

# 不飽和盛土内宙水の発生要因についての数値解析的研究

○南野佑貴<sup>1</sup>・肥後陽介<sup>2</sup>・大竹雄<sup>3</sup>・加藤亮輔<sup>1</sup>・吉村貢<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(株) 日建設計シビル・<sup>2</sup>京都大学大学院・<sup>3</sup>新潟大学・<sup>4</sup>ソイルアンドロックエンジニアリング(株)

## 1. はじめに

盛土では地震による崩壊事例がこれまでに多発しており、これらに対する調査・研究から盛土内に水が浸透することで内部の水位が高くなるのが崩壊の原因として挙げられている。そのため、対策工は盛土内の水位を下げることを重視し、排水工の設置や防水対策が主な方法となる。しかしながら、対策を実施した盛土の中には盛土内の水位が下がらず効果が発揮されないケースがしばしばあり、盛土が不安定化し表層すべり等の変状・崩壊を繰り返すことが問題となっている。この要因としては地下水水位上部に滞水した宙水の存在が懸念されており、問題解決には宙水の発生要因を明らかにする必要がある。このような宙水は、盛土内の構造や透水性の不均質性により、浸透水が透水性の高い箇所を選択的に流れ内部に滞留したために発生すると考えられ、不均一な浸透現象は実際に確認されている。別報<sup>1)</sup>では、宙水の発生メカニズムを現地調査によって明らかにしている。そこで本研究では、宙水の発生と深く関係がある盛土内部の透水性の不均質性に着目し、この不均質性を生じさせる盛土内密度の空間分布を考慮した浸透解析を実施した上で宙水の発生条件についての検討を行った。

## 2. 解析手法

不飽和浸透解析手法としてはLIQCA2D-SF<sup>2)</sup>を用いた。不飽和を考慮する場合、支配方程式は土・水・空気の三相各々の運動方程式と質量保存則から成る。LIQCA2D-SFでは、空気は非常に高い圧縮性を持つとし、気相の連続式は常時成立すると仮定する簡易三相法で定式化している。このとき、応力変数には骨格応力を用いている。なお、構成式にはサクシヨンの影響を考慮した砂の繰返し弾塑性構成式を用いているが、本研究では変形挙動を論議しないため、サクシヨンの影響を用いないパラメータセットとしている。不飽和浸透特性としては、水分特性曲線と透水係数の飽和度依存性を考慮している。

## 3. 盛土が有する不均質性

浸透現象に影響を及ぼす盛土内密度の不均質性が生じる要因としては次のことが考えられる。なお、本研究における「密度」は基本的に乾燥密度を指す。

- ① 土被りの違いによる自重の差異で生じる密度分布
- ② 締固めの際に生じる層内の密度分布
- ③ 土自体の潜在的な不均質性
- ④ 施工過程で生じる締固め層毎での密度の差異

本研究ではこれらの要因により生じる盛土内の密度空間分布を作成し、密度分布に対応した飽和透水係数分布を推定することで浸透現象における透水性の不均質性を考慮した。飽和透水係数は、実験的に土の透水係数と間隙比 $e$ の関数( $e^3/(1+e)$ )の間に比例関係があることが示されている<sup>4)</sup>。本研究ではこの比例関係を利用し、密度空間分布に対応した間隙比分布に透水係数との比例関係を適用することで推定する。

## 4. 締固め層内密度分布

締固め層内では一般に層の上部が密になり下部は疎になる傾向がある事が知られている。ここでは、この締固め層内の密度分布を実験により明らかにし、透水係数の分布を推定して解析に考慮する。密度分布はRI コア密度計で測定し、解析では透水係数が均質な盛土と透水係数の分布を考慮した盛土の浸透挙動の比較を行う。

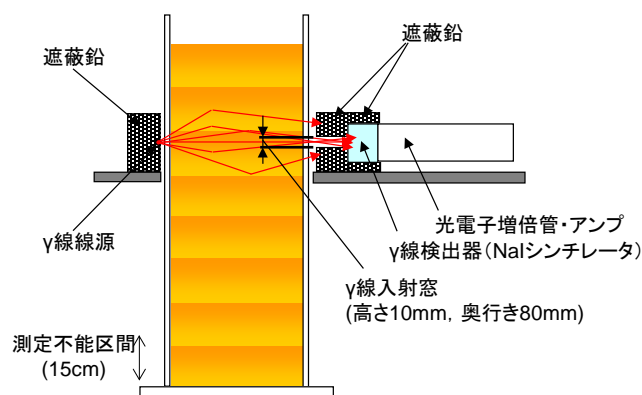


図-1 RI コア密度計測定原理

Numerical study on the mechanism of perched water in unsaturated road embankments

