



谷埋め盛土地盤における降雨に伴う水分変化と地震応答特性

森 友宏¹⁾，千葉 崇²⁾，渦岡良介³⁾，風間基樹⁴⁾，

1) 正会員 東北大学大学院，助教 博士（工学）

e-mail : mori@soil1.civil.tohoku.ac.jp

2) 鹿島建設株式会社 東北支店

e-mail : chibatak@kajima.com

3) 正会員 徳島大学大学院，教授 博士（工学）

e-mail : uzuoka@ce.tokushima-u.ac.jp

4) 正会員 東北大学大学院，教授 博士（工学）

e-mail : kazama_motok@civil.tohoku.ac.jp

要 約

大地震時に大規模造成宅地の谷埋め盛土地盤が基礎地盤の破壊による被害を受けることが懸念されている。しかし、実際の谷埋め盛土地盤において地震時応答を計測し、切土地盤との地震応答の差異を検討した事例は極めて少ない。地震時の谷埋め盛土地盤の安定性を評価するためには、基礎的なデータの蓄積が望まれている。そこで著者らは、実際の大規模造成宅地内の谷埋め盛土斜面およびその周辺の切土部に、地震計4台、雨量計、地下水位計（間隙水圧計）、土壌水分計等を設置して原位置アレー地震観測を行い、観測データを蓄積した。本論文では、これら実際の観測記録に基づき、谷埋め盛土地盤と切土地盤における地震応答の差、および、谷埋め盛土内の水分が地震応答に及ぼす影響について考察を行った。

キーワード： 谷埋め盛土，切土，原位置観測，土壌水分，地震応答

1. はじめに

これまでの地震被害事例に関する整理および解析から、谷埋め盛土地盤は地震時に被害を受けやすい事が示されている。浅田¹⁾は1978年宮城県沖地震における丘陵地宅地地盤の被害調査を行い、谷埋め盛土部と切盛境界部において地盤変形による家屋被害が大きい事を示した。柳澤ら²⁾は1993年釧路沖地震における宅地地盤の被害の整理を行い、切土地盤と盛土地盤における被害程度の差を示し、谷埋め盛土地盤が地震時に被害を受けやすい事を示した。釜井、守随³⁾は1995年兵庫県南部地震に関して多数の谷埋め盛土地盤における被害の有無を統計的に整理し、谷埋め盛土が地震時に被害を受けやすい事、谷埋め盛土の横断形状が被害の有無と関係があることを示した。

しかし、このような谷埋め盛土地盤における地震被害事例が数多く報告されているものの、谷埋め盛土地盤と切土地盤における地震時挙動の違いを実際に観測した事例は少ない。実際に盛土法面で地震動観測が行われた貴重な例として、兵庫県神戸市の高盛土地盤の例⁴⁾、北海道釧路空港の高盛土の例⁵⁾等

が挙げられるが、これらの例は高盛土の地震動増幅特性等を検討したものであり、盛土地盤と切土地盤との地震時応答の差を検討したものではない。

また、谷埋め盛土地盤を構成する土の地震時の動的特性は、土に含まれる水分によって変化するため、降雨による谷埋め盛土地盤内の水分変化と地震応答との関係を観察する事は重要である。降雨と斜面内の水分変化に関する研究、観測は数多く行われている（例えば^{6),7)}）が、降雨による地下水位変化に起因する斜面崩壊の研究や地表面付近の風化層の崩壊に関する研究が多く、谷埋め盛土のような厚い盛土の水分量と地震応答との関係に着目した事例は無い。

本論文では、谷埋め盛土地盤における地震時安定性を評価するための基礎データの収集を目的として、実際の大規模造成宅地内の谷埋め盛土斜面およびその周辺の切土部に、地震計4台、雨量計、地下水位計（間隙水圧計）、土壌水分計等を設置し、常時観測を行った結果を示す。また、観測結果を基に谷埋め盛土地盤と切土地盤における地震応答の違い、および谷埋め盛土内の水分が地震応答に及ぼす影響について示す。

2. 観測対象とした谷埋め盛土斜面および計測機器

2.1 観測対象とした谷埋め盛土斜面の概要

本研究で観測対象とした谷埋め盛土斜面は、宮城県仙台市内のある大規模造成宅地の一角にある谷埋め盛土斜面である。この大規模造成宅地は1960年代半ばから1973年（昭和48年）に開発が行われた。図1に、観測対象とした谷埋め盛土斜面周辺の1966年（昭和41年）時の地形と2002年（平成12年）時の地形を比較したものを示す。また、図2に観測対象とした谷埋め盛土斜面の全景写真を示す。写真の撮影方向は図1に示す通りである。観測対象とした谷埋め盛土斜面は図1の楕円で示した部分で、現在は公園として利用されている。観測対象とした谷埋め盛土斜面は、かつての谷地形の入口部にあたり、水田として

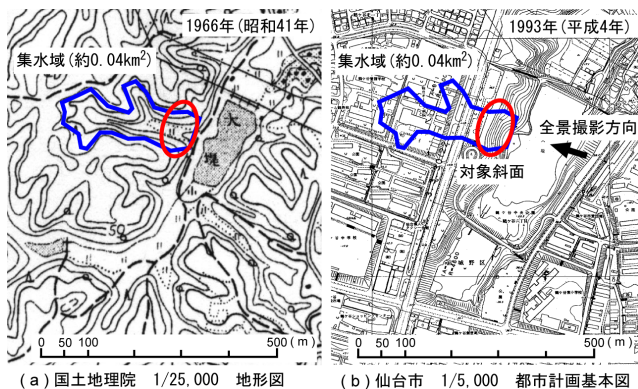


図1 新旧地形図の比較



図2 谷埋め盛土斜面の全景

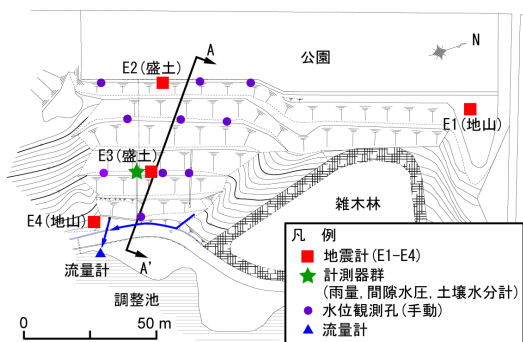


図3 谷埋め盛土斜面の平面図

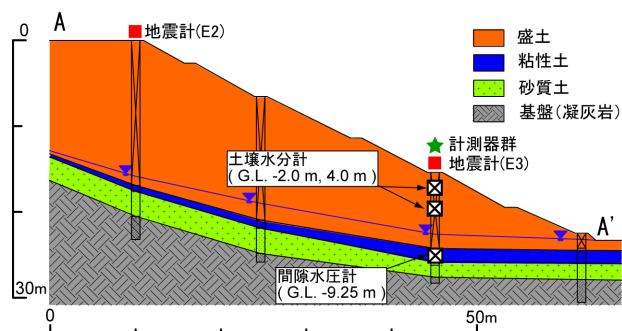


図4 谷埋め盛土斜面の推定断面図

利用されていた。宅地造成によってこの谷地形が埋め立てられ、現在の平坦な地形となった。観測対象とした谷埋め盛土斜面の法尻部には池があり、現在も調整池として使用されている。また、観測対象とした谷埋め盛土斜面は、2000年（平成12年）7月、および2002年（平成14年）7月の豪雨によって、法尻部が崩壊する被害を受けており、2002年（平成14年）の災害復旧時に、斜面法尻部分に排水対策工（蛇籠工）が施工された。

