

米国免震建物および設計事務所訪問記



高山 峯夫
福岡大学



安達 亮平
福岡構造



吉村 庄司
左同



宮崎 健太郎
日建設計



本田 裕之
エス・イー・アイ
構造設計

Report on a visit to seismically isolated buildings and design firms in the U.S.

The Seismic Isolation Promotion Society (SIPS) is working to promote seismic isolation structures; in 2019, the group toured Istanbul, Turkey, where they visited the world's largest seismically isolated hospital. This was their second overseas visit, with a survey conducted in October 2024. In California, seismically isolated buildings are being constructed near faults and designed for large response deformations. To confirm the status of such seismically isolated buildings in the U.S., the group visited design firms and seismically isolated buildings in San Francisco and Los Angeles. Here we report on the discussions at the design offices we visited and the seismic isolation buildings we toured.

Fukuoka University
Fukuoka Kozo
Nikken Sekkei
S.A.I Structural Design

Mineo Takayama
Ryohei Adachi, Shoji Yoshimura
Miyazaki Kentaroh
Hiroyuki Honda

1 はじめに

一般社団法人九州免震普及協会（SIPS、代表：高山峯夫）は免震構造の普及を目指して活動している。当協会は、普及の一助になればと考え2019年にトルコ・イスタンブールを訪問し、世界最大規模の免震病院などを視察した。

カリフォルニアでは断層近くに免震建物が建設され、大きな応答変形を想定して設計が行われている。こうした米国での免震建物の現状を把握することで、日本の免震建物の設計に役立てたいと考え、サンフランシスコとロサンゼルスで設計事務所と免震建物を訪問した。サンフランシスコではSOMとForell/Elsesserを、ロサンゼルスではA RUPを訪問し、最近の免震建物の設計事例などについて意見交換を行うとともに、免震建物の見学も行った。なお、視察は2024年10月13日～10月19日に実施したもので、参加者は執筆者を含めたSIPSの有志11名である。

2 SOM訪問と建物見学

(1) SOMサンフランシスコ事務所訪問

日時：2024年10月15日（火）9時00分～

事務所は、サンフランシスコの金融街のONE MARITIME PLAZAの5Fにある（写真1）。このONE MARITIME PLAZAは、高さ約120m、25階建てであり、外周ブレース構造が特徴的なSOMにより手掛けられたビルである。

事務所に入ると、さまざまなプロジェクトの模型や壁に貼られたプロジェクト概要が出迎えてくれ、いかにも設計事務所という感じである。また、事務室部分のスパンはそう大きくなく、外周ブレースも5層ごとに接合する形のため、外の見え方を大きく阻害するようなことはなく、こういった空間作りはこれからの日本のオフィスでもあり得るのではないかと感じる場所であった。

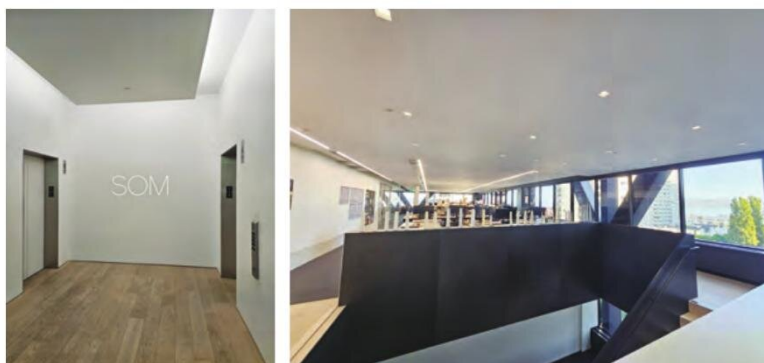


写真1 SOMサンフランシスコ事務所の様子



写真2 SOMによるプレゼンテーション

SOMからのプレゼンテーションは、2つのプロジェクトについてであった。1つ目はEric氏よりLACMA (Los Angeles County Museum of Art:ロサンゼルス・カウンティ美術館)の新常設展示棟、2つ目はDavid氏からカリフォルニア大学バークレー校 エンジニアリングセンター計画であった(写真2)。

