

## 【巻 頭 言】

## ケーブル利用の再認識

## Re-recognition of Use of Cable

川田建設(株) 取締役社長  
President村上 永一  
Eiichi MURAKAMI

## 1. はじめに

古い時代より、橋梁技術の大きな目標の一つは、大きい障害を乗り越えようとする人間本来の欲求を満たすべく、橋桁が一またぎする間隔、すなわち径間長をより長くすることであり、もう一つの目標は橋桁を軽量化し、工事の能率を高め、かつ耐久性を向上し、経済性、合理性を高めることである。これらは何れも材料とその接合法の進歩改良と構造系の合理性の向上によって高められてきた。

この橋梁技術を現実の橋梁に具現し、完成するためには設計と施工が有機的に噛み合うことが要請される。さらに施工条件が悪く、例えば支保工なしの架設が要求される場所では、架設工事には多くの工夫と検討が要請され、その重要度は一段と高まる。

今日、わが国では海峡や内海を横切る橋梁や山岳地を横断する高速道路橋が数多く計画され、着工されつつあるが、わが国の経済が発展するかぎり、さらに多くの大型橋梁工事の計画が次々と続くと期待してよい。新しい箇所には新しい要請が生れる。それに備えてわれわれは十分な力量を保持しておかねばならない。

## 2. 西海橋の架設を顧みて

“架設が非常にむずかしい地点だから、架設計画を速やかにたて、その架設が可能な橋桁設計に直せ”これは昭和27年9月、西海橋工事現場に赴任に当って、当時の道路局長であられた富樫凱一さんが私に送った言葉であって、39年経た今日でも私の心に生きている。

西海橋の架設地点は伊ノ浦瀬戸と言い、海面巾は200m、急深で最深部は40m、潮の干満差による潮流は渦潮となり、最大流速9ノット、兩岸の岩盤に基礎をおく支

間216mの固定鋼トラス・アーチはCantilever Tieback Erectionで架設する以外に方法はなかった。当時は支間104mの桜ノ宮橋(大阪市)が日本における最大支間アーチで、前面に支柱を設けず、橋台に固定し張出した半アーチを斜め後方よりのケーブルで支えながら架設を進める工事は、当時としては未知の分野が多い危険を伴う工事とされていた。

東西の兩岸橋台に上弦支承、下弦支承で固定した半アーチは図-2の順序で架設が進められた。

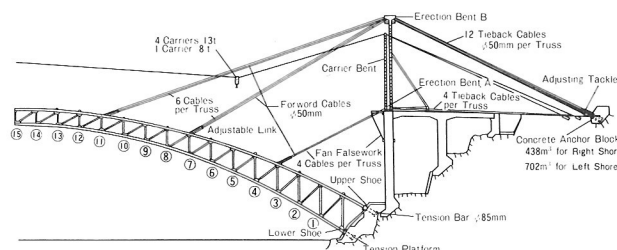
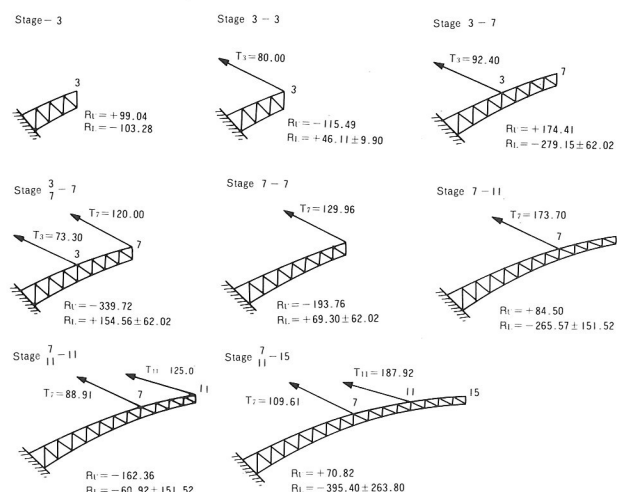


