

# (53) 免震・制振装置の分類によるCFT造超高層建築物の構造計画の分析

井出 翔太<sup>1</sup>・藤本 利昭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本大学大学院 生産工学研究科 建築工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1丁目2-1)  
E-mail:cish20003@g.nihon-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 日本大学教授 生産工学部 建築工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1丁目2-1)  
E-mail:fujimoto.toshiaki@nihon-u.ac.jp

コンクリート充填鋼管 (CFT) 造は優れた構造的特徴を有し、超高層建築物に多く適用されている。超高層建築物において耐震設計は重要であり、制振・免震構造のように装置を取り入れ地震等による振動を低減させることが一般的となっている。そこで本研究ではCFT造超高層建築物を対象に、1968年から2021年の期間でビルディングレターに掲載された性能評価シートを基にデータベースを作成した。本報では、各構造形式で採用されている免震・制振装置に着目し分類することで、上部構造の特性 (建築物高さ、塔状比、一次固有周期、設計用ベースシア係数)、構造物の地震応答 (最大層間変位、最大層間変形角、最大層塑性率、地震層せん断力) といった構造計画や振動特性の違いを分析し、得られた知見を報告する。

**Key Words :** CFT construction, Hight-rise-building, Damping structure, Seismic isolation structure, Strucutural plan and Vibration characteristics

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (以下、CFT) 造はコンファインド効果等の優れた構造的特徴を有することから、超高層建築物に数多く適用されている。これまでに多くの超高層建築物が建設される中、今後長周期地震動や巨大地震の発生が予想され、それらを考慮して耐震設計することが求められている。既存の耐震技術としては、免震装置を構造物の基礎階または中間層に設けて免震層とし、免震層上部の揺れを軽減し、地震時の損傷や応答加速度を抑える免震構造、骨組内にエネルギー吸収装置・部材を組み込み、地震動を受ける構造物の応答を低減させる制振構造がある。実際に、図1に示すように1995年兵庫県南部地震以降、CFT造超高層建築物において免震・制振構造が主流となっていることが伺える。免震・制振装置についてはそれぞれが振動制御特性を有し多種多様であるため、各種装置がどのような構造計画に対応しているのか、さらにどのような振動特性を示すのかを把握する必要がある。

そこで本研究では、免震・制振構造それぞれに着目し、取り入れられる各種免震・制振装置を減衰特性による分類を行い、CFT造超高層建築物の構造計画と関連付けながら分析した。

## 2. 対象建築物

本研究で取り扱うCFT造超高層建築物は、1968年から2021年の期間で日本建築センター発行「ビルディングレター」<sup>1)</sup>および日本総合試験所発行「GBRC」<sup>2)</sup>に記載された性能評価シートを基に、制振構造122棟、免震構造16棟、耐震構造28棟の合計166棟を対象としている。またCFT造超高層建築物については、文献3)に1968年から2013年の期間において構造計画の分析が行われており、本研究では、文献3)のデータに新たに2013年以降のデータを加えデータベースを作成した。なお、分析項目によっては明記されていない建物もあるため、その分析から除外した建物もある。

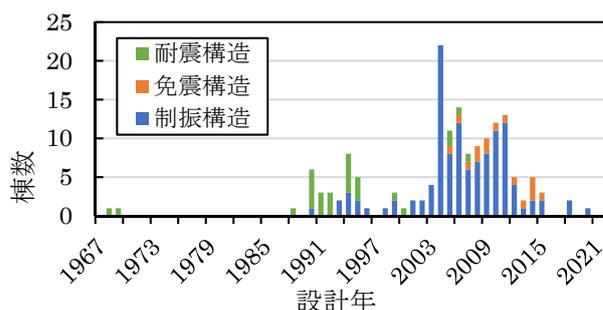


図1 CFT造超高層建築物の年代推移

### 3. 免震構造における分析

#### (1) 免震装置の分類について

免震構造建築物における免震層は、構造物の重量を支持する「支承材」、地震力によって変形した際に元の位置に戻そうとする「復元材」、地震のエネルギーを吸収し揺れを低減する「減衰材」の3つに大別される免震装置により構成されている。

本研究では、免震構造の事例を、「減衰材」としての機能を有する各種免震装置の減衰特性によって、減衰力が変位に依存するもの（以下、変位依存型）、速度に依存するもの（以下、速度依存型）、両方を併用するもの（以下、併用型）の3種類に分類した<sup>4)</sup>。変位依存型に分類される免震装置には鉛プラグ入り積層ゴム、鉛ダンパー、U字型鋼材ダンパーがあり、速度依存型に分類される免震装置には高減衰ゴム系積層ゴム、オイルダンパーがある。対象の免震構造16棟の内5棟が変位依存型、4棟が速度依存型の装置を採用しており、6棟が変位依存型と速度依存型の装置を併用していた。なお、1棟の事例に関しては「減衰材」が変位依存型、速度依存型のどちらにも分類されない弾性すべり支承のみを採用していたため、分類から除外することとした。

