

特集記事・1

我が国の社会インフラを支える鉄鋼材料

橋梁用高性能鋼

High Performance Steels for Bridge Structure

高木優任

Masahide Takagi

新日鐵住金(株)
建材開発技術部
橋梁開発技術室長

1 はじめに

橋梁は交通ネットワークの要であるとともに、地域のランドマークともなる重要な土木構造物であり、時代の要請に応じた新しい技術を取り入れながら発展してきた。近代以降の橋梁では、主構造に鋼材、コンクリートをそれぞれ用いた鋼橋およびコンクリート橋が建設されてきた。軽量かつ高強度な鋼材を用いる鋼橋は、コンクリート橋に比べて軽量で取り扱いが容易であることが大きな特徴であり、耐震性に優れるとともに長支間、軟弱地盤への対応性が高いことや狭隘地での施工、工期短縮が可能、など多くの長所を有し、わが国の社会資本整備における要求事項に応えやすいことから、都市部の橋梁や長支間を跨ぐ長大橋への適用を中心にわが国独自の発展を遂げてきた。

近年の社会資本整備においては、社会的なニーズの変化に合わせ、構造物に求められる機能に対する要求がますます高度化、多様化しており、橋梁においても建設費の縮減、耐久性の向上、維持管理の負担軽減などが強く求められるようになってきており、それに合わせて鋼材への要求も高度化、多様化してきている。このようなニーズに応えるべく、鉄鋼メーカーでは、強度、じん性、溶接性、曲げ加工性、耐候性などを向上させた、橋梁の高機能化に寄与する多様な鋼材の開発とその利用技術の提案を行ってきている。

鋼橋に用いられる鋼材には、桁などの主構造を構成する厚板、形鋼や接合に用いられる高力ボルト、吊橋・斜張橋に用いられるケーブル、基礎に用いられる鋼管杭や鋼管矢板など多種多様な品種があるが、本稿では厚板に的を絞り、橋梁用高性能鋼についてその代表的な例を紹介する。

2 わが国における鋼材と鋼橋の発展

わが国における鉄の橋の歴史は、文明開化の時代、1868(慶応4)年に長崎に建設されたくろがね橋(輸入錬鉄を使用)に

始まる。鉄の橋がわが国に建設されるようになって150年近くが経過することになる。この間の橋梁建設における技術開発の目標は社会的な環境とニーズに合わせて変化を遂げてきており、以下のように大まかに4つの時代に分類できる。①東京の隅田川にかかる永代橋、清洲橋などの関東大震災の復興橋梁に代表される、国産の鋼材を用いた大型の橋梁を建設する技術を確立するまでの時代、②第二次世界大戦後の高度成長期における、新幹線や高速道路などの交通網整備に伴う橋梁の大量建設の時代、③世界の頂点に君臨する明石海峡大橋の建設に象徴される、大きくて長い橋(長大橋)を建設する時代、④バブル景気崩壊後の建設コスト縮減に向けた、新東名高速道路の建設を契機とした合理化橋梁の建設の時代。これらのいずれの時代においても、材料の進歩が新しい構造を生み、また一方で新しい構造物を実現するための要求性能が提示され、それをクリアする新たな材料の開発によって様々な機能を有する鋼橋が生み出されてきた。

④の時代に包含される近年では、①～③の時代に培ってきた高強度鋼に代表される高性能な鋼材の開発を継承し、それをさらに応用、発展させた多種多様な鋼材が開発され、これらが広く鋼橋に適用されてきた。最近、建設分野では国土強靱化が重要なキーワードとなっており、安全性・信頼性の確保や、建設コストの縮減、維持管理費や環境負荷の軽減など、鋼橋に求められる性能はますます高度化、多様化してきている。このような状況の下、これまでとは異なる特性、品質が鋼材に求められる場合もあり、橋梁建設への高性能鋼のニーズは今後も高まっていくことが予想される。

3 橋梁用高性能鋼の概要

3.1 橋梁用高性能鋼とは

橋梁用高性能鋼とは、鋼橋において汎用的に使用される鋼種と比較して、強度、じん性、溶接性、曲げ加工性、耐腐食性

などにおいて、より優れた性能を有する鋼種、鋼材を総称したものである¹⁾。表1に主な厚板の高性能鋼の概要を示す。

わが国における多様な高性能鋼の創出を支えてきたのが、添加元素や鋼材のマイクロ組織制御の効果を最大限に引き出すメタラジー技術の進展であり、不純物を徹底的に除去する鋼材の高清浄化技術、鋼材のマイクロ組織を制御できる加工熱処理 (TMCP) 技術などの革新的な製造技術の登場が高性能鋼の製造を可能にしてきた²⁾。とくに、圧延工程での重要な技術がTMCP (Thermo Mechanical Control Process：熱加工制御プロセス) であり、鋼材の成分、加熱温度、圧延条件、冷却条件を最適に制御することで、原則として「圧延のまま」で微細な金属組織を作り込むことを可能にし、鋼材に様々な特性を付与することができるようになった。

これらの技術の進展に支えられて、様々な性能や特徴を持つ厚板が市場に提供され、鋼橋の高機能化に貢献してきた。以下に、主な橋梁用高性能厚鋼板が出現してきた背景やその特徴、ならびに適用の事例を紹介する。

3.2 高強度鋼板

鋼橋では、高強度の鋼板を用いることで板厚が薄くでき、構造物の軽量化を図ることができる。このため、より経済的な橋、あるいはより大きくて長い橋を実現するために、常に高強度の鋼材が求められてきた。