図-1 Cantilever Tieback Erectionの一般図



架設が格点3に進むと、上弦支承の反力は+99 t (引張力) となる。格点3に $\phi 50$ mmロープ4本を取付け、Tiebackケーブルの張力が80 t となるよう各ロープの長さを縮める。次に架設の格点7に進むとこの張力 $T_3$ は92 t に増加する。かくして張出し施工は図-2の順序で進み、スパン中央で東西アーチは相会し閉合に入る。この間下弦支承にも引張反力が生じるので $\phi 82$ mmのTension Bar 4本で下弦材端を定着するよう追加した。ちなみに当初設計では上弦支承のみ最大200 t の反力を想定していた。

アーチの閉合に予応力付加を決意する

半アーチの閉合にあたり、半アーチの架設時載荷応力を固定アーチ応力状態に近づけるためには

$$\left. \begin{array}{l} \text{上弦側ジャッキ推力} = -305.901 \text{ t } (15^\circ\text{C}) \\ \text{下弦側ジャッキ推力} = -168.902 \text{ t } (15^\circ\text{C}) \end{array} \right\} \dots \textcircled{1}$$

を必要とし、この推力は拱頂の上下弦材に設置した300 t ジャッキにより与えることとした。

完成時、上弦支承には主荷重応力の範囲内で+207.9 t の引張反力を生じる。さらに温度の異状降下 $-5^\circ\text{C}$ で+60.3 t, 縦方向の地震力 ( $K_H=0.2$ ) で+148.4 t の引張反力を生じる。従って総引張反力は416.6 t となる。また固定アーチの圧力線は起拱点で下弦側に、拱頂で上弦側に偏するので、これを中立軸に近づければ、アーチの各部の応力は平均化する。従ってこれらを改善するために、『④上弦支承に212 t の圧縮力を添加する。⑤拱頂の上下弦材の応力度を等しくする』ことを考えた。この2条件よりアーチの弾性重心に作用させる力を求めると

$$M_e = 114.579 \text{ t} \cdot \text{m} \quad H_e = 68.201 \text{ t}$$

これを上下弦でのジャッキ推力に直すと

$$\left. \begin{array}{l} \text{上弦側ジャッキ推力} = +33.728 \text{ t} \\ \text{下弦側ジャッキ推力} = -101.938 \text{ t} \end{array} \right\} \dots \textcircled{2}$$

①, ②の推力を合算すると

$$\left. \begin{array}{l} \text{上弦側ジャッキ推力} = -272.173 \text{ t} \\ \text{下弦側ジャッキ推力} = -270.840 \text{ t} \end{array} \right\} \dots \textcircled{1} + \textcircled{2}$$

②の推力をプレストレスとして付加することにより

(イ) 主荷重の範囲では上弦支承に引張反力は生じない  
(ロ) 下弦材応力(部材中最大応力)は $-1,203 \text{ t}$ が $-1,063 \text{ t}$ に減ずる

(ハ) 上弦材と格点6～格点15間の下弦材の応力はほぼ同等になる

(ニ) 斜材, 垂直材とも応力は減少する

アーチ閉合の実施は図-3の順序に従って実施した。上弦側拱頂の閉合は $6.1^\circ\text{C}$ で、下弦側閉合は $0^\circ\text{C}$ の下でそれぞれ早朝日の出前に行った。

基本計画への反省

西海橋の基本計画は当初より固定トラス・アーチであった。固定アーチにすれば、この型式では世界第3位

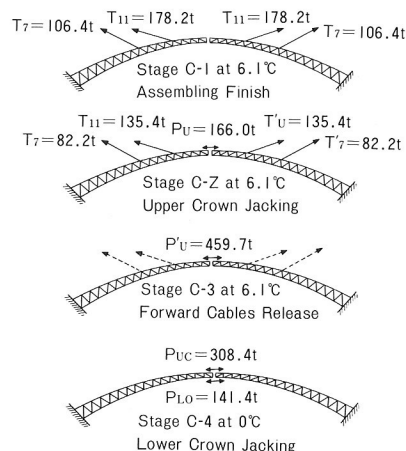


図-3 西海橋のアーチ閉合順序

だと言う考えもあったかも知れない。また架設時の安定を増すことを意図して橋台に強固に定着する固定アーチとし、上下弦支承間隔を10.6mと広くとった。これらのことは架設時には全く裏目に出た。剛度の高い突出桁と伸びの大きいケーブルとが応力を分担しあうことは中々困難を伴う。 $T_3$ で支えながら格点7まで伸ばす間の張力管理には苦心し、危険度も高いと感じた。

