

免震部材の多様性を考慮した免震建物の設計用地震荷重分布
 - 非線形モーダルアナリシスによる地震応答構造の分析 -

明治大学 松田紳吾

1. はじめに

免震建物の技術的基準として建設省告示 2009 号¹⁾(以下、免震告示)が制定され、これにより、免震告示の適用範囲内であれば、動的解析によらない構造計算が可能となった。しかし免震告示の設計用せん断力係数分布の計算方法は地震応答を過小評価する傾向があると多くの研究者・設計者から指摘されている²⁾。

本研究では、これらの問題点を改善する設計用せん断力係数分布の評価式の提案を目的とする。さらに、非線形モーダルアナリシスにより、免震建物における地震応答のメカニズムを分析し、ダンパー種別ごとに異なる高次モード発生程度の違いや提案式の特徴を把握する。なお、本研究では、高次モード応答を十分に評価し得る 10 質点系せん断モデルを用いて、固有周期の変化やダンパーの特性、入力地震動をパラメータとした時刻歴応答解析による検討³⁾を行っているが、モデル等の詳細は割愛する。

2. 設計用地震荷重分布の評価式

2.1 免震告示による評価法

免震告示では、建物各階の設計用せん断力係数分布 C_{ri} を次式で与えている¹⁾。

$$C_{ri} = \gamma \cdot \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (1)$$

ここに、 γ ：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、 Q_{iso} ：免震層の最大応答せん断力、 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、 Q_h, Q_v, Q_e ：それぞれ、履歴型ダンパー、速度依存型ダンパー、弾性支承が免震層の基準変位時に負担するせん断力

(1)式は、弾性支承の負担せん断力係数は上部構造で増幅せず、上部構造の応答増幅は専らダンパーに支配されるという知見⁴⁾に基づき、ダンパーの負担分に対し高さ方向増幅を A_i 分布で評価した簡便な評価方法であり、履歴型のみを考慮した場合では、図 1 の形で表現できる。

2.2 本研究による評価法

本研究では、免震告示や日本建築学会の免震

構造設計指針の評価法の構成を踏襲し、 A_i 分布による応答増幅作用を補正する増幅率 $\beta_{eq,i}$ を導入したせん断力係数分布 α_i を(2)式で提案する。

$$\alpha_i = \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i \cdot \beta_{eq,i}(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (2)$$

この増幅率 $\beta_{eq,i}$ は、履歴型および速度依存型ダンパーによる応答増幅の程度を表し、(3)式で求められる。 N は上部構造の層数である。

$$\beta_{eq,i} = \left(\frac{\bar{\beta}_{eq} - 1}{N - 1} \right) i + \frac{N - \bar{\beta}_{eq}}{N - 1} \quad (3)$$

$\bar{\beta}_{eq}$ は直線に近似した $\beta_{eq,i}$ 分布の最上層の値であり、 $\bar{\beta}_{eq}$ を免震の隔絶度を表す指標である等価免震係数 I_{eq} で評価するのが本評価式の特徴である。しかし、この I_{eq} は、*skinner* らの免震係数 I の定義⁵⁾とは異なることに注意されたい。

$$\bar{\beta}_{eq} = \frac{5.0}{I_{eq}^2} + 0.6 \quad (\bar{\beta}_{eq} = 3.0 \text{ を上限値とする}) \quad (4)$$

$$I_{eq} = T_{eq} / T_0 \quad (5)$$

ここに、 T_{eq} ：免震層のみかけの初期剛性 K_{eq} に対する等価周期 ($= 2\pi\sqrt{M/K_{eq}}$)、 T_0 ：上部構造基礎固定時の 1 次固有周期

$$K_{eq} = k_s \cdot \frac{Q_h}{Q_h + Q_v} + k_f \quad (6)$$

ここに、 k_s ：履歴型要素の初期剛性、 k_f ：弾性支承の剛性

(2)式から(6)式で算出する設計用せん断力係数分布の計算フローを図 2 に示す。この(6)式は、*skinner* らの免震係数 I と異なり、履歴型と速度依存型のダンパーの負担せん断力比に応じて履歴型の剛性を低減することで速度依存型の効果を考慮した I_{eq} を算出するための“みかけの初期剛性”である。ただし、(6)式では速度依存型に対し履歴型が支配的となるケースにおいて、地震応答を過大評価する場合もある。これをより適切に評価する場合には、 I_{eq} の別途算出あるいは既報での評価法³⁾を用いるのが望ましいが、詳細はここでは省略する。

