

TODA BUILDING の構造計画と開発技術の適用

STRUCTURAL PLANNING OF THE TODA BUILDING AND ADOPTION OF DEVELOPED TECHNOLOGIES

川又哲也^{*1}, 清水隆^{*2}, 桑素彦^{*3}, 太田行孝^{*3}, 得能将紀^{*1},
 千田啓吾^{*1}, 仁科智貴^{*1}, 吉江一馬^{*1}, 稲井慎介^{*4}, 竹中啓之^{*5},
 西村英一郎^{*4}, 丸尾純也^{*4}, 大月智弘^{*4}

Tetsuya KAWAMATA, Takashi SHIMIZU, Motohiko KUWA, Yukitaka OHTA, Masaki TOKUNO,
 Keigo SENDA, Tomoki NISHINA, Kazuma YOSHIE, Shinsuke INAI, Hiroyuki TAKENAKA,
 Eiichirou NISHIMURA, Junya MARUO and Tomohiro OTSUKI

The TODA BUILDING is a 165-meter-tall high-rise building that applies a seismic isolation structure to achieve the goal of strengthening the region's disaster prevention capabilities as part of the Special District for Urban Regeneration. A super-high-rise seismic isolation structure is required to ensure high horizontal rigidity and strength, as well as stability in wind-resistant conditions. Aiming to ensure the highest level of earthquake resistance in Japan's largest high-rise building that applies a seismic isolation structure, the structural plan uses a double H-shaped core wall arranged three-dimensionally, as the spine structure, and uses outrigger frames and damping beams. This leads to prevention not only of structural damage, but also of furniture from sliding or falling over by reducing the response acceleration of every floor to 2.0m/s² or less during large earthquakes, thereby differentiating it from other high-rise buildings. The seismic isolation system incorporates two newly developed types of oil damper with the aim of improving performance against a wide range of disturbances, from small earthquakes to massive earthquakes. The TODA BUILDING also serves as a demonstration of the company's own technologies that it has been researching and developing. This report provides an overview of the TODA BUILDING's structural plan and the technologies that apply it.

Keywords : core wall, seismic isolation structure, outrigger frames, damping beams, Concrete Filled Tube

コアウォール, 免震構造, アウトリガー架構, 制振梁, CFT 柱

1. はじめに

TODA BUILDING は都市再生特別地区の認可を受け、京橋一丁目東地区のB街区として、戸田建設旧社屋跡地に計画し、新社屋の建て替えを含む地上28階、地下3階、高さ約165mの大規模開発である。容積率1,300%まで割り増しを受け、延床面積は約95,000m²である。

TODA BUILDING は、都市への貢献として、

- 1) まちに開かれた、芸術・文化拠点の形成
- 2) 街区再編、防災対応力の強化、環境負荷低減

を掲げた。旧社屋の投影面積と同程度の広場を前面道路に面して開放し、内外をつなぐ広大な広場空間として、前面道路に対して新たな都市景観を形成した。建物内外に渡り、集まる様々な人々が集結し、個性・技術・理念を触発し、融合進化させ、新たなイノベーションを行う創造の場、人のための、人を中心としたプラットフォームの形成を目指した。

防災対応力の強化を実現するため、TODA BUILDINGでは免震構造を基本として、設計・施工の幅広い研究開発で得られた自社技術を適用し、実証を行っており、本報告では、TODA BUILDINGの構造計画と採用した構造関連開発技術の概要について報告する。



図1 外観パース

*1 戸田建設(株)本社構造設計部 修士(工学)

*2 戸田建設(株)本社構造設計部 学士(工学)

*3 戸田建設(株)本社構造設計部 博士(工学)

*4 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*5 戸田建設(株)技術研究所 博士(工学)

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, M. Eng.

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, B. Eng.

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, Dr. Eng.

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M. Eng.

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, Dr. Eng.

