

東三河地域防災協議会 委託研究

東三河地域における防災拠点の  
リアルタイム耐震診断技術に関する研究

(概要版)

令和3年 3月

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系

教授 齊藤 大樹

## 目 次

1. はじめに	1
1. 1 研究目的	1
2. 防災拠点建物の解析モデルの作成と LAN 地震計の設置	3
2. 1 建物概要	3
2. 2 立体骨組モデルの作成	5
2. 3 多質点系モデルの作成	6
2. 4 LAN 地震計の設置	7
2. 5 LAN 地震計による実地震観測	8
3. 解析パラメータの最適化手法	10
3. 1 目的関数の定義	10
3. 2 応答曲面法	11
3. 3 ベイズ最適化	16
4. モニタリング建物の剛性分布の最適化	17
4. 1 豊橋市中消防署	17
5. クラウドコンピューティングを用いたリアルタイム耐震診断システム	27
5. 1 現行のリアルタイム耐震診断システム	27
5. 2 リアルタイム耐震診断システムのクラウド化	28
6. まとめ	31

## 1. はじめに

東三河地域は、近い将来に発生する南海トラフ地震で、震度 6 強から 7 の激しい揺れが想定されている。なかでも被災時の大きな課題が、市役所や病院、消防署などの防災拠点の機能を確保する点である。実際に 2016 年熊本地震では、宇土市役所をはじめとする複数の防災拠点が被害を受け、避難や復旧の大きな障壁となった（図 1.1）。



大津町役場の被害 益城町役場の被害 益城町体育館の被害 宇土市役所の被害

図 1.1 熊本地震における行政建物の被害

本研究では、地震直後に防災拠点建物の安全性を即座に判定し、その結果を建物の防災担当者に通知するシステムを開発する。このシステムの利用により、建物が地震後に継続使用できるかなどを判断することができる。

このシステムは、LAN 地震計を防災拠点建物に設置し、豊橋技術科学大学で開発された解析ツール「建物の立体地震応答プログラム STERA\_3D」を用いて、観測された地震動記録から自動的に診断を実施するものである。図 1.2 にリアルタイム耐震診断システムのイメージを示す。また、図 1.3 には、地震発生後の診断の流れを示す。地震発生後、2 分程度で建物簡易診断を行い、必要に応じて数時間かけて建物精密診断を行う。

本システムの課題として、診断のための建物モデルは、図面をもとに作成しており、実際の建物の性状を正しく反映するようにチューニングが必要である点が挙げられる。また、現在稼働している診断システムは、豊橋技術科学大学キャンパス内のコンピュータが管理・運営する体制となっているため、本学が何らかの影響で停電しているときに地震が発生した場合や、地震により本学が被災したときはシステムが稼働しなくなる問題がある。

そこで、本研究では、最初に観測記録に基づいた建物解析パラメータの最適化手法について検討し、次に、クラウドコンピューティングを用いたリアルタイム耐震診断システムの開発について報告する。

以下の概要版では、最適化手法について検討した豊橋市役所東館、西館および豊橋市中消防署のうち、豊橋市中消防署に関する結果を報告する。

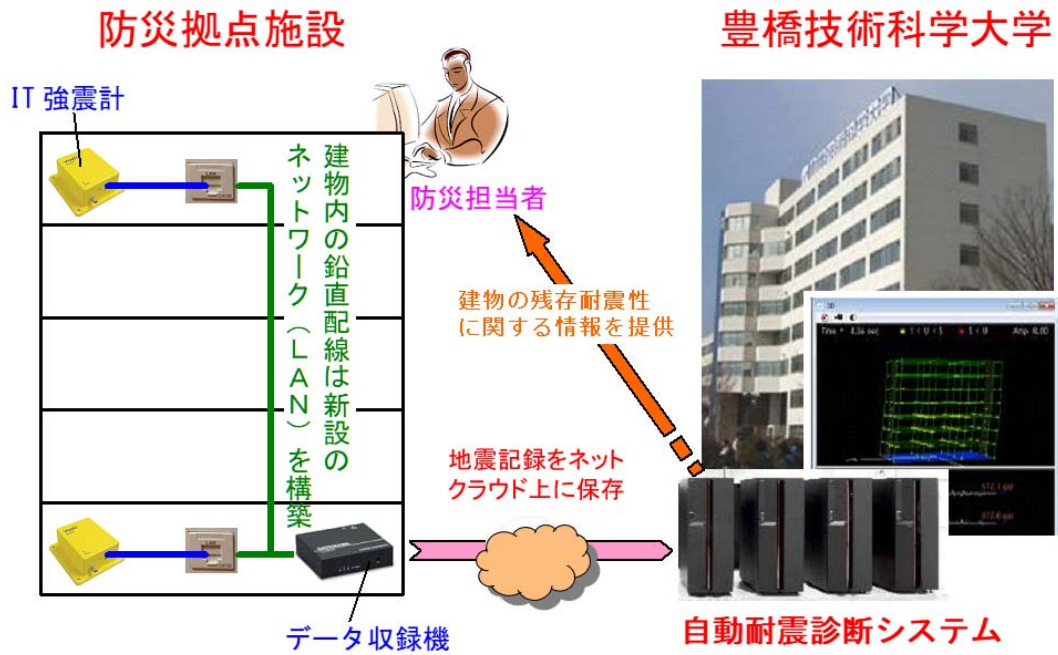


図 1.2 リアルタイム耐震診断システムのイメージ

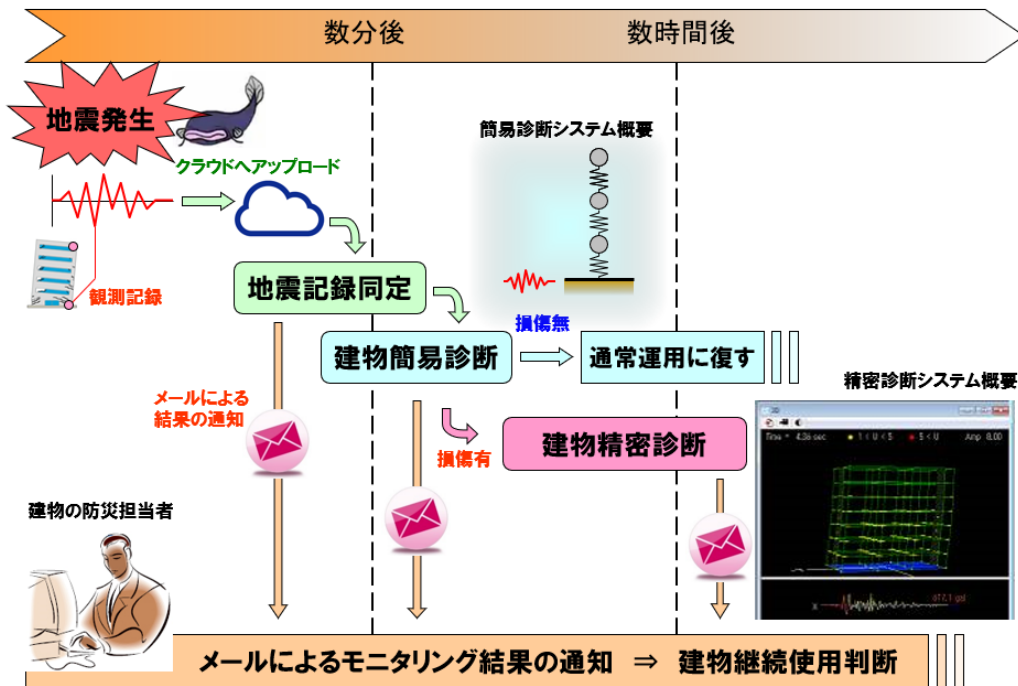


図 1.3 リアルタイム耐震診断の流れ

## 2. 防災拠点建物の解析モデルの作成と LAN 地震計の設置

### 2. 1 建物概要

#### 2. 1. 1 豊橋市中消防署

本建物は、地上7階（塔屋1階）、地下1階、軒高30.885mの消防署である。

平面系は1階X通り方向が38m、Y通り方向は21mの長方形である。スリットの入った雑壁が多く存在していることが特徴的である。

以下に建物概要を示す。また、図 2.1.1 に周辺地図および敷地図、図 2.1.2～図 2.1.4 に基準階構造伏図および北立面図、外観写真を示す。

名称	豊橋市中消防署
住所	豊橋市東松山町 23
主要用途	消防署庁舎・市民館
建築面積	997.582m <sup>2</sup>
建蔽率	80%
延床面積	6741.326m <sup>2</sup>
容積率	260.86%
階数	地上7階（塔屋1階）、地下1階
軒の高さ	GL+30.885m
最高の高さ	GL+35.16m
構造種別	地上 柱：鉄骨鉄筋コンクリート造 梁：鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造 地下 鉄骨鉄筋コンクリート造 基礎 杭基礎

