

随想

建築構造のはなし

九州大学 名誉教授 松井 千秋



1. はじめに

大学を定年退職した後も、建築学科の学生に特別講義をする機会があった。標記のタイトルは、ある大学の「構造力学」の基礎をすでに学んだ一年生に、実際の建物を力学的に説明し、建築構造への理解を深めて欲しいと考えて付けたものである。講義では、国内外の旅行の時に私が撮った写真や図を用いて、建物の特徴や外力への抵抗の仕方などを説明した。講義は90分で、用いた写真は150枚ほどであるが、その中から30枚ぐらいを選んで、講義の概要を紹介したい。



写真-1 三内丸山遺跡の復元大型掘立柱構造

2. 縄文・弥生時代の木造建築

わが国では、毎年数千件の遺跡の発掘調査が行われ、当時の生活用具や建物跡、時には建築用材が出土している。古代建築の形式としては、床の位置によって竪穴式、高床式、平地式がある。竪穴式は主に住居用で、地面を50cmから1mぐらい掘り下げて床にし、その位置から複数の柱を地中に埋込み、その掘立柱に水平の梁材を組んで骨組にする。床の平面形状は、縄文時代には円形が多く、次第に四角になっていく。柱の本数は円形では4本以上、四角では4本が多い。この住居形式は平安時代ごろまで使われた¹⁾。

2.1 掘立柱構造

写真-1は、三内丸山遺跡（青森県、縄文）の大型掘立柱建物で、骨組は4.2m間隔で直径80cmほどのクリの柱6本が配置され、3層骨組に復元されている。用途は不明で、最上階の屋根は除かれている。柱穴は直径約2m、深さ約2mで、柱の根元が残った状態で発掘された柱もあった。復元では、現在の日本にはクリの巨木は無いので、ロシアから輸入された。写真-2の大型の建物は、平面が約10m×約32mで、集会や共同作業あるいは共同住宅に使われたのではないかと考えられている。写真-3で分かるように竪穴式の掘立柱構造である。



写真-2 三内丸山遺跡の復元大型竪穴式建物



写真-3 写真-2の内部の掘立柱構造

池上曾根遺跡（大阪府、弥生）の高床式の大型掘立柱の建物を写真-4に示す。平面は、東西約19m、南北約7mで、柱は直径最大約60cmのヒノキが用いられていた。年輪による年代測定で、柱は紀元前52年に伐採されたことが分かっている。手前の小さい屋根の下には、直径2.3mのクスノキをくり抜いて、井筒にした井戸が復元されている。



写真-4 池上曾根遺跡の掘立柱による復元高床式建物

掘立柱は、「片持梁」の固定端を下側にして、90度回転した「片持柱」である。この柱材は、埋込み深さを充分に取り、埋戻土を充分に締固めれば、建物の自重や雪荷重などの鉛直荷重を支え、風や地震などの水平力に抵抗できる安全で安定な構造である。伊勢神宮の建物は、全て掘立柱構造であることから、日本列島の固有の構法と考えられている。

2.2 貫による骨組構造

写真-5は、吉野ヶ里遺跡（佐賀県、弥生）の復元された建物群で、『魏志倭人伝』で卑弥呼の居所として、「宮殿は物見櫓、城柵などが嚴重に設けられ、常に武器を持った兵が守衛している」を、表しているように見える。写真-6は、宮殿であるが柱に貫通した孔をあけ、角材を通し、楔（くさび）で固めた貫（ぬき）による骨組構造である。「貫」は日本建築史の通説では、鎌倉時代に東大寺南大門の修復のため大陸から取り入れられた技法と言われている²⁾。しかし、洪水で埋められた集落の桜町遺跡（富山県、縄文）が1988年に発掘され、各種の溝や孔を加工した保存状態の良い大量の木材と、伐採用の大型石斧だけでなく写真-7のような加工用の各種サイズの磨製石斧が出土した。この遺跡発掘によって、縄文時代に貫の構法と高床式建物が使われていたことが明らかになった。写真-8の桜町遺跡復元建物では、柱に孔をあけた貫の技法が使われている。



