T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	A Preliminary Study for Development of Framework for Design and Maintenance Planning of Seismic Isolators/Dampers Subject to Wind-induced Fatigue
著者(和文)	西嶋 一欽, 佐藤大樹
Authors(English)	Kazuyoshi NISHIJIMA, Daiki Sato
出典(和文)	建築物の安全性・信頼性 Vol.8 JCOSSAR2015論文集, Vol. 8, , pp. 575-579
Citation(English)	Proceedings of the Eighth Japan Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. 8, , pp. 575-579
発行日 / Pub. date	2015, 10

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

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

西嶋一欽* 佐藤大樹**

A Preliminary Study for Development of Framework for Design and Maintenance Planning of Seismic Isolators/Dampers Subject to Wind-induced Fatigue

by

Kazuyoshi NISHIJIMA* and Daiki SATO**

This study presents a framework for optimization of the design and maintenance planning of seismic isolators and dampers, which are subjected to wind-induced fatigues. It first presents two basic ideas for optimizing the design and maintenance planning. Then, it presents a general procedure for identifying optimal maintenance planning of seismic isolators and/or dampers. In doing so, the lacking knowledge and models required in the procedure are pointed out. Formats for those lacking models are presented along with an example, where change of the probability of failure of a structure is computed as a function of the damage degree caused by a typhoon event. Through the example it is demonstrated that models of the presented formats facilitates the analysis of the reliability of structures with damaged dampers. The study results advance the design and maintenance of isolators and dampers as well as ways for collecting data on them in experiments.

Keywords: SN curve, PoD curve, optimization, typhoon

1 緒言

本稿は、変動風圧に対する免震装置の疲労損傷に対する設計および維持管理計画に関する考え方を提示し、それらを実務レベルで運用するために必要となる知見を明確にすることで、今後の研究・実験計画の方針を得るものである。

2 免震構造設計・維持管理の現状

免震建物では，変位とエネルギー吸収を免震層に集約しており，配置された免震部材が交換できるという利点を有する。特に，アイソレータとは独立したダンパーの交換は一般に容易である。アイソレータは建物重量を支えているため，別置きダンパーほど交換は容易ではないが，建物全体あるいは局所をジャッキアップしてアイソレータを交換する方法が想定され，その補強が施されているものもある [1)]。

免震建物の維持管理基準 [2)]によれば「設計者は，建物の設計および監理に，施工者は設計図に記載された要求性能を満たす品質確保にそれぞれ責任を負っている。点検技術者は免震関連部材の検査・点検により，免震機能に支障を及ぼす経年劣化，環境変化などを発見し，その情況を報告するとともに問題点を指摘する」と示されている。

検査・点検の種類は，（１）竣工時に行なう「竣工時検査」，（２）毎年実施する「通常点検」，（３）竣工後 5, 10 年，以降 10 年毎におこなう「定期点検」，（４）地震や強風，水害および火災などの被災時に行なう「応急点検」がある。さらに，（２）～（４）の点検で異常が認められた場合に行なう「詳細点検」，免震機能に影響がある工事の完了後に実施する「更新工事後点検」がある。

一般的に、設計・維持管理計画を考える際の考え方としては大きく２つに分けられる（Fig. 1）。すなわち、

(1) 初期建設時に十分な余裕を持たせておく方法
(2) 疲労損傷が発生した時に補修、交換を行うことを前提に設計する方法

である。免震装置の風荷重による疲労損傷に関する現行の設計では、(1)の中でも特に、風荷重による効果を弾性範囲内の抑えることを原則としている。しかし、このような設計方法は、免震装置が本来有している性能を十分に発揮するものではない。また、免震装置は一般的な構造部材と比較して補修・交換が容易である場合が多いので、設計時に補修・交換の可能性をあらかじめ見込むことで、より合理的な設計が可能になる。

しかしながら、上記のような初期建設と補修・交換を統合した設計維持管理を行うための知見は十分ではない。具体的には、

(a) 設計時に想定すべき、疲労評価に資する風荷重の設定方法
(b) 点検時に免震装置に生じている損傷を検出できる可能性に関するモデルの構築に関する知見
(c) 免震装置に生じる損傷サイズを予測するモデルの構築に関する知見

2015年4月20日 Received.

