

世界をつなぐ日本の 橋梁用高強度鋼線の製造技術

新興国では今、交通インフラが急速に整備されつつあり、吊橋や斜張橋などの長大橋プロジェクトが数多く進行している。これらの大型プロジェクトには日本の高強度橋梁ケーブル用線材が採用されている。世界で日本製品が選ばれている理由と、その開発動向について紹介する。

トルコ・イズミット湾横断橋。メインケーブルには日本から直径5.91 mm、引張強度1770 MPa級橋梁ケーブル用線材2万 tが納入された(図1)。

(写真提供:東京製鋼(株))

世界の大型プロジェクトに採用される 日本製ケーブル用線材

2016年7月、トルコで建設が進められてきた「イズミット湾横断橋」が開通した。全長2,682 m、センタースパン1,550 mにおよぶ、世界第四位の規模となる長大吊橋である(図1)。

イズミット湾横断橋はトルコ西部に位置するイズミット湾の南北を結び、これまでフェリーで60分かけて対岸へ移動していたものが、たった6分で車での移動が可能となる。また今後この橋を含めた高速道路が開通すれば、トルコ最大の都市、イスタンブールと第三の都市、イズミル市への移動は最大10時間から3.5時間へと、劇的に短縮されることになり、地域活性化が期待されている。現地での式典にはトルコのレジェップ・タイイップ・エルドアン大統領も出席し、最後のボルトを締めた後、「世界4位の橋を誇りに思う。記念碑的な芸術作品だ」と褒め称えた。

橋全体での使用鋼材量は約8万3,500 t(東京スカイツリー®の倍に相当)、使用コンクリート量は約49万6,000 tにおよぶ。このような大型プロジェクトに対して、日本、中国、韓国の激しい受注合戦が繰り広げられたが、世界有数の地震国であるトルコは、同じく地震国である日本の施工メーカー、(株)IHIインフラシステムの

吊橋架設の実績を評価した。さらに吊橋のメインケーブルには、直径5.91 mm、引張強度1770 MPa級の日本製橋梁ケーブル用線材約2万 tが採用された(図2)。明石海峡大橋をはじめとする長大橋における実績と技術が高く評価されたものといえる。

一方、2016年9月、中国では香港、マカオ、広東省珠海市の三地をつなぐ「港珠澳大橋(ホンコン・ジュハイ・マカオ・ブリッジ)」の海上橋が完成し、世界の注目を集めた。橋は全長22.9 kmにおよび、海上橋としては世界最長となる(図3)。

このプロジェクトは広東省・香港・マカオが共同で開発を進めてきたもので、海上橋と人工島、海底トンネルが一体になった、大型海上自動車道が建設されている。これまで香港～珠海間の移動は、陸路で3～4時間、航路で約1時間かかっていたが、開通によって車で30分ほどに短縮される(開通は2017年予定(2016年9月現在))。

海上橋は3つの橋で構成され、このうち江海直達船航道橋と青洲航道橋の斜張橋部1.2 kmに直径7 mm、引張強度1870 MPa級の日本製橋梁ケーブル用線材が採用された。この線材を使って加工された高強度鋼線を使用することで、ケーブル重量が低減された。

近年、中国や韓国製ケーブル用鋼線の台頭が著しいなか、

■トルコ・イズミット湾横断橋に採用された正六角形ストランド(図2)



亜鉛めっき鋼線127本で構成されている。
(写真提供:東京製鋼(株))

■吊橋センタースパンTOP10(図4)

順位	橋名	センタースパン /m	国名	完成年
1	明石海峡大橋	1,991	日本	1998
2	舟山西候門大橋	1,650	中国	2009
3	グレートベルト・イースト橋	1,624	デンマーク	1998
4	イズミット湾横断橋	1,550	トルコ	2016
5	李舜臣大橋	1,545	韓国	2013
6	潤揚長江公路大橋	1,490	中国	2005
7	南京長江第四大橋	1,418	中国	2012
8	ハンバー橋	1,410	英国	1981
9	第三ボスボラス橋	1,408	トルコ	2016(予定)
10	江陰長江大橋	1,385	中国	1999

■中国・港珠澳大橋 (ホンコン・ジュハイ・マカオ・ブリッジ) (図3)



斜張橋部に直径7 mm、引張強度1870 MPa級の日本製橋梁ケーブル用線材が採用された。
(写真提供:新日鐵住金(株))

