T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	非線形粘性ダンパーを有するアクティブ免震構造のゲインスケジューリングによる応答等価モデルの構築
Title(English)	Response equivalent model based on gain scheduling for active base-isolated structures with nonlinear viscous dampers
著者(和文)	ZHANG Yunhao, 佐藤大樹, 陳引力, 佘錦華, 宮本皓
Authors(English)	ZHANG Yunhao, SATO Daiki, CHEN Yinli, SHE Jinhua, MIYAMOTO Kou
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 437-440
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 437-440
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2023年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2024年3月

非線形粘性ダンパーを有するアクティブ免震構造のゲインスケジューリングによる応答等価モデルの構築

構造－振動

正会員 ○ ZHANG Yunhao[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
〃　陳　引力[*3]　〃　余　錦華[*4]
〃　宮本　皓[*5]

免震構造　非線形粘性ダンパー　アクティブ制御
アクティブ免震　　ゲインスケジューリング制御

1. はじめに

兵庫県南部地震以降，日本でのパッシブ免震構造の適用件数が急増している[1)]。近年では，更なる制御性能を引き出し，さらに，異なる外乱にそれぞれ対応できる制御の実現のために，アクティブ制御と免震構造の組合せ，所謂アクティブ免震構造の研究が複数展開され報告されている。

従来では，アクティブ制御の制御系は一般的には試行錯誤的に設計されている。アクティブ免震構造は設計に必要なパラメータが多く，制御系の設計は非常に複雑になる。この問題を解決するために，Sato と Chen ら[2), 3)]は目標モデルによるアクティブ免震構造の簡易設計方法を提案した。これらの方法は，時刻歴解析と試行錯誤を行わずに，クライテリアを満たす制御系を簡単に設計できる。Sato と Chen ら[2), 3)]の研究は線形粘性ダンパーをパッシブ制震部材として免震層に設置することを考慮した。しかし，免震構造に使用されるダンパーは非線形性を有していることが多く，例えば，世界中の免震構造では予想外の高速度によるオーバロードを避けるために分数次速度べき乗則を持つ非線形粘性ダンパーが広く使われている。よって，免震層に含まれる非線形特性も考慮した制御系を用いることが望ましい。非線形系を対象とした制御手法としてゲインスケジューリング方法が挙げられる。ゲインスケジューリング[4)]は非線形系を線形パラメータ変動(LPV)モデルに転換し，制御器のゲインを時変係数と共に変えることにより，設計を簡易にし，高制御性能を実現する手法である。この方法により，時刻歴解析と試行錯誤が不要な目標モデルによる簡易設計方法は非線形粘性ダンパーを有するアクティブ免震構造への拡張が可能になり，より良い制御性能の実現も期待できる。

本報は非線形粘性ダンパーを有するアクティブ免震構造の目標モデルによる簡易設計方法の確立のための初期階段として，ゲインスケジューリング制御系を構築する。目標モデルと制御系の最大応答の対比は44個のファーフィールド(far-field)地震波を用いる数値解析で行う。

2. 構造モデルと制御系の概要

本研究ではFig. 1で示される1自由度系を用いる。制御系の運動方程式は次式により表される。

$$m\ddot{x}(t)+f_{\mathrm{d}}(t)+k_0x(t)=-m\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)-u(t) \tag{1}$$

ここに，$x(t)$ は応答変位，m は質量，k_0 は剛性，$f_{\mathrm{d}}(t)$ は非線形粘性ダンパーの減衰力，$\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$ は地震加速度，$u(t)$ は制御力である。$f_{\mathrm{d}}(t)$ は

$$f_{\mathrm{d}}(t)=c_{\mathrm{d}}\left|\dot{x}(t)\right|^{\alpha}\mathrm{sgn}(\dot{x}) \tag{2}$$

