

# 平成 27 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 特定課題研究 風応答による疲労損傷評価法に関する研究

研究期間：H 2 5～H 2 7 [継続]

課題番号：13132005

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）： 581000 円

## 1. 研究の目的

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、竹中、近藤ら(2011)、高森ら(2012)、寺崎、植松(2012)等の研究例があるが、現時点では検討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。

以上を鑑み、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、次の検討を行う。

- 1) 過去の気象観測記録に基づく、台風や発達した低気圧など、極めて稀な暴風 1 イベントの累積損傷度や等価継続時間の評価
- 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
- 3) 構造特性や空気力学特性の異なる種々の構造物に対する累積損傷の評価
- 4) 風荷重の作用が異なると考えられる構造骨組と外装材等の違いを考慮した累積損傷度の評価

## 2. 研究の方法

3 年度の継続研究として以下の項目の実施を計画している。

平成 25 年度：気象台記録を元にした累積的荷重効果の等価継続時間としての評価

平成 26 年度：空力特性、構造特性の違い、構造骨組や外装材等部位の違いによる累積的荷重効果の評価

平成 27 年度：極めて稀な暴風、中弱風等、風の成因の違いによる累積的荷重効果の評価、累積的荷重効果に与える影響因子のまとめ

## 3. 研究成果

平成 27 年度は、公開研究会を平成 28 年 1 月 19 日に開催し、風以外の荷重効果に対する繰返し荷重効果事例および繰返し荷重効果には構造物の維持管理方法も重要な要素となると考え長周期・長時間地震動によるダンパーの疲労損傷度評価法と維持管理方法に関する情報収集を行った。

・公開研究会での発表に関するまとめとその一部（抄録）

**【趣旨説明】(神奈川大・大熊先生)**

本研究の目的・目標  
「建築物等の疲労損傷を、強風起因の問題を中心として、情報の体系的な整理を進め、今後の課題を知り、展望を得る」

第1・2回研究会を振り返り、強風下での「疲労損傷問題への対応の視点」として、まだ話題提供・議論していない、

1. 疲労損傷のリスク低減・回避、維持管理
2. 供用期間中の風・地震等による累積疲労損傷の総合評価
3. 風応答による疲労損傷の要因別検討

の議論  
★「地震その他の外乱も考慮した損傷の総合評価と維持管理のあり方を一体的に考える。」という視点が重要

4

「免震建築物の耐風設計指針」講習会 主旨説明

→ **累積損傷度の内訳に関心を!!!**  
堂地ら(大林組) : 2015.4, 2014.8

5% : 地震動 (L2告示波120秒継続)  
25% : 暴風 (L2風荷重最大値 4時間30分継続)  
40% : 風荷重累積 (平均風速24m/s以上 建物供用期間50年)  
30% : 余力

図9 累積疲労損傷評価の内訳

**【招待講演】(大成建設・長島氏)**

「大型振動台による実大免震装置の繰返し荷重効果の評価」

1. Eーディフェンスによる実大免震部材実験の紹介
  - ・ 建築基準法整備促進事業 (H22年度～H25年度)
  - ・ 不明点が多い、免震部材の大振幅・多数回繰返し・2方向加振での繰返し特性・限界性能の把握 が目的
  - ・ 高摩擦弾性すべり支承・LRB・鉛ダンパー・オイルダンパー
2. 長時間・長周期地震動に対する免震部材の試験条件の整理
  - ・ 実大実験の結果をふくめ、多数回繰返し荷重を受ける免震部材の特性の知見から、免震部材に必要な試験法と試験条件(およびその根拠)の設定

5

**実験結果** ② 鉛プラグ入り積層ゴム

■ 破断試験 (正弦波1方向)

破断点(変形790mm) (せん断ひずみ399%)

- >  $\gamma$ 250%程度まで荷重-水平関係は線形その後ハードニングが顕著になった
- >  $\gamma$ 300%、350%は異常なし
- >  $\gamma$ 400%において、+400%経過後、-399%で積層ゴム破断
- > 破断時水平荷重は1,614kNであった

上から4層目のゴムが破断

試験後のカット試験体

2016.1.19 東京工芸大学・風共同研究拠点公開会 25

**【招待講演】(熊谷組・荻野氏)**

「長周期・長時間地震動によるダンパーの疲労損傷度評価法と維持管理方法」

- ・ 東日本大震災後に確認された免震構造関連の現象の紹介とその後の対策状況
  - ー 鋼棒ダンパーの取付けボルトのゆるみ・塗装の剥離・形状変化/ゆるみ対策、変形追従型の塗装
  - ー 鉛ダンパーの亀裂→金属疲労/SNカーブ、表面塗布による保護
- ・ 鋼材ダンパー・鉛ダンパーの疲労損傷/残存性能評価
- ・ オイルダンパーの疲労損傷評価/温度上昇に注目した評価
- ・ JSSI維持管理基準/履歴型ダンパーの点検方法・判定基準改定
- ・ 長周期地震動での免震ダンパーのエネルギー吸収性能の評価・・・国内に**免震部材の実大実験施設の必要性**

