

製作技術の変遷と今後の展望

製作小委員会 製作技術部会

加藤 千明

1. はじめに

日本で最初の鉄製橋梁「くろがね橋」(1868年)(写真-1)、二番目の「吉田橋」は、外国人技師が設計し、製鉄所が工事を担当した。鉄道橋は、明治政府が鉄道建設に力を注いだこともあり、外国の専門技師らの指導のもと工事を行っていたが、これに対し道路橋の発展は、橋梁技術を専門としない外国人技師の功績によるものが多かった。

鉄製道路橋の国産化は東京で始まり、そのはしりとして知られるのが、1878年(明治11年)東京楓川に建設された「弾生橋」である。これに続き、1882年(明治15年)に錬鉄製トラスの「高橋」、1884年(明治17年)にボーストリングトラスの「浅草橋」が建設された。いずれも工務省直轄の赤羽鉄工所で製作されたものである。なお、民間メーカーで初めて製作された鋼橋は、1884年(明治17年)に横浜大岡川に建設された「都橋」である(写真-2)。当時、民間での鋼橋製作は、ごく限られた造船所にゆだねられ、鋼橋製作を専門とするメーカーが創設されるようになったのは、明治30年代後半になってからである。

明治の後半には、国内の製作技術の進歩により、輸入鋼橋と遜色なくなり、大正の始めには輸入鋼橋はほとんどなくなった。

1923年(大正12年)の関東大震災が発生すると、構造物に対する基準類整備の必要性が高まり、1926年(大正15年)「道路構造に関する細則案」が制定され

道路橋示方書の原型が作られた。1939年(昭和14年)には、鋼橋設計を対象とした「鋼道路橋設計示方書案」が制定され、原寸から材料、工場製作から塗装、架設まで、今日の道路橋示方書施工編の基礎というべき内容が記載されている。

今日の鋼橋製作技術が確立されるまで、以上のように長い歴史を経てきており、工場製作の各技術も多種多様になってきた。ここからは、鋼橋工場製作の流れ(図-1)に沿ってその移り変わりを紹介するとともに、今後の展望を述べる。

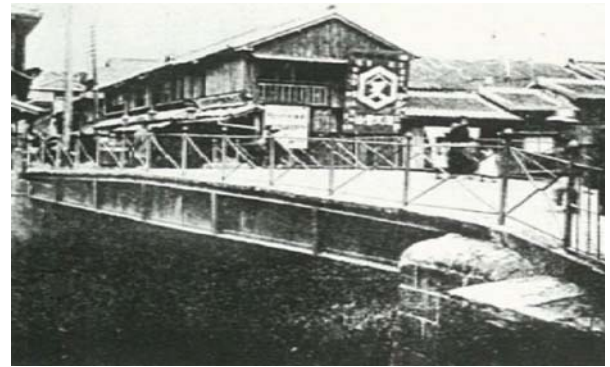


写真-1 日本で最初の鉄製橋梁 くろがね橋



写真-2 民間初の鋼橋 都橋

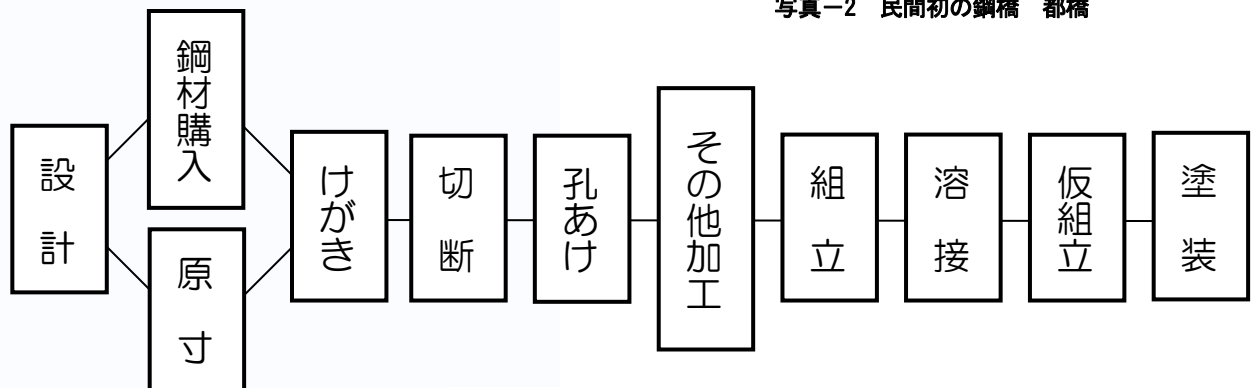


図-1 鋼橋工場製作の流れ

2. 原寸

2. 1 変遷

鋼橋は、部材の共通性がほとんどなく、自動化が困難といわれてきたが、1970年頃からの電子計算機の進歩とともに原寸作業のプログラムが開発、導入され、広大な原寸場で熟練作業者が行っていた床書き原寸から、机上の電子計算機にインプットデータを打ち込むNC (Numerical Control) 原寸へと移行していった。

NC原寸の導入により、製作ライン(けがき、切断、孔あけ、溶接)の自動化や、設計・原寸・製作・仮組立までの生産管理システムの構築、また3次元での原寸作業と発展し、生産工程は省力化を成し遂げている。

2. 2 原寸方法

(1) 床書き原寸法

設計図面をもとに広い床面に、実物大の展開図を書き、部材寸法の決定やけがき作業に必要な定規、型板等の作成を行う方法である。前述のとおり、特殊な場合を除き現在はほとんど行われていない(写真-3)。



写真-3 床書き原寸

(2) NC原寸法

電子計算機を利用し、線形計算で算出されている支点、格点等の座標と設計図のデータから展開計算を行い、製作情報を作成する方法である。NC機械や電子計算機の発展と相まって、現在は、大部分がNC原寸によって処理され、省力化、精度向上、工期短縮等の面で効果をあげている。

3. けがき

3. 1 変遷

けがきは、原寸作業により得られたデータにより切断線、孔位置、部材取付け位置など必要事項を鋼板表面に書き込む作業である。

作業は、ポンチ、タガネ、墨差し、水糸、けがき針などを用いて行っていたが、1970年代初めにガス切断トーチを活用して、亜鉛を主体としたパウダーを鋼板表面に溶射する技術が開発され、従来のポンチマーキングからラインマーキングが可能となった。また、原寸作業、工場機械の自動化、NC化にともない、1980年代中頃からドット式の印字装置も開発され、ラインマーク専用機に搭載したNC自動けがき装置が導入され始めた。

3. 2 けがき方法

(1) 手けがき法

簡単なものでは、製作図から寸法をとって鋼製巻尺、直尺を使って直接鋼材にけがきを行う場合があるが、一般には原寸工程で準備した定規、型板などを使って転写している。

(2) NCけがき法

NC原寸法で作られた数値情報をもとにNCけがき装置で、直接鋼板上にけがきを行う方法である。NCけがき装置は、切断線・孔あけ位置・部材取付け位置などの、ラインマーキング機能を有しているが、それに加え識別表示などの印字を行う機能を具備しているものもある。また、NCけがきにNC切断の機能をもたせた併用機も多く用いられている(写真-4)。



写真-4 NCけがき

4. 切断

4. 1 変遷

切断技術の歴史は、石器時代における剃片石器や石斧に始まり、長い間、機械切断に限られてきた。20世紀初頭にアセチレンガスと酸素を用いたガス溶接が開発されると、その応用としてガス切断が始まり、その後、TIG（ティグ）溶接に起源をもつプラズマ切断が開発されるなど、溶接技術とともに熱エネルギー切断（溶断）が発展した。

