

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	ダンパーを下層に部分配置した超高層鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法
Title	
著者(和文)	橋本奨吾, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 佐野剛志, 吉江慶祐, 石井正人
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, TUYOSHI SANO
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2045
Citation(English)	, Vol. 83, , 2045
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769791">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769791</a>

## ダンパーを下層に部分配置した超高層鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法

構造—振動 正会員 ○ 橋本奨吾<sup>\*1</sup> // 佐藤大樹<sup>\*1</sup> // 北村春幸<sup>\*1</sup> // 長江拓也<sup>\*2</sup>  
// 佐野剛志<sup>\*3</sup> // 吉江慶祐<sup>\*4</sup> // 石井正人<sup>\*4</sup>

超高層建物 制振構造 部分配置  
エネルギー法 直接せん断型モデル

## 1. はじめに

近年、超高層建物に対してダンパーを部分配置<sup>(例えば 1-4)</sup>する例が増えている。島田ら<sup>4)</sup>は、超高層建物における長周期地震動の被害は、下層で大きくなるということを明らかにし、21層鋼構造建物の下層40%にダンパーを配置することで、全層に配置した場合と同等のエネルギー吸収量であることを報告している。したがって、本論文でも、21層鋼構造建物(図1)を使用し、下層40%、20%に用いるダンパーを設計するとともに、ダンパー非設置層の安全性を確認する。

建物の設計方法の1つとして、エネルギーの釣合に基づく耐震設計法<sup>5-8)</sup>(以降、エネルギー法)がある。秋山らによって、ラーメン構造、制振構造および免震構造の設計法が提案されている<sup>5)</sup>。しかし、制振構造については、ダンパーを全層に配置した場合であり、部分配置した場合の資料はごくわずかである<sup>9)</sup>。

したがって、本論文では、ダンパーを下層に部分配置した建物を対象にエネルギー法の適応を試みる。本論文の流れは、使用する地震動のエネルギースペクトル  $V_E$  からダンパーを設計する。その後、全層を柔剛混合構造に置換し、せん断モデルを作成する。最後に、エネルギー法を用いることで、ダンパー非設置層の塑性化の程度を検討する。

## 2. ダンパー設計およびせん断モデル作成方法

● $V_E$  から損傷に寄与する  $V_D$  を以下の式で算出する<sup>5)</sup>。

$$V_D = \frac{V_E}{1+3h+1.2\sqrt{h}} \quad (1)$$

ここで、 $h=0.02$  とする。

● $V_D$  から損傷に寄与するエネルギー $E_D$ を以下の式で算出する<sup>5)</sup>。

$$E_D = \frac{1}{2} M \cdot V_D^2 \quad (2)$$

ここで、 $M$ : 全重量

● $E_D$  からダンパー1本あたりが吸収しなければならないエネルギー ${}_s E_D$ を算出する。

$${}_s E_D = \frac{E_D}{N} \quad (3)$$

ここで、 $N$ : ダンパー本数

●等価繰返し数  $n$  を用いて、ダンパー1本が1ループで吸収

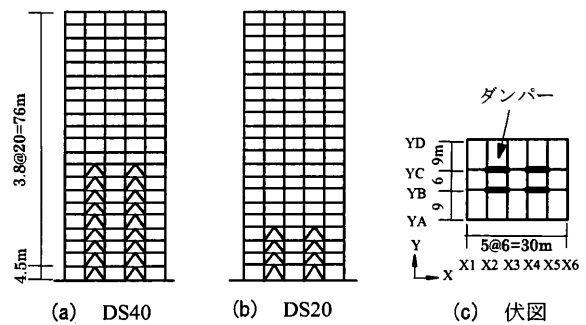


図1 建物概要

しなければならないエネルギー ${}_s E_{D1}$ を算出する。

$${}_s E_{D1} = \frac{{}_s E_D}{n} \quad (4)$$

ここで等価繰返し数  $n=5$  とする。

●ダンパー1本が1ループで吸収しなければならないエネルギー ${}_s E_{D1}$ より、ダンパーが必要な降伏軸力 ${}_s N_y$ を以下の式で算出する。なお、ダンパーは完全弾塑性とする。

$${}_s E_{D1} = 4 \cdot {}_s N_y ({}_s \delta_{\max} - {}_s \delta_y) \quad (5-1)$$

$${}_s N_y = \frac{{}_s E_{D1}}{4({}_s \delta_{\max} - {}_s \delta_y)} \quad (5-2)$$

