

# 道路盛土内の宙水の原位置調査および再現解析

○肥後 陽介<sup>1</sup>・南野 佑貴<sup>2</sup>・加藤 亮輔<sup>2</sup>・片岡 沙都紀<sup>3</sup>・甲斐 誠士<sup>4</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院・<sup>2</sup>(株)日建設計シビル・<sup>3</sup>神戸大学大学院・<sup>4</sup>(株)ダイヤコンサルタント

## 1. はじめに

基盤付近に排水工を打設しても、盛土内の水位が下がらず対策工が効果を発揮しない事がしばしばあり、盛土の安定性を低下させ表層すべりなどの変状をおこす問題となっている。これは、地下水位よりも上部に滞水する宙水が存在するためと考えられ、宙水の発生メカニズムを明らかにし有効な対策工を施す事が課題となっている。そこで本研究では、宙水の発生状況を把握するとともにそのメカニズムを究明することを目的とした。まず、宙水の存在が懸念される実盛土を対象として、RI コーンによる原位置調査を実施し盛土内の水分量と密度の深度分布を取得した。さらに、密度と透水係数の関係を室内試験によって明らかにし、原位置の密度分布から透水係数の分布を推定した解析モデルを作成し、そのモデルを用いた降雨時の宙水再現解析を実施した。これらの結果から、粘性土層などの低透水性の材料が介在せず、均質な盛土材料で良く締固められた盛土であっても、締固め時に発生する密度の違いにより宙水が発生することを明らかにした。

## 2. 研究対象盛土

本研究の対象とした道路盛土の平面図を図-1に、断面図を図-2に示す。ここで、本研究では、図-2に示すRI コーン調査地点である2段目の小段をGL-0mとする。盛土高は10m強であり片側は2段の小段を有する法面A、他方の法面Bは2段目の小段以下がテールアルメによる補強土になっている。いずれの法面も1:1.8勾配である。図-1の平面図を見ると、紙面の上方及び右側には山が存在しており、当該地は集水地形であると認められる。しかし、上側の山と盛土は接しておらず、排水溝も設置されているため、盛土への水の流入は無いと言える。また、切土されている右側の山と盛土は接しているものの、調査地点は山から離れた位置にあり高度差もさほど大きくない事から、調査位置へ山から水が流入しているとしても、動水勾配は非常に小さく流量はごくわずかと考えられる。また、山と盛土の間にはボックスカルバートがあり、カルバートの壁面から盛土内部へ排水工が設置されていることから、右側の山から盛土への水の流入は少ないと考えられる。これらの事から、この盛土への水の主たる供給源は雨水浸透であると考えられる。

補強土の無い法面Aの方は、建設後表層すべりを繰り返しており、絶え間なく法面から水の流出が確認されたため、排水溝からの水漏れに起因する水の流入の改善と2段目の小段部にふとん籠と排水パイプによる排水工を設置する対策が施された。なお、この盛土の小段には建設時から排水工は設置されていなかった。この対策により、図-2に示すように、補強土壁を有する法面Bは地下水位が低下したが、法面Aでは排水工設置後もなお盛土内水位が低下していない。この事実は、排水工よりも上部に独立して滞水している層、すなわち宙水が存在している事を示唆している。つまり、その滞水層は排水工設置位置の間隙水とは連続していないため、この排水工では宙水を排水できないのである。

図-3に調査地点に近い2本の既存ボーリングBr-2およびBr-4で実施した盛土材料の粒度試験結果を示す。この盛土材は、細粒分を25~35%程度含む粒度分布の良い砂質系の盛土であることが分かる。特に、この後の議論で着目するGL-2.3~5.8mの領域の粒度分布は、Br-2のGL-3.8mで局所的に粗い粒子を含んでいるが、その他は類似した形状を示しており、盛土材は比較的均質と言えることができる。また、調査地点で採取した盛土材を用いて締固め試験を実施した結果、最大乾燥密度は1.811 g/cm<sup>3</sup>、最適含水比は14.5%であった(図-4)。

