

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282110

研究課題名(和文) 街の揺れ方の観測研究-造成斜面での地震応答観測網の構築と脆弱斜面抽出手法の確立-

研究課題名(英文) Seismic response of townscape including artificial valley fill

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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：大都市の斜面における稠密地震・地中変位・間隙水圧観測を複数の地点で実施し、大地震時における、都市斜面の地震応答を詳細に検討した。2006年の宅造法改正以来、多くの大規模宅地盛土分布図が公開されている。しかし、これらを有効に活用し、ハザードマップとして減災に役立てるためには、斜面における脆弱性の空間的な分布を検討する必要がある。本研究では、東京西南部、横浜中心部で観測研究を実施し、これまでの地震被害想定等であまり考慮されていなかった、住宅密集地の脆弱斜面の評価手法を検討した。その結果、台地縁辺部と谷埋め盛土における異常な増幅、ローラースライダーモデルを裏付ける強震時の運動などが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Throughout Japan, large scale residential development on hillsides accompanied by massive grading operations in the suburbs of large cities started in the 1960s. However, the performance of landslide during strong motion has not been discussed based on observed facts. Thus, both earthquake ground motion and pore water pressure observations in the urban slopes including valley fill slopes were conducted in the southwestern Tokyo and the central part of Yokohama city. Notable amplification of seismic response at the edge of terrace and on the valley fill slope, and the characteristic motion of valley fill controlled by valley shape were clearly observed during strong earthquake. These basic information will be valuable for discussing on prediction of valley fills type landslides induced by strong seismic motion in urban region. Precise field observation on landslide movement during earthquake should be significant to mitigate the landslide risk in urban region.

研究分野：応用地質学

キーワード：谷埋め盛土 地震観測 間隙水圧 宅地

## 1. 研究開始当初の背景

高度成長期以降の都市への人口集中により、わが国の大都市では斜面を造成した宅地に居住する形式が一般的に見られるようになった。それに伴い、都市の斜面災害も急増したが、斜面住宅地の拡大速度に行政的対応が追いつかない状態が続いている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では仙台市を中心とする東北地方南部（ただし南端は茨城県東海村）で、造成宅地の地すべりが多数発生し、住宅に大きな被害が出た。仙台市では1978年宮城県沖地震においても同様の被害が発生しているため、東日本大震災では過去の教訓が十分に生かされたとは言いがたい。

一方、2006年の宅造法改正によって、自治体による実態調査が行われるようになり、大規模宅地盛土分布図が、2013年の時点で、川崎市、横浜市、京都市、仙台市（2013年）を含めて12県市で公開されている。この様に都市域の宅地斜面の危険性は広く認識されつつあるが、分布図公開後の行政の対応（2次調査）は低調で、実質的な対策はほとんど進展していない。

さらに、対策が予定されている場合も、自治体の施策は、地盤調査と震度法による安定解析、対策工事の実施という従来型の地すべり調査・対策であり、現象の科学的な解明から導かれた対応とは言いがたい。事実、仙台における提案者らの観測では、本震時に被災した宅地斜面では1000cm/s/sを越える地表最大加速度が発生し、地盤内では液状化の発生を意味する高い過剰間隙水圧比に達したと推定されている（釜井,2013）。東京西南部、横浜中央部で実施している観測では、崖際や谷埋め盛土上の地震動は平坦地（周辺地山）の数倍に達する場合がある事が判明している。したがって、最大加速度が重力加速度を超える状況は、大地震の際の斜面上では当然予想されるべき事態である。しかし、自治体の施策の前提（技術ガイドライン）は、「震度0.25（最大加速度換算で、400-450cm/s/s）過剰間隙水圧は考慮しない」ということなので、施策の前提と災害の実態とは相当乖離していると言える。

こうした現実と乖離した施策が生まれる原因としては、地震時における宅地斜面の“揺れ方”に関して、実証的研究がほとんどなされていなかった事が背景にある。今回の東日本大震災においても、復興を急ぐあまり、被災した造成地斜面における間隙水圧や地中変位の高時間分解能観測（動的観測）は、提案者らのものを除き実施されなかった。すなわち、今回の大震災後ですら、造成地斜面の被害実態が、将来に生かせるようなレベルで蓄積されているとは言いがたい。

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、首都直下地震による造成地斜面の被害予測や減災を計る事は難しい。そこで、不十分なままの実証的研究の

基盤を強化する試みとして、観測態勢を整備し、造成地斜面における地震応答（地震動、地中変位、間隙水圧等）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

地表付近での不均質地盤構造に由来する地震動の変化は、公式の地震被害想定では“ローカル・サイト・エフェクト”として一括され、一辺が数百mの粗いメッシュで評価されてきた。しかし、崖際や谷埋め盛土などの造成地の斜面では、地震応答に強い影響を与える微地形や盛土のスケールは、メッシュサイズ以下であることが多く、それらの分布も不規則である。したがって、斜面における地震被害想定は、現在の方法では相当に大きな誤差を含んでいる。こうした状況を改善するためには、斜面の微地形区分を基礎とし、ローカル応答の実測に基礎を置く被害想定が必要である。すなわち、斜面変動の有無を決定する要因である地震応答（地震動、間隙水圧、地中変位）を知るための観測研究は都市の斜面における減災・防災の要であると言える。

