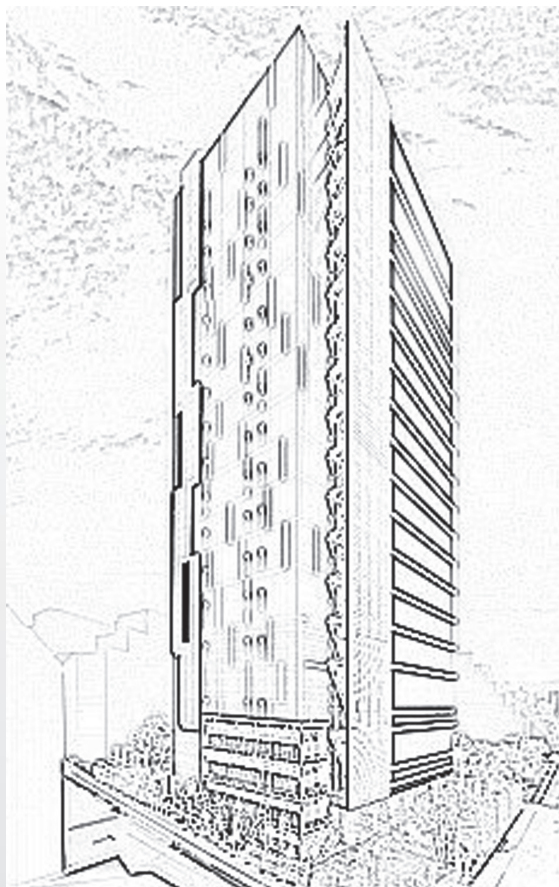


特 集

建築特集



【企画主旨】

本号は毎年恒例の建築特集号で、プレストレスを使用した建築物に関する報告などで構成されております。建築におけるプレストレスの使用率はまだまだ高いとはいえません。

プレストレス補強した耐震改修、プレストレストコンクリート造と他工法とのハイブリット建築物など建築におけるプレストレスの適応性を紹介することにより、より一層多くの方々に建築分野におけるプレストレスの有用性・可能性を理解いただき、プレストレスト技術の進歩、普及に役立つことを期待しております。

本特集号 担当編集委員

上原富士夫・田沼 毅彦・妹尾 正和
高津比呂人・片 健一

S 造の種々の問題が解決される。べつの見方をすれば、局所的に深く掘り下げる研究者はべつとして、一般の技術者には、平面上でなくプレストレスを利用する3次元空間で仕事をするようこの図によって勧めることができる。

なお、 x 軸、 y 軸の負の側に、木造、ブロック・レンガ造の軸を採れば、活動空間は一挙に拡大される。

すなわち、この図は一般の構造設計者の関心を高める効果があるのではないか。

2.2 社会はどのような建物を求めるのか

21 世紀の主流となるべき建物としては、どのようなものが求められるのであろうか。

一般論的には、意匠も満たしたうえで、高耐久性、高耐震安全性、利便性等の諸事項の更新版である。

それらの“更新版”とは次のようなものであろう。

2.2.1 これから求められる耐久性

近年国交省の方針として、200 年住宅、200 年建築の推進が図られている。

コンクリートの建物ではこの高耐久性のためには、

- ひび割れが無く、中性化の進行も遅い調合、材料も使用されていること
 - ひび割れが生じている場合は、必要な耐久性が確保される設計となっており、上記材料面の配慮もあること
- などが考えられるが、これに対し、RC・SRC 造等では不可能か、かなり困難であることは明白である。この要請に対し、PC 構造であればきわめて簡単に対応できる。

2.2.2 これから求められる利便性

一般に建物は、一旦建てられると増改築、移設等はかなり困難である。これに対し PC 造であれば、組立て、解体、増改築等は RC・SRC 造等と比べれば、そのための工法は容易であり、きわめて簡単に実施することができる。この利便性はもっともっと強調されるべきである。

2.2.3 これから求められる耐震性

免震構造は、地震対策の主要な手段として求められることは確かであるが、免震で無い場合に対しての要望事項は

- 1) 大地震に於いても軽微な被害で済むこと、
- 2) 大地震が終われば、ほとんど元の位置、状態に戻ること（高復元性）、
- 3) その後の補修、補強はほとんど無いか簡単に済むこと、などであろう。

これらの諸要求に対し、PC 構造とすれば、骨組架構の弾性範囲が大きいことに加えて、高復元性を供えているので、部材端部を横拘束補強（コンファインド補強）等で局部破損しないようにしておけば、これらの条件はほとんど解決される（たとえば、文献 9）参照）。

具体的には、後述の“圧着工法”（5.2 参照）、および“ピロティ層を Soft-story（免震層）”（5.4 参照）とする方法等が考えられる。

(1) 現在の地震力の仮定の問題点：現在の耐震設計は、水平震度 1 を前提にし、その構造体の変形能力を判断した耐力低減係数（構造特性係数） D_s 値を用い、極めて稀に起こる大地震（レベル 2 地震）に対し、その構造物の降伏域近辺にくるように設計するという、「保有耐力設計法」が、

主要設計法となっている。もしそのレベル 2 地震を超える地震力が作用した場合は、 D_s 値換算の塑性変形能力で対応できる、としている。これは、構造体の変形能力をいちいち算定しなくて済む大変便利な方法ではある。が、その変形能力の評価に関してはきわめてあいまいである。それゆえ、建物が被害を受けた場合、“予想を超えた地震力が作用したため”という表現でいつも片付けられている。

筆者はこれからの設計は、

レベル 2 地震（400～500 gal）：構造体の断面寸法を決めるための地震力：降伏域近辺にくる保有耐力設計

レベル 3 地震（約 1000 gal）：変形能力を決めるための地震力：必要塑性率に対する変形能力設計

のように、レベル 3 地震を正式に設計の対象とすべきであると考え。レベル 3 地震は“予想を超えた”ではない。事実“兵庫県南部地震は 818 gal”，以後台湾地震、トルコ地震、鳥取県西部地震、・・・等々、いずれも 1000 gal を超えた地震力が観測されているという歴然たる事実がある。それにもかかわらず、いまだ正式な設計力にはなっていない。将来を考えると大きな問題点である。

