

新潟県中越地震における各種構造物の被害と地盤の関係

那須 誠

フェロー会員 博士(工学) 前橋工科大学 工学部建設工学科(〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

新潟県中越地震によって盛土や建物、護岸、堰、トンネル、橋梁など各種の構造物が多数の被害を受けた。今回、それらの構造物毎に新潟県と群馬県における代表的な被害を取り上げて地盤に着目して調べた。その結果、今回の地震被害も過去の地震被害と同様に地盤の不連続点において多く発生していること、即ち地盤状態が大きく関係していることが分かったので、その結果と推定した被害機構を報告する。

キーワード:2004年新潟県中越地震, 被害, 盛土, 建物, 護岸, 堰, トンネル, 橋梁, 地盤の不連続点, 不同変位, 偏土圧

1. まえがき

これまでに各種構造物の地震被害が地盤条件の変化点で多く生じていることを明らかにするとともに、地震時の地盤の不同変位やそれに伴う急激で大きい偏土圧等がその原因として挙げられることを述べてきた¹⁾。2004年10月23日に発生した新潟県中越地震(M6.8)によって建物や盛土、橋梁、護岸、堰、トンネル等の各種構造物が地震被害を受けた。

今回、それらの代表的な被害を地盤に着目して調べたところ、過去の被害と同様に地盤条件の変化点等で多くみられたので、その地震被害と他の地震による類似の被害について以下に報告する。

2. 被害構造物と地盤の関係

今回の調査場所は関越自動車道路と旧山古志村等が中心である。その結果、道路では谷を渡る盛土や橋梁で、建物では斜面上の切土と盛土の境界の地盤等で被害が多くみられ、良好地盤や一様地盤では被害が殆どみられなかった。

(1) 道路等の被害と地盤の関係

関越自動車道においては、特に堀之内地区での被害が多く、沢を渡る盛土あるいは片切片盛土の沈下陥没、橋台裏の盛土の沈下等が多くみられる。いずれも過去に被害が多い地形や地盤上の盛土や構造物に接する盛土等¹⁾である。また、跨道橋の橋脚の被害(亀

裂等)は、左右の橋脚が地山と盛土等に設置されているところで多くみられる。

信濃川沿いの河岸段丘斜面に並列につくられて崩壊した国道17号線と上越線(221K000M付近)の両盛土²⁾は、斜面内の沢状地形の傾斜地盤にある。このような沢地形を横断する盛土の被害は過去の地震でも多く認められている³⁾。

(2) 旧山古志村内の被害と地盤の関係

建物被害は斜面上の盛土につくられた建物、切土と盛土の境界部につくられた建物等で多くみられる(例えば、-1)。中の家具等が散乱状態になった村役場の隣の村営体育館の地盤に亀裂や建物と地盤間に分離がみられ、建物裏側の地盤が崩落して基礎が露出したところがあり(-2 参照)、これらの建物は斜面上の切土と盛土からなる地盤につくられたことが推定される。-3 の中学校建物は中央部分が沈下しているが、地盤が建物中央部で窪み建物はその凹地形を横断するようにつくられており、窪んだ箇所の地盤は盛土地盤でないかと推定される。また、そのゲラント⁴⁾に亀裂が発生しているが、周囲の地形から切土と盛土の境界部に生じていることが推定される。いずれも地盤条件の変化点と言えるところであり、異種支持地盤状態の建物が被害を受けている。しかるに相当古い木造建物でも地山につくられた建物には、例えば-4 に示すように被害が認められないことが多い。

同村内の道路被害箇所では、-5 のように沢を渡る橋梁の前後で盛土が陥没しており、その他に道路の沈下と陥没、亀裂等が沢上の盛土や片切片盛土等で多くみられる。



図-1 山古志村の建物被害と地盤
(その1)



図-2 山古志村の建物被害と地盤
(その2)



図-3 山古志村の建物被害と地盤
(その3)



図-4 山古志村の無被害建物と地盤
(その4)

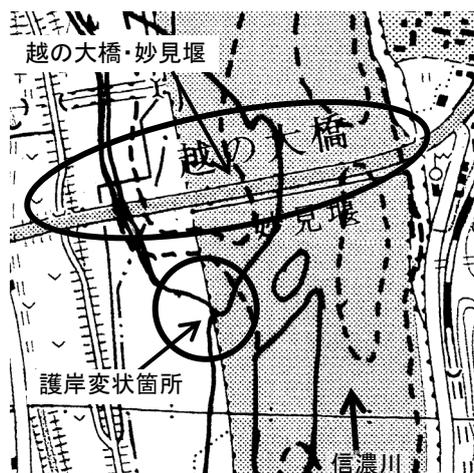


図-5 山古志村の道路被害と地盤
(その5)



