

## 2004年新潟県中越地震調査報告 ー地盤地震動災害ー

時松孝次、鈴木比呂子、関口徹、山高円

## 1. はじめに

2004年10月23日新潟県中越地震では、1-2Gを超える地震動、新幹線の脱線、震源域での大規模な斜面崩壊とそれに伴う河道閉塞による湛水域の形成など、これまでの地震とは異なった希有な現象、災害をもたらした。現地の交通状況や他の研究者の調査状況、調査開始時期を考慮して、以上の現象、災害と地盤の関連に重点を絞って、以下のような行程で現地調査を行った。ここでは、その結果を報告する。

調査行程：10月28日 東京、前橋、被災地上空、前橋、東京  
 10月29日 夕方東京、夜新潟  
 10月30日 新潟、川口町、堀之内町、小千谷、長岡、新潟  
 10月31日 新潟、長岡、川西町、十日町、山古志村、夜東京

## 2. 強震記録に見られるサイト特性

小千谷市内では近接する2地点（K-NET, JMA、写真1）で本震、余震、本震以前の地震の強震記録があり、微小地震から激震時までのサイト特性を検討するうえで興味深い。図1は、1996年以降、2004年10月末日までに近傍（震源が新潟県）で発生した地震の際、両地点で同時に強震記録が得られているケース（32回）について、その最大地動加速度を比較したものである。ばらつきはあるものの、加速度レベルが小さいと、JMAの記録がK-NETより大きくなるが、加速度レベルが大きくなると、K-NETの記録がJMAと同程度かそれ以上になる傾向が認められる。これらは、入力レベルの違いによって両地点

