

時間領域のモード解析とその適用

ー E-ディフェンスによる超高層 RC 造建築物の振動特性 ー

(株) バイブラントシステム開発 正会員 ○安藤幸治
 首都大学東京名誉教授 フェロー会員 岩楯敏広

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、長周期地震動が発生し、長時間にわたって堆積層の厚い大都市圏の超高層ビルに多大な影響を与えた。そこで長周期地震動を受けた場合の超高層 RC 造建物内各部材の性能や耐震性を調べるため、防災科学技術研究所兵庫耐震工学センターの E-ディフェンスを使用して振動試験「長周期地震動に対する RC 造建築物の安全性検証方法に関する検討¹⁾」が実施された。対象試験体は、実在する階高 3m、高さ 60m の超高層 RC 造建物を参考にして作成された。図 1 に試験体の外観図²⁾を示す。参考建物の 1/4 縮尺、即ち、階高 0.75m、高さ 15m の RC 造建物である。振動試験は、入力地震波として 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測波及び南海トラフを震源とする三連動地震を想定して作成された模擬波が使用され、建物が終局状態に至るまで行われた。その後、振動試験データは防災科学技術研究所の ASEBI²⁾ で公開されたが、同データに対して時間領域のモード解析手法³⁾を適用して、入力の大小に対する建物の動的特性の変動について検討した。

2. 時間領域のモード解析

時間領域のモード解析は観測記録を使用して対象系が次の運動方程式に従うことを条件に系のモード定数(固有値と固有ベクトル)を求め、周波数特性を把握することを目的とする。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

ここに、 M 、 C 及び K は、それぞれ質量、減衰、剛性の各行列であり、 $\mathbf{x}(t)$ 及び $\mathbf{f}(t)$ は、それぞれ相対変位、外力のベクトルである。モード定数は、最小二乗法に従って、式(1)の解(回帰式)と観測値間の誤差を評価して求められる。以下では、式(1)の解として加速度記録に対応する次の相対加速度 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ を使用する。

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = 2\text{Real} \left[\sum_{r=1}^N \left\{ \lambda_r \alpha_r e^{\lambda_r t} + \mathbf{u}_r^T \dot{\boldsymbol{\beta}}_r(t) \right\} \lambda_r \mathbf{u}_r \right] \quad (2)$$

ここに、 λ_r 、 \mathbf{u}_r はそれぞれ第 r 次の固有値、固有ベクトルである。固有値 λ_r は固有周波数 f_r 及び減衰定数 h_r とは $\lambda_r = -2\pi f_r h_r + i2\pi f_r \sqrt{1 - 2h_r^2}$ の関係にある。

式(2)の第一項は $\mathbf{f}(t) = \mathbf{0}$ のときの一般解であり、第二項は式(1)の特殊解である。また、ベクトル $\boldsymbol{\beta}_r(t)$ は微分方程式 $\dot{\boldsymbol{\beta}}_r(t) = \lambda_r \boldsymbol{\beta}_r(t) + \mathbf{f}(t)$ を満たす。

固有値 λ_r は相対加速度 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ に対して非線形の関係に固有ベクトル \mathbf{u}_r は線形の関係にあるため、誤差の正規性を考慮して個別に観測方程式を立て正規方程式を解いている。系の伝達関数は解析より求められたモード定数 λ_r 、 \mathbf{u}_r を使用して次式より求められる。

$$T(\omega) = \sum_r \frac{\omega^2 \mathbf{u}_r^T M \mathbf{I}}{i\omega - \lambda_r} \mathbf{u}_r + \mathbf{I} \quad (3)$$

ここに、刺激関数 $\mathbf{u}_r^T M \mathbf{I} \mathbf{u}_r$ は M に依らず一定である。 \mathbf{I} は単位ベクトルである。

3. 時間領域のモード解析の適用

解析は振動台に固定されている1階(1F)の記録を建物に対する入力波、11階(11F)及び21階(21F)の記録をその出力波と見なして行い、1Fと11F及び21F間の周波数特性について検討した。解析では建物の初期状態、L2入力後及び終局状態の3ケースの加速度記録を使用して建物の動的特性の推移を調べた。加速度記録は水平2成分 x 、 y 及び上下成分 z の各々40.96秒間を使用した。解析より求められた初期状態の建物の加速度波形及び伝達関数の観測データとの比較図(x 成分)を図2,3に示す。双方とも再現性は良好である。表1~3に固有値を示す。ここに、初期状態の x 、 y の2成分は10個のモードが求められたが、表1,2には主要なモード3個を示す。これより入力加速度の大きさの増大に伴い、固有周波数及び減衰定数に変動が確認される。特に長辺方向の x 成分は3個の固有周波数ともL2時で3割強の減、終局時で5割減と顕著である。減衰定数は終局時で7倍前後の値である。

キーワード：時間領域のモード解析，E-ディフェンス，超高層建物，長周期地震動，東北地方太平洋沖地震
 連絡先：〒207-0014 東京都東大和市南街5-39-16 tel:042-507-2731 E-mail:ando@vsdc.co.jp

