

特集 「快適な都市環境をめざして」

ヒートアイランド緩和対策への地下水利用と地盤沈下評価技術



杉江 茂彦



上野 孝之



赤川 宏幸

Effective use of Groundwater for Measurement of Heat-Island Phenomenon and Evaluation of Ground Subsidence

Shigehiko Sugie Takayuki Ueno Hiroyuki Akagawa

Abstract

If groundwater can be used as a measure for reducing the heat-island phenomenon, urban life of the summertime can be made more comfortable. This paper focuses on ground subsidence caused by groundwater drawdown, and discusses an ideal drawdown method that avoids ground subsidence and summarized a Soil/water coupled FEM analysis which is an effective method for predicting land subsidence.

In addition, the following results have been achieved by applying the analysis method to a ground model of Osaka city, (1) ground subsidence can be avoided by using groundwater in a range of natural level change, (2) enough sprinkling water can be provided for heat-island relaxation.

概要

都市部の「ヒートアイランド現象」の緩和対策に地下水を利用できれば、夏場の都市生活をより快適なものにできる。本報では地下水利用に伴う地盤沈下に着目し、沈下を極力抑えた揚水の在り方、ならびに予測評価に有効な土/水連成FEM解析の概要を紹介した。同解析法を大阪市の地盤モデルに適用した結果、地下水を自然の水位変動の範囲内で利用することにより、地盤沈下の発生を回避できること、またこのような制限を設けた揚水においてもヒートアイランド緩和対策の打ち水に必要な水量が十分に得られることが検証できた。

1. はじめに

都市部の気温が上昇傾向に有り、特に夏場に都市の中心部とその周辺地域で気温の差が生じる「ヒートアイランド現象」が顕在化している。この主たる原因には都市部でのエネルギー利用の集中と増大が考えられる。加えて土地利用の高密度化による水辺領域の減少、道路・商業利用地の舗装整備による大気に面した地表面の減少が指摘されている。水辺や地表面の減少は、大気のコールド効果を生んでいた水面・地表面および植生の葉面での水の蒸発散作用（潜熱）を低減させるものである。このように水の蒸発散量の減少・水循環の変化は「ヒートアイランド現象」と深く関連しており、水を利用した対策法が種々試行されている。例えば東京都では町を挙げての打ち水「大江戸打ち水大作戦」^{1),2)}が実施された。港区新橋地区の打ち水（2005年7月実施²⁾）では、住民1000人の参加により2m³の水がまかれ、気温が30.5℃から29℃に低

下することが確認された。当社においても水の蒸発散効果を用いた湿潤舗装システム「打ち水ペーパー」^{3),4),5)}ならびに「多機能緑化壁システム」⁶⁾を開発・実用化している。これらの対策法は広範囲に実施することで効果が高まる。そのための水の供給源としては量的面・衛生面、ならびにコストの面から地下水が有望である。近年、都市圏の地下水は揚水規制により水位が回復してきており、これによる鉄道の地下駅等への浮き上がりや漏水の弊害も生じている。環境保全と両立させながら、地下水を都市の生活や経済活動の防災面の安全性強化、快適性の向上に役立てていくことは社会的に意義深いことと考える。本報では「ヒートアイランド現象」の緩和対策への地下水利用に関して、地盤沈下の問題に着目し、沈下を極力抑えるための揚水の在り方、ならびに予測評価に有効な土/水連成FEM解析（自社ソフトGRASP3D）^{7),8)}の概要を述べる。また同解析法を大阪市の地盤モデルに適用した試算結果についても報告する。

