

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18149

研究課題名(和文)キャピラリー・バリア盛土の表面被覆層としての疎水材層の適用性評価

研究課題名(英文)Applicability evaluation of water repellent soil to the sand layer of capillary barrier

研究代表者

金 秉洙 (Kim, Byeongsu)

岡山大学・環境生命科学研究所・助教

研究者番号：90648601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、豪雨時の雨水浸透による土構造物の崩壊などの地盤災害が頻繁に発生している。地盤表層部からの降雨浸透を可能な限り遮断することが土構造物の安全性に繋がると考えられる。キャピラリーバリア(CB)は砂層とその下部に礫層を重ねた土層構造により生じる一つの遮水機能である。本研究では、このようなCBの遮水機能を改善させるため、疎水性地盤材料に注目し、CBの砂層に疎水性地盤材料を適用した室内模型実験・浸透流解析などを行った。その結果、降雨浸透に対するCBの遮水機能が極めて向上されたことが確認でき、疎水性地盤材料の利用により降雨浸透に対する土構造物の安全性が改善できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, ground disasters such as the collapse of soil structure due to rainfall infiltration have frequently occurred. Preventing the rainfall infiltration from the surface layer of the ground would lead to the safety of the soil structure. The capillary barrier (CB) system formed by a sand layer and a gravel layer at the lower part has an impermeable function. This study focused on the water repellent soil in order to improve the impermeable function of the CB. In order to evaluate the applicability of water repellent soils capable of preventing from the rainfall infiltration to the CB, the laboratory model tests and infiltration analysis of the CB were performed according to rainfall conditions. It was confirmed that the impermeable function of the CB against rainfall infiltration was greatly improved. Thus, it can be said that the application of water repellent soils to the CB would be helpful for the safety of the soil structure against rainfall infiltration.

研究分野：地盤工学

キーワード：キャピラリーバリア 疎水性地盤材料 保水特性 室内模型実験 限界長 浸透流解析 非側方流動性 遮水特性

### 1. 研究開始当初の背景

キャピラリー・バリア (CB) は、砂層とその下に礫層を重ねた単純な土層をいう。砂と礫の不飽和水分特性の相対的な違いにより、上部から浸潤してきた土中水は両層の境界面で遮断・保水され、境界面が傾斜していると保水された土中水は境界面に沿って流下し排水される。自然材料のみで構成される非常にシンプルな地盤層システムであるが、たとえば保水性に着目すると、乾燥地・半乾燥地域での節水かんがい結びつく。浸潤水の遮断性能に着目すると、斜面の安定化工法や廃棄物の表面被覆工として利用できるなど、さまざまな適用可能性をもつ。しかし、CBは、理論的には優れた機能を持つとされるものの、それを実務レベルで実証した系統的な取り組みは見当たらない。よって、不飽和土工学および土質力学の理論枠組みをベースにしながら、疎水材の特性を活かして傾斜 CB の表面被覆層としての疎水材層を提案し、これを適用して河川堤防や斜面の安定性の向上を図る。

### 2. 研究の目的

(1) 親水材と疎水材の地盤工学的性質の評価：本研究で用いる親水材と疎水材の物性値を把握する。また、不飽和状態での保水性試験により不飽和土水理学的特性を定量化する。

(2) 疎水材の CB 地盤材料として適用可能性の検証：河川堤防や斜面での傾斜 CB を表面被覆層としての疎水材層を適用による力学的・水理学的安全性を確保する必要がある。よって、室内模型実験及び不飽和浸透流解析により土中水の流動を予測し、CB 盛土の水理学的安全性・機能性を評価する。これにより、疎水材の CB 地盤材料として適用可能性を評価する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 疎水材の制作及び物理・遮水特性の把握

① 疎水材の制作：試験に用いる親水性砂は無処理の豊浦砂であり、疎水性砂はシラン処理を行い作製した。シラン処理では、豊浦砂をシラン混合溶液の中に入れ、1日ごとに攪拌して、72時間後に約110℃の温度の乾燥炉で1日乾燥させた。

