

塩害を受ける構造物（ORV 施設）の調査と塩化物イオン浸透予測

清水建設(株)	正会員	○藤山	堯大
東京ガス(株)	正会員	平松	英人
清水建設(株)	正会員	久保	昌史
清水建設(株)	正会員	柳沢	竜司

1. はじめに

本論文は東京ガス（株）袖ヶ浦 LNG 基地の ORV 施設 2 基（A 基、B 基とする）に対して塩害調査を行い、調査と塩化物イオン浸透予測に基づいた塩害対策について報告するものである。塩害調査はボイル法¹⁾により行った。塩害調査による塩化物イオン浸透予測の結果、時間の経過とともに塩化物イオンが内部に浸透していくと推定された。これらの結果から今後の維持管理について以下の提案を行った。既に炭素繊維シートによる補修が行っている A 基は、今後も性能上問題はなく点検を継続する。B 基は鋼材腐食発錆限界を超える塩化物イオンが深部まで浸透しており、今後損傷が生じる可能性が高い。よって、炭素繊維シートによる表面被覆等の対策を実施することが望ましい。

2. 構造物概要

対象の構造物は、海水を熱源として液化天然ガスを熱交換でガス化させる装置（オープンラック気化器）を囲う鉄筋コンクリート製の構造物であるため、海水に接触または飛沫を受ける塩害環境下にある。このような ORV 施設 2 基（A 基、B 基）に対して塩害調査を行った。それぞれの外観を写真-1、2 に示す。

A 基は、1973 年に建設され、塩害補修として 1988 年および 1999 年にエポキシ樹脂表面被覆、2003 年に炭素繊維シートによる補強を行っている。塩分調査²⁾は、2010 年と 2017 年に行っている。

B 基は、1983 年に建設され、塩害補修として 1987 年に浸透性（反応シラン系樹脂）コーティング材による環境遮断、2000 年に断面のはつり及びエポキシとポリウレタン系コーティング材による環境遮断の補修を行っている。塩害調査は 2017 年に行い、同時に劣化部の補修（6 箇所）も行っている。



写真-1 A 基の外観



写真-2 B 基の外観

3. 劣化調査

塩害調査は、ボイル法による塩分分析を行った。ボイル法は、ドリル削孔により採取したコンクリート粉末より塩化物イオンを抽出し、検知管により塩化物イオン濃度を計測する方法である。試料の採取は、20mm 毎に 5 深度、100mm までとした。1 箇所当たり 5 点の削孔を行い、深度毎にそれらを合わせて 1 試料とした。調査箇所は、海水の飛沫のかかる頂部梁底部、柱上部、柱下部および海水と接触する水中部の 4 箇所とした。A、B 基ともに 2 つの梁・柱の計 8 箇所調査を行った（A 基の調査した中の 1 つの梁・柱は 2010 年と 2017 年で場所が異なる）。A、B 基のそれぞれの調査箇所を図-1、2 に示す。

