

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                 |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 免震部材の疲労損傷に対する設計手法の提案 - 信頼性設計からのアプローチ -                                                          |
| Title(English)    | A concept of design for fatigue damage to seismic isolators -Reliability design based approach- |
| 著者(和文)            | 団栗直希, 西嶋一欽, 佐藤大樹                                                                                |
| Authors(English)  | Naoki Danguri, Kazuyoshi NISHIJIMA, Daiki Sato                                                  |
| 出典(和文)            | 日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 123-124                                                        |
| Citation(English) | , vol. B-2, , pp. 123-124                                                                       |
| 発行日 / Pub. date   | 2017, 8                                                                                         |
| 権利情報              | 一般社団法人 日本建築学会                                                                                   |

## 免震部材の疲労損傷に対する設計手法の提案 - 信頼性設計からのアプローチ -

正会員 ○団栗 直希\*

同 西嶋 一欽\*\*

同 佐藤 大樹\*\*\*

免震部材                      疲労損傷                      信頼性解析  
モンテカルロシミュレーション      想定シナリオ      設計点

## 1. 背景と目的

近年免震装置を有する高層建物が増えてきている。しかし、免震装置の疲労損傷に対する設計方法については、十分な検討がなされているとは言えない。

本研究では、風による疲労損傷と地震による疲労損傷の両方を考慮し、免震部材の疲労に対する設計を行う際に、評価期間中のどのような風荷重、地震荷重を想定すればよいか、また、設計目標としてどのような風疲労損傷度、地震疲労損傷度を想定すればよいか、を決定する手法を信頼性設計の考え方をを用いて提案する。

## 2. 免震部材の疲労損傷度

## 2.1. 疲労損傷度の評価

本研究では、累積風疲労損傷度( $D_W$ )と累積地震疲労損傷度( $D_E$ )を考える。それぞれは式(1)と(2)で表現されると仮定する。

$$D_W = \sum_u h_W(u; a_W) n_W(u; \Theta_W) \quad (1)$$

$$D_E = \sum_{v,T} h_E(v, T; a_E) n_E(v, T; \Theta_E) \quad (2)$$

式(1)で $u$ は風速を表す。式(2)で $v$ は最大地動速度(Peak Ground Velocity, 以下 PGV)、 $T$ は地震動の継続時間を表す。ここで、 $h_W(u; a_W)$ 、 $h_E(v, T; a_E)$ は D 値モデル、すなわち 1 回の強風イベント、地震イベントにおける累積疲労損傷への寄与を表す。なお、1 回の強風イベントとは、10 分間平均風速 $u$ の風が 10 分間作用することとする。1 回の地震イベントは、地震動が始まってから終わるまでとする。 $n_W(u; \Theta_W)$ は風速を変数とする、評価期間中の強風イベントの発生回数、 $n_E(v, T; \Theta_E)$ は PGV と継続時間を変数とする、評価期間中の地震イベントの発生回数を表す。本研究では、評価期間を 100 年としている。 $a_W$ 、 $a_E$ は免震部材の疲労損傷に対する耐力に関するパラメータである。 $\Theta_W$ は強風による風速の発生頻度の統計的な不確実性を表すパラメータである。 $\Theta_E$ は地震による PGV と継続時間の発生頻度の統計的な不確実性を表すパラメータである。なお、以降では疲労損傷度を D 値と呼ぶこととする。

2.2. 風疲労損傷度( $D_W$ )

$D_W$ を既往の研究に基づいて計算する。想定した免震建物は斎藤ら<sup>1)</sup>の D1-M1-T6model を用いた。西嶋ら<sup>2)</sup>は地上高さ 10m、地表面粗度区分Ⅲでの 10 分平均風速を変数として $D_W$ を計算した。西嶋らの計算をもとに、ダンパー量 0.04 の結果を用いて、D 値モデルを式(3)で近似した。

$$h_W(u; a_W) = a_W \cdot u^{14} \quad (3)$$

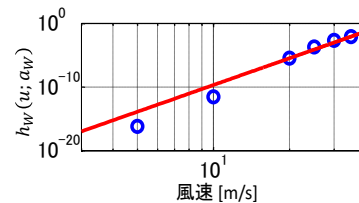
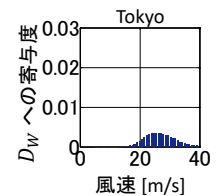


