

プレハブ平行線ストランド (PWS) の架設上の諸問題とその解決策

VARIOUS PROBLEMS AND THEIR SOLUTIONS IN ERECTING PREFABRICATED PARALLEL WIRE STRAND

三田村 武* 穂山 正幸** 堂垣内 光弘***
奥田 基****

By Takeshi MITAMURA, Masayuki AKIYAMA, Mituhiro DOUGAKINAI
and Motoi OKUDA

This paper points out various technical problems in erecting the cables using the prefabricated parallel wire strand(PWS) for the long-span suspension bridges, and describes how these problems were solved in constructing the long-span suspension bridges in Japan. Also evaluated in this paper the quality of the cables using PWS and indicates the high performance and quality cables which have already been developed.

Key Words: suspension bridge, cable manufacturing, PWS, cable erection

1. まえがき

1994年には、明石海峡大橋のメインケーブルの架設が予定されている。明石海峡大橋のメインケーブルはプレハブ平行線ストランド（以下 PWS と称する）が採用されており、約 4 kmの長さを有するいまだかつて未経験な長さのケーブルを架設することになる。長大吊橋に適用されている PWS は、表-1 に示すように、1960年代のニューポート橋の建設を緒として、順次そのサイズと長さを拡大してきている。

表-1 長大吊橋用のPWSの実績

橋名	完成年	PWSのサイズ	PWSの長さ
ニューポート橋	1969	PWS 61	1,381 m
関門橋	1973	PWS 91	1,162
因島大橋	1983	PWS127	1,360
大鳴門橋	1985	//	1,722
北備讃瀬戸大橋	1988	//	1,659
南備讃瀬戸大橋	1988	//	1,780
明石海峡大橋	建設中	//	4,073

*	(株)神戸製鋼所	都市環境エンジニアリング本部	技師長	(〒651 神戸市中央区脇浜町1丁目 3-18)
**	(株)神戸製鋼所	構造技術センター	課長	(〒651 神戸市中央区脇浜町1丁目 3-18)
***	新日本製鐵(株)	橋梁構造部	部長	(〒107-71東京都千代田区大手町2丁目6-3)
****	本四公団	第一建設局 建設部	専門役	(〒651 神戸市中央区浜辺通5丁目 1-14)

PWSを長大吊橋のメインケーブルに適用するに当たっては、工場製作時のPWSの当初の良好な品質を損なうことなく、また精度良くそれらを架設して、メインケーブルを形成する必要がある、それらに関連した種々な技術課題を解決してきている。

本文は、PWS架設上の技術にかかわる主な事項について現時点までの研究成果、および実橋における実績などを総括し、明石海峡大橋をはじめとする超長大吊橋ケーブル架設の参考に供することを目的として、それらの要点をとりまとめたものである。

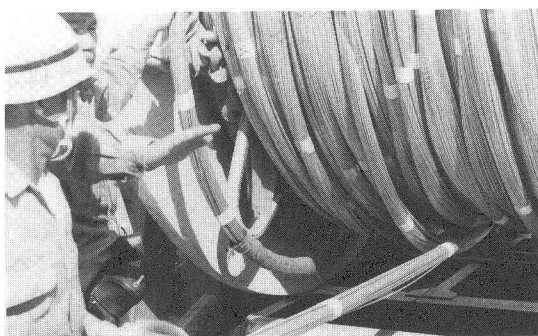
2. PWS架設時の課題と対応

PWS架設時に解決しておくべき課題としては、①アンリーリング時のたるみ、②引出時のふくらみ、③引出時のねじれ、および④温度変化による配列の乱れ、などがある。

以下には、これらの課題の内容とその対応経緯とについて記述する。

(1) アンリーリング時のたるみ

リール巻きしたPWSをアンリーリング（巻解）するとき、リール内でPWSが、たるみ出す現象が生じることがある。この現象は、関門橋の予備試験として行われたいわゆる展開試験を実施したときにはじめて見出された¹⁾。その時の状況を、写真－1に例示する。



