

鉄道の地震被害の実例と今後考え得ること

横浜国立大学 小長井 一男

東海道新幹線では国鉄時代から様々な震災の教訓を反映して耐震補強が連綿と進めてきた。2013年1月30日の報道 [1]によれば「**JR 東海が東海道新幹線土木構造物の大規模改修工事を5年前倒し、4月に着工**」――前半省略―― 現行の引当金積立計画では、2002年から2017年にかけての15年間で5,000億円を積み立て、2018年度からの10年間で大規模改修工事を行うとしていた。同社では工事に向けた積み立てを行う一方で、2002年より大規模改修の工法を研究。これにより、土木構造物の経年による変状の発生を抑止し、延命化を図る対策と部材取り替えなどの全般的な改修を実施する工法が開発された。新工法の採用により、工事実施時の列車運行への支障を大幅に低減できるほか、工事費の大幅な削減が可能になるとしている。今回の変更申請では、積み立て期間を2013年3月31日までとし、当初予定より4年半短縮。積立金の総額は3,500億円となる。大規模改修の工期は2013年4月～2023年3月。鋼橋では床組接合部補強や支承部の取替え・補強により、橋桁の変状の発生を防止する工事を実施。コンクリート橋では鋼板による被覆を施し、コンクリートの中性を抑制する対策工事を行う。工事費の総額は7,308億円で、当初予定より3割程度抑えられる見込みだ」とされている。連綿と積み上げられてきた耐震化の効果は、例えば2009年の駿河湾地震などこれまでの中小規模の地震の中でも検証されてきたが、鉄道側の耐震補強だけでは対応しきれない周辺地域で起こる地盤工学的課題が鉄道に影響する可能性についても考えなければならない。一方で鉄道は路線全線の工事の中で、その地盤状況を連続的に調査しているため、これは鉄道のみならずむしろ周辺の諸施設の耐震性を評価するにも大いに参考になると考える。鉄道に限らず一般に、地震被害は地盤条件が悪く、常時から補修工事が継続的に行われている場所や、難工事であった場所に集中するように思われるからである。

2004年10月3日中越地震によって生じた地盤変形と鉄道トンネル被害

2004年10月3日中越地震では震央に近い上越新幹線浦佐駅・長岡駅間の滝谷トンネル北側坑口付近を走行中だった東京発新潟行き「とき325号」の7・6号車を除く計8両が脱線した。日本の新幹線の営業運転中の初めての脱線事故で、これは脱線を想定しての踏み込んだ対応の検討を鉄道関係機関に強く迫る事故でもあった。併せて、上越新幹線の震源近くの堀之内、魚沼、妙見、滝谷トンネルで被害が報告された。**JR 東日本の報告書[2]**の記述の一部を以下に引用する。

「地質上の問題がある箇所では大きな被害が発生：魚沼トンネルの無被害区間の地質は、クラックが少ない砂岩および砂質泥岩層であるのに対し、覆工崩落等の覆工被害区間および路盤隆起被害区間の地質は、泥岩層を主体とするものの、クラックが多い低強度の砂泥ラミナ層や細粒砂岩層を挟む互層構造となっており、無被害区間と明らかに異なった性状となっている。また、今

回の地質調査結果から、覆工崩落区間の被災形状がトンネルを斜めに横断する地層の走向・傾斜と一致しており、覆工被害区間ではこの層の中に明確なクラック帯が存在していることを確認できた。覆工被害区間では、このクラック帯が地震の影響を増幅し、大規模な覆工被害を生じさせたものと考えられる。

和南津トンネルの地質は砂岩が主体であり、特に覆工崩落箇所は、固結度の低い低強度の地山である。和南津トンネルより震央に近く、同様な構造でありながら被害がほとんど無かった中山トンネルは、地質はクラックの少ない泥岩であり、地山の圧縮強度は和南津トンネルに比べ桁違いに大きい。このことから、和南津トンネルにおける覆工被害原因は、トンネル周辺地山が不良であったことに起因していると考えられる。また、和南津トンネルの覆工崩落箇所は土被りが30m程度と小さく、トンネル被害はこの土被りの影響も考えられる。

妙見トンネルの大規模な圧ぎ発生区間の地質は、今回実施した地質調査が2箇所だけのボーリング調査であったためトンネル周辺の地山の実体が的確に捉えられず、地質による無被害区間との明確な差異は確認できなかった。しかし、被害箇所の上方では大規模な地滑りが地震時に発生していること、**被害区間の覆工に地震以前からクラックが存在していたことを考慮すると、被害箇所周辺の地質は無被害箇所と比べ相当緩い地山と想定される。**

リモートセンシングから得られる全体的な地形変動と被害箇所の関係

中越地震で発生した鉄道トンネル被害について参考までにリモートセンシングから得られる全体的な地形変動と被害箇所の関係について紹介しておく。なおこの結果は土木学会を中核機関とした振興調整費事業「活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案」(代表者：小長井)らの研究成果の一部である。

この事業の中で地震前後の航空レーザー計測(LiDAR)で得られる地震時の地盤のオイラー(Euler)変位から、土粒子の動きであるラグランジアン変位を分離抽出する方法が開発された[3], [4], [5], [6]。中越地震地震前(1975年)および地震後(2004年10月28日)のデジタル標高モデル(DEM)を用いて、土粒子そのものの変位であるLagrangian変位を抽出し、これを移動平均法によって空間的に緩やかに変動する地殻変動起因の変位と、浅層部の地すべりなどによる変位に分離した。次の2ページに地殻変動による推定変位の鉛直方向成分(図1)と水平方向成分(図2)を示している[7], [8]。