で与えられる。ここに，c_{d} は非線形粘性ダンパーの減衰係数，α は速度に関する指数乗，sgn は符号関数である。

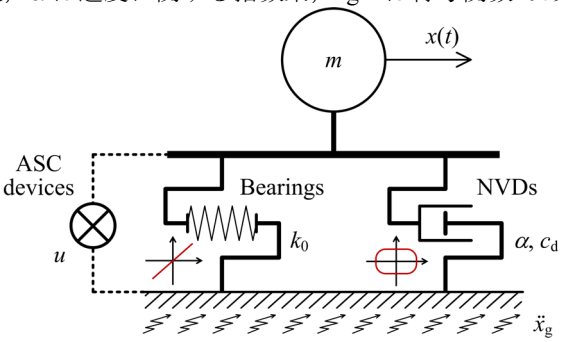

Fig. 1. Structure model

式(1)を式(3)で表される状態方程式に変換する。

$$\dot{z}(t)=Az(t)+Bu(t)+B_{\mathrm{d}}f_{\mathrm{d}}(t)+B_{\mathrm{g}}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t) \tag{3}$$

ここで，

$$\begin{cases} z(t)=\left[x(t)\quad \dot{x}(t)\right]^{\mathrm{T}}, \quad A=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m^{-1}k_0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B=B_{\mathrm{d}}=\left[0\quad -m^{-1}\right]^{\mathrm{T}}, \quad B_{\mathrm{g}}=\left[0\quad -1\right]^{\mathrm{T}}. \end{cases} \tag{4}$$

であり，$z(t)$ は状態ベクトル，A はシステムマトリックス，B は制御入力マトリックス，B_{g} は地震入力マトリックスである。

本研究では，制御系は式(5)の制御則を持つフィードバック制御を用いる：

$$u(t)=Kz(t)=\left[K_{\mathrm{D}}\quad K_{\mathrm{V}}\right]\begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}=K_{\mathrm{D}}x(t)+K_{\mathrm{V}}\dot{x}(t) \tag{5}$$

ここに，Kはフィードバックゲイン，K_{D} は変位フィード

Response equivalent model based on gain scheduling for active base-isolated structures with nonlinear viscous dampers

ZHANG Yunhao,　SATO Daiki,　CHEN Yinli,　SHE Jinhua,　MIYAMOTO Kou

バックゲイン，K_V は速度フィードバックゲインである。Fig. 2に制御系のブロック線図を示す。

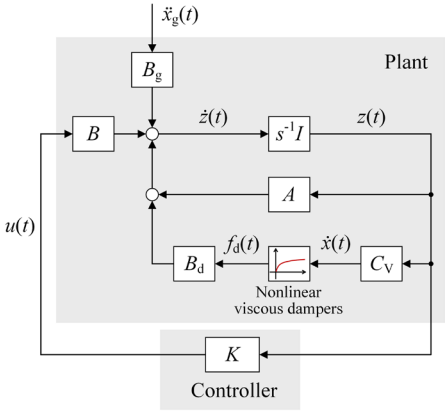

Fig. 2. Block diagram of system

3. 目標モデルに基づくゲインスケジューリング制御系の構築

本論文では，まず，減衰係数のみを目標値にすることを検討する。したがって，変位フィードバックゲインは0として検討を行う：

$$K_D = 0 \tag{6}$$

非線形制御系を線形パラメータ変動(LPV)モデルに変換するために，まず，式(7)で時変線形減衰係数 $c_{TL}(t)$ を定義する。

$$c_{TL}(t) = c_d \left|\dot{x}(t)\right|^{\alpha-1} \tag{7}$$

式(7)により，$f_d(t)$ は次式のように時変線形減衰力に表されることができる。

$$f_d(t) = c_{TL}(t)\dot{x}(t) \tag{8}$$

式(8)を式(3)代入すると，式(9)で表される擬似LPVモデル(Fig. 3)になる。

$$\dot{z}(t) = A_{TL}\left(c_{TL}(t)\right)z(t) + Bu(t) + B_g\ddot{x}_g(t) \tag{9}$$

ここで，$A_{TL}\left(c_{TL}(t)\right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m^{-1}k_0 & -m^{-1}c_{TL}(t) \end{bmatrix}$ は時変線形システムマトリックスである。

