネル内部面のコンクリート縁圧縮破壊）と考えられる破壊形態を示している。

歩道に着目すると、写真-2では西側歩道の縁石上



w : 亀裂開口幅(mm), d : 剥離コンクリート厚(mm), 湧水点

図-6 北側坑口から30～80 m 区間に生じた巨大軸方向亀裂

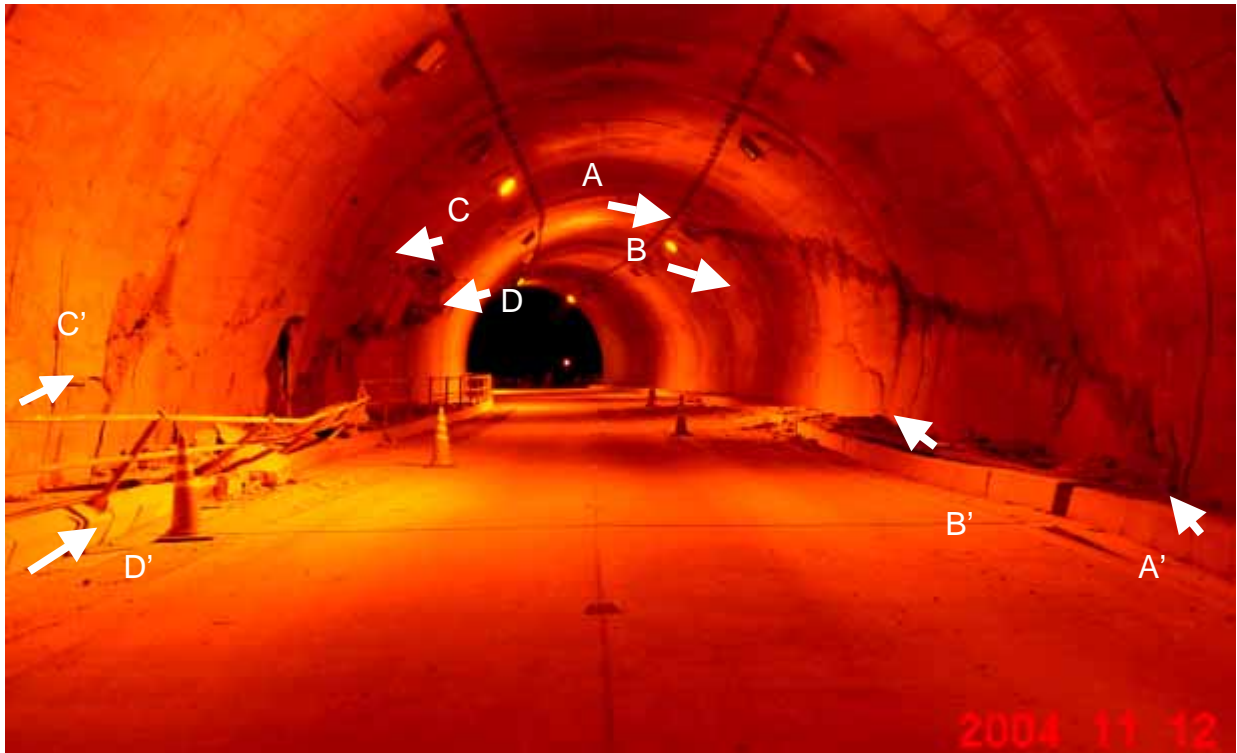


写真-2 トンネル軸低角度巨大亀裂（北側坑口から 80 m 奥より北側坑口へ向けて撮影した様子）

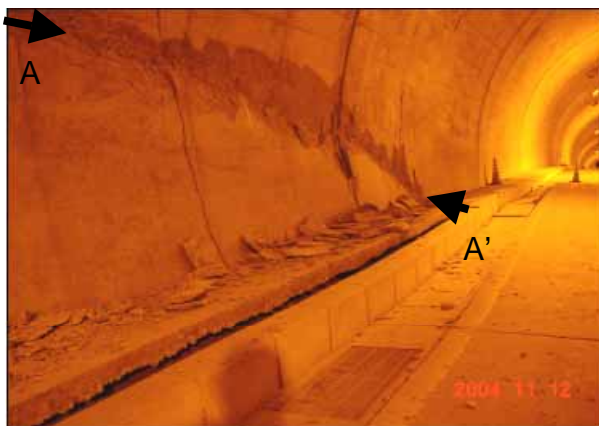


写真-3 北側坑口から 75 m 地点の東側歩道の変状

部が車道側（東側）に押されたかのように車道側に倒れ込むように回転している。一方，東側歩道では，圧挫を伴う巨大亀裂の下方では相対的に縁石が沈下しているように見えるが回転などは見られない。車道舗装は縁石と同様に僅かに相対沈下している。亀裂A-A'ではA'（75 m）付近の縁石が東側に回転している。側壁を含む覆工が東側に移動し，それに伴い引きずられて回転しているように見える。写真-3に北側坑口から75 m地点における東側歩道の様子を示す。60～75 m付近では東側歩道では縁石と歩道間に大きな開口が生じていること，圧挫亀裂A-A'より下方の側壁は下部が相対的にトンネル内側に大きく変位している。このような変状を説明するには