② 試料の物理特性の把握：親水性・疎水性豊浦砂の物理・浸透特性を把握するため、土粒子密度試験、最小最大密度試験、定水位透水試験、粒度試験を実施した。一方、安息角を知ることにより、親水性・疎水性豊浦砂で作製可能な斜面傾斜角度を比較することができる。安息角試験には注入法と箱傾斜法を用いた。注入法では、直径7cm円筒モールド内に乾燥した試料を空中落下させ、試料がモールド上端よりあふれて円錐の山をつくり、その山の形状が一定となつてから安息角を測定した。一方、箱傾斜法では、幅20cm、高さ5cm、奥行き10cmの長方形土槽内に、所

定の密度となるように試料を詰め、その後、長方形土槽を徐々に傾けて試料が土槽からこぼれ始める時の角度を安息角として測定した。両試験を5回ずつ行った。

③ 遮水特性の把握：水浸透値試験や長期自然浸透試験を行った。水浸透値試験は、疎水性豊浦砂を実際に現場の斜面で用いる場合に、何らかの原因により斜面から水が排水されないケースを想定し、斜面の地表面上に水がどのくらいの高さまで溜まると浸透を始めるのかを測定する試験である。試験材料は疎水性豊浦砂である。図1に示す試験装置を用いて、供試体（直径5cm、高さ2.5cm）の上部に高さ2cmの水を溜めておき、水面に与える空気圧を増加し、試料内に水が浸透して試料下部から排水された時の空気圧（水浸透値）を測定した。

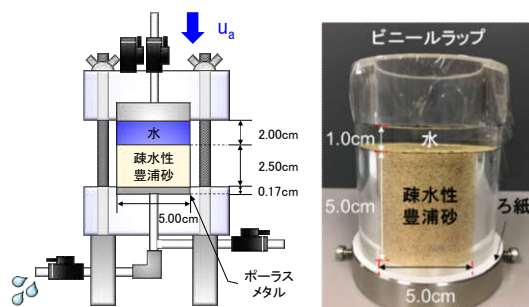


図1 水浸透値試験 図2 長期自然浸透試験

一方、長期自然浸透試験は、疎水性豊浦砂の長期自然浸透に抵抗する能力を測る試験である。水浸透値試験と同様に、疎水性豊浦砂を現場の斜面で用いる時に、何らかの原因で斜面から水が排水されなくなった場合を想定し、疎水性豊浦砂の上部に水が溜まった状態で時間が経つと浸透が起こるのかを検討する。図2のように試験容器に疎水性豊浦砂を入れて供試体（直径5cm、高さ5cm）とし、砂層の上に約1cmの水層を保ち、90日間放置して砂層内部への水の浸透状況を測定・観察した。試験の初期の試料は含水比0.20%、乾燥密度1.50g/cm<sup>3</sup>の状態であった。

#### (2) 保水性試験の実施

① 保水性試験装置の製作：今回作製した連続加圧方式の試験装置の概要図を図3に示している。従来の装置に比べ、上載圧を供試体に与えられるように載荷板を取り付けていることが改良点である。これにより、原位置の応力状態での水分特性曲線の測定が可能となる。また、供試体高さを求められるので、水分特性曲線の水分量としての飽和度をより正確に求めることができる。供試体中心部に位置するマイクロテンシオメーターの先端部はセラミックカップ（直径3.0mm、空気侵入値AEV=100kPa）を用いた。セル内に与える空気圧は、空気圧計により測定される。空気圧の上昇・下降速度は、パソコンの測定プログラムによりD/A変換器を通じて電空レギュレーターにより制御される。試験中の供試

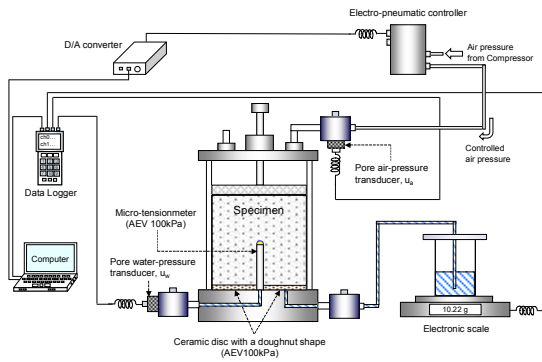


図3 保水性試験装置の概念図

表1 保水性試験における試験条件

| 項目  |       | $\gamma_{di}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $S_{ri}$ (%) |
|-----|-------|------------------------------------|--------------|
| 親水性 | No. 1 | 14.4                               | 48.2         |
| 豊浦砂 | No. 2 | 15.0                               | 58.7         |
| 疎水性 | No. 1 | 15.1                               | 51.4         |
| 豊浦砂 | No. 2 | 14.4                               | 58.7         |

