

京都市伏見地域における地下水保全に伴う地下構造物施工の影響に関する

3次元シミュレーション解析

地下水, 浸透流解析, 有限要素法

関西大学大学院理工学研究科

○北岡貴文

関西大学環境都市工学部

正会員

楠見晴重

関西大学環境都市工学部

中村 真

1. はじめに

多くの酒造会社が立ち並ぶ伏見地域は、水質的にも優れた伏流水が酒造りの伝統を支えている。しかし、平成19年度から酒造会社が密集する伏見地域で、合流式下水道管の改善を目的とした下水管の敷設工事が施工された。本研究は、その地下構造物が周辺の井戸の地下水位に及ぼす影響を検討したものである。最初に、伏見地域における解析地層モデルを作成し、浸透流解析を行い、伏見地域における地下水流動挙動を推定した。解析の精度を検証するために、実際の地下水頭と解析結果より得た地下水頭を比較することにより、モデルの妥当性の検証を行った。そして、当該地域に新たに施工された地下構造物が及ぼす周辺の井戸に対しての、地下水位への影響が少ないことを解析結果より確認した。

2. 伏見地域の地形地質構造

図-1に伏見地域周辺の地質図を示す。京都市の南に位置する伏見地域は、桂川、鴨川、宇治川の3つの川に沿った平野部と桃山丘陵を南端とする東山連峰の山並みから構成されている。桃山丘陵は稲荷山や大岩山の周辺に発達した丘陵である。丘陵の西麓には小規模な扇状地が分布し、深草、稲荷、伏見などがこの扇状地上に位置する。京都盆地の表層には大部分の地域で礫層が見られ、その上位に細粒土（砂・シルト・粘土）が被覆している。この礫層は基本的にN値が50を超えている。また、表層の細粒層はほぼ沖積層に相当すると考えられる¹⁾。対象地域の地質構造でも、洪積層に相当する礫層が分布し、その上位に沖積層が約10mの層厚で被覆している。沖積層は、桃山丘陵に向けて薄くなっていき、下部の洪積の礫層が地表面に現れてくる。



図-1 伏見地域周辺の地質図

3. 伏見地域の地下水測定

図-2は解析対象地域における観測井の位置を示したものである。当該地域に、計27本の観測井が存在する。平成20年6月から、各伏見酒造会社の休止井戸に自動水位計を設置し、6時間ごとに地下水位を測定している。また、下水道管が敷設される周辺の井戸においても自動水位計を設置し、30分～1時間ごとに地下水位を測定している。

同時刻に地下水位データを採取できた浅井戸観測井と関西圏地盤情報データベースの浅井戸より得た地下水位より、地下水の流れ方向の予測を行った。それらの地下水頭 (T.P.基準) から、GIS (Geographic Information System) で補間を行い、地下水頭コンター図を作成したものを図-3に示す。図から、地下水の流れは北東の桃山丘陵から南西の河川の合流地点に向けて流れており、丘陵地帯から地下水の流入があると推定した。

4. 解析地層モデル

4.1 地層分割の概要

関西圏地盤情報データベース2009年度版²⁾・新関西地盤・対象地域のボーリングデータなどの地盤調査結果によって、地層構成や主な帯水層の確認を行った。本研究の解析地層モデルでは、地表面から下水道管が敷設される箇所までの浅い層を対象としており、平野部においては約30mの深さである。沖積層と洪積層上部の地層から土質特性を考慮して3層に分割し、解析地層モデルを作成した。対象地域の地層構成を把握するために、約400本のボーリングデータと当該地域の地形図を使用して決定した。

4.2 モデル化範囲

図-4に、本研究の対象地域であるモデルの範囲を示す。東西10km、南北9kmの領域から解析範囲を決定した。モデルの境界は、北から南西に向けて流れる鴨川・桂川と東から南西に流れる宇治川の3河川と、北東部にある稻荷山・大岩山・伏見桃山等の山頂から分水嶺を結び決定した。モデルの表面積は約28km²である。



