

沈下対策を目的とした注水工法に関する海外調査結果について

Survey Group Report on the Water Injection Method as a Measure against Ground Settlement

井上博士*・尾島啓介*

INOUE, Hiroshi and OJIMA, Keisuke

* (財)沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

CDIT conducted research works on the Water Injection Method as a measure against ground settlement. Then we inspected the institutions which is performing large-scale water injection continuously. This report presents the results of the inspection.

Key words : water injection method, injection well, consolidation settlement

1. はじめに

わが国の沿岸域の多くは、軟弱な粘性土が堆積しているため、埋立地を造成する場合に、沈下抑制を目的とした地盤改良を必要とすることが少なくない。その地盤改良は、改良原理から「置換工法」、「密度増加工法」、「固結工法」の3工法に大別されるが、近年では施工機械の大型化によって、密度増加工法の一つであるサンドドレーン工法等では水面下 50m を超えるような大深度の地盤改良が可能となっている。しかし、沿岸域の開発が沖合いに移行し、大水深の埋立を対象とする場合には、埋立荷重が大きくなり、海底面の上層部に堆積する沖積粘性土層の沈下に加え、水面下 100m を超えるような大深度にある洪積粘性土層の沈下が問題となることも考えられる。このような場合は、既存の地盤改良技術による対策は不可能であり、大深度に存在する洪積粘性土層の圧密沈下を抑制する新工法の開発が望まれている。

圧密沈下とは、沈下対象となる粘性土層中に存在する水が荷重によって排水され、その排水された量に相当する沈下が発生する現象である。サンドドレーン工法等では、この排水を促進させ、埋立完了時の残留沈下を低減することを目的とするが、逆に排水を抑えることが可能となれば、沈下を抑制することができる。この原理から、「注水工法」と呼ばれる工法によって圧密沈下対象層の排水層となる砂層に加圧水を注水して、間隙水圧を上昇させ、粘性土層からの排水を抑制する沈下対策工法が考えられる(図-1参照)。注水工法は、地下水の揚水より生じた地盤沈下対策や塩水化の防止、あるいは地下水資源の有効利用を目的として国内外での事例も多い。しかし、従来の注水工法は帯水層への注水を目的としており、先に述べたように排水層に注水し、排水を制御することによる沈下対策の例はこれまでにない。

現在、関西国際空港では2期空港島の整備が進められているところであるが、前述したような大深度にある洪積粘性土層の沈下が予想されており、今後の沈下管理と合わせて洪積粘性土層の沈下対策に対する研究がなされて

いる。(財)沿岸開発技術研究センターでは関西国際空港用地造成(株)より調査業務を受託し、学識経験者等による「注水工法検討会」を設置して沈下対策を目的とした注水工法の適用可能性について検討を行った。

本報告は、そのうち大規模注水を長期間にわたって継続して実施している海外の事例に関する調査結果を紹介するものである。

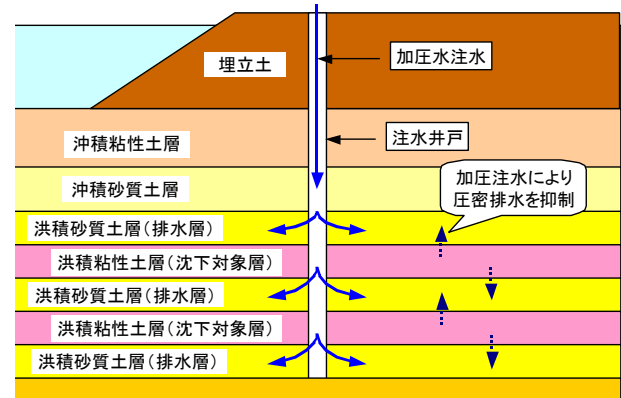


図-1 注水工法の概念図

2. 注水工法について

2.1 注水工法(人工涵養)の歴史

帯水層への人工涵養は、1810年にスコットランドにおいて都市用水の確保を目的とし、浸透池を用いて河川水を地層で浄化する方法で実施された。その後、時代と共に目的も多様化し、都市用水の安定供給や地下水の過剰揚水による塩水化の進行防止を目的として、ヨーロッパやアメリカ等では大規模な人工涵養が行われている。

日本では、1970年以降に地下水位低下による地盤沈下が問題となり、その対策として地下水涵養が実験的に実施されてきた。また、最近では水資源開発における地下水貯水施設として帯水層への涵養技術の研究が行われている。

2.2 注水工法の目的とその方法

帯水層への人工涵養の目的は、地層による水の浄化、地下水の塩水化防止、水資源の地下貯留、地盤沈下の防止、帯水層の蓄熱利用など多岐にわたっている。その涵養の方法は、井戸による注入法と地表面に水を張って浸透させる浸透法に大別される。井戸による注入法は、土地の占有面積が小さくて済むことから広域的な地下水障害対策や水資源開発といった利用目的のほか、近年では、「注水工法」として地下掘削工事の地下水揚水に伴う地盤沈下対策等の土木分野で利用されるようになってきている。