Yuki Nanno<sup>1</sup>, Yosuke Higo<sup>2</sup>, Yu Otake<sup>3</sup>, Ryosuke Kato<sup>1</sup>, Mitsugu Yoshimura<sup>4</sup> (<sup>1</sup> Nikken Sekkei Civil Engineering Ltd., <sup>2</sup> Kyoto University, <sup>3</sup> Niigata University, <sup>4</sup> Soil and Rock Engineering Co.Ltd.)

**KEY WORDS:** Perched Water, Density Distribution, Heterogeneity, Unsaturated Seepage Analysis

#### 4.1 層内密度分布の測定

RI コア密度計の測定機器の概念図を図-1 に示す。この試験に用いた試料は淀川堤防砂（最大乾燥密度  $1.861\text{g/cm}^3$ ，最適含水比 13.7%）<sup>9)</sup>である。直径 20cm 高さ 100cm のアクリル製のモールドに、予め最適含水比に調整した試料を木の棒を用いて一定の層厚で締め度 90% となるよう一層毎に密度管理しながら締め固めた。一層の層厚は 3.0cm と 2.5cm の 2 ケースを実施し、3.0cm のケースでは 10 層、2.5cm のケースでは 12 層作成し、いずれも高さ 30cm の締め固め土を用意した。このモールドを回転させながら  $\gamma$  線を照射し密度測定を実施した。 $\gamma$  線は線源から照射され密度に依存して減衰する。減衰後の  $\gamma$  線は検出器で測定され、データの解析によって水平方向に平均した密度を算定する。これを円筒形供試体の上端から下端まで連続して実施する事により、鉛直方向の密度分布を得ることができる。

この測定機器を用いて得られた締め固め層厚 3.0cm および 2.5cm のケースの層内密度分布の形状を図-2 に示す。ここで計測しているのは湿潤密度であるが、本研究では試料全体に含水比は均一であると仮定する事で、湿潤密度の分布と乾燥密度の分布は同一とした。測定で得られた密度深度分布を各締め固め層毎に抽出し、各層の密度の最小値から最大値を最大値が 1，最小値が 0 となるよう線形変換により正規化した。図-2(a)には各層の密度分布を全層分プロットしており、3.0cm のケースでは 10 本、2.5cm のケースでは 12 本の分布を示している。図-2(b)では、それらの平均値をそれぞれのケースで示し、密度分布のトレンドを求めた。図-2 の各層における密度分布の形状は同様の傾向を示しており、全層の平均をとった分布形状とそれを線形近似したものを見ると、密度分布形状は締め固め層上部において急勾配な密度分布を示し、それ以深においては緩やかな勾配で密度が小さくなり下層で密度が最小となっている。これは締め固めエネルギーが深度方向へ伝搬する際に減衰したためであると考えられる。なお、締め固め層の上下端において値が最大・最小となっていないが、これは測定の際に 0.5cm 幅の移動平均を出力していたために、上下で密度が最大と最小になる層境界で値が平滑化されたためであると考えられる。図-2 を見るとトレンドは 3.0cm と 2.5cm のケースで類似している。解析では、このトレンドを区分的に線形近似し、締め固め層内の密度分布として考慮した。

表-1 に湿潤密度、乾燥密度、間隙比の最大値と最小値および間隙比関数との関係から推定した透水係数を示す。ここで、淀川堤防砂の土粒子密度は  $2.661$ ，飽和透水係数は締め度 90%，間隙比  $0.589$  で  $4.79 \times 10^{-5}\text{m/s}$  である。乾燥密度の最大値と最小値の差は層厚の厚い 3.0cm の方が大きいことがわかるが、透水係数の差にするといずれの層厚も大きな差異は見られない。

