5 超高層建物の地下

～その基礎構造を語る～

梅野 岳
UMENO Takashi
梅野岳耐震コンサルタント

超高層ビルを地下の一番下で支える基礎は、超高層ビルの高さが更新されると同時に進化を遂げている。日ごろ目にしない地下で支える基礎構造物に焦点を当て、どのような構造がどのような原理で地上の構造物を支えているのかを解説していただく。

はじめに

我が国で最初に高さ100mを超える超高層ビルが誕生したのは、57年前の1968年4月のことです。東京都千代田区に建つ地上36階、地下3階建ての霞が関ビル、最高高さは156mです。

図1は、超高層ビル（以下、超高層）の最高高さがその後、更新され現在に至る経過をまとめました。現在、高さ日本一の超高層は、右端の麻布台ヒルズ森JPタワー、最高高さ325mです（写真1）。図中右隣には東京駅そばに建設中で、2028年に日本一の座を交代するTorch Tower（トーチタワー）、最高高さ385mも点線で示しました。

ここでは超高層の地下の一番下で、建物重量やその他の基礎に働く力を固い地盤に安全に伝える役割を担っている超高層の基礎構造について述べます。

超高層ビルの誕生から現在までの経緯

建築基準法は1950年に制定されましたが、それ以前から、建物の高さは31mを超えないこととされていました。1923年9月1日に発生した関東大震災で崩壊した建物の高さを踏まえ、建物の高さの上限を100尺（約30.3m）としたことがその始まりだそうです。

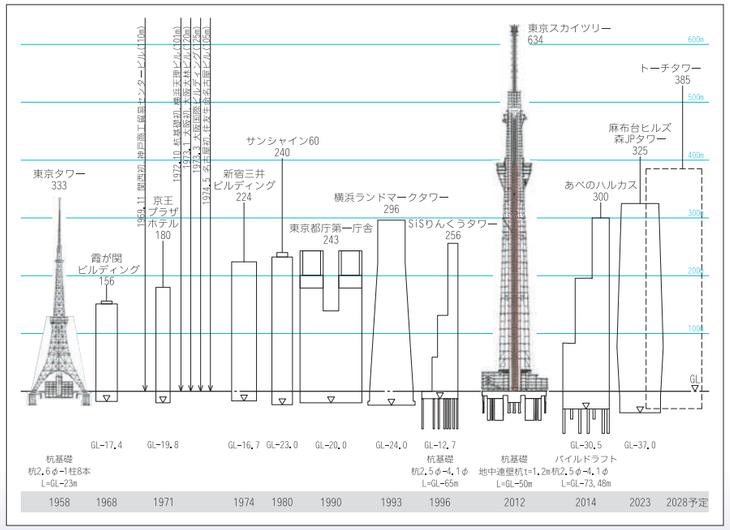


図1　超高層建物の誕生から現在までの高さ日本一ビルの変遷

1960年代の経済成長期に入り、この高さ規制では都市経済の活性化に対応できないため、これを見直したいという機運が高まり、敷地の広さに対する建物床面積の比率（容積率と呼ぶ）を規制対象に変更し、建物をより高く建設し、床面積を増やしながら、空地も確保するという街づくりの大きな方向転換が図られました。1963年7月の建築基準法改正です。

そこで課題となったのが、当時の構造法規が31mを超える高い建物の耐震設計を規定していなかったことです。その結果、高さ45mを超える建物では、特別な方法として地震動による建物の応答をコンピュータでシミュレーションする地震応答解析と呼ばれる高度な設計法を行い、専門委員会でその内容を審査する仕組みが導入されました。その後、阪神・淡路大震災を契機に耐震規定の大改正を経て、建物高さ60mを超える建物については、地震応答解析が要求され、民間開放によって複数となった審査機関がその審査を行う現在の制度に繋がりました。

なお、図1には、東京タワーと東京スカイツリーという法的には工作物に分類され、建物（法律用語では建築物）とは別扱いの通信鉄塔の有名どころも、高さ比較として掲載しました。数年後には東京タワーの高さを超える超高層が登場することはご存知の通りです。

