

PDF issue: 2025-06-24

雨水浸透適地マップ作成のための3次元地盤モデル の構築および地下水流動解析

澁谷, 啓 ; 白, 濟民 ; 橋本, 真基 ; 齋藤, 雅彦 ; 古宮, 雅之 ; 片岡, 沙都 紀

(Citation) 神戸大学都市安全研究センター研究報告,19:256-265

(Issue Date) 2015-03

(Resource Type) departmental bulletin paper

(Version) Version of Record

(JaLCDOI) https://doi.org/10.24546/81011492

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011492



雨水浸透適地マップ作成のための3次元地盤モデ ルの構築および地下水流動解析

Ground water flow analysis with 3D ground surface model for mapping out

installation of rainwater infiltration facilities

澁谷 啓¹⁾
Satoru Shibuya
白 濟民²⁾
Je-Min Baek
橋本 真基³⁾
Masaki Hashimoto
齋藤 雅彦⁴⁾
Masahiko Saito
古宮 雅之⁵⁾
Masayuki Furumiya
片岡 沙都紀⁶⁾
Satsuki Kataoka

概要:近年多発する内水氾濫等の都市型水害軽減のための有効な対策の一つに,浸透ます等の浸透施設を設 置して地盤内への雨水浸透を積極的に促進することで流出流量を抑制する方法がある.一方,浸透施設の設 置場所の選定にあたっては、コスト面・安全面の観点から,設置に適した地域(適地)とそうでない地域(不適 地)を区別する必要がある.そこで,澁谷ら¹⁾および白ら²⁾は、実在する都市(以下,A市と表記)を対象とし て,既存ボーリングデータを活用した3次元地形・地盤モデルを構築し、さらに3次元広域地下水流動解析 により雨水浸透施設の適地・不適地をひとまず判定した.一連の解析では、不飽和状態にある表層地盤の不 飽和浸透特性が不明であったため、表層の土質に応じた飽和透水係数の一般値を用いた.本論文では、より 現実的な数値シミュレーション結果を得るために、降雨時における表層地盤の保水性を定量的に評価した. そのために、原位置実験・調査により不飽和浸透特性を把握し、不飽和浸透特性を考慮した数値シミュレー ションを実施し、地下水位変動の解析値と実測値を比較検討した.一連の事例研究により、表層地盤の保水 性を考慮することにより、地下水変動の実態をより適切に推定・評価できることが分かった.

キーワード:都市型水害,地下水流動解析,雨水浸透適地マップ,現場注水試験

1. はじめに

近年多発する都市型水害の抑制・緩和には雨水流出流量の抑制が効果的であり、これを実現する簡易な手 立てとして、浸透ますや透水性舗装に代表される浸透施設の設置により地盤内への雨水浸透を促進する方法 が挙げられる.雨水浸透は浸透施設を設置した地盤近傍への雨水の集中を許容するため、過剰に地下水位が 上昇した場合、周辺地盤の不安定化や地盤沈下などの地盤災害を誘発する可能性があり、平常時の地下水位 が高い地域や透水係数が低い地域では流出抑制効果が期待できないため、設置に適した地域(適地)とそう でない地域(不適地)を事前に区別する必要がある.事前に十分な検討を行い適地・不適地を適切に区別す れば、適地では雨水浸透、不適地では雨水貯留を採用するといった流出抑制手法の使い分けが可能になる. また、浸透施設による流出抑制効果が高いエリアから優先的に浸透施設を設置するといった、経済的かつ効 果的な都市型水害対策が可能になると考えられる.そこで、澁谷ら¹は、浸透施設設置場所の選定を合理的 に行うため、関西地方に実在する中核都市(以下、A 市と明記)の全域を対象として、広域3次元地形・地盤 モデルの構築および3次元広域地下水流動解析を実施した.この解析結果は、適切な判定基準を導入するこ とにより、浸透適地・不適地区分図の作成に活用できる.

一方,一連の解析では,地下水面より上にある雨水浸透層の透水特性として,土質に応じた飽和状態での 透水係数の一般値を用いている.この場合,本来は不飽和状態にある浸透層中に雨水が留まる現象,つまり 保水性を適切に評価できないため,降雨による地下水の上昇量を過大評価する虞がある.さらに,地下水流 動解析結果の検証もされていない.

