

詳細シミュレーションを活用したデータ科学 —データサイエンスWGの成果の紹介—

小檜山 雅之

数値震動台 データサイエンスWG 主査
慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

1

内容

- データサイエンスWGについて
- 成果の紹介
 - 建築構造物の損傷評価に向けた粒子フィルタによる非線形時変システム同定
 - 建物の非線形応答に対する損傷同定法
 - 損傷解析に基づくloss assessment のフレームワークの構築
 - ベイズ更新によるNNを用いた損傷判別器の精度向上
- 終わりに

2

データサイエンスWGについて

- **目的:** 数値震動台の**社会実装**を検討
 - 構造ヘルスマニタリング(SHM)システムへの活用
 - ニューラルネットワーク(NN)等の機械学習, システム同定, データ同化, 不確実性モデリングなどの技術を応用
- **活動期間:** 2020年4月～2023年3月
- **メンバー**
 - 主査: 小檜山雅之(慶應義塾大学)
 - 委員: 張 景耀(京都大学)
 - 肥田剛典(茨城大学)
 - 松井智哉(豊橋技術科学大学)
 - 山下拓三(防災科学技術研究所)
 - 藤原 淳(防災科学技術研究所)

3

成果の紹介

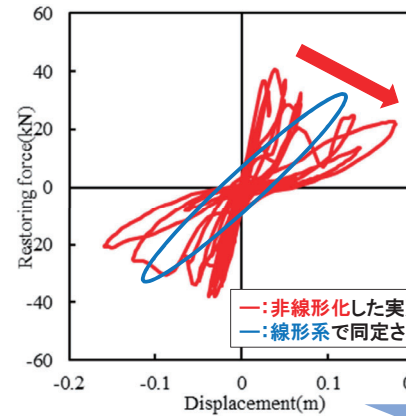
4

建築構造物の損傷評価に向けた 粒子フィルタによる 非線形時変システム同定

肥田 剛典 委員

茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学領域

研究背景



既往のシステム同定手法
部分空間法・ARXモデル: **線形系**
剛性や耐力が途中で変化する
強非線形挙動を示す系には不適切

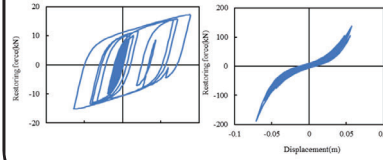
—: 非線形化した実建物の履歴曲線
—: 線形系で同定される履歴曲線

非線形システム同定が可能な**粒子フィルタ**により,
非線形時変システム同定の可能性を検討

時変Bouc-Wen モデル

Bouc-Wenモデル

運動方程式: $m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = -m\ddot{y}$



$$F(x) = \alpha kx + (1 - \alpha)kz(t)$$

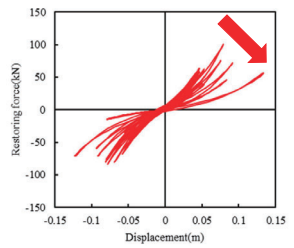
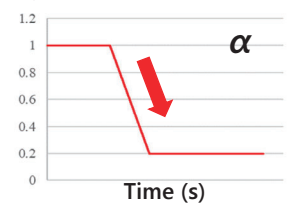
$$\dot{z} = \frac{1}{x_y} (A\dot{x}(t) - \beta\dot{x}(t)|z^n(t)| - \gamma|\dot{x}(t)|z^n(t))$$

$n = 1, 3, 5 \dots$

$$\dot{z} = \frac{1}{x_y} (A\dot{x}(t) - \beta\dot{x}(t)z^n(t) - \gamma|\dot{x}(t)||z^{n-1}(t)||z(t)|)$$

