

◆ 特 集 ◆

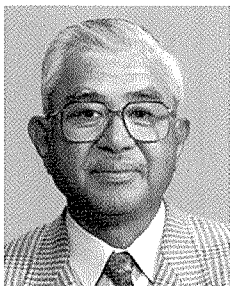
広範囲で活用される PC 技術

プレストレスの歴史と今後の展開

六車 熙*

1. まえがき

コンクリートにプレストレスを導入する考案は非常に古く、鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）と比べてそれほど遅れてはいない。1886年に米国の P.H.Jackson がアーチ形のコンクリート床版の補強に緊張した鋼材を使用する特許を出したのが、プレストレストコンクリート（以下 PC と略記）の原理の発表の最初である^{1), 2)}。1888年にはドイツの C.F.W.Doehring が同様の原理を発表している。1896年には J.Mandel がはじめて PC を理論的に論じ、プレテンション方式の部材製造方法を示した^{1), 2)}。1897年にはドイツの M.Koenen, J.G.F.Lund が当時の RC 用鉄筋を用いて PC 部材の製造実験を行ったが、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によって導入プレストレスの大半が消失し、実用化には至らなかった^{1), 3)}。以後、PC は RC の発展に押されていつしか忘れ去られ、約 40 年間の空白の時代が続いた。しかし、このような状況の中でも PC の技術的価値をいち早く理解し、その実現のときを待っていた技術者がいた。それは近代的 PC 技術の生みの親である E.Freyssinet であって、ようやく開発された高強度のピアノ線とコンクリートを用い、1928年に PC 部材の製造に成功したのである^{1), 4)}。その後、Freyssinet は 1939年に PC 鋼材緊張用特殊ジャッキと定着用コーンを開発し、ポストテンション法による部材製造の道を開き、今日の PC の発展の礎を築いた。とくに、第二次大戦終了後から今日までのわずか 50 年余の間に急速な発展を遂げ、会誌本号の主題である広範囲で活用される技術とよぶのにふさわしい広がりとお興行きをもった技術に成長している。筆者の与えられた命題は、PC 技術の歴史と今後の展開であるが、歴史については会誌 42 巻 6 号 (Nov. / Dec. 2000) に述べたところである⁵⁾。本稿では一部重複する部分もあることをお許し願ひ、PC 技術のわが国への導入から今日に至るまでの発達史の歴史を振り返りながら、今後の PC 技術の各種構造物への適用の可能性や問題点などについて簡単に述べる。



* Hiroshi MUGURUMA

本協会 名誉会員
京都大学 名誉教授

2. わが国での PC の先駆的研究

わが国における PC の研究は E.Hoyer 著「Stahlsaitenbeton」(1937 年)に刺激されるところが多く、いわゆるプレテンション方式に始まっている^{4), 6)}。1941年に運輸省鉄道技術研究所が委員会を設けて研究を始めたのが最初といわれている。1943年には吉田宏彦福井大学教授(故人)が京都大学において全長 2 710 mm、高さ 200 mm の I 形断面プレテンション梁の載荷実験を行い、Hoyer の著書に記載されているプレストレス導入効果の確認を行った⁶⁾。1944年には仁杉 巖博士による全長 1 000 mm、高さ 120 mm、幅 80 mm の PC 桁 14 本の曲げ破壊実験が行われた⁷⁾。

第二次大戦後は、1946年に商工省鉱山局鉄鋼技術委員会内に鋼弦コンクリート小委員会が設けられ、軍事資材として多量に余ったピアノ線を利用して研究が行われた^{4), 6), 7)}。その研究成果は「セメント・コンクリート」誌 1949年3月号～1950年1月号に発表されている。1951年には、吉田宏彦教授(前掲)が上記小委員会で研究され、かつ、自らが福井大学実験室で製造された厚さ 20 mm、幅 300 mm、長さ 2 950 mm のプレキャスト PC 版を、小松市庁舎地下室の 3 600 mm × 3 600 mm のグリッド状に配置された RC 基礎繋ぎ梁の間に弓状に曲げて落とし込み架設し、その上にコンクリートを現場打設して床を構築されている⁶⁾。これがわが国における PC の実構造物への最初の使用例であるが、庁舎の建て替えのために 1988年3月に解体された。解体時の調査によれば、建設後 37 年もの間湿気の多い地下室に使用されていたにもかかわらず、版はまったく健全であったと報告されている⁸⁾。

