

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	CONSIDERATIONS ON THE CURRENT STORY SHEAR COEFFICIENT DISTRIBUTIONS USING BASE-ISOLATED STEEL WAREHOUSES WITH AN INHOMOGENEOUS MASS AND STIFFNESS
著者(和文)	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
Authors(English)	Kazuaki Miyagawa, Daiki Sato, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura, Takuya Ueki, Yukio MURAKAMI
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 22, No. 53, pp. 59-64
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 22, No. 53, pp. 59-64
発行日 / Pub. date	2017, 2
権利情報	日本建築学会
Relation	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/23/53/23_59/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/23/53/23_59/_article/-char/ja/</a>
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

# 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

## CONSIDERATIONS ON THE CURRENT STORY SHEAR COEFFICIENT DISTRIBUTIONS USING BASE-ISOLATED STEEL WAREHOUSES WITH AN INHOMOGENEOUS MASS AND STIFFNESS

付 慧鑫 —— \* 1 宮川和明 —— \* 2  
佐藤大樹 —— \* 3 佐藤利昭 —— \* 4  
北村春幸 —— \* 5 植木卓也 —— \* 6  
村上行夫 —— \* 6

Huixin FU —— \* 1 Kazuaki MIYAGAWA —— \* 2  
Daiki SATO —— \* 3 Toshiaki SATO —— \* 4  
Haruyuki KITAMURA —— \* 5 Takuya UEKI —— \* 6  
Yukio MURAKAMI —— \* 6

キーワード：

層せん断力係数分布, 免震建物, 鉄骨造, 物流倉庫, 履歴ダンパー

Keywords:

Distributions of story shear coefficient, Base-isolated buildings, Steel structure, Warehouses, Hysteretic dampers

With the development of internet marketing, logistics bases have been increasing recently. Under the influence of the 2011 Tohoku Earthquake, base-isolated steel warehouses are on the increase. As the roofs of most warehouses are made of steel plates and with small loads, the rooftops of most warehouses are light. However, the current story shear coefficient distributions of base-isolated buildings are based on the buildings with a homogeneous mass and stiffness. So, this report shows a verification on the story shear coefficient distributions of base-isolated steel warehouses with an inhomogeneous mass and stiffness.

### 1. はじめに

免震構造の設計用層せん断力係数分布については、日本建築学会・免震構造設計指針<sup>1)</sup>(指針)と2000年の基準法改正に伴い規定された免震建築物に関する技術的基準<sup>2)</sup>(告示2009号)が用いられている。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、これまで指針で想定してきた上部構造の固有周期や剛性分布を逸脱するような免震建物も設計されるようになってきた。そのため、上述の方法で設計用層せん断力係数分布を設定することが適切でない場合も増えており、より広い範囲の免震建物に適用できるように、設計用層せん断力係数分布を見直す研究が行われ、種々の提案がなされている<sup>3)~6)</sup>。そこで、近年、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、免震構造を採用する事例が増えている鉄骨造物流倉庫を対象に設計用層せん断力係数分布について検討する。鉄骨造物流倉庫は、屋上階を設けず屋根に鋼板を用いる場合が主であり、屋上階の質量と剛性が一般倉庫階に比べて極端に小さくなる。このように、一般の建物に比べて免震鉄骨造物流倉庫は特殊ではあるが、実例の多い建物であり、かつ、物流倉庫は告示2009号で設計される事例もある。そのため、その建物に対して設計用層せん断力係数分布を検討することは重要である。

本報では鉄骨造物流倉庫に代表される屋上階の質量と剛性が極端に小さい免震建物を対象とし、時刻歴応答解析によりその応答性状を把握する。さらに、これまで提案された設計用層せん断力係数分布

の設定方法を適用して、応答値との比較により、それぞれの提案方法の特徴と鉄骨造物流倉庫に対する適用性を評価する。

### 2. 解析条件および上部構造の応答性状

#### 2.1 解析モデルの概要

本報では、長辺方向11.2mスパン、短辺方向10.4mスパン、平面67.2m×41.6m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7.5m、4階が6.6m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。床の固定荷重と地震用積載荷重の合計は、倉庫階である1階から4階は10750kN/m<sup>2</sup>、金属折板屋根の屋上階は550kN/m<sup>2</sup>を見込んでいる。柱部材は、1~3階がBCP325材□-500×500×16~22、4階がSS400材H-250×250×9×14を採用し、長辺方向に強軸を向けている。梁部材は、2~4階が長辺方向にSN490B材H-900×300~350×16×28~32、短辺方向にSN490B材H-600×200~250×12×22~25、R階が長辺方向にSS400材H-346×174×6×9、H-396×199×7×11、短辺方向にSS400材H-400×200×8×13を採用している。免震層は天然ゴム系積層ゴムと履歴ダンパーで構成する。図2に、免震層の配置図を示す。積層ゴムは外柱下にφ800mm、中柱下にφ1000mmをそれぞれ、20基、15基、ダンパーは16基配置する。このモデルをIHM(Inhomogeneous Mass)モデルと呼び、屋上階の質量・剛性を小さくしたことの影響を評価するため、屋上階の柱・梁部材と屋根重量を倉庫階の3階と同様にしたモデル<sup>7)</sup>を作成し、HM(Homogeneous Mass)モデルと呼ぶ。

<sup>1)</sup> 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

<sup>2)</sup> JFEシビル(株) 博士(工学)

<sup>3)</sup> 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

<sup>4)</sup> 九州大学大学院人間環境学研究院 准教授・博士(工学)

<sup>5)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

<sup>6)</sup> JFEスチール(株)

<sup>1)</sup> Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

<sup>2)</sup> JFE Civil Engineering & Construction Corp., Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Inst. of Technology, Dr. Eng.

