

鉄筋コンクリート構造物用の 大地震対応 TMD の開発

セミアクティブ制御により建物の振動周期の変動に対応

中井 武・栗野 治彦

超高層建物の長周期地震動対策技術として、TMD (Tuned Mass Damper : 同調質量ダンパ) が用いられる事例が増加しているが、現在のところその適用対象の多くは鉄骨 (S) 造に限られており、鉄筋コンクリート (RC) 造の超高層建物への適用事例はほとんど見られない。RC 造の建物は経年や地震によって、躯体にひび割れが発生することにより建物の固有周期が徐々に長くなっていく特性をもつため、共振現象を利用して建物の揺れを抑制する TMD の適用が難しいためである。本稿では、この課題を解決するために開発された、セミアクティブ (電気制御) 式の大型 TMD について紹介する。

キーワード：制震, 鉄筋コンクリート造, TMD, セミアクティブ, 周期変動

1. はじめに

近年、大地震対応 TMD (Tuned Mass Damper : 同調質量ダンパ) の開発が活発に行われており、様々な機構の TMD が発表されている^{1)~3)}。筆者らは、2015年に高さ210mの鉄骨造の既存超高層建物の屋上に計1800tonの錘を有する大地震対応 TMD を設置して制震改修を行うとともに、地震や台風に対して期待通りの制震効果を発揮することを、観測記録の分析によって実証した¹⁾。屋上などの特定階に集中配置できる TMD は、建物の外観の変化や建物内部の使い勝手の悪化を最小限に抑えながら耐震安全性を向上させることができるため、とりわけ既存超高層建物の耐震改修構法として魅力的なシステムである。

図-1に TMD の原理を模式的に示す。振り子の周期を建物周期に同調させておくと、共振現象が生じ、振り子は建物より1/4サイクル (位相90度) 遅れて揺れるため、錘の反力は建物の速度に対する抵抗力 (減衰力) として作用する。なお図-1には示していないが、振り子の運動エネルギーに変換された建物振動エネルギーは、TMD に付属するオイルダンパにより熱と

して消散される。

一方、このタイプの TMD を鉄筋コンクリート造 (RC 造) に用いるには解決しなければならない課題がある。前述したように、TMD では振り子と建物の周期が同調することが大前提である。しかしながら、RC 造の建物は、地震時に躯体にひび割れが発生することによって、固有周期が初期の1.5倍から2倍程度まで長くなるという特性がある。長くなった固有周期は時間が経過しても、もとの固有周期には戻らないため、同調ずれを起こした TMD では期待通りの制震効果を発揮することができない。このような周期変動する対象に適用する TMD の既往の研究開発として、主に以下の3ケースがこれまで考えられてきた。1つ目の手法は、はじめから大地震によって周期が伸びた状態を想定し、それに対して TMD の同調周期を合わせておくというものである。この手法では従来通りの単純な機構で実現できるという利点があり、いくつかの実施例も報告されている⁴⁾。一方、このタイプの TMD は周期が伸びる前は十分な制震効果を発揮できないため、中小地震や風揺れに対する効果の面で課題が残る。2つ目の手法としては、互いに異なる同調周期を有する複数の TMD を設置することで、適用対象の周期変動に対して冗長性を持たせようというものである⁵⁾。この手法も従来通りの機構で実現可能であるが、変動する周期に対して全ての TMD が同調するわけではないので、投入した錘の総質量に対する制震効果の面で弱点が残る。また、複数の TMD を建物屋上の限られたスペースに設置しなければならないという

