大阪地域における地下水環境マネジメント

地域 地盤 環境 研究所　長屋淳一
大阪市立大学大学院　　大島昭彦

１．はじめに

大阪平野における地下水変動は,戦前および昭和 30 年代の 2 度にわたり過剰な地下水汲み上げによる大規模で広域的な地下水低下が発生し，これに伴う地盤沈下が大きな社会問題となった。その後，1960 年代より法律･条例に基づく揚水規制により地下水位は上昇に転じ，2000 年代には過剰揚水による水位低下が発生する以前の水位まで回復し，地盤沈下もほぼ終息した状態となっている。しかし，地下水位が上昇したことにより，地下構造物の浮力による浮き上がり問題や地下工事において水圧の増加に伴う出水事故などの新たな問題が発生してきている。また，上昇した地下水を有効に活用するべきとの声も高まり，健全な水循環の構築に向けた地下水管理が求められている。さらに，近年，増加する専用水道による今後の地下水への影響など，これまでとは異なる新たな課題に取り組まなければならない状況となってきている。ここでは，このような大阪地域における地下水環境の変化に伴う地下水に係る課題とこれら課題に対する適正な地下水管理手法の考え方についてまとめる。

２．地下水位上昇に伴う新たな問題

1960 年以降，地下水の汲み上げ規制後，地下水位が上昇し，2000 年代には OP±0m付近まで回復した。この地下水位上昇に伴い，以下に示すような地下水に関わる新たな問題が生じた。

１）地下水位上昇による地下構造物の浮き上がり

地下水位が低い頃には現状のような水位回復を予測して地下構造物を設計されてはおらず，地下水の上昇により浮力が発生し，地下構造物を浮き上がらせることとなる。東京においても大阪と同じような地下水位上昇が生じており，ＪＲ上野駅に地下水位上昇に伴う浮き上がり問題が生じたことは良く知られている。大阪においても大阪中央区の大阪明治生命館（仮称 地上 13 階建て）の建て替え工事に際して同様の問題が生じた[1)]。昭和 40 年に建てられた旧ビルは地下 4 階，地上 9 階で，当初地下 10m だった地下水位は建て直し時には地下 2.5m まで上昇しており，上階を解体により重量が減じたことにより浮き上がりが発生する恐れが生じたため，図-1 に示すような地下階にカウンターウェイトとして重量コンクリートを打設する対策がとられた。

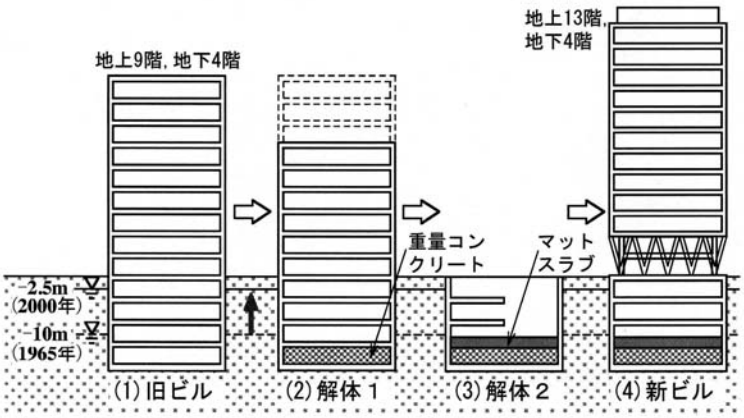


図-1 大阪明治生命館の建て替え計画[1)]

２）掘削工事における地下水対策

掘削工事において地下水対策は非常に重要であり，地下水位が上昇した状況下における掘削工事では，土留め壁に作用する水圧が増加するため，より厳しい施工条件となる。事前調査および事前設計時に比べて地下水位が上昇したことにより土留め壁の剛性を１ランク大きくしなければならなくなることや盤ぶくれに要する遮水壁の長さが長くなるあるいは，地盤改良による対策などの地下水処理が必要となり工費が増大する場合もある。また，地下水位が上昇したことにより掘削工事における掘削構内への出水の危険性も大きくなっており，実際の出水トラブル事例として片福連絡線建設工事福島地区がある。これは大阪市福島区に国道２号の地下を走る片福連絡線建設工事の開削工事において大量の地下水が噴出したもので，地上の背面地盤が幅 2.5m，長さ 30m にわたり，最大 30cm の陥没が発生し，付近の民家などに影響がでた。出水原因は，「異常出水対策委員会」によって審議され，土留壁の継目から，天満砂礫層などの高い被圧地下水が出水した可能性が高いと結論付けられた（図-2 参照）

