
セミプレファブ型高強度ケーブル「PAC-H」の鋼斜張橋への適用

Application of PAC-H Type Semi-Prefabricated Stay Cable System to Cable-Stayed Steel Bridge

熊野 拓志(Takuji Kumano) 古室 健史(Kenshi Furumuro) 本部 洋(Hiroshi kibe)
武井 雅光(Masamitsu Takei)

要旨：

斜張橋の大型化，長大化や公共工事コスト縮減などの社会的要求に対応するため，川崎製鉄は（株）エスイー，川鉄テクノワイヤ（株）との 3 社共同研究を実施し，セミプレファブ型高強度亜鉛めっき PC 鋼より線「PAC-H 型ケーブル」を開発した。開発にあたって実施した物理特性試験により疲労特性，遅れ破壊特性，応力腐食割れ特性，耐食性，クリープ特性および低温特性について実験を行い，プレファブ平行線ケーブルと同等の性能を有していることを確認した。また国内初の本格的規模の鋼斜張橋への実橋適用を通して，張力管理技術などの架設技術を確立したとともに，PAC-H 型ケーブルの工期，経済性などの検証を行った。

Synopsis：

A PAC-H type stay cable system, in which a semi-prefabricated zinc-coated steel wire strands for prestressed concrete are used, has been developed by a collaborated research of SE Corp., Kawasaki Steel Techno-wire Corp. and Kawasaki Steel. The system was introduced in order to be used for long-span cable-stayed steel bridges, and to meet social needs such as cost-reduction of a public enterprise. In this development, the basic data of mechanical properties, such as, fatigue, delayed fracture, stress corrosion, cracking, tensile creep and properties in low temperatures were examined. The results of these tests show that this cable system has excellent performances equal to that of a cable system of a parallel wire type. The first application to long-span cable-stayed steel bridges in Japan established a satisfactory erection technology, including tension control technology, of PAC-H type stay cable system.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

セミプレファブ型高強度ケーブル「PAC-H」の 鋼斜張橋への適用*

川崎製鉄技報
32 (2000) 2, 125-132

Application of PAC-H Type Semi-Prefabricated Stay Cable System to Cable-Stayed Steel Bridge



熊野 拓志
Takuji Kumano
橋梁・鉄構事業部 橋
梁・鋼構造技術部 主
査(掛長)



古室 健史
Kenshi Furumuro
橋梁・鉄構事業部 橋
梁・鋼構造工事部 主
査(課長)



木部 洋
Hiroshi Kibe
(株)エスイー 営業本
部 技術部 主査(課
長)



武井 雅光
Masamitsu Takei
川鉄テクノワイヤ(株)
取締役技術部長

1 はじめに

近年斜張橋の長大化、大型化にともないケーブルの大容量化、長尺化が進展しており、同時に施工性の向上、あるいは疲労耐久性、防食性などの品質向上に対する要求も増大している。また一方では昨今の公共事業費縮減の動向に関連し、社会資本の建設コスト縮減ニーズも高まってきており、斜張橋を含む橋梁分野においても要求性能を満足する範囲内でのより経済的な工法の開発が一段と重要視されるようになってきている。

ところで経済性の観点より諸外国で現場施工型 PC 鋼より線ケーブルが主流となっている中で、我が国においては鋼斜張橋用斜材としてプレファブ平行線ケーブルが一般的に用いられてきたが、斜張橋の長大化にともない架設現場におけるハンドリング性の低下、施工コストの増大に繋がる傾向も見られた。

このような状況の中、川崎製鉄は(株)エスイー、川鉄テクノワイ

要旨

斜張橋の大型化、長大化や公共工事コスト縮減などの社会的要求に対応するため、川崎製鉄は(株)エスイー、川鉄テクノワイヤ(株)との3社共同研究を実施し、セミプレファブ型高強度亜鉛めっき PC 鋼より線「PAC-H 型ケーブル」を開発した。開発にあたって実施した物理特性試験により疲労特性、遅れ破壊特性、応力腐食割れ特性、耐食性、クリープ特性および低温特性について実験を行い、プレファブ平行線ケーブルと同等の性能を有していることを確認した。また国内初の本格的規模の鋼斜張橋への実橋適用を通して、張力管理技術などの架設技術を確認したとともに、PAC-H型ケーブルの工期、経済性などの検証を行った。

Synopsis:

A PAC-H type stay cable system, in which a semi-prefabricated zinc-coated steel wire strands for prestressed concrete are used, has been developed by a collaborated research of SE Corp., Kawasaki Steel Techno-wire Corp. and Kawasaki Steel. The system was introduced in order to be used for long-span cable-stayed steel bridges, and to meet social needs such as cost-reduction of a public enterprise. In this development, the basic data of mechanical properties, such as, fatigue, delayed fracture, stress corrosion, cracking, tensile creep and properties in low temperatures were examined. The results of these tests show that this cable system has excellent performances equal to that of a cable system of a parallel wire type. The first application to long-span cable-stayed steel bridges in Japan established a satisfactory erection technology, including tension control technology, of PAC-H type stay cable system.

