

21世紀の建築と構造デザイン

金箱 温春

金箱構造設計事務所 / 工学院大学 / 東京工業大学

1. はじめに

20世紀は科学技術の時代であり、建築の世界においてはモダニズム建築と共に普遍的な合理性に基づく近代の構造デザインが発展し、この流れは現在に繋がっている。また、20世紀は科学によって自然を征服できるとの認識があったとも言われている。21世に入って十数年が経過したが、この間に20世紀型建築の見直しの潮流がある。それらは普遍性から個別性・多様性への流れであり、「歴史・時間」、「場所」、「自然」、「素人」と言ったキーワードから導かれるアプローチとも言われる^{1) 2)}。

本論は、21世紀の建築としての新たな視点を整理し、それに対する構造デザインの取り組みについて、筆者が実際に構造設計に取り組む中で実践してきていること、これから行おうとしていることを題材として考察したものである。

2. 21世紀の建築を考える新たな視点

2.1. 環境の視点

建築における環境配慮については多くの言及があるが、大きな動きの一つとして2000年6月1日に、(社)日本建築学会、(社)日本建築士連合会、(社)日本建築士事務所協会連合会、(社)日本建築家協会、(社)建築業協会の5団体の地球環境・建築憲章委員会による提言がある³⁾。地球環境問題と建築との係わりの認識に基づき、「地球環境・建築憲章」を制定し、持続可能な循環型社会の実現にむかって、連携して取り組むことを宣言している。「ライフサイクルCO₂の30%削減と建築寿命の3倍増」という目標を達成するために、下記の5つの項目を掲げて新たな建築文化のあり方を示した。

- 1) 建築は世代を超えて使い続けられる価値ある社会資産となるように、企画・計画・設計・建設・運用・維持される。(長寿命)
- 2) 建築は自然環境と調和し、多様な生物との共存をはかりながら、良好な社会環境の構成要素として形成される。(自然共生)
- 3) 建築の生涯のエネルギー消費は最小限に留められ、自然エネルギーや未利用エネルギーは最大限に活用される。(省エネルギー)
- 4) 建築は可能な限り環境負荷の小さい、また再利用・再生が可能な資源・材料に基づいて構成され、建築の生涯の資源消費は最小限に留められる。(省資源・循環)

5) 建築は多様な地域の風土・歴史を尊重しつつ新しい文化として創造され、良好な育成環境として次世代に継承される。(継承)

2.2. 自然災害と建築の安全性の視点

2011年に発生した東日本大震災では、建築の倒壊、津波被害、原発事故などが生じ、建築や生活のあり方に大きな影響を与えることとなった。構造デザインで考えなければならない教訓としては、非構造部材の被害の低減、事業継続性への配慮、性能設計の促進といったものがある。JSCAでは2014年6月に非構造部材の耐震安全性に関する提言を発表した⁴⁾。

この地震では津波被害もクローズアップされ、津波対策の技術的な知見が整理され津波避難ビルの建設も行われているが、一方で避難の重要性も認識され、津波に対するハードとソフトの組み合わせということも議論されている。地球環境建築憲章で述べられている「自然との共生」ということに通じるものである。また、原発事故を契機として省資源社会の志向が助長され、環境問題とも関連している。

兵庫県南部地震を契機として「耐震改修促進法」が制定され、既存建築の地震被害対策の必要性が促されてきたが、21世紀に入ってからいくつかの大地震の経験を踏まえ数度にわたり改正が行われてきた。直近では2013年11月施行の改正が行われ、これにより耐震診断、耐震改修の促進が必要とされてきている。

2.3. 建築デザインの視点

20世紀半ばにモダニズム建築が主流となり、普遍的、インターナショナルスタイルの建築が普及したが、その後は新たな建築デザインを目指す動きが出てきている。思想的には地域性や自然との融合、均質から多様といったキーワードなどから編み出されるデザインであり、ハードの側面では施工技術やコンピュータ技術などの恩恵によって生み出されてきたデザインもある。具体的表現としては、流動的、有機的な形態の追求やミニマムな構造体の追求、また建築機能の複合化などが挙げられ、いずれも目指すべき建築の価値観が多様化してきていることが特徴である。