体の間隙空気圧は、この測定された空気圧に等しいものと考えられる。一方、供試体に空気圧が与えられると、マイクロテンシオメーターに連結されている間隙水圧計により、供試体内の間隙水圧が測定された。与えた空気圧と測定された間隙水圧の圧力差を、供試体内のサクションとして考えている。

②保水性試験の実施：供試体は、豊浦砂を用いて静的締固め法で作製した。供試体サイズは、直径 50mm、高さ 50mm である。親水性和疎水性豊浦砂における各供試体の初期条件は表 1 に示す。まず、セル内で静的に締固めて作製した供試体に、マイクロテンシオメーター用の穴をあけた。そして、ペダスタル部の排水経路及びマイクロテンシオメーターを飽和させた後、ペダスタル部の上下を反転して、供試体の入ったセルと連結してセル全体を組み立てた。その後、セル全体を再度上下反転して設置した。空気圧荷重過程として、セル内の空気圧を一定速度 (0.1 kPa/min) で連続的に増加させ、空気圧が 40kPa と 80kPa に達したら一定の速度で連続的に減少させた。空気圧が 0kPa に達したら吸水過程が終了するまでその状態を保った。なお、試験開始から終了まで排水量の測定を続け、試験終了後に供試体含水比を測定して、それに基づいて試験中の供試体水分量を決定した。

### (3) 室内模型実験の実施

疎水材の CB 地盤材料として疎水材層を設置する室内模型実験を行い、その機能性を評価する。室内斜面模型 (幅 50cm×高さ 30cm×奥 20cm) は、盛土内の湿潤水の様子が見えるように透明アクリルの土槽の中に製作した (図 4)。試験装置は、水タンク、降雨装置、土槽で構成されている。水タンク内の水位は一定に保たれており、降雨装置の水頭差を利用して水を供給し、途中のバルブで供給流量を調整して降雨強度をコントロールしてい

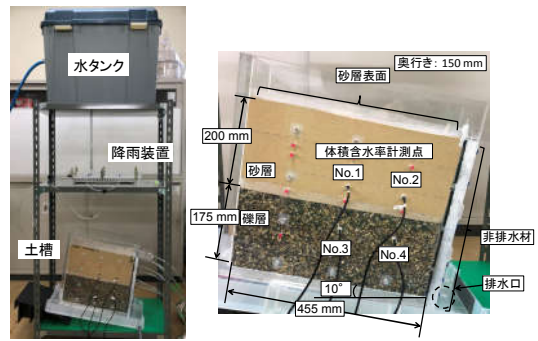


図4 試験装置の全景と土槽内の設置様子

る。土槽内部には 4 本の土中水分計 (EC-5 センサー) を設置し、試験中の体積含水率の測定を行った。一定強度の降雨を与えながら、経過時間に対する土槽内部の水分変化を測定して、遮水性能を検討した。

砂層に親水材を用いた 3 ケースと疎水材を用いた 1 ケースの計 4 ケースを、降雨強度を変化させて行った。降雨強度は、親水材・疎水材の Case1 が 100mm/hr、親水材の Case2, Case3 はそれぞれ 50mm/hr、20mm/hr である。砂層と礫層の高さは、それぞれ 200mm、175mm であり、横幅 455mm、奥幅 150mm である。全てのケースにおいて砂層と礫層の初期乾燥密度はそれぞれ、1.50g/cm<sup>3</sup>、1.64g/cm<sup>3</sup> とし、斜面傾斜角度は 10° と固定した。降雨時間は 6 時間として排水される水量を測定したが、6 時間で全て定常状態となっていることが確認された。模型土槽の排水条件は、土槽の右端を非排水条件とし、砂層からの浸透水は礫層の右端面の下部を通じて土槽の外部へ排水される構造となっている。このため、室内模型実験の排水条件は、表層からの降雨浸透により CB でのブレイクスルーが発生する極限状態を再現しているものと考えられる。

