T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震建物の変形の予測式を用いた設計例
Title(English)	
著者(和文)	付慧鑫, 佐藤大樹, 北村春幸, 松田頼征, 宮川和明, 植木卓也, 村上行夫
Authors(English)	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Yoriyuki MATSUDA, Kazuaki Miyagawa, Takuya Ueki, Yukio MURAKAMI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 577-580
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 577-580
発行日 / Pub. date	2018, 3

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2017年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2018年3月

免震建物の変形の予測式を用いた設計例

構造ー振動

正会員 ○ 付慧鑫[*1]　同　佐藤大樹[*2]　同　北村春幸[*1]
正会員　松田頼征[*1]　同　宮川和明[*3]　同　植木卓也[*4]
正会員　村上行夫[*4]

免震建物　等価変形　周期比
予測曲線　免震層設計

1. はじめに

1995 年以降，免震建物が増加し，鉄骨造建物や超高層建物にも免震構造が適用されるようになり，基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期が長い免震建物も設計されるようになってきた[1)]。また，インターネット通販市場の拡大と 2011 年東北地方太平洋沖地震の影響で，鉄骨造物流倉庫に免震構造を採用する事例が増えてきた。しかし，物流倉庫は内部空間を広く取りたいため，スパンが長く，階高が高く設計されている。そのような建物に免震構造を採用する場合，上部構造の周期と免震周期の差が少ないため，免震層は想定のように変形しない可能性がある。

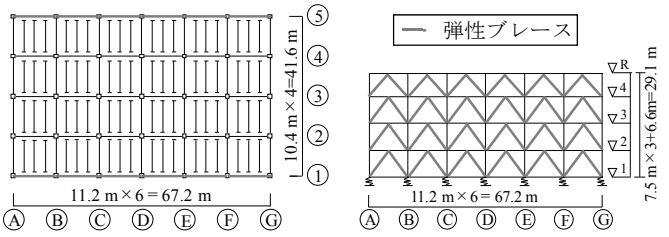
これまでの検討では，基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期が長い免震建物は，上部構造のせん断力係数が大きくなり，上部構造に伝わるエネルギーが増加することを確認した[2)]。これに伴い，上部構造の変形の増大を引き起こすことも考えられる。

本報では，エネルギー法に基づき，上部構造と免震層の等価周期比を用いた，免震建物の変形の予測式を提案する。さらに，本予測式を用い，免震層の変形と上部構造の層間変形角が設計目標に満足できるような履歴ダンパーの降伏せん断力係数の範囲について，設計例を示す。

2. 検討用モデルおよび入力地震動の概要

2.1　検討用モデルの概要

本報では，長辺方向 11.2 m スパン，短辺方向 10.4 m スパン，平面 67.2 m × 41.6 m の整形な形状を持つ 4 階建ての鉄骨造物流倉庫を対象とする。階高は 1 ~ 3 階が 7.5 m，4 階が 6.6 m である。基準階伏図と検討対象とする長辺方向の軸組図を図 1 に示す。1, 5 通りの全面に弾性ブレースを配置する。基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期 T_u は 1.4 s である。免震層は天然ゴム系積層ゴムアイソレータと履歴ダンパーで構成される。

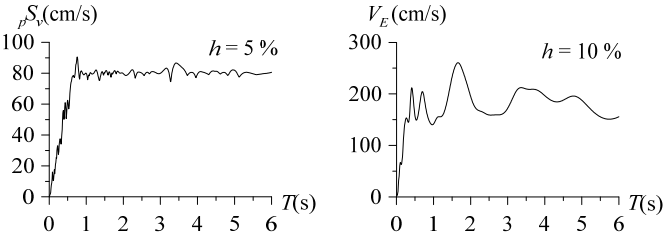


(a) 基準階伏図　　(b) ダンパー配置構面軸組図

図 1　伏図と軸組図

2.2　入力地震動の概要

入力地震動は，HACHINOHE（1968）EW 成分を位相特性に用い，コーナー周期以降で擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ (h = 5 %)が 80 cm/s で一定となる告示波とする（ART HACHI と呼ぶ）。図 2 に，擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ (h = 5 %)とエネルギースペクトル V_E (h = 10 %)を示す。図 2(b)より，V_E の平均値は 180 cm/s となる。また，ART HACHI に対する免震層の等価繰り返し数 n_1 を 6 とする。