レベル 3 の対応策として、レベル 2 を超える水平力に対して、構造耐力を上げて対応すると、その比率でコスト UP となるのに対し、変形能力で対応する場合はあまりコスト UP にはならない。図 - 2 に示すように塑性率 3 倍程度でもエネルギー吸収能力は数倍になる。地動速度が 2 倍、すなわちエネルギーで 4 倍になっても対応できる。

変形能力確保のための方法も容易である（4. 参照）。

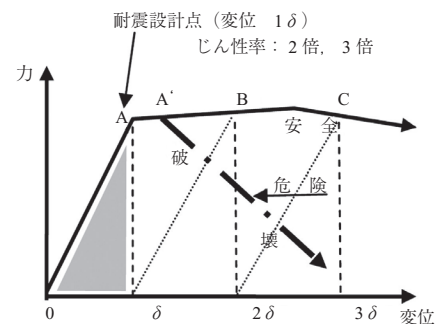


図 - 2 靱性（変形能力）と耐震安全性

(2) 全層降伏設計はもう止めるべき：現在の設計法の基本は、免震構造でないかぎり、地震動のエネルギーの吸収は建物全体で行わなければ無理である、という思想に基づいている。そのために、柱を降伏させた場合は層崩壊の危険性があるので、梁を降伏させて地震エネルギーを吸収させるという手法が採られている。したがって、レベル 2、レベル 3 の地震が襲った場合、建物の梁端部は大部分が壊れ、また建物も傾いたままとなる。さらに大変なことは、その後の修復工事が長期間続くことである。これは建物の所有者、使用者にとっては、ある意味では耐え難いこととなるのである。

この解決策が、コストが高めの免震構造であり、また PC 技術による後述の PC 圧着工法であり、Soft-story（免震層）構造ということになる。これらによって、地震後は

元の状態に復元し補修もほとんど行わなくて済むことになる。PC 構造の活躍舞台が開かれているのである。

全層降伏設計はもう止めるべき、という考えの賛同者は次第に増えてきていることを強調しておきたい。

(3) 地盤と建物との共振性の検討の必要性：現在この事項については、現存の建物の耐震診断においても行われていない。規定の入力地震波を用いた弾塑性応答解析が行われる場合は、ある程度の予測にはなるが、ただその地盤の振動特性ではないので一応の参考データ程度であろう。

地震は動荷重である。その地盤の振動に対して建物が共振性をもつかどうかのチェックができれば、地震時の安全性はかなりの確かさで推測でき、さらに建物が塑性域に入り長周期化するときの安全性も推測できる。この検討は将来の重要課題である（詳細省略）。

2.3 なぜ PC の技術は普及、一般化しないのか

これまでに述べてきただけでも、PC 構造は種々の事項を簡単に解決してしまう素晴らしい構造であるのに、なぜ普及し、一般化してこないのか。

2.3.1 大学での講義が少ない

筆者は、以前行われた PC 技術協会の全国調査結果にわが耳を疑った。それは全国の大学のカリキュラムにおいて「プレストレストコンクリート構造」の名称で講義を行っている大学は唯 1 校、という結果を知ったときである。その 1 校は実は阪大であると分ったからである。筆者は阪大において 30 年間この科目名で講義を行ってきたが、他大学では RC 構造の講義の中に入れて、半期あるいは大部分は 2～3 駒程度の講義を行っていることを知った。これでは一般の学生が PC 構造を、その設計法を理解して卒業することにならないこと、したがって実務についている構造技術者もほぼ同様であろうことが分かった。実際はいわゆる“専門業者”が設計も施工も行って実施されているからであろう。

今後は、大学が変わらなければ、一般技術者を対象とした講習会等によって普及を図る必要性を痛感している。

2.3.2 PC の価格が高すぎる

PC は高い、という通念はここ数十年固まっているというて良い。最近関西のある地方で、ある先進的設計事務所が PC 構造を設計したところ、価格が高過ぎたため他の構造に変更されたという話を聞いた。また大分以前、あるゼネコンの一施設を筆者の勧めで PRC 構造によって完成させたが、同社の責任者から、“こんなに高いものはもう 2 度と使わない”といわれたことも思い出す。

しかし、筆者が (株)大林組に在職当時、十数件以上の PC 建築の設計施工を直接行ったが、たとえば現場では、その現場にきていた型枠、配筋、コンクリート打設等の作業員にそのまま、固練りコンクリートの施工、PS の導入工事等の作業を行ってもらったが、何の支障もなく作業は行われた。そしてそれら PC 建物のコストは、その大空間にもかかわらず、RC 造のわずか数%程度のコスト UP で済んでいたのである。

もし PC 造の耐久性が RC 造の 2～3 倍と少な目に評価しても、PC 造とする優位性は図り知れない。さらに、最

近も SRC 構造との比較も話題になるが、梁 1 本の比較でも、SRC 造よりは 1 割以上は安くなり、それどころか建物全体では鉄骨部分が無くなるので 3 割位は安くなるともいわれている。これに耐久性も考慮に入れば、という点を強調したい。

結論として

- (1) PC 造は、設計施工を直接行えば決して高くはなく、RC 造より少しだけ高く、SRC 造よりははるかに安く済み、耐久性も考慮すれば実に何分の一にもなる！
- (2) 現在高いとされるのは、これを特殊な技術として設計施工が行われているからであり、これが普及を妨げていることを認識すべきである。すなわち自分で自分の首を絞めていることになっているのではないだろうか。

2.3.3 設計、施工が面倒

設計法が昔から確立されている RC、SRC 造等と比べれば、確かに条件は悪いが、PC の設計基本式、計算式は“+、-、×、÷”算だけで済むことは強調しなければならない。設計は決して面倒ではないこと、設計モーメントが分かれば、断面係数 Z 、プレストレス力 P 、その偏心 e の確認等は簡単な 3 個の式でその場で求めることができることを次の項で示す（2.4 参照）。

施工もプレストレス力の導入作業が他種構造に無い作業ではあるが、これも慣れてしまえば問題は無い。

2.3.4 計算規準、指針の内容が複雑？

一般論として、研究者が研究すればするほど、研究事項、算定事項も増え、その計算式も複雑となる。規準、指針作成委員会では、それら研究成果、算定式等がそのまま載せられてしまう。

したがって、初めて PC 構造に接する技術者たちは、その複雑さゆえに尻込みをしてしまうことになるであろう。コストの高い、設計も複雑な PC で設計するよりも、従来の慣れた構造にしよう、ということになってしまうのである。規準、指針作成に携わる委員会メンバーの方々は是非このことを考えていただきたい。