図-2 本研究で使用する観測井の位置

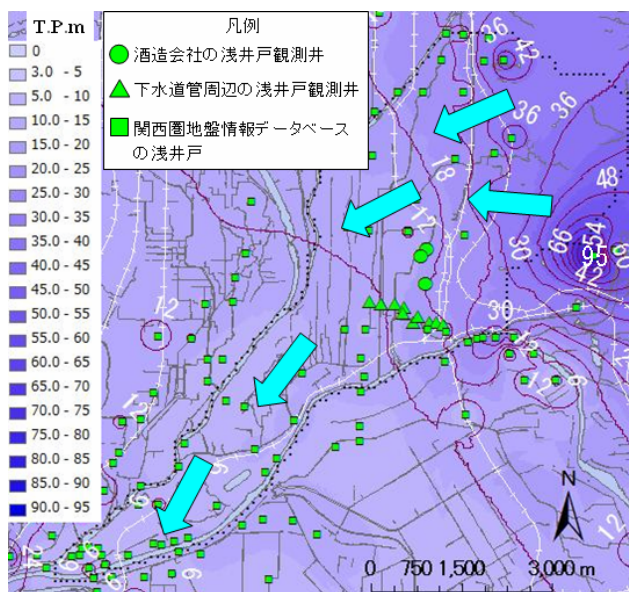


図-3 地下水頭コンター図

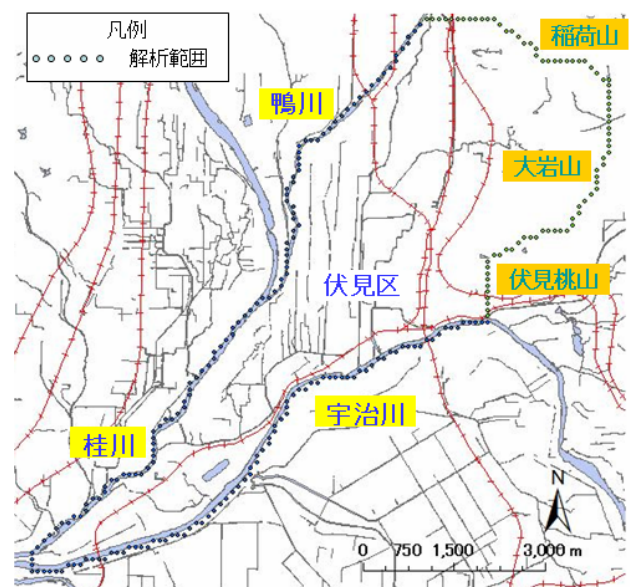


図-4 モデルの範囲

4.3 構想図

本研究の解析地層モデルは、地表面から下水道管が敷設される比較的浅い帯水層までを対象としており、平野部においては約30mの深さである。地層により層を分割していくと、地表面から沖積層・洪積礫層・洪積粘土層（半不透水層）の順に層を成していることを、ボーリングデータより確認した。また、沖積層においては対象地域の北側では、シルト・粘土成分の割合が多い土質に対して、南側の河川に挟まれた場所においては、砂成分の割合が多い土質であることを、ボーリング調査結果より確認した。解析地層モデルでは、それらの土質特性を考慮するために、4つの地盤特性を考慮して解析地層モデルを作成した。モデルの最下部は、半不透水層の下端部である T.P.-20m とした。解析地層モデルの構想図を図-5 に示す。

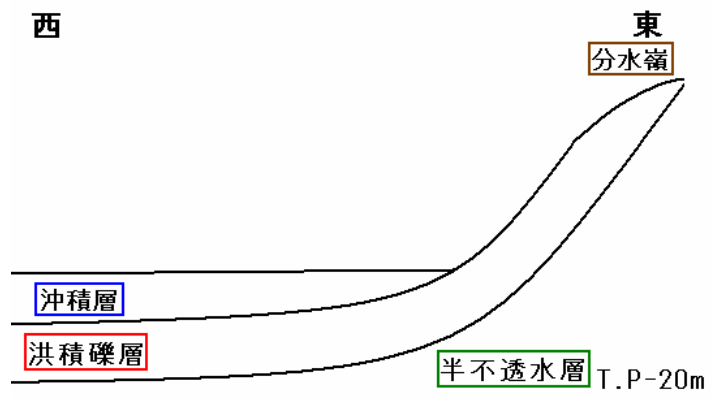


図-5 解析地層モデルの構想図

4.4 メッシュ図

本研究は、有限要素法により地下水浸透流解析を実行した。そのため、対象領域を有限の要素に分割した。図-6に対象地域をメッシュ分割した図を示す。下水道管が及ぼす周辺においての地下水流動挙動について検討するため、その周辺において最も細かくメッシュを作成した。図に示す、X方向の-23000m~-21000m、Y方向の-119000m~-118000mの位置に全長約1600mの下水道管が新たに敷設される。対象地域に新たに敷設される下水道管の外形は3.5mである。よって、最小メッシュサイズを、下水道管の大きさより小さくするために、下水道管の直径の半分以下の1.5mまで細かくした。下水道管の位置から離れるに従い、メッシュサイズを3m、12.5m、25m、50mと大きくしていった。最大メッシュのサイズは100mとして、広域に及ぶ対象地域を分割した。鉛直方向のメッシュの大きさは、最小50cm程で、最も大きいメッシュサイズで20m程である。節点数は110,872、要素数は109,402である。