<sup>4)</sup> Assoc. Prof., Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu Univ., Dr. Eng.

<sup>5)</sup> Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

<sup>6)</sup> JFE Steel Corp.

質量分布と剛性分布を図3に示す。IHMモデルの屋上階の質量はおおよそ4階の1/10である。上部構造において、最初に全塑性モーメントに達する部材は、IHMモデルで屋上階梁、HMモデルで2階梁である。その時のベースシア係数 $C_b$ はIHMモデルで0.11、HMモデルで0.14である。上部構造のみの1次固有周期 $T_0$ はIHMモデルで1.72s、HMモデルで2.17sである。解析にあたっては、アイソレータは弾性、ダンパーは完全弾塑性型の復元力特性とする。減衰定数は上部構造のみの1次固有周期 $T_0$ に対して $h=2\%$ となる初期剛性比例型の減衰を上部構造のみに与える。

本報では、各モデルにおいて、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期 $T_f$ を3, 4, 5, 6s、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ を0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05と変動させ、解析時のパラメータとする。

## 2.2 入力地震動の概要

入力地震動は、HACHINOHE(1968)EW成分とJMA KOBE(1995)NS成分を位相特性に用い、平成12年建設省告示第1461号により規定されたスペクトル特性を有する告示波の入力レベルを0.5倍、1.0倍した地震動とする。それぞれ、ART HACHI-0.5, ART HACHI-1.0, ART KOBE-0.5, ART KOBE-1.0と呼ぶ。図4に、加速度応答スペクトル $S_a(h=5\%)$ を示す。

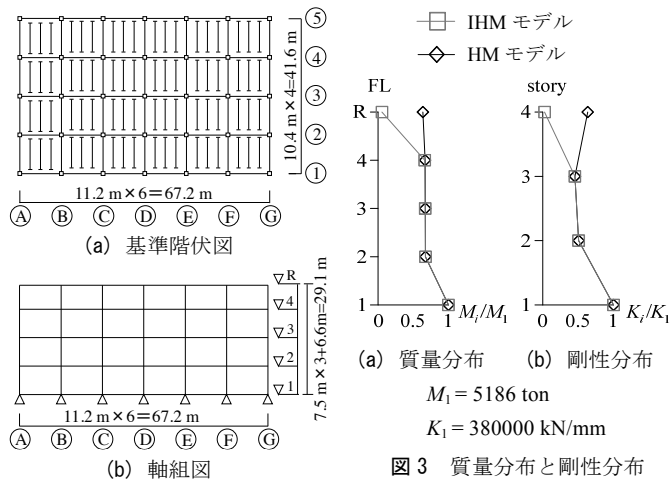


図1 伏図と軸組図

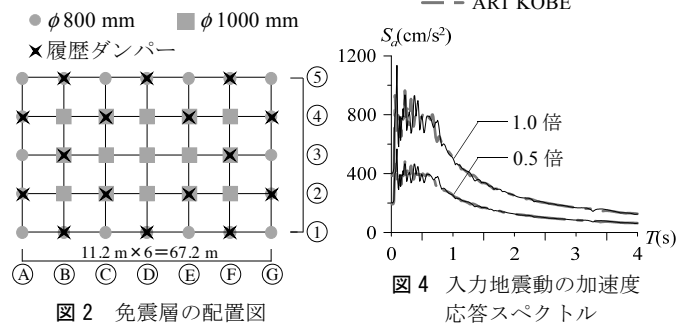


図2 免震層の配置図

図3 質量分布と剛性分布

— ART HACHI  
- - ART KOBE

図4 入力地震動の加速度応答スペクトル

## 2.3 時刻歴応答解析結果

図5に、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ を0.02、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期 $T_f$ をパラメータとした場合、図6に、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期 $T_f$ を4s、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ をパラメータとした場合の層せん断力係数 $\alpha_i$ 、絶対加速度 $A$ の最大応答の高さ方向分布と履歴ダンパー弾性時における刺

激係数 $\beta_i$ をモデル毎にそれぞれ示す。解析入力地震動はART HACHI-1.0とする。

図5(a)~(c)より、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期 $T_f$ が4s以上で層せん断力係数 $\alpha_i$ と絶対加速度 $A$ は小さくなる事が確認できる。また、 $T_f$ の変化による、層せん断力係数 $\alpha_i$ 、絶対加速度 $A$ と刺激係数 $\beta_i$ の変化は小さいことが分かる。一方、図6(a)~(c)より、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きくなるに従い、層せん断力係数 $\alpha_i$ 、絶対加速度 $A$ と刺激係数 $\beta_i$ は大きくなる事が確認できる。また、 $\alpha_s$ の変化による、層せん断力係数 $\alpha_i$ 、絶対加速度 $A$ と刺激係数 $\beta_i$ の変化は $T_f$ を変える場合に比べて大きい。

