

# 超高層建築の構造計画に関する研究

## －海外の建築事例に基づく構造分析－

日大生産工(院) ○ 宋 子成  
日大生産工 藤本 利昭

### 1. まえがき

高層建築物の歴史を見ると、広くは古代の中東での宗教建築に始まり、十九世紀末には北アメリカへ渡り摩天楼が建設された<sup>1)</sup>。今回の調査対象は2021年末時点で完成した高さ上位60棟（CTBUH（高層建築物・都市居住協議会）データベース<sup>2)</sup>）である。図1に示すように近年超高層建築物の建設地はアジアへと移ることになる。60棟の建築物の多くではコア+ベルトトラス・フレーム構造<sup>3)</sup>で制振システムが採用されており、建築物高さは異なるが構造計画に概ね共通した傾向が見られた。そこで本研究では、それら海外の建築事例に着目し、近年の超高層建築物の特徴を把握した上で、仮定した単純なモデルにより構造計画を分析する。

### 2. 調査事例

#### 2.1. 対象建築物

調査した60棟の超高層建築物の建築物高さは365.8mから828.0mであった。ここでは代表的と考えられるアジアの超高層建築物を対象に建築物高さ300mから600m程度を100mごとに区切り、300m級、400m級、500m級、600m級の4棟を選定した。表1に対象建築物の概要を示す。これらの超高層建築物は高さ順に、「Bank of China Tower」、「Shanghai World Financial Center」、「Goldin Finance 117」および「Shanghai Tower」である。

#### 2.2. 対象建築物の構造計画

図2に対象建築物の平面図を示す。

Bank of China Tower(図2 (a))の構造は中央にRC造のコアを設け、四隅に4本のSRC造のメガ柱を配置した平面計画であり、制振装置には座屈拘束ブレースが適用されている。

Shanghai World Financial Center(図2 (b))の構造も同様に中央にRC造のコアを設け、四隅にSRC造のメガ柱を配置した計画である。制振装置はTMD (Tuned Mass Damper) が設置されている<sup>4)</sup>。

Goldin Finance 117(図2 (c))の構造は、中央にRC造のコアを設け、四隅にCFT造のメガ柱を配置している。Bank of China Towerと同様に制振装置は座屈拘束ブレースが適用されている。

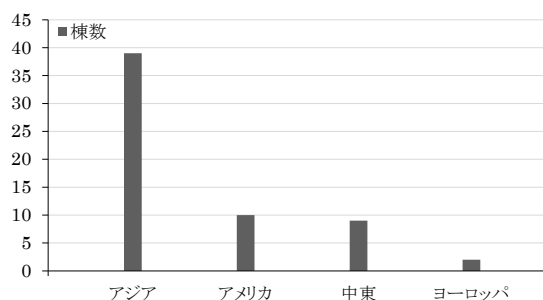


図1 地域別超高層建築物の建設数

表1 対象建築物概要

| 建築物名称                           | 建築物高さ (m) | 竣工年   | 構造システム           | コアタイプ | 構造種別       | 建設地      | 総階数 |
|---------------------------------|-----------|-------|------------------|-------|------------|----------|-----|
| Bank of China Tower             | 367.4     | 1990年 | コア+ベルトトラス・フレーム構造 | 中央型   | SRC, RC, S | Hongkong | 72  |
| Shanghai World Financial Center | 492.0     | 2008年 | コア+ベルトトラス・フレーム構造 | 中央型   | SRC, RC, S | Shanghai | 101 |
| Goldin Finance 117              | 569.5     | 2017年 | コア+ベルトトラス・フレーム構造 | 中央型   | CFT, RC, S | Tianjin  | 117 |
| Shanghai Tower                  | 632.0     | 2015年 | コア+ベルトトラス・フレーム構造 | 中央型   | SRC, RC, S | Shanghai | 128 |

A Study on the Structural Plan of Skyscrapers  
－ Structural Analysis based on Overseas Example －

Zicheng SONG and Toshiaki FUJIMOTO

Shanghai Tower(図2 (d) )の構造は、中央にRC造のコアを設け、周辺にSRC造のメガ柱を配置している。制振装置にはShanghai World Financial Center と同様にTMDが設置されている。

