

階層ベイズ更新による既存橋梁の耐震性能評価モデルの構築

一般財団法人 大成学術財団
第7回 研究成果発表会
2025年10月17日

北海道大学大学院工学研究院
准教授 北原優

FEモデル更新

- 観測データを再現するモデルパラメータを推定
- 計測誤差やモデル化誤差が推定に影響

→ 不確実性を確率的にモデル化

ベイズモデル更新

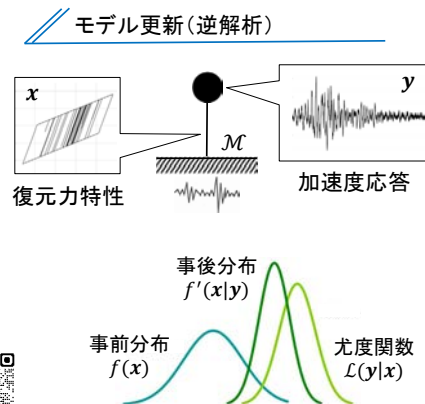
$$y = \mathcal{M}(x) + \varepsilon, \varepsilon \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$$

- ベイズの定理

$$f'(x|y) \propto \mathcal{L}(y|x)f(x)$$

→ モデルとデータのバランス解を与える

- 1径間免震橋で有効性を検証済み(北原ら, 2020)



研究の背景

免震橋梁の普及

- ゴム支承による橋脚の長周期化・高減衰化
→ 橋脚に作用する地震荷重を低減
- 長期使用による経年劣化が顕在化
- 実橋から取得したゴム支承の載荷試験(林ら, 2015)
 - ゴムの硬化による水平剛性の増加
 - 鉛プラグが負担できるせん断力の低下



能登半島地震での
北陸道の免震橋



東北地方太平洋沖地震での
ゴム支承の破断(利府高架橋)

モデルベースの現有性能評価

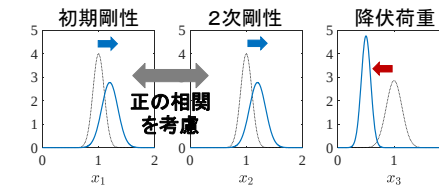
- FEモデルと地震時の観測データの融合
→ FEモデル更新

免震連続橋のモデル更新

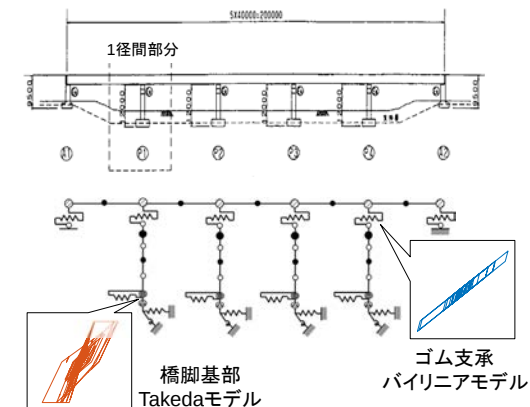
- 「橋の動的耐震設計」(JSCE, 2003)の5径間連続橋
- 梁要素・非線形ばね要素からなる2次元FEモデル

ゴム支承の不確実性

- 製造誤差(正規分布)+経年劣化



- 各径間の支承の値は乱数生成により決定



ベイズモデル更新

事前分布

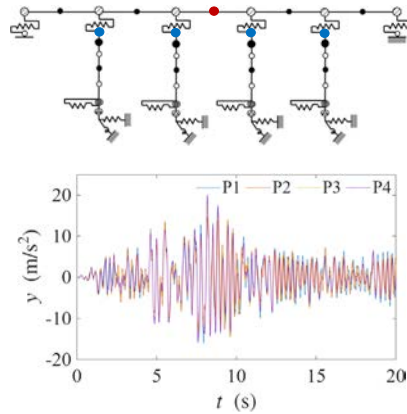
- $[0, 2]$ の独立な一様分布(合計で12変数)

尤度関数

- 入力地震動: 道路橋示方書のレベル2地震動II-I-1
- 観測量: 各径間の支承の相対加速度

$$\mathcal{L}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^4 \prod_{t=1}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y_i}^2}} \exp \left[-\frac{(y_i^o(t) - y_i^p(\mathbf{x}, t))^2}{2\sigma_{y_i}^2} \right]$$

- y_i : i 径間の相対加速度応答
- $\sigma_{y_i}^2$: 観測データ y_i^o の標本分散

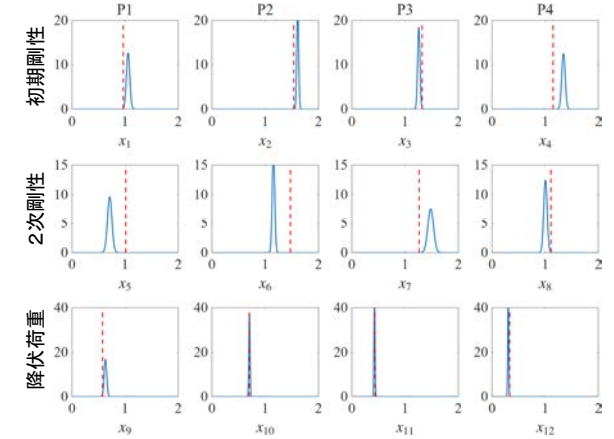


ベイズモデル更新結果

事後分布

- TMCMCを用いて5000サンプル取得
- PDFはカーネル密度推定
- 初期・2次剛性の相関が捉えられない

	推定誤差(%)			
	P1	P2	P3	P4
初期剛性	9.46	4.81	4.71	17.0
2次剛性	29.8	21.6	17.5	9.34
降伏荷重	9.43	0.46	1.81	7.90