3. 基礎研究から実構造物へ

一方、わが国では Freyssinet が 1932年に取得した PC の原理特許「補強コンクリート製品の製造法」が有効であり、1952年には特許の代行管理を業とする極東鋼弦コンクリート振興(株)が発足、Freyssinet 工法の技術導入を行ってわが国での PC 技術の実務指導、普及にあたった。PC 製品および工事を実施する業者もこの前後から発足し、PC 部材の製造も始められた。1951年には東重工七尾造船所がプレテンションまくら木を製造して試験的に使用している。同時に橋長 11.6 m、幅員 6.8 m のわが国最初の 3 径間 PC 合成床版橋「長生橋」が同造船所で製造され、1952年2月に七尾市生駒町に架設、竣工している⁹⁾。近年、長生橋はわが国最初の PC 橋であることから撤去保存されることになり、現在は新橋が架設されている。さらに、1951年には東京駅プラットフォーム新設に利用する長さ 10 m のポスト

テンション PC 桁が同造船所で製造、実験されている。ポストテンション方式の部材としては、わが国最初のものであり、1952年には東京駅 6, 7 番ホーム受け梁に使用された¹⁰⁾。その後約 20 年間供用後ホーム改造のために撤去された。

不静定建築架構に PC が本格的に使用されたのは 1956 年完成の 3 階建ての兵庫県南淡町庁舎が最初である^{11), 12)}。図 - 1 はこの建物の基準階梁伏図で、長さ 11 m の各階スパン方向の大梁および小梁がポストテンションプレキャスト PC、柱および桁行方向梁、PC 梁間のスラブ、両側の耐震コアはすべて現場打ち RC 造である。PC 梁と柱とは、梁端面から延長された PC 鋼棒を柱外側面から緊張する圧着工法で剛接されている。写真 - 1 は完成当時の外観であって、圧着工法が実施されたのもこの建物が最初であろう。

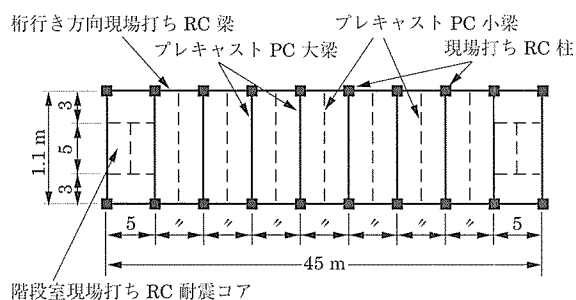


図 - 1 兵庫県南淡町庁舎基準階梁伏図

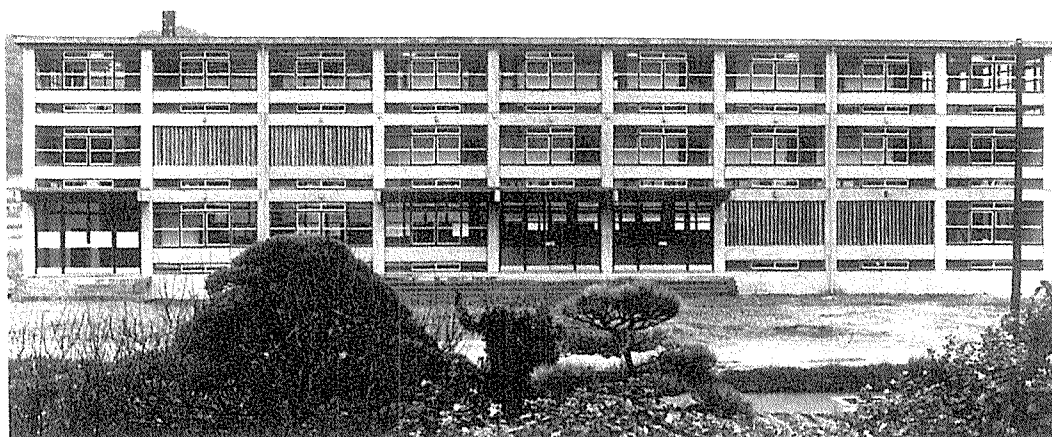


写真 - 1 完成当時の南淡町庁舎の全景

このころから PC 鋼棒および PC ストランドの品質も安定し、1958年には BBRV 工法、デイビダグ工法が、1959年にはレオンハルト工法が技術導入され、土木・建築構造物への利用が漸次盛んとなってきた。以後、1968年には VSL 工法および SEEE 工法が、1970年には CCL 工法が導入されている。この間わが国独自の定着工法も開発され、同時に緊張用ジャッキ、波付きシースなどの施工用具や材料なども国産品が生産されるようになってきた。