鋼橋の製作に用いられる切断技術は、熱エネルギー切断（溶断）と機械切断に大別され、基本的には熱エネルギー切断が用いられている。

また、工作機械のNC化により、緩曲線切断機能の追加、無人化運転が可能となり、高精度・高能率化が図られた。

4. 2 切断方法

(1) ガス切断

ガス切断は、鉄の燃焼熱を利用した切断法であり、切断する位置を局部的にアセチレンやプロパンガスによる予熱炎にて燃焼温度（1,350℃）まで加熱し、この部分に高純度（99.5%以上）の高圧酸素を吹き付け、酸化反応により酸化鉄に変化させ、溶融させると同時に高圧酸素にて吹き飛ばして切断していく。さらに、酸化反応により生ずる酸化熱で次の部分を予熱して、連続的に切断する（写真-5）。



写真-5 ポータブルガス切断

(2) プラズマ切断

プラズマ切断は、タングステン電極と母材間に発生したアーク熱を利用した切断方法であり、ノズル内部のタングステン電極と鋼材（切断対象）間にアーク放電を起こし、そこに動作ガスを噴出することによりプ

ラズマアークを発生させ、ノズルの効果によりアークを電磁的に集束させ、電子ビームをつくり、ノズルから鋼材に局部的に激突させ、溶融した金属を吹き飛ばして切断する（写真-6）。プラズマ切断はガス切断と比べ入熱量が少なく、熱収縮による影響が小さい。そのため、1980年代後半あたりから、ガス切断より切断速度が速いプラズマ切断が導入されはじめ、現在では最も使用頻度の高い切断方法となっている。

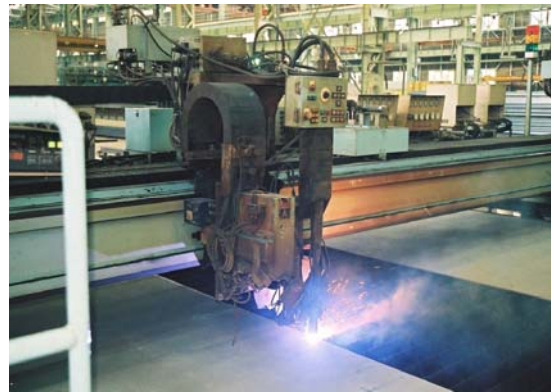


写真-6 NCプラズマ切断機

(3) レーザー切断

レーザー切断は、レーザー光を絞ることにより発生する、高密度の光エネルギーを利用した切断法である。

1990年代に入り、薄板を加工する自動車や電気・機械業界で早くから採用されていたレーザー切断の高出力化により、鋼橋の製作においてもレーザー切断が適用可能となった。



写真-7 NCLレーザー切断機

5. 孔あけ

5. 1 変遷

鋼橋の現場継手の大部分が高力ボルト接合であり、孔あけ精度が現場での組立精度に大きく影響を与える。

鋼橋の孔あけは、ドリルによるものが一般的であり、

1970年代から連結板など小物部材を中心にNC孔あけが行われるようになった。また、1980年代から大型のNC孔あけ機も導入されるようになり、フランジ、ウェブなど主要部材もNC孔あけが行われるようになった。

5. 2 孔あけ方法

(1) センターポンチ工法

孔位置の中心にポンチを打ち、ドリルの先端を合わせ孔あけする方法。使用機械としては、ボール盤(写真-8)、携帯式孔あけ機などが使用される。



写真-8 ガーターラジアルボール盤

(2) 型板工法

鋼製テンプレートまたは添接板をガイドとして孔あけを行う。

(3) とじ孔工法

一群の一部を孔あけし、これをとじ孔として利用し、部材の組立を行い、精度の確認後当てもみにて孔あけを行う。

(4) NC工法

NC制御で孔あけを行う方法で、添接板などの小物部材に適したNCラジアルボール盤やフランジ、ウェブなどの大型部材に適したNCガーターラジアルボール盤(写真-9)などが使用されている。



写真-9 NCガーターラジアルボール盤

6. その他の加工

6. 1 切削

切削加工は、組立精度を要する材片やガス切断などでは加工が困難な材片や部材を対象として施工され、部材時に行う縁削りと組立溶接完了後に行う端面削りに大別される。

縁削りはリベット橋が主流であった1950年代頃までは、鋼道路橋製作示方書(1956年5月)にも主要部材片のせん断縁およびガス切断縁は3mm以上縁削りを行うよう規定されていたことから、フランジ、ウェブなど主要部材の切断縁は必ず切削されていた。

しかし、自動ガス切断の発展により切断縁の品質、精度も向上し、現在では鉄道橋および道路橋ともガス切断縁をそのまま使用しており、切断による熱影響部や欠陥部を除く意味での縁削りは行われていない。

組立溶接完了後の現場継手部の端面削りは、仮組立時や架設時に出来形精度を要求される場合に行われる。

本州四国連絡橋をはじめとする長大橋の吊橋や斜張橋の塔柱製作では、大型のフェーシングマシン(写真-10)を使用し、端面切削を行い厳しい精度管理を行った。



写真-10 フェーシングマシン

6. 2 曲げ

リベット構造の鋼橋製作では補剛山形鋼の段下げ、大きなハンチの付いている支点付近のフランジや橋門構の山形鋼、その他形鋼の曲げ、および厚板の急曲げなどに熱間加工が盛んに行われていたが、溶接構造になった現在では、熱間加工はごく限られた部分で見られなくなり、ほとんどが曲げ加工用機械による冷間加工で施工されている。

6. 3 糸面取り加工

部材の自由縁となる角部は、塗装膜厚が確保しにくい箇所であるため、面取り加工を施す。以前はほとんど手動で行ってきたが、最近では自動面取り装置も使用し、製作コストの低減をはかっている。

7. 組立・溶接

7. 1 組立の変遷

鋼橋の組立作業は、作業者の技量に左右されやすいため、作業にあたっては図-2 に示すような治具を活用し、寸法精度のバラツキを最小限にする工夫がなされてきた。

1980年代後半より溶接作業の自動化および矯正作業の機械化が進むのに併せ、省力化を目的としたライン化の導入がなされ、鈹桁の製作ではI形組立装置(写真-11, 写真-12)や、I桁矯正機(写真-13)が使用されている。箱桁の製作においては、縦リブ組立装置(写真-14)やパネル矯正機(写真-15)が使用され、総組立工法に代わって、部材精度が安定しやすいパネル工法が広く採用されるようになった(図-3)。

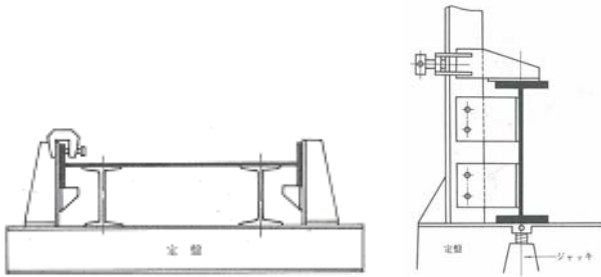


図-2 部材の組立治具の例



写真-11 I形組立装置(全景)



写真-12 I形組立装置(ローラー部)



