

3.4 降雨の影響を考慮した道路土工構造物の耐震設計・耐震補強技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ

（土質・振動）

研究担当者：佐々木哲也、加藤俊二、梶取真一

【要旨】

本研究は、事前降雨等の影響が耐震性に大きく影響すると考えられる道路盛土等の道路土工構造物を対象として、地震時挙動・耐震性に及ぼす事前降雨等の影響の定量的な評価、耐震性照査手法の検討、および合理的で経済的な耐震補強法を検討・提案することを目的として実施するものである。平成 25 年度は、平成 24 年度に引き続き、東北地方太平洋沖地震において被災した谷埋め道路盛土の復旧箇所において、降雨等による盛土内の水位変動について調査を行い、降雨や融雪等による水位変動の影響を検討するとともに、模型実験により排水対策工の効果について検討を行った。

キーワード：道路盛土、水位変動、現地観測、排水効果

1. はじめに

近年の地震等において、事前降雨が影響したと考えられる道路盛土等の道路土工構造物の被害により、長期間にわたり道路全体の交通機能を大幅に低下させ、社会問題を引き起こした。このため、道路土工構造物においても耐震性の向上が急務となっている。一方で公共事業費の縮減が求められており、事前降雨等の影響を考慮し適切かつ合理的に道路土工構造物の耐震性を向上させることが求められている。本研究は、事前降雨等の影響が耐震性に大きく影響すると考えられる道路盛土等の道路土工構造物を対象として、変状・被災事例の収集・分析、現地計測、模型実験等を通じて、①道路土工構造物の地震時挙動、耐震性に及ぼす事前降雨等の影響の定量的な評価、②事前降雨等の影響を加味した定量的な耐震性照査手法の提案、③既往の経験・実績に基づく仕様規定（標準のり面勾配、排水工等）が有する性能の明確化、④事前降雨等の影響を加味した合理的で経済的な耐震補強法の提案を目的に実施するものである。

平成 25 年度も昨年度に引き続き、仙台河川国道事務所に協力いただき、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東日本大震災という）において被災した谷埋め道路盛土の復旧箇所において、観測システムを設置して盛土内水位の長期観測を行い、道路盛土の降雨等による水位変動への影響を検討するとともに、模型実験により排水対策工の効果について検討を行った。

2. 盛土内水位の現地観測

2.1 観測箇所の概要

当該箇所は、宮城県亘理郡山元町に位置する丘陵部の谷間に構築された国道 6 号線の谷埋め盛土区間で、大小 2 つの谷埋め盛土からなる。この箇所における近傍震度は 6 強（山元町浅生原）であった。谷埋め盛土全体にわたって路面の沈下、クラック等の変状が確認され、大きな谷埋め部の切盛り境付近から約 50m 区間で盛土崩壊が発生した（写真 1）。



写真 1 崩壊状況

道路構築前の航空写真（写真 2）を確認すると、当該箇所は谷部全体を埋めた道路であり、盛土部背後の丘陵地に農業用水用のため池が見られる。また崩壊部に向かって沢筋が走っており、水の供給元になっている可能性が高い。道路とため池との間の道路用地外部分は、民

間開発により埋め立てられており（写真3）、集水井および排水砕石ドレーンが複数設置されていることから、施工当時より地山から盛土内に大量の水が供給されていた可能性が推察される。写真4は、復旧作業中の崩壊箇所ののり尻部の状況であるが、高い位置から湧水が確認され、湧水の影響から復旧作業中も小規模の崩壊が見られ、盛土内水位が高かったことが推定される。

一方、未崩壊箇所（写真3の下部）では前述のように1車線分が最大で1m程度の沈下による段差は発生したが、崩壊に至っていない。この部分は、写真3からもわかるように遊水池を形成するために両盛土の形状となっており背後地と連続しておらず、崩壊後の現地調査においてのり面からの湧水は見られなかったことから、背後地からの水の供給は少なく、盛土内の水位が低かったことが推定される。

当該箇所は、前述のように水が集まりやすい条件でかつ盛土内の水位が高かったことが要因で地震動により崩壊したものと考えられることから、復旧は排水対策を考慮したものとなっている。図1は復旧断面の概要を示したもので、ハッチ部分が復旧範囲である。また、下段の中央部については現地発生土を現場内で再利用するために、上段ののり面については復旧直後に発生したのり面崩壊（平成24年3月上旬）に対処するために、当初設計では想定していない改良土が使われている。のり面勾配は、のり尻から小段までが1:1.8、小段から路肩までが1:1.5となっており、全面に種子散布工が行われている。いる。背面から浸入してくる地下水に対しては、盛土内の排水を行うため「道路土工-盛土工指針」にあるように、基盤部には基盤排水層礫材を全面に敷設するとともに暗渠管を10mピッチで設置している。また、のり尻部の補強としてふとんかごが設置されている。さらに、小段部および上部のり面中央には幅30cm奥行き2.5mの排水マットが2mピッチで千鳥状に配置されている。

2.2 水位観測システムの設置概要

図2に観測システムの配置図を示す。道路建設前の地形状況および崩壊位置の状況を踏まえ、ため池側の道路脇に1箇所（B-1）および崩壊面内に4箇所（B-2～B-5）計5箇所の自動計測の地下水位計と雨量計1基を設置し、10分間隔で計測を行いWEB上で計測結果を確認できるようにしている。また、現地で設置作業を行っていた時期に小段部のり面全域から湧水が確認されており、3月ののり面崩壊の発生や基盤排水層上部に改良土が用いられており、盛土上段の水位も常時高いことが想定されることから、月1回の手ばかりによる補助観測を行うため、



写真2 道路建設前の航空写真（1952年米軍撮影）



写真3 崩壊後の航空写真
(2011年4月 Google Earth)



