

日本一の超高層ビルを支える 耐震技術と鉄鋼製品

世界一の高さを誇るドバイのブルジュ・ハリファなど、世界中で建設されている超高層ビルでは、風による変形に対抗できる十分な躯体強度を得るために、鉄筋コンクリート(RC)造が採用されている例が見られる。しかし、地震が多い日本では、強度と同時に軽量化や高い変形性能が求められるため、RC造ではなく、鉄骨造が採用される場合が多い。今回は、日本一の高層建築である2014年に竣工した「あべのハルカス」に採用された耐震技術と鉄鋼材料を中心に紹介する。



大阪市天王寺公園の北側より「あべのハルカス」の北西角を望む。階段上のセットバック形状がよく分かる。
(出典:「新建築」第89巻11号 2014年9月別冊)

「想定外」を想定して行われた耐震設計

日本の超高層建築は風の影響も考慮して設計されるが、特に耐震設計が重要となる。耐震設計には、構造部材の強度を高めることにより建築物を守る「耐震」、建築物の揺れを抑える「制振」、建築物に振動を伝えない「免震」の3つのアプローチがある。建築基準法では、震度5弱程度までの地震では構造部材の弾性範囲で建築物を守り、震度6強程度以上の大地震の

場合には、構造部材の塑性変形により地震エネルギーを吸収して、建築物の倒壊を防止するという考え方を採用している。

2014年3月に竣工した大阪市阿倍野区に建設された「あべのハルカス」は、地上60階、地下5階、高さ300mの超高層建築物である。国内の高層構造物としては、東京スカイツリー(634m)、東京タワー(332.6m)に次ぐ3番目の高さであり、居住空間を含む建築物としては、横浜ランドマークタワー(296m)を抜く日本一の高さである。延床面積は約30万㎡で、これは表参道の路面店の延床面積と同等である。垂直の都市ともいえる

●耐震グレード表(図1)

再現期間(年)	50年				500年		1500年
震度階	5弱 5ー	5強 5+	6弱 6ー	6強 6+	7 7	7 7	
地震の大きさ	中地震		大地震 + 東北地方太平洋沖地震 + 兵庫県南部地震		巨大地震	極大地震	
被害の程度							
軽微被害	一般的な超高层の耐震グレード あべのハルカスの耐震グレード 一般的なビルの耐震グレード 修復可能な被害 建築基準法の最低限の性能 想定外 想定外 △LEVEL1 △LEVEL2						
小破							
中破							
大破							
倒壊							

地震の震度(横軸)と、想定される建築物へ被害(縦軸)をまとめたものが「耐震グレード表」である。表では建築物を「一般的ビル」「一般的な超高层ビル」の2つに分類し、地震の震度に応じて許される被害の程度を定め、より高層の建築物にはより高い耐震グレードが要求されている。被害の程度は「軽微被害」から「倒壊」までが設定されており、「中破」までが修復可能な被害である。グレード表からは、一般的な超高层ビルには、震度6強の大地震の際でも、その被害が「中破」程度であることが求められていることが分かる。

しかし、建築基準法が想定しているのは震度6強程度の大地震までであり、巨大地震、極大地震に対する影響は想定されていない。

あべのハルカスでは、このような建築基準法の想定外の地震が発生した際にも、その被害が「中破」で抑えられ、震災後も継続して建築物を利用できるような設計が施されている。

(「新建築」第89巻11号 2014年9月別冊の図版を基に作成)

あべのハルカスの設計においては、将来発生が予想される東南海・南海地震や上町断層地震による巨大地震・極大地震に対しても「小規模被害」に抑えることを目的として設計が行われている(図1)。それが、「メガストラクチャ耐震構造」と「ハイブリッド制振構造」の2つのアプローチである。

あべのハルカスの構造設計においては、建物全体の耐震性能を高めるだけでなく、さらに細部についての要求があった。それは、低層階の商業施設、中層階のオフィス、高層階のホテル施設の各階に適したプラン(構造)を実現することである。例えば、既存建物と接続する低層階では柱の間隔(スパン)や太さなどを既存建物と合わせたいという要求があったり、中層部では柱を減らし、オフィス空間を広くしたいという要求などがあった。

