

開削トンネル工事に伴う地下水位低下による飽和度変化を考慮した液状化対策に関する研究

澤田 亮¹・仲山 貴司²・藤原 寅士良³
水野 弘二⁴・近藤 政弘⁵・坂本 寛章⁶

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

E-mail: sawada@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

E-mail: nakayama@rtri.or.jp

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社（〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地）

E-mail: t-fujiwara@jreast.co.jp

⁴正会員 東日本旅客鉄道株式会社（〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地）

E-mail: ko-mizuno@jreast.co.jp

⁵正会員 西日本旅客鉄道株式会社（〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20（中央ビル 2F））

E-mail: masahiro-kondou@westjr.co.jp

⁶正会員 西日本旅客鉄道株式会社（〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20（中央ビル 2F））

E-mail: hiroaki-sakamoto@westjr.co.jp

本研究では、開削トンネル施工中に底版安定のために実施されるディープウェル工法等による揚水によって周辺地盤が不飽和化することに着目し、不飽和化した地盤を部分的な薬液注入工法等で封入し、不飽和状態を維持することによる液状化対策を検討している。本研究では、模型地盤および実現場において地下水位の履歴と飽和度の関係を測定するとともに、数値解析による検証をとおり、飽和度の継続的な変化と保持効果について検討した結果を報告する。

Key Words: Tunnel, stability, simulation method, requification, saturation, ground water

1. はじめに

開削トンネルは、施工時および供用中に受ける土水圧等に対する耐荷能力を有していることのみならず、構造系全体としての安定していることが重要である。特に、地震時においては、液状化の可能性がある地盤中に位置する場合、浮き上がりが生じないよう対策等を講じておくことが必要になる場合もある。そのため、これまでも数多くの液状化対策が提案・実用化されており、例えば、鉄道の開削トンネルにおける液状化対策としては、薬液注入工法による対策方法等が関連マニュアル¹⁾に紹介されている。

しかし、鉄道の開削トンネルの場合は、列車の走行性を確保しながら、空間や時間的な制約が多いなかでの工事となることから、これらの液状化対策を用いても、施工性や経済性が課題となる場合も多い。

そこで、本研究では、開削トンネルの施工において底版安定のために実施されるディープウェル工法等による

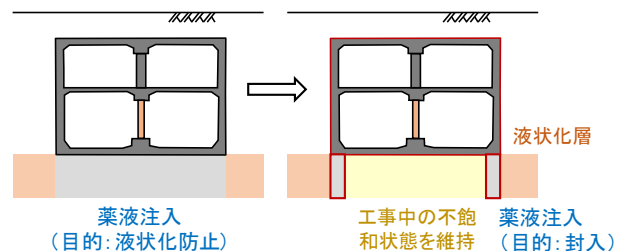


図-1 本研究で目標とする対策工法のイメージ

揚水によって周辺地盤が不飽和化することに着目し、図-1に示すように対象の液状化層を全面改良するのではなく、不飽和化した地盤を部分的な薬液注入等で封入し、不飽和状態を維持することによる液状化対策を検討している。

このように周辺地盤の不飽和化に着目した液状化対策工法として、これまでに空気を地盤に注入する工法^{例えば}が提案されており、飽和度と液状化程度の関係について研究が進められてきている。ただし、前述したような