３）地震に伴う液状化

地震による地盤の液状化は基本的には地盤の材料，有効上載圧に対する繰り返しせん断応力の相対的な大きさならびに地下水の存在状態によってその発生が左右され，地下水位が高いほど，液状化発生の可能性が大きくなる。すなわち，大阪平野における地下水位が上昇したことにより地震時における液状化の可能性が大きくなったことになる。図-3 は現況地下水位と現況よりの 3m水位が低下した場合の液状化発生予測図 [3]である。これより３m程度の水位低下で大阪市内の液状化範囲が大きく減じられることが分かる。文献 3)には水位低下による液状化被害軽減も試算されており，１～３mの地下水位低下により直下型地震で 1.3 兆円～2.9 兆円，海洋型地震で 100 億円～1440 億円の直接被害額低減が可能であるとされている。

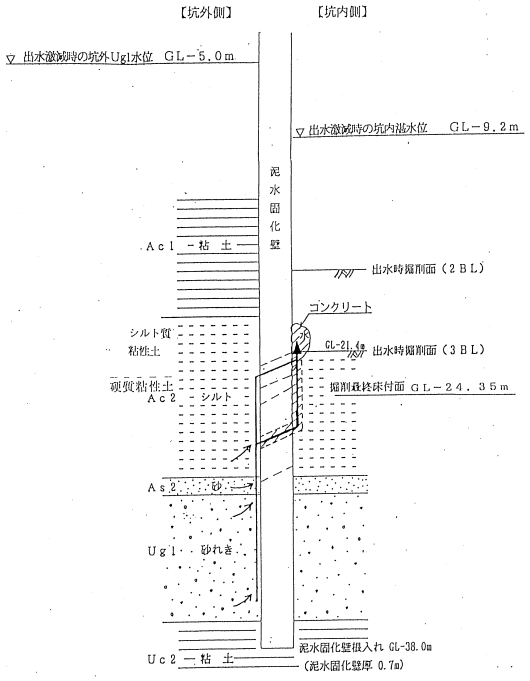


図-2　地下水流出状況 [2]

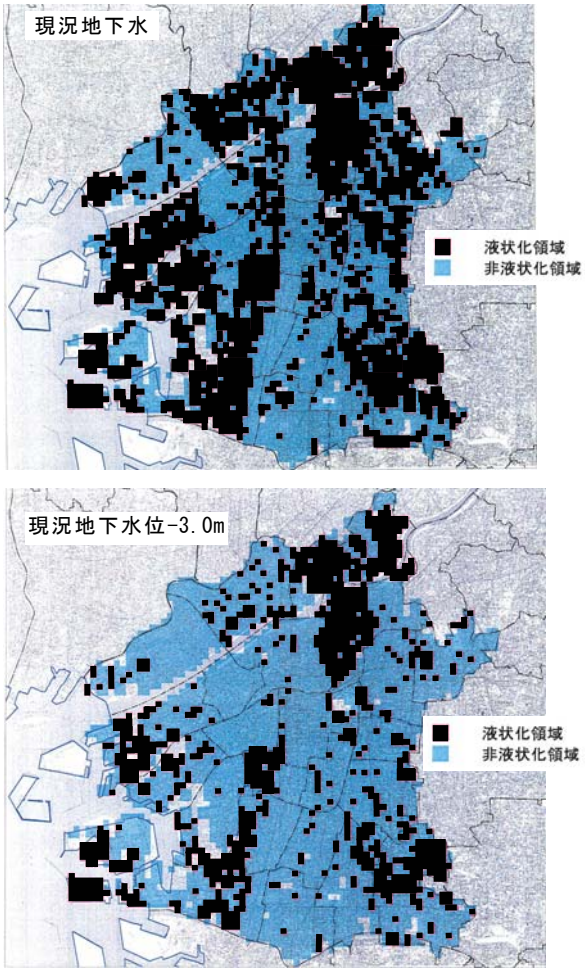


図-3 大阪市内における液状化発生予測図 [3]

３．地下水の有効利用

これまで過剰揚水に伴う地盤沈下などの地下水障害に対処するため，地下水採取規制が行われてきたが，2000 年代には地盤沈下などの問題は沈静化の傾向にあり，地下水の有効利用を求めるニーズが高まってきた。阪神淡路大震災以降，非常時用水としての利用，または環境用水など都市環境の改善のための用水など，以下のような地下水利用が望まれている。