港珠澳大橋で日本製ケーブル用線材が選ばれた理由として、ワイヤメーカーでの熱処理が不要で、かつ太径の線材を製造できる事が挙げられる。港珠澳大橋の斜張橋部では直径7 mmの鋼線が採用されたが、高度な熱処理技術を保有する日本は太径線材を安定した品質で製造することができる。これまでの実績や納入体制に加え、品質が重視されて、今回、日本製ケーブル用線材が採用されるに至った。

求められる橋梁ケーブル用鋼線の高強度化

長大橋に使用されるケーブルには、炭素を0.8%程度含有させた高炭素亜鉛めっき鋼線が使用されている。長大橋ケーブルで

は主塔間距離の増加に伴って自重が増加し、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。このためメインケーブルに高強度の鋼線を用いれば、ケーブル断面や本数が減少し、架設工事の効率化、主塔高さの低減や工期短縮等にも貢献する。そのためメインケーブルに使用される高炭素亜鉛めっき鋼線は橋の仕様を決める重要な部材であり、長大化や設計自由度の観点から高強度化が求められている。

海外および日本の長大橋には、長年にわたり引張強度1570 MPa級の鋼線が使用されてきたが、センタースパン1,991 mという世界最大の吊橋である明石海峡大橋には1770 MPa級鋼線が採用された。明石海峡大橋のセンタースパンは現在においても世界一であり、いまだこの記録は破られていない(図4)。

拡がるPWS工法によるケーブル架設

メインケーブルの架設方法には、亜鉛めっき鋼線を現場で一本ずつ糸をつむぐように架設していくAS(Air Spinning)工法と、事前に工場で亜鉛めっき鋼線を束ねてストランドとし、これを現場で引き出すPWS(Parallel Wire Strand)工法がある。

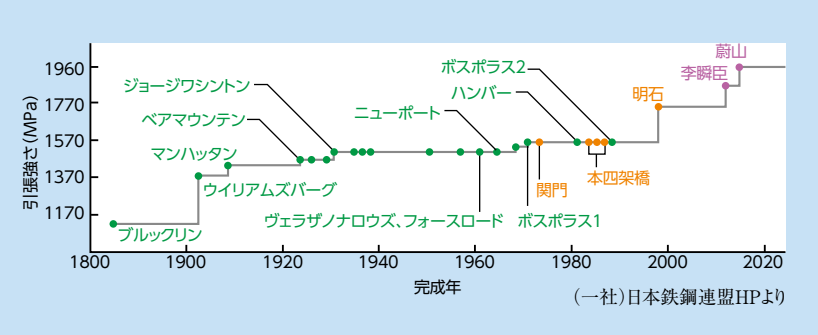
いずれの工法でも亜鉛めっき鋼線はよらずに架設されるが、PWS工法の場合は鋼線の平行(Parallel)性がAS工法に比べて維持でき、鋼線が持つ機械的性質を100%発揮できるケーブルとなっている。そのため直線性が必要となり、一般的な亜鉛めっき鋼線の製造では実施しない直線加工工程が追加されている。従来はAS工法が主流であったが、品質の安定化やケーブル架設の短縮から、PWS工法が多くの吊橋で採用されている。トルコ・イズミット湾横断橋ではトルコ国内初となるPWS工法が採用された。



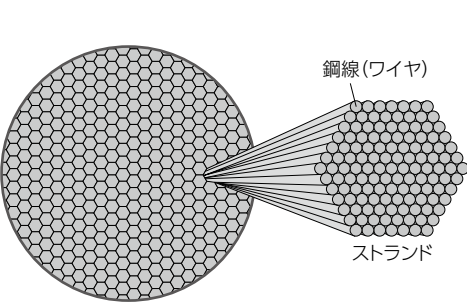
PWS工法は、事前に工場で亜鉛めっき鋼線を束ねてストランドとし、リール巻きた状態で輸送し、現地で引き出す。

(出典:「明石海峡大橋 ケーブル工事 CABLE WORK OF AKASHI KAIKYO BRIDGE」)

■橋梁ケーブル用鋼線の強度の変遷(図5)



■橋梁ケーブルの断面(図6)

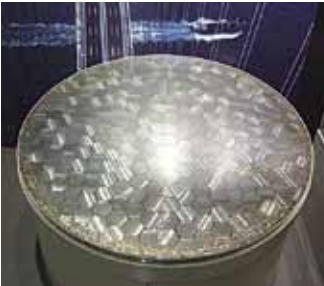


■橋架ケーブル用鋼線の主要特性比較(図7)