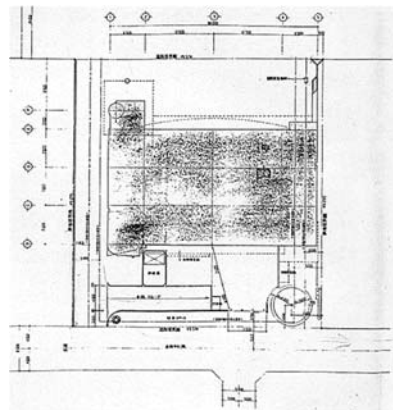


図 2.1.1 周辺地図および配置図



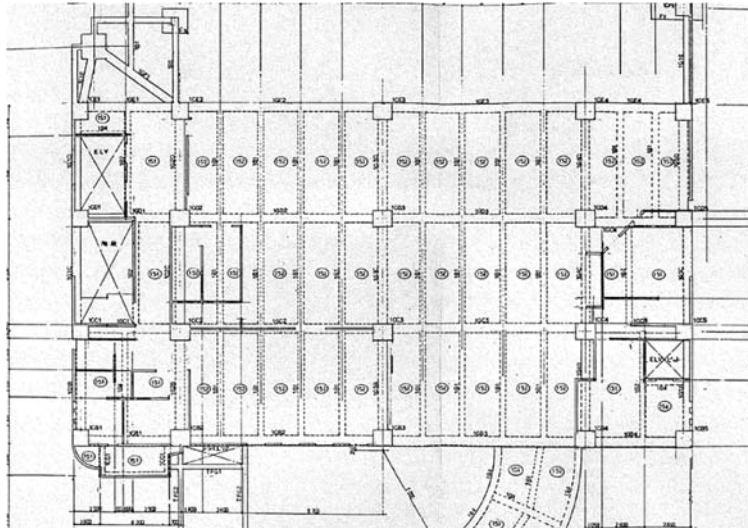


図 2.1.2 基準階構造伏図(設計図書より抜粋)

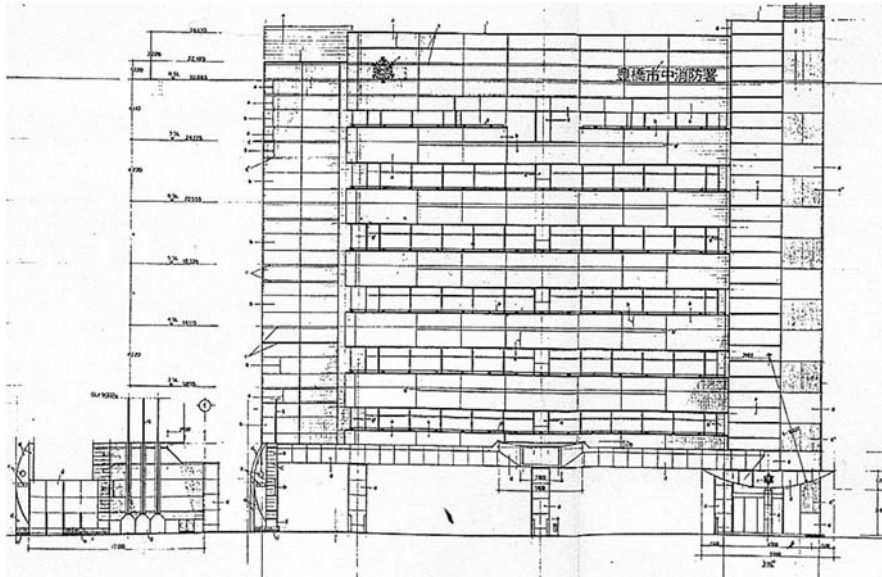


図 2.1.3 北立面図(設計図書より抜粋)



(a)北側



(b)北東側

図 2.1.4 中消防署の建物外観

## 2. 2 立体骨組モデルの作成

### 2. 2. 1 豊橋市中消防署

上部構造は、柱、梁、耐震壁の寸法や許容応力度など設計図書をもとに特性選択に入力し、立体骨組モデルを作成する（図 2.2.1, 図 2.2.2）。1 次固有周期は X 方向 0.758 秒, Y 方向 0.718 秒, 2 次固有周期は X 方向 0.282 秒, Y 方向 0.267 秒となった。

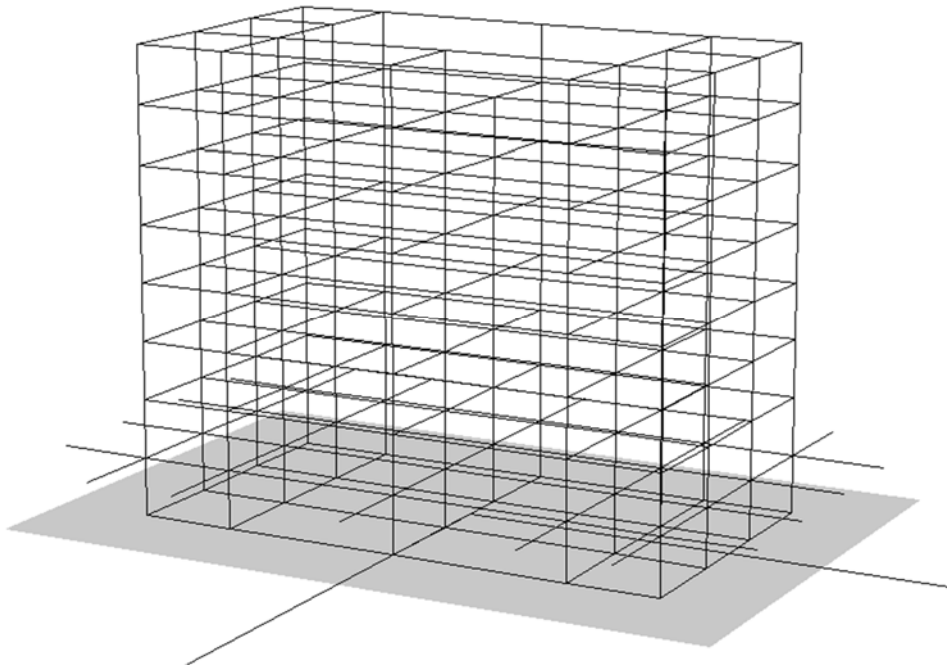


図 2.2.1 中消防署 立体骨組モデルの外観

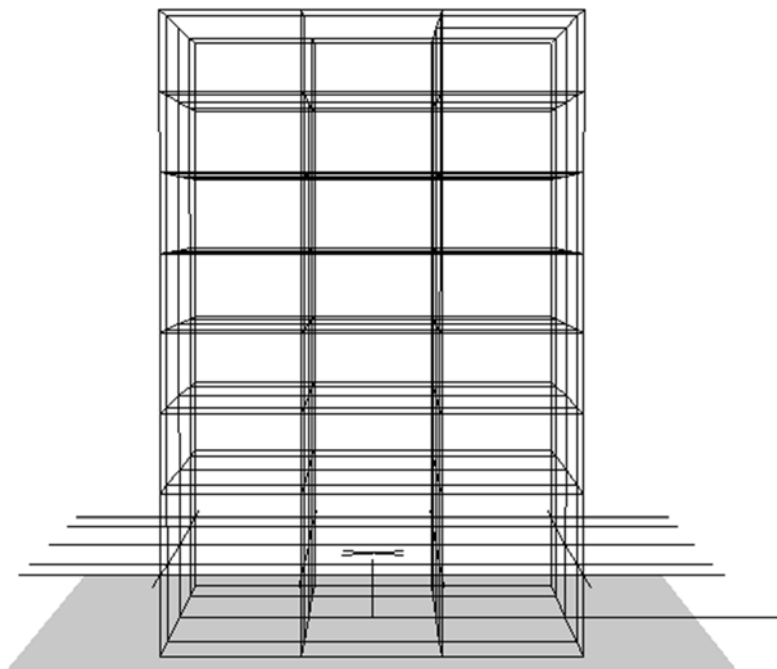


図 2.2.2 中消防署 東側から見た立体骨組モデル

## 2. 3 多質点系モデルの作成

### 2. 3. 1 豊橋市中消防署

リアルタイム耐震診断システムの1次診断に用いる多質点系モデルの作成を行う。多質点系モデルの作成には2.1節の立体骨組モデルの静的漸増载荷解析に基づき、骨格曲線を決定した。今回の応力分布にはAi分布を使用し、各階階高の1/50まで载荷した。

豊橋市中消防署の多質点系モデルの復元力特性には剛性低下型トリリニアである武田モデルを採用した。図2.3.1～図2.3.2に各階ごとの耐力曲線とそれを基に作成したトリリニアモデルの比較を示す。

