

薬液注入工法による既設石油タンク基礎地盤の液状化対策の施工 Ground Improvement on Liquefiable Sand with Existing Oil Tanks by Chemical Grouting

荒木 毅*

Tsuyoshi Araki

今村 眞一郎**

Shinichiro Imamura

要 約

徳島阿南発電所 No.5 タンクの耐震補強工事として、薬液注入工法による液状化対策工事を実施した。工事対象タンクは、直径 10.6 m、高さ 9.85 m の原油タンクである。当工事では、消防庁の規定によると、平面範囲ではタンク側板+3m、深度 5~7m とする 2m 厚の砂層が液状化対策工事の対象である。この平面範囲と深度であれば、鉛直および斜めボーリングにより注入施工を行うことができる。しかしながら、対象タンク周辺は配管や架構などが錯綜しており、タンク周辺に十分な施工ヤードを確保することができなかつた。そこで、50 m 以上離れた遠距離の施工ヤードから薬液注入施工を実施した。その結果、管理値に対して高い精度で削孔・注入を実現し、所定の品質を確保することができた。本論文では、長距離施工による液状化対策の施工概要、施工結果および施工上の課題について述べている。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 施工上の課題と施工方法の検討
- § 4. 施工管理計画と事後調査計画
- § 5. 施工結果
- § 6. 長距離施工上の課題
- § 7. おわりに

§ 1. はじめに

本工事は、四国電力(株)阿南発電所 No.5 サービスタンクの耐震補強工事として実施した液状化対策工事である。対象タンクは、直径 10.6 m、高さ 9.85 m の原油タンクである。液状化対策工法の選定にあたっては、平成 7 年 1 月の改正消防法¹⁾で既設タンク基礎地盤の液状化対策工法として示された、鋼矢板によるせん断変形抑制工法、過剰間隙水圧消散工法、地下水位低下工法、薬液注入工法の 4 工法の中から、沈下抑制効果、施工条件および工期を勘案して、薬液注入工法を採用することにした。しかしながら、対象タンク周辺には、配管・歩廊や架構などが錯綜し、地盤改良に必要な鉛直・斜めボーリング、あるいは立坑を構築するための十分な施工ヤードを確保することができないことが判明した。そこで、遠く離れ

た地上部からタンク直下の目標地点まで、削孔および注入施工を実施することにした。

本論文では、長距離施工を用いた薬液注入工法による施工概要、削孔、注入工、事後調査結果、ならびに施工実施時に明らかになった施工上の課題について述べる。

§ 2. 工事概要

2-1 工事概要

工 事 名：阿南発電所 No.5 原油タンク液状化対策工事
発 注 者：四国電力(株)

工事場所：徳島県阿南市橘町 106 阿南発電所内

工 期：平成 17 年 4 月～平成 17 年 7 月

工事内容：

(1) 削孔工

削孔本数：7 本

改良深度：G.L.-5.0 m～-7.0 m

削孔延長：約 437 m (約 62 m/本)

曲線半径：30 m

(2) 薬液注入工

薬液注入量：約 176 m³

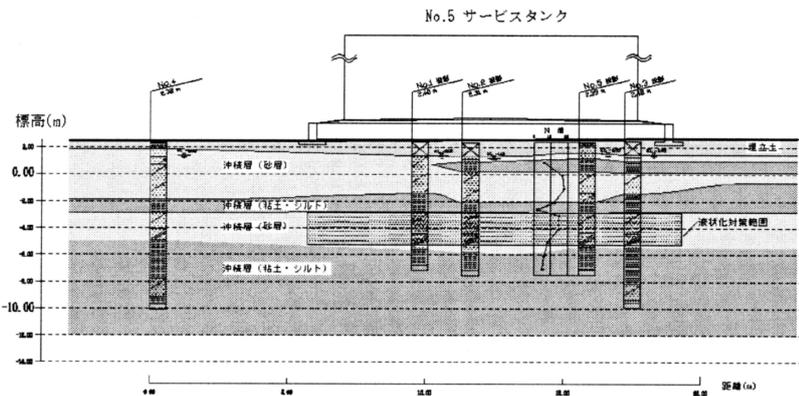
対 象 土 量：約 435 m³

2-2 地質概要

図-1 に地質構成図およびボーリング位置図を示す。地質構成²⁾は、地表面から G.L.-2m までは N 値 10 程度の細粒砂主体の埋立土であり、それ以深から G.L.-12

