

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14288

研究課題名（和文）超超高層建物の最適地震応答制御に用いる長尺のブレース部材の必要構造性能の解明

研究課題名（英文）Numerical and experimental investigation of long brace dampers adopted in a novel damping modification systems for super tall buildings in high seismic zones

研究代表者

寺澤 友貴（Yuki, Terazawa）

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：10848245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は超超高層建物に適用される各種の地震応答制御構造について、応募者が独自開発した一般化応答スペクトル解析法とスーパーコンピュータを用いて、長尺の耐震ブレースと座屈拘束ブレースおよびオイルダンパーの配置と容量の組合せを網羅的に探索し、最適化された外殻構造の地震応答低減効果と、長尺の各ブレースが達成する必要がある構造性能（部材全体の塑性率、芯材の弾性部と塑性部の長さ比・断面積比など）の統計情報を整備するとともに、長尺のブレースの疲労性評価に用いるべき極低サイクル疲労破壊評価法を実験的と有限要素法の補完解析によって明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本を含め深刻な地震地域で超超高層建物を実現した事例は殆ど無く、適切な地震応答制御手法は確立されていない。軒高さ300mを超える超超高層建物では、架構の曲げ応答が特に卓越し、各階のせん断変形を利用して制振部材に地震エネルギーを吸収させる従来の設計は十分な地震応答低減効果を期待できない。この様に超超高層建物に高い耐震性能を与える地震応答制御手法の開発は社会から求められており、学術的に見て推進すべき重要な研究課題である。本研究は“超超高層建物に適した地震応答制御手法とは何か”を研究課題の核心をなす学術的な「問い」とする。上記の問題に解決策を提示出来れば広く社会・学術へ波及効果を期待できる。

研究成果の概要（英文）：A series of numerical simulation was performed to investigate the required performance of long brace dampers adopted in a novel damping modification system for tall buildings in high seismic zones. Moreover, two ultra low-cycle fatigue fracture evaluation methods (a plastic-hinge-based damage model and a void growth model), which could be adopted in the structural design of long damper braces, were validated by experiments and finite element analysis.

研究分野：建築構造

キーワード：超高層 ダンパー 座屈拘束ブレース 最適化 Damped braced tube Damped outrigger

1. 研究開始当初の背景

国際 NPO「高層ビル・都市居住協議会(CTBUH)」の統計(図 1)や東京駅前 Torch Tower の発表(図 2)に示されるように、超高層建物の需要が世界中で加速し、日本でも軒高さ 400m に迫る超超高層建物(Super tall building)を建設する時代が到来した。しかし、日本を含め深刻な地震地域で超超高層建物を実現した事例は殆ど無く、適切な地震応答制御手法は確立されていない。軒高さ 300m を超える超超高層建物では、架構の曲げ応答が特に卓越し、各階のせん断変形を利用して制振部材に地震エネルギーを吸収させる従来の設計は十分な地震応答低減効果を期待できない。この様に超超高層建物に高い耐震性能を与える地震応答制御手法の開発は社会から求められており、学術的に見て推進すべき重要な研究課題である。本研究は“超超高層建物に適した地震応答制御手法とは何か”を研究課題の核心をなす学術的な「問い」として、上記の問題に解決策を提示出来れば広く社会・学術へ波及効果を期待できる。

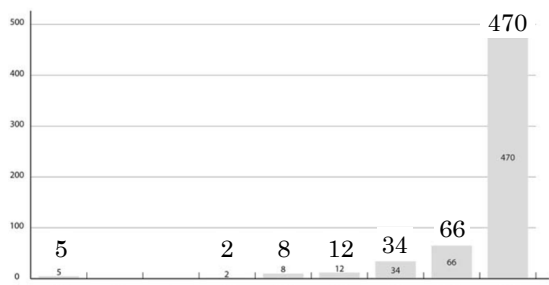


図 1 超高層建物の建設数(出典：CTBUH)



図 2 Torch Tower(出典：三菱地所)