井戸による注入法は、注入方式によって自然注入法と加圧注入法に分けられる。自然注入法は、注入水を開放状態で井戸の中へ送る方法であり、井戸内水位と帯水層の水頭の小さな圧力差で注水する方法である。一方、加圧法は、送水ポンプを用いて閉じた経路内に加圧水を送る方法である。

圧密沈下の抑制を目的とする場合は、排水層の間隙水圧を高い状態に保持する必要があるため、加圧法による注水工法を採用することとなる。

2.3 日本国内における地下水人工涵養の事例

日本国内の井戸を用いた注水による地下水人工涵養の主な事例を表-1に示す。

表-1 日本国内における地下水人工涵養の主な事例¹⁾

実施年	実施者	実施場所	目的
1951年	尼崎市水道局	武庫川河川敷	地盤沈下防止
1952年	N 紡績工場	名古屋市	地盤沈下防止
1953年	東洋レーヨン	瀬田工場	地下水量増強
1954年	武田薬品工業	大阪工場	地下水量増強
1955年	尼崎市水道局	神崎浄水場	還流実験
1957年	ラジオ東京	赤坂付近	地盤沈下防止
1960年	東洋レーヨン	徳島工場	塩水化防止
1962年	地質調査所	新潟市臨港	地盤沈下防止実験
1966年	農林水産省	京都府神足	地下水量増強
1967年	佐賀県	有明干拓地	涵養実験
1967年	地質調査所	埼玉県妻沼	涵養実験

ここに挙げた国内事例は、1951年から1967年と涵養技術が実験的に行われたものであり、そのほとんどが注水井戸に目詰まりを生じ、短期間の実施に終わっている。

3. 沈下対策を目的とした注水工法の課題

大深度における粘性土層の圧密沈下対策を目的とし、注水工法を適用した場合に考えられる技術的な課題や重要と思われる検討事項を以下に示す。

3.1 圧力注入による影響

大水深の埋立の場合には、埋立荷重が大きくなり、粘性土層内に発生する過剰間隙水圧も大きくなる。したがって、この粘性土層からの排水を抑制するには、それ以上の圧力で排水層となる砂層に注水する必要がある。しかし、高い圧力で注水した場合、注水対象とした砂層を排水層とする粘性土層に圧力による割目が発生し、割裂注入となる危険性が懸念される。割裂注入となると、注入水が漏水し、間隙水圧が十分に上昇せず、粘性土層からの排水を抑制できなくなるという問題が発生する。

3.2 圧力伝播範囲の確認

注水井戸による圧力注水を計画する場合、その井戸の設置間隔が重要となる。注水した圧力水は地盤中を伝播しながらその圧力は徐々に減衰するが、どの程度の距離まで有効な圧力が伝播するかを確認する必要がある。

3.3 圧力注入に対応した井戸構造

注水井戸は、注入水の浸透を容易にするとともに、井戸周囲の地盤が注水によって乱されることのないような掘削方法や、ストレーナ管の形状、ストレーナ管と掘削孔壁の間に充填するフィルタ材の選定等に関する井戸構造の検討が必要である。特に、加圧注入を行うには注入水が地表部に漏水したり、注水対象層から上部の地層への噴出等を防止することが重要となる。そのため、ストレーナ管周辺に確実な遮断層を設け、必要箇所以外に水圧が作用しない井戸構造とする必要がある。

3.4 目詰まり防止対策

注水井戸は、国内の事例にもあるように、種々の原因によって目詰まりを生じ、放置すれば注水可能量が急激に減少することになる。本調査の対象としている注水工法では、長期間にわたって安定的に一定量を注入することが要求され、目詰まり防止対策は最も重要な検討事項である。そのため、目詰まりの原因を極力排除するとともに、揚水等の洗浄が可能となる構造とする必要がある。

4. 海外における事例調査

前章で注水工法を適用する場合の技術的な課題を示したが、これらの課題について情報収集を行うため、長期にわたって大量の水を高圧で注水している現場を選定し、現地調査を行った。日本国内ではそのような条件に合う事例がないため、注水井戸による水資源の涵養や地盤沈下対策、塩水化防止が大規模に実施されているカリフォルニア州の4地区での取組みについて調査を実施した。また、注水対象となる砂層の圧力管理に必要な間隙水圧測定装置について、1つの観測孔による多深度測定と長期間の継続観測に実績のあるバンクーバー市にある測定