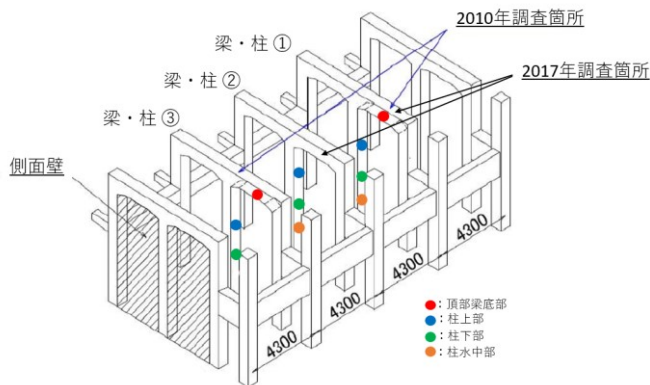


図-1 A 基の調査箇所

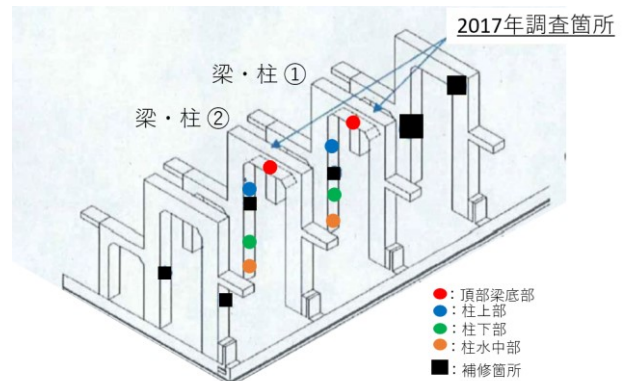


図-2 B 基の調査箇所

A 基の 2017 年および 2010 年のボイル法による塩化物イオン量の分析結果をそれぞれ図-3、4 に、B 基の 2017 年のボイル法による塩化物イオン量の分析結果を図-5 に示す。

図-3、4 より、A 基は各箇所とも塩化物イオン量は深度が深くなるにつれて減少しており、塩化物イオンが深いほうへ浸透していることがわかる。また、2017 年は柱水中部、2010 年は頂部梁底部が最も塩化物イオンが浸透している。2010 年と 2017 年の調査結果を比較すると、柱水中部を除いて 2017 年の方が 2010 年よりも塩化物イオン量が、すべての深度で小さくなる傾向となっている。これは、時間の経過により塩化物イオンがより深くに移動したためと考えられる。2017 年の方が 2010 年よりも塩化物イオンが多くなっている柱水中部については、試料採取箇所は同じであるが局所的に塩化物イオンが多く含まれていたと考えられる。

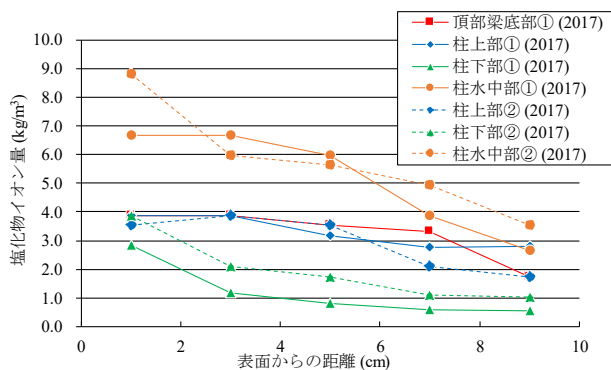


図-3 A 基のボイル法による塩化物イオン量の分析結果（2017 年）

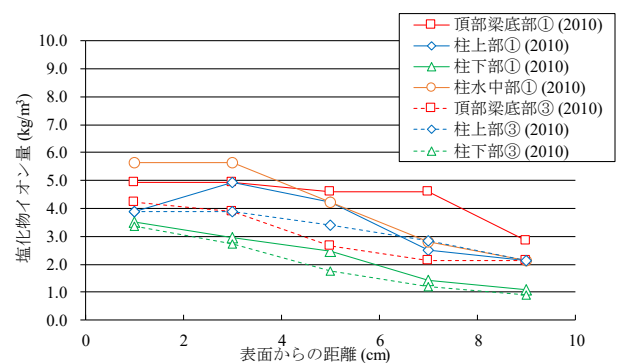


図-4 A 基のボイル法による塩化物イオン量の分析結果（2010 年）

図-5 より、B 基は柱上部①、②、柱下部①、柱水中部①、②では塩化物イオン量は深さ方向への一様な減少を見せず、これら 4 箇所は 4cm～6cm の深さで塩化物イオン量が最大となっている。これは、2000 年に断面はつり及びコーティング材による環境遮断を行っているため、0cm～4cm の部分は断面修復で補修した箇所ので、可能性が考えられる。また、これらの箇所の塩化物イオン量の最大位置（表面から 4cm～6cm の深さ）からと頂部梁底部①、②および柱水中部②は、深さ方向への塩化物イオン量の減少が見られ、塩化物イオンが深いほうへ浸透していることがわかる。最も塩化物イオンが浸透しているのは、柱水中部①であった。