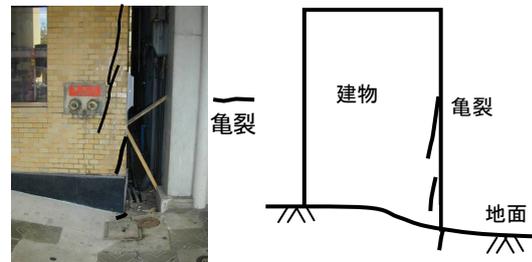
(2万5千分1地形図: 栃尾)(大正14年鉄道補入図に、平成13年修正図の建物と敷地境界を追加)

図-6 長岡工専付近の地形図



(2万5千分1地形図: 片貝)H16年集成測量図に、S28資料修正図(破線)とT3製版とM44測図(太実線)による川岸と砂州を追加

図-9 越の大橋付近地形図



(a) 建物側壁の亀裂と地盤の変状写真

(b) 同左の模式図

図-7 長岡駅付近の建物の変状と地盤



図-8 越の大橋付近の低水敷護岸の変状

(3) 長岡市内の建物の被害と地盤の関係

長岡工業高等専門学校で被害を受けた建物(図-6の3号館等)は丘陵上にあり,旧版地形図⁴⁾を参照すると図-6に示すように建築前に存在した沢を埋め立てて,その旧沢部に跨がるように建てられていることが分かる。即ち,この建物は異種支持地盤状態で被害を受けている。長岡駅前の軽微な被害を受けたホテルのコンクリート造り建物周辺の地盤に沈下,亀裂等がみられたが(図-7参照),今回の地震も含めていつの地震でも建物の被害箇所ではこのように地盤に何らかの変状が発生していることが多い。しかも,地盤が一樣でないところでの建物の変状が多い。

(4) 越の大橋(妙見堰)やその付近の被害と地盤の関係

越の大橋(妙見堰)の被害箇所を旧版地形図⁴⁾で調べると,図-8に示すようにこの橋は砂州とそうでない地盤に跨ってつくられている。このような地盤では過去の地震でも被害がみられる⁵⁾。越の大橋の上流側で低水敷護岸が図-9に示すように変状しており,その低水敷護岸の位置を旧版地形図で調べると図-8に示すように,砂州に接する旧河道締切り部でその変状が発生しており,この場所は過去の地震でも被害が多くみられる地盤状態⁶⁾と同じである。

(5) 群馬県内における被害と地盤の関係

2004年新潟県中越地震(M6.8)では群馬県でも多くの被害が発生した。その被害のほとんどが屋根瓦の落下および壁面の亀裂等である⁷⁾。今回はその中でも田口町と三原田団地の被害を調べるとともに,比較のために1923年関東地震(M7.9)による前橋市内の被害等を調べ,地盤と建物被害の関係を明らかにした。

a) 田口町における被害

前橋市田口町は前橋市の北側に位置し,今回の地震によって約14件の被害が報告されており,被害の多くは屋根瓦の落下である⁷⁾。今回調べた建物は約30年前に建てられ,図-10と図-11に示すように,建物西側が盛土で東側が地山である。被害としては西側の屋根瓦が落下し,屋根が少し沈下したような感じも見られた。また,盛土と切土の境界部で建物の基礎に亀裂が生じ,建物東側で基礎と地盤の間に隙間が生じていた。それらは地盤条件の変化点で生じた地震時の不同沈下や不同水平変位が原因と考えられる。即ち,地震で盛土が西側へ動き,その反作用で建物が東側へ動き,さらにその反作用で瓦が西側へ落下したことが推察される。

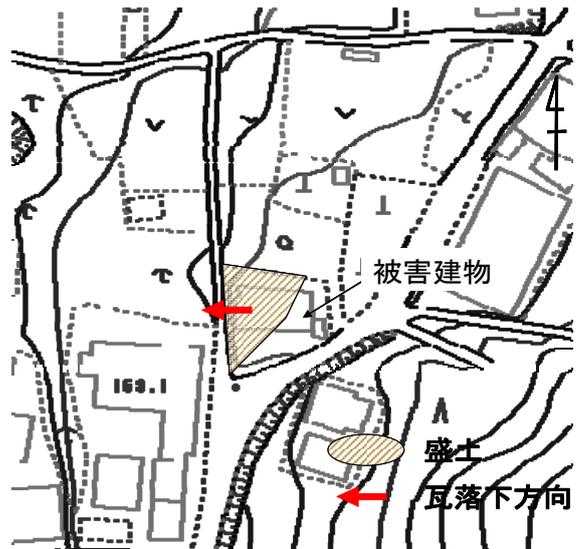


図-10 被害状況と地形の関係(文献8)に追加

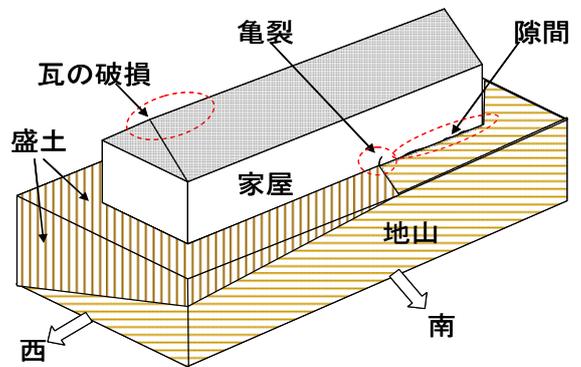


図-11 被害状況と地盤の関係図(模式図)

