

プレストレスを適用した高層建築の設計 － プレストレスによる設計上の課題解決 －

著：Bijan O. Aalami, Florian B. Aalami, Jeffrey Smilow, and Ahmad Rahimian
訳：高津比呂人

ニューヨークの高層建築 55 Hudson Yards の一部は、既存の建築物の上に建設される。新しい構造を構築することにより発生する反力を、既存の柱の位置とその耐荷能力に合わせることで課題であった。設計の概要と、ポストテンション方式によるプレストレスにより生じる不静定力が、設計目標を達成するためにどのように使用されたかについて示す。

キーワード：不静定力、支点反力、PC 鋼材

1. はじめに

プレストレスは、新築建物や既存建物の改修などの多くのコンクリート構造物で、たわみの減少、ひび割れ制御、強度付与の目的で用いられている。ポストテンション方式によるプレストレスの2つの主な特性は、コンクリートにあらかじめ圧縮力を与えることと、重力により生じるたわみを打ち消すことである。さらにポストテンション方式の第3の特徴は、不静定構造物に不静定2次力を発生させることである。

ニューヨーク市の高層建築 55 Hudson Yards の一部は、既存建物の上部に構築されるのだが、この建物の構造設計において直面した大きな課題を解決するために、この不静定2次力が使われた。既存建物の柱が新築部分の荷重の一部を支持する計画であり、意匠設計や施工計画によって新築部分に発生することが予想される支点反力を、既存建物の柱位置とその耐荷能力に合わせることで課題であった。

既存柱の耐荷能力は、新築部分の重量を保持できる能力があるものの、新築部分からの反力の分布は、既存柱の耐荷能力の分布とは著しく異なっていた。いくつかの検討を行なったなかで、ポストテンション方式によるプレストレス力を利用して、新築部分からの反力が既存柱の耐荷能力に一致するように不静定2次力を発生させる方法がもっとも実用的かつ効果的であることがわかった。本稿では、設計上の課題と、プレストレスによる不静定力によって、いかに設計目標を達成したかについて詳細を述べる。

2. Hudson Yards

デベロッパーによると、ハドソンヤードは米国史上最大の民間の不動産開発であり、ロックフェラーセンター以来、ニューヨーク最大の開発事業である。このプロジェクトの敷地は、マンハッタン西部の 11.3 ha に広がっており、2024 年の完成時には、125 000 人の人が働き、訪問し、居住する予定である。この敷地には、160 万 m² 以上の商業スペース、住居スペース、最先端の高層オフ

イスビル、100 店舗以上のショップ、レストラン街、約 4 000 世帯の住居、5.7 ha の公共緑地と 750 人収容可能な公立学校が建設される予定である。プロジェクト地の約半分は既存の車両基地の上であり、供用中の 30 路線を巨大なプラットフォームで徐々に覆って、その上に3つの高層建築と商業施設、2.4 ha の広場と新しい文化施設が建設される予定である。工事は 2019 年に完成予定で、工事中も鉄道は供用したままである。

3. 55 Hudson Yards

このプロジェクトでもっとも注目を集めているのが 51 階建ての商用オフィスビル 55 Hudson Yards である (図 - 1)。このクラスではニューヨーク市で最初の純 RC 造の高層建築で、120 773 m² 以上のオフィススペースをもつ。デベロッパーは、柱によって視線が遮られない先進的かつ効率的なフロア空間で、床から天井までの大きな窓をもつ建物を提供したいと考えていた。その解決方法として、ロングスパンのポストテンションフラットスラブとそれを支持する中央コアと外周柱で構成することとした (図 - 2)。意匠設計は、Kohn Pedersen Fox Associates



図 - 1 55 Hudson Yards 完成予想図

と Kevin Roche John Dinkello and Associates, 構造設計は WSP|Parsons Brinkerhoff により行われた。ADAPT がポストテンションに関する設計を担当した。