ダンパーの降伏変位 ${}_s \delta_y$ は、以下によって算出される。

$${}_s \delta_y = \frac{{}_s N_y}{{}_s K} \quad (5-3)$$

$${}_s K = \frac{4 \cdot E \cdot A}{L}, \quad A = \frac{{}_s N_y}{{}_s \sigma_y} \quad (5-4)$$

$$(5-3), (5-4) \text{式より, } {}_s \delta_y = \frac{L \cdot {}_s \sigma_y}{4E} \quad (5-5)$$

を得る。(5-5)式を(5-2)式に代入することで以下が成り立つ。

$${}_s N_y = \frac{{}_s E_{D1}}{4\{{}_s \delta_{\max} - (L \cdot {}_s \sigma_y / E)\}} \quad (5-6)$$

ここで、 ${}_s \delta_{\max}$ : 最大変形、 $L$ : ダンパーの塑性化部長さ(材長の1/4)、 ${}_s \sigma_y$ : ダンパーの降伏応力度(225N/mm<sup>2</sup>)、 $E$ : ヤング係数である。なお、本論文では、 ${}_s \delta_{\max}=h/100$ とする( $h$ :階高)。ダンパーの耐力比は、全層で一樣とする。

●上層を柔剛混合構造へ置換し、せん断モデルを作成する。

ダンパー非設置層の主架構を柔剛混合構造とする。柔剛混合構造への置換方法として、1次剛性 $f_1 K_i$ を以下の式によって算出する。

$$f_1 K_i = \frac{f Q_{yi}}{f \delta_{yi}} \quad (6)$$

ここで、 $Q_{yi}$ : その層のいずれかの部材が降伏モーメントに達した際のせん断力、 $f \delta_{yi}$ : その層のいずれかの部材が降伏モーメントに達した際の層間変形を表す。

次に、2次剛性 $f_2 K_i$ を以下の式によって算出する。

$$f_2 K_i = \frac{f Q_{end} - f Q_{pi}}{f \delta_{end} - f \delta_{pi}} \quad (7)$$

ここで、 $f Q_{end}$ : 静的増分解析より得られた最終ステップでの層せん断力、 $f \delta_{end}$ : 静的増分解析より得られた最終ステップでの層間変形、 $f Q_{pi}$ : その層のいずれかの部材が全塑性モーメントに達した際の層せん断力、 $f \delta_{pi}$ : その層のいずれかの部材が全塑性モーメントに達した際の層間変形を表す。

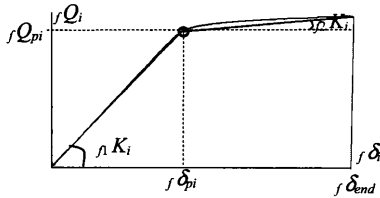


図2 2次剛性の考え方

次に、1次剛性 $f_1 K_i$ 、2次剛性 $f_2 K_i$ 、 $f \delta_{pi}$ 、 $f \delta_{end}$ 、 $f Q_{pi}$ 、 $f Q_{end}$ を用いて面積等価を行う。赤線の面積は以下の式によって算出できる。

$$W = \frac{f_1 K_i \cdot f \delta_{pi}^2}{2} + f_1 K_i \cdot f \delta_{pi} (f \delta_{end} - f \delta_{pi}) + \frac{f_2 K_i (f \delta_{end} - f \delta_{pi})^2}{2} \quad (8)$$

ここで、 $W$ : 静的増分解析から得られた最終ステップまでのエネルギー量。

(8)式の考え方に基づいて、 $f \delta_{yi}$ を算出すると以下の式を得る。

$$f \delta_{yi} = \frac{(f_2 K_i - f_1 K_i) f \delta_{end}}{f_2 K_i - f_1 K_i} + \frac{\sqrt{(f_1 K_i - f_2 K_i)^2 f \delta_{end}^2 - (f_2 K_i - f_1 K_i)(f_2 K_i \cdot f \delta_{end}^2 - 2W)}}{f_2 K_i - f_1 K_i} \quad (9)$$

