

ハイグレードな制振構造を実現する高減衰オイルダンパーの開発

株式会社 竹中工務店 技術研究所 嶺脇重雄
山本雅史

1. はじめに

近年、大都市の中心部に大規模な超高層建物が建設される事例が増えている。それらの建物では、商業・文化施設、ホテル、オフィスなど、ランドマーク建築に相応しい充実した都市機能を内包すると同時に優れた耐震性を併せ備えることが求められる。特に、2011年に発生した東日本大震災以後は、従来の耐震クライテリアを満たすのみでなく、極大地震動を適切に考慮した上で建物構造体に一定の余裕度が確保されていることを、それら大規模建物に相応しい優れた耐震性であると考えることがより一般的になった。

超高層建物に用いる地震対策技術として、制振技術が良く知られている。中でも、流体の抵抗力を利用したオイルダンパーを主要な制振部材として用いた制振構造は、中程度の地震による揺れにおいても生じる可能性がある仕物の移動、転倒などの室内被害に対する方策としても、大地震時の建物構造体被害の抑制策としても有効であることから、好適な地震対策と位置付けられている。

大規模な超高層建物の耐震性を従来よりも優れたものとする場合にも、制振部材の数量を増しさえすれば、制振効果を高度化でき、好適な対策となるはずである。

ところが、既往技術では、これは多くの場合、難しかった。

高い耐震性が要求される建物は、同時に、高品質な都市機能を内包することが求められる建物であり、かつ、それらの都市機能をそれぞれ適時に更新させるために、フレキシブルな建築空間であることも求められる。そのような建築計画上の必要条件を優先すると、ダンパー設置個所数や設置位置が限定されることとなる。すなわち、耐震性の要求と建築計画上の要求は並行して生じるが、実現の上ではしばしば相反するのである。従来の耐震クライテリアを目標として設計する場合であっても、建築計画との入念な調整の上、ダンパー設置個所を漸くねん出するという状況であったので、より優れた耐震性を大規模な超高層建物で実現するためには、新たな制振技術を開発することが課題であった。

筆者らは、この課題を解決するため、力学性能を従来製品のおよそ3倍に高めた高減衰オイルダンパーを開発した(写真1)。課題解決のイメージは図1のように表せる。本開発技術を利用することで、上記の相反する条件を克服してランドマーク建築に相応しい耐震性を有する「ハイグレードな制



写真1 高減衰オイルダンパー
(工事中の建物における取付状況)

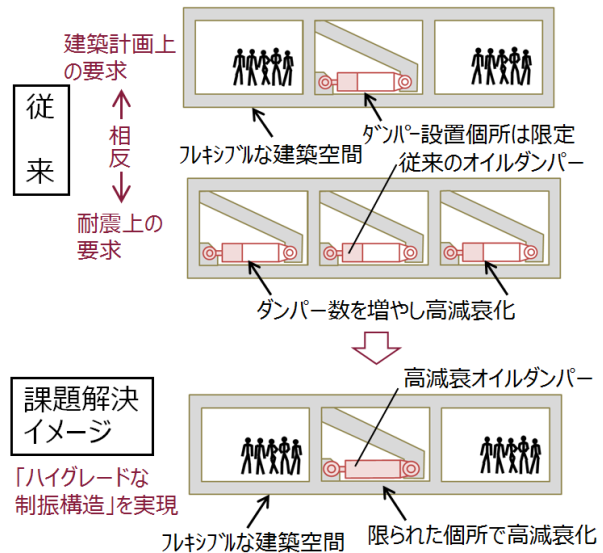


図1 高減衰オイルダンパーによる課題解決のイメージ

振構造」が実現できるようになった。本技術の特徴として、荷重容量に比してコンパクトであり建物の柱梁に囲まれたスペースに収容可能であること、従来製品用の出荷試験機で性能検査を行う方法を併せて開発し検査コスト増大を回避したことが挙げられる。

