

建築構造骨組を構成する部材ユニットの詳細FEMの代理モデル

Surrogate Models of Detailed FEM for Member Units in the Structural Framework of Buildings

山下拓三¹⁾, 今井隆太²⁾, 宮本裕平³⁾, 賀須井直規⁴⁾, 中村幸太郎⁵⁾

Takuzo Yamashita, Ryuta Imai, Yuhei Miyamoto, Naoki Kasui and Kotaro Nakamura

1) 博士(工学) 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1, E-mail: tyamashi@bosai.go.jp)

2) 博士(数理科学) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

(〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: ryuta.imai@mizuho-rt.co.jp)

3) 博士(理学) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

(〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: yuhei.miyamoto@mizuho-rt.co.jp)

4) 修士(工学) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

(〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: naoki.kasui@mizuho-rt.co.jp)

5) 博士(工学) みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

(〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3, E-mail: kotaro.nakamura@mizuho-rt.co.jp)

In order to develop a surrogate model for detailed FEM seismic response analysis of structures, in this paper, a surrogate model of a member unit consisting of columns, beams, and joints was developed. Using displacement as the input boundary condition for the member unit rather than the displacement increment resulted in more accurate predictions. The displacement and stress fields of the model are in good agreement with those produced by FEM. However, the total strain and plastic strain fields have a moderate correspondence with those produced by FEM. Furthermore, the equivalent plastic strain differs significantly. We will continue to enhance the neural network to increase the accuracy of the surrogate model for member units. Additionally, we aim to develop a surrogate model for the entire building assembled from the member units.

Key Words : Surrogate Model, Neural Network, Finite Element Model, Structural Analysis

1. はじめに

防災科学技術研究所の地震減災実験研究部門では、実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)の実験データを活用して、構造物の損傷破壊過程をシミュレートする数値解析システム(数値震動台, E-Simulator)を開発している^[1]。E-Simulatorは、局所的な損傷と構造全体の挙動を同時に再現するため、ソリッド要素を用いた詳細有限要素モデル(FEM)を採用している。しかしながら、この詳細FEMによるアプローチは、解析モデルの規模が大きく、E-ディフェンス実験試験体を対象とした解析モデルでは、数百万から数千万の自由度にも及ぶ。

構造物の確率論的地震リスク評価や都市の地震被害予測を行う際には、多数の数値解析を実施する必要があり、これらの評価や予測を効率的に行うためには、計算負荷の大幅な削減が求められる。

本研究では、構造物の詳細FEMによる地震応答解析の計算負荷を大幅に削減する代理モデルの開発を目指している。図-1に提案する詳細FEMの代理モデルを示す。柱、梁、接合部などから構成される部材の集合(部材ユニット)に対して、代理モデルを学習する。学習プロセスは物理場の変数を固

有直交分解(POD)により次元圧縮して、低次元空間で行う。部材ユニットごとに構築された代理モデルをアセンブルすることで、建物全体の代理モデルを構築し、釣合方程式を求解する。得られた低次元空間の結果を物理空間に復元して建物全体の解析結果を得る。本稿では、部材ユニットの代理モデルの研究結果を報告する。

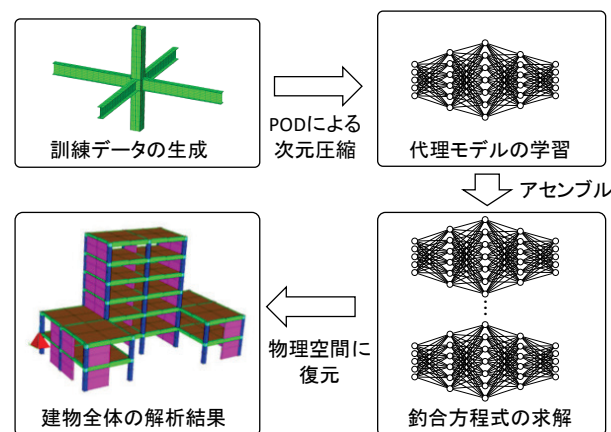


図-1 提案する詳細 FEM の代理モデル

2. 訓練データの生成

訓練データの生成に使用する解析モデルとその解析規模を、それぞれ図-2および表-1に示す。学習の対象となる部材ユニットに強制変位を加えるために、2層の2×2スパンの骨組モデル中央に柱、梁、接合部から構成される部材ユニットを組み込んでいる。解析モデルは六面体一次要素非適合モード要素 (C3D8I) で要素分割する。材料構成則は、von-Mises型等方硬化則による完全弾塑性モデルを採用し、材料パラメータとして、ヤング率は205 GPa、ポアソン比は0.3、降伏応力は235MPaと設定する。解析にはAbaqus(ver.2018)を用いる。境界条件として、底面の柱の断面を完全固定とし、上面の柱断面の節点と仮想節点を多点拘束条件(MPC)で接続して、その仮想節点に水平2方向の繰返し強制変位を適用する。