2. 構造計画

TODA BUILDING では、エレベーターシャフトを利用した平面形状がダブル H 形の RC コアウォールを心棒として立体的に配置し、アウトリガー架構を併用して水平剛性と耐力を確保することで、高さ165m の国内最大級の免震建築に「想定外を起こさない」最高クラスの耐震性能を付与することを目標とした。図2に構造計画概要を示す。コアウォールが建物の心棒となることで地震エネルギーを各層に分散でき、特定層の崩壊を防止することができる。また、地震力の大半を負担することで、外周架構の細柱化や低層階での魅力的な空間づくりを容易に実現することが可能となった。さらに、一般的な鉄骨造オフィスビルでは実現が難しい地震時の揺れの抑制（大地震時の床応答加速度 2.0m/s^2 以下）により、構造体のみでなく事務室内機器の転倒防止や設備機器・内装材の被害を最小化することができた。

構造種別は、鉄筋コンクリート造、鉄骨造（柱 CFT 造）、一部鉄骨鉄筋コンクリート造で、免震層を1階床下に設けた中間層免震構造を採用した。

架構は、基準階でコア部に2本の H 形立体耐震壁を配置し、それぞれのフランジ・ウェブ位置にアウトリガー架構を設けた構造である。アウトリガー架構は、RC・S 複合梁（TO-RCSB）を用い、外周部下層階では高強度 CFT 柱（高強度 Super CFT 柱：最大 780N/mm^2 級鋼材+Fc150）と接続しており、高い剛性確保と有効な曲げ戻し効果が期待できる。一方、2本の H 形立体耐震壁間には、せん断

降伏型制振梁を設け、立体耐震壁間の軸力伝達に加え、耐震壁間のせん断力の伝達による、短スパン部材の損傷制御と地震時のエネルギー吸収も行う役割を持たせた。

H 形立体耐震壁は低層部で連続する日の字型断面として一体化し、スタンスを大きく確保して転倒モーメントに抵抗する機構とした。開口部周囲は剛な RC 梁にて接続し、一体の立体耐震壁として架構を形成した。

立体耐震壁外寸法の塔状比は X 方向4.31、Y 方向6.18 である。また、基準階となる8階を基点とした場合の塔状比は、X 方向4.83、Y 方向6.54である。塔状比の大きな Y 方向では立体耐震壁の切替階においてベルトトラスを配置し、耐震壁脚部の免震部材の面圧制御を行った。なお、トラス斜材の外端部に座屈拘束プレースを配置することで、地震時の過大入力に対する軸力制限機構を付加し、外端の免震支承材の浮き上がりを防止した。

床組は3,600mm モジュールとして立体耐震壁への均一な荷重配分を図り、柱スパン18.0m～25.2m の無柱空間を構成した。また、立体耐震壁の周囲は EV シャフト・ボイドで構成されるため、キャピタルスラブを設けてスムーズな地震力伝達が行えるよう配慮した。

免震材料は長周期化と十分な減衰量を確保するため、天然ゴム系積層ゴム支承（NRB）、弾性すべり支承（ESB、高摩擦タイプ、一部低摩擦タイプ）と高性能オイルダンパー（セミアクティブオイルダンパー（SAOD）、自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー（GAPOD））の組合せとした。コアウォール下部は NRB を集中配置