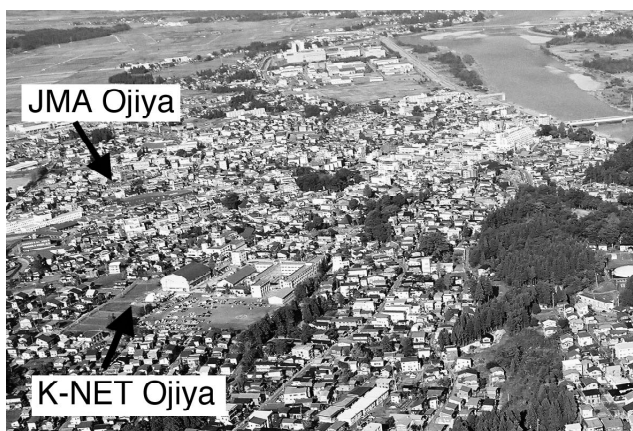


写真1 小千谷市街地と2強震サイト

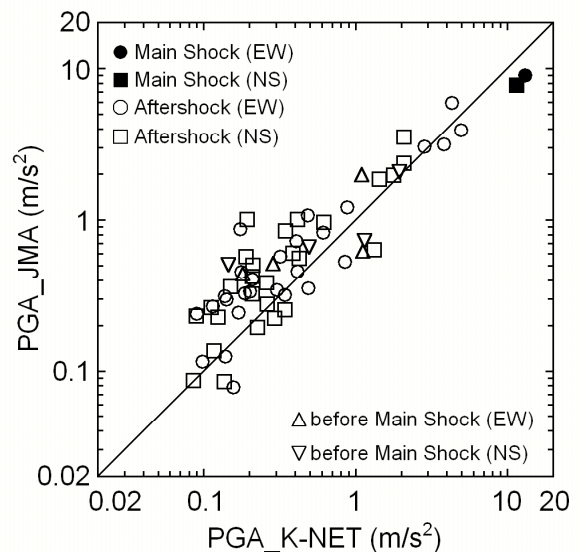


図1 K-NET 小千谷およびJMA 小千谷の最大地動加速度の比較

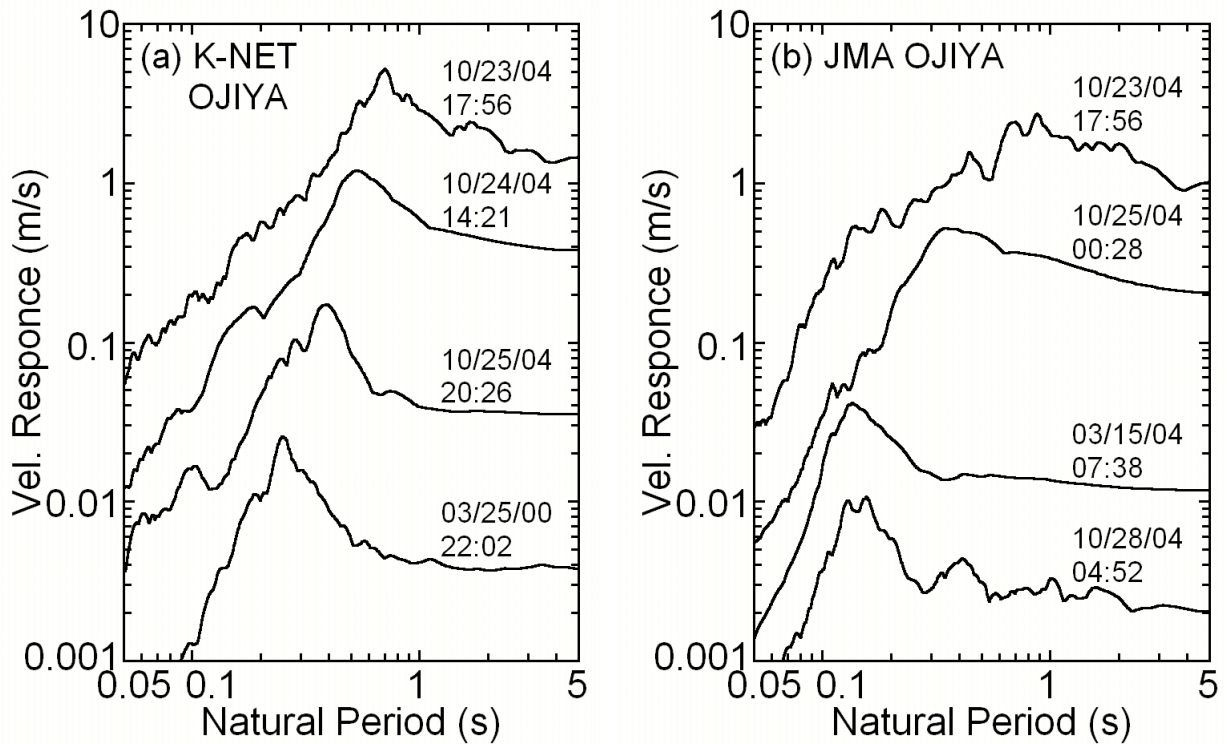


図2 2サイトのEW方向成分の速度応答スペクトル

の相対的なサイト特性が変化している可能性を示唆している。

図2に両地点の本震、余震のEW成分記録の速度応答スペクトルを示す。両地点ともスペクトルは比較的単純で鋭いピークを持ち、最大地動加速度の増加とともにスペクトルピーク周期の伸びが認められる。その傾向が他の地震の際にも認められるかどうか確認するため、図3に1996年以降、2004年10月末日までに近傍（新潟県）で発生した地震の際、両地点で得られた強震記録（K-NET 83記録, JMA 38記録）について、最大地動加速度とスペクトルピーク周期の関係を比較して示す。ばらつきはあるものの、両地点とも最大地動加速度の増加とともに卓越周期の伸びが認められる。これらは、両地点の表層地盤の非線形性の違いによるものと推察される。