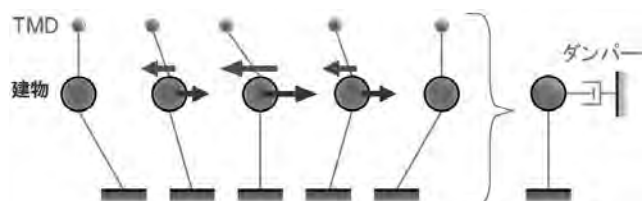


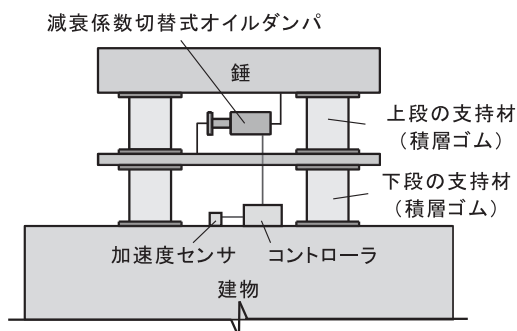
図-1 TMD の原理

面で実施上の制約も大きい。3つ目の手法として、TMDの剛性・減衰を可変とし、変動する周期に対して時々刻々追従させるというアイデアが提案されている⁶⁾。これが実現できれば全ての錘質量を振動周期に同調させることができるため、制震効率に優れる。しかし、超高層建物における大地震対応 TMD では、制震効果と設計可能なストロークを両立させるために 1000 ton 級の錘が必要となるため、これを安定的に支持しながら剛性を任意に変えられる支持機構を実現するのは容易ではない。

これら既往の手法の課題を解決するために、筆者らはセミアクティブ（電気）制御によって、適用対象の周期変動に適応可能な TMD を開発した^{7), 8)}。本 TMD では、減衰係数切替型のオイルダンパが周期調整と減衰付与の二役を担うため、剛性要素の操作を一切必要としない。そのため、大きな外部エネルギーを用いずに、単純な機構で幅広い周期帯域に適応することができ、RC 造の超高層建物や超高煙突など、様々な周期変動する対象に適応可能な合理的なシステムとなっている。本 TMD の開発項目は、機構の開発、設計法の構築、制御アルゴリズムの開発、振動台実験による確認など多岐にわたるが、本稿では TMD の機構の紹介と、原理確認のために行った振動台実験の概要を報告する。

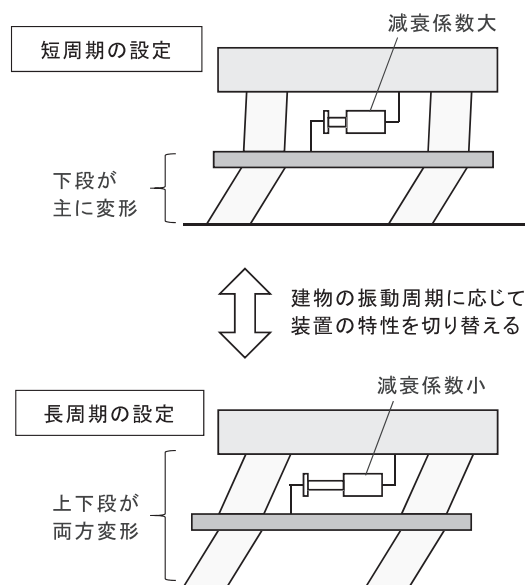
2. 基本構成と周期調整の原理

図一2に装置の基本構成を示す。TMDの復元力要素としては二段に積み重ねた積層ゴムを用いる。また、TMDの減衰要素として、一方の段に並列に設置した減衰係数切替型のオイルダンパを用いる。制御システムは、加速度センサとコントローラで構成される。地震の最中に、建物屋上での振動を加速度センサで計測し、コントローラに実装された新開発のアルゴリズムによって、オイルダンパの減衰係数をオンラインで切り替えることによって、TMDと建物の同調を保つ。



図一2 開発した TMD の基本構成

図一3に本 TMD の周期調整の原理を示す。オイルダンパの減衰係数が大きいときは、動的な荷重に対するオイルダンパの抵抗が大きくなるため上段の変形が拘束され、装置全体としては短周期の設定となる。一方、オイルダンパの減衰係数が小さいときは、上段・下段の両方の積層ゴムが大きく変形するため、装置全体としては長周期の設定となる。オイルダンパの減衰係数の設定に従って、装置の固有周期は連続的に変化していくが、制震性能という観点でみると2段階～3段階程度の切替えて RC 建物に対して十分な性能を発揮できる。なお本 TMD の対応可能な周期範囲は、上段と下段の積層ゴムの剛性比で決まるが、その設定は既往の TMD の最適設計式を準用して簡単に求めることができる⁷⁾。



図一3 周期調整の原理

3. 解析による効果の確認

上記で示した周期変動に適応可能な TMD の効果を確認するため、地震応答解析による検証を実施した。解析モデルは 30 階 (120 m) の RC 造超高層建物を質点モデルに置換したものとし、その最上階に有効質量比 5% (建物総質量の約 2%) の TMD を設置して応答を確認した。入力地震動として、超高層の設計に用いられる模擬地震動 (告示波 (極稀)) を入力した。

