

広域地下水流動解析を用いた岩盤地下水取水システムの取水量の推定 ESTIMATION OF DISCHARGE FROM GROUNDWATER INTAKE SYSTEM IN ROCK CAVERN USING WIDE GROUNDWATER FLOW ANALYSIS

鈴木 誠*・百田 博宣**・神野 健二***

Makoto SUZUKI, Hironobu MOMOTA, Kenji JINNO

The horizontally two-dimensional and quasi three-dimensional groundwater flow analyses are often used in the wide area. On the other, three-dimensional finite element analyses can be only used in the local area because of the large degrees of freedom. This paper describes the procedure to estimate the discharge from the groundwater intake system in a rock cavern when changing the water level in the shaft using the three- and quasi three-dimensional groundwater flow analyses. The procedure is applied to a simple model, and the simulation analyses are also carried out under different conditions of controlling the water level in the shaft of groundwater intake system. The simulated behavior of groundwater level, the stream flow and discharge are demonstrated.

keywords: rock, groundwater, intake system, seepage, runoff, rain

1. はじめに

従来から、生活用水・工業用水・農業用水の水資源開発は、ダムや堰による河川水資源の開発が中心であり、これを補完するものとして井戸や地下ダムなどによる浅層地下水(土壌地下水)の開発が行われている。しかし、近年は長期的な少雨傾向のため、河川水資源の減少を主要因とした渇水(水不足)が頻発傾向にある。異常気象に左右されない最も確実な水資源開発手段として淡水化プラントによる海水利用が拡大の方向にあるが、他の水資源施設に比して利水単価が高いという難点がある。

竹中ら¹⁾は既往の渇水事例の分析により、渇水頻発地域は概ね、1) 河川水資源が貧弱、2) 平野が貧弱で土壌地下水も貧弱、3) 岩盤が支配的(山地が近接している等)、の3項目を有す地域と報告している。これによれば、渇水頻発地域は渇水対策のみならず平時においても新たな水資源の確保が必要と考えられ、同報告には、渇水頻発地域の地形地質的な特徴を活かして、岩盤地下水を大規模開発する図-1の岩盤地下水取水システムが提案されている¹⁾。しかし、同システムは新たな水資源開発施設であり、取水量は地下水環境・地表水環境への影響等も考慮可能な解析手法で評価することが望ましいと考えられる。

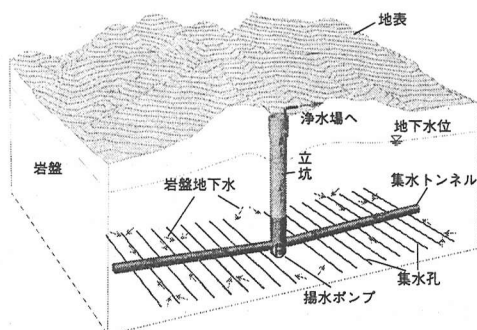


図-1: 岩盤地下水取水システム概念

岩盤地下水取水システムの取水量に関して、地下水面が変化しない一定の条件に対しては、既に3次元FEM地下水解析により湧水特性等を検討している²⁾。しかし、地下水面変動そのものが地下水環境の評価に関係する解

キーワード: 岩盤地下水取水システム, 準3次元, 地下水, 降水, 浸出点, 地表流出

* 正会員 工博 清水建設(株) 和泉研究室 主任研究員

** 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 地下技術グループ 主席研究員

*** 正会員 工博 九州大学 大学院 教授 環境システム科学研究センター

析上の課題である。また、岩盤地下水資源もその起源は降水であるから、岩盤地下水の大規模な取水は、既存の井戸水量の低減や河川流量の低減など、地下水・地表水環境に影響を与える可能性があり、地下水流に加えて地表流出量の算定も課題になる。このため、同システムの取水量の設計解析手法は、地下水・地表水環境の検討に資する広領域を対象に、降水量を考慮して、取水量、地下水位および地表流出量を同時に扱えることが必要である。