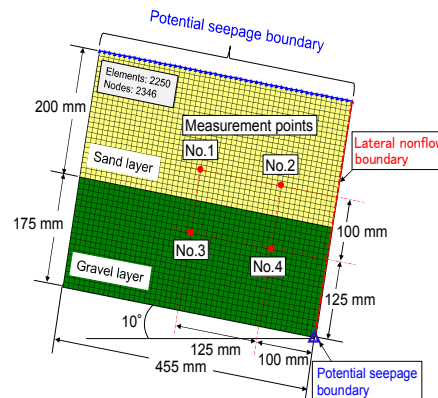


図5 数値解析モデル

### (5) 浸透流解析の実施

本研究では、市販の有限要素浸透解析プログラム (GeoStudio - SEEP/W) を用いた。解析領域は別報の室内模型実験と対応している。図 5 に示すように、幅 455mm、高さ 200mm の砂層を、幅 455mm、高さ 175mm の礫層の上に設置し、斜面を 10° 傾斜させている。なお、模型実験と同様に、砂層と礫層の初期乾燥密

表 2 各試料の物理特性

| 項目                          | 親水性<br>豊浦砂            | 疎水性<br>豊浦砂            |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.64                  |                       |
| 最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.64                  |                       |
| 最小乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.37                  | 1.36                  |
| 飽和透水係数 (cm/s)               | $1.45 \times 10^{-2}$ | $1.63 \times 10^{-2}$ |

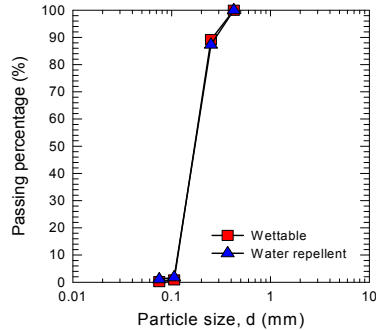


図 6 粒度分布曲線

度は、それぞれ  $1.50\text{g/cm}^3$ ,  $1.64\text{g/cm}^3$  とした。境界条件は、降雨強度 20, 50, 100mm/hr の降雨を想定し、3 ケースの一定浸透フラックスを砂層の斜面上部に適用した。また、礫層の下流側底部の節点を浸出点境界 (Potential seepage boundary) とし、それ以外は不透水境界とした。解析時間は、室内模型実験で定常状態に至ることが確認された 6 時間とした。豊浦砂と珪砂 1 号の飽和透水係数はそれぞれ  $1.45 \times 10^{-4}\text{m/s}$  と  $2.44 \times 10^{-3}\text{m/s}$  である。また、珪砂の自然含水比 0.2% に水分特性曲線上で対応する 21kPa を、土層の持つ初期サクションとして解析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 試料の物理・遮水特性の把握

① 物理特性の把握：親水性・疎水性豊浦砂の土粒子密度試験、最小最大密度試験、定水位透水試験の結果を表 2 に、粒度試験から得られた粒径加積曲線を図 6 に示す。これらより、親水性豊浦砂と疎水性豊浦砂の物理特性がほぼ同じであり、飽和状態では、疎水性豊浦砂は親水性豊浦砂とほぼ同じ透水係数を有していることが分かった。

② 安息角試験：試験結果から、両試験共に最小乾燥密度に近い乾燥密度であり、得られた安息角から 28 度程度までの傾斜を持つ斜面に適用できるということが分かった。

③ 遮水特性の把握：水浸透値試験により、水浸透値は約 1.2 kPa (12cm H<sub>2</sub>O) であった。また、試験後の試料の状況を観察した結果、3 回の試験のうち 2 回の試験で、比較的水の浸透しやすい容器と試料の境界面から水が浸透していたことが分かった。このことから、疎水性豊浦砂の上部に少なくとも 12 cm 程度の水が溜まるまでは浸透しないということが推察された。一方、長期自然浸透試験の場合、試験終了後の供試体の含水比は 0.35% であり、試験前とほぼ変わらなかった。また、

