

PC 建築の 50 年

渡邊 史夫*

1. 序

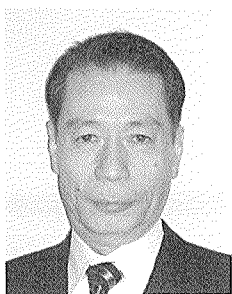
プレストレストコンクリート（以下 PC）技術協会は、昭和 33 年に設立されて以来、50 年の長きにわたりわが国の PC 技術の振興を図るとともに、PC を専門領域とするわが国唯一の学術団体として、PC の研究および技術開発に貢献してきた。旧 FIP（国際プレストレストコンクリート連盟：1953 年に設立され、1998 年に CEB と合併し fib と改組）の日本代表機関として、また、fib（国際構造コンクリート連合）が設立された後は、コンクリート工学協会とともに、日本代表機関を務めるなど、国際舞台での活躍も顕著なものがある。この偉業に心からの敬意を表すとともに、将来の更なる発展を信じている。このたび、設立 50 周年を記念した特集号に寄稿することになったことは、大変光栄であるとともに重責でもある。本来ならば、京都大学名誉教授である故六車 熙博士にご執筆願うべきところですが、残念ながら昨年 11 月に急逝され、小生がこの大役を仰せつかった次第である。

PC 構造は、鉄筋コンクリート（以下 RC）構造では困難な大スパン梁の架設を主目的として開発された構法であり、コンクリートに導入される元圧縮応力が、引張に弱いコンクリートの性質を補い部材の曲げひび割れ強度を増大させる、または、曲げひび割れ幅を抑制・制御するところに最大の特徴があり、ヨーロッパおよびアメリカを発祥とする技術である。PC の基本原理は、19 世紀末期から 20 世紀初頭に確立されていたが、実際の構造物に適用するには至らなかった。理由は、緊張材によって導入されたプレストレス力が、コンクリートのクリープと乾燥収縮ひずみ、鋼材のリラクゼーションによって時間の経過とともに喪失してしまうためであった。この問題を解決し実用化したのが、フランスのフレシネーで、1928 年高強度鋼材（ピアノ線）および定着装置をセットで提案し、特許を取得した。その後の 1932 年（昭和 7）、フレシネーはわが国で基本特許を取得し、昭和 31 年 5 月までその技術に対して原理特許と

しての工業権が与えられていた。

わが国においても、昭和 16 年（1941）に運輸省鉄道技術研究所でプレテンション構造に関する研究が始まり、同時期に福井大学吉田宏彦教授も同様の研究を行っている。しかし、これら研究は第二次世界大戦で中断し、真の研究推進および実用化は戦後となった。第二次世界大戦終了直後の昭和 21 年（1946）に、商工省鉱山局に設けられた鋼弦コンクリート小委員会が、軍需資材として大量に余ったピアノ線を用いて、PC に関する研究を開始した。そこには多くの研究・教育機関が参加し、PC 実用化への道を切り拓くことになった。その後、昭和 20 年代後半から 30 年代初頭における高強度より線または高強度棒鋼の材料開発と構造への応用研究が推進され実用化へと進んだ。以上の歴史的背景は、六車 熙博士（前出）著「プレストレストコンクリート」（コロナ社）に詳しく記述されている。