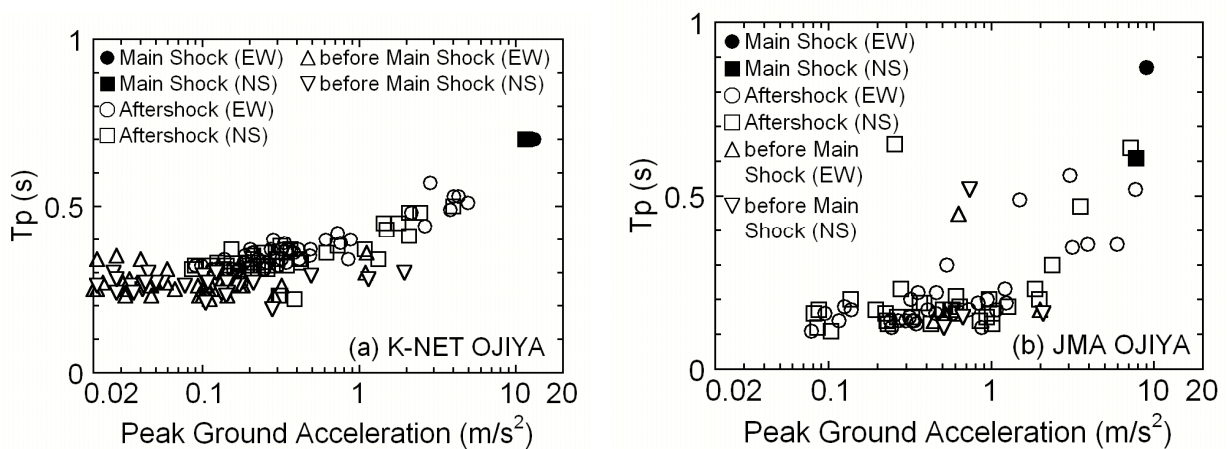


図3 2サイトのスペクトルピーク周期と最大地動加速度との関係

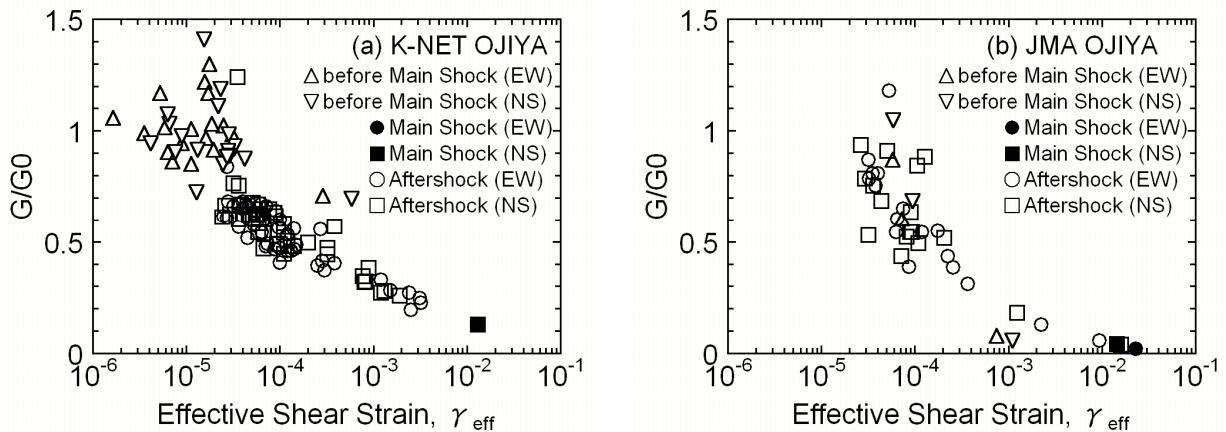


図4 地表強震記録から推定した2サイトの地盤の非線形性

以上の結果を踏まえ、文献<sup>1)</sup>の方法にしたがって、スペクトルピーク周期の伸びが表層地盤の非線形性により生じると仮定して、既往のPS探査結果、微動調査結果、地盤調査結果などを参考に、表層地盤の非線形特性を推定し、結果を図4に示す。特に微小ひずみレベルでのばらつきが大きいですが、いずれもひずみの増加とともにせん断剛性比が低下する傾向があり、特にJMAサイトの方が小さいひずみレベルから、せん断剛性の低下が著しく、より強い非線形性を示す傾向が認められる。この結果、JMAサイトでは、K-NETサイトより、大地震時に地盤の増幅率が低下して、図1のような傾向になったものと推察される。なお、JMAサイトでは、本震前の記録が少ないため明確ではないが、K-NETサイトでは、本震後の微小ひずみレベルでのせん断剛性が地震前の値の7—8割程度までしか回復していないように見える。この傾向は、大きなひずみを受けた試料の特性として室内実験では認められているが、実地盤でその傾向が認められたことは珍しい。今後、時間とともに本震以前の値に回復するかどうか興味深い。

推定されたせん断剛性比とせん断ひずみの関係を既往の結果と比較すると、K-NETサイトは粘性土の特性と、JMAサイトの結果は、砂の低拘束圧下の特性と比較的対応がよい。なお、以上の検討では、多くの仮定をもうけているため、その妥当性を確認するためには、今後さらに地盤調査などを含めた詳細な検討が必要である。

### 3. 地動の強さおよび方向性と被害

図5は小千谷K-NET, JMAで得られた本震記録の水平面上での軌跡である。断層直行方向(東西方向)の振動が卓越し、他の地点で得られた記録に比べて、変位振幅が大きくなっている。K-NET, JMAで、同じような変位波形であるにもかかわらず、JMAの方が地動加速度、地動速度が小さくなっているのは、先述した両地点のサイト特性、非線形性状の違いによるものと推察される。