#### (2) 免震層について

表1に免震層が基礎、中間層（地上階）、中間層（地下階）にある事例の棟数を示す。

対象免震構造建築物16棟の内、基礎免震構造であるのは4棟と少なく、残りの12棟は中間層免震構造であった。また、中間層免震構造12棟の内訳としては5棟が地上階、7棟が地下階に免震層を設計していた。

さらに中間層免震構造の事例に関しては、全ての事例が免震層を境界に上部構造と下部構造で異なる構造種別を採用しており、建物の機能を切り替えていた。

#### (3) 一次固有周期の伸長比率について

図2に免震層固定時の一次固有周期と免震化後のレベル2地震動時一次固有周期の関係、図3に免震化後のレベル2地震動時一次固有周期を免震層固定時の一次固有周期で除した値（以下、伸長比率と定義する）と建築物高さの関係を示す。なお、図2、3どちらも短辺、長辺の両方における伸長比率をプロットしている。

図2より免震層固定時の一次固有周期は1.38sから2.51sに分布しており、免震化後のレベル2地震動時一次固有周期は3.66sから6.18sに分布している。また、短辺、長辺における伸長比率の平均はそれぞれ2.46、2.38であり、免震化によって平均して短辺、長辺共に約2.4倍程度長周期化していることが分かった。さらに、免震層固定時

の一次固有周期が長いほど、伸長比率は小さくなり、免震化後のレベル2地震動時一次固有周期は大体の事例が4.0sから4.5sに分布している。これは一般的な地震波の加速度応答スペクトルは周期4s以上では建物の応答は一定であり、この領域に免震構造建築物の周期を設定することで高い免震効果を得ることができるため、免震化後の一次固有周期を4s近傍に設定していると考えられる。さらに図3より、免震化による一次固有周期の伸長比率は建築物高さが高くなるにつれて小さくなる傾向が見られた。これは免震層固定時の一次固有周期が2.5s程度で建築物高さが高い建築物では、免震化後の一次固有周期を4s近傍に設定するためこのような傾向を示したものと考えられる。

表1 免震層位置

	基礎免震	中間層免震 (地上階)	中間層免震 (地下階)
棟数	4	5	7

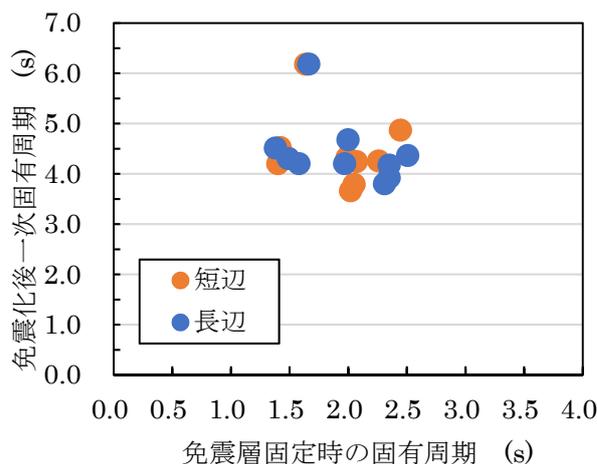


図2 免震化による一次固有周期の変化

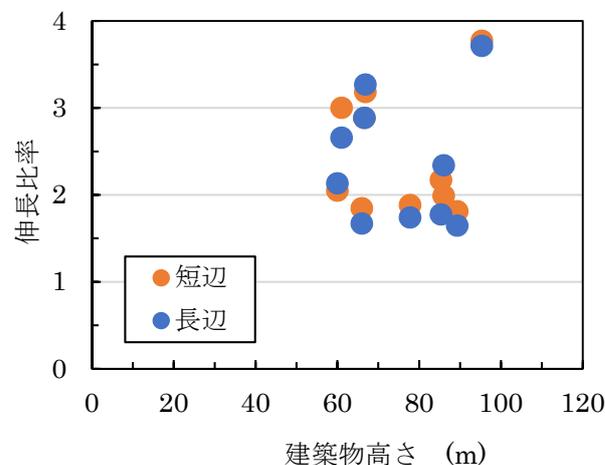


図3 伸長比率と建築物高さの関係

図4に免震装置の減衰特性の分類ごとにおける一次固有周期の伸長比率の棟数分布を示す。

図4より一次固有周期の伸長比率は変位依存型は1.5より大きく3.0以下の間に分布している。また、速度依存型と併用の両方には伸長比率が3.0を超している事例が確認できた。速度依存型において伸長割合が3.0を超している事例は「新しいわき市立総合磐城共立病院」であり、東日本大震災において病院建築における免震構造の安全性の証明がされたことから、医療業務における安全性確保のために免震構造を採用していることが伺える。