2.4. 建築生産システムの視点

リーマンショック後の建設需要の落ち込みにより建設労働者が減少傾向であったが、東日本大震災の震災復興事業や東

京オリンピックの施設整備のニーズが高まり、著しい建設労働者不足が生じることとなった。その結果、躯体建設コストの増大を招き、設計が完了しても工事ができない状況も生まれている。今までも構造設計においては施工性に配慮することは必要であったが、今後はさらに重要な視点として考えていかなければならないことである。躯体を単純化すること、プレファブ化を図ることなどが具体的な対応となると考えられるが2.3で述べた建築デザインの多様化との折り合いをどのように付けていくかは悩ましい問題である。

3. 建築の多様化に対応した構造設計の実践

前節で述べたように、建築を考える際の意識が多方面にわたり多様な価値観が求められるようになったことが認識できる。これらを受けて構造設計をどのように実践していくかをいくつかのテーマを取り上げて考えてみる。

3.1. 環境負荷低減・省エネルギーを目指す木造建築

環境負荷低減・省エネルギーを実践することの一つとして木造建築の促進が考えられる。日本において木造建築の歴史は古いが、都市不燃化の観点から大型建築に用いられることが制限されていた時代があり、本格的な大型木造建築は1990年代から始まっている。2010年10月には、「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が制定され、今後は大規模な木造建築の普及が見込まれる。

木質構造は部材強度に見合った接合部を作りにくいという特性から構造体として利用する際の制約が多く、そのことが建築に対する制約ともなっており、従来の発想の延長ではない構造設計の発想が必要といえる。筆者は木質ハイブリッド構造（木質併用構造）の活用を試みてきており、この手法は大空間建築においても有力であるが、ここでは学校、事務所建築への適用を紹介する。

木質構造を構造材料として捕らえた場合、接合部に特徴があり一体の剛な接合部が作りにくいということがある。そのため、ビル建築においてラーメン構造は作りやすく耐震要素として耐力壁や筋かいといったものが必要となることが多い。しかし、大規模の建築になると壁や筋かいを入れる箇所が不足することもあり、一方でラーメン構造の計画にすると、フレームとしての剛性や接合部強度を確保するため部材断面が大きく接合部のコストも高くなるため、あまり普及していない。耐震要素をRC造とし地震力の伝達を確実にできる床や屋根をつくるハイブリッド木造を用いることにより、開放的で経済的な木造空間が実現できる。

・ベターリビングつくば研修センター

2階建て、延べ床面積765㎡の事務所建築であり、木造の雰囲気を生かしつつ開放的な建築空間を目指した。両端のコア部分をRC造、中間部を木造で作り、地震力は全てRC造で負担させることにより、中央部は木造の柱、梁を配してモーメント抵抗を期待しない簡易な接合とした。屋根及び床は木造の梁の間に鉄骨ブレースを配して剛性・強度を確保し、また木造梁とRC造部分との接合を強固にした。

地震力は全て両側のRC造で負担できるが、中央に吹抜があり2階床がくびれているため2階床剛性の不足の懸念があり、1階の中央に木造の筋かいを設け局所的な地震力が負担できるようにした。

・豊富町定住支援センター

建築面積約2,800㎡の平屋建ての建築で、保健センター、介



写真1 ベターリビングつくば研修センター



写真2 つくば研修センターの施工

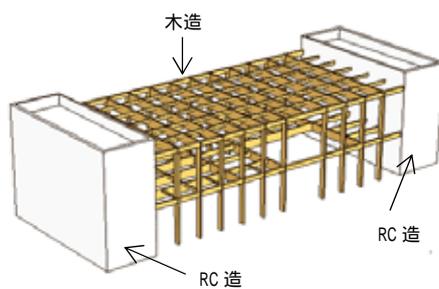


図1 つくば研修センターの構造システム



写真3 豊富町定住支援センター



写真4 豊富町定住支援センターの施工

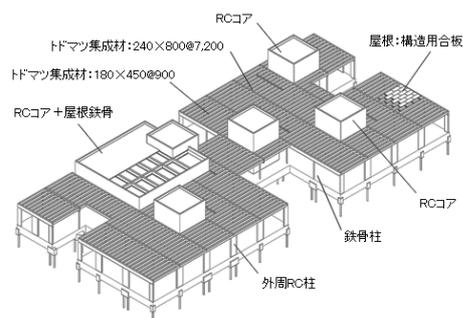


図2 豊富町定住支援センターの構造システム

護福祉サービス、多世代交流の複合機能を有するものである。建物内部に5つのRC造のコアを、外周部にRC造の壁柱を設けて耐震要素とし、屋根は地場産のトドマツ材の梁に24mmの構造用合板を用いた構造とした。廊下のない一体的な空間が木造で覆われているイメージを作り出している。当初は内部のRC造のコアだけを耐震要素とすることを考えたが、多雪地域のため屋根重量が大きく、耐震要素まで地震力を伝えるためには構造用合板の強度が不足することが分かり、外周部にもRC造壁を設けて地震力の伝達を可能とした。

