

PC 建築技術の国際化

高津 比呂人*1・渡邊 史夫*2

各種産業の国際化が進む一方、建築という地域性のきわめて強い産業では、関係法令、設計基規準、さらにはエンジニアに対する資格制度の違いなどにより、実質的な国際化は進んでいない。しかし、学術・技術そのものに国境はなく、お互いに得られた資産を共有し、相互活用していくことは大いに有意義である。さて、プレストレストコンクリート技術は、引張に弱いコンクリートの弱点を補い、通常の鉄筋コンクリート構造では実現できない大スパンや版構造を可能とするものとして海外の非地震国で開発され発展してきた構造技術である。地震国であるわが国では、1957年5月の建設省告示ならびに終局強度設計法に基づく日本建築学会 PC 設計施工規準・同解説（1961年刊行）により、プレストレストコンクリート建物の耐震設計法が提示された。その後、多くのプレストレストコンクリート建物が建設されたが、その復元性の高さが陽に設計に取り入れられることはなかった。もちろん、高復元性は震災を受けるたびに注目され、設計における付加価値としては認められてきたし、研究者による指摘もあった。そこで本稿では、復元性の良さに着目したいくつかの研究成果や実際の設計例を中心に紹介する。

キーワード：プレストレス、プレキャスト、復元性、エネルギー消費

1. PC 建築の発展と地震力への対応

わが国におけるプレストレストコンクリート（以下 PC）に関する草分けの研究は、1941年に運輸省鉄道技術研究所が行ったプレテンション構造の研究で、同時期に福井大学吉田宏彦教授も PC 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。戦後、軍需資材として大量に余ったピアノ線を PC に用いて、1946年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研究を開始し、そこには多くの研究・教育機関が参加した。その後、高強度撚り線または高強度棒鋼を用いた PC に関する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。

PC 建築の実用化に関しては、1957年5月に建設省告示が出され、さらに、1961年に、日本建築学会より PC 設計施工規準・同解説が学術的研究成果を盛り込んで出版され、

PC 建築が実用化された。当初は、本来の PC 構造の特徴である、大スパン構造への適用から始まり、大きな事務空間を必要とする事務所建築やボーリング場建物の大梁に適用された。その後は、PPC 構造（PRC 構造）、アンボンド PC 鋼材、後硬化型アンボンド PC 鋼材等が開発・実用化され、多くの建物に適用されてきた。さらに、コンクリート部材の接合にプレストレス力を用いれば、接合面でのせん断力伝達がきわめて容易に実現できるため、圧着接合と呼ばれる部材接合法を用いた架構が数多く建設され、現在では PC 建築の主流となっている。

さて長期荷重の下で曲げひび割れの発生を許さない RC 構造の実現が、プレストレス技術の出発点であり、曲げひび割れ発生後の非線形域での履歴エネルギー消費の小ささのゆえに¹⁾、PC 建物は耐震性能が劣るといわれていた。図 - 1 に西山らの行った実験結果を示す。また、岡本らによって行われた、同じ保有水平耐力を有する RC 建物と PC 建物の非線形域における地震時変位応答性状に関する比較では、PC 建物の方が応答変位が大きくなることが示されている²⁾。



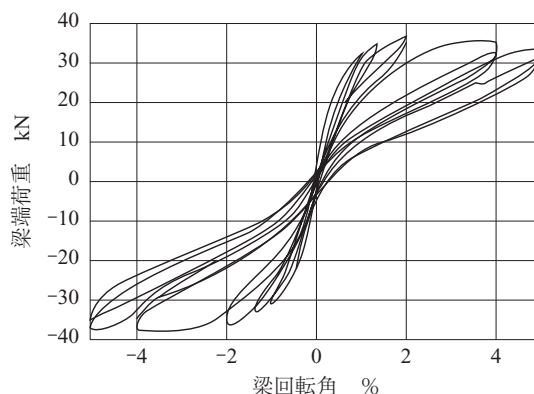
*1 Hiroto TAKATSU

(株) 竹中工務店技術研究所
新生産システム部



*2 Fumio WATANABE

京都大学
名誉教授

図 - 1 PC 梁の履歴復元力特性例¹⁾

長期荷重下で曲げひび割れの発生を許容しないフルプレストレスまたはパーシャルプレストレスからプレストレス力を徐々に減じ、長期荷重下での曲げひび割れの発生を許容する一方、曲げひび割れ幅を制御する、いわゆる PRC 構造に関する指針が、「プレ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」として 1986 年に日本建築学会から出版されている。ここでは、必要曲げ強度確保のための普通鉄筋が梁のクリティカル断面に配筋されており、塑性変形時においてある程度のエネルギー消費が期待できる。すなわち、PC 構造と RC 構造の中間に位置する構造形式である。これによって、フルプレストレス構造から RC 構造までが連続的に設計できるようになった。また、プレストレスのレベルによって異なるエネルギー消費能力に基づいた耐震設計法が、現行の建築基準法施行令に限界耐力法として示されている。

