

特集

PC 技術の歩み

PC技術の歩み

岡田 清*

1. はじめに

プレストレスの考えは古くからあったが、コンクリートに圧縮応力を導入することを最初に応用したのは米国のジャクソン(1886年)であり、1888年にはドイツのデーリングがプレテンションベッドについて最初の特許申請を行っている。20世紀に入ってから欧米で種々の試験研究が行われたが、これら初期の試みは成功せず実用化されるに至らなかった。プレストレストコンクリート(PC)技術を総合的に研究し、必要条件を確立したのはフランスのフレシネーであり、1926年に400 N/mm²以上の鋼材応力度を有するPCを造り特許を得た。フレシネーの最大の業績はコンクリートのクリープおよび乾燥収縮について理論的に考究したことであり、これによりPCの正しい評価が可能となった。彼の特許はわが国に昭和3年(1928)に出願され、昭和7年(1932)に登録され、原理特許として工業権が与えられていたが、昭和31年(1956)に消滅した。

その後の20世紀におけるPC技術の目覚ましい発展の根底には、コンクリート品質の向上や緊張材の改良、向上があり、また解析、設計法の進歩や設計基準の整備、各種の合理的な施工法や構造形式の開発、長大スパンや大規模構造物、各種工場製品への適用などによってPCは確固たる基礎を形成したと言えよう。

以下、わが国でのPC技術を中心に20世紀におけるその発展を概観する^{1)~4)}。

2. PCの設計、施工に関する基準の歩み

わが国でのPCの研究はホイヤー著「Stahlsaitenbeton(1937年)」(鋼弦コンクリートと訳されていた)に刺激され、昭和16年(1941)頃より吉田宏彦 福井大学教授が研究を始められ、京都大学等で小型のPC桁を造られたりしたが、その後、鉄道技術研究所においてプレテンション方式の組織的な研究が始められたのが、その第一歩である。しかし、戦時下では欧米からの学術資料の入手が絶えたことや、材料不足もありPCの実用化には至らなかった。これらの事情に

ついては仁杉 巖氏が詳しく述べておられる¹⁾。

昭和25年(1950)頃からプレテンションのPC枕木の製造が開始され、昭和26年(1951)には七尾市の長生橋(3径間プレテンションスラブ橋、全長11.6m)、昭和29年(1954)にはポストテンション方式で第一大戸川鉄道橋(支間31m)が本格的なPC橋の第一号として施工された。

なおフレシネーについては、昭和14年(1939)に非常に大きな緊張力を与えた鋼材をコンクリート部材に定着する定着コーンと鋼材の緊張を容易に行うことのできる緊張用特殊ジャッキを考案した。これによりPCの利用は企画的に増大し、PC技術の普及、今日の隆盛のもととなった。昭和27年(1952)にフレシネーの特許権を代行する極東鋼弦コンクリート振興(株)が発足し、フレシネー工法の導入とその技術の指導に当たった。PC製品の製造および工事を実施する専門業者もこの頃から発足している。

PC技術の導入はわが国のコンクリート界に新しい強烈な刺激を与えた。当時、たとえば土木学会「鉄筋コンクリート標準示方書」は昭和6年(1931)に制定され、その後若干の改訂はあったが基本的な変更はなされず、鉄筋の許容応力度は120 N/mm²、コンクリートの曲げ圧縮応力度は $\sigma_{28}/3 \leq 6.5$ N/mm²と定められた許容応力度設計法がとられており、コンクリートの硬化収縮の影響についても、これを考慮する必要のある場合(不静定構造等)には温度低下15℃に相当する影響があるものとする定められていた。PC設計上に重要なコンクリートのクリープやPC鋼材のリラクゼーション等についての記述はまったくない。したがってPC技術に携わる者にとっては、材料上では30 N/mm²~50 N/mm²程度の高強度のコンクリート、高強度のPC鋼材(最初は $\phi 1$ mm~3 mm程度のピアノ線等しか入手できなかった)の開発研究やら、コンクリートの収縮、クリープの影響等の究明に大わらわであった。

私は大戦終了時、昭和20年(1945)に大学を卒業し、混乱の中でようやくコンクリートの収縮やクリープ現象に興味をもち、近藤泰夫、坂 静雄両教授の指導下で実験的研究を始めていたこともあって、上記2現象がプレストレスの有効性に大きな影響をもつことからPCに非常な魅力と期待をかけて研究を始めていた。

