

都市空間レベルの数値解析基盤の構想 国立研究開発法人防災科学技術研究所 山下拓三

数值震動台研究成果発表会 2023年3月27日(月) 17:00-17:30



目次

- 数値震動台に基づく都市空間レベルの数値解析基盤の構想
- ・実施に向けた準備状況
 - 1. BIMと詳細FEMのモデル構築ソフトウェア(E-Modeler)の連携
 - 2. 詳細FEMのサロゲートモデル
 - 3. 実験と数値解析の多点比較ソフトウェア(E-Validator)
 - 4. 地震リスク評価のための地震デマンドの応答曲面の構築
 - 5. 異種シミュレーション結果のWebGIS上での可視化



トピック1

数値震動台に基づく都市空間レベルの数値解析基盤の構想 目的

大規模地震災害に対して都市の社会経済活動を確実に継続させるため、予防から復旧・復興に至るオールフェー ズに対応した被害状況推定や被害リスク予測などの評価結果を、各主体が必要とする情報として提示する技術の 研究開発を行う。



研究の全体像



トピック1

BIMと詳細FEMのモデル構築ソフトウェア (E-Modeler)の連携



生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE

Project PLATEAU



https://www.mlit.go.jp/plateau/

CityGML: PLATEAUで採用している3D都市モデルのデータフォーマット CityGMLはLOD(Level of Detail)と呼ばれる概念を持ち、これにより同じオブジェクトに関す る、詳細度の異なる様々な情報を統合的にデータとして管理



CityGMLのLODと

生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE

CityGMLの LOD 概念



https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/







建築構造分野におけるBIM活用

【ST-BridgeとIFCの連携】



building SMART Japan ホームページより https://www.building-smart.or.jp/meeting/buildall/structural-design/

- IFC(Industry Foundation Classes) :国際標準のデータフォーマット
- ST-Bridge:日本国内の建築構造分野における情報交換のための標準フォーマット



生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE

E-Modeler

- ・詳細FEMモデルの構築には多大な労力を要する
- ・簡単な操作で詳細FEMモデルを構築するためのプ リ処理モジュールとしてE-Modelerを開発







	√E FIV					
→ 初のシンコンエン・11F200 新規プロジェクトを作成します。建物のフロア数と通り芯の設定を入力してください。 - フロアの設定						
フロア数と各フロアの	皆高を入力してくださ	ເ <u>ບ</u>				
707数 207数通用						
階数		階高				
			^			
			-			
			-			
通り芯の設定	「難と位置を入力して	7/#*()				
通り芯の設定 XY方向の通り芯の本	「数と位置を入力して	てください マイナ ごろわ マチャ () () () () () () () () () (
通り芯の設定 XY方向の通り芯の本 X方向通り芯数	「数と位置を入力して	てください 】Y方向)動り芯数	通り芯款適用			
通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号	、数と位置を入力して メ座標値	てください Y方向)動り芯数 番号	- 通り芯数適用 ソ座標値			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号 	 数と位置を入力して X座標値 	Cください) Y方向)通り芯数 番号 番号	ノ座標値			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯の本 X方向通り芯数 番号 	×数と位置を入力して ×座標値	C(ださい) Y方向j動ご数 番号	 Y座標値 			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯の本 X方向通り芯数 		C(ださい) Y方向)動む芯数 番号 	· 通0芯数適用 //座標値			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯の本 X方向通り芯数 番号 	 数と位置を入力して 刈座標値 	C(ださい) Y方向)卸の芯数 番号	· 通0芯数適用			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号 	 数と位置を入力して X座標値 X (1) X (1)	C(ださい) Y方向)通り芯数 番号	- <u>通</u> 0芯数適用 - - - - - - - - - -			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号 	×数と位置を入力して メ1空標値 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	C(ださい) Y方向)通り芯数 番号 	<u>通り芯款適用</u> ソ座標値 ()			
通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号 	×数と位置を入力して メ空標値 は、 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	C(ださい) Y方向)通り芯数 番号	<u>通の芯款適用</u>			
 通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号 	 数と位置を入力して Xj座標値 3 4 5 5 6 7 7 8 8 9 9	C(ださい) Y方向)卸ご数 番号 ■ ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●				
 通り芯の設定 XY方向の通り芯のオ X方向通り芯数 番号 	×数と位置を入力して メ迎来標値 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	て(ださい) Y方向)卸の芯数 番号 ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	、 通り芯数適用			



