

地下水・地盤沈下

Groundwater and Ground Subsidence

橋 本 正 (はしもと ただし)

嵯峨地域 地盤 環境 研究所 代表取締役 所長

1. はじめに

関東平野や濃尾平野と同様に、大阪平野でも戦前・戦後の大規模な工業用揚水等によって、大幅な地下水位低下とそれに伴う激しい地盤沈下が進行したが、1960年代に入り、法律や条例に基づく揚水規制が功を奏して地下水位も上昇し、地盤沈下もほとんど見られなくなっている。近年では逆に、高い地下水位（水圧）が地下構造物の建設工事に対して障害となるケースも多く、その対策として多くの労力と費用が必要となっている。

また、地下水位の上昇に伴う浮力や水圧の増大により、地下水位低下時期に建設された地下構造物が浮き上がったたり漏水したりする危険性もでてきている。さらに、地震時の液状化対策の一環として、揚水により人工的に地下水位を下げるのが検討されはじめている。一方で、温泉や冷暖房などへの、地下水を積極的に有効利用するビジネスが広がりつつあるのも最近の傾向である。

ここでは、後述の地下水地盤環境に関する研究協会¹⁾で収集された情報やそれをもとに発表された研究成果を交えて、大阪平野やその周辺部における地下水の歴史と現状および新しい取り組みを紹介し、建設工事に伴う地下水の諸問題や地下水地盤環境問題の実態と対策を概観する。

2. 大阪における地下水の実態と特徴

2.1 地形・地質概要

大阪平野部においては、海拔0 m以下の土地が淀川河口を中心とした大阪湾沿岸に広がっていることと、平野の中央部を南から北に半島状に延びた上町台地が大阪平野を2分することが地形の特徴となっている。

大阪平野では地盤情報のデータベースに基づいて帯水層構造を含む地盤構造が明らかにされている。図-1は大阪市域における東西方向の代表的な地層断面図であるが、ここでは便宜的に上部より沖積層、第1洪積砂礫層（ほぼ従来の天満砂礫層に相当）、大阪層群砂礫層（第2天満砂礫層以深の複数の帯水層を総括）の3層にわけている。大阪平野の地質構造の特徴として、南北方向の上町断層や上町台地により帯水層を含む地層が西大阪地区と東大阪地区に大きく二つに分かれることが挙げられる。

2.2 地下水の過去と現状概要

ここでは大阪市、なかでも地盤沈下が最も激しかった

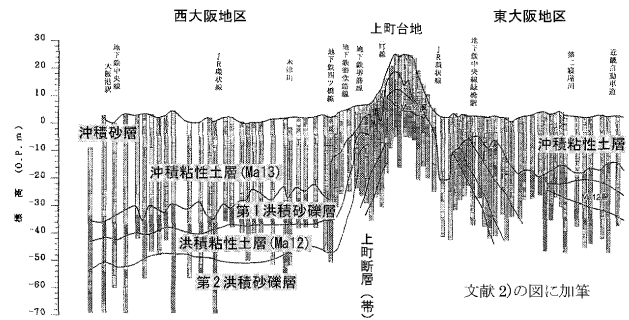
図-1 大阪平野の代表的な東西方向地質断面²⁾

表-1 西大阪地区における揚水の歴史

第1期：過去～1930年（昭和5年）
・微量揚水（ほとんど自然状態）
第2期：1930年頃～1942年（昭和17年）頃
・戦前の工業用大量揚水
第3期：1942年頃～1950年（昭和25年）頃
・戦中・戦後の大量揚水中断
第4期：1950年頃～1967年（昭和42年）頃
・戦後の工業用大量揚水
第5期：1967年頃～現在
・法律・条例に基づく揚水規制後の微量揚水

西大阪地区における揚水量・地下水位・地盤沈下の歴史の全体像を把握することを目的として、従来の部分的情報^{3)～5)}をつなぎ合わせた図-2により、地盤沈下開始前から近年までの経年変化を概観する。図-2より西大阪地区における揚水の歴史に関して表-1に示す区分ができる。