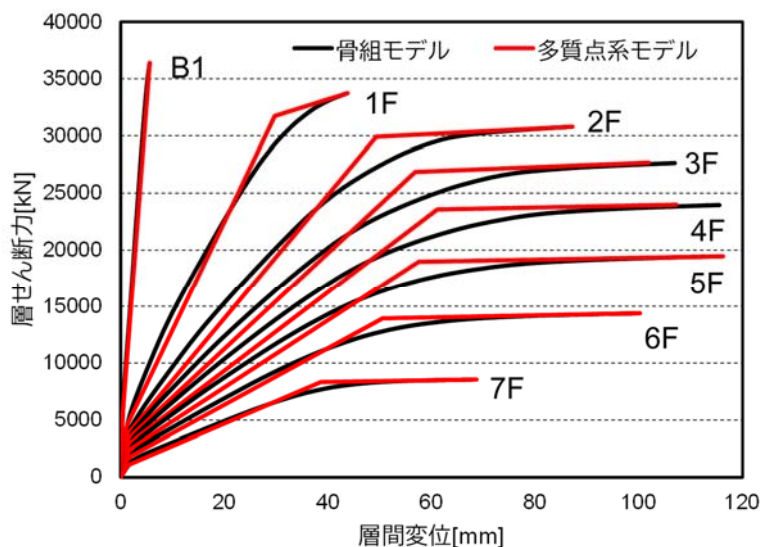


図 2.3.1 東西方向の耐力曲線とトリリニアモデル

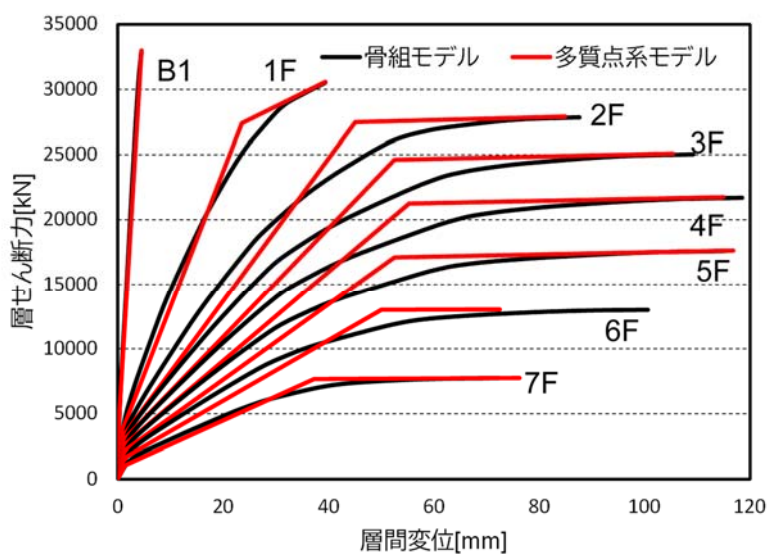


図 2.3.2 南北方向の耐力曲線とトリリニアモデル



## 2. 4 LAN 地震計の設置

### 2. 4. 1 豊橋市中消防署

中消防署では、地下1階1点、地上7階1点にLAN地震計を設置した。LAN地震計の方角はX方向に東西方向、Y方向に南北方向、Z方向に上下方向とした。計測データのチャンネル名を表2.4.1に示す。また、平面におけるLAN地震計設置位置を図2.4.1～図2.4.2、立面におけるLAN地震計設置位置を図2.4.3に示す。

表 2.4.1 チャンネル番号設定

LAN 地震計	計測階	チャンネル		
		X 方向 (東西)	Y 方向 (南北)	Z 方向 (上下)
B1	地下1階	B1_EW	B1_NS	B1_UD
7F	地上7階	7F_EW	7F_NS	7F_UD

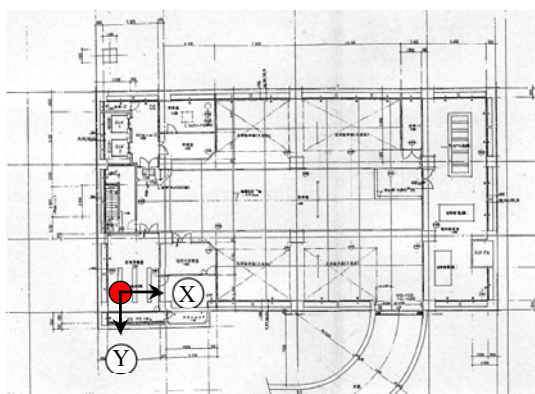


図 2.4.1 LAN 地震計設置位置 (地下1階)

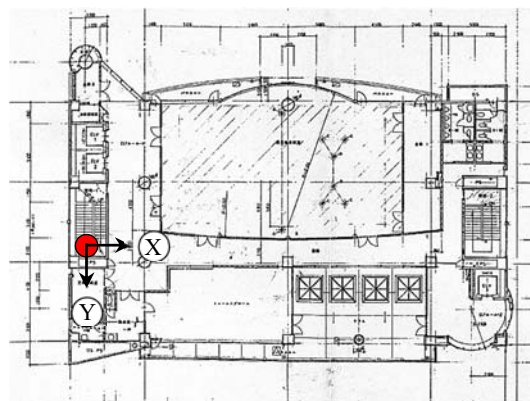


図 2.4.2 LAN 地震計設置位置 (地上7階)

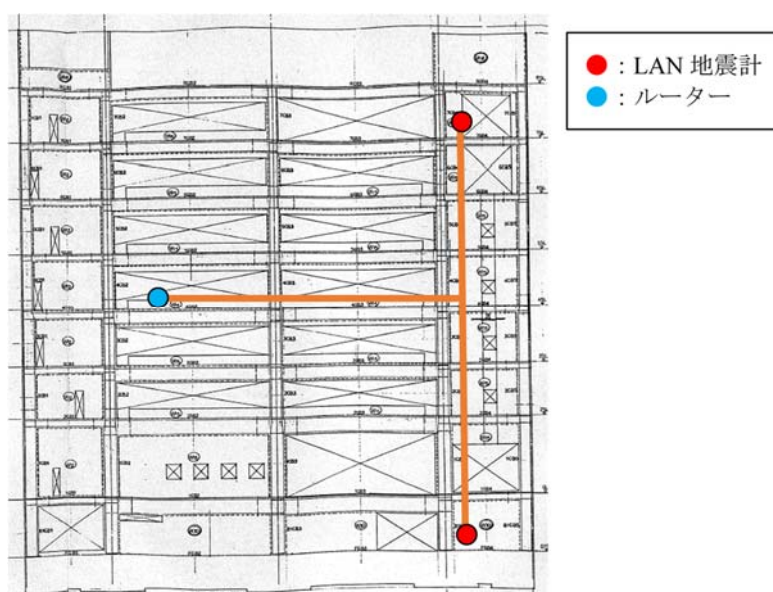


図 2.4.3 LAN 地震計設置位置 (東西方向軸組図)

## 2. 5 LAN 地震計による実地震観測

### 2. 5. 1 豊橋市中消防署

LAN 地震計を設置した後、実際に地震が発生した。そのため、LAN 地震計から実地震によるデータを収集することができた。豊橋市中消防署では 2017 年から強震観測を行っており、現在まで 18 の地震データを手に入れた。例として最も大きい地震であった 2020 年 9 月 27 日（以下、静岡県西部地震と記す）の気象庁のデータベースを図 2.5.1 に示す。その時の気象庁による発表では豊橋市の揺れの強さは震度 2 であった。図 2.5.2～図 2.5.3 に豊橋市中消防署の観測波形を示す。

