

# RC橋からPC橋への歴史的変遷

鈴木 圭\*

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PCと略記）橋の初期の歴史を概観するにあたり、著者の視点について述べておきたい。「鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）橋からPC橋への歴史的変遷」と題したのは、私自身の橋梁の歴史に対する根本的な視点を示しているものである。「エンジニアリングの歴史とは、いわゆる事実や、年代や、あるいは諸現象の集合、総括ではなく、エンジニアあるいはアーキテクトの偉大な思考と挑戦の過程である<sup>1)</sup>」と考えている。ある材料や構造物の発展のプロセスを見ると、それぞれの段階には因果関係があり、各段階は前の段階の有機的な連鎖の結果として発展するものであることは間違いがない。この関係を説明したのが自然科学としての進化論であり、ダーウィンの業績であると言える。しかしながら、「進化(Evolution)」を、ある事象が前の事象の絶対的な進歩であり、新しい物が古い物より高いレベルにあると考えると、大きな過ちを犯すことがある。その時代の構造物があるエンジニアの思考の結果として現れたものであるとすれば、その構造物の価値もまた同等なはずである。橋梁の形態もその時代時代によって変わっていく。しかし進化するのではなく変化(Metamorphose)していくものである。このように個々の歴史的な事象を同等に見ていくと、歴史的エンジニアやアーキテクトの作品が、われわれに生きて話しかけてくるのではないだろうか。

PCを橋梁に応用した技術者としてフランスのウジェーヌ・フレシネー(Eugène Freyssinet, 1879~1962)、ドイツのフランツ・ディシinger(Franz Dischinger, 1887~1953)とウーリッヒ・フィンスタールダー(Urlich Finsterwalder, 1897~1988)、スペインのエドワルド・トロハ(Eduard Torroja, 1899~1961)、イタリアのリカルド・モランディ(Riccard Morandi, 1902~1984)はよく知られている。彼らはいずれもコンクリート橋やコンクリートシェル構造物においても優れた実績を残しているが、PC橋を開発するにあたって、コンクリート構造物に関するさまざまな問題に直

面し、それをどのように解決するかによって、現代のPC橋の基礎となる技術を開発した。

材料的な面で言えば、コンクリートのひび割れを少なくするにはどうしたらよいか。または、クリープや乾燥収縮の現象を発見し、それをどのように評価し、どう解決すべきかということであった。構造的な面では、RC橋のスパンをさらに伸ばすために、新しい構造形式や架設工法を考えて解決しようと試みた。また、デザインの面からは、桁橋をさらにスレンダーにするにはどうしたらよいかという課題があった。いずれの場合にも、コンクリート構造物に特有な問題点を意識したところから、それぞれのチャレンジが始まった。

ここでは、彼らが生を受けた19世紀後半のコンクリート構造物の状況から述べることにする。

## 2. RC橋のパイオニアたち

RCがいつ発明されたかを明言することは難しい。重要な点は鉄筋で補強したコンクリートを、人々の生活のためにどのように役立てようと考え、それをどのように実現したのかということである。RCの活用については、次の二人のフランスのエンジニアの奇抜な発想がヨーロッパのRCの発展に寄与することになる。一人は造園技師であったジョゼフ・モニエで、もう一人は教会の修復工事を主な仕事としていた建築家のフランソワ・アネビクである。

### 2.1 ジョゼフ・モニエ

(Joseph Monier, 1823~1906)

造園技師であったモニエは1867年にコンクリートの中に鉄網を入れて、植木鉢や枕木を造るアイデアを特許として出願した(図-1)<sup>2)</sup>。モニエはRCを建物や橋に応用しようと試みて、1873年には橋に関する特許を取得する(図-2)<sup>3)</sup>。しかし、RCの力学的特性について十分理解したものであるとは言えない。モニエによって造られた世界最初のRC橋



\* Kei SUZUKI

鹿島建設(株)  
土木設計本部 設計技術部  
グループ長 景観設計担当

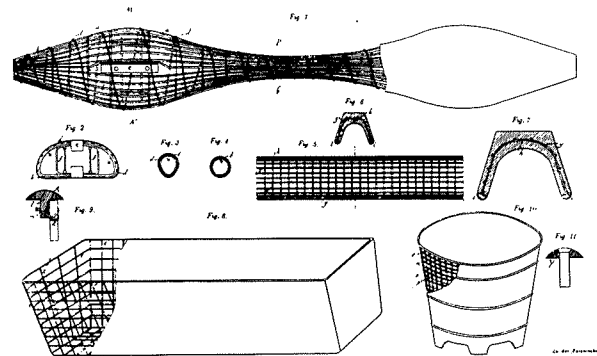


図-1 モニエの特許(1867年)

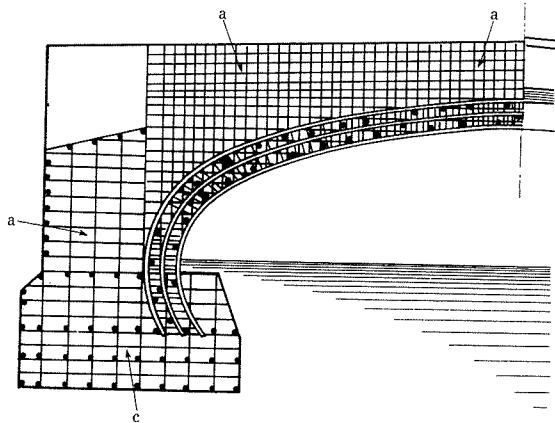


図-2 モニエの橋の配筋図

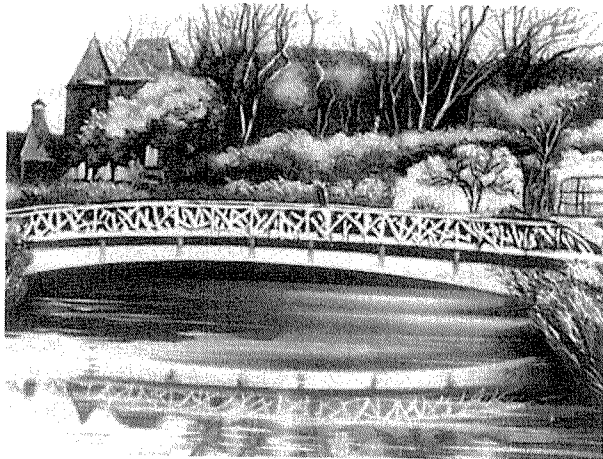


写真-1 モニエ式の橋 (1875年)