このような要求機能を満たす解析手法としては、非線形の飽和・不飽和の3次元FEM地下水分解析(以下、3次元解析と称す)が想定される。3次元解析は、地下水面が一定の条件であれば取水量の算出に最も有効な手法といえるが、降水条件下で地下水面変動と地表流出を同時に算出するには、飽和地表面条件または不飽和地表面条件を満足させながら(以下、地表面処理と称す)、降水の流出成分と浸透成分を正確に算定することが要求される。しかし、飽和・不飽和の地下水分解析で不飽和地表面に時系列の降水量を入力した場合、非線形解析の反復計算過程で解の収束性が低下する場合もある。実サイトの地形を考慮した広領域モデルを想定すると、3次元解析の場合には計算容量から要素分割数が制限されるため、降水データの入力に伴う解の収束性の低下も影響して地表面処理の精度が低下することが予想され、実際の解析とは言いがたい。

このため、著者らは準3次元FEM地下水分解析(以下、準3次元解析と称す)に空洞湧水量と地表流出量の評価機能を加えた広域地下水分流動解析手法を提案している³⁾。この解析手法は、岩盤地下水取水システムの取水量・地下水面・地表流出量等の同時推定が概ね可能であるが、図-1の立坑水位の変化に伴う空洞湧水量変動の評価機能は有していない。なお、準3次元解析は、鉛直方向に地層構成を考慮し、水理パラメータを水位の関数として設定するが、鉛直流が水平流に無視できるという準一様流を仮定した解析法である。

本報告では、提案済みの広域地下水分流動解析に、立坑水位変化に伴う湧水量変動の評価機能を加えたアルゴリズムを示すと共に、広域地下水分流動解析手法を中心とした岩盤地下水取水システムの設計解析フローの考え方を示す。また、簡単に地質構造モデルを設定し、同フローを適用して、2、3の取水運転条件下における岩盤地下水取水システムの取水量・地下水面および流出量の解析例を報告する。

2. 岩盤地下水取水システムを対象とした広域地下水分流動解析

ここでは、著者らが提案済みの空洞湧水量と地表流出量の評価機能を加えた準3次元解析(広域地下水分流動解析)を概説後、岩盤地下水取水システムの立坑水位変動を考慮した空洞湧水量の推定法を含む広域地下水分流動解析法を提案し、その適用方法を示す。

2.1 提案済みの広域地下水分流動解析

いま、時間を t 、水平方向に x, y 軸、鉛直上方に z 軸を設定し、地下水流を準一様流と仮定すると、地下水位 $h(x, y, t)$ に関する飽和・不飽和の準3次元地下水流の基礎方程式は次式で与えられる⁴⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + V + Q = (S_A + S_B) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 T : 不飽和域も加味した透水量係数、 S_A : 比水分容量の地下水面から地表面までの積分値、 S_B : 貯留係数、 V : 地表における降雨浸透量、 Q : 空洞湧水等の湧出し量である。

式(1)を空間に関してはガラキン法で離散化し、時間微分項に差分法を用いれば、有限要素各節点の地下水位 h を未知量とする非線形連立一次方程式が得られ、各時刻毎に反復計算にて地下水位 h が得られ、各節点の節点流量 Q' (湧水強度×節点の支配面積)も算出できる。準3次元解析の場合、降水量は式(1)の V で考慮され、空洞湧水量も式(1)の Q で考慮されるため、どちらも解析上の入力条件である。

<空洞湧水量の推定法>

空洞湧水量は準3次元解析の入力条件であるが、本来湧水量は解析で求める地下水位に依存するため、正確な入力そのものが困難である。そこで、空洞湧水量と地下水位の相互関係を考慮するため、空洞周辺に湧水量推定用の平面範囲を設定し、この範囲の平均地下水位 H と空洞湧水量 Q_c の関係を別途求めることにする。たとえば、空洞長さが長く、空洞湧水量の3次元性が比較的小さい条件にすると、図-2のように空洞横断面上の H と Q_c の関係は、 H をパラメータとした断面二次元解析の定常計算にて求めることができる。一方、空洞長さが短く湧水量の3次元性が強い条件下の場合には空洞を取り囲む平面領域を湧水量推定用の範囲とすれば、 H と Q_c の関係は H をパラメータとした三次元解析の定常計算で同様に求めることができる。このため、平均地下水位を H と空洞(大気圧条件)の水頭差を ΔH とし、別途3次元解析等の定常計算で求めた ΔH ～空洞湧水量 Q_c (または H ～ Q_c)の関係を利用すれば、次のように地下水位変動に伴う空洞湧水量を推定できる。

