

# 持続的社會資本形成のためのPC建築技術

渡邊 史夫\*

## 1. 社会の求めるもの

21世紀に入り、社会や経済の仕組み、人間のもつ価値観が大きく変化する中で、われわれPC技術に関わる技術者や研究者に対してもパラダイム（研究社新英和辞典：一時代の支配的考え方を規定している科学的認識体系または方法論）シフトが、人間、生活、社会、情報および環境等をキーワードとして求められている。現在までPC技術に関わる技術者は、人間社会をより豊かで暮らしやすくかつ持続性のあるものにする努力を継続してきており、人間社会に大きく貢献してきた。一方で、自然破壊やコンクリートジャングルといった批判も受けており、本当の意味での人類への貢献は何かが問われている。高橋康夫氏（京都大学 工学研究科 教授）は、建築のパラダイムシフトに対するキーワードとして、

- ① フロー社会からストックを重視する社会へ
- ② 省エネルギーや省資源、地球環境保護を重視する社会へ
- ③ 歴史的・文化的価値を重視する社会へ

を挙げており、文化面をも考慮に入れた人間生活空間の創造と再生と保全の必要性を説いている。このような社会を実現するための構造技術としてPCを捉えたときに、どのようなかたちでの貢献ができるのであろうか、また、PCの特長がどのようなかたちで生かされるのであろうか。本稿では、このような観点からの考察を行う。

## 2. 建物の性能とは何か

ちまたでは、性能設計という言葉が飛びかっている。そこで、先に述べたキーワードと性能に関連した言葉に関連づけると、「ストック：使用性、修復性および安全性の長期にわたる保証（耐久性）、空間柔軟性」、「省エネルギー、省資源：空間柔軟性、耐久性、リサイクル」、「歴史・文化的価値：形態創造性（小生の造語で、PCによる美しい空間形態構成能力を意味する）」となり、これらについて述べ、性能確保のためのPC技術と結び付けたい。



\* Fumio WATANABE

本協会常務理事  
京都大学大学院 工学研究科  
建築学専攻 教授

### 2.1 使用性 (Serviceability)

使用性は、常時荷重に対してのみでなく地震荷重などの非常時荷重に対しても求められるもので、建物の機能を継続的に保持する性能である。不快な振動（加速度）や変形、家具、建具および設備機器類に有害な影響をもたらす振動（加速度）や変形などを許容値以内（限界値）に留めることで、使用性が確保される。限界値は、計測可能な工學量で与えられるが、構造体とは無縁なものである。たとえば、不快な振動（加速度）や変形は、人間の感覚に起因するものであり、有害な加速度は、設備機器（病院の治療機器等も含まれる）類の耐加速度性、有害な変形は、建具の可動限界、設備機器取付け部や配管類の可動限界、2次部材の変形限界（損傷限界）によって定まる。これらに対する限界値が工學量として与えられ、それをクリアするのが構造体である。常時荷重に対して使用性が求められると同様、地震荷重に対しても検討が必要である。使用性を検討する対象地震荷重は、通常、まれに発生する地震動（レベル1地震動）であるが、建物用途によっては極めてまれに発生する地震動（レベル2地震動）も検討対象としなければいけない。とくに、災害情報センターや病院のように、地震災害時においてさえも機能を保持しなければいけない建物では、レベル2地震動に対しても使用性を確保しなければいけない。一般的には、使用性確保に対しては、各種応答量を限界値以内に収めるとともに、すべての構造部材に対して弾性挙動が要求される。例外的に、容易に取替え可能な制振を目的とした低降伏点鋼材を用いたダンパー等には塑性挙動が許容される。ここで、PC構造を考えてみると、外力としてプレストレスを導入することにより、たわみや変形を能動的に制御できる点やひび割れの発生を防止し剛性を確保できる点より、変形に関連した常時使用性の確保には極めて適した構造法である。一方、弾性的な挙動を示すゆえに、減衰が小さいことに注意が必要であり、地震動に対して、応答加速度が性能目標に掲げられるような場合には、制振装置や免震装置との併用が必要となる場合もある。

