

層風力分割数が弾塑性風応答解析に及ぼす影響について

Effects of Division Number of Layer Wind Forces on Elasto-plastic Response Analysis

作田 美知子 MICHIKO SAKUTA

野田 博 HIROSHI NODA

平田 裕一 YUICHI HIRATA

風圧実験から得られる層風力を用いて超高層建物の弾塑性応答解析を行う場合、風圧実験により4～6層ごとに層風力を測定し、その間の層は同じ層風力を用いて応答解析を行う。このとき、層風力の分割数が結果に影響することが予測される。本研究では、分割数が弾塑性風応答解析結果に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。分割数が少なくなるに従い、層間変位や累積塑性変形倍率は大きく見積もられる。このとき、分割数の影響は層間変位よりも、累積塑性変形倍率のほうが大きい。

キーワード：層風力、弾塑性応答、分割数、層間変位、累積塑性変形倍率

This paper describes the effects of the division number of layer wind forces on elasto-plastic response analysis results, in particular taking notice of story drift and cumulative plastic deformation ratio. As a result, each response increases as the division number decreases, and the cumulative plastic deformation ratio is affected considerably more than the story drift by the division number.

Key Words: Layer Wind Forces, Elasto-plastic Response, Division Number, Story Drift, Cumulative Plastic Deformation Ratio

1. はじめに

弾塑性履歴ダンパーを有する超高層建物の風応答解析には各層に作用する層風力の時刻歴が必要となる。風圧実験により層風力を測定する場合、風圧計個数の都合上、全層の風力を測定することは極めて困難である。そこで、4～6層ごとに層風力を測定し、その間の層は同じ層風力を用いて応答解析を行う¹⁾。このとき、層風力を測定する層数(以下、層分割数という)の粗密が応答結果に影響することが予測される。層分割数が線形応答解析に与える影響は大熊ほか²⁾により検討されているが、弾塑性応答解析に与える影響についての検討は見られない。

本研究では、層分割数が弾塑性風応答解析結果、特に層間変形や累積塑性変形倍率の応答値に及ぼす影響について検討した。また、応答値は複数の層風力によるアンサンブル平均で評価するものとし、層風力のサンプル数による応答値のばらつきについても検討した。

2. 解析モデル

解析対象建物は、各層に弾塑性履歴ダンパーを配置し

たRC造30階の集合住宅である。建物形状は幅 $B=30\text{m}$ 、奥行き $D=30\text{m}$ 、高さ $H=96\text{m}$ とし、層重量 w を 10.78 kN/m^2 とした。

振動モデルは、30質点の等価せん断モデルとした。主架構の剛性は、 A_i 分布から定まる層せん断力分布に比例する分布形状を仮定し、主架構のみの周期 T が $0.025H$ ($=2.4$)秒になるように設定した。主架構の耐力は構造特性係数 D_s を 0.35 として設定しており、第1折れ点、第2折れ点の層間変形角 R をそれぞれ $1/800, 1/150$ とした。履歴モデルは、武田モデルを用いる。

ダンパーの剛性は主架構に対する剛性比 α を 0.4 とし、降伏耐力は全耐力に占める割合 β を 0.05 と設定した。復元力特性は、降伏耐力の 1.5 倍を上限とする耐力上昇型のトリリニアモデルである。主架構ならびにダンパーのスケルトンカーブを図-1に示す。なお、主架構の曲げ変形量とダンパー取り付け部変形量の影響を、ダンパーの剛性を低減することで設定した。このとき、この二つの変形量の和は層間変形量に占める割合を最上層で 0.8 、最下層で 0 となる線形分布で仮定している。

