



## 雨水浸透施設の適地マップ作成のための地盤調査・ 解析法

瀧谷, 啓  
白, 濟民  
齋藤, 雅彦

---

**(Citation)**

土木学会論文集C（地盤工学）, 71(4):380-394

**(Issue Date)**

2015

**(Resource Type)**

journal article

**(Version)**

Version of Record

**(Rights)**

©2015 公益社団法人 土木学会

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003318>



# 雨水浸透施設の適地マップ作成のための地盤調査・解析法

澁谷 啓<sup>1</sup>・白 濟民<sup>2</sup>・齋藤 雅彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: sshibuya@kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学大学院学術研究員 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: baek@people.kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 神戸大学大学院助教 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: msaito@kobe-u.ac.jp

近年, 集中豪雨による都市型水害の緩和策の一つに, 公共の道路等に沿って雨水浸透施設を設置し, 地盤内への雨水浸透を促進する方法があるが, 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. 本論文では, 実在する都市をモデルケースとして, 雨水浸透施設の設置場所選定のために, [1]3次元地形・地盤モデルの構築, [2]表層地盤の不飽和浸透特性の把握, [3]広域地下水流动解析の実施と結果の定量的評価, [4]雨水浸透適地マップの作成, という一連の流れに沿った地盤調査・解析手法を提案している. 広域地下水流动解析により, 広域に亘る地下水位の変動をうまく表現できること, 雨水浸透適地マップに基づいて浸透施設を計画的に配置することにより, 地盤災害のリスク低減が可能となること, 等が分かった.

**Key Words :** urban flooding, seepage analysis, rainwater infiltration map, unsaturated soil hydraulic properties, in-situ water infiltration test

## 1. はじめに

近年, 地球温暖化やこれに伴うヒートアイランド現象などが遠因とされる局所的集中豪雨が頻発しており, その発生件数も年々増加傾向にある. また, 都市化の進行により従来の保水地域の開発, 舗装面積の増加, コンクリート建物の密集化, 等が進み, 都市域の不透水面積の増加により浸透能の低下を招いている. このような人為的および自然的要因が重なり, 都市部において集中豪雨時に下水道や中小河川に雨水が急速に流れ込み, 排水処理機能を超過した場合に内水氾濫による浸水被害が生じる「都市型水害」と呼ばれる災害が頻発している.

名古屋では, 平成12年に最大時間雨量93mm/hrの豪雨により浸水戸数約18,000戸の甚大な被害が発生し, 福岡では平成11年に最大77mm/hr, 続いて平成15年には最大99mm/hrの豪雨に立て続けに見舞われて博多駅や地下街が浸水し, 東京では平成17年に最大112mm/hrの豪雨により約3700戸を超える浸水被害が発生し, 都市機能に大きなダメージを受けた<sup>1)</sup>.

一方, 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法として, 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(雨水浸透法), 雨水貯留槽の設置や既存の公園などを豪雨時に貯留池として用いることで雨水を貯留する方法(雨水貯留法), 土地利用の計画的管理などが挙げられる. とりわけ雨水浸透法は浸透施設を設置した地盤近辺への雨水集水が円滑となることが重要である.

豪雨などにより過剰に地下水位が上昇した場合, 常時の地下水位が高い地域や透水係数が低い地域などは流出抑制効果が期待できないため, 事前に浸透設置の設置に適した地域(適地)とそうでない地域(不適地)を区別する必要がある. このように, 事前に十分な検討を行い適地・不適地の区別を適切に行えば, 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ほか, 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.

現在, 浸透施設設置のための浸透評価手法としては,

地盤調査や地形データ、土地利用データなどから得られる情報を元に評価する方法<sup>2)</sup>が主流である。しかし、この手法では降雨による地下水位変動が評価できず、浸透施設を設置した地点に雨水が集中して流入した際に、地下水位変動に及ぼす影響を考慮していない。したがって、不適地の評価はある程度妥当であると考えられるが、適地の評価に関しては安全上さらなる議論の余地がある。そこで、3次元地盤モデルを構築して地下水流动解析を行い、降雨に対する地下水位変動を推定することで浸透評価を行うのが望ましいが、市街地のような広い地域を対象にした研究事例は非常に少ない。

一方で、2011年東北地方太平洋沖地震に伴って発生した液状化被害や地震動被害を一つの契機として、地盤に関する情報を公的財産と位置づけ、それらの共有化と利活用を促進するための動きが活発化しており<sup>3)</sup>、国や自治体の地盤情報（ボーリングデータ）の公開と、それを用いた電子地盤図の作成や地盤の3次元モデル化、地震応答解析への活用といった二次利用が進められている。

このような背景から、本論文では、雨水浸透施設設置場所の選定の合理化のため、兵庫県内に実在する都市（以下、A市）の全域を対象として、[1] ボーリングデータを用いた3次元地形・地盤モデルの構築、[2] 現場注水試験による表層地盤の不飽和浸透特性の把握、[3] 広域地下水流动解析の実施と結果の評価、[4] 雨水浸透適地マップの作成、という一連の流れに沿った地盤調査・解析手法を新たに提案し、その有用性および一般性について議論している。

## 2. 解析対象地の概要

### (1) 地形概要

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<sup>4)</sup>。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。また、2つの河川が市域を流れており、いずれも北から南方向へと流下する。図-1に国土国交省国土地理院が公開する基盤地図情報（数値標高モデル）5mメッシュ<sup>4)</sup>を用いて作成したA市の地形の外観を示す。

### (2) 地質・土質概要

A市の地質は、背山を構成している固い岩盤と山麓から海岸へかけての台地や低地を構成している未固結の地層とからできている。岩盤は山地を作っているほか、平野部の地層の基盤となって深く広く横たわっている。台地や低地の地層は、かつての湖底や浅海底に堆積した土砂が陸上に現れたものや、かつての河原であった礫層な

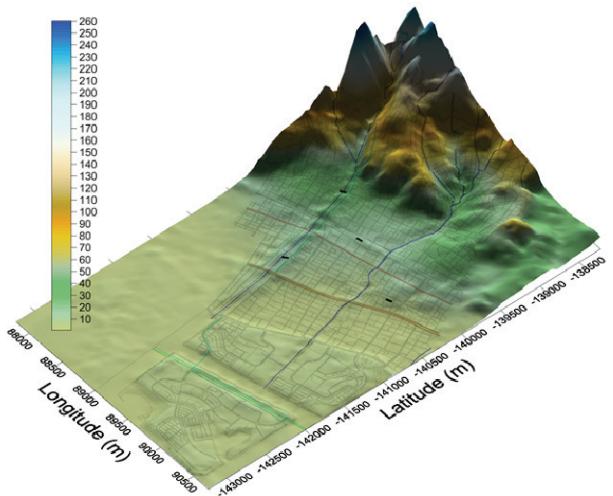


図-1 A市の地形概要（解析対象領域全域）

どであり、基盤岩を薄く覆っている関係にある。A市地域に出ている基盤岩は、古生層と花崗岩であり、被覆層は、大阪層群、段丘礫層と呼ばれる洪積層および沖積層である。

市街地の低地の地下には、未固結堆積物の軟弱な粘性土層、ゆるい砂、砂礫層からなる沖積層が分布する。この沖積層の地下には上部洪積層、大阪層群が分布している。上部洪積層は、海成の粘土、砂層と淡水生の砂礫、砂、粘土層が重なっている。大阪層群は、堆積年代が20万年前より古く、地殻変動と平均海水準の変動を反映して、海成の粘土、砂層と淡水生の砂礫、砂、粘土層が互層を形成している。

一方、基盤層では、中生代の貫入生成による花崗岩類が分布している。山地部の大部分は六甲花崗岩であるが、川以西の山地の南縁には別種の布引花崗岩が分布する。花崗岩は風化が進みやすく、深部風化の結果、まさ土層が形成されている。とりわけA市の山地部では、山稜地域周辺で深部風化が観られる。

### (3) 解析対象領域

本研究では、過去にA市で実施された約432本のボーリングデータを利用して地盤モデルを作成した。図-2にボーリング位置図を示す。図-2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。本研究では、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の範囲を解析対象領域とした。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. 数値解析プログラムの概要

本研究では, [1] Hydro GeoAnalyst (以下, HGA) , [2] Visual MODFLOW (以下, VMOD) , [3] Groundwater Modeling System-MODFLOW (以下, GMS) を解析プログラムとして使用した。

まず, [1] HGAは, SWS (Schlumberger Water Services) 社開発の地盤情報管理ソフトウェアであり, 入力したボーリング柱状図や現位置情報をデータベース化できるほか, 入力した柱状図の3次元表示や2次元地層断面図の作成が可能である<sup>9</sup>. 本研究ではボーリングデータの視覚化や3次元地盤モデル構築のための補助ツールとしてHGAを使用した。

[2] VMODと[3] GMSは, それぞれSWS (Schlumberger Water Services) 社とAquaveo, LLC社開発の地下水解析ソフトウェアである. VMODとGMSは, アメリカ地質調査所 (U.S.Geological Survey : USGS) で開発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。

MODFLOW は, つぎに示す3次元地下水水収支式(式(1))を基礎方程式として, これを有限差分法により解く.