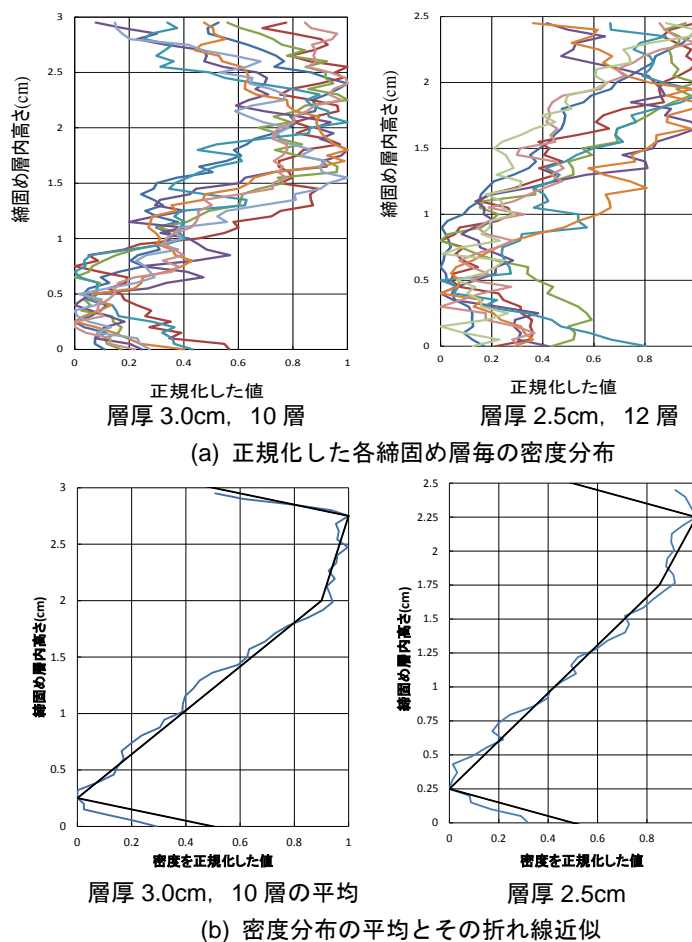


図-2 密度分布の形状

#### 4.2 層内密度分布の浸透現象への影響の検討

密度測定によって明らかとなった密度分布が浸透現象に与える影響を評価するために浸透解析による比較検討を行った。

材料パラメータが均質である場合(CaseA-1)と締め固め層内密度分布を考慮した場合(CaseA-2)の 2 つのケースについて不飽和浸透解析を行った。解析モデルおよび境界条件を図-3 に示す。解析モデルは既往の研究で実施された遠心模型実験と同様の条件とした<sup>9)</sup>。基礎地盤は 3.0cm の層厚で 2 層、盛土部は 2.5cm の層厚で 4 層に分けて締め

表-1 測定結果から得た諸数値と推定飽和透水係数の一覧

		層厚 3.0cm	層厚 2.5cm
湿潤密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	最大値	1.941	1.942
	最小値	1.867	1.872
乾燥密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	最大値	1.697	1.698
	最小値	1.632	1.637
間隙比	最大値	0.631	0.626
	最小値	0.568	0.567
飽和透水係数 ( $\text{m/s}$ )	最大値	$5.68 \times 10^{-5}$	$5.64 \times 10^{-5}$
	最小値	$4.39 \times 10^{-5}$	$4.39 \times 10^{-5}$

固められている。遠心加速度は 50g であり、プロトタイプでは基礎地盤を 1.5m の層厚で 2 層、盛土部は 1.25m の層厚で 4 層締め固めた事となる。盛土右側の水位は 6.75m であり、底面から 6.75m までを流入境界としている。また、盛土左側は、実験条件と同様に底面から 1.5m の要素を排水境界として設定した。解析パラメータは淀川堤防砂の強度定数を基に設定し、浸透解析用パラメータとして飽和透水係数を  $4.79 \times 10^{-5}(\text{m}/\text{sec})$ 、水分保持特性として  $\alpha$  を van Genuchten モデルの 19.6,  $n'$  を 1.2 とした<sup>9)</sup>。なお、CaseA-2 の解析パラメータは CaseA-1 のものを基に、透水係数の締め固め層内分布を考慮した。具体的には、表-1 の最大値および最小値を図-2 に示すトレンドで各締め固め層に分布させた。ここで、初期応力分布によって生じる密度分布から推定した透水係数分布も考慮しており、後述の各種数値解析検討を実施する際にも同様に考慮している。

