

平成 28 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 28 年度

課題番号：132005

研究課題名（和文）：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）：450,000 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效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效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。

2. 研究の方法

平成 25 年度から実施された共同研究や関連する研究者の成果により、強風による疲労損傷の評価手法と、その評価結果に及ぼす諸要因の影響について、徐々に明らかになりつつある。本共同研究では、これまでの手法の開発や研究成果を踏まえて、さらに検討事例を増やし、一般的な議論に結び付けるため、概ね 3 年程度の期間で以下の様な検討を行う計画としている。

- 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
- 5) 免震構造部材等、累積的荷重効果の影響が懸念される部材の評価方法、設計者等へのアンケートによる情報収集

3. 研究成果

平成 28 年度は、公開研究会を平成 29 年 2 月 23 日に開催し、素材の疲労特性に関して、信州大学名誉教授 中込忠男先生からアルミの疲労特性に関する講演を、様々な構造物の疲労評価事例として、道路付加物、免震構造、建築物外装材、防水システム等の事例を各分野の専門家から紹介いただき、貴重な研究情報交換の場を得た。

公開研究会は以下の内容である。（敬称略）

- 趣旨説明 大熊武司 (神奈川大学)
- 招待講演：アルミ材料の疲労特性について 中込忠男 (信州大学)
- 道路附属物の損傷事例と技術基準類での対応 星隈 順一 (国土技術政策総合研究所)
- 観測記録に基づく超高層免震建物の風応答疲労評価手法の提案 佐藤大樹 (東京工業大学)
- 免震建物の設計において想定すべき台風と地震および許容する D 値の設定方法 西嶋 一敏 (京都大学防災研究所)
- 強風による建築物外装材等の疲労損傷 高森 浩治 (奥地建産)
- 機械的固定工法防水システムの耐風性能評価 栗田 剛 (東急建設)

趣旨説明では、大熊武司先生 (神奈川大学) から本研究の目的・目標は、「建築物等の疲労損傷を、強風に起因する問題を中心として、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」ことであると紹介された。そして、風の繰返し荷重効果への関心として指針類での反映状況について、JSSI 指針、建築物荷重指針 (2015)、設計資料その 2 等が紹介された。また、橋梁、煙突、鉄塔、外装材での研究が行われていることに言及された。最後に将来への展望として、

- ・限界状態設計の時代への対応
- ・供用期間中の風・地震・温度などの累積効果の総合評価
- ・評価方法に存在するリスクに対応した評価体系の確立
- ・「風の繰返し荷重効果」を軸とした体系的設計資料・指針等の課題解決に期待を寄せた。

中込忠男先生 (信州大学) には招待講演をお願いした。

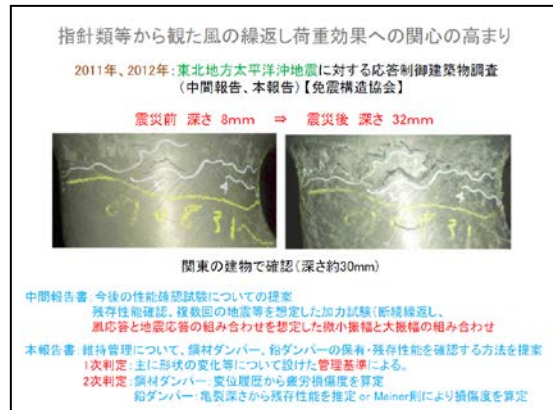
「アルミ材料の疲労特性について」と題して、繰返し応力を受ける部材および接合部の疲労設計について以下の項目について講演された。

1. アルミニウムの疲労 (アルミニウム建築構造協議会「疲労設計規準作成 WG」の活動内容、「疲労とは?」、アルミニウム構造設計規準 第 7 章)

2. アルミニウムの材料特性 (建築構造用アルミニウム合金の特性)

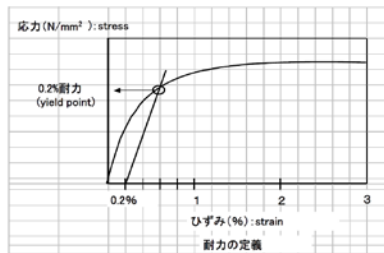
質疑応答では、以下のようなやり取りがなされた。

- ・スロットホール付の接合部の疲労評価については、スロット部を考えなくてよい。
- ・ばらつきはどのように考慮されているかについては、設計値は各種試験・実験の下限値で決まっていると考えてよい。
- ・アルミの疲労特性への载荷試験速度の影響については、弾性範囲では影響は小さい。一般的には低速度载荷だと疲労では不利である。
- ・疲労限については、実現象ではともかく、実用上の精度は確保できているという判断。その他、SN 曲線のマージン、実験の能力、疲労設計規準 (案) においてクライテリアは D=1 で良い等の議論がなされた。

