

海外調査報告：

第13回日中建築構造技術交流会参加報告

(前) EHS&S 研究センター上級研究員 兼 構造コンサルティング部担当部長
(現) EHS&S 研究センター研究アドバイザー

中野 時 衛



Keyword：日中建築構造技術交流会，蘭州，免震・制振システム，耐震診断・補強設計，複合用途建築物の構造設計

1. はじめに

13回目の日中建築構造技術交流会が2019年9月21～22日に中国甘粛省の省都である蘭州の蘭州理工大学で開催された。

蘭州は河西回廊と呼ばれる古代シルクロード沿いの都市であり、西安の北西約600km、標高1,510m、人口320万人で、かつては石油プラントによる大気汚染がひどかったが、最近プラントは縮小され、空気は綺麗になってきている。また蘭州は黄河が初めて通過する大都市であり、黄土を含んだ流れの早い泥色の大河が音をたてて流れている（写真1）。

本交流会は、日本と中国の構造技術者が2年に1度、建築構造技術全般について発表と討論を行う会として発展してきた。1993年の第1回が北京で開催されてから、現在まで12回交流会は行われており、過去2回の日本での開催以外はすべて中国の大都市で行われている。図1にこれま



写真1 蘭州と市内を流れる黄河

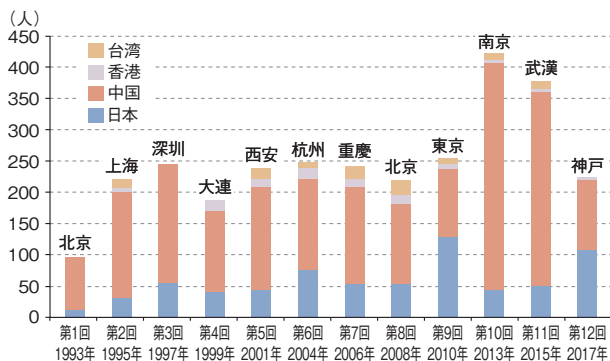


図1 交流会の開催年、開催地および参加人数

での交流会の開催年、開催地および参加人数を示す。

NTTの建築グループは2001年の第5回交流会（西安）から9回参加しており、論文発表と共に、副会長、幹事も務めている。

2. 会議の参加人数，発表論文数¹⁾

第13回交流会の参加人数は日本側55名、中国側は381名で合計436名であった。これは図1に示すように過去最大の参加人数である。交流会の論文集に掲載された論文総数は80編で、日本31編、中国49編であった。

3. 基調講演

基調講演は、日本側は和田章東京工業大学名誉教授より「大震災の起きない都市を目指して」というタイトルで、震災を受けてからの対応でなく将来の都市構成を見通した中で、災害を減ずるための具体的な行動を個人・企業・自治体・国は協力して推進すべきとの提言があった。

中国側からは遼礼立教授（中国地震局工程力学研究所）が「靱性都市：建物の耐震から都市の耐震へ」というタイトルで都市防災の重要性を説いた。建物の耐震は建築構造技術者や施工者が中心になって対策を考えなければよいが、都市の地震防災は非常に幅広く、工業分野のみでなく、農業、土木、金融の各分野まで広範囲に及び、各分野との連携が非常に重要であると説いた。

基調講演は他に、オリンピック施設である日本の「2020年東京オリンピックの新国立競技場の構造概要」および中国の「2022年北京冬季オリンピックスピードスケート場の構造設計」の紹介が行われた。

4. 学術報告および討論会

今回の交流会で取り上げた論文および討論のテーマは下記の11項目である。

- 1) 構造技術者の役割とあり方—建築，安全，経済，地球環境問題
- 2) 日中両国における設計基準と設計法
- 3) 巨大地震に対する建築物の終局耐震性

- 4) 台風、竜巻等の影響と建築物の耐風設計
- 5) 免震・制振構造の設計・研究
- 6) 既存建築物に対する耐震改修・補強技術の設計・研究
- 7) 大空間建築、超高層建築等の開発・設計・研究
- 8) 鋼・コンクリート・木造ほか各種構造の研究・開発
- 9) 工業化構工法の開発・設計・施工
- 10) 設計・施工におけるBIMの活用
- 11) 構造ヘルスマonitoringと損傷評価