と言われるのは、スパン16.5m、幅員4mの歩道橋で、1875年、フランスのシャーレ (Chazelet) にあるマルキ・テリエ (Marquis Tiliere) 公園に造られた(写真-1)<sup>4)</sup>。高欄はモニエお得意の擬木を使ってデザインされている。1887年には、今日の鉄筋コンクリート工学の基礎となる特許を取得した。つまり、コンクリートの中に配置した鉄筋は引張力に抵抗するという考え方である。

一方、19世紀後半はイギリスのベッセマー転炉製鋼法が發明され、鑄鉄よりも強い鋼を使いアーチやトラスを主体とした橋がイギリスのブルネル (Brunel) やドイツのパウリ (Pauli)、ゲルバー (Gerber) らによって開発された。イギリスにおけるフォース橋 (1883年～1890年)、エッフェルの設計したガラビー橋 (1880年～1884年) がその代表例である。鋼は大量生産され、鉄橋はいわば最盛期にあった。この時期、セメントモルタルを製造する社会体制はどうであったかと言えば、たとえば、ドイツでは1877年にドイツポルトランドセメント製造協会が設立され、ポルトランドセメントについて科学的な研究に取り組もうという声明が出された<sup>5)</sup>。その成果の一つが、1880年デュッセルドルフの「芸術と工業博覧会」で出展されたアーチスパン12m、ライズ2.25m、クラウンの厚さ20cmのコンクリート製の歩道橋である(写真-2)<sup>6)</sup>。これはディビダーク社が施工したものである。

1884年には、モニエの特許はドイツのフライターク

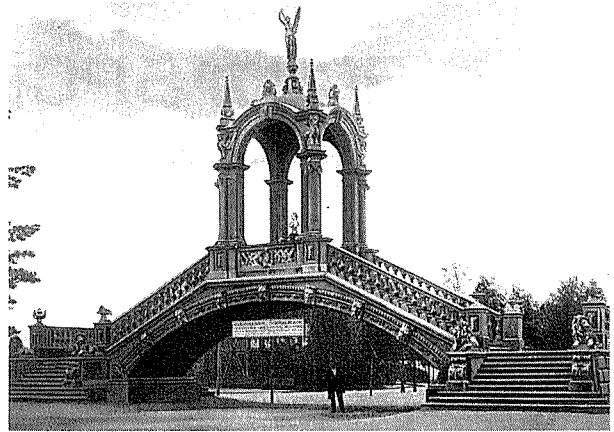


写真-2 ドイツのコンクリート製歩道橋 (1880年)

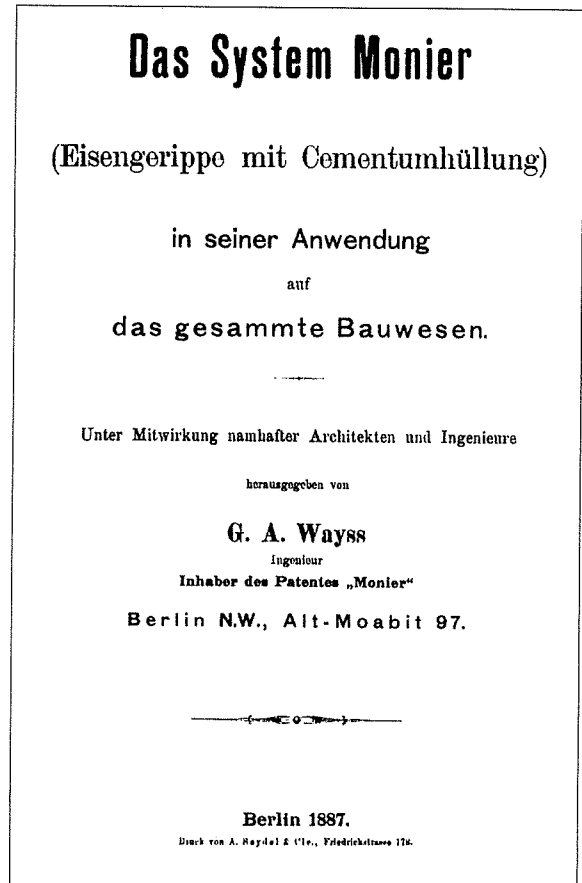


図-3 モニエシステムの本の表紙 (1887年)

(Freitag) 社を中心とする会社連合に買われ、翌年、その権利がワイス (Gustaf Adolf Wayss) に転売された。しかし、新材料が社会に認知されるためには、その材料特性や適用方法について科学的な裏付けが必要となる。ドイツやオーストリアにおいて産官学による共同研究のキーマンとなったのがマチアス・ケーネン (Matthias Koenen) で、彼はワイスが施工していたプロイセン政府のドイツ帝国記念館工事の発注者であったが、RCの将来性に気づいて官吏を辞め、ワイスとともにRCの普及に貢献した。ケーネンは自らRCの実験を行いながら、ドイツ・オーストリアの各材料研究所に実験を依頼した。とくに、ミュンヘン工科大学材料研究

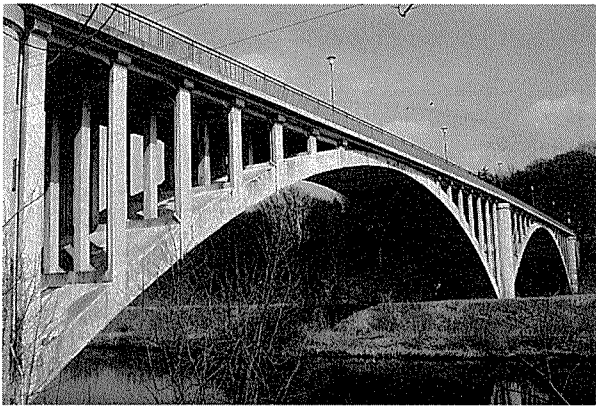


写真-3 グリーンバルト橋 (1904年)

所の創設者であるバウシンガー (Johan Bauschinger) は、RC製の水槽の供試体の破壊試験と、アーチ、屋根構造への適用の研究を行い、1887年12月、以下に示す鉄筋コンクリートの基本的な性質について発表した。

- ① コンクリート中の鉄筋は長期にわたって錆びないこと
- ② コンクリートと鉄筋の間には十分な附着があり、急激な温度変化のもとでも問題がないこと

ケーネン自身、無筋のコンクリートに比べて $3\text{cm}^2$ の鉄筋で補強したコンクリートでは6倍の耐力があることを確認した<sup>7)</sup>。こうして1887年には「モニエシステム」と題したRC構造物の簡易な設計法が発表され (図-3)<sup>8)</sup>、これがドイツにおいてRC構造物が普及し、更なる研究が進む契機となった。ドイツにおけるモニエ式の最大スパンを有する橋は、1904年にエミール・メルシュ (Emil Mörsch) によって設計されたミュンヘン市のイザール川に架かるスパン70mのグリーンバルト (Grünwald) 橋である<sup>9)</sup> (写真-3)。

