

特集 「自然災害にそなえる」

免震・制震構造の風外力に対するダンパーの損傷評価法

小泉 達也 後藤 暁
片岡 浩人 川口 彰久

Method for Evaluating of Fatigue Characteristics of Dampers for Base-isolation Structure and Damage Controlled Structure against Wind Load

Tatsuya Koizumi Satoru Goto
Hiroto Kataoka Akihisa Kawaguchi

Abstract

With increasing construction of base-isolated buildings and damage-controlled buildings, there has been an increasing number of cases where wind load has been the critical external force for design of the damper member. This paper introduces a wind-resistant design process for verifying the performance of damper materials for wind force with design examples. The deterioration characteristics of damper materials are classified on the basis of material characteristic changes and accumulated fatigue damage caused by repetitions of external wind external forces with temperature rise. Different evaluation methods are necessary for the external wind force model for fatigue collations depending on these deterioration characteristics.

概 要

免震構造、制震構造の高層化に伴い、ダンパー仕様が風荷重で決定されるケースが増加している。この風荷重で仕様が定まるダンパーの性能保証を行うための耐風設計プロセスについて実施設計例を交えて紹介する。ダンパーの劣化特性は繰り返し変形による疲労損傷が蓄積するタイプと、ダンパーの運動に伴う温度上昇等により材料特性が変動し疲労損傷が蓄積しないタイプとに分類される。これらの劣化特性に応じて、疲労照査用の風外力モデルも異なった評価法を選択する必要がある。本論文では、これらの選択方法と疲労設計に対する検討方法について述べる。

1. はじめに

近年の高層建築物は、耐震安全性を高める社会的な要求を背景として、免震・制震構造を採用するケースが増加している。これらの構造形式を選択することで、地震荷重の低減を計ることが可能となる。しかしながら、風荷重と地震荷重の差は相対的に縮まり、高層建物の制震・免震材料の設計では風荷重が設計荷重に対して支配的要因となる。また、一方で「品確法」での耐風等級のみを取得しようとする要求から風荷重は割増され、建物高さによっては地震荷重を上回る場合がある。

これらの社会的要求から風荷重が構造設計に与える影響は増加し始めている。免・制震化に伴う地震荷重と風荷重との関係をFig.1に示す。アスペクト比4、矩形断面を仮定した場合の比較例である。一つの目安として建物高さが超高層建物の場合には約200m、免震建物の場合には約100mが構造設計に対して風荷重を考慮しなければならない境界と言える。

本論は免震・制震構造用ダンパーの降伏耐力を設計する上で必要となる、ダンパーの性質毎の強風の予測モデルの提案を行い、疲労評価法を構築したので検討例とともに紹介する。耐風設計にて部材の降伏を許容する際に問題となる点は、主に入力エネルギーの増大と、それに

伴う応答性状の予測である。（例えば塑性化に伴う長周期化、大変形に伴う振動依存風力の影響、共振風速の低下等）。これらの応答性状は既往の研究等¹⁾で応答性状に関する研究がおこなわれ、評価法が提案され始めている。一方で、風荷重は作用時間が数時間に渡ることから、免震材料や制震材料、一般構造部材に対して設計荷重となる場合には、ダンパーの疲労照査が必要となる。その際に免震・制震用ダンパーの種類が多様化し、その性質毎に疲労照査を目的とした強風の評価方法を考える必要が出てきた。

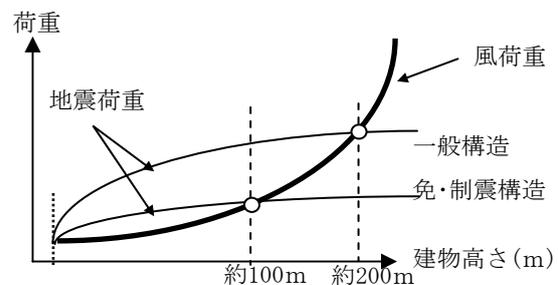


Fig.1 建物高さ地震荷重と風荷重の関係
Relations of Building height to Wind and Earthquake load

2. 風荷重に対する疲労評価法

制震・免震材料のうちダンパーとして用いられる材料の疲労評価を行う際には、材料の疲労劣化特性に応じて異なる強風および風外力モデルの設定が必要である。使用する材料は鋼材のように繰り返し荷重による劣化が蓄積していくタイプと、粘性系のように発熱等が材料の性能劣化につながり、劣化が蓄積しないタイプに分類され、それぞれに適した風外力を用いる必要がある。