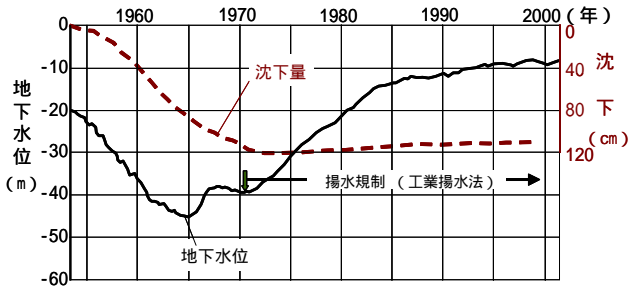


Fig. 1 地下水位の経年変動と地盤沈下⁹⁾
Aging Changes of Aquifer Water Level and Subsidence

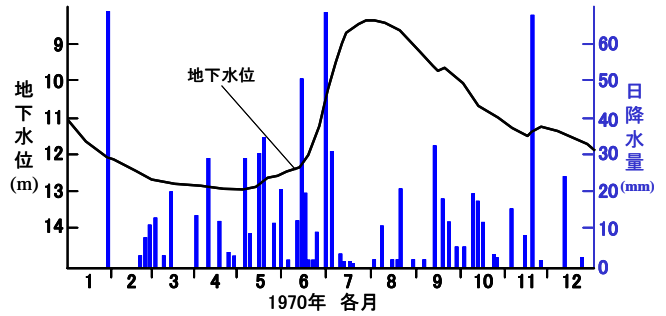


Fig. 2 地下水位の季刊変動¹⁰⁾
Quarterly Change of Groundwater Level

2. 都市圏における地下水と地盤の変動履歴

2.1 計測事例の変動傾向

関東平野の都市部で得られた地盤深部の砂礫層内の地下水位と地表沈下の計測事例⁹⁾をFig. 1に示す。戦後から高度経済成長期の1960年代までは地下水が工業用水やビルの空調に多量に用いられた。これにより地下水位が大きく低下し、地盤沈下が急増している。揚水規制が本格化したのは関東圏では1970年代（関西圏では1960年代）であり、規制以降では地下水位が上昇し沈下の進展は見られない。1990年代以降の地下水位は1950年代以前の水準に回復している。

このような揚水規制による人為的な地下水の長期変動に加えて、Fig. 2¹⁰⁾の様な年間の季刊変動の傾向もある。年毎の降水の影響を大きく受けるものであるが、一般には秋から春にかけては地下水位は降下し、夏から秋にかけて上昇する傾向がある。降水に時間遅れを伴った動きである。このような降水と連動した地下水位の変動は大阪平野や濃尾平野の都市部においても認められる。

2.2 地下水利用で留意すべき粘土層の圧密特性

帯水した砂・礫層は降水や河川水の浸透量以上に地下水が汲み上げられると層内の水圧が減少し圧縮する。加えて砂・礫層の上下の粘土層からも水が排出され、粘土層の圧縮（圧密）が生じる。特に粘土層の圧縮性は大きく沈下の大部分は粘土層で生じるため、地下水利用では粘土層の圧密に留意する必要がある。

2.2.1 粘土層の正規圧密状態での沈下特性 Fig. 1の地下水位の変動と粘土層の沈下（圧密）の関係をFig. 3に模式的に示す。横軸は粘土層に生じる地盤応力 p' 、縦軸は粘土層の体積 f である。 p' は地下水位が低下（上昇）すると増加（減少）する値である。この様な関係図は沈下の予測に用いられている。

Fig. 3中の経路は戦後～1970年の時期であり、地下水位が大きく低下したために粘土層の応力 p' は増加を続け、堆積以来経験したことの無い応力レベルを更新している過程である。地盤工学ではこの状態を正規圧密状態と呼んでいる。正規圧密状態の粘土層は、応力 p' の増加に対して体積 f の変化勾配（ $\frac{df}{dp'}$ ）が大きい。そのため沈下が生じ易い。したがって地下水の利用においては正