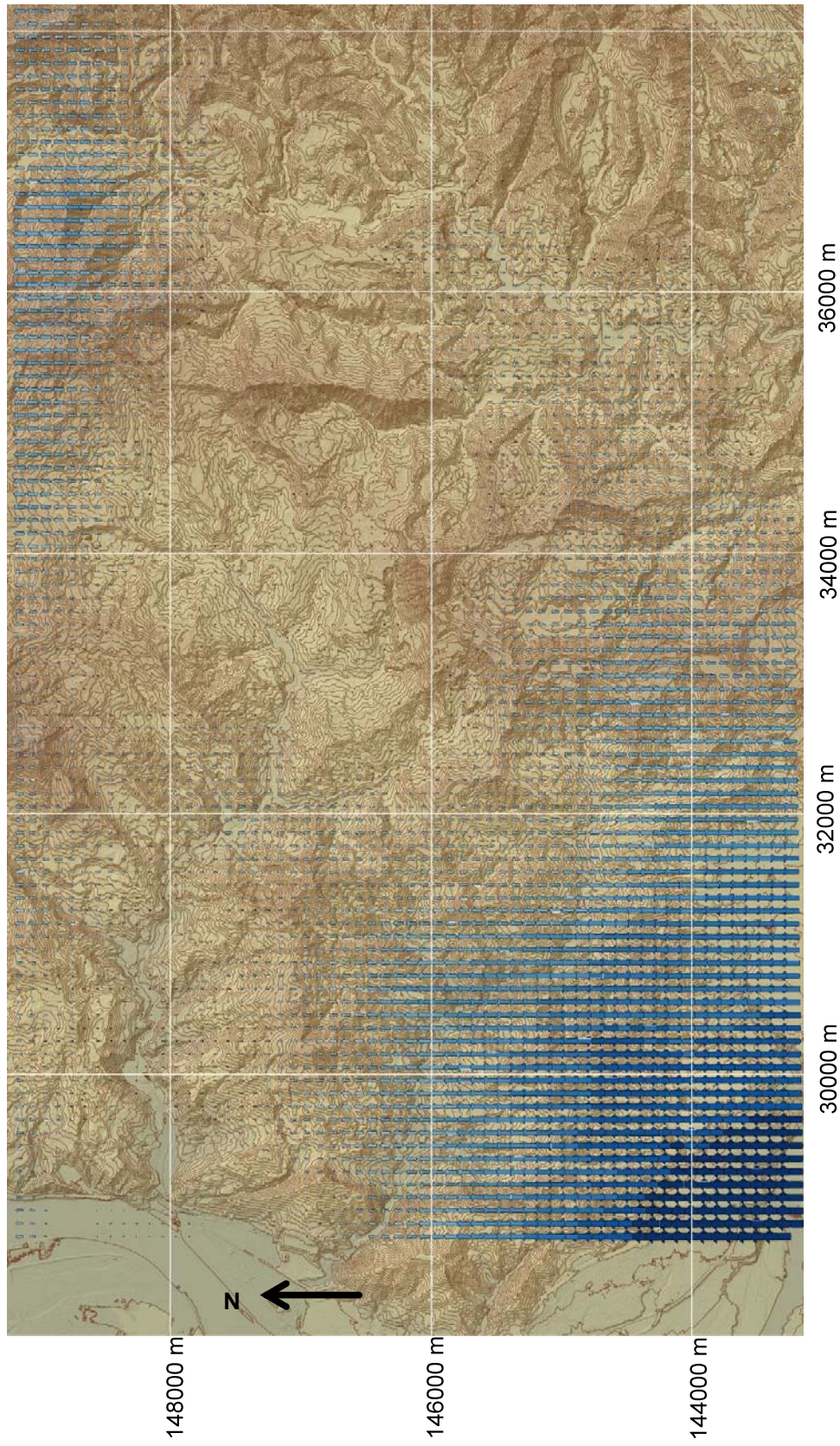


図1 地震前後のDEMから検出された地殻変動の鉛直方向成分 ↑ : 1.5m
Vertical components of tectonic displacements [5], [6]

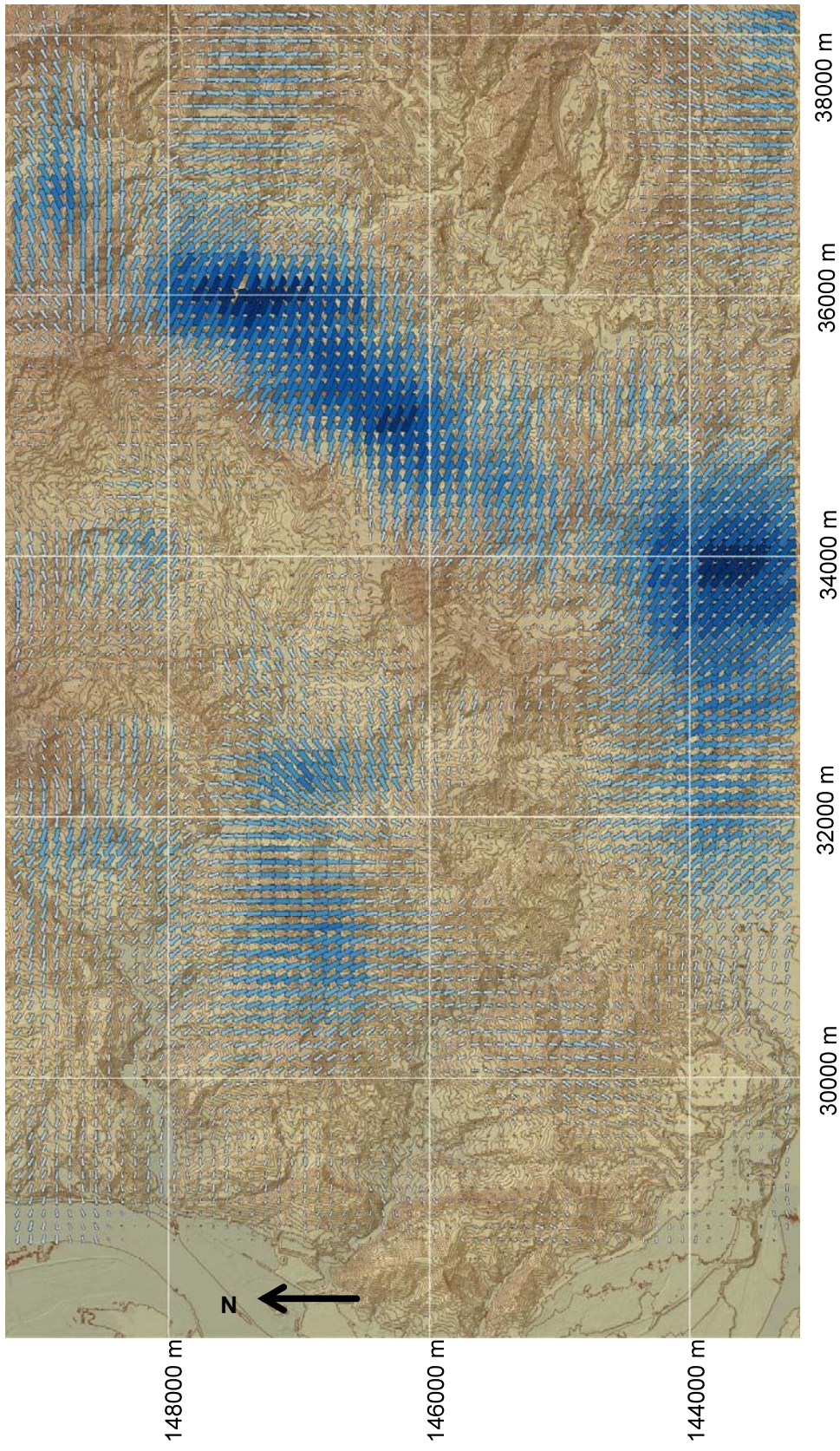


図2 地震前後のDEMから検出された地殻変動の水平方向成分
Lateral components of tectonic displacements [5], [6]

(日本平面直角座標系第VIII系, JGD2000, Japan Plane Rectangular CS VIII)

