

PC建築構造物の発達と歩み

—20世紀を顧みて—

六車 熙*

1. ま え が き

プレストレストコンクリート(PCと略記)技術は今世紀初頭に生まれ(PCの原理の考案は前世紀末)、今世紀後半に著しい発展を遂げた、いわば20世紀に生まれ育った構造技術である。発祥の地はヨーロッパおよびアメリカであり、わが国には戦後間もなく技術導入された。コンクリート部材の引張力の働く部分にPC鋼材を配置し、これを緊張することによってあらかじめコンクリートに圧縮力(プレストレス)を導入し、引張りに弱いコンクリートの弱点を補う構造形式であることから、常時使用状態ではひび割れ皆無、または、ひび割れ幅が導入プレストレスによって制御されていること、加えて高強度で密実なコンクリートを使用することから抜群の耐久性を示すこと、地震などの非常時の外乱によってひび割れが発生しても、外乱が去った後はひび割れが閉じて元に戻る優れた復元性を示すことなどのPCの優れた特性が、技術導入した当初から多くの技術者の注目するところとなり、今日のわが国PC技術は先進諸国を凌駕するレベルにまで到達している。とくに、耐震構造の開発に関しては、世界有数の地震国であるわが国は世界をリードする立場にあり、1995年兵庫県南部地震時に激震地区に多くのPC建築構造物があったにもかかわらず、ほとんどが無被害であったことが、技術レベルの高さを如実に物語っている¹⁾。本稿では、間もなく迎える次の千年期に鑑み、PC技術の一層の発展にいささかでも役立つことを願って、技術導入以来50年弱にわたるわが国PC建築構造技術の発展の歴史を、筆者なりに振り返ってみることにする。

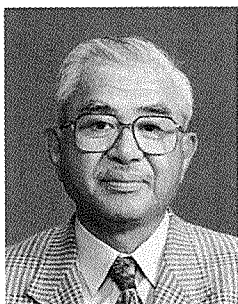
2. PCの考案と近代的PCの幕開け

PC建築構造物の発展の歴史を語る前に、PCの考案と近代的PCの誕生について簡単に触れておく。コンクリートにプレストレスを与える考案は非常に古く、鉄筋コンクリート(RCと略記)に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が、原理の発表の最

初である^{2), 3)}。ドイツでは1888年にC. F. W. Döhringが同様のPCの原理を発表、1896年にはJ. Mandelが初めてPCを理論的に論じ、プレテンション方式によるPC部材の製造法を示した^{2), 3)}。1897年にはドイツのM. Könen および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、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^{2), 4)}。以後、PCはRCの発展とともにまったく影をひそめてしまったが、1928年にフランスのE. Freyssinetが当時ようやく開発された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残存量の確保に成功し、これが近代的PCの幕開けの端緒となった^{2), 5)}。その後Freyssinetは、1932年に「補強コンクリート製品の製造法」で日本特許(特許第96254号)を取得、PCの原理特許としてわが国での工業権が与えられた⁶⁾。その特許は1956年5月に消滅している⁵⁾。

3. 黎明期のPC研究と技術導入

わが国におけるPCの研究はE. Hoyer著「Der 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^{5), 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、また、1943年には福井工専(現福井大学の前身)吉田宏彦教授(故人)が京都大学工学研究所において全長2710mm、高さ200mm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ている⁶⁾。1944年には、仁杉巖博士による全長1000mm、高さ120mm、幅80mmのPC桁14本の曲げ破壊実験が行われている⁷⁾。第二次大戦後の1946年には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用い、建設省建築研究所、同土木研究所、運輸省鉄道技術研究所、東大土木工学科、東工大建築学科、京大建築学科、福井工専建築学科、日本発送電水力研究室などが参加して研究に当たった^{5)~7)}。その貴重な研究成果は「セメント・コンクリート」誌1949年3月号~1950年1月号にわたって発表されている。1952年にはFreyssinetの特許代行管理を業とする極東鋼弦コンクリート振興協が発足、フレシネー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その前後から発足した。1954年には日本材料試験協会にPC鋼棒研究委員会が設けられ、鋼棒を緊張材とするPC部材の利用が漸次行われるようになった⁸⁾。また、PCストランドの使用も1958年から始まっている⁸⁾。同年には、スイスのBBRV工法、ドイツのデイビダーク工法が、1959年にはレオンハルト工法が技術導入され、PCの土木・建築構造物への利用が漸次盛んと



* Hiroshi MUGURUMA

本協会名誉会員
京都大学 名誉教授

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、材料も国産品が生産されるようになってきた。

4. 基・規準の制定と変遷

このような情勢のもとに、土木学会ではフレッシュ工法を主体とする「PC設計施工指針」を1955年に発表した。1961年には、その後の研究成果を盛り込んだ改訂指針を制定している。一方、日本材料試験協会からは1958年に「鋼棒使用PC設計施工指針および解説」が発表され、PCの利用をますます便ならしめた。とくに「鋼棒使用PC設計施工指針」は、地震国であるわが国建築構造物の耐震設計に終局強度設計法を初めて採用した点で特筆に値する⁸⁾。建設省ではこのような諸情勢に鑑み、1960年2月には告示第223号「PC建築構造物に対する建設省告示」を公布し、高さ16m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。1961年には、告示を補完するかたちで日本建築学会から「PC設計施工規準および同解説」が発刊され、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建築物に関しては、1973年制定の告示第949号で16mの高さ制限の撤廃、および設計用荷重係数の一部低減が、1983年制定の告示第1320号では、1981年制定の新耐震設計法における2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設計（ルート3a）の規定、プレストレスト鉄筋コンクリート構造（パーティ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た。これと並行して日本建築学会「PC設計施工規準および同解説」も1975年、1987年、1998年に改訂され、また、1986年には「プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計施工規準・同解説」が、1994年には「プレストレストコンクリート合成床版設計施工規準・同解説」がそれぞれ発刊されている。

5. FIPの発足とPC技術協会の設立

1950年代は世界におけるPC発展の基礎となる時代でもあった。1953年には国際プレストレストコンクリート連盟（FIP）が設立され、第1回国際大会がロンドンで開催された。第2回は1955年アムステルダム、第3回は1958年ベルリンと続き、この間、1957年にはサンフランシスコでアメリカ