ヤ(株)と共同で、施工性を確保しつつ大容量化が可能で、疲労耐久性、耐食性、コスト競争力を兼ね備えたセミプレファブ型高強度亜鉛めっき PC 鋼より線「PAC-H 型ケーブル」を開発した^{1,2)}。本ケーブルはくさび式 PC 定着工法と新規開発線材をベースに、疲労耐久性、耐食性などに改良を加え、鋼斜張橋にも適用可能なケーブルとして完成させたものである。

本論文では PAC-H 型ケーブルの開発にあたって実施した物理特性試験結果と、国内初の本格的規模の鋼斜張橋への実橋適用³⁻⁶⁾を通して確立した架設技術の要点について報告する。

* 平成12年2月24日原稿受付

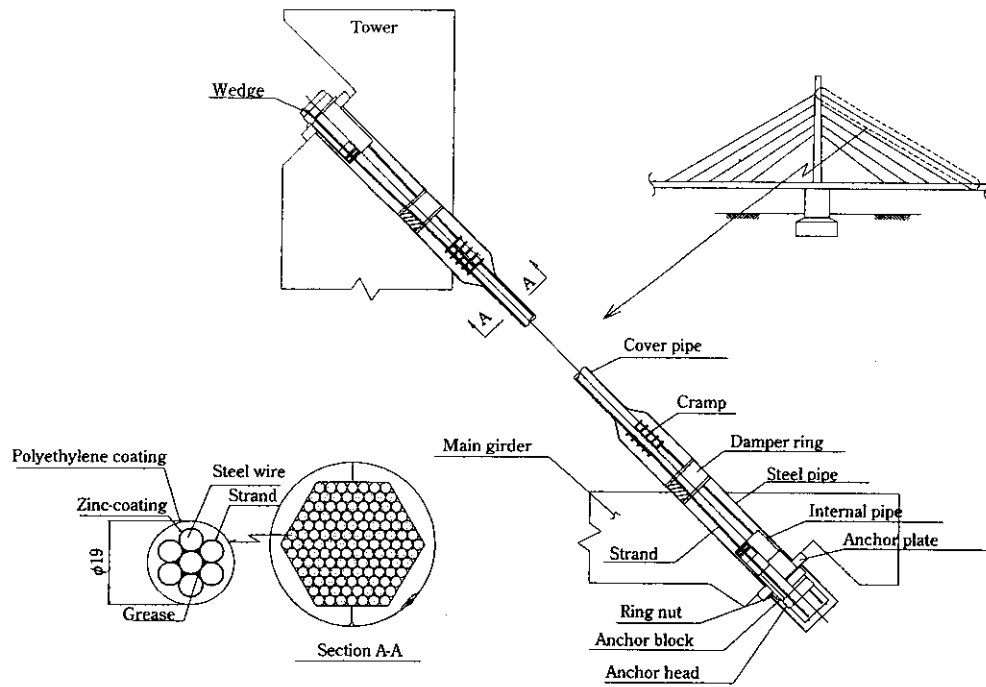


Fig. 1 System of PAC-H type stay cable

2 PAC-H 型ケーブルの概要

2.1 ケーブルシステムの概要

PAC-H 型ケーブルは垂鉛メッキ素線 7 本から構成されるストランドを架設現場にて所定本数収束し斜張橋用斜材とする、ノングラウトタイプのセミプレファブ型高強度ケーブルである (Fig. 1)。ストランド本数は設計張力に応じ、ストランド本数 19 本、引張荷重 (Pu) 4 952.9 kN の PAC 19 H から同 127 本、33 106.4 kN の PAC 127 H まで 1 本単位で設定可能となっており、導入張力の比較的小さい歩道橋から大きな張力を必要とする大型斜張橋まで対応可能となっている。

また、ストランドは約 2t の小型ドラムに巻き取られた状態で現場へ搬入、架設されるため、プレファブ平行線ケーブルなどと比較し運搬、ハンドリングの面で優れており、施工の省力化も実現している。

2.2 ストランドの構造および基礎特性

ストランドを構成する PC 鋼より線の素材は、JIS 規格のピアノ線材 (G3502) の SWRS82B 材に適合するものとしており、Fig. 2 に示す製造工程により直径 12 mm の線材を圧延する。その際、連続鍛圧法により中心偏析の生成を防止するとともに、素線性能に悪影響を与える P および S などの不純物成分を大幅に低下させるなど品質の向上を実現している。Table 1 に素材の化学組成を示す。線

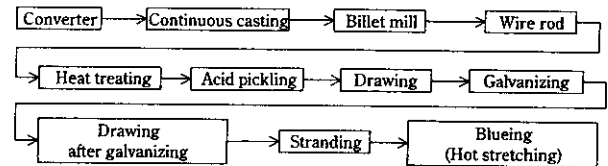


Fig. 2 Process of galvanized stress-relieved steel wire strand

材はさらに中間伸線、仕上げ伸線 (アフターローイング (after drawing)、以下 AD)、より線加工を経て、Table 2 に示す特性を有する JIS G3536 SWPR7BL の 7 本より 15.2 mm に準拠した引張強度 261 kN 級の高強度垂鉛めっき PC 鋼より線としている。

2.3 定着部の構造

ストランドの定着は、(社)土木学会「プレストレストコンクリート工法設計施工指針」で規定されているくさび式 PC 定着工法の 1 種である PAC 工法、すなわちアンカーヘッドの円錐孔にウェッジ (くさび) で 1 本ずつ定着する構造を採用している (Photo 1)。また素線つかみ部の応力集中を緩和できる特殊ウェッジ (Photo 2) を採用することで定着部の疲労強度の向上を実現している。

Table 1 Chemical compositions of steel wire

(mass%)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.80~0.83	0.15~0.32	0.76~0.86	≤0.015	≤0.010	≤0.05

