

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2019 変動風力を受ける超高層建築物の多質点系モデルを用いた応答評価：その2 FDD法による振動モード同定および構造物へのエネルギー入力の評価(構造)
Title	
著者(和文)	鈴木 悠也, 佐藤 大樹, 吉江慶祐, 岡本 有里子, 北村春幸
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453872

変動風力を受ける超高層建築物の多質点系モデルを用いた応答評価 (その2 FDD法による振動モード同定および構造物へのエネルギー入力の評価)

正会員 ○鈴木悠也*1 同 佐藤大樹*2 同 吉江慶祐*3
準会員 岡本有里子*4 正会員 北村春幸*5

構造—振動

風外力 多質点系 振動モード同定

FDD法 エネルギー入力

1. はじめに

本報その1では、風応答解析を行う上で考慮すべきアンサンブル数の確認および、エネルギー入力を始めとした各応答における高次モードの影響を確認した。引き続き、弾塑性範囲における多質点系の風応答評価を目的として、弾塑性範囲の時刻歴応答から各次数の動特性を同定することにより、応答の評価を行うため、その基礎研究として、本報その2では、弾性構造物のモーダルパラメータの同定手法の検討および、変動風力による構造物へのエネルギー入力を始めとした各応答を評価する。モーダルパラメータの同定手法としては、応答加速度をもとに固有値が近接している場合でも精度良く動特性を推定できる Frequency Domain Decomposition (FDD) 法¹⁾の有効性を報告する。構造物へのエネルギー入力は、FDD法によって得られたモーダルパラメータを用いて、各次数における時刻歴応答解析より応答を求め、その精度を評価する。

2. FDD法を用いたモード分解

2.1 解析概要

本報その1より、多質点の風応答評価において高次モードは3次まで考慮すれば精解と同等の値が得られるという結果が得られた。よって、本報その2においては、3次までの同定精度を確認する。解析モデルは、本報その1の評価で用いた、耐震構造物を想定したE-model, 基礎免震構造物を想定したI-1-model, 中間層免震構造物を想定したI-5-modelの応答加速度を用い、減衰定数は、Rayleigh減衰で1,2次共に $h=2, 3, 5\%$ とする。解析に用いた風力は、本報その1と同じ手法で作成し、風入力方向は、平均風力を有する風方向(Along)および風直交方向(Across)とした。同定に用いる応答加速度波形は、1波につき0.01秒刻みで80,000ステップ(100~900秒)を用い、2.2, 2.3節における同定精度の評価は50波のアンサンブル平均を用いた。

2.2 振動モード形の同定

図1に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2, 5\%$)の特異値の周波数分布を示す。特異値曲線には、それぞれの固有振動数に相当するピーク(図中、 f : s 次の固有振動数に相当するピーク)が見られ、振動モード形は、その固有振動数に相当するピーク周波数付近の特異値ベクトルから推定できる。図2に、E-model ($h=2, 5\%$)、I-5-model ($h=2\%$)の振動モード形と固有値解析による振動モード

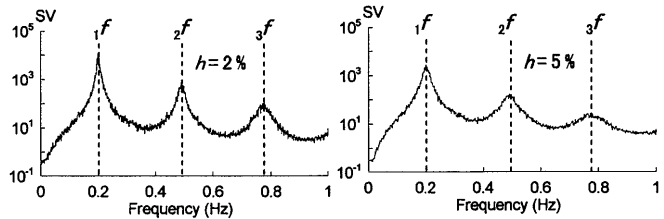


図1 E-model ($h=2, 5\%$)の特異値の周波数分布

形との比較を示す。減衰が大きい場合は特異値のピーク部がなめらかになるため(図1)、多少同定精度が低くなるが、どのモデルも振動モード形がほぼ正確に重なっていることから、非常に精度良く同定されていることがわかり、FDD法の有効性が確認できる。他のモデル条件の場合も同様の結果が得られた。

2.3 固有振動数および広義減衰の同定

特異値における各次数の範囲内を逆フーリエ変換して得られた自己相関関数の波形より、固有振動数および広義減衰を求める。そのため、同定の精度を向上させるためには、以下の2つの検討が必要となる。

