

# 詳細有限要素法を用いた非線形構造物の振動特性同定 Dynamic Characteristics Identification of Non-Linear Structures using Detailed Finite Element Analysis

○藤原 淳<sup>\*1</sup>, 大崎 純<sup>\*2</sup>, 宮村 倫司<sup>\*3</sup>  
Jun Fujiwara<sup>\*1</sup>, Makoto Ohsaki<sup>\*2</sup> and Tomoshi Miyamura<sup>\*3</sup>

\*1 防災科学技術研究所 主幹研究員 博士 (工学)

Research Fellow, NIED, Dr. Eng.

\*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 博士(工学)

Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

\*3 日本大学工学部情報工学科 准教授 博士(工学)

Assoc. Professor, Dept. of Computer Science, Nihon Univ., Dr. Eng.

キーワード：振動特性同定; 非線形構造物; 鋼構造露出柱脚; ソリッド要素

Keywords: Dynamic characteristics identification; non-linear structure; exposed column base; solid element.

## 1. はじめに

組積造のように接触によって力を伝える構造物は引張力を伝達することができず、ケーブルや膜材料は圧縮力を負担することができない。これらの例のように、荷重や変形の方法や大きさによって剛性が変化し、材料が弾性であっても挙動は非線形となる構造や材料が、建築構造の分野にはいくつか存在する。これらの構造の固有振動数や固有振動モードを固有値解析によって同定すると、固有値解析では構造物の剛性は線形であると仮定する為、上述の荷重や変形の方法による非線形性が考慮されない。固有振動数は最も基本的な動的特性であり、解析モデルの検証や比例減衰の定数決定に用いられる為、非線形性を考慮した評価法が必要である。

本報告では、鋼構造の露出柱脚を例として、固有値解析によらない非線形性を考慮した固有振動数の同定方法について論じる。露出柱脚では圧縮力はベースプレートと基礎コンクリートの接触で、引張力はアンカーボルトの張力で伝達する。曲げや引き抜き力によるベースプレート底面に生じる引張応力増分が固定荷重と積載荷重による圧縮応力を超えない範囲ではベースプレートと基礎コンクリートは一体的に挙動し、引張応力増分が固定荷重と積載荷重による圧縮応力を超えるとベースプレートと基礎コンクリートの間に離間が生じてアンカーボルトによって引張力が伝達される。よって、作用する荷重の大きさによって荷重を基礎コンクリートに伝達する機構が変化し、結果として回転剛性が変化する<sup>1)</sup>。ここでは、既報<sup>2)</sup>での弾塑性解析に用いた、ソリッド要素と接触、摩擦条件でモデル化した露出柱脚のモデルのランダム波加振およびインパルス加振を行い、応答変位の時刻歴波形から固有振動数を同定する。

## 2. 露出柱脚の有限要素解析モデル

第2節では、本報告で対象とする鋼構造露出柱脚とそのモデル化について述べる。内容の多くは既報<sup>2)</sup>で報告済みであるが、完結性の為にここに記載し、既報<sup>2)</sup>からの引用については引用符を付して区別する。

防災科学技術研究所のE-ディフェンスで行われた実大3層鉄骨造建物の震動台実験<sup>3),4)</sup>のB通り構面の②通りの露出柱脚を対象とする。2階床梁との接合部の下側ダイアフラムまでを切り出して、角形鋼管とベースプレート、ダイアフラムを非適合モードを加えた6面体1次ソリッド要素で、その他を6面体1次ソリッド要素でモデル化する。切り出した露出柱脚の立面図と各構成要素の仕様およびソリッド要素メッシュの概要図を、それぞれ Figure 1, Table 1, Figure 2 に示す。