* 四国(支)三坂トンネル(出)

**技術研究所技術研究部土木技術研究課



図一1 地質構成図

m 付近までは N 値 7~21 程度の中粒砂~細粒砂主体の砂質土と、N 値 5 程度の粘性土・シルトの互層で、この互層には貝殻片および腐植物が多く介在している。また、G.L.-12 m~G.L.-30 m 程度までは粘性土・シルト層が厚く堆積している。消防法の規定によれば、G.L.-5.0 m から G.L.-7.0 m の約 2 m 厚の緩い砂質土層が液状化対策の対象となる。

§ 3. 施工上の課題と施工方法の検討

3-1 施工環境を踏まえた液状化対策工法の選定

本工事では、12 年に一度、約 3 か月にわたって実施される対象タンクの定期点検期間を利用して、液状化対策を行う必要があった。このため、既設配管を移設する必要が無く、液状化地盤上に設置されたタンク基礎底板の沈下抑制や不同沈下抑制効果に最も優れている工法が望まれた。

液状化対策工法の選定にあたっては、消防法では鋼矢板によるせん断変形抑制工法、過剰間隙水圧消散工法、地下水位低下工法および薬液注入工法の 4 つの工法が示されている。薬液注入工法を除く他の 3 工法を採用する場合、周辺の配管等を全て移設する必要があり、大規模な工事となりコストもかかる。

これに対して、薬液注入工法¹⁾は、以下に述べる 3 点の長所を有している。①他工法と比べて、施工機械が小さく軽量であることから、狭隘で配管等が錯綜する既設タンク周りでの施工性に優れている。②従来工法に比べ 1 つの注入点から大型の改良体が造成されるため経済性に優れている。③液状化地盤上に設置されたタンク基礎底板の沈下抑制や不同沈下抑制効果にも最も優れていることが数多くの模型実験³⁾や数値解析⁴⁾によって明らかにされている。本工事では、これらの長所を踏まえて、薬液注入工法を選定することにした。

3-2 施工方法の選定と施工計画

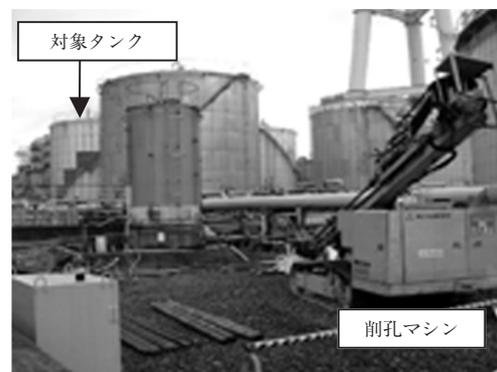
薬液注入工法における削孔・注入の施工方法としては、鉛直または斜めボーリング、あるいは立坑を構築した上で水平ボーリングする 2 つの方法が挙げられる。



