



中部ミニフォーラム  
優秀論文

# 工場内重要施設の 液状化検討調査から対策工事 事例

応用地質(株) ○塚田 秀太郎 / 応用地質(株) 吉川 治雄

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後、地震被害への社会的影響が深刻化している。地震被害は、地震の発生規模の違いによって、津波・土砂災害・地盤沈下・液状化・火災などの影響範囲が大きく変化する。東海地方では、**図-1**に示すとおり東海・東南海・南海域でのいわゆる3連動地震が想定されており、今後50年以内に発生する確率は90%以上と言われている。そのため、地震発生後の社会的機能の回復、特に東海地域の「もの作り」に係る企業では、3連動地震に対するハード、ソフトによる備えが急務となっている。



図-1 3連動地震想定範囲図 出典：三重県石油商業組合HP

そのような中、本業務は地震発生時の工場の被害を軽減するために**表-1**に示す要望を求められた。対象施設は、工場の稼働を左右させる材料の貯蔵施設である。本業務は、①対象施設が液状化した際の被害予測、②対象施設へ実施可能な対策工法の検討、③対策工事および対策の効果確認を行った。

本報文では、工場施設の液状化調査から対策工事を実施した事例を紹介する。

表-1 対象施設の状況および顧客の要望

条件	工場の製造開始拠点であり最重要構造物である。
要望	液状化の可能性がある場合には、地盤強化を実施。

## 2. 当該地の地質構成と液状化危険度

**図-2**に濃尾平野の地質断面図を、**図-3**には愛知県全域の液状化危険度マップを示した。濃尾平野は上層に沖積層の砂が広く分布し、液状化の危険性が非常に高い地域となっている。当該地も、液状化の可能性が「大～中」と評価される場所に含まれる。

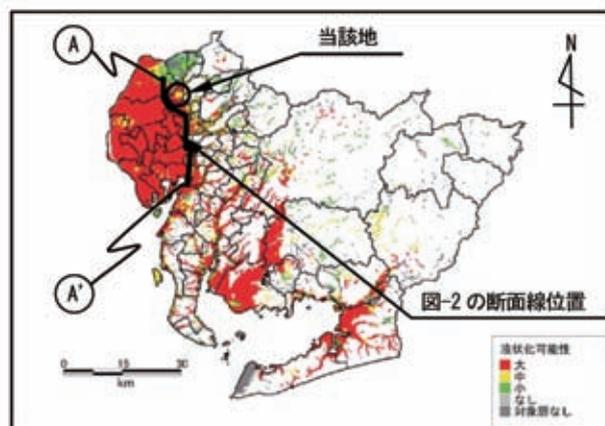


図-3 液状化危険度分布図 出典：1) 愛知県防災会議地震部会より一部加筆

## 3. 対象施設の地質地盤の特徴

本業務では、対象施設の地盤状況、地下水状況及び各地層の物理特性を把握するためにボーリング調査を実施した。**図-4**に対象施設の地質断面図を示す。当該地には、N値50以上と締まった洪積砂礫層(Dg)の上位に、緩く軟らかい沖積層(砂質土層(As)、粘性土層(Ac))が堆積し、埋土層(B)で覆われている。各層の性状は、以下の通りである。

