長大橋に使用される新鋼材

富田 幸男*

* 新日本製鐵株式会社鉄鋼研究所鋼材第二研究部厚板 Gr.

Newly Developed High Performance Structural Steels for Long Span Bridge Construction

Yukio Tomita*

* *Steel Products Lab-II Plate Sec., Steel Research Lab., Nippon Steel Corp.*

The recent trends for long span bridges and their using steels are reviewed. The newly developed structural steels, that is high performance steels for bridge construction, are also reviewed in this paper. As the span length increases, higher strength steel, increasing weldability for decreasing weld fabrication cost and bare use of weathering steel for decreasing maintenance cost are required. To meet these requirements, high strength steel, steel allowing low-temperature preheating, steel for cold bending, weathering steel for coastal region, longitudinally-profiled (LP) steel plate and high-strength steel wire for bridge cables have been developed. Especially newly developed weathering steel and its surface treatment for minimum maintenance cost are reviewed in detail.

Key words: long span bridge, high performance steel, high strength steel, weldability, bare use of weathering steel, steel allowing low-temperature preheating, longitudinally-profiled steel plate

1. 長大橋及びその使用鋼材における最近の動向^{1),2)}

我が国では橋長 2 m 以上の橋が 65 万橋以上あると言われていたが、ここ 10 年間で鉄鋼材料に大きな影響を与えた技術的動向は本州四国連絡橋の吊橋や名古屋港などの斜張橋など長大橋の建設 (図 1)、メンテナンスを考えた耐候性鋼使用の多用であろう。

本州四国連絡橋のように橋梁の支柱間が長い本格的長大橋では死荷重軽減が課題であり、橋桁軽量化のためには高張力鋼の利用と高強度ケーブルの利用が考えられた。

我が国では 1960 年芦有道路の西村橋、平野橋に SM 570 鋼板が、1974 年完成の南港大橋で HT690, 780 鋼板がそれぞれ最初に利用された。昭和 40 年代大々的に研究された設計、施工に関する高張力鋼板利用技術を反映して本四連絡橋の神戸-鳴戸ルートの大鳴戸橋 (1985 年完成)、児島-坂出ルート (瀬戸大橋) の番の州高架橋 (1988 年完成) に再加熱焼入れ焼戻しマルテンサイ

ト系 HT690 鋼板が、後者ルートの与島橋に同焼戻しマルテンサイト系 HT 670 と HT 780 の高張力鋼板が在来の SM 400, 490, 520, 570 鋼板とともに相当量使用された。

さらに、完成後間もない明石海峡大橋は支柱間 1990 m と世界最長であり、軽量化に向け溶接性を改善した橋桁用の新開発鋼板 HT780 が本格的に使用され、またケーブル用にも新線材 (引張強さ 1800 MPa 級) が新たに使用された。

この新開発鋼板は高い信頼性を求め、種々の特性が従来鋼と同等以上であることは言うまでもなく、溶接施工コスト低減や溶接作業環境改善の面から熱影響部における溶接われ防止のための予熱温度を従来の 100°C 程度から 50°C 以下へと図ったところに特徴がある。

構造上、溶接部の板厚方向拘束度が高くなるため、重要部材では溶接割れの一種であるラメラテアを防止する必要がある。板厚方向の延性を高めた耐ラメラテア技術 (高純・高清浄度鋼) が利用されることは言うまでもない。

さらに、加工コストを低減する厚肉少補剛断面化や主

* 〒293-8511 富津市新富 20-1 (20-1, Shintomi, Futtsu, 293-8511 Japan)

図1 世界の吊橋における中央スパンの変化

桁本数の削減とテーパプレート（LP 鋼板）の採用検討も必要である。

耐候性鋼は古くから世界中で建築とともに橋梁に用いられている。大気中の腐食に耐えてメンテナンスを軽減する耐候性機能を持つ以外に、自然に適合する色調を持つ高意匠性材との認識も強い。メンテナンス費用削減、労働力不足からメンテナンスフリー機能が強く要望され、裸もしくはさび安定化処理耐候性鋼の使用比率が高まりつつある。また、全国 41 橋における耐候性鋼試験片の暴露調査から、飛来海塩粒子が少ない海岸から離れた場所では耐候性機能が十分期待できること、飛来海塩粒子が 0.05 mdd (mg/dm²/day) 以上になると海浜地帯では耐候性機能を期待しにくい。海浜地区で無塗装使用が可能となる海浜耐候性鋼の開発が求められている。