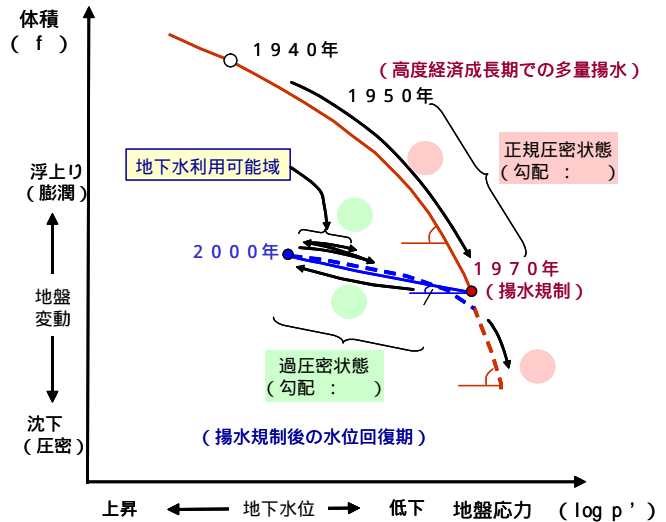


Fig. 3 粘土層の圧密沈下特性
Schematic Clayey Consolidation Character

規圧密あるいはこれに近い状態の粘土層に接した砂・礫層からの揚水は避けなければならない。

2.2.2 粘土層の過圧密状態での沈下特性 続く経路は揚水規制が本格化した1970年～2000年の水位上昇期であり、粘土層の応力 p' が減少する過程である。の正規圧密の経路に比べて、応力 p' の変化に対する粘土層の膨潤（吸水による膨張）の発生勾配（ $\frac{df}{dp'}$ ）は小さい。地下水位が再び低下した場合の経路も経路と近い勾配を辿ることになる。この様に既に経験した応力レベルの範囲内では p' が変化しても体積変化は小さく、粘土層は沈下が生じにくい。地盤工学ではこの状態を過圧密状態と呼んでいる。地下水利用においては過圧密状態の粘土層に挟まれた砂・礫層を選定し、粘土層の過圧密状態を維持できる範囲で揚水することが前提となる。

3. 揚水時の地盤沈下の評価解析法

3.1 Biotの多次元圧密理論に基づく土・水連成FEM解析 軟弱地盤を対象にした掘削工事や盛土工事では安全性や施工効率を高めるために地盤の沈下・変形や地下水の挙動を精度良く予測する必要がある。そのための解析法に土・水連成FEM解析法（自社ソフト：GRASP3D^{7),8)}がある。ここでねらいとする地下水の揚水に伴う地盤の

| | | |
|---------|--|--|
| 地盤の応力変形 | つりあい条件 | $\dot{\sigma}_{ij,j} = 0$ (1) |
| | 応力～ひずみ | $\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}$ (2) |
| | ひずみ～変位 | $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})$ (3) |
| | 有効応力の原理 | $\dot{\sigma}_{ij,j} = \dot{\sigma}'_{ij} + \dot{p}_w \delta_{ij}$ (4) |
| 地下水の浸透流 | 連続条件 | $\dot{\epsilon}_v = -v_{i,i}$ (5) |
| | Darcy則(流速) | $v_i = -k_{ij} \cdot h_{,j}$ (6) |
| | $\left(h = \frac{p_w}{\gamma_w} + \Omega \right)$ | p_w : 間隙水圧 Ω : 位置水頭 |

Fig. 4 Biotの多次元圧密理論⁽¹⁾による支配方程式 Governing Equations of Biot's Consolidation Theory⁽¹⁾

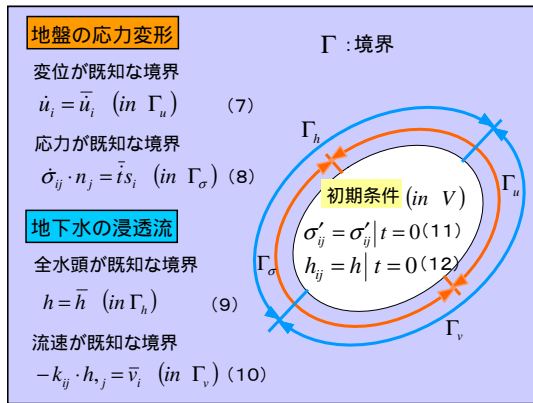


Fig. 5 Biotの多次元圧密理論⁽¹⁾の境界・初期条件 Boundary and Initial Condition of Biot's Consolidation Theory⁽¹⁾

沈下・変形の予測に適用することができる。この解析法はBiotの多次元圧密理論⁽¹⁾に基づくものであり、同理論の支配方程式をFig. 4に示す。従来別々に解かれていた地盤の変形・応力解析と地下水の浸透流解析とを同時に解くところに特徴がある。

地盤の変形・応力解析では、釣り合い式(1)、応力～ひずみ関係式(2)、およびひずみ～変位関係式(3)の三式を用いている。一方、浸透流解析では連続条件式(5)、ならびに水の流れやすさを表すDarcy則の式(6)の二式を用いている。残る式(4)は「有効応力の原理」として知られるものであり、地盤の変形・応力と地下水流れの相互の作用を関連付ける式である。

境界条件と初期条件をFig. 5に示す。地盤の応力変形に関する条件と地下水の浸透流についてのものを与える必要がある。これらの境界・初期条件(7)～(12)式のもとで、先の支配方程式(1)～(6)式を連立させて解くことにより、地盤の変形・応力、地下水の全水頭・流速の分布とその時間的変化を求めることができる。