交流会では、これらのテーマを4つの大括りのテーマに分類し、4会場で学術報告が行われた。学術報告の後、各会場のテーマごとに討論会が行われた。

4.1 学術報告における日本の論文

日本からの論文として、NTTファシリティーズの永作智也氏の論文を紹介する。

混合構造を利用した制振システムによる応答制御を2例紹介している。

設計例1は、「平面的に剛性が異なる部分を連結する制振システム」の事例であり、平面的に剛性が異なる混合構造では、柔構造部分と剛構造部分に変形差が生じるため、相互を制振部材で連結すると効率的な応答制御ができる。実例は建物表面の外壁を剛性の高いRC造（アウターフレーム耐震壁）として建物本体と分離し、剛性

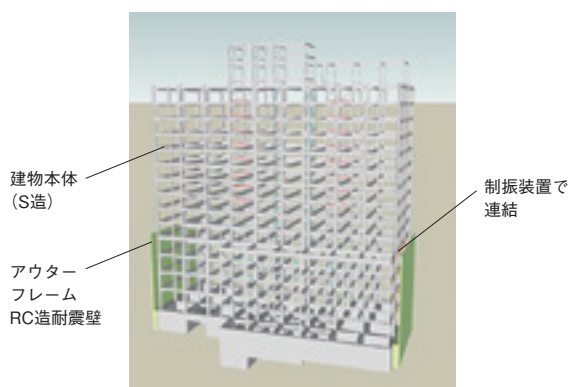


図2 設計例1：平面的な連結制振システム

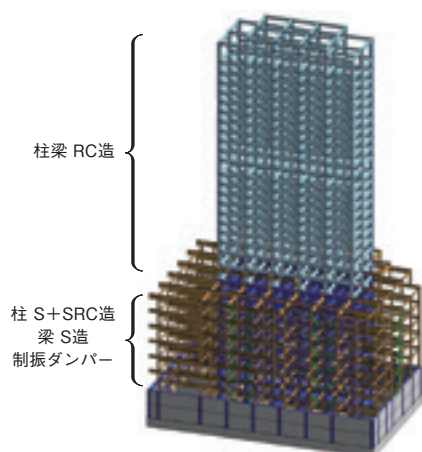


図3 設計例2：立面的な制振システム

の低い本体のS造建物とアウターフレーム耐震壁を制振部材で連結した制振システムである（図2）。

設計例2は、「立面的に剛性が異なる部分を利用した制振システム」の事例であり、立面的に剛性が異なる混合構造では、下部構造を柔構造とすることで、建物上部構造への地震入力を低減することができる。また、下部構造でエネルギー吸収を図ることで効率的な応答制御ができる（図3）。

4.2 学術報告における中国の論文

中国からの論文として、「複合用途の建築物の構造設計」を紹介する。著者は、東偉農（北京建築設計研究所）である。

この論文では、フェニックスセンター、僑福芳緑地、銀河SOHO、珠海オペラハウスなどの複合用途の建築物の構造設計を、同じタイプの他のプロジェクトの参考事例として提供することを目的に、その特徴と適用例を紹介している。

はじめにこれらの複合用途建物の構造的特徴を示す。

- ・建物のモデリングは複雑であるため、構造計算を簡略化するために、構造構成要素を様々な構造計算ユニットに分離する必要がある
- ・一般的に、複合用途建物のモデリングは特に複雑であり、構造の形状を把握することによって構造計算および解析モデルを確立する必要がある
- ・重要部分については、地震動レベルや建物性能レベルに応じて、建物の耐震性能目標を定め、性能設計を行う必要がある
- ・異なるニーズに応じて、異なる計算および解析モデルを選択する必要がある
- ・特別かつ技術的な問題を解決する必要がある。例えば、構造減衰の値、温度効果、安定性解析、計算された圧縮材とみなされるトラス部材の長さなどの値である
- ・重要な部品の主要節点には、特別な計算による解析または実験による検証が必要である