項目		1570 MPa級	1770 MPa級	1960 MPa級
線材	主成分	C(%)	0.75 ~ 0.80	0.80 ~ 0.85
		Si(%)	0.12 ~ 0.32	0.80 ~ 1.00
		Mn(%)	0.60 ~ 0.90	0.60 ~ 0.90
			0.30 ~ 0.60	
亜鉛めっきワイヤ	機械的性質	引張強さ(MPa)	1570 ~ 1770	1770 ~ 1960
		耐力(MPa)	≥ 1160(0.7%全伸び)	≥ 1370(0.8%全伸び)
		伸び(%)	≥ 4	≥ 4
		巻き付け(3d)	折損なし	折損なし
	Zn付着性	ねじり(回)	≥ 14	≥ 14
		Zn付着量(g/m ²)	≥ 300	≥ 300
		Zn付着性(5d 巻き付け)	剥離なし	剥離なし
		フリーコイル径(m)	≥ 4	≥ 4

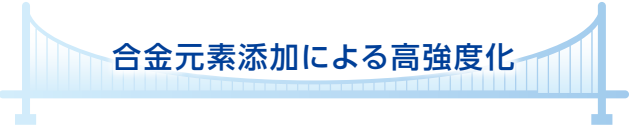
注：線径5 mmの場合

(一社)日本鉄鋼連盟HPより



明石海峡大橋のメインケーブルの断面(直径1,122 mm)。
(写真提供:東京製鋼(株))

最近では1870 MPa級鋼線が採用されているほか、世界最強となる1960 MPa級鋼線も実用化された(図5)。1960 MPa級鋼線のメインケーブルへの適用拡大はこれからとなるが、適用した場合の優位性は顕著であり、例えば明石海峡大橋では直径5 mm、引張強度1770 MPa級鋼線を127本束ねたストランドを、290本束ねてメインケーブルがつくられたが(図6)、このケーブルを1960 MPa級の鋼線に置き換えた場合、ストランド総本数は30本減少し、ケーブル重量は5,000 t減少、工期は3か月短縮できるという試算も出ている。高強度化による効果は大きく、今後の採用動向が注目されている。



高炭素亜鉛めっき鋼線の高強度化には、靱性および延性を確保しつつ高強度化を図ることが重要となる。高強度化によって靱性および延性が劣化する傾向にあり、延性が低下すると、ねじり変形時に伸線方向に沿って縦割れ(亀裂)が生じるデラミネーションを起こす場合がある。通常、亜鉛めっき鋼線は材料メーカーで熱間圧延された線材を、ワイヤメーカーで再加熱、オーステナイト域まで昇温し、550~600℃程度の溶融鉛浴中に浸漬するパテントリングを施し、パーライト組織をつくりこむ。その後、伸線工程を経て、溶融亜鉛めっき処理される。

亜鉛めっき鋼線の高強度化を図る手法として、主に1.素線強

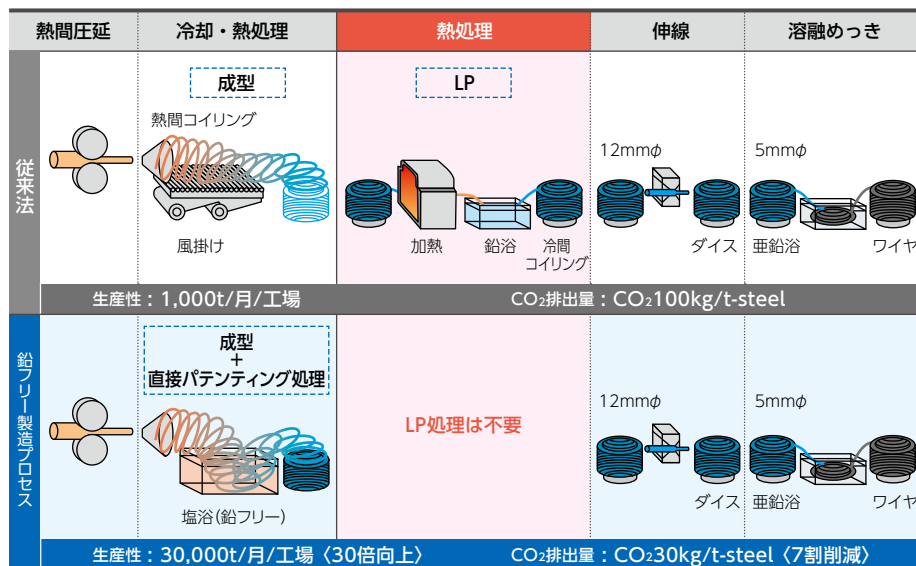
度の向上、2.伸線加工の減面率の増加、3.溶融亜鉛めっき処理での強度低下防止が挙げられる。強度と延性の確保のためには特に1と3が重要となる。