プレストレスの付加はアーチ閉合用のジャッキをそのまま使用したので、全く余分な経費がかからず、収穫のみを得た。しかし設計の当初からプレストレスを導入する計画で行えば、更に経済的な断面決定が可能であったと思えた。プレストレスを付加して応力分布も改善する決意をした時、アーチだけでなく一般的な利用技術についても併せ考え特許を取得することを考えた。“不静定構造物に内力又は外力として力又は曲げモーメントを付加し、その構造系の応力分布を改善し、弱点を除去する工法”が私の原案であった。当時の国道課長高野務さんに鬼の首でも取った気持ちで手紙でお話ししたところ“余計な事は考えずに、西海橋の完成に全力を尽せ”との返事で一件落着となった。

### 3. PC橋の出現と張出し桁への前進

鋼橋は1779年、イギリスのセバーン川中流にスパン30mのアーチ橋が架けられてから200年を経て、設計と施工、理論と実際とが噛みあいながら、時には失敗もあり、ドラマもあったが、全体技術は着実に向上しつづけ、鋼材の進歩改善にも助けられ、わが国ではスパン1,100mの南備讃瀬戸大橋(道路, 鉄道併用橋)、海外ではスパン1,410mのハンバー吊橋を架設するまでに発達した。

プレストレスト・コンクリート橋は提案や特許が先行し、実橋に利用されるまで長い年月を要した。すなわち1886年(明治19年)P.H.Jacksonがコンクリート中に配置

した鋼材を緊張することで特許を取って以来、1939年(昭和14年) Freyssinet が定着用コーンとPC鋼線を緊張するための特殊ジャッキを考案し、経済的にプレストレスト・コンクリート橋の施工を可能にするまで約半世紀の歳月が流れている。この間、いくつかの実験も行われたが、コンクリートの乾燥収縮、クリープにより部材が短縮する現象が分らず、普通鋼では導入したプレストレス力が消滅するなど、実験は失敗をくりかえした。

Freyssinetの偉大さは、PC鋼線を定着する一連の装置、コーンと特殊ジャッキを考案し、この道具を使って教えられた通りに行えばPC桁が製作できるというところまで完成させたことである。ここにファミリーが誕生するのは当然であって、ファミリーの存在がPC橋の発達に大きく寄与したことも事実である。これを見て諸国の先生方も自己考案のシステム(主として現場施工技术)を特許とし、新しいファミリーを誕生させていった。PC橋は小スパンのプレテン桁を除けば、全て現場施工であって、橋梁としての構造理論はすでに鋼橋の分野で開発済みと言ってよく、その開発の重点はPC鋼材の定着装置、施工法、施工機材の考案、改良におかれている。

わが国では、PC橋は26年プレテン桁橋(スパン3.5m) 28年ポステン桁橋(スパン7m)が架設され、以後スパンを伸ばし、連続桁では押出し工法、移動支保工工法などで経済性を高めたが、さらにスパンを伸ばす要請から張出し工法(Cantilever Erection)へと進んだ。

わが国での張出し工法で施工したPC橋は昭和34年、神奈川県の大瀬橋(12m+51m+12m)が最初で、ディビダーク工法による支保工なしの架設に成功した。この工法の橋は、39年越野尾橋(スパン100m)でスパン100mを越し、47年浦戸大橋(スパン230m)でスパン200m台にのせ、51年には浜名大橋(スパン240m)では世界最長PC桁の記録を更新した。

フレンネー張出し桁は、名神高速道路の釈迦池橋(26.7m+60.0m+26.7m)が昭和38年に架設されたのが初めて、二番橋は46年に飛び、以後年々2~3橋ずつ架設されてきたが、スパン100mを越えるものはなかった。釈迦池橋では予想以上の撓みが出たなどの風説もあって、ディビダーク工法による張出し架設が圧倒的に多くなった。

一方PCケーブルの各ファミリーも原発、海洋構造物等の巨大構造物の需要もあって、300t、500tさらに1,000tを越す容量のPCケーブルと、それに応じた定着装置でセット量の少ないものを開発している。また張出し桁架設を安全、確実、迅速に施工する方法や機材も考案され、1970年頃より欧州においてPCケーブルによる長スパンの張出し架設の工事が急速に増加し、ディビダークの鋼棒方式の張出し架設を圧倒するに至った。