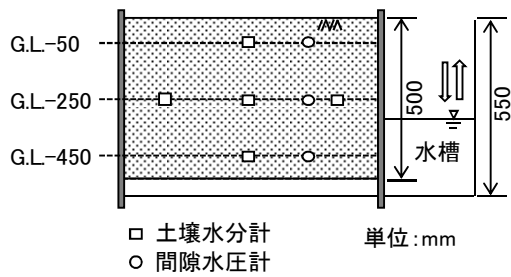


図-2 模型実験の模式図

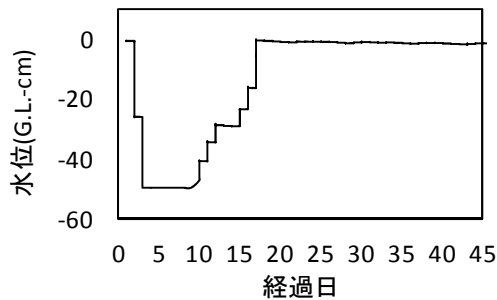


図-3 水槽内水位の履歴（模型実験）

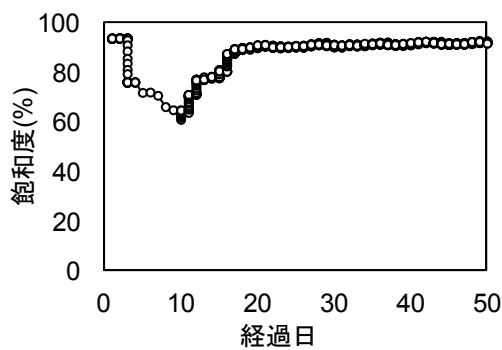


図-4 地盤全体の平均飽和度の経時変化（模型実験）

開削トンネルの施工に伴う揚水を利用する場合、地下水位をどのように制御すれば目標とする飽和度を得ることができるかを事前に予測する方法は一般化されていない。

そのため、本研究では、模型地盤および現場において地下水位の履歴と飽和度の関係を測定するとともに、数値解析による検証をとおして、飽和度の継続的な変化と保持効果について検討した結果を報告する。

2. 模型実験での水位変化と飽和度の関係の把握

(1)概 要

開削トンネルの施工時における地下水位低下と飽和度の関係を把握することを目的に、理想的な条件での模型実験を実施した。

模型実験は、図-2のように、地盤（珪砂6号、目標相対密度50%）と水槽をつなぎ、水槽内水位を変化させることで、地下水の揚水・復水の履歴を与えるものである。土槽全体の重量を測定するとともに、地盤内には土壌水

分計を設置することで飽和度の経時変化を調べた。

水槽内水位の履歴は表-1に示すように与えた。2日かけて地盤底面位置まで水槽内の水位を低下させたのち、5日間その水位を維持し、再度8日かけて復水させた。実際に測定した水槽内水位の履歴を図-3に示す。

表-1 水槽内水位の制御

経過日	水槽内水位
0～2日	G.L.0cm→G.L.-500cm
2～7日	G.L.-500cm
7日～15日	G.L.-500cm→G.L.0cm

(2)水槽内水位と飽和度の経時変化の関係

図-4には、土槽全体の重量変化から求めた地盤全体の平均飽和度の経時変化を示す。水槽内水位低下に伴い、地盤全体の平均飽和度は60%程度まで低下し、復水に伴い再飽和されるが90%程度までしか回復せず、長期間不飽和状態を維持していることがわかる。

また、図-5には、土壌水分計で測定した深度毎の飽和度の経時変化を示す。この結果から、水位低下の際には、水槽内水位から最も浅い G.L.-50cm では飽和度は40%程度まで低下しているのに対して、G.L.-450cm では飽和度は90%程度までしか低下していない。復水後は、G.L.-50cm、-250cm では飽和度は80%程度を維持するのに対して、G.L.-450cmでは95%程度となった。

(3)考 察

復水後に地盤が完全に再飽和しないのは、間隙中に存在した空気が、再飽和の際に気泡として封入されたためと考えられ、この封入される空気量は水位低下時の飽和度の影響を受けているものと考えられる。また、不飽和状態が維持される要因は、一度、封入された気泡は、室内実験のように安定した状態では、地盤中に存在し続けるためと考えられる。