* 京都大学防災研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Gokasho, Uji City, Kyoto
** 東京工業大学応用セラミックス研究所 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 Material and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Nagatsudacho 4259, Midoriku, Yokohama City, Kanagawa

が不足している。そこで本稿では、設計・維持管理計画の枠組みを提示し、上記知見のうち、(b)および(c)が果たす役割を明確にする。また、例題を通して具体的なモデル化に関する手法およびモデルパラメータが結果に及ぼす影響を議論する。なお、(a)の風荷重の設定には、最大風速だけではなく作用時間に関する確率モデルが必要である。これについては、西嶋[3]が考察している。

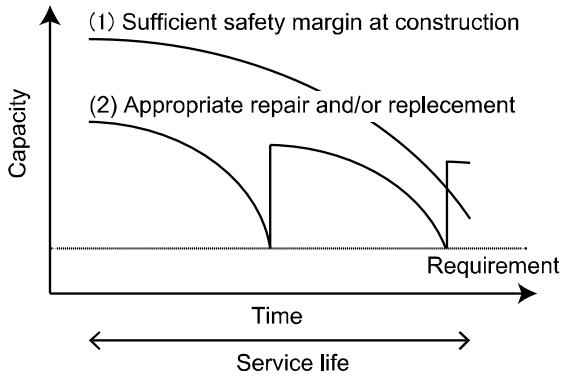

Fig.1 Two principal strategy for design and maintenance of seismic isolators subject to wind-induce fatigue.

3　設計・維持管理計画最適化の枠組み

3･1　先行研究

構造物のライフサイクルマネジメントの観点から、設計・維持管理計画最適化に関する研究がさまざまな用途・構造種別の構造物に対して行われている。例えば、海洋構造物の分野では、信頼性理論に基づいた疲労破壊評価およびそれに基づく維持管理計画に関する手法が実務においても活用されている[例えば 4]。また、疲労設計および維持管理計画に必要となる資料も整備されている[例えば 5,6]。風力発電設備に関する維持管理に関しても、リスクベースでの維持管理計画最適化の枠組みが提案されている[7]。また、Mori らは、信頼性理論に基づくコンクリート構造物の劣化に関する評価手法を提案している[8]。Straub らは、海洋構造物を主な考察対象とし、維持管理計画を不確実性下における意思決定問題として定式化する手法を提案している[9]。本研究は、これらの先行研究によって提案されてきた手法に基づき、免震装置に関する設計・維持管理計画を意思決定問題として定式化し、そのうえで、確率論的に疲労評価を行うために必要な確率モデルの形式を考察する。

3･2　問題の定式化

免震装置に関する設計・維持管理計画に関わる一連のイベントをツリー状に表現したものを Fig. 2 に示す。図中の Deterioration（劣化）は、ここでは台風等によってもたらされる強風の変動風圧による疲労蓄積を表す。Inspection（点検）は台風襲来後あるいは通常・定期点検などによる点検を、Inspection outcome（点検結果）は Inspection による結果を表す。Repair（補修）あるいは Replacement（交換）では、点検結果に基づき、補修・交換しないという選択肢も含めて、適当なものが選択される。図中の□印は意思決定ノード、○印はランダムノードを表す。設計・維持管理計画の最適化とは、上記の一連のイベントにおいて、適切な点検方法、点検結果に基づく最適な補修・交換方法を考慮したうえで最適な設計を行うことである。最適な設計・維持管理計画の最適化基準としては、期待リスクの最小化や、所与の要求性能を制約条件とした期待コスト最小化などが考えられる。

次に、上記の意思決定枠組みを用いた設計・維持管理計画の最適化に資する、疲労損傷予測および維持管理計画の考え方を示す（Fig. 3 参照）。なお、ここに示した手順は、海洋構造物に関して用いられている考え方[9]を免震装置に適用したものである。まず初めに、疲労損傷評価の基礎になる荷重のモデル化が必要である。これには、観測に基づく極値統計解析や台風シミュレーションなどを用いることができる[3]。次に、ある風速値が一定時間作用した時の荷重効果を評価する必要がある。具体的には、動的応答解析などを用い免震装置に生じる荷重効果を評価する[10]。一般的には、評価された荷重効果と SN モデルを用いて疲労損傷度（D 値）を評価することができる。ただし、SN モデルによる疲労損傷度評価では、損傷の程度を物理的な量（たとえば、亀裂の長さや深さ）として評価していないので、後に示す PoD 曲線を用いた点検による損傷検出確率を評価できない。そこで、点検による損傷検出確率の評価に資する、物理的な損傷の進展に関するモデル（Fracture Mechanics モデル、FM モデル）が必要になるが、確率論的 FM モデルを構築するのに十分なデータは蓄積されていないのが現状である。これについては、SN 曲線を用いた破壊確率の評価と一致するように FM モデルのパラメータをキャリブレーションすることによって求めることも可能であるが、次節で提案する疲労損傷度（D 値）と損傷に関する物理的な量（たとえば亀裂の長さや深さ）との対応関係をあらかじめ構築しておくことが有効と考える。PoD (Probability of Detection)曲線は、損傷に関する物理的な量の関数として損傷検出確率を表現したものである。PoD の値が大きいほど検出確率が高いことを表わす。最後に、物理的な損傷の進展モデルと PoD 曲線を用いることで、維持管理計画の最適化を行うことができる（Fig. 3、右下）。

