

# 報告 厳しい塩分環境下にあるコンクリート構造物の耐久性

阿部久雄<sup>\*1</sup>・周藤 功<sup>\*2</sup>・和賀秀悦<sup>\*3</sup>・前田敏也<sup>\*4</sup>

**要旨:**液化天然ガス（LNG）を気化させるための施設である開架式気化器（ORV）廻りは、海水の飛散によって厳しい塩分環境下にあり、鉄筋腐食やひび割れといった塩害の発生のため、継続的な補修を行っている。本報告は、供用後約20年を経たORVに対して現地調査を行い、耐久性および今後の維持管理手法について検討を行ったものである。その結果、①鉄筋腐食はかぶりに大きく影響を受ける、②自然電位により腐食の有無が判定できる、③初期の段階での補修が有効かつライフサイクルコスト（LCC）は安くなる、等の知見が得られた。

**キーワード:**塩害、耐久性、調査、補修、ライフサイクルコスト

## 1. はじめに

天然ガスは、クリーンエネルギーとして従来から広く使用されているエネルギー源である。また、近年の地球環境問題からみても、その需要は今後益々増大するものと予想される。天然ガスは、極低温の液化天然ガス（以下、LNG）の状態で運搬・貯蔵され、供給の段階で気化される。LNGの気化は、開架式気化器（以下、ORV）と称する施設で、LNGが流れている熱交換パネル外面に海水を流し、海水の温度を利用してLNGの温度を上昇させることによって行われる。したがって、海水中の塩分による鉄筋コンクリートの劣化が生じやすく、非常に厳しい腐食環境下にあるといえる。このような構造物に対しては、適切な調査および補修・補強によって効率的に維持管理していくことが重要である。本報告は、供用後約20年を経たORVに対して各種の調査を行い、耐久性および今後の維持管理について検討を行ったものである。

## 2. 構造物概要

ORV架構の構造概要を図-1に示す。構

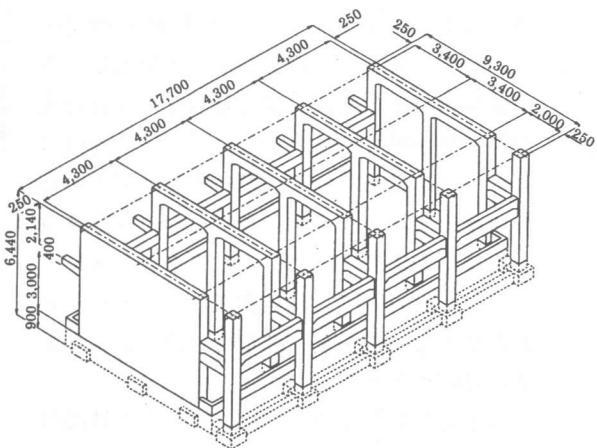


図-1(a) 構造物の概要

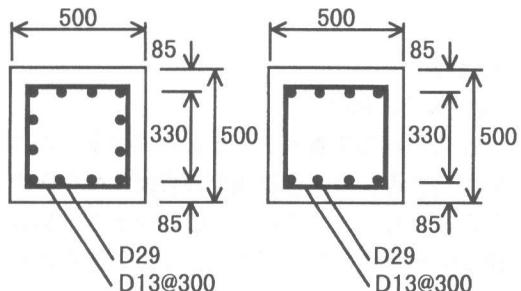


図-1(b) 柱標準断面

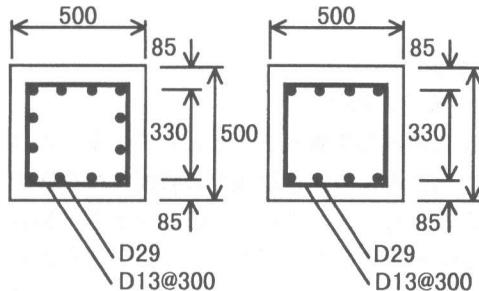


図-1(c) 梁標準断面

\*1 清水建設(株)土木本部技術第一部主査 (正会員)

