

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	木質制振架構の水平バネ系への変換と制振効果の理論的考察
Title(English)	CONVERSION RULE FOR WOODEN PASSIVELY CONTROLLED FRAME TO SPRING MODEL AND CONSIDERATION OF PASSIVE CONTROL EFFECT
著者(和文)	山崎義弘, 笠井和彦, 坂田弘安, 松田和浩
Authors(English)	Yoshihiro Yamazaki, KAZUHIKO KASAI, HIROYASU SAKATA, Kazuhiro Matsuda
出典(和文)	第13回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, No. , pp.
Citation(English)	, CD-ROM, No. , pp.
発行日 / Pub. date	2010, 11

木質制振架構の水平バネ系への変換と制振効果の理論的考察  
CONVERSION RULE FOR WOODEN PASSIVELY CONTROLLED  
FRAME TO SPRING MODEL AND CONSIDERATION  
OF PASSIVE CONTROL EFFECT

山崎義弘<sup>1)</sup>、笠井和彦<sup>2)</sup>、坂田弘安<sup>3)</sup>、松田和浩<sup>4)</sup>

Yoshihiro YAMAZAKI<sup>1</sup>, Kazuhiko KASAI<sup>2</sup>, Hiroyasu SAKATA<sup>3</sup> and Kazuhiro MATSUDA<sup>4</sup>

1) 東京工業大学、日本学術振興会特別研究員 修士(工学)

<sup>1</sup> JSPS Research Fellow, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

e-mail : yamazaki.y.ai@m.titech.ac.jp

2) 東京工業大学、教授 Ph. D

<sup>2</sup> Professor, Tokyo Institute of Technology, Ph. D

e-mail : kasai@serc.titech.ac.jp

3) 東京工業大学、准教授 工博

<sup>3</sup> Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

e-mail : hsakata@serc.titech.ac.jp

4) 東京工業大学、助教 博士(工学)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

e-mail : matsuda@serc.titech.ac.jp

**ABSTRACT:** In order to confirm the passive control effect for wooden houses, the authors propose simplified modeling method and demonstrate its applicability. Since wooden frame has some non-linearity, which typically makes it difficult to analyze its seismic performance, equivalent linearization method is adopted. As a result, the relation between added damper stiffness and dynamic properties of system is easily expressed.

**キーワード：** 木質架構、制振構造、水平バネ系、粘弾性ダンパー

## 1. はじめに

木造戸建住宅のための制振ダンパーの開発<sup>1,2)</sup>、およびその性能向上のための研究が盛んに行われており、ダンパーを住宅に組み込んだ後の制振効果を時刻歴解析によりシミュレーションすることも試みられている<sup>3,4)</sup>。このような解析で重要となるのは、制振壁の解析モデルの作成法である。筆者らはダンパー種別によらない架構の特性を求めておけば、ダンパー付きの架構の動的特性を厳密かつ簡易に求められる手法を示した<sup>1,5,6)</sup>。この手法を応用すれば、自由度の高い骨組解析モデルを2自由度の水平バネ系へと変換することで、その性能評価が容易になり、よって試行錯誤的な作業に頼らず目標性能を満たすダンパー量を直ちに設定することも可能となる。

本論では、粘弾性ダンパーを有する木質制振架構の水平バネ系への変換法を示し、これに基づき制振架構の性能評価法を示す。また、筆者らが開発した制振壁<sup>1,7)</sup>を例に、その制振効果を理論的に考察する。

2. 制振構造の自由度縮約法と水平バネ系への変換

2.1 水平バネ系への変換

文献 6)で述べたごとく、任意の形式の制振構造を図 1 に示すような水平バネ系に変換することを考える。すなわち、制振構造を「擬似ダンパー」、「擬似ブレース」および「擬似フレーム」の 3 要素からなる 2 自由度系に縮約する。これら 3 要素のバネ定数は、図 2 に示す 2 状態の特性値を用いて表すことができる。これらは、ダンパー解除の状態 N(No-Damper)と、ダンパー固定の状態 R(Rigid-Damper)である。なお、ここでは架構を弾性と仮定しておき、本論では粘弾性ダンパーのみ扱う。