PC学会（PCI）主催の世界PC学会が開催されるなど、PC研究の機運が国際的に盛り上がったのである。このような背景のもとに、1958年にPC技術協会が発足し、わが国の代表機関としてFIPに加盟、国内ばかりでなく国際的にも協力態勢が整ったのである。1961年にはPC技術協会第1回年次学術講演会（現「プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム」の前身）が東京で開催され、以後、今日に至るまで継続して開催されている。ちなみに、第1回年次学術講演会の研究発表講演番号1番の栄に浴したの筆者であった⁹⁾。

FIP大会は、1958年以後は4年ごとに開催され、その中間年に特定のテーマに関する国際シンポジウムが開催されてきた。近年は毎年の開催となったが、わが国でも1993年に「Modern Prestressing Techniques and Their Applications」と題する国際シンポジウムを京都で主催して、多大の成果を収めたことは記憶に新しい。そのFIPも1998年末をもって40余年の歴史を閉じ、ヨーロッパコンクリート委員会（CEB）と合体、国際コンクリート連盟（fib）として再発足した。わが国では2002年にfib国際大会を大阪で開催する予定である。

6. 初期のPC建築構造物

6.1 わが国初のPC建築構造物

わが国においてPCを用いた最初の建築構造物は、1951年に建設された小松市庁舎地下室床版である⁶⁾。図-1はその断面図であって、3600mm×3600mmのグリッド状に配置されたRC基礎梁の間にプレキャストプレテンションPC床版を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たものである。PC床版の仕様は下記のとおりである。

- 版の寸法：厚さ20mm、幅300mm、長さ2950mm
- 使用PC鋼線：引張強度220kgf/mm²～240kgf/mm²（2157MPa～2354MPa）のφ1.6mmピアノ線を間隔10mmで断面中央に配置、PC鋼線比は1%
- コンクリート：ペロセメントおよび最大粒径4mmの砂を使用、配合1：2、水セメント比33%、材齢7日でプレストレス導入
- 導入プレストレス：ピアノ線の緊張力は104kgf/mm²（1020MPa）、コンクリート断面導入プレストレスは104kgf/cm²（10.2MPa）

このようなPC薄板を弓状に曲げて型枠兼構造材として使用する方法は、吉田宏彦教授の考案になるものであって、1947年5月に開催の日本セメント技術協会（現セメント協会）

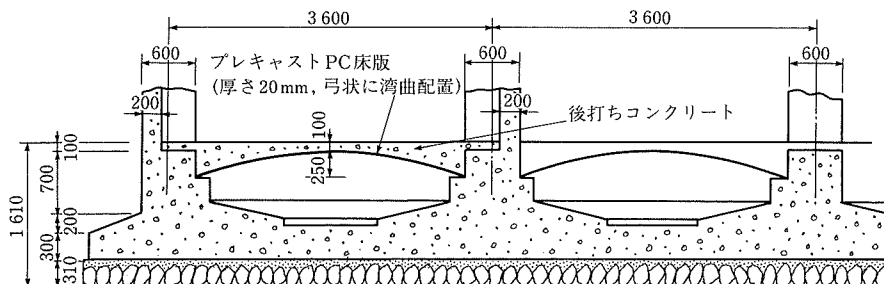


図-1 小松市庁舎地階ポンプ室プレテンションPC床版使用床スラブ

第1回セメント技術大会、および1946年に設置の商工省鉱山局鉄鋼技術委員会鋼弦コンクリート小委員会において「Flexible Concrete」と題して研究発表されている。僅か20mm厚のPC薄板を弓状に著しく曲げてもしび割れ一つ発生せず、かつ曲げ応力を除去すればたちまち元に戻るPCならではの特性を見てFlexible Concreteと名付けられたのは、まさに当を得た命名と言えよう。なお、小松市庁舎地下室で使用されたPC床版は、吉田宏彦教授が福井大学建築学科の実験室で自ら製造されたものである。地下室床版工事には約3ヵ月を要したとのことである⁶⁾。

小松市庁舎は建替えのため、残念ながら1988年3月に解体された。解体にあたっては、地下室床版に使用されたわが国最初のPC床版のカッターによる切断調査が行われ、湿気の多い地下室に使用されていたにもかかわらず、建設後37年間経過後も健全性を保っていたことが確認されている¹⁰⁾。参考までに切り出されたPC床版の状況を写真-1に示す。

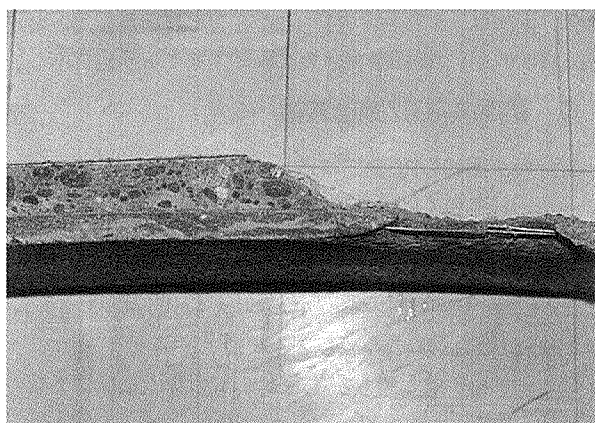


写真-1 小松市庁舎地階ポンプ室から切り出されたプレテンションPC床版

PC専門家によるPC部材の製造が始められたのは1950年である。当時はセメントの生産事情もようやく常態に復しつつあり、東重工七尾造船所がPCの製造に着手し、1951年にはプレテンションPC枕木を製造して試験的に使用している。同時に橋長11.6m、幅員6.8m(有効幅員は6m)のわが国最初の3径間PC合成床版橋「長生橋」のプレテンション橋桁が同造船所で製造され、七尾市生駒町に架設されている。本橋は1951年10月に着工、1952年2月に竣工しており、基礎にもPCが使用されている¹¹⁾。さらに、1951年には東京駅プラットフォーム新設に使用する長さ10m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PCとしてはわが国最初のものであり⁶⁾、1952年には東京駅6、7番ホーム受け梁に使用された。ちなみに、同ホームは1953年7月から使用を開始し、約20年間使用後ホーム改造のため撤去されている。

6.2 PC不静定フレーム建築構造物

不静定建築架構にPCが本格的に使用されたのは1956年完成の兵庫県南淡町庁舎(3層単スパンラーメン構造)が最初である^{12), 13)}。この建物は図-2(a)に示すスパン方向長さ11mの単スパン、桁行方向スパン5m×9スパン=45mの3層架構で、両側に階段室兼用の耐震コアが設けられてい

