

(解説)

吊橋ケーブルの製作架設技術

杉井謙一(工博)

都市環境・エンジニアリングカンパニー・構造技術部

Cable Manufacture and Erection of Suspension Bridges

Dr. Kenichi Sugii

Kobe Steel has been manufacturing suspension bridge cables, and developing innovative bridge cable erection techniques since 1955. Kobe Steel engineers and products were involved in nearly every suspension bridge built in Japan. This paper describes Kobe Steel's past, present and future suspension bridge cable and erection developments and projects .

まえばき = 当社の吊橋ケーブルへのかかわりは若戸橋(中央支間長 367m, 1962 年完成)にさかのぼる¹⁾。1955 年 10 月、建設省九州地方建設局内に若戸橋出張所が開設され、ケーブルに関する調査が開始された。調査業務の一部は建設省土木研究所に委託され、その土木研究所の要請を受けて、当社は吊橋ケーブル用ピアノ線材の試作実験を重ねた。その結果、若戸橋の特記仕様書には、日本で初めての長大吊橋のケーブルに使用する材料は「神戸製鋼所製ピアノ線材と同等以上のものでなければならない」と規定される栄えを、かつ実際に当社材料の採用が決定された²⁾。

若戸橋のケーブルはスパイラルロープで構成されたが、世界的に見れば、当時の長大吊橋ケーブルといえば平行線ケーブルが主流であった。このため、当社は 1961 年に平行線ケーブル用ワイヤに関する研究を開始した。また、ケーブル架設工法に関して、欧米の伝統的工法であるエアスピニング工法(詳細後述)の開発を進める一方、1965 年には新工法として注目を集めかけていたプレハブ平行線ストランド工法(詳細後述)の開発に着手した。

以来、当社は本四架橋をはじめとする我が国の主要吊橋において、ケーブル製作架設を担当させていただいた。また、最近では韓国の吊橋プロジェクトでケーブルの架設指導を担当させていただいている。

本文では、平行線ケーブルの製作架設技術に関する当社の歴史を振り返るとともに、次期超長大橋に向けてのケーブル技術の開発動向について略記する。

1. プレハブ平行線ストランド製作技術開発初期³⁾

1965 年当時、平行線ケーブルの架設はエアスピニング工法(AS 工法)によるのが世界的な通例であった。この工法は、架設現場でワイヤを一本ずつ空中で(エア)糸を紡ぐ(スピニング)ようにして架設していくもので、ブルックリン橋(米国, 中央支間長 486m, 1883 年完成)以来の伝統的工法である。AS 工法によるケーブル架設状況例(下津井瀬戸大橋)を写真 1 に示す。

しかし、米国のベスレームスチール社は、工場製作さ

れたプレハブ平行線ストランド(PWS)を吊橋のケーブル架設に適用するというまったく新しい発想の架設工法(PWS 工法)を 1964 年ごろまでにほぼ完成させており、適用橋梁を探索しているところであった。PWS 工法によるケーブル架設例(大鳴門橋)を写真 2 に示す。

おりしもこの時期に、建設省近畿地方建設局本州四国連絡道路調査事務所の相良所長(当時)は、PWS 工法をきたるべき本四架橋の有力工法と考え、当社に本工法の研究開発を推進するよう進言された。この進言を受け、早速、当社は PWS 製作に関する開発に着手した。

古い社内資料を紐解くと、1965 年度の開発項目は以下のものであり、非常に基礎的なものであったことがうかがえる。

- PWS 製造法
- スクリーン構造
- リーリング装置
- 機械的端末定着方法
- シーリング方法



写真 1 AS 工法によるケーブル架設
Photo 1 Cable erection by air-spinning method



写真2 PWS工法によるケーブル架設
Photo 2 Cable erection by PWS method

これらの開発は順調に進み、1967年に当社は我が国のきたるべき長大橋時代を見越して、八幡製鐵(株)と共同出資でPWS製造会社(日本パラレルワイヤー(株))を設立した。そして、1968年には緑川ダム吊橋(中央支間長188.5m)、八幡橋吊橋(中央支間長160m)向けにPWSを出荷し、当時の中規模吊橋への適用を果たした。

2. ケーブル架設技術開発初期¹⁾³⁾⁴⁾

ケーブルの架設工法にはAS工法とPWS工法とがあり、1965年当時の世界の主流はAS工法であったことは上述のとおりである。当社におけるケーブル架設技術の開発もAS工法に始まった。海外、とくに長大吊橋の黄金期にあったアメリカの文献調査に始まり、架設設備の試作、自社構内実験を経て、1966年には建設省土木研究所内での施工実験を成功させた。この実験の成功により、当社はワイヤ製作のみならずケーブル架設工事も担当できる会社であるとの評価をえた。

このようにAS工法の開発を進める一方で、多少のタイムラグを生じつつも、上述のPWS製作技術の開発をおこなっていたのが当時の当社の実状であった。

AS工法にせよPWS工法にせよ、架設されたストランドをスクイーズし(円形のケーブル断面となるよう成形する)、そののち防食用のワイヤラッピングを施す(ケーブルの周方向に細径のワイヤを巻き付ける)必要がある。このため、1966年には神戸大学建設工学研究所において、実物大模型をもちいたスクイーズとワイヤラッピングの実験を実施した。

