特 集

超大型鋼構造物 (III)

④ 超高層建築における設計・施工技術の現状とその将来展望*

山 崎 真 司**

The Present State and Future Prospects in Structural Design and Construction of High Rise Buildings*

by Shinji Yamazaki**

キーワード：超高層建築，構造設計，60 キロ鋼，熱管理，現場組立

1. は じ め に

我国における超高層建築第一号は、1968年に竣工した地上36階の霞が関ビルである。その後の超高層建築の歩みを建物高さについてみると、図1のようになる。同図は、各年代における最高高さの建物を示したものである。現在(1994年)最も高い建築物は、地上70階、高さ296mの横浜ランドマークタワー(図2)である。霞が関ビルの竣工より四半世紀が経過し、高さが約2倍になっている。21世紀に向けて、我国の高層建築は超高層から超々高層建築の時代に入ろうとしている。

高さ60m以上の、日本建築センターの評定および建設大臣の認定を受ける必要のある建物の件数を'89~'92の10年間についてみると、図3のようになる。この10年間の超高層建築の増加率にはめざましいものがある。

本稿では、超高層建築における設計・施工技術の現状について、筆者が設計に参画した横浜ランドマークタワーの場合を中心に報告し、さらにその将来展望について述べる。

2. 超高層建築の設計

2.1 超高層建築における荷重と応力の傾向

ここで、図4に示す様に、平面形状が同一で高さの比が1:nの二つの建物を考えると、概略次の様なことがいえる。建物重量の比は当然1:nであり、

自重により転倒に抵抗するモーメントの比も、1:nである。

高層建築では、経験的に固有周期は建物高さとはほぼ比例関係にあるので、固有周期の比は1:nである。

地震または風による荷重については、層せん断力

図1 建物高さの推移

図2 横浜ランドマークタワー

*原稿受付 平成6年9月2日

**正 員 三菱地所㈱(現東京都立大学工学部)
Member, Mitsubishi Estate Co., Ltd.
(Present Address: Faculty of Engineering,
Tokyo Metropolitan University)

図 3 高層建築物件数の推移

図 4 建物高さと応力との関係

の比が $1:n^a$ とすれば、転倒モーメントの比は $1:n^{a+1}$ となる。

これらの荷重に対する柱梁の応力について考える。

まず柱材については、鉛直荷重による軸力の比は、 $1:n$ である。水平荷重による軸力は、転倒モーメントに比例するので、 $1:n^{a+1}$ である。水平荷重によって生じる部材のモーメント、せん断力は、層せん断力に比例するので、 $1:n^a$ である。梁材については、鉛直荷重による応力は変わらず、水平荷重による応力は層せん断力に比例するので、 $1:n^a$ である。

ここで、 a の値について考える。

地震時に生じる内力の大きさは建物の固有周期に依存し、ベースシア係数は固有周期に反比例する傾向がある。建物最下部に生じる最大せん断力は建物重量とベースシア係数の積であるから、二つの建物のせん断力の比は、 $1:(n/n)=1:1$ となる。すなわち、地震荷重の場合 a は概ねゼロである。

風荷重については、一定の静的風圧力による荷重と考えれば、層せん断力は表面積に比例するので、 a は 1 であるが、上空ほど高風速であることと、振動

の影響を考慮すれば、 a は 1 以上の値である。後流の渦による風向直交方向の振動による風荷重については a は 2 以上の値になると考えられる。

以上より、建物高さが増加することによる寸法効果として次の様な傾向がある。

1) 鉛直荷重による応力に対しては、柱軸力が増大する。

2) 地震荷重による応力に対しては、転倒モーメントの増大により柱の軸力は増えるが、柱の曲げ、せん断および梁の応力は変らない。

3) 風荷重に対しては、柱、梁とも応力が増大する。その中でも柱軸力の増加する割合が大きい。

4) 上記 2), 3) より、建物高さが増した場合、地震荷重による応力よりも風荷重による応力の増大する割合が大きい。

5) 上記 1) 2) 3) より、建物高さが増加するのに伴い、部材応力として、柱応力に占める軸方向力による応力の比率が高くなる。

2.2 耐風設計

我が国では構造設計と耐震設計はほぼ同義語であるとも言われているように、多くの建物の主要架構は地震荷重に対する設計で決まっている。超高層建築においても従来の 200 m クラスの建物では、設計用水平荷重として地震荷重が風荷重を上回っていた。先に、2.1 の 4) に述べた理由により、建物の高層化によって風荷重による応力の比率が高まり、250 ~ 300 m 級の建物では風荷重による応力が地震荷重による応力と同等またはそれ以上となる傾向がある。横浜ランドマークタワーでは、風荷重が地震荷重を若干上回っており、主要骨組みの多くの部分が風荷重によって決まっている^{1,2)}。最近建物の形態の多様化、高層化によって、風荷重に対する検討が地震荷重に対するものと同等程度に重要な建物が出現しつつある。

