

## プレストレス－20世紀に開発され発展を続ける技術

池田尚治\*

### 1. はじめに

鉄筋コンクリートの発明は19世紀半ばであり、現代文明を支える構造技術として現在も発展を続けている。プレストレスコンクリートは20世紀の前半に誕生した技術開発の成果で高性能のコンクリート構造形式として飛躍的な発展を遂げてきた。また、現在も盛んに技術開発が進められている。ここでは、プレストレスコンクリート技術に関し、20世紀の間にエボックとなった事象を中心に時系列的に述べてみたい。

### 2. プレストレスの概念

「プレストレス」は荷重が作用する前にあらかじめ断面に圧縮力を導入して断面の引張力に対する抵抗に備えることであって、人間の経験や直感によって知らず知らずに応用されてきた。古くはエジプトのピラミッド（写真-1）や神殿の柱列構造なども重力による自然のプレストレスで地震時の水平力などに抵抗してきたのである。ローマ時代にはアーチの概念が広く適用され支間の大きな空間を構築できるようになったが、アーチ構造こそプレストレス技術の基本であるといえる。何故ならアーチ端部での水平反力の発生でアーチリブには圧縮力が導入されることとなり、これがプレストレスとなって極めて耐久的な構造物となっているのである。2000年前に建



写真-2 パンテオン教会の天井ドーム

設されたローマのパンテオン教会（写真-2）はコンクリート構造物として2000年間も風雪や荷重に耐え、現在も教会建物として日常生活に用いられている。その理由はコンクリート体がアーチ状のドーム構造として結果的にプレストレスが導入されているからである。南フランスのガールの水道橋も石造のアーチ構造として2000年間その威容を誇ってきたことはよく知られた画期的事象である。しかし以上の例の場合には概念としてのプレストレスという認識が必ずしも存在しているとはいえないかった。

19世紀になって鉄筋コンクリートの概念が登場したが、断面の引張側の鉄筋の存在によってアーチにおける外的な水平反力が不要となる点が構造上の特徴である。緊張されていない鉄筋の配置によって成り立っている鉄筋コンクリートはやはりプレストレスがゼロのプレストレスコンクリートともいえよう。この場合、鉄筋にあらかじめ引張力を与えておけば構造上有利になることは自明のことであり、1880年代にはこれに関する特許がアメリカとドイツで出されたがコンクリートの乾燥収縮などの影響で技術的には成功しなかった。これを成功させたのがフランス人のウジェヌ・フレシネーであって、1928年に実用的なプレストレスコンクリートに関する特許がフレシネーによって出現したのである。近代のプレストレス技術はこれが原点といえる。

### 3. フレシネーの発明

フレシネーはコンクリート構造の大天才であり、偉大な技術者であった。フレシネーは鉄筋コンクリートアーチ橋を数多く手掛けたが、おそらくアーチの概念の

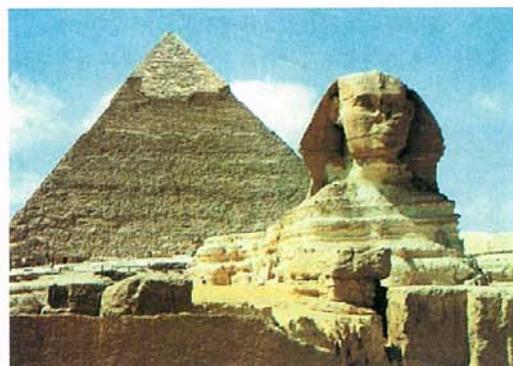


写真-1 エジプト カフラー王のピラミッド

（約200万個の石材を並べて積み上げたもので紀元前25世紀に既に今日のプレキャストセグメント工法の類型を見ることができる）

\* いけだ・しょうじ／横浜国立大学 教授（正会員）

中にプレストレスの概念を見出して技術開発に没頭したものと思われる。1928年のプレストレスコンクリートに関する特許は高強度コンクリートと高張力鋼線による緊張定着との組み合わせによっており、まさに天才的発想と技術開発の真摯なる努力の賜物である。