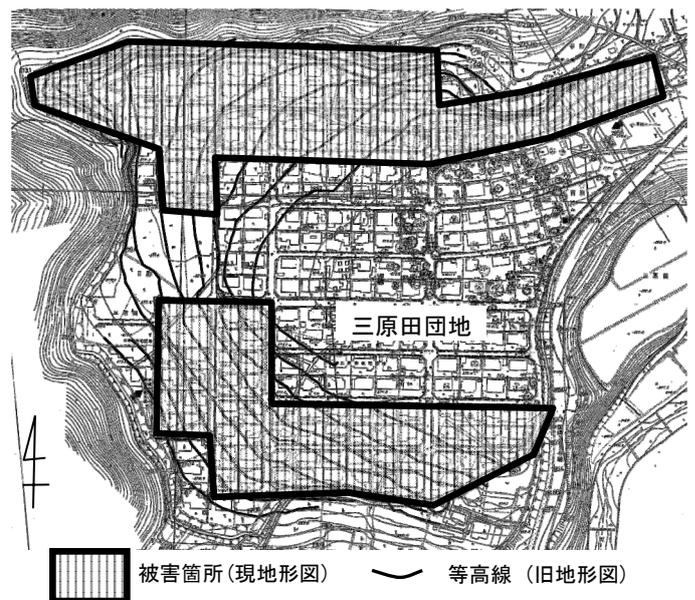


図-12 三原田団地の位置地形図(文献9,10)を集成して作成)

b) 三原田団地

三原田団地は利根川沿いにあり、赤城村西部の赤城山麓の丘陵地に位置しており、1975 年ごろに造成されはじめ、団地全体で約 300 棟の建物が立地している。今回の新潟県中越地震では震源からの距離が約 100km と遠いにもかかわらず、団地全体の約 3 割の建物で、棟瓦の落下や壁面の亀裂による被害が発生した。その被害は図-12 に示すように北側、西側および南側に集中し、中央部および東側ではほとんど発生していない。団地の北側の端および西側の端は崖地形になっている。図-12 の造成前の旧地形図⁹⁾と現在の地形図¹⁰⁾の地盤面の標高の等高線を見ると、被害のあった場所では中央部よりも等高線が比較的密な状態であり、また現在の地形図でも傾斜が中央部に比べて勾配が少し急である。これらのことから、造成前には傾斜のゆるやかな中央部に比べて傾斜のきつい場所である北側や西側および南側の盛土された場所で、地震の際に地盤の不同変位(沈下、水平変位)などで瓦の落下や、壁面の亀裂などの被害が集中したのではないかと考えられる。

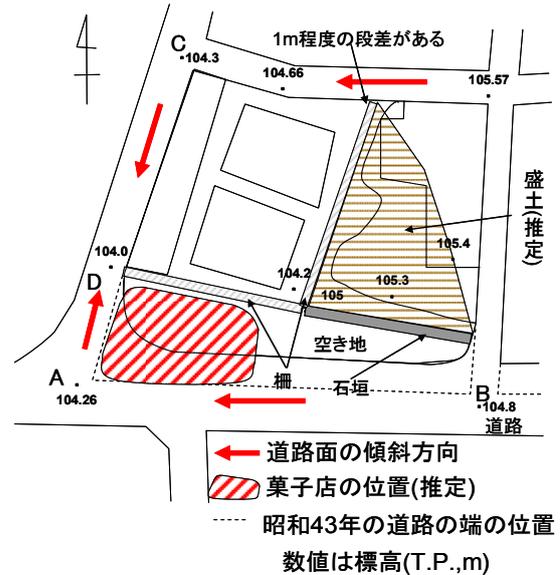


図-13 紅雲町被害地地形図(文献 8)に追加

(6) 群馬県内等における類似の被害例と地盤の関係

a) 紅雲町前田菓子店の煙突崩壊(1923 年関東地震)

ここでは 1923 年の関東地震での前橋市内で唯一の顕著な被害について述べる。前橋市で震度 4 を記録した。前橋市内では唯一、紅雲町の前田菓子店の煙突が崩壊するという被害が報告されている^{11),12)}。図-13 に示すように、その被害があったと思われる場所¹³⁾は、現在は道路の拡張によって道路および空き地になっている。道路は B 地点から D 地点が約 12/1000, C 地点から D 地点が約 11/1000 で比較的急勾配で傾斜し、また A 地点から D 地点が 9/1000 で傾斜しており、D 地点は谷底のような地形になっていることが分る。菓子店があったと思われる空き地も D 地点に向かって傾斜しており、菓子店は比較的急な勾配の傾斜地盤上の盛土に立地されていたと考えられ、関東地震によって平坦ではなく比較的急勾配の地盤上の盛土に不等沈下や不同水平変位などが発生して、煙突が倒れたのではないかと考えられる。

b) 玄界島の被害(2005 年福岡県西方沖地震)