2. 研究の目的

この「問い」の解答として、耐震ブレースと制振ブレースで建物外周を囲む制振スリット付ブレースチューブ構造(図 3, Damped brace tube)を提案する。同構造は従来の Braced Tube に類する構造であるが、高い水平剛性を与える耐震ブレース外殻面にスリットを設けて地震エネルギー吸収機構とし、国外では耐震部材と認識される座屈拘束ブレースやオイルダンパーを制振部材として積極的に利用する点で学術的独自性と創造性を有する。一方、ブレース部材は複数の階をまたぐ長尺(15m 以上)であり付加減衰効果、地震応答低減効果、要求される変形性能、疲労破壊評価法の適用性は未解明である。本研究は制振スリット付ブレースチューブ構造の有効性の実証を目的に、最適地震応答制御に用いる長尺のブレース部材の必要性能の解明を試みる。また、国外を中心に普及が進んでいるダンパー付アウトリガー構造についても同様の調査を行い、制振スリット付ブレースチューブ構造との比較検討も行う。

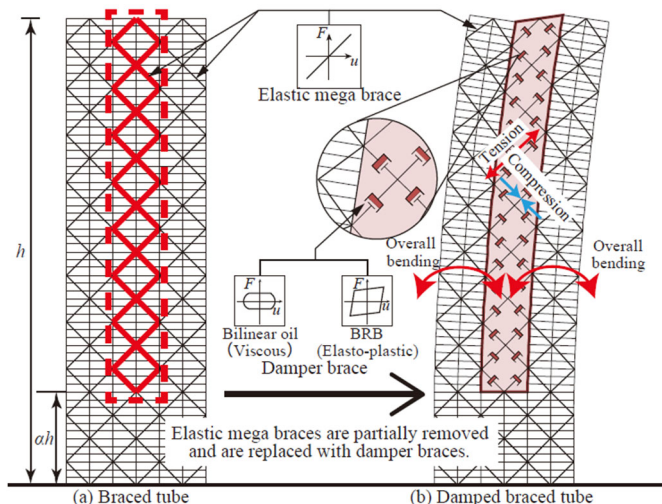


図 3 制振スリット付ブレースチューブ構造

3. 研究の方法

【超超高層建物に適用する地震応答制御手法の動的応答特性評価】

超超高層建物に適用する地震応答制御手法の動的応答特性（固有周期，付加減衰比，地震応答低減効果）は，応募者が独自に開発した一般化応答スペクトル解析法(GRSA)により網羅的に検証する。この数値解析手法は制振部材を具体的に配置した骨組モデルの最大地震応答を高速評価できる点が学術的独自性を有する。従来の地震応答シミュレーションで 10~15 分の計算が 5~10 秒で終了するため学術的創造性を有する複雑な配置最適化も可能である。(図 4)

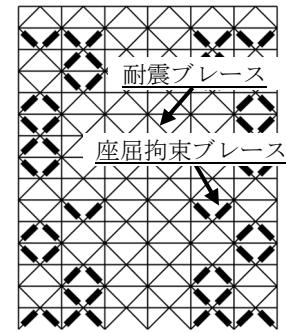


図 4 GRSA の利用例

【長尺の耐震・制振ブレースに用いられる鋼材の極低サイクル疲労破壊評価】

超超高層建物のブレース部材は極限地震荷重下において局部座屈部を起点に極低サイクル疲労破壊の発生が予想される。そこで超超高層建物に適用する耐震・制振ブレースに用いられる鋼材に適した極低サイクル疲労破壊評価を実験と有限要素法による補完解析によって実施する。比較する評価法は，(1)部材全体に対する局部座屈部の変形集中を評価し鋼素材の疲労曲線を適用して疲労破壊を判定する古典的な塑性ヒンジ理論(図 5)，(2)鋼材の疲労破壊が鋼素材中の介在物周辺で核生成する空隙の成長・合体により生じる実態を有限要素法解析結果として得られる固体力学の諸量を用いて評価する Void Growth Model(VGM, 図 6)である。