4. PC 技術協会の設立

このような背景を踏まえて 1958 年には PC 技術協会が設立され、わが国 PC 技術の開発と普及の中心的役割を果たすとともに、わが国の代表機関として国際プレストレスト

コンクリート連盟 (FIP) に加盟し、国際的にも協力体制が整ったのである。なお、FIP は 1998 年にヨーロッパコンクリート委員会 (CEB) と合体して国際コンクリート学会 (fib) を設立、移行した。2002 年には大阪で第 1 回 fib 大会が盛会裡に開催されたことは記憶に新しい。

5. 基・規準類の整備

基・規準類の整備も 1950 年代から 1960 年代前半にかけて行われた。とくに、建築分野では 1960 年 2 月に告示第 223 号「PC 建築に対する建設省告示」が公布され、高さ 16 m 以下の制限付きではあるが、荷重係数を用いた終局強度に基づく PC 建築物の耐震設計法が法制化されるに至った。当時のわが国では、建築物の耐震設計に許容応力度法による弾性設計が慣用され、PC 構造だけが終局強度設計を採用することに対して反対が強く、説得に苦勞をしたことが思い出される¹³⁾。1961 年には、告示を補完する形で日本建築学会「PC 設計施工指針規準および同解説」が刊行され、PC の建築構造物への利用も漸次多くなったのである。以後 PC 建築構造物については、1973 年制定の告示第 949 号で 16 m の高さ制限の撤廃と設計用荷重係数の一部低減が、1983 年告示第 1320 号では、1981 年制定の新耐震設計法における二次設計での保有水平耐力確認に代わるものとして、荷重係数による終局強度型の設計 (ルート 3 a) を規定、パ

ーシャリープレストレストコンクリート構造 (PPC と略記) およびアンボンド工法の適用範囲への盛り込みなどが行われ、これらに関する日本建築学会設計施工指針も制定された。最近では性能規定型設計法の基・規準の制定が予定されている。

6. PPC と設計基準の統一

1964 年に P.W.Abeles は常時使用状態においてある程度のひび割れの発生を許すパーシャリープレストレストコンクリート (PPC と略記) 構造を提唱し、自らもイギリス国有鉄道の車両車庫、駅舎などにこれを適用した^{14), 15)}。部材のひび割れ開口幅を導入プレストレス力の大きさによって直接制御できることから世界の注目を浴び、1970 年版

CEB - FIP モデルコードに PC と RC の中間を埋める構造として取り入れられた¹⁶⁾。以来、PPC は世界各国で急速に普及した。わが国でも RC 構造物のひび割れ、たわみ障害に悩まされていた技術者の関心をよび、1986 年には日本建築学会から「PPC 設計・施工指針・同解説」が刊行されて、建築物への利用が急速に進んだ。

PPC 部材における導入プレストレス力と偏心距離の選定は、T.Y.Lin が提唱した荷重釣合法¹⁷⁾と呼ばれるきわめて簡単な方法によって行うと便利である。図 - 2 は等分布荷重を受ける単純梁を例に取った説明図で、設計モーメントと逆モーメントを与えることによって設計曲げモーメントの一部をキャンセルするという PC 本来の仕組みをそのまま適用するものである。すなわち、部材の各位置における設計曲げモーメント M_x の一部と大きさが等しく作用方向が逆向きのプレストレスモーメント $M_p = Pe_x$ を与えることを条件にプレストレス力 P と部材各位置の偏心距離 e_x を決定する設計法で、設計式は次式で表される。

$$kM_x = M_p = Pe_x \quad (1)$$

kM_x : キャンセルモーメント

k : 係数で通常は < 1

実際の設計ではキャンセルモーメントを部材の自重モーメント程度とし、設計曲げモーメント最大の位置（図 - 2 では部材中央断面）に対して (1) 式を適用してプレストレス力 P および偏心距離を決め、他の断面については設計曲げモーメント分布と相似な偏心距離 e_x の曲線形を定める。

