

## 海水浸透したセメント改良土の劣化特性と透水性変化の機構解明

Deterioration properties and change in permeability of cement-stabilized soil under seawater seepage

山口大学大学院創成科学研究科 准教授 原弘行

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. 研究の背景

最近、海水が遡上する感潮河川において堤防基礎部に造成されたセメント改良土層の軟弱化が流域内のいたるところで確認された。当該河川に沿って堤防の調査を実施したところ、特に高い塩濃度を呈する河口付近に多くの問題箇所が分布しており、遡上した海水の化学的浸食を受けて軟弱化（劣化）したことが強く示唆された。セメント改良土の劣化は、上部構造の不安定化や不同沈下を引き起こし、土構造物が持つ本来の機能を大きく低下させることとなる。

現在まで、海水環境下におけるセメント改良土の劣化特性の検討は、海水への曝露試験から検討された例はみられるが、河川堤防等を模擬して通水環境下で検討された事例はほとんどない。海水環境下で劣化するとセメント水和物が崩壊するため、固化処理土の構造がポーラス化し、透水性が変化する可能性がある。透水性が著しく大きくなると、移流による劣化の促進だけでなく、改良対象地盤の土質によってはパイピング破壊などの被害の発生も懸念される。本研究では海水浸透に伴うセメント改良土の透水性変化および海水浸漬によって完全に劣化したセメント改良土の透水性をそれぞれ調べ、海水環境下における透水性変化のメカニズムについて検討した。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 実験に用いた材料

試料土には豊浦砂を用いた。固化材は普通ポルトランドセメント（OPC）を使用した。透水試験に用いる供試体は以下の要領で作製した。まず、豊浦砂と固化材を十分に空練りした後、含水比 15 %に相当するイオン交換水を加えて混合する。その混合試料を相対密度  $D_r = 60\%$ となるよう直径 100 mm、高さ 200 mm のプラスチックモールドに丁寧に詰めてフィルムで覆い、温度 20 °Cで管理された実験室内で 28 日間養生した。

##### 2.2 実験手順

###### 2.2.1 海水浸透に伴うセメント改良土の透水性変化

セメント処理土のような低透水性の材料の場合、剛壁による透水試験では側壁に水みちが生じてしまい、適切な透水性の検討が難しい場合がある。そこで、本研究では図-1 に示す柔壁型カラム透水試験機を用いて試験を実施した。本試験機は、試験中に動水勾配が変動しないように給水タンクにマリオット管を設けている。試験機をセットする際は、供試体内や試験機内に空気が入らず飽和状態を保てるように、水を張った大型水槽を用いて水中で作業した。供試体の設置は以下のようにして行った。まず、脱気しておいたポーラスストーンのみを水中で透水試験機に設置し、イオン交換水を通水する。その後、各添加量の供試体を設置した。なお、ポーラスストーンと供試体の間にはろ紙とモルトフィルターを挿入した。この時、供試体の側壁からの水漏れの対策として、メンブレンの内側にグリスを塗布し、オーリ

