

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310125

研究課題名(和文)ダイナミック地すべり現象学の新展開

研究課題名(英文)Developments of phenomenological approach on dynamic landslides movements

研究代表者

釜井 俊孝 (Kamai, Toshitaka)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：10277379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円、(間接経費) 4,710,000円

研究成果の概要(和文)："格段に精細な時間分解能"で地すべりを観測し、動的現象としての地すべり変動を解明した。具体的には、2011年東北地方太平洋沖地震によって、仙台市・緑ヶ丘4丁目で発生した造成地盤地すべりで観測した。その結果、弱層による免震効果の存在が明らかとなり、地すべり構造が、地震応答に強く影響を及ぼしている事が判明した。過剰間隙水圧と地震動の関係から、水圧の増加によるすべり層強度の喪失が地すべりを発生させた事がわかった。すべり層における局所破壊が、大規模な地すべり変動に発展する過程も観測された。今回のような精密動的観測は、強震時における地すべりの挙動を知る上で、基礎的な知見を提供するものとして重要である。

研究成果の概要(英文)：Field observations of landslide dynamic movements during earthquakes were planned and conducted in the landslides, the Midorigaoka #4 landslide, occurred in the widening fills by 2011 Tohoku earthquake. The largest seismic response of inclination was found at the weak layers, at the top soils of the base of fills and at the fragile lignite layer of bedrocks. These results indicate the self-dumping at the weak layers in ground structure. The effects of self-dumping varied depend on the thickness of weak layers and period characteristics of earthquakes. The relation between excess pore water pressure and horizontal peak ground velocity suggests that the landslide was initiated by the fully loss of shear strength of slip layer during the strong seismic motion. The performance of landslide during strong motion has not been discussed based on observed facts. Precise field observation on landslide movement during earthquake should be significant to mitigate the landslide risk in urban region.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：地すべり 東北地方太平洋沖地震 高精度観測 都市域 宅地盛土

### 1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震による谷埋め盛土の地すべり、2004年中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震による山間部の大規模地すべり等、近年の被害地震により頻発した地すべり変動は、地すべり斜面上の地震観測と地すべりの変動の高時間分解能観測（動的観測）が緊急に必要であることを示していた。

学術目的の地すべりの動態観測は、いくつかの研究機関（京都大学、土木研究所、森林総研など）で行われていた。しかし、その場合の観測の時間間隔は10分～1時間程度であり、動的現象としての地すべり性変動の解明に直接役立つデータは得られていない。この背景としては、地すべりの変動は比較的緩やかに進行するという想定に基づき、使用する地すべり観測機器の性能設計が行われてきた経緯がある。

その結果、多くの地震災害を経験しているにも係わらず、地震時における地すべりの挙動は良くわかっていない。例えば、地すべり斜面の基本的な震動特性、すなわち、地震によって地すべりのどの部分が、どの様に揺れるかといった基本的な問題についても実証的なデータはほとんど得られていなかった。

したがって、現状のままでは、予想される南海地震、東南海地震等による地すべり現象の予測はおろか、現象そのものも的確に観測する事も難しい。そこで、新たな観測態勢を整備し、地すべりの変動の高時間分解能観測（動的観測）を実施することが必要となっていた。

### 2. 研究の目的

“従来に比べて格段に精細な時間分解能“で地すべりの動態観測を実施し、動的現象としての地すべり変動の実態解明を通じて、高時間密度観測の意義を証明する事が、本研究の目的である。当初は、通常の山地斜面での観測を計画していたが、研究開始直前に東日本大震災が発生し、仙台都市域で多くの地すべりが発生した。地すべりは余震によって変動が継続していたため、これらは本研究の対象地域として非常に適している。そこで、仙台市緑が丘4丁目で発生した宅地盛り土地すべりにおいて一連の観測を行い、地震時における地すべりの動的挙動を検討した。こうした、新たな高時間分解能観測（動的観測）は、地震時の地すべりの現象の実態解明（地すべりにおける地震動の特徴、地震動による地すべりの動き方）や予測に止まらず、豪雨や融雪によって定常的に発生している地すべり現象の解明にも貢献するものであり、従来とは全く異なった地すべり現象の理解をもたらすものとして期待される。