①ヒートアイランド対策
②都市内水質汚濁河川･池等の浄化揚水
③アメニティ(親水)用水
④地下水熱を利用したヒートポンプ

環境省では地下水あるいは地中熱を利活用するヒートアイランド対策技術の環境影響などについて評価するクールシティ推進事業を推進しており，その 1 つとして堺市では，2006 年に地下水を市街地に打ち水としてまく実験が行われ，ヒートアイランドに対する地下水利用の有効性が確認された。また，大阪府では，府立国際児童文学館において地中熱利用ヒートポンプシステムを導入し，消費電力量，地下温度などを測定し，ヒートアイランド対策効果を評価するとともに，地中熱伝導による地盤環境への影響を評価する取り組みがなされている。

地下水は飲料用としても利用されるが，大阪府では条例により規制地域内で揚水機の吐出口の断面積が 6 cm^2 を超え，かつ動力を用いるものには採取規制がかけられている。しかし，近年，都市域において技術の進歩による地下水処理施設の低コスト化および水道需要者（企業）の経費削減を目的として，この規制対象とならない専用水道の設置が急増している（専用水道：居住人口が 101 人以上，または 1 日最大給水量（飲用等生活用）が 20 立方メートルを超える自家用水道などで，水源を水道水や地下水としている）。この専用水道の増加は，水道事業者の大幅な減収により，一般家庭の水道料金に波及するのみでなく，市･府への届出の必要がないためその利用実態が把握できず地下水環境への影響が懸念される。そのため，大阪市では，専用水道の利用状況を把握するために，平成 20 年 4 月より条例を改正し，専用水道設置についての届出を義務付けた。地下水の有効利用に際しては水収支のバランスを保持することが重要であり，地盤沈下の再発を引き起こすことがないよう適正な地下水管理が求められている。

４．再水位低下による沈下予測と水位低下可能量

大阪平野における地下水位の回復により浮力による構造物の安定問題などの新たな問題が生じており，さらに地下水の有効利用が求められる中で，地下水位を適正なレベルに下げる方策が必要と考えられる。しかし，再度，地下水を過剰に低下させると再び地盤沈下が発生する恐れがあり，沈下量を最小限に留めるためには，粘土層の性状を詳細に調べ，再水位低下による水位低下量と地盤沈下の関係を把握する必要がある。大阪平野においては過去の圧密沈下は未圧密部分を残した状態で地下水位が回復しているため，現状の圧密特性（特に，粘土層における圧密降伏応力の深度分布）を把握することが，再水位低下による沈下量を予測する上で重要である。大阪地域における再水位低下と地盤沈下の関係を把握するために，大島ら[4)5)6)]は，大阪地域の沖積粘土 Ma13 層と洪積粘土 Ma12 層を連続サンプリングし，詳細な物理･圧密試験結果を用いて浅層帯水層(沖積砂層，第 1 洪積砂礫層）の水位低下による粘土層の沈下量を調べ，これらのサンプリング地点を核にして「関西圏地盤情報データベース」（以下，DB)を用いて圧密特性を推定した地区を面的に広げ，大阪地域の浅層帯水層の再水位低下によって生じる Ma13

層と Ma12 層による地盤沈下量の分布を予測している [6]。ここでは，その検討の概要と浅層帯水層の水位低下可能量について述べる。

１）再水位低下による圧密沈下量

図-1 に DB から求めた大阪地域の沖積粘土 Ma13 層の層厚分布と沈下検討を行った 60 地区を示す。この内，●印で示す 10 地点にて Ma13 層の連続サンプリングを行い，圧密試験より得られる圧縮曲線(f-logp 曲線)より水位低下による圧密沈下量を求めた。また，DB による選定地区では, DB より得られる圧密特性および物理特性データより各深度における圧縮曲線を推定し，水位低下による圧密沈下量を求めた。圧密沈下量の算定方法の詳細は文献６)を参照されたい。

