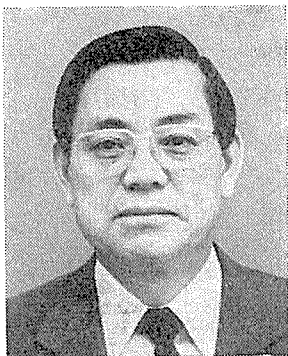


## PC 産業の将来展望

森 元 峯 夫\*



\* Mineo MORIMOTO  
新構造技術（株）取締役社長，工博

### 1. まえがき

我が国に PC 技術がヨーロッパから導入，実用化されて 35 年が過ぎようとしている。初期の頃は工場でのプレテンション部材の製品から PC 単純桁橋を中心として発達し，今日ではコンクリート構造物の殆どどの分野に利用されている。PC 長大橋にあってはスパン 250 m の斜張橋が建設され，さらに 300 m 級のものも計画されている。

また海洋構造物としての石油掘削用 PC プラットホームもすでに建設され，目下原子炉用 PC 格納容器も建設が終わろうとしている。ヨーロッパ先進国と比較して，年次の遅れはあるが，種々な分野に応用されてきている。また年間の PC 構造物の建設市場は世界一の市場ではないかと思われる。

このようなことから PC 産業の現状と将来は，このまま進めばバラ色の将来像が描けるやに見えるが，幾多の改善工夫と実態にそぐわない慣例的な制度の見直し等も必要ではないかと思われる。したがって本稿では一つ技術分野のみならず，産業としての諸問題をヨーロッパ，特にフランス等と比較しながら私見を述べて見たいと思う。

### 2. 技術的展望

#### 2.1 応用分野としての構造物

日本の PC 産業が主として PC 橋を中心に発展してきた歴史的背景と公共事業としての橋梁建設，特に有料道路建設の歴史の中で，橋梁建設が極めて重要な位置をしめてきたことを勘案して，まず PC 橋の分野に絞って話しを進めたい。

##### (1) 移動支保工による多径間連続桁橋

おおよそ 20 年前より機械化施工法の開発の必要性から委員会組織や各施工会社の努力でヨーロッパ，特にフランスとドイツの機械施工法を導入して，今日では高架橋建設の主流の一つとなるまでに急速に発展してきた。

今後は，より効果的な移動支保工の機械利用と地震時上部工反力を各橋脚に分散する支承構造の多使用，全体的な美観を主としたデザインなどを考慮しつつ，目下 10 径間程度のものをさらに超多径間連続桁である 15～20 径間の連続桁橋を建設する設計の試みにより 1 km 単位でノージョイントの高架橋の建設が可能になると思われる。この時，反力分散の支承構造は現存のものがそのまま利用できるが，主桁の上下間の温度差による温度変形応力クラック，反力変化等の検討を加え，下部構造，特に基礎の土質の変化による上部工の影響等も十分計算可能である。また反力分散技術も極めて高度に整備

されているので、20 径間程度の超多径間連続桁も線形との関連を考えたうえで建設可能な構造系である。

## (2) 押し出し工法

押し出し工法の応用の目的は、架設費を安くすることと、主桁製作の同一作業繰返しによる品質向上と経済性の追求にあるものと思われる。平面曲線も円弧に近いものであれば極めて多数の径間を順次押し出すことも可能であり、スパン 40~60 m の中程度の橋梁に極めて適しているため我が国でも比較的順調に発展してきた。私共はいち早く、ある公的機関から諸外国の文献と実績調査を依頼され、設計編、施工編をまとめて本技術の開発の端緒を作った経緯がある。

しかし我が国で一般に用いられている押し出し工法は、押し出す手法にやや重点がおかれ、構造物そのものの不経済性の改善に目が向けられていないように見える。すなわち桁高はスパンの  $1/13 \sim 1/15$  で、他の施工法と比較して 30~40% も桁高が高い。また上床版厚は幅員によって厚さが決まり、25 cm 以上となっている。一方、下床版厚は上床版との関係で中立軸位置の経済的高さ、すなわち  $\oplus$  モーメントゾーンで上床版上縁から  $0.4 H$ 、 $\ominus$  モーメントゾーンで  $0.5 H$  の必要性から下床版厚が自ずと決定される。さらにウェブコンクリート内に連続ケーブルを配置する従来方式では最小ウェブ厚は 35 cm 程度以上となる。以上のことから主桁断面  $A_c$  は他の施工法の場合よりかなり大きくなる。一方、架設ケーブルは施工の簡便さ(架設ケーブルの再利用か、再配置を考えない)から  $\sum P_c/A_c$  で偏心をかけないプレストレスのため PC ケーブルはさらに増加する。日本的積算法が使用材料の数量ベースで決まることを考えれば、一般に言われる押し出し工法の不経済性が、せつかくの架設工法の簡便さと経済性を失ってしまう結果となっている。したがって今後は、若干の高強度コンクリートの利用により、桁高を低くおさえ、さらにアウトケーブルの利用によりウェブ厚を薄くして断面積の減少と架設ケーブルの減少化を図ることが必要である。特に地震国である我が国では下部構造への好影響を考えればなおさら重要である。一方、アウトケーブルによる連続ケーブルの経済性も付加される。