浸透開始後 24 時間後の飽和度分布を図-4 に示す。CaseA-1 と CaseA-2 比較すると、両者は概ね一致している。図-5 は解析の対象とした遠心模型実験の結果で、間隙水圧計の測定値から計算した水頭を青で、色水によって推定される浸潤線を赤の点線で示している。これを見ると、計測した間隙水圧から推定した水頭が色水で確認される浸潤線の位置と一致せず、宙水が発生していると考えられる流れが現れている。一方、図-4 で示した解析結果では、実験の際に確認されたような水位差は現れなかった。つまり、このような不飽和領域を有する流れは、締め固め層内の透水係数の分布のみを考慮しても再現できず、その他の要因にも依存して現れると考えられる。

## 5. 材料の不均質性の考慮

次に、盛土材の土自体の潜在的な不均質性を考慮した解析を実施した。盛土の材料として用いられている土は様々な粒径や形をしており、このような材料の不均質性は盛土内部に密度分布をもたらす原因となると考えられる。そこで本研究では、大竹・本城<sup>7)</sup>が提案する確率統計論に基づいた地盤パラメータの空間的バラつきを生成する手法を用いて密度空間分布を作成することとした。この手法では地盤を確率場と仮定し、空間的バラつきを地盤内データ自身の相関の強さ(自己相関距離)に応じた正規乱数を発生させることで様々な周期のバラつきを生成することが可能であるといった特徴を持つ。空間的バラつきの生成方法の詳細は参考文献に譲る。

上記の手法を用いて 5.1 と 6.1 において、土自体が潜在的に持つバラつきの分布(等方モデル)と施工過程で生じる締め固め層毎での分布(異方モデル)を作成した。空間分布モデルを作成する上で設定した自己相関距離を表-2 に示す。

### 5.1 材料の不均質性に起因する密度空間分布の作成(等方モデル)

この手法を用いて作成した盛土内密度空間分布とそれに対応する飽和透水係数分布を図-6 に示す。作成した密度空間分布は RI コア密度測定の際に得られた密度差を参考に最大値が  $1.939(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、最小値が  $1.873(\text{g}/\text{cm}^3)$  とし、飽和透水係数は設定した密度分布に対応する飽和透水係数分布を 4 章と同様の方法で算出した。ここではまず、粒状材料であるが故に土が潜在的に持つと考えられる間隙のランダムなバラつきを表現するため、不均質性の周期を意味する自己相関距離を鉛直方向と水平方向で同じ値とする、等方モデルを用いた。

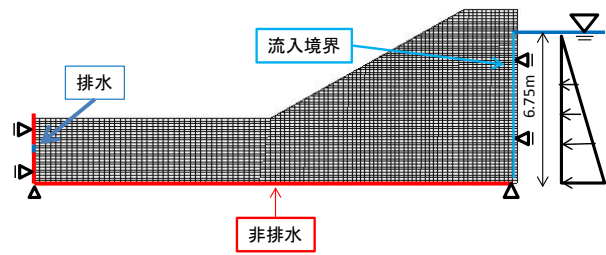
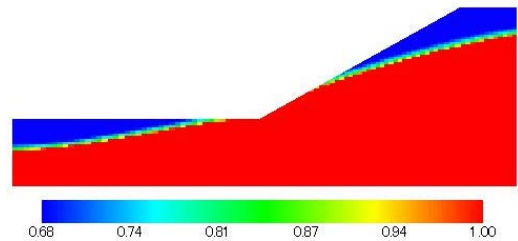
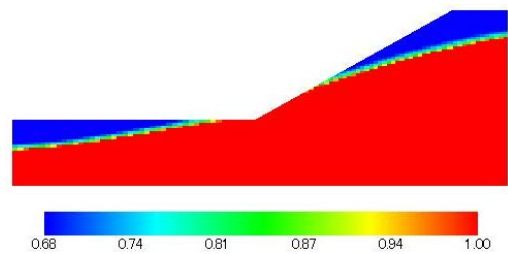


図-3 解析モデル



(a) CaseA-1(材料均一)

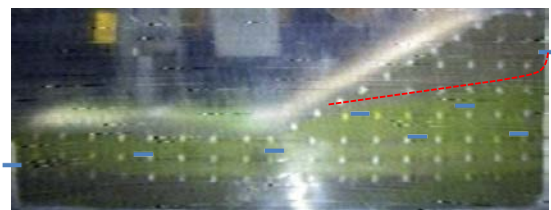


(b) CaseA-2(層内密度分布考慮)

