

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：32503

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012 年 4 月～2013 年 3 月

課題番号：24656289

研究課題名（和文） マイクロバブル水注水による基礎地盤の液状化対策工法の開発

研究課題名（英文） Development of a countermeasure against sand liquefaction by reducing the degree of saturation of foundation soils

研究代表者 畑中宗憲 (HATANAKA MUNENORI)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：60333019

研究成果の概要（和文）：

不飽和化による液状化対策工法について、a.地盤の飽和度の測定法（電気抵抗）、b.不飽和浸透流解析による原位置飽和度分布の評価の可能性を検討した。地盤の飽和度と電気抵抗の関係については、測定対象の地盤領域の大きさと間隙水の電気伝導度の影響が大きい。数値シミュレーションにより注入井を中心とした水平方向の不飽和帯の広がり表現することが可能である。不飽和領域の定量的評価には精度の良い現地の水理特性、透水異方性、空気注入量が必要である。

研究成果の概要（英文）：

A countermeasure against sand liquefaction by desaturation was investigated. The method to evaluate the degree of saturation by electric resistivity and the numerical method to evaluate the area of unsaturation were investigated. The electro-conductivity of the pore water and the area to be measured have significant effects on the correlation between the degree of saturation and the electrical resistivity. It is possible by using the present numerical calculation method to qualitatively estimating the distribution of degree of saturation in horizontal direction around the well for injecting air or micro-bubble water. It is important to precisely evaluate the hydraulic characteristics and the anisotropy of permeability of in-situ soils and the volume of injected air or micro-bubble water for quantitative evaluation of the area of unsaturation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：1

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：地盤工学、防災、耐震

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東京湾地域の埋め立て地において、広い範囲で液状化による被害が観察された。これらの地域は、近いうちに発生すると予測されている東海・東南海地震や東京湾北部地震による再度の被害が心配されている。一方、既存の液状化対策工法はすべて更地地盤を対象としており、既存構造物のある基礎地盤の液状化対策工法は皆無である。

2. 研究の目的

前記の背景を踏まえて、本研究は、既存構造物のある基礎地盤の液状化対策工法を開発するのが最終目的である。具体的には、砂地盤にマイクロバブル水あるいは空気を注入して、地盤を不飽和化して、地盤の液状化強度を増加させて、液状化による被害の低減を図る工法である。

本萌芽的研究では①地盤の飽和度の測定法の検討および②不飽和浸透流解析による

原位置不飽和化実験のシミュレーション解析の可能性の検討を研究目的とした。

3. 地盤の電気抵抗を用いた砂地盤の飽和度評価の研究

砂地盤の飽和度を低下させる方法としては空気注入工法やマイクロバブル水注入工法がある。いずれの方法でも、その実用化には、実地盤での飽和度を精度よく測定することが重要である。既往の研究で誘電率法を用いた方法が検討されているが、実地盤における測定では適用が難しく、現在のところ適切な地盤の飽和度を測定する方法がまだない。本研究はLCRハイテスタを用いて地盤の電気抵抗値を測定して、実地盤の飽和度を推定する方法の適応性を検討した。

3.1 研究の方法

試験では豊浦砂を使用し、500m³ 1 容器に相対密度が70%、飽和度が60%、70%、80%、90%、100%になるように供試体を作成した。できるだけ供試体の飽和度を一様にするため、砂試料を五層に分けて詰めて作成した。写真-1 に示すように、LCRハイテスタの測定センサーを供試体に挿入して抵抗値を測定した。一つの供試体に対して三回測定し、平均値をその供試体の抵抗値とした。LCRハイテスタ (HIOKI LCRハイテスタ 3532-50) の電圧は 0.1V、周波数は 3000Hz に設定した。センサーはステンレス銅製のものである。