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

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(正值のとき注水) ( $T^{-1}$ ) ,  $S_s$  : 比貯留係数 ( $L^{-1}$ ) ,  $t$  : 時間 (T) である.

本論文では, 表層地盤の不飽和浸透特性を考慮しない場合 (ケース1) の広域地下水水流動解析にはVMODを, 不飽和浸透特性を考慮した場合 (ケース2) の同様な解析にはGMSを使用した. その理由は, GMSと比べてVMODは, 3次元地形・地盤モデルを作成するにあたって, HGAやSurfer (Golden Software 社開発の等高線・3D地表マップ作成プログラム) とのデータ互換性に優れるが, 現場注水試験結果から得られた不飽和浸透特性を考慮する解析モジュールが組み込まれていないためである.

一方, 不飽和浸透流の基礎方程式は, 以下のリチャーズの式 (式(2)) で表すことができる.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial \psi_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \left( \frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right] = C \frac{\partial \psi_m}{\partial t} \quad (2)$$

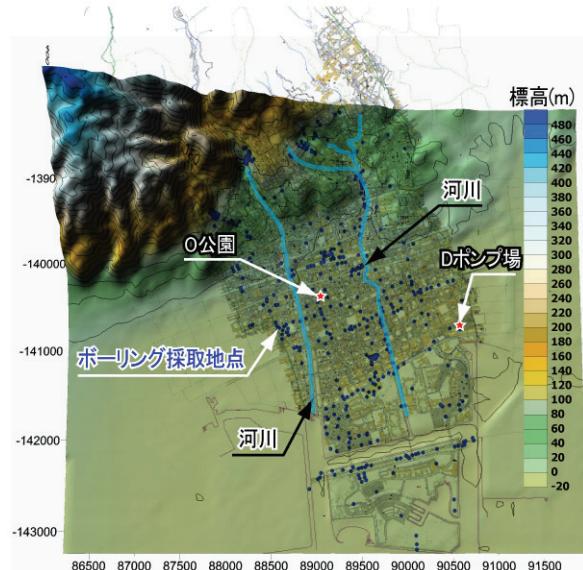


図-2 ボーリングおよび河川の位置図

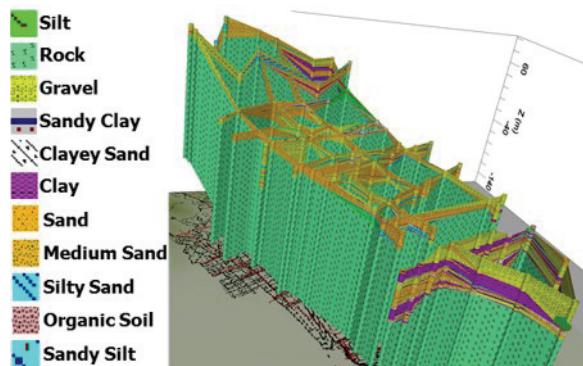


図-3 3次元地層断面図

ここに,  $\psi_m$  : 圧力水頭,  $C$  : 比水分容量 ( $=d\theta/d\psi$ ) ,  $\theta$  : 体積含水率,  $k$  : 不飽和透水係数である.

### 4. 3次元地形・地盤融合モデルの構築

都市部における水害防災のデータとして利用されている5mメッシュ数値標高モデルを用い, 3次元表層モデルを構築した. 解析対象エリアに該当する数値標高座標データをSurferに入力し, 格子状の標高データである数値標高モデルファイルを出力した. その後, 出力されたファイルを用いて2次元および3次元イメージをそれぞれ生成し, 地形を確認した. さらに, これに解析対象エリアの市街地図とボーリング位置 (図中の青丸) を重ね合わせ, これらの位置関係を確認した (図-2参照).

表-1 各地層に設定した透水係数

Layer	地層色	地層区分	透水係数	Layer	地層色	地層区分	透水係数
			$k_{xyz}$ [m/s]				$k_{xyz}$ [m/s]
1		表層土(中粒砂)	$7.2 \times 10^{-5}$	10	■	粘土質砂	$2.8 \times 10^{-5}$
2		礫	$2.0 \times 10^{-4}$	11	■	粘土	$1.0 \times 10^{-8}$
3	■	砂質シルト	$1.0 \times 10^{-6}$	12	■	砂	$2.8 \times 10^{-5}$
4		砂質粘土	$1.0 \times 10^{-8}$	13	■	砂質粘土	$1.0 \times 10^{-8}$
5	■	中粒砂	$2.8 \times 10^{-5}$	14	■	粘土質砂	$2.8 \times 10^{-5}$
6	■	シルト	$1.0 \times 10^{-6}$	15	■	粘土	$1.0 \times 10^{-8}$
7	■	粘土	$1.0 \times 10^{-8}$	16	■	粘土質砂	$2.8 \times 10^{-5}$
8		シルト質砂	$2.8 \times 10^{-5}$	17	■	粘土	$1.0 \times 10^{-8}$
9		粘土	$1.0 \times 10^{-8}$				

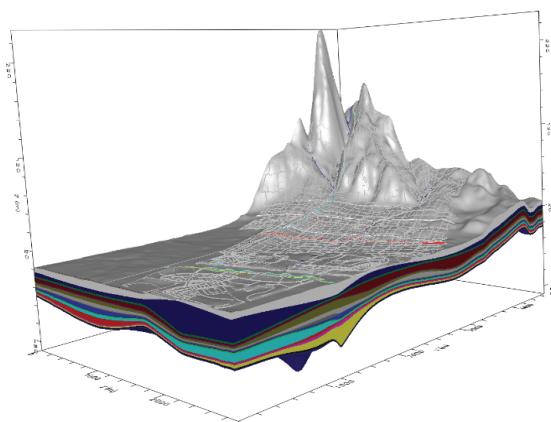


図4 3次元地形・地盤モデル

表2 設定した浸透パラメータ

比貯留率 $S_s$ [1/m]	比産出率 $S_y$	有効間隙率 $P_{eff}$	全間隙率 $P_{tot}$
$1.0 \times 10^{-5}$	0.2	0.15	0.3

3次元地盤モデルを構築するにあたって、解析エリアの地質構造を把握することが不可欠である。そこで、HGAを用いて1次元ボーリングデータを2次元・3次元的に視覚化した。具体的な手順として、まず、HGAに全432本のボーリング情報（土質分類、層厚、地下水位など）を入力する。その際、ボーリング柱状図に記載されている通りに土質分類を入力すると膨大な数の土質分類になるため、土質分類を簡略化した（表-1）。

まず、入力したボーリングデータの中から直線状に並ぶように任意のボーリングデータを選択し、その線内の区間を補間することで2次元断面図を得た。今回の解析では、同じ地層を直線で結ぶ線形補間にて断面図を作成している。線形補間を選択した理由は、[1] 解析対象領域とした市街地内では断層がごく一部の領域でしか見られず、ある程度地層の連続性が良いものと推測されるこ

と、[2] モデル化に要する時間を削減するため、の2つである。このとき、同一の断面内に含まれるボーリングデータのうち、明らかに近辺のボーリングデータと地層の構成が異なるものについてはデータから除外した。直線を複数本設定し、同様の作業を行い、これらを組み合わせることで3次元断面図を作成した（図-3）。なお、ボーリングデータが豊富な軌道敷や国道などの重要構造物に沿うように直線を設定した。このようにして得られた2次元・3次元断面図を俯瞰し、解析エリア全域の3次元地質構造を判読した。

つぎに、ボーリング柱状図からそれぞれ地層境界の標高を読み取り、地層と地層の境界面を作成した。これをボーリング最深部まで行い、2つの境界面で囲まれた領域を地層と認識させ、その領域に透水係数などのパラメータを設定することで地盤のモデル化を行った。得られた全17層から成る3次元地盤モデルを図-4に示し、各層の土質分類を表-1に示している。

## 5. 広域地下水流动解析～ケース1：表層地盤の不飽和浸透特性を考慮しない場合

本研究では、表層地盤の不飽和浸透特性を考慮しない場合と、考慮する場合の2ケースで広域地下水流动解析を行った。その理由は、表層地盤の不飽和浸透特性の影響を定量的に評価するためである。一方、不飽和浸透特性の考慮しない汎用解析プログラムを用いた場合の解析結果の適用性を吟味する目的もある。

まず、表層地盤の不飽和浸透特性を考慮しない場合に対する広域地下水流动解析の解析条件、解析結果および考察を以下に述べる。

### (1) 解析条件

#### a) モデルグリッドの設定

水平方向は各節点が25m間隔、鉛直方向は1つの地層

で最小厚のグリッドが0.1mとなるように設定した。VOMとGMSの場合、多彩なグリッドオプションがあり、グリッドサイズの違いに関係なく、モデル間の水頭差を計算することができる。今回の解析では、非均等グリッド(変形グリッド)のタイプでモデルグリッドを設定した。