図一4に最大応答水平変位を示す。「従来型 TMD」は初期状態の建物に同調させた通常の TMD を、「可変 TMD」は今回開発した TMD を示す。従来型 TMD は、建物の塑性化によって振動周期が延びた状態では制震効果を発揮することができないため、TMD を設置しない場合と比較して、最大応答の低減

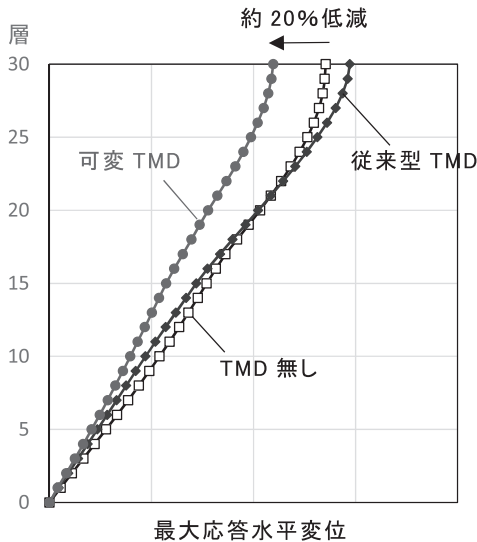


図-4 地震応答解析結果

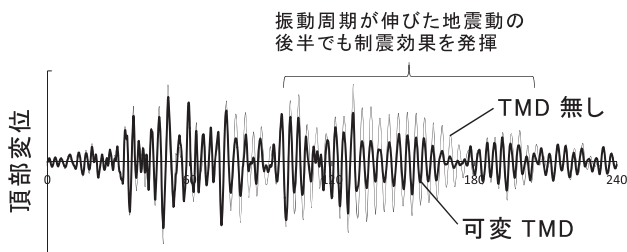


図-5 地震応答解析結果

効果は確認できない。それに対して可変 TMD は、建物の状態に追従して同調することが可能なため、TMD 無しと比較して 20% 程度最大応答を低減できていることが確認できる。また、図-5 に頂部変位の時刻歴を示すが、建物のひび割れなど塑性化が進行した地震動の後半部分においても、可変 TMD が制震効果を発揮していることが確認できる。

4. 縮小試験体の製作

本 TMD の原理を振動台実験により確認するための縮小試験体を製作した。写真-1 に試験体写真を、図-6 に試験体の立面図、断面図を示す。錘はプレキャストコンクリート製とし、錘重量は 40 ton とした。復元力要素は、上段は 2 段組、下段は 1 段の積層ゴムとした。可変減衰要素には新規に開発した減衰係数切替型のオイルダンパを用い、X・Y 両方向の実験を行うために十字型に配置している。

本試験体は高さ約 120 m の RC 建物の頂部に設置する TMD を想定しており、振動台の能力などの制約から、錘重量を約 1/10 に、TMD の周期を約半分にした縮小試験体である。