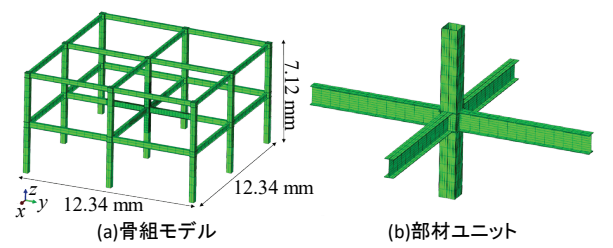


図-2 解析モデル

表-1 解析の規模

対象	要素数	節点数
全体	18833	31418
部材ユニット内部	6719	10005
部材ユニット境界	---	564

以下の①から④の過程に従って250ケースの繰返し強制変位のパターンを生成する。

- ① 初期ステップ t を0とし、繰返しのインデックス i も0とする。
- ② 平均10のポアソン分布に従う確率変数をサンプリングし、その値を $x^{(i)}$ とする。
- ③ 振幅 $U^{(i)}$ を $U^{(i)} = \frac{x^{(i)}}{10}a$ とし(ステップ、変位)のテーブルデータに $(t, 0)$ 、 $(t + x^{(i)}, U^{(i)})$ 、 $(t + 3x^{(i)}, -U^{(i)})$ 、 $(t + 4x^{(i)}, 0)$ を追加する。間のステップの変位は線形補間で求める。 $t \leftarrow t + 4x^{(i)}$ とし、 $i \leftarrow i + 1$ とする。
- ④ ステップ t が100に達するまで、上記の②と③の過程を繰り返す。

ここに、 a は振幅の大きさを決めるパラメータであり、弾塑性挙動が見られるように $a = 100 \text{ mm}$ とした。生成した繰返し強制変位の一例を図-3に示す。

これら300ケースの繰返し強制変位のパターンに対して解析を行い、部材ユニット境界では、全節点(節点数は $N_{\text{node}}^B = 564$)で100 ステップ分の変位3成分と反力3成分を取得した。部材ユニット内部では、全節点(節点数は $N_{\text{node}}^D = 10005$)で、100ステップ分の変位3成分、応力6成分、全ひずみ6成分、塑性ひずみ6成分、相当塑性ひずみ1成分を取得した。

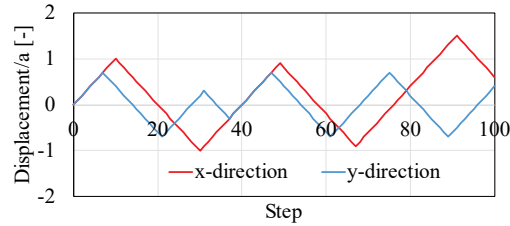


図-3 繰返し強制変位の一例

3. 固有直交分解 (POD) による次元圧縮

ある物理量の場の s 番目のサンプル $\mathbf{X}_s \in \mathbb{R}^N$ について、次式により固有直交分解(POD)を実行する。

$$\mathbf{X}_s(t) - \bar{\mathbf{X}} \approx \Phi \Sigma \mathbf{A}_s(t) \text{ where } \bar{\mathbf{X}} := \text{average}_{s,t} \mathbf{X}_s(t) \quad (1)$$

ここに、 $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times r}$ はモード形状、 $\Sigma \in \mathbb{R}^{r \times r}$ は特異値を対角成分に持つ対角行列、 $\mathbf{A}_s \in \mathbb{R}^r$ は s 番目のサンプルのモード係数(POD係数)、 r は選択されるモード数、つまり、次元圧縮後の次元である。対象となる物理量の場 $\mathbf{X}$ は、変位のベクトル場、応力、全ひずみ、塑性ひずみの2階テンソル場、相当塑性ひずみのスカラー場を含む。ベクトル場とテンソル場は、成分ごとに固有直交分解するわけではない点に注意されたい。境界部において、面の法線方向が x 軸、 y 軸、 z 軸の負側の境界をそれぞれ、 $X0$ 、 $Y0$ 、 $Z0$ と呼び、正側の境界をそれぞれ $X1$ 、 $Y1$ 、 $Z1$ と呼ぶ。境界部では $X0$ と $X1$ 、 $Y0$ と $Y1$ 、 $Z0$ と $Z1$ を一つのグループとみなし、それぞれのグループごとに固有直交分解を実行している。部材ユニット境界における変位と反力に関しては、全ての境界のグループで選択されたPODモード数は7つである。部材ユニット内部における各物理量の選択されたPODモード数を表-2に示す。