図5(a)と図6(a)より、層せん断力係数 $\alpha_i$ は両モデルとも高さ方向により増幅するが、屋上階の質量・剛性が小さいIHMモデルは各階の質量・剛性がほぼ一様であるHMモデルより、4層の層せん断力係数の増大が明らかに大きい事が確認できる。

図5(b)より、IHMモデルは、R階の絶対加速度 $A$ が他の階と比べて明らかに大きいことに対して、HMモデルは、絶対加速度 $A$ の高さ方向の差が小さいことが分かる。この要因には、免震構造の高次

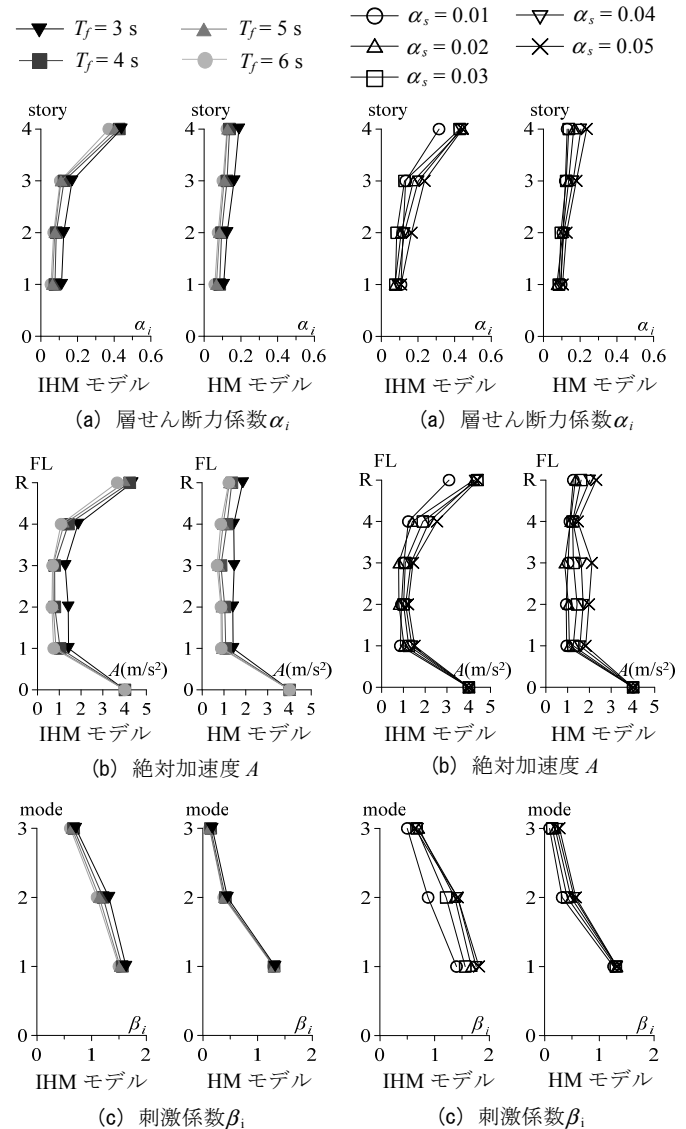


図5  $T_f$ をパラメータとした場合

図6  $\alpha_s$ をパラメータとした場合 ( $T_f=4s$ , ART HACHI-1.0)

振動モード<sup>8)</sup>の影響が大きくなったことが挙げられる。図6(c)より、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きいほど、高次の刺激係数 $\beta_i$ の値が大きくなり、屋上階の質量・剛性が小さいIHMモデルでは、その傾向が強くなることが分かる。

### 3. 既往の層せん断力係数算出方法

前章の検討から、屋上階の質量・剛性が小さいことで、高次モードの影響が大きくなり、上部構造の応答性状が変化することが分かった。本章では5種類の層せん断力係数算出方法<sup>1)~6)</sup>について説明し、次章では屋上階の質量・剛性が小さい中低層鉄骨造建物に対する適用性を検証する。既往の方法は、指針に基づく方法と告示に基づく方法に大別できる。図7(a), (b)に、各方法における層せん断力係数の算出方法を示す。

#### 3.1 指針法<sup>1)</sup>

免震構造設計指針では、ダンパー群に対する上部構造の第1層の水平剛性比 $b_s$ による免震構造の高次振動モードの影響を考慮し、各層の層せん断力係数 $\alpha_i$ を次式で表している。

$$\alpha_i = \alpha_f + a_i \cdot \bar{\alpha}_i \cdot \alpha_s \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_f$ : 弾性支承材のせん断力係数、 $\alpha_s$ : ダンパーの負担せん断力係数、 $\bar{\alpha}_i$ : 最適降伏せん断力分布(基準法における $A_i$ 分布)、 $a_i$ : ダンパーによるせん断力係数の増幅係数である。 $a_i$ は(2)式の $b_s$ に基づいて、(3)式で求めた $\bar{a}$ から(4)式で算出される。ここで、 $k_0$ : 通常の建物の第1層の水平剛性、 $k_s$ : ダンパー群の水平剛性、 $N$ : 上部構造の層数である。この方法を以降、指針法と呼ぶ。

$$b_s = \frac{k_0}{k_s} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{a} = 3.1238 - 0.1238b_s & 1 \leq b_s < 10 \\ \bar{a} = 2.0127 - 0.0127b_s & 10 \leq b_s < 80 \\ \bar{a} = 1 & 80 \leq b_s \end{cases} \quad (3)$$

$$a_i = \left( \frac{\bar{a} - 1}{N - 1} \right) i + \frac{N - \bar{a}}{N - 1} \quad (4)$$

