社会資本構造物及び建築物防食の歴史的発展*

松 島 巖**

** 前橋工科大学

Corrosion Engineering of Social Infrastructures and Buildings

A Historical Review of Events of Past Half Century

Iwao Matsushima**

** Maebashi Institute of Technology

Development of corrosion engineering of social infrastructures and buildings in the past half century has been reviewed in connection with the changes and resulting requirements of society. It was intended to pass down the historical background of the present technology to the new generation. Following a brief historical review, an account of ten important topics was given in more details. Included are the use of unpainted weathering steel, cathodic protection of buried pipelines in the early days, quality control of concrete to avoid corrosion of steel reinforcements, mitigation against delayed failure of high-strength bolts for structural bolting, development of groove-corrosion resistant welded water pipe, prevention of premature corrosion of buried utility piping, application of heavy-duty paint coating systems for long-span bridges over straits, various linings for splash-zone protection, instructive impact by a book "America in Ruins" authored by P.Choate and S.Walter, and use of rust-proof stainless steel and titanium for exterior of buildings for amenity.

Key words : social infrastructure, weathering steel, cathodic protection, pipeline, reinforced concrete structure, high-strength bolts, buried utility piping, heavy-duty coating system, lining for splash-zone

1. 緒 言

本稿は、1960 年頃から現在に至る社会資本構造物及びその他の鋼構造物防食の、歴史的発展を述べたものである***。この間防食法は大いに進歩したが、その歴史的背景を述べ、次世代の関係技術者の参考に供することを目的としている。

当然、正史を骨子としているが、関係者のみに知られている事実や、当事者としての筆者が教訓的であると考ええる事項を加えた。これらは重要であるにもかかわらず他の文献にはあまり記述されていないからである。

第 2 章でこの期における社会の動きとこれに対応する防食技術の概要を述べ、第 3 章ではこれらの中から、鋼構造物防食に関するトピックスを取り上げてやや詳しく扱う。技術の具体的内容や関連データについては、第 3 章に付した参考文献を参照されたい。

2. 社会の動きと防食技術

1960 年代から現在に至る、防食に直接、間接かわった社会の動きと、これらに呼応した腐食防食の世界における出来事を、10 年を区分として表 1 に示した。

1960 年代は 1950 年代後半から始まった高度経済成長が維持発展した年代であり、東海道新幹線や首都高速道路が完成し、東京オリンピックが開催された。大型の社会資本構造物やその他の構造物の建設を合理化するためのニーズから高張力鋼や耐候性鋼が開発されたが、前者

では化学装置での腐食割れ、後者ではさび層安定化不良のケースが問題となった。一方、鉄筋コンクリート構造物の建設ラッシュから細骨材である川砂が不足した結果海砂の使用が増加し、付着塩分の洗浄除去不良による鉄筋の腐食の問題が生じた。また、工事現場ではなく工場で第三者の手で調配合されるフレッシュコンクリート（生コン）の使用が一般化し、品質管理が十分行き届かず、粗悪なコンクリート構造物が蓄積されて行った。この「付け」は 80 年代以降に支払うことになる。

1970 年代には、高度経済成長の副産物である大気汚染の対策が本格化した。このため、工場一般の排煙脱硫装置、石油精製工場の重油脱硫装置などの材料選定や防食法の研究が進められた。1974 年 9 月、米国のドレスデン 2 号炉と呼ばれる沸騰水型発電用原子炉（BWR）の高温水再循環系バイパスラインに使われていた type 304 配管の溶接部付近に生じた割れが応力腐食割れとされ、調査の結果、世界中で同様な割れが発見された。これは本稿の対象ではないが、膨大な人手と費用をかけた長期にわたる研究活動の対象となった。

1973 年に到来した第一次石油危機の結果、高度経済成長時代は終わりを告げ、腐食損傷に関連する経費節減を図るため、工場などで装置の防食管理が強化された。これに関連して、腐食モニタリング、統計的手法による寿命予測などの研究や実用が盛んとなった。

1980 年代、低経済成長化の影響が、腐食防食の世界でも顕著となった。高度経済成長時代に多数建設された橋梁のメンテナンスのための塗装の費用が経済を圧迫するようになり、耐候性鋼の無塗装使用が始まり、拡大して行った。一方、本州四国連絡橋の建設が始まり、長期の

