

宅地地盤の安全性と性能評価
に関するシンポジウム

発 表 論 文

平成 17 年 7 月
社団法人 地盤工学会

2004 年新潟県中越地震による郊外住宅地の斜面災害

地震・崩壊・宅地・谷埋め盛土・斜面・応答解析

京都大学防災研究所 正会員 釜井俊孝

京都大学防災研究所 Aurelian C. Trandafir

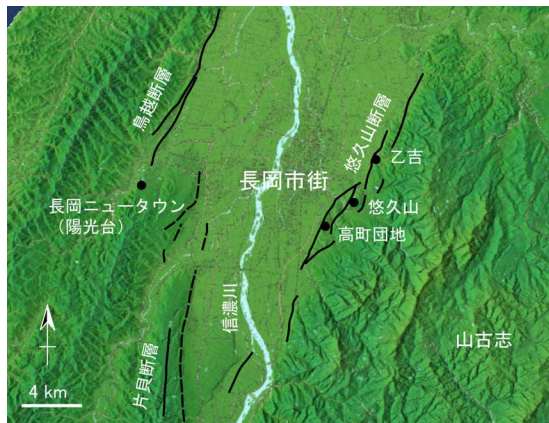
株式会社 村尾地研 国際会員 村尾英彦

1. はじめに

10 月 23 日 17 時 56 分頃、新潟県中越地方の深さ 13km の地点を震源とする M6.8 の地震が発生した。この地震により、新潟県の川口町で震度 7、小千谷市、山古志村（現在、長岡市山古志地区。以下、山古志村）、新潟小国町で震度 6 強、長岡市、十日町市、栃尾市、越路町、三島町、堀之内町、広神村、守門村、入広瀬村、川西町、中里村、刈羽村で震度 6 弱を観測するなど、東北地方から近畿地方にかけて震度 1 から 5 強を観測した。また、同日 18 時 11 分頃に M6.0、18 時 34 分頃に M6.5 の地震が発生し、いずれも最大震度 6 強を観測した。この地震活動は M6.8 の地震を本震とする本震－余震型であると考えられ、震源は、北北東－南南西方向に長さ約 30km に分布している。

これらの地震活動によって、道路や鉄道などの輸送路、下水道・電気などのライフライン、山地の自然斜面の崩壊、天然ダムの形成など、地盤に関連して多くの被害が報告されている。中でも、山古志村を中心とする山地斜面での地すべり災害が注目されたが、人口や経済的影響の点では都市域の宅地地盤の被害も深刻であったと言える。そこでここでは、都市域の住宅地で発生した斜面災害に焦点を当て、主に長岡市を中心とした東山丘陵北西縁部で発生した被害について述べる。

2. 地形・地質



図－1 長岡盆地周辺の活断層と被害地域

長岡市付近の信濃川の両側に沿って、幅 15-20km の丘陵が北北東－南南西方向に連続している。東側の丘陵は全体として魚沼丘陵と呼ばれるが、丘陵を横切る魚野川の北側を特に東山丘陵と呼ぶ。西側の丘陵は長岡付近では西山丘陵と呼ばれ、南方に向かって次第に高度を上げながら頸城丘陵に連続する。東西 2 つの丘陵の間は長岡盆地と呼ばれる低地が形成されていて、北方の新潟平野に続いている。東山丘陵・西山丘陵は新第三紀及び第四紀の褶曲した地層からなる隆起帯となっている。丘陵を構成する地層の大部分は一連の海成砕屑岩類であるが、最上部の魚沼層は鮮新世末から第四紀中期までに堆積した内湾から平野の堆積物（礫、砂、泥、一部は火山灰）からなる。長岡盆地内部の河成段丘は、信濃川西岸域で発達がよく、東岸域では活断層沿いの地塁状の丘陵をわずかに修飾しているに過ぎない。したがって、盆地東縁部ではしばしば沖積面が直接丘陵斜面に

連続する場合が多く、この部分斜面勾配は総じて急である。

東山丘陵と西山丘陵は最近約 200 万年以降に陸地になり、現在に至るまで隆起を続けてきたと考えられている。その過程で隆起から取り残された部分が長岡盆地となった。したがって、長岡盆地の東西両縁部には変位速度のすれを表現した活構造が認められ、東縁部は活断層（悠久山断層）、西縁部は活断層と活撓曲軸（深部では活断層）が形成されている。すなわち、こうした丘陵の内部で発生した今回の新潟中越地震は、現在にまで引き続く地殻変動（丘陵と盆地を形成運動）が表現されたものであると考えられる。