### 2.2 安全性 (Safety)

安全性は、常時荷重や地震荷重のもとで、構造物の倒壊、構造部材や2次部材の脱落・転倒・落下、設備機器や什器の飛散・転倒・落下等による人命の喪失や、致命的な傷害を防止するための性能である。安全性に対する限界状態は、架構の終局水平強度および終局限界層間変位（構造じん性）、部材や部材接合部の終局強度および終局限界変形（部材じん性）、架構および床の応答加速度で与えられる。レベル2地震動もしくはレベル3地震動（建築地点で想定される最大級地震動を意味し、極めて重要な建物、たとえば「原子力発電所」などではこれに対する安全性が求められる

る)に対して得られる各種応答値が、上記限界値を超えないことを確認することによって安全性が確保される。PC建物の耐震設計では、通常のRC構造とは異なった履歴減衰特性(繰返し荷重下での履歴曲線が幅の狭いものであり、履歴エネルギー消費が少ない特性)を適切に考慮する必要がある、建築基準法施行令告示の「限界耐力法」にその方法が示されている。履歴減衰特性を適切に評価すれば、耐震性の高いPC建物の設計が可能となる。安全性確保のために加速度制御が必要な場合には、応答加速度が通常のRCに比べて大きくなることを考慮するとともに、必要性に応じて使用性が述べたと同様、制振装置や免震装置との併用が求められる。

### 2.3 修復性 (Reparability)

修復性は、まったく損傷のない状態と安全限界の間を繋ぐ性能で、そのレベルは幅広い。地震荷重等を受けた後に、使用性や安全性を損なうような損傷(残留変形、部材強度や塑性ヒンジの回転能力劣化等)を許容しない、すなわち修復を必要としない「無損傷状態」と、もう一つは、安全限界には至っていないが損傷を受けた「損傷状態」に分けて考えると分かりやすい。先の「限界耐力法」の損傷限界設計は、この無損傷状態に対応したものであり、構造材料の材料応力が材料降伏点または材料強度以下にしなければいけないとともに、安全性を損なう有害な残留変形や部材の強度・じん性劣化を生じさせてはいけないと定義されている。損傷状態に対する修復性は、元の構造性能を回復するための程度を表すもので、技術的な難易度と経費の観点より評価される。この性能は、使用性や安全性に比べてやや漠然としているように見えるが、実際に地震被害を受けた場合の、被災度の判定と復旧に密接に関連した項目であり、今後大いに検討すべきである。修復性レベルの決定は、建物全寿命の間のトータルコストから評価されるべきもので、建物発注者と設計者が協議のうえで決定する。これに関連する限界状態は、架構や部材の残留変形、コンクリートかぶりの剥落やコンクリートの圧壊、残留ひび割れの幅、鉄筋やPC鋼材の塑性化・破断や座屈といった尺度で与えられる。これらに対して、可能な修復工法を検討し、経費を算出することになる。PC構造は、極めて高い復元性を有しているため、残留変形が小さい利点を有している一方、塑性ヒンジの回転によってPC鋼材の降伏やコンクリートの損傷が生じた場合、プレストレス力が減退するので、減退量が使用性や安全性を損なわないか、また、元の性能に復元することが可能な範囲にあるかどうかの検討が必要となる。

### 2.4 耐久性 (Durability)

耐久性には、長期にわたって、先に述べた使用性、安全性および修復性が維持される構造耐久性と美観保持の2つがある。これらは、限りある資源を有効に活用するために重要な性能で、建物の長寿命化に対応する。構造耐久性を損なう原因は、材料に劣化をもたらす温度変化、時間経過、水や塩分等の化学物質の飛来と侵入等、極めて多い。常時荷重、温度応力、コンクリートの乾燥収縮やクリープおよび地震荷重等の作用により発生した予期せぬひび割れ幅拡大が、水の侵入を許し、鉄筋の発錆やPC鋼材の破断を引き起こすなどの現象が過去経験されている。耐久性確保

