

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風速・風向変化を伴う長時間の風応答時における超高層建物に付加した履歴型ダンパーの疲労損傷度の評価
Title(English)	Estimation of fatigue damage degree of hysteretic dampers installed in high-rise building for long-term wind response with changing wind speed and direction
著者(和文)	宮本滉大, 佐藤大樹, 陳引力, 田中英之, 畔上泰彦, 曾根孝行, 今野大輔, 渡井一樹
Authors(English)	Kodai Miyamoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Hideyuki Tanaka, Yasuhiko Azegami, Takayuki Sone, Daisuke Konno, Kazuki Watai
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 577-580
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 577-580
発行日 / Pub. date	2026, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

風速・風向変化を伴う長時間の風応答時における 超高層建物に付加した履歴型ダンパーの疲労損傷度の評価

構造—振動

超高層建物 制振構造 履歴型ダンパー
疲労損傷度 耐風設計 台風シミュレーション

正会員 ○ 宮本 滉大^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 陳引力^{*3} 〃 田中英之^{*4}
〃 畔上泰彦^{*4} 〃 曾根孝行^{*4}
〃 今野大輔^{*4} 〃 渡井一樹^{*4}

1. はじめに

現行の耐風設計では、想定される最大級の強風に対して主要な構造体を弾性応答に留めることを原則に、10分間の応答評価時間での最大応答に着目した評価が一般的に行われている。一方、近年の建築物の高層化に伴い、低い荷重レベルで塑性化させ、地震応答を主な対象に積極的なエネルギー吸収を行うことを意図した履歴型ダンパー（以降、ダンパー）を備えた制振構造が普及している。これにより、地震のみならず風力に対してもダンパーが塑性化する恐れがある。風応答は地震応答に比べて継続時間が極めて長く、建築物の供用期間中においては地震および風力を含む全ての累積荷重効果を考慮する必要がある。その例として、長時間の繰返し作用によってダンパーに蓄積する疲労損傷の評価が挙げられる。

本報では、超高層建物に付加したダンパーである座屈拘束ブレースを対象に、台風シミュレーションに基づいた風速・風向変化を伴う長時間風力を外力として、累積疲労損傷度（D 値）の評価を行う。

2. 建物およびダンパーの概要

検討建物は、地上 45 階建ての超高層制振建物を模した立体モデルとする。図 1 に検討建物モデルの概要を示す。なお、図 1(c) に示す固有周期は、主架構のみでの各方向の弾性 1 次固有周期である。主架構は弾性とし、構造減衰は主架構に対して 1% の剛性比例型とする。

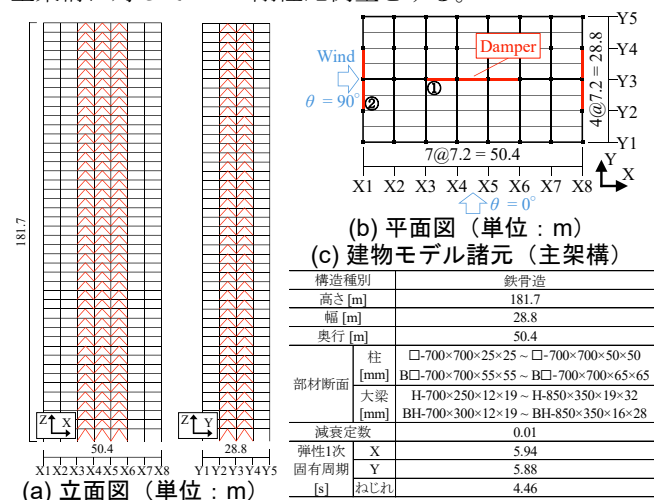


図 1 検討建物モデルの概要

履歴型ダンパーである座屈拘束ブレースは、文献 1) と同様にモデル化する。高さ方向のダンパー配置を図 1(a) に、平面配置を図 1(b) に示す。図 1(b) のダンパー①、②は、平面上に付加した複数のダンパーの中で、5 章で後述の各応答値が大きくなる傾向がある X、Y 方向のダンパーである。ダンパー諸元を決定するために、ダンパーの降伏層せん断力係数 α_{dy1} を式(1)で定義し、これをダンパー量と呼ぶ。