このような背景から、本研究では、以下に示す手順で澁谷ら¹⁾が実施した研究成果を検証するとともに新たな展開を試みた.

① 現場注水試験により地下水面より上部の不飽和状態にある表層部に雨水が浸透した場合の保水性を評価 する.このとき,表層の不飽和地盤内で土壌水分および間隙水圧の両方を測定し,表層部の水分特性曲線を 求める.

② ①で得られた不飽和状態にある表層地盤の保水性を考慮し、それ以外は澁谷ら¹⁾が実施した解析と全く同じ条件で3次元地下水流動解析を実施する.

③ ②で得られた地下水変動推定結果と既往の地下水変動計測結果を比較検討することにより,本解析結果の 妥当性を検証する.併せて,以前と今回の地下水変動推定結果を比較検討する.

④ ③に加えて,市内の2箇所において数か月に亘る地下水変動ならびに表層部の水分および間隙水圧の変化 を観測し,当該地点での地下水変動解析結果と比較検討することにより,本解析結果の妥当性を検証する.

これらを踏まえ, 澁谷ら¹⁾が作成した浸透適地・不適地区分図をより精度の高いものとするため, 降水量・ 地下水位を観測し, キャリブレーションを実施するとともに, 飽和地盤モデルをより現実に近い不飽和地盤 モデルに置き換え, 数値シミュレーションを実施した.



図-1 ボーリングおよび河川の位置図

2. 数値解析プログラムおよび解析対象地の概要

本研究では、Aquaveo、LLC. 社開発の地下水解析ソフトウェアである GMS (Groundwater Modeling System) の中に含まれている GMS-MODFLOW を解析ツールとして用いた. GMS-MODFLOW は、アメリカ地質調査 所(U.S.Geological Survey: USGS)で開発のされたパブリックドメインの Fortran プログラムである MODFLOW (MODular finite-difference FLOW model)を GUI 化したもので、解析モデルの可視化により境界 条件や浸透パラメータなどの設定、結果の出力などを容易に行うことが可能である. GMS-MODFLOW の特 徴として、i)アメリカで最も広く使われている3次元地下水流動解析プログラムである、ii)地下水および浸 出水の模擬時に井戸、河川、排水、蒸発散等の複雑な境界条件の影響を全て考慮することができる、iii)グリ ッド(有限差分グリッド)の構成、水理・地質因子の入力および境界条件の定義等をダイアログボックスを用 いて簡単かつ迅速に解決することができる、等が挙げられる. GMS-MODFLOW では、以下に示す3次元地 下水水収支式(式(1)参照)を基礎方程式として、これを有限差分法により解く.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$
(1)

ここで,*h*:ピエゾ水頭(L),*K_{xx}*,*K_{yy}*,*K_{zz}:座標系の x*, *y*, *z* 軸方向の透水係数(LT⁻¹),*W*:通過体積内での単位体積あたりの注水/排水量(正値のとき注水)(T⁻¹),*S_s*:比貯留係数(L⁻¹),*t*:時間(T)である.

A市の市域は、山頂部から海岸、埋立地におよぶため、山、川、谷、平地など様々な地形が展開している. 当該市域を大きく分けると、北部の山地部、台地や低地の平坦部、埋立地となっている.本研究では、過去 にA市で実施された約430本の既往ボーリングデータを用いて表層地盤をモデル化した^{1),2)}.図-1にボーリ ング位置図を示す.図-1より、ボーリング調査位置が市街地に密集していることがわかる.また、都市型水 害を対象とした検討を目的としていることから、市街地を中心とする東西約3km、南北約5kmの領域を解析 対象領域としている.また、市街地を流れる河川のうち、二級河川である2つの河川を解析に反映させた.

3. 水位観測孔の現場注水試験

(1) 現場注水試験の概要

A市の南西部に位置する O 公園内に既設されている地下水観測孔と D ポンプ場内の 2 地点で,水位観測孔 を利用した現場注水試験を行った(図-1 参照). これら 2 地点は, 澁谷ら¹⁾が提示した浸透適地・不適地区 分図において,それぞれ適地および不適地に対応している.