## 2.2 フランソワ・アネビク

(François Hennebique, 1842~1921)

1842年、農夫の息子としてヌピーユ・サン・バー (Neuville St-Vaast) に生まれたアネビクは、子供の頃から自然科学に興味をもち、18歳のときに理論と技術を結びつけた仕事として教会の修復工事を始めた。やがて彼の名声が高まるにつれて鉄道や橋梁、一般建築へと仕事を拡張した。1880年当時の建築は、主構造は鋳鉄製の柱と梁で、床は鋳鉄の梁の間にコンクリート版を挟む構造であった。ところが、ベルギーのマドウ (Madou) 氏邸を設計していた当時、同じ構造の建物が火事に遭って倒壊した現場を見た施主が、耐火性のある建物となることを設計条件に加えたことが、アネビクの考える鉄筋コンクリートのきっかけになったと言わ

れている<sup>10)</sup>。アネビクは耐火性を上げるためには鋳鉄をコンクリートスラブの中に埋設することを思いついたが、その後の実験によって、コンクリートに圧縮力を負担させ、鉄筋に引張力を負担させることによって、建物の耐火性能、構造性能と経済性が向上することを確認した。1892年に取得した床の構造に関する特許を見ると、原始的ながらスラブに作用する曲げとせん断力に対して、鉄筋が配置されている (図-4)<sup>11)</sup>。

RCの建物が1890年代にヨーロッパにおいて急速に普及した原因は、アネビクの企業家としての才能によるところが大きい。アネビクは自分のシステムを普及させるにあたって、ライセンス契約を結ぶ前に、アネビクシステムの設計法、施工監理について教育をしながら、フランスを中心としてイギリス、スイス、イタリアに支店を拡張した。また、鉄筋コンクリート構造物を広報するために、1897年には機関誌「Le Béton Armé」も刊行している。1898年には827件の請負契約を結んだが、1917年には3万5000件に増加していることからその普及ぶりが理解される。とくに、橋梁については1920年までに3600橋を完成させた。1911年、当時、RC橋として初めてスパン100mに達したリゾルシメント (Risorcimentto) 橋がローマのテベレ (Tevere) 川に架かった (写真-4)<sup>12)</sup>。この橋は、6室の箱桁アーチであったが、下フランジの下床版の厚さがアーチの付け根で50cm、クラウンで20cmという薄さで当時のエンジニアに衝撃を与えた。アーチの付け根でコンクリートが圧壊し、鉄筋も降伏すると考えられていたからである。完成後、総重量110tの蒸気ローラーで載荷試験を行ったところ、健全な挙動が認められた<sup>13)</sup>。これは鉄筋コンクリートの上床版、ウェブ、下床版が一体となって荷重に抵抗する補剛アーチの原型だ

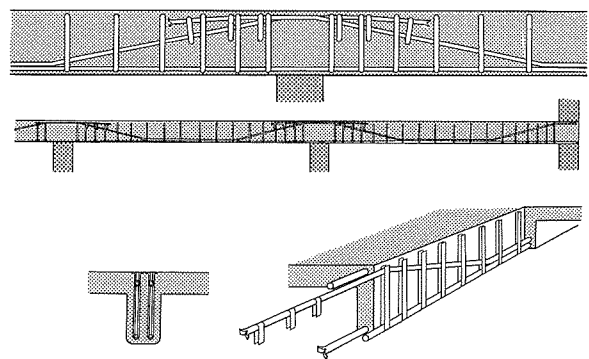


図-4 アネビク式の配筋方法

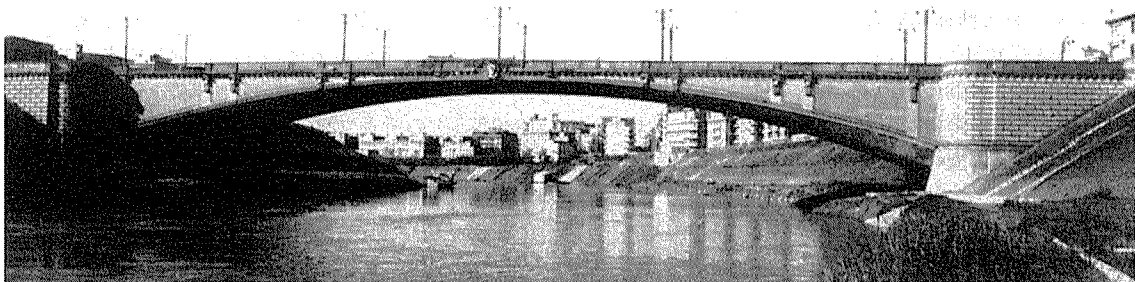


写真-4 リゾルシメント橋 (1911年)



写真-5 ラングヴィーズの鉄道アーチ橋 (1916年)

と言える。1916年に完成したスパン100mを有するスイスのラングヴィーズ (Langwies) の鉄道アーチ橋はアネビクシステムによるものである (写真-5)<sup>14)</sup>。

### 2.3 ロベール・マイヤール

(Robert Maillart, 1872~1940)



写真-6 ロベール・マイヤール

アネビクの構造物はフランスのフレシネーやスイスの橋梁エンジニア、ロベール・マイヤール (写真-6) に大きな影響を与えた。とくに、マイヤールは1901年3月、チューリッヒのエンジニア・建築家協会で「アネビクシステムとその適用」について講演し、I形断面のRC梁と上部に薄いRCスラブを結合した床版システムを高く評価している<sup>15)</sup>。マイヤールはRC

橋のスパンをさらに伸ばすためにはRCをどのようなかたちで使うことが効率的であるのかを考えた。19世紀後半はまだ石橋が施工されており、RC橋の構造も石橋と同じようにアーチ部分を充実断面とすることが基本であると考えられていた。一方、荷重に対して箱桁断面で抵抗させることを考えたのがマイヤールであった。とくに1902年に出願した特許からは、すでに箱桁構造と補剛アーチのアイデアを抱いていたことは驚くべきことである (図-5)。すでに1901年にはスイスのツォツ (Zuzo) においてアーチスパン36mの3ヒンジ式箱桁アーチが完成し、1905年にはマイヤールの代表作の一つであるアーチスパン51mを有するタバナサ橋 (Tabanasa, 写真-7)<sup>16)</sup>が完成していることから、前述のリゾルシメント橋の箱桁断面に影響を与えた可能性が高いと考える。

マイヤールのアーチ橋の施工は極めてアイデアに富んでいて、その一つが箱桁橋の分割施工であった。まず初めに、木製支保工の上でアーチスラブのみを打設し、アーチスラブが完成するとその上にウェブコンクリート、そして上床版という手順になる。そうすることで、支保工はアーチスラブを支持するに十分な材料ですむことになる (写真-8)<sup>17)</sup>。マイヤールはコンクリートの特

Fig.1.