図-4 各ケースでの飽和度分布の比較

表-2 各空間分布モデル作成に用いた自己相関距離  $\theta$

分布モデル	自己相関距離 $\theta(\text{m})$	
	水平方向	鉛直方向
等方モデル	5.0	5.0
異方モデル	5.0	50



--- : モニタで観測された浸潤面  
— : 間隙水圧計から推定される水頭

図-5 遠心模型実験結果<sup>5)</sup>

## 5.2 材料の不均質性の浸透現象への影響の検討

解析メッシュ，境界条件，透水係数以外のパラメータは4章と同様のものを用い，密度空間分布を考慮した場合 (CaseA-3)について不飽和浸透解析を実施した。

図-7にCaseA-1とCaseA-3の浸透開始から24時間後の飽和度分布の結果を示す。両者の飽和度分布を見ると，均質材料では上流側から下流側に向かって浸潤線が徐々に低下していくのに対して，不均質材料では上流側に存在する低透水係数の領域の影響で浸透が阻害され，浸潤線が急速に低下した後下流側へ緩やかに低下する現象，および飽和領域内に不飽和領域が点在する現象が確認できる。このような飽和度分布に大きな差異が発生した要因として，盛土背面からの浸透が進み，浸透水が高密度な箇所が存在する領域に到達すると，密度の高い低透水箇所を避けるように浸透水が流れ，不均質な流れが形成されたためであると考えられ，このような浸透現象は背面の地山からの浸透水が存在する盛土においては不連続な滞水域を形成し，宙水の発生に寄与する可能性があると言える。

