

強風と地震動による作用を受ける免震建物の疲労損傷に対する設計手法
 Fatigue Design Methodology for Seismically-isolated Buildings Subject to Actions Caused by
 Strong Wind and Seismic Motion

○団栗直希・西嶋一欽・佐藤大樹

○Naoki DANGURI, Kazuyoshi NISHIJIMA, Daiki SATO

As the number of seismically-isolated high-rise buildings has been increasing, the interest on fatigue damages to components of seismic isolation systems has been raised. In this study an approach to determine the design criteria for fatigue accumulation is proposed. The goal of this study is to determine the design criteria as the combination of acceptable wind-induced fatigue level and acceptable earthquake-induced fatigue level for given combination of a series of typhoon events and a series of earthquake events. The proposed approach is composed of probabilistic hazard analysis based on Monte Carlo simulation and reliability-based analysis. As an example, a high-rise building located in Tokyo is considered in order to illustrate the procedure for determining the fatigue design criteria.

1. 背景と目的

阪神・淡路大震災以降、免震装置を採用している建物（免震建物）の数が増えてきている。近年では免震建物の高層化が進行しており、免震建物に作用する風の影響が無視できなくなっている。このような背景を踏まえ、免震装置の風による疲労への関心は高まってきている。しかし、地震による疲労と風による疲労を同時に考慮した免震装置の疲労損傷に対する設計方法は確立されていないのが現状である。

本稿では、風と地震による疲労の蓄積を同時に考慮した設計クライテリアの決定方法を提案する。ここで言う設計クライテリアとは、設計時に想定する強風イベントおよび地震イベントと、それらのイベントに対してどの程度の疲労損傷度以下に抑えるか、の組み合わせである。なお、以降では疲労損傷度を D 値と呼ぶ。

2. 免震装置の疲労損傷度

2.1 疲労損傷評価

本稿では、累積風疲労損傷度(D_W)と累積地震疲労損傷度(D_E)を式(1)と(2)で表現する。

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

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

u は10分間平均風速、 v は最大地動速度（以降ではPGV）、 T は地震動の継続時間を意味する。 $h_W(u; a_W)$ 、 $h_E(v, T; a_E)$ はD値モデルで、それぞれ1回の強風イベント、地震イベントによって累積するD値を表している。なお、1回の強風イベ

ントとは、10分間平均風速の風が10分間作用することである。 $N_W(u)$ は風速が u である風の評価期間における発生回数、 $N_E(v, T)$ はPGVが v 、継続時間が T である地震イベントの評価期間における発生回数である。 a_W 、 a_E は設計パラメータである。

2.2 風疲労損傷度

馬橋ら[1]は仮想の高層免震建物の免震装置に累積する風疲労を風向角 θ ごとに計算した。ここでは、馬橋らの計算結果をもとに文献[2]を参考にして風のD値モデルを作成する。風のD値モデルを式(3)に示す。

$$h_W(u, a_W(\theta)) = a_W(\theta) u^{b(\theta)} \quad (3)$$

なお、ダンパー量が変化する場合、ダンパーの風に対する強度が変化するため、D値モデルも変化すると考えられるが、本稿ではダンパー量の変化によるD値モデルの変化を a_W の変化のみで表現できるとし、10分間平均風速の指数 b はダンパー量の変化に関わらず不変とする。ダンパー量0.04の場合の風向角毎の設計パラメータ $a_W(\theta)$ および10分間平均風速の指数 $b(\theta)$ を表1に示す。なお、表1では風向角が0度から45度まで示されているが、これは対象とした免震建物が正方形断面を有し、対称性があるからである。

本稿では、確率台風シミュレーション（領域限定直線台風モデル）[3]を用いて評価期間100年間に累積するD値を5,000回計算し、 D_W の確率分布を推定する。本研究では、 D_W の確率分布を一般化極値分布でモデル化する。

2.3 地震疲労損傷度

馬橋らは 2.2 節で想定した高層免震建物と同じ建物について累積する地震疲労損傷度を計算した。馬橋らの計算結果をもとに地震の D 値モデルを作成する。地震の D 値モデルを式(4)に示す。

$$h_E(v, T; a_E) = a_E v^{AT^B} \quad (4)$$

地震 D 値モデルについても風 D 値モデルと同様に、ダンパー量の変化に伴う D 値モデルの変化を a_E の変化のみで表せるとする。ダンパー量が 0.04 の場合のパラメータ a_E 、 A 、 B の値を表 1 に示す。