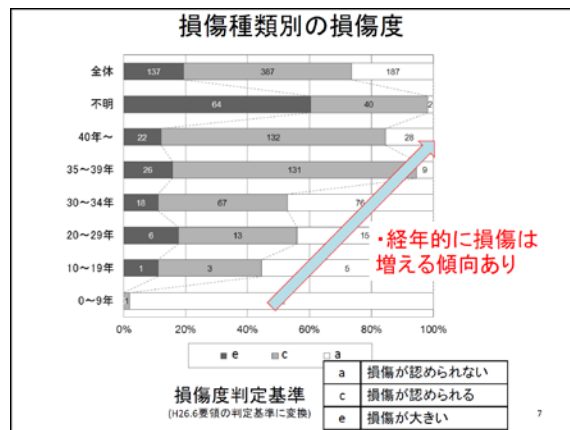


アルミニウム合金の応力度・ひずみ関係

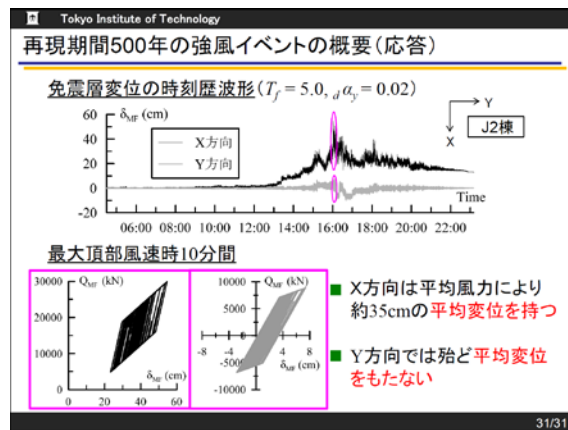
アルミの応力-ひずみ曲線は、鋼材の応力-ひずみ曲線と異なり明瞭な降伏点 (yield point) の表れないいわゆる『ランドハウス型』である。



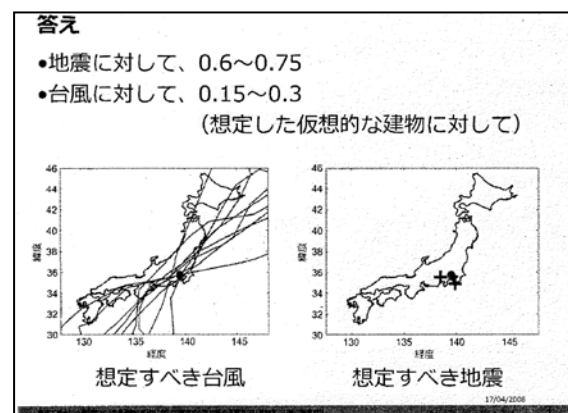
引き続き、「道路附属物の損傷事例と技術基準類での対応」と題して、星隈 順一氏（国土技術政策総合研究所）から以下の発表がなされた。日本の道路附属物の現況について、疲労損傷に加えて、劣化も問題となること、対象となる道路附属物は膨大な数であり、如何に維持管理するかが重要であること等が強調された。さらに、附属物の劣化損傷状況については、供用期間と撤去状況から、25年から影響が顕著になるが、40～50年使用される場合もある。腐食は柱脚・開口部等で発生するが、点検できない部位の被害等は問題である。また、溶接部・取付け部は弱点となりやすいこと等が紹介された。附属物の設計については、道路標識設置基準、道路照明施設設置基準等に基づき実施されている。リスクに基づく安全性の評価に向けた研究が必要であり、リダンダンシーの確保、考慮などが重要であると考えられること等が紹介された。質疑応答として、調達時に供用期間はどのように設定されているかという問いに対し、現状では明示されていない、点検して検出された場合にメンテする対応であること。設計風速は瞬間風速であるかという点については、明示されていないこと。腐食の要因として凍結防止剤の影響もあること等が議論された。



「観測記録に基づく超高層免震建物の風応答疲労評価手法の提案」と題して、佐藤大樹先生（東京工業大学）から以下の発表がなされた。強風時の超高層免震建築物の観測記録（東工大 J2 棟）をもとに、疲労評価方法を検討した。観測概要と強風時の免震ダンパーの疲労損傷評価事例を紹介した。さらに、10 分間毎のデータを用いた簡易（実用的）疲労損傷評価手法を提案し、弾塑性時刻歴応答解析による提案手法の検証や 1 イベント中の疲労評価 (D 値の累積) における問題点を指摘し、その解決方法を提案した。定常とみなして 10 分間応答を単純加算する際の問題点、1 イベントの D 値算定の実用的方法の提案である。質疑応答として、時刻歴応答解析の終了側にエンベロープの必要性、再現期間あるいは供用機関 500 年を考えたとき、地震と風がどのように関係するか、提案手法が課題としている点は、外装材のように高振動数の現象だと、影響が小さいのではないかな等の質疑がなされた。



