

将来のPC構造 —— 建築の立場から ——

渡邊 史夫*

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下 PC）構造に携わる技術者には、PC 構造の特徴を十分に理解し設計・施工に反映させていく能力に加えて、他種構造との複合も含めた総合的判断のもとで PC 構造を選択していく姿勢が必要である。“己を良く知り適所で能力を発揮すること”が重要なのである。

PC 構造は難しいという話をよく聞く。構造設計理論が多少複雑なことに加えて、定着部を含めたプレストレス導入工法の多様性、慣れ親しんだ鉄筋コンクリート（以下 RC）構造とは異なった施工工程等、幾つかの理由が考えられる。教育機関で PC 構造を講義しているところが少ないという事実もある。PC 構造は、巷で言われているように難しい構造であろうか。頭から難しく複雑な構造形式だと決めつけずに、自らが扱ってみようとする姿勢さえあれば PC 構造は難しくない。一度足を踏み入れるとその多様な可能性に驚かされ、興味は尽きない。また、PC 構造を扱う研究者・技術者は他種構造も理解していなければいけない。PC を用いた建築構造では、多くの部分が RC 造であるし、他種構造との合成構造にも多くの可能性がある。また、RC、PC、鉄骨鉄筋コンクリート (SRC)、鉄骨等の各種構造形式は、共に競い合い、助け合い発展するものと理解すべきである。

本稿では、PC 構造とその将来について著者の考えを

述べるが、それが健全な形での将来発展に少しでも役立てばと考えている。

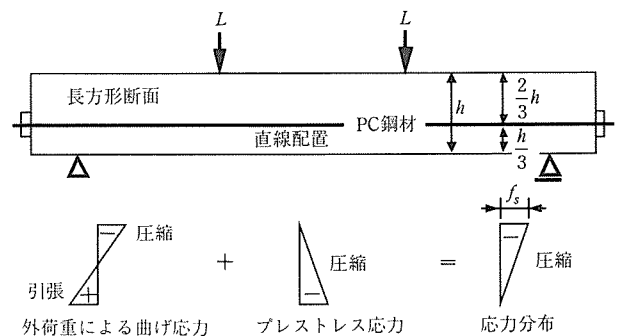
2. PC 構造の特徴

PC 構造は PC 部材と RC 部材の両者で構成されることが多く、その構造挙動は両者の複合形態として表れる。ここでは、PC 造建物全体の挙動を左右する PC 梁の挙動に焦点をあてて説明する。

コンクリート構造のパフォーマンスを考える一つの尺度として、コンクリート断面のいかに多くの部分を有効に利用しているかがある。図-1 に PC 単純梁の中央断面でのコンクリート応力変化の例が示してある。断面の核半径の位置に PC 鋼材を配置してあり、長期荷重 P のもとでコンクリート断面の下端応力がゼロとなるいわゆるフルプレストレスの状態となっている。簡単化のために自重の影響は無視しており、プレストレス導入時には断面下端コンクリート応力が圧縮、同上端応力がゼロとなっている。次に長期荷重による曲げ応力が加わり、圧縮縁応力が許容圧縮応力 f_s に到達し、下端応力はゼロとなっている。すなわち、長期荷重によるコンクリート断面応力変化は全断面（ひび割れがない）にわたって生じており、コンクリート断面を 100% 有効に使用している。鉄筋コンクリート梁断面では、曲げひび割れが早期に生じ、長期荷重によるコンクリート応力変化が中立軸より上方でしか生じず、コンクリート断面を有効に利