$$\alpha_{dy1} = Q_{dy1} / \sum_{i=1}^N m_i g \quad (1)$$

ここで、 Q_{dy1} : 第 1 層のダンパー降伏層せん断力、 N : 建物の層数、 m_i : 第 i 層の質量、 g : 重力加速度である。

本報では、地震および風応答を同一フレームで検討した文献 1) に続き、地震応答を対象にモデル化を行ったダンパー量 $\alpha_{dy1} = 0.020$ の制振モデルを対象に検討を行う。 $\alpha_{dy1} = 0.020$ における X、Y 方向の弾性 1 次固有周期はそれぞれ 4.67 s、5.21 s であり、ねじれ方向は 3.66 s である。

3. 台風および比較用風力（10 分間）の概要

3.1 モンテカルロシミュレーションの概要

台風性状は畔上らの文献 2) に基づき、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (database for Policy Decision making for Future climate change, d4PDF)」の全球モデル版³⁾の現在気候実験と、京都大学防災研究所が作成した d4PDF の台風トラックデータ⁴⁾を用いた解析結果を使用し、畔上らの文献 5) に基づきモンテカルロシミュレーションを行った。なお、東シナ海沿岸や本州の太平洋沿岸の海上を通過する台風も日本に与える影響が大きいため、藤井・光田の文献 6) と同様に、長崎県沿岸から西に 200 km、千葉県沿岸から東に 200 km 先の海上を通過した台風も解析対象とした。以降、海上の通過も含めて“上陸”と呼ぶ。台風上陸の検討地域は、日本の都市（福岡、大阪、東京）を対象とする。シミュレーションの計算期間は 10,000 年であり、計算の試行回数は乱数列を変えて実験毎に 5 回である。台風の風速・風向の時刻歴データは、10 分間毎に算出した結果である。

3.2 検討台風の選定および評価

3.1 節のシミュレーション期間が 10,000 年（計 50,000 年分）の台風データの中から、建築物荷重指針・同解説 (2015)⁷⁾（以降、荷重指針）の各都市における再現期間 500 年の風速 $U_{500} = 38$ m/s（福岡、大阪）または 40 m/s（東

Estimation of fatigue damage degree of hysteretic dampers installed in high-rise building for long-term wind response with changing wind speed and direction

Kodai MIYAMOTO, Daiki SATO, Yinli CHEN, Hideyuki TANAKA, Yasuhiko AZEGAMI, Takayuki SONE, Daisuke KONNO, Kazuki WATAI

京) を目標値として、台風上陸時の最大風速 $U_0(t)_{\max}$ が許容範囲を満たす台風を選定する。

はじめに、シミュレーションで発生させた台風の中から、荷重指針の U_{500} を目標に、10 分間平均風速 $U_0(t)$ の最大値 $U_0(t)_{\max}$ が許容範囲を満足するような台風を抽出した。許容範囲は、福岡、大阪で $U_0(t)_{\max} = 37.5 \sim 38.4 \text{ m/s}$ 、東京で $U_0(t)_{\max} = 39.5 \sim 40.4 \text{ m/s}$ とする。次に、抽出した台風を、①風速が時間とともに増大し、1つのピークを迎えた後に低下する「P-1 型」、または②2つの異なる時刻でピークを持ち、その間で一時的に風速が低下する「P-2 型」のいずれかに分類した(図 3、後述)。その後、P-1 型および P-2 型それぞれの平均風速曲線 $\overline{U_0(t)}$ に類似する風速変化の台風を本報での検討台風とした。