すなわち、前者の場合には、建物の供用年数中に発生する全ての強風を対象にした累積作用時間の評価が、後者の場合には、台風通過など1イベント中の強風の継続時間の評価が必要である。

また、複数のダンパー材料を並列に用いる場合や、摩擦ダンパーのように、摩耗による劣化と温度上昇に伴う性能変化がある材料は、両面の検討が必要となる。免震・制震用ダンパーの風荷重に対する設計フローをFig. 2に示す。設計フローは2段階で構成されており、ダンパー性能の決定後に応答性状を確認する段階と、ダンパー材料の疲労性能を確認する段階である。

免震・制震材料のいずれの場合にも、最初にダンパーの変形量に対するチェックが必要となる。特にダンパーが降伏し固有周期が長周期化する場合には、渦励振、空力不安定振動に対する確認が必要となる。

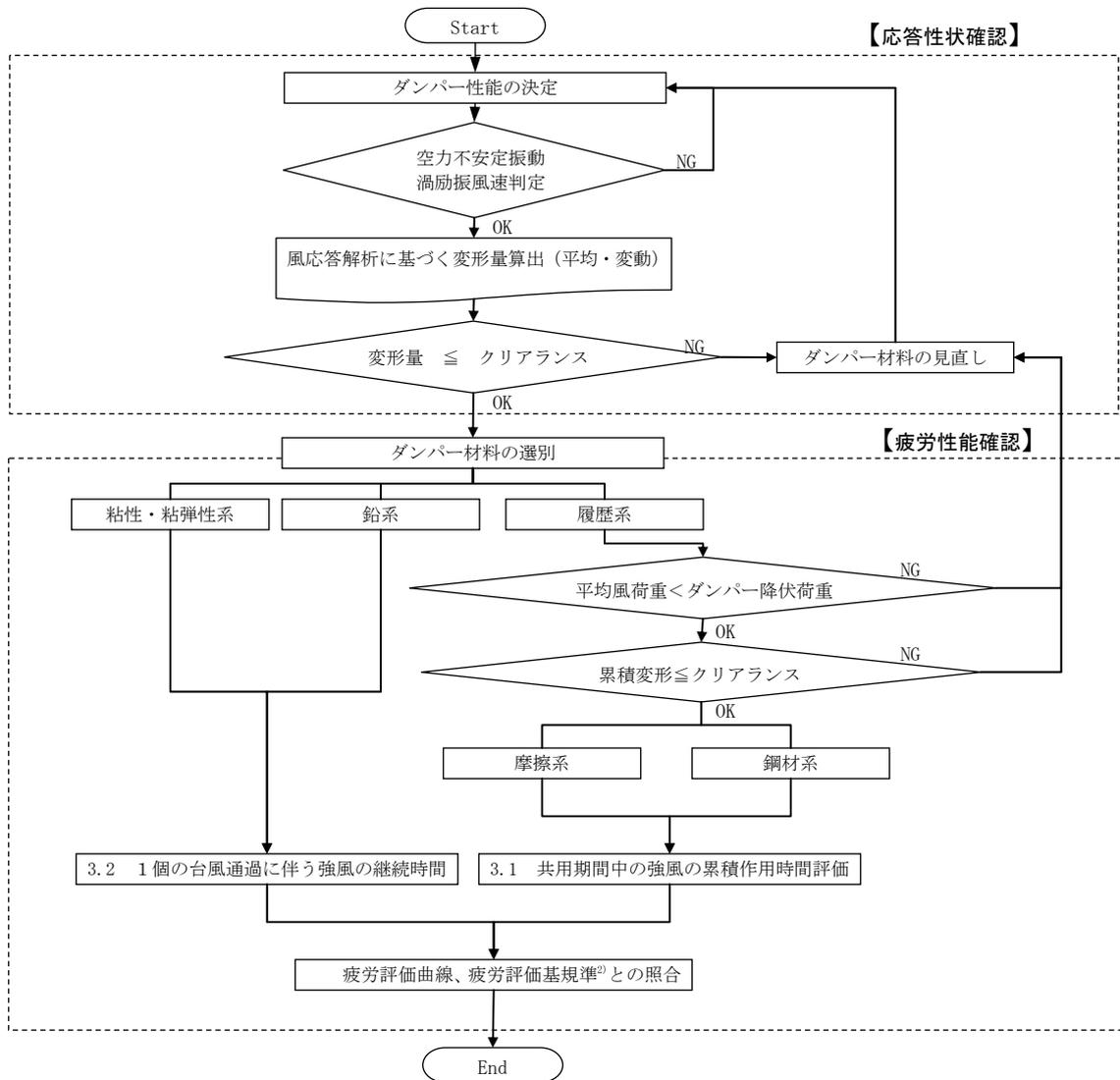


Fig. 2 ダンパー材料の耐風設計フロー

The fatigue evaluation flow of damper materials

これらを満たさない場合には、ダンパー性能を見直す必要がでてくる。特に注意しなければならない点として、鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）の場合には、風荷重の平均成分（準静的成分）に対しては剛性要素としての抵抗力がないため、平均変位のチェックが必要となる。

履歴系のダンパーを用いる場合には、平均風荷重（ Q_{ave} ）とダンパーの降伏荷重（ Q_y ）の大小関係に対するチェックが必要である。ダンパーの降伏点が風荷重の平均成分を下回ると、変形が時間の経過とともに増加していく可能性が生じるため、ダンパーの降伏点は平均成分を下回らない配慮が必要となる。