$n = 2, 4, 6 \dots$

時変システム

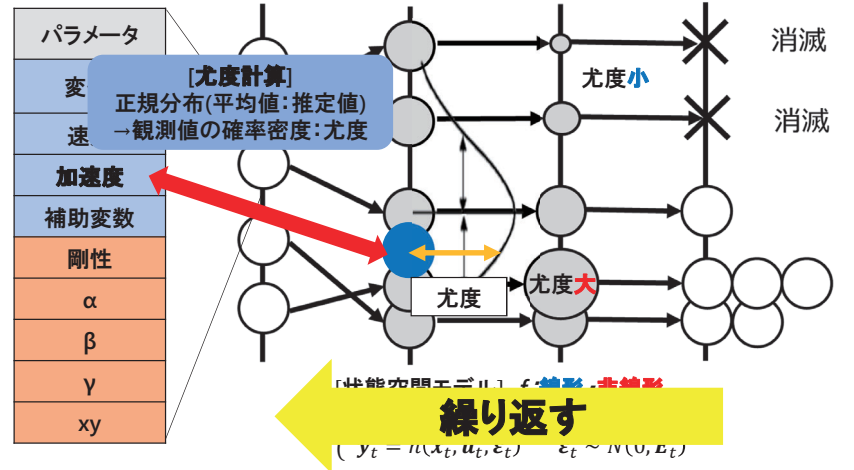


剛性・非線形性パラメータ α が途中で低下するデータを作成

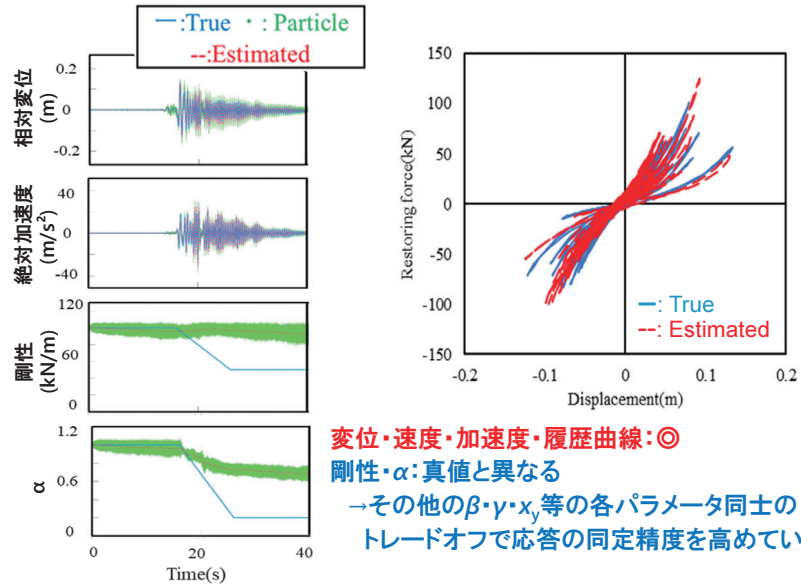
粒子フィルタ

[前提: **入力加速度**・**応答加速度**が既知] ●: 応答加速度の観測値

各パラメータを乱数で発生 → 予測 尤度計算 リサンプリング
1個の組を**粒子**(N=5)

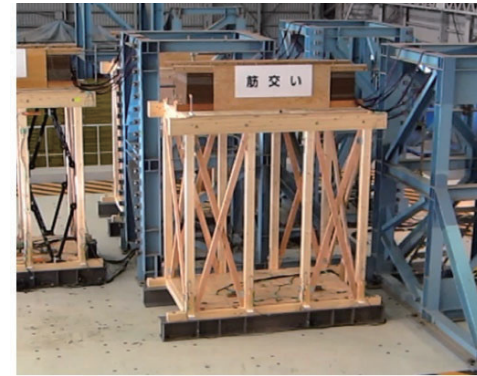


粒子フィルタによる同定結果



9

振動台実験データを用いた検証



実大木造軸組架構の振動台実験データを用いて妥当性を検証

加振スケジュール

Case 1	BCJ-Lv.1 (50%)
Case 2	BCJ-Lv.1 (100%)
Case 3	BCJ-Lv.2
Case 4	JMA Kobe

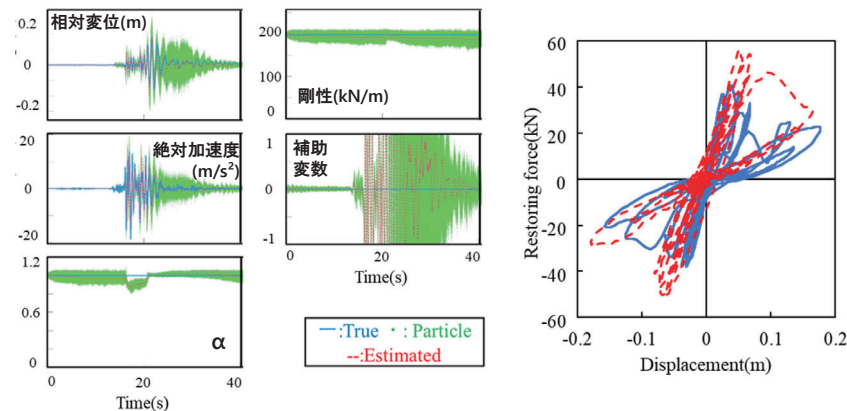
JMA Kobe加振時に破断



T. Hida, M. Nagano and T. Sato: Structural Tests, Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Quebec City, Canada, 2014.8