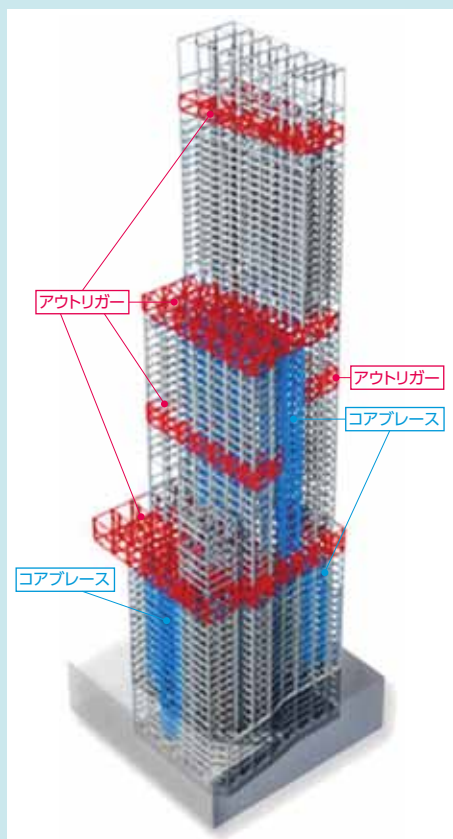
これらに対応するために採用された架構(柱・梁構造)が「アウトリガー(outrigger)システム」である(図2)。これは、波形鋼板壁やブレースで構成されるスチール系コアと、超高強度鋼と超高強度コンクリートによるCFT(Concrete Filled Tube:コンクリート充填鋼管)柱による外周架構を、トラス構造階(アウトリガー)で繋ぐ構造である。低層階と中層階、中層階と高層階の接続部、さらに最上階にアウトリガーを設置し、構造材を集約して効率的に変形を抑制することにより、アウトリガー間の構造に高い自由度を持たせている。

メガストラクチャ耐震構造のための架構技術

あべのハルカスのメガストラクチャ耐震構造では多数の新しい技術が採用されているが、ここでは特徴ある3つの技術を紹介する。

1つめは、超高強度CFT柱の採用である。鋼管にコンクリートを充填したCFT柱は、圧縮力に強いコンクリートと、それを拘束しながら変形性能にすぐれた鋼管のそれぞれの長所を活かし、細く少ない数の柱で大空間を構築できるメリットがある。あべのハルカスでは、約6,000tの高軸力を支える超高強度CFT柱が採用されている。CFT柱の強度はコンクリートと鋼管の強度の組み合わせによって決まるが、超高強度CFT柱にはFc(圧縮強度)150N/mm²の高強度コンクリートと、引張強度590N/mm²級のSA440C角形鋼管が使用されている。最大柱断面は1,400×1,400mmで、角形鋼管の最大板厚は90mmである。このビルでは、鉛直荷重は上層部を支える低層部に大きくかかるうえ、ビル全体は階段状のセットバック形状であるため、非対称形状となっている。このような構造を効率的に支持するために、CFT柱は低層部を中心に配置されている(図3)。なお、このセットバック形状はビル周辺に発生するカルマン渦の影響を

●あべのハルカスの架構モデル(図2)



●あべのハルカスの耐震・制振構造(図3)