図 2 に各都市における P-1 型および P-2 型の検討台風の進行経路をそれぞれ示す。図には最大旋衡風速半径と進行速度を併記する。以降、各都市の検討台風を検討地域と台風の分類の組合せ(例えば、福岡の P-1 型は FKP1)で呼称する。図 2 の検討地域と進行速度の関係より、P-1 型は高緯度の地域ほど進行速度が速い。P-2 型は東京に比べて低緯度の大阪で進行速度がわずかに速い。台風の分類と進行経路の関係に着目すると、P-2 型は P-1 型に比べて台風中心(赤線)が記録地点(星印)に近い経路を進んでいることがわかる。また、いずれの台風も記録地点の西側を通過している。図 3 に検討台風の $U_0(t)$ と時刻 t の関係を示す。時刻 t は P-1 型で $U_0(t)$ が最大となる時刻を、P-2 型で $U_0(t)$ が 2 つの異なるピークの間で極小値をとる時刻をそれぞれ $t = 0$ とする。P-1 型の $U_0(t)$ 変化に着目すると、高緯度の地域ほど台風の継続時間は短くなり、僅かではあるが単位時間当たりの $U_0(t)$ 変化率は大きくなっている。これは、図 2 で高緯度の地域ほど台風の進行速度が

速いことに起因する。P-2 型の $U_0(t)$ 変化に着目すると、図 2 で台風の目が記録地点の付近を通過する時刻に、 $U_0(t)$ は一時的に低減することがわかる。高緯度の地域ほど、2 つの $U_0(t)$ ピークの時間間隔が短くなり、ピーク付近の $U_0(t)$ 変化率が大きくなっている。また、すべての都市で P-1 型に比べて P-2 型の継続時間が長い。なお、以上の検討地域の緯度と検討台風の進行速度、継続時間、 $U_0(t)$ との関係は、本報で扱う事例の範囲内で認められる傾向である。

台風の風向は、シミュレーションで得た 10 分間毎に変化する風向を、文献 8) と同じ風洞実験での 5°刻みの方向(計 72 風向)に置き換え、階段状の変化として扱う。例として、図 4 にシミュレーションで得た福岡での風向変化の時刻歴と解析用に置換した後の風向変化の時刻歴を示す。本報では、図 1(b)のように建物に対する風向 $\theta = 0^\circ$, 90° を定義した(時計回りを正)。その後、文献 1) で建物短辺方向に正対する向きに風向を定義した場合に、ダンパーに蓄積する D 値が最大となったことを踏まえて、図 3 の $U_0(t)_{\max}$ を計測する時刻 t に $\theta = 90^\circ$ となるように、建物と台風の風向変化の関係を設定した。図 4 よりシミュレーションで得た風向変化の置換は、風洞実験での 5°刻みの風向を用いることで、忠実に再現できている。

3.3 台風上陸時における長時間風力の時刻歴波形の作成

はじめに、風洞実験⁸⁾で得た高さ方向に 8 レベル分の層風力係数の時刻歴波形と式(2)⁷⁾で表される 10 分間頂部平均風速 $U_H(t)$ より、10 分間の風力を異なる時間、風速、風向毎に作成する。

$$U_H(t) = U_0(t) K_D K_S E_H \quad (2)$$

ここで、 $U_0(t)$: 地上 10 m での 10 分間平均風速、 K_D : 風向係数 ($K_D = 1$)、 K_S : 季節係数 ($K_S = 1$)、 E_H : 風速の鉛直分布係数(地表面粗度区分Ⅲに換算)である。

10 分間の風力は、風方向、風直交方向、ねじれ方向の風力係数に負担面積等乗じて計算した。具体的には、 $U_H(t)$ を 10 分間毎に計算し、負担面積に応じた分配により、建物 45 層分の床位置に作用する風力に変換した。風力は 0.05 秒刻みの時刻歴である。本報では、これら 10 分間の風力を繋ぎ合わせて、風速・風向変化を伴う長時間風力を再現する。台風上陸時のような長時間の風力を作成する場合、異なる