(4)式における $\bar{\beta}_{eq}$ と等価免震係数 I_{eq} の関係は、図 3 に示す時刻歴応答解析から得られた $\bar{\beta}_{eq}$ の

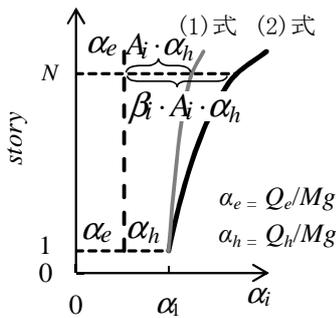


図1 α_i の構成
(履歴型のみの場合)

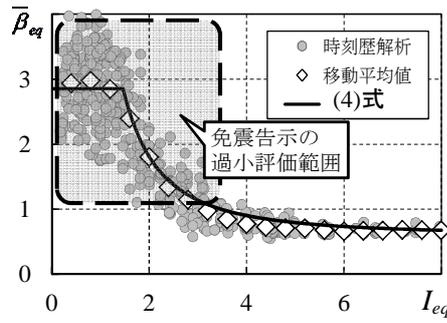


図3 免震係数 I_{eq} と $\bar{\beta}_{eq}$ の関係

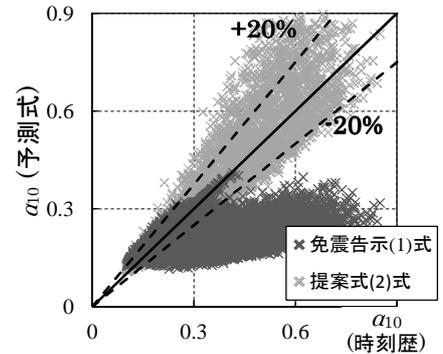


図4 応答予測精度の比較
(10 質点系せん断モデル最上層)

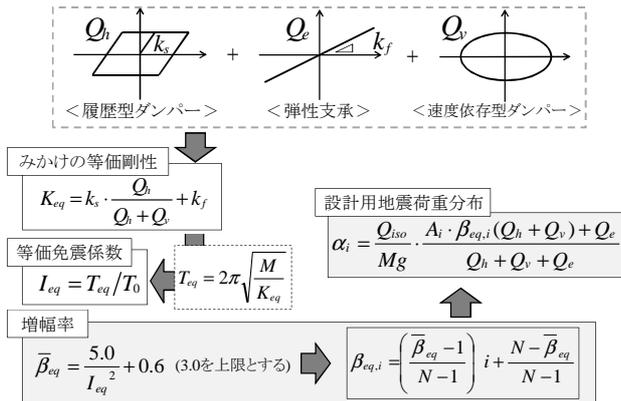


図2 地震荷重分布の算出手順

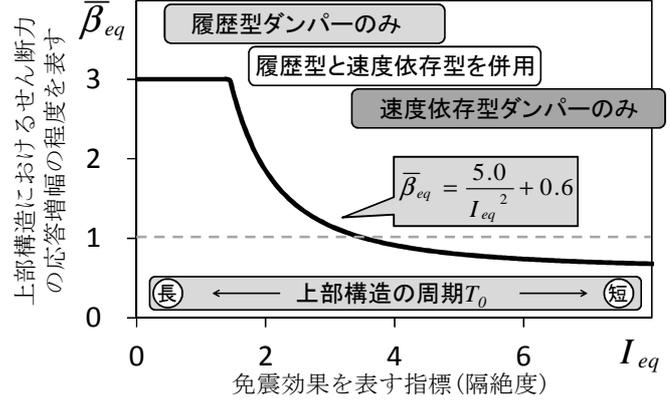


図5 I_{eq} と $\bar{\beta}_{eq}$ を用いた提案式の特性

平均値を捉えるように設定している。 $\bar{\beta}_{eq}$ は、 I_{eq} の減少に伴い増加し、入力地震動によるばらつきも大きくなる。 $I_{eq} \leq 3.5$ の領域は免震告示(1)式が地震応答を過小評価する可能性が高い範囲を示しており、一方、 $3.5 \leq I_{eq}$ では A_i 分布による高さ方向への応答増幅を低減させる領域も存在することを示している。免震告示および提案式によりせん断力係数分布を予測した場合の最上層での時刻歴応答との対応を図4に示す。提案式(2)式を用いることで免震告示に比べて大幅な応答予測精度の改善が確認できる。

