

化学廃液による地下水汚染と既設鋼管杭腐食に関する調査

喜田大三
守屋正裕

Investigations of Contamination of Underground Water and Corrosion of Steel Pipe Piles by Chemical Waste Fluids

Daizo Kita
Masahiro Moriya

Abstract

Well-points were constructed in the neighborhood of surface-type LNG tanks of a certain factory and underground water contaminated by waste fluid judged to be leaked from a neighboring chemical factory was pumped up causing concern over corrosion of steel foundation piles of the tanks. Samples of underground water were therefore taken from the vicinity and compositions were analyzed to grasp the scope and degree of contamination. Investigations were made of corrosivity and measures for protection against corrosion. As a result, it was found that contamination of underground water was spread within a radius of 50 m of the well-points, being most prominent near the well-points. It was also clarified that corrosivity of the contaminated underground water was extremely high. As a countermeasure, it was decided to provide cathodic protection for steel piles using an external source of electricity and a current density requirement of approximately 20 mA/m² was calculated as a result of polarization tests.

概要

大阪府堺市の海岸埋立地に建設中の地上式LNGタンクの近くでウェルポイントを施工したところ、隣接化学工場の廃液と判定される汚染した地下水が揚水され、LNGタンクの基礎鋼管杭の腐食が心配された。そこで、この周辺において地下水を採取し、水質分析を行なって、廃液による地下水の汚染範囲と汚染程度を把握するとともに汚染地下水の腐食性と鋼管杭の防食対策について調査検討した。その結果、地下水の汚染はウェルポイント施工地点を中心とした半径約50mの周囲に広がっており、特にウェルポイント施工地点の近くが著しく汚染していた。また、汚染された地下水は腐食性が非常に大きいことが明らかとなった。対策としては鋼管杭に外部電源方式による電気防食を施すこととし、通電分極試験の結果から約20mA/m²の必要防食電流密度が算出された。

1. まえがき

今日大気汚染や水質汚染などの公害は各所に様々な形態で悪影響をおよぼしており、建設関係においては、大気汚染や水質汚染とも関連して金属部材の腐食がしばしば大きな問題になっている。たとえば、亜硫酸ガスなどによる大気汚染の影響によって建物の空調用の冷却水配管が異常に腐食劣化する事故が都市部や工場地帯で発生しており、それに関し著者等も^{2, 3}の報告を先に行っている^{1), 2), 3), 4)}。また工場地帯において、化学工場の薬品とか廃液がその処理設備の劣化などによって地中に漏洩し、地下水が汚染して建物の基礎鋼

管杭の腐食を促進する事例もある^{5), 6)}。このような状況のもとで、建築物の金属部材の腐食の問題は建物を設計する上でまたメンテナンスの上でますます重要な問題となってきている。

この報告は、汚染地下水による基礎鋼管杭の腐食性について調査し、対策を検討した1例である。

大阪府堺市の海岸埋立地において、地上式LNGタンク3基が建設された。このタンクの基礎には径0.4064m、長さ23mの鋼管杭がタンク1基について496本使われている。当工場の敷地は海岸埋立地であるために地下水は海水を多く含んでいると考えられ、タンクの建設にあたって基礎鋼管杭の腐食が心配された。そ

ここで、工事開始直後の昭和46年4月に、海側であるNo. 1タンクおよび陸側のNo. 3タンク建設地においてコロージョンサウンド法による地盤の腐食性調査および土中水の水質調査を行ない、杭の設計耐力や腐食しろとの関連で検討した結果、特に防食処置を施すことなく当初の計画通り40年間の耐用年数は期待できると判断された。

ところが、昭和47年1月頃に3基のタンクのうち、No. 2タンクの南側約50mの地点において、地下ケーブル用ピット工事のためウェルポイントを施工したところ、隣接化学工場の廃液の影響と思われる非常に汚染された地下水が揚水され、この汚染地下水の影響によるNo. 2タンクの基礎鋼管杭の腐食が懸念された。そこで、この汚染地下水の分布状況および腐食性について調査し、対策を検討することになった。