のためには、材料検討のみでなく構造的検討も併せて行われなければならない。これら要因による材料劣化または部材性能劣化は、主として材料選択、配筋詳細、構造解析さらには定期的な補修計画の実施によって防止されている。PC構造では、高品質コンクリート(高強度コンクリート)の使用、繊細な構造ゆえの入念な施工、プレストレスによるひび割れ幅制御等によって、高い構造耐久性を確保できる一方、ポストテンション工法で用いられるグラウトの善し悪しと定着端の保護が構造耐久性を左右するキーとなるので、良いグラウト材料の選択、完璧なグラウト施工と定着端保護が求められる。グリースおよびプラスチックシースで完全に防錆されたPC鋼材を用いたアンボンド工法の適用、鋼材表面を防錆材料で覆ったPC鋼材の使用、後硬化型グラウトをあらかじめシース内に注入したPC鋼材の使用等もある。一方、設計段階において、材料劣化により耐久性が低下することをあらかじめ予測し、材料劣化の照査および交換が容易な構造法を選択する場合もあり、今後の方向の一つであろう。美観保持は、とくにPC構造にとってのみの問題ではなく建物一般に求められる性能であり、建物表面仕上げ材料の選択や打放しコンクリート表面の処理などで対応するとともに定期的なメンテナンス(清掃)が必要である。

### 2.5 空間柔軟性 (Space Flexibility)

耐久性の一つとも位置づけられるが、空間柔軟性も重要な性能項目である。社会や環境の変化に伴って建物の用途は変化する。たとえば、集合住宅の2戸分を一つの大家族住宅に改装する場合、RC造集合住宅のように戸境壁(構造体)があると困難である。大きな空間を構築しておき、用途に応じて空間を再分割したり融合したりできるPC構造は大きな空間の柔軟性を有していると言える。さらに夢は膨らむが、PCメガストラクチャーや人工地盤を永久構造物として構築しておき、そこに、用途に応じた建物を建設していくようなことも可能であろう。

### 2.6 リサイクル (Recycling)

コンクリート構造の最大の欠点は、コンクリート材料のリサイクルが困難な点にある。コンクリートから再生骨材を取り出す試みもなされているが、いまだ新築に用いられるには至っていない。再生骨材製造に必要なエネルギー(コスト)もばかにならないし、生成する粉体の処理についても問題がある。したがって、再生骨材の考えではなく、PC部材の再利用といった観点でのアプローチが有効である。たとえば、建物で常に弾性挙動(無損傷)を示す部分をPCで製造し、塑性化する部分(塑性ヒンジ等損傷を受ける部分)を交換可能なメタル系材料等として、これらをプレストレスで圧着するなどはどうであろうか。PCの高い耐久性を考えると、十分可能な方法と言える。そのためには、建物に用いられる部材をモジュール化しておく必要がある。モジュールは、梁、柱といった大きなものから、コンクリートブロック程度の小さなものまで考えられ、これらを接合する手法としては、PCの圧着が最も適している。最近、圧縮強度で100 MPaを超えるような高強度コンクリートの製造が可能となっており、石材と同等の高耐久性がコンクリートに期待できる。人類の歴史の中で、過去の建造物に

用いられた石材を新たな建築に転用することが頻繁に行われてきたのと同様に、高強度コンクリートそのものの再利用が期待できる。

### 2.7 形態創造性 (Shape Creativity)

先に述べたように、建築物には文化や歴史が感じられる美しさが必要である。美しさには、芸術的な美しさと構造的な美しさ(力学的合理性の表現)がある。PC構造は、造形性豊かなコンクリートの使用と軽快でシャープな部材形態をキーとした架構構築によって、この両者を満足させることができる。わが国の伝統的木質構造のような繊細で豊かな空間や、ダイナミックな大空間を無理なく可能とする。とくに、プレキャスト工法によるPC建物は、各種建築的表現を可能とし、構造合理性と相まって今後大きな発展が期待できる。

