

# 論文 粘性境界を用いた半無限連続高架橋に対する非線形動的解析

李 相勲<sup>\*1</sup>・田邊 忠顕<sup>\*2</sup>

**要 旨**：非常に長く連続する一様な架橋と隣接する構造物に対し有限要素法を用いて地震応答解析する際には、隣接する架橋の部分を何らかの境界条件として考慮する必要がある。また解析対象が長大橋やコンクリート構造物の場合は材料非線形性や幾何学的非線形性などを考慮に入れて解析しなければならない。本研究ではこのような構造物に対し粘性境界を取り入れたファイバーモデル非線形動的解析を行いその適用性について議論する。

**キーワード**：粘性境界, 離散系構造物, 群速度, 非線形解析

## 1. はじめに

離散系における半無限体の動的問題において、振動数領域でのエネルギー伝達境界<sup>1)~3)</sup>は時間領域の解析ができないために非線形挙動の強いコンクリート構造物（正確にはコンクリート橋脚を持つ非常に長い連続高架橋）に対する強震時の破壊形態や終局挙動などを求めるには適していない。この問題に対し著者らは時間領域の解析が可能な粘性境界<sup>4)</sup>を提案している。

粘性境界を非線形有限要素解析に取り入れる研究は地盤-構造物系などの連続系の分野では多く行われている<sup>5),6)</sup>。しかし、離散系構造物については非線形解析に伝達境界を考慮に入れた研究は行われていない。無限領域に対する境

界条件として粘性境界を用いる場合、その解析対象としては、**図-1**に示すような解析領域に斜長橋を含む不規則的な連続高架構造物や、解析領域の構造は同じであるがスパンのみが異なる場合などさまざまな構造形式が不規則領域に含まれる構造物が考えられる。この場合は、不規則領域にある構造物の非線形性のみ考慮されることになる。

本研究では材料非線形性ならびに幾何学的非線形性を考慮に入れた3次元12自由度を有する有限変形理論に基づくファイバーモデルの非線形有限要素解析を用いて、粘性境界を取り入れた後、地震動応答解析を行いその適用性について議論する。

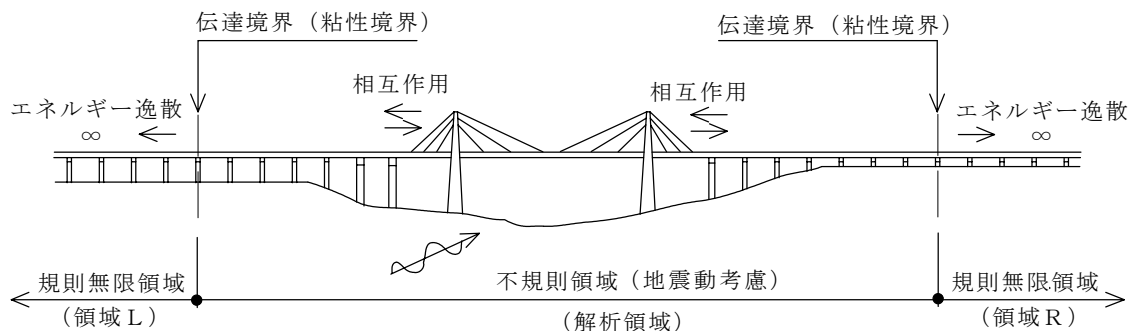


図-1 解析対象橋梁の概念図

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 博士課程後期課程 工修 (正会員)

\*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

## 2. ファイバーモデルを用いた非線形解析

### 2.1 解析理論

ファイバーモデルを非線形解析に取り入れる手法は、構造分野ではより要素の非線形解析に欠かせないほど主流になっており、コンクリート分野に限っても数多く検討に用いられている<sup>7),8)</sup>。本研究では、解析領域がコンクリート橋脚を持つ長大橋の場合を想定して、材料的非線形性および幾何学的非線形性を考慮に入れたファイバーモデル非線形解析を用いる。