(a) 擬似速度スペクトル　　(b) エネルギースペクトル

図 2　解析用入力地震動

3. 等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 の予測式および予測曲線

図 3 には，質点系に基づいた上部構造と免震層の変形の定義を示す。上部構造の等価変形 δ_{ueq} は，式(1)に示しているように，上部構造の 1 階と中間階における変位の差の最大値とする。なお，中間階は上部構造高さの半分に最も近い階と定義する。上部構造の等価変形 δ_{ueq} とダンパーが存在せずアイソレータが無減衰の場合の免震層の最大変形 δ_0 との比を等価変形倍率と呼ぶ。

$$\delta_{ueq} = x_M - x_1 \tag{1}$$

ここで，x_M：上部構造の中間階の変位，x_1：免震建物における上部構造 1 階の変位である。

免震等価剛性 K_{eq} の定義を図 4 に示し，式(2)と表される。

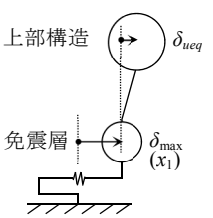


図 3　質点系に基づいた変形

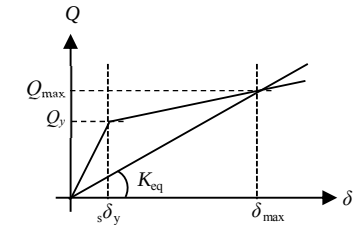


図 4　免震等価剛性

免震等価周期 T_{eq} は免震等価剛性 K_{eq} に基づく周期であり，式(3)で表す。

$$K_{eq} = k_f + \frac{{}_s\delta_y}{\delta_{\max}} k_s \quad (2)\ , \qquad T_{eq} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{eq}}} \quad (3)$$

ここで，k_f：アイソレータ群の剛性，k_s：履歴ダンパー群の初期剛性，${}_s\delta_y$：履歴ダンパーの降伏変形，$\delta_{\max}$：免震層の最大変形，M：上部構造の総質量である。

等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 は式(4)のように変換できる。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_0} = \frac{\delta_{ueq}}{\delta_{\max}} \cdot \frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \quad (4)$$

3.1 $\delta_{\max}/\delta_0$ の予測方法

ダンパーが存在せずアイソレータが無減衰の場合の免震層の最大変形 δ_0 は式(5)，ダンパーが存在しない場合の免震層の層せん断力係数 α_0 は式(6)で表される。

$$\delta_0 = \frac{T_f \cdot V_E}{2\pi} \quad (5)\ , \qquad \alpha_0 = \frac{2\pi \cdot V_E}{T_f \cdot g} \quad (6)$$

ここで，T_f：アイソレータのみの周期，V_E：入力エネルギーの速度換算値である。

$\delta_{\max}/\delta_0$ と免震層履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0 の関係について，次式が提案されている [3),4)]。

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_0} = \frac{\alpha_f}{\alpha_0} = -4n_1\frac{\alpha_s}{\alpha_0} + \sqrt{\left(4n_1\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right)^2 + 1} \quad (7)$$

ここで，α_f はアイソレータのせん断力係数である。

式(7)は入力エネルギーが全て免震層で吸収されると仮定しているため，免震層変形 $\delta_{\max}$ を安全側で評価できる。なお，本検討における履歴ダンパーのエネルギー吸収率は全て 80 %以上である。

3.2 $\delta_{ueq}/\delta_{\max}$ の予測方法および検証

$\delta_{ueq}/\delta_{\max}$ は免震層の最大変形に対する上部構造の等価変形の比であり，上部構造の増幅を表す。上部構造の等価変形 δ_{ueq} は式(8)で表される。免震層の最大変形 $\delta_{\max}$ は式(9)に示すように，免震等価剛性 K_{eq} を用いて表される。

$$\delta_{ueq} = \frac{Q_{u1}}{K_{ueq}} \quad (8)\ , \qquad \delta_{\max} = \frac{Q_{\max}}{K_{eq}} \quad (9)$$

ここで，Q_{u1}：上部構造の 1 層目に伝わる最大せん断力，$Q_{\max}$：免震層の最大層せん断力，K_{ueq}：基礎固定時での上部構造の等価剛性である。