免震建物において時刻歴応答解析の結果により認識されてきた“履歴型のみ”に比べ速度依存型を併用した場合に、上部構造での応答が低減される”といった知見⁶⁾に対して、導入するダンパー量や上部構造との周期比で等価免震係数 I_{eq} を算出することで上部構造での応答増幅作用の変動(増幅率 $\beta_{eq,i}$)を連続的かつ定量的に捉えることが可能となる(図5)。これにより設計時に地震応答を容易にかつ適切に評価した分布形を設定することが可能となる。

3. 地震応答構造の分析

Skinnerらの両端自由振動モード⁵⁾を用いた非線形モーダルアナリシスにより、せん断力係

数分布の応答増幅に及ぼす高次モード応答の影響度を把握し、等価免震係数 I_{eq} に対する増幅率 $\beta_{eq,i}$ の変動メカニズムおよび高次モード応答の発生要因を分析する。

3.1 両端自由振動モードによるモード分析

両端自由振動モードは、免震層の剛性を0とした場合の振動モードであり、免震建物の振動特性を包括的に表現するのに有効とされる。

上部 N 質点の免震建物について、免震層の剛性を0とした剛性行列 \mathbf{K}_{FF} 、質量行列 \mathbf{M} とすれば両端自由振動モードの s 次固有ベクトル ${}_s\mathbf{u}_{FF}$ と固有振動数 ${}_s\omega_{FF}$ の関係は次式となる。

$$\mathbf{K}_{FF} \cdot {}_s\mathbf{u}_{FF} = {}_s\omega_{FF}^2 \cdot \mathbf{M} \cdot {}_s\mathbf{u}_{FF} \quad (7)$$

免震層の抵抗 Q_{iso} 、地動加速度 \ddot{y}_g とすると、相対変位ベクトル \mathbf{y} についての振動方程式は次式となる。

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_{FF} \cdot \mathbf{y} + (\mathbf{0}_{n-1} \quad Q_{iso})^T = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{1} \cdot \ddot{y}_g \quad (8)$$

ここに、 \mathbf{C} :減衰行列、 $\mathbf{0}_n$: n 次のゼロベクトル、 $\mathbf{1}$:要素が全て1の列ベクトル

固有ベクトル ${}_s\mathbf{u}_{FF}$ を用いて(8)式を展開すると(9)式となる。なお、減衰項の振動モード間での連成は小さいためここでは無視する。

$${}_s\ddot{\mathbf{y}} + 2{}_s h_s \omega_{FF} \dot{\mathbf{y}} + {}_s\omega_{FF}^2 \mathbf{y} + \frac{{}_s\mathbf{u}_{FF} \cdot \mathbf{u}_{FF} \cdot Q_{iso}}{{}_s\mathbf{u}_{FF} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{u}_{FF}} = -{}_s\Gamma_{FF} \cdot \ddot{y}_g \quad (9)$$

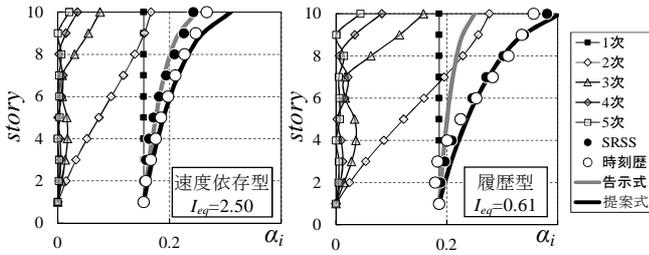


図6 各次モードのせん断力係数分布($T_0=1.6s$)

