

建築におけるプレキャストプレストレスト コンクリート耐震構造の現状と将来展望

渡邊 史夫*

1. 序

プレストレストコンクリート（以下PC）は、鉄筋コンクリート（以下RC）では困難な大スパン梁（桁）の架設を可能とすることを主目的として開発された工法である。コンクリートに導入される元圧縮応力が、引張に弱いコンクリートの性質を補い部材の曲げひび割れ強度を増大させる、または、曲げひび割れ幅を制御するところに最大の特徴がある。一方、わが国は有数の地震国でありPC造建物には高い耐震性能が求められるため、過去の研究の多くが地震荷重を対象としてきている。すなわち、如何にして、高い耐震性能を付与しながら大スパン構造を実現するかが研究課題であった。このことが、わが国をPC構造の耐震研究での世界のリーダーとならしめた理由である。1998年にCEBと合体しfibとなった旧FIP（国際プレストレストコンクリート連盟）の耐震委員会は、故坂 静雄博士、中野清司博士、六車 照博士が委員長を歴任してきた。旧FIPとCEB（ヨーロッパコンクリート委員会）の合体によって、1998年に新たな組織として発足したfib（International Federation for Structural Concrete）の耐震委員会（Commission 7：Chairman Paolo Pinto, Co-chairman Robert Park）では、建築・土木分野から7名の日本人委員が活躍しており、川島一彦東京工業大学教授がTG7.4 -Seismic Design and Assessment Procedures for Bridgesの、小生がTG7.5- Seismic Design of Buildings incorporating High Performance Materials of the Convenorを務めている。

PC建築構造物の耐震性能の高さは、1995年の阪神淡路大震災（兵庫県南部地震）において実証された。理由は、いろいろ取りざたされているが、高強度コンクリートの使用、丁寧な施工、終局強度設計法の適用等が代表的なものであるといわれている。後に詳しく述べるが、この終局強度設計法の特徴は、ベースシャー換算値で0.3の設計地震荷重の採用、弾性解析で得られた応力に対する部材の終局強度設計、柱および梁に十分なせん断余力を与えこれらの

せん断破壊を防止する設計にある。この設計法で設計された建物の真の保有水平耐力は、種々の上昇要因により、ベースシャー換算値で0.3をかなり上回るものとなっていたと想定される。PC構造の一般的性質である履歴エネルギー消費能力が小さいにも関わらず地震被害がきわめて軽微であった要因は、上記の大きな保有水平耐力と原点指向性（荷重が取り除かれた後、ひび割れが閉合し残留変形がきわめて小さくなる性質）にあったといえるであろう。もし、より大きな履歴エネルギー消費能力を、上記の原点指向性を損なうことなく実現できれば耐震設計はより合理化され経済性の高いPC建築物を設計できることは容易に想像できる。後に述べるが、このような構造システムのことを、Mechanical Self Centering Systemとよび、世界の研究者や技術者が新しい構造システムとして研究している。一方、地震に架構自体で抵抗する耐震構造に対して、上部構造に対する入力を低減する免震装置との組合せも弾性挙動を示すPC上部構造との相性に優れており実際に用いられている。このように、地震に強いPC構造に関するさらなる技術開発が進んでいる。

さて、現在のPC建築構造では、それらのほとんどがプレキャスト工法によって建設されている。これはわが国に留まらず、世界共通である。理由は、部材接合を圧着で行い得るとともに、部材製造が工場で行われるという品質管理と経済性の高さ、工期の短さおよび建設現場作業の軽減（各種車両の進入数制限や騒音防止等も含む）による。したがって、本稿では主としてプレキャストPC構造の耐震設計についての現状と将来展望について言及することにした。

2. プレキャストPC耐震架構の技術現状

2.1 耐震設計

現在のPC建物の耐震設計は、建築基準法²⁾に基づいて行われており、主として保有耐力設計法もしくは終局強度設計法が適用されている。わが国では、プレキャストコンクリート構造に対して一体打ちと同等の構造性能が求められており、プレキャストPC構造に対しても同様である。したがって、圧着により接合される接合面には、少なくとも1.96 N/mm²のコンクリート圧縮応力が要求されている。この要求は、プレキャスト構造のコンクリート接合面は引張強度をもたないため、コンクリートの引張強度とほぼ同等のプレストレストを導入することにより、一体打ちRCと同等の曲げひび割れ強度を確保するためと解釈できる。また、接合面でのせん断滑り破壊の防止が必要で、摩擦係数0.5を用いたせん断設計が行われる（接合面に対する凹凸処理は求められていない）。これらによって、一体打ちとの同