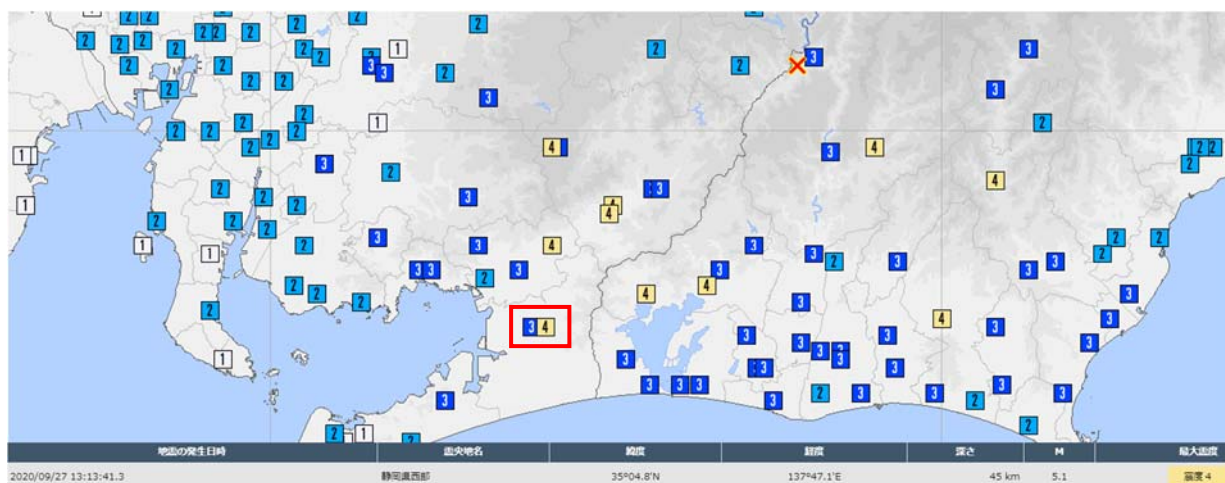


図 2.5.1 静岡県西部地震時の気象庁のデータベース（各地の震度）

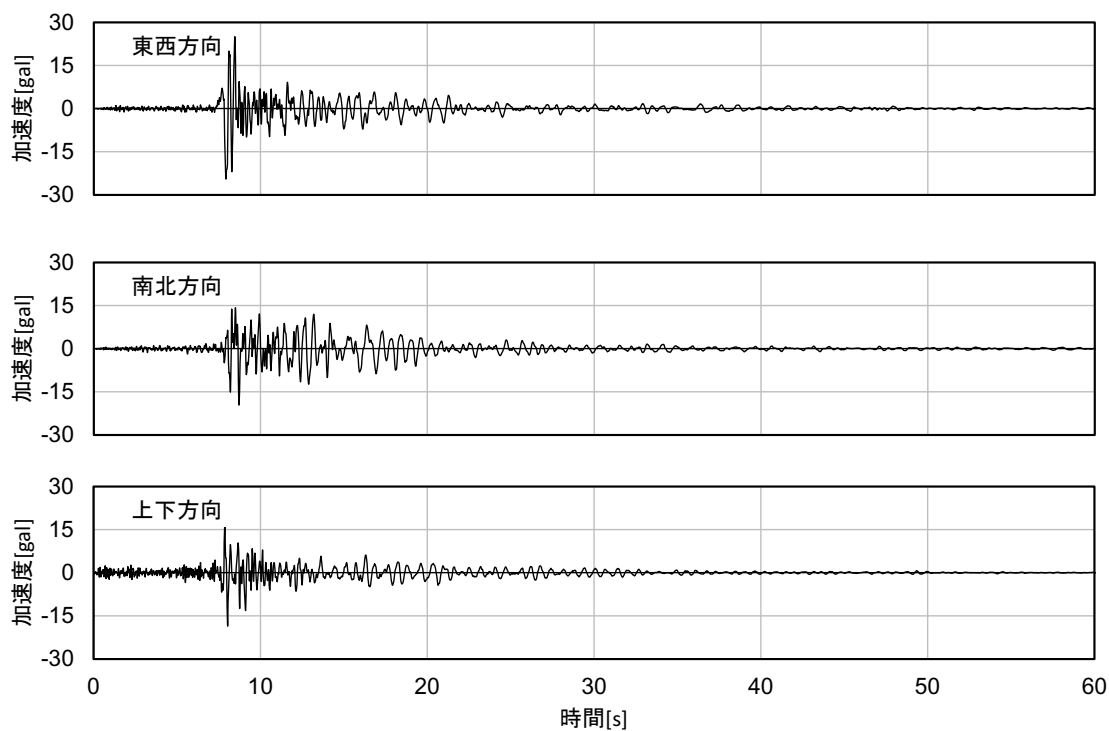


図 2.5.2 静岡県西部地震（地下 1 階）

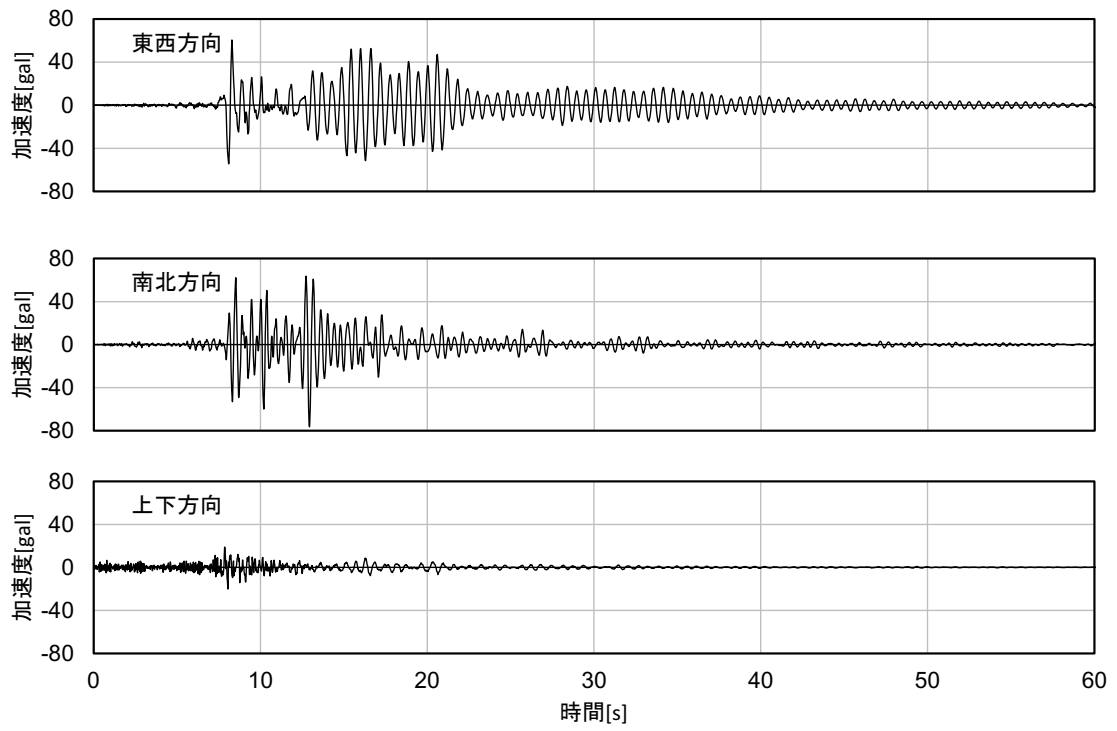


図 2.5.3 静岡県西部地震 (地上 7 階)

### 3. 解析パラメータの最適化手法

#### 3. 1 目的関数の定義

本研究では対象建物に設置した LAN 地震計から得られた観測記録波形および多質点系モデルを使用し、解析パラメータの最適化を行う。図 3.1.1 に 階建ての建物における例を示す。多質点系モデルは主に質量、初期剛性、減衰定数の 3 つのパラメータからなるが、本研究では質量  $m$  および減衰定数  $h$  の値は固定し、初期剛性  $k$  のみを最適化する。図中の星は、LAN 地震計の設置位置を表し、1 つは基礎部に設置されている。もう 1 つはターゲット階となる  $n$  階の床面に設置されているため、多質点系モデル上では  $(n-1)$  階と対応している。

多質点系モデルのパラメータと基礎部で記録された波形を入力加速度としてターゲット階での加速度応答（図中の simulated wave）を計算し、観測記録（図中の target wave）と比較する。したがって、目的関数は以下のように、ターゲット階での観測記録波形と解析により得られた加速度応答波形との誤差として定義される。

$$error = \frac{\sqrt{\sum_{data} (Acceleration_{target} - Acceleration_{simulated})^2}}{Number} \quad (3.1)$$

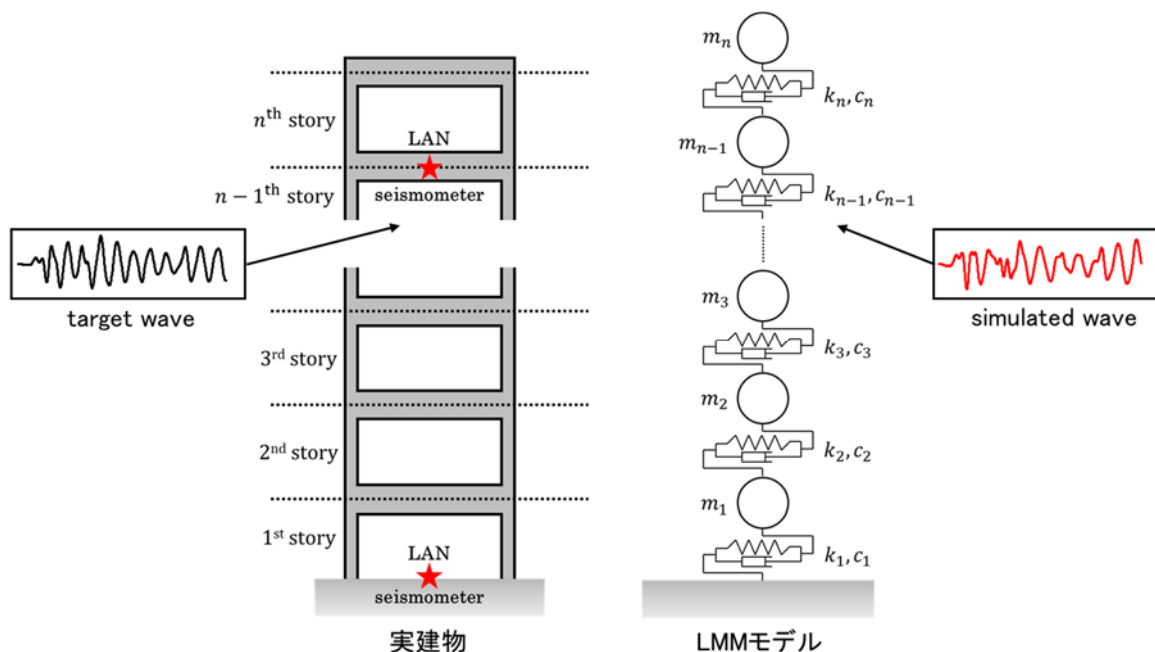


図 3.1.1 最適化問題の目的関数

### 3. 2 応答曲面法

応答曲面法は、可能な限り少ないサンプルを用いて、最適値を求めるための数字・統計学的手法である。応答曲面法では、応答量  $Y$  を 個の設計変数  $X_i$  の 2 次多項式関数として次式のように表す。