3. 長岡の都市発達

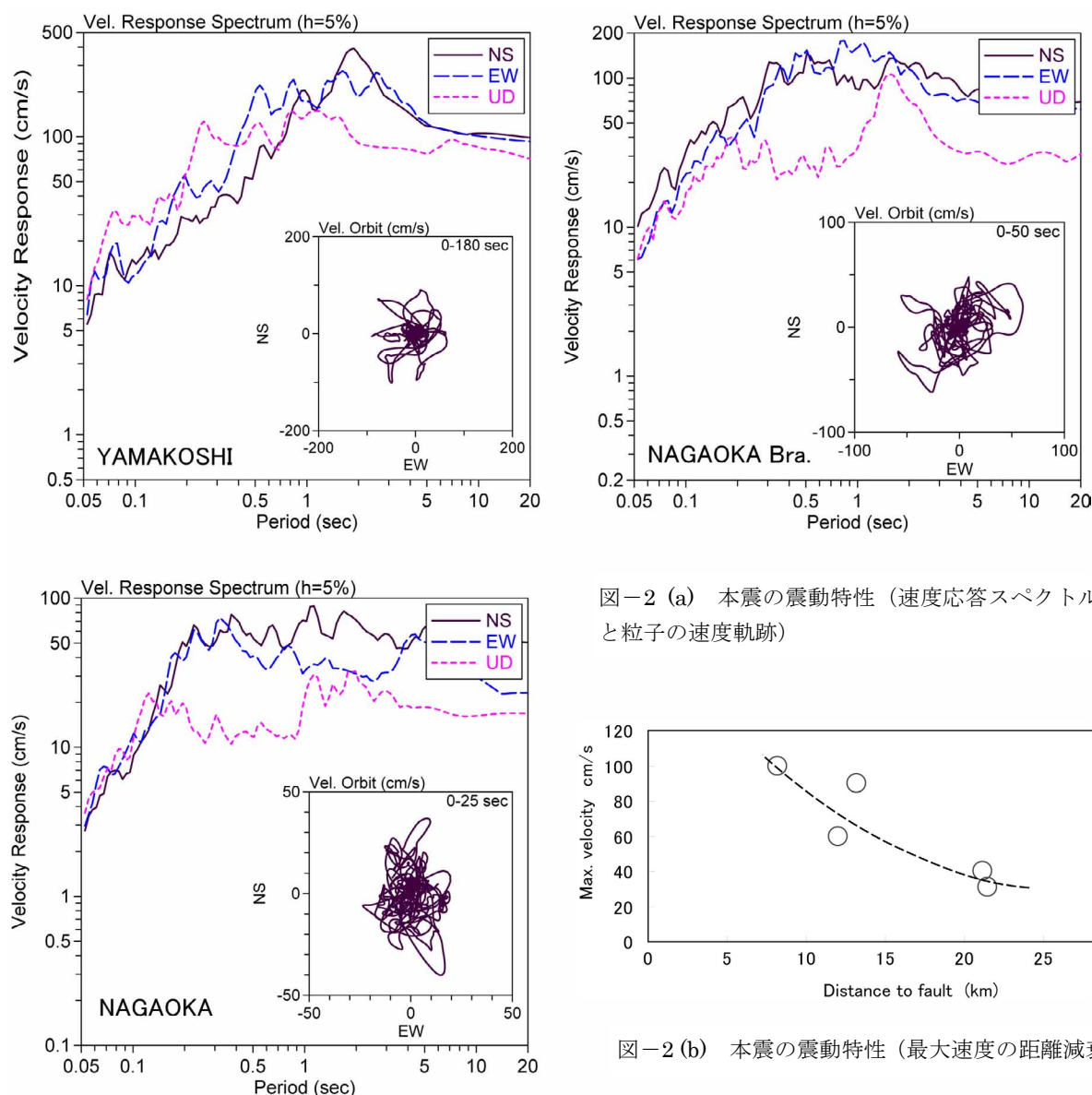
長岡市は、人口約 20 万、新潟県第 2 の都市である。長岡市郊外の開発は、戦災復興事業による区画整理から始まったが、昭和 41 年に開始された国の第一期住宅建設 5 ヶ年計画に呼応し、昭和 40 年代前半から加速した。この頃、10 数地区で土地の区画整理と市街化区域への編入が進められ、市、県住宅供給公社、民間の住宅、雇用促進事業団のアパート、市営アパートなどが建設され、水田地帯が急激に住宅地に変容していった。土地区画整理事業は、昭和 40 年代後半には更に大規模化し、昭和 50 年からは、長岡ニュータウンの建設も開始された。現在の市域が確定した昭和 35 年以降

の人口の変化を見ると、昭和 55 年頃までは急増しているが、それ以後は二度のオイルショックの影響もあり漸増に転じている¹⁾。今回の地震による都市域の斜面災害は、こうしたバブル期以前の郊外住宅地で発生した。

4. 都市域の地震動

長岡市周辺の強震観測点は、K-NET長岡支所（長岡雪氷防災研究所：NIG028）、K-NET長岡（千種小学校：NIG017）、JMA長岡、K-NET小千谷（NIG019）、JMA小千谷が存在する。このうち、K-NET長岡とJMA長岡は観測位置が近く、ほぼ同様の記録である。また、K-NET小千谷は表層地盤の液状化の影響を受けていると考えられる。

図一2(a)は、本震の速度応答スペクトル（5%減衰）と速度の水平粒子軌跡である。山古志村の記録では、1～2秒の周期に400 cm/sに達する大きな応答のピークが認められ、1秒以下の周期では応答が急激に減少している。これに対し、K-NET長岡支所での応答スペクトルは短周期側が顕著となり、0.3 秒から2 秒程度の領域が優勢である。応答は100 cm/sを超える大きな値を示している。K-NET 長岡の応答スペクトルはK-Net長岡支所のものと類似しており、スペクトルの平坦領域が0.2 秒から5 秒と拡大すると共に、応答値は50 cm/s 程度に低下している。



図一2 (a) 本震の震動特性（速度応答スペクトルと粒子の速度軌跡）

図一2 (b) 本震の震動特性（最大速度の距離減衰）

速度の水平粒子軌跡についてみると、直下型地震の性質を反映して震源断層に近い山古志の記録には定向性が認められないが、JMA 小千谷では断層の走向に直交する方向（北西—南東方向）に強軸方向が認められる。一方、震源断層からやや外れた K-NET 長岡支所と K-NET 長岡では、北東—南西及び南北方向に強軸方向が認められる。K-NET 長岡支所付近は、悠久山断層に沿って北東—南西の地質構造が支配的であり、こうした強軸方向の変化は地域的な地質構造の影響を受けている可能性が高い。このことは、縁辺部の活断層系を含めた広義の盆地構造が、山古志村～K-NET 長岡で見られた卓越周期の短周期化現象（図一2a）に影響していることを示唆するものと考えられる。