3.2. 長寿命・省資源を目指す耐震改修

耐震性能が不十分な建築は建て替えが耐震改修が必要であるが、耐震改修はネガティブなイメージを持たれていることもあり、改築が選択されることも多い。この場合には資源のロスを伴うことがありサステナブル的な観点からマイナスである。改修が建て替えと同様の価値を得ることが重要であり、単なる耐震補強だけではなく、空間の質を高めることや新しいファサードを生み出すといったデザイン性を加味した改修が求められる⁵⁾。

・上野ビルディング耐震改修

建物は神田駅前に位置する1965年竣工のオフィスビルであり、地上9階地下2階延べ床面積約8,000㎡である。北側、西側は道路に面しておりPC版のカーテンウォールの外壁を持ち、南側は隣地の建物に、東側は裏通りに面してほとんどがRC外壁であり、2方向とも耐力壁の配置が偏っているという耐震的な弱点を持つ。柱や梁は非充腹型の鉄骨を内蔵したSRC造であり、靱性が小さい構造である。既存のPC版カーテンウォ

ールを撤去し、新たに耐震性能を持ったファサードに作り替え、耐震補強とファサードデザインを一体化して建物の外観を一新させることが改修計画のメインテーマであった。道路側の2面は片持ちスラブの先端を40cm撤去し、そこに柱・梁・ブレースから構成される鉄骨フレームを設置した。柱、ブレースの形状は300mm×300mmのボックス断面とし、梁および間柱はせいり300mmのH形鋼を用いた。1階では出入り口を確保するため、長手面では偏心ブレースを、短手方向はV字形のブレースを配置した。

ファサードは、昼はブラインドを背景としてガラスを透過してブレースが認識され、夜になると青色のLEDライトによってブレースが象徴的に表現され、周囲の街並みにも新しい印象を与えている。

・浜松サーラリファイニング工事

1981年に完成した建物であり、設備の不具合や機能的な改善も含めたりファイニング建築が計画された。地上7階地下1階建て、延べ床面積14,627㎡の建築で、平面的には下部は矩形形状であるが、上部で二つのブロックに分かれた形態となっている。構造は、3階までがSRC造で4階以上がRC造（一部SRC造）である。

改修は“スパイラル・ブレースド・ベルト補強”と称する鉄骨ブレースを建物の外周を連続的にスパイラル状に取り巻くように配置し、その他にRC壁の打ち増しや内部の鉄骨フレーム補強を行った。既存建物は、柱・梁が外周面にそって配置されているので、外付けブレース補強が容易に行えた。ただし、東西面の低層部分にはバルコニーやアトリウムがあり、外壁面への補強が行いにくい状況である。もともと、下層階



写真5 改修前の上野ビル



写真6 改修後の上野ビル



写真7 上野ビルの夜景

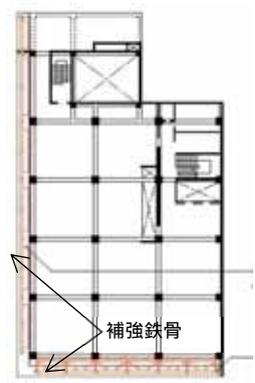


図3 上野ビルの補強内容



写真8 改修前の浜松サーラ



写真9 改修後の浜松サーラ

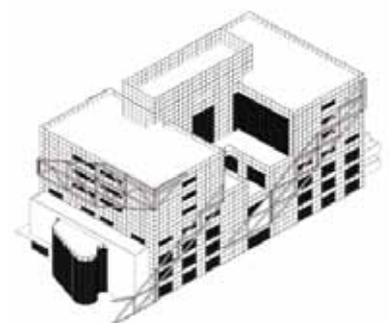


図4 浜松サーラの補強システム

はSRC造で耐震性能は比較的高いこともあり、バルコニーやアトリウムの部分を避けて外周の鉄骨補強を行うことは効果的であった。建物の南西の隅では、補強ブレースが建物の外部にまで延び視覚的な効果を生み出している。

