

实用講座

鉄構造物の防錆と防食

第1回

総論

山本洋一*

1. 土木に鉄材を使う工事がふえる

新村 出編の「広辞苑」によると、土木とは家屋・道路・堤防・橋梁・港湾・鉄道・上下水道・河川など、すべて木材・鉄材・土石などを使用する工事とでている。木材・鉄材・土石などを使用する工事を土木というところがあるが、第一次世界大戦の前には、鉄材は主として軍用として使われ、民需にはほとんどが木材と土石であった。土木が民事の技術 Civil engineering といわれたのも、このためであろう。辞書によれば、civil とは軍人以外の、という意味がでている。

今日の土木工学では、家屋は建築学にゆずり、道路・河川・鉄道・橋梁・上下水道・灯台・飛行場・港湾・都市計画などの施設を取り扱いかい、橋梁・岸壁・パイプライン・基礎杭・水門・鉄塔などに強くて硬い鉄材を使用する工事が多くなっている。第二次世界大戦以後とは、とくに鉄の生産量が増し、民需への供給が増えて、工事の規模が大きくなるとともに、木材では強度が不足し、コンクリートと鉄材を使用しなくてはならぬこととなり、土木は、文字どおりには正しくなく、土鉄といわなくてはあたらぬときになってきた。

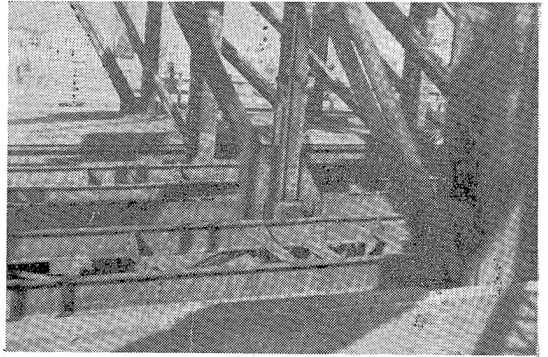
最終用途のわかっている鉄材 708 万 t の使用量の割合は、建設関係で 47.2% におよんでいる。これに対して、自動車では 11.8%、船舶が 11.6%、産業機械器具が 7.8%、電気機械器具が 7.2%、容器が 6.3% というのが、今日における日本の鉄材使用量の割合である。建築を含めてであるが、日本の鉄生産額が 2000 万 t におよぶ現在において、土木に鉄材の使用量が、いかに増えてきているかがわかる。

2. 鉄筋コンクリートと鉄構造物

鉄材は強くて硬いが、その反面にさびて腐食をすると

* 工博 日本大学教授

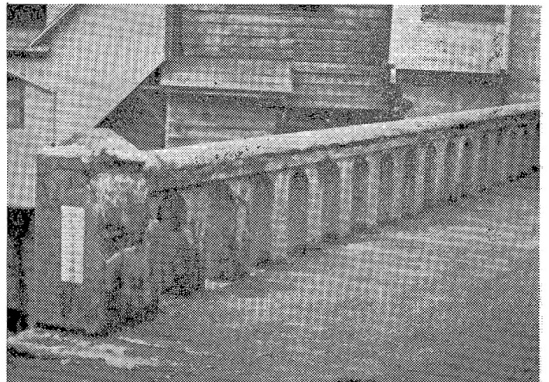
写真-1 とりこわされた鎧橋のさびくちた橋桁



いう欠点がある。さびるにまかしておくならば、鉄材は木材よりも早くいたむものである。昭和 24 年にとりこわされた東京都での最古の鉄橋、中央区日本橋兜（かぶと）町 1 丁目にあった「鎧橋（よろいばし）」は、昭和 21 年 5 月の末には、写真-1 のように、橋桁や橋脚がさびくちはててあぶなくなっていたのである。都の予算が少なく、昭和 4 年に塗りがかえてから 20 年もさびるにまかせていたために、橋そのものが 60 年もたなかったのである。