#### (4) 地震層せん断力係数比について

ここでは、レベル2地震動時における頂部の絶対加速度を重力加速度(980cm/s<sup>2</sup>)で除した値を最上階の最大応答地震層せん断力係数<sup>9)</sup>とし、その値を免震層の最大地震層せん断力係数で除した値を地震層せん断力係数比とする。地震層せん断力係数が大きいほど、高さ方向に対して地震層せん断力係数の増幅が大きいことを示す。図5に地震層せん断力係数比と免震層固定時の一次固有周期の関係、図6に地震層せん断力係数比と免震層最大層せん断力係数の関係、図7に地震層せん断力係数比と免震層最大層間変位の関係を示す。また、図5, 6, 7の全てに短辺、長辺の両方における地震層せん断力係数比をプロットしている。なお本検討は、文献5)で建築物高さが60mを越えない免震構造建築物において分析されており、本研究では建築物高さが60mを超える免震構造のCFT造建築物における傾向を読み取ることを目的とした。

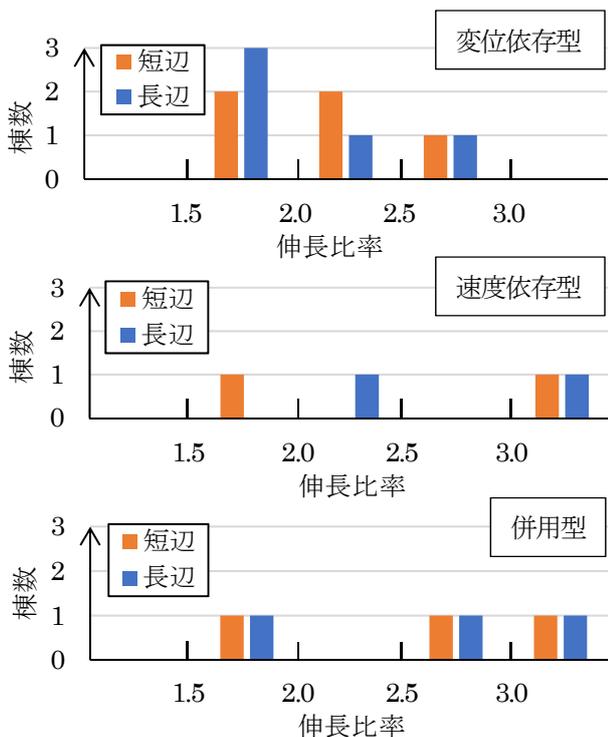


図4 伸長比率の棟数分布

図5より一部の建物を除き地震層せん断力係数比は免震層固定時の一次固有周期が長い建物において大きくなる傾向を示している。図6より免震層最大層せん断力係数が小さいほど地震層せん断力係数比が大きくなる傾向が見られる。図7より地震層せん断力係数比と免震層最大層間変位における明確な関係は見られなかった。これらの結果は文献5)で報告されている建築物高さが60mを越えない免震構造建築物における傾向と同様であり、建築物高さが60mを越える免震構造のCFT造建築物においても同様の傾向を示すことが分かった。