### b) 浸透パラメータ

地下水流动解析には、流动モデルにおいて個々のグリッドセルに対して透水係数や比貯留係数などの浸透パラメータが必要となる。これらのパラメータは、原位置試験や室内試験の結果から得られた値を用いるのが望ましいが、今回の場合、透水係数に関してはごく一部のボーリングデータに記録があるので、透水係数以外の浸透パラメータに関する情報は得られなかった。また、解析対象領域が広大であることや、山から海まで様々な地形が存在するため、数点の局地的なデータで浸透パラメータを決めるのは現実的でない。そこで本解析では、文献調査により得られる土質分類ごとの一般的な透水係数<sup>6,7)</sup>を設定した(表-1参照)。

また、[1] 同一の層の透水係数は一様、[2] 飽和度による透水俓数の変化を考慮しない、[3] 透水俓数の異方性はない、の3つを仮定した。また、透水俓数以外の浸透パラメータは、現場観測データが得られなかったため、解析対象領域全域でそれぞれ一様であると仮定し、全ての層に同一の値を設定した(表-2参照)。

### c) 境界条件

本検討では境界条件として、定水頭境界条件、不透水境界条件および河川境界条件を設定した。

定水頭境界条件は、解析対象領域の南北端である海の領域および山地部に設定した。海の領域では全て海平面を基準として標高KP+3mで一定とし、山地部ではボーリングデータをもとに、海拔高度KP+20m～+80m程度の範囲で地形に沿うように定水頭を与えた。

不透水境界条件は解析対象領域の東西端および地盤モデルの最下面に設定した。東西端を不透水としたのは、東西方向の浸透流と比較して北から南への浸透流が卓越すると考えたためである。

図-5は、河川境界条件の概念である。河川境界条件は、地下水流动に与える地表水域の影響を表現するために用いられる。すなわち、河川、流路、湖などの地表水域は、その底面と地下水系との間の動水勾配によって、地下水系への水の供給源や、地下水系からの流出ゾーンとしての機能を有する。河川におけるこの現象を解析に反映させ、河川境界条件とした。

河川境界条件の設定には、河川水位、河床標高、河床のコンダクタンス値が必要となる。コンダクタンス値は、浸透層(河床堆積物)によって生じる地表水域と地下水間の流动の抵抗値を示す数値パラメータを指し、以下の

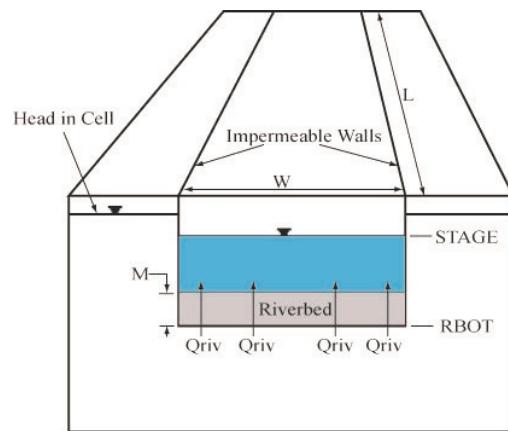


図-5 河川境界条件の概念<sup>8)</sup>

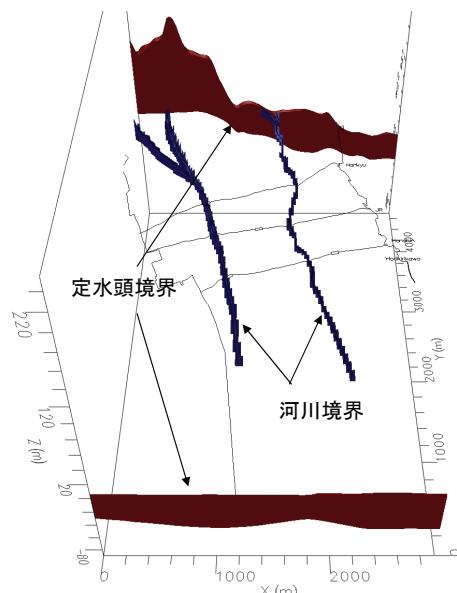


図-6 境界条件の設定

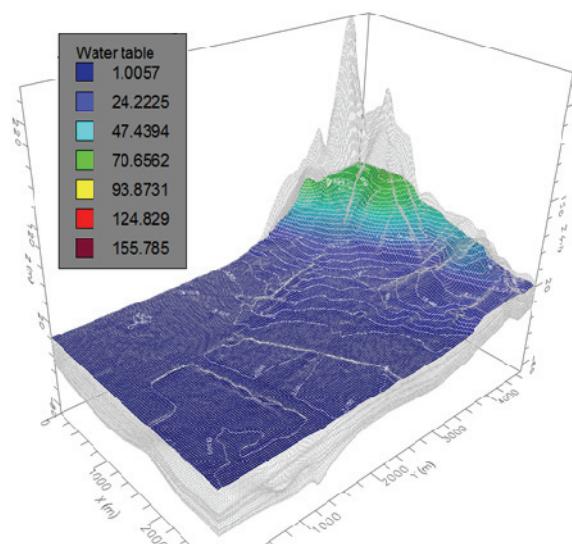


図-7 初期条件(常時の地下水位)

式(3)で定義した<sup>8)</sup>.

$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M} \quad (3)$$

ここで,  $C$ : コンダクタンス値 ( $L^2 T^{-1}$ ),  $K$ : 河床堆積物の鉛直透水係数 ( $L T^{-1}$ ),  $L$ : 河川の流路延長 ( $L$ ),  $W$ : 川幅 ( $L$ ),  $M$ : 河床層厚 ( $L$ ) である.

本解析では, A市の主要な二つの河川 (AJ川, MJ川) に対してこの条件を設定した. 河川水位は2013年2月17日から19日までの期間で, 1時間毎に測定された水位の平均値としてAJ川で0.16m, MJ川で0.06mを入力した. 河床標高, 河床層厚はデータが得られなかつたため, 前者は地表面から深さ1mで一定, 後者は0.5mで一定であると仮定した. 河床堆積物の鉛直透水係数は第1層の透水係数を採用し, 河川の流路延長はセルの通過延長を, 川幅はGISデータを用いてそれぞれ算出した. また, コンダクタンス値はAJ川およびMJ川の縦断方向における6,000~12,000 m<sup>2</sup>/day程度の範囲で設定した.

図-6に境界条件の設定状況を示す.

#### d) 初期条件

本解析では, 解析対象領域の常時の地下水位を初期条件として地下水流动解析を実施した. この設定は, 複数の継続的な地下水位計測データをもとに行うのが望ましいが, 継続的な地下水位の変動記録が得られなかつたため, 1年間集中豪雨を与えた後, 無降雨状態を継続させ, 水位変動が収束した時点の地下水位を常時の地下水位として扱うものとした. その理由は, ボーリングデータからも地下水位の情報が得られるが, 地下水位の情報が明記されているボーリングデータは解析領域の南部で局所的に分布しており, 長期的な地下水位の変動を計測したものではなく, ある時点での地下水位の記録であるため, ボーリングデータの水位を初期値として設定したとしても, 最終的には解析結果から得られた定常状態の地下水位に収束するためである.

また, 本解析では降雨による地下水位の変動傾向に着目して浸透評価を行うことから, 点ではなく面的に常時の地下水位の状態を把握する必要がある. これらの点からも, 上述の手法が適当であると判断した. 上述の手法により得られた初期の地下水位を図-7に示す.

#### e) 降雨条件

降雨条件として, 2002年から2011年までの10年間のA市での年間降水量の平均値1239.4 mm/year を解析対象領域全域に均等に1年間降らせた.