階,通り芯の設定



モデル作成作業2

2 部材の登録						
部材の断面寸法等を登録します						
部材の種類	RC造 梁	RC造梁 🚽				
登録済みの名前	RCbeam		● 削除			
登録名	RObeam 名前変更					
項目名		値				
梁せい		500.0				
梁幅		300.0				
かぶり厚さ		20.0				
上端筋直径		30.0				
上端筋水平方向2	本 数	2				
上端筋垂直方向2	本敬	2				
ト端筋直径		30.0				
下端筋水半方向。	₩₩ ₩	2				
下端肋壁固方回/	1-2011-2011-2011-2011-2011-2011-2011-20	2				
土肋壁凹方回面的	商(0)对主助但1至比	2.0				
あげた数月明戸		200.0				
COLOR CARDING	200.0					
上端筋 💶			配筋位置を設定する 配筋位置を設定する			
	データベースに登録 プロ	ジェクHz追加 閉じる				

1 材料の登録						×
材料の物性値等を登録します						
材料の種類	RC部材					•
登録済みの名前	iconcrete 1					削除
登録名	concrete 1					名前変更
項目名			値			
コンクリートヤング率			22000.0			·
コンクリートポアソン	七		0.2			
コンクリート密度			2.3			
鉄肋ヤンク半			205000.0			
転期面度			7.0			
						-
L						
		of bloches		881	L	
		シェクトに知道加		BHU@		



部材(形状),材料情報の設定



モデル作成作業3



境界条件の設定



生成メッシュ





ST-BridgeとE-Modelerの連携



部材の定義

<StbColumn id="2128" name="column128" idNode_bottom="128" idNode_top="144" id_section="6001" kind_structure="RC"/>

節点の定義

<stbnode< td=""><td>id="128"</td><td>x="12000" y="8000" z="18250" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="128"	x="12000" y="8000" z="18250" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="129"</td><td>x="0" y="0" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="129"	x="0" y="0" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="130"</td><td>x="4000" y="0" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="130"	x="4000" y="0" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="131"</td><td>x="8000" y="0" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="131"	x="8000" y="0" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="132"</td><td>x="12000" y="0" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="132"	x="12000" y="0" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="133"</td><td>x="0" y="3100" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="133"	x="0" y="3100" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="134"</td><td>x="4000" y="3100" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="134"	x="4000" y="3100" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="135"</td><td>x="8000" y="3100" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="135"	x="8000" y="3100" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="136"</td><td>x="12000" y="3100" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="136"	x="12000" y="3100" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="137"</td><td>x="0" y="4900" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="137"	x="0" y="4900" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="138"</td><td>x="4000" y="4900" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="138"	x="4000" y="4900" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="139"</td><td>x="8000" y="4900" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="139"	x="8000" y="4900" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="140"</td><td>x="12000" y="4900" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="140"	x="12000" y="4900" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="141"</td><td>x="0" y="8000" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="141"	x="0" y="8000" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="142"</td><td>x="4000" y="8000" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="142"	x="4000" y="8000" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="143"</td><td>x="8000" y="8000" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="143"	x="8000" y="8000" z="20750" kind="OTHER" />
<stbnode< td=""><td>id="144"</td><td>x="12000" y="8000" z="20750" kind="OTHER" /></td></stbnode<>	id="144"	x="12000" y="8000" z="20750" kind="OTHER" />