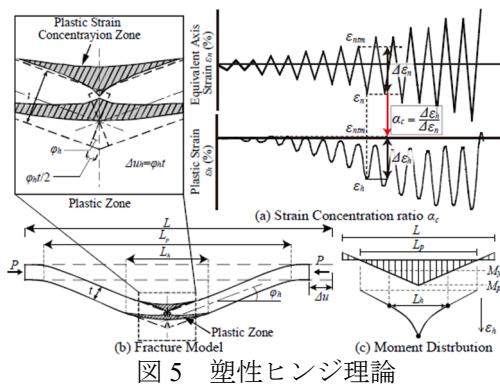


図 5 塑性ヒンジ理論

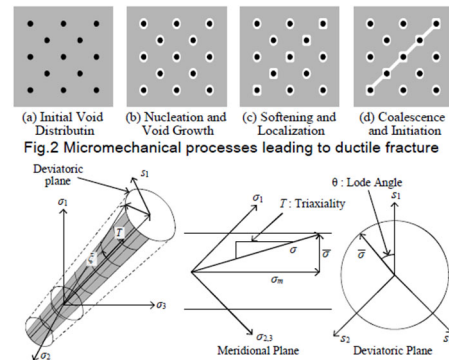


図 6 VGM の概念図

4. 研究成果

【制振スリット付ブレースチューブ構造の動的応答特性評価】

本検討では，GRSA と数値最適化手法によるモンテカルロ・シミュレーションを実施し，スリット配置，主架構剛性，ダンパー種類（座屈拘束ブレース，オイルダンパーあるいは両者の混合）が制振スリット付ブレースチューブ構造に与える影響を網羅的に検討し，(1)日本都市部の不動産開発で好まれる建物規模ではアウトリガー構造は曲げ剛性の確保が難しく一般的に知られている性能より劣化するため制振スリット付ブレースチューブ構造の方が望ましい，(2)同構造は高次モードまで付加減衰効果を得られる，(3)主架構はスリット部に鉛直せん断変形の振動モードが卓越するように建物外周部に大断面の弾性メガブレースを配置する必要がある，同振動モードが卓越しないと付加減衰効果は著しく劣化する，(4)付加減衰効果の観点ではオイルダンパーが座屈拘束ブレースより優れる一方，地震応答を設計クライテリア以下に納めるという観点では座屈拘束ブレースの方が費用対効果（2021 年関東地域の設計価格準拠）が高い，(5)十分な

疲労性能を確保するという観点で座屈拘束ブレースの塑性化部長さは全長に対して 0.5 以上とする必要がある, (6)ダンパーはスリットだけの場合の層間変形角応答分布に比例するよう容量配分すると連続様に配置した場合より費用対効果が高くなる, (7)オイルダンパーと座屈拘束ブレースを混合して配置することで付加減衰と費用削減を両立した設計も可能である, ことを明らかにした。研究成果は後述する査読付き論文 3 編(国内 2 編, 海外 1 編)に掲載済みである。

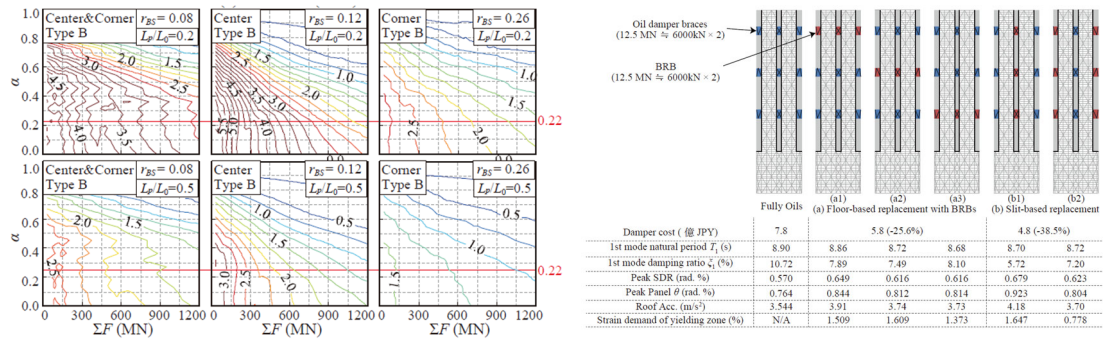


図7 研究成果の例 (左: 座屈拘束ブレースの塑性歪分布, 右: ダンパー混用配置の費用対効果)

【ダンパー付アウトリガー構造の動的応答特性評価】

本検討では, GRSA と数値最適化手法によるモンテカルロ・シミュレーションを実施し, 建物高さ, アウトリガーの数・高さ・剛性, ダンパー種類 (座屈拘束ブレース, オイルダンパーなど), 地震荷重レベルがダンパー付アウトリガー構造に与える影響を網羅的に検討し, (1)アウトリガー構造は主に 1 次モードに特化した付加減衰効果・地震応答低減効果があり, 高次の付加減衰効果はアウトリガー数の増加によって改善される, (2)1 次モード減衰比の向上はたかだかアウトリガー数が 4 までに限られる, (3)1 次モード付加減衰比は最大で座屈拘束ブレースで 5%, オイルダンパーで 10%獲得できる, (4)座屈拘束ブレースに要求される変形性能 (塑性化部歪) はレベル 2 地震動で約 1%, レベル 4 地震動で約 2%である, (5)1 次モード減衰比を最大化する設計が総合的に優良である, (6)各種ダンパーに対応した最適剛性比推定式および人工知能を用いた設計ツールを提案・開発した, ことを明らかにした。研究成果は後述する査読付き論文 2 編(国内 1 編, 海外 1 編)に掲載済みである。