その一つの対策例として、複雑な算定式の場合は、その精度を少し落として多少不経済な結果になってもよいとした簡略式も同時に示しておくことである。

あるいは、算定図表を提示するとか、計算ソフトを添付するとか、その考えがあれば何か方法はあるはずである。

その例として、筆者が PRC 指針作成時に、わが国で初めてひび割れ幅算定式を載せたとき、共線図表を利用して、平均ひび割れ間隔、鉄筋応力、平均・最大ひび割れ幅等の算定図表を提示した。たとえば図 - 3 は、平均ひび割れ間隔の算定図であるが、梁幅、かぶり厚さ、主筋本数、使用主筋等が分かれば、わずか 3～5 秒で、平均ひび割れ間隔 lav を求めることができるようになっている。この図によって、何をどうすれば lav がどうなるか、という傾向を簡単に目の下で知ることができ、その影響を感覚的に捉え、その感覚を養うことができるのである。この感覚をもてることが設計上大切であることを強調したい。

2.4 PC の断面設計は簡単

詳細は省略するとして、プレストレス導入後に作用する

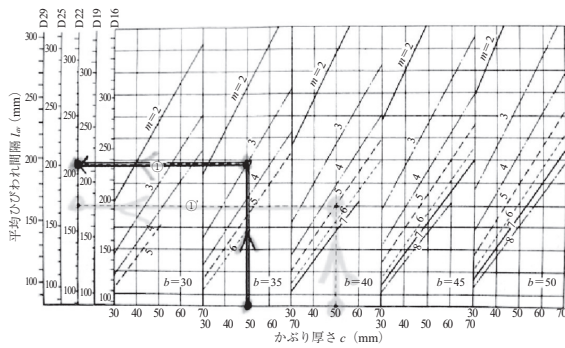


図 - 3 平均ひび割れ間隔 l_{av} 算定図¹⁾ p.119

曲げモーメント M_e が求められていれば、次のように簡単に“断面係数 Z 、プレストレス力 P 、偏心位置 e ”等のおよその値を求めることができる。今、断面は長方形断面とすれば次のようになる。

1) Z (断面係数) : ($Z_1 = Z_2 = Z = bh^2/6$ とする)

$$Z \geq M_e / f_c \quad (1)$$

これは、正しくは次の式で求めるべきであるが、

$$Z \geq \frac{M_e + (1 - \eta) M_d}{f_c + \eta f_t'}$$

ここに、 M_d : 梁自重による曲げモーメント、

f_c, f_t' : コンクリートの圧縮、引張許容値

($1 - \eta$) の値は 0.15 程度 (η : プレストレス力有効率 ≈ 0.85 とする) となるので、分子と分母の第 2 項を省略すると (1) 式となる。これで断面の b と h (幅、高さ) を定めれるが、多少の余裕は見ておく方がよい。

2) P (プレストレス力) : 一般に、

$$P = \text{断面積} \times \text{断面図心の圧縮応力度}$$

であるから、 $P \geq b \times h \times f_c / 2$ (2)

と、簡単に P を求めることができる。

3) e (偏心距離) : プレストレス力 P だけであれば、断面に引張応力を発生させない偏心距離は核半径の e_k が限界位置となるが、自重が同時に作用するので、その分偏心距離を大きくできる。したがって偏心距離 e は、

$$e = e_k + M_d / P \quad (3)$$

で与えられる。以上より、 P に対して決めた PC 鋼材の本数の重心が、断面のこの e を満足するように配置できればよい。

本項では、次の過程で行う設計計算の詳細は記述できないが、これらの Z 、 P 、 e 算出の後、精算によって最終断面を決めることになる。上記のような簡単な概算にもかかわらず、ほとんど大きな変更は無くことを進めることができる。もし、たとえば断面が少し不足するときは、断面を大とするよりも、コンクリートの強度を少し調整するほうが、架構の応力計算をやり直さなく済むのでよい。

なお、施工方法として柱完成後、プレキャストの PC 梁を柱に剛接する場合は良いが、柱梁一体打で梁にプレストレスを導入する場合は、不静定二次応力が生じるのでこの計算を行って再チェックする必要がある (これが PC 構造としての面倒な点であるともいえる)。

以上、(1)、(2)、(3)式によって、こんなに簡単に PC 部材

の断面を計算できることは、初心者ばかりでなくデザイナー等にも是非知っておいて欲しい事項である。

3. 構造設計の連続・統一化

PC 構造の利用は、構造設計上いくつかの利点をもたらす。その一つの見方として、設計上断絶状態となっている構造種等を連続化することができ、統一の見地に立って構造設計を行うことができるようになる。その例を以下に示す。

3.1 連続・統一化 (その 1) :

PC ~ PRC ~ RC によるコンクリート構造の連続化

PRC の設計指針が日本建築学会から発刊されたのは、1986 年であった。筆者は在ドイツ時代に、日本も早く西欧のように RC ~ PC 構造を連続、統一化する必要性を痛感していたのであるが、この年にそれがやっと実現した¹⁾。この“PRC”は、プレストレス鉄筋コンクリート (第 III 種 PC) 構造であるが、西欧では学術的にも“PPC”と表現されている。筆者は、当時 PC 造が日本の建築分野では普及していない現実を考慮し、また PRC は RC を改良、改善するものであるという印象を与える目的で、RC 分野の技術者があまり抵抗なく参入できるよう、“PRC”という表現を固持したが、それが実現したものである。実はずっと以前日本の土木で、北大の横道先生がこの PRC の表現を用いておられたのである²⁾ (この経過は文献参照)。この PRC は建築における PC 構造の普及に少しは貢献できたのではないかと考えている。

3.2 連続・統一化 (その 2) :