写真一1 工事全景



写真二2 対象タンク周辺の隣接タンク、配管状況



写真三3 長距離施工による施工状況

写真一1~3 に示すように、タンク周辺には数多くの配管や架構が錯綜しているため、十分な施工ヤードを確保できないことが明らかになった。さらに、対象タンク

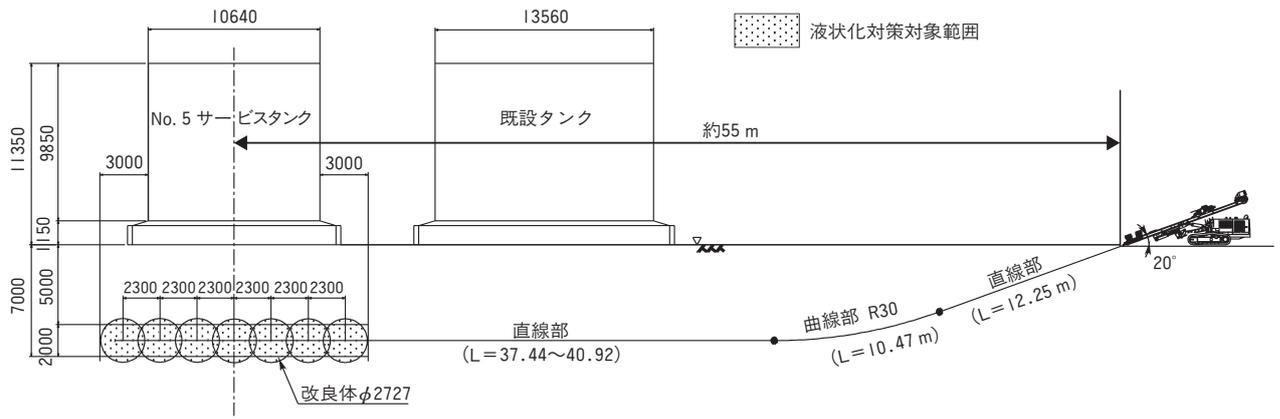


図-2 改良体の配置および削孔計画線図

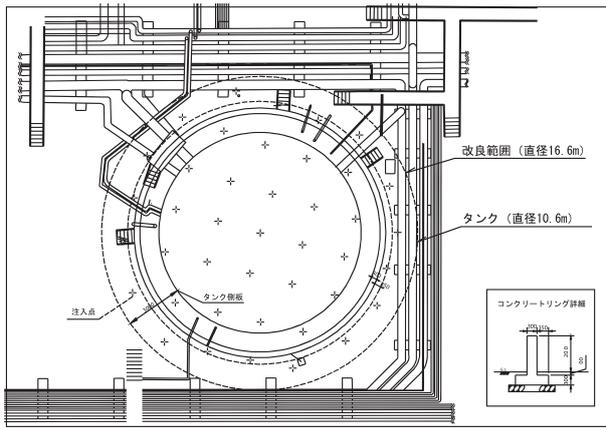


図-3 注入位置平面図およびコンクリート基礎断面図

の周辺にはタンクが隣接しており、本施工するにあたっては周辺タンクについても十分配慮する必要があった。

このような施工上の問題点を解決する方法として、50 m以上離れた施工ヤードから削孔および注入施工を可能とする長距離施工を提案した。この長距離施工の国内の施工実績によれば、削孔精度は削孔延長に対し、 $\pm 1/200$ と高精度である。

図-2に改良体の配置および削孔計画線図⁹⁾を、図-3に注入位置平面図およびコンクリート基礎断面図を示す。本工事では、対象タンク中心から直線距離で約55 m離れた地上部より、タンク直下の目標地点 (G.L.-5.0 m~G.L.-7.0 m) まで計7本のボーリングによる薬液注入工事を計画した。また、タンク直下における41個の球状改良体 ($\phi 2.727$ m) の造成は、注入ピッチ間隔を2.3 mとするラップ注入施工とし、改良体相互の一体化を図ることとした。これにより、図-3で示される改良範囲 (半径16.3 m) が地盤改良されることになる。

3-3 注入材料と目標強度

薬液注入工法では、特殊シリカ系水ガラスを注入材とする二重管ダブルパッカー工法で施工した。注入材料には、直径2.7 m程度の大型改良体の造成を目的として、ゲルタイムが長く、かつ浸透性に優れ、長期耐久性が確認されているもので、アルカリ分を除去した超微粒子シ

表-1 注入材の標準配合および注入率

材料名	注入材の標準配合
超微粒子シリカ	515 l
反応材 A	20 l
反応材 B	8 l
助剤	1 kg
水	457 l
合計	1,000 l
計画注入率	40.5%

リカ (エコシリカ I) を採用した。表-1に注入材の標準配合、注入率を示す。改良目標強度は、事前土質調査結果に基づき、改良土が液状化しない液状化強度が得られる一軸圧縮強度として73.5 kPaとした。

§ 4. 施工管理計画と事後調査計画

4-1 削孔管理

削孔に用いた削孔管は、ポリエチレンの削孔外管と可とう性に富む削孔ロッドの2重管で構成されている。この削孔ロッドの先端には切削用ビットが装備されている。

削孔時においては、その切削用ビットから削孔泥水 (52 l/min) を吐出させることで、削孔した孔壁を保持しながら、削孔時の抵抗を低減した。また、削孔中における削孔精度の管理は、先端ビットの軌跡、向き、傾斜および方向を把握することで、計画削孔ラインからの誤差を常時監視し、目標到達点に到達できるように計画削孔ラインを調整した。