以下に本技術の開発経緯と実施例を紹介する。

2. 技術開発の経緯

2.1 要求性能¹⁾

上述課題を解決する高減衰オイルダンパーの要求性能として以下を設定した。

(1) 荷重容量

1 基あたりの荷重容量(最大減衰力)6000kNを開発目標とした。従来製品の最大荷重容量のおよそ3倍に相当する。この値は、ダンパー取付部付近の建物構造部材が合理的に設計できることや、ダンパー製造上の部品調達の容易さなどを考慮して設定したものである。また、最大減衰力だけでなく、最大減衰力に到達するまでの性能(減衰係数:地震時の応答速度に対する発生減衰力の割合)も従来製品(荷重容量2000kNのオイルダンパー;以下単に、2000kNダンパー)の3倍とすることを目標とした(図2)。すなわち、地震応答中の全時間帯でダンパー1基あたり3倍の制振効果を発揮させることを目指した。

(2) 外径寸法

高減衰オイルダンパー本体部の見つけ幅寸法(以下、外径)が550mmを下回ることを開発目標とした。本技術の適用対象と考えられる超高層建物の柱幅、梁幅の実績を考慮して定めた数値である。なお、比較のため従来製品と同じ構成で試行設計すると外径は680mmとなる(図3)。

(3) 出荷試験方法

2000kNダンパー用出荷試験機を用いた性能検査手法を開発することを目標とした。同試験機は製造メーカーが保有する最大規模の出荷試験機であり、出荷時検査を内作化させることで検査コスト転嫁による製品価格の増大を回避することができる。

2.2 基本構成

2.1で述べた要求性能を実現するためには、新しいオイルダンパーの構成が必要であった。筆者らの開発グループで考案した高減衰オイルダンパーの基本構成を図4に示す。従来のオイルダンパーに相当する一個のピストンとひと組の油室で構成された部位(これを要素ダンパーと称する)を材軸方向に3基分積層し、共通のロッドによって同時に働かせる構造である。各々の要素ダンパーは従来の2000kNダンパーと同じ構成を有しており、それぞれ最大2000kNの減衰力を発揮する。これらの力はピストンを介してロッドに伝わり、ロッドには最大6000kNの減

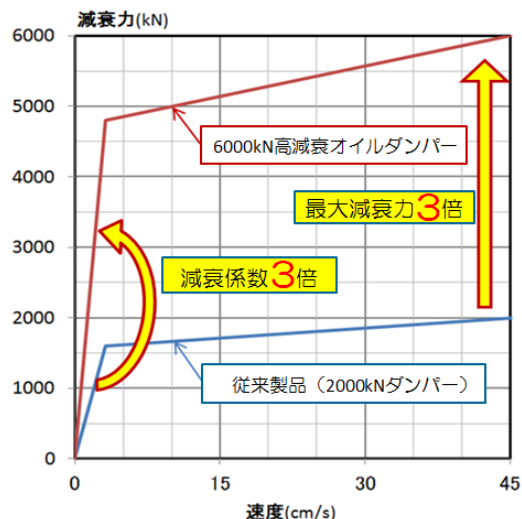


図2 高減衰オイルダンパー荷重容量の開発目標値

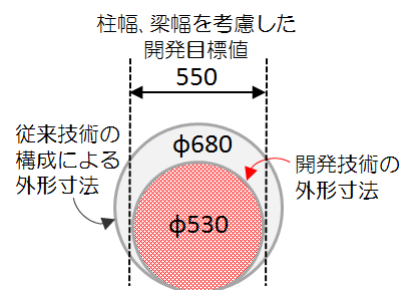


図3 高減衰オイルダンパー外径寸法の開発目標値

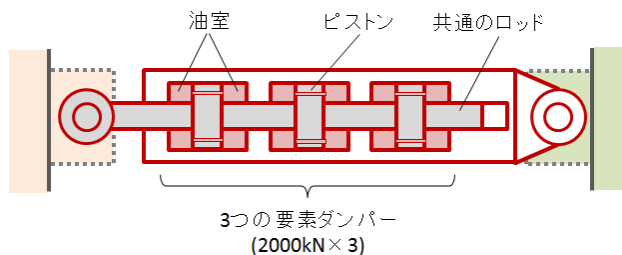


図4 高減衰オイルダンパーの基本構成

衰力が集まるという構成である。形状的には 3 つの要素ダンパーが直列配置されているが、力学的には 3 基の 2000kN ダンパーを並列した効果を発揮する。この高減衰ダンパーを建物内に配置すれば、1 ヶ所で 2000kN ダンパー 3 ヶ所分の制振性能を与えることができ、要求性能(1)を満足できる。

