バイリニア型復元力特性をもつ免震建物モデルの応答予測図

Response Prediction Diagram of Base-isolated Buildings with Bilinear Restoring Characteristics

R&Dセンター　新井　雄大　YUDAI ARAI
R&Dセンター　川島　学　MANABU KAWASHIMA

超高層建物などの固有周期の長い建物に免震構造を採用する場合，剛体1質点系への置換に基づく標準的な設計法が適用できない。そのため，設計実務においては時刻歴応答解析による試行錯誤が必要となるケースが多く，効率的に免震層の諸元を決定できる方法が望まれている。本報では，超高層免震建物の設計時の課題に対する解決法の一つとして，免震層の諸元と応答の関係を可視化した図である応答予測図を作成する手法を示す。応答予測図を用いることで，設計クライテリアから免震層の諸元を簡易的に選定できることを確認した。
キーワード：基礎免震，モーダルアナリシス，複素固有値，等価線形化，高次モード

When base-isolated structures are used for high-rise buildings with long natural periods, the standard design method based on a rigid one-mass system cannot be applied. Therefore, in design practice, a repeated trial-and-error process of time history analysis is often required, and an efficient method to determine the properties of the isolation layer is desired. As an example of a study to solve this issue, this paper presents a method of visualizing the relationship between the response and parameters of the isolation layer with a response prediction diagram. By using the response prediction diagram, it was confirmed that the isolation layer parameters can be selected based on the design criteria without time history analysis.
Key Words: Base Isolation, Modal Analysis, Complex Eigenvalue, Equivalent Linearization, Higher Mode

1．はじめに

免震構造は，大地震時に人命保護のみならず事業継続性を確保できる技術として広く認知されている。近年では，実用化当初の適用対象であった中低層建物のみならず，超高層建物を筆頭に多様な建物に免震構造が採用される事例が増えている。

免震構造による応答制御の仕組みは，上部構造に比べて極端に剛性の低い免震層を上部構造の下部に配置し，建物の長周期化により主に加速度応答を低減させ，減衰付加により変位応答を抑制するものである。そのため，免震建物の上部構造は，免震層に比べて相対的に剛体とみなせる固有周期の短い建物が元来の対象であった。文献[1]には，上部構造に比べて免震層の固有周期が2.5倍以上の周期比の場合に上部構造を剛体1質点系モデルへと置換できることが示されており，このようなケースでは応答スペクトル法やエネルギー法などの標準的な簡易設計法を適用することが可能である。

しかしながら，超高層建物のような固有周期が長い建物においては，剛体1質点系モデルへと置換することができないため従来の簡易設計法を適用することができず，設計実務においては時刻歴応答解析を繰り返す試行錯誤により免震層の諸元を決定することが少なくない。こうした背景から，超高層免震建物の設計においても，目標応答から免震層の諸元を少ない検討回数で決定できる効率的な設計法が望まれており，これを目指した研究が精力的になされている[例えば2)-4)]。

一方で制振構造の各諸元の選定を容易に行うためのツールの1つとして，「制振性能曲線」が広く知られている[5)]。笠井らにより様々なダンパーを付加した1質点系モデルの制振建物を対象とした「制振性能曲線」が提案され[例えば6),7)]，日本免震構造協会パッシブ制振構造設計・施工マニュアル[5)]にも記載されている。さらにこの考え方は，上部構造の剛性を考慮した免震建物を模擬した1質点系2層モデルにも応用され，免震層の周期と減衰が基礎固定時からの応答低減効果に与える影響が「免

震性能曲線」により明快に示された[8]。これらの性能曲線は，時刻歴応答解析をすることなく応答制御法へ活用できる[5]ことをはじめ，非常に有用なツールといえる。しかしながら，それらの検討の多くは1質点系のモデルを対象にしていることから，免震性能曲線を用いて超高層基礎免震建物の高次モードの影響や刺激関数に依存する有効質量の影響まで考慮することは難しい。

以上の背景を踏まえ本報では，超高層免震建物の設計時の課題に対する解決法の1つとして，超高層免震基礎建物を模擬した多質点系モデルに対して，構造技術者に広く用いられている文献[6),8)]の性能曲線の考え方を参考に，免震層諸元と最大応答の関係（以降，応答予測図）を作成する手法を示す。さらに，特定の建物に対して応答予測図を利用して，設計クライテリアより免震層の諸元を選定した例を提示する。本報でのポイントは，①バイリニア型復元力特性の免震層を対象とすること，②高次モードの影響を反映させること，③上部構造の最大層間変形角応答を可視化すること，の3つであり，応答予測図が免震層諸元の選定に役立つことを確認する。