写真-5 吉野ヶ里遺跡の復元された建物群



写真-6 復元された大型高床式建物の貫構造



写真-7 桜町遺跡で発掘された各種の磨製石斧



写真-8 復元された掘立柱と貫による高床式建物

貫の力学的性能は、坂静雄博士（京大教授）が昭和16年に実験で明らかにしている³⁾。掘立柱と貫の併用によって、古代の建物はさらに水平力に対して安全性の高い骨組になったと考えられる。貫を用いた骨組構造は、水平力によって柱材が貫（梁）材にめり込むので、剛節ラーメンの柱・梁接合部の剛接度が緩くなった半剛接ラーメンと言える。貫を用いた建造物の例として鳥居が挙げられる。写真-9は厳島神社（広島県）の大鳥居で、平安時代（1168年）に創建され、以後7回建て替えられている。現在のものは明治8（1875）年の8代目で、主柱間隔10.9m、高さ16.6m、2本の主柱はクスノキの自然木で根元の直径3.6m、控柱はスギで根元の直径1.8m、柱間隔9.4mである。主柱は、長さ3mほどの100本の松杭の上に捨てコンクリートが打たれ、その上の厚さ25cmの花崗岩に乗せてあるだけで、掘立柱ではない。構造的には、正面は2本の柱と貫による、半剛接の門形ラーメン、その直交方向は2層2スパンの半剛接ラーメンである。満潮時、高潮時には水深2～3mになるが木柱と石板間の鉛直荷重による摩擦力で強風、波浪に耐えて移動しない。



写真-9 厳島神社の大鳥居

3. チベット・ブータンの木と石の建物

東チベットは森林資源に恵まれ、山村の住居は丸太組構法（ログハウス）が一般的である。その形式は、日本の律令制度で租税の稲穀を収納する倉庫として用いられた、「丸木倉」、「甲倉」、「板倉」が全て存在している⁴⁾。写真-10は、1層が石積壁、2層が板倉（板ログ）による民家である。石積壁とログによる木壁は、共に鉛直荷重と水平力に抵抗できる。石積壁の内側では、木の柱と梁で2階の木の床を支えている。2階の床の上に炉が設けられ、煮炊きが行われる。炉の上部で燻製など保存食を造り、火は一年中絶やさない。



写真-10 東チベットの石積壁と板ログによる民家

写真-11は、チベットの都ラサにあるポタラ宮で白宮と紅宮で構成されている。白宮は1645年から3年で完成し、紅宮は1690年から5年で完成した。建物の長さは、東西約370m、高さ約110m、層数は13層と言われている。外壁は石積壁で内部空間は民家と同様、木の柱、梁、床で構成されている。白宮の最大の部屋は、44本の柱で支えられた床面積432m²、柱1本で約10m²の床を支えている。紅宮の最大の部屋は44本の柱で面積726m²、柱1本当たり約16.5m²である。柱間隔は、最大4mで、一般には3m、民家では2mが基準である⁵⁾。ポタラ宮の内部には入れなかったが、ある寺院で薄暗い室内に木柱が林立した宗教的空間を体験した（写真-12）。



写真-11 ラサにあるポタラ宮殿



写真-12 木柱列で支える寺院の大空間

ブータンは1907年に建国された人口約70万人、面積3.8万km²の九州ほどの小さな国で、国民総幸福度（GNH）を国是としている。写真-13は、民家のある農村の風景である。写真-14は「ゾン」と言われる、17世紀に戦略上の要所に建てられた行政の中心施設で、寺院や僧院を内蔵する、要塞のような石と木の建物である。写真-15は、木造の橋で兩岸から片持梁を何段にも重ねて張り出し、中央部に単純梁を架けている。川岸の両端に重量のある石組の小屋を設け、片持梁の固定端の跳ね



