

性能設計図表を用いた多質点系の最大応答値予測および耐久性評価に関する研究

その 1 性能設計図表を用いた多質点系の最大応答値の予測手法

A Study on Prediction of Peak Response and Durability Evaluation of MDF with Performance Design Chart

Part1. Prediction Method of Peak Response of MDF with Performance Design Chart

○渡辺直輝², 秦一平¹, 石丸辰治³, 古橋剛¹, 廣谷直也²

* Naoki Watanabe², Ippei Hata¹, Shinji Ishimaru³, Takeshi Huruhashi¹, Hirofumi Naoya²

Ishimaru and Hata show the inverse design method that is "response performance design method by the separated variables of the energy spectrum" to the earthquake input for designs to use a simple design method for a damper aimed at the response. There is the CQC method to predict the maximum response of MDF. This study, synthesizing the two methods, is proposed on a simple method of prediction on the maximum response and durability of seismic control and isolated structure of MDF. In this paper, it is examined on the prediction of the peak response of MDF.

1. はじめに

免震制震構造物の免震部材やダンパー部材の設計について、石丸、秦は設計用入力地震動に対して目標応答値を満足するダンパーの設計を簡易的に決定することが出来る”逆設計法”を提唱している。これは、「エネルギースペクトルの変数分離を用いた応答性能設計法⁽¹⁾」により、指定された応答値以内に収めるための適切なダンパーパラメータの設計が簡単に導き出せる手法を示している。さらに、弾塑性ダンパーや粘性ダンパーの耐久性評価として、累積吸収エネルギー及び粘性減衰エネルギーを算出することができる「耐久性評価の応答性能設計図表」⁽²⁾まで、拡張している。この設計法は、1 質点系を対象としており、多質点系への拡張が必要と考えられる。

そこで本研究は、モードの相関関係を考慮した重ね合せ手法である CQC(完全 2 次結合法)⁽³⁾⁽⁴⁾を用いて、既往の研究⁽¹⁾⁽²⁾を多質点系構造物へ適応し、応答性能設計図表と CQC 法を併用した多質点系の最大応答値予測および耐久性評価の手法を示す。その 1 では、性能設計図表と CQC 法を併用した多質点系の最大応答値の予測手法を示す。その 2 では決定したパラメータのほかに 2 モデルに対して耐久性の評価を行う。

2. 応答性能設計図表を用いた免震設計

免震構造とする対象モデルは Table.1-1 に示すように、上部構造を 20 層の高層モデルとしている。最下層に免震層を設け、免震層の質量を 9,000ton としている。上部構造は 1 次固有周期が 2.1 秒、減衰定数が 2.0%となっている。

設計用入力地震動は JMA-神戸 NS 波とし、Fig.1-1 に減衰定数 40%時の擬似速度応答スペクトル pSv₄₀、速度応答スペクトル Sv₄₀、そして秋山による減衰定数 10%時のエネルギースペクトル Ve₁₀を示す。

目標性能として、応答変位が 0.3m 以内になるような、免震装置の設計をする。なお、免震層の構成は、鉛プラグ入り積層ゴムとオイルダンパーの併用系を採用する。

Table.1-1 Parameters of Structure

層	質量 (ton)	減衰係数 (kN·s/m)	初期剛性 (kN/m)
21	3000	36665	2742500
20	3000	38498	2879625
19	3000	40331	3016750
18	3000	42164	3153875
17	3000	43997	3291000
16	3000	45831	3428125
15	3000	47664	3565250
14	3000	49497	3702375
13	3000	51330	3839500
12	3000	53164	3976625
11	3000	54997	4113750
10	3000	56830	4250875
9	3000	58663	4388000
8	3000	60496	4525125
7	3000	62330	4662250
6	3000	64163	4799375
5	3000	65996	4936500
4	3000	67829	5073625
3	3000	69663	5210750
2	3000	71496	5347875
1	9000	73330	5485000

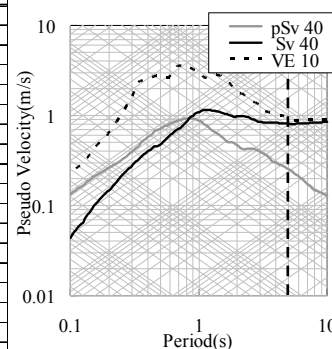


Fig. 1-1 Response Spectrum

また、鉛プラグ入り積層ゴムのバイリニア係数 pd を 0.3 とし、速度に対し線形なオイルダンパーを採用するため、応答性能設計図表で用いるリリーフ率 $\mu v=1.0$ 、減衰比 $p_v=0.4$ とする。免震層を含む系の 1 次実効周期 T' を 4 秒とし、Fig.1-1 から $pSv_{40}=0.296(m/s)$ 、 $Sv_{40}=0.826(m/s)$ を読み取る。ここで、 $T' = 4.0sec$ に対する D_{40} は、0.188(m) であるので、目標変位 D_{max} が 0.30(m) を D_{40} で割ると、変位応答倍率 D_{max}/D_{40} が 1.6 となる。そのため、変位応答倍率が 1.6 以下になる組合せとなる免震層のパラメータを応答性能設計図表より読み取る。その図表を Fig. 1-2 に示す。