次に、観測対象斜面の詳細平面図を図3に、対象斜面におけるボーリング調査（10測点）、スウェーデン式サウンディング試験（32測点）の調査結果に基づいて推定された対象斜面の想定断面図を図4に示す。図4に示した地下水位は2週間以上無降雨の状態が続いた時の水位であり、観測対象とした谷埋め盛土斜面のほぼ最低水位を示している。盛土斜面は、周辺の凝灰岩の地山を切り盛りして造成されたため、盛土は破碎された凝灰岩、風化凝灰岩から構成されている。盛土の高さは約25m、盛土の厚さは最大17mである。盛土の締固めの程度は緩く、地山部のN値は $N > 50$ であったのに対し、盛土のN値及びスウェーデン式サウンディング試験による換算N値はおおむねN 5であった。

2.2 計測機器および設置位置

設置した計測機器の一覧を表1に示す。また、計測機器の設置位置を図3、図4に示す。谷埋め盛土地盤と切土地盤との地震応答の差を観察するために、地山上部（E1（E4比標高+23 m））、盛土上段（E2（盛土厚17.0 m））、盛土中段（E3（盛土厚8.8 m））、地山下部（E4）の計4箇所に地震計4台を設置した。地震計は、盛土地盤にG.L.-1.5 mまで打ち込まれた鋼製パイプを抱き込んだ0.5 m × 0.5 m × 0.5 mのコンクリート製基礎にアンカーで固定した。地震計の計測開始のトリガーは連動しており、4台の地震計のうち、いずれかの地震計で設定値以上の加速度が検出されると、全ての地震計で同時に計測が開始される。

地下水位は盛土中段の地震計E3の隣に埋設した間隙水圧計を用いて計測した。間隙水圧計はボーリング孔を利用して粘性土層中（G.L. - 9.25m（基準高：地震計E3））に設置した。ケーシングパイプ内には現地土を突固め充填し、雨水の進入を防ぐため孔口部および周辺地表面をモルタルで閉塞した。

また、降雨による盛土地盤内の土壌水分の変化を観察するために、盛土中段の地震計E3の隣に誘電率測定型の土壌水分計をG.L. - 2.0 m、-4.0 m（基準高：地震計E3）に2台設置した。地表面付近にテンシオメータを設置して降雨による体積含水率の変化を計測した事例はあるが、本事例のように盛土の深い位置における体積含水率の変化を計測した事例は無い。ケーシングパイプ内に現地土を突固め充填した所に土壌水分計を挿入し、それ以浅のケーシングパイプ内にも現地土を突固め充填し、孔口部および周辺地表面をモルタルで閉塞した。誘電率測定型の土壌水分計は土質、地盤の密度による測定値のばらつきが比較的大きいため、あらかじめ現地土を用いて密度、含水量を変化させた予備試験を行い、測定値の較正を行った。

降水量は盛土中段の地震計E3の隣に設置した雨量計で計測を行った。雨量計の周辺には大きな樹木は無く、降水量の計測値に影響は少ないと考えられる。

表1 計測機器の一覧

機器種類	機器名称	型式	製作会社	分解能	周波数範囲（-3dB）	計測間隔
地震計	E-キャッチャー	-	応用地震計測	水平：4892/65536 (cm/s ²) 上下：6872/65536 (cm/s ³)	水平：DC-20 (Hz) 上下：DC-4 (Hz)	0.01 (sec)
機器種類	機器名称	型式	製作会社	分解能	精度	出力
雨量計	転倒ます型雨量計	RT-5型	池田計器製作所	0.5 (mm)		
地下水位計	高精度間隙水圧計 アナログ型	MODEL-4585	応用地質	0.175 (kPa)	±0.5 (%FS)	0 - 2000 (mV)
土壌水分計	Theta Probe (誘電率測定型)	TYPE ML2x	Delta-T Devices	0.0045 (%vol)	±0.01 (%vd)	

3. 降雨による地下水位，土壤雨量指数，土壤水分の関係

地震時の土のせん断抵抗力は，土に含まれる水分量に左右されるため，地震時の谷埋め盛土の安定性を評価するためには，地震発生時の谷埋め盛土地盤に含まれる水分量を把握する事が必要である．本論文では，谷埋め盛土地盤内に含まれる水分量を示す指標として，地下水位，土壤雨量指数，土壤水分計による飽和度を用い，それぞれの指標と地震応答との関係について考察を行う．ここでは2007年1月から2008年7月までの降雨量，地下水位，土壤雨量指数，土壤水分計による飽和度の計測結果を示し，降雨による各指標の経時変化について考察する．

3.1 降雨量，地下水位の記録

観測対象とした谷埋め盛土斜面で2007年1月～2008年12月に観測された降雨量，地下水位，土壤水分，土壤雨量指数の記録を図5に示す．降雨量は，谷埋め盛土斜面中段に設置した雨量計で計測した降雨は，降雨開始時から降雨終了後24時間以上無降雨状態が続いた時刻までを1回のイベントと数えた．このように降雨の回数を数えた結果，2007年の降雨回数は60回，年間降雨量は1233.5 mm，2008年の降雨回数は70回，累積降雨量は1084.5 mmであった．気象庁仙台気象台における1971～2000年までの年間降水量の平年値は1241.8 mmである．観測された降雨記録のうち，1イベントで最も多くの降水量を記録したのは2007年7月11日～7月18日にかけて観測された降雨で，累積降雨量160.5 mmであった．

地下水位の深さは，谷埋め盛土中段に設置した地震計E3を基準高としたG.L.表記で表示している．これまでの観測結果から，地下水位は最低水位G.L. -7.25 mを基準として降雨量によって変化するが，通常の降雨ではG.L. -7.00 ~ -7.25 m付近で推移する．地下水位が最も上昇したのは，2008年8月28日～9月2日にかけての降雨（累積降雨量123.0 mm）によるもので，一時，地下水位はG.L. -5.25 mまで上昇した．地下水位の変動と降雨との関係を見ると，降雨によって上昇した谷埋め盛土斜面内の地下水位は，降雨量の大小にもよるが約2～3週間で降雨以前の地下水位に戻る．