表-2 部材ユニット内部の各物理量の POD モード数

物理量	変位	応力	全ひずみ	塑性ひずみ	相当塑性ひずみ
モード数	2	6	12	12	3

4. 部材ユニットの代理モデル

図-4に示すように時間ステップ $t-1$ での内部の物理量のPOD係数と、時間ステップ t での境界変位もしくは境界変位増分のPOD係数から、時間ステップ t での内部の物理量のPOD係数および境界反力のPOD係数を予測するモデルをニューラルネットワーク(NN)で構築する。このNNは、入力層、3層の中間層、出力層から構成される全結合型ニューラルネットワーク(FCNN)である。内部の入出力における物理量の種類は、変位3成分、応力6成分、全ひずみ6成分、塑性ひずみ6成分、

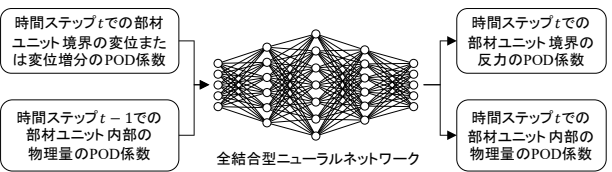


図-4 部材ユニットの代理モデル

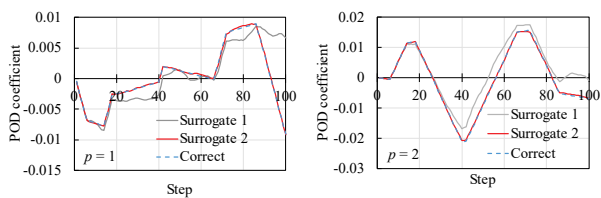


図-5 変位の POD 係数

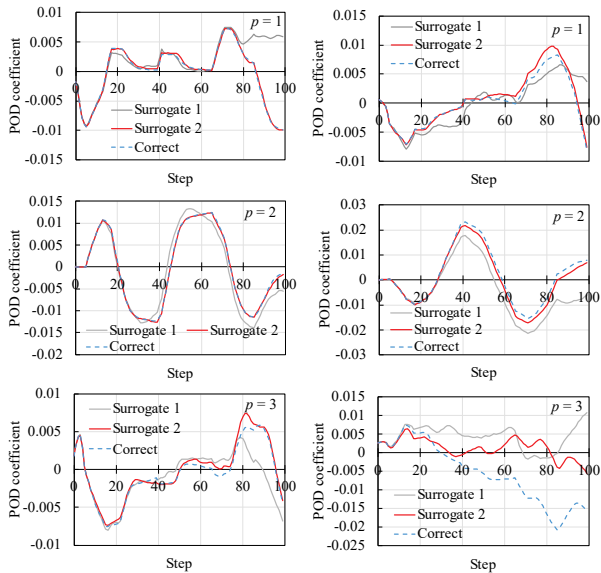


図-6 応力のPOD係数の時刻歴

図-7 全ひずみの POD 係数の時刻歴

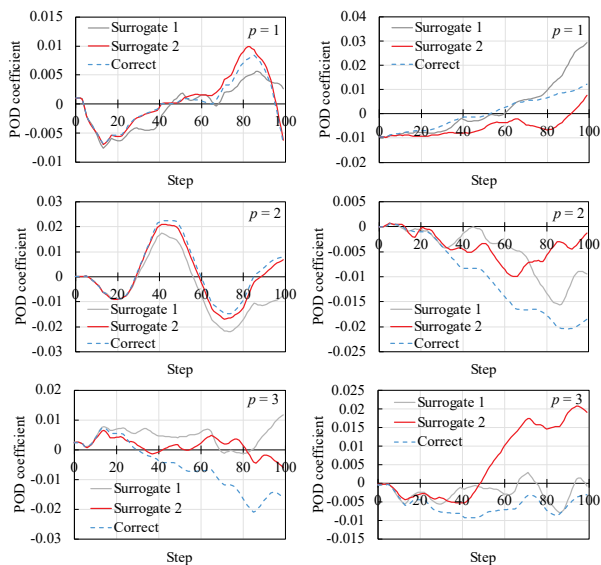


図-8 塑性ひずみの POD係数の時刻歴

図-9 相当塑性ひずみの POD 係数の時刻歴

相当塑性ひずみ1成分であり、境界における入力の変位または変位増分の3成分、境界での出力は反力の3成分である。境界の入力として変位増分を用いた場合の予測モデルをSurrogate 1と称し、変位を用いた場合の予測モデルをSurrogate 2と称する。