図一2(b)は、堀川の仮定した断層面²⁾までの距離と本震の最大速度の関係である。ほぼ直線的に最大速度の距離減衰

が認められるが、地震の規模（M6.8）に比べて絶対値が大きいことが特徴として挙げられる。

5. 被害

今回の地震による宅地の斜面災害は、地形的に丘陵地端部の斜面と丘陵地と低地の境界部の低地側で発生しており、特に長岡市の東部郊外で顕著である（図-1）。まとまった被害としては、高町団地、悠久山周辺、乙吉町鶴が丘団地の被害が著しい。これらの地点は、いずれも活断層である悠久山断層に沿って分布しており、類似した地形地質条件を有している。

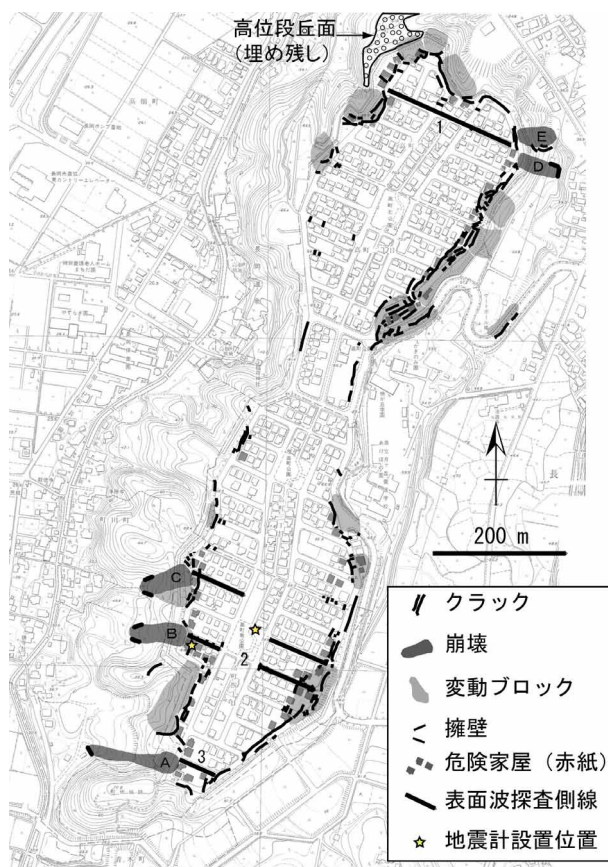


図-3 高町団地における被害の分布

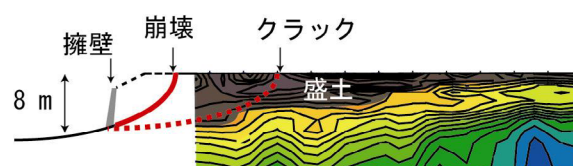


図-4 崩壊 B の背後斜面における盛土の分布

に分布しており、クラック等の変形もその周辺で顕著である。近くに位置する K-NET 長岡支所 の速度記録では北東-南西の強軸が認められ、高町団地においても同様の強震動が作用したとすれば、こうした被害分布は地震動の強軸方向を反映している可能性がある。

盛土の厚さは、一般に周縁部ほど厚くなるが、開発前の丘陵の地形が複雑であったため、詳細に見ると場所によってかなり異なっている。高精度表面波探査の結果を見ると、崩壊した部分の盛土の厚さは、崩壊 B では約 7~8m である（図-4）。また、北西部では、10m に達する厚い盛土が広く分布する。これは、高位段丘面（標高約 60m）と計画した標高（約 70m）の比高の差を埋めたためであると考えられる。このため、団地北西端の住宅周辺では、旧地形では尾根上に当たるのにも関わらず、変動が顕著であり地盤が放射状に移動したことを示すクラック認められた。ただし、この部分の盛土の S 波速度は、崩壊地点の谷埋め盛土よりも約 1.2~1.5 倍程度早く、顕著な崩壊は発生しなかった。開発以前の地形が広く平坦な段丘面であり谷の様な集水地形では無いため、地下水位が比較的低く、サクシンの影響を受けてい

5.1 高町団地

(1) 開発と被害の概要

高町団地は、昭和 50 年代半ばごろに行われた民間の開発地である。昭和 55 年修正測量の 1/2.5 万地形図「片貝」³⁾に、一部の街区が記載されている。この当時、南側部分（3、4 丁目）の切り盛りは終わっているが、道路はできていない。開発以前は、魚沼層からなる標高約 90m の丘陵であった。東西両側を活断層（悠久山断層）に画された南北に長い孤立した丘陵であり、団地の北東端を含む領域が高位段丘化（標高約 60m）していた⁴⁾。開発は、基本的に標高 70m 以上の丘陵の頂部を切土し、周辺に盛土することにより、平坦地を多く確保する形式で行われた。したがって、盛土の大部分は粘土、シルトを主体とする魚沼層起源の土砂であり、締め固めによって凝灰岩のクサリ礫が特徴的に薄く引き延ばされている。周縁部に出現した高い盛土斜面は、コンクリート擁壁によって支持されていた。擁壁の高さは場所によって異なるが、ほぼ 4~6m で、主としてモタレ式擁壁である。団地の総戸数は 522 戸、人口は約 1820 人（平成 15 年）でこのうち約 70 戸が応急判定によって危険家屋（赤紙）と認定された。