ちなみに、霞が関ビルの総重量を計算してみると約90,000トンで、東京スカイツリーの上部構造の総重量、約40,000トンに対してはるかに重いことが分かります。これら独立通信鉄塔の場合、暴風や地震に伴う横力で基礎に作用する押込み力・引抜き力と水平力に対しての安全性確保が1番重要な設計上の課題であり、下部の広がりで踏ん張る形態や大規模な杭基礎が採用される状況も理解いただけると思います。

高さ日本一の座を占めた超高層ビルの基礎

超高層に限らず建物の基礎構造をその形式で分類すると、直接基礎と杭基礎に分けられます。基礎下の地盤が堅固な場合に採用される直接基礎は最も安定した基礎と考えられます。その基礎構造は、3つに分類され、柱下ごとに基礎スラブを設ける独立基礎、帯状に基礎スラブを設ける布基礎、そして超高層でもっぱら採用される建物下を一体の厚いスラブ版とするべた基礎です。

一方、杭基礎は地盤を掘削して地中に構築される構造部材で、昔から杭地業と呼ばれてきました。基礎に作用する荷重や力を堅固な支持地盤まで伝える基礎形式です。工場で製作された杭体を、地盤中に挿入する既成杭と、地中を機械掘削してコンクリートを流し込み丸い杭体を作る場所打ちコンクリート杭（以下場所打ち杭と略す）に大別されます。

写真1　麻布台ヒルズ森JPタワー付近遠望
左から森JPタワー（325m、直接基礎）、レジデンスA棟（237m、直接基礎）、背後に建設中のレジデンスB棟（263m、直接基礎、竣工25年8月予定）、その奥、左から住友不動産六本木グランドタワー（230m、直接基礎）、泉ガーデンタワー（201m）、仙石山森タワー（206m、直接基礎）（2025年2月筆者撮影）

これに2000年頃から新たな基礎形式として、直接基礎と杭基礎を組み合わせたパイルドラフト基礎が加わりました。ヨーロッパから伝わった基礎形式のため、上手い訳語が出来ず、現在はこの呼び方が一般化しています。これら基礎形式ごとの支持メカニズムを解説する前に、超高層で選択される基礎形式の概略をみておきましょう。

図1に記載の各超高層の立面スケッチは、地下部分も描き、基礎底面レベルに▽マークを付けました。

脚注最下段の数値は建設年ですが、その上段には地表面（グランドライン）からの基礎底面深度を表記しています。杭基礎には、杭径や杭長も記載しました。

霞が関ビルを例にとると、基礎形式は直接基礎で、基礎種類はべた基礎です。時代を進めると1993年に高さ日本一の座についた横浜ランドマークタワー（296m）まで、全て直接基礎が採用されていました。

一方、図中に注記の通り、100m超え超高層で初めて杭基礎が採用されたのは、1972年の横浜天理ビル（101m）です。その基礎は、初めてということもあり建物直下の地盤を四角く溝状掘削し、厚さ60cmのコンクリート壁の囲いを築造する地中連続壁工法が採用され、内側にも最大杭径2.0mの場所打ち杭を配置する極めて堅牢な杭基礎とされました。

関西に目を転じると、初めて100mを超える超高層が登場するのは、霞が関ビルの次の年に神戸に建設された神戸商工貿易センター（110m）です。大阪

でも73年に大阪大林ビル（120m）と大阪国際ビルディング（125m）が建設されました。これらは全て直接基礎で、直下の地盤で超高層が支持できる敷地を選んで実現したともいえます。

横浜ランドマークタワーの隣に記載のSISりんくうタワー（256m）は大阪の臨海部、関西空港の陸地側に位置する、あべのハルカス以前の関西一高い超高層です。ここでは拡底場所打ち杭という現在では超高層で定番となった杭基礎が採用されています。杭先端径を軸径2.0mから最大4.1mに広げ、杭先端の底面積を大きくして支持力の増強が図られています。

その後、連続地中壁杭基礎の構造物として東京スカイツリーが登場、その2年後には直接基礎と杭基礎を組み合わせたパイルドラフト基礎のあべのハルカス（300m）が大阪に誕生して日本一を更新。2023年に至って麻布台ヒルズ森JPタワー（325m）に日本一を交代。再び直接基礎の超高層が日本一に返り咲いたというのが、今日までの超高層の建設史です。