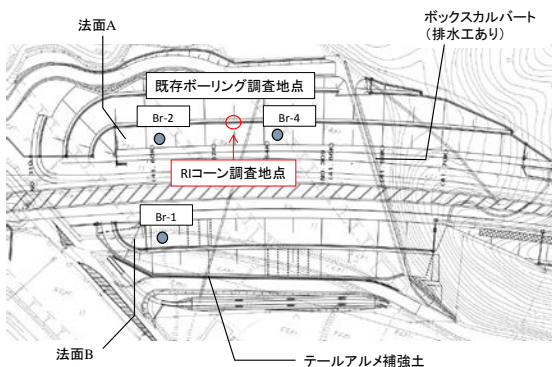


図-1 対象盛土の平面図と調査位置

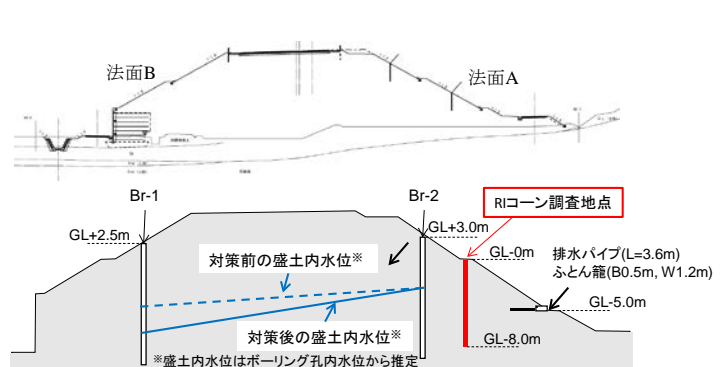


図-2 対象盛土の断面図と調査位置

Site investigation and numerical simulation of perched water in a road embankment

Yosuke Higo<sup>1</sup>, Yuki Nanno<sup>2</sup>, Ryosuke Kato<sup>2</sup>, Satsuki Kataoka<sup>3</sup>, Seiji Kai<sup>4</sup> (<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>Nikken Sekkei Civil Engineering, Ltd., <sup>3</sup>Kobe University, <sup>4</sup>Dia Consultant, Co. Ltd.)

**KEY WORDS:** Perched Water, Road Embankment, RI Cone Penetration, Unsaturated Seepage Analysis

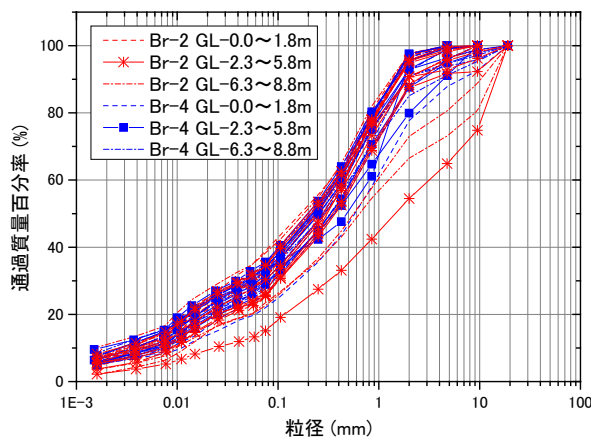


図-3 粒度試験結果 (Br-2, Br-4)

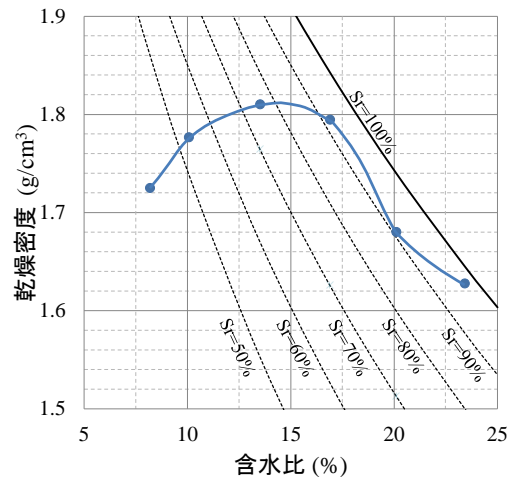


図4 締固め試験結果(RI コーン調査地点地表面)

### 3. RI コーン貫入試験による原位置調査

#### (1) 調査概要

盛土内の密度と水分量の分布状態の把握を行うためにラジオアイソトープ (RI) コーン貫入試験を実施した。RI コーン貫入試験は、 $\gamma$ 線と中性子線の減衰特性を活用した、地盤の密度と水分量を深度方向に連続的にサウンディングする手法である<sup>1),2)</sup>。

調査地点は図-1、図-2に示している通りで、法面Aの1段目の小段からRI コーンを貫入した。本調査では、同一調査地点で、電気式コーン(三成分コーン)、散乱型RI密度計コーン、散乱型RI水分計コーンの3種類のコーンを貫入した。三成分コーンでは、地盤の強度特性を取得する事が目的であり、先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧を測定する。RI密度計コーンでは $\gamma$ 線を利用して密度を、RI水分計コーンでは中性子線を利用して水分量を測定した。