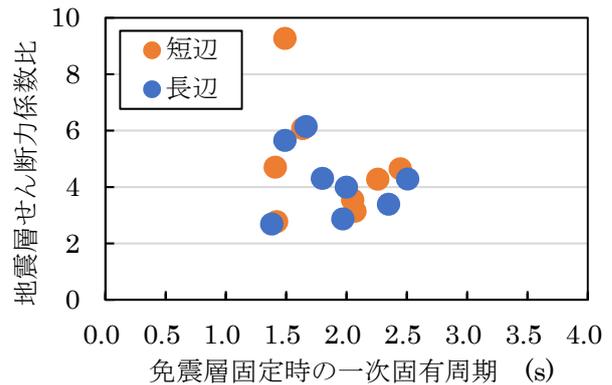


図5 地震層せん断力係数比と免震層固定時の一次固有周期の関係

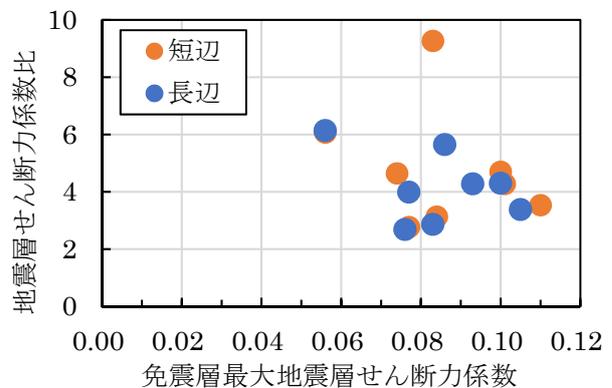


図6 地震層せん断力係数比と免震層最大地震層せん断力係数の関係

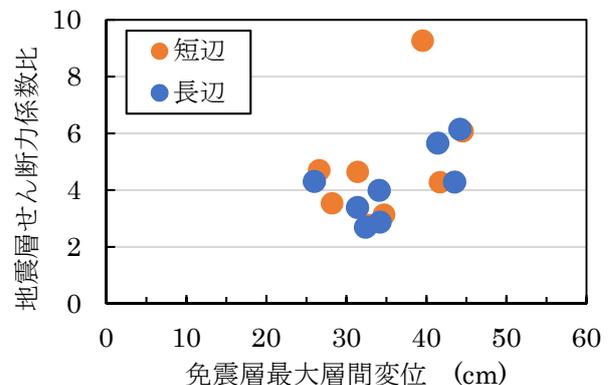


図7 地震層せん断力係数比と免震層最大層間変位の関係

(5) 地震時応答値

表2に前述の免震装置の分類によって見た時の短辺、長辺方向の免震層最大層間変位を示す。図8に免震層最大層間変位の年代推移、図9に免震層最大層間変位と免震化後のレベル2地震動時一次固有周期の関係を示す。また、図8、9どちらの図にも短辺、長辺の両方における地震層せん断力係数比をプロットしている。

表2より対象建築物全体における免震層最大層間変位の平均は短辺、長辺それぞれ36.5cm、36.0cmであった。免震装置の分類では免震層最大層間変位における明確な差はなかった。また、一般的に免震構造物の目標耐震性能として免震層層間変位はレベル2地震動時において40cm以下とされることが多いが、本データベースにおいて最大値が48.9cmの事例もあった。この事例は「東京電機大学千住キャンパス（W棟）」であり、応答変位を制御する目的として鉛プラグ入り積層ゴムと鉛ダンパーにオイルダンパーを併用していた。図8より年代による免震層最大層間変位の明確な傾向は見られなかった。図9より免震化後のレベル2地震動時一次固有周期が長くなるほど免震層層間変位は大きくなる傾向が見られた。

表2 免震装置の分類における免震層最大層間変位

	全体	変位依存型	速度依存型	併用
短辺(cm)	36.5	34.4	33.3	34.1
長辺(cm)	36.0	36.1	34.3	36.3

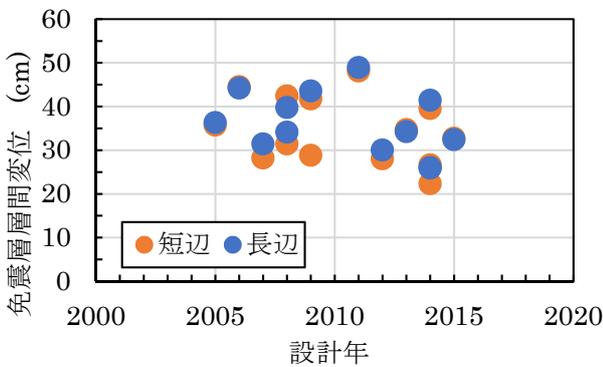


図8 免震層層間変位の年代推移

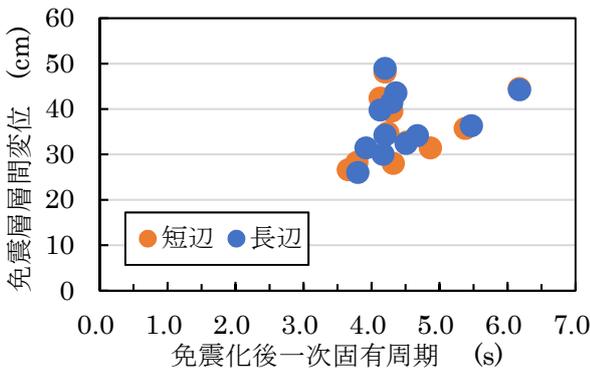


図9 免震層層間変位と免震化後一次固有周期の関係

図10、図11にそれぞれレベル1、2地震動時の最大層間変形角(R1、R2)の年代推移、図12にR1とR2の関係を示す。

図10、図11よりレベル1、2地震動時の最大層間変形角R1、R2はそれぞれ1/300、1/200を概ね下回っており、大体の事例がその値を設計クライテリアにしていることが伺える。またR1、R2共に年代による明確な傾向は確認出来なかった。図12よりR1、R2共に本データベースにおいて最大値をとる事例が確認できる。この事例は「仙台共同ビル計画」であり本研究で免震装置による分類がされていない1棟で、免震層は「支承材」の天然ゴム系積層ゴム、弾性滑り支承のみで構成されていた。これより「減衰材」としての機能を有する免震装置の有無が最大層間変形角に影響すると考えられる。