#### 3.2 補正法<sup>3)</sup>

小林らは、上部構造のみの1次固有周期 $T_0$ が長くなるほど、 $\alpha_s$ の増加による層せん断力係数の高さ方向への増幅が大きくなる傾向を考慮するために、免震構造設計指針で記載されているダンパーによる層せん断力係数の増幅係数 $a_i$ の代わりに、応答増幅 $\beta_i$ を用いて、各層の層せん断力係数 $\alpha_i$ を次式で評価する方法を提案している。

$$\alpha_i = \alpha_f + \beta_i \cdot A_i \cdot \alpha_s \quad (5)$$

応答増幅 $\beta_i$ は免震構造設計指針と同様に直線分布が採用され、(6)式で表される。

$$\beta_i = \left( \frac{\bar{\beta} - 1}{N - 1} \right) i + \frac{N - \bar{\beta}}{N - 1} \quad (6)$$

$\bar{\beta}$ は免震係数 $I$ と等価減衰 $h_{eq}$ を用いて、(7)式~(10)式で計算される。なお、 $h_{eq}$ はパーセント表示の値である。

$$\bar{\beta} = \frac{s}{I^2} + t \quad (\bar{\beta} > u \text{ の場合では } \bar{\beta} = u \text{ とする}) \quad (7)$$

$$s = 0.26h_{eq} + 0.29 \quad (s > 5.0 \text{ の場合では } s = 5.0 \text{ とする}) \quad (8)$$

$$t = 0.60 \quad (9)$$

$$u = 0.09h_{eq} + 1.28 \quad (u > 3.0 \text{ の場合では } u = 3.0 \text{ とする}) \quad (10)$$

ここで、免震係数 $I$ は(11)式で定義されるように、上部構造剛体時の

免震層の初期剛性に対する周期 $T_1$ と上部構造のみの1次固有周期 $T_0$ の比である。

$$I = \frac{T_1}{T_0} \quad (11)$$

文献3)の建物モデルは10質点系せん断モデルとし、免震層を除く上部構造(9質点)は弾性としている。質量は各層1000ton、剛性分布は最下層に対して最上層が0.5となる台形分布としている。免震層は弾性のアイソレータと完全弾塑性型の履歴ダンパーで構成し、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期 $T_f$ を4.0sとしてある。解析パラメータはダンパーの負担せん断力係数 $\alpha_s$ を0.01~0.10、ダンパーの降伏変位 $\delta_y$ を0.1cm, 1.0cm, 3.0cm、上部構造のみの1次固有周期 $T_0$ を0.2s~1.6sの範囲で変動させている。時刻歴応答解析時は、 $T_0$ に対して、減衰定数 $h = 2\%$ となる初期剛性比例型の減衰を上部構造のみに与えている。入力地震動は、3パターンの乱数位相とELCENTRO(1940)NS成分、HACHINOHE(1968)EW成分およびJMAKOBE(1995)NS成分を位相特性に用い、第I種地盤、第II種地盤および地盤増幅係数 $G_s = 1.23$ とした告示適合波を使用している。本報では、ばらつき補正係数なしとする場合で検証する。この方法を以降、補正法と呼ぶ。

#### 3.3 告示法<sup>2)</sup>

免震建築物に関する技術的基準(告示2009号)では、ダンパーによる層せん断力係数の増幅を $A_i$ 分布のみで考慮し、各層の層せん断力係数 $C_{ri}$ を次式で表している。

$$C_{ri} = \gamma \cdot \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (12)$$

ここで、 $\gamma$ : 免震部材の力学特性のばらつき等の影響を考慮する係数、 $M$ : 上部構造の総質量、 $g$ : 重力加速度、 $A_i$ : 建築基準法の基準せん断力係数分布( $A_i$ 分布)、 $Q_{iso}$ : 免震層のせん断力、 $Q_e$ ,  $Q_h$ ,  $Q_v$ : 支承材、履歴系ダンパー、流体系ダンパーが免震層の基準変位時に負担するせん断力である。この方法を以降、告示法と呼ぶ。

#### 3.4 増幅法、割増法<sup>4)~6)</sup>の方法

飯場らは、上部構造での応答増幅が大きいほど、告示法において算出した層せん断力係数と応答解析で求めた層せん断力係数との差が大きい傾向を示し、層せん断力係数を2種類の方法で評価している。最上層の層せん断力係数 $\alpha_R$ の1つの算出方法は、(13)式で示すように、告示法によって算出した免震層の層せん断力係数 $C_{r0}$ に応答増幅率 $a$ を乗じる方法である。

$$\alpha_R = C_{r0} \cdot a \quad (13)$$

飯場らは、 $T_1/T_0$ が小さく、非線形係数 $NL$ が大きいほど、上部構造の増幅率が大きくなる傾向を示すことから、応答増幅率 $a$ を $T_1/T_0$ によって下式と提案している。

$$\begin{cases} 0.0 < T_1/T_0 \leq 0.5 & a = 2.19 + 3.95NL \\ 0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 & a = 2.31 + 3.34NL \\ 1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 & a = 1.66 + 2.58NL \\ 3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 & a = 1.04 + 1.59NL \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 $T_1$ : 上部構造剛体時の免震層の初期剛性に対する周期、 $NL$ : 免震層の最大応答変形に基づく非線形係数である(図8に示すように、最大変位 $\delta_{max}$ とその時のせん断力 $Q_{max}$ により囲まれた長方形の面積に対する、Bi-linear型履歴曲線の面積の比)。この方法を以降、増幅法と呼ぶ。