断面内では圧挫亀裂を挟みトンネル内面が圧縮状態となりながら，路面コンクリートは東側で引張，西側で圧縮の状態となっているはずである。

さらに，東側側壁からアーチコンクリートにかけて圧挫を伴う亀裂A-A'の下方に概ね平行に亀裂B-B'があり，西側側壁からアーチコンクリートにかけて圧挫を伴う亀裂D-D'の下方に概ね平行に亀裂C-C'がある。これらは開口亀裂であり，亀裂周辺は開閉や衝突などによるコンクリート剥落の少ないことから，単調に開口するように発生したものと推察される。したがって，圧挫に比べて目立たないが，開口幅の大きな亀裂である。

したがって，この左右の側壁とアーチコンクリートに生じたトンネル軸に低角度で伸びる巨大亀裂は，上または下におよそ平行に伸びる開口亀裂を伴っており，それらの対は互いにたすきがけの位置にあることが特徴である。

4．被害形態に着目した被害メカニズムの考察

(1) 亀裂の発生メカニズム考察の仮定

先に示した4つに分類される亀裂と変状のうち，(1)の斜め円周方向亀裂は，引張状態にあるなかで一方のせん断もしくは，ねじりが作用したと考えられるが，亀裂の傾き方向から北側坑口付近では西から東の，南側坑口では東から西のせん断力が作用したと推測される。(2)の円周方向亀裂は，引張方向にトレンドを有する繰返し軸ひずみが作用したと

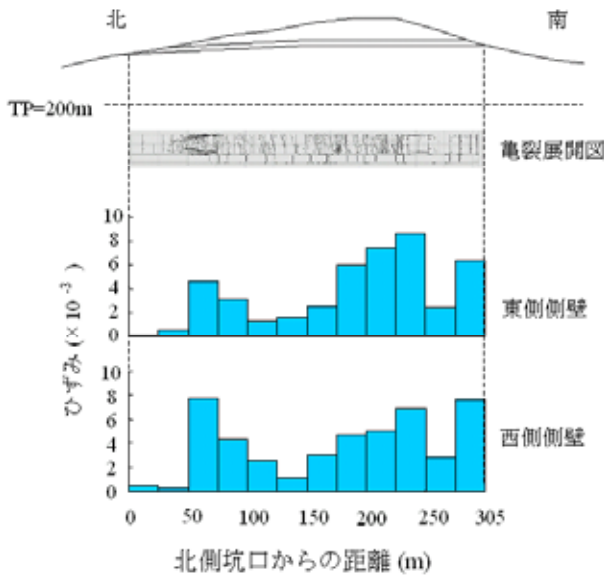


図-7 木沢トンネル開口亀裂に基づく引張ひずみ分布(10 m 区間)