鉄筋 ~ PC 鋼材の設計上の連続・統一化

実は、鉄材 (鉄筋、PC 鋼材等) 利用のうえで、設計上連続化ができないものかと以前から考えていたところ、“1888 年ドイツの Doehring が普通鉄筋の緊張で PC 部材を製作したところ、導入力が消失して失敗”したのを思い出し、これをこの PRC の概念と重ねたときに、本項の方式を思い付いた。それは“高強度鉄筋の高強度になった分をプレストレスに利用し、それを PC ではなく PRC 部材として利用する”ということであった。これによって、プレストレスは減少しても、発生ひび割れ幅は RC の半分程度には直ぐなる、という効果がいと簡単に得られることになる。さらに高強度になった分はフルに利用でき、また数倍の強度をもつ PC 鋼材まで、連続的に利用できるようになった。これに関する論文は 1987 年に報告した³⁾。1988 年イスラエルのエルサレムで開催された FIP の国際会議に於いて筆者は周りの何人かの西欧の人達にこのアイデアを話したが、残念ながら理解してもらえなかった。この力学性状、有効利用等の詳細は後の 5.1 に示した。

3.3 連続・統一化 (その 3) :

建物の層剛性比制限の撤廃と免震への連続化

建築基・規準では、建物の層剛性比は 0.6 以上と定められている。“阪神大震災”においてこの値が 0.6 に近かったと思われるピロティ建物が多く被害を受けたこともあって、一時はピロティ構造を禁止する意見も出されたようであるが、何とか継続されている。被害が多かった理由は、ピロティ層に変位が集中するのに対し、変形能力の明確な

設計が普通はなされていないからである。

この場合の“連続化”とは、後述の表 - 1 に明示してあるように、層剛性比 $\kappa = 0$ の免震構造と繋ぐことである。

繋ぐためには、ピロティ層の変形能力を、層剛性比 0.6 の層間変位、数 cm から免震の約 30 cm までを連続化させて、このピロティ層を Soft-story (免震層) にすればよい。この層の柱の変形能力を大とする方法は、次の事項で述べるように簡単である。

筆者は、約 40 年以前からこのための研究を続けてきたが、その研究委員会を、数年前は JCI に、現在は国交省系の“建築研究開発コンソーシアム”に立ち上げて研究開発活動を行っている。これに PC の技術を応用すれば、2.2 の(3)に述べた、“大地震でもあまり被害が無くほとんど元の状態に戻る”建物が可能となろう(詳細は 4. と 5.4 参照)。

4. 変形能力を大とする経済的方法

図 - 2 で説明したように、これからの耐震設計、とくにレベル 3 地震も正式に考慮に入れて設計するには、コストがかかる耐力 up ではなく、変形能力を大とする方法が正解である。架構の降伏は、梁、柱のどちらを降伏させるかでもあるが、梁については“圧着工法”の所で述べるので、ここでは柱についてその方法の例を示す。

4.1 円形柱の横拘束補強⁵⁾

図 - 4 は円形柱のフープ筋ピッチを数 cm とした横拘束(コンファインド) PRC 柱の繰返し実験結果であるが、数十回の正負繰返し荷重であっても、部材角が実に 1/10 まで耐えることを示している。この際重要なことは、この大変形塑性域における繰返し荷重による耐力劣化は、部材角 1/10 付近より小の領域では安定状態にあることである。この実験は、塑性域の各変位階で 10 回ずつ計数十回にもおよび正負繰返し載荷を行った結果である。

このほかにも関連する多くの実験結果を得ている。

4.2 角型柱の横拘束実験

角型柱であれば、中子筋を縦横に 15 cm 間隔程度に配置し、フープ・中子筋を数 cm ピッチで配置すれば、円形柱に近い変形性能が得られるであろう。必要変形能力と横配筋ピッチの計算式も示してある⁶⁾。もちろんその補強範囲は部材丈の 1.5 倍程度の範囲でよい。

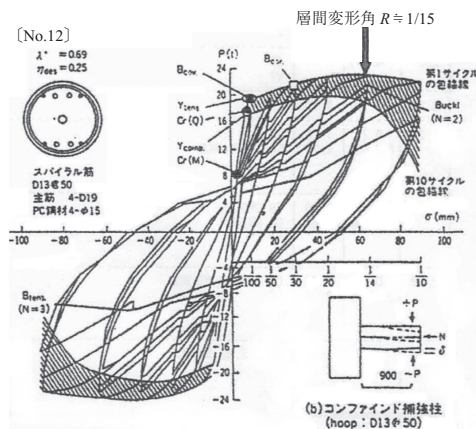


図 - 4 円形横拘束柱の大変形能力⁵⁾

4.3 円形 CFT 柱

円形 CFT とすれば、そのまま十分な横拘束柱となるが、この場合鋼管の上下端は柱が変形しても梁部材に接触しないよう、空隙を設けておくことが必要である。

4.4 角型柱の鋼板巻立て補強+端部アングル補強^{7, 8)}

角型柱に対して鋼板巻立て補強をすると、変形能力を向上させる効果がある、とよくいわれる。しかし、実部材ではこの方法による“横拘束効果”は期待できない。その理由は、実験の試験体の大きさが 30 cm 程度と小さいものが使われており、柱端部が塑性域に入ると内部からの膨らみに対し巻立て鋼板が寸法が小さい理由で簡単に円形になって、横拘束状態になるからである。

実際の柱の寸法は一辺の長さが試験体の場合の 3 倍程度はあり、巻立て鋼板は簡単に膨らんで、小試験体のように円形にはなれず、横拘束効果は生じないからである。

そこで、写真 - 1 に示すように、巻立て鋼板の端部にアングル材を取り付けて、鋼板の外側への孕み出しを拘束するよう、したがって横拘束効果が得られるよう取り付けられたところ、図 - 5 のような良い結果が得られた^{7, 8)}。すなわち、試験体は一辺 60 cm であったが、部材の大きさが大きくなれば、補強アングル材の寸法を大とすれば一応その効果がえられると考えて良いであろう。