もう1つは、(15)式で示すように、告示法によって算出した最上層の層せん断力係数  $C_{rR}$  に応答割増率  $b$  を乗じる方法である。

$$\alpha_R = C_{rR} \cdot b \quad (15)$$

飯場らは、非線形係数  $NL$  よりも  $T_{eq}/T_0$  および  $T_1/T_0$  をパラメータとした方が、応答割増率  $b$  とパラメータとの関係が明確であること、また、 $T_{eq}/T_0$  が大きくなるに従い、上部構造の増幅率がやや大きくなる傾向を示すことから、応答割増率  $b$  を  $T_1/T_0$  によって下式で提案している。

$$\begin{cases} 0.0 < T_1/T_0 \leq 0.5 & b = 1.61 + 0.31(T_{eq}/T_0) \\ 0.5 < T_1/T_0 \leq 1.5 & b = 1.60 + 0.19(T_{eq}/T_0) \\ 1.5 < T_1/T_0 \leq 3.0 & b = 1.33 + 0.08(T_{eq}/T_0) \\ 3.0 < T_1/T_0 \leq 5.0 & b = 0.94 + 0.02(T_{eq}/T_0) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 $T_{eq}$ : 免震層の最大変形に基づく等価周期である。この方法を以降、割増法と呼ぶ。なお、免震層の応答増幅率と応答割増率を1.0とし、高さ方向を台形分布として求めた応答増幅率分布および応答割増率分布において、それぞれの中間層の応答増幅率または応答割増率を用いて、中間層の層せん断力係数を算出する。

解析において上部構造を階高が3.5 mの7層および14層を用いている。上部構造の質量分布は一律とし、線形弾性の復元力としている。剛性分布は最下層に対して最上層の値が0.4となる台形分布としている。上部構造のみの1次固有周期を  $T_0 = \eta H$  より決定している。ここで、 $\eta = 0.02, 0.03, 0.04$ ,  $H$ : 建物高さである。 $T_0$  に対して、減衰定数  $h = 2\%, 3\%$  となる初期剛性比例型の減衰を上部構造のみに与えている。解析パラメータは、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期  $T_f$  を2.5 s, 4.0 s, 6.0 s, ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  を0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 降伏変位  $\delta_y$  を0.1 cm, 1 cm, 3 cmである。入力地震動は第I種地盤と2種類の第II種地盤および地盤増幅係数  $G_s = 1.23$  とした告示適合波を使用している。

図9に、既往の層せん断力係数算出方法の検討に使用された解析条件と本検討に使用する解析条件の比較を示す。上部構造のみの1次

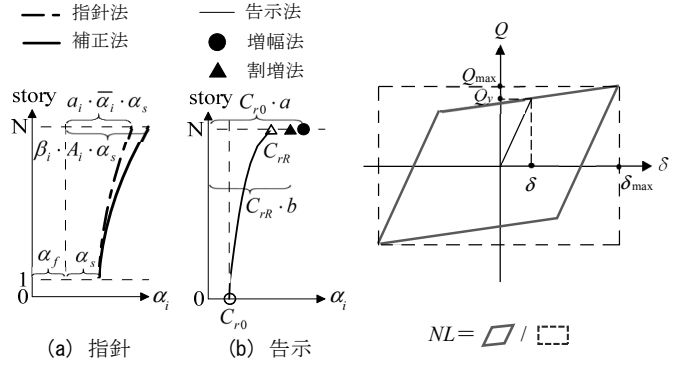


図7 既往算出方法の構成

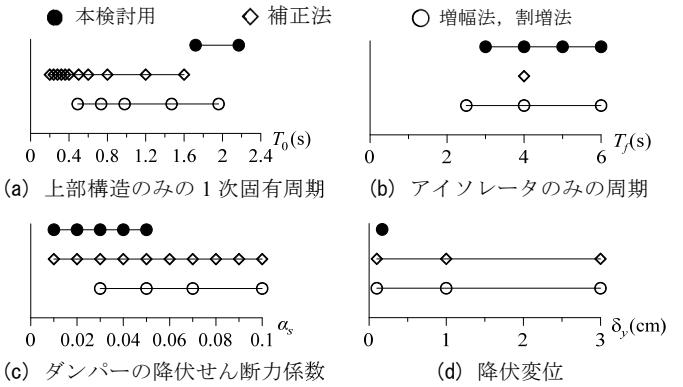


図9 解析条件の比較

固有周期  $T_0$  は既往研究<sup>3)~6)</sup>と比べて長い、既往研究には1.6 s, 2.0 sのような長周期のケースも含まれている。上部構造剛体時のアイソレータのみの周期  $T_f$ , ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  およびダンパーの降伏変位  $\delta_y$  の解析条件においては、本検討と既往研究の解析条件は対応している。また、既往手法には各階の質量・剛性が一律であるモデルが使用されている。なお、解析条件については文献1)~6)で明確に示されているもののみを載せている。