1の素線の強度向上について、パーライト組織はセメンタイト、フェライトからなるラメラ(層状)構造となるが、この高強度化にSiの添加による固溶強化やCrの添加によるラメラ間隔の微細化が有効となっている。特にSiは1%の添加で約100 MPaの強度向上が期待できるなど、その効果は大きい。この他、VやC、Mn等も高強度化に寄与する。

3の溶融亜鉛めっき処理時の強度低下防止については、溶融亜鉛めっき工程において、伸線加工された鋼線は450℃程度の溶融亜鉛の中を通して亜鉛めっきされる。加工を受けた鋼線は加熱されるとパーライト組織中のセメンタイトが球状化し、狭いラメラ間隔を持った相が分解し、引張強度の低下が生じる。このような強度低下の抑制には、SiやCrの添加が有効であることがわかっている。特にSiはセメンタイトとフェライトの界面に濃化する性質があり、Si量が増えると界面に集まったSiがセメンタイトの球状化を抑制することがわかっている。

これまで主にSiやC添加量を増加させることで高強度化が図られてきたが、特にSiについては従来の1570 MPa級の橋梁用鋼線で0.12~0.32%だった添加量が、1770 MPa級で0.8~1.0%、1960 MPa級で1.0~1.2%に増加している(図7)。

■従来法と鉛フリー製造プロセスの工程比較 (図8)



(資料提供:新日鐵住金(株))

環境負荷を低減するプロセス開発

近年、新興国でのインフラ整備に伴い、垂鉛めっき鋼線の需要が増えており、これに対応し高品質で高強度な鋼線の供給量を増やしていくためには、従来の方法に捉われない製造技術の改良が必要となっている。

通常、垂鉛めっき鋼線はワイヤメーカーで鉛パテンティング(LP, Lead Patenting)処理が行われるが、LP処理は生産性が低いうえに、鉛を使用するため環境負荷低減が課題となっている。

そこでLP処理に替わって、塩浴処理を行う「直接パテンティング処理」を採用した鉛フリー製造プロセスが開発された(図8)。塩浴処理は従来から使用されてきた技術であるが、橋梁用に最適化し、適用された。

開発されたプロセスでは、線材メーカーにおいて熱間圧延直後に塩浴処理が実施される。高強度線材はコイルの状態では塩浴処理されるため、冷却中に温度ムラが生じやすく、LP材と比べて強度や組織がバラつきやすい。また高Si添加鋼であるため、コイル表層に有害なベイナイト組織が生成し、延性が安定しなかった。

そこで圧延直後に強水冷することでコイル内の組織のバラつきを低減させることに成功し、またBやTiの添加によりベイナイト組織の生成を抑制し、鋼線の延性を向上させることが可能となった。この技術を用いて製造した垂鉛めっき鋼線は、橋梁ケーブル用鋼線として必要な基本特性を持ち、特にねじり特性は

長手方向で安定的にデラミネーションの発生がなく、良好である。またクリープ特性、水素脆化感受性はLP材と同等であることが確認されている。

この技術を導入することによって、熱処理工程の生産性が向上するとともに、ワイヤメーカーにおける鉛フリー化とCO₂排出量の大幅削減を実現した。また鋼線の延性を確保しつつ、熱処理工程の線径制約がなくなることで、強度と線径の製造範囲が拡大した。このような特性からケーブル本数削減効果が得られ、メインケーブル架設作業工期の大幅な短縮を図ることができる。同技術は第47回(平成26年度)市村産業賞「本賞」を受賞した。トルコ・イズミット湾横断橋や中国・港珠澳大橋では、この技術が適用されている。

近年、海外において長大橋の建設が活況を迎えており、特にモータリゼーションが進む中国では、長江を中心に多数の橋梁の建設が予定されている。その数は大小の橋を含め数百とも言われ、今後も橋梁ケーブルを大量に使用する案件が目白押しである。最近、コストで強みを持つ韓国や中国の線材メーカーの追い上げは著しく、日本は技術で常に先を走っていかねばならない。靱性および延性を確保しつつ高強度化を進めてきた日本の橋梁用高強度鋼線の製造技術は優位性を発揮しており、さらに環境負荷低減型プロセスの開発等、先進的な技術開発で他をリードしている。今後、実用化された世界最強の1960 MPa級鋼線の採用動向も含めて、世界の長大橋プロジェクトから目が離せない。

●取材協力 新日鐵住金(株)、東京製鋼(株) ●文 藤井 美穂