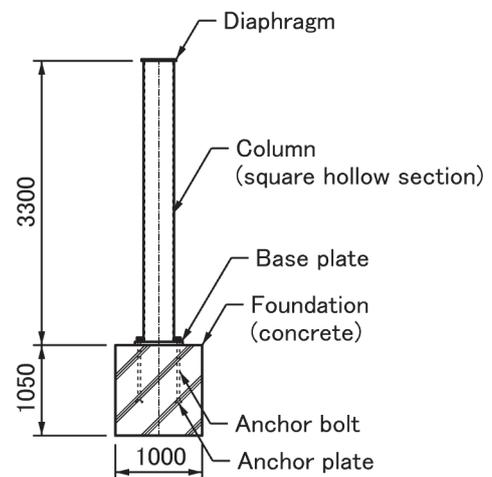
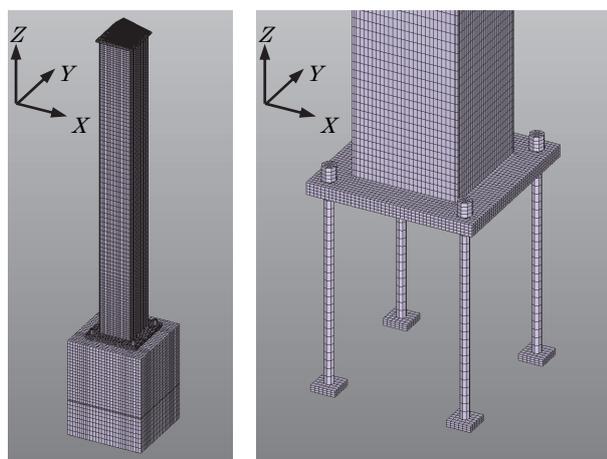


Figure 1. Exposed column base<sup>2)</sup>

Table 1. Specification of column base<sup>2)</sup>

Component	Member	Material
Column	Square hollow section (width: 350mm, thickness: 12mm)	BCR295
Base plate	Plate (Thickness: 40mm)	SM490A
Diaphragm	Plate (Thickness: 19mm)	SM490A
Anchor bolt	4-M30	ABR400
Anchor plate	Plate (Thickness: 16mm)	---
Nut	M30 (doubled)	---
Foundation	Plain concrete	FC21



(Overview) (Column base)

Figure 2. Solid element mesh model<sup>2)</sup>

Table 2. Connection conditions<sup>2)</sup>

Component 1	Component 2	Connection condition
Column	Base plate	Shared node
Column	Diaphragm	Shared node
Base plate	Foundation	Contact
Base plate	Anchor bolt	Contact
Base plate	Nut	Contact
Anchor bolt	Nut	Shared node
Anchor bolt	Anchor plate	Shared node
Anchor bolt	Foundation	Contact
Anchor plate	Foundation	Sticked

構成要素間の接続条件は、溶接で一体化された箇所と接続面の離間が生じ難い箇所および離間を考慮せずとも解析結果への影響が小さいと考えられる箇所は節点共有接合または固着接合として、その他の箇所は接触条件を設定する。接触条件を設定した箇所では、共通して離間と有限滑り考慮し、摩擦係数を 0.5 とする。構成要素間の接続条件を Table 2 にまとめる。

柱梁接合部の構造芯に仮想節点を設け、切り出した柱が支える質量 (73.42 ton) を作用させる。この仮想節点とダイアフラム上面の全節点を剛体梁要素で接続して、ダイアフラムが Y 軸まわりにのみ回転するように、仮想節点の X, Z 軸まわりの回転を拘束する。仮想節点には、Y 軸まわりの回転ばねを設ける。回転ばねの剛性は、接続される柱と梁の剛性から想定して、 $3.451 \times 10^5$  kN m / rad とする。

鋼材は等方硬化を伴う von Mises モデルとする。材料規格の降伏応力を初期降伏応力として、硬化係数を弾性係数の 1/100 に設定する。但し、アンカーボルトは実際の軸直径が 27.51mm<sup>5)</sup> に対してメッシュモデルの軸直径が 30mm なので、軸剛性、降伏軸力が等しくなるように断面積比に応じて弾性係数、初期降伏応力、硬化係数を割り引く。また、材質が不明の部材は SS400 相当を仮定する。材料パラメータを Table 3 にまとめる。

基礎コンクリートは、双曲線形式に拡張された Drucker Prager モデル<sup>6)</sup>とする。弾性定数とポアソン比は、文献 7) より、それぞれ 21,700 N/mm<sup>2</sup> と 0.2 とする。引張強度を圧縮強度の 1/10、内部摩擦角を 50 度<sup>8),9)</sup>として、降伏曲面を定める。硬化は等方硬化として、硬化係数は弾性係数の 1/1000 とする。材料パラメータを Table 1 に示す。