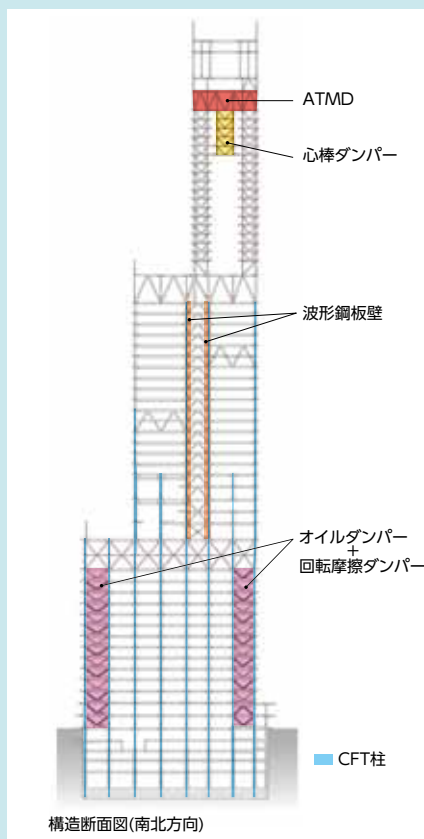


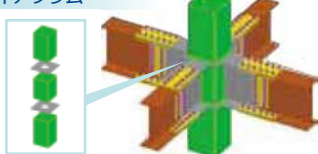
図2では、青色で示した垂直構造の「コアブレース」と、赤色で示した水平構造の「アウトリガー」によって構成されていることを示した。

図3にはCFT柱の使用場所(水色)と、低層部(オイルダンパー・回転摩擦ダンパー)、中層部(波形鋼板壁)、上層部(心棒ダンパー・ATMD)にそれぞれ採用されている制振デバイスを示した。

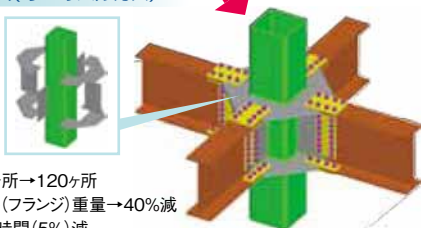
(「新建築」第89巻11号2014年9月別冊の図版を基に作成)

●外ダイアフラムの構造(図4)

一般的なダイアフラム



外ダイアフラム(あべのハルカス)



ボルト本数 152ヶ所→120ヶ所
スプライスプレート(フランジ)重量→40%減
工場組立時間 2時間(5%)減

一般的なダイアフラム(上)とあべのハルカスで採用された外ダイアフラム(下)。CFT柱は現場で溶接後、コンクリートが充填されるが、ダイアフラム部分ではコンクリートの充填が不十分になる施工不良が発生することがある。鋼管を切断しない外ダイアフラム方式では、鋼管内面に突起物がないために、充填性にすぐれるというメリットがある。また、スプライスプレート(図中の黄色の部材)にアルミニウム溶射を施すことですべり係数を上げ、ボルト本数の削減を実現している。

(出典:「新建築」第89巻11号 2014年9月別冊)

和らげる効果もあり、風の影響の軽減にも寄与している。

2つめの技術は、CFT柱梁接合部の「外ダイアフラム」である。柱梁接合部は鉄骨柱をいったん切断してダイアフラムを接合する方法が一般的である。しかしこのビルでは、鉄骨柱の仕口部分を切断せず、ダイアフラムを切断した「分割型外ダイアフラム」を採用した。それによって、鉄骨加工費の削減、仕口部分の信頼性向上、CFT柱のコンクリート充填性の向上が図れるからである。

3つめの技術は、フランジと梁の接合部分に用いられた「アルミ溶射接合」である。具体的には、ダイアフラムと梁フランジをつなぐためのスプライスプレート(添え板)にアルミニウムを溶射することですべり係数の向上と耐食性の向上を実現している。これによって、スプライスプレート(フランジ)質量を40%削減し、接合ボルト本数は152カ所から120カ所に削減することが可能になった(図4)。

あべのハルカスは大阪の中心部にあるため、工期短縮が

求められ、これらの技術の採用によって、信頼性の向上と工数削減を同時に達成したのである。

適材適所で制振技術を適用

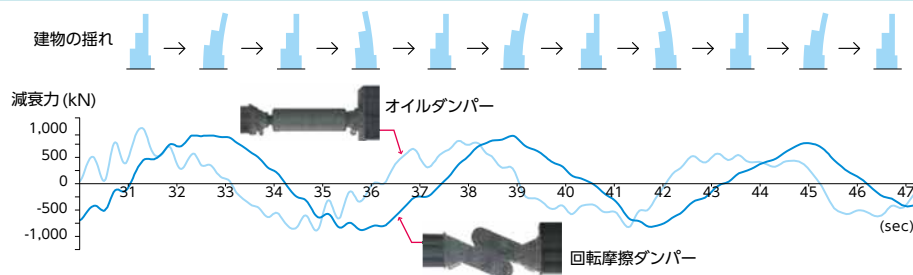
現在、風や地震の振動を抑えるために、オイルダンパーやマスダンパーなど、さまざまな種類の制振ダンパーが開発され、実用化されている。あべのハルカスのハイブリッド制振構造では、低層部、中層部、高層部の構造プランに適合するように制振デバイスが効果的に配置されている(図3)。