超高層ビルの基礎形式の内訳をみる

さて、図2は2014～21年に超高層の審査が行われた超高層660棟[3]のデータから、100mを超える超高層234棟を抽出し、その基礎形式の内訳を、3段階に高さ区分して示しました。100m超え150m以下のグループでは杭基礎超高層が全体の60％、84棟と多数を占めますが、200m超えのグループ18棟（100m超≦200mからの増分6＋4＋8）では直接基礎、パイルドラフト、杭基礎の順と変化し、建物重量が重くなると直接基礎が優勢になり、杭基礎の比率が低下する傾向が読み取れます。杭基礎超高層では、高さが増すと杭体発生応力が増大しその処理が難しくなる様子が理解されます。

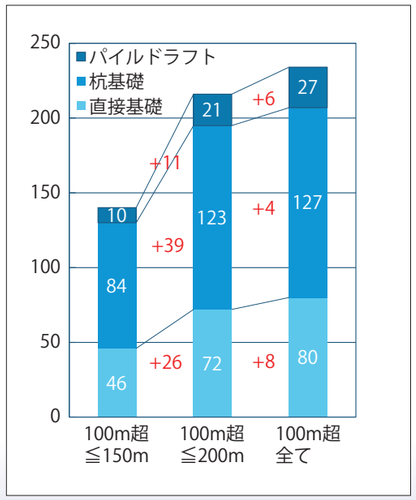


図2　最近の超高層の基礎形式の選定状況

基礎構造の支持力発生メカニズム

表1には超高層に限らず、基礎構造全般での抵抗力の発揮メカニズムをまとめました。

例えば、建物自重に対する基礎の押込み方向の支持力を例にとると、直接基礎では基礎直下の地盤の支持力が抵抗要素です。杭基礎では杭体周面摩擦抵抗力と杭先端支持力の合算値を考えます。

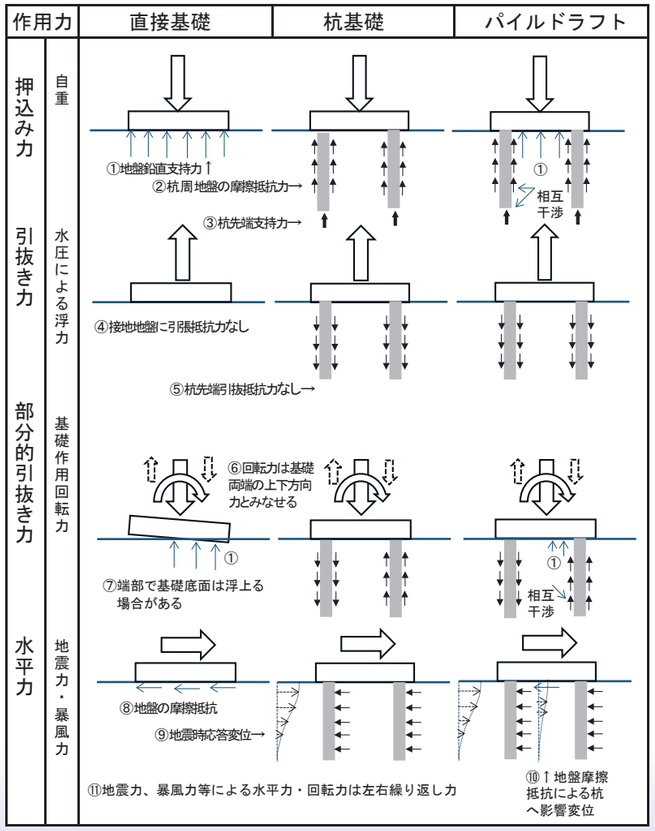
一方、パイルドラフト基礎では、直下の地盤の抵抗力と杭基礎抵抗力の合算値とはなりません。基礎底板下の地盤抵抗力が発揮されると地中応力が発生し、これが周辺にある杭体には荷重となって作用するからです。その結果、杭基礎の抵抗力が軽減され、直接基礎と杭基礎間での相互干渉が生じます。この影響評価は設計上の難しい課題で、精密な地盤中の応力解析を伴うことが特徴です。基礎の沈下性状の研究実績、その検証解析能力と設計実績の積み重ねが必要な設計技術と言っても過言ではありませんし、大手建設会社等でないと手を出せない難しい基礎形式ともいえます。