(2) 被害と表層地盤

被害は周縁の盛土部に作られた外周道路とそれに沿った住宅に集中し、団地の中央部にはほとんど見られない（図-3）。このうちの 5 箇所では、斜面が崩壊し大きな被害が発生した。これらは、全て浅い谷の谷頭部に相当し、盛土が谷埋めの形式となったため、周囲よりもやや厚く、擁壁に作用する土圧が大きかった箇所である。崩壊しなかった地点でも、クラックや沈下等の被害分布から変形ユニットを認定できる場合が多い。これらの変形ユニットの幅は場所によって異なるが、50~100m である。詳細に見ると外周部においても被害分布には粗密があり、崩壊斜面は、台地状造成地の北東端と南西端

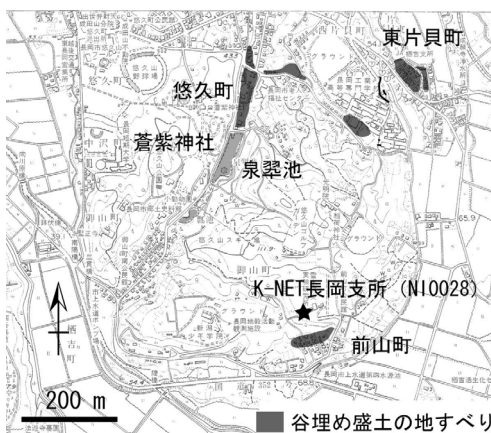
るためと考えられる。

また南東部では、幅の広い谷状の低速度帯が団地中央部の表層に認められる。S 波速度は、やや崩壊した周縁部の盛土よりも速いが、形状から見て谷埋め盛土である可能性が高く、旧地形によってはかなり内陸にまで谷埋め盛土が及んでいることを示している。昭和 6 年測量の 1/2.5 万地形図「片貝」⁵⁾には、この部分に短く深い谷が描かれているが、昭和 32 年の 1/1 万「長岡市全図」⁶⁾にはこの谷は描かれていない。この谷は開発以前に埋められていた可能性もあるが、それよりも測量精度の問題で表現されなかった可能性の方が高いと考えられる。したがって、この谷埋め盛土は、地形図（この場合は縮尺 1/1 万）の単純な比較によって谷埋め盛土を発見しようとする場合、その盛土規模に関する適用限界（下限）を示す事例と考えられる。

(3) 崩壊

残存する擁壁の壁面に地下水の古い流出痕が認められること、一部の擁壁の中央部付近から地震後も地下水の浸出が認められることから、通常は擁壁底面よりも高い位置に地下水位が存在していると考えられる。したがって、崩壊には間隙水圧の急激な上昇が影響したと考えるのが妥当である。しかし、崩壊土砂の到達距離が長く、土砂が流動化したと考えられるのは崩壊 A のみであり、他は流動化に至らなかった。ただし、崩壊 A では、他に比べて崩壊源に残留している土砂が多く、ここでは後退的に崩壊が進行し、見かけの到達距離が長くなった可能性もある

崩壊の末端部に見られる擁壁の断片を見ると、前面に倒壊したものは少なく、底部から全体として移動し、谷の中央



図－5 悠久山一帯における被害の分布

部付近にあったものが、最も遠方まで達しているケースが多い。これは、底面付近を巻き込む大きなすべり土圧によって、擁壁が土砂と共に移動を開始し、土砂の速度場構造によって決まる到達距離に応じて断片が配置されたためであると考えられる。

5.2 悠久山周辺

悠久山は開発以前の高町団地と同じく、両側面を断層で画され、孤立した標高約 100m の丘陵である。悠久山には多くの文化財が分布し、中心部には本来の地形が残されている。しかし、周辺部は宅地化されており、転々と谷埋め盛土が分布する。これらのうち 6 箇所で地すべり性の変動が認められた(図-5)。5 箇所は悠久山北側の悠久町から東片貝町に至る斜面で発生した。各地点の盛土の最大厚さは、3～5m と比較的薄く、底面の傾斜は緩いのが特徴である。盛土の基底が、盛土

の下流側に見られる低地面（水田の表面）へ滑らかに連続すると見られることから、盛土の下に旧谷底堆積物が残っていた可能性が高い。また、地下水位も多くの盛土で高い位置にあると想定される。

5.3 乙吉町鶴が丘団地

(1) 開発と被害の分布

長岡市乙吉町の鶴ヶ丘団地は典型的な都市近郊のミニ開発地である。丘陵地末端の小さな谷を堰き止めてため池を建設し、上流側に谷埋め盛土（鶴が丘団地 A）を行っている。また丘陵地側も簡単に整地して住宅地（鶴が丘団地 B）とした。地震による被害は、鶴が丘団地 A、B の双方に発生した（図-6）。

昭和 41 年改測の 1/2.5 万地形図「枳尾」⁷⁾には、ため池と鶴が丘団地 B に向かう道路の一部が描かれているが、これらは昭和 32 年の 1/1 万「長岡市全図」には存在しない。この事は鶴が丘団地 A の開発は昭和 42 年であるとする、住民の証言とも一致するので、この地域の開発は昭和 40 年代初頭に行われたと考えられる。

(2) 鶴が丘団地 A

この地区は、幅の広い谷の中に造成された住宅地（一部、別荘）である。谷の側壁の片盛土（ため池の南岸）とため池の上流側の谷埋め盛土が地すべり的に変動した。15 戸が危険