2000kN ダンパーの外径寸法が 360mm 程度であることをベースに、3 倍の力を伝達するためにダンパー各部の構造体がサイズアップとなること、特に、製作上の都合で必要となるロッドや外殻構造体の接合部に十分な安全率を与えることなどを考慮して、6000kN 高減衰オイルダンパーの外形寸法を決定した。結果は 530mm となった。要求性能(2)を満足する数値である。

この基本構成を利用して、要素ダンパーのいずれか一つのみが順次力を発揮する状態となるような所作を施して試験を行う方法(部分バイパス試験法:詳細は 2.3 に述べる)を開発した。この試験方法により 2000kN ダンパー用試験機で出荷時検査が可能となり、要求性能(3)を満足できた。なお、高減衰オイルダンパーの型式試験(開発時の性能検証)は、6000kN 以上で加力可能な試験機を使用して実施しており、その際に部分バイパス試験法による出荷時検査が妥当であることも検証した。詳細は 2.4 で述べる。

2.3 部分バイパス試験法²⁾

部分バイパス試験法の手順を以下に述べる。

- 高減衰オイルダンパーを構成する 3 つの要素ダンパーそれぞれにバイパス回路用の配管を取り付ける。バイパス回路とはピストンの両側にある油室を直結して減衰力が発生しないようにする連結回路である。
- 各バイパス回路のストップ弁を、順次閉じたケースについて加力を行う。図 5 では × 印でストップ弁を閉じた状態を表した。ストップ弁を閉じるとバイパス回路が働かず、当該要素ダンパーに減衰力が発生する。すべての要素ダンパーがバイパスされた状態(図 5 の最下段)についても、要素ダンパー以外の要因による誤差(摩擦、バイパス配管の影響など)を補正するために実施する。
- 3 つの要素ダンパーのいずれか一つに減衰力が働くようにした加力結果を順次 F_1 、 F_2 、 F_3 、すべての要素ダンパーがバイパスされた状態での加力結果を F_0 と表すと、高減衰ダンパーの性能 F_T を図 5 中の式で評価できる。
- 検査終了後、バイパス配管は撤去する。

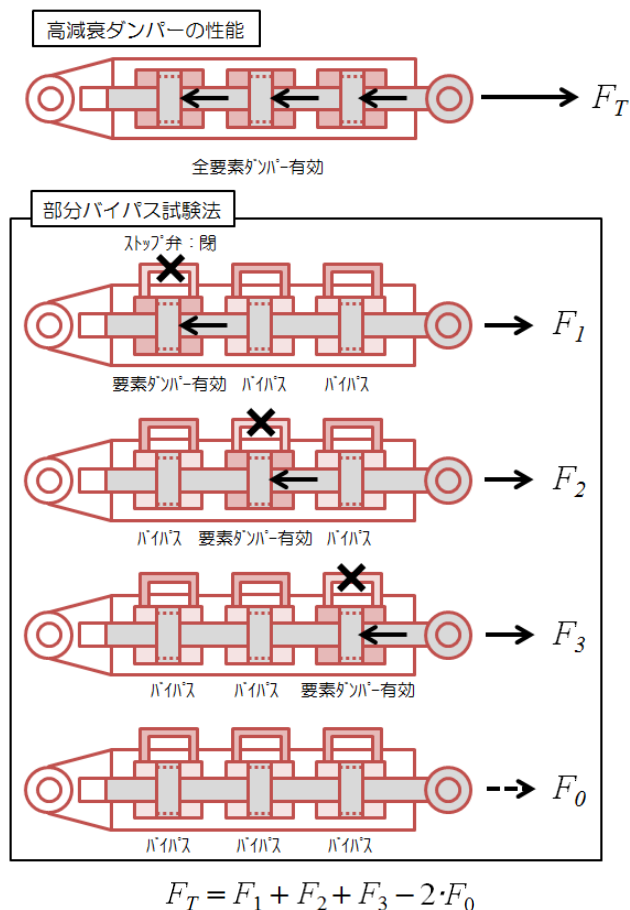


図 5 部分バイパス試験法

2.4 性能検証試験³⁾

開発品の型式試験として性能検証試験を実施した。試験項目として、減衰力発生特性が設定値通りであること、ダンパー自体が 6000kN という大荷重に対する安全性を有していること、長周期地震動が連続するような多数回繰返し加力に対してもオイルの温度上昇が許容値に対し十分な余裕度を有していること、および、出荷試験方法としての部分バイパス試験法が精度よく成立すること、の確認を行った。同試験のためには、高速度、大荷重で加力可能な試験機が必要であったので、米国・カリフォルニア大学が保有する施設を利用