2. 現場の状況

現場平面略図を図-1に示す。同図には、汚染地下水が揚水されたウェルポイント施工地点および汚染源と考えられる隣接化学工場の廃液槽の位置を併記している。

ところで当現場は海岸埋立地であり、地盤はほぼ平行地層で、その平均的な地盤柱状図を図-2に示すように、およそGL-6.5mまでは砂質の盛土、その下層に厚さ3m程度のシルト・粘土層をはさんでGL-14m前後まで砂レキ層となっている。

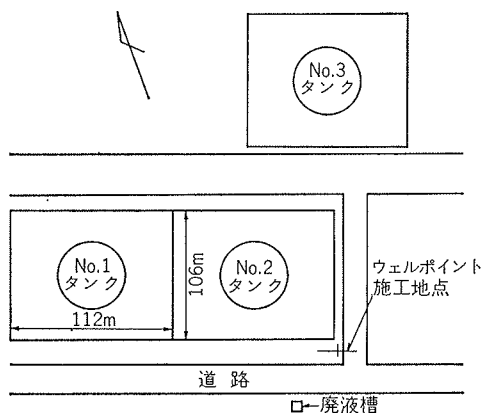


図-1 現場平面略図

3. 調査方法

3.1. 地下水の採取方法

各調査地点の地下水採取深度まで鋼管を打込み、揚水ポンプにより鋼管内の水を一旦排出し、その後溜った地下水を採取する。

3.2. 水質試験法

採取した地下水をNo. 4の東洋ろ紙でろ過し、ろ

液について工業用水試験法 JIS K0101 によって分析する。分析項目はPH, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ であり、さらに一部の地下水についてはNH₄⁺も測定した。

3.3. 腐食性試験法

試験装置を図-3に示す。採取した地下水を腐食液とし、鉄片を回転させながら24時間浸漬した時の腐食量(重量減)を測定して地下水の腐食性を相対的に比較する。

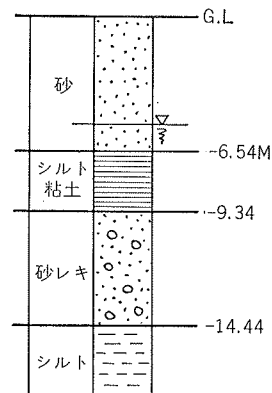


図-2 地盤柱状図

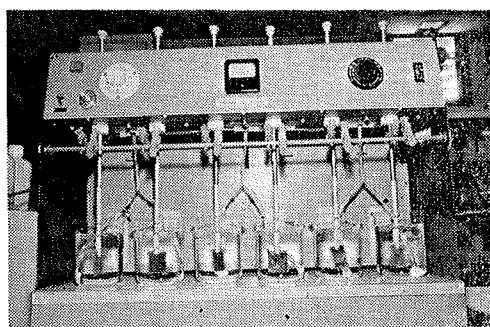


図-3 腐食性試験装置

浸漬用鉄片の材質：GIS G3141, 40×50×1.2mm
320番研磨

浸漬前における鉄片の処理：アセトンによる脱脂
→ 20%硝酸に20秒浸漬 → 水洗 → 10%硫酸に60秒浸漬 → 水洗 → メタノール脱水 → 0.1mgまで精秤。

浸漬後における鉄片の処理：水洗 → 沸トウした5%クエン酸アンモンに15秒浸漬 → 水洗 → メタノール脱水 → 0.1mgまで精秤。

4. 地下水の調査 (I)

4.1. 供試地下水

図-4に示すNo. 2タンクの南側3地点において、GL-6mの砂層およびGL-14mの砂レキ層からそれぞれ地下水を採取した。その供試地下水の一覧表を表-1に示している。これら地下水について水質分析および腐食性試験を行ない地下水の汚染状況と腐食性について調査検討した。