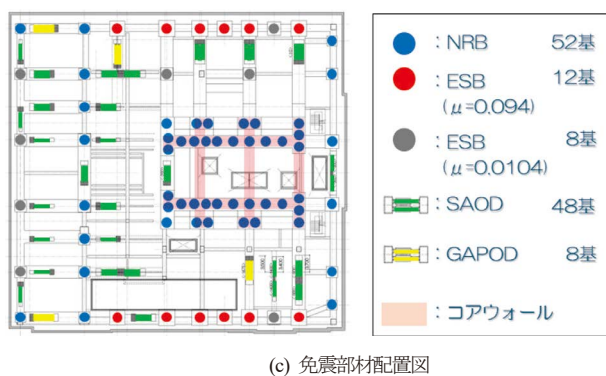
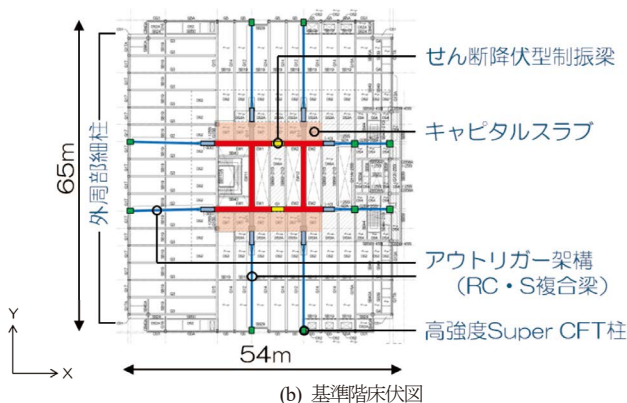
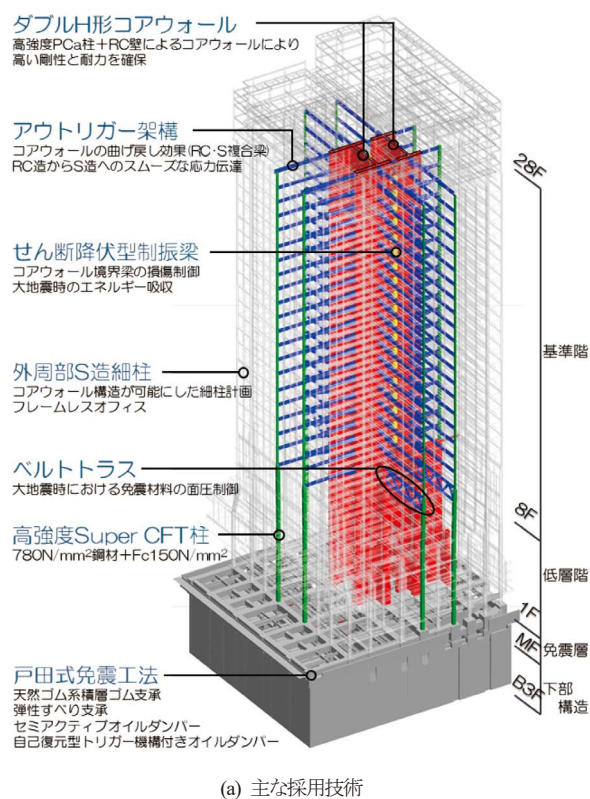


図2 構造計画概要

し、抵抗モーメントを確保した。

耐震設計の目標値を表1に示す。これに加えて日本最高クラスの耐震性能を目指して、JSCA（（社）日本建築構造技術者協会）の耐震グレード表による「免震構造特級」を確保するほか、応答加速度 200cm/s^2 以下とすることで別途オプションとして設定されている「Aランク（最高グレード）」も確保する高い目標を設定した。

レベル2地震動の地震応答解析結果を図3に示す。最大応答層間変形角は $1/350$ 程度であり、免震構造特級の目標値である $1/300$ を満足している。最大応答加速度は上階においても 1.5m/s^2 程度であり、目標値である 2.0m/s^2 以下を満足している。なお、レベル2地震動の1.5倍を想定した余裕度検討用地震動に対しても最大応答加速度は上階で 1.8m/s^2 程度である。高い剛性を持つコアウォールを建物の心棒として、超高層免震構造に適切な水平剛性を確保する計画により、目標とした「想定外を起こさない」高い耐震性能が得られた。