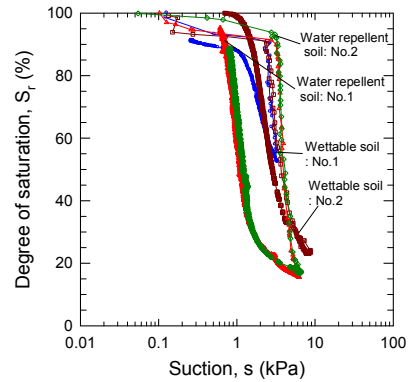


図 7 保水性試験結果

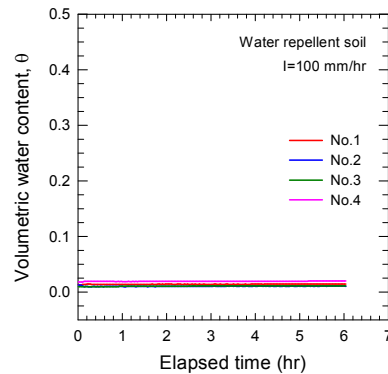
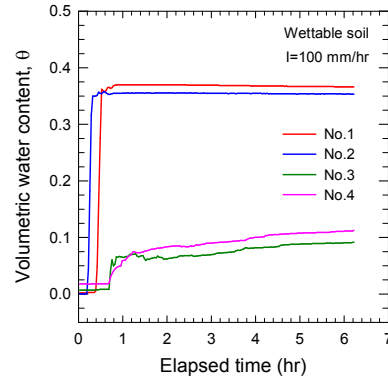


図 8 体積含水率の経時変化

若干、水位は変化していたが、すべて蒸発によるものであり、浸透は発生しなかったと判断される。2つの試験結果より、疎水性豊浦砂は長い時間に対する遮水性も非常に高いと考えられる。

##### (2) 保水特性の把握

連続加圧方式による保水性試験により、疎水性材料についても水分特性曲線 (排水・吸水過程) を得る試験時間が短縮されることが確認された。また、親水性・疎水性砂の水分特性曲線結果の比較により、疎水性豊浦砂の方が空気侵入値と残留飽和度が親水性より高い値が得られることが示された (図 7)。最後に、水浸入値 (WEV) や水浸透値 (WIV) の場合、疎水性豊浦砂の方が親水性豊浦砂より低い結果が得られ、ヒステリシスが親水性より大きいという特徴を把握することができた。

##### (3) 室内模型実験の結果

① 浸透挙動の測定結果：図 8 は、各ケー

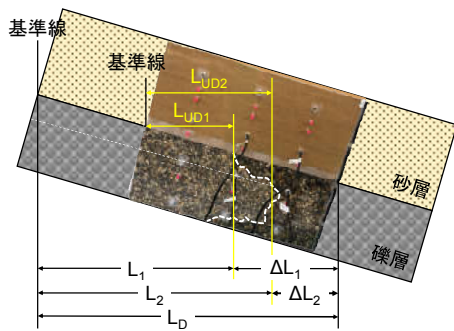


図9 限界長の定義

表3 限界長の測定値及び推定値

| 項目             | 親水材                   |       |       | 疎水材   |      |
|----------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|
|                | Case1                 | Case2 | Case3 | Case1 |      |
| 降雨強度, I(mm/hr) | 100                   | 50    | 20    | 100   |      |
| 排水条件           | 推定値<br>$L_D$ (cm)     | 27.7  | 56.8  | 145.5 |      |
| 非排水条件          | 測定値<br>$L_{UD1}$ (cm) | 0     | 11.7  | 13.5  | 44.1 |
|                | 測定値<br>$L_{UD2}$ (cm) | 0     | 10.2  | 23.9  | 43.2 |
| 限界長 $L_1$ (cm) | 0                     | 23.7  | 114.2 |       |      |
| 限界長 $L_2$ (cm) | 0                     | 23.1  | 125.5 |       |      |

スにおける体積含水率の経時変化を示している。親水材を用いた場合、全てのケースでブレイクスルーが生じた。ブレイクスルーが発生した経過時間は、親水材 Case1 が 45 分、Case2 が 90 分、Case3 が 190 分であった。よって、降雨強度が小さくなると、ブレイクスルー発生時間は長くなることが確認された。一方、疎水材を用いた実験の場合、降雨強度が 100mm/hr と非常に強い雨に設定したが、6 時間の間、砂層に水は浸透せず、ブレイクスルーは生じないことが確認できた。