フランスを中心とするヨーロッパでは以上のことは当然のこととして実施されていて、経済性が一層発揮されている。アウトケーブルの技術に関する理論的体系の確立はフランスによってなされているし、1982 年のストックホルム FIP 国際会議でもフランスグループのディスカッションで大変活発に討議されていた。このような基本的技術の整理を通じた経済性の追求がこの押し出し工法の分野では是非必要であると思われる。

## (3) PC 斜張橋

従来の片持梁施工による PC 長大橋は  $\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$  のコンクリート使用ではスパン 240~250 m が経済的に限界である。そこで近年 PC 斜張橋が経済性と美観、桁高の低さ等の利点のため、急速に脚光を浴びている。

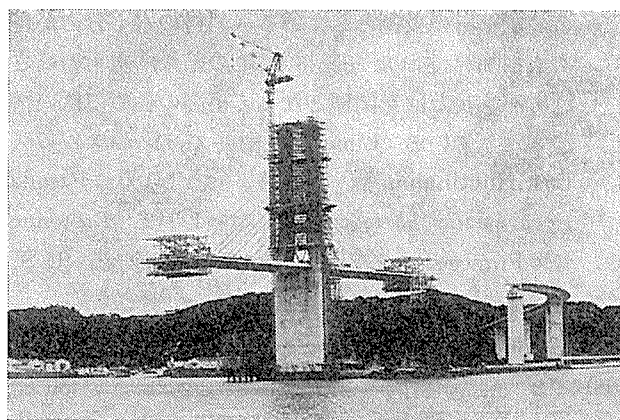
我が国の PC 斜張橋は大阪万国博覧会時に歩道橋で架設されている。以来主として歩道橋架設で大変遠慮がちな使用でしかなかったが、国鉄久慈線の小本川橋でスパン 85 m の鉄道橋用 PC 斜張橋が世界に先がけて架設されている。

しかし道路橋の本格的 PC 斜張橋は、目下建設中の佐賀県呼子大橋(中央スパン 250 m)によってようやく世界的技術レベルに達した段階である(写真—1, 2)。

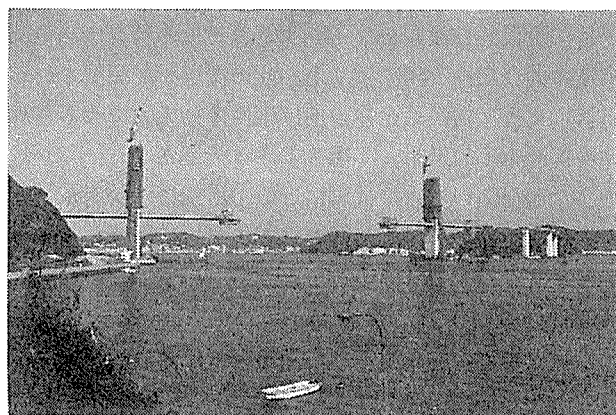
PC 斜張橋は世界的にもフランスの Brotonne 橋が 1977 年に建設されて以来、全く新しい段階を迎えた。

すなわち、それまでは主桁の曲げ剛性の極めて大きいプレストレス力の大きな斜材数の少ない構造であった。これに反し Brotonne 橋を初めとする以降のマルチタイプ PC 斜張橋では、上部構造の剛性は極めて flexible な構造であり、多数本の斜材が接近して配置された構造となっている。

この形式の PC 斜張橋は、従来の伝統的な片持梁施工



写真—1 呼子大橋(中央スパン 250 m)(1987 年 8 月)



写真—2 呼子大橋

の PC 橋の拡張された形式と考えられる。PC 片持梁施工用のケーブルをコンクリートの外に配置し、その配置の手段として Pylon を介して斜材を吊っていると考えることができる。この斜材とカンチレバー架設用ケーブルとは次の事項で異なっている。

- ・ケーブルが破損したとき取換え補修が適切にできる。
- ・しかし疲労に対して極めて敏感であり、振動に対しても同様である。

またマルチタイプ PC 斜張橋は MORANDI 方式などの斜材の少ない形式と比較して、多くの特長を有している。

- ・力の伝達が単純化されていて、上部構造への PC ケーブルの配置と Pylon への斜材の配置が簡単であり定着部の応力集中が軽減され、斜材の上部構造への定着部、すなわち吊点間の曲げモーメントも軽減される。

したがってこの種の橋の挙動は曲げ剛性の大きい桁橋とは異なったものとなる。

- ・長さの異なった斜材を多数用いるので、それぞれの振幅も異なり主構造の固有振動効果も増加された耐風安定性の極めて優れた構造である。
- ・また主桁は引張力を受けた斜材に吊られたトラス構造の圧縮材の役割をしている（斜材の水平分力が逐次累積加算された圧縮材）。この結果、主桁の高さはスパン長とは無関係となって桁高の極めて低い構造となっている（Luna 橋で中央スパン  $l$  の  $1/176$ 、East-Huntington 橋 (U.S.A.) で  $1/180$ 、Pasada Encarnacion 橋 (Argentin) で  $1/112$ 、Brottonne 橋 (France) で  $1/81$ 、Pasco-Kenewick 橋 (U.S.A.) で  $1/140$ 、呼子大橋で  $1/114$  である)。

さらに理論的には主桁のコンクリート強度を  $\sigma_{ck} = 100 \text{ MPa}$  とし斜材間隔を  $7 \text{ m}$  前後とすれば  $1/450$  ぐらいにすることも可能である。すなわち主桁の軸方向座屈と橋軸方向変形の限界のみが Critical となる。したがって近代的なマルチタイプ PC 斜張橋の場合は、上部構造の曲げ剛性を増すよりも相互に接近して配置される斜材によって構造系全体の曲げ剛性は効果的に改善され極めて高い応力に対して抵抗できる構造となる。