この状態 N, R における架構の層間変形と層せん断力を、それぞれ  $u_N, F_N$  および  $u_R, F_R$  と呼ぶ。また、ダンパー部の変形と力を、それぞれ  $\hat{u}_{dN}, \hat{F}_{dN}$  および  $\hat{u}_{dR}, \hat{F}_{dR}$  と呼ぶ。ただし、2 状態の定義より  $\hat{F}_{dN} = 0, \hat{u}_{dR} = 0$  である。これらを用いて、以下の特性値を定義する。

$$K_N = F_N / u_N \quad , \quad K_R = F_R / u_R \quad , \quad \alpha_N = \hat{u}_{dN} / u_N \quad , \quad \alpha_R = \hat{F}_{dR} / F_R \quad (1a-d)$$

これらの特性値を用いて、擬似ブレース・擬似フレームのバネ定数  $K_{bs}, K_{fs}$ 、そして擬似ダンパーの貯蔵剛性  $K'_{ds}$ 、損失係数  $\eta_{ds}$  を以下のように表す<sup>6)</sup>。

$$K_{bs} = K_R - K_N \quad , \quad K_{fs} = K_N \quad , \quad K'_{ds} = \alpha_N^2 \hat{K}'_d \quad , \quad \eta_{ds} = \eta_d \quad (2a-d)$$

ここに、添え字「s」はバネ系(spring)を表し、 $\hat{K}'_d$  = ダンパー稼働方向の剛性、 $\eta_d$  = ダンパーの損失係数である。ただし、方杖型架構のようにダンパーが複数ある場合の  $\hat{K}'_d$  は、それらの和とする。また、式(1)の 4 つの特性値の間には、次式のような関係がある。

$$K_N = (1 - \alpha_N \alpha_R) K_R \quad (3)$$

ゆえに、式(1)に示す 4 つの特性値のうち 3 つを実験より得ることができれば、制振構造の応答を厳密に再現する水平バネ系を作成できる。

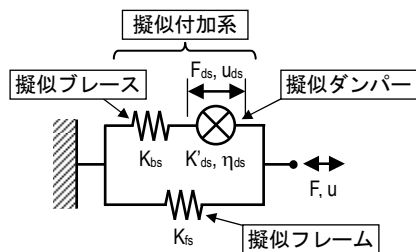


図 1 制振構造を表す水平バネ系

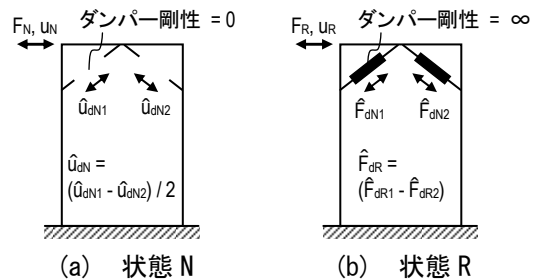


図 2 制振構造の状態 NR の定義

2.2 骨組特性値の算出と木質架構における問題点

前節では線形理論に基づいて式展開を行ったが、木質制振架構を対象とした場合には、木材の材料特性のために、比較的小変形時から架構の非線形性が見られるため、骨組特性値も変形量に応じて変化する。文献 7)で示した方杖型制振壁(図 3)の状態 NR 静的載荷実験結果を図 4 に例示する。これより、状態 NR の剛性を表す  $K_N, K_R$  は一定値ではなく、容易には求まらないことが分かる。あるいは、このような木質部分の挙動を非線形バネで再現することも考えられるが、当然ながら、線形バネに置換することができれば解析が容易になるだけでなく、ダンパー量と制振効果の関係を理論に基づき考察可能となる。次節以降で、この非線形性を考慮した骨組特性値の算出方法を述べる。