VMODでは, それぞれの表層のメッシュに対して涵養量を設定することで降雨現象を表現している. すなわち, 想定する降雨に対して「降雨浸透の結果, 地下水として蓄えられる水分量」をそれぞれの表層メッシュに与え,

表-3 土地利用区分毎の浸透率

土地利用区分	浸透率
道路用地	0.15
河川・湖沼等	0
海	
田	
畑・その他農地	
造成中地	0.80
空地	
公園・録地等	0.85
山林・荒地等	0.70
工業用地	0.38
一般低層住宅地	0.52
密集低層住宅地	0.38
中高層住宅地	0.38
商業・業務地	0.24
その他の公共公益施設	0.38

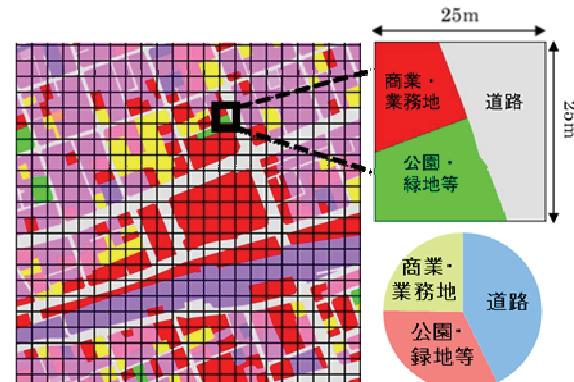


図-8 メッシュ毎の浸透率の算定例

表-4 メッシュ毎の浸透率の算定例 (図-8に対応)

土地利用区分	浸透率 [1]	面積 [2]	面積比率 [3]	浸透率 [1]×[3]
道路	0.15	267	0.43	0.06
公園・録地等	0.85	203	0.32	0.27
商業・業務地		155		0.06
対象メッシュの浸透率				0.39

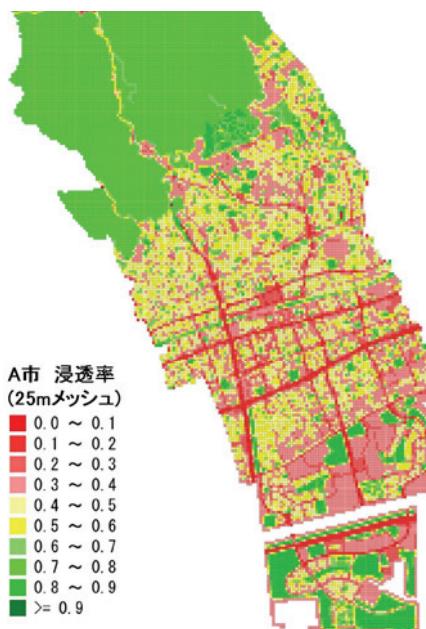


図9 メッシュ毎の濾透率分布

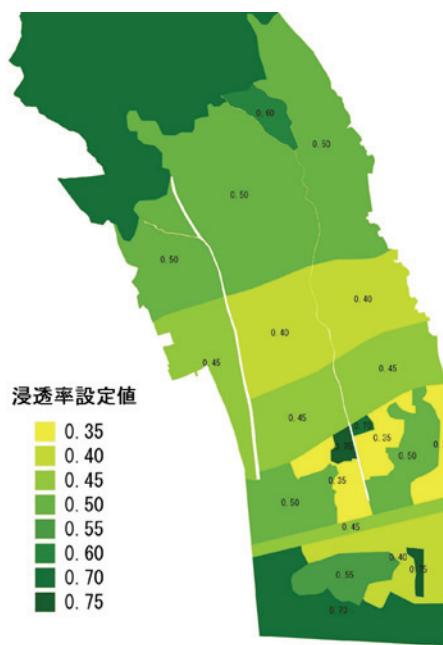


図10 ゾーン毎の濾透率分布

その水分量に対応した地下水位上昇量を与えることで降雨現象を表現している。今回の場合、涵養量に関する現場測定データが得られなかったため、下水道施設計画・設計指針と解説<sup>9</sup>で定められている流出係数を用いて涵養量を推定した。ここで、蒸発散などを無視した場合、「1 - (流出係数)」により、降雨量に対する地中へ浸透する雨水の割合が得られる。本解析ではこれを濾透率と定義し、さらに、地中へ浸透した雨水が中間流出することなく全て鉛直浸透により地下水位に到達すると仮定した。このときの涵養量は、降雨量に濾透率を乗じることで得られる。

各メッシュに対する濾透率の設定手順を以下に示す。

[1] 文献<sup>9</sup>より得られる土地利用区分毎の流出係数の標準値をもとに、土地利用区分毎の濾透率を算定した。標準値に幅がある場合は中央値を用いるものとした。例えば、道路の流出係数の標準値は0.8 ~ 0.9となっているが、この場合0.85を採用している。住宅地については、屋根と間地のみで構成されると仮定して、建ぺい率を用いて以下の式(4)を用いて算定した。

$$\begin{aligned} \text{住宅地の濾透率} &= (\text{屋根の濾透率} \times \text{建ぺい率}) \\ &+ (\text{間地の濾透率} \times (1 - \text{建ぺい率})) \quad (4) \end{aligned}$$

算定した土地利用区分毎の濾透率を表-3に示す。これを土地利用区分のGISデータに入力し、解析対象領域全てに濾透率を付与した。なお、土地利用データは、数値地図5000(土地利用)近畿圏2008年<sup>24</sup>を用いた。

[2] 解析モデルのメッシュ毎に濾透率を設定するためには、[1]で作成した土地利用区分毎に濾透率が入力され

たGISデータを25m四方のメッシュに分割し、メッシュ毎に濾透率を算定した。各メッシュに対する濾透率の算定は、メッシュ内に含まれる土地利用区分の面積比率による重み付け計算により行った。図8、表4にメッシュ毎の濾透率算定例を、図9にメッシュ毎の濾透率の算定結果を示す。

[3] 解析時間の短縮のため、[2]で作成したデータを簡易化した。すなわち、図9において、河川などの水面や道路といった濾透率が大きく変化する箇所で解析領域を複数のゾーンに区切り、各ゾーン毎に代表的な濾透率を設定した。図10にゾーン毎の濾透率分布を示す。本解析ではこれを用いて、同一のゾーンに含まれるメッシュに同一の涵養条件を入力することで降雨条件を設定した。

## (2) 解析結果および考察

図-11は、降雨終了直後、1ヶ月後、2ヶ月後、4ヶ月後、6ヶ月後の各段階における初期の地下水位( $H_0$ )に対する地下水位( $H$ )の変化量 $\Delta H$  ( $\Delta H = H - H_0$ )のコンター図である。図-11(a)から、地下水位は最大で約3.6m上昇し、特に東部の平坦部および西の山地部の2地域において $\Delta H$ 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(図-12参照)、降雨時に地下水位が上昇しやすい地域である。

降雨終了後、時間経過とともに地下水位が常時の状態に復元していく過程に着目すると、降雨終了後1ヶ月経過した段階で地下水位の変化量の最大値が1.25m程度、4ヶ月経過した段階で0.5m程度以下となっていることが分かる。このことから、降雨終了後1ヶ月間で急速に地下水位が低下し、その後、時間の経過とともに地下水位

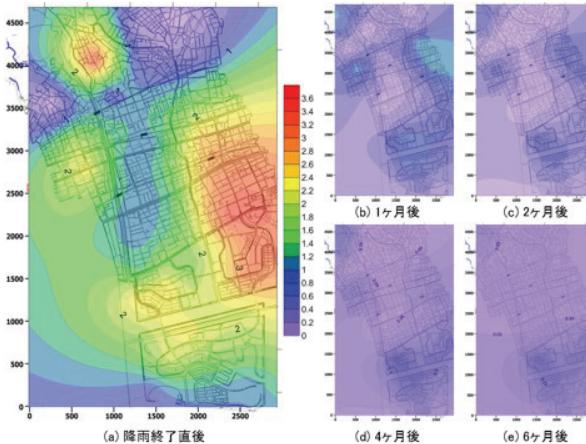
図-11 降雨による地下水位変動量の経時変化( $\Delta H$ )

図-12 浸水履歴を有する地域

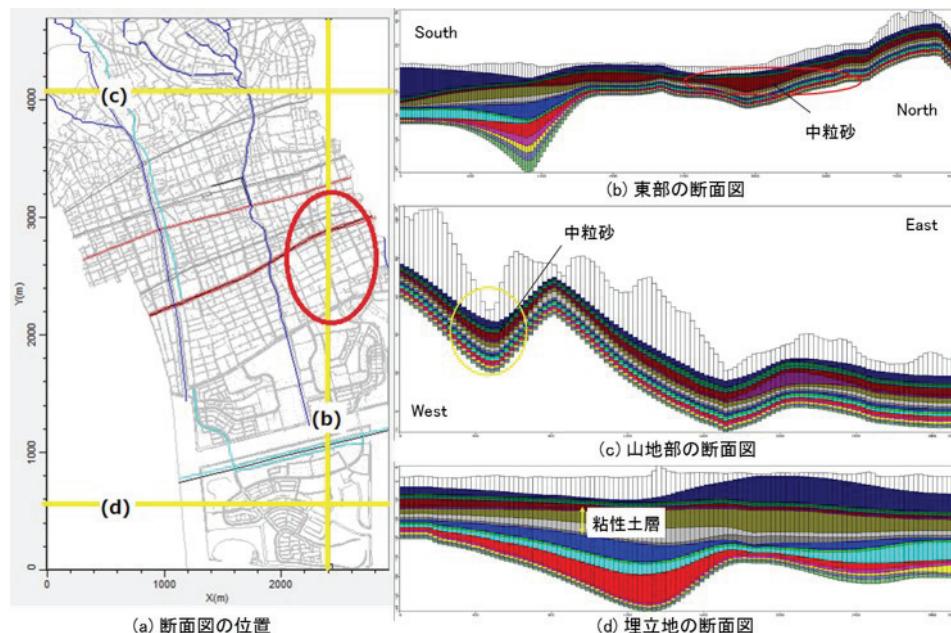


図-13 特徴的な地下水変動挙動を示すエリアの地層断面図

が徐々に減少し、降雨終了後4ヶ月間で大半の地域で地下水位が初期状態へと復元していることが分かる。また南部の埋立地では、降雨により上昇した地下水位が初期状態へと復元するまでの時間が相対的に長く、降雨終了後6ヶ月になっても僅かながら地下水位の変動が残留していることが確認できる。