疲労照査は、それぞれの材料毎に疲労試験に基づき定められた方法により行う。例えば、鋼材系ダンパーの場合には繰り返し疲労試験に基づく材料のS-N曲線、D値による判定を行い、LRBの場合にはメーカーが提示している単位体積仕事率等での判定を行う。

3. 疲労評価のための強風モデル

3.1 強風の累積作用時間の評価

建物供用期間中の累積作用時間評価には非常に長期間のデータを必要とするが、気象官署の観測データでは観測期間や観測の時間間隔に関して十分とは言えない。そこで、台風シミュレーション手法³⁾により評価する。これは過去の台風に基づいて台風の経路・気圧場に関する確率モデルを作成し、モンテカルロ法により台風を仮想発生させる手法であり、長期間にわたり細かい時間分解能での強風の評価が可能となる。台風の特性は地域により異なるため、建設地点の情報（建設位置の緯度・経度、評価高さ、地表面粗度区分）が必要となる。低風速側では季節風などの風の頻度が高くなりシミュレーションの精度も悪くなるため、気象官署の観測結果に基づいた累積作用時間も算出し、値が大きい方を採用する。

東京23区内を想定した検討例を示す。計算条件をTable 1 に示す。平成12年建設省告示第1454号、1461号に基づく倒壊防止用の設計風速（再現期間500年、極めてまれに発生する強風）は53.6m/sとなる。尚、以後の風速は全て10分間平均値である。

Table 1 計算条件
Condition of Calculation

計画地	東京都23区
基準風速 (V_0)	34m/s
評価高さ(H)	100m
地表面粗度区分	III
鉛直分布係数 (E_r)	$E_r=1.7(H/450)^{0.20}=1.26$
倒壊防止用設計風速	$1.25 \cdot V_0 \cdot E_r=53.6\text{m/s}$