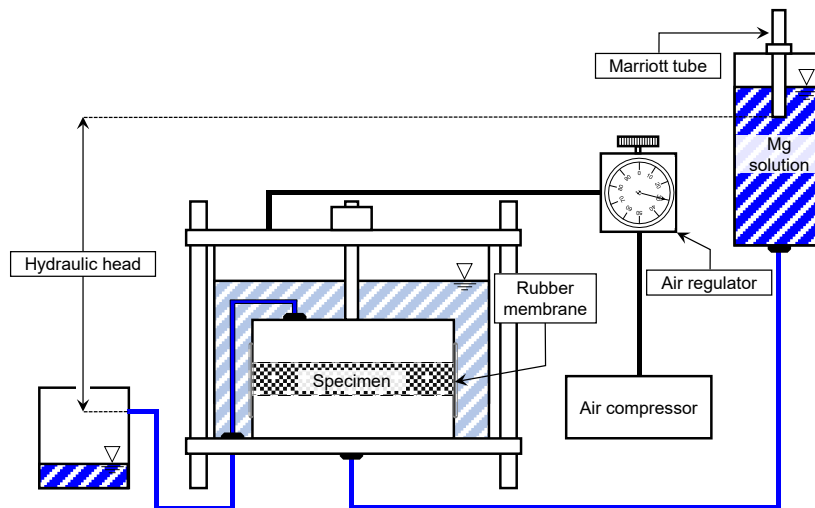


図-1 透水試験機の模式図

ングで固定して側壁からの水漏れが生じないようにした。拘束圧として 30kPa を加えた後、給水タンクのcockを開けて通水を開始した。最初にイオン交換水で通水を行い、いくつか動水勾配を変化させて透水係数を算出した。その後、供試体を交換して Mg 水溶液による透水試験を行った。セメント改良土中の水和物の崩壊を引き起こす主な海水中の成分は Mg を含む塩である。そのため、本実験では、海水の代用として Mg 塩を溶解した水溶液を使用した。海水には塩化マグネシウム( $MgCl_2$ )と硫酸マグネシウム( $MgSO_4$ )の 2 種類の塩が含まれており、一般的な海水はそれらの比率が 7:3 程度となっている。これを参考に、 $MgCl_2$ と  $MgSO_4$ の割合が 7:3 となるように、塩化マグネシウム 6 水和物( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )と硫酸マグネシウム 7 水和物( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ )の混合試薬を作製した。この混合試薬をイオン交換水に溶解させて Mg 水溶液を作製した。このとき、有明海の平均的な  $Mg^{2+}$ 濃度である 1,000 mg/L に調製した。

透水試験開始後は採水した流出水に対して流量と  $Ca^{2+}$ 濃度を測定した。流量が時間とともに大きく変化したため、測定頻度はあえて固定せず、流量の測定に十分な量が確保できたタイミングで測定した。また、一定の流量を得るため、動水勾配も流量とともに変化させ、最大で 25 とした。試験開始から 58 日経過後、供試体を試験機から取り出し、流入面側および排水面側から 0~10mm の箇所から試料を採取した。採取した試料を 110°C で炉乾燥後、蛍光 X 線分析装置による元素分析を実施した。また、同様の位置で 5mm 角程度の試料を採取して、水銀圧入式ポロシメーターによる間隙径分布の測定を行った。このとき、乾燥方法次第では過度な収縮が生じ、間隙容積や間隙径分布が変化することが報告されている<sup>1)</sup>。本実験では、固化処理土に対しても体積収縮が小さいことが確認されているフリーズドライ法<sup>2)</sup>によって約 24 時間乾燥処理を行った。

## 2.2.2 劣化前後の透水性変化

2.2.1 の実験では、完全に劣化して定常状態に達するには至らなかった。そこで、完全に劣化したセメント改良土の透水性を調べるため、有明海の約 25 倍に相当する  $Mg^{2+}$ 濃度 (23.45 g/L) に調整した Mg 水溶液中にセメント改良土を浸漬させた。浸漬から 112 日経過後に供試体を取り出し、2.2.1 と同様の手順で透水試験および蛍光 X 線分析、間隙径分布の測定を行った。

## (実験調査によって得られた新しい知見)

### 3.1 海水浸透に伴うセメント改良土の透水性変化

Mg 水溶液を用いたときの試験期間中における透水係数の経時変化を図-2 に示す。図中には、イオン交換水を通水した時の透水係数も併記している。イオン交換水を通水した時の透水係数は OPC70kg/m<sup>3</sup> の条件で  $2.02 \times 10^{-6}$  m/s, OPC120kg/m<sup>3</sup> の条件で  $1.83 \times 10^{-7}$  m/s であった。未処理の豊浦砂の透水係数は  $1.0 \times 10^{-3}$  m/s 程度であることが示されており<sup>3)</sup>, セメント処理によって透水性が低下していることがわかる。また、豊浦砂に対して OPC を 100, 150kg/m<sup>3</sup> 添加したときの透水係数は  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  m/s 程度であることを示した研究報告<sup>4)</sup>もあり、固化材量、密度、材齢など作製条件は多少異なるもの、概ね同程度の透水係数を示した。Mg 水溶液を通水すると、OPC70, 120kg/m<sup>3</sup> とともに徐々に透水性が低下することが確認された。OPC120kg/m<sup>3</sup> は試験開始から 29 日以降は流量がほとんどゼロとなり、透水係数が算出できなかった。両添加量とも Mg 水溶液の通水によって、著しく透水性が低下しており、試験終了時点の透水係数はイオン交換水の場合に対して OPC70kg/m<sup>3</sup> は約 60,000 分の 1, OPC120kg/m<sup>3</sup> は約 180,000 分の 1 まで低下した。

