

# 建築建造物における耐震技術

加藤 博人\*

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）造建築物が日本で建設されるようになって、約半世紀が経過する。PC 構造は、主に大スパン架構や積載荷重の大きな建物に用いる構造形式として発展してきた。その特徴は、高強度鋼を使ってコンクリート部材にあらかじめ圧縮力を与えることによって引張に弱いコンクリートの性質を改善し、鉄筋コンクリート（RC）構造では設計できない範囲の構造物まで実現できるようにしたものである。RC 構造と同じコンクリート系の構造物でありながらその構造特性が異なる部分もあり、適用される耐震設計法にも違いがある。

PC 構造は 1920 年代に Freyssinet によってその基礎が確立され、その後ヨーロッパを中心に発展してきたように、鉛直荷重に対する性能改善が大きな目的であった。PC 造部材は、残留変形が小さい高度な復元性を示し、履歴吸収エネルギーが小さいという特性を有する。このような性質は耐震構造物として考えた場合、必ずしも有利な性質とはいえず、日本のような地震地域での利用に適さないという議論も行われた。しかし、わが国の PC 造建築物は、1995 年の兵庫県南部地震を始めとして大きな被害地震の洗礼を幾度か受けたが、その被害の割合は他の構造形式に比べて非常に小さく、十分な耐震性能を有していることが実証されてきた。その理由としては、採用されてきた耐震設計法によるもの、使用される材料強度が高く構造物が十分なポテンシャルを有していたこと、規模の大きな建物への適用が多いことから入念な施工品質管理がなされてきたこと、RC 構造ほど一般化していないことが幸いして業者による施工が多く、高い品質の維持が図られてきたことなどが指摘されている。

近年、コンピュータの発達による構造設計技術の向上に伴い PC 建造物の動的挙動を耐震設計に取り入れる試みや、免震装置との組み合わせなど新しい構法の開発も盛んになってきている。ここでは、PC 構造に関わる耐震技術のいくつ

かについて概観する。

## 2. 設 計 法

### 2.1 終局強度設計法

わが国では建築物の耐震設計は、通常、建築基準法施行令に規定されるルート 1, 2, 3 のいずれかによるものと定められてきた。加えて 2000 年 6 月の施行令改正以降は、ルート 3 と同等以上に耐震安全性を確認できる設計法として導入された限界耐力計算法によることも可能である。PC 造建築物の耐震設計については、国土交通省（旧建設省）の告示にその方法が定められており、上記ルート 1 から 3 に対応する方法に加えて終局強度設計法の使用が認められてきた。

終局強度設計法は PC 構造に特有な設計法であり、既存の PC 造建築物はほとんどこの設計ルートによっているといっても過言ではない。終局強度設計法は、PC 構造の耐震設計法が検討された当初から導入されたものであり、1960 年の最初の建設省告示第 223 号、1961 年の日本建築学会「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説<sup>2)</sup>」で採用された。建築学会の PC 規準第 1 版によると、PC 造建築物の設計は長期応力に対する許容応力度設計と、短期応力に対する終局強度設計の 2 本立てで行われるとある。PC 造建築物の一般的な設計の流れを図 - 1 に示す。解説によれば、「長期応力の計算は弾性計算による。これは長期応力のもとでの PC 部材各断面はひび割れない状態にあり、かつ、コンクリート全断面が応力に対して有効に働くように設計されるからである。」とされる。また、「実際の構造物の破壊機構とは異なるけれども、短期設計応力の計算にも長期設計応力の場合と同様に弾性計算を行うこととした。弾性計算によって得た短期設計応力は、一般にリミットアナリシスによる場合よりも安全側の結果をあたえる。」と記されている。以来、弾性解析から得られた応力を係数倍した応力の組合せに対して、部材の終局強度が上回るようにする設計法が一貫して用いられてきた。終局強度設計法は、RC 構造に比べて弾性的に挙動する範囲が広く、部材の降伏を明確に定義しにくい PC 構造にとって適していたと考えられる。

1983 年の建設省告示 1320 号では、1981 年の新耐震設計法で導入された保有水平耐力計算に対応する設計法としてルート 3a が位置付けられた<sup>3)</sup>。1981 年以前の建築基準法施行令では、設計震度 0.2 に対して短期許容応力度の確認を行うことを規定しており、RC 構造などはこの設計法で設計されていた。それに対して PC 構造では、設計震度 0.2 の地震荷重に対する弾性応力  $K$  を用い、これを係数倍した