さらに、降雨に対して地下水位変動が特徴的な挙動を示したi)東部平坦部、ii)山地部西部およびiii)埋立地、の3つのエリアに関して、これらの挙動が地層構造に起因するものと考えた。

#### a) 東部平坦部

図-13(b)より、当該エリアでは、砂層が凹形の粘性土層の上に堆積している様子が伺える(図中の赤丸)。このことから、周辺から水が集まり地下水位の上昇量が大

きくなったものと考えられる。

#### b) 山地部西部

図-13(c)より、該当エリアが集水地形となっており、また東部平坦部と同様に、砂層が凹形のなっている様子が伺える。これらのことから、地下水位の上昇量が大きくなったものと考えられる。

#### c) 埋立地

図-13(d)より、該当エリアで粘性土層が厚く堆積していることから、地下水位の消散速度が遅くなったものと考えられる。

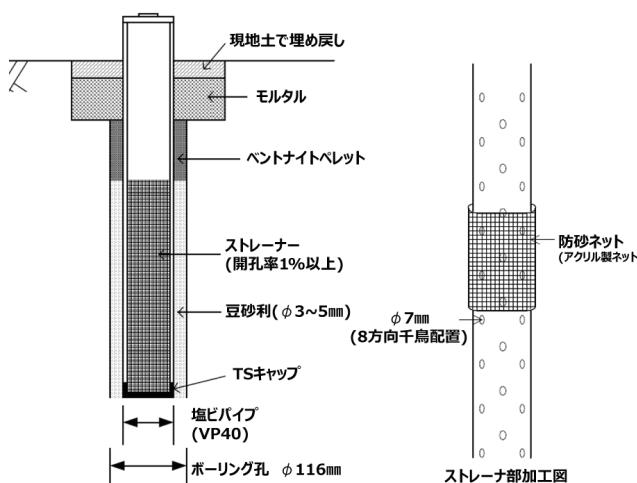


図-14 地下水位観測孔の詳細

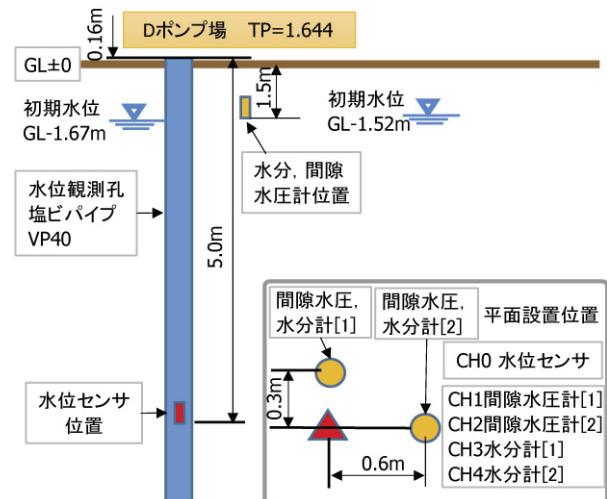


図-15 計器設置位置図

## 6. 広域地下水流动解析～ケース2：表層地盤の不飽和浸透特性を考慮する場合

ここでは、現場注水試験の概要および結果、不飽和浸透パラメータの同定方法、また、現場試験から把握した表層地盤の不飽和浸透特性を考慮する場合に対する広域地下水流动解析の解析条件、解析結果および考察を以下に述べる。

### (1) 水位観測孔を利用した現場注水試験

#### a) 地下水観測孔設置の概要

O公園内と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。これら2地点は、ケース1の解析結果では、それぞれ地下水位変動量が少ない地域(O公園)と地下水位変動量が大きく消散速度が遅い地域(Dポンプ場)に相当する(図-2参照)。

O公園内では、既存の地下水観測孔を活用して注水試験を実施するとともに長期の地下水変動を観測した。一方、Dポンプ場内には地下水観測孔が設置されていなかったため、ボーリングにより注水試験と地下水位変動をモニタリングするための地下水観測孔を新たに設置した。なお、ボーリング孔はGL-8mまで掘削した。

図-14は、地下水位観測孔の詳細である。設置の手順は以下のとおりである。

- [1] 清水でボーリング孔内の洗浄を行う。
- [2] 観測対象層の位置にストレーナーが設置されるように塩ビ管を挿入する。ストレーナーには、目詰まり防止のための防砂ネットを取り付ける。
- [3] 観測対象層上位の部分で、シール材を塩ビ管の外周に充填し遮水する。
- [4] 孔口付近は、塩ビ管の外周にセメントモルタルを注入する。

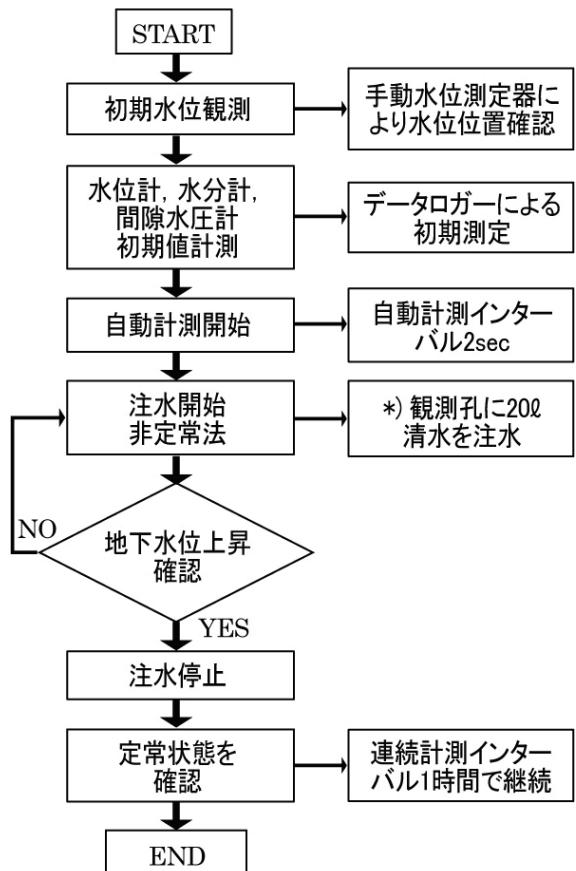


図-16 現場注水試験の概略フローチャート

#### b) 現場注水試験の概要

初期に不飽和状態にある砂質地盤の透水特性を求めた。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透水特性を、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る。

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」に準じた手順で試験を実施した。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、非定常法にて試験を実施した。

図-15に、Dポンプ場における計器の設置位置を示す。Dポンプ場およびO公園における初期の地下水位は、それぞれGL-1.67mおよびGL-1.52mであった。水分計・間隙水圧計は、地下水表面より上のGL-1.50m付近に設置した。Dポンプ場では、水分計・間隙水圧計を2ペア、O公園では1ペア設置した。一方、水位センサーは、両地点と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。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2秒のインターバルで、自動計測を行った。また、図-16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があるため、注水量そのものは参考値である。

### c) 現場注水試験の結果

図-17に、ボーリング孔内の水位と時間との関係を示す。このときの含水比の変化および間隙水圧の変化を、図-18および図-19に示す。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間隙水圧が増加する。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間隙水圧が減少する。したがって、含水比および間隙水圧は、それぞれ時間に対してピークを示している。

図-20は、間隙水圧計[1]と水分計[1]から得られたデータを用いて作成した「間隙水圧と体積含水率」の関係、即ち水分特性曲線である。浸透パラメータの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。

### (2) 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、

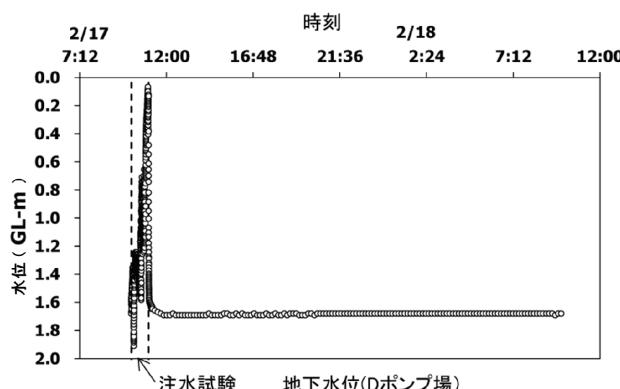


図-17 時間経過に伴う地下水位変動 (Dポンプ場)

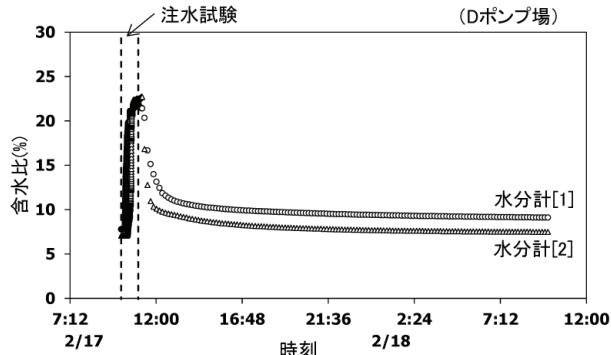


図-18 時間経過に伴う含水比 (Dポンプ場)