注水による浸透飽和化の過程を,表層の不飽和地盤内に設置した水分計及び間隙水圧計を用いて観測した. この試験により求めた不飽和浸透特性を,地盤モデルのパラメータとして,雨水浸透解析に反映させた.

本研究では、対象土質の透水性が極めて良好で、大量の注水量の確保が困難であったため、注水試験は、 地盤工学会基準 JGS 1314「ボーリング孔を利用した透水試験方法」の非定常法にて試験を実施した.



図-2 計器設置位置図

図-2 に、計器の設置位置を示す. D ポンプ場における初期の地下水位は、GL-1.67m であった.水分計・間 隙水圧計は、地下水面より上の GL-1.50m 付近に設置した. 図-2 の平面図に示すように、D ポンプ場では、 水分計・間隙水圧計を 2 ペアー設置した. 一方、水位センサーは、両地点ともにボーリング孔内において GL-5.00m の位置に設置し地下水位を測定した.

計測項目は、水位センサーによる地下水位、間隙水圧計による地盤内の負の間隙水圧、水分計による地盤 の含水比(あるいは飽和度)およびボーリング孔内への注水量である.ここで、注水量は地盤内への水の浸透 を促すための目安であり、正確な注水量は記録していないが、水分計・間隙水圧計の設置位置に、確実に浸 透水が到達する量の注水を行った.注水前に地盤定常値を測定し注水開始とともに 2sec インターバルで、自 動計測を行った.また、図-3のフローチャートに示す方法で注水試験を実施した.本試験の目的は、不飽和 地盤内に水が浸透する過程(wetting 過程)および乾燥過程(drying 過程)での含水量(飽和度)と間隙水圧の関係、 すなわち水分特性曲線を求めることにあった.







(2) 現場注水試験の結果

D ポンプ場で実施した現場注水試験の結果を図-4~図-7 に示す.図-4 はボーリング孔内の水位の時間変化 であり、このときの含水比の変化および間隙水圧の変化を、図-5 および図-6 に示す.ここでサクションは負 圧が正であるため、間隙水圧がマイナスの状態は、正のサクションが発生していることを意味する.

これらの図から,注水によりボーリング孔内の水位が上昇し,しばらくすると水が下方に浸透して測定地 点で含水比が上昇し同時にサクションが減少する.また,注水を止めてしばらく時間が経過すると,脱水が 始まり,含水比が下降し同時にサクションが上昇する.したがって,含水比およびサクションは,それぞれ 時間に対してピークを示している様子が読み取れる.ちなみに,O公園の現場注水試験結果でもDポンプ場 と同様な傾向が見られた.

図-7 は、測定した「間隙水圧と体積含水率」の関係である.これらの関係は水分特性曲線と呼ばれ、この 曲線から不飽和浸透解析に必要な地盤の透水特性パラメータを同定した.同定方法については後述するが、 両地点での水分特性曲線は互いに似通っていたため、Dポンプ場の drying 過程でのデータを用いて解析に必 要なパラメータを決定した(図-7 参照).



図-8 時間経過に伴う地下水位変動(Dポンプ場)



4. 地下水位の長期観測結果

Dポンプ場

図-8 に、測定開始時の2月中旬から6月中旬までの地下水位の変動記録を示す.この約4ヶ月の期間,降 雨による地下水の小刻みな変動が見られる.また、全体的に地下水位は上昇傾向にある.これは、地下水位 の季節変動の影響であると考えられる.これらの傾向については、後で降雨データおよび地下水位の季節変 動を含む長期観測結果を示して詳しく分析する.

図-9 および図-10 に、それぞれ飽和度および間隙水圧の変化を示す.常時において飽和度は 30%程度であるが、降雨時には飽和度が上昇し、大雨のときには 90%近くまで上昇する事がわかる.また、2つの水分計の変動傾向はほぼ同じである.