FCNNの入出力における総ノード数は、部材ユニット内部の全物理量のモード数の総和 $N_{\text{POD}}^D = 35$ と、6箇所の部材ユニット境界の変位(変位増分)または反力のモード数の総和 $N_{\text{POD}}^B = 6 \times 7 = 42$ とバイアス項のノードを加えた合計で78

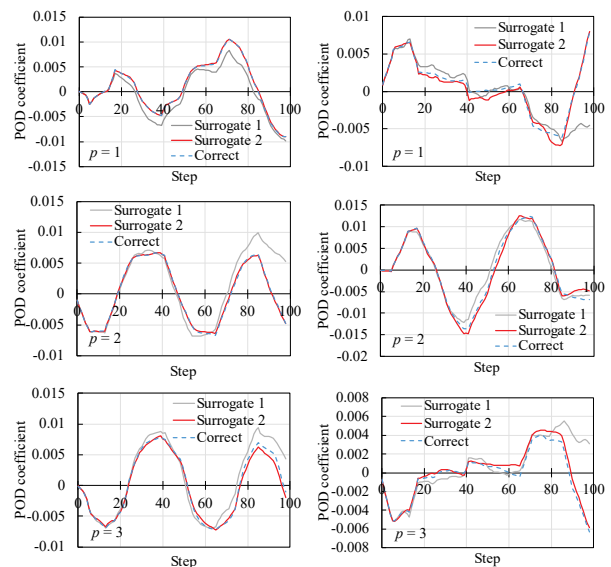


図-10 X1境界の反力の POD係数の時刻歴

図-11 Z1境界の反力の POD 係数の時刻歴

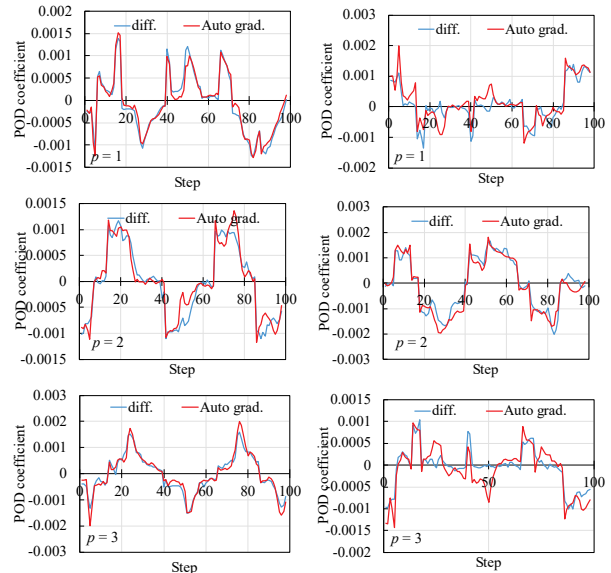


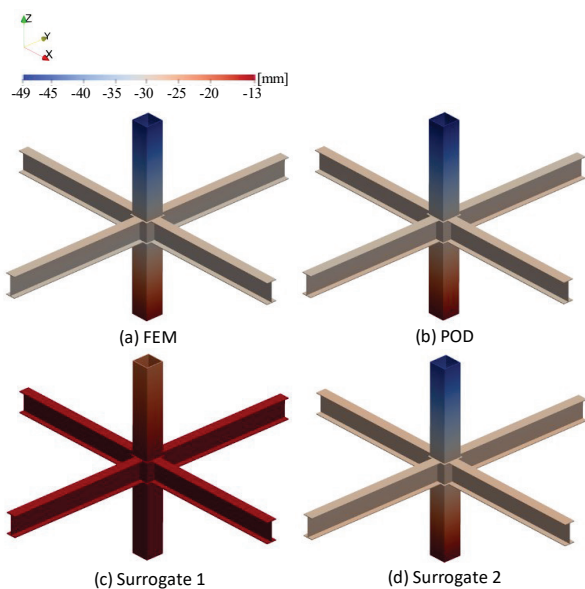
図-12 X1境界の反力のPOD係数の時間増分の時刻歴 (Surrogate 2)

図-13 Z1境界の反力のPOD係数の時間増分の時刻歴 (Surrogate 2)

となる。中間層のノード数は、全ての層で $1 + (N_{\text{POD}}^D + N_{\text{POD}}^B) = 155$ とした。活性化関数にはRectified linear unit(ReLU)を採用し、重みの更新にはAdaptive momentum gradient method (Adam)を使用した。学習率は 10^{-5} とし、学習エポック数を10000に設定した。