長大吊橋では、支間長の増加に従って自重が増加し、同じ強度のケーブルを用いた場合、必要なケーブル断面は大きくなっていく。長大吊橋のメインケーブルに高強度のワイヤを用いれば、ケーブル断面が減少し、架設工事の効率化、主塔高さの低減や補剛構造の簡素化が実現できる。センタースパン 1990 m の明石海峡大橋では、従来の橋梁ケーブル用ワイヤより引張強さが 20 kgf/

mm² 高い 180 kgf/mm² (1770 MPa) ワイヤが開発され、実用に供されている。

2. 長大橋に使用される新鋼材（橋梁向け高性能鋼）^{1), 3), 4)}

2.1 高強度鋼

一般的に広く使用されている厚板の引張強さは 400 MPa (40 キロ級)、490、520 MPa (50 キロ級) であるが、高強度部材としては 570 MPa (60 キロ級) 鋼板が用いられる。今回の道路橋示方書の改訂により、これら厚鋼板の適用可能板厚範囲は板厚 50 mm から 100 mm まで拡大された⁵⁾。高張力鋼としては 780 MPa (80 キロ級)、950 MPa (100 キロ級) 鋼板も実用化しており、本州四国連絡橋の明石海峡大橋の補剛桁に予熱低減型 780 MPa 鋼板が適用された^{6)~8)}。

2.2 溶接性

今回の道路橋示方書改訂により、鋼板の溶接性の評価指標とし Pcm 値（溶接割れ感受性指数）の導入が位置付けられ、橋梁用の溶接構造用鋼板が持つべき品質も Pcm 値で明確化された（表 1）⁹⁾。従って、鋼板のユーザーは一定以上の溶接性を有する鋼板を安定して入手す

表1 予熱温度の標準を適用する場合の Pcm 値の条件（単位：％）

鋼材 の板厚 (mm)	鋼種	SM400	SM400W	SM490 SM490Y	SM520 SM570	SMA490W SMA570W
25 以下		0.24 以下	0.24 以下	0.26 以下	0.26 以下	0.26 以下
25 超 50 以下		0.24 以下	0.24 以下	0.26 以下	0.27 以下	0.27 以下
50 超 100 以下		0.24 以下	—	0.27 以下	0.29 以下	—

ることが保証された。また鋼板の P_{cm} 値表示が義務付けられたため、ユーザーはミルシートに示された P_{cm} から、その鋼材の溶接条件（予熱の要否、温度）を適切に決めることが容易となった。更に、ユーザーは鋼材メーカーにオプションで通常より低い P_{cm} 値の鋼板を発注することにより、溶接時の予熱温度低減等作業負荷を軽減することも可能である。また、溶接時の入熱については道路橋示方書にて 570 MPa 級鋼板での溶接入熱は 70 kJ/cm 以下に規定されている。但し、溶接施工試験にて溶接継手部の機械的特性を確認し要求を満足できる場合は 70 kJ/cm を越える大入熱溶接も可能である。

2.2.1 溶接時予熱低減型鋼板

明石海峡大橋では、我が国初の予熱低減型 780 MPa 鋼板が適用された。ここで適用された Cu(銅)析出強化型 HT780 鋼は、低炭素化に加え通常焼入れ焼戻し型高張力鋼には不可欠な焼入れ性強化元素であるボロン(B)を添加せず、代わりに 1%程度添加された Cu の析出強化機構を利用することにより溶接性改善と強度確保を両立させたものである。析出強化は加熱により固溶した元素を鋼中に微細析出させると効果的である。従って、加熱圧延後のオンライン直接焼入れの後、焼戻し過程で固溶させた元素を微細に析出させる方が、圧延空冷後再加熱焼入れするよりもはるかに効果的である⁸⁾。従来 780 MPa 級鋼板については予熱温度 120°C が必要であったが上記技術により、板厚 50 mm 程度まで予熱温度 50°C で溶接割れ発生を防止することが可能となった。