1945年に第二次世界大戦が終り、その後復興工事としてフレシネーはパリ郊外にプレファブリケーションによるルザンスィー橋（1946年）（写真-3）とマルヌ5橋（1951年）を建設した。いずれの橋も極めて健全な状態で現存し、供用されており、プレストレスコンクリート橋の耐久性を証明しているといえる。

マルヌ5橋は支間74mの長大橋であり、5橋とも全く同一のボータルフレーム構造である。極めて軽快なデザインのこの橋は、プレストレスコンクリートの勝利といえる構造物である。注目すべきことは、架橋地点近くの工場で5橋分のプレキャストセグメントを製作したことである。各セグメントは上下フランジをまず造り、ウェブにはプレテンション鋼材を配置して4MPaのプレストレスが導入された。各架設地点では、橋軸方向に5分割したユニットにセグメントを接合し、これらのユニットをケーブルクレーンによって張出し架設したことである。ユニット化は2本の主げたごとに行われた。変



写真-3 ルザンスィー橋



写真-4 エスブリー橋（マルヌ5橋のひとつ）

断面のプレキャストセグメントをマッチキャストによらずに精度よく製作したこと、プレキャストセグメントの総数は960個であったこと、等々、現時点で考えても極めて画期的な構造物である。マルヌ5橋はルザンスィー橋の下流に位置し、それぞれ、ユスリー、シャンジス、エスブリー（写真-4）、トリルバルドー、およびアネ橋の名称でその優美な姿をマルヌ川に映している。

#### 4. プレストレスの発展

フランスの隣国ベルギーでは、マニエルが独特のPC定着工法を1940年に開発し、隣国ドイツでは1937年にディッシンガーが取替え可能な外ケーブルによるアウエ高架橋を完成供用させた。この橋りょうは建設当初独裁者ヒトラーの名前であるアドルフヒトラー橋と命名された。ドイツでは1865年に創立されたディビダーク社のフィンステルバルダーが高張力鋼棒を接続して片持張出し式のディビダーク工法を発明し、1950年には支間62mのパルドウィンスタイン橋を初めて片持張出し工法によってラーン河に架設した。この工法による画期的な支間の橋りょうはライン川に架かる支間208mのベンドルフ橋であって、1956年に完成し、かなりの期間この種の橋りょうの世界最大支間の記録を保持していた。

イタリアの構造家モランディは1957年にベネズエラのマラカイボ湖橋（写真-5）を設計し1962年に完成させた。この橋はPC斜張橋の原点ともいえる橋で支間235mの多径間長大橋である。完成後不幸にして大型船舶の衝突によって一部の径間が落橋したが、すぐに原形通りに修復された。モランディは南アフリカで支間100mのストームスリバー橋をロワリング工法によるアーチ橋として完成させている。なお、コンクリートアーチ橋ではオーストラリアのシドニーに支間305mのグラデスヴィル橋が1964年に完成した。この橋は全面的にプレキャストセグメントとプレキャスト材を用いて建設された橋りょうとして特筆すべきものである。また、コンクリート橋としての最長支間をしばし保っていた。

我が国でも著名なレオンハルトは1949年にドイツの



写真-5 マラカイボ湖橋

フライブルク近くで支間約30mの大変美しい橋であるブライバッハ橋を完成させた。1909年生まれのレオンハルトは世界各所で著名な橋りょうを手掛けてきたが惜しくも20世紀とともにその生涯を閉じた。

以上に述べた例のように、PC技術は1928年のフレシネーの特許以降世界各地で飛躍的に普及発展し、1950年代にはその構造形式としての地位を確固たるものとした。

その後の発展としては、長大橋の構造形式としてPC斜張橋が発展し、1977年にはフランスのセーヌ川下流にフレシネーの弟子であるジャン・ミュラーの努力により支間320mのプロトンヌ橋（写真-6）が建設された。1991年にはノルウェーのトロンハイム郊外に支間530mのスカルンズンド橋（写真-7）が建設され、建設当初は鋼橋も含めて斜張橋として世界最長支間の記録を保持した。現在もコンクリート橋としての世界最長支間の記録を保持し続けており、北欧ノルウェーのPC技術者の心意気が感じられる。