写真-2 に減衰係数切替型オイルダンパの単体試験

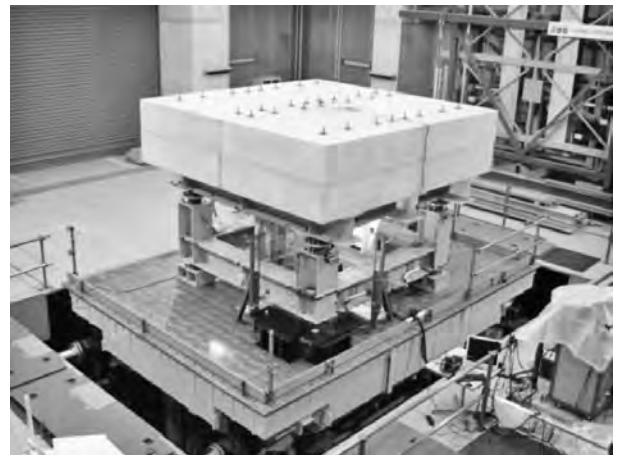


写真-1 振動台実験の試験体

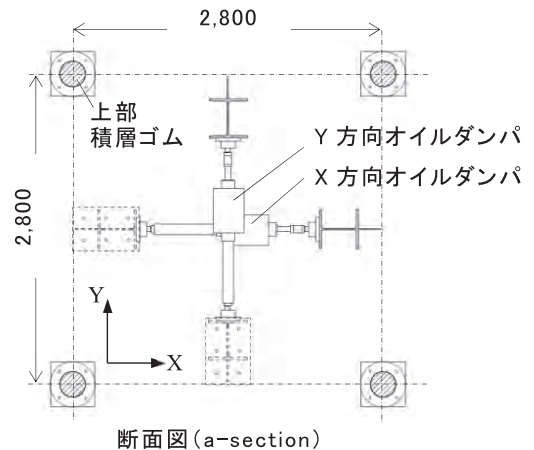
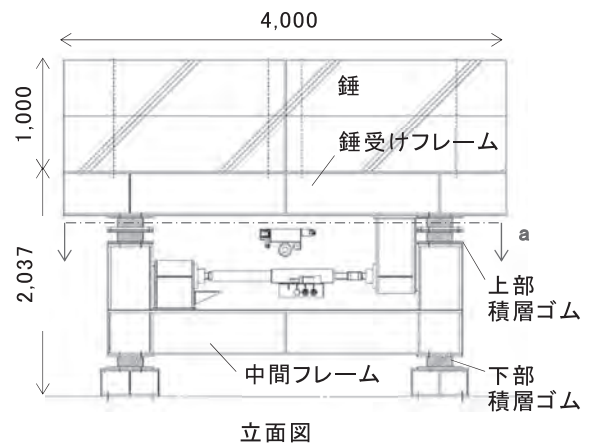


図-6 試験体の概要

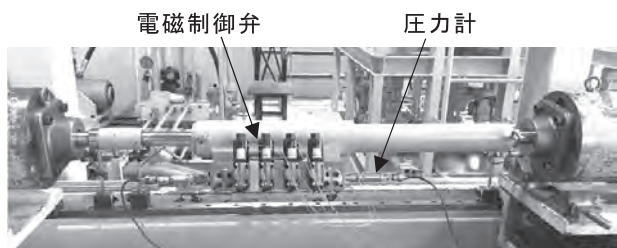
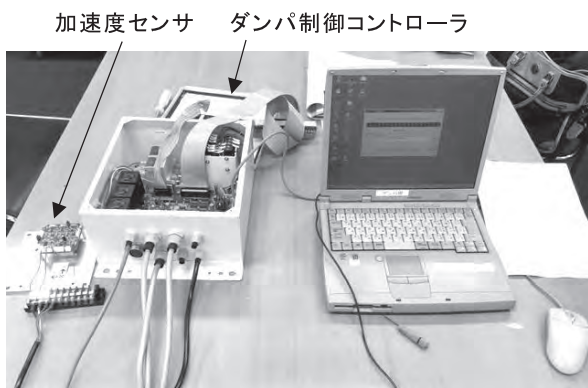


写真-2 減衰係数切替型オイルダンパの単体試験

験の様子を示す。このオイルダンパは4つの電磁制御弁を内蔵しており、電気制御によって各弁を開閉することで減衰係数を多段に切り替えることができる。本試験では、急激な内部油圧の変動などがないスムーズな切替動作が実現できていることが確認された。

写真-3に、振動台実験で用いた加速度センサとダンパ制御コントローラを示す。加速度センサは高層建物の被災度判定システムで多数の実績がある静電容量式の製品を採用した。この加速度センサは1つのユニットでX・Y両方向の計測を行うことができる。

ダンパ制御コントローラは、加速度計からの信号を分析して制御の要否を判定し、オイルダンパの制御弁を開閉する。本コントローラは、常時フィルタ処理や制御のための解析処理を実行し続けることになるが、消費電力は最大でも150W程度とわずかである。また故障に対する自己チェック機能と、断電や過大入力に対するフェイルセーフ機能を備えた耐久性と信頼性の高いシステムとなっている。



PCはコントローラの内部プログラムの書換え用
写真-3 制御システム

5. 振動台実験

図-7に振動台実験の制御系の配線図を示す。振動台のテーブル面を建物屋上に見立て、テーブル上に制御用の加速度センサを設置する。加速度センサの計測記録はコントローラに送信され、専用のアルゴリズムによって建物の振動状態が分析され、自動的にオイルダンパの減衰係数の切り替えが行われる。