LACMAは、Peter Zumthor氏とSOMの共同設計である。初期コンセプトは、全てのアートを1つのレベルに集めて平等に扱うこと、そのために大きく4つに分けたエリアをつなげるために道路上空をまたぐような形の渡り廊下などが必要となった。2018年に現状案に近づく形になる案として、鉄筋コンクリートのせん断壁で構成するタワーを設け、展示室レベルと屋根レベルの大きな片持を有する断面構成が検討され、床や屋根スラブについては最大25mの片持を実現するため、2重スラブの中に梁型を設け、そこにポストテンションを加えるプレストレストRC造により剛性・耐力を確保する架構が計画された。その際、二重スラブ内のPC梁型はどのような配置がよいかを、意匠設計者とタワーの配置とともに綿密に考え、ひし形パターンの繰り返しとすることで、合理的な計画ができた。

米国の免震建物の設計は、免震層上下の構造体に関しては、日本と同様に、再現期間43年を想定したSLE (Service Level Earthquake ; レベル1) 及び再現期間475年を想定したDBE (Design Basis Earthquake ; レベル2) に対する検討で問題ないが、免震部材サイズや免震クリアランスの設定においては、再現期間2475年を想定したMCE (Maximum Considered Earthquake ; レベル3) に対する検討を必要としている、とのことだ。ただし、日本のように告示波やサイト波の最大応答を設計用に採用するのではなく、サイト波7波以上の平均値を採用するという違いがある。しかし、MCEレベルを想定する必要があるため、断層等が近く大きな地震が想定される地域では免震部材サイズや免震クリアランスが非常に大きなものになってしまう場合が多い。これが、米国で

免震構造の採用が大きく進まない要因になっている可能性がある、とのことであった。日本の現状ではレベル2を超える地震動について、どのような地震動を想定するのか、免震層変形やクリアランスについてどう考えるのか、という点が全国で足並みを揃えて義務付けられていないこともあり、今後米国のようにレベル3の対応まで義務付けがなされるのか、その場合に免震構造の採用率が変わってしまうのか、設計者として注視していく必要があると感じた。

LACMAでは、近くにサンアンドレアス断層が存在し、盆地の増幅により、固有周期0.2sで2.5G程度の応答スペクトルとなっているが、免震化により固有周期を5sとすることで1/10程度となるため、展示・収蔵品を守るため免震構造の採用が必須との結論に至ったとのことであった。免震部材は周期5sのTFP (Triple Friction Pendulum) を採用しているが、前述の通り、MCEレベルで免震層変形が非常に大きくなり、その値は60in(1.5m程度)となるとのことであった。また、片持部分の振動を抑えるために、外装部分の支柱等の上に鉛直ダンパーを入れ減衰を与えることを考えた。

UCB エンジニアリングセンターでは、新素材が大きなテーマとなっていた。それは、Shape Memory Alloy (SMA) という形状記憶合金である。このSMAは航空業界においてはすでに用いられており、温度によって特性が変わるもので、建築分野では通常の温度であれば元に戻って壊れないというスーパーエラスティックという特性を生かせないか、と考えた。そのうえで、SMAを使用したケーブルという形として、振動台実験で動的試験を実施し、その有効性を確認した。この建物では、既存建物を改修して上に増築する、という計画であり、鉄骨造で軽くすることが求められた。センターコアの構造計画として、コア内はBRB (座屈拘束ブレース) にて耐震性能を確保し、外周の屋根部分の架構にこのSMAケーブルを用いたSMAテンションロッドシステムを採用した。通常のテンションロッドの一部にSMAケーブルを束ねたヒューズの役割をする機構を組み込むことで、通常

は圧縮時に座屈等を生じてしまうテンションロッドが、このSMA部分で圧縮されてつぶれるが、その回復力で引張力に変わった際に回復して、また引張力を負担できるようになる、という形で長くエネルギー吸収できる形となっているということであった。地震力のうち、BRBで80%、このSMAテンションロッドシステムで20%を吸収しているとのことであった。形状記憶合金については、大学在学中に研究していたとのことで、それを実際のプロジェクトに採用するまで高めたという点は、とても感心させられた。

いずれのプロジェクトも、意匠・構造・設備の統合や新素材の採用といった組織設計事務所の強みが活かされていることを強く認識させられた。組織設計事務所に身を置く自分としても、今後の自らのプロジェクトに対して、大きな刺激を受けたことは言うまでもない。