前述の田口町の被害に類似した例として、2005 年に発生した福岡県西方沖地震による玄界島の被害がある¹⁴⁾。玄界島ではその南側が緩斜面で北側が急斜面になっており、緩斜面側に建物が集中している。ここでは図-14(a)に示すように、土留壁があり盛土が崩れていない場合には斜面下方向に建物が倒れたり傾いたりしているが、図-14(b)に示すように土留壁

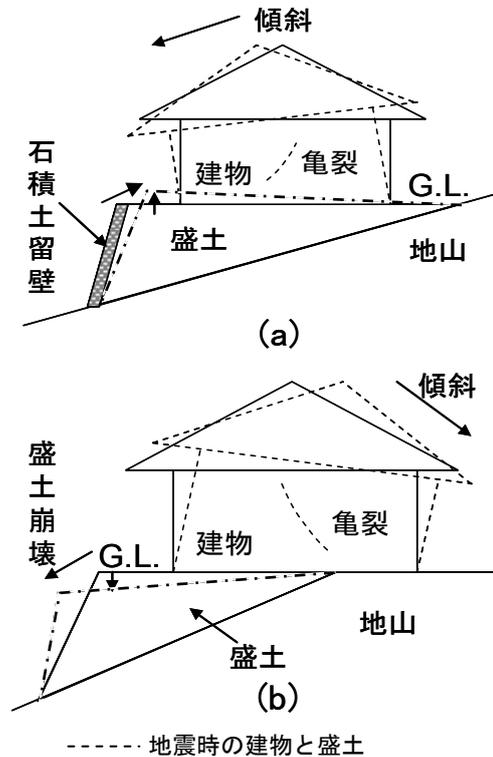


図-14 玄界島の建物被害とその発生機構推定図

がなく盛土が崩れている場合には土留壁がある場合と反対方向に建物が崩れている例が多く見られる。これらの被害は図-14 に示すように盛土等が変形、即ち盛土等の地震時の不同沈下や不同水平変位を起こして生じたことが考えられる。

c) 高町団地と鶴ヶ丘団地(2004 年新潟県中越地震)

長岡市の高町団地では団地外周部の盛土地盤や盛

土と切土の境界上でクラックや斜面の崩壊などが発生した。また、鶴ヶ丘団地では盛土が地震によって北側の池に向かって大移動し、盛土切土地盤の境界上の建物に被害が生じた^{15),16)}。これらは、盛土地盤の厚くなる方向への移動や沈下等によって生じたものと考えられる。

以上の(5),(6)の被害はいずれも傾斜地盤上の盛土や、盛土と切土地盤の境界上に立地している建物での被害であり、地山の切土地盤や平坦な地盤上では被害が殆ど認められない。これらのことから、(5)と(6)のいずれの地震被害も地盤条件の不連続点で発生した地盤の不同変位(沈下,水平変位)などで生じたことが推定される。

(7) 橋梁の被害と地盤の関係

多くの河川はその横断方向に谷形状をしていて、相対的に急な斜面と緩い斜面から成り立つ埋没谷にできており、その河川を渡る橋梁の地震被害の多くは緩斜面の部分で埋積土層が緩斜面の傾斜方向に動いたために発生したことが考えられる¹⁷⁾。例えば、次に示す新幹線魚野川橋梁等もそれに該当すると考えられる。

新幹線魚野川橋梁は図-15,16 に示すように魚野川を約 60 度の斜角で横断する¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。2004 年新潟県中越地震で橋脚 2P と橋脚 3P の主鉄筋段落し部(剛性変化点)にコンクリートの剥落や鉄筋のはらみ出し等が発生した。特に被害程度が大きい橋脚 3P は図-16 から分かるように川の「瀬」側の高水敷(緩斜面上)に存在する。水平方向の曲げクラックの他に両橋脚に起点側と終点側の側面に西下がりの斜めクラック^{18),19)}が発生した。

また、付近にあって魚野川をほぼ直角に渡る上越線魚野川橋梁は無被害であるが、この橋梁は大正 11 年 8 月と昭和 41 年 11 月使用開始である。このことは古い直接基礎の JR 静内川橋梁等が 1982 年浦河沖地震(M=7.1)で無被害であったことと似ており、上越線魚野川橋梁も基礎が比較的浅かったか、あるいは地盤内に軟弱粘性土層が存在していなかったため

被害が発生しなかったこと等が推察される。

2004 年新潟県中越地震で新しい橋梁(新幹線魚野川橋梁)が被害を受け古い橋梁(上越線魚野川橋梁)が無被害であった。前者はトップ・ベーターのコンクリート製橋梁で基礎がしっかりしている。前者の被害は地盤変位抵抗型¹⁷⁾で発生し、後者の無被害は地盤変位追従型¹⁷⁾で発生したことが推察される。即ち、以上に述べた地震被害状態と地盤の関係から、新幹線魚野川橋梁の被害は河床の緩傾斜面側の埋積地盤が傾斜方向に地震で比較的大きく動いたとき、橋梁がトップ・ベーターでしっかりした基礎を持って地盤の動きに抵抗したため、基礎に強い偏土圧が作用して発生したことが推定される。このように、橋脚に作用した地震力は地盤が左側の川岸の方向に動いて生じたこと、即ち地盤状態に大きく影響されて生じたことが推察される^{20),21)}。

