

観測記録に基づく 2 棟連結型超高層免震建物の風応答挙動の分析

東京工業大学 平島 裕大

1. はじめに

超高層免震建物の実観測記録が報告された例は少なく、風に対する応答挙動には不明な点が数多く残る。そうした背景を受けて、大熊ら¹⁾は中層の、佐藤ら²⁾は超高層の免震建物において強風時の風速と加速度の観測記録を基に分析を行い、加速度ピークファクター g_A が 4 ~ 8 程度の値となることを報告している。 g_A は現行の耐風設計において等価な最大荷重を算出するための係数であり、風外力および応答が定常ガウス過程かつ応答が狭帯域のランダム振動であることを前提として、一般的に 3 ~ 3.5 程度の値が用いられる³⁾。これと比較して、上述した免震建物における観測値は有意に大きい、その原因の特定には至っていない。

筆者らは、東京工業大学の超高層免震建物(J2-3 棟、図 1)を対象として、2018 年台風 24 号(以降、T1824)と 2019 年台風 15 号(以降、T1915)接近時の建物最上階の加速度記録を分析し、応答が増大する時間において g_A が最大で 8 程度となる場合があることを確認している⁴⁾。これより、応答増大時の加速度波形が非定常な性質を示すことが考えられ、風速変動が風力そして建物の応答へと伝達される過程を踏まえると、①：周辺地形・建物により生じた非定常な風外力、または、②：免震建物に特有の非線形なシステムの 2 つがその要因として挙げられる。これより本論文では、まず免震建物における応答増大時の加速度波形の特性を明らかにする。また、風速変動の定常性についても分析し、応答に非定常な性質が入り込む要因を絞り込むことを目的とする。

2. 対象建物および観測システムの概要

J2-3 棟は、先に建設された J2 棟(2005 年竣工)に後で建設された J3 棟(2012 年竣工)が連結した 2 棟連結型の超高層免震建物である(図 1)。建物高さは 91.35 m で、免震層は 1 階と 2 階の間にある。免震装置の詳細については文献 5)、6)を参照されたい。2 棟は各階の渡り廊下と水平ブレース(6, 10, 14, 18 階)を介して連結されており(図 2)、J2-3 棟の平面全体を剛床と見なす設計がなされている。

図 2 に J3 棟 20 階の 3 つのサーボ型加速度計(X(E), Y(E), X(SW))の設置位置を示す。加速度記録は、

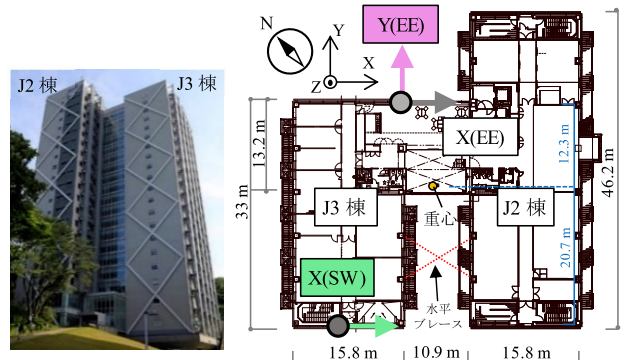


図 1 J2-3 棟外観

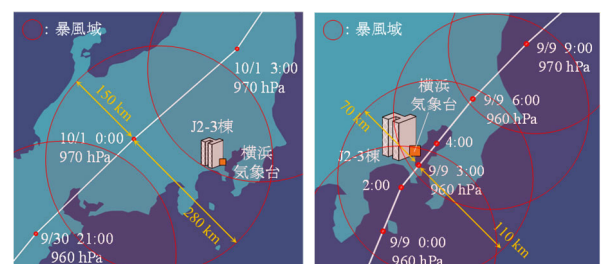
図 2 20 階平面および加速度計位置

収録機において 30 Hz のローパスフィルターを介し、100 Hz で収録されている。なお、図 2 中の重心は、部材レベルで再現した 3 次元立体解析モデルにおける重心位置である⁷⁾。