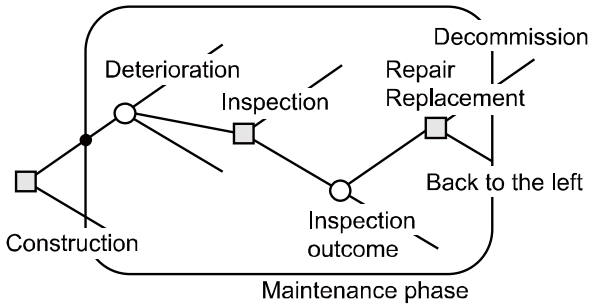

Fig.2 Event-decision tree for design-maintenance.

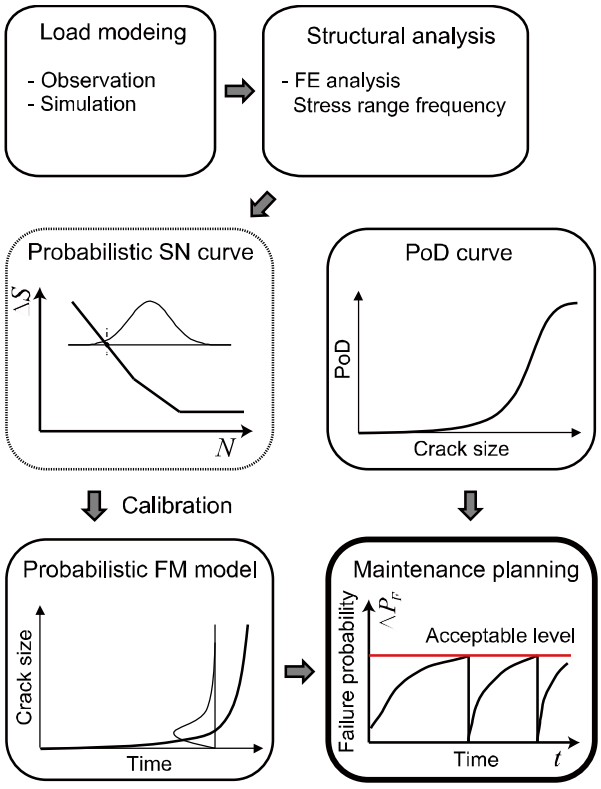

Fig.3 Procedure for design-maintenance planning[9].

4 例題計算

4･1 問題設定

本例題計算では、維持管理計画最適化に資することを念頭に、免震装置を有する建物に台風による強風が作用したことで免震装置に疲労損傷が発生し、建物に要求される性能を満たさない確率（破壊確率）が上昇した可能性がある状況を想定し、強風による疲労損傷の程度（D値）、それに加えて台風後の点検結果が得られた場合の条件付き破壊確率（更新された破壊確率）を計算する。また、そのために必要になる疲労、損傷検出および破壊確率に関するモデルの形式を提案する。

4･2 想定建物

本例題では、高さ 200m、幅および奥行が 40m の鉄骨造の建物を想定した（斎藤ら[10] の D1-M1-T6model）。上部構造の固有周期は 5 秒、免震周期は 6 秒とした。免震層はアイソレータと完全弾塑性の復元力を有する鋼材ダンパーで構成される。免震層のダンパー量（ダンパーの降伏せん断力係数＝ダンパーの降伏せん断力/建物重量）を 0.01、0.02、0.04 とした。風向角を 0 度として、Table 1 に示す基本風速値（地上高さ 10m、地表面粗度区分 III）に対応する変動風圧が 10 分間作用した時の、風直角方向の振動による D 値を計算したものを Table 1 に示す。建物に作用する変動風圧は風洞実験結果[11]を用いた。実験気流は「建築物荷重指針・同解説」[12]の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成された。また、D 値は、免震層変位の時刻歴波形にレインフロー法で免震層全変位振幅を抽出し、Miner 則を用いて算出した。鋼製ダンパーの疲労評価には次式を用いた[13]。