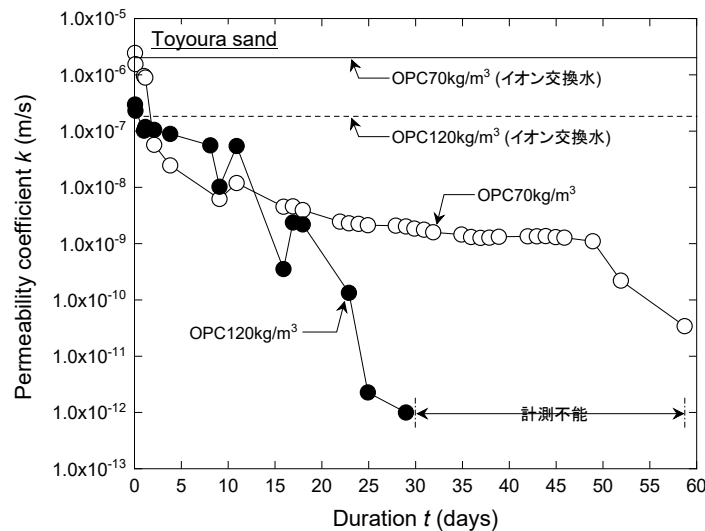


図-2 Mg 水溶液通水時の透水係数の経時変化

流出水の水質分析結果からセメント処理土供試体からの Ca<sup>2+</sup>実測溶出量  $M_{Ca}$  (g/m<sup>2</sup>) を以下の式(1)から算出した。

$$M_{Ca} = \frac{C_{Ca} \times V}{S} \quad (1)$$

ここに、 $C_{Ca}$  は流出水の Ca<sup>2+</sup>濃度(g/m<sup>3</sup>),  $V$  は流出水の体積(m<sup>3</sup>),  $S$  は曝露面の面積(m<sup>2</sup>)を表す。図-3 に累積 Ca 溶出量を示す。OPC70kg/m<sup>3</sup> の場合、試験開始から約 4 日、OPC120kg/m<sup>3</sup> では通水開始から約 11 日経過まで多量の Ca の溶出が確認でき、それ以降は僅かな溶出傾向を示した。これは、透水性の低下に伴う流量減少が主な要因であり、透水係数が  $10^{-8}$  m/s オーダーとなった時期に溶出量が激減していることがわかる。

図-4 に両添加量の通水前および通水終了後における供試体の間隙径分布を示す。OPC70kg/m<sup>3</sup> の場合、通水前は 60~70 $\mu$ m で鋭いピークがみられ、さらに 25 $\mu$ m にもう一つのピークが確認できる。それに対して通水後の場合、排水面側では通水前と同程度の位置にピ

ークがみられるが、ピーク値は通水前よりも小さくなっており、その他の間隙は通水前と同様な分布であった。流入面側では通水前にみられた  $60\sim 70\mu\text{m}$  付近の間隙が大きく減少し、 $25\mu\text{m}$  付近の間隙が増加していることがわかる。OPC120  $\text{kg}/\text{m}^3$  の場合、通水前はピークの値は小さいが、OPC70  $\text{kg}/\text{m}^3$  と同様の位置にピークが確認できる。排水面側・流入面側の両者とも通水前の大きな間隙径のピークはほとんど消失し、 $10\mu\text{m}$  付近の間隙が通水前と比較して増加している。また、排水面側では  $3\mu\text{m}$  以下の径の間隙が増加していることもわかる。