\*2 東京ガス(株)扇島工場施設部係長

\*3 清水建設(株)土木東京支店土木第二部所長

\*4 清水建設(株)土木本部技術第一部 工修 (正会員)

表一 1 構造物の履歴

名称	ORV 1 (PB)	ORV 2 (EP)
竣工	1976 年	1976 年
補修履歴	1984 年 全面表面被覆 (ポリブタジエン) 1989 年 部分補修 (断面修復および表面被覆) 1993 年 同上 1997 年 同上	1986 年 全面表面被覆 (エポキシ) 1997 年 部分補修 (断面修復および表面被覆)

造形式は鉄筋コンクリートラーメン構造であり、柱の断面は  $500 \times 500\text{mm}$ 、設計上の純かぶりは主筋が  $70\text{mm}$ 、帯筋が  $60\text{mm}$  程度である。調査対象とした ORV は 2 基であり、供用開始約 10 年後に全面に対して行われた表面被覆材が異なることを除けば、ほぼ同様の条件で供用されている。表一 1 に構造物の補修履歴をまとめて示す。エポキシで表面被覆を行った ORV2 に比べ、ポリブタジエンで被覆を行った ORV1 では被覆後の部分補修の頻度が高くなっている、被覆材の違いによる影響の可能性がある。

調査時の ORV の状況は、主として柱部材に表面塗膜の割れおよび錆汁が発生しており、表面被覆後に鉄筋が腐食して劣化が顕在化したものと考えられた。

### 3. 調査

#### 3.1 調査の概要

調査の概要を表二にまとめて示す。ここで、自然電位の測定は既存の表面被覆を撤去した後に行った。また、塗膜に関する試験は構造物から塗膜とコンクリートが一体となった状態で試料を採取し、試験室にて整形後に行った。

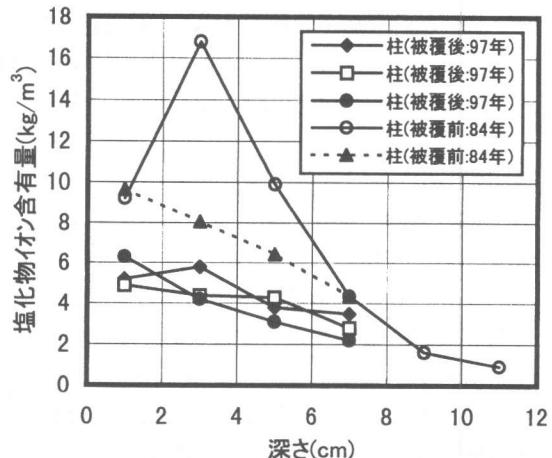
#### 3.2 結果および考察

##### (1) 塩分含有量

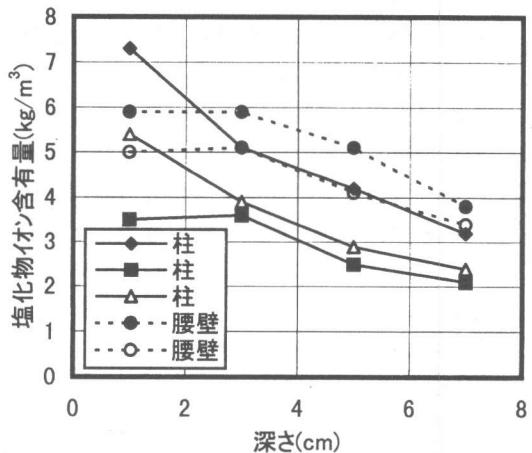
図一 2 に塩化物イオン含有量の分布を示す。これより、鉄筋位置の塩化物イオン含有量は

表一 2 調査概要

調査項目	調査方法	備考
塩化物イオン含有量	化学分析法	全塩分量
コンクリートの圧縮強度	一軸圧縮試験	JIS A 1107
鉄筋腐食	目視 自然電位法	
塗膜の遮塩性	遮塩性試験	化学分析法 <sup>6)</sup>
塗膜の透水性	透水性試験	JIS A 6910



図一 2(a) 塩化物イオン含有量分布(ORV1)



図一 2(b) 塩化物イオン含有量分布(ORV2; 被覆後: 97年)