3.2 粘土層の非線形な圧密特性の表現

2章で述べた粘土層の圧密沈下の非線形性、すなわち正規圧密状態では沈下が生じやすく、過圧密状態では沈

Table 1 関口・太田^{(2),(13)}による粘土の非線形モデル Clayey Non-linear Model Brought by Sekiguchi and Ohta^{(2),(13)}

| | | |
|-------------------|---|---------------------------------|
| 弾塑性構成モデル | | (関連流れ則) |
| 降伏関数 | $f = \epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D \cdot \eta^*$ | 有効応力～塑性ひずみ増分 |
| | $\rightarrow d\epsilon_{ij}^p = h \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}}$ (14) | |
| | ϵ_v^p : 体積ひずみの塑性成分 | ϵ_{ij}^p : ひずみの塑性成分 |
| 弾・粘塑性構成モデル | | (関連流れ則) |
| 降伏関数 | $F = \epsilon_v^{vp} = \alpha \cdot \ln \left[1 + \frac{\dot{v}_o}{\alpha} \right] \cdot \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right)$ | 有効応力～粘塑性ひずみ増分 |
| | $\rightarrow d\epsilon_{ij}^{vp} = H \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}}$ (15) | |
| | ϵ_v^{vp} : 体積ひずみの塑性成分 | ϵ_{ij}^{vp} : ひずみの塑性成分 |

Table 2 関口・太田モデルの材料・応力パラメータ Material Parameter and Stress Parameter of Sekiguchi and Ohta Constitutive Model^{(2),(13)}

| | |
|---|---|
| 材料パラメータ | |
| λ : 圧縮指数 | κ : 膨潤指数 |
| D : ダイラタンシー係数 | |
| $\left[\alpha : 2次圧密係数, \dot{v}_o : 初期体積ひずみ速度 \right]$ ← 粘性項 | |
| 応力パラメータ | |
| p' : 平均有効応力 | 一般化された応力比 (関口・太田, 1977 ⁽²⁾) |
| $q = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}, \eta^* = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{s_{ij}}{p'} - \frac{s_{ij0}}{p'_0} \right) \left(\frac{s_{ij}}{p'} - \frac{s_{ij0}}{p'_0} \right)}$ | |
| ∴ s_{ij} : 偏差応力, 添字 0 は圧密終了時の値を示す | |

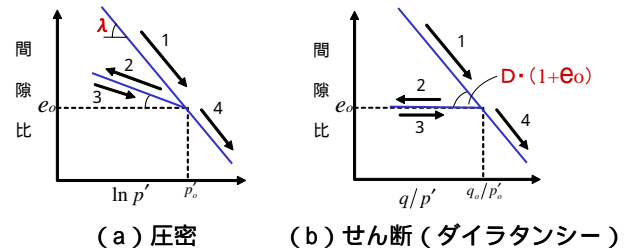


Fig. 6 粘土の体積変化の近似 Approximation of Clayey Volume Change Character

下や浮上りが生じにくい特性、を表現するためFig. 4中の応力～ひずみの関係式(2)に関口と太田の提案^{(2),(13)}による非線形モデル(以後、関口・太田モデルと表記)を用いる。同モデルでは自然堆積粘土の異方的な強度・変形特性を表現することができる。Table 1に関口・太田モデルの定義を示す。Table 2に同モデルで用いられている材料と応力のパラメータを示す。

同モデルは粘土の体積変化を圧密によるものとせん断によるもの(ダイラタンシー)の和で近似することから出発している。Fig. 6は粘土の体積変化を空隙比と応力の関係で表したものである。(a)に圧密の場合を、(b)にせん断(ダイラタンシー)の場合を示す。(a)の経路1と4は、2章で述べた正規圧密の領域の過程である。経