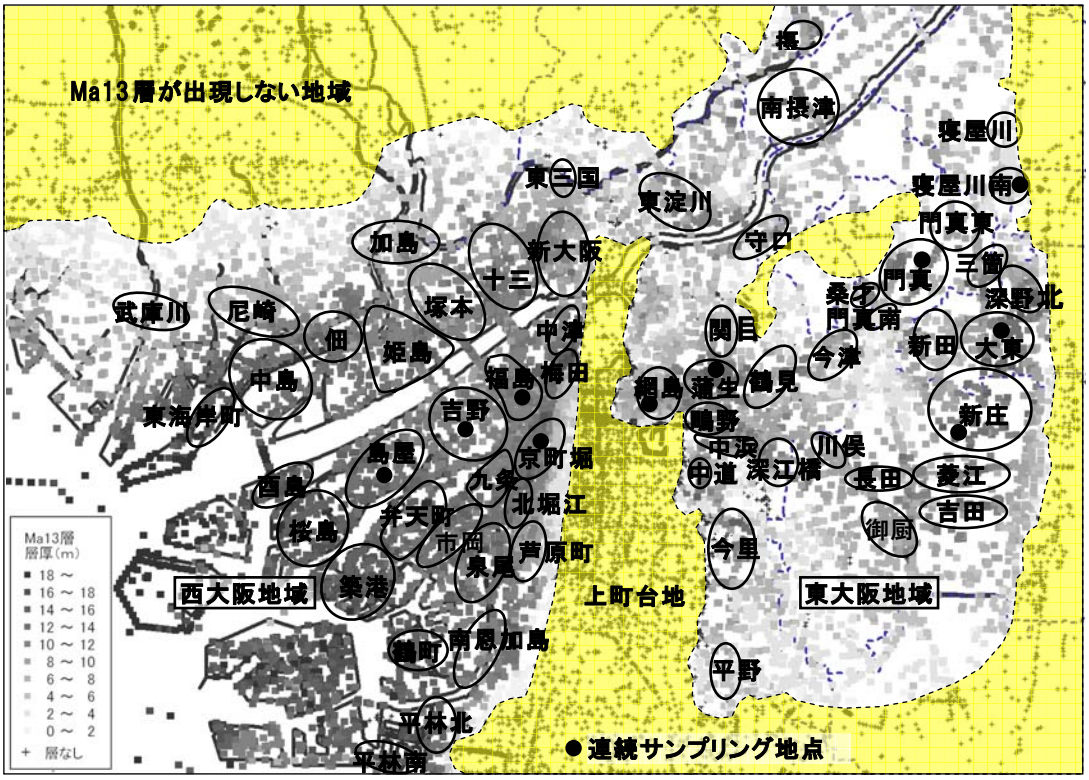


図-4　沖積粘土 Ma13 層の層厚分布と選定地区

２）沖積粘土層の沈下量に基づく地下水位低下可能量

水位低下可能量を定義する最小限の許容沈下量は，建築物については建築基礎構造設計指針から5cm程度といえるが，水位低下による沈下は広範囲で生じ，不同沈下は起こしにくいため，ここでは5～10cm程度（構造物の重要度に依存）と仮定した。

そこで，大阪地域の60地区の沖積粘土Ma13層に対して，DBによる推定圧縮曲線を用いた場合の沈下量が5，10cmとなる時の水位低下量を計算し，水位低下可能量とした（ただし，連続サンプリング地点を含む地区は実測圧縮曲線を用いた）。水位低下は沖積砂層，第１洪積砂礫層単独の場合と両層同時の場合を行った。なお，第１洪積砂礫層の水位低下はその直下にあるMa12層も沈下させるが，その量はわずかであることを確認している。表-1に連続サンプリング実施位置における沈下量5cmの場合の水位低下可能量を示す。

(1) 沖積砂層の水位低下可能量

図-5にMa13層の沈下量5，10cmに基づく沖積砂層単独の水位低下可能量の分布を示した。地域によって水位低下可能量がかなり異なるが，西大阪地域では臨海部（東海岸町-酉島-桜島-築港）で小さく，陸側ほど大きくなる。一方，東大阪地域では東南部で小さい（特に大東，新庄で小さい)。これはこれらの地区では粘土層の層厚が厚く，塑性が高いため圧縮性が高く，過圧密性が低いためである。

(2) 第１洪積砂礫層の水位低下可能量

図-6にMa13層の沈下量5, 10cmに基づく第１洪積砂礫層単独の水位低下可能量の分布を示した。やはり西大阪地域の臨海部と東大阪地域の東南部で小さいが，図-5の沖積砂層と比べると全体に水位低下可能量は大きい。これはMa13層の下方ほど過圧密性が高いためである。