一方,サクションは降雨時に一時的に低下し、しばらく時間が経つと元の値に戻る.間隙水圧計①と間隙 水圧計②では明らかに変動傾向が異なる.間隙水圧計①は、飽和度の上昇・下降に応じて負圧を維持しなが ら下降・上昇している.ところが、間隙水圧計②は、サクションの値そのものが小さく、一定時間正圧を示 している.これは、間隙水圧計②を設置した地点が元々の埋立て地盤ではなく、近年においてポンプ場の配 管工事に伴い、相対的に保水性の小さい砂質土を用いて埋め戻したためであると考えられる.よって、埋立 て地盤の挙動を捉えた間隙水圧計①の方がより現実的な変動傾向を示しているものと推定される.



(2) 0 公園

図-11 に、O 公園における地下水の変動記録を示す.図-12 および図-13 には、それぞれ飽和度および間隙水圧の変化を示す.本サイトでは、4ヶ月間で地下水位が 50cm 程度徐々に上昇している.これに伴い計器の設置位置 GL-1.5m は、3 月の時点で飽和度 100%近くになり、間隙水圧がプラス(つまり、サクションの喪失)に移行している.このため、おそらく地下水面下にあったと考えられる.なお、地下水位の上昇は、D ポンプ場と同様に地下水位の季節変動による影響と考えられる.

5. 不飽和浸透パラメータの同定

水分保持曲線と不飽和透水係数は,不飽和土中の水分移動特性に影響を及ぼす重要な物性値である.とり わけ,Richards 式³⁾を用いて浸透流解析を行う場合,不飽和土中の水分移動を推定するためには,水分保持 曲線と不飽和透水係数の水分移動特性を適切な水分移動特性モデル(hydraulic property model)で与える必要が ある.

体積含水率θとマトリックポテンシャルψmの関係を表す水分保持曲線は、これまでに様々なモデルが提案 されているが、本論文では Brooks & Corey(1964)⁴⁾が提案したモデル化手法を採用した.

一般的には,水分保持曲線の実測値に対してモデルを適合してモデルパラメーターと同定する ^{5,6}.本研究の3次元広域地下水流動解析には,有限差分モデルである GMS-MODFLOW を使用した.解析における水分 特性曲線は,現場注水試験の結果から Brooks & Corey(1964)の式⁴によりフィッティングして式(2)を得た(図-14 参照).

$$S_{e} = \frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}} = \left(\frac{\psi_{me}}{\psi_{m}}\right)^{\lambda} = \frac{\theta - 9.778}{31.56 - 9.778} = \left(\frac{0.176}{\psi_{m}}\right)^{0.484}$$
(2)

ここで、 $S_e:$ 有効飽和度、heta:体積含水率、heta:飽和体積含水率、heta:残留体積含水率、 $\psi_{me}:$ 空気侵入値、 $\lambda:$

無次元パラメータ(間隙径分布指標)である.

$$k = k_{ws} S_e^{\xi + 1 + 2/\lambda}$$

= $k_{ws} (\psi_{me} / \psi_m)^{2 + (\xi + 1)\lambda}$
= $k_{ws} (\psi_{me} / \psi_m)^{2 + (2 + 1) \times 0.484}$
= $k_{ws} (\psi_{me} / \psi_m)^{\varepsilon} = k_{ws} (\psi_{me} / \psi_m)^{3.452}$ (3)

ここで、 ψ_m :マトリックスポテンシャル、k:不飽和透水係数、 k_{ws} :飽和透水係数、 ε : Brooks-Corey 指数、 ξ : 無次元のパラメータ(=2)である.

また,式(2)を用いて式(3)のように Brooks-Corey 指数(ε =3.452)が求められた.ここで式(2)は,現場注水試験から求めた水分特性曲線を図-14 に示すように fitting して求めた.この Brooks-Corey 指数(ε =3.452)を表 1 に示すように不飽和浸透特性パラメータとして GMS-MODFLOW に入力して 3 次元広域地下水流動解析を行った.

ちなみに、本研究では、澁谷ら¹⁾がボーリングデータと GIS データに基づいて構築した3次元地盤モデル を用いた.また,現場注水試験の結果から得られた不飽和浸透特性以外は,同様な解析条件(浸透パラメータ, 境界条件,初期条件,降雨条件等)で浸透流解析を実施した.