以下に4つのプロジェクトの事例を示す。

1) フェニックスセンター

フェニックスセンターのユニークなアーキテクチャは、構造設計に大きな課題（2つのボリュームを曲面屋根でつなぐことなど）をもたらす（図4）。計画は「メビウスの輪」の概念から発展し、建築の形は伝統的な中国文化の陰と陽の精神を体現している。

設計は多くの前例のない技術的問題を克服し、最先端のデジタル情報技術と長年のエンジニアリング経験を使用して、建築設計コンセプトを実現している。構造設計の主な技術的問題は次のとおり。

- ・パラメトリックな曲面形成方法
- ・双方向重ね合わせの格子型構造システム



図4 フェニックスセンター

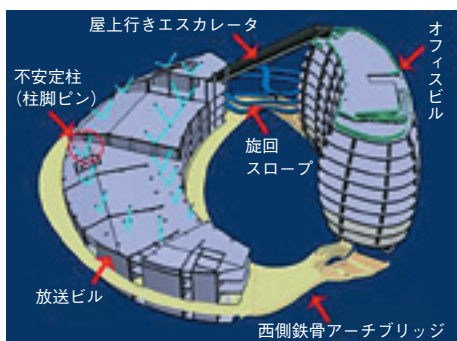


図5 構造ユニットの概要



図6 特殊構造部材

- ・複数の構造システムを組み合わせた構造物の地震時応力・変形解析 (図5)
- ・特殊構造部材の設計 (図6)

2) 僑福芳緑地 (Parkview Green)

このプロジェクトは、4つのタワービルをピラミッドのような形で全体に巧みに接続する (図7)。構造的には、4棟+構造膜大屋根で外周は別途外装がある。面外方向は寄りかかり、面内方向は自立している。

これは、トップオフィスビル、ファッションショッピングセンター、アートセンター、ブティックホテルを統合する革新的なビルである。4つのタワーを1つに接続

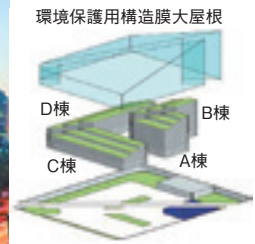


図7 僑福芳緑地

環境保護用構造膜大屋根

C, D棟：低いタワー	連結ブリッジ	A, B棟：高いタワー
1. 一部階の開口部が大きい	連結構造体	1. 平面不規則
2. 個別平面が長い		2. 連結ツインタワー
3. 連結ツインタワー		3. 最上階面積縮小
4. 最上階面積縮小		
複雑な高層構造		複雑な高層構造

図8 構造の構成要素

する不規則な平面、垂直の不規則性、ツインタワー、および環境保護用の構造膜大屋根を備えた複合用途の高層ビルである (図8)。

このプロジェクトでは、複数の構造構成要素が接続されており、構造要素間の応力は特に複雑である。異なるニーズに応じた異なる計算法および解析モデルを確立することにより適切な接続方法が選択され、地震時の各構造構成要素の応答が調べられている。これより全体の構造、個々の構造構成要素および主要部材の安全を確保し、耐震性能の設計目標を達成するために、的を絞った耐震性能の向上策を講じている。

3) 銀河SOHO

銀河SOHOセンターは、商業オフィスなどの機能を集約する、ランドマークとなる大きな公共建築物である (図9)。意匠設計は東京オリンピック新国立競技場の当



図9 銀河SOHO

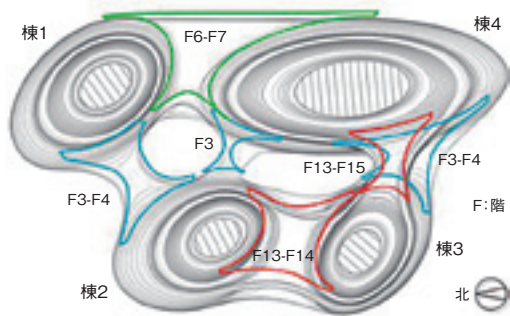


図10 銀河SOHOの接続ブリッジの概要図

初の設計者であるザハ・ハディド氏である。

全体の構造は、4つの高層ビル、各ビル間の接続構造、付属建築物、3階建ての地下室で構成されている。構造的には4棟を渡り廊下でつないでいるが、つなぐレベルは異なっている。2棟ごとに分離しているため、その間にEXPJを設けている。外装も曲線となるため、外側の柱を曲線とするなどして対応している。

