

# 技術展望

## TECHNICAL OVERVIEW

## 技術展望

# プレストレストコンクリートの歴史 (道路構造物)

HISTORICAL DEVELOPMENT OF PRESTRESSED CONCRETE—HIGHWAY STRUCTURE

渡辺 明\*

Akira WATANABE

\*正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科  
(〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**Keywords** : girder bridge, arch bridge, cable stayed bridge, stress ribbon bridge, cantilever erection, movable form carrier, incremental launching method

### 1. ま え が き

日本におけるプレストレストコンクリートの歴史 (道路構造物) を年表形式で概観する。年表には工法導入・開発, 基準制定, 橋梁竣工, 技術内容等について特筆すべき事項を年代順に列挙し, 本文で 2. 日本における PC の幕開け, 3. コンピュータが支えた設計技術の進歩, 4. 時代が求めた施工法の変革, 5. 橋梁の多径間連続化と高橋脚橋, 6. PC 斜張橋の発展と新素材 PC 橋の登場, の順に簡単に解説する。

### 2. 日本における PC の幕開け

コンクリートにプレストレスを与えるという考案はかなり古く, 1886 年 P. H. Jackson (米), 1888 年 C. F. W. Döhring (独) らの特許取得にその萌芽が見られる。引き続き J. Mandel, M. Könen らによってその理論的補強も進められたが, 当時の鉄筋を緊張材として用いてプレストレスを導入した程度では, コンクリートの乾燥収縮やクリープなどでその殆どが失われてしまい, 実用化に発展しなかった。しかしながら, 1928 年 (昭 3) にフランスの E. Freyssinet が降伏点の高いピアノ線と高強度コンクリートを用いてプレストレスの残存量の確保に成功したのが, PC の本格的幕開けを導く端緒となった。彼はその後, 1932 年 (昭 7) 6 月に「補強コンクリート製品の製造法」で日本に特許を出願し, 特許第 96254 号として登録されている。

さて, 日本では, ドイツの Hoyer 著 Der Stahlsaitenbeton (昭 14) の訳本「鋼弦コンクリート」に触発されて発展した気配が濃く, 福井工大建築科の吉田宏彦教授が逸早く PC を紹介され, 研究を展開されている。

昭和 16 年には鉄道技術研究所内に「鋼弦コンクリート委員会」が構成されて研究が開始され, 昭和 21 年には,

軍が残っていた機関銃ばね用ピアノ線の転用を図るべく, 商工省鉱山局鉄鋼技術クラブ委員会の中に「鋼弦コンクリート小委員会」(三島鋼の発明者三島徳七博士が委員長) が設置されている。

日本最初の PC 橋としては, プレテンション方式の長生橋が昭和 26 年, ポストテンション方式の東十郷橋が昭和 28 年に, それぞれ架設され, 実構造物としての歴史が開幕したが, 以後, フレシネー工法, BBRV 工法, デイビダーク工法, レオンハルト工法等の外国工法が技術導入され, かたわら, 安部ストランド工法, SWA 工法, MDC 工法, OBC 工法等の国産工法も次々に開発されて, 土木の主として橋梁中心に展開していった。

もとより, 土木学会による「PC 設計・施工指針」の制定 (昭 30) や PC 技術協会設立と FIP 加盟 (昭 33) が PC の発展に拍車をかけたことはいうまでもない。また, PC 技術協会が昭和 35 年より開始した「年次研究発表会」, 昭和 46 年から開始した「主要都市での講習会」などによる技術普及の功も忘れてはならない。そして, FIP を介しての国際的技術交流の中で, 終始日本の代表的役割を果たされた故猪股俊司博士の貢献を特筆しなければならない。

ちなみに, 日本ではフレシネー工法の導入と共に専門業者が発足したが, 平成 4 年 3 月末現在の総受注高は 3729 億円となっている。

### 3. コンピュータが支えた設計技術の進歩

PC 技術が, 建設事業を取り巻く外的条件を背景に, また, 当時の技術水準に支えられて発達することはいうまでもない。戦後の社会基盤整備のための建設投資から, 高速道路・国鉄新幹線・本四架橋等の大型プロジェクト推進, 東京オリンピック・大阪万博・沖縄海上博等のビッグイベント開催のための活発な建設投資等を背景

年表 プレストレストコンクリートの歴史 (道路構造物)