建築の分野では、昭和 35 年（1960）に建設省告示 223 号が制定され PC 建物の建設が可能となった。昭和 36 年（1961）には、日本建築学会より PC 設計施工規準・同解説（学会 PC 基準）が学術的研究成果を盛り込んで出版され（現在は改訂を重ね 1998 年版となっている）法的小および学術的基盤が整備された。これを受けて、PC の実際構造への応用が進められ、昭和 32 年には、わが国初めての PC 多層不静定骨組である南淡町庁舎（現南あわじ市南淡庁舎）が建設された。その後、大スパンを必要とするボーリング場等が PC によって次々に建設された。昭和 48 年（1973）に、建設省告示 949 号が新たに制定され PC 建物に対する 16 m の高さ制限が撤廃された。同年の住指発第 305 号で、建設省告示 223 号の廃止と定着部の安全性確認のための試験法が示された。昭和 50 年（1975）には学会 PC 基準の大改訂が行われ、アンボンド工法が追加された。昭和 58 年（1983）に、新耐震設計法の成立にあわせて建設省告示 1320 号が制定され、PC 造建物の設計ルートに 2 次設計（ルート 3）が加えられた。ここでは、S 造や RC 造と同様の保有水平耐力設計（ルート 3b）と、PC 独自の荷重係数を用いた終局強度設計（ルート 3a）が併記された。これは、PC 造が、開発当初より用いてきた終局強度設計法が国の建築物構造設計体系のなかで市民権を得たことを意味し、きわめて意義深いことである。さて、昭和 50 年代よりひび割れの発生を許容し、そのひび割れ幅を制御する構造パーシャリー PC 構造（わが国ではプレストレスト RC 構造（PRC と略称）と呼ばれている）の研究が進み、昭和 61 年（1986）、日本建築学会よりプレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説が出版された。その後、昭和 62 年（1986）学会 PC 基準小改訂、平成 6 年（1994）学会



* Fumio WATANABE
京都大学名誉教授

PC 合成床板指針の出版、平成 10 年（1998）学会 PC 規準の SI 単位化と学会規準類が進化してきた。また法令関係では、平成 12 年（2000）の建築基準法施行令の改正により、新たな耐震設計法が限界耐力計算として加えられたのに対応して、平成 19 年（2007）国土交通省告示 823 号によって、PC 造建物の耐震設計法として限界耐力計算が認められることになった。

PC 技術は、PC の典型的応用である大スパン構造のみでなく、テンション構造、テンションリング構造、ポストテンション工法によるプレキャスト構造（圧着接合—図-1）等、その応用範囲は大きく広がっている。とくにプレキャスト構造に用いられる圧着接合は、通常の RC プレキャスト構造の接合部と比べて単純明快な接合方法であり、現場でのコンクリート打設が無いことと接合面応力伝達機構の合理性のゆえに幅広く用いられている。一方、PC 構造はその豊かな造形性のゆえに多くの建築家に愛されており、構造家とのコラボレーションにより、構造的に明快で芸術性の高い建築物が数多く建設されてきている。わが国における PC 建築の歴史は、2002 年に技報堂出版から発行された、(社) PC 技術協会編「歴史的にみたプレストレストコンクリート建築と技術」に掲載されている歴史年表と、そこに紹介されている 54 の PC 建物によってたどることができる。また、高い造形性および芸術性と構造可能性を併せもつ PC 建築が、2004 年に (株) 建築技術から発行された、渡辺邦夫監修「Perfect Collection 知られざる PC 建築」で紹介されており、PC 建築の設計者には大いに参考となる。また、PC 技術協会でも毎年優れた PC 建築作品を協会賞として表彰し、協会誌であるプレストレストコンクリートに掲載しているので参照されたい。現在、PC 建築はプレキャスト構造として建設される場合がほとんどである。すなわち、PC とプレキャストはきわめて相性の良い組合せでありその特徴は以下のように要約されるであろう。

環境との共生：建設時における生コンクリート車等工事車両の台数削減、躯体工事により発生するゴミ、騒音、振

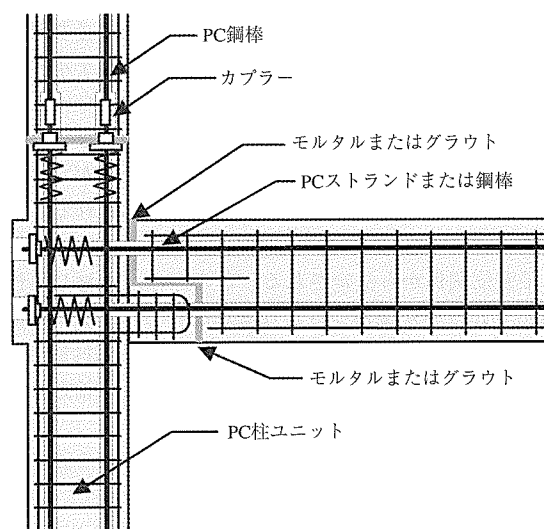


図-1 プレキャスト PC 接合部例

動および粉塵の削減によって、建設地周辺住民の生活環境保持と良好な作業環境を実現できる。また、プレキャスト部材製造時に鋼製型枠を繰返し使用し南洋材合板型枠量削減、コンクリートガラ、産業廃棄物、アルカリ排水の大幅低減を図ることができる。

