

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06643

研究課題名(和文) 高層建物用履歴ダンパーの台風時および竜巻時風力下での制振性能の比較評価

研究課題名(英文) Comparative evaluation of damping performance of hysteretic dampers for high-rise buildings under strong winds and gusts

研究代表者

竹内 崇 (Takeuchi, Takashi)

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：80624395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、長時間継続する強風下や瞬間的に大きな風力が作用する突風下における履歴減衰型ダンパー(履歴ダンパー)付き建物の応答性状や性能保証限界に関して、強風下での風力の平均成分の影響や、履歴ダンパーの荷重変形量関係に及ぼすひずみ速度の影響を解明することを目的として、数値流体計算による突風を受ける建物の風力特性の解明、動的荷重を受ける履歴ダンパーの動特性の解明、および動的風応答計算による履歴ダンパー付き建物の応答特性の解明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した風外力に対する履歴ダンパーの特性に関する検討および、履歴ダンパー付き建物の動的風応答特性の検討の成果は、これまでに十分に明らかにされていなかった風荷重時のダンパーの履歴挙動の解明につながり、風外力を受ける建物に履歴ダンパーを用いた際の特性を把握する上での資料になると共に、その効果を検討する上での一助となるものであり、延いては、風外力が支配的となる高層建築物における履歴ダンパーの利活用幅の拡大に繋がるものである。

研究成果の概要(英文)：To clarify the effects of the strain rate on the lateral load-displacement relationship of a hysteretic damper and the effects of the mean wind force on the response of buildings with hysteretic dampers under strong winds and gusts, this study have investigated the unsteady wind force acting on buildings under gusts by using a computational fluid dynamics software. And the dynamic behavior of a hysteretic damper have been experimentally investigated by using a high speed actuator. In addition, the response of buildings with hysteretic dampers under strong winds have been numerically investigated.

研究分野：耐風工学

キーワード：動的風応答計算 立ち上がり時間の短い突風 載荷速度 数値流体計算 高速載荷

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地震に対する構造体の損傷を低減する目的で、履歴ダンパーを建物に組み込んだ制振構造が広く普及しているが、建物の超高層化が進み、風荷重が建物の設計に及ぼす影響が高くなってきている。しかしながら、風外力は、図1のように数時間に亘って継続することや、静的な平均成分を含むことから、現状の耐風設計においては主要な構造体を弾性応答に留めるように設計が行われている。履歴ダンパーは塑性化させることでエネルギー吸収を行うため、履歴ダンパーを強風時の建物応答の低減を目的に用いるためには、長時間継続する繰り返し荷重に対してエネルギー吸収性能を維持できるか、風力の平均成分によりダンパーの保有性能が低下しないかを検証する必要がある。履歴ダンパーを有する制振建物の風応答時の評価として、風外力に対する応答を考慮に入れた累積疲労損傷に関する研究¹⁾や、累積損傷をエネルギーの釣合に基づき予測する研究²⁾が行われているが、平均成分の影響や、建物の応答の高次モードの影響など、風外力に対する履歴ダンパーの特性に関しては未だ不明な点がある。

さらに、現行の耐風設計で考慮される台風のような強風だけでなく、竜巻などの突風による被害が日本においても頻発しており、突風時の建物の安全性を検討する必要性が高まっている。短時間で風速が変化する突風を受ける場合には、風力が通常よりも大きくなる“風力のオーバーシュート現象”を生じることが既往の研究³⁾で報告されているが、このような突風下での建物の応答性状や、履歴ダンパーによる制振効果の有効性は明らかではない。

また、履歴ダンパーの有効性を検証する上で、骨組みの動的応答計算を行う必要があるが、履歴ダンパーの荷重-変形量関係は、静的載荷実験時のデータに基づいてモデル化されて用いられており、その載荷速度による速度依存性は一般に考慮されていない。これまでに、動的加力実験によりひずみ速度の影響を調べた研究^{4,5)}や、鋼材ダンパーにおける速度依存性を考慮した履歴挙動の再現に関する研究⁶⁾が行われているが、想定外力は一定のひずみ速度での三角波⁴⁾か、地震動入力を対象としたもの⁵⁾であり、風力のパワースペクトル密度を想定した外力でのダンパーの動的応答性状や、累積損傷度の評価への影響は明らかではない。