コーン貫入試験は3回に分けて実施した。1回目は、まず、三成分コーンを貫入したが、GL-2.5mで貫入力不足で貫入不能となった。そこで、三成分コーンを外して、RI密度計コーン、RI水分計コーンの順に貫入し、GL-2.5mまでの密度と水分量を測定した。2回目は、試料採取の目的も兼ねて、GL-2.5mからGL-4.5mまで標準貫入試験を実施して削孔した後に、RI密度計コーン、RI水分計コーンを貫入した。N値の測定と試料の採取は50cm毎に実施した。3回目は、GL-8.35mまでプレボーリングコーンによる削孔後、RI密度計コーン、RI水分計コーンを貫入したが、調査孔の閉塞のため、データ取得は約GL-8.0mまでであった。

#### (2) 孔内水位

GL-2.5mまでの1回目の貫入試験終了時には孔内水位は見られなかったが、2回目の貫入試験終了時にはGL-2.4mに水位が観測され、翌朝調査再開時にはGL-2.1mであった。最終的な3回目の貫入試験終了時の孔内水位はGL-2.3mであった。

#### (3) 地盤の強度特性

電気式コーンで得られた先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧のGL分布を図-5に示す。先端抵抗および周面摩擦はおおよそ増加傾向にある事が分かる。GL-2m付近で高い先端抵抗と周面摩擦が見られ、その後2.5mで貫入不能となった。間隙水圧分布をみるとGL-2m付近で負の間隙水圧が計測されているが、通常RIコーン調査で不飽和土のサクションを測る事は困難であり、これは孔内水位の影響で部分的に飽和した土における正のダイレイタンスの発生を示唆している。図-5に併記しているN値(Br-2)とN値(Br-4)は既存調査結果であり、RIコーン調査地点はこれらのボーリング調査地点の間に位置している(図-1)。電気式コーンによる貫入が不能となったGL-2.5m以深について実施して標準貫入試験及びプレボーリングコーン貫入試験から得られたN値とNd' 30°値は礫当たりによって一部非常に大きな値を示しているが、概ねBr-2とBr-4のN値の間に分布している。なお、換算N値の計算方法は参考文献を参照されたい<sup>3),4),5)</sup>。

#### (4) 飽和度分布

図-6に示す飽和度分布では、地表面付近で約70%、GL-0.7m付近において約50%の領域が存在し、GL-1.7m付近で飽和度95%を示すまで増加する傾向にある。GL-1.7m~3.0mの区間は飽和度95%前後を示していることから、GL-1.7mから3.0mでは高い飽和度を示すものの、地表面からGL-3.0mまでの領域は不飽和状態であると考えられる。一方、GL-5.8m以深では飽和度100%を示したことから、およそGL-5.8m付近に地下水面が存在していると考えられる。

GL-3.0m~5.8mに注目すると、GL-3.0m~3.6mの間で飽和度が100%となっているが、GL-3.6m以深は飽和度が低下してGL-4.5m付近に約80%の局所的に低い領域が見られ、再び徐々に増加してGL-5.8mで100%となる。つまり、GL-3.0m~3.6mには、地下水面とは連続しない滞水層である、宙水が存在することで局所的に飽和していると考えられる。

### (5) 密度分布

図-6 の乾燥密度  $\rho_d$  に着目すると、飽和度が局所的に低い GL-4.5m 付近に約  $1.85 \text{ g/cm}^3$  の極大域があり、GL-4.5m 以浅は  $1.45 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$  の範囲に分布している。GL-4.5m 以深は、GL-5.2m 付近に約  $1.5 \text{ g/cm}^3$  の極小域があり、GL-7.5m 以深に乾燥密度が大きくなる傾向が見られるまで、約  $1.6 \text{ g/cm}^3$  であった。

なお、これらの密度分布、飽和度分布は、同じ調査地点で実施した固定ピストン式二重管サンプラー (GS サンプラー) により採取された乱れの少ないサンプルで測定した密度、飽和度  $\rho$  と良い一致を示しており、妥当な値と言える。