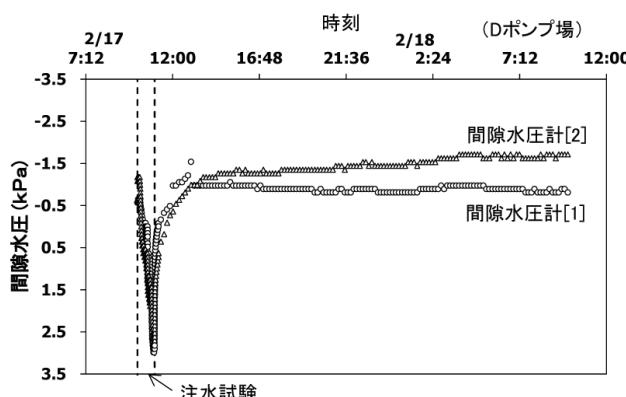


図-19 時間経過に伴う間隙水圧 (Dポンプ場)

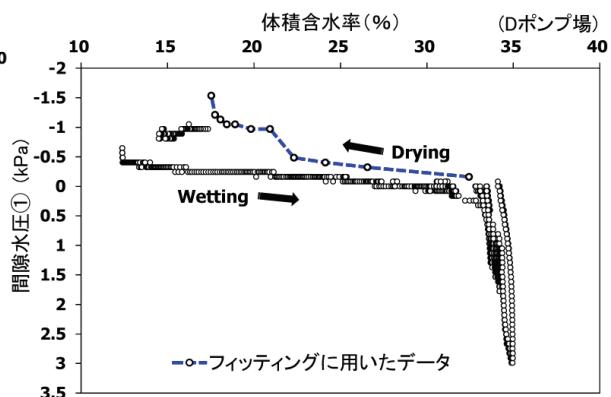


図-20 現場注水試験結果から求めた水分特性曲線

(間隙水圧 vs 体積含水率)(Dポンプ場)

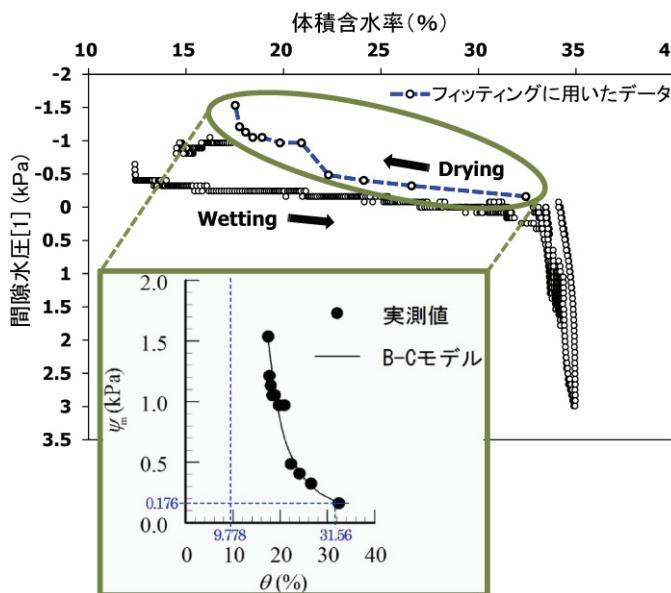


図-21 水分特性曲線の同定方法(Brooks-Corey モデル) (Dポンプ場のデータ)

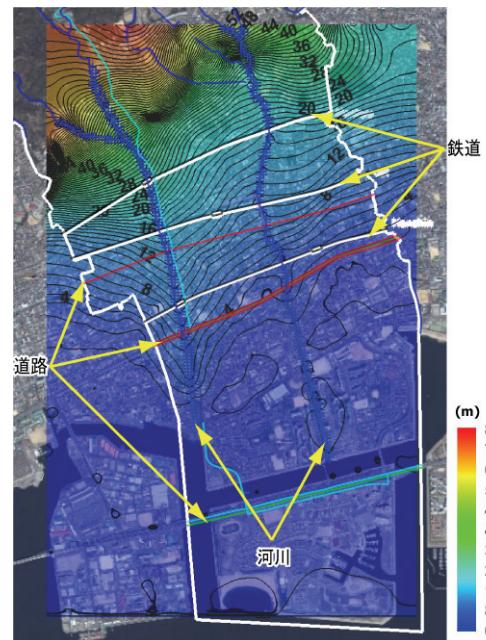


図-22 初期条件 (常時の地下水位)

式(2)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 $\theta$ と間隙水圧 $\psi_m$ 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(Brooks & Corey (1964)<sup>10</sup>, van Genuchten (1980)<sup>11</sup>, Campbell (1987)<sup>12</sup>, Kosugi (1994)<sup>13</sup>)。

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と同定する<sup>14, 15</sup>。現場注水試験結果を適用した広域地下水流动解析(ケース2)には、有限差分モデルであるGMSを使用した。その理由として、GMSには、不飽和浸透特性を考慮することができるUZF1 (Unsaturated-Zone Flow) packageというモジュールが含まれているためである。このUZF1 packageは、不飽和浸透パラメータを適用し、地下水面と地表面の間に不飽和領域における水の浸透・流れ・貯留をシミュレートすることが可能である。

解析における水分特性曲線は、ヒステリシスを無視し、現場注水試験の結果(排水過程の主曲線)からBrooks & Corey (1964)の式<sup>10</sup>によりフィッティングして式(5)を得た(図-21参照)。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{\psi_{me}}{\psi_m} \right)^\lambda = \frac{\theta - 9.778}{31.56 - 9.778} = \left( \frac{0.176}{\psi_m} \right)^{0.484} \quad (5)$$

ここで、 $S_e$  : 有効飽和度、 $\theta$  : 体積含水率、 $\theta_s$  : 飽和体積含水率、 $\theta_r$  : 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。

表-5 不飽和浸透パラメータの一覧表

指標	数値
Brooks-Corey 指数	3.452
飽和含水比 ( $m^3/m^3$ )	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
蒸発散収束深さ (m)	1.0
蒸発散収束含水比 ( $m^3/m^3$ )	0.1002

以下の式(6)は、Burdineモデル<sup>16</sup>を用いて得られた不飽和透水係数モデルの式である。

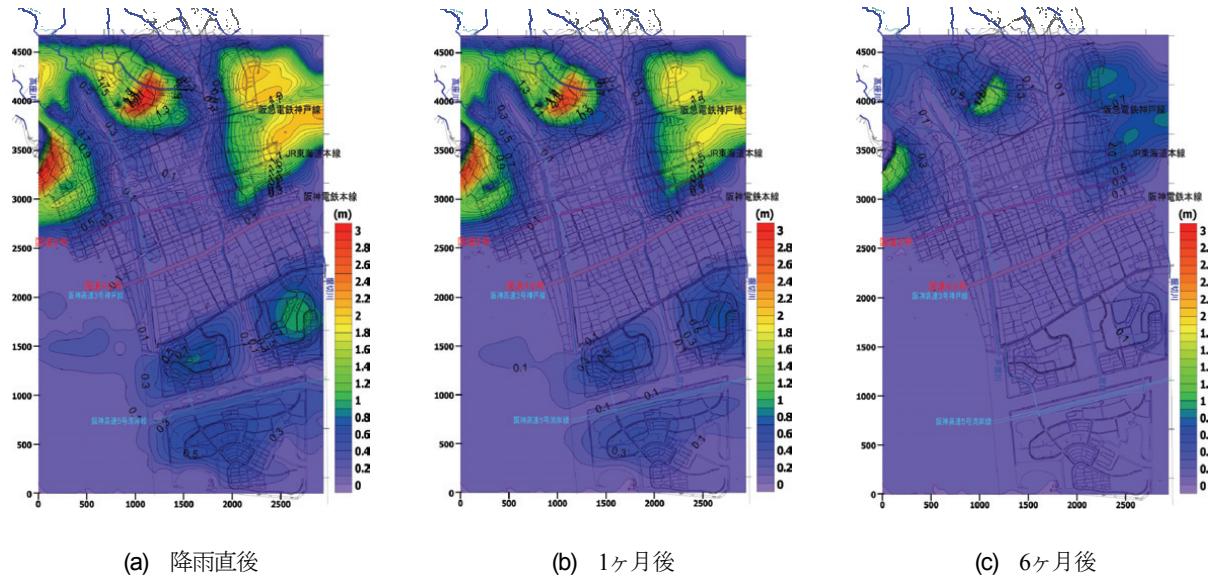
$$k = k_{ws} S_e^{\xi+1+2/\lambda} = k_{ws} \left( \frac{\psi_{me}}{\psi_m} \right)^\xi = k_{ws} \left( \frac{\psi_{me}}{\psi_m} \right)^{3.452} \quad (6)$$