- 1) 特異値を逆フーリエ変換する際の各次数のバンドパスフィルタの範囲。
- 2) 自己相関関数からの固有振動数および広義減衰の同定手法。

まず、様々な固有振動数を持つモデルに対応できるように、バンドパスフィルタの範囲の決定手法を、以下の方法で検討する。

特異値曲線のピークから読み取った、各次数の固有振動数間の差を $_{s-1,s}F$ (式(1a))とし、さらに $_{s-1,s}F$ を10分割した $_{s-1,s}\beta$ (式(1b))を求める。

$$_{s-1,s}F = s f -_{s-1}f, \quad _{s-1,s}\beta = _{s-1,s}F / 10 \quad (s=1\sim 3) \quad (1a, b)$$

ここで、 $s f$: 特異値曲線のピークから読み取った s 次の固有振動数とし、 $_{0}f=0$ (Hz)とする。

$_{s-1,s}\beta$ を用いて各次数のハイパスフィルタ $s f_{high}$ (式(2a))およびローパスフィルタ $s f_{low}$ (式(2b))を求め、各次数のバンドパスフィルタの範囲を決定する。ここで、任意の定数 n を2~7で変化させることで、各次数の変換範囲を変化させ自己相関関数の同定精度が高くなる適切な n を検討する。

$$s f_{high} = s f - n_{s-1,s} \beta, \quad s f_{low} = s f + n_{s,s+1} \beta \quad (2a,b)$$

図3に、風方向風力が入力された場合のE-model, I-5-model ($h=2\%$) における $n=5$ (各次数の固有振動数間の中央値で各次数の範囲を分割) での逆フーリエ変換する際のバンドパスフィルタの範囲を示す。この手法であれば、どのような振動数分布を持つモデルに対しても有効であり、汎用性は高いといえる。また、図4に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2\%$) における $n=2\sim 7$ での特異値を逆フーリエ変換した場合の3次モードの自己相関関数と、各モデルの固有値解析結果から得られた3次モードの自由振動波形の比較を示す。自己相関関数と自由振動波形の重なり具合に注目すると、 $n=4, 5, 6$ のときには、高い精度で自己相関関数を同定できているといえる。なお、3次は1, 2次に比べて自己相関関数の同定が難しいため、ここでは3次のみを検証をおこなった。

次に、特異値を逆フーリエ変換して得た自己相関関数と、自由振動の理論曲線が、同定範囲内で誤差が最小となるよう、最小二乗法を用いて、固有振動数および広義減衰を同定するため、その際に同定する自己相関関数のサイクル数範囲を検討する。同定を開始するサイクルと同定するサイクル数をパラメータとして、19のケースに分け、どのモデルに対しても同定精度が高い、同定サイクル数を評価する。表1に、同定開始サイクルおよび同定サイクル数を示す。データ処理の都合上、1サイクル目からの同定はせず、1.5サイクル目から同定を開始した。バンドパスフィルタの範囲は、前検討において精度の高かった $n=4, 5, 6$ の3ケースで検討した。

表2に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2, 3, 5\%$), I-5-model ($h=2\%$), 風直交方向風力が入力された場合のE-model ($h=2\%$) における、全体的に精度が高かった1.5サイクル目から読み取ったケースのサイクル数ごとの、広義減衰の同定精度を示す。各モデルで適切な読み取りサイクル数は異なるが、中でも、様々なモデル諸元においても共通に高い精度で減衰を同定できる読み取りサイクル数として、 $n=5$ の場合の、1.5サイクル目から4サイクルを同定する場合が適切であることがわかる。

また、固有振動数においては、自己相関関数の同定精度が高い $n=4, 5, 6$ の場合であれば、どの読み取りサイクル数であっても、精度の高い同定結果が得られた。

よって、以後の固有振動数および広義減衰の同定手法として、1) 特異値を逆フーリエ変換する際の各次数のバンドパスフィルタの範囲は、式(2a,b)において $n=5$ として求め、2) 自己相関関数の波形の1.5サイクル目から4サイクルを読み取り、最小二乗法を用いて、固有振動数および広義減衰を同定する。