As層は、シルト混り細砂～中砂で構成され、上部はシルト分を多く混入する細砂、下部は中砂が主体となる。含水量は中位であり、N値は概ね2～13と小さい。

Dg層は、主にGL-5.0m以深に分布し、玉石混り砂礫で構成される。礫はφ50mmを超える角礫を主体とし、最大

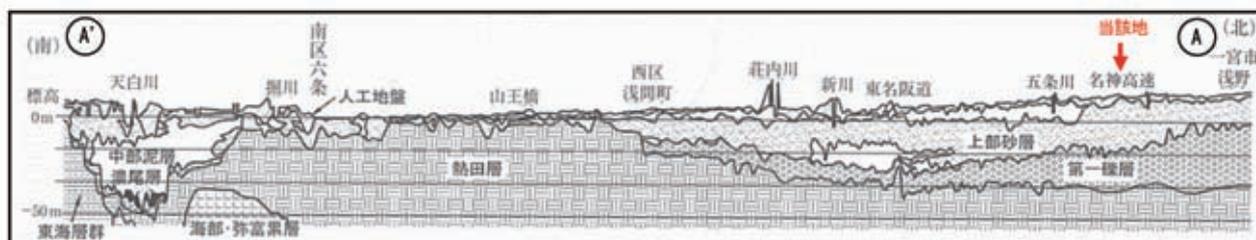


図-2 濃尾平野の地質断面図 出典：2) (社)地盤工学会より一部加筆

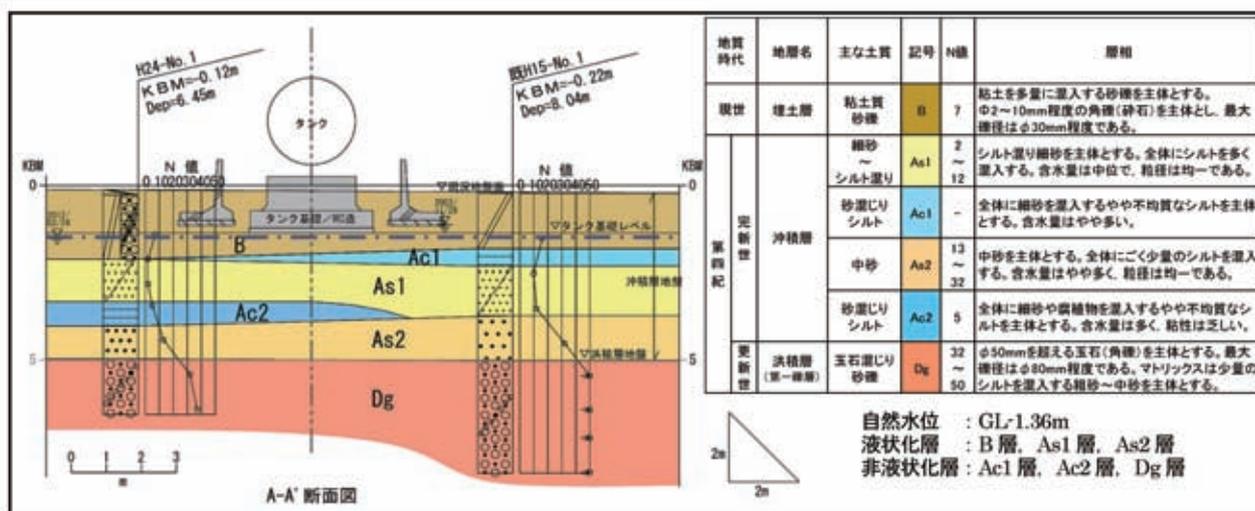


図-4 対象施設周辺の地質断面図

礫径はφ80mm程度である。マトリックスは、少量のシルトを混入する中砂～粗砂が主体であり、N値は32～50と高い。地下水位は、対象施設の基礎直下付近で確認された。

#### 4. 地震時の液状化判定について

地震時の液状化判定の方法は「建築基礎構造設計指針<sup>3)</sup>」(2001年)に記されているN値と粒度試験結果を用いた簡便法により行った。

表-2に液状化検討結果を示す。液状化検討の結果、損傷限界(加速度200gal)は、沖積砂質土層(B層, As1層, As2層)のほぼ全ての深度で液状化抵抗率FL値が1を上回った。PL値は0.84となり、中央防災会議が公表しているPL値の液状化判定(以下、中央防災会議液状化判定)によれば、「液状化の可能性が小さい」と判定された(表-3参照)。一方、終局限界(加速度350gal)は、沖積砂質土層(B層, As1層, As2層)のすべてでFL値が1を下回った。PL値は6.98となり、中央防災会議液状化判定の基準である5.0を上回り、「液状化の可能性が中」と判定された。

また、沈下量を算定した結果では、H24-No.1地点では5.4～6.8cm、既H15-No.1地点では3.2～10.1cmの沈下量が見込まれた。

表-2 液状化検討 結果概要一覧

液状化検討地点	H24-No.1
損傷限界 加速度=200gal	PL値 0.84 液状化の可能性小:一般に対策の必要なし
終局限界 加速度=350gal	PL値 6.98 液状化の可能性中:一般に対策の必要あり
沈下量	H24-No.1地点 損傷限界:5.4cm 終局限界:6.8cm
	既H15-No.1地点 損傷限界:3.2cm 終局限界:10.1cm
傾斜角	14/1000 ※基礎幅7m, 不同沈下量10.1cmを想定

これらの結果を基に、機能的障害程度と関係の深い傾斜角を算定すると、最大で14/1000となり「排水管の逆勾配」程度の変状が発生する傾斜角に相当する結果を得た(表-4参照)。

