

プレストレストコンクリート

- 高層オフィスへの挑戦 -

京都大学名誉教授 渡邊史夫

鉄筋コンクリート構造の高層化

1960 年代、現場打ち鉄筋コンクリート構造で用いられていたコンクリートの強度は、 18N/mm^2 が主流で、高強度でも $21\sim 24\text{N/mm}^2$ であった。1970 年代に入ってもこの傾向は変わらず、プレストレストコンクリート構造のみが、高強度コンクリート ($30\sim 35\text{N/mm}^2$) を用いていた。このようなコンクリート強度では、中層程度まで (せいぜい 7~8 階程度) で、1968 年に竣工した、地上 36 階、地下 3 階、高さ 147 メートルの霞が関ビル (図 1) のような超高層鉄骨造建物には遠く及ばなかった。むしろ鉄筋コンクリート建物には、1968 年の十勝沖地震の被害教訓から、柱の崩壊防止 (せん断破壊を防止し、変形能力を付与する) が喫緊の課題であった。その後宮城県沖地震 (1978 年) を経験し、建築基準法改正 (1982 年) が行われ、いわゆる新耐震設計法が用いられるようになった (保有耐力設計法の導入)。この新耐震設計法の妥当性は、後に 1995 年の兵庫県南部地震で証明されることになった。さて、このころより、鉄筋コンクリート構造にかかわる人々も超高層建物実現を目指すようになり、1978 年には我が国で初めての超高層鉄筋コンクリート建物である椎名町アパート (18 階建て) が建設された (図 2)。更なる高層化に向けた産官学一体となった総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」

(略称: New RC) が 1988 年より 5 年間にわたって実施された。その成果に基づいて、現在ではきわめて多くの超高層鉄筋コンクリート造建物が建設され、高さで 200m に達するとともに、使用されるコンクリートの強度も 150N/mm^2 に到達している (図 3)。しかし、それらの大多数は集合住宅である。大規模な事務所建築の殆どは鉄骨造として建設されてきており大きなスパンを



図 2 椎名町アパート

図 1 霞が関ビルディング



図3 武蔵小杉集合住宅(59F)

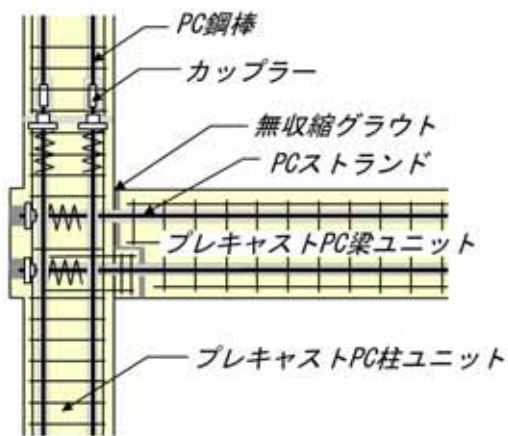


図4 プレキャスト PC 柱梁接合工法例

必要とする事務所建築には鉄筋コンクリートが向いていないと考えられてきた。これは本当であろうか。高強度コンクリートおよび高強度鉄筋の利用、プレストレス技術の適用、センターコア形式や外周フレームなど最適構造形式の採用、さらには組み合わせ、免震装置や制振（震）装置の組み込み、軽量床システムの開発、鉄骨や鋼管コンクリート構造との混合、などなど、色々組み合わせれば十分可能であると考えられる。一方、2006年より世界的規模で始まった建設用原材料費の高騰、特に鉄骨価格の高騰が、鉄骨造事務所建築の建設コストを押し上げ、鉄筋コンクリート構造による事務所建築の建設がにわかに脚光を浴びた。しかし、ここにきて鉄骨価格の暴落が起きており、経済性の面からのみのアプローチの危うさが浮き彫りになった。コンクリート系構造の発展を図るために、建築技術者は適材適所を再認識し、コンクリート系部材の特質を生かした構造システム構成や意匠設計に努力しなければならない。また、生産性向上と高品質化に向けたプレキャスト化が欠かせないし、構造性能の追及のみでなく、環境面での配慮も必要である。そこで、コンクリート系高層オフィス構築に関連して実現が望まれる性能の幾つかを挙げておく。