(8) トレの被害と地盤の関係

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震では、今まで比較的被災例の少なかったトレが各所で深刻な被害を受けた。また、1978 年伊豆大島近海地震(M7.0)において伊豆急行鉄道の稲取トレが被災し、そのほか常時や施工中においても地層境界(不連続面)付近でトレ被害が発生している。それらのトレ被害の中で共通する要因として、地層境界(不連続面)が挙げられることを以下に述べる³⁵⁾。



図-15 魚野川橋梁の地形図(文献 18)に追加

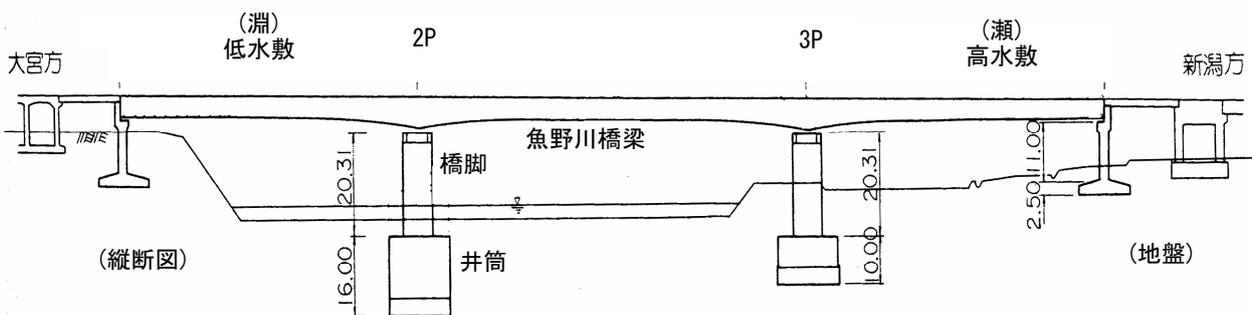


図-16 新幹線魚野川橋梁全体図(文献 17)-19)に追加

a) 県道 71 号木沢トンネル

2004 年新潟県中越地震によって、県道 71 号木沢トンネル(延長 305m,幅 9.2m,高さ約 6m,図-17²³⁾参照)では,図-18²⁴⁾,図-19²⁵⁾に示すように北側坑口より 30~80m 区間で大規模低角亀裂,100~307m 区間で横断方向亀裂や打継目の開口が現れるなどの被害が生じた²²⁾.この附近のトンネルひび割れ展開図(図-19²⁵⁾)をみると,沢地形(図-18 の A 部)に集中荷重が作用したように,即ち沢の下流方向に地すべりが生じて荷重が作用したかのように曲げひびわれが発生している.これは図-20 に示す RC 単純梁載荷試験時の曲げせん断ひびわれの現れ方に似ている.大規模低角亀裂も地層境界位置で発生しており,曲げ亀裂のような変形発生後に大きい地すべりが地層境界に沿って発生して大規模低角亀裂が生じたことが推察される.

新潟県中越地震の発生前

(2004.10.20)

には,各地で記録的な被害をもたらした台風 23 号による多量の降雨(例えば,長岡観測所で 102mm/day²⁶⁾)が観測されていて,巨大低角亀裂

附近の沢地形(図-18 参照)での地下水の集中が地すべりの原因の 1 つとなり,これがトンネルの地震被害に影響を与えたこと等も考えられる.

b) 上越新幹線魚沼トンネル

新潟県中越地震で小千谷市から川口町に跨ってつくられている上越新幹線魚沼トンネル(延長 8,624m,幅 9.6m,高さ 7.4m,覆工厚 50~90cm)で,コンクリートアーチ部崩落,路盤コンクリート隆起,側壁の押し出しなどの被害が発生した(図-21 参照)²⁷⁾. 図-21 よりこのトンネルは右側から偏土圧を受