断面の定義

<stbseccolumn_rc id="6001" name="ca" strength_concrete="FC27"></stbseccolumn_rc>
<stbsecfigurecolumn_rc></stbsecfigurecolumn_rc>
<stbseccolumn_rc_rect width_x="500" width_y="500"></stbseccolumn_rc_rect>
<stbsecbararrangementcolumn_rc <="" depth_cover_start_x="30" td=""></stbsecbararrangementcolumn_rc>
<pre>depth_cover_end_X="30" depth_cover_start_Y="30"</pre>
<pre>depth_cover_end_Y="30"></pre>
<stbsecbarcolumn_rc_rectsame <="" d_band="10" d_main="19" td=""></stbsecbarcolumn_rc_rectsame>
N_main_X_1st="3" N_main_Y_1st="3" N_main_total="8"
pitch_band="100" N_band_direction_X="2" N_band_direction_Y="2"
<pre>strength_main="SD345" strength_band="SD295A"/></pre>



ST-Bridgeを変換して作成したE-Modelerの入力ファイル

<pre>"BaseLines": { "X1": 0, "X2": 4000, "X3": 8000, "X4": 12000, "Y1": 0, "Y1": 0, "Y2": 3100, "Y3": 4900, "Y4": 8000 }, </pre>	<pre>"MemberUnits": { "10F": { }, "1F": { }, "2F": { }, "3F": { }, "4F": { }, "5F": { }, "6F": { }, "7E": { }, "7E": { } </pre>	<pre>F": { "X1Y1": { " "X1Y2": { " }, "X1Y2": { " }, "X1Y3": { " }, "X1Y4": { " }, "X2Y1": { " }, "X2Y2": { " }, "X2Y3": { " }, "X2Y4": { " }, "X2Y4": { " }, " "X2Y4": { " }, "</pre>	<pre>"X1Y1": { "columnZm": { "MemberProperty": "cb" }, "columnZp": { "MemberProperty": "ca" }, "connection": { "MemberProperty": "cb_com }, "girderXp": { "MemberProperty": "sec_ba }, "girderYp": { "MemberProperty": "sec_ba }, "slabXpYp": { "MemberProperty": "S1_FC2 } }</pre>	nnection" ar_beam_three_types_10027" ar_beam_same_10007" 27"
Y4 Y3 Y2 Y1 X1 X2 X3 X4	<pre>}, "8F": {</pre>	<pre>}, "X3Y2": { "X3Y3": { "X3Y3": { " }, "X3Y4": { }, "X4Y1": { }, "X4Y1": { }, "X4Y2": { }, "X4Y3": { }, "X4Y3": { }, "X4Y4": { }</pre>	<pre>"ca": { "Concrete": "FC27", "CoveringDepth": 30, "HoopBarDiameter": 10, "HoopBarInterval": 100, "LengthX": 500, "LengthY": 500, "MainBarDiameter": 19, "MainBarDiameter": 19, "NumMainBarX": 3, "NumMainBarY": 3, "Type": "RCColumn" }</pre>	



E-Modelerで生成した10層RCのメッシュ



10層RCのメッシュ拡大図(左:コンクリート;右:鉄筋)



まとめ

- ST-Bridge形式のBIMデータからE-Modelerにより10 層RC実験試験体のメッシュモデルを作成した.
- 今後の課題
 - ST-Bridgeで記述可能な様々な部材へのE-Modelerの対応.
 - ST-Bridgeに対応したE-ModelerのGUIの改良
 - 複雑な構造への対応(ex. 直交しない通り芯への対応等)
 - 非構造部材や家具什器類のモデル化のためのBIMとの 連携の検討



