

屋上に超大型制震装置（1800 t）で 長周期地震動の揺れを半減

栗 野 治 彦

TMD（Tuned Mass Damper：同調質量ダンパー）は古くから知られる制震技術の一つであり、建物屋上に集中設置するだけで良いため一般居室階に影響を与えることなく工事が可能であり、既存建物の制震改修には魅力が大きいシステムである。しかしながら超高層ビルの大地震対応とするには、千トン単位の巨大な錘を安全に支持しつつ、2～3 mに達する錘の動き（ストローク）を安全に制御する錘支持機構やオイルダンパーが課題であった。本稿では、上記の課題を解決して開発された錘総重量 1800 t の超大型 TMD の概要と、本装置を適用した既存超高層ビルの長周期地震動対策事例について紹介する。

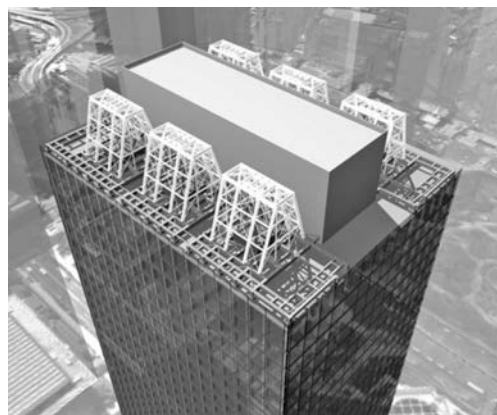
キーワード：長周期地震動、既存超高層ビル、制震改修、レトロフィット、TMD、オイルダンパー

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震では首都圏の超高層ビルが長時間にわたり揺れ続け、主要構造体には大きな損傷はなかったものの、天井や間仕切壁などの非構造部材の被害や居住者の恐怖心の問題がクローズアップされ、長周期地震動対策の重要性を強く印象付けた。南海トラフの巨大地震では更に大きな長周期地震動が発生するものと予測されており、耐震安全性はもちろん、居住者の安心感を高める上でも長周期地震動対策は急務である。

長周期地震動の様な継続時間の長い共振的振動には制震装置による減衰付加が効果的であるが、中でも TMD（Tuned Mass Damper）は建物の特定箇所に集中設置できるため、既存建物の制震改修など一般居室階へのダンパー設置が困難な場合には魅力あるシステムである。しかしながら、これまで超高層ビルを対象とした大地震対応の TMD は実用化されなかった。大規模な超高層ビルでは必要な錘重量が千トン規模におよぶが、こうした巨大な錘を安全に支持しつつ 2～3 m に達する錘の動き（ストローク）を許容する錘支持機構やオイルダンパーの実現性の問題、更には建物頂部に千トン規模の重量物を設置することに対するフェイルセーフの問題等が障害になっていたものと考えられる。特にストロークの問題は重要であり、対象地震動に対しては十分な制御効果を発揮しつつ、設計想定を上回る地震時にもストロークオーバー（装置の損傷）を回避する制御技術が必要である。

本稿では、上記の課題を解決して開発された、ストローク制御機能を内蔵した超大型 TMD の概要と、本装置を適用した既存超高層ビルの長周期地震動対策事例について紹介する（図－1）。



