

伝統的木造建物の振動計測に 基づく構造特性の推定

建築都市デザイン学科

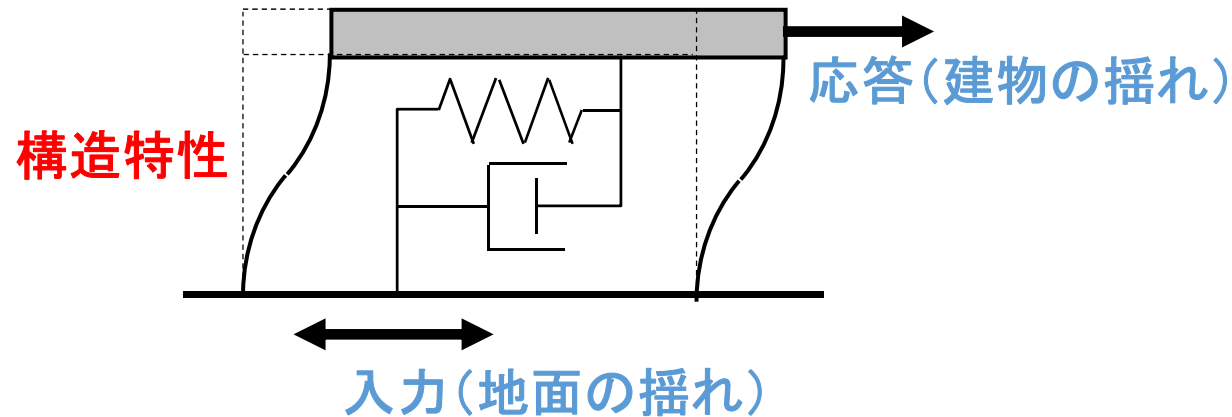
吉富信太

振動計測による構造特性の推定

建物の揺れを計測すれば，構造性能を推定できる

$$\text{(応答)} = \text{(構造特性)} \times \text{(入力)}$$

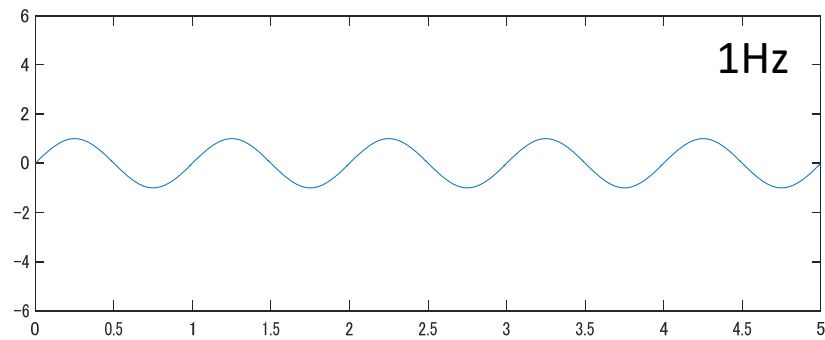
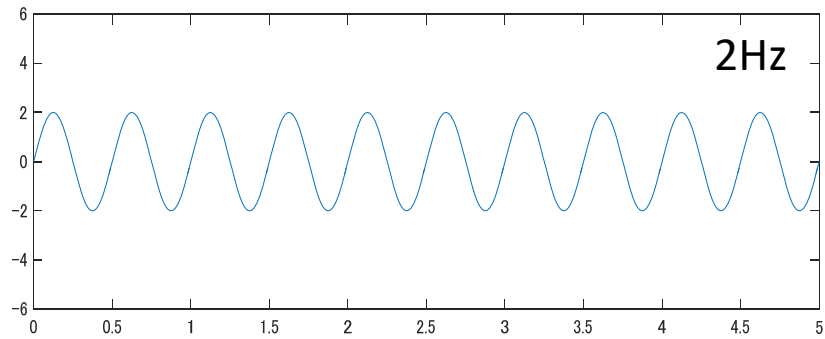
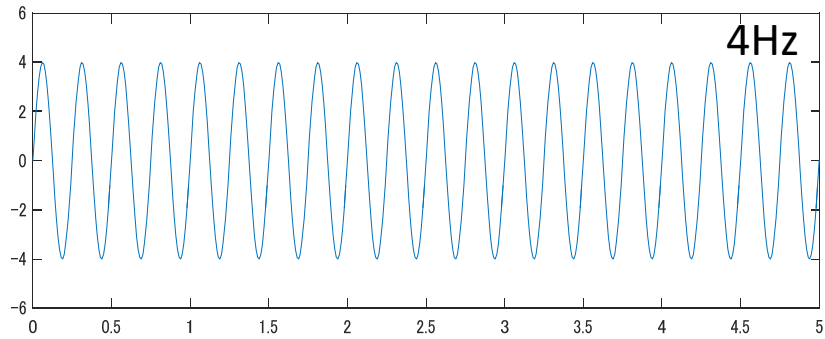
実現象，応答解析



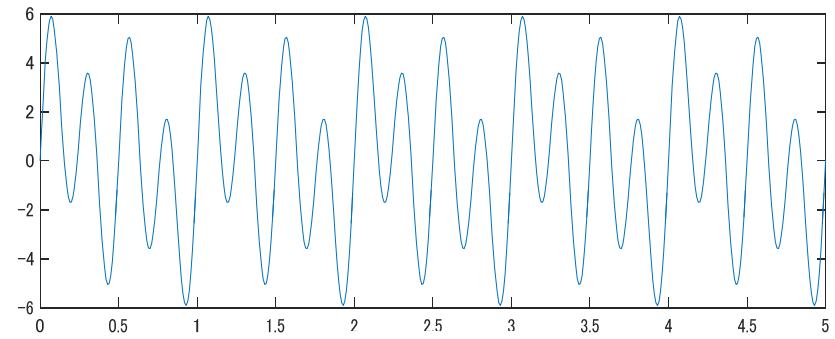
$$\text{(構造特性)} = \text{(応答)} \div \text{(入力)}$$

逆問題，システム同定

フーリエ変換 (周波数分解)



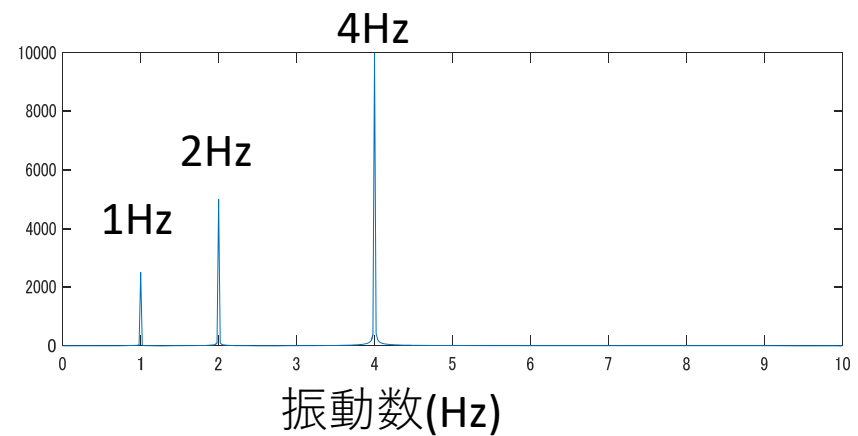
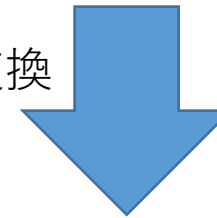
時間(t)



時間(t)

