

バンコク首都圏における地下水揚水量規制に起因する インフラ構造物への影響評価

京都大学工学研究科 大津 宏康^{*1}京都大学工学研究科 大川淳之介^{*2}水文技術コンサルタント (株) 高橋 健二^{*3}

By Hiroyasu Ohtsu, Junnosuke Okawa, Kenji Takahashi

アジア諸国では、近年の急速な経済発展過程において、水道施設を付設すること比べ安価であることから過剰な地下水揚水が実施され、それに起因する地盤沈下により深刻な社会経済的な損失が発生している。この過剰な地下水揚水は、日本では1960年代に法規制という行政的措置により解決されてきたが、そのような措置は開発途上国においては必ずしも有効ではなく、地下水利用税・地下水環境税等の経済的措置による解決が図られつつある。

ただし、過剰な地下水揚水に起因する課題の複雑さは、地下水位の低下過程で地盤沈下が多様な構造物に被害を生じるのみでなく、揚水量を低減することに成功しても、地盤のリバウンド、地下構造物へのアップリフトの増加、および基礎構造物の支持力の低減等の多様な問題を誘発する危険性を有していることである。

このような背景から、本研究ではタイ・バンコク首都圏を対象とした過剰な地下水揚水に起因する課題について検討を加える。バンコク首都圏では、1980年以降の経済発展に伴う過剰な地下水揚水によって地盤沈下などの問題が顕在化し、構造物の不同沈下や洪水災害の誘発など様々な社会的被害をもたらしてきた。この地下水揚水量の増大を防ぐために、行政は地下水利用に2000年以降課税措置を実施し地下水揚水量は減少し、帯水層の地下水位は回復してきたため、地盤沈下についても今後沈静化することが予想される。その一方で、地下水位の回復に伴い、地下構造物の浮き上がりに対する安定性、および盛土型道路の安定性等の問題が懸念される。

上記の課題に対して、本研究では将来的な地下水揚水量については、不確実性を考慮した確率過程を用いてモデル化し、モンテカルロシミュレーションによる3次元地下水流解析により算定された地下水位変動量を用いて、インフラ構造物に及ぼす影響について検討を加える。

【キーワード】地下水揚水、地盤沈下、地下水位

1. はじめに

日本を含むアジア諸国における大都市の多くは、大河の河口部に位置しており、その地質構造は河川の堆積物による粘性土および帯水砂層との互層から形成されている。従来より、その帯水砂層から揚水

された地下水が、新たに水道施設を付設すること比べ安価であることから、生活用水、農業用水および工業用水等として利用されてきた。しかし、経済成長に伴う都市部の急速な拡大に伴い、地下水揚水量が急激に増加するにつれて、地下水の枯渇、

*1 工学研究科都市社会工学専攻 075-383-3260 ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

*2 工学研究科博士前期課程学生 075-383-3263 okawa@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

*3 水文技術コンサルタント 043-298-7515

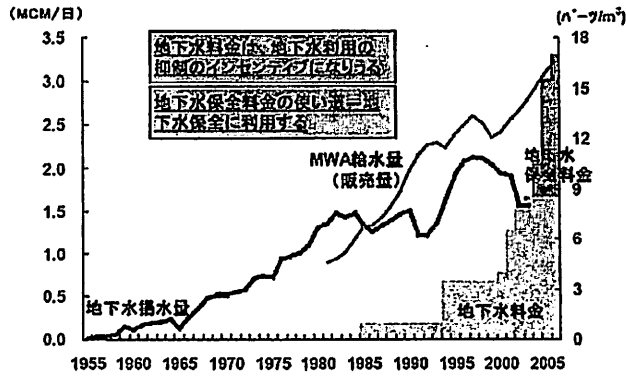


図-1 地下水揚水量と課税措置

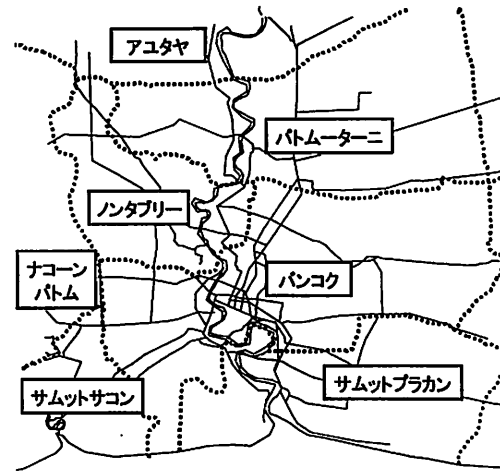


図-2 研究対象地域

地下水圧低下に伴う地盤沈下，さらには帯水層の塩水化等の都市環境保全にかかわる諸問題が顕在化してきた。これらの課題の内，従来は過剰な地下水揚水による建物被害につながる地盤沈下が主要な課題とされてきたが，その地盤沈下は，日本を始めとして，東アジア・東南アジア・南アジアの多くの大都市において発生事例が報告されている。

これらの大都市の内，本研究で対象とするタイ・バンコク首都圏は，東南アジア諸都市の中でも，早くから地下水の過剰揚水による問題が顕在化した都市である。バンコク地区では，1980 年以降の経済発展に伴う大量の地下水利用により，帯水層において大幅な水位低下が起こり¹⁾，地盤沈下や帯水層への塩水流入等の問題が生じた。なかでも地盤沈下は，バンコク地区に隣接しているチャオプラヤ川の堤防高の低下を招き，雨季における洪水リスクを増大させ²⁾，さらに，地盤沈下はバンコク南部の海岸線の後退も引き起こしている。これに加えてバンコク粘土層の高い圧縮特性は，深度の異なる基礎上に構築された構造物の間の不同沈下発生を招き，建物・道路・橋梁等に損傷を与えることで大きな社会的損失を生んでいる³⁾。

同種の問題は，かつて日本の大阪でも報告されている。戦前の大阪市では，自噴性掘抜井戸すら存在するほど地下水位は非常に高かったが，産業の発展により地下水利用が著しく増加し，地盤沈下の増加が見られるようになった。しかし，工業用水給水施設の整備が進められたことや，市が地盤沈下防止条例などの法整備を進めたことで，地下水利用は徐々に制限され，地盤沈下はそれとともにほぼ収束して