### 2.2 材料モデル

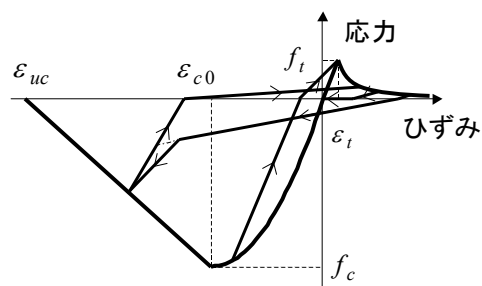
コンクリートの応力ひずみ関係は図-2のa)に示すようにモデル化した。それは、圧縮応力領域では、応力が最大圧縮強度まで二次放物線で増加し、それ以降は $\epsilon_{uc} = -0.012$ まで直線的に減少するモデルである。また、引張応力領域では、応力が最大引張強度までは一定の傾きで増加し、それ以降はテンションステイフニング効果を考慮して徐々に低減するモデルである。なお、解析では最大圧縮強度を設計強度の0.85倍と仮定している。

鉄筋は図-2のb)に示すように、一般的なバイリニア型とし、降伏後は初期勾配 $E_s$ の1/100の傾きまで応力が増加するものとした。

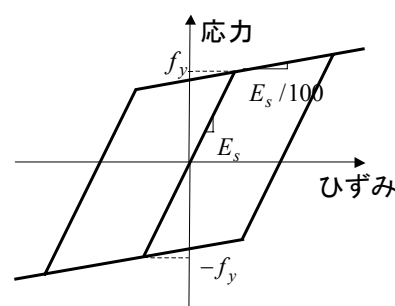
## 3. 解析対象

### 3.1 解析モデル

前節で述べた非線形解析を用いて、実構造物大のモデルに対し粘性境界を設定した地震応答解析を行いその妥当性を検討する。解析対象としては阪水地区の新幹線高架橋にする。その概略図を図-3に示す。この高架橋の両側に、図-4に示す中間ばりのない形状の様な架橋が半無限に繋がっている場合（左：領域L，右：領域R）を想定する。図-5に各部材における断面の概略的な寸法と鉄筋配置を示す。また、材料緒元は、コンクリート圧縮強度 $f'_c = 29.4\text{MPa}$ ， $\epsilon_{c0} = -0.002$ ，鉄筋の降伏強度 $f_y = 294\text{MPa}$ ，鉄筋のヤング係数 $E_s = 1.96 \times 10^5$ とした。減衰はレーリー減衰を用い、減衰定数は5%とした。



a) コンクリート



b) 鉄筋

図-2 材料モデル

### 3.2 解析条件

この構造物を図-6に示すようにモデル化し、次に説明する5つのケースに対し解析を行う。まず、線形解析として、両側を自由境界にした時間領域解析（ケース1）、両側をエネルギー伝達境界にした振動数領域の解析（ケース2）と粘性境界にした時間領域解析（ケース3）を行う。また、非線形解析として、両側を自由境界にした時間領域解析（ケース4）と粘性境界にした時間領域解析（ケース5）を行う。ただし、粘性境界は近似解であるので境界の近くに誤差が生じるのは避けられないため、規則領域の一部を不規則領域に含ませ解析領域を大きく取る必要がある。以下、その部分をDUMMYという。地震動はDUMMYの部分にも入力する。次に各ケースにおける詳細な解析条件を述べる。