(9)式によって算出された復元力特性を図3に示す。

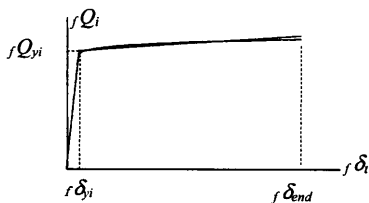


図3 面積等価した復元力特性

(8)式によって算出された2次剛性 $f_2 K_i$ を柔要素の1次剛性 $f k_i$ とする。1次剛性 $f_1 K_i$ と2次剛性 $f_2 K_i$ の差を剛要素の1次剛性 $s k_i$ とする。剛要素の2次剛性は0の完全弾塑性型とする。

図4に、上層を柔剛混合構造に置換した場合の復元力特性を示す。太線で示しているのが、柔剛混合構造に置換した場合の復元力特性である。

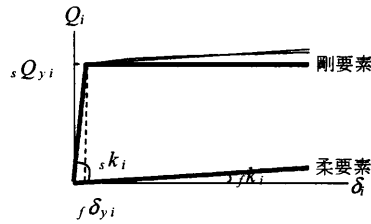


図4 柔剛混合構造の復元力特性

図5に、全層を柔剛混合構造に置換したモデル図を示す。柔要素と19~21層の剛要素は、降伏変位に達しなかった為、弾性としている。

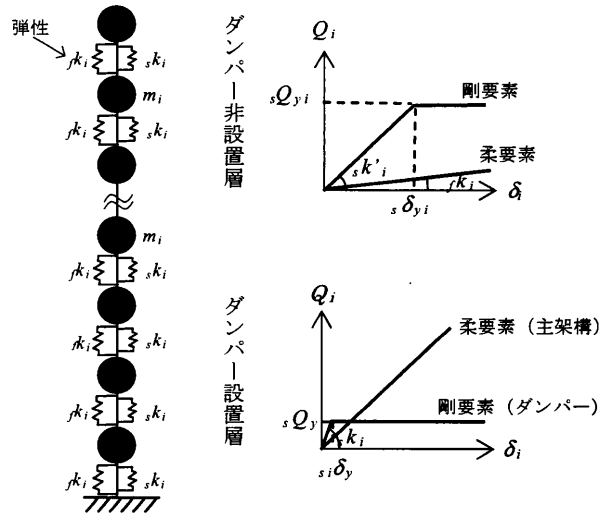


図5 モデル図

### 3. 入力地震動

想定する入力地震動は、 $S_T=100(\text{cm/s})$ 、 $160(\text{cm/s})$ 、 $200(\text{cm/s})$ に基準化したART-HACHINOHE(以降、ART-HACHI100, ART-HACHI160, ART-HACHI200)を使用する。図6(a),(b)に速度応答スペクトルおよびエネルギースペクトルを示す。

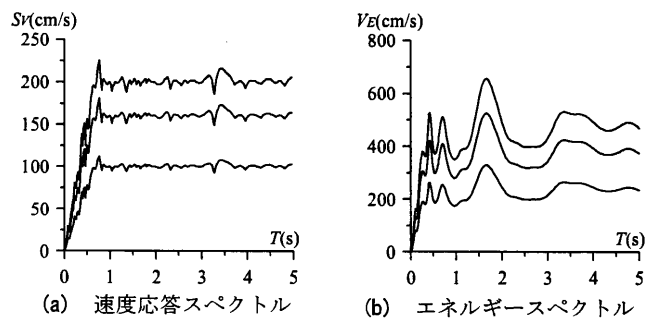


図6 検討用地震動

### 4. ダンパー量算出結果

#### 4.1 DS40モデル

表1に、DS40モデルにおけるダンパーの必要降伏軸力を示す。ART-HACHI100で539.7kN, ART-HACHI160で1381.7kN,

ART-HACHI200で2159.0kNとなった。なお、表中の $T_1$ は、建物の1次固有周期を表す。

表1 ダンパー設計結果(DS40)