現場についても調査した。現地調査位置図を図-2に示す。

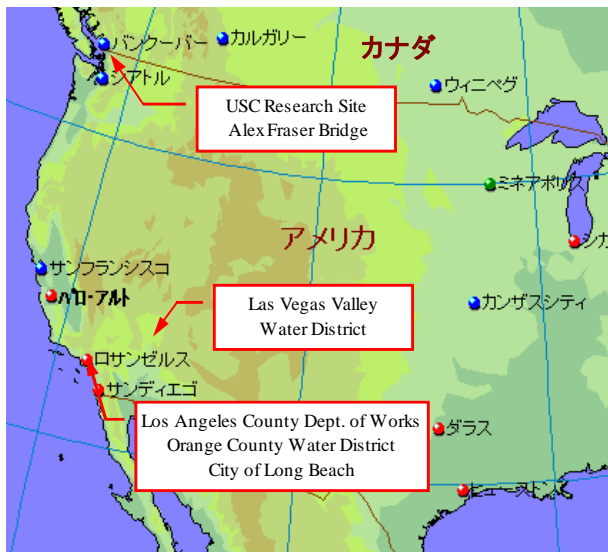


図-2 現地調査位置図

4.1 現地調査地の概要

現地調査における訪問先の概要を以下に示す。

(1) Las Vegas Valley Water District

水資源の有効利用と地盤沈下防止を目的として 1987 年から注水工法が開始されている。注水が本格化した 1993 年から地盤沈下は停止している。現在は 52 本の注入井戸があり、1 本当たり $3.6\text{m}^3/\text{min}$ の注入が約 10 年間継続されている。注入対象層は、層厚が 300~1,500m に達する未固結の砂礫、砂、シルトの互層である。注入水はコロラド川を水源とした飲料用水を使用している。なお、井戸の機能回復のため、注水・揚水兼用井戸を採用し、揚水ポンプ等は 5~7 年で交換されている。

(2) Los Angeles County Dept. of Works

地下水塩水化防止のため、3 地区で注水井戸を配列したバリエーを設けた注水工法を実施している。バリエーの総延長は 25km に達し、注水井戸が 250 本、観測井戸が 800 本配置されている。注水バリエーによって、現在は海水の進入が止まっている。最も古い井戸は 50 年間維持されているが、井戸の耐用年数は 30 年で設計されている。注入水は主として飲料水が使用されているが、一部再処理水が利用されている。井戸の機能回復にはエアリフトによる逆流洗浄と、酸と塩素による化学的な洗浄を行っている。

(3) Orange County Water District

地下水塩水化防止のための注水工法を 1 箇所のみで実施している。1968 年にパイロットプロジェクトが開始され、1975 年から本格的な注水が開始されている。現在の井戸本数は 26 本であり、1 本当たり $2\text{m}^3/\text{min}$ の注水

が継続されている。現在では、注水の効果によって海水の進入は止まっている。注水対象層は、厚さ 150m 程度の未固結の礫、砂、シルトである。注入水はリサイクル水を消毒して使用しており、バクテリア発生防止のため定期的に井戸の洗浄作業を行っている。

(4) City of Long Beach Dept. of Oil Properties

地盤沈下対策のために注水工法が実施されている。この地域は 1936 年に油田が発見され、石油掘削に伴って地下水位低下を生じ、地盤沈下量は 1950 年代に $74\text{cm}/\text{年}$ となり、最大 8.8m の大きな地盤沈下が発生した。注水は 1952 年から開始されており、現在は 529 本の注入井戸が配置され、 $173,000\text{m}^3/\text{日}$ の注水が行われ、地盤沈下抑制に効果を発揮している。注水対象層は、未固結の砂層およびシルト岩、頁岩の互層であり、注入水として油田産出水を使用している。井戸の寿命は個々に異なるが、平均 10 年程度とされている。

(5) USC Research Site and Alex Fraser Bridge

USC Research Site では多深度間隙水圧測定装置を設置し、40m の観測孔 1 孔に 12 点の測定装置を取付けて継続的な観測が行われている。

Alex Fraser Bridge においても、同様に多深度間隙水圧測定装置を設置し、橋梁建設工事のモニタリング装置として 1983 年~1989 年まで 1 孔で 22 点の間隙水圧と 9 点の沈下を観測していた。

4.2 現地調査結果

先に述べた注水工法の課題に対して現地調査で明らかとなった事項は以下のとおりである。

(1) 圧力注入による影響

現地調査を行った 4 地区の地質は、未固結の礫、砂、シルトの互層や未固結砂とシルト岩、頁岩の互層が分布しており、注水量は表-2のとおりであった。

表-2 現地調査地の注水量

調査場所	注水量	井戸本数
Las Vegas Valley	平均 $3.6\text{m}^3/\text{min}/\text{本}$	52 本
Los Angeles County	$1.9\sim 3.8\text{m}^3/\text{min}/\text{本}$	250 本
Orange County	平均 $2.0\text{m}^3/\text{min}/\text{本}$	26 本
Long Beach	全体で $3.6\text{m}^3/\text{min}$	529 本

