

平成 30 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：強風防災

研究期間：平成 30 年度

課題番号：132005

研究課題名（和文）：構造部材の強風による累積疲労損傷評価法に関する研究

研究課題名（英文）：Estimation of cumulative fatigue damage for structural member under wind load

研究代表者：大熊武司

交付決定額（当該年度）：330,000 円

1. 研究の目的

■研究の学術的背景

風荷重が長時間作用する荷重であることを考えると、極めて稀に発生する暴風時の安全性の確保のためには、風荷重に対する最大応答値が許容値を超えていないことを確認するだけでなく、長時間の繰返しによる損傷の累積に対する安全性の検証も必要である。風荷重に対する最大応答値の予測と安全性の検証であれば、評価期間中の最大の風荷重のみを対象とすればよいが、長時間の繰返しによる損傷の累積的効果を検証する場合には評価時間内または供用期間内の風荷重による応答値の累積的効果を評価することが求められる。この繰返し荷重の評価方法について日本免震構造協会による「免震構造物の耐風設計指針」では、極めて稀に発生する暴風に対応する一つの台風を対象とし、敷地での台風による風荷重の発生から終息までの疲労などの累積値を評価するための資料として、暴風の経時特性の評価方法を紹介するとともに、風荷重に対する免震部材の損傷評価のための基礎資料を提示している。この種の累積的荷重効果に関する検討を積み重ねて、累積的荷重効果に対する設計法へと発展していくことが求められているのが現状であり、これまで、本研究に先立って実施された共同研究の成果等があるが、かならずしも事例が十分とは言えず、風向特性の影響、極めて稀な暴風以外の日常風の影響、構造特性の影響、等々、累積的荷重効果に対する未解明の項目は多い。

■当該分野における本研究の学術的な特色・独創性、予測される結果と意義

上述した状況の中で、本共同研究は複数年にわたって活動を続け、平成 29 年度は日本風工学会誌に「風による繰返し荷重効果、累積疲労損傷評価」と題した特集を組み、これまでの知見や関連分野の対応状況についての情報を集約して発表する等、関連研究の情報集約および情報発信を実施してきた。関連研究者・実務者間の情報交換を行った結果、研究で取り組むべき課題は、

- 1) ダンパーや制振装置等の繰返し荷重効果を疲労設計にどのように反映させるべきか。
- 2) 風荷重の繰返し効果の影響は、地震や日射等の他の自然外乱と比較してどの程度か。
- 3) 風荷重を発生させる成因を考えたときに、どのような現象を設計で考慮すべきなのか。
- 4) 材料レベル、部材レベル、構造のシステムとしての疲労特性はどのようなものであるか。

等であると認識された。

本共同研究はこれらに対して総合的に取り組み、建築物の長期間にわたる安全性の確保に貢献するものである。

2. 研究成果

平成 30 年度は、年 5 回程度の研究会や年度末の公開研究会を企画し、構造物の耐風性について、累積損傷の観点から、次の検討を行った。

- 1) 過去の気象観測記録に基づく、台風の暴風 1 イベントの抽出を行い、観測記録が極めて限られていること、風荷重評価で対象とする設計風速レベルの台風の風速時刻歴は、シミュレーションなどの方法を援用する必要があることを確認した。
- 2) 台風及び台風以外の中弱風が累積損傷に及ぼす影響の評価、またその等価継続時間としての評価については、疲労損傷度への寄与が、応答が小さくなると急激に低下するため、最大風速の影響が極めて強くなる。
- 3) 風荷重と比較するため、地震荷重による繰返し荷重効果の影響について、情報収集し、取りまとめた。
- 4) 超高層免震建築物に対する台風時の繰返し荷重の影響を、様々な台風の条件について、計算し、分析した。
- 5) 繰返し荷重に重要な影響を及ぼすと考えられる減衰定数の評価について、広島大学大学院 中村尚弘教授に依頼し、特別講演をおこなっていただいた。
- 6) 研究会、公開研究会は、日本免震構造協会や日本建築学会の研究 WG 等と連携を取るな

ど、研究者コミュニティへの情報発信を行った。

3. 公開研究会

公開研究会として、建築物の減衰定数に関する最近の動向について（招待講演）、地震による繰返し荷重効果について、免震構造物の風応答に関する検討、地震および強風による累積疲労損傷を考慮した免震装置の設計法についての講演を開催した。また、開催に際して、日本免震構造協会、日本建築学会の後援を得た。