推測される。(3)の軸方向亀裂は一部の側壁にのみ生じており、それらの区間では一般に言われる両側からの側圧の増加によるものと考えられる。

図-3～図-5に示したように、幅1 mm以上の亀裂については亀裂幅を記録した。円周亀裂と斜め円周亀裂による開口亀裂幅の両側壁 SL(スプリングライン)上での平均値と差をそれぞれ引張によるものと水平面内の曲げによるものと仮定して、引張による伸びと曲げによる水平変位を算定した。

(2)引張によるトンネル変形

両側壁の開口亀裂幅の総和によれば東西側壁の平均は約1.2 mであり、トンネルが約1.2 m 軸方向に伸びたことになる。このような変形は両側坑口周辺の地すべり性の地山挙動によると推察される。

地震後に行われた測量によれば、南側坑口が南南東に105 cm変位したことがわかった。したがって、誤差は約1割であり、この推定方法は妥当である。

また、トンネルを一定の区間毎に亀裂幅を加算し

て東西両側壁の引張ひずみ分布を検討した。ここでは25 m区間ごとに加算した開口亀裂幅を区間長で除すことにより引張ひずみを求めた。図-7にトンネルの引張ひずみ分布を示す。東西側壁のひずみ分布は概ね同様の傾向であり、50～100 mと175～250 mの2区間でひずみが卓越する傾向が見られる。しかし、前者では西側が後者では東側が大きく、この区間では曲がりが生じている可能性がある。この軸方向引張りひずみの卓越する2区間は、両方の坑口から50～75 mのところを位置し、それぞれすべり地塊上部の滑落崖の上端部に相当することから、すでに判別されている地すべり地塊の動きではなくさらに地山側に潜在するトンネル周辺地山に生じた地すべり性の地山挙動によりこれらの亀裂が発生したと考えられ、そのすべり境界がこれらの区間に位置する可能性がある。

(3)両側壁亀裂の積分によるトンネル軸の曲げ変形

前述したように引張ひずみ分布の傾向は東西の側壁において全体として同様の傾向を示しつつも2区間では東西側壁で異なっている。トンネル全体が水平面内で曲げ変形していると推測されるので、以下のような方法(剛体の変形角増分の積分)で水平面内の変位を評価した。

- [1] 施工目地が10 m 間隔で存在するため10 m 区間ごとのブロックに区分して考える。
- [2] トンネルのブロックは剛体と仮定する。
- [3] ブロック区間内に生じている両側壁SL上での亀裂の開口幅を加算し、開口幅合計が両端部でのブロック間の開きであると仮定する。
- [4] 境界条件となる特定のブロックの変位を決めるて、隣接ブロックの位置を計算する。これらの操作を全長にわたって繰返し行い最終的に全区間のトンネルの水平変位を求める。

言うまでもなく、境界条件により変位分布形状が左右される。

ここでは、後述の理由により不同であると仮定できる北側坑口を基準(変位, 変位角をゼロ)とする。図-8にこのようにして求められたトンネル軸線の水平変位分布を示す。60 m付近までは変位が現れない