(2) LACMA見学

日時：2024年10月16日（水）15時30分～

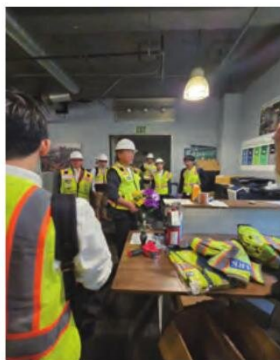
SOM事務所訪問の翌日にロサンゼルスに移動し、建設中の現場を見学した（写真3）。非常に注目されているプロジェクトのため、敷地内での写真撮影不可であったことが残念ではあるが、最大3mのRC柱の上に載るTFPや意匠・構造・設備が統合された三角形グリッドのハニカム2重スラブなど、非常に貴重な建設中の各要素を見ることができ、質問などのコミュニケーションをしながら見て回れたことは非常に有意義な時間であった。その中で、工事の進行に伴い、免震部材であるTFPの固定を外して施工管理を行う際、プレストレストRC造の収縮を含めた上部構造の動きなどの管理に電子機器を用いたシステムを用いて当初は行っていたが、トラブルが多く発生したため、下げ振りをを用いるというアナログなシステムに切り替えたという話を聞いた。やはり、最終的には、簡単なアナログなシステムが強い、というのはどの国の施工管理でも同様なのかと思わされた。



写真3 LACMA（Los Angeles County Museum of Art）の現場見学
（敷地内での撮影不可）

※LACMA美術館は2026年4月の開館にむけて準備中。

参考URL：<https://www.world-architects.com/en/architecture-news/headlines/take-a-peek-inside-peter-zumthor-s-new-building-for-lacma>



3 Forell/Elsesser訪問と建物見学

(1) Forell/Elsesser訪問

日時：2024年10月15日（火）11時00分～

SOMの事務所訪問後、徒歩15分程度に位置するForell/Elsesserの事務所を訪問した。Forell/ElsesserのSteve氏からは、Ray and Dagmar Dolby Regeneration Medicine Buildingのプロジェクトについてのプレゼンテーションがあった（写真4）。

この建物は、カリフォルニア大学サンフランシスコ校にある1階建ての医療研究所である。急傾斜地に建設されたこの建物は、建物全体が湾曲した地形に沿って曲がりくねった平面形状をしており、4つの研究エリアが地形に沿って半階ずつ緩やかに上がっている。上部構造は放射状の鉛直ブレースで構成されており、ブレースが集約された側の支点で建物全体の80%の長期荷重を負担しているため、反対側の支点に大きな引張力が生じる架構計画となっている。

大学から大地震（MCE）後も継続利用できる建物性能を要求され、免震構造が採用された。免震部材は42基のTFPと8基の引抜き抵抗部材URD（Uplift Restraint Design）で構成されている。TFPはスライダーの水平摺動に伴い、上面プレートが上方に移動するため、URDはこの鉛直変位に追従できるように本建物用に設計製作された特注品である。また、モックアップを作成し施主に説明する試みも行われた。MCEレベルの水平変位は650mmで、上下動による鉛直変位はURDなしの場合が約40mm、URDありの場合が約15mmとのことであった。

複雑な架構計画を有する本建物は、スケジュールも非常にタイトであり、設計開始から2年で竣工する必要があった。そのため、設計コンペで勝利した後、2週間後には免震部材を発注し、4週間後には鉄骨部材を発注した、とのことである。



写真4 Forell/Elsesserによるプレゼンテーション

(2) Ray and Dagmar Dolby Regeneration Medicine Buildingの見学

日時：2024年10月15日（火）13時30分～

Forell/Elssesserの事務所訪問後、本建物の見学に向かった。Forell/ElssesserのSteve氏に同行いただき、建物周辺および免震部材（写真5、6）を見学した。

敷地の高低差が非常に大きく、大きな引張力が生じる架構であることを身をもって感じた。独特な架構形状や引抜き抵抗部材機構（写真7）など、貴重な建築要素を設計者とコミュニケーションを取りながら見学することができ、非常に有意義な体験であった。

(3) de Young Museumの見学

日時：2024年10月15日（火）15時30分～

Ray and Dagmar Dolby Regeneration Medicine Buildingの見学後、サンフランシスコの都市公園ゴールデンゲートパーク内にある本建物に向かい、建物の内部および免震層を見学した。この建物は、基礎免震のS

造3階建ての博物館（高さ約20m）と10階建てのタワーで構成されている。

この建物は1989年の地震により被災し、10数年後、展示品を守るため基礎免震を採用した建物として建替えられた。免震部材は、ブリヂストン製の高減衰ゴム系積層ゴム支承を76基、Earthquake-Protection-Systems製のすべり支承を76基、Taylor-Device製の流体粘性ダンパーを24基使用している（写真8～10）。設計では約20種類の免震部材の組合せを検討し、上記の組合せが採用された。MCEレベルの最大応答加速度は目標性能500gal以下に対して380gal、水平変位は660mm（クリアランス900mm）とのことであった。