以上、柱の変形能力を大とする補強法 4 例を示したが、低コストでもレベル 3 地震程度に対応できる変形能力は容易に得られるであろうことが分かった。

さらに、このような大変形能力柱を用いれば、ピロティの Soft-story (免震層) 化も可能であるといえる。

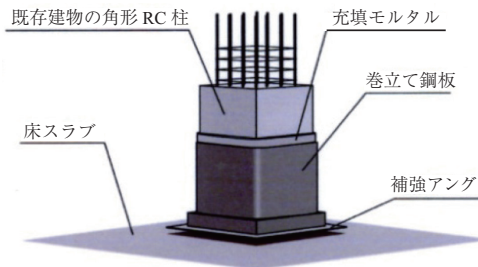


写真 - 1 巻立て鋼板裾のアングル補強

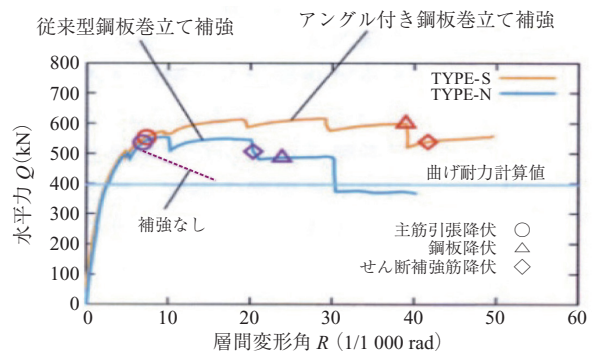


図 - 5 裾部アングル補強巻立て鋼板柱の実験結果

5. 今後の PC 技術の展開

すでにいくつかの新技术を部分的に紹介してきたが、本

項では、それらに関する補足と、今後大きく展開させて行けるであろうと考えているいくつかの技術を要約した。

5.1 高強度鉄筋緊張の PRC 部材：連続化（その2）

3.2 で述べたように、高強度になった分をプレストレス導入に利用する“連続・統一化（その2）”であるが、これによる利点をいくつか挙げれば次のようなものであろう。

(1) RC では不利：すなわち、高強度になった分を長期荷重の設計には使えない。理由はひび割れ幅制御のため鉄筋の応力制限があるからである。ただし梁、柱であれば、短期の地震力には役立つ。

(2) PRC で有効利用：前記のように PRC 部材に使用すれば、後述するように長期荷重に対してはひび割れ制御にそのまま役立ち、また梁、柱であれば短期荷重に対して高強度になった分がそのまま利用できるため、100%活用となる。

(3) さらに、プレキャストの床スラブ等の場合、通常プレストレスの導入が PC 鋼材によって行われるが、これに替えてこの高強度鉄筋を用いるとすれば、導入とひび割れ制御・分散効果等、一石二鳥となる。

以下その具体的内容を示す³⁾（以下の図は旧単位表示）。

図 - 6 は、高強度になった分をプレストレス導入力に利用し、その部材は PC ではなく PRC 部材に用いることを示したもので、長期・短期応力に対する効果が同図左側に、またひび割れ制御のために鉄筋応力度は 200 N/mm² 程度に抑えられてしまうことを図中に示してある。

図 - 7 は引張材に用いた場合の RC と PRC の状態を比較したもので、発生ひび割れ幅に大きな違いが生じることを明確に示したものである。すなわち、この図は両者の違いを、応力度-ひずみ度平面上に表したもので、RC は原点 0 からコンクリートの乾燥収縮で A 点まで圧縮された後、引張荷重によって許容引張応力度点 F で釣り合い状態となる。それに対して、PRC はここでは緊張応力度を少し低めの 100 N/mm² とした場合を示しているが、B 点からコンクリートのクリープ・乾燥収縮により C 点まで応力度が下がり、引張荷重によって釣り合い点 F に移る、ということを示した。この際注目すべきは、両者のひび割れ幅やたわみの違いである。PRC はわずかな緊張力でも RC の 2/3 位にはなることが分かる。実際の緊張力はもっと大

あろうから、ひび割れやたわみは半分程度かそれ以下になることが推測される。

次に図 - 8 であるが、高強度鉄筋の緊張力を、100, 200, 300 N/mm² とした場合の応力の減少状況、荷重-たわみ関係およびモーメント-ひび割れ関係を RC 部材と比較した実験結果であるが、その効果が明確に示されている³⁾。