PC 建物が、非線形応答を示したのちも高い復元性を示す点に関しては、地震後の損傷がきわめて小さいという事実より広く認められていたが、設計で前向きに用いられることはなかった。すなわち、RC 構造と同様の大きな履歴エネルギー消費を実現し、かつ、残留変形も小さいという理想的な構造形式実現にプレストレスがきわめて有効であることが予想されながら、それをうまく力学モデルで表現し実用化できなかった。さらに、プレストレスの導入は、RC 構造では避けることのできない柱梁接合部を含む部分架構モデルにおける接合部損傷を低減し、履歴曲線のピンチング現象が大きく改善することが実験によって示されている^{3,4)}。

このような PC 構造の特長を実際建物に適用するための研究は、M. J. Nigel Priestly および John Stanton らの大学研究者と Susie Nakaki および Robert E. Englekirk らの米国の構造設計者らによって実施された。それが 1990 年代初頭に米国ではじまった、US PRESSS (Precast Seismic Structural System) プロジェクトである^{5,6)}。

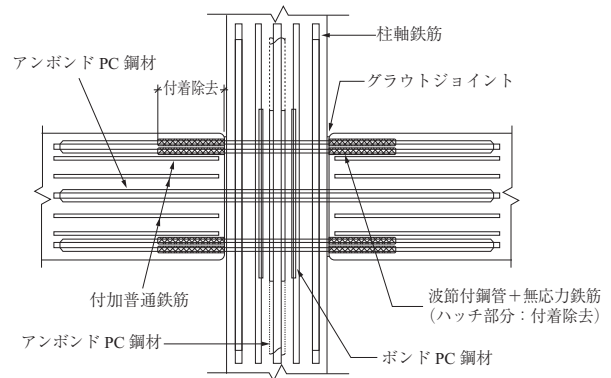
その成果は、国際構造コンクリート連合 (fib: International Federation for Structural Concrete) の耐震委員会が取りまとめた State of the Art Report on The Seismic Design of Precast Concrete Building Structures⁷⁾ に示されている。また、この US PRESSS プロジェクトの成果も含めて、プレキャストプレレストコンクリート構造が高い耐震性能を与える一つであるとの詳細な解説が、Stefano Pampanin によって執筆されている⁸⁾。同時期、わが国でも米国との共同研究という形で US-Japan PRESSS プロジェクトが実施されたが、わが国ではプレキャスト RC 建物が主対象とされ PC 建物は除外された。

この US PRESSS プロジェクトで開発されたプレストレス技術とエネルギー消費デバイスの組合せ例を図 - 2 に、また、期待される履歴復元力特性を図 - 3 に示す。

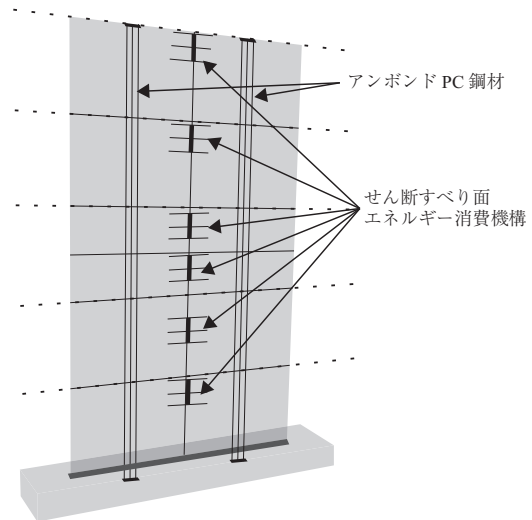
図 - 2(a) は、断面中心に配置されたアンボンド鋼材でプレストレスを導入し、高い復元性を得ようとしている。また、梁断面の上縁と下縁に配置されたパイプおよび接合部に配置されたパイプを貫通させてエネルギー消費のための普通鉄筋を配置し、左側梁、柱、右側梁を接合している。