トピック2

マルチフィデリティ解析フレームワーク



マルチフィデリティ解析フレームワーク

- 目的
 - 様々な詳細度のシミュレーションを柔軟に選択して都市空間レベルの地震被 害を予測
- コンセプト(案)
 - BIMにより建物情報を一元管理して,異なる種類のシミュレーションモデルを構築し,それぞれのシミュレーション結果を相互比較し,計算負荷の小さい適度な精度のモデルを選択する.
 - 独自開発モデル
 - 数值震動台(詳細FEM)
 - 数値震動台の材料構成則を用いた構造要素モデル
 - 簡易モデル(検討中)
 - 詳細FEMの代理モデル ←この取組について紹介
 - 様々なシミュレーションと柔軟に連携できる仕組みを検討する. (データレベルの連携~コードレベルの連携)
 - 詳細FEM: ADVENTURECluster, E-FrontISTR
 - フレーム解析: ASI-Gauss法, wallstat
 - 都市規模のシミュレーション:IES







7.12m

寸法

解析モデルの規模

対象	要素数	節点数
全体	18833	31418
部材ユニット	6719	$N_d = 10005$
部材ユニット境界	_	$N_{BC} = 564$

材料物性

パラメータ	值
ヤング率	205[GPa]
ポアソン比	0.3
降伏応力	235[MPa]

部材ユニットのメッシュ



20



生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE

境界条件, MPCの設定

強制変位:水平2方向





境界条件(底部固定)

MPCによる部材ユニット間の接合と 強制変位載荷の設定





強制変位の設定

- ① ステップtをt = 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とする.
- ③ 振幅UをU = $\frac{x}{10}$ aとし、(ステップ、変位)のテーブルデータに(t,0)、(t + x,U)、

(t + 2x,0),(t + 3x,-U),(t + 4x,0)を追加する.間のステップの変位は線形補 間する.なお,aは振幅を意味する.

④ $t \leftarrow t + 4x$ とする.

⑤ tが100に到達したら終了する. t < 100の場合には②に戻り繰り返す.





生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE









部材ユニットの解析から取得したデータ

位置	節点数	物理量
部材ユニット境界	$N_{\rm BC} = 564$	変位(3成分) 反力(3成分)
部材ユニット内部	<i>N</i> _D = 10005	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(スカラー)



固有直交分解(POD)によるデータの次元圧縮

PODでは訓練データSを、次式のようにモード係数(POD係数)Aとモード形状Tを用いて近似

$$S_{d,i,t,n,s} - \bar{S}_{d,i,n} \simeq \sum_{p=1}^{N_{\text{mode}}} A_{d,i,t,s,p} \times T_{d,i,n,p} \qquad \left(\bar{S}_{d,i,n} \coloneqq \operatorname{average} S_{d,i,t,n,s}\right)$$











<u>変位</u>



step

相当塑性ひずみ



 *<i>
 ^p*のコンターと節点位置







相当塑性ひずみのコンター(99step目)





まとめ

- 都市空間レベルの数値解析のためのマルチフィデリティ解析の1手法として詳細FEMの代理モデル開発の開発状況について報告した.
- ・部材ユニットの代理モデルについて、応力については良好に予測できていたが、ひずみについては誤差が累積する傾向が確認できた。
- 今後の課題
 - 誤差の累積を抑止するための学習方法の改良
 - 建物の代理モデル構築のためのアセンブル手法の開発



トピック3

実験と数値解析の多点比較ソフトウェア (E-Validator)



生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE

E-Validator

実験および異種の数値シミュレーションのセンサー データやそれらの処理データの比較を行うソフトウェア









設定ファイル 2/3	"SDA_SSFA_X1_AVE_6F10F": {
<pre>"Validator": { "Folder": "C:\\Users\\Yamashita\\Documents\</pre>	<pre>{ "Postprocess": "SDA_X1_AVE", "Return Values": "SD10F" }.</pre>
"Relation": [{
"SDA_SSFA_X1_AVE_6F10F", "SDA_SSFA_X1_AVE_1F5F",	{
"SDA_SSFA_X2_AVE_6F10F",	{ ···
"SDA_SSFA_X2_AVE_1F5F",],	}, {
"SDA_SSFA_X1_AVE_6F10F": {],
<pre> SDA_SSFA_X1_AVE_1F5F": { "</pre>	──▶ "Y":[Y軸側の設定
}, "SDA SSEA X2 AVE 65105" + {	"Postprocess": "SSFA_X1_AVE", "Return Values": "SSE10E"
<pre>SDA_SSFA_X2_AVE_OFIOF : 1" },</pre>	},
"SDA_SSFA_X2_AVE_1F5F": { ~ .	},
در ا ر	{ ··· },