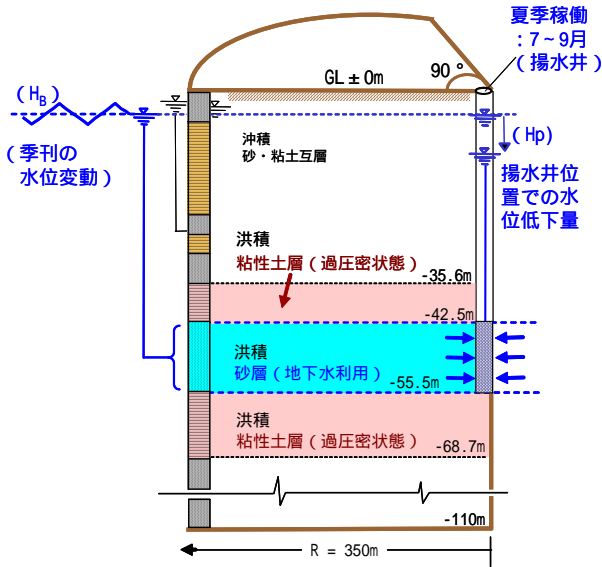


Fig. 7 地盤モデルと水理条件
Schematic Ground Model and Groundwater Condition

路2と3は過圧密の過程である。Fig. 3で示した正規圧密領域と過圧密領域での地盤変動の勾配とは、この非線形モデルではとで表現されており、地盤の圧密状態の違いによる変形・沈下の生じやすさを考慮することができる。(b)のダイラタンシーはせん断による土粒子の乗り上げや落ち込みによる体積変化である。ここでDは柴田¹⁴⁾によるダイラタンシー係数である。

弾塑性構成式では、降伏関数 f の硬化パラメータに塑性体積ひずみ e_p を選び (Table 1の(13)式)、関連流れ則を用いて、応力と塑性ひずみ s_{ij}^p の増分関係(14)式を定義している。ここで、(13)式の右辺の第1項と第2項は、先に述べた圧密とせん断による体積変化の式である。第2項の $*$ (Table 2参照)は応力比を一般化した表現であり、載荷による、応力比 s_{ij}/p' の初期先行圧密時(応力比 s_{ij0}/p'_0)からの変化量である。 $*$ を用いることにより、堆積時の異方圧密に伴う異方的な力学挙動を表現している。弾・粘塑性構成式では、さらに2次圧密の効果を加えた粘塑性体積ひずみ(15)式を定義し、これを硬化パラメータとしたスカラー関数 F に関連流れ則を用いて、応力と粘塑性ひずみの増分関係(16)式を定義している。

4. 地下水利用の試解析

4.1 沈下を抑制した地下水利用の在り方

同対策への地下水利用は夏季7月~9月に限定される。一般にこの時期は地下水位の年間変動の高水位期にあたる (Fig. 2)。年毎の降水の影響も勘案しながら、低水位期の3月~5月の水位レベルよりも上位に保ちながら揚水を行うことにより、粘土層の過圧密状態を確実に保つことができる。加えて、沈下の蓄積が年毎に進まないことを計測と予測解析の相互評価で確認する。これにより沈下を抑えながら地下水を安全に利用すること

Table 3 洪積砂層・洪積粘土層の定数値
Material Parameter values of Diluvial Clayey and Sandy Aquifer Subsoils

| | 圧縮指数 | 変形係数 | ポアソン比 | 摩擦角 | 過圧密比 | 透水係数 |
|----------|------|-----------|-------|----------|------|-------------------------------|
| 洪積粘土層(上) | 0.21 | - | 0.34 | 30(deg.) | 2.5 | 7.9×10^{-8} (cm/sec) |
| 洪積砂層 | - | 1093(MPa) | 0.35 | - | - | 2.0×10^{-2} |
| 洪積粘土層(下) | 0.13 | - | 0.39 | 30 | 2.5 | 3.0×10^{-8} |

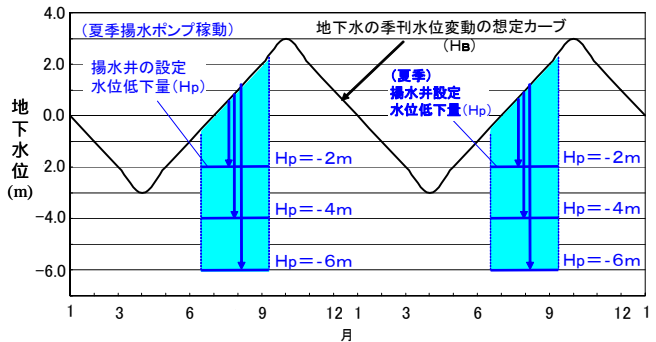


Fig. 8 地下水の想定水位変動と揚水井の設定水位低下
Assumed Quarterly Behaviours of Diluvial Sandy Aquifer Water Level and Set Water Levels of draw Well

ができると考える。

4.2 地下水利用による地盤沈下の試算

4.2.1 地盤および水位変動の解析モデル化 大阪市の地盤を採り上げる。この地盤では掘削工事において実測挙動と、ここで用いる解析法との相互検証^{15), 16)}を実施し、整合性を確認している。地層構成と揚水的位置をFig. 7に示す。揚水井による水の放射流れと変形の対称性から、地盤の軸対称の4分の1の領域をモデル化した。地表面を除くモデル境界面には面外方向の変位を拘束した。