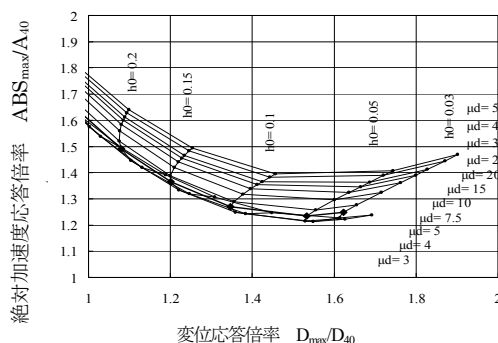


Fig. 1-2 Performance Design Chart of Response

1:日大理工・教員・建築 2:日大理工・院・建築 3:㈱2S2 技術顧問

1次モードの粘性減衰定数を $h_0=0.10$ とし, Fig. 1-2 から, 変位応答倍率が小さい塑性率 $\mu d=7.5$ を決定する. 固有値解析により, 1次モードの T' , h_0 , pd 及び μd を満足するように, 1層目に免震層のダンパーパラメータを決定する. Table. 1-2 と Table. 1-3, Fig. 1-3 に決定したパラメータと固有値解析結果, 変位の刺激関数を示す.

Table. 1-2 Parameters of First Floors

	剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	バイリニア係数 pd	塑性率 μd
1層目パラメータ	543069	38760	0.196	11.9

Table. 1-3 Characteristic of Vibration ($h_0=0.10$)

	実行周期 T'	弾性周期 T_e	減衰定数 heq	モーダル バイリニア	モーダル 塑性率
1次	4.00	2.95	0.10	0.30	7.50
2次	1.10	1.03	0.10	0.74	10.99
3次	0.60	0.59	0.10	0.91	12.89
4次	0.41	0.41	0.12	0.97	13.08
5次	0.31	0.31	0.14	0.99	12.87

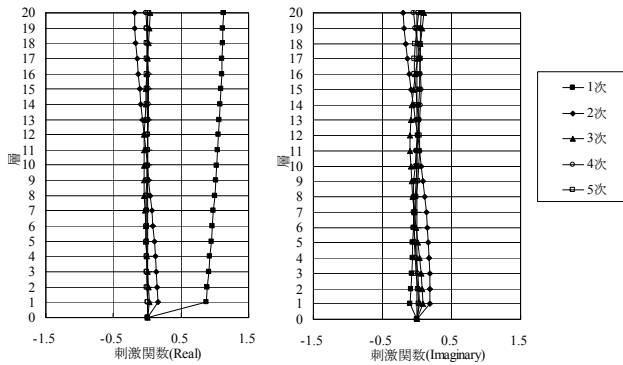


Fig. 1-3 Effective Participation Factors

3. CQC 法を用いた最大応答値予測

多質点系の最大応答値予測の手法として(1-1)式に示す CQC 法を用いる.

$$|W_{\max}| = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\rho_{ij} \text{Re}(\beta_i \gamma_i) \nu_i \text{Re}(\beta_j \gamma_j) \nu_j + \rho'_{ij} \frac{\text{Im}(\beta_i \gamma_i) \text{Im}(\beta_j \gamma_j)}{\sqrt{(1-h_i^2)(1-h_j^2)}} \right] S(h_i, T_i) S(h_j, T_j)} \quad \dots(1-1) \text{式}$$

h_i : i 次モードの減衰定数

$\beta_i \gamma_i$: i 次モードの刺激関数

ρ_{ij} : CQC 法相関係数

$\nu_i = 1 - (h_i / \sqrt{1-h_i^2}) i$

ω_i : i 次モードの固有円振動数

$S(h_i, T_i)$: i 次モードの基準座標応答

$\rho'_{ij} = (h_i \omega_j + h_j \omega_i) \rho_{ij} / (h_i \omega_i + h_j \omega_j)$

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{h_i h_j} \left(h_i + \frac{\omega_j}{\omega_i} h_j \right) \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right)^2}{\left(1 - \frac{\omega_j^2}{\omega_i^2} \right)^2 + 4h_i h_j \frac{\omega_j}{\omega_i} \left(1 + \frac{\omega_j^2}{\omega_i^2} \right) + 4(h_i^2 + h_j^2) \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right)^2} \quad \text{: 相対変位}$$