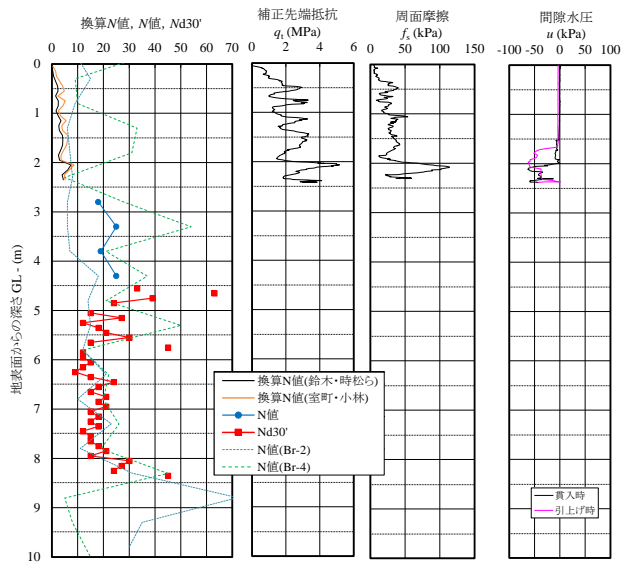


図-5 三成分コーンによる調査結果

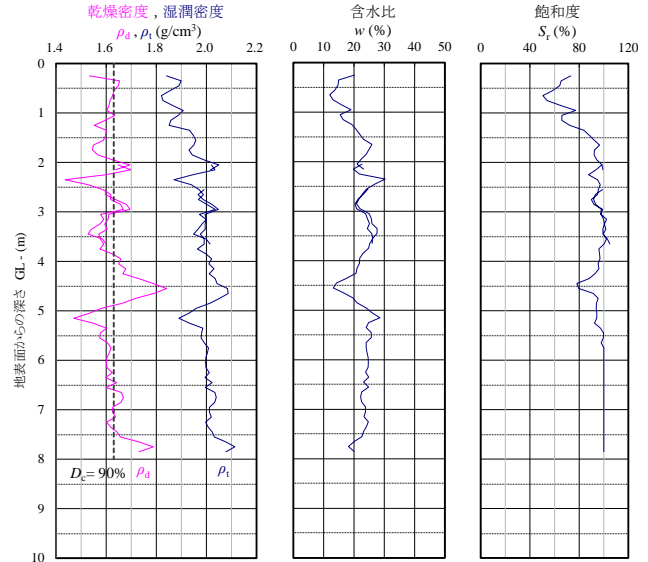


図-6 RI水分計および密度計コーンによる調査結果

### (6) 宙水発生メカニズム

飽和度分布を分析したところ、孔内水位は 2.3m 付近にあるが、孔内水位は種々の深度から流れ込んだ地下水が貯まったものであり、RI 水分計コーン貫入試験結果から、地下水位は GL-5.8m であると分かった。一方で、地下水位よりも上部の GL-3.0m~3.6m に幅 60cm の飽和度が 100% を示す滞水層が存在し、地下水位とこの滞水層の間の GL-3.6m~5.8m に明らかに不飽和な層が存在する事から、GL-3.0m~3.6m の滞水層は地下水とは連続しない宙水であると認められる。

間隙水圧の測定結果から、正のダイレイタンスを示した GL-2m 付近の土の乾燥密度は約  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 、締固め度は 90% 程度であり、これは、本盛土の平均的な乾燥密度および締固め度である。つまり、この盛土は全体にせん断により体積膨張を示す程度に密に締固められていると言える。局所的には低密度領域が見られるが (GL-2.4m, GL-5.0m)、宙水の存在位置である GL-3.0~3.6m の乾燥密度はほぼ  $1.6 \text{ g/cm}^3$  であり、正のダイレイタンスを示した GL-2m と同レベルにあるため、特別に緩い層に水が滞水しているのではない。

宙水下部の飽和度が局所的に低い GL-4.5m において、局所的に高密度帯が存在していた。その深度での乾燥密度は  $1.85 \text{ g/cm}^3$  と高く、他の箇所よりも良く締固められた層であり、この層が低透水層となってその上部に滞水しやすい密度構造となっていると考えられる。

盛土内に低透水層が存在する原因として、粘性土等の細粒土層の介在も考えられるが、宙水下部における N 値や Nd30' 値は盛土内の粘性土としては大きい。また、既存の調査および本調査の標準貫入試験採取した土の観察からも、盛土材は深度方向に均質な砂質土系の材料である結果を得ており、細粒土に起因する低透水層の介在は認められない。

以上のことから、当該盛土内に宙水が発生した原因は、全体に締固め度 90% 程度で締固められた盛土内において局所的に特に良く締固められた締固め度 100% 程度の層が低透水層となり、降雨により盛土表面から浸透した水の盛土下部への透水を阻害し、その上部に水が滞水し易い構造になっていたためと考えられる。