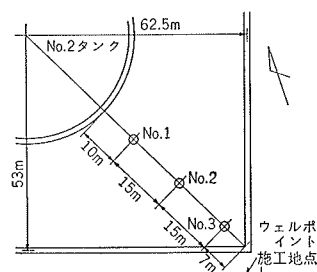


図-4 地下水の採取地点

地下水No.	採取地点	採取年月日
1-1	No.1 地点、GL-6m 砂層	47. 2. 16
1-2	" "	2. 18
1-3	No.1 地点、GL-14m 砂礫層	2. 18
2-1	No.2 地点、GL-6m 砂層	1. 29
3-1	No.3 地点、GL-6m 砂層	1. 22
3-2	" "	2. 16
3-3	" "	2. 18
3-4	No.3 地点、GL-14m 砂礫層	2. 16
3-5	" "	2. 18

表-1 供試地下水

4.2 水質試験結果と検討

水質分析の結果を表-2 に示した。地下水の水質汚染の有無を検討するにあたって、汚染源と考えられる工場廃液の水質組成の詳細は不明であるが、廃液中には Na^+ 、 SO_4^{--} 、 NH_4^+ が含まれているといわれるのでこれら成分ならびに PH、 Cl^- を分析した。

地下水No.	pH	Cl^- (ppm)	Na^+ (ppm)	SO_4^{--} (ppm)	NH_4^+ (ppm)	海水含有率(%)
1-1	6.65	16823	9500	2350	4.2	88.6
1-2	6.72	17605	9850	2450	12.5	92.8
1-3	7.75	15938	9100	1825	0.8	84.0
2-1	8.08	1771	1630	1773	22.5	9.3
3-1	8.00	4603	2950	2750	46.3	24.3
3-2	7.82	4167	3170	2650	37.5	22.0
3-3	7.90	3750	3130	2750	42.5	19.8
3-4	7.53	16146	9400	2025	3.8	85.1
3-5	7.50	16355	9400	2150	0.4	86.2

表-2 水質分析結果

さて、当工場の敷地は海岸埋立地であるために、地下水の水質は本来海水と近似しているはずである。したがって、地下水が工場排水などによって汚染されていないとすれば、地下水に含まれる各種イオン濃度の比たとえば $\text{SO}_4^{--}/\text{Cl}^-$ の値は、雨水などによって多少希釈されてはいても、海水の値と近似すると考えられる。そこで、表-

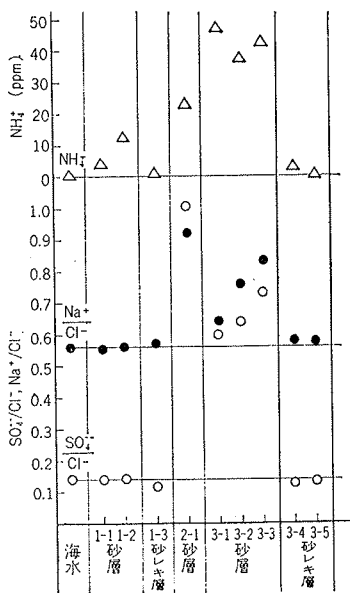


図-5 イオン濃度比による地下水汚染の検討

2の水質分析結果から、 Cl^- 濃度に対する SO_4^{--} 濃度の比 ($\text{SO}_4^{--}/\text{Cl}^-$)、 Cl^- 濃度に対する Na^+ 濃度の比 (Na^+/Cl^-) を算出し、これらの各値と NH_4^+ 濃度とを

図-5 に示した。また、 Cl^- 濃度を基準とした海水含有率 (Cl^- 濃度 $\times 100/18980\%$) を算出し、表-2 に併記した。

以上の水質分析結果に基づく各採取地点ごとの検討結果は次のとおりである。

(1) タンクに最も近い No.1 の地点では、GL-6m 付近の砂層および GL-14m 付近の砂レキ層ともに、地下水中のイオン濃度の比は海水と近似しており、工場廃液によって汚染されていないと判断される。

(2) No. 2 の地点では砂層の地下水だけしか採取していないが、そのイオン濃度の比は海水と近似しておらず数倍大きな値となっており、 NH_4^+ 濃度も高い値を示している。したがって、 Na^+ 、 SO_4^{--} 、 NH_4^+ などを多く含んだ工場廃液によって汚染されていると判断できる。