風速計は J2 棟屋上階の北側と南側にそれぞれ 1 機ずつあり(図 4(a),(b)赤点)、風速・風向のサンプリング周期は 1 秒である。瞬間風速は 3 秒間平均で評価する。風向は正 16 方位で記録される。

3. 対象とする台風の概要

T1824 と T1915 の台風の経路を図 3(a), (b)に示す⁸⁾。T1824 は J2-3 棟に対して西側、T1915 は東側を通過している。図 4(a), (b)に J2 棟屋上階の風速計と横浜气象台⁹⁾で観測された平均風速・最大瞬間風速(上段)、最多風向(下段)の時系列を示し、最大平均風速観測時の建物と風向の関係を併記する。J2-3 棟には南北 2 か所の風速計が設置されているが、T1824 の主風向は南寄りであるため、南側の風速計を用いた。T1915 では主風向が北寄りであるため、北側の風速計を用いた。最大平均風速は T1824 で 28.7 m/s, T1915 で 27.9 m/s と同程度であった。2 台風の風速・風向はいずれも横浜气象台と高い相関を示す。



(a) T1824

(b) T1915

図 3 台風の経路⁸⁾

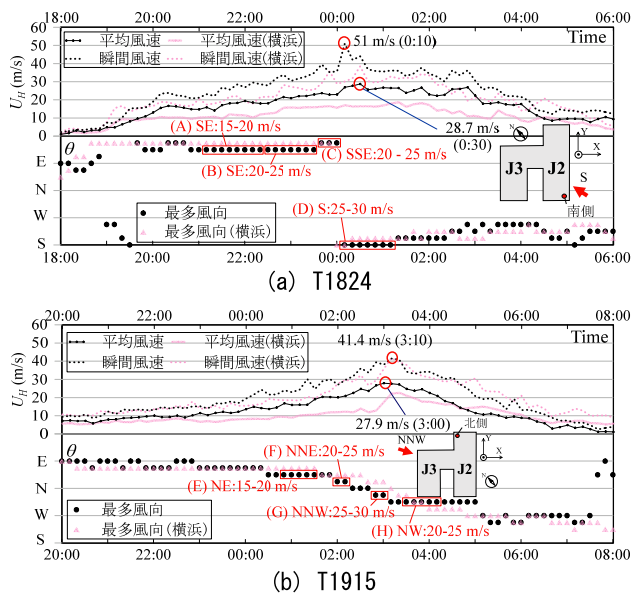


図4 風向風速の時系列変化⁹⁾

4. 加速度応答結果の分析

4.1 フィルター処理方法の概要

図5にT1824において全加速度計で最大値を記録した10分間(2018/10/1 0:10 - 0:20)のパワースペクトル密度(PSD)を示す。XとY方向のPSDの谷が1.0 Hz付近に確認される。以降は、図に見られる第一ピーク付近を対象に分析を行い、平均値を除いたうえで、0.1 ~ 1.0 Hzの矩型のバンドパスフィルター処理を行った時刻歴波形を用いて検討する。

4.2 加速度応答結果の分析

各台風における最大応答加速度 A_{max} と加速度ピークファクター g_A の時系列を図6(a), (b)と図7(a), (b)に

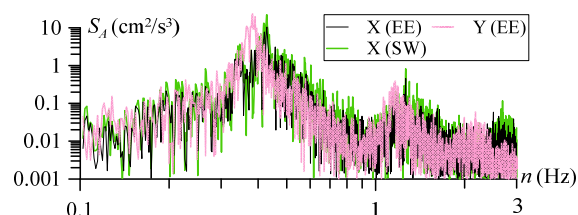
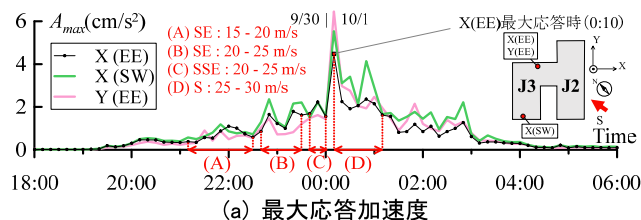
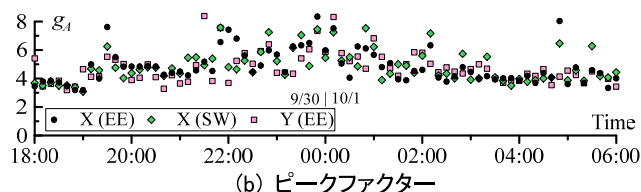