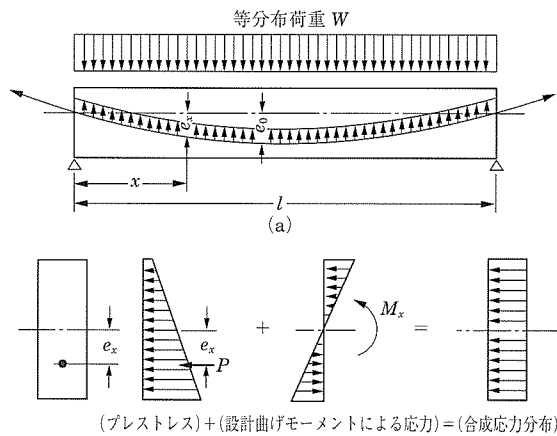


図 - 2 T. Y. Lin 提案の荷重釣合法説明図

PPC の開発によって、従来から存在した PC と RC 間の溝は埋められ、今日では PC - PPC - RC 一連のものとして取り扱うことができるようになった^{18), 19)}。これを図 - 3 に示す同じ大きさの曲げ破壊モーメントをもつ PC, PPC および RC 部材の曲げ破壊に至るまでの荷重たわみ曲線模式図で説明すると、以下ようになる。すなわち、常時使用状態では設計荷重が作用しても PC 部材ではひび割れが発生しないが、PPC および RC 部材ではひび割れが発生してしかるべき状態にあること、および、破壊荷重に至るまでのたわみ量が PC - PPC - RC の順に大きくなることを除いて基本的な相違はなく、しかも曲げ破壊に至るまでの部材断面応力および変形の解析は、同じ計算式が適用できるの

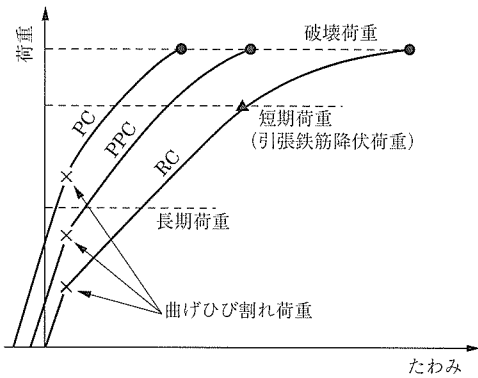


図 - 3 PC - PPC - RC 部材の荷重たわみ曲線の比較

である。最近、おくれればながら設計基準を統一すべしとの声があがりだしたことは喜ばしい。統一にあたっては設計法そのものだけでなく、コンクリートも PC から RC まで同一の品質のものでなければならない。

7. アンボンド PC の普及と逆曲げモーメントの利用

アンボンド PC 工法は、表面に防錆材を塗布または接着架構してポリエチレンまたはポリプロピレンシースの中に入れた PC 鋼材をコンクリート中に打設し、コンクリートが所定の強度に達したときにこれを緊張してプレストレスを導入する工法であって、グラウトを必要としない点を除けば、通常ポストテンション工法とまったく同じである。1952 年に米国の或建物に用いられたのが最初であるといわれている²⁰⁾。その後、ラスベガスの 10 校の学校建築をアンボンド PC フラットスラブ構造で建設したが、建設後まもなくスラブに異常むくりまたは異常たわみが起こって使用に支障をきたし、取り壊された²⁰⁾。原因は設計曲げモーメントに対して過大または過小プレストレスの設計となっていたのが原因と推定されている。この事故を契機に米国ではフラットスラブ構造に対する適正な設計法の研究が行われ、グラウト施工の手間が省けることから、種々の構造物への利用が急速に伸びた。1970 年代には建築物に用いられるポストテンション PC 鋼材の 80 ~ 90 % がアンボンド PC 鋼材であったという。

これに対して欧州諸国では、アンボンド PC 部材に曲げ荷重が作用すると、PC 鋼材の引張応力が部材全長にわたって増大するので、繰り返し荷重のもとでは定着部の引張疲労破壊の心配があるとして、1980 年代に至るまでアンボンド PC 部材の使用について否定的であった。しかし、部材の曲げ疲労破壊実験を実際に行っても、付着の有無による疲労耐力に有為差は認められず²¹⁾、欧州各国でもようやくアンボンド PC 部材の利用が考えられるようになったのである^{22), 23)}。