主架構の減衰は内部粘性型とし、減衰定数 h_1 は 3% である。ダンパーの内部減衰は無視している。

風外力は各質点にそれぞれを与え、平均成分と変動成分を有する風方向振動と変動成分のみを有する風直角方向振動の2通りについてそれぞれ別々に計算した。

3. 風外力

応答解析に用いる各層の層風力はNoda and Nakayama³⁾の手法を用いて、30層の層風力を同時に人工的に発生させた。層風力を発生させる際に用いる各層のパワースペクトル密度 $S_{\hat{f}}(n)$ は野田ら⁴⁾の方法を準用し、式(1)により求めた。層風力のパワースペクトル密度を図-2に示す。

$$S_{\hat{f}}(n) = (C_f' \times q_H \times \Delta h \times B)^2 \times (S_0(n) / \sigma_0^2) \quad (1)$$

式(1)の風方向、風直角方向の基準レベルの単位高さ当たりのパワースペクトル密度 $S_{D0}(n), S_{L0}(n)$ は、式(4)～式(7)を用いてそれぞれ式(2), 式(3)により求めた。

$$S_{D0}(n) = S_u(n) \times |X_H(n)|^2 \quad (2)$$

$$S_{L0}(n) = S_F(n) / |X_V(n)|^2 \quad (3)$$

$$S_u(n) = \frac{4 \cdot \sigma^2 (L_x / U_0)}{\{1 + 70.8(nL_x / U_0)^2\}^{5/6}} \quad (4)$$

$$\frac{nS_F(n)}{\sigma^2} = \sum \frac{4k(1+0.6)\beta}{\pi} \cdot \frac{(n/n_s)^2}{\{1 - (n/n_s)^2\}^2 + 4\beta^2(n/n_s)^2} \quad (5)$$

$$|X_H(n)|^2 = \int_0^B \int_0^B \exp(-n \times 8 \times |y_1 - y_2| / U_0) dy_1 dy_2 \quad (6)$$

$$|X_V(n)|^2 = \int_0^H \int_0^H \exp(-n \times 8 \times |z_1 - z_2| / U_0) \quad (7)$$

$$\times \sqrt{S_u(z_1, n) \cdot S_u(z_2, n) / S_u(H_0, n)^2} dz_1 dz_2$$

ここで、 n ; 周波数、 $S_{\hat{f}}(n)$; 各層の変動層風力のパワースペクトル密度、 C_f' ; 変動層風力係数、 q_H ; 速度圧、 Δh ; 階高、 H ; 高さ、 B ; 幅、 $S_0(n)$; 基準レベルの単位高さ当たりのパワースペクトル密度、 $S_u(n)$; カルマン型パワースペクトル密度、 $S_F(n)$; 風直角方向の一般化風力係数のパワースペクトル密度、 $|X_H(n)|^2, |X_V(n)|^2$; 空力アドミッタンス、 H_0 ; 基準レベル (=2/3H)、 U_0 ; 基準レベルでの風速、 L_x ; 乱れのスケール、 n_s ; 固有振動数、 k, β ; それぞれ建築物荷重指針・同解説⁵⁾による値とする。

平均層風力係数、変動層風力係数はともに高さ方向で

一定とし、それぞれ風方向で $C_f=1.0, C_f'=0.3$ 、風直角方向で $C_f=0.0, C_f'=0.3$ とした。

建物頂部での風速は、建設地を粗度区分II相当、レベル2と想定して $U_H=56.2\text{m/s}$ とした。層風力は継続時間を800秒として、10サンプル発生させ、応答値は最初の200秒を除いた600秒の結果をアンサンブル平均した値を用いた。

弾性応答時の最大せん断力 Q_e を図-3に示す。このとき、風外力は各層で異なる層風力を与えた。図中には、各層のダンパー降伏時せん断力 Q_y を併せて示す。設定した層風力は、風方向、風直角方向とも下10層程度でダンパーの降伏耐力を上回る。

4. 検討ケース

検討ケースは、表-1に示すように発生させた30層分の異なる層風力を各層に与えた場合(ケース1)と30層分の層風力から3,5,10層ごとに1つの層風力を取り出し、それを代表層風力として3,5,10層すべてに同じ層風力を与えた場合(ケース2,3,4)の4ケースとし、層分割数によ