3.2 土壤雨量指数の記録

斜面における土砂災害の発生の可能性は，地盤内に含まれる水分量と大きな関係があると言われている．降雨量と地盤に含まれる水分量との関係性を評価するために，主に水文学で用いられていた「タンクモデル」を援用し，地盤内に含まれる水分量を推定したのが岡田ら⁸⁾の土壤雨量指数である．

土壤雨量指数は，気象庁が発表する土砂災害警戒情報の情報作成に用いられており，土砂災害発生の危険性の度合いを評価する指標として用いられている．気象庁では非都市域における土壤雨量指数を求めるためのモデルとして，Ishiharaら⁹⁾の「直列三段タンクモデル」を用いている．図6に気象庁が土砂災害警戒情報の作成に用いている直列三段タンクモデルの模式図を示す．この直列三段タンクモデルは，一段目タンクが表面流出を，二段目タンクが表層浸透流出を，三段目が地下水流出をそれぞれ模擬している．土壤雨量指数は，これら各タンクの貯留高の総和で表され，地盤内に含まれる水分量を表す指標として用いられている．

2007年，2008年の土壤雨量指数の変化を見ると，降雨に対する反応は地下水位の変動の方が鈍く，土壤雨量指数は敏感に反応する．これは，土壤雨量指数を計算する際の直列三段タンクモデルの特性によるもので，タンクモデルでは下層タンクへの浸透が降雨開始と共に瞬時に開始されるため，降雨に対する反応が鋭くなる．しかし，実地盤は土の飽和度によって透水係数が異なっており，一般的に飽和度が低いと透水係数も小さく，降雨が浸透していくのに時間がかかる．また，土の飽和度が低くかつ降水量が少ない場合，地表面から浸透した水分が地下水面まで到達しない場合もある．そのため，長期間降雨が無く地盤が乾燥している場合や，降雨量が少ない場合，地下水位の変動は小さくなる．一方，長期間降雨が継続して地盤の飽和度が大きい場合，土の透水係数も大きくなるため降雨に対する反応も大きくなる．

この土壤雨量指数と地下水位との関係を示したものが図7(a)，図7(b)である．縦軸に地下水位，横軸に土壤雨量指数を示す．図7(a)，図7(b)のプロットは，通常，反時計回りのループを描き，土壤雨量指数が最大値を示した後，しばらくの時間差を伴って地下水位が最大値を示す．この時間差は，観測対象とした谷埋め盛土斜面において，2007年7月の降雨では9時間，2008年8月の降雨では11時間であった．図

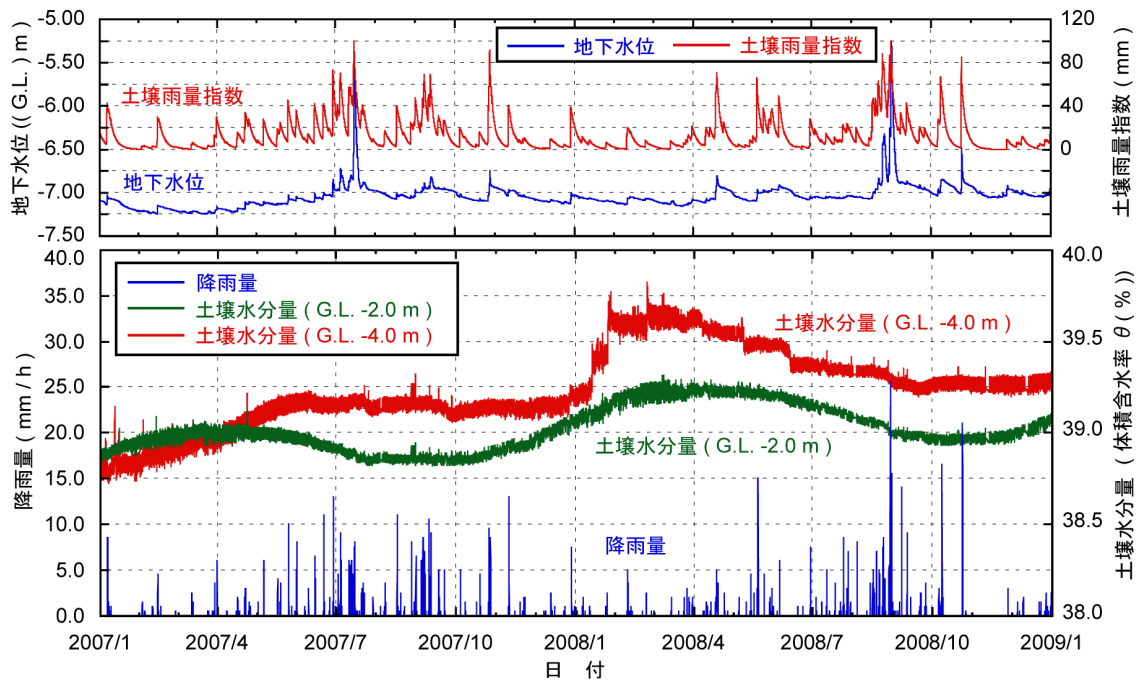


図5 降雨量，土壤水分，地下水位，土壤雨量指数の経時変化（2007/01～2008/12）

8, 図9にそれぞれ2007年7月, 2008年8月の降雨における降水量, 地下水位, 土壤雨量指数の関係を示す. 土壤雨量指数は少量の降雨でも反応するが, 地下水位は少量の降雨には鈍感である. 地下水位は, 多量の降雨もしくは継続的な降雨があったときのみ反応する. また, 地表面から地下水位面までの雨水の浸透にかかる時間の分, 降雨に対する反応は地下水位の方が土壤雨量指数より緩やかである. 土壤雨量指数の変化は降雨を即時反映するが, 地下水位や土壤水分量の変化は盛土地盤の水分特性の影響を大きく受けるため, 土壤雨量指数と盛土内の地下水位や土壤水分量を関連付ける事はできない.

3.3 土壤水分の記録

図5に2007年, 2008年の土壤水分の変化を示す. 土壤水分は体積含水比 で表され, G.L. -2.0 m, およびG.L. -4.0 mの深度における体積含水率は, 年間を通して38.75～39.75%の間で推移しており大きな変動はない. 観測対象とした谷埋め盛土斜面の盛土材料の土粒子の密度 $\rho_s = 2.558 \text{ g/cm}^3$, 土の乾燥密度 $\rho_d = 1.20 \text{ g/cm}^3$ 程度であった事から, この体積含水率の値は, 飽和度で約75～80%を意味する. 毎日の0.1%ほどの細かい値の振れは決まった時間に周期的に発生しており, 昼間電力と夜間電力の電圧差が土壤水分計の出力電圧に影響しているものと思われる. G.L. -2.0 mの土壤水分の値を見ると, 1年間で周期的な変動を見せており, 日射量が減少し地表面からの蒸発散が減少する10月～3月にかけて土壤水分は緩やかに上昇し, 日射量が増加し地表面からの蒸発散が増加する4月～10月にかけて土壤水分は減少する. 深度が深くなるG.L. -4.0 mにおける土壤水分は, G.L. -2.0 mで見られるような季節変動は認められない. また, 降雨の浸透による土壤水分の変化は極めて小さく, 多量の降雨があった場合でも土壤水分の変化はほとんど無い. しかし, 降雨による土壤水分の変化量が小さいからといって, 盛土内に水分が浸透していないわけではない. 降雨によって地下水位は確実に変化しており, 谷埋め盛土地盤内を雨水が浸透しているのは間違いのない事実である. このような現象を説明するためには, 土の保水性と, 盛土全体としての透水性について考える必要がある.