写真4 復旧作業中ののり尻部の小崩壊

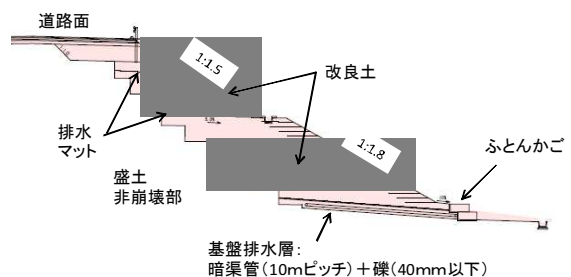
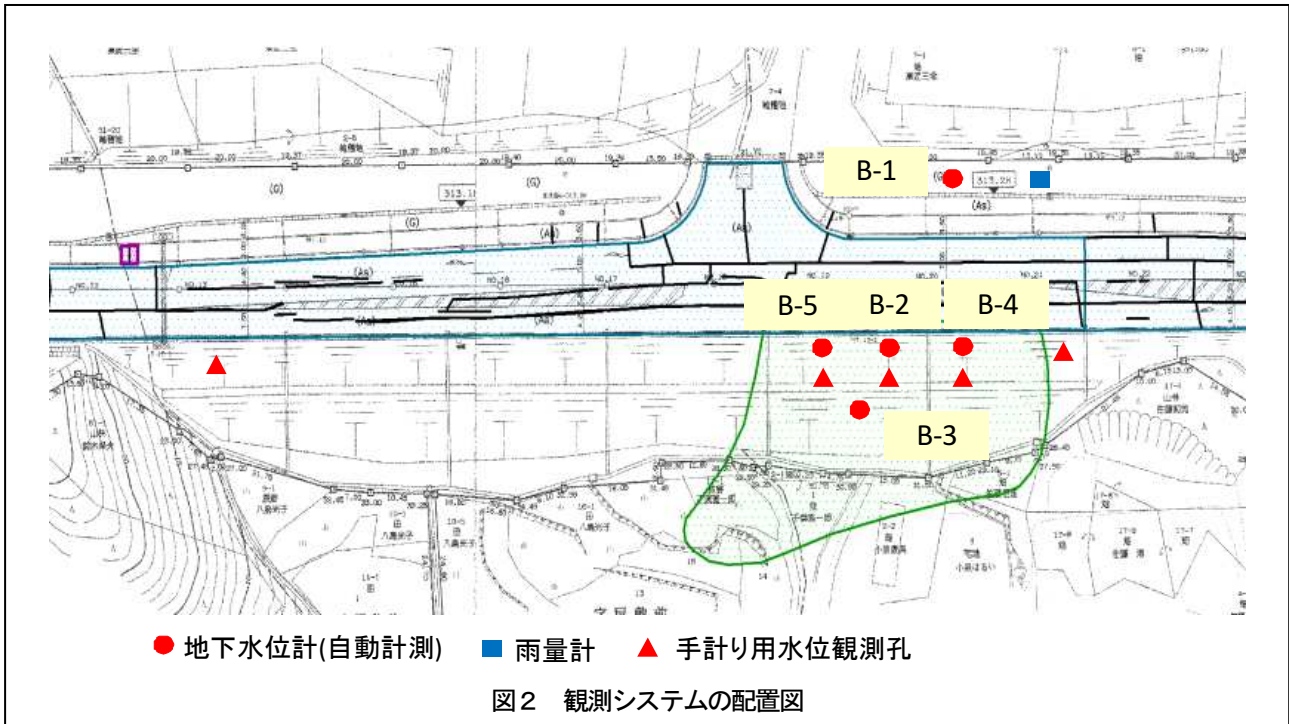


図1 復旧断面図



小段位置に3箇所および盛土両サイドの切盛り境界部に2箇所観測孔を設けている。

自動計測を行う観測孔の深さは、元地形、旧盛土および復旧後の盛土を踏まえて設定する必要がある、山側(B-1) およびのり肩部(B-2、B-4、B-5)についてはボーリングコアから旧沢目を埋めたサンドマット層が確認できたことからその上面、B-3について基盤排水層の上面から約10cm以上の余裕があるように設定した。

図3に観測孔とサンドマット層との位置関係を示す。山側の観測孔(B-1) とのり肩部の観測孔(B-2、B-4、B-5)のサンドマット層上面を結んだ線(赤線)の勾配の状況からも、沢筋がB-1からB-2の方向に向かって走っているのが確認できる。また、図4にのり肩部のボーリングコアから推定したサンドマット層の形状(旧沢地形)を示しているが、この断面からもB-1～B-2～B-3のラインが沢筋に当たることが確認できる。なお、B-2についてはほぼ段切り位置にあたり旧盛土位置にある可能性もあったことから、図面の段切り位置を考慮して復旧後の盛土位置となるように孔底位置を引き上げることとし、観測孔B-5の孔底位置に合わせている。