$$\gamma_i = 35\, N_{fi}^{-0.15} + 3620\, N_{fi}^{-0.80} \tag{1}$$

ここで、γ_i は，全変位振幅を鋼製ダンパー高さで除した平均せん断変形角、N_{fi} は破断回数を意味する。

Table 1. D values as a function of basic wind speed.

基本風速(m/s)	ダンパー量		
	0.01	0.02	0.04
35	6.48E-01	7.88E-02	9.22E-03
30	3.46E-01	4.08E-02	2.36E-03
25	1.65E-02	4.87E-03	2.03E-04
20	1.95E-03	2.52E-04	3.67E-06
10	1.63E-08	1.69E-10	2.79E-12
5	1.83E-13	3.51E-15	6.64E-17

4･3 疲労、損傷検出および破壊確率のモデル

D 値および損傷（損傷サイズ：a）の進展はともに、応力振幅と載荷回数について単調増加関数で表される[5]。ここでは、D 値および損傷サイズ a が以下のような関係で表現できると仮定する。

$$a = \min(X \cdot D^{\alpha}, 1) \cdot a_c \tag{2}$$

ここで、a_c は免震装置の機能が完全に喪失される損傷サイズの最小値であり、本研究では確定値と仮定している。従って、$\tilde{a} = a / a_c$ とすると、(2)式は $0 \le \tilde{a} \le 1$ で意味をもつ。以下、基準化された損傷サイズ $\tilde{a}$ で議論する。なお、$\tilde{a} = 0$ は近似的に損傷サイズがゼロということを表しているにすぎず、実際には免震装置の初期設置時に存在している十分に小さな損傷サイズに対応するものである。一方、D は計算によって得られる値であり、必ずしも $D = 1$ で完全機能損失に至るとは限らない。α はモデルパラメータ、X は式(2)によるモデル化に対する不確実性を表す確率変数である。Fig. 4 に 5 つの異なる X の実現値に対する D 値と $\tilde{a}$ の関係を例示する。

点検による損傷検出確率 $PoD(\tilde{a})$ は、損傷サイズの関数として、次のように表現できると仮定する。

$$PoD(\tilde{a}) = \Phi(\ln(\tilde{a} / \tilde{a}_m) / \xi) \tag{3}$$

ここで、$\Phi(.)$ は標準正規確率変数の累積分布関数、$\tilde{a}_m$ は検出確率が 50%になる損傷サイズ、ξ は損傷サイズによる検出確率の変化の度合いを表すパラメータである(Fig. 5 参照)。

最後に、損傷サイズが $\tilde{a}$ のときの単位時間（ここでは 1 年とする）あたりの破壊確率 $\Delta P_F(\tilde{a})$ を以下の形式で表現できると仮定する。

$$\frac{\ln(\Delta P_F(\tilde{a}) / \Delta P_{F,0})}{\ln(\Delta P_{F,1} / \Delta P_{F,0})} = \tilde{a}^{\gamma} \tag{4}$$

ここで、$\Delta P_{F,1} = \Delta P_F(1)$、$\Delta P_{F,0} = \Delta P_F(0)$ である。$\gamma(\ge 1)$ はモデルパラメータであり、その値が大きいほど、より大きな損傷サイズまで破壊確率の変化が小さい。なお、$\Delta P_{F,0}$ は建設当初の破壊確率、$\Delta P_{F,1}$ は免震装置の機能が完全に喪失された場合の破壊確率に対応する。以上のモデル化における確率変数、パラメータの確率分布または値を Table 2 にまとめる。

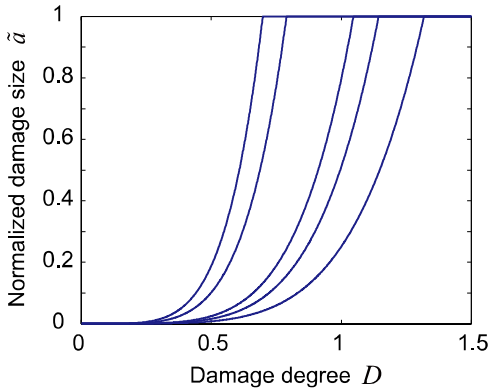

Fig.4 Five realizations of relationship between D and $\tilde{a}$.