表-3 PL値による液状化判定

液状化指数	液状化判定
PL=0	液状化の可能性が極小 (対策は不要)
0<PL≤5	液状化の可能性が小 (一般に対策は不要, 特に重要な構造物では詳細な検討が必要)
5<PL≤15	液状化の可能性が中 (一般に対策が必要)
PL<15	液状化の可能性が大 (対策は不可避)

出典:4) 中央防災会議より一部加筆

表-4 傾斜角と機能的障害程度との関係

傾斜角	障害程度	区分
3/1000以下	品確法技術的基準レベル-1相当	1
4/1000	不具合が見られる	2
5/1000	不同沈下を意識する 水はけが悪くなる	
6/1000	品確法技術的基準レベル-3相当, 不同沈下を強く意識し申し立てが急増する	3
7/1000	建具が自然に動くのが顕著に見られる	
8/1000	ほとんどの建物で建具が自然に動く	4
10/1000	排水管の逆勾配	
17/1000	生理的な限界値	5

出典:5) 小規模建築物基礎設計指針

以上、液状化の可能性及び想定される施設の傾斜から、「地震後の早期の操業再開のために、対象施設の液状化対策を実施する」結論を得たものである。

### 5. 液状化対策工法の検討

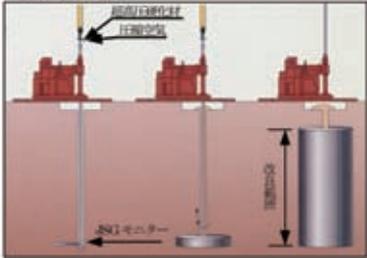
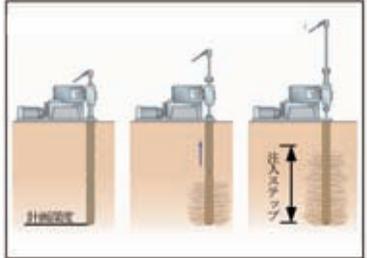
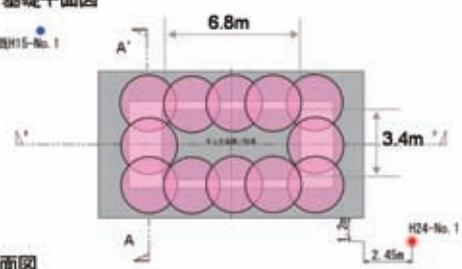
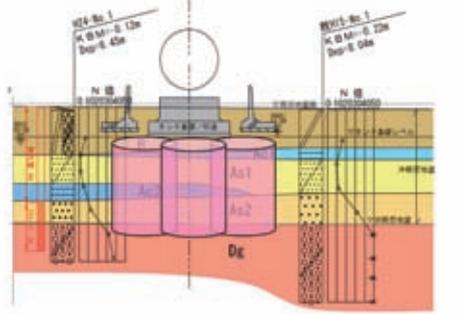
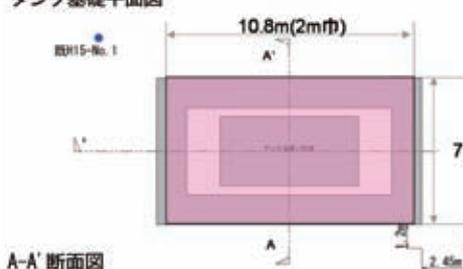
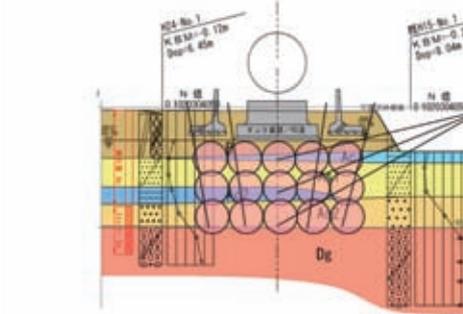
液状化対策工法選定の際の課題・問題点を表-5に取りまとめた。対象施設では、①既設建造物の支持地盤を改良するため対策工事をを行うスペースが非常に限られること、②製造開始拠点のため配管が多く地盤改良時の変状は最小限に抑える必要があること、などの制約条件があった。これらの制約条件に対応可能な工法として、高圧噴射攪拌工法および薬液注入工法の2工法を比較検討した。

表-6には、それぞれの対策工法の考え方と併せて、対策工法の比較検討結果を示す。

表-5 工法選定上の課題と適応可能な対策工法

課題・問題点	対策可能な工法
限られたスペースの中で、既設建造物の地盤を改良する必要がある。	・高圧噴射攪拌工法
対象施設は製造開始拠点のため、工場と対象施設をつなぐ配管が多く、地盤改良時の変状は最小限に抑える必要がある。	・薬液注入工法