図－6 乙吉町における被害の分布

家屋（赤紙）の指定を受けると共に、谷埋め盛土の12戸は唯一の進入路が地すべりで破壊され、孤立した。盛土は魚沼層起源の緩い粘性土である。ため池の堰堤は、七月の台風災害で損傷していたが、応急修理によって池の水位は保たれていた。したがって、盛土内の高い地下水位が地すべりの原因となった可能性が高い。

変動ユニットは4個に分かれているが、上流部の谷埋め盛土が、最大幅100m、長さ約180mと最も大規模である。頭部の背後に人工の池があり、地下水が盛土の内部に供給されていた。高精度表面波探査（図-7）の位置では、地すべり右翼の盛土（＝地すべり土塊）の厚さは2～4mであり、左翼の谷中央部の約8mに比べて非常に薄い。昭和32年の1/1万「長岡市全図」によれば、この部分には小さな尾根と浅い谷が描かれており、造成地はそれらを含んでいる。したがって、このことが盛土厚の横断方向における急激な変化の原因となり、地すべりの複雑な三次元形状を作り出していると考えられる。

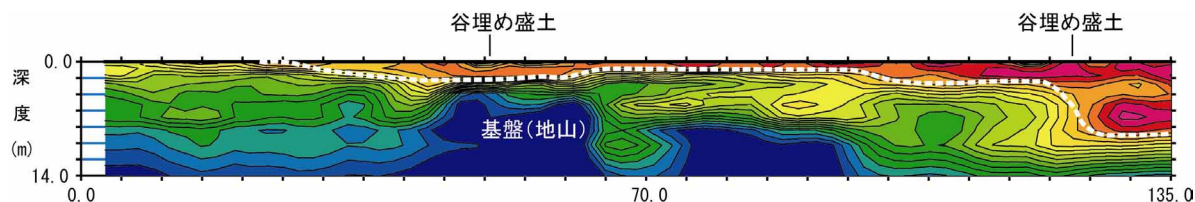


図-7 乙吉町における谷埋め盛土のS波速度横断面

(3) 鶴が丘団地B

この地区は、鶴が丘団地Aの南の台地である。台地中央部に、長さ約150m、幅約25mのテンションゾーン（段差、引張クラックの集中する部分）が発達し、台地末端部には小規模な崩壊が2箇所認められる。テンションゾーンに沿った7戸が危険家屋（赤紙）の指定を受けた。このテンションゾーンは、造成地盤の地形を切って連続する事から、人工地形改変の影響圏以深の現象を反映していると考えられる。1/5万地すべり地形分布図「栃尾」⁷⁾には、この付近に地すべり地形が描かれており、このテンションゾーンは再活動した地すべりの頭部である可能性が高い。その場合の地すべりの規模は、最大幅200m、長さは150mである。



図-8 長岡ニュータウン（陽光台）における液状化被害

いたため、被害が限定的であったと考えられる。

5.4 長岡ニュータウン

信濃川以西の丘陵地では、被害が急速に減少する。長峰町、上除町、関原町等の丘陵・段丘の造成地では、ほとんど被害が認められない。一方、より震源から遠い長岡ニュータウン陽光台1丁目では、2棟ほどが沈下、傾斜する被害が出た（写真-6）。さらに、周囲の道路では噴砂とクラックが認められ、クラックの分布は、150m四方に及ぶことから変動は造成地全体に広がっていると考えられる（図-8）。陽光台1丁目の中心部は、約35mに達する厚い谷埋め盛土である。沈下した住宅はほぼ谷の中央に位置していること、噴砂の跡が認められることから、被害の原因は液状化による沈下である可能性が高い。道路面上のクラックにも横ずれを示すものは見られず、地すべりの可能性は低い。同様の被害は、2003年十勝沖地震の際にも、札幌市美しが丘で発生しており、比較的深い谷埋め盛土特有の被害形態である。

図-2bで示した最大速度の距離（断層面までの最短距離）に対する減衰関係を陽光台付近まで外挿すると、液状化が発生した地域の最大速度は約25cm/sであったと推定される。この事は、谷埋め盛土において液状化被害が発生する下限の速度は約20cm/sと考えられている事と矛盾しない。

長岡ニュータウンは、昭和58年に分譲を開始したが、計画通りに分譲が進まず不振が続いた。当初計画の4万人規模から1万人規模へ計画は縮小されたが、平成15年時点の居住者は約3150人に留まっている。したがって、陽光台では実際に建設された住宅は36戸に過ぎない。

5.5 加茂市若宮町

震源から北北東に 40 km 以上の距離にあり相当離れているにも関わらず、加茂市若宮町二丁目の住宅団地において被害が発生した。周辺で発生した住宅地の斜面変動としてはほとんど唯一の例である。この地区は尾根を切土し、谷側に幅約 5m、高さ約 4m の片盛土を行い造成された。盛土の末端は重力式擁壁で支えられていた。谷に沿って長さ約 40m の地域が変動したため、住宅 3 戸が傾斜や沈下の被害を受けた。この造成地は昭和 40 年代の造成であるが、擁壁は老朽化しており古いクラックや地下水の浸出跡が認められた。この点で維持管理上の問題があった造成地であるといえる。