* Fumio WATANABE
京都大学
工学研究科建築学専攻



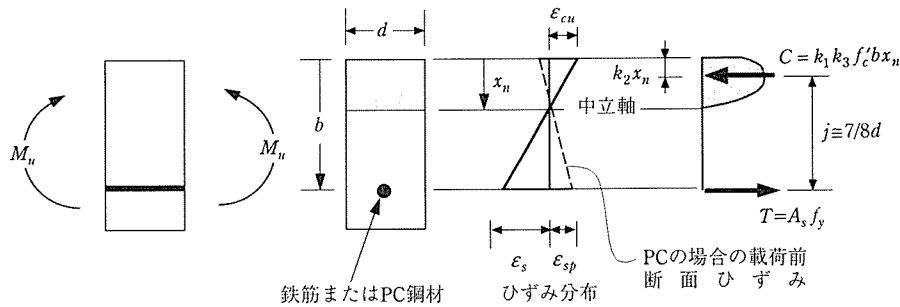


図-2 PCおよびRC梁断面の曲げ終局状態

用していないのと対照的である。すなわち、長期荷重に対して、PC構造（特にフルプレストレス）は極めて有効な構法といえる。

一方、終局限界状態に対しても同様のことが言えるのであろうか。答は、否である。なぜならば、終局限界状態においてはコンクリート断面には曲げひび割れが発生しており、鉄筋コンクリート梁断面と同様な状態になっているので、PCであるがゆえの利点はない。図-2にPCまたはRC梁断面が、引張鋼材（鉄筋）が降伏した後、圧縮縁コンクリートの圧縮破壊により曲げ終局状態に達した場合が示してある。PC梁もRC梁も、引張鋼材（鉄筋）が降伏したのち終局状態に達する場合の終局曲げ強度は、 $M_u = 7 A_s f_y d / 8$ で与えられ、図-2に示すように中立軸より上方のコンクリートのみが有効に働いている。ここで、 A_s ：PC鋼材または引張鉄筋断面積、 f_y ：PC鋼材または引張鉄筋降伏強度、 f'_c ：コンクリート圧縮強度、 d ：PC鋼材または引張鉄筋の有効深さであり、プレストレス力は曲げ強度 M_u に影響しない。変形能力について考えると、鉄筋またはPC鋼材の降伏引張力が同じであれば、 $C=T$ の条件より、中立軸深さが、 $x_n = A_s f_y / (k_1 k_3 f'_c b)$ で両者とも同じとなる。すなわち、圧縮強度限界ひずみが一定値 ϵ_{cu} であること、およびプレストレス導入によるPC梁の荷前断面ひずみが小さいことを併せて考えると、PCおよびRC梁断面とも終局時の変形能力は、曲率で表すと $\phi_u = \epsilon_{cu} / x_n = \epsilon_{cu} k_1 k_3 f'_c / p_s f_y d$ となり、RCおよびPC梁断面ともに変形能力は、いわゆる鋼材係数と呼ばれる $\omega = f'_c / p_s f_y$ で評価できることになる。ここで、 p_s ：鋼材比（鉄筋比）で $p_s = A_s / b d$ 、 b ：梁断面幅。

一方、地震荷重のように繰返し応力をうける場合の建物の応答を左右するPCおよびRC梁の履歴復元力特性はどのような形態をしているのであろうか。図-3にPC梁が繰返し曲げをうけるときの履歴復元力特性の一例が示されている。図-3は、PC鋼材により圧着接合された片持ち梁先端部に繰返し荷重を加えた場合の荷重たわみ曲線（文献1）であり、PC鋼材のみが配置された最もPCらしい履歴復元力特性である。また、図-4