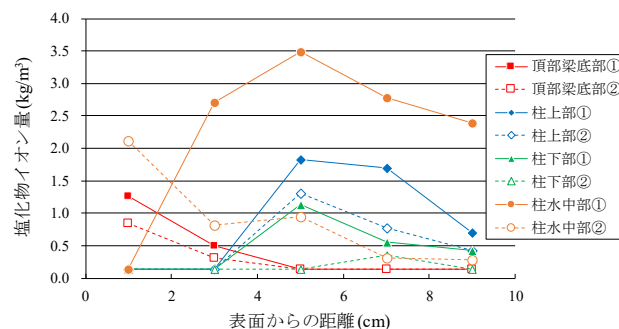


図-5 B 基のボイル法による塩化物イオン量の分析結果（2017 年）

4. 塩化物イオン浸透予測結果

塩化物イオンの拡散予測は、JSCE-G573-2013²⁾に準じて、実構造物コンクリート中に外部から浸入した塩化物イオンの見掛けの拡散係数を式(1)に示すフィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて、各深さ位置で測定された全塩化物イオン濃度を回帰分析し、コンクリート表面における全塩化物イオン濃度ならびに見掛けの拡散係数を算出することにより行った。ただし、A 基は建設後 15 年目、B 基は建設後 17 年目に表面被覆が行なわれているため、塩化物イオンの供給はその時点でほぼ止まっていると見なし、被覆後の予測は式(2)に示す差分方程式により行なった。

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x 、時間 t における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_s : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D_c : 拡散係数 ($\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)

erf : 誤差関数

$$C(x_i, t + \Delta t) = D_c \frac{C(x_{i-1}, t) - 2C(x_i, t) + C(x_{i+1}, t))}{(\Delta x)^2} \Delta t + C(x_i, t) \quad (2)$$

ここに、 $C(x_i, t)$: 深さ x_i 位置での表面被覆後 t 時間の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

$C(x_{i\pm 1}, t)$: 深さ $x_{i\pm 1}$ 位置での表面被覆後 t 時間の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

$C(x_i, t + \Delta t)$: 深さ x_i 位置での表面被覆後 $t + \Delta t$ 時間の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

Δx : 計算上分割した距離 (cm)

D_c : 拡散係数 ($\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)

表-1 A 基の表面塩化物イオン量および拡散係数

調査箇所	表面被覆時 表面塩化物イオン濃度 C_s (kg/m^3)		拡散係数 D_c ($\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)	
	近似値	平均値	近似値	平均値
頂部梁底部①	9.74	9.74	2.92	2.10
頂部梁底部②	-		-	
柱上部①	9.24	9.80	4.46	
柱上部②	10.36		1.77	
柱下部①	5.65	6.65	0.46	
柱下部②	7.64		0.96	
柱水中部①	16.65	17.45	2.01	
柱水中部②	18.25		2.13	

表-2 B 基の表面塩化物イオン量および拡散係数

調査箇所	表面被覆時 表面塩化物イオン濃度 C_s (kg/m^3)		拡散係数 D_c ($\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)	
	近似値	平均値	近似値	平均値
頂部梁底部①	2.33	1.93	0.31	1.49
頂部梁底部②	1.52		0.35	
柱上部①	5.21	4.68	2.20	
柱上部②	4.16		1.44	
柱下部①	3.54	3.27	1.41	
柱下部②	3.00		0.97	
柱水中部①	7.76	5.58	4.46	
柱水中部②	3.40		0.79	

これらの式を用いて算出した値と、今回の調査結果との差の二乗和が最小となるような表面塩化物イオン濃度と拡散係数を同定することにより、その後の塩化物イオンの拡散予測を行った。A、B 基の表面塩化物イオン量および拡散係数の同定結果をそれぞれ表-1、2 に示す。なお、JSCE-G573-2013 には、式(1)で回帰分析を行う際は隣接する前後の深さ位置での測定結果と著しく異なる結果については回帰分析の結果から除外した方がよいと記載がある。コンクリート内部に浸透する塩分は表面から拡散するため、全塩化物イオン濃度は表面に近い程大きくなるはずである。そのため、今回の分析では、表層部の塩化物イオン濃度が深部と比較して小さい箇所は、測定結果を除外し、塩化物イオン量の最大位置からの測定結果をもとに算出した。拡散係数はコンクリートの配合によって決まるため、同一構造物では同じ条件と考えて平均値を用い、表面塩化物イオン量は部位毎に異なるため、それぞれの値を浸透予測に用いることとした。