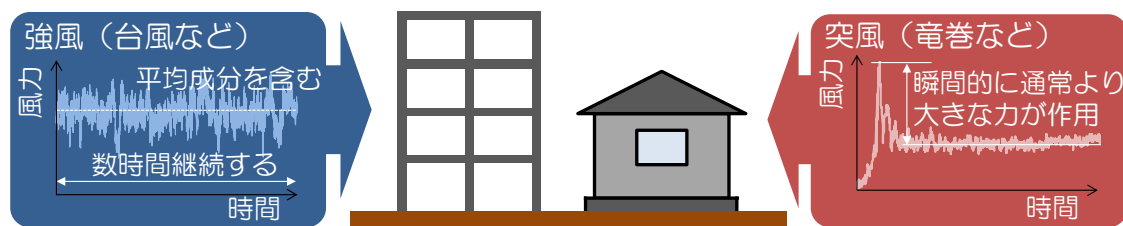


図1 強風と突風の特徴

【参考文献】 1)中込忠男, 李建: 繰返し力を受ける SM490 鋼の疲労性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 469 号, pp.127-136, 1995. 2)佐藤大樹ほか: 履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の風応答時における累積損傷分布予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 728 号, pp.1635-1645, 2016. 3) S. Taneda, The Development of the Lift of an Impulsively Started Elliptic Cylinder at Incidence, Journal of the Physical Society of Japan, 33, pp.1706-1711, 1972. 4)田中清ほか: 極低降伏点鋼制震パネルの動的履歴特性に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究 (その 1~2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.803-806, 1997. 5)山田哲ほか: 動的繰返し載荷実験結果に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 553 号, pp.121-128, 2002. 6)笠井和彦, 西澤恵二: 鋼材ダンパーの実験結果と速度依存性を考慮した動的解析法, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.807-808, 2010.

2. 研究の目的

本研究は、長時間継続する強風下や瞬間的に大きな風力が作用する突風下における履歴減衰型ダンパー（履歴ダンパー）付き建物の応答性状や性能保証限界に関して、強風下での風力の平均成分の影響や、履歴ダンパーの荷重変形量関係に及ぼすひずみ速度の影響を解明することを目的とする。まず突風時に建物に作用する非定常風力を明らかにし、突風時の応答性状を解明する。そして、履歴ダンパー付き骨組みの動的風応答計算を実施し、風外力の有する平均成分が履歴ダンパーの性能評価に及ぼす影響を明らかにする。さらに、風荷重下の建物における履歴ダンパーの応答を模擬した動的載荷試験を行い、履歴ダンパーの履歴挙動および終局時の累積損傷度に及ぼす載荷速度の影響を解明する。

3. 研究の方法

(1) 数値流体計算による突風下の 3 次元正方形断面建物に作用する非定常風力の解明を行う。3 次元正方形断面建物を対象とし、建物周りの 3 次元流れ場に立ち上がり時間の短い突風を流入し、LES モデルを用いて解析 (図 2) を実施することで、短時間で風速が変化する突風を受ける 3 次元建物に生じる非定常風力を明らかにする。建物高さ、風向角による非定常風力特性の変化を明らかにすると共に、動的風応答計算に用いる突風時風力の時刻歴波形を出力する。

- (2) 動的風応答計算による強風下および突風下の建物の応答性状の解明を行う。強風下での履歴ダンパー付き建物の動的風応答計算を行い、履歴ダンパーの累積損傷評価に及ぼす平均風力ならびに建物応答の高次モードの影響を明らかにする。建物は高さ 200m の正方形の平面を有する建物を想定し、変動風速波形は回帰法により、カルマン型のスペクトル構造となるように作成する。また建物の風応答解析を通じて動的载荷実験の入力データを取得する。
- (3) 履歴ダンパーの载荷実験を通じて、履歴ダンパーの荷重変形量関係および累積損傷度を解明する。履歴ダンパーは、ポリプロピレン板で面外変形を拘束した鋼製せん断パネルを用い、図 3 の载荷装置により载荷実験を行う。载荷プログラムとしては、静的正負交番繰り返し载荷、動的正負交番繰り返し载荷、並びに風荷重を想定した外力を入力する。また载荷実験結果を元に、履歴ダンパーの荷重変形量関係をモデル化する。