大地震に対しては骨組の塑性エネルギー吸収によって安全性を確保することが耐震設計の基本的な考え方である。一方、耐風設計においては骨組の塑性化により水平剛性が低下し見かけの固有周期が長くなると、特に風向直交方向に対しては、応答振幅が急増し進行性破壊に至る可能性があることから、塑性化の程度は制限されたものとなろう。また、風荷重は地震荷重に比べて作用時間が長いことから、疲労に対する検討も必要と考えられる。骨組の終局状態に対するクライテリアは、耐震設計と耐風設計で別に考えるべきであろう。

2.3 鋼材

表1 建築構造用 60 キロ鋼の仕様

品 質	降伏強度 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %	衝撃値 0°C, J	Ceq %	Pcm %
SA440I	440 以上	590 以上 740 以下	80 以下	20 (26) 以上	47 以上	0.44 (0.47) 以下	0.28 (0.30) 以上
SA440 II	440 以上 540 以下	590 以上 740 以下	80 以下	20 (26) 以上	47 以上	0.44 (0.47) 以下	0.28 (0.30) 以下

伸びは4号試験片による。ただし5号試験による場合は括弧内の数値とする。Ceq, Pcm の括弧内の値は板厚 40 mm を超え 100 mm 以下に適用する。

超高層建築において主要な役割を担う構造材料は高張力鋼材である。従来高層建築に用いられている鋼材は 50 キロ鋼がほとんどであった。従来の 60 キロ鋼材は、降伏強度を高めることに主眼があり、降伏比が高く、また、溶接においても扱いにくいところがあり、使用は限られていた。近年鋼材の製造技術の進歩により、低降伏比で延び性能、溶接性の優れた 60 キロ鋼（建築構造用 60 キロ鋼、または高性能 60 キロ鋼と呼ばれる）の製造が可能になった。文献³⁾による建築構造用 60 キロ鋼の仕様は、表 1 に示すとうりである。

先に 2.1 の 2), 3) に示したように建物高さの増加に対して梁の応力は柱程増大しないことから、現在のところ 60 キロ鋼の利用は柱材に限られており、下層部で特に軸力の大きい箇所での利用が殆どである。

ランドマークタワーでは、中低層階のボックス、H、鋼管柱に計 6,000 トンの建築構造用 60 キロ鋼を採用している。

3. 超高層建築の施工

超高層建築の鉄骨施工の実例としてランドマークタワーの溶接施工および現場組立について紹介する。

3.1 60 キロ鋼の溶接施工

60 キロ鋼を用いた鉄骨の溶接施工においては、継手部の性能確保および施工効率の点で、予熱、入熱量などの管理値をどのように設定するかが重要である。以下に熱管理の概要について示す。

1) 予 熱

a. 仮付溶接予熱温度

60 キロ鋼厚板を使用する場合、低温割れ防止の点から 100°C という高予熱温度による施工が推奨されている。当工事ではこれまでの建築工事に比較して大量の 60 キロ鋼を使用しており、予熱温度が作業性に与える影響が大きく、予熱温度の低減が望まれた。

表2 60 キロ鋼に対する予熱温度

溶 接 法	予熱温度
被覆アーク溶接	100°C 以上
CO ₂ 半自動溶接	50°C 以上
サブマージアーク自動溶接	50°C 以上

表3 60 キロ鋼に対する溶接入熱量

溶 接 法	入熱量
CO ₂ 半自動溶接	70 kJ/cm 以下
サブマージアーク自動溶接	200 kJ/cm 以下
エレクトロスラグ溶接	1,000 kJ/cm 以下

そこで、仮付予熱温度検討のための試験⁴⁾に基づき、以下のような条件で仮付溶接を行うこととし、予熱温度は 50°C 以上とした。

- i) 溶接法は CO₂ 半自動溶接とする。
- ii) 溶接材料は、50 キロ級のものを使用する。
- iii) ビード長さは 80 mm 以上、ピッチは 300～400 mm を標準とする。

b. 本溶接予熱温度

採用した予熱温度管理値を表 2 に示す。

2) 溶接入熱量

試験⁵⁻⁷⁾に基づき定めた当工事中溶接入熱量の管理値を表 3 に示す。

3) パス間温度

60 キロ鋼と 60 キロ鋼の溶接の場合 250°C 以下、60 キロ鋼と 50 キロ鋼の溶接（溶接材料は 50 キロ鋼のものを使用）の場合 350°C とした。