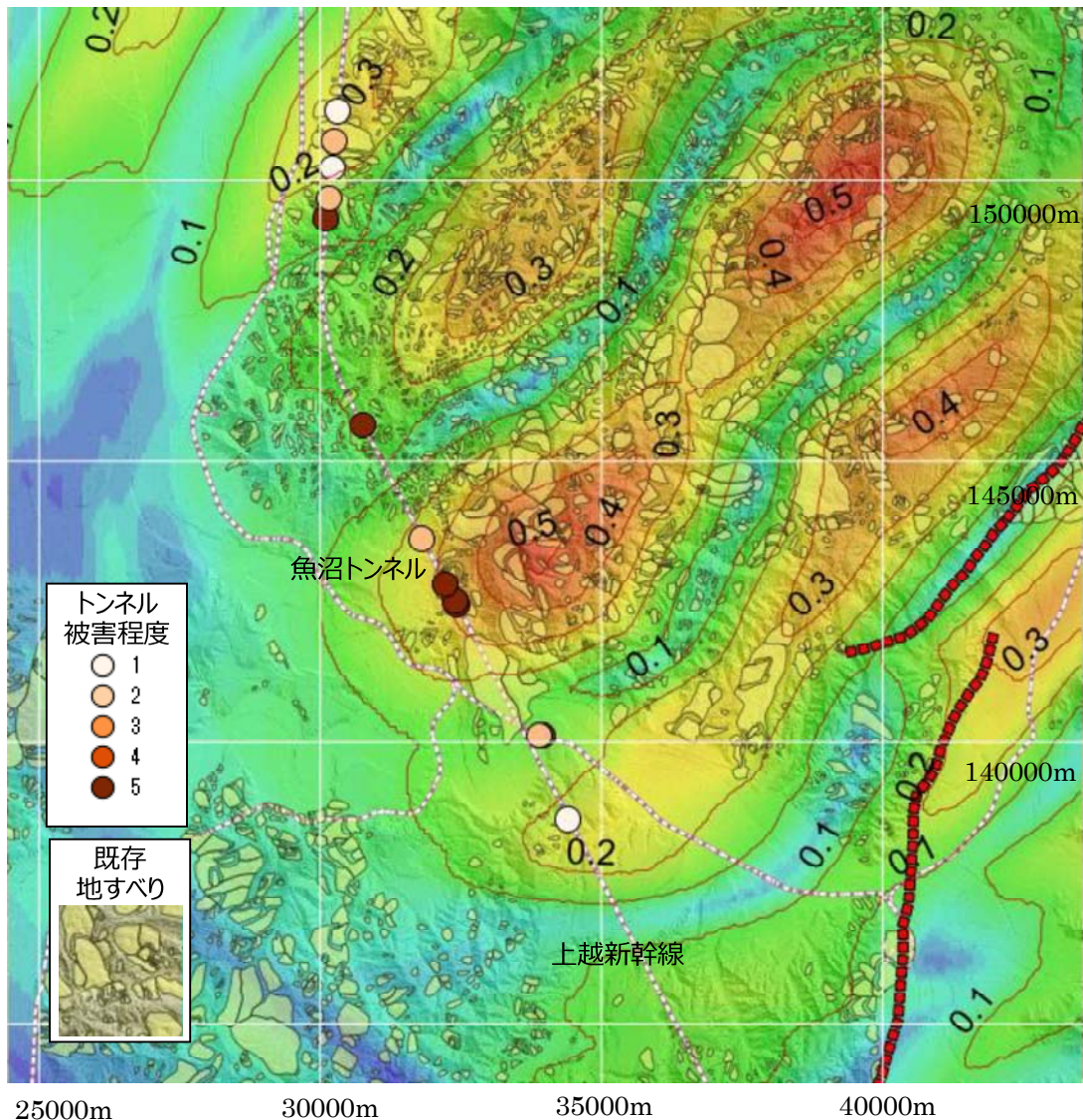


図3 中越の中山間地域での深さ75mでの偏差応力テンソルの2次不変量の平方根($\sqrt{J_2}$)の推定分布[7],[8]

さらに、抽出された変位から浅層の局所的な変位を除外できれば、地盤内部の応力状態をも推定することができるようになる[7],[8]。図3は2004年中越地震で被害を受けた山古志村を中心とする中山間地域の深さ75mでの偏差応力テンソルの2次不変量の平方根($\sqrt{J_2}$)の推定分布である。北東から南西に向かって併行して伸びる複数の大きな $\sqrt{J_2}$ の帯は、地震以前に防災科学技術研究所でまとめられた地すべり地形分布と良く符合する(図3)。これは2004年の地震のみならず、過去の地震でも同じ応力変化が繰り返し起こっていたことを示唆するものと考えられる。さらにここに養鯉池やため池などの人々の営みのしるしを重ねてみると、これらも同じく大きな $\sqrt{J_2}$ の帯に重なり、人の生活の場が長い時間をかけて形成された地形・地質の上に成り立っていることも見えてくる。

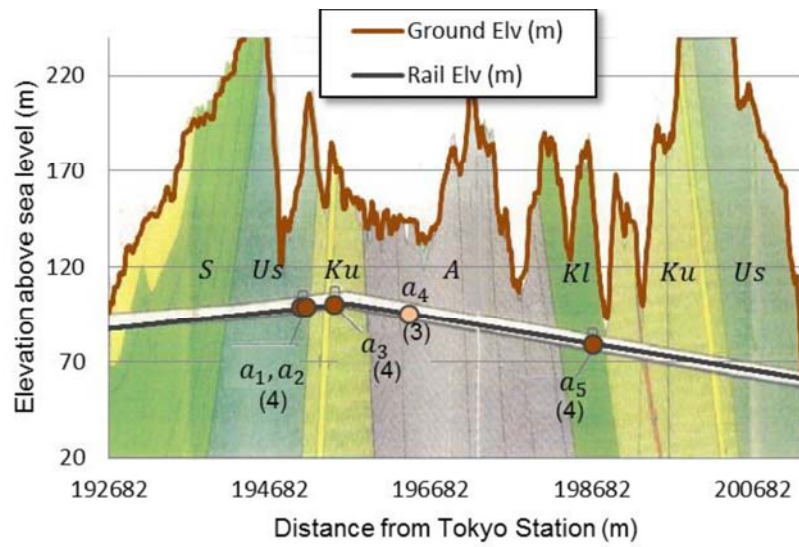


図4 魚沼トンネル被害箇所 [2]: 地質図凡例は後出の付表 1. 括弧内()の数字はJR東日本による被害程度分類 (1~5)



図5 魚沼トンネルの被害箇所 a_1 (37.2833°N , $138.86579^{\circ}\text{E}$), 東京側入口より 195,050m. トンネルを斜めに輪切りにするようなクラックパターンが現れている (写真: 小長井, Jhansson et al [9]より)

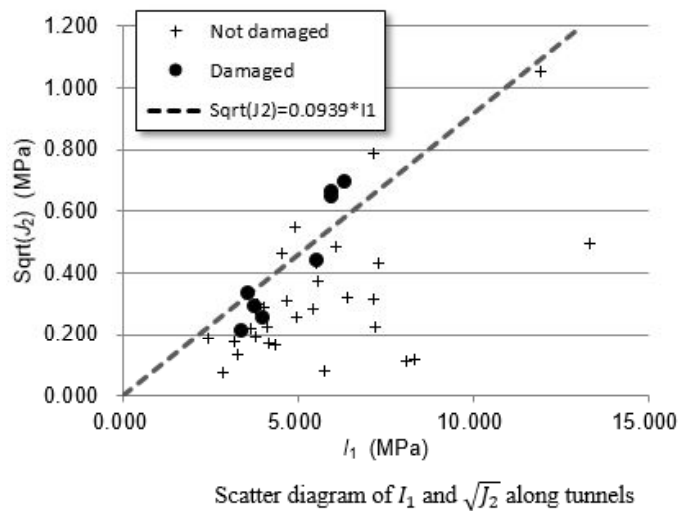


図 6 上越新幹線沿いの軟岩内部で推定された I_1 と $\sqrt{J_2}$ の散布図：魚沼，妙見，滝谷の連続する 3 つのトンネルに沿って 300m 間隔で I_1 と $\sqrt{J_2}$ を評価している。+ は無被害箇所，● は被害箇所である。

浅層の局所的地盤変形を除去した地殻変動による全体変形が得られれば，さらに想定された断層面上のすべり量を逆解析し，地下深くの応力変化を推定することが可能になる。ただしこれに加算すべき地震前の初期応力が分からないと，地盤，岩盤の破壊やそれに伴うトンネルなど地下構造物の被害を議論することはできない。中越については，この地域で地震前から掘削していた 2 つの NATM トンネルと全国の軟岩 NATM トンネルの内空変位記録を用いて地震発生前の軟岩中での側圧係数をほぼ 1 に等しいと推定した[8]。そしてこの仮定の下に，上越新幹線トンネル周辺地山の偏差応力テンソル 2 次不変量の平方根 ($\sqrt{J_2}$) および Cauchy 応力の 1 次不変量 I_1 を 300m 間隔で求めている (図 6)。トンネルの被害箇所はプロットされた点群の上を包絡する直線上に並び，トンネル周辺地山があたかも Drucker Prager の破壊基準に従うかのようである。この包絡線の勾配は 0.09 と通常の堆積軟岩の試験結果と比べると著しく小さいが，これは亀裂や弱層，トンネル内空の影響を含んだ巨視的な包絡線であるためと考えられる。

上記のように周辺の地盤・岩盤が変形する以上，これに追従して構造物も変形してしまう。したがって一旦路線が決まってしまうと，構造的な対応だけでこれを避けることは困難である。可撓性のジョイントの導入や，生じる変位を吸収するクリアランスの設定などの対応が全くないわけではないが，断層や弱層を含む岩盤のずれそのものを止めることはできない。だからこそ，運用上の対応が重要であり，その対応を計画するうえで，従来の様々な記録と併せ，様々な専門分野からの問題提起を子細に検討しておく必要がある。

以下は、専門書籍や鉄道の工事資料の中で記載されたものを参考までに、ほぼ原文のまま引用する。

由比トンネルについての問題提起

千木良雅弘「深層崩壊」 近未来社[10]から抜粋

静岡市の東部の浜石岳から薩埵峠に至る山稜には、南北に延びる多重山稜とそれらの間の線状凹地が発達している。これは、東西の幅 3km、南北の長さ 6km の範囲に認められる。この範囲の山頂の標高は 250m から 500m である。個々の線状凹地は南北に 1～2km の長さで、最大 60m の深さを有している。(図 7 中の黄色の破線)

— 途中省略 —

これらの多重山稜と線状凹地は、山稜頂部が陥没して形成されたものであることがわかる。つまり線状凹地の外側の急崖は重力性の正断層なのである。この正断層がもともとの断層を利用しているのか否かは今のところ分からない。また山頂が陥没するためには、山体が横方向に拡大することが必要であるが、それが発生している広がりや深さは今のところわからない。