2.3 水位観測結果および考察

図5に自動計測システムでの地下水位および降水量の平成25年度の計測結果を示す。R-1 およびB-1～B-5は、図1で示した箇所の雨量計および地下水位計である。

この一年間の降水状況としては、6月～7月の梅雨時期においては48時間累積雨量で20～40mm程度の雨が数

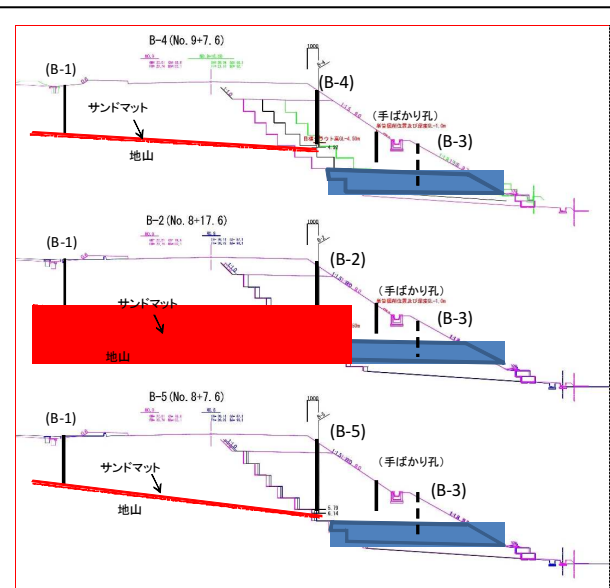


図3 観測孔位置とサンドマット層の関係

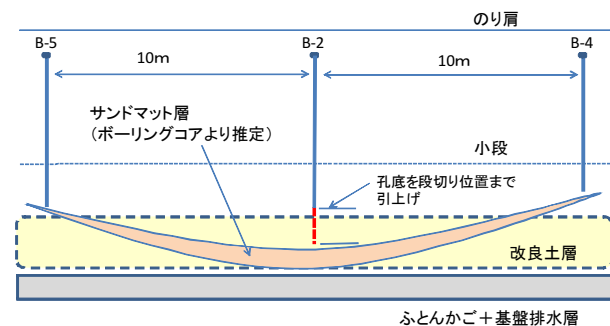
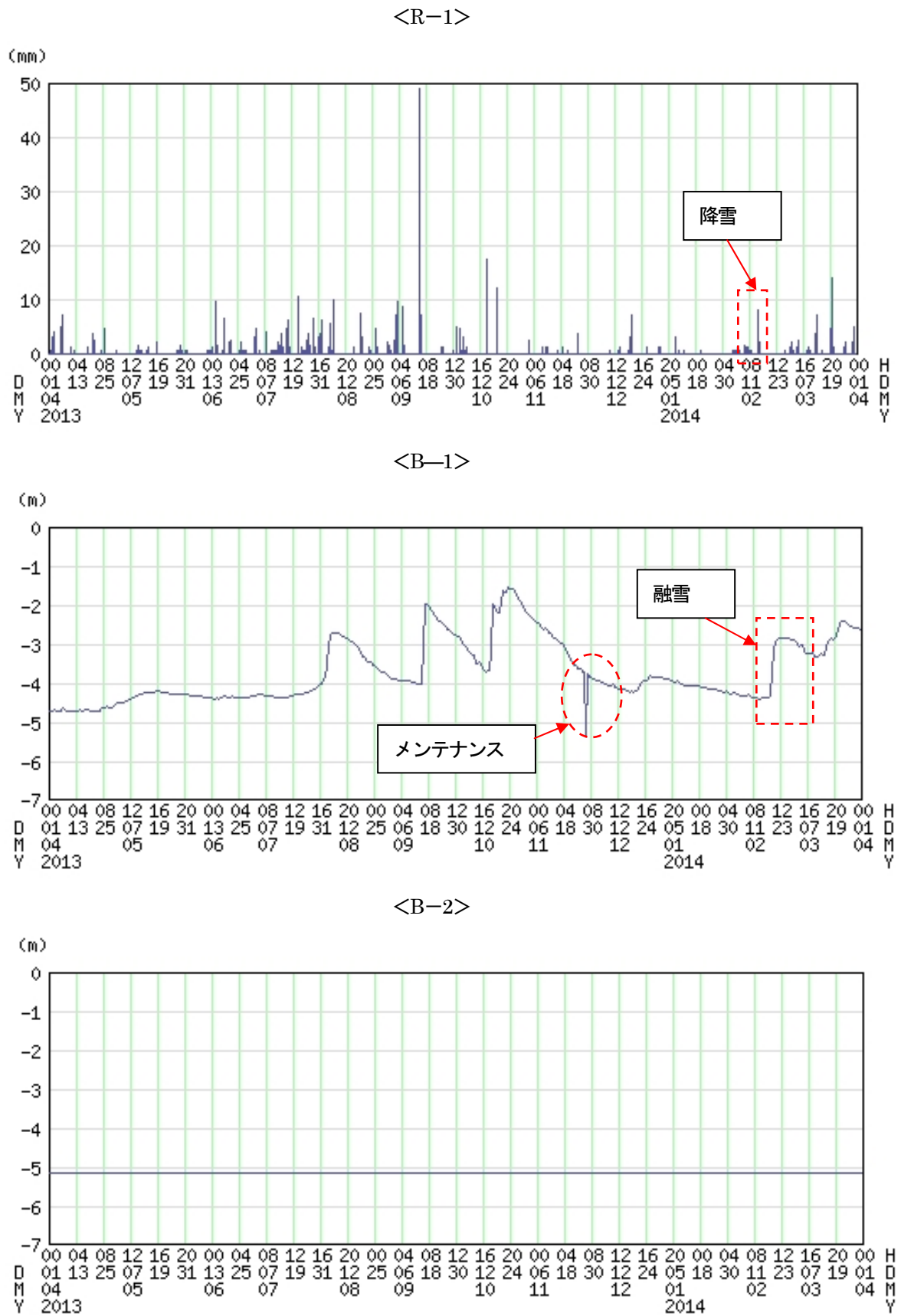
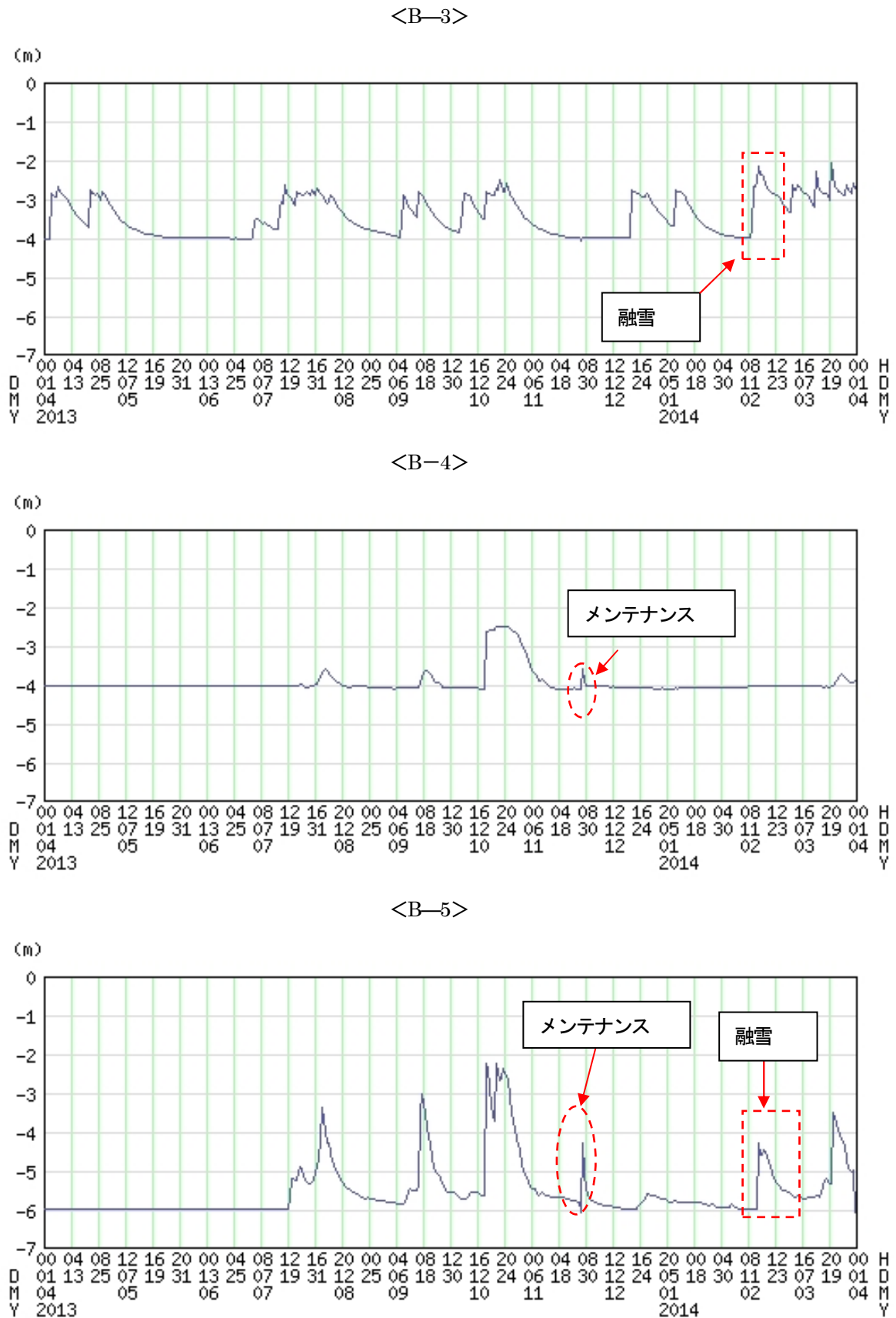