* 関東支部技術交流会（東京、2006 年 1 月 20 日）で講演

** 〒371-0816 前橋市上佐島町 460-1 (460-1 Kamisadori-machi, Maebashi, 371-0816 Japan)

*** 視点の異なる歴史的推移を記述したものに、本筆者による他の文献^{1), 2)}がある。

表 1 社会の動きと腐食防食の世界

西暦	社会の動き	腐食防食の世界
1960年代	高度経済成長 社会資本整備（新幹線・高速道路） 川砂枯渇 大気汚染 長距離パイプライン時代へ 超高層のあけぼの	高張力鋼開発 低合金耐食鋼開発（耐候性鋼・耐海水鋼） 海砂使用による塩害対策開始 大規模大気暴露試験（陸防研） LPG タンク、高力ボルト割れ
1970年代	大気汚染対策 石油ショック（'73） 原子炉配管の割れ	公害防止機器腐食対策 BWR 配管応力腐食割れ研究 耐みぞ状腐食電鍍鋼管研究開発 腐食コストの調査（'74） 防食管理の強化（モニター・統計的手法）
1980年代	低経済成長 長大橋時代へ（本四橋建設開始） 「荒廃するアメリカ」 安全・長寿命化（自動車・埋設管・橋梁） 港湾施設劣化 構造物美麗化	無塗装耐候性鋼橋梁拡大 橋梁重防食塗装 自動車防錆鋼板（さびコード対策） 耐食性油井管開発 埋設管腐食対策基準確立・普及 RC 構造物塩害対策強化 海水飛沫帯防食強化 住宅用防錆鋼材の性能向上
1990年代	地球環境保全・省エネルギー 酸性雨問題化 海洋汚染防止強化 森林保護強化（米国） 阪神淡路大震災（'95）	新エネルギー用耐食材料研究開発 文化財の腐食対策（酸性雨） 二重船体タンカーの塗装合理化 スチールハウスの耐食性 腐食コスト調査（'97） 「コンクリートが危ない」
2000年代	グローバル化 循環型社会構築 高度情報通信社会構築 ナノ・バイオ研究開発 高齢化社会進展 多様化の時代	メンテナンスの省力化 海上空港建設（含：鋼製栈橋構造） 腐食防食研究の多様化 超高力ボルト開発 埋設管の交流腐食対策

耐久性を重視して重防食塗装系が採用され、塗装の歴史における新時代を開いた。米国などでは石油供給確保のため、腐食性の高い、深い油井の開発が進んだ。これに用いる油井用の材料として、高耐食性油井管の研究開発が盛んであった。

安全と長寿命への社会の要請は、各方面で大きくなった。上水やガスを供給する建物周辺の埋設配管の早期の腐食貫通が多発することへの対策が進んだ。また、消費者保護のため、自動車の融雪塩によるさび発生や穴あきに対する防錆基準が、カナダ、米国、北欧などで作成され、自動車用防錆鋼板の開発が精力的に行われた。

1981 年、米国の社会資本構造物の劣化の状況を述べた『荒廃するアメリカ』が出版された。わが国では戦後になって建設が進んだ社会資本構造物の経過年数は比較的短いとはいえ、港湾施設などでの劣化が顕在化しており、腐食が大きな原因となっていたこと、沿岸地域で塩粒粒子の作用によるコンクリート橋梁の鉄筋の腐食が多数発見されたこと、粗悪なコンクリート構造物の損傷が顕在化したことなどから、社会資本構造物を中心に防食が重要な課題として着目され、調査や対策が検討され実施された。

80 年代後期になると、構造物の美麗化、住宅用材料の性能向上が着目され、ステンレス鋼の耐さび性向上などが重要な研究対象となった。

1990 年代は、地球環境保全・省エネルギーがクローズアップした年代である。燃料電池の開発、地熱発電の拡大、ごみ処理発電の効率化などクリーンエネルギー開発上のニーズから、腐食が問題となる構成材料が研究開発された。原油タンカーの事故に伴う海洋汚染の対策としてタンカーの二重船体化が義務づけられるようになり、防食塗装面積の拡大から、塗装作業の合理化と高品質化が大きな課題となった。酸性雨による腐食が、文化財などで問題化したが、一般の構造物ではあまり顕在化しなかったのは幸いであった。

1995 年に発生した阪神淡路大震災による山陽新幹線などの構造物の損傷によって、コンクリート構造物の原料や工事の不適正がもたらす危険性が改めて明らかとなった。鉄筋の腐食が進んでいたが、これは鉄筋自体の問題ではなく、より適正な原料・施工による解決の重要性が強く認識された。

2000 年代になると、高齢化が進む社会において、循環型社会の構築が重要な課題となった。要求されるのは、材料・構造物の長寿命化と再利用である。腐食防食の立場からは、長寿命化は以前から進められていたが、再利用の面では今のところ顕著な研究開発実績はない。

腐食防食は多様化の時代であり、ある種の研究開発への重点化は見られない。

2009 年度末からの供用を目標に、羽田空港第 4 滑走路が海上に建設されるが、栈橋構造となる部分の 100 年の腐食に対する耐久性と低メンテナンス化は、前世紀の技術の進歩の総決算と言える。