## 4. 多相連成有限要素法による降雨時の宙水再現解析

盛土内宙水の再現を目的として、対象盛土の 2 次元断面をモデル化し、原位置調査で得た盛土内密度の不均質性を考慮した不飽和浸透解析を行った。また、解析で得られた飽和度と原位置調査で得た飽和度分布を比較し、解析の妥当性を検証すると共に宙水発生メカニズムを更に議論する。本研究の解析法は砂の弾塑性構成式を用いた浸透-変形連成解析法 LIQCA-SF2D<sup>7),8)</sup> である。支配方程式は固体・液体・気体の混合体全体相の運動方程式と液相および気相の連続式で、運動方程式は有限要素法で、連続式は有限差分法で離散化している。本解析法では、空気圧が常に大気圧に等しく気相の連続式は常に満足するものと仮定する簡易三相法を用いており、未知数は全体相の加速度と間隙水圧である。不飽和浸透特性

としては、水分保持特性と透水係数の飽和度依存性をそれぞれ van Genuchten モデルと Brooks & Corey モデルで考慮している。また、本研究では変形挙動を議論しないため、砂の構成式には簡単のためサクシジョンの影響は考慮していない。解析法の詳細は参考文献<sup>7,8)</sup>を参照されたい。

#### (1) 飽和透水係数の不均質性

密度が変化すると土のあらゆる力学特性が変化するが、ここでは浸透挙動に着目するため、変形・強度特性の変化は考慮しない。不飽和土の浸透問題では、透水係数と水分保持特性が密度変化の影響を受ける。本研究では、この2つの特性のうち水の浸透挙動により支配的な影響を持つと考えられる透水係数の密度依存性を考慮する。なお、水分保持特性の密度依存性は、間隙率の変化による有効飽和度の変化として考慮されている。

土中の水の流れを考える時、土の透水係数に影響を与える因子として、間隙比と飽和度が挙げられる。このうち、RI コーン調査で得られた密度分布から、対象盛土内部では間隙比が分布していると考えられるため、間隙比を基に飽和透水係数の分布を推定し、解析に考慮した。

対象盛土材料を採取し、締固め度 85%、90%の供試体に対して定水位透水試験を行った結果、それぞれ飽和透水係数は  $1.35 \times 10^{-5}$  m/s、 $1.99 \times 10^{-7}$  m/s となった。なお、これらの締固め度に相当する間隙比は、それぞれ 0.782、0.655 である。ここで、土粒子密度は  $2.676 \text{ g/cm}^3$  である。締固め度 90%の透水係数は、85%の透水係数に比べて2オーダーほど小さい事が分かる。図-3の粒度分布を見ると、GL-2.3~5.8mでは  $D_{20}$  が  $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$  程度の土が多く存在し、Creagerの方法によると  $1.05 \times 10^{-7} \sim 4.00 \times 10^{-7}$  m/s 程度の透水係数を持つ土に分類され、締固め度 90%の透水係数はこの範囲内にある。

本解析では、Kozenyによる間隙比関数と飽和透水係数の関係<sup>9)</sup>を用いて、これらの2つのデータ間の飽和透水係数を線形補間により内挿した。締固め度 85%以下(間隙比 0.782以上)については、同じ傾きで外挿した。一方、締固め度 90%以上(間隙比 0.655以下)の土については、間隙比関数-飽和透水係数空間内の原点と間隙比 0.655時の点を結び線形補間した。すなわち、本解析では間隙比が 0.655よりも高い領域と低い領域で異なる線形関係を持つバイリニアな関係を仮定した。これは、間隙比関数と透水係数の実験的關係は、全間隙比レベルにおいて線形で無く、区分的に線形である事を示唆しているが、この点については、十分な実験データの集積とその分析が今後の課題である。

図-7にRI密度計コーンの乾燥密度の深度分布から算出した間隙比深度分布および解析に用いた飽和透水係数深度分布を示す。0.782以上で透水係数を外挿している点は2点あり、最大の間隙比 0.846で透水係数は  $2.16 \times 10^{-5}$  m/s である。一方、間隙比 0.655以下の点は多数存在し、最小の間隙比は 0.439で透水係数は  $6.88 \times 10^{-8}$  m/s となった。

なお、間隙比と透水係数以外のパラメータは均質と仮定した。また、初期応力も自重とつり合うように設定しており、間隙比と透水係数の不均質性の影響は受けないものとした。

#### (2) 降雨条件

降雨浸透解析の外力、すなわち降雨条件の設定には、RI コーン調査日を含む実降雨量を用いた。本研究で実施したRI コーン調査日から遡って13日間の対象盛土付近の降水量<sup>8)</sup>のグラフを図-8に示す。調査日の13日前に時間雨量 30mm強、日雨量 40mm程度の降雨があり、その後も数回の降雨があった。一方それ以前の一週間程度は降雨量が比較的少ないため、13日前の6/17を盛土の初期状態として、それ以降の降雨の時間降雨を降雨強度として解析に用いた。なお、地表要素における透水係数と境界と要素中心間の動水勾配から得られる流量を超える雨水は、解析土地盤内に浸透しない。