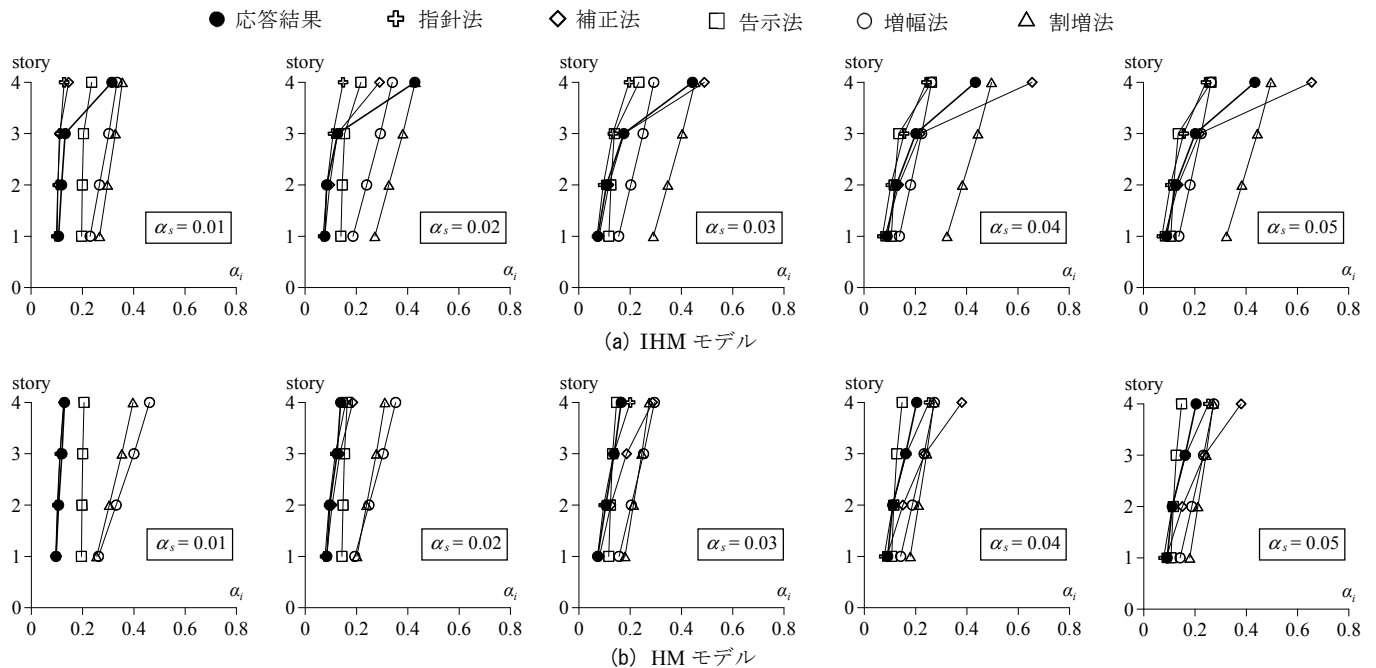


図10 せん断力係数の高さ方向分布 ( $T_f = 4$  s, ART HACHI-1.0)

#### 4. 設計用層せん断力係数分布の適用性の検証

本章では、屋上階の質量・剛性が小さい IHM モデルに対し、前章で述べた各方法の適用性について検証する。4.1 節では、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  をパラメータとした際の時刻歴応答解析結果と、各方法によって算出した層せん断力係数の高さ方向分布を比較する。4.2 節では、全ての時刻歴応答解析による結果と比較し、各方法の適用性を評価する。

##### 4.1 高さ方向分布の比較

図 10 (a), (b)に、ART HACHI-1.0 入力時における各方法で算出した各層の層せん断力係数をモデル毎にそれぞれ示す。ここでは例として、上部構造剛体時のアイソレータのみの周期  $T_f=4$  s の場合を挙げ、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  をパラメータとした結果を示す。

図 10 (a)より、屋上階の質量・剛性が小さい IHM モデルの場合、前述のとおり、応答結果において 4 層の層せん断力係数が增大することが分かる。指針法はこの傾向を評価できず、危険側となる。補正法はダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が 0.02 以下の場合に危険側の評価となっているが、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  の増加に従い、安全側の評価になる傾向が確認できる。告示法は 4 層が大きくなるという傾向を表現できているが、IHM モデルにおける最上層の応答増幅を低めに評価している。増幅法は最上層において、 $\alpha_s = 0.01$  の場合に安全側な評価となるが、 $\alpha_s$  が 0.02 以上の場合に危険側な評価となる。これは増幅法では、上部構造の層せん断力係数分布を台形分布と考え、IHM モデルにおける 4 層の応答増幅を評価していないためと考えられる。それに対して、割増法は概ね安全側な評価となった。1~3 層の層せん断力係数は、指針法、補正法、告示法は、応答結果と概ね一致している。最上層で応答結果に対して安全側に評価していた増幅法と割増法は、応答結果に対して全般的に過大な評価となっている。