このことから、開削トンネルの施工に伴う揚水による地下水位の低下程度に応じて、復水後に期待できる飽和度が決定されることが示唆される。

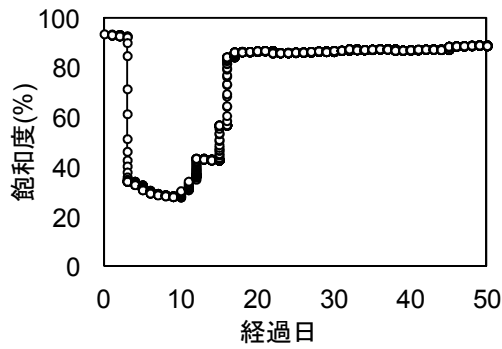
3. 現場計測での地下水位と飽和度の関係の把握

(1)概 要

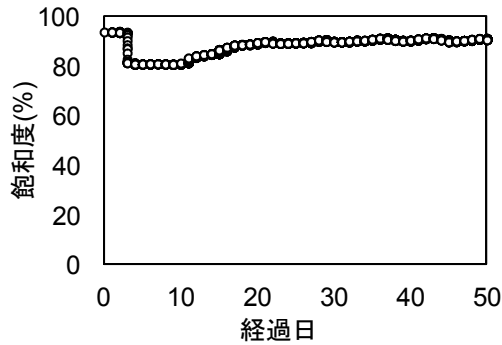
模型実験により、水位変化と飽和度の関係についての傾向を把握した。そこで、実際の地盤における地下水位の経時変化と飽和度の関係を測定し、模型実験の傾向の検証を行った。

現場計測は、図-6のように原地盤中に土壌水分計を設置して、300日にわたり自然地下水位と飽和度の経時変化を測定したものである。

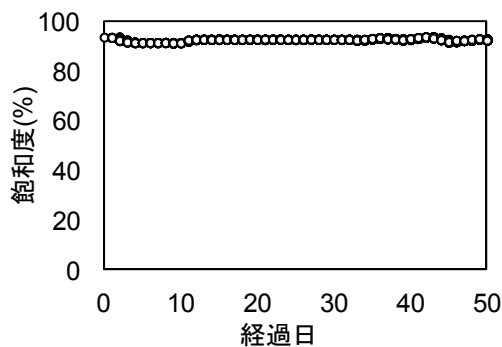
現場においては、後述する水分特性曲線等を得るため、



(a) G.L.-50cm



(b) G.L.-250 cm



(c) G.L.-450 cm

図-5 深度毎の飽和度の経時変化（模型実験）

不攪乱試料を採取しており、そのボーリングコアの状況を図-7に示す。地盤は砂礫層であり、礫の間隙の多くを砂が充填されていることがわかる。なお、保水性試験に用いた試験体には、試験精度の観点から同図(b)に示すように砂が密実に充填されている箇所を選択した。

現場における地下水位の経時変化を図-8に示す。これは設置した土壌水分計のうち、最も浅い G.L.-3.5m 付近を推移している状態であった。なお、当該現場は、周辺の振動や地下水の変動が比較的小さい箇所を選定した。

(2)地下水位と飽和度の経時変化の関係

土壌水分計で測定した深度毎の飽和度を図-9に示す。この結果から、G.L.-3.5m では飽和度の変動が計測され、地下水位が土壌水分計以深となる場合には、飽和度は

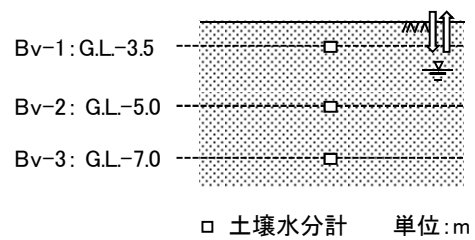


図-6 現場計測の模式図



(a)ボーリングコア



(b)保水性試験体

図-7 試料写真

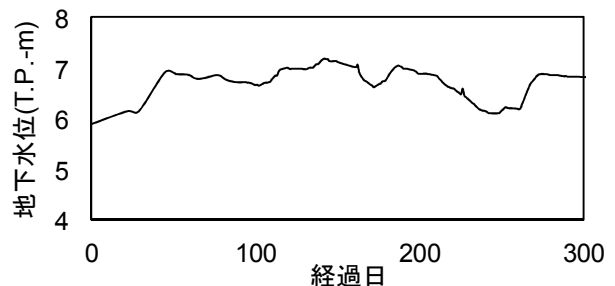


図-8 地下水位の経時変化（現場計測）

20%程度、地下水位が土壌水分計以浅となる場合には、飽和度は90%程度であることが測定された。また、地下水位よりも深い位置に設置した G.L.-5.0m, G.L.-7.5m の土壌水分計においても、飽和度は90%程度で安定して推移していることが確認された。