6. 議論

6.1 盛土斜面における地震動の増幅

高町団地において、2004 年 12 月 1 日～12 月 17 日にかけて余震観測を行った。この期間で最大であった 12 月 17 日の余震 (M2.7) では、造成地縁辺部の盛土上では中央部 (高町南公園) の切土部分に比べて加速度で約 1.8 倍、速度で約 1.3 倍の増幅が認められた。増幅の原因としては、地形 (崖の淵) と盛土地盤の柔らかさ (剛性の低さ) の効果が考えられる。

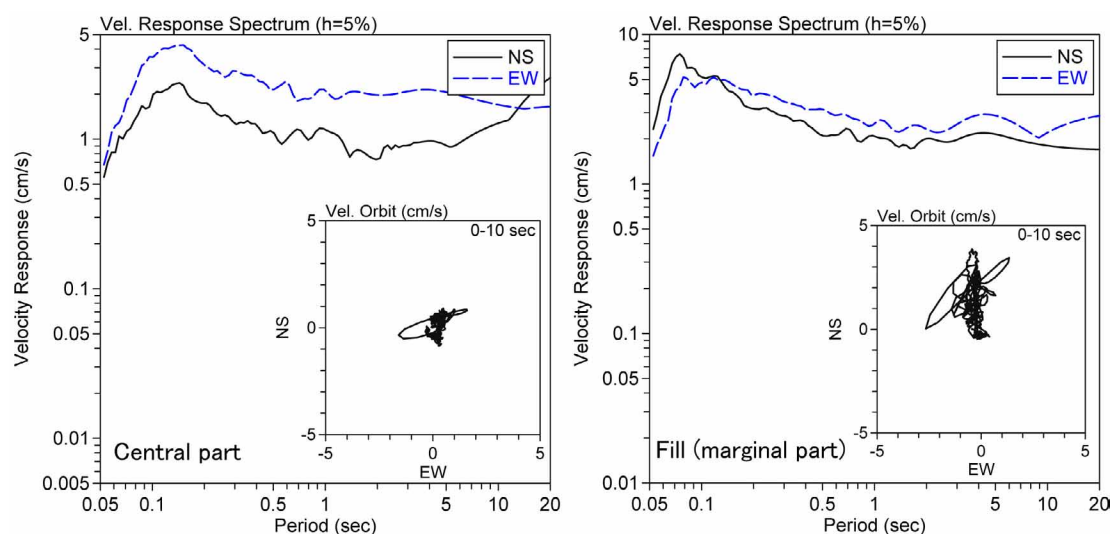


図-9 余震 (12 月 17 日) の震動特性

盛土における加速度応答のフーリエスペクトルでは、公園の記録よりも高く 15Hz に鋭いピークが認められる。これは、地震計を肩に近い場所に設置した影響と考えられる。短い卓越周期であるにも関わらず増幅が見られた点にも、同様に地形の影響が現れている。これに対し、公園での記録は 8Hz 付近になだらかなピークを有し、全体として 5 から 20Hz までフラットな連峰型のスペクトル形状である。観測地点との距離が 2km と極近傍の K-NET 長岡支所においても、本震の記録について連峰型のスペクトルが認められ、公園における余震記録は地山上における本震時の地表の記録と類似していると言える。

K-NET 長岡支所における最大加速度と最大速度は、それぞれ 870gal (NS 成分) と 62cm/s (NS 成分) であった。K-NET 長岡支所は丘陵地の切土部に位置しており、高町団地中央部と同様の地質構造である。したがって、この増幅比がそのまま適用できるとすれば、本震時における盛土上の地震動は、1G を大きく超え、速度も 80 cm/s に達する強烈なものであったと考えられる。しかし一方、盛土上における卓越周波数のピークの幅は地山の場合よりも狭く、しかも、住宅や地盤の固有振動数よりも大きかった可能性がある。このことは、共振の効果があまり無かったことを意味するので、加速度や速度の大きさの割には被害がそれほど拡大しなかった理由であると考えられる。

6.2 盛土斜面の地震応答解析

盛土の破壊メカニズムを検討するため、FLUSH による等価線形解析を高町団地の崩壊 B をモデルに行った。まず、高

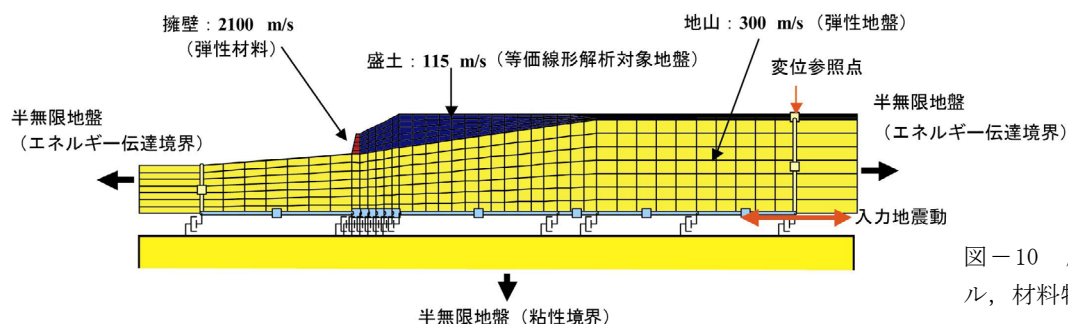


図-10 応答解析結果のモデル、材料物性及び境界条件

精度表面波探査の結果と 1/2500 地形図及び周辺の状況から、崩壊以前の地形と地盤条件を図-10 の様に想定した。ここで魚沼層群の基盤は単純な弾性体とし、その上に高さは 5m の擁壁で支えられた最大層厚は 8m の盛土を想定した。入力動は底面境界に水平に加えた。初期せん断剛性 G_0 は、表面波探査で得られた S 波速度から求めた。

