LRB 免震建物の風による疲労損傷の試算

STUDY ON FATIGUE DAMAGE OF LEAD-PLUGGED RUBBER BEARING IN BASE ISOLATED BUILDING UNDER WIND LOAD

島岡俊輔 — * 1 安井八紀 — * 2
大熊武司 — * 3 北村春幸 — * 4

Shunsuke SHIMAOKA — * 1 Hachinori YASUI — * 2
Takeshi OHKUMA — * 3 Haruyuki KITAMURA — * 4

キーワード:
免震構造, LRB, 風応答, 疲労損傷

Keywords:
Base isolated building, Lead-plugged rubber bearing, Wind response, Fatigue damage

In this study, fatigue damage of LRB in base isolated building under wind load during review period is evaluated with employing result of anamnestic cyclic loading test. Frequency of displacement amplitude is calculated from time history of displacement using Rain Flow Method. In this model, fatigue damage of LRB in the corner of building is the largest from the effect of torsional component of wind force. Due to frequency of accumulated time in low wind speed range, responses in this range have a large effect on fatigue damage of LRB.

1. はじめに

近年、高層建築物や大型の建築物に対しても免震構造を採用する事例が増えている。このような構造物に対しては、地震による損傷に加え、風荷重による長時間の繰返しに起因する損傷について安全性を確保する必要がある。例えば、日本免震構造協会の調査²⁾において、鉛ダンパーに東北地方太平洋沖地震以前に亀裂が生じていた事例が報告されている。しかしながら、風荷重は地震荷重より小さくなるという理由から設計に十分考慮されない場合が多く、照査対象とする期間中(以下、照査期間と呼ぶ)の疲労に対する検討が十分になされているとは言えないのが現状である。このような状況の中、「免震建築物の耐風設計指針³⁾」における暴風の累積作用時間の簡易評価方法の紹介や、鉛プラグ入り天然積層ゴム型免震支承(以下、LRB と呼ぶ)を対象とした微小振幅での繰返し加力実験⁴⁾など、免震装置の疲労損傷に関する情報が少しずつ豊かになってきている。

そこで、本報告では、LRB を対象として、微小振幅繰返し加力実験の結果⁴⁾を用いて、照査期間における超高層免震建物に設置した免震部材の風による疲労損傷について検討する。なお、本報告では風力を3方向同時入力としているが、LRB の累積損傷度 D 値については、風方向の振幅による D 値と風直交方向での D 値を、それぞれ独立して評価する。また、比較のために風力を1方向入力した場合についても示す。

2. 対象構造物と疲労損傷度の算定法

2.1. 対象構造物

対象とするモデルは、鈴木らが検討を行った LRB 免震層を有する

高さ約 160m の RC 造建物とする⁵⁾。対象とする建物の諸元を表 1 に、免震部材の配置を図 1 に示す。

上部構造は、図 2 に示すように、各層をせん断 2 方向と回転 1 方向の 3 自由度を有する 1 質点にまとめ、49 質点でモデル化する。

表 1 建物諸元

高さ H (m)		159.1
幅(奥行) B (m)		31.82
アスペクト比 H/B		5
総重量 W (kN)		652159
密度 $W/(B^2H)$ (kN/m ³)		4.05
免震周期 T_f (s)		5.5
降伏荷重比 α_s (s)		0.025
免震層固定	並進1次周期 T_{x1} (s)	3.13
	ねじれ1次周期 $T_{\theta 1}$ (s)	2.82
免震層 初期剛性時	並進1次周期 T_{x1} (s)	3.36
	ねじれ1次周期 $T_{\theta 1}$ (s)	3.00

本稿は 2014 年日本建築学会大会(近畿)にて発表した文献 1) に加筆したものである。

¹⁾ 佛泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 研究員・博士(工学)
(〒299-0268 千葉県袖ヶ浦市南袖 51)
²⁾ 佛泉創建エンジニアリング都市環境技術研究所 所長代理・博士(工学)

³⁾ 神奈川大学工学研究所 客員教授・工博
⁴⁾ 東京理科大学 教授・博士(工学)

¹⁾ Research Engineer, Urban Environment Research Center, Izumi Sohken Engineering Co., Ltd., Dr. Eng.
²⁾ General Manager, Urban Environment Research Center, Izumi Sohken Engineering Co., Ltd., Dr. Eng.
³⁾ Visiting Prof., Institute of Technology, Kanagawa Univ., Dr. Eng.
⁴⁾ Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