以上述べた施工管理によって、所定の位置まで削孔を行った後、削孔ロッドを抜管し、削孔外管を介して、注入外管を所定の位置に達した。

4-2 注入管理

(1) 水注入試験に基づく注入速度および管理圧力

薬液注入工法では、均質な改良体を造成するためには、注入方法や注入材料の選定に加えて、浸透注入に適切な注入速度を決定することが重要である。そこで、本注入

に先立ち、対象地盤にて水を用いた限界注入速度試験を行い、注入圧と注入速度の関係から求められる初期値直線勾配を用いて、注入速度および注入圧力の上限管理値を決定した。

(2) 本注入施工

改良体を造成するためには、上述の注入速度の管理とともに重要なのが、注入材のゲルタイムの管理である。ゲルタイムが短い場合は所定の改良体を造成することができず、ゲルタイムが長い場合には、注入材がゲル化するまでに地下水により希釈される可能性が高くなる。ゲルタイムは、注入材のpHに影響されるため、注入中は注入材のpHを定期的に管理した。

4-3 削孔・注入施工に伴うタンク底板や隣接タンク基礎に及ぼす影響の確認

削孔に伴う削孔計画線直上の対象タンクおよび隣接タンク、ならびに注入施工に伴う対象タンク底板や隣接タンク基礎に及ぼす影響の確認を目的として、タンク本体、底板および基礎リングコンクリートについて、レベル測量により変状監視を行った。

4-4 事後調査

薬液注入工法の技術資料⁶⁾によれば、改良効果は一軸圧縮強さで評価することを標準としている。しかしながら、事前調査結果²⁾によれば、細粒分が多くシルト質粘土層の介在や貝殻の介在が確認されていた。この場合、一軸圧縮試験の結果が実際の地盤強度よりも低く評価されることが指針でも述べられている。そこで、指針に倣い改良効果を正しく評価するため、ボーリング試料の状況を観察するとともに、以下に述べる4つの試験項目を併用し、改良効果について総合的に判断することにした。

- ① 改良土の一軸圧縮強度試験
- ② 改良土の圧密排水三軸圧縮試験
- ③ 改良土の繰り返し非排水試験
- ④ 改良土の透水試験

§ 5. 施工結果

5-1 削孔工

削孔工では、目標注入点で注入工を実施することで、所定の径を有する改良体を造成することが可能になる。本施工では、目標地点における削孔精度を確保するため、計画線に対する誤差を小さくするように常時、方向制御を実施し、管理することで、最終注入計画地点における削孔位置の誤差は、いずれの削孔線についても削孔延長約63mに対して1/200(≒320mm)以下の誤差で削孔を行うことができた。