実際に室内透水試験から求めた谷埋め盛土斜面の土の透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であったのに対し, 原位置観測による降雨開始から地下水位が変化するまでの時間差は地震計E3位置で9～11時間であった. 平常時の地下水位はG.L. -7.0 m程度であるので, 7.0 mの厚さの盛土を9～11時間で流下したと考えれば, 盛土の透水速度は約 $1.7 \times 10^{-2} \sim 2.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度となる. 降雨による水頭差はそれほど大きくならないと考えられる事から, 盛土全体としての透水係数は, 土単体の透水係数と比べて明らかに大

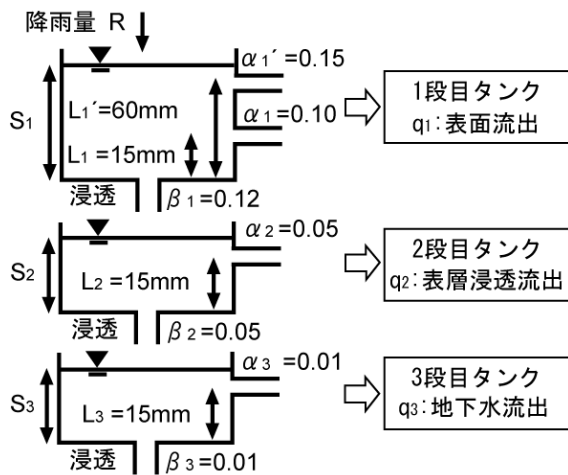


図6 直列三段タンクモデル

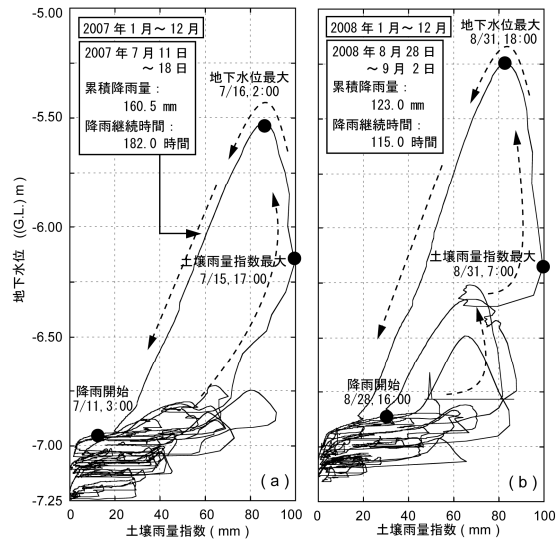


図7 土壌雨量指数～地下水位関係

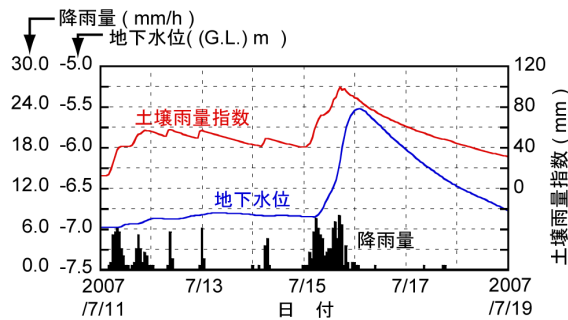


図8 降雨量，地下水位，土壌雨量指数の関係 (2007/07/11～2007/07/18)

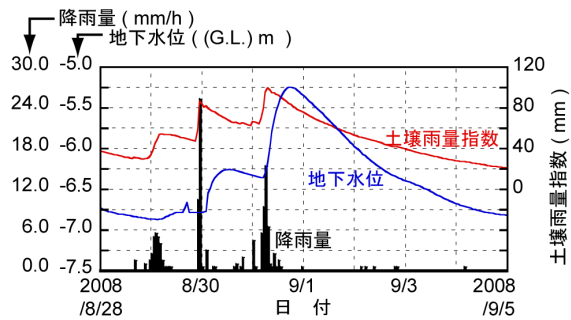


図9 降雨量，地下水位，土壌雨量指数の関係 (2008/08/28～2008/09/04)

きい。この事から、降雨による水分が谷埋め盛土内へ浸透するとき、水分の大部分は盛土内の透水係数の大きい部分（礫が多い、空隙の大きい部分）を流下し、盛土の砂分以下の粒径の土の間を流下する割合は小さいと推測される。

4. 盛土内の水分変化が谷埋め盛土地盤の地震応答に及ぼす影響

4.1 計測された地震

2007年1月に計測を開始して以来、2008年7月までに13回の地震データを計測した。表2に、これまでに計測された地震の日時、震源、計測値の代表値の一覧を示す。最大の加速度時刻歴を記録したのは2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震、次いで2008年7月24日に発生した岩手県沿岸北部地震である。

観測によって得られた加速度時刻歴は、基線の修正を行った。基線の修正方法は大崎¹⁰⁾の方法を参考にし、地震終了時の速度がゼロとなるように加速度時刻歴の基線の修正を行った。また、基線修正済みの加速度記録から加速度スペクトルを求める際には、結果を見やすくするためにスペクトルの平滑化を行った。スペクトルの平滑化は、基線修正済みの加速度時刻歴をフーリエ変換して得られた加速度スペクトルにParzenの窓関数（バンド幅0.8 Hz）をかけて行った。

4.2 観測対象とした谷埋め盛土地盤の基本的な地震応答特性

地震応答を分析するにあたって、地山下部に設置した地震計E4による計測記録を他の地震計の記録を比較する際の基準とした。また、図1に示すように、観測対象とした谷埋め盛土斜面の旧谷地形の谷の方向は、ほぼ東西方向に一致しており、計測を行っている谷埋め盛土斜面は東を向いている。計測地震記録のEW成分は盛土斜面の縦断方向の応答を示し、NS成分は盛土斜面の横断方向の応答を示す。