1979年に完成したライン河に架かるKöln-Deutz新橋

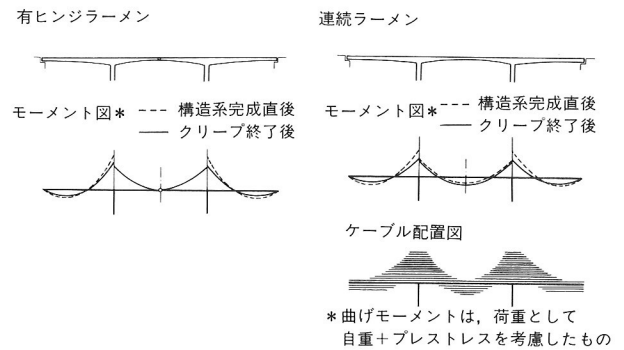


図-4 張出し工法による有ヒンジと連続とのモーメント差

はPCケーブル使用の張出し工法に連続桁の傑作と考えられる。旧橋は第2次大戦直後の1948年、戦争で破壊された橋(タイド・アーチと記憶する)を鋼箱桁橋の一番手として、132m+184m+121mのスパン割で復現し、鉸桁の記録を更新し、世界をあとと言わせたが、この美しい鋼橋も交通量の増加で巾員を倍加することになった。新橋は既存の鋼橋に並列し、同じスパン割で、かつ各部の桁高も全く同じと言う設計を敢て実施したのである。PC桁は定位置より5.3m上流側で造られ、完成後全長437m桁を5.3m横移動させて鋼桁と一体使用する。そのためPC橋の高さの誤差は既存の鋼桁に対し±5cmが要求される精密施工を行いつつ、1ブロック(3.6m)を4日のサイクルで施工している。

鋼橋でもスレンダーと言われたものと同じ桁高のPC橋を架設できたのは、④中央部に軽量コンクリートを使ったこと、⑤導入力の大い主ケーブルを使うことで主桁断面を小さくできたこと、⑥中間部にプレストレスによるスパンモーメントを添加して連続桁とし、支点モーメントを減じたこと等の理由によっている。このうち後の2項はPCケーブル使用の長所であって、FCC協会設立の原点であった。

FCC協会はPCケーブルによる張出し桁を施工したいと思う会社に対し、在来のファミリーの垣根を越えて入会でき、その施工に必要な情報を提供する協会である。FCC工法には多くの特徴と利点があるが、その一つはケーブルの後挿入が容易である利点を活かし、スパンケーブルにより、桁の負の曲げモーメントを添加して連続桁とし、かつ支点モーメントを減少させることにある。さらに連続桁とすることで耐震性も向上する。

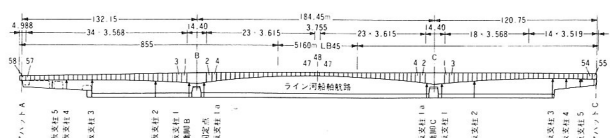


図-5 Köln-Deutz橋(鋼橋、PC橋とも同形)

#### 4. スパンの増大とともにケーブルの重要度は高まる

長大橋の主役である吊橋は強度が高く、耐久性のあるワイヤーの開発とそれを空中で集成して主ケーブルとすることによって、今日の長大吊橋技術にまで発展した。

PC橋は高強度の鋼材（主として鋼線）に高い張力を与えつつ定着する技術によって、今日の盛況がもたらされた。

第2次大戦後に出現した斜張橋は、斜めに張られたケーブルに支えられ、張出し架設して行くそのまの姿で構造系を完成する橋梁と言ってよい。PC張出し施工による橋梁も同じ原理と言える。そして何れも戦後の同時期（1955～60年）に実用化されている。

西海橋のアーチ閉合が近づいた昭和29年12月、内務省の橋梁の先輩鈴木清一さんが見え「これだけ立派に造った斜吊りケーブルをアーチ閉合後撤去するのは惜しい。残して本体に組入れられないのか。」私は構造上残せない理由を述べて抗弁したが、当時はもっと長いスパンのアーチになら利用できるかも知れないが、桁橋に应用するなどとは予想だにできなかった。