2．多質点系モデルの応答予測

（1）複素固有値を用いたモーダルアナリシス

本報で検討対象とする建物モデルは上部構造を弾性状態に維持することを想定し，線形な多質点系せん断型モデルに置換した基礎免震建物モデルである（**図-1**）。免震層は線形な水平剛性を有するアイソレータと完全弾塑性の履歴系ダンパー（以降，ダンパー）から構成され，免震層全体はノーマルバイリニア型の復元力特性を有している（**図-2(a)，(b)**）。ダンパーの降伏変位 δ_y を基点としたときの免震層の塑性率 μ により，免震層の等価周期（割線剛性周期）T_{beq} は次式[9)]により得られる。

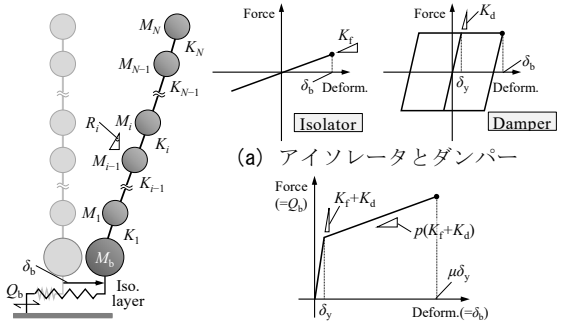
$$T_{beq} = T_f\sqrt{\frac{p\mu}{1-p+p\mu}}, \qquad T_f = 2\pi\sqrt{\frac{\overline{M}}{K_f}} \qquad (1),(2)$$

ここに，p は免震層全体の2次剛性比（$=(K_d+K_f)^{-1}K_f$），$\overline{M}$は建物総質量，K_dはダンパーの1次剛性，K_fはアイソレータの水平剛性である。免震層の等価減衰定数 h_{beq}は，免震層の粘性減衰定数を0として，ランダム振動による振幅のばらつきを考慮した次式[9)]により算出する。

$$h_{beq} = \frac{2}{\mu\pi p}\ln\left(\frac{1-p+p\mu}{\mu^p}\right) \qquad (3)$$

以降でモーダルアナリシスによる応答予測を行う際には，免震層を等価剛性 K_{beq} および等価粘性減衰係数 C_{beq}（それぞれ式(4),(5)）を用いてバイリニアモデルを等価な線形モデルに置換する。

$$K_{beq} = (2\pi/T_{beq})^2\overline{M}, \quad C_{beq} = 2h_{beq}\sqrt{\overline{M}K_{beq}} \qquad (4),(5)$$



(a) アイソレータとダンパー

(b) 免震層全体の骨格曲線

図-1　多質点系モデル

図-2　免震層の復元力特性

なお，T_{beq}，T_f，K_{beq}，C_{beq} はいずれも便宜的に上部構造を剛体と仮定したときの値である。

式(1)-(3)によって免震層を等価線形化した多質点系モデルのモーダルアナリシスによる応答予測の手順を述べる。上部構造の各層の質量，粘性減衰係数および剛性をそれぞれ $M_1,\ldots,M_N$，$C_1,\ldots,C_N$，および $K_1,\ldots,K_N$ で表すと，上部構造と免震層を含めた系全体のシステムを以下のように表現できる。なお，N は上部構造の層数，M_b は免震層真上の質点の質量である。$(\cdot)^T$は転置を表す。

$$\mathbf{M} = \mathrm{diag}(M_b, M_1,\ldots, M_N) \qquad (6)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{T}^T\mathbf{C}'\mathbf{T},\ \mathbf{C}' = \mathrm{diag}(C_{beq}, C_1,\ldots, C_N) \qquad (7),(8)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{T}^T\mathbf{K}'\mathbf{T},\ \mathbf{K}' = \mathrm{diag}(K_{beq}, K_1,\ldots, K_N) \qquad (9),(10)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & & & 0 \\ -1 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & -1 & 1 \end{bmatrix} \text{(座標変換マトリクス)} \qquad (11)$$

本モデルは免震層の減衰を上部構造とは独立して設定するため系全体が非比例減衰系となることから，複素固有値を用いる。複素固有値問題は式(12)のように表される。

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\lambda\{\phi\} \\ \{\phi\}\end{Bmatrix} = \lambda\begin{Bmatrix}\lambda\{\phi\} \\ \{\phi\}\end{Bmatrix} \qquad (12)$$