また側径間の橋台や橋脚に近い主桁部に定着される控え斜材、すなわち Back Stay Cables は構造物の曲げ抵抗に特別の役割をもつこととなり、Pylon の頂点の水平変位を小さく限定する役割も果たすものである。また外荷重による応力変動に対して、その大部分に抵抗するのもこの控え斜材である。以上のことから側径間が中央スパンに比較して短い場合、言い換えれば中央橋脚部を陸

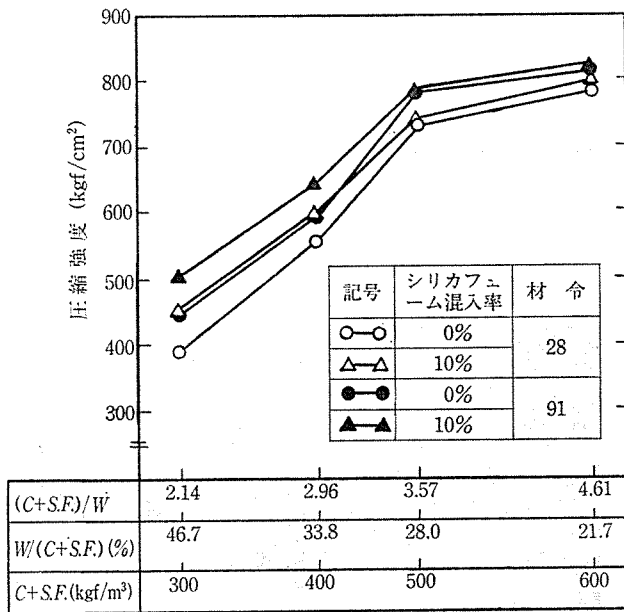
地に接近して設け中央スパンを大きくし他をアプローチスパンの連続桁構造とする PC 斜張橋や複合斜張橋では、この控え斜材の配置位置と大きさは構造全体の曲げ剛性と安定性に極めて重要な役割をもつものである。また主桁架設を片持梁施工による長大スパン PC 斜張橋では、架設の点からもこのマルチタイプ PC 斜張橋として、2 ブロックの片持梁施工ごとに斜材を配置することが極めて有効な手段である。このことから斜材は、架設が容易で、引張力調整、すなわち、Retension の容易な定着工法で、しかもセメントミルク、その他、グラウトの不要なポリエチレンコーティング斜材が最も優れた斜材となる。

一方、耐風安定性、すなわち、架設時最大張出し施工状態での低風速渦励振と、高風速の曲げ、ねじりの連成振動、さらに完成後の耐風安定性から、主桁断面が実験を基礎として決められる。そして我が国のような地震国では、地震時の主桁の橋軸方向絶対変位と主塔と橋脚結合部、橋脚下端の曲げモーメントの大きさを考慮して、セミハーブタイプの斜材配置とし、これらのバネ剛性の関係する地震時長周期構造の選択によって、構造物を経済的にかつ安定なものとするのが極めて重要である。また、中央スパン長と幅員の関係で、地震時横方向の主桁剛性も検討すべき重要な事項である。

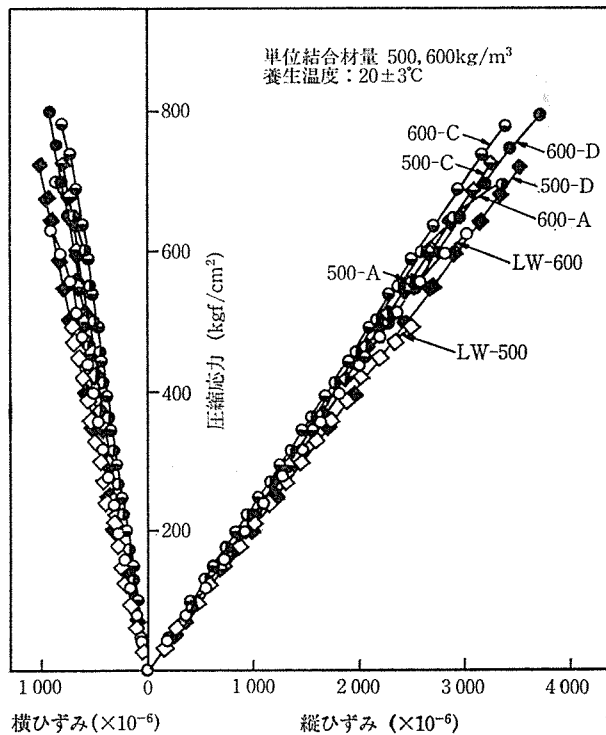
以上のことから、主桁断面も、幅員の広さと関係する箱型断面や、2 主エッジガーダー方式で、鋼製や高強度コンクリートプレキャスト横桁を密に配置した構造等がこれからの主桁横断面の主流となろう。