2.2.2 大入熱溶接用鋼板

溶接時の入熱が大きくなると溶接熱影響部 (HAZ) の領域が拡大し、熱影響により変態したオーステナイト結晶粒が粗大化し冷却速度も遅くなるため HAZ 部のフェライトの結晶粒度が粗大化すると同時に硬さの低下（強度低下）が生じる。この現象を抑制し、大入熱溶接に対応するため適用されているのが TiN, TiN+MnS, あるいは TiO などの微細析出物のピンニング効果によるオーステナイト結晶粒の粗大化抑制と、析出の核として変態後のフェライト結晶粒内の粒内フェライト(IGF)を助けることにより組織を微細化するなどの技術である。HAZ部の靱性低下を補償するため母材部の靱性を向上させておくことも必要である^{10)~12)}。日本道路公団が建設を進めている第2東名神高速道路の大府高架橋ではI桁の接合に現地溶接が採用されており、特にウェブの突合せ溶接の効率化のために大入熱溶接のエレクトログラス溶接が採用されている。

2.3 高靱性鋼板及び冷間曲げ加工

高い靱性を有する鋼板を用いると、以下

のようなメリットが生じる。

- ① 寒冷地などの低温地域（北海道など）での鋼材の利用範囲が広がる。
- ② より小さい曲げ半径で冷間加工が可能となる。

2.3.1 冷間曲げ加工

従来道路橋示方書では鋼板の冷間加工に関して、内曲げ半径を板厚の 15 倍以上確保することを規定していたが、今回の改訂で、鋼板の靱性が充分高ければ、すなわち、曲げ加工方向のシャルピー吸収エネルギーが 150 J あるいは 200 J 以上あり、鋼中の N が 60 ppm 以下であることが確認できれば板厚の 7 倍、更に 5 倍の内曲げ半径まで冷間曲げ加工が許されるように改訂された（表 2）¹³⁾。これは、冷間曲げ加工すなわち永久歪みを与えられ鋼材が脆化するすなわちシャルピー衝撃試験における破面遷移温度が上昇するため、劣化代に相当する分、母材靱性を向上させておくとの考えから決められている¹⁴⁾。

2.4 LP 鋼板

（テーパプレート/Longitudinally Profiled Plate）

厚板は通常上下のロール間に赤熱状態の鋼板を通し荷重を掛けることにより徐々に薄く長く延ばしていく、いわゆる熱間圧延で製造している。従って、基本的には板厚が均一な鋼板を製造する設備となっている。鋼板がロールの間を通り 1 回圧延されることを 1 パスと言い、通常パス内のロールギャップ（上ロールと下ロールの間隔）は一定に保ち、パス間でロールギャップを変えていく。ロールギャップは油圧で制御しているが、これをパス内で変化させると鋼板の圧延方向に板厚が変化した鋼板ができる。すなわち、鋼板の圧延速度とロールギャップを変化させる速度をコントロールすることにより希望するテーパ（板厚変化率）を持った鋼板を製造する¹⁵⁾。現在国内厚板ミルで製造可能とされる LP 鋼板のテーパは 4 mm/mm 程度で板厚の変化幅は最大 30 mm から 40 mm 程度である。LP プレートは圧延方向に単に板厚が変化する一方向テーパプレートに加え平行部、あるいは逆方向のテーパ部と組み合わせた鋼板の製造が可能である。LP プレートの製造可能タイプを図 2 に示す。鋼板の板厚を必要に応じ変化させることにより溶接箇所を減少させコストを削減しようとの考えから LP 鋼板のニーズが生まれてきた。一試算によれば、橋梁の主桁に LP プレートを適用した場合、約 12%

表 2 冷間曲げ加工条件

・ 鋼中の N（窒素）の量が 0.006% 以下であること
・ $vE \geq 150 J \rightarrow$ 内側曲げ半径 $\geq 7t$ (t : 板厚)
・ $vE \geq 200 J \rightarrow$ 内側曲げ半径 $\geq 5t$ (t : 板厚)