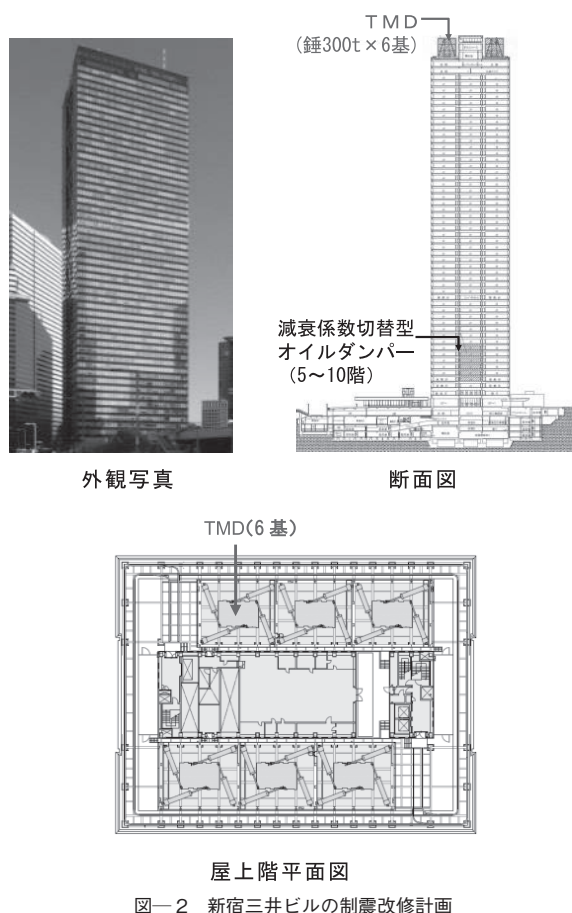
図－1 超大型 TMD の設置イメージ

2. 既存超高層ビルの制震改修計画

対象建物である新宿三井ビルは、今から 40 年前の 1974 年に竣工した、軒高 210 m、地上 55 階建の鉄骨造オフィスビルである。安全・安心、BCP ニーズへの対策強化を進めている事業者の要望は、「将来の長周期地震動に対するこのビルの揺れを最新の超高層ビル並に抑え、居住者の安心感を高めたい」というものであった。本建物のコア周辺部は、スリット壁と呼ばれる RC 耐震壁で占有されているため、一般のダンパーと比較して設置台数の低減が可能な、高効率な減

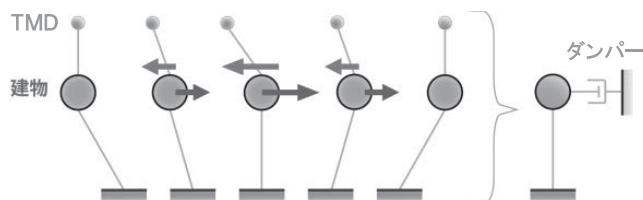
減衰係数切替型オイルダンパー¹⁾を居室階の窓際に設置する案を基に検討を開始したが、眺望障害や室内工事が発生するという理由で再検討が求められ、最終的に新開発の超大型 TMD による制震補強案に到達した。なお短辺方向については、専有部に影響を与えないコア共用部の 5～10 階に前述の高効率な減衰係数切替型オイルダンパーも設置することとし、長周期地震動に対する余裕度を向上させる計画としている。建物および制震計画の概要を図一 2 に示す。

TMD の総合性能（制震効果のみならず地震特性や建物特性の変動に対する安定性など）は錘の重量に依存し、建物重量に対する錘重量の比が小さ過ぎると効果を発揮できず、ストロークも過大となる²⁾。本建物用 TMD は錘 300t を 1 ユニットとし、屋上階に合計 6 基（錘合計 1800t）を設置する計画とした。大地震に対して安定した効果を期待できる、建物有効質量の 6% 強（地上部質量の 2% 強）の質量比となっている。



3. TMD の原理

図一 3 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、共振により振り子は建物より 1/4 サイクル（位相 90 度）遅れて揺れる



図一 3 TMD の原理

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。なお図一 3 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ーにより熱として消散される。