昭和30年(1955)6月に土木学会では、主として独・英・仏諸国の示方書、文献を参考に、国内における研究、従来の経験等を考慮して、実情に即したものを目標として、「プレストレストコンクリート設計施工指針」を制定した。これにはプレストレスのほかに、許容引張応力度を超えない範囲という制限つきのパーシャルプレストレスの考え方も導入されていて、PCの設計・施工について一応の規準を与えたものであった。たとえばコンクリートの品質についてはプ



* Kiyoshi OKADA

本協会名誉会員
岡田材料研究会 会長
京都大学 名誉教授

レテンション、ポストテンションの場合には、それぞれ σ_{28} で40 N/mm²以上、30 N/mm²以上、また最小単位セメント量はそれぞれ300 kg/m³、200 kg/m³以上、さらにPC鋼線については2.0 mm～7.0 mm径のもので、引張強度1 550 N/mm²～2 400 N/mm²、などと明記している。応力度計算上の仮定としてコンクリートやPC鋼線のヤング係数、PC鋼線のリラクセーション値、コンクリートのクリープを考慮したヤング係数のとり方、各種雰囲気下のクリープ係数や乾燥収縮度のとり方、部材のひび割れや終局強度設計法に基づいた破壊に対する安全度の計算の方法、また施工時においてPC鋼線に引張力を与える方法やシース、グラウト、継目での処理、PC鋼線の定着や定着部の補強の必要性等についても触れている。

昭和33年(1958)日本材料試験協会(現日本材料学会)のPC鋼棒研究小委員会ではPC鋼棒として圧延、熱処理および引抜きの種類3種類の製造方法により製造された径12 mm～26 mmで、800 N/mm²～1 250 N/mm²の強度をもつ鋼棒を用いる場合についての設計・施工指針を刊行している。

昭和35年(1960)にはPC鋼線およびPC鋼より線のJIS G 3536が制定され、昭和36年(1961)には日本建築学会でも「プレレストコンクリート設計施工規準、同解説」を定めている。

昭和30年前後から昭和40年代の初めには公共事業の拡大に伴い、道路橋、鉄道高架橋等の建設が相次ぎ、当初のプレシネー工法に続いて、昭和32年(1957)BBRV工法(スイス)、昭和33年Dywidag工法(ドイツ)、昭和34年(1959)Leonhardt工法(ドイツ)などが相次いで導入された。中でもPC鋼棒を用いたDywidag工法は、片持ち架設工法という当時では画期的な施工法の開発によってPC橋の支間の適用範囲を飛躍的に増大させたことは、特筆に値する。

一方、わが国独自の工法として各種定着工法(昭和35年MDC工法、昭和40年(1965)OBC、OSP、フープコーン工法)が、また外来工法として昭和43年(1968)VSL工法、SEEE工法、昭和45年(1970)CCLC工法等が続々と導入され、土木学会でもこれら工法別の設計・施工指針(案)を制定し、その普及に努力した。

またこれら状況に相応じ、昭和43年には日本道路協会「プレレストコンクリート道路橋示方書」が、昭和45年には当時の国鉄から「建造物設計標準プレレストコンクリート鉄道橋」が制定されている。

昭和46年(1971)にはPC鋼棒のJIS G 3109が制定された。

その後土木学会では、昭和53年(1978)に「プレレストコンクリート標準示方書」を制定した。これはCEB-FIP国際指針(昭和45年)の影響を受けて限界状態設計法の影響を反映した先駆的なものであった。すなわち、使用状態に相当するひび割れ限界状態をⅠ、Ⅱ、Ⅲ種の種別に区分し、ひび割れを許容するⅢ種PCの考え方を導入した。また、破壊安全度の検討に対して現在の限界状態設計法における部分安全係数の概念を導入している。

さらに進んで、昭和61年(1986)に「土木学会示方書」の大改訂が行われ、限界状態設計法が全面的に取り入れられた。すなわち、RCについては従来の許容応力度設計法は暫