10

同定結果



筋交い破断後に試験体の耐力が半分程度まで低下
→ 層剛性が大きく低下し 相対変位が急激に増大

11

まとめ

非線形時変システムの同定

→剛性, α 等のパラメータが真値と異なる値に収束した場合でも, Bouc-Wenモデルは真値と異なるパラメータの組み合わせでも適応するため, 履歴曲線等の同定が可能

実大木造軸組架構の振動台実験データを用いた検証

剛性や耐力が加振中に急激に低下する木造実構造物でも, その履歴曲線を同定可能

今後の課題

パラメータの数がより少ない履歴モデルを用い, 同定精度を高めつつ計算コストを低くする

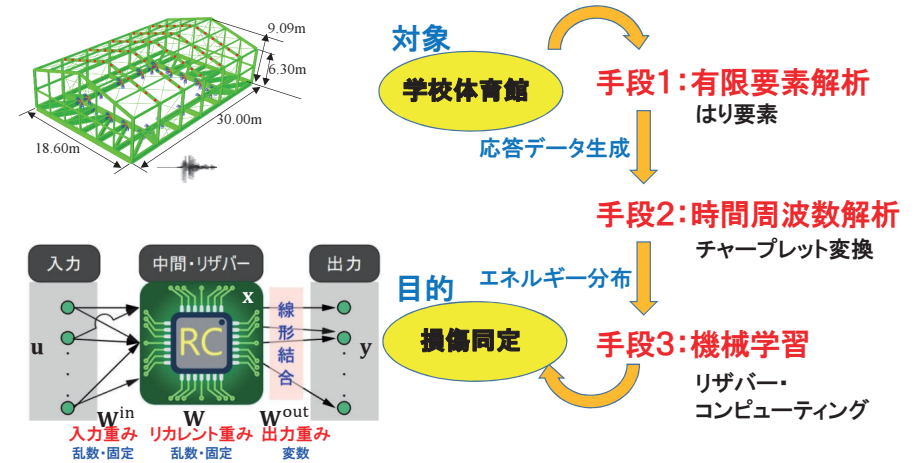
12

建物の非線形応答に対する 損傷同定法

張景耀 委員

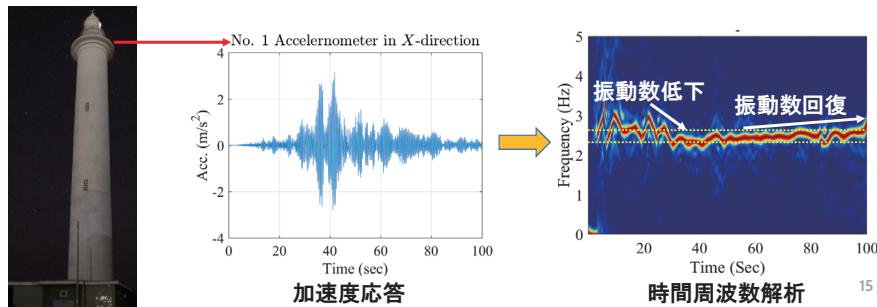
京都大学大学院工学研究科建築学専攻

研究内容・手法



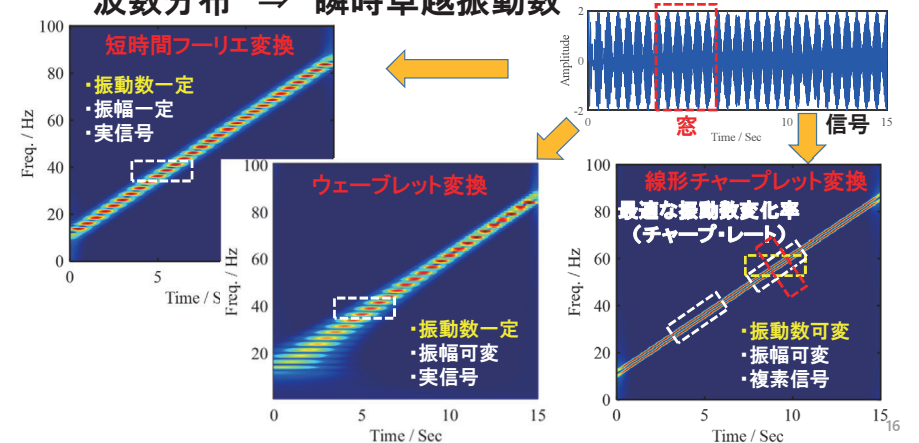
時間周波数解析の必要性

- 地震時: 建物の構造損傷
⇒ 固有振動数・剛性が一時的低下
- 地震後: 固有振動数・剛性が一部回復
⇒ 地震時の非線形応答追跡が必要



既存の時間周波数解析法

- 時間周波数解析: 信号のエネルギー分布の時間・周波数分布 ⇒ 瞬時卓越振動数



逐次線形チャープレット変換

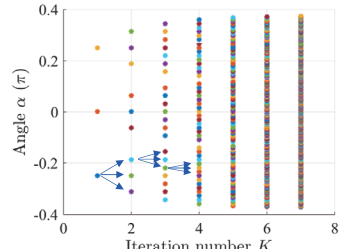
- 線形チャープレット変換(CT)に**逐次的局所探索戦略**

⇒ 時間周波数解析の**効率/精度**を大幅に向上