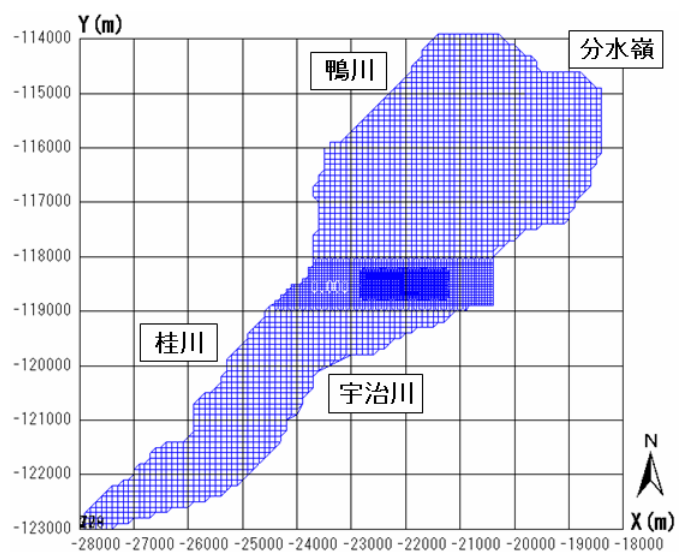


図-6 平面メッシュ図

4.5 解析地層モデル

図-7に、解析地層モデルを示す。鉛直方向を10倍したモデルの3次元表示である。平野部では、北側と南側で土質特性が異なる沖積層が上層に堆積している。その下層には洪積の礫層が堆積しているが、平野部の地表面は沖積層で覆われているため、洪積礫層が地表面に現れることはないが、山側では洪積の礫層が地表面に現れている。最下部の地層として半不透水層がある。よって、実際のボーリングデータより調べた土質構成を再現できていることが確認できる。

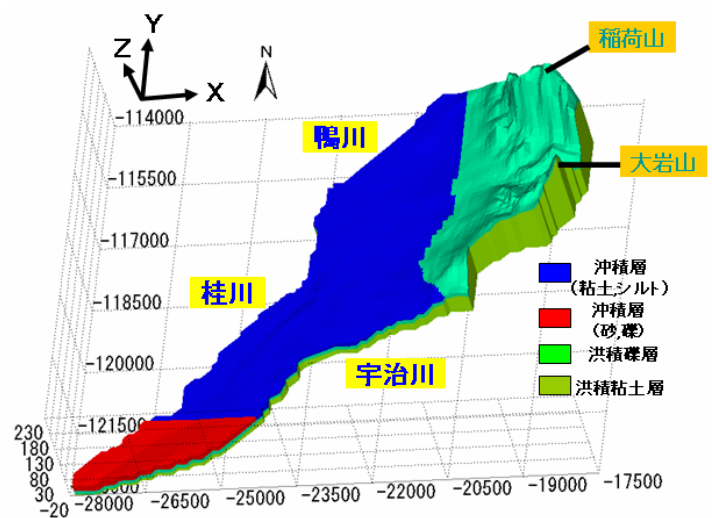


図-7 3次元解析地層モデル

5. 伏見地域における地下水浸透流解析

5.1 浸透流解析の概要

本研究では、有限要素法による3次元浸透流解析を行った。自動水位計を設置している浅井戸の場所において得られた地下水位、そして、対象領域の全域を検証するため、実際に我々が測定することができなかった場所においては、関西圏地盤情報データベースから得られた地下水位を用いて、解析結果で求めた地下水位と比較することにより、解析地層モデルの精度を検証した。本研究のモデルは浅い層を対象としているため、浅井戸との地下水位と一致することを確認し、モデルの検証を行った。