写真-13 I形矯正機



写真-14 縦リブ組立装置



写真-15 パネル矯正機

が戦後の溶接橋梁第1号として架けられ、継手には初めて完全溶込み溶接が用いられた。

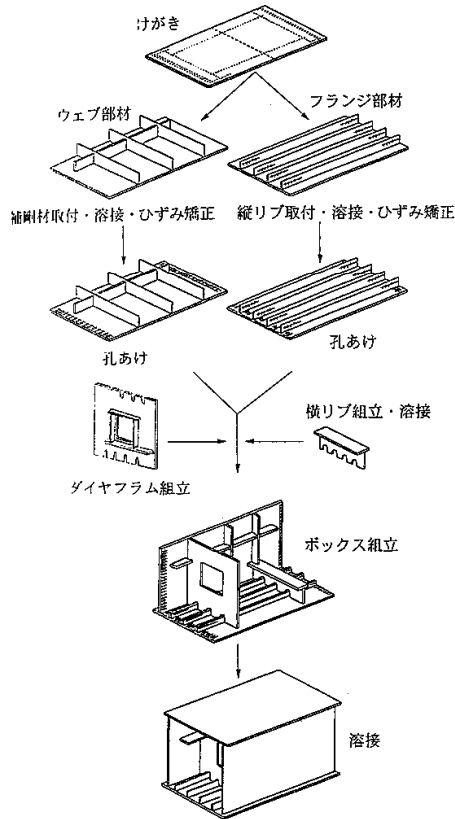


図-3 箱桁パネル工法フロー図

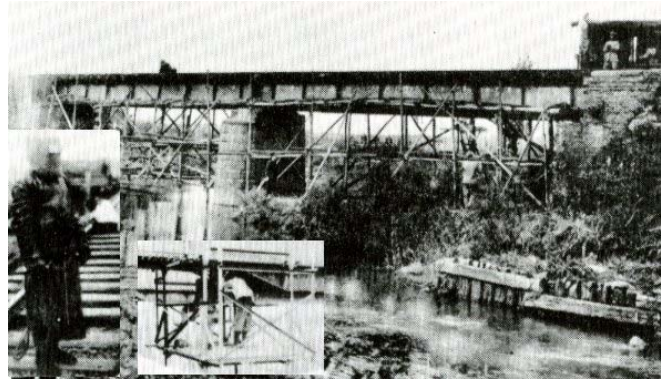


写真-16 檜山川橋梁溶接補強



写真-17 瑞穂橋

7. 2 溶接の変遷

溶接が導入されたのは1904年(明治37年)で、当初は鑄鉄のきず直しに使用されていた。1928年、鉄道省官房研究所において溶接工法の研究を目的としたI形の溶接桁が試作され、在来リベット接合構造との破壊試験比較が行われた。1931年に檜山川橋梁(写真-16)で初めての溶接補強が実施され、以降、1941年までに1,300連以上の溶接補強が行われた。

また、溶接補強とは別に溶接橋の建設も始まり、檜山川橋梁の補修に先立って、1930年に九州西鹿児島駅の跨線橋が建設され、以降、今宿橋(1932年)、瑞穂橋(1934年)(写真-17)など、いまだ健全な溶接橋も多い。

以上のように、昭和初期から溶接橋はいくつかでき始めていたが、1935年に完成した田端大橋(写真-18)は、特に規模が大きく、現場継手も溶接であった。翌年には田端大橋と同じく全溶接橋の鶴川橋が架けられている。1949年には溶接道路橋の恵川橋(写真-19)



写真-18 田端大橋



写真-19 恵川橋

鋼橋で 50 キロ級鋼が本格的に用いられたのは 1954 年に架橋された相模大橋で、この鋼種の溶接橋第 1 号は翌年完成した宮城野橋である。この橋では板厚 30mm の溶接が行われた。1959 年には溶接用鋼材 SM50 の J I S 規格が制定され、50 キロ級鋼を用いた溶接橋はその後急速に普及し現在に至っている。さらに 60 キロ級鋼の橋梁への適用が 1960 年頃に始まり、80 キロ級鋼までも 1964 年の花輪跨線橋に試験適用されるなど、橋梁の長大化、大型化にともない高張力の鋼材が用いられるようになった。高張力鋼の溶接では、低温われ防止が重要となるが、この時代にはすでにわれ防止の指標として P_{CM} （溶接われ感受性組成）が提唱されており、現行の道路橋示方書の予熱温度の指標として採用されている。

1974 年完成の港大橋には、70 キロ級鋼と 80 キロ級鋼が本格的に使用され、1998 年の明石海峡大橋では、今までより溶接性の優れた予熱低減型の 80 キロ級鋼が使用されている。

材料や施工法の研究開発、経験の蓄積により、溶接技術は発展し、リベット接合に代わり溶接接合が一般的となった。

7. 3 溶接法および材料の変遷

表-1 に、溶接法および材料の変遷を示す。

(1) 戦後の溶接技術の導入 (1950 年代～1960 年代)

① 被覆アーク溶接法

戦前に輸入された被覆アーク溶接法は、この時代に現在の被覆系のほぼすべてが体系化され、1955 年には、JIS G 3211「軟鋼用被覆アーク溶接棒」として制定されている。また、高度経済成長のニーズから、水平すみ肉専用の長尺太径溶接棒を用いたグラビティ溶接法が開発された。現在ではガスメタルアーク溶接が主流となり、この溶接法を観ることは希であるが、一人で複数台を操ることができ高能率化に貢献した。

② サブマージアーク溶接法

アメリカで開発されたサブマージアーク溶接「ユニオンメルト」が日本に輸入されたのは 1950 年で、施工能率、性能面から造船分野では一気に導入された。橋梁では部材が小さく、溶接長も短尺であり、この溶接法が下向き姿勢に限定されることから、板継ぎや I 桁

首溶接など限られた部位への導入にとどまっている。

鋼床版の現場溶接は片面サブマージアーク溶接法が用いられるが、1963 年～1965 年頃にわが国で開発実用化されたもので、両面からの溶接作業を不要とし、生産システムそのものを改善する画期的な手法であった。

現在では、ガスメタルアーク溶接にも片面溶接法が採用されており、工場での板継ぎ溶接や現場継手の溶接など、施工能率の向上に寄与している。

表-1 溶接法および材料の変遷

年代	溶接法と材料	主要溶接橋
1910	・被覆アーク溶接法の開発・導入	
1920		・ I 形溶接桁試作
1930	・サブマージアーク溶接の開発	・九州西鹿兒島駅 ・檜山川橋梁 ・今宿橋 ・瑞穂橋 ・田端大橋 ・鶴川橋
1940	・ C_{eq} の提案	・ 恵川橋
1950	・ 40キロ級溶接用鋼材規格【1952】JIS G 3106 ※ ・ 軟鋼用被覆アーク溶接棒規格【1955】JIS G 3211 ※ ・ 50キロ級溶接用鋼材規格【1959】JIS G 3106 ※ ・ サブマージアーク溶接導入 ・ アークエアークウジング導入 ・ 炭酸ガスアーク溶接の開発 ・ エレクトロガス溶接の開発 ・ 混合ガスマグ溶接の開発 ・ グラビティ溶接の開発・導入	・ 相模大橋 ・ 宮城野橋
1960	・ 高張力用被覆アーク溶接棒規格【1961】JIS G 3212 ※ ・ 鋼用サブマージアーク溶接材料規格 JIS Z 3311 ※ ・ 60キロ級溶接用鋼材規格【1968】JIS G 3106 ※ ・ 片面サブマージアーク溶接の開発・実用化 ・ 炭酸ガスアーク溶接導入 ・ エレクトロガス溶接導入 ・ P_{CM} の提唱	・ 花輪跨道橋
1970	・ サイリスタ溶接電源の開発・実用化 ・ 細系フラックス入りワイヤの開発・実用化 ・ 各種自動溶接装置の開発・実用化 （簡易すみ肉溶接機など）	・ 港大橋
1980	・ 軟鋼&高張力用鋼溶接棒規格【1980】JIS Z 3312 ※ ・ インバータ溶接電源の開発・実用化 ・ T M C P 技術の開発・実用化	
1990	・ NC制御自動溶接装置の開発・実用化 （カントリー式多電極溶接装置、多関節溶接ロボットなど） ・ CAD/CAM一貫システムの開発・実用化	・ 明石海峡大橋
2000	・ 橋梁用高降伏点鋼板規格【2008】JIS G 3140	