ただし、塑性域での繰返し曲げによって普通鉄筋に大きな累積塑性ひずみが生じ、破断に至ることを防止するために、梁端部の一部で周辺グラウトとの間に空隙を置き、付着作用を取り除いている。

図 - 2(b) は、2 枚の連層耐震壁にアンボンド鋼材で鉛直方向プレストレスを導入し、地震時に壁がロッキングしたのち、元の鉛直位置に戻るよう設計されている。ただし、それだけではまったくエネルギー消費が生じないので、2 枚の連層耐震壁が水平変位をした時に左右の壁の間で生じるせん断すべりに着目し、せん断すべりによってエネルギー



(a) ハイブリッド骨組システム



(b) 壁システム

図 - 2 PRESSSプロジェクトで開発された架構システム⁷⁾

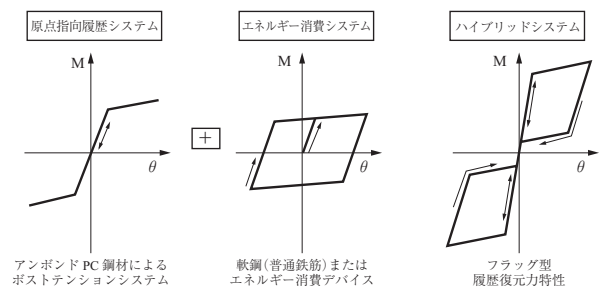


図 - 3 ハイブリッドシステムによるフラッグ型の履歴復元力特性⁷⁾

一消費を起こすデバイスが挿入されている。

図 - 3 には、プレストレスの付与によって実現される原点復帰を示す性質 (Self-Centering)、普通鉄筋やエネルギー消費デバイスによって実現されるエネルギー消費、これらの2つを組合せた場合のフラッグ型 (Hybrid System) の履歴復元力特性が示されており、US PRESSS の目指す建物の地震時力学的性質がきわめて明確に示されている。わが国でも、同様の試みがなされるように期待しているところである。

このように、エネルギー消費デバイスによって耐震能力を向上させるハイブリッド型とはべつに、地盤からの地震入力を低減する免震構造も幅広く PC 建物に適用されている。免震構造では、大地震時にも上部構造を弾性応答範囲にとどめ無損傷とすることができるとともに、地震時の床面の加速度応答を低減できるため、安全であるとともに安心感の高い建物にすることができる。病院、災害拠点、学校など、重要な建物への適用が進んでいる。

2. 実建物への PC 技術の適用

2.1 PRESSS 技術適用建物

(1) パラマウントアパート

図 - 2 (a) に示したハイブリッドシステムを適用した最初の建物であり、建設中から大いに注目された^{9,10)}。39 階建ての集合住宅で最頂部高さは 128 メートルとなっている。柱、梁ともプレキャストであり、外周部柱梁からなるペリメーターフレームが地震力に抵抗する。このフレームの梁には断面中心にストランドを配置し、柱との接合を行うとともに、原点指向型の復元力特性を与えている。建物平面の隅角部では、梁が直角に交わるためにストランドが 90 度折れ曲がる。そのため、柱梁接合部に特殊なサドルを配置し、ストランドにスムーズな角度変化が生じるように工夫されている。さらに外周フレームの短スパン部には、じん性に富んだ鍛鉄からなるエネルギー消費機構が、柱梁接合部に仕込まれている。

PRESSS で開発されたハイブリッドシステムは、塑性変形が接合部分に集中するので、いわゆる現場打ち同等の架構ではないが、このような新しい構造システムが、高い耐震性能を有するかどうかを実験に基づいて判断する方法が米国の ACI 規準 (ACI ITG/T1.1-99 「Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing」¹¹⁾) に定められており、新たな構造システムが開発された場合に、早期に利用できる仕組みが構築されている。

プレキャスト柱のコンクリート強度は 41 - 55 MPa、プレキャスト梁のコンクリート強度は 34 MPa であり、プレキャストエレメントの総数は 2 231 ピースとなっている。施工スピードは、1 フロアー 5 日が標準で上部構造の工期は 16 か月である。柱梁接合部ディテールと建物外観を図 - 4 および写真 - 1 に示す。