Table 2 Property of zinc-coated steel wire strands for prestressed concrete

Tensile load (kN)	Load for 0.2% permanent elongation (kN)	Elongation (%)	Young's modulus (kN/mm ²)	Strand pitch (multiple)	Quality of straight (mm/1.5 m)	Relaxation value (%/100 h)
≥261	≥222	≥3.5	186 (average)	12~18	≤30	≤2.5

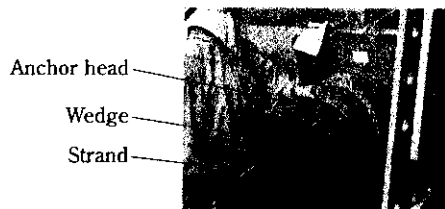


Photo 1 Anchorage system

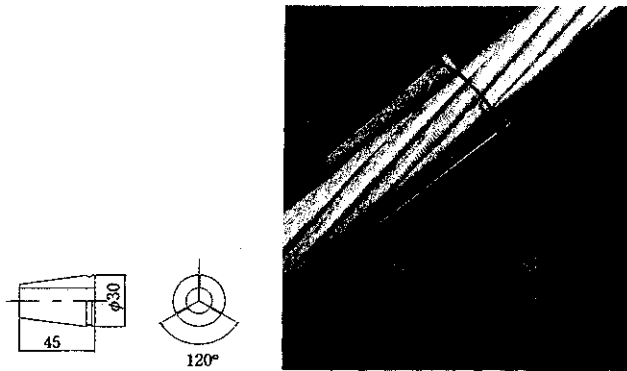


Photo 2 Wedge

ケーブル張力の調整はセンターホールジャッキを用いてケーブルを緊張した状態でアンカブロックに取り付けたナットを回転し、ケーブル長を調整することにより比較的容易に行うことができる (Fig. 1)。

2.4 防錆システム

PAC-H ケーブルは、工場で亜鉛めっき PC 鋼より線に防錆剤としてグリスを封入し、表面にポリエチレン被覆加工を施した 3 重の防錆構造とすることで、架設期間中から重防食性能を発揮することにも長期防食性も確保している。

3 PAC-H 型ケーブルの物理特性

鋼斜張橋ケーブル材料としての実用化を目的とし、PAC-H 型ケーブルの材料特性に関する評価試験を実施した。鋼斜張橋用ケーブル材料として確認すべき項目としては、疲労特性、遅れ破壊特性、応力腐食割れ特性、耐食性、クリープ特性、および低温特性を考えた。物理特性の評価はストランドにまで加工した最終製品によることを基本としたが、一部事項に関しては比較調査という観点から素線による試験も追加した。

3.1 疲労特性

ケーブルに作用する活荷重による変動応力に対する、くさび定着部を含めた高強度亜鉛めっき PC 鋼より線の基本疲労特性の把握と、ストランドを複数本束ねたケーブルの疲労強度を確認することを目的とし疲労試験を実施した。試験は Table 3 に示すように、モノストランドとケーブルの引張疲労試験、およびケーブルの曲げ疲労試験を行った。

Fig. 3 に疲労試験結果を示す。各供試体間の平均応力の影響を補正するため、縦軸の応力範囲を完全片振り状態に換算した場合の基本応力範囲とした数値により示している⁷⁾。定着部を含むモノスト

Table 3 Condition of fatigue strength test

	Number of strands	Tensile load Pu (kN)	Condition of test		Number of test
Mono strand	$\phi 15.6 \times 1$	261	$\sigma_{\max}$	804 N/mm ² (0.45 Pu)	59
			$\Delta\sigma$	353~706 N/mm ²	
Small size cable	$\phi 15.6 \times 6 \sim 8$	1 564~2 085	$\sigma_{\max}$	804 N/mm ² (0.45 Pu)	10
			$\Delta\sigma$	216~461 N/mm ²	
Large size cable	$\phi 15.6 \times 55$	14 337	$\sigma_{\max}$	804 N/mm ² (0.45 Pu)	2
			$\Delta\sigma$	216 N/mm ²	
Bending fatigue strength	$\phi 15.6 \times 48$		Axial force	0.60 Pu	1
			Bending angle	$\pm 0.5^\circ$	

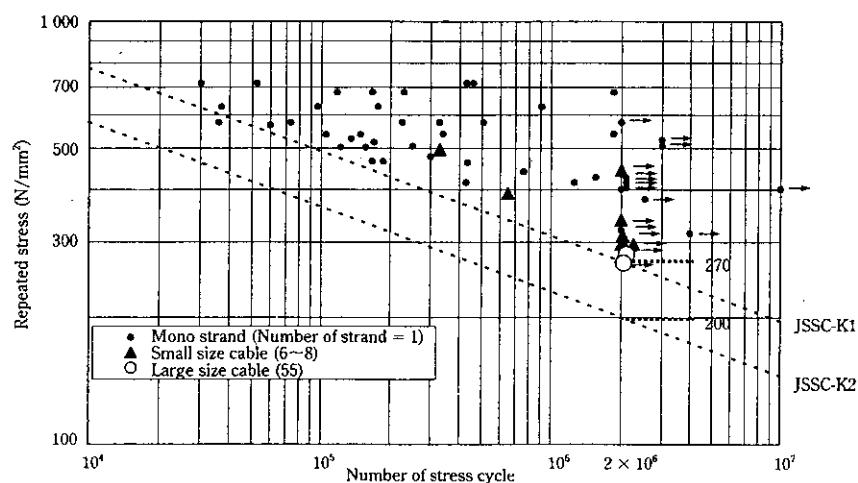


Fig. 3 Results of fatigue test

ランドの疲労限は基本応力範囲で 400 N/mm^2 程度以上、またケーブルの疲労限についても、ストランド本数 6~8 本、および 55 本のもの、それぞれ基本応力範囲で 277 N/mm^2 以上、 267 N/mm^2 以上であり、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説⁷⁾」に規定される平行線ケーブルおよび定着部の強度等級 K1、ロープの強度等級 K2 に基づく疲労設計曲線と比較し、PAC-H 型ケーブルが十分な疲労強度を有していることを確認した。また曲げ疲労試験結果に関しても繰り返し回数 203 万回で無破断であった。以上の試験結果より PAC-H 型ケーブルが張力変動比率の大きい鋼斜張橋に適用可能な十分な疲労強度を有していることを確認した。