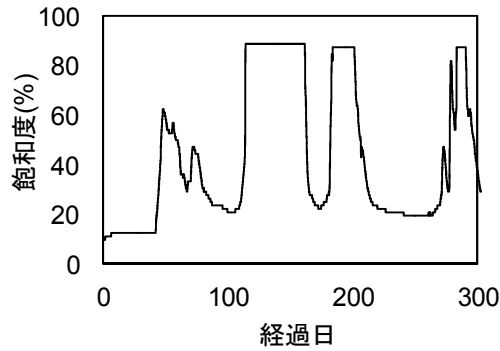
(3)考 察

現場計測の結果、地下水低下による不飽和後に地下水位が回復した際、完全に再飽和しないという点で、模型実験と整合する結果を得ることができた。また、地下水位以深の計測位置も完全に飽和していないことから、過去に地下水位以浅となった履歴を受けた可能性も示唆される。したがって、現場においても、周辺環境が良ければ不飽和状態は長期にわたり継続することが推定された。

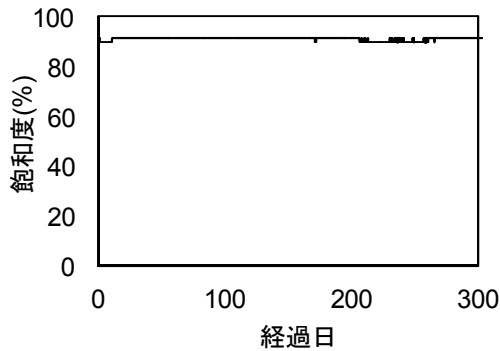
4. 地下水の変化を考慮した飽和度の推定手法の検討

(1)概 要

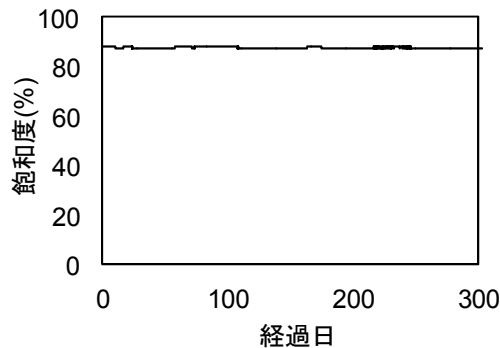
前述した模型実験および現場計測より得られた地下水位と飽和度の傾向に関し、飽和・不飽和浸透流解析により検証し、地下水変動時の飽和度を把握する手法を検討



(a)Bv-1 : G.L.-3.5m



(b)Bv-2 : G.L.-5.0m



(c)Bv-3 : G.L.-7.5m

図-9 深度毎の飽和度の経時変化（現場計測）

した。

本研究で対象とする砂質地盤で揚水・復水を行うとき、地盤の飽和度とサクションの関係は、図-10 の a→b→c→d の履歴をたどることが知られている。

a→b→c の履歴は、本研究における対策工法では、開削トンネルの施工に伴う揚水の履歴にあたり、模型実験および現場計測でも確認された。また、c→d の履歴については、大雨等による周辺環境の影響が異なる場合には、間隙中の空気量が減少するような状態であるが、模型実験および現場計測では確認されなかった。

そのため、本研究ではこの影響は少ないものと考え、

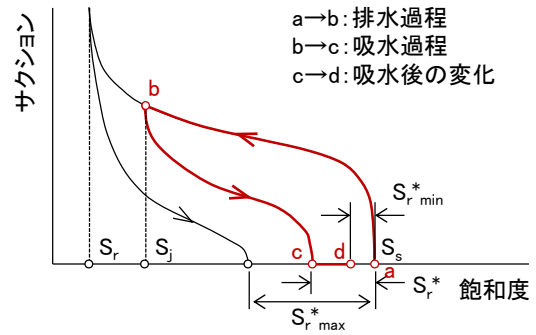


図-10 水分特性曲線の概念図

表-2 地盤物性値（模型実験）

飽和透水係数 (m/sec)		1.3×10^{-4}
間隙率 (%)		42.3
最大体積含水率 θ_s		0.429
最小体積含水率 θ_r		0.048
最大残留飽和度 S_r^* (%)		15.9
α (m ⁻¹)	排水過程	9.53
	吸水過程	19.06
n		2.15