耐風設計は風洞実験から得られた層風力を用いた風応答解析によりJSSI（（社）日本免震構造協会）の風応答ランクAであることを確認した。TODA BUILDINGで

表1 耐震設計の目標値力地震動

設計用入力地震動		稀に発生する地震動 (レベル1)	極めて稀に発生する地震動 (レベル2)
上部構造	応答加速度	—	200cm/s^2 以下
	部材の状態	短期許容応力度以内	短期許容応力度以内
	応答層間変形角 (重心位置)	$1/400$ 以下	$1/200$ 以下
制振部材	累積損傷度の安全率	10以上	2以上
免震材料	水平変位量	安定変形量(372mm)以内 (ゴム総厚の150%水平変形)	性能保証変形量(620mm)以内 (ゴム総厚の250%水平変形)
	天然ゴム系 積層ゴム 支承	圧縮面圧 短期許容圧縮面圧以内 (基準面圧 $\times 2.0$)	引張面圧 部材に引抜き力を 生じさせない
		引張面圧 (ひずみ)	引張ひずみ5%以下 (引張面圧 1.0N/mm^2 以下)
	弾性すべり 支承	圧縮面圧 短期許容圧縮面圧以内 (基準面圧 $\times 2.0$)	引張面圧 部材に浮き上がりが生じない
	オイル ダンパー	最大速度	150cm/s 以下
	下部構造	部材の状態	短期許容応力度以内

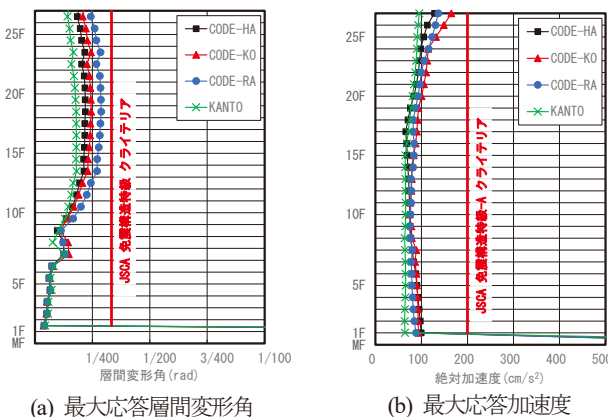


図3 時刻歴応答解析結果（レベル2地震動）

は、建物形状の決定過程において、風洞実験で種々の建物形状に対する比較検討を実施し、基準階コーナー部の隅切りや屋上架構をセットバックさせることで、直方体形状と比較して約25%の風荷重の低減効果が得られることを確認した。

3. 採用技術

3.1 高強度プレキャスト柱を用いたRC造H形立体耐震壁¹⁾

TODA BUILDINGは、建物コア部に連層で配置したRC造H形立体耐震壁を心棒として用いる「コアウォール構造」を採用した。RC造H形立体耐震壁の曲げ耐力と変形性能を向上させることを目的として、高軸力を負担する壁板端部および壁板交差部に高強度RC柱（コンクリート強度 $\text{Fc}80$ 、鉄筋強度 $\text{USD}685$ ）を配置する計画とした（図4）。また、この高強度RC柱をプレキャスト化（以下、高強度PCa柱）することにより、工期短縮も実現した。さらに、この高強度PCa柱を介して、2つのH形立体耐震壁相互の制振梁や、アウトリガー梁（RC・S複合梁）を接続した（図5）。

3.2 アウトリガー架構（RC・S複合梁）

コアウォールと外周の鉄骨架構をつなぐアウトリガー梁は、コアウォールと接続する側の梁端部をRC造、梁中央部および外周の鉄骨架構と接続する側の端部をS造としたRC・S複合梁（TO-RCSB）を用いることで、連続的な応力伝達を図り、コアウォールの曲げ戻し効果を向上させた（図6）。