通常のブレース補強では、四周に柱・梁の鉄骨の枠部材があるが、この方法ではブレースがフレームのエッジのラインを構成していることが特徴であり、既存躯体と鉄骨ブレースの力の伝わり方が特殊となる。補強フレームはカラーガラスで覆ってデザインし耐久性確保も図った。

・戸畑図書館（旧戸畑区役所改修工事）

1933年に竣工した地上3階、地下1階、塔屋3階、延べ床面積2,884㎡の区役所であり、歴史的にも価値のある建築であるが、新しい区役所が作られたことにより、改修して図書館として使われることとなった。設計図書が存在しないため、意匠図、構造図の復元作業を行い、現地でのコンクリート、鉄筋、地盤調査を十分に行った。コンクリート強度は12.5～17.3N/mm²と小さく、中性化のかぶり厚さは進んでいる部材が多くあった。

前2例と異なり外観を変えない改修が必要とされた。区役所から図書館へと内部の様式替えが大幅に行われることもあり、内部での補強を検討し、最終的には内観のデザインと一体となった鉄骨フレーム補強を中心とする補強を行った。既存のRC造の靱性が期待できないため、F値1.0としての補強を前提としたが、鉄骨ブレースに比べると鉄骨フレームは剛性・強度が小さく、補強箇所が多くなるため、鉄骨フレームの剛性確保に工夫を要した。梁をアーチ状として柱の可撓長さを短くし、柱をL型のボックス断面とするなど、少し変わった鉄骨フレームとなった。

3.3. 事業継続性・性能設計に着目した建築

現在の日本では物流のシステムが複雑となっており、例えば工業製品の部品の一つの欠落が製品の製造に大きな影響を受けることもある。東日本大震災では生産施設において建物被害は軽微であるが機能維持・事業継続ができないことにより連鎖的に大きな問題となることが認識され、また企業の事業継続を考えた時の建物の耐震性能を再考することが必要となった。従来からリスクマネジメントの概念があり、地震を受けた際の建物の損傷や修復費用も考慮する設計、いわゆる「性能設計」という形で行われている。今後はこの傾向が増すことと思う。

この視点に立つと免震構造や制振構造の活用が考えられるが、通常の耐震設計においても非構造部材の耐震安全性を考えて変位制御による設計という考えやあるいは、鉄骨低層建築への制振構造の利用が考えられる。

以下に、国宝を展示する博物館の性能設計の事例と、小規模鉄骨建築への制振構造の適用例を紹介する。



写真 10 旧戸畑区役所外観



写真 11 旧戸畑区役所改修状況



図 5 旧戸畑区役所補強平面図

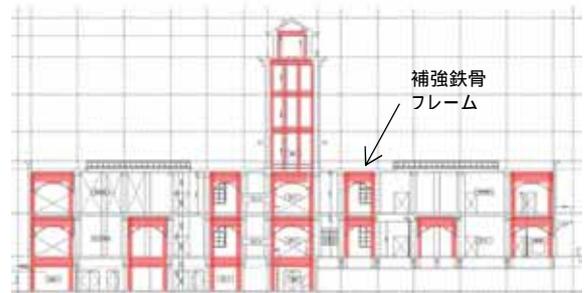


図 6 旧戸畑区役所補強断面図



写真 12 東大寺総合文化センター展示室



写真 13 展示室下部の免震層

・東大寺総合文化センター

敷地内の一部に遺構があり、掘削深さが1.5m以下という制限があるため建物全体を基礎免震とすることは不可能であった。建物全体は耐震壁を適切に配置し、十分な強度を持つ構造とし、収蔵品の保護の必要から、展示室と収蔵庫については、床、壁、天井を一体として機密性を高めて免震とする“部屋免震”を採用した。部屋免震は支える重量が軽いため、建物免震のように積層ゴムを利用して構造体の周期を長くすることは困難であり、今回の計画では“摩擦振子支承”を採用した。26m×20mの大きさの展示室に12基の“摩擦振子支承”を配置し、その上に鉄骨梁と鉄筋コンクリートスラブにより強固な床をつくり、この床の上に鉄骨フレームを組み、壁と天井を含めた部屋全体を免震装置で受け、周囲の躯体との間に350mmのクリアランスを設けた。