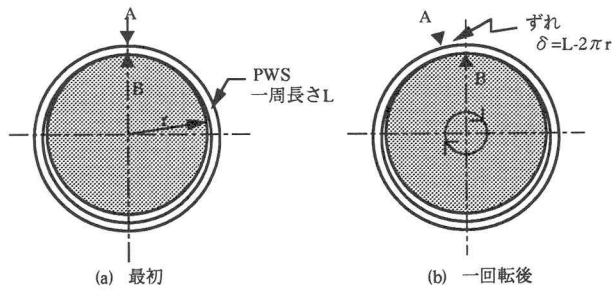
写真－1 PWSのたるみの一例

本来、PWSは、リールに緊密で、均一に巻かれる必要がある。しかし、たるみ発生現象は、図－1に示すように、リール内でPWSに緩みがある場合、PWSの一周長を L とすると、リール一回転の回転長である $2\pi r$ との差 $\delta = L - 2\pi r$ がずれとして残り、このずれが回転ごとにリール内で下層方向に送り込まれ、累積することによって、たるみを生じる現象である。

その対策として、関門橋においては、PWS製作時に、

- ① : リール巻取り時、PWSに張力をかけて緊く巻き取るとともに、アンリーリング時に発生するたるみが吸収できるように、PWSの巻きはじめ端をリールに固定せず、移動できるようにする。ワイヤ素線1本当たりの導入張力は、 10 kg f とする。
- ② : 巻取り後、さらにリールを回転させて締め直すいわゆる「巻締め」を行い、PWSをできるだけ緊密に巻く。巻締めは、PWSのリールへの巻き回数程度の回転を行うことを目安とし、巻締め状況をPWSの巻終端の動きで観察して管理する。

の2つの方法でPWSを巻き取った²⁾。ところが、現場におけるアンリーリング時には、一部のPWSにたるみが発生し、引出し架設を一時停めて、その修正を行う必要があった。



図－1 リール内でPWSのたるみが発生するメカニズム

PWSのサイズを大きくした因島大橋では、関門橋のPWSの製作時にとった2つの対策をもとに巻取り時のPWSの張力を増し（素線張力は同じ）、巻締め回数増を行うとともに、よりPWSを整列に巻取る処置を講じた。そして、展開試験でそれらの効果を確認したうえで、実際のPWSを製作し、架設した。

大鳴門橋、および南北備讃瀬戸大橋では、因島大橋における実績を踏まえて、その延長線上でPWSを製作し、著しいたるみが生じないようにした。

明石海峡大橋のPWSは、表－1に見るように、実績最大長 1,780m（南備讃瀬戸大橋）の2倍以上の長さもあり、たるみの発生が大いに危惧される。すなわち、この超長大なPWSを従来の工法を延長してリールに巻くと、PWSの巻き厚さ（巻き層数）が大きくなる。そのため、通常40～50%の空隙率で巻かれているPWSが、自重によってリール上方ではPWSが押しつぶされて密になり、また下方では粗となって、巻きの緊密性と均一性が損なわれることが予想される。

その対策としては、

- ① PWS巻き厚さを従来実績程度に納めるように、リール寸法を大きくする。

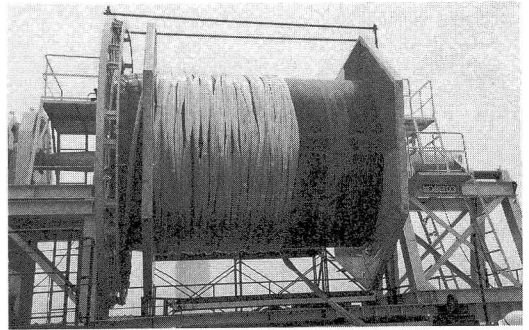
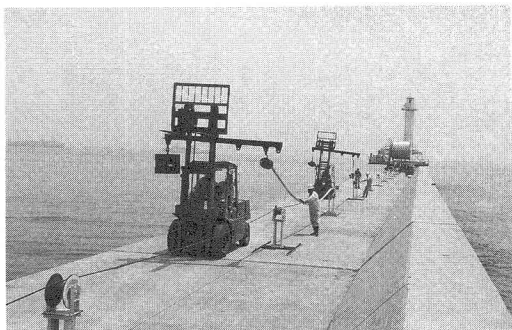
リール胴径 ⇒ 3.0 m （南備讃瀬戸大橋では、1.8 m）