7

(2) 亀裂の発生原因  
微小振幅時の繰返しで発生する亀裂→鉛の金属疲労

鉛の疲労曲線

破面のSEM 観察写真 (4500倍)

21

**【一般講演】(京都市大・西嶋先生)**

「風応答による免震装置の疲労損傷に対する設計・維持管理計画の枠組み」

- ・ 免震部材の風による設計・維持管理の枠組みの提示
- ・ 提示された枠組みの中で、設計・維持管理計画を最適化するために、現時点で不足している事項を整理
  - ー 疲労評価用の風荷重の設定 (昨年、発表)
  - ー 点検により免震部材に生じている損傷を検出できる可能性のモデル (PoD曲線)
  - ー 免震部材の損傷サイズに応じた破壊確率モデル (FMモデル)
- ・ 例題(台風時の免震部材)により、PoD曲線とFMモデルを用い、変動風力による累積疲労損傷度の関数として「建物の破壊確率の変化」を計算を紹介
  - 高精度の点検技術があれば結果として破壊確率を相対的に小さくできる
- ・ 今後の研究の方向性を示す

9

**維持管理計画策定手順**

海洋構造物の分野での手法を参考。

Load modeling (Observation, Simulation) → Structural analysis (FE analysis, Stress range frequency)

Probabilistic SN curve → PoD curve (Crack size)

Calibration → Probabilistic FM model (Crack size vs Time) → Maintenance planning (Failure probability vs Time, Acceptable level)

7 東京工芸大学・風共同研究拠点・公開研究会  
風応答による免震部材の疲労損傷に対する設計・維持管理計画の提示

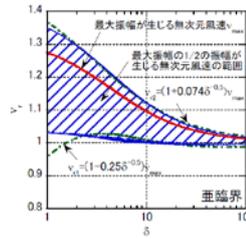
【一般講演】(泉創建エンジニアリング・片桐氏)

「渦励振による部材の疲労損傷の評価方法」

- 小径の部材には低風速での渦励振が生じる→供用期間中の疲労損傷が生じる可能性がある
- 小部材での渦励振による疲労損傷への影響の検討の紹介
- 鋼管部材(76.3φ×3.2, 部材長1.5m・2m, 端部CT型継手)の100年間の累積疲労損傷の評価
  - 供用期間中の風の累積作用時間は荷重指針を利用した暴風の累積作用時間の簡易評価法とワイブル近似による日常風評価の組み合わせ
  - FEMを用いて振動性状とホットスポット応力を算定&荷重指針による渦励振の共振風速と最大振幅の関係から疲労評価をおこなう(田村の後流振動子モデルで渦励振の発生風速範囲を求めて組み合わせる)

渦励振の生じる風速範囲

- 最大変位の1/2の変位の生じる風速範囲
- 質量減衰パラメーターδが小さいほど渦励振の生じる風速範囲が広い

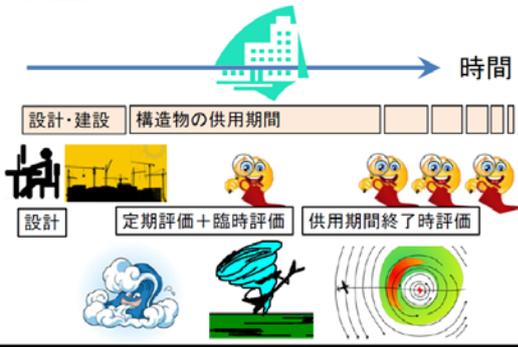


【一般講演】(東京工芸大・松井先生)

「風応答による疲労損傷評価に必要な要因別計算法」

- 疲労評価, 設計段階-供用中の定期評価/臨時評価段階-供用期間満了時の評価-供用期間満了後
  - それぞれ風速変化の予測もしくは実履歴による疲労評価を行うことになる
  - その際に用いる疲労評価の要素技術の紹介
- 構造骨組みに対する累積疲労損傷度の閉形式解
- 外装材に対する累積疲労損傷度の閉形式解→風圧疲労係数
- 疲労損傷度簡易評価
- 等価継続時間