空間の創造性：高強度コンクリートを用いた造形性豊かなプレキャストユニットの使用により、創造性に富んだ空間を自由な形態で実現できる。

持続性・耐久性：品質管理の行き届いた工場生産による高強度コンクリート部材を用いること、プレストレスの導入によるひび割れ防止により、次ミレニアムまで使用可能な構造耐久性の高い建物を実現できる。また、柔軟性の高い空間創造により、さまざまな時代の要請に応えた建築空間の変化に対応できる。

このように優れた性質をもつ PC を普及させるべく、共同研究「PC 構造設計・施工指針の作成」が、平成 8（1996）～10 年（1998）の 3 年間にわたって実施された。これは、建設省建築研究所からの共同研究の提案を受けて、(社) 建築業協会、(社) プレストレストコンクリート建設業協会、(社) 日本建設業経営協会、(社) 日本建築構造技術者協会、住宅・都市整備公団、(財) 日本建築センターの参加の下に、(社) 建築研究振興協会が研究委員会を設置し、大学・民間の研究者・技術者の協力によってプロジェクトを推進した。この研究プロジェクトからは多くの成果が得られ、とくに限界耐力計算による耐震設計法を PC 建築物に適用する際の実際手法が示され、前出の国土交通省告示 823 号へと繋がった。

2. PC 建物の構造設計法

PC 造建物の構造設計では、RC 造とは異なったいくつかの考慮点がある。PC 構造は、PC 鋼材によりコンクリートに導入された元圧縮応力（コンクリートの見かけの引張強度が上昇）が、コンクリートに生じるひび割れを防止し全断面を有効に働かそうとする構造法である。したがって、常時荷重に対する設計では線形弾性解析が用いられる。ただし、導入プレストレスが減退すると予期せぬひび割れが発生したりするので、コンクリートの乾燥収縮やクリープによるプレストレスの減退を正しく予測しないとイケない。この予測法確立なしには、現在の PC 建築はないといっても過言ではない。乾燥収縮やクリープの小さな硬練りで高強度なコンクリート、レラクセーションの小さな PC 鋼材、実験と解析によるプレストレス減退の信頼性のある予測の 3 つが不可欠である。もう一つの RC 構造との相違点は、プレストレスの導入により梁や柱に不静定応力が発生する点である。外荷重が加わってないにもかかわらず、曲げモーメント、軸力、せん断力が柱や梁部材に内力として発生する。この不静定応力の予測を誤ると、プレストレス導入時に予期せぬひび割れや部材の損傷を招くので注意が必要である。また、プレストレスの導入は PC 鋼材（鋼棒や Strand）で行われるが、プレストレスの導入による部材軸縮みを拘束するもの（たとえば剛性の高い壁）があると、PC 鋼材は所定の値まで緊張されても、部材に所定のプレストレスが導入されない。一方、PC 梁が長く連続するような

大規模建物では、プレストレスの導入による梁軸縮みが累積し柱に大きな部材角を生じさせるので注意が必要である。プレキャスト PC 構造では、架設時期・順序とプレストレス導入時期・順序が不静定応力の大きさに影響するため、施工計画には細心の注意が必要である。このように、PC 構造では施工と構造設計が表裏一体となっている。したがって、学会 PC 規準は、「設計・施工規準」となっている。

さて、PC 建築物の構造設計法は、RC とは異なる発展を示してきた。もっとも大きな相違点は、PC 構造では荷重係数を用いた終局強度設計法が昭和 36 年の学会 PC 規準制定時より採用されたことである。表 - 1 は、現行の学会 PC 規準に示されている、終局曲げモーメントに対して考慮すべき応力の組合せを示す。参考のため、昭和 36 年の制定当時の常時に対する荷重組合せを示しておいた。このように、外力に対する破壊安全率が明確な形で定義されていたといえる。とくに地震荷重に対しては、1.5 の荷重係数が用いられており、当時の震度 0.2 に相当する短期許容応力度設計用地震荷重が、大地震に対する安全性確保からは不十分であることを指摘していたといえる。