(3) 沖積砂層と第１洪積砂礫層の水位低下可能量

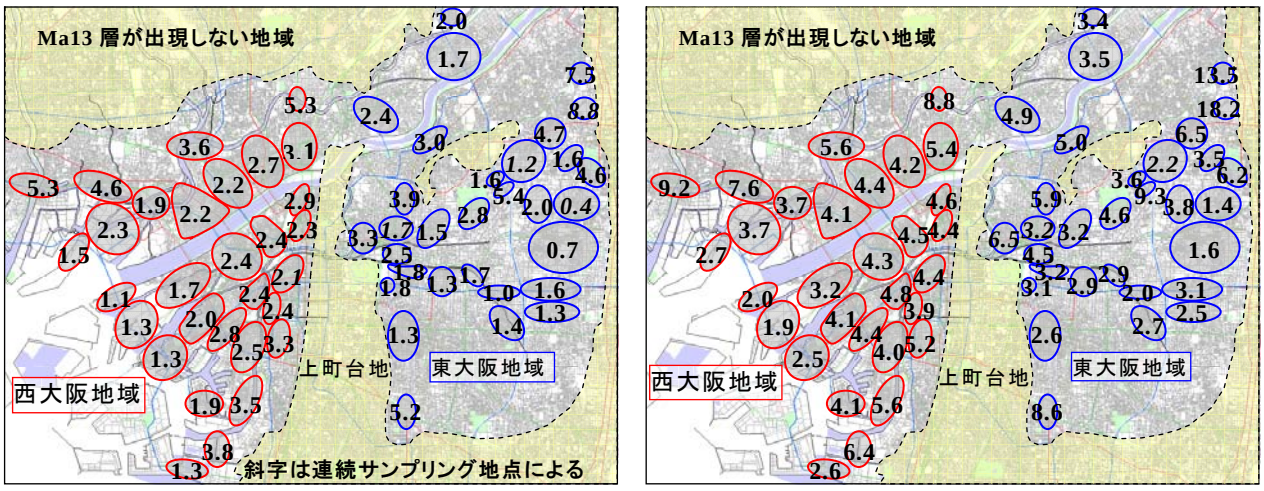
図-7にMa13層の沈下量5, 10cmに基づく沖積砂層・第１洪積砂礫層同時の水位低下可能量の分布を示した。両層同時に水位低下させると有効応力増加が大きいので，図-5，6の単独のケースに比べて水位低下可能量は小さい。やはり西大阪地域の臨海部と東大阪地域の東南部で小さい。

表-1　沈下量 5cm による水位低下可能量 (m)

粘土層	地区	上面のみ		下面のみ		上・下面	
		実測	推定	実測	推定	実測	推定
Ma13	島屋	1.7	1.8	2.7	2.5	1.0	1.0
	吉野	2.4	2.1	3.6	2.5	1.4	1.1
	福島	2.4	2.6	4.5	2.9	1.5	1.4
	京町堀	2.1	2.0	4.2	3.6	1.4	1.3
	網島	3.3	－	4.6	－	2.7	－
	蒲生	1.7	1.8	2.7	2.1	1.0	0.9
	寝屋川南	8.8	－	10.9	－	4.8	－
	門真	1.2	1.3	2.3	2.0	0.8	0.8
	大東	0.5	1.1	0.6	1.4	0.3	0.6
	新庄	0.7	1.0	1.0	1.2	0.4	0.5
Ma12	吉野	28.7	28.3	32.9	33.5	15.4	14.5
	福島	23.2	22.7	24.8	30.2	12.7	12.6
	京町堀	12.1	13.3	15.0	14.8	6.9	6.9
	寝屋川南	24.2	13.3	18.5	13.5	10.7	6.8
	門真	6.7	6.8	10.2	7.6	4.1	3.5
	大東	7.5	9.8	10.3	11.1	4.3	5.2
	新庄	8.6	7.5	8.6	7.6	3.8	3.9