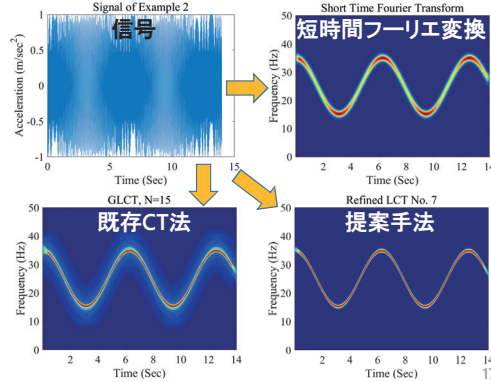
$$S(t_0, \omega_0, c) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(t-t_0) \cdot z(t) \cdot e^{-jc(t-t_0)^2/2} \cdot e^{-j\omega_0 t} dt$$

スペクトル
密度

窓関数複素信号 復調項



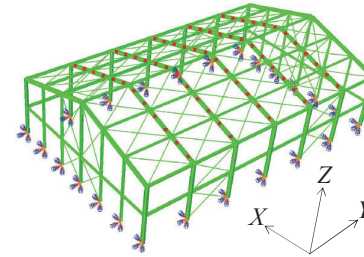
卓越振動数傾斜角の局所的最適値を逐次的に探索



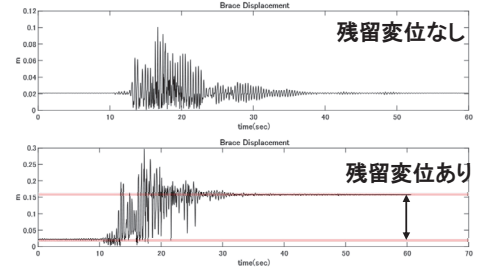
*張景耀, 青木孝義, 逐次線形チャープレット変換による灯台の強震時非線形挙動追跡, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 21434, 2022.09

対象構造物

- 対象構造物: 鉄骨造学校体育館
- 目的: プレースの損傷同定



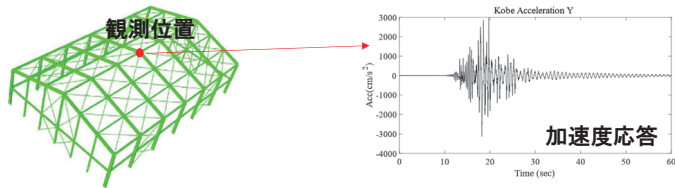
鉄骨造学校体育館



プレース全長の約0.5%を超えたら**損傷あり**とする

*遠山大成, 張景耀, 藤原淳, エコステートネットワークを用いた鉄骨造空間構造のプレース損傷同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 21188, 2022.09

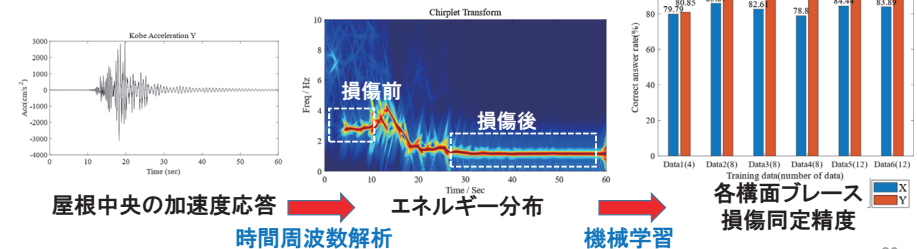
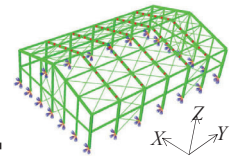
応答データ