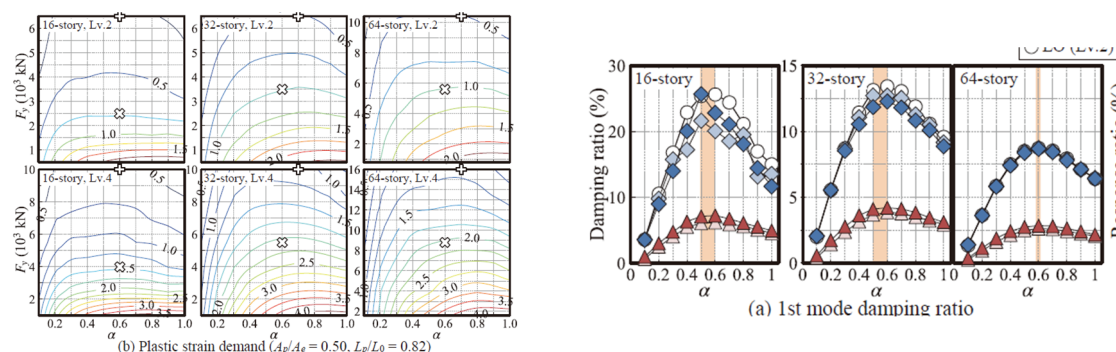


図8 研究成果の例 (左: 座屈拘束ブレースの塑性歪分布, 右: ダンパー別の付加減衰比)

【曲げを受ける二辺固定二辺自由支持平板の極低サイクル疲労破壊評価】

本検討では, 局所の板要素を最も単純化した二辺固定二辺自由支持平板の繰返し曲げ実験を行い, 画像解析結果(実験結果)と有限要素法による補完解析により, 塑性ヒンジ理論と VGM に基づく極低サイクル疲労破壊評価法の適用性を検証し, (1)塑性ヒンジ理論に基づいて評価した局所塑性歪振幅履歴に鋼素材の疲労曲線を適用して亀裂発生を判定した場合の累積等価軸歪 $\Sigma \epsilon_n$

の最大評価誤差は約 50%($L_B/t \geq 25.0$ または L_h に実験近似値を適用した場合)~約 80%($L_B/t < 25.0$ または理論値どおりの L_h を適用した場合)であった。その一方で、時々刻々変動する L_h の影響を含んだ画像解析結果の局部塑性歪振幅履歴を直接用いた場合でも累積等価軸歪 $\Sigma \varepsilon_n$ の最大評価誤差は約 50%である、(2)VGM による極低サイクル疲労破壊評価法は、実験結果の亀裂発生時期を誤差 2cycle 以内、累積等価軸歪 $\Sigma \varepsilon_n$ を誤差 30%以内で安全側評価した。同手法は長さ厚み比 L_B/t に関係なく、局部座屈部の疲労破壊に適用可能であり、応力状態による疲労度の増減を考慮することで、歪量だけで疲労破壊を評価する古典的なマクロ手法(塑性ヒンジ理論, Coffin-Manson 則+線形・非線形の累積積損傷則)より亀裂発生時期や累積変形性能を高精度で評価する、(3) 開断面部材局部の板要素を模擬する二辺固定二辺自由支持平板の極低サイクル疲労破壊の疲労度の進展は $0.394 \leq T_{avd} \leq 0.511$, $0.226 \leq \zeta_{avd} \leq 0.934$ の範囲で生じ、疲労寿命の劣化は $-0.573 \leq T_{avc} \leq -0.411$, $-0.905 \leq \zeta_{avc} \leq -0.044$ の範囲で生じ、薄い板要素($L_B/t \rightarrow$ 大)ほど塑性平面歪状態、厚い板要素($L_B/t \rightarrow$ 小)ほど一軸応力状態に近いことが確認された。塑性ヒンジ理論が極低サイクル疲労破壊を良好に評価できる範囲は塑性平面歪状態近傍($\xi \approx 0$)であると考えられる、(4)VGM を長尺のブレース部材の極低サイクル疲労性能評価に適用するには日本の鋼材に適合した材料定数が必要である、ことが明らかになった。研究成果は後述する査読付き論文 1 編に掲載済みである。