図4 のり肩部のサンドマット層の位置関係





日毎に降り、比較的長雨タイプの降雨であった。また、9月～10月の台風・秋雨時期には120mm程度の雨を2回、1月～3月には80mm程度の降雨・降雪を3回経験しており、昨年度に比べて多くの雨を経験した。過去のアメダスデータを見ると、この地域では48時間累積雨量が200mmを超える雨を年に1回程度経験しているが、平成25年度も昨年度に引き続き経験することはできなかった。一方、2月上・中旬には比較的まとまった降雪があり20cm以上の積雪および融雪が確認されている。この地域の降雨は、近傍のアメダス（亘理）を見ると年間1300mm前後の降水量があり、現地の雨量計では1298mmの降水量を記録しており、ほぼ平年並みの降水量であった。

水位計の観測状況をみると、前述のようにB-2の設置箇所におけるサンドマットの位置が基盤排水層の位置とほぼ一致しているため、この部分から排水が行われていると考えられ、昨年度の観測結果と同様に水位上昇が見られなかった。一方、その他の観測孔では前述の降雨と連動して顕著な水位上昇が見られたが、降雨との反応がよいのり肩部のB-5においては春先の降雨での反応が見られなかった。これは、昨年度の10月～3月の総降水量が241mm、特に1月～3月の総降水量が51mmとほとんど顕著な降雨がなかったため、盛土内の水位が孔底よりもかなり低い位置まで下がったものと推察される。春先の降雨による山側のB-1の水位変動状況が比較的長い時間で数10cm上昇しており、B-5においても同様の水位上昇があるものと仮定すると、B-5位置における水位は降雨による水位変動が確認されなかったことを踏まえると、孔底から数10cm以上も下すなわち元々の地山位置より下にあることが推察される。さらに今年度の4月中旬～6月上旬にかけてもほとんど顕著な降雨はなく、このためのみ尻のB-3でも孔底以下に水位が下がっており、通常であれば反応していたものと思われる6月中旬の比較的まとまった降雨でも水位が観測されなかった。これらの点から、のみ尻のB-3の水位が孔底以下に下がった5月下旬から反応が戻った6月下旬頃までは盛土内にはほとんど水が無かったものと考えられる。

さらに、平成25年度の観測期間において特徴的な点は、2～3月に比較的まとまった降水があり、山側B-1の水位が高い位置で維持しているとともに、のみ尻のB-3においても比較的高い位置で水位を維持していることである。これは、2月にまとまった降雪があり、融雪の影響によるものと考えられるが、現地では積雪量の計測は行っていない。このため、近傍アメダス等の観測データを元に、観測箇所における2014年2月14～15日の降雪による積



写真5 盛土のり面および周辺の状況



写真6 山側埋め立て地の状況

雪量および融雪量の推定と水位変動への影響について分析を行うこととした。

降雪、積雪および融雪に関しては、現地に積雪計を設置していないため、近傍のアメダスによる観測結果から推察する必要がある。最も近いアメダスは「亘理」で、現地から北に約10km、海岸線からも約1kmに位置し、周辺も田畑で観測箇所と類似した条件にあるが、ここでは積雪計による観測が行われていない。現地の近傍で積雪計が設置されているアメダスは「仙台」である。このため、「仙台」の降水量、気温、積雪量の変化から、「亘理」の降水量および気温より降雪・積雪量を推察し、「亘理」の降水量と現地雨量計による降水量から現地の降雪・積雪量の変化を推察する必要がある。図6は積雪変化量の推察を行った結果である。降雨と降雪の分かれ目として、当時の降水が確認されている時間帯が「仙台」「亘理」にほとんど違いがなかったこと、外気温の変化についてもほとんど差が無かったことから、降雪により積雪量が増加している時間を目安に、「仙台」における降水量と降雪量の比（降水量1mm当たり降雪量1cmに換算）を用いて

「亘理」の最大積雪量 20cm とし、「仙台」における融雪による積雪の変化から「亘理」の積雪変化量を求めた。山元町の計測箇所についても同様の方法によって現地の最大積雪量を 28.5cm とし、融雪による積雪変化量の推定を行った。写真5、写真6に示すように、2月21日の正午時点で現地状況を確認したところ、一部に若干の残雪は見られたものの概ね積雪がなくなっていたことから、積雪変化量はほぼ推察通りであると考えられる。

図7はこの間の水位変化の状況で、沢の元地形から基盤排水による影響が小さく、水位変化が顕著に表れている3点を示す。また、図8には比較のためほぼ同量の降水量があった2013年12月19～20日の降雨による水位変化を示す。のり尻の水位に着目すると、通常の降雨の場合には比較的短時間で急激に水位が上昇し、ピークに達した後も比較的早く水位が減少して背面からの供給に合わせて水位を維持しているが、降雪・融雪時では水位上昇も比較的なだらかで、ピークに達した後も融雪に合わせて増減しながら高い水位が継続している。また、のり肩でも融雪時には背面から水が供給される前から高い水位を維持する傾向が見られる。雪密度が小さいため、融雪量を降水量に換算しても日雨量で数 mm 程度の降水量であり、通常の降雨であればほとんど水位変動が見られないが、融雪の場合には表面流失や特に地表面からの蒸発散がほとんど無く、効率的に浸透しているものと考えられる。