Data No.	強震観測記録	入力Lv.(%)	入力方向	データ数
1	神戸	100	X,Y,XY, XYZ	訓練4検証188
2	神戸, 仙台	100	X,Y,XY, XYZ	訓練8検証184
3	北海道, 熊本	100	X,Y,XY, XYZ	訓練8検証184
4	大阪, 新潟	100	X,Y,XY, XYZ	訓練8検証184
5	神戸, 仙台, 北海道	100	X,Y,XY, XYZ	訓練12検証180
6	熊本, 大阪, 新潟	100	X,Y,XY, XYZ	訓練12検証180

プレース損傷の同定

- 時間周波数解析(線形チャープレット変換)より信号のエネルギーの時間・周波数分布
 - 機械学習(リザーブ・コンピューティング)より鉄骨造学校体育館のプレース損傷を同定
- 少ない訓練データで高精度**



*遠山大成, 張景耀, 藤原淳, エコステートネットワークを用いた鉄骨造空間構造のプレース損傷同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 21188, 2022.09

まとめ

まとめ

- 信号のエネルギーの時間・周波数分布
→ 効率/精度の高い解析手法を提案
- 鉄骨学校体育館ブレースの損傷同定
→ 少ない訓練データで精度の高い手法を提案

今後の課題

- 時間周波数解析法の効率/精度の更なる向上
- 機械学習に基づいた損傷同定法の可解釈性

損傷解析に基づくloss assessment のフレームワークの構築

松井智哉 委員

豊橋技術科学大学大学院工学研究科建築・都市システム学系

コンクリート系建物の損傷評価

◆地震災害時の損傷評価技術

地震後の建物安全性の評価, 継続使用性の評価,
都市としての損傷予測のための技術としての確立が望まれる

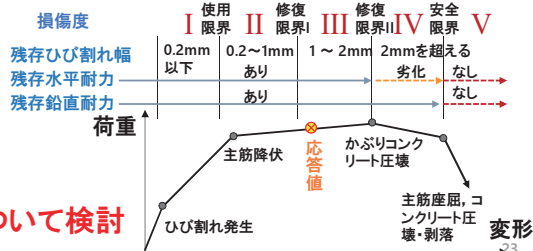
建物や部材は損傷度(限界状態)を
推定される応答値と
損傷の程度を関連付けて評価

曲げ部材の復元力特性と損傷(限界状態)概念

損傷量として

残留ひび割れ幅, ひび割れ率
鉄筋の降伏, コンクリートの剥落
塑性率, 吸収エネルギーなどが
挙げられるが,

損傷量の評価における
有限要素解析の活用法について検討



FEM解析により得られるアウトプット と本課題で用いる損傷指標

求められる損傷指標の特徴

- 各種破壊モードに対応できる
- 各種部材の評価に適用できる
- 異なる材料モデルに基づいた解析コードに適用できる
- 単調荷重および繰り返し荷重に適用できる... など

有限要素解析から得られる アウトプット (コンクリート系建物)

- 変位
- 荷重
- ひずみ
- 応力
- 鉄筋降伏
- コンクリート圧壊

処理

- 層せん断力, 層間変位, 履歴エネルギー
- 部材の断面力 (M, Q, N)
- ひび割れ幅, ひび割れ面積率
- 主応力, 主ひずみ

本課題では

【偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{J_2'}$ 】

【正規化累加ひずみエネルギー W_n 】

を対象に建築構造部材を評価する際の
適用性について検討

損傷指標の算出

【文献】齊藤成彦, 牧剛史ほか: 土木学会コンクリート標準示方書に基づいた有限要素解析による性能照査とその高度化に向けた取り組み, コンクリート工学, Vol.54, No.3, pp.246-252, 2016.3 より

【偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{J_2'}$ 】

引張・せん断による損傷を表現

$$\sqrt{J_2'} = \sqrt{\frac{1}{2} e_{ij} e_{ij}} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{2}\right)^2}$$

e_{ij} : 偏差ひずみテンソル

$d\epsilon_{ij}$: ひずみ増分テンソル

【正規化累加ひずみエネルギー W_n 】

圧縮による損傷を表現

$$W_n = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^n (\sigma_{ij} d\epsilon_{ij})^{(k)}$$