図-17 木沢トンネル周辺の地質²³⁾

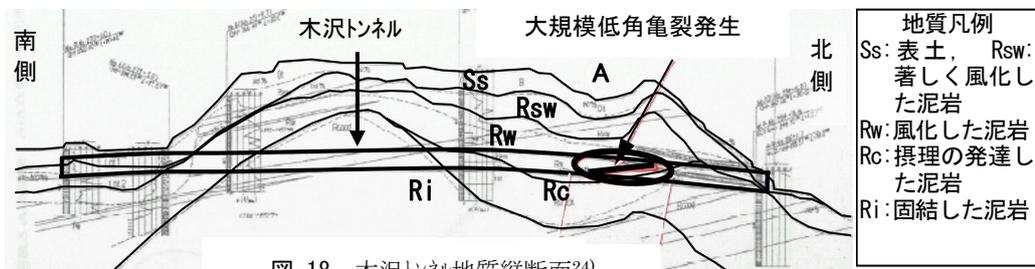


図-18 木沢トンネル地質縦断面²⁴⁾

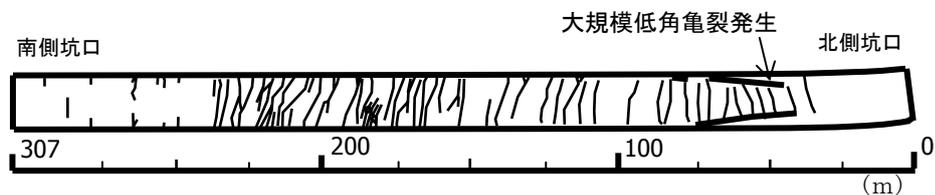


図-19 クラック展開図(平面透視図)²⁵⁾

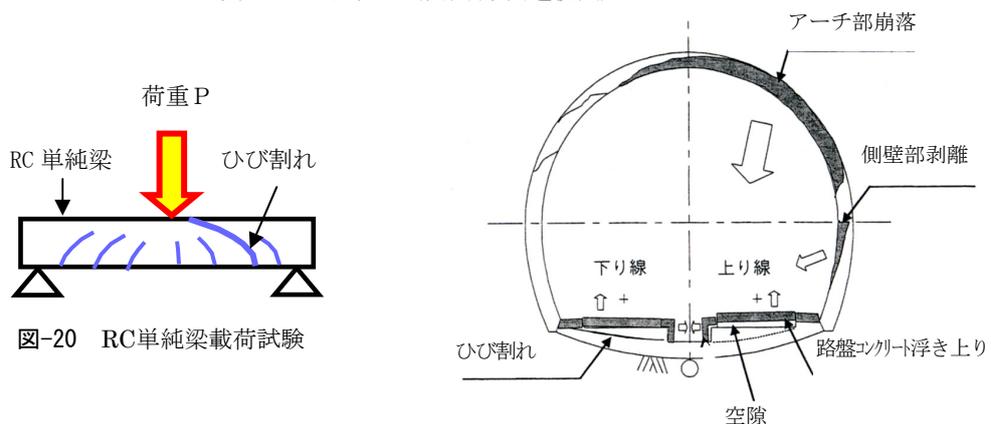


図-20 RC単純梁載荷試験

図-21 魚沼トンネル変状図²⁷⁾

けたように変形した.主な被害箇所は図-22,23 に示す南側坑口より①約 2,400m 附近,②約 2,820m 附近,③約 6,020m 附近の 3 箇所である.図-22,23 をみると,①及び②の被害地点は震央と非常に近く,附近

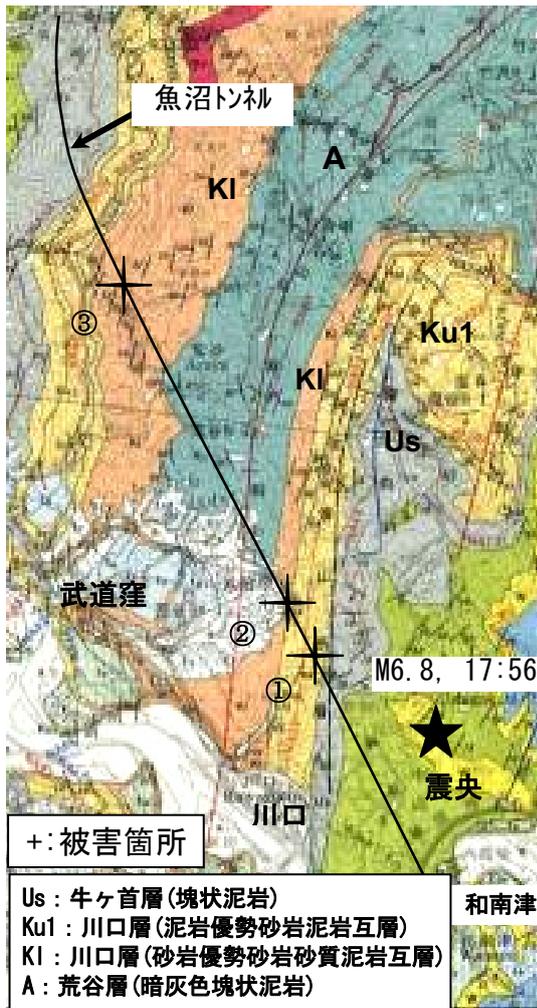


図-22 魚沼トンネル周辺の地質(文献 23)に追加

をほぼ NS 方向に延びる猪倉山断層が通っている。そして両者は地層境界部に位置していることが分かる。この地点はトンネル施工時に多量の湧水が発生した場所²⁸⁾に近い。一般に岩盤の節理を水みちに地下水が存在することもあるが、地層境界部には透水性の違いから地下水が集中し易いといえる。