鉄材は、その厚さの 1% がさびにかわって腐食をすれば、その強度は 5~10% もへり、両面から 5% が腐食をすれば、使用に耐えなくなる。鉄といえば、さびるものと考えられている。ここに、鉄材よりも、化学的に安定な人造石としてのコンクリート構造物がとりあげられて、土木用材料として広く、多量に使われることになってきた。しかし、圧縮強さは大きくても、コンクリートは引張り力と曲げに対する強度が小さい。このため、張力に耐えるようにと、コンクリートの中に鉄筋が入れられ、鉄筋コンクリートが一般的になったわけである。しかし、鉄材はさびるという欠点があるが、コンクリートにもきれつが入りやすいので困るのである。コンクリート表面には、それがつくられて 1 ヶ年もするときれつが生

写真-2 コンクリート橋欄干の鉄筋のさびによるきれつ破壊 (北海道登別)



じ2年ほどで、ますます大きくなる。けれども、2ヵ年すぎると、そのきれつは、さほど大きくなる。コンクリートのきれつは、その収縮性が原因である。コンクリートが緻密に鉄筋をつつておれば、それにさびは生じない。ところが、きれつから侵入する水が作用すれば、鉄筋はさびる。さびれば、さびの体積がさびに変わった鉄のその4~7倍も大きく、スキマに生じるさびが15 kg/mm²におよぶ圧力を生じて、コンクリートをおしあげて、それをぶちこわすことになるのである。写真-2は、北海道登別温泉のコンクリート橋欄干の鉄筋のさびによるきれつ破壊である。

コンクリートを打つときが、寒冷時で凍結防止に塩化マグネシウムなどをまぜてあると、鉄筋のさびへの変化が早くなる。コンクリートは、アルカリ性であるので、内部の鉄のさびを防ぐと考えるのは誤りである。硬化後のコンクリートにきれつが入り、水が侵入するならば、鉄はさびて、さびがさらにコンクリートの破壊を早めるのである。

鉄はさびやすいものであるとはいえ、木材のごとく内部よりの腐朽のごときはなく、さびを防ぐ手段を講じるならば、永久に、その姿を保たせることができるのである。

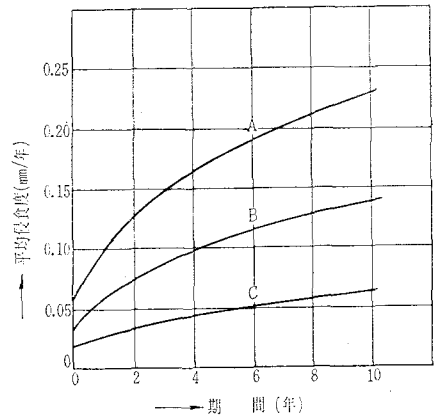
1964年11月21日、ニューヨーク港の入口に10万tの鉄材を使用して完成された、支柱塔間の距離1.5kmという世界一のつり橋ベラザノ・ナローズ橋の設計者、オスマー H. アソマンが、適切な保守方法を講ずるかぎり、この壮大な建造物は永遠に長持ちするはずであるといっておられるのも、鉄材であれば、さびを防げば永久構造物になるとの意味であろう。

3. 鉄はいかにしてさびるか

いまや、土木工事において木材よりも、鉄材の使用が多くなってきた。土木工事で、材料に接する環境は、一般に地球表面の自然の状態の大気中、淡水中、海水中および地中である。最近において、都市、およびとくに工場地帯では大気や河海の汚染がひどく、かなりの酸や化学薬品類が、鉄材の腐食を早め、コンクリートをいためつけるようになってきた。

鉄という金物は、この地球表面の状態では不安定な化学製品である。クロムという金属を12%程度以上まぜあわしたステンレス鋼はさびないが、普通に鉄材として使われている炭素鋼・鋳鉄・低合金鋼では、さびるという点では五十歩百歩である。土木材料としての鉄材は、主として炭素鋼と高張力鋼としての低合金鋼である。最近において大気中でさびにくい耐候性鋼といわれ、リンと銅とを普通の炭素鋼よりも、いくぶん多くして少量の

図-1 アメリカの工業地帯での鉄材の腐食程度と化学組成との関係



鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A 普通鋼	0.17	0.043	0.57	0.019	0.035	0.05	0.02	0.02
B 含銅鋼	0.18	0.025	0.49	0.024	0.034	0.32	0.02	0.02
C 高張力鋼	0.09	0.03	0.30	0.16	0.05	0.42	0.06	1.1

(単位: %)