既報 2) で実施した、基礎コンクリート底面の全節点の X, Y, Z 軸方向の変位を拘束して柱梁接合部の仮想節点に X 軸方向の繰り返し強制変位を与えた静解析により得られた柱脚回転角-柱脚曲げモーメントの関係を、Figure 3 に示す。柱脚回転角-柱脚曲げモーメントはループを描いておらず弾性であるが、荷重を伝達する機構が変化することによる非線形性が確認できる。

Table 3. Material parameters of steels<sup>2)</sup>

Material	Elastic modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Yield stress (N/mm <sup>2</sup> )	Hardening coefficient (N/mm <sup>2</sup> )
BCR295	205,000	0.3	295	2,050
SM490A	205,000	0.3	325	2,050
ABR400	172,000	0.3	198	1,720
Others	205,000	0.3	235	2,050

Table 4. Material parameters of concrete<sup>2)</sup>

Elastic modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )
21,700	0.2	21
Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Internal frictional angle (deg.)	Hardening coefficient (N/mm <sup>2</sup> )
2.1	50	21.7

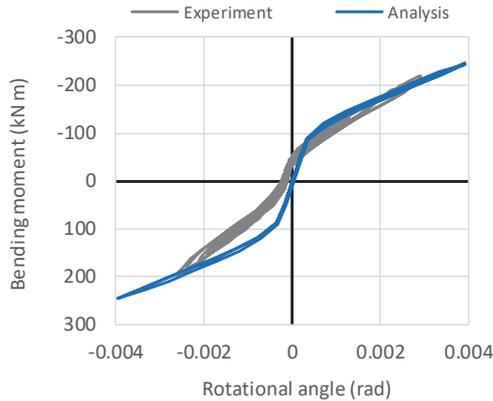


Figure 3. Rotational angle-moment diagram of column base<sup>2)</sup>

### 3. 固有値解析による固有振動数同定

第2節で述べた露出柱脚の有限要素モデルの固有振動数を、固有値解析により求める。ここで、固有値解析では接触条件を扱うことはできないので、Table 2 に示した接触条件は全て固着条件に置き換える。得られた1次固有振動数は、2.36 Hzであった。

一方、実際の実大震動実験の試験体をホワイトノイズで加振して応答加速度から求めた固有振動数は1.57 Hzである。以上から、固有値解析ではFigure 3に示す非線形性を考慮できず、剛性を実際よりも高く評価していることが分かる。

### 4. 動的解析に基づく固有振動数同定

実験では一般的に、起振機や振動台、インパルスハンマーによって対象構造物を加振し、応答波形を計測、分析して固有振動数を同定する。ここでは、第2節で述べた柱脚の有限要素モデルをランダム波およびインパルス力で加振した動解析を行い、入力加振波と応答変位波形から固有振動数を求める。

#### 4.1. ランダム波加振による固有振動数の同定

基礎底面の全節点のY、Z軸方向変位を拘束し、X軸方向に強制加速度を入力する。入力加速度は、振動数が0.3~35 Hzの間は振幅が1で位相がランダム、それ以外の振動数の範囲では振幅が0のフーリエスペクトルをフーリエ逆変換して作成する。継続時間は35秒であり、開始から2.5秒で0から漸増し、終了前の2.5秒で0に漸減させる。加速度の絶対値の最大値が500, 1000, 2000 mm/sec<sup>2</sup>となるように加速度軸方向にスケールした加速度を入力した3ケースの動解析を行い、それぞれRand-500, Rand-1000, Rand-2000と呼ぶ。Rand-500の加速度波形を、Figure 4に示す。

全てのケースで最初に自重を作用させた静解析を行い、その解析結果を動解析の初期状態とする。減衰は質量比

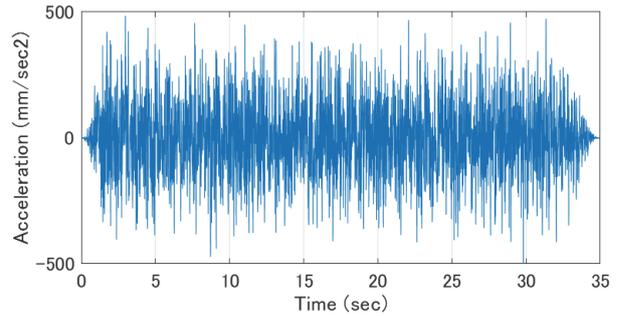


Figure 4. Input acceleration of random excitation (Rand-500)