わが国でのアンボンド PC の力学的性質に関する研究は 1955 年から開始され、1957 年に阪急電鉄営業線にアンボンド PC まくら木が試験的に使用され、その後のアンボンド PC まくら木の全面採用につながった²¹⁾。また、1959 年には伊勢湾台風による河川および海岸護岸の被災箇所の修復

に約2万tのアンボンドPC矢板が使用されている²⁴⁾。その後フラットスラブへの利用が始まり、今日もお根強い需要があるようである。その理由としては、スラブのような扁平な構造部材では比較的細径のPC鋼材を多数本独立に配置する必要があり、現場で重荷となるグラウトの必要のないアンボンドPC工法が歓迎されたことによる。アンボンドPCストランドを使用して建設されたわが国最初のPCフラットスラブ建物は、1980年竣工の郵政省大阪倉庫である。桁行き方向6m×21スパン(一部6m×12スパン)、張間方向18m×2ス

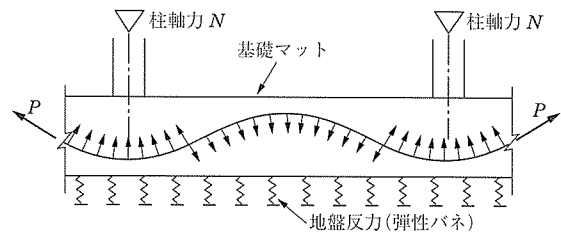


写真-2 建設中の郵政省大阪倉庫のアンボンドPCフラットスラブ

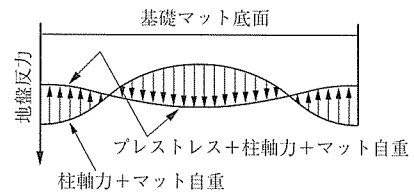
パン(一部18m×1スパン)の平面を持ち、アンボンドPCストランドは写真-2に示すように桁行き方向に配置されている²⁵⁾。ちなみに、PCフラットスラブの導入プレストレスの設計には、図-2の荷重釣合法が用いられた。

アンボンドPC鋼材による逆曲げモーメント導入のユニークな利用方法にマット基礎がある²⁶⁾。図-4はその説明図で、基礎マットの自重および上部の柱から作用する軸力 N は、同図(a)に示すように弾性支承地盤に支えられている。これらによる地盤反力分布は、同図(b)に示すように柱下で最大、2本の柱の間で最小となる波形分布となる。これを一様分布またはこれに近くなるようにするには、同図(a)のように柱下を上方向に押し上げ、かつ、柱中間部を下方向に押し下げよう、基礎マットにプレストレスモーメントを導入する。これによって同図(b)のように地盤反力は一様化され、その結果、基礎マットにも曲げモーメントがほとんど発生せず、マットの厚さを著しく薄くできる。わが国での使用例は少ないが、ヨーロッパでは数多く用いられている。PC技術の応用の新しい分野として今後の普及が期待される。

なお、アーチやトラスは逆曲げモーメントの導入がさらに効果的な構造である。すなわち、アーチのタイやトラスの下弦材にプレストレスを導入すると偏心距離が一層大きくとれるので。逆曲げモーメントだけを部材に与えるというプレストレス利用の理想状態に近づく。最近では高強度コンクリートの開発が進み、200MPaを越えるコンクリートが容易に製造できるようになり^{27), 28)}、コンクリートで鉄骨梁並のI型断面部材も製造可能となって、構造体の著しい軽量化を計ることができるようになった。コンクリートを用いた大スパン軽量構造へのプレストレス技術の適用を期待したい。また、鉄骨部材へのプレストレス導入はかなり以前から実用化されているが、とくに近年は、トラスの上弦材として比較的剛な鉄骨梁部材を用い、これに束材を取り付けてPC鋼材を弓状に張り、プレストレスを導入して