#### (1) ケース1

図-3と図-4に示した高架橋の橋脚部分、中間ばり部分、及び床版部分の伸び剛性 $EA$ ，曲げ

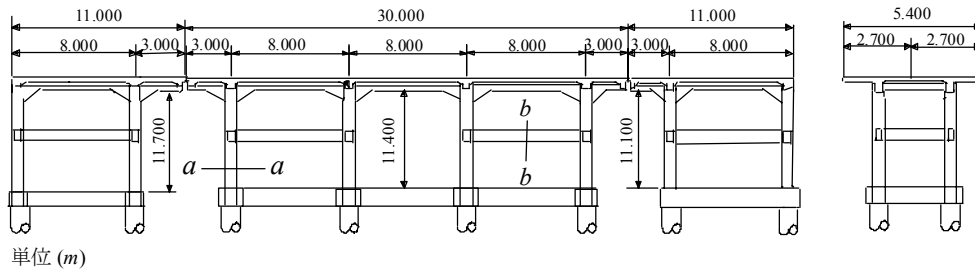


図-3 阪水新幹線高架橋一般図および断面図

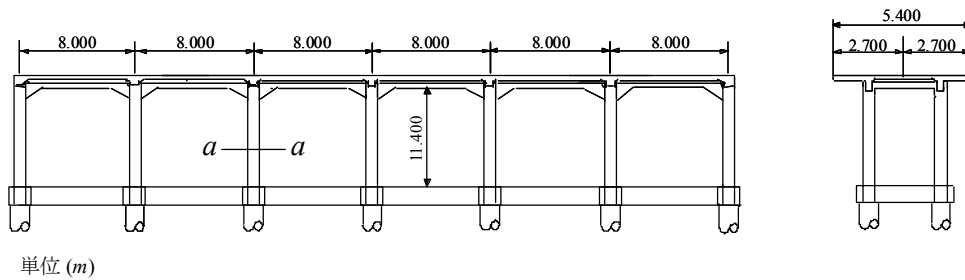


図-4 領域L, Rの一般図および断面図

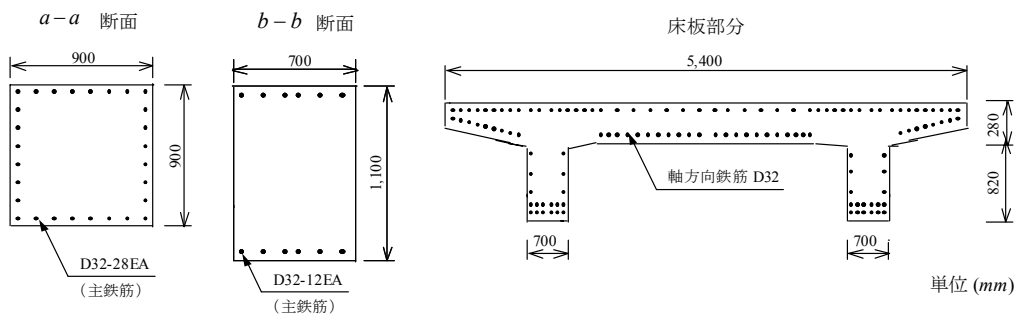


図-5 各部材の断面図

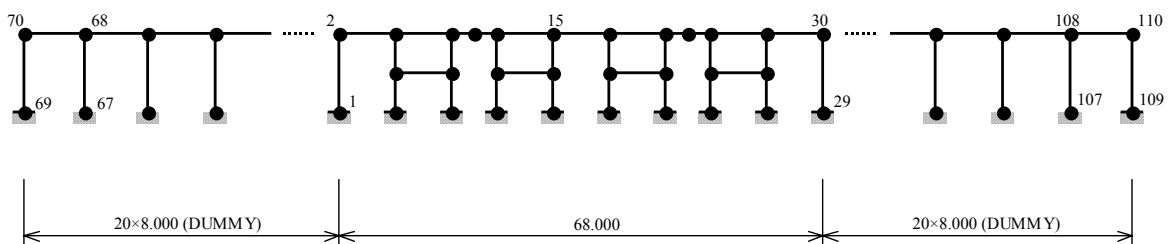


図-6 解析モデル

表-1 各部材の特性

	断面積 ( $m^2$ )	鉄筋量 ( $cm^2$ )	伸び剛性 ( $kN$ )	曲げ剛性 ( $kNm^2$ )
橋脚	0.81	222.3	$1.98 \times 10^7$	$1.41 \times 10^6$
中間ばり	0.77	95.3	$1.68 \times 10^7$	$1.76 \times 10^6$
床版(1/2分)	1.33	492.3	$4.68 \times 10^7$	$3.90 \times 10^6$

剛性  $EI$  の値を表-1 に示す。ここで、各部材は弾性体として取り扱う。ただし、鉄筋部材、コンクリート部材それぞれの単調応力下での構成

則モデルを使用して  $M-\phi$  曲線を求め、その傾きを利用し曲げ剛性  $EI$  を算定したものをを用いる。図-6 のモデルに対し地震応答解析を行う。数値

積分法には Newmark  $\beta$  法 ( $\beta = 0.25$ ) を用いる。  
 入力地震動としては阪神大震災において神戸海洋気象台で観測された地震波 (NS 成分) を用いる。  
 図-7 に入力地震動を示す。伝達境界は考慮しない。