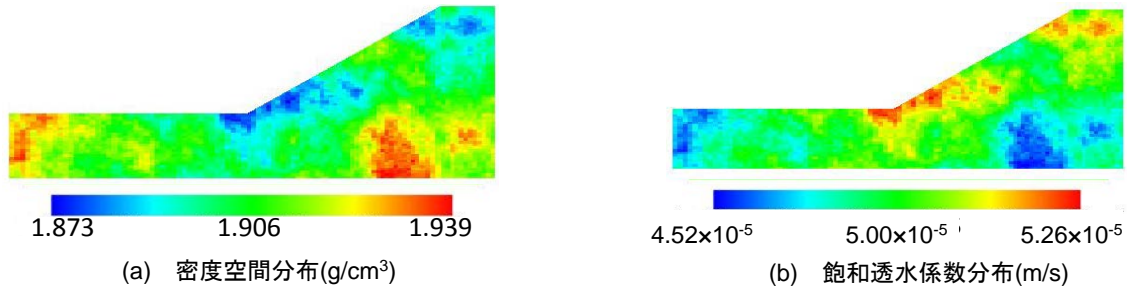


図-6 当方モデルで生成した密度空間分布とそれに対応した透水性

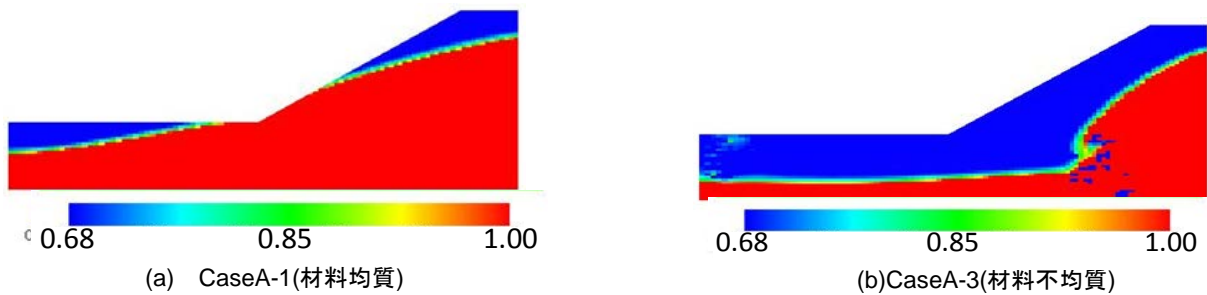


図-7 飽和度分布の比較

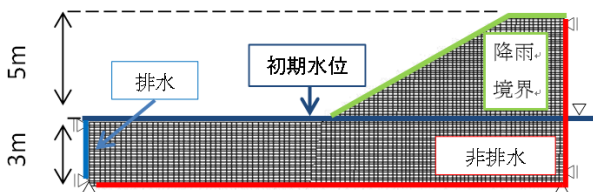


図-8 解析メッシュ図

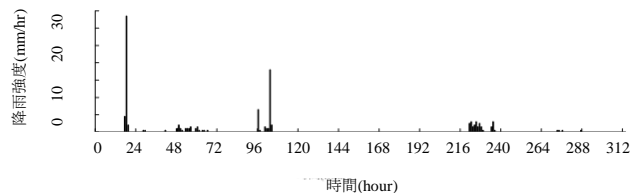


図-9 降雨強度

## 6. 施工過程で生じる締固め層毎での密度の差異の考慮 (異方モデル)

盛土造成時に生成される密度分布として，締固め層ごとの密度差が考えられる。盛土材が均質であったとしても，天候や締固め後の次の層を造成するまでの期間などの影響によって，層毎に密度差が生じる可能性がある。実際に，別報<sup>1)</sup>で報告しているように，比較的均質な盛土材においても，深度方向に比較的大きな密度差のある分布となっている。一方で，同一層内の水平方向には鉛直方向に比較しての密度差の大きくない分布と考えられる。つまり，密度分布には異方性が存在する。そこで本検討では，水平方向と鉛直方向で異なる自己相関距離を有した空間分布モデル (異方性モデル) を5.1と同様の手法で，分布の異なる2つのモデルを作成し，実盛土の密度計測<sup>1)</sup>で得られた結果を基に密度の最大値(2.08g/cm<sup>3</sup>)と最小値(1.82g/cm<sup>3</sup>)を設定した。

### 6.1 締固め層毎での密度の差異に起因する密度空間分布の作成 (異方モデル)

実鉛直方向には盛土が4層に分けて締め固められている事から，盛土高を4分割する程度の不均質性の周期となるような自己相関距離を与えた。一方，水平方向には比較的均質である事から，鉛直方向の10倍の自己相関距離を与えた。

## 6.2 締固め層毎での密度の差異の浸透現象への影響の検討

透水係数以外のパラメータ、解析メッシュは前章5で用いたものと同じである(図-8)。ただし、本検討では側面からの浸透ではなく降雨浸透を解析した。降雨強度および検討期間は図-9に示すような時間降雨を312時間与えた。この降雨強度は、別報<sup>1)</sup>の宙水が実際に発生していた対象盛土付近で観測された降雨である。

図-10の左側に6.1の方法で生成した2つのケース、Case B-1、Case B-2の密度分布を締固め度の分布として表した図を示す。密度の高い層と低い層が存在する事が見て取れる。この密度分布に対応する透水係数は、Case B-1では最小値が $7.09 \times 10^{-8}$  m/sで最大値が $2.25 \times 10^{-5}$  m/s、Case B-2では最小値が $6.91 \times 10^{-8}$  m/sで最大値が $2.15 \times 10^{-5}$  m/sである。

各ケースについて、降雨終了後(312時間後)の盛土部分を拡大した飽和度分布と締固め度分布の比較を

図-11に示す。両者を比較すると、Case B-1では盛土内に飽和度100%の領域が現れ、宙水が形成されていると考えられるが、一方でCase B-2では飽和度100%の領域は確認できなかった。締固め度分布を見ると、Case B-1では斜面に局所的に締固め度85%程度の緩い箇所が存在し、その下層の締固め度の分布は90%前後となっており、さらにその下層では90%を超えている箇所も存在する。一方Case B-2では盛土内の締固め度は概ね90%以上であり、全体的に良く締固められた状態である。特に、法面上に締固め度の低い領域が存在しないため、水の流入そのものがCase B-1に比べて少なかった。したがって、Case B-1で確認できた宙水は盛土法面の締固め度が85%の領域から浸透した降雨がその直下の締固め度90%を超える透水性の低い層で浸透阻害を受けたことで発生し、盛土全体が基準値(90%)を満たす程度に締め固まっていたCase B-2では降雨の浸透量が少なかったために宙水が発生しなかったと考えられる。