また，基礎固定時での上部構造の等価剛性 K_{ueq} は，式(10)より求める。それと同様に，免震等価剛性 K_{eq} は式(11)に示すように，免震等価周期 T_{eq} を用いて表される。

$$K_{ueq} = \frac{4\pi^2 M_u}{T_u^{\,2}} \quad (10)\ , \qquad K_{eq} = \frac{4\pi^2 M}{T_{eq}^{\,2}} \quad (11)$$

ここで，M_u は 1 層より上層の総質量である。

上部構造 1 層目の最大せん断力係数と免震層の最大せん断力係数が等しいと考え，上部構造の 1 層目に伝わる最大せん断力 Q_{u1} は式(12)と表せる。

$$Q_{u1} = \frac{M_u}{M} \cdot Q_{\max} \quad (12)$$

式(8)，式(9)と式(12)より，$\delta_{ueq}/\delta_{\max}$ は次式で表される。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_{\max}} = \frac{M_u}{M} \cdot \frac{K_{eq}}{K_{ueq}} \quad (13)$$

式(10)と式(11)を式(13)に代入すると，$\delta_{ueq}/\delta_{\max}$ は次式に示しているように，T_{eq}/T_u の 2 乗に反比例することが分かる。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_{\max}} = \left(\frac{T_u}{T_{eq}}\right)^2 \quad (14)$$

以降，免震等価周期 T_{eq} と基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期 T_u との比を等価周期比と呼ぶ。免震構造設計指針より，上部構造の応答増幅は上部構造と免震層の剛性比に依存することが示されている [5)]。式(14)はそれと同義である。

3.3 予測式における予測曲線

式(7)と式(14)を式(4)に代入すると，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 の予測式は式(15)で表される。なお，本予測式は天然ゴム系積層ゴムアイソレータと履歴ダンパーで構成される免震層を持つ免震建物に適用できる。また，検討に用いたアイソレータのみの周期 T_f の範囲は 4 s ~ 6 s，履歴ダンパーの降伏せん断力係数 α_s の範囲は 0.01 ~ 0.05 である。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_0} = \left(\frac{T_u}{T_{eq}}\right)^2 \cdot \left(-4n_1\frac{\alpha_s}{\alpha_0} + \sqrt{\left(4n_1\frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right)^2 + 1}\right) \quad (15)$$

等価周期比 T_{eq}/T_u が 1.0 の場合，式(15)は式(7)と一致する。つまり，$\delta_{ueq}/\delta_0 = \delta_{\max}/\delta_0$ であるため，上部構造の等価

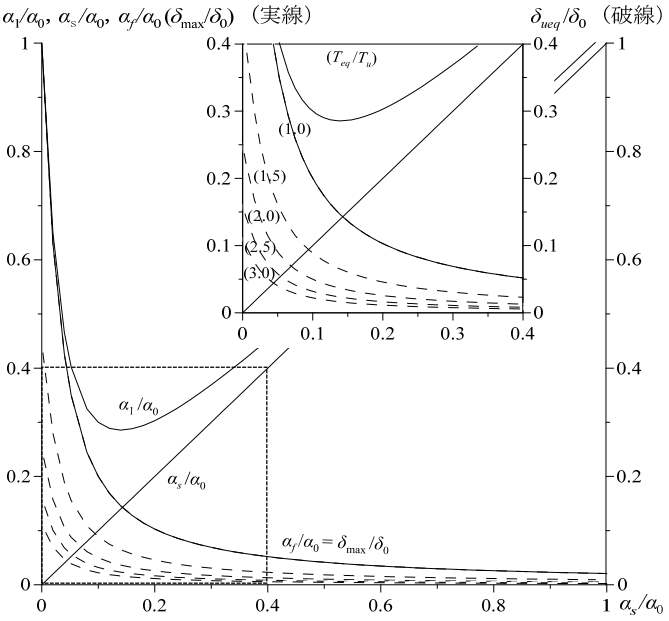


図 5　予測曲線（$n_1 = 6$）

変形 δ_{ueq} は免震層の最大変形 δ_{max} と等しくなる。

式(15)に基づき，履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0 を横軸，等価周期比 T_{eq}/T_u を変数とした予測曲線を図 5 に示す。なお，免震層における等価繰り返し数 n_1 は 2.2 節で述べたように 6 とする。同図の実線は履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0 とアイソレータの耐力 α_f/α_0 の関係（左の縦軸），破線はそれぞれの等価周期比 T_{eq}/T_u における，履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0 と等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 の関係（右の縦軸）を表している。