図5 PSD(T1824, 2018/10/1 0:10 - 0:20)



(a) 最大応答加速度



(b) ピークファクター

図6 T1824 (9/30 18:00 - 10/1 6:00)

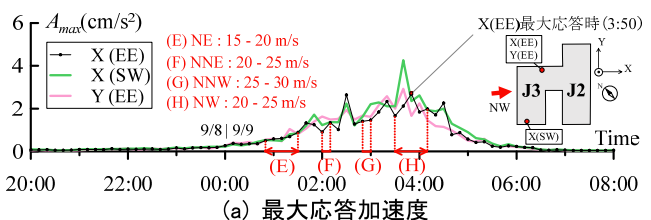
それぞれ示す。なお、X(EE)における加速度最大値が観測された時の風向を併記する。T1824で全加速度計において最大値を記録した時間は最大瞬間風速が観測された時間と一致する。図6(a), 図7(a)より、X方向の2つの加速度計における A_{max} を比較すると、全体的にX(SW)の値がX(EE)を上回る。これは振れの影響と考えられ、図2の各加速度計および重心の位置関係より、端部に位置するX(SW)はX(EE)と比較して重心との距離が大きく、振れの影響が相対的に大きいといえる。次章では振れの影響が比較的小さいと考えられるX(EE)を対象に分析を行う。図6(b), 図7(b)より g_A は応答が比較的小さい時間帯(T1824: 9/30 21:00以前・10/1 4:00以降, T1915: 9/9 0:00以前・9/9 6:00以降)では設計時に想定される3~3.5程度の値と比較してやや大きいものの近い値となる。しかし、比較的大きな応答が観測された時間では応答増大に伴い g_A も大きくなる傾向があり、最大で8程度の値を示す。これより、応答増大時には加速度応答が非定常な性質を示すことが考えられる。

5. 風速変動と加速度応答の定常性の分析

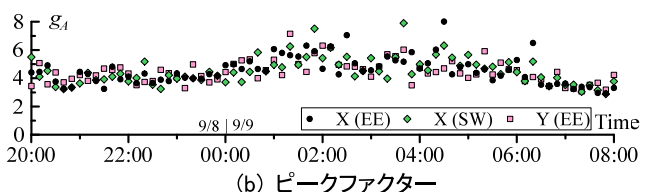
5.1 分析手法の概要

本章ではX(EE)を対象に、応答増大時の加速度波形および風速変動の定常性に着目した分析を行い、応答が非定常となる要因を把握することを目的とする。なお、10分間毎の観測記録には当然ながらばらつきが含まれるため、風向と風速レベル毎にグループ分けを行い、分析結果をアンサンブル平均することで風速変動と加速度応答の共通の特性と個々のばらつきを分離して議論する。図4(a), (b)および図6(a), 図7(a)にグループの内訳を示しており、T1824では(A)~(D), T1915では(E)~(H)のそれぞれ4つのグループを対象に分析を行う。

まず、風速の分析方法を述べる。理想的な定常ラ



(a) 最大応答加速度



(b) ピークファクター

図7 T1915 (9/8 20:00 - 9/9 8:00)