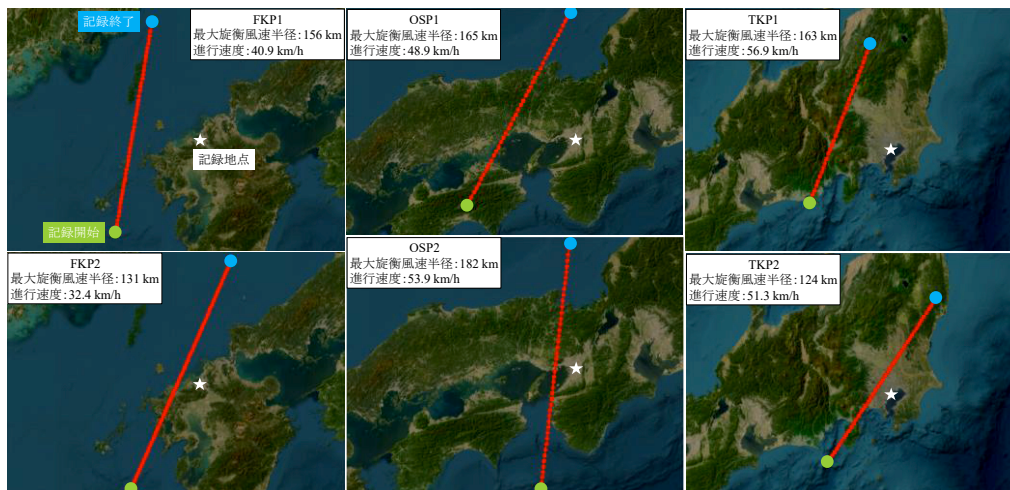


図 2 台風の進行経路

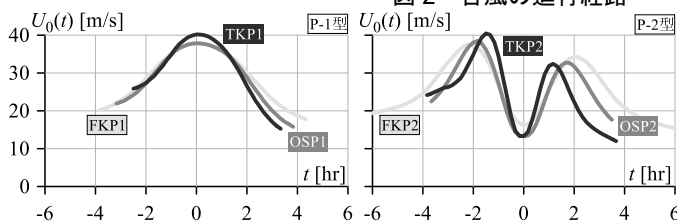


図 3 台風の風速変化

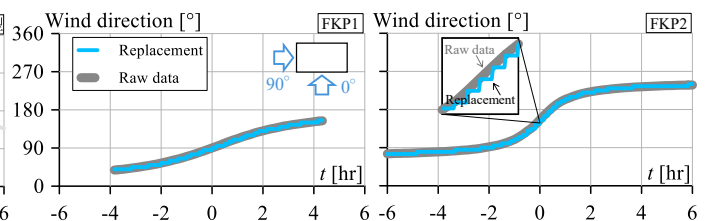


図 4 台風の風向変化の置換@福岡

る時間、風速、風向の風力波形を繋げる必要がある。この時、不連続な接続により特異な応答が生じないように、それぞれの風力波形の負担率を余弦関数で徐々に変化させて繋いでいる⁹⁾。波形同士の重ね合わせ部は、主架構のみでの弾性1次固有周期(図1(c))の約10倍の長さの波形(60秒)とした。また、解析開始時の過渡応答の影響を避けるため、接続後の風力波形の前半に50秒のエンベロープを設け、50秒以降の加振時間における応答に対して評価する。本報で扱う風応答は、風方向、風直交方向、ねじれ方向風力の組合せを1組の組合せ風力とする8組によるアンサンブル平均値である。図5に例としてFKP1の第40層におけるX,Y方向の風力 F 、ねじれ方向風力 M の時刻歴波形を示す。比較用風力として10分間風力(5.3節で対象)も使用する。10分間風力は、長時間風力において $U_H(t)$ が最大となる10分間の時刻歴波形に概ね一致するように作成したものである。