2.4 アンサンブル数の確認

2.3, 2.4 節で述べた手法で振動モード形、固有振動数、広義減衰の同定精度を安定させるために必要なアンサンブル数を確認する。10~50波までの10波ごとのアンサンブル平均を用いた同定結果により検討した。図5に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2\%$) における、振動モード形のアンサンブル数による同定精度の変化、図6に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2\%$) に

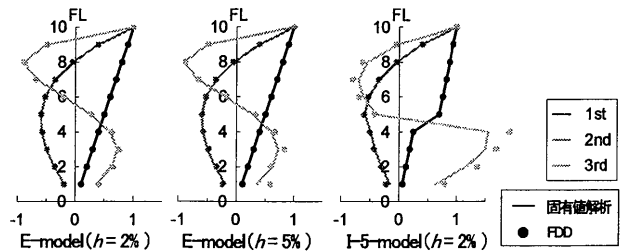


図2 振動モード形同定精度

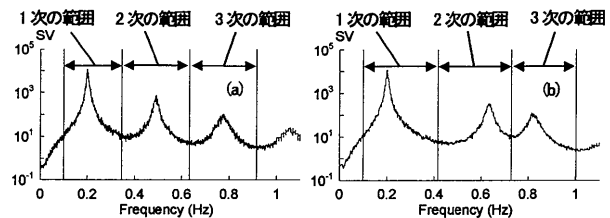


図3 (a) E-model, (b) I-5-model ($h=2\%$) の各次数の変換範囲 ($n=5$)

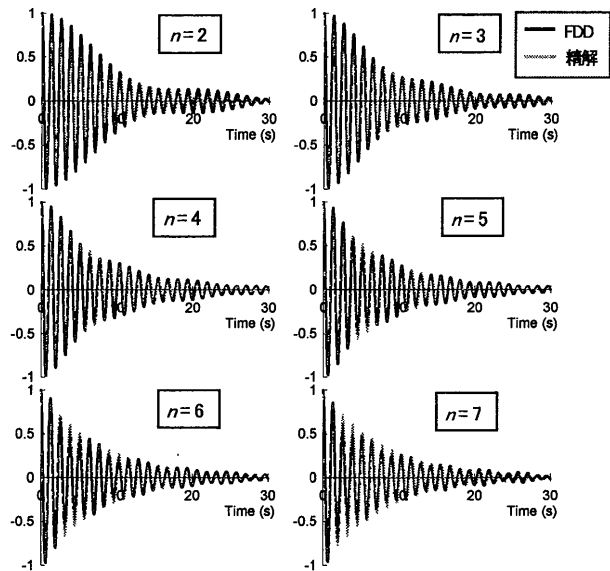


図4 E-model ($h=2\%$) の3次モードでの自己相関関数の比較

表1 同定開始サイクルおよび同定サイクル数

開始サイクル	サイクル数				
1.5	1.5	4	6.5	9	11.5
3	2.5	5	7.5	10	12.5
5.5	2.5	5	7.5	10	12.5
8	2.5	5	7.5	10	

表2 同定サイクル数別減衰同定精度 (開始サイクル1.5の場合)

n	サイクル数	E			I 5 6		[凡例]
		Along $h=2\%$	Along $h=3\%$	Across $h=5\%$	Along $h=2\%$	Along $h=2\%$	
4	1.5	△		○			同定したモーダル減衰の固有値解析によるモーダル減衰との誤差を評価 ○: 1, 2次で3%, 3次で5%未満のもの △: 1次で3%, 2次で5%未満のもの
	4	○	○	△	△		
	6.5	○			△		
	9	○			△		
5	1.5					△	
	4	△	○	○	○	△	
	6.5	△		○	○	○	
	9	△			○	○	
6	1.5					○	
	4	△					
	6.5	△		○			
	9	○					
	11.5	○				○	