ここに，$\mathbf{M}$，$\mathbf{C}$，$\mathbf{K}$ は系全体の質量，減衰，剛性マトリクス，$\mathbf{I}$ は単位マトリクス，λ は複素固有値，$\{\phi\}$は複素固有ベクトル（$=\{\phi_0,\phi_1,\ldots,\phi_N\}^T$）である。$j$ 次モードの系全体の固有周期 ${}_jT_{eq}$，減衰定数 ${}_jh_{eq}$ および複素刺激係数 ${}_j\beta$ はそれぞれ式(13)-(15)により得られる。

$${}_jT_{eq} = 2\pi/|{}_j\lambda|, \quad {}_jh_{eq} = -\mathrm{Re}\left[{}_j\lambda/|{}_j\lambda|\right] \qquad (13),(14)$$

$${}_j\beta = \frac{2\mathrm{i}\{{}_j\phi\}^T\mathbf{M}\{\mathbf{1}\}\ \mathrm{Im}[{}_j\lambda]}{2{}_j\lambda\{{}_j\phi\}^T\mathbf{M}\{{}_j\phi\} + \{{}_j\phi\}^T\mathbf{C}\{{}_j\phi\}} \qquad (15)$$

ここにiは虚数単位である。j次モードにおける免震層の変形 ${}_j\delta_b$，ベースシア ${}_jQ_b$，i 層目（$i=1,\ldots,N$）の層間変形角 ${}_jR_i$ の応答値が式(16)-(18)により算出される。

$${}_j\delta_b = {}_j\beta\,{}_j\phi_0\,D_h\,{}_pS_v\,{}_jT_{eq}/2\pi \qquad (16)$$

$${}_jQ_b = {}_jM_{eq}\,D_h\,{}_pS_v 2\pi/{}_jT_{eq} \qquad (17)$$

$${}_jR_i = {}_j\beta({}_j\phi_i - {}_j\phi_{i-1})D_h\,{}_pS_v\,{}_jT_{eq}/2\pi/H_i \qquad (18)$$

ここに D_h は減衰効果係数[9)]，${}_pS_v$ は疑似速度応答スペクトル値，${}_jM_{eq}$ は j 次モード有効質量（$={}_j\beta\{{}_j\phi\}^T\mathbf{M}\,{}_j\beta\{{}_j\phi\}$），$H_i$は階高である。$D_h$は長周期帯に応じた次式[9)]を用いる。

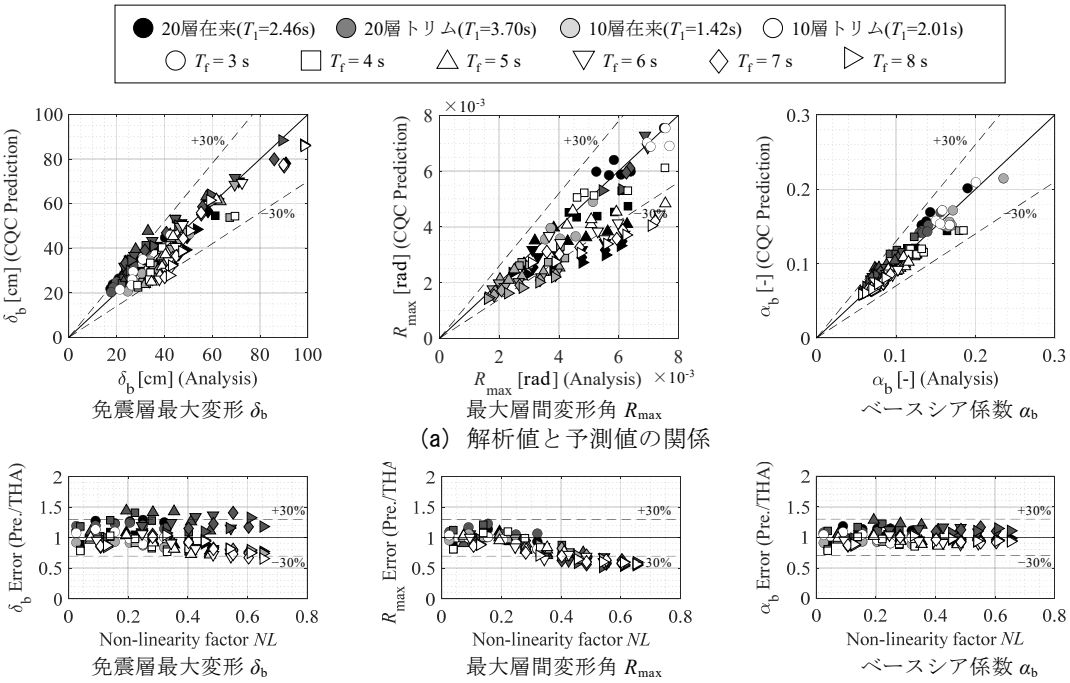


図-3 各検討ケースの応答予測精度（T_f = 3 ~ 8 s, α_s = 0.01 ~ 0.06）

$$D_h = \begin{cases} 5T_{eq}(D_{h0}-1)+1 & (0 < T_{eq} < 0.2) \\ D_{h0} & (0.2 \le T_{eq} < 2.0) \\ D_{h0}\left\{\dfrac{T_{eq}-2}{40}\sqrt{h_{eq}/h_0}+1\right\} & (0.2 \le T_{eq} < 8.0) \end{cases} \quad (19)$$