これらの PC 斜張橋を要約すれば、次のようになり、今後の技術開発と市場開発の要点となるものと思われる。

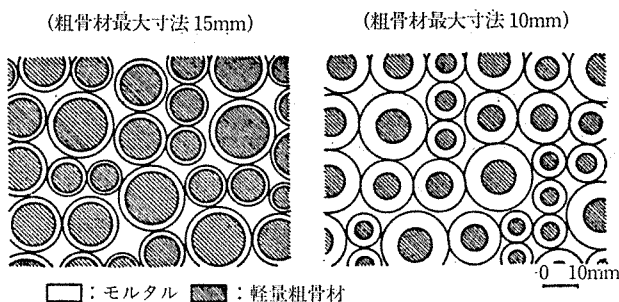
- ① マルチタイプ、フローティング、またはマルチタイプ単純支持の連続桁形式とする。
- ② 斜材間隔は、片持梁施工、2 ブロックごとに配置する。
- ③ 主桁の桁高は、中央スパンの長さには直接関係しないむしろ幅員の広さと活荷重の大きさに関係する。
- ④ 斜材の大きさは、幅員の広さと斜材間隔に関係するが、直接的には幅員に関係する。
- ⑤ 耐風安定性から見て、若干のウインドノーズを張出し床版として用いた傾斜ウェブをもつ箱桁断面か、ウェッジビームと横桁を密に配置した横断面形状が主流となろう。
- ⑥ 主桁のコンクリートは、圧縮強度が高い超高強度軽量コンクリート ( $\sigma_{ck} = 80 \sim 100 \text{ MPa}$ ) の利用が長大スパン PC 斜張橋では特に下部構造との関係から



図一 軽量コンクリートの圧縮強度と  $(C+S.F.)/W$  との関係



図二 軽量コンクリートの応力-ひずみ曲線



図三 軽量コンクリートの複合体モデル (軽量粗骨材 Silica Fume 処理)

も望ましい (図一, 図二, 図三)。

- ⑦ 主塔は、一面吊り、2面吊りでその形式が異なるが、いずれの場合も、斜材配置と付属品施工のため、軽量鉄骨フレームを用いた RC 構造が望ましく、超長大スパンとなれば Pylon も  $\sigma_{ck}=60\sim 80$  MPa の軽量超高強度コンクリートの利用が下部工、特に軟弱地盤などでは必要となろう。
- ⑧ コンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響による二次変形は、斜材の引張力を調整して、自重による主桁曲げモーメントを、支保工上で一度に施工した時と同様になるように調整すれば消去できる。さらに超高強度コンクリートの利用では、シリカフェームや高性能流動化剤の使用の結果、クリープ乾燥収縮量が  $W/C$  の関係から普通 PC 用コンクリートの約 1/2 にもなる場合があるので、なおさらこれらのハイテク化コンクリートの利用は有意義である。

⑨ PC 斜張橋は、スパン 170~180 m 以上では、下部工を含め他のいかなる構造形式 (片持梁長大橋、鋼斜張橋、鋼トラス等) よりもイニシャルコスト、メンテナンスコスト共に経済的となる。

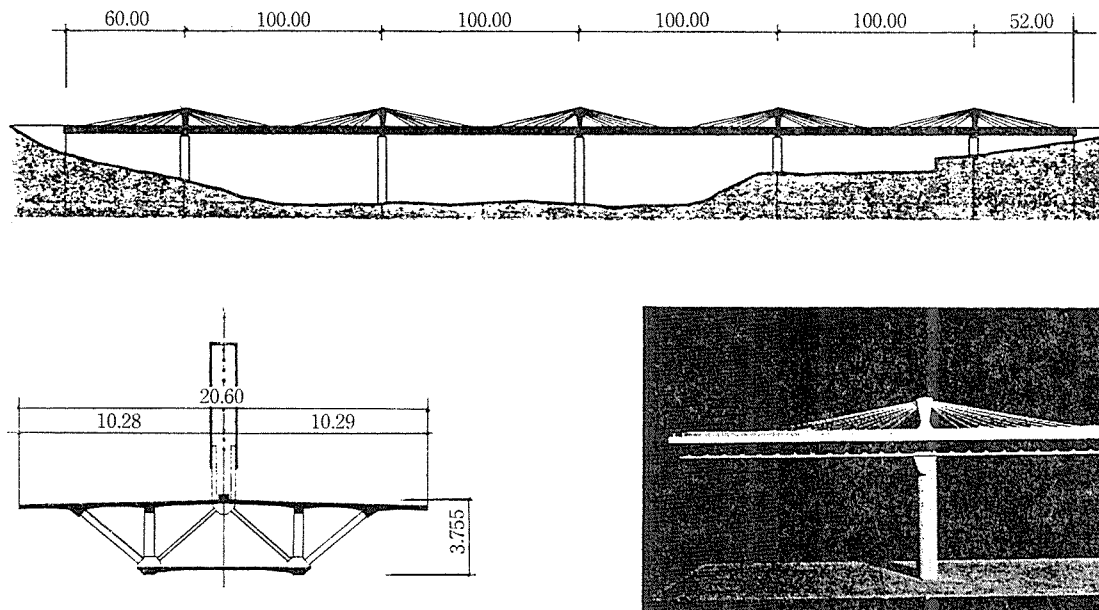
⑩ 一般に主桁は、水密性とクラックコントロール程度の橋軸方向プレストレスで十分であり、その意味では RC 構造でよく、横方向は幅員が広い場合と斜材定着部の補強のための横方向プレストレスが特に重要である。