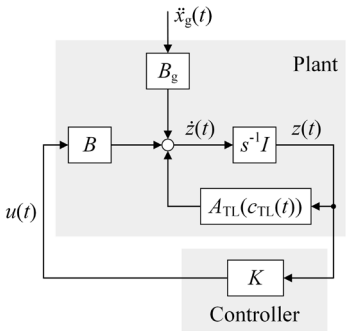

Fig. 3. Equivalent pseudo LPV system

非線形制御系(式(3))を式(9)で表される時変の線形制御系に変換することにより，線形制御系の設計法で非線形制御系を設計することが可能になる。本報では，SatoとChenら[2),3)]が提案した簡易設計法を使い，以下の式で目標モデルを構築する。

$$\dot{z}(t) = A_{tar}z(t) + B_g\ddot{x}_g(t) \tag{10}$$

ここに，$A_{tar} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m^{-1}k_0 & -m^{-1}c_{tar} \end{bmatrix}$ は目標システムマトリックス，$c_{tar}(t)$ は目標線形減衰係数である。式(10)と式(9)の差で速度フィードバックゲインが得られる。

$$K_V\left(c_{TL}(t)\right) = c_{tar} - c_{TL}(t) \tag{11}$$

しかし，式(7)により，速度が0に近い時には $c_{TL}(t)$ は無限大になり，式(11)の $K_V\left(c_{TL}(t)\right)$ は負の無限大に発散し，制御系は不安定になる恐れがある。式(11)での $K_V\left(c_{TL}(t)\right)$ と速度の絶対値 $|\dot{x}|$ との関係をFig. 4(a)に示す。Fig. 4(a)により，速度が特定の数値より小さい時は $K_V\left(c_{TL}(t)\right)$ は負になる。ここで，この特定の数値をスイッチ速度 $|\dot{x}|_{sw}$ と定義し，運動空間を Σ と定義する。以下のように運動空間を分割する。低速領域：

$$\Sigma_{LV} : |\dot{x}(t)| \le |\dot{x}|_{sw} \tag{12}$$

高速領域：

$$\Sigma_{HV} : |\dot{x}(t)| > |\dot{x}|_{sw} \tag{13}$$

$K_V\left(c_{TL}(t)\right)$ が負になるのは制御力が速度と同じ符号になることを意味する。その結果，低速領域 Σ_{LV} では，制御力を用いて減衰を下げることを意味し，制御性能を下げてることを意味する。よって，本研究は，低速領域 Σ_{LV} における $K_V\left(c_{TL}(t)\right)$ を0と設定し，$K_V\left(c_{TL}(t)\right)$ を式(14)にする。

$$K_V\left(c_{TL}(t)\right) = \begin{cases} c_{tar} - c_{TL}(t), & |\dot{x}(t)| > |\dot{x}|_{sw}, \\ 0, & |\dot{x}(t)| \le |\dot{x}|_{sw}. \end{cases} \tag{14}$$

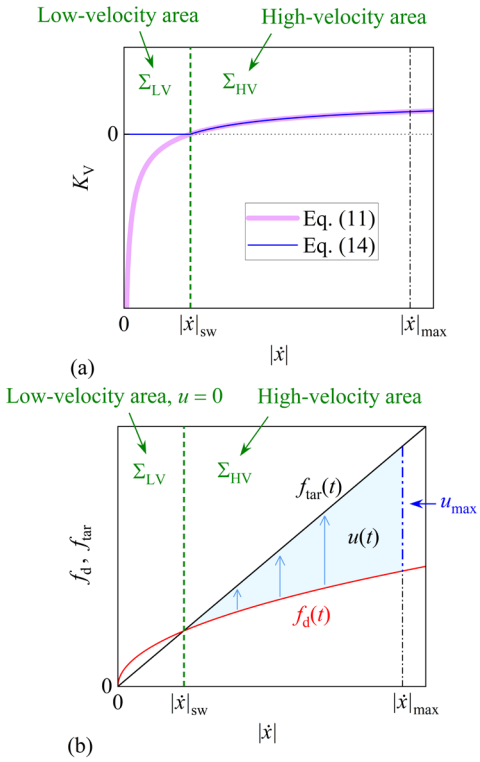

Fig. 4. Control strategy: (a) velocity feedback gain and (b) control force

制御力は式(15)になる。

$$u\left(c_{\mathrm{TL}}(t)\right)=\begin{cases}\left[c_{\mathrm{tar}}-c_{\mathrm{TL}}(t)\right]\dot{x}(t), & \left|\dot{x}(t)\right|>\left|\dot{x}\right|_{\mathrm{sw}},\\ 0, & \left|\dot{x}(t)\right|\le\left|\dot{x}\right|_{\mathrm{sw}}.\end{cases} \tag{15}$$