西暦 (年号)	工法導入開発・基準制定・特記事項	橋梁竣工・技術内容
1941 (昭16)	鋼弦コンクリート委員会設置 (鉄道技研)	
1946 (昭21)	鋼弦コンクリート小委員会設置 (商工省)	長生橋 (日本最初のプレテン単純スラブ橋, スパン 3.6 m × 3, 石川県) 東十郷橋 (日本最初のポステン単純T桁橋, スパン 7 m, 福井県)
1951 (昭26)		
1952 (昭27)	フレシネー工法技術導入	
1953 (昭28)	プレストレストコンクリート小委員会設置 (土木学会)	
1954 (昭29)	PC 鋼棒研究委員会設置 (日本材料試験協会) 安部ストランド工法開発	
1955 (昭30)	PC設計・施工指針制定 (土木学会)	城ヶ島大橋 (ポステン単純T桁橋, 大重量桁の海上高所架設, 神奈川県) 大川橋 (日本最初のPC連続桁, スパン [26m+18m], 単純桁と張出桁を連続ケーブルで連結, 長崎県) 嵐山橋 (デイビダーク工法架設, 当時日本最大スパン桁橋, 12 m+51 m+12 m, 神奈川県) 越野尾橋 (日本のPC桁橋のスパンが100 mを越えた, スパン 100 m, 宮崎県) 島田橋 (日本最初のコンクリート斜張橋, スパン 39.7 m, 岐阜県) 釈迦池橋 (支保工をレール上で移動, 移動支保工工法のはしり, スパン 70 m, 大阪)
1956 (昭31)	日本道路公団設立	
1957 (昭32)	BBRV工法技術導入	
1958 (昭33)	PC技術協会設立とFIP加盟 デイビダーク工法技術導入	
1959 (昭34)	レオンハルト工法技術導入 SWA工法開発 首都高速道路公団設立	
1960 (昭35)	MDC工法開発	
1961 (昭36)	PC設計・施工指針改訂 (土木学会) PC設計・施工基準制定 (建築学会) レオバ工法技術導入	
1962 (昭37)	阪神高速道路公団設立	
1963 (昭38)		
1965 (昭40)	OBC工法開発 OSPA工法開発 フープコーン工法開発	
1966 (昭41)		目黒架道橋 (日本最初のブロックカンチレバー工法架設, 東京) 天草3号橋 (桁橋として当時スパン日本一 [160 m], 熊本県)
1967 (昭42)		石川高架橋 (連続桁方式を採用, スパン 21.9m × 6, 東京八王子)
1968 (昭43)	PC道路橋示方書制定 (日本道路協会) VSL工法技術導入 SEEE工法技術導入	根古屋橋 (プレテンションド・ケーブルトラス架設工法を採用, 静岡県) 玉津橋 (日本最初のプレビーム桁橋, スパン 18.5 m, 高さ 65 cm, 大阪)
1969 (昭44)		万国博歩道橋 (日本最初のPC斜張橋, 大阪) 万国博9号歩道橋 (日本最初の吊床版橋, 大阪) 波羅密橋 (日本最初のピルツ橋, 東京)
1970 (昭45)	CCL工法技術導入 本州四国連絡橋公団設立	浦戸大橋 (日本のPC桁橋のスパンが200 mを超えた, スパン 230 m, 高知県) 高島平高架橋 (移動吊り支保工工法を採用, 東京板橋) 幌萌大橋 (押し出し工法を採用, 北海道) 外津橋 (日本最初のトラス張出し工法による海上アーチ橋, 佐賀県)
1972 (昭47)	道路橋耐震設計指針制定 (日本道路協会)	
1973 (昭48)		
1974 (昭49)		
1976 (昭51)		
1977 (昭52)		浜名大橋 (桁橋としてスパン世界一 [240 m], 静岡県) 速日峰橋 (PC吊構造としてスパン日本一, 54.5m, 宮崎県)
1978 (昭53)	PC標準示方書制定 (土木学会) 道路橋示方書 (Ⅲ) コンクリート橋 篇改定 (日本道路協会)	帝釈橋 (ピロン・メラン併用工法採用, スパン 161 m, 広島県)
1982 (昭57)		月夜野大橋 (P&Z工法を採用, 群馬県)
1985 (昭60)		川端橋側道橋 (日本最初のバイプル方式設計橋, スパン 58.5 m, 福岡県) 永井川橋 (橋脚高日本一 [75.7m], 群馬県)
1986 (昭61)	コンクリート標準示方書制定 (限界 状態設計法の採用) (土木学会)	岡谷高架橋 (PC 5 径間連続箱桁ラーメン橋, 主桁と橋脚を剛結, 途中で主桁が分岐, 長野県)
1987 (昭62)		万の瀬川橋 (PC 双弦アーチ・ローゼ橋, スパン 49.9 m, 鹿児島県)
1988 (昭63)		新宮橋 (新素材を緊張材として使用した日本最初のプレテンPC橋, スパン 5.76 m, 石川県) 内の倉橋 (ロアリング工法によるRC固定アーチ橋, スパン 37m, 新潟県)
1989 (平 1)		呼子大橋 (日本最大スパン [250 m] のPC斜張橋, 佐賀県) 別府明礬橋 (トラス, メラン併用工法によるスパン東洋一 [235 m] のRC固定アーチ橋, 大分県) 撥川南橋 (新素材を緊張材として使用した日本最初のポステンPC橋, スパン 17.55 m, 福岡県)
1991 (平 3)		池間大橋 (連続箱桁橋, プレキャストブロック片持ち張出し工法として日本最大規模 [1425 m] 沖縄県) 生口橋 (複合斜張橋, 154 m+490 m+154 m, 広島県)