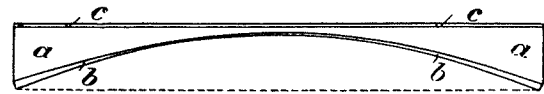


Fig.2.

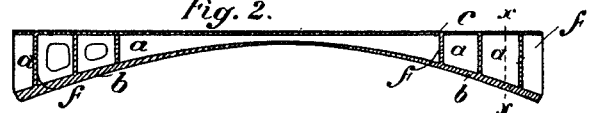


図-5 マイヤールの特許 (1902年)

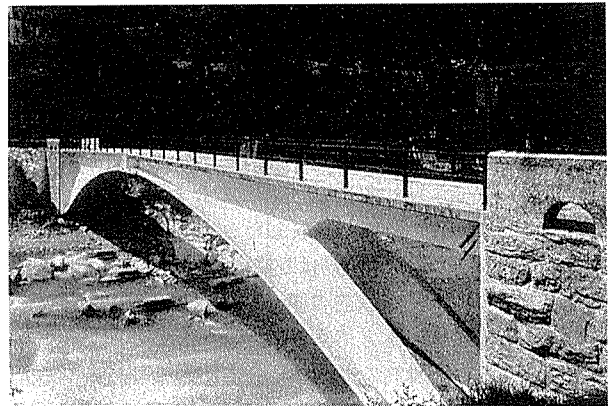


写真-7 タバナサ橋 (1905年)

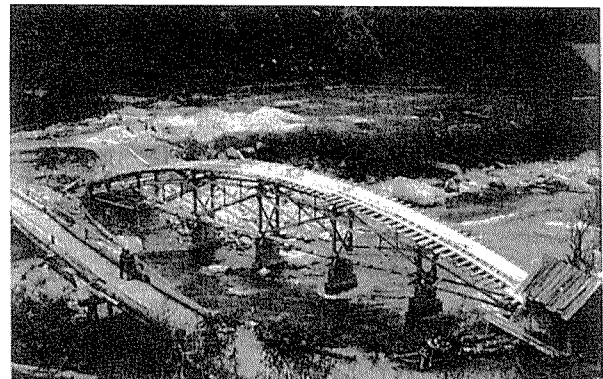


写真-8 タバナサ橋の施工状況

性については、自分の完成した橋梁での荷重載荷試験を通じてよく把握していた。さらに、コンクリートの配合によって高強度コンクリートができることも経験から分かっていた。そのために、1915年の「コンクリート示方書」の制定において、RCの基本的な許容圧縮応力度は40 kg/cm<sup>2</sup>と低く抑えられている現状に、それでは経済的で合理的なRC橋は普及しないと正面から反発した<sup>18)</sup>。マイヤールはフレシネーと同時代に活躍したエンジニアであるが、なぜPCという技術に着目しなかったのかという疑問が湧いてくる。彼はコンクリートの示方書の規定に関して当時スイスの示方書の制定に影響力のあったスイス連邦材料試験所 (EMPA 1880年~) の所長フランソワ・シューレ (François Schüle, 1860~1925) と闘っていたために、高強度コンクリートを使える環境になかったからだと言える。それがマイヤールにとっての試練であると同時に、鉄筋コンクリートを使った新しい橋の形態を次々と考案する原動力にもなったのである。

### 3. PC橋のパイオニアたち

#### 3.1 ウジェーヌ・フレシネー

(Eugene Freyssinet, 1879 ~1962)

さて、1930年当時、補剛アーチの木製支保工をどのように外していたのだろうか。図-6<sup>19)</sup>は1930年に完成したマイヤールのKlosterの補剛アーチの支保工図である。あらかじめコンクリートの基礎の中に掘込みを造り、砂を充填した上に枕木を置いて、支保工を構築した。アーチの支保工を下げるときには、この砂を崩してやると、支保工が自然に下がる仕掛けになっている。これに対してフレシネーは、支保工を簡易に下げるために1907年に施工したプレリアル・シュル・ベブル (Praireal-sur-besbre) 橋において支保工のクラウン部にフラットジャッキをセットしておき、橋が完成した後、そのジャッキを収縮させることによって支保工を下げる方法をとった<sup>20)</sup>。実はこれが、後にフレシネーがPCを発明すると同時に、コンクリートのクリープ現象を発見するきっかけにもなった。

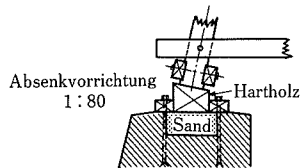


図-6 砂を使った支保工基礎の構造

フレシネー (写真-9)<sup>21)</sup>を一躍エンジニアとして有名にしたのが1911年、アリエ川に架けるルブルドゥル (Le Veudre) 橋である。アリエ川は川幅約250mで当時石橋が3橋計画されていた。しかし、当時の予算では石橋1橋しか架からない状況であった。そこでフレシネーは橋脚を少なくし、



写真-9 ウジェーヌ・フレシネー

かつ高価な鋼は用いず、コンクリートの体積を少なくすることを目標として、スパン72.5mを有する中央ヒンジ付き3径間のRC橋を提案する。結果的に1橋のコストは、予算の1/3ですむことになり、ルブルドゥル橋、ブチロン橋 (Boutiron, 写真-10)、シャンテ・デ・ネブレ (Chantel de Neuvre) 橋を施工することになった。フレシネーのエンジニアとしての偉大な点は、何事も自ら実験を通じて確かめることである。これはスイスのマイヤールにも共通している。そこで、彼はルブルドゥル橋を施工する前年の1908年、橋脚上から両側に張り出すアーチを互いにバランスさせるために必要とされるアーチの半径と、偏平な支保工の取外しの可能性を確認するためにスパン50mのアーチを仕事場に製作した。そこでアーチの支持台に作用する水平力に抵抗できるように、支持台間にφ8mmの3本の鋼より線を多数用いて、両支持台にプレストレスを