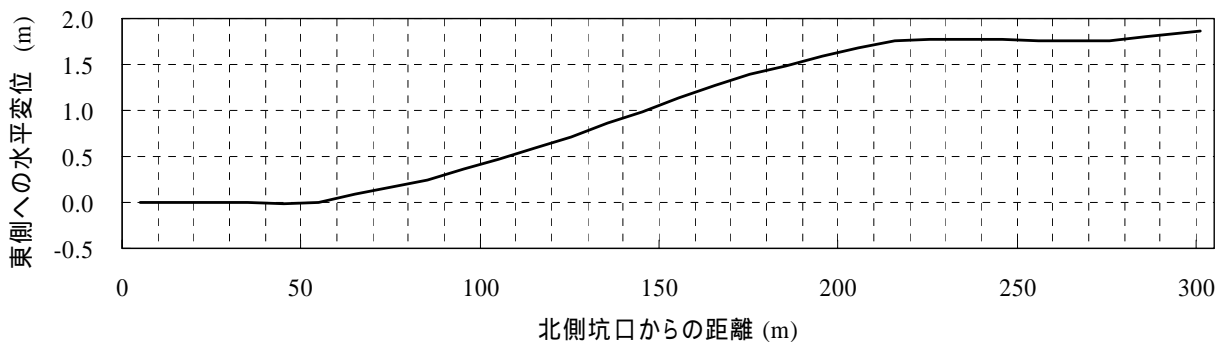


図-8 木沢トンネル軸変形曲線

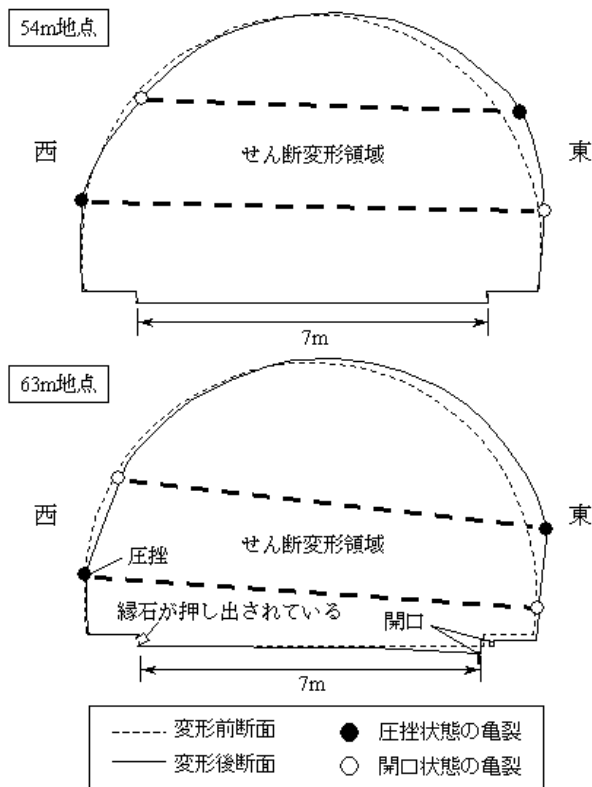


図-9 木沢トンネルの北側に生じた巨大亀裂区間の断面変形状態 (北側坑口から 54 m 63 m 地点)

が、60 m 付近で東方向の変位が急に出現し、200 m 付近までおよそ単調に増加した後、変位の増加が緩やかになり 230 m 以降では約 1.8 m で一定となる (最大は 1.86 m)。水平変位分布では 60 m 付近が急激な変化点であり 230 m 付近が緩やかな変化点であるが、引張りずみの卓越している地点とも整合している。

一方、地震後に測量された結果によれば、北側坑口から 60 ~ 70 m のところで東側への水平変位が急増しその値は 40.5 cm に達した。したがって、亀裂に基づく方法では 4.5 倍大きめに算定された。しかし、定性的には妥当なものである。

5. トンネル軸低角度巨大亀裂の考察

先に 3. (4) で述べたように、左右の側壁とアーチコンクリートに生じたトンネル軸に低角度で伸びる巨大亀裂は、上または下におよそ平行に伸びる開口亀裂を伴っており、それらの対は互いにたすきがけの位置にある。また、トンネル軸方向に巨大な亀裂が生じる (北側坑口を起点として 35 ~ 75 m) 区間では、トンネル横断面に著しい変形が見られる。ここでは、亀裂の状況と断面の変形状況を合わせて考察する。

(1) 亀裂発生と断面変形の力学的メカニズム推定

図-9 に北側坑口から 54 m, 63 m 地点における横

断面の変形状態を示す (写真測量による)。西側のアーチコンクリートには、スプリングラインより上の方でトンネル内部方向への押し出しが認められる。一方、東側の側壁とアーチコンクリートはトンネル外側へ (東側へ) 向かって変形している。したがって、どちらか一方の側壁に荷重が作用したわけではなく、西側が押され東側が引っ張られた状態であると考えられる。この図には、圧挫亀裂と開口亀裂の位置を記入してある。これによれば、両側にある各々一對の圧挫亀裂と開口亀裂で挟まれた領域がせん断変形している様子が明瞭である。すなわち、圧挫亀裂と開口亀裂はそれぞれヒンジの働きをして、トンネル中間部分がせん断変形し、その領域より上部のアーチコンクリートが東側に移動している。したがって、せん断変形領域とその上の周辺地山全体がトンネル上部を拘束しながら東側に向かって移動したことがメカニズムとして推定できる。北側坑口から 54 m の地点も 63 m の地点も同様なメカニズムが考えられる。