5.2 境界条件

本研究における境界は、桂川・宇治川・鴨川の3河川と北東部の分水嶺に決定した。境界条件は、3河川には国土交通省の水文水質データベースから得た河川水位から、北東部の分水嶺には、関西圏地盤情報データベースより得た地下水位から、共に水位一定境界として解析を実行した。その結果、水頭コンター図で推定した通り、分水嶺において流入が見られた。しかし、丘陵地帯における地下水位が、関西圏地盤情報データベースより得た実測の地下水位より、数10m程低い結果を得た。よって、分水嶺の境界条件に、境界条件を水位一定境界として解析を行った結果得た流量値を、流量境界条件として設定した。そして、水収支の一部としてこの辺りに降る降雨量を、細密数値情報(10mメッシュ土地利用)から丘陵地帯を特定し、その節点に降雨条件を加えて分水嶺からの流入量に加算して再度解析を行った。

5.3 地盤物性値

表-1 に本研究で用いた地盤物性値を示す。定常解析であるため、比貯留係数に関しては、値を変更しても解析結果には影響がなかった。また有効間隙率についても解析結果には大きな影響は見られなかった。よって、一般的な値として地下水ハンドブック³⁾を参考に決定した。透水係数に関しては解析結果に大きく影響を与えるため、一般的な値を参考にしながら、解析で求めた地下水位の値と実測で求めた地下水位に最も整合性のある値を決定した。

5.4 伏見地域における広域的な地下水流動挙動

伏見地域における全体的な地下水浸透流解析を行った結果を、図-8 に地下水頭コンター図として示す。流れ方向をおおまかに矢印で表示する。全体的な流れとしては、北東部の分水嶺から南西の河川が合流地点に向けて流れている。概ね地形に沿った流れとなっており、今回の解析結果で得られた地下水流動方向は、図-3 で示す実測で得た地下水頭コンター図と一致している結果である。

表-1 3次元浸透流解析に用いる地盤物性値

	透水係数(X, Y, Z) (cm/s)	有効間隙率(%)	比貯留係数(1/m)
沖積層(粘土・シルト)	5.0×10^{-4}	10	1.1×10^{-3}
沖積層(砂・礫)	5.0×10^{-3}	15	7.1×10^{-5}
洪積礫層	5.0×10^{-3}	20	7.1×10^{-6}
洪積粘土層	5.0×10^{-5}	10	1.8×10^{-4}

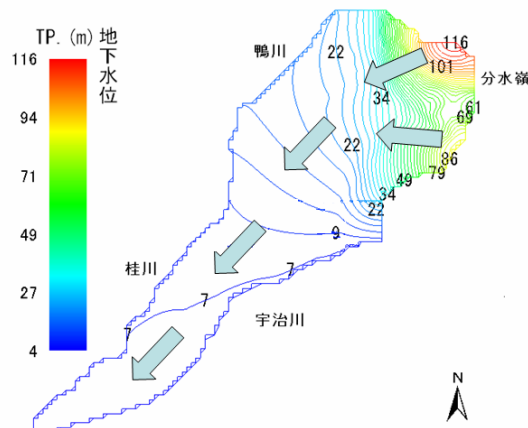


図-8 解析結果より得た地下水頭コンター図

5.5 解析地層モデルの検証

モデルの検証をするために、図-9 に示す箇所においての実測の地下水位と解析で求めた地下水位を比較することにより、解析地層モデルの妥当性を検証した。図に示す⑭-⑱が下水道管周辺の検討地点である。本研究対象範囲においての実測地下水位データが下水道管周辺部しかないため、全域においての妥当性を検証するために、関西圏地盤情報データベースの地下水位データも使用した。図-10 より、全体的には3m以下におさまっている。また、下水道管が敷設される周辺では、解析結果の地下水位が全体的に1.5m程の誤差である。

6. 地下構造物施工に関する地下水浸透流解析

6.1 伏見地域に施工されている合流式下水道管の概要

今回施工された地下構造物は下水道管で、伏見地区における合流式下水道管の改善を目的としている。この幹線は地表面下約15mの位置にあり、仕上がり内径はφ3,000mmの大手筋幹線と仕上り内径φ1,800mmの大手筋南幹線を敷設する。それらの幹線の長さは約1600mである。施工は、新設の下水道幹線工事で一般的に採用されている「シールド工法」により行われる。この工法は、工事基地内に設けた立杭から円筒形の掘進機（シールド機）を発進し、地下トンネルを作る工法である⁴⁾。