今日、鋼橋に汎用的に使用される鋼板は、JISに規定されている引張強さ 400N/mm² の一般構造用熱間圧延鋼材 (SS400)、引張強さ 400～570N/mm² の溶接構造用熱間圧延鋼材 (SM400～SM570) および溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (SMA400W～SMA570W) である。その他、長大支間の大規模橋梁には本州四国連絡橋公団規格 (HBS) に規定される引張強さ 690N/mm²～780N/mm² の溶接構造用高強度鋼板 (HT70 (690) ～HT80 (780)) も使用されている。

構造物の大規模化に対応する高強度鋼のニーズは鋼材の使用が始まった時代からあり、戦前には既に永代橋 (1926年竣

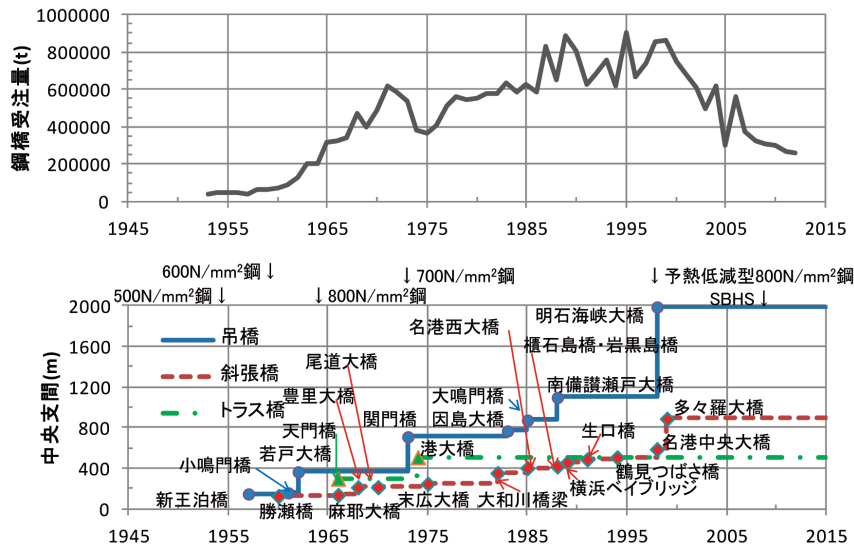
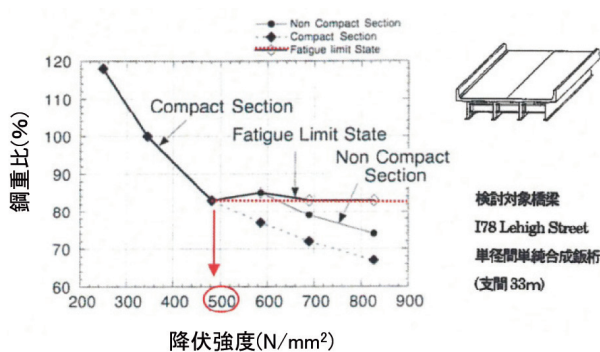
工)、清洲橋 (1928年竣工) の建設で艦船用に開発された引張強さ 620N/mm² 級の低マンガン鋼 (デュコール鋼) が適用されている³⁾。ただし、この高強度鋼は溶接性、じん性などが劣るため、溶接構造に適用されることはなかった。戦後、溶接構造の普及に歩調を合わせ、新たに溶接性に配慮した高強度の鋼板が開発、適用されてきた。戦後のわが国における鋼橋の需要と構造大型化の変遷を図1に示す。橋梁は高強度鋼の特徴を活かしやすい弾性設計 (降伏強度を上限とする設計) が基本であったため、軽量化が求められる長大橋の建設ニーズが高まったこともあって、1970年ごろまでに高強度鋼の適用が進んだ。鋼橋では、一般的な形式であるI形や箱形の桁からなる桁橋を手始めに鋼板の高強度化が進み、1950年代に引張強度 500N/mm² 級が、1960年には引張強度 600N/mm² 級の鋼板の適用が開始された³⁾。その後、トラス橋や斜張橋、吊橋などの長大橋への適用が橋梁分野における高強度鋼開発の主な舞台となったが、1960年代後半までに、鋼板では引張強度 780N/mm² 級まで高強度化が進んだ。当時の高強度鋼は、合金の添加と熱処理の組み合わせにより強度を確保しており、溶接施工には各種の制約があった。1998年完成の明石海峡大橋の補剛桁には、TMCPとCuの析出強化の組み合わせにより、溶接性を高めた予熱低減型 780N/mm² 級鋼板が開発・適用⁴⁾され、予熱温度の大幅な低減により、製作の省力化、溶接部の品質・信頼性の向上が図られている。

現在、水圧鉄管や建築鉄骨では既に 1000N/mm² 級鋼板が適用されている一方で、橋梁に適用される鋼板の最大強度は、1960年代以降、引張強度 800N/mm² 級より上がっていない。これは、一般的な桁橋では、疲労強度や剛性 (たわみ制限) が設計上の問題になるためであり、更なる高強度化のためには材料・構造を含めた何らかの工夫が必須となる。図2は、I形断面を有する鋼橋を対象として、米国基準に基づいて使用鋼材の降伏強度をパラメータとする試設計を実施し、主桁断面の鋼重の変化を調査したものである⁵⁾。本検討によれば、鋼材の降伏強度の増加に伴い鋼材重量は低減するが、降伏強度

表1 主な橋梁用高性能鋼 (厚板)