(2) San Francisco Public Utilities Commission Headquarters

図 - 2 (b) に示すハイブリッドシステムを適用した 13 階建てのオフィスビルである^{12,13)}。建物外観を写真 - 2 に示す。

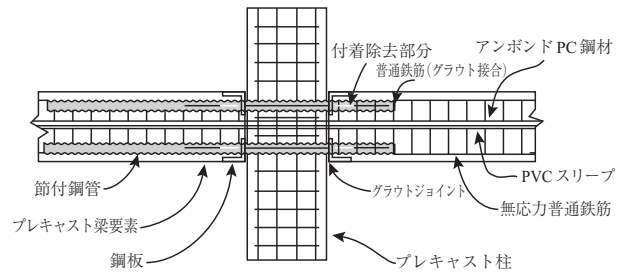


図 - 4 パラマウントアパートの柱梁接合部概要⁷⁾



写真 - 1 パラマウントアパート外観⁷⁾



写真 - 2 San Francisco Public Utilities Commission Headquarters 外観

連層耐震壁に鉛直方向のプレストレスを導入し高復元性を確保するとともに、境界梁に大きな塑性変形能力を付与し、エネルギー消費機構を実現している。とくに、境界梁にはコンクリートの破壊を防ぐための鉄骨による被覆がなされ、また、軸鉄筋が大きな塑性変形領域で破断することを防止するために、想定ヒンジ部において部分的に付着を切り、鉄筋ひずみの集中を避けている。

この建物は壁へのプレストレスの導入方法が特徴的であり、壁の上端からPC鋼材を挿入して、基礎内部でU字型に配置されたシース内を通して折り返され、壁の上部から再びPC鋼材を取り出して緊張するという手法を取っている。また、フライアッシュとスラグによりポルトランドセメントを置換した低炭素型セメントを使用するなど、環境への配慮もなされた建物となっている。

2.2 プレキャストPC工法+免震構造

プレキャストPC工法と免震構造を組合せることによって、大スパンで自由な空間が実現でき、さらに地震発生後の損傷もほとんど無いため、わが国では事業継続性が重視される庁舎や病院など（たとえば、文献14）、15）での適用が広がっている。また、大スパンの架構にすることによって、柱の本数を減らすことができ、柱の軸力を増やすことができるため、免震装置にとって不利となる引抜き力を小さくすることができるとともに、免震装置の数も減少するためコスト削減につながる。

2.3 その他のPC技術の応用

オフィスにおいて、内部に柱の無い広い空間をRC系構造で実現するため、外周部に剛性の高い壁柱を配置し、ロングスパンプレキャストPC梁を長期部材として壁柱と近

似的ピン接合で架ける工法が開発され実現している^{16,17)}。このロングスパンプレキャストPC梁は、緊張材として高強度鉄筋(SD685)が使用されており、プレテンション方式で緊張力が導入されている。これによって、従来のPC鋼材を用いた場合に比べ、梁断面の縮小化・梁貫通孔の自由な配置が可能となった。

また、ニュージーランドではUS PRESSSプロジェクトで開発されたプレストレス技術とエネルギー消費デバイスの組合せを木構造に展開した研究開発が進められており¹⁸⁾、実建物に適用した例もある(写真-3)。