上部構造については弾性とし、免震層の LRB については、復元力モデルに Bi-Linear 型を 8 本組み合わせさせた MSS 要素をそれぞれの位置に配置する。ここで、滑り支承については摩擦係数を 0 としてモデル化する。なお、LRB については、鉛プラグの温度上昇やクリープ特性などの問題があるが、本報告ではこれらの影響は考慮しないものとする。

減衰行列は剛性比例型とし、上部構造には 1.5%、免震層については 1.0%の減衰をそれぞれ与える。

2.2. 風速の累積作用時間の算定法

風速の累積作用時間は、建設地点と照査対象期間を仮定し、暴風と暴風以外に分けて以下のように算定する。なお、ここでいう暴風とは再現期間約 1 年から 500 年の風速であり、暴風以外とは日常的な風速を示している³⁾。

(1) 建設地点および照査期間

建設地点を表 2 に示すように仮定する。また、照査期間については $N=100$ 年を想定する。

表 2 建設地点諸元

建設地点	緯度(度)	地表面粗度区分 ⁶⁾	Z_G (m)	α	基本風速 U_0 (m/s)
札幌	43.1	III	450	0.20	32
東京	35.6	III	450	0.20	38
鹿児島	31.6	III	450	0.20	40

(2) 暴風の累積作用時間

安井らによって提案された方法⁷⁾に従って算定する。ここでは、照査期間 $N=100$ 年であることから、経験的再現期間は 200 年³⁾となり、再現期間 500 年程度の暴風が含まれないことになる。そこで、照査期間 $N=100$ 年での上位 $N=100$ 個の最大風速を有する暴風に加え、再現期間 500 年の暴風 1 つを対象とする。

(3) 暴風以外の風速の作用時間

表 3 に示す各気象官署の毎 10 分の観測データ⁸⁾を基に、以下の手順で暴風以外の風速の作用時間を算定する。

- ①観測データをそのまま用いて Weibull 近似を行い、気象官署における Weibull 係数 C_m および k_m を算定する。ここで、観測データには前述の暴風に相当する風速も含まれているが、Weibull 近似を行う際には、その影響は小さいと考えられるため、観測データから暴風のデータを取り除く等の特別な処理は行わない。
- ②照査期間 $N=100$ 年、暴風の累積作用時間において算定した累積作用時間の合計 $r_{Storm}(\text{min})$ を全期間から差し引くことで、各風速に対する暴風以外の累積作用時間を以下のように算定する。

$$T_{Daily}(U) = \{F_{Daily}(U + \Delta U) - F_{Daily}(U - \Delta U)\} r_{Daily} \quad (1)$$

$$r_{Daily} = 60 \times 24 \times 365.2422 \times N - r_{Storm} \quad (2)$$

- ③建設地点の地表面粗度区分⁶⁾III、気象官署の地表面粗度区分⁶⁾IV および観測高さ H_m を考慮して、Weibull 分布に基づいた建設地点の建物頂部 H における非超過確率を下式で算定する。ここで、式中の Z_G および α の添え字は粗度区分を表す。また、 β は粗度区分の差異による補正係数である。

$$F_{Daily}(U) = 1 - \exp\{-(U/C)^k\} \quad (3)$$

$$C = \beta \cdot C_m = (Z_{G,IV}/H_m)^{\alpha_{IV}} (H/Z_{G,III})^{\alpha_{III}} C_m \quad (4)$$

$$k = k_m \quad (5)$$

表 3 気象官署諸元

気象官署	地表面粗度区分 ⁶⁾	観測高さ H_m (m)	使用した観測データ
札幌	IV	59.5	2008年1月～2012年12月
東京	IV	35.1	2008年1月～2012年12月
鹿児島	IV	44.8	2009年1月～2013年12月

2.3. 風応答解析法

時刻歴風応答解析は、建物頂部における風速を再現期間 500 年での風速 61m/s から 10m/s の範囲に対して 1m/s 刻みとし、60 分間を 10 分毎の 6 区間に分けて行う。ここで、過渡応答の影響を排除するため、評価対象とする各 10 分間の前に層風力を漸増させて作用させる区間を 1 分間設ける。