(3) 隣接化学工場側に最も近い No. 3 の地点においては、砂層の地下水は各イオン濃度の比が海水に比較して大きく、 NH_4^+ 濃度も高いためやはり汚染されていると判断できる。一方、同地点の砂レキ層では、地下水の各イオン濃度の比は海水と近似しており、 NH_4^+ 濃度も低いことから汚染されていないと判断される。

以上の判定結果を要約すると次のとおりである。

(1) タンクに最も近い No.1 地点の地下水は汚染されていない。

(2) 中間の No. 2 の地点および隣接化学工場に最も近い No. 3 地点の砂層の地下水は SO_4^{--} 、 Na^+ 、 NH_4^+ などを含む工場廃液によって汚染されている。

(3) 砂レキ層は汚染されておらず、砂層の直下のシルト・粘土層が遮水層となるためこの層より下は汚染されていない。

なお、汚染されていると判定された地下水には今回分析しなかった他の腐食性物質を含有していることも十分に考えられる。

4.3 地下水の腐食性試験結果

採取した地下水のうち、水質試験結果から汚染されていないと判定された地下水3点と汚染されていると判定された地下水2点および標準海水の水質に基づいて実験室で調製した人工海水について、3.3. に前述した方法により腐食性試験を行なった。試験結果を表-3 に示す。

試験結果から明らかのように、汚染されていないと判定された地下水の腐食性は人工海水とほぼ近似している。このことは同地下水の水質が海水と近似していることからなっとくできる。一方、汚染されていると判定された地下水ではその腐食性は人工海水の約2倍もの大きな値を示している。

	地下水 No.	腐食比率
汚染されていないと判定された地下水	1-2 (砂層)	1.02
	1-3 (砂レキ層)	1.07
	3-5 (砂レキ層)	0.89
汚染されていると判定された地下水	2-1 (砂層)	1.77
	3-3 (砂層)	2.23
人工海水		1.00

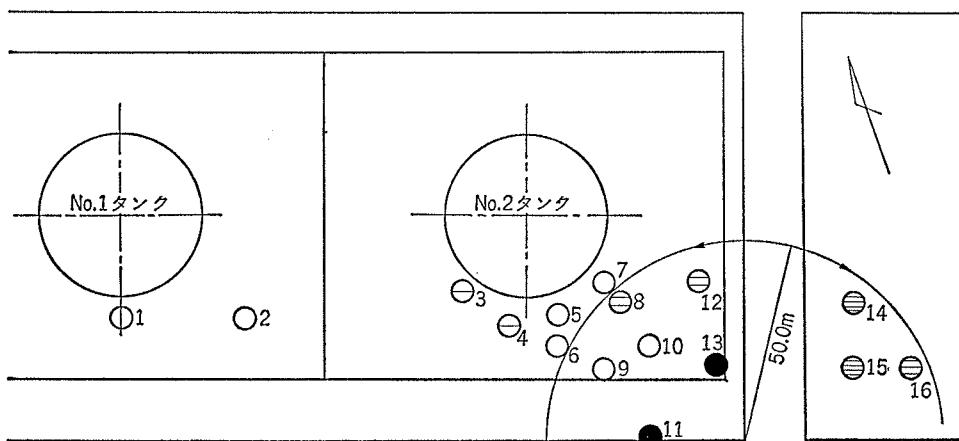
表-3 腐食性試験結果

5. 地下水の調査 (II)

5.1. 供試地下水

調査 (I) の結果を参考にして、地下水の汚染範囲を詳細に把握するために、図-6 に示す16カ所においてGL-6mの砂層から地下水を採取し、水質試験および腐食性試験を行なった。なお、地下水の採取は昭和47年4月5日から4月14日にわたって行なった。

5.2. 水質試験結果と検討



(注) 汚染状況の分類記号は図-7に示している

図-6 地下水の採取地点と汚染状況

水質分析の結果を表-4 に示した。また、各地下水の汚染の有無を判定するために、調査 (I) と同様に水質分析結果から各地下水中に含有しているイオン濃度の比 (SO_4^{2-}/Cl^- , Na^+/Cl^-) を算出し表-4に併記した。