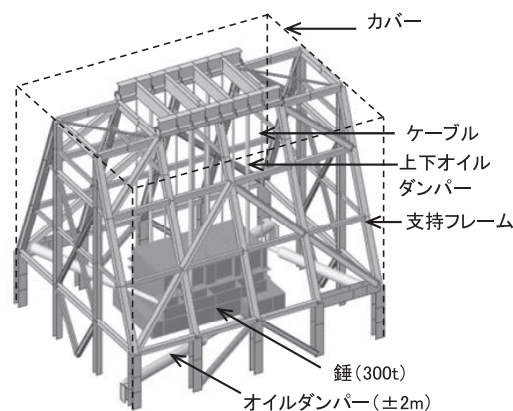
4. 超高層用大地震対応 TMD

(1) 構成

図一 4 に本 TMD の構成を示す。錘支持機構として構造用ケーブル 8 本による懸垂式（吊長 8 m）を採用し、水平全方向に対して ± 2 m 可動できる構造とした。水平運動を制御する大型オイルダンパー 4 台に加え、上下地震動によるケーブルの張力変動を抑えるため、ケーブルと並行に上下方向用オイルダンパーも設置している。

本 TMD はタワークレーンで揚重できる重量・大きさのパーツに分割できる構造になっており、揚重後に屋上で高力ボルト等により接合する。ちなみに 300t の錘は 60 mm の鉄板を積層した後、PC ケーブルで緊結する構造となっている。ケーブル懸垂式は摩擦等の抵抗力が小さいため、高感度な水平オイルダンパーの性能と相まって、風揺れから長周期地震動まで幅広いレンジの外乱に対応できる高性能 TMD が実現した。

本 TMD のレイアウト設計に当たっては、限られた屋上のスペースの中で、TMD 構成要素の相互干渉を避けながら、錘の可動範囲（ ± 2 m）を確保すること



図一 4 TMD の構成

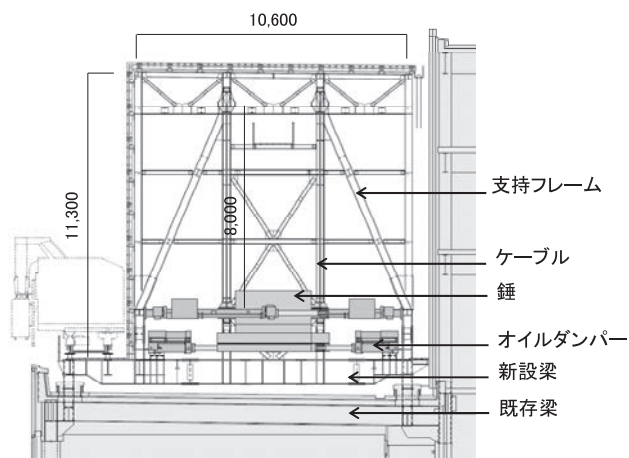


図-5 TMD 断面図

がポイントになったが、新宿三井ビルが位置する西新宿エリアは、地域冷暖房のため屋上に設備機器等がなく、大型 TMD の設置が可能であった条件が大いに幸いした。なお、TMD は屋上階の既存梁に負担を与えないよう、梁背 1 m の新設梁上に設置することで、最上階の既存の柱梁に対する補強量を最小限に留めている (図-5)。

(2) 新開発オイルダンパー

本システムの実現に重要な役割を果たしているのが、図-6 および図-7 に示す新開発の大型オイルダンパー (取付長約 8 m, ストローク ± 2 m, 最大許容荷重 1000 kN) である。 ± 2 m の大変形に追従して TMD に必要な減衰を付与するだけでなく、万一の際に錘を安全に制御する機能が盛り込まれている。

1 つ目の機能は、ダンパー速度 (シリンダ圧力) が一定値以上に達すると、電気を使用することなく自動的に減衰係数が切り替わって急激に抵抗力を増大させ、錘の速度 (運動エネルギー) を制限することで変位量を抑制する機能である。本オイルダンパーの油圧回路図を図-8 に、荷重-速度関係を図-9 に示す。本オイルダンパーは 2 系統の調圧弁を備えており、閾値荷重 F_1 以下では両方が作動することで TMD の所期減衰 (最適減衰係数) を発揮する。速度レベルの増大に応じて内圧が高まり、荷重が F_1 に達すると、I 系統の調圧弁 A を操作するパイロット弁①が閉じることで II 系統の調圧弁 B のみの特性となり、急激な減衰係数の増大が実現される。しかし、そのままでは荷重が上昇から下降に転じて F_2 よりも低下した時にも調圧弁 A は閉じたままの状態となり、所期の減衰特性に復帰しない。そこで、減衰係数切替型オイルダンパー¹⁾で開発した油圧回路 (III 系統) を導入し、 F_2 よりも荷重が低下すると調圧弁 A を開くようにパ