表 - 1 学会 PC 規準における応力の組合せ

行	状態	考慮すべき応力の組合せ
1	常時 (現行)	1.7 (G + P + S*), 1.2 G + 2.0 (P + S*)
	常時 (昭和 36 年)	2 (G + P + S*), 1.2 G + 2.4 (P + S*)
2	地震時	(G + P + S*) + 1.5 K
	積雪時	(G + P) + 1.5 S
	暴風時	(G + P + S*) + 1.5 W

G : 固定荷重, P : 積載荷重, K : 地震力, S : 積雪荷重
S* : 多雪区域の積雪荷重, W : 風圧力

2.1 常時荷重に対する設計

学会 PC 基準は常時使用状態での曲げひび割れの発生を許容しないいわゆるフル PC を設計目標にしている。一方、ひび割れの発生を許容し、ひび割れ幅の制御にプレストレス技術を適用しようとの考えが、1960 年代より広く議論されるようになった。旧 FIP が旧 CEB とともに策定した CEB-FIP 国際指針 (1970 年) では、コンクリート部材を第 I 種から第 IV 種まで以下のように分類しており、ここで第 III 種がひび割れの発生を許容する PC 構造である。

- I 種 : もっとも不利な長期設計荷重時にコンクリート断面には引張応力の発生を許さない設計 (フル PC)
- II 種 : もっとも不利な長期設計荷重時にコンクリート断面に、許容値以内の引張応力の発生を許す設計 (パーシャル PC, 断面の引張側に用心鉄筋として普通鉄筋を配置することがある)
- III 種 : もっとも不利な長期設計荷重時にコンクリート断面に曲げひび割れの発生を許容するが、軽度のプレストレスの導入と引張側普通鉄筋とによって、厳しいひび割れ幅制限を満足する設計 (RC に軽度のプレストレスを導入したプレストレスト鉄筋コンクリート)
- IV 種 : もっとも不利な長期設計荷重時にコンクリート断面に曲げひび割れの発生を許容するが、引張側普

通鉄筋によって、ひび割れ幅制限を満足する設計 (いわゆる RC)

この III 種を実用化するための研究がなされ、学会 PRC 指針 (前出) が 1986 年に出版された。ここでは、曲げモーメントに対するひび割れ幅を直接算定する手法が示されており、長期ひび割れ幅を直接の設計対象とした性能設計への道が開かれたといっても過言ではない。この指針に示された手法は、RC 構造における梁曲げひび割れ幅算定にも準用されている。

2.2 地震荷重に対する設計

さて、わが国の建築構造設計は、耐震工学とともに歩んできた。そこで、ここからは PC 建物の耐震設計法について述べる。わが国の建築物の設計は、建築基準法という法律の下で行われ、学協会等の出版する、規準や指針類には法的効力は無い。建築基準法策定時の学術的基盤になっていると考えるのが妥当であろう。さて、建築基準法の示す設計ルートは、PC 造建物の耐震 2 次設計に対して 2 つある。一つは通常の RC 造建物と同じ保有耐力設計法で、もう一つは終局強度設計法である。

保有耐力設計では、各層の必要保有水平耐力が式 (1) および式 (2) で与えられている。

$$Q_{ui} = W_i C_i \quad (1)$$

$$C_i = Z A_i R_i F_{cs} D_s C \quad (2)$$

Q_{ui} : 第 i 層の必要保有水平耐力, W_i : 当該層より上部の耐震設計用建物重量, C_i : 当該層の層せん断力係数, Z : 地域係数で 0.7 ~ 1.0, R_i : 地盤性状および建物固有周期に依存した振動特性係数 ($R_i \leq 1.0$), A_i : 建物高さ方向の層せん断力分布係数, C : 標準ベースシヤール係数で 1.0 (加速度で 1g 相当), F_{cs} : 建物の偏心および高さ方向の水平剛性分布による割増し係数 ($1.0 \leq F_{cs} \leq 3.0$), D_s : 構造特性係数で建物のじん性に依存した値 (骨組架構に対して $0.30 \leq D_s \leq 0.45$)