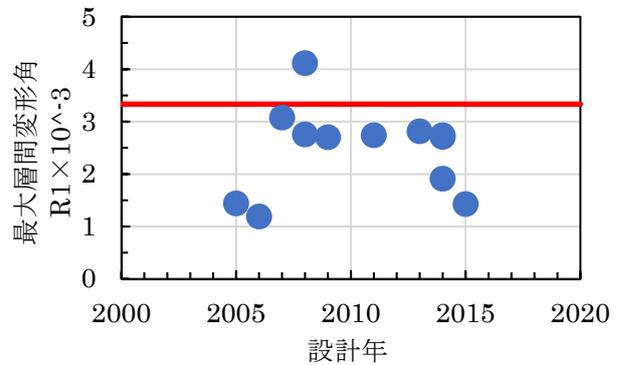


図10 最大層間変形角 (R1) の年代推移

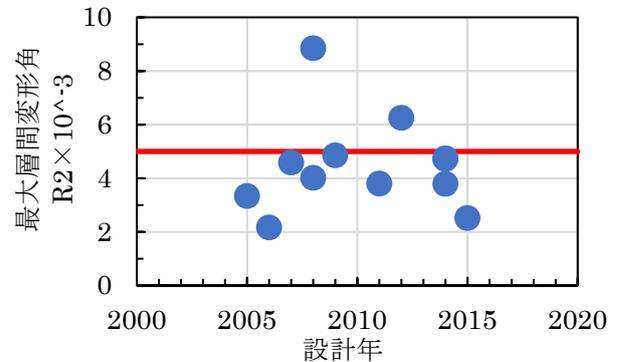


図11 最大層間変形角 (R2) の年代推移

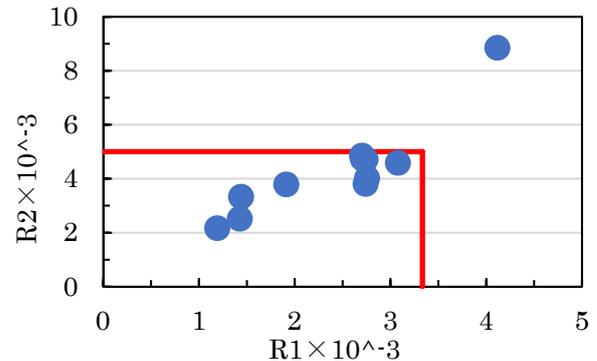


図12 R1とR2の関係

#### 4. 制振構造における分析

##### (1) 制振装置の分類

免震構造と同様に制振構造の事例を、適用されている装置の減衰特性によって変位依存型、速度依存型、併用型の3種類に分類した<sup>4)</sup>。変位依存型の制振装置には材料の塑性化を利用し履歴エネルギー吸収をする鋼材ブレース等があり、変位依存型には粘性体の粘性抵抗によって振動減衰効果を得る粘性ダンパー等がある。制振構造122棟の内51棟が変位依存型、27棟が速度依存型の装置を採用しており、34棟が併用していた。なお、事例によっては採用している制振装置について詳細な明記がなかったため、それらの事例に関しては分類から除外することとした。

##### (2) 塔状比

表3に塔状比（建築物高さを基準階平面の短辺方向の長さで除した値）が得られた建物139棟の塔状比の平均と、制振構造（変位依存型、速度依存型、併用型）に分類した建物の塔状比の各平均値を示す。

対象となるCFT造超高層建築物の全体の塔状比の平均は3.29であり、全体の約7割強が転倒に対する指標である塔状比4以下であった。また、速度依存型、および併用型に分類される制振構造の平均は3.51、3.52で全体の平均と比べ大きく、変位依存型の場合、平均が3.11で塔状比が小さい。これは塔状比が大きな細長い建物では、地震時の架構の変形に曲げ変形成分が大きくなることから、一部または全体に速度依存型を適用するものと考えられる。

##### (3) 一次固有周期と設計用ベースシア係数の関係

図13に建物の短辺および長辺における設計用ベースシア係数 $C_b$ と一次固有周期 $T_1$ の関係を示す。表4に制振装置の分類による短辺、長辺における $C_b \times T_1$ の関係を示す。

図13、表4より対象建物全体における短辺、長辺それぞれの $C_b \times T_1$ の平均値は0.277、0.271であり、短辺の方がやや大きいことが分かった。

図14、図15に制振装置の分類ごとで建物の短辺および長辺における一次固有周期 $T_1$ と建築物高さ $H$ の関係を示す。

$T_1 = aH$ の関係で見ると、短辺、長辺どちらにおいても変位依存型の制振装置を採用した事例は、速度依存型の場合と比べ短周期であることが分かった。制振装置の部材の塑性化を利用して減衰効果を発揮する変位依存型を採用した事例では、エネルギー吸収を効果的に行うため、架構の剛性が高く設計されているものと考えられる。