5-2 限界注入速度試験

対象タンクの中心および両端部における3か所の注入

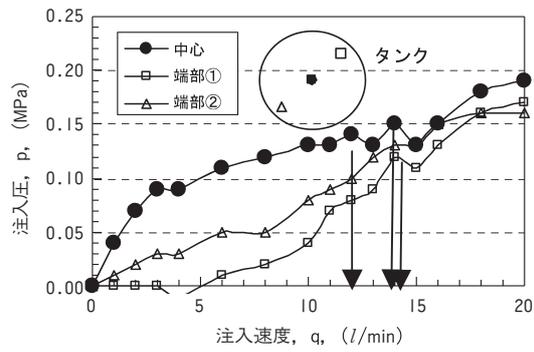


図-4 注入速度と注入圧力の関係

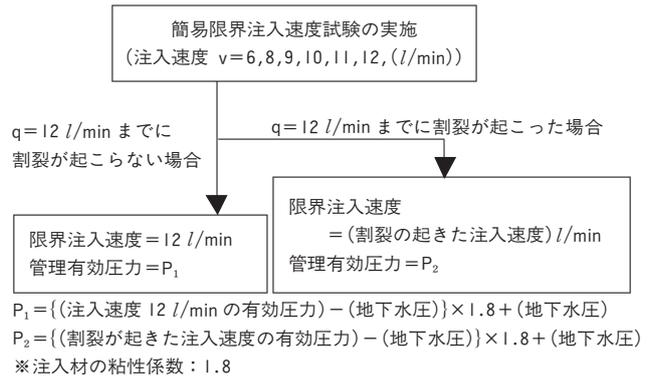


図-5 注入速度および管理圧力の設定フロー図

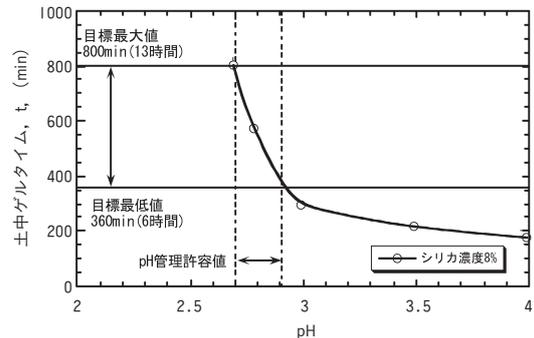


図-6 pH とゲルタイムの関係

点で実施した限界注入速度試験の結果を図-4に示す。図から、安全側となる $q=12\text{ l/min}$ を当該現場の限界注入速度と決定し、注入有効圧力を 0.14 kPa とした。しかしながら、事前土質調査結果から土質のバラツキが顕在していたことから、この試験結果を全ての注入点に対して適用することができないと考えられた。

そこで、各注入点付近の地盤条件に対応した注入速度および管理圧力を決定するため、図-5に示すフローに従って、低速域の注入試験を省いた簡易限界注入速度試験を行った。その結果、例えば $q=12\text{ l/min}$ における管理注入有効圧力は $0.1\sim 0.18\text{ kPa}$ と必ずしも一定でない結果となった。これは土質のバラツキ、いわゆる透水性が大きく影響しているものと考えられる。

5-3 注入工

当該現場から採取した試料を用いた事前配合試験で得

られた pH とゲルタイムの関係を図-6 に示す。図から、注入材であるシリカ濃度 8% の場合、pH が 2.7~3.0 を示す酸性の低域でゲルタイムが急激に変化していることがわかる。すなわち、pH が許容管理値を越えるとゲルタイムが変わり出来形に影響を及ぼす。当現場では、注入速度 12 l/min の場合、改良体 1 個当りの設計注入量 (4300 l) を注入するのに必要な時間は約 360 min であるが、翌朝の注入開始時間 (約 800 min) までに前日注入した注入材をゲル化させておく必要がある。したがって、改良体の出来形を確保するため、ゲルタイムの許容時間を 6~13 時間と設定したことで、注入材の pH の許容管理値を 2.8 ± 0.1 とした。許容管理値としては厳しい条件であったが、pH の計測頻度を高めて作液調整することで、許容管理値内に収めることができた。なお、実施注入量は、設計注入量 (4,300 l/球 \times 41 球 = 176,300 l) に対して、ほぼ計画通りの注入を実施することができた。

5-4 事後調査

(1) 改良土の一軸圧縮強度試験

薬液注入工法による改良強度は、注入孔からの距離に逆比例することが実験的に確認されている。図-7 に、林らが行った大型土槽実験で得られた注入孔中心からの距離と一軸圧縮強さの関係を示す。一軸圧縮強さには若干のバラツキが見られるが、注入孔の近傍では 80~90 kN/m² と事前に行った配合試験の一軸圧縮強さ 100 kN/m² に近い。これに対して球状改良体の端部での一軸圧縮強さは、20~40 kN/m² と配合強度に比べて非常に小さい値となっている。この強度低下の原因としては、