10,000年間の台風シミュレーションによって発生した台風の経路をFig. 3 に示す。地図上に示す1本1本の線が仮想台風の経路を示している。

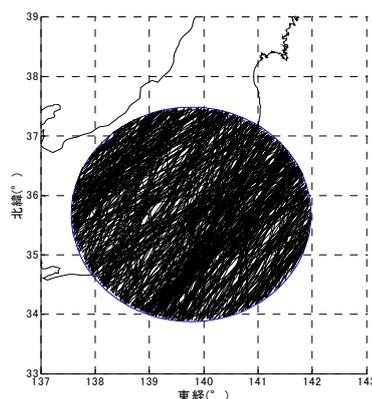


Fig. 3 台風シミュレーションによる台風の経路
Typhoon's paths by Monte Carlo simulation

供用期間100年間の累積作用時間をFig. 4 に示す。縦軸が累積作用時間であり、横軸に示す風速以上の風が吹く時間を示している。したがって風速53.6m/s以上の累積作用時間は0.16時間（96分）となる。これを各単位風速あたりの作用時間にしたものをFig. 5 に示す。

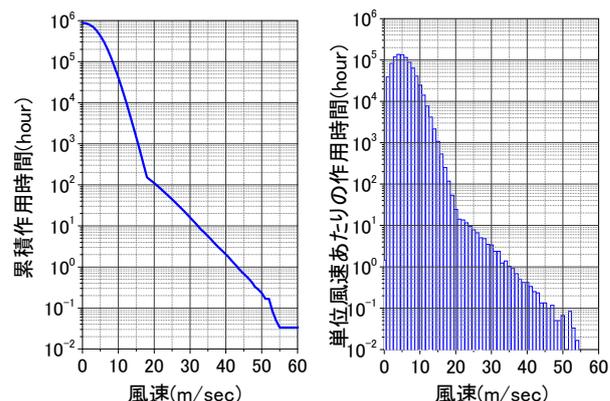


Fig. 4 累積作用時間 (供用期間100年) Accumulated duration time during one hundred years
Fig. 5 単位風速毎の作用時間 (供用期間100年) Accumulated time dividing every 1 meter per second

3.2 台風通過に伴う強風の継続時間

1イベントにおける強風継続時間評価にあたっては、制震・免震ダンパーの疲労損傷評価で対象とするのが長い再現期間の風であるため、台風通過に伴う強風が対象となると考えられる。台風モデルの設定としては以下のような方法が考えられる。

- ① 既往の台風を利用する方法: 既往の大型台風と同様の性質を持つ台風を想定し、対象地点で風速が最大になるように経路を設定する。
- ② 確率分布に基づいた台風を発生させる方法: 台風シミュレーションで利用した確率モデルに基づいて、対象となる再現期間に対応する台風を発生させる。

確率分布から推定したモデル台風の経路をFig. 6 に、台風通過に伴う風速の時間変化をFig. 7 に示す。評価高

さは地上100mである。最大風速が再現期間500年の風速となるように調整した。この例における風速53.6m/s以上の継続時間は約10分間であった。ここでは1例にとどめるが、実際には1イベントの結果のみからではなく、複数の台風データに基づいて評価することが必要である。

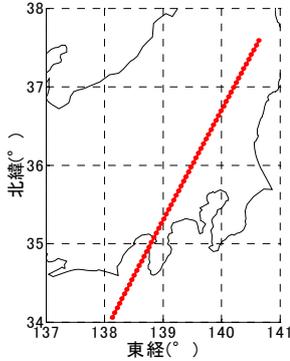


Fig. 6 仮想台風の経路
Path of the probabilistic model typhoon

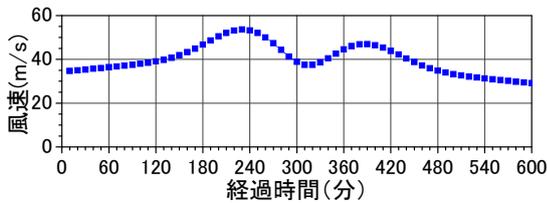


Fig. 7 台風通過に伴う風速変化の時刻歴
Wind speed during passage of the typhoon

4. 適応例

風荷重によりダンパー材料の降伏を許容する免震建物、制震建物の疲労照査の一例を示す。対象建物はどちらのケースも地上100m, アスペクト比4の矩形形状とした。外力の設定はTable-1に従う。建物諸元をTable-2に示す