※示方書（鋼道示、溶接鋼道示、道示 II 鋼橋編）に明記された JIS 規格

③ ガスメタルアーク溶接法

シールドガスに炭酸ガスを用いたガスメタルアーク溶接法は、1953 年～1955 年頃、開発された。この溶接法は高能率で可搬性に優れる小型設備であることから、短尺の溶接継手が多い橋梁では最適とされ、広く採用されている。また、ウェブの現場溶接で実績のあるエレクトロガス溶接や自動溶接機に適用が多い混合ガスのマグ溶接など、橋梁製作において現在用いられるさまざまな溶接法がこの時代に集中して開発されている。

(2) 高能率化技術への展開 (1970年代～1980年代)

この時代より被覆アーク溶接法が急速に減少し、サブマージアーク溶接法やガスマタルアーク溶接法が大幅に普及している。特に、細径フラックス入りワイヤと炭酸ガスを組み合わせた半自動溶接(写真-20)の出現は、全姿勢にて高能率、高品質溶接を可能とし、ガスマタルアーク溶接法を飛躍的に普及させた。

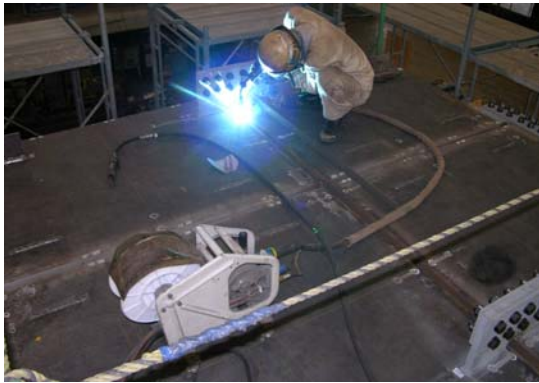


写真-20 半自動溶接

1970年代以降は、溶接作業者のウィービング(揺動運棒)を自動制御する機構を付加したオシレート方式の自動溶接機や溶接トーチと自走式台車を組み合わせた簡易溶接機など数多くの溶接装置が生み出された。オシレート方式の自動溶接機は主に開先溶接に、簡易すみ肉溶接機は縦リブや補剛材などの溶接に用いられた。

(3) ロボット化技術の躍進 (1990年代～現在)

1990年代頃より簡易自動溶接機の複数台使用による高能率化、NC制御による大型ガントリー式多電極溶接装置(写真-21)が実用化され、省人化や溶接の高速化が図られている。



写真-21 大型ガントリー式多電極溶接装置

ウェブパネルに取付く補剛材のすみ肉溶接では、オフラインティーチングシステムを機軸とした多関節溶接ロボット(写真-22)が稼働している。

溶接の自動化は、簡易自動機に代表される機械化から始まり、センサーとコンピューターを駆使したロボット化へと展開された。現在では更に発展し、CAD/CAM一貫システムによる橋梁パネルラインも実用化されるなど、生産プロセスを総合的に管理するシステムへと展開している。



写真-22 多関節溶接ロボット

8. 仮組立

8.1 変遷

仮組立は、工場では組立溶接された部材を、工場ヤードで実際に橋梁形状に組立て架設現場での再現性を保証する作業である(写真-23)。

1994年(平成6年)2月に発行された道路橋示方書・同解説の中に「仮組立にかわる他の方法によって仮組立と同等の精度の検査を行える場合などには仮組立を部分的に行ったり、省略することができる。」という記述があり、実際に部材を組み立てて行う仮組立(実仮組立)に替わる工法として、部材計測結果を用いて



写真-23 全体立体の仮組立法

数値シミュレーションにより組み立てた状態を確認する方法（シミュレーション仮組立）の開発と運用が進められてきた。

以前は検査項目として「仮組立」の項目があったが、仮組立は製作・施工の途中段階で完成形における組立精度を確認するために行うもので、仮組立を行わず所要の精度が確保できる場合には省略することも可能であることから、2002年版の道路橋示方書では検査の項目として、「部材・組立精度」と改められた。

8.2 シミュレーション仮組立による方法

図-4 に実仮組とシミュレーション仮組立の工法比較を示す。

シミュレーション仮組立は、部材の3次元計測結果をコンピューターで数値シミュレーションし、部材精度と組立精度を確認するものであるが、複数の計測方法がある。

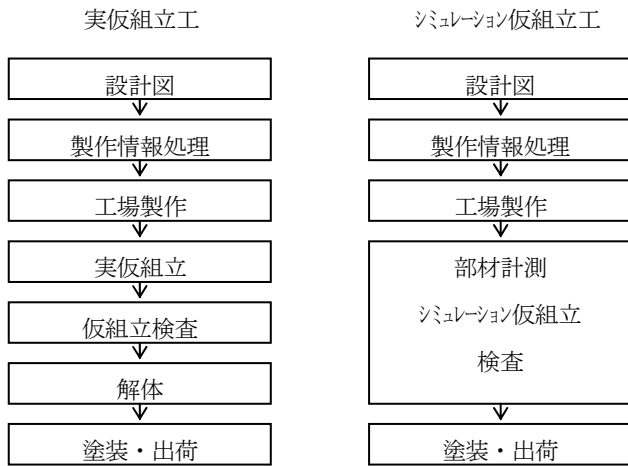


図-4 仮組立工法別による工程比較

8-2-1 部材の3次元計測

(1) CCDカメラによる計測

写真測量の原理を応用したものであり、複数のCCDカメラが部材の計測ターゲット近傍を視準する。その後、映し出された画像を解析し、ターゲットと識別された画素の重心を求めることにより3次元座標を算出するものである（写真-24）。

(2) トータルステーションによる計測

トータルステーションとは、角度を測る電子式セオドライトに距離を測る光波測距計を組み込んだ測量機

器で、計測データを電子信号で取り出すことが可能である。部材の計測ポイントに取り付けた光波反射用ターゲットを視準することにより3次元座標を得る。マニュアル計測のほか、CCDカメラを搭載し、ターゲットの視準を自動的に行う自動計測システムも構築されている（写真-25）。

(3) ロボットによる計測

計測専用ロボットのアーム先端に取り付けられた機械的なタッチセンサーあるいは視覚センサーにより、部材の計測ポイントの3次元座標を得る方法である（写真-26）。また、製作ラインの多関節溶接ロボットやNC工作機を準用した部材計測も行われている。



写真-24 CCDカメラによる計測



写真-25 トータルステーションによる自動計測

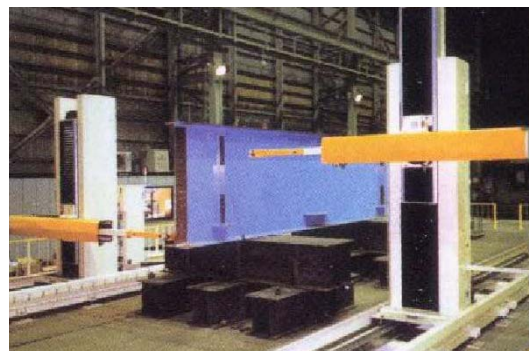


写真-26 3次元視覚センサーによる計測

(4) デジタルカメラによる計測

写真同士を繋ぎ合わせるコードターゲットと計測ポイントにシールターゲットを取り付けた部材をデジタルカメラで複数カットに渡って撮影し、撮影した写真を専用の解析ソフトに読み込めば、複数の写真から同一のコードターゲットを見つけ、立体形状を再現する（3次元座標を得る）方法である（写真-27）。デジタルカメラによる計測は、光波系測距器に比べ扱いが簡単で、屋内外でも使用可能である。