地下水No.	PH	Cl ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻	Na ⁺ /Cl ⁻
1	8.16	10110	5500	1750	0.17	0.54
2	8.20	12677	6850	1950	0.15	0.54
3	8.21	9219	5150	1950	0.21	0.56
4	8.11	8277	4500	1750	0.21	0.54
5	8.10	14877	8250	2050	0.14	0.55
6	8.10	10058	5500	1650	0.16	0.55
7	7.65	17967	9900	2300	0.13	0.55
8	8.23	11210	6500	2450	0.22	0.58
9	8.17	15191	8250	2050	0.14	0.54
10	8.10	12781	6750	1950	0.15	0.53
11	8.30	4086	3000	2550	0.62	0.73
12	8.25	4453	2600	1500	0.34	0.58
13	8.35	4295	3100	2550	0.59	0.72
14	8.22	943	560	1750	1.86	0.59
15	8.22	1100	650	1800	1.64	0.59
16	8.40	1152	965	1450	1.26	0.84
標準海水	8.3±	18980	10556	2649	0.14	0.56

表-4 水質分析結果

これらのイオン濃度比から次のことが明らかである。

(1) 調査地点 No. 1, 2, 5, 6, 7, 9, 10 で採取した地下水中のイオン濃度の比は海水の値と近似しており、工場廃液によって、汚染されていないと判断される。

(2) 調査地点 No. 3, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16で採取した地下水は程度の差はあるがいずれも汚染されていると判断される。

次に、この汚染されていると判定された地下水について汚染の程度を検討する。その際汚染度の判定は次の方法によって行なった。地下水中の Cl^- はすべて海水に由来しているという想定のもとに、 Cl^- 濃度を基準として海水に由来しない SO_4^{2-} 量すなわち工場廃液が侵入したことによって増加したと考えられる地下水中の SO_4^{2-} 濃度を次式で算出した。

$$\begin{aligned} & \text{海水に由来しない } SO_4^{2-} \text{ 濃度 (ppm)} \\ &= A \text{ の } SO_4^{2-} \text{ 濃度 (ppm)} \\ & \quad - \frac{B \text{ の } SO_4^{2-} \text{ 濃度 (ppm)}}{B \text{ の } Cl^- \text{ 濃度 (ppm)}} \\ & \quad \times A \text{ の } Cl^- \text{ 濃度 (ppm)} \\ & \quad A : \text{ 供試地下水,} \\ & \quad B : \text{ 海水} \end{aligned}$$

そしてこの SO_4^{2-} 濃度の値を指標として、それが大きいほど汚染が著しいと判定した。

さて、海水に由来しない SO_4^{2-} 濃度の計算結果を図-7に示した。また同図に記号で併せて示すように、

海水に由来しない SO_4^{2-} 濃度から地下水の汚染程度を6段階に分類した。この分類結果を図-6にプロットした。

図-6から次のことが明らかとなる。

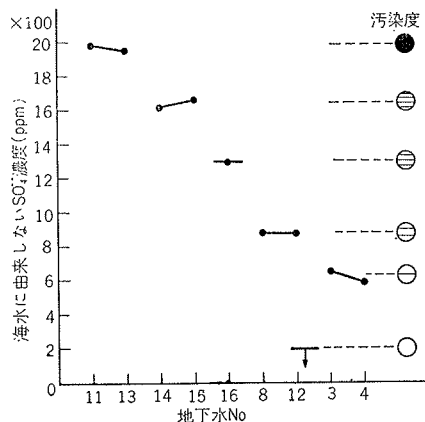


図-7 SO_4^{2-} 濃度による地下水の汚染度

(1) 隣接化学工場に最も近くしかもウェルポイント施工地点に最も近い No. 11, 13 地点の地下水が最も著しく汚染されている。

(2) 汚染範囲はウェルポイント施工地点を中心として半径約50mの周辺である。

(3) 現状においては地下水の汚染は No.2 タンクまで達していないと判断される。

5.3. 地下水の腐食性試験結果

採取した地下水の中から水質分析結果を参考にして汚染度の異なる代表的な6試料を選び腐食性試験を行なった。その試験結果を表一5に示す。地下水の腐食性の比率は人工海水を1とした時の腐食速度の比で表示した。試験結果から次のことが明らかである。