表-6 液状化対策工法検討結果一覧

	高圧噴射攪拌工法	薬液注入工法
概要	<p>地盤に超高压でセメント系の固化材を攪拌混合し、強度の高い改良地盤を造成する。</p> 	<p>地盤の隙間に薬液を注入し、隙間水と置き換えて液状化を防ぐ。</p> 
対策原理	液状化対象地盤を格子状に改良することにより、固化地盤で囲まれた砂地盤のせん断変形を抑制する。	砂質地盤の隙間に固化剤（薬液）を注入し、安定した地盤に改良する工法。注入した薬液は土粒子の隙間に浸透固化し、過剰隙間水圧の発生を防止することによって、液状化を防ぐ。
対策仕様	<p>タンク基礎平面図</p>  <p>A-A' 断面図</p> 	<p>タンク基礎平面図</p>  <p>A-A' 断面図</p> 
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・強度が高く（1MN/m<sup>2</sup>以上）地震時の変位が少ない。</li> <li>・対策工事は短期間で終了する。</li> <li>・施工時の変形量が小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・斜め施工との併用でタンク基礎直下の改良が可能。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・排泥が薬液注入よりかなり多く、その処理に費用がかかる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・強度が高圧噴射攪拌工法と比べ低く、地震時の変位が大きい。</li> <li>・埋土には粘土分を多く混入するため均一な改良体とならない可能性が大きい。</li> <li>・施工時に隆起の可能性があり、施設に有害な変形を発生させる恐れがある。</li> <li>・対策工事に長期間を要する。</li> </ul>
工期	2週間（別途確認工が必要）	1ヶ月（別途室内配合試験0.5ヶ月）
概算工費	≈67,000円/m <sup>2</sup>	≈52,000円/m <sup>2</sup>
評価	○	△

液状化対策工法は、以下の3つの利点から高圧噴射攪拌工法を採用した。

- ①対象施設は、製造開始拠点であるため、多くの配管が繋がっている状況にあった。高圧噴射攪拌工法は、改良時の地盤強度が1MN/m<sup>2</sup>以上と高く、地震時の変位が少ないことから、配管の対策とも併用できると考えた。
- ②対象施設周辺の立ち入りは、タンクが空になる定期メンテナンス時に限られていた。薬液注入工法は、実績工期が1ヶ月程度であり、製造を止める必要があった。従って、実働工期が2週間程度と短く製造を止める必要のない、高圧噴射攪拌工法が優位であると考えた。
- ③薬液注入工法は、薬液を圧入するため施工時の変形（地盤の隆起）が大きくなる可能性がある。一方、高圧噴射攪拌工法は、地盤に超高压でセメント系の固化材を攪拌混合し、排泥を処理するため、施工時の変状が小さいと考えた。

## 6. 液状化対策工事

図-5に液状化対策工事の流れを示す。

高圧噴射攪拌工法は、まずメタルビットにより地盤改良予定深度まで削孔を行う。次にロッド先端を高圧噴射ノズルに取り換え、地上から孔底まで水により攪拌する（プロジェクト工）。孔底まで攪拌した後、固化材を孔底から地上へ向かって水平に噴射し上昇させて改良体を造成する。

対策工事で重要な点は、①対象施設への変位を最小限とすること、②所定深度まで品質の高い改良体を造成することであった。工事を行う際の課題および対応策を表-7に示す。



図-5 工事の流れ図と工事中写真

表-7 施工時の課題と対応策

課題①	対象施設の変位監視
対応策	造成施工時は、トータルステーションを対象施設基礎周辺および造成施工箇所周辺に設置。変位していないことを常に確認しながら施工。
課題②	改良径（φ3.0m）の確認
対応策	造成工事1箇所目では、施工中心位置から1.5m離れた位置に観測孔を設置し、排泥噴射状況を確認。
課題③	非液状化層（Dg層）までの確実な施工
対応策	地盤改良深度まで掘削する際に、Dg層を10cm掘進し、砂礫層の分布深度を各造成地点で確認した。