公開講演会は以下の様な内容である。（敬称略）

建築物の減衰評価に関する動向【招待講演】

中村 尚弘（広島大学大学院）

長周期地震動に対する繰返し荷重効果の評価の実務

吉江 慶祐（日建設計）

免震構造の風応答観測と数値計算結果の比較

佐藤 大樹（東京工業大学）

地震および強風による累積疲労損傷を考慮した免震装置の設計手法

団栗 直希，西嶋 一欽（京都大学防災研究所）

まとめ 松井 正宏（東京工芸大学）

まず、研究会の趣旨とこれまでの活動について、松井正宏より日本建築学会 風疲労WGや日本免震構造協会 耐風設計部会の協力を得て「風による疲労損傷問題に関する公開研究会」を継続的に開催してきており、これまでに、風による疲労損傷を評価するための強風の継続時間、超高層免震建築物の実測と応答評価、信頼性設計法に基づく評価等の検討が行われてきたこと、関連する周辺分野の話題として、材料（鋼材、高分子材料）、制振部材・免震部材等の疲労特性、風以外の繰返し荷重効果（地震、温度荷重など）の情報収集・情報交換を行ってきたことが説明され、今回の公開研究会では、動的な性質に大きな影響を及ぼす減衰の現状と長周期地震動への対応等の情報を交換し、風応答による疲労損傷問題について、議論が続く期待が述べられた。

中村 尚弘（広島大学大学院）による「建築物の減衰評価に関する動向【招待講演】」では、減衰定数の取り扱いは実務的な課題であり、現状良く用いられている剛性比例型の適用性について慎重に検討した結果が報告された。建築物の骨組の履歴モデルは材料分野で評価例があり、固有周期に振幅依存性がみられ、大振幅後元に戻らない等の報告があること、減衰定数にも振幅依存性がみられ、S造では振幅が増大すると減衰が低下することも報告されており、S造で2%は過大である可能性が指摘された。また、高次モードの減衰は1次モードと同程度である例などが指摘された。さらに、減衰定数に与える経年変化の影響は、RC 中低層と高層で異なる傾向があること、地盤との相互作用の影響を考慮すると建物本体の減衰定数はRCで2%を切る程度と評価される事例等が報告された。従って、これらを取りまとめた減衰の提案値は、従来の値より小さくなる可能性があるとのことであった。減衰のモデル化では、因果的減衰モデルや変動型レリー減衰モデル、変動型モーダル減衰等が紹介された。

吉江 慶祐（日建設計）による「長周期地震動に対する繰返し荷重効果の評価の実務」では、近年行われた表記の研究について、小穴温子、北村春幸ら（2017）を元に取りまとめ、報告された。国土交通省からの通知「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」において、南海トラフ沿いのM8-M9対応の耐震設計における考え方、繰返し荷重効果に対する対応等について、地震動の継続時間などの研究成果を交えながら、超高層建築での家具の転倒・移動評価や、ダンパー、免震材料の繰返し累積損傷（疲労）評価、基盤促波（目標スペクトル、公開波、継続時間300~400秒）、RC、Sに対する検証方法・設計疲労曲線（ μ - N_f 関係）等が説明された。現状では、対象は免震部材、鉄骨梁端部の限られた条件のチェックのみであり、将来は総合的な設計方法が求められている。また、長周期地震動のエネルギースペクトルについて応答スペクトルとの関係を明らかにすることが設計（目標エネルギースペクトル）に結びつく等の説明がなされた。

佐藤 大樹（東京工業大学）による「免震構造の風応答観測と数値計算結果の比較」では、東京工業大学すずかけ台J2棟高層免震建築の振動観測記録を分析し、地震応答、風応答で応答特性は同一か否かの検討が行われた。風応答と同レベルの地震応答観測記録の伝達関数を分析すると、免震層は設計値より高い剛性と履歴減衰性状を示していた。等価減衰定数は、小振幅（観測風応答）で20%程度であった。設計モデルは摩擦や粘性の減衰を入れたモデルにくらべ大きな応答を示すこと等が明らかにされた。応答計算からは、剛性モデルはモード形状から作成したものをを用いたが、モデルの違いは応答にあまり寄与しなかったとのことであった。設計と実測の相違についての質問があり、微小振動領域で剛性の大きな相違（固有周期が小さい）がみられるなど、応答レベルの違いが大きいことから、居住性用、構造骨組用のモデルを分けて検討すべきである等の説明があった。

団栗 直希, 西嶋 一欽 (京都大学防災研究所) による「地震および強風による累積疲労損傷を考慮した免震装置の設計手法」では, これまで, 風と地震を同時に考慮した疲労設計方法の検討がされていないことが指摘され, 信頼性設計法による地震と台風を対象とした疲労設計法を構築する試みが紹介された。これは, 想定した破壊確率を満足する地震と風による疲労損傷度をもたらす最尤シナリオを信頼性解析により設定するもので, 風荷重は, 台風モデルにより最大風速半径, 中心気圧, 移動方向…を考慮し, 地震荷重は海溝地震, 地殻内地震, 継続時間 (群遅延時間考慮) 等を考慮した。供用期間中のイベントの累積損傷をターゲットとし, 最大値はフレッシェ分布を仮定した。許容破壊確率は地震のみで5%, 地震+風で1%とした。その結果, 風荷重は最大風速をもたらす一つの台風を想定すれば十分であり, 地震荷重は上位1個または2個の地震を考えれば十分であるという結果になった。設計すべ疲労クライテリアは, 鹿児島での計算例では, 風による累積損傷度 $D_w=0.26$, 地震による累積損傷度は $D_e=0.5$ となること等が紹介された。