戦前戦後の地下水揚水量の増減が、直接的に地下水位の上下や地盤沈下速度に影響を与えていることは明白である。地盤沈下最盛期の第4期後半に、地下水位はO.P. -25～-30 mまで低下している。その地下水位低下時期の平均沈下速度は10 cm/年以上であるが、その後は急激に減少し、環境省基準の2 cm/年以下におさまっている。また、地盤の良い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10 cm程度の隆起が生じている。

2.3 帯水層の連続性

大阪平野における1983～2008年の地下水位の経年変化は、変動の類似性から図-3に示すように、自由（不圧）地下水・西大阪地区第1洪積砂礫層・同地区大阪層群砂礫層・東大阪地区大阪層群砂礫層の四つのグルー

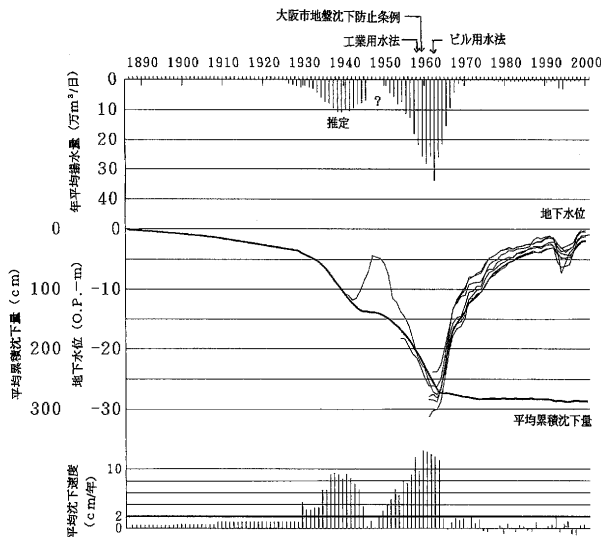


図-2 西大阪地区における揚水量・被圧地下水・地盤沈下経年変化図⁶⁾

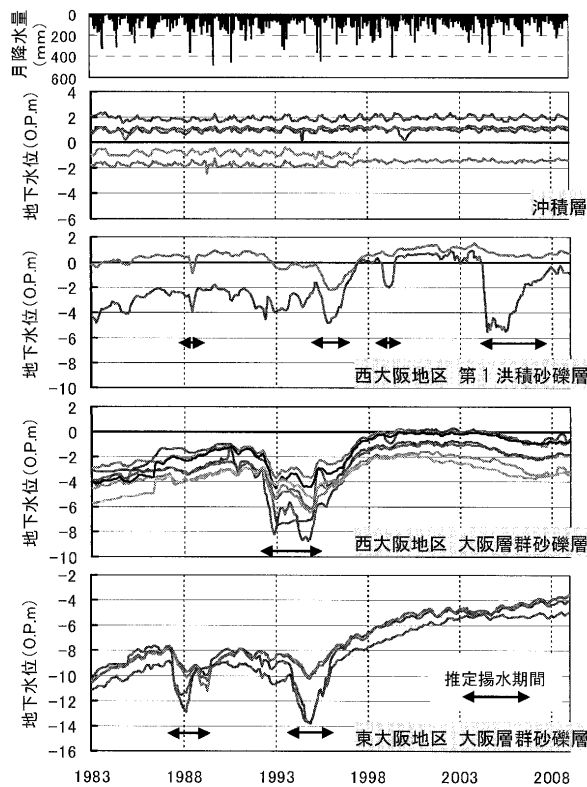


図-3 帯水層別の地下水位経年変化⁵⁾

に分けることができるが、その変動原因と帯水層の連続性に関する検討結果を以下に示す。

自由(不圧)地下水・被圧地下水・河川水の連続性

図-1に示すように、沖積層の上部層は自由地下水となっており、季節変動がわずかに見られるものの、第1洪積砂礫層や大阪層群砂礫層といった他の被圧帯水層、また海水や河川水位との連動は見られない。