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^N b_{ii} X_i^2 \quad (3.2)$$

ここで、 $X$  は基準化された入力変数、 $b$  は推定される未知の係数、 $N$  は入力変数の個数である。また、入力変数  $X$  は以下のように表すことができる。

$$X_i = \frac{R_i - M_i}{L_i} \quad (3.3)$$

$$L_i = \frac{(R_{i,\max} - R_{i,\min})}{2} \quad (3.4)$$

$$M_i = \frac{(R_{i,\max} + R_{i,\min})}{2} \quad (3.5)$$

ここで、 $L$  は変数の範囲の半分、 $M$  は変数の範囲の中心点である。

応答量  $Y$  を求めるためのサンプルは無数に存在するが、本研究ではその計画には中心複合計画を用いる。中心複合計画の変数は以下の通りとする。

- 1) 各変数の 2 水準の因子  $X_i = -1, 1$
- 2) 各軸上の 2 点  $X_i = -\alpha, \alpha$
- 3) 中心点

中心複合計画の計画点の個数は  $N = 2^k + 2k + 1$  で表すことができる。例として、図 3.2.1 にパラメータ  $k$  の個数が 2 および 3 の場合の計画点を示す。

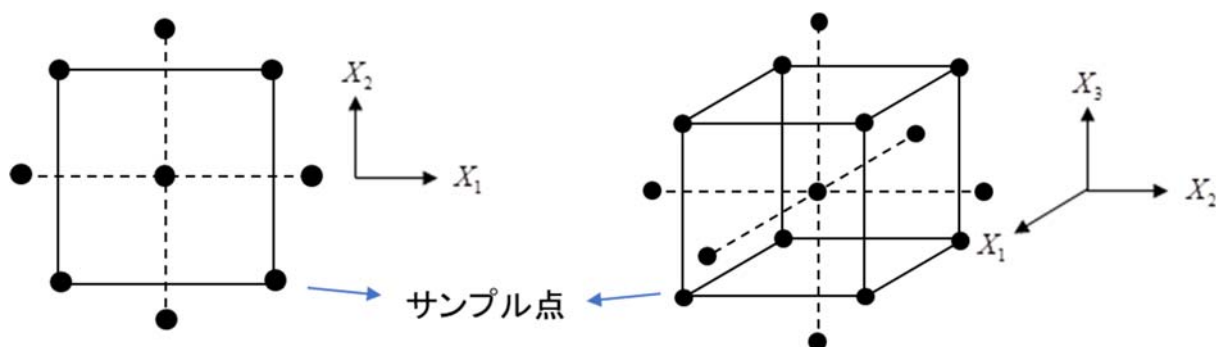


図 3.2.1 中心複合計画

式(3.2)は式(3.6)のように行列を用いた式で表すことができる。

$$\{Y\} = [X]\{b\} \quad (3.6)$$

ここで、式(3.6)の行列の要素は以下のように表す。

$$\{Y\} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}^T \quad (3.7)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & {}_1X_1 & \cdots & {}_1X_N & {}_1X_{11}X_2 & \cdots & {}_1X_{N-11}X_N & {}_1X_1^2 & \cdots & {}_1X_N^2 \\ 1 & {}_2X_1 & \cdots & {}_2X_N & {}_2X_{12}X_2 & \cdots & {}_2X_{N-12}X_N & {}_2X_1^2 & \cdots & {}_2X_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & {}_M X_1 & \cdots & {}_M X_N & {}_M X_{1M} X_2 & \cdots & {}_M X_{N-1M} X_N & {}_M X_1^2 & \cdots & {}_M X_N^2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\{b\} = \{b_0, b_1, \dots, b_N, b_{1,2}, \dots, b_{N-1,N}, b_{1,1}, \dots, b_{N,N}\}^T \quad (3.9)$$

パラメータベクトル $\{b\}$ は式(3.10)によって求められる。

$$\{b\} = [X]^+ \{Y\} \quad (3.10)$$

ここで $[X]^+$ は $[X]$ の疑似逆行列である。

$[X]$ が長方形行列( $N \times m$ )の場合、その特異値分解は、

$$[X] = [U][\Sigma][V]^T \quad (3.11)$$

ここで $[U]$ ( $N \times N$ )と $[V]$ ( $m \times m$ )は直交行列である。 $[\Sigma]$ は対角成分に特異値を持つ長方形行列( $N \times m$ )である。

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_m \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

したがって $[X]$ の疑似逆行列 $[X]^+$ は式(3.12)で求められる。

$$[X]^+ = [V][\Sigma]^+ [U]^T \quad (3.13)$$

ここで $[\Sigma]^+$ は次のような長方形行列( $m \times N$ )となる。



$$[\Sigma]^+ = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \lambda_1 & & & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\lambda_m} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

応答曲面から、応答曲面を最小化するための変数  $X_1, X_2, \dots, X_N$  は次の式で得られる。

$$\frac{\partial Y}{\partial X_i} = b_i + \sum_{1 \leq i < j} b_{ij} X_j + 2b_{ii} X_i = 0, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

マトリクス形式では、

$$\begin{Bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ \vdots \\ -b_{N-1} \\ -b_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2b_{11} & b_{12} & \cdots & \cdots & b_{1N} \\ & 2b_{22} & \ddots & & b_{2N} \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & \ddots & b_{N-1,N} \\ \text{sym.} & & & & 2b_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{N-1} \\ X_N \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

もしくは、

$$\{-b\} = [B]\{X\} \quad (3.17)$$

と表す。したがって、最適変数は、 $[B]$  の疑似逆行列を用いて求められる。

$$\{X\} = [B]^+ \{-b\} \quad (3.18)$$

図 3.2.2 に、 $N=2$  の場合の応答曲面の概略図を示す。本研究では、応答量  $Y$  は式(3.1)で表される誤差、設計変数  $R_1, R_2, \dots, R_N$  は、最適化する構造パラメーター（剛性  $k_1, k_2, \dots, k_N$ ）である

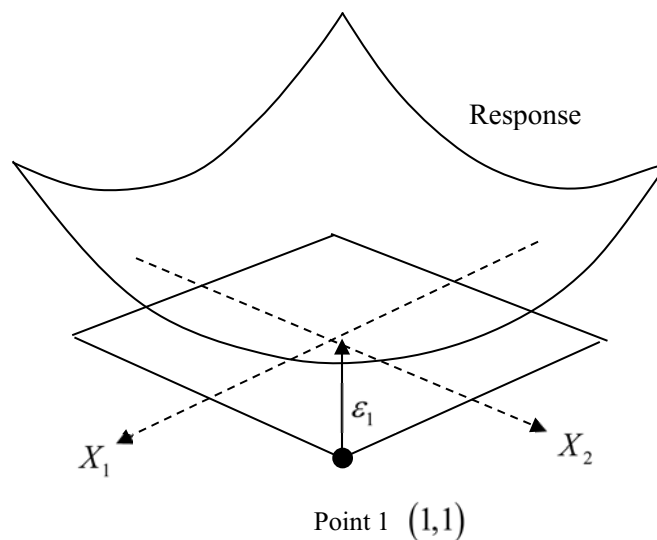


図 3.2.2 応答曲面の概念図

応答曲面法を用いて解析モデルの剛性を最適化する手順を以下に示す。また、その概念図を図 3.2.3 に示す。

**【STEP1】**

LAN 地震計で観測された基礎部と上階の加速度波形から伝達関数を計算し、1 次の卓越周期  $T_{rec}$  を算出する。卓越周期と解析モデルの固有周期  $T_a$  から下式に示す剛性を補正する係数  $\alpha$  を算出する。