リール巻幅 ⇒ 3.5 m （南備讃瀬戸大橋では、2.4 m）

- ② リール胴径の拡大に対応し、従来と同等な巻取り内圧（締めつけ力）を確保するため、PWSの

巻取り張力をリール胴径の増加に比例させて1.7倍に増加し、ワイヤ素線の張力を17 kgf とする。の2つの対策を講じることとした。そして、1987年に上記対策を講じた 4,000mのPWSを実際に製作し、ほぼ 4,000mの直線展開距離がある神戸六甲アイランド沖の防波堤上で引出し展開試験を実施し、たるみが発生しないことを確認した³⁾。写真－2には、引出し展開試験状況を示す。

現在、明石海峡大橋のPWSは、製作中で、1994年に架設の段階に入ることとなる。



(a) PWSの引出し展開

(b) PWSのアンリール試験

写真－2 4,000m級のPWSの引出し展開試験

(2) 引出し時のふくらみ（バードケージ）

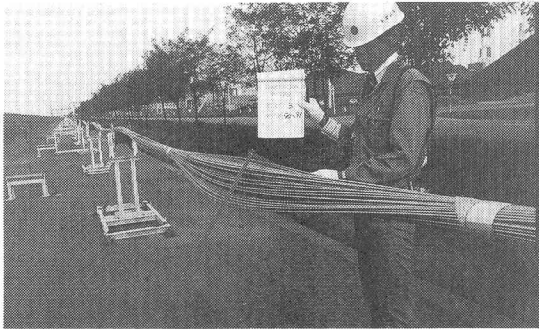
PWSは、通常、キャットウォーク上に設置したローラ上を引出していく。そのときには、PWSにふくらみ（バードケージ：bird cage）が発生する。このバードケージの発生の状況を、写真－3に例示する。

バードケージは、PWS素線と引出しローラとの摩擦により素線間にずれが発生し、それが累積して、約1.5m間隔に施しPWSの形状を保持しているシー징グテープ（テープと素線は粘着していない）間で、ふくらみとなって発生することに起因している。このふくらみ幅が引出しローラ幅を超える大きさになったときは、引出し作業を中断し、ふくらみの部分をテープで仮に巻くなどの手当てをする必要が生じる。

バードケージの発生、または増長を防ぐ手段として、具体的には、

「PWS製作時に、ある間隔でワイヤシー징グを施し、強固にPWS素線間を固縛し素線相互を拘束し、ワイヤシー징グ前後の素線のずれを無くす。」

という方法を取り、素線間のずれの累積区間をワイヤシー징グ間に限定し、バードケージの成長を制限している。ワイヤシー징グの位置は、後述の図－4に示す各サドルの近傍部と、各径間の中央部、および、その中間位置に設定している。



写真－3 バードケージ

表－2 ワイヤシー징グ間隔（中央径間） (単位：m)

橋名	中央径間長	ワイヤシー징グ 間隔	取付け場所
関門橋	712	360	塔頂と中央径間中央
因島大橋	770	390	//
大鳴門橋	876	440	//
南備讃瀬戸大橋	1100	280	塔頂と中央径間3ヶ所

表－2は、わが国のPWSを用いた長大吊橋のワイヤシー징グ間隔の実績をとりまとめたものである。いずれの場合も、引出し時のバードケージの大きさが引出ローラ幅を超えるまでに至らなかった。この既設橋の施工実績から、引出し作業に支障をきたさないワイヤシー징グ間隔の最大実績は、大鳴門橋の440mであるといえる。明石海峡大橋の場合、引出し延長が長く、ローラ通過回数が多いことから、従来の最大間隔実績と区間割り数とを考慮して、ワイヤシー징グ間隔を、330mと設定している。