一方、図 10 (b)より、各階の質量・剛性がほぼ一様である HM モデルの場合、指針法と補正法における 1 層では危険側の評価となるが、免震構造の高次振動モードによる上部構造の高さ方向の応答増幅を考慮しているため、2~4 層では安全側の評価になる傾向を示した。それに対して、告示法の結果はダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が大きくなるに従い、安全側から危険側に移っていく。これは、告示法において、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  による上部構造の層せん断力係数の増加を十分に評価できていないためと考えられる。告示法に基づく上部構造の増幅を考慮する増幅法と割増法は、全ての値で応答結果に対して過大な評価を示し、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が大きくなるに従い、応答結果に近づく傾向がある。

##### 4.2 適用性の考察

図 11 (a)~(e)に各方法で算出した各層の層せん断力係数（算出結果）と 4 種類の上部構造剛体時のアイソレータのみの周期  $T_f$  を設定した両モデルに対して時刻歴応答解析により得られた層せん断力係数（応答結果）の比較をモデル毎にそれぞれ示す。ここでは、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が 0.01, 0.03, 0.05 の結果を示す。なお、本検討では地震動の位相特性、または入力レベルによる顕著な差異が認められなかったため、図 11 には全ての地震動での結果をまとめて示している。

図 11 (a)より、指針法は IHM モデルの 1~3 層および HM モデルの全層では良い対応が見られる。一方、IHM モデルの 4 層ではダンパ

$\alpha_s$	0.01	0.03	0.05
1~3 層	○	□	×
4 層	○	□	×

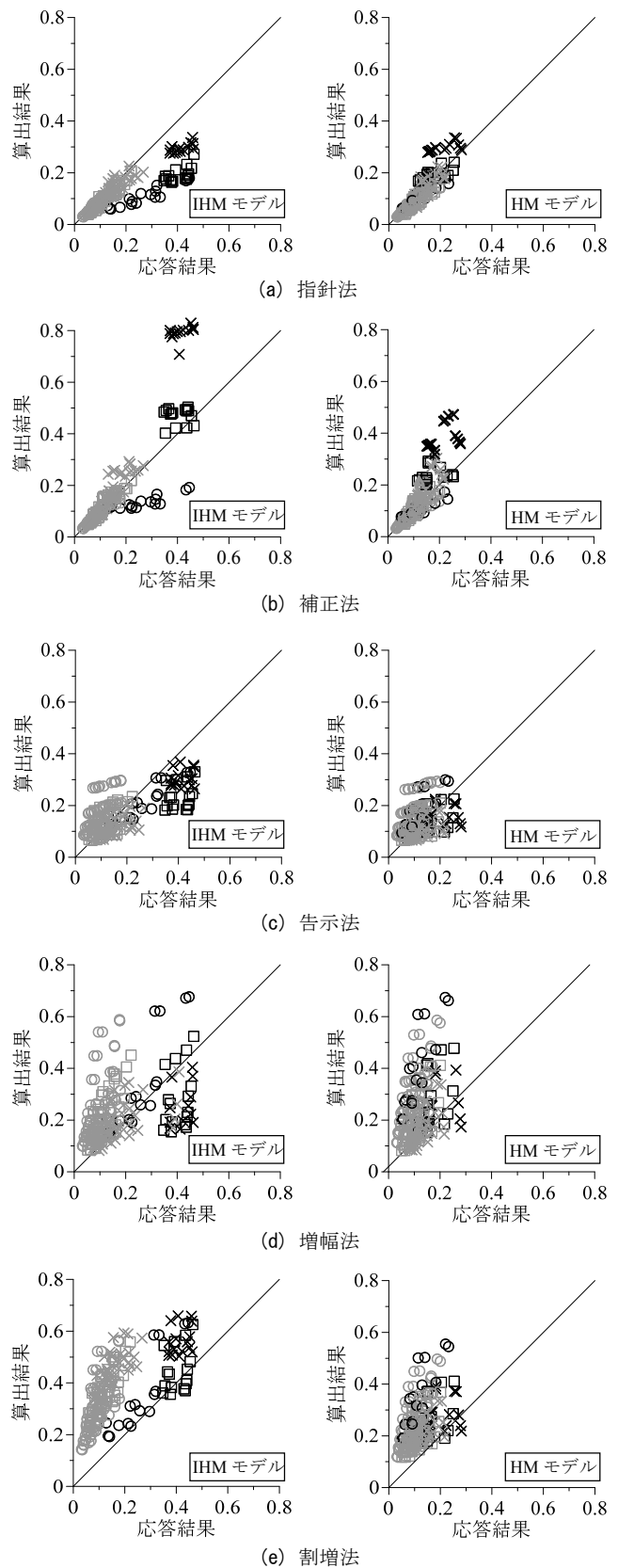


図 11 せん断力係数の応答結果と算出結果の比較

一の降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きくなるに従い、算出結果は応答結果に多少近くなるが、危険側の評価となっている。これは上部構造の質量・剛性分布の変化による高さ方向の応答増幅を十分に評価できていないためと考えられる。