- (1) 時刻毎に地下水位 h (仮定値)より、 H (仮定値)と ΔH (仮定値)を求め、図-2より Q_c (仮定値)を算出。各節点の湧水量入力値(q_c (仮定値) = Q_c (仮定値) / 空洞水平面積 × 節点の支配面積)を算出。

- (2) q'_c (仮定値) や降水等の境界条件を考慮した反復計算過程で、 h (仮定値) の変更に伴う q'_c (仮定値) の変更を行えば、解が収束した h (仮定値) $\doteq h$ (計算値) の段階で、 q'_c (仮定値) $\doteq q'_c$ (計算値) となり、地下水位変動に伴う空洞湧水量が推定できる。

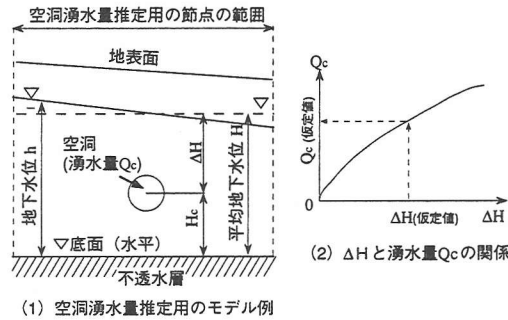


図- 2: 空洞湧水量の入力条件

<地表面処理方法と地表流出量および河川流量の推定法>

降水条件下における河川流量 $Q_r(t)$ は、地表からの地表流出量 $R_r(t)$ 、河川への降水直接流入量 $R_p(t)$ 、河川への地下水流入量 $R_s(t)$ の総和と与えられる。

$$Q_r(t) = R_p(t) + R_r(t) + R_s(t), \quad R_r(t) = R_{r1}(t) + R_{r2}(t) \quad (2)$$

ここに、 $R_{r1}(t)$ は降雨浸透能 P_{out} を超える降水の直接流出量、 $R_{r2}(t)$ は飽和地表面で地下に浸透できない降水量および地表流出量、である。

降水量 $p(t)$ を P_{out} 以下の降水成分 $P_s(t)$ と P_{out} を超える降水成分 $P_r(t)$ の和で表し、地表面を不飽和域と飽和域に分けて地表流出量と地下浸透量を図-3 に示す。図中の各流量値は有限要素法と対応させるため、 Q' や q'_c と同様に節点の支配面積を考慮して表示し、 P_r 、 P_s の節点流量値は P'_r 、 P'_s と表している。このため、不飽和地表面と飽和地表面の満足すべき地表面条件は、次のように表せる。

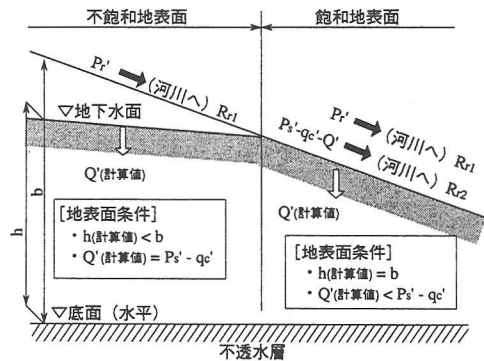


図- 3: 地表面条件と地表流出成分と地下浸透成分

[不飽和地表面を有する節点]

$$h < b, \quad Q' = P'_s - q'_c$$

[飽和地表面を有する節点]

$$h = b, \quad Q' < P'_s - q'_c \quad (3)$$

したがって、 h (仮定値) $\doteq h$ (計算値) と式 (3) の地表面条件を共に満足するまで、反復計算を行えば、不飽和地表面と飽和地表面の各節点で地表流出量と地下浸透量が算定される。このため、各時刻毎に式 (2) の $R_p(t)$ 、 $R_r(t)$ 、 $R_s(t)$ が算定され、地表流出量の河川流量に対する平均的な時間遅れ δ を仮定すれば、 $R_r(t)$ も推定され、河川流量 $Q_r(t)$ を求めることができる。