名称	特性	表記例
① 高強度鋼	引張強さ 570N/mm ² 以上の高強度の鋼材	
② 高じん性鋼	冷間曲げ加工や寒冷地での使用に対応した鋼材	*-5C,-5L,-7C,-7L など
③ LP 鋼板	長手方向に直線的に板厚を変化させた鋼材	*-LP1 など
④ 予熱低減鋼	溶接施工時の予熱温度低減が可能な鋼材	*- EX
⑤ 大入熱溶接対策鋼	大入熱溶接が可能な鋼材	*- EG など
⑥ 耐ラメラテア鋼	板厚方向の強度特性を改善した鋼材	*- Z15,- Z25,- Z35, -Z15S,-Z25S,-Z35S
⑦ 耐候性鋼	大気環境下で、鋼材表面に緻密なさび層が形成され、腐食進展が抑制される鋼材で、マイルドな環境下で無塗装での使用が可能	SMA***W (JIS 耐候性鋼) SMA***W-MOD (ニッケル系高耐候性鋼)
⑧ 極厚鋼板 (降伏点一定鋼)	板厚にかかわらず一定の保証降伏点を有する鋼材	*- H
⑨ 極軟鋼	降伏点の低さと大きな伸び能力を有した鋼材	LY100,LY225

*: オリジナル規格記号 (SM490YB など)、 ***: 強度クラス (400, 490, 570)

図1 戦後の鋼橋の需要と構造大型化の変遷²⁾図2 鋼橋の降伏強度と鋼重の関係⁵⁾

500N/mm²程度を超えると、交通荷重に起因する疲労強度やたわみが設計を支配する要因となり、鋼重低減ができなくなることが示されている。このような背景から近年では、橋梁用鋼材の高性能化は高強度化だけではなく、加工性や構造物の信頼性などをより一層向上させる方向で進化してきている。

3.3 溶接性を改善する鋼板

鋼橋分野において鋼板を桁などの部材へ組立てる接合方法は、1960年代から溶接が主流となっている。接合後は部材の一部となる溶接部についても鋼板と同様に高い安全性・信頼性が要求されるため、溶接作業においては低温割れなどの溶接欠陥が発生しにくく、施工が容易であること、および溶接継手としての強度、じん性、その他の使用性能を満足することが要求される。近年では、予熱作業負荷の軽減、大入熱溶接の適用など、溶接作業を効率化、省力化する技術に注目が集まっており、それらに対応する鋼板が提供されてきている。

3.3.1 予熱低減鋼

溶接欠陥の一種である低温割れを防止するためには、鋼板を予熱することが効果的である。しかし、高強度鋼や板厚が厚い鋼板（厚鋼板）では高温の予熱が必要となり、溶接時の予熱作業負荷が大きくなり、工程上も多くの時間を必要とする。また、高温の予熱は溶接作業の品質確保の阻害要因にもなるため、その解消が強く求められるところである。

一般に、高張力鋼の低温割れ感受性を決める要因としては、鋼材の熱影響部の硬さ、溶接部の拡散性水素量、および溶接部の拘束応力度、が挙げられる。鋼材の低温割れ感受性の改善には、溶接熱影響部の硬さの低減が要求され、化学成分が重要な因子となる。

鋼材の溶接性の判定手段としては、溶接熱影響部の最高硬さに関係する炭素当量 (Ceq) が長い間、溶接性判定の手段とされてきたが、研究の進歩により溶接低温割れに対する総合的な評価指標として溶接割れ感受性指数 (Pc) が提案され、その中の化学成分の項である、下式で計算される溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) が溶接低温割れ感受性の評価に適していることが明らかになった⁶⁾。

$$P_{CM} = C + Mn/20 + Si/30 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + B \quad (\%)$$

鋼道路橋の設計基準である道路橋示方書⁷⁾は、平成8年にP_{CM}に基づいて予熱温度を求めるように改定された。これにより、橋梁用の溶接構造用鋼板が持つべき品質もP_{CM}値で代表されることとなり、鋼材検査証明書（ミルシート）にもP_{CM}の表示が求められることとなった。

図3は道路橋示方書に示されている各鋼種のP_{CM}の標準値とそれから計算される予熱温度を図示したものである。この

図から、鋼板の P_{CM} 値から、板厚に基づいて溶接条件（予熱の要否、温度）を適切に決めることができるようになったことがわかる。また、通常より低い P_{CM} 値の鋼板を使用することにより、溶接時の予熱温度の低減や省略などの作業負荷の軽減が可能となることがわかる。

このように、橋梁における予熱低減鋼板とは、通常の鋼材よりも P_{CM} の低い鋼板であると言える。低 P_{CM} 鋼の製造では、強度を確保しつつ合金元素の量を低減しなければならないが、それを可能にする製造技術がTMCPであり（図4）、TMCP技術が鋼橋の溶接施工の省力化を推進していると言える。

3.3.2 大入熱溶接対策鋼

鋼橋分野では、コスト縮減策として、厚鋼板を用いて補剛材等の材片を極力減らした合理化桁と呼ばれる構造が近年普及してきた。厚鋼板断面の接合の合理化には溶接施工の効率化が欠かせないが、厚鋼板を少ないパス数で溶接できる大入熱溶接が採用される場合がある。鋼橋では、溶接時の入熱量は一般的な材料であるSM490Yの場合10kJ/mm以下に制限されているが、製作工場における多電極サブマージアーク溶接や現場溶接におけるエレクトログラスアーク溶接において、入熱量が10kJ/mmを超える大入熱溶接が適用された例がある。大入熱溶接対策鋼は、このような大入熱の溶接を行って