要素技術はどこで用いられるか

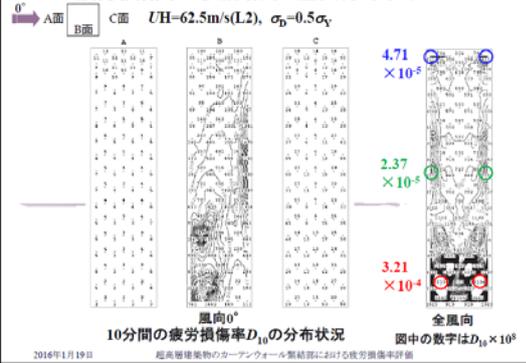


【一般講演】(大成建設・寺崎氏)

「超高層建築物のカーテンウォール緊結部における疲労損傷評価-等価継続時間の検討」

- 外装材(ファスナー部ボルトを対象)の疲労評価
- 第1, 2回で紹介した方法に続き, 気象データに基づく建物供用期間中の疲労損傷評価と簡便な等価作用時間の提案
    - 日常風=Weibull分布/暴風=Gumbel分布(N年間に年3回台風)+台風シミュレーション
    - 実用的には高風速のみに注目すればOK...等価作用時間 $T_{eq}$ の近似式

■疲労損傷率 $D$ 検討結果 壁面分布状況



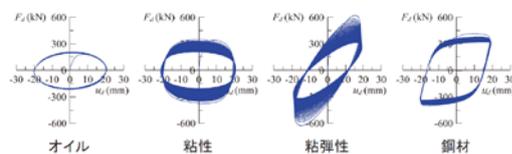
【一般講演】(東京工業大・佐藤先生)

「長時間繰返しによる制振ダンパーの特性変化」

- 長時間加振時の制振ダンパーの動的特性の把握の重要性を指摘
- 実大の制振ダンパー(4タイプ)の長時間正弦波加振実験による, ダンパー特性値低下傾向の把握
  - 粘性/オイル/粘弾性/履歴型(鋼材)
  - ダンパー力/エネルギー吸収量/貯蔵剛性/損失剛性
  - サイクル数による基準化した特性値低下率はダンパー毎に同一
- ランダム振動の正弦波置換法の提案と検証
  - 正弦波加振試験結果の実応答や設計への応用に有用

長時間の繰返しによる制振ダンパーの特性変化

実験結果(履歴曲線)



- ▶ オイルダンパーでは, ダンパー力に大きな減少は見られず安定
- ▶ 粘性・粘弾性・鋼材ダンパーでは, サイクル数を重ねるごとにダンパー力が低下
  - ▶▶ サイクル数ごとの特性値の減少量の確認を行う

<p>2016.1.19 東京工芸大学・公開研究会 「強風による建築物等の疲労損傷問題の現状と展望(3)」</p> <p style="text-align: center;">まとめ</p> <p style="text-align: center;">日建設計・吉江慶祐</p>	<p>【討論】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>維持管理点検での損傷発見確率の評価は現実的？(佐藤) <ul style="list-style-type: none"> <li>大規模な建物では免震部材数も膨大。耐火被覆で隠れてしまうケースもある。</li> <li>点検自体は欠陥のあり／なしであり、点検者の判断は入れない</li> <li>どの程度の損傷から識別が可能なものか？…免震部材によってことなる。現段階は、目視レベル。</li> </ul> </li> <li>鉛ダンパーの保護グリース塗布：初期亀裂発生後、塗布までの時間と性能維持の関係も調べる必要</li> <li>日常点検者の技量は？／通常点検などはJSSIの点検技術者保有者だが、日常点検では限定していない(推奨ではあるが)</li> </ol>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

松井正宏, バフエッティングや準静的風荷重の変動成分を対象とした疲労損傷評価用等価作用時間, Proceedings of The Eighth Japan Conference on Structural Safety and Reliability, JCROSSAR2015 論文集, pp.591-595, 2015.10

[学会発表] (計 2 件)

佐藤俊則, 松井正宏, 田村幸雄, 高層建築物外装材に対する風向ごとの累積疲労損傷度の分布と変動風圧係数との関係, 日本風工学会誌, Vol.40(2015), No.2(No.143), pp.197-198, 2015

松井正宏, バフエッティングや準静的な風応答を対象とした累積疲労損傷度を評価するための等価作用時間, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 構造 I, pp.215-216, 2015.9

#### 5. 研究組織

##### (1) 研究代表者

大熊 武司 (神奈川大学工学研究所・客員教授)

##### (2) 研究分担者

吉江 慶祐 (日建設計・構造設計部・部長)

北村 春幸 (東京理科大学・建築学科・教授)

竹中 康雄 (株式会社小堀鐸二研究所)

田村 和夫 (千葉工業大学・教授)

安井 八紀 (泉創建エンジニアリング)

寺崎 浩 (大成建設・技術センター)

佐藤 大樹 (東京工業大学, 准教授)

田村 幸雄 (東京工芸大学, 教授)

松井 正宏 (東京工芸大学, 教授)

吉田 昭仁 (東京工芸大学, 准教授)