鋼材腐食の判定は、塩化物イオンによる鋼材腐食発錆限界濃度で判断し、2012 年制定コンクリート標準示方書【設計編】では、使用セメント種類および水セメント比に応じた算出式が示されている。しかし、本構造物は施工記録が残っておらず、それらの情報を得ることができなかったため、安全側の評価方法として、2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】に準じ、鋼材腐食発錆限界濃度を 1.2kg/m^3 で評価した。A 基の調査結果から、代表部位として柱上部の調査時の 2017 年（建設 44 年後）から建設後 100 年までの塩化物イオン浸透予測を図-6 に示す。2017 年調査時点の塩化物イオン濃度は、表面から 10.8cm まで鋼材腐食発錆限界濃度を上回っている。また、時間の経過による塩化物イオンの内部拡散により、建設から 100 年後では鋼材腐食発錆限界濃度を上回る部分が 14.0cm まで広がる結果となっている。

鋼材腐食発錆限界を超過している塩化物イオンが、柱上部では今回の調査による塩化物イオン浸透予測で表面から 10.8cm 以深では発錆限界を超えているため、鉄筋腐食の発生が予想される。しかし、本構造物は建設後 15 年目に塩害補修として表面被覆を行い、30 年目には鉄筋腐食を想定した炭素繊維シートによる補修³⁾を行っている。これにより、発錆限界を超える塩化物イオン量が内在する箇所においても、鉄筋の腐食膨張に起因する浮きやはく離等を抑制することができ、性能上の問題はないと考えられる。また、柱①の 2010 年時（建設 37 年後）の調査結果から 2017 年（建設 44 年後）時の塩化物イオン浸透予測と 2017 年の調査の実測値を図-7 に示す。柱下部と柱水中部は 2010 年と 2017 年の調査結果で差異があるため、浸透予測と実測値は乖離している。これは、試料採取箇所は同じであるが局所的に塩化物イオンの含有量の差があったと考えられる。頂部梁底部と柱上部については、予測値と実測値がほぼ同等の結果と言える。