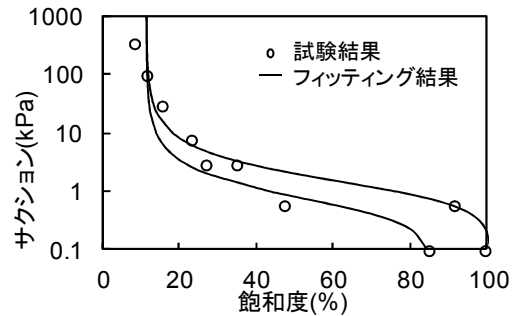


図-11 水分特性曲線（模型実験）

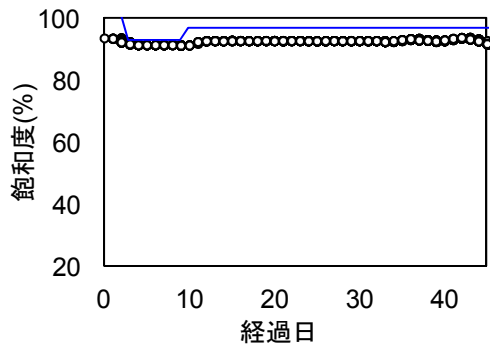
c 点までの予測を試みた。なお、将来的に揚水工の設計で用いることも想定し、数値解析においては、既往の文献³⁾⁻⁶⁾を参考に、パラメータが極力少なく、計算方法も簡易となるような計算モデルを用いることとした。

具体的に、水分特性の主曲線には式(1)の van Genuchten モデルを、走査曲線には、主曲線のスケーリングにより表現する Mualem モデルを適用することとした。

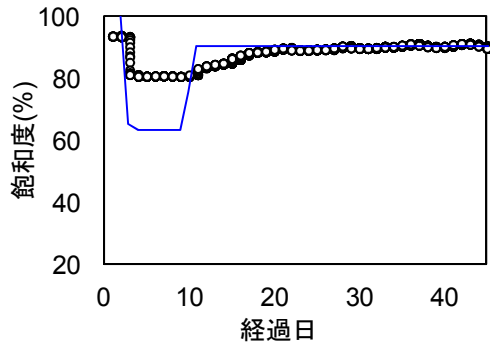
$$\frac{S(\psi) - S_r}{S_s - S_r} = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m} \quad \dots (1)$$

ここに、 $S(\psi)$: 飽和度、 S_r : 残留飽和度、 S_s : 最大飽和度、 α : ψ の逆数のスケーリングを持つパラメータ、 n, m : 無次元パラメータ ($m=1-1/n$)

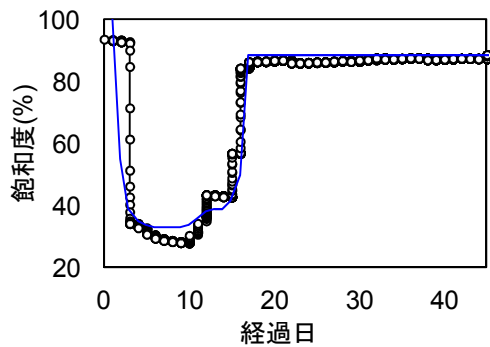
吸水直後の残存飽和度 S_r^* の決定には、式(2)の Land の式を適用した。



(a) G.L.-50cm



(b) G.L.-250 cm



(c) G.L.-450 cm

図-12 模型実験と計算結果の比較

$$S_r^* = \frac{1 - S_j}{1 + R(1 - S_j)} \quad R = \frac{1}{S_{r \max}^*} - 1 \quad \dots (2)$$

ここに、 S_r^* ：残存飽和度、 $S_{r \max}^*$ ：最大残存飽和度、 S_j ：排水・吸水中の最小飽和度

また、間隙水の浸透特性は、本来は3次元的な挙動をすると考えられるが、簡易に式(3)の鉛直次元浸透の支配方程式で表現し、計算では地下水位に相当する水頭境界を底面に与えることとした。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\psi) \right) - C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad \dots (3)$$