6階から10階の層間変形角層せん断力関係

}, {... }-

"X label": "Story Drift Angle [rad]", "Y label": "Story Shear Force [kN]"

],



```
設定ファイル 3/3
```

```
"Comparisons":[
                                          比較ケースは複数設定可能
   "JMA KOBE 100% slip for Sim. and Exp."
Ι,
"JMA KOBE 100% slip for Sim. and Exp.":[
                                           シミュレーションor 実験の種類
       "Simulation": "E-Simulator2022",
       "Test":"JMA KOBE 100% s small ts"
                                           加振ケース名
   },
                                           シミュレーション or 実験の種類
       "Simulation":"E-Defense",
                                           加振ケース名
       "Test":"JMA KOBE 100% s small ts"
ر ا
"Lowpass Filter":{ ローパスフィルタの設定
   "fp":10,
   "fs":20,
   "gpass":3,
   "gstop":6
```



E-Validatorの出力データ



比較ケース毎に出力



JR-Takatori 60%

Mahaham	- My frage	Martin		+Hyporthermo	- Million Marine
2-R2-A1X.png	2-R2-A1Y.png	2-R2-A2X.png	2-R2-A2Y.png	2-R3-A1X.png	2-R3-A1Y.png
			- Michaellan		+ Mploreture
2-R3-A2X.png	2-R3-A2Y.png	2-R4-A1X.png	2-R4-A1Y.png	2-R4-A2X.png	2-R4-A2Y.png
-	Molonham	+ Mprastrum	Michardian	- Harris	-Hop-more
2-RR-A1X.png	2-RR-A1Y.png	2-RR-A2X.png	2-RR-A2Y.png	3-R1-D1XT.png	3-R1-D1YT.png
- Harden Maria	HAMMAN	Helphan	apple of the second	- MANNA	-the phates
3-R2-D1XT.png	3-R2-D1YT.png	3-R3-D1XT.png	3-R3-D1YT.png	3-R4-D1XT.png	3-R4-D1YT.png
Mann	AMAMARIA	Mandam	- 4HUMM	-	-all Vinaliana
9X-R2-DB1T.png	9X-R2-DC1T.png	9Y-R2-DB1T.png	9Y-R2-DC1aT.png	9Y-R2-DC1T.png	9Y-R3-DB1B.pn
Maham	affifterspren	Maphanan		Mahlappan	Mulum
9Y-R3-DC1aB.png	9Y-R3-DC1B.png	10-R1-DC1aNE.pn g	10-R1-DC1aNW.pn 9	10-R1-DC1aSE.png	10-R1-DC1aSW.j g
William		J.M.M.M.	- AND	- HAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	Hilling
A3-R1-D1.png	A3-R1-D2.png	A3-R2-D3.png	A3-R2-D4.png	A3-R3-D5.png	A3-R3-D6.pnc

センサーデータや後処理データの 多点比較





※その他,変位荷重関係などの出力も可能





4層鋼構造建物実験での多点比較



合計712個のセンサー データとその処理データ の多点比較を実施





パネルゾーンの変位計測



生きる、を支える科学技術 SCIENCE FOR RESILIENCE

非類似度による評価

Xの波形の確率密度関数f_xをノンパラメトリックな手法で作成

$$f_X(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

Jensen-Shannon divergenceにより非類似度を定義





4層鉄骨建物実験での多点比較



長辺方向で後半に応答の対応が悪くなる



-500

短辺方向の応答が合わない原因

灰色:理論值



x2軸まわりの柱脚の非類似度が大きい

2B柱の柱脚の材端モーメント回転角関係で実験値の剛 性が何らかの原因で低下していることがわかった.