地震動	ART-HACHI100	ART-HACHI160	ART-HACHI200
$V_E$ (m/s)	2.7	4.3	5.4
$V_D$ (m/s)	2.2	3.5	4.4
$E_D$ (kNm)	28502.5	72966.3	114009.8
${}_s E_D$ (kNm)	395.9	1013.4	1583.5
n	5.0	5.0	5.0
${}_s E_{D1}$ (kNm)	79.2	202.7	316.7
${}_s E_{D1}$ (kNmm)	79173.5	202684.1	316693.9
${}_s N_y$ (kN)	539.7	1381.7	2159.0
${}_s K_1$ (kN/mm)	406.3	1040.2	1625.3
$T_1$ (s)	1.912	1.755	1.705

4.2 DS20 モデル

表2に,DS20モデルにおけるダンパーの必要降伏軸力を示す。ART-HACHI100で1214.4kN, ART-HACHI160で3108.9kN, ART-HACHI200で3657.0kNとなった。

表2 ダンパー設計結果(DS20)

地震動	ART-HACHI100	ART-HACHI160	ART-HACHI200
$V_E$ (m/s)	2.7	4.3	5.4
$V_D$ (m/s)	2.2	3.5	4.4
$E_D$ (kNm)	28502.5	72966.3	114009.8
${}_s E_D$ (kNm)	890.7	2280.2	3562.8
n	5.0	5.0	5.0
${}_s E_{D1}$ (kNm)	178.1	456.0	712.6
${}_s E_{D1}$ (kNmm)	178140.3	456039.2	712561.3
${}_s N_y$ (kN)	1214.4	3108.9	4857.7
${}_s K_1$ (kN/mm)	914.3	2340.5	3657.0
$T_1$ (s)	2.158	2.115	2.094

5. 時刻歴応答解析とエネルギー法の比較

5.1 エネルギー配分式

高さ方向における剛要素のエネルギー配分式を示す<sup>5)</sup>。

$$\frac{1}{{}_s \gamma_i} = \frac{{}_s W_{pi}}{\sum_{i=1}^N {}_s W_{pi}} = \frac{{}_s s_i \cdot {}_s p_i^{-s n_i}}{\sum_{i=1}^N ({}_s s_i \cdot {}_s p_i^{-s n_i})} \quad (10)$$

ここで、損傷集中指数 $n_i$ は、秋山<sup>5)</sup>が提唱している梁降伏型の $n_i=8$ を全層で用いることとする。

$${}_s s_i = \left( \sum_{i=1}^N m_i \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \frac{{}_s k_1}{{}_s k_i} \quad (11)$$

$${}_s p_i = \frac{{}_s \alpha_{yi} / {}_s \alpha_{y1}}{\bar{\alpha}_i} \quad (12)$$

$${}_s \alpha_{yi} = \frac{{}_s Q_{yi}}{\sum_{j=i}^N m_j \cdot g} \quad (13)$$

$$r_{qi} = \frac{f Q_{max i}}{{}_s Q_{yi}} \quad (14)$$

$x' > 0.2$  の場合

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.5927x' - 11.8519x'^2 + 42.5833x'^3 - 59.4827x'^4 + 30.1586x'^5 \quad (15)$$

$x' < 0.2$  の場合

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 0.5x' \quad (16)$$

$$x' = 1 - \frac{\sum_{j=i}^N m_j}{M} \quad (17)$$

ここで、 $m_i$ :  $j$ 層の質量、 $M$ : 全質量、 ${}_f Q_{max i}$ : 主架構のみの時刻歴応答解析より得られた最大層せん断力、 ${}_s Q_{yi}$ : 剛要素の降伏せん断力である。

5.2 時刻歴応答解析とエネルギー法の高さ方向比較

5.2.1 DS40 モデル

最初に、せん断モデルの時刻歴応答解析より得られたDS40モデルにおける上層の損傷分散係数 $1/{}_s \gamma_i$ と塑性率 $\mu$ に着目する。図7(a),(b)より,ART-HACHI100とART-HACHI160入力時には、上層にエネルギーがほとんど配分されていない。一方で,ART-HACHI200入力時には、上層の各層にエネルギーが約0.3%配分されている。図7(c)を見ると,ART-HACHI100,ART-HACHI160入力時には、上層の $\mu$ は、1以下なのに対して、ART-HACHI200入力時には、上層の $\mu$ は、1以上となっている。したがって、本モデルの場合、エネルギーが0.3%でも配分された場合、梁が塑性化していると判断できる。次に、時刻歴応答解析より得られた $1/{}_s \gamma_i$ とエネルギー法により算出した $1/{}_s \gamma_i$ を比較する。図8(a),(b)より,ART-HACHI100,ART-HACHI160入力時には、上層にほとんどエ