## 3. 構造設計の新しい方向

### 3.1 性能設計のための構造解析法

前節では、建築に求められる各種性能について述べ、PC構造を特徴づけた。ここでは、構造法としてはすでに確立されているPC構造の今後進むべき設計法に関連した項目、とくに、わが国で重要な耐震設計に焦点を絞って述べる。現在は、与えられた条件(要求性能)のもとで架構における材料、部材断面や配筋を直接決定できる構造設計手法は、実際に応用できるレベルに到達していない。何がしかの仮定のもとで構造解析を実施し、要求される性能が満足されていることを確認するのが現在の構造設計法である。構造解析によって架構および部材の応力と変形が得られ、それに対して部材設計が行われる。構造解析は主として静的解析、動的時刻歴解析および等価線形化解析等によって行われる。とくに、等価線形化法は、静的解析によって性能設計に必要な各種応答量を予測できるとともに、PCの履歴復元力特性を前向きに評価するもので、より信頼性の高い耐震設計が可能となる。現在は、動的な地震荷重を静的な水平力に置き換えた設計地震荷重に対して構造設計を行う方法が広く用いられている。これに対して、地震動の性質と建物の履歴特性をよりの確に反映させる構造解析手法が等価線形化法で、建築基準法施行令に「限界耐力法」として新たに加えられた。これは、非線形履歴応答挙動を示す1自由度系を、履歴減衰を等価粘性減衰定数に置き換えた線形1自由度系で表現する手法で、多自由度系である建築物を縮約した1自由度系に適用する。方法はいくつかあり、ここではデマンドスペクトルとキャパシティスペクトルを用いた方法を示す(図-1)。まず、対象とする建物に非線形漸増増載荷解析(プッシュオーバーアナリシス)を実施し、等価重心に関する水平力と変位関係、および、変位に対応する等価粘性減衰定数(変位の値によって変化する)を求める。等価粘性減衰定数を求める方法には、非線形漸増増載荷解析によって得られる各変位時の各部材変形に対応する等価粘性減衰定数を重みづけ平均する方法と、架構全体に架構じん性率で表現した簡易な等価粘性減衰定数式を適用する方法の2つがある。得られた水平力と変位関係を、等価質量を用いて応答加速度と応答変位で表したキャパシティスペクトルを作成する。入力地震動は、設計用地震スペクトル

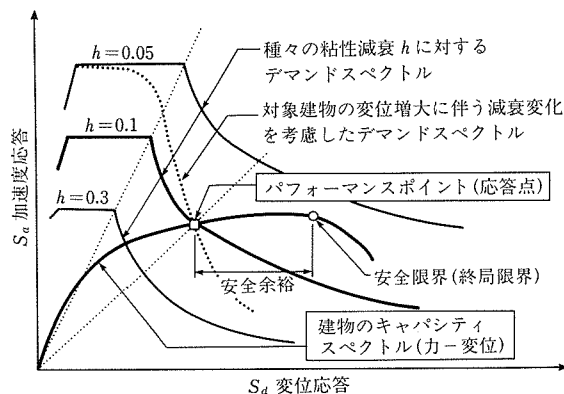


図-1 等価線形化法による応答変位予測原理

(5%減衰)を用い、粘性減衰定数を種々変えて得られる加速度応答と変位応答で表したデマンドスペクトルを求める。用いる粘性減衰定数としては、先に求めておいた対象架構の変位によって変化する等価粘性減衰定数が用いられるので、対象架構に対するデマンドスペクトルは、一定の粘性減衰定数で描かれたスペクトル上をわたっていく(図-1中の点線)。得られた対象架構に対するデマンドスペクトルとキャパシティスペクトルの交点が応答変位点(パフォーマンスポイント)として得られる。図-1の架構の場合、応答変位点に対する等価粘性減衰定数は10%ということになる。架構の保有する部材強度や変形能力が、得られたパフォーマンスポイントに対応する部材応力や変形を上回るように部材細部設計がなされる。この方法は、新しいものではないが、変位応答点とそれに対応する部材変形や材料ひずみと応力の応答値を予測することができるとともに、PCの特殊な履歴減衰特性を考慮できるため、PC建物の性能設計を行う場合の極めて有用な方法である。