3. 鋼構造物防食の進歩

3.1 耐候性鋼の開発と利用^{2), 3)}

有効成分として、銅、クロム、ニッケルなどを添加した低合金耐食鋼である耐候性鋼は、無塗装のまま大気中で使用するとき、生成するさび層の腐食保護性のため、さび層安定化後の腐食が小さいという特性を持つ。もともと米国で 1933 年に開発され、貨車、客車、トラック、農業用機械、産業用機械などの塗装メンテナンス軽減のために塗装して使用されていた。

米国で建築物への無塗装使用が始まった 1960 年代、日本でも耐候性鋼が開発ないし技術導入され、市販されるようになった。わが国における耐候性鋼の開発と利用の経過を、表 2 に示した。

初期には米国での動向の影響を受けて建築物への利用が主であったが、不満足な結果に終わるケースも少なかった。当時の高度経済成長に付随した SOx 汚染が激

表2 耐候性鋼の利用

西暦	全般	建築物への利用	橋梁への利用
1955～	耐候性鋼開発 大気汚染激化		
1965～	石油危機 (’73)	ビルへの利用主体 さび安定化不良の例 かなり	鉄鋼会社社内などに例
1975～	低経済成長へ 大気汚染改善	利用ほとんどなくな る	道路橋への利用開始 (’78～) 適用可能地域決定への共研 (’82～) 道路橋への利用急増 (’82年)
1985～			道路橋への利用年間 100 橋以上 (’87) 道路橋への利用累積約 1000 橋 (’91) 適用可能地域決定 (’93)
1995～	Ni 系 (海岸 用) 耐候性鋼 開発		道路橋への利用累積約 4000 橋 (’02) Ni 系耐候性鋼利用累積約 62 橋 (’02)

しい地域や、もともと使用が不適当な海塩粒子付着が過度の臨海地域でのさび層安定化不良、さび層が安定化する数年ないし 10 年近い期間におけるさび層のむらなど外観上の問題、さび表面を伝った鉄イオンを含む雨水（いわゆる「さび汁」）による下辺のコンクリートなどの汚損が主な理由である。さびむら解消のため構造物の形状的工夫が行われ、大気汚染も次第に改善されたが、1980 年頃までに建築物における耐候性鋼の利用は、ほとんどなくなった。さび層安定化への不信と同時に、建築物においては塗装しないことの経済効果は大きくないこと、無塗装耐候性鋼の外観がデザイン効果を与える建築物は限られることなども影響した。

橋梁への耐候性鋼の無塗装使用は 70 年代までは試行的な数例に限られていた。しかし、第一次石油危機から約 10 年経過した 1980 年代前半になると、莫大な費用を要する橋梁の塗装の塗替えが大きな経済的負担となり、道路橋を中心にその利用が始まり、急速に増加して行った。橋長 30 メートル以上の無塗装耐候性鋼橋梁の累積数は、1990 年代初めまでに約 1000 橋、2002 年度までには約 4000 橋に達した²⁾。耐候性鋼は石油危機によって甦ったのである。

橋梁への利用においても、さび層安定化を有利にするため、滞水、漏水、雨水の定常的水みち形成の回避などの設計的改善が進められた。また、建設省土木研究所（当時*）は鋼材倶楽部（当時**）、及び日本橋梁建設協会と共同で、全国 41 カ所の既存の道路橋に試験片を取り付けて 9 年間の暴露試験を行い、さび層安定化の調査結果に基づいて、1993 年、海塩粒子付着量が限度を超えず、無塗装耐候性鋼の適用が可能な地域を決定した⁴⁾。現在では、耐候性鋼は橋梁建設用材料として、定位置を確保している。

一方、適用可能地域外となる臨海地域

での橋梁建設数は多いので、臨海地域でもさび層が安定化してその適用が可能であるニッケル系高耐候性鋼がその後研究開発され、2002 年までに約 60 橋での使用実績ができた。

3.2 パイプラインの電気防食

パイプラインの電気防食技術は、天然ガスパイプラインの発展につれて米国において 1935 年頃からしだいに普及した。1945 年頃までに一応の技術的確立を見たが、その後の幹線の延長拡大とともに発展して行った。

わが国における初期の経過を、表 3 に示す。最初の長大パイプラインは、1962 年に完成した新潟 - 東京天然ガスパイプライン（335 km）であり、電気防食の本格的適用もこの時である。塗覆装はアスファルト/ガラスクロスで、外部電源法と選択排流法が用いられた。

1960 年代後半、首都圏や近畿地区でいくつかの都市ガス幹線が建設され、以前から開発されていたポリエチレン被覆鋼管の使用が定着した。1971 年、日本最初の長大

表3 初期におけるわが国のパイプライン電気防食の発展

西暦	米国	日本
1935～	天然ガスパイプラインの発展 電気防食、次第に普及	
1945～ (終戦)	電気防食技術、一応確立 NACE 設立 '45～幹線発展、電気防食発展	1949 東京電蝕防止対策委員会設立
1955～	幹線 142,000 マイルに	1956～ポリエチレン被覆鋼管普及へ 1962 新潟～東京天然ガス PL (335km) (アスファルト/ガラスクロス被覆、選択排流・外部電源法)
1965～	Peabody: "Control of Pipe-line Corrosion" (NACE '65) SCC 問題発生 NACE 電気防食基準 (RP-01-69) 政府パイプライン安全基準 (OPS '71)	1968～首都圏、近畿地区に諸ガス幹線 (ポリエチレン被覆鋼管使用) 電防技術の進歩へ (含: 測定技術)
1970 代		1971 東京湾横断海底幹線(26km)