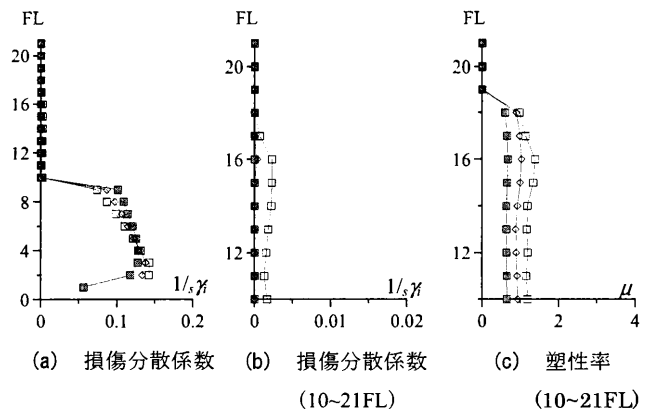


図7 時刻歴応答解析 (DS40モデル)

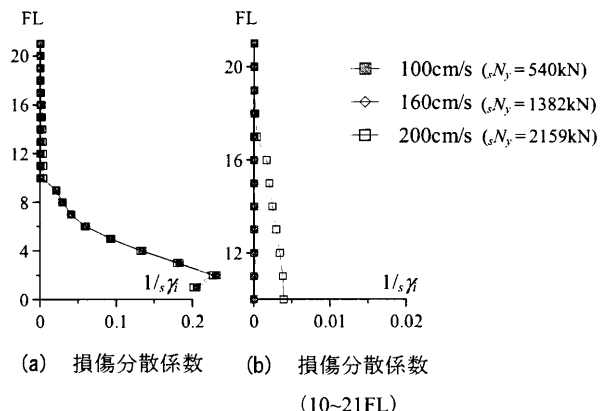


図8 エネルギー法 (DS40モデル)

エネルギーは配分されていないのに対して ART-HACHI200 入力時には、上層にエネルギーが配分されており、10層では約0.5%配分されている。したがって、エネルギー法により算出した  $1/s\gamma_i$  は、時刻歴応答解析の  $1/s\gamma_i$  と酷似しており、DS40モデルにおいては、本手法の妥当性が確認できた。

### 5.2.2 DS20 モデル

最初に、せん断モデルの時刻歴応答解析より得られた DS40モデルにおける上層の損傷分散係数  $1/s\gamma_i$  と塑性率  $\mu$  に着目する。図9(a),(b)より、ART-HACHI100入力時には、上層にエネルギーは配分されておらず、下層の剛要素が全てのエネルギーを吸収している。一方で、ART-HACHI160, ART-HACHI200入力時には、上層にエネルギーが配分されており、ART-HACHI200入力時にいたっては、5~18層で全てのエネルギーを吸収している。図9(c)より、ART-HACHI100入力時には、上層の  $\mu$  が1以下なのに対して、ART-HACHI160, ART-HACHI200入力時には、上層の  $\mu$  が1以上となっており、塑性化していることが分かる。次に、時刻歴応答解析より得られた  $1/s\gamma_i$  とエネルギー法により算出した  $1/s\gamma_i$  を比較する。図10(a),(b)より、ART-HACHI100入力時には、上層にエネルギーが配分されていないのに対して、ART-HACHI160, ART-HACHI200入力時には、上層にエネルギーが配分されている。この結果は、時刻歴応答解析より得られた結果と同様の傾向を示している。しかし、 $1/s\gamma_i$  が最大とな

る層を判断するのは難しい。たとえば、時刻歴応答解析で、ART-HACHI160入力時に、16層で  $1/s\gamma_i$  が大きくなるのに対して、エネルギー法では、5層で  $1/s\gamma_i$  が最も大きくなり、16層の  $1/s\gamma_i$  は小さくなる傾向にある。