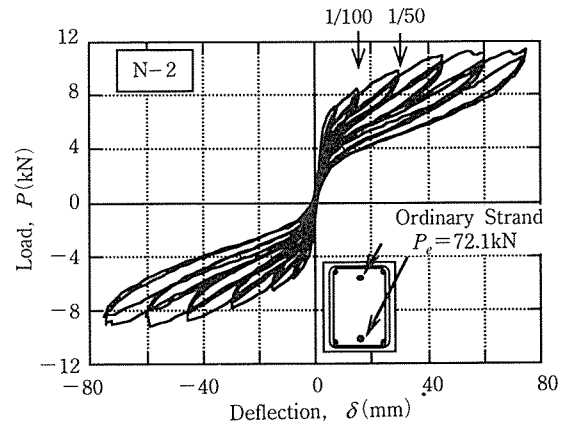


図-3 PC鋼材のみを有する片持ち梁の履歴復元力特性例

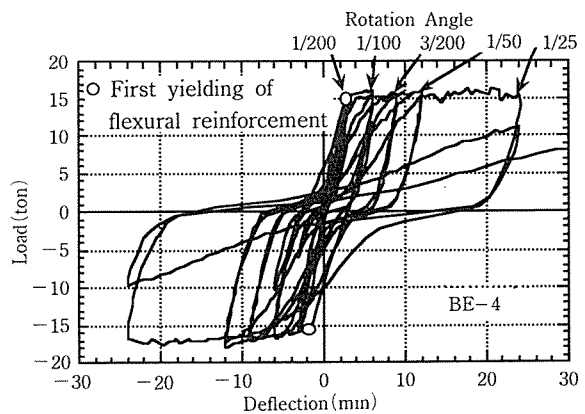


図-4 鉄筋コンクリート片持ち梁の履歴復元力特性例

は、十分にせん断補強された鉄筋コンクリート片持ち梁に繰返し荷重を加えた場合の履歴復元力特性（文献2）の例を示す。これらの図の比較より、PC梁は、部材角で1/50を超えるような大変形を経験した後も徐荷曲線は原点指向を示しており、残留変形は極めて小さいこと、RC梁では、部材角で1/50を超えるような大変形を経験した後、荷重の小さいところでヒンジ部のせん断変形と接合部からの軸鉄筋抜け等によってスリップ形の履歴曲線を示すのに対して、PC梁ではそのような履歴曲線を示さないこと、PC梁の履歴によるエネルギー消費はRC梁に比べると小さいことがわかる。

ここでの比較は、純PCとRCについて行ったが、

PPC と呼ばれる普通鉄筋を PC 断面に配置したものは、PC と RC の中間的な特性を示す。なお、PC 柱については述べなかったが、PC 梁の特性と類似した構造特性を持っている。

一方、プレストレスの利用法として、圧着による部材接合がある。柱—梁間、柱—柱間および梁—梁間等の部材接合面では、接合面に直交する方向の、軸力および曲げモーメントに起因する直応力（圧縮及び引張）とせん断力に起因する接合面に平行なせん断応力を伝達しなければいけない。接合面に直交する方向の応力伝達は、コンクリート間での圧縮直応力伝達および接合鉄筋または PC 鋼材による引張と圧縮応力伝達で容易に実現できる。接合面に平行な応力（せん断応力）伝達は通常、コンクリートシャーク、鉄筋ダウエル作用、軸力または曲げ圧縮応力を期待したコンクリート間摩擦およびその他デバイスによって実現されるが、圧着力（プレストレス）を導入された接合面では、圧縮力と摩擦係数の積で与えられる力が、何ら特殊なことをせずに確実に伝達され得る。すなわち、接合面に導入された圧着力により確保される摩擦抵抗に期待する方法は極めて軽便かつ確実な方法である。また、コンクリートに曲げ圧縮応力が生じないような場所にも用いることができる。すなわち、プレキャスト工法におけるポストテンションによる圧着は極めて有効な部材接合法といえる。

以上とりまとめると、

- 1) 常時荷重に対しては、コンクリート断面を有効に利用できるため、大スパン構造を可能とするとともに、PPC (Partially Prestressed Concrete : プレストレス鉄筋コンクリートと呼ばれ曲げひび割れの発生を許容する構造形式) 梁においては、ひび割れ幅を制御し設計条件に応じた曲げひび割れ幅及びたわみを実現できる (文献 3)。
- 2) 終局限界変形能力は、鋼材係数で評価される。したがって、RC 梁および PC 梁において鋼材係数が同じならば終局限界変形能力に差がない。ただし、スパンの大きな PC 梁等では、鋼材係数が大きくなりやすいので、大きな変形能力を確保するためにはヒンジ部に横拘束鉄筋を配する必要がある。
- 3) 塑性域を含む繰返し応力下では、原点指向型の徐荷曲線を有し、残留変形が小さい。一方、繰返しによる履歴エネルギー消費能力は RC 梁に比べ小さい。
- 4) PC 梁は、大変形領域においてスリップ型の履歴曲線を示さない。
- 5) PPC は、RC と PC の中間的な性質を示す。
- 6) プレストレスによる部材接合は極めて軽便で、プレキャストコンクリート構造に適している。

3. PC 建築の新しい構造設計法

3.1 PC 共同研究プロジェクト

PC 構造は、現在に至るまで幅広く使用されてきたが、いまだ十分に理解され、かつ普及しているとは言えない。理由は、経済的な理由、技術的な理由等種々あるが、その性能を考えるともっと利用されるべき箇所があると考えられる。兵庫県南部地震において、PC 造建物の被害が極めて少なかったことも、PC 構造の将来にとって大いにプラスとなることである。