* 現在、独立行政法人 土木研究所。

** 2001 年、日本鉄鋼連盟に統合。

海底管である東京湾横断海底ガス幹線（26 km）が敷設された。

電気防食施工技術は当然進歩したが、見逃せないのは、必要防食電流の決定方法、測定される電位の解釈などの進歩を含め、施工、管理に必要な測定技術が確立されたことである。69年に制定された米国の電気防食技術の結集である“Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems”（NACE Standard RP-01-69（1969）；1992年版が最新）は、大きな助けとなった。

今日までに重要な埋設パイプラインが増加し、電気防食技術は世界最高水準にある。わが国の首都圏など直流電鉄網が広がっている地域の埋設パイプラインでは、米国などに比べて迷走電流による腐食（いわゆる「電食」）対策がはるかに重要であり、排流法や定常的な電気防食だけでは対応できず、自動電位調節など、独自の技術が大きく発展したという特色がある。

電食防止のために関係者の連絡協調を密にし、必要な各種の調査及び測定などを行い、これらの対策を研究し、かつ実施の促進を図るため、電鉄、ガス、水道、電力、電気通信などの業者に学識経験者を加えた電食防止対策のための委員会がある。1949年に設立された東京電食防止対策委員会を最初として、わが国5地域で活動が続いている。例えば東京電食防止対策委員会の場合、会員からの提案による具体的調査の件数は、毎年80～100件に上る。

種々の分野における防食技術の中で、埋設パイプラインのそれは最も整備され有効なものと言える。

3.3 鉄筋コンクリート構造物の鉄筋の塩害対策

鉄筋コンクリート構造物（RC構造物）の鉄筋の塩害対策の経緯を、表4に示した。

1950年代後半から、わが国でRC構造物の建造が急増

したため、細骨材として使用する川砂不足の傾向を生じ、一部に海砂の使用が始まった。海砂の洗浄が悪く、塩化物が多く付着していると鉄筋を腐食させるため、日本建築学会では最初の塩化物限量をこの頃規定している⁵⁾。

1960年代に入ると、高度経済成長に伴ってRC構造物の建設はさらに増加し、川砂不足は深刻となり、60年代後半以降、洗浄不良の海砂使用が多くなった。また、工場で調配合するフレッシュコンクリート（生コン）が広く使用されるようになり、大きな水/コンクリート比（W/C比）、高い塩化物量、アルカリ反応性骨材の使用など、品質の悪い生コンが使用されるケースが増大した。同時に、施工の不良も多発するようになった。

1980年代になるとその影響が顕在化し、コンクリートの割れ・はがれ、鉄筋の腐食、アルカリ骨材反応などの発生が、多数の既設構造物で問題となった⁶⁾。山陽新幹線の橋脚や床版に生じた損傷がその典型例である。生コンの品質を確保するため、日本建築学会⁷⁾やJIS⁸⁾では、生コン中の塩化物イオンの量を0.30 kg/m³以下と定めると共に、アルカリ骨材反応防止のための基準を作成した。この結果、生コンの品質、ひいては新規のコンクリート構造物は大きく改善された。しかし、過去の不良構造物は蓄積されており、その弱点は、1995年に発生した阪神淡路大震災によって、世間の注目を広く集めることとなった。

一方、80年代、臨海地域では、RC橋表面に付着した飛来塩分が内部に浸透して鉄筋を腐食させるという事例が多数見い出され、新しい問題として浮上した⁹⁾。建築物でも同じ問題を生じた¹⁰⁾。この対策として臨海RC構造物では、W/C比の低減、表面の被覆など、塩化物イオンの浸透を抑制する方法が採用されるようになった¹⁰⁾。