上記の D_s 値は、架構の崩壊機構と部材じん性の組合せによって決定されるもので、構造じん性率 (塑性率と同義で使っている) の大きいものほど小さな値とすることができる。すなわち、構造じん性率の大きなものほど必要保有水平耐力が小さくなり、梁崩壊による全体崩壊型を示すじん性骨組では最小の 0.3 となる。ただし、注意しなければいけないのは、構造じん性率と部材じん性率は異なったものである点である。構造じん性率とは、架構全体が水平力を受けた時に示す水平力と水平変位の関係で示されるじん性率であり、骨組漸増載荷解析などによって得られる水平力 - 水平変位関係から決定される。この際に、部材じん性率と構造じん性率が関係づけられる。部材じん性率は、部材そのもののじん性率で、プレストレス力、PC 鋼材量、コンクリート強度、横補強筋 (せん断補強筋) 量、軸力などに依存する。

終局強度設計では、式 (3), (4) で与えられる設計地震水平力 (層せん断力で与えられている) に対して、架構の弾性解析を行い、得られたせん断力、曲げモーメントおよび軸力に対して部材の終局強度設計を行う。部材の終局強

度設計では、すべて材料の規格値を用いる。部材の脆性的なせん断破壊を防止するために、部材両端部に曲げ塑性ヒンジが形成されたときのせん断力の1.2倍で部材のせん断設計を行うか、または、弾性解析で得られたせん断力の2.5倍で柱の、2.25倍で梁のせん断設計を行うよう規定されている。また、過大なPC鋼材量による曲げじん性の低下を避けるために、鋼材係数を0.3以下とするよう推奨されている。

$$Q_d = W_i C_i \quad (3)$$

$$C_i = Z A_i R_i F_{vs} C' \quad (4)$$

ここで、 C' は標準せん断力係数で0.3である。これは、短期許容応力度設計で用いられている標準せん断力係数0.2の1.5倍となっており、昭和36年に初めて学会PC規準が制定されたときに、地震荷重に対して荷重係数を1.5としたことに対応している。終局強度設計では、荷重係数を用いて骨組に1.5の破壊安全率を与えたわけであるが、地震荷重そのものが不確定であるため、ある程度の余裕が必要となる。その余裕を強度でとる考えもあるが、弾性応答を仮定するかぎり、際限がない。そこで、ある限界を超えた場合には、その先の塑性変形に対応しなければならない。それを実現するためには、部材のせん断破壊を防止し、塑性変形能力を確保することが求められる。そこで、先に述べたせん断余裕度に基づく部材せん断設計法が付加されている。これによって、曲げ降伏後の部材塑性変形を保障していることになる。この考え方は、学会PC規準制定時にはきわめて先進的な考え方であった。また、この設計法が適用されていたことが、1995年の兵庫県南部地震におけるPC造建物の被害がきわめて少なかった理由の一つと考えられている。

さて、ここまでではPC造建物の特徴的な履歴復元力特性が反映されたものとはなっていない。過去、PC造建物は、復元性はきわめて高いがエネルギー消費能力に欠けているため耐震性能が通常のRC造建物より劣るのではないかと長年議論されてきた。この議論は、平成12年(2000)建築基準法に新たに加えられた限界耐力計算法によって一つの解答を与えられることになった。

限界耐力計算では、等価線形化法が用いられる。等価線形化法とは、コンクリート構造のような劣化形の履歴特性をもつ構造を、定常振動しているときの履歴ループが示すエネルギー消費を等価な粘性減衰定数 h_{eq} に置き換えて線形化する手法である。この方法によると、ある粘性減衰定数をもつ線形形の応答スペクトルが、対象とする地震動に対して容易に得られることを利用して、劣化形の履歴特性をもつ構造物の応答を予測できる。ただし、地震に対する応答は非定常(入力地震動が定常的なサイン波のようなものでなく、非定常な性質をもつため、応答も非定常となる)であるので、Sozen および Gulkan の提唱した Substitute Damping の考えを取り入れる。これは、地震応答が終了した時点までの全地震動エネルギーと、粘性減衰の成した仕事を等しいと仮定し、平均的な等価粘性減衰定数を与えるものである。この平均的な等価粘性減衰定数が与えられれば、非定