そこで本研究では、崖際、谷埋め盛土、切土部分という街区を構成する地形要素を包含する規模で、その街区の地震動、間隙水圧、地中変位応答の違いを、地震の特徴や地下水条件ごとに整理し、脆弱斜面を特定することを目指した。こうした研究によって、将来の地震被害想定は、より被害実態に即した高精度のものになると期待される。

## 3. 研究の方法

### (1) 観測斜面の状況

観測を実施した斜面は、横浜市神奈川区三ツ沢下町の台地周辺と東京都目黒区八雲の衾町公園周辺である。三ツ沢下町観測点では、地表地震動観測点を5点（速度計4点、加速度計1点）、間隙水圧を2点（谷埋め盛土中と基盤直上）、地中地震計2点八雲観測点では地表地震動3点（速度計）と間隙水圧、地中傾斜変動3深度を100Hzで観測している。時刻同期はGPS時刻信号を利用してロガー側で行っている。

### (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2013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 層のペ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。

#### 4. 研究成果

##### (1) 2014 年 5 月 5 日 5 時 18 分の地震

この地震の震源は伊豆大島沖で、M6.0、震源の深さは 156km であった。K-net 新宿では、PGA 59.8cm/s/s 深度 3.5、K-net 横浜では、PGA 68.8cm/s/s 震度 3.9 を記録した。この地震で特筆すべき点は以下の 3 点である。

台地縁辺と谷埋め盛土における異常な増幅  
この地震では、三ツ沢下町の台地中央部での地震動は、低地に設置されていた K-net 横浜よりも小さく、PGA は 47.8cm/s/s であった。しかし、台地縁辺部の盛土上に設置した地震計では PGA が 144.9 cm/s/s に達する強い地震動が記録された。実に 3 倍以上である（図 1）。崖際の盛土では増幅が極めて大きいと言える。さらに、八雲（衾町公園）では、谷埋め盛土上で地震動の顕著な増幅を示す記録が得られた。すなわち、水平の PGA（微分値）が

135.1cm/s/s、垂直の PGA（微分値）が 156cm/s/s に達した。この時、台地上（地山）での地震動の PGA は 67.1 cm/s/s であり、K-net 新宿と大差は無かった。この異常な上下成分の増幅は、盛土内での S-P 変換と思われる。スペクトルを比較したところ、S 波上下動は 5 Hz 前後、20-24 Hz において顕著な増幅を示すことが分かった。盛土内の構成物質による顕著な速度不連続や地下水位によって増幅が作り出された可能性がある。

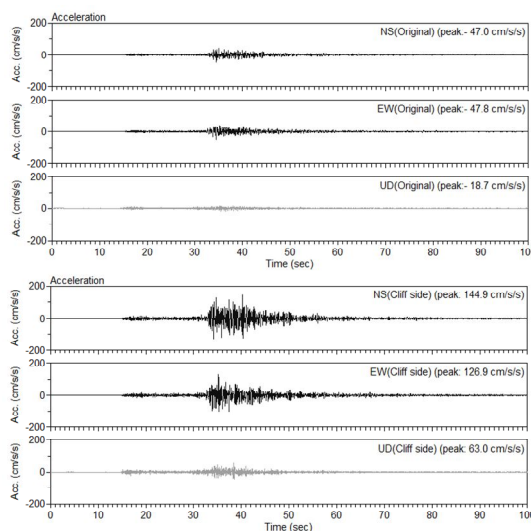


図1 2014年5月5日の地震における台地の応答（三ツ沢）。台地中央部（上）に比べて、縁辺部の盛土（下）では大きく増幅している。

##### 谷埋め盛土の強震時の挙動

八雲（衾町公園）に設置した地中傾斜計の変動パターンは、強震動の継続中に大きく変化した（図 2）。強震時の地中傾斜計で観測された傾斜方向は、地震加速度と傾斜変化の両方が混在する見かけの傾斜であるが、水平粒子軌跡はほぼ盛土の運動を反映していると考えられる。この時、P 波の段階ではほぼ等方的であった盛土の運動が、S 波の到来直後には、谷埋め盛土の短軸方向（かつての谷筋に直交する方向）にベクトルを持つ運動に変化し、さらに S 波のピーク段階では、盛土長軸方向（かつての谷筋の方向）にベクトルを持つ運動に変化した。S 波の到来と共に間隙水圧が急上昇し、盛土は塑性化（部分的に破壊）したので、観測結果は、まず盛土が短軸方向にローリング運動し、摩擦が切れてから盛土長軸方向に動いたことを示すと考えられる。この事は、過去の被害事例から推測された盛土の変動メカニズムと調和的である。