3.2 試験結果と考察

(1) コードの長さによる影響の検討

現場では、地盤中に設置されるセンサー（電極）から地上の測定器（LCRハイテスタ）までの距離（コード）は様々である。図-1 はコードの長さが測定される地盤の抵抗値への影響を調べた結果である。本研究では、現場実験の状況を考慮して、8mコードと1mコードで測定し、標準長である 1mコードと抵抗値を比較した。実験結果より、どちらも飽和度が低下するにしたがって抵抗値が上った。1mコードと 8mコードの抵抗値に有意な差はなく、コード長さによる抵抗値測定への影響は少ないことが確認できた。

(2) 現場での測定環境における影響の検討

図-2 は現場で本工法を施工する際の環境として、①複数の測定コードを束ねる、および②コードが水（地下水）につかることを踏まえて、それらの影響を調べた結果である。図 2 に示すように、8mコードを束ねて水につけた状態でも、1mコードを空中で測定した結果とほぼ同じ値を示した。現場環境①および②による地盤の抵抗値測定への影響は少ないことが確認できた。

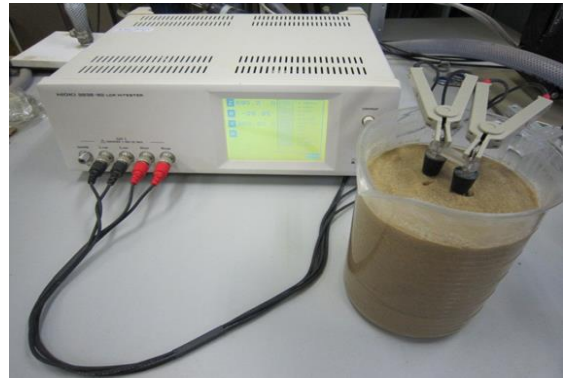


写真-1 LCRハイテスタによる電気抵抗値測定

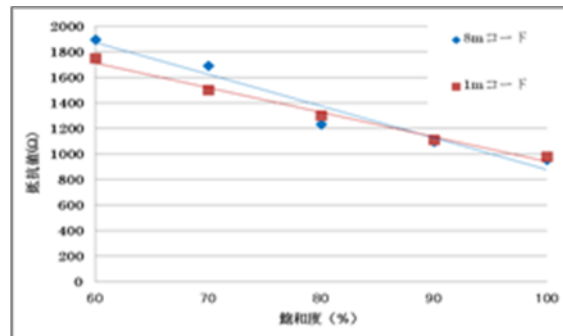


図-1 コードの長さが抵抗値に与える影響

(3) 測定する地盤の領域による影響の検討

図-3 は測定する地盤の領域の違いによる抵抗値の変化を調べた結果である。実験には基本となる 500m³ 1 容器に加えて、その 10 倍となる 5000m³ 1 容器を用いて供試体を作成して比較検討した。実験結果より、500m³ 1 容器試料の抵抗値の方が 5000m³ 1 容器試料の抵抗値より高い値を示した。この結果は測定対象の地盤領域の広さが電気抵抗に影響を及ぼし、地盤の抵抗値から飽和度を推定するためには、地盤領域の影響を考慮する必要があることを示している。

(4) 間隙水の温度による影響の検討

実地盤では、地下水の温度の季節による変動や、注入するマイクロバブル水の温度と原地盤の間隙水の温度差が抵抗値に与える影響が考えられるので、間隙水温を変化させて地盤の電気抵抗への影響を把握した。