σ_{ij} : 応力テンソル,

$d\epsilon_{ij}$: ひずみ増分テンソル

f : 正規化パラメータ

損傷指標の平均化

(要素寸法の依存性の低減)

$$\bar{D}_d = \frac{\int_v D_d \cdot w(s) dv}{\int_v w(s) dv}$$

D_d : 局所ひずみに基づく指標 $\sqrt{J_2'}$ or W_n

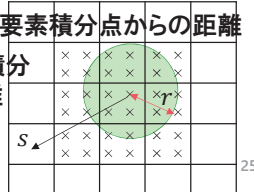
$w(s)$: 重み関数

$$w(s) = \begin{cases} 1 - s/r & (s \leq r) \\ 0 & (s > r) \end{cases}$$

s : 対象とする要素積分点からの距離

r : 着目する積分点からの距離

$r = 150\text{mm}$

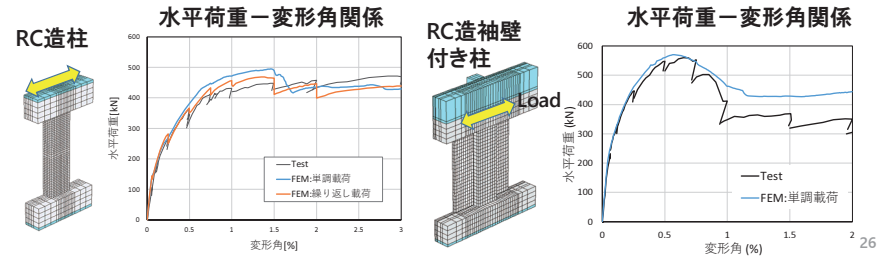


モデル化手法の妥当性の検証

RC造柱および袖壁付き柱の静的加力実験を対象に非線形有限要素解析によるシミュレーション解析を実施

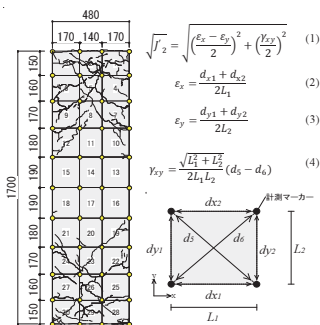
- 曲げ破壊型の部材の水平荷重-変形角を捉えている
- 曲げ変形成分の比較から、鉄筋の抜け出しによる変形は過小評価
- せん断破壊型の袖壁付き柱の急激な耐力は模擬できていない

最大耐力付近まで、概ねシミュレートできていることを確認

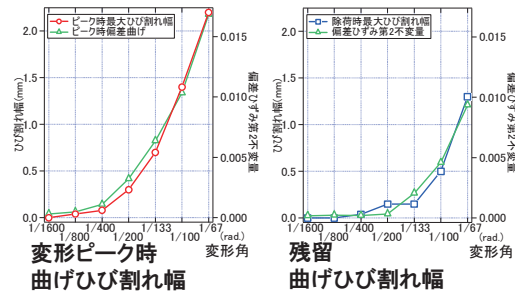


偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{J_2'}$ とひび割れ幅の推移

実験による変位から算出した偏差ひずみ第2不変量とコンクリートのひび割れ幅を比較し、両者の推移の対応を確認



実験における変位計測とひび割れの観察

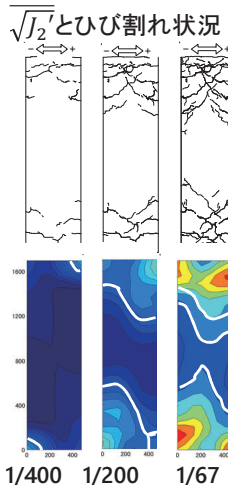


* 推移を比較するため縦軸の範囲を調整して図示

偏差ひずみ第2不変量は曲げひび割れ幅が増加する推移を概ね捉えている。斜めひび割れについては、変位計測面のひび割れ状況と観測した面のひび割れが異なっていたため、若干傾向が異なる。