クロムその他を加えたものが世にだされているが、アメリカの工業地帯での大気腐食の研究結果(図-1)でもわかるように、そのさびによる腐食の程度も、1/4以下ではない。腐食による試験片の重量減から求めた平均の厚さのへりである平均侵食度では、あとでのべる局部腐食は入らない。

アメリカの研究結果に対し、日本の陸上鉄骨構造物防食研究会が、昭和38年に発表した大気腐食の全国平均侵食度では、普通の炭素鋼が0.055 mm/年、含銅鋼では0.043 mm/年、高張力鋼で0.050~0.043 mm/年ということで、耐候性ありという成分の鉄材でも、腐食の程度がわずかによいかと思われるぐらいで大差はない。耐候性の鉄材だからとて、さびを防がないでよいというものではない。

大気が汚染され硫酸分を含めば、鉄材の腐食は早く、それに海気の塩分が加われば、大気腐食の程度は全国平均の10数倍にもなる。

鉄材として一般に使われる炭素含有量の少ない炭素鋼である軟鋼について、多賀谷正義博士が、過去における多くの長期間(5~25年)の腐食試験結果を大約され、軟鋼の平均侵食度とそれに対する局部腐食の最もひどい

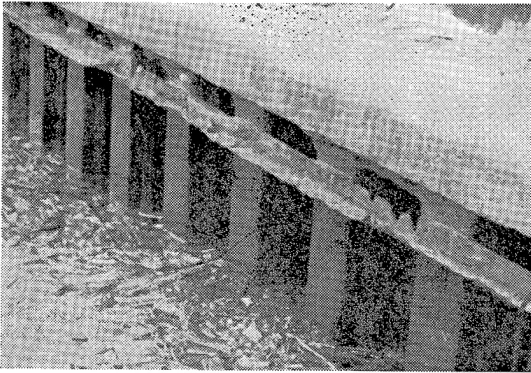
表-1 軟鋼の自然環境における腐食程度

環 境	平均侵食度 (mm/年)	孔食倍数 (最大深さ / 平均侵食度)
大 気 中	0.25	2~10
淡 水 中	0.05	2~5
海 水 中	0.12	2~30
地 中	0.01	5~25

ところの深さと割合である孔食倍数を、表一のごとくまとめられた。ただし、大気は工場地帯のきわめて悪条件の場合であり、試験片表面は、研削した状態である。

自然の環境としての、大気中・淡水中・海水中・地中でも、その状態の条件によって大差がある。実際に、どの程度の腐食があるかというよりも、腐食は必ずおこり、とくに局部腐食によって予想しえざる部分的な侵食があるからには、防錆・防食を絶対に行なわなくてはならぬと心得るべきである。しかも、悪条件の下では、大気中の方が淡水や海水の中でよりも腐食が激しいのである。写真一は、鋼矢引岸壁にとりつけられたL型鋼材が、大気中で、海水のシブキをうけて激しく腐食しているありさまである。

写真一 鋼矢引岸壁にとりつけられた L 型鋼材の腐食
(静岡県沼津港)



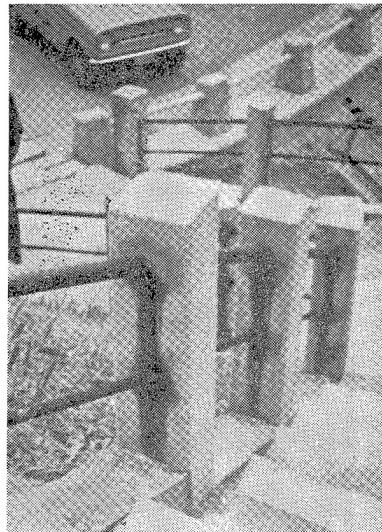
鉄材のさびへの変化とそれによる消耗である腐食は、その表面に液体の水の作用がなくては、空気存在の自然状態でも絶対におこることがない。とくに、液体の水とおことわりしたのは、同じ水でも気体の水蒸気と固体の水とは、鉄をさびさせないものであるからである。それは、なぜか。気体の水である水蒸気は、常温では、鉄を酸化して、自からが水素に分解することがなく、鉄そのものと反応しないからである。また、水では、水の分子が拘束されていて、これまた、鉄と反応ができないので、鉄という原子の集まりである金物としての鉄を、表面から溶かしだすことができない。