(4) 浅層帯水層の水位低下可能量

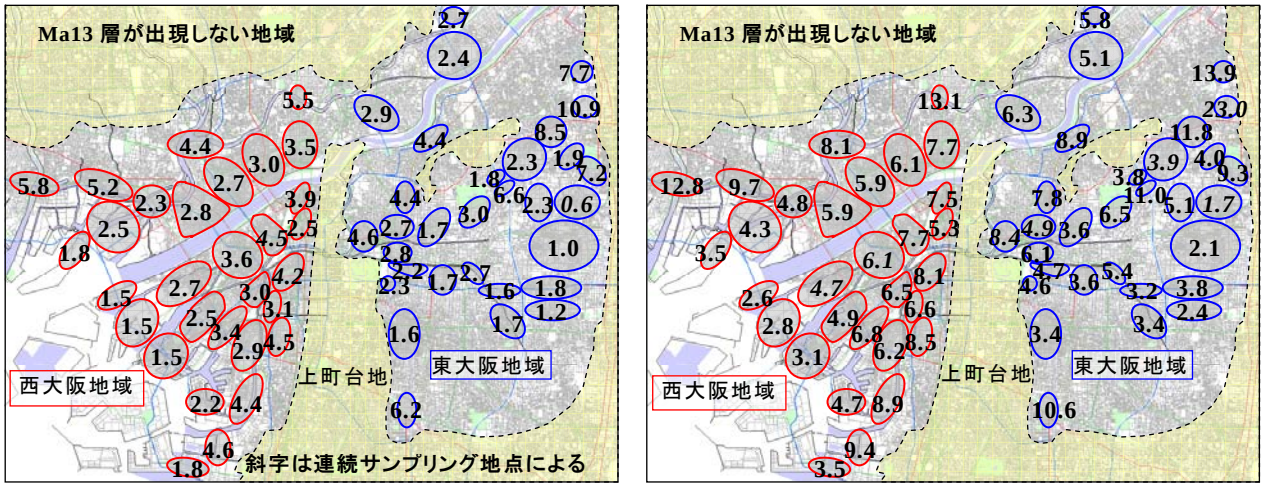
本研究では，水位低下可能量を定義する最小限の許容沈下量を5〜10cm程度（構造物の重要度に依存）と仮定した。したがって，図-5〜7から，西大阪地域の臨海部と東大阪地域の東南部を除