### 3. 研究の方法

#### (1) 観測斜面の状況

緑ヶ丘4丁目は、更新世中期の段丘面への腹付け型の盛土造成地である。図-1(a)に地

表変状の分布を示す。等高線に沿って、明瞭な頭部引張り亀裂が形成されている。地すべりは、基盤の地層傾斜とは関係なく、基盤表面の最大傾斜方向に変動した。また、斜面の末端では、擁壁の倒壊、圧縮亀裂を伴う変形が顕著であった。本震から60日以上経過した時点で当初の状況と比較してみると、一部で亀裂の拡大が見られることから、地すべりの変動が継続していたと考えられる。この斜面では、1978年宮城県沖地震によっても、全く同様な地すべりが発生した。

本研究では、ボーリング調査を3箇所で行った。その結果を基に作成した地質断面図を図-1(b)に示す。地山（基盤）は、鮮新統の砂岩、泥岩、凝灰岩で亜炭の薄層が挟まれている。地質構造は、断面線方向（斜面の最大傾斜方向）に対して走向方向～やや逆傾斜の単斜構造である。盛土は混じり・砂～シルト質砂～シルト～粘土および、礫質・砂質シルトが主体であり、N値は0～4と極めて軟質である。盛土と地山（基盤）との境界には、旧表土と想定される有機質粘土層を挟在する。場所によって厚さが異なり、No.1では約85cm、No.2では約30cm、No.3では約7cmの層厚を確認した。地下水位は、各孔ともに地表付近（GL-0.45～1.10m）に形成されており、盛土部分の大半が飽和状態にあると考えられる。盛土部分と基盤の強度比が大きいことから、両者の境界をすべり面として、盛土土塊が変動したと推定される。

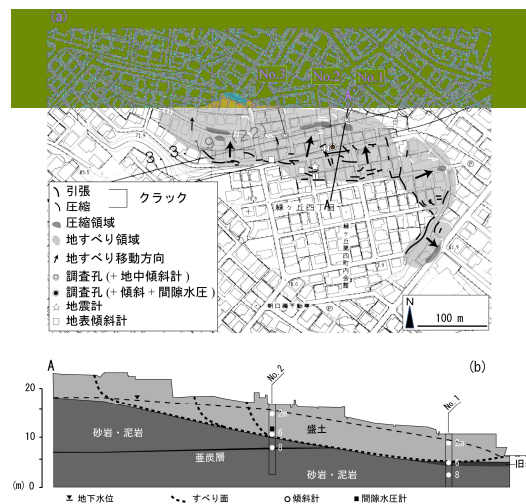


図-1 緑ヶ丘4丁目地すべりの平面図及び断面図

#### (2) 観測方法

地表地震動（速度）、間隙水圧、地中変位（傾斜）、地表傾斜について、観測を実施した。回転角（傾斜角）は、強震時における地盤の変形を議論する上で重要な指標であると考えられる。したがって、今回、地盤変動の指標として地表と地中の傾斜変動の観測を実施した。観測は2011年5月半ばから

開始されたが、初期のトラブルが解消され、順調にデータ収集が可能となったのは、6月以降であった。

地表地震動の計測に用いた速度計（近計システム、KVS-300）の固有振動数は約2Hzで、感度は約0.88V/cm/sである。これを差動入力±5V（シングルエンド入力±2.5V）、24bitの分解能を持つデータロガー（白山工業、LS-8800）で連続計測した。したがって、計測の限界は約5.68cm/sであるが、期間中に記録した最大の地表速度は約5.6cm/sであった。すなわち、観測期間中に発生した地震動は、概ね計測範囲内に収まっていたと言える。計測時刻は、データロガーに内蔵されたGPS受信器を使用し、±1ms以内の精度で定期的に校正されている。