大地震後も、残留変形が残らず継続使用が可能な構造

(Damage Free and Continuous Services)

高耐久無劣化材料の使用

(Durable and Deterioration Free Materials)

空間自由度(Space Flexibility)

居住性(Habitability)

材料・構造要素技術と組み合わせ

超高強度コンクリート： コンクリート系構造の欠点である重量を軽減し、空間の自由度を上げる為の長スパンを実現するためには、超高強度コンクリートの使用が不可欠である。最近の技術レベルを勘案すると、部材製造を、プレキャスト化すれば、200 N/mm²程度のコンクリートは容易に製造できそうである。超高強度化に伴うコンクリートの脆性的な性質を改善し、かぶりコンクリートの早期剥離などを防止するために、短繊維混入コンクリートが使用された例がある（図3）。

高強度鉄筋： 超高強度コンクリートといえどもクリープが生じる。クリープ係数が普通コンクリートに比べて小さいとは言え、常時許容応力状態下での弾性ひずみが大きい(圧縮強度に比例して弾性係数が増

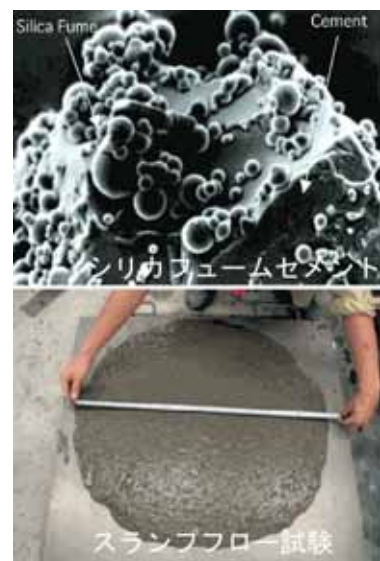


図5 超高強度コンクリート

大しない)ので、絶対的なクリープひずみは普通コンクリートより大きくなる。そこで、柱には降伏点の高い軸鉄筋を用い早期圧縮降伏を防止しなければいけない。また、超高強度コンクリートは、圧縮破壊時に極めて脆性的な様相を示すので、高強度鉄筋を用いた横拘束が必要不可欠となる。

プレストレス技術：

プレストレス技術が不可欠な理由は二つある。ひとつは、空間の自由度を大きくするための大空間を構成するためであり、もう一つは高復元性の確保である。この復元性の確保は、プレストレス以外に有効な方法はなく、

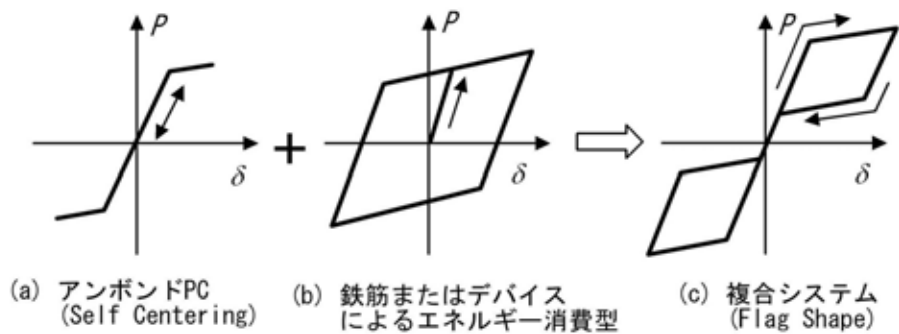


図6 セルフセンタリング + エネルギー消費

大いに活用されるべき技術である。プレストレスによる復元性とそのほかのエネルギー消費機構を組み合わせれば、地震が去ったのち、有害な残留変形を生じることなく、エネルギー消費を実現しながら原点近傍まで変形が復帰するセルフセンタリング機能(このような履歴復元力特性をフラッグシェイプと呼ぶ)を得ることができる。この特性を図6に示す。

また、梁柱架構形式及び連層耐震壁形式に適用した場合の例を図7及び図8に示す。また、このように耐震一時要素にプレストレスを用いるのみでなく、小梁や床スラブシステムにもプレストレス技術を用いれば、空間の自由度を大きくするとともに重量軽減にも役立つ。