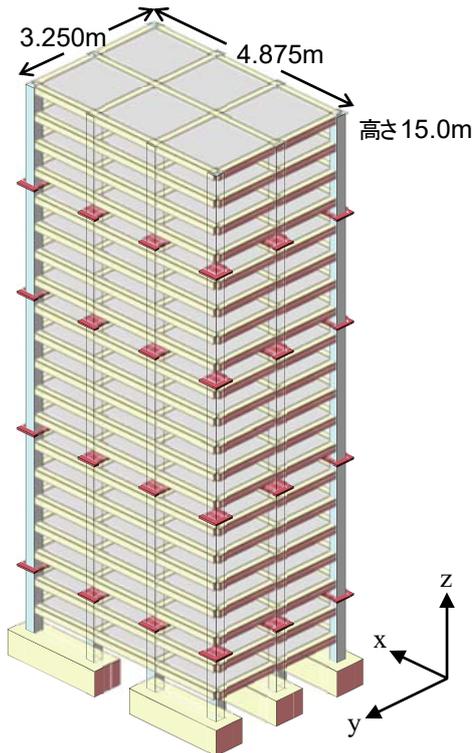


図1 解析対象建物の外観図²⁾

表1 x成分の固有周波数及び減衰定数の推移

No.	固有周波数(Hz)			減衰定数(%)		
	初期	L2	終局	初期	L2	終局
1	1.82	1.12	0.80	1.52	6.25	9.93
2	6.03	3.97	3.10	1.09	4.48	8.80
3	11.0	7.36	5.73	0.97	5.19	7.47

表2 y成分の固有周波数及び減衰定数の推移

No.	固有周波数(Hz)			減衰定数(%)		
	初期	L2	終局	初期	L2	終局
1	1.69	1.24	1.09	1.57	3.46	4.70
2	5.59	4.27	3.82	1.29	2.75	3.61
3	10.46	7.91	6.99	1.22	3.22	3.35

表3 z成分の固有周波数及び減衰定数の推移

No.	固有周波数(Hz)			減衰定数(%)		
	初期	L2	終局	初期	L2	終局
1	14.66	13.48	12.76	2.22	1.26	1.12

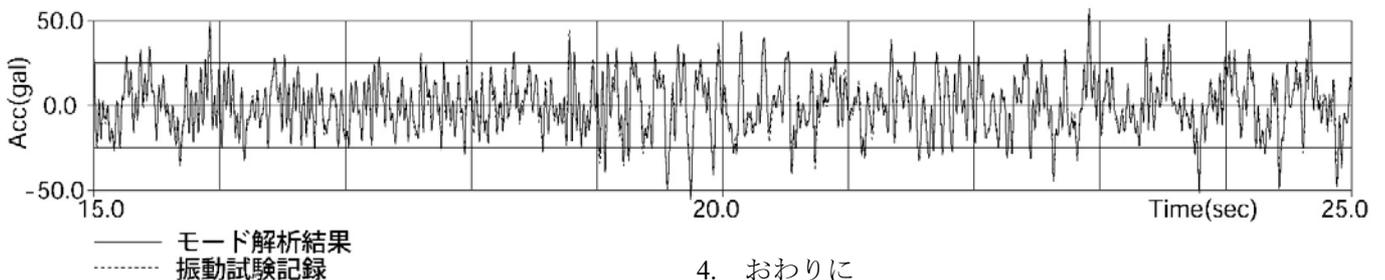


図2 初期状態 21F の x 成分の加速度波形の比較

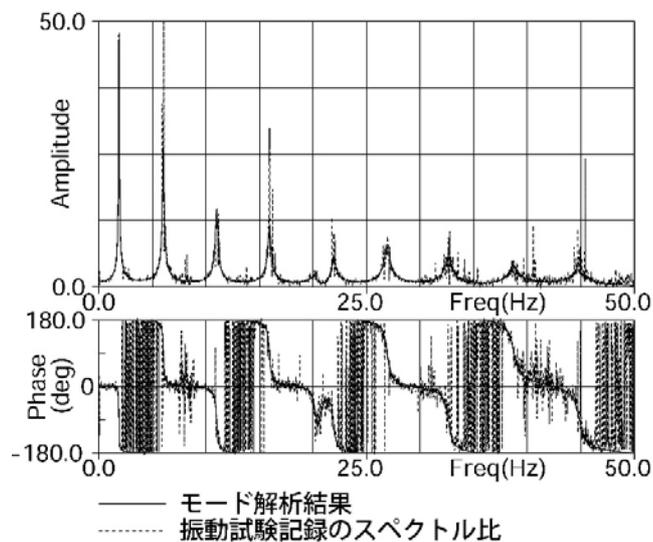


図3 初期状態 21F の x 成分の伝達関数の比較

4. おわりに

時間領域のモード解析より、加振の大小による建物の状態の変化に伴い、固有周波数及び減衰定数に変動が確認された。特に建物の水平長辺方向で顕著に見られた。今後、数値モデル同定解析³⁾を実施して剛性低下の発生箇所の特定及びその低下量について検討していきたいと考える。

参考文献

- 1)長周期地震動を受ける超高層鉄筋コンクリート造建物の耐震性能 その1 20層 RC 造建物試験体の震動実験 大林組技術研究所報 No.78 2014
- 2)国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」より 課題名「長周期地震動に対する RC 造建築物の安全性検証方法に関する検討」 (<https://www.edgrid.jp/datas/>)
- 3)安藤幸治・岩楯徹広：時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用, 土木学会論文集, No.450/I -20, pp.151~160, 1992