(a) マット基礎システム



(b) プレストレス導入による地盤反力の一様化

図-4 マット基礎におけるプレストレスの利用

逆曲げモーメントを与える張弦梁構造^{29), 30)}も、プレストレス利用大スパン架構法として期待できる。

8. PC鋼材の発達と問題点

PC構造物では、PC鋼材に錆が発生すると破断の恐れが高くなり、部材や構造物全体の崩壊の原因にもなりかねない。したがって、錆の発生は絶対に避けなければならないのである。幸いにしてコンクリートはpH12~13のアルカリ性雰囲気を持ち、PC鋼材がコンクリート中に完全に埋設されて外気と遮断されておれば、錆が発生することはまずない。とくに、大スパン構造物や組立構造物では主としてポストテンション部材が使用され、付着の付与と防錆のためにシース内にセメントグラウトを注入してPC鋼材を完全に被覆することが必要である。しかし、現場では手間のかかるグラウト注入は好まれず、かつ、橋梁では外ケーブル方式の開発が進むにつれて、グラウト以外の別の防錆方

法の開発が強く望まれるようになった。このような要望に応えるものとして提供されたものの1つが、エポキシ被覆PCストランドである^{31), 32)}。

わが国ではエポキシ樹脂に勝る防食性能を有する材料はないとの思い込みが強い。現在使用されているエポキシ被覆ストランドは、ストランドの心線と側線間の内部空隙にも樹脂が注入された内外完全防錆ストランドであるが、表面被膜にピンホールがなく、被膜が十分厚く（ASTM A 882 M-91 および ISO 14655-99 で0.4～1 mmと規定）、鋼材表面との接着が完全であれば、優れた防錆力が期待できる。しかし、エポキシ樹脂被膜そのものは透湿性があり、鋼材表面と樹脂被膜との接着力が阻害されると、湿気が被膜を通過して被膜と鋼材表面との間に浸透し、たちまち錆の発生につながることはあまり知られていない。被膜の接着力消失は、被膜加工後2～10年でおこるといふ。そのためエポキシ被覆ストランドの開発国である米国でさえ、高価格であることとも重なって、多くは使用されていない。ヨーロッパにおいても、fib 鉄筋およびPC鋼材委員会レポートにおいて腐食環境下での防錆耐久性を2～10年と規定しており、半永久的防錆力が期待できるとは考えていない³³⁾。

PCストランドの表面に常温で硬化する熱硬化型エポキシ樹脂を塗布し、ポリエチレンシースで被覆することにより、工事現場での緊張定着までを従来からあるアンボンドPC鋼材と同様な取り扱いができ、かつ、緊張定着後は樹脂が硬化することによりコンクリートとの付着が発生する後硬化型のPC鋼材が、1987年に開発され、アフターボンドPC鋼材と名付けられた³⁴⁾。写真-3はその姿図であって、使用されるエポキシ樹脂は、アミン系硬化促進剤の添加量を制御することにより、硬化期間を自由に制御する仕組みになっている。しかし、熱硬化型樹脂は、夏期の高湿時の硬化時間制御に問題があり、その後高湿時でも硬化の制御が容易な湿気硬化型エポキシ樹脂を塗布したものが開発され、以後、プレグラウトPC鋼材と呼ばれるようになった³⁵⁾。硬化添加剤としてケチミンに含湿させたものを使用し、ケチミンと水分との反応で生成される硬化剤であるアミンの量を、湿気の含有量で制御する仕組みのものであることから、湿気硬化型と名付けられている。外気温やセメントの水和熱の硬化速度に対する影響は熱硬化型と比べて少ないが、含有湿気の量を著しく少なくしないと硬化制御に支障