PC 構造が伸び悩んでいる一方で、RC 構造では「鉄筋コンクリート造建物の超軽量化・超高層化技術の開発プロジェクト」(以下 New RC)、「プレキャストコンクリートラーメン構造プロジェクト」(以下 PRESSS)等、次々と新しいプロジェクトが実施され、それらの成果が実際の設計に反映されつつある。これら成果は、RC 構造に留まらず PC 構造にも大きなインパクトを与えた。成果の全部を紹介することはできないが、PC 構造に関わるものを上げると以下ようになる。

- 1) New RC プロジェクトでは、従来 PC の世界では幅広く（特にプレキャスト製品）用いられていた高強度コンクリートに関する研究が進められ、60 MPa 程度までのものに対しては構造設計上必要な諸情報が整備された。
- 2) 耐震設計に関する考え方が、明快なクライテリアでもって示され、New RC プロジェクトでは 45 m~200 m の高さ範囲の建物に対する、PRESSS プロジェクトでは 60 m 以下の高さの建物に対する実際的设计手法が示された。
- 3) PRESSS プロジェクトでは、部材接合部に対する考え方と接合部設計法が示されており、プレキャスト工法への PC の応用に大いに参考となる知見が得られている。

このような成果をふまえて、PC 造建物のより合理的な耐震設計法を策定し、さらなる普及をはかるための PC 共同研究（建築研究振興協会）が実施されており、平成 10 年度には、設計および施工に関する技術指針が完成される予定である。このプロジェクトでは、過去の New RC および PRESSS プロジェクトの成果、日本建築学会および PC 技術協会等の学術団体、研究者が行ってきたホットな研究成果を採り入れて、より高性能なプレストレスコンクリート造建物実現を目指している。PC 共同研究により達成されるであろう成果は以下のように要約される。

- 1) 大スパン架構による自由な利用空間の実現
- 2) 事務所、商業ビルと住宅が一緒に入れるような複合用途建築物への対応

- 3) 居住性, 耐久性に優れ, メンテナンス経費の軽減につながる高品質建物の実現
- 4) ライフサイクルに応じてフレキシブルな使用形態が可能な高規格住宅の実現
- 5) プレキャスト化による工期短縮, 現場作業の低減, 建築廃材の削減
- 6) 建築コストの低減

平成6年秋から, 平成7年12月までの間, PC造建物(プレキャストPCを含む)のニーズと設計指針作成に必要な研究項目に関するフィージビリティスタディー(FS)が実施され, 平成8年度から本研究(MS)が実施されている。研究では, 設計に関わる問題として, 耐震設計の考え方, 架構の選定, 設計クライテリアの検討, 略試設計, 接合部(部材)要求性能等が, 構造性能に関わる問題として, 履歴復元研究特性モデル, 柱・梁接合部挙動, 部材接合面の性能評価, 梁のせん断特性, 塑性ヒンジ領域の回転変形能力, 導入時不静定応力と終局時への影響, PC鋼材の応力歪特性と付着特性が, また, 工法に関わる問題として, 接合部ディテール, 施工品質管理等が研究されている。このプロジェクトは, PC造建物の普及に大いに貢献するものと期待される。

3.2 PC造建物性能設計

建築物の設計目標は, 与えられた環境条件および耐用期間の下で, 建物に保証した諸特性が損なわれないことである。性質要求を大きく分けると, (1)耐久性, (2)常時の使用性と安全性, (3)非常時安全性と要求機能確保に分類される。この性能要求とその達成度合いが建物の性能を表す尺度となり, 最低限の達成度合いのものは性能が低く, 十分余裕をもって達成されているものは性能が高いと評価されなければいけない。これは, すべての工業製品にピンからキリまでであると同様で, 建物のみが特殊なものとは言えない。今後の建物設計は, 建築基準法・同施行令に基づく仕様書設計から性能設計へ移行すると想定され, 現在〔新構造設計体系〕策定のプロジェクトが進行している。

ここで, 性能設計を実現するために不可欠な技術水準について考えてみる。技術は日々進歩しており完全なものはないので, 現在の技術でできる限りの努力をしていくしか方法はない。要は, 設計に対する方法論の問題であり, 現在の技術水準が十分とは言えないにしても, 性能設計を指向することが重要である。そのなかから新しいものが創造されPC建物がより優れたものに進化していく。現在は, このような方向に変化していくべき時にきており, また, PC構造がわが国に導入されてすでに50年近くの経験を有するので, 仕様書設計から性能設計への移行は十分可能である。このような性能設