(1) 沈下量 5cm の場合　　(2) 沈下量 10cm の場合

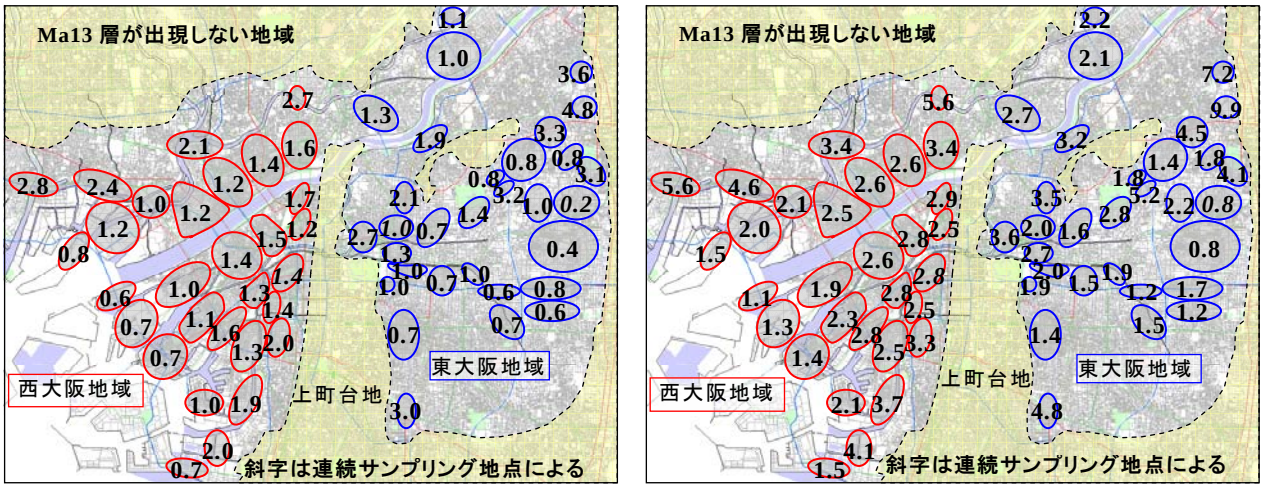
図-5 Ma13層の沈下量に基づく沖積砂層単独の水位低下可能量 (m) の分布

けば，沖積砂層，第１洪積砂礫層ともに2～3mの水位低下が可能と考えられる。ただし，両層を同時に下げる場合には1～2mに制限される。



(1) 沈下量 5cm の場合　　(2) 沈下量 10cm の場合

図-6 Ma13層の沈下量に基づく第１洪積砂礫層単独の水位低下可能量 (m) の分布



(1) 沈下量 5cm の場合　　(2) 沈下量 10cm の場合

図-7 Ma13層の沈下量に基づく沖積砂層・第１洪積砂礫層同時の水位低下可能量 (m) の分布

５．地下水管理手法

大阪地域における地下水管理は，これまで過剰揚水に伴う地盤沈下などに対処するために，地下水の採取規制を実施してきた。これにより近年では地下水が上昇し，地盤沈下も沈静化の傾向を示しているが，前述のような新たな地下水に関わる問題が生じるている。また，最近では専用水道としての地下水の利用や河川の浄化用水，ヒートアイランド対策などの環境用水としての地下水利用の必要性や地下水の有効利用を求める声が高まっている。さらに，地下水は，湧水として水辺空間を創造するとともに河川水などの表流水と密接な関係にあり，健全な水循環確保の視点からも適正な地下水管理が求められてきている。これに対して環境省では大阪地域をモデルとした地下水管理手法 [7]に関する検討が行われ，大阪地域の地下水管理における検討項目として表-2 に示すような①地盤沈下，②塩水化，③井戸･湧水の枯渇，④生態系へ影響，

⑤構造物への影響，⑥地震時の液状化可能増加，⑦土壌水分への影響，⑧表流水を含めた水循環への影響の 8 項目を挙げ，これらの影響を総合的に評価した管理水位を設定する考え方（図-8)を示した。これらの検討項目の内，地盤沈下が最も重要な管理項目であるが，大阪平野では過去に地下水位が大きく低下した履歴を持つ地盤であり，地下水位が再度低下した場合に発生する地盤沈下は，圧密履歴を受けた地盤の圧密特性（特に，圧密降伏応力の深度分布）を把握することが必要である。4 章に示した，大島らの大阪平野における水位低下量と地盤沈下量の関係は，今後の地下水管理に有用なデータを提供している。しかし，現況ではこれらの検討項目を検討できるだけのデータおよび管理技術が十分に備わっている訳ではなく，適正な地下水管理手法を構築する上では以下のような課題がある。

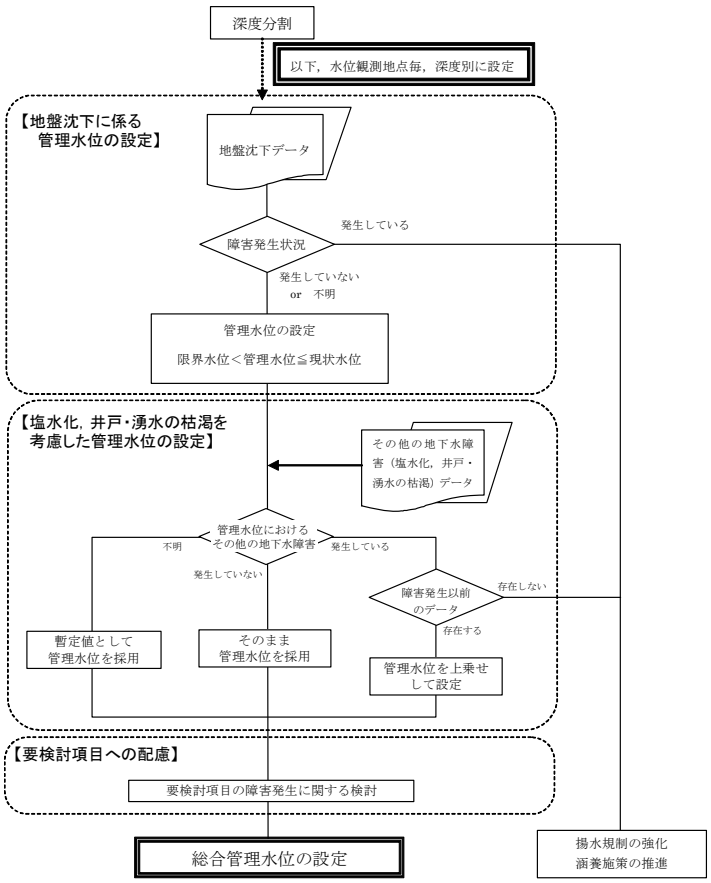


図-8 管理水位の設定フロー図

①地下水位監視の課題

大阪府域全体の観測網として,現在の大阪府･市の地下水位観測点はかつて深刻な地盤沈下に見舞われた地域に重点的に配置されており,全体的な地下水管理を行うには十分とは言えない。今後は地盤沈下の経験の無い地域も含めて観測体制の充実を図っていく必要がある。