速度フィードバックゲイン及び制御力は Fig. 4(a)と(b)に示す。ここに， $f_{\mathrm{tar}}(t)=c_{\mathrm{tar}}\dot{x}(t)$ は目標線形減衰力である。

4. 最大応答等価のためのスイッチ速度比の上限

本章では，式(14)を用いるゲインスケジューリング制御系と等価線形モデルである目標モデルの最大応答を比較し，目標モデルを用いる最大応答の評価の妥当性を検討する。検討用地震波はFEMA P695 [5)]の44個のファーフィールド(far-field)地震波である。ただし，各波のピーク地動速度（PGV）は75 cm/sに基準化された。Fig. 5に地震波の速度スペクトルを示す。時刻歴解析に用いるパラメータをTable 1に示す。ここに， R_{sw} は式(16)で定義されるスイッチ速度比である。

$$R_{\mathrm{sw}}=\frac{\left|\dot{x}\right|_{\mathrm{sw}}}{S_{\mathrm{V}}\left(T_{\mathrm{tar}},\zeta_{\mathrm{tar}}\right)} \tag{16}$$

ここに $S_{\mathrm{V}}\left(T_{\mathrm{tar}},\zeta_{\mathrm{tar}}\right)$ は目標モデルの速度スペクトルである。

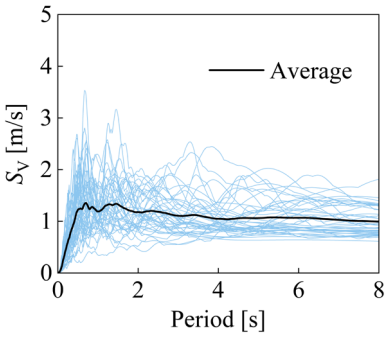

Fig. 5. Velocity response spectra (damping ratio $\zeta=5\%$)

Table 1. Parameters

α	0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
T_{tar}[s]	2 ~ 8, per 0.5
ζ_{tar}	0.2, 0.4
R_{sw}	0.1 ~ 1, per 0.1

Fig. 6-Fig. 10に $\alpha=0.1$ の時刻歴解析(THA)の結果と目標モデルの応答スペクトルとの比較を示す。その結果，以下の結論が得られる。

(1) 目標モデルで制御系の最大応答評価する場合の誤差はスイッチ速度比とともに増加する。

(2) 目標モデルの応答スペクトルによる応答評価は基本的に安全側の評価(THA < Spectrum)となる傾向がある。また，スイッチ速度比が0.5まで上がったとしても過小評価(THA > Spectrum)のケースの誤差は最大-20%にとどまる。

(3) スイッチ速度比の上限を設置することで，応答評価誤差が±5%以下にとどまることができる。$\alpha=0.1$ の場合，スイッチ速度比の上限は0.2と設定できる。

$\alpha\in[0,\ 1]$ の場合は $\alpha=0.1$ と同じくスイッチ速度比の上限を時刻歴解析の結果に基づいて設定できる。線形補間で以下にスイッチ速度比の上限の経験式を提案する。

$$R_{\mathrm{sw,lim}}=\begin{cases}0.2, & 0<\alpha\le0.1,\\ 0.5\alpha+0.15, & 0.2<\alpha\le0.7,\\ 2.5\alpha-1.25, & 0.7<\alpha\le0.9,\\ 1, & 0.9<\alpha<1.\end{cases} \tag{17}$$