図1 風速の D 値モデル

図2  $D_W$ への寄与度

結果を図1に示す。図中の丸は西嶋らの計算結果を表す。実線はフィッティングでモデル化した $h_W(u; a_W)$ を表す。

このモデルでは指数部分是不変とし、ダンパー量の変化による D 値モデルの変化を $a_W$ の変化のみで表現する。

次に、どの風速域が免震装置の風疲労損傷に大きな影響を与えるかを検討した。図2に東京での結果を示す。縦軸は各風速の発生頻度と $h_W(u; a_W)$ の値をかけ合わせたもの( $D_W$ への寄与度と呼ぶ)を表す。図2から、地表面粗度区分Ⅲでの風速 15m/s 以下の風速域では、 $D_W$ への影響は無視できることが分かる。このことから、図1の D 値モデルでは風速 5、10m/s での値がずれているが、実用上問題は無いと判断した。

本研究では、Zhang ら<sup>3)</sup>の台風シミュレーションを用いて、評価期間 100 年における $D_W$ の値を 500 回計算し、 $D_W$ の確率分布を推定した。 $D_W$ の確率分布は対数正規分布で近似できることが分かった。

2.3. 地震疲労損傷度( $D_E$ )

$D_E$ については、1 つの地震イベントでの D 値モデル $h_E(v, T; a_E)$ を式(4)でモデル化できると仮定した。

$$h_E(v, T; a_E) = a_E \cdot v^2 \cdot T \quad (4)$$

$D_W$ の場合と同様に、ダンパー量の変化による D 値モデルの変化を $a_E$ の変化のみで表現する。

本研究では、西嶋<sup>4)</sup>の地震シミュレーションを用いて、評価期間 100 年における $D_E$ の値を 10000 回計算し、 $D_E$ の確率分布を推定した。 $D_E$ の確率分布はパレート分布で近似できることがわかった。

## 3. 信頼性解析

## 3.1. 設計時に考慮すべき D 値の組み合わせ

評価期間 100 年間に免震部材に疲労損傷が発生する確率は式(5)で定義される安全余裕 $M$

$$M = 1 - (X_W D_W + X_E D_E) \quad (5)$$

を用いて式(6)で表される。

$$P_f = P[M < 0] \quad (6)$$

ここで、 $X_W$ 、 $X_E$ はモデルの不確実性の影響を表すパラメ

ータである。 $X_W$ 、 $X_E$ は中央値 1、変動係数 0.3 の対数正規分布に従うと仮定した。本研究では、FORM(First Order Reliability Method)により、破壊領域の中で最も発生する可能性が高い確率変数の値の組み合わせ、すなわち設計点( $x_W^*$ 、 $x_E^*$ 、 $d_W^*$ 、 $d_E^*$ )を決定し、設計に用いることを提案する。

### 3.2. 設計用台風、設計用地震の設定方法の提案

本節では、信頼性解析を行うことによって、あらかじめ設定された許容疲労破壊確率に対応する設計点( $d_W^*$ 、 $d_E^*$ )を算定する手順を示す。

- ① 台風と地震の両方の許容疲労破壊確率 $P_f^*$ を設定し、次に地震のみの許容疲労破壊確率 $P_{fE}^*$ を設定する。
- ②  $P_{fE}^*$ に対応する $a_E$ を試行錯誤により求める。
- ③  $P_f^*$ を満たすように、FORM を用いて、 $a_W$ を試行錯誤により求める。
- ④  $a_W$ と $a_E$ が決まれば、FORM を用いて $d_W^*$ と $d_E^*$ を算定できる。それらに対応する風シナリオ、地震シナリオをモンテカルロシミュレーションの結果から抽出する。抽出されたシナリオに対して、 $d_W^*$ と $d_E^*$ を上回らないように設計すればよい。

風シナリオとは、設計時に想定すべき風速の発生頻度とする。地震シナリオとは設計時に想定すべき PGV と継続時間の発生頻度とする(図 3(c)(d)参照)。

なお、免震部材を設計すると $a_W$ と $a_E$ の値は一意に決まるので、 $a_W$ と $a_E$ の値を独立に決定することはできないと考えられるが、本研究では独立に決定できると仮定した。

### 3.3 算定例

本研究では、 $P_f^*$ を 1%、 $P_{fE}^*$ を 0.7%に設定し、設計点を算定した。結果を表 1 に示す。 $P_f^*$ と $P_{fE}^*$ を地域によらず一定とすると、表中の 4 地点で $d_W^*$ は 0.1~0.3 程度、 $d_E^*$ は 0.6~0.8 程度の値を示した。