3.2 遅れ破壊特性

ケーブル用材料としての高応力負荷環境下における使用を考慮し、応力負荷条件下での遅れ破壊特性試験を実施した。試験は高温高湿環境下における遅れ破壊試験、および水素チャージによる遅れ破壊促進試験を実施した。供試体としてはストランドの心線を用いることを基本とし、さらにストランド製造工程途中における特性比較のため、亜鉛めっき後の心線および AD 後の心線についても試験を行った。

3.2.1 高温高湿遅れ破壊試験

Table 4 に試験条件を、また Table 5 に負荷応力の設定値を示す。Table 6 に示すとおり暴露試験中にはいずれの供試体にも遅れ破壊は発生せず、また環状切欠きの有無、製造工程の段階に関わらず、6 ヶ月間の暴露前後の引張強さについても差異は認められなかった。

3.2.2 水素チャージによる遅れ破壊促進試験

供試体はストランドの心線を 500 mm の長さで切断後めっきを除去し、 100°C で 2 h の水素抜き焼鈍を施した後に試験に供した。また負荷荷重は引張荷重の 0.55 倍および 0.65 倍の 2 種類とした。試験の結果、20 h から 100 h の間で大部分のものが破断した。既往の

研究^{8,9)} 結果と比較し、破断までの時間はその変動範囲内に収まっていることなどから、遅れ破壊特性は平行線ケーブルとほぼ同レベルであることを確認した。

3.3 応力腐食割れ特性

一定応力を受けた腐食環境下での長期使用を考慮し、応力負荷条件下で腐食が進行する過程で発生する応力腐食割れ特性を確認した。供試体にはストランドの心線を用い、低歪速度法により試験を行った。試験片は平行部長さ 20 mm、厚さ 2 mm とし、使用状態に極力近づけるため幅方向の両側面は製品の表面部を残した。試験条件は Table 7 に示すように歪速度 2 ケース、環境条件 3 ケース、および試験温度 2 ケースとした。耐応力腐食割れ特性値としては、腐食環境下における引張試験値の大気中での試験値に対する比により評価した。

Table 8 に最大応力、破断歪、溶液中での最大応力と破断歪の大気中試験値に対する比を示し、以下に試験結果の特徴を示す。

- (1) $20\% \text{NH}_4\text{NO}_3$ 水溶液中、 20°C では強度、延性とも大気中の値とほぼ同レベルであり、応力腐食割れ現象はほとんど進行していない。
- (2) $20\% \text{NH}_4\text{NO}_3$ 水溶液中、 70°C では強度低下はあまりないが、破断歪は大気中より低下する。特に歪速度が遅いケースでの低下率が大きく、また破断した試験片に応力腐食割れと判断されるクラックが明瞭に発生した。歪速度による応力腐食割れへの影響の程度に差異はあるものの、 70°C においては応力腐食割れが発生すると考えられる。今回の試験結果を既往の研究結果と比較したところ、両者の間に有意な差は認められなかった。
- (3) $20\% \text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\% \text{NaCl}$ 水溶液中、 20°C では、最大応力の低下は小さいが破断歪の低下が大きくなっており、既往の研究と同様の傾向にあることを確認した。

3.4 耐食性

耐食性に関する試験は塩水噴霧試験および乾湿繰返し試験の 2 種類について実施した。

3.4.1 塩水噴霧試験

供試体としてストランドの心線、側線、めっき後素線、および AD 後素線を用い、JIS Z 2371 に定められる 35°C の $5\% \text{NaCl}$ 水を連続的に噴霧する条件により試験を行った。試験期間は 10 d, 20 d, 30 d, 50 d の 4 期間とし、耐食性の評価は各期間までの腐食減量の測定および外観観察により行った。また腐食減量は試験前後の重量

Table 4 Condition of delayed fracture in high temperature

Test piece	Circumferential notched piece ($\phi 4 \text{ mm}$) Round wire ($\phi 5.22 \sim 6.30 \text{ mm}$)
Exposure condition	
Temperature ($^\circ\text{C}$)	60
Humidity (%)	≥ 90
Term (month)	6

Table 5 Load stress

	Galvanized steel wire		Steel wire after drawing		Core	
	Load (kN)	Stress (N/mm^2)	Load (kN)	Stress (N/mm^2)	Load (kN)	Stress (N/mm^2)
Round wire	33.1	1062	24.1	1124	25.3	1124
Circumferential notched piece	15.7	1245	16.6	1319	15.7	1245

Table 7 Conditions of stress corrosion test

Speed of strain (s^{-1})	4.17×10^{-7} , 4.17×10^{-6}
Conditions of solution used	$20\% \text{NH}_4\text{NO}_3$ $20\% \text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\% \text{NaCl}$ In the air
Temperature ($^\circ\text{C}$)	20 ± 2 70 ± 2