写真-27 デジタルカメラによる計測

8-2-2 仮組立シミュレーションシステム

仮組立シミュレーションシステムは、概ね、3次元データ作成システム、付属物干渉チェックシステム、部材計測システム、シミュレーションシステムで構成されており、3次元の部材データ、計測データおよび付属物データから、それぞれの3次元モデルを作成し、設計シミュレーション、付属物の干渉チェックおよびシミュレーション仮組立を行うものである。

写真-28 にシミュレーション仮組立の実行画面を、写真-29 にシミュレーションシステムによる橋梁内部（箱桁内面部）の画面を示す。

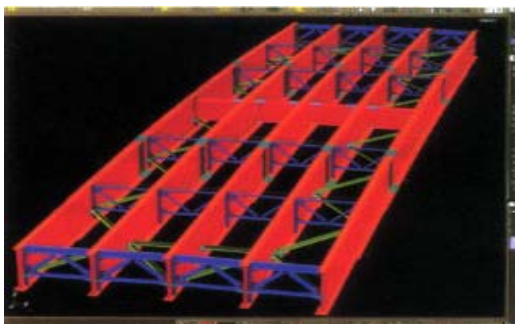


写真-28 シミュレーション仮組立実行画面

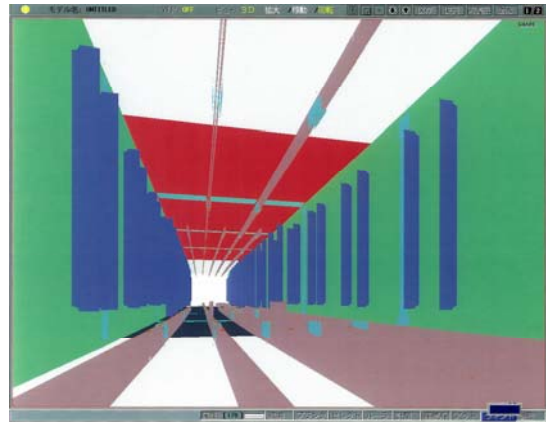


写真-29 シミュレーションシステムによる橋梁内部画面

9. 防錆・防食技術の変遷

9. 1 はじめに

日本の気候は、四季の変化に富んでいる上、四方を海で囲まれ、南北に長く、国土の70%を山地が占めるという地形上の特徴から、その環境が各地域によって多種多様になっている。高温多湿であるというわが国の最も特筆すべき環境は、鋼橋における腐食環境面において非常に厳しい条件下にあると言える。そのため、鋼橋の防食を考える上において、架橋位置の環境に合わせた長期耐久性を持った防錆方法を選定・適用することが重要である。高耐久性を有した防錆・防食技術（使用材料とその組合せ、施工方法など）を確立することは、過去から常に求められてきた鋼橋の建設における最重要課題であった。

わが国の鋼橋における防錆・防食方法は、明治初期からこれまで大部分が塗装で行なわれてきており、第二次大戦以降、防錆・防食のための塗装技術の変化はめざましいものがあった。また同時に、戦後は塗装のほか、多種多様な防錆方法が試みられてきた。ここでは、鋼橋の代表的な防錆方法である塗装と耐候性金属材料による防食の変遷について述べることにする。

9. 2 塗料・塗装系による防食の変遷

9-2-1 塗料

塗料は、1853年にアメリカから伝えられ、1878年にわが国で初めて生産された。1885年には塗料に関する初めての特許『堀田錆止塗料及び塗装』が登録され、1928年には『亜鉛化鉛粉錆止塗料』が開発されて、日

本などの各国は特許を取得するようになってきた。その後、戦前の1940年までに鉛系防錆顔料およびジンクロメートやベンガラなどが開発された。

戦後の塗料について、以下に示す。

第二次大戦後：

石油化学工業の発達により、各種合成樹脂の塗料化が盛んに行なわれるようになった。

1950年代：

エポキシ樹脂塗料、塩化ビニル塗料、長油性アルキド樹脂塗料、ポリウレタン樹脂塗料が開発された。

1955年（昭和30年）：長ばく型ウォッシュプライマーが実用化。

1960年代：

エポキシ樹脂系ジンクリッチ塗料が普及。

1975年（昭和50年）：

ガラスフレーク塗料が開発された。

1984年（昭和59年）：

常温乾燥型ふっ素樹脂塗料が開発された。

日本の高度成長期において、不飽和ポリエステル樹脂塗料、フェノール樹脂塗料、シリコンアルキド樹脂塗料、ビニルエステル樹脂顔料、シリコーン系樹脂塗料などの新しい塗料が開発された。

9-2-2 塗装系（仕様）

まず、鉄構造物の防錆に使用され始めたのは、鉛丹、亜鉛華や堅練りペイント（顔料にボイル油を混入した糊状の塗料）を製造開始した1881年のことであった。その後、1930年代頃までの鋼橋の防錆は、ベンガラや鉛系さび止め顔料を主体とした現場調合ペイントが主流であった。堅練りペイントは、1945年以降（戦後）大幅に減り、ほとんどがこの調合ペイントに取って代わった。なお、顔料には亜鉛華を配合した配合白亜鉛ペイントが1955年（昭和30年）頃まで使用されている。ここでは、鋼道路橋の塗装系の変遷について述べることにする。

鋼道路橋の戦前の防錆は、油性さび止め塗料が主流で、上塗りもまた、さび色や緑色系の現場調合による濃色のもので、3回塗りが一般的であった。

1955年（昭和30年）頃～：

鋼橋の防錆塗装は、鉛丹および鉛系さび止め塗料に長油性アルキド樹脂塗料を上塗りとする塗装系が主流になってきた。なお、塗装技術面においては、ミルスケールのまま鋼材に塗装するようになっていた。

1960年（昭和35年）頃～：

ジンクリッチプライマーが採用されるようになり、防食性が大幅に延長された。また、大気汚染が顕著になってきたため、長油性フタル酸樹脂塗料では、耐久性において不十分な環境が多くなり、塩化ゴム系塗料が採用されるようになってきた。

こうして以下の方法（作業手順）が確立された。

① 製鋼工場にて

鋼材をショットブラストしてショッププライマーを塗付する。

② 橋梁製作工場にて

上記の原板を加工して中塗りまで塗装する。

③ 架橋現場にて

架設・床版打設後、上塗り塗装を行なう。

1971年（昭和46年）：

鋼道路橋塗装便覧の初版が発刊される。ポリウレタン上塗り塗料を適用したものなど様々な塗装系が示されたが、実施工は鉛丹さび止め塗料と長油性フタル酸樹脂塗料とを組み合わせた塗装系が主流であった。その後、鉛丹さび止めの代わりに乾燥性のよい鉛系さび止めが使用されるようになっていく。

箱桁内面や桁端部の塗装にはタールエポキシ樹脂塗料が使用され始めるが、この時点ではタールエポキシ樹脂塗料が、厚膜で密着性、耐水性が高くもっとも信頼できる塗料であったため“永久塗装”と称されるようになった。

また、比較的厳しい腐食環境でジンクリッチプライマーに塩化ゴム系塗料を組み合わせた塗装系も適用された。しかし、塩化ゴム系塗料については1968年（昭和43年）から1972年（昭和47年）にかけて製造された一部のものにPCB（ポリ塩化ビフェニル）が可塑剤として使用されてい

た。PCBは毒性が強いため該当する橋梁の塗替えにあたっては慎重な対策が必要となっている。

1973年（昭和48年）：

関門橋にて、亜鉛溶射を防食下地として上塗りに塩化ゴム系塗料を用いた重防食塗装の先駆けともいえる塗装系が採用された。

1974年（昭和49年）：

土木学会から“本州四国連絡橋防錆防食塗装系案“が答申された。その中には”無機ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂塗料下塗り+ポリウレタン上塗り“など、その後の重防食塗装の主流になる塗装系が含まれていた。