長大橋の形式としては斜張橋のほかにアーチ橋がある。アーチ橋はアーチリブに圧縮力が導入されるためアーチリブは鉄筋コンクリート構造や合成構造であるが、張出し架設工法や上部げたにはプレストレスの技術が大幅に適用されている。前述のシドニーのグラデスヴィル橋以降、クロアチアのサン・マルコ橋が支間390mを誇る世界一のコンクリートアーチ橋として1979年に完成し



写真-6 プロトンヌ橋



写真-7 スカルンズンド橋

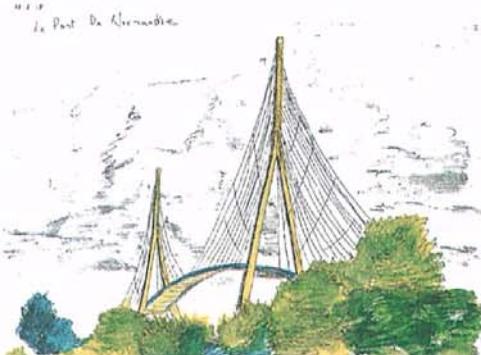


写真-8 ノルマンディー橋（住友建設(株)井谷計男氏 画）

た。また、南アフリカのプロウクランズ橋（1983年）、フランスのシャトーブリアン橋（1991年）、等の長大橋も建設してきた。その後中国では1997年に支間425mの万県長江大橋が完成し、世界一の記録を保持することとなった。

鋼とコンクリートとの複合構造としては支間中央部分を鋼断面とする長大橋りょうとしてフランスのノルマンディー橋（写真-8）が世界最大支間856mの斜張橋として1995年に完成した。ただし、1999年には複合斜張橋として本州四国連絡橋の多々羅大橋が中央支間長890mとして完成し世界一の支間の斜張橋となった。

ショートライスマッチキャスト工法による多径間橋りょうのフランスのレ島橋、外ケーブルの大々的な採用によるアメリカのロングキー橋、波形鋼板ウェブを採用したフランスのコニャック橋やモープレ橋、ウェブに鋼トラス形式を採用したプロネ橋、高強度軽量コンクリートを用いて支間300mの片持張出し式橋を完成させたノルウェーのラフトズンド橋、大型プレキャスト工法を採用したデンマークのグレートベルト橋やカナダのプリンスエドワード島橋、等エポックとなる橋りょうが世界各地で建設され、PC橋が世界各国の社会基盤として活躍しているのが20世紀の終わり頃の状況であり記憶に新しい。

## 5. 我が国のプレストレス技術

フレシネーが支間74mのマルヌ5橋を建設した頃に我が国ではようやくPC橋として我が国初の支間3.8m、3連の長生橋がプレテンション工法により石川県七尾市に建設された。この橋はプレテンションけたを並べてスラブ橋としたもので、けたは造船所で造られ馬車で運搬された。その後PC橋は飛躍的に発展し滋賀県にある信楽線の第一大戸川（ダイドガワ）橋りょうが鉄道橋として初めて1954年にポストテンション工法により完成した。ディビダーク形式の橋りょうとしては、神奈川県に支間51mの嵐山橋（写真-9）が1959年に完成し、これを契機に首都高速道路渋谷高架橋（1964年）、熊本県

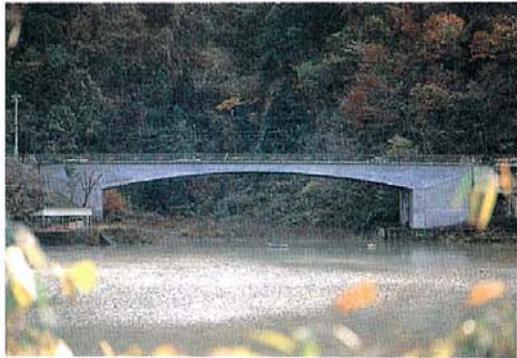


写真-9 嵐山橋

の天草 3 号橋（1966 年）、佐賀県の名護屋大橋（1967 年）、高知県の浦戸大橋（1972 年）、山口県の彦島大橋（1975 年）等を経て 1976 年にはこの形式で世界最長支間 240 m を持つ静岡県の浜名大橋が完成した。