コアウォール周辺の床は、ELVシャフトや設備シャフト等による大きな開口が計画されており、RC・S複合梁に設計上無視できない軸力が作用することが想定され

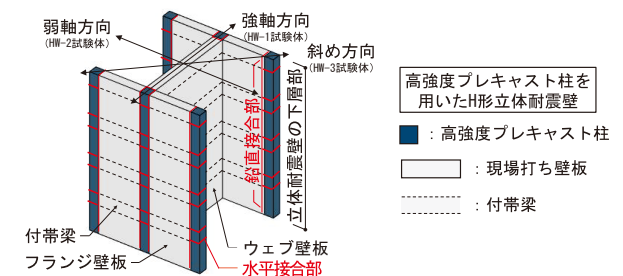


図4 高強度プレキャスト柱を用いたH形立体耐震壁

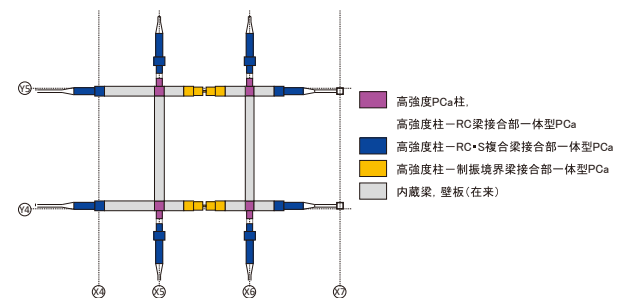


図5 コアウォール構造におけるプレキャスト部材使用範囲

た．そのため、これまで開発を行ってきた非埋込み型の RC・S 複合梁²⁾に、軸方向補強筋や軸方向補剛リブ等を追加し、軸力に対応した仕様(図7)とした³⁾．

3.3 セン断降伏型制振梁

H 形立体耐震壁相互を連結する短スパン境界梁は、地震時の変形が大きいため、RC 造として計画した場合には損傷が大きくなることが懸念された．そのため、この短スパン境界梁の端部を RC 造、中央部を低降伏点鋼ダンパーとしたセン断降伏型の制振梁^{4),5)}を採用することで、境界梁の損傷を低減することに加え、地震エネルギーの吸収による応答低減も図る計画とした(図8)．

3.4 高性能オイルダンパー

免震工法には、中小規模地震から巨大地震まで幅広い外乱に対する性能向上を目的として、新たに2種類のオイルダンパーを開発し、組み込んだ．レベル1地震からレベル2地震に対してはセミアクティブオイルダンパーが、レベル3地震に対しては自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーが、耐震性能の向上に寄与している．

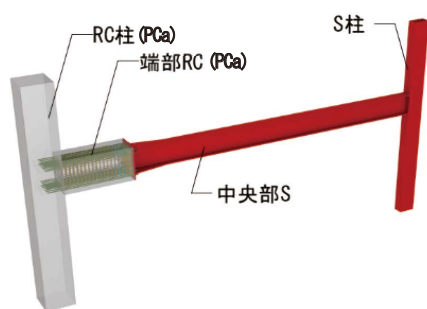


図6 RC・S 複合梁

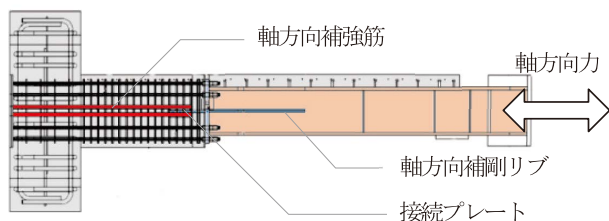


図7 軸力対応仕様

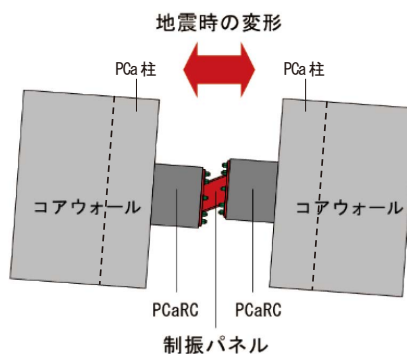


図8 セン断降伏型制振梁

3.4.1 セミアクティブオイルダンパー

セミアクティブオイルダンパーは、高減衰(以下CH)側と低減衰(以下CL)側の2種類の減衰係数を持つ可変減衰型オイルダンパーであり、免震層の応答変位を参照して、適切な減衰に切り替え制御を行う⁶⁾(図9)．免震層のセン断力が減少する第2, 4象限では減衰係数をCHに設定することで、効果的な加速度低減とエネルギー吸収を図った．

3.4.2 自己復元型トリガー付きオイルダンパー

自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーは、意図的にオイルダンパーが効かない領域を設け、中小地震時は応答加速度を増大させずに大地震時のみオイルダンパーが機能することで、免震層の過大な変位を抑制する(図10)．減衰力の作用が開始する変位(トリガー変位)は15cmとし、地震終了後は機構内に設けたばねの復元力により中立位置まで自己復元することを特徴としている．トリガー変位到達時の衝撃力を内部に設けた緩衝ゴムにより吸収する機構を有する⁷⁾．