(2) せん断変形と地山移動の原因

亀裂の下側の側壁は、相対的に足元が内側に押し出されている。その結果、東側側壁に生じている軸方向の巨大な亀裂はコンクリート内側縁が強く圧縮され圧挫の様態を呈している。また、西側の歩道が車道側にはらみだし、東側の歩道が側壁の方向に変形していることから考えると、アーチコンクリートが全体的に東側に移動するような力がトンネル上部に作用したのに引きずられて、せん断変形領域より下部にも東側にもかなりの力が作用したと推測される。

前述したように、75 m 付近で見られた東側側壁の移動のみならず歩道縁石や車道路面の沈下については、トンネル路面下部の地山の沈下も考えられる。

せん断変形領域は、54 m の地点では側壁中間部にあり東側に約 5 度傾いているのに対して、63 m の地点では東側に約 10 度傾いており、領域の下部は道路面に達している。このせん断領域は地山のせん断変形層に相当し、これより上の部分は移動地塊であると推察される。東側の側壁に現れていた開口亀裂は 63 m より奥では消失する一方、圧挫亀裂は 75 m 付近で路面高さとなる。すなわち、75 m では推察されるせん断変形層はトンネルより下方に位置することになり、このようなメカニズムを仮定すれば、それより奥ではトンネル全体が東側に移動していることになる。前述の 80 m 付近の路面の沈下は、トンネル地山の東側下方への移動という現象の想定で説明が付くことになる。

さて、図-9 に示すように 54 m の地点は 63 m の地点に比べてせん断領域の位置は高くなっている。巨大亀裂は北側坑口に向かうに連れ低角度に上がっていることが図-6 からわかる。その角度は道路面に対して約 5.3 度の角を成している。実際には北側坑口から 140 m 付近より北側坑口に向かって最急縦断勾配 3.8 度の下り坂⁷⁾となっているため、低角度

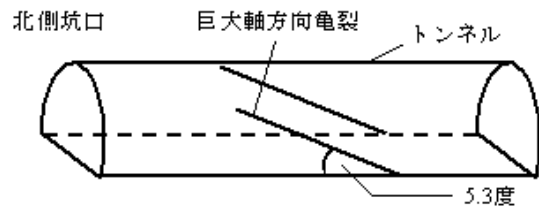
に上がる亀裂の角度は地表面に対して約 1.5 度程度となる。図-10 にこの状況を模式的に表したものを示す。推定せん断層は東側に約 5~10 度傾いているが、北側に向かっては約 1.5 度上方に傾いていることになる。図-6 によればせん断変形領域の最上部に相当する西側開口亀裂は、北側坑口 35 m でトンネルクラウンに達する。すなわち、ここで想定している移動地塊説に依拠するならば、北側坑口 35 m 区間はせん断帯より下方に位置することとなり、安定した地山にあると推察される。実際、北側坑口 35 m 区間は図-3 に示すように亀裂はほとんどなく、この仮説と整合している。さらに、北側坑口より北に延びる道路には、道路東側側端の盛土部の縦断亀裂を除き、東側への地山移動に起因するような変状は全く見られない。これもこの仮説の傍証である。

さらに、先に 4.(3) で得られたトンネル軸線の水平変位は、北側坑口を基準とすると、60 m 付近で東側への変位が出現し、230 m 付近で最大に達してそれ以降変化がないという特徴があった。これは移動地塊の下部にある推定せん断帯が 60 m 付近からトンネル路面より下方に位置し、それより南側は東側に移動するという移動地塊説と整合する。また、230 m 付近に円周ひび割れが多く、軸方向亀裂から推測された 230~305 m の間で水平方向、特に西側から土圧が作用したとする推察と整合する。