層風力の時刻歴としては、地表面粗度区分 III、アスペクト比 5、辺長比 1 の風洞実験データ⁹⁾を用いる。免震層固定時の一般化層風力のパワースペクトル密度の一例を図 3 に示す。免震層固定時の周期(3.13s)を対象に前述建物の頂部風速に対する無次元振動数を算定すると 0.167～1.02 (図 3 参照)となり、無次元振動数で 3 までを含むこのデータは十分この検討に耐えうるものである。

風応答解析は、風方向(x 方向)、風直交方向(y 方向)およびねじれ方向の 3 方向の風力を同時に入力する。なお、比較のために、各風向をそれぞれ個別に入力した場合の解析も行う。

図 3 一般化風力のパワースペクトル密度

2.4. 疲労損傷評価方法

累積損傷度 D 値の算定は、以下の手順で行う。

- ① 各風速 U_H で 60 分間の解析を 10 分毎の 6 区間に分けて行う。
- ② 10 分間の解析より得られた応答変位より、レインフロー法を用いて変位全振幅 A を求め、各変位全振幅に対する破断に至る回数より累積損傷度 D 値を計算する。ただし、変位全振幅 A と破断回数の関係には、既往の文献⁴⁾において実験目標値として示されている式を援用する。従って、以降では破断回数ではなくこの目標回数 N_T を用いて疲労損傷を評価する。この実験目標値は、鉛ダンパーの疲労曲線における破断限界の繰返し回数を 10 倍したものであり、LRB に関する破断や亀裂を対象としたものではない。実験での変位全振幅 $A_0(\text{mm})$ と目標回数 N_T との関係を、せん断歪 $\gamma = (A_0/2)/h_{b0}$ と目標回数 N_T の関係として次式のように表す。ここで、実験でのゴム層厚は $h_{b0} = 99\text{mm}$ である。

$$N_T = 4 \times 10^6 (\Delta_0/2)^{-1.8302} = 890.47 \gamma^{-1.8302} \quad (6)$$

今回使用すると仮定した装置のゴム層厚が $h_b=0.203\text{m}$ であることから、上式から変位全振幅 $\Delta(\text{m})$ と目標回数 N_T の関係は、せん断歪 $\gamma=(\Delta/2)/h_b$ より、次式とできる。

$$N_T = 890.47 \left(\frac{\Delta/2}{0.203} \right)^{-1.8302} = \left(\frac{c}{2} \right)^m \left(\frac{\Delta}{2} \right)^{-m} = 48.1 (\Delta/2)^{-m} \quad (7)$$

ここで、 $m=1.8302$ であり、 $c=16.6$ となる。

この目標回数 N_T と変位全振幅 Δ の頻度 n_i を用いて、修正マイナー則より次式で D 値を求める。

$$D = \sum D_i = \sum (n_i / N_T) \quad (8)$$

③ 10 分間での D 値を各々の区間で算定し、全区間の平均を当該風速 U_H の 10 分間での D 値とする。

④ 風速毎の累積作用時間(min)に、上記で求めた 10 分間での D 値を 10 で除して得られる 1 分間での D 値を乗じて総和をとり、照査期間での D 値とする。

3. 10 分間での応答と疲労損傷

3.1. 免震層の応答性状

免震層隅角部(図 1 の A 点)における変位時刻歴波形を図 4 に、免震部材のせん断力 Q と変位 δ の関係を図 5 に、レインフロー法で求めた評価時間 10 分間での変位全振幅 Δ の頻度分布を図 6 にそれぞれ事例として示す。

図 4 に示す時刻歴応答変位より、風速が低い場合には、応答変位に対する共振成分の寄与が小さいが、風速が高くなるとその寄与が増加していることが分かる。また隅角部ではねじれ方向入力による応答変位は、風直交(y)方向入力時と概ね同程度となっている。またこのねじれの影響により、3 方向同時入力時には 1 方向のみの場合に比して応答変位が大きくなっている。

図 4 応答変位時刻歴

(a) 風(x)方向 (b) 風直交(y)方向

図 5 $Q-\delta$ 関係($U_H=50\text{m/s}$ 、3 方向同時入力時)

(a) x 方向($U_H=10\text{m/s}$) (b) y 方向($U_H=10\text{m/s}$)

