

# 200kgf/mm<sup>2</sup> 級高強度亜鉛めっき鋼線の開発

隠岐保博\*・茨木信彦\*・鹿嶋正人\*・横井浩一(工博)\*\*

\*神戸製鉄所・条鋼技術部 \*\*技術開発本部・材料研究所

## Development of 200kgf/mm<sup>2</sup> Grade High-strength Zinc-galvanized Wire

Yasuhiro Oki・Nobuhiko Ibaraki・Masato Kaiso・Dr Koichi Makii

To improve the strength of zinc-galvanized wire for cables up to the 200kgf/mm<sup>2</sup> (1960N/mm<sup>2</sup>) grade, new hypereutectoid steel with additions of Si and Cr was manufactured on a trial basis. This wire maintains its nano-microstructure after being galvanized with zinc. Properties such as ductility, toughness, fatigue and delayed fracture were also tested and met with the requirements for high-tensile-strength zinc galvanized wire for main cables.

まえがき = 長大吊橋に使用される線材製品として、吊橋の主ケーブル用亜鉛めっき鋼線がある。吊橋が長期間の使用に耐えるために、この主ケーブルには耐食性、耐候性が要求される。また長大化実現のために、主ケーブルの軽量化、すなわち高強度化が要求される。海外および日本の吊橋には、長年にわたり引張強さ 160kgf/mm<sup>2</sup> 級 (TS: 1 568 ~ 1 764N/mm<sup>2</sup>, 以後 160 キロ級と記述) の亜鉛めっき鋼線が使用されてきた。しかし、中央径間 1 991m という世界最大の吊橋である明石海峡大橋には、従来の亜鉛めっき鋼線を上回る引張強さ 180kgf/mm<sup>2</sup> 級 (TS: 1 764 ~ 1 960N/mm<sup>2</sup>, 以後 180 キロ級と記述) の

高強度鋼線がはじめて採用され、主ケーブル重量や主塔高さの低減、工期短縮に寄与した。

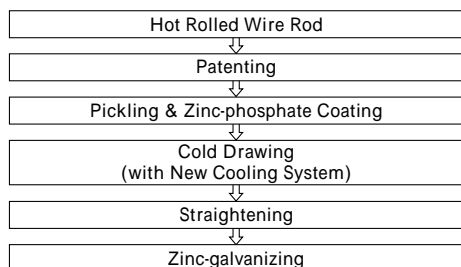
日本だけでなく世界的にみても、次期長大吊橋には明石海峡大橋を上回る中央径間を有する超長大橋の構想もあり、さらなる高強度化は必要であると考えられる。

そこで本研究では、引張強さ 180 キロ級を超える高強度亜鉛めっき鋼線の試作評価をおこなったので、その結果について述べる。

### 1. 亜鉛めっき鋼線の現状

第 1 図に主ケーブル用亜鉛めっき鋼線の製造工程を示す。吊橋主ケーブルの架設方法には、亜鉛めっき鋼線を現場で直接引出す AS 工法と、事前に工場亜鉛めっき鋼線を束ねてストランドとし、これを現場で引出す PWS 工法がある<sup>1)~3)</sup>。主ケーブル用亜鉛めっき鋼線は、いずれの工法でもロープのように撚られることなく平行線として直線のまま束ねて使用される。そのため直線性が必要となり、この特性を満足させるために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を追加している。

第 1 表に主ケーブル用 160 キロ級、180 キロ級亜鉛め



第 1 図 亜鉛めっき鋼線の製造工程  
Fig. 1 Manufacturing process of zinc-galvanized wire

第 1 表 現行亜鉛めっき鋼線の仕様

Table 1 Specification of zinc-galvanized wire

		160kgf/mm <sup>2</sup> Grade HBS G3501	180kgf/mm <sup>2</sup> Grade HBS G3508	
Chemical Composition	mass%	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
		P	0.025	0.025
		S	0.025	0.025
		Cu	0.20	0.05
		Ni		0.05
Diameter	mm	Tolerance	± 0.06	± 0.06
		Unsoundness	0.06	0.06
Mechanical Properties		Tensile Strength kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	160 ~ 180 1 568 ~ 1 764	180 ~ 200 1 764 ~ 1 960
		Proof Strength kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	118 1 156	140 1 372
		Elongation %	4	4
		Wrapping Test 8 turns/3 d	Without Fracture	Without Fracture
		Torsion Test turn/100d	14	14
		Coating Weight g/m <sup>2</sup>	300	300
Galvanizing Properties		Adhesion Test 2 turns/5 d	Without Crack or Flake	Without Crack or Flake
		Increased Diameter mm	0.12	0.12
		Appearance	Smooth without Flake or Crack and Free from Harmful Foreign Material through Entire Length	Smooth without Flake or Crack and Free from Harmful Foreign Material through Entire Length
Straightening Properties		Free Coil Diameter m	4	4
		Free Coil Lift cm	15	15