揚水の対象層は深度50m付近に堆積する洪積砂層とした。同層は厚さ13mと十分な層厚を持ち、上下の洪積粘土層は過圧密状態にあり安定している。2.2で述べた揚水の対象とすべき砂・礫層の条件を満たすものである。これらの層の入力物性値をTable 3に示す。モデルの影響圏 ($R=350m$) はSeichardt¹⁷⁾の式により設定した。洪積砂層の季刊の水位変動をFig. 8の様に想定し、モデル外周部 ($R=350m$) に水頭境界条件として与えた。

夏季7月~9月の揚水井稼働時の揚水井の水位低下量 (H_p) を $H_p=-2m, -4m, -6m$ の3ケース設けた。加えて揚水を行わない場合1ケースの計4ケースの計算を行った。

4.2.2 全水頭および地盤沈下の計算結果 揚水時の全水頭コンターをFig. 9に示す。揚水井の水位低下量を $H_p=-2m$ とした場合の9月時の値である。7月から3ヶ月の短期の揚水であるため、水位低下が生じるのは揚水の対象とした洪積砂層とその上下の洪積粘土層に限定されている。地盤の変形については揚水井を中心とするすり鉢上の沈下に加えて、モデル外周部 ($R=350m$) 付近では洪積砂層が夏場に高水位となることに伴う隆起が得られた。地下水利用においては沈下の絶対量だけではなく沈

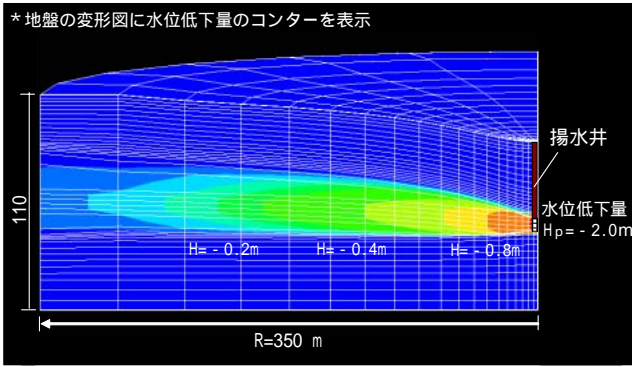


Fig. 9 揚水時の水位低下量のコンター (Hp=-2m, 9月時)
Contours of Quantity of Water Table Fall (Hp=-2m, At September)

Table 4 揚水量の算定値 (Hp=-2m)
Pumping up Water Quantity Calculated (Hp=-2m)

| | 7月 | 8月 | 9月 |
|--|---------|---------|---------|
| 排水量 (Q) (m ³ /日) | 557 | 679 | 804 |
| 打ち水可能面積 (A) (m ²) ^{*1} | 111,400 | 135,800 | 160,800 |
| 影響圏(半径R=350mの円の面積)に対する打ち水可能面積(A)の割合 (%) | 29 | 35 | 42 |

*1 夏場の蒸発量の一般値 $Q_b=5L/m^2/日$ により、 $A=Q/Q_b$ で算定

下勾配にも留意する必要がある。

揚水井近傍の地表の鉛直方向の変位をFig. 10に示す。揚水を模擬したケースでは揚水井の水位低下量(Hp)に応じて変動カーブが下方にシフトしている。揚水井の水位が年間の水位変動の最低レベル(HB=-3m)を大きく下回るHp=-6mの場合を除き、地表の変位は揚水を行わない場合(自然状態)の地盤変動の範囲内にある。したがって揚水井の水位を年間の変動の範囲内で設定することにより、沈下を回避した地下水利用が可能と考えられる。

4.2.3 揚水量の計算結果と打ち水利用からの考察

揚水井の水位をHp=-2mとした場合の7月~9月の揚水量(Q)をTable 4に示す。この量(Q)で可能なヒートアイランド緩和対策の打ち水の面積(A)を同表に示す。面積(A)の算定にあたっては、湿潤性舗装路面からの蒸発量³⁾、または、芝生の蒸発散量^{1,8)}等から、一日あたりの蒸発量(Q_b)は4~5L/m²/日と想定され、ここでは $Q_b=5L/m^2/日$ を用いた。

一本の揚水井から得られる揚水量(Q)で賄うことができる打ち水の面積(A)は、対象とする揚水井の影響圏の面積(半径R=350mの円の面積)の29%~42%にあっている。地盤モデルの対象とした地区の道路の面積は土地面積の約20%程度であり、これを上回る割合となっている。打ち水の主な対象が道路であることを考えると本試算による地下水の揚水量(Q)は当該地区の道路全体に打ち水を行うのに十分な量と言える。