### 3.2 性能評価のための問題

構造解析で得られた架構変形、部材変形、材料ひずみと応力が、要求性能を満たしているか否かをチェックするのが最後の性能設計の段階となる。とくに、性能を保証する限界状態は、架構の変形、部材の変形、材料の応力およびひずみで与えられており、これらの関係づけがどこまで正確にできているかが設計の精度を左右する。PC部材を含めコンクリート系部材の各種強度に関しては過去多くの研究成果があり、実用的な強度設計式にはおおむね不自由しない(精度の向上等、今後の研究課題は多くある)。一方、部材応答が軸力、曲げモーメント、せん断力および変形として得られたときに、これらを、ひび割れ幅、鉄筋およびPC鋼材応力とひずみ、コンクリート応力とひずみ等の材料応答に正確に関連づける手法が確立されているとは言えない。現在、多くの部材復元力特性が解析に用いられているが、それらは一つのルールとして確立されたもので、材料応答との関連性は考慮されていない。材料応答と結びつけた部材復元力特性が与えられない限り、精度のよい性能設計はできない。これは、性能設計での大きな目的である、使用性、安全性および修復性の確保に欠かせない項目で、今後の大きな研究テーマである。そのためには、個々の材料に生じる物理現象の実験観察を基本としたマイクロモデルまたはマクロモデルによる定式化、同様にミク

ロモデルまたはマクロモデルを用いた部材応答予測法の確立、さらに、架構のモデル化と一貫した枠組みが必要である。このような枠組みを明確に保持することによって研究の効率が上がるとともに、性能設計の信頼性も向上する。すなわち、全体枠組みの中で各種設計法（設計式）の長所、短所、適用の可否等を明確にするということである。

#### 4. プレキャストPCのすすめ

プレキャストRC構造は、施工の合理化と品質管理の徹底を目的としており、わが国では一体打ちと同等（Equivalent Monolithic）の構造性能を付与することに設計の目標が置かれてきた。このような設計法は、エミュレーションデザイン（Emulation Design）と呼ばれており、設計ではプレキャスト接合部のない架空の一体打ち建物を想定して実施される。その一方で、プレキャスト部材の寸法、施工の方法、建設コスト、想定崩壊形、接合部ディテリングを考慮して、接合部の種類と位置が決定される。接合部の種別を分類すると、部材間接合部（Member/member connection）、複合化接合部（Composite connection）およびダイアフラム接合部（Diaphragm connection）の3つに分類される。部材間接合部は、複数の部材を剛に接合し剛接骨組を作り出す。複合化接合部は、プレキャスト梁とトッピングコンクリート間のように複合部材を構成する接合部である。ダイアフラム接合部は、プレキャスト床スラブシステムのように、面内せん断力の伝達と面内剛性を確保し、ダイアフラムアクションを保証するための接合部である。これら接合部を構成する接合要素としては、

- ① プレキャストユニット間またはプレキャスト中空ユニット内のジョイントコンクリート
- ② フック、定着装置等を用いた軸鉄筋の現場打ちコンクリート内への定着部
- ③ 重ねまたは機械式カップラーを用いた軸鉄筋継手
- ④ 平滑または凹凸を有するプレキャストユニットと現場打ちコンクリートの界面（結合鉄筋を有する場合と有しない場合）
- ⑤ 鉄板と現場打ちコンクリートの界面
- ⑥ 鉄板と軸鉄筋の溶接部
- ⑦ 鉄板と鉄板の溶接またはボルトによる接合部