品質の良い生コンを用いて正しく施工された健全なRC構造物では、外来の塩分などの影響がない場合、その耐久性は空気中の二酸化炭素の作用で外部からゆっく

表4 鉄筋コンクリート（RC）構造物の劣化への対応

西暦	社会の動き	コンクリート事情	対策など
1955～	RC構造物建設急増	川砂不足の傾向 海砂使用へ（'57～）	細骨材中 NaCl ≤ 0.01%を規定 （日本建築学会）
1960～	高度経済成長へ 首都高速道路、東海道 新幹線、オリンピック 施設建設	川砂不足深刻化（'63～）	
1965～	フレッシュコンクリート（生コン）使用へ 阪神高速道路、山陽新 幹線建設	洗浄不良海砂使用増大 生コン品質低下（W/C 比大、塩化物大、アルカリ 反応性骨材使用）	
1980～	沿岸 RC 橋梁塩害問題 発生（飛来塩分の影 響、'82）	割れ、剥がれ、鉄筋腐食 増大、アルカリ骨材反応 発生（建築物、橋梁など）	JIS A 5308-86、JASS 5-1986 生コン中 Cl ⁻ ≤ 0.30kg/m ³ アルカリ骨材反応防止策 生コン品質改善へ（Cl ⁻ 、反応 性骨材）
1990～	阪神淡路大震災	大震災で不良 RC 構造物 弱点に一般の注目集まる 品質・施工不良 RC 構造 物減少へ	コンクリート品質管理指針 （例：日本建築学会 '91） RC造建築物耐久性調査・診断・ 補修指針（日本建築学会 '97） 耐久設計基準強度規定（日本建 築学会：JASS 5-1997）

り進む中性化が鉄筋位置に到達して、腐食損傷を生じさせるまでの期間によって決まる。中性化進行速度が基本的には W/C 比の値、ひいてはコンクリートの強度によることから、日本建築学会では、建築物に求められる耐用期間に応じて必要な「耐久設計基準強度」を規定した¹¹⁾。これは、腐食がからむ構造物の耐久設計を定量的に規定するという、他に類を見ないものとして注目される。

3.4 高力ボルトの遅れ破壊

1965 年頃、橋梁や建物で部材の摩擦接合に用いる高力ボルトのうち、当時の JIS 規格で引張強さ (TS) が最大の製品であった F13T (TS: 約 130 kgf/mm²) に遅れ破壊が頻発した。このため、1970 年の JIS の改定でこれを廃止し、引張強さが約 110 kgf/mm² の F11T までとしたが、やはり遅れ破壊の事例を生じた。このため現在では、F10T (TS: 約 100 kgf/mm²) が一般に使用されている。

高力ボルトの強度が低いことは、ボルトの数が増え、重量が増すなど、設計上不利である。本稿での対象外であるが、このことは、粗製プロパンガス貯蔵用タンク、液体アンモニア貯蔵用タンクなどに使われた高い強度の高張力鋼材が応力腐食割れを起こしたため、その後はより強度の低い高張力鋼材を使用していることと類似している。

高力ボルトにおけるこの問題に対処するため、最近になってようやく、遅れ破壊に強い F13T 相当又はそれ以上の強度を持つ高力ボルトの開発が進み、耐遅れ破壊性を実証するための努力が続けられている¹²⁾。

3.5 溶接部の腐食に対する鋼中の硫化物の影響

現在では標準的な製品となっている連続鋳造法による鋼材 (連鋳鋼) の製造が始まった 1968 年、関係者を驚かせたのは、連鋳鋼は特に溶接部などにおいて海水などによる腐食を受けやすいという、スウェーデンの学者の報告であった。これは砕氷船の外板に使用した連鋳鋼の溶接部の腐食事例に基づくもので、連鋳鋼では製造過程の冷却速度が大きいため、鋼中のいおうは安定な MnS ばかりでなく、多量の FeS となることが原因とされた。

このことは、本稿の筆者を含む社内での WG の研究によって、すぐに否定され¹³⁾、その後話題にならなくなった。また驚いたことには、問題を提起した学者自身が 1971 年の発表論文¹⁴⁾で、砕氷船の腐食を生じた鋼板は、連鋳鋼ではなかったと述べている。

硫化物が関連する腐食が再び問題となったのは、電縫鋼管の電縫溶接部の急速な腐食 (みぞ状腐食) である³⁾。この種の腐食は海水、工業用水、給湯などの配管に用いられた電縫鋼管で 1965 年頃から多発し、侵食度がきわめて大きい事例が目立った。

みぞ状腐食の原因は電縫溶接部が溶接後急速に冷却されるため、不安定な MnS を生じることにあるとされ¹⁵⁾、1980 年代初めまでに、このような硫化物の生成を抑制するなどした耐みぞ状腐食鋼管が、鉄鋼数社で開発され市販された。その後、この種の腐食問題は生じていない。

連鋳鋼にかかわる腐食として行われた硫化物の影響に関する研究は、腐食したのが連鋳鋼でないことが判明して結果的に不要であったことになるが、後日、みぞ状腐

食対策の研究に大いに役立った。

3.6 埋設管の腐食対策¹⁶⁾

わが国の腐食防食の歴史上、事例が圧倒的に多かったのは、ガスや水道を供給するための建物周辺の土壌埋設鋼管の外面からの急速な腐食である。この種の腐食は以前から生じていたが、RC 建物が多くなった 1960 年代から急増した。