定的には認めるが、新示方書では従来のⅠ、Ⅱ、Ⅲ種というPCの区分はこれをなくしてRCと同じ扱いとし、使用限界状態としては構造物の機能や使用目的、環境条件に応じてひび割れ限界状態の種類(i.引張応力発生限界、ii.ひび割れ発生限界、iii.ひび割れ幅限界)を選定するという方法をとっている。その後、平成8年(1996)に部分的に改正があり、プレレストコンクリート構造をPC構造とPRC構造に大別し、前者は使用限界状態でひび割れ発生を許さない構造、後者は使用限界状態でひび割れ幅を制御するものとした。なお後者の場合、ひび割れ間隔の制御はRC構造と同様に異形鉄筋のひび割れ分散作用に依存し、プレストレスは鉄筋応力度の増加量を抑制するものである。

また、PC鋼材については太径のもの、高引張強度、低リラクセーション等の要求に応ずるため、数次の改正がそれぞれ加えられ、PC鋼線およびPC鋼より線についてはJIS G 3536-1994が、PC鋼棒については、PC鋼棒JIS G 3109-1994、細径異形PC鋼棒JIS G 3137-1994が定められている。

3. PC橋梁と架設工法の歩み

PCが最も多用されている橋梁について架設工法の歩みを眺めてみる。

3.1 桁 橋

昭和20年代後半からの初期時代では、工場でプレテンション方式で製作された長さ20 m程度までの橋桁を現場で架設し、横方向はPC鋼棒等でプレストレスングし、一体化する方式がとられた。続いてポストテンション方式で現場製作する方式が続き、架設機械の進歩もあり支間40 m程度までの橋桁へと発展した。昭和43年には、建設省標準設計「ポストテンション方式PCT形桁橋」が制定され、広く世間に認知されるに至っている。

それ以後、単純桁より連続桁への応用、日本道路公団によるPC桁の上にRC床版を設けたⅠ桁合成桁、またこれの連結化、連続化などが進歩発達した。

高度成長期に入った昭和40年代後半から、長く続いた労働力不足を償うため、できる限りの機械化施工を行うとともに、コストの低減と急速施工への要求を満たすために、大型架設機械使用の大型移動支保工(大体支間50 mぐらい)による桁橋の施工が行われるようになった。これにより天候に左右されず、市街地においては橋梁下の交通を阻害せず、寒冷地でもコンクリートの養生設備を型枠支保工とともに移動させることになり冬期施工が可能となり、工期の短縮が図られるに至っている。

また、前述のように昭和33年後からは、コンクリート橋の支間40 mの壁を超える工法としてドイツより導入されたDywidag工法によって片持ち張出し工法が行われはじめた。その第一号として施工された嵐山橋(昭和34年完成、12m+51m+12m)は有名で、当時としては驚異の工法であった。それ以後、昭和51年(1976)には当時世界最長支間の浜名大橋(支間240 m)、後述のPC斜張橋では国内最大級の鳴子大橋(支間250 m)などにも適用されてきた。この工法は各種のラーメン橋、連続橋などばかりでなく構造形式もアーチ、トラス橋その他への対応も行われ、国内だけでも1 000

橋以上の橋梁が完成している。

そのほか支間40m~100mの範囲で省力化工法として昭和50年代より押し出し工法が行われた。この工法の特徴は工場内で桁を製作し、既設桁に後方で連結しながら種々に工夫された架設機械を先導に前進していくものである。

架設応力軽減のため、仮支柱使用、ピロン形式、斜吊り材使用などが行われることもある。この工法は桁下空間を制約しないことで、鉄道上、道路上の施工に広く用いられた。

3.2 斜張橋

PC橋の形式で支間の長大化に対応できる構造形式として、PC構造の主桁をRC構造あるいはSRC構造の主塔から張り渡した引張力に強いPC鋼材の斜材で吊り上げるPC斜張橋は、構造的合理性と経済性において極めて優れたものである。

本格的なPC斜張橋は鋼斜張橋に遅れること7年の1962年に架設されたベネズエラのマラカイボ橋（イタリア人のMorandiの設計）が最初である。1970年代になってドイツ、フランス等で盛んに建設されはじめた。