いる。ただし，その地盤沈下の沈静化の一方で，地下水利用の規制以降地下水位が大きく回復に転じた。地下水位が低い時期に建造した地下構造物の中には，水位が現状まで回復することを想定した浮力の検討設計をしていないものもあり，大阪明治安田生命館（仮称）の建て替え工事に際しては，地下構造物の浮き上がりが問題となった。また，大阪南部の泉南地方などでは，地下水位の回復上昇に伴い，最大約 10cm 程度の隆起が確認されている。

ここで，大阪をはじめとして日本の大都市においては，過剰な地下水揚水は，行政的規制による解決が図られた。しかし，筆者らが参考文献 3) に示したように，タイのバンコクにおいては，1980 年代に施行された行政による規制により，公的機関による地下水揚水量が劇的に減少したが，民間による地下水揚水量は増加の一途を辿った歴史的背景がある。このため，バンコクの行政機関は，2000 年以降，図-1 に示すように地下水利用に対する段階的な課税措置を施した。このような課税措置によって，現状として一部地域において帯水層の地下水位は回復しつつあり，今後ともその傾向は継続するものと予想されるが，一方で，大阪の事例でもみられるような新たな問題が発生する可能性がある。

このような背景から，本研究では，課税措置による地下水揚水量の変化を予測し，この揚水量の変化による帯水層における地下水位変動量予測を行い，その水位の変動量を用いて，地盤変動量予測，および将来的なインフラ構造物への影響評価を行う。なお，研究対象地域は，図-2 に示すように，前述のバ

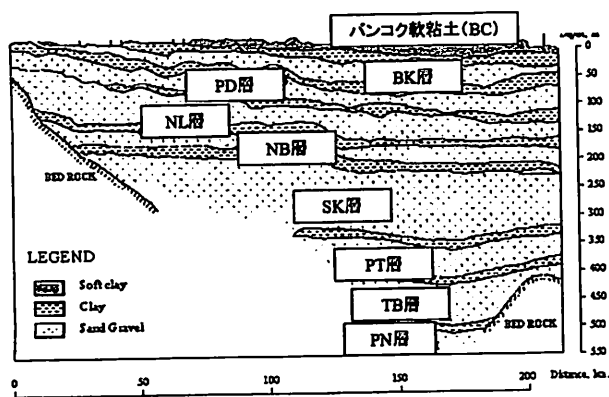


図-3 タイ中央平原南部の南北断面

ンコク首都圏の 6 地域に、アユタヤを加えた 7 地域とする。また、対象とするインフラ構造物としては、地下水位が低下した時期に建設されたバンコク地下鉄を対象とする。

2. 予測モデルへの入力データ

(1)対象地域の地盤条件

図-3 は、バンコク地区を含むタイ中央平原南部の南北断面での水理地質形状を示している。バンコクの地盤条件は、基準海面からの標高が約 0~3m という極めて低地に立地し、地表面下約 30m まではバンコク粘土として知られる青灰色を呈する圧縮性の高い海成粘土が分布しており、その下部は約 550m まで粘土層もしくは砂質粘土層によってほぼ隔てられた八つの主要な被圧帯水層に区分される。

第一層目の帯水層(Bangkok 帯水層、以下 BK と称する。)の水は元来塩分濃度が高いことに加えて、近年では生活排水等による汚染が顕在化してきたため、給水には不適とされてきた。このため、バンコク地域では、地下水の利用にあたって、第二層 (Phra Pradaeng 帯水層, PD), 第三層 (Nakhon Luang 帯水層, NL), 第四層 (Nonthaburi 帯水層, NB) の三つの帯水層に依存してきた。また、第五層 (Sam Khon 帯水層, SK) 及び第六層 (Phaya Thai 帯水層, PT) は、バンコク北西部のパトムターニ地域において多く利用されつつあり、第七層 (Thon Buri 帯水層, TB) 及び第八層 (Paku Nam 帯水層, PN) は、家庭用井戸で供するには深すぎるという点で、上部に他の帯水層が存在していないバンコク南部・南西部、サムットサコンの東部の地域で工業用途に供されて

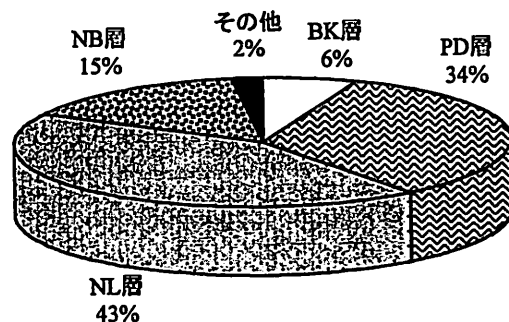


図-4 各帯水層の揚水比率

いる。³⁾

図-3 に示したように、各帯水層がそれぞれ粘土層により区分されているように表記されているが、実際の計測結果からは、その地下水挙動は粘土層によって完全には分断されていないものと推定される。これに加えて、中央平原南部全体という広範囲を解析対象としていることから、深さ方向の解析範囲で粘土層のみをモデル化することは解析上不経済である。これらの理由から、本論文では、粘土層によって分断された被圧帯水層を、帯水層と粘土層を平均化して、一つの帯水層ユニットとして取り扱うものとする。

(2) 不確実性要因の評価

a) 地盤に関する不確実性の評価

バンコク帯水層系は、BK・PD・NL・NB・SK・PT・TB・PN という 8 層の主要帯水層に区分され、図-4 に示すように地下水揚水の大部分が PD・NL・NB 帯水層からなされている⁴⁾。そのため、地下水揚水による帯水層の地下水位変動が地盤変動、および構造物の基礎に対して影響を与えている主要因になっていると推察される。ここで、本研究で用いるクリギング手法とは、地盤統計学手法の一つであり、対象物性値の観測値を用いて確率変数としての物性値の空間分布を内挿補間法に基づいて算出する方法である⁵⁾。なお、クリギングはこれら上部 3 帯水層とその上部に存在する BK 層に対して適用する。

本研究では、123 箇所のボーリングデータを用いたクリギングによって、帯水層深度と帯水層厚を推定した。この際、全帯水層の深度は正規分布に従った確率変数であると仮定している。さらに地盤変動量

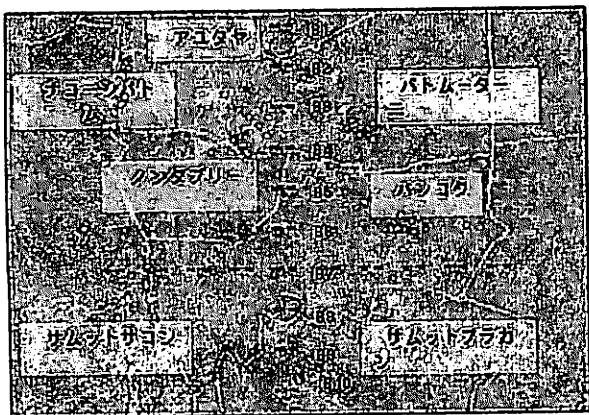


図-5 検討対象測線

の計算においては、粘土含有量も重要なパラメータであるため、粘土含有量についても、105 箇所の試料採取箇所から得られたデータを用いてクリギングにより分布を推定した。