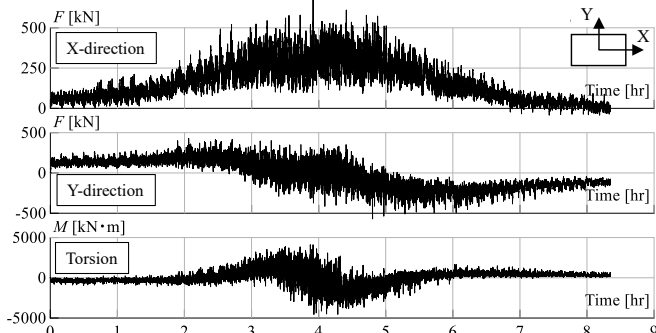


図5 台風上陸時の長時間風力 (FKP1@第40層)

4. 疲労損傷評価方法

累積疲労損傷度(以降、D値)は、Rainflow法¹⁰⁾より算出したダンパーの全歪振幅 $\Delta\epsilon_{dp}^{(k)}$ (両振幅)毎に、修正Miner則¹¹⁾(式(3))を用いて算出する。

$$D = \sum D^{(k)} = \sum \frac{n^{(k)}}{N_d^{(k)}} \quad (3)$$

ここで、 $D^{(k)}$: $\Delta\epsilon_{dp}^{(k)}$ による疲労損傷度、 $n^{(k)}$: $\Delta\epsilon_{dp}^{(k)}$ の繰返し回数、 $N_d^{(k)}$: $\Delta\epsilon_{dp}^{(k)}$ による破断回数である。

座屈拘束ブレースの $N_d^{(k)}$ を算出するための疲労性能曲線を式(4)で設定する¹⁾。

$$\Delta\epsilon_{dp}^{(k)} = 0.18 N_d^{(k)-0.46} \quad (4)$$

本報では、評価の明確化のために $\Delta\epsilon_{dp}^{(k)}$ の上限は設けず、かつ下限である疲労限度はないものと仮定した仮想ダンパーに対する評価を行う。

5. 解析結果

5.1 層間変形角およびD値の高さ方向分布による評価

図6, 7に各都市におけるP-1型およびP-2型の台風を $\alpha_{dy1} = 0.020$ のダンパーを付加した検討建物にそれぞれ入力した場合の第 i 層の層間変形角の最大値 $R_{i,max}$ およびD値 D_i の高さ方向分布をY方向に着目してそれぞれ示す(図7はダンパー②に着目)。図6より台風の種類によらず、 $U_{500} = 38$ m/sの福岡、大阪では $R_{i,max}$ は1/100 rad以内に、 $U_{500} = 40$ m/sの東京では $R_{i,max}$ は1/100 radをわずかに上回る。図7よりダンパー②では、検討地域、台風の種類

によらず第2層で D_i は最大となり、その範囲は $D_i = 0.29 \sim 0.45$ となっている。検討地域とD値の関係に着目すると、 $U_{500} = 40$ m/sの東京では、 $U_{500} = 38$ m/sの福岡、大阪に比べて D_i は大きくなり、 D_i の大小は $U_H(t)$ の影響を受けることが確認できる。台風の種類とD値の関係に着目すると、P-2型はP-1型に比べて継続時間が長く(図3, 4)、繰返し作用も多数回になるが、台風の種類による著しい D_i の差はなく、継続時間と D_i の間に明確な相関関係は確認できない。なお、X方向の $R_{i,max}$ と D_i (ダンパー①)の応答レベルはY方向に比べて小さく、例えば、 $R_{i,max}$ は台風によらず1/200 rad前後であったため、結果は割愛する。