このように4棟の建築物は、竣工時期が異なり、建築物高さも367mから632mと異なるが、構造システムは概ね同様である。この理由としていずれの建築物も台風が頻繁に発生する地域であり、このような塔状比が大きい建物に対しては、コア+メガ柱といった形式が適しているものと考えられる<sup>5)</sup>。

### 3. 簡易なモデルによる検討

#### 3.1. モデル化の概要

2章で示した通り、対象とした超高層建築物の建築物規模は大きいですが、構造的には単純な形式であり、簡単な1本棒モデルにより構造性能の検討を試みることにした。

図3に検討モデルの平面図を示す。モデルの平面は2章の建築物を参考に、標準的なものとして基準階平面は50m×50mの面積 $A=2,500\text{m}^2$ とした。中央部には25m×25mとしたボックス型のRC造のコアを設け、平面の四隅にメガ柱を想定した。なお各階階高 $h$ は5m、各階の単位荷重 $w$ は7.5kN/m<sup>2</sup>と設定した。なお柱・壁のコンクリートの設計基準強度は $F_c=100\text{N/mm}^2$ として検討を進めた。

表2に検討モデルの概要を示す。検討モデルは建物高さ $H$ をパラメータとして、表3に示すように100mから600mまでを100m間隔で設定し、計6ケースについて検討を行った。

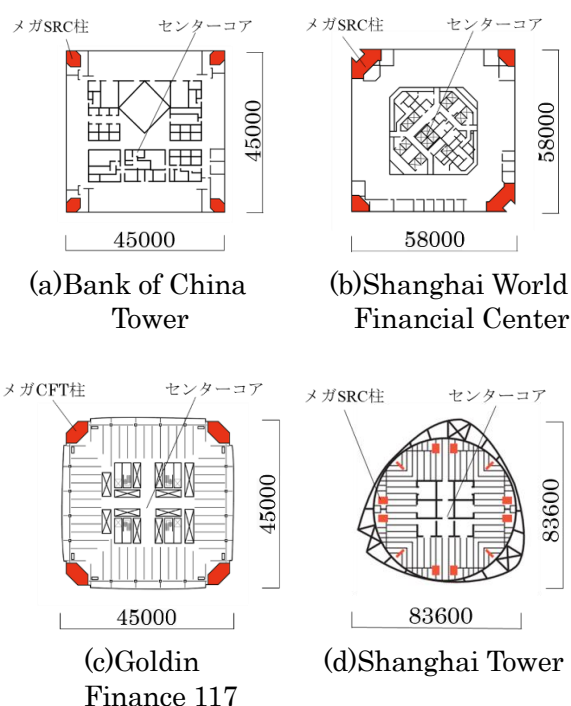


図2 対象建築物の平面図(単位：mm)

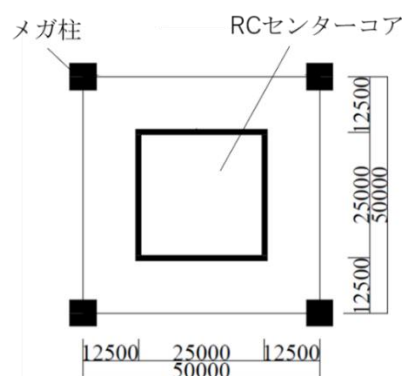


図3 検討モデルの平面図(単位：mm)

表2 検討モデルの概要

|    | 幅 $b$ (m) | せい $d$ (m) | 面積 $A$ (m <sup>2</sup> ) | 各階の単位重量 $w_i$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 階の重量 $W_i$ (kN) |    | 階高 $h$ (m) | コンクリート強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|----|-----------|------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|----|------------|-------------------------------------|
| 平面 | 50        | 50         | 2500                     | 7.5                                | 18750           | 立面 | 5.0        | 100                                 |