2.2 立坑水位変化に伴う空洞湧水量の評価機能をもつ広域地下水流動解析

いま、図-4のように、平均地下水位 H が同一の条件下で、立坑水位がない場合（大気圧条件）の水頭差と岩盤地下水取水システムの湧水量を $\Delta H, Q_c$ 、立坑水位が H_t の場合の水頭差と湧水量を $\Delta H_t (= H - H_t)$ 、 Q_{ct} とする。この場合、 $Q_{ct}/\Delta H_t = Q_c/\Delta H$ の関係が成立するので、 Q_{ct} は次式で得られる。

$$Q_{ct} = Q_c / \Delta H \times \Delta H_t \quad (4)$$

このため、提案済みの空洞湧水量の推定法を以下のように変更すれば、時系列の立坑水位制御に応じた地下水位変動と空洞湧水量を推定できる。

- (1) 時刻毎に地下水位 h (仮定値) より、 H (仮定値) と ΔH (仮定値) を求め、図-2 より Q_c (仮定値) を算出。また、立坑水位 H_t より ΔH_t (仮定値) $= H$ (仮定値) $- H_t$ 、 Q_{ct} (仮定値) $= Q_c / \Delta H \times \Delta H_t$ を算出。各節点の湧水量入力値 (q'_c (仮定値) $= Q_{ct}$ (仮定値) / 空洞水平面積 $\times$ 節点の支配面積) を算出。
- (2) q'_c (仮定値) や降水等の境界条件を考慮した反復計算過程で、 h (仮定値) の変更に伴う q'_c (仮定値) の変更を行えば、解が収束した h (仮定値) $\doteq h$ (計算値) の段階で、 q'_c (仮定値) $\doteq q'_c$ (計算値) となり、立坑水位を考慮した条件下で地下水位変動に伴う空洞湧水量が推定できる。

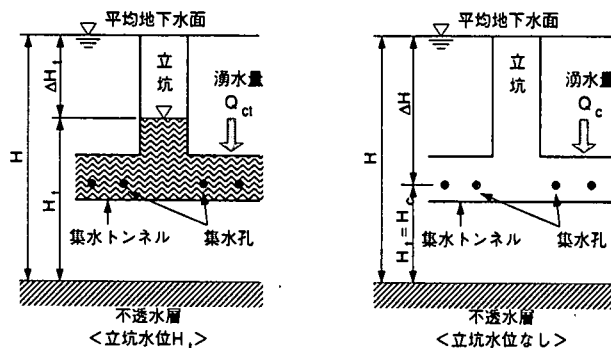


図-4 岩盤地下水取水システムにおける水頭差と湧水量の概念

地表面処理方法と地表流出量および河川流量の推定法については、提案済みの推定法がそのまま使える。このため、空洞湧水量の推定法のみを変更すれば、岩盤地下水取水システムに対しても、準3次元解析を用いて空洞湧水量と地表流出量も評価可能な広域地下水流動の解析が行える。

2.3 広域地下水流動解析の岩盤地下水取水システムへの適用方法

実サイトにおける岩盤地下水取水システムの取水量の解析方法として、広域地下水流動解析手法の利用を念頭に置いた調査～解析～取水量の設定までの検討フローを図-5に示す。図中、広域地下水流動解析は、準3次元解析を用いた「現状解析」、定常3次元解析による平均地下水位～湧水量の関係解析と準3次元解析を組み合わせた岩盤地下水取水システムの「取水解析」の2段階で構成する考え方としている。

3. 岩盤地下水取水システムの取水量に関する適用シミュレーション

ここでは、本論で提案した広域地下水流動解析を用いて、立坑水位制御による各種取水運転条件下における岩盤地下水取水システムの取水量、地下水挙動および地表水流出量等を検討するために、簡単な地形地質モデルを作成し、図-5に示した「現状解析」と「取水解析」の2段階の適用シミュレーションを行う。