なお、発生したバードケージは、引出し後に行う移設作業時に、PWSをフリーハングすることによりPWS素線に張力が加わり、解消される。

(3) 引出し時のねじれ

PWSには、引出し中にねじれ（回転）を生じることがある。このねじれは、PWSに予め組み込んであるレッドワイヤ（赤色に着色した素線）を観察することによって確認できる。

ねじれが生じた場合、そのPWSは、隣接するPWSとなじまないため、良好な平行線ケーブルが得られない。そのため、現場では、修正作業が必要となる。

ねじれ発生の要因は、主に引出しローラ配列の不整にある。そのため、ローラの引出しライン合わせと回転軸の合わせとを充分におこなっておく必要がある。また、関門橋以来、PWSの中間部のねじれを機械的に拘束するいわゆる中間キャリアを使用して、ねじれ拘束をより確実なものにしている。中間キャリアの概要を、図-2に示す。この図で、PWSはクランプで掴まれ、クランプは中間キャリアを介して、ホーリンググループに連結されており、PWSのねじれを拘束している。

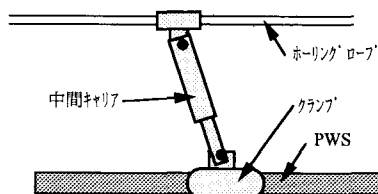


図-2 中間キャリアの概要

(4) 温度変化による配列の乱れ

昼間に引出されたPWSは、若干、各径間で上げ越して架設され、外気温が安定し、PWSの温度が安定する夜間にPWSの絶対高さ、または相対高さとPWS温度とを計測し、所定高さに調整するいわゆるサグ調整を実施している。

調整時の相対高さの調整許容範囲は、PWSどうしが交差しないように、 $\pm 0.5d$ (d : PWS径) としている。PWSのサグは、温度変化によって敏感に変化し、たとえば南備讃瀬戸大橋の場合 1°C のPWS温度変化により、中央径間で 3.1mm 、また側径間で 2.3mm もサグが変化する。この値は、PWSの直径(約 66mm)の $1/2$ にもなる。また、中央径間長 $2,000\text{m}$ クラスの明石海峡大橋では、 1°C のPWSの温度変化で、約 5.2mm にも達する大きなサグ変化を生じることになる。

夜間の調整作業で所定の位置に架設されたPWSは、昼間、日照や風の影響を受けてPWS間に温度差が生じ、上層のPWSが下層のPWSの間に沈みこみ、PWS間の配列を乱すことになる。そのため、良好な平行線ケーブルを架設するためには、その配列を保持する対策が必要となる。

PWSの配列を保持するため、一般に、ケーブルフォーマを配置することによって対応している。ケーブルフォーマは、図-3に示すように、種々のタイプのものが考案されており、それらを組み合わせて使用している。同図中の(a)が基本となるフォーマ形状で、通常、中央径間の中央、および $1/4$ 点の位置に配置している。また、同図(b)、および(c)は、太径ケーブルのときに、中央径間中央部に適宜配置し、ケーブル配列の全体の保持を行っている。

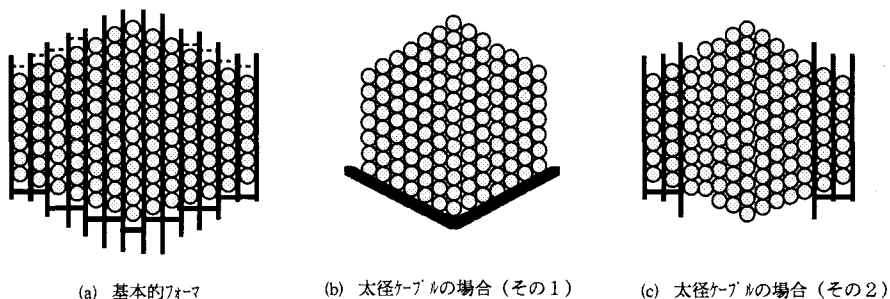


図-3 ケーブルフォーマの例

3. PWSの品質

架設したPWSの品質のうち、ここでは、空隙率と素線間の応力度差との評価を試みる。

(1) ケーブルの空隙率

ケーブルワイヤの平行性を評価する指標として、ケーブルの空隙率が用いられている。この空隙率の算出式を示すと、以下のとおりである。

$$\lambda = \left[1 - \left(\frac{d_w}{D} \right)^2 n \right] 100 \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに、