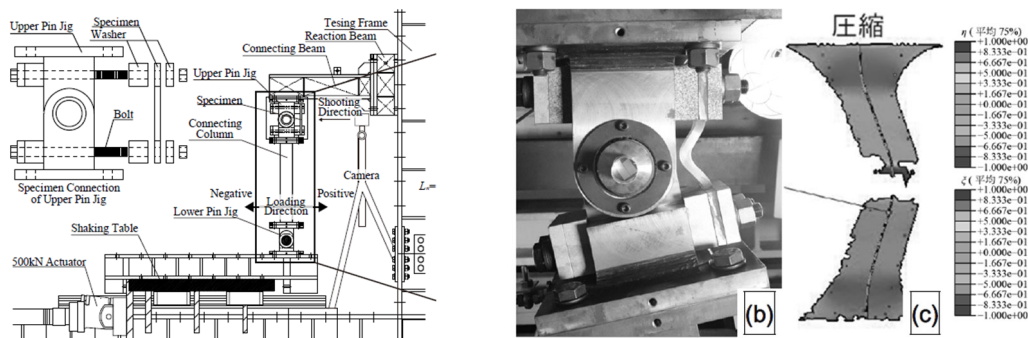


図 9 研究成果の例 (左: 実験セットアップ, 右 b: 実験の様子, 右 c: 画像解析)