### 1) 造成施工時の変位監視

管理施工として、対象施設基礎周辺および造成施工箇所周辺に監視点を設置し、トータルステーションにより、常時変位を確認しながら工事を行った。

### 2) 品質の高い改良体を造成

品質の確保として改良径の確認と非液状化層（Dg層）までの確実な造成に注意した。

改良径の確認では、造成工事の1箇所目において、施工中心位置から1.5m離れた観測孔を設置し、排泥噴射状況を確認した。また、非液状化層（Dg層）までの確実な造成は、地盤改良深度まで掘削する際に、砂礫層を10cm掘進し、その出現深度を確認した。

### 3) 改良体の品質確認

造成後10日間の養生期間を置いた後、効果確認のためにボーリングによる試料採取を行い、室内力学試験で設計強度（1MN/m<sup>2</sup>）を満足しているかを確認した。コア採取位置は、3箇所で行い液状化対策層厚の上・中・下とした。試験時には、材齢28日まで湿潤状態で養生し、一軸圧縮試験を実施した。室内力学試験の結果、全ての試料において設計強度を満足する結果が得られた。

## 7. おわりに

東海地域において、今後想定される3連動地震による液状化の被害は、各企業の事業継続に大きく影響するものである。我々、地質調査業協会員は、民間企業に対し、液状化の危険性や対策の重要性を提示し、意識の高揚を図ることが重要と考える。私は、土質技術者として、液状化に対する調査から対策工事までの一連の社会貢献を持続的に行い、有事の際の社会的機能回復の一助となれるよう努めていきたい。

### 参考文献

- 1) 愛知県防災会議地震部会：愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査, pp3, 2013.5
- 2) 社団法人地盤工学会：ジオテクノート⑮濃尾平野の地盤, pp57, 2006.6
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp61~72, 2001.10
- 4) 中央防災会議事務局：中部圏・近畿圏の内陸地震に係る被害想定手法について, pp10~12, 2007.11
- 5) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針, pp253~256, 2008.2

# 先行降雨指数を用いた 地下水排水工事の影響判定方法について

東邦地水(株) 三好 千春

## 1. はじめに

建設工事現場では、地下水の排水に伴う周辺井戸の水位低下が大きな問題となることが少なくない。そして、その原因が本当に排水工事の影響によるものか判定することがある。ただしこの場合、観測井の地下水位の記録や排水量、工事の施工記録等を単純に比較検討するだけでは判定が困難なケースがある。

ここでは、先行降雨指数 (antecedent precipitation index)<sup>1)</sup> (以下APIと表記)を用いて地下水位推定式を作成し、それによって排水工事の影響について判定した方法とその事例を紹介する。

## 2. 影響判定方法

判定の概念を表-1.に示す。降雨データよりAPIを算出し、工事着手前の地下水位との関係より水位推定式を作成する。その式より工事中および工事後の推定水位を求め、実水位と対比することで、工事の影響を判定する。

表-1 判定方法の概念

工事前	工事中	工事後
水位観測期間		
APIの算出		
推定水位と実際の水位との比較による影響判定		
推定式の作成		

## 3. 先行降雨指数 (API) による地下水位の推定方法

### 3.1 APIの算出方法

地下水位に最も影響する自然要因は当該地域の雨量である。しかし、たとえ前日の雨量が同じであっても、その3日前に3mmの雨量があった場合と、30mmの雨量があった場合とでは、当日の水位は当然異なるため、単純に当日または前日の雨量を水位と対比してもその違いを表すことはできない。これに対し、APIは直近の雨量に重みを大きく、時間が経過した過日の雨量には重みを小さく乗じた加重和であるため、これを水位と対比して相関式を求めることにより、過去の雨量を当日の水位に反映することができる方法である。

APIの算出式については、文献によって多少の違いはあるが、ここでは数式の簡素化も考慮して、降水量を降水後の日数で除した値を用い、次式で表す。

$$API(n) = \frac{P_1}{1} + \frac{P_2}{2} + \frac{P_3}{3} + \dots + \frac{P_n}{n} \quad \dots \text{式-1.}$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{i}$$

P : 降水量  
Pi : i日前における降水量  
i : 降雨後の任意の日数  
n : さかのぼる日数

表-2に計算例を示す。

表-2 API参考計算表

日降水量 P (mm)	1/n	P×1/n
5日前 10	1/5	2.00
4日前 5	1/4	1.25
3日前 0	1/3	0.00
2日前 0	1/2	0.00
1日前 2	1/1	2.00
Σ (1/n×P)		5.25