る。PC梁が用いられたのは長さ11mの各階スパン方向大梁および小梁であって、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梁は工場でのプレキャスト梁でPC鋼棒によってプレストレス導入されている。オリエンタルコンクリート(株)(現オリエンタル建設(株))大阪工場で製造され、船積み輸送されたものである。図-2(b)は現場打ちRC柱とのプレストレスによる圧着接合法の説明図である。すなわち、まず、プレキャストPC梁を所定位置で仮受けする。次いでRC柱および桁行方向RC梁の鉄筋を組み立て、同時に圧着用PC鋼棒を柱外面まで延長する。併せてプレキャストPC梁間のRCスラブの型枠を組み、配筋を行う。以上の準備の後にRC部分にコンクリートを打設し、硬化後圧着用PC鋼棒を緊張して現場打ち柱-プレキャストPC梁の圧着が終了する。プレキャストPC梁にはあらかじめ所定のプレストレス力が導入されており、したがって、圧着用PC鋼棒をPC梁の導入プレストレス力より僅かに大きい引張力で緊張することにより、圧着面には不静定応力が発生することなくPC梁と同じ大きさのプレストレス力が導入される。なお、図-2(b)の接合法は、プレキャストPC小梁と桁行方向現場打ちRC梁との接合にも適用され

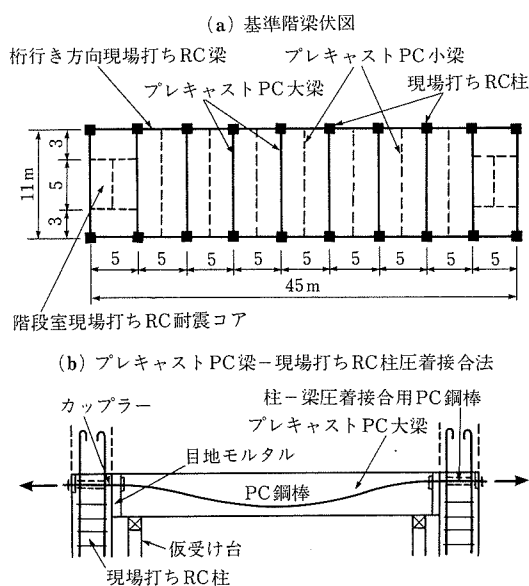


図-2 兵庫県南淡町庁舎基準階梁伏図とフレーム圧着接合法

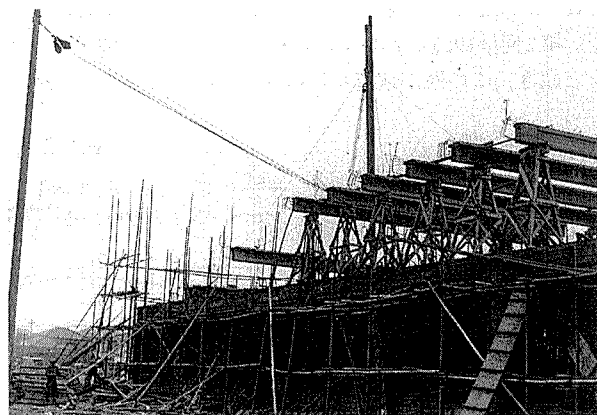


写真-2 3階PC梁架設工事中の兵庫県南淡町庁舎

る。写真-2は3階床面のプレキャストPC梁を吊り上げ、所定の位置に仮置きしている状況を示すものである。重機もままならない当時の施工状況を如実に知ることができよう。併せて、桁方向現場打ちRC架構の鉄筋組立ておよび型枠建込みを行う以前にPC梁の吊込みを行っている理由も容易に理解できよう。

プレストレス導入による柱-梁圧着工法は、プレストレス導入によって接合部を完全剛接とすることができるPCならではの特性から生まれたものであって、鉄筋によるRC型接合部とは対照的なアクティブ接合 (Active Connection) である。南淡町庁舎の建設以後、組立て工法によるPC不静定建築構造物の建設が続き、1957年には丸見屋向島工場および住友ベークライト京都工場などが次々と完成した。なお、上記のPC組立て建築物のうち、丸見屋向島工場および住友ベークライト京都工場はすでに取り壊されたが、南淡町庁舎は1995年兵庫県南部地震にも被害を受けることなく、今なお庁舎としての使用に耐えている。

6.3 PC建築技術に対する旧国鉄の貢献

旧国鉄はPCに関してはパイオニア的役割を果たしたと言っても過言ではなく、旧国鉄の貢献を抜きにしてPC建築技術発達の歴史は語れない¹⁴⁾。すでに3章で述べたように、1941年には鉄道技術研究所が鋼弦コンクリート委員会を設けて研究に着手、第二次大戦後は1946年に設立された商工省鋼弦コンクリート委員会に同研究所が参加し、PCの土木・建築鉄道構造物への利用に関する研究が進められた。当初はプレテンションPC枕木の開発研究に関心もたれていたようであるが、やがてポストテンション方式による鉄道橋の建設にも関心もたれるようになり、1954年にはスパン31mのわが国初めての本格的鉄道橋 (信楽線第一大戸川橋梁) がフレシネー方式ポストテンションPC桁を使用して建設されている³⁾。PC建築物については、断面450mm×450mm、長さ4000mmのプレキャストPC柱頂に全長7400mm、中央断面300mm×500mm、端部断面300mm×170mmのテーパー付きプレキャストPC梁を圧着接合したT形骨組を8m間隔に建て、梁両端部の桁方向には200mm×90mm×8mm鋼チャンネルを、中央部の柱頂桁方向には200mm×90mm×8.5mm鋼チャンネル2本をそれぞれ架設してT形骨組を繋ぎ、その上に両端部に55mm×75mmリブ付きの幅487.5mm、スラブ厚さ25mmプレテンションPC屋根板を架設した浜松町駅プラットフォーム上屋が最初のPC実構造物として1954年に完成している¹⁴⁾。PC梁-柱の圧着接合には12-φ5mmフレシネーケーブル4本が用いられている。また、柱脚部には650mm×650mm×25mm鋼製ベースプレートが取り付けられ、8-φ25mmアンカー鉄筋で基礎コンクリートと緊結されている。この上屋は、後日、浜松町駅構内の改築によって一部が新しい上屋に取り替えられたが、東京駅方面のプラットフォーム端部には今なお数スパンが残っており、建設当時と変わらぬ健全な姿を見ることができよう。プレストレス導入と40MPaという当時としては著しく高強度のコンクリートが使用されたことが、優れた耐久性の基本であることを如実に示す生きた実例と言えよう。参考までに筆者の手元に残っている上記プラットフォーム上