図-5 に示すような B 測線における東西・南北方向の断面図を図-6 に示す。クリギングによる推定値は、標準偏差の範囲と共に示してある。また、ここで得られた帯水層の深度の最適推定値を、地下水流解析モデルの物性値として用い、各帯水層の層厚と粘土含有量の最適推定値を地盤変動量解析の物性値として用いる。

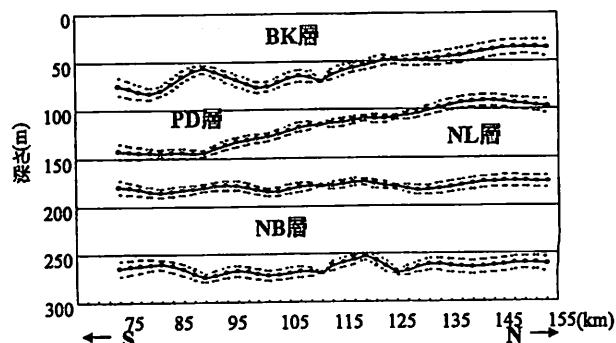


図-6 B 測線における断面図

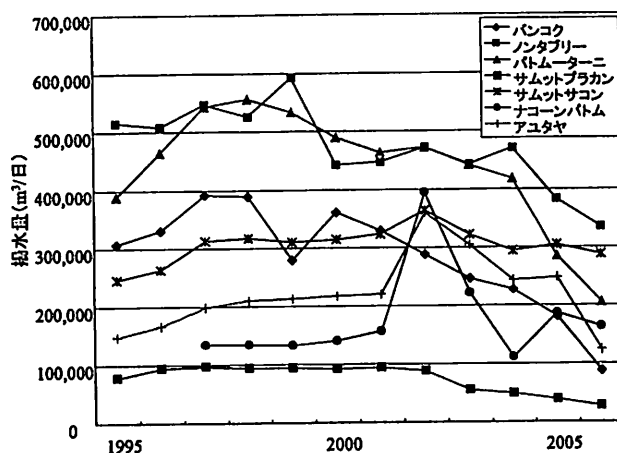


図-7 各地域の地下水揚水量

b) 将来的な地下水揚水量の予測

① 近年の地下水揚水傾向

研究対象地域の揚水井戸の 1995～2006 年の揚水量データを図-7 (ナコーンパトムの 1995, 1996 年の地下水揚水量の空白はデータの欠損によるものである。) に示す。1995～2006 年の揚水データから近年の傾向をみると、1995 年から 1990 年代の後半にかけては 7 つの地域すべてにおいて増加傾向がみられるが、バンコク・パトムターニ・サムットプラカンでは、1990 年代の後半から揚水量は減少傾向に転じ、その他の 4 地域についても 2002 年以降は軒並み減少を示している。これは、増え続ける地下水揚水量を制限するため、タイ政府が上水道給水ネットワークの拡大、地下水利用料金の値上げの実施 (1997 年)、および 2000 年度国会制定法による地下水利用に関する厳格な対応策を実施した結果であると考えられる。さらに、それ以降も地下水に対する課税が段階的に

増加するに従い、地下水の揚水量は減少を続けている。

② 地下水揚水量の予測モデル

将来的な揚水量については、不確実性を含んでおり一意的に設定することが困難であるため、本研究では、将来的な地下水揚水量に含まれる不確実性を表現するため、幾何ブラウン運動を用いてモデル化を行った。幾何ブラウン運動は非定常の確率過程を表している。次式はその幾何ブラウン運動を表す確率微分方程式を離散的に表現した式である⁹⁾。

$$Q_t = Q_0 \cdot \exp \left\{ \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma \cdot \varepsilon_t \right\} \quad (1)$$

ここで、 μ はトレンド成分、 σ はボラティリティ成分、 ε_t は標準正規分布 $N(0,1)$ 、 t は年単位の期間を示し、 Q_0 は地下水の揚量の予測を開始した 2006 年

表一 地下水揚水量のトレンドとボラティリティ

地域	トレンド μ	ボラティリティ σ
バンコク	-0.29706	0.29115
ノンタブリー	-0.29273	0.15329
パトムターニ	-0.20818	0.17222
サムットプラカン	-0.085375	0.11453
サムットサコン	-0.058087	0.068147
ナコーンパトム	-0.22112	0.54497
アユタヤ	-0.26529	0.30097
単位 (m ³ /日/年)		単位 (m ³ /日/(年) ^{1/2})

の揚水量を示すものとする。

このモデルを用いて、2006 年を基準年とした 2006～2030 年の揚水量予測を行う。

③ 地下水揚水量の予測

式(1)を用いて、7 地域のそれぞれの地下水の揚水量を予測する。なお、7 地域における総揚水量は 2002 年を境にして減少傾向を示し、地下水利用への課税規制の影響を受けて今後も減少すると考えられる。このような理由からトレンドとボラティリティ成分は、図-7に示す 2002～2006 年の各地域の地下水揚水量データの過去統計値に基づいて決定した。表一は各地域における地下水揚水量のトレンドとボラティリティを表している。トレンドの絶対値が最も大きいのはバンコクで、この 7 地域の中で最も都市部に位置するため、上水道給水ネットワークが他地域と比べ発達していることが反映されている。ボラティリティについては、ナコーンパトムで最も大きく、将来的な揚水量が最も不確実であることが予測される。

本研究では、モンテカルロシミュレーションで算定される確率の最小単位が 1%となるように、各地域において 100 通りの標準正規乱数を発生させ、100 通りの揚水パターンを設定した。各地域における、2006～2030 年の期間での 100 通りの揚水量の予測結果の代表例を図-8 に示す。地域別の特徴として、都市部のバンコクでは早い段階で揚水量がゼロに近づくのに対し、沿岸部に位置するサムットプラカンの予測揚水量が 2030 年の時点でも比較的高い水準を保っている。これは、負のトレンドのオーダーに起因す