* Fumio WATANABE
京都大学 工学研究科 教授

等性を確保している。現在用いられている保有耐力設計法および終局強度設計法には、PCの特徴である履歴エネルギー消費の少ない原点指向型履歴復元力特性（図-1に京都大学西山峰広博士が行ったト型PC柱梁接合部模型実験の結果を示す）が考慮されていないが、新たに制定される予定の建築基準法施行令告示のPC建物に対する限界耐力法には、これを考慮した設計法が示される。これについては、3節新しい耐震設計法のところで詳細に述べる。

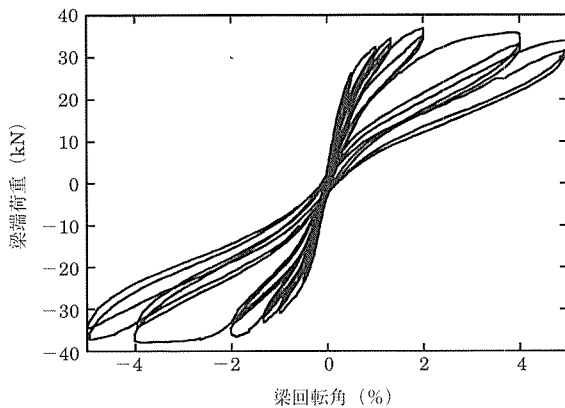


図-1 PC構造の履歴復元力特性

保有耐力設計法では、各層の必要保有水平耐力が式(1)および式(2)で与えられている。

$$Q_{ui} = W_i C_i \quad (1)$$

$$C_i = Z A_i R_i F_{cs} D_s C \quad (2)$$

Q_{ui} ：第*i*層の必要保有水平耐力、 W_i ：当該層より上部の耐震設計用建物重量、 C_i ：当該層の層せん断力係数、 Z ：地域係数で0.7～1.0、 R_i ：地盤性状および建物固有周期に依存した振動特性係数 ($R_i \leq 1.0$)、 A_i ：建物高さ方向の層せん断力分布係数、 C ：標準ベースシヤール係数で1.0（加速度で1g相当）、 F_{cs} ：建物の偏心および高さ方向の水平剛性分布による割増し係数 ($1.0 \leq F_{cs} \leq 3.0$)、 D_s ：構造特性係数で建物の靱性に依存した値（骨組み架構に対して $0.30 \leq D_s \leq 0.45$ ）

上記の D_s 値は、架構の崩壊機構と部材靱性の組合せによって決定されるもので、構造靱性率の大きいものほど小さな値とすることができる。すなわち、構造靱性率の大きなものほど必要保有水平耐力が小さくなる。ただし、注意しなければいけないのは、構造靱性率と部材靱性率は異なったものである点である。構造靱性率とは、架構全体が水平力を受けたときに架構が示す水平力と水平たわみの関係で示される靱性率で、一般的に部材靱性より小さな値となる。図-2に D_s 値の考え方の基本が示されている。同図の横軸は架構の応答水平たわみで、縦軸は応答水平力である。架構が弾性応答をする場合の、最大応答点がA (Q_e, δ_e)となると仮定する。これに対して、架構の水平強度が $D_s Q_e$ と Q_e 以下であるが十分な構造靱性をもっている場合には、図に示すように最大応答点はB ($D_s Q_e, \delta_{ep}$)となる。応答水

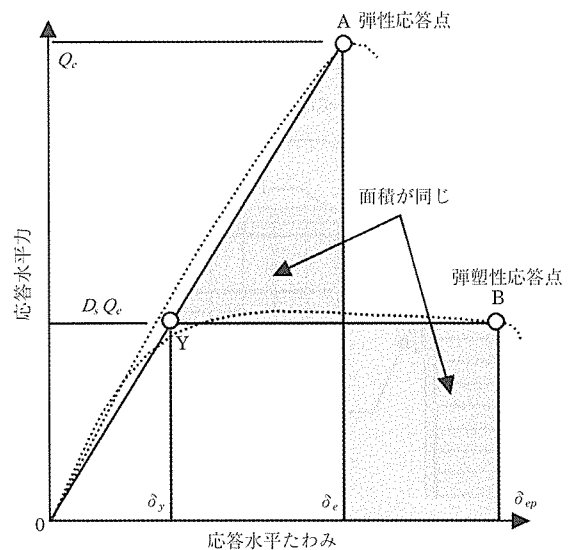


図-2 構造靱性と D_s 値

平たわみ δ_{ep} は、経験的に得られたエネルギー一定則により得られる（図中のハッチ部面積が同じ）。すなわち、構造靱性率（点Yから点Bまでの変形能力で δ_{ep}/δ_y で与えられる）が大きいくほど架構に必要な水平強度は小さくなる（ D_s 値が小さくなる）。