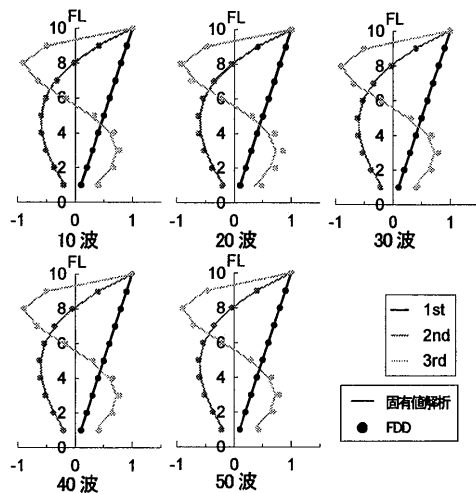


図5 振動モード形のアンサンブル数による同定精度

おける、固有振動数および広義減衰のアンサンブル数による同定精度の変化を示す。

振動モード形(図5)は、同定精度が安定するためには30波のアンサンブル平均をとる必要があることがわかる。また、広義減衰および固有振動数(図6)も同様に、30波のアンサンブル平均をとることで、同定精度が落ち着くことがわかる。他のモデル条件の場合も同様の結果が得られたため、以後の同定結果においては、30波のアンサンブル平均を用いる。

2.5 FDD法によるモーダルパラメータの同定結果

図7に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2, 5\%$), I-1-model ($h=2\%$), I-5-model ($h=2\%$), 風直交方向風力が入力された場合のE-model ($h=2\%$)における同定結果を示す。モデルごとに多少の誤差はあるが、どのモデルも振動モード形、固有振動数、広義減衰ともに同定精度は高いといえる。他のモデルにおいても同等の結果が得られたため、FDD法によるモーダルパラメータ同定の有効性を確認できた。

3. 弾性構造物へのエネルギー入力の評価精度

3.1 解析概要

解析モデルは、E-model, I-1-model, I-5-modelを用い、減衰定数は、Rayleigh減衰で1,2次共に $h=2, 5\%$ とする。風力方向は、平均風力を有する風方向風力および風直交方向風力とした。風力は、0.01秒刻み95,000ステップで30波作成し、30波による応答のアンサンブルを求め、応答を評価した。

FDD法によって各次数の振動モード形、固有振動数、広義減衰が同定でき、 i 層質量 m_i 、 i 層外力 $F_i(t)$ が既知なので、次式より各次数の広義質量 M 、広義剛性 K 、広義外力 $F(t)$ が求められる。

$${}_s M = \sum_{i=1}^n m_i \cdot u_i^2 \quad (3)$$

$${}_s K = {}_s \omega^2 \cdot {}_s M = (2\pi \cdot f)^2 \cdot {}_s M \quad (4)$$

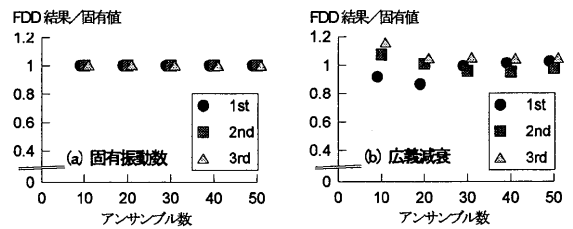
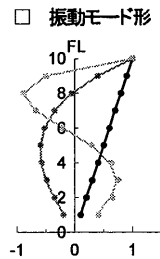


図6 (a) 固有振動数 (b) 広義減衰のアンサンブル数による同定精度

■ E-model_Along $h=0.02$

□ 固有振動数			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.200	0.490	0.775
FDD	0.199	0.487	0.768
FDD/固有値	0.994	0.993	0.992

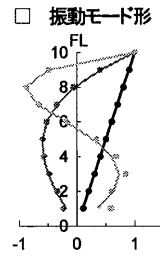
□ 広義減衰			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.020	0.020	0.026
FDD	0.022	0.020	0.026
FDD/固有値	1.108	1.010	0.993



■ E-model_Across $h=0.02$

□ 固有振動数			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.200	0.490	0.775
FDD	0.199	0.485	0.764
FDD/固有値	0.994	0.990	0.986