なお、上越新幹線妙見トンネルもその被害状況²⁷⁾をみると魚沼トンネルと同様に右側(東側)から偏土圧を受けたように変形している。上越線の和南津トンネルと天王トンネルもその被害位置の地質をみると地層境界部で大きく被災していることが分かる²⁹⁾。

c) 塚山トンネル

信越本線塚山トンネル(延長 1766m,幅 8.7m,高さ 6.3m)では、1966 年の完成直後から覆工コンクリートひび割れ、断面縮小、墳泥発生、沈下などの変状が現れ、長期間修復を行ってきたが³⁰⁾、今回の新潟県中越地震でも圧挫、ひび割れなどの被害が発生した²⁷⁾。また、1964 年の新潟地震(M7.5)において、旧トンネルの塚山第一トンネルと第二トンネルが圧砕、剥離、ひび割れなどの被害を受けている(図-24 の①

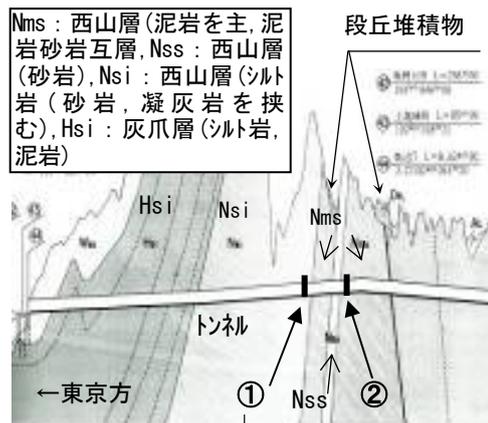


図-23 魚沼トンネルの地質縦断図(文献 29)に追加

と②に示す)。この地点は新潟地震の震央から直線距離で約 120km 離れている。現在の塚山トンネルで常時から特に著しい変状を見せた区間は、西側坑口より 300m 地点から約 30m 区間(図-24 の③に示す)であり、詳細な地質図が示されている文献³⁰⁾をみるとここは図-24 の左上の枠内図のように地層境界(不連続点)に当たることが分かる。この地層境界部をモデルに 2 次元 FEM 静的応力変形解析(文献 32)の解析プログラム使用)を行った結果、地層境界部に卓越するせん断変形を確認することができた³³⁾。従って、常時でも変位量に違いの現れる地層境界部は、地震時であればなおさらそこにせん断変位が大きく生じ、トンネルに被害を及ぼすことが考えられる。

d) 稲取トンネル

1978 年伊豆大島近海地震(M7.0)で稲取トンネル(延長 906m,伊豆急行鉄道)が、トンネルのほぼ中央部(図-25³⁴⁾の丸印)で、横断方向にレールが最大 73cm の食い違いを生じた。被害箇所附近には、トンネルとほぼ直交するかたちで稲取一大峰山断層(右横ずれ)が通っている。なお、この断層は稲取泥流地帯の南側縁端部ではないかという説もある。この断層の約 3km ほど北側に浅間山断層(左横ずれ)がほぼ平行する形で存在する。この 2 つの断層に挟まれた部分で地すべりが起きたとする見かたもあるが^{35),36)}、トンネルが大きなせん断力を受けたことは間違いないと考えられる。

3. あとがき

以上に述べたように、2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震による盛土や建物、橋梁、護岸等は類似の地盤構造で類似の被害を受けている。即ち、地盤条件の変化点等で異種支持地盤状態、あるいは沢部の埋土部等で被害を多く受けており、過去の地