その原因は、埋設配管が建物基礎貫通部などで建物の鉄筋と接触し、鉄筋に対してマクロ腐食電池のアノードとなることにある。パイプライン業界ではこれを避ける措置を取ることは基本事項であったが、建物配管分野ではその必要性が認識されていなかった。このため、腐食発生に関連して鉄筋との絶縁の必要性が指摘されても容易に実施されず、本誌に掲載された解説「配管の土壌腐食」(1976)¹⁷⁾も、注目はされたものの、一部の業者を除くと施工の改善は進まなかった。

1980 年代初め、ある小学校で埋設 LP ガス配管の不等沈下・折損による大量のガス漏洩事故を生じた。幸い人身事故には至らなかったが、調査の際、配管の腐食が激しいことが重大問題として注目され、国会でも問題となった。これを契機として行われた全国の学校、病院、公会堂などの LP ガス配管の漏洩歴の調査で、腐食貫通による事例が多いことが判明し、事態は深刻に受けとめられた。

これに対応して、腐食防止のための基準ないしガイドラインが、高圧 LP ガス (1982)、都市ガス (1985)、簡易ガス (1990) についてそれぞれ作成された。この結果、対策の重要性和そのための施工技術が広く普及し、腐食事故は激減した。本件はある事故をきっかけに、長年の懸案が比較的短期間に解決した代表的な例である。

3.7 橋梁の長期防食

低経済成長、老齢化などの日本社会の動向によって、社会資本構造物の長寿命化が不可欠であることが 80 年代から認識されるようになった。従来の橋梁では寿命を 50 年としてきたが、仮に現存する多数の道路橋をすべて 50 年で更新するとすれば、近い将来、毎年更新橋梁数は極めて多くなり、低経済成長、老齢化社会では負担しきれなくなる。そこで、橋梁は 100 年以上の耐用とする必要を生じた。

メンテナンスが十分であれば、橋梁は 100 年以上使用できる。有名な英国のアイアンブリッジは 1779 年の建設以来、200 年をはるかに超えている。ニューヨークのブルックリン橋も 120 余年の使用に耐えている。わが国でも 1912 年に建設された山陰線の余部鉄橋は主柱以外の部材は取り替えたが、まもなく 100 年を迎える。

必要なメンテナンスのうち、防食のための塗装の塗替えは大きな項目である。しかし、橋梁の塗替えにはその都度、上部工建設費の 10% 程度の費用を必要とする。海上の長大橋ではさらに大きい。

本州四国連絡橋 (本四橋) は、設計寿命を 100 年とした最初の橋梁である。瀬戸大橋 (1988 年完工) から明石海峡大橋 (1998 年完工) をもって全ルートが完成したが、その塗替えの費用は莫大であるとともに、例えば 10 年ごとに塗り替えるとなると 100 人以上の塗装技能者を常

時張付けにしなければならず、高齢化、3K 忌避の社会では技能者の確保が難しくなる。

メンテナンス塗装をミニマムにするために、本四橋では、耐久性に優れた重防食塗装系の仕様が、実地試験を含め 20 年近い検討を経て作成された。その後建設された海上長大橋はすべて、基本的には同様の重防食塗装系が採用されている。

本四橋に端を発した 100 年耐用の考え方は、住宅の一部にも始まっており、海上に建設される羽田空港第 4 滑走路でも同様である (3.8 節参照)。

3.8 海水飛沫帯の防食

海に囲まれ、海洋立国であるわが国では港湾施設は重要であるが、海水飛沫帯の腐食が激しいことはよく知られている。1960 年代、第 2 の耐候性鋼を意図して、主として海水飛沫帯の耐食性に優れた低合金組成の耐海水鋼の開発が進められた³⁾。また、この特性を持つ耐食鋼が米国ではすでに開発されていたため、その技術導入も行われた。

耐海水鋼の開発における一つの課題は、溶接部での腐食を防ぐための溶接金属の成分系の決定、及び溶接熱影響部での腐食を抑制するための母材の成分系の決定であった。海水環境などでは普通鋼でも溶接部が腐食する傾向にあり、基本的には Si や Mn の量の適正化によって軽減するとされるものの系統的な研究はほとんどないのは、20 世紀の積残しである。耐海水鋼は無塗装で使うため溶接部の腐食対策が不可欠であるのに対し、普通鋼では被覆などの防食手段が施されることが、溶接部の腐食問題への関心を低くさせているのであろう。

耐海水鋼の開発は 1970 年代初期にはほぼ完了し数社から市販されたが、ほとんど採用されるに至らなかった。当時護岸などで防食措置があまり採られなかったこと、飛沫帯での耐食性が普通鋼の約 2 倍という性能がアピールしなかったことなどが原因であろう。後者の理由は、低合金耐食鋼は廉価ながら、その限られた特性が時代のニーズに適合しなければ成功しないという宿命をよく現している。成功した耐候性鋼も、市販開始から 20 余年を経て、塗替えの費用が経済を圧迫するという、3.1 節で述べた状況が生じなかったならば、広く受け入れられなかったであろう。