\* Hiroto KATO  
独立行政法人 建築研究所  
構造研究グループ

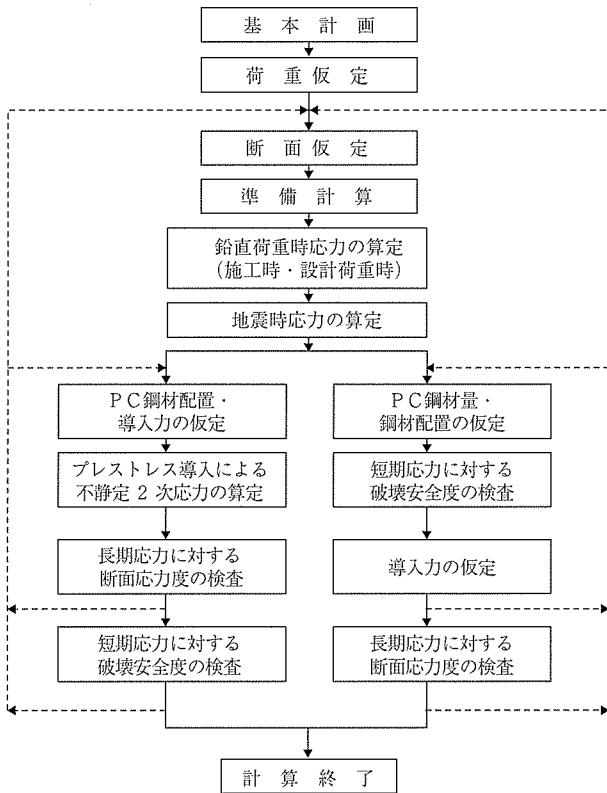


図 - 1 終局強度設計法による PC 構造の設計フロー

表 - 1 設計応力の組合せの変遷

	告示	設計応力の組合せ	建物高さ制限
1960年	第223号	1.2 (G+P) + 1.5 K	16m 以下
1973年	第949号	G+P+1.5 K (曲げ) G+P+2.0 K (せん断)	31m 以下
1983年	第1320号	G+P+1.5 · Fes · K	

1.5 K に対して部材の終局耐力を確保することが行われてきた。つまり、1981年の保有水平耐力計算で規定された構造特性係数、 $D_s = 0.3$ に相当する耐力以上を従前から確保していたことになる。1983年以降のルート3aによる設計では、建物の剛性率および偏心率に応じて設定される形状係数  $F_{es}$  を用いて設計応力を割り増し、要求する断面性能を高めることで動的荷重による影響を考慮するようになっている。PC 構造の耐震設計に用いられてきた荷重係数と応力の組合せの変遷を表 - 1 に示す。

建設省告示1320号では、PC 構造に用いてよいコンクリートの設計基準強度の下限を  $30 \text{ N/mm}^2$  から  $21 \text{ N/mm}^2$  へと引き下げ、いわゆるプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 造の普及に大きく寄与する結果となった。PC 造建築物の中で PRC 構造が占める割合についての統計的な資料はないが、兵庫県南部地震後の被害調査によると1982年以降に建てられた PC 造建築物では約半数が PRC 構造であったことが報告されている<sup>4)</sup>。PRC 構造が認められたことで、それまでのフル PC 構造と RC 構造の中間に位置する範囲での設計が可能になり、ひび割れや過大なたわみを防止する目的で比較的軽微なプレストレスを導入することができ

ようになり、経済的で使いやすい設計として広く普及している。

## 2.2 限界耐力計算法

2000年6月の施行令改正で限界耐力計算法が導入されたが、PC 構造の場合も RC 構造など他の構造で採用されたものと基本的に同じ設計法によることが可能である<sup>5)</sup>。限界耐力計算法とは、いわゆる等価線形化法と呼ばれるもので、建築構造物の非線形地震応答を近似的に等価線形系の応答でもって表現するもので、地震応答解析によらずに応答値 (荷重や変形) を直接予測することができる。応答値が求めれば、それに見合った変形能力を確保するように部材設計を行うことになる。限界耐力計算法による耐震安全性の検証フローを図 - 2 に、設計法を概念を図 - 3 に示す。大きな外力を受けた場合に構造物は塑性化していくが、それに応じていかに適切に等価な1質点系に置換するか、また、入力を表す必要耐震性能スペクトルも構造物の塑性化に応じて低減されるが、そのための等価減衰をいかに適切に評価できるかが重要なポイントとなる。PC 構造では、いわゆるフルプレストレスの設計をした部材から PRC 構造として設計をした部材まで多様であり、履歴ループ形状も大きく変わるので、等価減衰を適切に表現することが重要である<sup>6)</sup>。

本設計法によれば RC 構造と同じ枠組みの中で設計を行うことが可能であり、従来、同じコンクリート系構造物でありながら設計法が異なることから生じていた不都合が解消され、PC 構造から RC 構造まで連続した設計が実現できるものと期待される。限界耐力計算法は性能照査型の設計法であり、終局強度設計法と違って、あらかじめ何らかの方法で断面を設定しておく必要がある。また、限界耐力計算法では荷重増分解析を行うことが原則となるので、手計算によって設計を行うことは実用上困難である。現時点では、限界耐力計算法に対応できる市販のプログラムは少な