1964 年開通の東京モノレールの建設に際しては PC 軌道がたが全面的に採用され、よく今日まで車輌荷重の繰返しに耐え、供用が続けられている。

また、世界に先駆けて 80 MPa の高強度コンクリートを用いて設計施工された PC トラス橋である山陽新幹線の岩鼻架道橋（1973 年）や久慈線の安家川（アッカガワ）鉄道橋（1975 年）（写真-10）が誕生したことでも特記すべきことである。



写真-10 安家川鉄道橋

長大アーチ橋では 1974 年に支間 170 m の外津（ホカツ）橋が佐賀県に建設されて以来、日本道路公団の帝釈橋（支間 145 m、1978 年完成）、宇佐川橋（同 204 m、1982 年）を経て 1989 年には大分県に支間 235 m の別府明礬橋（写真-11）が完成した。この橋りょうは 1990 年の FIP（国際プレストレストコンクリート連合）コングレスで FIP 賞を受賞した。2000 年には我が国最大支間 260 m を有する宮崎県の天翔大橋が完成した。

PC 斜張橋は 1962 年に建設された岐阜県の島田橋（写真-12）が我が国の第 1 号のものであり、その後斜張橋は独特の直線的なデザイン性から各地でランドマーク的に建設された。そのうち長大橋としては 1988 年に建設された支間 250 m の佐賀県の呼子大橋、1992 年に建設された支間 240 m の青森ベイブリッジ、1996 年に建設された支間 260 m の鹿児島県の伊唐大橋（写真-13）などがある。伊唐大橋は現在我が国における最大支間の PC 斜張橋である。

1993 年に完成した新潟県の新開橋は我が国初の波形鋼板ウェブ PC 橋であり、引き続いだ秋田県の銀山御幸橋を経て、日本道路公団の本谷橋（写真-14）が 1998 年にこの種の橋りょうで世界最大の 97 m の支間を持つ橋りょうとして完成した。その後も続々とこの形式の橋りょ