表3 検討モデルの計算結果

| 建物高さ $H$ (m) | 塔状比 $H/B$ | 階数 $n$ | 総重量 $\Sigma W$ (kN) | 振動特性係数 $R_t$ | 断面二次モーメント $I_w$ (m <sup>4</sup> ) | 壁断面積 $A_w$ (m <sup>2</sup> ) | 壁厚 $t_w$ (mm) | 1階せん断力 $Q_1$ |
|--------------|-----------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| 100          | 2.00      | 20     | 375000              | 0.320        | 1171.9                            | 11.3                         | 113           | 120000       |
| 200          | 4.00      | 40     | 750000              | 0.160        | 2343.9                            | 22.5                         | 225           | 120000       |
| 300          | 6.00      | 60     | 1125000             | 0.107        | 3516.3                            | 33.8                         | 338           | 120000       |
| 400          | 8.00      | 80     | 1500000             | 0.080        | 4689.0                            | 45.0                         | 450           | 120000       |
| 500          | 10.00     | 100    | 1875000             | 0.064        | 5862.3                            | 56.3                         | 563           | 120000       |
| 600          | 12.00     | 120    | 2250000             | 0.053        | 7036.4                            | 67.5                         | 675           | 120000       |

### 3.2. 検討結果

#### I. RC造コア壁の検討

まずコア壁を検討する。建築物の重量はコア壁が負担すると考え、長期許容応力度に収まるよう仮定すると壁の必要断面積 $A_w$ と壁厚さ $t_w$ は式(1)、(2)より得られる。

$$A_w \geq \Sigma w / (F_c / 3) \quad \dots (1)$$

$$t_w \geq A_w / (4 \times 25\text{m}) \quad \dots (2)$$

図4の検討モデルにおけるコア壁の計算の流れに示すように高さ300mの場合について説明すると、必要な壁厚さは $t_w \geq 338\text{mm}$ となる。また、ベースシア係数 $C_0=0.2$ および地震地域係数 $Z=1$ とした地震力を想定すると、1階のせん断力は $Q=120000\text{kN}$ であり、壁の平均せん断応力度は $\tau = 7.11\text{N/mm}^2$ となる。これに対して、建築物高さ300m級のBank of China Towerのコア壁厚さは1200mmである。

次に、高さ400mの場合、計算すると必要な壁厚は $t_w \geq 450\text{mm}$ となる。同様に、 $C_0=0.2$ および $Z=1$ とした地震力を想定すると1階のせん断力は $Q=120000\text{kN}$ であり、壁の平均せん断応力度は $\tau = 5.33\text{N/mm}^2$ となる。一方、高さ400m級のShanghai World Financial Centerのコア壁厚さは1600mmである。

さらに、高さ500mの場合、必要な壁厚は $t_w \geq 563\text{mm}$ となる。 $C_0=0.2$ 、 $Z=1$ とすると1階のせん断力は $Q=120000\text{kN}$ であり、壁の平均せん断応力度は $\tau = 4.27\text{N/mm}^2$ となる。なお、高さ500m級のGoldin Finance 117のコア壁厚さは1600mmである。

最後に、高さ600mの場合、計算すると必要な壁厚は $t_w \geq 675\text{mm}$ となる。 $C_0=0.2$ 、 $Z=1$ とすると1階のせん断力は $Q=120000\text{kN}$ であり、壁の平均せん断応力度は $\tau = 3.56\text{N/mm}^2$ となる。高さ600m級のShanghai Towerのコア壁厚さは比較的薄く1200mmである。

以上の結果から、計算値と実建築物の壁厚さには大きな差が見られ、モデルの値が小さい。そこで、各建築物の壁のコンクリート強度を確認すると高さ600m級のShanghai Towerの37階から下には強度C70( $F_{cu}=70\text{N/mm}^2$ )のコンクリートが使用されている。ここで、中国のコンクリート強度を日本のコンクリート強度に換算すると式(3)<sup>9)</sup>により得られる。

$$F_c = 0.75 \times F_{cu} \quad \dots (3)$$

ここで、 $F_c$ : 日本のコンクリート設計基準強度( $\text{N/mm}^2$ )、 $F_{cu}$ : 中国のコンクリート基準強度( $\text{N/mm}^2$ )である。