⑪ 斜材は 7~10 m/sec 程度の低風速での風琴振動が殆どの場合見られるので、制振装置が一般に必要である。

私共では中央スパン 500 m までの斜張橋を高強度軽量コンクリートを用いて試設計しているが、本形式の PC 斜張橋は吊橋と比較しても下部構造の軽減化、耐風安定性、および耐震安定性、メンテナンスコストなどからも極めて有望な PC 橋の市場だと考えている (図四)。フランスでは目下中央スパン 856 m の PC 斜張橋、複合斜張橋の試設計も実施されている。

### 2.2 複合構造と合成構造

超長大スパンの斜張橋で中央スパンの長さと比較して側径間が短い斜張橋は、海峡や河川部の両岸にできるだけ接近して中間支柱を設ける必要のある場合にしばしば生じるケースである。このような場合、中央径間を軽量で軸圧縮抵抗力の大きい鋼構造とし、重量、すなわち、自重による曲げモーメントのバランスから側径間を PC 構造とし主塔も RC, PC 構造とする形式が用いられている。すなわち、複合 PC 斜張橋である。この複合斜張橋の例としては、西ドイツ・ライン川に架設されている



図—4 L'Arrêt Darré Viaduct (SECOA Project)

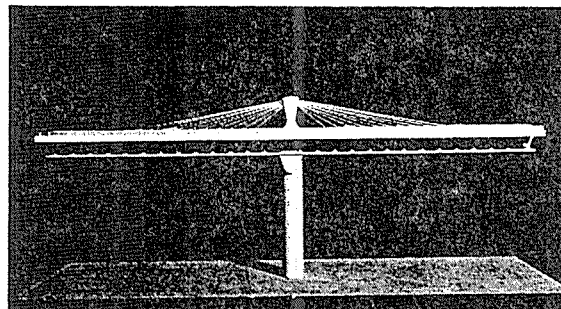
Flehe 橋（中央スパン 368 m）と日本の本四架橋生口橋がある。PC 技術の応用という意味では、市場の拡大になっているものであるが、中央スパンもこの程度以上の斜張橋でも超高強度軽量コンクリート、例えば  $\sigma_{ck} = 60 \sim 80 \text{ MPa}$  のもので、十分超長大スパン PC 斜張橋が可能であるので、鋼構造との共存を一步進めて、次の時代では超長大スパン PC 斜張橋の時代が来るものと思われる。

一方、最近のフランスを中心とした合成構造は、ウェブに鋼材を用いる PC 構造物であり、軽量化と経済性の追求の結果生まれた新しい発想による PC 構造物と呼べる（写真—3, 4, 図—5）。

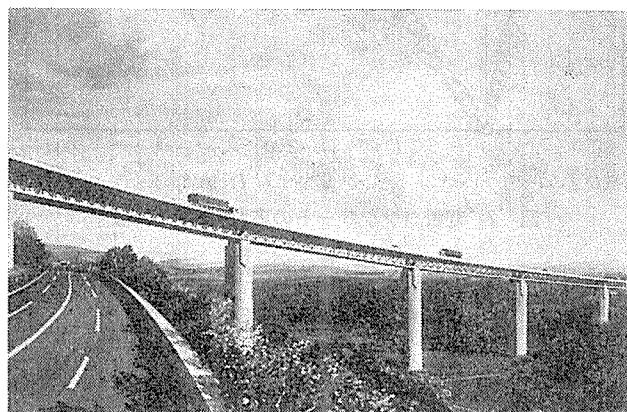
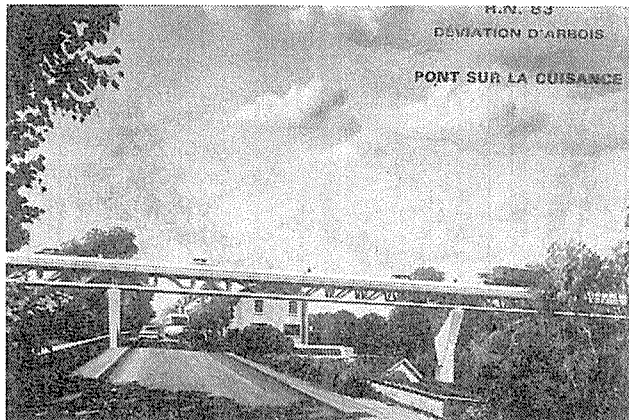
PC 橋は、スパンが長大化するに従って、自重による曲げモーメントが支配的となる。一方、橋の幅員が決まれば、上床版の厚さは 25 cm 以上となって、おのずとウェブ間隔と張出し床版の関係で決定される。また、下床版厚は、前述のように経済的断面形状決定のため  $0.4H$ ,  $0.5H$  の中立軸位置をもつ下床版厚が自動的に決定される。したがって、自重の軽減化は、ウェブの軽減化に帰着する。

これらのことは、桁高が一定の場合、ウェブの全断面に占める割合が 30~40% であることと、ウェブを鋼構造とした場合、横断面の幾何学的効率がコンクリートウェブに対して、1.5 倍程度改善されると言われている。また箱桁断面の場合、主としてコンクリート打設の困難さと欠陥はウェブにあり、Out Cable の併用によって、軽量化、経済性が見出されてきている。

