

特集

PPC 構造

コンクリート構造物の設計は、常時荷重作用時において曲げひびわれを許す鉄筋コンクリート (RC : Reinforced Concrete) とその発生を許さないプレストレストコンクリート (PC : Prestressed Concrete) に分類され、それぞれ別個の設計体系をもっていた。

昭和 53 年度制定のプレストレストコンクリート標準示方書においては、使用状態での曲げひび割れ幅等により、プレストレストコンクリートをⅠ種、Ⅱ種およびⅢ種に分類していた。そして、昭和 61 年度制定の現行コンクリート標準示方書では、終局耐力が鋼材の降伏で決まるとした場合、鉄筋コンクリートもプレストレストコンクリートも本質的には同じ範疇に属するものであること、プレストレストコンクリートはコンクリートのひび割れ特性を積極的に改善した補強コンクリートである等の理由により、プレストレスング度合いを表す用語は全く用いられていない。

近年、PC の分野では、引張応力の発生を許さないフルプレストレスとコンクリート引張強度を無視する鉄筋コンクリートとの両極端を埋めるため、またこれら両者設計法を限界状態設計法で統一するため、パーシャルプレストレストコンクリート (PPC : Partially Prestressed Concrete) の概念が導入され、その経済的、技術的利点が見直されてきているのは周知のとおりである。

しかしながら、これらの PC から中間領域である PPC へ向かう設計方法とは別に、RC から中間領域へ向かう設計法として、RC 部材のひび割れ性状を改善する目的で PC 鋼材によってプレストレスを与えるとした考え方もある。これはプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC : Prestressed Reinforced Concrete) という和製英語で呼ばれている。このように、使用状態における部材へのアプローチは異なるが、いずれにおいても、終極状態では PC 鋼材と鉄筋が曲げ耐力に寄与するため、曲げ挙動の点では同一であると考えられる。

パーシャルプレストレストコンクリート関係の用語については種々議論があり、統一されるには至っていない。本特集号は、土木および建築の両分野における研究者、実務者に研究報告、施工報告等を依頼し掲載していることより、用語についてはそれぞれの分野で通常的に使用している PPC または PRC をそのまま使用することにした。

なお、巻頭言において六車熙氏、論説において池田尚治氏が、用語に関する傾聴すべき御意見を提示しておられる。これを契機に、当編集委員会としては、この種の用語の使用法に関する議論が活発になされ、統一・収束に向かうことを願うとともに、今後とも、本誌がこれら議論の場として活用されれば幸いであると考えている。

池田 尚治*

1. はじめに

PPCとは Partially Prestressed Concrete の略称であり、また、PRCとは Prestressed Reinforced Concrete の略称とされている。後者は我が国で名付けられた名称である。現在我が国では両者はほぼ同じ概念として用いられているが、PPCの方が世界的に用いられているので、本文では前者のPPCをこの概念に用いるものとする。

プレストレストコンクリートは、高性能の材料を用いて成り立っており、作用荷重のもとでコンクリートにひびわれが発生しないようにした独特の構造形式である。しかしながら、作用荷重のもとで、場合によってはコンクリートにひびわれの発生を許しても構造物にとってはほとんど支障がないこと、およびひびわれの発生を許さないとして設計しても、場合によっては構造物が設計条件と異なる事態となってコンクリートにひびわれが生ずる恐れのあること、などの理由により供用状態におけるコンクリートのひびわれに対する制約条件がそれほど単純でないことが認識されるようになってきた。また、プレストレストコンクリート構造物を設計する場合、コンクリートのひびわれをある程度許容すると、終局限界状態に対する安全度を確保しながら経済的な設計が可能となる場合があることも認識されるようになってきた。

一方、作用荷重のもとでコンクリートのひびわれを許容する鉄筋コンクリート構造に関しては、そのひびわれ

幅の制限が必要なことからそれに若干のプレストレスを導入してひびわれ幅を制御することも可能である。

最近では、プレストレストコンクリートから鉄筋コンクリートまでを同一の概念で包含し、これを構造コンクリート (Structural Concrete) と呼称しようとする提案もある。PPCは、当然のことながらその中のある位置を占めるものとされている。

このように、設計における制約条件に自由度が多い場合、設計者は何を指標として設計すればよいのか判断に迷うことになりかねない。供用性、耐久性および安全性に優れ、かつ、経済的で合理的なコンクリート構造物を設計しようとする場合、プレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートおよびその中間に位置すると言われていた PPC とについて、まず基本に立ち戻って概観することが重要であると思われる。本文はこのような趣旨で、PPCとして、ある設計のレベルを想定されている構造の概念について、その意義と位置付けとを明らかにしようとするものである。