写真-13 ブータンの農村



写真-14 ブータンの「ゾン」



写真-15 ブータンの木造の橋

上がりを抑えている。自然木の単純梁では架けられない川幅に対する工夫である。この形式の橋は、チベットにもあった（写真-16）。



写真-16 チベットの木造の橋

4. ネパールの木とレンガの建物

ネパールは、ブータンと共にアジアでは珍しく外国に支配されなかった国の一つで、1951年に開国した。1934年1月に首都カトマンズの南東100kmのネパール・インドの国境近くでM8.3の地震があり、7.2千人の死者と多くの建物が被害を受けた。1977年1月にカトマンズを訪れた時、その地震で傾いた建物がまだ残っていた。2010年12月に再訪して、以下の写真を撮った。写真-17は通りに面する住居や商店、写真-18は旧王宮で、木とレンガ壁による構造である。写真-19, 20 は王宮前広場の仏塔である。日本の塔と違って、庇が木の方杖で支えられているのが特徴である。写真-21はカトマンズ盆地で一番高い、高さ36mのニャタポラ寺院である。2015年4月に、カトマンズの北西77kmで、M7.8の地震が発生し、これら世界遺産の歴史的建造物の多くが崩壊したことが報ぜられた。



写真-17 ネパールの住居と商店



写真-18 ネパールの旧王宮



写真-19 ネパールの王宮前広場の仏塔



写真-20 仏塔の底の構造



写真-21 ニヤタポラ寺院の五重塔

5. スイスの木造建築

スイスは東チベットと同じように森林が多く、山村にはログハウスの建物が多い（写真-22）。写真-23は農家の角ログの古い倉庫で、右の建物の柱にはネズミ返しの円形の石盤が取り付けられている。日本でも高床倉庫の柱に取り付けられていたと考えられる木製のネズミ返しが各地の遺跡で発掘されている。写真-24, 25は登山基地のツエルマットの町で、4～5階のホテルもほとんど角材によるログハウスである。ログハウスはスイスの伝統的な構法である。



写真-22 スイス山村の木造建物



写真-23 農村のログハウスによる倉庫



写真-24 ログハウスによるホテル



写真-25 通りに面するログハウスのホテル



写真-27 円形CFT柱による教育・研究棟

6. パリ大学のCFT建物

パリ大学は12世紀に創建され、現在は第1～第13の独立した大学で構成されている。写真-26は、1971年に設立された第6, 7大学のキャンパスで、左は低層の教育・研究棟、右の建物は高層の事務所棟である。建物の柱は、全てコンクリートを充填した円形鋼管のCFT柱である。



写真-26 パリ大学のキャンパス

低層棟は人工地盤の上にCFT造の6層、下にRC造の1層がある。CFT柱は直径20cmで、桁行（長辺）方向にスパン3mで10スパン30m、梁間（短辺）方向に1スパン15mである（写真-27）。写真-28で分かるように、短辺方向の梁は鉄骨の箱型断面で両端はせいが小さくなる変断面材である。CFT柱は細く、梁材端の接合部はピンに近いので、骨組は短辺方向に不安定に見える。しかし、長辺方向には両端に直径7.5mの鉄筋コンクリートのコアが45m間隔で配置され、各階の床板はそれに接合され、その面外剛性で骨組の安定性は保たれている。



写真-28 スパン15mの鉄骨箱形変断面梁

高層棟は30層ぐらいで、正方形の平面の中心にRCコアがあり、外周に直径30cmのCFT柱が配置され、鉛直荷重だけを支えるように設計されている（写真-29）。日本のCFT構造に比べて柱が極めて細いが、地震がなく、風荷重も小さいなど荷重条件の違いによると考えられる。