ここで， $R_{\mathrm{sw,lim}}$ はスイッチ速度比の上限である。

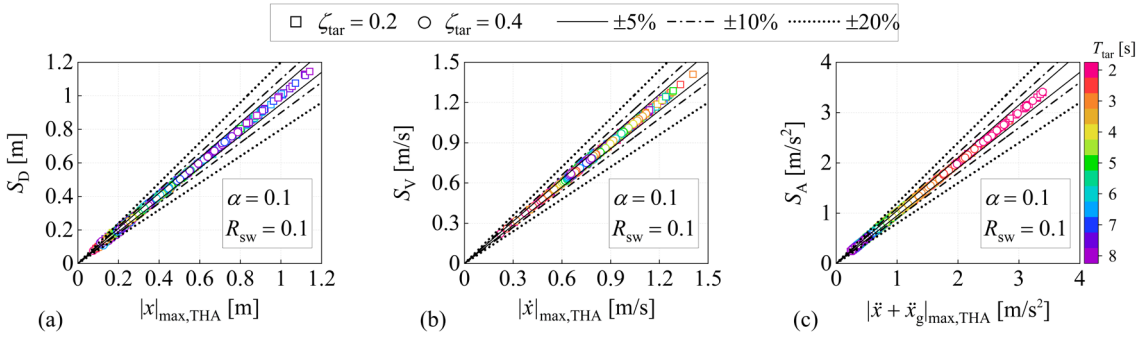

Fig. 6. Comparison of spectra and THA results ($\alpha=0.1$, $R_{\mathrm{sw}}=0.1$): (a) Displacement, (b) Velocity, and (c) Acceleration.

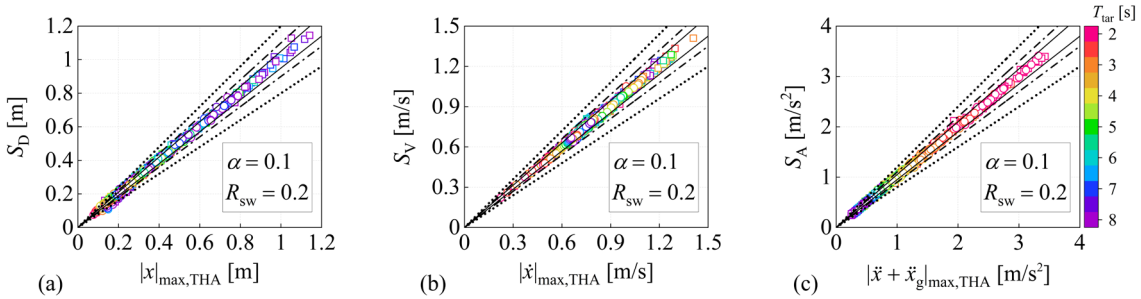

Fig. 7. Comparison of spectra and THA results ($\alpha=0.1$, $R_{\mathrm{sw}}=0.2$): (a) Displacement, (b) Velocity, and (c) Acceleration.

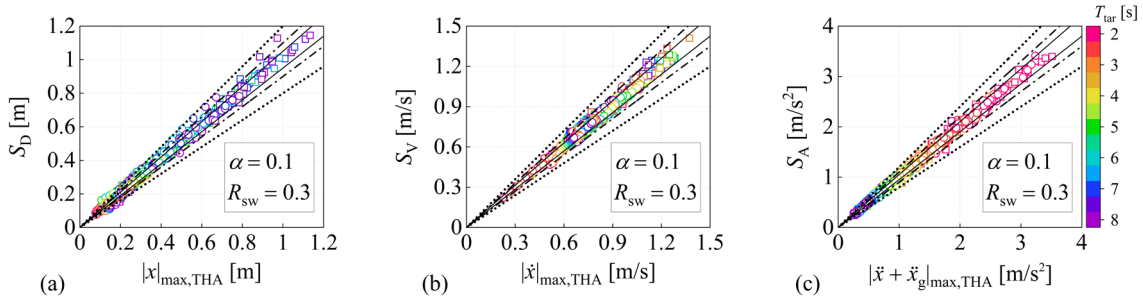

Fig. 8. Comparison of spectra and THA results ($\alpha = 0.1$, $R_{sw} = 0.3$): (a) Displacement, (b) Velocity, and (c) Acceleration.