図 5 の実線に着目すると，式(7)に示したように，上部構造を剛体とした場合のアイソレータの耐力 α_f/α_0 は免震層無減衰時の変形に対する免震層最大変形の比 δ_{max}/δ_0 と等しい。その関係線によって，履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0 の変化に従う免震層最大変形 δ_{max}/δ_0 の変化を把握し，免震層変形が設計クライテリアを満足するかが判断できる。

図 5 の破線に着目すると，履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0（横軸）の増大に従い，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 が小さくなることが確認できる。また，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 は，等価周期比 T_{eq}/T_u の増大に従って小さくなることが確認できる。

4. 予測曲線を用いた設計例

上部構造の変形を考慮した免震層の設計フローを図 6 に示す。入力地震動，免震層変形のクライテリア，および上部構造の層間変形角を条件とし，等価変形倍率の予測曲線を用い，履歴ダンパーの降伏せん断力係数の範囲を決める手法である。

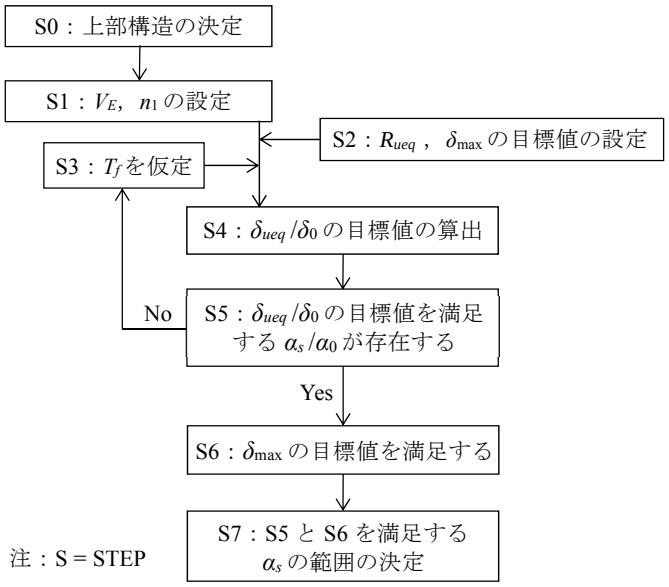


図 6　設計フロー

STEP 0：上部構造を決定する

2.1 節で述べた上部構造形状を本設計例のモデルとして用いる。基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期 T_u は 1.4s である。免震層直上の階を除いた上部構造の質量 M_u = 14,354 ton，建物の総質量 M = 20,303 ton である。1 階から中間階までの高さ H_{ueq} = 1500 cm である。

STEP 1：入力地震動を設定する

2.2 節で述べたように，入力地震動は ART HACHI，予測式に使用される n_1 は 6 と設定する。図 2(b)のエネルギースペクトルより，V_E は 180 cm/s とする。

STEP 2：設計目標を設定する

レベル 2 地震動である ART HACHI に対する免震建物の設計クライテリアを，免震層変形 $\delta_{max} \le 30$ cm，上部構造の層間変形角 $R_{ueq} = (\delta_{ueq}/H_{ueq}) \le 1/300$ とする。

STEP 3：アイソレータのみの周期を仮定する

免震層アイソレータのみの周期 T_f を 4 s と仮定する。ダンパーが存在せずアイソレータが無減衰の場合の免震層の最大変形 δ_0 は 115 cm となる（式(16)）。アイソレータ群の剛性 k_f は式(17)より求められる。

$$\delta_0 = \frac{V_E \cdot T_f}{2\pi} = \frac{180 \times 4}{2\pi} = 115 \ \ \text{cm} \tag{16}$$

$$k_f = \frac{4\pi^2 M}{T_f^{\,2}} = \frac{4\pi^2 \times 20303}{4^2} = 50096 \ \ \text{kN/m} \tag{17}$$

STEP 4：等価変形倍率の目標値を算出する

上部構造における層間変形角の設計目標 R_{ueq}，上部構造の等価高さ H_{ueq} および免震層無減衰時の最大変形 δ_0 より，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 の設計目標は式(18)で求められる。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_0} = \frac{R_{ueq} \cdot H_{ueq}}{\delta_0} = \frac{1/300 \times 1500}{115} = 0.044 \tag{18}$$

