特　集

構造物・技術への思い

～私の好きな構造物・思い出の構造物～

【企画趣旨】

現在，建設業界は長引く公共事業の減少傾向による市場の縮小に加えて，入札制度の変化によるダンピングや低価格入札などきわめて厳しい環境下におかれています。

一方，業界内における環境の厳しさだけでなく，入札を巡る不正行為や耐震強度偽装問題などによって，一般社会からも厳しい目を向けられています。

こうした状況では，ともすると技術者をはじめ建設業に携わる関係者も意気消沈してしまいがちです。また，建設業界においても「2007 年問題」が目前に控えており，人材の確保や技術の継承が急務であるにもかかわらず，若手技術者が離職するという状況さえも現実にあります。

こうした状況を少し離れた所から見つめるため，本号では『構造物・技術への思い ～私の好きな構造物・思い出の構造物～』という特集を組み，かつて PC 技術を導入するとともに開発・発展させてきた先達や現役の気鋭の技術者や関係者の方々に，かつてあるいは現在の構造物や技術に賭けてきた思いや今後への期待をつづっていただくことにしました。それら珠玉の言葉を光として，われわれが技術者を職業として選んだ時の夢や誇りを思い出し，今後の持続的な発展に資することができればと考えています。

本号が読者の皆様にとって，有意義なものとなることを願っております。

本特集号　担当編集委員

秋山　博・岩波　光保・下西　勝
妹尾　正和・中井　聖棋

PC 技術の発展を省みて
― プレストレス導入理念の拡大と多様化 ―

六車　熙＊

1. はじめに

近代的プレストレストコンクリート（以下 PC と略記）は，1928 年にフランスの Freyssinet によって考案された。わが国での PC 技術の普及・発展は 1952 年の Freyssinet 法の技術導入に始まる。当時のわが国には，Freyssinet の PC に関する原理特許があり，PC を用いるためには許可を必要とした。原理特許は 1954 年 5 月に消滅し，以後はコンクリートにプレストレスを導入する原理は何人も自由に使用できるようになった。1950 年代後半から 1960 年代前半には，欧米諸国で開発された種々の工法・技術が導入され，材料，設計および施工に関する基・規準類の整備も進んで，1970 年代には PC はコンクリート系構造物にとってなくてはならない技術の一つとなるまでに発展した。本稿では，PC 技術がわが国に導入されてから今日に至るまでの建築構造物での発展を，プレストレス導入理念の拡大と多様化の観点から概説する。

2. 技術導入当時の PC

わが国に PC 技術が導入された当初は，コンクリートの引張抵抗力の増大がプレストレス導入の主目的であった。建築部材は常時使用状態で多かれ少なかれ曲げモーメントを受けるので，部材の各断面にこれと逆方向のプレストレスモーメントが与えられるように偏心軸力を導入することによって，常時使用状態でひび割れ皆無の構造，すなわち，全断面が圧縮にも引張にも有効に働く部材が得られる。さらに，プレストレス導入と同時に部材には逆たわみ（キャンバー）が生じ，全断面有効となることと併せて長大スパン構造を可能にする基本となっている。

常時使用状態におけるひび割れ皆無を保障する部材断面弾性設計法としては，長期設計荷重作用時にコンクリート断面に引張応力の発生を許さないフルプレストレスの設計と，これを許すパーシャルプレストレスの設計とがある。すなわち，前者はコンクリートの許容引張応力度が 0，後者は引張強度の 1 / 3 の引張応力の発性を許すものである。建築構造物においては，地震力を負担する大梁，柱などの主要構造部材には前者の弾性設計法が規定され，後者の設計法は小梁などの非耐震部材に対してのみ適用されていた。それは，大地震を受けてコンクリートに曲げひび割れが発生した後は，本来コンクリートが保有していた引張に対する抵抗力が 0 に低下し，常時使用状態とはいえひび割れが開口したままになって，発錆による PC 鋼材の破断をおそれたためである。大げさにいえば，常時使用状態ではいかなる場合でも構造体にひび割れ開口を残さないことを意図したものである。

フルプレストレスの設計で柱および梁にプレストレスを導入したわが国最初の PC 架構は，図 - 1 に示す 1957 年竣工の ㈱ 丸見屋向島工場の 2 階建て PC 不静定架構である [1]。プレキャスト PC 柱および梁をポストテンション圧着接合で一体化している。この建物は 1956 年竣工の兵庫県南淡町庁舎（3 階建て，スパン 11 m のプレキャスト PC 梁を現場打ち RC 柱に圧着）に次ぐ PC 耐震フレームで，柱にもプレストレスを導入することによって，常時使用状態における架構の曲げ応力を緩和する措置をとっている。工場移転に伴って 1974 年に解体され，現存しないのが残念である。参考までに解体中の PC フレームを写真 - 1 に示す。なお，解体時には架構の振動実験，水平加力実験，応答解析による地震時架構の挙動推定，PC 梁の静的曲げ破壊試験などの詳細な研究が行われ，PC 建築フレームがきわめて安全性の