- λ : ケーブルの空隙率 (%)
- d_w : PWS素線径 (mm)
- D : ケーブル径 (mm)
- n : ケーブル素線本数 (本)

PWSのサゲ調整が良好で、配列が良く、ねじれが少なく、またふくらみが少ないほど、ケーブルの空隙率が小さく、平行性の良好なケーブルが得られる。換言すると、本文2. で述べた事項の達成度が、ケーブルの空隙率に直接反映することになる。

表－3には、わが国のPWSで施工した吊橋ケーブルの空隙率実績と、わが国、および諸外国のエアスピニング工法によって施工された吊橋ケーブルの空隙率実績とを示す。PWSにより施工したケーブルは、わが国、および諸外国でエアスピニング工法により施工したケーブルと比べても、より小さな空隙率を達成しており、平行性の良好なケーブルであると判断される。

表－3 ケーブルの空隙率

橋名	ケーブル構成	スライス後のケーブル空隙率	参考文献
関門橋	PWS91 *154	mean 19.5 %	4)
因島大橋	PWS127 *91	mean 19.3 %	5)
大鳴門橋	// *154	mean 20.0 %	6)
北備讃瀬戸大橋	// *234	mean 20.3 %	7)
南備讃瀬戸大橋	// *271	mean 20.0 %	7)
下津井瀬戸大橋	AS552 *44	mean 20.3 %	7)
ジョージワシントン橋	AS432 *61	22.7 %	8)
ゴールデンゲート橋	AS452 *61	19.4 %	8)
フォース道路橋	AS314 *37	21.7 %	8)
第一ボスボラス橋	AS548 *19	22.2 %	8)
ハンバー橋	AS404 *37	約 22 %	8)

(2) ワイヤ素線間の応力度差

ケーブルの品質として評価されるワイヤ素線間の応力度差を、PWSに特徴的な次の3つの要因から考察すると、下記のとおりである。

① PWS製作時の素線のばらつきの影響

工場製作時のPWS素線のばらつき誤差は、± 1/14,000と推定される⁹⁾。

このばらつき誤差を、応力度のばらつきに換算すれば、次のようになる。

$$\pm \Delta \sigma_1 = \pm E \quad \alpha = \pm 2.0 \times 10^4 \times \frac{1}{14,000} = \pm 1.43 \text{ kgf/mm}^2 \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここに、

- $\pm \Delta \sigma_1$: PWS素線のばらつき誤差に起因する応力度のばらつき
- E : PWSの弾性係数
- α : PWS素線のばらつき誤差

② サグ調整誤差の影響

PWS間のサグ調整許容差は、PWS径の1/2以下とされている。

いま、例として、径間長 1,000mで、またサグ比 1/10の場合について応力度の差を試算するれば、以下に示すように、極めて小さな値となり、応力度の差への影響は、無視し得るものである。

$$\pm \Delta \sigma_2 = \pm \sigma_2 \frac{\Delta f}{f} = \pm 9.81 \times \frac{33}{100,000} = \pm 0.003 \text{ kgf/mm}^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- $\pm \Delta \sigma_2$: サグ調整誤差に起因する応力度差
- σ_2 : 径間長 1,000m、およびサグ比 1/10 における素線応力度
- Δf : PWSのサグ調整誤差 (PWS径の1/2)
- f : サグ

③ サドル部の曲率の影響

工場で作成したPWSを架設したとき、図-4に示すように、吊橋の幾何学的形状により、サドル部でPWSが屈曲し、PWSの上側の位置と下側の位置とでは、長さが相違する。