写真-29 高層事務所棟の円形CFT柱

7. 香港の鉄骨構造

香港上海銀行は1865年に開業し、本社ビルはこれまで3回建て替えられていて、写真-30の建物は4代目で1985年に完成した。平面は幅約65m×奥行約54m、高さ179m、47階建の鉄骨構造である。骨組構造は、円形鋼管4本を4.8m×5.1mの間隔に組まれた2本の格子柱(写真-31)に、高さ方向に5組の大型トラスが接合されている。そのトラスの先端に4層～7層の床を吊る引張材が接合されている(写真-32)。床は航空機の仕様で軽量化されている。建物の外観には、これらの構造材だけが表われて、建物の鉛直荷重を支える仕組みがよく理解できる。建物の直交方向には1列4本、2列合計8本の格子柱が配置され、各柱列はX形のブレースで接合され



写真-30 香港上海銀行の本店ビル



写真-31 円形鋼管4本による格子柱

ている。建物の前後の道路間は通行できるように吹き抜けである(写真-33)。この建物は、使用期間を50年と設定して、解体し易いように設計されている。



写真-32 格子柱・トラス梁・床を支える引張材の構成



写真-33 ピロティー形式の地上部分

8. 日本の高層建築

写真-34は2014年に大阪市阿倍野区に完成した「あべのハルカス」である。地上60階・地下5階、高さ300mの現在日本一高い建物で、角形のCFT柱を用いた鉄骨構造である。建物の用途は、百貨店・オフィス・ホテルなどであるが、低層階が百貨店のため、柱断面を小さくし、梁スパンを長くして、有効床面積が広くなるように工夫されている。1階のCFT柱は1.1m×1.1mの溶接箱形断面で、鋼板の厚さは9cmの高張力鋼(基準強度440N/mm²)が使われ、高強度コンクリート(基準強度150N/mm²)が充填されている。梁スパンは約11mで、1本の柱は常時荷重7千トン、地震時1.1万トンの圧縮力に耐えるように設計されている。建物の近くに上町断層があり、耐震安全性を高めるため、骨組に各種ダンパーを配置して、地震エネルギーを吸収する制振構造になっている。



写真-34 日本一高い「あべのハルカス」

写真-35は、2014年に東京都港区に完成した「虎の門ヒルズ」である。地上52階・地下5階、高さ247mで、円形および角形のCFT柱を用いた鉄骨の制振構造である。この建物の特徴は、建物の完成に合わせて、東京都心の大動脈になる環状2号線の新橋-虎の門間（1.4km）が開通し、建物の地下2階-1階の骨組の中を道路が通っていることである。そのため、車路に柱が配置できないため、上階の鉛直荷重を写真-35で分かるように傾斜柱で車路の外側で支持している。1階では写真-36のように、地下部分の道路に合わせて柱列が曲線になっている。この部分の開通は、1946年の都市計画決定から、住民の立ち退き問題などで遅れ、完成までに68年かかっている。地上の道路部分は最大13mの幅の歩道があり、2020年のオリンピックに向けて、東京都はパリのシャンゼリゼ通りのように、オープンカフェなどを設けて、歩いて楽しい街にする計画である。



写真-35 地階を環状2号線が通る「虎の門ヒルズ」



写真-36 「虎の門ヒルズ」の外周1階円形CFT柱列

9. おわりに

自分が見て関心を持った日本や外国の建物について、外力への抵抗の仕組などを説明し、建築構造に興味を持ってもらいたいと考えて、大学で学生に講義してきた。本誌の読者は学生ではなく技術者なので、「随想」として適切ではないようにも思えたが、大学での建築構造教育の一端を理解していただければ幸いである。

【参考文献】

- 1) 石野博信：古代住居のはなし，吉川弘文館，2006. 10
- 2) 山野善郎：神社，建築史塾あるきすと，2015. 3
- 3) 坂静雄：社寺骨組の力学的研究（第1部 柱の安定復元力，第2部 貫の耐力）建築学会大会論文集，1941. 4
- 4) 松井千秋：東チベットの丸太組建築，GBRC，Vol.34，No.4，pp.2-5，2009. 10
- 5) 大岩昭之：チベット寺院・建築巡礼，東京堂出版，2005. 9