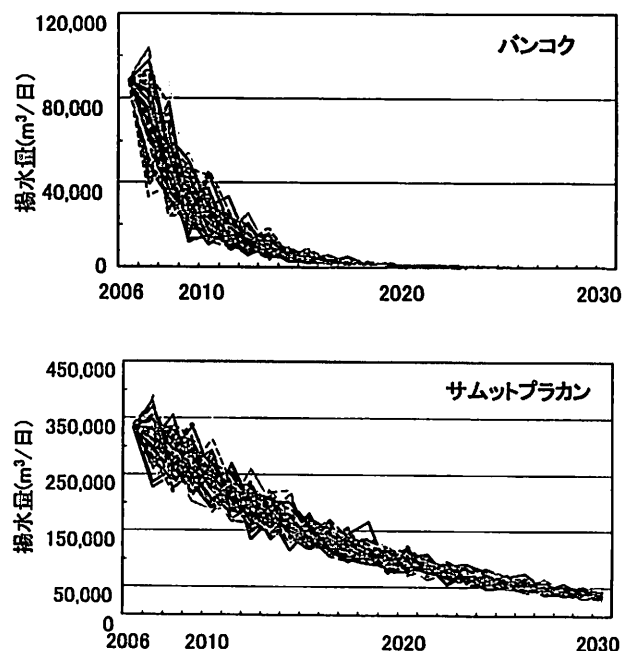


図-8 地下水揚水量の予測結果

るもので、都市部のバンコクにおいては課税による規制が反映された結果であるといえる。

3. 地下水位変動量予測

(1) 地下水流解析

a) 予測モデル

本研究では、バンコク首都圏とその周辺地域における地下水流を 3 次元モデル化する手法として、差分モジュール地下水流量モデル (MODFLOW) を選択した。MODFLOW は、帯水層が被圧もしくは不圧またはその組み合わせとなっている不規則形状を有する流動系内における定常流・非定常流をシミュレーションすることができ⁷⁾、地下水流の支配方程式は以下の式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (2)$$

ここで、 x, y, z は空間座標、 t は時間、 K_x, K_y, K_z はそれぞれ x, y, z 方向の透水係数、 h は水頭、 S_s は比貯留係数である。 R は吸い込みおよび注水項で、単位時間に単位体積あたりの系に流入する体積であらわされ、流入時にプラスをとる。比貯留係数は貯留量の

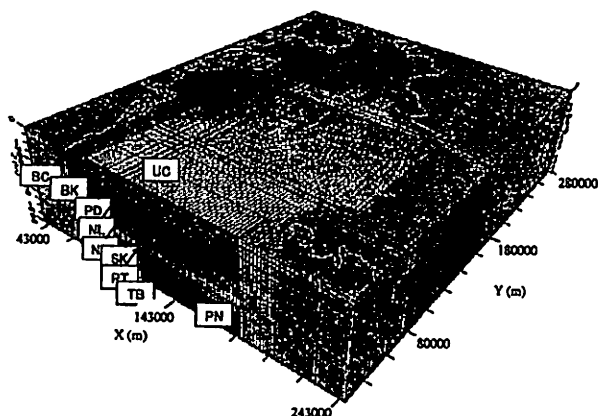


図-9 バンコク帯水層系に適用した3次元モデル

変化を表し、単位水頭変化に対して単位体積あたりに解放あるいは貯留される水量で定義される。式(2)は質量保存則とダルシー則を組み合わせることで導かれる。

b) 解析領域と境界条件

詳細な地質調査は研究対象地域に集中して行ったが、対象地域外部の地下水流は対象地域内に影響を与える可能性があり、モデルの地下水盆構造を反映させるため、中央平野南部全体の地下水流のシミュレーションを行った。従って、中央平野南部全体にモデルグリッドを設定し、詳細な検討が必要となる研究対象地域のモデルグリッド間隔は2kmとする。モデルは水理地質学上の分類に基づいて10層に分割した。バンコク帯水層系に適用した3次元モデルの構造を図-9に示す。最上部の層については、バンコク粘土層に存在するほぼ一定の表面水位をモデル上で表現するために、不圧帯水層(UC)として設定した。また、各帯水層ユニットの境界条件については、各層の境界外側にあるセルはモデル内における非活動セルとして扱い、定水位の境界条件は、UC層の活動セル全体、および各層のシャム湾内南端の列上の活動セルに割り当てた。さらに、降雨がもたらす地下水の涵養については、湾から北へ130kmほどは透水性の低いバンコク粘土層に覆われているため、降雨が地盤に直接浸透する可能性は非常に小さいものとする。ただし、図-3に示すようにBK・PD・NL帯水層に関しては、これらの層が露頭している部分

のセルについて涵養を施し、SK～PN帯水層は岩盤が境界となっている。また、モデル側面からの涵養については考慮されておらず、そのため、系への流入に関しては過小評価されており、地下水位の回復についても過小評価されていることに留意されたい。

モデルへの入力パラメータに帯水層深度や土質性状などがあるが、各層の深度については、バンコク粘土層とBK・PD・NL・NBの4帯水層にクリギングにより推定された最適推定値を用いた。また、透水係数等の土質性状は試験により得られた統計の平均値を用い、表-2にモデルに用いた土質性状のパラメータをまとめた。ここで、 S_s は比貯留率、 S_y は比浸出率、 n は間隙率である。なお、鉛直方向の透水係数については、帯水層ユニットとして取り扱っているため、砂質の層相と粘土質の層相の透水性の対数平均を用いた。

c) 揚水井戸の分布

シミュレーションの重要なパラメータの一つである地下水揚水箇所(井戸)の分布は2006年のデータ⁸⁾に基づいている。図-4に示すように、バンコク都市圏における地下水揚水比率は、PD、NL、NB帯水層が全体の95%を占めているため、本研究では、この三つの帯水層からの揚水のみをモデル化する。