$$\alpha = \left( \frac{T_a}{T_{rec}} \right)^2 \tag{3.19}$$

式(3.19)の補正係数を各層の剛性に乘じ、解析モデルの固有周期と観測記録の卓越周期を一致させる。

**【STEP2】**

STEP1 で補正した剛性を変数の範囲の中心とし、応答曲面法から解析モデルの剛性を最適化する。

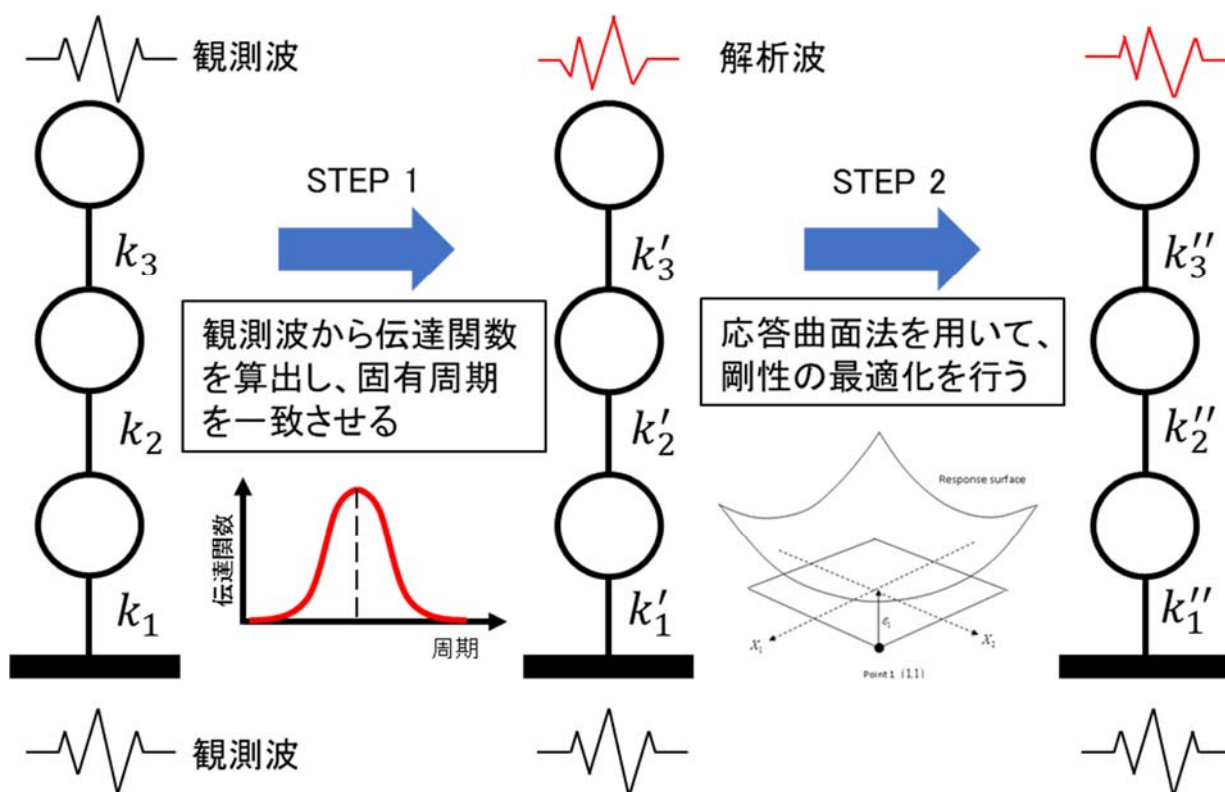


図 3.2.3 応答曲面法を用いた最適化の概念図

図 3.2.4 に応答曲面法による最適値の探索フローを示す。STEP1 で補正した剛性を中心に広い範囲を設定し、解析を行う。これにより得られた誤差が許容値以下でなければ、範囲を狭めて再び解析を行う。ここで、本研究では許容値を STEP1 で求めた剛性の解析モデルにより得られた加速度応答波形と上階の観測波形との誤差とする。最適値が範囲外ならば範囲を移動させ、再び解析を行う。以上の処理を誤差が許容値以下になるか、指定回数に達するまで繰り返し実行する。

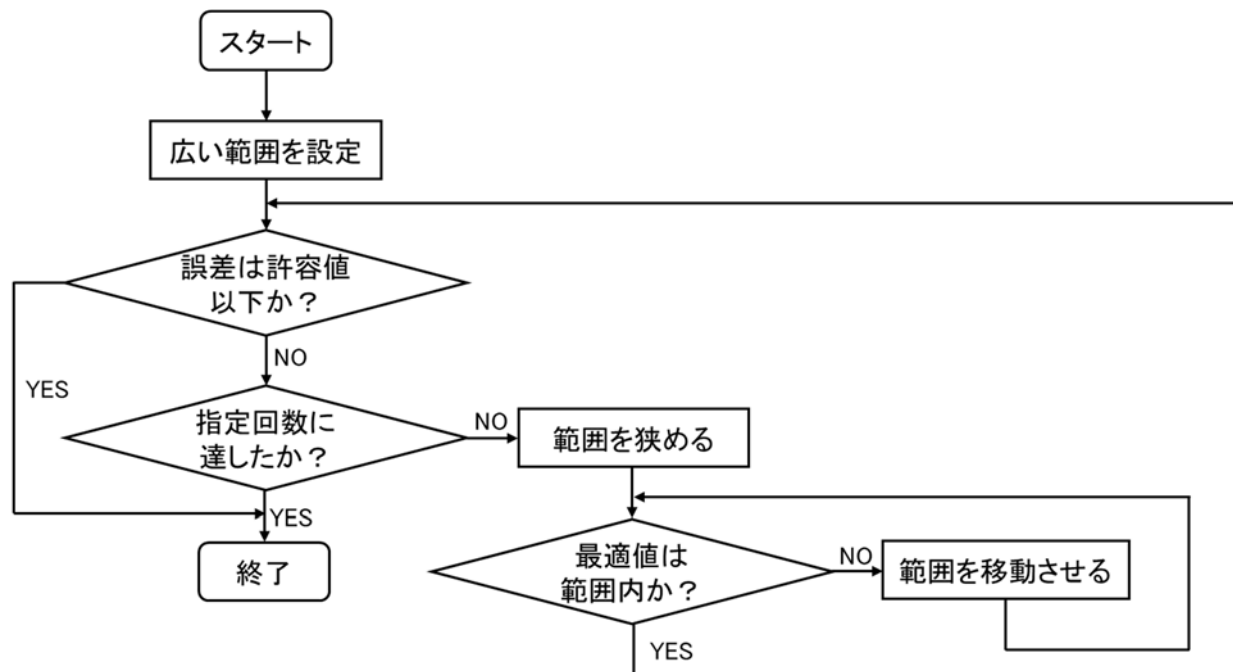


図 3.2.4 応答曲面法による最適値の探索フロー

### 3. 3 ベイズ最適化

ベイズ最適化は関数の最小値を逐次におよび確率的に探索する機械学習的手法である。本研究では、シェフィールド大学の機械学習グループによって開発されたオープンソースである Python プログラムの GPyOpt モジュールを使用する。ベイズ最適化では、定義された目的関数を最小化する最適なパラメータ値を迅速かつ高精度で求めることができる。

ベイズ最適化の解析手順を以下に記す。また、図 3.3.1 にベイズ最適化の実行プロセスを示す。はじめに、1 つのサンプル点における加速度応答の誤差を式(3.1)で求める。続いて、ガウス過程 (Gaussian Process) を実行し、関数の平均および分散を予測する。ガウス過程で求めた平均、分散を用いて獲得関数 (Acquisition function) を最適化し、次の探索点を求める。得られた探索点の誤差を計算し、評価値を得る。これにより得た探索点と評価値を保存し、再びガウス過程を実行する。