項目	値
建物高さ	100m
建物幅×奥行き	25m×25m
建物形状	矩形
建物重量	20000ton
(免震層のクリアランス)	500mm

4.1 高層免震建物

4.1.1 LRBを用いた免震建物の風応答特性 想定する建物はLRBのみを用いた免震構造とする。既往の研究⁴⁾によるとLRBの風荷重に対する挙動は、平均成分と変動成分とに分離して評価することとしている。免震層の風に対する特性をFig. 8に示す。風荷重の平均成分に対しては、積層ゴムの剛性にのみ依存して変形し、変動成分に対しては鉛プラグに期待する。風外力による免震建物の最大応答は、積層ゴムの剛性と平均成分によっ

て決まる変形量をオフセットした点を原点として変動成分による応答を評価すればよい。この変動成分の応答値を用いて鉛プラグの疲労照査を行う。鉛の疲労特性は鉄の金属疲労とは異なり、疲労が蓄積されないために、対象とする風外力としては、3.2に記述した、共用年中に遭遇する最大級の1イベントの台風とする。

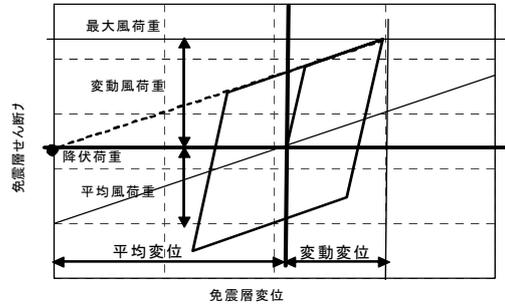


Fig. 8 免震層の風応答特性
Characteristic of LRB against wind load

4.1.2 損傷評価例 検討例はLRBのみを用いた免震構造とし、LRBの健全性を照査するために、3.2で算定した台風通過に伴う風速変動から、LRBの降伏超過時間を算定した。その結果をFig. 9に示す。LRBの降伏風速を超える累積時間は本ケースの場合約60分であることがわかる。また、LRBの降伏頻度を調べるために時刻歴応答解析を行った。

解析モデルは、免震構造は振動モード免震層の降伏に伴う非線形性を有し、一般化風力の評価が困難になることから等価線形化手法は用いずに、上部構造を25質点2自由度に置換した質点系モデルとした。

解析モデルをFig. 10に示す。免震層にはLRBを用いていることから、風方向及び風直角方向の荷重効果を考慮するためにMSSモデルとした。MSSバネは30°ピッチで12本とし、各バネは一方方向加力時の復元力特性が等価となるよう調整した。本例ではLRBを用いており、復元力の方向性が無いためにMSSバネによるモデル化を行っているが、実際には使用するダンパーの特性に応じたモデル化が必要となる。

時刻歴風荷重は、風圧実験により得られた層風力係数の時刻歴データに再現期間500年の風速による速度圧および負担面積を掛けて風荷重とし、各質点に作用させた。時刻歴応答解析は応答結果を統計処理する目的で、継続時間10分間の3セット行った。