構造の一体化がこのプロジェクトの焦点であり、難点でもある。4つのタワーが建物の3、4、6、7、13、14、15階の接続ブリッジで接続されており、その位置と接続ブリッジは図10に示されている。接続ブリッジのスパンは約20～40mで、その構造には鉄骨トラスが使用されている。

4) 珠海オペラハウス

珠海オペラハウスの日月貝^{註1)}計画は、「真珠は貝から生まれ、貝は海から生まれた」という諺から発想された。これは珠海市と同じ意味を持っている。珠海オペラハウスは、「中国で唯一のアイランドオペラハウス」というコンセプトを持ち、中国南部で最も魅力的な文化と観光リゾートを構築することを目指している(図11)。

2つの貝の形の複合構造物で、劇場の形は貝の中の真



図11 珠海オペラハウス

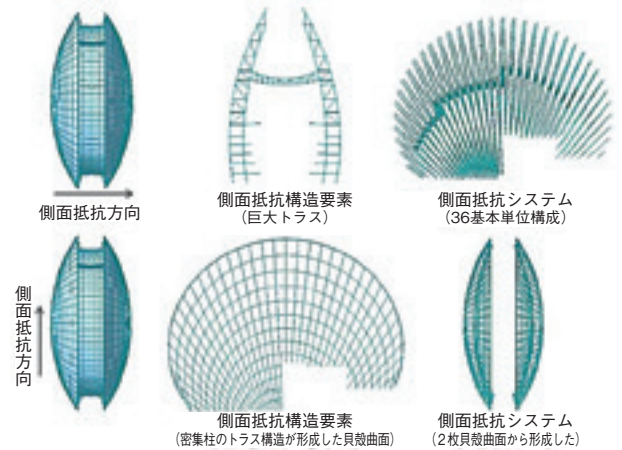


図12 力の伝達機構

珠をイメージしている。2枚の貝殻は、面内方向は自立、面外方向は上部をトラスでつないでラーメン構造としている。構造は風荷重で決まっています、解析モデルは分離したモデルと一体モデルを用い、それぞれのモデルで検証している。解析にはMidasを使用している。

シェル状の鋼構造は、空間鋼構造および高層構造の両方であり、斬新な形状をしている。新しい構造形態を目指し、力の伝達機構(図12)、側面抵抗のシステム、構造安定性などの面から体系的な研究が行われた。

このプロジェクトの構造設計における主な技術的問題は、複雑な構造、シェル状の鋼構造、複雑な構造計算と性能の解析、複雑な節点と構造詳細、複雑な構造と終局耐震性の把握である。

5. 討論会

筆者が参加した「既存建築物に対する耐震改修・補強技術の現状」の討論会について紹介する。まず、日本の耐震補強の施策とその実施状況について筆者が報告した。

日本では国が主導して、耐震診断・補強を精力的に進めている。東京都の特定緊急輸送道路沿道建築物については、1981年の新耐震設計法以前に建設された建築物で、構造耐震指標 $I_s < 0.6$ の場合には、耐震性能が不十分ということで耐震補強が必要になる。2018年12月時点で、耐震診断を実施し耐震性能が不足することが判明した建築物で未補強建築物の割合は55.5%、耐震診断が未実施の建築物は2.5%であった²⁾。

耐震性能が不足して補強が必要な建築物の補強が進まない原因は、分譲マンションの住民の高齢化、高額な改修工事費などにより管理組合の同意が得られないことが挙げられている。そこで行政による助成および段階的補強などの方法も取られているが、なかなか進捗していない。