表3 塔状比

	全体	変位依存型	速度依存型	併用
塔状比	3.29	3.11	3.51	3.52

表4  $C_b \times T_1$ の関係

	全体	変位依存型	速度依存型	併用
短辺	0.277	0.282	0.279	0.281
長辺	0.271	0.272	0.275	0.274

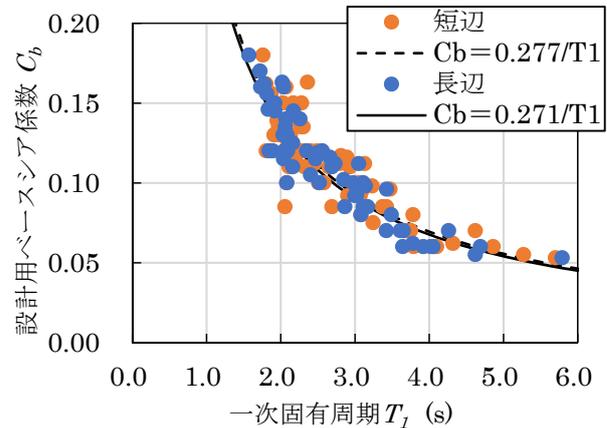


図13 設計用ベースシア係数と一次固有周期の関係（短辺）

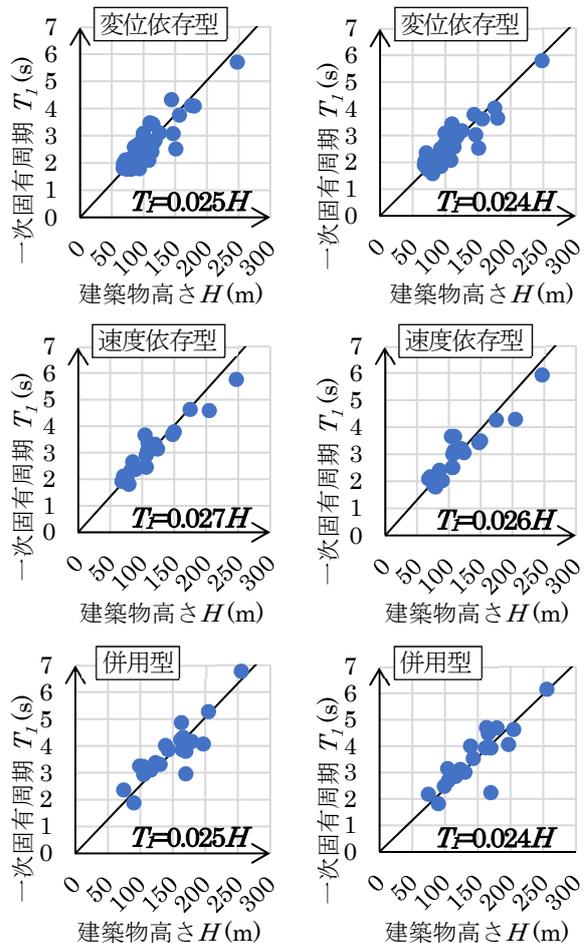


図14  $T_1$ と $H$ の関係（短辺）

図15  $T_1$ と $H$ の関係（長辺）

#### (4) 地震層せん断力係数比

図16に設計用地震層せん断力係数比と建築物高さの関係、図17に地震層せん断力係数比と一次固有周期関係を示す。なお、最下階の設計用せん断力係数を最上階の設計用せん断力係数で除した値を設計用地震層せん断力係数比とする。

図16よりばらつきはあるが短辺、長辺共に建築物高さが高くなるにつれて地震層せん断力係数比も大きくなる傾向が見られた。図17よりこちらもばらつきはあるが短辺、長辺共に一次固有周期が長くなるほど地震層せん断力係数比が大きくなる傾向が見られた。

#### (5) 地震応答値

図18、図19にそれぞれレベル1、レベル2地震動時の最大層間変形角 (R1, R2) の年代推移、図20にレベル2地震動時の層の最大塑性率の年代推移を示す。

一般的な設計クライテリアとしてレベル1地震動時において R1 が 1/200 以内、レベル2地震動時において R2 が 1/100 以内、最大層塑性率が 2.0 以内とされている<sup>4)</sup>。

図18、19より年代による最大層間変形角の明確な傾向は見られなかったが、大半の事例が設計クライテリア

である 1/200 (R1) , 1/100 (R2) を満たしていることが分かった。また図20より年代による最大層塑性率の明確な傾向は見られなかったが、殆どの事例が設計クライテリアである 2.0 以内に収まっていることが確認できた。しかし、最大層間変形角、最大層塑性率どちらにおいても複数の事例で設計クライテリアを越す事例があるように必ずしもすべての事例が設計クライテリアを満たしているわけではなく、その場合、設計者の工夫によって安全が確保されていると考えられる。