間隙水圧の計測に際しては、No. 2孔の近傍に別孔（深度6m）を掘削し、水圧計（センサー、JW-7300-100KP）を深度5.5mの孔底に設置した。設置時点の地下水位は深度1.1mであった。深度5～6mの孔内は珪砂を充填し、上部は2層のベントナイトペレット層と掘削土砂でシールした。No. 2孔で確認された盛土底面の深度は、約6.6mである。したがって、今回計測された間隙水圧は、盛土下部の間隙水圧を代表すると考えられる。計測には、速度計と同じデータロガーを用い、他の計測結果と時刻を同期させた。間隙水圧の表示に当たっては、2011年6月17日0:00時点のゲージ圧を基準（ゼロ）として整理した。

地中変位は、No. 1、2、3の各孔の各3深度に、埋設用地中傾斜計を設置して計測した。傾斜計は塩ビパイプ（径50mm）に装着されており、設置時に作用方向を定める形式である。今回は、谷側に傾斜した場合に出力電圧が最も減少する方向に設置した。傾斜計挿入後、孔壁との間に珪砂を密に充填し、塩ビパイプと孔壁を密着させた。計測には、速度計と同じデータロガーを用い、他の計測結果と時刻を同期させた。ただし、傾斜計の出力電圧には2.6Vのオフセットが加えられている。そこで、傾斜計とロガーの間にアッテネータを挿入し、ロガーに対する入力を1/2.5に低減した。これによって、SN比が低下したが、計測結果を見ると雑音は0.005°程度に抑えられており、観測において大きな支障となっていない。

地表傾斜は、通常のプラスチック境界杭の頭部に2軸加速度センサーを装着した傾斜センサー杭（リプロ、簡易斜面変位監視システム）によって計測した。各センサーからのデータは小電力無線によって中継器（ゲートウェイ）に集められ、携帯電話網を介してサーバーに送信された。これにより、傾斜変化ベクトルのリモート監視が可能となった。しかし、中継器が無線受信のため、各センサーから中継器が見通せる必要があった。そのため、住宅が密集する本観測地では、センサー設置箇所が制限された。また、システムに使用されている2軸加速度センサーの出力には温度

の日変化の影響が大きい。そのため、生データを24時間移動平均し、結果の整理に用いた。

以上の観測に必要な電力として、地表傾斜センサー杭を除いて全て12Vのバッテリー（鉛蓄電池）を使用した。そのため、バッテリー交換時や消耗時に欠測期間が複数回発生した。また、降水量の情報としては、緑ヶ丘4丁目地すべりから北東に4.4km離れた、仙台管区气象台（宮城野区五輪）の記録を使用した。

#### 4. 研究成果

地すべり斜面においては、重力によって発生する長期的な現象と降雨や地震動による短期的な不安定化現象が複合的に発生している。本研究では、100Hzで地中変位と間隙水圧を記録した。そのため、データ整理の時間間隔を変えることにより、数秒から数ヶ月にわたる幅広いダイナミックレンジで地中の現象を調べることができた。ここでは、その結果明らかになった代表的な現象について述べる。

##### （1）数ヶ月にわたる長期の斜面変動

図-2は、No. 1孔における約1年間の地中傾斜の変化を示している。観測開始直後から、全ての深度で斜面下方に、ほぼ定速度で急激に傾斜する傾向が認められた。この傾向は、2011年12月～2012年1月まで7～8ヶ月間継続し、傾斜変化は累積で最大約0.1°に達した。2012年1月以降の傾斜変化は減少した。この長期間の斜面変動は全ての孔で認められ、イベント中の傾斜速度も、個々の傾斜計においてはほぼ一定であり、降雨イベントや余震による影響は少ない。この事は、この傾斜イベントが本震の余効現象の一つである事を示唆している。更に、比較的堅固なNo. 1孔の地山も変動している事から、この変動イベントは、地山を巻き込んだ重力性斜面変動（ボーリング深度よりも深い位置での変動）の減速過程である可能性がある。すなわち、太平洋方向にベクトルを持つ、テクトニックな余効変動の極表層における影響を捉えていたと考えられる。