3.2 現場組立

建築工事において、高層部の躯体組立が工期のクリティカルパスとなる。高層部の組立工期を出来るだけ短くするため、鉄骨部材のブロック化、外装 PC 板の大型化を計り、それを可能にする大型タワークレーンを導入した。

クライミング式タワークレーンとしてこれまで我

国最大の900 t・mの能力を大幅に上回る今回新しく開発した1,500 t・m級のタワークレーンを4基設置した。

鉄骨部材の大型ブロック化工法は、鉄骨の柱・梁を地上で一体化し接合まで行って大型のブロックとし、揚重ピース数を大幅に削減しようとするものである(図6)。地上のブロック組立を効率よくかつ精度良く行うために、自動建入れ計測システムを開発した。エレクションボックスという装置を用い、柱建入れ調整を20~30秒で行うことができた(図5)。

結果として、1サイクル12日(3層分を12日で、

図5 自動建入れ装置

図6 鉄骨大型ブロックの吊上げ

すなわち1層あたり4日)で現場組立を進めることが可能となった。

4. 設計施工技術の将来展望

4.1 設計

従来の超高層建築は整形で単純な形状のものが殆どであったが、近年、多様な形態の建物が出現している。先に示したランドマークタワーも独特な形状の建物であるが、図7のNEC本社ビルでは、建物の真中に大きな風穴が吹抜けており、また、図8の梅田スカイビルでは、2棟の上部を空中庭園で結び、連結超高層としている。これらの形態の変化に対応し、構造設計の面でも多様化が進んでいる。

また、これまでの超高層を考える100階以上の超々高層建築についての研究・試設計も盛んに行われており、技術的には建築可能な段階に達している。超々高層建築の計画案の一例を図9に示す⁹⁾。

構造物の大型化に伴い、高強度鋼材を利用する可能性が高まっている。ランドマークタワーで用いた建築構造用低降伏比60キロ鋼については、現在規格が統一され、設計指針(高性能鋼利用技術指針)、溶接施工指針の案が提案されており、一般的な材料としての利用の方向にある。80キロ級については、建築構造用として降伏比や伸び性能、溶接性等を改良した高性能80キロ鋼が開発されている。建築構造に適用するための研究が進められており、技術データも蓄積されてきている。これらの高強度鋼材を有効に利用することにより、設計の自由度が広がることが期待される。

4.2 施工

図7 NEC本社ビル

図8 梅田スカイビル

図9 超々高層建築 SSH (清水建設)

建築鉄骨は、鋼材の高強度化、部材の大型化が進み、技術の向上が期待される一方で、鉄骨加工業における高齢化と技術労働者不足の状況があり、必然的に省力化、自動化の方向に向かわざるを得ないと思われる。

鉄骨工場では、生産ラインの合理化が推進されている。

溶接については、溶接工不足の解消、生産性の向上、作業環境の改良を目的として、自動化が検討さ

図10 総合機械化施工システム (大成建設)

れ、鉄骨の工場製作および現場溶接に、溶接ロボットの導入がなされている。

現場施工については、生産性の向上、工期の短縮、安全な作業環境の創出を目的とした、総合機械化施工システム、工場化施工システム等と呼ばれる施工法が開発され、実工事で適用が始まっている。高層建築における総合機械化施工システムの例を図10に示す。今後の展開が期待される。

参考文献

- 1) 山崎真司：横浜ランドマークタワーの構造設計，本会会誌，第61巻（1992）2号
- 2) S. Yamazaki, S. Sawada, H. Tsukatani and S. Yamada: Wind Resistant Design of Landmark Tower in Yokohama, 4th World Congress of Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Hong Kong, 1990
- 3) 建設省建築研究所，(社)鋼材倶楽部：高性能鋼利用技術指針（1994）
- 4) 北村信男，森田耕次，山崎真司他：SM570Q 鋼厚板の仮付溶接予熱温度の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（1991）
- 5) 吉田 譲，森田耕次，山崎真司他：SM570Q 超厚鋼材の性能に関する実験的研究（その1 厚板及び鋼管素材に関する実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（1991）
- 6) 山崎真司，森田耕次他：SM570Q 超厚鋼材の性能に関する実験的研究（その2 溶接組立箱形断面柱に関する実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（1991）
- 7) 澤田昇次，森田耕次，山崎真司他：SM570Q 超厚鋼材の性能に関する実験的研究（その3 鋼管柱に関する実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（1991）
- 8) 渡部 丹，伊藤 徹他：超々高層建築物（SSH）の構造設計（その1）～（その7），日本建築学会大会学術講演梗概集（1993）