国宝の仏像を安置することが決まっており、性能目標を建築主等と協議し、想定される地震に対して幅と高さの比率がおおむね1:5程度までの展示品の転倒を防ぐこととし、南海地震や奈良盆地東縁断層を起因とする地震に対して床面の応答加速度を40gal以下とすることを目標とした。

・低層鉄骨造建築への制振構造の適用

低層の鉄骨建築、特にラーメン構造の建築で通常の耐震設計を行ったものは、地震時の層間変形角が1/100を越えることが想定され、また揺れの継続時間も長い。応答加速度や層間変形を減少させるためにはダンパーの利用が効果的である。但し、平面形が小規模のことが多いため、ダンパーの配置箇所と建築計画との調整が課題である。また、申請手続き上は大臣認定を取得する時間と費用をかけられないことが多く、通常の申請手続きの中で耐震設計を行い、付加的にダンパーを用いるという手法が今のところ有効である。

写真14は10m×23mの平面的な大きさの階建てのオフィスビルに、ブレース形状のオイルダンパーを組み込んだ事例である。ダンパーは8階まで各方向に1箇所ずつ配置したものであるが、地震時の応答加速度、層間変形が70%程度に減らすことができその効果は大きい。図10,11は、間口6.3m、奥行き13m、高さ31mの細長いプロポーションを有する10階建ての共