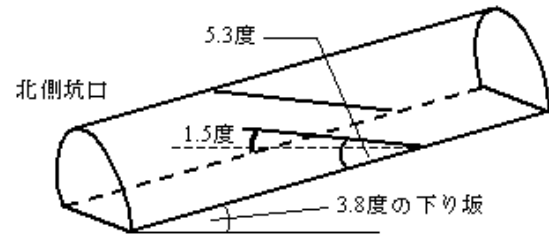
したがって、東側へのせん断変形と地山移動の原因は、地山にあるせん断変形層とそれに運ばれる移動地塊であると推定される。

(3) 木沢トンネル周辺の被害状況

図-11 に木沢トンネルの周辺の被害状況を示す。これによれば、木沢トンネル上部の地山には、道路や裸地に多くの引張亀裂が見られた。さらにトンネル東側の斜面では表層崩壊が 2 箇所で見られた。ま



(a) 道路面を水平としたときの巨大軸方向亀裂の傾き



(b) 実際の道路面を考慮したときの巨大軸方向亀裂の傾き

図-10 軸方向亀裂の傾きに関する模式図

た、木沢トンネルの東に位置する木沢隧道には西側から押されたような側壁の変形と断面の変形が見られた。写真-4 に木沢隧道の側壁の変形の様子を示す。これらは、木沢トンネルが貫く地盤が引っ張り状態にあったこと、東側に移動する動きがあったことを示すものであり、これまでの推測を裏付けるものと考えられる。