与えた<sup>21)</sup>。これが、フレシネーのプレストレス工法の発明のきっかけとなった。

また、1941年~1951年にかけて施工されるマルヌ川5橋 (写真-11) においてプレキャストブロック工法が実現されるが、すでにこの実験のときに、現場打ちコンクリートの品質を改善するためには、プレキャストコンクリートでなければならないという発想をしている。プレストレスコンクリートの重要な点はコンクリートの強度であるが、幸運にも彼はシリカ質の砂を含み、3ヵ月で400kg/cm<sup>2</sup>という高強度を発現するセメントをルアーブル (Le Havre) で発見していた。1910年の秋、ルブルドゥル橋は完成したが、1911年春にはアーチクラウン部が13cm下がった状況を見て、フレシネーはこれまでの心配が恐怖に変わったと述懐している。これがクリープ現象の発見である。しかし、これを修正するためにアーチクラウン部にフラットジャッキをセットして、両側に押し広げることによって変形を元に戻すことができた。この技術が、後にアーチ橋施工時に軸力を調整するための一般的な技術になっていった。

このコンクリートのクリープと乾燥収縮による現象について、フレシネーは1928年ウィーンで開催された「第2回橋梁と建築に関する国際会議」で発表した<sup>22)</sup>が、誰も関心を示さなかったことを述べている<sup>22)</sup>。むしろフレシネーを「架設の魔術師」と言わせたプルガステル橋 (Plougastel, 写真-12) の施工方法に世界のエンジニアは注目した。この橋はエルロン川の河口にあって当時世界のRCアーチとしては最長のスパン180mを有していたが、アーチのセントルを台船に載せて支保工の転用を図るという離れ業を実現したのであ

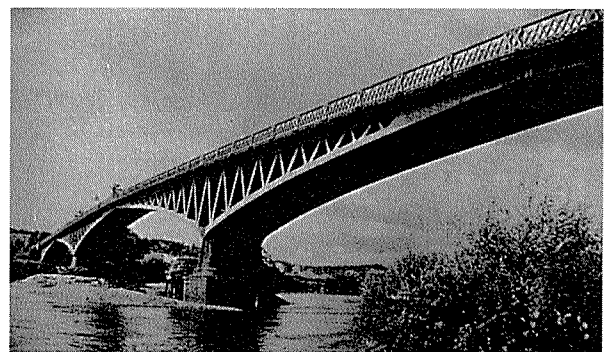


写真-10 ブチロン橋 (1912年)

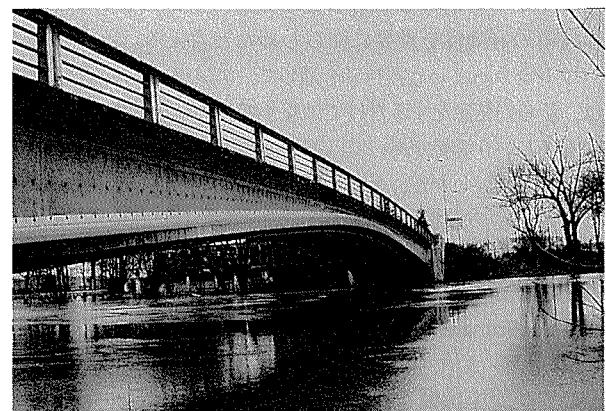


写真-11 マルヌ川5橋 (撮影:小林一郎)

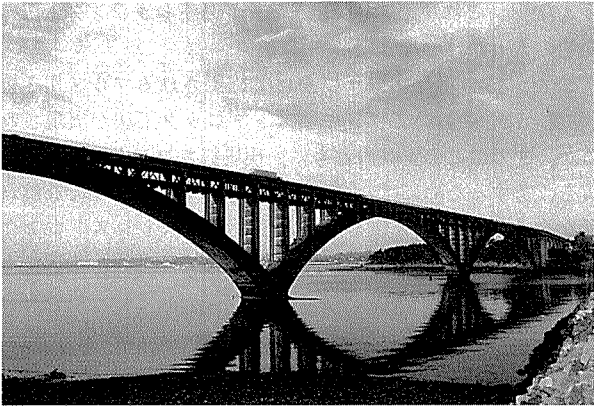


写真-12 プルガステル橋 (1930年)

る<sup>23)</sup>。しかし、1930年のリエージュ (Liege) の会議で、初めてこの現象について国際的な認識がなされた。1928年の10月、49歳のフレシネーは、コンクリート構造物に永久的にプレストレスを導入する手法と理論について特許を取得した。しかしながら、このときに現在使われているPC鋼より線を油圧ジャッキで緊張し、それをウェッジで定着するというフレシネーシステムが完成したわけではなかった。その後、1929年～1934年の5年間フレシネーはPCの電柱の製作事業に参加するが、その事業に失敗した。しかし、財産をなくし、精神的にも消耗した中でプレストレッシングをいかにコンパクトに行うかという研究に没頭した。そして1939年、ちょうど60歳になったとき、今日のくさび定着式のフレシネー工法が完成した<sup>24)</sup>。

フレシネーのフランスの「コンクリート示方書」に対する考え方は、確かにマイヤールと相い通じるものがある。1906年、当時のフランスのコンクリート示方書では、コンクリートの弾性係数は一定であるという規定になっていたが、ルブルドゥル橋の現象を発見して以来、荷重の載荷期間によって弾性係数が変化していくことに気づいた。そのために、示方書なるものは実際の現象を取り入れたものではないとして、常にこれを疑ってかかっていた。しかし、フレシネーにとって、また彼のプレストレッシング技術にとって幸運であったことは、1934年に国際港として知られるルアーブル (Le Havre) の海上ターミナル施設 (長さ600m、幅45m) の沈下を大規模なプレストレッシング技術とPC杭を使って、僅か4ヵ月でくい止めたことである。これが、フレシネーの名声を高めるとともに、プレストレッシングの技術の有効性を世界に知らしめたと言える。

フレシネーという技術者を通じて、エンジニアリングの歴史は、新しい発想をするだけではなく、それをどのように実現するかという姿勢があって、初めてつくられるものだということが分かる。しかし、それが簡単ではないのは、その技術がビジネスとして成功しなければ、社会に認められないという厳しさが常に存在するからである。

### 3.2 フランツ・ディシンガー

(Franz Dischinger, 1887～1953)

ディシンガー (写真-13)<sup>25)</sup> はドイツにおいてプレストレッシングを実構造物に適用した第一人者であり、クリープ・乾燥収縮を初めて定式化した理論家である。ディシン