(2) ケース 2

振動数領域の解析である。解析条件はケース 1 と同様であるが、図-6 に示すモデルにおいて質点番号 70 と 110 にエネルギー伝達境界を設ける。即ち、図-4 に示す架橋を考慮して、地震応答解析を行うことになる。橋脚と上部構造物の部材特性は表-1 と同じものを用いる。

(3) ケース 3

時間領域の線形解析である。ケース 1 の解析モデルに対し、質点番号 70 と 110 (図-6 参照) に粘性境界を設けた場合である。ケース 2 とともにファイバー非線形解析プログラムの粘性境界設定をチェックすることが目的である。

(4) ケース 4

時間領域の非線形解析である。図-6 に示すモデルに伝達境界は考慮していない。解析には中央部の不規則部分のみ非線形性を考慮する。即ち、橋脚と中間ばりに該当する部材についてはファイバー要素としてモデル化する。

(5) ケース 5

時間領域の非線形解析である。ケース 4 の解析モデルに対し、質点番号 70 と 110 に粘性境界を設けた場合である。非線形解析のための材料緒元はケース 4 と同じである。

3.3 粘性境界の設定

粘性境界を設定するため、無限領域 L,R を等価なマス - バネ系モデルに置き換える。領域 L,R に対する等価バネ<sup>3)</sup>は次式で計算する。

$$k' = \frac{12 \times EIL + EI'l}{3 \times EIL + EI'l} \cdot \frac{3 \times 3EI'}{L^3} = 8494.7kN/m \quad (1)$$

$$k = \frac{EA}{l} = 5850000.0kN/m \quad (2)$$

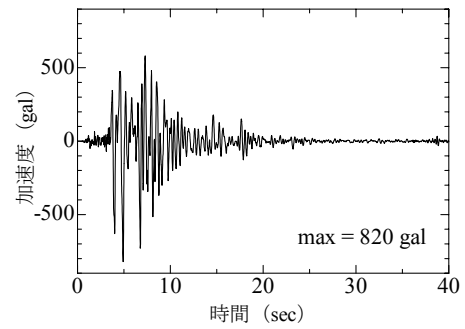


図-7 入力地震動

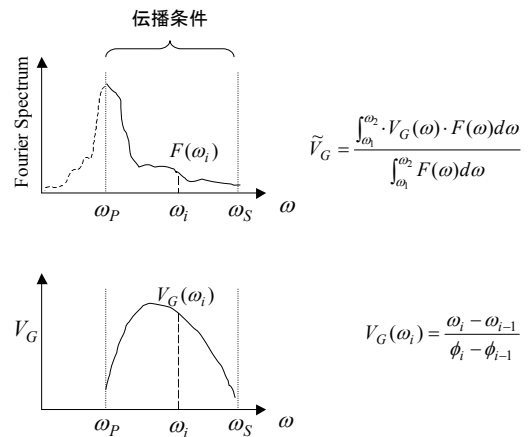


図-8 平均群速度

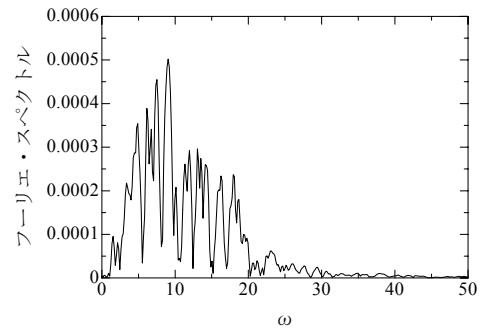


図-9 フーリエ・スペクトル

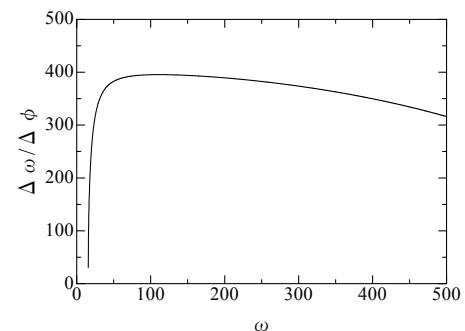


図-10  $\Delta \omega / \Delta \phi - \omega$  関係曲線

質量は

$$m = (1.33 \times 8.0 + 0.81 \times 12.35 / 2) \times 2.3 = 36.0 \text{ ton}$$

この質量  $m$  と地盤連結バネ  $k'$ ，軸方向バネ  $k$  で構成されるマス - バネモデルに対し粘性境界を設定する<sup>4)</sup>。

離散系における粘性境界の設定には伝播速度を求めるのが重要である。地盤連結バネ  $k'$  の影響を無視すれば，次の縦波速度を用いて粘性境界を設定することができる<sup>4)</sup>。

$$V_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = 400 \text{ (EA/sec)} \quad (3)$$