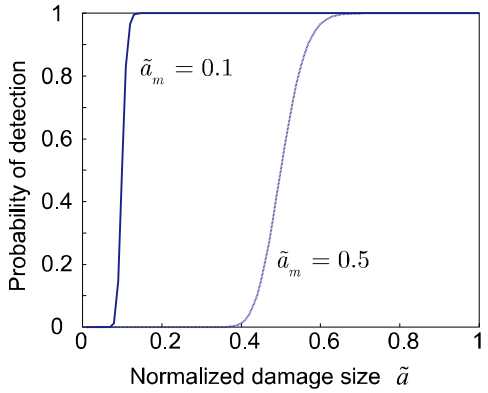

Fig. 5 Probability of detection.

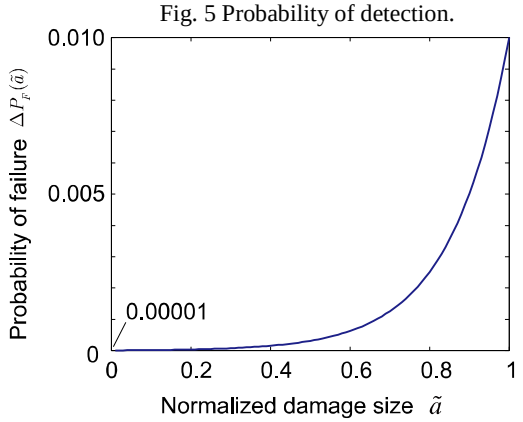

Fig. 6 Probability of failure as a function of normalized damage size.

Table 2. Assumed distributions and parameter values.

確率分布パラメータ	確率分布・値
X	Lognormal, median=1, COV=0.8
α	5
$\tilde{a}_m$	0.1, 0.5
ξ	0.1
$\Delta P_{F,0}$	10^{-5} [1/year]
$\Delta P_{F,1}$	10^{-2} [1/year]
γ	1

4･4　計算結果

計算された D 値が 0.2～1 のそれぞれの場合について、$\tilde{a}_m = 0.1$ として破壊確率を計算したものを Fig. 7（上）に示す。図中の○印は、点検を行う前の確率、△印は点検を行い損傷が検出された場合の確率、□印は点検を行ったが損傷が検出されなかった場合の確率を表す。ただし、$D = 0.2, 0.3$ では、点検で損傷が検出される確率は非常に小さく、したがってその場合の確率は計算していない。いずれの場合も、D 値が大きくなるとともに破壊確率が大きくなるが、点検によって損傷が検出されなかった場合には、破壊確率の増加が大幅に低減されていることがわかる。次に、$\tilde{a}_m = 0.5$ として破壊確率を計算したものを Fig. 7（下）に示す。$\tilde{a}_m$ の値が大きいことは点検の性能が低いことに相当するが、このような場合には、たとえ点検によって損傷が検出されなかったとしても、破壊確率の低減は $\tilde{a}_m = 0.1$ の場合ほどは大きくないことがわかる。

4.2 節で述べた想定建物のダンパー量 0.02 の場合に当てはめてみると、たとえば $D = 0.5$ の疲労損傷は風速 30m/s が約 2 時間作用することに対応する。このとき、点検によって損傷が検出された場合、破壊確率は、無損傷時に比べて、約 3 倍（$\tilde{a}_m = 0.1$）、約 100 倍（$\tilde{a}_m = 0.5$）となることが Fig. 7 からわかる。