(c) x 方向($U_H=50\text{m/s}$) (d) y 方向($U_H=50\text{m/s}$)

図 6 各方向の変位全振幅 Δ 頻度分布

図 5 の $Q-\delta$ 関係に示すように、 $U_H=50\text{m/s}$ において免震部材が塑性化している。ちなみに、今回の検討においては、 $U_H=40\text{m/s}$ 程度以下の風速では弾性範囲に留まっている。

図 6 に示す変位全振幅の頻度より、風速が低い場合には微小振幅の頻度が高く、風速が高くなるにつれ微小振幅の頻度が減少し、振幅が大きい側の頻度が増加する傾向にあり、風速 $U_H=50\text{m/s}$ では免震部材の降伏変位 0.013m を越える振幅が発生している。対象としている免震建物ではねじれと並進の固有周期が近接していることもあり、隅角部ではねじれ成分の影響が大きく、ねじれ方向入力時の頻度が他の方向入力時と同程度となる。

3.2. 10 分間での応答値

3 方向同時入力時における最大応答変位と風速 U_H の関係を図 7、標準偏差と風速 U_H の関係を図 8、D 値を計算した振幅の回数の平均値を図 9 にそれぞれ示す。また、 $U_H=40\text{m/s}$ 以下の範囲において、風速 U_H に関するべき乗関数で近似したものを重ねて示す。ここで、標準偏差は、変位の全成分に対する値 σ と、免震層初期剛性時の固有振動数の 1/3 より高い振動数の成分から求めた共振成分に対する値 σ_r の 2 種類を示す。

図 7 より、 $U_H=50\text{m/s}$ 以上では、風(x)方向の最大応答変位が急激に増加している。これは免震部材の塑性化し、平均変位が増加するためである。

図 8 より、風(x)方向の全成分に対する標準偏差 σ は $U_H=50\text{m/s}$ 以上で著しく増加している。これは平均変位の増加を含んだ全成分について標準偏差を算定しているためである。共振成分の標準偏差 σ_r は、風(x)方向では風速 U_H の約 3.1 乗、風直交(y)方向では約 3.0 乗に比例している。

図 9 より、D 値を算定する対象とした振幅の回数は、風速 $U_H=20\text{m/s}$ までは増加するが、それ以降はほぼ 240 回程度となっている。これは、免震層初期剛性時の固有周期 $T_{1x}=3.36\text{s}$ で 10 分間($T_{\text{total}}=600\text{s}$)を除した回数 178 回よりも大きい。

図 7 最大応答変位(3 方向同時)

図 8 標準偏差(3 方向同時)

図 9 振幅の総数

3. 3. 10 分間での疲労損傷

10 分間($T_{\text{total}}=600\text{s}$)での D 値(以下、レインフロー法による D 値)と、文献 3), 10) に示される変位全振幅がレーリー分布に従う場合の評価式(9)による D 値(以下、評価式による D 値)とを図 10 に比較して示す。

$$D = \frac{T_{\text{total}}}{T_1} \cdot c^{-m} \cdot 2^{m/2} \cdot (\sigma')^m \cdot \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \quad (9)$$

$$\sigma' = \left(1 + e^{-h\pi}\right) \sigma \quad (10)$$

ここで、 T_1 は振動系の 1 次固有周期、 σ は変位波形の標準偏差、 h は振動系の減衰定数、 m は疲労延性指数、 c は目標回数と全振幅の

関係を表す定数(式(7)参照)、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数である。 T_1 には免震層初期剛性時の固有周期、 h には上部構造の減衰定数 0.015、標準偏差には全成分に対する値 σ と共振成分に対する値 σ_r を用いる。

まず、レインフロー法による D 値について、入力成分の違いに着目する。ねじれ方向入力での D 値は、風(x)方向あるいは風直交(y)方向のみの場合の D 値を上回っている。3 方向同時入力時での D 値は、風(x)方向では風速 U_H の約 5.5 乗、風直交(y)方向では約 5.3 乗に比例している。この D 値の風速に対するべき乗数と、応答変位の共振成分の標準偏差 σ_r の風速に対するべき乗数との比は、両方向とも約 1.75 であり、疲労延性指数 $m=1.83$ (式(7)参照)と同程度である。D 値の変動係数は平均で約 0.15、最大で約 0.32 である。