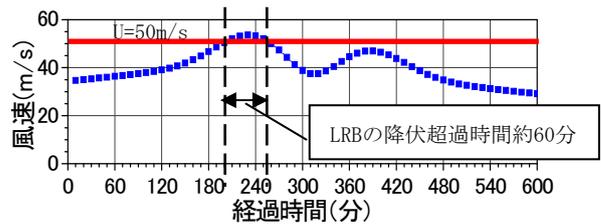


Fig. 9 LRBの降伏超過時間
Yield time for LRB

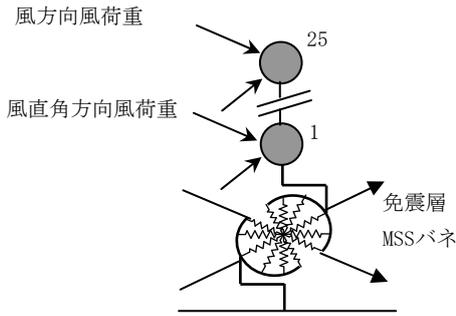


Fig. 10 振動解析モデル
Analysis specifications

4.1.3 損傷評価結果 損傷評価の判定法についてはメーカー毎に異なるため、ここではLRBを用いる場合の健全性の判定式の一例として(1)式を用いる²⁾。この判定式は、変動風力の最大値の40%に対して鉛プラグの降伏荷重 Q_d が2/3以下で安定範囲内である。

$$0.4xQ_{rms} \leq 2/3Q_d \quad (1)$$

免震層の応答解析結果をFig. 11に示す。 $Q_d=6635kN$ 、変動風荷重 $Q_{rms}=9652kN$ であることから、

$$0.4Q_{rms}=3861kN < 2/3Q_d=4423kN$$

となり(1)式を満たしていることから免震材料の強風に対する健全性が確認された。また、平均変形は約211mm、最大変形は約297mmでありピットクリアランス500mmに対して十分な余裕があることが確認された。残留変形について免震材料がLRBを用いており、ゴムの弾性剛性で復元するため生じない。継続時間が長いことに伴うクリープ変形に対する健全性の評価を行うために、変動成分に対する応答せん断力の時刻歴から検証を行った。応答せん断力の時刻歴をFig. 12に示す。評価時間10分間に対して、40%最大風荷重振幅を超える回数は15回程度である。Fig. 9より、降伏を超える強風の継続時間が1時間であるので、評価時間中の降伏回数は $15 \times 6=90$ 回である。LRBの歪み200%の200の繰り返し載荷試験からクリープが確認されていない試験に基づき、今回のケースは免震材料の健全性が保たれていると判断される。

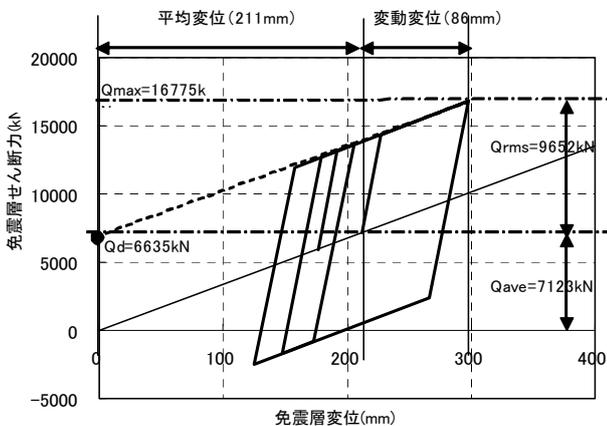


Fig. 11 LRBの応答解析結果
Analysis result

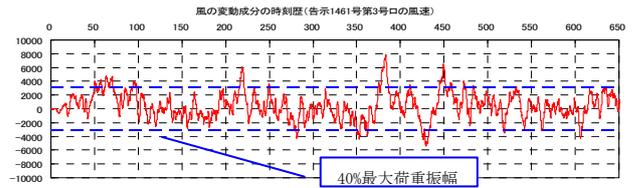


Fig. 12 応答せん断力の変動成分の時刻歴
Result of Time hysterics of response

4.2 制震建物例

4.2.1 履歴系ダンパーの風応答特性 既往の研究によると履歴系ダンパーの風応答特性は、降伏点荷重と平均風荷重との関係で性状が大別できるとされている⁴⁾。Fig. 13に模式図を示す。ダンパーの降伏荷重が平均風荷重 (Q_{ave}) 以上の場合には、時間の経過とともに平均変位が増加するが、変動成分に対しては弾性挙動となる。一方で降伏荷重が平均風荷重よりも低い場合には、平均変位が平均風荷重と原点から第二剛性の釣り合い点まで変形し、その点周りで履歴ループを描く。また、降伏荷重が平均風荷重に対して著しく低い場合にはFig. 14に示すように平均変位がドリフトしていく性状がある。これらのことから、ダンパーの降伏荷重は平均風荷重以上とすることが望ましい。