Table 6 Results of delayed fracture in high temperature and humidity

	Galvanized steel wire		Steel wire after drawing		Core	
	Before exposure	After exposure	Before exposure	After exposure	Before exposure	After exposure
Round wire	53.2	54.3	41.3	42.1	41.5	41.7
Circumferential notched piece	28.6	28.7	30.4	30.2	30.5	30.5

Table 8 Results of stress corrosion test

Condition	Temperature (°C)	Speed of strain (s ⁻¹)	Maximum stress (N/mm ²)	Maximum strain (%)	σ_s/σ_a	$\varepsilon_s/\varepsilon_a$
In the air	20	4.17×10^{-6}	1890 1858	9.9 9.3		
20%NH ₄ NO ₃	20	4.17×10^{-6}	1876 1903	9.2 9.8	1.00 1.02	0.96 1.02
20%NH ₄ NO ₃	70	4.17×10^{-6}	1856 1869	10.1 8.3	0.99 1.00	1.05 0.86
		4.17×10^{-7}	1657 1688	5.6 5.8	0.88 0.90	0.58 0.60
20%NH ₄ NO ₃ + 5%NaCl	20	4.17×10^{-6}	1790 1848	4.6 6.9	0.96 0.99	0.45 0.72

ε_s, σ_s : Maximum stress and strain in solution

ε_a, σ_a : Maximum stress and strain in the air

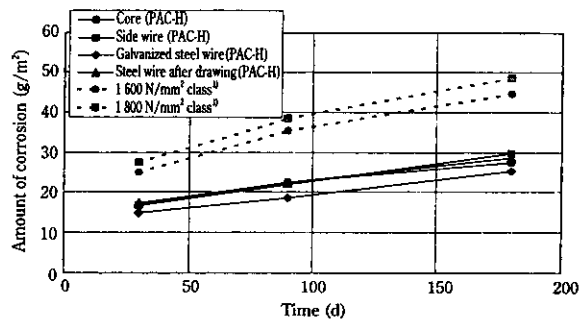


Fig. 4 Results of alternate dry and wet tests

差から算出した。

試験の結果、いずれのケースにも発錆は認められたが、局所的な外傷によるものは認められなかった。各試験体の腐食進行状況はほぼ同様の挙動を示しており、また既往の研究における腐食減量とも同レベルであることを確認した。

3.4.2 乾湿繰り返し試験

試験は屋外に8h暴露後、温度60°C、湿度90%の湿潤条件に16h暴露する条件を180d繰り返す方法により行い、30d、90d、180d後の腐食減量および外観観察により耐食性を評価した。屋外暴露場所は岸壁から50mの海岸工場地帯である。

各ケースとも赤錆は生じたものの、外傷などによる発錆は認められなかった。またFig. 4に示すように各ケースとも亜鉛メッキの腐食減量は180dで30g/m²程度で腐食進行状況も同一傾向であり、亜鉛めっきにより高い耐食性が確保されていることを確認した。

3.5 クリープ特性

斜張橋ケーブルには応力負荷状態で長時間保持されることによりクリープ歪が発生する。高強度亜鉛めっきPC鋼より線のクリープ特性は鋼の化学成分、金属組織、加工歪、より構造、ブルーイングの熱処理などの影響を受けるため、ストランドを供試体としクリープ特性を評価した。試験条件はTable 9に示す通りとし、試験時間500hおよび1500hについて実施した。また負荷応力は規格引張荷重の0.55倍とした。

試験の結果クリープ歪はFig. 5に示すように500h後で0.005%、1500h後で0.0055%と極めて良好な値であった。

3.6 低温特性

低温特性として通常の使用温度範囲を含む-80°C～+80°Cにお

Table 9 Condition of tensile creep test

Load	143.7 kN (980.7 N/mm ²)
Measuring interval (mm)	600
Temperature (°C)	20±2

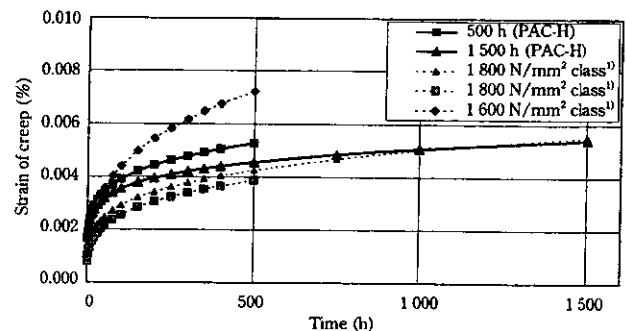


Fig. 5 Results of tensile creep test

ける強度、延性、靱性を確認した。強度および延性を引張試験、また靱性を切欠き引張試験と衝撃引張試験により実施した。

3.6.1 引張試験

Fig. 6に試験結果を示す。試験温度が低下するとともに引張強さ及び0.2%耐力は上昇している。また伸びは低温・高温側ともに室温と比較しほとんど変化ないが、絞りについては低温側・高温側でわずかに低下する傾向が見られる。全温度領域で伸び10%程度、絞り30%以上となっており、極めて良好な延性を有していることを確認した。また既往の研究結果と比較し強度、延性ともに有意な差は認められなかった。

3.6.2 靱性試験

靱性の評価は環状切欠付試験片を用いた引張試験と衝撃引張試験により行った。引張試験、衝撃引張試験にはそれぞれ引張試験機、シャルピー衝撃試験機を用いた。引張試験結果をFig. 7に示す。切欠き強さは各試験温度で変動幅が小さく安定しており、低温側で高く高温側で低い傾向を示している。また今回の試験結果を既往の研究結果と比較し、両者が同一特性レベルにあることも確認した。また衝撃引張試験結果より衝撃値は低温側でわずかに低下する傾向を示すが、その値は300～350J/cm²の範囲内で、各試験温度での変動幅も最大50J/cm²程度と安定していることを確認した。