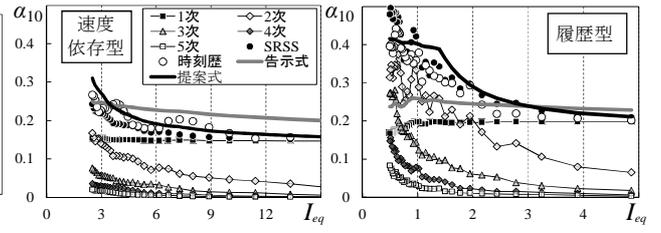


図7 せん断力係数 α_{10} と免震係数 I_{eq} の関係

ここに、 ${}_s h$: s 次モードの減衰定数、 ${}_s u_{FF,1}$: s 次固有ベクトルの上部構造第1層の成分、 ${}_s \Gamma_{FF}$: s 次刺激係数

(9)式は、1次モード($s=1$)の場合では、固有振動数 $\omega_{FF}=0$ 、刺激関数 ${}_1 \Gamma_{FF} \cdot {}_1 u_{FF,1} = \mathbf{1}$ となることから(10)式となり、高次モード($s \geq 2$)の場合では、 ${}_s \Gamma_{FF} \cdot {}_s u_{FF,1} = \mathbf{0}$ となるため(11)式となる。

$${}_1 \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{1} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_g = -\mathbf{1} \cdot Q_{iso} / m_T \quad (10)$$

$${}_s \ddot{\mathbf{y}} + 2 \cdot {}_s h \cdot {}_s \omega_{FF} \cdot \dot{\mathbf{y}} + {}_s \omega_{FF}^2 \cdot {}_s \mathbf{y} = -\frac{{}_s \mathbf{u}_{FF} \cdot {}_s u_{FF,1} \cdot Q_{iso}}{{}_s \mathbf{u}_{FF}^T \cdot \mathbf{M} \cdot {}_s \mathbf{u}_{FF}} \quad (11)$$

ここに、 m_T : 建物全質量

(11)式より、高次モード応答は、免震層の抵抗力 Q_{iso} による加振によって生じることになる。

Q_{iso} の時刻歴波形には、入力地震動および免震部材の振動特性が反映されるため、これを分析することで各次モードへの影響が評価可能となる。ここで、 Q_{iso} / m_T に対する相対加速度応答スペクトル ${}_1 S_{a(rel)}(s, T, s, h)$ を用いて、高次モード($s \geq 2$)の相対加速度応答の最大値 ${}_s \ddot{\mathbf{y}}_{max}$ を求めると、(10)式と(11)式の関係から次式となる。

$${}_s \ddot{\mathbf{y}}_{max} = \frac{{}_s \mathbf{u}_{FF} \cdot {}_s u_{FF,1}}{{}_s \mathbf{u}_{FF}^T \cdot \mathbf{M} \cdot {}_s \mathbf{u}_{FF}} \cdot m_T \cdot {}_1 S_{a(rel)}(s, T, s, h) \quad (12)$$

次に、この加速度より各次モードの最大せん断力係数を、さらにSRSSにより地震応答の最大値を近似的に表現すると以下の式となる。

$${}_1 \alpha_i = \sum_{i=1}^N m_i ({}_1 \ddot{y}_i + \ddot{y}_g) / \sum_{i=1}^N m_i \cdot g = Q_{iso} / m_T g (s=1) \quad (13)$$

$${}_s \alpha_i = \sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_s \ddot{y}_{max,i} / \sum_{i=1}^N m_i \cdot g \quad (s \geq 2) \quad (14)$$

$$\alpha_{i(SRSS)} = \sqrt{\sum_{s=1}^N {}_s \alpha_i^2} \quad (15)$$

3.2 せん断力係数分布の高次モード応答

(13)式から(15)式により各次モードのせん断力係数およびSRSSを用いた最大応答せん断力係数分布(5次モードまで考慮)を算出し、時刻歴応答との比較を図6に示す。速度依存型ダンパーに対して履歴型ダンパーでは全体応答に対する高次モード応答の寄与度が高いこと

がわかる。図7に、最上層のせん断力係数 α_{10} と免震係数 I_{eq} の関係を示す。 I_{eq} が小さい範囲で高次モード応答の影響が強くなる傾向にあり、提案式は免震係数 I_{eq} に対する増幅率 $\beta_{eq,i}$ の導入により、高次モードによるせん断力係数分布の増幅傾向を適切に表現していることが分かる。