第2表 亜鉛めっき鋼線の製造実績

Table 2 Mechanical properties of zinc-galvanized wire

		160kgf/mm <sup>2</sup> Grade (Minami Bisan-Seto Bridge)	180kgf/mm <sup>2</sup> Grade (Akasi Kaikyo Bridge)
Diameter	mm		
	Diameter	5.130	5.243
	Unsoundness	0.019	0.036
Mechanical Properties	Tensile Strength	kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup> 168.7 1653	187.7 1839
	Proof Strength	kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup> 136.5 1338	152.5 1495
	Elongation	%	6.63
	Wrapping Test	8 turns/3 d	Good
	Torsion Test	turn/100 d	23.4
Plating Properties	Coating Weight	g/m <sup>2</sup>	343.2
	Adhesion Test	2 turns/5 d	Good
	Increased Diameter	mm	0.097
	Appearance		Good
Straightening Properties	Free Coil Diameter	m	35.4
	Free Coil Lift	cm	0.0

第3表 現行亜鉛めっき鋼線の工程別強度比較  
Table 3 Tensile strength change of wire

TS Grade	Chemical Composition			TS kgf/mm <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )		
	C	Si	Mn	LP Wire	Drawn Wire	Zinc-galvanized Wire
160kgf/mm <sup>2</sup> Grade	0.77	0.25	0.75	123 (1205)	185 (1813)	167 (1637)
180kgf/mm <sup>2</sup> Grade	0.82	0.90	0.75	133 (1303)	195 (1911)	187 (1833)
TS				10 (98)	10 (98)	20 (196)

つき鋼線の仕様を示す。引張強さを 20kgf/mm<sup>2</sup> (約 200 N/mm<sup>2</sup>) 向上させるために、鋼の化学成分の中で、C と Si を増量添加している。180 キロ級亜鉛めっき鋼線の製造実績を、160 キロ級<sup>1)</sup>との比較で第2表に示す。引張強さが約 20kgf/mm<sup>2</sup> (約 200N/mm<sup>2</sup>) 向上しているにもかかわらず、伸びやねじりなどのその他の特性は劣化せず、靱性および延性に富む高強度亜鉛めっき鋼線を製造できたことがわかる。

## 2. 亜鉛めっき鋼線の高強度化に対する考え方

亜鉛めっき鋼線を高強度化すると靱性および延性が劣化する傾向にある。靱性および延性を確保しつつ亜鉛めっき鋼線の高強度化をはかる方策として、以下の4点が上げられる。

- 鉛パテンティング材 (以後 LP 材と記述) の強度向上
  - 伸線加工率の増加
  - 伸線中の歪み時効抑制
  - 亜鉛めっき処理での強度低下防止
- 180 キロ級亜鉛めっき鋼線では 160 キロ級鋼線に比べて、
- LP 材の強度向上のために C, Si 添加量を増加、伸線加工率の増加は靱性および延性劣化が懸念されるために採用せず、
  - 歪み時効抑制のために冷却伸線技術の採用、めっきによる強度低下防止のために Si 添加量の増加、などを実施することによって高強度化を達成した<sup>4)</sup>。

第3表に 160 キロ級と 180 キロ級鋼線の各工程における強度変化を示す。180 キロ級亜鉛めっき鋼線は 160 キロ級鋼線に比べて、LP 材で 10kgf/mm<sup>2</sup> (約 100N/mm<sup>2</sup>) の強度上昇が達成されており、同時に伸線材でも同レベルの強度上昇がえられている。

亜鉛めっきによる強度低下防止に関しては、伸線材と亜鉛めっき鋼線との強度を比較すると、160 キロ級鋼線

では 20kgf/mm<sup>2</sup> (約 200N/mm<sup>2</sup>) 低下であるのに対し、180 キロ級では 10kgf/mm<sup>2</sup> (約 100N/mm<sup>2</sup>) 低下にとどまった。これによって亜鉛めっき鋼線で 20kgf/mm<sup>2</sup> (約 200N/mm<sup>2</sup>) の強度上昇が実現できている。