さらに両工法に共通の課題であるが、キャットウォー

ク(ケーブルトラスを基本構造系とするケーブル架設用空中足場)を如何にして設計、架設、調整するかという問題を解決していく必要があった。また、吊橋全体系の解析、ケーブルの温度特性やケーブルバンド近傍のケーブル挙動(二次応力問題)を把握しておく必要があった。これらの問題点については、1970年に設立した構造研究所と実務部隊とが一体となって研究開発し、関門橋建設から本四架橋初期にかけて解決していった。

3. 関門橋

1970年3月、当社は八幡製鐵(株)、富士製鐵(株)とともに関門橋(中央支間長712m、1973年完成)のケーブル工事を共同受注した。この吊橋のケーブル架設は、当初、AS工法で計画されていたが、建設間近になって新しい技術への挑戦と国産技術の開発という観点から、PWS工法に変更された。

これだけ大きな規模の吊橋にPWS工法が適用されるのは初めてのことであり、発注されたケーブル工事の工事範囲には、PWSの試作と実物大PWS(長さ1160m)の引き出し展開実験が含まれ、1970年10月に新日鐵大分製鉄所構内でPWS引き出し展開実験がおこなわれた。実物大PWSの引き出し展開実験の最大の成果は、リール巻きされたPWSがリールから解かれる過程で、リール内で弛みを生じる現象を発見できたことであった。

この現象に対しては、種々検討の結果、工場でPWSをリール巻きする際に、緊密にかつ均一に巻取するためのいくつかの対策が講じられ、PWSの工場製作に反映された。さらに、補助的機能として、PWSの尻手ソケットを移動させることにより弛みを吸収できる装置を開発し大きな効果をえた。

4. 本州四国連絡橋⁵⁾

1980年代~1990年代は本州四国連絡橋、レインボーブリッジ(東京都)、白鳥大橋(北海道)が架設され、我が国長大吊橋の黄金期となったが、当社はこれらの吊橋すべてのケーブルに、新日本製鐵との共同受注により関与する機会をえた。この時期のケーブル技術に関して、とくに大きな話題を整理すると、以下のとおりである。

4.1 コンピュータを利用した解析技術の発達

1980年頃は大型計算機が普及し始めて間もない時期であったが、上述の構造研究所でFORTRANによる各種構造解析プログラムを精力的に作成した。とくに非圧縮材であるケーブルやロープを含む構造系の解析には、当時、適当な汎用ソフトがなく大変な労力をかけて自社開発した。これにより、複雑な挙動を示すキャットウォークの解析が可能となり、構造の合理化を大いに進めることができた。

1990年代はパソコンが急速に発達した時代であり、大型モデルの解析にもパソコンで対応が可能となった。当社でも、大型計算機からパソコンへの転換は急速に進み、最近では本社事務所での設計業務と現場事務所での架設計画業務とに共通して使用できる三次元大変形解析

プログラムを自社開発し有効活用している。

4.2 超長尺の高強度 PWS

ワイヤ百本程度を六角形に束ねたストランドをあらかじめ工場で作り、リール巻きした状態で輸送して現地でキャットウォーク上を引き出す工法がPWS工法である。上述の関門橋の項で述べたことであるが、リールから解かれる過程でPWSはリール内で弛みを生じる。関門橋で構じられた対策は功を奏し、南備讃瀬戸大橋（PWS長さ1780m）までは問題なく架設することができた。しかし、明石海峡大橋（PWS長さ4070m）に向けて1985年に超長尺PWSを試作し、引き出し展開実験をおこなったところPWSの弛み量は予想をはるかに超え、引き出し展開実験途中で引き出し不可能となってしまった。このときの状況を写真3に示す。

リール内でPWSが弛むメカニズムは、リールの回転とともにわずかなPWSの弛みが後ろへ後ろへと送られて大きく蓄積する現象である。種々の検討の結果、その解決策はリールの胴径とPWS巻取り時のバックテンションの改善にあることをつきとめた⁴⁾。改善策を施した上で、二度目の試作・展開実験を1987年に実施し、4070mのPWSをリール内で弛ませることなく引き出すことに成功した。引き出し展開状況を写真4に示す。

いっぽう、ワイヤの高強度化は吊橋関係者の長年の夢であったが、当社は世界に先駆け従来の160kgf/mm²級を20kgf/mm²上回る180kgf/mm²級ワイヤを開発した⁶⁾。このワイヤは、CとSiを増量添加することにより高強度化を図ったものである。CとSiは鉛パテティング材の強度向上に効果があり、Siはめっきによる強度低下の防止に効果がある。

180kgf/mm²級ワイヤをもちいたPWSは明石海峡大橋で初めて採用されたが、片側2本で設計されていたケーブルが片側1本で済むこととなり、工費・工期低減に大きく貢献することができた。