わが国では昭和43年（1968）に中央径間355mの鋼斜張橋の大和川橋梁が造られたが、コンクリート斜張橋では昭和53年（1978）に支間長96mの松ヶ山橋、昭和54年（1979）に支間長85mの小本川橋梁が架設されたのみで、支間長100mを初めて超えたものは昭和63年（1988）完成の新綾部大橋である。それ以後支間の長大化、橋梁の大型化が始まり、最大支間長200mを超えるものが続々と建設され、現在国内で最大支間長は伊唐大橋（平成8年（1996）完成、260m）である。外国では時代的にはフランスのプロトン橋（1977年、320m）、スペインのルナ橋（1983年、440m）、ノルウェーのスカルンズデ橋（1991年、530m）などが有名である。斜張橋は全体構造が高次の不静定構造であり、耐風、耐震設計上の考慮も必要で、かつ架設方法は難易度が高く、コンピュータ、センサー等をフルに利用した多岐にわたる計測など、施工管理が極めて重要となる。

3.3 複合斜張橋

長い中央径間に対し側径間が短いような場合、中央径間と側径間の荷重に大きなアンバランスが生じるので、側径間あるいはその一部に対して死荷重の大きいPC桁を配置し、それ以外の区間はすべて鋼桁とした複合構造の長大斜張橋は合理的構造と言えよう。この例としてフランスのノルマンディ橋（1993年、全長856m、鋼桁は中央624m、PC桁は両端116m）、本四公団の多々羅大橋（平成11年（1999）、270m+890m+320m、側径間270m中105m、側径間320m中62.5mのみPC桁、それ以外は鋼桁）などがある。このような複合斜張橋では外見上同じ断面寸法をもつ鋼桁と、PC桁とを接合するため、その接合部は構造特性や材料特性が急変する不連続点で構造上の弱点となりやすいため、その接合位置や接合構造等に特別の配慮が必要であり、種々の工夫が試みられている。

3.4 エクストラードーズド橋

桁高の低い主桁をもつPC斜張橋であるが、PC斜張橋とPC片持ち橋梁の中間的な構造特性をもっており、中規模橋梁（支間200mぐらいまで）への適用に対し有利な特徴をもつ

ものである。たとえば、斜張橋に比べ塔高さを小とすることができ、また維持管理も容易となる。わが国で最初なのは小田原ブルーウェイブリッジ（平成6年（1994）完成、74m+122m+74m）で、主塔の高さは10.7mである。日本道路公団で現在施工中のPC桁のプレキャストセグメントの張出し架設と鋼桁とを複合させた木曾川橋（橋長1145m、支間160m+3@275m+160m）および揖斐川橋（橋長1397m、支間154m+4@271.5m+157m）の連続エクストラードーズド橋は世界でも異色のものである（主桁は中央径間部に木曾川橋では105m長の鋼桁、揖斐川橋では95m~100m長の鋼桁を挟んでいる）。

3.5 アーチ橋

コンクリートアーチ橋の歴史は古く、固定支保工形式またはセントル工法で施工されていた。アーチリブは曲げ部材であるという認識の浸透とPC技術の発展によってPC工法を利用してコンクリートアーチ橋を架設したのは、わが国では外津橋（昭和49年（1974）、最大支間170m）が最初で、いわゆるトラス工法によっている。張出し架設をする場合には仮支柱を建て、アーチリブを斜吊りして伸ばすピロン工法、さらにリブ先端をメランで伸ばすピロン・メラン併用工法、斜吊りケーブルでカンチレバートラスを形成しながら張り出すトラス工法、基部付近はトラス工法で、中央部はメランを併用するトラス・メラン併用工法、などがある。別府明礬橋（平成元年（1989）、最大支間235m）はトラス・メラン併用工法で建設された。最近ではアーチリングを支間中央で分割したものを、それぞれアーチアバット上で鉛直方向に製作し、前方に回転させて中央で閉合するロアリング工法も開発されている。その例は三貫目大橋（施工中、アーチ支間90m）である。アーチ橋は、不静定構造かつ架設時には計測などの高度な施工管理体制が必要であるが、架設地点によっては適用支間は400mも可能であり、PC橋の長大化に今後とも寄与するものである。