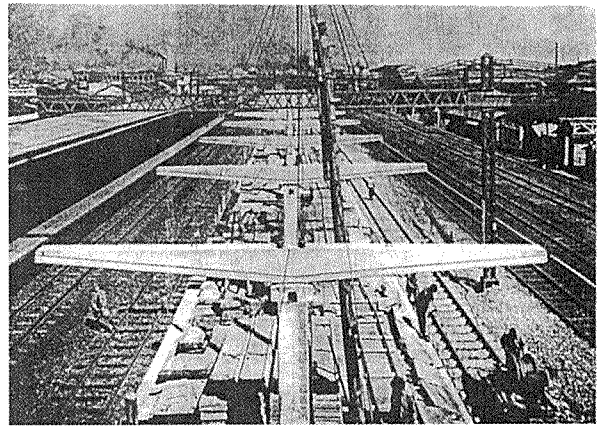


写真-3 建設中の浜松町駅旅客ホーム上屋 (1954年完成)

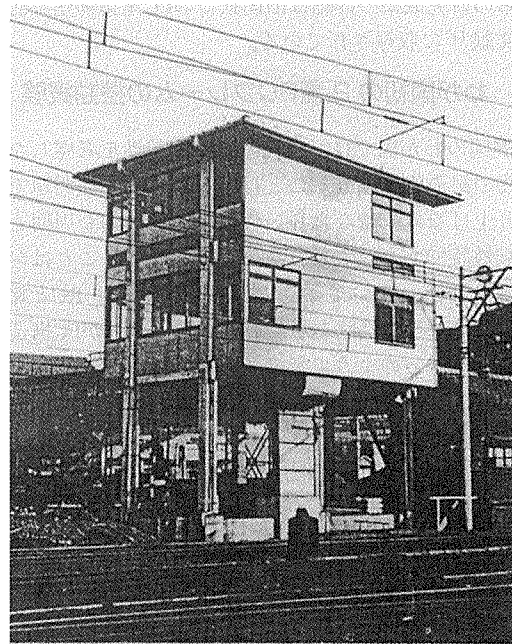


写真-4 3階建て組立て不静定フレーム構造の新宿駅信号所 (1956年完成)

屋の建設中の貴重な現場写真を写真-3に示す。

PC不静定フレーム建築については、6.2で述べた1956年完成の南淡町庁舎がわが国最初の本格的実施例であると紹介したが、同じ年代に写真-4に示す3層組立てフレーム構造の新宿信号所が完成している¹⁴⁾。部材のプレストレス導入にはPC鋼棒が用いられ、かつ組立てには圧着接合が用いられている。この建物は柱の建込み中にPC鋼棒が破断して柱から飛び出し、その原因究明に約2ヵ月を要したという。この事故が契機となってPC鋼棒の材質、製造過程の見直しが行われ、今日の良品質のPC鋼棒開発の基礎が築かれたのである。新宿信号所建物は残念ながら竣工後数年にして駅構内配線変更のために取壊しとなり、今は写真-4で当時の姿を偲ぶ以外にその存在を知る由もない。

以後、PC組立てタイドアーチ屋根をもつ大井工場塗装職場 (1959年)、PC円筒曲面屋根をもつ勝田電車庫 (1961年)、PC折板屋根をもつ大井工場食堂 (1962年)、2層不静定フレーム構造の同車体修理場 (1963年) などのユニークな建物

が次々と完成している。また、駅舎への利用も数多く実施され、千駄ヶ谷駅本屋（1956年）、本千葉駅本屋（1957年）、千種駅本屋（1961年）などが単層PC不静定フレーム構造で、多治見駅本屋（1963年および1964年）が2層PC不静定フレーム構造でそれぞれ建設されている。これらの建物は一部を除きいずれも健全な姿を保ち、有効にその機能を果たしている。この間、1959年～1962年の4年間の期間で坂 静雄 京都大学名誉教授（故人）を委員長とするPCの鉄道建築構造物への応用研究委員会が鉄道建築協会に設けられ、ポストテンション工法におけるグラウトや摩擦損失問題、PC部材の疲労強度や耐火性の実験研究、組立て構造における接合部性能の研究などの、これらの建築物の建設に必要なPC技術の基礎研究が行われている。その成果はPC業界に益するところ大であり、建築へのPCの利用拡大に著しく貢献した。これらの研究成果の詳細は旧国鉄でのPC建築物建設記録として文献¹⁴⁾に収録されている。

7. わが国初の2層PCフレームの振動実験

地震国のわが国では、地震時の動的特性を考慮しないで構造物の耐震性を論じることはできない。耐震問題でとくに取り上げなければならない性状は、その固有周期と振動の減衰性状であり、これらを的確に推定することは今日でも困難である。まして、PC技術の導入当時は、RCと比較して弾性に富む振動性状を示すことから、これがPC構造物の地震時挙動にどのように影響するのかは、必ずしも明確に把握されてはいなかった。このような背景のもとに加藤六美、猪股俊司、中川恭次の3博士（いずれも故人）は、PC建築物の振動性状を知るために、図-3に示す2層組立てPC不静定フレーム模型についてわが国初の強制振動実験を実施した^{15)~17)}。この実験では供試体重量は起振機も含めて屋階で15t、2階床面で10tであった。表-1は実験結果を一部簡略化して示したものである。壁がまったくない純フレーム構造であるので比較的柔な振動性状を示し、層せん断力が10tを超えると降伏の性状を示すこと、当時の規定による設計震度0.2よりもはるかに大きい0.6~0.8の振動を与えた後も、いったん生じたひび割れは振動の作用しないときには完全にその口を閉ざし、フレームは著しい復元性を示すこと、表-1の結果によると微振動（ひび割れ発生以前の弾性振動）に対する共振周期に比べて、大振動の場合にはフレームの各所にひび割れが発生したにもかかわらず約2倍程度の共振周波数にしかならなかったこと、減衰定数はひび割れが発生するような大振動の場合でも0.056~0.061程度にしかならなかったことなどが明らかにされた。このように減衰性が悪いことは一般的に地震時の設計地震力を大きくとらなければならないことを意味している。同様な実験結果が中野清司博士の行った4層PCフレームの強制振動実験においても得られており¹⁸⁾、これらの実験結果を勘案してPC構造物の終局強度に基づく耐震設計用震度の値を当時の一般の規定値0.2の1.5倍の値である0.3と決められたのである。