### 3.2 地下水位とAPIとの関係

APIでさかのぼる日数nは、降水量の影響日数を表すことから、地域条件を考慮するために、nには範囲を持たせてそれぞれ検討する。最終的には最も相関の高いnを採用するが、経験的には、河川に近く透水性の高い地域では10数日～数10日程度、河川から遠いまたは透水性のやや低い地域では100日程度までさかのぼることもあり、地形地質等の地域的な条件を考慮する必要がある。

APIと地下水位との相関は、毎日の水位と対応する毎日のAPIを各nについて対比し、その関係から近似式を求める。その際、近似式は各種の回帰式(線形・累乗・対数・指数等)について検討し、各nと各回帰式の中から最も相関の高い式を水位推定式として採用する。

## 4. 事例

### 4.1 事例1. ウェルポイントに伴う地下水位低下例

下水道工事に伴う地下水位への影響を監視するために観測を行っていた地区において、工事期間中に周辺の一部の既設井戸で障害が確認された。

このときの調査対象は沖積層を帯水層とする不圧地下水である。

#### (1) 対象期間中のAPIの算出

当該地域の最寄の気象庁降雨観測資料を用い、対象期間のAPIを算出した。

APIでさかのぼる日数nについては、対象地域が比較的透水性の高い平野部で河川からそれほど遠くないことを考

慮して n=10~70と設定し、水位観測データが存在する期間と同じ期間のAPIを各nについてそれぞれ算出した。

### (2) 近似式の作成

調査対象地域には小規模な既設井戸が多数あったことから、井戸の使用による人工的な水位変動の影響を最小に抑えるために、使用する観測井の水位データは毎時データの中から午前5時の値を抽出して採用した。

近似式作成の対象期間は観測開始から工事着手前までとし、この間の各nのAPIと地下水位の関係を求めた結果、最も高い相関が得られたのはn=59とした累乗回帰式であった。このときのAPIと地下水位の関係は図-1.となり、近似式と相関係数は以下ようになる。

$$y = 4.8372 \times \text{API}(59)^{0.0294} \quad \dots \text{式-2.}$$

相関係数 R = 0.9069  
y : 地下水位

相関係数はR=0.9とかなり高く、APIと地下水位の相関は良好であることから、近似式を水位推定式として採用した。

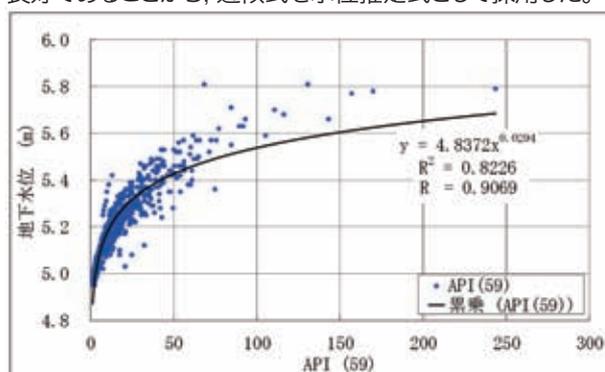


図-1 APIと地下水位の相関

### (3) 実水位と近似式による推定水位の比較

式-2.により求めた推定水位は、工事の影響がない状態において降雨のみの要因で変動する水位を表すものである。この推定水位と実水位を比較することで、降雨以外の変動要因が加わった場合には、実水位が推定水位と異なる変動傾向を示すことになる。

図-2.に実水位と近似式による推定水位の比較を示す。

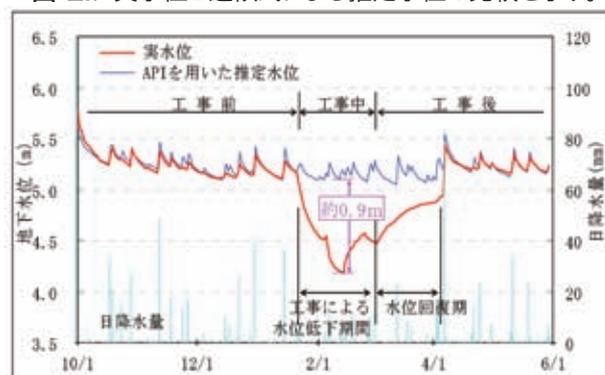


図-2 実水位と推定水位の比較

工事開始前の実水位と推定水位は、推定式の相関係数が高いこともあり、ほぼ同様の動きを示す。しかし、工事開始直後からは実水位の低下傾向が確認され、工事中はその施工状況によって水位が変動し、工事終了と同時に水位の回復傾向がみられた。水位が元の値に回復するまでに約