常な地震動に対する応答スペクトル(加速度および変位で表現したもので、デマンドスペクトルと呼ぶ)が得られる。次に構造物の静的解析で得られた水平荷重と水平変位の関係を、加速度(水平荷重を質量で除したもの)と変位で表した曲線(キャパシテースペクトルと呼ぶ)を求め、先のデマンドスペクトルとの交点により応答変位が求められる。この方法を図-2に模式的に示す。図-2の縦軸上向きは、応答加速度で、横軸は応答変位である。また、縦軸の下向きは、構造物の最大変位に対応した等価粘性減衰定数で、先に述べた平均的等価粘性減衰定数である。図中には、粘性減衰定数 h が0.05、0.1 および0.3と、応答変位にかかわらず一定とした場合の加速度-変位応答スペクトルが一点鎖線で示されている。実際の建物では、先に述べたように等価粘性減衰定数が応答変位によって変化するので、応答変位に対応して変化する等価粘性減衰定数を用いた加速度-変位応答スペクトルが必要となる。これが、デマンドスペクトルとよび図中に実線で示されている。このデマンドスペクトルは、等価粘性減衰定数を一定としたスペクトル線上を渡っていくことになる。多自由度系を等価1自由度系に置き換えることにより、この考えを建物耐震設計に適用でき、地震時の変位応答を予測できる。この限界耐力設計法では、平均的等価粘性減衰定数をどのように与えるかがキーとなり、PC構造に適した等価減衰定数をとることになる。

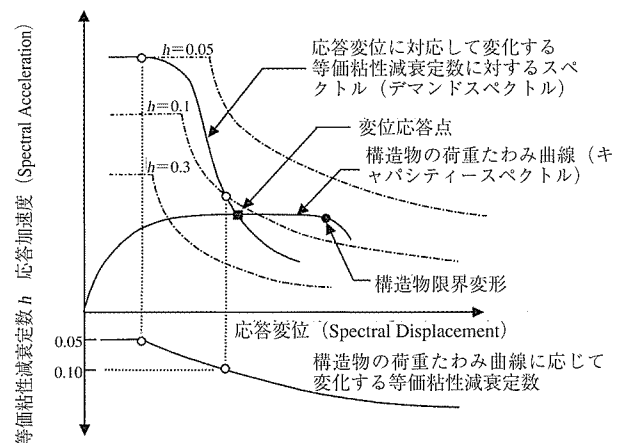


図-2 限界耐力設計法の概念

3. 将来への展望

PC構造の更なる発展のためには、PC構造のもつエネルギー消費能力は小さいが復元性はきわめて高いという特徴をいかに生かすかである。これには2つの道がある。一つは、建物を小さな弾性応答に留め、地震時およびその後も無損傷で建物機能を継続できる構造である。このためには免震装置との組合せが最適で、BCP(事業の継続性)といった観点から注目されている。もう一つは、建物にはある程度の応答が生じるが、エネルギー消費機構との組合せによって過大な応答を防ぎ、地震が去った後の残留変形が

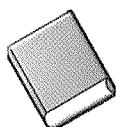
プレストレスの復元性によってほとんど無い構造である。このような構造に焦点をあてた研究が米国およびニュージーランドで行われており、プロジェクトの名前から、PRESSS 建物と呼ばれており、その特徴的な履歴復元力特性はフラッグシェイプと呼ばれている。一方、地震を対象とした構造性能の観点から以外にもいろいろな将来性がある。とくに最近のような材料価格（とくに鋼材）の高騰が続くと、従来は鋼構造と相場が決まっていた高層事務所ビルにも、PCの出番が巡ってきそうである。大スパンPC梁とセンターコアシステムの組合せは、大きな可能性を秘

めた構造形式であり、わが国でも今後大きな展開が期待される。

4. 結 語

PC構造にかかわる技術者すべてが大きな夢をもって新しいPC構造を開拓していくことが、今までのPC技術協会50年の歴史を基礎として、更なる発展を図る唯一の方法である。立ち止まることは停滞を意味し技術の陳腐化を招く。会員諸氏の今後の活躍を大いに期待する次第である。

【2008年12月15日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成20年度 PC 技士試験講習会

資料のほか、過去3年間の試験問題、正解および解説が掲載されています。
現金書留または郵便普通為替にてお申込みください。

(平成20年6月)

定 価 6,000円／送料500円

会員特価 5,000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