作用引抜き力の項は、2段に区切りました。基礎全体が上向きの力を受けるケース、例えば海浜部の地下水位が高い敷地に深い地下室を設ける場合などで、地下水による浮力が基礎底板に作用します。ただし、土質の引張り抵抗は期待できないことから、直接基礎では地盤の抵抗力は考えません。

杭基礎の場合も引抜き力に対する杭先端抵抗力は考えず、杭周面抵抗力のみが抵抗力となります。また、基礎に引抜き方向の力が主に作用するのは、地震時等に引き起こされる、基礎位置での回転力（転倒モーメントと呼ぶ）による場合が主です。引抜きを受ける側で部分的に引抜き力が発生する訳です。

次に建物への水平力作用時を考えると直接基礎では基礎スラブと直下地盤の接触面での摩擦抵抗力を考えます。一方、杭基礎では建物に作用する地震時慣性力などの水平力が杭頭へ作用し、地盤中の杭体に応力が発生します。地盤も地震時水平力を受けると杭体とは異なる動きをすることから、地盤からの応答変位が荷重となって杭体に作用することも特筆されます。これら基礎工学の専門的な知識を学習したい方は、専門書や設計指針類等を参照ください。ここでは詳しい説明は省略します。

表1　基礎の作用する外力と抵抗力発揮メカニズム



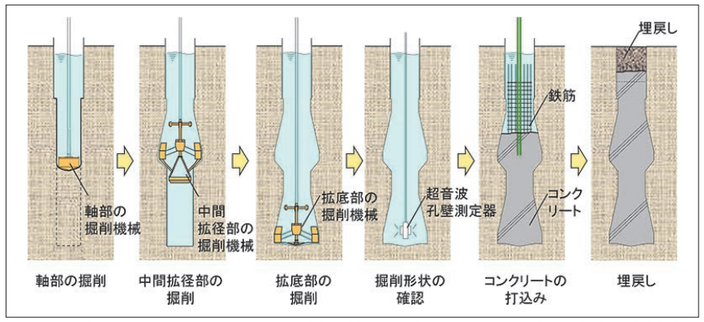


図3　場所打ちコンクリート杭の施工概要（多段拡径場所打ちコンクリート杭の例）参考資料4）

写真2　試験杭体の掘り出し状況 参考資料5）

場所打ち多段拡径杭基礎

杭基礎の押込み力に対する抵抗要素として、杭先端抵抗力がありますが、この抵抗力を増強するため、杭先端を軸径の2倍以上にも拡底し接地面積を増やすことで支持力を増強する場所打ち杭工法が、建築の分野では今や主流となっています。特に超高層では大きな支持力確保が必要なことから、ほとんどがこの工法です。最近では拡底径6.1mにまで達する大口径拡底杭工法も登場し、高さ400mクラスの超高層の杭基礎利用も視野にあると喧伝（けんでん）されています。図3、写真2はこれら工法の説明資料の一部です。

また、杭中間にも拡径部を設けた拡底杭として多段拡径杭も開発され超高層での採用事例が報告されています。例えば、東京都港区の虎ノ門ではRC超高層集合住宅（215m）のパイルドラフト基礎では、軸径2.8m、中間拡径部径3.6m、杭先端拡底径4.2mの多段拡径杭が採用されたと報告されています。

超高層の基礎に係る話題はまだまだ尽きませんが、次の機会をご期待いただき、ここで幕とします。

<参考資料>

1）内藤多仲ほか、日本に於ける地震学及び地震工学のレビュー（仏文）、日仏工業技術会、1964
2）小西厚夫、東京スカイツリーの構造計画、月刊基礎工2012.11、総合土木研究所
3）井上波彦、梅野岳、超高層建物の基礎構造の現状、月刊基礎工2024.11、総合土木研究所
4）竹中工務店、高層建物の大荷重を効率的に支持ー多段拡径杭工法®、https://www.takenaka.co.jp/solution/disaster/tadan
5）濱 健太郎ほか、多段拡径場所打ちコンクリート杭工法「T-EAGLE® 杭工法」の開発、大成建設技術センター報No.52、2019