図2 LP鋼板の種類

のコスト削減効果が期待できる¹⁶⁾。接合部及び溶接箇所への減少は構造物全体の信頼性向上、メンテナンス負荷の軽減にもつながり今後の橋梁合理化に資する技術と思われる。

2.5 耐候性鋼板

耐候性鋼の起源は米国 U. S. Steel で開発された COR-TEN 鋼で、米国では 1965 年頃から橋梁に適用されている。日本国内では JIS G 3114 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (SMA シリーズ) として規定されている。SMA 材は耐候性向上成分として Cu, Ni, Cr が微量添加されている。後述のように表面の塗装無しで長期間維持できることから鋼橋のミニマムメンテナンス化¹⁷⁾に貢献できると期待される。

2.5.1 耐候性鋼の裸使用

耐候性鋼を裸使用した場合、初期には鋼板表面には普通鋼と同じさびが発生する。日照降雨が繰り返され数年経過すると落ち着いた焦げ茶色の緻密なさび (安定さ

図3 耐候性鋼安定さび構造の模式図

び)へと変化し、以降の腐食進展速度が抑制される (図3)。安定さび層は内層に P, Cu, Cr などの耐候性向上元素が濃縮した非晶質さび層が地鉄界面に連続的に形成されることを特徴としている¹⁸⁾。岡田らによって提案されたこのモデルは、暴露5年前後の試験片を解析して構築されたものとされている。

最近、安定さび構造に関する研究が改めて活発になされ、20年以上経過した安定さびの内層さびの主体は Cr 置換 $\alpha FeOOH$ であり、数年後の非晶質さび内層は最終安定さび層に至るまでの遷移過程とする説^{19)~21)}が提案されている。一方、35年を経た安定さび層でもさび内層は X 線的にも局所レーザーラマン分光でも非晶質さびであり、安定さび層は暴露後数年でその構造的特徴を完成させ、その後約 30 年間保持されてきたとする説²²⁾も提案されている。今後は、保護性に優れた安定さび層構造に加えて、海浜地区で形成される保護性の低い層状剝離さびの生成機構などさらなる研究が待たれている。

構造物の維持管理低減を目的とするほか、安定さびの落ち着いた色調で構造物を周囲の景観と調和させるなどの目的で耐候性鋼を裸で使用する例もある。

ただし、裸使用で生成するさびは飛来塩分などからの塩化物イオンの影響により、層状で剝離性のさびとなって十分な保護性が望めない場合がある。それゆえ、耐候性鋼材の適用にあたっては事前に使用環境の確認が望ま

しい。

建設省土木研究所, 日本橋梁建設協会, 鋼材倶楽部は, 全国 41 橋の調査「耐候性鋼材の橋梁への適用共同研究 (1981~1993)」に基づき「無塗装橋梁の設計施工要領 (改定案)」をまとめており, 耐候性鋼の無塗装橋梁への適用可能限界として飛来塩分量 0.05 mdd ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$) 以下であることを推奨している (図 4 参照)²³⁾。

最近では, 飛来塩分に強い新しい耐候性鋼 (海浜耐候性鋼) が開発されている^{24)~27)}。例えば Ni を 3% 添加して Cr を無添加とした海浜耐候性鋼²⁶⁾ は 9 年間の暴露試験結果などで, 従来の耐候性鋼では安定さび化が期待できない飛来海塩粒子の多い地域でも, 優れた耐候性を示すことが実証されており (図 5, 6), 海浜地区への適用だけでなく, 融雪塩を頻繁に散布する山間部の高速道路などへの適用も期待されている。

2.5.2 耐候性鋼の表面処理

耐候性鋼を裸使用した際に生じる初期さびは飛散あるいは降雨などによる流れさびとして周辺の構造物にさび汁跡をつくり問題となる場合がある。この問題を解決するために開発されたのがさび安定化処理である。表面処理による処理膜が鉄イオン (Fe^{3+}) の溶出を抑制し, 流れさびを押さえることができる。従って, 裸材に比べて非常にゆっくりとした腐食進展となり, 長期間経過した後安定さびとなると考えられる。耐候性鋼の表面処理は, 裸使用時の流れさびなどが特に問題となる建築物の外装, あるいは橋梁, 鉄骨などに広く適用されている。