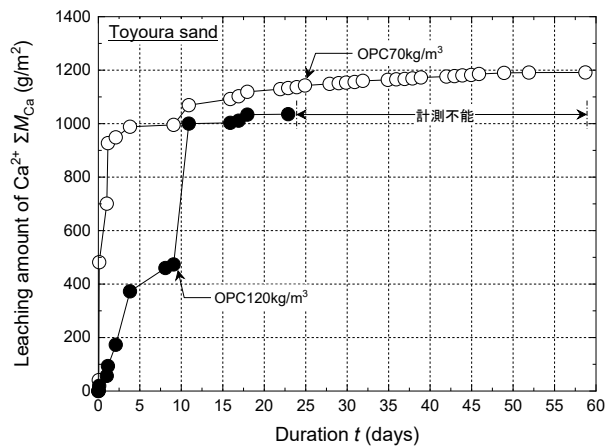
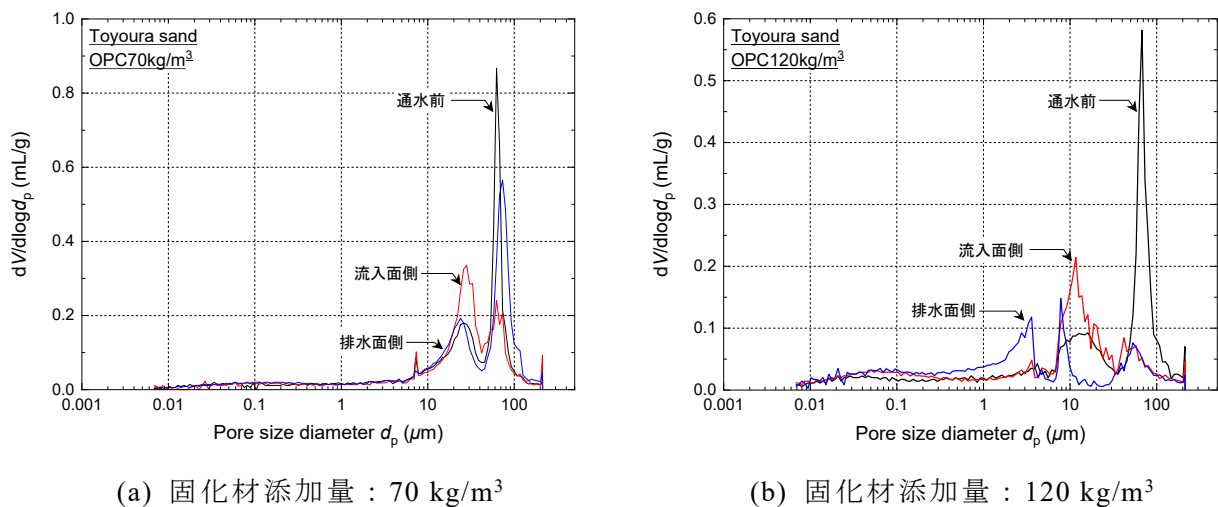


図-3 累積 Ca 溶出量



(a) 固化材添加量 :  $70 \text{ kg}/\text{m}^3$

(b) 固化材添加量 :  $120 \text{ kg}/\text{m}^3$

図-4 通水前後の供試体の間隙径分布

### 3.2 劣化前後の透水性変化

完全に劣化したセメント処理土を作製するため、定期的に採水した浸漬水の水質分析を行ったところ 112 日目でカルシウム (Ca) の溶出量の増加が落ち着いていた。図-5 に浸漬前後の供試体の Ca 含有率を示す。劣化供試体 (浸漬後) は健全供試体 (浸漬前) に含まれていた Ca の多くが溶出し、豊浦砂と同程度の Ca 濃度を示した。このことから、Mg 水溶液に浸漬した供試体は添加したセメントに含まれる Ca がほとんど溶出し、全層にわたって劣化したと判定した。以降では、養生 28 日の供試体を健全供試体、Mg 水溶液に浸漬した供試体を劣化供試体と称する。

図-6 に健全供試体と劣化供試体の透水係数を示す。添加量によって劣化による透水性の変化に若干違いがみられるが、いずれも透水係数は  $10^{-6}$  オーダーであり、劣化による透水性の大きな変化が無いことが確認された。図-7 に OPC50, 100 の間隙径分布を示す。劣化供試体では健全供試体に比べて数  $\mu\text{m}$  以下の空隙が消失しているが、大きな間隙構造の変化はみられない。したがって、健全供試体内にあるセメント水和物と代替するように劣化後の Mg 化合物が充填されることで、間隙構造に大きな変化がなく透水性に大きな差異がなかったと考えられる。