2. パーシャルプレストレスング

我が国では、PCが導入された当初にはパーシャルプレストレスングなる用語は、作用荷重下ではコンクリートの引張強度以下の引張応力度を許す設計の手法として用いられていた。この場合にはコンクリートにひびわれの発生を許していない。一方、作用荷重のもとでコンクリートの引張側に引張応力度の発生を許さない設計手法をフルプレストレスングと称して部材のコンクリートの軸方向応力度を常に正側に保つ条件を示した。

これらの定義は、土木学会のプレストレストコンクリート設計施工指針（昭和30年制定および昭和36年改訂）によっている¹⁾。これは、AbelesやT.Y. Linの著書の中でこのような分類が示されていたからである。

しかしながら、DIN 4227における Volle Vorspannung（フルプレストレスング）、Beschränkte Vorspannung（限定プレストレスング）および Teilweise Vorspannung（部分プレストレスング）の3段階の分類や、1970年のCEB・FIP指針におけるI種、II種およびIII種の分類、ならびにFIPの構造設



* Shoji IKEDA
横浜国立大学
工学部建設学科教授

計指針における full prestress, limited prestress および partial prestress の 3 段階の分類方法が現れるに及んで、従来のパーシャルプレストレッシングの定義はほとんど用いられないようになってきたのが実情である。

猪股博士は「パーシャルプレストレッシング（以下、PPC と呼ぶ）とは、使用状態の最も不利な荷重組合せに対し、環境状態および使用鋼材の腐食に対する敏感性を考慮して定められた許容ひびわれ幅を超えないようにプレストレスの与えられた構造用コンクリートのことであると定義して使用するものとする。したがって、世界的に通用しない PRC なる略語は使用しないのがよいと考える」と述べられた¹⁾。

以上に述べたように、パーシャルプレストレッシングなる用語および概念は、プレレストコンクリートに作用荷重のもとでひびわれを若干許容するが鉄筋を配置してそのひびわれ幅を所定の値以下に制限する手法と、これを別の方向から考えて、鉄筋コンクリートのひびわれ幅をプレストレスの導入によって制限する手法の両方に対して用いることができるものと思われる^{2),3)}。

3. RC と PC との相違

曲げモーメントを受ける RC（鉄筋コンクリート）と PC（プレレストコンクリート）の梁について

単純にその力学的特性を概念的に比較してみる。

RC 梁はコンクリートのひびわれ発生によって若干曲げ剛性が低下するが、ひびわれ幅を制限する鉄筋の引張応力度（鉄筋の許容引張応力度に相当）を経て鉄筋の降伏応力度に至るまでの挙動は弾性的で極めて安定した状態である。ひびわれ幅に関しても、その値は鉄筋の引張応力度にほぼ比例し、急激にひびわれ幅が増大するのは鉄筋の降伏以降である。これらの状況を概念的に示したのが図-1 である。これに対して、PC 鋼材のみが配置された PC 梁の曲げ挙動は、図-2 に示すように、コンクリートにひびわれが発生するまでは極めて弾性的であるが、いったんひびわれが発生すると梁の曲げ剛性は大幅に低下して変形が急激に増大するとともにひびわれの開口も著しい。これは、PC 鋼材の断面積が鉄筋のそれに比べて相当に少なく配置されているためにひびわれ後の断面二次モーメントが鉄筋コンクリートより相当に小さいことによるものであり、また、ひびわれについても 1 か所に集中して発生しやすいため、その幅が著しく大きくなるのである。しかしながら PC 梁の場合には、除荷によりひびわれはほぼ完全に閉じて全断面有効の剛性に戻ることができる。