一般的な発錆限界である  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  以上<sup>1)</sup> であり、厳しい塩分環境下にあることがわかる。また、図一 2(a) から、調査位置および数量が

表-3 表面塩分量および拡散係数

位置 (高さ)	表面 塩分量 (kg/m <sup>3</sup> )	拡散係数 (10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)	拡散係数 (計算値) (10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /s)
柱上部 (4~6m)	5.08	9.44	4.7~10.2
柱中部 (2~4m)	5.00	6.93	
柱下部 (0~2m)	5.58	4.54	
腰壁 (0~1m)	6.85	13.41	

異なることから明らかな傾向はみられないが、被覆前の分布に比べて被覆後の分布において相対的に表面部の含有量が小さく、逆に内部の含有量が大きくなっているものと考えられる。すなわち、表面被覆によって外部からの塩分浸透が抑制され、拡散によって塩化物イオンが表面部から内部に移動したものと考えられる。このことから、表面被覆時に鉄筋が腐食していない場合でも、内部の塩化物イオンの拡散によって被覆後に鉄筋が腐食する現象が説明できる。

次に、Fick の拡散方程式により近似した見かけの表面塩分量および拡散係数を表-3 に示す。これらの結果から、表面塩分量は下部の方が大きく、拡散係数は下部ほど小さくなっている。これは、下部ほど海水の飛沫量が多いこと、ブリーディングの影響でコンクリートが上部に比べて密実であるためと考えられる。また、コンクリートの圧縮強度から式(1)<sup>2)</sup>により算定した拡散係数の計算値を表-3 に併記する。

$$D_c = \exp (-0.08477 f'_c + 5.46) \quad (1)$$

ここに、  $D_c$  : 拡散係数 ( $\times 10^{-8}$ cm<sup>2</sup>/s)

$f'_c$  : 圧縮強度 (MPa)

ただし、コンクリートの圧縮強度は、圧縮試験の平均値で 46MPa であった。この値は経年による強度増加が含まれているが、材齢

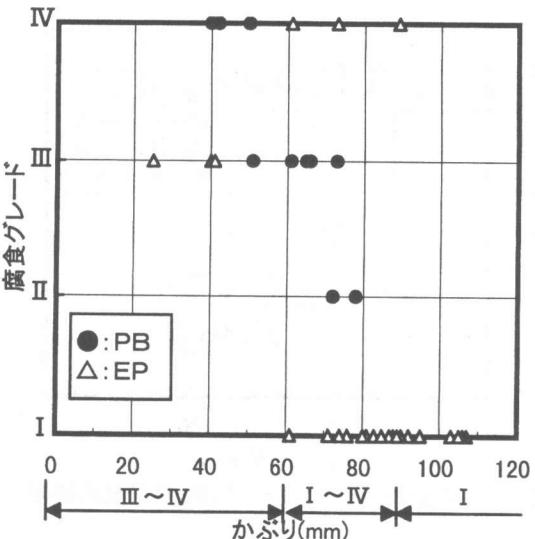


図-3 かぶりと腐食グレードとの関連

表-4 鉄筋の腐食グレード<sup>4)</sup>

グレード*	腐食状況
I	腐食していない
II	点錆程度の腐食
III	全周または全長にわたって浮き錆が生じている
IV	断面欠損を生じている

28 日の圧縮強度は長期圧縮強度の 80% 程度である<sup>3)</sup> ことから、28 日強度を逆算すると 37MPa となる。表中の計算値は圧縮強度が 37~46MPa に対応するものである。これより、見かけの拡散係数は概ね計算値の範囲に含まれていることがわかる。ただし、腰壁については部材厚が 20cm と小さいために、塩化物イオンが滞留し、見かけの拡散係数が大きくなっているものと考えられる。

## (2) 鉄筋の腐食状況

鉄筋のかぶりと腐食状況との関連を図-3 に示す。ここで、鉄筋の腐食状況は表-4 に示す腐食グレードによって表した。相対的にかぶりが小さい帯筋では、断面欠損率が 100% で鉄筋が破断している箇所もあった。これより、かぶりが 60mm 以下では腐食グレードが III ~ IV であり、腐食がかなり進行していることがわかる。これに対し、かぶりが