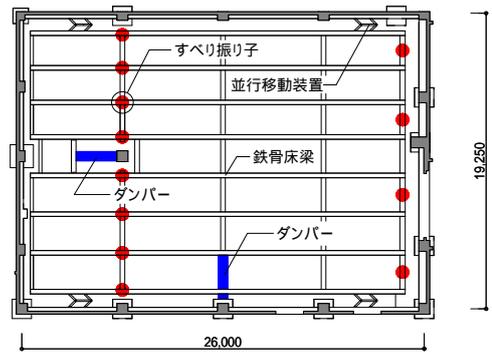


図7 鉄骨梁と免震装置の配置

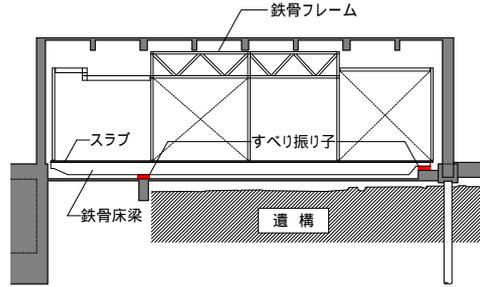


図8 展示室の断面図



写真 14 9階建て事務所ビル

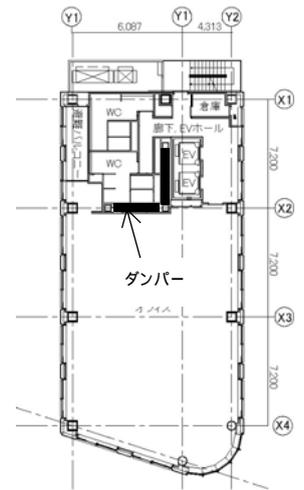


図9 事務所ビルの平面図



図10 共同住宅の平面



図11 共同住宅の軸組・立面

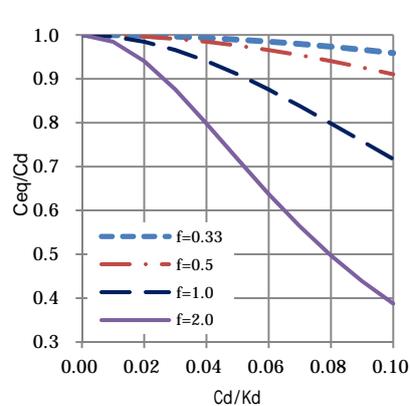


図12 オイルダンパーの減衰係数

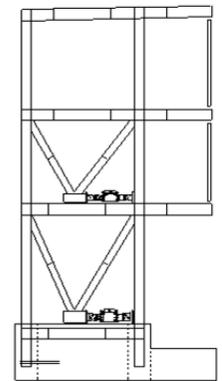


図13 3階建て鉄骨造の軸組

・サイエンスヒルズこまつ

小松駅前に2013年に竣工した地上3階、延べ床面積6,063m²の建築で、展示室を中心とする複合建築である。公園のような建築を目指し、4列の湾曲する屋根面（ウェーブ）が並び、各ウェーブが境界で部分的に接している。湾曲した屋根はライズを大きく取れば力学的に有利な軸力系の構造となり、スパンを大きくすることができるが、高さが大きく建築のイメージする形態と異なってしまい、またスパンを大きくすると接地部分に鉛直力が集中して直接基礎が不可となることが問題であった。曲面屋根を形成し、必要な空間の大きさに応じて補助的に鉛直荷重を負担する鉄骨柱を配置することにより、理想的な軸力系とは異なるが曲面の力学的効果を活かした構造とした。シェルとフラットスラブとが混在した構造となっており、それぞれの場所での応力状態を考慮してフラットスラブ、球形ポイドスラブ、小梁つきスラブを用いた。

RC造の耐震壁の多い強度型の構造であるが、耐震壁の配置箇所が限定されることから隣接するウェーブ間で地震力の移行が生じ、この力をウェーブ境界の接続部で伝達できるように調整と工夫を要した。

3.5. 多様な形態・造形に対する構造デザイン

建築が多様化・複雑化し、それにふさわしい構造デザインが必要とされている。複雑なプログラムに対応する一つの手法として構造のハイブリッド化（併用化）がある。

・新広島球場

開かれたグラウンドのイメージをもち、非対称かつ多彩な観客席を有する特異な形態の野球場である。1階観客席の後方に球場内を一周するコンコースが配置され、上部には2階席を支えるアーチ状の架構が連続してデザインとして表現されていること、2階席の先端の跳ね出し部分にさまざまな形式の客席が設けられていることが架構計画の重要な与条件であった。

構造体を内側と外周部とに分け、円周方向を適当に分割して全体を10のブロックに分けて計画した。外周部の架構については、コンコースから下部を現場打ちプレストレスコンクリート造とし、上部はプレキャストコンクリート構造（PCa造）とした。PCa造は同一形状の可能に対して効果を発揮するが多様化には対応できないので、PCa造の欠点を補う意味で鉄骨造を併用して架構のバリエーションを増やした。コンコース上部の放射方向の基本的なPCa架構は3種類とし、張り出した2階席の下部に床を設ける部分は鉄骨造としてPCa梁から吊り下げ、2階席上部に位置する屋根は鉄骨造として計画した。桁行方向のPCa梁はそれぞれの位置において共通化を図り、また、2階客席は床もPCa床版を用いた（図15）。

外野の2階席であるパフォーマンスシートでは、放射状の基本架構に対して端部で三角形の平面が追加されている。端部の梁は特殊な形態、寸法の部材となるためPCa造とすることは得策ではなく、梁及びそれを支える鉄骨柱により支持し、床は基本のPCa床版の長さを調整して対応した（図16）。



写真 20 新広島球場鳥瞰写真

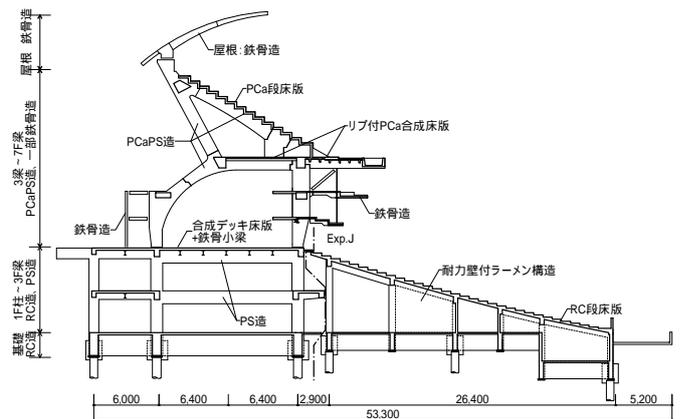


図 15 新広島球場の架構形式



写真 21 パフォーマンスシート

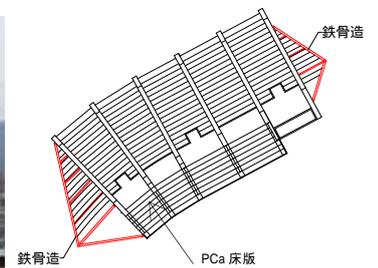


図 16 パフォーマンスシートの構造



写真 22 工学院大学八王子総合教育棟

・工学院大学八王子総合教育棟

キャンパス施設の新しいタイプの建築として、4つのL字形平面の建物が配置された建物間にパッサージュと呼ばれる空間が組み込まれ、教室間の回遊性と建物内外の可視性が配慮された計画である。建物には研究室個室という小さい空間から300人講義室の大きい空間までがあり、小空間、大空間を別々にまとめて4棟が構成されている。地上4階地下1階、延べ床面積12,029㎡の建築である。