ポストテンションフラットスラブ構造と、軽量コンクリートの使用により、スラブのスパンを 13.72 m とすることが可能となった。併せて、内部の梁も不要となった。これによって、階高を抑えることができ、建物高さ 237.74 m のなかに、必要なオフィススペースを確保することができた。この建物は、10 階建ての大きな基部の建物の上に、基準階が 41 層連なり、全部で 51 階建てとなっている。高層部の外周柱の荷重を、オフセットされた下層の格子状に配置された各柱に直接伝えるために、複数階にわたる荷重伝達構造となっている。荷重伝達構造は、3 層のスラブとトランスファーウォール（荷重移行壁）と、“walking” 柱（上階の柱芯と下階の柱芯がずれているときに、その間の荷重を移行する柱）により構成されている。これらスラブのうち 2 層に配置されるポストテンション PC 鋼材は、荷重伝達層で発生する水平方向の引張力に抵抗するために用いられている。トランスファーウォールの緊張材の配線形状によって、上部構造からの荷重を保持するための不静定力が生じる。この独自の荷重伝達システムについては、のちほど詳しく紹介する。

高層部の床スラブは中央から外周柱まで 11.74 m の梁の無い、視線の遮られない空間がある（図 - 2）。既存の



図 - 4 PC 鋼材と普通鉄筋の床配筋

建物は、スパンは最大で 13.4 m である。基準階は、229 mm 厚のフラットスラブで、外周部の梁は梁せい 762 mm で幅は 1 219 mm である。設計用の固定荷重は 1.68 kN/m² で、積載荷重は 2.39 kN/m² とした。スラブの軽量コンクリート（1 922 kg/m³）の 28 日強度の設計値は 48 MPa、柱やコア壁の普通コンクリートの設計基準強度は 83 MPa とした。各階のスラブは 3 つのゾーンに分けるよう建築主からの要望があり、それに沿って設計を行った。一つ目は将来的に大きなスラブ開口を設けられるゾーン、二つ目は小貫通を設けられるゾーン、最後は、PC 鋼材が配置されていて、開口を設けてはいけないゾーンである。

スラブ構造は、アンボンド PC 鋼材と通常の鉄筋で構成されている。緊張材はグループ化して配置され、建築主の要望に応えられるよう、床パネルの中央に緊張材を配置しない領域を設け（図 - 2, 3）、入居するテナントが内部でのフロア間の行き来ができるようにし、その他構造の変更にも柔軟に対応できるようにした。PC より線 1S12.7 mm（1 860 MPa 級）が使用された（図 - 4）。