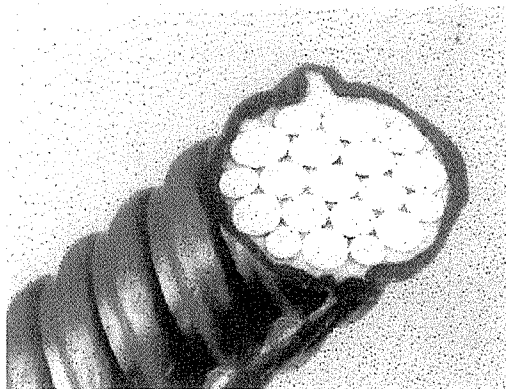


写真-3 プレグラウトPCストランド

を来すことから、近年は果たして完全に固化するのかがどうか疑問視されている。くわえて、熱硬化型であれ湿気硬化型であれ、未硬化樹脂中に含まれる低分子量のエポキシ樹脂および硬化添加剤であるアミンやケチミンは、官報公示の化審法および安衛法記載の有毒性物質に指定されており、人体への有害性が公的に警告されている物質である。とくに、現場では鋼材緊張時に緊張端の表面被覆を切り取って写真-4に示すように鋼材を露出させた場合に、付着しているまだ硬化していない樹脂が肌に付着したり目に入ったりとすると、著しく危険である。したがって、手袋、眼鏡、防護服を着用して細心の注意を払って作業を行わなければならない。とくに、アレルギー性体質の場合には、肌に直接付着しなくても近くに寄るだけで皮膚に炎症が生じる可能性があることが専門家によって指摘されている。また、このような毒性の強い材料を使用した構造物を後日補修する場合、事故で損壊を受けた場合、使用にそぐわなくなつて建て替える場合などに、万一、完全硬化していないエポキシ被覆が残っていると人体に影響を及ぼす危険性があることを、十分留意しておかなければならない。最近では技術の著しい進歩によって、われわれの取り扱う材料もますます高度化・複雑化している。上記のプレグラウトPC鋼材の樹脂毒性問題は、単に土木・建築分野の研究者・技術者だけでなく、他の広い分野の専門家の協力も仰ぎつつ、多方面からの慎重な検討が必須であることを如実に物語る例として、今後の開発のあり方に対する警鐘として重く受けとめなければならない。

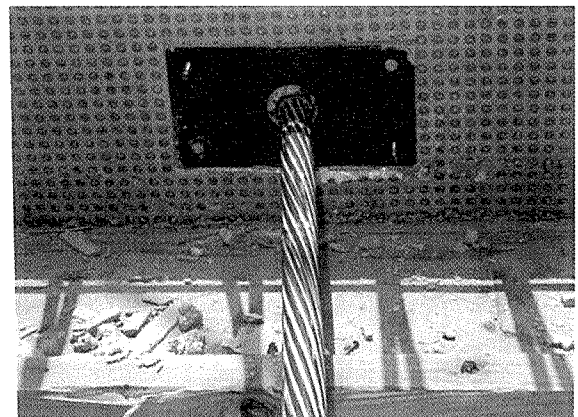


写真-4 定着部のプレグラウト鋼材表面露出の一例

9. 結言にかえて

市場開放、国際化をうたって政府が省庁のスリム化、規制の緩和を打ち出してからやがて10年になる。建設技術については法の縛りの強い仕様書（示方書）型基・規準から基本的に技術者の自由裁量に任せることを原則とする性能評価型基・規準への移行が進められたが、現実にはむしろ従来よりも複雑に膨れあがってしまっている。相変わらずの官主導縦直型であることは否めない。これでは多様に発展する現代技術にはついていけない。とりわけ、技術が洗練されるほど、一般には危険と隣り合わせとなると思わな