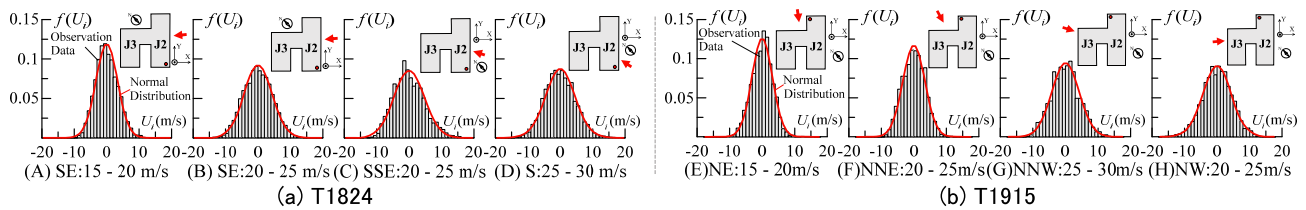


図 8 風速の変動成分のヒストグラム

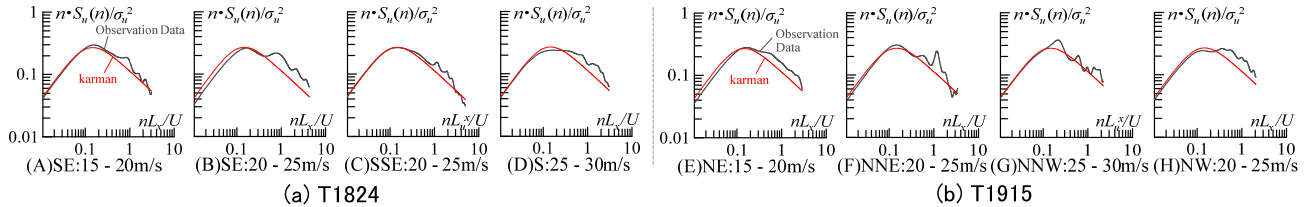


図 9 風速の PSD (T1824)

ランダム波形の性質を持つ風速変動は、そのヒストグラムが正規分布を示し、またその PSD はカルマン型スペクトルとなる。従って、10 分間毎の風速の変動成分を基に作成したヒストグラムを正規分布と比較する。また、風速の PSD をカルマン型と比較する。これにより、周辺地形・建物の影響を受けた風速変動がどのような特性を持つかを確認する。

次に、加速度の分析方法を述べる。10 分間の加速度時刻歴 $A(t)$ を加速度標準偏差 σ_A で除したデータ $q(t)$ を用いて分析する。加速度応答が定常とみなされ、 g_A が 3~3.5 となる条件は 2 つある。1 つ目はその波形のヒストグラムが正規分布に従う、すなわち定常ガウス過程となることである。2 つ目はピーク値のヒストグラムがレイリー分布に従う、すなわち定常ランダム振動となることである。これより 10 分間の時刻歴 $q(t)$ に対してヒストグラムを作成し正規分布と比較する。次に 10 分間の時刻歴 $q(t)$ に対してゼロクロス毎にピーク値 q_{ei} を取り出し、これに対してヒストグラムを作成し、レイリー分布と比較する。

5.2 風速変動の分析

各台風の風速変動のヒストグラムと正規分布の比較を図 8(a), (b) に、風速の PSD とカルマン型の比較を図 9(a), (b) にそれぞれ示す。なお、図 8, 図 9 は各グループのアンサンブル平均結果である。図 8(a), (b) より、いずれのグループにおいてもヒストグラムが正規分布とよく合致し、定常ランダム過程の特性を示す。図 8(a), (b) より、どのグループにおいても風速の PSD のピーク位置はカルマン型とよく合致する。ただ、ピークより高周波側では観測の PSD のパワーがカルマン型より大きくなる傾向を示し、これは周辺地形・建物の影響であると考えられる。特に、風向 NW となる T1915 の(H)では風速計が J3 棟の風下側に位置し、建物自身の影響を受けた可能性があ

る。ここまで、グループ毎に見れば風速変動は概ね定常的であることを示したが、(D) に属する T1824 の最大応答時は、図 10(a), (b) に示すように風速変動のヒストグラムが正規分布と大きく乖離し、風速の PSD もカルマン型とピーク位置に差が生じる。図 11 に T1824 最大応答時の風速・風向の時刻歴を示す。風速は 300 s 付近で急激に増速している。また、図 3(a) より 0:00 時点における台風の目と建物の距離はかなり大きく、風向に大きな変動は見られないことから、気象的要因の可能性が高いと考えられる。