さて、わが国では船積み問題解消のため 1960 頃から港湾施設の整備が大いに進んだが、防食措置への関心が低かったため、1980 年代には改修が必要な施設が目立ち始めた。なかでも護岸の腐食は大きな問題であった。

この事態を予測して、1970 年代前半、鉄鋼会社の一部では種々の防食被覆を施した鋼杭の大規模な海洋暴露試験を開始し*、後半になると建設省土木研究所 (現在、独立行政法人)、(財)沿岸開発技術研究センター、(財)国土技術研究センター、鋼管杭協会、鋼材倶楽部 (前出) などがいくつかの組合せの組織によって、波崎沖、千葉沖、阿字ヶ浦沖ほかの試験所で、試作防食杭の実地試験を開始した¹⁸⁾。

1980 年代前半には、ポリエチレンやポリウレタンを被

覆した鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板を初め、ベトロラタムテープと FRP のコンボジットライニング工法などが広く実用されるようになり、これが定着して、わが国の海洋環境での防食は画期的に進歩した。1990 年代になって、先に述べた設計寿命 100 年への動向に合わせた新しい防食方法が出現した。すなわち、1994 年に完成した関西国際空港連絡橋及び 1997 年に完成した東京湾横断道路の橋脚の海水飛沫帯では、それぞれ、鉄筋コンクリート 500 mm + 鋼板 28 mm + エポキシ樹脂系塗装 2.5 mm のライニング、1 mm 厚のチタンクラッド鋼板ライニングという長期に耐える防食被覆を使用している。

2009 年度末からの供用が予定されている羽田の東京国際空港 D 滑走路は海上にあり、埋立部に続く 1100 m がジャケットによる栈橋構造である。100 年の設計耐用年数に対応して、その飛沫・干満帯には耐海水ステンレス鋼ライニングを使用すると共に、大規模な点検・補修を計画している。

3.9 『荒廃するアメリカ』の教訓

1981 年米国で出版され翌年わが国でも翻訳された著書『荒廃するアメリカ』¹⁹⁾ は、1970 年代までに大いに整備が進んだわが国の社会資本構造物の劣化対策、ひいては腐食対策の進歩に大きなインパクトを与えた。1950 年代にゴールデンエージを享受した米国社会は、1965 年頃からの緊縮予算とインフレによって公共事業投資額が減少し、社会資本ストックの補修、維持管理が十分行われなくなった結果、これらの老朽化が進んだが、その状況が同書に示されている。この再生のためには、その後の 20 年間に 1 兆ドルとも 3 兆ドルともいわれる投資が必要であるとされた。

鋼材倶楽部 (前出) の防せい特別委員会では、1987 年から 2 年間に社会資本構造物の腐食・防食をテーマに数回の防食技術セミナー²⁰⁾を開催し、わが国における社会資本構造物の腐食による劣化状況と防食技術についての報告や討議を行ったが、折からわが国でも港湾施設、橋梁、水道などで腐食が問題になってきたため、大きな関心を喚起した。

1991 年、腐食防食協会は資源協会と共催して「社会資本の荒廃とその対応」をテーマに公開講座を開催したが、このテーマは 1993 年に発足する本協会の腐食センターへの大きな動機づけの一つであった。

こうして、「荒廃するアメリカ」という前轍は、わが国の社会資本構造物を中心とする防食対策の重要性への認識を深め、対策の進展に寄与したことは確かである。

3.10 構造物の美化化

高度経済成長時代は街を歩くとさびが目立ったが、大気環境の改善、塗装仕様の高級化、アルミニウムやプラスチックへの材料転換などによって、しだいにさびは見かけなくなった。そして 1980 年代末期になるとアメニティへの志向が強くなり、建物やその他の構造物の長期防食を兼ねた美化化が重視されるようになった。代表的には、体育館などでのステンレス屋根の使用が増加した。また、地下街の柱などにも、ステンレス鋼巻きが多くなった。

さびないステンレス鋼は当時の活発な研究の対象とな

* 代表例として、NKK (現 JFE スチール) が福山製鉄所 (当時) の海岸で実施したものが知られている。

り、素材のほかに塗装ステンレス鋼が製品化され普及した。また、ステンレス鋼よりさらにさびにくく、耐久性の良い材料として、チタンの屋根もかなりの実績を挙げた。1993年に完成した福岡ドームの屋根は、チタンを大量に使用した代表例である。

都市部の高速道路橋においても美麗化が進められ、桁を視野から隠すために桁力バーが設置されるものが現れたが、当然、さびを防ぐ必要があり、アルミニウムやステンレス鋼が使用されている。

一方、耐久性と美麗化を兼ねて、ステンレス鋼の建築構造部材としての使用について建築基準法の一般認定を取得するための活動をステンレス協会が1984年から開始し、実証構造物の建設、建設省（当時）新素材総合プロジェクトの研究などを経て、1994年、一般認定を取得した。実績は徐々に増えつつあり、今後の発展が期待されている¹⁾。