ここで、 $k_{ws}$  : 飽和透水係数、 $\xi$  : Brooks-Corey指数、 $\xi$  : 無次元のパラメータ(Burdineモデルを用いた不飽和透水係数の推定には通常Burdineが提示した $\xi=2$ の関係が用いられる)である。

また、式(4)を用いて式(5)のようにBrooks-Corey指数( $\xi$ )が求められる。このBrooks-Corey指数( $\xi$ )3.452を表-5に示すように不飽和浸透パラメータとしてGMSのUZF1 packageに入力して広域地下水流动解析を行った。

### (3) 解析条件

ケース2の解析では、ケース1で用いた3次元地盤モ

図-23 降雨による地下水位変動量の経時変化( $\Delta H$ )

ルをそのまま用いた。また、現場注水試験の結果から得られた不飽和浸透パラメータ（表-5参照）とその不飽和浸透パラメータを反映して求めた初期条件（図-22参照）以外は、ケース1と同様な解析条件（浸透パラメータ、境界条件、降雨条件等）で広域地下水流动解析を実施した。ちなみに、今回の解析では、現場観測データが得られなかつたため、表-5に示すBrooks-Corey指標以外の浸透パラメータは、GMSに設定されている初期設定値を用いた。

一方、海に面する境界領域では、実測値が得られなかつたため、ケース1の場合、全て海面を基準として簡易的に標高KP+3mで一定としたが、ケース2では、標高0.0m～2.6mの範囲で地形に沿うように定水頭を与え、その違いを比較する。

#### (4) 解析結果および考察

図-23は、降雨終了直後、1ヶ月後、6ヶ月後の各段階における、地下水位の変動量 $\Delta H$  ( $\Delta H = H - H_0$ ) のコンター図である。不飽和浸透特性を導入していない解析結果（図-11参照）と比較すると、山麓地帯の地下水位の上昇・低下の傾向および変動量に違いが認められる。解析ケース1の場合、6ヶ月経過後には地下水位の上昇量がほぼ100%消散しているのに対し、解析ケース2の場合は、6ヶ月経過後にも1m程度の地下水位が残留している。

このように、地下水位の消散速度が遅い理由として、不飽和浸透パラメータを解析に適用することにより、地下水面上より上の表層部の不飽和浸透特性が適切に反映されたためと考えられる。一方、東部の平坦部は降雨によって地下水位が変化しやすい地域であり、南部の埋立地は降雨により上昇した地下水位が初期状態へと復元するまでの時間が相対的に遅くなることは、解析ケース1の

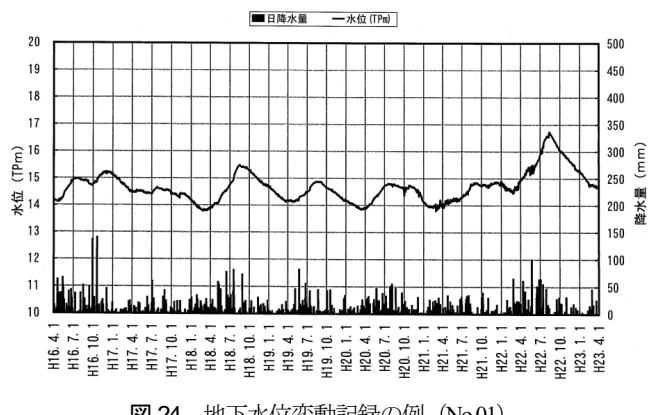


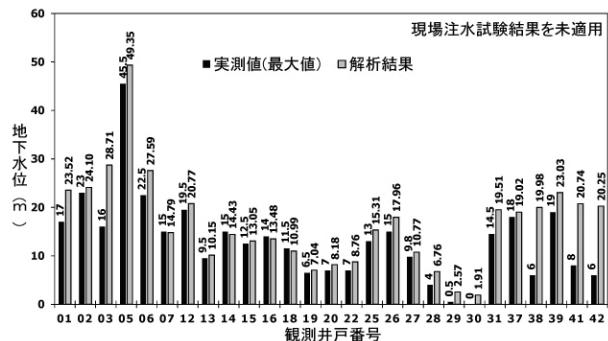
図-24 地下水位変動記録の例 (No.01)

結果と同様な傾向である。

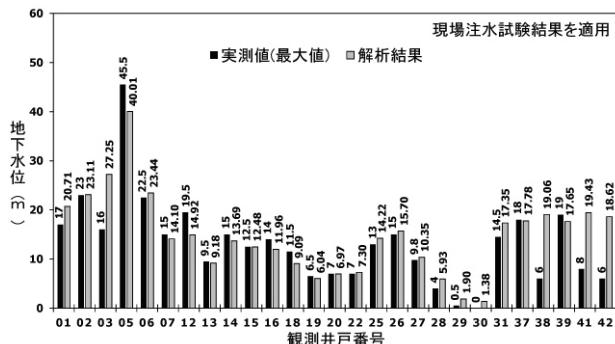
#### 7. 実測データと解析結果の比較によるモデルの検証

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約7年間に亘る地下水位観測データ（図-24の例参照）と、解析による地下水位の推定値とを比較検討した。ここで、降雨に関しては先に述べたとおり、数値解析では実際の降雨波形ではなく年間降水量の平均値を均等に与えている。この場合、地下水位の最大値は降雨終了時と考えられる。これより、本研究では、各観測地点の地下水位の最大値と、解析による降雨直後の地下水位とを比較した。

図-25(a)は、不飽和浸透パラメータを適用せずに解析を実施した場合（ケース1）の推定値と実際の観測データとの比較結果である。図-25(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



(a) 表層地盤の不飽和浸透特性を考慮しない場合 (ケース1)



(b) 表層地盤の不飽和浸透特性を考慮した場合 (ケース2)

図-25 解析による地下水位の推定値と実際の観測データ (最大値) の比較

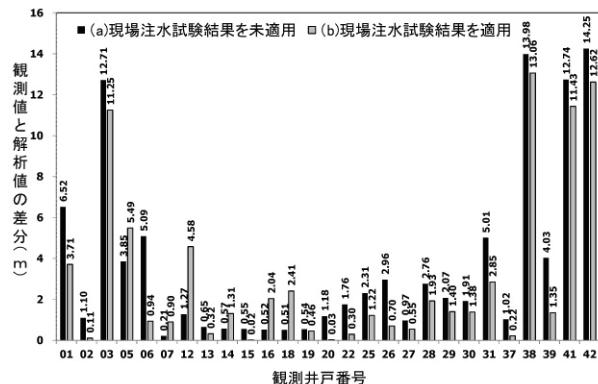


図-26 ケース1およびケース2の地下水位の推定値と実測データとの差分

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。上記の地点での地下水位の解析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沿いに位置し、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动に局所的に影響を与えたためであると推察される。また、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-26参照)、誤差の傾向がほぼ同じであると言える(図-25(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。

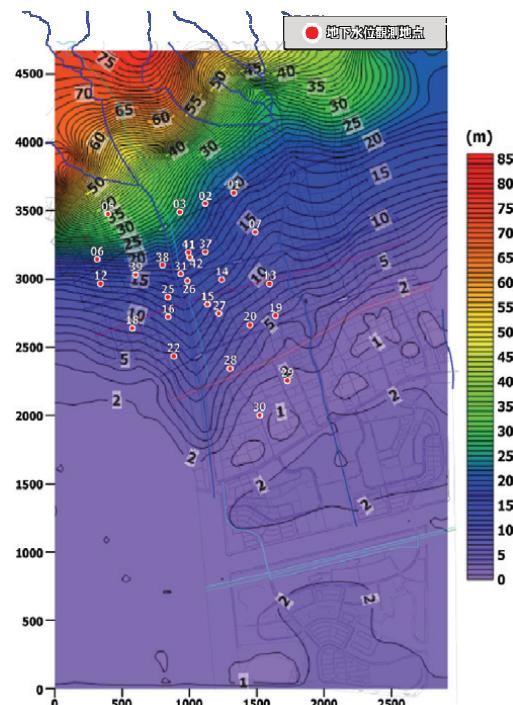


図-27 地下水位観測地点の位置および降雨直後の地下水位コンター図

一方、図-25(b)は、解析ケース2の推定値と観測データの比較である。近隣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、ケース1と比較して実測値と解析値の差が小さく、定量的にも十分な精度で推定できている。図-26に示す推定値と観測値の差分からも、ケース2の方が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。これは、海側の境界条件を一定値ではなく、地形に合わせたことに加えて、表層地盤の不飽和浸透特性を考慮したことにより、地下水変動をより高い精度で定量的に推定できることが明らかとなった。

ちなみに、地点No.38, No.41, No.42での地下水位の解析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沿いに位置し、道路工事において何らかの地下水対策工が施工されて、地下水の流动に局所的に影響を与えたためと推察される。

