

半導体型 pH センサーを利用した盛土モニタリング技術の開発

株式会社大林組 正会員 ○森下智貴 三浦俊彦 西田憲司
 静岡大学 非会員 二川雅登
 岡山大学 正会員 小松 満

1. 目的

黄鉄鉱を含む地山の掘削工事で発生する土砂は、掘削直後は pH が中性付近であるが、大気に暴露されて酸素と反応すると硫酸酸性となり pH が 2~3 に低下することが知られている。このような土砂は酸性土と呼ばれ、盛土材として有効利用する場合は、周辺への酸性水の拡散を抑制するために覆土やモニタリングなどの対策が必要である¹⁾。覆土工は盛土内への水や酸素の供給を遮断する効果が報告されており²⁾、酸性土の酸性化対策に有効であるが、長期的な供用を考慮すると、覆土の損傷等から部分的に酸素が侵入して酸性化が進行することも考えられる。モニタリングは浸出水を集水して適宜 pH を測定する方法が一般的であるが、盛土内の酸性土の pH を直接モニタリングできれば、盛土からの酸性水の発生にさらに迅速に対応できると考えられる。従来は、盛土など不飽和地盤の間隙水 pH を直接、かつ、連続測定することは難しかったが、ストライプゲート型の半導体型 pH センサー（以下、pH センサー）を利用することで測定が可能となった³⁾。本報では、pH センサーを実際の現場の盛土に埋設するために開発した容器の検討内容について報告する。

2. pH センサーの特徴と課題

(1) 特徴 pH センサーは長さ 240mm、幅 8mm、厚さ 2mm の PCB 基盤に ISFET 型のセンサチップを配置した構造である（写真 1）。従来の ISFET 式の pH センサーは長期的に連続計測すると測定値のドリフトが生じる課題があった。本報告で使用した半導体型 pH センサーはストライプゲート型 ISFET 式であり、長期間の安定した pH 測定が実証されている³⁾。

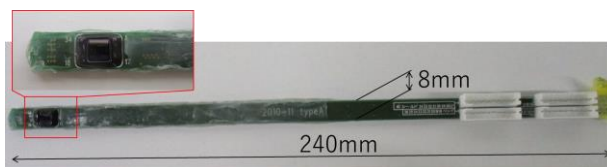


写真 1 半導体センサー外観

(2) 課題 既往の文献³⁾では均質なマサ土で効果が確認されている。一方で、現場での測定対象はトンネルズリなどの粗粒土が相当する。直接 pH センサーを粗粒土に挿入すると、岩片がセンサーの基盤部分に接触して損傷する可能性がある。また、粗粒土は保水性が低く水の供給がなければセンサー周辺が乾燥する。その場合、センサー周辺で静電気が生じて測定に不具合を引き起こす可能性がある。そのため、pH センサーの基盤部を保護でき、その周辺の水分環境を一定に維持し、かつ、間隙水を容易に入れ替えられる容器が必要と考えた。

3. pH センサー容器の開発

3.1 容器の構成

pH センサー容器はポリエチレン製のメッシュバック（目開き $\phi 86\mu\text{m}$ ）の中にガラスビーズを配置する構造とした。ガラスビーズは一般的な製品では酸・アルカリ溶液にガラス成分が溶解して



写真 2 センサー容器

pH に影響する恐れがあるので、化学的に安定なホウケイ酸ガラスビーズ（以下、BGB）を選定した。BGB に pH センサーと参照電極を挿入した状態で、土壤に埋設して間隙水 pH を測定した（写真 2）。

3.2 pH センサー容器の評価

(1) 保水性評価 測定対象を粗粒土相当と考えて、7号砕石（ $\phi 2\sim 9.5\text{mm}$ ）と BGB（ $\phi 0.5\sim 0.71\text{mm}$ ）の保水性試験を実施した。得られた水分特性曲線を使用した解析により pH センサー周辺の水の移動特性を評価した。

図 1 に BGB と 7号砕石の水分特性曲線を示す。BGB は粒径が小さい製品を選定しており、砕石に比べて保水しやすい材料である。pH センサー容器を 7号砕石に埋設した場合の BGB に残留する水分量の変化を HYDRUS-2D による解析で検討した。図 2 に示すように初期は飽和（体積含水率 0.45）、モデル下端面を自由排水面として、100 日後の水分分布を計算した。図 3 に

キーワード 酸性土、モニタリング、pH センサー、保水性試験、不飽和地盤
 連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 大林組技術研究所 070-1048-7311

