

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	変形制御構造におけるエネルギーの釣合に基づく応答予測法
Title	
著者(和文)	野村尚史, 佐藤大樹, 北村春幸, 植木卓也, 宮川和明
Authors	Naoshi Nomura, daiki sato, Haruyuki Kitamura, Kazuaki Miyagawa
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 1045-1046
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 1045-1046
発行日 / Pub. date	2013, 8
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/110009682889">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009682889</a>

変形制御構造におけるエネルギーの釣合に基づく応答予測法

正会員 ○野村尚史\*1 佐藤大樹\*2 北村春幸\*2  
植木卓也\*3 宮川和明\*4

極大地震 柔剛混合構造 変形制御機構  
1 質点系モデル エネルギーの釣合 応答予測法

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、震度7クラスの極大地震により甚大な建物被害が発生した。これを機に、柔剛混合構造<sup>1)</sup>が損傷制御構造<sup>2)</sup>として認知され、制振構造が多く採用されてきている<sup>3)</sup>。また、2011年の東北地方太平洋沖地震では、M9という極大地震が発生した。さらに近年では、南海トラフ地震、首都直下地震、上町断層地震等の発生が懸念されており、都市部で甚大な被害が想定されている。以上のような従来の想定以上の地震動に対しては、建物機能の維持を目的として高度な耐震性を持った建物(例えば<sup>4)</sup>)が目ざされるとともに、フェイルセーフを目的として変形制御機構を導入する重要性が高まってきている。変形制御機構については、ある変形以上の範囲で作用する硬化型復元力特性を持つ機構として様々な研究がなされており<sup>5-7)</sup>、解析的検討から変形制御機構による変形の低減効果を示している。しかし、様々なパラメータによる応答特性の変化を定性的に評価することは困難である。よって本報では、柔剛混合構造を1質点系でモデル化し、エネルギーの釣合に基づく耐震設計法<sup>1)</sup>(以降、エネルギー法と表記)を、硬化型復元力特性を有する変形制御機構を組み込んだ変形制御構造に拡張することで、応答特性の定性的かつ簡便な評価方法を提案する。

2. 変形制御構造におけるエネルギー法の提案

図1に変形制御構造の復元力特性を示す。変形制御構造は柔要素(*flexible element*)<sup>1)</sup>、剛要素(*stiff element*)<sup>1)</sup>、硬化型復元力特性を有する変形制御機構(*displacement controller*)で構成され、変形制御機構が作用し始める変形 $d\delta_{gap}$ は剛要素の降伏変形 $s\delta_y$ より大きく設定する。最大応答値発生時刻 $t_m$ のエネルギーの釣合<sup>8)</sup>を考え、変形制御機構が作用する場合( $\delta_{max} > d\delta_{gap}$ )のエネルギーの釣合式とエネルギーの算出式を以下に示す。

$$fW_e(t_m) + sW_p(t_m) + dW_e(t_m) = E_D(t_0) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} E_D(t_0) &= \frac{M \cdot V_D^2}{2}, fW_e(t_m) = \frac{M \cdot V_D^2}{2} \left( \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} \right)^2, \\ sW_p(t_m) &= \frac{M \cdot V_D^2}{2} \cdot 8n_1 \left( \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0} \right) \left( \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} \right), \\ dW_e(t_m) &= \frac{M \cdot V_D^2}{2 \cdot f_d \kappa} \left( \frac{d\alpha_{max}}{f\alpha_0} \right)^2 = \frac{M \cdot V_D^2}{2} \cdot f_d \kappa \cdot \\ &\left\{ \left( \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} \right)^2 - 2 \frac{d\delta_{gap}}{f\delta_0} \left( \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} \right) + \left( \frac{d\delta_{gap}}{f\delta_0} \right)^2 \right\} \end{aligned} \tag{2a-d}$$

$dW_e$ は $f\alpha_{max}/f\alpha_0$ を用いて導出され、 $d\kappa = f_d \kappa \cdot f\kappa$ に $\delta_{max} = fQ_{max}/f\kappa$ 及び $\delta_{max} - d\delta_{gap} = dQ_{max}/d\kappa$ を代入し $d\alpha_{max}/f\alpha_0$ は下式で表される。

$$\frac{d\alpha_{max}}{f\alpha_0} = f_d \kappa \cdot \left( \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} - \frac{d\delta_{gap}}{f\delta_0} \right) \tag{3}$$