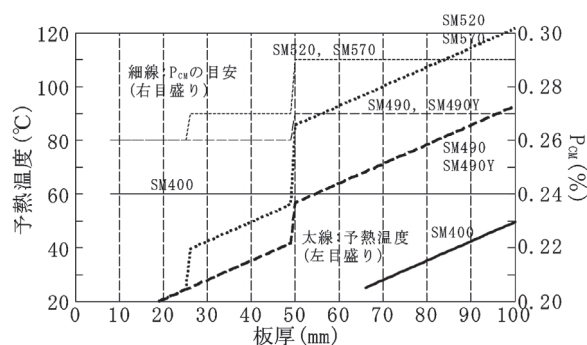


図3 鋼板の P_{CM} と予熱温度

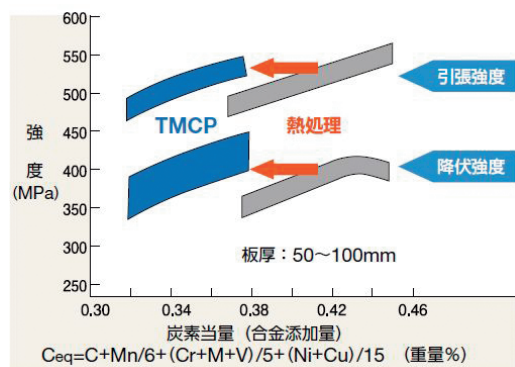


図4 TMCPによる合金元素の低減（イメージ）

も溶接継手の強度とじん性を確保できる鋼材である。

溶接時の入熱が大きくなると、熱影響により溶接熱影響（HAZ）部の結晶が粗大化し、硬さ（強度）とじん性が低下する（図5）。この現象を抑制し、大入熱溶接を行っても所定の品質を確保するための技術が、TiNやTiOなどの微細な粒子を分散させ、結晶の粗大化を抑止するピン止め効果（図6）による結晶粒の粗大化抑制であり、析出の核の作成を補助するTiなどの元素を微量添加することにより組織を微細化する技術が実用化されている⁸⁾。ただし、Tiは、入熱量がある程度以上に大きくなるとピン止め効果を発揮できなくなるので、溶接時のさらなる入熱量増大に対応するため、CaやMgなどの添加により、より高い温度まで効果を保持する技術も開発されており⁹⁾、鋼材側での大入熱溶接に対応する性能も向上し続けている。

3.4 構造物の信頼性を向上させる鋼板

構造物の大型化やその利用技術の進歩に伴い、構造物の信頼性を高めることがこれまで以上に求められるようになってきている。以下では、構造物の信頼性を向上させるための高性能鋼板を紹介する。

3.4.1 高じん性鋼

鋼橋に一般的に用いられるSM490Yでは、試験温度0℃でのシャルピー吸収エネルギーの保証レベルにより、A（規定なし）、B（27J以上）、C（SM520；47J以上）の3種類があり、道路橋では板厚16mm以下はA、16以上40mm以下はB、40mm以上はCと板厚により使い分けられている。

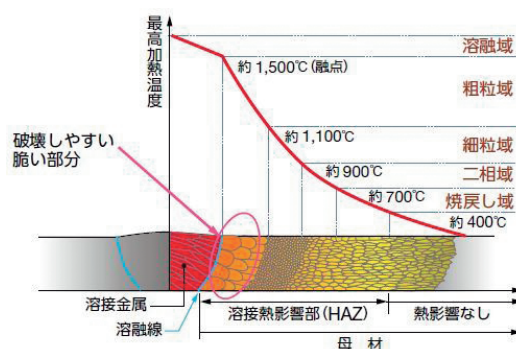


図5 溶接熱影響部の模式図

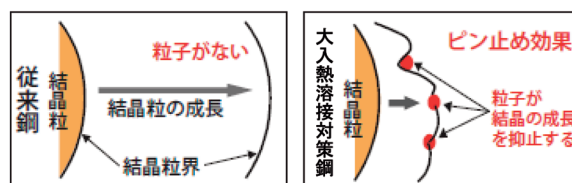


図6 ピン止め効果

わが国で製造される鋼板は、一般に規格で保証される値よりも優れたじん性を有しているが、通常とは異なる使用条件、例えば冷間加工を受ける鋼板や、温度の低い環境での使用においては、鋼板のじん性が低下することがあるので、使用条件に合わせた適切なじん性を有する鋼板を使用する必要がある。鋼板のじん性は通常シャルピー衝撃試験で得られる吸収エネルギー値で評価する。鋼橋において、じん性が優れた鋼材とは、使用する条件でシャルピー吸収エネルギーが高く、エネルギー遷移温度あるいは破面遷移温度が低い鋼材のことである。

図7にシャルピー吸収エネルギーと脆性破面率の遷移曲線のイメージを示す。鋼板のじん性は、その鋼材固有の温度より低くなると急激に低下する。道路橋示方書では、「気温が著しく低下する地方では鋼種の選定に特別な配慮をしなければならない」とされている。国内では北海道で最低使用温度 -40°C が想定される地域があり¹⁰⁾、このような使用条件による要求じん性レベルに応じた鋼板が製造されているが、溶接部も母材の要求値と同じじん性が要求されるため、溶接によるじん性の低下を見込み、溶接後も要求されるじん性を確保できる高じん性鋼が提供されている。また、海外においては、

国内の使用条件を超える -50°C の極寒地に鋼橋が建設された事例もあり、高じん性鋼の利用と高度な溶接施工技術によって溶接継手部の要求性能を満足させた例がある¹¹⁾。

また、溶接作業の省略による製作コストの低減や耐震性の向上などを目的として、鋼板を冷間曲げ加工して断面を構成する例がある(図8)。このような用途では冷間曲げ加工によりじん性の低下が起こるため、許容される冷間曲げ加工の範囲は厳しく規制されてきた。例えば、道路橋示方書では鋼板の冷間曲げ加工に関して、内曲げ半径が板厚の15倍(15t)に相当する3%の塑性ひずみを導入した場合、鋼材のじん性が相当低下するとの試験データに基づいて、冷間曲げ加工半径は15t以上とされてきた。しかし、図9に示すような、高じん性鋼による塑性ひずみの程度と鋼材のじん性低下(シャルピー吸収エネルギーの低下、破面遷移温度の上昇)の関係の定量的なデータが整備された¹²⁾ことを受け、平成8年の改定で、鋼材が保有すべきじん性(27J以上@ 0°C 、かつ破面遷移温度が 0°C 以上)を明確にした上で、加工前に鋼材が保有すべきじん性が明らかにされた。すなわち曲げ加工方向のシャルピー吸収エネルギーが150Jあるいは200J以上あり、時効脆化に影響する鋼中の窒素(N)量が60ppm以下であることが確認されれば、板厚の7倍、さらに5倍の内曲げ半径までのシャープな冷間曲げ加工が可能とされた。