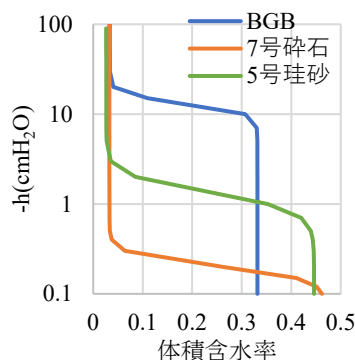


図1 水分特性曲線

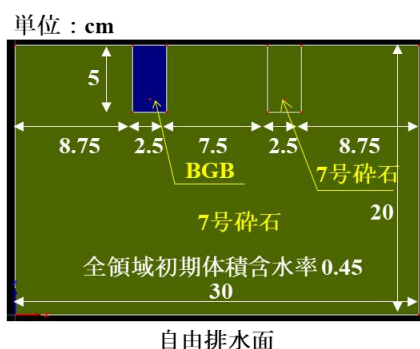


図2 水分移動解析モデル

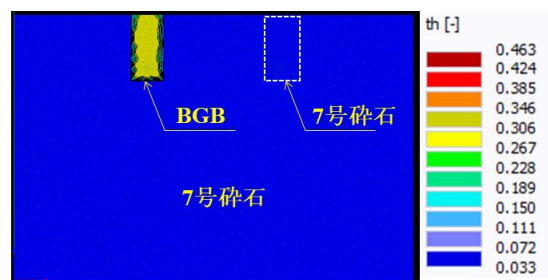


図3 水分移動解析結果 (100 日後)

示すように BGB の体積含水率は 100 日後も 0.33 程度と高い水分状態を維持した。これは、7 号砕石と BGB で粒径、保水性に差が生じ、相対的に毛管力が大きくなる BGB においてセンサー容器ほどの大きさであれば長期的に水分が保持されたと考えられる。pH センサーを盛土に埋設する計測では、間隙水の供給源は降雨が想定されるが、降雨の間隔として 100 日程度保水できればセンサー周辺を湿潤に維持できると考えられる。

(2) 移動性評価 保水性が高い場合、BGB が溶液を保持しすぎて周辺の土壌間隙水と交換しない可能性がある。容易に容器内の水が交換することを確認するため、図4に示す装置で通水試験を実施した。VU キャップ (φ 16.5cm) の上端から 1.3, 2.0cm の位置に対称に穴をあけ、L=3cm, φ 1.3cm VU 管を接着してエルボーを接続した。上端から 1.3cm を IN 側、2.0cm を OUT 側として、IN 側から水が通水され、上端から溢れる前に OUT 側から排水される構造とした。5 号珪砂を VU キャップの上端から 1cm の深度まで締固めず投入した。その後、IN から純水を通水して 5 号珪砂を飽和状態とした後に pH センサーの測定を開始した。溶液は IN から定量ポンプを使用して継続的に 7~8mL/分で通水した。通水溶液は開始後から純水、pH2 に調整した硫酸溶液、純水の順で変化させた。また、間隙水採取器をセンサー近傍に設置し、適宜採水した間隙水の pH を pH 電極で測定した。

図5に示すように、間隙水 pH は測定開始後から pH6 ~7 で推移し、その後、IN からの通水を硫酸溶液に切り替えたところで pH2 程度に低下した。さらに、再度純水を通水すると徐々に pH は 4 程度まで上昇した。pH センサーで得られた値は採取器で取得した pH と相関が良く、容器内外で同様の pH 変化を取得できた。そのため、pH センサー容器の BGB に保水された溶液は、盛土内の浸透水と容易に交換できると考えられること

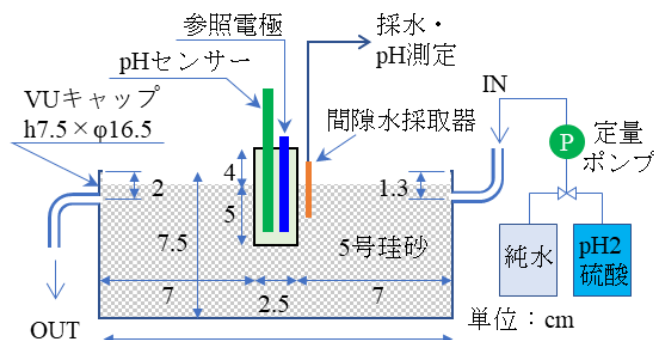


図4 通水実験装置

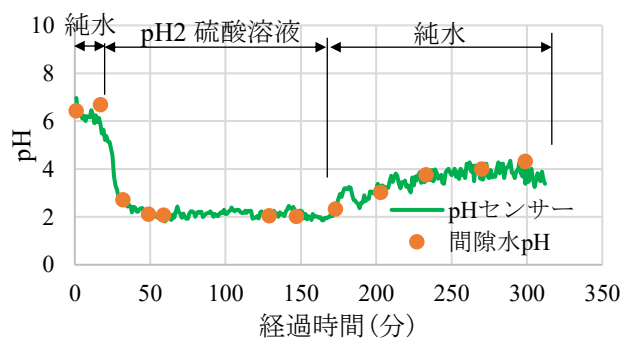


図5 通水実験結果

から、pH センサーに容器適用することで盛土間隙水の pH を適切に測定できると評価した。

4. まとめ

本報告では、pH センサー容器に充填する BGB の特性について解析と実験から検討した。その結果、粗粒土の場合は BGB の水分量が維持され、かつ、保水された水は浸透水と容易に交換しやすく、盛土間隙水 pH をモニタリングできることを示した。

参考文献 1) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル検討委員会(2010): 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル (暫定版)。2) 高畑ら(2022): 道路盛土構造が有する酸性化抑制機能の評価, 土木学会論文集 C, Vol. 78, 83-95. 3) 二川ら(2018): 半導体型 pH センサによる低水分量土壌リアルタイム pH 計測に関する研究, 電気学会論文誌, Vol. 138, pp. 417-422.