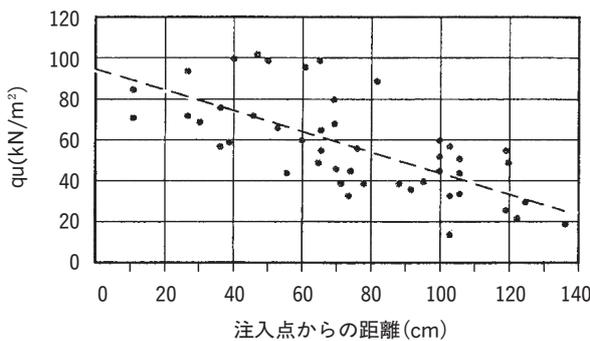


図-7 注入孔からの距離と一軸圧縮強度の関係⁷⁾

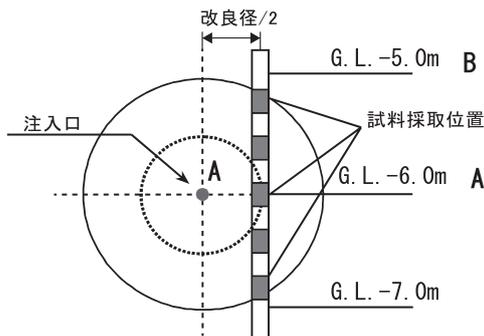


図-8 球状改良体のサンプリング位置図

薬液の浸透の際に、溶液型の薬液と間隙水とが接触して拡散現象が生じ、薬液が地下水によって希釈されたものと推測されている。

当現場における球状改良体のサンプリング位置図を図-8 に示す。ボーリング位置は、技術資料⁶⁾によれば改良半径の 1/2 の位置と規定されている。そこで、上述の関係を参考にして、改良体の端部での一軸圧縮強さを中心の 50% と仮定して、注入孔からの距離に関係した推定強度を求め、代表ボーリング位置における一軸圧縮強度と比較したものを図-9 に示す。図から、推定強度と現場試料の一軸圧縮強度は良好に一致しており、一軸圧縮強度は注入孔からの距離との相関性が認められる。また、全ての試料の平均圧縮強さは 74.9 kN/m² であり、設計基準強度 73.5 kN/m² を満足する結果が得られた。

(2) 三軸圧縮試験

① 良土の圧密排水三軸圧縮試験

薬液注入工法では、土粒子間の間隙水を低強度のゲル状物質で置換し、粘着力が付与されることによって、液状化を防止する。そこで、改良土の粘着力の確認を目的として、圧密排水三軸圧縮試験を実施した。表-2 に、三軸圧縮試験の結果を示す。未改良土が 0 kN/m² に対して、改良土では粘着力 24.3 kN/m² まで増大しており、内部摩擦角の増加に加え、明確な改良効果が認められる。

② 改良土の繰り返し非排水試験

未改良の原地盤における動的せん断強度比は 0.1 以下であり、液状化に対する抵抗性が著しく低いことがわかる。これに対し、改良土の動的せん断強度比 (応力比) は 0.3 以上が得られることが確認され、十分な液状化強度を有しているものと判断できる。

(3) 改良土の透水試験

改良土の間隙はゲル状物質で置換されているため、未

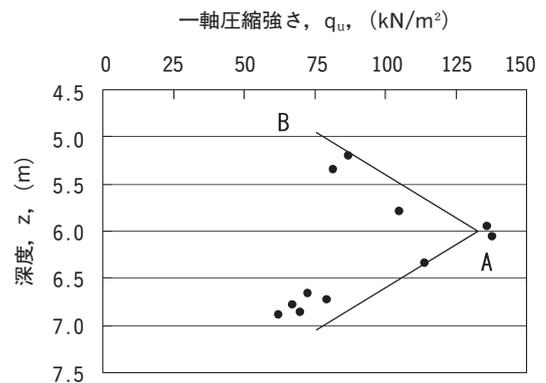


図-9 一軸圧縮強度分布

表-2 三軸圧縮試験結果

		全 応 力		
土の種類	粘着力 C_d (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ_d (°)	$\tan \phi_d$	
未改良土	0.00	29.5	0.57	
改良土	24.3	34.6	0.70	

改良土に比べ、その透水性が1/100から1/1000程度低減することが技術資料⁶⁾からも明らかにされている。試験の結果、平均透水係数は、未改良土が 2.9×10^{-3} cm/secに対し、改良土では 5.0×10^{-6} cm/secを示し、1/100から1/1000程度低下していることがわかる。改良土の透水係数が大きく低下していることから、薬液注入工法により、適切に浸透注入が実施されたものと判断できる。