上述のように、同じコンクリート梁でも RC と PC とでは、コンクリートのひびわれや変形の挙動が大幅に

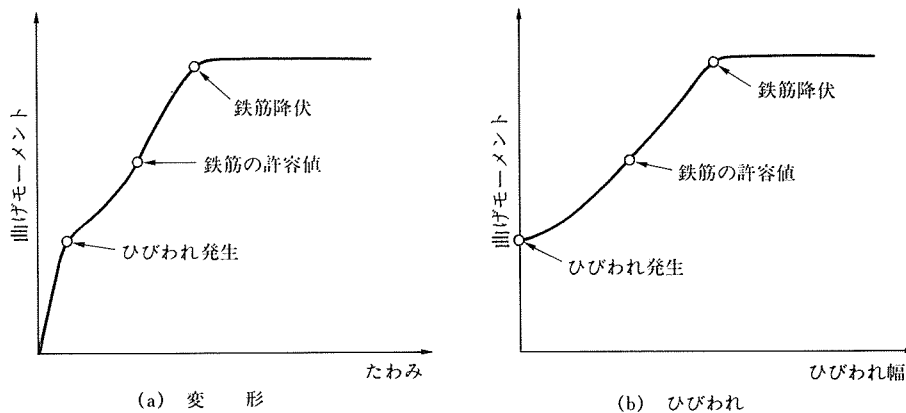


図-1 鉄筋コンクリート梁の曲げ挙動の概念図

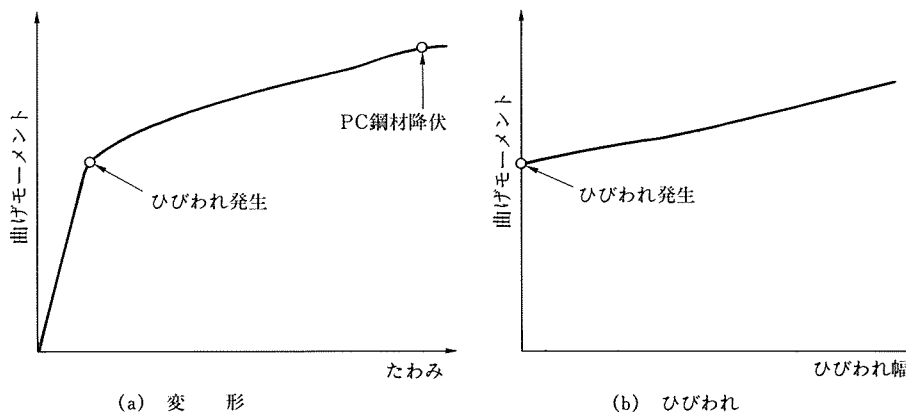


図-2 プレレストコンクリート梁の曲げ挙動の概念図

異なるのであって、RC 梁の場合には設計で仮定した作用荷重を若干上回った荷重状態となっても梁の挙動はそれほど大きく変わらないのに対して、PC 梁では、フルプレストressingに対応して想定された作用荷重が若干増大したり、支承等の状況が設計で仮定したものと若干相違した場合などに梁の挙動が大幅に変化する可能性があるのである。

作用荷重が極めて安定しているか、あるいは設計荷重が実際に作用する荷重より相当に高めに設定されている場合にはフルプレストressingにより PC 梁を設計すれば所期の性能の PC 梁を建設することが可能である。一方、作用荷重の実際の値が、設計値を大幅に超える恐れのある場合には、フルプレストressingで設計することは梁の供用時における性能や耐久性に対して好ましくない結果となる恐れがある。

また、フルプレストressingで設計するために断面に過大なプレストレスを導入すると、場合によっては長期間経過後にクリープ変形が過大になることがある。

過去にフルプレストressingで設計された構造物に種々の問題が生じたことが報告されているが、その主な原因は上に述べた事柄によるものと思われる。

供用限界状態近傍における RC 梁と PC 梁との相違は、上に述べたように相当に異なることは明らかであるが、終局限界状態近傍における両者の挙動も相当に異なるものと考えてよい。なぜなら、鉄筋と PC 鋼材との降伏点の相違は一般に 3 倍程度もあるので、PC 鋼材が若干降伏ひずみを超えても緊張時のプレストレス力により PC 梁は除荷時の復元性が著しい。また、PC 鋼材の伸び能力は鉄筋のその 3 分の 1 程度以下なので、引張鋼材比が小さい場合には終局時に PC 鋼材が破断する恐れもある。

PPC 梁の場合の力学的挙動は、RC 梁と PC 梁との中間的なものと考えてよい。

4. 設計荷重

供用限界状態 (Serviceability Limit State) における設計変動荷重は、道路橋、鉄道橋あるいは容器構造物、防波堤など、構造物の構成する施設の種類によってそのレベルが異なっており、一般にはそれぞれの施設の設計仕様書によってノミナルな値が与えられている。したがって、設計変動荷重と、実際に構造物に作用する荷重との関係は、個々の設計仕様書によって相当に異なっているものと思われる。そこで、ある企業体がある寸法の PC 梁を PPC で設計したとしても、実際の荷重が作用する状態ではフルプレストressingの状態となっていることもあり得るのである。逆に、フルプレストressingの状態を想定して設計された PC 梁が実際の作用

荷重のもとでコンクリートの引張側にひびわれが発生するような状態となるのであれば、極めて不具合な挙動を示すことになるのである。したがって、供用限界状態における設計荷重のレベルとその性質とをよく把握することが PC 構造物の設計にとって極めて重要となるのである。疲労の影響を与えるような繰返し荷重に関する評価も重要である。単に耐久性から定まる許容ひびわれ幅のみを指標とした設計の考え方だけでは不満足な結果を与えることになるものと思われる。

ほとんどの構造物は、供用限界、終局限界、および疲労限界の各状態に対して安全なように設計されるが、終局限界に達する可能性はほぼ皆無と言ってよい。これに対して供用限界や疲労限界の状態となる可能性は相当に大きく、これらの限界状態に対して十分な検討が必要である。特に PC 構造物は供用限界に対応する荷重に対して PC 部材はその挙動が極めて敏感に変化することを認識する必要がある。PPC 構造の場合にはこの敏感性が PPC の程度に応じて鉄筋コンクリートのそれに近くなるが、コンクリートのひびわれに関しては依然として敏感な状態である。