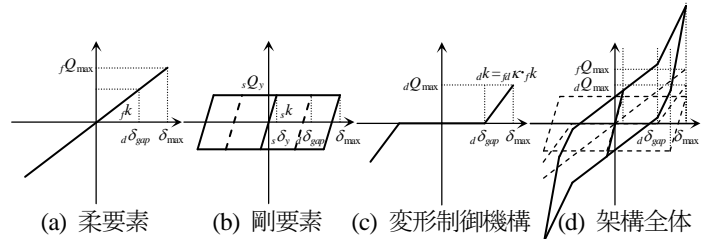


図1 変形制御構造の復元力特性

ここに、 $M$ :質量、 $t_0$ :地震動の継続時間、 $E_D$ :損傷に寄与するエネルギー<sup>1)</sup>、 $fW_e$ 、 $dW_e$ :柔要素及び変形制御機構の弾性振動エネルギー、 $sW_p$ :剛要素の塑性履歴エネルギー、 $V_D$ : $E_D$ の速度換算値<sup>1)</sup>、 $fQ_{max}$ 、 $dQ_{max}$ :柔要素及び変形制御機構の最大せん断力、 $f\alpha_{max}$ 、 $d\alpha_{max}$ :柔要素及び変形制御機構の最大せん断力係数、 $s\alpha_y$ :剛要素の降伏せん断力係数、 $f\alpha_0$ :柔要素のみの場合の最大せん断力係数、 $\delta_{max}$ :最大変形、 $f\delta_0$ :柔要素のみの場合の最大変形、 $f_d \kappa$ :柔要素の剛性 $f\kappa$ に対する変形制御機構の剛性 $d\kappa$ の割合、 $n_1$ :剛要素の等価繰返し数である。

$f\alpha_{max}/f\alpha_0 (= \delta_{max}/f\delta_0)$ は式(1),(2)を用いて下式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} &= \frac{\delta_{max}}{f\delta_0} \\ &= \frac{1}{1 + f_d \kappa} \cdot \left[ \frac{-4n_1 \cdot \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0} + f_d \kappa \cdot A}{\sqrt{\left( 4n_1 \cdot \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0} \right)^2 + 1 - f_d \kappa \cdot B + f_d \kappa \cdot C}} \right] \end{aligned} \tag{4}$$

$\alpha_{max}/f\alpha_0$ は式(4)より下式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_{max}}{f\alpha_0} &= \frac{f\alpha_{max}}{f\alpha_0} + \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0} + \frac{d\alpha_{max}}{f\alpha_0} \\ &= -(4n_1 - 1) \cdot \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0} + \sqrt{\left( 4n_1 \cdot \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0} \right)^2 + 1 - f_d \kappa \cdot B + f_d \kappa \cdot C} \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、式(4),(5)において、

$$A = \frac{d\delta_{gap}}{f\delta_0}, B = 8 \cdot n_1 \cdot A \cdot \frac{s\alpha_y}{f\alpha_0}, C = 1 - A^2 \tag{6a-c}$$

なお、式(4),(5)において $f_d \kappa = 0$ とすると、変形制御機構が作用しない場合( $\delta_{max} < d\delta_{gap}$ )の応答予測式が導出される。

3. 時刻歴応答解析による応答予測式の検証

図2に解析モデル、表1に解析パラメータを示す。なお、図2及び表1では制振構造を想定している。建物高さ $H$ を33mとし、柔要素のみの場合の1次固有周期 $fT_1$ は $0.03H, 0.06H$ <sup>9)</sup>となる。等価建物高さ $H_{eq}$ は $2/3H (= 22m)$ とし、剛要素の $s\delta_y$ は3.36cmとする。 $V_D$ の解析値が表1に示した $V_D$ と同程度となるよう、ART KOBEの入力加速度倍率を調整して解析を行

う。表1に示した $V_D$ は、 $f_h=0.02$ として下式<sup>1)</sup>で算出される。

$$V_D = \frac{V_E}{1+3f_h+1.2\sqrt{f_h}} \quad (6)$$

解析では $V_E=120$  cm/sをレベル2地震動とし、 $V_E=120, 240, 360$  cm/s (表1参照)を対象とする。図3に入力地震動の擬似速度応答スペクトル ${}_p S_v$ 及びエネルギースペクトル $V_E$ を示す。入力地震動には ${}_p S_v$ が一定となる模擬波を用いる。位相特性はJMA KOBE 1995 NSとし、ART KOBEと表記している。図3には ${}_p S_v$ が160 cm/sで一定となる場合を示し、ART KOBE 160と表記している。各解析ケースで、 $V_D$ の解析値が表1の $V_D$ と同程度となるように入力加速度倍率を調整して解析を行う。