(4) 推定される移動地塊と周辺地質の関係

図-12 に木沢トンネル周辺の地形図ならびに地質

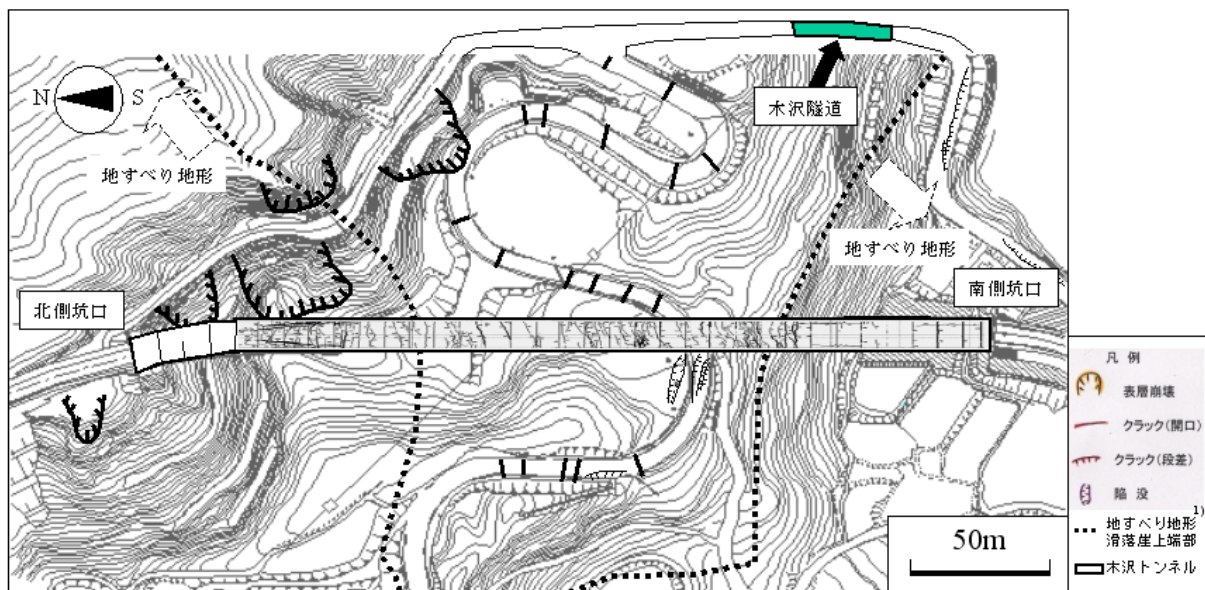


図-11 木沢トンネル周辺の地形と被害状況

断面図を併記する⁸⁾。地質断面図は木沢トンネルの約 500 m北側のものであり地形図における破線A-A断面に相当する。木沢トンネルはこの地形を形作っている活褶曲の軸方向南側に位置するため、この地質断面は木沢トンネル周辺におけるものをある程度代表していると考えられる。地形図から北側坑口付近は 18 度の差し盤となる地層上に位置していることがわかる。この地層の傾斜は、これまで検討してきた東側への約 5～10 度の傾斜の推定せん断帯の説と必ずしも整合しない。木沢トンネル位置における詳細な地質断面がわからないので、結論が出せないが、褶曲地域特に背斜構造の地域の地質では必ずしも地すべり面が地山の地層傾斜と一致しないのか、この地点で地質構造が変化しているのか、と言う点では結論を見ない。しかしながら、当該地は地すべり地帯であり、地すべり性の地塊移動であるものと推察される。

5. 結論

2004 年新潟県中越地震による木沢トンネルの被害を現地調査し、亀裂展開図を作成し、地形・地質の状況を併せて考察し、被害状況とメカニズムを考察した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) トンネルコンクリートの亀裂には、[1] 円周方向の亀裂、[2] 円周斜め方向亀裂、[3] 軸方向亀裂、[4] 北側坑口付近のトンネル軸と低角度に交わる巨大亀裂の 4 つのパターンがあることそれらの発生区間を明らかにした。
- (2) 亀裂展開図と亀裂幅に基づき、引張りひずみと曲げひずみを算定し、トンネルの引張りと水平面



写真-4 木沢隧道における西側側壁の変形及び路盤の圧縮

内曲げ変位挙動を推定した。地震後の測量による値と比べると伸び量は、約 1 割増し、水平変位量は 4.5 倍であったが、定性的には合致した。したがって、被害メカニズム推定には有効であった。

- (3) 北側坑口付近の左右の側壁とアーチコンクリートに生じたトンネル軸に低角度で伸びる巨大亀裂は、圧挫によりコンクリートが大きく剥落した亀裂（圧挫亀裂）と上または下におよそ平行に伸びる開口亀裂を伴っていた。それらの対は互いにたすきがけの位置に向かい合い、トンネル断面上に位置する 4 つの亀裂を結ぶ領域内で大きく東側にせん断変形し、4 つのヒンジのように挙動した。せん断変形領域の上の地山は東側に平行移動したと推測された。