② 限界長の測定結果：図 9 は、ブレイクスルーを生じた状況を示している。砂層と礫層の境界面から斜め方向に浸透が生じているが、砂層の右端を非排水条件としたため、土槽下端で溜まった浸透水の影響によりブレイクスルーした地点を特定することが困難である。このため、図のような非排水条件での 2 種類の限界長を定義した。1 つは、砂層と礫層の境界面において基準線からブレイクスルーが生じた部分で計測する限界長  $L_{UD1}$  (Undrained Diversion Length) であり、もう 1 つは、礫層内に埋めた水分センサーの高さ (125mm) のレベル線にフィンガー流が交差した点までの距離に基づく限界長  $L_{UD2}$  である。 $L_{UD1}$  と  $L_{UD2}$  の測定結果を表 3 にまとめている。降雨強度が小さいほど、また、深さが深いほど非排水条件での限界長は短いことが分かる。なお、疎水材に関しては降雨の浸透が生じてなかったため、土槽幅から得られる値を表示している。

今回、土槽の右端を非排水条件としたため土槽下端で溜まった浸透水の影響により、通常の排水条件とした場合よりも限界長は短

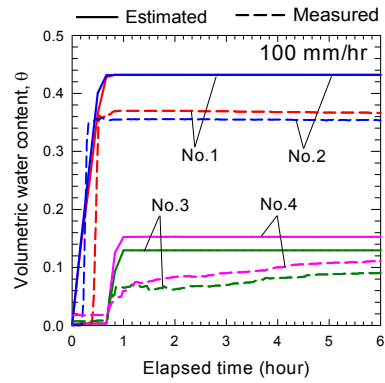


図10 体積含水率の比較 (Case 3)

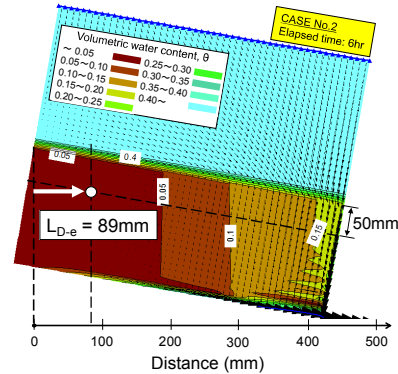


図11 解析における限界長の測定

縮しているものと考えられる。そこで、 $L_{UD1}$ 、 $L_{UD2}$  を用いて、図 9 に示すように限界長  $L_1$ 、 $L_2$  を計算し、Steenhuis らの推定式により推定した限界長  $L_D$  と比較した (表 3)。ここで、 $L_1$  は境界面での短縮後の限界長、 $L_2$  は礫層のセンサーレベルでの短縮後の限界長である。限界長  $L_1$ 、 $L_2$  は、 $L_D$  より短縮 ( $\Delta L_1$  &  $\Delta L_2$ ) されていることが分かる。よって、砂層が非排水条件となった場合、浸透水の影響により設計時の CB 期待機能がより低下されると考えられる。

③ 考察：本研究では、降雨条件を変化させて親水・疎水性砂を用いた CB の室内模型実験を行い、得られた結果に基づいて疎水性地盤材料の CB への適用性について検討した。室内模型実験では右端を非排水状態としたため、親水性砂を用いた場合は全てのケースでブレイクスルーが生じたが、疎水性豊浦砂を用いた場合は砂層への水の浸透はなかった。この結果から、疎水性地盤材料の降雨浸透に対する遮水性が優れていることが明らかになった。また、非排水境界条件が加わることで、限界長が短縮され、CB の機能が下がることが確認された。以上より、疎水性地盤材料を用いた場合、CB の限界長をより伸ばすことができると考えられる。

#### (5) 浸透流解析の結果

① 体積含水率の経時変化：別報の室内模型実験の測点と対応する 4 つの節点における体積含水率の経時変化を図 10 に示す。室内模型実験では、計測点 No. 1、No. 2 では砂層の体積含水率を、計測点 No. 3、No. 4 では礫