図-6 オイルダンパーの外観写真

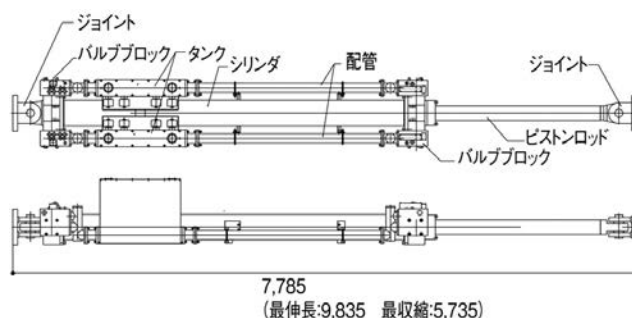


図-7 オイルダンパーの外形図

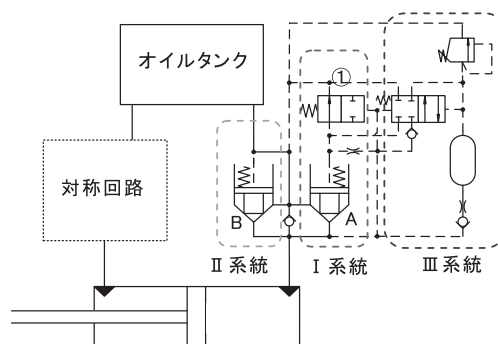


図-8 オイルダンパーの油圧回路図

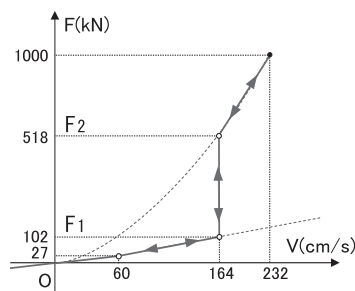


図-9 オイルダンパーの減衰特性

イロット操作することにより、減衰特性が所定の速度で非線形弾性的に切り替わることを可能としている。このオイルダンパーにより、対象とするレベルの地震に対しては TMD として最適な特性を発揮しつつ、想定以上のレベルでは効率的に過大な錘移動を回避して装置の安全性を高めることを可能としている。