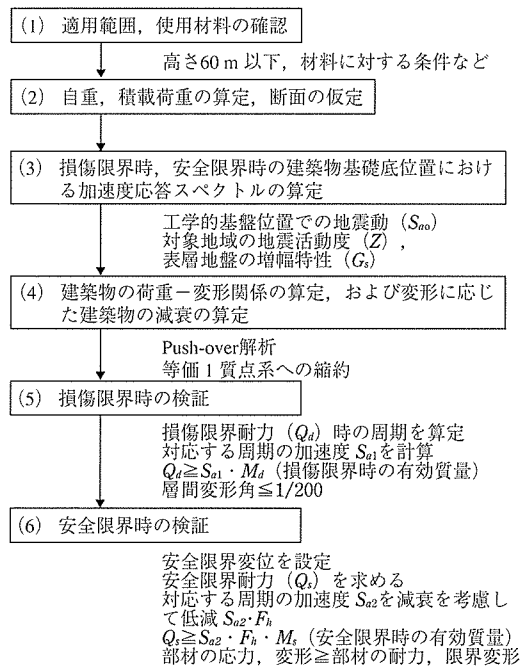
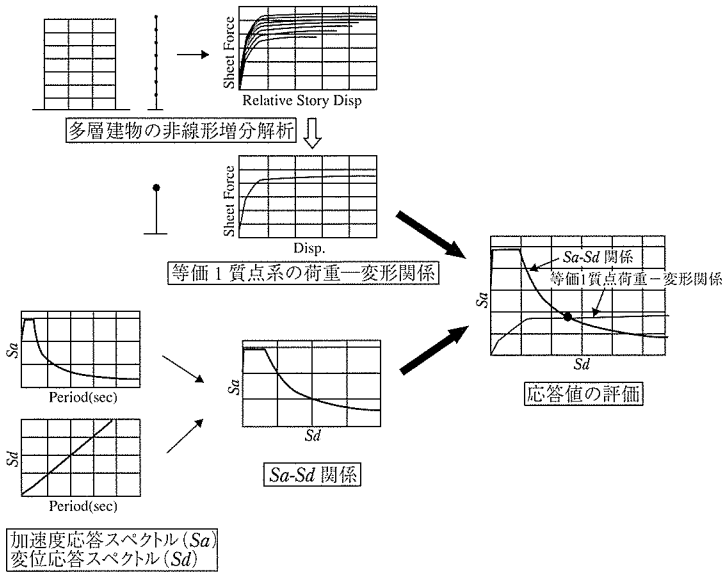
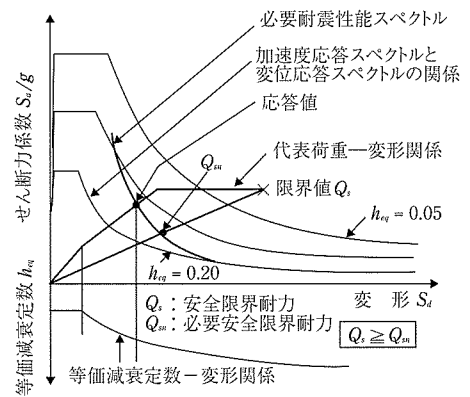


図 - 2 限界耐力計算のフロー



(a) 計算手順のイメージ



(b) 大地震時の性能評価と応答値

図-3 限界耐力計算法の概要

く、とく PC 構造も対象にしたプログラムはまだ実用化されていないようである。本設計法が一般化するためには、設計プログラムの開発が鍵を握るかもしれない。

### 3. PC 技術を活かした耐震構造

#### 3.1 圧着接合

PC 構造に特有な耐震架構形式として、圧着接合による方法がある。導入されるプレストレス力を部材接合にも利用する方法で、簡単な方法によって剛接架構を実現できる極めて合理的な構法である。あらかじめ工場で作られたプレキャスト部材を現場で組み立てて一体化するため、現場作業が低減できること、品質管理の行き届いた工場製品を利用することで高い信頼性が得られることなど、多くの利点を有する。プレキャスト部材を圧着により組み立て、架構を形成する方法は、PC 構造の研究開発が始められた当初から有効な構造形式として考えられていたもので<sup>2)</sup>、施工順序を工夫してプレストレス力の導入に伴う不静定 2 次応力の調整が行えるなどの特徴を有する。圧着接合によるプレキャスト PC 構造は、大規模な競技場や物流倉庫などの用途を中心に広く用いられるようになってきており、1990 年頃からの使用実績は総延床面積で 300 万 m<sup>2</sup> を超えたという報告もある<sup>7)</sup>。建築構造物のプレキャスト化は将来に渡る重要なキーワードであり、さらなる発展が期待される。以下に、圧着接合により建設された建築構造物の事例を紹介する。