視察では複数の建物の免震層を見学したが、他の建物は球面すべり支承（TFP）を使用しており、積層ゴムを使用した建物はこの建物のみであった。遠くアメリカの地で日本製の免震部材が使用されている様子を見ることができ、感慨深いものがあった。



写真5 建物全景



写真6 免震部材TFP



写真7 引抜き抵抗部材



写真8 高減衰ゴム系積層ゴム支承



写真9 すべり支承



写真10 流体粘性ダンパー

4 ARUP訪問と建物見学

(1) ARUP訪問

日時：2024年10月17日（木）9時30分～

ARUPのロサンゼルス事務所訪問では、インターコンチネンタルロサンゼルスの19階に案内された（写真11～13）。本建物は西海岸を代表する高層ビルである。ARUPからは、（W）Rapper Tower、Shuttle Stack、Loma Linda University Hospitalの3つのプロジェクトについてのプレゼンテーションがあった。

1つ目の（W）Rapper Towerは、訪問前日に現地で見学した建物である。プレゼンテーションはAris氏より主に建物の解析に関する内容であった。本建物が免震構造となった経緯は、建物外周を曲線の帯状に取り囲むバンド柱（鋼板BOX柱）が塑性化する懸念があること、および耐震コア（鋼板耐震壁）が平面的に偏心配置されるためであった。3Dフル立体解析にて応答性状の把握をされており、米国では串団子モデルによる解析はほとんど行わず、3Dフル立体解析で非線形時刻歴応答解析を行うことが一般的なようである。免震部材はTFPを18基採用し、ベースシアは0.17、最大変形は約84cmである。数テラバイトにもなる膨大な解析データは、クラウド向けのリレーショナルデータベースやビジュアルプログラミング等を活用することで、パラメトリック解析の効率化を図っていた。

2つ目のShuttle Stackは、退役したスペースシャトル「エンデバー号」を打ち上げ時と同じ姿勢で展示するプロジェクトで、2026年竣工予定である。基礎免震構造を採用し、免震部材はTFPを使用している。プレゼンテーションは、Amie氏より主に構造計画に関する内容であった。

3つ目のLoma Linda University Hospitalは、地上17階建て、延べ面積約97,000m²の2021年に竣工した病院である。基礎免震構造で、免震部材はTFPを126基、流体粘性ダンパー（1基あたりの減衰力800kip≒3600kN）を104基採用している。プレゼンテーションはBranden氏より主に免震部材に関する内容であった。建設地は、断層の直上かつ近傍にも別の断層があると推測される地域である。また、災害時に機能維持が求められる施設であるため基礎免

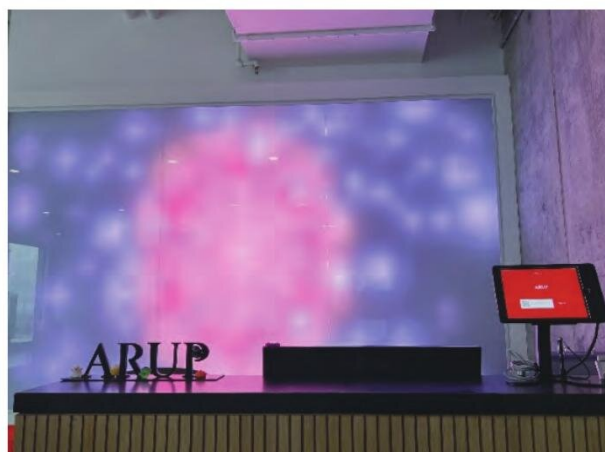


写真11 ARUPロサンゼルス事務所

震構造が採用された。水平方向の最大変形は、流体粘性ダンパーを併用しない場合約2mであり、併用した場合約1mであった。そのため、TFPと流体粘性ダンパーを併用する方針になったとのことであった。なお、本建物のベ-



写真12 ARUPのプレゼンテーション



写真13 3D Isolationの説明

スシアはDBEで0.20、MCEで0.28である。また、建設地は水平動に加え上下動も大きな地域で、上下動の応答スペクトルは0.1sで2.8G程度である。そのため、本建物は一般的な水平動に対する免震に加え、上下動に対する免震機構を検討されていた。3D Isolationと呼ばれており、TFP下に剛強な鋼製の台座を設け、その台座の四周にスプリングアイソレーションを設置するものである。ただし、この機能はオプションであり、スプリングアイソレーションなしでも成立する計画となっている。