3.1 解析モデルおよび解析条件

表土や風化層で構成された「表層部」とそれ以深の「岩盤部」で構成された2層モデルを対象に、解析領域を平面図と断面図で図-6に示す。地形地質構造は y 軸方向に変化しない簡単なモデルとしているが、地層厚さは EL-500m～地表面までであり、表層部と岩盤部の透水係数 K も図に記している。なお、比貯留量 s は0とする。すなわち、計算時刻毎に節点水位を仮定すると、式(1)の T は K と $\theta \sim K_r$ の関係、 S_A は $h_p \sim \theta$ 関係を用いて設定できる。また、 S_B については比貯留量 s を0と仮定しているため、 $S_B = 0$ となる。

支域1と水収支域2を設定している。立坑水位については、図-8に示す1年間の取水運転 (CASE-1~3) を対象とする。また、降雨浸透量⁶⁾については、我が国の平均的降水量 P と蒸発散量 E から $P-E=3\text{mm/日}$ と仮定した。これまで説明した解析モデル・条件で、岩盤地下水取水システム設置前の現状解析については準3次元解析による定常計算 ($t=0$ 日)、設置後の取水解析については $H\sim Q_c$ を考慮した準3次元解析による非定常計算 ($t=0\sim 365$ 日)を行う。

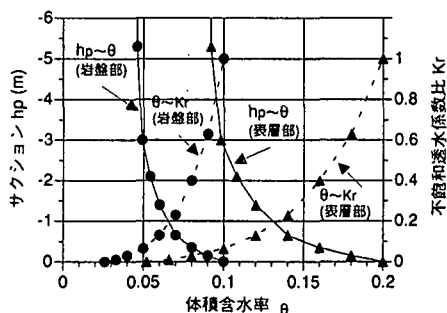


図-7: 不飽和浸透特性

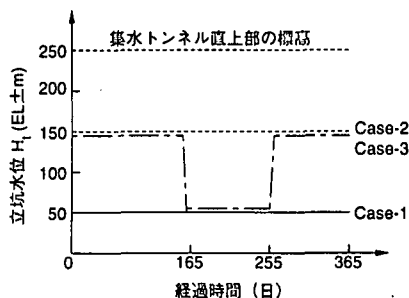


図-8: 立坑水位による取水運転条件

図-6のように集水孔は水平間隔20mで多連設置されたものであり、Muskatの無限列井戸理論⁷⁾を考慮すると、集水孔一孔あたりの湧水量は水平間隔の解析で求まるが、この間隔における対称性を利用すれば、1/2間隔幅(10m幅)の解析で比較的に精度よく求められる。そこで、平均地下水位～空洞湧水量の関係解析は、 $0\text{m} \leq x \leq 2000\text{m}$ を対象に、図-9に示す3次元解析モデルを設定する。同モデルは集水孔の1/2間隔幅の解析領域であり、平均地下水位は固定条件、集水トンネルと集水孔は大気圧の条件で、定常計算による湧水量を算出する。平均地下水位 H がパラメータであり、 H は標高表示でEL+100m, 150m, 200, 250mの4通りとする。