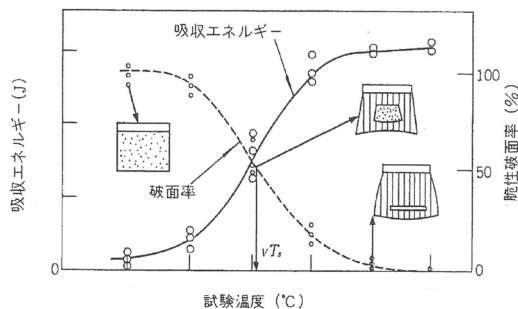


図7 鋼材の衝撃特性

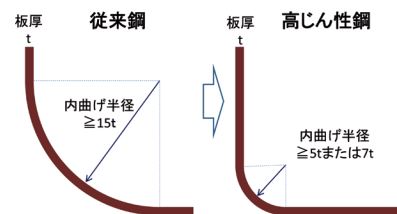


図8 鋼板の冷間曲げ加工

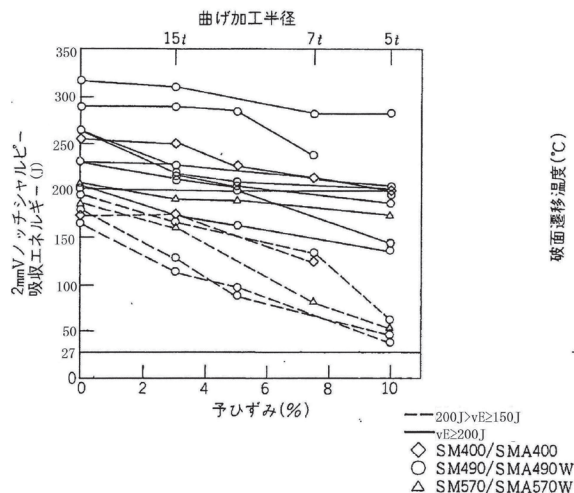
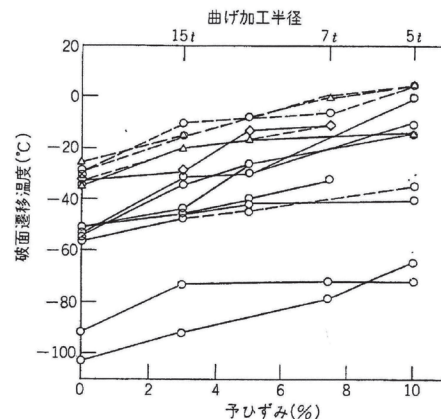


図9 予ひずみによる鋼板じん性の低下



3.4.2 耐ラメラテア鋼板

近年、鋼橋の大型化にともない板厚は増大し、複雑な構造の溶接継手が採用される例が増えてきている。大型の吊橋や斜張橋の主塔、あるいは鋼製橋脚において、構造上の制約から板厚方向に引張力を受ける場合があり、このような部材では溶接部またはその周辺にラメラテアによる割れが発生する可能性がある。ラメラテアとは溶接による影響で板厚方向に働く残留応力と水素の侵入の影響で、圧延により伸展した鋼中のMnSを主体とする非金属介在物を起点として層状に割れが発生する現象（図10）で、溶接割れの一種として知られている¹³⁾。

耐ラメラテア鋼はラメラテアを発生しにくくした鋼板であり、製鋼時に脱硫、脱ガス処理を行ってラメラテアの発生の起点となる介在物を少なくし、板厚方向の絞り値（ ϕz ）を高めている。とくに、圧延により延ばされたMnS系介在物がラメラテアの起点となることが多いので、鋼材の硫黄（S）量がラメラテア感受性の目安となる。図11はS量とZ方向引張り試験における試験片の断面収縮率（絞り値； ϕz ）の関係を示したものであるが、S量と ϕz には相関関係があることが分かる。JIS G 3199では耐ラメラテア鋼として表2に示すように、 ϕz が15、25、35%の3等級に分類されている。また付属書で特別品質規定として、クラス毎にS量はそれぞれ0.010%以下、0.008%以下、0.006%以下とされている。

鋼橋における耐ラメラテア鋼の選定は、一般に土木学会の提案¹³⁾で示されているラメラテア感受性指数Zにより行う。溶接サイズ、継手形状、曲げ拘束度、引張拘束度によりそれぞれ求められる指数値（ $Z_A \sim Z_D$ ）を足し合わせて得られるラメラテア感受性指数Zから、必要な耐ラメラテア鋼のクラスが選定できる。

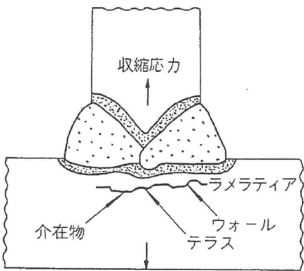


図10 ラメラテア

ラメラテアは鋼材の改質によらずとも、設計により板厚方向の応力を低減する方法、低水素系溶接材料の適用および予熱の実施などの溶接条件、施工方法の対策により回避することも可能である。しかし、構造物の信頼性を高めるために、材料面での対策を取ることも重要であり、橋梁設計の合理化の推進に歩調を合わせ、耐ラメラテア鋼の必要性は増大している。