また、地下水は年間を通して温度の変化が小さい。外

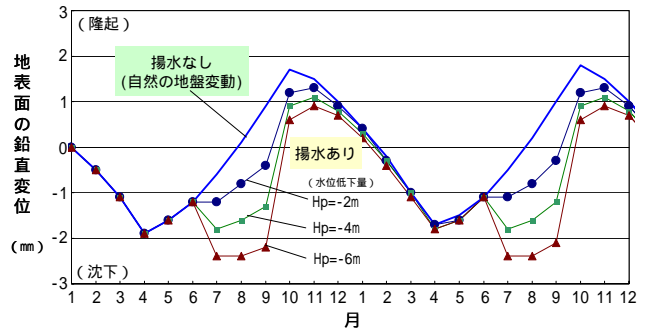


Fig. 10 揚水井近くの地表面の変動(沈下・隆起)
Vertical Behaviours of Ground Surface Adjacent to Draw Well

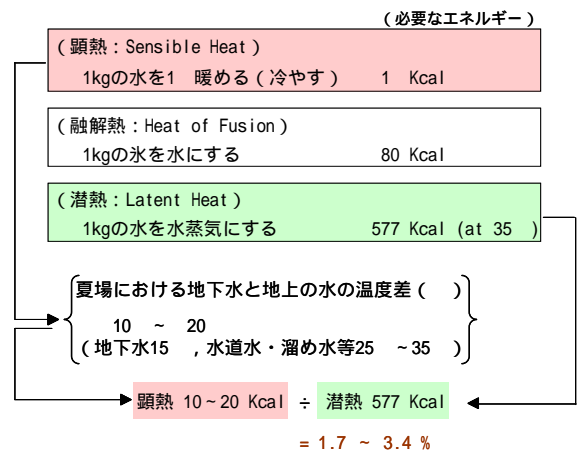


Fig. 11 潜熱(蒸発熱)と顕熱の冷却効率の比較
Comparison of Cooling Efficiency Between latent Heat and Sensible Heat

気で暖められた水道水や溜め水等を打ち水に用いる場合に比べて、地下水が低温であることによる冷却効果(顕熱の効果)も期待できる。しかし、先の蒸発による効果(潜熱の効果)を前提とした $Q_b=5L/m^2/日$ という値は、顕熱の効果を期待するには少量である。Fig. 11に試算概要を示すように、地下水と地上の水との温度差を10~20と仮定すると、顕熱によるヒートアイランドの緩和効果は、潜熱による同効果に比べて約4%未満と小さいと言える。

4.3 地下水環境への影響についての考察

前節では打ち水への地下水の利用において、地盤沈下を生じさせることなく打ち水に必要な量の地下水が得られることが検証できた。地下水環境への影響についてはどうか。揚水の対象とした洪積砂層への、揚水の影響圏(揚水井の位置を中心とした半径R=350mの領域)の外部からの地下水の流入量が、Table 4に示した揚水量(Q)を大きく下回る場合には、同砂層内の地下水が顕著に減少していくことになる。

影響圏の領域内への外部からの地下水の流入量はこれ

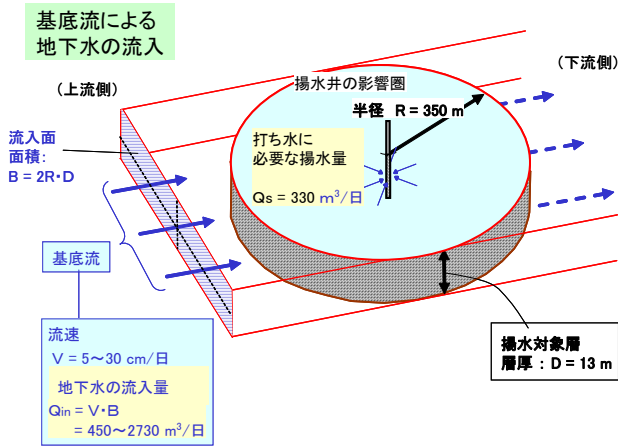


Fig. 12 基底流による地下水の流入量
Quantity of Inflow Brought by
Natural Base Flow of Groundwater