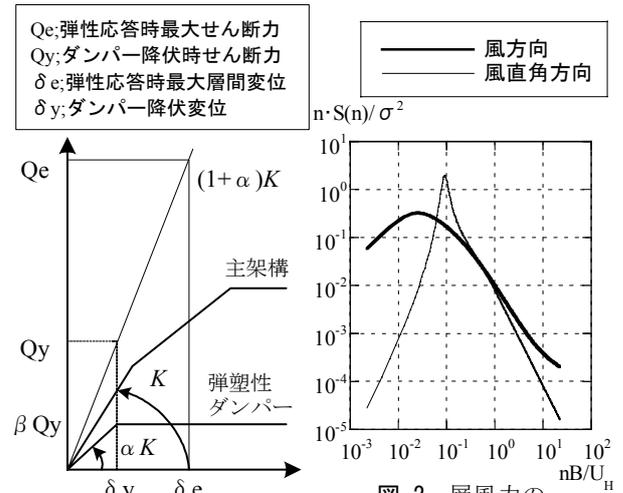


図-2 層風力のパワースペクトル密度

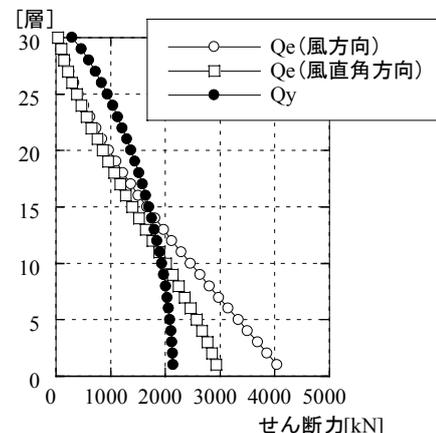


図-3 弾性応答時最大せん断力

る影響を検討した。ケース2の層風力の入力方法例を図-4に示す。

5. 解析結果ならびに考察

(1) ダンパーの変位とせん断力の関係

ケース1における最下層のダンパーの変位とせん断力の関係の一例を図-5に示す。風方向では、平均風力が正側であること、および Q_e に対する Q_y の比が大きいことから⁶⁾、ほぼ正側の塑性変形量の累積となる。風直角方向においては平均風力がゼロであるため、正負両側で塑性変形量が累積している。

(2) 最大層間変位ならびに最大加速度

各層の最大層間変位を図-6に示す。図中には、ダンパーの降伏変位を付記する。最大層間変位は各ケースとも同様の分布形状となり、層分割数による分布形状の差は小さい。層分割数が少なくなるに従い、最大層間変位は大きくなるが、ケース1とケース2の差は小さい。最下

表-1 検討ケース

検討ケース	風外力
ケース1 (層分割数30)	全層異なる層風力を用いる (例:30層→30層の層風力,29層→29層の層風力)
ケース2 (層分割数10)	3層ごとに同じ層風力を用いる (例:30,29,28層→30層の層風力)
ケース3 (層分割数6)	5層ごとに同じ層風力を用いる (例:30,29,28,27,26層→30層の層風力)
ケース4 (層分割数3)	10層ごとに同じ層風力を用いる (例:30,29,28,27,26,25,24,23,22,21層 →30層の層風力)



図-4 層風力の入力方法例

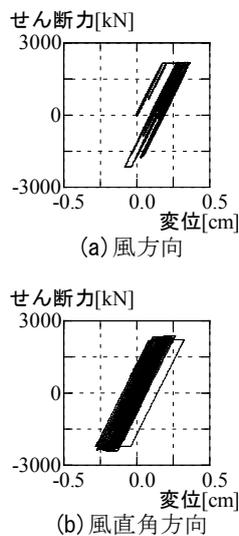


図-5 ダンパーの変位-せん断力の関係

層におけるケース1と他のケースとの差は、風方向ではそれぞれ約0.1%,4%,10%、風直角方向は約1%,6%,17%になっており、風直角方向の方が層分割数による影響が大きい。