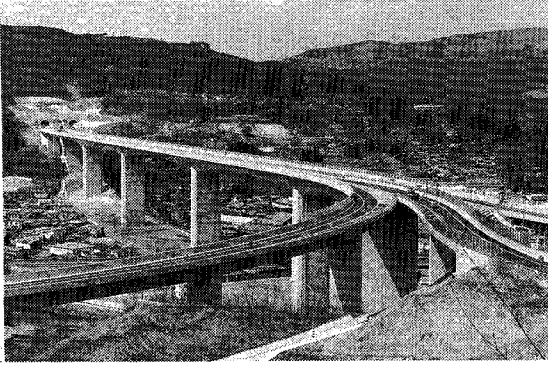


写真-1 岡谷高架橋



写真-2 浜名大橋

に、PC 設計施工技術が逐年進展していった有様を年表は如実に物語っている。すなわち、設計計算の殆んどが手回しの計算機で処理された昭和 30 年代には、不静定次数の少ない、解析しやすい構造が選ばれたが、コンピュータの出現で多次元の連立方程式が解けるようになり、種々の解析プログラムが開発された昭和 40 年代からは、次第に高次の不静定構造物が増えていっている。

昭和 40 年後半から昭和 50 年前半にかけては、PC 単純 T 桁橋の自動設計・図化が建設省土木研究所で開発されたり、支間中央にヒンジがなく、中間橋脚で主桁と橋脚を剛結した PC 連続ラーメン箱桁橋の設計プログラム開発なども進んでいる。更に、有限要素法の登場で複雑な構造への取組みも可能となるなど、コンピュータの支援による設計技術の発達には目を瞠るものがある。

昭和 61 年竣工の岡谷高架橋(写真-1)は主桁が分岐している高橋脚 PC 5 径間連続ラーメン箱桁橋であるが、その複雑な構造解析には立体有限要素法が用いられたし、張出し架設と共に構造系の変化が伴い、コンクリートのクリープや乾燥収縮で不静定力の生ずる高次不静定構造の PC 斜張橋、例えば新綾部大橋、呼子大橋なども、コンピュータに負わなければ決して実現しなかったはずである。

パイプ工法はコンクリート部材の引張縁を従来工法で補強した上に、さらに圧縮縁もポストコンプレッション工法で補強する、桁高低減の妙法であるが、川端橋側道橋(昭 60)はその適用第 1 号である。

プレビーム工法は鋼桁の曲げ変形を利用してコンクリートにプレストレスを導入する方法で、ベルギーの技師により考案された。日本最初の適用橋は玉津橋(昭 43)であった。

部材のプレキャスト化と主ケーブルを巧みに利用した架設工法により、地形条件と無関係に現場施工を簡略・急速化できる利点を有する吊床版工法は、日本では大阪万国博歩道橋に初めて適用されたが、床版上に更に鉛直材を立て、上床版 PC 桁をプレキャスト施工する PC