$$D_{h0} = \sqrt{(1+\alpha h_0)/(1+\alpha h_{eq})} \quad (20)$$

ここに，h_0 は初期減衰定数である。次節に後述する BCJ-L2 では α = 75（模擬波）とする。以上の手順により得られた各モードの応答値を絶対値和（ABS），2 乗和平方（SRSS），完全 2 次結合（CQC）[10]などの方法でモード合成する。次節では，例題建物モデルを用いて予測手法の妥当性を確認する。

（2）時刻歴応答解析による精度検証

精度検証に用いる免震建物の上部構造は，日本免震構造協会（JSSI）により設計された鉄骨造 20 層，10 層のテーマストラクチャ（在来タイプ・トリムタイプ）[5]の計 4 ケースのせん断棒モデルとする。基礎固定時の 1 次固有周期 T_1 の範囲は T_1 = 1.42 s（10 層在来タイプ）~ 3.70 s（20 層トリムタイプ）である。架構情報の詳細は文献 [5]を参照されたい。上部構造の減衰マトリクスは，T_1 に対して減衰定数 2%の剛性比例型とした。免震層におけるアイソレータとダンパーの組み合わせは，上部構造の各モデルに対して免震層接線周期 T_f = 3 ~ 8 s（1 s 刻み），ダンパー降伏層せん断力係数 $\alpha_s = K_d\delta_y/\bar{M}g$ = 0.01 ~ 0.06（0.01 刻み）の範囲とする（g：重力加速度）。なお，δ_y = 2 cm とし免震層の粘性減衰は考慮しない。

入力地震動を日本建築センター模擬波 BCJ-L2 として時刻歴応答解析（THA）を実行し，前節で述べた応答予測による結果（Pre.）との対応関係を確認する。応答予測は BCJ-L2 を T_{eq} > 0.64s，h_0 = 5%において ${}_pS_v$ = 100 cm/s と仮定し，${}_pS_v$を一定とみなせる固有周期帯である 1 次と 2 次モードを CQC により足し合わせる。比較の対象とする応答を δ_b，上部構造の最大層間変形角 R_{max}，およびベースシア係数 α_b とする。それらの結果を**図-3 (a)** に示す。δ_b と α_b は，概ね±30%以内の精度で THA 結果を予測できているが，R_{max} では THA が Pre.を上回っていることが確認できる。この原因は，バイリニア型復元力特性の免震層における剛性急変による高次モードの励起に起因していると考えられる。そこで，免震層全体の非線形性を表す指標として知られる非線形係数 NL（Non-Linearity factor）[11]により予測精度を整理した結果を**図-3 (b)** に示す。なお，NL は式(21)により算出できる。**図-3 (b)** では時刻歴応答解析結果を用いて算出した。

$$NL = \frac{(K_d+K_f)\delta_y}{Q_b} - \frac{\delta_y}{\delta_b} = \frac{(1-p)(\mu-1)}{\mu\{1+p(\mu-1)\}} \quad (21)$$

同図より，NL の増大に伴い R_{max} の予測精度が低下し危険側の予測となる定性的な傾向を捉えられるといえる。本解析条件では，NL が 0.4 程度以上で高次モードの影響により危険側に評価する傾向が確認できたため，当該範囲で応答予測を実施する際には注意が必要である。なお，Q_b および δ_b を本手法により十分な精度で予測できることが確認できたため，Q_b と δ_b の予測値により適切な NL が得られるといえる。