した。試験状況を写真 2 に、加力概念図を図 6 に示す。加振台を高速で動かすことによりロッドが押し引きされ各要素ダンパーのピストンが動くことでダンパー試験体に減衰力が発生する。

減衰力特性試験結果を図 7 に示す。横軸がダンパー試験体に与えられた速度 v_d 、縦軸が発生した減衰力 F である。図中の黒実線は減衰力特性の設定基準値であり、破線は許容ばらつき範囲である。プロットで示した試験結果は設定値を満足し、当初の要求性能が実験的に確認できた。

また、その他の試験項目についても以下のように良好な結果が得られ、開発した高減衰オイルダンパーが十分実用に供せることが確認できた。

- ・6000kN を上回る最大荷重に対してもダンパー構造体は健全であった。
- ・多数回繰返し加力に対する余裕度は充分大きく、従来製品の余裕度の 2.5 倍程度であった。
- ・部分バイパス試験による評価値と性能検証試験の誤差は 3%以内であり、同試験法による出荷試験が精度よく成立することが検証された。

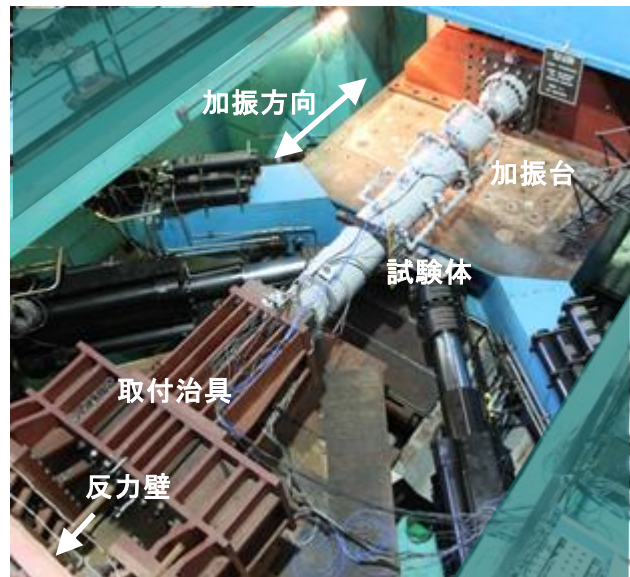


写真 2 高減衰オイルダンパー試験状況

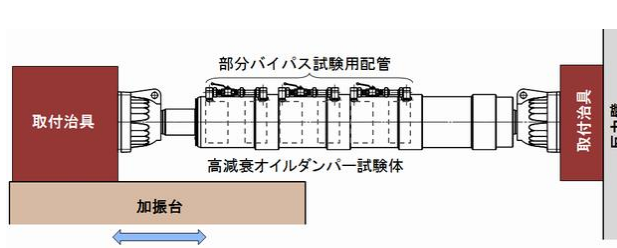


図 6 加力概念図

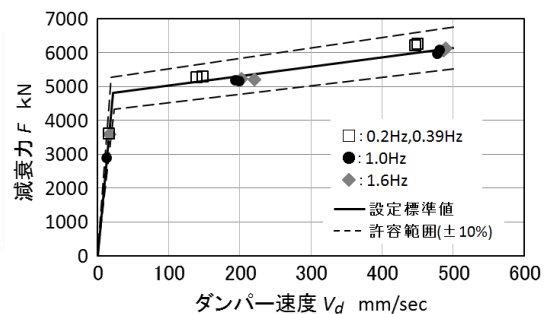


図 7 減衰力特性試験結果

3. 実施例

3.1 中之島フェスティバルタワーウエスト⁴⁾

大阪市の中心部に位置する、商業・文化施設、ホテル、オフィスなど複合的機能を有する超高層



名 称	中之島フェスティバルタワー・ウエスト
所 在 地	大阪市北区中之島3丁目
敷地面積	約 8,400 m ²
延床面積	約 150,000 m ²
構 造	鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造および鉄筋コンクリート造
規 模	地上 41 階、地下 4 階
建物高さ	約 200m
主な用途	事務所、ホテル、文化交流施設、店舗等
事 業 者	株式会社朝日新聞社、株式会社竹中工務店
設計・監理	株式会社 日建設計（構造・設備設計協力：竹中工務店）
施 工	株式会社 竹中工務店
竣 工	2017年3月

図 8 中之島フェスティバルタワーウエスト概要

建物である。地上 41 階、地下 4 階、延床面積約 150,000 m²、建物高さは約 200m である(図 8)。

同建物は、低層階(1 階～4 階)に商業施設、文化施設などを内包しており、これらの都市的機能を質的に優れたものとするために、また、それらをそれぞれ適時に更新することができるように、建築空間としてのフレキシビリティが要求された。一方で、これらの階層は、地震時に発生する力が相対的に大きくなるなど、建物全体の耐震性能確保の上で特に重要な部分であり、十分な量の制振部材を配置することが必要であった。そこで、高減衰オイルダンパー計 52 基がこれらの階層に配置された。冒頭に示した写真 1 は同建物建設中の高減衰オイルダンパー取付状況である。写真 3 には建設中に建物外部から撮影したダンパー取付状況を示す。

構造システム概念図を図 9 に示す。えんじ色でダンパー取付位置の部材を示す。高減衰オイルダンパーが建物外周に配置され、内部空間のフレキシビリティが確保されていることが示されている。

同建物は本技術を利用した「ハイグレードな制振構造」の最初の実施例である。

3.2 複雑な平面・立面形状を有する高層ビル⁵⁾

第二の例は、大阪市梅田地区に建設中の複合超高層建物である。高さ 54m の L 字形基壇部建物(商業・文化施設)の一部に高層オフィスタワーが設けられ、平面、立面とも複雑



写真 3 ダンパー取付状況(建設中の外観:
白い水平部材が高減衰オイルダンパー)