3.5 高強度 CFT 柱 (780N/mm²級鋼材+Fc150)

低層階の魅力的な大空間を実現するため、高軸力を負担する長柱が存在している．そのため、鉄骨材質を最大で780N/mm²級鋼材、コンクリート強度を最大でFc150N/mm²まで適用範囲を拡大した高強度 Super CFT 工法(UHEC 評定一構26001: 評定範囲には内蔵鉄筋685N/mm²も含まれる)を適用し、耐震安全性を確保することとした(図11)．

780N/mm²級鋼材の溶接は実大柱(□-1000×1000×60)での施工実験を行い、パス間温度、予熱・後熱温度、超音波探傷試験手順を定めた⁸⁾．また、鋼管内への超高

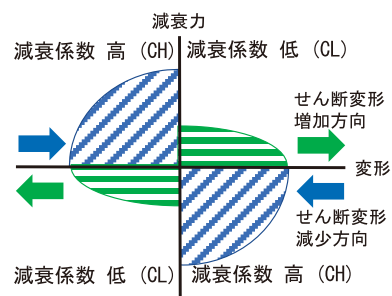


図9 セミアクティブオイルダンパーの減衰特性概念図

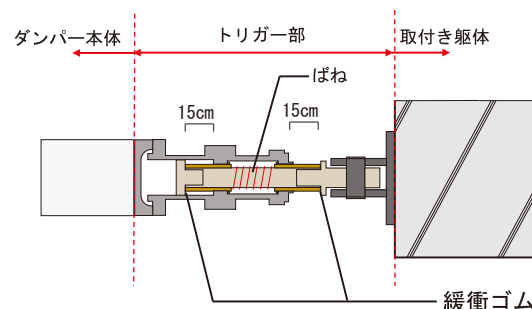


図10 自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーの機構概要

強度コンクリートの充填性や確実な強度発現を確認するため、実大施工実験を行った。

3.6 屋上緑化マスダンパー

4階～6階の片持ち架構の長さは最大9.3mであり、6階には屋上庭園が計画されており、大きな重量による地震時の上下動の増幅が懸念された。そのため、屋上緑化の質量を用い、大地震時にも有効に機能する屋上緑化マスダンパーを計画した(図12)。地震時に50%以上の応答加速度低減効果を確認した⁹⁾。

3.7 外周部細柱

コアウォール構造の採用により、上部構造の地震力を約80%負担できるため、外周架構は、地震力分担を大幅に軽減し、開放性の高い細柱架構を形成することができる(図13)。断面は長期軸力を参考に決定し、柱幅を400mm、せいを480mm～700mmとしている。アウトリガー架構の付帯柱はCFT柱を採用しているため、実大断面での施工実験を行い、圧入充填性を確認した。

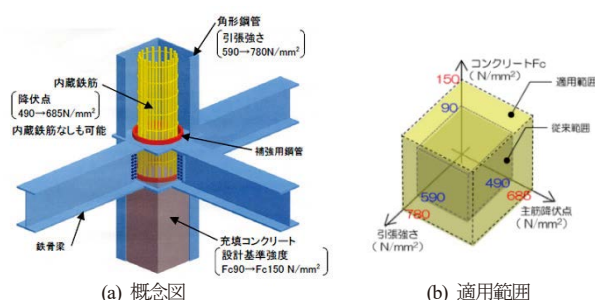


図11 高強度 SuperCFT 工法

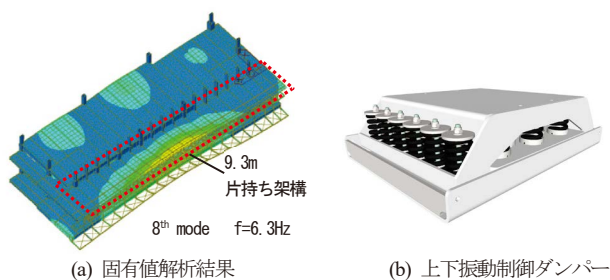


図12 屋上緑化マスダンパー



図13 基準階の外周細柱架構

4. おわりに

本報では、TODA BUILDING の構造計画と採用した開発技術の概要について報告した。

TODA BUILDING では、コアウォール構造と免震構造を始めとする多くの開発技術を適材適所に適用することで、国内最大規模の超高層免震構造において最高クラスの耐震性能を有する建築を実現した。なお、各開発技術の詳細は技術研究報告第50号^{10)~14)}を参照されたい。