中国のコンクリート強度C70を日本のコンクリート強度に換算するとコンクリート強度は $F_c = 52.5\text{N/mm}^2$ となる。このことから $F_c = 52.5\text{N/mm}^2$ をもとにコア壁厚さを計算した場合高さ600m級の壁厚さは $t_w \geq 1280\text{mm}$ となり、この計算値は実建築物に近い値となる。同様にコンクリート強度を換算して計算すると、Bank of China TowerにはC40のコンクリートが使用されており、必要な壁厚は $t_w \geq 1125\text{mm}$ 、Shanghai World Financial CenterにはC40のコンクリートが使用されており、必要な壁厚は $t_w \geq 1500\text{mm}$ となる。さらに、Goldin Finance 117にはC60のコンクリートが使用されており、必要な壁厚は $t_w \geq 1250\text{mm}$ となる。建築物高さも300m～600mと異なるが、検討モデルによるコア壁厚さの計算値は実建築物のコア壁厚さに近い値となった。

#### II. 水平剛性・固有周期およびメガ柱の検討

超高層建築物を一様の曲げ棒と仮定し、式(4)<sup>7)</sup>により一次弾性固有周期 $T_{b1}$ を検討する。

$$T_{b1} = \frac{2H^2}{(0.59686)^2 \pi} \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} \quad \dots (4)$$

ここで、 $H$ : 建築物高さ(m)、 $\rho$ : 単位体積当たりの質量( $\text{t/m}^3$ )、 $A$ : 基準階面積( $\text{m}^2$ )、 $E$ : ヤング係数( $\text{kN/m}^2$ )、および $I$ : 断面二次モーメント( $\text{m}^4$ )である。

まずコア壁のみの曲げ剛性を考慮した場合、300mモデルの固有周期は $T_{b1} = 8.3\text{sec.}$ となり、400mモデルは $T_{b1} = 12.8\text{sec.}$ 、500mモデルは $T_{b1} = 18.0\text{sec.}$ 、600mモデルは $T_{b1} = 23.8\text{sec.}$ となった。

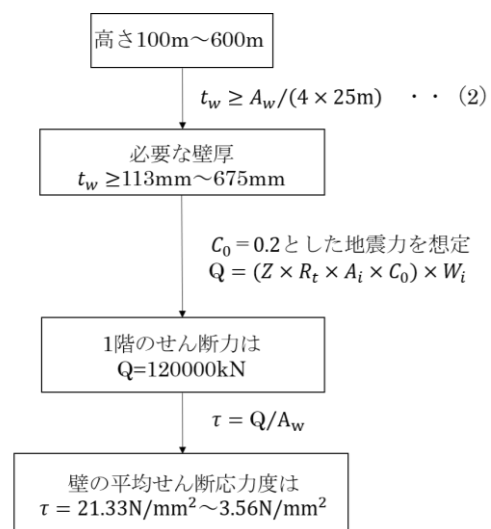


図4 検討モデルコア壁の計算の流れ

図5に検討モデルの水平剛性・固有周期およびメガ柱の計算の流れを示す。2章に示した高さ600m級の超高層建築物の固有周期が約10秒であることからアウトフレームのメガ柱の断面を検討する。 $T_{b1} = 10\text{sec.}$ としたと主の建築物全体の曲げ剛性は、式(4)によりコア壁のみの曲げ剛性の5.66倍が必要になり、メガ柱の断面二次モーメントを $I_c = A_c \times (25\text{m})^2 \times 4$ とすると、メガ柱1本の断面積は $A_c = 16\text{m}^2$ と求まり、メガ柱を正方形断面と仮定すると $B \times D = 4.0\text{m} \times 4.0\text{m}$ という結果になった。高さ600m級のShanghai Towerのメガ柱の断面サイズは $3.7\text{m} \times 5.3\text{m}$ である。

同様に300m級の超高層建築物の固有周期をデータベースより約6秒と仮定するとメガ柱1本の断面積は $A_c = 2.69\text{m}^2$ となり、 $B \times D = 1.64\text{m} \times 1.64\text{m}$ という結果になった。高さ300m級のBank of China Towerメガ柱の断面サイズは $2.9\text{m} \times 4.4\text{m}$ である。