ガーは1887年にハイデルベルクに生まれ、1907年～1911年の4年間カールスルーエ工科大学で土木技術者としての教育を受けた。とくにディシンガーに影響を与えた教授は、数学者であり、近似計算手法の開拓者であり、ドイツの構造力学の基礎を築いたフリードリッヒ・エンゲッサー (Friedrich Engesser) である。1913年にディビダーク社に入社し、ライン河橋のニューマチックケーソン基礎にRCを適用した。とくに初期のディシンガーの業績として有名な構造物は、1922年カメラのレンズで有名なツァイス (Zeiss) 社が発注し、1924年イエナ (Jena) に完成したプラネタリウムである (写真-14)<sup>26)</sup>。この半球は半径28.28mでローマのパンテオン (直径40m)、ミケランジェロが設計したバチカンのピーター教会 (直径44m) を凌ぐ規模であった。ディシンガーはこのプロジェクトでRC薄肉半球シェル構造物の解析手法を開発し、ディビダーク・ツァイス工法として大規模市場、見本市そして自動車工場等の屋根構造に使われるようになった<sup>27)</sup>。

ディシンガーが初めてプレストレッシングをアーチ橋に適用しようと考えたのは1928年、アルスレーベン (Alsleben) に架けたスパン

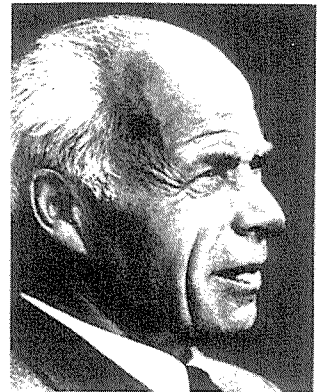


写真-13 フランツ・ディシンガー

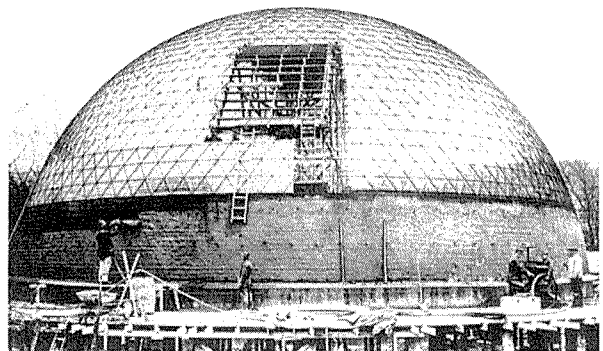


写真-14 プラネタリウムの施工状況 (1924年)

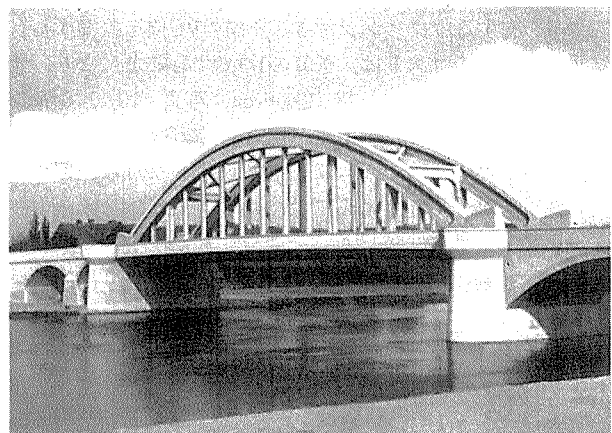


写真-15 ザール橋 (1928年)

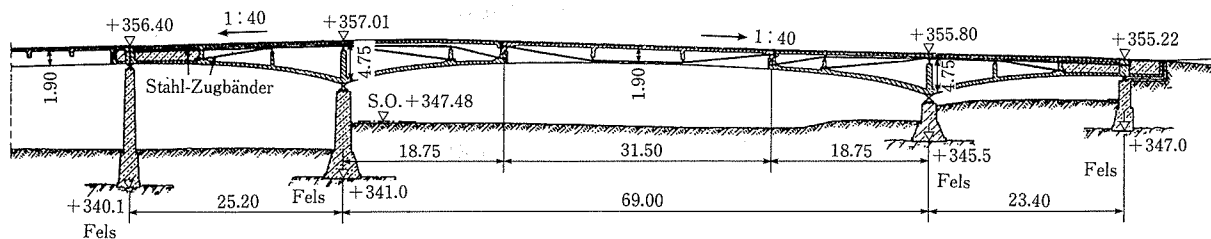


図-7 外ケーブルを用いたアウエ橋



写真-16 アウトバーンの跨線橋 (1938年)

68 m, 幅員10.88 mのザーレ橋 (Saale, 写真-15)<sup>28)</sup>である。この発想は、一般に下路アーチではライズが低くなればなるほど、両端の支点部における水平反力が大きくなるが、この水平力を解消するためにアーチのスプリング間を型鋼で繋いだ引張り床版を採用したことである。1928年の特許によれば、プレストレスの導入方法は、アーチリングの中央部に油圧ジャッキをセットしておき、型枠の脱型と同時にプレストレスを与えるという方法である。この工法の特長は型鋼の設置によって支保工を兼用でき、アーチリングの型枠脱型が容易で、さらに床版に作用する曲げモーメントを打ち消すように2次モーメントを導入することができることである<sup>29)</sup>。

1932年8月、ディシingerは、ベルリン・シャロッテンブルグ工科大学の鉄筋コンクリート工学の教授に任命され、コンクリートの材料特性、とくにフレシネーによって発見されたコンクリートのクリープと乾燥収縮に関する実験と定式化の研究を開始した。この研究成果は1937年に発表されたが、1944年に設計指針として認められ、戦後の1950年にドイツのPCの設計指針に盛り込まれた。

桁橋において、曲げモーメントをゼロにすること、または自重の影響をゼロにすることは、桁橋のスパンを伸ばすためには理想的である。このアイデアをディシingerは、1937年に完成したアウエ (Aue) 橋に適用した。この橋はアンボンドPC鋼材を使った外ケーブル橋で、PC橋の実質的な幕開けとなった橋である。アウエ橋は橋長308mの高架橋であるが、駅を跨ぐ3径間の部分にこの外ケーブル方式が採用された (図-7)<sup>30)</sup>。ケーブルにはφ70 mmのPC鋼棒が使われたが、コンクリートのクリープ・乾燥収縮によってPC鋼棒の張力が僅か1ヵ月の間で、吊り桁は初期緊張力の78%、片持ち桁は90%にまで低下していることが判明した。この現象に対して、定期的に再緊張をする対策がとられた。