参考文献

- 1) 川又哲也, 西村英一郎, 太田行孝, 和泉信之: 高強度プレキャスト柱を用いた鉄筋コンクリート造 H 形立体耐震壁の曲げ耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, 2023.7
- 2) 桑素彦, 竹中啓之, 中村匠, 和泉信之: 非埋込み型の端部 RC 中央部 S 梁に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.97-105, 2014.3
- 3) 仁科智貴, 桑素彦, 竹中啓之, 和泉信之: 軸方向力が作用する非埋込み型 RC・S 複合梁の耐力と変形, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.727-732, 2022.7
- 4) 太田行孝, 濱田聡, 菊田繁美, 渡部幸宏, 竹中啓之, 石岡拓, 傅野悟史: 低降伏点鋼を用いた境界制振梁の実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.689-690, 2012.9
- 5) 得能将紀, 桑素彦, 太田行孝, 西村英一郎, 竹中啓之, 大月智弘, 和泉信之: 低降伏点鋼を用いた制振部材に関する実験的研究 その12: 高耐力パネルの載荷実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.749-750, 2021.7
- 6) 鈴木太輝雄, 渡壁守正, 谷地敏和夫, 稲井慎介, 仁田佳広, 西谷章: 可変減衰セミアクティブ免震構造の開発: その1 可変減衰オイルダンパーの基本性能と制御則, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.395-396, 2013.8
- 7) 谷地敏和夫, 鈴木彰, 齋藤雄太, 得能将紀, 小林正人: 不感帯機構付きオイルダンパーを用いた免震建物の地震応答性状, 日本建築学会構造系論文集, 第781巻, pp.381-391, 2021.3
- 8) 川又哲也, 塙亨, 嶋徹, 稲永英治, 桑素彦, 藤沢清二, 小林光博, 古舘岳実: 建築構造用高強度780N/mm²級鋼材の溶接施工法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.39-40, 2018.7
- 9) 丸尾純也, 桑素彦, 川又哲也, 石田琢志, 得能将紀, 石塚圭介: 片持ち架構の上下振動制御に屋上緑化をマスダンパーとして利用した制振構造の性能検証, 戸田建設株式会社技術研究所報告第46号, 2020.11
- 10) 太田行孝, 西村英一郎, 川又哲也, 釣賀達稀, 恒成恭宏, 得能将紀, 桑素彦, 竹中啓之: 高強度 PCa 柱を用いた RC 造 H 形立体耐震壁の曲げ特性に関する実験的研究, 戸田建設株式会社技術研究所報告第50号, 2024.2
- 11) 大月智弘, 桑素彦, 仁科智貴, 竹中啓之: 軸方向力に対応した TO-RCSB 工法の開発: 軸方向力が作用する非埋込み型

RC・S 複合梁の耐力と変形, 戸田建設株式会社技術研究所
報告第50号, 2024.2

- 12) 得能将紀, 竹中啓之, 桑素彦, 太田行孝, 西村英一郎, 大月
智宏: 低降伏点鋼を用いた制振部材に関する実験的研究,
戸田建設株式会社技術研究所報告第50号, 2024.2
- 13) 吉江一馬, 稲井慎介: 高性能オイルダンパーの開発と適用
事例による地震応答解析結果の比較, 戸田建設株式会社技
術研究所報告第50号, 2024.2
- 14) 川又哲也, 嶋徹, 石田正法, 塙亨, 谷地畝和夫, 桑素彦, 得能
将紀: 建築構造用高強度780N/mm²級鋼材の溶接施工法, 戸
田建設株式会社技術研究所報告第50号, 2024.2