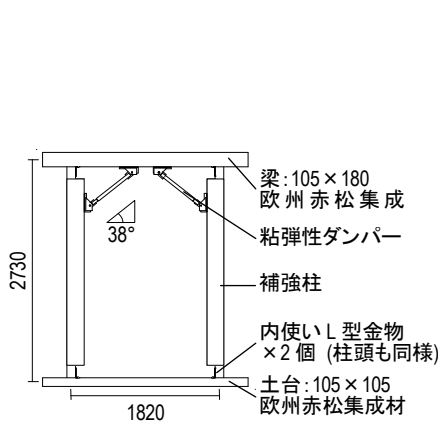


図3 方杖型制振壁の立面図

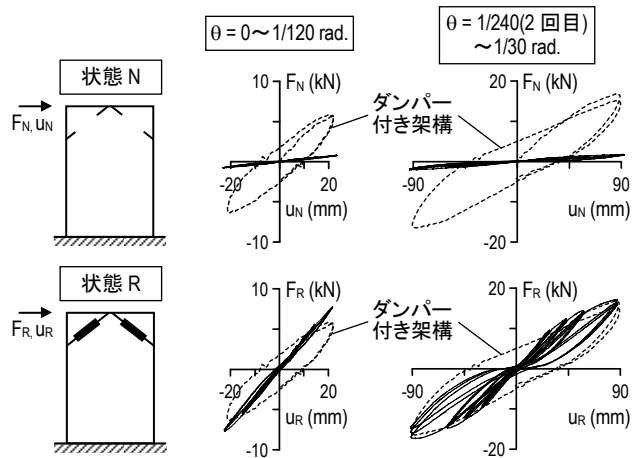


図4 方杖型制振壁の状態N, 状態Rにおける実験値 (破線はダンパー付き架構の1/120, 1/30rad. 時)

### 3. 木質制振架構の動的特性・最大応答評価法

#### 3.1 線形構造への近似

ある仮定した量のダンパーを付加した水平バネ系における力の釣り合い、および変形の適合条件から、各バネの最大変形を求め、これにより各バネの等価剛性を定める。そして、既報の線形理論<sup>8,9)</sup>に基づき、システムの動的特性・最大応答、ダンパーの最大力・最大変形の理論解を求めることができる。始めに仮定するダンパー量を様々に変化させれば、ダンパー量と動的特性等の関係が連続関数で表される。ある特定の大きさのダンパーを付加した制振構造の性能はこの図を基に評価でき、ダンパー量の適正を判断することもできる。

与条件として、状態NR実験より $\alpha_N$ ,  $F_N-u_N$ 関係、および $F_R-u_R$ 関係が得られているものとし、これらの包絡線を最小二乗法により4次関数に近似しておく。すなわち、

$$F_R = \sum_{i=0}^4 a_i (u_R)^i, \quad F_N = \sum_{i=0}^4 b_i (u_N)^i \quad (a_i, b_i = \text{定数}) \quad (4a,b)$$

図5のように、著しく耐力低下が生じない場合には、4次関数で良い近似が得られる。なお、式(4)は $u_R > 0, u_N > 0$ の場合である。

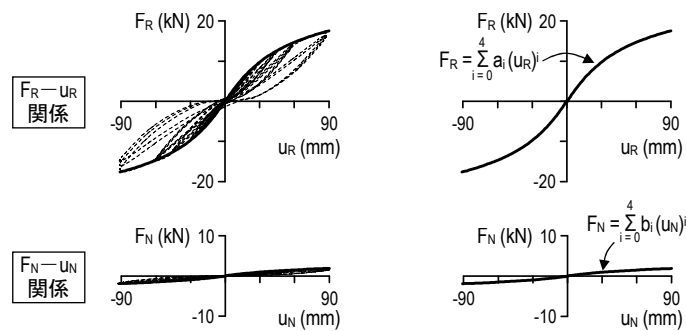


図5  $F_R-u_R$ 関係と $F_N-u_N$ 関係の包絡線の4次関数による近似

まず、システムの最大変形  $u_0$  を設定すれば、擬似フレームの剛性  $K_{fs}$  は  $u_N = u_0$  における  $K_N (= F_N/u_N)$  として、式(4b)より求まる。また、擬似ダンパーと元の粘弾性ダンパーの損失係数は等しく、 $\eta_{ds} = \eta_d = 1$  と仮定する<sup>8)</sup>。そして、以下に述べる 4 ステップの計算を行う。