また、辺長比が大きい場合や、平面形状が非対称等の場合で、風外力に対してねじれ応答が励起されやすいと予想される時は、ダンパーの耐力のばらつきを考慮して、耐力偏心を含む形でねじれ応答解析を行う必要がある。

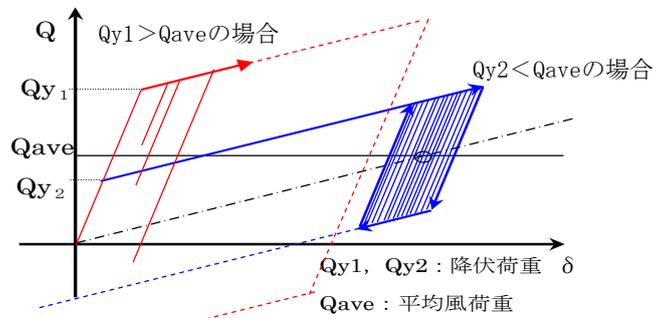


Fig. 13 平均風荷重と降伏点による風応答特性
Characteristics of wind response to yield load

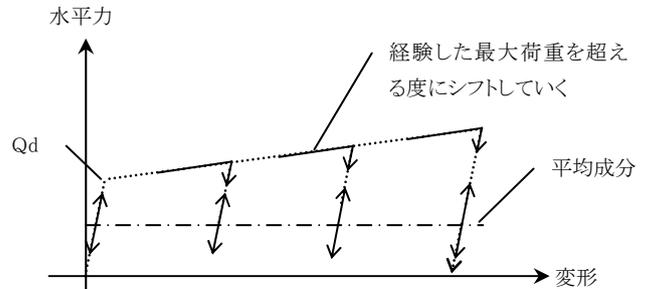


Fig. 14 降伏点が平均風荷重よりも低い場合の特性
Characteristics of wind response to low yield load

4.2.2 **ダンパー特性** ダンパーにはSS400の鋼材を用いた、せん断パネル型ダンパーを想定した。本建物は再現期間500年の風速に対してダンパー降伏を許容する設定とした。ダンパーの降伏耐力の風速換算値 U_d は風速50.0m/sと想定した。

解析仮定としてダンパーは全層均一に降伏し振動モードの変動はなく、風力の変動はないものとした。ダンパー降伏時の等価周期を2秒と仮定した。

4.2.3 **疲労評価結果** 鋼材系ダンパーの疲労評価も一例として、(2)式に示すマイナー則の線形累積損傷則⁵⁾を適用して、疲労寿命を予測する方法を用いた。

$$D = \sum (n_i / N_{f,i}) \quad (2)$$

ここで、 D : 累積損傷値

(但し $D=0.0$: 疲労蓄積なし, $D=1.0$: 疲労寿命到達)

n_i : i レベルの振幅で制振パネルに生じる繰返し回数

$N_{f,i}$: i レベルの振幅に対して、幅圧比により得られる耐力低下までの繰返し半サイクル数

ここでは、説明のためにせん断パネル型ダンパーの疲労特性として、文献6)を引用する。この疲労特性はダンパーの材質、形状、降伏パターン等により様々であるため、使用するダンパーに応じたデータを用いる必要がある。

疲労性能は、ピーク時荷重が最大から5~10%低下する寿命予測として、せん断変形角 γ と疲労寿命 N_f の関係を、幅圧比 (d/t_w) で評価した。

$$d/t_w : 50 \quad : \quad \gamma \cdot N_f^{0.341} = 0.0674$$

ダンパーに生じる繰返し回数を求めるために、台風シミュレーションによる結果を用いた。ダンパーの降伏耐力の風速換算値から降伏耐力を超える継続時間を算定する。ダンパーの降伏風速 $U_d=50.0$ m/sから、Fig. 15より累積作用時間 $\sum t$ は830秒となる。全体の繰返し回数 N は1次固有周期が支配的であるという前提条件から下記の通り計算される。

$$N = 830 \text{秒} / 2 \text{秒} = 415 \text{回} \quad (1 \text{次固有周期} T_1 = 2.0 \text{秒})$$