(1) 汚染されていないと判定された地下水の腐食性は人工海水と近似している。

(2) 最も著しく汚染されていると判定されたNo. 11地点の地下水の腐食性が最も大きく、人工海水の3倍弱である。

(3) 中間的な汚染度の地下水は人工海水の1.6~2.05倍の腐食性を示している。

地下水No.	汚染度	腐食比率
1	○	0.80
5	○	1.16
4	⊖	1.60
8	⊖	2.05
15	⊖	1.95
11	●	2.86
人工海水		1.00

表一5 腐食性試験結果

6. 基礎鋼管杭の腐食性の検討

6.1. 現状における腐食性

地下水の調査(II)の結果から、現状においてはNo.2タンクの基礎鋼管杭は汚染された地下水と接触しておらず、海水の水質に近似した地下水に接していると判断された。

ところで、当工場の敷地はほぼ平行地層をなしており、当工場建設工事開始直後に No. 1, No. 3 タンク建設地点で実施したコロージョンサウンド法による腐食性調査の結果では、海側である No. 1タンクと陸側である No. 3タンクの基礎鋼管杭の予想腐食速度は、マイクロセルによる腐食速度およびマクロセルによる腐食速度ともに近似しており、マクロセル腐食の発生予想深度も同じであった。したがって、No. 2 タンクの基礎鋼管杭も汚染地下水の影響を受けていない現状においては No.1および No. 3 タンクの基礎鋼管杭と同程度の腐食を受けると推定される。

さて、No. 1, No. 3タンクでは、コロージョンサウンド法に基づく予想腐食速度と腐食しろおよび杭にかかるモーメントの関係から、特別の防食処置を施すこ

となく十分に40年の耐用年数が期待できると判断した。したがって、No. 2 タンクの場合においても地下水が汚染されない限り防食処置の必要はないと考えられる。なお参考までに、地下水中の海水含有率が70~100%と高い地点における No. 1, No. 3 タンクの基礎鋼管杭の予想腐食速度は 0.017~0.035mm/y であった。

6.2. 地下水が汚染された場合の腐食性

地下水の調査(I), (II)で代表的な地下水について行なった腐食性試験の結果(表一3, 表一5)から明らかのように、汚染の程度によって差はあるが汚染されている地下水の腐食性はいずれも大きく、最も汚染の著しい地下水では汚染されていない地下水の約3倍の腐食性を示した。この数値を定量的に土中における鋼管杭の腐食に適用することはできないが、いずれにしても汚染地下水による腐食性は大きいと判断される。このことは7章の対策のところの後述するように、現場において地中に打込んだ鋼管を用いて測定した腐食電流の値が地下水の汚染している地点では増大していることから明らかである。

7. 鋼管杭の防食対策

6.1. において説明したように、鋼管杭が汚染地下水と接触していない現状においてはなんら防食処置を施す必要はない。しかし、汚染地下水はすでに No. 2 タンクの近くまで広がっており、今後ともわずかず拡散していくことが予想される。この汚染地下水が鋼管杭に接触するようになると、6.2. において説明したように鋼管杭の腐食が予想以上に促進されることは明らかである。したがって、汚染源から廃液が漏洩することのないように処理するだけでなく、鋼管杭に防食処置を施す必要があると判断する。

一般に鋼管杭の防食方法としては、防食皮覆や流電陽極または外部電源方式による電気防食が実施される。しかし、当現場の鋼管杭は既設のため、防食皮覆を施すことができないだけでなく、現場の諸条件から流電陽極方式による電気防食も実施することが不可能であった。したがって、当現場で実施可能な方法として、外部電源方式による電気防食を施すことにした。