まで測定されている砂層・砂礫層内の地下水の自然な流れ（基底流）の速さから推定できる（Fig. 12参照）。砂層・砂礫層内の基底流の速さ（ V ）は広い平野部の中の都市域では $V=5 \sim 30 \text{ cm}/\text{日}$ 程度であり、この値に流入面積（影響圏の領域の投影面積）を乗じることにより、影響圏の領域内への基底流による地下水の流入量（ Q_{in} ）は $Q_{in}=450 \sim 2730 \text{ m}^3/\text{日}$ と求まる。Table 4に示した揚水量（ Q ）と同程度かそれを上回る量の地下水が影響圏の領域内に供給されることになる。対象とした地区の道路面積の割合約20%から求まる打ち水の必要水量（ Q_s ）は $Q_s=390 \text{ m}^3/\text{日}$ である。この量に近づけるように揚水を制御することにより、地下水の環境面への影響を軽微に抑えたより安全な地下水の利用が可能であると考えられる。

5. おわりに

本報では「ヒートアイランド現象」の緩和対策への地下水利用に関して、地盤沈下の問題に着目し、沈下を極力抑えるための揚水の在り方、ならびに予測評価に有効な土/水連成FEM解析（自社ソフト：GRASP3D）の概要を述べた。同解析法を大阪市の地盤モデルに適用した結果、地下水を自然の水位変動の範囲内で利用することにより、地盤沈下の新たな発生を回避できること、またこのような制限を与えた揚水条件においてもヒートアイランド緩和対策の打ち水に必要な水量が十分得られることが検証できた。地下水利用では地盤沈下の問題の他にも、本文でも触れた地下水環境への影響、加えて塩水化、土壌・植生、生物の生態系への影響など環境評価の対象は多岐にわたっている。また揚水井を複数本配置する場合場合には井戸の干渉問題も考慮する必要がある。これらを併せた総合的な評価のもとにヒートアイランド緩和対策への地下水利用の可能性を探る必要がある。

参考文献

- 1) 木内：水循環とヒートアイランド対策，水循環，VOL. 51，（社）雨水貯留浸透技術協会，pp.23～28，2003
- 2) NHK：ニュースでの報道，「港区新橋での町を挙げての打ち水の状況」，2005，7月21日
- 3) 赤川，小宮，斉藤，宮川：湿潤舗装システム「打ち水ペープ」の開発（その1），大林組技術研究所報，No. 58，pp.119～122，1999
- 4) 久保田，小宮，宮川：湿潤舗装システム「打ち水ペープ」の開発（その2），大林組技術研究所報，No. 59，pp.89～92，1999
- 5) 赤川，小宮：湿潤舗装システム「打ち水ペープ」の開発（その3），大林組技術研究所報，No. 61，pp.89～92，2000
- 6) 久保田，杉本，小宮：揚水性セラミックボードによる多機能緑化壁システムの研究開発，大林組技術研究所報，No. 67，pp.1～6，2003
- 7) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y., Sugie, S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 2, pp.1191～1196, 1991
- 8) 杉江：3次元地盤/地下水連成解析プログラム「GRASP3D」の解析理論と粘土の力学挙動解析への応用，大林組技術研究所報，No. 51，pp.15～22，1995
- 9) 東京都土木研究所：平成13年地盤沈下調査報告，2002
- 10) 土質調査法（第2回改訂版），（社）土質工学会，1982
- 11) Biot, M.A.: General theory of three dimensional consolidation, J. Applied Physics, Vol. 2, pp.155～164, 1941
- 12) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, 9th ICSMFE, Tokyo, Proc. Specialty session 9, pp.220～239, 1977
- 13) Ohta, H. and Sekiguchi, H.: Constitutive equations considering anisotropy and stress reorientation in clay, Proc. 3rd Int. Conf. Numerical method in Geomechanics, pp.475～484, 1979
- 14) 柴田：粘土のダイヤラタンシーについて，京都大学防災研究所，第6号，pp.128～134，1963
- 15) 上野，水口：大規模建築施工例，基礎工，Vol. 21, No. 7, pp.97～101，1993. 7月号
- 16) 杉江：土留め掘削地盤の挙動実測事例と有限要素法解析，第46回地盤工学シンポジウム論文集，（社）地盤工学会，pp.147～150，2001
- 17) Leonards, G.A.: Foundation Engineering, McGraw-Hill, pp.306～308，1979
- 18) 三小田：軽量土壌を用いた屋上芝生植栽の熱環境緩和効果に関する研究，日本建築学会技術報告集 No. 2, pp.116～119，1996. 3