#### (1) 横浜国際総合競技場<sup>8)</sup>

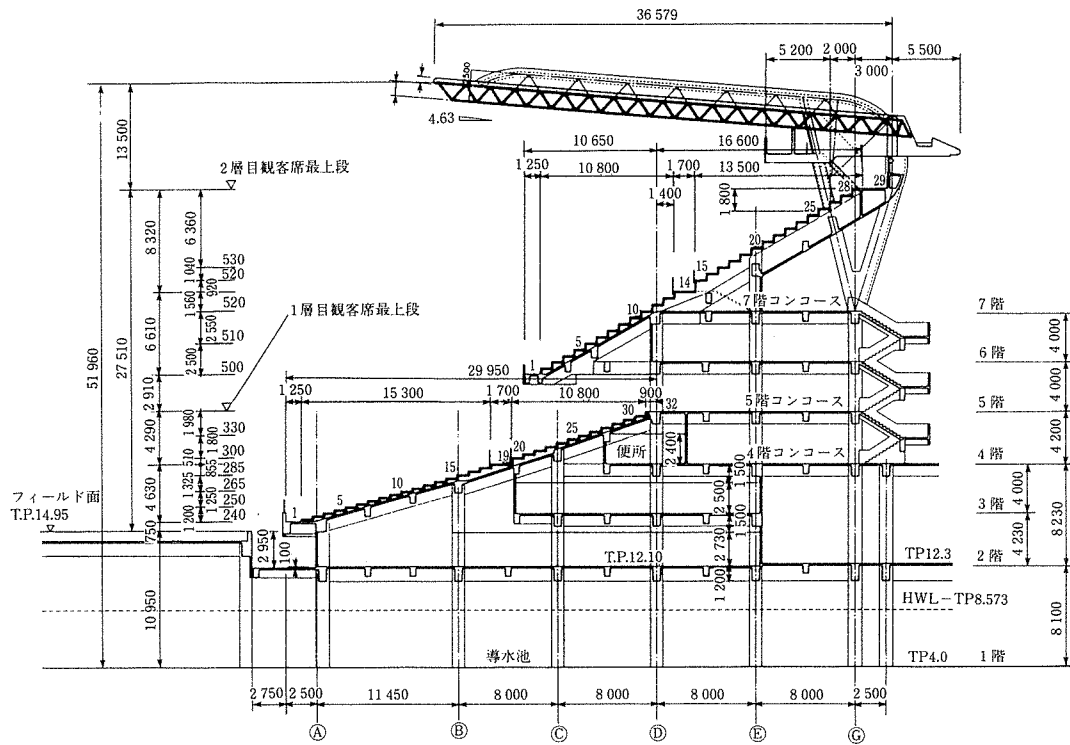
2002 年のサッカーワールドカップ決勝戦が開催された横浜競技場は、全部材をプレキャスト PC 造とし、圧着接合構法によって構築した日本最大規模のスタジアムである。スタンドは地上 7 階建て、最高高さ 38.5 m で、外周約 900 m、施工床面積約 164 000 m<sup>2</sup> の巨大な構造物である。1 次設計では、鉛直および水平荷重による応力の組合せに対し

て、許容応力度設計を行っている。また、温度応力による影響を考慮した上でエキスパンションジョイントを設けず、全体を一体の構造物として設計している。2 次設計はルート 3b (保有水平耐力の確認) によって行い、 $D_s = 0.3$  を採用している。本建物は非常に多くの人が集まる施設であることから、とくに重要度係数 1.25 が採用された。さらに、動的解析を行って地震応答性状の確認も行っており、レベル 1 地震動 (最大速度 0.2 m/sec) に対して全部材が弾性範囲にあり層間変形角は 1/200 以下、レベル 2 地震動 (最大速度 0.4 m/sec) では一部の梁で降伏ヒンジを生じた他はおおむね弾性範囲にあり、層間変形角 1/100 以下とする設計クライテリアを満足したとしている。建物外観を写真-1 に、架構の断面と PC 部材のケーブル配線を図-4 に示す。

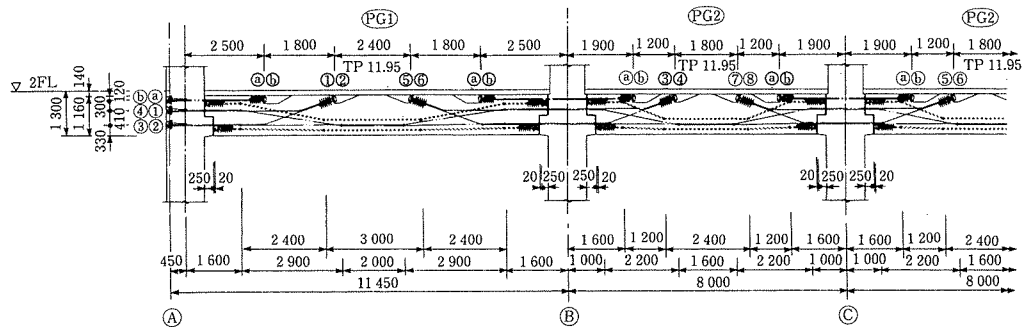
施工は、梁部材を柱に圧着接合して架構を構築する方式であり、プレキャスト PC 造柱を自立させた後に、梁部材を柱に設けたコーベルで仮受けし、PC 床板を敷設後、柱部材、ならびに梁部材を本緊張している。PC 建て方工事の工