そこで、必要とされる防食電流密度を決定するために、地下水の汚染が著しい地点に鋼管を打込み、通電分極試験を行なった。その結果、図一8に示すように腐食電流密度は 19.5mA/m² であり、基本的な防食電流密度を 20mA/m² と決定した。

なおこの腐食電流密度は、工事開始直後の昭和46年4月に、No. 1 および No. 3 タンクの近くで同様に測定した値の 1.5~1.95倍であり、廃液によって汚染

された地中における鋼管杭の腐食傾向が増大することを示している。

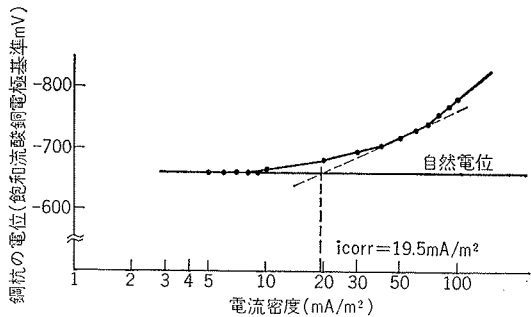


図-8 通電分極試験結果

8. まとめ

海岸埋立地に建設中の LNG タンクの近くでウェルポイントを施工したところ、隣接化学工場の廃液で汚染された地下水が揚水された。この汚染地下水による既設鋼管杭の腐食が懸念されたので、廃液による地下水の汚染範囲と汚染程度およびそれによる鋼管杭の腐食性を調査した結果次の結果が得られた。

(1) 化学廃液による地下水汚染の有無を、地下水のイオン濃度比 ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$, Na^+/Cl^-) と海水のそれとを比較する方法で検討した。

(2) 地下水の汚染はウェルポイント施工地点を中心とした半径およそ50mの周辺に広がっていた。その際 GL-6.5mの砂層の部分が汚染されており、その直下のシルト・粘土層が遮水層となるためにこの層以深の地下水は汚染されていなかった。

(3) 地下水の汚染度すなわち廃液の混入程度を廃液に由来する SO_4^{2-} 濃度で算定した結果、ウェルポイント施工地点の近くの地下水が最も著しく汚染されていた。

(4) 実験室における鉄片浸漬法による腐食性試験の

結果によれば、汚染度の大きい地下水ほど腐食性が大きいという傾向が認められた。最も汚染された地下水の腐食性は汚染されていない地下水の約3倍であった。

(5) 現場における通電分極試験による腐食電流の測定結果でも、地下水が汚染された地点における鋼管杭の腐食性は大きいことが明らかとなった。

(6) 既設鋼管杭に接する地下水は現状では汚染されていないが、将来汚染範囲が拡大することも予想される。そこで、ここでは現場の諸条件を考慮して外部電源方式による電気防食を施すことにした。その際の必要防食電流密度は通電分極試験の結果から約 $20\text{mA}/\text{m}^2$ と計算された。

終わりに、本調査を行なうにあたり、現場の担当者各位に大変お世話になりここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 喜田ほか：建築設備配管の腐食と水質に関する調査研究（その1, その2）大林組技術研究所報 No. 4
- 2) 喜田・守屋：建築設備配管の腐食と水質に関する調査研究（その3）大林組技術研究所報 No. 5
- 3) 喜田・守屋：建築設備配管の腐食と水質に関する調査研究（その4）大林組技術研究所報 No. 6
- 4) 喜田・守屋：建築設備配管の早期腐食と水質 建築技術 1971, 10, No. 242
- 5) 喜田・守屋：某工場、硫安の地中浸透による鋼管杭の腐食性の調査（その1, 2, 3）大林組技術研究所報告 No. 1817. 1971, 9
- 6) 喜田・守屋：某工場、地下水の分析と鋼管杭の腐食性の検討（調査1, 2, 3）大林組技術研究所報告 No. 1984, 1972, 9
- 7) 喜田・川地・守屋：某工場、LNG タンク建設地内の土中における鋼管杭の腐食性に関する調査、大林組技術研究所報告 No. 1564, 1970, 5