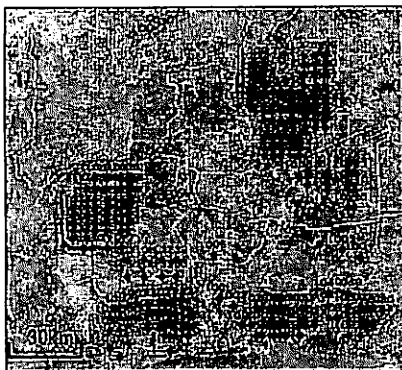
図-10に2006年の地下水揚水箇所(井戸)の分布を示した。各揚水井戸の揚水量は、各地域の総揚水量を帯水層別の揚水比率に応じて分配し、地域ごとの揚水井戸の個数で除することによって定めた。

d) 初期水頭の設定

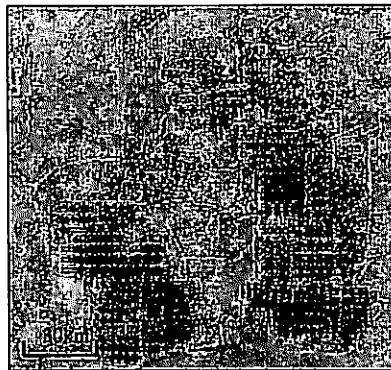
本研究では、すでに述べたように、地下水の揚水が減少傾向にあり、各帯水層における水位の変動は回復傾向を示すことが予測されるため、各帯水層の水位はあらかじめ低下させておく必要があった。しかし、本研究においては上部の4帯水層の初期水頭のみしか得られなかったため、下層の初期水頭についても推定する必要があった。よって、本シミュレーションの初期水頭は2006年の上部4帯水層の実測水頭に合致するよう1995～2006年までの揚水データに基づいてキャリブレーションを行った。この初期水頭に基づき2006～2030年の100パターン(1000)の地下水流のシミュレーションを行う。

表-2 モデルへの入力パラメータ

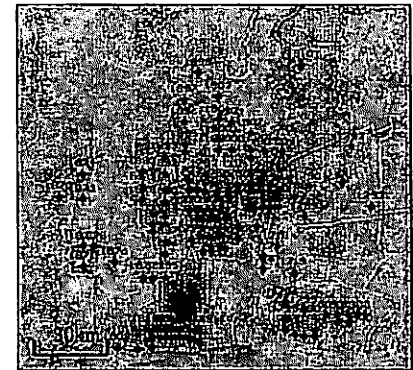
層	透水係数(m/s)			S_s	S_y	n
	K_x	K_y	K_z			
UC	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-11}	5.0×10^{-1}	0.01	0.4
BC	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-11}	5.0×10^{-1}	0.01	0.4
BK	1.50×10^{-5}	1.50×10^{-5}	1.50×10^{-8}	1.0×10^{-3}	0.01	0.3
PD	2.60×10^{-5}	2.60×10^{-5}	2.60×10^{-8}	7.0×10^{-4}	0.01	0.2
NL	3.72×10^{-4}	3.72×10^{-4}	1.86×10^{-8}	7.0×10^{-5}	0.01	0.2
NB	1.98×10^{-4}	1.98×10^{-4}	1.98×10^{-8}	7.0×10^{-5}	0.01	0.2
SK	1.86×10^{-5}	1.86×10^{-5}	1.86×10^{-8}	2.5×10^{-4}	0.01	0.2
PT	1.23×10^{-5}	1.23×10^{-5}	1.23×10^{-8}	2.5×10^{-4}	0.01	0.2
TB	1.16×10^{-5}	1.16×10^{-5}	1.16×10^{-8}	2.5×10^{-4}	0.01	0.2
PN	2.03×10^{-6}	2.03×10^{-6}	2.03×10^{-8}	2.5×10^{-4}	0.01	0.2



2. Phra Pradaeng Aquifer



3. Nakhon Luang Aquifer



4. Nonthaburi Aquifer

図-10 揚水井戸の分布

(2) シミュレーション結果

図-11 は 2006～2030 年における各帯水層における地下水位変動量の等高線図である。なお、等高線図に示す正の値は水位の低下、負の値は水位の回復を示すものとする。2006～2030 年の期間では、パトムーターニやサムットプラカンとパトムーターニの間に位置するバンコクの東部でも水位の回復がみられ、また、顕著ではないが、サムットサコンの東部でも水位回復の傾向がみられる。この水位回復の予測される地域の大きな特徴としては、2006～2030 年における地下水揚水量の絶対的な減少量が大きいのといことがいえる。

4. 地下水位変動による影響評価

(1) 地盤変動量予測

a) 地盤変動量計算式

地下水揚水による水位低下によりバンコク粘土層の圧密は長時間かけて進行する。Noppadol⁹⁾の研究に示されているように、帯水層からの地下水の揚水による全体の地盤沈下の約 25%は、最上部に存在するバンコク粘土層の圧縮から生じるものである。したがって、本来地盤の変動量を予測するには、バンコク粘土層の水位変動と水位変動に伴う圧密現象を考慮すべきある。しかし、前述したように、研究対象地域内全域で上部 4 帯水層において将来的に地下水位の回復がみられ、BK 帯水層と境界をもつバンコク粘土層においても地下水位は回復すると予測されるので、バンコク粘土層における圧密は 1 次圧密過程から 2 次圧密過程に移行すると考えられる。そのた