フーリエ変換

時間波形を
周波数成分に分解

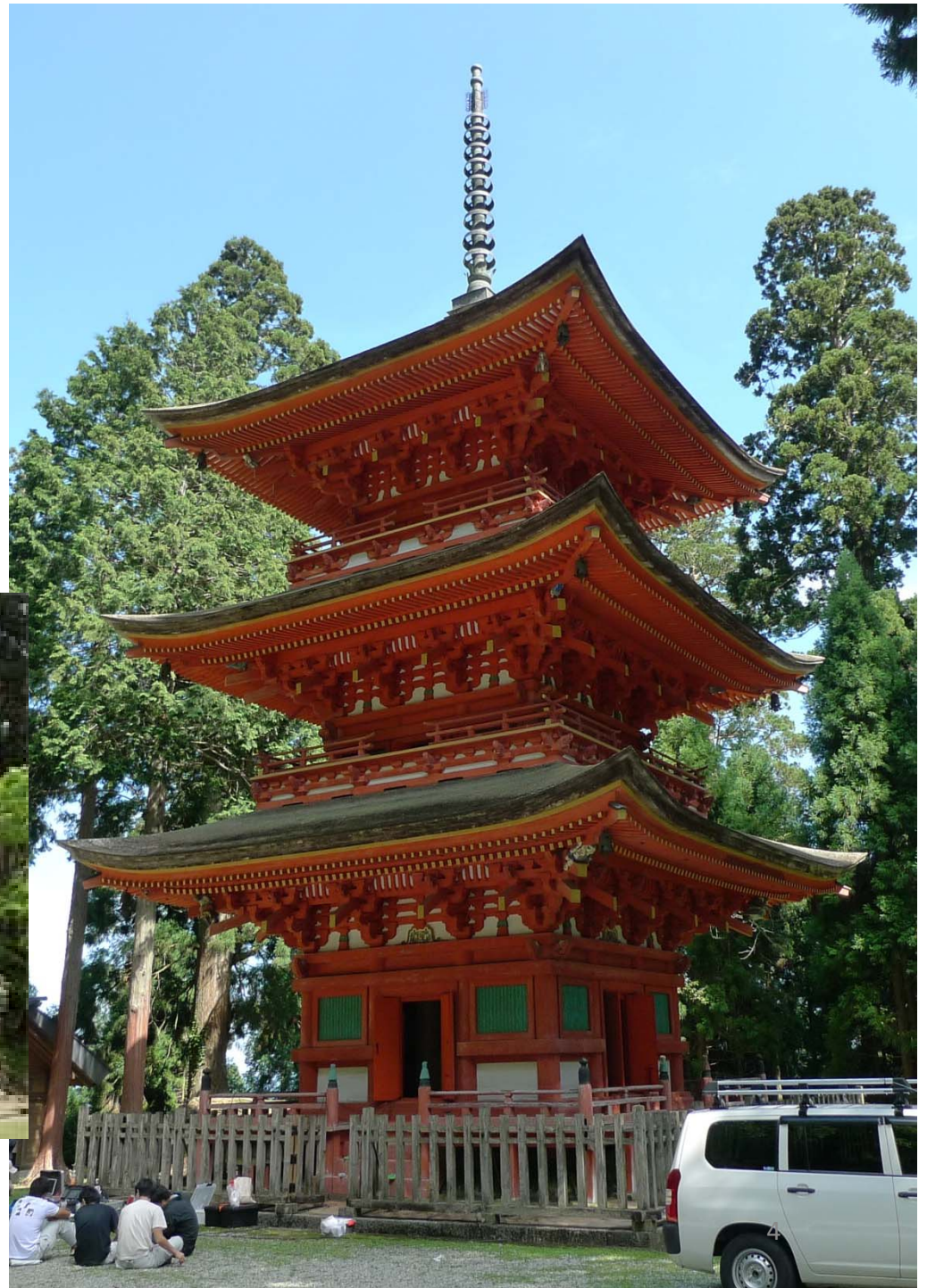


三重塔の実測例

- ◇ 建築年：1665年
- ◇ 屋根：柿葺き
- ◇ 修理：昭和59～62年

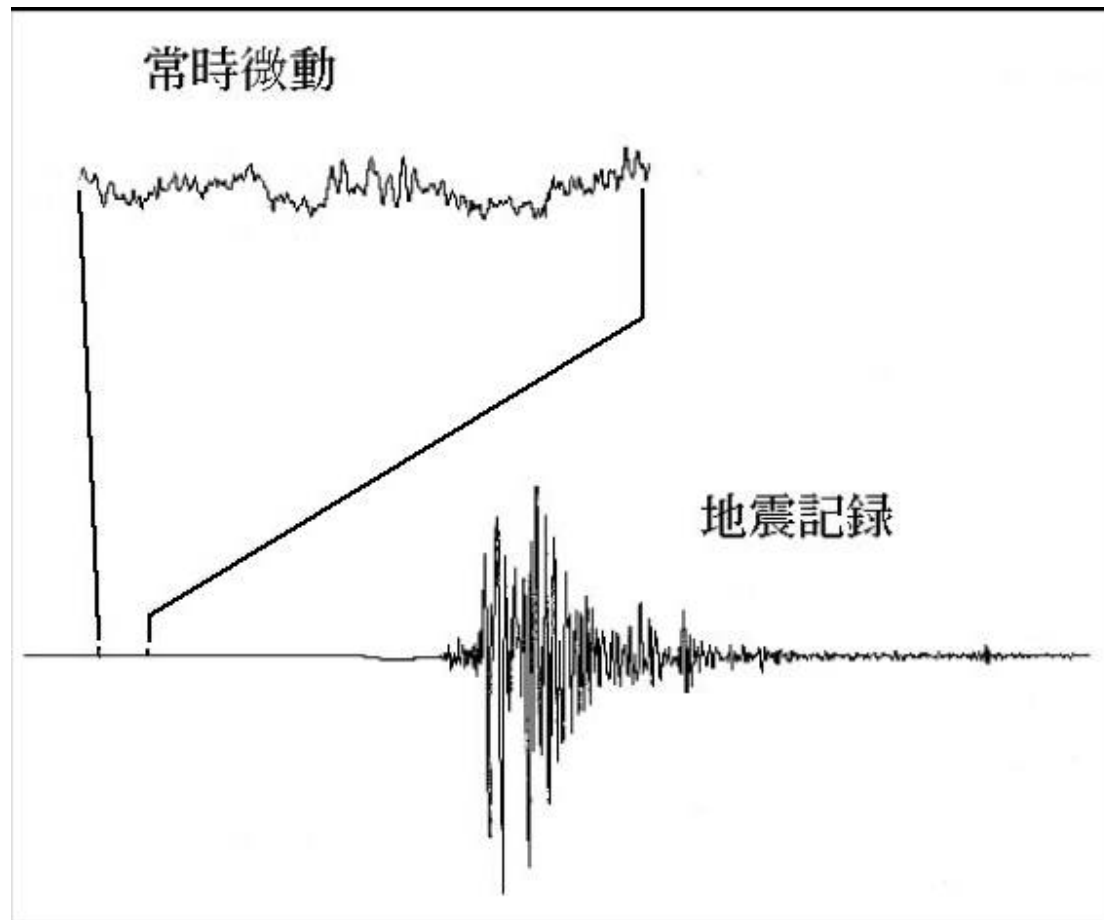


本殿と拝殿

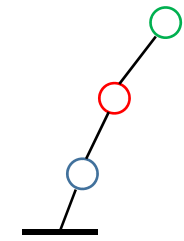
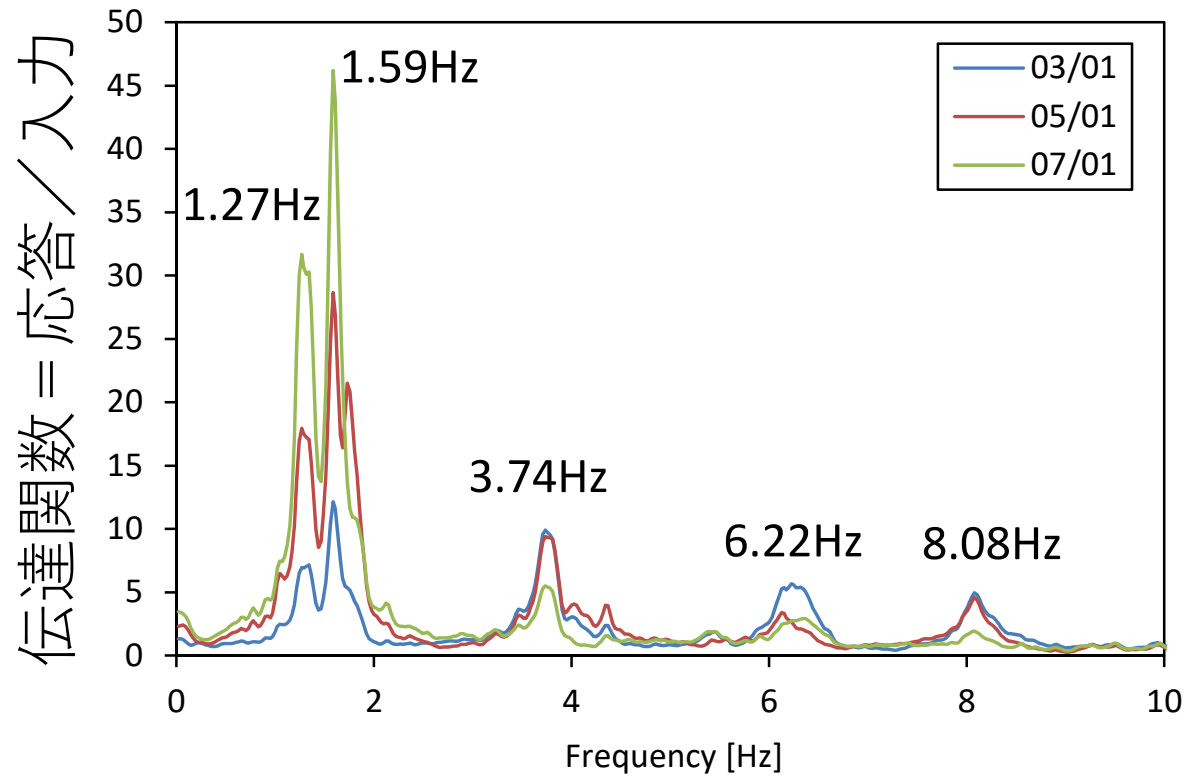


常時微動

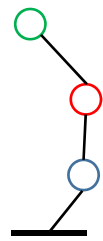
- 地盤や構造物は常に揺れている→常時微動
- 風などの自然現象や人間活動が振動源
- 大地震時の揺れと比べると数千～数万分の一



