

プレストレスト コンクリート 建築物の構造計画 (1)

本 岡 順 二 郎*

1. ま え が き

わが国で建築構造物に PC 工法が利用されはじめてから、すでに 10 年を経過した。その間実施例も年ごとに増加しつつあり、過去 3 年間で工事量は 5 倍以上に達している。しかしながらその絶対量は少なく、土木関係の PC 工事量の約 8%, 建築の全鉄筋コンクリート造延面積の 1.3%, 鉄骨造の 1.8%, 鉄骨鉄筋造の 5.2% 程度にすぎない。RC や鉄骨と同列の大きな特徴を有している構造としては、はなはだ利用度が少ない——いい変えれば、今後さらに発展する余地を残している構造——といえよう。

PC 工法の利用度が少ない原因にはいろいろの事情があろうが主なる原因としては次の事項が考えられる。

- a) 比較的新しい構造(歴史的には RC とほとんど同じであるが)であるため、使用者側や構造形式を決定する設計事務所の認識が薄い。また RC 的な構造計画や小規模の構造物に適用したのでは工費が割高になる。
- b) RC の場合などより設計と施工が密接な関係にあり、また施工には高度の技術を必要とする。
- c) 運搬、建方に大規模な作業や機械を必要とすることが多く、施工の機械化がまだ不十分である。
- d) 従来、一体構造が耐震の必須条件であったため、プレキャスト部材を使用する慣習がなかった。

この講座は主として a) を対象として設けられたものであるが、本誌の読者が PC 専門技術者や PC に関心の深い人達によって構成されているので、この際建築物の構造計画の中で PC 工法がいかに利用されるべきかを検討することをも目的の一つとしたものである。

2. 構造材料選定のための要素

(1) 材料としての強度

構造物の計画の最初に決められる構造材料の選定の最も大きな要素は通常の場合経済性であって、意識するしないにかかわらず、強度経済比 $\frac{\text{材料の許容強度}}{\text{所要経費}}$ が大きくなるように選ばれている(この場合の所要経費とはその

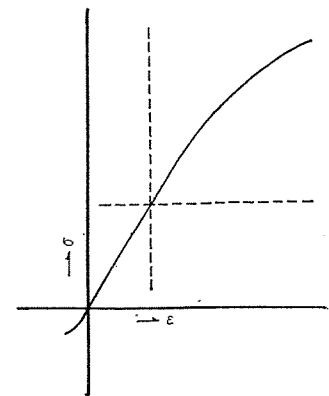
材料の費用と部材になるまでの施工費である)。

鋼材や木材では圧縮にたいしても引張りにたいしても強度はほぼ同じ値をとるが、コンクリートでは引張りにたいする値が圧縮の 1 割程度となっている。圧縮、引張りの両応力が存在する曲げ材で、引張側に鉄筋を配置することにより引張側の強度経済比を大きくしたのが鉄筋コンクリート曲げ材であって、この構造が多用されるのもこの比が大きいことによるものである。このような観点から PC を考えてみよう。

PC に関する多くの本の第一ページは PC の原理、概念に始まっていて、たるのたがや両手で押えた数冊の本などで説明されているが、ここでは応力—ひずみ曲線の上で説明してみよう。