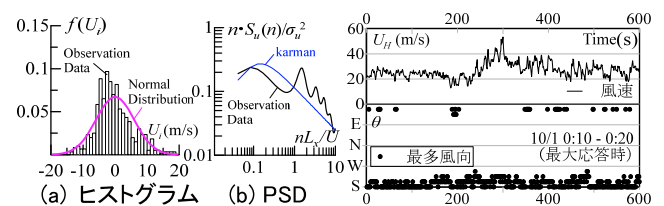


図 10 風速変動の比較
(T1824 10/1 0:10 - 0:20)

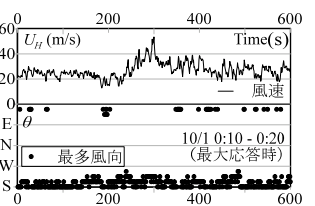


図 11 風速・風向の時刻歴
(T1824 10/1 0:10 - 0:20)

5.3 加速度応答の分析

各台風の時刻歴 $q(t)$ のヒストグラムと正規分布の比較を図 12(a), (b) に、ピーク値 q_{ei} のヒストグラムとレイリー分布の比較を図 13(a), (b) にそれぞれ示す。なお、図 12, 図 13 は各グループのアンサンブル平均結果である。

まず、T1824 について考察する。図 12(a), 図 13(a) の(A)より、 $q(t)$ およびピーク値 q_{ei} のヒストグラムが正規分布およびレイリー分布と概ね合致し、定常ガウス過程および狭帯域のランダム振動の特性を示す。一方で、応答が増大する(B),(C),(D)の 3 グループでは各ヒストグラムが正規分布およびレイリー分布からそれぞれ乖離し、定常ガウス過程および狭帯域のランダム振動の特性を示さない。前節で風速変動が概ね定常的な特性を示したことから、免震建物特有の非線形な構造特性が影響したと考えられる¹⁰⁾。

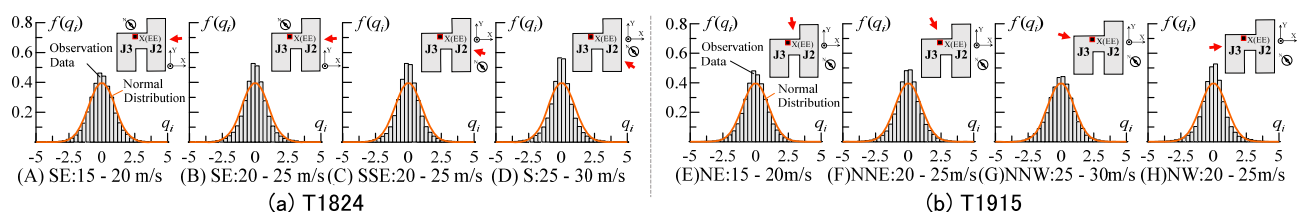


図 12 時刻歴 q_i のヒストグラム

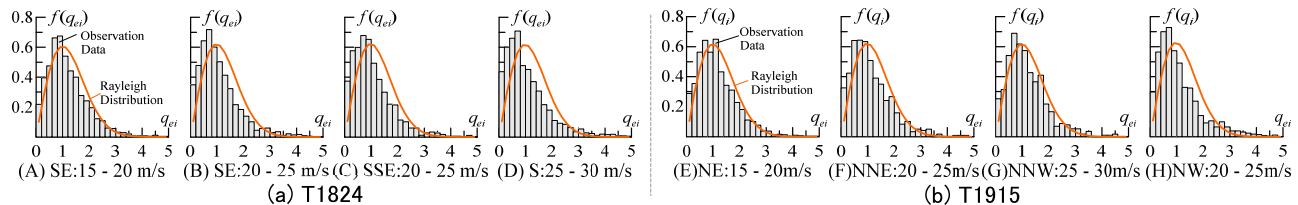


図 13 ピーク値 q_{ei} のヒストグラム

また、(D)に属する T1824 の最大応答時では、図 14(a), (b)に示すように各ヒストグラムの正規分布、レイリー分布との誤差が図 12(a), 図 13(a)の(D)と比較して顕著となる。図 15 に、T1824 の最大応答時の加速度時刻歴を示す。風速変動と同様に 300 s 付近で応答が急増しており、風速の非定常性も加速度応答の非定常性に影響したと考えられる。