さらに、ここで図5に戻ると7月上旬～8月上旬にかけて連日のように降雨が続き、それに伴いのり尻のB-3の水位も継続して高くなっているが、融雪のあった2月中旬以降でも降水状況が7月～8月にかけての降雨と比べてかなり少ないにもかかわらず、ほぼ2ヶ月間も高い水位が継続している。大きな違いは、地下水の供給側にあたる山側のB-1の水位が、融雪以降ほとんど下がっていない点である。融雪水の効率的な浸透は盛土背面の集水地内でも同様であり、このため集水地内の地下水位が継続的に高い状態となり、その結果背面から継続的に地下水が供給されること

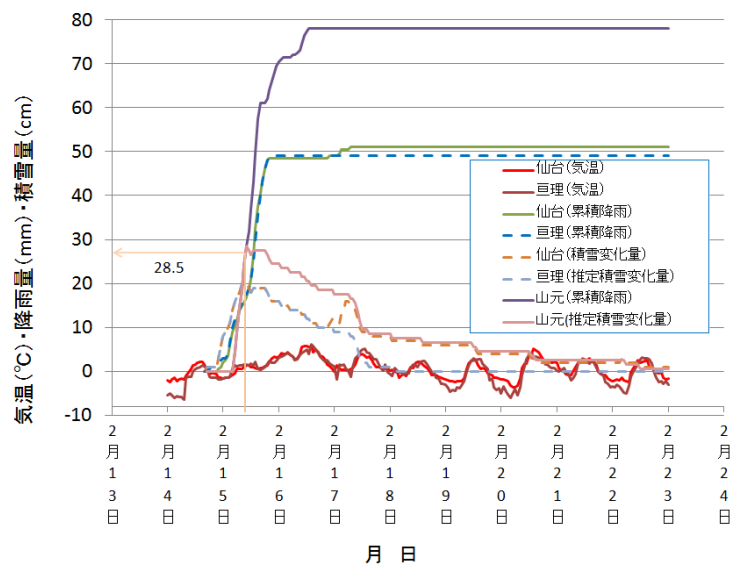


図6 積雪変化量の推定結果

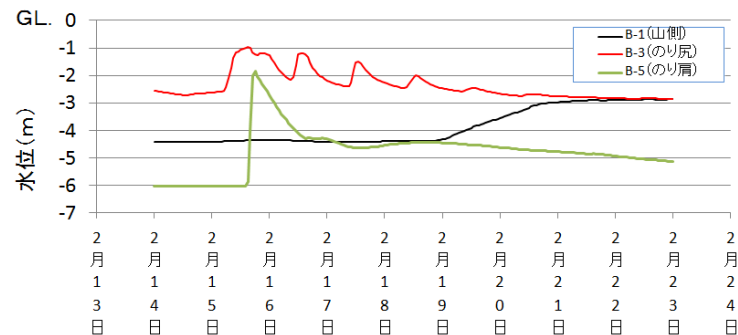


図7 降雪・融雪時の盛土内水位の変化

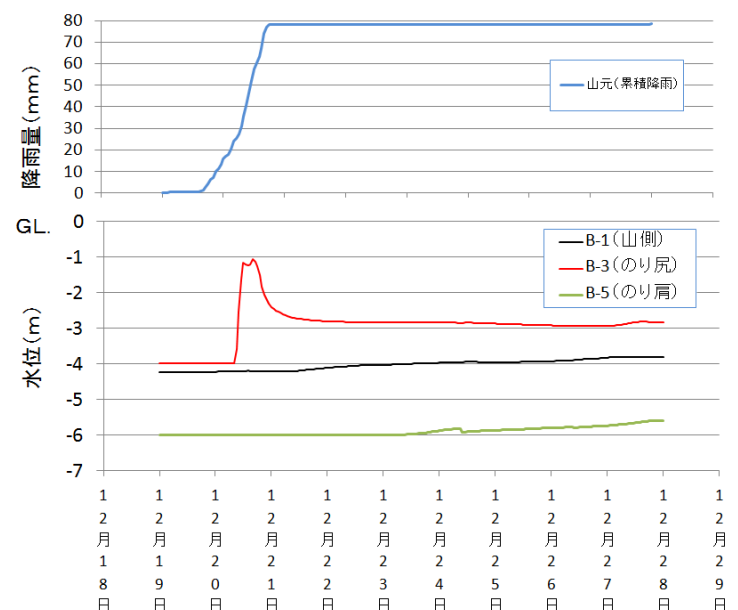


図8 類似降雨時の盛土内水位の変化

でのり尻部も高い水位が継続しているものと考えられる。

当該箇所は、災害復旧のため基盤排水層を設けており、排水対策のない集水地内盛土に比べて水位の低下速度は速い状態にあると考えられる。このため、基盤排水層などの地下水に対する排水対策がなく積雪地に位置する集水地内盛土に関しては、融雪期は地震に対して特に脆弱な状態なるものと考えられる。

3. 排水マットの効果に関する検討

近年、ジオテキスタイルを用いた薄型の排水マットが盛土の排水に用いられるようになり、前述の震災復旧箇所においても小段部分に2mピッチで施工されている。道路土工指針では、砕石等による排水層を全面に敷設するように規定されており、上記のような排水マットの設置は十分な排水能力を有しているかが疑問である。実際に、水位観測を行っている現場において降雨後の排水状況を確認した際も、写真7に示すように盛土内水の排水水は、排水マットからではなく排水マットが設置されていない部分ののり尻から多く滲みだしており、耐震性を踏まえると対策として不十分である可能性が考えられる。このため、排水マットを用いる方法が盛土の耐震性も踏まえて十分な排水能力を有するかを確認することを目的として模型実験を実施した。

3.1 実験概要

図9に実験模型の概要を示す。実験模型は、図(a)に断面を示すように、小段までの高さが5m程度でのり面勾配1:1.5の盛土から、のり尻部から高さ3mまでの部分を切り出したものを想定し、盛土内に水を供給するための背面水槽を設置している。盛土材は山砂を、排水マットは、上記観測現場で用いられているものと同じ、幅300mm×厚さ5mmのM社製のものを用いた。盛土の基盤部の構築は1層当たり10cmとし締固め度90%で管理して、基盤面は背面からのり尻に向かって3%程度の勾配をつけた。また、基盤層を作製した後、排水マットを敷設するケースでは排水マットを基盤層上面にのり尻から2.5mまでの範囲に布設した。盛土部の構築も締固め度90%で行った。基盤部上面の第1層目を10cmで造成し、図(b)に示す位置で水位計測ができるようにマノメータを設置したのち、2層目も10cmで造成した。その後は15cmで管理・造成し、3mまで造成した。また、無対策および排水マットを敷設したものの実験を同時に行うため、遮水処理を行ったコンクリートブロック壁で実験土槽を分割して模型を併設している。