計はPC構造にとっては大いに歓迎すべきことである。なぜなら, PC構造は他の構造種別には無い特長を有しているからである。PC構造を発展させていくうえでのポイントを以下にとりまとめた。

- 1) PC構造では品質の高い高強度コンクリートを使用するのが通常であり, また常時荷重下での曲げひび割れが抑制されているので耐久性が高い。一方, PC鋼材を保護しているグラウト材の品質と施工管理は, 耐久性評価の主たる尺度となる。
- 2) ひび割れの発生を抑制できるため, たわみおよび振動障害を防止でき常時の使用性に優れた大スパンによる大建築空間を構成できる。
- 3) 図-3に例を示したように復元性が極めて高いため, ある限度内で最大応答変形が制御されるならば, 地震が去った後の残留ひび割れ幅および残留変形が小さく補修が容易である。
- 4) プレストレスを用いたプレキャスト化は, 工期, 施工性, 品質管理等, 種々の観点からみて極めて有効な手法と考えられる。また, 部材間の応力伝達が容易に実現できるため, 従来のプレキャスト構法以外の新しい構法への発展が期待できる。他種構造との複合化も考えると大なる発展の可能性が秘められている。すなわち, 要求される性能を満足させるためのアイデアを実現するための強力なツールになりうる。

4. ま と め

本稿では, PC構造の特徴, 現状および将来についての考えを述べたが, ここで, PC構造の将来の可能性と

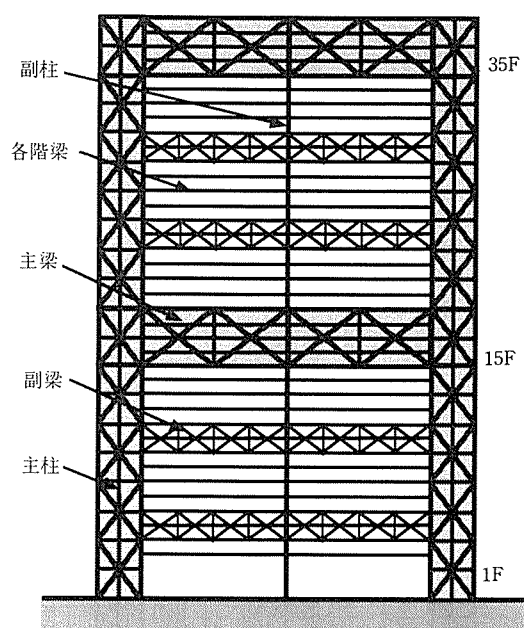


図-5 PCプレキャストトラスによるスーパー骨組み

して、小生の考える夢のような話を紹介し結びとした。図-5は、プレキャストPCによるスーパー架構を示しており、35階建ての複合施設建物である。すべての部材はプレキャスト化されており、すべて圧着による接合形態をとる。各階は、鉛直荷重のみを支持する大スパンPC梁で構成されており、地震荷重は主柱と主梁で構成されるスーパー骨組みで抵抗される。また、このような建物の供用期間は極めて長いと考えられるので、各プレキャストエレメントは交換可能な構造となっている。実現の可能性は定かではないが、このような夢を見ることによって新しい技術の開発も生まれるものと信じている。

最後になりましたが、PC構造に関わる研究者・技術者が、PC構造をよく理解しその発展に努力するとともに、たとえ実現が不確かでも大きな夢をもって前進されることを期待する。

参 考 文 献

- 1) 西山峰弘他：混合ストランドを用いたプレキャスト圧着接合部骨組の履歴性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 16, No. 2, 1994, pp. 811-816.
- 2) F. Watanabe, M. Nishiyama and H. Muguruma : Strength and Ductility of High Strength Concrete Beams Subjected to Combined Bending and Shear, Proceedings of the Third Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Lillehammer, Norway, June 20-23, 1993., pp. 412-419.
- 3) プレストレスト鉄筋コンクリート(3種PC)構造設計・施工指針・同解説，日本建築学会，1986

【1996年9月10日受付】