液体の水では、同じ水の分子ではあるが、金物である鉄の原子を表面から水酸化第一鉄という水にとける化合物になしうる性質のものを含んでいる。くわしいことをのべようとすれば、土木屋さんのおきらいな化学反応式をかかなくてはならないので、ここでは、科学的ではないが、こうした表現にとどめさせていただく。水酸化第一鉄が水にとけて、鉄表面からはなれるだけ、鉄そのものが減っていく。これが鉄の腐食ということである。流れ動く水の中で、鉄はいわゆる赤さびを表面に生じるこ

となく、腐食をしているわけである。ところが、鉄面に接している液体の水の中に、溶けだした水酸化第一鉄は、水の中にとけている酸素で酸化され、さらに水と結びついて水にとけない水酸化第二鉄というものになる。この水酸化第二鉄が、粗雑なすがたで、腐食していく鉄表面に沈殿してこびりついたものが、いわゆる赤さびなのである。赤さびは、水酸化第二鉄を主とした粗雑なもので、鉄表面に層となって付着しても、液体の水のしみこむのをさまたげないので、その後の腐食をおしとどめないどころか、むしろ、さびはさびをよぶ、といわれるようにその後の鉄そのものの腐食を早めるのでよくない。

鉄は、その表面に液体の水の作用で腐食をする。それは、液体の水の作用で、水にとける水酸化第一鉄を生じるからである。いわゆる赤さびとして、さびが鉄表面につくのは、二次的に、その表面に沈殿するからである。水にとける水酸化第一鉄は、鉄面をはなれて流れおちて、それから水にとけない水酸化第二鉄の赤褐色のものになる。さびを防ぐための塗装がいたんだり、防錆の悪い鉄構造物から、いわゆるさび汁(じる)が流れ下るのは、このためである。さび汁は、写真二のごとく、構造物の美観をそこなうが、それを生じることは、防錆の悪いことであり、鉄構造物のいたみつたある指示でもある。

写真二 さび汁による汚染
(広島県音戸大橋付近)



4. 好ましからざる局部腐食

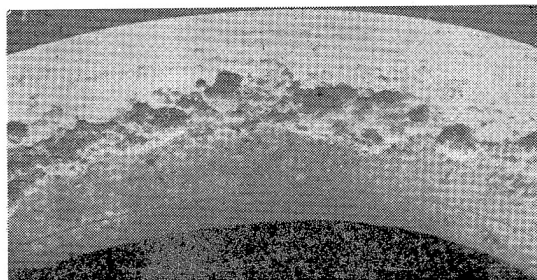
液体の水と、それにとけた空気中の酸素とが作用すれば鉄は水にとけて腐食をする。大気や河海を汚染する硫酸は鉄をとかすことを早めて、腐食を大きくする。しかし、自然環境での鉄材の平均侵食度は、汚染した大気や

河海の中でも、さほどでもないともいえる。しかし、鉄材も金属体であって、とくに酸や塩分をとかした液体の水の作用の下では、その表面の状態の差異あるところに電池を構成する。この電池の中で、陽極となる部分に異常に激しい腐食を生じるに反し、陰極部の腐食がおしとどめられる、いわゆる局部腐食という好ましからざることがあるのである。

多賀谷博士が、孔食倍数として局部腐食による最大の消耗が、平均侵食度にくらべて何倍ぐらいあるかを示されているが、実際には陰極部の面積にくらべて、陽極部のその割合が、局部的な腐食の程度をきめるので、局部腐食がどのくらいの早さで進行するかは、全く予想がつかない大問題なのである。

局部腐食とは、金属体（かなもの）の表面の局部に激しい腐食のおこることで、孔状の場合を孔食、溝（ミゾ）状になるのを溝食（ミゾしょく）などともいう。写真—5 は、地中に埋設した鉄管表面に生じた局部腐食のありさまで、地中では土壌中の状態の差異で、とくに局部腐食がおこりやすい。