5. 代理モデルとFEMの結果比較

Surrogate 1(入力境界に変位増分のPOD係数を用いたモデル)とSurrogate 2(入力境界に変位のPOD係数を用いたモデル)の検証データを用いた予測結果とFEMによる結果の比較を行う。部材ユニット内部の変位場の1次、2次モードのPOD係数の時刻歴波形を図-5に示す。Surrogate 1は途中からFEMの結果と差異が見られたが、Surrogate 2は1次、2次モードともFEM結果をほぼ正確に再現している。応力、全ひずみ、塑性ひずみ、相当塑性ひずみの1次、2次および3次モー

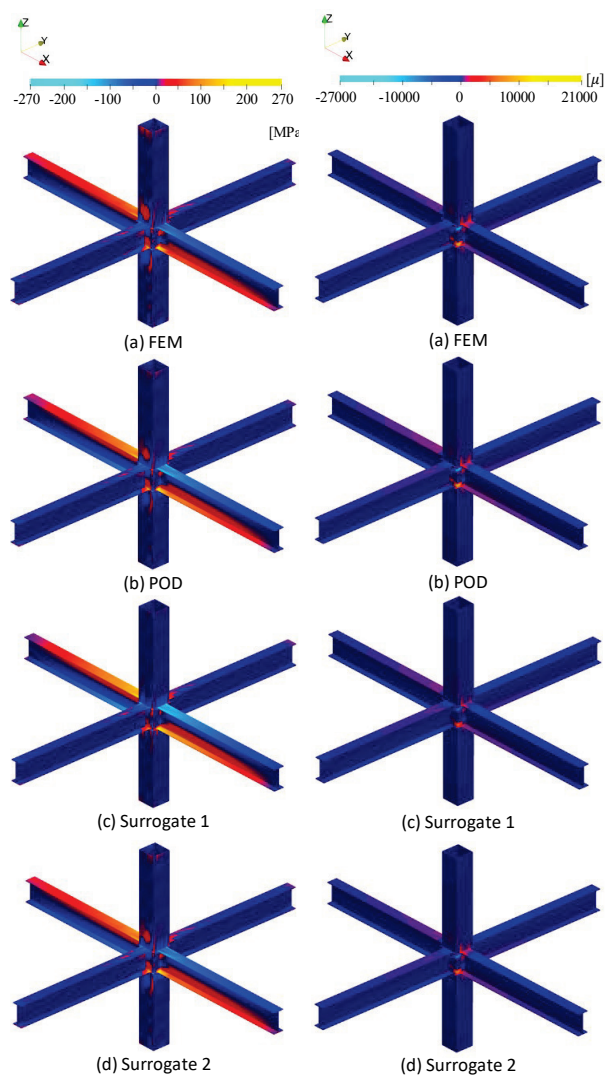
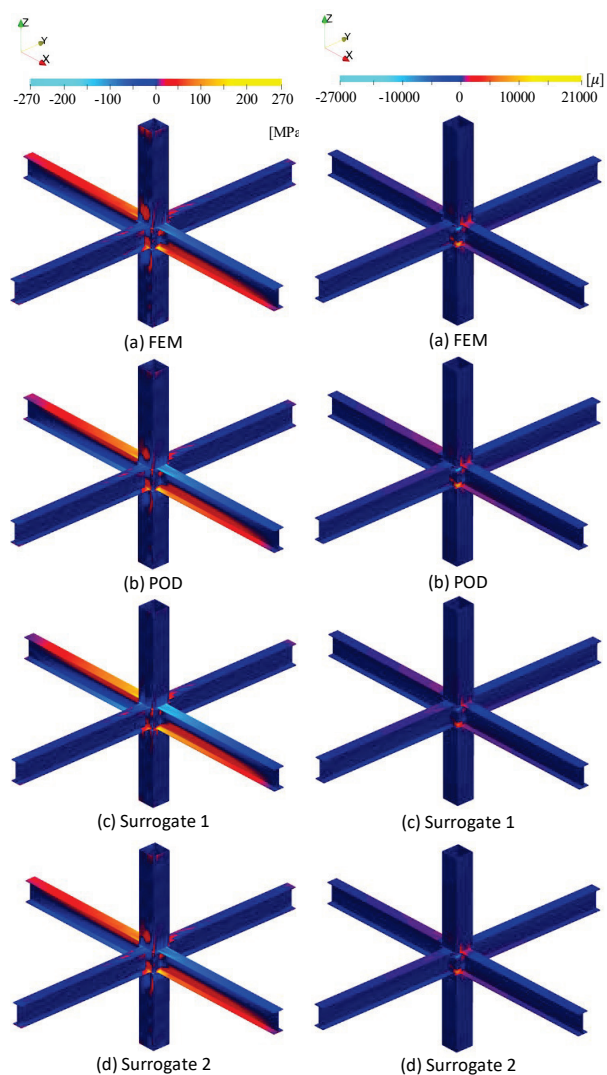
図-14 u_x のコンター