- 1) 付加するダンパー量  $K'_{ds}/K_{bs}$  を仮定し、次式より擬似ブレースの最大変形  $u_{bs0}$  を求める<sup>9)</sup>

$$u_{bs0} = u_0 \sqrt{1 + \eta_{as}^2 K'_{as}/K_{bs}} \quad (5)$$

ただし、 $K'_{as}$ 、 $\eta_{as}$  = 擬似付加系の貯蔵剛性と損失係数であり、式(5)における  $K'_{as}/K_{bs}$  と  $\eta_{as}$  は次式から得られる。

$$\frac{K'_{as}}{K_{bs}} = \frac{K'_{ds}/K_{bs}}{K'_{ds}/K_{bs} + 1/\Gamma_b}, \quad \Gamma_b = 1 + \frac{\eta_d^2}{1 + K_{bs}/K'_{ds}}$$

$$\eta_{as} = \frac{\eta_d}{1 + (1 + \eta_d^2)K'_{ds}/K_{bs}} \quad (6a-c)$$

- 2) 1)の式(5)で得た変形  $u_{bs0}$  から、擬似ブレースの割線剛性  $K_{bs}$  を以下のように得る(付録 A)。

$$K_{bs} = \sum_{i=0}^4 (a_i - b_i)(u_{bs0})^i / u_{bs0} \quad (7)$$

さらに、1)で仮定した  $K'_{ds}/K_{bs}$  より、 $K'_{ds}$  も得られる。

- 3) 次式よりシステムの貯蔵剛性  $K'_s$ 、損失剛性  $K''_s$ 、等価減衰  $h_{eqs}$ 、最大力  $F_{s0}$  を得る。

$$K'_s = K'_{as} + K_{fs}, \quad K''_s = 2h_{eqs} K'_s$$

$$h_{eqs} = \eta_{as} K'_{as}/K'_s, \quad F_{s0} = \sqrt{1 + 4h_{eqs}^2} K'_s u_0 \quad (8a-d)$$

また、擬似ダンパーの最大変形  $u_{ds0}$  と最大力  $F_{ds0}$  は、

$$u_{ds0} = \sqrt{\eta_{as} K'_{as}/\eta_{ds} K'_{ds}} u_0, \quad F_{ds0} = \sqrt{1 + \eta_{ds}^2} K'_{ds} u_{ds0} \quad (9a,b)$$

- 4) 擬似ダンパーの応答を元の制振架構におけるダンパー稼働方向の応答に変換する<sup>6)</sup>。ダンパーの最大変形  $\hat{u}_{d0}$  と最大力  $\hat{F}_{d0}$  は、

$$\hat{u}_{d0} = \alpha_N u_{ds0}, \quad \hat{F}_{d0} = F_{ds0}/\alpha_N \quad (10a,b)$$

と表される。

以上が、ある仮定した  $K'_{ds}/K_{bs}$  に対する計算手順であり、他の  $K'_{ds}/K_{bs}$  については 1)~4)の計算を繰り返して行うことで、システムの性能評価曲線が作成できる。

### 3.2 制振効果のパラメトリック解析

図 6 は、 $u_0 = 22.8 \text{ mm}$  ( $\theta = 1/120 \text{ rad.}$ ) での方杖型制振壁において、付加する擬似ダンパーの貯蔵剛性  $K'_{ds}$  とシステムの動的特性値・最大応答、ダンパーの最大力・最大変形の関係を示している。図中黒丸は、方杖型制振壁の  $K'_{ds}$  値 ( $= 0.37 \text{ kN/mm}$ ) のケースであり、三角と白丸は左から順に、 $h_{eqs}$ 、 $K''_s$  を最大にする  $K'_{ds}$  値のケースである。

実験に用いた方杖型制振壁は、高めの  $K'_{ds}$  値を与えたため、高い  $K'_s$  を有しており、 $h_{eqs}$  は 0.15 となった。これとは別に、 $K'_s$  よりも  $h_{eqs}$  を重要視したい場合には、かなり低めの  $K'_{ds}$  値で十分であり、そのとき  $h_{eqs} = 0.25$  が得られるが、壁倍率は 1 を下回ってしまう。ここで、 $1/120 \text{ rad.}$  での  $F_{s0}$  値が  $3.6 \text{ kN}$  ( $= 1.96 \text{ kN} \times 1.82 \text{ m}$ ) のときに壁倍率 = 1 と定義した。 $K''_s$  を最大にする  $K'_{ds}$  値では、 $K'_s$ 、 $h_{eqs}$  をともに高めに設定できるように思われるが、壁倍率 = 1.4 となり、実験値よりも低くなる。