写真—5 地中埋設鉄管表面に生じた局部腐食



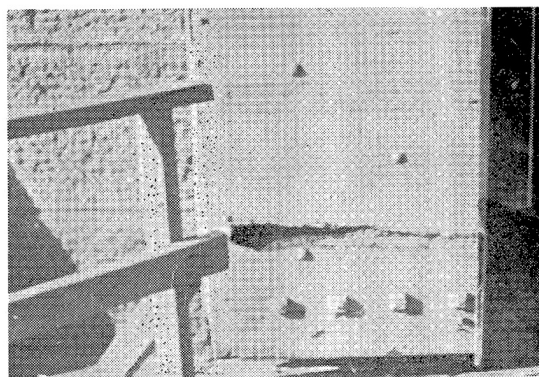
電池が金属体表面の状態の差異で、水にとけた酸や塩などの電解質の電気分解現象で構成され、エネルギーが液中にでて電解質をおしのけて反応のおこらぬ陰極部の腐食がおしとどめられ、流動するエネルギーで電解質をおしつけられて、電気分解により分解する電解質の一部と反応して水にとける化合物をつくる陽極部の腐食の早められること、陰極部の面積に対し陽極部のその小なるほど腐食が激しく急速であることなどの詳細な説明は、ここでは省略するが、鉄製構造物には、その表面の局部腐食の可能性を常に考えて、対処する必要があることだけは知っておいていただきたい。

ロンドンにある British Iron and Steel Research Association (BISRA, イギリス鉄鋼研究協会) の Corrosion Advice Bureau (防食相談所) の案内書のはじめに、“Steel need not corrode, if it is used correctly.” (正しく使用すれば、鉄材は腐食をするものではない) ということが書かれてある。私は、この腐食ということとは、局部腐食を意味していると思われている。その理

由は、平均侵食度であらわされるような全面腐食の程度であるならば、腐食代（ふしょくしろ）さえ考えておけばよいのであるが、鉄構造物の破壊の原因は、予想しえざる局部腐食であり、局部腐食をおこさせない設計や加工・接合について、この防食相談所の案内書はのべているからである。

人目につくうわべだけの塗装をよくしても、内部に局部腐食をおこさせるような水ハケの不良やスキマなどがあれば、写真—6 のように破壊がおこる。完全にスキマのないように、よく塗装のできるための、鉄構造物の設計 Good Design が、防食として大切なことなのである。

写真—6 内部の水はけ不良で生じた、すき間における局部腐食
(ニューヨーク自由女神台座)



5. さびを防ぎ、防食するには

鉄材として土木に使われるものは、それを用いる自然の環境中では必然的に腐食をする。大気中でも雨や雪どけ、結露などが鉄をさびさせる。河海の水中では、もちろん地中でも液体の水が作用するかぎり腐食がある。厚さ 2 mm の鉄材で片面 0.05 mm/年の平均侵食度があれば 1 ヶ年での厚さのへりは 2.5% で、それによる強度の低下は、12.5~25% におよぶ。腐食代を見こせばよいわけではあるが、これでは鉄材を腐食するにまかせておくこととなり、そのようなわけにはいかない。しかも、金属体である鉄材には、電池構成による予想のできない局部腐食がある。

赤さびを腐食する鉄面に残して、腐食がさらに進んでいくことをさびる、あるいは錆化（せい化、rusting）といい、さびを生じないようにすることを防錆という。大気中で、作用する液体が、生じる水溶性の水酸化第一鉄を腐食する鉄面にとどめて流しださないときに、さびの付着がある。防錆といえば、主として大気中における鉄の腐食防止であると思えばよい。地中では、生じる水酸

化第一鉄の流出がなく、主として錆化であるが、とくに局部腐食が激しいので、防錆というより、防食というほうがぴったりである。河海の水中では、赤さびを付着することなしに、消耗する腐食であり、その防止が防食である。

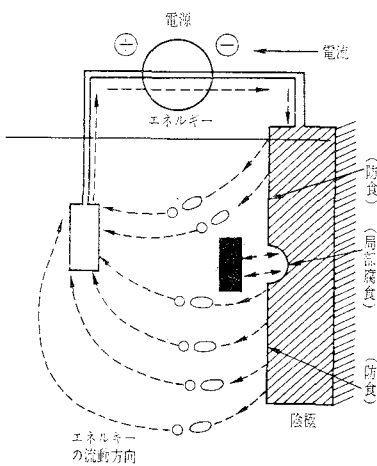
さびを防ぎ、腐食をさせないようにしなければ、鉄構造物は未完成である。防錆・防食は、鉄構造物を完成させるための手段であり、これを忘れては完全ではない。防錆・防食の効果をたえず発揮させていく防錆・防食管理が、鉄構造物を永久的に長もちさせる保守における問題である。