ここに、 $c(\psi)$ ：比水分容量、 $k(\psi)$ ：透水係数、 ψ ：圧力水頭

なお、水分特性曲線の決定にあたって、排水過程は非線形最小二乗法による近似⁷⁾を行い、吸水過程の α は排水過程の2倍、 n は排水過程と同一とした⁸⁾。

表-3 地盤物性値（現場計測）

飽和透水係数 (m/sec)		1.0×10^{-2}
間隙率 (%)		25.9
最大体積含水率 θ_s		0.253
最小体積含水率 θ_r		0.042
最大残留飽和度 $S_{r \max}^*$ (%)		10.7
α (m ⁻¹)	排水過程	15.00
	吸水過程	30.00
n		2.50

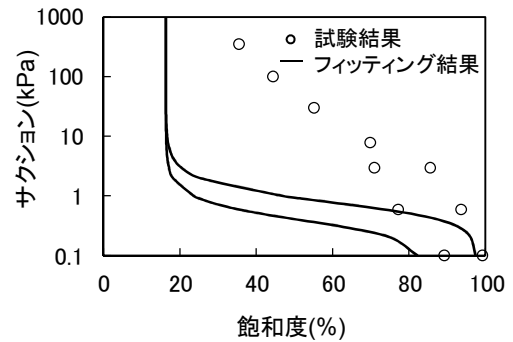


図-13 水分特性曲線（現場計測）

(2)模型実験の再現解析結果

模型実験において使用した試料の土の保水性試験、透水試験から得られた地盤物性値を表-2に示す。また、土の保水性試験結果と van Genuchten モデルによる水分特性曲線を図-11に示す。

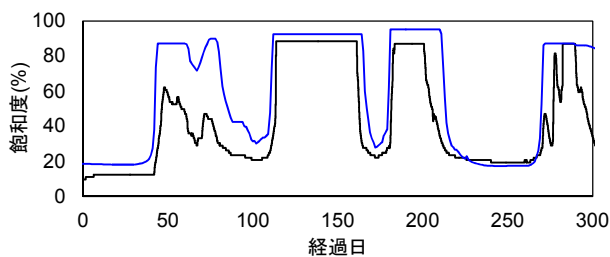
これらを用いた計算結果を図-12に示す。この結果から、揚水・復水過程においては、G.L-250cm に誤差が生じているものの、復水後の飽和度については、模型実験と計算結果に良い一致がみられる。したがって、簡易なモデルを用いたものの、前述した計算方法で復水後の飽和度を精度よく予測できることがわかる。

(3)現場計測の再現解析結果

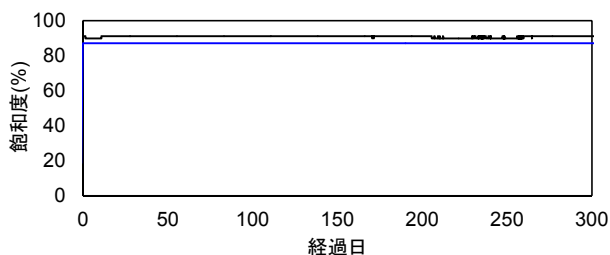
計測の対象とした現場においては、図-7(b)に示した間隙が密実な試料を用いた土の保水性試験を実施した。ただし、図-7(a)のコアにみられるように部分的な空隙を有するため、一般的な礫における水分特性も参考に、表-3のように地盤物性値を設定した。土の保水性試験結果と van Genuchten モデルによる水分特性曲線を図-13に示す。土の保水性試験では粘性土のように曲線が急な勾配を示しているが、空隙を考慮して仮定した水分特性曲線は礫のように曲線が緩やかな勾配とした。

なお、解析は2つの水分特性曲線を用いて行ったが、空隙を考慮したほうが現場の実態を説明できていることから、以下は、この図-13の van Genuchten モデルによる水分特性曲線を用いた結果を示す。

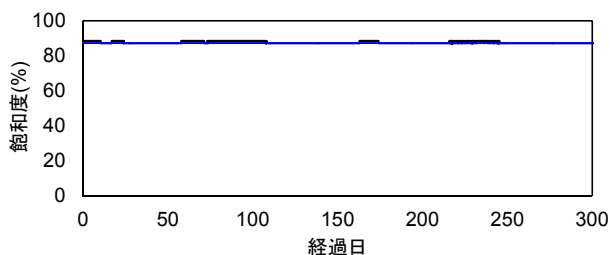
また、数値解析において、Bv-2、Bv-3の飽和度が100%以下を推移するためには、一度は地下水位が浅と