ドのPOD係数の時刻歴波形をそれぞれ図-6、図-7、図-8、図-9に示す。応力についてSurrogate2は、1次および2次モードにおいてFEMの結果をほぼ正確に再現できているが、3次モードでは若干の差異がある。Surrogate1はSurrogate2に比べてFEMの結果との対応が悪い。全ひずみと塑性ひずみでは、Surrogate 2の1次および2次モードは応力に比べて再現性は低いが比較的良好にFEMの結果と対応している。しかし、3次モードの対応は良くない。Surrogate 1の1次と2次モードはSurrogate 2に比べてFEMの結果との対応はやや悪く、特に最終ステップ付近で対応が悪くなっている。3次モードはSurrogate 2と同様にFEMの結果と対応していない。相当塑性ひずみでは、Surrogate 2とFEMとの対応が悪く、Surrogate1のほうがFEMの結果との対応が良い。

X1境界とZ1境界の反力のPOD係数の時刻歴波形をそれぞれ図-10、図-11に示す。Surrogate 2はFEMの結果と良好に対応している。Surrogate1はSurrogate2に比べてFEMの結果との対応はやや劣り、ステップ100付近で特に対応が悪くなっている。

代理モデルをアセンブルして建物全体の代理モデルを構築する際には、方程式の係数行列を導出するために $\partial F / \partial U$ の計算が必要になる。反力の時刻歴から直接 $\partial F / \partial U$ を導出できないため、時刻歴波形から求めた反力の時間増分と代理モデルの自動微分により計算した $dF = \sum_i (\partial F / \partial X_i) dX_i$ (i は物理量の種類のインデックス)を比較する。Surrogate 2のX1境界とZ1境界の反力のPOD係数の時間増分の時刻歴をそれぞれ図-12、図-13に示す。X1、Z1とも自動微分により求めた値(Auto grad.)はステップ間の差をとった数値微分(diff.)と全体的には良好に対応しているがピーク値で差異が見られる。

モード係数が求まると式(1)から元の物理空間での物理量の場合を復元できる。ここでは、FEMとSurrogate 1, Surrogate 2について、変位 u_x 、応力 σ_{xx} 、全ひずみ ϵ_{xx} 、塑性ひずみ ϵ_{xx}^p および相当塑性ひずみのステップ50でのコンターをそれぞれ、図-14、図-15、図-16、図-17、図-18に示す。これらの図には

図-15 σ_{xx} のコンター図-16 ϵ_{xx} のコンター

FEMの結果にPODを施してそれを復元した結果(図中のPOD)も併せて示す。変位についてはSurrogate 1以外の3つの結果が同様の分布になっている。変位についてはSurrogate 1で上側柱の付け根での応力のピークが見られないが他の3つの結果は同様の分布となっている。全ひずみと塑性ひずみはSurrogate 1, Surrogate 2はFEMやPODの結果に比べてピークの値が小さいが似た分布となっている。相当塑性ひずみは接合部に発生していることは代理モデルとFEM, PODの結果と対応しているが、その分布の対応は良くなく、Surrogate2では小さい値となっている。

復元した物理次元のそれぞれの物理量の時刻歴波形を比較する。各物理量の評価点を図-19に示す。FEM, POD, Surrogate 1, Surrogate 2の変位、応力、全ひずみ、塑性ひずみ、相当塑性ひずみの時刻歴波形をそれぞれ図-20、図-21、図-22、図-23、図-24に示す。変位についてSurrogate 2はFEMとPODとほぼ一致しているがSurrogate 1には差異が見られる。応力についてFEMとPODでも若干差異は見られ特に σ_{xy} では大きな差異が見られる。Surrogate2はPODを良好に再現できおりSurrogate 1はSurrogate 2よりPODとの対応は劣る。全ひずみについてはFEMとPODでも差異が見られるところがあり、