ビルの低層部はせん断変形が大きいいため制振ダンパーが有効であり、199基のオイルダンパーと108基の回転摩擦ダンパーが設置されている。このうちオイルダンパーは、ロッドの伸縮により圧縮された油室のオイルが、バルブを通過する際の抵抗により減衰力を発揮するため、振動に対する速度依存性が大きいという特徴がある。一方、回転摩擦ダンパーは、水平鋼板と垂直鋼板が摩擦パッドを挟み、高張力ボルトで締め付けた構造になっており、地震時の建築物の変形をダンパーの回転変形に変換し、摩擦による熱エネルギーとして地震のエネルギーを減衰する仕組みである。速度依存性が大きいオイルダンパーと、変形依存性が大きい回転摩擦ダンパーという、2種類の制振ダンパーを組み合わせることで、最大速度時、最大変形時のいずれのタイミングでも揺れを最小化することが可能になっている(図5)。

広いオフィス空間のある中層部には柱が少なく、制振ダンパーを設置するスペースが限られている。そのため、中層部では狭い空間にも設置できる波形鋼板壁が採用された。一般建物では波形鋼板耐震壁としても採用されており、鋼板が降伏するまでは通常の耐震壁として機能し、降伏して座屈するまでの塑性変形領域でエネルギーを吸収する仕組みである。座屈を防止するために波形に加工された鋼板は、EVコア(エレベーターホール)の建物長辺方向の225カ所に設置されている。

吹き抜け構造になっている高層部には、3基の心棒ダンパーとATMD(Active Tuned Mass Damper)が設置されている。心棒ダンパーは五重塔の「心柱」と同じ働きを利用した制振ダン

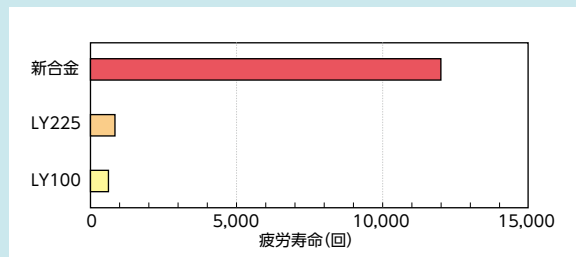
●建築の振動周期とダンパーの作用(図5)



オイルダンパーは地震動による揺れの速度が最大のときに最も大きな減衰力を発揮する。一方、回転摩擦ダンパーが最大減衰力を発揮するのは、変位(変形)が最大になったときである。2つのダンパーの減衰力が最大になるタイミングが異なるため、両者を組み合わせることで、より効果的に制振することが可能になる。

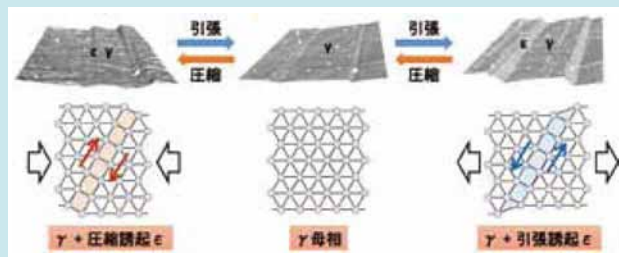
(出典:「新建築」第89巻11号 2014年9月別冊)

●FMS系合金と従来合金の疲労寿命の比較(図6)



低サイクル疲労試験では、従来のダンパー鋼材(LY225、LY100)は、1,000サイクル未満で破断する。これに対しFMS合金は10,000サイクルを超える長寿命を実現している。このことから、東日本大震災のときに発生した長周期地震動に対応する制振ダンパー材料として注目を集めている。

●FMS系合金の可逆的な塑性変形の模式図(図7)