終局強度設計では、式(3)、式(4)で与えられる設計地震水平力（層せん断力で与えられている）に対して、架構の弾性解析を行い、得られたせん断力、曲げモーメントおよび軸力に対して部材の終局強度設計を行う。部材の終局強度設計では、すべて材料の規格値を用いる。部材の脆性的なせん断破壊を防止するために、部材両端部に曲げ塑性ヒンジが形成されたときのせん断力の1.2倍で部材のせん断設計を行うか、または、弾性解析で得られたせん断力の2.5倍で柱の、2.25倍で梁のせん断設計を行うよう規定されている。また、過大な鋼材量による曲げ靱性の低下を避けるために、鋼材係数を0.3以下とするよう規定されている。

$$Q_u = W_i C_i \quad (3)$$

$$C_i = Z A_i R_i F_{cs} C' \quad (4)$$

ここで、 C' は標準せん断力係数で0.3である。すなわち、終局強度設計では、架構における部材のせん断破壊の防止と曲げ変形能力の確保を行うことにより、標準せん断力係数を0.3としている。

2.2 部材分割と接合

プレキャストPCでは、柱にPC梁を圧着する工法が一般的である。柱は圧着PCで建設する場合とプレキャストRCで建設する場合がある。ディテールには種々あるが、それらのうち梁に無応力鉄筋を用いない代表的なものを図-3から図-6に示す。もちろん、これらとは異なった組合せも可能であり、設計者の判断に委ねられる。

図-3は、RC柱プレキャストユニットとPC梁ユニットの接合例である。柱は、その中間部で機械式鉄筋継手と目地モルタル（グラウト）で接合され、PC鋼材定着具は、柱

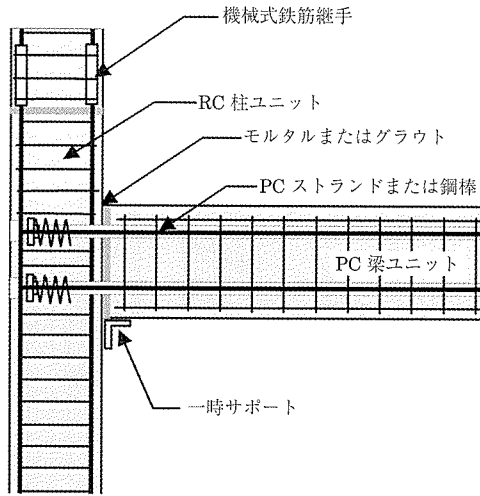


図-3 RC柱ユニットとPC梁ユニットの接合例
(柱中間接合、定着具接合部内)

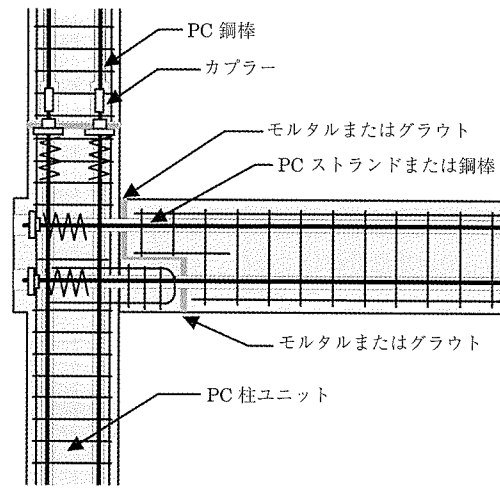


図-5 PC柱および梁ユニットの接合
(支持コーベル梁断面内)

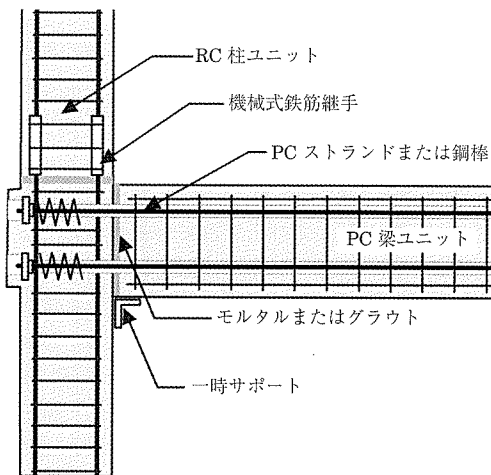


図-4 RC柱ユニットとPC梁ユニットの接合例
(柱脚部接合、定着具接合部外)