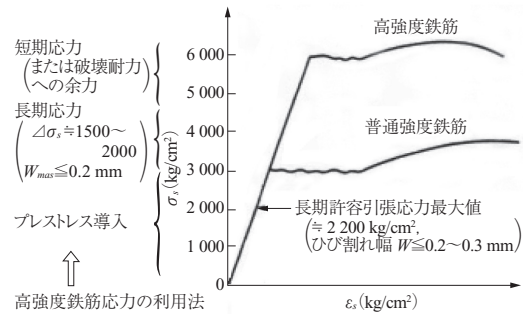


図 - 6 高強度鉄筋の PRC 部材への利用

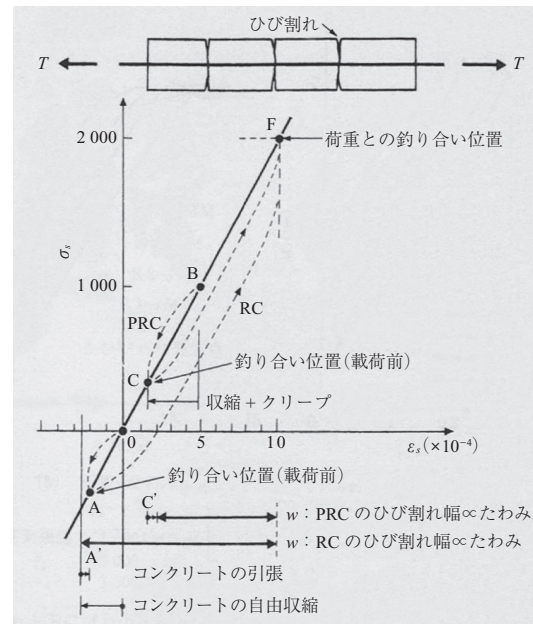


図 - 7 引張材に用いた場合の RC と PRC

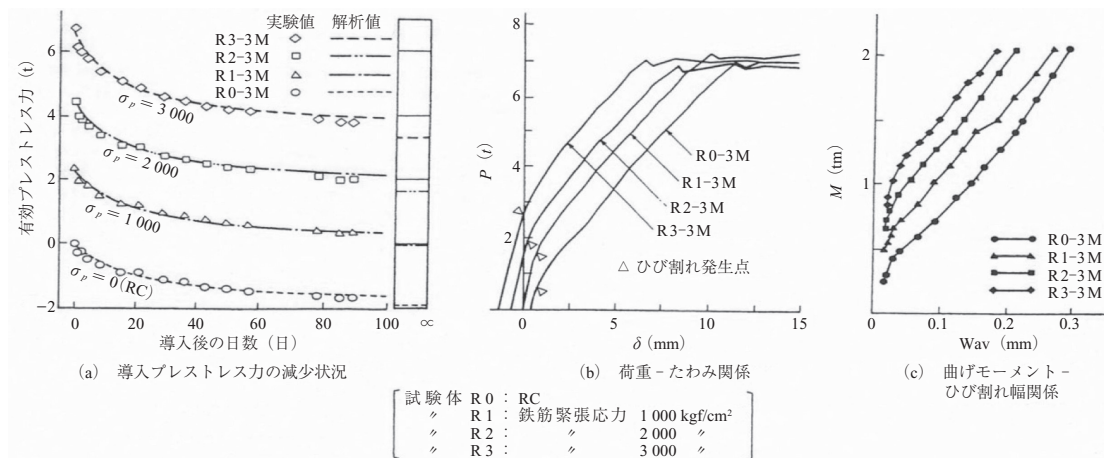


図 - 8 鉄筋緊張 PRC 梁と RC 梁の力学性状の比較³⁾

5.2 PC 圧着工法の展開

次に地震時の、“軽微被害・高復元性”の解決策の一つとしてこの圧着工法がある。

これは下の図 - 9 に示すように、梁をプレキャスト等として PC 鋼材で柱に圧着するというもので、“全層降伏設計”に代わる有力な構・工法として実施例も増えてきている。

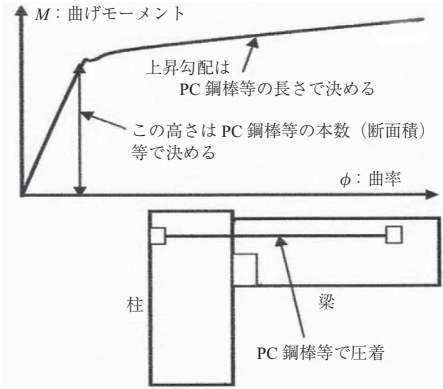


図 - 9 PC 圧着工法の原理

地震時には梁端部にひび割れが発生する代わりに、梁端目地部の目開きが上下繰り返して生じ、梁端の塑性ヒンジ破損を生じないようにすると同時に、地震が終わればプレストレスの圧着力によって目地部は閉じ、ほとんど元の状態に戻るようになる。この部分の設計は同図の上側に示したように、 M の高さは PC 鋼材の断面積と配置位置等で決まり、降伏後の勾配は PC 鋼材の長さで決まるといって簡潔明快な理論である。ただし目開き時に梁端部コンクリートが壊れないように何らかの補強対策を施しておくことと、持ち送り部でのすれの対策を施しておく必要がある。

本工法の今後の展開：現在の設計法の主流ともいえる“全層降伏設計”は当分続くであろうが、2.2 で説明したように、施主、使用者の立場に立つと、地震を受けたとき、およびその後のことを考えると、次第にこの圧着工法が目されるようになるはずである。ただしこの圧着工法は、現在コスト高ではある免震構造や、後述する、より経済的な Soft-Story（免震層）構造等と“全層降伏設計”との中間域に位置する工法ではあると考えられる。

この工法の今後の一層の進展を図るための事項として筆者は次のようなことを考えている。

- 1) 梁端部が壊れない工法の開発：端部を薄い鋼板で巻く方法は、実験データがある⁹⁾。また端部の一部を繊維等で補強したプレキャストとする方法、も考えられる。
- 2) 梁端部が減衰機能をもつ工法の開発：圧着用 PC 鋼材にアスファルトアンボンド鋼材を使用すれば、多少の減衰効果が得られると思われる。これに加えて、柱側面に梁側面に沿う鋼板を取り付け、その隙間に粘弾性剤を詰めることも可能であろう。
- 3) PC 鋼材、配線、定着法の更新：現在 PC 鋼材として湾曲を容易とするためにくさび定着による PC 鋼線が使わ

れ、梁の上端に定着されているようであるが、ケーブルが短いための定着時のセットロスを補うため、定着具はねじ切りナット定着加工されたものが用いられている。これに対し、圧着用の PC 鋼棒を少し長めにして曲線配置ができるようにすれば、定着も簡単になり、この工法の一層の普及に役立つであろう。また梁を I 型断面とすれば、定着部を梁側面とすることができ、PC 鋼棒も直線にでき、コンクリートの量も少しは少なくなる。なお、大梁が PC 鋼棒使用であれば、梁端で止められている鋼棒をそのままカッターで延長して反対側の梁に定着することもできる。

4) 鉄骨造への展開：鉄骨梁端の溶接破断も大地震時には良く起こるようである。この破断部の補修のための現場溶接は、工場溶接と異なって品質管理も難しく、いろいろ問題があるようである。鉄骨造も PC 圧着工法が可能となれば、大地震後の残留変位は無く元の状態に戻り、当然補修作業もなくなるので、鉄骨造の大きな進展をもたらさずである。PC 鋼材の定着部の工法の創出もそれほど困難ではないと思われる。これは図 - 1 の $y-z$ 領域での展開である。今後を大いに期待したい。

5.3 トルク管理による手締式導入工法の開発^{10), 11)}

プレストレスの導入は、1928 年頃のフレシネによる PC 技術の実用化以来、ジャッキ使用を原則として行われてきている。

筆者は数十年前、筑波の建築研究所で行ったクリープ実験のとき、 $\phi 11$ の PC 鋼棒を手で締めて 7・8 ton は導入できることを体感することができた。土木のように、導入力が大の場合はべつとして、建築では細い鋼棒を使用する場合も当然あるはずであること、ハイテンボルト等はナット締めで行われていること、この方式が可能であれば、建築の分野ではいろいろな面に展開できるであろうこと、等を理由として、この技術に関する開発研究を(株)長谷工コーポレーションの協力を得て行った。いくつかの研究結果のうち、トルクと緊張力との関係の結果を図 - 10 に示す。

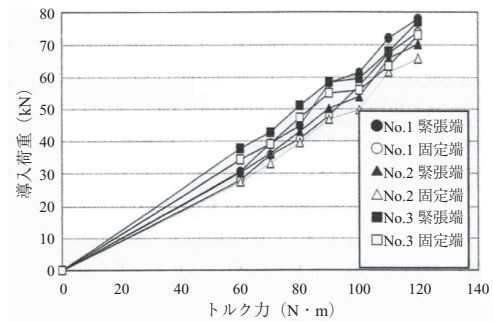


図 - 10 トルクと荷重の関係 (6m 試験体, 30°C)^{10), 11)}

この結果によれば、緊張力の変動はトルク 100 N・m 付近で見ると、中心値 $\pm 10\%$ 程度であり、またトルク値が変わっても割に安定していることが分かる。ジャッキ使用の場合は $\pm 5\%$ が施工精度の目標であろうから、トルク管理による導入作業は上図の結果より少し精度を落とした“施工要領”を設定すればよいと考えられる。