このときの Si 添加による亜鉛めっき時の強度低下抑制メカニズムについては、高橋らによってパーライト中のフェライト/セメンタイト界面に Si 濃化層が生成し、その結果セメンタイトの崩壊を抑制するためと報告されている<sup>5)6)</sup>。著者らは、さらに微細なナノオーダーレベルでの組織観察をおこない、Si の効果をより明確にした<sup>7)~9)</sup>。すなわち、亜鉛めっき処理時に鋼線温度は 400

以上まで上昇する。この温度上昇によって鋼線中のラメラセメンタイトがナノサイズに粒状化し、さらに粗大化することによって強度と同時に延性も低下する。Si はラメラセメンタイト表面に濃化して存在しており、温度上昇によるラメラセメンタイトのナノ粒子の粗大化を抑制することによって、強度低下を防止しかつ高延性を保つ働きをする。

以上のような亜鉛めっき鋼線高強度化のための方策をふまえ、180 キロ級を超える 200 キロ級亜鉛めっき鋼線を試作するために、成分的に以下の2点、

- LP 材強度向上のために C, Si 増量添加, Cr 添加<sup>10)</sup>、
  - 亜鉛めっき時の強度低下をさらに抑制するために Si を増量添加、
- を考慮して亜鉛めっき鋼線の試作と特性評価をおこなった。

## 3. 200 キロ級高強度亜鉛めっき鋼線の試作と特性評価

200 キロ級亜鉛めっき鋼線の目標値を第4表に示す。引張強さの下限を 200kgf/mm<sup>2</sup> (1960N/mm<sup>2</sup>) とし、範囲を従来と同様に 20kgf/mm<sup>2</sup> (196N/mm<sup>2</sup>) とした。その他の特性は 180 キロ級と同等とした。その中で、と

第4表 200キ口級亜鉛めっき鋼線の目標値  
Table 4 Target value of 200kgf/mm<sup>2</sup> grade zinc-galvanized wire

			200kgf/mm <sup>2</sup> Grade Target Value
Mechanical Properties	Tensile Strength	kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	200 ~ 220 1960 ~ 2156
	Proof Strength	kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	156 1 523
	Elongation	%	4
	Wrapping Test	8 turns/3 d	Without Fracture
	Torsion Test	turn/100 d	14
Plating Properties	Coating Weight	g/m <sup>2</sup>	300
	Adhesion Test	2 turns/5 d	Without Crack or Flake
	Increased Diameter	mm	0 .12

第5表 200キ口級鋼線の化学成分と初期線径、伸線加工率

Table 5 Chemical composition of 200kgf/mm<sup>2</sup> grade wire, initial diameter and reduction of area in drawn

Mark	Chemical Composition mass%						Initial Diameter mm	Reduction of Area %
	C	Si	Mn	P	S	Cr		
Wire A	0.87	1.21	0.73	0.006	0.004	-	12.0	83
Wire B	0.92	1.25	0.50	0.005	0.001	0.20	11.0	80
Wire C	0.92	1.25	0.50	0.005	0.001	0.20	12.0	83
Wire D	0.95	1.44	0.51	0.007	0.006	-	13.0	86

第6表 200キ口級亜鉛めっき鋼線の試作結果

Table 6 Mechanical properties and galvanizing properties of 200kgf/mm<sup>2</sup> grade zinc-galvanized wire

		Wire A	Wire B	Wire C	Wire D	
Mechanical Properties	Tensile Strength	kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	202 1 980	207 2 029	214 2 097	223 2 185
	Proof Strength	kgf/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	179 1 754	176 1 725	189 1 852	198 1 940
	Elongation	%	5.9	6.4	6.1	5.2
	Wrapping Test	8 turns/3 d	Good	Good	Good	Good
	Torsion Test	turn/100 d	23 No Delamination	34 No Delamination	31 No Delamination	12 Delamination
Plating Properties	Coating Weight	g/m <sup>2</sup>	382	340	376	320
	Adhesion Test	2 turns/5 d	Good	Good	Good	Good
	Increased Diameter	mm	0.11	0.10	0.09	0.10