3.6 吊床版橋

まず主ケーブルを定着するアンカー部を施工の後、主ケーブルを張り渡し、その上にプレキャスト版を架設、間詰めコンクリートを打設、床版を緊張する方法で施工されている。

長大橋への可能性はあるが施工実績は少なく、歩道橋が主になっている。問題点も多く最大支間は140mぐらいまでである。

4. 再び注目されるPC技術

4.1 アンボンドPCと外ケーブルPC

アンボンドPCは煩雑なグラウト注入作業を必要とせず、また必要に応じ再緊張が可能で、PC施工の省力化や合理化を図るうえで多くの利点がある。アンボンドPCは1960年代に米国とカナダで採用されはじめたが、土木学会では昭和53年（1978）制定の「プレストレストコンクリート標準示方書」においてアンボンドPCが本格的に取り上げられた。日本建築学会も昭和54年（1979）よりグラウト作業の不要なアンボンドPCの利用を認め、昭和57年（1982）に「プレストレストコンクリート（Ⅲ種PC）構造設計施工指針（案）」が発表さ

れ、アンボンド工法およびPRC造の適用が容易になった。

昭和61年(1986)制定の土木学会「コンクリート標準示方書」においては、具体的な計算方法は示していないが、曲げひび割れ幅限界状態の検討を要するパーシャルPC部材へのアンボンドPCの適用についても触れている。

最近では後述のようにケーブル防錆技術の向上と太径ケーブルの開発に伴って、アンボンドPCの応用形態と見なすことのできる外ケーブルのPCが注目されている。

1980年頃より構造物の断面外にケーブルを配置してプレストレスを導入する外ケーブル構造が注目されている。この考え方は内ケーブル方式より古く、すでに1920年代から欧州では橋梁を中心に採用され、1950年代までに数橋が建設された。しかしケーブルの防錆技術上、また補修費等のためその後の使用は途絶えていた。1970年代に入ってからPC橋の補強に再び採用されはじめ、1980年代にKey橋(アメリカ)の架設後急速な発展をみた。わが国では昭和60年(1985)に東北新幹線の笹目川橋梁に内ケーブルと外ケーブルの混合方式が採用され、現在建設中の日本道路公団第二東名、第二名神高速道路のいくつかの長大橋にも用いられている。

外ケーブル方式は、

- ① ケーブルが断面外に配置されるので、ウェブ厚が減少できるため桁重量の軽減やコンクリートの充填性の向上、また補修・補強工法として有効に利用も可能
- ② ケーブル配置が簡単で施工期間の短縮が可能
- ③ ケーブル緊張力の摩擦損失の軽減が可能

など種々の利点をもっている。一方、課題としては、

- ① ケーブルの振動
- ② ケーブルの彎曲部や定着部の応力分散とその補強
- ③ ケーブルの防錆
- ④ 構造系全体としての耐荷力

などが挙げられる。なお、外ケーブルとしてはPC鋼材のほかに最近では、腐食の恐れが少ないCFRPやAFRPなどの新素材連続繊維(後述)も注目され、実用化に向けて各種の調査研究が行われている。

4.2 プレキャストセグメント工法

この工法は、桁をいくつかのセグメント(従来、小型の場合ブロックとも称していた)に分割し、継目に接合キーを配置したプレキャストセグメントを工場等で製作し、これを架設地点に運搬し、接合面にエポキシ樹脂など接着剤を塗布して接合し(マッチキャスト方式ではこの処理をしないこともある)、プレストレスを与えて一本化するものである。これにより十分な品質管理のもとで高強度コンクリートの利用も容易などの利点が多く、最近では長大な桁橋やラーメン橋等への応用が増加している。たとえば弥富高架橋(平成12年(2000)、12径間連続+11径間連続+12径間連続=1.5 km)は、マッチキャスト方法で製作され、スパンバイスパン工法で標準ブロック長3m、最大重量80tのセグメントを用いて架設された。わが国で最初の大規模セグメント工法の利用であった。内ケーブルと外ケーブルを併用している。

プレキャスト部材を適用したPC構造は不連続な接合部を

もっているため、一体打設のPC構造とは基本的に異なっている。このため、接合部挙動については十分な考究が必要である。たとえば、使用限界状態においては両者は同一の挙動を示すとしても、終局限界状態では変形能力やじん性の点では同一でないため、これらに格別の配慮が必要である。