一方、付着のあるPC工法の研究についても研究が開始され、1933年にフレシネーの特許に関してライセンス契約を結んだワイッス・フライターク (Wayss & Freytag) 社はスパン20mのポストテンション方式のPC桁を使って、フレシネー定着具の信頼性を含むさまざまな実験を行った。実験はドレスデン工科大学で1937年12月に開始され、徐々に荷重載

荷を行った。ひび割れは使用荷重の1.5倍の状態が発生し、破壊は1938年5月に2.5倍の荷重強度のときに起こったことが報告されている。この研究成果をもとに1938年アウトバーンを跨ぐ跨線橋としてスパン33mのプレテンション式PC桁がエールデ (Ölde) に施工された (写真-16)<sup>31)</sup>。これは桁高1.6mの4本のI桁からなり、床版はRCである。スパン・桁高比は20:1で、これまでにコンクリート梁でこれほどスレンダーな橋は存在しなかった<sup>32)</sup>。

### 3.3 ウーリッヒ・フィンスターバルダー (Ulrich Finsterwalder, 1897~1988)



写真-17 ウーリッヒ・フィンスターバルダー

ディビダーク工法と張出し架設工法の発明者としてPC橋の発展に貢献したウーリッヒ・フィンスターバルダー (写真-17)<sup>33)</sup>は、1897年ミュンヘン工科大学の数学の教授であり、航空写真測量の基礎を築いたセバスチャン・フィンスターバルダー (Sebastian Finsterwalder) の息子としてミュンヘンに生まれた。高校卒業後、1916年から西部戦線に参加するが、1918年

~1920年までフランス軍の捕虜となり、釈放されるまで数学を中心として勉強した。1920年にミュンヘン工科大学に入学するが、純粋数学の道へは進まず、数学をエンジニアリングの基礎と見なし、アイデアと計算を目に見える構造体に変換できる土木工学科に入学した。大学ではフェッブル教授 (Prof. Föppl) のもとで、半円筒シェル荷重実験等を行っていたが、前述のツァイス社の半球形のプラネタリウムの研究でディシingerと運命的な出会いをした。フィンスターバルダーの最初の業績は、網構造をコンクリートで被覆した薄肉シェル構造の解析手法を確立したことである。それは、網構造をシェル構造と見なして、それぞれの荷重によって生じる応力を微分方程式で求め、それから網に作用する応力を求めようとするものであった。さらに半球シェル構造よりも平面的には四角形の縁辺を有するシェルの方が、産業界にとって有用であると考え、彼は解析手法をさまざまなシェル構造に応用した<sup>34)</sup>。

1923年秋、ディプロム試験に合格するとディビダーク社に入社し、イェナにおいて2年間、ツァイス社とともに半円筒形屋根の設計と施工を担当した。1930年、33歳のフィン

スターバルダーはこれまでのシェル構造物の解析手法の開発に対してミュンヘン工科大学から博士号を与えられた。同年バーゼル市に3径間を有するドライローゼン (Drei-Rosen) 橋 (スパン割: 51 m + 102 m + 51 m) の国際コンペがあり、フィンスターバルダーが参加した。当時、RC桁では、スパンを100 mも飛ばせないことが分かっていたため、自重と活荷重によって桁に引張応力が作用しないようなケーブル配置と中央スパンにヒンジを設置した構造を提案した。残念ながら審査結果は、コスト的に合わないという理由で採用されなかった。しかし、これがきっかけとなりPCの研究に着手することになった。1935年には自重の作用によってI形断面のRC桁にプレストレスを導入する方法を考案し、特許を取得した。第二次大戦後、フィンスターバルダーはこれまでのプレストレスの導入法とはまったく異なるシステムの研究に着手した。それは、直径26 mmの高張力鋼棒 (St 60/90) をカップラーで繋ぎ、両側の端部にはアンカープレートを設置して、ナットを回転させてプレストレスを与える方法であった。さらに、鋼棒の周囲を直径30 mmのシースで囲み、モルタルを注入して桁と鋼棒を一体化させるアイデアであった (写真-18)<sup>35)</sup>。ディビダーク式PC橋の第1号は、1949年ミュンヘンの南西にあるシュタルンベルク (Starnberg) 市のペルシャ (Percha) に建設されたスパン21 mの道路橋である<sup>36)</sup>。

張出し架設工法によって架設された最初のRC橋は、1930年10月、ブラジルのリオ・デ・パイク (Rio de Peixe) 川に架けられたスパン68.5 mのハーバル (Harval) 橋だと言われている (写真-19)<sup>37)</sup>。これはドイツからの移民者であったバウムガルト (Baumgart) によって施工された。張出し架設

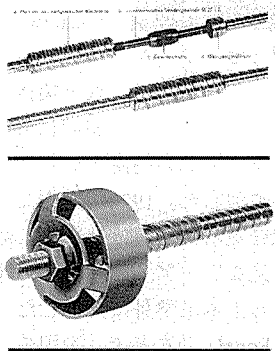


写真-18 ディビダークシステム

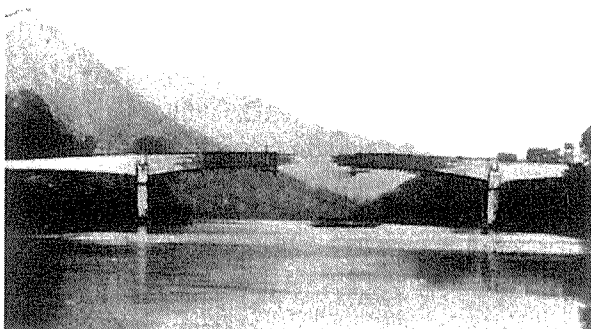


写真-19 RC橋の張出し施工 (ブラジル, 1930年)

は、1.5 mのブロックを木製支保工で支え、直径45 mmの鉄筋をカップラーで継ぎ足していく方法であった。しかしながら、鉄筋コンクリート製の桁ではスパンに限界があり、桁の下縁に発生するひび割れを制御することはできない。本格的な張出し架設工法は、20年後のPCの出現を待たなければならなかった<sup>38)</sup>。

ディビダーク (以下、DWと略記) 式PC工法の発明によって、フィンスターバルダーは橋梁架設工法における画期的な張出し架設工法を考案した。橋脚を建て、その柱頭部から両側に向かって長さ約3.5 mのコンクリートブロックを張り出し、その端部をDW式鋼棒で定着する方法である。この特許は1950年、DW式張出し架設工法が初めて適用されるバルドウィンシュタイン (Baldwin stein) のラーン (Lahn) 橋 (写真-20)<sup>39)</sup> の施工のために出願されるが、競合する会社から特許に関するクレームがあり、14年後の1964年に成立した。1952年には、ヴォルムス (Worms) のライン河橋でスパン114 mの桁橋が建設され、それ以降PC橋の張出し架設は急速に発展していった。