(1) 電気防食による方法

土木関係では、普通の鉄材を防錆・防食せずに裸の表面のままを使うことは許されない。ただ、海水中の鉄構造物は、電気分解現象を利用し、陰極より海水中にでるエネルギーによって、腐食をおこさせる液体の水の作用をおこさせないようにして防食する電気防食を行なう場合には、裸鉄面のままで使える。

電気防食は、電気分解によって電流を生じ、陰極表面にて腐食をさせる液体の水の作用をおしとどめることであるので、いわゆる電流の方向に反対に陰極からおしで、腐食をおこさせるものをおしはらわなくてはならない。電気防食の場合には、このため鉄面が裸であって、じゃまものないことが必要である。くわしくのべないが、電気防食を行なうには、陰極とした鉄面に腐食させるものをおしはらうことをさまたげる異物の存在は好ましくない(図-2)。

図-2 電気防食の原理とエネルギーの流動をさまたげる非金属固体のある場合の陰極の局部腐食



(2) 環境しゃ断による方法

鉄材がさび、腐食するのは、土木構造物の使われる

状態では、表面に液体の水が作用するからである。液体の水の作用をさえぎる物質をもって、表面をち密におおいかぶせれば、それが完全であるかぎり、鉄のさびも腐食も防げるわけである。これが、環境しゃ断による防食方法である。

環境しゃ断による防錆・防食に使われる物質には、金属と非金属とがある。非金属物質は、無機質と有機質にわかれる。

金属にも、大気中・淡水中・海水中・地中などで腐食しにくいものがある。大規模な鉄構造物の防錆・防食に主として使われるのは亜鉛である。鉄面に最大100μの厚さで密着させる金属被覆をメッキという。河海の水中や地中で使われる鉄材の防食には85μほどの厚さの亜鉛メッキがよい。大気中での防錆のための亜鉛メッキでは、厚さ10μで、普通の状態では3ヵ年ほどの寿命である。電気メッキであれば、必要に応じて、いかにどの厚さのメッキができるが、熱漬メッキは、鉄の厚さがうすいと厚味のメッキができない。亜鉛メッキは、鉄の防錆に広く、多く使われているが、硫酸で汚染された工場地帯の大気中では効果的でない。

(3) 塗料による方法

大規模な鉄構造物の大気中での防錆には、塗料の使用が一般である。最近では、これまでの、いわゆるさび止め塗料にかわって、高濃度亜鉛塗料が鉄構造物の防錆に価値あるものとしてみとめられ、下地塗装は、これに限るというようにすらなってきた。土木関係の塗装としては、鉄材のミルスケールをよくおとして、高濃度亜鉛塗料(Zinc rich paint)を下塗りとし、上塗りとして適当なものをえらんで美観を与えるという傾向になっている。なお、塗料の顔料としてリン酸カルシウムを使用するものも、防錆効果があるので、開発されようとしている。

大気中、水中などの防錆・防食を目的とする塗料としてタールエポキシ樹脂塗料も、腐食性の激しい環境に対して適当である。

(4) その他の方法

海水中の鉄構造物の防食に電気防食と塗装とを併用して、あたえる電気量の軽減が考えられているが、電気防食は陰極として防食すべき鉄面に作用する腐食作用あるものをおしはらう必要があるのであるから、塗膜のごとき異物も、おしはらいをさまたげるわけであって、よくないことである。

地中埋設の鉄管その他の構造物の防食に、電気防食を行なうことも、その表面に石塊とか、砂礫が、いわゆる電氣的しゃへい(シールド)すれば、むしろ、そのとこ

ろに局部腐食をおこすので危険性のあることを考えなくてはならない。

地中に埋設される鉄管とか鉄杭などは、鉄面に反応して不溶性のリン酸鉄カルシウムの被覆をつくらせるように、酸性リン酸カルシウムをもって防食する方法がよいのではなかろうか。燐酸カルシウム肥料の中にうずまっていた神聖ローマ帝国の兵士の使った鉄刀が、1600年間も原形を保っていたという例からみても、完全に長期の防食の可能性をもち、安心しうることである。