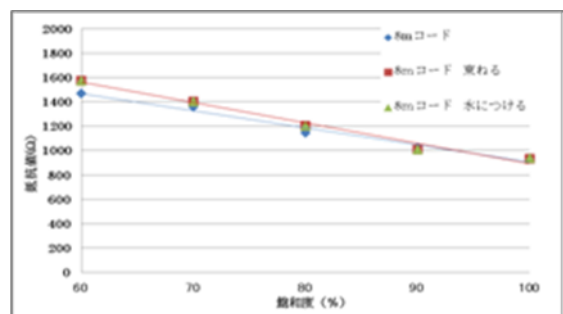


図-2 計測コードの実地盤環境が抵抗値に与える影響

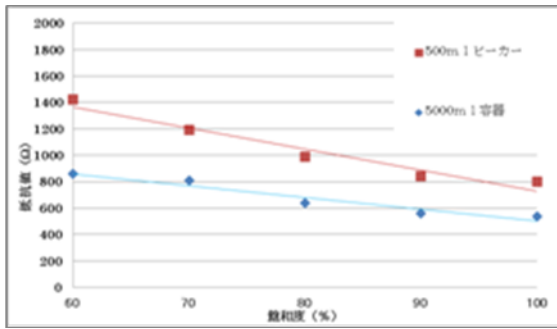


図-3 測定地盤領域の大きさが抵抗値に与える影響

図-4 は間隙水の温度による抵抗値への影響を調べた結果である。現場の地下水の温度は10℃程度であったので、本実験では温度が再現し易い水温5℃と大きく違う60℃で地盤の抵抗値を比較した。実験結果より、水温10℃と水温5℃では、抵抗値に大きな差は見られなかったが、水温10℃と水温60℃では抵抗値に大きな差が見られた。季節による地下水の温度の変化は数度程度で影響は少ないと考えられるが、マイクロバブル水の温度の影響については、考慮する必要があると考えられる。

(5) 水質の違いによる影響

地下水には様々な成分が溶存している。それらによる電気抵抗への影響も検討する必要がある。図-5 は現場実験地盤の地下水と水道水を用いて水質の違いによる抵抗値の変化を調べた結果である。地下水は実験現場の茜浜運動場から採取した。相対密度、容器の大きさなどの実験条件は同じとした。実験結果より、間隙水を地下水とした供試体の抵抗値が間隙水を水道水とした供試体に比べかなり低い値だった。大きな違いが生じた原因を調べるため、地下水と水道水それぞれの電気伝導度を測定した。その結果、地下水は150m S/m、水道水は25m S/mとなっており、地下水の電気伝導度は水道水の約5分1の値だった。このことから、間隙水の電気伝導度の違いが、地盤の電気抵抗値に大きな影響を与えていることがわかった。この結果より、地盤の電気抵抗により飽和度を推定するに当たっては、間隙水の電気伝導度の影響を除去する方法を検討する必要がある。

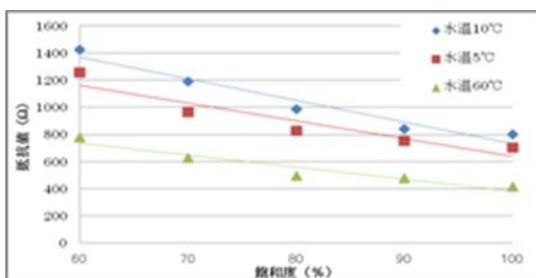


図-4 間隙水の水温が抵抗値に与える影響

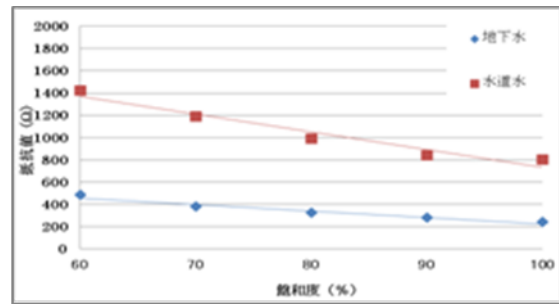


図-5 間隙水の水質が抵抗値に与える影響

3.4 結論

LCR ハイテスタを用いて測定した地盤の電気抵抗値に与える様々な影響についての実験より得られた結論は以下の通りである。

- ① コードの長さによる影響は少ない。
- ② コードを束ねる・水につけることによる影響は少ない。
- ③ 測定対象の地盤領域の大きさの影響は大きい。
- ④ 温度差が数度程度では、間隙水の温度による地盤抵抗への影響は少ない。
- ⑤ 地下水と水道水では電気抵抗値に大きな差があり、水質の影響は大きい。これは、間隙水の電気伝導度の違いの影響である。