次に、評価式による D 値との違いについて着目する。全成分の標準偏差 σ を用いた場合には、レインフロー法による D 値を上回っており、平均変位の増加分を含む風(x)方向の $U_H=50\text{m/s}$ 以上ではその差が大きい。風(x)方向および風直交(y)方向において共振成分の標準偏差 σ_r を用いた場合は、レインフロー法による D 値に近い値となる。

(a) 風(x)方向およびねじれ方向入力時

(b) 風直交(y)方向およびねじれ方向入力時

(c) 3 方向同時入力時

図 10 10 分間での D 値と評価式との比較

4. 照査期間 100 年での疲労損傷

4. 1. 各風速の累積作用時間

表 4 に示す各定数を用いて算出した暴風以外の累積作用時間、暴風の累積作用時間およびその合計を図 11 に示す。ここで、暴風の累積作用時間の合計は $r_{Storm}=145,440\text{min}$ となっている。

図 11 より、札幌では $U_H=25\text{m/s}$ 程度、東京と鹿児島では $U_H=20\text{m/s}$ 程度を境界として、低風速側では暴風以外の頻度、高風速側では暴風の頻度がそれぞれ高くなっている。

表 4 非超過確率算定用定数

建設地点	β	C_m	k_m
札幌	1.481	3.98	1.57
東京	1.707	3.73	1.94
鹿児島	1.599	4.06	1.82

(a) 札幌

(b) 東京

(c) 鹿児島

図 11 風速毎の累積作用時間

4. 2. 照査期間での疲労損傷

(1) 風速毎の D 値

3 方向同時入力時における 10 分間の D 値に、累積作用時間をかけて求めた各風速での D 値の事例として、免震層隅角部(図 1 の A 点)における風(x)方向、風直交(y)方向、ねじれ方向および 3 方向入力時での比較結果を図 12 に示す。また、各建設地点における 3 方向入力時の風(x)方向の D 値を図 13 に示す。

図 12 より、10 分間での D 値(図 10 参照)と同様に、3 方向入力時の D 値が全風速域で最も大きく、次いでねじれ方向入力時の値が大きくなっている。3 方向同時入力時の D 値は、 $U_H=10\text{m/s}$ 付近および $U_H=35\text{m/s}$ 付近において、それぞれ風(x)方向入力時と風直交(y)方向入力時の 3 倍程度の値であり、この差は、ねじれに起因するものである。

図 13 より、全建設地点において、暴風以外の累積作用時間が多い $U_H=10\text{m/s}$ 付近の D 値が大きくなっている。暴風による D 値は、札幌では 25m/s 程度、東京および鹿児島では 35m/s 程度に D 値のピークがみられる。札幌ではこのピークが暴風以外の 1/7 程度であり、東京と鹿児島に比して小さい値となっている。

(a) 1 方向入力

(b) 3 方向同時入力

図 12 各方向の風速毎の D 値の比較(東京)

(2) 全風速で集計した D 値

全風速での D 値を集計して得られた照査期間での D 値について、表 5 に東京における各方向同時入力時の集計する風速の範囲による D 値の差異、表 6 に各建設地点での 3 方向同時入力時における D 値をそれぞれ示す。

表 5 より、照査期間での D 値は、3 方向同時入力時において、風(x)方向で 0.071、風直交(y)方向で 0.079 がそれぞれ最大である。風(x)方向または風直交(y)方向の 1 方向に入力した場合の D 値は、3 方向同時入力時の 4 割以下の値であり、ねじれ方向の寄与が大きいことを示唆している。風速域毎の D 値を比較すると、風速 $U_H=20\text{m/s}$ 以下では、10 分間での D 値は小さいものの(図 10 参照)、暴風以外の累積作用時間が大きいことから、照査期間における D 値への寄与が大きく、全体の 4 割程度である。また、免震部材の塑性化が発生する風速 $U_H=40\text{m/s}$ 以上の D 値の合計は、変位振幅は大きい、照査期間中の累積作用時間が小さいために、全体の D 値に占める割合は 1 割程度である。

表 6 より、照査期間での D 値の最大は、鹿児島における風直交(y)

方向の0.122である。札幌では、合計のD値に対して、暴風以外によるD値が8割を占めるのに対して、東京および鹿児島では4割程度となり、札幌では暴風以外が支配的である。なお、この風上側隅角部に配置された免震部材におけるD値は、全部材内で最大となっている。