3.3 各種免震部材による応答増幅作用

各免震部材が免震層の相対加速度スペクトル ${}_1 S_{a(rel)}(s, T, s, h)$ に及ぼす影響を検討する。

表1に解析モデルを示す。履歴型のみを使用した状態(HD100)を基準とし、免震層の最大応答変位が一定となるように徐々に履歴型の負担せん断力を減らし、代わりに速度依存型で減衰を確保するものとし、最終的には速度依存型のみ(VD100)となるものとする。

図8に示す各モデルにおける ${}_1 S_{a(rel)}(s, T, s, h)$ では、速度依存型要素が加わるにつれて全体的に応答が小さくなり、両端自由の2次、3次での周期帯でも変動が大きい。このときHD60における Q_{iso} を部材別の負担せん断力 Q_e, Q_h, Q_v に分解したものを図9に示し、免震層 Q_{iso} に対する比率を各周期帯で表したものを図10に示す。ここでは、履歴型と速度依存型の負担耐力 Q_h, Q_v を単純和しダンパー群として評価する $Q_h + Q_v$ のスペクトルも併せて示す。このダンパー群のスペクトル $Q_h + Q_v$ と弾性支承のスペクトル Q_e をSRSSしたものが免震層の応答値を的確に捉えていることから、上部構造の応答増幅を発生させる両端自由の高次モード周期帯におけるスペクトルでは、履歴型および速度依存型の割合が支配的であり、免震告示や提案式におけるダンパーの負担耐力 $Q_h + Q_v$ にせん断力係数の増幅を考慮する構成が妥当であるといえる。

これらの相対加速度応答スペクトルより算出した高次モードの加速度応答分布を図11に示す。ここで、比較としてダンパーなしの場合の分布も示している。ダンパーなしでは、2次

と3次のモード応答は極めて小さく、ダンパーを加えることによって短周期帯のスペクトルが増すことから高次モード応答が励起されることになる。また履歴分のみ(HD100)に対して速度依存型が少量でも加わった際の高次モードの変動が大きいことが認められ、文献6)による知見とも整合する。図12に示す(13)式から(15)式によるせん断力係数においても(a)時刻歴と(b)SRSSの対応は良好である。(c)提案式においては、応答値をやや大きめに設定する傾向だが、(d)時刻歴に対する倍率で見れば全体的な分布の平均値を捉えられているといえる。以上のことより、本章で示す非線形モーダルアナリシスおよびせん断力係数の評価式が妥当であることが確認される。

4. まとめ

本論では、免震告示の過小評価を改善した新たな設計用せん断力係数分布の評価式を提案した。本評価法は、ダンパーの種別を問わず、

上部構造での応答増幅作用の変動を連続的かつ定量的に捉えられ実務的にも有効性の高い評価式といえる。さらに免震建物における高次モード応答の影響度を分析し、増幅率は高次モード応答によるせん断力係数の増幅を適切に評価しており、評価式の妥当性が確認された。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局指導課など編：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説，2001.5
- 2) 高山峯夫，森田慶子：免震建築告示における上部構造のせん断力係数に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.473-474，2002.8
- 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676号 pp.859-868，2012.6
- 4) 秋山宏：エネルギー集中型構造物のDs値，日本建築学会論文報告集No.341，1984
- 5) R. I. Skinner, W. H. Robinson and G. H. McVerry：An Introduction to Seismic Isolation, Wiley, 1993（監訳 川島一彦，北川良和：免震設計入門，鹿島出版会，1996）
- 6) 白山敦子，山下忠道，鈴木祥之，井上豊：履歴・粘性減衰を複合利用した基礎免震建物の地震応答特性 免震層の最大変形が同じ場合，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.917-918，2007.8