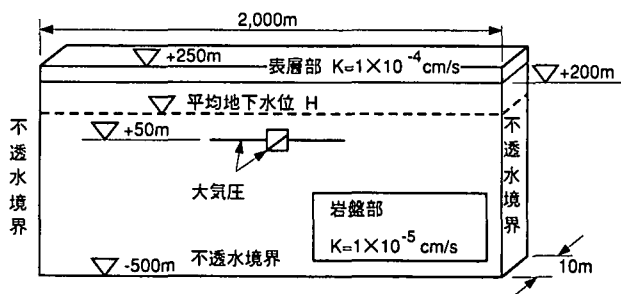


図-9: $H\sim Q_c$ 算定用の3次元解析モデル

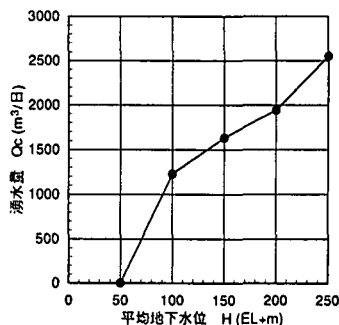


図-10: $H\sim Q_c$ の算出結果

3.2 解析結果および考察

解析結果として、平均地下水位と湧水量の関係に関する3次元解析結果を図-10に示す。 Q_c はトンネル長さ500mの総湧水量である。 H がEL+200mを超えると Q_c の増大割合が大きくなるが、これは表層50mの高透水性層の影響である。準3次元解析では、 $t=0$ 日で岩盤地下水取水システム設置前の定常計算にて「現状解析」を行い、 $t>0$ 日以降1年間について、図-10の $H\sim Q_c$ 関係を考慮した「取水解析」を行っている。準3次元解析における空洞湧水量推定用節点 ($x=1,000\text{m}$) の平均地下水位と湧水量および水収支域1の流出量の経時変化を図-11に示す。取水運転によって平均地下水位は低下するが、立坑水位を高くすることにより低下量を小さくできること、またCASE-3のように立坑水位の変更によって低下量を制御できる可能性があることがわかった。また、湧水量や流出量についても、立坑水位の制御に伴う合理的な結果が得られていることが認められる。

次に、現状解析と取水解析による地下水流動等の変化を具体的に示すため、 $t=0$ 日の現状解析結果と $t=365$ 日のCASE-1の取水結果をまとめ、図-12に示す。(1)は地下水位分布、(2)は地形コンターと浸出点分布であり、岩盤地下水取水システムの設置により周辺地下水位が低下して、浸出点も減少する様子が認められる。現状とCASE-1