TMDの周期調整の原理を実験的に確認するために、正弦波を入力してオイルダンパの減衰係数とTMDの共振振動数の関係を確認した結果を図-8に示す。図の横軸は振動台から入力された正弦波の振動数、縦軸は加速度応答倍率（錘の応答加速度の最大値／振動台加速度の最大値）を示す。オイルダンパの減衰係数を小さくするにしたがって、TMDの共振振動

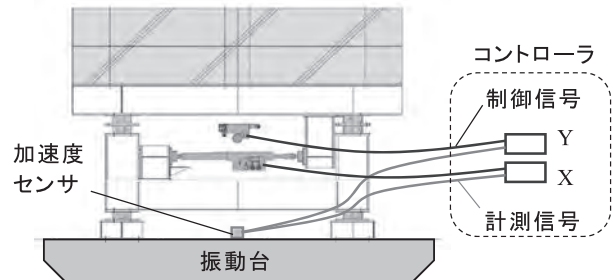


図-7 振動台実験の制御系

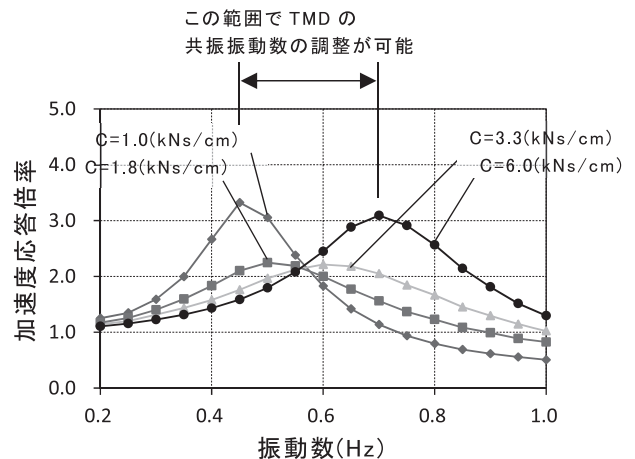


図-8 試験体の加速度応答倍率

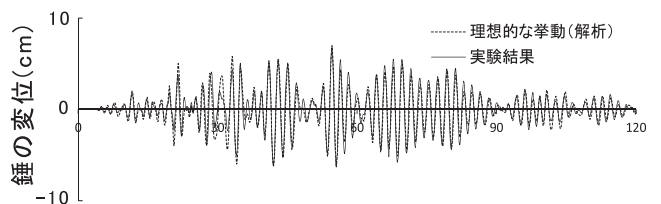


図-9 錘の変位の時刻歴

数（加速度応答倍率のピーク振動数）も小さくなっている。この結果から、試作した試験体は剛性要素の操作なしに、0.45～0.70 Hzの広い振動数帯域に共振振動数を変化させられることが確認された。

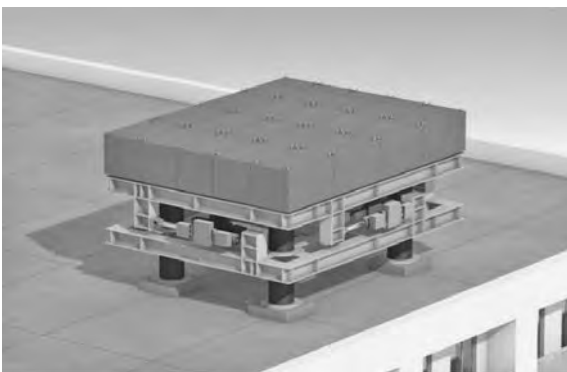
図-9に地震応答波加振実験の結果を示す。ここでは、TMDを設置したRC造建物に地震動を入力した際の、屋上の応答加速度を解析によって求め、それを振動台への入力として用いた。図中には解析から得られた、理想的に挙動した場合の錘の変位時刻歴を併記しているが、解析結果は実験結果と良好に対応しており、試験体が想定通りの挙動を示していることが確認できた。また、コントローラの所定通りの動作も併せて確認している。