#### (3) 解析条件

図-9に本検討で用いた解析メッシュを示す。底面および側面を固定境界とし、排水境界条件は底部を非排水、側面を水位に応じた定水圧境界としている。地下水位は紙面右側の地山から常に湧水が見られた地表面位置を基準に設定した。盛土天端はアスファルト舗装されているが、法面の浸透挙動に与える影響は少ないため、簡単のため土と同じ条件とした。

解析に用いたパラメータは淀川堤防砂の土質試験から決定したものを基本とし(表1)、飽和透水係数と水分特性曲線のパラメータのみ、対象盛土の実験から決定した。飽和透水係数は図-7の分布をRI コーン調査区間に該当する高さに適用した。調査区間に該当しない箇所については、調査区間以深は簡易的に透水係数分布最下部の値を用い、調査区間以上の標高には地表面から図-7に示す透水係数分布の深度分布を同様に適用して補完した。

ここで、飽和度の初期値は73%とした。この初期値はRI コーン調査で観測した地表面からGL-2mまでの飽和度の平均的な値として決定した。図-8に示すように、RI コーン調査の3日前に20mm強の降雨が観測された後2日間は降雨がほとんどない事から、水の蒸発によって少なくとも地表面付近では高含水状態ではなかったと考えられるため、このGL-2mまでの領域の飽和度を定常的な保水状態と仮定した。一方、解析期間の前一週間以上の期間まとまった降雨がなかった事から、解析の初期状態において盛土内は全体において定常的な保水状態であったものとした。

#### (4) 解析結果

不飽和浸透解析で得られた飽和度分布の時間水位を盛土部について拡大して図-10に示す。飽和度分布の時間推移をみると、大きな降雨のあった1日目以降に盛土内へ降雨が浸透し、時間経過に伴って局所的に飽和度が上昇して検討期間終了時には100%に到達する領域が存在している。飽和領域は盛土内に2箇所表れており、盛土下部にある飽和領域はRI コーン調査で明らかとなったよく締固められた低透水層に該当する透水係数を有した層が存在する箇所と一致している。

この箇所では、局所的に透水性が悪くなることで浸透した水が下層へと流れなくなり、低透水層上部に滞水していくことで宙水が形成されたと考えられる。なお、盛土上部に存在する飽和領域は、盛土上部の RI コーン調査区間外の飽和透水係数分布を盛土下部と同じデータで補完したことにより、宙水形成要因である低透水層におけるデータが含まれたためである。

次に、解析で得られた飽和度分布から RI コーン調査区間に該当する区間（2段目の小段から、2段目の小段を0mとしてGL-8mまで）について抽出した飽和度深度分布と RI コーン調査で得られた飽和度深度分布を図-11に示す。解析結果ではGL-3.78~4.28mにかけて飽和度が100%の値を示しており、その下層には飽和透水係数が局所的に小さい低透水層が存在している。したがって、GL-3.78~4.28mにかけて存在する飽和領域は下層への浸透が阻害されることで滞水した宙水であると考えられる。一方、調査結果では飽和度が100%の領域は3.0~3.6mと解析結果よりも上部に位置している。

飽和度100%の領域が解析と実験で異なる理由を考察する。調査結果では、3.6~4.2mにかけて96%程度の高い飽和度になっていることが分かる。土の水分特性曲線の吸水側では、サクションが0になっても封入不飽和状態で飽和度が完全に100%にならない事を考えると、この領域もほぼ飽和していると考えられる。解析においては、封入不飽和状態を考慮したモデル化になっていないため、この位置の飽和度が100%に至っている。また、解析ではGL-3.0~3.6mの領域が不飽和のままとなっているが、降雨量の増加に伴い宙水の領域が広がっていることから、さらなる降雨により浸透水が増加すれば、この領域の飽和度が更に上昇すると考えられる。この降雨で100%に至らなかったのは、初期飽和度の設定にも起因していると考えられ、3.0~3.6mの領域は初期状態から飽和度が高かった可能性も考えられる。以上より、解析結果は低透水層の上部における宙水の発生を定性的に再現しており、定量的にも調査結果と比較的良好な一致を示している。