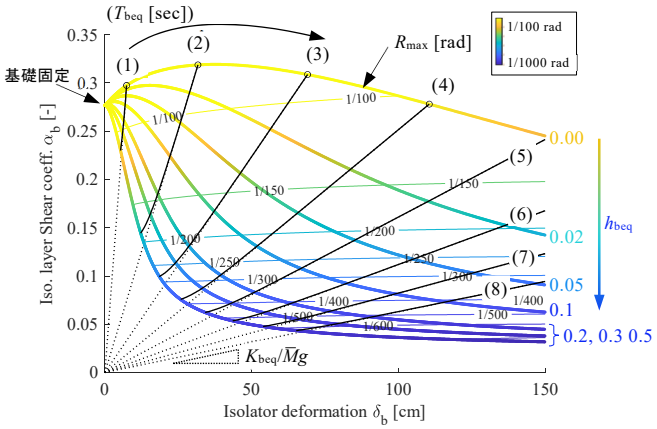


図-4　線形モデルにおける応答予測図

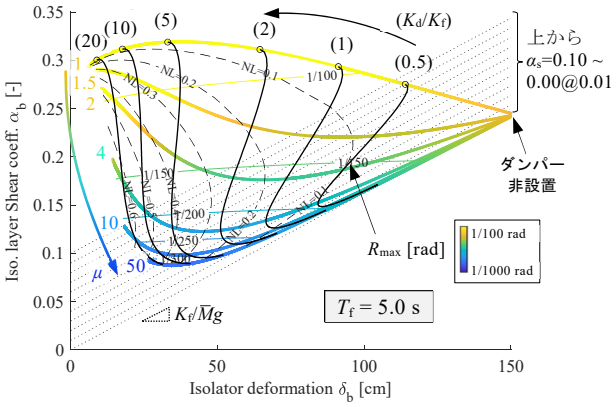


図-5　バイリニアモデルにおける応答予測図

3．多質点系免震建物モデルにおける応答性能図

（1）応答予測図の作成

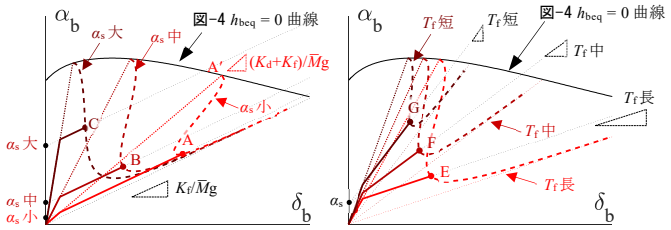
文献 [8]において提案された免震性能曲線は，免震層の周期および減衰と，基礎固定時の上部構造の応答に対する免震建物の応答の比率の一般的な関係を可視化したものである。本報では，絶対値表現した軸を用いることで応答予測を直接的に行える関係にしたものを応答予測図と定義し，免震性能曲線の考え方を利用して，バイリニア型免震層を有する多質点系モデルの応答予測図を作成する。その際に，特定の建物モデルに対して，①バイリニアモデルの免震層への適用，②2 次モードの影響を考慮，③上部構造の最大層間変形角の情報の可視化も含めたうえで応答予測図を作成する。

例題建物として，前述した JSSI テーマストラクチャである 20 層在来モデルを採用する。免震層の割線剛性周期 T_{beq} と等価減衰定数 h_{beq} をパラメータとした線形な免震層に対して，${}_pS_v = 100$ cm/s（$h_0 = 5\%$）の地震動を想定した応答予測により，各パラメータが特定建物の各応答値に与える影響を可視化した応答予測図が**図-4** である。同図で示す応答は 1 ~ 2 次モードを CQC により足し合わせており，最大層間変形角 R_{max} は等高線により表記している。また，黒点線はそれぞれの T_{beq} の免震層割線剛性に応じた直線であり，傾きは $K_{beq}/\bar{M}g$ を意味する。また，縦軸の切片の値は K_{beq} が剛，すなわち基礎固定時の応答を意味しており h_{beq} に依存しない。同図より免震層の変形 δ_b が十分大きい領域では R_{max} の等高線は横軸に対してほぼ平行であるが，δ_b が小さい領域では 2 次モードの影響が無視できなくなるため，R_{max} の等高線がやや左下がりになることが読み取れる。また，h_{beq} を増大させることは δ_b とベースシア係数 α_b の両方を低減させる効果があるが，T_{beq} を増大させると α_b は低減しやすいが δ_b は増大する傾向があることがわかる。なお，h_{beq} = 0 ~ 0.05 程度で T_{beq} = 1 ~ 3 s の短周期の免震層を設定すると，α_b が基礎固定時よりもかえって増大するケースがある。これは全体系の減衰の増大が見込めず加速度応答の低減効果が期待できないことに加えて，1 次モードの有効質量 ${}_1M_{eq}$ が基礎固定時よりも増大することに起因している。この領域の免震層諸元は，実務上は考慮されることは少ないが，応答性状を理解するうえで特徴的な傾向である。