4.3 低張力エアスピニング工法⁷⁾

従来の伝統的なエアスピニングは、ワイヤをフリーハンク状態で一本ずつ架設しながら、同時にサグ調整（ワイヤの垂れ下がりを調整し、ワイヤ相互の長さを揃えること）をおこなっていく工法である。この工法は、風の強い日にはワイヤのサグ調整がネックとなって、スピ



写真3 失敗した4000m-PWSの引出し実験
Photo 3 Failed unreeling experiment of 4000m-PWS



写真4 成功した4000m-PWSの引出し実験
Photo 4 Succeeded unreeling experiment of 4000m-PWS

ニングがおこなえなくなってしまうという問題があった。

そこで、ワイヤのサグ調整をおこなわなくてもよい工法として、低張力エアスピニング工法を開発した。本工法は、スピニング時のワイヤのバックテンションをフリーハンク相当の張力よりも低く設定し、スピニングされたワイヤをキャットウォーク上に設置されたフォーマーに載せていくことによりワイヤの長さを揃えるものである。風がある程度強い日にもスピニングが可能で、稼働率の向上が図れるようになった。本工法は本四架橋の下津井瀬戸大橋に適用された。そのケーブル架設状況を写真5に示す。



写真5 低張力AS工法による下津井瀬戸大橋のケーブル架設状況
Photo 5 Air spinning under low wire tension at the Shimotui-Seto Bridge

5. 韓国ヨンジョン大橋⁸⁾

我が国の長大吊橋建設は、1999年5月に完成した来島大橋をもって一応の終焉をみたが、中国や韓国では、現在、吊橋の建設が盛んにおこなわれている。当社は、これまで蓄積したケーブル架設技術を維持・発展させる目的で、現在、韓国のヨンジョン大橋（三星物産受注）のケーブル架設指導をおこなっている。

韓国ヨンジョン大橋は、仁川に建設中の新空港に接続する道路の一環として架設されているものであるが、ユニークなケーブル形状をしていることで有名である。つまり、ケーブルは塔頂で絞られ桁部分で開いているいわゆる三次元サグケーブルと呼ばれる形式であり、吊橋全体系のねじり剛性の向上を狙ったものである。2000年6月現在の状況を写真6に示す。

この吊橋への当社の係わりは、ケーブル架設指導、ケーブル架設機械類の貸与、ハンガーロープの製作、ケーブル内乾燥用送気装置の製作などである。

世界で初の三次元サグケーブルの架設に関与できたことは幸運であると同時に、当社の技術力を世界に紹介できる機会となったことを大いに喜んでいる。

6. 次期超長大橋時代に向けて

1998年5月29日に平成10年度を初年度とする新道路整備五箇年計画が閣議決定され、東京湾口道路、伊勢湾口道路、紀淡連絡道路、関門海峡道路、豊予海峡道路、島原・天草・長島架橋の構想について、長大橋梁にかかわる技術開発、地域の交流、連携に向けた取組みなどを踏まえ調査を進めることが謳われた。これらの構想には、明石海峡大橋を上回る規模の吊橋が含まれており、新技術・新工法に関する技術開発が強く求められている。

これらの課題に応えるべく、当社としても多くの技術開発を推進中であり、主なものを列挙すると以下のとおりである。

- 1) 200kgf/mm² 級ワイヤ
- 2) 走行性に優れたオープングレーチング床版
- 3) パイプトラスとオープングレーチング床版を組合せた構造形式
- 4) 動吸振器やジャイロをもちいた耐風安定性向上策
- 5) 7mm ワイヤをもちいたエアスピニング
- 6) ケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法

むすび＝当社が吊橋ケーブルにかかわりを持って以来、



写真6 韓国ヨンジョン大橋の架設状況

Photo 6 Construction condition of the Youngjong Grand Bridge in Korea

40年以上の歳月が経過した。この間に建設された我が国吊橋のほとんどに関与できたことは、本当に幸せなことであった。また、国内プロジェクトが一段落したこの時期に、韓国の新形式吊橋のケーブル架設に関与できる機会をえて、将来に向けた技術蓄積をおこなえることに感謝している。

開発スタート当初は材料開発に始まったものが、架設まで含めた総合エンジニアリングとして技術育成できたことは、社外関係者各位のご指導があったればこそと、ここに本紙をかりて改めて御礼申しあげますとともに、今後ともより一層のご指導ご鞭撻を賜わりたくお願い申しあげます。

参考文献

- 1) 80年史編纂委員会：神戸製鋼80年，1986年9月，p.520.
- 2) 土木学会発行：若戸橋工事報告書，1964年2月，p.309.
- 3) 三田村武ほか：橋梁と基礎，1998年12月，p.33.
- 4) 三田村武：大阪市立大学学位論文，1994年11月.
- 5) 穂山正幸ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49，No.2（1999）p.2.
- 6) 石岡千里ほか：R&D 神戸製鋼技報 Vol.38 No.1（1998）p.23.
- 7) 三田村武ほか：橋梁用ケーブルの最近の話題と展望，土木学会論文集，No.444VI - 16（1992）p.97.
- 8) 本四公団発行：長大橋 NEWS レター No.4（2000）p.4.