更に、本オイルダンパーのシリンダ油圧室端部にはバッファが設けられており、ストロークが許容値に達した場合にはバネとなって抵抗する緩衝材として機能

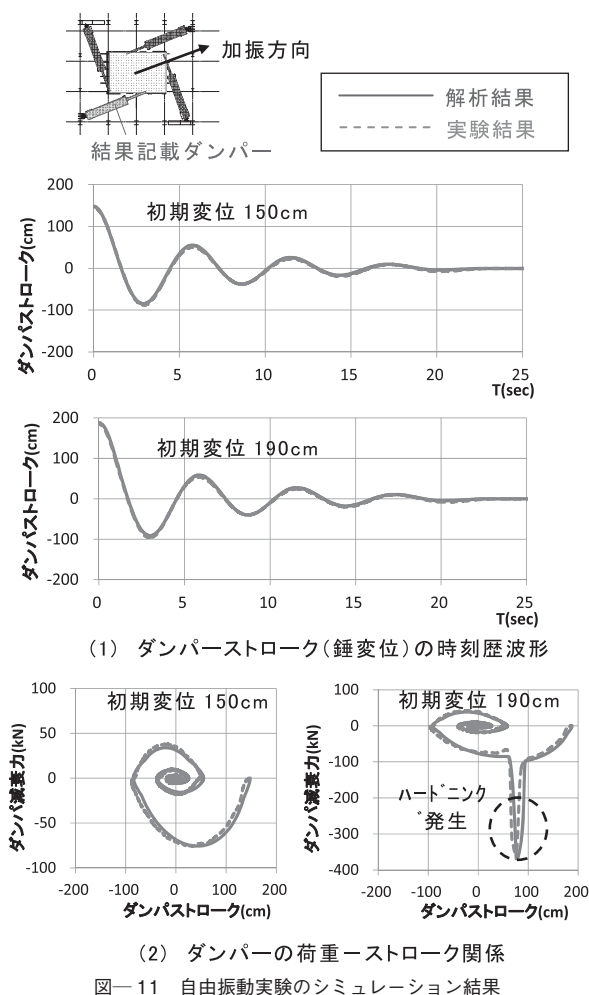
する。当然、オイルダンパー本体や取付フレームは、万一の衝突時の荷重（最大 1000 kN）にも耐えられる余裕のある強度設計が施されている。これらの機能を備えることで、高い制御効果と安全性の両方を同時に実現している。

(3) 実大モックアップ試験

本工事に先立ち、実大モックアップを別敷地にて施工し、性能確認実験を実施した。モックアップの全景



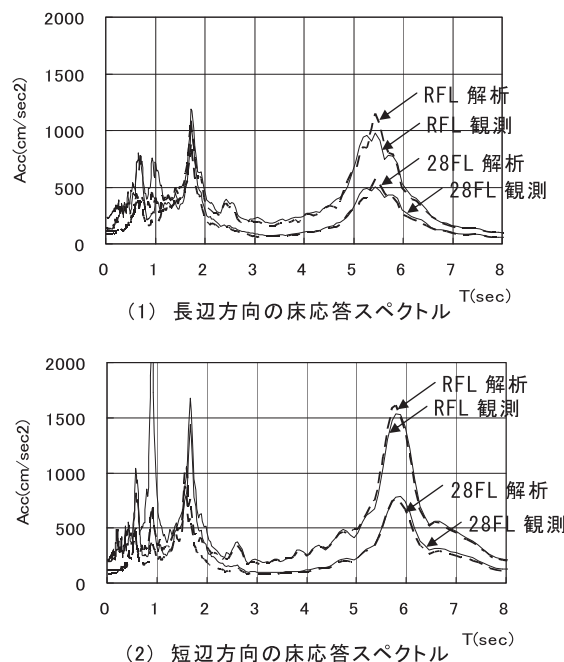
図—10 実大モックアップ



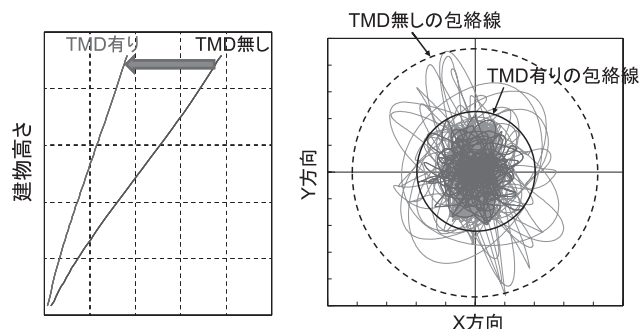
を図—10に示す。ストローク ± 60 cmのシールド用ジャッキ4台を直列に連結した治具を用いて錘に最大2 m近い初期変位を与え、自由振動実験を実施した。ケーブルやフレームに軋み音等もなく、オイルダンパーは図—9に示した所期の減衰特性を発揮して極めてスムーズに稼働することを確認した。計測された錘の動的挙動とシミュレーション結果と比較した一例が図—11である。オイルダンパーのハードニング発生状況を含めて両者はほぼ完璧に一致しており、構造設計に用いた解析モデル・手法の正しさが確認された。