階層ベイズモデル更新

- パラメータ間の制約を階層的な事前分布で考慮

$$f'(\mathbf{x}|\mathbf{y}) \propto \mathcal{L}(\mathbf{y}|\mathbf{x})f(\mathbf{x})$$

$$\rightarrow f'(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}|\mathbf{y}) \propto \mathcal{L}(\mathbf{y}|\mathbf{x})f(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})f(\boldsymbol{\theta})$$

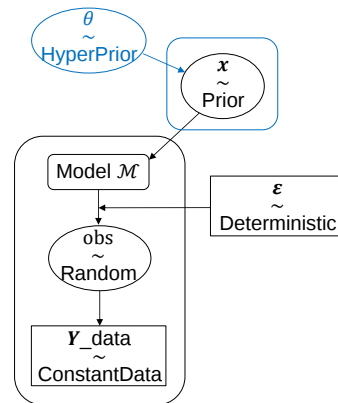
正規コピュラ階層事前分布

- 正規分布間の相関係数 ρ を任意の分布に拡張

$$f(\mathbf{x}; \rho) = \prod_{i=1}^4 c(F(x_i), F(x_{i+4}); \rho) \underbrace{f(x_i)}_{\text{初期剛性}} \underbrace{f(x_{i+4})}_{\text{2次剛性}} \cdot \prod_{i=9}^{12} f(x_i) \quad \text{降伏荷重}$$

- $c(\cdot, \cdot; \rho)$: コピュラPDF

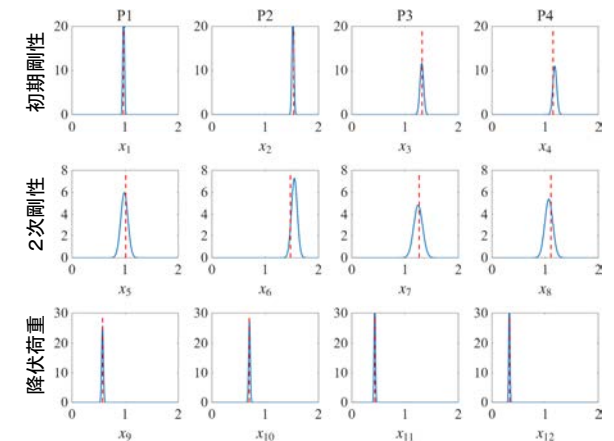
- ρ の事前分布は $[-1, 1]$ の一様分布



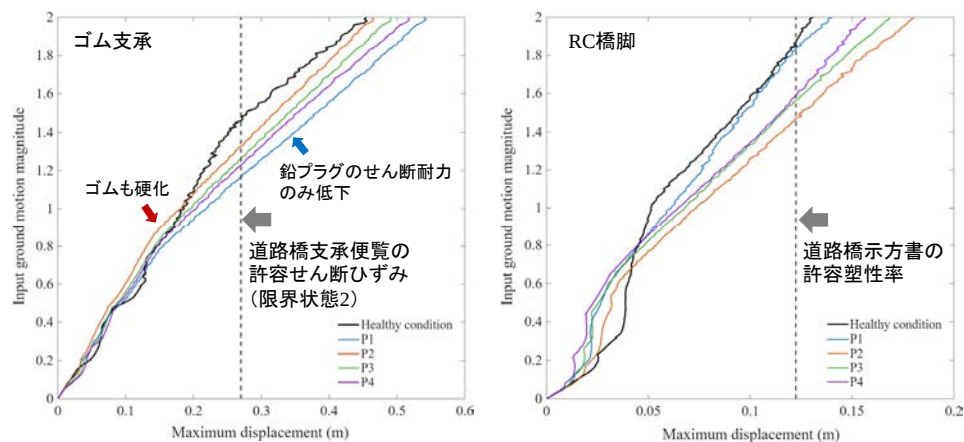
階層ベイズモデル更新結果

	推定誤差(%)			
	P1	P2	P3	P4
初期剛性	0.70	1.07	0.49	2.82
2次剛性	2.55	5.00	1.55	3.63
降伏荷重	0.11	0.44	0.74	1.56

- 初期・2次剛性の相関を適切に考慮
- 径間毎に異なる支承の劣化度を定量化



更新したモデルによる漸増動的解析



結論



- ゴム支承の経年劣化を想定した連続免震橋のFEモデル更新を検討した
- 正規コピュラモデルによる階層ベイズモデル更新法を提案した
- 提案手法では、各径間の支承の相対加速度応答から、初期・2次剛性間の相関関係を適切にとらえた妥当な事後分布を推定した
- 更新したモデルで漸増動的解析を行い、ゴム支承の経年劣化により設計時の免震性能が発揮されず、橋脚の許容塑性率に対するキャパシティ低下を確認した

→ 階層ベイズ更新により径間毎に劣化状態の異なる既存橋梁の
現有性能を定量化したFEモデルを構築することができた