Bv-1 : — 計測値, — 解析値



Bv-2 : — 計測値, — 解析値



Bv-3 : — 計測値, — 解析値

図-14 現場計測と計算結果の比較

なることが必要となる。そのため、事前計算を行い、地下水位以浅となる履歴を与えた。

関係を図-14 に示す。この結果から、各計測深度において、前述した計算方法で飽和度の推移を概ね推定でき、地下水の変化により不飽和状態が維持することが示唆された。

5. 結 論

本研究では、開削トンネルの液状化対策の施工性、経済性を向上させることを目的に、開削トンネルを対象に底版安定のために実施される場合のあるディープウェル工法等による揚水によって周辺地盤が不飽和状態となることに着目した液状化対策を検討した。

模型実験、現場計測および数値解析から得られた結論は以下の通りである。

1) 模型実験の結果、地盤中の地下水位低下に伴い、地盤は不飽和化し、低下した地下水面から浅いほど飽和度の低下量は大きい。また、復水後も同様の傾向を示しており、十分に不飽和化されていれば、完全に再飽和されず、

飽和度 80%程度で安定することを確認した。

2) 現場計測の結果、地下水変動の履歴を受ける計測深度の飽和度は復水後も 90%程度であることが確認された。また、計測期間中は地下水変動の履歴を受けていない計測深度においても、過去に地下水変動の履歴を受けたと想定され、再飽和後も飽和度は 90%程度で維持していることが示唆された。

3) 再飽和を飽和・不飽和浸透流解析で簡易に推定する方法を検討した結果、水分特性の主曲線には van Genuchten モデルを、走査曲線には、主曲線のスケーリングにより表現する Mualem モデル、吸水直後の残存飽和度の決定には Land の式を適用することで、模型実験および現場計測結果を概ね説明でき、飽和度を把握することができた。

以上の結果から、開削トンネル施工時における地下水の変動による地盤の不飽和状態の経時的な傾向を把握することができた。このことは開削トンネル施工時における補助工法の活用で、合理的な液状化対策が可能となることを示唆している。今後は、実際の開削トンネルの設計手法や施工方法に関して深度化した検討を行う予定である。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：注入の設計施工マニュアル，2011。
- 2) 小川佳裕，西垣誠，小松満，吉岡清次，大内正敏：地盤の不飽和化による液状化防止工法に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.58，pp.825～826，2003。
- 3) 小杉賢一郎：講座 古典を読む Y.Mualem 著「不飽和多孔質体の透水係数を推定する新たなモデルについて」ならびに M.Th.van Genuchten 著「不飽和土壌の透水係数を推定する閉形式解について」，土壌の物理性，No.106，pp.47～60，2007。
- 4) 藤縄克之，日比義彦，藤原幸彦：多孔体中における水-疎水性液体-気体の等温多層流れに関する研究の進歩
- 5) 西垣誠，小松満，藤井直，大内正敏：液状化防止を目的とした地盤の不飽和化に関する実験的研究，土木学会論文集 C，Vol.64，No.2，pp.340-352，2008.6
- 6) Seki, K. (2007) SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4: 407-437. doi:10.5194/hessd-4-407-2007
- 7) Luckner, L., van Genuchten, M. Th. And Nielsen, D. R. : A Consistent Set of Parametric Models for the Two-Phase Flow of Immiscible Fluids in the Subsurface, Water Resour. Res., Vol.25, No.10, pp.2187-2193, 1989.
- 8) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，Vol.264，1977.8

(2009.7.1 受付)

Analysis method of the ground saturation recharging groundwater after tunnelling

Ryou SAWADA, Takashi NAKAYAMA, Torajiro FUJIWARA,
Kouji MIZUNO, Masahiro KONDO and Hiroaki SAKAMOTO

In this study, it is focused on the fact that the surrounding ground of a cut and cover tunnel is unsaturated by pumping up of ground water, under construction period and the method of liquefaction in which the unsaturated soil is sealed by a part of injection is examined. In this paper, the measurements to understand the relationship between history of underground water level and the degree of saturation are performed in both the model ground and the site. And, simulation analysis is performed to understand continuous change of saturation.