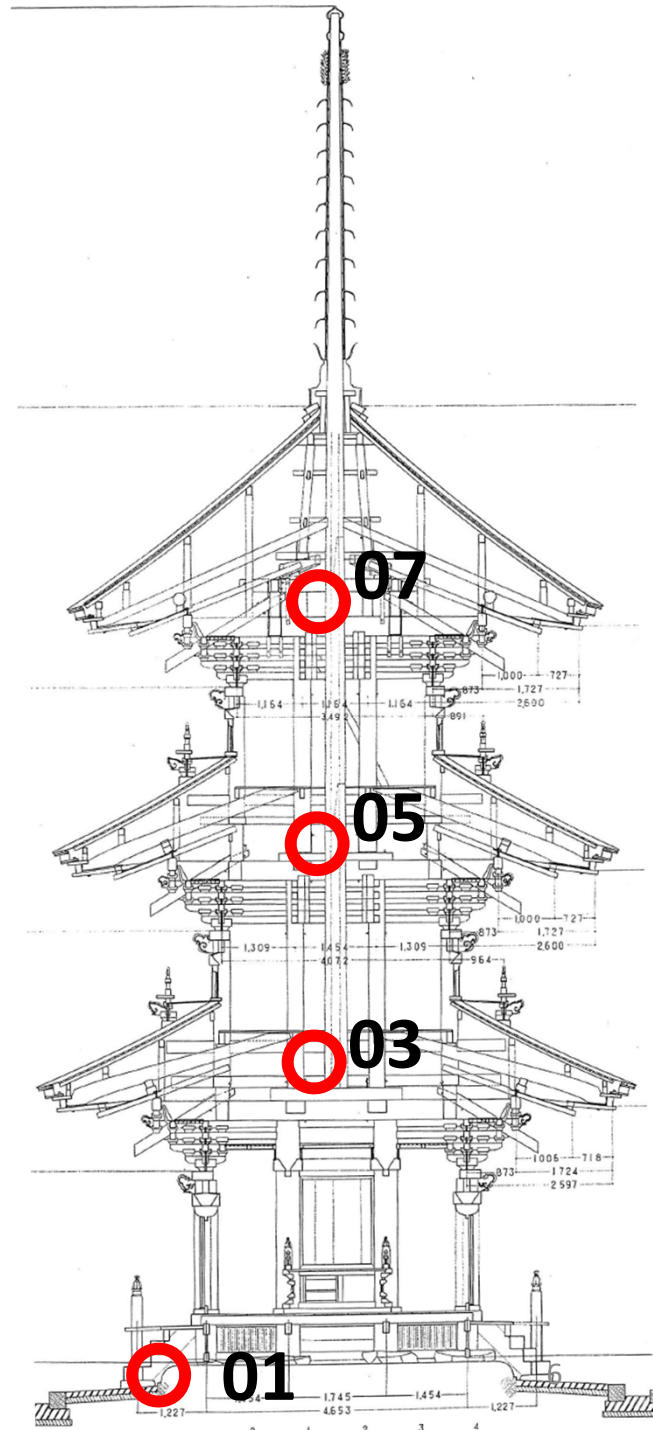
計測① NS方向



1.27Hz

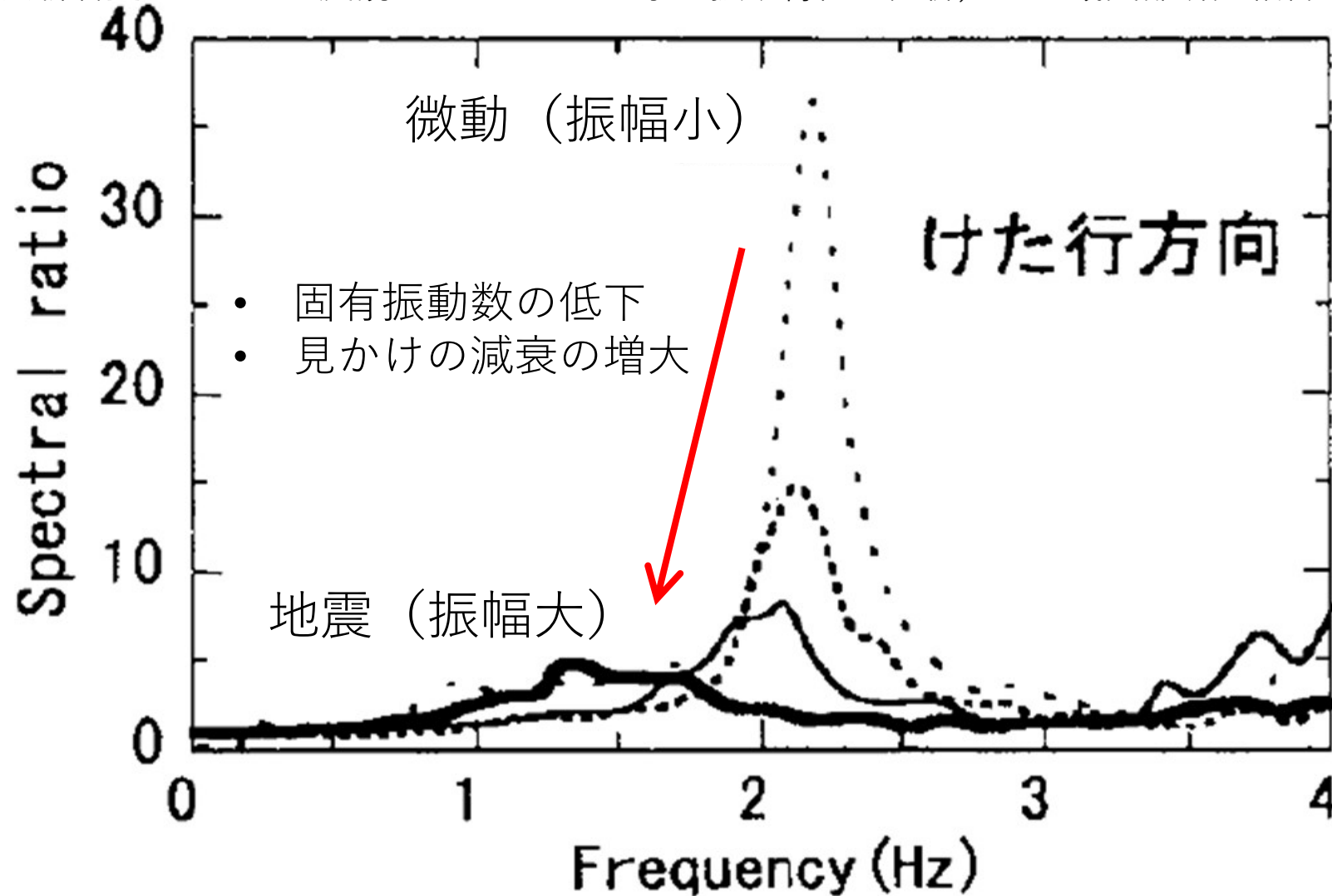


3.74Hz



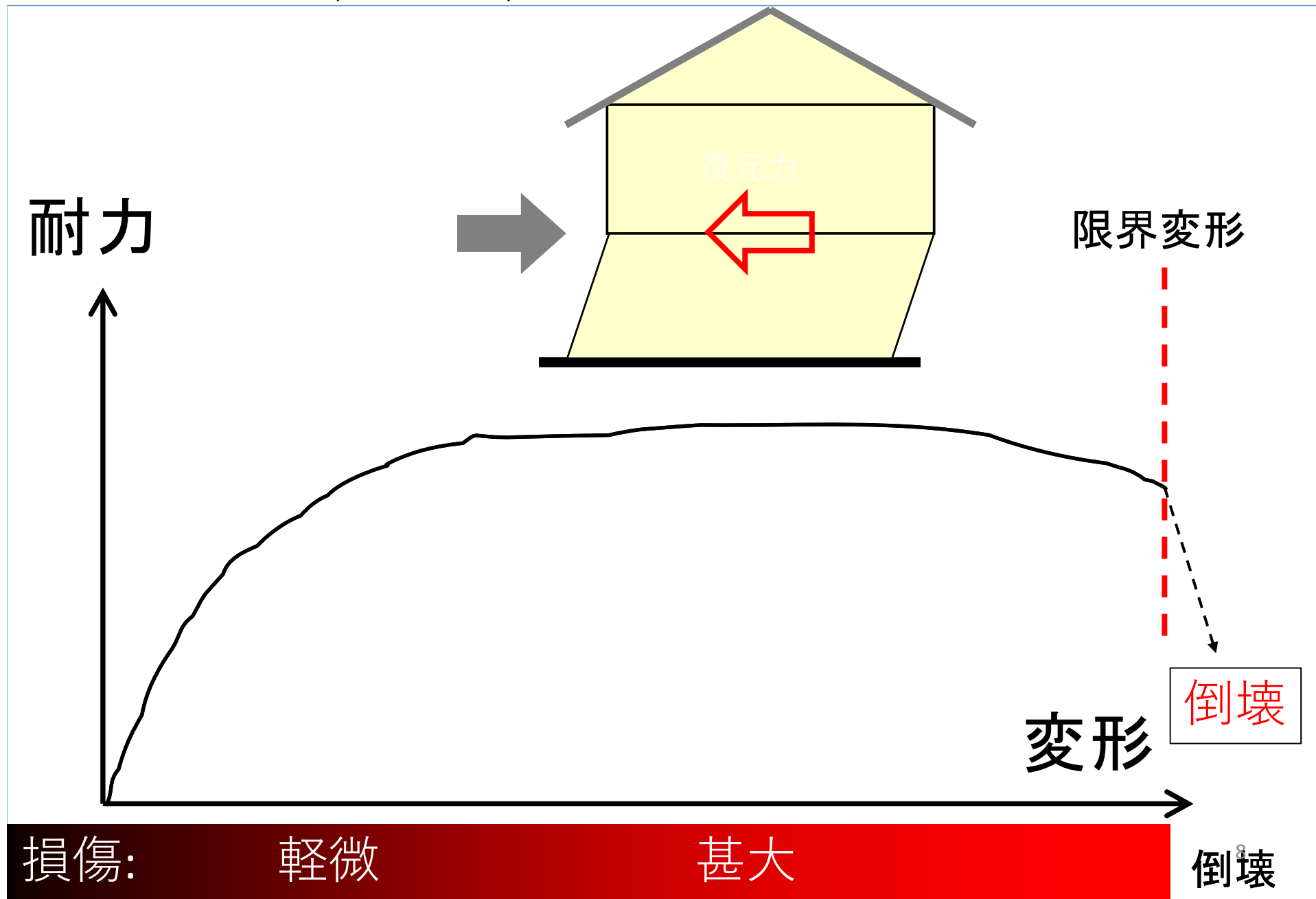
弾塑性応答における伝達関数の変化

※新居藍子ほか：地震観測に基づく京町家の振動特性の分析，AIJ近畿支部研究報告集，平成18



大振幅⇒損傷⇒剛性低下⇒固有振動数低下

復元力（耐力）と変形角

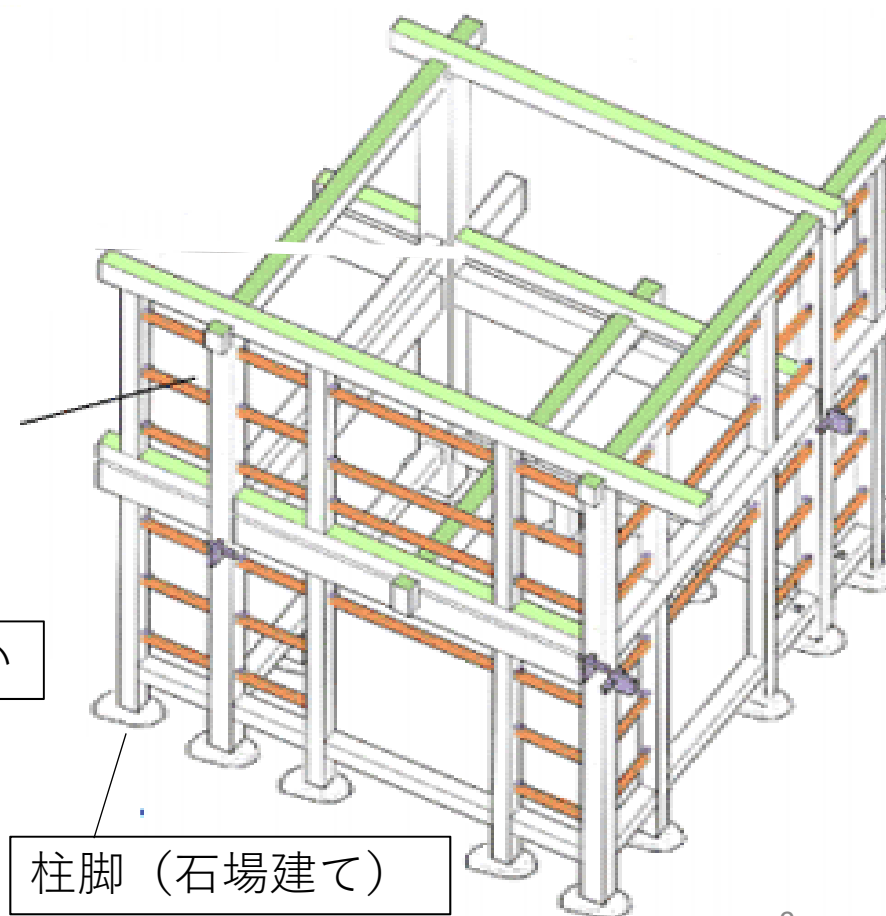
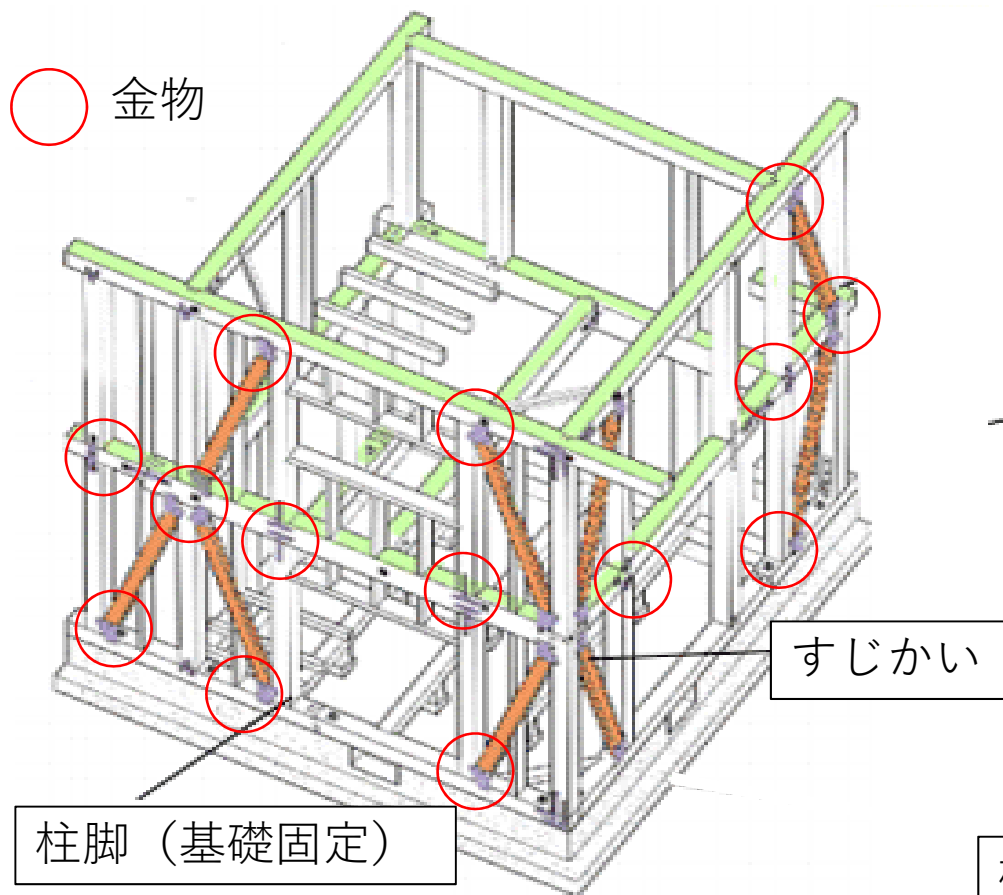