②揚水量の把握に関する課題

表-2　大阪地域の地下水管理における検討項目

検討対象項目	大阪地域における位置づけ	直接指標例	間接指標例
地盤沈下	**管理項目**	沈下量 圧縮量	**地下水位**（揚水量）
塩水化	**管理項目**	塩分濃度 塩素イオン濃度	**地下水位**（揚水量） 海水進入量
井戸（温泉含む）・湧水の枯渇	**管理項目**	**地下水位** 湧水量	地下水流動量 揚水量
生態系への影響	要検討項目	枯木や根腐れ木 生息種類・個体数	土壌の含水率 **地下水位**（揚水量）
構造物への影響	配慮項目	構造物浮上り量 漏水量，湿度	**地下水位**（揚水量）
地震時の液状化可能性増加	配慮項目	FL 値，PL 値	**地下水位**（揚水量）
土壌水分への影響	要検討項目	土壌含水率 飽和度，ｻｸｼｮﾝ	**地下水位**（揚水量） 地温
表流水を含めた水循環への影響	要検討項目	表流水域への湧出量	地下水流動量 **地下水位**（揚水量）

（注 1）FL 値：深度ごとの液状化安全率，PL 値：FL 値を深度方向に積分した値

（注２）サクション：負圧（大気圧以下）の単位（不飽和状態の土壌水の圧力は負圧である。）

現在の大阪府の条例による地下水採取量報告の対象地域は，概ね平野部に限定されており，また，報告が必要な対象は，揚水機の吐出口断面積が 6cm^2 を超え，かつ動力を用いるものになっている。しかしながら，最近は揚水機の性能の向上もあり，吐出口 6cm^2 以下の揚水機を用いる井戸を複数本掘って地下水を多量に採取する事例が出てきており，地下水管理に際しては，揚水量が多い井戸については，地域や用途に限らずできるだけ網羅的に揚水量を把握することが望ましい。

③シミュレーションモデルによる影響分析の課題

揚水量を現在より増加させた場合や新たな地点で揚水した場合の水位変化を地下水シミュレーションモデルにより予測を行うことは地下水管理を行う上で有効である。現在，大阪府の帯水層を対象とした地下水涵養研究委員会モデル [8)]があるが，揚水量の変化による地下水位変化の予測に用いるためには，定量的な予測が行えるように，実測データに基づいたモデルの向上が必要である。

④関係機関との連携･協働

地盤環境の監視結果のみならず，水質調査結果や汚染情報について地下水利用者などに積極的に提供するとともに，事業者による観測結果の活用を図るなど関係者間の連携を密にし，地下水問題に関する啓蒙をはじめ,地下水管理の必要性に対する共通認識を形成する必要がある。

６．まとめ

大阪地域においては揚水規制により地下水位が回復，地盤沈下は沈静化し，2000年代の地下水･地盤沈下は安定期を迎えることとなった。その一方で，地下水位上昇による新たな問題を抱えることとなり，また，地下水位が上昇した状況において地下水の有効利用も求められるようになった。このようなこれまでとは異なる，新たな地下水環境の中で，地下水観測網をさらに充実させ，地下水環境の変化に応じた地下水管理手法を構築することが必要である。

＜参考文献＞

１）岡田篤生，岡 泰子：浮力とたたかうビル，日経アーキテクチャア，No.661，pp.102～117，2000

２）橋本 正，飯田智之：大阪平野における建設工事に伴う地下水の諸問題と対策，土木技術，Vol.59，No.12，pp.49～50，2004.

３）土木学会関西支部地下水制御が地盤環境に及ぼす影響評価に関する調査研究委員会：地下水制御が地盤環境に及ぼす影響評価 平成14年度講習･研究討論会テキスト，平成14年９月

４）盛岡 学，大島昭彦：大阪地域の浅層帯水層の地下水位低下による粘土層沈下量の計算方法の比較

５）大島昭彦，盛岡 学：大阪地域の浅層帯水層の地下水位低下による地盤沈下量の予測

６）大島昭彦，盛岡 学，春日井麻里，福本哲也：大阪地域の浅層地下水の水位再低下による地盤沈下量の予測，地下水地盤環境に関するシンポジウム 2008，投稿中

７）坪谷剛，藤塚哲朗，佐藤郁太郎：大阪地域をモデルとした地下水管理手法の例について，地下水地盤環境に関するシンポジウム2006 －水辺と堤防と地下水－，pp.101～110，2006.10.

８）地下水涵養研究委員会：大阪平野地下水涵養機構に関する研究 Ⅱ．涵養モデルの作業報告，地下水地盤環境に関するシンポジウム2003，pp. 65～79，2003

９）地下水地盤環境に関する研究協議会 地下水涵養研究委員会：大阪平野の広域地下水流動解析モデルと涵養気候，地下水涵養研究委員会 報告書，2005. 6.