3.5 維持管理の手間を軽減する鋼材

橋梁ストックの増大とその高齢化を受け、その維持管理費用の増大が社会的に大きな問題になりつつある。この観点から、鋼橋の計画・建設から供用が終了するまでの防食にかかる費用（防食LCC：Life Cycle Cost）を低減する技術が求められている。

鋼橋における維持管理の負担を軽減する鋼材の代表は耐候性鋼である。現在、新しく建設される鋼橋の25%程度に耐候性鋼が適用され¹⁴⁾、塗装を省略することで防食LCCの低減に貢献してきている。耐候性鋼は、1930年代に米国で開発されたCOR-TEN鋼が起源で、Cu、Cr、Niなどを微量添加することで、鋼材の表面に緻密なさび層を形成し、以降のさびの進行を抑制するものである（図12）。米国とは気候が異なり、高温多湿であることを踏まえて、1955年頃から日本独自の成分系の耐候性鋼の開発が開始され、1968年にJIS規格化（SMA）

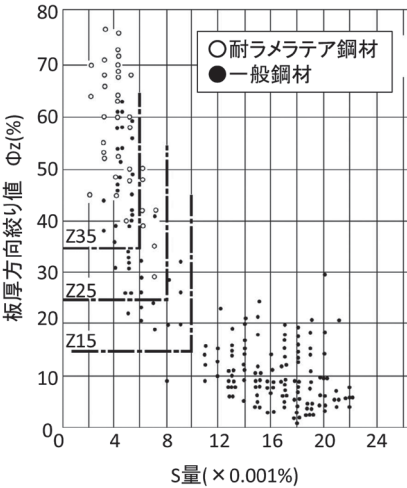


図11 S量と板厚方向絞り（ ϕz ）の関係

表2 耐ラメラテア鋼のクラス（JIS G 3199）

クラス番号	板厚方向の絞り値		S量(%)	
	3個の平均値	個々の試験値	*(溶鋼分析値)	
Z15(S)	15%以上	10%以上	0.010以下	(受け渡し当事者間の協定によって適用する)
Z25(S)	25%以上	15%以上	0.008以下	
Z35(S)	35%以上	25%以上	0.006以下	

されたが、実際の鋼橋への適用が進むのに伴って成分系に改良が加えられ、1983年のJIS改正で現在の成分系が確立された(表3)。SMAには無塗装仕様(W種)と塗装仕様(P種)の2種類があるが、現在では橋梁には基本的にW種(SMA-W)のみが適用されている¹⁵⁾。

SMA-Wは、溶接性に配慮して成分系が決められているため、適用できる環境には制限がある。具体的な適用条件や設計施工上の留意事項を明確にするため、全国41橋での大規模な曝露試験を含む9年に及ぶ官民の三者共同研究が1981年から実施された¹⁶⁾。その研究の成果として、飛来塩分量が0.05mdd(mg/dm²/day)以下の環境での使用が推奨されることとなり、海岸線からの距離(離岸距離)により使用可能な環境かどうかを判断する指標が示された(図13)。現在、道路橋示方書などの設計基準でもこの判断基準が適用されている。

また、湿潤状態が長く続く場合は腐食の進行が抑制されないことも明らかになっているので、構造設計にあたっては水はけのよくなる構造になるよう留意するとともに、伸縮装置からの漏水などにより湿潤状態となりやすい桁端部については塗装するなどの構造的な工夫も施されている。

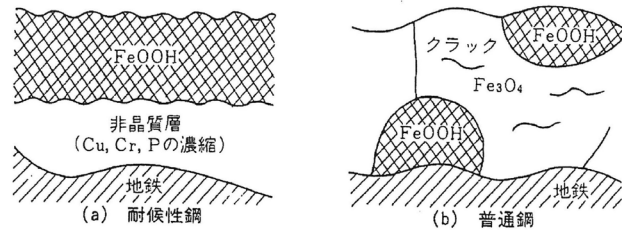


図12 さびの模式図

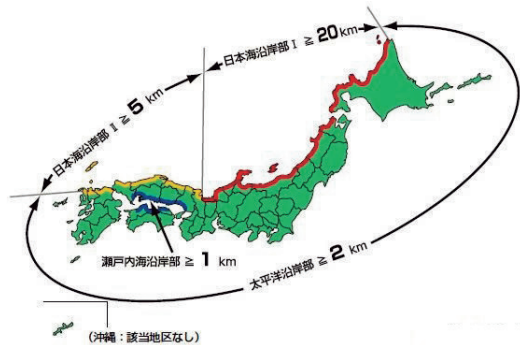


図13 適用可能地域

わが国は海岸部に人口・産業が集積していることから、離岸距離の短い地域での橋梁建設計画も多い。そのような地域では飛来塩分量が高く、SMA-Wは無塗装で使用できない。一方で、維持管理コストの縮減ニーズの高まりを受け、耐塩害性を改善した新しい耐候性鋼が求められていた。それを受けて開発された鋼板がニッケル(Ni)系高耐候性鋼である。この鋼板はNiを1~3%含み、Crを無添加としている点に特徴があるが、Ni以外にCu、Mo、Tiなども微量添加されている。耐食性向上のメカニズムは、ナノレベルの組織解析など¹⁷⁾で明らかにされている。それによれば、Niは内層さびに濃縮してさび層を緻密化し、加えてNiを含むさび層が飛来塩分中のNa⁺を吸着して有害なCl⁻を地鉄から遠ざけ、耐食性を高める(図14、図15)。Ni系高耐候性鋼は3% Ni-Cu系が最初に開発されたが、Niの添加量やその他添加元素の種類によっていくつかの種類があり(表4)、適用環境に応じて使い分けられている。