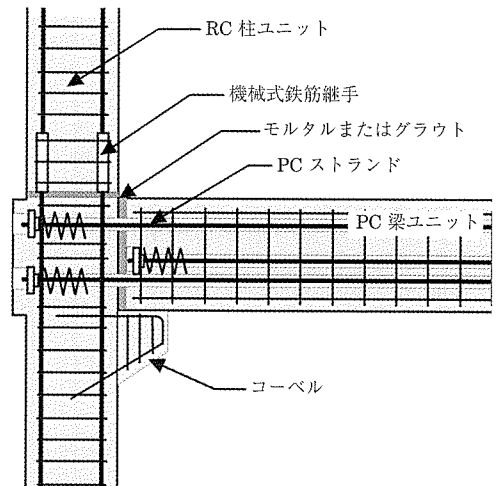


図-6 RC柱ユニットとPC梁ユニットの接合
(PC梁ユニット内一次緊張材)

梁接合部コア内に配置されている。また、架設時に仮サポートが柱に取付けられる。

図-4は、図-3と同様であるが、柱接合部が柱脚部にある点とPC鋼材定着具が接合部外にある点が相違している。定着具が接合部内にある場合の架構の挙動に関しては不明確な点があり、現在PC技術協会内に設置された、PC柱梁接合部研究委員会で検討が進められており、近ちか成果が公表される。

図-5は、柱および梁ともにPCユニットであり、梁端切欠部が、柱ユニットより突出したコーベルに乗る形となっている。架設時の仮サポートが不要な点に特徴があるが、梁端部における塑性ヒンジ形成メカニズムに不明な点がある。

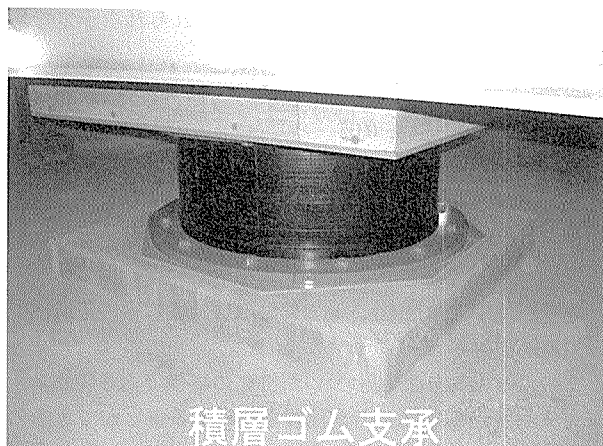
図-6は、RC柱ユニットとPC梁ユニットが接合されており基本的には、図-3および図-4と同じである。ただし、架設時にPC梁ユニットを支えるコーベルが、梁下に配置されている点と、鉛直荷重のみに抵抗するためのPC鋼材が、梁ユニット内にあらかじめ配置されている点に特徴が

ある。大スパン梁の架設が必要な場合には、このように梁ユニット内にあらかじめPC鋼材を配置することが多い。

以上のような各種工法があるが、これらの選択または組合せは、設計者がそれらの特徴をよく理解して決定しなければいけない。梁に無応力鉄筋を配置して、エネルギー消費能力を増大させる形式のものは4節新しい構造システムのところで述べる。

2.3 免震装置や制振装置との組合せ

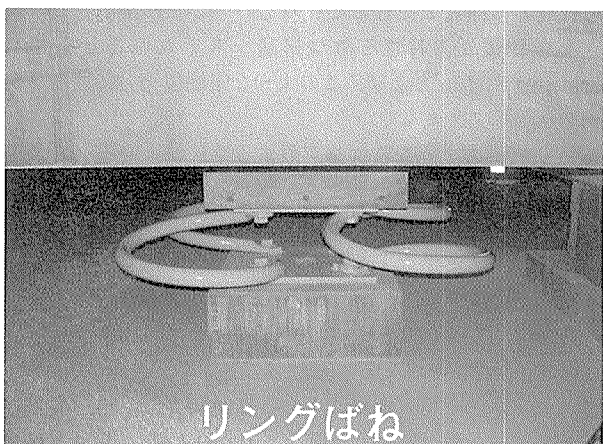
上部構造で地震荷重に抵抗する耐震構造では、地震時の安全性確保は行われるが、何がしかの損傷が生じるのが通例である。骨組み架構では、梁降伏型の崩壊メカニズムがもっとも望ましいとされているが、塑性ヒンジの発生そのものが、材料の非弾性挙動によっていることを考えると、損傷が生じるように設計されているといってもよいであろう。図-1に示すPC架構の履歴復元力特性を見ると、大変形を受けても損傷が無いように見えるが、PC鋼材の降伏や、コンクリートの部分的圧壊が生じている。すなわち、材料に対する損傷が発生している。もちろん、対象とする大地