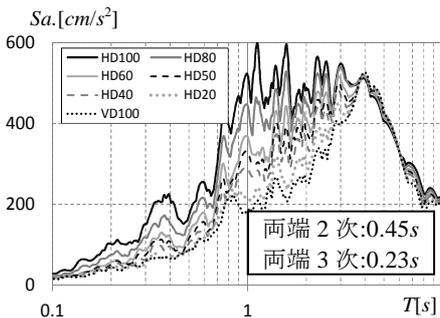


図8 免震層の相対加速度スペクトル

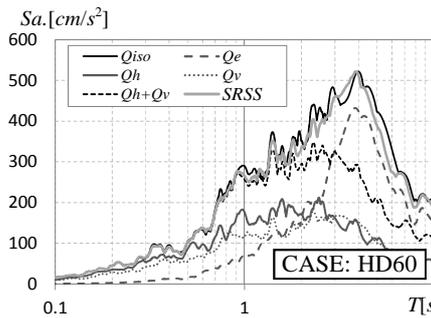


図9 部材別の加速度スペクトル

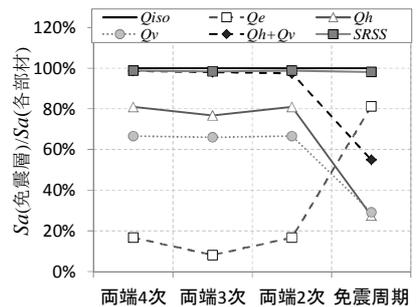


図10 免震層に対する割合

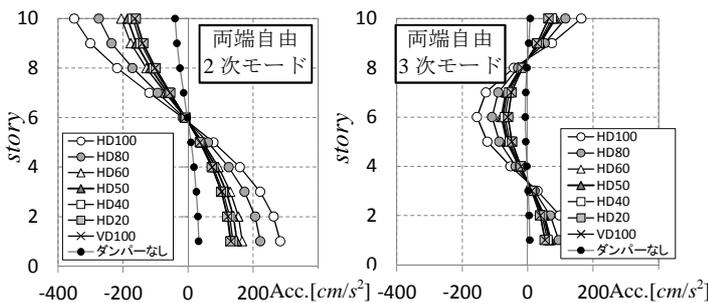


図11 各次モードの応答加速度分布

表1 ダンパー特性を変動させた解析パラメータ

CASE名	HD100	HD80	HD60	HD50	HD40	HD20	VD100
上部構造 T_0 (10質点系)[sec]	基礎固定0.8 (両端2次:0.45, 両端3次:0.23)						
使用するダンパー	履	履	履	履	履	履	速
履歴型ダンパー	降伏変位 δ_y : 1.0cm						
	降伏せん断力係数 α_s : 0.06, 0.048, 0.036, 0.03, 0.024, 0.012, -						
速度依存型ダンパー	リリーフ速度 V_r : 32cm/s						
	減衰低減率 γ : 0.068						
		9.9%	19.8%	24.5%	28.7%	37.3%	46.5%
		3.5%	7.4%	9.5%	11.6%	16.4%	22.4%
免震層	46.0	46.0	46.0	45.9	45.9	45.9	46.0
等価免震係数 I_{eq}	1.00	1.60	1.81	1.96	2.26	3.54	5.00

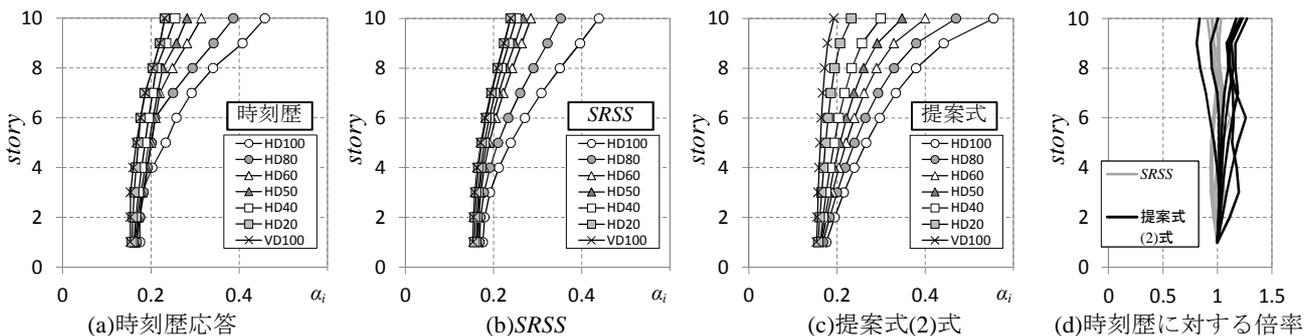


図12 せん断力係数分布