4 腐食防食の発展を振返って

約半世紀にわたって経験した腐食防食の世界を通じて、特に筆者の印象に残る事柄は次のように要約される。

- (1) 耐候性鋼は、石油危機で甦った。
- (2) 埋設パイプラインは、防食管理の優等生。
- (3) 構造物耐久設計の定量的規程は、鉄筋コンクリート構造物に見習へ。
- (4) 遅れ破壊に耐える高力ボルト開発は、20世紀へのリベンジ。
- (5) 構造物溶接部の耐食性向上は、20世紀の忘れ物。
- (6) 埋設建物配管の早期穴あき防止法の普及の契機はニアミス。
- (7) 橋梁の100年耐用には重防食塗装系。200年耐用には何か。
- (8) 100年耐用の海上空港は、飛沫帯長期防食メンテナンスの正念場。
- (9) 「荒廃するアメリカ」の前轍を踏むな。

- (10) 構造物の長期美麗化には、経年的に美しくなる材料と構造という考え方も必要。

参 考 文 献

- 1) 松島巖, *BOUNDARY*, 15, No.12, 3 (1999).
- 2) I. Matsushima, *Zairyo-to-Kankyo*, 53, 167 (2004).
- 3) 松島巖, 「低合金耐食鋼」(日本鉄鋼協会「叢書・鉄鋼技術の流れ」, 第1シリーズ第7巻), 地人書館 (1995).
- 4) 土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会, 「耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX), 無塗装耐候性鋼橋梁の設計・施工要領」(改訂版) (1993).
- 5) 日本建築学会, 「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事」, JASS 5 (1957), 日本建築学会 (1957).
- 6) 小林一輔, 「コンクリートが危ない」, 岩波新書 616, 岩波書店 (1999).
- 7) 日本建築学会, 「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事」, JASS 5 (1986), 日本建築学会 (1986).
- 8) JIS A 5308-86.
- 9) 池田政道, 道路, p.62, (1984. 2).
- 10) 大即信明, 櫻野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章, 「塩害 (I)」, 技報堂出版 (1986).
- 11) 日本建築学会, 「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事」, JASS 5-1997, p.132, 156, 日本建築学会 (1997).
- 12) 建築研究所, 物質・材料研究機構, 日本鉄鋼連盟, 「超高力ボルトの性能評価法の開発」委員会 最終報告書, (2005. 3).
- 13) N. Kaneko, T. Kawawa, I. Matsushima, Y. Ishizu and Y. Fukuda, *Nippon Kokan Technical Report-Overseas*, No.9, 21 (1969).
- 14) G. Wranglen, International Congress on Localized Corrosion, Williamsburg, VA, Dec.6-10, 1971; Publ. "Localized Corrosion", p.462, NACE (1974).
- 15) 加藤忠一, 乙黒靖男, 門智, 防食技術, 23, 385 (1974).
- 16) 松島巖, 日本材料学会, 第226回腐食部門委員会, (2002. 1).
- 17) 松島巖, 防食技術, 25, 563 (1976).
- 18) 鋼管杭協会, 「鋼管杭・鋼管矢板・鋼板 防食ハンドブック 設計・施工・維持管理」, p.4-10, 鋼管杭協会 (1998).
- 19) P.Choate, S.Walter, "America in Ruins", (1981), 岡野行秀監修, 古賀一成訳「荒廃するアメリカ」, 開発問題研究所 (1982).
- 20) 鋼材倶楽部 防せい特別委員会防食技術セミナー, 「社会資本の腐食・防食」1987.11~1989.11, テキスト合本出版, (1994. 10).

(2006年4月13日受理)

要 旨

過去半世紀におけるわが国の社会資本構造物及び建築物の防食技術の発展を、社会の変化及びそれによって生じたニーズと関連付けて概説した。これは現在の防食技術の歴史的背景を新世代に伝承することを意図している。短い歴史的概説に続いて、10項目のトピックについてより詳細に述べた。取り上げたのは、無塗装耐候性鋼の利用、初期における埋設パイプラインの電気防食、鉄筋の腐食を避けるためのコンクリートの品質管理、高力ボルトの遅れ破壊対策、水配管に用いる耐みぞ状腐食電縫鋼管の開発、建物周辺の埋設配管の早期腐食対策、長大海上橋梁への重防食塗装系の適用、海水飛沫帯防食のためのライニング、『荒廃するアメリカ』(P. Choate, S. Walter 著)の衝撃的教訓、及びアメニティのための建築物外装への耐さび性ステンレス鋼とチタンの使用である。

キーワード 社会資本構造物, 耐候性鋼, 電気防食, パイプライン, 鉄筋コンクリート構造物, 高力ボルト, 埋設設備配管, 重防食塗装系, 飛沫帯ライニング