沿岸部のような飛来塩分量が極めて多い環境下では、Ni系高耐候性鋼であってもその性能が発揮できない。このため、

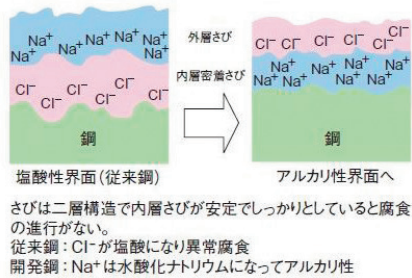


図14 Ni系高耐候性鋼のさびの模式図

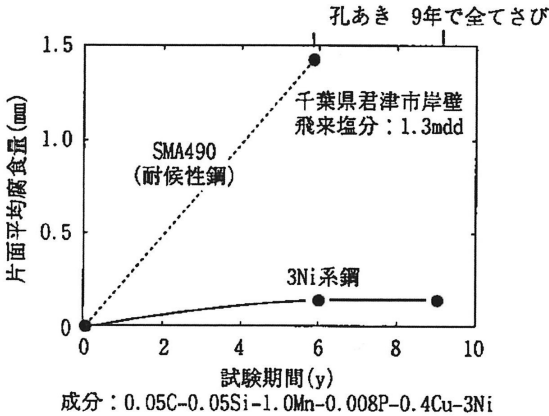


図15 Ni添加の効果

表3 耐候性鋼と普通鋼の成分の比較(例)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
SMA490W	≤0.18	0.15 - 0.65	≤1.40	≤0.035	≤0.035	0.30 - 0.50	0.45 - 0.75	0.05 - 0.30
SM490Y	≤0.20	≤0.55	≤1.65	≤0.035	≤0.035	—	—	—

塗装を前提として、Snを微量添加することで塗膜の損傷部からのさびの進展を抑制することで塗装の塗り替え周期を延長することを可能とする鋼材が開発された¹⁸⁾。Sn添加の効果については、塗装欠陥部における腐食現象の電気化学的な考察に基づいて検討されており、SnがCl⁻の濃縮するアノード側（鉄が溶出する側）の反応を効果的に抑制することによってされている。曝露試験や促進試験の結果（図16）から、Sn添加鋼の適用により塗装寿命が延びることを期待できることが報告されており、橋梁に要求される100年の供用期間で普通鋼に比べてLCCを低減することが可能との試算がある。

4 橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS)

SBHS (Steels for Bridge High performance Structure) は、鋼橋の建設コスト縮減のために産学連携研究プロジェクトの成果に基づき開発された高性能鋼板である。1992年の米国における橋梁用高性能鋼材の研究に触発され、1994年から産学連携による橋梁用高性能鋼の研究が開始されたのがその始まりである¹⁹⁾。この研究では、鋼橋の要求性能に着目した鋼材への要求性能が示されており、それを受けて鋼材の規格化が行われたことが大きな特長である。例えば、降伏強度については国内一般橋梁の建設に最も合理的であるとされる500N/mm²、高強度要求への対応を考慮した700N/mm²が提案され、規格化の際は、これに加えて現在の鋼橋での使用量が最も多いSM490Yの降伏点を上昇させた400N/mm²を加

えた3水準が設定された。また、ここまで述べてきた高性能鋼の技術を利用して、強度以外のじん性、溶接性、冷間曲げ加工性、耐候性、更には耐ラメラテア性などの要求性能が検討・提案され¹⁹⁾、鋼材の規格へと反映されている。

この鋼材は、東京ゲートブリッジでの本格的な適用に向けて、2004年に（社）日本鉄鋼連盟製品規定「橋梁用高性能鋼材 (BHS500、700)」として規格化された。その経験を基に、2008年にSBHS500とSBHS700（いずれも数値は降伏強度）が新たなJIS規格 (JIS G3140-SBHS) として制定され、2011年にSBHS400が追加された。SBHSの性能を従来鋼 (SM) と比較したものを表5に示す。多様な性能が規格化されていることがわかるが、この鋼材の実現のベースとなったのは、これまでも述べたようにTMCP技術であり、組織の微細化により強度、じん性、その他性能を同時に満足させることが可能となり、橋梁に必要とされる様々な性能に対応可能となっている。

SBHSはこれまでの橋梁用高性能鋼の集大成とも言える鋼材であり、従来鋼に比べて高い性能を有するSBHSを鋼橋に適用することで、設計の合理化や製作の効率化などを図り、橋梁建設コストの縮減や構造物の信頼性向上を図ることが期待される。SBHSは、長大橋から一般の桁橋まで、様々な形式の橋で十数橋の適用実績を有しており、今後の適用拡大が期待される²⁰⁾。

5 今後の橋梁用高性能鋼の開発

過去、構造物の大型化・合理化、使用環境厳格化などへの対応から新しい技術が必要となり、鋼材に対する品質特性の要求が具体化され、それに応えて行くことで鋼材の高性能化は進展してきた。鋼橋における競争力強化、安全性・信頼性の向上、コスト（初期および維持管理）の縮減などの強い要望は今後も変わることは無いと考えられるので、新たな橋梁用高性能鋼の開発・適用は今後も終わることなく続いていくものと思われる。しかしながら、どんなに優れた素材であっ

表4 Ni系高耐候性鋼の化学成分の例

種類の記号	化学成分
SMA400W-MOD	3%Ni-Cu系
SMA490W-MOD	2.7%Ni-Cu-Ti系
SMA570W-MOD	2.5%Ni-極低炭素-Cu系
	1.5%Ni-Mo系
	1%Ni-Cu系