次に、T1915 について考察する。まず、応答が比較的小さい(E)では、図 13(b)より q_{ei} のヒストグラムはレイリー分布と概ね合致するが、図 12(b)より $q(t)$ のヒストグラムが正規分布から僅かに乖離する傾向がある。次に、応答が比較的大きい(F),(G),(H)の 3 グループについて考察する。図 12(b), 図 13(b)の(F)と(H)では、各ヒストグラムがそれぞれ正規分布、レイリー分布と乖離する傾向があり、非定常な特性を示す。これについても免震建物特有の非線形な構造特性が影響したと考えられる。一方で、 A_{max} の大きさが(F)と概ね等しい(G)では、各ヒストグラムが正規分布およびレイリー分布と概ね合致し、定常的な特性が確認される。この点については、荷重方向の違いで免震層の変形状況が異なるために、構造特性が異なる状態にあった可能性があり、構造特性を同定するなどして今後検討する。

6. 結

2018 年台風 24 号 (T1824) と 2019 年台風 15 号 (T1915) において比較的大きな応答が観測された時間では、応答が定常ガウス過程かつ狭帯域のランダム振動でなく非定常な特性を示した。風速変動は 2 台風全体として定常的な特性を示したため、非定常な応答には免震建物に特有の非線形な構造特性が影響したといえる。今後、構造特性の同定を行い非線形な特性を明らかにしていく。また、T1824 の最大応答時の加速度波形は他の時間帯よりも突出して

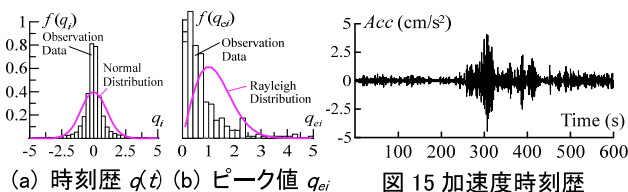


図 14 各ヒストグラムの比較
(T1824 10/1 0:10 - 0:20)

図 15 加速度時刻歴
(T1824 10/1 0:10 - 0:20)

非定常な特性を示し、免震建物特有の非線形システムに加えて非定常な風外力が作用したためと考えられる。これについては気象的要因である可能性が高いが、2 台風全体の最大応答を発生させた風速変動であり、周辺地形の影響なども含めて要因を別途追及していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 大熊武司, 安井八紀, 下村祥一, 小賀伸一: 23 号館の強風時実挙動観測, 地震・台風災害の制御・低減に関するシンポジウム, pp. 69-80, 2002. 3
- 2) 村上智一, 佐藤大樹, 他: 強風時の観測記録に基づく超高層免震建物の実挙動の分析, 構造工学論文集, Vol. 62B, pp. 329-337, 2016. 3
- 3) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, pp. 123-130, 2004. 6
- 4) 平島裕大, 他: 2 棟連結型超高層免震建物の強風観測記録に基づく実応答挙動の分析 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 20037, pp. 71-72, 2020. 9
- 5) 大木洋司, 山下忠道, 盛川仁, 山田哲, 坂田弘安, 山中浩明, 笠井和彦, 和田章: 超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み, 日本建築学会技術報告集, 第 21 号, pp. 73-77, 2005. 6
- 6) 平島裕大, 吳嘉瑞, 佐藤大樹, 普後良之, 田村哲郎: 超高層免震建物の最上階における風応答加速度記の分析, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2018, pp. 225-228, 2020. 3
- 7) 平島裕大, 佐藤大樹, 普後良之, 田村哲郎: 3 次元解析モデルによる超高層免震建物の振れ振動の分析, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2021. 3
- 8) ウェザーニュース: https://weathernews.jp/onebox/typhoon/past_index.html (2020. 9 参照)
- 9) 横浜気象台: <https://www.jmanet.go.jp/yokohama/> (2020. 9 参照)
- 10) 中井亜里沙, 他: 超高層免震建物の地震動観測記録に基づく免震層および上部構造の剛性の評価, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 57 号, pp. 571-576, 2018