図4に $\alpha_{\max}/f\alpha_0$ 及び $\delta_{\max}/f\delta_0$ の解析値と予測値の比較を示す。予測値は、 ${}_s \alpha_y$ をパラメータとし、式(4)より $\delta_{\max}/f\delta_0$ ( $f\alpha_{\max}/f\alpha_0$ )、式(5)より $\alpha_{\max}/f\alpha_0$ を算出する。 $n_1$ は $2.5^{-10}$ を採用する。着目するケースは $V_E=360$  cm/s、 $fT_1=2.0$  s、 ${}_d R_{gap}=1/500, 1/100$  rad、 ${}_{fd} \kappa=1.0, 4.0$ とし、制振構造の予測値も示している。図4より、一定の ${}_s \alpha_y$ における高耐震性能構造の応答特性を、 ${}_s \alpha_y/f\alpha_0=0$ の予測値を代表して説明する。 ${}_d R_{gap}$ を一定として ${}_{fd} \kappa$ の変化が応答に与える影響について述べると、 ${}_{fd} \kappa$ が大きいほど ${}_d R_{gap}$ 以降での $\alpha_{\max}/f\alpha_0$ の増大は顕著であり、 $\delta_{\max}/f\delta_0$ の低減及び $\alpha_{\max}/f\alpha_0$ の増大傾向は顕著である。 ${}_{fd} \kappa$ を一定として ${}_d R_{gap}$ の変化が応答に与える影響について述べると、 ${}_d R_{gap}$ が小さいほど $\delta_{\max}/f\delta_0$ の低減傾向は顕著であり、 $\alpha_{\max}/f\alpha_0$ は増大する傾向となるが、 $\alpha_{\max}/f\alpha_0$ の増大傾向は ${}_d R_{gap}$ の変化による影響に比べ ${}_{fd} \kappa$ の変化による影響が顕著である。これらは、文献11)で得られた部材レベルモデルの傾向と一致する。また、予測値は解析値の傾向を概ね捉えていることがわかる。以上より、変形制御機構の応答特性は式(4)、(5)で評価可能である。

ここで、式(4)、(5)の適用例として、変形制御機構を組込んだ免震構造について検討する。図5に、変形制御機構を組込んだ1質点系免震構造モデルの検討として、 $\alpha_{\max}$ と $\delta_{\max}$ の解析値及び予測値を示す。解析モデルは図2と同様とし、 $fT_1$ は免震層の周期、 $f_h$ は粘性減衰型ダンパーによる減衰を想定する。図5より、 $V_E=120$  cm/sに対して $\alpha_{\max}$ が十分に低減している、 ${}_s \alpha_y=0.02$ に着目すると、変形制御機構を付与しない場合の $V_E=240$  cm/sに対する $\delta_{\max}$ は設計クライテリアとして設定した60 cmを上回る(図中□)が、 ${}_d \delta_{gap}=30$  cm、 ${}_{fd} \kappa=20$ の変形制御機構を組込むことで60 cmを下回る(図中△)ことがわかる。また、予測値は解析値を概ね捉えていることがわかる。以上より、免震構造を想定した場合の応答特性も式(4)、(5)で評価可能である。

#### 4. まとめ

本報では、1質点系モデルを対象として硬化型復元力特性を有する変形制御機構を組込んだ変形制御機構のエネルギー法を提案した。変形制御機構の応答特性は、文献11)で示している部材レベルモデルの傾向と一致し、提案したエネルギー法により変形制御機構の応答特性を定性的かつ簡便に評価可能であることを示した。

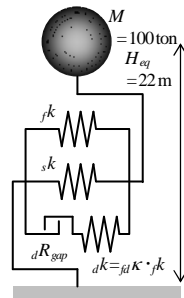


図2 解析モデル

表1 解析パラメータ

柔要素の 1次固有周期 $fT_1$ (s)	1.0, 2.0
剛要素の 降伏せん断力係数 ${}_d \alpha_y$	0.02, 0.04, 0.08, 0.12, 0.15
変形制御機構が作用し始める 変形角 ${}_d R_{gap}$ (rad)	1/500, 1/200, 1/120, 1/100
柔要素の剛性に対する プレースの剛性比 ${}_{fd} \kappa$	1.0, 2.0, 4.0, 8.0
入力エネルギーの 速度換算値 $V_E$ (cm/s)	120(98), 240(195), 360(293) ※括弧内: $V_D$