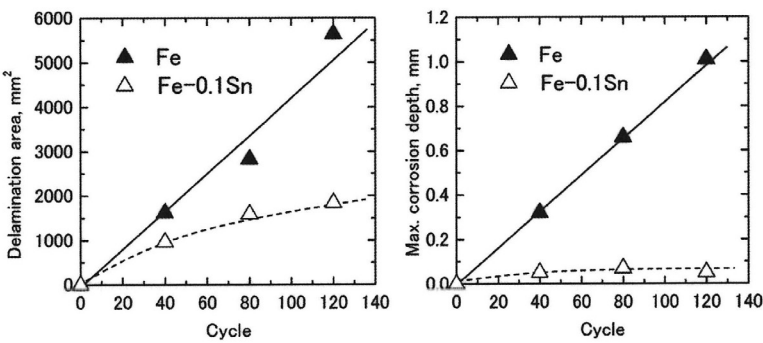


図16 塗装欠陥部の広がりに対するSn添加の効果（エポキシ樹脂塗装鋼板：SAEJ2334試験）

表5 SBHS と従来鋼との主な性能の比較 (板厚50mm の場合)

		490N/mm ² 級鋼		570N/mm ² 級鋼		780N/mm ² 級鋼	
		SBHS400 SBHS400W	従来鋼 (SM490Y /SMA490W)	SBHS500 SBHS500W	従来鋼 (SM570 /SMA570W)	SBHS700 SBHS700W	従来鋼 (HT780*)
強度	降伏点 (N/mm ²)	≥400	≥335	≥500	≥430	≥700	≥685
	降伏点 一定	○ (6-100mm)	△ (≥40mm)	○ (6-100mm)	△ (≥40mm)	○ (6-75mm)	△ (≥40mm)
加工性 溶接性	高じん性	○ (100J@0℃: 圧延直角方向)	△ (47J@0℃: 圧延方向)	○ (100J@-5℃: 圧延直角方向)	△ (47J@-5℃: 圧延方向)	○ (100J@-40℃: 圧延直角方向)	△ (47J@0℃: 圧延方向)
	予熱低減	○ (予熱なし)	△ (80℃)	○ (予熱なし)	△ (80℃)	○ (50℃)	△ (100℃)
耐食性	耐候性	○ (SBHS400W)	○ (SMA490W)	○ (SBHS500W)	○ (SMA570W)	○ (SBHS700W)	—

○：通常仕様で対応，△：通常仕様では未対応

*:HBS:本州四国連絡橋公団規格

でも、性能を最大限に引き出す設計・施工・維持管理のそれぞれの技術の融合がなくては高性能鋼もその十分な性能を発揮することができないことは自明である。鋼橋の関係者（研究者、発注者、コンサルタント、ファブリケーター、鋼材メーカー）が一丸となって、鋼橋の機能向上、高性能化に向けた連携しての技術開発がこれまで行われてきた。その結果、SBHSという橋梁用途の高性能鋼が実用化され、現在はその性能を最大限に活用するための設計・施工手法の確立が関係者の連携のもと進められている。高性能鋼の開発におけるこれらの連携の重要性は今後も変わらないものと考えている。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟:高性能鋼の概要(橋梁向け)パンフレット,(2015)
- 2) 菅野良一:鋼構造とそれを支える鋼材の発展と今後の展望,第225・226回西山記念技術講座,日本鉄鋼協会編,(2016),21.
- 3) 日本橋梁建設協会:日本の橋—鉄・鋼橋のあゆみ—,朝倉書店,(2012)
- 4) 岡村義弘,糟谷正,山場良太,田中睦人,為広博:Cu析出強化型予熱低減HT780鋼の開発,鋼構造論文集,1(1994),53.
- 5) 本間宏二,田中睦人,松岡和巳,糟谷正,川崎博史:橋梁用高性能鋼BHSの利用技術開発,新日鉄技報,387(2007),47.
- 6) 日本溶接協会:WES3001,(1996)
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説,II.鋼橋編,(2012)
- 8) 児島明彦,糟谷正,鶴田敏也,南邦明:橋梁製作におけるSM570鋼へのエレクトロガスアーク溶接適用に関する研究,土木学会論文集A,63(2007)1,1.
- 9) 児島明彦,清瀬明人,植森龍治,皆川昌紀,星野学,中島隆雄,石田浩司,安井洋二:微細粒子によるHAZ細粒高韌化技術“HTUFF®”の開発,新日鉄技報,380(2004),2.
- 10) 北海道土木技術会:北海道における鋼道路橋の設計および施工指針,(2012)
- 11) 宮田明,船木正志,山本裕一,工藤光弘,加藤千明:カザフスタン共和国「イルティッシュ河橋梁」建設工事,石川島播磨技報,(2001),148.
- 12) 本間宏二,三木千壽,征矢勇夫,笹尾英弥,奥村健人,原修一:冷間曲げ加工を受けた構造用鋼材の歪時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究,土木学会論文集,570(1997)I-40,153.
- 13) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会:耐ラメラテア鋼の土木構造物への適用,土木学会誌,70(1985)8,61.
- 14) 日本橋梁建設協会:耐候性鋼橋梁実績資料集(2014年度受注まで),第21版,(2015)
- 15) 高木優任,鈴木克弥,玉越隆史,窪田真之:耐候性鋼橋の変遷,橋梁と基礎,49(2015)10.
- 16) 建設省土木研究所,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),(1993)
- 17) 宇佐見明,紀平寛,楠隆:耐塩害性を高めた3%Ni耐候性鋼,新日鉄技報,377(2002),19.
- 18) 菅江清信,上村隆之,安藤隆一,都築岳史:塗装周期延長耐食鋼(CORSPACE®)の開発と実用化,新日鉄住金技報,400(2014),79.
- 19) 三木千壽,市川篤司,楠隆,川端文丸:橋梁用高性能鋼材(BHS500,BHS700)の提案,土木学会論文集,738(2003)I-64,1.
- 20) 安藤隆一,田中睦人,高木優任,本間宏二:新日鉄住金(株)の橋梁用高降伏点鋼板SBHS 500,新日鉄住金技報,400(2014),114.

(2016年9月12日受付)