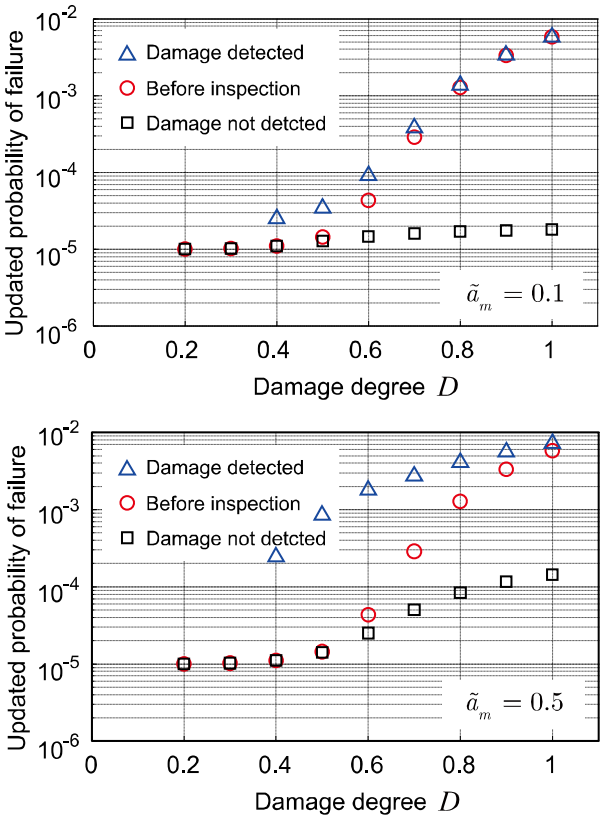

Fig. 7 Updated probability of failure.

5　考察

本稿の例題計算で用いた 4.3 節のモデルは仮定されたものなので、実際の免震装置や点検の性能に対応するかは不明であり例題計算で得られた数値には具体的な意味はないが、いくつかの定性的な知見を得ることができる。まず初めに、D 値と損傷サイズ $\tilde{a}$ および損傷サイズと破壊確率 $\Delta P_F(\tilde{a})$ の非線形関係に対応して、D 値が小さい領域での破壊確率の変化は小さい。なお、本計算では D 値と損傷サイズ $\tilde{a}$ を下に凸の関数として仮定したが、実際の免震装置の損傷サイズ $\tilde{a}$ の立ち上がり位置や傾きの変化については、今後実験による検討が必要である。次に、高性能の点検（PoD の値が大きい、すなわち、より小さなサイズの損傷も検出されやすい点検）のほうが、点検により損傷が検出される場合もそうでない場合も更新された破壊確率は小さくなる。このことは、高性能の点検技術の開発の有効性を示唆する。最後に、本稿の結果（4.4 節）には掲載していないが、D 値と損傷サイズ $\tilde{a}_m$ に関する不確実性 X のばらつきが大きいほど、検査結果によって更新される破壊確率の変化が大きくなり、点検の果たす役割が大きいことがわかる。

6　まとめ

本稿では、免震装置の風荷重による設計・維持管理計画の枠組みを提示した。また、この枠組みの中で設計・維持管理計画を最適化するための不足している知見を明確にした。例題の中で、この不足している知見についてモデリングの手法を提案し、変動風荷重による疲労累積の関数として、建物の破壊確率の変化を計算した。提案したモデルリング手法によって建物の破壊確率等を計算できることを示すことで、今後の研究方針や実験によって集積すべきデータの形式などを明らかにした。

参考文献

1) (社)免震構造協会：免震構造　部材の基本から設計・施工まで，2010.
2) (社)免震構造協会：免震建物の維持管理基準－2014－，2014.
3) 西嶋一欽，疲労損傷評価のための台風時の風速時刻歴に関する確率論的考察，JCOSSAR論文集，2015.
4) Moan, T., Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 1:1, 33-62, DOI: 10.1080/15732470412331289314, 2005.
5) DNV-RP-C203:2011, Fatigue design of offshore steel structures.
6) BS7910:2013, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
7) Sorensen, J.D. (2009) Framework for risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind turbines, Wind Energy, 12, pp.493-506.
8) Mori, Y. and Ellingwood, B., Reliability-Based Service-Life Assessment of Aging Concrete Structures, ASCE, J. Struct. Eng., 119(5), 1600-1621, 1993.
9) Straub, D. and Faber, M.H., System Effects in Generic Risk Based Inspection Planning, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, 126(3), 265-271.
10) 斎藤元紀，佐藤大樹，吉江慶祐，池上昌志，佐藤利昭，北村春幸，多質点系モデルを用いた変動風力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, pp. 541-544, 2015.
11) 丸川比佐夫，大熊武司，北村春幸，吉江慶祐，鶴見俊雄，佐藤大樹，風洞実験に基づく高層建物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，pp.193-194,日本建築学会大会学術講演梗概集（構造I），2010.
12) (社)日本建築学会，建物荷重指針･同解説, 2004.
13) 吉敷祥一，大河原勇太，山田哲，和田章，免震構造用U字形鋼材ダンパーの繰返し変形性能に関する研究，第73巻，第624号，pp.333-340，日本建築学会構造系論文集, 2008.