ダンパー型ケーブル： プレストレス技術を用いる際に、その特徴的な力学特性の故に役立つような材料としてダンパー型ケーブルがある。これは、

高強度の素線と低強度の素線を一体に撚り合せたもので、その履歴特性が図9に示されている。このケーブルの特徴は、繰返荷重に対して、常に引張領域において決して緩むことなくエネルギー消費を実現する点にある。現在科学技術振興機構(JST)の援助のもとで、開発研究が進められている。従来のストランドの代わりに用いれば、PRC部材としてエネルギー消費と復元性の両者を得ることができるし、

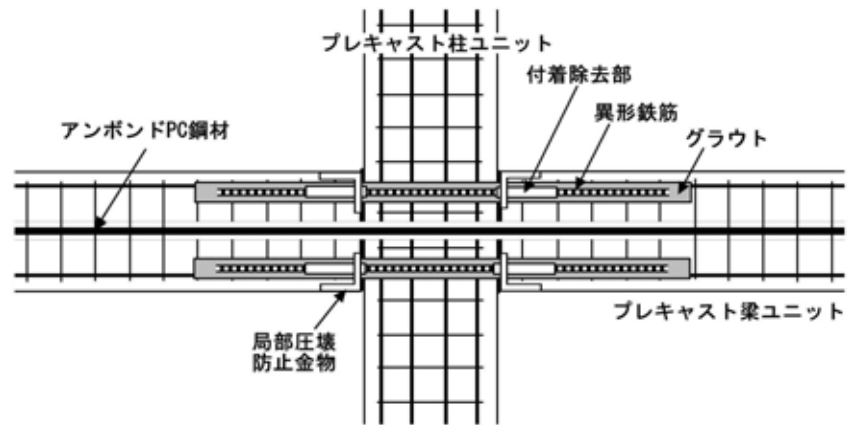


図7 柱梁架構システム

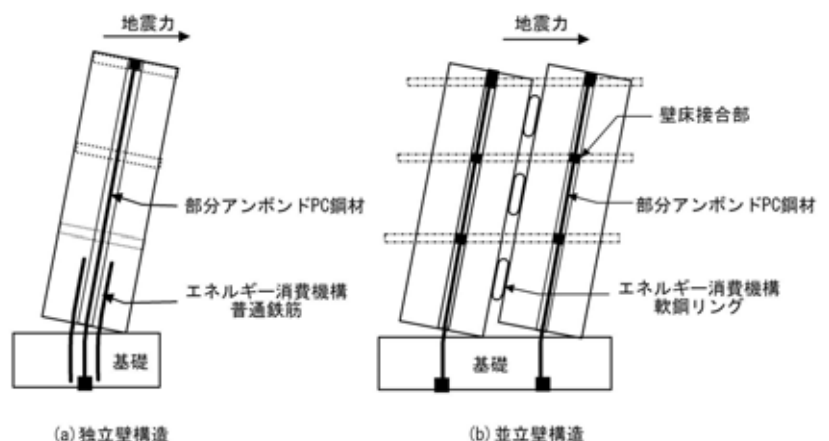


図8 連層耐震壁システム

裸で斜めに張り渡しても緩まないわけであるから、耐震要素としてのブレースにもなり得る。

構造システム： 最も基本的な構造形式は、柱梁からなる純フレーム構造である。しかし、高層オフィスとなると、地震時層せん断力も大きく、純フレーム構造のみで抵抗するのは難しく、柱や梁断面が極めて大きくなってしまふ。そのため、連層耐震壁をうまく使うのが合理的である。図 10～12 に、米国で検討されている連層耐震壁をセンターに配した構造形式が例示されている。

図 10 は、センターコア壁と付帯フレームからなる構造形式である。付帯梁は、壁に対して曲げ戻しモーメントを付与し、壁モーメントを減少させる効果がある。また、プレストレス梁とすれば高復元性も期待できるし、図 7 に示すようなシステムとすればエネルギー消費にも貢献する。一方、連層耐震壁にも、図 8 に示したような機能を付与できれば極めて優れた耐震架構が形成できる。