写真-12 島田橋（小柳 治教授提供）

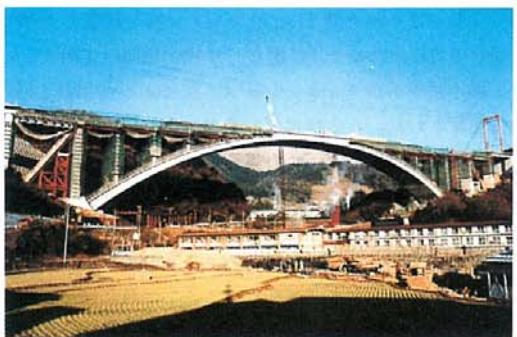


写真-11 完成前の別府明礬橋

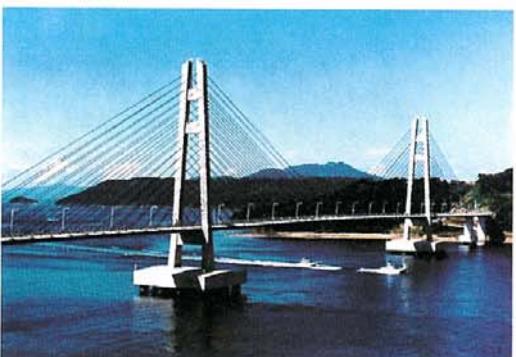


写真-13 伊唐大橋



写真-14 本谷橋



写真-15 小田原ブルーウェイブリッジ

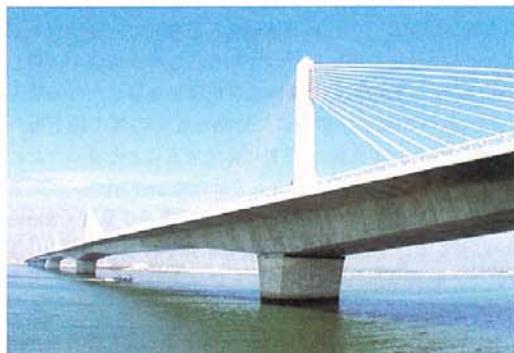


写真-16 木曽三川橋（揖斐川橋、2001年完成）

うが建設されている。

PC 斜張橋のタワーを低くし、斜材を PC ケーブルの一部とみなしたエクストラドーズド橋が世界に先駆けて我が国で建設され、急速に発展してきたことは注目すべきことである。1995年に完成した支間 122 m の小田原ブルーウェイブリッジ（写真-15）がその始まりであり、2001年に完成した木曽三川橋（写真-16）へと発展を続けている。木曽三川橋は最大 400 ton の超大型プレキャストセグメントを用いた支間 275 m の複合 PC エクスト

ラドーズド橋である。なお、小田原ブルーウェイブリッジは 1998 年の FIP コンгрレスで FIP 賞を受賞した。

1995 年 1 月の阪神淡路大震災では直下型の大きな地震を受けたにもかかわらず PC 構造物に特段の被害もなく、PC 構造物の耐震性が改めて認識されることとなった。

## 6. PC 構造物の耐久性

PC 構造は本来耐久的な構造であるが、施工や維持管理が不適切な場合には事故につながることがある。1985 年にイギリスのイニス・イ・グワス橋（Ynys-y-Gwas Bridge）が PC 鋼材の破断によって突然落橋したこと端を発し、イギリスでは 1992 年から 1996 年の間、グラウトを要する内ケーブルのポストテンション PC 橋の新設が一時的に禁止された。これを契機に PC グラウトの問題点が注目され、各種の技術開発が行われてきた。外ケーブル技術は PC ケーブルの取替えが可能であるので急速に普及することとなった。

1978 年に建設された南太平洋パラオ島のコロール・バベルツアブ橋は建設当時我が国の浜名大橋を 1 m 抜いてこの形式で世界最長支間 241 m を誇る橋りょうとなつたが、設計施工上の問題があつて支間中央で 1 m 以上のクリープたわみが生じ、これを修復するために行った工事が適切でなく、1996 年修復の 3 カ月後に突然落橋した。大型 PC 橋の供用中の落橋事故としては他に類のないものである。

我が国においても、PC ケーブルの耐久性への配慮が不足していた小規模の PC 橋の落橋（島田橋を含む）や、床版横縫およびウェブ縦縫の PC 鋼棒の腐食破断が顕在化し、高粘性グラウトや外ケーブルあるいは波形鋼板ウェブ、プレグラウト PC 鋼材などが 20 世紀の終わり頃から大々的に採用されることとなった。

## 7. 終わりに

20 世紀のプレストレスコンクリートの発展史といえばほとんど PC 技術のすべての歴史が含まれている。ここでは橋りょうを中心にその発展経緯を著者の思考の中で組み立てて記述したが、あくまで発展の一部を示しただけであつて多くの重要事項が含まれていないことをお許しいただきたい。

PC の発明者フレシナーは 1952 年に FIP の初代会長に就任した。1998 年からは FIP が fib (国際構造コンクリート連合) となってその第 1 回のコンгрレスが 2002 年 10 月に我が國の大坂で開催される。20 世紀に誕生、発展した PC 技術がこの fib 大坂コンгрレスを契機として 21 世紀に一層発展することを望みたい。

## **fib 大阪 コングレス 2002 の開催について**

池田 尚治\*

### **1. 開催の経緯**

fib 大阪 コングレス 2002 が今年 10 月 13 日から 19 日まで大阪国際会議場で開催されることとなり、現在準備が進められている。誠に喜ばしいことである。関係各位の一層のご支援とご参加を得てこのコングレスの成功を願う次第である。

fib の前身である FIP は 4 年ごとにコングレス（大会）を世界各国の都市で開催してきた。近年の例では 1982 年にスウェーデンのストックホルム、1986 年にインドのニューデリー、1990 年にドイツのハンブルグ、1994 年にアメリカのワシントン D.C. および 1998 年にオランダのアムステルダムで開催されており、この流れを踏襲することが fib の創設以前からの了解事項となっていた。