宙水の発生は、盛土に用いられる材料の透水性や気象条件や施工環境等の様々な要因に左右されるため、本検討のような密度分布の際に必ず宙水が発生するわけではないが、最大値と最小値が同じである密度空間分布であっても、その分布によって宙水の発生状況が大きく変わったように、宙水はある程度の透水性の不連続性を有する盛土であれば発生する可能性があると考えられる。

このような密度分布に起因する宙水の発生を防ぐためには、盛土造成の際にはできる限り透水性に不均質性が生じないように厳密な密度管理の下、施工を実施していくことが望ましいと言える。

## 6.3 宙水発生の抑制方法の検討

宙水の発生を抑制する方法の一つとして、盛土造成時に発生する密度差の管理が挙げられる。これは、宙水の発生の原因の一つとして、盛土材料がよく締固まることで局所的に透水性が不連続的となり、下層への浸透を阻害することを踏まえた対策方法である。検討方法としては、6.2の検討の際に宙水の発生が確認できた密度空間分布(Case B-1)を利用し、内部に発生する密度差を小さくした分布モデルについて同様の条件で降雨浸透解析を実施し、飽和度分布を比較する。空間分布に設定する密度は、その差が6.2の1/2(Case C-1)および1/4(Case C-2)の大きさとなるように設定する。

図-11に各解析ケースにおける降雨終了後の飽和度分布を示す。結果を見るとCase C-1では法面において飽和度100%の領域が残っているが、密度幅を変化させる前に比べると盛土内部にまで飽和領域は達しておらず、形成される宙水の範囲は大きく低減されていることがわかる。また、Case C-2では宙水が発生していた箇所での飽和度上昇は確認されず、宙水の発生を抑制できていると言える。

また、両者を比較するとCase C-1の場合では法面に飽和領域が存在し、その下部では締固め度95%を超える層が存在しているが、一方でCase C-2では宙水が確認されず、締固め度95%以上の層が存在した箇所の締固め度は92%となり、

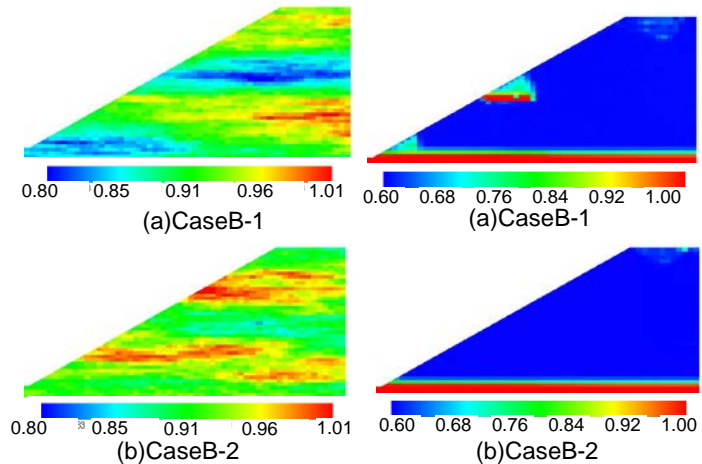


図-10 異方モデルで生成した締固め度空間分布による宙水発生状況の違い

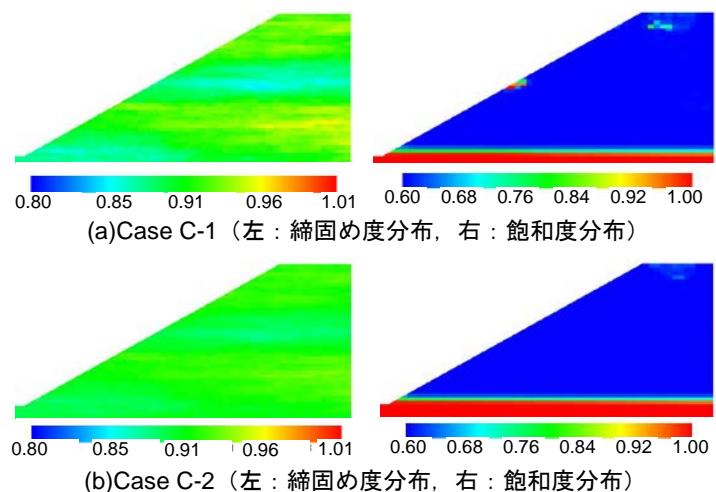


図-11 密度制御による宙水発生状況の違い

法面の締固め度は概ね 88%以上となっている。よって、宙水発生抑制として盛土内部に発生する密度分布の密度幅が小さくなったことで降雨の浸透箇所である法面の緩い領域が減少し、またその下層における締固め度が小さくなったために、盛土内の透水性が連続的になり、浸透阻害に対する影響が小さくなったことが影響していると考えられる。