##### マイクロフォン効果

八雲（衾町公園）において、S 波ピーク以前の上下地震動と間隙水圧は逆位相の関係にあった。すなわち、地表面が押される（低下する）と間隙水圧が上昇した。一方、上下地

震動と気圧の関係は、正位相の関係であった。すなわち、地表面が上がると気圧も上昇した。気圧の変化はわずかではあったが、変位による高さの変化幅よりも大きかった。強震時に、地表面の振動が大気の振動を励起することは良く知られている。ここでの観測結果は、そうした広義のインフラサウンドに属する現象と考えられる。

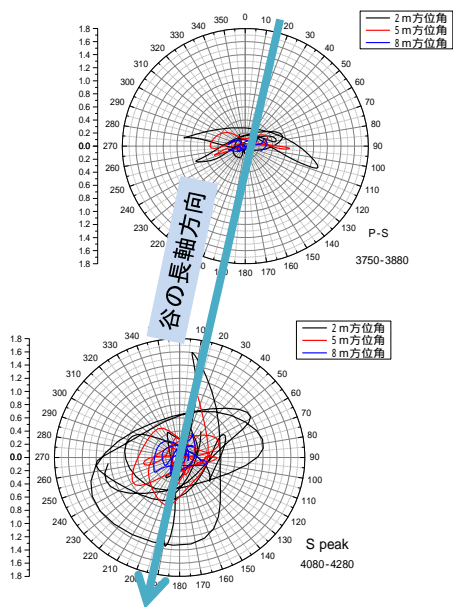


図2 2014年5月5日の地震における谷埋め盛土の運動(八雲)。S波到来時(上)に対して、ピーク時(下)では運動方向が異なっている。

## (2) 2015年9月12日5時49分の地震

この地震の震源は、東京湾西部で、M5.2、震源の深さは57 kmであった。観測点に対してはほぼ直下型の地震である。K-net 新宿では、PGA 138.5 cm/s/s、震度 3.9、K-net 横浜では、最大加速度 57.5 cm/s/s 震度 3.2 を記録し

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

釜井俊孝、2016年熊本地震による斜面災害、地震工学会誌、査読無、No.29、2016 27-32.

[https://www.jaee.gr.jp/secure/AP/com/download\\_contents.php?filename=/group50/kaishi29.pdf](https://www.jaee.gr.jp/secure/AP/com/download_contents.php?filename=/group50/kaishi29.pdf)

秦吉弥・釜井俊孝・王功輝、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく1968年十勝沖地震における剣吉中学校造成斜面での強震波形の評価、日本地すべり学会誌、査読有、Vol. 52、No.2、2015、26-31.

<http://doi.org/10.3313/jls.52.74>

Kamai, T., Landslides urban residential slopes induced by strong earthquakes in Japan,

た。K-net 新宿において震度のわりにPGAが大きいのは、瞬間的な地震動が表れているためである。

この地震においても台地縁辺(崖際)と谷埋め盛土での大きな増幅が見られたが、その傾向は2014年5月5日の地震とはやや異なっていた。すなわち、三ツ沢下町の台地中央部での地震動は、低地に設置されていたK-net 横浜よりも大きく、PGA(微分値)は89.2 cm/s/sであった。2014年5月5日と逆である。この時、台地縁辺の盛土でのPGAは、148.5 cm/s/sであったので、増幅率は低下したことになるが、大きな増幅である事には変わりはない。一方、この斜面下に位置する谷埋め盛土では、PGA(微分値)220.0 cm/s/sに達する大きな増幅が観測された。この時、盛土中の間隙水圧は急上昇したまま、しばらく戻らないという盛土が塑性化(部分的に破壊)した事を示す変化を示した。

## (3) 議論 - 観測結果が示すもの -

今回報告した観測結果は、震度4にも満たない中小規模の地震によるものである。しかし、そうした地震においても崖際の盛土や谷埋め盛土で顕著な増幅が見られ、間隙水圧には盛土が塑性化(部分的に破壊)したことを示すパターンが表れた。この事は、こうした場所(崖際の盛土と谷埋め盛土)が、いわば「街の傷」であり、次の震災ではこうした傷が執拗に攻撃され、具体的な災害の場となるであろう事を示唆している。それを実証的に予測する上で、今回の様な観測を継続することが必要である。

しかし、観測によってメカニズムが明らかになったとしても、大都市域ではこうした場所が無数にあるため、全てをハード的に対策することは不可能である。したがって、最低限の対策として、「街の傷」がどこにどの様に分布しているのかについて、住民も含めた情報共有が強く望まれる。

Episodes (Journal of Inter. Geoscience), 査読有, Vol.37, No.4, 2014, 295-302.

<http://www.episodes.org/journalArchiveArticle.do>

[学会発表](計10件)

Kamai, T., Landslides in urban residential slopes induced by strong earthquakes in Japan. Keynote speech of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Mega Earthquake Induced Geo-disasters and Long Term Effects, 2015, Chengdu, China. [招待講演]

[図書](計2件)

釜井俊孝、埋もれた都の防災学 - 都市と地盤災害の2000年 -、京都大学学術出版会、2016、209.

## 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

土井 一生 (DOI Issei)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号：00572976

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

倉岡 千郎 (KURAOKA Senro)  
日本工営(株)・中央研究所・研究員  
研究者番号：30463540