在来工法と伝統工法

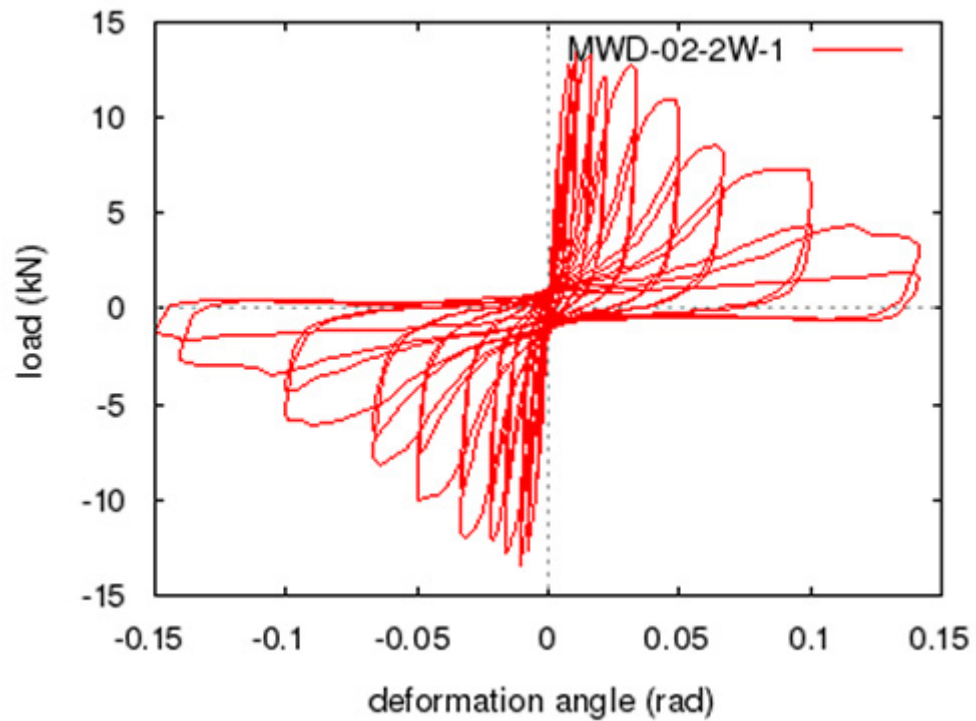
- ・ 在来工法

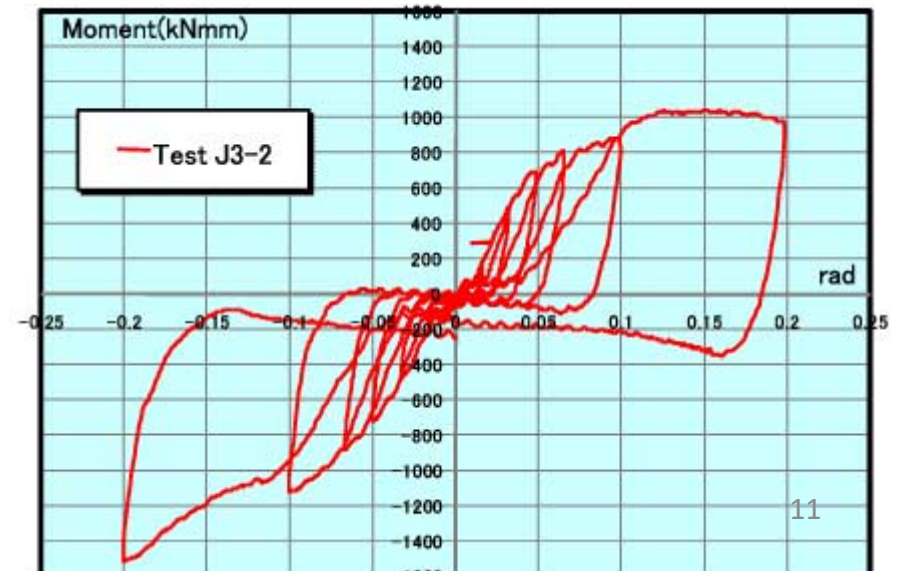
- ・ 金物
- ・ 柱脚

- ・ 伝統工法



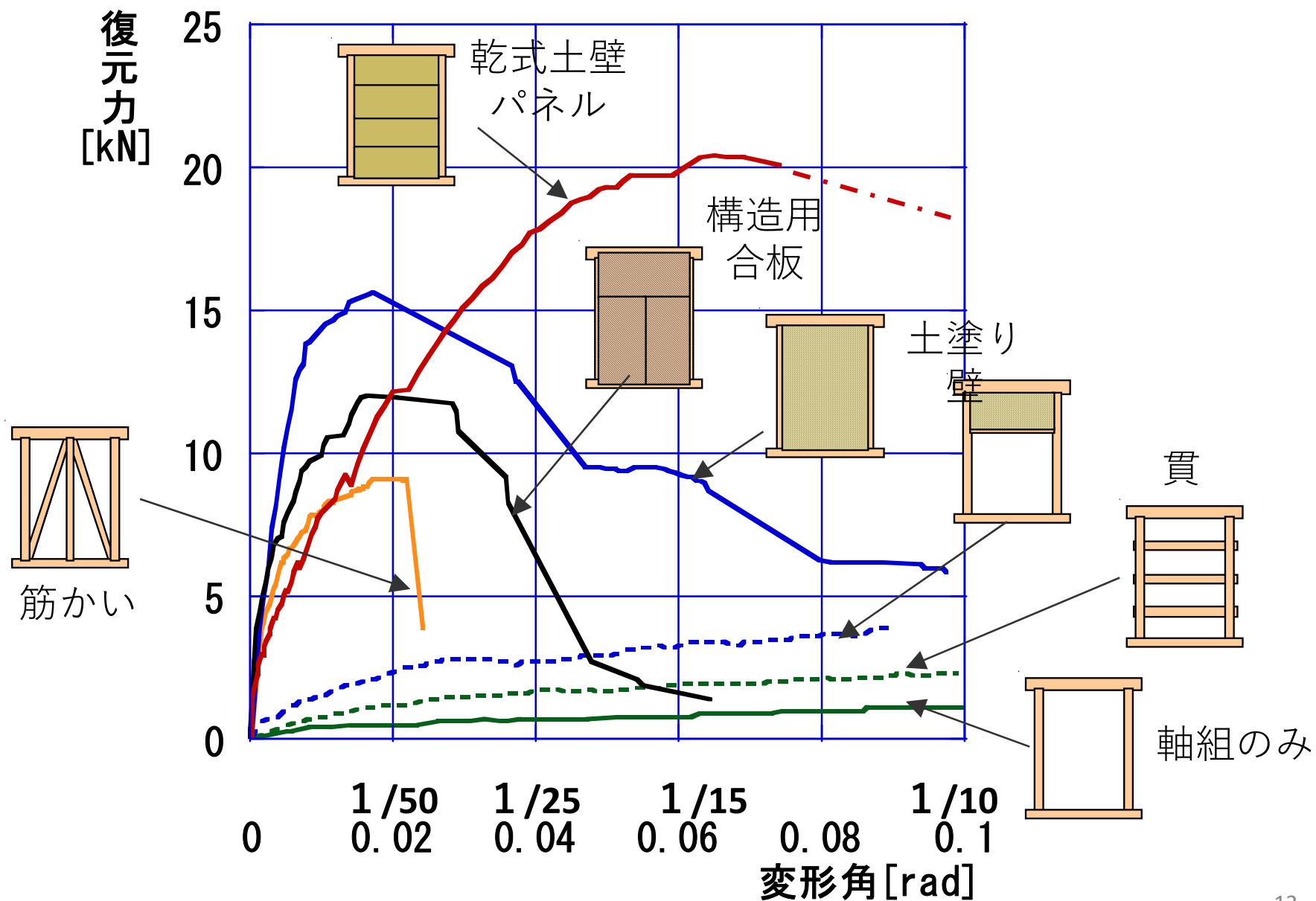
耐震要素の静的載荷試験





<http://green-arch.or.jp/dentoh/progress/>

耐震要素の復元力特性（荷重－変位関係）





座屈した筋かい



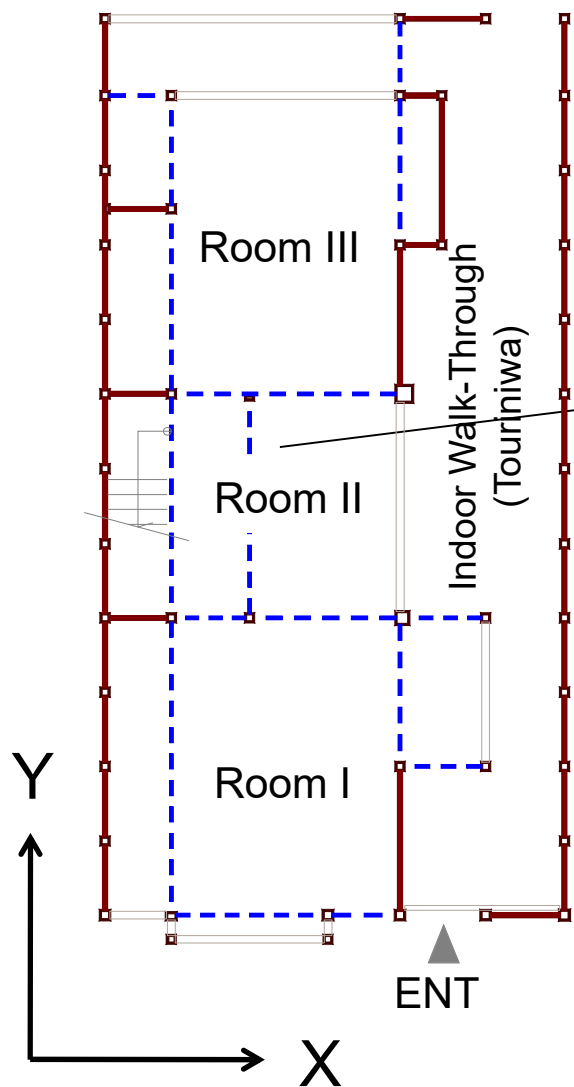
切り欠きのある筋かい



切れた筋かい

筋かい端部金物

建物の耐震性能（耐震要素の総和）

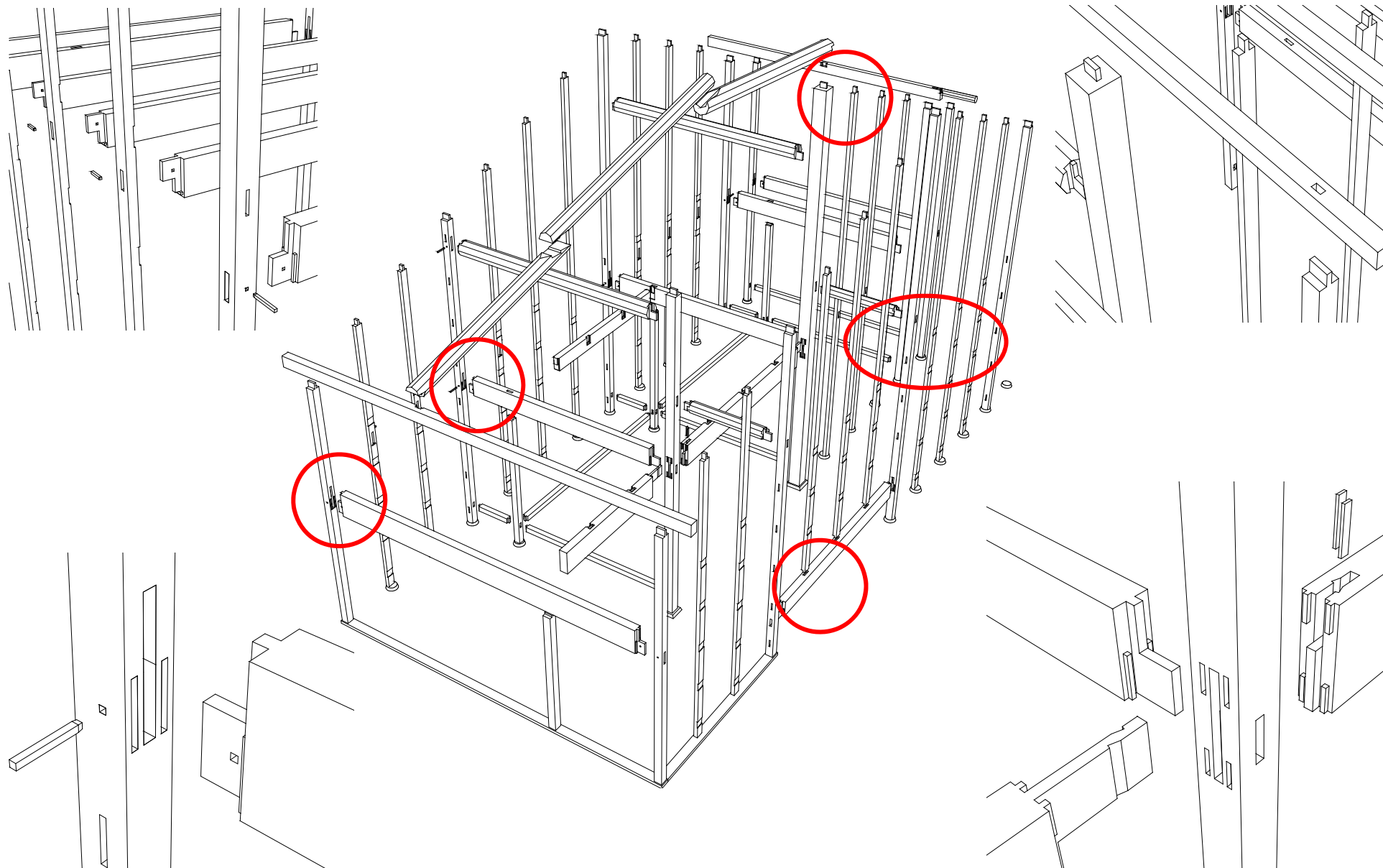


Hanging wall

Mud wall

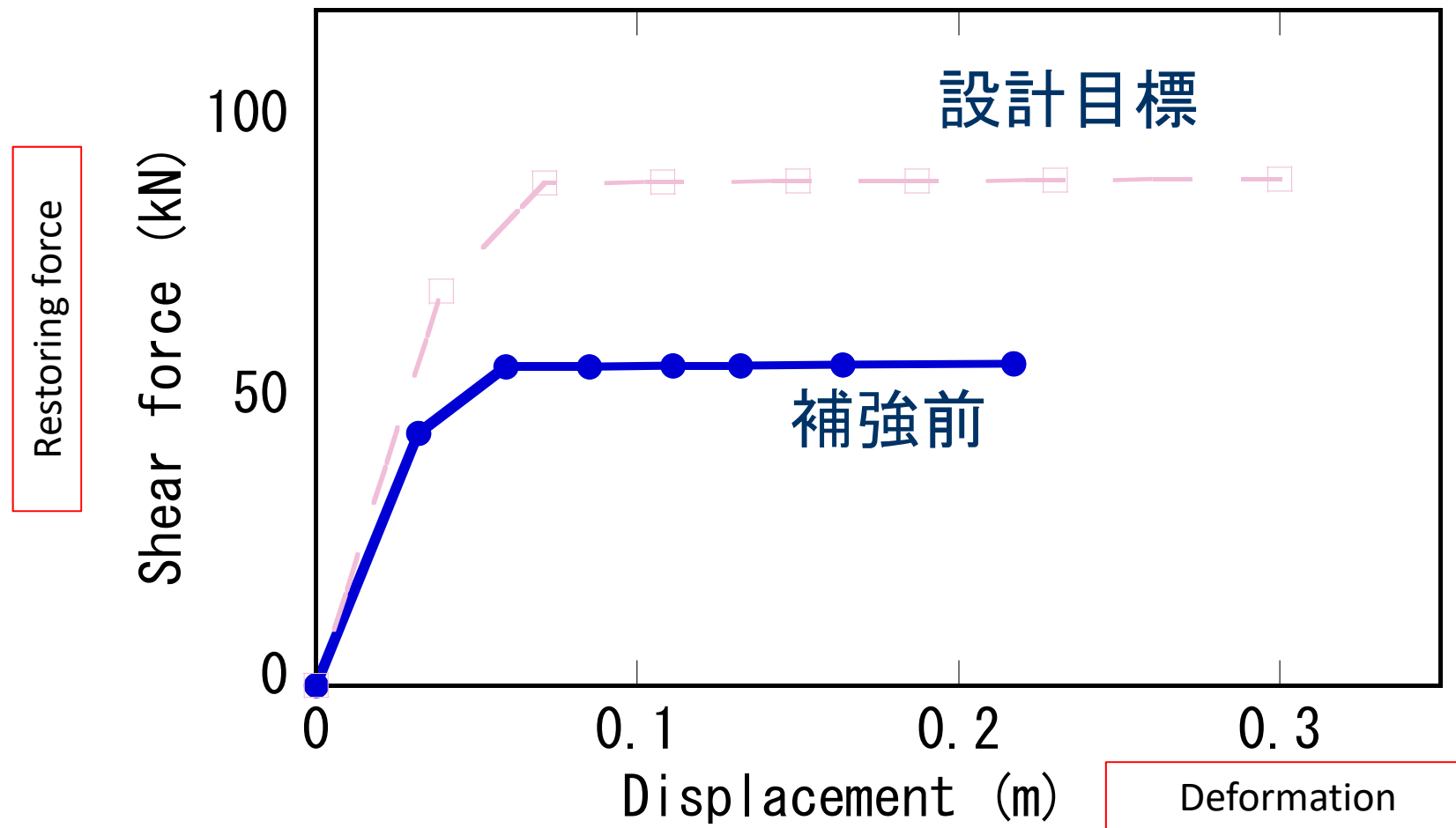


接合部詳細



種々の仕口が用いられる

建物全体の荷重変形関係



耐震要素の性能の和が全体の性能と合わない場合がある

伝統木造特融の 高い変形性能

耐力

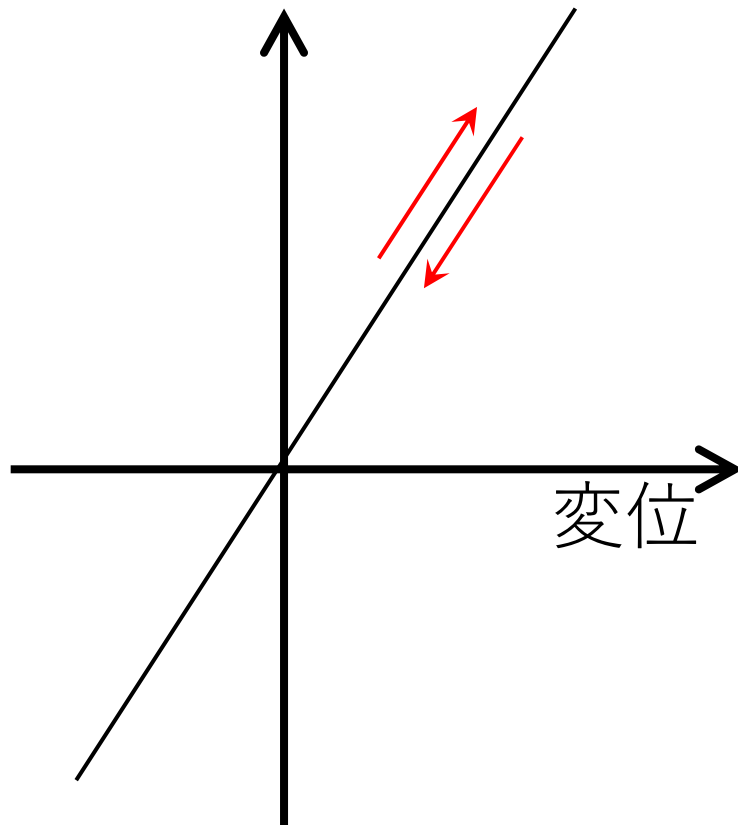


脆性的な挙動を示す構造物は比較的小さな変形角で倒壊につながる

弾塑性系の地震応答

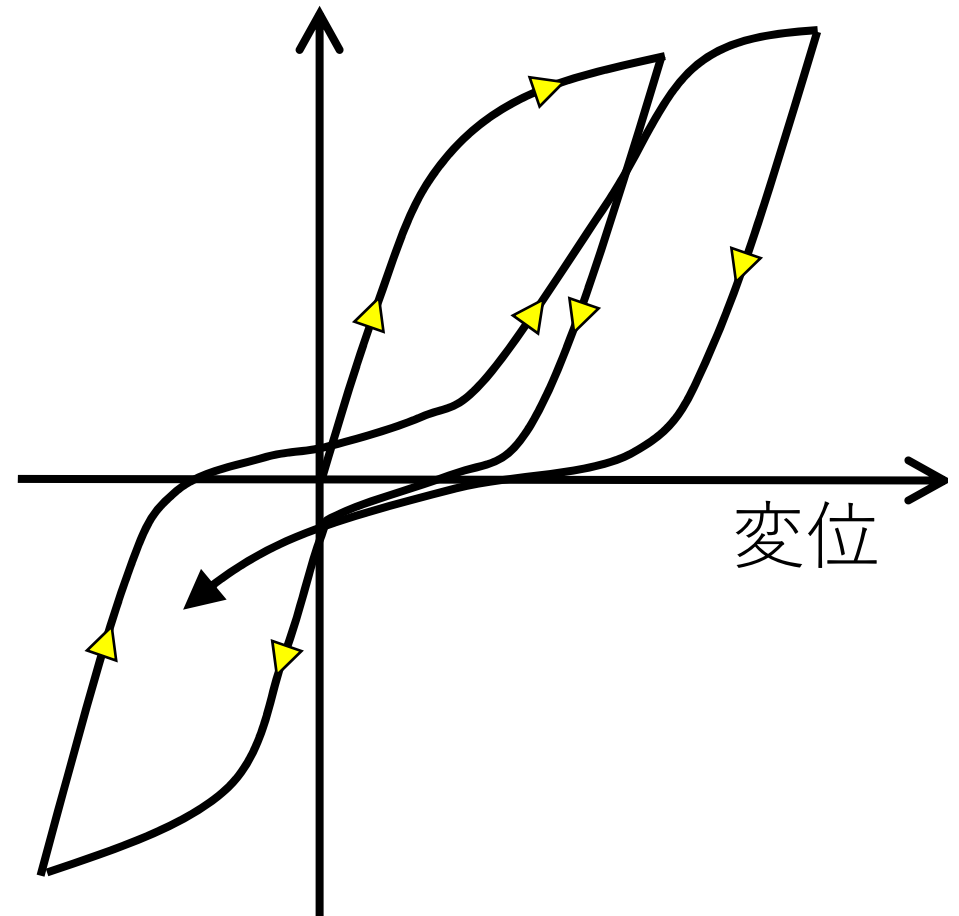
線形・弾性

復元力



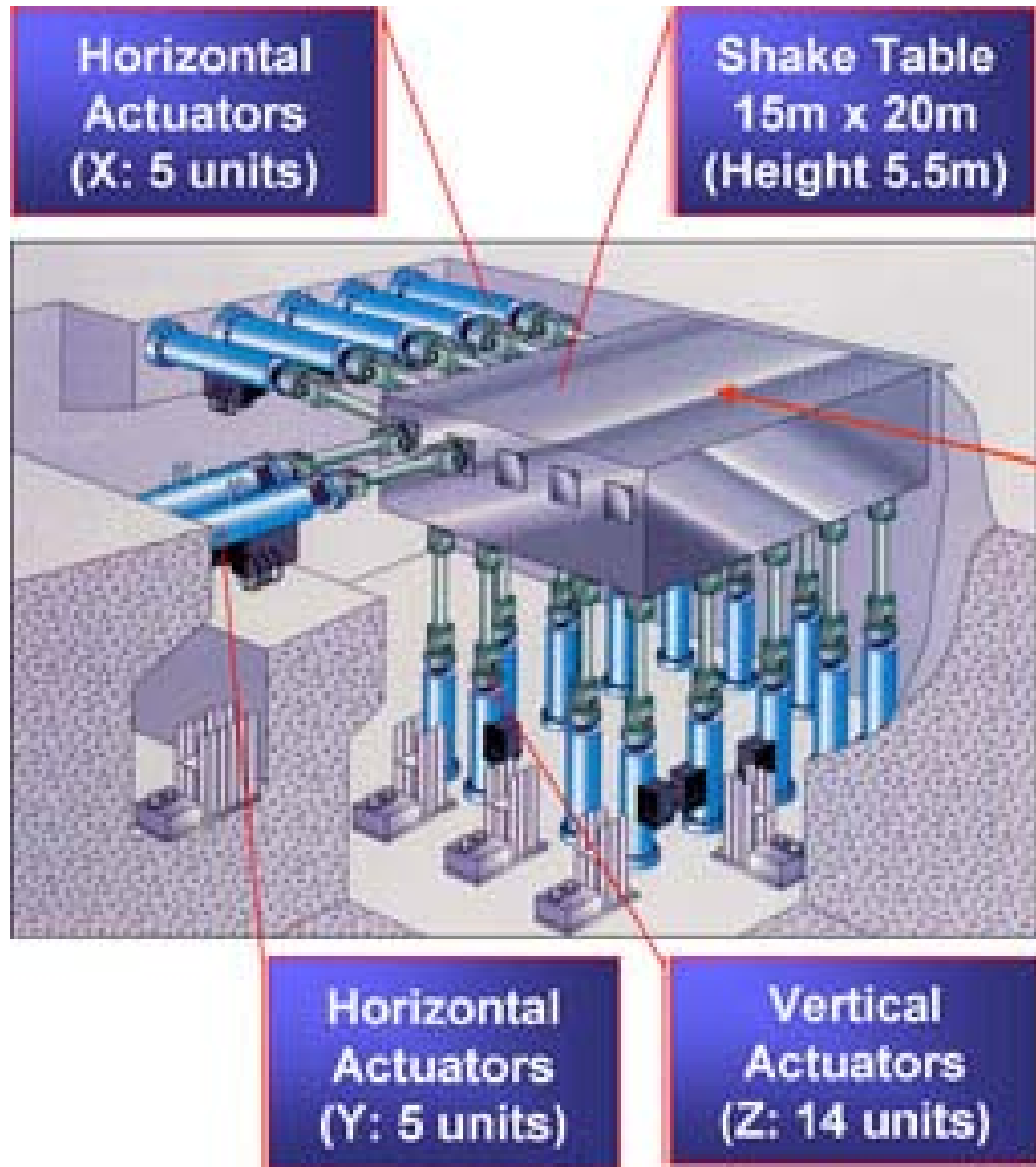
非線形・塑性

復元力

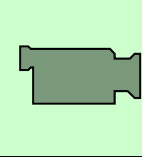


木造は極めて非線形の強い履歴特性を有する 18

3次元実大振動台(E-ディフェンス)