L字形の平面形に対して、分散したRC造の壁状の耐震要素で構成することとし、幅の狭いL字形平面では短手方向のみにRC壁を配置した。その他、鉛直荷重を負担する鉄骨柱を適宜用いている。この計画は通常の耐震構造では成立しがたいが、免震構造との組み合わせによって実現できている。

大空間と小空間では床の構造方式は異なる。幅の狭い棟では床はスパンが10.35m以下であり天井懐に設備を内蔵させることもありRC造の小梁付きスラブで作り、大きい棟では最大18mの大空間となり、床をプレキャストコンクリート(PCa)で作ることとし、空間の大きさと構造形式の関連を計った(図17)。結局、構造の仕組みとしては、小空間は壁、床とも現場打ちのRC造の構造による構成となり、大空間は現場打ちのRC壁、鉛直荷重のみを負担する鉄骨柱、床とそれを受ける梁はプレキャスト部材による構成となった。

4. おわりに：構造デザインの原理

建築として目指す価値が時代と共に変化し、多様化してきていることは認識できるが、これに対して構造デザインの考え方はどうあるべきだろうか。構造デザインにおいては工学・技術の原理を踏まえることが必要であり、その上での創造的な追及が不可欠であり、建築の与条件にふさわしく最適な構造を目指すことが必要である。“最適な構造”を考慮してみるとかつてのような普遍的な力学合理性に基づく価値観だけではなく、個別的・多面的な価値判断が求められることが今日の特徴であり、悩ましい問題である。しかし、価値観が多様化しても変わらない原理があると思われ、バランスの取れた構造であり建築となっているか、また構造設計としての工夫が考えられているかという点が重要である。

建築デザインが描くイメージは無数の可能性があるが、それを具現化する構造では物理現象や工学原理による制約、あるいは解析・施工など技術的制約があり、無条件に可能なわけではない。新しい技術の導入によって画期的に変わるものもあるが、既存の技術の見直しや応用によって新たな可能性が生まれるものもある。例えばハイブリッド構造(併用構造)、耐震改修などは既存技術の応用により新たな構造デザインの可能性を見出すことができる。このことは個別的な実践事例の集約から新しい構造デザインの原理が生まれる可能性があるということでもある。

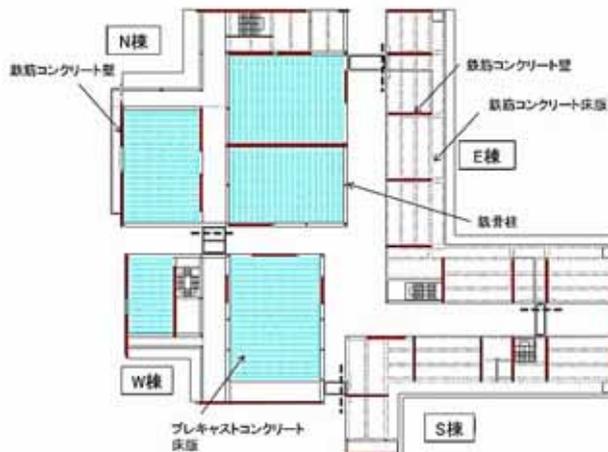


図 17 工学院大学の構造システム



写真 23 鉄骨柱とプレキャスト床版

参考文献

- 1) 日本の現代建築が失ったもの, GA JAPAN 121, 2013 MAR-APR
- 2) 馬場璋道他: 建築21世紀はこれからだ, 相模書房, 2013
- 3) 地球環境・建築憲章, <http://news-sv.aij.or.jp/kensho/panfu.pdf>
- 4) (一社)日本建築構造技術者協会: 非構造部材の安全性確保に向けてのJSCAの提言, 2012.6, http://www.jsca.or.jp/vol15/p1_5/jsca20140618.pdf
- 5) 金箱温春: 耐震改修の構造デザイン, 鉄構技術, 2008.1
- 6) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第3版, 2013