—— 途中省略 ——

側方拡大に伴うとみられる亀裂の形成などは認められていないため、その動きは間欠的である可能性が高い。そして、当地域は、東海地震の想定震源域にあり、繰り返し大地震を経験してきた地域でもあることから、大地震の際に動きを生じてきた可能性がある。仮に拡大の底が新幹線の由比トンネルよりも下にあるとすると、予期されている東海、東南海地震の時に側方拡大が起き、由比トンネルが影響を受ける可能性もある。

由比トンネル施工時に実際に起こった事柄を東海道新幹線工事誌（静岡幹線工事局）[11]で確認しておく。

146k100m～147k150m 間は泥岩層（図 7 中泥岩層 1）が続き、途中凝灰岩が挟まれているが、全体的にもろく、泥岩は風化膨張、更には浸水による地盤支持力の低下など多くの支障をもたらした。導坑掘削に際しては、湧水は極めて少なく、比較的容易に進行したが、掘削後 1 か月～3 か月経過するに従い、盤ぶくれが生じ、支保工を補強して変状を防止する必要が生じてきた。特に 146k890m～147k120m 間は、盤ぶくれは 2 回、約 40cm 程を生じ、その都度盤下げを施工した。また 146k260m～560m 間は、37 年 6 月 15 日の異常出水（147k630m）により浸水し、泥岩は支持力を低下し、S、L 部分に変状をきたし、コンクリートは剥離状の変状を発生、これがため、既に施工済みの中央通路の両側に、インバートコンクリートを施工して進行を防ぐなどの方策を講じた。

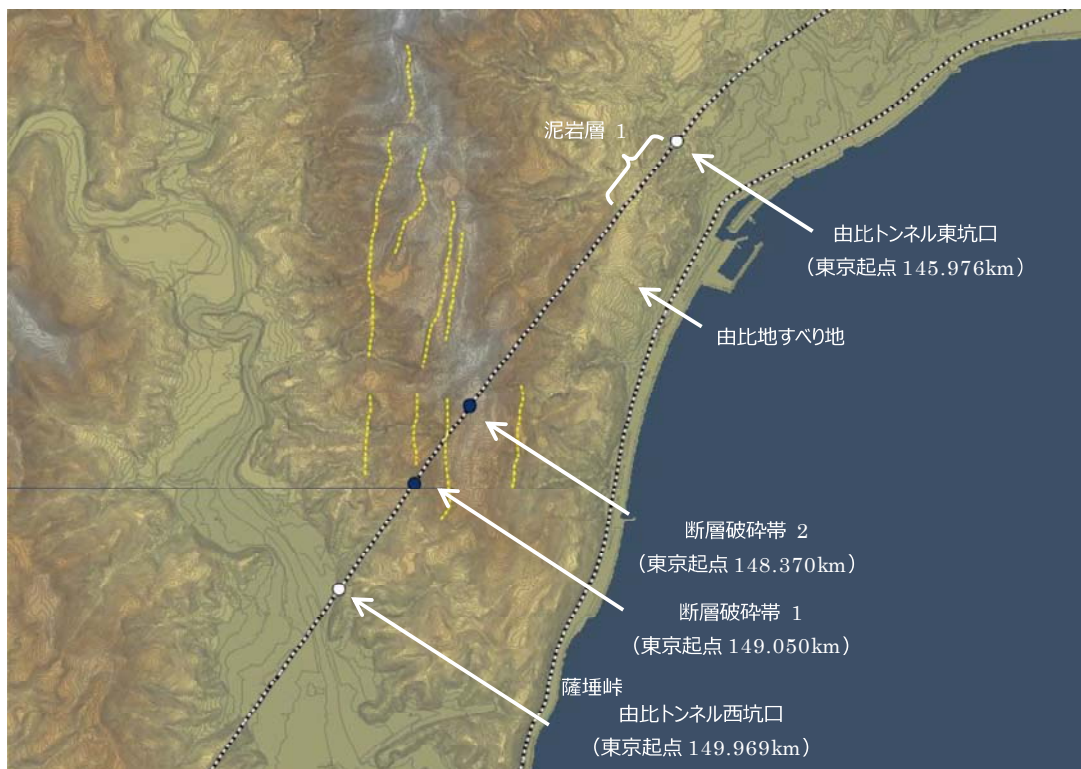


図 7 由比浜石岳付近の地形と由比トンネル：地形図は国土地理院基盤地図情報からの 5m DEM。線状凹地は文献[10]より。

西工区

149k050m 付近の断層破碎帯 (図 7 の断層破碎帯 1)

—— 前半省略 ——

海側導坑が 149k150m に至り、青みを帯びた細粒泥岩に粘土をかみ、掘削時は硬いが、数日後、重圧を伴って膨張し始め、山側導坑が併行すると一層激しくなり、導坑支保工の柱は根を押し出され、あるいは折られ、天端は垂れ始めたので増柱で補強しながら縫い返した。粘土化した表層 (30cm~60cm) の中は硬く縫い返しに発破を要した。

切羽は屈伸するにつれて次第に湧水を増したが、支保工を補強しながら進み、7月20日の朝方 148k997m 付近、海側導坑切羽のずり出し中、鏡面からの湧水が急に止まったので警戒していたところ、切羽から 70m に亘って、導坑天端の湧水が急激に増加し、随所で支保工が鳴り出したので全員退避した。夕方から坑口側より必死の補強作業を開始し、中坊主、胴ばり、やらずなどを入れ落盤を防止することができた。翌 21 日側壁コンクリートを早急に打設する方針を立てたが、林立する中坊主、胴ばりなどのため、コンクリートが運搬できず、コンクリートポンプ (6 インチ) を据え付けパイプ輸送をした。

このようにして打設した側壁コンクリートに担を盛り替え、8月3日に補強を完成した。このように破砕帯が長く続いたのはルートにやや併行する弓状の破砕帯に遭ったため、地表にも同方向に大きな谷が存在していた。

—— 以下省略 ——

148k370m 付近断層破砕帯 (図7の断層破砕帯2)

37年11月、148k500m地点を通過し、砂岩と泥岩の互層に入った。初めの約60m間は砂岩が多く、雨降り程度の湧水が続いたが、しだいに湧水が減少するとともに、泥岩の量を増してきたが、格別の困難もなく掘進した。

12月9日、山側導坑は148k375mに達し、全面泥岩となり、ぼそぼそとしたもろい切羽となった。翌10日、377mで支保工の根(A点)から湧水が始まり、次第に増加して2~3//secとなった。調査の結果同所が断層であることが判った。粘土の厚さは5~10cmであり、やや垂直で本線右35°の走向を示していた。

11日になり、両導坑とも背後の70mに水が廻り、支保工が鳴り出したので補強作業にかかった。12日湧水はA地点に集中し、6~8//secに増加、補強区間の水は激減したが、泥岩に水が廻り、流出土砂と盤ぶくれのため排水が悪くなり、ますます支保工は変形を増して、鋼製押木はねじれ、側圧によって導坑柱は折損したり足が押し出したりした。この補強には一週間を要し、以後側壁コンクリートの打設を急いだ。

山側切羽は148k340m付近で透水層に突入し、大量の湧水と流出土砂のため、鏡を抑えて掘り進んだ。

海側導坑は、A点の断層方向よりの湧水を予想し、導坑支保工を角型より馬蹄形(III型)に切り替えたところ、26日、373m(B点)の側壁より12//sec、天端より3//secの湧水に遭遇し、370mの大背に空洞(幅1.5m、高さ1.8m、長さ5.5m)が生じた。天端の湧水も次第に増加し、土砂を流失するので360mで鏡を押えて中止した。

かくして38年を迎え、山側切羽が295mに達した1月12日、20時ごろ、突然350m付近天端より、60~70//secの湧水が発生、次第に水勢を増して拡がり、13日2時ごろ最大となり、340m左側上部には特に集中して滝のような状態になった。このため、他の湧水は極端に減少したが、この箇所のみで、推定150//sec、坑口の量水堰は200//secを越えた。

シヨベル、ディーゼル機関車、鋼車6台は引き出す余裕がなく、流出土砂に埋没した。導坑上部にはときどき土砂崩壊の音が聞こえ、水みちはときどき変化した。導坑は下水があふれ坑口までの間は川のような有様であった。