盛土内水位は、盛土の背面水槽に水を供給し、背面水位が想定する盛土の高さの1/2程度にあたる2.5mまで上昇させ、2.5mになったら背面水位を一定に

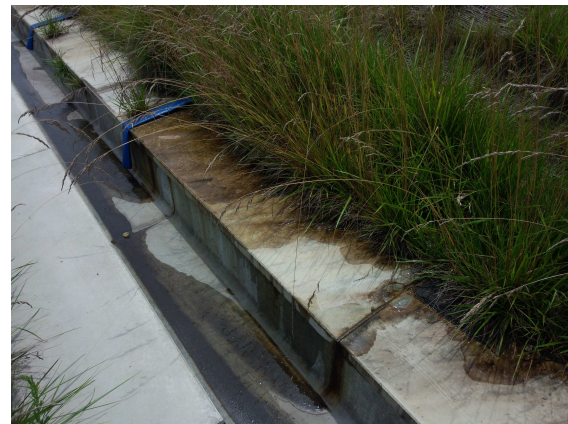
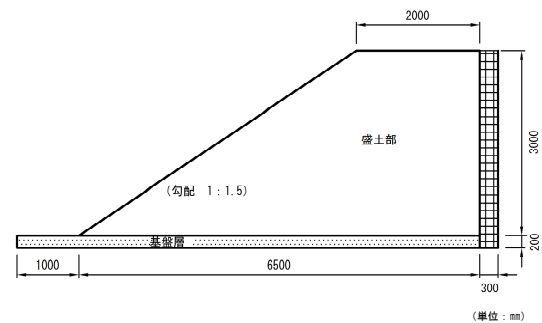
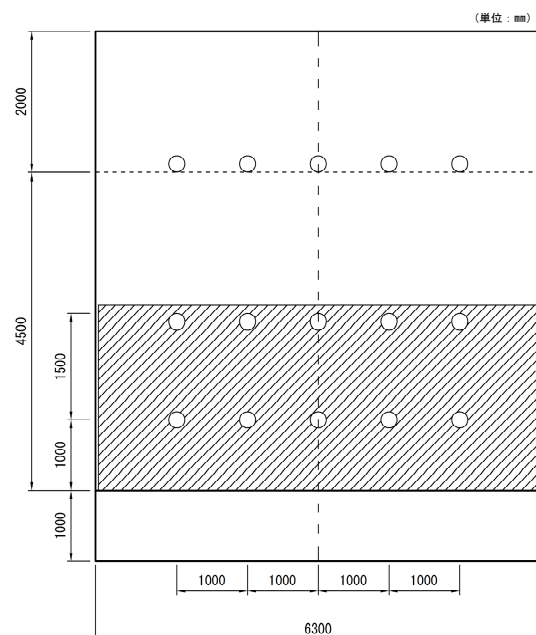


写真7 排水マット設置位置の間からの湧水状況



(a) 断面図



(b) マノメータおよび排水マットの設置位置

図9 実験模型概要

保った状態にして盛土内に水を浸透させ、1時間毎に盛土内水位の観測を行うとともに、のり先にて集水して1分間当たりの排水量の計測を行った。また背面水位は、排水マットによる対策を行った盛土内の水位がほぼ一定になるまでを目安として、48時間定常に保った。その後、排水過程での計測を行うため、背面水

槽への水の供給を中止して盛土のり尻からの排水により背面水位を自然低下させ、マノメータにて給水停止直後から1時間毎に盛土内水位、背面水槽の水位、および排水量の計測を行った。