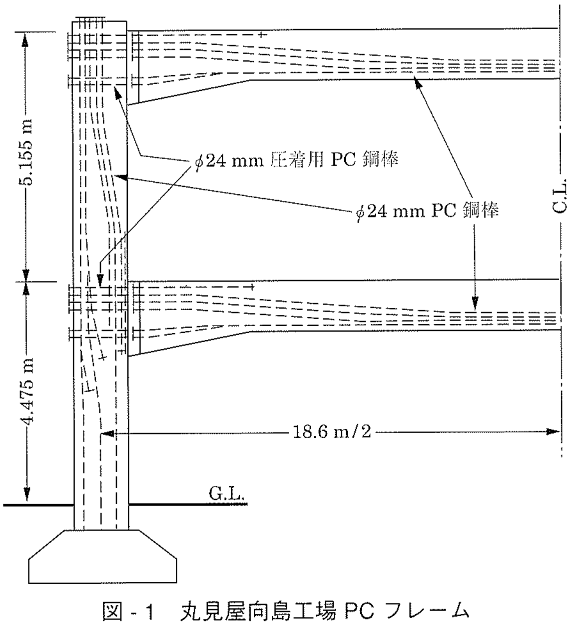
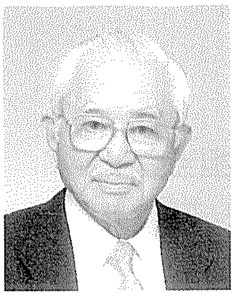


図 - 1　丸見屋向島工場 PC フレーム



＊ *Hiroshi MUGURUMA*
本会名誉会員　京都大学名誉教授

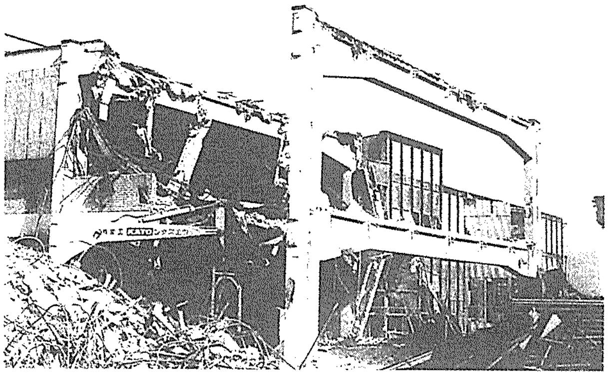


写真 - 1　解体中の㈱丸見屋向島工場 PC フレーム

高い構造であることが実証されている。当時の建築構造物の耐震設計は，震度 0.2 の地震水平力に対する許容応力度を用いた弾性設計が規定されていたが，PC 建築物にかぎり震度 0.3 の地震力に対する終局強度設計が筆者らの提案により用いられていた。このことも，高い安全性が得られた理由の 1 つであろう。

3.　プレストレスによるひび割れ開口幅の制御

1964 年にイギリスの P. W. Abeles は，常時使用状態において曲げ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（以下 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，駅舎にこれを適用した[2), 3)]。もちろん，PC 鋼材は RC 用鉄筋と比較して発錆しやすく，かつ，PC 鋼材の腐食破断は構造物の崩壊につながることから，積載荷重の比較的小さい構造物にかぎり適用すること，および，常時使用常態における曲げひび割れ幅の検討を行うことを条件付けしている。ひび割れ開口幅は導入する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 FIP - CEB 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。わが国でも RC 構造物のひび割れ，大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設計・施工指針[4)] が刊行されて，建築物への利用が急速に進んだ。とくに，わが国では PPC 部材に導入するプレストレス力 P と偏心距離 e をいかにして決めるかが問題となり，種々検討の結果，T. Y. Lin 考案になる荷重釣合法[5)] を応用するのが最適であるとの結論に達した。図 - 2 は等分布荷重を受ける単純梁を例にとった説明図で，部材の各位置において下式のプレストレスモーメント M_{px}（設計モーメントと逆方向のモーメント，キャンセルモーメント）を与えることを条件に，各位置の導入プレストレス力 P と偏心距離 e_x を決める。

$$M_{px} = kM_x = Pe_x \qquad (1)$$

M_x：任意位置 x における長期設計曲げモーメント
k：キャンセルモーメント係数（< 1）

k ＝ 1 の場合には，長期設計曲げモーメント作用時にたわみは 0，すなわち，部材は軸力 P だけを受ける真直梁となる。このことから（1）式から P および e_x を選定する PC 部材の設計法を荷重釣合法と名付けたのである。