図-4 の応答予測図を，式(1),(3)の関係を利用してバイリニア型復元力特性の免震層（T_f = 5.0s）へ適用したものが**図-5** である。具体的な解析方法は次節にて説明するが，同図は文献 [6]の制振性能曲線の考え方を利用したものであり，多質点モデルにおける R_{max} の等高線および式(21)で算出される NL の等高線（黒破線）を加えている。灰点線の傾きは免震層の接線剛性に対応しており，$K_f/\bar{M}g$ に相当する。α_s は縦軸の切片値になることを考慮すると，灰点線は α_s に応じた免震層全体の折れ点通過後の骨格曲線（2 次剛性）に相当する。$\mu = 1$ の曲線はダンパー弾性時の応答すなわち線形モデルの応答の関係を示しており，**図-4** における $h_{beq} = 0$ の曲線と同じである。

図-5 の応答予測図より，K_d/K_f が大きく，かつ早期に降伏し μ が大きい免震層では，δ_b，α_b および R_{max} のいずれの応答も同時に低減できることがわかる。また，原点を通る傾き $K_f/\bar{M}g$ の直線より下側には応答解が存在していないことも読み取れる。これは，T_f を特定の値に設定すると，α_b の応答解の下限値が δ_b に応じて存在しており，T_f を長く（= 傾き $K_f/\bar{M}g$ を小さく）することで存在しうる解の領域を大きくできることを意味する。

このように，バイリニアモデルの免震層を等価線形化し，多質点系のモーダルアナリシスを行うことで，免震性能曲線の考え方を利用した応答予測図を作成できる。なお，**図-5** の関係は，ダンパー非設置時の応答により軸を基準化して示すことも可能である。また，**図-5** のパラメータである K_d/K_f（= $1/p - 1$）および μ を式(21)に代入して得られる NL の予測値を同図に等高線として表



(a) T_f, δ_y 一定，α_s の変動による影響　　(b) α_s, δ_y 一定，T_f の変動による影響

図-6　応答予測図から得られる応答傾向

示することで，免震層自体の非線形性の程度を把握できる。なお，文献 [12]のような手法を応用することにより NL を用いて上層部の応答増幅率を考慮した手法へと拡張できると考えられ，この点は今後の検討課題である。

（２）応答予測図から得られる応答傾向

図-4 および**図-5** に示した応答予測図は変形とせん断力の関係を可視化した曲線であることから，免震層の骨格曲線をイメージしながら建物応答の情報を図式的に取得することができる。$\mu = 1$ 線上の点（**図-6 (a)** 点 A′）と原点を結ぶ直線（**図-6 (a)** 赤点線）の傾きが，特定の K_d/K_f における免震層全体の弾性剛性に対応しており $(K_d + K_f)/\bar{M}g$ に相当する。特定の α_s における傾き $K_f/\bar{M}g$ の直線（**図-6 (a)** 灰点線）と初期剛性に対応した直線との交点が履歴折れ点に相当し，折れ点通過後は傾き $K_f/\bar{M}g$ の直線上を移動し，特定の K_d/K_f における応答曲線（**図-6 (a)** 赤破線）との交点（**図-6 (a)** 点 A）が最大応答となる [6]。このように，**図-5** の応答予測図を用いることで任意のダンパーに対して図式的に最大応答が得られるため，異なるダンパーによる応答比較にも有用である。

例えば，ダンパー降伏変位 δ_y と免震層の接線周期 T_f を固定しダンパーの降伏層せん断力係数 α_s が応答へ与える影響を定性的に示した関係が**図-6 (a)** である。α_s が小さい場合は点 A が最大応答点となるが，α_s が増大するにつれ K_d（$= \alpha_s \bar{M}g/\delta_y$）が増大し，最大応答点が A→B→C へと変動する。すなわち，α_s の増大により δ_b は減少する傾向があり，α_b は低下して最小となる極値を過ぎた後に増大に転じることが同図から理解できる。同様に**図-6 (b)** は，δ_y と α_s を固定し T_f が応答へ与える影響を示している。T_f が変動する場合，免震層全体の接線剛性に対応する灰点線の傾きが変動する。T_f が長い場合の最大応答点 E が，T_f の短周期化に伴い E→F→G へと変動する。つまり，T_f の短周期化により δ_b は減少し，α_b は増大する傾向があることがわかる。以上のように，**図-5** の応答予測図は免震層の骨格曲線と最大応答との対応関係を同時に把握しながら，応答予測やパラメータの選定に役立つと考えられる。