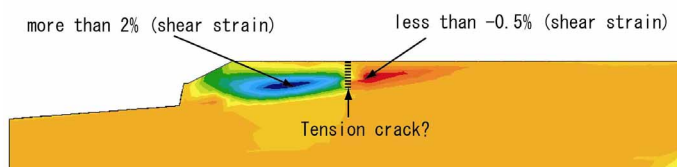


図-11 応答解析結果の一例(最大せん断ひずみの分布)

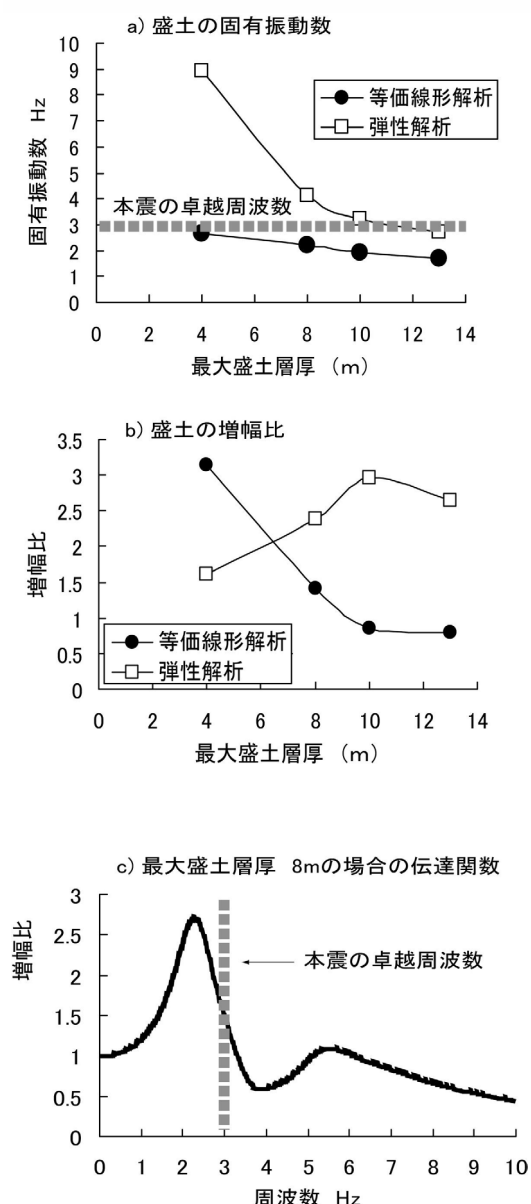


図-12 応答解析結果(振動特性と増幅)

この土圧によって擁壁の壁体自体は破壊されなかったが、擁壁の基礎前面では破壊が発生し、擁壁は前に押し出された。底面付近の柔らかい谷底堆積物の存在によって、この傾向は更に助長されたと推定される。押し出された擁壁は、横断方向(斜面に平行な方向)の変位の違いによって破壊され、その断片は水平に回転したが、崩壊土砂に載って移動したため転倒したものは少なかった。また、盛土が薄い部分でも大きいせん断ひずみに達したため、比較的造成

盛土のせん断剛性比 G_0/G と減衰定数 h のせん断ひずみ γ による変化は、同種の地盤のデータから大きく外れないという条件のもとに、団地中央部(モデルの右端部)と盛土地表部(地震計設置位置)の最大加速度が、12月17日の余震による状況とほぼ同様の関係(増幅比)になるように試行を繰り返して求めた。

入力波形は、K-NET 長岡支所(NIG028)のNS波形を使用し、モデルの右下から水平に加えた。この地域ではNS成分とEW成分にはほとんど違いが無く、むしろNS成分に地域の周波数特性が良く現れているためである。ただし、地表部で同等の加速度(870gal)が得

られるように入力波の大きさ(最大振幅)を240galに調整した。K-NET 長岡支所は、高町団地から約2km北北東に位置し、両者の震源域からの距離はほぼ同じである。また、その敷地は高町団地と同様に東西を活断層(悠久山断層)に画された丘陵であり、整地状況も御山層(中期更新統:魚沼層を整合で覆う)の切土平坦面である。このことから、K-NET 長岡支所の記録は高町団地中央部(魚沼層の切土)とほぼ同じ地盤条件を反映したものであり、入力波形として妥当なものであると考えられる。

高町団地の崩壊Bをモデルにした解析(盛土の最大厚を8mとした場合)では、盛土斜面の破壊過程に関して以下の諸点が明らかになった。

- (1) 盛土の地表部では、最大で約1400galの地表加速度が作用したと推定される。団地中央部と盛土部の地表加速度の比(増幅比)は、余震観測(12月17日)の結果よりもやや小さい。
- (2) 盛土の地表部で最大加速度応答となった時点では、盛土の内部にもほぼ1Gに達する大きな加速度の領域が形成され、盛土は全体として斜面方向に大きく変形する。
- (3) 盛土ほぼ中央の底面(盛土と地山の境界)付近に最大せん断ひずみの集中が認められる(図-11)。
- (4) 各時刻歴におけるせん断ひずみ集中域は、比較的盛土が薄い部分の底面付近に、最初に形成される。その後、この領域は、底面(盛土と地山の境界)に沿って内部すなわち盛土が厚くなる方向(斜面方向)に伝播し、盛土全体に広がった後、地震波の減衰と共に消散する。主要動が継続する間にこのプロセスが繰り返される。
- (5) 擁壁では最大約 0.16N/mm^2 に達するせん断応力が発生する。しかし、この値は一般的なコンクリート擁壁の短期許容せん断応力度($0.7\sim 1.0\text{N/mm}^2$)に比べると小さい。