積層ゴム支承



金属ダンパー



リングばね

図-7 免震装置例

震は、再現周期が数百年と長く（国によって異なる）、建物供用期間中に震災にあう確立はきわめて小さい。また、たとえ大地震を経験しても、建物は崩壊せず、人命が損なわれないように設計されておれば、損傷を受けてもよしとすべきである。

一方、さらに高い耐震性能、たとえば、大地震を受けても上部構造は弾性応答範囲にとどまり、各種設備・設置機器も含めてまったく無損傷の状態を保つことが設計目標に

成ることもある。きわめて重要度の高い建物や、地震時に生じる応答加速度が大きくなると各種器具が損傷を受け建物機能が麻痺する場合（情報センターや病院等）が該当する。このような場合には、上部構造に入力する地震荷重を低減するために、基礎部に免震装置を挿入することが多い。図-7に免震装置の例を示す。建物重量は、すべてゴムの薄層と金属板を重ねた積層ゴム支承により支えられる。この、積層ゴム支承の水平剛性は建物に比べてきわめて小さく、免震層を含む構造体全体の固有周期を大きく増大することにより、上部構造に対する入力地震動を低減する（地震動の卓越周期に比べ、構造系の固有周期が大きくなればなるほど、構造系への入力地震動は小さくなる）。金属ダンパーおよびリングばねは、免震層における減衰および復元性を与えるものである。免震装置の挿入により、上部構造への入力地震動が低減されると、床応答加速度の低減とPC架構の特徴である原点指向性の履歴復元力特性（図-1）とによって、地震時にまったく損傷を生じない（構造体のみでなく加速度に弱い各種機器に対する損傷も含む）建物を建設できる。免震装置とPC架構の組合せには、今後大きな発展が期待される。

免震装置による上部構造への入力地震動低減とは異なり、各種ダンパーを用いて架構の応答低減を行う工法もある。ダンパーとしては、低降伏点鋼、摩擦ダンパー、粘性ダンパー等が用いられる。これらダンパーが有効に働くためには、ある程度の変形が必要で、一般的には層間に設置されエネルギーを消費する。ただし、変形量が小さくても効果を発揮するダンパーの場合には、柱と梁の仕口等に設置することもできる。設計では、架構自体の応答を無損傷弾性域または修復不要の微損傷にとどめ、所用のエネルギー消費をダンパーに負担させるように行われる。しかしながら、現在の建築基準法には、ダンパーによる制振効果を考慮できる通常建物に対する静的な設計法が含まれていないので、ダンパーを無視した架構設計により安全性を確認し、時刻歴解析によって確認されたダンパーの制振効果を付加価値としているのが現状である。

3. 新しい耐震設計法

現在の保有水平耐力設計および終局強度設計に加えて、建築基準法には新しい変位依存型設計法（Displacement Based Design Method）が追加されている³⁾。これは、限界耐力法とよばれており、等価線形化法が応用される。等価線形化法とは、コンクリート構造のような劣化形の履歴特性をもつ構造を、定常振動しているときの履歴ループが示すエネルギー消費を等価な粘性減衰定数に置き換えて線形化する手法である。この方法によると、ある粘性減衰定数をもつ線形系の応答スペクトルが、対象とする地震動に対して容易に得られることを利用して、劣化形の履歴特性をもつ構造物の応答を予測できる。ただし、地震に対する応答は非定常（入力地震動が定常的なサイン波のようなものでなく、非定常な性質をもつため、応答も非定常となる）であるので、Sozen および Gulkan の提唱した Substitute Damping の考えを取り入れる⁴⁾。これは、地震応答が終了

した時点までの全地震動エネルギーと、履歴減衰の成した仕事を等しいと仮定し、平均的な等価粘性減衰定数を与えるものである。この平均的な等価粘性減衰定数が与えられれば、非定常な地震動に対する応答スペクトル（加速度および変位で表現したもので、ダイヤモンドスペクトルとよぶ）が得られる。次に構造物の静的解析で得られた水平荷重と水平変位の関係を、加速度（水平荷重を質量で除したもの）と変位で表した曲線（キャパシティースペクトルとよぶ）を求め、先のダイヤモンドスペクトルとの交点により応答変位が求められる。この方法を図-8に模式的に示す。図-8の縦軸上向きは、応答加速度で、横軸は応答変位である。また、縦軸の下向きは、構造物の最大変位に対応した等価粘性減衰定数で、先に述べた平均的等価粘性減衰定数である。図中には、粘性減衰定数 h が 0.05, 0.1 および 0.3 と、応答変位に関わらず一定とした場合の加速度—変位応答スペクトルが一点鎖線で示されている。