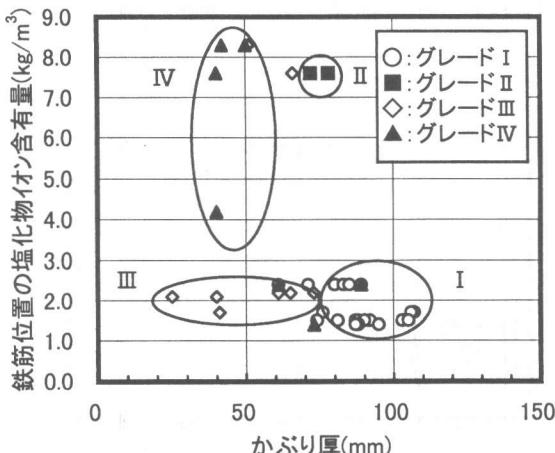


図-4 腐食グレード別のかぶり厚と塩分量の関連

90mm以上ではグレードがⅠであり、腐食が発生していない。また、かぶりが60~90mmの範囲は遷移領域となっている。

また、かぶりと鉄筋位置の塩化物イオン含有量との関連を図-4に示す。これより、かぶりと塩化物イオン含有量によって鉄筋の腐食グレードがほぼ分類されることがわかる。すなわち、かぶりが大きい場合には塩化物イオン含有量が多いにも関わらず腐食は軽微である。これに対し、かぶりが小さい場合には塩化物イオン含有量が比較的少ない場合でも腐食が進行している。これらのことから、塩化物イオン含有量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の場合でもかぶりが大きい領域では腐食を生じていないことからもわかるように、腐食の進行は塩化物イオン含有量のみならず、かぶりによって大きく影響を受けるものと考えられる。これは、塩化物イオン以外の水分および酸素等の腐食因子の浸透に対しても、かぶりが大きく影響しているためと考えられる。

### (3) 塗膜の性能

図-5に塗膜の塩分浸透量と鉄筋の腐食状況との関連を示す。塗膜の遮塩性については、日本道路協会規格<sup>5)</sup>で $10^{-3}\text{mg}/\text{cm}^2\text{日}$ 以下とされている。したがって、塗膜は所要の遮塩性を確保していると考えられる。このこと