しかし，実際にはこのような場合の波動は分散するので，本研究では各振動数の速度変化が考慮できる方法（図-8）で伝播速度（以下平均群速度<sup>9)</sup>という）を求める。図-8の式の中で  $V_G$  は波のスペクトル分布が非常に狭いときの群速度， $\tilde{V}_G$  は並みのスペクトルに重みをつけて求めた  $V_G$  の平均値である。まず，質量  $m$  と地盤連結バネ  $k'$  で構成される1自由度系マス - バネモデル（1質点）に対し，図-7の地震動による時刻歴応答解析を行う。その応答に対するフーリエ・スペクトルを図-9に示す。また，同じモデルに対する  $\Delta\omega / \Delta\phi - \omega$  関係曲線（図-10）を求めれば平均群速度が計算できる。

一方，質量  $m$  と地盤連結バネ  $k'$ ，軸方向バネ  $k$  で構成される無限領域における伝播条件の振動数は次式から求めることができる<sup>1),3)</sup>。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k'}{m}} = 15.36, \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k' + 4 \times k}{m}} = 806.37$$

従って，伝播条件は  $15.36 < \omega < 806.37$  であり，この条件内に対する平均群速度を求めると  $235 \text{ (EA/sec)}$  である。この速度を用いて粘性境界を設定する。比較のため式(3)で設定した粘性境界を用いた解析も行う。

## 4. 解析結果

### 4.1 線形解析（ケース1～3）

線形解析であるケース1～3の解析結果を図-11に示す。以下，節点番号15番における応答変位を用いて議論する。最大応答変位はケース1の場合が  $+83.5 \text{ mm}$ ， $-81.8 \text{ mm}$  で，ケース2の場合が  $+26.2 \text{ mm}$ ， $-30.3 \text{ mm}$  である。また，ケース3の  $v=235$  の場合が  $+31.6 \text{ mm}$ ， $-27.8 \text{ mm}$  である。それに対しケース3の  $v=400$  の場合は  $+27.5 \text{ mm}$ ， $-20.8 \text{ mm}$  である。伝達境界を考慮した場合が自由境界の場合に比べておよそ38%の応答変位になっている。

エネルギー伝達境界のケース2の結果を正解とし，粘性境界の妥当性を検討する。波形の比較にはWaveform Chain Code<sup>10)</sup>を用いる。粘性境界の速度に，平均群速度 ( $V=235$ ) を採用した場合は正解の波形との平均勾配差が3.723%で平均曲率差が0.260%である。縦波速度 ( $V_0=400$ ) を採用した場合は正解の波形との平均勾配差が4.068%で平均曲率差が0.302%である。

このことから，本研究で設定した粘性境界は有効であり，また平均群速度を用いた場合が正解に近いことが確認された。

### 4.2 非線形解析（ケース4とケース5）

ケース4とケース5の解析結果を図-12に示す。ケース4の最大応答変位は， $+85.1 \text{ mm}$ ， $-76.5 \text{ mm}$  であり，ケース5 ( $v=235$ ) の最大応答変位は， $+38.7 \text{ mm}$ ， $-30.6 \text{ mm}$  であり， $2\delta y$  程度の非線形応答が生じている。線形の場合が，粘性境界を考慮した場合が考慮しない場合に比べておよそ38%の応答変位になることに対し，非線形の場合ではおよそ45%の応答変位になっているが，伝達境界考慮時の最大応答を基準にすると両ケースとも半分くらいの応答変位になっている。何れの場合も粘性境界の影響が顕著である。