図10(a), (b), (c)に、計測された13回の地震における各地震計の方向別最大加速度、最大加速度の偏りを示す。最大加速度値(図10(a), (b))を見ると、地震計の位置による最大加速度の値は $E2 > E3 > E1 > E4$ の大小関係を示しており、どの地震においてもその傾向は一定である。このことから、最大加速度の値は盛土の厚さが厚いほど大きくなり、また、同じ地山部であっても標高が高いほど最大加速度が大きくなるのがわかる。次に、最大加速度値の方向による偏りを見てみると(図10(c))、EW成分の最大加速度の方がNS成分よりも全体的に大きい事がわかる。観測対象とした谷埋め盛土ではEW成分はNS成分の1.0~1.5倍程度大きな最大加速度を示した。このように、盛土の縦断方向の最大加速度値が大きくなる原因として、盛土斜面が東を向いていて東方向に盛土が開放されている事が考えられる。盛土斜面横断方向(NS成分)は盛土部分が地山に挟まれているが、盛土斜面横断方向(EW成分)の

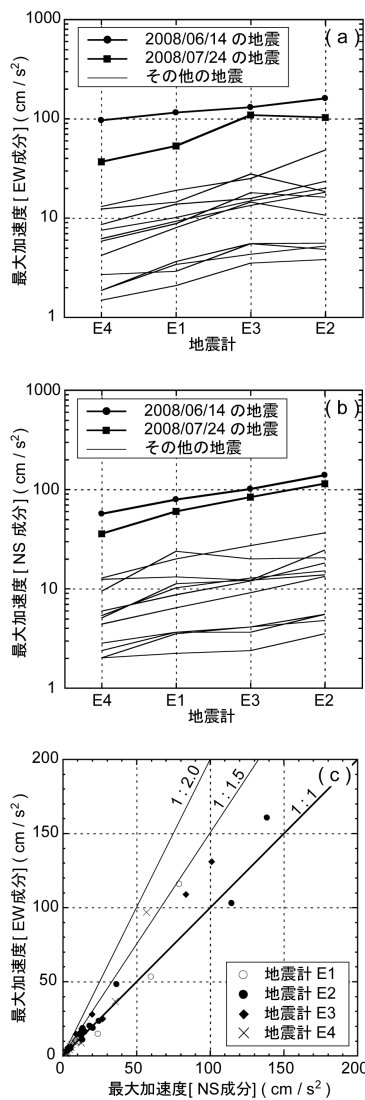


図10 各地震計の最大加速度

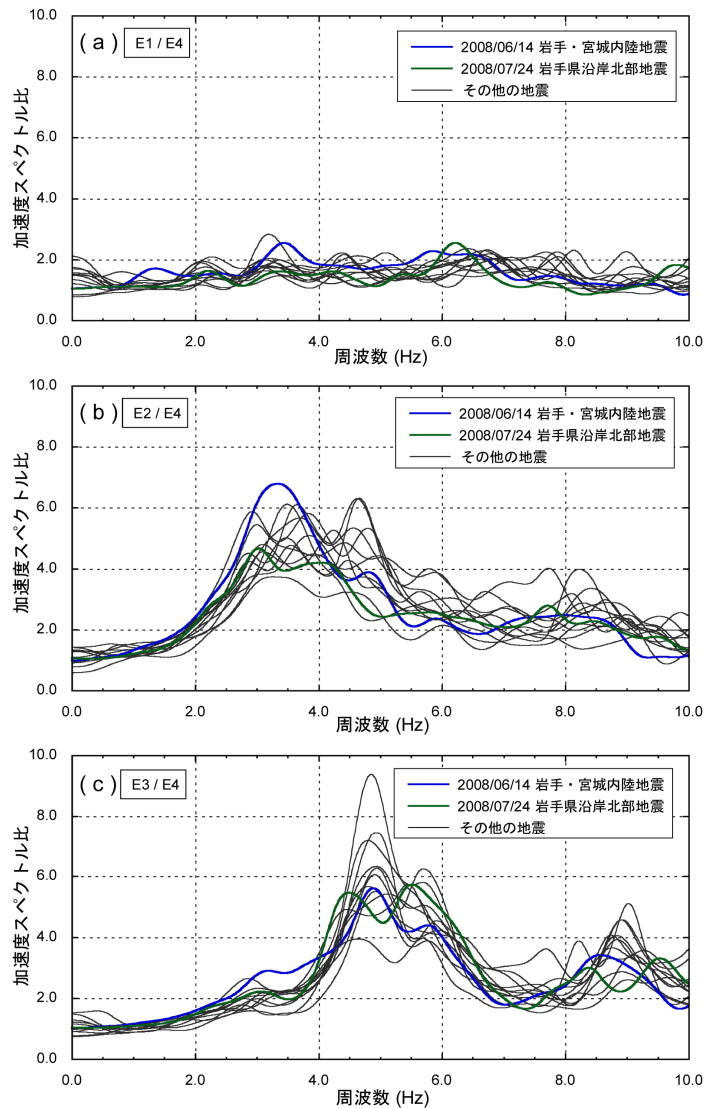


図11 各地震の加速度スペクトル比(EW成分)