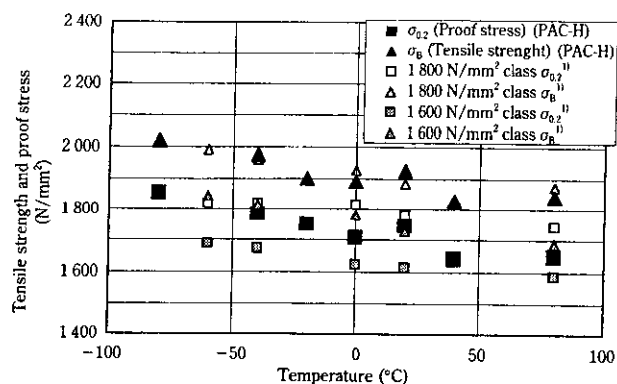


Fig. 6 Results of tensile strength test in low temperature

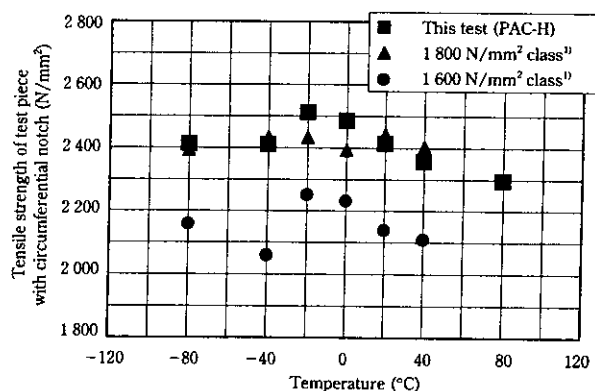


Fig. 7 Results of toughness test in low temperature

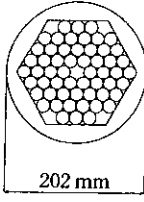
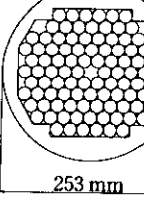
4 PAC-H 型ケーブルの鋼斜張橋への適用

本格的規模の鋼斜張橋として国内で初めて、S 橋において PAC-H 型ケーブルが適用された^{3,4)}。本章では実橋適用を通して確立した本ケーブルの架設システムの要点について説明する。

4.1 S 橋の工事概要

S 橋は中央径間 215 m、斜張橋部 385 m の 5 径間連続鋼箱桁斜張橋である。本橋は現橋に隣接して建設されるため、現橋およびその周辺環境との調和から 1 本塔柱斜張橋形式とし、また塔基部と主桁を剛結する構造としている⁵⁾。本橋の橋梁一般図を Fig. 8 に、ケー

Table 10 Cross section of the cable

Type	56 H (Minimum)	100 H (Maximum)
Cross section	 202 mm	 253 mm
Nominal cross sectional area	8 204 mm ²	14 650 mm ²
Tensile strength	14 598 kN	26 068 kN
Weight	72.5 kg/m	131.9 kg/m

ブル断面図を Table 10 に示す。本橋の主塔および主桁の鋼重は 7 500 t、ケーブル重量は 200 t であり、またケーブルはマルチハーブ形式 1 面吊り 7 段配置とし、最小ケーブルはストランド本数 56 本、引張荷重 14 598 kN の PAC56H、最大ケーブルはストランド本数 100 本、引張荷重 26 068 kN の PAC100H を採用している。

4.2 ケーブル架設システム

ケーブルの架設手順を Fig. 9 に示す。PAC-H 型ケーブルの架設はケーブルを構成するストランドの架設から始められる。すなわち、橋面上に設置したドラム受台とプッシングマシンを用いて、ドラムに巻かれた状態のストランドをプッシングマシンにより塔上まで押上げ、架設シュートを用いて 1 本づつ張渡し、塔側でストランドを切断後ウェッジで定着し、最後に桁側でストランドを緊張、定着する。所定本数のストランドを架設した後、塔側と桁側で全ストランドをクランプで束ね 1 本のケーブルとし、再度緊張し設計張力を導入した¹⁰⁻¹²⁾。

4.3 張力管理システム

現場組立型ケーブルである本ケーブルシステムの張力導入は、モノストランドジャッキによるストランドごとの緊張 (1 次緊張) とマルチジャッキによるケーブルの緊張 (2 次緊張) の 2 段階で行う方法としている。1 次緊張段階においては、各ストランドを順次緊張していく過程で先に緊張したストランドの張力が漸減することや、温度変化、重機などの上載荷重の変化により張力変動が生じることなどから、ストランドごとの張力管理は困難となる。そこで 1