以上の動作を指定回数に達するまで実行し、最適値を求める。図 3.3.1 にベイズ最適化のフローチャート図を示す。

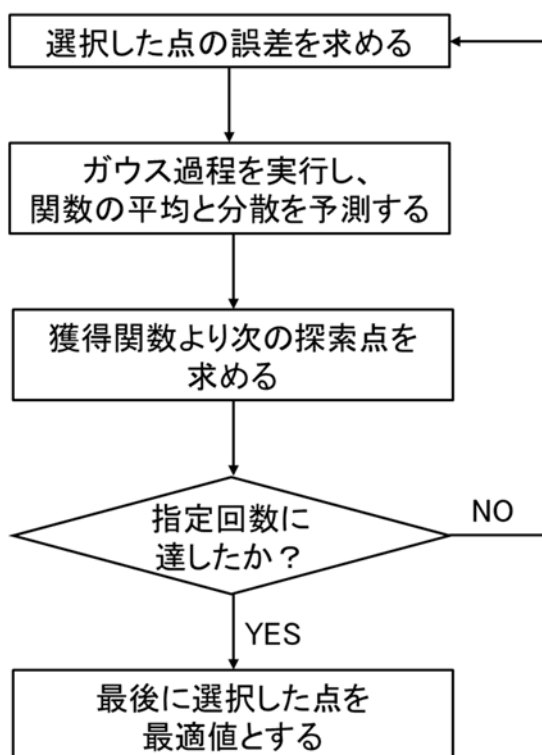


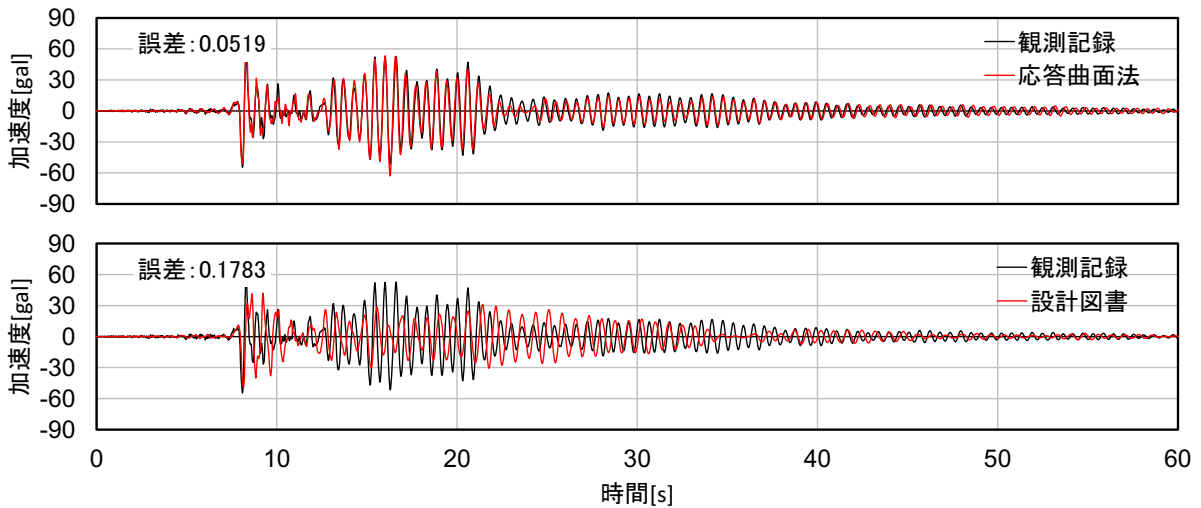
図 3.3.1 ベイズ最適化のフローチャート

#### 4. モニタリング建物の剛性の最適化

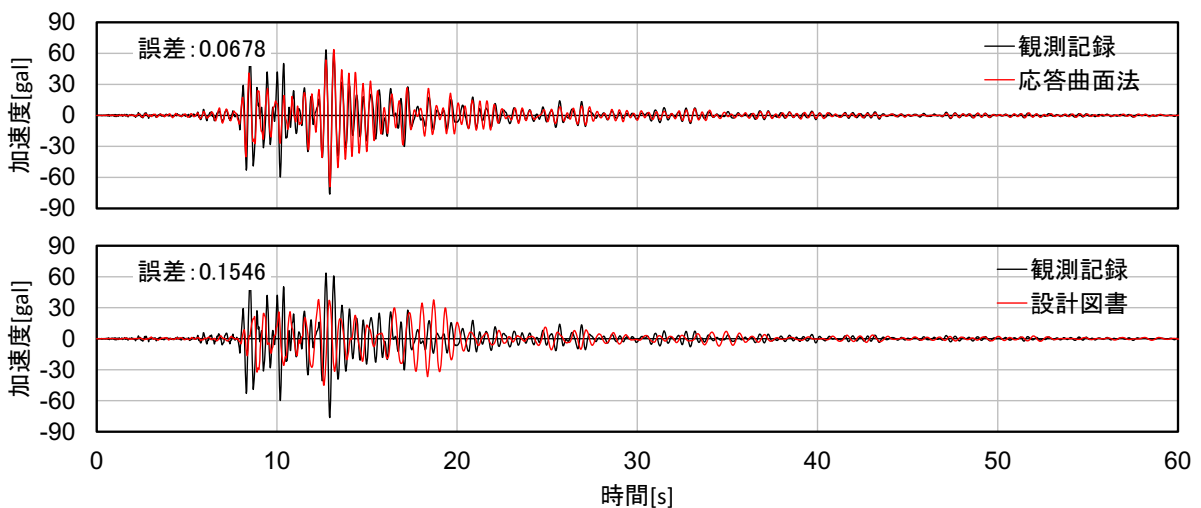
##### 4. 1. 豊橋市中消防署

##### 4. 1. 1 応答曲面法

同様に豊橋市中消防署の解析モデルの最適化を行った。例として、静岡県西部地震の解析結果と観測記録との比較および誤差を示す(図4.1.1)。両方向において、最適化モデルの加速度応答波形は観測記録と概ね一致しており、誤差は小さくなっている。



東西方向



南北方向

図 4.1.1 観測記録と最適化モデルの比較 (上)、観測記録と設計図書モデルの比較 (下)

過去の全地震データより得られた最適パラメータの分析を行う。図 4.1.2～図 4.1.3 に各階の最適化した初期剛性の値と最大加速度の関係図を示す。

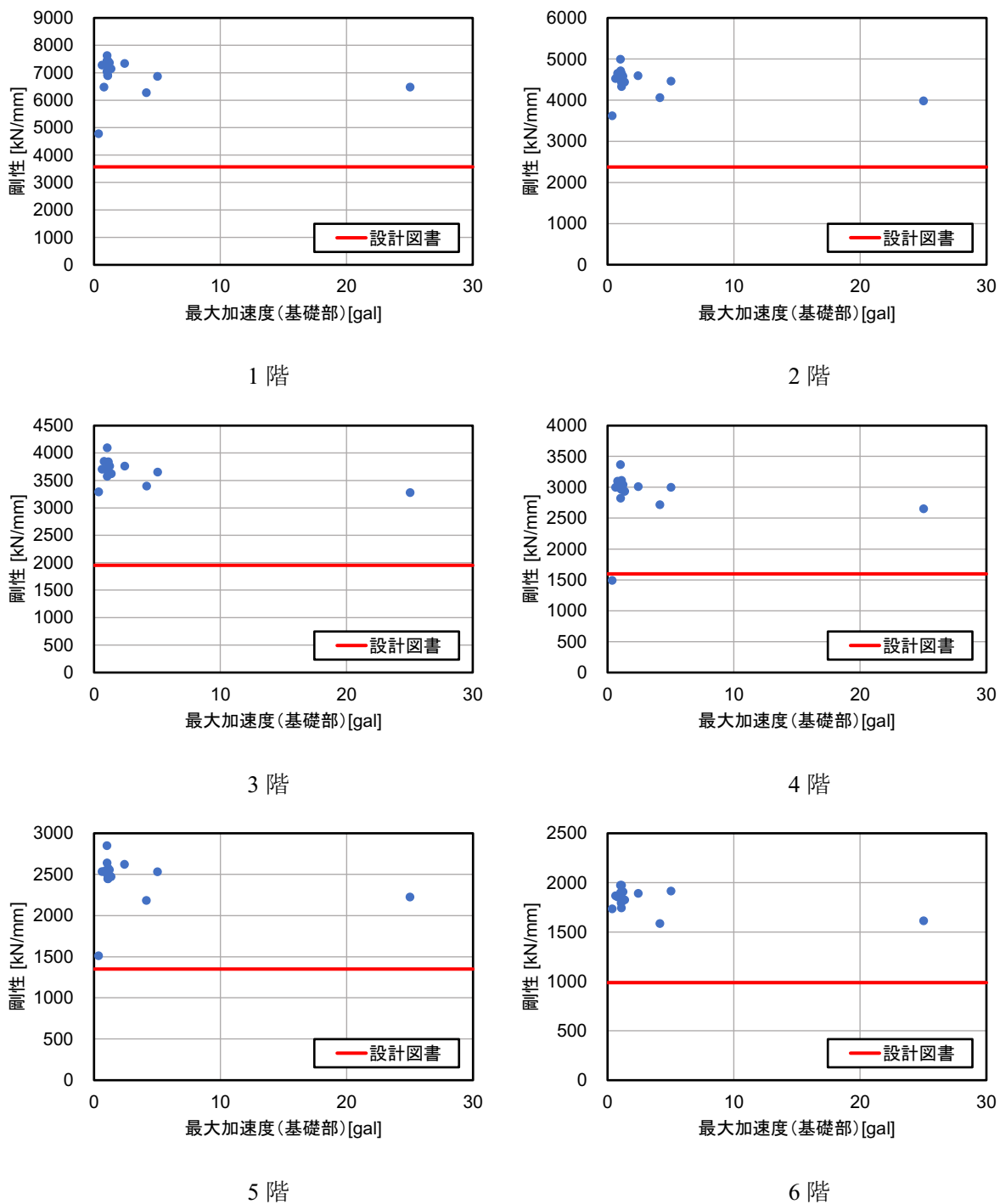
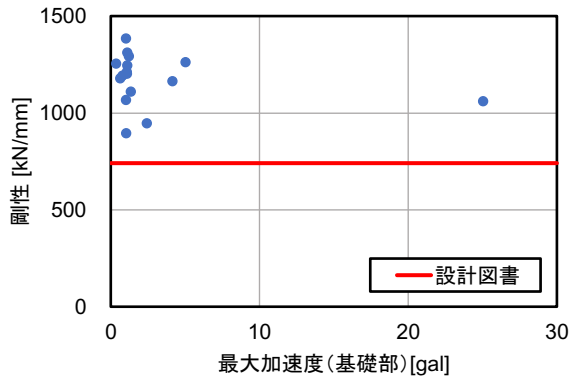