8. PPC構造の開発と設計規準の統一

1964年にP. W. Abelesは、常時使用状態においてある程度

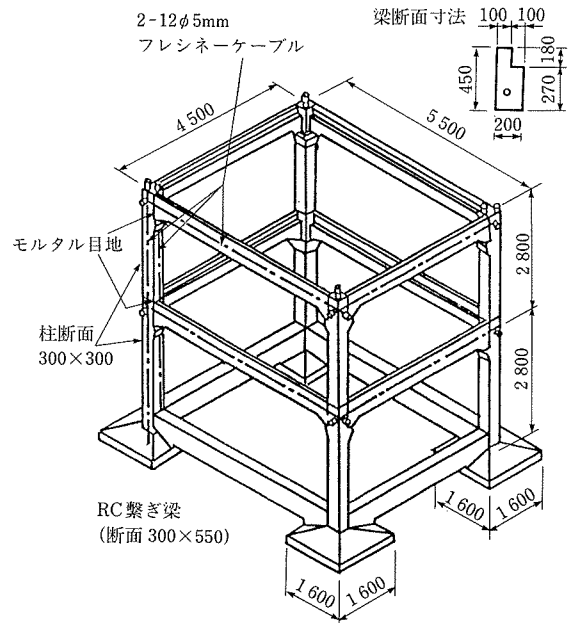


図-3 わが国最初の強制振動実験に用いたPC組立てフレーム（加藤、猪股、中川による）

表-1 2階建てPCフレーム模型の共振周期実測結果

振動方向	微振動時 共振周期 (sec)	ひび割れが発生するような 強制振動を与えたときの		左記の約2倍の強制 力で振動時共振周 期(sec)
		共振周期(sec)	減衰定数	
短辺方向	0.209~0.238	0.323~0.353	0.056	0.414~0.449
長辺方向	0.217~0.227	0.296~0.358	0.424	0.424

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、自らも英国国有鉄道の車庫車庫、駅舎などにこれを適用した^{19), 20)}。もともとの発想は、RC部材に発生するであろう曲げひび割れの開口幅であれば、鋼材腐食が促進されて構造物の耐久性が阻害される心配はなく、また、導入プレストレス力を小さくできることから経済的にもなることにあった。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、CEB-FIPモデルコードにRCとPCとの中間を埋める構造として取り入れられた²¹⁾。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呼び、1986年には日本建築学会から「PPC設計・施工指針」が刊行されて、建築物への利用が急速に進んだ。PPC部材の常時使用状態に対する設計は、最初に設計曲げモーメントに対して導入プレストレス力と偏心距離を選び、以後は常時使用状態における設計荷重と偏心プレストレス力とを同時に受けるRC部材と見なして、RC部材の弾性設計法をそのまま適用する方法を採用したために^{22), 23)}、ひび割れ幅のチェックを必要とする点で多少手間がかかるが、RCの設計に馴染むことができたことが、急速に普及した要因の一つと考えられる。

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の提唱する荷重釣合い法²⁴⁾と呼ばれる極めて簡単な方法によって行くと便利である。図-4は等分布荷重

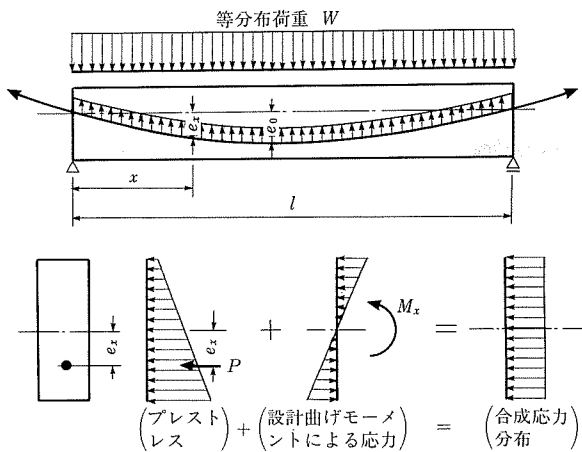


図-4 T. Y. Lin 提案の荷重釣合い法説明図

を受ける単純梁を例にとった荷重釣合い法の説明図であって、設計曲げモーメントと逆方向の曲げ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。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 $M_p = P e_x$ 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。

$$k M_x = M_p = P e_x \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $k M_x$ はプレストレスモーメントによってキャンセルしようとする設計用曲げモーメント (キャンセルモーメント) であって、常数 k は

$$k \leq 1 \dots\dots\dots(2)$$

である。 $k=1$ の場合には、全設計曲げモーメントが作用したとき、部材の各位置でプレストレスモーメントによって設計曲げモーメントがキャンセルされ、部材はたわみ0の真直状態となる。実際の設計では、キャンセルモーメントとしては部材の自重モーメント程度とし、部材の設計曲げモーメント最大の位置 (図-4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 e を決め、他の断面については設計曲げモーメント分布形と相似な形になるよう偏心距離 e_x の曲線形を定めればよい。

PPCの開発によってPCとRCの間に従来から存在した溝は埋められ、今日ではPC-PPC-RCを一連のものとして取り扱おうとする動きが急速に高まりつつある、1991年4月にはコンクリート系構造物の設計に関する IABSE コロキウムがシュツットガルトで開催され、設計規準の統一について論議された^{25), 26)}。なぜこれら一連の構造物が統一規準で扱えるかを一言で言えば、いずれもコンクリートのもつ特性が主体的に現れる構造物であることによる。これを図-5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。ただし、ひび割れ開口幅はPPC部材ではプレ

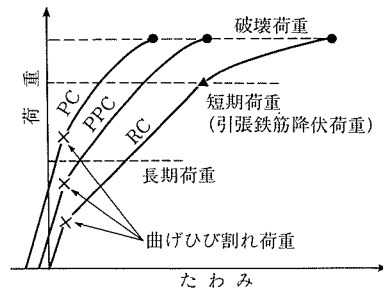


図-5 PC-PPC-RC部材の荷重たわみ曲線比較

トレス力により、また、RC部材では引張鉄筋の許容引張応力度によりそれぞれ制御されている。また、たわみ量もPC部材が最も少なく、PPCおよびRC部材の順に大きくなる。換言すれば、これら3つの部材は常時使用状態におけるひび割れの有無または開口幅の大きさ、たわみ量の点でそれぞれ相違する。しかし、荷重を増大すればPCと言えどもひび割れが発生し、他の部材と同様な弾塑性力学的性状を示しながら曲げ破壊に至る。しかも、曲げ破壊モーメント M_u の計算式は、どの部材に対しても基本的に

$$M_u = (A_{sp} f_{py} + A_{sr} f_{ry}) j \dots\dots\dots(3)$$

- A_{sp} : PC鋼材断面積
- A_{sr} : 引張り側普通鉄筋断面積
- f_{py} : PC鋼材の降伏点強度
- f_{ry} : 普通鉄筋の降伏点強度
- j : 応力中心距離