6.2 下水道管再現後の周辺の地下水位への影響

本研究における解析では、当該地域の下水道管が敷設される場所の要素を正確に取り除いていくことにより、解析においての地下構造物を再現する。本解析においては、T.P=-3m～T.P=0.5mの位置においての要素を取り除く。また解析においてさらに大きな地下構造物が敷設された場合においての地下水流動への影響も検討した。その大きさは10m程であり、T.P=-3m～T.P=7.0mの位置においての要素を取り除いて解析を実施した。図-11 に3.5mの大きさの地下構造物が及ぼす浸透流解析結果を一例として示す。図に示すように、地下水の流れは下水道管を微小ながらも避けて回り込むように流れている。そのため、地下水流動に及ぼす影響はわずかであると推定される。よって、下水道管周辺においての上流側と下流側の地下水位が変化していると推定できる。

次に、下水道管周辺において、各大きさの地下構造物が及ぼす地下水位への影響を検討した。図-12 はある地点においての、上流側への地下水位の影響を示したグラフである。グラフより、3.5mの大きさの下水道管と10mの地下構造物を再現させた状態の周辺への地下水位の影響を考察すると、地下水位への影響はほとんどない。しかし、10mの地下構造物を敷設させると、周辺の地下水位に影響を及ぼす。下水道管より5m上流側で5cm程の上昇が見られる。下水道管より96m上流地点の地下水位に及ぼす影響を推定すると、4.4cm程の上昇が見られる。その傾向は下水道管敷設地点から離れるに従い、影響を及ぼさなくなると推定できる。