図 11 は、センターコア壁と外周フレームからなる構造形式である。この外周フレームに図 7 の機能を持たせれば高復元性が期待できる。壁については図 10 と同様である。

図 12 は、さらに合理化された架構形式である。ここでは、キャピタルないフラットプレートシステムが用いられている。スラブへのアンボンド鋼材を用いたプレストレス導入も、スラブたわみの抑制に効果的である。しかし、フラットプレート構造では、柱の剛性も小さく地震水平力を負担する能力は低い、したがって、地震荷重は主として、センターコアを形成する連層耐震壁で負担されることになる。そのため、前出の 2 ケースに比べて、センターコア耐震壁が大きくなると共に、使用鉄筋量も増加する。

図 10～12 までは、センターコア形式が示されているが、これらの構造形式を拡張し、複数のコアー壁を配置した構造とすればさらに自由度が広がる。

ここまでは、鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリート構造での構築を頭に置いてきたが、他の組み合わせもあり得る。鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁の組み合わせがあり、実際の設計で用いられている。その場合、プレストレス技術が必要なかどうかは構造形式によるが、免震構造のような上部

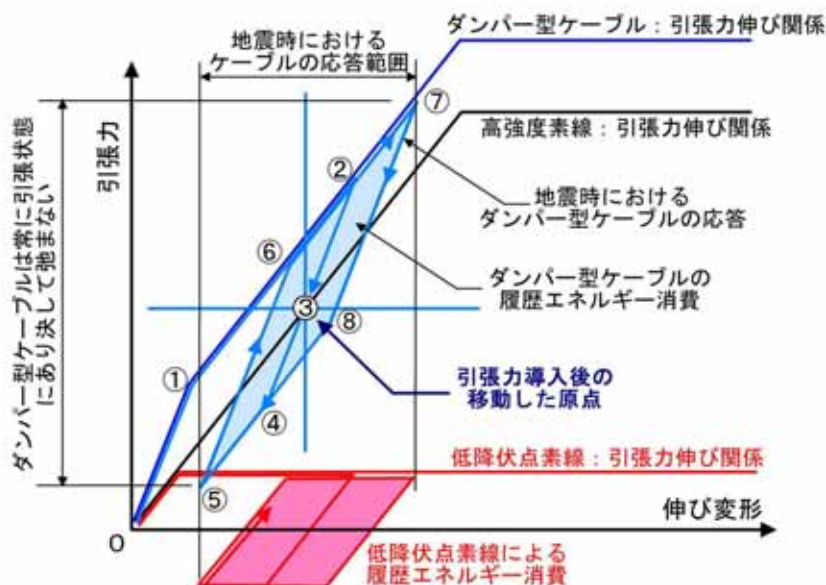


図 9 ダンパー型ケーブル

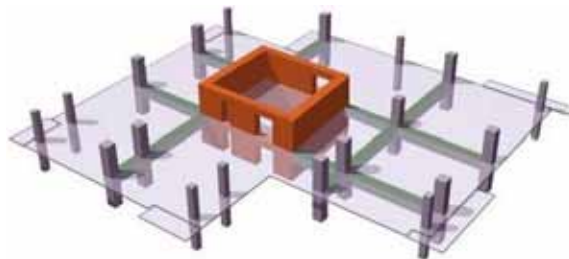


図 10 連層耐震壁 + 付帯フレーム
Courtesy of Prof. Jack Moehle

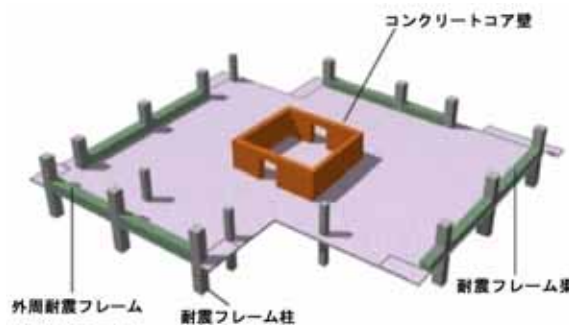


図 11 連層耐震壁 + 外周フレーム
Courtesy of Prof. Jack Moehle

弾性応答建物でない耐震構造であれば、復元性付与に貢献するはずである。いずれにしても、非線形応答を期待する構造形式であれば、プレストレスによる高復元性は極めて魅力的である。どのように使うかは、従来の固定観念を脱却した発想から生まれてくると考えている。