まとめ

- 数値シミュレーションの妥当正確のための多点比較システム(E-Validator)を開発して、4層鋼構造実験と数値震動台による結果の比較を行った。
- ・非類似度を実験と数値解析の対応の尺度に採用して、各比較での対応の傾向を把握した。
- ・短辺方向での対応が悪くなる原因として、実験において1階柱脚の一部で短辺方向の剛性が低下していることを特定した。
- ・ 今後の課題として以下が挙げられる
 - 異なる数値シミュレーション間での比較
 - 様々な実験に利用するための実験メタ情報の整備
 - Eーディフェンス実験データアーカイブ(ASEBI)との連携 のためのWebAPIの開発.



トピック4

地震リスク評価のための 地震デマンドの応答曲面の構築



地震リスク評価の流れ





断層モデルを用いた3次元波動伝播計算による地震動解析

- 一つのシナリオに対して断層の周り
 を囲むように多数の出力地点を設定
- 出力地点を同一の点とみなして、断層の強震発生領域(アスペリティ)の位置や断層平面のすべり量分布の出力地点に対する相対的な位置の多様性を表現

水平成層構造モデルのパラメーター覧

layer	Depth (km)	P wave Velocity $V_{\rm P}$ (m/s)	S wave Velocity $V_{\rm S}$ (m/s)	Density (kg/m ³)
1	0 - 0.25	1,800	500	1,900
2	0.25 - 0.62	2,400	950	2,100
3	0.62 - 1.3	4,600	2,900	2,550
4	1.3 - 2.0	5,500	3,200	2,650
5	2.0 - 30.0	6,000	3,400	2,750



内部の長方形領域はアスペリティを示しており, その中のコンターは破壊時刻を示している.





解析対象と詳細解析モデル





6面体1次非適合モード要素で要素分割

- 部材断面の幅, 高さ方向:19mm
- 板厚方向:2分割
- 部材の材軸方向:25mm (接合部から1200mm離れた位置では120mm)
 要素数:1,790,654
 節点数:2,519,314
 自由度数:7,560,876



簡易解析モデルによる地震応答解析

- 多質点系せん断バネモデルによる簡易 解析
- せん断バネの復元力特性
 - 静的増分解析による荷重変位関係を用いて、等方硬化則とvonMises型降伏関数の弾塑性構成則でせん断バネの復元力特性をモデル化
- 粘性減衰
 - Rayleigh減衰でモデル化して、初期のバネ剛性を用いた固有値解析から求めた1次モード(固有振動数1.017Hz)と2次のモードを(固有振動数2.978)を採用して減衰比を2%とした.
- 境界条件
 - 地面部分の節点に地震動集合の加速度
 時刻歴波形の断層に直交する方向の成分を与えた。
- その他の条件
 - 時間増分:0.0025秒,数値積分法:
 Newmark-β法
- 対象とする地震デマンド
 - 1階の層間変位



静的増分解析による荷重変位関係





真値とDecode結果の比較

<u> 地震動の特徴量の次元=60</u>





地震デマンドの応答曲面作成のアルゴリズム

Input : $\mathcal{E} = \{e_i\}$: 地震動 $\mathcal{X} = \{x_i\}(i = 1, \dots, N)$: 地震動の特徴量 Output : $\mathcal{Y} = \{y_i\}(i = 1, \dots, N)$: 地震デマンド

初期サンプルでの学習

- 1. Determine initial sampling size |S|
- 2. S = RamdomSampling(X)
- 3. $\mathcal{X}_{\text{train}} = \{x_i\} (i \in S)$
- 4. for each $i \in S$ do
- 5. $y_i = StructuralAnalysis(\boldsymbol{e}_i)$
- 6. add y_i to $\mathcal{Y}_{\text{train}}$
- 7. end for
- 8. *GPR*. Learn(X_{train}, Y_{train})