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{h_i h_j} \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} h_i + h_j \right) \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right)^2}{\left(1 - \frac{\omega_j^2}{\omega_i^2} \right)^2 + 4h_i h_j \frac{\omega_j}{\omega_i} \left(1 + \frac{\omega_j^2}{\omega_i^2} \right) + 4(h_i^2 + h_j^2) \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right)^2} \quad \text{: 相対速度}$$

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{h_i h_j} \frac{\omega_j}{\omega_i} \left[\left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right)^3 h_i + h_j + 4 \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right) h_i h_j \left\{ h_i \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right) + h_j \right\} \right]}{\sqrt{(1+4h_i^2)(1+4h_j^2)} \left[\left(1 - \frac{\omega_j^2}{\omega_i^2} \right)^2 + 4h_i h_j \frac{\omega_j}{\omega_i} \left(1 + \frac{\omega_j^2}{\omega_i^2} \right) + 4(h_i^2 + h_j^2) \left(\frac{\omega_j}{\omega_i} \right)^2 \right]}$$

: 絶対加速度

Fig. 1-1 のスペクトル図から各モードの T' に対する $pSv_{.40}$ と $Sv_{.40}$ を読み取る. そして Table. 1-3 の複素固有値解析の結果の値を用いて, 性能設計図表から各モードの基準座標応答を求める. 求めた基準座標応答を Table. 1-4 に示す. 重ね合せ次数を, 1次モードのみ, 1~2次モードまで, 1~3次, 1~4次, 1~5次, 全モードとして(1-1)式に代入した時の最大応答値予測の結果, そして時刻歴応答解析(図中の"EP-RESP")の結果を Fig. 1-4 に示す.

Table. 1-4 Peak Responses of Normal Coordinate

	絶対加速度 (gal)	相対速度 (m/s)	相対変位 (m)
1次	59.80	0.95	0.26
2次	696.40	1.55	0.23
3次	1414.00	0.84	0.14
4次	1502.00	0.55	0.06
5次	1323.00	0.36	0.03

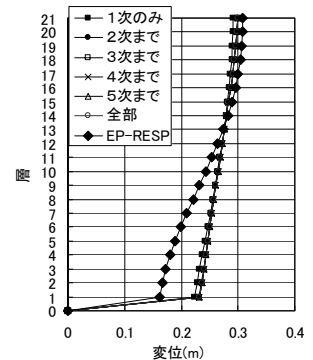
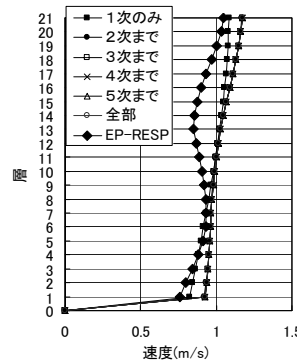
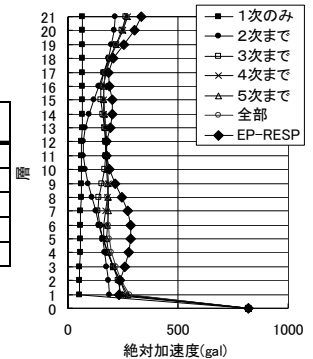


Fig. 1-4 Responses of Prediction and analysis of time history

応答変位に着目すると, 応答予測の精度は 1次モードのみの応答結果でも十分良好であることが確認できる. また, 応答速度及び応答加速度においても 3次モードまでを考慮することで良い対応を示していることがわかる.

5. まとめ

性能設計図表と CQC 法を併用した多質点系の最大応答値の予測手法を示した. 応答変位・速度については, 重ね合せ次数が 1次モードのみでも予測精度に問題はないことが確認できた. 絶対加速度に関しては, 高次モードまで考慮すれば良い対応を示していることが分かる.

【参考文献】

- (1) 秦一平,石丸辰治他『非線形粘性ダンパーと弾塑性ダンパーを併用した系の応答性能設計手法』,日本建築学会構造系論文集 第 617号,pp.47-54,2007.7
- (2) 秦一平,石丸辰治他『応答制御のための性能設計図表による耐久性評価法に関する研究その1,2』2010年(北陸)日本建築学会大会梗概集 B-2,pp.989-992
- (3) 下田智博,笠井和彦他『非比例減衰系の応答予測制度に関する一考察』2005年(近畿)日本建築学会大会梗概集 B-2,pp.311-312
- (4) 大網浩一『CQC法におけるモード相関係数の簡便な近似式とその適用例』,日本建築学会大会論文集 第515号,pp.83-89,1999.1