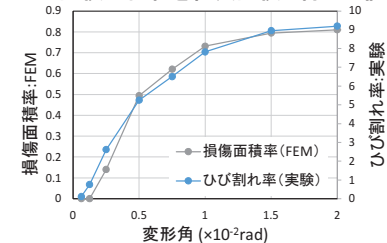
損傷指標 $\sqrt{J_2'}$ を用いた損傷面積比とひび割れ率

偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{J_2'}$ とひび割れ状況



ひび割れ率: 実験によるひび割れ長さを柱の表面積の平方根で除した値

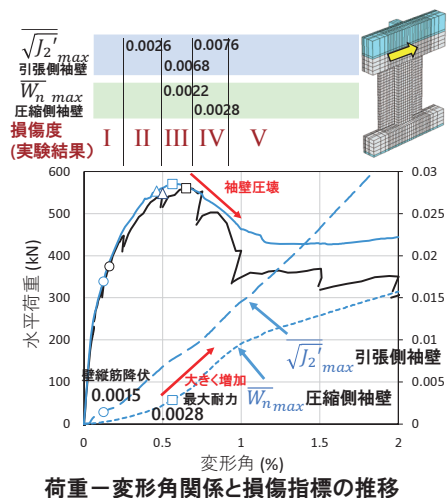
損傷面積率: FEM解析により $\sqrt{J_2'}$ が 1000μ 以上を示した要素の面積の総和を柱表面積で除した値の平方根



両者の推移を比較すると、変形角が小さいところでは損傷面積比はひび割れ率より小さいが、1/200以降は概ね増加の傾向は一致している

定量的な関係性については今後検討が必要

部材の損傷度(実験)と 損傷指標値(FEM)



袖壁付き柱の引張側袖壁の $\sqrt{J_2}'_{max}$
圧縮側袖壁の $\bar{W}_{n,max}$ 推移より
損傷指標の定性的な特徴を確認。
(各部位の損傷指標の最大値)

$\sqrt{J_2}'_{max}$ は、変形角の増加とともに
直線的に増加していく。

実験では最大耐力付近で、袖壁の
コンクリートの圧壊が進行しており、
それに対応して

$\bar{W}_{n,max}$ は大きく増加していく傾向
が表れている

まとめ

まとめ

- $\sqrt{J_2}'_{max}$ は、ひび割れ幅およびひび割れ率の増加の推移を概ね捉えていることを確認
- コンクリート圧壊による耐力低下の現象と $\bar{W}_{n,max}$ が大きく増加する傾向が対応していることを確認

今後の課題

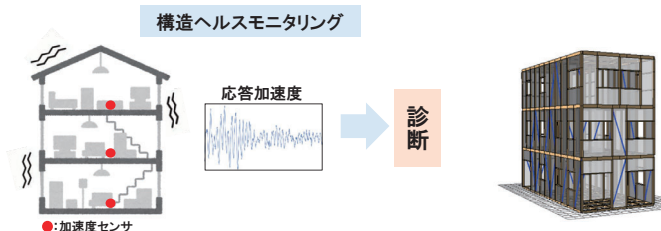
- 限られたケースの検討であることから、異なる断面・荷重条件を変数としたパラメトリック解析の実施し、損傷指標値と損傷度の関係性を解明

ベイズ更新によるNNを用いた 損傷判別器の精度向上

主査 小檜山雅之
慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科

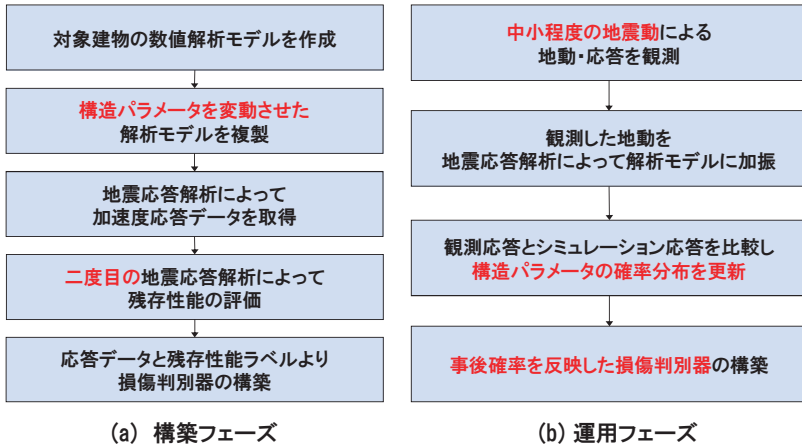
背景・目的

- 木造建物は材料特性のばらつきが大きいいため、地震応答が変化し、予測が困難。
- 構造パラメータの確率分布更新を用いた、木造建物の地震による倒壊危険性の判別精度の向上。