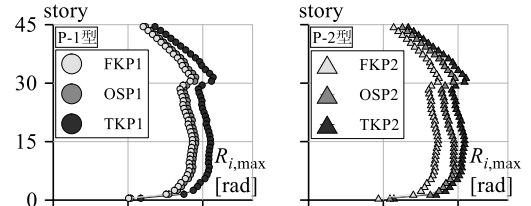


図6 層間変形角の高さ方向分布 (Y方向)

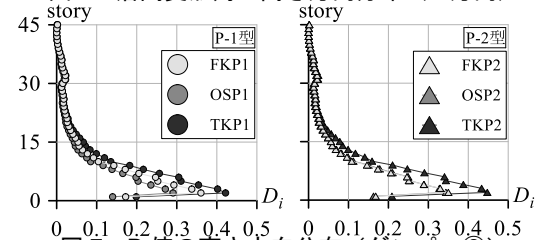


図7 D値の高さ方向分布 (ダンパー②)

5.2 10分間毎のD値と風速・風向変化の関係

本節では、台風上陸時の長時間の応答時間の中で、D値の増大に影響する時間帯を調べるため、10分間毎に算出したD値 $D(\Delta t_{10min})$ と風速・風向変化の関係を分析する。なお、10分間毎の $D(\Delta t_{10min})$ の総和は、全時間で累積計算したD値(図7)とほぼ同値になることを確認している。

図8に福岡のP-1型およびP-2型の台風上陸時に、4章の手法を10分間毎に適用して算出したD値である $D(\Delta t_{10min})$ および $U_0(t)$ と風向 θ の変化の関係を示す。図の横軸はシミュレーションで10分間毎に算出した置換前の風向(図4)、縦軸は $D(\Delta t_{10min})$ および $U_0(t)$ の2軸とする。なお、図8では5.1節でD値が大きくなった第2層のダンパー②(Y方向)に着目する。 $D(\Delta t_{10min})$ は8組の組合せ風力による応答のアンサンブル平均値である。図8のFKP1に着目すると、 $U_0(t)_{max}$ に対応する10分間($t=0$)で $D(\Delta t_{10min})$ は最大となることが確認できる。これは、 $U_0(t)$ が最大となるだけでなく、図に示した風向 θ が建物短辺方向に正対する向き($\theta=90^\circ$)となり、Y方向に設置したダンパー②に対して風力の風直交方向成分の影響が最も支配的に作用するからである¹⁾。また、図8で $U_0(t)$ と θ の対応関係に着目すると、FKP1, FKP2ともに、 $U_0(t)_{max}$ に対応する θ に対して 10° 程度の変化が生じると、 $D(\Delta t_{10min})$ はピーク時に比べて約50%未満まで低減することが確認できる。図8より、 $D(\Delta t_{10min})$ のピーク時に対して 10° 程度の風向変化が生じる応答期間中では、 $U_0(t)$ は $U_0(t)_{max}$ に比べてほと

んど変化していないことが確認できるため、本報で対象とする扁平形状の建物では、風向変化に対する D 値の変動が過敏であり、 D 値の算定における重要なパラメータといえる。よって、3.2 節の手順で台風上陸時の風向変化を再現する場合には、十分に細かい刻みで置換を行う必要があるといえる。図 8 で FKP2 の 2 回目の $U_0(t)$ ピーク時に着目すると、当該時刻では $D(\Delta t_{10\min})$ はほとんど増大しない。以上の傾向は他の都市でも同様に確認できる。

5.3 等価継続時間の概念を用いた台風上陸時の D 値評価

5.2 節より、本報で扱う扁平形状の建物では、風向変化に対する D 値の変動が過敏であり、大部分の時間は D 値の増大にほとんど影響しないことがわかった。一方で、台風のような長時間の風応答を対象に時刻歴応答解析を行う場合、継続時間の長さだけでなく、多くのアンサンブル数が必要となることで、膨大な計算量と計算時間を要することが問題となる。そこで、本報では、松井ら¹²⁾によって検討された等価継続時間の概念を用いて、台風のような強いイベントがダンパーに与える累積値 (D 値) と、台風上陸時の最大風速 $U_0(t)_{\max}$ が吹き続けると仮定した場合 (代表風速) の累積値が等価になるような継続時間を算出することで、簡易的に台風上陸時の D 値を見積もる際の数値オーダーの一例を示す。