センターコア壁における境界梁：

センターコア壁の開口部上下は、境界梁となり大きなせん断変形が強制される。従ってこのような所には、強度と靱性を付与するためにX型配筋が用いられる（図 13）。これは、図 8(b)の並立壁と類似のメカニズムと考えてよい。この部分を、鉄骨境界梁とし、その部分のエネルギー消費に期待する設計もある。

プレストレストコンクリート梁の開口補強：

梁には、設備配管のための開口が必要となるが、プレストレストコンクリート梁では緊張材配置が曲線状になること、また、プレストレスによる軸応力により開口部周辺に局部引張応力が発生するなど、通常の RC 梁とは異なる条件が付加されるが、開口補強の方法については日本建築学会の PC 規準に書かれているので参考になる（図 14）。ただ、市場に出回っている RC 梁用の開口補強筋が有効かどうかは、適用範囲も含めて検討の必要性があろう。

コンクリート系柱と鉄骨梁の接合： 鉄筋コンクリート又はプレストレストコンクリート柱と鉄骨梁の混合構造もある。その場合接合をどのように行うかがキーとなる。当然、柱はプレキャスト構造となり、色々なバリエーションがあり得る。ピン接合、剛接合、柱面での接合、柱面から少し離れた位置での接合、などなど。設計者のアイデア勝負だが、その構造安全性については、要求強度や変形能力に対応できているかの検証が不可欠である。

床システム： 床構造が建物重量を左右するキーとなり、振動障害さえ生じなければ軽ければ軽いほどよい。超高強度コンクリートとプレストレス技術をもちいれば、Single-T、Double-T断面を用い大きなスパンを架け渡す床システムを構築できる。図 12 のようなフラットプレート構造では、アンボンドケーブルを用いて床スパンを大きく出来ると共に、たわみ障害も防止できる。また、鉄骨造事務所建物では、鉄骨量を極力減らすために種々のデッキプレート配置と小梁配置が研究されており、コンクリート

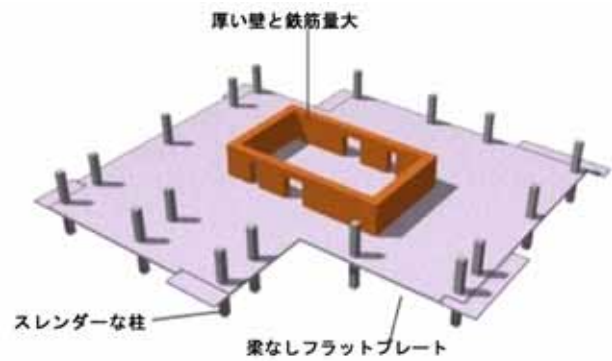


図 12 連層耐震壁 + フラットプレート
Courtesy of Prof. Jack Moehle



図 13 境界梁におけるX型配筋
Courtesy of Prof. Jack Moehle

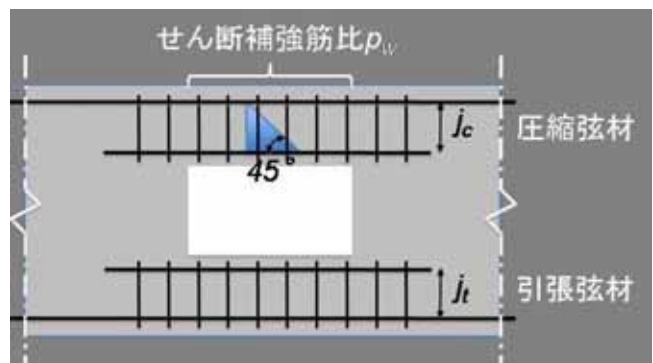



図 14 浜原らによる開口補強原理

系事務所建築でも大いに参考になる。もし、振動障害が出るようであれば、パッシブマスダンパーによる振動制御も可能である。

免震・制振装置の組み込み： ここまでは、特殊な工法を用いないコンクリート系構造システムについて述べてきたが、免震装置を用いるとなると、自由度が大きく広がる一方、コストが上昇する。床加速度応答を極力減らさなければならない場合は、免震構造を採用しなければならないが、そうでなければ使う必要はない。要は、要求性能に関わる問題である。応答を軽減するための制振装置も有用である。しかし、鉄骨造建物に使われているような、オイルダンパーや座屈拘束型低降伏点鋼ブレースは、取り付け部のディテールが複雑となるため、コンクリート系構造には向かない。低降伏点鋼を用いた間柱タイプダンパーや波型鋼板耐震壁が使いやすい。