以上述べた事後調査結果より、未改良土の力学的特性と物理的特性の両面からも良好な改善が認められた。

5-5 施工に伴うタンク、隣接タンクに及ぼす影響

削孔および注入施工中において、対象タンク本体および隣接タンク底板および基礎リングコンクリートについてレベル測量した結果、いずれの場所も変位はほとんど観測されず、高い安全性が確認された。

§ 6. 長距離施工上の課題

本施工事例における主な問題点とその対応策について、以下に項目別に整理した。

(1) 事前調査について

対象地盤において、当初3か所において、事前ボーリング調査を実施したところ、液状化対策の砂層の位置はG.L.-5.0mからG.L.-7.0mであり、計画深度(G.L.-7.3m~G.L.-9.3m)に対して約2mの誤差が判明した。そのため、削孔工の計画深度が変わったため、削孔ロッドの入射角を30°から20°に変更して対応した。当該現場は埋立地であり、僅か数mの範囲でも土質のバラツキが数多く見られた。注入対象地盤では、土質の違いによっては本工法が適用できない場合もあるため、通常のボーリング数で地層構成を特定できない場合には、追加ボーリングを実施の上、詳細に検討する必要がある。

(2) 削孔精度

本施工においては、計画注入位置における施工誤差を最小限に抑えることができた。しかしながら、方向制御は対象地盤の土質や障害物に依存し、計画ラインにおける削孔精度を確保できない場合がある。所定の改良径の改良体を造成するためには、注入点における削孔精度を確保する必要がある。このような場合を想定して、事前に削孔試験を実施し、注入外管の増設、あるいは注入量を変更するなどの対応策を事前に検討しておく必要がある。また、削孔中においては、遠方の位置から予め障害物を検知できる探知センサーの導入が望まれる。

(3) 出来形調査

本施工では、事後調査の結果より、削孔および注入施工は十分に満足にできたものと考えられる。しかしなが

ら、地盤内の改良地盤の出来形の確認方法には課題も多く、施工中および施工後において、薬液の浸透状況、ならびに改良地盤の出来形を確認する手法が望まれる。

§ 7. おわりに

今回の液状化対策工事では、当初の想定よりも複雑な地盤であったが、薬液注入施工として当社で初めて採用した長距離施工により、所定の精度で無事に削孔を行うことができた。また、注入工においては、複雑な地盤を考慮して、簡易限界注入速度を行うことにより、所定の工期内に要求された品質を満足する薬液注入施工を実施することができた。

今後は、今回の施工経験から明らかになった技術課題とその対策を検討し、同種工事に反映させたい。

最後に、本工事の施工にあたり、御指導、御鞭撻を戴きました四国電力(株)、ならびに四電エンジニアリング(株)の関係各位に謝意を表します。

また、本工事を実施するにあたり、適切なお助言、ご指導を頂きました本社土木設計部ならびに技術研究所の関係者各位に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 消防庁危険物規制課：危険物の規制に関する政令等の一部改正について、KHKだより、No. 45, Apr., pp. 7-10, 1995.
- 2) (株)四電技術コンサルタント：阿南発電所 石油タンクヤード地盤地質調査工事 報告書, 2005.9.
- 3) たとえば、今村眞一郎、平野孝行、佐藤靖彦、萩原敏行、竹村次朗：部分改良による薬液注入固化工法による既設石油タンク地盤の液状化対策工法の提案、地盤工学会誌、土と基礎、No. 49, Vol. 5, pp. 28-30, 2001.
- 4) Imamura, S., Hirano, T., Yoshino, O., Hagiwara, T., Takemura J., Fujii, N.: Chemical grouting as a countermeasures against soil liquefaction of sand with existing oil tanks, Proc. of Physical Modeling in Geotechnics, pp. 575-580, 2002.
- 5) 平林 武司、森 佳一、荻山 和樹、田中 邦保：火力発電所 既設油タンク基礎地盤液状化対策の設計と施工、pp. 87-92, 電力土木 No. 321, 2006.1.
- 6) 財沿岸開発技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル, 2003.3.
- 7) 林健太郎、善 功企、山崎浩之、林 規夫：溶液型薬液注入工法における浸透および強度特性に関する大型土槽実験、土木学会論文集、No. 694/III-57, pp. 221-228, 2001.12.