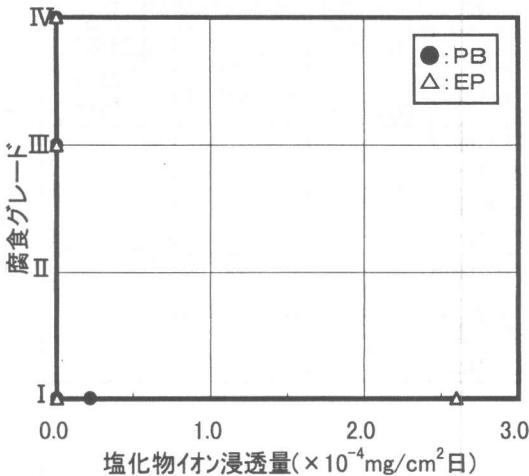


図-5 塗膜の塩化物イオン浸透量と腐食グレード

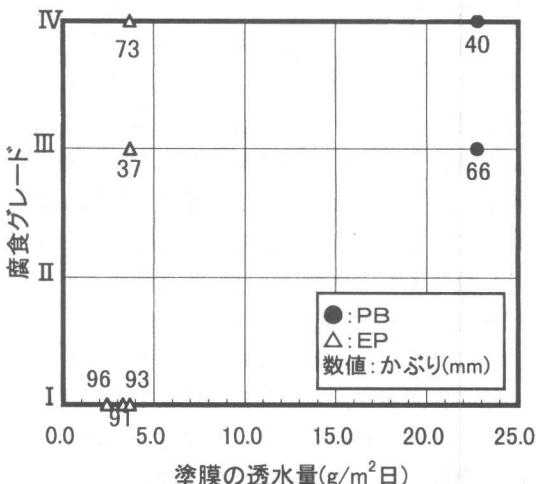


図-6 塗膜の透水量と腐食グレードとの関連

から、鉄筋の腐食は表面被覆以前にコンクリート中に浸透した塩化物イオンが、被覆後に拡散して発生したものであると考えられる。また、図-6に塗膜の透水量と鉄筋の腐食状況との関連を示す。塗膜の透水量については、阪神高速道路公団規格<sup>6)</sup>で $1.2\text{g}/\text{m}^2\text{日}$ 未満（ただし吸水率）とされている。また、初期の透水試験結果はいずれも $0.0\text{g}/\text{m}^2\text{日}$ であることから、経年劣化により遮水性能が低下したものと考えられる。さらにその低下はポリブタジエンの方がエポキシに比べて大きく、塗膜の種類による影響が表れている。遮水性能の低下はコンクリート中への水分、酸素の浸透

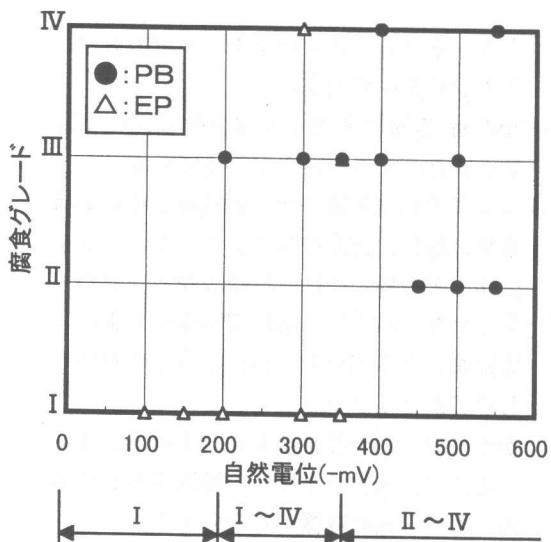


図-7 自然電位と腐食グレードとの関連

を増加させるため、これらが被覆前に浸透していた塩化物イオンとともに、かぶりが小さい箇所の鉄筋腐食を進行させたものと考えられる。すなわち、被覆材の種類により補修後の鉄筋腐食の進行が異なるものと考えられる。

#### (4) 自然電位による腐食の推定

図-7に測定した自然電位と鉄筋の腐食状況との関連を示す。これより、電位が-200mVよりも貴である場合には腐食グレードがI、すなわち鉄筋は腐食していない。一方、電位が-350mVよりも卑である場合には腐食グレードがII～IV、すなわち鉄筋は腐食している結果となっている。また、電位が-200～-350mVの範囲では腐食グレードがI～IVであり、腐食の判定は困難である。これらの結果はASTM規格<sup>7)</sup>に一致しており、自然電位によって鉄筋腐食の有無を判定できることが確認された。

## 4. 補修

### 4.1 補修の概要

塗膜の割れおよび錆汁発生部に対して補修を行った。補修は、

- ①鉄筋のはつり出し
- ②錆の除去および防錆処理

③無収縮モルタルあるいはポリマーセメントモルタル(PCM)による断面修復  
④柔軟性エポキシ樹脂による表面被覆<sup>8)</sup>の手順で行った。ここで、新たに施工する表面被覆と既存塗膜との重ね代は100mm程度とした。

### 4.2 LCCの試算

調査結果にも述べたように、当該構造物には既に多量の塩化物イオンが浸透しており、また、表面被覆の経年劣化によって水分および酸素が供給される環境下にある。したがって、今後長期間に渡って供用していく過程で、鉄筋腐食の進行は避けられない状況にある。現状では、劣化箇所に対する部分的な補修を隨時行っているが、今後の劣化範囲および補修頻度の予測は困難である。このような状況から、ある仮定条件の下、いくつかの補修工法について今後のライフサイクルコスト(以下、LCC)の試算を行った。補修工法は以下の6つとした。

- ①断面修復(PCM)+表面被覆(エポキシ樹脂)
- ②電気防食(内部挿入型電極方式)
- ③脱塩+表面被覆(エポキシ樹脂)
- ④かぶり増厚( $t=40\text{mm}$ )
- ⑤連続繊維巻き立て(シート5層)
- ⑥解体・更新