本報では、風速・風向が変動する台風による D 値と等価になる代表風速の等価継続時間 $T_{eq,D}$ を式(5)で表す。

$$T_{eq,D} = D_{\max} / (d_{U_{\max 10}} / 600) \quad (5)$$

ここで、 $D_{\max}$: 台風上陸時の最大 D 値 (図 7 の第 2 層)、 $d_{U_{\max 10}}$: 10 分間の比較用風力 W_{comp} ($U_{500} = 38 \text{ m/s}$ または 40 m/s 一定、風向変化なし) による最大 D 値である。

表 1 に式(5)を用いて算出した各都市での台風上陸時の等価継続時間 $T_{eq,D}$ を示す。 $T_{eq,D}$ はいずれの都市においても、概ね 40~50 分の範囲になった。表 1 で台風の最大風速 $U_0(t)_{\max}$ と $T_{eq,D}$ の関係に着目すると、台風の分類ごとに $U_0(t)_{\max}$ が大きいほど $T_{eq,D}$ は短くなる傾向がある。台風の進行速度 (図 2) と $T_{eq,D}$ の関係に着目すると、 $U_0(t)_{\max}$ がほぼ同程度である福岡、大阪では、進行速度が速いほど台風の分類ごとに $T_{eq,D}$ は短くなることわかる。なお、 $T_{eq,D}$ と $U_0(t)_{\max}$ および進行速度の間に認められる傾向は、構造物の代表高さにおける設計風速と応答の関係が近似的にベキ関数で表されることを利用して便宜的に累積値を計算した文献 12) で同様に確認されている。

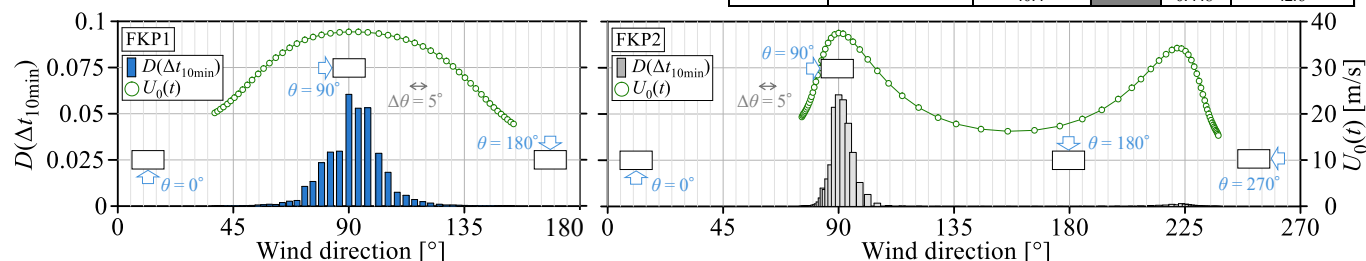


図 8 10 分間毎の D 値と風速・風向変化の関係 (ダンパー②@第 2 層、福岡)

本報で行った $T_{eq,D}$ の算定は、特定のアスペクト比の建物、かつ特定の箇所に付加したダンパーの D 値を対象にしたものであり、建物形状やダンパー量をパラメータとして、更なる解析データの蓄積が必要であると考え。

6. まとめ

本報では、超高層建物に付加した履歴型ダンパーを対象に、台風上陸時の風速・風向変化を伴う風応答時における累積疲労損傷度 (D 値) の評価を行った。

- 1) 台風上陸時の D 値は最大で 0.29~0.45 となり、その程度は $U_H(t)$ の大小の影響を受けるが、台風の分類の違いによる著しい D 値の差はなかった。
- 2) 本報で対象とする扁平形状の建物では、風向変化に対する D 値の変動が過敏であり、 D 値の算定における重要なパラメータといえる。
- 3) 等価継続時間 $T_{eq,D}$ の試算を行い、地域によらず概ね 40~50 分の範囲になった。