最後に松井正宏 (東京工芸大学) により「まとめ」が報告され, 閉会となった。

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[その他, 産業財産権, ホームページ等] (計1件)

1. 団栗 直希, 西嶋 一欽, 免震装置の風疲労設計に資するハザード適合最尤台風の抽出方法, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 I, 2018, pp.101-102, 2018-07
2. 馬橋 聖生, 佐藤 大樹, 免震ダンパーの疲労損傷度と頂部平均風速の関係性に関する検討—考慮する強風イベントのサンプル数が関係式に与える影響—, 日本建築学会関東支部研究報告集, 89, pp.489-492, 2019-03
3. 銭 暁, 佐藤 大樹, 馬橋 聖生, 風応答解析による免震ダンパーの疲労損傷評価 建物アスペクト比が疲労損傷度を与える影響, 日本建築学会関東支部研究報告集, 89, pp.497-500, 2019-03
4. 焦 展, 松井 正宏, 高層建築の風応答特性—建築物荷重指針に基づく高さ 50m~150m の風応答特性—, 東京工芸大学 2018 年度卒業研究, 2019.2

5. 研究組織

(1) 研究代表者

1. 大熊 武司 (神奈川大学工学研究所・客員教授)

(2) 研究分担者

2. 吉江 慶祐 (日建設計・構造設計部・部長)
3. 竹中 康雄 (株式会社小堀鐸二研究所)
4. 田村 和夫 (千葉工業大学・教授)
5. 安井 八紀 (泉創建エンジニアリング)
6. 寺崎 浩 (大成建設・技術センター)
7. 佐藤 大樹 (東京工業大学, 准教授)
8. 西嶋 一欽 (京都大学防災研究所, 准教授)
9. 田村 幸雄 (東京工芸大学, 名誉教授)
10. 吉田 昭仁 (同, 教授)
11. 金容徹 (同, 准教授)
12. 松井 正宏 (同, 教授)

6. 要約(Abstract)

研究課題名：構造部材の強風による累積疲労損傷評価法に関する研究

Estimation of cumulative fatigue damage for structural member under wind load

研究代表者名：大熊武司(神奈川大学)

風荷重が長時間作用する荷重であることを考えると、極めて稀に発生する暴風時の安全性の確保のためには、風荷重に対する最大応答値が許容値を超えていないことを確認するだけでなく、長時間の繰返しによる損傷の累積に対する安全性の検証も必要である。本研究では、構造物の耐風性について、累積損傷の観点から、次の検討を行った。

- 1) 過去の気象観測記録に基づく、台風1イベントの抽出を行い、観測記録が極めて限られていること、風荷重評価で対象とする設計風速レベルの台風の風速時刻歴は、シミュレーションなどの方法を援用する必要があることを確認した。
- 2) 台風及び台風以外の中弱風が累積損傷に及ぼす影響の評価、またその等価継続時間としての評価については、疲労損傷度への寄与が、応答が小さくなると急激に低下するため、最大風速の影響が極めて強くなる。
- 3) 風荷重と比較するため、地震荷重による繰返し荷重効果の影響について、情報収集し、取りまとめた。
- 4) 超高層免震建築物に対する台風時の繰返し荷重の影響を、様々な台風の条件について、計算し、分析した。
- 5) 公開研究会では、以下の様な内容が紹介された(以下、敬称略)。中村 尚弘(広島大学大学院)による「建築物の減衰評価に関する動向【招待講演】」では、減衰定数の取り扱いの実務的な課題であり、現状良く用いられている剛性比例型の適用性について慎重に検討した結果が報告された。建築物の骨組の履歴モデル評価例では固有周期に振幅依存性がみられ、大振幅後元に戻らない等の報告があること、減衰定数にも振幅依存性がみられ、S造では振幅が増大すると減衰が低下する例などが報告された。また最近までの研究成果を取りまとめた減衰の提案値は、従来値より小さめになる可能性があるとのことであった。吉江慶祐(日建設計)による「長周期地震動に対する繰返し荷重効果の評価の実務」では、近年行われた表記の研究について、小穴温子、北村春幸ら(2017)の研究等を元に取りまとめ、繰返し荷重効果に対する評価方法等について、地震動の継続時間などの研究成果や、長周期地震動のエネルギースペクトルについて応答スペクトルとの関係を明らかにすることの重要性が説明された。佐藤 大樹(東京工業大学)による「免震構造の風応答観測と数値計算結果の比較」では、高層免震建築の振動観測記録を分析し、地震応答、風応答で応答特性は同一か否かの検討が行われた。その結果、応答レベルの違いが大きいため、居住性用、構造骨組用のモデルを分けて検討すべきである等の説明があった。団栗 直希、西嶋 一欽(京都大学防災研究所)による「地震および強風による累積疲労損傷を考慮した免震装置の設計手法」では、これまで、風と地震を同時に考慮した疲労設計方法の検討がされていないことが指摘され、信頼性設計法による地震と台風を対象とした疲労設計法を構築する試みが紹介された。