耐候性鋼の表面処理分野でも, 最近新しい技術が開発されている。短期間で安定さびを生成させる耐候性鋼板の表面処理方法²⁸⁾が新たに提案され, 長期耐久性試験で追跡調査が実施されている。一方, 時間をかけて緻密な安定さびを生成させながら長期間の景観性を両立させる処理方法²⁹⁾も提案され, その長期耐久性が実証されている。

図 4 耐候性鋼の無塗装使用に対する適用地域 (0.05 mdd 以下)

図 5 3%Ni 系海浜耐候性鋼の腐食曲線

図 6 海浜耐候性鋼に及ぼす Ni の影響

2.5.3 耐候性鋼の塗装使用

耐候性鋼板に通常の塗装をして使用される例もある。普通鋼に塗装して使用するより塗装の寿命が長いことが経験的に知られ, 主に海上輸送用コンテナ, 鉄道貨車などに広く適用されてきた。

20 年にわたる長期の暴露試験片を調査した結果, 普通鋼の塗装皮膜にき裂などが生じ水・空気が地鉄表面まで浸透した場合, ポーラスなさびが発生し水・空気の侵入が増大し, 最終的には塗膜の剥離, さびの拡大につながる。一方, 耐候性鋼に塗装した場合には塗膜の欠陥から水・空気が侵入しても緻密なさびとなりその後の水・空気の侵入を抑制し塗膜の剥離には至らないという。

その結果, 耐候性鋼に塗装した場合, 普通鋼に塗装するよりも塗装寿命が得られることが確認されている (図 7)³⁰⁾。

最近, 飛来塩分の多い地域での塗装寿命の延伸を目的とした, 塗装耐久性向上鋼板³¹⁾が新たに提案され, 開発が進められ

図7 耐候性鋼への塗装

ている。塗装寿命延伸には、Ni, Ti の添加および Cr フリー化が有効であるとされ、鋼材の成分設計思想は前述の海浜耐候性鋼と共通項が多い。

2.5.4 安定さびの診断・評価技術

耐候性鋼の安定さび形成の有無を簡便かつ的確に調査判定することもメンテナンスの要否を判定する上で重要である。一般に、正確を期する場合、鋼板断面の偏光顕微鏡観察により緻密なさび層存在の確認と X 線によるさびの形態分析を行うためサンプル鋼板の採取が必要となり、実構造物の調査では適用が難しい。X 線による方法としては、さび中の αFeOOH と γFeOOH との構成比 (α/γ) による評価法³²⁾ が提案されている。紀平ら³³⁾ の開発した交流インピーダンス法によりイオン透過抵抗を直接測定する方法は、現場にて非破壊（サンプル採取不要）で耐候性鋼表面さび層の経年変化を定量的に調査・追跡できる方法として有効である（図 8, 9）。今後のさらなる研究の進展を期待したい。

2.5.5 耐候性鋼の橋梁への適用

今回の道路橋示方書の改訂（H 8 年 12 月）により、溶接構造用圧延鋼板（SM シリーズ）は板厚 100 mm まで適用板厚が拡大したが、溶接構造用耐候性熱間圧延鋼板（SMA シリーズ）については技術的には製造可能であるが、JIS 改訂が未完了であるため、上限板厚 50 mm となっている。現在 JIS 改訂の作業が進められており、順調に進めば平成 10 年中には改訂内容の告示があると予想される。

耐候性鋼についても板厚の拡大、溶接性の改善、大入熱溶接特性、低温靱性保証、冷間曲げ特性の確保など、高性能耐候性鋼の開発が進み、橋梁の新技术にも対応が可能である。

2.6 橋梁用高強度ワイヤ¹⁾

吊橋用ケーブルには従来引張強さ 1600 MPa 級めっき鋼線を供してきたが、明石海峡大橋ではこの強度で設

図8 さび安定度診断装置

図9 RST 法による耐候性鋼上に生成したさびの分類

計するとケーブルが片側 2 本ずつの 4 本必要となり、複雑構造・死荷重増加・架設費増大を生ずる。合計 2 本とすべく世界に先駆けて高強度化され、線径 5.1 mm の引張強さ 1800 MPa 級めっき鋼線が本線に、架設用キャットウォーク用に線径 4.6 mm の引張強さ 2000 MPa 級が使用された。