未固結層だけを対象とした Las Vegas Valley, Los Angeles County, Orange County の 3 地区の現場では、それぞれ最大圧力 600kPa, 230kPa, 115kPa で加圧注水を行っている。また、未固結砂とシルト岩、頁岩が分布する Long Beach では 10MPa と非常に高い圧力で注水されている。

Long Beach では、採油対象となるシルト岩や頁岩を含

む層厚 600~1,700m の厚い地層が注水対象となっていることから、高い圧力条件で注水されており、注入圧力は地盤強度を基準に管理されている。

Las Vegas Valley では、水資源の有効利用を図るため、余剰河川水の注入と地下水の揚水が繰り返し行われており、地下水位に応じて 0~600kPa と幅広く注入圧力を調整している。

Orange County では、当初 330kPa で注水していたが、孔口からの漏水が発生したため、井戸の遮水シールの安全性を考慮し、現在では最大加圧力を 115kPa に減圧している。

このように、注入圧力は現地の条件によって設定根拠は異なるが、地盤の強度と井戸構造の耐圧性能を考慮し、効果的な加圧力を設定する必要がある。

(2) 圧力伝播範囲の確認

現地調査した現場では、注入井戸の設置間隔を注入効果の実績から経験的に決定している。そのため、有効な圧力伝播範囲の工学的な設定根拠は不明であるが、実例として参考となるものである。今回調査した事例を示すと以下のとおりである。

- ・ Los Angeles County : 平均 100m
- ・ Orange County : 120~150m

(3) 圧力注入に対応した井戸構造

未固結層を対象とした Las Vegas Valley, Los Angeles County, Orange County の 3 地区の現場では、共通した井戸の掘削方法や井戸構造を採用しており、表-3に示すとおりである。

表-3 注入井戸の掘削方法とその構造

掘削方法	リバース工法
使用パイプ	ステンレスパイプ
スクリーン	ワイヤーラップスクリーン
充填材料	粒度調整した砂利

国内の井戸掘削方法は、ロータリーボーリングやパークッションボーリングによる方法が一般的であるが、今回調査した現場ではリバース工法を採用し、井戸の孔壁の安定を図るとともに、周辺地盤を極力乱さないように配慮している。また、井戸に使用されている材料は、耐久性や目詰まり防止効果を考え、経験的に表-3のような仕様に決定している。

(4) 目詰まり防止対策

注水工法を長期間にわたって継続的に実施するには、目詰まり防止対策が最も重要である。現地調査した各現場においては、表-4に示すような対策が実施されている。

表-4 目詰まり防止対策

Las Vegas Valley	注入・揚水兼用井戸であり、水需要期に揚水井戸として使用し、その際に揚水洗浄を実施。ポンプ等の機材は5~7年で交換。
Los Angeles County	エアリーフトによる逆流洗浄と酸、塩素による化学的な洗浄を2~3年毎に実施。
Orange County	注入水がリサイクル水であるため、バクテリア発生防止として消毒後に注水。2年毎に井戸洗浄を実施。
Long Beach	半年毎に酸による洗浄を実施するとともに、月1回程度の水質検査を実施。

注水と揚水が季節的に繰り返される Las Vegas Valley 以外は、半年から3年程度の間隔で定期的に揚水洗浄や薬品による化学的な洗浄を実施している。また、バクテリアの発生等の生物学的な原因による目詰まりは、大きな課題となっており、その対策が研究されている。

(5) 設備の管理に関する事項

最も管理システムが整備されている Las Vegas Valley では、全井戸のデータを電話回線で集中管理しており、注水井戸の起動・停止が管理室内で操作可能となっている。また、Long Beach においても井戸の運転状況は管理室でモニター管理されている。Los Angeles County では、メンテナンス作業の円滑化のため、予備井戸が配置されており、井戸の設計耐用年数を30年として設備計画がなされている。

5. おわりに

今回実施した現地調査において、注水工法を沈下対策として採用する場合の技術的な課題を整理するとともに、その解決策の一部を見出すことができた。しかし、現地調査した現場では、注水対象層の透水性や層厚等の土質条件が比較的良好な状態であり、実際に注水工法を採用するに当たっては、排水層への注水の効果を確認するため、浸透流解析等の解析的な検討に加え、現場確認試験等を実施することが必要となるであろう。さらに、注水による周辺海域への環境影響、生物・化学的な目詰まり防止対策や維持管理費用を考慮したライフサイクルコスト等の検討も実施に向けての重要課題となるであろう。

最後に、本稿は「注水工法検討会」(座長・西垣 誠 岡山大学教授)における検討成果の一部を抜粋したものであり、関係各位に心から感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 小西康次郎：人工地下水と沖繩への想い、地下水技術、第42巻、第12号、pp.32-43、2000。