表-1 解析に用いたパラメータ

圧縮指数, $\lambda$	0.0804
膨潤指数, $\kappa$	0.0001
正規化せん断弾性係数, $G_0/\sigma_{m0}'$	2250
水の体積弾性係数, $K^f$ (kPa)	$2.0 \times 10^6$
変相応力比, $M_m^*$	1.270
破壊応力比, $M_f^*$	1.270
硬化関数中のパラメータ, $B_0^*$	4500
硬化関数中のパラメータ, $B_1^*$	150
硬化関数中のパラメータ, $C_f$	50
擬似過圧密比, $OCR^*$	1.3
異方性パラメータ, $C_d$	2000
ダイレイタンス係数, $D_0^*$	0.5
ダイレイタンス係数, $n$	2.0
規準ひずみ(塑性), $\gamma_{ref}^{P*}$	0.008
規準ひずみ(弾性), $\gamma_{ref}^{E*}$	0.08
水分特性曲線パラメータ $\alpha$ (1/m)	6.40
水分特性曲線パラメータ $n'$	3.15

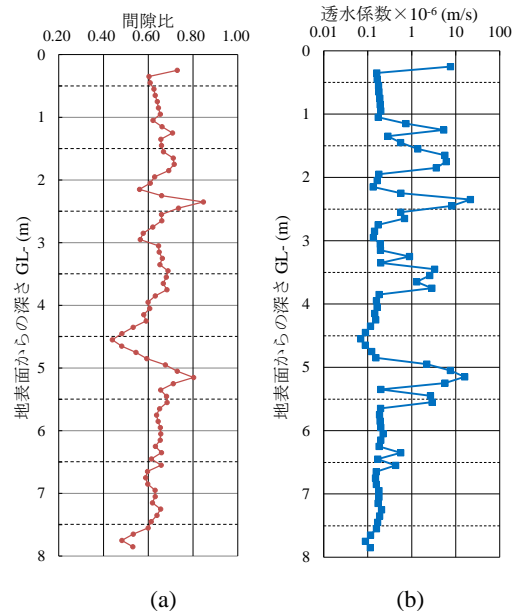


図-7 RI 密度計コーン結果から算出した間隙比深度分布(a)および解析に用いた飽和透水係数深度分布(b)