写真-1 横浜国際総合競技場<sup>8)</sup>



(a) 架構断面図



(b) PC ケーブル配置  
図 - 4 構造概要<sup>8)</sup>

期は約 13 ヶ月で、SRC 構造とする場合に比べて約 1 年間の工期短縮が実現できたと報告している。

(2) 埼玉県立大学<sup>9)</sup>

埼玉県立大学の大学棟は、桁行方向の長さ 261.8m、梁間方向スパンが 10.4 m、地上 4 階、高さ 18.23 m の扁平な建物である。桁行方向では、7.7 m の基本グリッドが 35 スパン連続する構成で、8 グリッドに 2 グリッドずつ設けた RC 造耐震壁（厚さ 350～600 mm）で囲まれた 7.7 m×8.4 m のコア部分に地震時の水平力を 100% 負担させ、残りの柱、梁は鉛直荷重のみを負担する明解な構造形式となっている。桁行方向は、1 グリッドをさらに 4 分割して柱スパンを短くし部材サイズを極小化した特徴ある建物で、柱断面は 230×630 mm の長方形である。スパン 10.4 m に対して梁せいが 400 mm、幅 1.915 m のハーフ PCa 床板と一体化させた梁部材は、ひび割れの発生を許さないバーシャルプレストレスとして設計されている。構造部材はすべてプレキャ

スト部材で、梁部材を上下の柱部材で挟み込むように鉛直方向に PC 鋼棒で緊張し、圧着接合して架構を形成する。建物外観を写真 - 2 に、組立て概要と接合部詳細を図 - 5 に示す。使用した部材数は柱が 1 518 ピース、梁が 789 ピースに及ぶが、約 5 ヶ月の期間で組立て工事を完了でき、プレキャスト化による効果が発揮できたとしている。

3.2 免震構造との組合せ

PC 構造は鉛直荷重に対して合理的に抵抗させる構造形式であり、地震荷重に対しては必ずしも有利な特性ではないという議論は、一面では真実であろう。そのような PC 構造の特長を生かした利用法として、免震構造との組み合わせは両者の長所を引き出せる合理的で相性の良い工法として注目される。免震層で構造物への地震エネルギーの入力を大幅に低減させることによって、上部構造物の応答を小さくすることが可能である。免震構造物では、基本的に上部構造でのエネルギー消費は期待しないので、PC 構造の特性