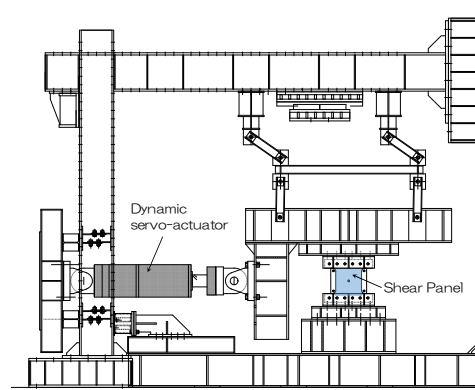
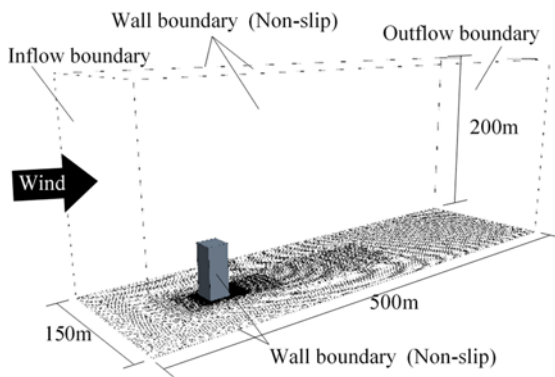


図 2 突風を受ける建物周りの数値流体計算モデル 図 3 履歴ダンパーの载荷装置

4. 研究成果

(1) 短時間で風速が変化する突風を受ける 3 次元建物に生じる非定常風力に関して、建物高さ、風向角を変数として数値流体計算を実施し、風向角 30 度時において、建物中層部で大きな風力が生じることを明らかにした。また、得られた非定常風力波形を用いて、その建物に対する動的風応答計算を実施し、突風時の建物応答における非定常渦の影響を調べた。数値流体計算で得られた突風下の建物に作用する非定常風圧力と、各層に作用する局部風力の関係性を風向角ごとに明らかにするとともに、その局部風力と建物の応答を明らかにした。突風時に生じる渦による風圧力のピーク値(図 4) と、そのピークが発生する時間について整理すると共に、より大きな局部風力を生じる条件となる渦の形成パターンを明らかにした。

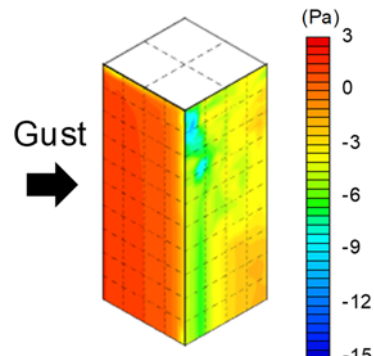


図 4 突風時のピーク風圧力分布

(2) 強風下での履歴ダンパー付き建物の動的風応答計算を行い、履歴ダンパーの累積損傷評価に及ぼす平均風力ならびに建物応答の高次モードの影響を調べると共に、動的载荷実験の入力荷重のデータを取得した。履歴ダンパーの累積損傷度は、建物モデルが塑性化する場合に、平均風力の影響を受け、その影響は建物モデルの塑性率が大きくなるほど顕著になる傾向が見られた(図 5)。面外変形が拘束された鋼製せん断パネル型履歴ダンパーの静的载荷および動的载荷実験結果を元に、その荷重変形量関係の骨格線および履歴ループを曲線モデルによりモデル化した。提案の曲線モデルと従来のトリリニア型の履歴モデルを用いて、強風および突風下における高層建物の履歴ダンパーによる応答低減効果の評価に及ぼす荷重-変形量関係モデルの耐力および履歴形状の影響を動的風応答計算により調べると共に、その応答計算結果に対して Rainflow 法を用いて累積損傷度評価を行い、評価値に対する荷重変形量関係モデルの影響を明らかにした。