さらに、曲げ応力度に対する使用限界状態と終局限界状態のリミットとせん断および斜引張応力度に対するそ

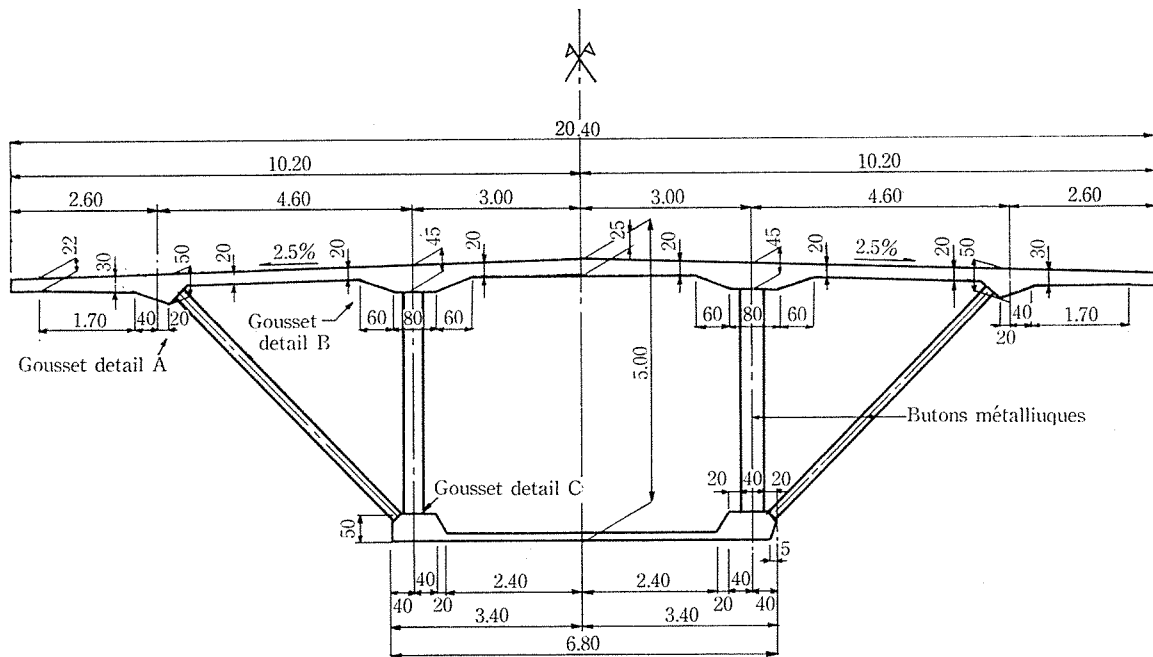


写真—3 Arbois 橋ホトモンタージュ  
（ウェブ、鋼製トラス）



写真—4 スパン 100 m の合成橋梁

れらは、後者にかなりの余裕があるのが一般的である。したがって、軽量化と力学特性から、このウェブを鋼製とし、波形鋼板ウェブと、トラス部材ウェブを用いた PC 合成構造の連続桁がフランスで建設されている。多



図—5 スパン 100 m の合成橋梁横断面図

くの理論的取扱いのほか、CEBTPにおいては各種タイプの実験的裏付けがなされ、設計・施工されている(Autoroute A 71のSalbris橋, Cognac橋, Arbois橋等)。この種のPC橋は従来の鋼合成桁と異なるものである。これらの特長は、

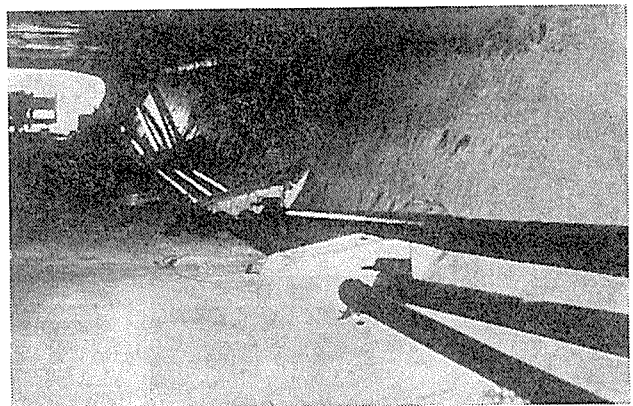
- ① 軽量化により、橋軸方向プレストレス量が減少する。
- ② さらに、幾何学的断面効率の向上により、PCケーブル量を減らすことができる。
- ③ 橋軸方向のプレストレスにより、上下床版のコンクリートのクリープの影響が鋼ウェブとコンクリート床版に付加される。したがって、鋼ウェブは軸方向に変形しやすい形が必要となる。

目下のところ、フランスでも経済性については、今後幾多の実橋建設から明確にしたいと言っているが、検討に値する構造形式かと思われる。

### 2.3 アウトケーブルと軽量化

数年前から、フランスでは特に Outside Cable, または External Concrete Prestressing が SETRA と、Prof. Dr. Michel VIRLOGEUX の理論的開発指導により数社の建設会社を中心となって実用化されている。目下ア・ラ・モードの状況である。このアウトケーブルについては、施工が容易であるとか、完成した構造物の品質保証などの点のほか、もし、PCケーブルが腐蝕した場合、取換え容易であるし、またコンクリート部材厚、特にウェブ厚を薄くできることとプレキャスト部材の結合と連続構造化が容易などの利点をもっている(図—6, 写真—5~7)。