ればならない。技術の基本を知り物事に熟知した専門技術者の詳細な検討が必須であることを強調したい。本来の目的をいささか逸脱した拙稿が何かのお役に立てば幸甚である。

参考文献

- 1) 猪股：プレストレストコンクリートの設計および施工，pp.1 - 3，技報堂，1957.11
- 2) 野口：プレストレストコンクリートの歴史－鉄道構造物，土木学会論文集，第442号/V-17，pp.9-14，1992.2
- 3) 渡辺：プレストレストコンクリートの歴史－道路構造物，土木学会論文集，第442号/V-17，pp.1-5，1992.2
- 4) 坂，岡田，六車：プレストレストコンクリート，朝倉書店，pp.6-7，1961.1
- 5) 六車：PC建築構造物の発達と歩み－20世紀を顧みて，プレストレストコンクリート，pp.50-58，2000.11/12
- 6) 吉田：プレストレストコンクリートの発展，セメント・コンクリート，No.77，pp.2-15，1953.7
- 7) 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.10-14，2000.1/2
- 8) ビー・エスコンクリート（株）：昭和26年施工鋼弦コンクリート薄版片採取記録（石川県小松市庁舎内地下床版部），1988.3（Private Circulation）
- 9) わが国最初のPSコンクリート橋，長生橋（七尾市），セメント・コンクリート，No.77，p.15，1953.7
- 10) 石橋：鉄道におけるPCの歴史について，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.6，pp.39-42，2000.11/12
- 11) 南淡町庁舎，新建築，Vol.33，No.2，pp.58-62，1958.2
- 12) 兵庫県南淡町庁舎，コンクリート工学，Vol.29，No.1，p.62，1991.1
- 13) 六車：プレストレストコンクリート研究裏話，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.1，pp.15-20，2000.1/2
- 14) P. W. Abeles：Introduction to Prestressed Concrete，Vol.2. Concrete Publications, Ltd., 1964
- 15) P. W. Abeles：Design of Partially Prestressed Concrete Beams, ACI Journal, Vol.64, No.10, pp.669-676, 1972.10
- 16) CEB-FIP Recommendations Internationales pour le Calcul et L'execution des Ouvrages en Beton, 1970
- 17) T. Y. Lin：Load-Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures, ACI Journal, Vol.60, No.6, pp.719-742, 1963.6
- 18) J. E. Breen：Why Structural Concrete?, Proc. of the IABSE Colloquium on Structural Concrete, Stuttgart, IABSE Report, Vol.62, pp.15-26, 1991
- 19) A. S. C. Bruggeling：An Engineering Model for Structural Concrete, Proc. of the IABSE Colloquium on Structural Concrete, Stuttgart, IABSE Report, Vol.62, pp.27-36, 1991
- 20) T. Y. Lin：Unbonded vs. Bonded Tendons for Building Construction with Particular Reference to Flat Slab, Proc. of the FIP Symposium on Prestressed Concrete in Building, Sydney, 1976.9
- 21) 六車：アンボンドプレストレストコンクリート，材料，Vol.26，No.287，pp.719-729，1977.8
- 22) FIP Recommendations for the Design on Seismic Prestressed Concrete, 1977.11
- 23) P. Matt：FIP Design Recommendations for Flat Slabs in Post-Tensioned Concrete Using Unbonded Tendons, Proc. of the 8th FIP Congress, London, Part 3, pp.15-23, 1978.5
- 24) 豊田コンクリート（株）：伊勢湾台風災害復旧に使用されたPC鋼棒を用いたPSコンクリート矢板について，1960.9（Private Circulation）
- 25) H. Muguruma：Development of Prestressed Concrete Buildings in Japan, Proc. of the FIP Symposium on Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Kyoto, Vol.1, pp.19-30, 1993.10
- 26) M. Mayer：Post-Tensioned Foundations, FIP Notes, pp.9-11, 1991.3
- 27) 六車：超緻密超高強度コンクリート－圧縮強度2000 kg f/cm²への挑戦，GBRC（日本建築総合試験所機関誌），Vol.11，No.4（通巻40号），pp.32-39，1985.10
- 28) P. C. Aitcin & R. Richard：The Pedestrian/Bikeway Bridge of Sherbrooke, Proc. of the 4th International Conference on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, France, Vol.2, pp.1399-1403, May 1996
- 29) 齊藤：張弦梁構造の原理と応用，カラム，No.75，pp.67-77，1980.1
- 30) 齊藤：張弦梁の理念と応用，Structure，No.13，pp.39-53，1985.1
- 31) V. Dorsten, F. F. Hunt & H. K. Preston：Epoxy Coated Seven-Wire Strand for Prestressed Concrete, PCI Journal, Vol.29, No.4, pp.120-129, July/August 1984
- 32) H. Muguruma, F. Watanabe & M. Nishiyama：Development of New Corrosion Protection Prestressing Tendons and Their Use in Bonded and Unbonded Prestressed Concrete Members, Proc. of the Pacific Concrete Conference, Vol.2, pp.581-590, Nov. 1988
- 33) fib Bulletin 11：Factory Applied Corrosion Protection of Prestressing Steel, State-of-Art Report Prepared by Task Group 9.1, January 2001
- 34) 材寄，南，小林：アフターボンドPC鋼材の諸特性について，プレストレストコンクリート，Vol.32，No.4，pp.91-98，1990.7/8
- 35) T. Niki & Y. Touda：Latest Technology Applied to the Pre-Grouted Prestressing Strand, fib Bulletin 15, Durability of Post-Tensioning Tendons, pp.195-202, November 2001.

【2004年6月13日受付】