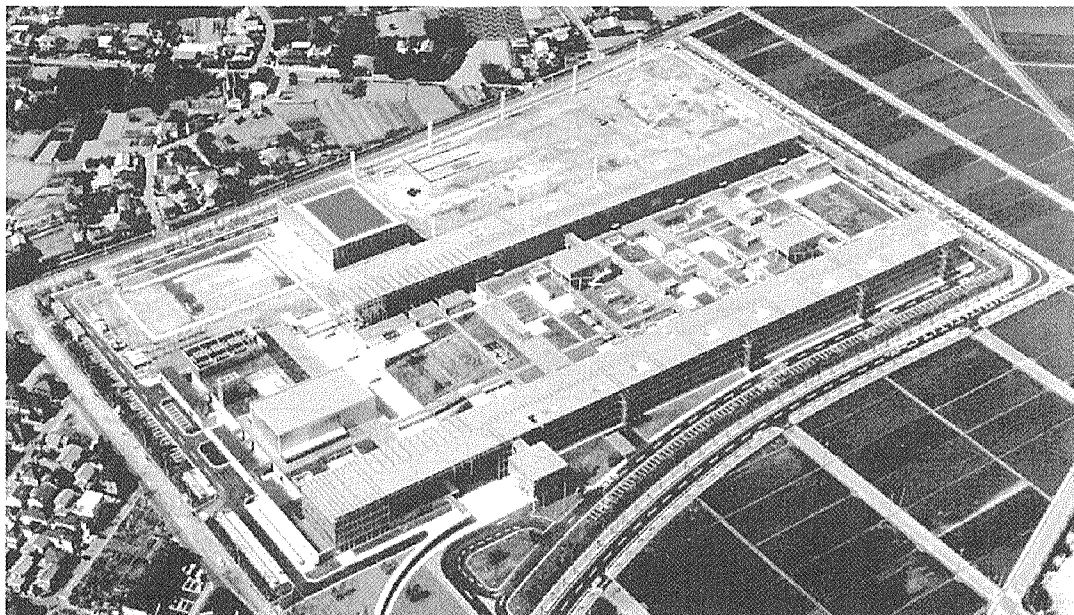


写真 - 2 埼玉県立大学<sup>9)</sup>

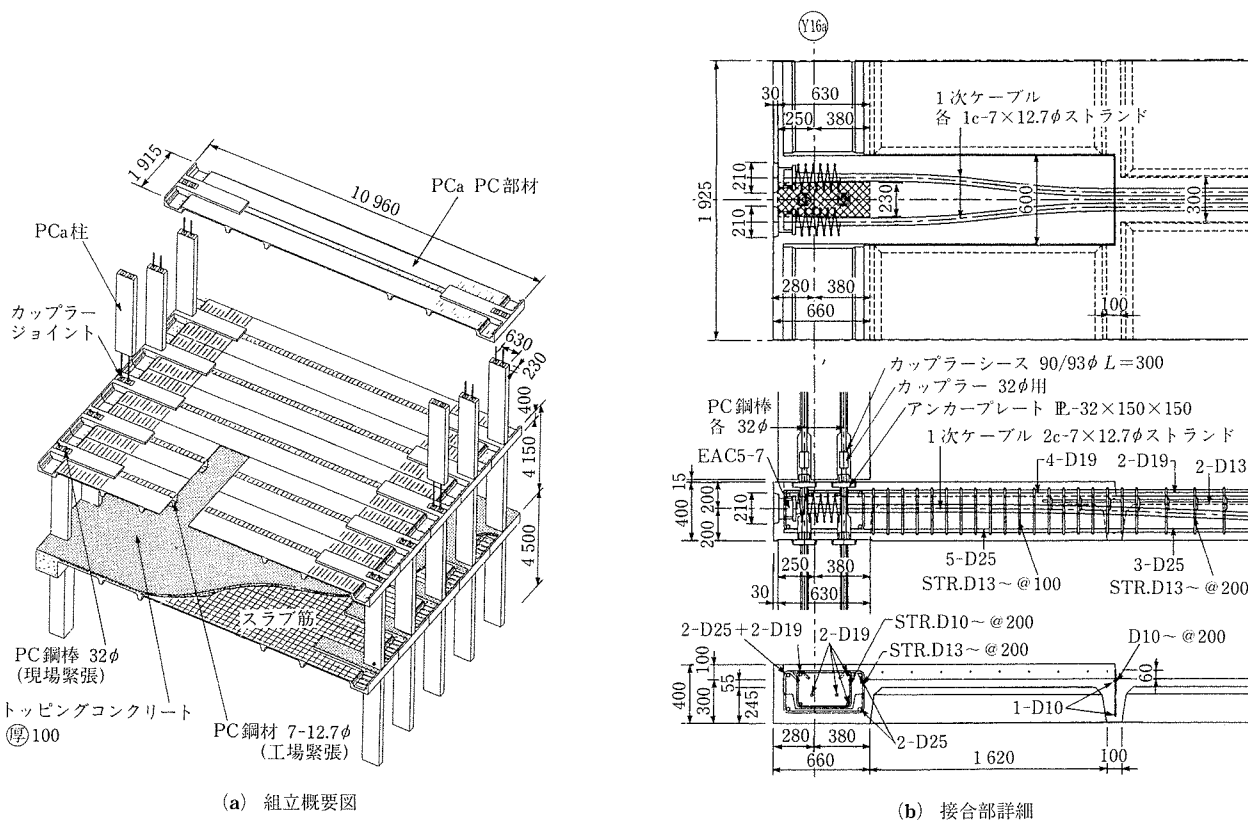
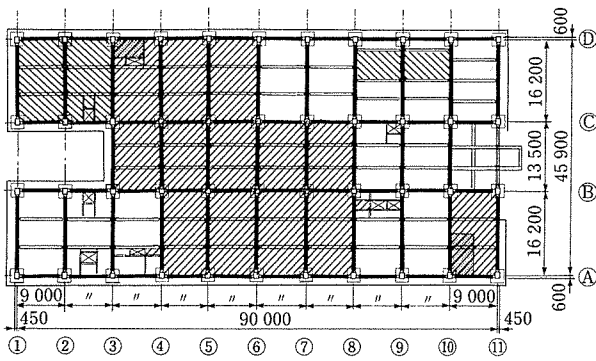


図 - 5 構造概要<sup>9)</sup>

である高度な復元性や面積の小さな履歴ループも問題とならない。一般に上部構造の重量を大きくし、建物を長周期化させる方が免震性能を効果的に発揮でき、併せてある程度の剛性も確保することが望ましいとされる。そのためには、柱スパンを飛ばして免震装置に掛かる軸圧を大きくできるPC構造は有効である。