ここで、①の工法については現在行っている部分的な補修である。ただし、補修範囲、頻度およびコストについては今後増加する可能性もあるが、現状の実績と同様に設定した。また、④、⑥については、コンクリートのはつりにより部材断面が減少するため、設備の仮受けが必要となる。図-8に今後30年間のLCCの試算結果をまとめて示す。LCCは解体・更新のそれを1.0としている。これらの結果から、既に多量の塩化物イオンが浸透した構造物に対して、補修後のランニングコストを少なくする場合には連続繊維巻き立てが、そうでない場合には随時断面修復および表面被覆による部分的な補修を行うのが最

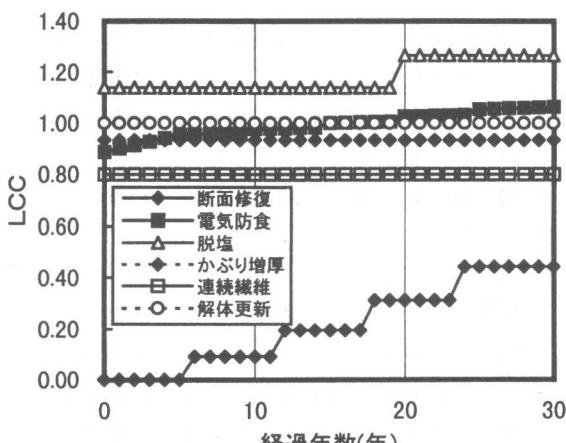


図-8 LCCの試算結果

も LCC が安くなる結果となった。ただし、部分的な補修については、コンクリート中に浸透している塩化物イオンによる今後の劣化予測が困難であるため、補修面積および頻度等の不確定要素が含まれている。したがって、かぶりが比較的小さい部材の LCC を最小とするためには、塩化物イオンの浸透が少ない早期における表面被覆工法が有効であると考えられる。

## 5. おわりに

今回の調査で得られた主な知見をまとめると以下のようである。

- ① 塩化物イオンが多量に浸透した状態で表面被覆を行っても、塩化物イオンの拡散よって被覆時に腐食していなかった鉄筋が腐食する可能性がある。
- ② コンクリートの圧縮強度を用いて拡散係数は概ね算定できる。
- ③ 腐食の進行は塩化物イオン含有量のみならずかぶりによって大きく影響を受け、かぶりが 90mm 程度以上あれば腐食は生じていない。
- ④ 被覆後約 10 年経過した塗膜は所要の遮塩性を確保しているが、遮水性能が低下して

おり、その低下はポリブタジエンの方がエポキシに比べて大きい。

- ⑤ ASTM 規格に準拠すれば自然電位による鉄筋腐食の有無の判定が可能である。
- ⑥ 既に多量の塩化物イオンが浸透している構造物に対し、補修後のランニングコストを少なくする場合には連続繊維巻き立てが、そうでない場合には随時断面修復および表面被覆による部分的な補修を行うのが最も LCC が安くなる。
- ⑦ かぶりが小さい部材の LCC を最小とするためには、塩化物イオンの浸透が少ない早期における表面被覆が有効である。
- ⑧ 塩化物イオンが多量に浸透した状態で表面被覆を行った場合、腐食因子の浸透を抑制することによって腐食の進行を遅くすることは可能であるが、腐食を抑止することは困難である。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方, 1995.5.
- 2) 堤, 阿部, 前田：コンクリート中の塩分浸透量の推定に関する検討, 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集 V, pp.250~251, 1993.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧, 技報堂, pp.229~230, 1996.2.
- 4) 日本国土開発技術研究センター：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 1986.6.
- 5) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 昭和 59 年 2 月
- 6) 阪神高速道路公団：コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説, 平成元年 3 月
- 7) ASTM : Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1985.
- 8) 成田, 阿部, 前田, 久保, 藤間：塩害により劣化した港湾施設の表面被覆工法による補修, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集, pp.17~22, 1992.10