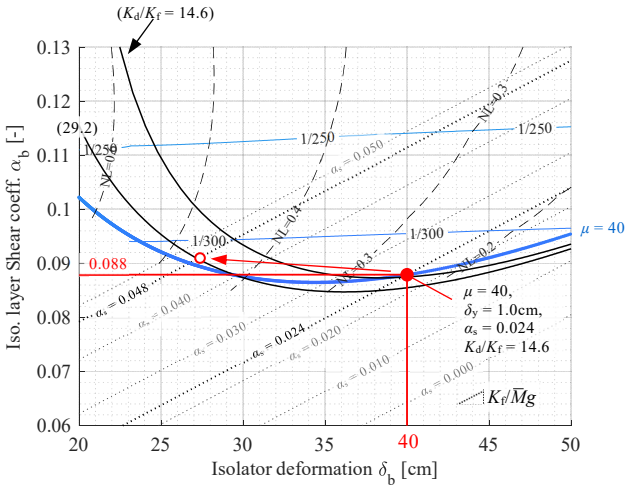


図-7　応答目標値からパラメータの読み取り

（３）応答予測図を用いた免震層パラメータの選定例

応答予測図の活用例として，T_f，α_s，δ_y を免震層パラメータとし，クライテリアを定めたときのパラメータ選定を行った例を示す。前述した 20 層在来モデルを対象とし，BCJ-L2 入力時の設計クライテリアを $\delta_b < 50$ cm，$R_{max} < 1/200$ rad，$\alpha_b < 0.100$ と設定し，免震層のパラメータを選定する。なお，T_f は 5 s と仮定して，ダンパーの降伏せん断力係数 α_s および降伏変位 δ_y を選定する。クライテリアに余裕度を考慮し，$\delta_b = 40$ cm を目標応答値として指定したうえでパラメータを読み取る。

図-5 における設定したクライテリア近傍の拡大図を**図-7** に示す。$\delta_y = 1.0$ cm のダンパーを用いて $\delta_b = 40$ cm に変位応答を指定する場合，μ は $\delta_b/\delta_y = 40$ となり $\mu = 40$ の応答曲線（青線）上の $\delta_b = 40$ cm の値（赤色プロット）が選定したパラメータであり，傾き $K_f/\bar{M}g$ の直線から α_s を読み取ると $\alpha_s = 0.024$ であることがわかる。このとき $\alpha_b = 0.088 < 0.100$，$R_{max} < 1/300$ rad $< 1/200$ rad であり，予測した応答がクライテリア以内となっていることも同時に読み取れる。

仮に α_s を選定した値の 2 倍である 0.048 に変更した場合の応答変動を一例として考える。**図-6 (a)** に示したように δ_y と T_f が一定で α_s が 2 倍になる場合は，K_d/K_f も 2 倍になる。$\alpha_s = 0.024$ のときの K_d/K_f は 14.6 であるため，$K_d/K_f = 29.2$ の応答曲線と $\alpha_s = 0.048$ の灰点線との交点が，α_s が 2 倍に変動したときの応答（白色プロット）である。本モデルの場合は，α_s を 0.024 から 0.048 に増大させることで δ_b は 27 cm 程度に小さくなるが，α_b は 0.092 程度にやや増大する。このように，応答予測図によりパラメータ変更時の応答も簡易的に把握することができる。

図-7 で決定した免震層のパラメータ（$T_f = 5.0$ s，$\alpha_s = 0.024$，$\delta_y = 1.0$ cm）を用いた多質点系モデルに対して時刻歴応答解析を実施し，最大応答とクライテリアおよび応答予測値との関係を確認する。**図-8** には基礎固定時

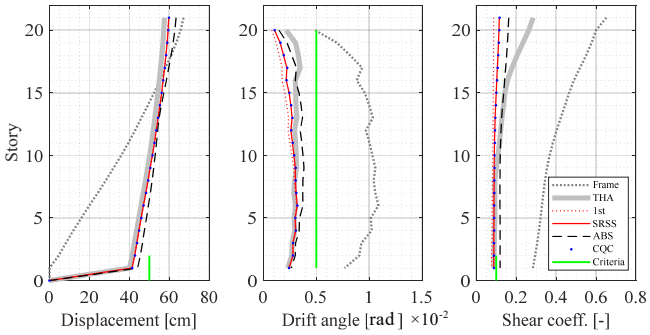


図-8　最大応答値の確認

の応答（Frame），時刻歴応答解析結果（THA），1 次モードのみの予測応答（1st），SRSS，ABS，CQC の方法で 1 ～ 2 次モードのモーダルアナリシスによる予測応答，および設計クライテリア（Criteria）を示す。