断層直行方向(東西方向)の振動が卓越していることは、東西方向の振動に抵抗力の乏しい建物に被害が多いとの報告と調和的である。この地域にある免震建物にも大きな変位が生じたものと思われ、取り付け部に衝突の跡が認められ、免震層は東方向に残留変形を生じていた(写真2, 3)。



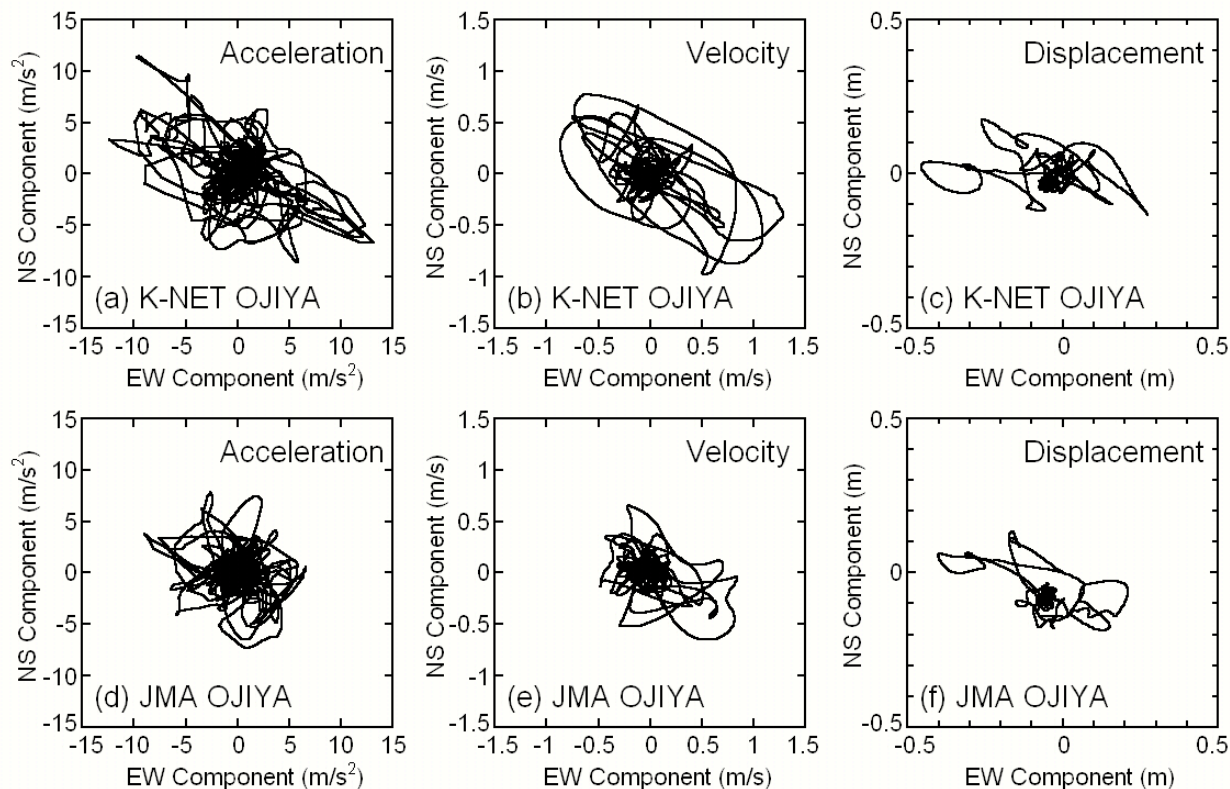


図5 K-NET 小千谷および JMA 小千谷の本震の地動加速度、速度、変位の軌跡

大きな地動加速度が記録された小千谷消防署（JMA）を含め小千谷市街地で、建物と地盤間で顕著な衝突の跡が認められる場合は、その面はほぼ東西方向に面していた。建物と地盤間での顕著な衝突の跡は、加速度記録を積分して求めた変位が小千谷の値に比べ相対的に小さい長岡市街地、十日町などではほとんど確認できなかった。小千谷、川口町、十日町市街地付近を含め、大きな地動加速度を記録したにもかかわらず、被害の多くが耐震性の低い建物に限定されていたことは興味深い。この地域は豪雪のため、新しい木造建物の1階はRCで、柱は雪の荷重に耐えるため太くなっているが、そのことが被害軽減にどの程度有効であったのか、あるいは他に原因があるのか、その究明は今後の課題と考えられる。