以上のことから、盛土内部の密度のバラつきを厳密に管理し、締固め度をある程度の範囲で制御することで宙水の発生抑制に効果を発揮すると考えられる。

## 7. まとめ

本研究では、不飽和盛土内に宙水を形成する要因として、盛土内部の密度分布に起因する透水性の不均質性に着目し、その不均質性をもたらす要因として、①土被りの違いによる自重の差異で生じる密度分布、②締固めの際に生じる層内の密度分布、③土自体の潜在的な不均質性、④施工過程で生じる層状の密度分布の4つについて透水性の不均質性への影響を検討した。それぞれの検討の結果の概要は以下の通りである。

- RI コア密度計を用いた測定により、締固め層内密度分布の形状を明らかにしたが、その密度分布を反映した浸透解析では一様な浸透解析との違いは確認できなかった。
- 材料の不均質性に起因する密度分布として、確率統計論に基づいた地盤パラメータの空間的バラつきを生成する手法を用いた密度空間分布モデルを適用して浸透解析を実施したところ、局所的な難透水領域の存在により、浸透水が枝分かれする不均一な浸透流が確認でき、材料の不均質性が盛土内宙水の発生要因である可能性が明らかとなった。
- 層ごとの密度分布を考慮した密度空間分布モデルでは、実降雨を基に作成した降雨強度を与え、その飽和度分布と締固め度分布の比較を行ったところ、盛土内に飽和領域が発生し宙水が形成されていると考えられる密度分布と内部に飽和領域が発生しない密度分布が存在した。これらを比較すると、宙水が発生した密度分布では法面に比較的緩い箇所が存在し、その直下では締固め度が高い領域が存在していた。したがって、緩い箇所が降雨の浸透を許し、その直下の締固め度の高い層が難透水層として浸透を阻害することで宙水が発生したと考えられる。
- 宙水発生抑制方法の検討では、実盛土を想定した密度空間分布を基に、内部に発生する密度差を小さくしたモデルでの検討を行った。検討の結果、内部に発生する飽和領域は密度差の減少に伴って小さくなっていった。これは法面からの降雨浸透量が低減されたことと内部の透水性が連続的になったためであると考えられる。

以上の数値解析的検討から、盛土内宙水の発生には盛土内部に生じる密度分布が密接に関わっていることが明らかとなった。特に、盛土材料の不均一性に起因する密度分布や施工時に発生する可能性の高い締固め層毎の密度の差異は宙水発生に及ぼす影響は大きく、宙水の発生抑制には盛土造成時における材料および施工実施時の厳密な密度管理が必要であると言える。

**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には、様々な貴重なご意見をいただいた。これらの方々には、ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 肥後陽介・南野佑貴・加藤亮輔・片岡沙都紀・甲斐誠士：道路盛土内の宙水の原位置調査および再現解析, *Kansai Geo-Symposium 2016*, 投稿中。
- 2) 一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所：LIQCA2D15・LIQCA3D15 (2015年公開版) 資料, 2015。
- 3) 加藤亮輔：不飽和浸透-変形連成シミュレーション法の開発とその堤防への応用, 京都大学大学院博士論文, 工学研究科, 2011。
- 4) 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。
- 5) Higo, Y., Lee, C.-W., Doi, T., Kinugawa, T., Kimura, M., Kimoto, S. and Oka, F., Study of dynamic stability of unsaturated embankments with different water contents by centrifugal model tests, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.1, pp.112-126, 2015. DOI information: 10.1016/j.sandf.2014.12.009.
- 6) Chung-Won Lee : A study on dynamic stability of unsaturated road embankments using dynamic centrifugal model tests, 京都大学大学院博士論文, 工学研究科, 2012。
- 7) 大竹雄・本城勇介：地盤パラメータ局所平均を用いた空間的ばらつきの簡易信頼性評価法の検証, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.3, 475-490, 2012。
- 8) 本城勇介・大竹雄・加藤栄和：地盤パラメータの空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.1, 41-55, 2012。