キャンセルモーメント M_{px} は固定荷重による設計曲げモーメントとするのが基本である。(1) 式から P および e_x を選定した後，全長期設計荷重による曲げモーメントが最大となる位置（図 - 2 の場合はスパン中央）での曲げひび割れ開口幅を検討し，長期設計荷重に対する部材の設計が終わる。なお，曲げひび割れ開口幅の計算には，コンクリートの引張抵抗を無視して行わなければならない。

このような PPC の原理の特徴は，導入するプレストレス力の大きさを変えることにより，曲げひび割れ開口幅をいかようにも制御できることにある。RC の設計では，特別の場合を除き設計においてひび割れ開口幅を直接検討することはないが，これと比較して対照的である。

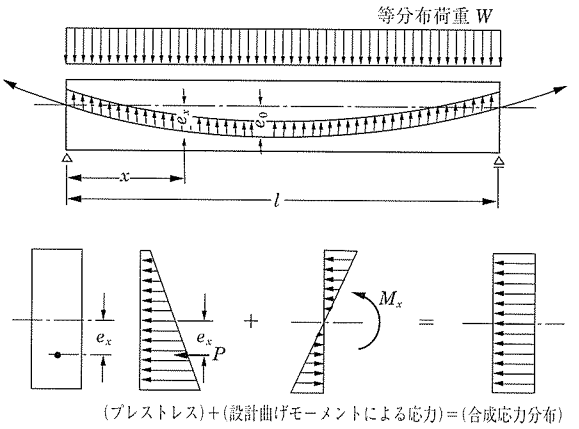


図 - 2　T. Y. Lin 提案の荷重釣合法説明図

4.　コンクリート系構造物の設計基準の統一

PPC の出現によって，常時使用状態において曲げひび割れ発生を許さない PC と，発生が当然とする RC との間の溝が埋められ，今日では PC － PPC － RC をコンクリートの特徴を共有するコンクリート系構造として取り扱えるようになった。図 - 3 はその説明図であって，いずれの種別

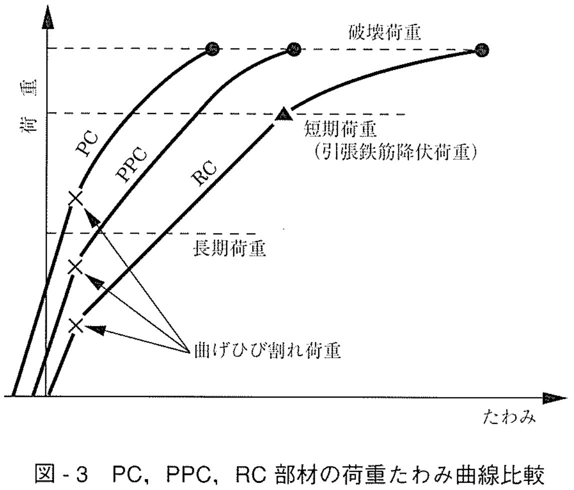


図 - 3　PC，PPC，RC 部材の荷重たわみ曲線比較

のものであっても同じ大きさの曲げ破壊モーメントをもつように設計できる。長期荷重に対してはPCは曲げひび割れ皆無であるが，PPCとRCとは曲げひび割れが発生してしかるべき構造である点，および，曲げ破壊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無く，しかも，同じ計算式で曲げ破壊に至るまでの応力および変形の解析ができる。このことから世界では，これら3つをコンクリート系構造（Structural Concrete）と総称して設計基準の統一が行われつつある[6)]。わが国ではいまだにPCとRCとは別物との認識が強く，このままでは世界と太刀打ちできなくなる時代がくるのではないかと懸念される。

5. アンボンドPCの普及

アンボンドPC工法は，表面に油脂系，樹脂系の防錆材を塗布または接着してポリエチレンなどのシースを被覆したPC鋼材をコンクリート中に打設し，コンクリートの硬化後にこれを緊張してコンクリート体に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ことを除けば，ほかは通常のポストテンション工法とまったく同じである。1952年に米国で建築物のフラットスラブへの使用が始まったが，建設後間もなくスラブに異常むくりやたわみが頻発し，取り壊さざるをえなくなった。過大または過小プレストレスの設計になっていたことが原因であった。米国ではこの事故を契機にフラットスラブ構造に対する適正設計法の研究が行われ，アンボンドPC鋼材の使用がフラットスラブ構造を中心に急速に伸びた。