本論で例示した方杖型制振壁は開口部への設置により、木造住宅の剛性偏心を矯正するという趣旨の基で設計を行ったため、高い  $K'_s$  を重要視し、これを実現したことが図 6 より分かる。その他、筆者らの

理論を基に、制振構造の設計に必要な動的特性値、ダンパーの局所応答も求めることが可能となった。

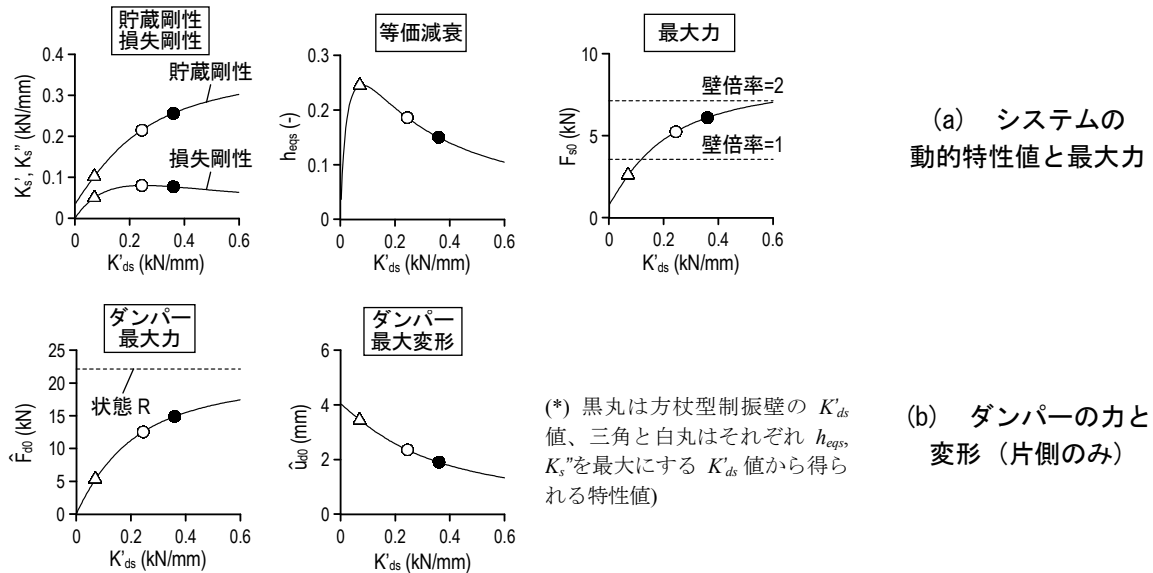


図6 方杖型制振壁の状態NR実験に基づく動的特性値・最大応答の評価結果

### 3.3 実験結果との比較

前節の手法を用い、実験結果の予測を行う。対象とするのは前述の方杖型制振壁とK型制振壁<sup>1)</sup>である。これらの制振壁の状態NR実験の結果を用いて水平バネ系(図1)を作成し、ダンパー部の構成則には文献10)のアルゴリズムを用いて時刻歴解析を行った。

図7に、 $\theta = 1/120, 1/60$  rad.の定常载荷を行ったときの実験結果と水平バネ系による解析結果の比較を示す。2種制振壁ともシステムの剛性や最大力、エネルギー吸収量、ダンパー変形など、実験値を高精度で予測できている。実験結果と同様に、解析結果においてもサイクル毎にダンパー剛性が若干低下しているが、これは温度上昇を考慮したためである<sup>10)</sup>。水平バネ系の解析で粘弾性体の温度上昇を考慮する場合、比熱と密度の積である  $s\rho$  を、 $\alpha_N$  で割っておく必要があるため、注意されたい。

なお、図1に示した制振壁の時刻歴解析モデルを、状態NR実験を行わずダンパー付き架構実験のみから作成する例も見られるが<sup>3)</sup>、この方法では同一架構においてダンパー力が最も上昇する状態Rを考慮できないため、前節で示したダンパー量を変化させた場合の検討ができず、特定のダンパー量での検討に留められる。