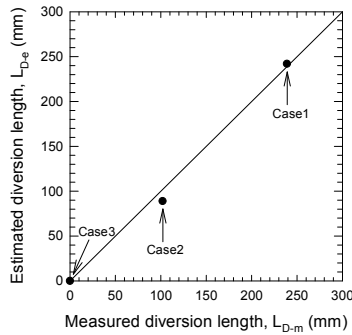


図 12 限界長の実験値と解析値の比較

層の体積含水率を測定するために土中水分計 (EC-5) が設置された。解析結果より、Case 1 (20mm/hr) : 降雨開始後 4 時間、Case 2 (50mm/hr) : 1.7 時間、Case 3 (100mm/hr) : 0.8 時間でブレイクスルーが発生し、礫層の体積含水率が上昇していることが分かる。また、Case 2 の場合、ブレイクスルーが発生して以降はほぼ変化がみられず定常状態になり、図 11 に示すような体積含水率の分布となった。一方、別報の室内模型実験において Case 1 : 3.2 時間、Case 2 : 1.7 時間、Case 3 : 0.8 時間でブレイクスルーが発生していることから、Case 2、Case 3 において降雨開始からブレイクスルーが発生するまでの経過時間の再現性が高いことがわかる。また、降雨強度とブレイクスルー発生時間の関係から、約 80mm の浸透水により、砂の保水能力を超えブレイクスルーが発生することが確認された。

② 限界長の測定結果：限界長の測定方法は図 11 に示すように、土中水分計 No. 3, No. 4 が埋設されている境界面から 50mm 下の節点で体積含水率が 0.03 を上回る地点をブレイクスルーが発生したと判断して、砂と礫の境界面最上部からブレイクスルーが発生した節点までの水平距離を限界長とした。そのように判断した理由は、珪砂 1 号の水分特性曲線において乾燥状態から水分量が急激に増加する体積含水率が 0.03 となるためである。図 12 は解析結果から推定された限界長と金らによる室内模型実験によって測定された限界長の関係を示しており、高い再現性が確認された。また、降雨強度 100mm/hr の場合において、CB (側方流動性境界) での限界長を高い精度で推定できるとされる Steenhuis et al. の式では限界長は 277mm と推定されるが、非側方流動性境界での限界長は 0mm と測定され、通常に比べ限界長が減少することが確認された。

③ 考察：今回の浸透流解析により、非側方流動性境界をもつ CB を有する盛土においてブレイクスルーが発生するまでの時間および限界長を推定することができ、室内模型実験と比較して高い再現性を得ることが確認できた。また、CB が非側方流動性境界を持つことで限界長が減少し、現場適用を困難にしている一因を明らかにした。今後の課題としては砂層材料の改良により CB 性能の向上

させることが考えられる。よって、従来の CB システムの砂層を、疎水性地盤材料に置き換えることで降雨に対する土構造物の安全性が改善されるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 5 件)

①金 秉洙 (金 秉洙), キャピラリーバリアの砂層における浸透水の非側方流動性を考慮した解析的研究, 全国大会 第 73 回年次学術講演会, 土木学会 (III), 2018 年 8 月 29 日 -31 日, 北海道大学札幌キャンパス (北海道 札幌市). (掲載可)

②Kim, B.S. (Kim, B.S.), Characterizing water retention capacity of non-wettable soils using continuous pressurization method, 7th International Conference of Unsaturated Soils, 3-5 August 2018, Hong Kong (China). (掲載可)

③金 秉洙 (金 秉洙), キャピラリーバリアの被覆層における疎水材の適用性の検討 - その 1: 疎水材の物理・保水特性 -, 第 53 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 2018 年 7 月 24 日 - 26 日, サンポートホール高松 (香川県・高松市). (掲載可)

④小林 弘昌 (金 秉洙), キャピラリーバリアの被覆層における疎水材の適用性の検討 - その 2: 室内模型実験の実施 -, 第 53 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 2018 年 7 月 24 日 - 26 日, サンポートホール高松 (香川県・高松市). (掲載可)

⑤Kobayashi, H., (Kim, B.S.), Applicability evaluation of water repellent soil to the sand layer of capillary barrier. 5th Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils, 18 May 2018, Seoul (Korea). (掲載可)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

該当なし。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 秉洙 (KIM, Byeongsu)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・助教

研究者番号 : 90648601

(2) 研究分担者

該当なし。

(3) 連携研究者

該当なし。

(4) 研究協力者

竹下 祐二 (TAKESHITA, Yuji)

加藤 正司 (KATO, Shoji)