で表される。すなわち、PC鋼材も普通鉄筋も同じ役割を演じているのであって、演じ方についての差異はまったくないのである。すなわち、必要鋼材をすべて普通鉄筋とすればRC部材になるし、また、PC鋼材として適量のプレストレスを導入すればPC部材、両者を併用すればPPCになるのである。したがって、このような部材を別のものと見なすことの方が不自然であり、PCからRCに至る一連のものをコンクリート系構造として設計規準の統一を図る方が自然なのである。近年、わが国では建築基準法の改訂が行われ、性能規定化が図られているが、その中であってPC-PPC-RCの設計規準統一の声がようやく聞かれるようになった²⁷⁾。筆者は、来るべき21世紀初頭には、ぜひ統一規準を実現していただきたいと強く希望している。

9. アンボンドPCの発達と逆曲げモーメントの導入

アンボンドPC工法は、表面に防錆剤を塗布または接着加工してポリエチレンまたはポリプロピレンシース中に入れた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これを緊張してプレストレスを導入するポストテンション工法であって、グラウト注入を必要としない点を除けば通常のポストテンション工法とまったく同じ工法である。1952年に米国において、ある建築物に用いられたのが最初であると言われている²⁸⁾。その後、ラスベガスの学校建築約10校がアンボンドPCフラットスラブ構造で建設されたが、建設後間もなくスラブの異常むくりまたは異常たわみが起こり、使用に支障を来して取り壊された。原因は設計モーメントに対して過大または過小プレ

トレスの設計となっていたためと推定されている²⁸⁾。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、フラットスラブ構造はもちろん、種々のプレキャスト部材へのアンボンド工法の利用が徐々に増加した。グラウト施工の手間が省けることも急速に普及した要因の一つと考えられる。一方、1964年のアラスカ地震において、完成間近の5階建てアパートが倒壊し、プレキャストスラブに用いられていたアンボンドPC鋼材のくさび定着部が破壊してPC鋼材が飛び出すという事故が起こった。当初はアンボンドPC鋼材定着部の破壊が建物倒壊の直接原因であるかのように言われ、論議を呼んだが、その後の調査により、スラブを支持していたRC耐震コアの倒壊によってスラブ端コンクリートがもぎ取られて定着くさびが飛んだものと推論され、定着部の破壊が建物倒壊の直接原因ではないことが明らかにされた²⁹⁾。以来、米国およびカナダではアンボンドPC工法の建築物（主としてフラットスラブ構造）への利用が急増し、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。

これに対して欧州各国では、アンボンドPC部材に曲げ荷重が作用すると、PC鋼材の引張応力は部材全長にわたって増大するので、繰返し荷重のもとでは定着部の疲労破壊が心配され、1980年代に至るまでアンボンドPC部材の使用については否定的であった。FIP耐震委員会（当時の委員長は猪股俊司博士）においても、同様の理由から耐震構造物にこれを用いることについての了解は容易に得られなかったが、1974年FIPニューヨーク大会での同委員会の席上、グラウトを行った部材がアンボンド部材よりも耐震性の点で優れているという確たる論拠は必ずしも明確にされていないこと、および定着部の疲労破壊に対する単なる懸念からアンボンド部材の使用を否定するのは根拠のない主張であることが指摘され、アンボンドPCの耐震構造物への利用の道を開くための耐震安全性に関する諸問題研究の推進が強調されて、ようやく欧州各国においてもアンボンドPC部材の利用が前向きに考えられるようになった^{30), 31)}。1978年FIPロンドン大会では、フラットスラブ構造に関するFIP設計指針作成の基本方針が示され³²⁾、アンボンドPC工法の設計指針への盛り込みが討議されるに至っている。

わが国のアンボンドPCの力学的性質に関する研究は1955年頃から開始され、1959年、伊勢湾台風による河川および海岸の護岸被災箇所の復旧に約2万tのアンボンドPC矢板が³³⁾、また、1957年には阪急電鉄営業線にアンボンドPC枕木が使用された³⁴⁾。とくに、アンボンドPC枕木については18年間使用に供した後にその性能を調査したところ、アンボンドPC鋼棒の品質劣化はまったくなく、また枕木そのものの力学的性質の劣化もまったく認められないことが確認されている^{34), 35)}。参考までに、当時撮影した18年間使用後の枕木の載荷試験状況を写真-5に示す。

わが国でアンボンドPC鋼材が本格的に使用されたのはPCフラットスラブ構造の床スラブである。スラブは一般の梁、柱と比較すると厚さの薄い平面構造部材であることから、これにプレストレスを導入するには、比較的細径のPC鋼材を多数本独立に配置する必要がある。そのため、グラ