5. 制震効果に関するシミュレーション

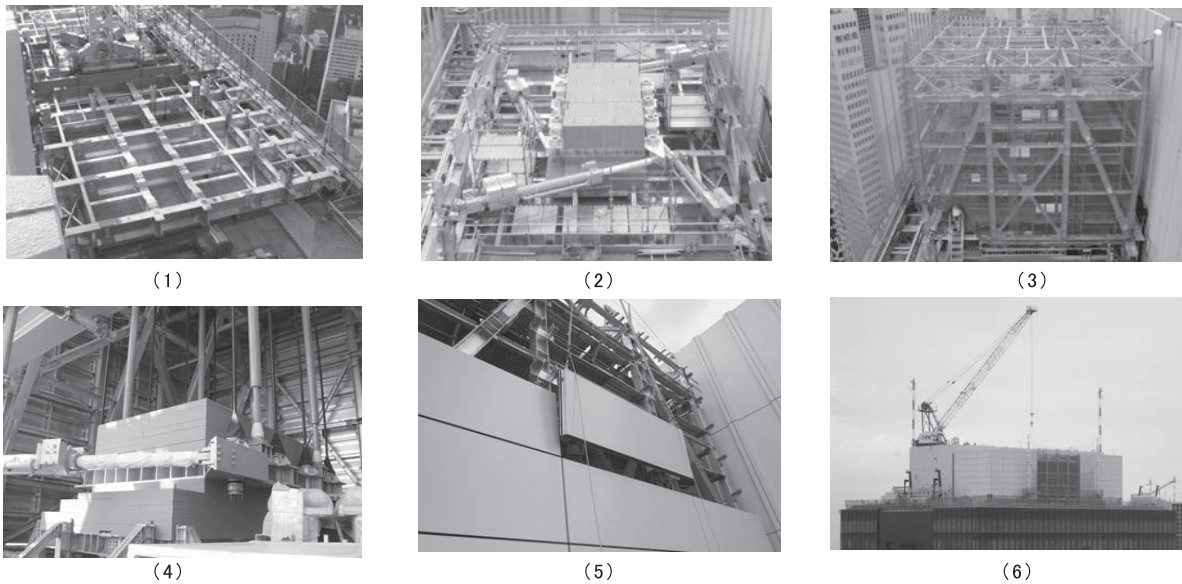
地震応答解析による制震効果の評価に際しては、建物を立体骨組モデルで表し、基部にロッキングばねを考慮するものとした。本モデルの妥当性については、東北地方太平洋沖地震の際に本建物で計測された地震記録のシミュレーション解析を通して確認している。



図—12 観測記録と解析結果の比較（東北地方太平洋沖地震）



図—13 制震効果のシミュレーション結果（東北地方太平洋沖地震）



図一 14 屋上階での TMD 施工状況

図一 12 に、屋上階と 28 階の観測記録と本建物モデルを用いた解析結果の床応答加速度スペクトルを比較して示す。両方向共に観測結果と解析結果は良好に対応していることが確認できる。

図一 13 は、東北地方太平洋沖地震に対する制震効果を示したものである。左図は建物全体変形、右図は最上階の床の 2 次元的な動きを示したものであり、全ての方向に効果を発揮して揺れを半減していることが分かる。なお、十分な錘重量を確保しているため、直下型地震に対する応答も 15 ～ 20% 程度低減可能である。このように、本 TMD は、風揺れから大地震までダイナミックレンジの広い外乱に対応可能な、高感度でかつロバストな制震装置である。

6. 施工

新宿三井ビルの制震改修工事は、執務者が居る中で夜間および休日を中心に施工が行われた。2013 年 8 月に開始し、2015 年 4 月に無事完了した（施工期間 21 ヶ月）。TMD の施工に当たっては、敷地内の 3 階レベルに構台を設けて接道から荷取りを行い、屋上階には 2 基のタワークレーンを新設の支持フレームに設置し、地上から 200 m 以上の屋上階まで材料を吊り上げては順次 1 基ごと組み立てていった。大勢の人々が利用中の超高層建物屋上階での工事ということで、騒音、浸水、飛散・落下等の対策には細心の注意が払われたことは言うまでもない。