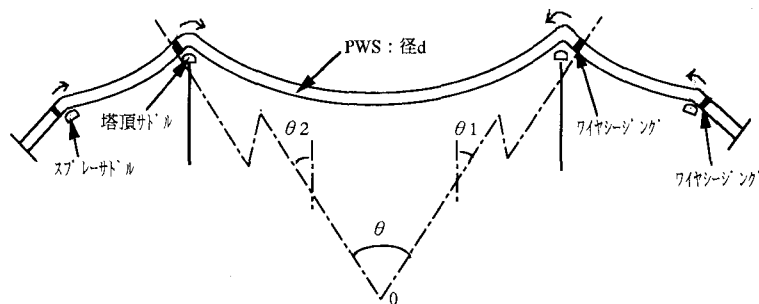


図-4 吊橋の幾何学的形状によって生じる
PWS上下の長さの差

各サドルの外側位置には、図-4に示すように、PWSの素線相互のずれを防ぐためのワイヤージングを施している。そして、サドル部における曲がりによって発生する上下の素線長差を、塔頂サドルでは中央径間に、またスプレッドサドル部では側径間に送り込む施工法を採用している。その理由は、素線長差を径間長さの大きい方へ送り込んで、応力度の差の影響を少なくするためである¹⁰⁾。

例として、径間長 1,000m、サグ比 1/10、および塔頂サドルでの屈曲度が 50° の場合について発生する素線長の差と応力度の差を試算すれば、次のように算出される。

$$\pm \Delta C_3 = \pm \frac{d}{2} \theta = \pm \frac{66}{2} \times 0.87 \text{ rad} = \pm 29 \text{ mm} \dots\dots\dots (4)$$

$$\pm \Delta \sigma_3 = \pm E \frac{\Delta C_3}{C_3} = \pm 2.0 \times 10^4 \times \frac{29}{1,027,000} = \pm 0.56 \text{ kgf/mm}^2 \dots\dots (5)$$

ここに、

- $\pm \Delta C_3$: サドル部での曲がりによって発生するの素線長の差
- θ : サドルにおける屈曲度 (50° = 0.87 rad)
- $\pm \Delta \sigma_3$: サドル部において曲がりによって発生する応力度の差
- C_3 : 径間PWS長さ

以上の試算に示すように、PWSに特徴的なものとして現れるであろう素線応力度の差の値は、許容応力度に比べていずれも小さく、ケーブル品質を損なうものではないと考えられる。

4 まとめ

本文では、PWSの品質精度にかかわるPWS架設上の課題として、①アンリーリング時のたるみ、②引出し時のふくらみ、③引出し時のねじれ、および④温度変化による配列の乱れをとりあげ、それらの現象の要因を述べ、対策を講じて良い成果が得られるに至った経緯を明らかにした。また、架設したPWSの品質・精度をケーブルの空隙率とワイヤ素線間の応力度の差とから評価し、良好であることを示した。

明石海峡大橋をはじめとし、さらに長大化が期待されている吊橋に対して、良い品質のケーブルを経済的に架設することを目標に、今後とも、鋭意、研究を重ねてゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路公団：関門橋工事報告書、p. 529、1977年。
- 2) 中島保彦・吉田弘・磯貝恭二・三田村 武：関門橋ケーブル工事の記録、R & D神戸製鋼技報、Vol. 23、No. 1、p. 73、1973年。
- 3) 三田村武・亀山正幸・遠藤鷹光・杉井謙一・桑本俊一：40,000m級PWSの製作・展開実験、R & D神戸製鋼技報、Vol. 38、No. 1、pp. 46-47、1988年。
- 4) 日本道路公団：関門橋工事報告書、p. 686、1977年。
- 5) 本州四国連絡橋公団：因島大橋工事誌、p. 215、1985年。
- 6) 本州四国連絡橋公団：大鳴門橋工事誌、p. 261、1987年。
- 7) 本州四国連絡橋公団：瀬戸大橋工事誌、p. 414、1988年。
- 8) 内川千彦・堂垣内光弘・細川淑：南備讃瀬戸大橋ケーブル架設工事、季刊カラム、No. 107、p. 96、1988年。
- 9) 本州四国連絡橋公団：吊橋のケーブルに関する検討、p. 105、1979年。
- 10) 三田村 武・守 国夫・川田忠樹・堀米 昇・野村国勝：パラレルワイヤストランド工法による八幡橋の施工、橋梁と基礎、pp. 21-22、1969年。

(1993年9月16日受付)