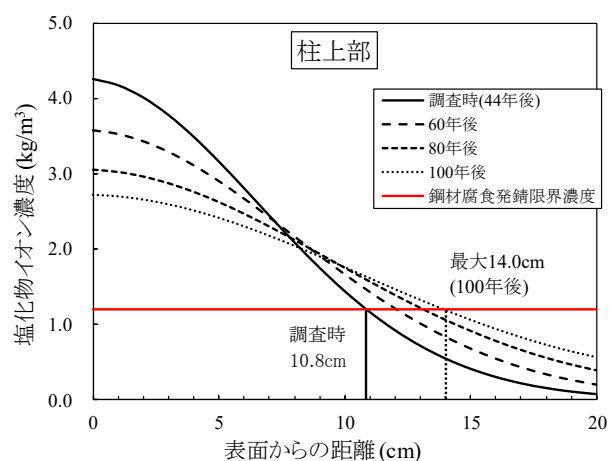


図-6 A 基の塩化物イオン浸透予測

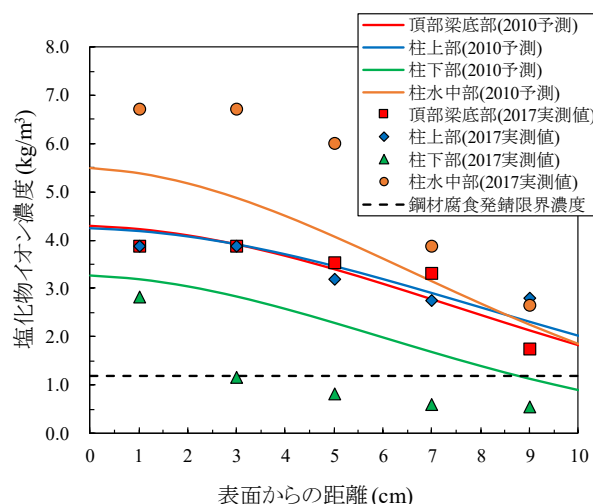


図-7 A 基柱①の塩化物イオン浸透予測と実測値の比較

B 基の調査結果から、代表部位として柱上部の調査時の 2017 年（建設 34 年目）から建設後 100 年までの塩化物イオン浸透予測を図-8 に示す。調査時点の塩化物イオン濃度は、表面から 6.0cm まで鋼材腐食発錆限界濃度を上回っている。また、建設から 60 年後では、時間の経過とともに塩化物イオンの内部拡散により、鋼材腐食発錆限界濃度を上回る部分が 6.5cm まで広がる結果となっている。かぶりは不明ではあったが、柱上部付近は今回の調査と平行してひび割れや浮きが生じている箇所の補修を実施しており、塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食が既に生じていた。そのため、かぶりは 6.0cm 程度と想定される。鋼材腐食発錆限界を超過している塩化物イオンが、柱上部では 2017 年の調査による塩化物イオン浸透予測で今後さらに内部に浸透する結果がでており、現在変状が認められない箇所においても、今後同様の損傷が生じる可能性があるため、予防保全の観点から補修の検討が望ましい。補修方法としては、塩化物イオンの侵入を防止しかつ鉄筋の腐食膨張に起因する浮きや、はく離等を抑制することができる炭素繊維シートによる表面被覆等の対策が考えられる。

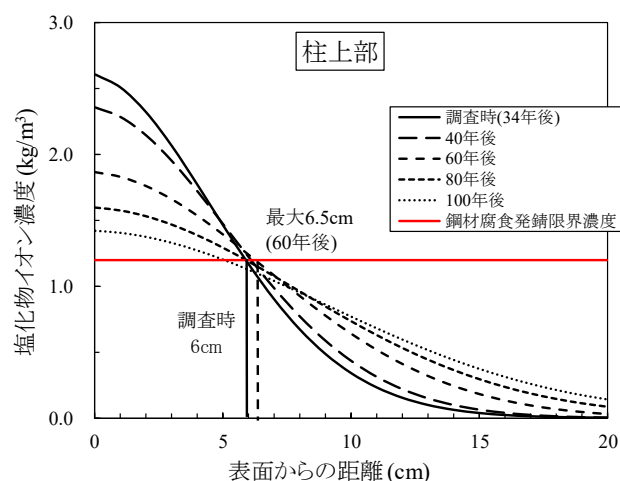


図-8 B 基の塩化物イオン浸透予測

5. まとめ

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物に対して調査を行い、塩化物イオン浸透予測を行った。その結果、調査時で鋼材腐食発錆限界の塩化物イオンが深部まで浸透していることが分かり、浸透予測では今後さらに塩化物イオンが深部まで浸透することが予測された。そのため、鋼材腐食の進展、それに伴う劣化が予想されるため、施設の維持のためにも定期的に点検を行い、変状の早期の発見と必要に応じて補修等の対策が必要となる。A 基は既に炭素繊維シートによる補修を行っており、鉄筋の腐食膨張に起因するひび割れ、浮きやはく離等を抑制することができている。B 基については、ひび割れや浮きが生じている箇所があるので、同様の構造物の A 基で実績のある炭素繊維シートによる補修が望ましい。

参考文献

- 1) 清水建設株式会社技術研究所，技術テクニカルリーフレット№18，清水建設株式会社，1990
- 2) JSCE-G573-2013：実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）
- 3) 宮田，野村，前田：40 年経過した海上基礎の塩害調査と劣化予測に基づいた補修，第 71 回年次学術講演会講演概要集，VI-668，pp.1335-1336，2016