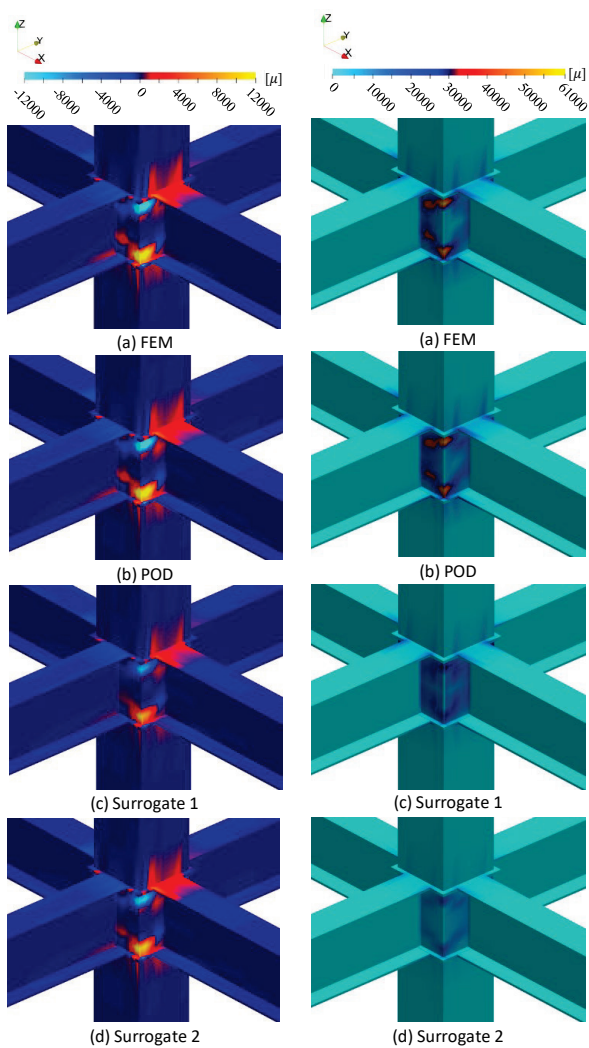
図-17 ϵ_{xx}^p のコンター

図-18 相当塑性ひずみのコンター

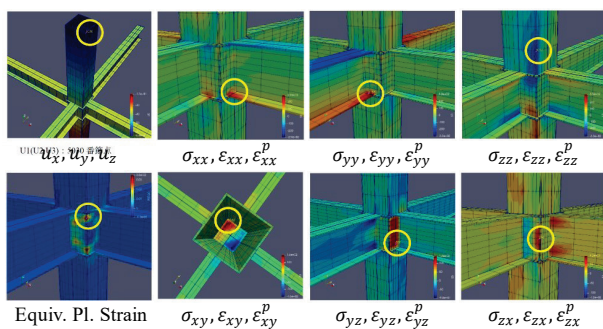


図-19 物理量の時刻歴波形の評価点

Surrogate 2は応力に比べてPODとの対応は良くなく、 ϵ_{zx} で特に対応が悪くなっている。Surrogate 1はSurrogate 2に比べてPODとの対応は劣る傾向がある。塑性ひずみについてFEMとPODは ϵ_{xy}^p で大きな差異が見られる。PODとSurrogate 2は ϵ_{zx}^p を除いて概ね良い対応を示しており、Surrogate 1はSurrogate 2に比べてPODとの対応は劣る傾向にある。相当塑性ひずみについてFEMとPODはある程度対応しているものの、Surrogate 1とSurrogate 2はPODと差異が見られ特にSurrogate 2は後半のステップでPODと大きな差が見られる。