被圧地下水相互の連続性

西大阪地区第1洪積砂礫層と同大阪層群砂礫層(図-1参照)の両グループの地下水位経時変化と両グループの揚水時期との関係(特に、1992~1994年の後者揚水時期と1995~1996年の前者揚水時期)を詳細に比較

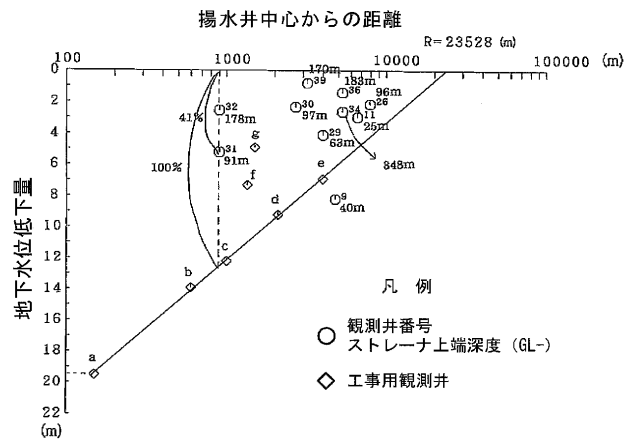


図-4 揚水による地下水位低下の例⁵⁾

すると、お互いのグループの揚水による地下水位低下の影響が見てとれる。この二つの帯水層は、同じ西大阪地区でMa12の粘土層を挟んで上下に分布しており、両帯水層は何らかの経路(粘土層の不連続部・ボーリング孔跡・観測井自体などが推定される)で連続しているようである。

2.4 帯水層の水理特性

多数の多孔式揚水試験結果⁷⁾を地域別に取りまとめると、梅田付近の大阪市中心部から沿岸部および北西部の第1・第2洪積砂礫層で、透水係数は 10^{-1} (cm/sec) オーダー、透水量係数(透水係数×帯水層厚)は 10^0 (m^2/min) オーダーと、他の地区や他の帯水層と比較して1オーダー以上大きいことがわかった。また、影響圏半径 R と透水量係数 T は、平均的に $R=3800 T^{0.83}$ の関係にあること、単孔式透水試験から得られる透水係数は、多孔式試験結果の1/10以下の場合が多いことなどの結果が得られた。

実施工時の揚水は広域的にみた場合の大規模な揚水試験とみなすことができる。梅田付近での揚水の例を以下に示す。

図-4は第2洪積砂礫層での揚水中心からの距離の対数と地下水位低下量の関係を示したものであるが、揚水中心からみて西側の工事用観測井a~eのデータはほとんど一直線上にプロットされ(◇印)、理想的な定常井戸理論(Thiem式)が適用できる。そこで直線勾配と推定総揚水量をあてはめて計算すると、透水量係数 T は 10^0 オーダー (m^2/min) と非常に大きな値(大阪市内の揚水試験結果によると、 10^{-1} オーダーが多い)となる。また、図に示すように影響圏半径 R は23.5 kmと大阪地下水盆の半径に匹敵するような大きな値となっており、1箇所での揚水の影響が西大阪地区全域におよぶことを示している。

2.5 地下水の塩水化

西大阪地区の第1洪積砂礫層の塩素イオン(Cl^-)濃度は、1950年代と比べて1990年代では上昇がみられる⁸⁾。塩素イオン濃度は海岸に近い程大きい、1990年代には福島付近でも約6000 ppmと海水の1/3程度の濃度が観測されている。