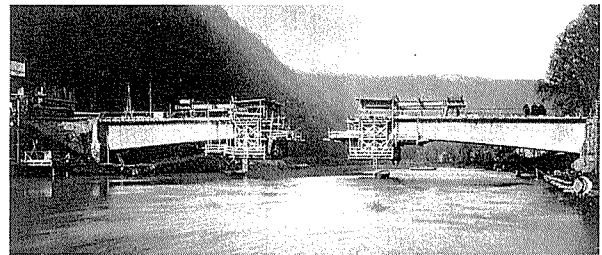


写真-20 ラーン橋 バルドウィンシュタイン (1951年)

フィンスターバルダーはミュンヘン工科大学からの教授の要請を再三にわたって固辞した。それは、彼が常に第一線におけるエンジニアであることを願ったためである。また、彼と一緒に働く者にも仕事の面だけではなく、エンジニアの精神的な姿勢についても強い影響を与えた。ミュンヘン工科大学で実験を担当していたハンス・ホルスト・ミュラー (Hans Horst Müller) は、フィンスターバルダーはいつも物腰が低く、たいへん優しい一面があるが、独創的な創造力、豊かな発想、いったんアイデアを思い浮かべるとそれが実現するまで決してあきらめない強じんな忍耐力の持ち主であったと語っている。

#### 4. おわりに

鉄筋コンクリート橋の時代からPC橋の初期の時代に活躍したエンジニアの歴史を述べたが、時代を変えていったエンジニアに共通して言えることは、常に新しい材料の特性や特異な現象に対して真摯であり、たとえ示方書に規定された事項であっても、それを追究することを辞めなかったことである。その問題を克服する過程で、新しい構造形式、施工技術が生まれ、研究活動 (Wissenschaft) が刺激され、その結果として示方書 (Verwaltung) が整備され、さらに材料を用いた工業技術 (Industrie) が発展していく。20世紀はそうした一連の動きの中でPC橋が発展してきたと言える。21世紀を迎えるにあたり、上記の3つ要素の連携を上



手に保っていくことがPC橋の新たな展開に貢献するのではないかと考えている。

参 考 文 献

- 1) Bekker : Musik Geschichte als Geschichte der musikalischen Formwandlung, 1926
- 2) Ricken : Der Bauingenieur Geschichte eines Berufes, Verlag für Bauwesen, p.78, 1994
- 3) Wittfoht : Building Bridges, p.113, Beton Verlag, 1984
- 4) Wittfoht : Building Bridges, p.113, Beton Verlag, 1984
- 5) Kurrer : Stahl+Beton=Stahlbeton? Stahl+Beton=Stahlbeton!, Beton und Stahlbetonbau 92, Heft 1, 1997
- 6) Klass : Weitspannt sich der Bogen 1865~1965, Die Geschichte der Bauunternehmung Dyckerhoff & Widmann, p.33, 1965
- 7) Ricken, Der Bauingenieur Geschichte eines Berufes, Verlag für Bauwesen, p.82, 1994
- 8) Mcbeth : François Hennebique (1842~1921) reinforced concrete pioneer, Civil Engineering, p.87, May 1998
- 9) Kupfer : Stahlbetonbogenbrücken von Emil Mörsch, Beitrage zur Geschite des bauingenierwissens 5, TU München, pp.27~28, 1993/1994
- 10) Mcbeth : François Hennebique (1842~1921) reinforced concrete pioneer, p.88
- 11) Mcbeth : François Hennebique (1842~1921) reinforced concrete pioneer, p.87
- 12) Nervi : Structures, F.W. Dodge Corporation, p.15, 1956
- 13) Wittfoht : Building Bridges, p.121
- 14) Wittfoht : Building Bridges, p.121
- 15) Maillart : Zur Entwurf der neuen schweizerischen Vorschriften für Eisenbetonbau, Schweizerische Bauzeitung, 1932.1.30
- 16) Ros : Versuche und Erfahrungen an aus gefuhrten Eisenbeton Bauwerken in der Schweiz, Bericht Nr.99, p.46, 1937
- 17) Ausstellung der Robert Maillarts Brücken, Zurich, 1990
- 18) Maillart : leichte Eisenbeton-Brücken in der Schweiz, SBZ, 1931.3
- 19) Maillart : leichte Eisenbeton-Brücken in der Schweiz, SBZ, 1931.3
- 20) オルドネス, 池田 (訳監) : PC構造の原点, 建設図書, p.42
- 21) オルドネス, 池田 (訳監) : PC構造の原点, 建設図書, p.263
- 22) オルドネス, 池田 (訳監) : PC構造の原点, 建設図書, pp.60~61
- 23) オルドネス, 池田 (訳監) : PC構造の原点, 建設図書, p.138
- 24) オルドネス, 池田 (訳監) : PC構造の原点, 建設図書, p.237
- 25) Ricken : Der Bauingenieur Geschichte eines Berufes
- 26) Schönemann : Spannweite der Gedanken, Springer Verlag, p.13, 1987
- 27) Schonemann : Spannweite der Gedanken, pp.7~9
- 28) Weit spannt sich der Bogen 1865~1965, Verlag für wirtschaftspublizistic H. Barteils KG, p.159, 1965
- 29) Utsch, Jahn : Die Entwicklung der externen Vorspannung, p.330, Beton und Stahlbetonbau, Heft 8, 1999
- 30) Utsch, Jahn : Die Entwicklung der externen Vorspannung, p.330
- 31) Wittfoht : Building Bridges, p.147
- 32) Wittfoht : Building Bridges, pp.147~148
- 33) Ulrich Finsterwalder 70 Jare, Dywidag-Berichite, 1-1968
- 34) Ulrich Finsterwalder 70 Jare, Dywidag-Berichite, 1-1968
- 35) Dywidag-Berichite, p.2, 3-1963
- 36) Weit spannt sich der Bogen 1865~1965, Verlag für wirtschaftspublizistic H. Barteils, KG, p.166, 1965
- 37) Wittfoht : Building Bridges, p.196
- 38) Wittfoht : Building Bridges, p.196
- 39) Dywidag-Berichite, p.6, 1-1963

【2000年10月20日受付】

◀ 刊行物案内 ▶

## プレストレストコンクリート橋脚の 耐震設計ガイドライン

(平成11年11月)

頒布価格：3 000円 (送料 500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会