—— 途中省略 ——

148k300m~200m間は、浜石岳(工事誌には浜名岳とあるがおそらく浜石岳の誤りであろう)底部の掘削で、もろく、地層は乱れ、切羽の湧水は1~7//secが続き、既設導坑内の湧水もなかなか涸れなかった。東口の掘削により、貫通点の地質は泥岩と確認されているので、導坑支保工

は III 型を使用し、地質の変化に備えた。

38 年 3 月初め、148k200m において、泥岩、砂岩の互層に突入したが、その後の 70m は湧水が僅かながらあり、泥岩は吸水膨張し、盤ぶくれも次々に起き、そのため 150H 型支保工は異常なまでに変形しながら辛うじて耐えたが、37 kg 古レール製の支保工は脚部より折損するものが多かった (図 8 参照)

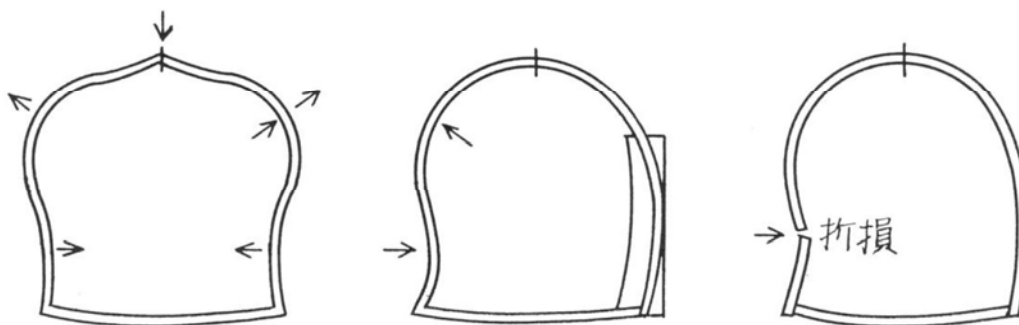


図 8 支保工の変状 (148k200m 付近) [11]

—— 以下省略 ——

補注

千木良教授の指摘と新幹線工事誌の比較を行ったのは、これをもって鉄道トンネルの安全性を議論するためではない。周辺岩盤が動いたらトンネルはそれに追随するしかない。むしろ南北に延びる多重山稜とそれらの間の線状凹地が東西の幅 3km、南北の長さ 6km の範囲にあって、これが山体の側方拡大によるものであるのなら、どの範囲が影響を受け、それを回避する輸送路が確保できるか、などのシナリオ構築に踏み出す必要性を感じるのである。鉄道の地震被害のうち、揺れによるものは阪神・淡路大震災や中越地震などの教訓を得て、高架橋、盛土、電架線柱などの耐震補強に大きく反映されてきた経緯を考えると、路線変更でもしない限り対策の困難な断層や山体の側方拡大、斜面崩壊など地盤の変位にどう対処するか工夫が求められるのである。変形の場合はまた人々の日常の営みも支えているのである。

その他の困難であった施工箇所例

(同じく、静岡幹線工事局編 東海道新幹線工事誌[11]より抜粋)

熱海路盤

この工事には第 1、第 2 熱海隧道と、熱海停車場とが含まれている。**第 1 熱海隧道の切掘り掘削中、地上における八丁園ホテルの変状が起こり、その補償問題について、国鉄側では隧道掘削の影響が地上建造物ならびに地盤に如何に現れるか、いろいろな角度から詳しい調査を行った。**またその西坑口付近の地上建物に影響ないようにと、水平ボーリング工法という特殊工法をとった所である。**熱海駅の高架橋では基礎地盤が悪く、ローム質土層中に大玉石がたくさん混じっ**

ているので基礎杭の長さが定まらず苦心した所である。また地形的に狭い箇所、山側ホーム築造のため山の斜面を根掘りを含めて13mも切り取り、傾斜4分の土留壁を上部より下に向かって2.5mの高さごとにコンクリート仮土留をもって押えながら切下り、最後に一体とした本土留を、仮土留に沿わせて、高さ13.0mの鉄筋コンクリート土留壁を完成させたのである。

地質・熱海地区（泉越隧道記述の一部）

崩壊崩土より湯河原火山の凝灰岩、安山岩層に入り、湯ヶ島層の上に稲村安山岩がある。断層が発達し温泉作用による変質作用を受けて風化しやすく、地質不良である。伊豆山より丹那隧道東口までは相の原安山岩溶岩で温泉による変質作用を受けている。

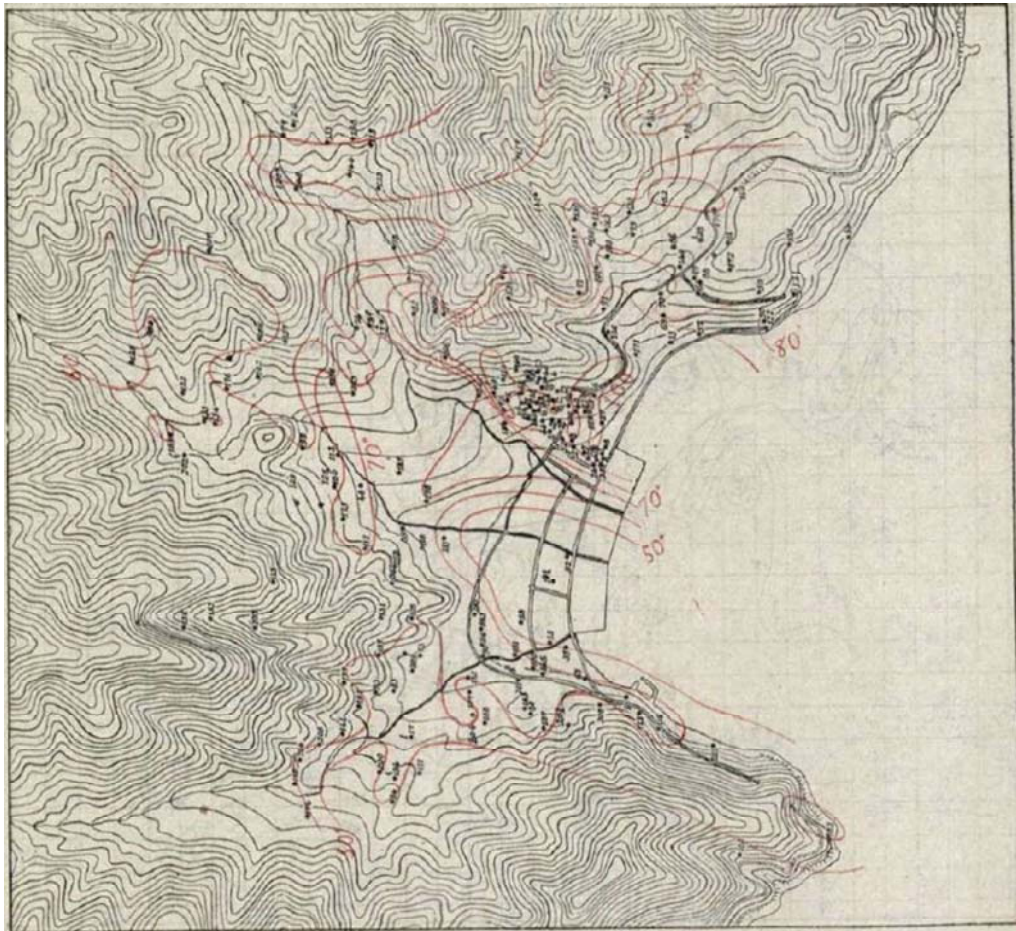


図9 熱海温泉源地分布図および等温曲線[12]

補注

新幹線工事誌には八丁園に加えて、ミカン畑の地表や他の建物の変状の状態が記載されているが、トンネル内部の異常は認められなかったようである。たとえば、「9月14日半断面掘削切羽が94k880m付近、アーチ覆工が94k870m付近まで進行中、94k770m付近地表の住友生命KKの寮から、家屋の所々に亀裂が入り、柱が曲がったとの連絡があり、工事区員と建設係職員が調査にいったところ、柱も曲がり壁や浴場の一部に亀裂が入っていた。この付近は4月26日にアーチ覆工が完了しているところであった。なおこの寮と前記八丁園ホテルは多額な補償の対象となった所である」とある。因果関係はともかく、熱変質を受けた亀裂含みの安山岩が続くこの地域で、地表の変状が起こされるような事象が発生していたことは留意されなければならないであろう。もたせ式擁壁のある熱海駅もこのトンネルに隣接しているのである。