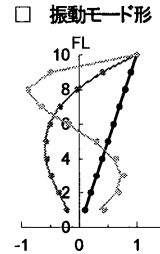
□ 広義減衰			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.050	0.050	0.065
FDD	0.051	0.051	0.060
FDD/固有値	1.024	1.029	0.921



■ I-1-model_Along $h=0.02$

□ 固有振動数			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.200	0.490	0.775
FDD	0.199	0.487	0.769
FDD/固有値	0.995	0.994	0.993

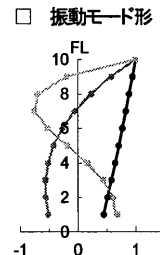
□ 広義減衰			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.020	0.020	0.026
FDD	0.019	0.021	0.026
FDD/固有値	0.969	1.072	1.014



■ I-5-model_Along $h=0.02$

□ 固有振動数			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.200	0.549	0.918
FDD	0.197	0.540	0.899
FDD/固有値	0.983	0.982	0.980

□ 広義減衰			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.020	0.020	0.028
FDD	0.020	0.021	0.030
FDD/固有値	0.980	1.052	1.077



■ I-5-model_Across $h=0.02$

□ 固有振動数			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.200	0.636	0.826
FDD	0.198	0.630	0.816
FDD/固有値	0.990	0.990	0.987

□ 広義減衰			
mode	1st	2nd	3rd
固有値	0.020	0.020	0.023
FDD	0.020	0.021	0.019
FDD/固有値	0.991	1.065	0.830

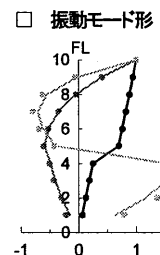


図7 各モデルの同定結果



$${}_s F(t) = \sum_{i=1}^n F(t)_{i,s} u_i \quad (5)$$

ここで、 ${}_s u_i$: i 層の s 次における振動モード、 ${}_s f$: s 次の固有振動数を示す。

3.2 エネルギー入力の精度評価

本報その1と同様の手法を用いて、モーダルアナリシスによる応答を評価する。図8に、風方向風力が入力された場合のE-model ($h=2, 5\%$), I-1-model ($h=2\%$), I-5-model ($h=2\%$), 風直交方向風力が入力された場合のE-model ($h=2\%$)における、FDD法および固有値解析から得られたモーダルパラメータを用いて時刻歴応答解析し、1~3次まで足し合わせた応答加速度、応答変位、エネルギー入力の10質点時刻歴応答解析結果との一致度の比較を示す。どのモデルにおいても同定結果から得られたエネルギー入力が、固有値解析から得られたものと誤差が小さく、高い精度で評価できているといえる。応答加速度、応答変位に関しても同様の結果がみられ、他のモデル条件においても同等の結果が得られたため、この手法による各応答の評価の精度の高さと有効性が確認できる。また、本報その1と同様に、応答加速度は3次まで足し合わせることで、10質点時刻歴応答解析結果とほぼ同等の結果を得られることがわかる。応答変位、エネルギー入力も高次モードの影響として、本報その1と同じ傾向の結果がみられ、それ以外の応答速度、層間変位の評価においても、同様の結果が得られた。

4. まとめ

弾塑性範囲における変動風力に対する多質点系の風応答評価をするための基礎研究として、弾性構造物のモーダルパラメータの同定手法の検討および、変動風力による構造物へのエネルギー入力を評価し、以下の結論を得た。

- 1) 本報で検討した手法を用いることで、FDD法により、応答のみから高い精度で各次数の動特性を同定することが可能であることを確認することができた。
- 2) FDD法による同定結果を用いた、弾性範囲のモーダルアナリシスにより、応答加速度、応答変位、エネルギー入力の評価の精度の高さを確認でき、この手法の有効性を検証することができた。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学笠井研究室の解析プログラムPC-ANSRを使用しました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉田昭二, 田村幸雄: FDD法および2DOF-RD法を用いた構造物の動特性の同定, 日本機械学会第8回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp.601-604, 2003. 10