図 13 照査期間における風速毎のD値 (3方向同時入力時、風(x)方向)

表 5 集計範囲によるD値の差異(東京)

		$\leq U_H=20\text{m/s}$	$\leq U_H=40\text{m/s}$	全風速
風(x)方向のみ	風(x)方向	0.0083	0.0205	0.0232
風直交(y)方向のみ	風直交(y)方向	0.0151	0.0277	0.0301
ねじれ方向のみ	風(x)、風直交(y)方向	0.0201	0.0437	0.0502
3方向同時	風(x)方向	0.0274	0.0616	0.0705
	風直交(y)方向	0.0344	0.0701	0.0787

表 6 地点毎のD値(3方向同時入力時)

建設地点	風(x)方向			風直交(y)方向		
	暴風以外	暴風	合計	暴風以外	暴風	合計
札幌	0.0427	0.0103	0.0530	0.0524	0.0112	0.0636
東京	0.0261	0.0444	0.0705	0.0329	0.0458	0.0787
鹿児島	0.0380	0.0734	0.1114	0.0473	0.0749	0.1222

5. まとめ

本報では、まずLRBを用いた超高層免震建物を対象として、照査期間における各風速の累積作用時間を算定した。次に、風力を3方向同時入力および各方向個別入力として与え、時刻歴風応答解析より変位振幅を算定した。これらを用いてLRBの累積疲労損傷D値を風方向および風直交方向にそれぞれを独立として算定した。これにより得られた結果は以下の通りである。

- ・評価式(9)によるD値はレインフロー法によるD値と同程度の値となる。
- ・対象とした超高層免震建物では、LRBの累積疲労損傷度を示すD値は、最大で鹿児島の風直交方向において0.122程度となる。
- ・今回検討した免震建物隅角部に配置された免震部材については、D値に対するねじれの寄与が大きい。したがって、風方向のみ、風直交方向のみあるいはねじれ方向のみの1方向入力ではなく、3方向同時入力による検討を行う必要がある。
- ・照査期間中の累積作用時間が大きい低風速域における応答が全体のD値に大きく寄与する。
- ・緯度が高くなるほど、全体のD値に対する暴風以外の寄与が大きくなる。

今後の検討課題として、微小振幅時のLRBの復元力特性について、モデル化¹¹⁾および実測結果を含めて検討することが挙げられる。

6. 謝辞

本報は、日本免震構造協会内に設置された鉛プラグ入り積層ゴム小振幅多数繰返しWG(委員長：北村春幸東京理科大学教授)ならびに耐風設計部会(委員長：大熊武司神奈川大客員教授)にて議論されたものであり、委員各位に心から謝意を表します。また、本研究に際し多大なご協力を頂いた関係各位に感謝します。

参考文献

1) 安井八紀他：LRB 免震建物の風による疲労損傷の試算 その1からその3, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造II, pp.529・534, 2014. 9
2) 日本免震構造協会：東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建物調査(中間報告), 第14回免震フォーラム, 2011. 9
3) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針, 2012. 9
4) 宮崎充他：繰返し変形をうけた鉛プラグ入り積層ゴムの健全性 その5 鉛プラグ入り積層ゴムの微小振幅疲労実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造II, pp.911・912, 2013. 8
5) 鈴木雅靖他：高層免震建築物の風応答時刻歴解析による検討 その1 対象免震建物と風力波形評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造II, pp.277・278, 2010. 9
6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004), 2004. 10
7) 安井八紀他：疲労損傷評価のための暴風の累積作用時間の簡易評価方法、日本建築学会技術報告集, 第42号, pp.413-418, 2013. 6
8) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
9) 丸川比佐夫他：風洞実験に基づく高層建築の多層層風力によるエネルギー入力性状 その2 矩形高層建築物に作用する層風力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造I, pp.193・194, 2010. 9
10) 吉江慶祐他：広帯域性の変動風力を受ける弾塑性構造物の応答変位振幅の確率分布, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp.37-46, 2006. 6
11) 竹中康雄他：免震用積層ゴム支承の曲線型履歴復元力モデル：「修正HDモデル」, 日本建築学会技術報告集, 第14号, pp.87-92, 2001. 12

[2015年2月16日原稿受理 2015年4月8日採用決定]