建物の構造モデル（図 - 5）の右側に示されている、

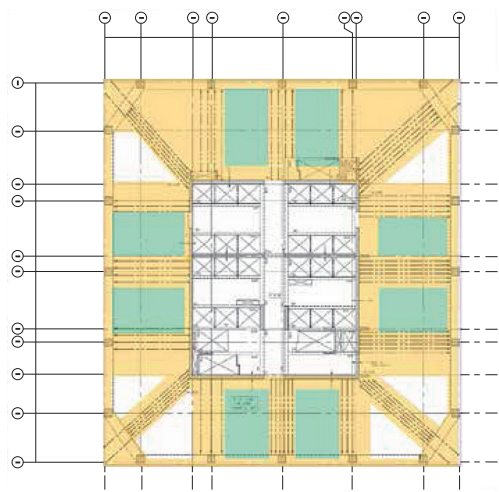


図 - 2 高層部基準階平面図

（緑：将来的に階段を設置するなど大きい開口を設けられるゾーン、黄：開口を設けられないゾーン、白：小開口を設けることが可能なゾーン）

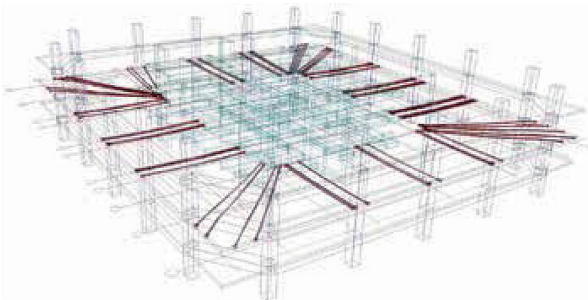


図 - 3 高層部基準階の PC 鋼材配置イメージ

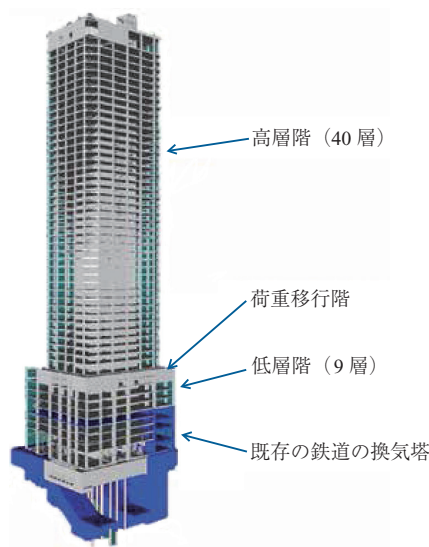


図 - 5 55 Hudson Yards の構造モデル

中央コアの奥側の建物の突き出た部分は、既存の鉄道の換気塔の柱で支持されている。新しい構造物からの反力を既存建物の柱の耐荷重の許容値内で伝達させるために、ポストテンション方式によるPC壁システムが新しい構造物に導入された。

4. PC 壁

既存の換気塔は、将来のハドソンヤードの開発に対応するために、指定された位置に支点がくるように設計されていた。しかし、意匠設計上の要求と新たに提案された新築部分のボリュームによって、内部の既存支点のうちの2つに許容値以上の過大な不可がかかる結果となった。一方で、外部の支点には余裕がある結果となった。構造設計者は、鋼製メガトラスの利用と内部柱の後打ちの組合せによって、荷重を再分配できる設計と施工の方法を検討した。荷重の再分配は、最初に鋼製トラスを外周柱のスパンまで渡すことで可能になる。内部柱は、外側のスパンに十分な荷重が移されたあとにコンクリートを打設すればよい。内部柱を打設したあと、残りの建物荷重はすべての支点に分配される。

ADAPT (コンサルタント) と協力して開発したもう一つの施工方法は、ポストテンションPC鋼材を用いて、10階の外周柱近くから、8階の2本の内部柱に荷重を伝達する方法である。この代替案では1フロアごとにRC壁を施工する際に壁にシース管を仕込むだけでよい。マルチストランドPC鋼材をシース管の中に配置し、壁のセグメントが終わる10階から緊張することができる。計算によると、20階の施工完了後にPC鋼材を緊張すれば、適切な荷重に調整することができる。

ポストテンションPC工法を現場打ちRC壁に適用することによって、施工手順を簡略化し、既存の建物への反力を再分配できる。また、鋼とコンクリートの混合構造とする必要もなく、鋼製トラスを使うオプションよりも安価となる。

プレストレスによる代替案の設計思想は、プレストレスによる不静定力に基づいたものである。不静定構造物では、プレストレスによって引き起こされる支点の移動が拘束されることによる内力が生じる。これを不静定2次力という。PC部材の構造設計では、構造物にかかる他の荷重とともに不静定力を考慮して計算しなければならない。

図-6は、PC部材の支点反力の概念を説明したものである。プレストレスにより生じる内力によって部材が変形する(図-6(a))。部材にかかる荷重やPC鋼材の量によるが、プレストレスによって部材を支点から持ち上げる力が働く。プレストレスにより発生する力と、それによって部材に加わる力とはつねに静的に釣り合っている(図-6(b))。これは、力の合計がゼロであることを意味している。部材が自由に変形できる状態にあるときには、図-6(a)のように変形する。PC部材の支点が固定されている場合、支点の位置で変形が拘束される(図-6(c))。プレストレスによって引き起こされる部材の動きに抵抗