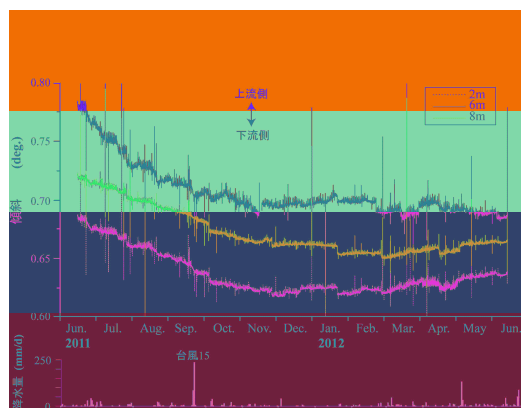


図-2 No. 1孔における長期的傾斜変動



しかし、No. 1 孔において、すべり層中での傾斜が最大である点は、盛土全体の地すべりが、地山の斜面変動よりも活発であり、今回の斜面変動の主体である事を示していると考えられる。

一方、No. 2 孔においては、地山が脆い亜炭層や風化凝灰岩で構成されるという特殊な条件が存在し、その結果、地山で最も大きな傾斜変化が生じた。すなわち、脆弱な地山では、傾斜計及び塩ビパイプの変形に伴う反力を支えられないため、孔内のパイプ全体が盛土下部を中心に回転し、その結果、パイプ両端の傾斜計（盛土上部と地山）において同程度で同方向の傾斜が計測されたと推定される。

### (2) 降雨イベントに対応する数日間の変動

観測期間中の最大の日降雨は、2011 年 9 月の台風 15 号によるものである。この期間の地すべり変動を数日の時間間隔で見ると、地すべり変動が降雨イベントと良く対応している事がわかる。

その代表例として、No. 3 孔における地中傾斜と間隙水圧の変化を見ると、9 月 19 日から始まる間隙水圧の急上昇に対応して、深度 1 m では山側に、深度 3m と 5m は谷側に向かう傾斜が加速された。このイベントは、降雨終了後、数日以内には終了した。深度 1m の山側傾斜は、盛土内部の局所的な動きか表層部の後方回転に対応すると考えられる。この緩慢な山側傾斜は、24 日早朝に発生した突然の谷側傾斜によって終了した。

間隙水圧の変化は、本格的な降雨開始以前から始まっていた。19 日の最大時間降水量は 1mm/h であったが、早朝から 0mm (0.5mm/h 以下の降水)、0.5mm/h の降水が継続していた。間隙水圧が、こうしたわずかな降雨に対しても敏感に反応した点は注目される。

### (3) 余震に対応する短時間の変動

観測期間中には多数の地震（余震）が発生し、地震動に対して間隙水圧と地中傾斜が動的に応答した。その状況は厳密には毎回異なっていたが、地震の特徴（震央距離、震源深さ、マグニチュード等）によって、いくつかの典型的なパターンが認められる。ここでは、間隙水圧と地中傾斜の応答について、それらの代表的事例を述べる。

#### ① 地中傾斜の地震応答に及ぼす地すべりの構造の影響

地中傾斜の観測では、塑性化を示す応答は認められなかった。観測期間中の地震が最大でも震度 4 と小さかった事、傾斜センサーを装着している塩ビパイプの剛性のため、短時間では塑性的な応答が現れにくい事が影響していると考えられる。

一方、地盤内に弱層が存在する場合、近地地震による応答は、そうした弱層の影響を強く受ける事が、今回の観測によって判明した。

通常、基盤に入力した地震動は、表層に近いほど増幅される。地中傾斜も同様に、地山よりも盛土で、盛土下部よりも盛土上部で大きくなる事が予想された。しかし実際には、2011 年 7 月 31 日の地震の際、No. 1 孔で観測された様に、応答は軟弱なすべり層で最も増幅され、それよりも上方の盛土における応答は地山とほぼ同等であった（図-3）。これは、地山からの盛土へ伝わった地震動が、柔らかい弱層（すべり層）を大きく揺らすことによって吸収され、上方に伝わりにくい状況が生まれたためと考えられる。すなわち、No. 1 孔での応答は、地盤に一種の免震機構が組み込まれていた結果であると言える。