次に各振幅レベルの繰返し回数を定めるために、レインフロー法により、時刻歴応答解析から求まる変形角の頻度分に基づき、変形角毎の繰返し回数を定める。

Fig. 16に応答層間変形角の頻度分布を示す。降伏風速を超える変形角の累計回数が415回であるという前提から、変形角の繰返し回数を算定し D 値の評価を行う。

D 値の算出結果を下記に示す。

$$d/t_w : 50$$

$$\gamma = 0.004 \quad N_f = 3954 \quad n = 237$$

$$\gamma = 0.005 \quad N_f = 2055 \quad n = 119$$

$$\gamma = 0.007 \quad N_f = 764 \quad n = 47$$

$$\gamma = 0.010 \quad N_f = 269 \quad n = 12$$

$$D = 0.060 + 0.058 + 0.062 + 0.045 = 0.225 < 1.0$$

以上より D 値に基づくダンパーの健全性が確認された。

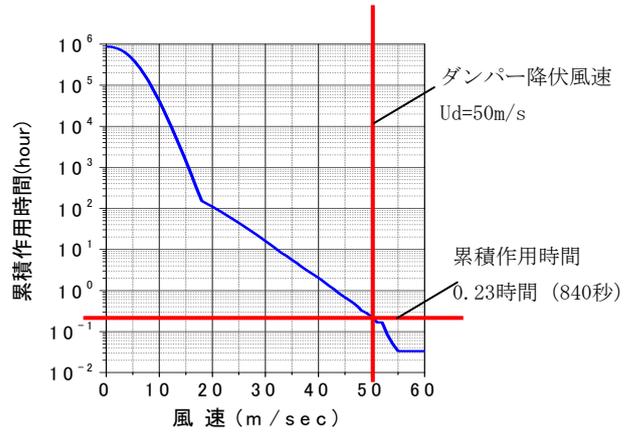


Fig. 15 ダンパー降伏の累積作用時間
Accumulated duration time during damper yield

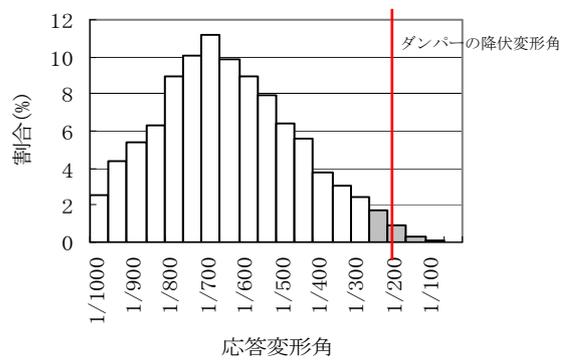


Fig. 16 応答層間変形角の頻度分布
Distribution of rotation

5. まとめ

免震・制震構造用ダンパーを風外力により降伏を許容する際の疲労設計方法について述べた。ダンパーの疲労設計を行う上で、ダンパーの種類に応じた適切な強風モデルを選択し疲労評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) 小泉, 他: 「ニューハイブリッド空力振動法を用いた高層免震構造の空力安定性に関する検討」2007年日本建築学会大会, 学術講演梗概集B-1 pp. 151-152
- 2) 例えば, オイレス工業技術資料「高層免震建物における強風時のLRBの挙動」
- 3) 後藤, 他: 「地形効果を考慮した台風シミュレーション手法の開発」, 大林組技術研究所報No70, 2006
- 4) 小泉, 川口: 「風洞実験におけるハイブリッド振動法(その2) —高層建築物の弾塑性風応答に関する考察—」大林組技術研究所報No60, 2000
- 5) 成原, 中込: 「低降伏点鋼製せん断パネル型履歴ダンパーの低サイクル疲労曲線」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造(3), pp. 627-628, 2001.9