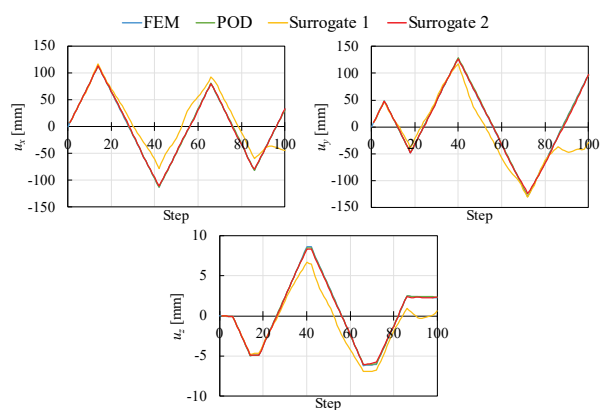


図-20 変位の時刻歴波形

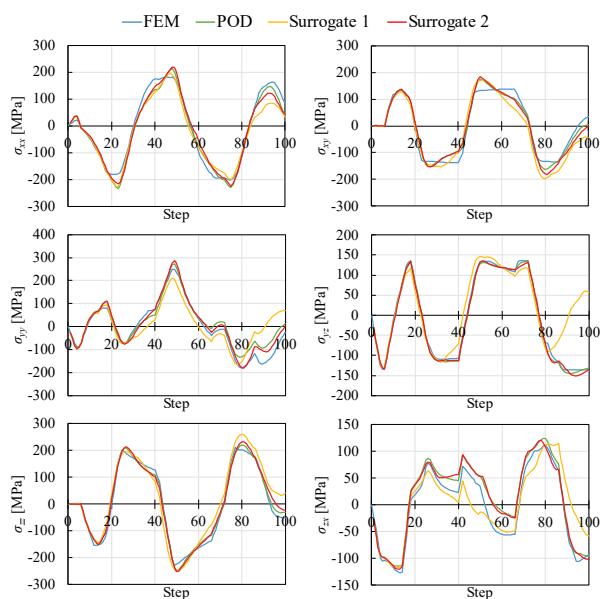


図-21 応力の時刻歴波形

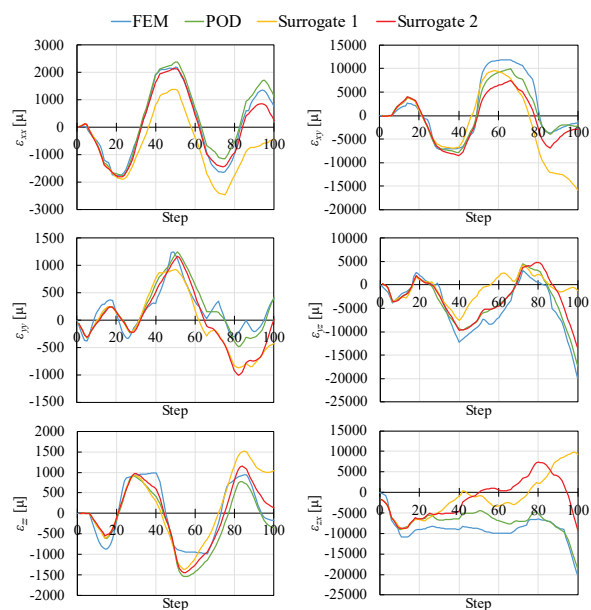


図-22 全ひずみの時刻歴波形

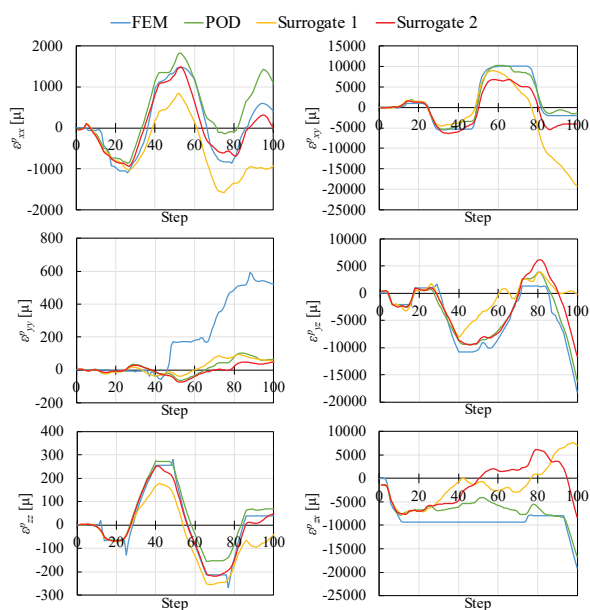


図-23 塑性ひずみの時刻歴波形

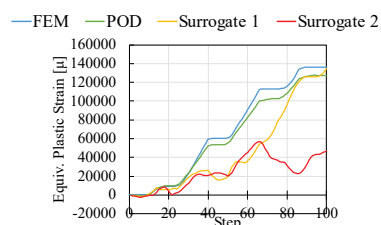


図-24 相当塑性ひずみの時刻歴波形

6. おわりに

構造物の詳細FEMによる地震応答解析の代理モデルの構築を目指して、柱、梁、接合部から構成される部材ユニットの代理モデルを開発した。部材ユニット境界の入力として変位増分を用いるより変位を用いるほうが、予測精度が高い結果となり、変位、応力が非常に良くFEMの結果を再現して、全ひずみと塑性ひずみも一定の対応が見られた。しかし、相当塑性ひずみには大きな差異が見られた。今後の部材ユニットの代理モデルの高精度化のためのネットワークの改良と部材ユニットをアセンブルした建物全体の代理モデルの開発を進める。

謝辞:本研究は、JST未来社会創造事業JPMJMI22H2の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Yamashita T, Hori M, and Kajiwar K. Petascale computation for earthquake engineering. Computing in Science and Engineering. 2011; 13(4):44-49.