4.3 鋼PC合成構造

長スパンのコンクリート橋で問題となるのは桁重量が大きくなることであるが、その原因の一つは桁重の約30%も占めるウェブである。このウェブ重量を軽減するためには、前述の外ケーブル方式の採用であり、他の方法としてはウェブに鋼材を利用する方法である。後者の場合、ウェブを単に鋼板で置き換えたもの、またウェブのせん断座屈耐力を確保しつつウェブ鋼板が導入プレストレスを阻害しないようにするために、ウェブを波形の折板構造にする例がある(たとえばフランスのドール橋、1994年、最大支間80m、日本道路公団の本谷橋、1998年、最大スパン97m)。また他の方法として、下フランジにコンクリート充填鋼管を用いて自重を約35%軽減した例(たとえばフランスのモーブレ橋、1987年、最大スパン53.6m)、その他ウェブを鋼管のトラスに置き換えた例(フランスのプロネ橋、1997年、最大スパン110m、日本道路公団の巴川橋、施工中、最大スパン119m)もある。

そのほか、少し古いがプレキャストの高強度主桁に鋼横桁を配置し、かつ床板との合成桁として版厚を軽減した例(アメリカのハンチントン橋、1984年、274m+185m)もある。

以上のように、PC部材と鋼部材とを組み合わせる合成断面とする方法は前述の複合斜張橋と同様に、それぞれ単独に使用した場合に得られない大きな効果が期待できる。

5. 高性能材料の使用によるPCの高性能化

5.1 高強度コンクリート

PC構造ではRC構造に比べて高い強度のコンクリートが使用されてきたが、昭和55年(1980)頃より60 N/mm²~80 N/mm²のものが高強度コンクリートと位置づけられ、土木学会でもそれに沿った標準示方書を制定した(平成8年(1996))。一般に使用されているPC用コンクリートの設計基準強度は60 N/mm²程度までのものであるが、100 N/mm²程度まで含めたものについても研究対象とされている。

高強度コンクリートのもつ高強度、低い乾燥収縮、クリープ、高耐久性等の長所はPC構造物に多くの有用性を与える。また、これら諸特性を十分に利用した構造形式やPCと鋼との複合構造の発展に大きく寄与するものであろう。

一方、コンクリートの自重の軽減を図るために高強度軽量コンクリートの利用についても研究が行われ、たとえば米国で42 N/mm²~63 N/mm²、カナダで70 N/mm²、ノルウェーでは60 N/mm²~90 N/mm²の軽量コンクリートの開発研究も報告されている。ストルマ橋(ノルウェー、1998年、PC箱桁橋、94 m+301 m+72 m)では、中央径間301mのうち184mには平均立方体強度70.4 N/mm²の高強度軽量コンクリート(シリカフェーム使用 $W/(C+S)=0.35$ のもの)が

用いられている。

5.2 連続繊維緊張材

連続繊維補強材 (FRP) は一般に鋼材に比べて高強度であり、比重はたとえば炭素繊維 (CFRP) で1.5、アラミド繊維 (AFRP) で1.3程度で、鋼材の1/5～1/6と軽量であるなどの特徴をもっている。その応力ひずみ関係は直線的で、降伏点を有せず、CFRPで $1.4\sim 4.2\times 10^5$ N/mm²、AFRPで $0.54\sim 0.632\times 10^5$ N/mm²である。さらに多くは塩分や酸に対して腐食せず、かつ非磁性である。

PC緊張材として高強度、かつ弾性応力範囲の広いことが望ましく、また沿岸域に建設されるPC構造物には十分な耐食性が要求される。なお、近い将来リニアモーター用高架構造物へのPCの適用が想定されるが、この場合には緊張材は非磁性であることが要求される。FRPへの期待は大きい。

FRP緊張材は終局時には脆性的に破断するので、これら特性を十分に把握した設計手法の確立や、施工面では付着特性の向上や定着方法の開発など、解決すべき問題点も多い。

また、FRP緊張材の現在の価格はPC鋼材に比べて数倍程度である。将来、価格のある程度の低下が期待できるとしても、一般のPC構造への採用は困難で、腐食環境下にある構造や特殊用途での構造への適用が先行するものと思われる。