- 世界最大級の3次元実大振動台
- 阪神淡路大震災以降に建造
- 実大建物の崩壊挙動を把握

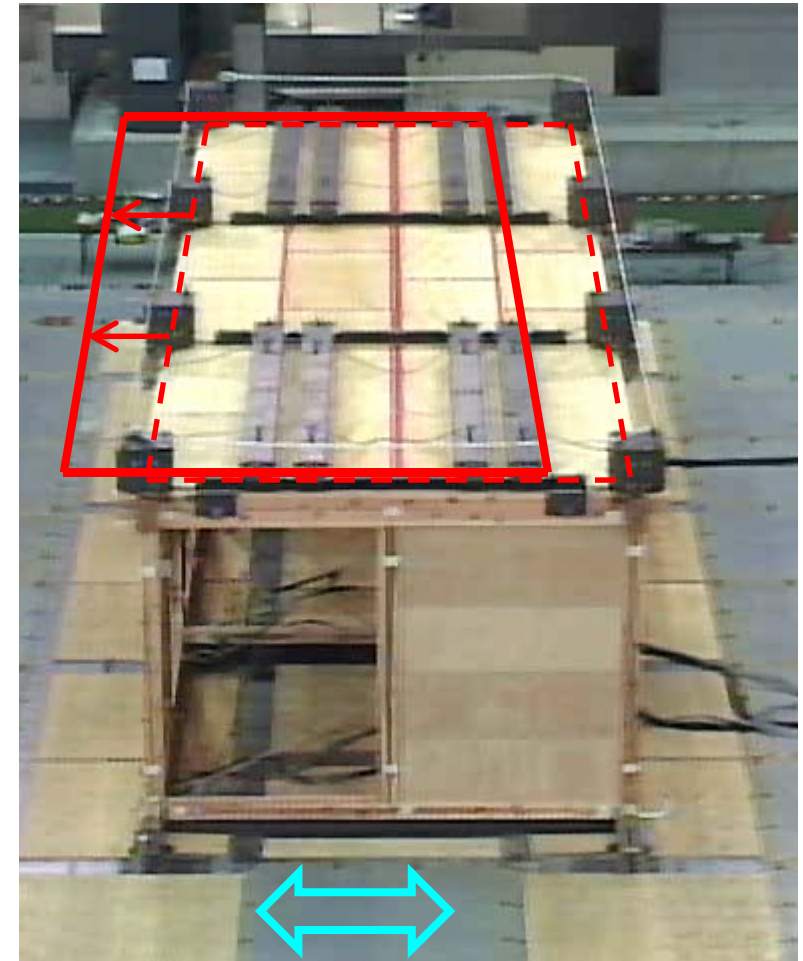
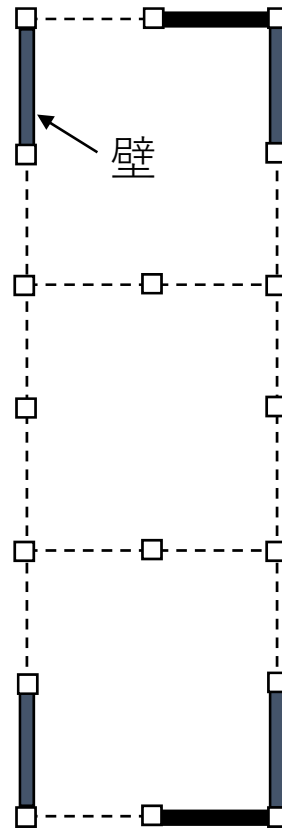
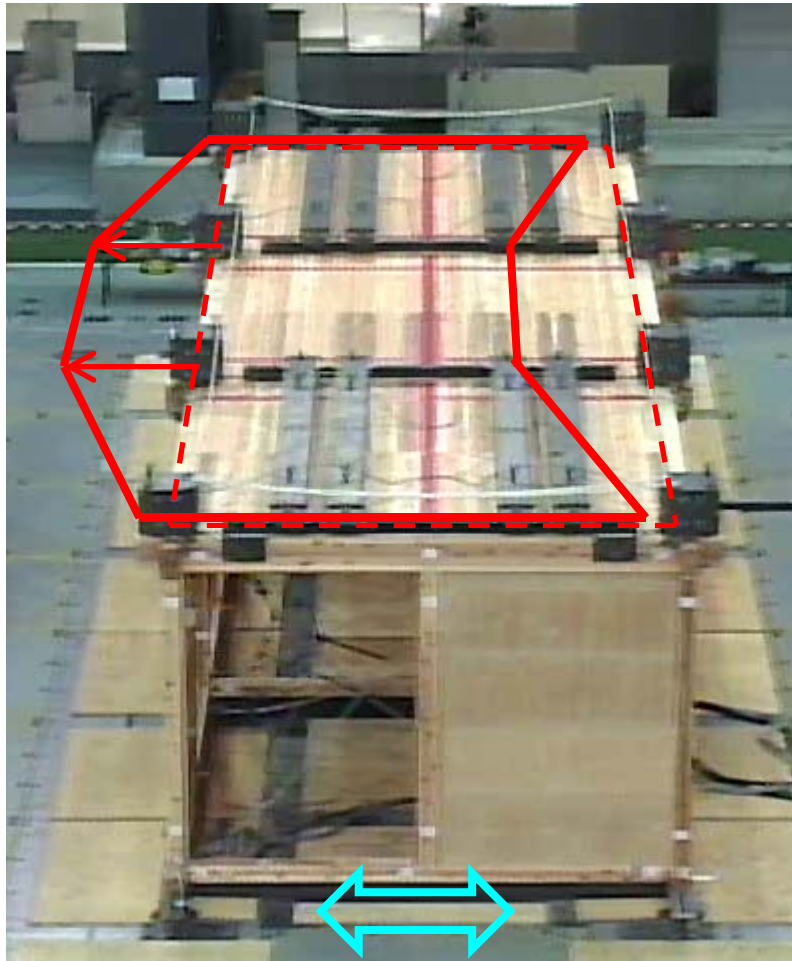


水平構面の違いによる地震時の揺れ方の違い

柔床 柔らかい水平構面

BCJ-L2波300cm/s²

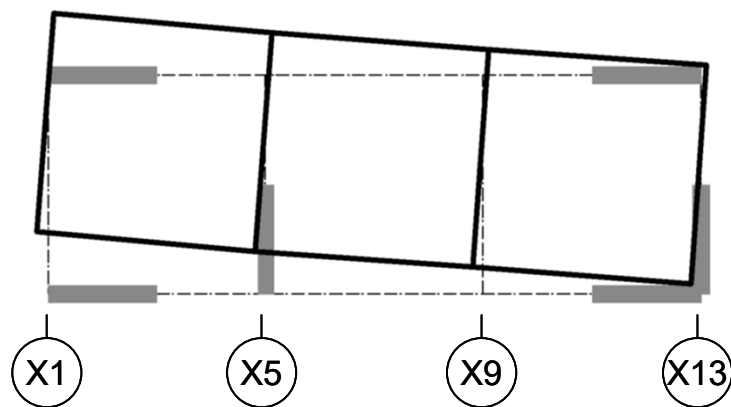
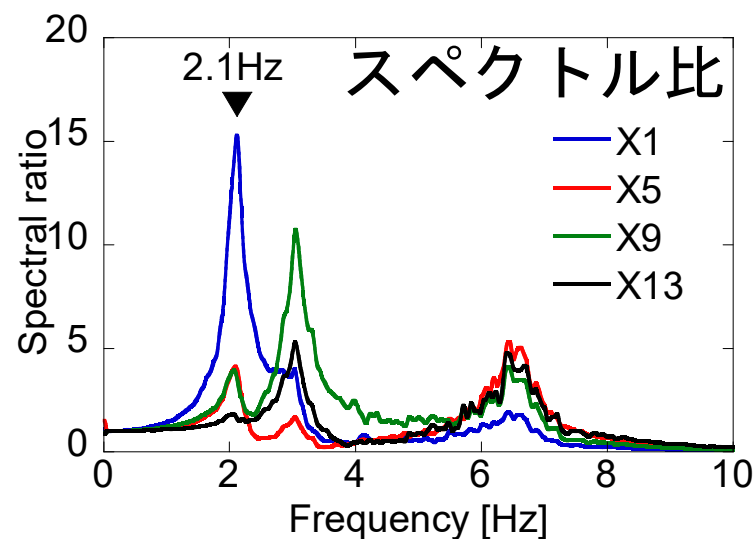
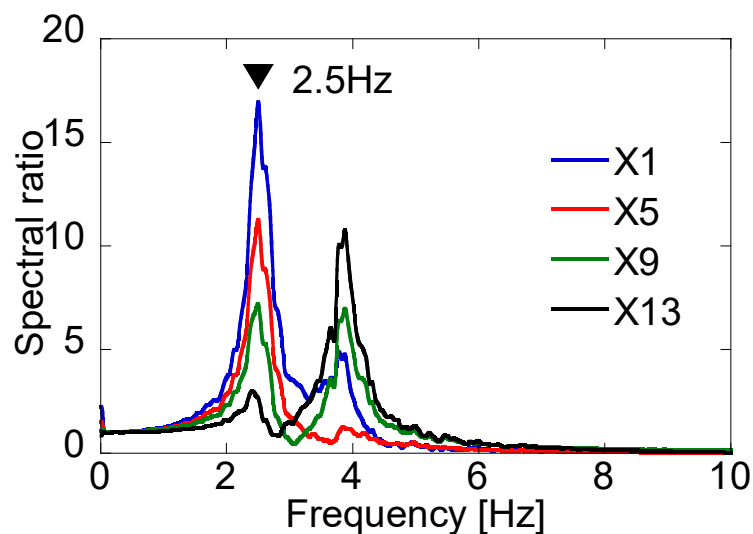
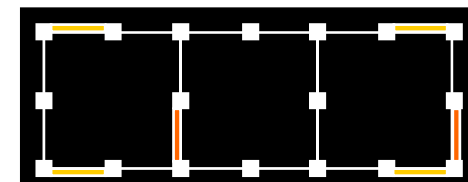
剛床 堅い水平構面