写真2 小千谷市の免震建物



写真3 小千谷市の免震建物



#### 4. 液状化

長岡市以南の信濃川流域は、表層近くから砂礫または礫が卓越するためか、水田などで噴砂は確認できるものの、自然堆積地盤の液状化による顕著な構造物被害はほとんど報告されていない<sup>3)-5)</sup>。しかし埋め戻し土の液状化によるマンホールの浮き上がりは各所で認められ、液状化がライフラインの致命的な被害の主因になっている。

#### 5. 新幹線脱線現場周辺の地盤変状

図6は、地震で新幹線が脱線した付近の地盤断面、高架橋概要、地盤変状、高架橋の被害を示している。左が東京（南）、右が長岡で、トンネルを抜けた0.4 km地点で新幹線（10両編成全長約250 m）は脱輪を開始し、1.6 km走って停止したといわれている。トンネルを抜けて脱輪開始地点付近までは、標高約50 mから下り勾配の沖積段丘堆積層、標高約30 mの旧期扇状地堆積層、標高約40 mの扇状地堆積層、標高約30 mの旧期扇状地堆積層の順に地盤面の高低が繰り返されて、新幹線停止位置に至る。この間、線路の勾配は、3/1000, 6/1000, 1/1000と変化して、10 m程度緩やかに高さを落としているため、地盤面との差に応じて、高架橋は矩形1本柱、1層ラーメン、2層ラーメンなどで支持されている。柱頭被害が認められた地点（写真(c)）の柱に貼り付けられたパネルによれば、基礎はコンクリート杭で、根入れはスラブ下から14.5 mである。文献<sup>2)</sup>によれば、この区間に使用されたPC杭の径は、350 mmと推察される。

この区間の地盤変状、高架橋の被害と脱線した新幹線との関係は、東京（左）側から順に、地盤沈下、噴砂噴泥、脱輪開始地点を経て、高架橋柱頭部被害、噴砂噴泥、停止位置となっている。ここで興味深いのは、地盤変状（液状化、沈下）と高架橋被害（高架橋柱頭部の曲げ破壊）が、標高の相対的に低い部分ではなく、一段高い段丘または扇状地堆積層の高架橋またはその基礎部に選択的に生じていること、地盤変状と構造被害が両方同時に生じている箇所はないこと、液状化が認められる地点でのみ高架橋柱部と地盤との間に大きな隙間ができていないこと、また脱輪開始地点付近では線路の沈下が報告されていること<sup>5)</sup>、などである。

液状化が認められる地点での高架橋柱部と地盤との間の大きな隙間は、地震時に両者の間に大きな相対変形が生じたことを示唆している。また隙間部には噴砂、噴泥、高架橋柱部には最大1.5 m程度の泥はねのあとが確認できた。おそらく、液状化して隙間部にたまった噴砂、噴泥が、地震時の地盤と高架橋柱の相対変形により飛び跳ねたものと思われる。液状化した材料が埋め戻し土か原地盤のものかは、今後の調査により明らかにされるものと思われる。

地盤変状や構造物被害の認められない低地部では、支持層が表層付近から現れているのに対し、何らかの地盤変状や構造被害が認められた区間では、支持層となっている砂礫層の上に10 m程度の堆積層が存在していることから、これらの表層ならびにそれによって生じた高架橋の構造形式の違いが、地盤変状、高架橋の応答性状と構造的被害などに関連している可能性が示唆される。