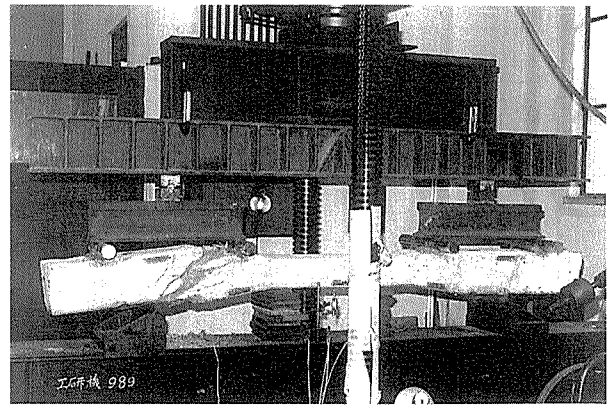


写真-5 18年間供用したアンボンドPC枕木の載荷試験による耐力確認

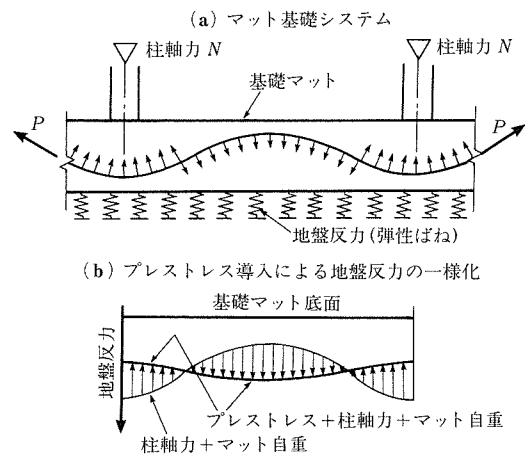


図-6 マット基礎におけるプレストレスの利用

ウト作業は現場では非常な重荷であり、その必要のないアンボンドPC鋼材の開発によって、一挙にPCフラットスラブ構造への利用が進んだのである。スラブへのプレストレス導入は逆曲げモーメントによる設計曲げモーメントの一部キャンセルにある。したがって、導入プレストレスの設計は、図-4の荷重釣合い法を適用して行われる。わが国でのPCフラットスラブ構造による最初の建物は、桁行方向6m×21スパン（一部6m×12スパン）、張間方向18m×2スパン（一部18m×1スパン）の平面をもつ3層の郵政省大阪倉庫であり、1980年に竣工している³⁶⁾。

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³⁷⁾。図-6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柱軸力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)に示すように柱軸力Nの作用位置で最大、柱の中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に押し上げ、かつ柱中間部を下方に押し下げよう、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る。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することができる。わが国での使用例は極めて少ないが、PC技術応用の新しい分野として今後の普及が期待される。

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さらに近づく。とくに、コンクリート系トラスについてはプレキャスト部材の組立て一体化がプレストレス導入の役割とされていたが、組立て一体化後、さらに下弦材にプレストレスを導入すればトラス全体に逆曲げモーメントが付与できるので、変形の制御とともにその耐荷能力を著しく増大できる³⁸⁾。最近では高強度コンクリートの開発が進んで、圧縮強度が100MPaを超えるコンクリートが容易に製造できるようになり³⁹⁾、構造体の著しい軽量化が期待できるようになった。今後の発達、普及を期待したい。

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、鉄骨梁部材から束材を立ててその先端にPC鋼材を貫通させて下弦材とし、かつ、PC鋼材を緊張して逆曲げモーメントを与える張弦梁構造が注目されている^{40), 41)}。その構造形態は図-7に示すように、PC鋼材をサスペンション材に使用する構造、アーチのタイとして使用する構造、および、両者の組合せの構造の3種類に分類できる。いずれの構造も張弦材としてのアンボンドPC鋼材を緊張することにより、鉄骨梁に著しく大きい逆曲げモーメントを付与し、軽量で長大スパンの架構を可能ならしめている。

10. PC鋼材ばね作用の利用

PC部材に繰返し荷重を載荷すると、極めて復元性に富む履歴曲線が得られ、かつ載荷によって曲げひび割れが発生

しても、除荷すれば発生したひび割れはすべて口を閉じてひび割れの痕跡すら見つけることが困難となる。これは緊張されたPC鋼材のばね作用によってもたらされる特性である。このようなPC鋼材のばね作用を利用して構造体または構造部材の力学的特性の欠点を改善するユニークなPC技術の応用方法がいくつか開発されている。プレストレス導入によるRC構造の柱-梁接合部の地震時復元力特性の改善は、その代表例である。RC柱-梁接合部では、地震時に正負繰返し曲げモーメントを受け、梁主筋の付着力不足による接合部からの抜出しが起るが、これが原因で接合部のせん断耐力の低下や履歴ループの形が逆S形になったりする。とくに、外柱、隅柱などの拘束の少ない接合部では、このような劣化が起りやすい。接合部を貫通して梁部材にプレストレスを導入すると、PC鋼材のばね作用によって梁主筋の接合部からの抜出しが防止され、かつ、接合部の拘束が増大することから、接合部のせん断耐力低下が防

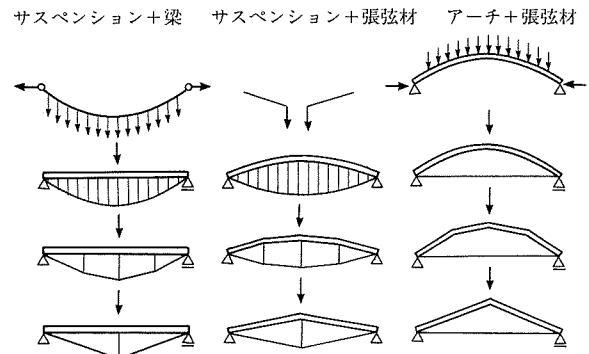


図-7 張弦梁構造の原理と形態 (齊藤による)

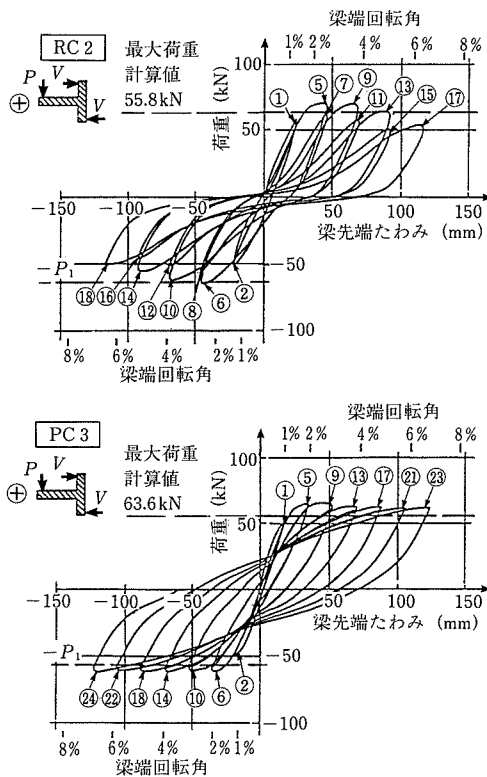
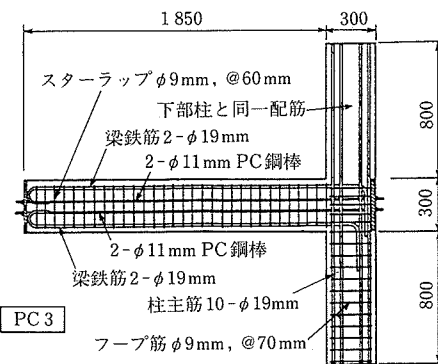


図-8 プレストレス導入による外側柱-梁接合部の復元力特性改善



(右上：供試体)
(左上：RC柱-梁接合部復元力特性)
(左下：プレストレス導入による改良)