写真 - 3 は神戸に建設された電算センターで、地上3階、

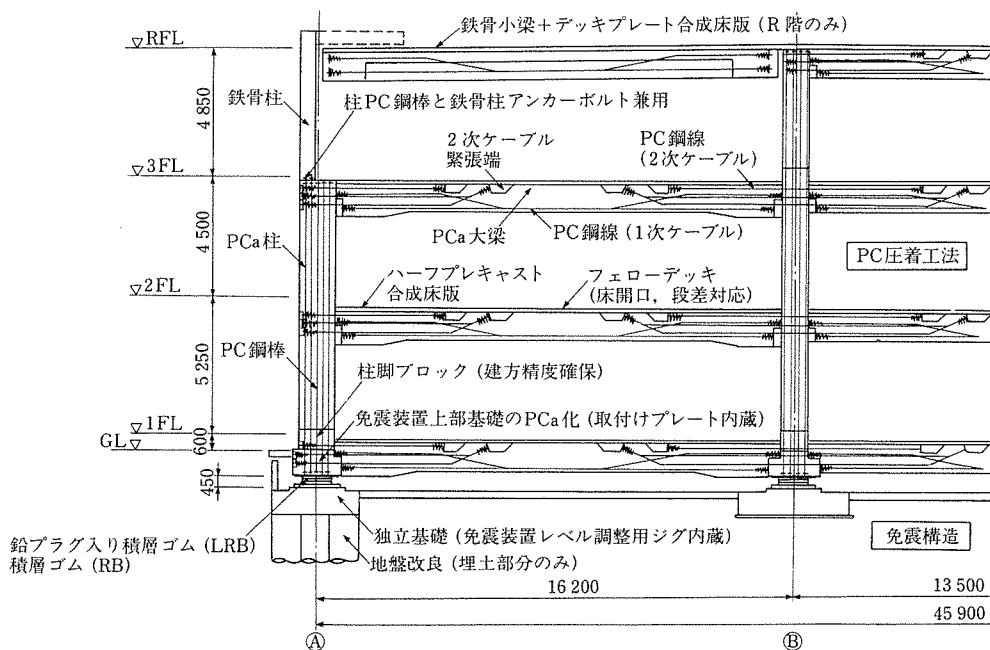
軒高15.2 m、延床面積12 110 m<sup>2</sup>の建物で、PC構造と免震構造を組み合わせた構造形式である<sup>10)</sup>。上部構造は、プレキャストPC造の梁部材を柱に圧着接合して架構を形成し(図-6)、免震装置には、鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)と積層ゴム(RB)を組み合わせて使用している。地震応答解析の結果は、想定される最大級の地震(最大加速度500 gal程度)に対する応答加速度が115 gal、建物の最大層間変形角



(a) 1階床伏図



写真-3 免震構造を使ったプレキャストPC造建物<sup>10)</sup>



(b) PC架構軸組図

図-6 構造概要<sup>10)</sup>

は 1/1 700 と非常に小さく、設計クライテリアを満足できたとしている。

これまで、免震構造物を建設するためには、建設大臣の認定を個別に取得する必要があった。免震構造は比較的新しい技術であるため、地震に対する安全性を確認する意味で動的解析によってその性能を検証することが求められていた。建築基準法施行令改正を受けて、2000年10月には免震構造物および免震材料に関する建設省告示第2009号と第1446号が制定され、動的解析によらずに免震構造物の設計を行う道が開かれた。基本的な概念は、免震層の変形を評価することと、上部構造を剛体と考えて応答値を算出し、上部構造に対して許容応力度設計を行うという方法である。本告示によって、免震構造物の設計が容易に行えるようになり、PC構造と免震構造を組合せた建築物が普及することが期待される。

### 3.3 PC技術を使った耐震補強

古い基準で建てられた建築物の中には、耐震性能に問題のある構造物も少なくない。そのような建物に対する耐震診断と、それに基づく耐震改修の必要性は以前から指摘されてきたが、兵庫県南部地震以降はとくにその重要性が再認識されるようになった。これまで、古いPC建築物自体を対象とした耐震補強事例はほとんど報告されていないが、耐震補強にPC技術を応用する方法は、すでにいくつか実用に供されている。

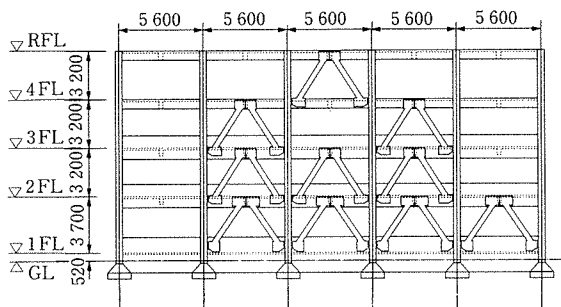
耐震補強法の一つとして、既存建物の外面にブレースなどを取り付け、強度ならびに剛性の改善を図る方法がある<sup>11)</sup>。耐震補強部材を既存の梁や柱に結合して、外力に対して一体として働かせる必要があるが、PC鋼棒などを利用して圧着接合する方法も良く用いられるようになっている。従来、そのような接合には後施工アンカーを打設する方法

が一般的であったが、大規模な構造物では数多くのアンカーを打つことになり多大な労力を必要とする。PC 鋼棒を使った圧着接合では、1 本当たりの耐力が大きく、少ない本数で必要な圧着力を得ることができる。

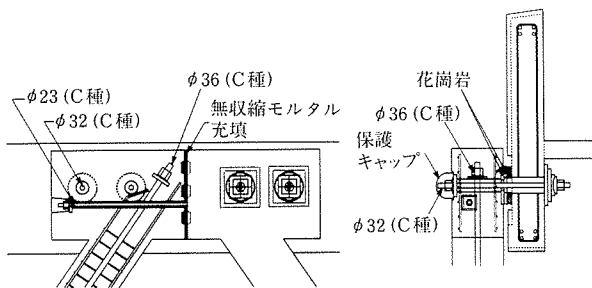
既存建物の外面に耐震補強を行った事例を、写真 - 4 に示す。通常よく使われる鉄骨ブレースに替えて、プレキャスト PC 造のブレースを使って耐震補強を行ったものである。この補強方法では、ブレース上端の接合部に花崗岩の板を挟み、摩擦制御型圧着接合としていることに特徴がある。作用するせん断力が設計せん断力を越えた場合、せん断力を保持したまま接合部を滑らせることで、過大な応力の伝達を抑制することができる。ブレースは、最大耐力に達した後急激な耐力低下を生じやすいが、滑らせることで