3. 地下掘削工事における地下水対策

3.1 地下水対策工の変遷

地下掘削工事においては、地盤特性、掘削深度、地下水位などによって地下水対策が異なる。地下水対策工は大別すると地下水位低下工法か遮水工法に分けられる。1980年頃までは、掘削深度も G.L. - 20 m を越えるものも少なく、また地下水位も G.L. - 10 m 以深に低下していたため、親杭横矢板工法等の簡易な土留めと揚水工法が主な地下水対策であった。1980年以降は、地下水位上昇と掘削深度の増大に伴い、SMW や連続地中壁などの遮水壁工法と盤ぶくれ対策のための揚水工法の事例が多くなるが、土留め壁欠損部等からの出水トラブルや周辺地盤の地盤沈下の発生が問題となってくる。特に1975年の大阪駅前第2棟建設時の出水トラブルと1992年の片福連絡線福島地区での出水トラブルは、世間を騒がせた。これら出水トラブルや大量揚水に伴う地盤沈下の発生などを契機に、遮水壁の大深度化とより確実な遮水壁工法の開発改良および掘削内揚水による遮水効果確認調査方法の実施などによって、周辺の水位低下を伴わない工法が標準となってきた。

鉛直性制御式 SMW 工法、鋼製連壁および TRD 工法などは、関西を中心に近年実用化された遮水壁工法である。また大深度化に対して、無人化ケーソン工法などの新技術も有用である。

3.2 地下水位低下工の大量揚水と広域水位低下

今日まで、大阪、神戸、京都の地下鉄および大阪駅前ダイヤモンド地下街などの地下街、共同溝、地下河川の建設など数多くの地下工事が実施されてきた。近年の地下工事の特徴としては、大深度化と近接工事の増加、施工技術の進歩と多様化、および環境対策の重要性などが挙げられる。一方、図-2 に示すように、昭和30年代の地下水汲み上げ規制の結果として、近年では被圧地下水の水位が回復してきた。また西大阪地域などでは、帯水層の透水量係数や影響圏半径が大きいことから、地下水位低下に必要な揚水量とその影響範囲とも非常に大きくなった。このことは、広域の地盤沈下再発、排水設備や下水放流量など排水処理費用にも関係する。したがって、大深度の地下工事を行う場合に、盤ぶくれ対策や土留め壁の遮水性や地盤改良の確実性などの地下水対策が非常に重要な問題となっている。

4. 地下水位上昇に伴う諸問題

4.1 地下水位上昇による浮力増加問題と対策

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て浮力の検討設計をしていない場合がある。この問題は東京における JR 新幹線山野駅の例が有名であるが、大阪においても発生している⁹⁾。例えば、大阪明治生命館（仮称）の建て替え工事に際して地下躯体を再利用する計画が進められたが、浮力による浮き上がりが問題となった。すなわち、建設当時、G.L. - 10 m 程度であった地下水位が最近で

は G.L. - 2.5 m ~ 3 m まで上昇し、上階を解体した際の重量減による浮き上がりの恐れが生じたため、その対策として地下階にカウンターウエイトとして重量コンクリートを打設し工事が進められた。

4.2 地震に伴う液状化問題と対策

地震時の液状化は、一般に地下浅部の緩い砂層に起こりやすいので、自由（不圧）地下水の地下水位が問題となる。先に述べたように、大阪平野の自由地下水の下部には一般に厚い沖積粘土層が介在するため、第1洪積砂礫層などの被圧地下水とは不連続となっているが、沖積粘土層が介在していない地域や沖積粘土層下部の緩い沖積砂層は、被圧地下水位の変動の影響を受けるため、水位上昇に伴って液状化が発生しやすくなる可能性がある。この対策として揚水による地下水位低下が効果的と考えられ、その経済効果も試算されている¹⁰⁾が、地下水の揚水に対しては特に沖積粘土層における地盤沈下再発の可能性も指摘されており慎重論も多い¹¹⁾。