コンクリートの応力—ひずみ曲線は 図—1 のように引張側が圧縮側の 1 割以下

図—1



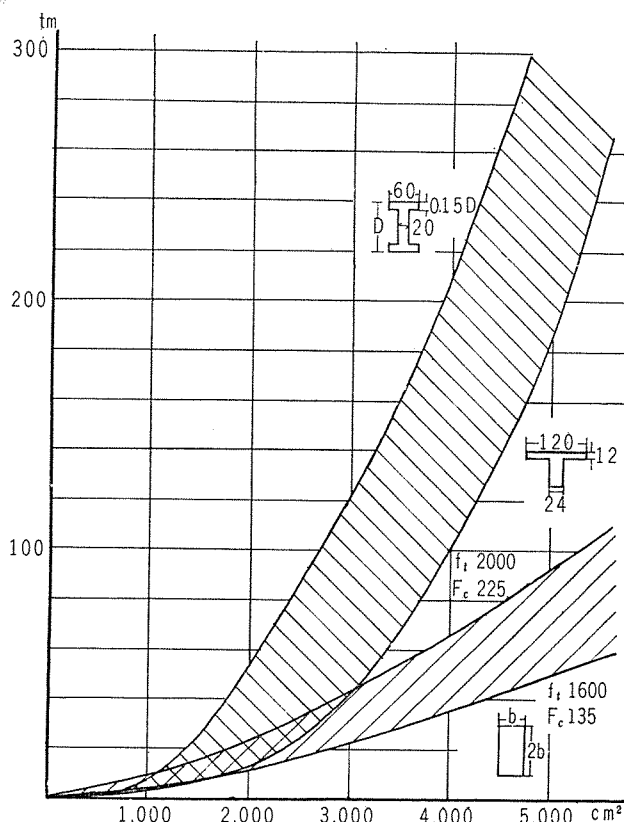
である。このような材料に圧縮力を与えることにより座標軸を圧縮側の鎖線の座標軸まで移動させることができる。この圧縮力が、プレストレス力であって、原点移動は通常圧縮強度の 4 割程度である。その後コンクリートの収縮、クリープと PC 鋼材のリラクセーション

によって、この点は時間とともに多少移動する。最初の移動量を大きくその後の移動量を小さくすることができれば、このコンクリートは原点を中央付近にもち、普通のコンクリートとは異なった力学的性質を有する新しい材料に生れ変わったことになるわけである。そして最初の原点移動を大きくとりうるためにのみ高強度のコンクリートの必要性が生じ、その後の移動量を小さくするためにのみ伸びの大きい鋼材とクリープや、収縮が小さいコンクリートが必要となるのである。鋼材のヤング係数は品質にかかわらず一定であるため、伸びを大きくするためには結局高強度の鋼材を使用することになり、クリープや収縮を少なくするためには高強度で密実なコンクリートを用いることになる。

このようにして生れた新しい材料——プレストレストコンクリート——は引張り、圧縮の両方向に十分な大きさの強度経済比をもちうるから、力学的性質の上ではむしろ鋼材、木材に近いものといえる。しかし PC 鋼材の量と位置を変えることにより必要に応じた原点移動が可能となり、耐力を鋼材の調節で行なうという点では RC に近く、結局、構造計画の上では鉄骨と RC との中間的

* 日本大学講師, 理工学部建築教室

図-2



な性格が PC であると考えてよいようである。なお、土木、建築の両 PC 規準では“プレストレスを与えられた一種の鉄筋コンクリート”と定義している。

強度経済比の要素の一つである強度重量比 $= \frac{\text{許容強度}}{\text{比重}}$ は木材が 120~250、鋼材が 200~250、コンクリートが圧縮にのみ 20~30 kg/cm² であるのに対して新しい材料と考えた PC では圧縮、引張りに 50~80 kg/cm² で、コンクリートの 3 倍、鋼材の 1/3 程度である。このことによって PC は RC よりかなり軽量化し、曲げ材では載荷能力が増し、あるいはスパンを大きくとることが可能となる。例えば 図-2 は RC と PC の曲げ材を通常使用される断面形で比較したもので、両者の断面積を等しく（したがって、はり自重による曲げモーメントは常に等しい）としてある。PC ばかりでは同じ断面積でも断面形の選び方によってその許容モーメントにかなりの差が生ずるが、図の I 形は有利な場合、T 形は不利な場合で一般にこの中間にある。RC はりは $r=0.4$ で釣合鉄筋比として材料強度の最高・最低をとってあり、一般にこの中間にあるものとして PC と RC を曲げに関してのみ比較すれば次の結論が得られよう。

a) 曲げモーメントが小さい範囲では PC は不利で許容モーメントの RC との境界は 10~20 t・m 付近である（経済性での境界はもっと大きくなる）。

b) この境界以上では、同じ曲げモーメントに対して

PC 断面は RC 断面の 50~60% であり。

c) この境界を越える分のモーメントに対して、同じ断面積で PC は RC の 4~5 倍程度の載荷能力をもつ。したがって加えられるモーメントが大きくなるほど PC の有利さが増す。