図-27に地下水位観測地点の位置および降雨直後の地下水位コンター図を示す。

## 8. 雨水浸透適地・不適地マップの作成

浸透適地の選定基準として表-6、また浸透不適地は、表-7に示す選定基準を適用した。浸透施設を設置する地盤は、浸透に伴う水位の上昇ができるだけ小さく、またその影響が速やかに解消されることが望ましい。一般に

表-6 浸透適地の選定基準

区分	選定基準の主な内容
最適地	降雨終了直後の時点で、降雨による地下水位の変動がほとんどない区域
適地	降雨終了後1ヶ月の経過時点で、降雨により上昇した地下水位が100%消散する区域
準適地	降雨終了後1ヶ月の経過時点で、降雨により上昇した地下水位が100%消散する区域 地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の50%未満

表-7 浸透不適地の選定基準

区分	選定基準の主な内容
浸水地	過去の浸水履歴地
浸透不適地	不適地 地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の75%以上 または、降雨中止後6ヶ月経過しても降雨前の状態に戻らない
	要検討地 地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の50%以上

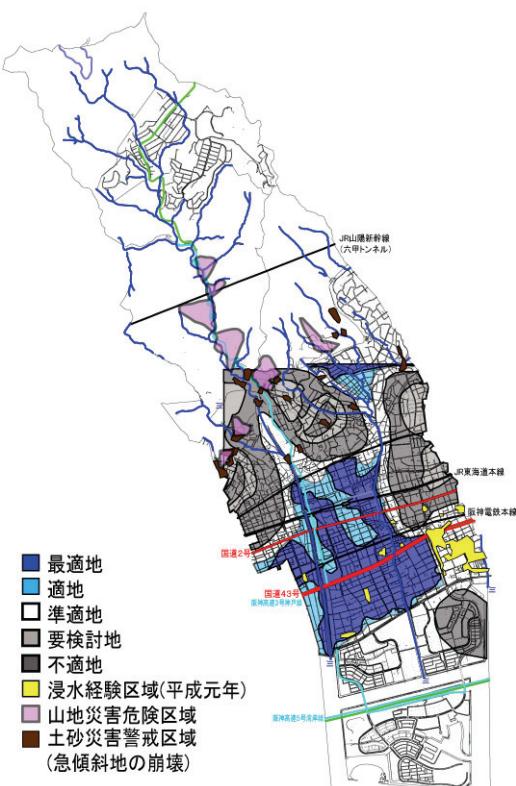


図-28 浸透適地および不適地の区分図

透水性が高い地盤では汲み上げ時や注水時の水位変化は小さいが、地下水位の変化は透水性のみならず地層構成にも依存する場合があるため、透水性のみを判断基準とすることは適切ではないと考えられる。このため、領域全体の地下水位分布を求めた上で、降雨浸透に伴う地下

水位の応答を判断基準としている。この基準の根拠となる降雨終了直後および1ヶ月経過後の地下水位変化量は、図-23を参照されたい。一方、浸透不適地は、図-23の解析結果に表-7に示す選定基準を適用した。図-28は、ケース2の解析結果および表-6と表-7を踏まえて作成した浸透適地・不適地区分図である。ちなみに、図-28に示す白色の地域は適地と要検討地の中間にあるとの判断から「準適地」とした。準適地は、降雨終了後1ヶ月の経過時点で、降雨により上昇した地下水位が100%消散する区域であり、降雨に伴う地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の50%未満となる区域である。即ち、準適地は、地下水位の消散速度の傾向は適地に準じるが、地下水位の上昇量は適地より約0.2~0.7m程度高い。

## 9. まとめ

本研究では、雨水浸透施設設置場所の選定を合理的に行い、都市型水害を軽減するため、実在するA市全域を対象として、3次元地形・地盤モデルの構築、現場注水試験による表層地盤の不飽和浸透特性の把握、広域地下水水流動解析の実施および結果の評価、そして浸透適地・不適地マップの作成を行った。

得られた結論は以下の通りである。

- [1] GIS情報と地盤ボーリング情報を融合した3次元地形・地盤モデルを構築した。このモデルの特徴として、一般的な地形情報(GISデータ)に加え、約432箇所の既存のボーリングデータを活用していること、雨水浸透の対象となる表層地盤の複雑な地層構成を反映したこと、の2点が挙げられる。
- [2] 水位観測孔を利用した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不飽和浸透特性を評価した。表層の不飽和地盤内で土壤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、これを浸透解析モデルに適切に反映した。
- [3] 上記で得られた不飽和状態にある表層地盤の不飽和浸透特性を考慮した広域地下水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データと良く一致した。一方、表層地盤の不飽和浸透特性を考慮しない場合の地下水変動の推定結果は、押し並べて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。
- [4] 広域地下水水流動解析結果に対して、降雨直後の地下水位の上昇量と地下水位の消散速度の2点に着目した基準を設けることにより、浸透適地・不適地マップ

を提案した。既往の地下水変動を考慮せず、地盤ボーリングデータおよび地形の情報のみに基づく浸透評価手法と比較して、本手法では、降雨による地下水の変動傾向を評価して地盤の浸透評価を行うため、地盤災害のリスク低減を斟酌した判定結果が得られる。本論文で述べた提案法には十分な一般性があり、他都市における同様な雨水浸透施設の設置計画策定のための利用が期待できる。

今後、降雨による地下水の変動傾向と浸透施設が発揮し得る性能との関係を明確にした浸透評価基準について精査する必要がある。

**謝辞**：本研究の遂行において、一般社団法人近畿建設協会からの研究助成金を受けた。また、協和設計(株)（元、神戸大学大学院学術研究員）の許晋碩博士、神戸大学大学院の片岡沙都紀博士、ショーボンド建設株式会社（元、神戸大学大学院博士前期課程）の古宮雅之氏、神戸大学大学院博士前期課程の橋本真基氏、(株)昭和設計の小畠博之氏、齋藤学氏、平井緩苗氏、各位の技術的支援を受けた。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 社団法人雨水貯留浸透技術協会：戸建住宅における雨水貯留浸透施設マニュアル, p.6, 2006.
- 2) 名古屋市：“浸透適地マップ（市政情報）”，名古屋市公式ウェブサイト, 2010-10-01, <http://www.city.nagoya.jp/kankyo/page/0000016733.html> (2014.1.9閲覧) .
- 3) 大井昌弘, 藤原広行：地盤情報の統合と提供—オ・ステーション—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp.8-11, 2013.
- 4) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報, <http://www.gsi.go.jp/kiban/> (2013.6.10閲覧) .
- 5) Schlumberger Water Services : Hydro GeoAnalyst, <http://www.swstechnology.com/software/groundwaterdata-management-visualization-software/hydro-geoanalyst> (2014.1.12閲覧)
- 6) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説, 丸善出版事業部, p.450, 2009.
- 7) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp.75-76, 2009.
- 8) レックス : Visual MODFLOW 2011.1 日本語版（英和併記）ユーザーズマニュアル, レックス, pp.289-293, 2012.
- 9) 公益社団法人日本下水道協会：下水道設置計画・設計指針と解説 2009年度版, 日本下水道協会, 2009
- 10) Brooks, R. H. and Corey, A. T. : *Hydraulic Properties of Porous Media*, Hydrol. Pap. No. 3, Colorado State Univ., Fort Collins, 1964.
- 11) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 12) Campbell, G. S.: パソコンで学ぶ土の物理学 (中野政詩, 東山勇監訳), 鹿島出版会, 東京, 1987.
- 13) Kosugi, K.: Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention, *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 891-901, 1994.
- 14) 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, 土壤の物理性, 111号, pp. 61-73, 2009.
- 15) (社)地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価, 2004.
- 16) Burdine, N. T.: Relative permeability calculations from pore-size distribution data, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, Vol. 198, pp. 71-77, 1953.

(2014. 11. 19 受付)

## GEOTECHNICAL SURVEY AND ANALYSIS FOR RAINWATER INFILTRATION FACILITIES AGAINST URBAN FLOODING

Satoru SHIBUYA, Je-Min BAEK and Masahiko SAITO

Recently, in urban cities of Japan, water hazards termed as ‘urban flooding’ have been frequently experienced when the city was attacked by heavy rainfall. In cope with such flooding, infiltration facilities are often installed, with which the seepage of rainwater into ground is promoted. However, areas being suitable (or not suitable) for mounting infiltration facilities should be manifested at the stage of planning by considering two facets; i.e., cost and safety. In this paper, case study as such is described for a model city in Hyogo Prefecture. First, a 3-D stratigraphy model near ground surface was established based on the existing borehole data, a total of 432. Second, the water-retention characteristics of unsaturated surface soil above the ground water level were measured by performing in-situ infiltration test. Third, the 3D seepage flow analysis by considering these characteristics was carried out, and the results were evaluated by comparing the predicted ground water level against the field observation. Finally, a map for rainwater infiltration is proposed. It was manifested that the accuracy and reliability when predicting the fluctuation of ground water level were greatly enhanced by considering water retention characteristics of surface ground. Furthermore, any risk for secondary geo-hazards will be greatly reduced by installing seepage facilities based on the proposed map.