以上のことから、①と②については、電気抵抗による飽和度の評価への影響は少ない。④については、季節による地下水の温度差の影響は少ない。しかし、注入するマイクロバブル水の温度については、地下水の温度を考慮して対応する必要がある。③については、測定対象の領域による影響を考慮する必要がある。⑤については、飽和度の評価に影響が大きい。これらの結果から、地盤の電気抵抗の絶対値ではなく、地盤の初期状態（飽和状態）からの変化を評価することで、今後、引き続き検討したと考えている。

4. 地盤不飽和化実験のシミュレーション解析検討

本工法の実用化にあたっては、設計法を確立する必要がある。どのような間隔で、どの深さで、地盤中にマイクロバブル水あるいは空気を注入すれば、どれぐらいの期間でどの範囲まで、どの程度に飽和度が下がるかを予測する必要がある。それには、数値解析法の確立が必要である。本研究では、不飽和化による液状化対策の実現性を確認するため、砂質地盤を対象とした空気注入実験を行い、数値シミュレーションと実験結果の比較検討を行うこととした。

4.1 実験サイトの概要

実験は千葉県習志野市茜浜で実施した。実験サイト付近の地形図を図-6 に示す。実験サイトは約12m×10mのエリアで、標高5m程度



図-6 実験サイト付近の地形図

のほぼ平坦な地形である。サイトの西側に一般道があり、一般道の標高は3m程度である。実験サイトの土層構成を図-7に示す。実験サイトは沖積土、埋立土、盛土の成層地盤であり、深度3~6mの砂質埋立土を不飽和化実験の対象地盤とした。

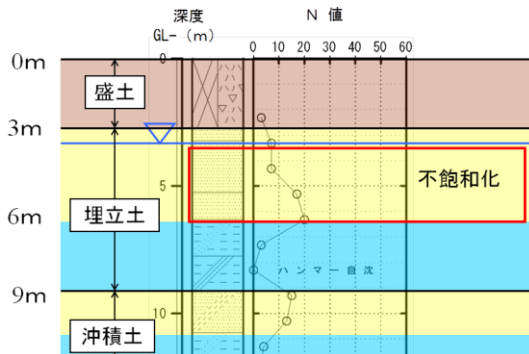


図-7 実験サイトの地層構成

実験サイトの概要を図-8に示す。領域端部に設定した注入井から空気を注入し、水飽和度変化や地下水面変化などを図中に示す各観測孔で計測した。

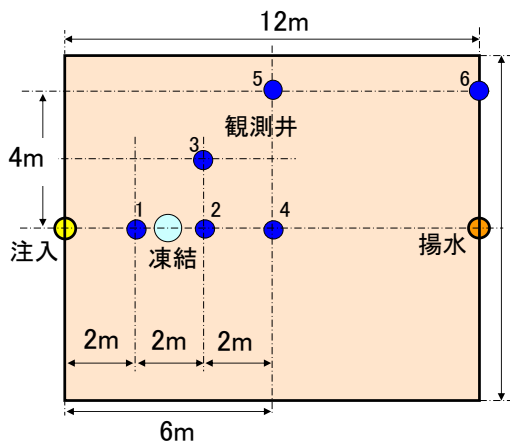


図-8 実験サイトの概要

4.2 不飽和特性

不飽和特性（毛管圧曲線、相対透水係数曲線）は、対象領域にて行われた pF 試験を van Genuchten（以後 VG と称する）の式³⁾を用いてフィッティングし、得られた VG パラメータから相対透水係数曲線を算出することで設定した。実験サイトでは、深度 3.3~4.3m、

4.3~5.3m、5.3~6.3m の 3 試料について pF 試験を行った。それぞれの pF 試験結果と、同定した VG 曲線および VG パラメータを図-9~11に示す。