の $t=365$ 日後の地下水位の差を表した低下量分布を求めると図-13 となり、岩盤地下水取水システムの地下水環境への影響を定量的に評価することができる。

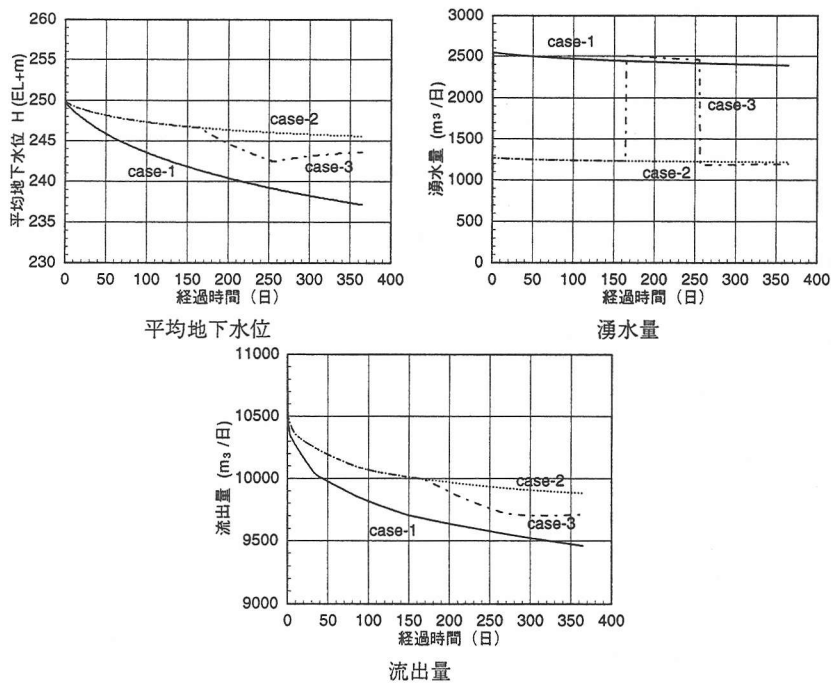


図- 11: 取水解析による広域地下水流動の経時変化

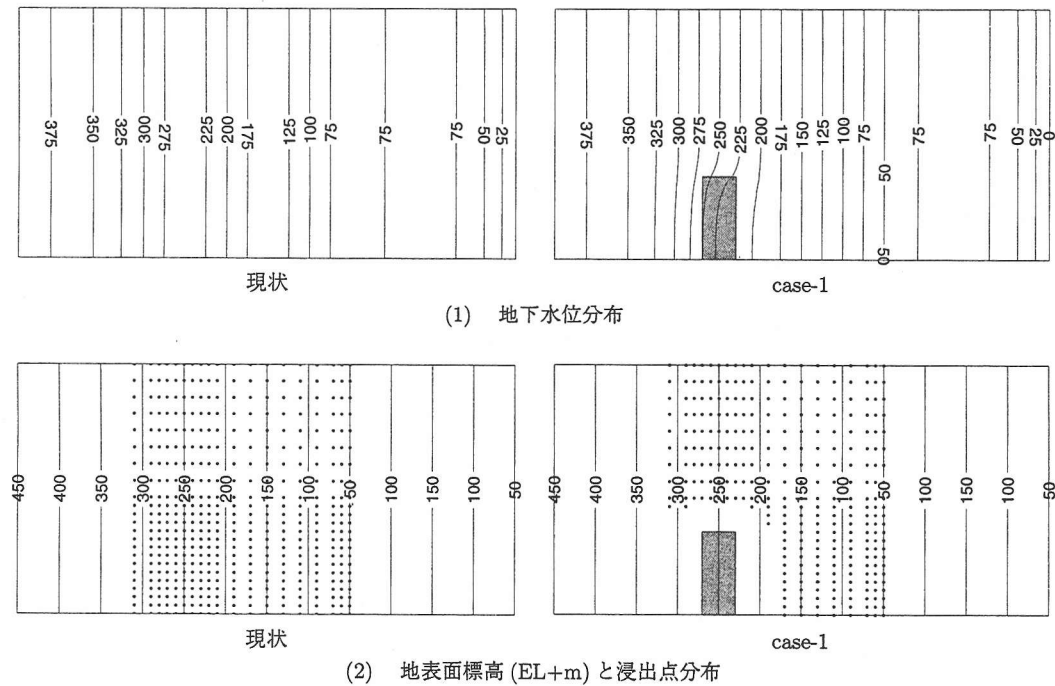


図- 12: 取水解析による広域地下水流動結果 (365 日後)

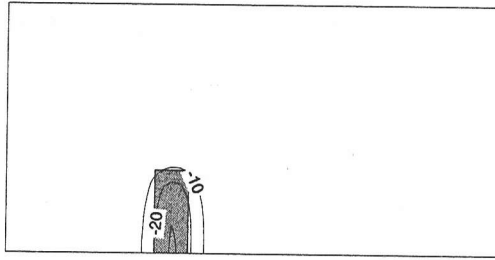


図- 13: Case-1 の取水運転による地下水位低下量 (365 日後)

4. 結 論

本論では、岩盤地下水取水システムの立坑水位制御に対して、湧水量の評価が可能な準 3 次元解析を主体とした広域地下水流動解析手法を提案し、実サイトにおける同システムの取水量の解析について同手法の適用フローを示した。また、簡単な地形地質構造モデルを設定し、適用シミュレーションを行った。得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) 適用シミュレーションの結果、提案した広域地下水流動解析手法により、立坑水位が変化する条件下でも、地下水位変動に伴う湧水量と広域地下水流動が得られると共に、地表面処理によって浸出点と地表流出量が得られることを示せた。しかし、今回のモデルは簡単なものであったため、今後は実サイトの複雑な地形地質構造や実際の時系列の降水量データに対する適用性を検討する必要があるものと考ええる。
- (2) 本手法は、立坑水位が変動する条件下でも、湧水量や広域の地下水位分布や地表流出量が算出可能であるため、地下水環境や地表水環境への影響を許容範囲内に抑える立坑水位制御方法と許容開発水量を策定できる。

参考文献

- 1) 竹中 久・西 琢郎・百田博宣・竹林亜夫：岩盤地下水資源の取水システムに関する基礎検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 4 巻，pp.95～104，1999.1.
- 2) 山田俊子・長谷川誠・百田博宣・鈴木誠・神野健二：岩盤地下水取水システムの湧水特性と湧水量近似式の基礎検討，土木学会第 53 回年次学術講演会，pp.426～427，1998.10.
- 3) 鈴木誠・百田博宣・神野健二：広域地下水解析による地表流出量と空洞湧水量の評価手法，土木学会第 55 回年次学術講演会，II-99，2000.9.
- 4) 百田博宣・佐藤邦明：割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした地下水の三次元地下水挙動の解析，土木学会論文集，No.364 / III-4，pp.41～50，1985.12.
- 5) 百田博宣・楠本 太：多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水解析，第 29 回水理講演会論文集，pp.739～744，1985.2.
- 6) 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.20～25，1979.11.
- 7) Muskat, M.: The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, McGraw-Hill, pp.524-530, 1937.