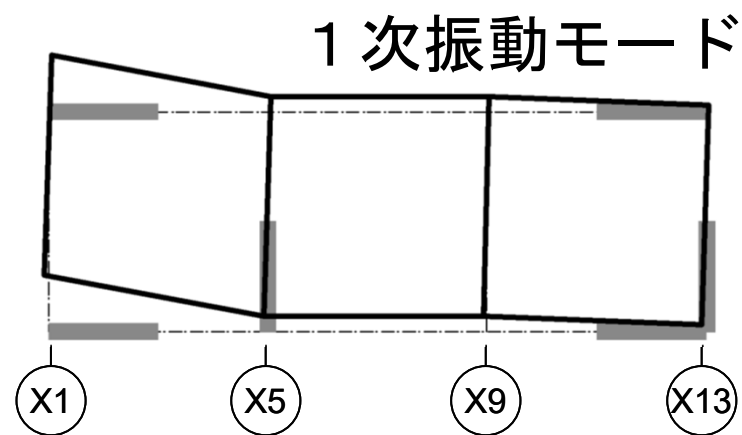
柔床の場合、壁の無い構面の揺れ方が大きくなる

ホワイトノイズ波加振における振動特性

土台試験体 偏心小



剛床仕様



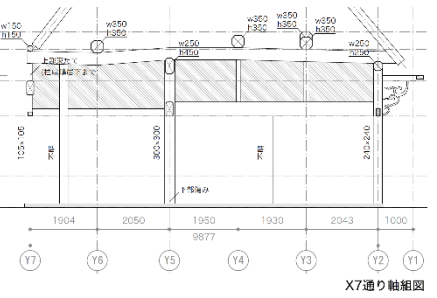
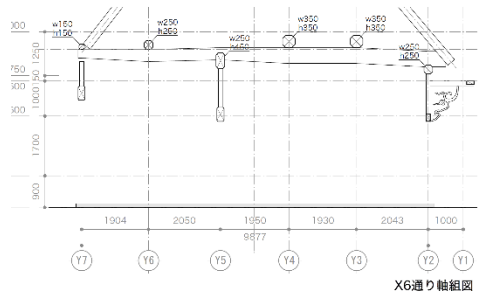
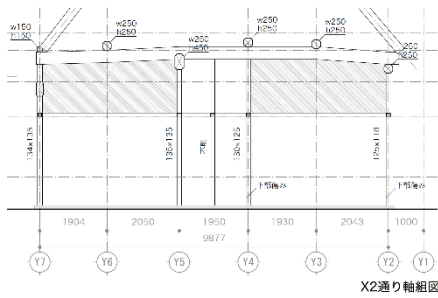
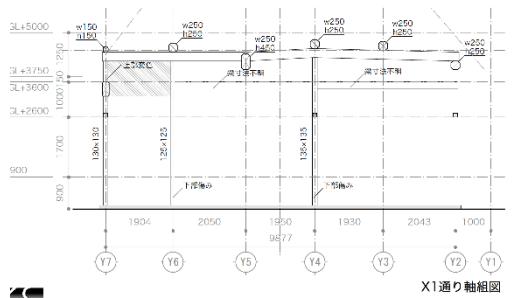
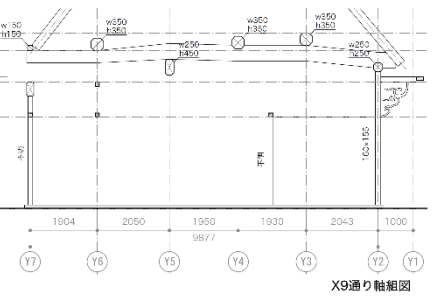
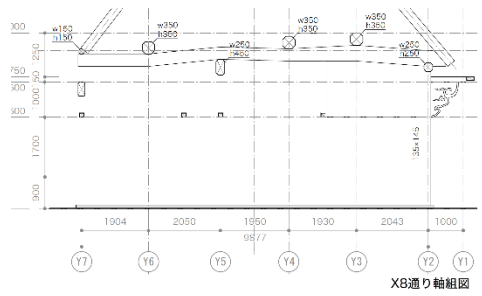
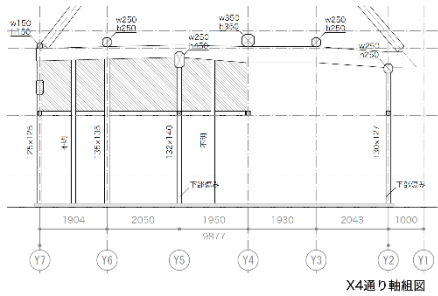
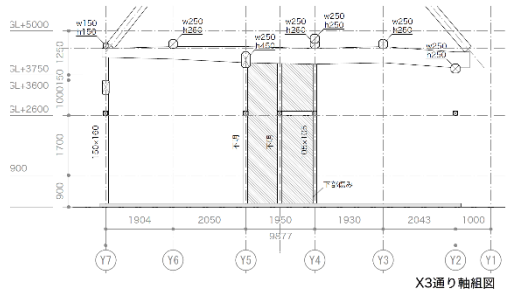
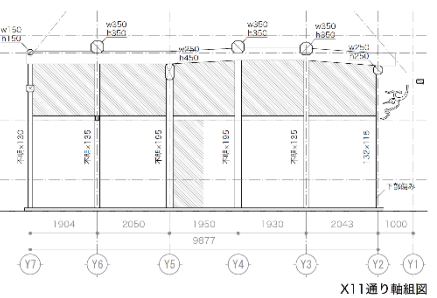
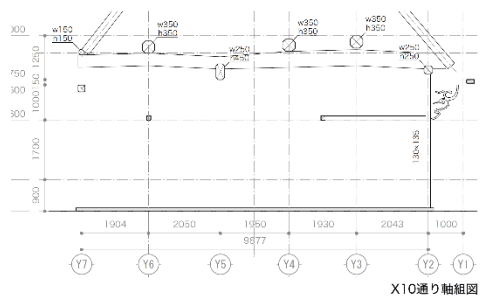
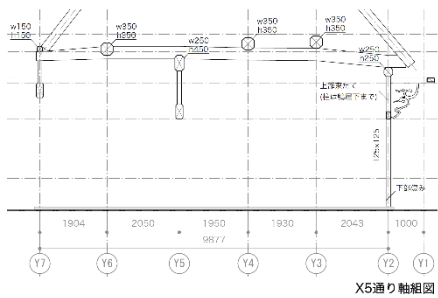
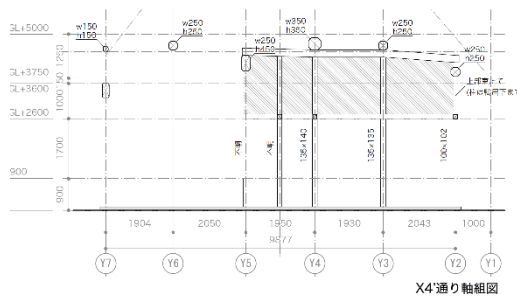
1次振動モード

柔床仕様

古民家の実測例

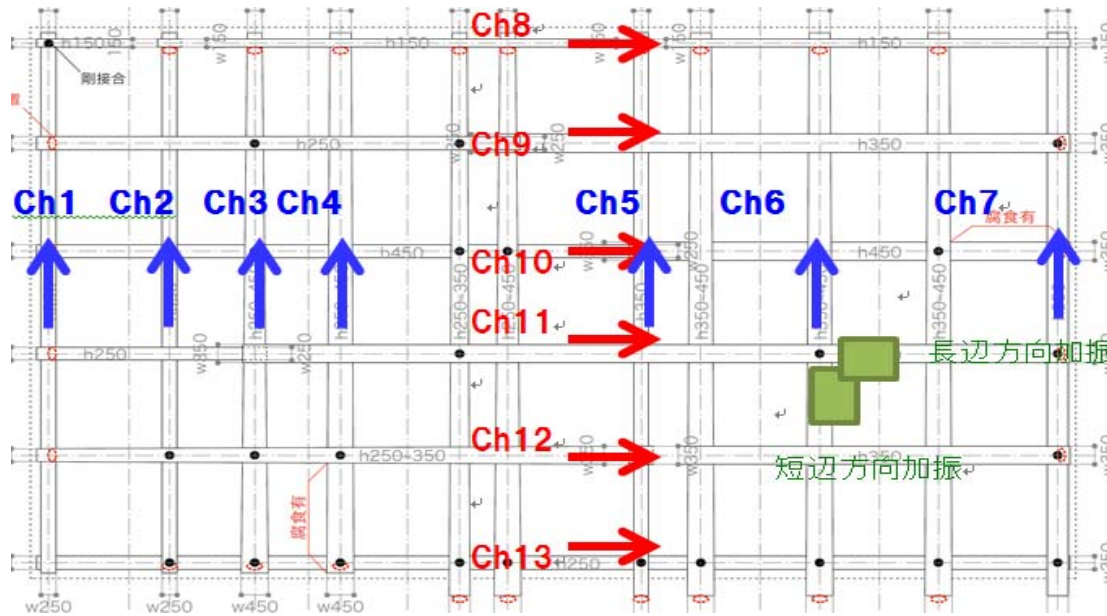
- 大分県中津市耶馬溪
- 茅葺古民家







実測調査の概要



微動計
(VSE15 × 18 台)



起振器 (質量20kg)

微動計を既存の木造建物の小屋組みのレベルに複数台設置



建物の振動計測を多点で行う

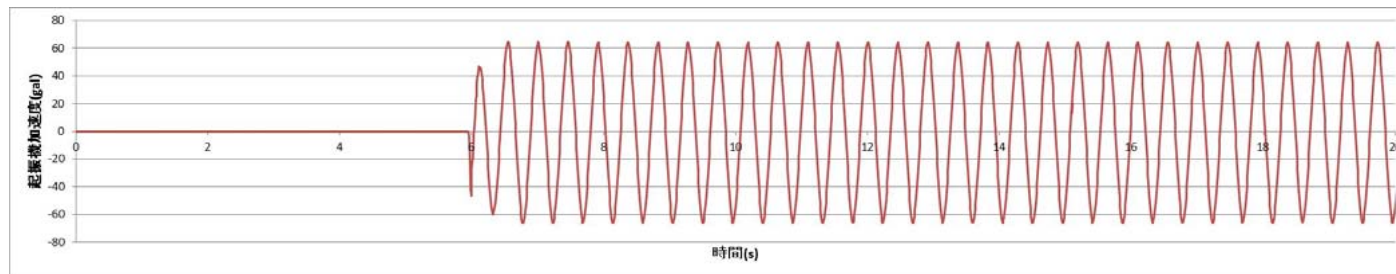


建物全体の特性について分析

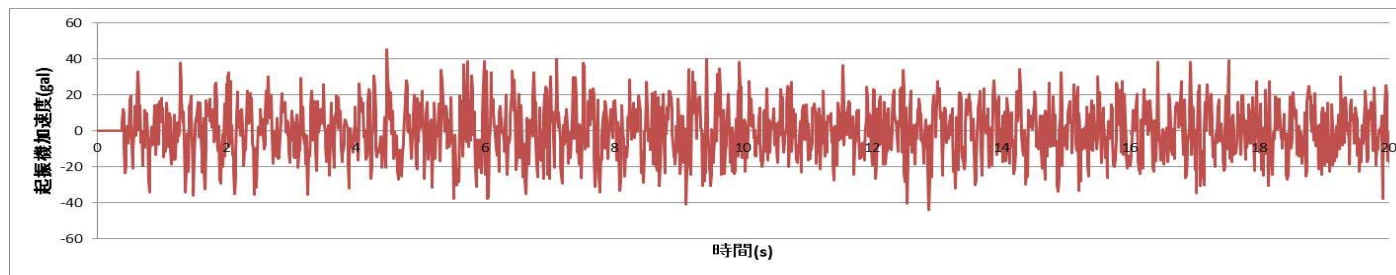
加振方法

常時微動計測、人力加振および

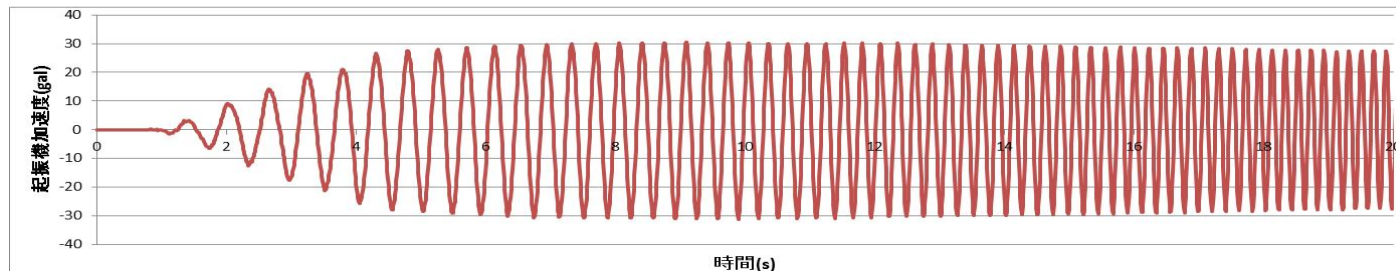
起振機による加振時計測（正弦波、ランダム波、スweep波）



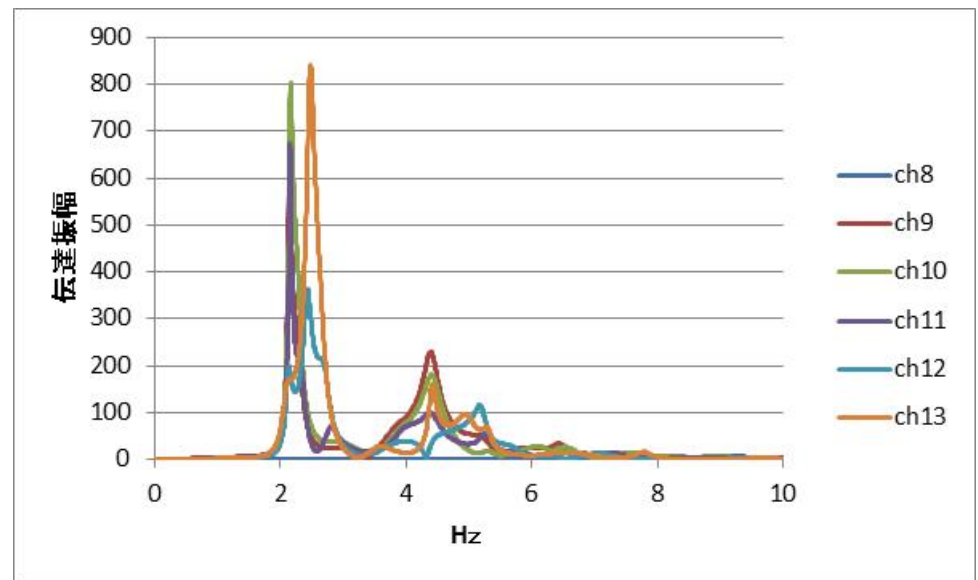
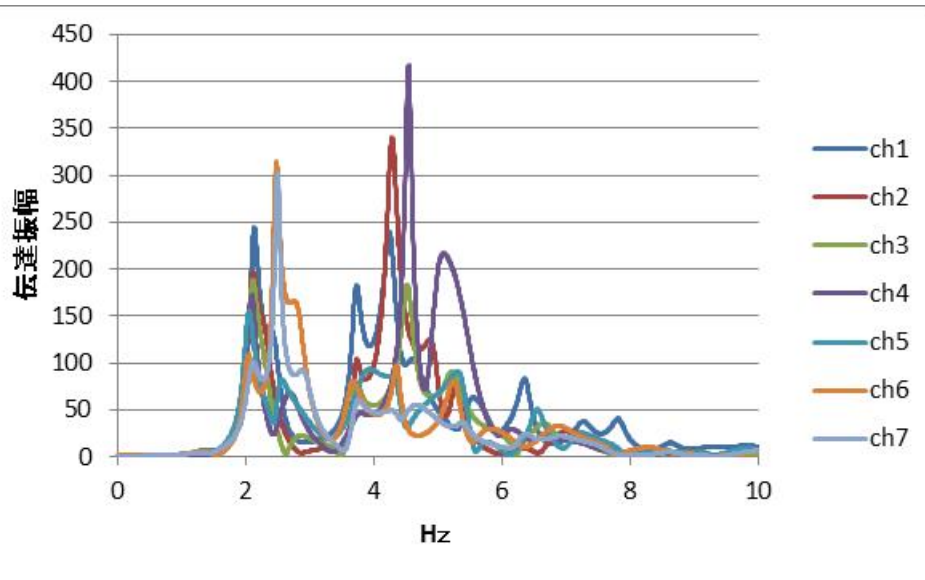
正弦波