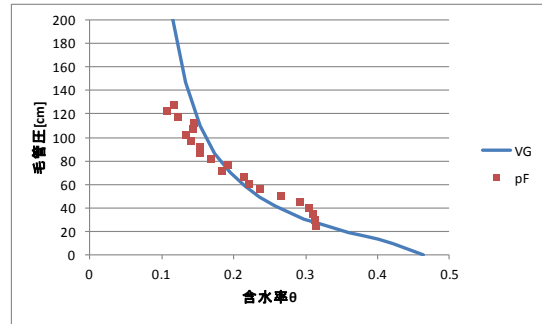


図-9 pF 値および VG 曲線（深度 3.3~4.3m）

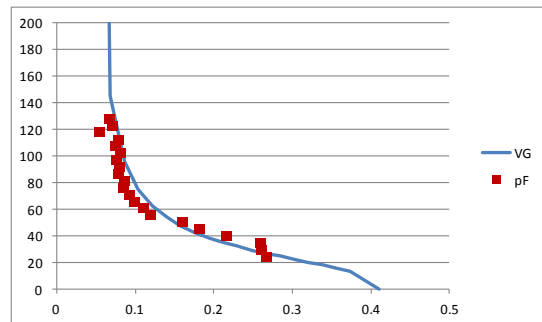


図-10 pF 値および VG 曲線（深度 4.3~5.3m）

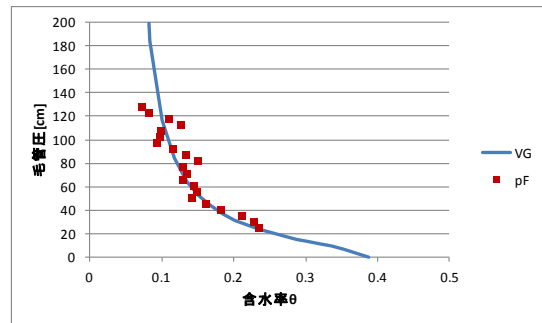


図-11 pF 値および VG 曲線（深度 5.3~6.3m）

以上から得られた VG パラメータを用いて相対透水係数を算出した。なお、空気の相対透水（透気）係数は、VG 式に Lenhard&Parker の関係式を適用して求めた透気係数の式⁴⁾を用いて算出した。相対透水係数、相対透気係数を図-12~14に示す。