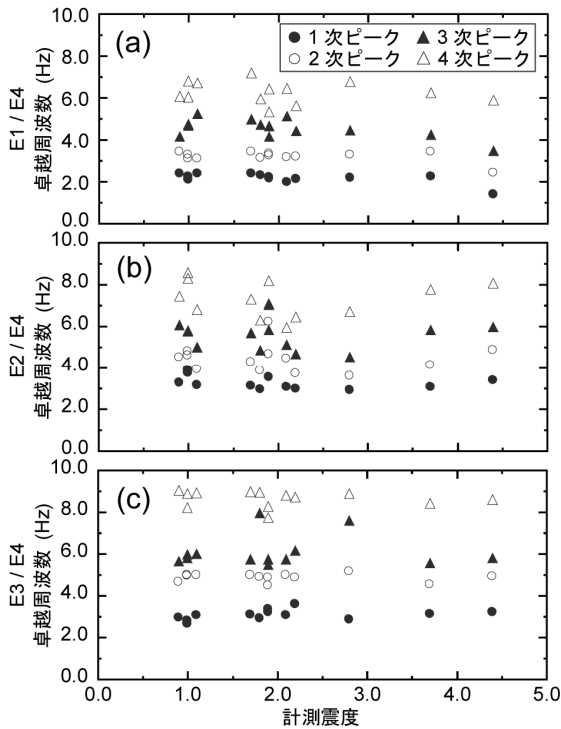


図 12 計測震度と加速度スペクトル比の
1次～4次卓越周波数

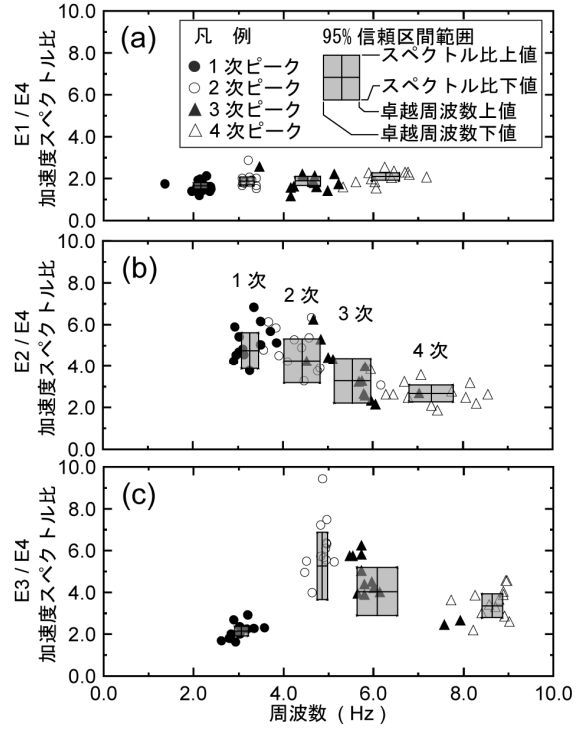


図 13 1次～4次卓越周波数と
加速度スペクトル比の推定範囲

表 3 加速度スペクトル比 (地震計 E4 比) の卓越振動数のピーク

地震	計測震度	土壌雨量		卓越振動数											
		指数 (mm)	地下水位 (G.L. (m))	E1 / E4				E2 / E4				E3 / E4			
				1次	2次	3次	4次	1次	2次	3次	4次	1次	2次	3次	4次
2006/12/28	0.9	44.55	-7.232	2.40	3.41	4.16	6.06	3.28	4.50	6.06	7.45	2.95	4.66	5.66	9.03
2007/01/13	1.1	10.04	-7.084	2.38	3.10	5.23	6.71	3.16	3.93	5.01	6.79	3.05	4.99	6.01	8.92
2007/03/31	1.7	29.51	-7.202	2.39	3.42	4.98	7.18	3.13	4.27	5.69	7.31	3.08	4.98	5.74	8.98
2007/04/05	1.9	9.77	-7.193	2.21	3.32	4.65	6.41	3.52	4.66	5.84	7.08	3.36	4.85	5.74	7.73
2007/04/12	1.9	2.44	-7.223	2.15	3.24	4.16	5.33	3.53	6.20	7.04	8.17	3.21	4.49	5.48	8.26
2007/11/26	2.2	4.98	-7.055	2.12	3.17	4.42	5.62	2.98	3.70	4.69	6.46	3.59	4.85	6.15	8.72
2007/12/25	1.8	3.06	-7.113	2.31	3.12	4.70	5.96	2.95	3.87	4.85	6.30	2.91	4.89	7.94	8.95
2007/12/26	1.0	2.81	-7.116	2.23	3.10	4.74	6.04	3.88	4.80	5.80	8.30	2.81	4.97	5.81	8.22
2008/03/24	1.0	2.19	-7.159	2.09	3.26	4.68	6.81	3.74	4.60	5.77	8.57	2.64	4.96	5.97	8.89
2008/06/14	4.4	6.61	-6.968	1.38	2.41	3.47	5.90	3.38	4.85	5.97	8.07	3.22	4.92	5.81	8.58
2008/07/19	2.8	9.85	-7.091	2.17	3.28	4.44	6.78	2.92	3.59	4.54	6.71	2.86	5.15	7.58	8.89
2008/07/21	2.1	8.11	-7.098	1.98	3.15	5.13	6.46	3.05	4.44	5.12	5.96	3.05	4.97	5.74	8.80
2008/07/24	3.7	7.28	-7.102	2.25	3.42	4.24	6.25	3.05	4.12	5.84	7.76	3.11	4.53	5.55	8.42
13地震平均				2.16	3.18	4.54	6.27	3.27	4.43	5.56	7.30	3.06	4.86	6.09	8.65

表 4 加速度スペクトル比 (地震計 E4 比) の卓越振動数の平均, 標準偏差, 信頼区間

区分	項目	卓越振動数											
		E1 / E4				E2 / E4				E3 / E4			
		1次	2次	3次	4次	1次	2次	3次	4次	1次	2次	3次	4次
計測震度 3.0未満の 地震	記録の数	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	卓越振動数の平均	2.22	3.23	4.66	6.31	3.29	4.41	5.49	7.19	3.05	4.89	6.17	8.67
	卓越振動数の標準偏差	0.130	0.111	0.339	0.532	0.318	0.686	0.700	0.821	0.253	0.170	0.775	0.397
	卓越振動数の95%信頼区間(上値)	2.309	3.308	4.890	6.663	3.499	4.876	5.962	7.743	3.216	5.002	6.686	8.939
	卓越振動数の95%信頼区間(下値)	2.133	3.159	4.435	5.948	3.072	3.953	5.022	6.639	2.876	4.773	5.645	8.405
全ての地震	記録の数	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	卓越振動数の平均	2.16	3.18	4.54	6.27	3.27	4.43	5.56	7.30	3.06	4.86	6.09	8.65
	卓越振動数の標準偏差	0.255	0.251	0.453	0.501	0.300	0.648	0.661	0.802	0.238	0.184	0.736	0.372
	卓越振動数の95%信頼区間(上値)	2.312	3.336	4.812	6.573	3.456	4.817	5.955	7.787	3.208	4.973	6.535	8.870
	卓越振動数の95%信頼区間(下値)	2.004	3.033	4.265	5.967	3.093	4.034	5.156	6.818	2.921	4.751	5.646	8.421

東斜面は開放されているため、最大加速度値は NS 成分よりも EW 成分の方が大きくなるものと考えられる。

次に、地震動の大きさによる谷埋め盛土の応答の違いを見るために、これまでに計測した 13 回の地震の谷埋め盛土縦断方向 (EW 成分) の加速度スペクトル比を図 11 に示す。2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸地震と 2008 年 7 月 24 日の岩手県沿岸北部地震のデータは強調して示した。加速度スペクトル比は、E1, E2, E3 における加速度スペクトルを E4 における加速度スペクトルで除して求めた。図 11 より加速度スペクトル比の概形は地震動の大きさによらず、ほぼ同じような形状をしているように見える。この事を定量的に示すために、加速度スペクトルの 1 次～4 次卓越周波数を表 3 に、計測震度に対する 1 次～4 次卓越周波数をプロットしたものを図 12 に示す。加速度スペクトルは既に Parzen の窓関数によって平滑化されているので、1 次～4 次卓越周波数は単純に低周波数側から数えて 1 番目の加速度スペクトルの山を 1 次、2 番目の山を 2 次と数えた。また、卓越振動数のばらつきの程度を示すために、平均値、標準偏差、卓越振動数の分布が正規分布に従うと仮定した時の t 分布を用いた 95%信頼区間を表 4 に示す。計測震度が 4.4 に達している地震があり、地盤の非線形性の発現による谷埋め盛土の応答特性の変化が生じている可能性があるため、計測震度 3.0 以下の地震(11 回の地震)に関する統計量と、全地震(13 回の地震)に関する統計量とを分けて表示した。ここで、卓越周波数のばらつきは正規分布に従うと仮定した。仮に計測震度 3.0 以上の地震によって卓越周波数に有意な変化があるならば、表 4 の計測震度 3.0 未満の地震における 95%信頼区間外に、計測震度 3.0 以上の地震の卓越周波数の値があるはずである。しかし、計測震度 3.0 以上の地震の卓越周波数の値のほとんどは、計測震度 3.0 未満の地震における 95%信頼区間内にあることから、観測対象とした谷埋め盛土において、計測震度 4.4 までの地震による加速度スペクトル比の有意な差は無いと言える。