PC 曲げ材が以上のような能力をもつのは引張側に大きな強度重量比をもっているからで、偏心が大きくない柱では引張耐力を必要としないから、曲げの小さい圧縮材で PC を使用しても RC より特に有利とはならず、経費の上では一般に割高となる。

PC が有利となるのは引張応力が作用する部分であるから、せん断力に対してもプレストレスは、有効となる。PC と RC の同じ矩形断面で比較すれば $Q_{RC} = f_t b j$, $Q_{PC} = \frac{I}{S} b \sqrt{f_t^2 + \sigma_g f} = \frac{2}{3} b D \sqrt{f_t^2 + \sigma_g f}$ でコンクリート強度を 225 および 500 kg/cm²、平均プレストレスを 80 kg/cm² とすれば $Q_{PC}/Q_{RC} = 22.4 bh/5.8 bh = 3.86$ となり、PC は約 4 倍の載荷能力をもつことになる。したがって PC 部材がせん断力で定まったり、ハンチが必要となることはあまりない。

3. 耐久 性

構造物の設計の条件には当然耐久性を考慮されるべきであるが、実際にはこのことにほとんど注意が払われていない。約 30 年を経た RC ラーメン造建物を調査した結果、コンクリート内部の鉄筋が腐食して消失していた例もあって、打込んだコンクリートの質と建物の条件によっては構造上の寿命が案外短かいことがある。

鋼材の腐食を防ぐのは鉄骨造の場合、防錆塗料、RC や SRC の場合はコンクリートかぶりであり、その質と厚さによって効果が異なるのはもちろんである。防錆能力上でのコンクリートの質とはアルカリが年月とともに中性化してゆく速度（中性化が必ずしも発錆の原因とはならないという実験結果もある）と表面に発生するひびわれで定められる。中性化の速度は富調合、低水セメント比、密実なものほど、つまり高強度のものほど遅くこの点では PC はすぐれた能力をもっていることになる。RC では通常の場合、鉄筋の付着、耐火上のこともあって中性化に対して十分なかぶり厚さをもっているが、ひびわれが発生して鉄筋に到達すれば、コンクリートの品質に関係なく錆が発生し、他の部分では健全でもきれつ部分は円錐状に腐食する。このような有害なきれつ幅は 0.2 mm 以上といわれているが、この程度のきれつは普通の RC ラーメン材ではあまり見られず不同沈下などにより壁にはよく発生している。コンクリートの収縮によるヘアークラックはこれより小さいが、RC では各所に発生している。PC ではコンクリート

の引張応力が0か、少なくとも許容引張応力以下となるように設計されるから、常時荷重のもとできれつが発生することはないし、たとえ非常時荷重によってきれつが発生しても常態に復した後きれつは閉じる。したがってきれつの点でも中性化の点でもRCよりすぐれた能力をもっていることになり、腐食を避ける目的でPC造を採用した肥料工場の例がある。実際構造物でのRCとPCの耐久性の比較例はまだないが、フランスで製作されたRC電柱が30年で使用に耐えなくなったのに、同時に製作されたPC電柱は健全であるとのことで、近年汚水槽がPCで作られているのも一つは耐腐食性能の良さによるものであろう。

4. 耐火性

PC部材の耐火性能に関するデータは各国に大型の炉が完成するとともに集まりつつある。最近のPCI誌に従来の試験データがまとめられていて、本誌の文献抄録に出される予定であるから、ここでは簡単に述べておく。

鋼材が高温度になると引張強度や弾性限界が低下し、曲げ材の場合にはその載荷能力が低下する。そこで通常引張強度が1/2に低下するような温度をもって限界温度としている。RC用の軟鋼では550°C、PC鋼材では400°C付近がこの限界温度である。したがってPC部材の耐火性能はRC部材に劣り、かぶり厚さはPCの方が大きく要求されることになる。しかしながらRC用鉄筋の限界温度の基準を引張強度にとるのは誤まりで、弾性限界の低下が1/2になる温度を限界温度にとるべきで、この場合にはPCとRCとの耐火性での差はないという主張もある。