6. 効果と特長

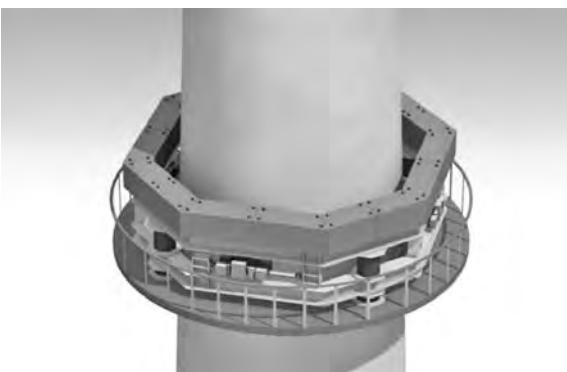
以下に本TMDの効果と特長をまとめる。

- ①年単位の長期的な周期変動だけでなく、地震動の最中に時々刻々変化する構造物の振動状態に追従し、揺れを効果的に抑制可能
- ②風揺れから大地震までの様々なレベルの揺れに有効であり、方向による周期の違いにも対応できるため、建物全方向の揺れを一つの装置で抑制可能
- ③ TMD を設置した場所の情報のみで建物の振動周期を判断するため、それ以外の場所へのセンサやコントローラの設置や配線が不要
- ④屋外使用（全天候型）に対応しており、建物屋上や煙突など、様々な場所に設置可能
- ⑤消費電力は制御時でも 150 W 程度とわずかであり、小型の無停電電源装置（UPS）で停電時にも作動する。万一の断電時にはパッシブ型の TMD に切り替わり、さらに設計想定以上の地震時にも錘の動きを安全に制御する、ソフト・ハード両面のフェイルセーフ機構を内蔵する。

図一 10 に RC 超高層住宅への設置例を、図一 11 に RC 超高煙突への設置例を示す。本 TMD の基本構成は適用対象の条件に応じて、様々な形状で実現することが可能であり、実適用に当たっては最適な形状を物件ごとに検討・設計する予定である。



図一 10 RC 超高層住宅への設置例の CG



図一 11 RC 超高煙突への設置例の CG

7. おわりに

本稿では、鉄筋コンクリート造建物などの周期変動する構造物に適用可能な大地震対応 TMD の開発について報告した。本開発により、鉄骨造の建物に加え、鉄筋コンクリート造の超高層建物や超高煙突への大地震対応 TMD の適用が可能となった。

TMD による制震構法は、屋上などの特定階に制震機能を集中させることができるため、居住空間への影響を最小限に抑えることができ、建物内部に制震装置を設ける一般的な制震構法には無い優れた価値を提供することができる。今後、本技術の適用を積極的に推進し、鉄筋コンクリート造構造物の安全性の向上に寄与していきたい。

JCMA

《参考文献》

- 1) Nakai, T, Kurino, H, et al.: Control effect of large tuned mass damper used for seismic retrofitting of existing high-rise building. Japan Architectural Review. vol.2, issue 3, p.269-286, 2019.7
- 2) Sone, T, et al.: Experimental verification of a tuned mass damper system with two-phase support mechanism. Japan Architectural Review. vol.2, issue 3, p.250-258, 2019.7
- 3) Ishikawa, Y, et al.: Development and analysis of long stroke tuned mass damper for earthquakes. Japan Architectural Review. vol.2, issue 3, p.259-268, 2019.7
- 4) Makino, A, et al.: Seismic Vibration Control of a High-rise R.C. Building by a Large Tuned Mass Damper Utilizing Whole Weight of the Top Floor, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.10
- 5) 岩浪孝一, 背戸一登: 2 個の複合動的吸振器の最適設計法とその効果, 日本機械学会論文集 (C 編), 50 巻 449 号, p.44-52, 1984.1
- 6) Nagarajaiah, S.: Adaptive Stiffness Systems: Recent Developments in Structural Control Using Semiactive/Smart Variable Stiffness and Adaptive Passive Stiffness, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010.7
- 7) 中井武, 栗野治彦: 周期変動に適用可能なセミアクティブ同調質量ダンパの機構及び設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 83 巻 744 号, P.233-243, 2018.2
- 8) 鹿島建設(株): 鉄筋コンクリート構造物用の大地震対応 TMD 「D²SKY-RC」を開発～建物の振動周期の変動に対応した、セミアクティブ式(電気制御式) TMD ～, プレスリリース 2019.3

【筆者紹介】



中井 武 (なかい たけし)
鹿島建設(株)
建築設計本部 構造設計統括グループ
チーフ



栗野 治彦 (くりの はるひこ)
鹿島建設(株)
建築設計本部 構造設計統括グループ
統括グループリーダー, 博士 (工学)