これらの結果から、高町団地の崩壊B周辺における被害のプロセスは次の様に推定される。すなわち、極めて大きな加速度によって盛土が塊として運動し、底面をすべり面とする地すべりに発展した。このため、擁壁は想定外の大きなすべり土圧を受け持たなければならな

地の中心に近い地域にも道路や住宅の被害が発生した。

次に、盛土の厚さを4～13mの間変化させて同様の解析を行った。具体的には、上記の盛土厚8mに加えて、4、10、13mの場合の解析を行った。ただし、底面の傾斜は一定とし、擁壁の高さと盛土の幅を厚さに比例して変えた。その結果、以下の諸点が明らかになった。

- (1) 最大加速度やせん断ひずみ、応力等の絶対値は異なるが、傾向は上記の最大盛土厚8mの場合と同様である。
- (2) 固有振動数(加速度フーリエスペクトルのピークに相当する周波数)は盛土の厚さが増加するにつれて低下するが、いずれも本震の卓越振動数(約3Hz)に比べて小さい(図-12a)。
- (3) 団地中央部と盛土部の地表加速度の比(増幅比)は、最大盛土厚4～10mにかけて急速に低下し、10m以上厚くなるとほぼ一定である(図-12b)。
- (4) 8mよりも厚い盛土では、本震の卓越振動数(約3Hz)は伝達関数のピークよりも大きく、厚さ4m付近で一致するようになる(図-12c)。

上記の結果は、入力動(K-NET長岡支所NS波)に対する加速度及び速度応答の増幅比(団地中央部と盛土部の地表加速度、速度の比)は浅い盛土ほど大きくなり、最大盛土層厚が10mを越えると増幅はほとんど見られないことを示している。これは、短周期成分が卓越する今回の様な地震では、相対的に浅い宅地盛土に厳しい揺れが作用し、多数の地点で被害が発生するのに対し、長周期成分を含むような地震、例えば南海地震、東南海地震等のプレート境界地震ではより深い大規模な宅地盛土地盤で被害が発生することを示唆する結果である。実際に長周期の揺れが観測された2003年十勝沖地震では、震央から100km以上も離れた札幌市の住宅地で宅地盛土(厚さ15-20m)の被害が発生している。したがって、宅地地盤の被害予測においては、極表層部の震動特性の把握が重要であると言える。

7. まとめ

新潟県中越地震では、長岡市を中心とした都市域においても、丘陵地と低地の境界部に建設された造成地(ニュータウン)において、低平地特有の斜面変動が発生した。斜面変動は、主に人工斜面で発生し、長岡市郊外の東側で顕著であった。まとまった被害としては、高町団地、悠久山周辺、乙吉町鶴ヶ丘団地における宅地地盤の変動である。いずれも以前から良く知られた災害の形態であり、今回もそれが繰り返された。その意味では、過去の地震の教訓はあまり生かされていなかったと言える。今回の被害は山地で発生した自然斜面の崩壊に比べて数少なく小規模であるが、典型的な都市型の斜面災害として、詳細に検討する価値を有している。高精度表面波探査により、高町団地及び乙吉町鶴ヶ丘団地のS波速度構造を検討したところ、顕著な被害は主に浅い谷埋め盛土の部分で発生していることが判明した。高町団地において実施した余震観測の結果では、周縁部の盛土上での加速度は中央部の切土地盤に比べて約1.8倍、速度は約1.3倍に増幅されている。余震と本震の卓越周波数の違いを考慮すると、崩壊箇所(最大盛土厚約8m)の加速度は1Gを越えていたと考えられる。FLUSHによる等価線形解析の結果、入力動に対する加速度及び速度の増幅比は浅い盛土ほど大きくなり、最大盛土層厚が10mを越えると増幅はほとんど見られない。これは、短周期成分が卓越する今回の様な地震では、相対的に浅い宅地盛土に厳しい揺れが作用し、長周期成分を含むような地震ではより深い大規模な宅地盛土地盤で被害が発生することを示唆する結果である。したがって、宅地地盤の被害予測においては、極表層部の震動特性の把握が重要であると言える。

謝辞: 調査に当たって、(有)太田ジオリサーチの太田英将氏、山梨大学の後藤聡助教授、京都大学防災研究所のTewodros Ayele 博士の協力を得た。また、長岡市中央図書館文書資料室(互尊文庫)所蔵の旧版地形図を複写して使用した。本震の記録は、気象庁が収集した山古志村竹沢、K-NET長岡支所、K-NET長岡の記録を用いた。地震波形の解析はT. Kashima制作のViewWave(ver. 1.49)を用いた。ここに記して感謝します。

文献

- 1) 長岡市(1997): 長岡市史 通史編 下巻 965p.
- 2) 堀川晴央(2004): <http://staff.aist.go.jp/h.horikawa/2004Chuetsu/source.html> (2005年5月26日現在)
- 3) 国土地理院(1982): 1/2.5万地形図「片貝」(昭和55年修正測量)。
- 4) 堤浩之ほか(2001): 1/2.5万都市圏活構造図「長岡」、国土地理院。
- 5) 国土地理院(1948): 1/2.5万地形図「片貝」(昭和6年測量)。
- 6) 長岡市(1957): 1/1万「長岡市全図」。
- 7) (独)防災科学技術研究所(2004): 1/5万地すべり地形分布図「栃尾」。