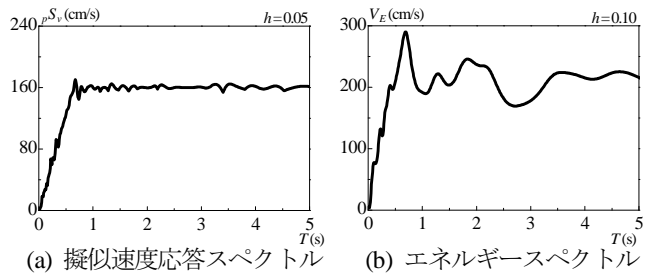


図3 地震動のスペクトル (ART KOBE 160)

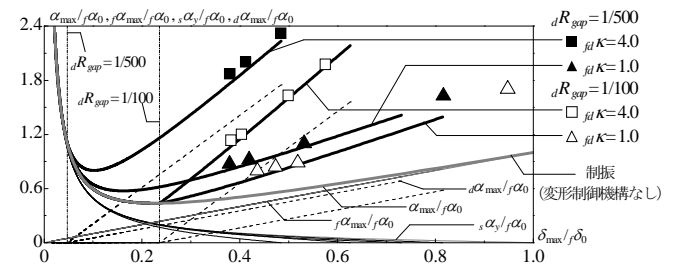


図4 解析値と予測値の比較 ( $V_E=360$  cm/s,  $fT_1=2.0$  s)

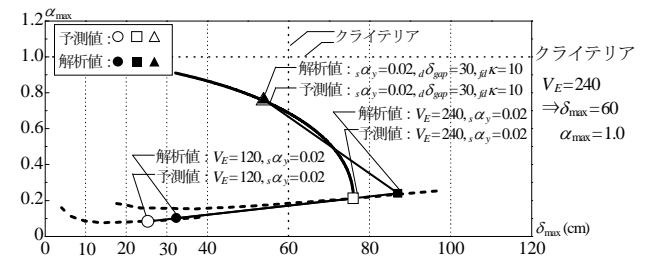


図5 1質点系免震構造モデルの検討例 ( $fT_1=4.0$  s,  $n_1=2.0$ )

#### 参考文献

- 1) 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，1999
- 2) 岩田衛，黄一華，川合廣樹，和田章：被害レベル制御構造「Damage Tolerant Structure」に関する研究，日本建築学会技術報告集，第1号，pp.82-87，1995.12
- 3) 北村春幸，北村佳久，伊藤優，坂本光雄：適用建物調査に基づく日本の応答制御構造の分析・評価，日本建築学会技術報告集，第18号，pp.55-60，2003.12
- 4) 府省連携 革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発プロジェクト：新構造システム建築物設計・施工（案），新都市ハウジング協会，日本鉄鋼連盟，日本鋼構造協会，2009.3
- 5) 渡辺宏一，田村和夫：ギャップ連層壁架構の基本振動特性，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.2753-2758，1998.11
- 6) 本間誠，堀則男，井上範夫：エネルギー応答に基づいた地震を受ける鉄筋コンクリート建物におけるダンパーと変形制御機構の設計，日本建築学会構造系論文集，第618号，pp.49-56，2007.8
- 7) 南博之，鈴木恭平，多幾山法子，大西良広，林康裕：パルス性地震動に対する変形制御機構の効果に関する研究，日本建築学会技術報告集，第39号，pp.471-476，2012.6
- 8) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門，彰国社，2002
- 9) 野村尚史，佐藤大樹，北村春幸，藤澤一善：建築構造用高強度鋼材 H-SA700 と制振部材を組合せた高耐震化中低層鋼構造建物の応答性状，構造工学論文集，Vol.58B，pp.179-187，2012.3
- 10) 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
- 11) 野村尚史，佐藤大樹，北村春幸，植木卓也，宮川和明：高強度鋼と制振部材及び変形制御機構を組合せた高耐震性能構造の部材レベルモデルによる検討，日本建築学会関東支部研究報告集，2013.3

\*1 戸田建設株式会社 (元 東京理科大学)  
\*2 東京理科大学  
\*3 JFE スチール株式会社  
\*4 JFE シビル株式会社

Toda Corporation  
Tokyo University of Science  
JFE Steel Corporation  
JFE Civil Engineering & Construction Corporation