そこで、安全で合理的な PC 構造物を設計するためには、供用限界状態および疲労限界状態に対応した設計荷重を正しく定めることがまず必要である。単に現在定められている設計仕様書の荷重をそのまま供用限界状態の荷重として用いてフルプレストressingとか PPC とかを論じても本質的な議論とならないことに留意しなければならない。

5. PPC の意義と位置付け

今までに述べてきたようにフルプレストレスで設計された PC 部材が必ずしも高性能なものでないことがわかりただけのものと思われる。しかしながら作用荷重のもとでひびわれの発生が少ない方が耐久性や美観その他の点で好ましいことには違いない。それでは、どのようなことを指標としてコンクリート構造物を設計したらよいのであろうか。

それにはまず建設しようとするコンクリート構造物の目標とする性能を明確に定めることである。鉄筋と PC 鋼材とでは腐食に対する鋭敏性が異なるので、コンクリートのひびわれ幅に関しては同一の許容値を定めることは適当でない。そこで、RC の場合には常時の死荷重状態において鉄筋の引張応力度あるいはひびわれ幅をある値以下におさえ、さらに供用限界状態の荷重に対してはこれに対応した許容値を定めるのである。一方、PC 鋼材が配置されている場合には常時の死荷重状態でフルプレストレスの状態とし、供用限界状態の荷重に対しては鋼材の応力の増加量あるいはひびわれ幅を耐久性に関

連させて定めればよいのである。次に PC 鋼材が配置されている場合には、供用限界状態における設計荷重の変動を考慮して設計荷重の 1.4 倍程度の荷重に対して部材の性能を確認するのである。これにより、従来フルプレストレスングで設計された PC 部材に生じていた不具合を除くことができると思われる。また、コンクリートのひびわれ発生後に急激に剛性が低下しないように断面の最少主鋼材量を定めることも必要である。このような設計のプロセスを考えれば、RC と PC との設計上の連続性も保たれるものと思われる。

プレストレスのレベルについては、2. で述べた FIP の構造設計指針の用語を適用し、例えば、死荷重のもとではフルプレストレス状態、通常の変動荷重のもとではリミテッドプレストレスの状態、および供用限界状態では PPC の状態といったように、作用する荷重のもとで、PC 部材のプレストレスの程度を表す用語として活用すればよいのである。

PC 部材の設計では従来より全断面有効として断面計算が行われてきた。これは PC がフルプレストレスを基本として出発したからと思われる。しかしながら PPC の設計概念が登場するに及んで PPC にはこの方法の適用が疑問視され、むしろ PPC には従来から用いられている RC 方式による計算方法が用いられるようになった。そのため、PPC と、リミテッドプレストレス（限定プレストレス）との間に設計上大きな隔りが生じることとなった。そこで、これは全く著者の私案であるが、PC と RC との共通的な設計手法の点から考えて、すべての断面計算でコンクリートの引張強度を無視する方式を採用すればよいと思うのである。ただし、全断面有効の計算方法は概略の計算値として大いに活用することが

できる。

以上のように考えてくると、鉄筋や PC 鋼材の力学的特性、コンクリートの品質、耐久性、構造物の置かれる種々の条件のもとで、最も適切なコンクリート構造物が設計できるものと思われる。

6. おわりに

プレストレストコンクリートは長大斜張橋や大型石油貯蔵施設などにも活用され、その用途は大いに広がっている。また、ブロック工法や外ケーブル方式なども注目されており、基本的な構造設計理論を改めて見直す時期にきているものと思われる。PPC 構造に関する検討もその現れであり、プレストレストコンクリートの今後の発展にとって基本的な概念の一層の明確化は重要である。

本文はこのような趣旨に基づいて PPC 構造について概説を試みたものであるが、著者の私見によるところが相当に多く含まれていることをお許しいただきたい。本文が今後の議論のたたき台となって PPC 構造を中心としたプレストレストコンクリートの設計の論理が大いに発展することを切望する次第である。

参 考 文 献

- 1) 猪股俊司：パーシャルプレストレストコンクリートの歴史的背景，コンクリート工学，Vol. 25, No. 7, pp. 6～12, 1987年7月号
- 2) 猪股俊司：パーシャルプレストレストコンクリート部材断面の設計法，土木学会論文集，第348号，V-1, pp. 1～12, 1984年8月
- 3) 西沢紀昭：パーシャルプレストレストコンクリートの実用を盛んにするために，プレストレストコンクリート，Vol. 26, No. 6, pp. 8～11, 1984年11月，12月号