この工法の利点：導入にはナットを回せばよいのであるか

ら、たとえば床スラブの一部を、あるいはベランダ部分の締付けを部屋側から行う場合等、ジャッキ取付け用の大きな箱抜き孔をあける必要はなく、締付け用のナットが回せる小さな箱抜き程度の孔で済む。また締付け本数が多い場合は、ハイテンボルト方式の電動用具を使えば良い。とにかくこの工法であれば、施工精度を少し落とすことによって、誰でも手軽にプレストレスの工事ができ、PC技術の建築分野での一般化を促進させるはずである。

個別住宅、小規模建築への展開：2.2で述べた、これからの建物に求められる事項、耐久性、耐震性そして利便性を考え、さらにPC技術の建築分野での普及、等を考えると、この様な小規模建物で、気軽に使えるようにすることが、大きな転機を与えることになろう。そこで、個人住宅に対し“大工さんでも建てれる増改築・組立て解体、自由自在のPC住宅”と銘打って工法開発を行う動機が出てくるのである。

開発の方向として、コンクリート躯体は軽量断熱性をもち、部材はできるだけ細分し、小さなクレーン車を使う、あるいは大人2・3人が運べる程度とすることのほか、工場ではほとんど表面仕上げも済んだプレキャスト材とすると、床部材は壁上に並べて、横締めでそのまま一体化する等々いろいろな開発技術が生まれることになる。

個人住宅だけでなく、2～3階建程度の小規模建築も当然適用範囲に入ってくる。これからの建物とはとにかく100年、200年ほもち、しかも耐震的であることが必要条件であり、さらに、躯体が軽量・断熱性をもつことが大きなポイントとなるはずである。この分野での展開が期待できる。

手締め工法の今後の開発課題：トルク管理によるナット締付け方法は、ハイテンボルトや、車の分野で普通に使われているが、異なるのは鋼材の長さが長いことであり、この点の更なるデータと、設計、施工の要領書、指針の作成が急がれる現状である。

5.4 Soft-story (免震層) 構造におけるPC技術：連続・統一化 (その3)¹²⁾

3.3でも強調したように、免震性の建物が経済的に得られることを社会は望むはずである。「建築研究開発コンソーシアム」における研究委員会でも、このSoft-storyにPCの技術を生かして、経済的であり、かつ地震後ほとんど元の状態に戻る高復元性建築を実現するべく活動を開始している。この建物の原理は簡単である。図-11にそれを示した。原理的には“倒立振子”のバネの部分のプロティ部分となっていると考えればよい。

また免震構造への連続化の考え方は表-1に示した。

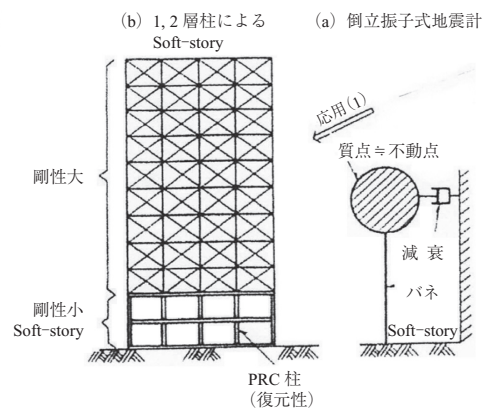


図-11 Soft-story (免震層) の原理；基礎の杭も利用

すなわち、層剛性比0.6の建物と免震構造との間を変形量で結ばばよく、レベル2地震時の剛性比0.6の建物は、層間変位約3cm (変位角約1/100)、一方免震構造は(その地の最大地震動に対して?) 約30cm程度を想定しているので、この中間の必要変形量を直線で結んだものである。設計上はこの必要変形量に対して、レベル3地震も考慮した変形量の設計をすることになる。その変形能力の設計は、図-4に示したように横拘束補強の柱を用いれば、層間変位角1/15程度は容易に得られることが分かる。

ところでこのプロティ層の大変形能力と高復元性を確保するために、PCの技術を如何に活用するかであるが、その一つの方法は、円形CFTの柱をPC鋼材(棒)で締めつける方法であろう。究極の横拘束であるCFTと復元性のPC構造との組合せである。

他の一つは、図-12に示したように、地下階のある場合、この層をそのままSoft-storyにすることである。この場合は非常に都合よく種々の装置をセットできる。復元性のための“PC鋼材ブレース”、地下外壁との間に“ダンピング装置”の取り付け、フェイルセーフ確保のため、地下外周壁上部まで1階床梁の延長等である。この方式の実現性はきわめて高いと思われる。

このSoft-story 構造についても一つ付け加えるならば、その場所の地震動との共振性が懸念される場合はプロティ階の剛性、したがって建物の固有周期を調整できることだけでなく、一質点の弾塑性応答解析で済むことであろう。

現在、鉄骨造ではすでに3～4件のSoft-storyビルが実現されている。いわゆるP-δ効果の懸念は、コンクリート系の構造よりも鉄骨造の方が大きいと思われるが、このようにすでに実現されていることを強調したい。

表-1 各種設計(法)の関係・特徴

設計法	新耐震基準	Soft-story (免震層) プロティ階	免震構造
層剛性比	最低値 0.6	← 中 間 →	≒0
塑性降伏条件	全層 降伏型	プロティ階 降伏型	-----
地震エネルギー	全層で吸収	プロティ階で吸収・遮断	免震層で遮断
所要変形能*)	$R \approx 1/100 \sim 1/50$	$R \approx 1/20 \sim 1/15$	変位 ≒ 30 cm

約3～5 cm ← 設計と変形・変位関係 → 約30 cm (直径約60 cm)

*) 極めて稀に起こる大地震時の変位 (cm), 層間変形角 R (変位 / 階高さ)