謝辞

本報は、(株)竹中工務店、東京科学大学佐藤大樹研究室による共同研究の成果の一部を用いたものです。本研究では、文部科学省による複数の学術研究プログラム (「創生」、「統合」、SI-CAT、DIAS) 間連携および地球シミュレーターにより作成された d4PDF を使用しました。d4PDF (Mizuta et al., 2017) に基づく台風トラックデータは、Webb et al. (2019) により提供されたデータを用いました。

参考文献

- 1) 宮本 滉大, 佐藤大樹ほか: 地震および風応答時における超高層建物に付加した履歴型ダンパーの疲労損傷度の評価, 日本建築学会技術報告集, 第 32 巻, 第 80 号, pp.110-115, 2026.2
- 2) 村上 泰彦ほか: 地球温暖化が日本列島上陸時の台風の性状に及ぼす影響に関する研究, 風工学研究論文集, 第 27 巻, pp.126-133, 2022
- 3) Mizuta, R. et al.: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models, Bulletin of the American Meteorological Society, 98, 7, 2017, pp.1383-1398
- 4) Webb, A. et al.: Global tropical cyclone track detection and analysis of the d4PDF mega-ensemble projection, Journal of Japan Society of Civil Engineers, B2(Coastal Engineering), 75, 2, 2019, pp.1-12
- 5) 村上 泰彦ほか: 気候変動が日本の設計風速に与える影響に関する研究, 2023 年度日本風工学会年次研究発表会梗概集, pp.185-186
- 6) 藤井 健, 光田 寧: 台風の確率モデルによる強風のシミュレーション, 日本風工学会誌, 第 28 号, pp.1-12, 1986.6
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015), 2015.2
- 8) 平塚 紘基, 佐藤 大樹, 田中英之: 変動風力を受ける超高層制振建物の弾塑性風応答予測その 1 風洞実験気流特性および風力特性に関する検討, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.313-316, 2021.3
- 9) 鈴木 雅雄ほか: 高層免震建築物の風応答時刻歴解析による検討 その 3 風向変化を伴う 3 方向風力時刻歴波形の作成, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.613-614, 2011.8
- 10) 遠藤 達雄ほか: 「Rain Flow Method」の提案とその応用, 九州工業大学研究報告 (工学), No.28, pp.33-62, 1974.3
- 11) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 一付・設計例一, 技報堂出版, 2012.6
- 12) 松井 正宏ほか: 耐風設計で累積の荷重効果を評価するための強いイベントの等価継続時間, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.85-86, 2011.8

表 1 台風上陸時の等価継続時間 (ダンパー②@第 2 層)

地域	台風名	最大風速 $U_0(t)_{\max}$ [m/s]	$d_{U_{\max 10}}$	$D_{\max}$	等価継続時間 $T_{eq,D}$ [min]
福岡, 大阪	W_{comp} (38 m/s)	38.0	0.070		
	FKP1	37.7		0.360	51.6
福岡	FKP2	37.5		0.350	50.2
	OSP1	37.8		0.290	41.6
大阪	OSP2	38.4		0.344	49.3
	W_{comp} (40m/s)	40.0	0.105		
東京	TKP1	40.1		0.422	40.1
	TKP2	40.4		0.448	42.6

*1 東京科学大学

*2 東京科学大学総合研究院 准教授・博士 (工学)

*3 東京科学大学総合研究院 助教・Ph.D.

*4 (株)竹中工務店 技術研究所

Institute of Science Tokyo^{*1}

Assoc. Prof., IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.^{*2}

Assist. Prof., IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.^{*3}

Research & Development Institute, Takenaka Corporation^{*4}