1ヶ月間を要したが、その後は工事前の変動状況と同様の動きとなり、恒久的な影響が残ることはなかったと判断した。なお、参考値ではあるが、この観測地点での最大水位低下量は実測値と推定値の差から約0.9mと推定された。

障害が発生した既設井戸は、水位測定ができない構造であった。所有者によると、工事中には取水量が非常に少なくなったが、工事後には回復したとのことであり、この既設井戸は観測地点と同様に、工事による水位低下の影響を受けた結論を検証できた。

### 4.2 事例2. 別工事による地下水位低下例

道路工事に伴う地下水位への影響を監視するために水位観測を継続していた地区で、工事期間の初期に一部の既設井戸で障害が報告され、最寄の観測地点での水位低下が確認された。調査対象は沖積層を帯水層とする不圧地下水である。

このとき、工事はまだ水替工の実施前であり、他の観測地点では水位低下がみられなかったため、観測地点周辺の状況を調査したところ、近隣で基礎工事に伴うウェルポイントの実施が確認された。

図-3.に実水位と近似式による推定水位の比較を示す。

水位低下期間がこのウェルポイント工の期間に一致したこと、および水位低下がこの地点に限られたものであったことから、ウェルポイント工による局所的な影響であり、本工事との関連はないと判断した。なおこの観測地点では、観測期間中を通して、本工事による影響は確認されなかった。このときの推定式と相関係数は以下のとおりである。

$$y = 10.6572 \times \text{API}(74)^{0.0191} \quad \dots \text{式-3.}$$

相関係数 R = 0.9239

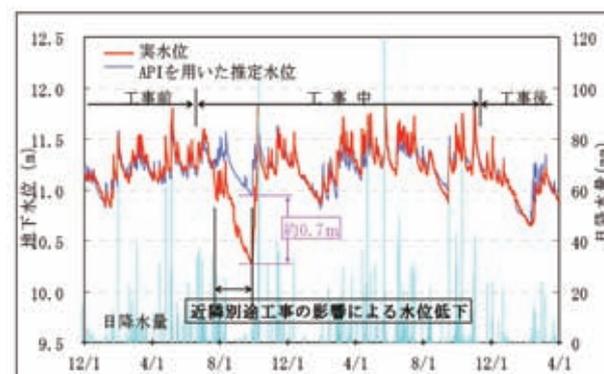


図-3 実水位と推定水位の比較

### 4.3 事例3. 降雨以外の要因が含まれるケース

既設水源井等、人工的な水位変動要因が大きく含まれる地域に設置されている観測井では、降水の要素だけで相関を求めても、良好な近似式は得られない場合が多い。

図-4.は、沖積層を帯水層とする不圧地下水を対象に大規模な取水が行われている既設井戸がある地域の水位比較結果である。工事開始前の水位は降雨と既設井戸の取水状況により変動していると考えられたが、既設井戸の影響があるため、降水要因だけによる推定式では相関係数が低めとなった。

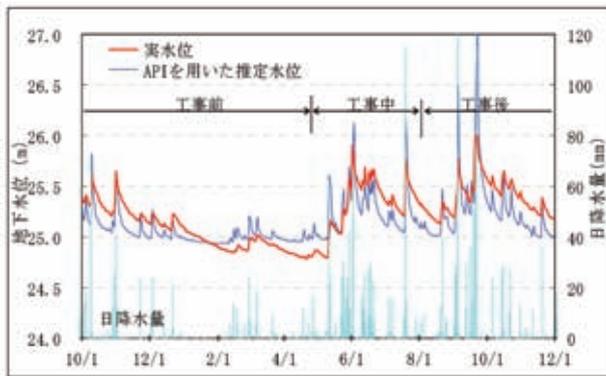


図-4 実水位と推定水位の比較

$$y = 24.9309 + 0.0100(\text{API}(50)) \quad \cdots \text{式-4.}$$

相関係数  $R = 0.7119$

そこで、水位推定式に人工的な水位変動要因を取り込む方法を試みた。既設井戸の水位データを降水と共に要素に含めて重回帰式を作成する方法である。

図-4.のデータより既設井戸の水位変動を要素に含めて得られた推定式が式-5.である。

$$y = 14.7919 + 0.4199(\text{既設井戸水位}) + 0.0065(\text{API}(50)) \quad \text{式-5.}$$

相関係数  $R = 0.9742$

式-5.による推定水位は図-5.に示すようになり、降水と既設井戸の両要因が推定式に反映され、精度の向上につながった。また同図より工事による影響はなかったものと判定した。