### 4. おわりに

粘弾性ダンパーを有する木質制振架構の水平バネ系への変換法を示し、制振効果を理論的に考察した。制振架構の木質部分は非線形挙動を示すが、これを線形バネに置換したバネ系により、実験履歴を高精度で予測できた(図7)。また、付加ダンパー量とシステムの動的な特性値・ダンパーの局所応答の関係は図6のように表され、パラメトリックに検討可能となった。

なお、粘弾性ダンパー以外のダンパーを有する制振架構について本論では扱わなかったが、同様の手法を展開することで本提案法を拡張可能と考えられる。

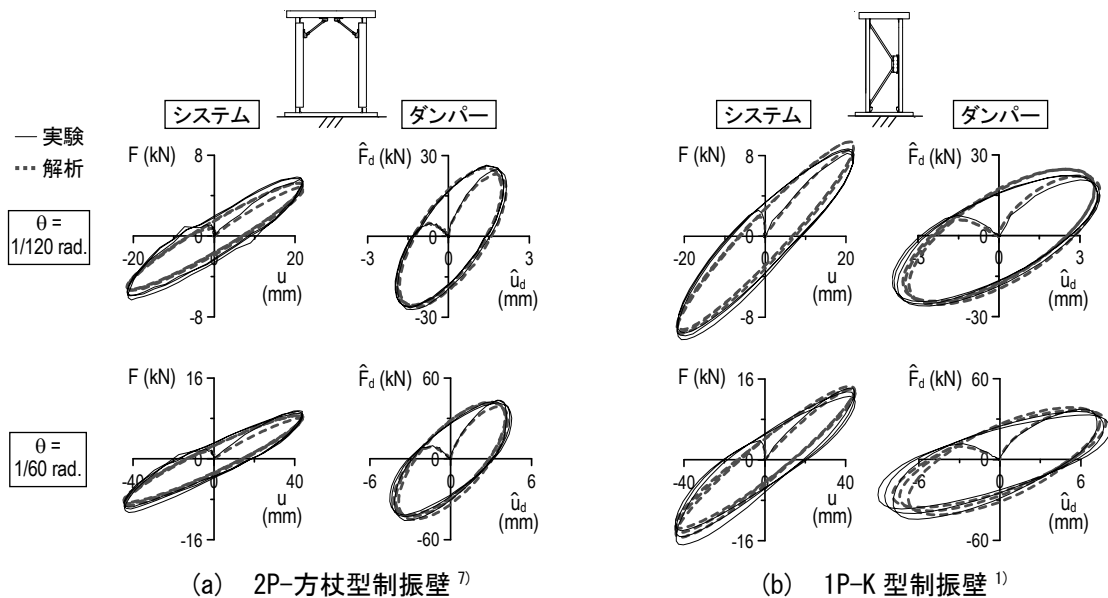


図7 線形に近似した水平バネ系による実験履歴の解析結果

参考文献

- 1) 笠井和彦, 坂田弘安, 和田章, 宮下健 : K型ブレースによるシアリンク制振架構を用いた木質架構の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第598号, pp.51-59, 2005.12
- 2) 坂田弘安, 笠井和彦, 和田章, 宮下健 : 合板パネルによるシアリンク制振架構を用いた木質架構の動的挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第594号, pp.65-73, 2005.8
- 3) 篠原昌寿, 五十田博, 石本篤史 : オイルダンパー制振壁を持つ2層木質架構の地震時応答変位の解析的再現と木造用制振壁の評価値の妥当性, 日本建築学会構造系論文集, 第648号, pp.377-384, 2010.2
- 4) 曾田五月也, 宮津裕次, 松永裕樹 : 方杖型圧効きオイルダンパによる木造住宅の制振に関する実験的研究, 第649号, pp.559-566, 2010.3
- 5) 笠井和彦, 城台顕 : 間柱型粘弾性ダンパーをもつ制振構造の動的特性と挙動およびそれらの簡易評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第558号, pp.125-132, 2002.8
- 6) 笠井和彦, 岩崎啓介 : 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, 第605号, pp.37-46, 2006.7
- 7) 山崎義弘, 笠井和彦, 坂田弘安, 大木洋司 : 剛性偏心した木質立体架構の粘弾性ダンパーによる振れ応答制御, 日本建築学会構造系論文集, 第655号, pp.1961-1700, 2010.9
- 8) 笠井和彦, 大熊潔 : 振動数に依存する制振構造の等価周期・等価減衰の評価法とその精度, 日本建築学会構造系論文集, 第580号, pp.51-59, 2004.6
- 9) 笠井和彦, 湊直生, 川鍋佳史 : 粘弾性ダンパーの等価剛性の調節による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集, 第610号, pp.75-83, 2006.12
- 10) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健 : 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則 (その1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp.77-86, 2001.5