能動学習(ベイズ最適化)

- 10. while active learning do
- 11. $i^* = \underset{i \in \{1, \dots, N\}}{\operatorname{argmax}} GPR. AquisFunc(\mathbf{x}_i)$
- 12. $y_{i^*} =$ StructuralAnalysis (e_{i^*})
- 13. add x_{i^*} to \mathcal{X}_{train}
- 14. add y_{i^*} to \mathcal{Y}_{train}
- 15. *GPR*. Learn($\mathcal{X}_{train}, \mathcal{Y}_{train}$)
- 16. end while
- 17. for each i = 0 to N do
- 18. $y_i = GPR.Predict(x_i)$
- 19. end for



能動学習の効果の把握





51

能動学習の応答曲面への影響(最終サンプル200)





地震デマンドの累積度数分布

最終サンプル数200,能動学習有(Init10)





まとめ

- 地震動の次元圧縮
 - ニューラルネットワークを用いたAutoencoderにより, 地震動を次元圧縮する 手法を提案した. 高精度に元の波形を復元可能な地震動の特徴量を生成 することができた.
- ・地震デマンドの応答曲面
 - ガウス過程回帰とベイズ最適化を用いた地震デマンドの応答曲面手法を提 案した.
 - 能動学習を行うとランダムにサンプリングした場合に比べて正解値にフィット した結果が得られ、ベイズ最適化による能動学習の効果が確認できた.
- 今後の課題
 - 詳細FEMの代理モデルを地震応答解析に導入して,部材レベルのフラジリ ティ関数を作成する.
 - エレベーターなどの設備機器や室内の家具・什器の地震応答解析と連携して,機能性に関わるフラジリティ関数を作成する.



トピック5

異種シミュレーション結果の WebGIS上での可視化



異種シミュレーション比較サイトの構築

- デジタルツインでの構造物の地震応答解析として、
 利用可能な都市の構造物の情報や計算資源に応じて、異なる種類のシミュレーション技術を柔軟に
 選択して統合する技術が求められる.
- ・熊本県益城町を対象としてGIS上で異種シミュレー ション結果を統合して可視化する異種シミュレー ション比較サイトを構築

<u>異種シミュレーション比較サイト</u>



まとめ

- ・熊本県益城町を対象としてGIS上でIES, wallstat, 数値震動台の異種シミュレーション結果を統合し て可視化を行った.
- ・今後の課題
 - GIS上でBIMデータ, 観測データ, 数値解析結果を統合 的に管理して, 複数の研究機関が共同で研究を実施で きるような環境の構築
 - 各種データの標準化とデータベース化
 - UI, バックエンドの自動処理, API化などの基盤的な機能 の強化
 - シミュレーション機能のWeb化



全体のまとめ

- 防災科研第5期中長期計画で実施する「数値震動台に基づく都市空間 レベルの数値解析基盤の構築」に関する構想と5つのトピックの準備状 況を紹介した。
- 各トピックについての今後の目標
 - BIMとE-Modelerの連携
 - 都市のBIMモデルの整備と解析モデル構築の自動化により都市の構造物群の詳細な 数値解析モデルを整備する。
 - 詳細FEMのサロゲートモデル
 - 詳細FEMの計算負荷を劇的に低減することにより、都市空間レベルの建物群の詳細 FEMの解析を実現する。
 - 実験と数値解析の多点比較ソフトウェア(E-Validator)
 - E-Defense実験等を活用した各種数値解析の妥当性確認の環境整備により、都市空間
 レベルのシミュレーションに信頼性が示された数値解析技術を活用。
 - 地震デマンドの応答曲面の構築
 - 物理シミュレーションに基づいた個々の構造物の地震リスク評価
 - 異種シミュレーション結果のWebGIS上での可視化
 - シミュレーションによる地震被害リスクや災害時の被害推定情報から防災,減災に資す
 る合意形成に適した情報を提供