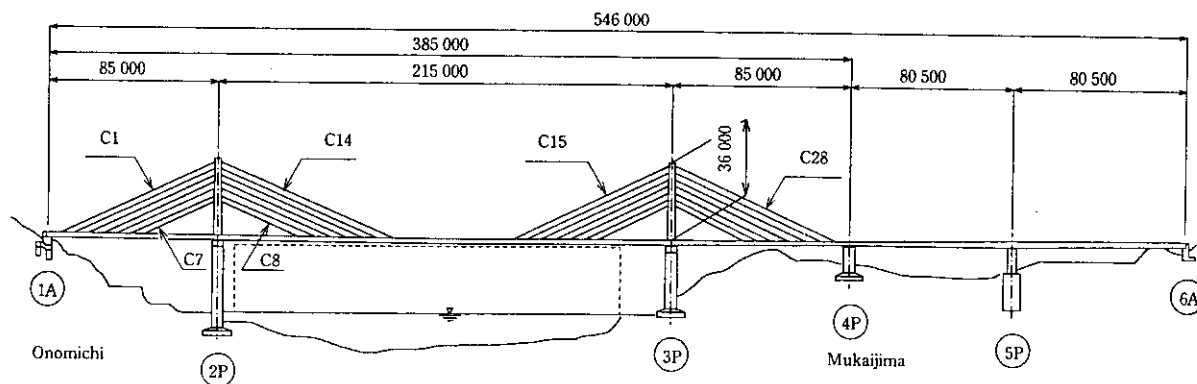


Fig. 8 General view

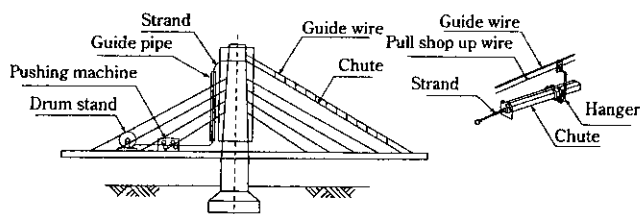


Fig. 9 Erection method for cables

次緊張時におけるストランドの張力管理は、あらかじめ工場で全ストランドにマーキングを行い、現場架設時には各ストランドのマーキング位置を揃えるように定着する方法、すなわちストランド長さ管理方式によることにした。ストランド張力管理を長さ管理方式で行うことにより、たとえば長さ 50 m のケーブルで許容誤差 ± 5 kN の張力管理が要求される場合、ストランド長さでは ± 8 mm の誤差に相当するが、工場でのマーキング誤差 ($\Delta L = L/20\,000 + 1.5$ mm = 4 mm) を考慮しても十分な精度で施工することが可能である。

1 次緊張のストランド計画導入張力は、サグの影響により桁側鋼管にストランドが接しないために必要な張力 (20~40 kN) 以上で、かつストランド規格引張荷重の 50% (130 kN) 以下となるよう設定した。設計張力に対する1次緊張力の割合は Table 11 に示すように、ケーブル長 50 m 程度の下段ケーブルで設計張力の約 50%、ケーブル長 90 m 程度の上段ケーブルで約 100%とした。

4.4 PAC-H 型ケーブル架設工法の評価

4.4.1 施工性

Table 12 に PAC-H 型ケーブルとプレファブ平行線ケーブル工法との施工性に関する比較を示す。プレファブ平行線ケーブルでは架設時に 150 t クレーンなどの大型重機が必要となるのに対し、PAC-H 型ケーブルは橋面の大型重機や専門の作業員を必要とせず、比較的小規模な資機材を用いた単純作業の繰り返しにより架設することが可能である。また輸送については、10 t を超える大型ドラム輸送のため超低床トレーラが必要となるプレファブ平行線ケーブルに対し、PAC-H 型ケーブルではドラム重量が約 2 t であることから小型トラックによる輸送が可能である。

一方緊張作業についてはプレファブ平行線ケーブルでは 1 回で完了するが、PAC-H 型ケーブルではストランド 1 本ごとに行う 1 次緊張と、ケーブルへ設計張力を導入する 2 次緊張の 2 段階の作業が必要である。

4.4.2 工期

中央径間の海面上の主桁架設には、ブロック長 7.2 m、桁重量約 90 t の主桁ブロックを海上輸送し、2 週間に 1 度海上規制を行い直下吊りにより架設する工法が採用されていたため¹⁰⁾、ケーブル架設は主桁架設工程を考慮して計画する必要があった。

そこでケーブルの架設は 2P 側と 3P 側でのおおの作業グループ

Table 12 Comparison of PAC-H and parallel wire type cables

	PAC-H type cable	Parallel wire type cable
Assembly	In shop	In field
Weight of drum	2	12
Transportation	4~8 t truck	Low floor trailer
Crane size	25 t	150 t
Worker	8 persons	8 persons
Installation time	3 d/cable	1.5 d/cable
Tension adjustment	By turning nut	By sim plate
Jack	Mono strand jack + Multi jack	Center-hole-jack
Merit	Easy-to-control tension No limitation in transportation Small size installation equipment No specialist personnel necessary	Easy-to-control quality
Demerit	Required to apply tension twice	Limitation in transportation Large size installation equipment Specialist personnel necessary
Performance	Sun-marine Bridge etc.	Tatara Bridge Yokohama Bay Bridge etc.

を編成し、各グループが側径間側と中央径間側の架設を交互に行うことにし、主桁の架設サイクルが 2 週間であることを考慮し、各作業グループが側径間側と中央径間側のケーブルを 1 本ずつ計 2 本架設するための所要日数を準備工も含め 10 d として工程を策定した。

ストランドの架設に要する時間は、ケーブル架設工事開始当初 1 本当たり約 12 min 程度であったものの、架設工事終盤においては作業員の慣れなどにより約 6 min 程度にまで短縮された。ストランド本数が 100 本である最大ケーブルの架設日数は、準備 0.5 d、架設 2 d、二次緊張 0.5 d の約 3 d であった。

本橋では 28 本のケーブルの架設を当初工程通り約 3.5 ヶ月で完了した。PAC-H 型ケーブルの架設は、プレファブ平行線ケーブルと比較し現場施工工期が長くなることが懸念されていたが、本工事の実施によりケーブル架設工程が全体工程の中でクリティカルにならないことが実証できた。