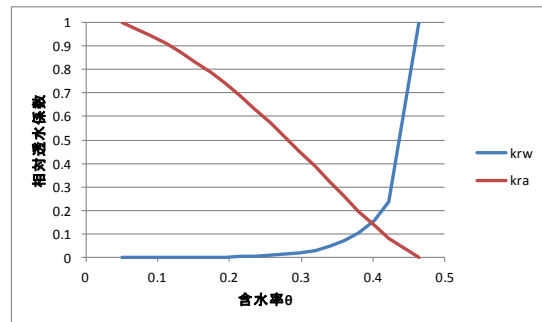


図-12 相対透水係数曲線（深度 3.3~4.3m）

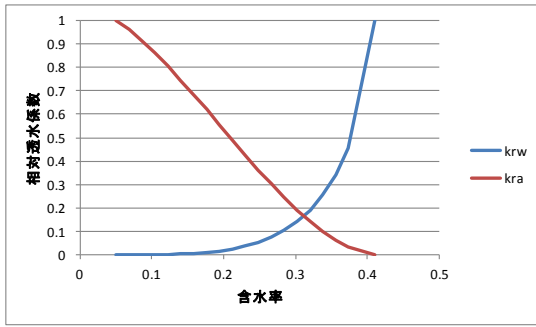


図-12 相対透水係数曲線（深度 4.3～5.3m）

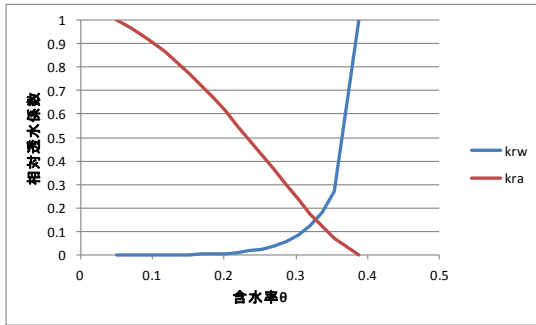


図-12 相対透水係数曲線（深度 5.3～6.3m）

4.3 シミュレーションモデル

(1) シミュレータ

シミュレータには地表および地下の二相流解析を扱うことのできる GETFLOWS を用いた。

(2) 解析格子および境界条件

図-13 に解析格子（水平面図）を示す。

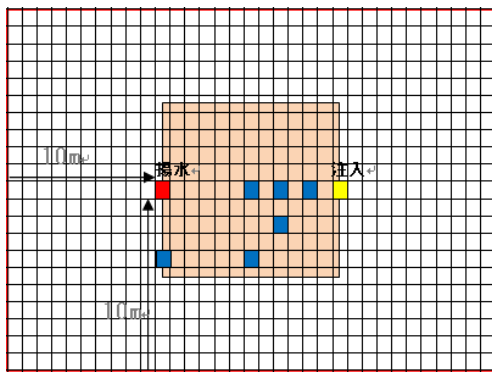


図-13 解析格子（水平面図）

モデル化エリアは実験サイトを含む 30m×20m の範囲とし、深度方向は深度 20m までモデル化対象とした。

境界条件は上部境界（大気層）：大気圧固定境界、底部境界：不透水境界、側面境界：固定水頭境界とした。地表面は自由浸出面で、降雨強度、地表面直下の水飽和度、浸透能力に応じて自動的に浸透あるいは表面流出が計算される。地表面形状は数値地図標高 5m

メッシュに現地調査による修正を加えたものである。

(3) 透水係数および間隙率

透水係数および間隙率は、前述の類似地盤試料を用いた透水試験結果を用い、以下の値とした。

透水係数 $4.49 \times 10^{-5} \text{m/s}$

間隙率 0.4

(4) 解析ケース

地盤の透水異方性が不飽和領域の広がり大きな影響を及ぼすことが示唆されるため、透水係数の異方性を考慮した複数のケースを設定して解析を実施した。

また、不飽和領域を効率的に拡大させるための揚水井を併用した工法が考えられたことから、その効果の有無を評価するために揚水井を設置したケース、設置しないケースを設定した。解析ケース一覧を表-1 に示す。

空気注入量は実際に実験で実施した空気注入と同様の注入量を設定する。なお、マイクロバブル水については 5%の空気を含む水とみなして水量と空気量を設定した。

表-1 解析ケース

	透水異方性（鉛直/水平）
case01	0.1/1
case02	0.3/1
case03	1/1（異方性なし）

4.4 解析結果

(1) 水飽和度

図-14～16 に空気注入終了直前の段階における解析結果（不飽和領域の広がり）を示す。透水異方性が強いほど水平方向の不飽和帯の広がりが大きくなる傾向が見られる。

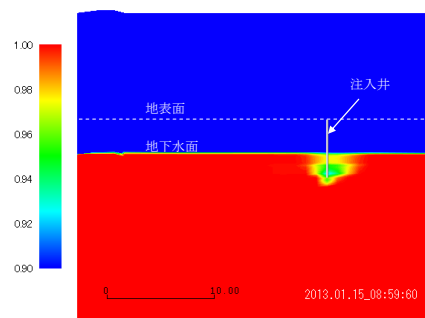


図-14 解析結果（case01）

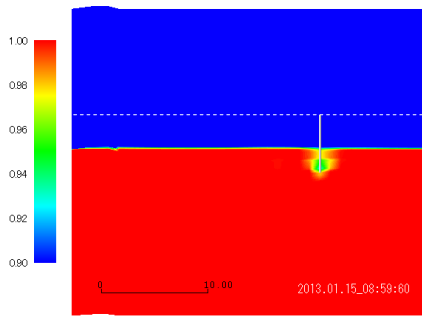


図-15 解析結果 (case02)

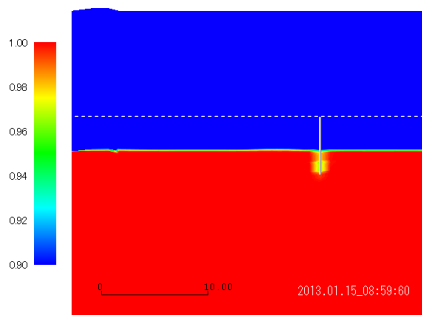


図-16 解析結果 (case03)