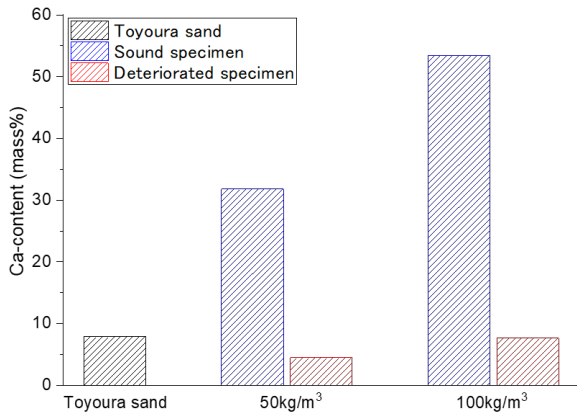


図-5 Ca含有率

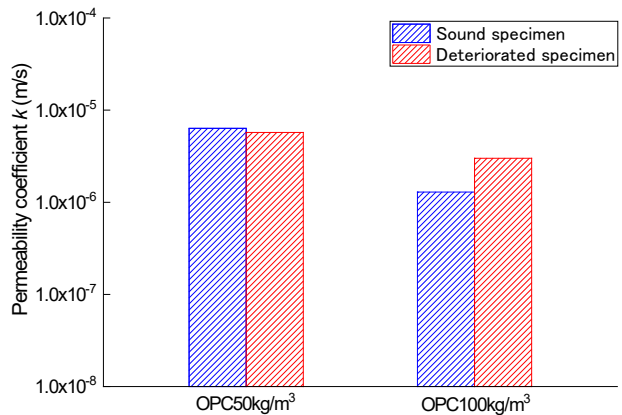
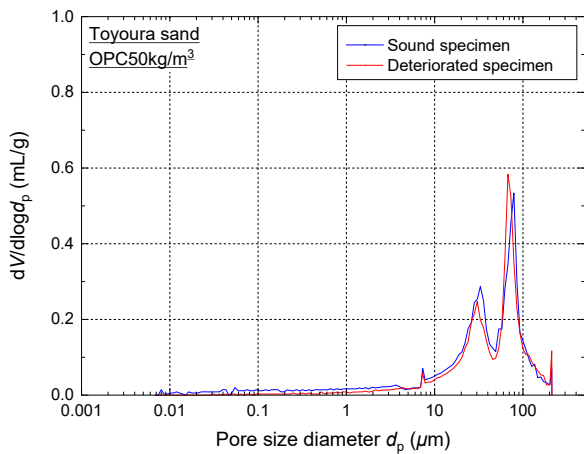
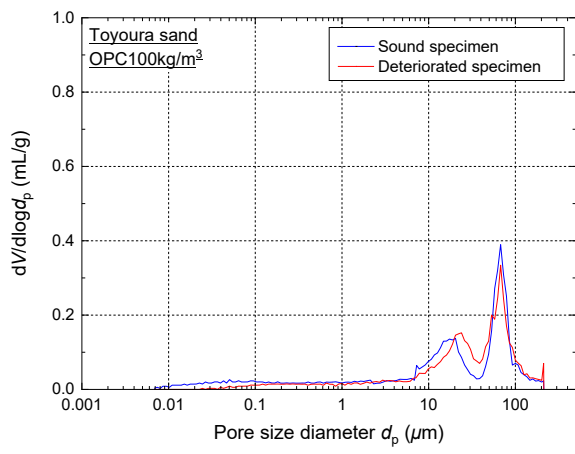


図-6 健全・劣化供試体の透水係数の比較



(a) 固化材添加量：50 kg/m<sup>3</sup>



(b) 固化材添加量：100 kg/m<sup>3</sup>

図-7 健全供試体と劣化供試体の間隙径分布

### 3.3 海水環境下におけるセメント改良土の透水性変化

図-8 に本実験から考えられる海水浸透に伴う透水性変化の概念図を示す。海水接触前のセメント改良土は図中の①のようにセメント水和物が土粒子間の空隙を充填し、未処理時と比べて透水性が低下する。そこに、Mg 水溶液を通水すると図中の②の状態に遷移すると考えられる。すなわち、セメント改良土中の水酸化カルシウムと反応し、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  が析出する。セメント水和物が完全に崩壊しないままに  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  が空隙を充填するため、徐々に透水性が低下したと考えられる。しかしながら、完全に劣化したセメント改良土の透水性は海水接触前とほとんど同等であった。これは、図中の③のようにセメント水和物が崩壊し、セメント