ランダム波



スweep波

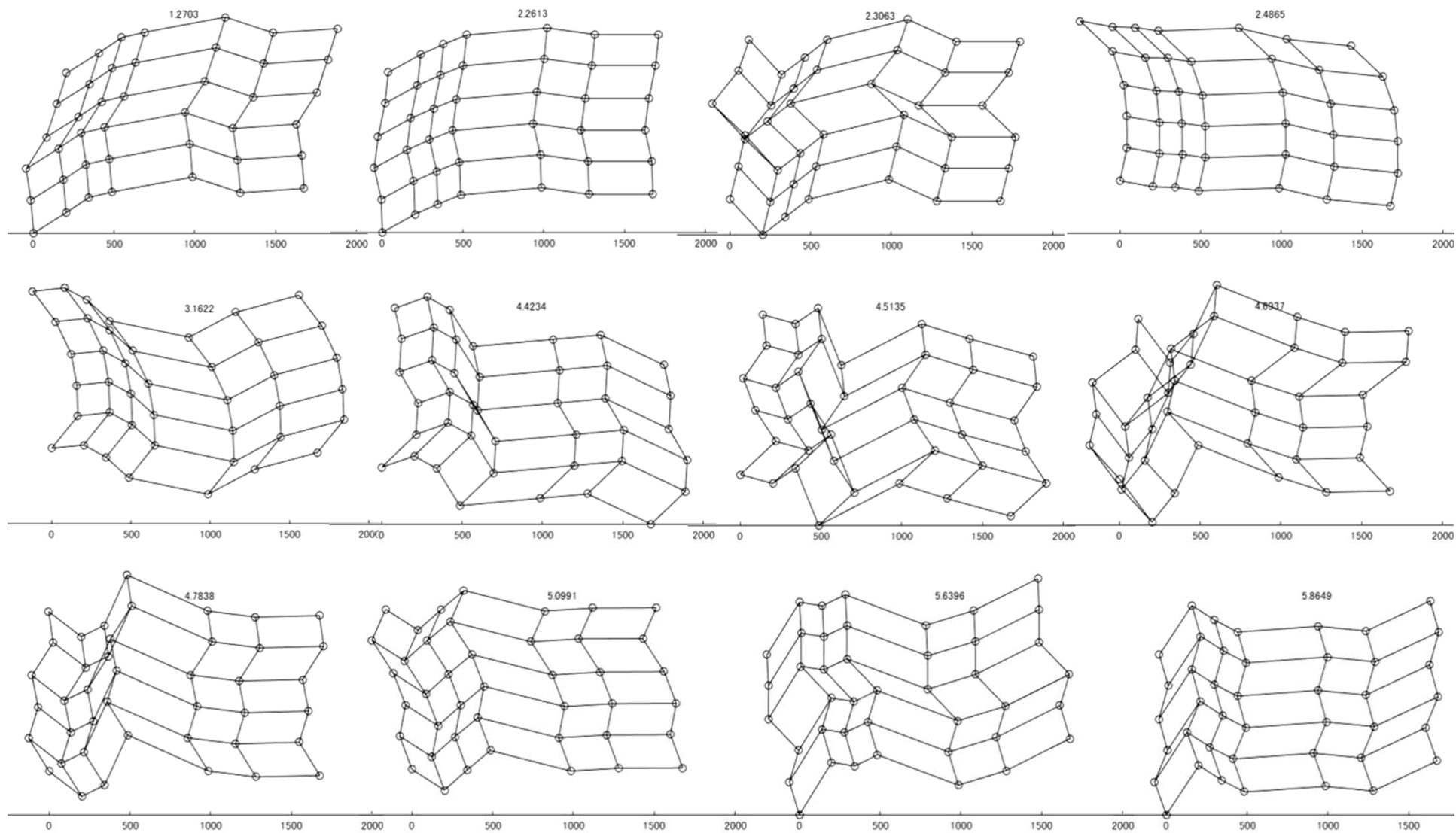


通常木造建物は1層1質点でモデル化するため、伝達関数は1つしかピークを持たないが、1層建物でも複雑な振動性状であることが確認された



耐震性能評価のためにはより実態に適したモデルを構築する必要性

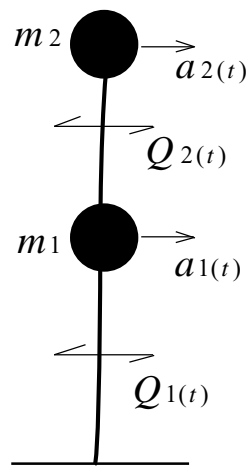
スweep加振振動性状



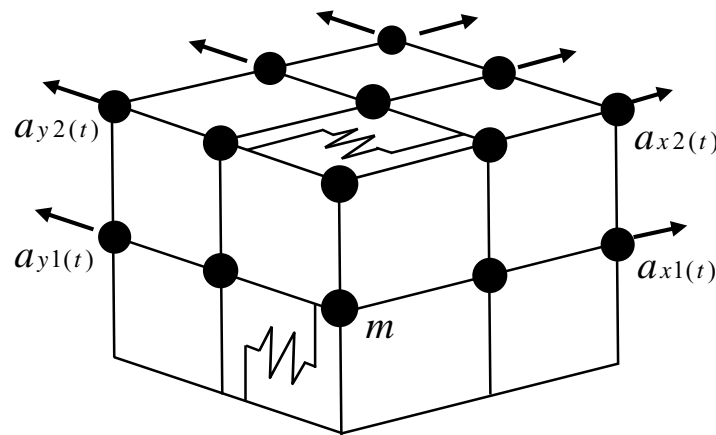
整形な建物と異なり、屋根が柔らかく変形し、耐力壁の配置が対称でないため、加振方向以外の揺れの成分も多く含む複雑な振動

部位別の構造特性の推定法

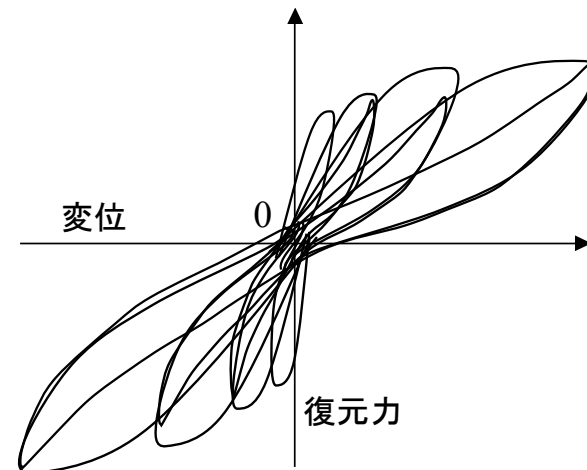
- 振動計測に基づく構造特性推定手法は. . . .
 - 剛な床を持つRC造やS造を想定
 - 1層を1質点としてモデル化
 - 線形モデル（弾性モデル）を想定
- 木造建築物の特徴である非線形性や柔床を考慮した立体モデルを想定した部位別性能推定法の開発



従来: 平面せん断



本研究: 内部構面を含む柔床3Dモデル



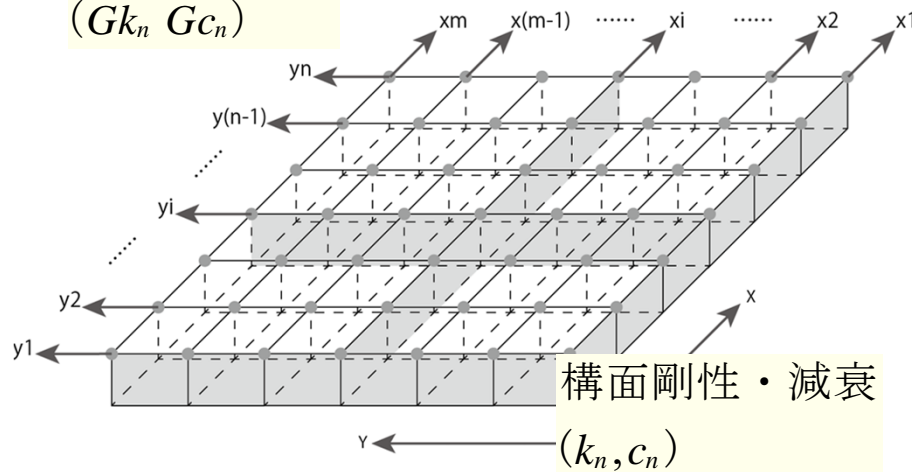
構造フレームの荷重変形関係

提案手法①(柔床・多層・線形)

建物各構面の変位、速度、加速度応答及び入力地震波を計測し、建物の各構面の剛性、減衰係数を求める

床剛性・減衰

(Gk_n, Gc_n)



構面剛性・減衰

(k_n, c_n)

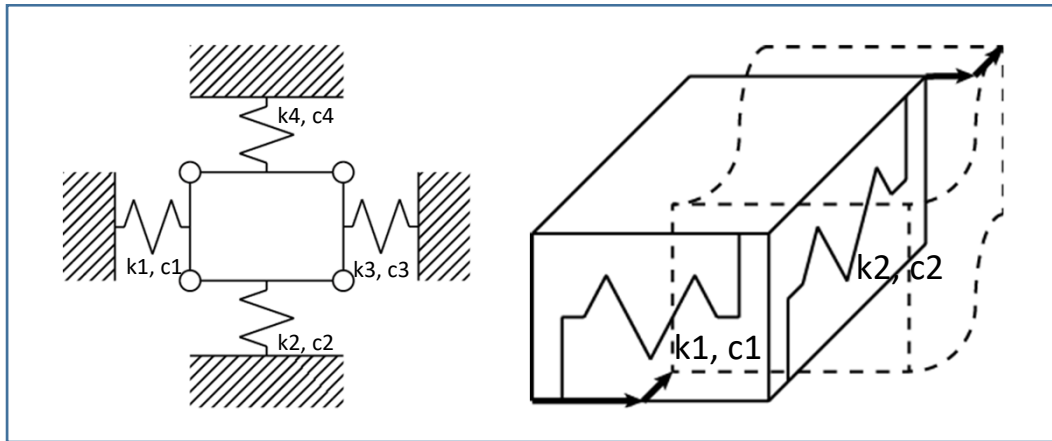
運動方程式の誤差の最小化

$$\text{Find } \Theta (=k_1, \dots, k_{4n}, c_1, \dots, c_{4n}, Gk_1, \dots, Gk_n, Gc_1, \dots, Gc_n) \quad (1)$$

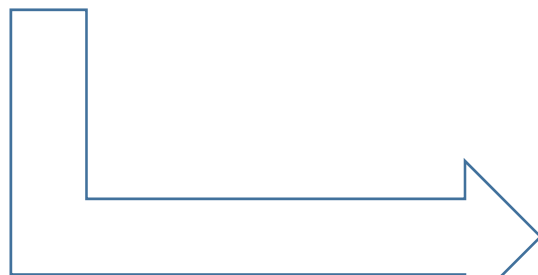
$$\text{to minimize } E = \sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{x}, t_i) \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, t_i)) \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \underbrace{\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t)}_{\text{(慣性力、復元力、減衰力)}} - \underbrace{(-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{y}_g(t))}_{\text{(外力)}} \quad (3)$$

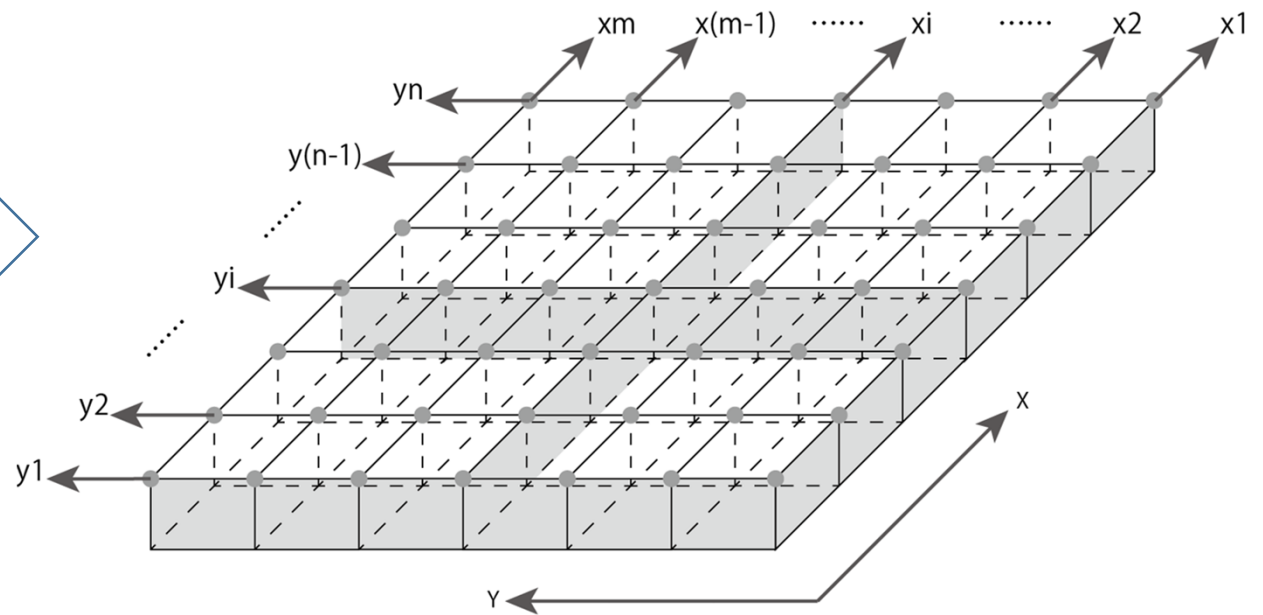
- 建物の応答値(変位 $\mathbf{y}(t)$ 速度 $\dot{\mathbf{y}}(t)$ 加速度 $\ddot{\mathbf{y}}(t)$)及び地動 $\ddot{y}_g(t)$ を与える
- 質量 \mathbf{M} は既知とする
- 運動方程式の誤差 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ の二乗和 E が最小となる Θ を推定値とする