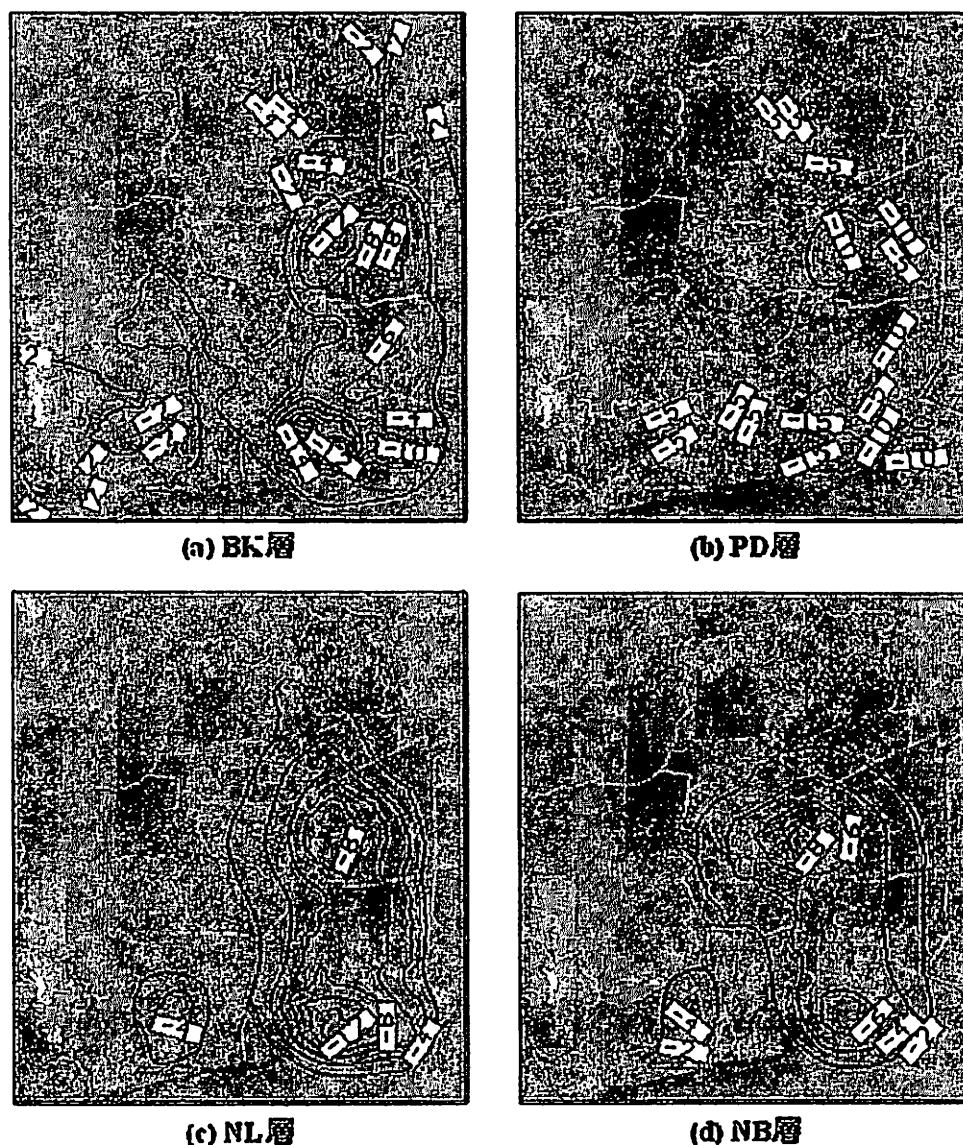


図-11 2006～2030年の各帯水層における水位変動量の等高線図

め、本研究においては帯水層ユニットの瞬時変動のみを扱い、帯水層ユニットの地盤変動量を予測する。

地盤変動量を予測するうえで帯水層ユニットの粘土成分は地下水位変動による圧縮もしくはリバウンドの影響をうける主部分であるとみなすと、各帯水層の変動量は下式で求められる。

$$\rho = \begin{cases} m_v^{(+)} \gamma_w \cdot b \cdot c \Delta h & (\Delta h < 0) \\ m_v^{(-)} \gamma_w \cdot b \cdot c \Delta h & (\Delta h > 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $m_v^{(+)}$ は体積圧縮係数、 $m_v^{(-)}$ は体積膨潤係数、 γ_w は水の単位体積重量、 b は層厚、 c は粘土含有量、 Δh は地下水位変動量である。なお、体積圧縮

表-3 各帯水層の体積圧縮(膨潤)係数

帯水層	$m_v^{(+)}(\text{m}^2/\text{kN})$	$m_v^{(-)}(\text{m}^2/\text{kN})$
BK	7.85×10^{-5}	2.72×10^{-5}
PD	2.16×10^{-5}	4.25×10^{-6}
NL	1.28×10^{-5}	2.94×10^{-6}
NB	6.85×10^{-6}	1.59×10^{-6}

(膨潤)係数、粘土含有量、層厚については、帯水層ユニットとしての値を示し、体積圧縮(膨潤)係

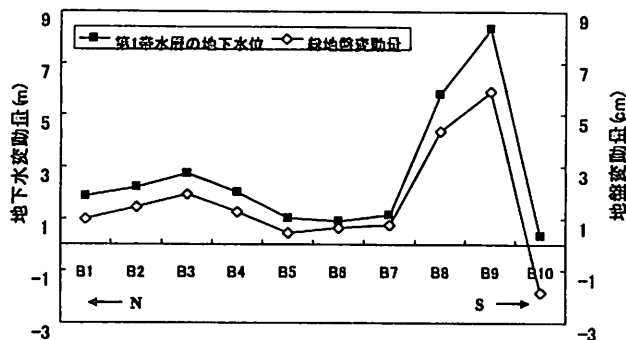


図-12 2006～2030年のB側線における
水位変動量と地盤変動量の関係

数と粘土含有量の値については、砂層部分と粘土層部分の平均値を用いている。なお、各層の体積圧縮（膨潤）係数を表-3にまとめた。この計算式は通常の圧密沈下の計算式に粘土含有量 c が乗じてある。これは国際協力機構（JICA）のバンコク首都圏地盤沈下に関する報告書¹⁰⁾の中で使用されていたものを参照した。式(3)において、上式は地下水位が減少した場合に起こる帯水層の圧縮を示し、下式は地下水位が回復した場合に起こる帯水層のリバウンドを示す。

以上より、ある地点における地盤の変動量は4つの帯水層における地盤変動量の和とし、以下の式で表される。

$$\rho = \rho_{BK} + \rho_{PD} + \rho_{NL} + \rho_{NB} \quad (4)$$

ここで、 ρ_{BK} 、 ρ_{PD} 、 ρ_{NL} 、 ρ_{NB} はそれぞれBK層、PD層、NL層、NL層の圧縮量である。この沈下量計算は以下の仮定に基づいている。

- 1) 水位が一単位分低下すると有効応力も一単位分増加する。
- 2) 帯水層の粘土要素は地下水位低下による圧縮の影響を受ける主部分とする。
- 3) 研究対象地域の地盤変動は地下水の大半が取水されているPD・NL・NB帯水層とその上部に存在するBK帯水層の圧縮量の和とする。
- 4) 体積圧縮係数、各層の層厚、粘土含有量は定数とし、層厚・粘土含有量についてはクリギングによって得られた最適推定値を用いるものとする。

b) 地盤変動量解析結果



図-13 バンコク地下鉄の通過地域図

図-12に2006～2030年の地下水位変動量、および地盤変動量を示している。なお、ここでは図-5で示したB測線のみを示し、値は100パターンの期待値を示している。なお、グラフの縦軸の正の値は地盤のリバウンドを、負の値は地盤の沈下を表すものとする。