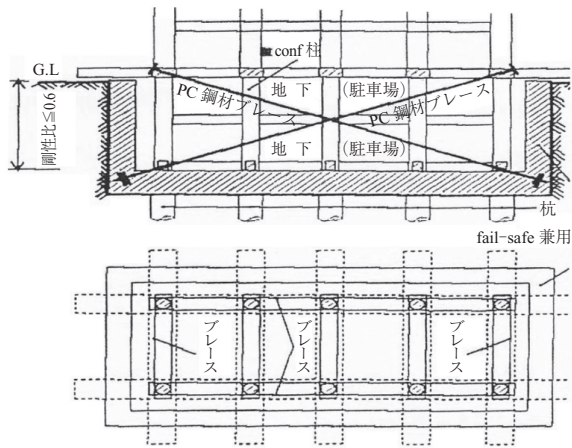


図 - 12 フェイルセーフ機能をもつ地階 Soft-story

5.5 建設現場の中に PC 工場を

これは一つの提案であるが、たとえば超高層ビルの床にプレキャスト（以下 PCa と略記）の PC 部材が使われる場合、もちろん近くに PCa の工場があればその製品を用いるのもよいが、そうでない場合もある。大都市の真ん中、また遠い辺地の何かと不便な場所等、現場工場の方が有利な時もあるはずである。筆者の考えるその現場工場のイメージは次のようなものである。

- 製作スペースは、建物下層部（地階、一階等）が完成されたその部分を現場工場とする（辺地の場合で十分な敷地があれば当然そこを使えば良い）。
- そこに現場製作用プレテンベッドをセットする。
- コンクリート打設後の蒸気養生は行わない。その代わりに、筆者考案の“超早強減水コンクリート”を用いる。これは設計規準強度が3日程度（調整可能）で得られるが（したがって脱型強度は2日位か）、その価格が普通セメントコンクリートと同じになるよう、その調合が工夫されている¹³⁾（注）。ただしその調合は JIS ではないので特別調合の手数料（数百円程度）を取られる可能性がある。

（注）この考案は特許等は取っていないので自由に使える。

- 運搬しにくい大型 PCa 部材の現場には最適である。本格的にこのような現場工場を検討すれば、いろいろな開発事項が出てくるはずである。

5.6 その他の事項

(1) PC 部材は曲がったものでも折れない

PC 部材は緊張材の重心がその断面の核半径以内であれば折れることは無い。一般の技術者、デザイナーの多くは折れると思いついでいるようであるが、これは実験的にも理論的にも簡単に証明できる。しかし国内外の PC 関連の参考書等にはどこにも書かれていない。図と力学的式をここに記述するスペースは無いが、これは明確であるので、是非これを一般の人達、とくにデザイナーに強調して欲しい。

(2) PC 鋼棒の緊張作業の能率化の一方法

PC 鋼棒の緊張作業では、緊張ロッドをねじ山の数だけねじ込み、ねじ戻す必要がある。ここでは参考までに、筆

者がかつて現場で使っていた、ねじる必要のないわずか2、3の動作で緊張ロッドを取り付ける方法を示す。それは、

- まず使用するカップラー1個を縦2分割し片側をヒンジにするがその部分はカップラー外周に出ないようにする。
- カップラー外周にぴったりで肉厚も同じ外側パイプを用意する。道具立てはこれだけである（詳細省略）。PC 鋼棒の緊張作業はこれで数分の一位にはなるであろう。

6. おわりに

これら以外にも津波対策としての人工地盤、杭基礎をそのまま Soft-story として利用すること等も考えている。

とにかく、このような素晴らしいプレストレスの技術を早く建築分野で普及、一般化させなければ、という積年の思いで本項をまとめたつもりである。

PC 専門技術者のこれからの技術開発に、そして一般技術者、デザイナー等への啓蒙と普及のための解説に、本項が役立つことを切に願うものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：プレストレス鉄筋コンクリート（三種 PC）構造設計・施工指針・同解説、1986：初版、2003：改訂
- 2) 鈴木計夫：RC・PC から PRC への流れ：教室、コンクリート技術の歴史第14回、コンクリート工学、Vol.31, No.10, 1993.10
- 3) 鈴木計夫、大野義照、白井敏彦：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した PRC はりの曲げ性状：コンクリート工学年次論文報告集、92, 1987, pp.489-494
- 4) 鈴木計夫：ピロティ式建物の耐震性と安全対策：日本マンション学会、マンション学、第40号、2011, Autumn, P.116
- 5) 鈴木、中塚、祭、中田、白沢：円形スパイラル筋を有するプレストレス鉄筋コンクリート円形柱の力学的性質（その1：破壊性状および荷重-変形関係）、日本建築学会構造系論文報告集、No.383, 1988.1, pp.69-79
- 6) 岸本一蔵担当部分：8章2節：角形横配筋断面の変形能力の算定：コンクリート構造物の靱性設計手法に関するシンポジウム—コンファインド（横拘束）コンクリートの利用—：日本コンクリート工学協会、委員会報告書：2011.10, pp.176-180
- 7) 森浩二、鈴木計夫、井上重信、山内豊英：山型鋼により柱頭・柱脚を拘束した角形鋼板巻立 RC 柱の実験：日本建築学会大会学術講演梗概集、2006.9, C-2, pp.513-514
- 8) 井上重信：6) と同題目：ピロティ式構造物およびラーメン高架橋の耐震性能と耐震対策：日本コンクリート工学協会研究委員会報告書、2009.9, pp.74-81
- 9) 山下仁、越川、溝口、上田、小松：アンボンド PCa.PC 柱・梁圧着接合によるスチールバンドを有する梁の繰り返し積荷実験：日本建築学会大会学術講演梗概集、2008, 題目 No.23427
- 10) 鈴木計夫、常松豪、伊井敬二、中村佳史：トルクによる簡易プレストレス導入工法の実証的研究：第18回 PC の発展に関するシンポジウム、論文報告集、2009.10, pp.337-340
- 11) 鈴木、常松、伊井、山根弘士、中村：10) と同じ題目：日本建築学会学術講演梗概集、A-1 分冊 2004, pp.557-558
- 12) 鈴木計夫担当分：1章概説：ピロティ式構造物およびラーメン高架橋の耐震性能と耐震対策：日本コンクリート工学協会研究委員会報告書、2009.9, pp.1-10
- 13) 鈴木計夫：超早強減水コンクリートの利用：化学工業、Vo.49, No.5, 1998, pp.19-26

【2012年5月9日受付】