さらに、400m級の超高層建築物の固有周期も同様に約8秒と仮定するとメガ柱1本の断面積は $A_c = 4.8\text{m}^2$ となり、 $B \times D = 2.20\text{m} \times 2.20\text{m}$ という結果になった。高さ400m級のShanghai World Financial Centerメガ柱の断面サイズは $2.7\text{m} \times 5.5\text{m}$ である。

最後に、500m級の超高層建築物の固有周期を約9秒とするとメガ柱1本の断面積は $A_c = 9.4\text{m}^2$ となり、 $B \times D = 3.07\text{m} \times 3.07\text{m}$ という結果になった。高さ500m級のGoldin Finance 117メガ柱の断面サイズは $5.2\text{m} \times 8.3\text{m}$ である。

この検討モデルのメガ柱の断面サイズの計算値と実建築物のメガ柱の断面サイズに異なることから、以下の二つの原因を考えられる。

- ① 実建築物のメガ柱は建築物が高くなるにつれて断面サイズが徐々に小さくなっており、本検討では対象建築物のメガ柱の最大断面と比較している。
- ② 検討モデルは一様の曲げ棒と仮定して、コアとメガ柱を完全に一体化として挙動すると考えているが、実建築物ではコアとメガ柱をベルトトラスなどで接続しているため完全に一体ではない。従って想定より剛性が小さくなっているためメガ柱の断面サイズが大きくなる可能性がある。

#### 4. まとめ

本研究は海外の建築事例を基に単純なモデルを用いて超高層建築物の構造計画を分析した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 近年建設された超高層建物は、主に中央RC造コア+メガ柱による制振装置を設置した構造であった。
- ・ 超高層建築物の構造性能を単純なモデルを用い、コア壁厚とメガ柱の検討を試みた。
- ・ コア壁厚の検討において、コンクリート強度を換算した結果、検討モデルの計算値は実建築物のコア壁厚さに近い値となった。
- ・ 実建築物の柱断面は上層ほど小さくなっていること、また検討モデルではコアとメガ柱は一様の曲げ棒として仮定したが、実際にそれらは完全に一体には挙動しないことから、検討モデルの柱断面の結果と差異が生じたと考えられる。

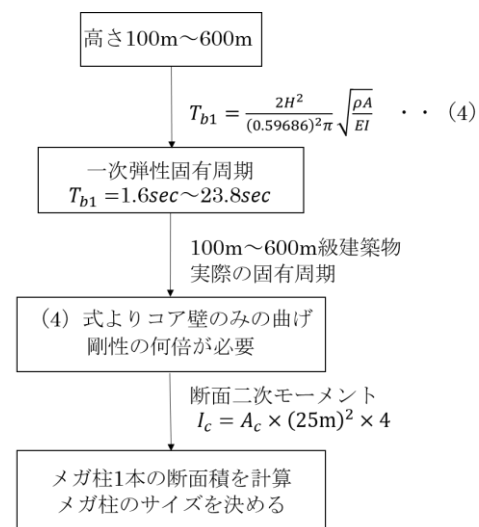


図5 検討モデルの水平剛性・固有周期  
およびメガ柱の計算の流れ

#### 参考文献

- 1) 大澤昭彦：高層建築物の世界史,講談社現代新書,(2015)
- 2) CTBUH：100 Tallest Completed Buildings in the world,URL:100 Tallest Completed Buildings in the World - The Skyscraper Center,(参照日2022.10.8)
- 3) 三栖邦博：建築計画・設計シリーズ38 新・超高層事務所ビル,市ヶ谷出版社,p. 73,(2007)
- 4) 森ビル株式会社：建設中の「上海環球金融中心」地上90階に制振装置を設置,(2007)
- 5) 宋子成,藤本利昭,李文聰,井出翔太：国内外における超高層建築物の構造計画の分析－中国の建設例の分析－,日本大学生産工学部第54回学術講演会講演概要,(2021)
- 6) 三浦尚：土木材料学(改訂版),コロナ社,(2000)
- 7) 日本建築構造技術者協会：耐震構造設計ハンドブック,オーム社,(2008)