- *1 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻
- *2 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)
- *3 (株)日建設計 構造設計部門 主管 博士(工学)
- *4 東京理科大学理工学部建築学科
- *5 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

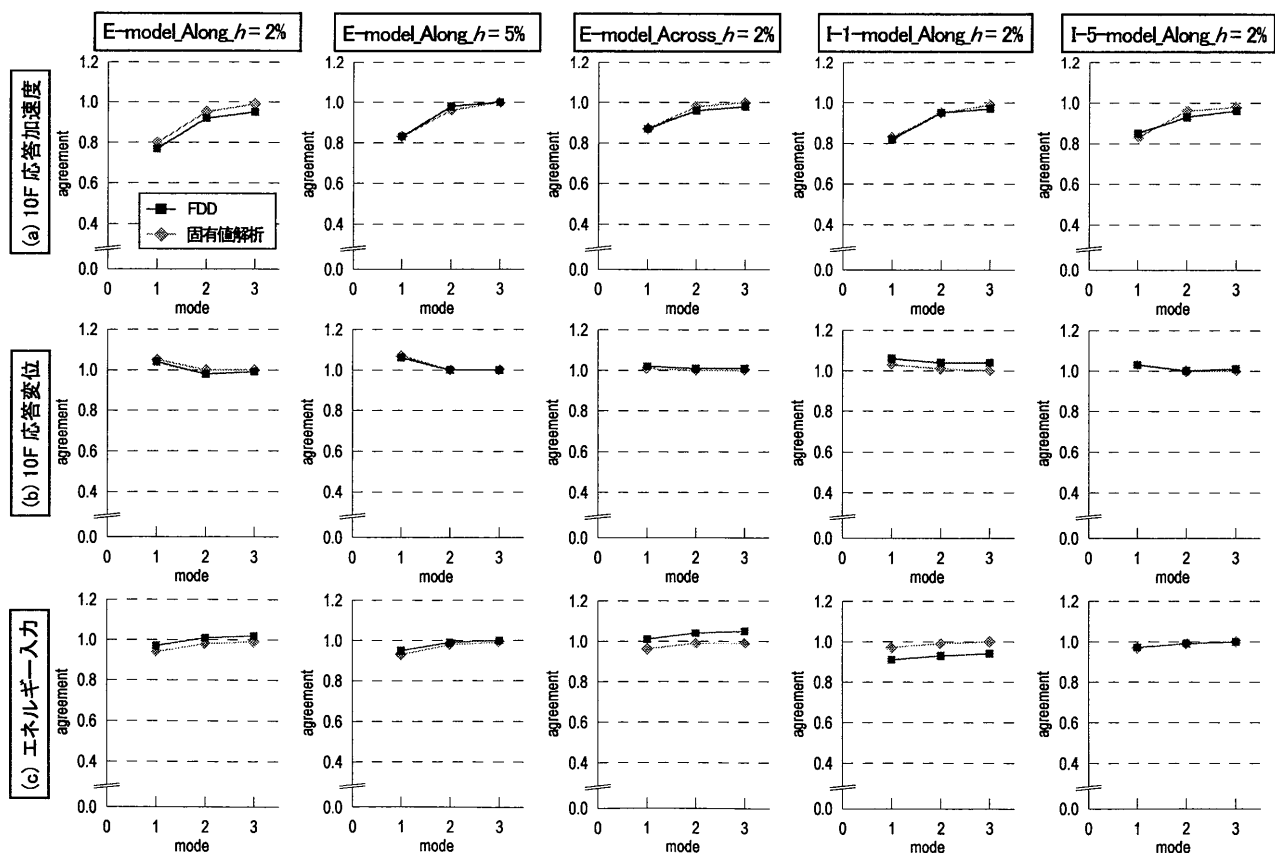


図8 弾性範囲における(a)応答加速度、(b)応答変位、(c)エネルギー入力精度

$$agreement = \frac{\text{モーダルアナリシス応答}}{\text{10質点解析応答}}$$