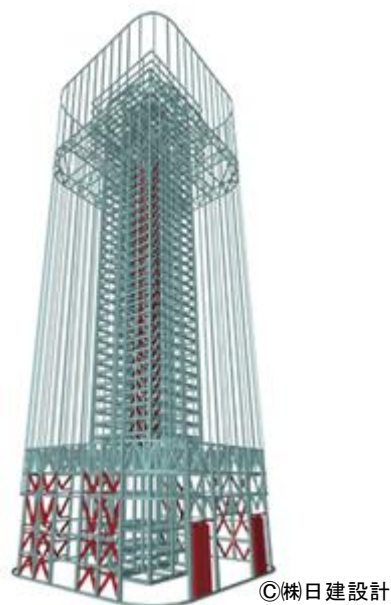


図 9 中之島フェスティバルタワー・ウエスト
構造システム概念図

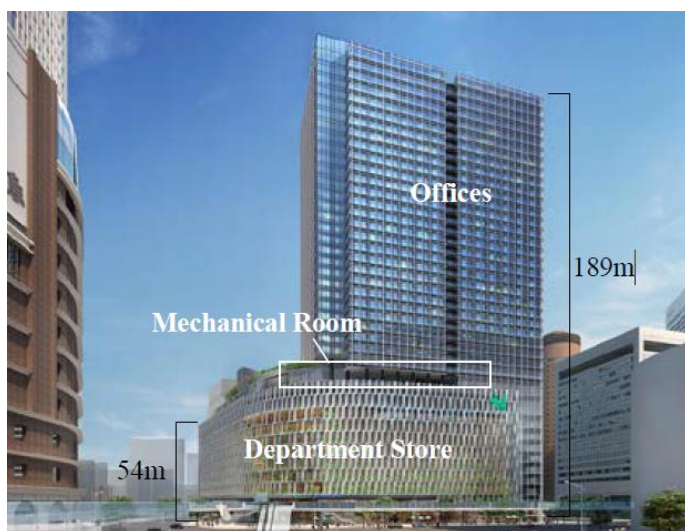


図 10 第 2 事例建物の外観及び用途構成概要

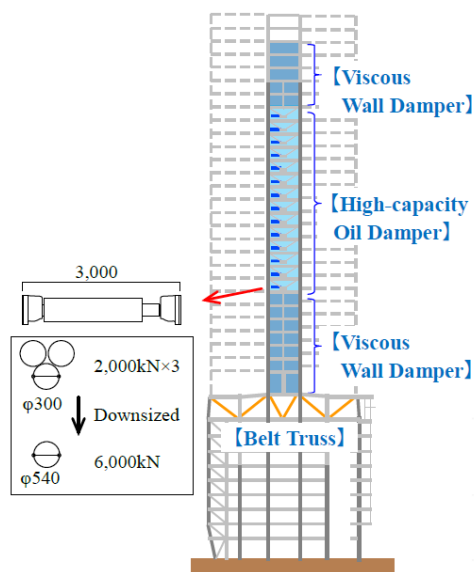


図 11 第 2 事例建物高層オフィスタワーの
ダンパー配置計画概要

な形状となっている。高層部の建物高さは 189m である(図 10)。

この建物では、複雑な形状に伴って生じる構造設計上の課題を解決して優れた耐震性を実現するために各所に制振部材を配置した計画が採られた。高層オフィスタワーにおいては、地震時に高次モード振動が発生する可能性を考慮して、その影響で変形が増大することを防止するために、制振性能を高めることが課題となった。ところが、開放的な執務空間を実現するための建築計画上の要請から、ダンパー設置個所数および個所ごとの寸法が制約された。この相反する課題を解決するため、高減衰オイルダンパー計 42 基をオフィスタワー中間部の 14 層に亘って設置する計画が採られた。図 11 中に示すように、既往技術である 2000kN ダンパーを 3 基束ねて配置する案に比べ、サイズダウンされることで設置が可能となった。

4. まとめ

大都市に展開されつつある大規模な超高層建物にはランドマーク建築に相応しい優れた耐震性が求められる。超高層建物に用いる地震対策技術としては、オイルダンパーを主要な制振部材として用いる制振構造が好適である。しかしながら、既往技術では、極大地震動を適切に考慮した耐震性を付与するためのダンパー設置個所を確保することと、建築計画上の要請とが相反する条件となり、難しかった。

本論文では、上記課題を解決し、「ハイグレードな制振構造」を実現する高減衰オイルダンパーの開発経緯と実施例を紹介した。本開発技術の特徴は、1 基で従来製品 3 基分の性能を発揮すること、荷重容量に比してコンパクトであり建物の柱梁に囲まれたスペースに収容可能であること、従来製品用の出荷試験機で性能検査が可能となり検査コスト増大を回避できること、などである。