土石流の課題：

箱根火山の外輪山外側斜面は1923年関東地震の折に数カ所で崩壊し山津波を起こした。多くの犠牲者を出した地域は熱海側から、根府川（2つの土砂崩壊）、そして米神を含む。



図 10. 鉄道盛土でせき止められた米神沢の土石流（鉄道省， 国有鉄道震災記）：下の写真は異なる角度で米神沢を俯瞰した様子。鉄道盛土の山側に土石がせき止められた。

Debris mass stopped behind railway embankment at Komekami-sawa

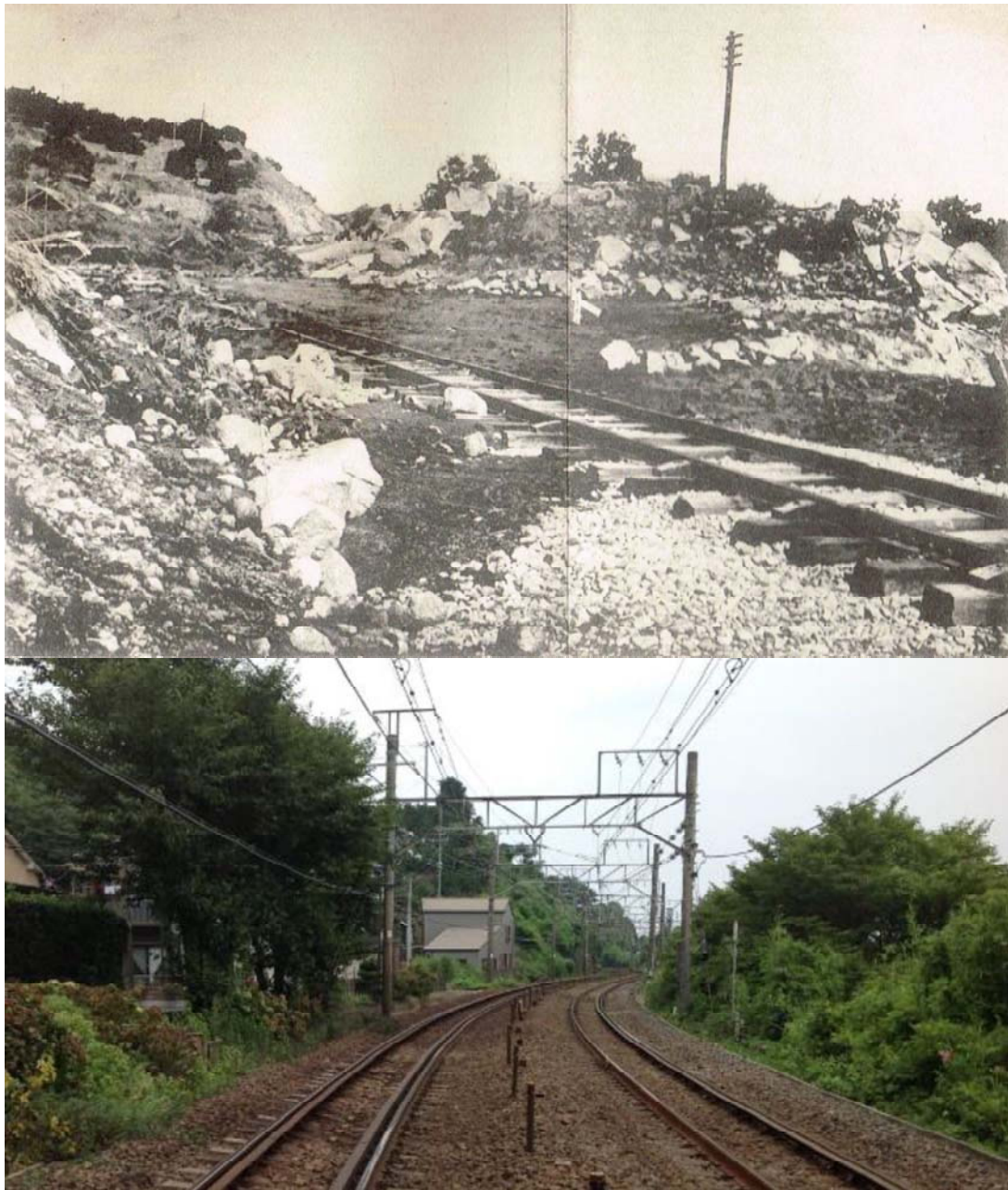
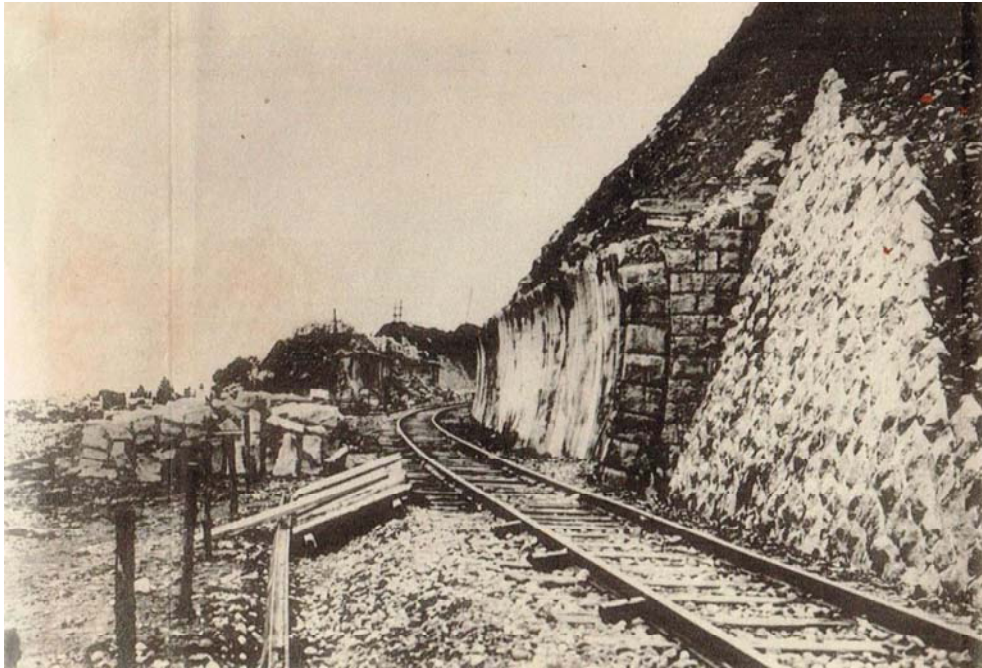


図 11. 米神駅付近（鉄道省，国有鉄道震災記）および現在の米神踏切付近（撮影 小長井）
Looking north from Komekami railroad crossing



地震後の根ノ上トンネル：側壁だけが残る。(鉄道省， 国有鉄道震災記)