止できるばかりか、図-8にその一例を示したように履歴復元力特性が著しく改善される⁴²⁾。この問題に関する研究は極めて少なく、接合部の力学的特性を理想的に改善するには、どの程度のプレストレス力の導入が必要なのか、今後の研究に待たなければならない。

11. 結 言

本稿では建築構造物におけるPCの利用と発展の歩みを概説した。プレストレス導入によるコンクリートの引張抵抗力改善という基本理念から始まったPC技術は、当初は常時使用状態におけるひび割れ皆無の構造であることが特徴とされていたが、PPCの出現でその役割がひび割れ開口幅制御に拡大され、さらには偏心距離を大きくとって少ない軸力導入による逆曲げモーメントの部材への効果的付与や、PC鋼材のばね作用による復元力特性改善技術へと発展した。今日ではコンクリートの収縮ひび割れの防止のような構造的な要求からではないプレストレス力の利用法も考えられるようになった。PC技術・工法の使われ方の多様化時代を迎えたと言えよう。このようなPC技術・工法の応用域の拡大は、プレストレス導入理念の拡大・変遷と相まって起こり、ユニークな構造・工法の開発は今日もおおまかしく知られない。PC-PPC-RC一連の構造が同一の力学的特徴を備えたコンクリート系構造として包括され、設計標準・指針の統一を図る国際的動きが出てきたのも、一つにはプレストレス導入の役割が、RCにおける普通鉄筋によるコンクリート補強役割と同等と見なし得るとの理解によるところが大きい。21世紀には、PC-PPC-RCが一体となったコンクリート系構造として、より高度に発展することを願って止まない。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会PC構造運営委員会地震調査WG：1995年兵庫県南部地震PC建物被害調査報告書，1996.7
- 2) 猪股：プレストレスコンクリートの設計および施工，pp.1～3，技報堂，1957.11
- 3) 野口：プレストレス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-16，pp.9～14，1992.2
- 4) 渡辺：プレストレスコンクリートの歴史—道路構造物，土木学会論文集，第451号/V-17，pp.1～5，1992.8
- 5) 坂，岡田，六車：プレストレスコンクリート，朝倉書店，pp.6～7，1961.1
- 6) 吉田：プレストレス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：プレストレスコンクリート(PC)事始め，プレストレスコンクリート，Vol.42，No.1，pp.10～14，2000
- 8) 六車：プレストレスコンクリート研究裏話，プレストレスコンクリート，Vol.42，No.1，pp.15～20，2000
- 9) 坂，六車：かた練りコンクリートのウオーカビリティー測定と配合設計，PC技術協会第1回年次学術講演会概要集，pp.1～2，1961.1
- 10) 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)
- 11) 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
- 12) 南淡町庁舎，新建築，Vol.33，No.2，pp.58～62，1958.2
- 13) 兵庫県南淡町庁舎，コンクリート工学，Vol.29，No.1，p.62，1991.1
- 14) 鉄道建築協会(編著)：PC建築設計施工例，1964.11

- 15) 加藤，猪股，中川：プレストレスコンクリート2階建建物の耐力試験，日本建築学会関東支部第17回研究発表会講演集，1955.2
- 16) 猪股：プレストレスコンクリートの設計および施工，pp.598～601，技報堂，1957.11
- 17) 六車：PC構造物の耐震性および耐火性，土木学会関西支部昭和41年度講習会テキスト「プレストレスコンクリート最近の進歩」，pp.75～91，1966.11
- 18) K. Nakano：Experiment on Behaviour of Prestressed Concrete Four Storeyed Model Structure Under Lateral Force，PC技術協会耐震規定委員会資料，1954.7
- 19) P. W. Abeles：Introduction to Prestressed Concrete，Vol.2，Concrete Publications，Ltd.，1964
- 20) P. W. Abeles：Design of Partially Prestressed Concrete Beams，ACI Journal，Vol.64，No.10，pp.669～676，1972.10
- 21) CEB-FIP Recommendations Internationales pour le Calcul et L'execution des Ouvrages en Beton，1970
- 22) 六車：アンボンドプレストレスコンクリート—最近の発達と問題点，PC技術協会昭和53年度講習会テキスト，pp.25～61，1979.1
- 23) 六車：PC構造物の新しい設計法について，PC技術協会昭和57年度講習会テキスト，pp.61～75，1984.1
- 24) 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
- 25) J. E. Breen：Why Structural Concrete?，Proc. of the IABSE Colloquium on Structural Concrete，Stuttgart，IABSE Report，Vol.62，pp.15～26，1991
- 26) 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
- 27) 日本建築学会構造委員会PC構造運営委員会：21世紀のプレストレスコンクリート—設計法の新しい動向，2000年度日本建築学会構造部門(PC構造)パネルドイスクッション資料，2000.9
- 28) 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
- 29) W. E. Kunze，J. A. Sharounis，J. E. Amrhein：Behaviour of Prestressed Concrete Structures during the Alaskan Earthquake，PCI Journal，Vol. 10，No.2，pp.80～91，1965.4
- 30) Report of FIP Commission on Seismic Structures，Proc. of the 7th FIP Congress，New York，pp.63～74，1974.5
- 31) FIP Recommendations for the Design on Seismic Prestressed Concrete，1977.11
- 32) 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
- 33) 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)
- 34) 六車：アンボンドプレストレスコンクリート，材料，Vol.26，No.287，pp.719～729，1977.8
- 35) 六車：18年間の使用に耐えたアンボンドPCまくら木について，PC技術協会第17回研究発表会講演概要，pp.5～6，1977.11
- 36) 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
- 37) H. Mayer：Post-Tensioned Foundations，FIP Notes，pp.9～11，1991.3
- 38) 坂：プレストレスコンクリートの建築構造，コンクリートパンフレット，第60号，日本セメント技術協会，1959.6
- 39) 六車：超緻密超高強度コンクリート—圧縮強度2000kgf/cm²への挑戦，GBRC(日本建築総合試験所機関誌)，Vol.1，No.4(通巻40号)，pp.32～39，1985.10
- 40) 斉藤：張弦梁構造の原理と応用，カラム，No.75，pp.67～77，1980.1
- 41) 斉藤：張弦梁の理念と応用，Structure，No.13，pp.39～53，1985.1
- 42) 藤村，大平，西山，渡辺，六車：プレストレスコンクリート外部梁・柱接合部の繰り返し試験(その1；試験概要)，(その2；試験結果および考察)，日本建築学会大会学術講演集(九州)構造2，pp.967～970，1989.10

【2000年10月17日受付】