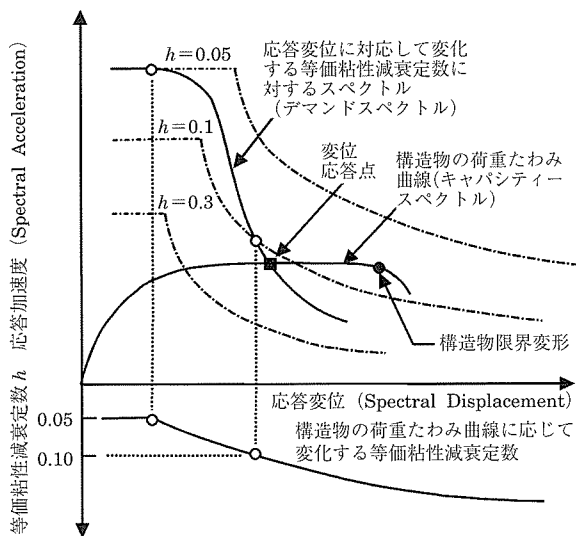


図-8 限界耐力設計法の概念

実際の建物では、先に述べたように等価粘性減衰定数が応答変位によって変化するので、応答変位に対応して変化する等価粘性減衰定数を用いた加速度—変位応答スペクトルが必要となる。これを、ダイヤモンドスペクトルとよぶ図中に実線で示されている。このダイヤモンドスペクトルは、等価粘性減衰定数を一定としたスペクトル線上を渡っていくことになる。

構造物の等価重心位置での、荷重—たわみ曲線を加速度と変位で表したものをキャパシティースペクトルとよび、図中に示されている。ダイヤモンドスペクトルとキャパシティースペクトルの交点が、構造物の最大変位応答点を与える。図-8に示す場合のように、構造物の限界変形がこの応答点よりも大きい場合には、構造物は地震に対して崩壊しないことになる。この限界耐力設計法では、平均的等価粘性減衰定数をどのように与えるかがキーとなり、建築基準法では、鉄筋コンクリート構造に対して式(5)を与えている³⁾。西山博士は、この式をフルプレストレス構造から鉄筋コンクリート構造までカバーできるように拡張し、式

(6)を提案している⁵⁾。この考えは、現在施行が待たれているPC構造に対する限界耐力法に取り入れられる予定である。

$$h = 0.2 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right] + 0.05 \quad (5)$$

$$h = (0.06 + 0.14 \sqrt{\alpha}) \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right] + (0.02 + 0.03 \sqrt{\alpha}) \quad (6)$$

μ ：韌性率（塑性率）、 α ：部材曲げ強度に占める普通無応力鉄筋の寄与

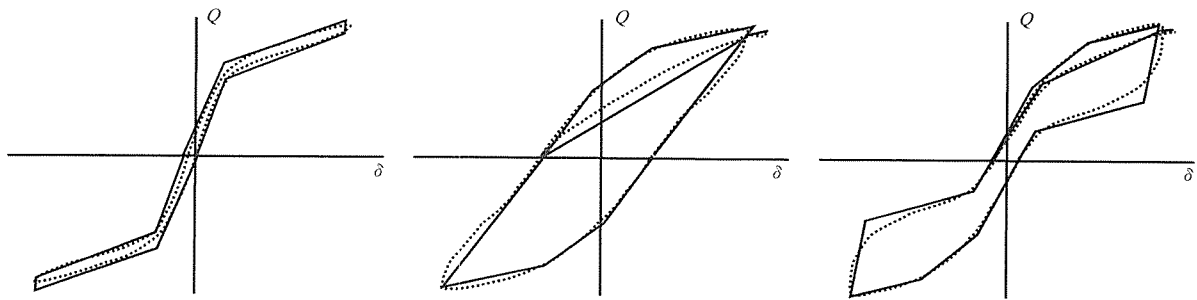
この、限界耐力法を用いれば、PCの特徴である履歴エネルギー消費が小さいという性質を反映することができるので、従来からいわれてきた「PCの耐震性能はRCに比べて小さい」との議論に終止符を打つことになる。