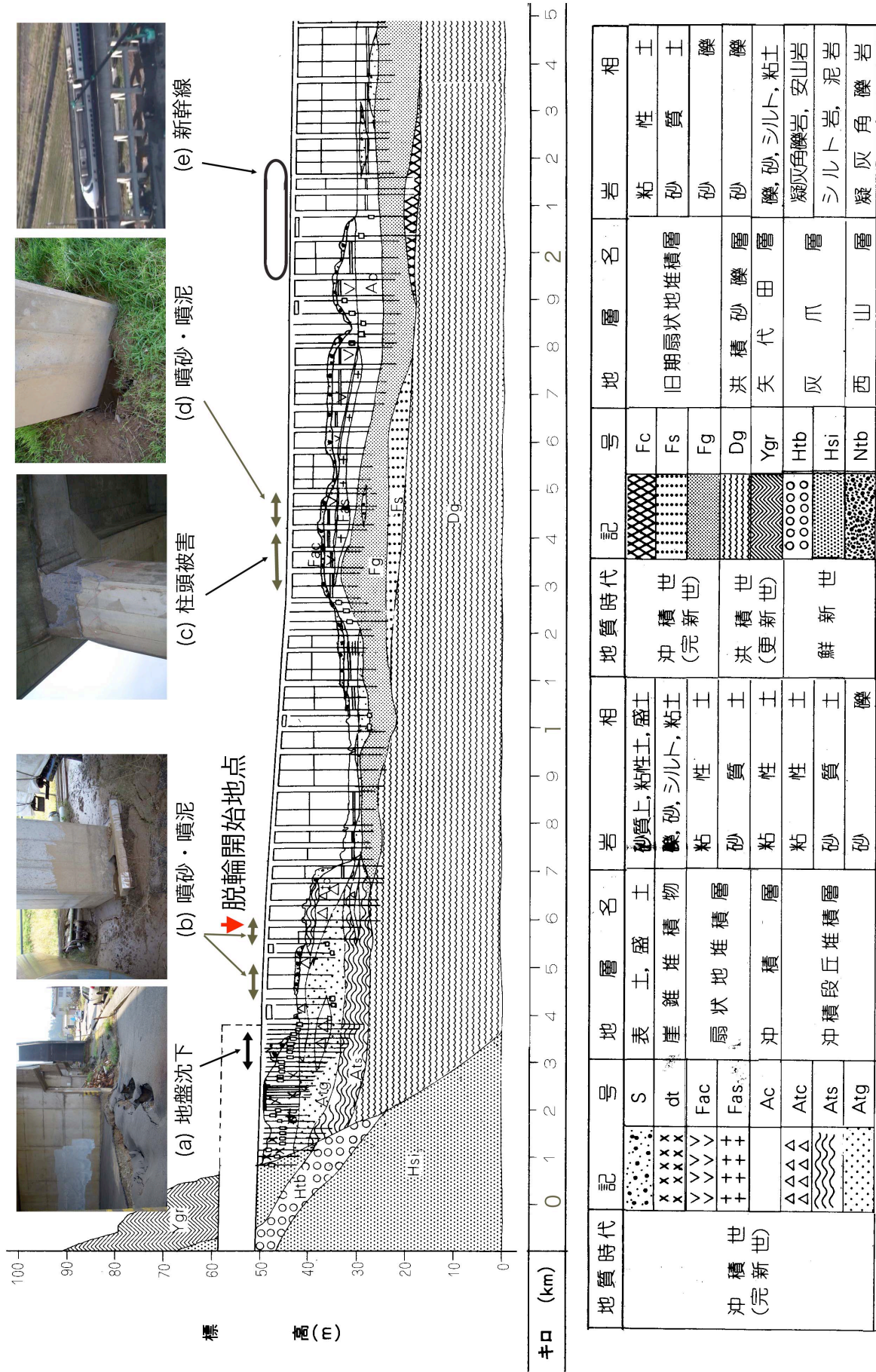


図6 上越新幹線脱線現場付近の断面と地盤変状 (参考文献<sup>2)</sup> に加筆修正)



## 6. 斜面崩壊

盛土斜面、自然斜面（写真4－8）などが、震源域を中心に多数崩壊した。山古志村芋川流域を中心におきた斜面崩壊はもっとも壊滅的で、一部の家屋を巻き込み（写真9）、谷沿いの地形や道路は原形をとどめないほどであった。また、崩壊土は川をせき止めて、