水和物と代替するように Mg 化合物が充填されることで、間隙構造に大きな変化がなく透水性に大きな差異がなかったと考えられる。したがって、セメント改良土の透水性は劣化の進行程度によって大きく異なると考えられる。

改良対象土の土質やセメントの添加量などの改良条件によって左右されると考えられるが、海水浸透によって、セメント処理土の透水係数が著しく増大する可能性は低いと考えられる。本実験では、通水過程と完全に劣化した状態での検討に異なる固化材添加量を使用したため、今後、同一の添加量での透水性変化を確認する必要がある。

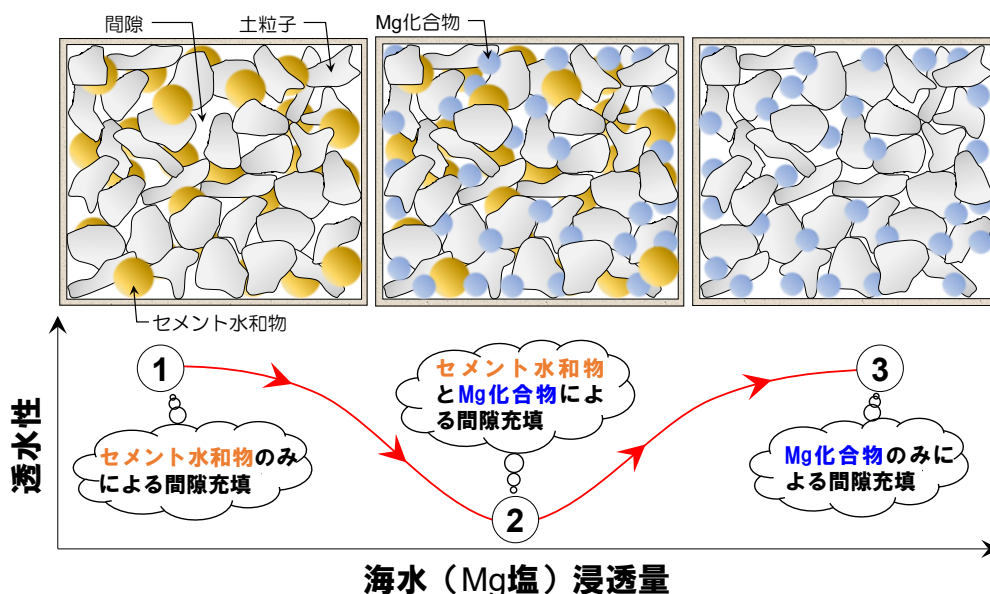


図-8 本実験から考えられる海水浸透に伴うセメント改良土の透水性変化の模式図

#### 参考文献

- 1) 姜敏秀, 渡部要一, 土田孝: SEM およびポロシメーターを利用した土の微視的構造の観察とその評価, 港湾空港技術研究所資料, No.1032, 2002.
- 2) 田口岳志, 鈴木素之, 平岡真樹, 藤野秀利, 藤本哲生, 山本哲朗: 養生時に上載圧の影響を受けたセメント安定処理土の微細構造, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.67-78, 2008.
- 3) 福島伸二, 望月美登志, 香川和夫: 三軸セルを用いた深い地盤の透水性調査法, 土木学会論文集, No.445/III-18, pp.127-133, 1992.
- 4) 堀田崇由, 北島明: 超微粒子セメント混合改良による砂地盤の遮水性向上の検証, フジタ技術研究報告, No.53, pp.19-24, 2017.

#### ( 発 表 論 文 )

- 原弘行, 藤江佑大, 末次大輔: Mg 水溶液を通水したセメント改良砂の透水性変化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, pp.I\_571-I\_576, 2022.
- 池田賢史, 原弘行: 海水曝露によって劣化したセメント改良土の透水性, 環境地盤工学シンポジウム (投稿中).
- 池田賢史, 原弘行: Mg 水溶液に浸漬したセメント改良土の透水性, 土木学会中国支部 (投稿中).