STEP 5：等価変形倍率を目標値に満足させる

式(2)～式(3)より，免震等価周期は式(19)と表される。

$$T_{eq} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{eq}}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{M}{k_f + \frac{{}_s\delta_y}{\delta_{max}} \cdot k_s}} \tag{19}$$

履歴ダンパーは完全弾塑性型の復元力特性を持つ部材を使用する。また，降伏変形 ${}_s\delta_y$ が 3 cm となるものを採用する。ダンパー群の水平剛性 k_s は式(20)と表される。

$$k_s = \frac{Mg}{{}_s\delta_y} \cdot \alpha_s \tag{20}$$

式(7)，式(19)，式(20) を式(15)に代入することより，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 は式(21)のように表せる。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_0} = T_u^{\,2} \cdot \frac{1}{4\pi^2 M} \cdot \left\{ \left(-4n_1 \frac{\alpha_s}{\alpha_0} + \sqrt{\left(4n_1 \frac{\alpha_s}{\alpha_0}\right)^2 + 1} \right) k_f + \frac{\alpha_0 Mg}{\delta_0} \cdot \frac{\alpha_s}{\alpha_0} \right\} \tag{21}$$

図 7 では，赤線で式(21)の等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 と α_s/α_0 の関係を示す。同図より，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 が目標値に満たすための α_s/α_0 の範囲は，式(22)であることが分かる。

$$\alpha_s/\alpha_0 \in [0.065 \ , \ 0.285] \tag{22}$$

なお，目標値を満足する α_s/α_0 が存在しない場合は，STEP3 に戻り，アイソレータのみの周期 T_f を再仮定する。

STEP 6：免震層変形に満足させる

n_1 が 6 のとき，履歴ダンパーの降伏耐力（α_s/α_0）とアイソレータの耐力（α_f/α_0）の関係は図 7 の実線で示される。3.3 節で述べているように，この線は上部構造を剛体とした場合の免震層無減衰時の変形に対する免震層最大変形の比 δ_{max}/δ_0 も表す。履歴ダンパーの降伏せん断力係数が小さくなるに従い，免震層変形が大きくなり，免震クライテリアを満足できない可能性がある。免震層変形のクライテリアは 30 cm であるため，式(7)と式(16)より，アイソレータの耐力 α_f/α_0 の最大値は 0.262 となる。

$$\frac{\alpha_f}{\alpha_0}=\frac{\delta_{max}}{\delta_0}=\frac{30}{115}=0.262 \tag{23}$$

履歴ダンパーの降伏耐力 α_s/α_0 とアイソレータの耐力 α_f/α_0 の関係より（式(6)，図 7），α_s/α_0 の下限値は 0.074 であることが分かる。式(22)に踏まえ，等価変形倍率と免震層変形の目標値に満たすための α_s/α_0 の範囲は，式(24)であることが分かる。