次に、観測対象谷埋め盛土の計測震度 4.4 までの地震における、加速度スペクトル比の 1 次～4 次卓越周波数と加速度スペクトル比の推定範囲を図 13 に示す。図中のプロットは各地震における卓越周波数とその時の加速度スペクトル比、灰色の四角の範囲は 1 次～4 次卓越周波数と加速度スペクトル比の 95%信頼区間の範囲を示す。灰色の四角の範囲が小さいほどデータのばらつきが小さい事を意味する。E1/E4 の卓越周波数と加速度スペクトル比は全体的にばらつきが小さいが、目立って大きい加速度スペクトル比は無い。E2/E4 では 1 次ピークにおける加速度スペクトル比が最も大きく、かつ卓越周波数のばらつきは小さい。E3/E4 では、2 次ピークにおける加速度スペクトル比が最も大きく、かつ卓越周波数のばらつきは小さい。これより、加速度スペクトル比が最も大きくなる卓越周波数のばらつきは小さいと言える。これは、観測地点の谷埋め盛土の地震応答特性を反映した周波数帯で特に大きな地震動の増幅が生じる事を示している。地震計 E2 の位置では 3.3 Hz、地震計 E3 の位置では 4.9 Hz の波が最も増幅しやすい特性を持っていると言える。

4.3 地下水位、土壌雨量指数の変化が加速度スペクトル比に及ぼす影響

地下水位の変化に伴う加速度スペクトル比の変化を見るために、図 14 に地震発生時の地下水位と加速度スペクトル比および 1 次～4 次卓越周波数との関係を示す。1 次～4 次卓越周波数は前述の方法で定義した。卓越周波数、平均、標準偏差等は表 3、および表 4 の全ての地震の欄に示す通りである。図中に示す地下水位は、盛土中段(地震計 E3 の位置)に設置した間隙水圧計を用いて計測した値である。各地震における加速度スペクトル比の原点は、地震発生時の地下水位に応じて垂直方向に変化させた。例えば、地震発生時の地下水位が G.L. -6.968 m であった地震の加速度スペクトル比の原点は、(周波数, 地下水位) = (0.0, -6.968)となる。加速度スペクトル比のスケールは図中に示した。図 14(b)に示した地震計 E2 と E4 との加速度スペクトル比および卓越周波数について見てみる。E2 と E4 との加速度スペクトル比のうち大きなスペクトル比を示す 1 次、2 次ピークは、図 14(b)の矢印に示す通り地下水位が高くなるほど低周波数側に移動する傾向が見られた。次に、図 14(c)に示した地震計 E3 と E4 との加速度スペクトル比および卓越周波数について見てみる。E3 と E4 との加速度スペクトル比のうち大きなスペクトル比を示す 2 次、3 次ピークの変化傾向は図 14(b)とは異なり、地下水位が高くなってもピークを示す周波数に大きな変化は見られなかった。加速度スペクトル比 E3/E4 に地下水位による影響が現れなかった要因として、谷埋め盛土斜面の法尻に設置されている排水対策工(蛇籠工)により、地震計 E3 の位置における盛土内の地下水位変化が小さく抑えられた事が考えられる。斜面法尻の排水対策工の効果は斜

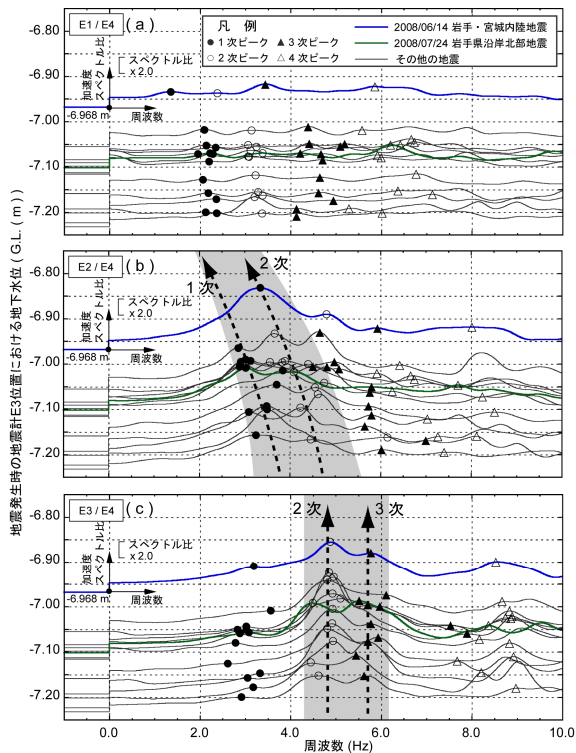


図 14 地震発生時の地下水位と
加速度スペクトル比

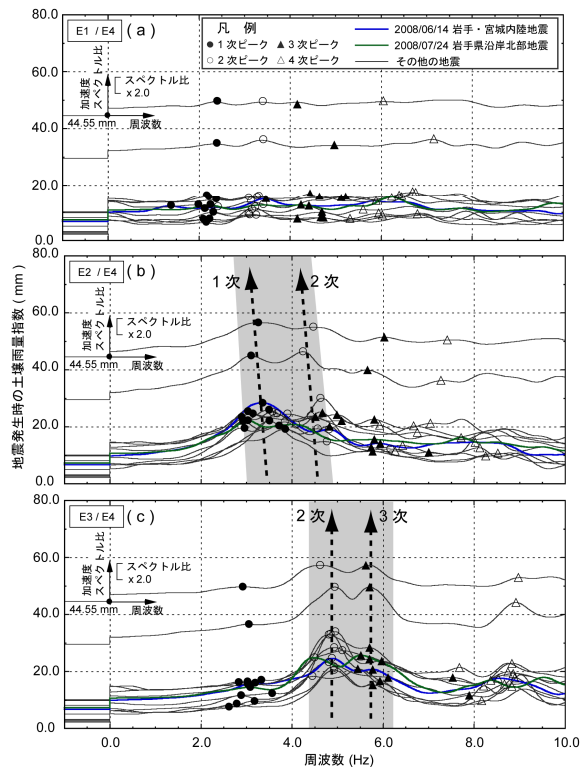


図 15 地震発生時の土壌雨量指数と
加速度スペクトル比

面法肩部に位置する地震計 E2 の位置では小さく、地震計 E2 の位置における地下水位の変動量は、地震計 E3 の位置における地下水位の変動量よりも大きかった事が要因の一つと予想されるが、地震計 E2 の位置における地下水位観測を行っていないため確実な事は言えない。