わが国のアンボンドPCの力学的性質の研究は，筆者らが1955年から開始したのが最初である[7)]。当初は主として枕木，矢板などのプレキャスト製品に用いられていたが，1980年頃から米国での使用に刺激されてスラブへの利用が活発となった。設計は図-2に示した荷重釣合法が適用される。最初の本格的利用は，スパン方向18 m × 2スパン，桁行方向6 m × 21スパンの3階建て近畿郵政省資材部倉庫で，桁行方向にϕ 15.2 mmアンボンドPCストランドを750 mmピッチで波型に配置し，プレストレスを導入している[8)]。

施工は桁行方向21スパンを7スパン＋5スパン＋5スパン＋4スパンに4分割し，コンクリート打設およびプレストレス導入を各分割区分ごとに順次繰り返す工法がとられた。竣工は1980年9月である。参考までに，床スラブへのアンボンドPCストランドの配線状況を写真-2に示す。なお，本建物の完成により床スラブへのアンボンドPC鋼材の使用が急速に増え，耐震地域でのフラットスラブ構造の研究も数多く行われるようになった。

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年代に至るまで使用には否定的であった。とくに，FIP耐震委員会では，定着部の引張疲労破壊の心配から，地震地帯での使用に強い反対意見がだされ，12年間にわたる平行線の議論に苦しめられた。賛否の終止符を打ったのは，筆者の行った付着の有無による梁の曲げ疲労破壊実験結果であった。図-4はその一例である[9)]。付着の有無による曲げ疲労破壊耐力の差は認められないことを説明すると同時に，当時の欧州各国で慣用されていた鋳物などで製造した粗悪くさびでは耐震性を保障できないのは当然であると反論し，1986年に至ってようやく欧州勢も耐震構造へのアンボンドPC鋼材の使用を認めるに至ったのである。なお，かつてわが国でも，アンボンド工法の主要耐震部材への使用は許されていなかったが，現在はその規制もなくなり，自由に使用できるようになっている。

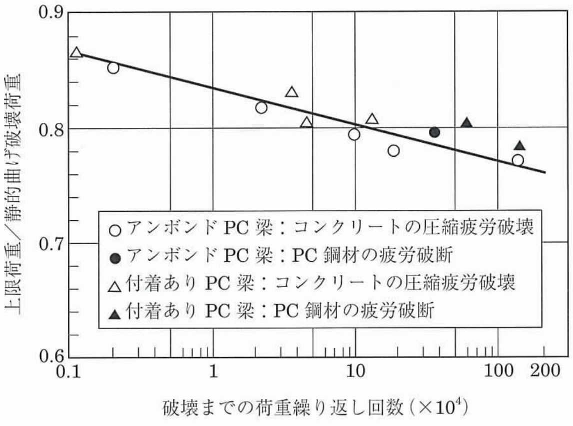


図-4 曲げ疲労耐力に対する付着の有無の影響

6. 逆曲げモーメント導入の積極利用

3項でのべた設計曲げモーメントと逆方向のプレストレスモーメントを与えるという考え方は，曲げ材におけるプレストレスのもっとも理想的な使い方である。とくに，外ケーブルを使用すると，導入プレストレス力の偏心距離を大きくとることができ，結果として少ないプレストレス力で大きな逆曲げモーメントを付与できる。図-5は筆者が1964年にミュンヘンを訪れた際に，たまたま公共市場建築で見つけたアンボンドPC鋼棒による大梁の外ケーブル補強を模式的に示したものである[10)]。設計ミスによる曲げ破壊強度不足を補うと同時に，常時使用状態でのひび割れお

写真-2 施工中の近畿郵政省資材部倉庫の床スラブ

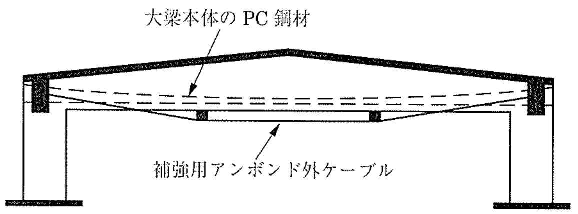


図 - 5　外ケーブルによる PC 梁の補強・補修説明図

よびたわみによる垂れ下がりを補強，修復している。ただし，建築物に外ケーブル工法を適用する場合には，PC 鋼材に十分な防錆を行うと同時に，火災時の温度上昇による PC 鋼材の劣化を防止するための耐火被覆を行う必要がある。