5.3 ノングラウトPC鋼材

ポストテンション工法においてグラウト注入作業を省略できるアフターボンドPC鋼材が注目されている。これは、PC鋼材に常温硬化型の樹脂を未硬化なグリース状の状態に塗布し、ポリエチレンシースで被膜したものである。この樹脂は硬化時期を緊張定着後に設定しておけば、緊張時には樹脂が硬化しないので、アンボンド鋼材と同じように緊張できる。その後、ある時間経過後に樹脂が硬化し、PC鋼材とコンクリートが一体化する。現在は径12.7mm以上の鋼より線および鋼棒がアフターボンド化されている。

なお樹脂は同じ配合であっても、置かれた環境の温度により硬化速度が大幅に異なってくるので、コンクリートの硬化時温度、気温などを配慮して硬化促進剤の量を決めておかなければならない。

5.4 防食PC鋼材

海岸線沿いの塩害等を受けやすいPC構造等においてPC鋼材の防食性の必要性が改めて認識されつつある。その対策の一つに鋼材表面に直接エポキシ樹脂等の防食加工を施したPC鋼材が出現している。米国ではASTMとして規格化されており、ISOでも規格化が決まっている。主に7本より線が外ケーブルや斜張ケーブルに使用されている。

エポキシは長期的には紫外線で劣化を生じるので、そのような場合にはポリエチレン被膜を施した多重防食型もある。また、耐候性、耐食性に優れたポリエチレンをより線の表面と各素線の隙間に加工押し被膜した7本より線や19本より線も製造され、ポリエチレン樹脂被膜鋼より線と呼ばれている。

5.5 グラウトの品質改良

ポストテンション方式のPC構造ではシース内のPC鋼材に対し緊張作業後、シース内の空隙にグラウトを充填してPC鋼材を防護する。また、外ケーブルの場合も多くの場合、PC鋼材の防食上グラウティングが行われる。

このグラウトが十分にシース内に充填されず、このため冬期においてシース内の残留した水分の凍結により桁コンクリートにひび割れを発生したり、またPC鋼材の腐食を生じた例が報告されている。英国では、グラウト注入の不適正のため1985年ポストテンション方式で造られた橋梁の桁が落下して以来、ポストテンション桁に多くの異常のあることが発見され、1992年9月に英国運輸省はグラウトによってPC鋼材のシースを充填するポストテンション工法による橋梁の施工をとりやめた。このため、英国ではコンクリート学会を中心に4年間にわたる研究を行った結果、1996年に上記禁止令は解除された。このような状況下で各所で研究調査が行われ、グラウトの充填状況の非破壊検査方法として放射線透過法、レーダー法、打音振動法、赤外線法等、種々開発されたが、いずれも部分的には有効であっても完全なものはないというのが現状である。このため、グラウトの品質改良のためにノンブリーディング用の混和剤を用いたグラウトの研究も行われている。また、その施工についても作業の確実性について各種の提言がなされつつある。

6. おわりに

20世紀終わりの年を迎えてPC技術の歩みをわが国での実状について、主としてPC橋に限定して概観した。約75年前にわが国に導入されたPC技術は主としてPC橋の架設工法の進歩、構造形式の変化、外国技術の導入と刺激、コンクリートやPC鋼材の品質の向上、諸架設機械の開発や改良、設計理論や設計施工規準の整備によって、また、経済的な高度成長に支えられて極めて大きな発展をしてきた。それぞれの成果はPCの先進諸国に較べ決して遜色のないのみならず、それを凌駕するものも少なくない。PC技術は今後もコンクリート系構造物の非常に広い分野で、かつ多用途で新しい材料をも利用しながら活用されていくものであることを確信し、若い人々のより一層の活躍を願う次第である。

なお本稿作業にあたり、小林和夫 大阪工業大学教授に多数の資料提供をいただいた。厚く感謝する。

参考文献

- 1) 仁杉：プレストレストコンクリート(PC)事始め、プレストレストコンクリート、Vol.42, No.1, pp.10～14, 2000
- 2) 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、pp.153～179, 1986.1
- 3) プレストレストコンクリート技術協会：高性能なPC構造物をめざして、pp.109～124, 1996.2
- 4) 小林：外ケーブルPC構造に関する研究の現状、土木学会論文集、No.550, V.33, pp.1～12, 1996.11

【2000年8月21日受付】