4.4.3 ロングスパン化への対応

S 橋の最大ケーブル長は約 90 m であるが、たとえば中央径間約 600 m の斜張橋のケーブル長は 300 m 以上となるために、ロングスパン橋梁へ対応した施工法の検討も重要である。プレファブ平行線ケーブルでは、ケーブル長が長くなると陸上輸送が困難になるとともに大型の架設機材も必要となってくるため施工性の低下は避けられないと考えられる。

Table 11 Tension of strands and cable

		Number of strands	Length (m)	Tension of strand		Tension of cable		
				First (kN)	Final (kN)	First (T1) (kN) (T1/T2)		Second (T2) (kN)
Side span	C1	100	88.6	67	45	4 500	0.95	4 730
	C7	56	42	81	61	3 420	0.53	6 470
Center span	C8	58	43.3	63	47	2 730	0.48	5 740
	C14	92	90.3	63	45	4 140	1.00	4 150

一方 PAC-H 型ケーブルの場合、ケーブル長に関係なくドラム重量が約 2~4t であるため、輸送上の制約が非常に少なく、また架設機材も同一のものが使用できることから、長大橋のケーブル架設工事においても施工性の低下は極めて小さいと考えている。また工期短縮も必要不可欠な条件であるが、ストランド伝送の高速化やシュート数の増加などで対応可能と判断している。

5 まとめ

斜張橋の大型化、長大化や公共事業コスト縮減などの社会的要求を受け、川崎製鉄は(株)エスイー、川鉄テクノワイヤ(株)の3社による共同研究を実施し、まず PC 斜張橋用斜材として「PAC ケーブル」を開発した。さらに、プレファブ平行線ケーブルが主流となっている鋼斜張橋への本ケーブルの適用を図ることを目的とし、材料面における研究を継続するとともに、S 橋での架設工事を通し架設技術の確立、経済性の確認を行い、鋼斜張橋用ケーブルとしての要求性能も満足できるセミプレファブ型高強度亜鉛めっき PC 鋼より線「PAC-H 型ケーブル」を完成させた。本システムの特徴を以下に列挙する。

- (1) 新規開発線材と改良型くさび式定着工法をベースに開発した PAC-H 型ケーブルについて、物理特性として重要な疲労特性、遅れ破壊特性、応力腐食割れ特性、耐食性、クリープ特性および低温特性について実験を行った。その結果、本ケーブルが本

四公団規格 HBS3508 に規定されるプレファブ平行線ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線と同等の性能を有していることを確認した。

- (2) 現場施工型ケーブルの架設においてはプレファブ型ケーブルとは異なる現場品質管理、架設管理が必要となるが、中央支間長が 200m を超える大型斜張橋である S 橋における PAC-H 型ケーブルの架設工事を通し、ストランド張力の管理技術など一連の架設技術を確立することができた。また架設工期についてもプレファブ平行線ケーブルとほぼ同等の架設サイクルが実現可能であるとともに、現場ハンドリング性にも優れることを実証した。

- (3) PAC-H 工法はプレファブケーブル工法と比較し、材料・製作コスト面では汎用性の高い PC 鋼より線を使用していることにより有利であり、また現場施工コスト面についてもほぼ対等となることを確認した。

今後、社会資本整備における経済性、安全性への要求はさらに厳しくなることが予想されており、橋梁分野においてもさらなる高機能化、高耐久化と同時にローコスト化を進めていくことが必要となってきた。これらの要求性能を具備した「PAC-H 型ケーブル」のメリットを生かすことにより、鋼斜張橋における適用拡大が可能であるとともに、鋼斜張橋用斜材のみならず複合斜張橋、エクストラードス橋、鋼・RC 複合構造などのケーブル補剛構造への事業展開が可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 坂吉利邦, 植野良二, 大橋 渡, 武井雅光:「斜張橋用大型斜材「PAC-H 型ケーブル」」, 川崎製鉄技報, 25(1995)4, 253-254
- 2) 大橋 渡, 木部 洋, 中村茂樹, 庄司茂雄:「研究報告, 斜張橋用ノングラウトタイプケーブルシステムの開発」, プレストレストコンクリート, 38(1996)3
- 3) 小松原仁, 北川竜三, 金子正猪:「斜張橋用より線ケーブルの材料特性と架設」, 橋梁と基礎, 34(1999)5, 11-15
- 4) 金子正猪:「新尾道大橋」, 橋梁と基礎, 33(1998)8, 28-31
- 5) 秋山晴樹:「新尾道大橋の設計と架設」, JSSC, (1999)33, 32-36
- 6) 宮野 修, 夏目良平, 山下幹夫, 竹房秀一, 横田 務, 鴻上浩明:「サンマリノブリッジの設計と施工」, 橋梁と基礎, 31(1996)10, 2-9
- 7) 日本鋼構造協会:「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」, (1993)4, 7
- 8) (財)海洋架橋調査会:「ケーブル設計法に関する整理検討報告書—橋梁ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線(180キロ級)の開発」, (1986)3
- 9) 森山 彰:「主ケーブル材料としての高強度鋼線」, 本四技報, 13(1989)50
- 10) 森山 彰:「新尾道大橋上部工の設計」, 本四技報, 23(1999)90, 38-44
- 11) 小松原仁, 金子正猪:「新尾道大橋の上部工架設報告」, 本四技報, 23(1999)90, 45-53
- 12) 金子正猪, 吉原軍治:「新尾道大橋架設工事」, 土木施工, 40(1999)4, 47-53