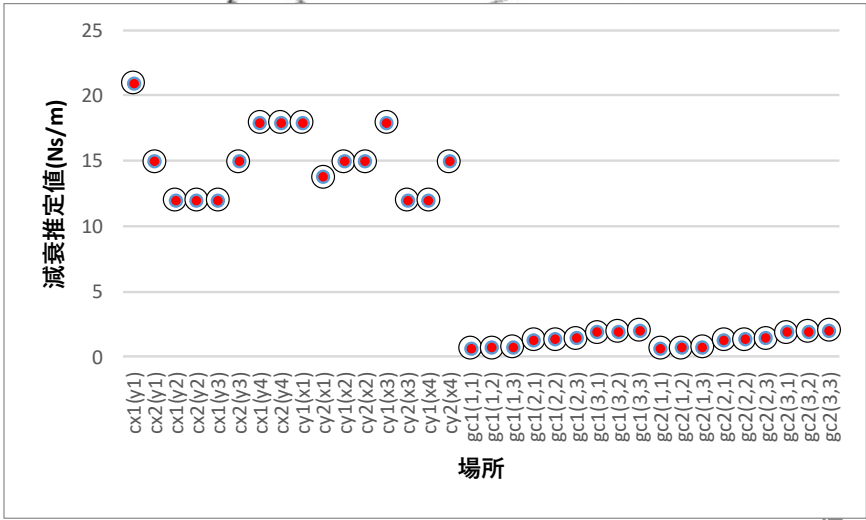
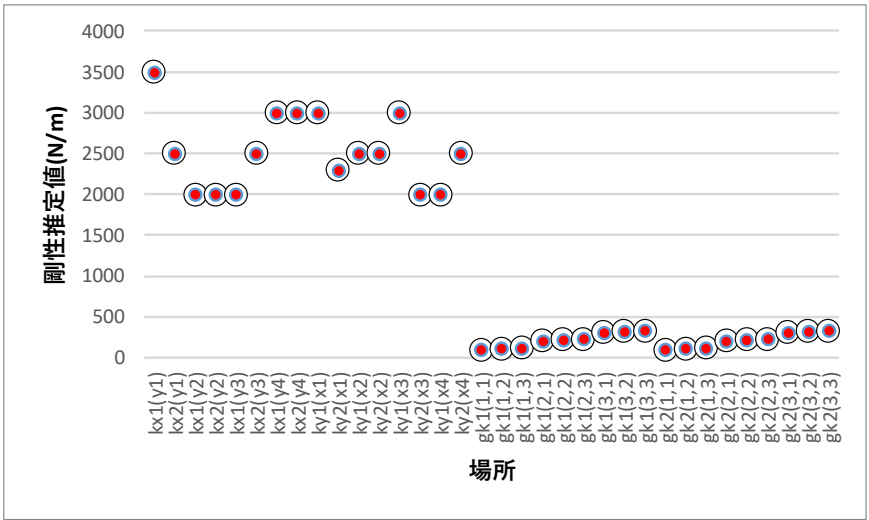
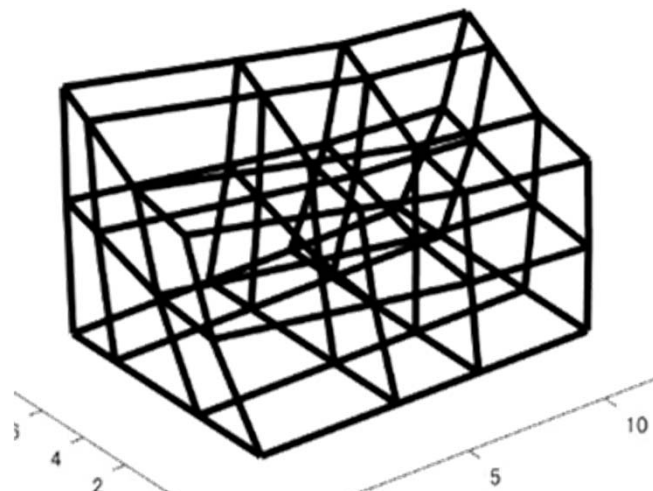
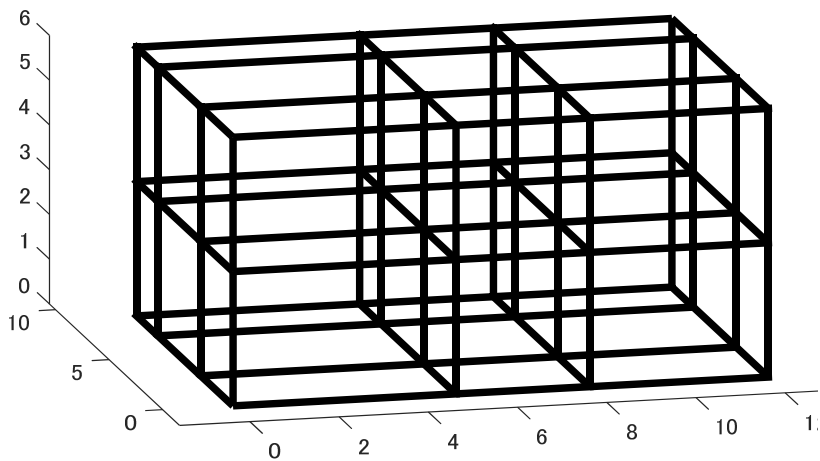
構面によって剛性・減衰を自由に設定する



任意の数の内部構面で分割する

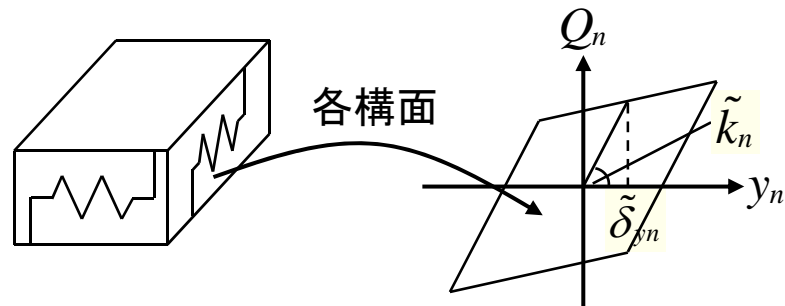


- EL Centro波に対する時刻歴応答解析の結果を計測応答とみなして用い、推定の精度検証を行う。



提案手法②(柔床・非線形・履歴モデル指定)

初期値(変数)



• 降伏変位も推定対象

運動方程式の誤差最小化問題

Find $\mathbf{x}(=k_1, k_2, k_3, k_4, G, \delta_{y1}, \delta_{y2}, \delta_{y3}, \delta_{y4}, \delta_{y5})$

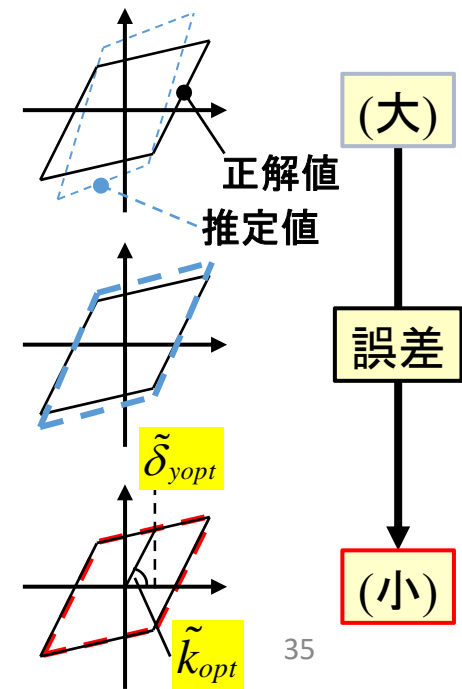
to minimize $\sum_{i=1}^n (\mathbf{E}^T(\mathbf{x}, t_i) \mathbf{E}(\mathbf{x}, t_i))$ (5)

$\mathbf{E}(t) = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \tilde{\mathbf{Q}}(t) - (-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{y}_g(t))$ (6)

(慣性力 ← → (外力))

復元力 $\tilde{\mathbf{Q}}$ が正しいとき釣り合う

- 建物の応答値(変位, 速度, 加速度)及び地動を与える
- 質量Mは既知とする
- 運動方程式の誤差 $\varepsilon(t)$ の二乗和Eが最小となるXを推定



数値解析②(例題)

- ① 柔床多構面モデル(図7)を対象に、図6の地震波形を使用して非線形応答解析を実行
- ② 解析によって得られた変位、速度、加速度を使用して最適化を行い、剛性を推定する

表1 モデル諸元(参考文献4をモデルに合わせた)

剛性 (kN/m)			
$k_1=3500$	$k_2=2000$	$k_3=2000$	$k_4=3000$
床剛性 (kN/rad · m)		降伏変位 (m)	
$G_k=250$		$\delta_y=0.05$	
構面長さ (m)		剛性低下率	質量 (t)
$L_x=10.7$	$L_y=15$	$\gamma=0.15$	16.5

表2 初期値

	$k_1 \sim k_4$	G	$\delta_1 \sim \delta_5$
初期値①	500	50	0.01
初期値②	4000	400	0.08

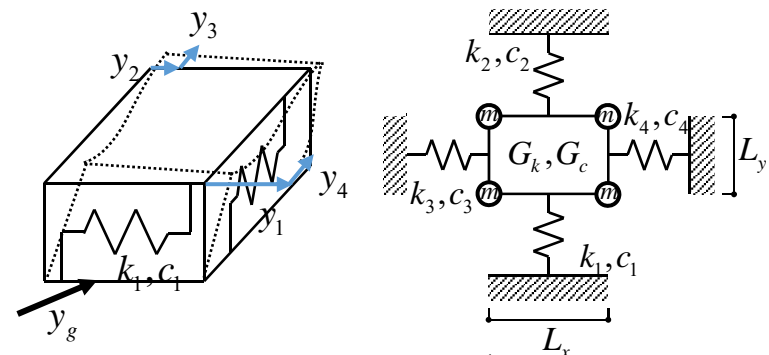


図4 対象モデル

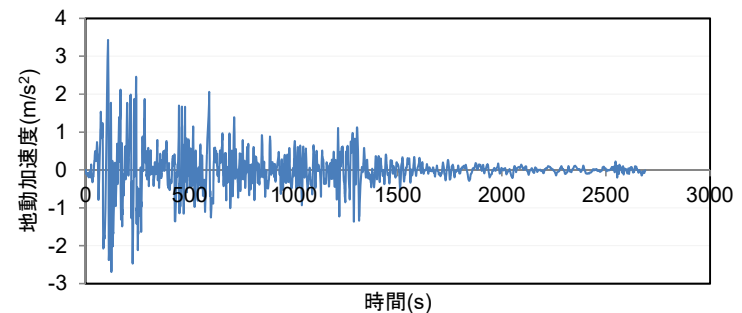
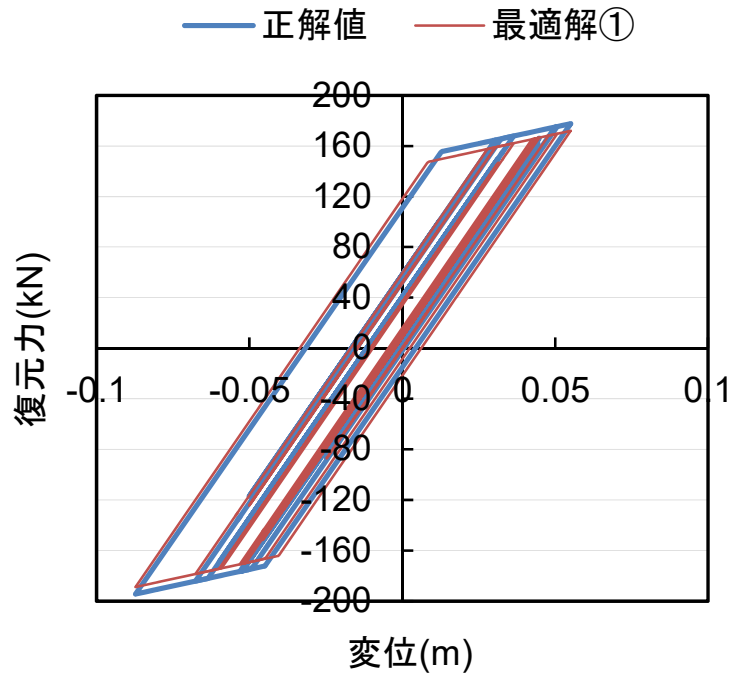
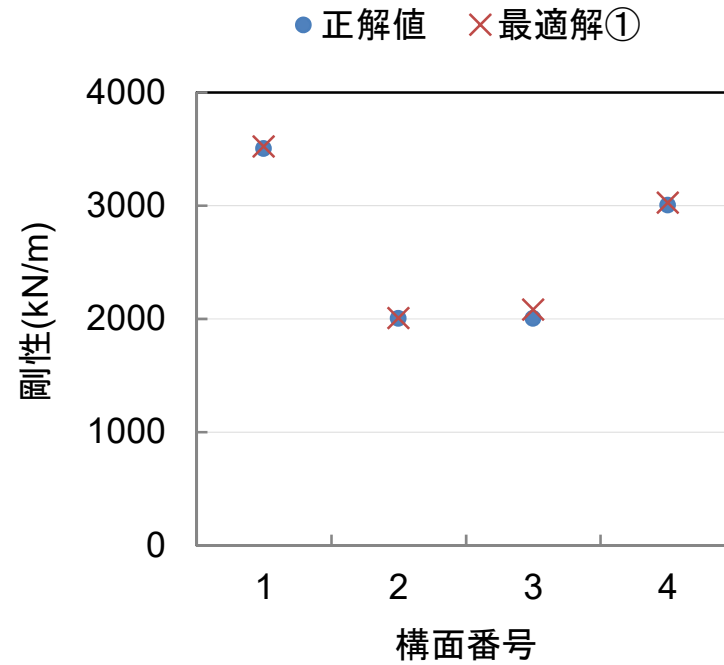


図5 El Centro波

数値解析②(結果)



推定された復元力特性



推定された剛性

- 推定値は正解値とほぼ一致
- 提案手法は、弾塑性モデルに対して有効

提案手法③(柔床・非線形・履歴モデル不要)

任意の非線形履歴特性に対応可能な手法

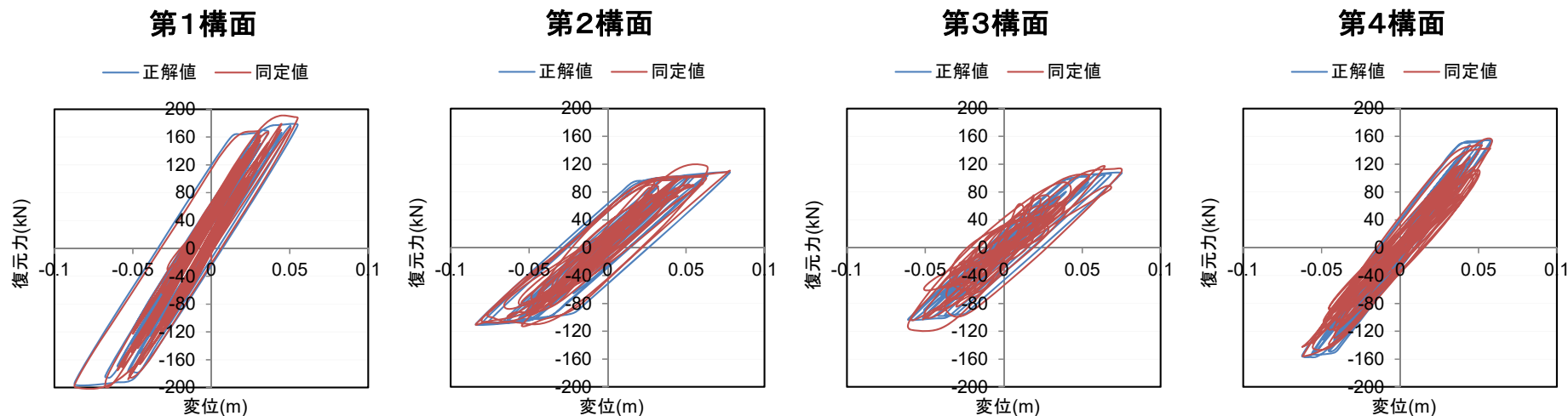


図13 復元力特性(正解値と同定値の比較)

- 同定値は正解値とおおむね一致
- 提案手法は、変位を正確に計測できれば非線形復元力特性の同定に有効

まとめ

- ① 古民家の振動計測を行い，柔な床の変形を含む複雑な振動性状を明らかにした
- ② 木造建築物を想定した柔床多構面モデルを対象に，各構面や床の非線形復元力特性を同定する手法を提案した
- ③ 数値例題を通じて提案手法の妥当性を検討した
- ④ 今後の課題として，柱脚の滑りを考慮した理論展開と，実大建物の振動台実験の結果を用いた妥当性の検証