1978年（昭和53年）頃～：

本州四国連絡橋の施工が始まり、海峡部橋梁の塗装系には“無機ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂塗料下塗り+エポキシMIO+ポリウレタン樹脂上塗り”が採用された。

1979年（昭和54年）：

鋼道路橋塗装便覧が改訂されている。鉛系さび止め塗料と現場塗装との塗装間隔の長期化に起因した層間剥離を防止するために、フェノールMIO塗料を工場塗装の最終層に追加する塗装系、またフェノールMIO塗料の溶剤に侵されにくい特性を利用して層間に塗装することで、膨潤を防ぎ、鉛系さび止め塗料と塩化ゴム系塗料の塗り重ねを可能とした塗装系などが加わっている。

また、「長期防錆形塗装系」として“無機ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂下塗り+エポキシMIO+ポリウレタン樹脂上塗り”の塗装系が設定されている。

鋼床版形式の橋梁では、グースアスファルト舗装の舗設時の熱影響を強く受ける範囲のみを耐熱性に優れた塗装系（外面はエポキシ+ポリウレタン、内面は有機ジंकリッチペイント）に塗り分ける手法が試みられるようになってきた。

1990年（平成2年）：

鋼道路橋塗装便覧の2度目の改訂版が発行された。大きな改訂内容を、以下に示す。

- ① 耐候性の高いふっ素樹脂上塗りの採用
- ② 全工場塗装系の設定

③ 内面塗装系で白色仕上げが可能な変性エポキシ樹脂内面用を使用した塗装系の追加
また、変性エポキシ樹脂塗料内面用は耐熱性が高いため、鋼床版形式の橋梁に適用された。

この便覧で、腐食環境別に適用する塗装系が明確に定義されるようになり、一般塗装系（A塗装系）、重防食塗装系（C塗装系）の使い分けが行われている（表-2）。

表-2 平成2年版塗装便覧腐食環境と塗装系

腐食環境の分類	塗装系	
一般環境	A塗装系	鉛系さび止め+長油性フタル酸上塗り またはシリコンアルキド上塗り
やや厳しい環境	B塗装系	鉛系さび止め+塩化ゴム系上塗り
厳しい腐食環境	C塗装系	ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂下塗り+ポリウレタン樹脂またはふっ素樹脂上塗り

1997年（平成9年）：

日本道路公団において薄膜形重防食塗装I仕様が採用された。これは機能性プライマーを採用し、二次素地調整として、溶接部は $G-a\frac{1}{2}$ Sa2 相当)、活膜部はスィープブラストで“有機ジंकリッチペイント+ポリウレタン樹脂中上塗装（またはシリコン変性アクリル樹脂中上塗装）”という仕様である。一般環境に油性系の塗装仕様が変わって適用されるようになった。

1998年（平成10年）頃～：

MIO塗料を使用した塗装系で工場塗装と現場塗装の層間で剥離を起こす事例が多発したため、全工場塗装（上塗りまで工場施工する仕様、便覧ではC-2、C-4塗装系）の採用事例が増加した。

2005年（平成17年）：

鋼道路橋塗装・防食便覧が発刊された。この便覧では塗装以外の防食法として、耐候性鋼材、溶融亜鉛めっきおよび金属溶射についても取り扱われるようになった。

また、この便覧における基本的な考え方は、あらゆる環境において重防食塗装を適用して塗り

替え周期を伸ばすことでライフサイクルコスト（LCC）を低減させることにある。そのため、新設橋梁の外表面塗装は原則、ふっ素樹脂塗料上塗りを用いた全工場塗装のC-5塗装系のみとなっている。ただし、20年以内に架替えが予定されている場合などには一般塗装系のA-5塗装系を適用することとしている。前便覧のC-4塗装系に対し、C-5塗装系では下塗りを1層で120 μm の厚膜型となっており、省工程化が図られている。

また、環境への配慮から、A-5塗装系では重金属を含んだ鉛系さび止め塗料の代わりに鉛・クロムフリーさび止めペイントが適用されている。タールエポキシ樹脂は発がん性の疑いのあるコーラルを含んでおり、作業者の安全衛生上の観点から扱われなくなっている。

9-2-3 塗装作業

(1) 素地調整

素地調整（ケレン）は、塗膜性能を十分に発揮・保持させるために鋼材塗装面を清浄にし適度に粗にする作業で、重要な役割を持っている。その素地調整方法の移り変わりについて、以下に述べる。

第二次大戦前：

人力による方法。

1953年（昭和28年）頃：

動力工具（電動のワイヤーホイール・カッター等）を用いた工法が試みられるようになってきた（2種ケレン）。

これにより除錆度・能率が向上した。

1960年（昭和35年）頃：

ブラスト処理（写真-30）による1種ケレン（完全ケレン）が標準的な素地調整として採用されるようになった。また、サンドブラスト法（日本では、1945年に車両塗装で使われたのが最初）が一般的に取り入れられるようになった。

これにより発錆問題を大幅に削減した。



写真-30 ブラスト処理

(2) 塗付方法

塗付作業は、塗残し、むら、すけ等の欠陥を生ずることなく均一な厚さで塗付する必要がある。その塗付作業方法の移り変わりは、以下の通りである。

第二次大戦前：

ほとんどの鋼橋の塗付方法は、はけ塗りで、一般的であった。

1957年（昭和32年）頃：

エアレススプレー法が研究発表された。

1965年（昭和40年）頃：

エアレススプレー法（写真-31）がはじめて鋼構造物の塗装に採用された。

これにより作業能率が大幅に向上した。



a) 施工状況（左側：外面、右側：内面）



b) エアレススプレー装置



c) スプレーガン

写真-31 エアレス塗装

9. 3 耐候性鋼材による防食の変遷

9-3-1 適用に至るまでの経緯と時代背景

20世紀初頭欧州や米国において、鋼の中に銅を微量添加することにより大気腐食が抑制されることが知られるようになり、大規模な大気暴露試験が実施された。この時、米国USS（USスチール）社は、3,000種類にのぼる低合金鋼について長期暴露試験を行い、1933年に高強度で大気耐食性に優れた鋼材としてCOR-TEN鋼を開発・商品化した。これが世界初の耐候性鋼材である。

わが国においてCOR-TEN鋼が知られるようになったのは第二次大戦後のことである。車両用薄板や構造用厚板などに耐候性に対するニーズが高まり、1955年頃から鉄鋼メーカー各社で耐候性鋼材の研究開発が本格化した。このとき、耐候性鋼材（Weathering steel）という名称が開発に携わった研究者によって命名され、その後国内において一般的呼称として広まった。

当初は橋梁においても他の構造物同様、耐候性鋼材に塗装を施すと塗装が長持ちするといった利点を生かして、塗装橋梁に耐候性鋼材が用いられることがあった。1964年に開業した東海道新幹線の長良川橋梁および木曾川橋梁のトラス縦桁上フランジにそのような使い方がされている。

耐候性鋼材を無塗装（裸使用）で用いた橋梁は、1965年に米国デトロイトのEight Mile Road, Highway Bridgeで初めて採用され、日本では1967年に、知多2号橋（愛知県半田市 写真-32）や村中小橋（愛知県小牧市）が試験的に採用されたのが国内最初である。実橋としては北海道に尻別跨線橋が1968年に完成している（写真-33）。



写真-32 知多2号橋



写真-33 尻別跨線橋

その後、1973年から1978年にかけて建設された室蘭新道（橋梁総延長2,707m）において約7,800tもの耐候性鋼材が使用された。鉄道で最初の無塗装橋梁は、1980年に建設された会津線（現在の会津鉄道会津線）第三大川橋梁である。その後も、社会資本施設の整備拡充とともに、初期建設費の縮減と維持管理コスト軽減への期待から耐候性鋼橋梁の需要が増え、現在鋼橋の中に占める耐候性鋼橋梁の重量割合は約20%となっている（図-5）。