鉄骨部材へのプレストレス技術の利用は，かなり以前から行われているが，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，これに束材を立ててその先端に PC 鋼材を下弦材として配置して緊張し，逆曲げモーメントを与える張弦梁構造[11), 12)]が注目される。その構造形態は図 - 6 に示すように，PC 鋼材をサスペンションとして用いる構造，アーチのタイとして用いる構造，および，両者の組み合わせの構造の 3 種類に分類できる。いずれの構造も張弦材としての 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。

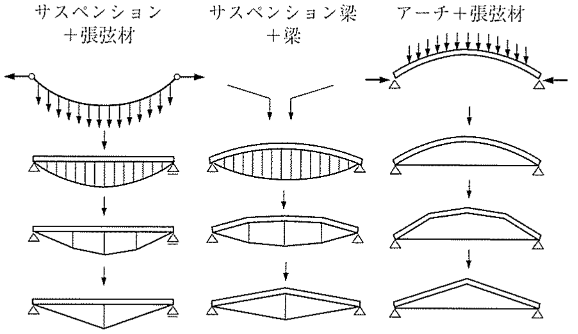


図 - 6　張弦梁構造の原理と形態

7. 兵庫県南部地震と PC 建築物

1995 年 1 月 17 日未明に発生した兵庫県南部地震は，一瞬にして 6 500 余の人命を奪い，阪神地区および淡路島北部の構造物に大被害をもたらした。とくに，六甲山系の南山裾に帯状に広がる風化花崗岩扇状地および旧縄文時代海岸線地帯では多くの構造物が倒壊し，震災の帯と呼ばれる程甚大な被害を受けたことは記憶に新しい。震災の帯およびその周辺には約 300 棟の PC 建築物があったが，幸いにして大被害を受けたものは 3 棟ほどで，ほかは無被害または軽微な被害で収まった。新耐震設計法施行以前の弾性設計時代の水平震度の 1.5 倍の設計地震力に対する終局強度設計の採用と，高強度コンクリートの使用が，上記の結果をもたらしたものと判断される。甚大な被害を受けた RC 構造においても，PC 並みとはいわないが，せめて 40 ～ 50 MPa の圧縮強度をもつコンクリートを使用していれば，相当の被害防止が可能であったのではと，今でも口惜しくてならない。地震に耐えた PC 建築物の写真は，紙数の関係で割愛する。

8. おわりに

以上述べたように，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理念から始まった PC 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率的付与，ここでは述べなかったがバネ作用の積極利用やクリープ，乾燥収縮などの影響防止など，多方面に展開，発展している。PPC の出現によって PC － PPC － RC 一連の構造が同一の力学的特徴を備えた構造（コンクリートの特性のでる構造）として包括され，設計基・規準の統一を図る国際的動きがでてきたのも，見逃すことはできない。近い将来，これら一連の構造を一括してコンクリート系構造（Structural Concrete）として扱われる日がくるのを期待して止まない。

参考文献

1) PC 造建築耐力実験委員会：丸見屋向島工場実験結果報告書，1974.9.
2) P. W. Abeles ：Introduction to Prestressed Concrete, Vol.2, Concrete Publications, Ltd, 1964.
3) P. W. Abeles ：Design of Partially Prestressed Concrete Beams, ACI Journal, Vol.64 No.10, pp.669-676, October 1972.
4) 日本建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説，日本建築学会，1989.
5) T. Y. Lin ：Load-Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures, ACI Journal, Vol.60 No.6, pp.719-742, June 1963.
6) J. E. Breen ：Why Structural Concrete? Proc. of the IABSE Colloquium on Structural Concrete, Stuttgart, IABSE Report Vol.62, pp.27-36, 1991.
7) 坂　静雄, 六車　熙：付着のない PC 梁の亀裂および曲げ破壊耐力，日本建築学会論文報告集，第 60 号，pp.641-644，1958.10.
8) H. Muguruma ：Development of Prestressed Concrete Buildings in Japan, Proc. of the FIP Symposium on Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Vol.1, pp.19-30, October 1993.
9) H. Muguruma ：Study on Low-Cycle Fatigue Strength of Post-Tensioned Unbonded Prestressed Concrete Beams, プレストレストコンクリート，Vol.20 Extra No., pp.41-48, 1978.5.
10) 六車　熙：アンボンドプレストレストコンクリート（V），GBRC（日本建築総合試験所機関誌），Vol.3 No.2，pp.4-10，1970.4.
11) 斉藤公男：張弦梁構造の原理と応用，カラム，No.75，pp.67-77，1980.1.
12) 斉藤公男：張弦梁の理念と応用，Structure，No.13，pp.39-53，1985.1.

【2006 年 9 月 25 日受付】