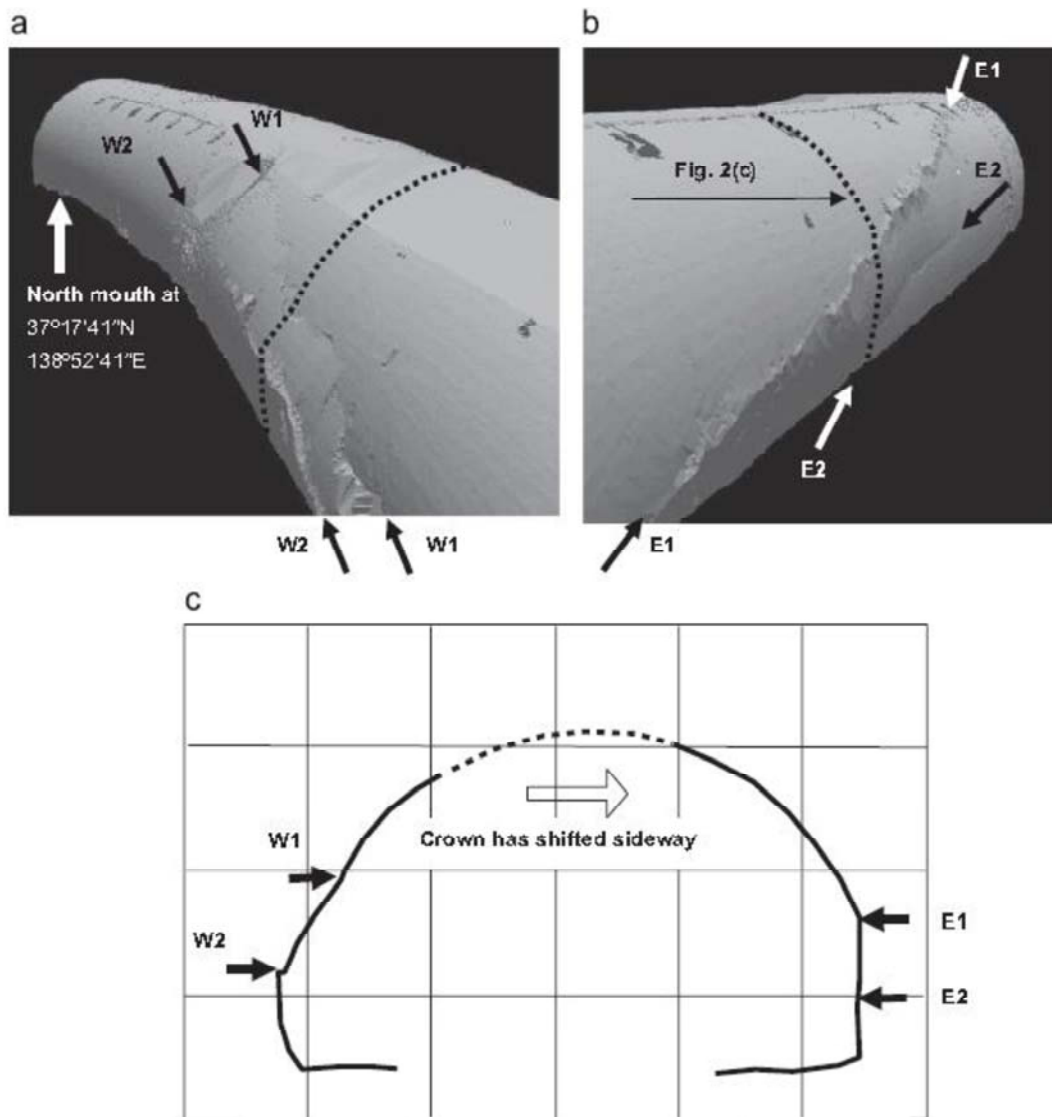


現在の根ノ上トンネル跡 (擁壁に転用されている。撮影 小長井)

<http://bbs.yahoo.co.jp/bazu55555/19988257.html>

図 12 根ノ上トンネル跡

Nenokami Tunnel: immediately after the quake (above) and current view (below)



参考：図 13 木沢トンネル：上記の根ノ上トンネル同様，伏在する弱層面から上部の土塊の動きで横断方向にせん断された道路トンネルである[5]．横断面をせん断していて，この地すべり土塊が雪解け期に再び滑るかどうか大きな懸念事項になった．このためトンネル横に掘り進めた 2 つのボーリング孔のうちの一つにパッカーを挿入し，異なる深さで順次限界水圧を求めていった．長期観測の結果，孔内水位の季節変動が，せん断面付近の限界水圧に達しないことが確認されようやく復旧工事を開始することができた．

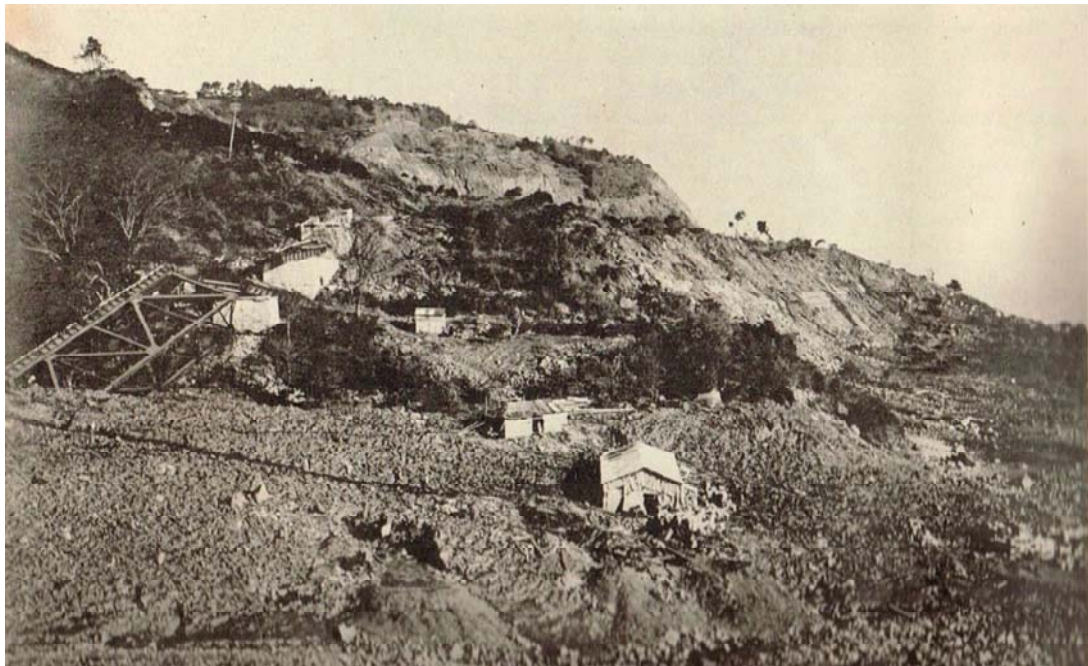
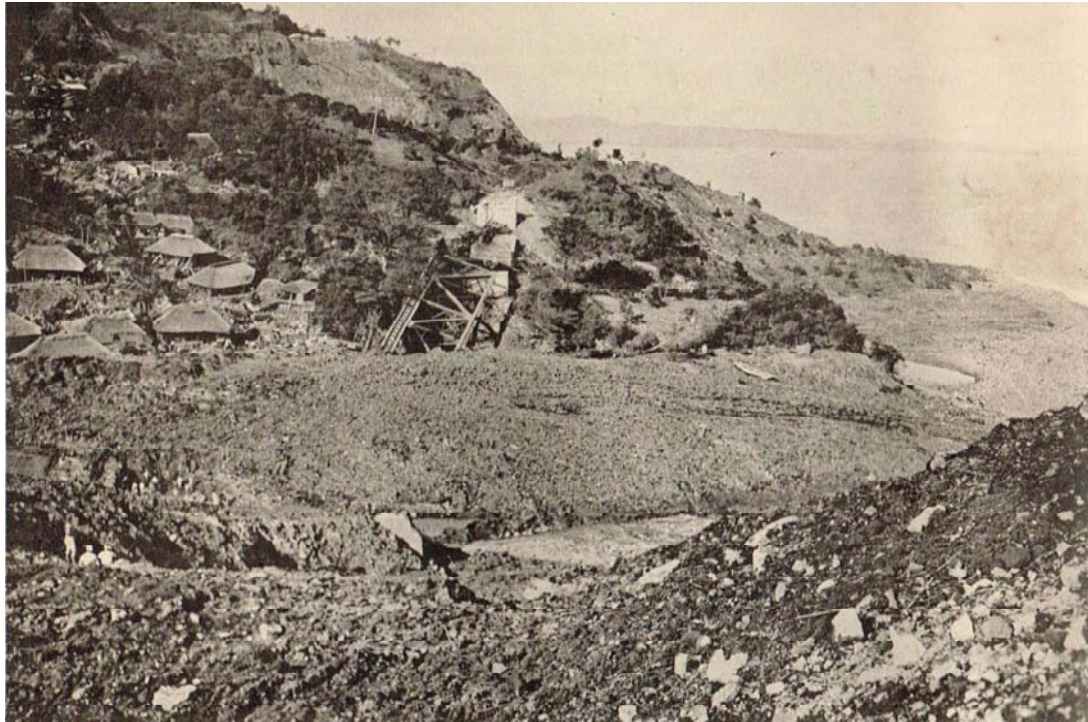