$$\alpha_s/\alpha_0 \in [0.074\ ,\ 0.285] \tag{24}$$

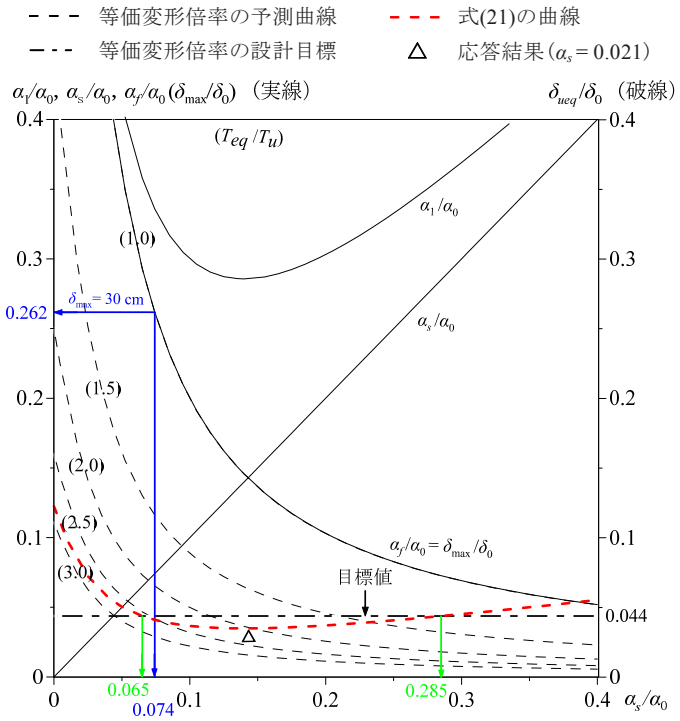


図 7　予測曲線および予測結果（$n_1=6$，$T_f=4$ s）

STEP 7：履歴ダンパーの降伏せん断力係数を算出する

ダンパーが存在しない場合の免震層の層せん断力係数 α_0 は式(25)から求められる。

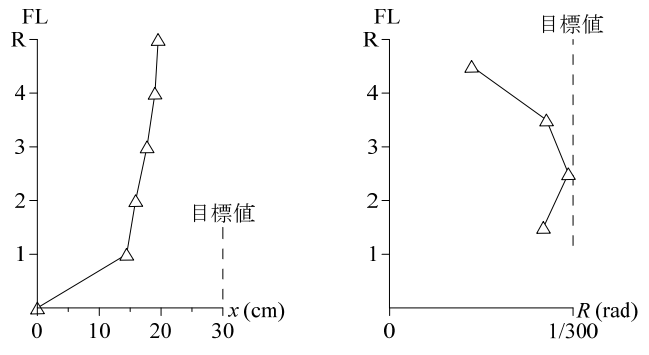
$$\alpha_0=\frac{2\pi V_E}{T_f\cdot g}=\frac{2\pi\times180}{4\times980}=0.29 \tag{25}$$

式(24) ~ 式(25)と 3.3 節で述べた等価変形倍率の予測式の検討範囲より，設計クライテリアに満たすための履歴ダンパーの降伏せん断力係数 α_s の範囲は式(26)となる。

$$\alpha_s \in [0.021\ ,\ 0.050] \tag{26}$$

STEP 8：時刻歴応答解析によって確認する

基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期 $T_u=1.4$ s，免震層アイソレータのみの周期 $T_f=4$ s，履歴ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s=0.021$ のモデルを用い（α_1/α_0 が極小値にあたるモデル），$V_E=180$ cm/s，$n_1=6$ の ART HACHI を入力地震動とし，時刻歴応答解析を行った結果を図 7 に△で示す。同図より，等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 の時刻歴応答解析結果は設計目標を満たすことが分かる。また，相対変形と層間変形角の高さ方向分布を図 8(a)，(b)に示す。図 8 より，免震層の最大変形は設計目標値の 30 cm 以下，上部構造の各階の最大層間変形角は 1/300 以下であることが分かる。



(a) 相対変形 x　　(b) 層間変形角 R

図 8　高さ方向分布

5. まとめ

本報では，天然ゴム系積層ゴムアイソレータと履歴ダンパーで構成される免震層を持つ免震建物を対象とし，免震等価周期と基礎固定時での上部構造の 1 次固有周期との比に着目し，上部構造の等価変形に与える影響について予測式を提案した。また，本予測式に基づく予測曲線を用いることで，免震建物の免震層最大変形と上部構造の最大層間変形角は，設計目標に満足できるような履歴ダンパーの降伏せん断力係数の範囲について，設計例を示した。

なお，免震層の最大変形を安全側に評価するために，地震動の入力エネルギーを全て履歴ダンパーに吸収させる（上部構造が剛体）と仮定し，エネルギーの釣合い式（式(7) ）を用いている。免震層履歴ダンパーのエネルギー吸収率が小さい場合，本手法では精度が低下する可能性がある。本解析における免震層履歴ダンパーのエネルギー吸収率は 84 %である。

参考文献

1) 田中佑治，福和伸夫，飛田潤，護雅史：国内免震建物のデータベース構築と現状分析，日本建築学会技術報告集，第 17 巻，第 35 号，pp.79-84，2011.2

2) 付慧鑫，宮川和明，佐藤大樹，佐藤利昭，北村春幸，植木卓也，村上行夫：屋上階の質量・剛性が小さい免震鉄骨造物流倉庫を用いた各種設計用層せん断力係数分布の考察，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 53 号，pp.59-64，2017.2

3) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，1999.10

4) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門，第二版，2009.4

5) 日本建築学会：免震構造設計指針，第 2 版，pp.99-110，1993.12

*1　東京理科大学　　*2　東京工業大学

*3　JFE シビル株式会社　　*4　JFE スチール株式会社