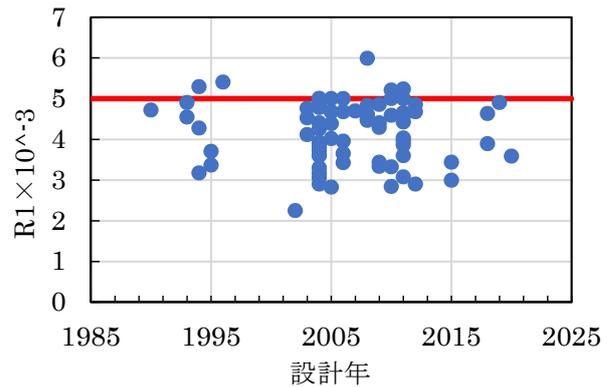


図18 最大層間変形角 (R1) の年代推移

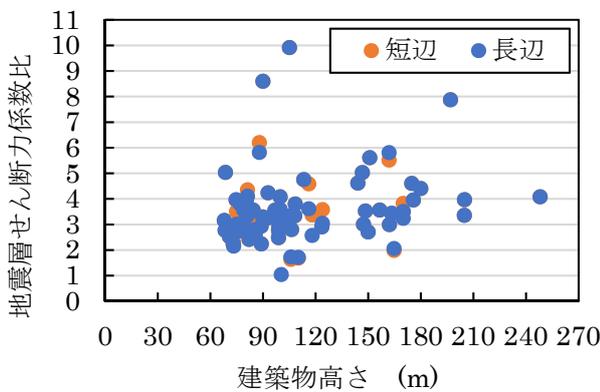


図16 地震層せん断力係数比と建築物高さの関係

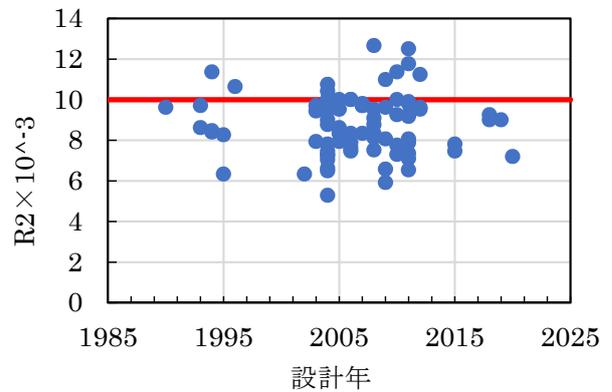


図19 最大層間変形角 (R2) の年代推移

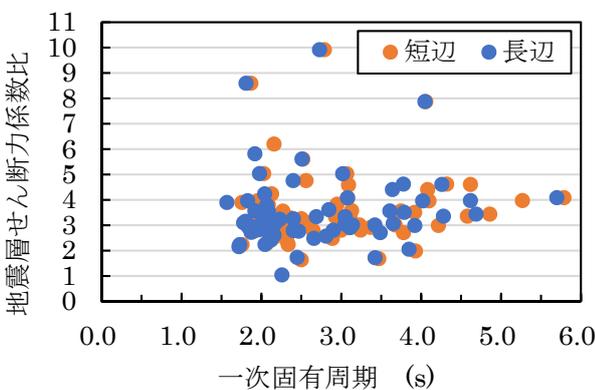


図17 地震層せん断力係数比と一次固有周期の関係

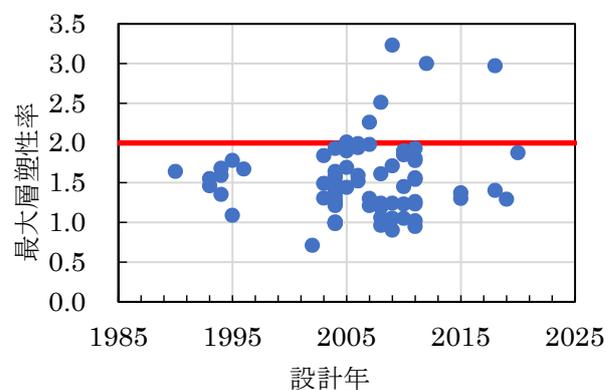


図20 最大層塑性率の年代推移

図21に制振装置の分類における最大層間変形角R1とR2の関係を示す。図22に制振装置の分類ごとによる最大層塑性率の棟数分布を示す。

図21より変位依存型、速度依存型の制振装置を併用した建物は、全ての事例がレベル1地震動時のクライテリアとなる $R1 \leq 1/200$ を満足していることが分かった。また図22より、制振装置による分類に関わらず最大層塑性率が2.0を超す設計がなされていることが分かった。