各層の最大加速度を図-7に示す。最大加速度は最大層間変位と同様に、層分割数が少なくなるに従い大きくなる。最上層におけるケース1と他のケースとの差は、風方向ではそれぞれ約1%,10%,28%、風直角方向は約0.5%,7%,18%となっており、風方向の方が層分割数による影響は大きい。

(3) 塑性率ならびに累積塑性変形倍率

各層の塑性率を図-8に、各層の累積塑性変形倍率を図-9に示す。塑性率と累積塑性変形倍率はそれぞれ式(8)、式(9)により定義する。

$$\mu = \delta_{max} / \delta_y \quad (8)$$

$$\eta = \sum \delta_p / \delta_y \quad (9)$$

ここで、 μ ; 塑性率, η ; 累積塑性変形倍率, δ_{max} ;

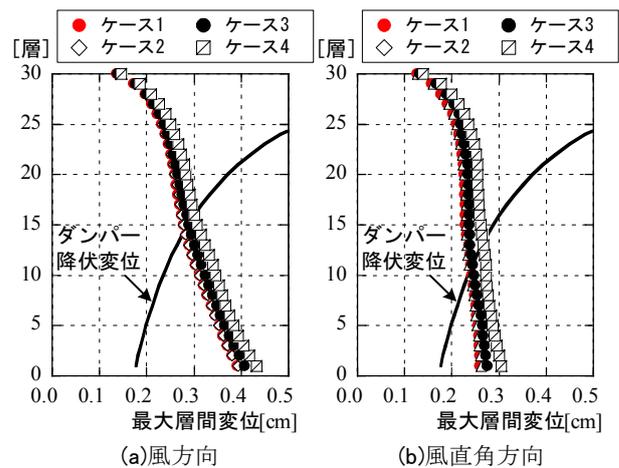


図-6 各層の最大層間変位

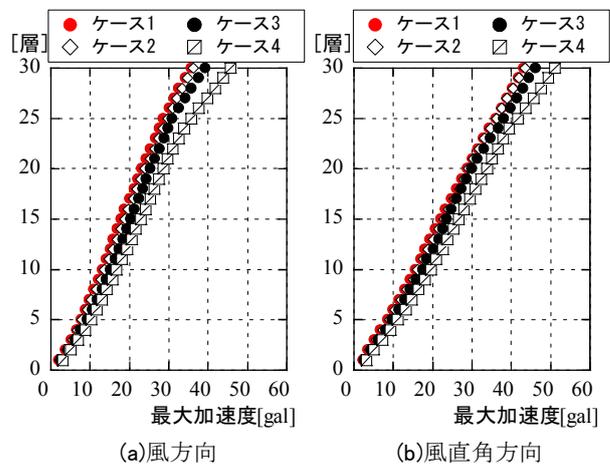


図-7 各層の最大加速度

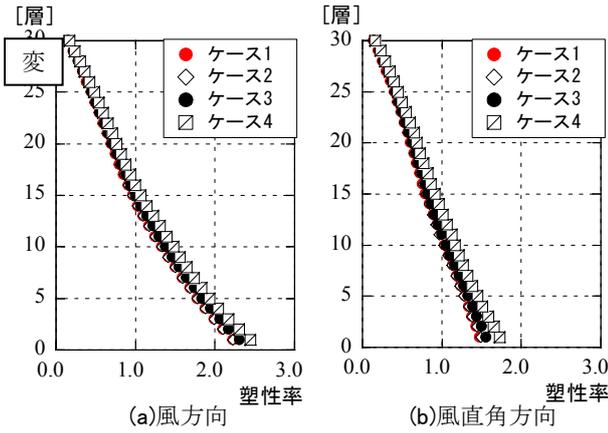


図-8 各層の塑性率

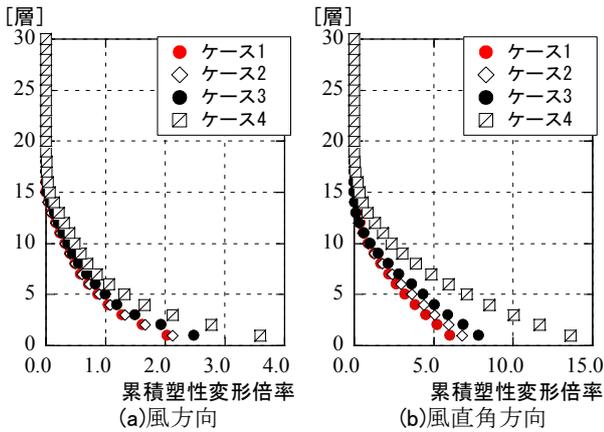


図-9 各層の累積塑性変形倍率

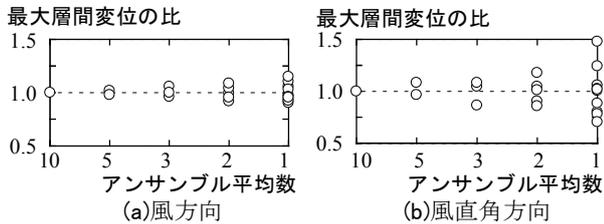


図-10 アンサンブル平均数による最大層間変位のばらつき

最大層間変位, δ_y ; ダンパー降伏変位, δ_p ; 塑性形量とする。

図-8より、塑性率の層分割による影響は最大層間変位と同様の傾向を示す。図-9より、累積塑性変形倍率も風方向、風直角方向とも層分割数が少なくなるに従い、大きくなる。最下層における値では、ケース1とケース2、ケース3との値の差は、風方向でそれぞれ約5%、20%、風直角方向で約10%、30%である。ケース4は風方向、風直角方向ともケース1の2倍程度の値となる。層分割数による影響は、層間変位より累積塑性変形倍率の方が大きい。これは、層間変位の差が積み重なり、累積塑性変形倍率の差となるためである。

ここで、本検討での差は評価時間600秒の差であり、

風揺れによるダンパーの疲労損傷の検討時に台風の通過などにより継続的に強風が吹くことを想定すると、累積塑性変形倍率の差は時間の経過とともに積み重なり、さらに大きくなると考えられる。

(4) アンサンブル平均によるばらつき