わが国の耐火規準は等級はあっても耐火試験法とその判定規準が不明確であるが、取扱い上はかぶり厚さ5cmでRCと等価とされている。建築学会PC規準におけるラーメン材のかぶり厚さ5cmも、特に耐火性についてふれてはいないが、これらを考慮して定められたものである。厚さの薄いダブルTスラブは耐火構造として認められていないので、必要ある場合は天井を吊るか耐火被覆を行わなければならない。

なお、はりの耐火性能はかぶり厚さだけでなくスターラップや組立鉄筋の量にも左右され、コンクリートのはく落を防ぐので、変形にも大きな影響があるようである。

5. 組立構造

RCが構造部材として使用される時小規模な場合を除いては、必らず現場での一体打ちとなるのに反して

PCでは組立工法を採用することが多い。工場や現場で製作した部材のブロックをプレストレスで一体材とすることもあり、建方能力を超える場合には所定の位置で通常のRC工事と同じように部材を製作したのちプレストレスを与えて構造を一体化することもある。一方PC工法では導入されるプレストレスが正確であることを必要とするから、導入の操作を行なうときには単材(静定)となっていることが望ましい。したがって上記のような組立工法が可能であることはPC構造の大きな特徴であるとともに、常にある程度の組立工法をとらざるを得ない点では欠点となることもある。つまり構造物が静定でないかぎりは導入プレストレスの一部が余力になってしまうので、理論的にはこの余力が計算できても、実状との誤差が大きな影響を与えるような場合には部材を個々にプレストレスしたのちに構造を一体化する方が望ましいことになる。組立工法が建物の工期、平面計画、経済性、施工上の問題などに原因して採用された場合はよいが、プレストレスを正確に導入する目的のみ採用するのでは、工程が増す分だけ欠点となってしまう。いずれにしてもプレストレス導入に関して工程が増したり作業順序が限定されたりするので、これらを構造計画の最初に考慮しておかなければならない点はRCの構造計画と異なってくる。また導入に関する多くの工法が工夫されているので、これらの知識がPCの構造計画にとって必要となる。

6. 安全性

PC部材の材料的信頼性は高く、コンクリートの変動係数は工場管理の場合0.08、現場施工の場合0.15程度を目標として施工されている。鋼材の信頼性も現在では問題なく(PCストランドが多量輸出されている)、前にも述べたようにプレストレス導入時には常時の引張力よりも大きな力で緊張され、一種の荷重試験が行なわれるわけであるからその信頼性は高い。

部材としては破壊までの変形が大きく、はりではひびわれ発生までにスパンの0.1~0.2%の変形、破壊時にはRCの10倍近い2~3%の変形を示す。さらに曲げ破壊がせん断破壊に先行するように設計されるから突然破壊を起こす危険は少ない。一方、破壊荷重の大きさはプレストレスの有無に関係ないから、きれつ発生から破壊までの荷重の割合はRCの方が大きい。

PC部材はRCにくらべて破壊近くまでかなり弾性的性質を保持するので変形の復元性が大きく、破壊荷重の95%を載荷したのちでも、たわみの半分以上の復元を示す。きれつ発生後も弾性的性質を有する半面きれつによるエネルギーの吸収が小さい点は耐震設計などで考

慮する必要がある。

荷重安全率をいくらに定めるかは材料と施工の信頼性や荷重の性質によるもので、各国で種々の定め方があるが、建築学会規準ではPC部材のひびわれに対して1.3倍、常時荷重に対して2倍、地震に対して震度0.3などと定めている。RCの曲げ破壊安全率が1.5倍程度であるからかなりきびしく、半面部材としては安全度が高いことになる。