図 11 (b)より、補正法は指針法と同様に、IHM モデルの 1~3 層および HM モデルの全層では良い対応が見られる。さらに、IHM モデルの 4 層では、指針法に比べて応答結果との対応が良いことと、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きいほど応答結果との対応が良くなり、 $\alpha_s = 0.05$ では最上階で過大な評価となるが、全てのケースで安全側の評価となることが確認できる。ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ の増加による層せん断力係数の高さ方向への増幅が大きくなる傾向を評価できていると考えられる。しかし、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が小さい場合、IHM モデルの 4 層では危険側な評価が多いことが確認できる。これは補正法がダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が小さい場合、上部構造の質量分布の変化による高さ方向の応答増幅を、 $\beta_i$ によって十分に評価できていないためと考えられる。

図 11 (c)より、告示法は両モデルにおいてばらつきが大きいことが分かる。また、IHM モデルの 1~3 層において、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s = 0.01$ では概ね安全側な評価となるが、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が 0.03 以上の場合、ばらつきが大きく危険側になるケースが多いことが確認できる。告示法は上部構造の高次振動モードを考慮していないため、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きい場合、上部構造の層せん断力係数を低く評価したと考えられる。4 層では、IHM モデルにおける算出結果が応答結果を下回る危険側の評価となる。これは告示法が質量分布の変化による上部構造の応答増幅を、 $A_i$ 分布のみでは十分に評価できないためと考えられる。

図 11 (d)より、増幅法では IHM モデルの最上層においては危険側な評価となることが多いが、HM モデルでは概ね安全側な評価となっている。さらに、告示法と同様に、両モデルにおいてダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きくなるに従い、危険側な評価になる傾向が確認できる。これは増幅法においてダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ の増加に従い、上部構造の応答増幅を低く評価しているためと考えられる。

図 11 (e)より、割増法はばらつきが、両モデルにおいては概ね安全側の評価をしていることが確認できる。また、IHM モデルの 4 層においては、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きくなることに伴い、安全側に評価していることが分かる。

## 5. まとめ

本報では、鉄骨造物流倉庫に代表される屋上階の質量・剛性が極端に小さい免震建物を対象とし、これまで提案された 5 種類の設計用層せん断力係数分布の設定方法を適用して、応答値との比較により、それぞれの提案方法の特徴と鉄骨造物流倉庫に対する適用性を評価した。限られた範囲の検討ではあるが、得られた知見を以下に示す。

- 1) 指針法は屋上階の質量・剛性が小さい IHM モデルの 1~3 層と各階の質量・剛性がほぼ同様である HM モデルの全層では上部構造の応答増幅を評価できるが、質量分布の変化による上部構造の応答増幅を十分に評価できていないため、IHM モデルの 4 層では危険側な評価となった。
- 2) 補正法は上部構造のみの 1 次固有周期  $T_0$  が長くなるほど、ダン

パーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ の増加による層せん断力係数の高さ方向への増幅が大きくなる傾向を考慮しているため、指針法より応答結果との対応が良い。しかし、IHM モデルの 4 層においては、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が小さい場合の応答増幅が危険側の評価となった。

- 3) 告示法は IHM モデルの 1~3 層と HM モデルでは、応答結果と概ね対応しているが、免震構造の高次振動モードの影響を考慮していないため、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きい場合、危険側になることが多い。また、上部構造の質量分布の変化による最上層の応答増幅を  $A_i$  分布のみでは十分に評価できないため、IHM モデルの 4 層ではほぼ危険側な結果となった。
- 4) 増幅法は、IHM モデルの 1~3 層と HM モデルでは応答結果に対して全般的に過大な評価となっている。IHM モデルにおいて、上部構造の応答増幅を低く評価しているため、4 層においては危険側の評価が多い。なお、この傾向は、ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ が大きいほど顕著であった。
- 5) 割増法は、IHM モデルの 1~3 層と HM モデルでは応答結果に対して全般的に過大な評価となっている。IHM モデルの 1~3 層においては常に安全側な評価となった。また、4 層においては応答結果とのばらつきが少なく、概ね安全側な評価となった。
- 6) 既往の提案式のような基準を設ける場合には、質量・剛性分布に対する適用範囲の設定が重要となる。

## 謝辞

本報告は、JFE スチール株式会社、JFE シビル株式会社、東京工業大学佐藤研究室、東京理科大学北村研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して、感謝の意を示します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，pp.73-110，1993
- 2) 国土交通省住宅局建設指導課など：免震層建築物の技術基準解説及び計算例とその解説，2001.5
- 3) 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，第 77 巻，第 676 号，pp.859-868，2012.6
- 4) 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）パラメータスタディ，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.231-232，2010.9
- 5) 森川和彦，田村和夫，猿田正明，西村拓也，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 2）層せん断力係数評価法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.233-234，2010.9
- 6) 飯場正紀，田村和夫，猿田正明，西村拓也，森川和彦，北村佳久，小林正人，石原直：免震建築物の設計用地震層せん断力係数に関する検討，建築研究所，建築研究資料，No.162 号，2014.8
- 7) 付慧鑫，渡辺泰成，佐藤利昭，北村春幸，佐藤大樹，宮川和明，植木卓也，村上行夫，戸張涼太，久保田航平：鉄骨造の中低層免震建物の応答に固有周期が与える影響，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.425-428，2016.3
- 8) 森川和彦，西村拓也，猿田正明，田村和夫：免震建築物の高次振動モード評価に関する研究（その 2）主成分分析によるモード分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.923-924，2009.8

[2016 年 5 月 31 日原稿受理 2016 年 8 月 19 日採用決定]