5. 地下水地盤環境に関する研究協議会

5.1 研究協議会の設立¹²⁾

地下水に関連した諸問題に対しては、地下水や地盤の地域特性の実態や問題点を明らかにし、関連する機関や専門分野の情報の集積交換、あるいは研究や問題解決の手法提言等の場としての協議会を組織して総合的に取り組む必要がある。このような産官学の共通認識から、全国に先駆けて1993年6月に大阪を中心として標記研究協議会（初代座長 赤井浩一 京大名誉教授）が設立された。当研究協議会には、地下水涵養、地盤災害、地下水水質、地盤環境および地下水流動保全など目的に応じた研究委員会が設置された。

5.2 3次元地下水浸透流シミュレーション¹³⁾

地下水涵養研究委員会（委員長 村岡浩爾）では、大阪地下水盆を対象として3次元地下水浸透流モデルを作成し地下水位変動のシミュレーションを実施した。図-5はその成果の一部であるが、多数の地質ボーリング情報をもとに、海域も含む大阪平野を3次元的にモデル化した。また、過去の揚水と地下水位変動を再現シミュレーションすることによって、水理パラメータを推定した3次元帯水層モデルを作成し、揚水に伴う地下水位変化予測などに用いられている。

5.3 地下水流動保全

帯水地盤中に地下構造物を築造する場合には、図-6

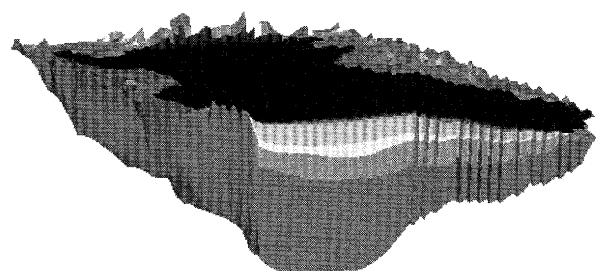


図-5 大阪地下水盆を対象とした3次元帯水層モデル¹³⁾

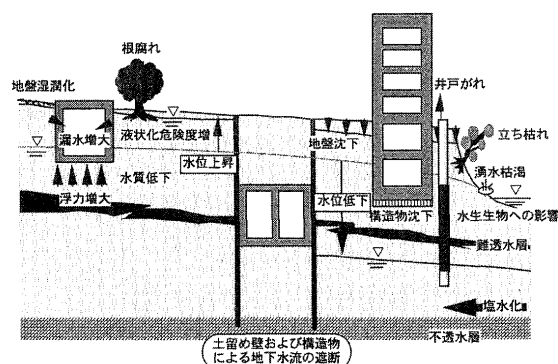


図-6 地下水流動阻害により発生が想定される問題のイメージ¹⁴⁾

に示すように、地下水の流れを阻害することになり、上流側では水位上昇・下流側では水位低下が生じる。このような地下水流動阻害や流動状態を極力変化させないよう、地下工事を実施する上で留意・工夫が必要である。そこで、1998年に地下水流動保全工法に関する研究委員会（委員長 丹原光隆）を設置し、事例研究、流動予測方法、流動保全工法、モニタリング、維持管理などに関する研究を行い、関西発の同工法テキスト等^{14),15)}を発売した。

例えば、1984年に築造した神戸市地下鉄三宮駅では、施工中に上流側で地下水位が約3m上昇し、ビル地下室に漏水が生じる等の問題となり、上下流側の泥水固化連壁に孔をあけて通水設備を施すことで地下水流動保全を図った。また、京都市地下鉄では、1992年頃に東西線二条城～三条間の開削部で地下水流動の変化が生じたため、1997年に築造した地下鉄烏丸線延伸北山通り開削部においては、事前にSMW連壁に通水設備を施したSNF工法を適用し、地下水流動保全を図った。

このような地下水流動保全の問題は、地下鉄工事以外にも、阪神西宮での鉄道高架橋基礎¹⁴⁾や大阪平野泉北丘陵地での掘削道路¹⁴⁾でも生じている。2000年代になると、地下水流動保全の検討を工事の計画・設計段階から組み込むことの重要性が高まっていった。