次に、地震発生時の土壌雨量指数と加速度スペクトル比および 1 次～4 次卓越周波数との関係を図 15 に示す。1 次～4 次卓越周波数は前述の方法で定義した。卓越周波数、平均、標準偏差等は表 3、および表 4 の全ての地震の欄に示す通りである。各地震における加速度スペクトル比の原点は、地震発生時の土壌雨量指数に応じて垂直方向に変化させた。例えば、地震発生時の土壌雨量指数が 44.55 mm であった地震の加速度スペクトル比の原点は、(周波数, 土壌雨量指数) = (0.0, 44.55) となる。加速度スペクトル比のスケールは図中に示した。図 15(b) に示した地震計 E2 と E4 との加速度スペクトル比および卓越周波数について見てみる。E2 と E4 との加速度スペクトル比のうち大きなスペクトル比を示す 1 次、2 次ピークは、図 15(b) の矢印に示す通り地下水位が高くなると、わずかに低周波数側に移動する傾向が見られた。次に、図 14(c) に示した地震計 E3 と E4 との加速度スペクトル比および卓越周波数について見てみる。E3 と E4 との加速度スペクトル比のうち大きなスペクトル比を示す 2 次、3 次ピークの変化傾向は図 15(b) とは異なり、地下水位が高くなってもピークを示す周波数に大きな変化は見られなかった。

5. まとめ

本研究は、仙台市北東部に位置する谷埋め盛土斜面における原位置地震動観測および降雨量、地下水位、土壌水分の観測記録のうち、2006年12月～2008年8月までの1年9ヶ月の観測記録をまとめたものである。観測対象とした谷埋め盛土厚は最大17 m、期間中の一連の降雨量の最大値は160.5 mm、観測した地震は13回、最大計測震度は4.4であった。これらの観測結果を用いて、谷埋め盛土地盤と周辺切土地盤との地震応答の違い、盛土内の水分変化と盛土の地震応答との関係について検討を行った。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 盛土厚，旧谷地形形状，計測震度による観測対象谷埋め盛土地盤の地震応答特性の違いを検討したところ，観測対象とした谷埋め盛土斜面においては，最大加速度の大きさは盛土の厚さが厚くなるほど大きくなり，また，切土部であっても標高の高い方が大きくなることが確認された．盛土厚さ17 mの盛土上における最大加速度は，盛土下の切土部基盤の2~3倍となった．また，盛土の厚さが厚いほど，低周波数の地震動成分が増幅することが確認された．
- (2) 観測対象とした谷埋め盛土斜面において，地震計測結果の盛土の縦断方向（EW成分）と横断方向（NS成分）の最大加速度を比較したところ，盛土縦断方向（EW成分）の最大加速度は横断方向（NS成分）の1.0~1.5倍となった．なお，計測された地震動の大きさ（計測震度4.4）の範囲においては，計測震度の大きさが加速度スペクトル比に及ぼす影響は認められなかった．
- (3) 谷埋め盛土内の水分量と地震応答との関係を地下水位，土壤雨量指数を指標として検討を行ったところ，地震発生時の地下水位が高いほどE2/E4の加速度スペクトル比の卓越周波数が低周波数側に移動する傾向が見られたが，E3/E4の加速度スペクトル比の卓越周波数に変化は見られなかった．一方，地震発生時の土壤雨量指数が大きいほどE2/E4の加速度スペクトル比の卓越周波数はわずかに低周波数側に移動する傾向が見られたが，E3/E4の加速度スペクトル比の卓越周波数に変化は見られなかった．

本研究の観測結果から，地下水位の変化に伴い加速度スペクトル比の卓越周波数が変化する傾向が見られた．今後も観測を継続し盛土内水分と盛土の地震応答に関する検討を続けていきたい．

謝辞：研究を行うにあたり，株式会社復建技術コンサルタント・佐藤真吾氏，株式会社ミサワホーム総合研究所・松下克也氏の御協力を賜りました．ここに記して，謝意を表します．

参考文献

- 1) 浅田秋江，小澤初美，三橋至：宅地造成地・街路および公園，1978年宮城県沖地震調査報告書，土木学会，pp.435-458，1980．
- 2) 柳沢栄司，安田進，吉田望，若松和寿江：住宅地の被害，1993年釧路沖地震・能登半島地震災害調査報告書，土質工学会，pp. 231-275，1994．
- 3) 釜井俊孝，守隨治雄：斜面防災都市（都市における斜面災害の予測と対策），理工出版，2002．
- 4) 沖村孝，南部光広，篠原秀明，桜井秀憲，前田修：高盛土地盤における物性評価と地震動増幅特性，土木学会論文集，Vol.707 / VI-55，pp.51-65，2002．
- 5) 井合進，一井康二，佐藤幸博，桑島隆一：高盛土の地震応答解析，第10回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 1157-1562，1998．
- 6) 森脇寛，矢崎忍，黄文峰：降雨浸透に伴う地下水流の発達・減衰過程と斜面崩壊に及ぼす影響に関する考察，日本地すべり学会誌，Vol.43，No.1，pp.9-19，2006．
- 7) 酒匂 一成，深川 良一，岩崎 賢一，里見 知昭，安川 郁夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol.1，No.3，pp.57-69，2006．
- 8) 岡田 憲治，牧原 康隆，新保 明彦，永田 和彦，国次 雅司，斉藤 清：土壤雨量指数 Soil Water Index (SWI)，天気，Vol.48，No.5 pp.349-356 社団法人日本気象学会，2001．
- 9) Ishihara Y. and Kobatake, S.: Runoff Model for Flood Forecasting, Bull. D. P. R. I., Vol. 29, pp. 27-43, 1979．
- 10) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，pp.134-138，鹿島出版会．

（受理：2009年11月20日）
（掲載決定：2010年 7月 9日）

The relationship between change of soil moisture resulted from rainfalls and seismic response characteristics in the valley fill ground

MORI Tomohiro ¹⁾, CHIBA Takashi ²⁾, UZUOKA Ryosuke ³⁾
and KAZAMA Motoki ⁴⁾

1) Member, Research Associate, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

2) Tohoku branch, Kajima Corporation

3) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Tokushima University, Dr. Eng.

4) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

ABSTRACT

The fill ground has higher risk of seismic damages comparing to the cut ground. However, few attempts have been made so far to measure actual seismic responses and to investigate the difference of seismic responses between the fill ground and the cut ground. Accumulation of basic observation data is required for evaluating the fill slope stability against the earthquake. Authors performed in-situ array seismic observation in the fill ground and the cut ground for two years. Four seismographs, a rain gauge, a water table gauge and two soil moisture sensors are installed in this observation area. This paper shows differences of seismic responses between the fill ground and the cut ground. And influences of the soil moisture to the seismic responses are studied.

Key Words: Fill ground, Cut ground, In-situ observation, Soil moisture, Seismic response