図-14 水分特性曲線の同定方法(B-C モデル)(D ポンプ場のデータ)

衣 「 ¹ 昭相後近待住八) 「 50 見衣	
指標	数值
Brooks-Corey 指数	3.452
飽和含水比(m³/m³)	0.3156
初期含水比(m ³ /m ³)	0.2
浸透率 (m/d)	0.0004
蒸発散要求率 (m/d)	0.0001
蒸発散収束高さ (m)	1.0
蒸発散収束含水比(m ³ /m ³)	0.1002

表-1 不飽和浸透特性パラメータの一覧表

6. 実績データと解析結果の比較によるモデルの検証

解析モデルの妥当性を検証するため, A市内の計 27箇所における既往の地下水位観測データと, 解析による地下水位の推定値との比較検討を行った.



図-15 に既往資料による、約7年間の長期に亘る地下水位観測データの一例を示す.

本研究では、各観測地点データの最大値と、解析により算定した降雨直後の地下水位との比較検討を行った.

図-16(a)は、不飽和浸透特性パラメータを適用せずに解析を実施した場合の推定値と実際の観測データとの 比較結果である.図-16(a)より、観測地点07,14,16,18を除く殆どの点で解析値が実測値を上回っている ことが分かる.また、一部の観測地点(観測地点03,38,41,42)で12~14m程度地下水位を過大に評価して いることが分かる.しかし、上記以外の地点では、実測値と解析値の差が最大6.52m、最小0.21m、平均2.05m となっており(図-17参照)、誤差の傾向がほぼ同じであると言える(図-16(a)参照).よって、定性的には解 析対象領域の地下水位に対する挙動の傾向を再現することができたものと考えられる.

一方,図-16(b)は、今回現場注水試験結果から求めた不飽和浸透特性パラメータを適用した解析による推定値と実際の観測データの比較である.隣接する市との境界部に位置している地点(05,12,16,18)を除外すると図-16(a)と比べて実測値と解析値の差が少ない.これを確かめるために、現場注水試験結果の未適用解析結果および適用解析結果の実測データとの差分を求めた(図-17).この図から、不飽和浸透特性を考慮した解析では、概ね全42測定地点における過去の地下水位の最大値の実測値と推定値がより近くなっていることが分かる.この比較検討により、表層地盤の不飽和浸透特性を考慮することにより、地下水変動を定量的により高い精度で推定できることが明らかとなった.なお、地点(05,12,16,18)等の隣接する市との境界付近の市内北西部においては、表層地盤が深く分布しており、この地域において解析の推定値と実測値の差が相対的に大きくなっている(図-18参照).ここで、地点No.38,No.41,No.42での地下水位の解析推定値が実測値より大きくなっている理由として、当該地域は河川の下を通る幹線道路沿いに位置し、以前の道路工事において何らかの地下水対策工が施工されて地下水の流動に局所的に影響を与えたためと推察される.

図-19 に降雨終了直後における,初期の地下水位(H₀)に対する地下水位(H)の変化量△H(△H=H-H₀)のコンター図を示している.図-19から,検討した降雨により地下水位は最大で約3.0m 上昇し,特に東部の 平坦部および山地部の2地域において,△Hが相対的に大きいことが分かる.また,東部平坦部に関しては 過去に浸水履歴を有しており,降雨によって地下水位が変化しやすい地域であると推測される.

図-19 のような解析結果に基づき、降雨による時間経過に伴う地下水位の上昇量および消散速度に着目す

ると澁谷ら¹⁾が作成した浸透適地・不適地区分図の精度を改善することが期待できる.



7. まとめ

関西地方に実在するA市全域を対象として,不飽和状態にある表層部の不飽和浸透特性を現場注水試験により求めた.また,この特性を反映した3次元地盤モデルを用いて広域地下水流動解析を実施し,市内 27 箇所に点在する既往の地下水位観測の最大値と解析値を比較検討した.さらに,不飽和浸透特性を考慮した 場合の推定精度について議論した.