斜張橋の桁はケーブル取付点でそのケーブル方向に弾性的に支持されると考え、この点でケーブルの伸びと桁のたわみが等しいとの条件からケーブルの張力は求められ、桁の曲げモーメントはケーブルのない桁に較べて大巾に減ずる。ケーブルに計算された張力が加わったとき、ケーブル長さが（サグを含め）原点間距離となるよう短く製作して、格点をあらかじめ上げ越しておけば、桁には曲げモーメントはほとんど生じない。

これは斜辺がケーブルで、塔と桁（圧縮材）とを共用する複合三角形とも考えられ、塔側からこの三角形を逐次積重ねて張出し架設をすることを考えてよい。これは塔と桁をコンクリート構造とする機会を与えることになる。PC斜張橋の実施は鋼斜張橋より遅れて始まったが、最

近急速に伸び、今年スペインのラマ橋でスパン440mを記録し、鋼斜張橋の最大級と肩を並べるまでに発展した。このことはPC橋でスパンを伸ばすためには、斜張ケーブル方式が唯一の工法で、かつ経済的な工法であると実証したとも言える。

ケーブルの素線は冷間引抜き鋼線で、構造用材のうちで最も強度が高いが、溶接で接合できない欠点もあってそれを集成したケーブルも定着具によって他部材に定着する。ケーブルの特性を活かし、欠点を改良しつつ発達したのが吊橋であり、その基本は平行鋼ケーブルを空中で集成する主ケーブル架設で、現在の最大スパン1,410mにまで領域を拡大し、他の橋梁型式をよせつけない。本年春、明石橋梁の着工が行われ、その工事が始まろうとしている。ここにケーブルを架け渡す工事が先頭を切り、ケーブルを使った多くの架設が行われるであろうし、スパンの拡大はそれらの架設に新しい進歩をもたらすであろう。

イタリアのメッシナ海峡にスパン3,000mの単径間の新型吊橋の構想がMusmeci教授によって発表された。これは張力構造的な吊橋と言ってよく、下段ケーブル（耐風ケーブル）は上部引張材を通じて主ケーブルに張力を伝えるが、その張力は各ケーブルが十分にプレストレスを導入されているため、荷重がかかってもほぼ一定である。このように床部分が上下左右の方向に相互にプレストレスされていることは何れの方角にも変位の少ない構造となろう。主ケーブルと下段ケーブルの間に、床部だけが圧縮材で、各方向に張られ、プレストレスを加えて形を整えつつ進む架設には複雑な計算を要し、それを空中で実施する作業の困難さは想像を絶するものになろう。この案は、実施とは別に研究に値するものである。

最近の英国雑誌によると鋼線ケーブルに勝る新素材のロープ(Parafil Rope)がコンクリート構造のクーリング塔の修理に使われている。このParafil RopeはPolyaramidの繊維を平行にパックしたもので、強度は195kg/mm<sup>2</sup>、弾性率は鋼材の60%、耐久性もあり、両端定着具も開発されていて、その重量は同強度の鋼の1/7である。鋼線を使った吊橋の実用限度は3kmと言われているが、このロープを使えば5kmに伸びうると述べている。かかる新素材のロープは橋梁の設計に架設に新風をもたらすであろう。

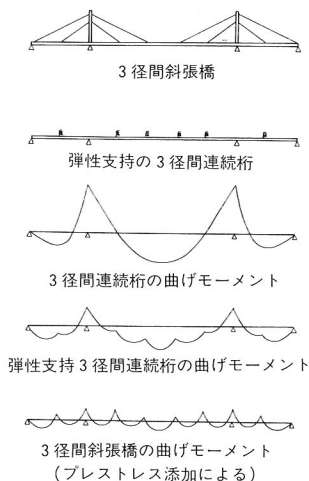


図-6 斜張桁の桁の曲げモーメント図

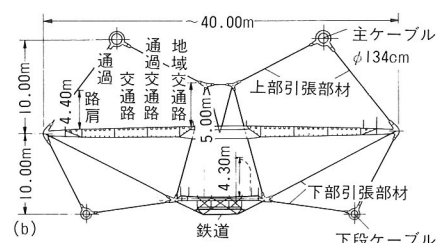


図-7 Musmeci提案の張力構造吊橋の吊構造部