写真4 長岡市高町



写真5 川口町天納



写真6 小千谷市川井新田



写真7 山古志村寺野

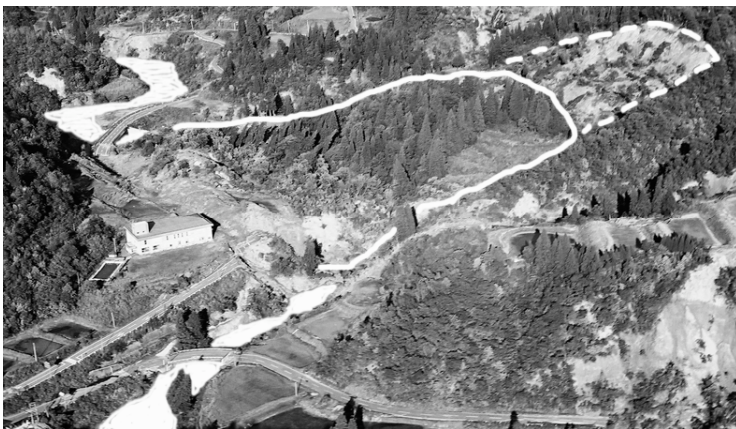


写真8 山古志村東竹沢 （右上から中央への斜面崩壊が左上から左下に流れる芋川と道路を押しつぶし、河道を閉塞している。）



写真9 山古志村東竹沢 （河道閉塞により湛水域が広がっている。）



10月28日現在、45の湛水域（天然ダム）を形成している（写真7，9）。このうち最大の東竹沢地区の天然ダムは、日ごとに水位が上昇し、上流の家屋、道路を含めて湛水域を8haに広げている（写真9，11，12）。

この地帯は、もともと豪雪地帯で融雪による湧水が多く、その浸透や温度変化が地盤の風化を促進して地滑りの多発地帯としても知られている。地震では、断層平行方向に尾根が形成されていることも原因していると思われるが、多くの大規模な斜面崩壊、地滑りが断層直行（東西）方向に生じており、慣性力の滑りへの影響を示唆している。同時に、地震発生の直前に上陸した台風23号などの豪雨によって、地盤の飽和度が高い状態にあったものと想像される。これに加えて、この地方一帯は、米および錦鯉の産地であり、山古志村を代表とする山間部では斜面が水田や養鯉池（飼育池：水深1.5m以下で主に5-10月に使用。越冬池：常時湧水流水があって水温10℃以上に保て、水深1.5m以上で夏は飼育池に使用）となっている。養鯉池の一部は年中水をためていることで、周囲の地盤の飽和度、地下水位を高くした可能性がある。実際、滑り部分は飽和状態にあり、小規模な噴砂（写真13，14）も見られたことから、飽和した地盤の液状化または地盤内間隙水圧の上昇が、滑りの一因になっているものもあると考えられる。また崩壊した斜面の上端に養鯉池（写真15）がある場合もあり、養鯉池の一部は地震で決壊し大量の水を流出したのと考えられる。養鯉池からの水の流出の大部分は、斜面崩壊と同時か遅れて



写真10 山古志村東竹沢



写真11 山古志村榑木



写真12 山古志村東竹沢



写真13 山古志村東竹沢



写真14 堀之内町竜光  
(段差のついた道路と手前右下の噴砂)



写真15 山古志村檜木

発生していると思われるが、崩壊土に水を加えることで、余震などによる斜面崩壊をさらに劣悪なものとした可能性も否定できない。また、養鯉池がそのような箇所にあったことで、地山そのものの風化、劣化にも影響を及ぼしていた可能性もある。

1847年善光寺地震では、流出した土砂により犀川にできた天然ダムが決壊し、下流に巨大な2次災害を招いている。雪解けの増水に備えて適切な対策が望まれる。

## 7. まとめ

2004年新潟県中越地震は、1-2Gを超える地震動、新幹線の脱線、震源域での大規模な斜面崩壊やそれにとまなう河道閉塞による湛水域の形成など、希有な現象、災害をもたらした。本報告では、これらの現象や被害を地盤地震工学的な視点から調査、検討した。なお、ここでの検討は、少ない情報の中での推論もあり、今後、追加調査にもとづく詳細な再検討が必要である。

## 謝辞

本報告で用いた強震記録は、K-NET（防災科学技術研究所）および気象庁の提供による。また、調査にあたって、国土地理院、国土交通省および参考文献に記載の3サイトの情報を参考にした。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 時松、翠川（1988）：地表で観測された強震記録から推定した表層地盤の非線形性状、日本建築学会構造系論文報告集、388、131-137.
- 2) 上越新幹線工事誌（水上・新潟間）、日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局。
- 3) [http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/photo/2004/niigata\\_ja.html](http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/photo/2004/niigata_ja.html)
- 4) <http://www.yasuda.g.dendai.ac.jp/news041025/news041025.htm>
- 5) <http://geo.dpri.kyoto-u.ac.jp/research/2004Niigata/NIIGATA.htm>