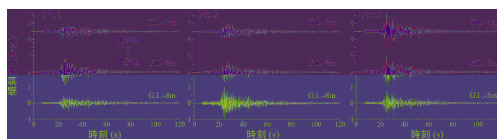


図-3 No. 1 孔における地中傾斜の地震応答

しかし、地盤内に弱層が存在しないか、存在しても厚さが薄い場合は、No. 3 孔で見られた様に、応答は通常通り上方に行くほど増幅する。また、2012 年 1 月 1 日の地震の様な遠地地震においては、地盤全体がほぼ一様に地震力を受ける。そのため応答も均一化され、地盤構造の影響がほとんど見られなかった。すなわち、応答に及ぼす地盤構造の影響は、200km 以内で発生する近地地震において顕著であるが、遠地地震においては小さいと言える。

緑ヶ丘 4 丁目地すべりの様に、柔らかい弱層（すべり層）が基盤の直上にほぼ水平・層状に発達する地盤構造は、多くの自然斜面の地すべりにおいても認められる構造である。一方、地すべりの地中における地震応答の観測事例は、きわめて少ない。したがって、今回の観測結果は、人工斜面、自然斜面を問わず、強震時における地すべりの応答を予測する上の基礎的な知見としての意義を有している。

#### ② 地震動と過剰間隙水圧

図-4 に、最大水平地動速度（PGV）と過剰間隙水圧の関係を示す。ここで過剰間隙水圧は、地震直前の静水圧と地震中の最大間隙水圧の差として定義される。これより、PGV が約 2cm/s よりも大きい地震では、過剰間隙水圧が 1.5kPa を越え、間隙水圧応答は非弾性的な挙動を示していた事がわかる。土質試験結果とボーリング時の地下水位記録から、No. 2 孔の深度 5.5m（間隙水圧観測地点）における有効上載圧は、約 59kPa と推定される。これより、間隙水圧応答に非弾性的挙動が現れる過剰間隙水圧比は、約 2.7% と推定される。これまでの同様な観測において、この境界の過剰間隙水圧比は 2~3% とされており、

今回の結果はそれと一致する。

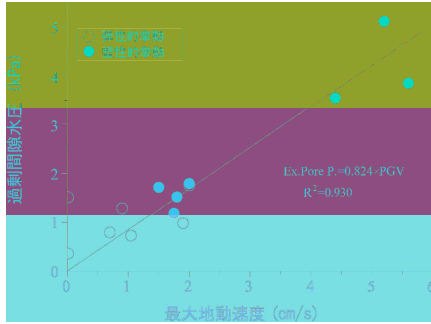


図-4 過剰間隙水圧と最大地動速度 (PGV) の関係

図-4 の関係を原点を通る直線と仮定し、過剰間隙水圧 $=0.824 \cdot PGV$  の回帰式が得られた。PGV と過剰間隙水圧の関係は、これまでも様々な地震において議論され、両者の間にほぼ比例関係が成り立つ事が、PGV=20cm/s 程度までは知られている。そこで、今回得られた関係が地すべり全体で成り立つと仮定すると、深度 6~7m のすべり層において過剰間隙水圧比が 1.0 に達する PGV は、76~86cm/s と推定される。余震観測の結果から本震の波形を合成した結果によると、本震時の PGV は 100cm/s を越えたと推定されている。すなわち、緑ヶ丘 4 丁目地すべりでは、本震時の大幅な過剰間隙水圧の上昇によってすべり層の強度がほぼ失われ、地すべりの発生に至った事が示唆される。