## 5. 結論

本研究では，材料非線形性ならびに幾何学的非線形性を考慮に入れた3次元12自由度を有する有限変形理論に基づくファイバーモデルの非

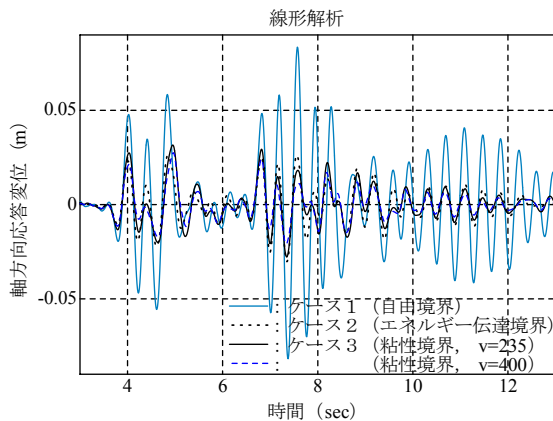


図-11 ケース1～ケース3

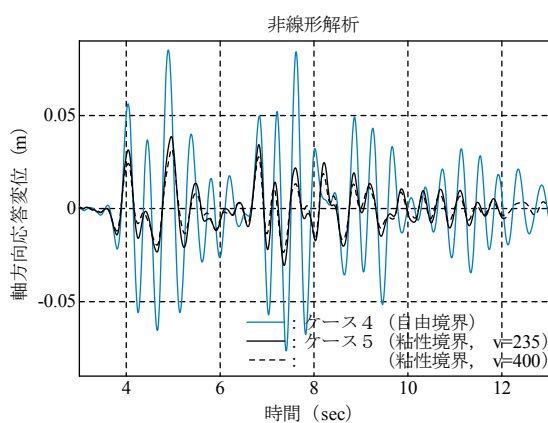


図-12 ケース4とケース5

線形有限要素解析に、半無限境界を表すために、粘性境界を構築し地震動応答解析を行い、その適用性について検討した。

まず、線形の地震応答解析を通じて、粘性境界を取り入れた場合とエネルギー伝達境界を取り入れた場合の解析結果を比較し粘性境界の妥当性を確認した。また、粘性境界を設定する際の伝播速度は平均群速度を用いるのが正解に近いことを確認した。また、自由境界の場合と粘性境界を取り入れた場合の非線形有限解析の結果から、ファイバーモデルの非線形有限要素解析に取り入れた粘性境界が良く機能することを確認した。本研究で提案した粘性境界は、簡単に非線形解析に取り組むことができ、また平均群速度を用いてその精度が高まることが確認された。これを用いることによって、半無限に続く構造体の応答解析の精度を一層向上させることが判明された。

## 参考文献

- 1) 李相勲, 田邊忠顕: 連続したマス-バネ系モデルを用いた連続高架橋構造物の伝達境界の定式化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1165-1170, 2002.6
- 2) 李相勲, 田邊忠顕: 無限領域の地動を考慮したマス-バネ系モデルのエネルギー伝達境界, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1453-1458, 2003.7
- 3) 李相勲, 田邊忠顕: 3自由度はり要素モデルを用いた離散系における伝達境界の定式化, 土木学会論文集, No.745 / I-65, pp.25-38, 2003.10
- 4) 李相勲, 田邊忠顕: 時間領域解析におけるマス-バネ系モデルを用いた離散系無限体の境界設定, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, Paper No.78, 2003.12
- 5) 三浦房紀, 沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集, No. 404 / I-11, pp. 395-404, 1989.4
- 6) 中村秀明, 森川慎吾, 麻生稔彦, 浜田純夫: 内容液と地盤との相互作用を考慮したコンクリート製液体貯蔵タンクの地震応答解析, 土木学会論文集, No. 655 / V-48, pp. 47-61, 2000. 8
- 7) 中村光, 二羽淳一郎, 田邊忠顕: 鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.420 / V-13, pp.115-124, 1990.8
- 8) 土屋智史, 前川宏一: 多方向入力を受けるRC 棒部材断面の損傷指標, 土木学会論文集, No.718 / V-57, pp.45-57, 2002.11
- 9) 李相勲: 離散系における半無限体の伝達境界設定に関する研究, 名古屋大学学位論文, 2004.2
- 10) Samman, M. J. and Biswas, M.: Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. I: Theory, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.120, pp.269-289, 1994.1