3.2 実験結果および考察

図10に無対策、排水マットを敷設した場合のそれぞ

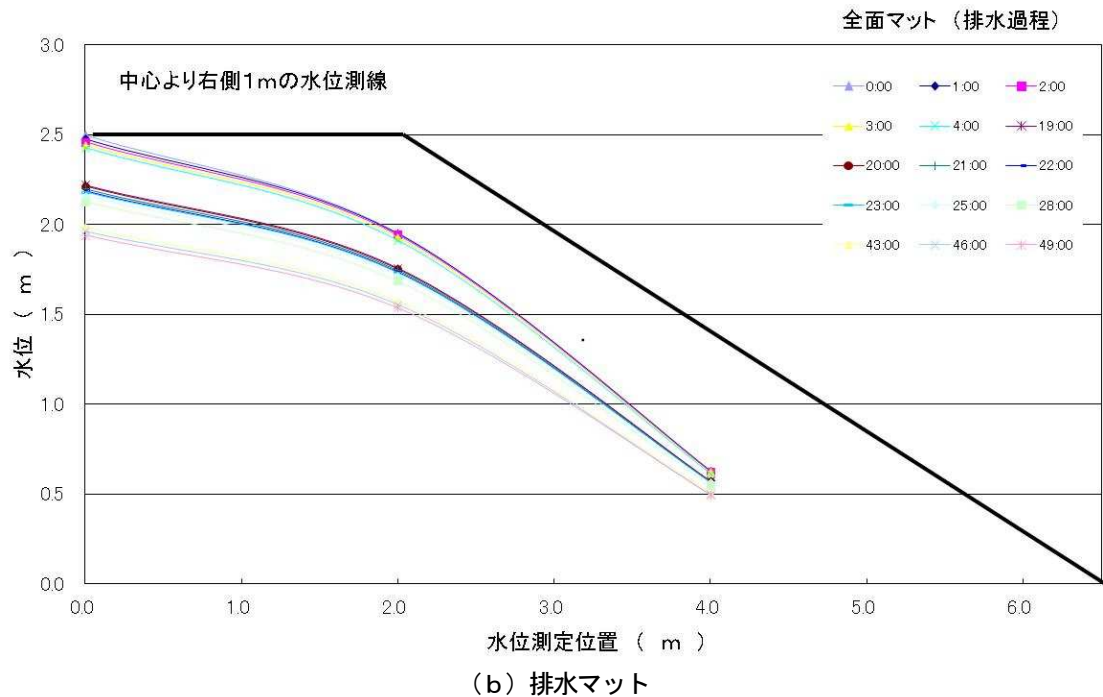
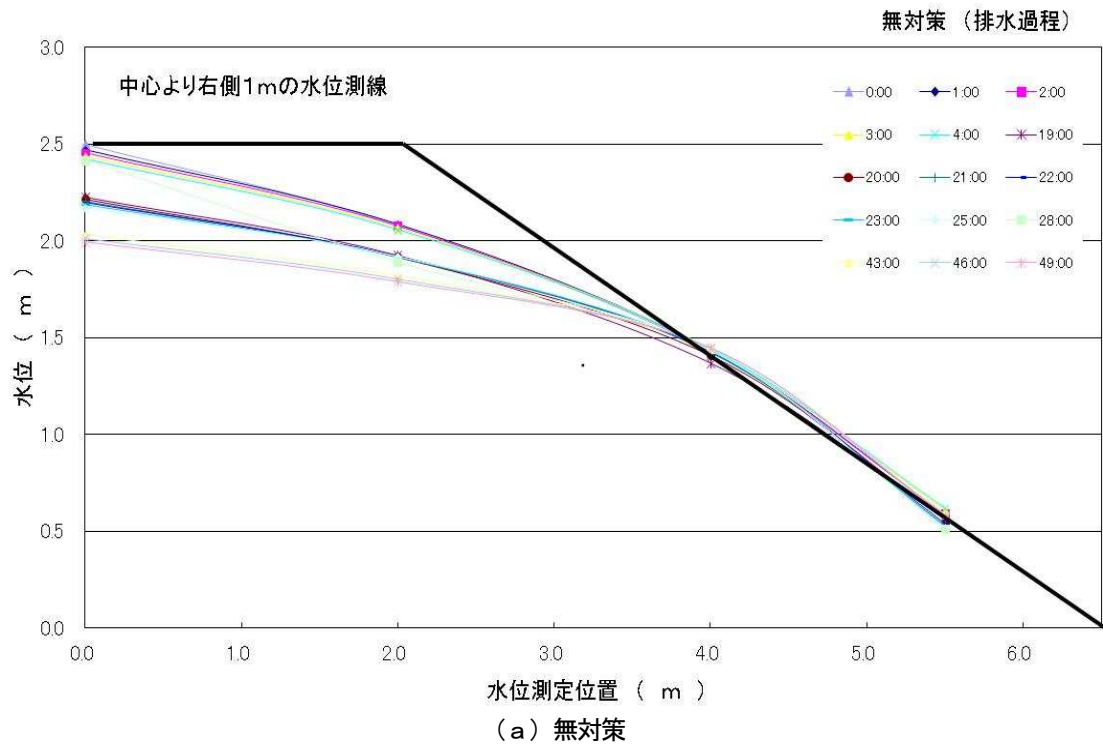
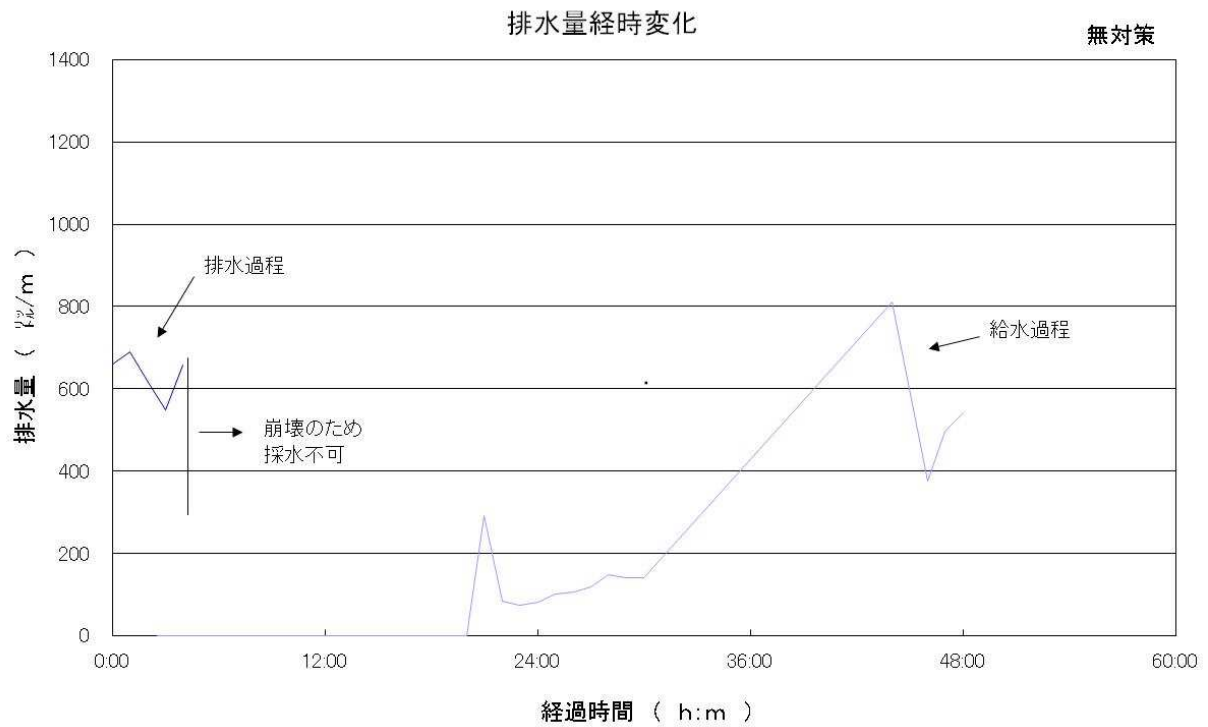
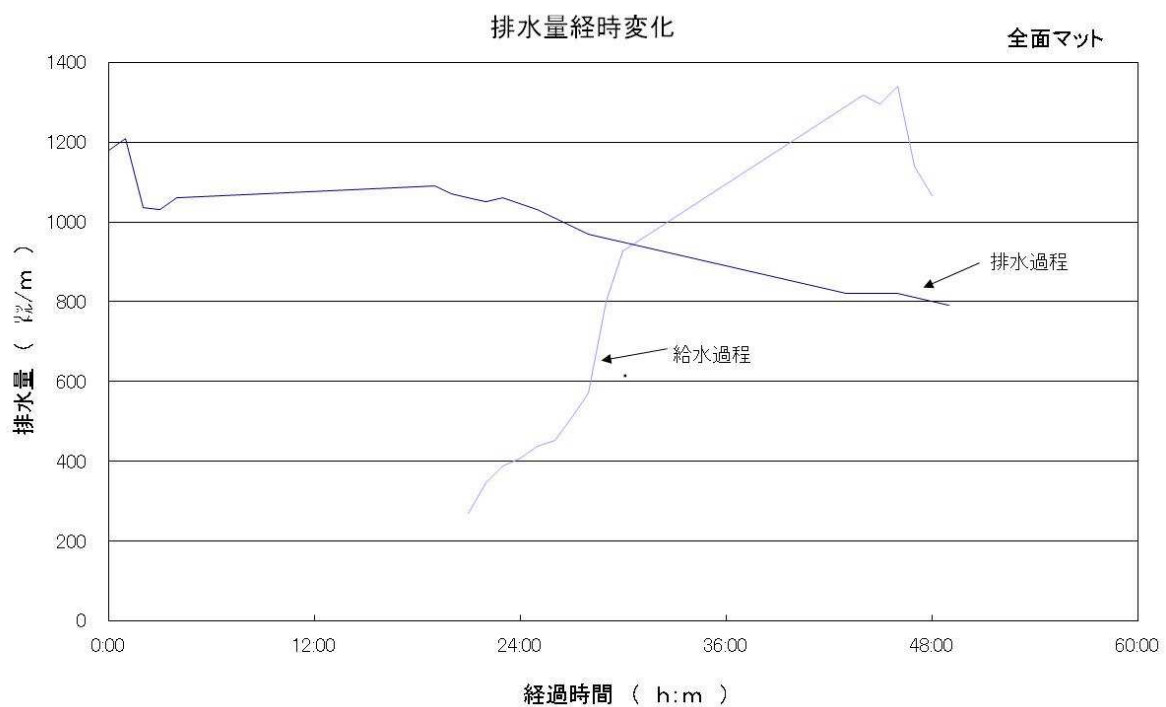