(2) 地下水位

図-17～19に観測井 No.1、2、5における水位計測結果とシミュレーション結果(計算結果)の比較を示す。各ケースともMB水および空気注入に伴う水位の低下の影響が見られるが、実測値よりも小さい結果となった。この要因にはについては、①透水異方性、②相対透気係数および③空気注入量の現場実験の値と乖離していることが考えられる。

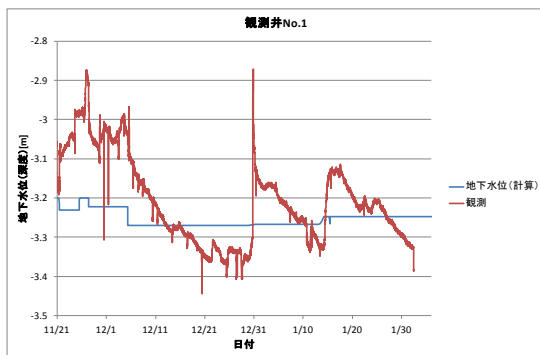


図-17 地下水位変化比較 (case01)

4.5 結論

注入井を中心とした水平方向の不飽和帯の広がりを数値シミュレーションによって表現することが可能であることを示した。シミュレーションによって不飽和帯の広がりを定量的に評価するためには、①現地の水理特性、透水異方性及び②空気注入量について

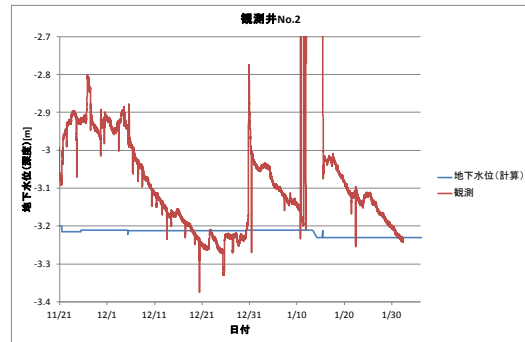


図-18 地下水位変化比較 (case02)

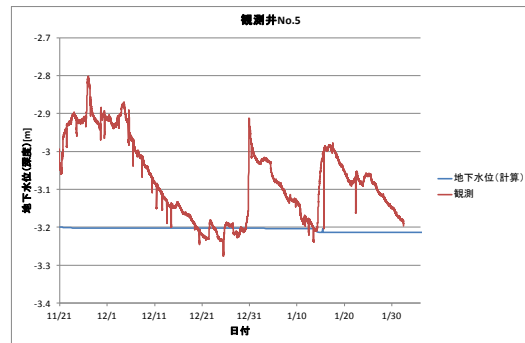


図-19 地下水位変化比較 (case03)

精度良く把握する必要がある。

シミュレーションによる評価においては、パラメータ取得からモデル作成、解析というワンスルーではなく、モニタリングデータとの比較およびモデル校正によって精度を継続的に上げていくことが肝要である。

参考文献

- 1) 畑中宗憲、増田剛美:砂質土のP波速度と液化強度に及ぼす飽和度の影響、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第645号、pp2029～2037、2009年11月
- 2) 北村・海老澤:LCRハイテスタを用いた砂地盤の飽和度測定に関する基礎的研究、千葉工業大学、建築都市環境学科卒業論文、2012.
- 3) van Genuchten: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils、Soil Sci. Soc. Am. J.、44、892-898、1980.
- 4) 神谷浩二、Rully Bakrie、本城勇介:保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定、土木学会論文集、Vol.62、No.3、679-678、2006.
5. 主な発表論文等(計1件)
 - 1) 稲葉 薫、松田裕樹、畑中宗憲、内田明彦:空気注入による地盤不飽和化の原位置試験およびシミュレーション、第57回地盤工学シンポジウム、2012
6. 研究組織
 - (1)研究代表者 畑中宗憲
研究者番号:60333019