図-12より、バンコク市内から南部の沿岸地域に向かうにつれ、地下水位の上昇幅は大きくなり、地盤の変動もB側線の南端部において若干量の隆起がみられるという結果が得られた。その他の地域についても2cm程度の隆起、あるいは沈下が予測されたが、最上部に位置するバンコク粘土層の遅延圧密を十分に考慮すれば、実際の地盤の変動量については、B測線ともに下方修正されることが予想され、将来的に地盤の変動がバンコク地区に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(2) 地下構造物の浮き上がりに対する評価

a) バンコク地下鉄の概要

図-13はバンコク地下鉄の通過地域を示しており、バンコク地下鉄がバンコク市内のほぼ中心部を通っていることがわかる。図-14に示すように、バンコク都市圏地域の地盤条件は、表層部分に軟弱粘土層が存在し、その下部に硬質粘土層および砂礫層（BK帯水層）が分布している。このような点から、バンコク地下鉄の設計の際には、地盤沈下の影響を避けることが設計条件となり、さらにバンコク粘土層の下部に存在するBK層に地下構造物を建設する場合については、透水性が非常に高く、シールドトンネ

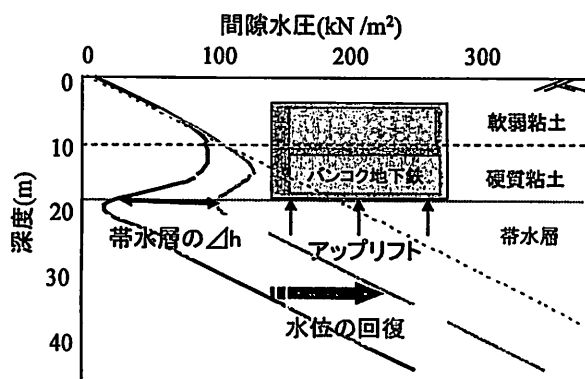


図-14 バンコク地下鉄へのアップリフトの概念図

ル掘削および駅部の掘削において、湧水が施工する際に大きな支障となる。以上から、バンコク地下鉄でのトンネルおよび駅部は、主に軟弱粘土層下部の硬質粘土層内に設計された。

このバンコク地下鉄建設は、1997～2003 年にかけて行われ、ちょうどバンコク地域において地下水の揚水量が減少傾向を示した時期と一致する。図-14 は間隙水圧の深度分布の概念図を示しており、1997 年に粘土層と BK 帯水層の境界部分の水圧がほぼゼロであると仮定している。前述したが、大阪では間隙水圧が回復することで、その回復水圧が上部の粘土層、および地下構造物に作用する現象が発生した。これに伴って、大阪地区では、地下鉄駅あるいは地下街のような地下構造物に対して、アップリフト（揚圧力）による地下構造物の浮き上がりが懸念されている。バンコク地区についても同様に BK 帯水層内の間隙水圧が回復し、BK 帯水層上部に建設されたバンコク地下鉄底部にアップリフトが作用することにより、浮き上がりの問題が懸念される。

b) 浮き上がり評価手法

バンコク地下鉄が通過する位置に、図-13 に示したように、地下水位を観測する観測井戸を合計 7 ヶ所設置した。本検討では、バンコク地下鉄が硬質なバンコク粘土層に建設されたことを考慮に入れ、図-14 に示すように、バンコク粘土層と BK 帯水層の境界部分の間隙水圧の回復分が、地下鉄の駅舎およびトンネル部分に作用するアップリフト（揚圧力）の発生をもたらすものとする。ただし、図-14 ではバンコク粘土層の深度を固定しているが、本検討で

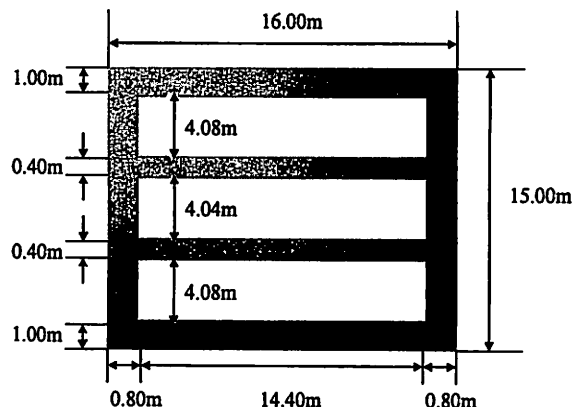


図-15 バンコク地下鉄の想定断面

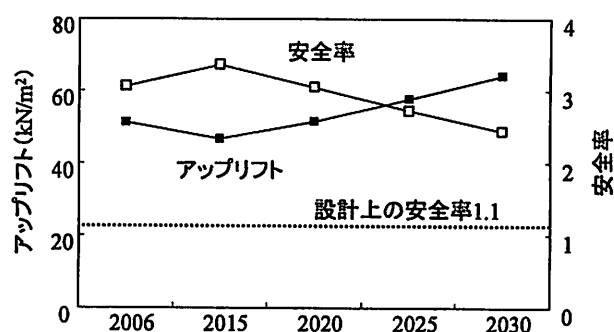


図-16 M6 地点におけるアップリフトと安全率の関係

は、観測地点ごとに粘土層の深度が異なることに留意されたい。また、ここでは駅舎に対するアップリフトの影響のみを評価するものとする。アップリフトは次式を用いて求められる。

$$F = \gamma_w (h + H) \quad (5)$$

ここに、 h は BK 帯水層の地下水位、 H は地表面から躯体底面までの深度を表す。

次に、式 (5) で算出されたアップリフトの値を用いてバンコク地下鉄の浮き上がりに対する安定性について検討する。図-15 には浮き上がりの評価を行うため、地下鉄の断面図を示した。ここでは、地下鉄に使われた部材を鋼材とコンクリートに限定し、鋼材とコンクリートが 1 対 2 の割合で用いられたと仮定している。浮き上がりに対する安定性を評価する式として以下の式を用いた。

$$\frac{W}{FB} \geq F_s \quad (6)$$

ここに、 W は躯体重量、 B は躯体底面の幅、 F_s は安全率を表す。

このような評価式を用いて、BK 層の 100 通りの水位変動に対して 100 パターンの評価を行った。

c) 結果と考察

図-16 は M 測線における M6 地点におけるアップリフトと安全率の関係を表している。なお、すべての値は 100 パターンの評価の期待値を示していることに留意されたい。この M6 地点は最も水位の変動（回復）が大きかった地点で、アップリフトの増加率が最も顕著な地点であった。