図 14 押し流された白糸川橋梁 (鉄道省, 国有鉄道震災記)
Debris mass and Shiraitogawa railway bridge



国有鐵道 熱海線根府川眞鶴間國府津起點 7 哩 76 鎖 50 節寒ノ目山隧道國府津方坑門の崩壞列車は上り旅客第 160 列車なり

図 15 賽ノ目山 (寒ノ目山) トンネル北坑口での 160 列車
Sainomeyama Tunnel

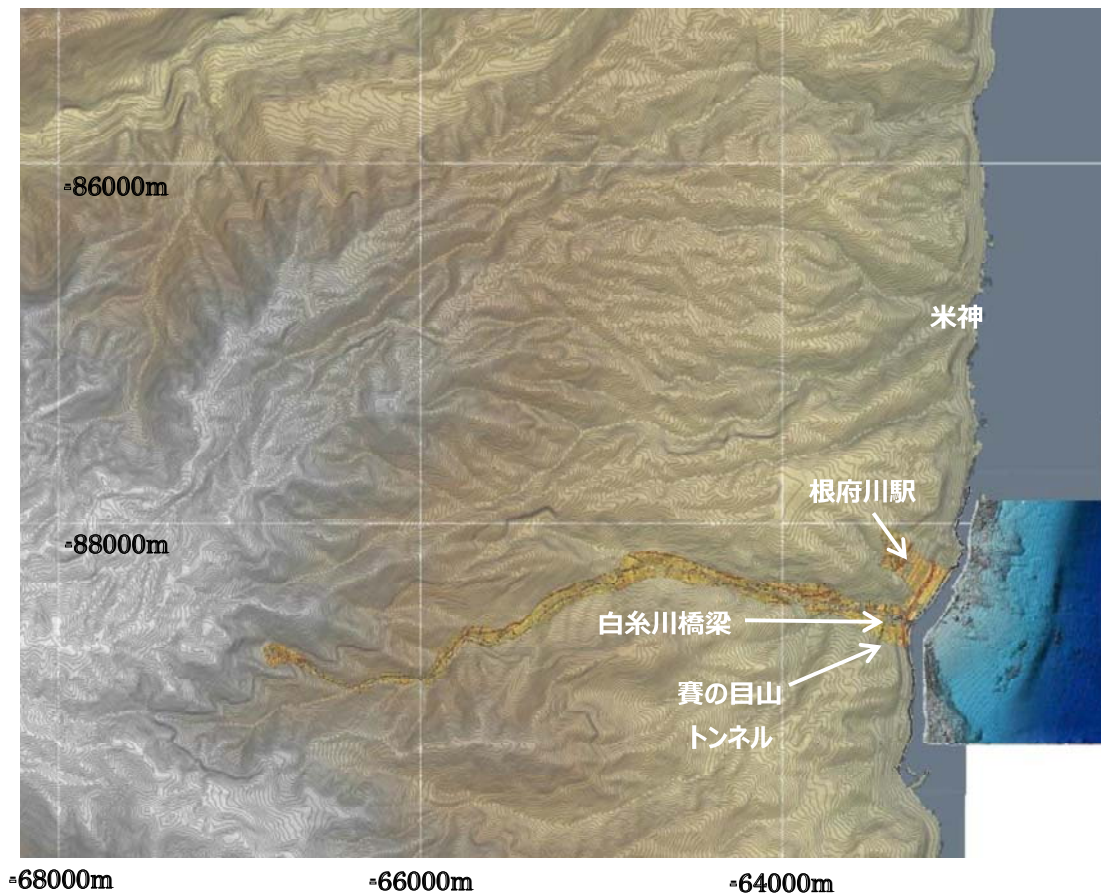


図 16 内田一正氏による白糸川の土石流と根府川駅の斜面崩壊の被害状況

地震当時10歳だった地元の内田一正氏が白糸川の土石流と根府川駅の斜面崩壊の被害状況を関東地震から52年後の1975年8月に当時の状況を思い出して和紙に克明に描いたものが神奈川公文書館に残されている。これを国土地理院基盤地図の5mDEMに重ねてみたものが図16である。和紙に書いたものなのでひずみが大きいが、当時の道路なども克明に描かれていて geo-referencing を行うことで重ねることができたものである。海底の地形図は東海大学海洋資源部の坂本、根元[14]による。












参考文献

- [1] JR東海が東海道新幹線土木構造物の大規模改修工事を5年前倒し、4月に着工、マイナビニュース, 2013/01/30, <http://news.mynavi.jp/news/2013/01/30/261/>
- [2] 新潟県中越地震鉄道トンネル被害原因調査等検討会報告書, 東日本旅客鉄道株式会社, 2006.
- [3] Konagai K., Kazmi Z.A. and Zao Y. (2012). Extracting Earthquake Induced Coherent Soil Mass Movements, Earthquake Research and Analysis, Ch. 14 in *New Frontiers in Seismology*, DOI: 10.5772/30822, 361-379.
- [4] Konagai, K (2011) Earthquake-induced soil displacements and their impact on rehabilitations, *Proc., Japan Academy*, 69(5) (Ser.B), 433-449.
- [5] Konagai K., Takatsu, S, Kanai, T, Fujita, T, Ikeda T. and Jhansson, J (2009). Kizawa tunnel cracked on 23 October 2004 Mid-Niigata earthquake: An example of earthquake-induced damage to tunnels in active-folding zones, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 394-403, 2009.
- [6] Konagai K., Fujita, T, Ikeda T. and Takatsu, S. (2009). Tectonic deformation buildup in folded mountain terrains in the October 23, 2004, Mid-Niigata earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 261-267.
- [7] Kazmi Z. A., Konagai K., Sekiguchi H. and Fujita T. (2013). Extracting earthquake induced Lagrangian ground displacements and their implication for source inversion analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48, 198-208.
- [8] Kazmi Z. A. and Konagai K. (2013). Evaluation of seismic stress for Mid-Niigata Prefecture Earthquake and Kashmir Earthquake, *Bull., Earthquake Resistant Structure Research Center*, IIS, Univ. of Tokyo, 46,
- [9] Jhansson J and Konagai K (2006). Fault induced permanent ground deformations? an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 26, 45-53.
- [10] 千木良雅弘 (2013). 深層崩壊 — どこが崩れるのか —, 近未来社
- [11] 静岡幹線工事局 (1965). 東海道新幹線工事誌

- [12] 大塚彌之助(1944). 静岡県熱海温泉と地質構造との関係一考察, 東京帝国大学地震研究所彙報 21(3/ 4), 414-434.
- [13] 鉄道省 (1927), 国有鉄道震災記,
- [14] 坂本 泉, 根元 謙次 (2008). 浅海域における精密地形測量・高密度地層探査及び地質試料分析 ～人間社会と自然環境の共存をめざして～, 東海大学環境エネルギー分野.
http://www.u-tokai.ac.jp/about/collaboration/seeds/energy/09energy_013.html

付表 1. 地質図凡例

Table 1 Geology legend for Figures 2, 3 and 5: Contains the Japan Geological Survey (JGS) geological map symbology and stratigraphic nomenclature [12]. Color identification is based on Reference [7].

	<i>U₃</i>	Pleistocene	Marine silt, sand and gravel
	<i>U_{2b}</i>	Pleistocene	Mudstone inter-bedded with sand
	<i>U_{2a}</i>	Pleistocene	Silt, sand and gravel
	<i>U₁</i>	Pliocene	Gravel, silt and sand
	<i>W</i>	Pliocene	Sandstone
	<i>S</i>	Pliocene	Sandy mudstone, and thinly inter-bedded sandy mudstone
	<i>U_s</i>	Pliocene	Massive mudstone intercalating sandstone in part
	<i>K_{u2}</i>	Pliocene	Sandy mudstone inter-bedded with sandstone
	<i>K_{u1}</i>	Pliocene	Mudstone inter-bedded with sandstone
	<i>K_l</i>	Pliocene	Sandstone inter-bedded with mudstone
	<i>A</i>	Pliocene	Dark gray massive mudstone