する力が、支点に作用する(図-6(d))。これらの反力を、プレストレスによる不静定力という。

図-6(b)に示す反力を発生させる力は平衡状態にあるので、不静定力の合計もゼロとなるはずであるが、各反力の方向と大きさはプレストレスの設計を通して設定することができる。PC鋼材の配置と緊張力を思慮深く検討することで、設計で要求される反力の方向と大きさを設定することができる。プレストレスの特徴を活かして、既存建物の許容範囲内の反力に収まるよう、荷重を再配分することができた。

図-7は、55 hudson Yardsのコンクリートフレームへの適用概念図である。壁内部のプレストレスからの不静定力によって、柱の反力が許容値内になるように設計されている。

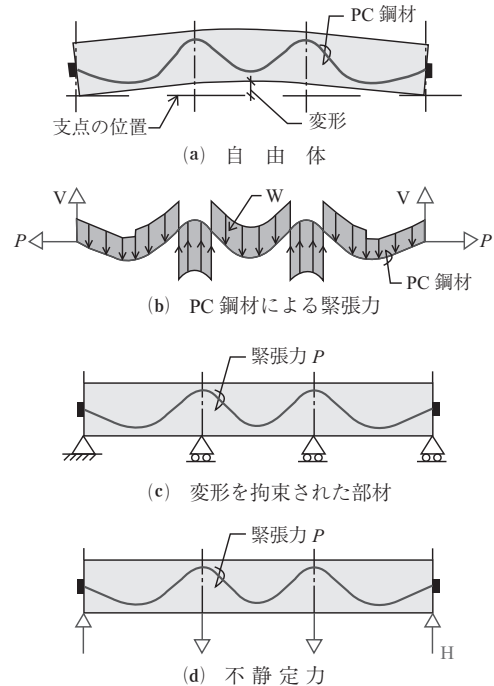


図-6 プレストレスによる不静定力

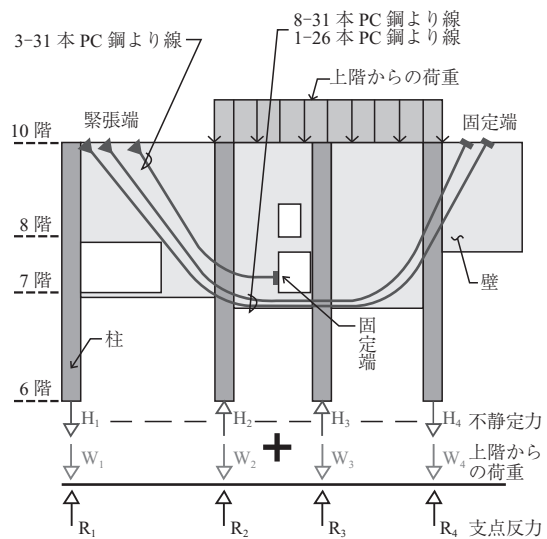


図-7 トランスファーウォール部概略立面図

W1 ~ W4 は、柱基部での上部構造からの反力である。この構造の荷重の弾性分布に基づくと、それぞれ値は異なるが、W2 と W3 の反力は既存構造物の許容値を超え、一方で、W1 と W4 は既存構造の許容値を下回る。全部で 367 本の、PC より線 1S15.2 mm によって、約 62 275 kN の緊張力を、図に示すようにおおむね 31 本ずつ束ねて配置し、柱基部で H1 ~ H4 の不静定力が発生するようにした。H2 と H3 は上向きの力で、H1 と H4 は下向きの力である。H1 から H4 の反力の合計はゼロだが、合計 22 240 kN 以上の荷重を中央の支点から端部の支点ま