得られた結論は以下の通りである.

- 現場注水試験により、地下水面より上部の不飽和状態にある表層部に雨水が浸透した場合の保水性を評価した.表層の不飽和地盤内で土壌水分および間隙水圧の両方を測定し、表層部の水分特性曲線を求め、これを解析モデルに適切に反映した.
- ・ ①で得られた不飽和状態にある表層地盤の保水性を考慮し、それ以外は澁谷ら¹⁾と全く同じ条件で3次元地下水流動解析を実施した結果、解析結果は市内27箇所に点在する既往の地下水位観測の最大値とよく一致した.一方、澁谷ら¹⁾が求めた地下水変動推定結果は、実測値を過大評価していることが分かった.地下水変動推定精度の向上のためには、表層部の不飽和浸透特性を正しく評価し、解析に適切に反映することの重要性が確認できた.
- 市内の適地および不適地の2箇所において長期に亘る地下水変動ならびに表層部の水分および間隙水 圧の変化を観測した.常時において飽和度は30%程度であるが、降雨時には飽和度が上昇し、大雨のと きには90~100%近くまで上昇する事が分かった.

謝辞:本研究の遂行において,都市安全研究センターからの研究助成金を受けた.また,(株)昭和設計から ボーリングデータの提供など多くのご協力を得た.ここに記して感謝の意を示す.

参考文献

- 1) 澁谷啓,許晋碩,白濟民,古宮雅之:「都市型洪水災害」軽減のための三次元地形・地盤モデルの構築と その活用事例,基礎工総合土木研究所, Vol.41, No.9, pp.98-102, 2013.
- 2) 白濟民,許晋碩,古宮雅之,澁谷啓:雨水浸透適地マップ作成のための3次元地形・地盤モデルの構築と 広域地下水流動解析の事例, Kansai Geo-Symposium 2013-地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシン

ポジウム-論文集,公益社団法人地盤工学会関西支部地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.5-10, 2013.

- Richards, L.A.: Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums, Physics, 1, pp.318-333, 1931.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T.: Hydraulic Properties of Porous Media, Hydro 1. Pap. No.3, Colorado State Univ., Fort Collins, 1964.
- 5) 坂井勝, 取出伸夫:水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動特性モデル, 土壌の物理性111 号, 61-73, 2009
- 6) (社)地盤工学会:不飽和地盤の挙動と評価, 2004.

著者:1) 澁谷 啓,神戸大学大学院工学研究科,教授;2) 白 濟民,神戸大学大学院工学研究科,研究員; 3) 橋本 真基,神戸大学大学院工学研究科,学生;4) 齋藤 雅彦,神戸大学大学院工学研究科,助教;5) 古宮 雅之,ショーボンド建設(元 神戸大学大学院工学研究科,学生);6) 片岡 沙都紀,神戸大学大学院工 学研究科,助教

GROUND WATER FLOW ANALYSIS WITH 3D GROUND SURFACE MODEL FOR MAPPING OUT INSTALLATION OF RAINWATER INFILTRATION FACILITIES

Satoru Shibuya Je-Min Baek Masaki Hashimoto Masahiko Saito Masayuki Furumiya Satsuki Kataoka

Abstract

Recently in urban cities in Japan, water hazards called generally as 'urban flooding' have been frequent when the urban cities were attacked by heavy rainfall. In cope with such urban-type flooding, infiltration facilities are often introduced, with which the seepage of rainwater into ground is promoted. Shibuya et al. (2013) has conducted comprehensive research, in which the 3D ground surface model was first established based on the existing borehole data of City "A", and second, the areas suitable for the installment of infiltration facilities were selected based on the 3D seepage analysis. However, the water-retention characteristics for a part of unsaturated surface soil above the ground water level were not considered in their early analysis. In this study, in order to improve the reliability of predicting the change in ground water level, the water-retention characteristics were directly measured by in-situ water infiltration test. The 3D seepage flow analysis by considering these characteristics was again carried out. It was manifested that the accuracy and reliability of predicting the fluctuation of ground water level with the unsaturated soil characteristics were greatly enhanced when compared to the filed monitoring data.

©2015 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.