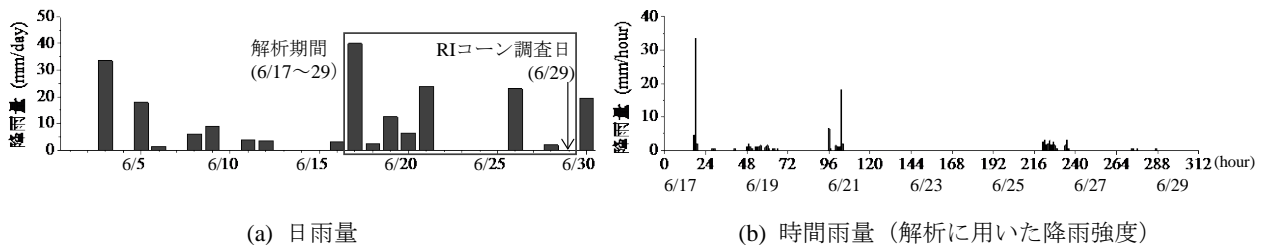


図-8 当該盛土付近の観測地点における降水量<sup>10)</sup>

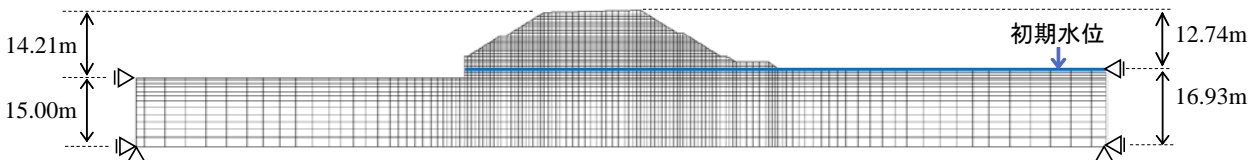


図-9 解析に用いた有限要素メッシュ

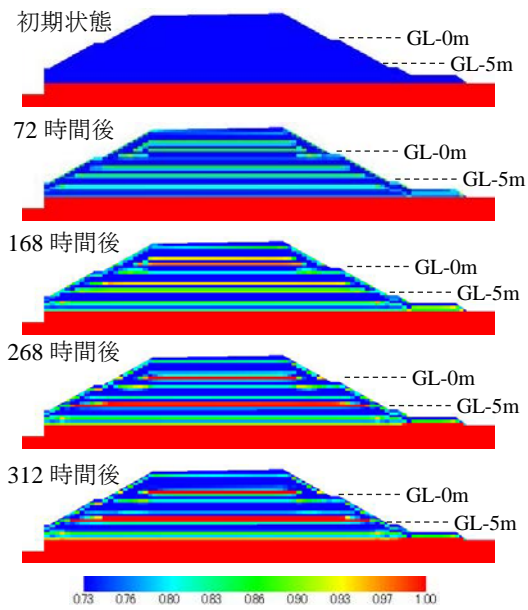
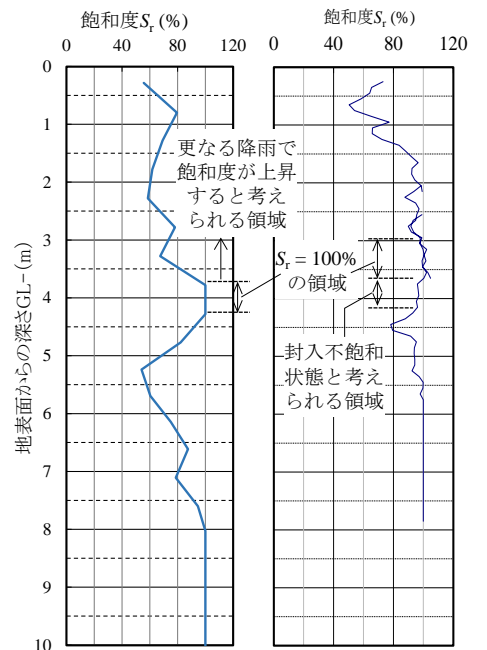


図-10 盛土内の飽和度分布



(a) 解析結果 (b) RI コーン調査結果  
図-11 飽和度深度分布の比較

## 5. おわりに

宙水の発生メカニズムを明らかにするため、宙水の存在が懸念されていた実盛土を対象に RI コーン調査を実施した結果、地下水よりも上部の不飽和領域の更に上部に、飽和度が 100%を示す宙水を検出した。また、宙水の直下には相対的に密度の高い領域が存在した。更に、計測した密度分布から推定した透水性の分布を考慮した降雨浸透解析を実施し、この高密度領域が鉛直下方への透水を阻害していることが宙水発生の原因となっている事を明らかにした。

対象盛土の盛土材は比較的均質であったにも関わらず、密度に大きな分布が見られたのは締固めの不均質性に起因すると考えられる。つまり、粘土層などの低透水の材料が介在しているのではなく、均質な材料で良く締固められた良質な盛土であっても局所的に特に良く締め固まった低透水層が、宙水の発生要因となっているのである。さらに、この盛土は平均的な締固め度が 90%程度であり、比較的降雨が浸透しやすい密度であったことも宙水発生の一因である。水を盛土内に貯めないためには、締固め時を厳密に管理し、各締固め層の密度をより均質にする事が重要である。

**謝辞：**本研究は、新都市社会技術融合創造研究会の研究テーマ3「道路盛土における排水施設点検・管理手法に関する研究」(プロジェクトリーダー：澁谷啓教授(神戸大学))の一部として実施した。プロジェクト構成員各位には建設的なご議論とデータを提供いただいた。また、京都大学の三村衛教授、ソイルアンドロックエンジニアリング(株)の吉村貢氏、重富晶志氏には、RI コーン調査に関して貴重なご意見をいただいた。これらの方々に、ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Shibata, T., Mimura, M., Shrivastava, A.K. and Nobuyama, M.: Moisture measurement by neutron moisture cone penetrometer: design and application, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.4, pp.58-67, 1992.
- 2) Shibata, T., Mimura, M. and Shrivastava, A.K.: RI-cone penetrometer experience in marine clays in Japan, *Proc. 4th Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering*, Vol.3, pp.1024-1033, 1993.
- 3) 鈴木康嗣・時松孝次・實松俊明：コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 566 号，pp. 73-80，2003 年 4 月。
- 4) 室町忠彦・小林精二：qc/N 値の粒度による変化の実測例について，サウンディングシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.151~154，1980
- 5) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013。
- 6) 原崇彰・片岡沙都紀・肥後陽介・甲斐誠士・加藤亮輔・澁谷啓：各種の原位置および室内試験による既設道路盛土内の宙水層の把握に関する事例，第 51 回地盤工学研究発表会，岡山，pp.447-448，2016。
- 7) 一般社団法人 LIQCA 液化地盤研究所：LIQCA2D13・LIQCA3D13 (2013 年公開版) 資料，2013。
- 8) 加藤亮輔・岡二三生・木元小百合・小高猛司・角南進：不飽和浸透—変形連成解析手法と河川堤防への適用，土木学会論文集 C，Vol.66，No.1，pp.226-240，2009。
- 9) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，p.458，2009。
- 10) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2015 年 12 月閲覧)。