この討論会では中国の程紹革副会長(中国建築科学研究院有限公司)から、中国の耐震診断基準、既存不適格部材に対する補強設計の考え方、組積造の耐震補強方法などの話題提供があり、孫玉平神戸大教授(進行係兼通



図13 西固区漢方病院・婦人幼児保険院の外観



図14 金茂シティコンプレックスの外観

訳)により討論が進められた。

1) 中国の耐震診断基準について

中国では、当該建物の基準とした法の施行年ごとに異なり、今後の継続使用期間がそれぞれに定められ補強の基準となっている。建物ごとに基準が異なるのは合理的ではないのでは、との意見が中国側からあった。それに対して、日本は継続使用期間など統計的な考え方は取り入れていない。地域係数は、1981年の新耐震法施行以来大きな地震が何回かあったが変更はしていないとのことであった。

2) 既存不適格部材に対する補強設計の考え方

中国側から既存の部材で現行基準を満たさない部材がある場合の対応法はどのようにするのかとの質問があり、日本側からは既存部材の強度、変形を考慮して性能評価を行う。個別部材をすべて現行法規に満足させるのは無理であり、建物全体の耐力を上げることで対処していると回答された。

3) 歴史的な煉瓦造建物の耐震補強方法について

中国側から歴史的な煉瓦造建物の耐震補強方法として、日本では免震化している事例がよく紹介されているが、煉瓦壁、床の部位などの補強はどうしているのかとの質問があり、日本側から免震化する場合にも上部の煉瓦造部分は補強している。免震でない耐震補強もたくさん行われており、煉瓦壁の面外方向の補強が必要となる場合が多いとの発言があった。

6. 建物視察

交流会では、会議の前日(9月20日)、蘭州市内の2カ所の建設現場(免震構造と超高層建物)を視察した。

1) 西固区漢方病院・婦人幼児保険院(免震構造)(図13)

地上13階と11階の棟が低層部でつながり、地下階を含め一体になっている。地上床面積約27,000m²、RC構造の地下1階に免震層を有する中間層免震構造である。甘粛省は地震烈度8で地震が多い地域である。免震アイソレータにはφ600~1,100mmの天然ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムが用いられていた。

2) 金茂シティコンプレックス(超高層建物)(図14)

建物用途は事務所・商業であり、51階建て建物(A棟)250mと32階建て建物(B棟)150mを低層の商業棟でつなぐ計画になっている。A棟基準階は50m×50mの正方形平面でRC造センターコア壁とし、外周部をCFT柱のラーメン構造としている。建物中間層の設備階(23,36,51階)を利用してベルトトラスを構成し層間変形を制御している。ベルトトラスの斜材がコーナー部で角柱に対して斜めに取りついている。建物周期は5.7秒で地震荷重で決まっているが、日本の半分程度である。

B棟は外周ラーメン構造+センターコア形式であるが、RC構造であった。

7. あとがき

第13回交流会は過去最大の参加人数で、活発な討論が行われた。筆者が最初に参加した16年前の第6回交流会(杭州)に比べ、中国側の技術が大きくレベルアップしてきており、高さ600mを超える日本にはない超高層建物、大規模な空間構造もたくさん建設が進んでいる。今後は中国に学ぶことが増えてくるのではないと思われる。

次回の交流会は2021年5月に四川省成都の四川大学で開催されることが決まった。

[注記]

注1) 日月貝：二枚貝であり、片方が明るいクリーム色、もう片方が赤味を帯びた褐色のため、「昼と夜」つまり「太陽(日)と月(夜)」が名前の由来。今回は建物がこの二枚貝によく似ているのでこの計画の名前にしたと思われる。また、珠海という都市名は「海の真珠」という意味である

[参考文献]

- 1) 江村勝, 福喜多輝:「第十三回日中建築構造技術交流会」の開催報告, Structure No.153, pp.82~87, 2020.1
- 2) 東京都耐震ポータルサイト:耐震化状況の公表, <https://www.taishin.metro.tokyo.jp/tokyo/topic04.html>, 2019.5.24