「免震建物の設計において想定すべき台風と地震および許容する D 値の設定方法」と題し、西嶋 一欽先生（京都大学防災研究所）から以下の発表があった。地震・台風に対する D 値の許容値をどのように設定するかという問題に対し、想定すべき地震動・台風について、確率台風シミュレーション、確率地震シミュレーションを用いることを考える。その際には、継続時間の評価が課題である。風（地震）に対する D 値モデルを開発するために、信頼性解析・設計、FORM を用いて、設計実務にどう落とし込むか、許容 D 値や、想定シナリオをどのように考えるかについて言及した。今後の課題として、各モデルの開発・改良、維持管理の疲労評価への反映等を指摘した。質疑応答として、地震動の波形合成を行った方が、評価目的に沿う



のではないかと、計算検討地点を全国対象として、比較検討してほしい等の議論、要望などが出た。

「強風による建築物外装材等の疲労損傷」と題して高森 浩治氏（奥地建産）から以下の発表がなされた。外装材などの耐風設計の現状や強風・台風時の繰返し荷重による疲労損傷、疲労を考慮した外装材の耐風性能評価の基本方針について触れた後、維持管理を前提にした1台風での安全性確保を目標とする考え方、台風通過時の屋根面の風圧力と屋根ふき材の疲労損傷評価、台風通過時の壁面の風圧力と壁外装材の疲労損傷評価、屋根ふき材の繰返し載荷試験、建築物の付属物の繰返し載荷試験と疲労損傷特性等が紹介された。質疑応答として、防水シートの破壊強度と固定ピッチの関係、ベランダ手すりの破壊状況や設計条件（安全率）、外装材の変形の大きさによる破壊モードの変化等について議論があった。

58

5. 建築物の付属物(手摺の支柱)の繰返し載荷試験と疲労損傷特性
風荷重を想定した載荷試験の結果




支柱の足元での芯材の曲り

□ 頂部載荷の試験結果と異なり、支柱の基部での芯材の変形のみであった。

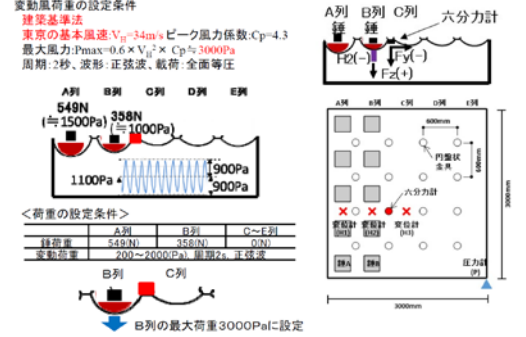
「機械的固定工法防水システムの耐風性能評価」と題して栗田 剛氏（東急建設）から以下の発表がなされた。「外装材耐風圧性能試験装置を用いた機械的固定工法防水システムの耐風性能評価に関する研究」の一部の紹介である。「機械的固定工法防水システム」に関する解説と現状の課題、被害例、屋外実験棟での観測結果から指摘される課題等が紹介された。また、外装材耐風性能試験装置を用いた実験や繰返し荷重に対する検討事例が紹介された。質疑応答として、被害例の原因は再現できたといえるのかの問いに、実際には経年劣化や施工不良なども影響していると考えられるがそれは再現されていないとされた。固定ピッチを変える場合があるとすると、そこでは水平力が大きく変化すること、等価累積作用時間の評価は、風速-疲労関係をどのよう考えたか等について質疑がなされた。

59

錘積載法による繰返し載荷実験

変動風荷重の設定条件
建築基準法
東京の基本風速: $V_{10} = 34\text{m/s}$ 、ピーク風力係数: $C_p = 4.3$
最大風力: $P_{\text{max}} = 0.6 \times V_{10}^2 \times C_p \approx 3000\text{Pa}$
周期: 2秒、波形: 正弦波、載荷: 全面等圧

A列 B列 C列 六分力計
 $F_x(-)$ $F_y(-)$ $F_z(+)$



549N (≒1500Pa) 358N (≒1000Pa) 1100Pa 900Pa 900Pa

<荷重の設定条件>

	A列	B列	C~E列
積荷重	549N	358N	0N
変動荷重	200~2000Pa	1000Pa	1000Pa

B列 C列
B列の最大荷重3000Paに設定

Copyright © Tokyo Cement Co. All rights reserved.

一般公開研究会では、吉江慶祐氏を司会に総合討論を行った。強風による建築物等の疲労損傷評価体系を確立するために必要な課題、外乱評価、検討対象（構造体・ダンパー・非構造材料など）の疲労評価のための情報、素材、部材、接合部の疲労特性、S-N曲線、設計クライテリア、複数の外乱の総合的考慮の必要性（風・地震・温度など）等に議論が及んだ。

4. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者には下線）

〔図書〕（計1件）

1. 佐藤大樹, 寺崎浩, 中込忠男, 西嶋一欽, 松井正宏, 安井八紀, 吉江慶祐, 他, 建築物荷重指針を活かす設計資料 2 —建築物の風応答・風荷重評価/CFD適用ガイド—, 7章, 7.2 疲労評価, 2017年2月

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, 教授)
金 容徹 (東京工芸大学, 准教授)