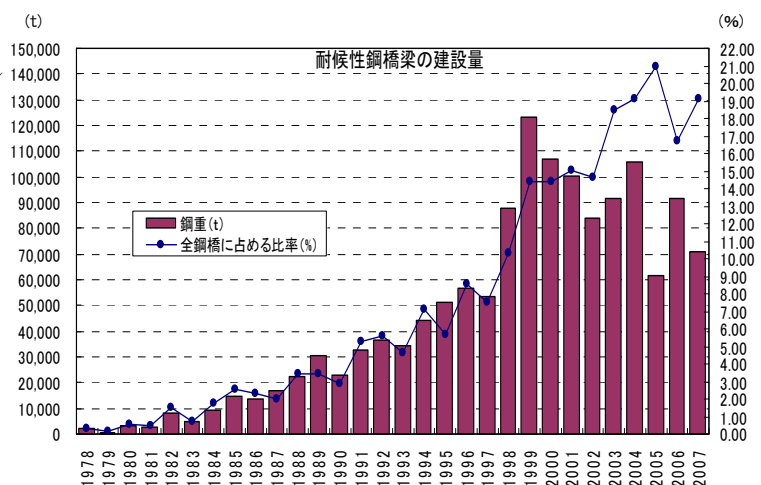


図-5 耐候性鋼橋梁の適用実績推移

表-3 耐候性鋼材・無塗装橋梁のあゆみ

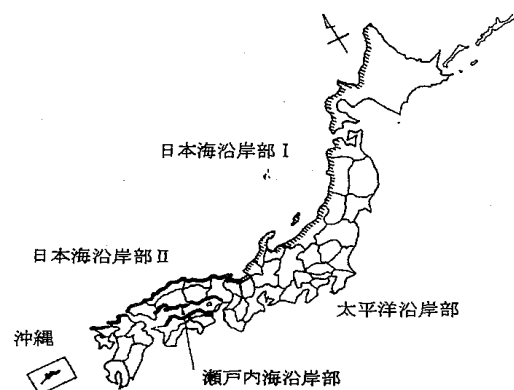
西暦	年号	日本のうごき	世界のうごき
1900頃 1933頃	明治33 昭和 8		米 耐候性鋼のはしりとして「含銅鋼」が市販 米 U. S. Steel 社が低合金耐候性鋼 CORTEN-A を製品化 Bethlehem Steel 社耐候性鋼 MAYARI-R を製品化
1955 1964	30 39	耐候性鋼を開発、市販 東海道新幹線開業 長良川橋梁、木曾川橋梁 で塗装橋梁に耐候性鋼材を使用	米国にて無塗装橋梁の使用始まる。 米 Illinois 州 Moline Deere & Co. 本社ビル 米 Detroit の Eight Mile Road の Highway Bridge
1965	40		米 New Jersey. Turnpike 南端の Highway Bridge
1967	42	無塗装での橋梁への使用が始まる 知多 2 号橋(川鐵知多製造所内)、村中小橋(小 牧市)	
1968	43	尻別跨線橋(北海道)	
1969	44	溶接構造用耐候性鋼 SMA 材が JIS に制定され る 第一両国橋(日本鋼管福山製鉄所内)	ドイツにて無塗装橋梁の使用始まる。
1971	46		
1972	47	高耐候性鋼の SPA-H および SPA-C が JIS に制 定される	英国にて無塗装橋梁の使用始まる。 英 Lincs の Crowle の道路橋
1973	48		英 Bristol の Hartcliffe Project の橋梁
1974	49	くろがね橋(新日本製鐵広畑製鉄所内)	英 Durham の Allerdene 社の跨線橋
1976	51		米 New York
1977	52		George Washington Bridge (鋼床版改造)
1978	53		米 New River Gorge Bridge (スパン 518m アーチ橋)
1979	54		米 San Francisco
1980	55		San Joaquin River Bridge (二主桁橋)
1981	56	第三大川橋梁(トラスで最初) 三者共同研究開始	米 New York New Burgh Beacon Bridge(Cantilever Truss)
1983	58	三宝入路鋼桁橋(鋼床版箱桁) 塗装用耐候性鋼として SMA-P が、無塗装用耐 候性鋼として SMA-W が JIS に制定	米 New Orleans Mississippi River Bridge(斜張橋)
1985	60	志染川橋(πラーメン)	
1988	63	久路見橋(ランガー桁) 麻生大橋(吊橋)	
1991	平成 3	十勝中央大橋(斜張橋)	
1993	5	スパイクタイヤの使用禁止 三者共同研究報告書「無塗装耐候性橋梁の 設計・施工要領(改訂案)」の出版	
1994	6	道路橋示方書において、SMA 材の選定鋼種を W 種のみ限定	
1995	7	さび安定化補助処理の仕様が開発・実橋への 適用が始まる	
1997	9		
1998	10	ニッケル系高耐候性鋼材の開発 ニッケル系高耐候性鋼材を用いた初の橋梁	
2001	13	北陸新幹線北陸道架道橋 「さび安定化の定義」発表(腐食防食シンポ ジューム)	
2004	16		
2005	17	「現代の橋梁工学」発行(数理工学社) 「鋼道路橋塗装・防食便覧」発行(日本道路 協会)	
2006	18		
2007	19	「耐鋼性鋼橋梁の可能性と新しい技術」発行 (JSSC テクニカルレポート No73) 耐候性鋼橋梁の実績は 1978 年からの累計で 138 万 t。単年度では鋼橋全体の 19.1%を占める(本実績は(社)日本橋梁建設 協会加盟会社分)	

耐候性鋼材の J I S 規格については、「JIS G 3114 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」が 1969 年(昭和 44 年)に制定された。その後、1983 年(昭和 58 年)には同 JIS が改訂されて塗装用 (SMA-P) と無塗装用 (SMA-W) の鋼種がそれぞれ規定された。道路橋示方書では、昭和 47 年版に JIS G 3114 の SMA41、SMA50、SMA58 の 3 種類が使用材料として取り入れられた。その後、道路橋における使用状況を踏まえ、道路橋示方書平成 2 年版では無塗装用 (SMA-W) のみが使用鋼材として規定された。

また最近では、J I S に規定されている耐候性鋼材に比べ、塩分に対する耐食性を高めた耐候性鋼材 (ニッケル系高耐候性鋼材) が開発され実橋への適用が進められている。これまでの耐候性鋼材および橋梁のあゆみを、表-3 に示す。

9-3-2 適用可能環境

耐候性鋼橋梁の増加に伴い、耐候性鋼橋梁の適用可能な環境条件や設計・施工および維持管理について留意する必要がある。そこで、建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会の三者による「耐候性橋梁の橋梁への適用に関する共同研究」(以下、三者共同研究という)が 1981 年から 11 年間にわたって実施された。全国 41 箇所における小型試験片暴露と飛来塩分の影響調査の研究成果は、「無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領 [改訂案]」(建設省土木研究所他)として 1993 年に発行された。この中で、飛来塩分量の許容値 0.05mdd(mg/100cm²/day 以下)は、層状剥離さびが見られず、50 年後腐食減耗量が概ね 0.3mm (水平方向に暴露した場合の回帰式による)を超えない値としている。また、道路橋では無塗装使用の適否の判定を容易にするために、飛来塩分量の分布特性等に基づき、飛来塩分量の測定を省略して、耐候性鋼材を無塗装で使用してよい地域を 5 区分に分け離岸距離で表している (図-6)。



地域区分		飛来塩分量の測定を省略してよい地域
日本海沿岸部	I	海岸線から 20km を越える地域
	II	海岸線から 5km を越える地域
太平洋沿岸部		海岸線から 2km を越える地域
瀬戸内海沿岸部		海岸線から 1km を越える地域
沖縄		なし