### ③局所破壊と地すべり変動

9 月 24 日の早朝、それまで数日間山側傾斜を続けていた No. 3 孔の深度 1m の傾斜計は、短く 2 回振動した後、突然谷側に大きく傾斜した。同様の現象 (緩慢な山側傾斜後の突然の谷側傾斜) は、No. 1 孔においても発生した。図-5 (a) は、2012 年 3 月 2 日に No. 1 孔で発生した現象を示している。このケースでは、地山における傾斜変動は見られず、すべり層 (深度 6m) での変動が盛土上部 (深度 2m) よりも明瞭である。したがって、この突然の谷側傾斜は、重力性の地すべり変動の発生を示すと考えられる。

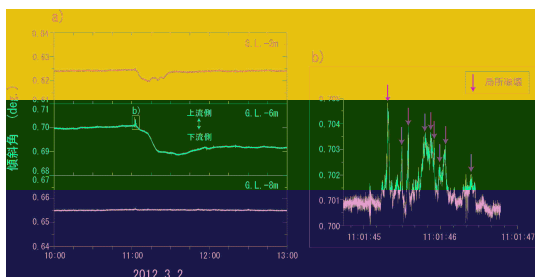


図-5 No. 1 孔における地すべり変動と局所破壊

3 月 2 日の地すべり変動 (突然の谷側傾斜) に先だて、短周期の山側変動が見られた。特に、深度 6m (すべり層) の傾斜変化に明瞭に現れている。図-5 (b) は、その部分を拡大して示している。これより、この区間において一回が数秒~数十秒間のスパイク状の山側変動が、少なくとも 8 回連続して発生したことがわかる。こうしたスパイク状の変動の発生原因は現時点では不明である。しかし、同様の数秒~数分間周期の山側変動イベントは、このすべり層において他にも複数回発生している。この事から、この種のスパイク状の変動は、すべり層における地盤の局所的破壊に関連する可能性が高いと考えられる。すなわち、上記の 2011 年 9 月 24 日や 2012 年 3 月 2 日の記録は、地盤の局所破壊が成長し、より大規模な地すべり変動に発展する過程が、偶発的にとらえられたものと考えられる。

### (4) 地すべりのプロセス

採取した土質試料の繰り返し 3 軸圧縮試験を実施した。その結果をもとに、本震時の推定波形を入力として、斜面の動的変形解析を実施した。すべり層におけるせん断ひずみの発達過程と変位の時刻暦を検討した結果、約 3 分間継続した本震のどの時点で、地すべりが発生したかを推定することができた (図-6)。すなわち、1 回目の大きな揺れ (25-35 秒) では、破壊領域は斜面中央部の一部に限定され、全体の崩壊 (地すべり) は発生しなかった。しかし、2 回目の大きな揺れ (73-83 秒) では、破壊領域が盛土底部全体に拡大したと推定される。

すなわち、緑ヶ丘 4 丁目地すべりでは、本震時の大幅な過剰間隙水圧の上昇によって、頭部と末端部ですべり層の強度がほぼ失われると同時に、中央部 (底部) ではせん断破壊が生じた。これらによって、すべり面が斜面全体に貫通し、地すべりの発生に至った事が示唆される。

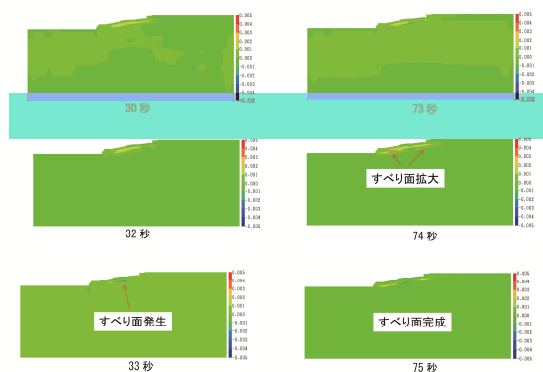


図-6 本震における破壊領域の発達過程

(5) まとめ

本研究によって、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震によって発生した、仙台市・緑ヶ丘4丁目の造成地盤(盛土)を対象に地すべり変動、地表地震動、間隙水圧の高時間分解能による観測が初めて実施された。観測の結果、地震動、間隙水圧、地すべり変動の三者の関係が、主として以下の様に明らかになった。