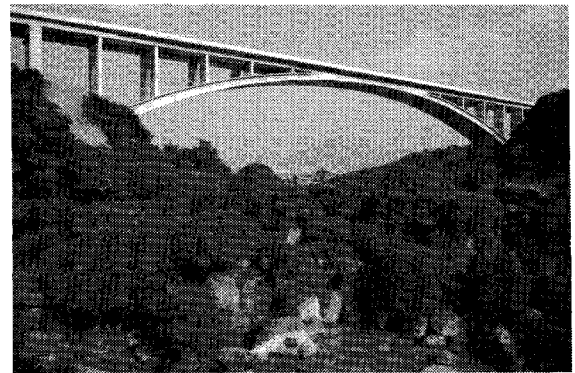


写真-3 別府明礬橋

逆吊橋の第 1 号は速日峰橋(昭 52)で、宮崎県で実現した。

#### 4. 時代が求めた施工法の変革

次に PC 技術の発展を支えた要因に機械化施工法の導入が挙げられる。すなわち、労務者の不足・現場技術力の低下、都市内などで支保工を組み長時間場所を占有することの至難さ、現場近くに桁の制作ヤードやストックヤードを確保することの困難さ、などの事情に対処し、安全・迅速かつ労働生産性の高い機械化施工法が、海外からの技術導入、国産工法の開発などにより次々に登場し、大規模 PC 構造物の施工を可能ならしめたのである。

張出し工法は、架設地点の各種制約条件に左右されず、足場なし施工を可能にした点で画期的で、昭和 34 年の嵐山橋を皮切りに、越野尾橋(スパン 100 m)、天草 3 号橋(スパン 160 m)、浦戸大橋(スパン 230 m)などの長大橋を次々に誕生させ、遂に昭和 51 年、桁橋として世界一の浜名大橋(スパン 240 m、写真-2)を実現させた。また、斜吊りケーブルを利用し、トラスを形成させながら張出していくトラス工法や、橋脚上にピロン

を立て、それよりアーチリブを斜吊りしながら張出し架設するピロン工法を利用し、更にそれらにスパン中央部をメランで結ぶ方法も併用するなどして、コンクリートアーチ橋の長大化にも大きく貢献した。外津橋(昭49)、帝釈橋(昭53)そして別府明礬橋(平1, スパン東洋一、写真-3)などがその適用例である。

なお、張出し工法はPC斜張橋の主桁施工にも採用されている。

次に昭和40年代後半から急速に普及した施工法として、移動吊支保工工法、可動受支保工工法、そして押し出し工法がある。移動支保工工法の萌芽は、支保工をレール上で移動させ、支保工・足場等の組立て・解体の手間を省いた釈迦池橋(昭38)の架設に見られるが、外国工法の導入やそれに刺激されて改良開発された本格的移動吊り支保工工法等が、高島平高架橋等首都高速576区で採用されて以来、同じく可動受支保工工法と共に主として高架橋や多径間橋梁で多用され、優れた実績を示した。

押し出し工法は、一般に橋台の後方に桁製作設備を配置し、そこで造られたコンクリートブロックを順次前方へ押し出していく方法で、日本では幌萌大橋(昭48)に初めて採用され、以後30~60m程度の中規模橋梁に汎用されている。

西ドイツのPolensky & Zöllner社の開発によるP & Z工法は、橋梁上部工上に設けた送り桁から型枠装置を懸垂し、橋脚の両側に上部工を順次張出し分割施工する工法であり、日本では月夜野大橋(昭57)がその最初の適用例となった。

橋梁架設の安全迅速施工を図るべく、主索・下索・吊索から構成されるケーブルトラスを組み、それにプレストレスを導入したプレテンションドケーブルトラスを支保工・足場代わりに用いる工法を道路公団が初採用した例に根古屋橋(昭43)があり、その後多方面で利用されている。

## 5. 橋梁の多径間連続化と高橋脚橋

上部工に伸縮装置の多い構造は自動車走行上好ましくないとして、それを廃止するため、支点上で曲げをとらないように単純連結した構造例を石川高架橋(昭42)に示したが、ノージョイント・ノーシューへ向けての一連の構造系変革は、橋梁の維持管理面の負担を軽減し、耐震性を高める利点が極めて大きい。この様な視点から有ヒンジラーメン箱桁橋からヒンジを省いた連続ラーメン箱桁橋選択への傾斜、連続中空床版橋の多径間連続化や充腹式多径間連続アーチ橋の採用等が、計算・施工技術の進歩の中で一層加速されていることは、近年の特色の一つといえよう。昭和54年、金沢高架橋(10径間連続RC中空床版橋)、昭和61年、岡谷高架橋(5径間連