既存のコンクリート系超高層オフィス

現在のところ、鉄筋コンクリート構造またはプレストレストコンクリート構造による超高層オフィスはわが国には無い。諸外国では、コンクリート系超高層オフィスが建設されているが、プレストレス技術の適用場所は、シングルTまたはダブルT断面を用いた床スラブが主である。図15は、ニュージーランドのオークランドにある、ANZセンタービルである。床システム

 ANZ Center, Auckland, RC35F, H=143m, 1991

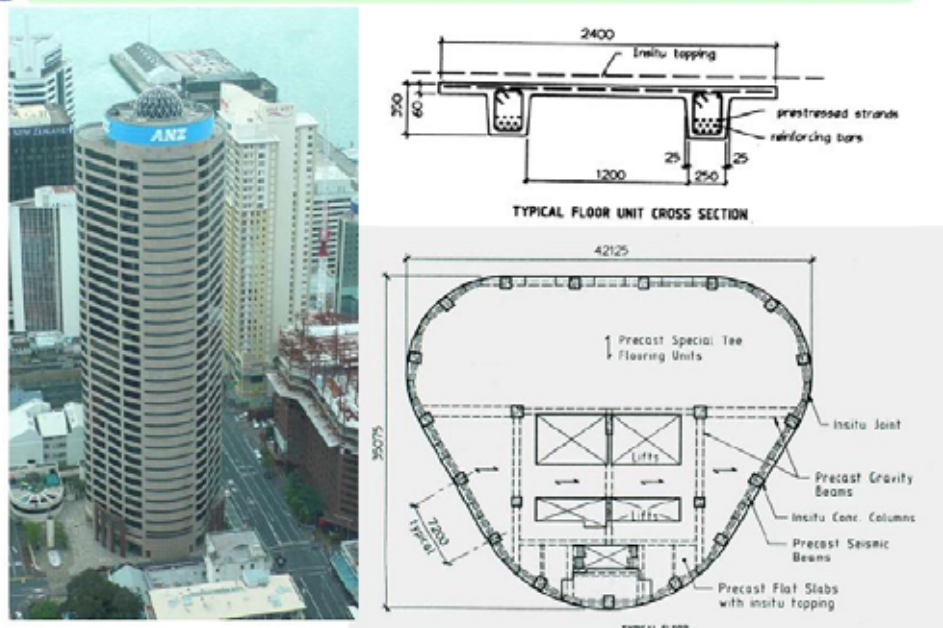


図15 ダブルスラブを用いた超高層オフィス

にプレストレスが適用されているが、地震荷重は、鉄筋コンクリート造の外周骨組によって負担されている。サンフランシスコのパラマウントアパートは、PCの高復元性に期待したものでアンボンドケーブルを外周耐震架構の梁に適用しており、ディテールは図7に類似のものである。

おわりに

鉄骨価格の高騰で一躍鉄筋コンクリート系オフィスが注目されたように見えるが、技術者は過去からその可能性の高さに注目しており、基礎研究を行ってきた。そこでは、プレストレスの高復元性が注目されており、如何に構造システムに組み込むかを思考してきた。そこから出てきたのが図6に示す概念であり、我が国における実用化が待たれる。あとは、設計者がプレストレスを生かしたコンクリート系構造を使うかどうかである。構造骨組を表現に用いることのできる高い造形性を再認識するとともに、「技術の粋をつくし、高層さらには超高層コンクリート系オフィスを可能とする」という強い意思を、技術者一人ひとりが持つことが、将来のコンクリート系構造の発展を支える原動力となる。