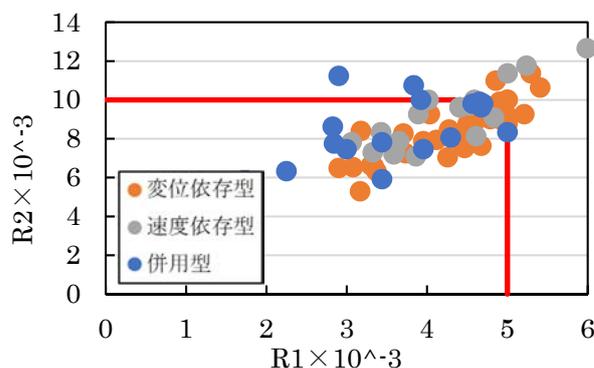


図 21 制振装置の分類における最大層間変形角

## 5. まとめ

### (1) 免震構造

- ・ 一次固有周期は免震化によって平均して約2.4倍程度長周期化されており、建築物高さが高いほど伸長比率は小さい。免震装置の分類ごとでは併用に最も伸長比率の大きい事例があった。
- ・ 地震層せん断力係数比は免震層固定時の一次固有周期が長いほど大きく、さらに免震層の最大地震層せん断力係数が小さいほど大きい。
- ・ 免震層最大層間変位は免震化後（レベル2地震動時）の一次固有周期が長いほど大きく、免震装置の分類ごとでは明確な差は見られなかった。
- ・ 大体の事例が最大層間変形角R1、R2の設計クライテリアをそれぞれ1/300、1/200としていた。

### (2) 制振構造

- ・ 変位依存型の制振装置は、速度依存型と比べ塔状比が小さい建物に適用されている。
- ・ 変位依存型の制振装置が最も多く採用されており、一次固有周期は比較的短周期である。
- ・ 地震層せん断力係数比は建築物高さが高いほど大きく、一次固有周期が長いほど大きい。
- ・ 制振装置の種類に関わらず、殆どの建物がレベル1、レベル2地震動時における最大層間変形角、最大層塑性率の設計クライテリアを満たしていた。

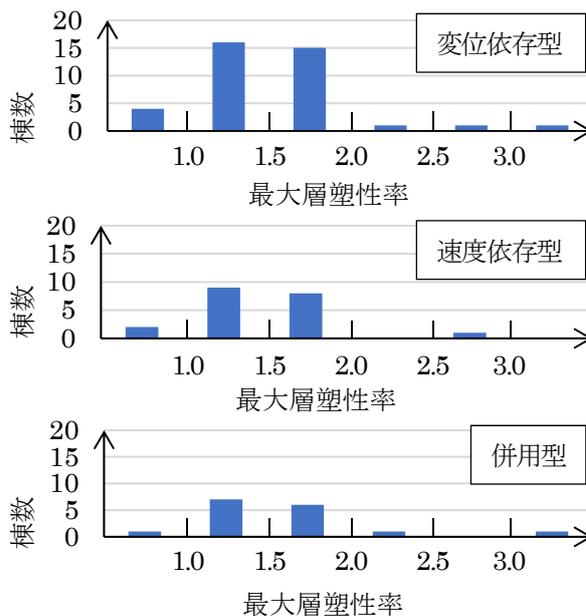


図 22 制振装置の分類における最大層塑性率

### 参考文献

- 1) 日本建築センター：ビルディングレター，No.1-No.668，1967.1-2021.7
- 2) 日本建築試験合験所：機関誌 GBRC，Vol.36 No.3-Vol.46 No.3，2011.7-2021.7
- 3) 藤本利昭，他：CFT造超高層建築物の構造計画の変遷，日本建築学会技術報告集 第23巻 第55号，pp.897-902，2017.10
- 4) 日本建築センター：超高層建築物の構造設計実務，2019.7.
- 5) 飯場正紀，他：免震建築物の設計用地震層せん断力係数に関する検討，建築研究資料 No.162，2014.8

(Received September 10, 2021)

## ANALYSIS OF STRUCTURAL PLANS FOR CFT HIGH-RISE BUILDINGS THROUGH CLASSIFICATION OF SEISMIC ISOLATION AND DAMPING DEVICES

Shota IDE and Toshiaki FUJIMOTO

CFT construction has great structural characteristics and is frequently applied in High-rise buildings. Seismic design is important, and incorporation of vibration damping devices and seismic isolation devices is common practice for minimizing vibrations induced by earthquakes. Thus, in this study I developed a database for CFT High-rise buildings based on the performance assessment sheet published in the building letter from 1968 to 2021. In this research, I analyzed the structural features and seismic response of CFT High-rise buildings based on a database I generated and reported the findings obtained.