図 - 8 8階トランスファーウォール部施工状況

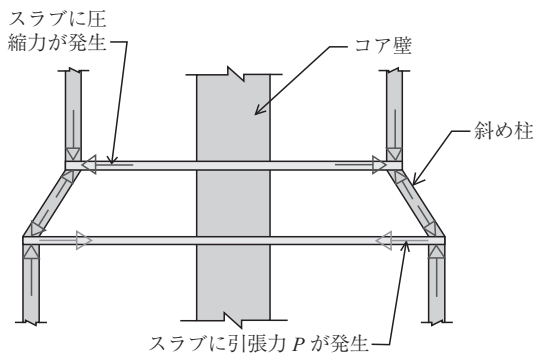


図 - 9 床面積が小さいフロアから大きいフロアに変わる際にスラブに引張力がかかるメカニズム

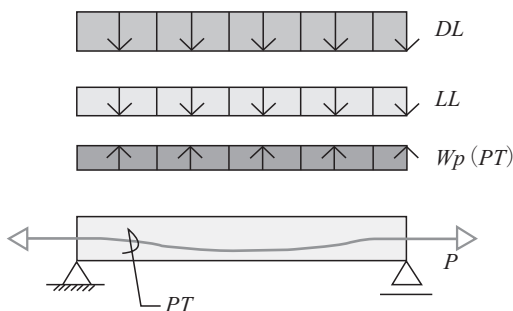


図 - 10 床面積が拡大するフロアにかかる荷重 (DL: 固定荷重, LL: 積載荷重, W_p : ポストテンション方式によるプレストレス (PT) によって発生する上向きの力)

で伝達している。これによって、合計の建物反力 R1 ~ R4 が耐荷能力を超えない結果となる。

図 - 8 に 8 階の PC 壁の施工状況の一部を示す。マルチストランド PC 鋼材を通すシース管が、設計で指定された経路に沿って配置されている。壁の両側のたて筋は、下の階からつながっている。残りの壁筋は、シース管の配置完了後に配筋される予定である。アンボンド PC 鋼材を含むスラブ筋も配置されているところである。

設計において、プレストレスの、従来の使い方とは異なるが有益な使い方に、小さな床面積の高層部と、床面積の大きい基部の間の荷重移行をするスラブに発生する引張力を打ち消す役割がある。図 - 9 に、下階の床スラブに引張力が発生するメカニズムを示す。図 - 10 は、下部フロアの典型的なスパンにおける荷重を示しており、続けてスラブの強度設計に必要な調整が行われる。

下部フロアに発生する面内の引張力には、普通鉄筋を追加するか、PC 鋼材を追加するか、あるいは両方を併用することで抵抗する。

スラブでの荷重移行による引張力に抵抗するプレストレスは、引張力だけでなく上向きの力を与えるように配置することができる。上向きの力は、固定荷重と積載荷重を打ち消すように働くが、一般的なスラブの安全性設計が必要である。

以前は、PC 鋼材はつなぎ材として使われていたが、PC 鋼材を曲線配置することで部材の曲げ強度を向上させる効果があるとわかったことには新規性がある。式 (1) は、PC 部材の強度要求に一般的に使用される荷重の組み合わせであり、HYP はポストテンションによって引き起こされる部材のたわみによる不静定力である。これは PC 鋼材がスラブの縁に定着され、スラブに圧縮力が働く一般的な場合に適用可能である。この曲げに対しては、PC 鋼材と普通鉄筋を組み合わせで抵抗すべきである。

式 (2) は、PC 鋼材がつなぎ材で曲線配置されたときの荷重組合せである。PC 鋼材の曲線配置によって生じる上向きの力と、スラブに生じる曲げによる上向きのたわみ (不静定力による) は不変である。しかしながらその力 P は、斜め柱のスラスト力を打ち消すために働くので、PC 鋼材は設計用モーメントに抵抗することはできない。このケースでは、式 (2) で導かれる設計用モーメントに対しては、普通鉄筋と追加の PC 鋼材で抵抗しなければならない。

$$U = 1.2 DL + 1.6 LL + 1.0 HYP \quad (1)$$

$$U = 1.2 DL + 1.6 LL + 1.0 W_p \quad (2)$$

原 典

Bijan O. Aalami, Florian B. Aalami, Jeffrey Smilow, and Ahmad Rahimian: Novel Application of Post-Tensioning Solves High-Rise Design Challenges? Solution provides long spans and efficient transfer of horizontal and vertical forces -, Concrete International, Vol.38, No.10, pp.58-63, 2016

【2017 年 4 月 6 日受付】