次に $d_W^*$ と $d_E^*$ に対応する風シナリオ、地震シナリオをシミュレーション結果から抽出する。東京の結果を図 3 に示す。図 3 に示されているのが想定すべき設計用台風、設計用地震となる。ただし、台風経路は東京での最大風速が 30m/s 以上の台風のみを表示している。また、地震震央は東京での PGV が 50cm/s 以上の地震のみを表示している。

### 4. まとめ

免震部材の疲労損傷に対する設計をする際に、どのような荷重を想定すべきか、設計目標としてどのような D 値の組み合わせを想定すべきか、を決定する手法を提案した。本研究での仮定の下では、 $d_W^*$ は 0.1~0.3 程度、 $d_E^*$ は 0.6~0.8 程度を想定すればよいことが分かった。

今後の課題を以下に示す。

- ① 地震の D 値モデル $h_E(v, T; a_E)$ について、本研究では式(4)で仮定したが、地震による D 値に関係する

主要なパラメータを明らかにし、より現実的な D 値モデルを構築する必要がある。

- ② モデルの不確実性を表す変数 $X_W$ 、 $X_E$ についてどの分布を用いるべきか明らかにする必要がある。
- ③ 本研究では累積疲労損傷評価に Miner 則を用いたが、吉敷ら<sup>5)</sup>が言及したように、Miner 則の適用可能性と妥当性についても検討されなければならない。

### 謝辞

本研究は京都大学防災研究所共同研究(平成 28 年度一般共同研究 28G-03)の成果による。

### 参考文献

- (1) 齋藤元紀, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 池上昌志, 佐藤利昭, 北村春幸, (2015), 多質点系モデルを用いた変動風圧を受ける超高層免震建物の応答評価, 2014 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I
- (2) 西嶋一欽, 佐藤大樹, (2015), 変動風圧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構築に向けた基礎的検討, JCOSSAR 2015 論文集
- (3) S. Zhang, K. Nishijima, (2012), Statistics-based investigation on typhoon transition modeling, The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications
- (4) 西嶋一欽, (2002), 建築物ポートフォリオ最適設計のための多地点自然災害危険度解析モデル, 東京大学修士論文
- (5) 吉敷祥一, 大河原勇太, 山田哲, 和田章, (2008), 免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, vol. 73, no. 624, pp. 333-340

表 1 設計点の算定結果

|     |         |         |      |      |      |      |
|-----|---------|---------|------|------|------|------|
| 東京  | 7.9E-24 | 2.5E-07 | 0.20 | 0.69 | 1.04 | 1.15 |
| 札幌  | 4.2E-23 | 1.2E-04 | 0.13 | 0.77 | 1.02 | 1.12 |
| 鹿児島 | 1.0E-24 | 6.2E-06 | 0.15 | 0.75 | 1.02 | 1.12 |
| 高知  | 5.6E-24 | 2.5E-08 | 0.28 | 0.63 | 1.05 | 1.12 |

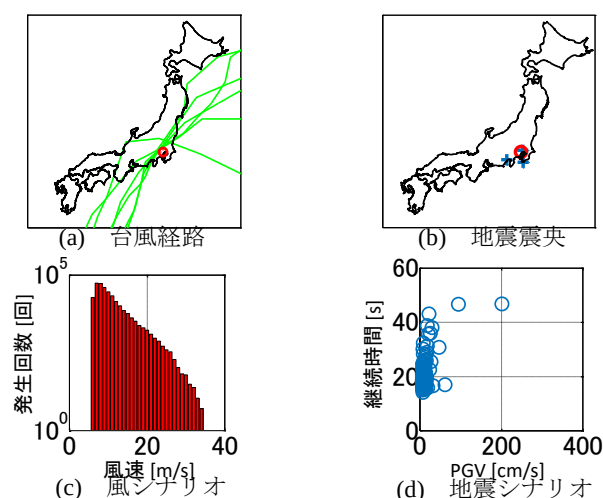


図 3 東京での風シナリオ、地震シナリオ

\*京都大学 大学院 大学院生

\*\*京都大学 防災研究所 准教授

\*\*\*東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授

\*Graduate student, Kyoto University

\*\*Associate professor, Kyoto University

\*\*\*Associate professor, Tokyo Institute of Technology