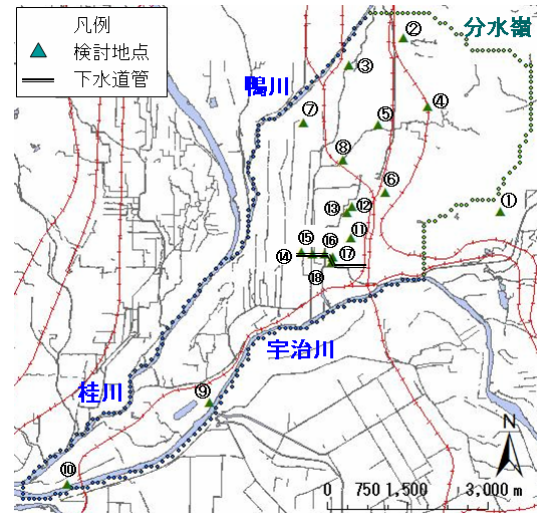


図-9 モデルの妥当性を検証した位置

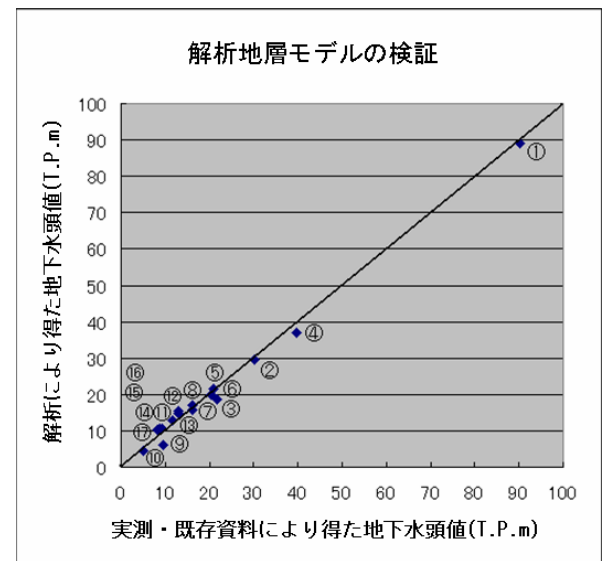


図-10 解析地層モデルの検証結果

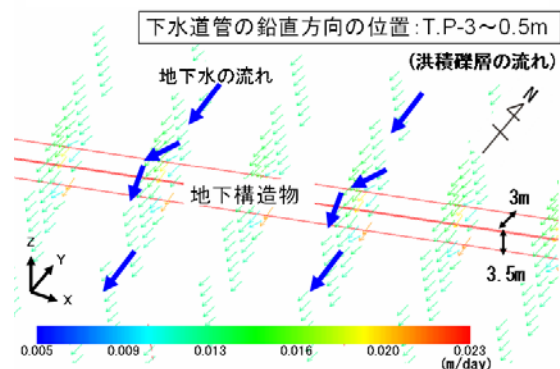


図-11 3.5mの地下構造物が及ぼす地下水流動挙動

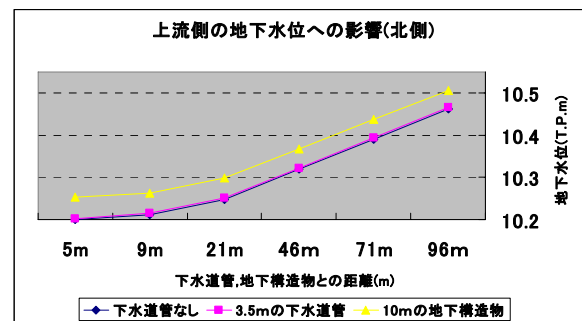


図-12 上流側の地下水位への影響

6.3 伏見酒造会社の揚水井の地下水位に及ぼす影響範囲

図-13 に各酒造会社が主に酒造りのために地下水を揚水する揚水井の位置を示す。伏見の酒造会社が持つ揚水井は42本である。本事業における3.5mの大きさの下水道管が各酒造会社の揚水井に及ぼす地下水位への影響は少ないため、10mの下水道管を敷設させた場合における揚水井への影響を解析結果より検討すると、地下水位に1cmの影響を及ぼすと推定される揚水井の数は、17本程である。また、地下水位に3cmの影響を及ぼす揚水井での影響は、13本程である。また、5cm程の影響を及ぼす揚水井はないと解析結果より推定される。そのため、本事業における下水道管の周辺への揚水井の地下水位に及ぼす影響は、実際の大きさより大きい10mの地下構造物を再現させた状態でさえ、数cm程しか地下水位に影響を及ぼさない。実際の3.5mの大きさの下水道管を敷設させたことによる、酒造会社の揚水井に及ぼす地下水位への影響はほとんどないことを解析結果より確認した。



図-13 揚水井の地下水位に及ぼす影響範囲

7. 結論

平成19年度から、酒造会社が密集する伏見酒造組合の近接に、合流式下水道管の改善のための下水道管が施工されている。そこで本研究では、安全な地下水利用を行うために、解析地層モデルを構築し、地下水流動挙動を推定した。そして、そのモデルを用いて下水道管が及ぼす周辺への地下水位の検討を行った。以下に本研究で得られた所見を示す。

①解析対象地域の浅層部である沖積層、また上部洪積層についてのボーリングデータや井戸資料などから地層特性の把握、整理を行った。伏見地域には、連続性のよい粘土層が何層か存在し、その間にある砂礫層などの帯水層が存在することが確認できた。また、これらの調査結果を用いて解析対象地域の解析地層モデルを構築した。

②作成した解析地層モデルより3次元浸透流解析を行い、伏見地域における浅部の地下水流動挙動について推定を行った。その結果、全体的な流れとしては、北東部の分水嶺から南西の河川が合流している地点に向けて流れている。概ね地形に沿った流れとなっており、今回の解析結果で得られた地下水流動方向は、観測した地下水頭結果から得られた地下水位コンター図と概ね一致している結果である。

③研究対象地域で地下構造物を施工した場合における周辺に及ぼす地下水位への検討を行った。実際の下水道管の大きさと同じ3.5mでは、解析結果より、周辺に及ぼす地下水位への影響は数mm程度で、地下水流動への影響はないと検討される。また、さらに大きい10m程の大きさの地下構造物を想定した状態でさえ、周辺に及ぼす地下水位への影響は数cm程の変動しかない。よって、本事業における下水道管が及ぼす地下水位への影響はほとんどないことから、地下水保全に関する深刻な問題は現状ではないと考えられる。

地下水利用が盛んな地域において、適正な地下水流動挙動を知ることが、地下水汚染などの問題が発生した場合の迅速な対応に繋がる。伏見地域において、解析地層モデルを構築することによって、これらの判断の手助けになることができると考えられる。

参考文献

- 1) 関西地盤情報活用協議会地盤研究委員会、関西地盤情報活用協議会：新関西地盤-京都盆地-，pp.13-43，2002。
- 2) 関西圏地盤情報協議会，関西圏地盤DB運営機構：関西圏地盤情報データベース2009。
- 3) 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.21-76，1979。
- 4) 京都市下水道局：大手筋公共下水道工事・大手筋南幹線公共工事地下水保全計画書，pp.1-17，2007。