写真 - 4 PC 造による耐震補強事例<sup>12)</sup>



(a) 補強立面図



(b) PCa ブレース接合部  
図 - 7 耐震補強概要<sup>12)</sup>

そのような現象を回避できるとしている。また、ブレースを PC 造部材とすることで、引張と圧縮の両方にバランス良く効かせることができる。ブレース補強概要と接合部詳細を図 - 7 に示す。

耐震改修の必要性は認識されていながら、実際の改修はなかなか進展していないのが実状である。耐震改修を行うには、さまざまな条件を満たさなければならないが、その最も大きな要件は費用の問題であろう。その他、建物の使用を中断することなく実施できる構法、いわゆる“居ながら施工”の実現や、施工期間の短縮、補強部材の重量を含めた施工性の改善など、いくつかの問題がある。プレキャスト PC 造部材の利用やプレストレス技術の利用は、耐震改修の分野でも有効な改善策の一つになるものと期待される。

#### 4. ま と め

PC 造建築物の耐震技術として、設計法に関すること、PC 構造に固有の技術を活用した構法、免震など新しい技術との融合、耐震補強への応用など、最近の動向について見てきた。PC 構造は非常に優れた耐震技術の一つであり、今後、いろいろな用途での応用が期待される。PC 構造を特殊な技術として位置付けるのではなく、一般の設計者、構造技術者にとってなじみやすく、使いやすい技術として発展させていくことが重要であろう。また、建物のオーナーや一般ユーザーに対しては PC 構造を意識させる必要はないが、他の建築構造と同等以上に信頼性があり、合理的なものであるという評価を確立することが求められよう。

PC 技術の原点は必要なプレストレス力を正確に導入し、建築物の全供用期間にわたって確実に保持することに帰結する。そのような観点から考えれば、グラウトの信頼性を確保することは古くて新しい問題であり、グラウトに関する事故がたびたび報告されることは重大な問題として受け止めなければならない。最新の耐震技術を駆使して建てられる PC 造建築物も、最終的には施工によって性能、品質が担保されるものであり、PC 構造に携わる者として施工品質管理の重要性を再認識することが肝要である。

#### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告、建築編 - 2 (プレストレストコンクリート造建築物)、日本建築学会、1998 年 8 月、pp.1-92
- 2) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 (第 1 版)、1961 年
- 3) 日本建築センター：プレストレストコンクリート造設計施工指針、1983 年
- 4) 兵庫県南部地震 PC 建築物調査用委員会：兵庫県南部地震における PC 造建物の被害と耐震診断、プレストレストコンクリート、Vol.38, No.4, 1996 年 7 月、pp.57-64
- 5) 加藤博人：限界耐力計算と PC 建築、プレストレストコンクリート、Vol.43, No.4, 2001 年 7 月、pp.10-16
- 6) Minehiro Nishiyama : Response Prediction of Prestressed Concrete Buildings Against Earthquake Excitations by Capacity Spectrum Method, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 2000
- 7) 田邊恵三：PC 建築物の性能評価による施工管理、プレストレスト

コンクリート, Vol.43, No.6, 2001年11月, pp.89-94

- 8) 坂井吉彦, 小林直紀, 田邊恵三, 桑折能彦: プレスジョイント耐震システムによる PC 圧着フレーム構造 —横浜国際総合競技場の構造設計と施工—, プレストレストコンクリート, Vol.39, No.4, 1997年7月, pp.16-24
- 9) 金田勝徳, 深澤正彦, 下野繁太郎, 廣瀬恵: 打放しコンクリート仕上げに用いられたプレキャストプレストレストコンクリート構造 —埼玉県立大学の設計と施工—, プレストレストコンクリート, Vol.41, No.4, 1999年7月, pp.45-49
- 10) 福山國夫, 上田博之, 池田英美: プレキャストプレストレストコンクリート組立工法による免震構造物 —興亜火災神戸センター計画—, プレストレストコンクリート, Vol.41, No.4, 1999年7月, pp.30-34
- 11) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル, 2002年9月
- 12) 小山内裕: PC 技術による建築物の耐震補強, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.4, 2001年7月, pp.28-32

【2002年9月13日受付】



刊行物案内

## PC 定着工法

—2000年版—

2000年12月発行

頒布価格: 会員特価 4 000 円 (送料 400 円)

非会員特価 4 800 円 (送料 400 円)

体 裁: B5判, 220頁 (無線綴じ製本)

発行・発売: 社団法人 プレストレストコンクリート技術協会

最新の  
「定着工法」を  
掲載!!