付録A 非線形領域における水平バネ系への変換法

図 1 に示した水平バネ系における力の釣り合いは、次式で表される。

$$F = K_N u + \frac{\alpha_N^2 \hat{K}_d (K_R - K_N)}{\alpha_N^2 \hat{K}_d + K_R - K_N} u \quad (\text{A1})$$

式(A1)を非線形領域に拡張するため、次のように書き換える。

$$\begin{aligned} F &= F_{fs} + F_{as} \\ F_{fs} &= K_N u = [F_N(u_N)/u_N] u \\ F_{as} &= \frac{\alpha_N^2 \hat{K}_d (K_R - K_N)}{\alpha_N^2 \hat{K}_d + K_R - K_N} u = \frac{F_{ds}/u_{ds} [F_R(u_R)/u_R - F_N(u_N)/u_N]}{F_{ds}/u_{ds} + F_R(u_R)/u_R - F_N(u_N)/u_N} u \end{aligned} \quad (\text{A2a-c})$$

ここに、 $F_N(u_N)$ ,  $F_R(u_R)$ は、それぞれ状態 N,R に変形  $u_N$ ,  $u_R$  を与えたときの力を表し、 $K_N$ ,  $K_R$ はそのときの割線剛性とした。式(A2a)が示すように、システムの力は擬似フレーム力  $F_{fs}$  と擬似付加系力  $F_{as}$  の和で表される。式(A2b),式(A2c)において、 $u_N = u$ ,  $u_R = u_{bs} = u - u_{ds}$  とすれば、

$$\begin{aligned} F_{fs} &= F_N(u) \\ F_{as} &= \frac{F_{ds}/u_{ds} [F_R(u_{bs})/u_{bs} - F_N(u)/u]}{F_{ds}/u_{ds} + F_R(u_{bs})/u_{bs} - F_N(u)/u} u \end{aligned} \quad (\text{A3a,b})$$

式(A3b)中の  $[F_R(u_{bs})/u_{bs} - F_N(u)/u]$  は擬似ブレース剛性を表す項であるため、 $u_{bs}$  のみを用いて表した方が理解しやすい。したがって、状態 N が比較的線形に近く  $F_N(u)/u \cong F_N(u_{bs})/u_{bs}$  と考え、式(A3b)を次のように近似する。

$$F_{as} = \frac{F_{ds}/u_{ds} [F_R(u_{bs})/u_{bs} - F_N(u_{bs})/u_{bs}]}{F_{ds}/u_{ds} + F_R(u_{bs})/u_{bs} - F_N(u_{bs})/u_{bs}} u = \frac{K_{ds} K_{bs}}{K_{ds} + K_{bs}} u = K_{as} u \quad (\text{A4})$$

ここに、 $K_{as}$  = 擬似付加系剛性であり、

$$K_{bs} = [F_R(u_{bs}) - F_N(u_{bs})]/u_{bs} \quad , \quad K_{as} = K_{ds} K_{bs} / (K_{ds} + K_{bs}) \quad (\text{A5a,b})$$

よって、擬似ブレースと擬似フレームの荷重と変形は、次式により表される。

$$F_{bs} = F_R(u_{bs}) - F_N(u_{bs}) = \alpha_N \alpha_R F_R(u_{bs}) \quad , \quad u_{bs} = u_R \quad (\text{A6a,b})$$

$$F_{fs} = F_N(u_{fs}) \quad , \quad u_{fs} = u_N = u \quad (\text{A7a,b})$$