図-6 耐候性鋼材を無塗装で使用する場合の適用地域 (道路橋)

一方、1991 年にスパイクタイヤの使用が禁止されてから凍結防止剤の散布量が急増したため、地理的な条件としては適用可能な条件で使用されている橋においても耐候性鋼材に新たな形態の腐食が発生する事例が現れた。これらの再発を防ぐ適用の考え方が鋼道路橋塗装・防食便覧などにて一部規定されたが、現在も整備すべく調査研究中である。

9-3-3 耐候性鋼橋梁のライフサイクルコスト

各防食法の初期費用と 100 年後のライフサイクルコストの概算例を、C 塗装系の m² 当たりの初期費用で基準化 (基準値 100) して表-4 に示す。

表-4 代表的な防食法のライフサイクルコスト

費用/環境区分	塗装		溶融亜鉛めっき	金属溶射 + 封孔処理	耐候性鋼材無塗装使用	耐候性鋼材さび安定化補助処理または塗装	溶融亜鉛めっき + 塗装	金属溶射 + 塗装	
	A 塗装系	C 塗装系							
初期費用	45	100	60	137	16	84	83	160	
100年後の LCC	一般環境	465	240	60	137	21	91	222	-
	塩害環境	-	520	-	-	-	-	-	300

このように経済性の観点からは、耐候性鋼橋梁は塗装橋梁に比べ有利になると言われている。

9-3-4 表面処理の種類

耐候性鋼材の使用方法には、(1)無塗装で使用する、(2)耐候性鋼用表面処理を施す、(3)普通鋼材と同

様に塗装して使用する、がある。

(1) 無塗装使用

塗装や表面処理を施さず、裸で使用するものである。

表-4 のとおり最も経済的な使用方法である。最近では、原板ブラストによって黒皮を除去した後、工場出荷時の製品ブラストをかけないのが普通である。

(2) 耐候性鋼用表面処理仕様

裸使用の際に生じるさび汁の流出で周辺を汚すことを抑制する必要がある場合には、耐候性鋼用表面処理を施す。この耐候性鋼用表面処理材をさび安定化補助処理剤と呼んでいる。さび安定化補助処理の呼称において、安定さび促進形成処理、保護性さび促進形成処理、さび安定化促進処理など数多くの表現が用いられていた。性能照査型の防食設計を行う上で誤解を生じやすいため、その表現法をさび安定化補助処理とした。なお、「さび安定化」とは、異常や要観察を示すさびが発生しない程度に、腐食速度が低減している状態、および腐食速度が低減していることにより流れさびの発生が抑制される状態と定義している。

(3) 塗装仕様

箱桁の内面や桁端部は、環境条件の悪い箇所であり、耐久性に優れた塗装系を適用するものである。

箱桁の内面に塗装を施す場合には、普通鋼材による桁と同様に内面用塗装仕様D-5 塗装系を適用する。桁の端部に塗装を施す場合も、内面用塗装仕様D-5 塗装系を適用することが多い。桁端部の塗装範囲は、桁の内側面で下部構造の天端上となる部分までの範囲を目安に、一般部と同程度の環境とみなせる範囲まで塗装することが基本である。なお、凍結防止剤散布の多い路線では、桁の外側面も塗装するのが良い。外面部への塗装仕様については、色調と日射に考慮して外面用塗装仕様C-5 塗装系を適用する。

9. 4 環境に配慮した塗料と塗装系について

現代における環境や安全に対する社会的認識の変化とその責務により、化学物質管理促進法、P R T R 法、グリーン購入法、大気汚染防止法などの法整備が進められた。そのため、橋梁やタンクなどの大型鋼構造物用塗料についても、それらの法規制に対応できる塗料、塗装系が適用されるようになってきた。これら

の動向の具体例として、2003年（平成15年）11月に鉛・クロムの有害化学物質を含まない鉛・クロムフリーさび止めペイントがJ I S化された。

また、鋼道路橋塗装・防食便覧（2005年12月（社）日本道路協会）では、有害化学物質の削減や作業者の健康上の観点から、鉛系さび止めペイントやターレポキシ樹脂塗料等が廃止され、それに換わって、鉛・クロムフリーさび止めペイントや変性エポキシ樹脂塗料内面用が適用されるようになった。さらに、光化学スモッグや大気汚染の原因となるV O C（揮発性有機化合物）を削減する弱溶剤形塗料および塗装系も上述の便覧に記述されたため、適用されるようになってきた。

水性塗料および水性塗装系によるV O C削減については、各機関での塗膜品質試験や施工検討が行なわれ、上述の便覧の付属資料や鋼構造物塗装設計指針（2005年（財）鉄道総合技術研究所）や東京都V O C対策ガイド（2006年4月東京都環境局）で記述されるようになった。その結果、橋梁やタンクなどにおいても徐々にではあるが、適用するようになってきている。また、輸出橋梁であるカリフォルニア州から発注されたニューカルキネス橋に、V O C規制の関係で水性塗料を工場で塗布し発送した例もある。

10. 今後の展望

本格的な少子高齢化社会の到来により、あらゆる熟練工の不足は、鋼橋に限らず今後のものづくりに大きな影響をあたえるのは確実である。工場製作が大きなウェイトを占める鋼橋は、今後更なる自動化・省力化を進める必要がある。また、現在は少数である女性技術者・技能者の育成により、生産能力の維持、技術の向上は十分可能であると考えられる。

国内での鋼橋の受注量の推移を図-7に示す。成熟した国内市場において、かつての高度経済成長時のような新設鋼橋の建設ラッシュが訪れる可能性はない。

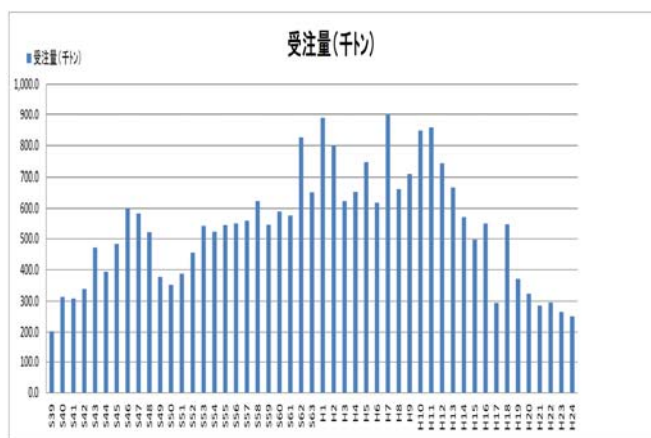


図-7 国内鋼橋受注量推移

一方、インフラ老朽化対策は緊急課題であり、橋梁大規模更新時代が訪れている。これまで長い歴史の中で培った技術を、メンテナンスにも注力していかなければならない。

海外の市場に目を向けると、多くの橋を必要としているインフラ整備途上の地域も多い。日本の「ものづくり」の強みは、自動車業界に代表されるように工場技術力の高さにある。国内市場が縮小傾向にある今、鋼橋製作技術力の高さをPRし、より積極的な海外展開が重要である。

2020年の東京オリンピックに向けて、東京では競技場へのメインアクセス道路となる環状二号線の整備が進められている。今年5月、隅田川に鋼橋の特徴を生かした優美なアーチ橋が一括架設された(写真-34)。その上流には、2007年国の重要文化財に指定された「勝鬨橋」、河口の先の海上には東京のシンボルである「レインボーブリッジ」を見ることができる。オリンピック開催の際には、世界中の人々に日本の鋼橋のすばらしさを改めて認識してもらえることを期待する。



写真-34 隅田川橋りょう

11. 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：日本の橋(増訂版)(1994.6)
- 2) (社)日本橋梁建設協会：鋼橋技術の変遷(2010.5)