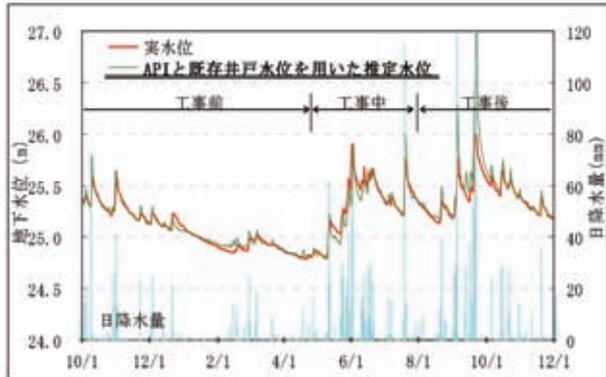


図-5 既設井戸水位を推定要素に含めた場合の水位比較

#### 4.4 事例4. 相関が低いケース

図-6.は、実水位の変動がなだらかであり、ある程度まとまった降水時以外は急激な水位上昇がみられないケースで、対象は沖積層を帯水層とする不圧地下水である。

この観測地点は平野部にあり、近接する既設井戸もないことから、降水以外の要因は考えられない。しかし、降水要因で推定する近似式の相関係数はやや低い値となった。ただし、図-6.からは推定式が大局的に実水位の動きを表していると考えられた。

そこで、工事前から工事後の全体的な水位変動の流れを比較した結果、明瞭な水位低下がなかったことを確認した。

また他の観測地点の推定式も同様に相関係数が低かったため、他の方法として、地下水位等高線を一定期間および各施工段階ごとに作成してその変化をみることで、総合的に地域の水位変動状況を確認し、工事の影響はなかったものと判定した。

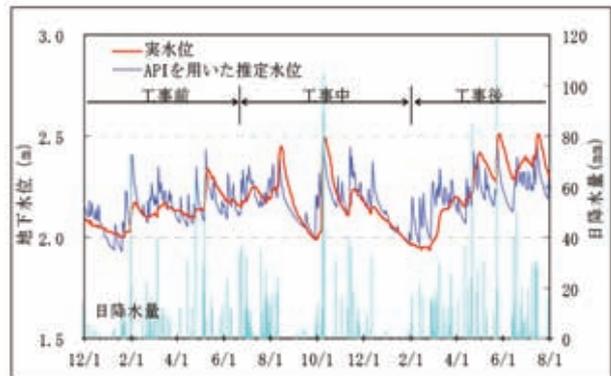


図-6 実水位と推定水位の比較

$$y = 1.7992 \times \text{API}(86)^{0.0669} \quad \cdots \text{式-6.}$$

相関係数  $R = 0.7474$

## 5. おわりに

この手法は推定式の精度によって、判定の有効性が左右される。推定式の精度を向上させるためには、ある程度の事前データが必要である。その期間は、大雨あるいは少雨といった降雨のさまざまな状況や季節変動を考慮する観点から、高水位期・低水位期を含めた1年以上のデータを用意することが望ましい。

地下水位の変動要因が降水による自然要因によってほぼ決定される場合、APIを用いた推定水位と実水位の相関は高く、精度の高い推定式が得られる。そこに工事の影響といったその他の変動要因が加わると、かなり明確にその傾向が把握できることから、この評価方法は有効な手法のひとつと考えられる。

ただし、降水を要因とするため、対象は不圧地下水が主であり、降水による変動が小さい被圧地下水では、適用しても相関が低いケースが多い。また既設井戸等、降雨以外の変動要因が存在する場合も相関は低くなる。外部要因が明確な場合は、その影響を小さく抑えることや要因自体を推定式に取り込む等、推定式の精度を高める工夫をすることで、有効な判定方法になると考えられる。

また相関係数が低い場合には、地下水位等高線の併用等、各種の資料から総合的な観点で工事の影響評価を行うことが重要である。

今後の課題として、APIを算出する季節や期間、また地形、地質、帯水層の条件等、判定に有効な適用範囲や条件を明確化していきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) Streamflow Generation in a Forested Watershed, New Zealand: M. Paul Mosley, WATER RESOURCES RESEARCH, pp.795~806, 1979.8.
- 2) 水村 和正: 水圏水文学, pp.82~84, 1998.12.
- 3) 加治佐 隆光: 先行降雨指数による溪流取水の評価事例, 三重大生物資源紀要第7号 pp.59~62, 1992.7.