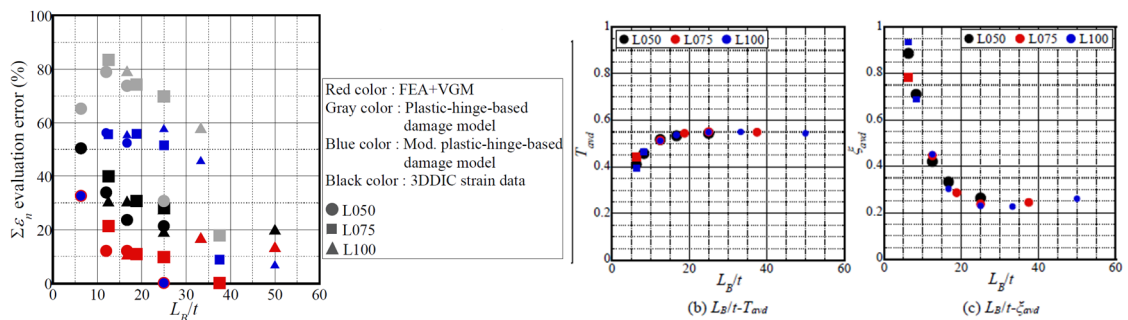


図 10 研究成果の例 (左: 変形性能評価誤差, 右: L_B/t と応力三軸度・ロード角パラメータ)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 TERAZAWA Yuki, TANAKA Haruki, TAKEUCHI Toru	4. 巻 87
2. 論文標題 OPTIMAL SEISMIC RESPONSE CONTROL OF DAMPED BRACED TUBE SYSTEM WITH FOCUS ON COST PERFORMANCE OF INTRODUCING ENERGY-DISSIPATION DEVICES	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1082 ~ 1092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.1082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 TERAZAWA Yuki, ISHIBASHI Yoji, TANAKA Haruki, YOKOYAMA Ryo, MIZUNO Hiroki, TAKEUCHI Toru	4. 巻 87
2. 論文標題 NUMERICAL INVESTIGATION OF DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTIC OF DAMPED BRACED TUBE SYSTEM WITH DIFFERENT DAMPED SLIT COMFIGURATION	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1247 ~ 1256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.1247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Asai Tomoki, Terazawa Yuki, Miyazaki Takashi, Lin Pao-Chun, Takeuchi Toru	4. 巻 247
2. 論文標題 First mode damping ratio oriented optimal design procedure for damped outrigger systems with additional linear viscous dampers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 113229 ~ 113229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2021.113229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 TERAZAWA Yuki, ISHIBASHI Yoji, OMURA Hiroki, ASAI Tomoki, TAKEUCHI Toru	4. 巻 87
2. 論文標題 NON-LINEAR DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTIC OF SINGLE-DAMPED OUTRIGGER SYSTEMS WITH OIL DAMPERS OR ELASTO-PLASTIC DAMPERS CONSIDERING DESIGN EARTHQUAKE LEVELS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 149 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishibashi Yoji, Terazawa Yuki, Tanaka Haruki, Yokoyama Ryo, Mizuno Hiroki, Takeuchi Toru	4. 巻 31
2. 論文標題 A novel damped braced tube system for tall buildings in high seismic zones	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Structural Design of Tall and Special Buildings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tal.1926	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TERAZAWA Yuki, ITO Daigo, TAKEUCHI Toru, SITLER Ben	4. 巻 89
2. 論文標題 EXPERIMENTAL AND NUMERICAL CHARACTERIZATION OF ULTRA LOW-CYCLE FATIGUE FRACTURE OF CFCF RECTANGULAR PLATE ELEMENTS UNDER CYCLIC BENDING	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 651~662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.89.651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 伊藤大悟, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 繰返し曲げを受ける二辺固定二辺自由支持平板の極低サイクル疲労破壊評 価と結果分析 その1 二辺固定二辺自由支持平板の繰返し曲げ実験の概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 濱大貴, 寺澤友貴, 竹内徹, 伊藤大悟
2. 発表標題 繰返し曲げを受ける二辺固定二辺自由支持平板の極低サイクル疲労破壊評 価法の適用性 その2 塑性ヒンジ理論またはVGM を用いた極低サイクル疲労破壊
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中瑞希, 大村広輝, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 1次モード減衰比の最大化に着目した非線形ダンパー付多層アウトリガー構造の最適応答制御 –その1 二層アウトリガー構造の動的応答特性–
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大村広輝, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 1次モード減衰比の最大化に着目した非線形ダンパー付多層アウトリガー構造の最適応答制御 –その2 多層アウトリガー構造の動的応答特性と最適設計–
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤大悟, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 繰返し曲げを受ける二辺固定二辺自由支持平板の極低サイクル疲労破壊評 価とその結果分析 –その1 二辺固定二辺自由支持平板の繰返し曲げ実験の概要と結果分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 繰返し曲げを受ける二辺固定二辺自由支持平板の極低サイクル疲労破壊評 価とその結果分析 –その2 塑性ヒンジ理論またはVGM を用いた極低サイクル疲労破壊評価法の適用性
2. 発表標題 濱大貴, 寺澤友貴, 竹内徹, 伊藤大悟
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 池田理央, 寺澤友貴, 田中瑞希, 竹内徹
2. 発表標題 線形粘性ダンパー付並列連層耐震架構を用いた超高層建物の最適応答制御 その1 一様配置の動的応答特性
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中瑞希, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 線形粘性ダンパー付並列連層耐震架構を用いた超高層建物の最適応答制御 その2 非一様配置の動的応答特性と最適ダンパー設計法
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Terazawa Yuki, Takeuchi Toru, Tanaka Mizuki
2. 発表標題 Modal damping and seismic performance of damped shear wall systems for tall building in high seismic zones
3. 学会等名 The 11th International Conference on the Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA'24) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中瑞希, 寺澤友貴, 竹内徹, 田中陽樹
2. 発表標題 全体曲げせん断比の異なる線形粘性ダンパー付並列連層耐震架構の動的応答特性
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村広輝, 寺澤友貴, 竹内徹, 田中陽樹
2. 発表標題 ダンパーの費用対効果を考慮した全体曲げせん断比の異なるDamped braced tube の最適地震応答制御 その1 数値解析モデルと連続一様配置での地震応答特性およびダンパー費用対効果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中陽樹, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 ダンパーの費用対効果を考慮した全体曲げせん断比の異なるDamped braced tubeの最適地震応答制御 その2 集約配置での地震応答特性とダンパー導入費用削減の可能性探索
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村広輝, 寺澤友貴, 竹内徹, 浅井智樹.
2. 発表標題 地震入力レベルとダンパーの非線形性が単層アウトリガー構造の動的応答特性に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中陽樹, 浅井智樹, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 1次モード減衰比に着目した線形粘性ダンパー付複層アウトリガー構造の最適応答制御 その1 数値解析モデルと固有振動特性
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井智樹, 寺澤友貴, 竹内徹
2. 発表標題 1次モード減衰比に着目した線形粘性ダンパー付複層アウトリガー構造の最適応答制御 その2 地震応答と最適設計手法
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関