4. 新しい構造システムの開発

図-1に示すように、PC構造は原点指向でエネルギー消費の小さな特徴を有している。これを模式的に示したのが図-9(a)である。原点指向性による復元性の高さは大きな特長であるとともにエネルギー消費が少ない点は欠点でもある。一方、鉄筋コンクリート構造では、図-9(b)に示すように、剛性劣化が生じるもののエネルギー消費は大きく、式(5)と式(6)の比較からも明らかのように、大きな等価粘性減衰定数を取ることができる。しかしながら、外力が取り除かれた後の残留変形は大きい。このように、PCとRCはおのおの長所と短所を有している。もっとも効率的な履歴復元力特性は何であろうかと考えると、図-9(c)に示すような、残留変形の小さな原点指向性と大きなエネルギー消費能力の両者を保有したものということになる。このような履歴復元力特性をもつ構造システムのことを Self Centering System とよび、このような履歴復元力特性をフラッグシェイプとよんでいる。

図-9(c)のような特性を実現する手法が、いろいろと提案されている。図-10はその一例で、普通強度素線と高強度素線を撚り合わせた混合ストランドを用いた場合の効果が、普通ストランドを用いた場合との比較で示されている⁶⁾。試験体N-1およびN-2は、普通ストランドを用いた外部柱梁接合部部分架構で、図には梁先端部荷重とたわみの関係が示されている。試験体C-1およびC-2は、混合ストランドを用いた場合である。同図より、混合ストランドを用いた場合には、履歴復元力特性が図-8(a)から図-8(c)に変わり、エネルギー消費能力の増大が得られることがわかる。このようなシステムは、他にも提案されており、たとえば、PC鋼材による復元性をさらに高めるために、PPC構造（RC構造にプレストレスを導入したもので、わが国ではPRCとよばれている）の梁におけるPC鋼材の付着を部分的に除去したものが提案されている。さらに、PC鋼材全長にわたって付着のないアンボンドPC鋼材の使用も考えられている。

図-11に、きわめて興味深いシステムを紹介する⁷⁾。図には2種類の構造システムが示されており、おのおの、エ



(a) 原点指向非線形弾性型(PC) (b) 剛性劣化履歴型(RC) (c) 原点指向履歴型

図 - 9 典型的な3つの履歴復元力特性

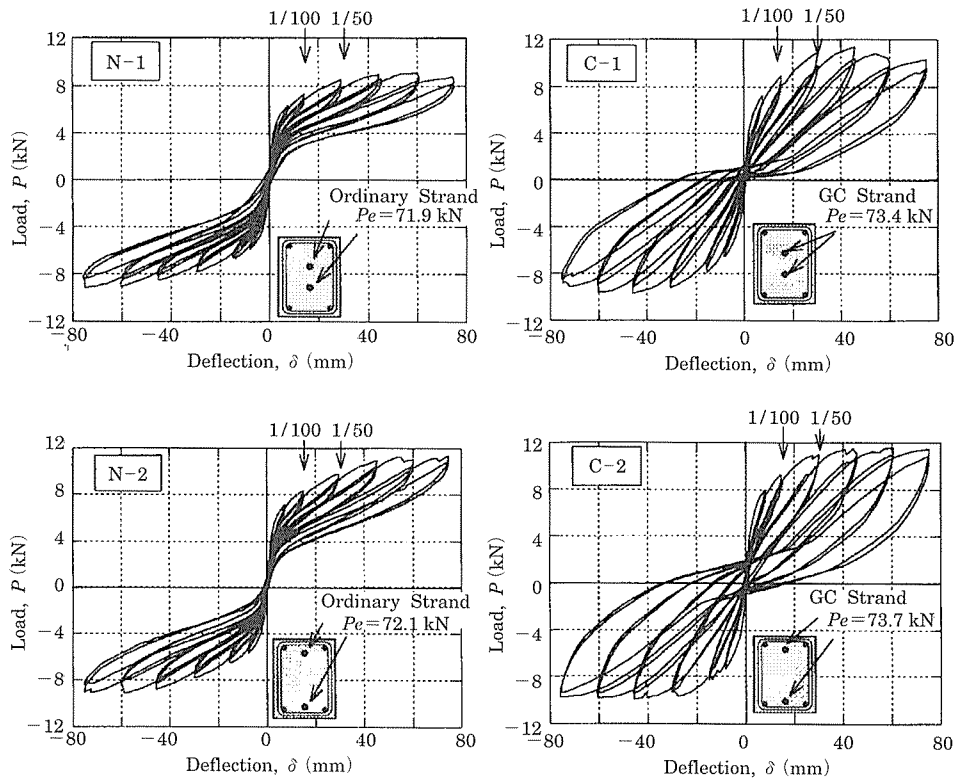


図 - 10 Self Centering System の例 1 (混合ストランド使用)