などが広く用いられている。上記の接合部要素で構成される各種接合部は剛接を基本とするが、何がしかの滑り変形の発生は避けられないし、接合部強度を確保するために極めて複雑なディテリングが要求される。これらRC接合部に対して、プレストレスによる圧着接合は、プレストレス力によって2つの部材を締め付け、コンクリート境界面の摩擦によってせん断伝達を可能とする単純明快な工法である。複雑なディテリングや現場でのジョイントコンクリート施工が不要である。力学的には、摩擦接合なので、接合面入力せん断力が摩擦抵抗以下であれば滑りがまったく生じない完全な剛接合を可能とし、部材間接合部、複合化接合部およびダイアフラム接合部のすべてに適用可能な優れた接合工法である。現在広く用いられている柱間および柱梁間をプレストレスで締め付ける圧着架構法（図-2）は、プレストレスをプレキャ

ストに応用した代表的なものである。施工の合理化、完璧な品質管理および信頼性のある部材接合を考えると、圧着架構法には大きな発展が期待される。この圧着接合の応用形態として、プレストレスを制御することによって摩擦抵抗を制御する摩擦制御接合があり、境界面せん断力がある値に達すると、一定の摩擦力を保持しながら滑りが進行する特殊な接合法もある。また、通常のRCプレキャスト工法にプレストレスを併用し、不可避な滑り変形を防止するとともに大変形を受けた後の変形回復性を向上させる使い方もある。今後は、PCを積極的にプレキャスト工法へ適用することによって、より性能の高い建物建設を可能とする工法や構造システムの開発が進められるよう期待する。

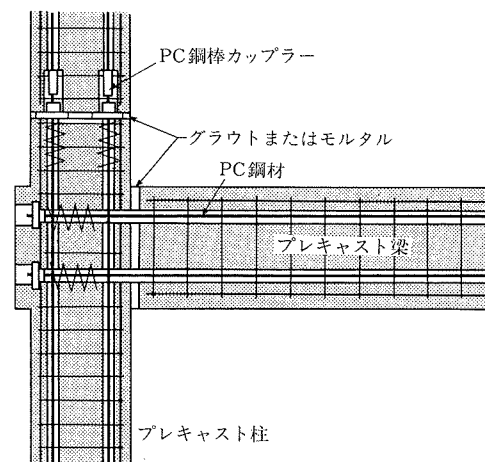


図-2 PC圧着接合工法例

#### 5. アンボンドPCの有効利用

わが国では、アンボンドPCの使用は、2次部材、非耐震部材およびプレストレスの軽微な耐震部材に限定されている。理由は定かでないが、PC鋼材破断時に部材もしくは架構全体にわたってプレストレスが喪失し直ちに部材や架構の崩壊に繋がる危険性を考慮してのことと推察される。しかし、アンボンドPC工法は、多くの利点を有しており、PC鋼材破断時に対する安全性の確保と破断の可能性が高い定着部の強度に対する信頼性確保がなされれば、大いに活用すべき工法である。たとえアンボンドPC鋼材が破断しても、常時荷重に対しては終局安全性を確保できるだけの普通鉄筋を配置し、構造システムとしてのフェイルセーフを保証する、定着部の安全性を通常のボンドPC鋼材を用いた場合よりも高くするなど、技術的配慮で十分対応できる。これが実現できれば、アンボンドPCには広い応用形態があり、大いに活用すべきである。

#### 6. あとがき

本稿では、持続的社会資本形成という立場からPC建築技術を捉え、その可能性についていろいろ述べた。PCのもつ可能性は無限であり、技術者や研究者の発想によって大きな未来が展開できる。筆者もその将来性にかけており、皆さまの今後の奮闘を期待するものである。

【2000年12月15日受付】