3. おわりに

米国を中心に開発されたプレストレス技術とエネルギー消費デバイスの組合せた架構の研究成果や実施例を中心に紹介した。ここで紹介した技術や日本で研究開発した成果が共有されることによって、地震国においてプレストレスコンクリート造建物がさらに普及していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 小山内 裕, 西山 峰広: PC部材の履歴復元特性モデルの定常ループ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.959-960, 2000
- 2) 岡本 伸, 加藤 博人: プレストレストコンクリート造建物の地震応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.2575-2576, 1983
- 3) 太田 義弘, 西山 峰広, 渡辺 史夫, 六車 照: プレストレス力の梁柱接合部履歴復元力特性に対する影響(その1: 実験目的及び概要), 日本建築学会学術講演梗概集, C, 構造II, pp.629-630, 1991
- 4) 小田 雄生, 西山 峰広, 渡辺 史夫, 六車 照: プレストレス力の梁柱接合部履歴復元力特性に対する影響(その2: 実験結果及び考察), 日本建築学会学術講演梗概集, C, 構造II, pp.631-632, 1991
- 5) M. J. Nigel Priestley and Jian Ren Tao: Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames With Partially De-bonded Tendons, PCI Journal, pp.58-69, January-February, 1993
- 6) M. J. Nigel Priestley et al: Preliminary Results and Conclusions From the PRESSS Five-Story Precast Concrete Test Building, PCI Journal, Special Report, pp.42-67, November-December, 1999
- 7) State of the Art Report on The Seismic Design of Precast Concrete Building Structures, report of Task Group 7.3 of Commission 7 Seismic Design of the International Federation for Structural Concrete (fib)
- 8) Stefano Pampanin: Emerging Solutions for High Seismic Performance of Precast/Prestressed Concrete Buildings, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.3, No.2, pp.207-223, June, 2005 (Japan Concrete Institute)
- 9) Robert E. Englekirk: Design-Construction of The Paramount-A 39-Story Precast Prestressed Concrete Apartment Building, PCI Journal, pp.56-71, July-August 2002
- 10) 西山 峰広: ニュージーランドとアメリカにおけるPC圧着工法, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.4, pp.28-33, 2003.7
- 11) ACI ITG/T1.1-99: Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing
- 12) Leo Panian, Phillip Williams, and Mike Donovan: Redefining High-Performance Concrete Structures -Design and Construction of the San Francisco Public Utilities Commission Headquarters-, Concrete



写真 - 3 木造プレストレス (Pres-Lam) 建物

International, pp.23-30, 2012.11

- 13) 高性能コンクリートによるサステナブル建築 - サンフランシスコ公益事業委員会本部ビル設計・施工 -, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.4, pp.84-88, 2013.7
- 14) 城戸 隆宏, 妹尾 正和: 立川市庁舎設計・施工 - PCaPC 間柱を耐震要素とした中間層免震構造 -, プレストレストコンクリート, Vol.52, No.4, pp.42-50, 2010.7
- 15) 山浦 晋弘, 秋田 智, 池田 直子, 屋田 研郎: 兵庫県立淡路医療センターの構造計画と施工 - 一辺が約 100m の平面形状を有する免震病院 -, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.4, pp.21-28, 2013.7
- 16) 小室 努, 河本 慎一郎, 竹崎 真一, 甲斐 隆夫: 知的制振システ

ムを採用した事務所ビル設計 - 大成札幌ビル -, プレストレストコンクリート, Vol.48, No.4, pp.22-28, 2006.7

- 17) 有山 伸之, 関 清豪, 西本 信哉, 竹崎 真一, 甲斐 隆夫: みなとみらいセンタービル設計, プレストレストコンクリート, Vol.53, No.4, pp.31-38, 2011.7
- 18) Andy Buchanan, Bruce Deam, Massimo Fragiacommo, Stefano Pampanin, and Alessandro Palermo: Multi-Storey Prestressed Timber Buildings in New Zealand, Structural Engineering International, vol.18, No.2, pp.166-173, 2008.4

【2016年9月1日受付】



刊行物案内

フレッシュマンのための PC 講座 — 増補改訂版 —

平成 28 年 1 月 発刊

これからプレストレストコンクリートについて学ぼうとする方への教材として、おすすめの一冊です。

- イラストを多用し、平易な文章でプレストレストコンクリートの世界をわかりやすく解説
- 内容・資料・写真などを最新のものに更新、全ページをカラー化
- 維持管理と補修・補強（基礎編 9）について追補



(A4判 全 150 ページ)

目次構成

基礎編 1	PC とは何か
基礎編 2	PC とはどんなものに利用できるか
基礎編 3	プレストレスの与え方について考えてみよう
基礎編 4	プレストレスは変化する
基礎編 5	荷重と断面力について考えてみよう
基礎編 6	部材に生じる応力度について考えてみよう
基礎編 7	プレストレス量の決め方について考えてみよう
基礎編 8	PC に命を与えるには (プレストレッシングとその管理)
基礎編 9	PC を長生きさせよう
PC 橋編 1	PC 橋にはどんなものがあるか
PC 橋編 2	PC 橋を計画してみよう
PC 橋編 3	PC 橋を設計してみよう
PC 橋編 4	現場を見てみよう
PC 建築編 1	PC 建築とは
PC 建築編 2	PC 建築にはどんなものがあるか
PC 建築編 3	プレキャスト PC 建築の設計について考えてみよう
PC 建築編 4	PC 建築でオフィスを設計してみよう

定 価 3,600 円 (税込) / 送料 300 円

会員特価 3,000 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会