FMS系合金に圧縮(引張)応力をかけると、圧縮(引張)誘起ε相が形成され、圧縮(引張)変形が起こり、バンド状の表面起伏が発生する。次に引張(圧縮)応力をかけると形成したε相はγ相に戻り、元のフラットな平面になることが、原子間力顕微鏡による表面観察で分かっている。

(資料提供: (独)物質・材料研究機構 元素戦略材料センター構造材料ユニット 澤口孝宏氏)

パーである。頂部から吊り下げられた心棒(鉛直トラス)をオイルダンパーで周囲の構造と接続することで、地震の揺れを抑える働きを担っている。

最上部のアウトリガー階には、単振り子と倒立振り子を組み合わせ、小型化を実現した、最新型のマスダンパーが設置されている。これにより、年に数回から十数回程度の頻度で発生する、強風による揺れを抑えている。あべのハルカスは、これらの制振技術によって、地震や風による影響を最小限に抑えているのである。

疲労寿命にすぐれた鉄系合金の開発

あべのハルカスには最新の制振技術が採用されているが、2011年の東日本大震災により、以前より指摘のあった長周期振動の脅威が現実のものになり、既存の建築物にも予想を上回る振動のために制振ダンパーが交換されるなど、新たな対応が求められている。また、既存建築物の耐震補強工事では、使用する制振ダンパーの形状などが制約される場合が少なくない。そのため最近の制振ダンパーには、小型化、高性能化や長周期振動への対応が求められている。

また、シンプルな構造を持つせん断パネルダンパー用の新材料の実用化も進んでおり、先ごろ制振ダンパー用鉄系形状記憶合金が実用化された。一般的に形状記憶合金は、形状記憶効果と超弾性の2つの特長を持つが、代表的な実用鉄系形状記憶合金であるFe-Mn-Si系合金は超弾性を示さず、これまでダンパー材料には不向きであるとされていた。しかし最近の研究により、すぐれた疲労耐久性を持つことが明らかになり、制振ダンパー材料としての研究が開始された。

実用化を実現したのは(独)物質・材料研究機構の震災対応プロジェクトのひとつである「社会インフラの復旧、再生に向けた

構造材料技術の開発」プロジェクトであり、2012年研究開始後、2015年までの実用化を目指すという高い目標が掲げられた。

開発された鉄系形状記憶合金はFe、Mn、Siを主成分とすることから「FMS合金」と名付けられた。従来のダンパー用鋼材(LY225、LY100)と比較して10倍以上の10,000サイクルを超える疲労寿命を持っている(図6)。

FMS合金が持つ高い疲労耐久性の発現原理は、以下のように考えられている。FMS合金の母相はオーステナイト(γ)相であるが、Mnの作用により、変形すると稠密六方晶のマルテンサイト(ε)相が形成する。FMS合金に応力がかかると、材料の劣化の原因となる「すべり変形」を起こさずにγ相からε相へのマルテンサイト変態が生じる。さらに逆方向の応力を付加すると発生したε相がγ相に戻るため、すぐれた疲労寿命を示す(図7)。

また、金属疲労は、金属内の転位が増殖・集積して破壊の原因になるが、FMS合金の場合には転位がγ相とε相の境界にあり、規則正しく反復運動をするため、欠陥が蓄積されにくい。このことも疲労寿命の延長に大きな役割を果たしていると考えられる。

開発当初、ほかの添加元素と比較して蒸気圧の高いMnを高濃度(一般的に約28wt%)に含むFMS合金は、溶解や加工が難しいという課題があった。しかし、研究者、製造者、需要家の協力により、約2年という短期間で実際の建築物に採用されることができた。さらに、この研究成果により、蓄積したデータを元に、より効率的な材料開発の道が開けた。

現在、日本では、国土強靱化基本計画をまとめ、災害に強いインフラ整備を進めている。今後、都市の集約化や建築物の高層化がいつそう進み建築材料にはより高い制振性能が求められていくことは間違いのない。より安全で快適な生活を支えるために、鉄鋼材料の技術開発はますます重要になっていく。

●取材協力 (株)竹中工務店、(独)物質・材料研究機構
●文 石田亮一