パテンティング・冷間伸線加工・耐食性向上のための亜鉛めっき工程で得られたパーライトラメラ間隔の極めて微細なパーライト鋼である。この強度を得るため固溶体硬化とめっき作業時のパーライトの崩壊を防止するため Si を 1 % に増量している。

3. おわりに

新しい橋梁向け鋼材について厚鋼板を中心に報告した。過去、橋梁の長大化・合理化や使用環境の苛酷格化などへの対応から新しい技術が必要となり、鋼材に対しても新しい品質特性の要求が生まれ鋼材の技術も進歩してきた。今後はその新鋼材の特性を十分に引き出す設計、施工法の発展により、より経済合理性のある橋梁が製作されていくことを期待したい。

(1998 年 8 月 6 日受理)

参 考 文 献

- 岡本健太郎：鉄と鋼，**81**，462 (1995)。
- 間渕秀里：西山記念講座，“新しい時代を創造する高性能厚板”，p.71 (1996)，日本鉄鋼協会
- 楠 隆：橋梁と基礎，**8**，117 (1997)。
- 鋼材倶楽部橋梁研究会：“高性能鋼の概要（橋梁向け）”，(1998. 1)。
- 道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編），p.107
- 矢野清之助，岡村義弘：“新 80kgf/mm² 級高張力鋼の開発”，製鉄研究，**309**，110 (1982)。
- 矢野清之助，岡村義弘，井上尚志，田辺康司：“100 kgf/mm² 級高張力鋼の開発”，製鉄研究，**322**，99 (1986)。
- 岡村義弘，田中睦人：“Cu 析出強化型予熱低減 HT 780 鋼の開発”，新日鉄技報，**356**，62 (1995)。
- 道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編）p. 391
- Y. Tomita, N. Saito, T. Tsuzuki, Y. Tokunaga and Okamoto: *ISIJ International*, **34**, 829 (1994)。
- 大北 茂，若林正邦：製鉄研究，**327**，9 (1987)。
- 有持和茂：住友金属，**40**，107 (1988)。
- 道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編）p. 379
- 道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編）p. 382
- 若月邦彦：差厚鋼板の製造技術，第 118 回塑性加工懇談会資料
- 橋梁と基礎，9 月号 (1989)
- 西川和広：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，501/I-29，p.1-10 (1994)。
- 岡田秀弥，細井祐三：鉄と鋼，**55**，355 (1969)。
- 三澤俊平，山下正人：鉄と鋼，**79**，69 (1993)。
- 山下正人，幸 英昭：材料と環境，**43**，26 (1994)。
- 塩谷和彦：腐食防食'95講演集，p.331 (1995)。
- 宇佐見 明，富田幸男：CAMP-ISIJ，**11**，452 (1998)。
- 建設省土木研究所，鋼材倶楽部，日本橋梁建設協会：共同研究報告書，No.88，p. 1 (1993)。
- 宇佐見 明，田辺康司：腐食防食'95，p.395 (1995)。
- 山本正弘，紀平 寛：鉄と鋼，**84**，194 (1998)。
- 宇佐見 明，富田幸男：材料と環境'98，p.65 (1998)。
- 田中賢逸，清水義明：材料と環境'98，p.67 (1998)。
- 幸 英昭，岸川浩史：材料と環境'98，p.51 (1998)。
- 伊藤陽一，山口伸一：材料と環境'98，p.63 (1998)。
- 山口伸一，伊藤陽一：CAMP-ISIJ，**8**，1602 (1995)。
- 中山武典：CAMP-ISIJ，**11**，454 (1998)。
- 山下正人，幸 英昭：住友金属，**47**，5 (1995)。
- 紀平 寛：溶接学会誌，**63**，435 (1994)。