前に述べたようにPC部材では断面が少なくてもよいので、ヤング係数が高い(RCの1.5倍)ことを考慮しても剛性が小さくなる。したがってRCにくらべて変形が大きく固有周期が大きくなり、また弾性的性質を有することから振動の減衰が小さい。変形はスパンの3乗または4乗に、固有周期は2乗に比例するので、スパンの大きいPCはり、この傾向がさらに助長される。これらのことは通常の建物で問題になることはほとんどないが、特に振動障害を問題にする場合や特にスレンダーな場合には考慮する必要がある。

PC部材では断面が小さくはなるが通常の場合、座屈が問題になるほどではない。PC鋼材の圧縮力は部材を真直ぐにするように働いているから座屈に考慮する必要はない。

構造の一体性はPC構造の場合プレストレスが作用している限りは、むしろRC構造より完全と考えてきつつかえない。ただし部材断面が小さいのでRC構造では問題とならないラーメン隅角部などには注意しておく必要がある。このような部分の応力は正確に計算できない場合が多いし、PC構造ではこの部分に定着端などの局部荷重が加わるからである。

不同沈下などRC構造で計算上予期していない条件に対してはPC構造でも同様に計算を行っていない。長期間の変形に対してクリープが追随する点では両者とも同じであろうが、プレストレスが変化することによりきれつ発生時期は多少影響を受けるかもしれない。PC構造はスパンがRC構造の2倍程度となることが多いから、不同沈下による部材の回転はRCの半分程度となり、むしろ影響を受ける割合はRCより小さくなる。

7. 工 期

工期もまた構造材料、形式の選定にとって重要な要素である。

工場製作の部材によって組立構造を行えば工期の短縮は可能となるはずであるが、現在のところ、かならずしも大幅な工期短縮が実現してはいない。しかしながら、現場練り現場打ち → レデーミクスト現場打ち → 工場製作現場組立て、が将来の建築生産のビジョンであ

ろう。輸送、建方、現場段取りなどが進歩するとともに工期の大幅短縮も実現するものと思われる。構造計画はまたこれらの実状に合わせて立てられるべきで、結局、構造計画立案者が輸送、建方の方法や限界、施工段取りなどの広範な知識を要求されることになる。現状では小規模の部材を除いて現場製作のポストテンションで行なわれることが多く、工場などの駆体工事は4~5ヵ月で完了している。PC工事に限らないが、工期を短縮する一つの方法は少種類部材の多数生産で、このことが結局工費の低減をもたらす。PC構造はこのような大量生産に適した構造の一つである。

8. その他の問題

PC用コンクリートは高強度であるため外装のための目荒し、ドライビット打込みなどがRCに比較して困難である。その半面かならず振動打ちを行なうのでコンクリート地はだは完全で、打ちはなしコンクリートとして使用する場合には好都合である。

設備関係の発達とともに有孔はりとなることが多くなってきたが、PCはりではRCのような大きな孔をあけることは、ウェブを広範囲に厚くする以外には不可能である。

RC構造ではかなり無神経な改造や補強が行なわれているが、PC構造では十分な注意をする必要がある。RCでは荷重の軽減は一般に安全側であるが、PCでは必ずしも安全側とは限らないことが多い。しかしPC構造では部材の交換ができる設計も可能で、実際に火害を受けた部材を交換した例もある。

以上述べたような各種要素にもとづくとき、構造計画におけるPC構造のイメージを浮べることができる。

1. 大スパンでスレンダーなラーメンやシェル
2. せまい敷地に工場製作の部材で行なう組立構造
3. 建方機械が活躍する工期の短い工事
4. 同一部材が多数使用されている低工費の建物

これらの構造計画の詳細について進めてゆきたい。なお、建築構造計画の参考書として次をあげておく。

参 考 文 献

- 1) Y・ギヨン・大島・中野訳：プレストレス コンクリート，共立出版。
- 2) 坂・岡田・六車：プレストレス コンクリート，朝倉書店。
- 3) 猪股俊司：プレストレス コンクリートの設計および施工，技報堂。
- 4) 坂 静雄：プレストレス コンクリートの建築構造（60号），日本セメント技術協会。
- 5) 日本建築学会：プレストレス コンクリート設計施工規準・同解説。
- 6) PC工業会編：プレストレス コンクリート イヤーブック，建設文化社。

1963.3.10・受付