本技術は大阪市内の 2 つの複合超高層建物に適用ないしは適用決定された。今後、優れた耐震性を実現する制振技術の主力として更なる展開を目指す所存である。

【参考文献】

- 1) 山本雅史, 嶺脇重雄, 二木秀也, 鴨下直登: 高容量オイルダンパーの開発(その 1) 全体概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp.727-728, 2014 年 9 月
- 2) 中原学, 露木保男, 火箱義文, 山本雅史, 嶺脇重雄, 曾根孝行: 高容量オイルダンパーの開発(その 3) 出荷試験方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp.731~732, 2014 年 9 月
- 3) 嶺脇重雄, 山本雅史, 曾根孝行, 中原学, 露木保男: 高減衰オイルダンパーの実大性能実験, 日本建築学会技術報告集 第 22 卷 第 52 号, pp.881-884, 2016 年 10 月
- 4) 吉田聡, 佐分利和宏: 中之島フェスティバルタワー・ウエストの構造設計, 日本建築総合試験所 GBRC165 号 (Vol.41, No.3), pp1-10, 2016 年 7 月
- 5) Kushima, S., Yamashita, Y., Murakami, R., Okuno, Y., Nakahira, K., Morishita, T.: Structural Planning for 189-Meter-Tall Damped Building with Irregularly-Shaped Plan and Elevation, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE, paper No. 3502, 2017

【備考】

本論文には、参考文献 1)~5) で発表された内容が含まれています。