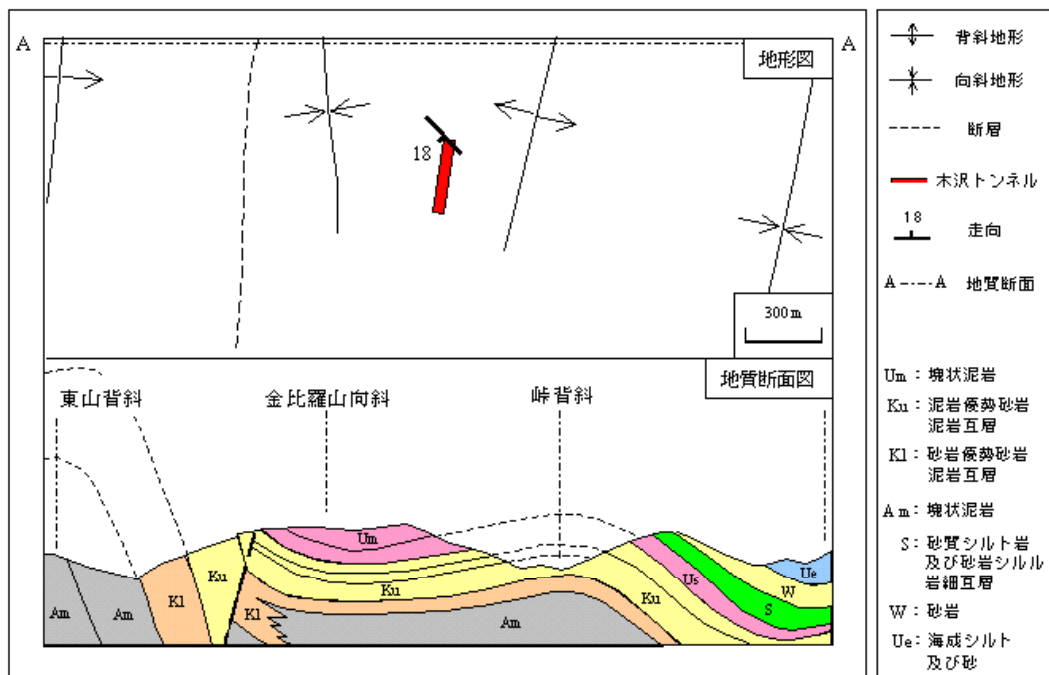


図-12 木沢トンネル周辺地形および地質断面⁶⁾

- (4) せん断変形領域は，地山内のせん断変形層に対応するものと考えられ，その層の上の地塊が移動するものと推察される．せん断層と移動地塊は南北方向には約 1.5 度で南下がりであると推察され，東側に 5～10 度傾いており，地すべり性の地塊移動であると推察された．
- (5) 以上の仮説は，トンネルの詳細な亀裂状況，変位，断面変形，周辺地山の被害状況などいずれも整合するものばかりであり，仮説は妥当なものであると考えられる．

謝辞：新潟県土木部にはトンネル台帳のコピー他，関連する資料を提供戴きました．また，第1回の調査では神野 邦彦氏(愛媛建設コンサルタント)，第2回の調査では，キンキ地質センターの増田 信氏，愛媛大学工学部学生の松下 怜，和仁 晋哉，平川 克利の各氏には調査に同行して多大な協力を戴きました．また，応用地質の高柳朝一氏には木沢トンネル周辺の被災状況について資料を提供戴きました．ここに記して深謝いたします．

参考文献

- 1) 吉川 恵也：鉄道トンネル災害事例調査 鉄道技術研究報告，No.1123 施設編第479号，日本国有鉄道 鉄道技術研究所. pp26-34，1979．
- 2) 朝倉 俊弘，志波 由紀夫，松岡 茂，大矢 敏雄，野木 一栄：山岳トンネルの被害とそのメカニズム 土木学会論文集No.659 pp27-28，2000.
- 3) 小野田 耕治，楠山 豊治，吉川 恵也：伊豆大島近海地震による被害(1) 鉄道トンネルの例 トンネルと地下 第9巻6号 pp7-12，1978.
- 4) 今田 徹：伊豆大島近海地震による被害(2) 鉄道トンネルの例 トンネルと地下 第9巻7号 pp9-16，1978.
- 5) 地盤工学会，土木学会：阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 第2章 トンネル・地下構造物 pp3，pp77-85，1998.
- 6) 国土地理院：2万5千分の1 都市圏活断層図 小千谷 国土地理院技術資料 D・1-No.388, 2002.
- 7) 新潟県土木部：県管理道路トンネル台帳 .
- 8) 独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ http://www.aist.go.jp/index_j.html

(2005. 3. 15 受付)

DAMAGE TO KIZAWA TUNNEL DURING THE 2004 NIIGATA-KEN CHUETSU EARTHQUAKES AND ITS MECHANISM

Shinichiro MORI and Motohiro TSUCHIYA

The Kizawa road tunnel suffered serious damage by the Niigata-Ken Chuetsu earthquake with a magnitude of 6.8 and its damaging aftershocks on October 23, 2004. Authors immediately conducted a series of detailed investigation on its damage, including observation, surveying, measuring width and length of cracks on the tunnel concrete and drawing the cracking map. As a result, it is clearly shown that the cracking on the tunnel concrete can be broadly classified into three patterns; (1) circumferential cracking, (2) circumferential cracking with slightly diagonal angle, and (3) a pair of gigantic longitudinal fissures with an extremely low angle in terms of tunnel axis extending over 35 m. Furthermore, distribution of tensile strain along the tunnel, deformation of tunnel axis in horizontal plane based on integration of difference of opening due to cracks on both side walls and cross sectional deformation due to the gigantic fissures are analyzed from a quantitative point of view, and the results of the analyses and consideration of the features of the active fault-bend region lead discussion on possible mechanism of the three patterns of cracking. Finally, it is concluded that the behavior of mountain with potential landslide likely triggered this damage.