### 6. おわりに

本論文では、ダンパーを下層に部分配置した建物を対象にエネルギー法が適応できるか検討した。最初に、エネルギースペクトルからダンパーを設計し、その後、全層を柔剛混合構造に置換し、せん断モデルを作成した。最後に、エネルギー法を用いて、ダンパー非設置層の塑性化の程度を確認した。その結果、本手法を用いたモデル化をすることで、秋山によって提案されているエネルギー法を適応することができ、上層が塑性化しているか判断できることが分かった。しかし、本論文では、限られた地震動と解析モデルを使用しているために、今後様々な地震動と解析モデルを使用し、妥当性を確認する必要がある。

### 謝辞

本研究は、社団法人日本鉄鋼連2011年度「鋼構造研究・教育助成事業」による「一般テーマ研究助成」(研究代表者:佐藤大樹)によって実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 山崎昭司, 大宮幸, 村岡康祐, 寺本隆幸: 低降伏点鋼制振部材を用いた超高層建築の応答性状に関する研究 その1,2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.723-724, 2003.9
- 2) 平田淳二, 寺本隆幸: 各種ダンパーを用いた鋼構造建物の応答性状に関する研究—ダンパー配置による影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.569-570, 2008.9
- 3) 星幸男, 鱗沢曜, 久田嘉章, 小菅美沙子: 首都圏にある超高層キャンパスの地震防災対策に関する研究(その4)超高層ビルの制震補強の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.619-620, 2007.8
- 4) 島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 斎藤大樹, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討—長周期地震動を想定した耐震改修—, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第649号, pp.549-557, 2010.3
- 5) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1997
- 6) 北村春幸, 財津和康, 馬谷原伴恵: 主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.71-78, 2006.1
- 7) 北村春幸, 馬谷原伴恵, 川崎恵: 時刻歴応答解析結果をもとにエネルギーの釣合に基づく耐震設計法を適用した建築物の耐震性評価法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第632号, pp.1755-1763, 2008.10
- 8) 長谷川隆, 西山功, 向井昭義, 石原直, 加村久哉: エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp.147-154, 2004.8
- 9) 栗林晃司, 佐藤大樹, 北村春幸: 履歴型制振部材を下層に部分配置した鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.273-276, 2010.3

\*1 東京理科大学 \*2 (独) 防災科学研究所

\*3 (株) 大林組 \*4 (株) 日建設計

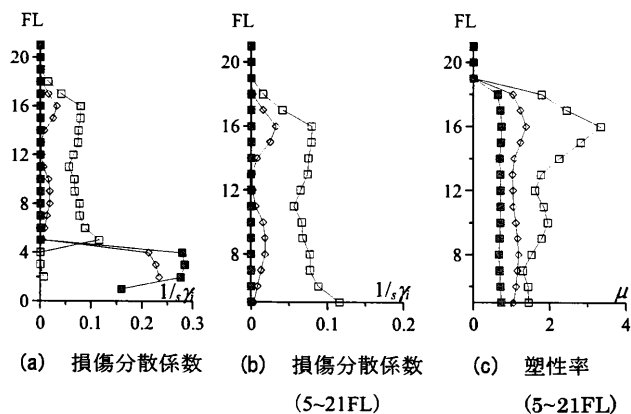


図9 時刻歴応答解析 (DS20 モデル)

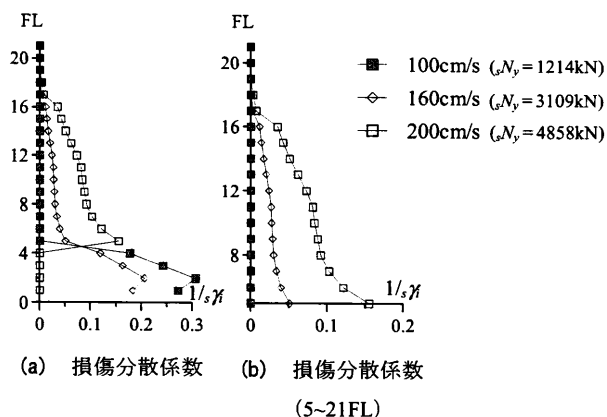


図10 エネルギー法 (DS20 モデル)