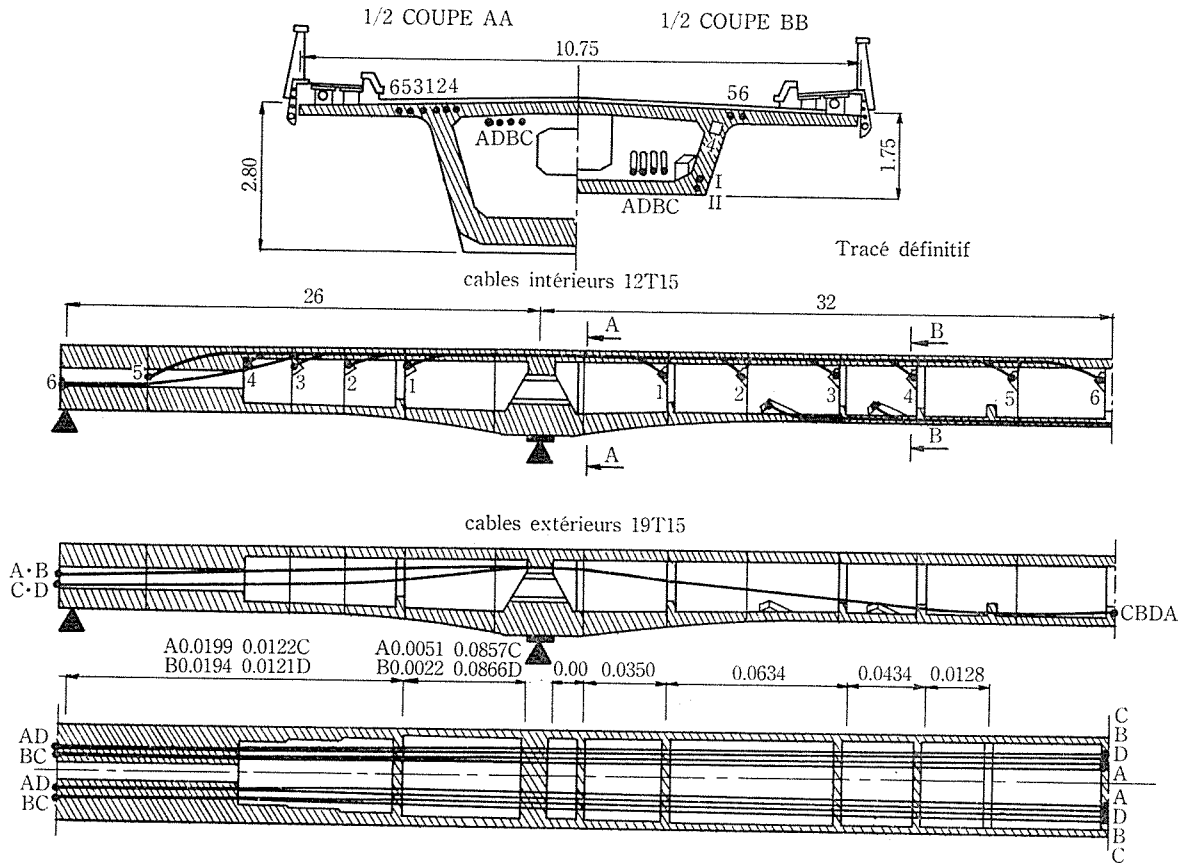
前述のように、アウトケーブルに関する理論体系の確立は、ANNALES de ITBTP, Décembre 1983, “La Précontrainte Extérieure” に施工編と理論編としてまとめられている。これらの基礎研究をもとに、ブロック



写真—5 Long Key 橋のアウトケーブル



写真—6 Bubiyan 橋のプレキャストセグメント



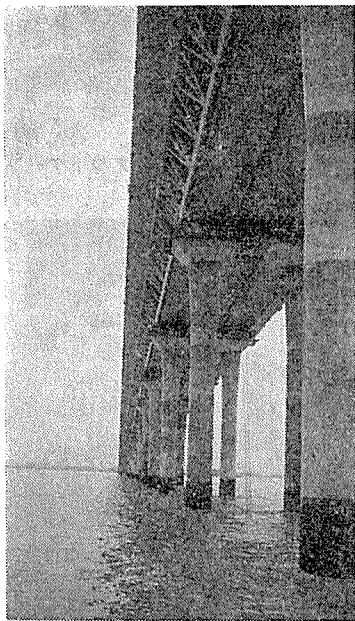
図—6 片持梁施工 PC 長大橋のアウトケーブル。Flèche 橋

工法による連続桁，押し出し工法，片持梁施工の連続ケーブル，斜張橋などに広く用いられている。我が国では前述の押し出し工法の経済性のため，本工法による設計・施工の実用化が必要な段階に来ている（写真—8）。

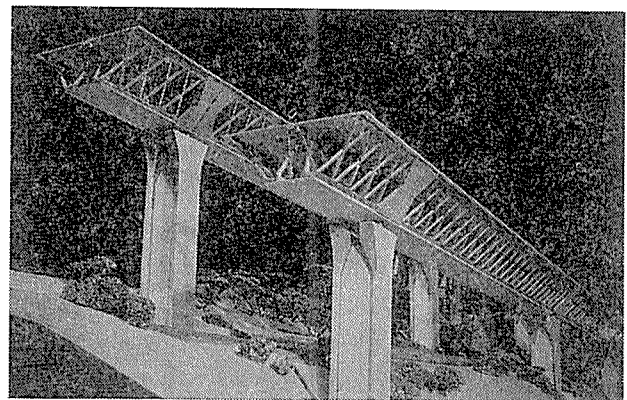
#### 2.4 使用材料の改善とハイテク化

プレストレストコンクリートが我が国で用いられて 35 年になる。この間 PC 鋼材は  $\phi 2.9, 5, 7, 8$  の PC 鋼線から  $\phi 15.3$  のストランドで  $\sigma_{pu}=190 \text{ kg/mm}^2$  の世界最高品質のものがかなり以前から開発应用されてきた。一方 PC 用コンクリートは  $\sigma_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2$  のものがほぼ 30 年間も使用されてきた。