わが国ではぜひ FIP コングレスを日本の都市で開催したいとの希望があり、当時の FIP 日本代表の猪股俊司博士が FIP 理事会に 1994 年のコングレスの日本招致を提案したが、アメリカの希望の方が強く、1994 年のコングレスはワシントン D.C. に決定された。その代わりに、1993 年に日本で FIP シンポジウムを開催することが決定された。これに基づき、1993 年に京都で約 700 名以上の参加者を得て成功裡にわが国初めての FIP シンポジウムが開催された。当時は FIP の日本のナショナルグループは PC 技術協会であり、PC 建設業協会の多大なるご支援を受けてこの国際シンポジウムの実施が図られた。コングレスに関しては猪股博士の強い招致希望を引き継いだかたちで FIP と CEB との統合の有無にかかわらず、2002 年すなわち 21 世紀になって初めてのコングレスを日本で開催したい旨の提案を 1996 年のロンドンの FIP シンポジウムの際に開かれた FIP 理事会において筆者が日本代表として提案し、念願がかなって了承されたのである。この了承事項は fib 設立準備会においても了承されるとともに、fib コングレスも FIP コングレスの方式を引き継ぐことが具体的に決定されることとなった。



\* Shoji IKEDA

本協会理事、元会長  
fib 2002 組織委員会 委員長  
横浜国立大学大学院  
工学研究院 教授

さて、わが国で今後開催される fib の国際会議と今までの FIP のそれとの大きな相違は、日本のナショナルグループとしての機関が PC 技術協会単独から日本コンクリート工学協会 (JCI) との共同となったことである。また、当然のことながら FIP はプレストレストコンクリートのみであったものが、fib ではコンクリート構造全般が含まれるのである。したがって fib のコングレスの準備についても、1993 年の FIP シンポジウムの経験のみでは当然不十分であって、準備の立ち上げに若干の時間を要することになった。

ここでは、コングレスの準備について若干述べてみたい。まず、FIP コングレスを日本で開催するに際し大阪を開催地に選定した理由は、1995 年の阪神淡路大震災後の復興状態を参加者に見てもらうこと、わが国の古都京都や奈良に近いこと、および大阪が独特の文化をもっていること、などが挙げられる。大阪開催については PC 技術協会の理事会で特段の異議もなく了承された。そこで PC 技術協会では fib 大阪 コングレスのための準備会を組織して、会議場の選定や諸々の準備を開始したのである。この準備会では折しも建設中の大阪国際会議場の工事現場を視察し、この時点で 2002 年の大阪コングレスの会場としての仮予約を行った。やがて 1998 年に fib が正式に発足することになったために、改めて PC 技術協会と JCI とで新たに fib 大阪 コングレスのための準備委員会を組織して、組織委員長を筆者（池田尚治）にすることを立案し、両協会で承認されたのである。これにより組織委員長の責任のもとに組織委員会と実行委員会が組織され、正式な活動が開始された。

2000 年 11 月 22 日には第 1 回の組織委員会と実行委員会が開催され、ここに本格的な大会のための活動が始まったのである。なおこれに先立ち、1998 年の FIP アムステルダム コングレスでは fib 大阪 コングレスのための Preliminary Announcement (会議予告案内) が配布された。

次いで 2000 年のアメリカのオランダにおける fib シンポジウムでは fib 大阪 コングレスの First Circular & Call for Papers (会議 1 次案内) が配布された。

「会議予告案内」および「会議 1 次案内」は国際会議ということで英文のものを作成したが、組織委員会の席上で日本語版も必要だととの意見があり、「会議 1 次案内」については日本語版も作成した。

「会議 2 次案内」は "Second Circular and Call for Registration" であり、詳細な会議案内と登録の案内が載せられている。これについては 2001 年の fib ベルリン シンポジウムでの配布を目指して準備された。また、日本語版については 2001 年