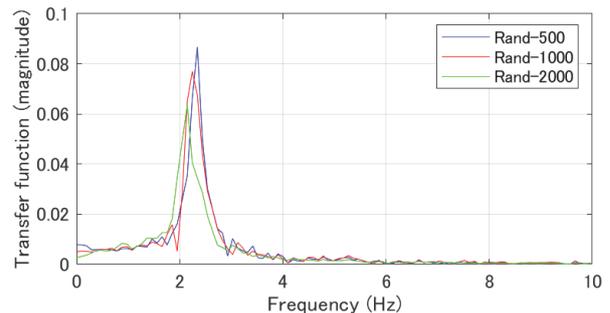


Figure 5. Transfer function (input: random excitation, output: response displacement)

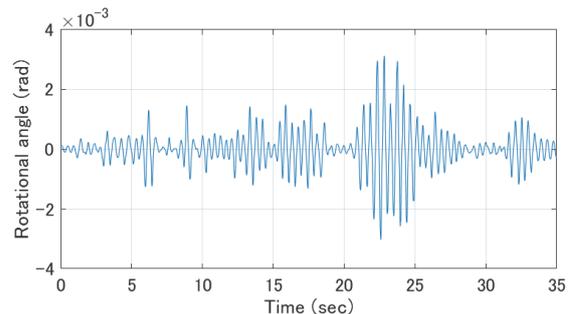


Figure 6. Rotational angle at column base (Rand-2000)

例減衰として、全ての接触面を固着条件として固有値解析で求めた1次固有振動数(2.36 Hz)で減衰比が0.02となるように係数を求める。動解析の時間刻みは0.005秒として、0.01秒ごとに解析結果を出力する。ソルバとして、ADVENTURECluster Solver ver. 2014<sup>10)</sup>をベースとした数値震動台を用いる。

各ケースの入力加速度と柱梁接合部の仮想節点のX軸方向変位を、解析時刻5秒から1024サンプルずつ512サンプルオーバーラップさせて4回切り出し、それぞれで求めた伝達関数を平均する。求めた伝達関数をFigure 5に示す。Rand-500, Rand-1000, Rand-2000で得られた固有振動数は、それぞれ2.34, 2.25, 2.15 Hzであり、ランダム波の最大加速度が大きくなると固有振動数が小さくなる傾向がみられるが、Rand-2000で得られた固有振動数でも実験結果とは大きな差がある。Rand-2000の柱脚回転角をFigure 6にプロットする。

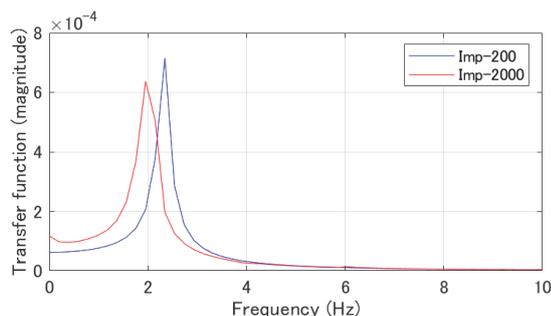


Figure 7. Transfer function (input: impulse excitation, output: response displacement)

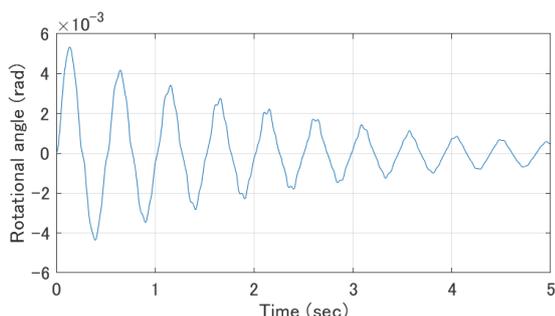


Figure 8. Rotational angle at column base (Imp-2000)

Figure 3 から、柱脚回転角が  $0.0005 \text{ rad}$  を上回ると非線形性がみられるようになるが、Rand-2000 ではほとんどの時間帯で柱脚回転角が  $0.0005 \text{ rad}$  を下回っている。

#### 4.2. インパルス加振による固有振動数の同定

基礎底面の全節点の  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  軸方向変位を拘束して、柱梁接合部の仮想節点に  $X$  軸方向にインパルス力を入力する。インパルス力は継続時間  $0.02 \text{ 秒}$  の三角波形とする。インパルス力の最大値が  $200 \text{ kN}$  と  $2000 \text{ kN}$  の 2 ケースの解析を行い、それぞれ Imp-200 と Imp-2000 とする。