第7表 遅れ破壊試験条件

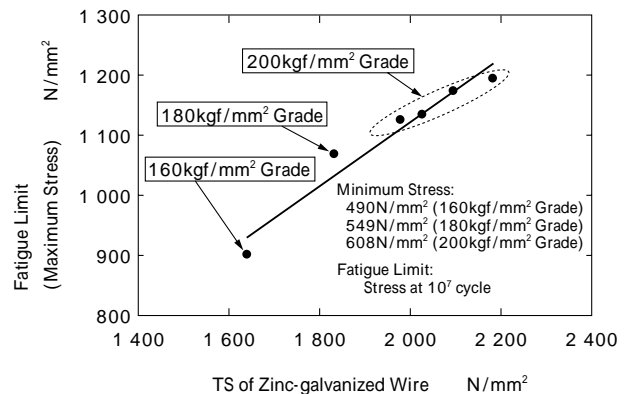
Table 7 Conditions and results of delayed fracture test

	160kgf/mm <sup>2</sup> Grade Wire	180kgf/mm <sup>2</sup> Grade Wire	200kgf/mm <sup>2</sup> Grade Wire
Solution Tested	0.1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
Electric Current Density	10 mA/cm <sup>2</sup>		
Specimen Length	100 mm		
/TS	0.66		
Applied Stress	1 035N/mm <sup>2</sup>	1 164N/mm <sup>2</sup>	1 294N/mm <sup>2</sup>
Fracture Time	>100h	>100h	>100h

くに耐力は180キ口級の目標値である140kgf/mm<sup>2</sup> (1372N/mm<sup>2</sup>) に、引張強さ向上率 (200/180 = 1.11) を乗じた値 (140 × 1.11 = 156kgf/mm<sup>2</sup>, 1523N/mm<sup>2</sup>) を目標とした。

この強度範囲を目標に、4種類の線径5mmの亜鉛めっき鋼線を試作して特性評価をおこなった。試作した鋼線の化学成分と初期線径、伸線加工率を第5表に示す。200 ~ 220kgf/mm<sup>2</sup> (1960 ~ 2156N/mm<sup>2</sup>) の範囲で種々の強度をえるために、化学成分と伸線加工率を調整した。えられた亜鉛めっき鋼線の特性を第6表に示す。その結果、引張強さが200キ口級鋼線の目標下限レベルの202kgf/mm<sup>2</sup> (1980N/mm<sup>2</sup>) を有するWire Aから、目標上限レベルを超えた223kgf/mm<sup>2</sup> (2185N/mm<sup>2</sup>) を有するWire Dまで、4種類の亜鉛めっき鋼線がえられた。その中でWire Dのみがねじり試験において縦割れが発生している。ただし、その他の特性についてはすべての鋼線で満足していた。

亜鉛めっき鋼線の高強度化によって劣化が懸念される特性として疲労と遅れ破壊が挙げられる。そこで、第6表に示した4種の強度レベルを有する200キ口級亜鉛め



第2図 部分片振り引張疲労試験結果

Fig. 2 Results of partially fluctuating tensile fatigue test

っき鋼線と、比較のために160キ口級と180キ口級の亜鉛めっき鋼線をもちて疲労、遅れ破壊特性を評価した。試験条件については、森山の報告<sup>11)</sup>に基づいた。

第2図に疲労試験結果を示す。ここでは、部分片振り疲労試験における疲労限応力を疲労強度とした。亜鉛めっき鋼線の強度の上昇とともに疲労強度が向上していることがわかる。