アンサンブル平均を採るサンプル数(以下、アンサンブル平均数という)の違いによる応答値のばらつきを検討した。ケース1における各アンサンブル平均数での最下層の最大層間変位を図-10に示す。図の最大層間変位はアンサンブル平均数10つの値を基準値とした比で表す。アンサンブル平均数5つでは、基準値との差は風方向で最大2%、風直角方向で最大8%、アンサンブル平均数3つではそれぞれ5%、14%である。最大層間変位のアンサンブル平均数の差を10%以下とするためには、アンサンブル平均数を5つ以上とる必要がある。

6. おわりに

弾塑性応答解析における層分割数による応答値への影響を検討した。層分割数が少なくなるに従い、応答値を大きく見積もる傾向がある。このとき、層分割数による影響は層間変位よりも、累積塑性変形倍率の方が大きい。また、アンサンブル平均数による応答値のばらつきについても検討し、アンサンブル平均数5つ以上では、最大層間変位の差は10%以下となることがわかった。

参考文献

- 1)野田, 小林: 高さ方向に平面形状が異なる超高層建物の層風力評価と時刻歴弾塑性応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B1 構造 I, pp.147-150, 2002
- 2)大熊ほか: 動的天秤データを利用した高層建物の時刻歴応答解析 その2 層分割の仕様, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B1 構造 I, pp.65-66, 1992
- 3)H.Noda, A.Nakayama: Reproducibility of flow past two-dimensional rectangular cylinder in a homogeneous turbulent flow by LES, J. of Wind Eng. and Ind. Aero. 91, pp.265-278, 2003
- 4)野田, 長谷川: 超高層建物の多質点系時刻歴変動風力の作成に関する研究, 日本風工学会誌第55号, pp.39-40, 1993
- 5)日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 1993
- 6)辻田ほか: 弾塑性構造物の風応答性状ならびにその予測に関する研究 その2 風方向振動の場合, 日本建築学会構造系論文集第485号, pp.25-34, 1996