図-8 より THA の応答がクライテリアを下回っていることが確認できる。つまり，**図-7** のような手順により，指定した応答に対する免震層のパラメータをただちに選定できるといえる。応答予測の精度に関しては，ABS > THA > SRSS ≈ CQC の結果であったが，いずれの手法でも十分な精度で応答を予測できている。なお，CQC と SRSS の結果が同程度であったのは，1 次と 2 次モードの周期の差が大きく CQC の相関係数がほぼ 0 であったためである。R_{max} と α_b の 17 層目付近で THA が応答予測結果をわずかに超えている部分は，1 次モードの応答より大きかったことから高次モードの影響であるといえる。選定した応答値（**図-7** 赤色プロット）の *NL* は**図-7** の *NL* 等高線より 0.25 程度と読み取れ，**図-3** で確認した傾向（*NL* < 0.4 では非線形成分による高次モードの影響は小さい）とも合致している。この例のように，応答予測図は *NL* を把握しながら応答値を選択することもできる。

以上の検討により，応答性能図を用いることで，設定した設計クライテリアに対し，応答目標値を指定することで免震層のパラメータを，時刻歴応答解析を行わずに簡易的に決定できることが確認できた。

4．まとめ

超高層免震建物は，上部構造を剛体とみなせないため，設計クライテリアを満足する免震層諸元を選定するためには時刻歴応答解析を繰り返し行う試行錯誤が必要とされていた。本報では，より効率的に免震層のパラメータ（免震層接線周期 T_f，ダンパー降伏せん断力係数 α_s，ダンパー降伏変位 δ_y）を選定した検討事例として，応答予測図を利用した方法を検討した。以下に要約する。

1) 文献 [6),8)]に示される性能曲線の考え方を参考に，免震層の等価線形化と多質点系モデルのモーダルアナリシスにより，上部構造の層間変形角の情報や刺激関数に依存する有効質量の影響も含んだ応答予測図の作成手法を示した。
2) 応答予測図の図式的解釈を示し，応答予測図を用いて，設定したクライテリアから免震層のパラメータを選定した検討事例を示した。
3) 時刻歴応答解析の結果と，多質点系免震建物モデルの応答予測の結果を比較し，複素固有値を用いたモーダルアナリシスにより十分な精度で応答を予測できることを確認した。つまり，応答予測図から読み取る応答の妥当性を確認した。
4) 時刻歴応答解析によりバイリニア型の免震層では上層部の応答が増幅することを確認した。これは，本報での応答予測手法では高次モードの影響が十分に考慮されていないことに起因すると考えられた。バイリニアモデルの非線形性に関する指標である非線形係数 NL を応答予測図に等高線図として表示できることを示した。NL が大きい場合の高次モードによる上層部の応答増幅を応答予測図に反映することは，今後の検討課題とする。

参考文献

1) 日本建築学会：免震構造設計指針，2013.10
2) 小林正人, 谷崎豪, 松田紳吾：免震部材の多様化に対応した免震建物の設計用地震荷重分布, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77，No.676， pp.859-868, 2012.6
3) 寺澤友貴, 佐野航, 竹内徹：一般化応答スペクトル解析法に基づく免震構造の設計手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85，No.775，pp.1187-1197, 2020.9
4) 大浦英恵，秦一平，阿久戸信宏，伊藤愛実，山上哲哉， 郭鈞桓：複素固有値を考慮した基礎免震構造物の地震応答予測手法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.89，No.819，pp.513-524, 2024.5
5) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計施工マニュアル第 4 版，2024.6
6) 笠井和彦，伊藤浩資：弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制振構造の応答制御手法，日本建築学会構造系論文集，Vol.70，No.595，pp.45-55，2005.9
7) 笠井和彦, 湊直生, 川鍋佳史：粘弾性ダンパーの等価剛性の調節による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集，Vol.71，No.610，pp.75-83，2006.12

8) 笠井和彦, シムアンパン サラン, 松田和浩：免震建物の上部構造周期を考慮した免震性能曲線の提案, 日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No.720，p.239-249，2016.2
9) 笠井和彦，伊藤浩資，渡辺厚：等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法，日本建築学会構造系論文集，Vol.68，No.571，pp.53-62，2003.9
10) A. D. Kiureghian：A Response Spectrum Methods for Random Vibration Analysis of MDF system, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24， No.2， pp.615-619，1981
11) Skinner R.I., Robinson W. H. and McVerry G.H.: An Introduction to Seismic Isolation, Wiley，1993
12) 西村拓也，田村和夫，猿田正明，森川和彦，飯場正紀：免震建築物の層せん断力係数の評価に関する研究，その 1，その 2，日本建築学会大会（北陸）学術講演梗概集，B-2，pp.231-234，2010.9