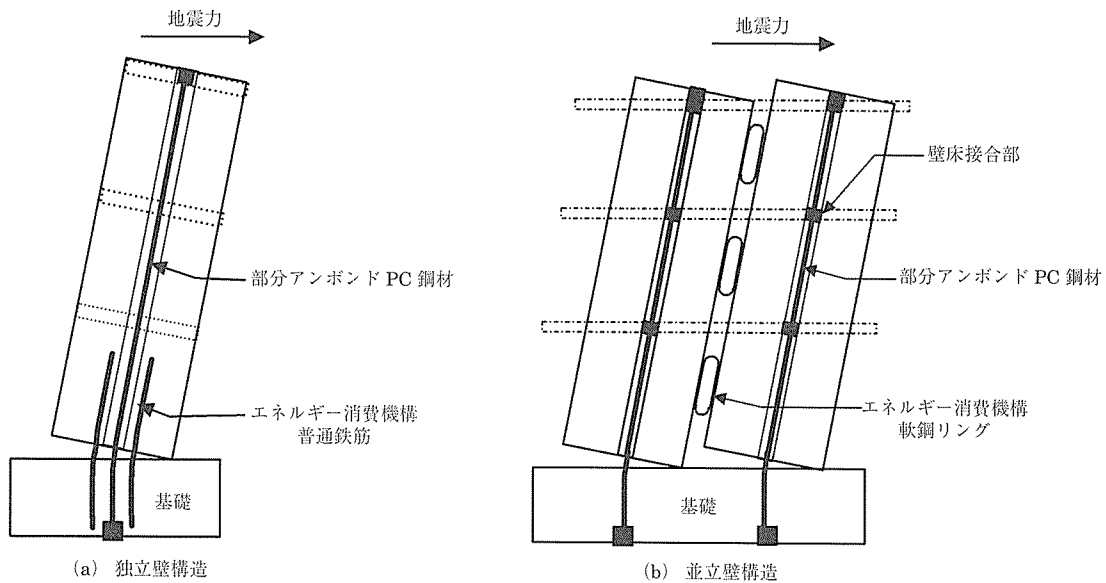


図 - 11 Self Centering System の例 2 (耐震壁構造)

エネルギー消費機構が異なる。図 - 11(a) は、独立耐震壁に部分アンボンド鋼材により鉛直方向プレストレスを導入し復元性を高めた構造である。エネルギー消費は、壁脚部に配置した普通鉄筋に依存する。図 - 11(b) は、並立耐震壁を部分アンボンド PC 鋼材により縦締めしたものである。このような構造では、地震水平力による変位が生じると壁間にせん断すべりが発生するので、このせん断すべりによりエネルギー消費が生じるようなデバイスを挿入すればよい。ここでは、軟鋼によるリング状デバイスが挿入されている。

以上紹介した Self Centering System は、上で述べたようなメカニカルなエネルギー消費機構や粘性体や各種材料を用いたダンパー機構などによって実現でき、きわめて多くの可能性がある。常時の使用性はもとより、地震に対する安全性確保と無損傷またはきわめて軽微な損傷とといった理想的な構造システム開発に PC 構造は不可欠である。現在 fib 耐震委員会の TG7.5- Seismic Design of Buildings incorporating High Performance Materials において、新しい構造システムに関する世界各国の情報収集を進めており、2006 年には fib から SOA レポートとして出版される予定である。

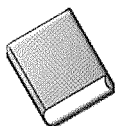
5. 結 語

本稿では、建築におけるプレキャストプレストレストコンクリート耐震構造に関して述べた。PC 構造の将来像を策定する上で何がしかの助けになれば幸いである。

参考文献

- 1) Hiroshi Muguruma, Minehiro Nishiyama, Fumio Watanabe, Lessons Learned from the Kobe Earthquake - A Japanese Perspective, PCI Journal, Vol.40 No.4, pp.28-42, July-August 1995.
- 2) 建築物の構造規定—建築基準法の施行令第 3 章の解説と運用—1997 年版, 日本建築センター
- 3) 平成 12 年 6 月 1 日施行「改正建築基準法 (2 年目施行) の解説, 新日本法規
- 4) 鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン, 新構造体系シリーズ, 技報堂出版
- 5) 共同研究 PC 構造設計・施工指針の作成, 最終年度研究報告書, 平成 11 年 3 月
- 6) 西山, 丹羽, 渡辺, 六車: 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
- 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), To be published

【2003 年 8 月 25 日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリート技術の 適用拡大と世界の動向

第 31 回 PC 技術講習会

(平成 15 年 2 月)

頒布価格 会員特価：5 000 円 (送料 500 円)

非会員価格：6 000 円 (送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会