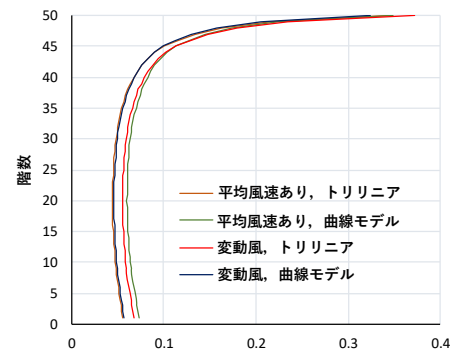


図 5 履歴ダンパーの累積損傷度分布

(3) 面外変形が拘束された鋼製せん断パネル型履歴ダンパーの変形性能に及ぼす荷重プログラムや拘束量の影響を静的荷重実験により調べ、鋼製せん断パネルの変形性能を、一般化幅厚比に基づくパラメータにより評価できることを明らかにした。動的アクチュエータを使用したせん断パネル型履歴ダンパーに対する動的荷重実験システムを構築し、履歴ダンパーに対して、強風を想定した外力を導入し、その応答性状を調べ、風外力に対するダンパーの履歴性状を解明すると共に、平均変位を変数とした実験を行い、その影響を明らかにした。また、面外変形が拘束された鋼製せん断パネル型履歴ダンパーのより詳細な変形性能を明らかにするために、荷重履歴を変数とした動的荷重実験を実施し、動的荷重下での履歴ダンパーの終局変形性能を明らかにした(図6)。さらに、実際の履歴ダンパー付き建物の風応答により近い状況下での履歴ダンパーの性能検証を行うための、強風・突風時の履歴ダンパー付き建物の解析と、動的アクチュエータを用いた履歴ダンパーの動的実験を同時に行うハイブリッド実験手法を考案した。本実験手法においては、事前に動的アクチュエータの時間遅れが解析モデルの応答値並びに実験結果に及ぼす影響を検証し、時間遅れ補償を組み込むことで、ダンパーの非線形挙動をより高精度に応答解析に反映させることを可能としている。

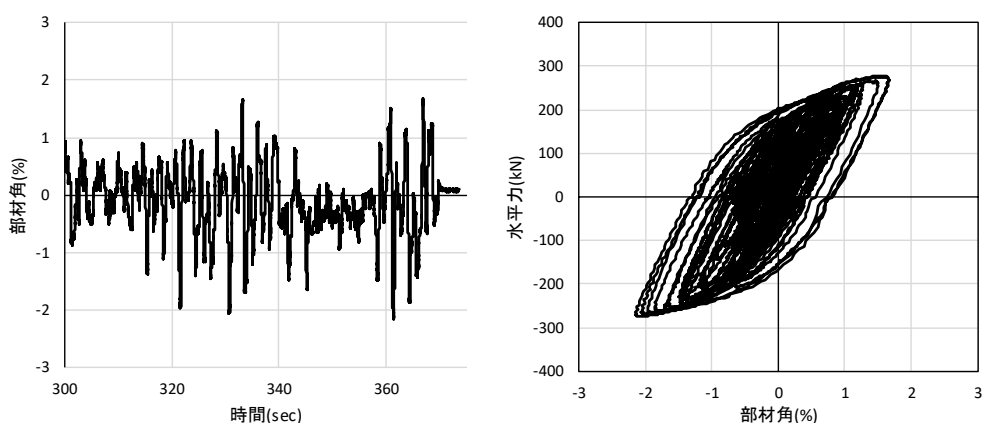


図6 荷重実験での風外力を想定した入力変位の時刻歴波形とせん断パネルの履歴性状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 竹内崇, 孫玉平	4. 巻 85
2. 論文標題 拘束鋼製せん断パネルの終局耐力と変形性能に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 263 ~ 273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.85.263	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 Takashi Takeuchi, Naohiro Takeuchi, Junji Maeda, Yong Chul Kim	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of wind direction on local wind force and wind response of a building under short-rise-time gusts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 7th International Symposium on Computational Wind Engineering	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) なし	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 Takashi TAKEUCHI, Naohiro Takeuchi, Junji Maeda, Yong Chul Kim	4. 巻 1
2. 論文標題 Characteristics of local wind force and wind response of a building under short-rise-time gusts	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering	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) なし	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takashi TAKEUCHI, Naohiro TAKEUCHI, Junji MAEDA, Yong Chul KIM
2. 発表標題 Effects of wind direction on local wind force and wind response of a building under short-rise-time gusts
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering 2018. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内崇, 孫玉平
2. 発表標題 突風下の木造住宅の柱-土台接合部の引き抜き性能に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究(その2 引き寄せ金物による接合)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi TAKEUCHI, Naohiro Takeuchi, Junji Maeda, Yong Chul Kim
2. 発表標題 Characteristics of local wind force and wind response of a building under short-rise-time gusts
3. 学会等名 the 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Takeuchi
2. 発表標題 Unsteady wind force on a low-rise building under a short-rise-time gust
3. 学会等名 International Symposium on Novel Engineering Materials and Structures (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----