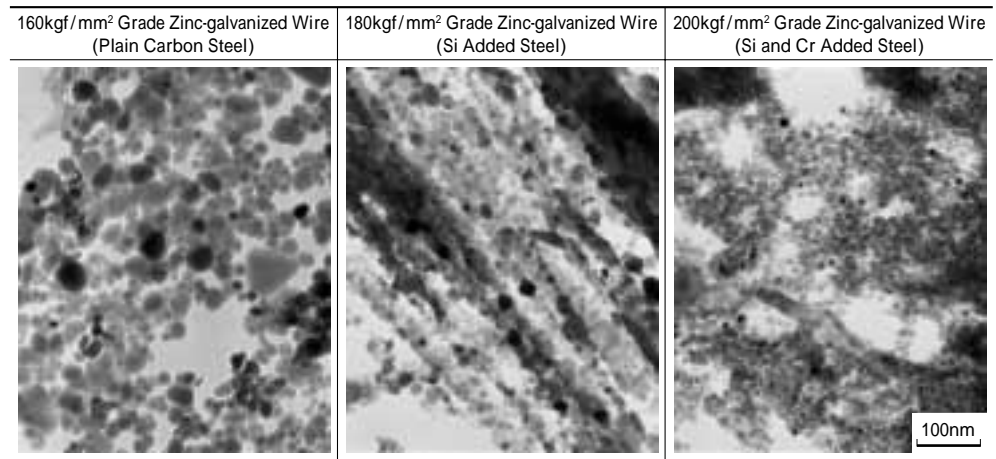


写真1 各種亜鉛めっき鋼線中のセメンタイトのTEM観察結果  
Photo 1 TEM images of electrolytically extracted cementite

第7表に遅れ破壊試験条件と結果を示す。強度レベルに対する負荷応力の比(負荷荷重比:  $\sigma/T_S$ )は0.66を採用した。明石海峡大橋の主ケーブルにおける安全係数は2.2であり<sup>12)</sup>、供用中に生じる負荷荷重比は0.45(安全係数の逆数)であるため、負荷荷重比0.66は実際の使用条件0.45よりも大きく、実験条件としては十分厳しいと判断したため採用した。試験の結果、すべての鋼線は100時間で破断が生じず、強度レベルによる遅れ破壊特性の差は認められなかった。

試作した200キ口級亜鉛めっき鋼線では、目標上限強度を超えたWire Dでねじり試験において縦割れが発生したこと以外は、180キ口級鋼線とほぼ同等の特性を有することがわかった。したがって、主ケーブル用として使用できる特性を有した200キ口級亜鉛めっき鋼線が製造できる可能性が高いと考えられる。

以上のように亜鉛めっき鋼線の高強度化を、韌性および延性を劣化させることなく達成することができた。亜鉛めっき処理時のSi添加によるパーライト中のナノセメンタイトの粗大化抑制効果を確認するために、鋼線を電解抽出することによってえられたラメラセメンタイトをもちいてTEM観察をおこない<sup>3)</sup>、その内部構造を観察した。その結果を写真1に示す。粒状に見えるのが、亜鉛めっき前には板状であったセメンタイトである。160キ口級に比べてSiを増量添加した180キ口級のほうが、さらにSiを増量添加してCrも添加した200キ口級のほうが粒状セメンタイトのサイズが小さいことがわかる。したがって亜鉛めっき鋼線へのSi増量添加、Cr添

加によるセメンタイトの粒状化抑制によって、亜鉛めっき鋼線の高強度化が達成できていることを確認できた。

むすび=明石海峡大橋の主ケーブル用に開発され、世界に先駆けて実用化された180キ口級亜鉛めっき鋼線を超える200キ口級亜鉛めっき鋼線を試作した。鋼線の高強度化によって劣化が懸念される疲労特性と遅れ破壊特性についても、今回の試作では顕著な劣化は認められなかった。その結果、200キ口級亜鉛めっき鋼線を製造できる可能性があることがわかった。

この高強度亜鉛めっき鋼線によって、明石海峡大橋を超える長大吊橋の実現や、使用鋼材の低減による吊橋製造費用の削減が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 光島功雄ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.38, No.1 (1988), p.5.
- 2) 角岡正吾ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.38, No.1 (1988), p.8.
- 3) 三田村武ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.38, No.1 (1988), p.12.
- 4) 池田辰雄ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.38, No.1 (1988), p.23.
- 5) 高橋稔彦ほか: 材料とプロセス, Vol.5, No.3 (1992), p.881.
- 6) 榎井敏三: "JIM Seminar ナノ・メゾ組織制御と高機能材料の開発" 金属学会, (1995), p.29.
- 7) 鹿嶋正人ほか: 材料とプロセス, Vol.7, No.6 (1994), p.1804.
- 8) 榎井浩一ほか: 材料とプロセス, Vol.8, No.3 (1995), p.663.
- 9) 榎井浩一ほか: 鉄と鋼, Vol.83, No.8 (1997), p.514.
- 10) 高橋稔彦: 金属, Vol.66, No.1 (1996), p.19.
- 11) 森山 彰: 本四技報, Vol.13, No.50 (1989), p.10.
- 12) 本州四国連絡橋公団: 「上部構造設計基準・同解説」(1989).