本稿では、確率地震シミュレーション[4]を用いて評価期間 100 年間に累積する D 値を 2,500 回計算し、 D_E の確率分布を推定する。本稿では、 D_E の確率分布を一般化極値分布でモデル化する。

3. 設計クライテリアの決定方法

式(5)で定義される安全余裕を用いて、評価期間 100 年間での免震装置の破壊確率を式(6)で表す。

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

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

X_W は風 D 値モデルの不確実性を表すパラメータ、 X_E は地震 D 値モデルの不確実性を表すパラメータである。本稿では、 X_W 、 X_E を中央値 1、変動係数 0.3 の対数正規分布でモデル化する。

設計クライテリアの決定手順は以下の通りである。まず、破壊領域の中で最尤の組み合わせ (d_W^* , d_E^* , x_W^* , x_E^*) を選び出す。選び出された d_W^* , d_E^* が設計時に目標とする D 値に相当する。また、 d_W^* , d_E^* に対応する風シナリオ n_W^* および地震シナリオ n_E^* をシミュレーション結果から抽出する。本稿で決定する設計クライテリアとは、抽出された n_W^* , n_E^* によってもたらされる D 値がそれぞれ d_W^* , d_E^* を超えないように設計することである。

4. 算定例

本章では、3 章で説明した信頼性解析手法に則って、対象地点を東京とした場合の設計クライテリアを決定する。本稿では、まず地震のみを想定した場合の破壊確率を 0.5% に設定し、設計パラメータ a_E を算定する。次に風と地震両方を想定した場合の破壊確率を 1% に設定して a_W を算定し、目標とする D 値および想定シナリオを求めた。算定された目標とする D 値を表 2 に、抽出された想定シナリオを図 1 に示す。疲労に対する設計を行う際には、図 1 の想定シナリオに対して表 2 の D 値以下に抑えるように設計を行うことが要求される。

5. まとめ

本稿では、免震装置の疲労損傷に対する設計を

行う際の設計クライテリアの決定方法を提案した。また、具体例として東京の仮想の高層免震建物の疲労に対する設計クライテリアを決定した。

謝辞

本研究は、京都大学防災研究所一般共同研究(28-G03)および H30 年度東京工業大学フロンティア材料研究所共同利用研究による成果である。また、東京工業大学大学院生の馬橋聖生氏に協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

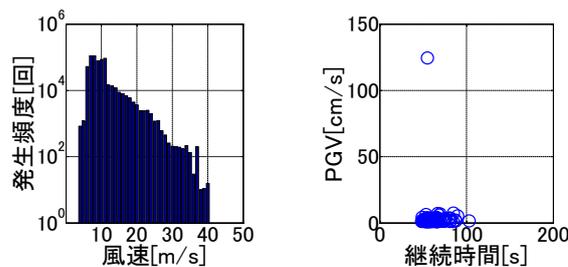
- [1] 馬橋聖生, 佐藤大樹, 台風シミュレーションを用いた免震ダンパーの累積損傷評価、第 25 回風工学シンポジウム論文集, pp.373-378, 2018
- [2] 団栗直希, 西嶋一欽, 佐藤大樹, 免震部材の疲労損傷に対する設計手法の提案 信頼性設計からのアプローチ, 2017 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 20062, 2017
- [3] 団栗直希, 西嶋一欽, 免震装置の風疲労設計に資するハザード適合最尤台風の抽出方法, 2018 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 20051, 2018
- [4] 西嶋一欽, 建築物ポートフォリオ最適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, 2002

表 1 D 値モデルのパラメータ

θ	風方向D値		風直交方向D値	
	$a_W(\theta)$	$b(\theta)$	$a_W(\theta)$	$b(\theta)$
0°	1.2E-28	16.0	2.2E-22	12.0
22.5°	1.3E-29	16.2	1.5E-29	16.7
45°	2.1E-29	16.1	2.6E-30	16.7
	a_E		A	B
	5.8E-8		2.2	1.2

表 2 目標とする D 値の算定結果

d_W^*	d_E^*	x_W^*	x_E^*
0.16	0.75	1.02	1.12



(a) 風シナリオ (b) 地震シナリオ

図 1 想定シナリオ