図10 盛土内水位の変化状況



(a) 無対策



(b) 排水マット

図 1 1 のり尻における排水量の変化

れの盛土内の排水過程における4時間経過まで、24時間経過時前後、48時間経過時前後の水位状況を、図11に給水過程および排水過程におけるそれぞれの排水量の変化を示す。なお、図11は、写真8に示すように排水マットを敷設したケースでも中心より左側ののり尻部分で浸透崩壊が発生しており、比較的浸透破壊の影響が少ないと考える中心より右側1m位置のマノメータでの水位を示している。

背面水位の低下状況は無対策および排水マットを敷設したケースともほぼ同様の低下状況を示した。盛土内の水位変化状況を見ると、無対策ではのり尻からの距離で2.5mの位置でほぼ表面まで水位があり、排水過程に入ってから約4時間経過ところで盛土が大きく崩壊し、のり尻での排水量については計測不能となった。一方、排水マットを敷設したケースでは、その効果によりのり尻からの距離1mに設置したマノメータでは水位は見られず、排水マットの端部にあたる2.5mの位置にあるマノメータでも無対策と比べ盛土高の半分程度までの水位であった。しかしながら、排水過程に入ってから水位の低下状況を見るとは、排水マット端部の位置においてはほとんど変化しておらず、のり尻付近では背面の水位が低下するまで長時間高い水位が保持されることが推察される。また、写真8でも示したように、排水マットを敷設したケースでものり尻部分で浸透崩壊が発生しており、観測された水位より上面においても、かなりの湿潤状態にあることが推察される。

本実験における排水マットの排水能力は、排水マットを敷設したケースの排水量から無対策のケースの排水量を引いた値と考えられる。排水マットを敷設したケースの1分間当たりの排水量の最大値は排水開始当初の約1200リットル、一方の無対策では約700リットルであり、この差分の約500リットルが排水マットを敷設したことによる排水量の増分と考えられる。本実験では排水マットを21枚敷設しており、この値が排水マット21枚による排水能力の最大値と仮定すると、排水マット1枚当たり最大で一分間に約25リットル程度の排水能力があるものと推察される。実際の敷設状況と同様に2mピッチで敷設すると、本実験の模型では3枚分のマットの敷設となり、排水能力が敷設枚数に単純比例すると仮定すると排水マットによる排水量は1/7に低下するため、1分間当たりの排水量も約800リットルと、無対策とさほど変わらない量となる。排水マットが敷設されている部分は、本実験に近い水位低下が起こるものと思われるが、排水マットの敷設されていない部分では、無対策のケー



写真8 のり尻部の浸透崩壊（排水マット有り）

スほどではないもののかなり高い位置で水位が継続することが推察される。

これらのことから、排水マットを全幅で敷設した場合はある程度の排水能力を有していることから、浸透崩壊に対しては多少の効果はあるものの、盛土の耐震性を考慮すると不十分であり、特に現状で行われているような部分的な配置については問題があるものとする。

4. まとめ

昨年度より、東日本大震災で被災した集水地内盛土の復旧個所にて、水位観測システムを構築して降雨等による盛土内水位の変動観測を実施している。昨年度は顕著な降雨があまり無く、少降雨の年であったが、今年度は平年並みの降水量であり、また冬期には比較的まとまった降雪もあったことから、融雪による影響も確認することができた。融雪に関しては、表面からの浸透効率も高く持続的に高い水位を維持すると共に、背後の集水地かも長期にわたって地下水供給もある。このため、積雪地の集水地内盛土における対策としては、地下水の排除とともに融雪中ののり面からの浸透への対応の必要性も検討を要することがわかった。

また、排水マットの排水性に関する模型実験により、集水地内の盛土の耐震性を踏まえると薄型の排水マットの排水能力は不十分であり、特に現在行われている配置方法は問題があることが推察された。

今後も引き続き現地での水位観測を継続してデータの収集を行い、簡易な水位変動の予測手法の検討を行うとともに、表面からの浸透水の影響を把握するための盛土材の含水状態と強度特性の関連についての室内実験や対策効果に関する模型実験等を行い、降雨等の盛土の耐震性への影響や耐震対策に関する検討を行う予定である。

RESEARCH ON THE SEISMIC DESIGNS AND RETROFITS CONSIDERED INFLUENCE OF THE RAINFALL FOR EARTH WORKS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Geology and Geotechnical
Engineering Research Group
(Soil Mechanics and Dynamics)

Author : Tetsuya SASAKI

Shunji KATO

Abstract : This study is carried out for suggesting the quantitative evaluation methods on influence of the prior rain to behavior, quake resistance due to earthquake, and rational and economical seismic strengthening method on road earthwork structures. In 2013FY, it was carried out water level observation in the road embankment that was built on a swamp, and analyzed about relations of the rain and the water level, and the effect of drainage measures.

Key words : seismic designs and retrofits, road earthworks, prior rainfall