提案手法の構築・運用の流れ

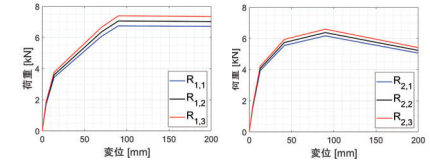
大きな地震動の前に中小程度の地震動を経験すると仮定し、運用フェーズを想定。



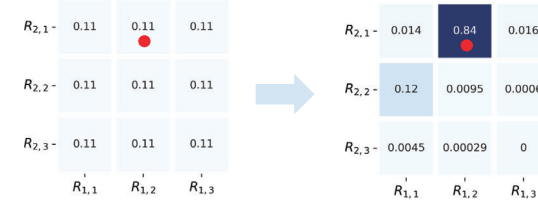
ベイズの定理を用いたパラメータ更新

$$p(\theta|\mathcal{D}, \mathcal{M}) = \frac{\text{尤度関数} \cdot \text{事前確率}}{p(\mathcal{D}|\mathcal{M})} = \frac{p(\mathcal{D}|\theta, \mathcal{M})p(\theta|\mathcal{M})}{p(\mathcal{D}|\mathcal{M})}$$

入力データ $\mathcal{D} = \{u, q\}$
 u : 入力加速度, q : 応答加速度
 \mathcal{M} : モデル, θ : パラメータ



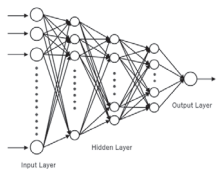
2種類の壁部材の構造パラメータ(骨格曲線)



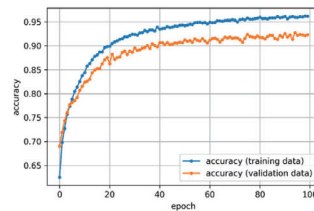
9つのモデルの事前確率と事後確率

NN判別器(更新の導入前)

入力層, 中間層3層, 出力層の計5層のNN



入力: 要素数400の応答加速度
 出力: 2度目の地震における1層最大層間変形角
 1/30 rad { 以上: ラベル(1)
 未満: ラベル(0)



学習時の正解率の推移

テストデータの混合行列(30のテスト建物モデルの合計)

		損傷判別結果		合計
		(1)	(0)	
損傷パターン (真値)	最大層間変形角 1/30以上(1)	3167	384	3551
	最大層間変形角 1/30未満(0)	2172	4027	6199
合計		5339	4411	9750
		正解率(%)		73.8

正解率: 73.8%
 適合率: 59.3%
 再現率: 89.1%
 F1値: 71.2%

NN判別器(更新の導入後)

重み付き損失関数によってNN判別器にパラメータの事後分布を反映。

$$L_{\text{WBCE}}(t, y) = - \sum_{k=1}^{N_M} \left\{ p(M_k|\mathcal{D}, \mathcal{M}) \cdot \frac{1}{N_k} \sum_{n \in D_k} \{-t_n \log y_n - (1-t_n) \log(1-y_n)\} \right\}$$

損失関数: 「正解値」と「予測値」の誤差の指標。

逆誤差伝播法により損失関数を最小化するように学習。

重み付けによってデータの重要度を反映。

テストデータの混合行列(30のテスト建物モデルの合計)

		損傷判別結果		合計
		(1)	(0)	
損傷パターン (真値)	最大層間変形角 1/30以上(1)	3329	222	3551
	最大層間変形角 1/30未満(0)	700	5499	6199
合計		4029	5721	9750
		正解率(%)		90.5

正解率: 90.5%
 適合率: 82.6%
 再現率: 93.7%
 F1値: 87.8%

正解率
 更新前 73.8% → 更新後 90.5%

まとめ

まとめ

- NNを用いた損傷判別器を構築
- 材料特性のばらつきを考慮して多様な解析モデルを用意し、観測記録からベイズ更新アルゴリズムによりNNを更新することで判別精度の向上が可能

今後の課題

- さまざまな建物に対する有効性の検証
- SHMシステムに用いることができる汎用性のある判別器の構築

37

終わりに

- データサイエンスWGの3年間の活動成果を紹介
- 数値震動台を**構造ヘルスマニタリングシステム**に活用するため、以下の技術を開発
 - 非線形時変システム同定法(粒子フィルタ):**木造**
 - 非線形応答に対する**損傷同定法**(逐次線形チャープレット変換+リザーブ・コンピューティング):**S造**
 - **コンクリート系建物の損傷評価指標**(偏差ひずみ第2不変量, 正規化累加ひずみエネルギー):**RC造**
 - **損傷判別器のベイズ更新手法**(ニューラルネットワーク+ベイズ更新):**木造**
- 数値震動台の**社会実装**に向けて活動を継続

38

ご清聴ありがとうございました。

39