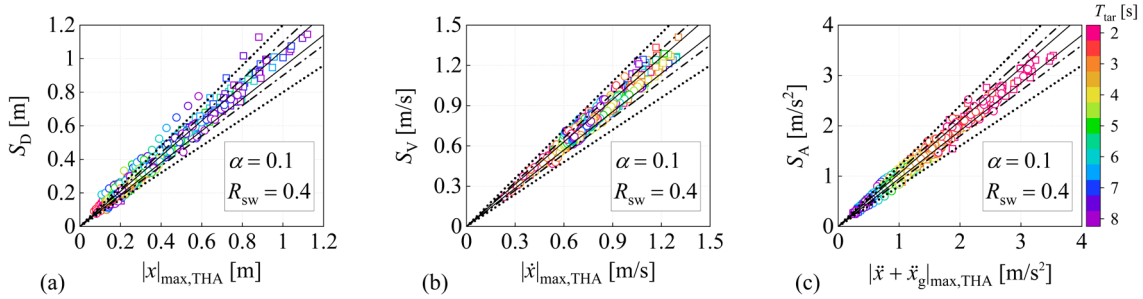

Fig. 9. Comparison of spectra and THA results ($\alpha = 0.1$, $R_{sw} = 0.4$): (a) Displacement, (b) Velocity, and (c) Acceleration.

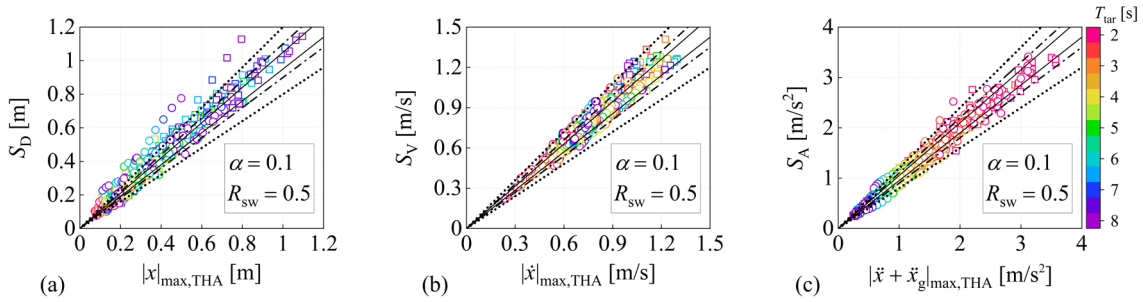

Fig. 10. Comparison of spectra and THA results ($\alpha = 0.1$, $R_{sw} = 0.5$): (a) Displacement, (b) Velocity, and (c) Acceleration.

5. まとめ

本報は，非線形粘性ダンパーを有するアクティブ免震構造の制御系の設計を簡便にすることを目的として，等価線形モデルである目標モデルによるゲインスケジューリング制御系の設計方法を提案した。また，数値解析で目標モデルと制御系の最大応答を比較した。以下に得られた知見を示す。

(1) 低速領域にて速度フィードバックゲインを0にすることにより，制御器は速度と同じ位相で力を印加する励振を避け，高い減衰力を維持できる。また，アクティブ制御に必要なエネルギーも低くなる。

(2) 目標モデルで制御系の応答評価する場合の誤差はスイッチ速度とともに増加する。応答評価は基本的に安全側の評価となる傾向がある。

(3) スイッチ速度比の上限を設置することで，応答評価誤差を±5%以下にとどめることができる。

Reference

[1] Architectural Institute of Japan. Recommendation for the design of base isolated buildings. 2013

[2] Sato D, Chen Y, Miyamoto K, She J. A spectrum for estimating the maximum control force for passive-base-isolated buildings with LQR control. Engineering Structures 2019;199:109600.

[3] Chen Y, Sato D, Miyamoto K, She J. Response-spectrum-based design method for active base-isolated buildings with viscous dampers and hysteretic dampers. Mechanical Systems and Signal Processing 2022;180:109413.

[4] Liu K, Yao Y. Robust Control: Theory and Applications. John Wiley & Sons; 2016.

[5] FEMA. Quantification of Building Seismic Performance Factors. Report FEMA P695; 2009.

*1 東京工業大学 大学院生 *Graduate Student, Tokyo Institute of Technology*1

*2 東京工業大学 准教授· 博士(工学) *Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng*2

*3 東京理科大学 助教· 博士(学術) *Assistant Professor, Tokyo University of Science, Ph.D*3

*4 東京工科大学 教授· 博士(工学) *Professor, Tokyo University of Technology, Dr. Eng*4

*5 清水建設技術研究所· 博士(工学) *Institute of technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng*5