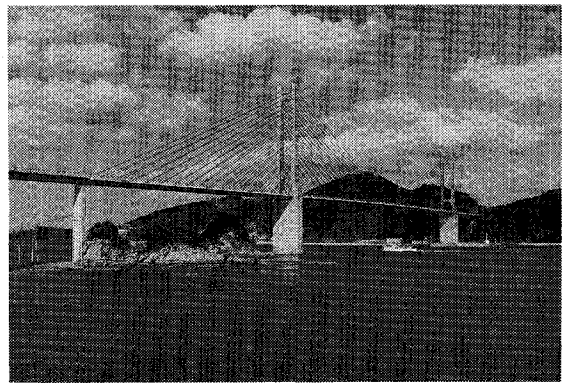


写真-4 呼子大橋

続PC箱桁ラーメン橋)等が施工され、また武雄佐世保道路で昭和61年、10径間連続充腹式アーチ橋が建設されたのはその例である。

なお、多径間連続化に伴い地震エネルギーの分散を目的として支承部に制度装置を配置した構造が増えてきている。

さて、東名・中央高速道路時代に入ると山岳地を通過することが多くなり、高橋脚橋梁の採用がふえると共にその設計・施工上の新たな問題の解決を迫られた。そこで、「道路橋耐震設計指針」(昭47)が制定される前の酒匂川橋(高さ57m)、広沢橋(高さ49m)などの設計において、動的挙動解析や振動試験などで研究を重ねた末、橋脚の高さに応じて地震力を割増す独特の設計法を案出して対処したことは、特記されよう。施工法も格段の進歩を遂げ、コンクリート打設のためのスライディングフォーム工法、セルフクライミング工法、ジャンプアップ工法等が次々に開発された。今後の高速道路は益々山岳渓谷地へ移行する趨勢にあるので、高橋脚の設計施工技術の更なる発展が期待される。なお、現在の橋脚高日本一は永井川橋(高さ75.7m、昭60)である。

## 6. PC斜張橋の発展と新素材PC橋の登場

PC斜張橋はPC片持ち張出し施工用のケーブルをコンクリート断面の外に配置し、ピロンを介して斜材を吊っている構造と考えることができ、長さの異なった斜材を多数用いるため、それぞれの振動数が異なり、耐風安定性に優れることや、主桁が斜材の水平分力の累積加算された圧縮材となるため、スパン長と無関係に桁高を極めて小さくできるなどの利点を有し、現在、コンクリート橋長大化の最右翼に位している。日本における目下の最大スパン日本一は呼子大橋(スパン250m、平1、写真-4)であるが、今後主桁をウェッジビームと横桁を密に配置した横断面形状にしたり、軽量超高強度コンクリートを用いたり、あるいは複合斜張橋(中央径間は軸

圧縮に強い鋼構造にし、側径間は自重による曲げモーメントのバランス上PC構造とする)にするなどして、さらに長大化が図られよう。現在各国で様々な試みがなされており、1000mの超長大スパン斜張橋の実現も夢ではないといわれている。本四架橋生口橋(H3)は複合斜張橋の適用例である。

近年、塩害による鋼材腐食に対して種々の対策が講じられ実効を挙げているが、注目すべき動向として、緊張材に炭素繊維、アラミド繊維等の新素材を用いる研究が展開され、そのプレテンションタイプとして新宮橋(スパン5.76m, 昭63)、ポストテンションタイプとして撥川南橋(スパン17.55m, 平1)がそれぞれ実橋として登場した。高耐久性に加え非磁性の性質も買われて、超電導磁気浮上式鉄道用ガイドウェイなどへの応用も考えられている。

なお、コンクリート橋は鋼橋に比べ、一般にそのメンテナンスコストが安い利点が評価されて採用されることが多いが、その優れた吸・遮音性が買われて(鑄鉄のおよそ6倍)市街地で多用されていることも注目に値しよう。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：日本道路史，1977年10月。
- 2) 荏田信彦・阿部源次：プレストレストコンクリート橋，橋梁と基礎，Vol.13, No.4. 1979年4月。
- 3) 土木学会：土木学会略史(1914~1984)，1984年10月。
- 4) プレストレストコンクリート技術協会：最近のプレストレストコンクリート構造物と30年の歩み，1986年1月。
- 5) 公団橋梁技術の変遷に関する調査研究委員会：高速道路の橋，1986年3月。
- 6) 日本道路公団：日本道路公団三十年史，1986年4月。
- 7) プレストレストコンクリート建設業協会：PCのあゆみと未来，プレストレストコンクリート，Vol.30, No.1. 1988。
- 8) プレストレストコンクリート技術協会：最新PC橋架設工法，プレストレストコンクリート特別号，Vol.31, 1989。
- 9) プレストレストコンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート，1990年7月。
- 10) 渡辺明：土木構造物とコンクリート(総論)，コンクリート工学，Vol.28, No.7, 1990年7月。

(1992.6.8 受付)