- ①地震から10~11ヶ月後の2011年12月~2012年1月頃まで、地山を巻き込む重力性の斜面変動が継続した。しかし、地中傾斜の変化速度、累積変化量は、盛土下底のすべり層(旧表土)中で最大であり、盛土全体の地すべりが、今回の斜面変動の主体であると考えられる。
- ②地中傾斜の地震応答は、すべり層や亜炭層など地盤内の弱層で最大となり、それよりも上部の盛土では増幅率が小さくなる傾向が認められた。この弱層による免震効果は、弱層の層厚や地震の震央距離によって異なる。すなわち、地すべりの構造が、地震応答に強く影響を及ぼしている事が判明した。この事は、地震による地すべり変動を予測する上で重要な発見である。
- ③過剰間隙水圧は最大水平地動速度(PGV)にほぼ比例して増加した。この関係から、地すべりのすべり層において過剰間隙水圧比が1.0に達するPGVは、76~86cm/sと推定される。本震時、緑ヶ丘4丁目ではそれを上回る大きさのPGVが推定されており、すべり層における大きな過剰間隙水圧の発生と強度の喪失が、地すべりの主要な要因と推定される。
- ④すべり層における局所破壊が成長し、より規模の大きい地すべり変動に発展する過程を示唆する記録が得られた。地すべり変動をより深く理解するための基礎的情報として重要である。

宅地盛土の地すべりは、緑ヶ丘4丁目地すべりの様に下底部にすべり層となり得る柔らかい弱層(旧表土)が存在することが多く、地盤構造は自然斜面の地すべりと類似する点が多い。一方、地すべりの地中における地震応答の観測例は、きわめて少なく、地震による地すべりの発生過程には未解明な点が多く残されている。したがって、今回の様な精密な動的観測は、強震時における地すべりの挙動を知る上で、基礎的な知見を提供し、ダイナミック地すべり現象学の構築に資する試みとして重要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

- ①釜井俊孝、2011年東北地方太平洋沖地震

で発生した造成地盤地すべりにおける変動量観測. 応用地質、査読有、Vol.53、No.6、pp.282-291、2013

DOI:10.5110/jjseg.53.282

- ②秦吉弥、釜井俊孝、野津厚、王功輝：拡張型サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市緑ヶ丘団地での強震動の評価、土木学会論文集A1、査読有、Vol.69、No.2、pp.153-158、2013

DOI: 10.2208/jscejsee.69.153

- ③釜井俊孝、谷埋め盛土における地震動と間隙水圧の観測、日本地すべり学会誌、査読有、Vol.48、No.6、pp.30-39、2011

DOI:10.3313/jls.48.334

[学会発表] (計10件)

- ①Kamai,T.,Dynamic movements of the valley fill-type landslide-Monitoring of the landslide induced by the 2011 Tohoku Earthquake, Proceedings of the international symposium in commemoration of the 5th Anniversary of the 2008 Wenchuan Earthquake, Chengdu, China, pp.76-81, May 12-18, 2013 (招待講演)

[図書] (計2件)

- ①Kamai,T.,Ohta, H., Ban Y., and H. Murao, Landslides in urban residential slopes induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. DPRI Series Vol.1 "Studies on the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake", Springer, 103-122, 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

釜井 俊孝 (KAMAI Toshitaka)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：10277379

(2) 研究分担者

末峯 章 (SUEMINE Akira)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：00109092

王 功輝 (OH Kouki)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号：50372553

渋谷 拓郎 (SHIBUTANI Takuo)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：70187417

西山 賢一 (NISHIYAMA Kenichi)  
徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部 准教授  
研究者番号：60363131

秦 吉弥 (HATA Kichiya)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：80463561