震でも多く認められる被害であり、その被害原因として地盤の不連続点で発生した地盤変位による不同変位、偏土圧等¹⁾が考えられる。

終わりに、以上の調査で引用させて頂いた文献の著者並びにお世話になった土木学会関東支部、群馬県前橋土木事務所、前橋市役所、赤城村役場の関係者、及び現地調査でご協力していただいた住民の皆さんと、解析等でお世話になった本学卒研究生の立川宗克君、増山裕幸君に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠:地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い,土木建設技術シンポジウム 2003 講演論文集,pp.299-306,2003.7.
- 2) 仁杉巖監修:巨大地震と高速鉄道-新潟県中越地震をふりかえって-,pp.142-144,山海堂,2006.11.
- 3) 日本海中部地震調査研究グループ編:1983年日本海中部地震調査報告,鉄道技術研究報告,No.1267,1984.
- 4) 国土地理院発行,2.5万分1地形図:片貝,T.14年鉄道補入,H.13年修正,栃尾,M.44年測図,T.3年製版,S.28年資料修正,H.16年集成測量.
- 5) 那須誠:橋梁の2方向被害への地盤の影響,第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,B4-1,pp.447-454,2005.2.
- 6) 昭和39年新潟地震震害調査報告,土木学会発行,1966.6.
- 7) 群馬県総務局消防防災課編:新潟中越地震による被害,2004.7.
- 8) 前橋市現況図,1:2,500,1999.3.10.
- 9) 群馬県企業局編:三原田遺跡住居篇付録1,1980.2.29.
- 10) 赤城村現況平面図,1:1,000,1987.3.31.
- 11) 前橋市観光協会編:風のふるさと-まえばし,pp.157-158,1997.8.1.
- 12) 上毛新聞編:突如稀有の大地震襲来,1923.9.2.
- 13) 保存版 前橋市街明細地図(1919年,東京交通社発行),好きですまえばし,Vol.23,前橋市観光協会,2005.12.1.
- 14) 安福規之,和田弘,小林泰三,内田宏:玄界島における急傾斜地・宅地地盤の擁壁の被害とその特徴,福岡県西方沖地震における被害調査報告,地盤工学会,pp.7-26,2005.6.
- 15) 沖村孝,鳥居宣之,大藪剛士:新潟中越地震による被災宅地の地形立地条件,建設工学研究所論文集,第47号,pp.101-108,2005.11.
- 16) 京都大学防災研究所,山梨大学,大田ゾリナチ,環境地質編:2004.10.23 新潟県中越地震調査速報,2004.11.5
- 17) 日本鉄道建設公団編:上越新幹線工事誌(水上・新潟間),1983.3.
- 18) 那須誠:橋梁の2方向被害への地盤の影響,第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,pp.447-454,2005.2.
- 19) 幸左賢二,山口栄輝,猪熊康夫,田崎健治:新潟県中越地震で被害を受けた橋梁等構造物の調査と分析,第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,pp.35-40,2005.2.
- 20) 那須誠:地震による橋梁の軸方向と軸直角方向変形への地盤の影響の考察,土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, I-053,pp.105-106,2003.9.
- 21) 那須誠:地震被害を受けた橋梁と地盤,土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, I-B512, pp. 1020-1021, 1999
- 22) 小長井一男:活褶曲地形と地震被害概要,土木学会中越地震被害調査団(第1次)速報,pp.9-17,2005.1.
- 23) 産業総合技術研究所編:5万分の1数値地質図(Ver. 1),長岡,小千谷地質図,2004.11.
- 24) 土木学会トンネル工学委員会編:新潟県中越地震特別小委員会報告書,2005.6.

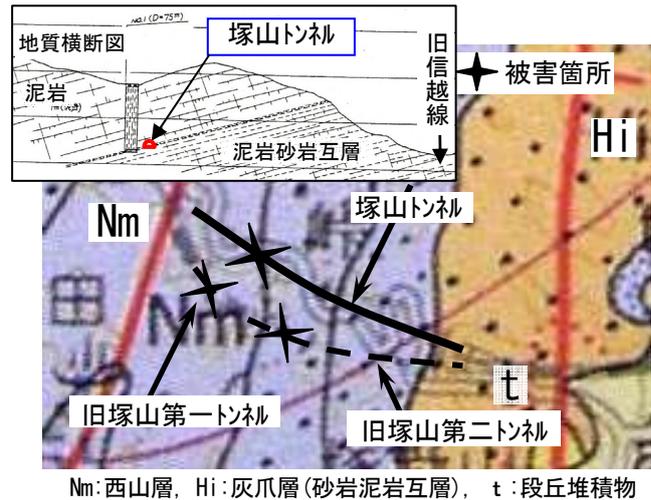


図-24 塚山トンネル附近地質平面図(文献 31)に追加



図-25 稲取トンネル位置図³⁴⁾

- 25) 森伸一郎, 土谷基大: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,土木学会地震工学論文集 第28巻,CD-ROM, No. 182, 2005. 8.
- 26) 気象庁HP, 気象統計情報, 長岡観測所記録, 2004. 10.
- 27) 清水満, 鈴木尊, 安東 豊弘:新潟県中越地震の鉄道トンネル被害と復旧, 土木技術, 60-6, pp. 92-92, 2005. 6.
- 28) 鉄道建設公団編:上越新幹線地質図(水上-新潟間), 1983. 3.
- 29) 那須誠, 増山裕幸貴:トンネルの変状と地盤条件(その 4、地震時の変状), 第 24 回日本自然災害学会学術講演会要旨集, No. I-6-4, pp. 65-66, 2005. 11.
- 30) 東日本旅客鉄道株式会社編:変状トンネル保守からの教訓-塚山トンネル検査補修の記録より-, pp. 1-27, 東日本旅客鉄道株式会社施設電気部土木課, 1997. 2.
- 31) 通商産業省地質調査所工業技術院編:日本地質図大系, 中部地方, 朝倉書店, 1991. 9.
- 32) 基礎地盤コンサルタンツ株編:二次元FEM静的応力変形解析システム SOIL2N/PWIN, 1999. 9.
- 33) 増山裕幸, 那須誠:地震によるトンネル被害と地盤の関係及び被害機構の考察, 第33回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, I-72, 2006. 3.
- 34) (社)日本建築学会編, 1974年伊豆半島沖地震・1978年伊豆大島近海地震災害調査報告, pp. 200-228, 1980. 6.
- 35) 池田俊雄:わかりやすい地盤地質学, pp. 160-161, 鹿島出版会, 2002. 2.
- 36) 田村重四郎:写真と図で学ぶ, 地盤と地震被害, pp. 67-69, 山海堂, 1996.