プレゼンテーションの中では、「JSSIのwebpageのデータベースが参考になった」というコメントも聞かれた。

(2) (W) Rapper Towerの見学

日時：2024年10月16日（水）13時30分～

(W) Rapper Towerは、地上17階建て、高さ約71.6m、延べ面積約17,000m²の2022年に竣工した商業オフィスビルである。現地では、ARUPのAris氏に同行いただいた。

特徴的な外観である建物外周を曲線の帯状に取り囲むバンド柱は、外殻から建物を支持しており、オフィスフロアの無柱空間を実現している。上部構造は鉄骨造であるが、セメント系の仕上げ材を用いる等、一見すると

RC造と錯覚する外観であった（写真14、15）。

見学の際、設計者に「設計は楽しかったですか？」と尋ねたところ、「Yes！免震構造の採用によって今まで経験をしたことがない構造設計に携わることができてワクワクした」との回答を得られた。

(3) Loma Linda University Hospitalの見学

日時：2024年10月17日（木）13時00分～

ARUPでの事務所訪問後、当該病院建物の見学に向かった。ロサンゼルス中心街から車で1時間程度のロマリンド市にあり、免震層に入り免震部材、その後建物周囲を見学させていただいた。現地ではARUPのBranden氏に同行いただいた（写真16～18）。

3D Isolationのスプリングアイソレーションについては、残念ながら見学時点では導入されていなかった。アメリカでも前例のない機構であるため、認定の手続きが難しいようだが、将来的に取り付けられる予定とのことであった。また、流体粘性ダンパーが傾斜して取り付けられているのが特徴的だと感じた。これは、TFPに水平変位が発生した際に発生する鉛直変位に追従できるようにしているためとのことであった。



写真14 建物全景



写真15 免震層、TFP



写真16 Loma Linda University Hospitalの外観

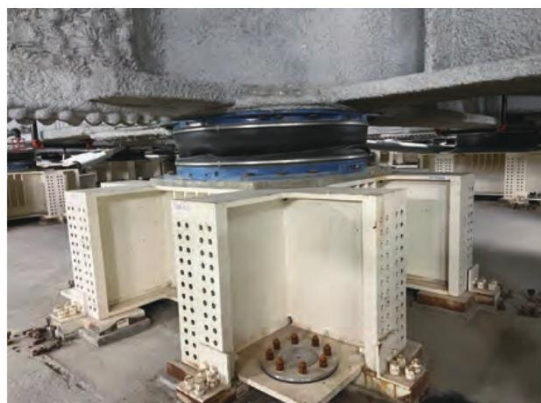


写真17 3D Isolation、台座



写真18 流体粘性ダンパー

5 おわりに

訪問した各事務所では、現地設計者からのプレゼンテーション後に、高山から近年日本で起こった大地震の際に免震建物で観測された強震記録結果を示し、免震効果の実例についてプレゼンテーションを行った。プレゼンを受けた現地設計者からは、「アメリカでは免震建物はあまり普及しておらず、また実際に免震建物が地震を受けた事例が非常に少ないため、実例による免震効果について知ることができ有意義」との意見を頂いた。訪問した3つの事務所ともに、免震建物で観測された強震記録結果に強い関心を示してくれた。

本報告にはないが、サンフランシスコ市庁舎やオークランド市庁舎などのレトロフィット事例などの見学も行った。アメリカでは免震建物の建設数は日本に比べると少ないものの、レトロフィットなどの事例は早くから取り組まれていた。米国で免震建物を設計する場合、設計用地震動が大きく、免震層の応答変形は80cmや1m以上となることもある。こうした大変形に対応した設計例は日本での免震設計にも役立つのではないかなと思う。ただ、現在米国で使われているアイソレータのほとんどがTFPであり、今後日本でも免震部材の種類が集約化されていくのだろうか。今後も海外での免震建物の設計例などを調べて、必要に応じて現地視察などを行っていきたいと考えている。

謝辞

免震建物の見学先の選定や構造設計者との意見交換などにあたっては、SIE社のIan Aiken氏に多大なご協力をいただきました。またSaeko Higa-Dickinsonさんに同時通訳をしていただくことでスムーズな意見交換を行うことができました。ここに記して感謝の意を表します。



写真19 SOMでのプレゼン後の集合写真