図一 14 に TMD の施工状況を示す。

- (1) 補強した既存梁上に支持フレームを構築する。
- (2) 支持フレーム上で錘を組み立て、4 台の水平オ

イルダンパーを設置する。

- (3) TMD 架構（鉄骨フレーム）を構築する。
- (4) 錘—TMD 架構間に、8 本のワイヤと 4 台の上下オイルダンパーを取り付け、錘下部に設置した油圧ジャッキを下ろすことで、TMD フレームより錘を懸垂する。
- (5), (6) TMD 架構の側面および屋根面に外装となるアルミパネルを取り付けて完了。

なお、今後の地震あるいは強風時に、建物全体の挙動とともに TMD の観測記録を得ることができるよう、TMD6 基のうち 2 基の錘と屋上床面に加速度計を設置している。

7. おわりに

成熟したストック時代に入った日本では、今後レトロフィットの需要が増していくことは明らかであり、建物使用性を低下させずに耐震性の向上が可能な制震改修への期待・要望はますます高まると考えられる。特に、既存超高層のテナントビルの場合は一般居室階への影響回避が強く求められるため、新築以上に制約が大きい場合が多い。制震改修技術の新たな選択肢として加わった本 TMD は、「建物居住者に影響を与えない制震改修」を実現する一つのソリューションであり、ユニット数や吊り長の調整により、幅広い規模・形状の建物に対応可能なフレキシブルで汎用性の高いシステムである。今後も適用対象の拡大に応じた改良・改善の努力を続けていきたいと考えている。

謝 辞

新宿三井ビルの設計に当たっては、三井不動産(株)、三井不動産アーキテクチャル・エンジニアリング(株)、(株)日本設計より多大なご協力を頂きました。また、オイルダンパーの開発に当たっては、日立機材(株)に多大なご協力を頂きました。この場を借りて謝意を表します。

J C M A



【筆者紹介】

栗野 治彦（くりの はるひこ）
鹿島建設(株)
建築設計本部
グループリーダー

《参考文献》

- 1) 栗野治彦, 田上淳, 山田俊一, 松永義憲: エネルギー吸収効率に着目した ON/OFF 型パッシブダンパ (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21034-21035, 2004 年 8 月
- 2) 栗野治彦, 狩野直樹, 小田衛ほか: ストローク制御機能を有する超高層ビル用大地震対応 TMD の開発 (その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21375-21377, 2014 年 9 月

「建設機械施工ハンドブック」改訂 4 版

建設機械及び施工の基礎知識, 最新の技術動向, 排出ガス規制・地球温暖化とその対応, 情報化施工などを, 最新情報も織り込み収録。

建設機械を用いた施工現場における監理・主任技術者, 監督, 世話役, オペレータなどの現場技術者, 建設機械メーカー, 輸入商社, リース・レンタル業, サービス業などの建設機械技術者や, 大学・高等専門学校・高等学校において建設機械と施工法を勉強する学生などに必携です。

建設機械施工技術の修得, また1・2級建設機械施工技士などの国家資格取得のためにも大変有効です。

[構成]

1. 概要
2. 土木工学一般
3. 建設機械一般

4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令
6. トラクタ系機械
7. ショベル系機械
8. 運搬機械
9. 基礎工事機械
10. モータグレーダ
11. 締固め機械
12. 舗装機械

●A4判／825ページ

●定 価

一般: 6,480円 (本体6,000円)

会員: 5,502円 (本体5,095円)

※送料は一般・会員とも沖縄県以外は600円, 沖縄県1,050円

●発行 平成23年4月20日

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>