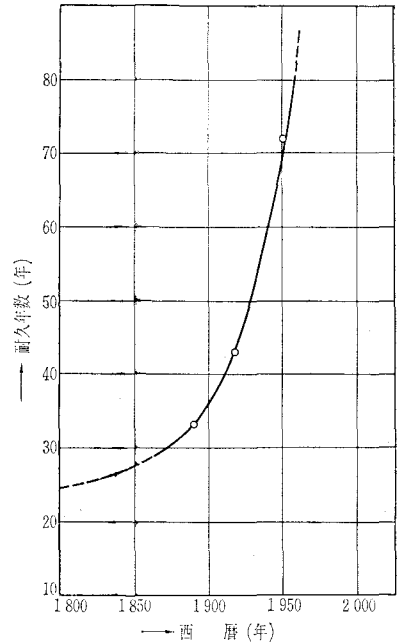
6. 鉄時代における土木技術のありかた

現代は鉄時代である。鉄の生産量は増大し、軍備に主とした鉄材は、国土開発のためにも、その大量を使い得るようになり、土木は実は土鉄ともいいかえられるべきときがきた。強く硬く、しかも、木材や鉄筋コンクリートのごとく内部よりの変質のおこることのない鉄材はその欠点ともいうべきさび、腐食の防止さえするならば、それによってつくられた構造物は永久に寿命をもちうるわけなのである。人民の財産である公共の鉄製構造物を永もちさせることは、財産の保護であり、人びとの生活を豊かにする要因である。

1937年(昭和12年)に、アメリカ鉄鋼協会の調査によれば、1857年ごろには鉄製品の平均耐久年数は約36年であったが、それから50年の1937年には約43年にのびたという。そして、その理由は、防錆・防食の技術の進歩であるとのことだ。ところで、今日では、鉄構造物の使用耐久年数は74年ほどであることになった。明治21年(1888年)10月に、皇居の二重橋の鉄橋は完成し、それから74年、鉄構造物の耐久年数をまっけて、昭和38年になってかけかえられることになった。アメリカ鉄鋼協会の調査の資料に、今日の鉄構造物の耐用年数74年を入れて、西暦年数と鉄製品の耐久年数との関係を曲線にすると図-3のごとくで、このままでいくなら1975年をまたずして、鉄製品の耐久年数は永久的になるのである。

さび、腐食をするから、鉄構造物はこわされる。こわされるから鉄材が売れるのだ、というような考えかたは今ではまちがいである。鉄材のさびが防げ、防食しうることの進歩が鉄材の使用を大規模にし、大量の生産を必要

図-3 鉄製品の使用上の耐久年数
(1937年アメリカ鉄鋼協会調査による)



としているのである。

鉄構造物は工期が早く、しかも、製作がしやすい。溶接技術の進歩は塗装その他を容易にし、防錆防食を完全にさせるようにした。鉄材も、それぞれのものが、鉄という元素の原子を主とした化学製品であり、防錆・防食のための材料・薬品も化学製品である。電気防食も、電気分解という化学の応用である。

これからの土木技術においては、鉄構造物の設計において、防錆・防食の方法の適用を容易にし、保守を簡単に行なえるようにする考えかたが必要である。

鉄材はさび、腐食をする。防錆・防食に使用する塗料は、塗装してからあとでは、膨潤 (swell) し、きれつ (crack) を生じる性質をもっているのが一般である。しかし、環境シャ断が常に完全であり、電気防食その他に適用の方法の誤まりがなければ、鉄構造物の耐久性は永久的となるわけである。このために、これからの土木技術者、いや土鉄技術者に、防錆・防食の知識が必要になるわけである。

コンクリート・ライブラリー第10号 構造用軽量骨材シンポジウム頒布中

本文は、最近特に注目を集めている軽量コンクリートについて各方面で行なわれている研究を集録した論文です。ぜひご一読下さるようおすすめ致します。

体 裁：B5判 96ページ 図・表・写真多数

定 価：500円(〒50円)

会員特価：400円(〒50円)

申 込 先：土木学会 振替東京 16828 番 電話 351-5130 (販売・編集直通)