動解析の時間刻みは  $0.005 \text{ 秒}$  として、 $0.005 \text{ 秒}$  ごとに解析結果を出力する。解析は  $5.12 \text{ 秒}$  行う (サンプル数 1024)。その他の条件は、ランダム波加振と同様とする。

インパルス力を入力、柱梁接合部の仮想節点の  $X$  軸方向の応答変位を出力として、全サンプルを用いて伝達関数を求める。ここで、継続時間の終わりで大きさが  $0.2$  となる指数窓を作用させる。求めた伝達関数を Figure 7 に示す。Imp-200, Imp-2000 で得られた固有振動数は、それぞれ  $2.34$ ,  $1.95 \text{ Hz}$  である。Imp-2000 では、ランダム波加振に比べて実験結果に近づいたが、実験結果に比べて解析で求めた固有振動数は大きい。Imp-2000 の柱脚回転角の時刻歴を Figure 8 にプロットする。Imp-2000 では、柱脚回転角がほとんどの時間帯で  $0.0005 \text{ rad}$  を上回っている。

#### 5. まとめ

動的解析で得られた応答の時刻歴波形から、非線形構

造物の固有振動数の同定を試みた。本論では、非線形構造物の例として鋼構造の露出柱脚を対象として、これをソリッド要素と接触、摩擦条件でモデル化し<sup>2)</sup>、ランダム波加振とインパルス加振を行い、得られた応答変位波形から伝達関数を求めて固有振動数を同定した。

ランダム波加振では最大加速度が  $500$ ,  $1000$ ,  $2000 \text{ mm/sec}^2$  の 3 ケースの動的解析を行った。それぞれのケースで得られた固有振動数は  $2.34$ ,  $2.25$ ,  $2.15 \text{ Hz}$  であり、実験結果 ( $1.57 \text{ Hz}$ ) に比べて大きな差がある。

最大インパルス力が  $200$ ,  $2000 \text{ kN}$  の 2 ケースのインパルス加振を行った。それぞれのケースで得られた固有振動数は  $2.34$ ,  $1.95 \text{ Hz}$  であった。ランダム波加振に比べて実験値との差は小さいが、十分小さいとは言い難い。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター・数値震動台研究開発分科会における成果である。また、本研究の一部は、科学研究費補助金 (基盤(B), No. JP19H02286) の助成による。ここに記して謝意を表する。

#### 【参考文献】

- 1) 佐藤 邦昭他: 鋳鋼製柱脚金物 HIBASE を用いた柱脚の定着に関する研究 (その 2, 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.2031-2034, 1981
- 2) 藤原 淳, 山下 拓三, 大崎 純, 宮村 倫司: ソリッド要素を用いた鋼構造物の露出柱脚のモデル化と解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 24, B-04-04, 2019.5
- 3) 兵庫県, 防災科学技術研究所, 神戸大学: 地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究, 2014  
<https://web.pref.hyogo.lg.jp/kk37/e-defenseh25.html>  
(最終閲覧日 2019 年 10 月 3 日)
- 4) 防災科学技術研究所: ASEBI 地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究,  
<https://www.edgrid.jp/datas>  
(最終閲覧日 2019 年 3 月 28 日)
- 5) 日本工業規格: JIS1220:2015 構造用両ねじアンカーボルトセット, 2015
- 6) Hadjigeorgiou, J., Ghanmi, A. and Paraszczak, J.: 3-D Numerical Modelling of Radial-Axial Rock Splitting, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 16, Issue 1, pp. 45-57, 1998.3
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 8) 藤田 吉夫, 石丸 麟太郎, 花井 重孝, 末永 保美: Plain Concrete の内部摩擦角と引張強度についての一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 494 号, pp. 7-14, 1997.4
- 9) 吉田 幸夫, 畑中 重光, 水野 英二: Drucker-Prager 型構成則を用いた円柱コンファインドコンクリート供試体の圧縮破壊 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, pp. 155-162, 2005.1
- 10) ADVENTURECluster ソルバ 2014R1.1 入力データリファレンスマニュアル, 株式会社アライドエンジニアリング, 2014