6. おわりに

地下水を取り巻く社会環境も、ここ数十年の変化は大きい。特に都市部において、1960年以前には、地下水の過剰な揚水により地盤沈下が発生し大きな社会問題となったため法律による揚水規制が行われた。その後、地下水位の回復が見られたが、地下開発に伴う建設事業の拡大と地下利用の大深度化に伴い、高水圧対策が課題となったが、密閉型シールド工法、無人化ケーソン工法、または連続地中壁などが改良・開発され、高水圧下でも信頼性の高い工事が行えるようになってきた。

一方、地下水を大量に汲み上げる揚水工事は地盤沈下の再発につながりかねないが、注水工法の併用や井戸またはスクリーンの最適配置計画により、工事域に限定した小範囲の地下水位低下をはかることができれば、工事の安全性の向上や事業費の削減につなげることが可能である。

また、地下水地盤環境の保全も今後の重要な課題である。例えば線状地下構造物の計画、実施および維持管理においては、地下水流動保全対策や構造物への漏水防止技術の研究開発がますます重要となってくる。

快適な生活環境を持続していくためには、地下水に関してもその環境保全との調和をはかることが21世紀の重要な課題となることが認識されてきた。地下水に係わるこれらの諸問題に対して、地下水観測網をさらに充実させて、地下水の挙動の実態把握、有効利用の目的と方法、地下水地盤環境保全の目標、あるいは地下建設技術や地下水環境保全技術開発の動向と展望などを総合的に検討していく必要があると思われる。

参考文献

- 1) 橋本 正・飯田智之・沖 泰三：大阪平野における地下水地盤環境に関する研究協議会の動向，地下水技術，第43巻9号，(社)地下水技術協会，pp. 20～34，2001.
- 2) (社)土質工学会関西支部・関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会・地下空間の活用と技術に関する研究協議会編：「関西地盤」，pp. 43～44，1992.
- 3) 戸上拓也：地下水位変動と地盤沈下，地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集，(財)日本地下水理化学研究所・(財)大阪土質試験所，pp. 49～52，1993.
- 4) 大阪地盤沈下総合対策協議会：大阪地盤沈下対策誌，1972.
- 5) 橋本 正・飯田智之・宇野尚雄・神谷浩二：大阪平野の地下水位変動の特徴とその影響要因，地下水地盤環境に関するシンポジウム2000発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp. 65～78，2000.
- 6) 戸上拓也・橋本 正：大阪における地下水問題，地下水地盤環境に関するシンポジウム2002発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp. 64～75，2002.
- 7) 霜上民生・岸尾俊茂・鎌田敏正・有本弘孝・小林 圭・沖 泰三：大阪地盤帯水層の水理特性，地下水地盤環境に関するシンポジウム'95発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp. 21～38，1995.
- 8) 鶴巻道二：大阪平野における被圧地下水の塩水化について，地下水技術，第34巻第10号，(社)地下水技術協会，pp. 37～50，1992.
- 9) 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 (No. 661)，pp. 102～117，2000.
- 10) 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，(社)土木学会関西支部 平成14年度講習・研究討論会テキスト，(社)土木学会関西支部，pp. 5-9～5-52，2002.
- 11) 色摩勝司：大阪市における地下水・地盤問題へのアプローチ，前掲10)のテキスト，pp. P-7～P-8，2002.
- 12) 霜上民生・橋本 正：地下水環境情報の観測網について，地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集，(財)日本地下水理化学研究所・(財)大阪土質試験所，pp. 107～118，1993.
- 13) 地下水涵養研究委員会：大阪平野地下水涵養に関する研究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発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp. 65～79，2003.
- 14) 地下水流動保全工法に関する研究委員会：地下水流動保全工法，地下水地盤環境に関する研究協議会，2002.
- 15) 地下水流動保全技術に関する研究委員会：地下水流動保全技術，地下水地盤環境に関する研究協議会，2006.

(原稿受理 2009.6.16)