バンコク地下鉄におけるアップリフトと安全率の關係に着目すると、安全率は 2.0~3.5 までの間に分布しており、地下構造物の浮き上がりに対する安全率が一般に 1.1 程度に設定されていることを考慮すると、2006~2030 年の期間においてバンコク地下鉄は浮き上がりに対して安全だと考えられる。しかし、本研究では 2006 年を地下水位の予測開始年としたため、課税措置が厳格化する以前に揚水量の減少を示したバンコク地区では、2006 年以前の水位回復を正確に反映されていない可能性が十分に考えられ、安易に安全とは断言できない。また、日本の JR 上野駅は地下構造物の浮き上がりの一例として知られているが、この上野駅の掘削底部より約 10~15m 高い地下水位であり、約 100~150kN/m² のアップリフトが発生したことを考慮しても、バンコク地下鉄にはたらくアップリフトが、大きくはないが決して小さいものだとは断言できない。

5. まとめ

本研究では、将来的な地下水の揚水量の減少を考慮し、バンコク地域における地下水位の回復に伴う構造物への影響評価を、確率論的手法を用いてモンテカルロシミュレーションにより予測した。本研究で得られた知見は、以下のように要約される。

1) 地下水流の解析結果より、パトムーターニの西部・サムットプラカンほぼ全域で、広範囲でかつ大きな水位の回復がみられた。地下水の涵養とともに地下水位が回復した大きな要因は、地下水の揚水量の絶対的な減少量に起因するものであることが考えられる。ただし、本研究では揚水井戸

を等分布的に与えているため、地下水位の絶対的な回復量という観点では、実際の回復量よりも小さいと考えられるが、研究対象地域全体としての地下水位の回復の傾向を予測することは可能であると推察される。

2) 地下水位の回復による地盤変動の過程については、膨潤指数 κ が圧縮指数 λ に比べて小さいため、圧縮された帯水層において、地下水位の回復により有効応力が減少し、間隙比が不可逆的な経路で回復する。このため、あらかじめ圧縮された帯水層において地下水位が元の水準まで回復しても、そのリバウンド量は圧縮量と比較すると極めて小さくなるという特徴がある。

3) 沿岸部のサムットプラカン地域では、2006~2030 年の地下水揚水の減少量が特に大きかった地域でもあることから、地下水位の回復が地盤のリバウンドの支配的な要因であると推察される。ここで得られた結果と、最上部のバンコク粘土層の遅延圧密を考慮に入れると、バンコク中心部を通過する測線上では、今後地下水位の回復により地盤変動に影響は現れない、もしくはやや沈下の傾向を示すと推察される。よって、今後地下水の揚水に起因する地盤の変動に関しては、重大な社会的被害をもたらす可能性は低いと推察される。

4) バンコク地下鉄の浮き上がりに対する検討については、地下水位回復に伴う浮き上がりに対する安全率は 2.0~3.5 までの間に分布し、地下構造物の浮き上がりに対する安全率が一般に 1.1 程度であることから、2006~2030 年の期間においてバンコク地下鉄は浮き上がりに対して安全だと考えられる。しかし、前述のように、バンコク中心部の水位変動については 2000~2006 年の段階で水位が回復し、より大きなアップリフトが発生している可能性があり、決して楽観視はできない。

以上の結果より、本研究で検討対象とした地盤のリバウンドおよび地下構造物に作用するアップリフトについては、地下水揚水量の減少に伴う影響はある程度限定的であると判断される。しかし、地下水位の回復に伴い有効応力が減少することから、都市内の高架方式の高速道路、および新交通システム等の基礎構造物の支持力低下が発生することが想定される。このため、支持力低下を始めとする他の要因

についても今後検討を加えることが必要である。

加えて、アジア諸国の中では、経済発展過程において、水道施設を付設することに比べ安価であることから、今後とも特定の国においては地下水揚水量が増加することが想定される。それらの国においては、インフラ構造物の開発が過剰な地下水揚水と同時に進行した場合には、地盤沈下による構造物の損傷が、維持補修コストの増加につながるとともに、将来的な地下水回復により、新たな補強コストが発生する危険性も想定される。

このことから、例えばベトナムに代表されるようなこれからインフラ構造物開発が進展する国においては、地下水揚水に関して長期的な展望を立案するとともに、インフラ構造物のライフサイクルを想定した設計段階において、地下水位の低下・回復過程をも考慮することが不可欠になるものと推察される。

【参考文献】

- 1) Chula-Unisearch : A Study for Concept Design of Artificial Recharge of Groundwater for Conservation of Environment.Final.Technical Report submitted to the Department of Mineral Resources, Bangkok, 2000.
- 2) Noppadol Phienwej, 大津宏康, Nutthapon Supawiwat, 高橋健二: バンコクにおける地下水揚水に伴う地盤沈下, 土と基礎, 2005.
- 3) 大津宏康: 東南アジア諸国における都市地下水環境保全に関する調査研究, 2004.
- 4) Department of Groundwater Resource, 2009.
- 5) Hohn, M.E.原著, 地球統計学研究委員会 訳編: 地球統計学, 森北出版, 2003.
- 6) 保江邦夫: 数値確率解析入門, 朝倉出版, 2000.
- 7) Mary P. Anderson, William W. Woessner: 地下水モデル-実践的シミュレーションの基礎-, 共立出版, 1994.
- 8) IGES : Water for growth and development , Stakeholder Meeting on Sustainable Groundwater Management in Bangkok, Thailand, 4th World Water Forum, Mexico City, 2006.
- 9) Noppadol Phienwej, P.H.Giao, P.Nutalaya : Land subsidence in Bangkok, Thailand, Engineering Geology 82, pp.187-201, 2006.
- 10) 国際協力機構 (JICA), タイ鉱物資源局 (DMR), 公共事業局 (PWD) : バンコク首都圏地盤沈下・地下水管理計画調査, 1995.

The Study on the Effect of Mitigation of Groundwater Extraction on the Infrastructures in Bangkok Metropolitan Region

By Hiroyasu Ohtsu, Junnosuke Okawa, Kenji Takahashi

In many Asian Mega-Cities, groundwater has been extracted from relatively shallow aquifers excessively because of its cheaper cost than installation of tap water system. And, the excessive groundwater extraction also has caused various problems such as land subsidence, increase of flooding risk, salt water intrusion and so on. Therefore, the imposition of some measures to control amount of groundwater pumpage is required from a viewpoint of urban governance. For an example, in Japan, regulatory measure was successful. On the other hand, in Thailand, economic measure consisting of groundwater charge and/or groundwater preservation charge was effective.

However, recovery of groundwater level due to decrease of groundwater extraction may also cause another type of problems such as vertical displacement of subsoil, and uplift acting on underground infrastructures.

From such viewpoints, this paper aims to investigate the effect of mitigation of groundwater extraction due to economic measures on the infrastructures in Bangkok Metropolitan Region.