その間，若干の流動化剤や，施工性改善の工夫はなされてきたが，High Quality, High Strength のコンクリート，すなわち  $\sigma_{ck}=600\sim 800 \text{ kg/cm}^2$  程度のコンクリ



写真—7 Bubiyan 橋のアウトケーブル



写真—8 Sylans-Glacières 高架橋  
(軽量化とアウトケーブル)

ートを安定して使用し部材の軽量化とその結果としての下部構造の経済性を図る努力は殆んどなされていない。重厚長大産業が否定される昨今、PC 構造物、特に PC 橋梁では、施工の難易度もあまり考慮せず、たんに使用材料が減少すれば受注金額が減るという積算方法にも大きな原因があるとも思われるが、もっと根本的には PC 産業界の技術的研究、経済性の追求に対する努力不足にも大きく基因していると思われる。ハイテク化と生産性の向上によって競争の原理を生み出し、他産業とのパフォーマンス競争を行うことこそが重要な時期にきているものと思われる。我々の試算では高強度コンクリートの単価アップと数量減を勘案して、コンクリート工事費そのもののバランスと経済性のほか、型枠、鉄筋、支保工、架設費、労務者数の減少等、下部工への経済性に結びつくものである。

### 3. イノベーションと経済性の追求

我が国の PC 技術はヨーロッパ先進国の技術事例を実用化することで 30 年が過ぎた。この間、主として橋梁中心として、積算手法や経済性の追求という点では従来慣習のまま、日本を代表する他の国際的産業群のように、常に技術、コストの競争のまっただ中ではなかった。極めて慣例的な PC 工法などの利用と新しいイノベーション的工法技術は日本に使用例がないとなかなか採用されなかったシステムとも関連してか、イノベーション的な技術は生まれてこなかったと思われる。しかし今後は国内建設事業にも先進諸外国の建設業者が直接建設に参加するなどの機運と、海外工事、すなわち日本企業の国際化を考えると、さらには、熟練労務者の不足と、その結果としての労務賃金の高騰などを考えるとき、少しでも軽くて安い近代化されハイテク化された PC 構造物を世に提供し、生産性の高い産業となることは日本経済の拡大、国際化と他産業とのバランスのためにも極めて重要であると思われる。

このためには、イノベーションのできる環境の整備と技術、コストの競争の原理の導入、蓄積されたノウハウ料や設計施工技術の改善努力の結果が企業に還元される積算システムを創り出す工夫をまず産業人が取り組む必要があるのではないと思われる。

### 4. 市場の拡大

価値ある技術は必ずポピュラー化するものと思う。PC 技術は第三種 PC の技術レベルの応用も含めて、ますます多方面で応用され得る。また鋼構造との併用による部分共存もあるであろう。

このような応用性の優れた建設技術の市場拡大にとって必要なことは、以上述べた使用材料の改善工夫や、技術開発、イノベーション、積算手法の工夫などのほか、大手建設会社がますます PC を利用するようになることも市場拡大の大きな動機となるであろう。

一方、建設コンサルタント分野での PC 技術者の数は、段階的に増えてはいるが、鋼構造を専門とするそれと比較して未だ少数と言わざるを得ない。これらは高等教育での PC 技術指導者の数の問題と産業界による学界への協力支援がさらに強化される必要性を示している。

ヨーロッパなどのように、学者、研究者による実務に直接たずさわるシステムができないものであろうか。

また産業側にとっては、施主側が PC を使いやすくするための諸々の環境整備、特に構造系や、PC 工法の選択で、直接担当者レベルでわかり易く、使い易いマニュアルやシステムの整備と技術サービスの充実がより一層必要のように思われる。建設産業の事業遂行のシステムも他産業が国際化し、日本経済がますます拡大して世界 GNP への比率が急速に大きくなるに従って、従来の慣例のみではよく運用できない時もやがて来るであろう。日本政府の言う外国企業のフェアオポチュニティ（公正なる機会）の必要性もますます論ぜられるであろうし、日本的な調和の理念に基づいたフェアシェア（公正なる分配）もその中味を吟味しながら変遷するであろうことを考え、ますますの PC 産業の発展を心から祈念するものである。

#### 参考文献

- 1) 関慎吾ほか：“超高強度軽量コンクリートの開発  $\langle \sigma_{28} = 800 \text{ kg/cm}^2 \rangle$ ”，セメントコンクリート，No. 473，July 1986，p. 50～57
- 2) Michel VIRLOGEUX：“La précontrainte Extérieure”，L'ANNALE de ITBTP，N° 420，Décembre 1983
- 3) S. DUTRUY et Les autres：“le viaduc de l'Arrêt-Darre (Hautes-Pyrénées)”，Travaux，mai 1987，p. 39～50
- 4) Jaques MATHIVAT：“The recent evolution of prestressed Concrete bridges”，AFPC. Symposium, Paris-Versailles, September 2-4, 1987, p. 75～86