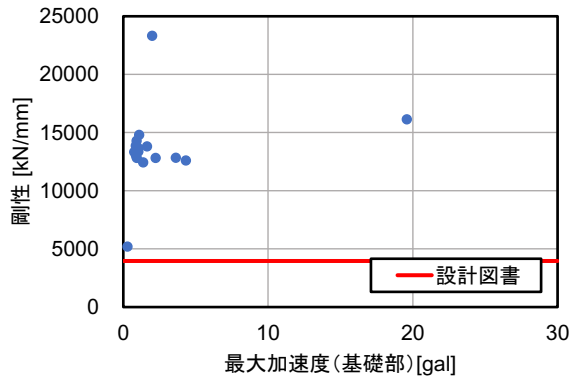
図 4.1.2 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



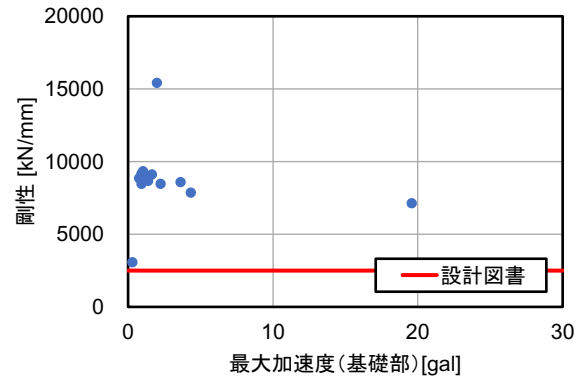


7階

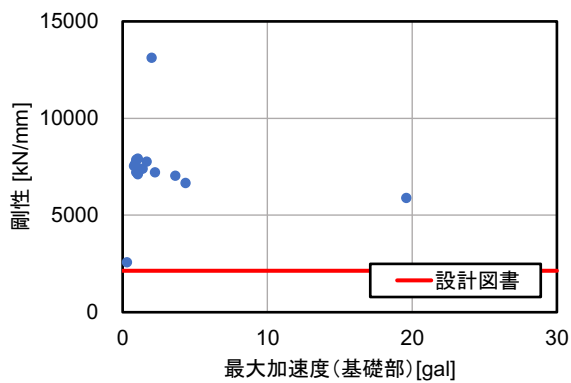
図 4.1.2 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



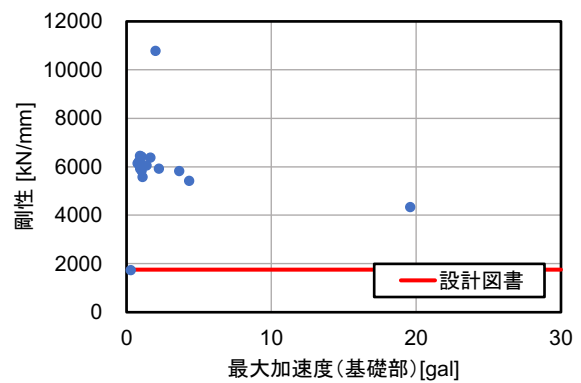
1階



2階

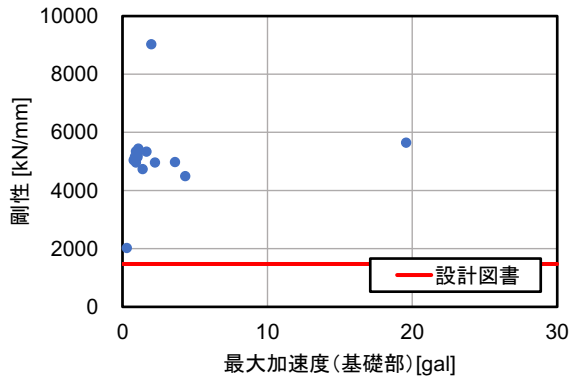


3階

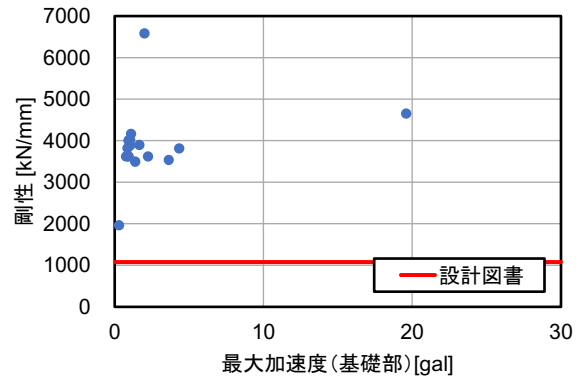


4階

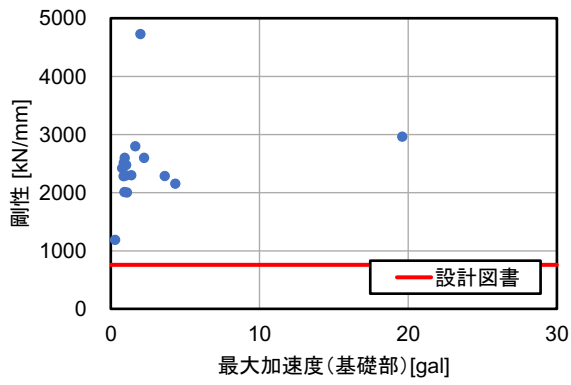
図 4.1.3 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



5階



6階



7階

図 4.1.3 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)

図 4.1.4 に全地震データから算出した最適化モデルの固有周期の正規分布と 2.3 節で作成した多質点系モデルの固有周期（設計固有周期）および微動記録の固有周期の比較を示す。

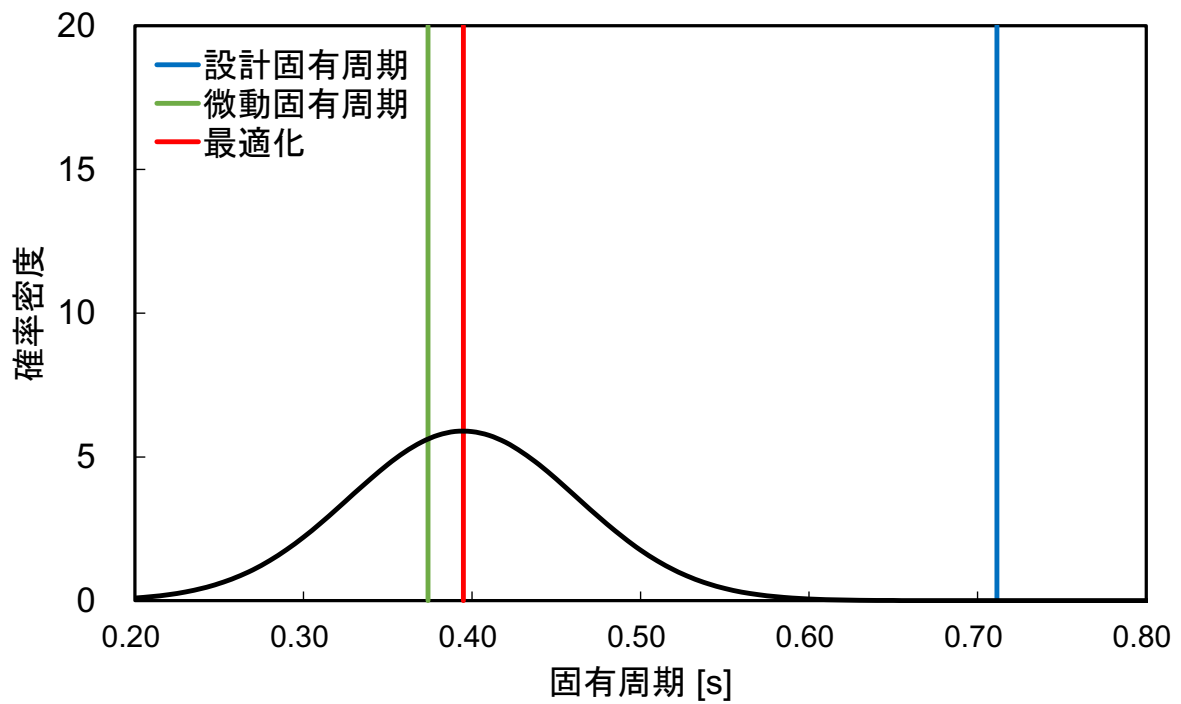
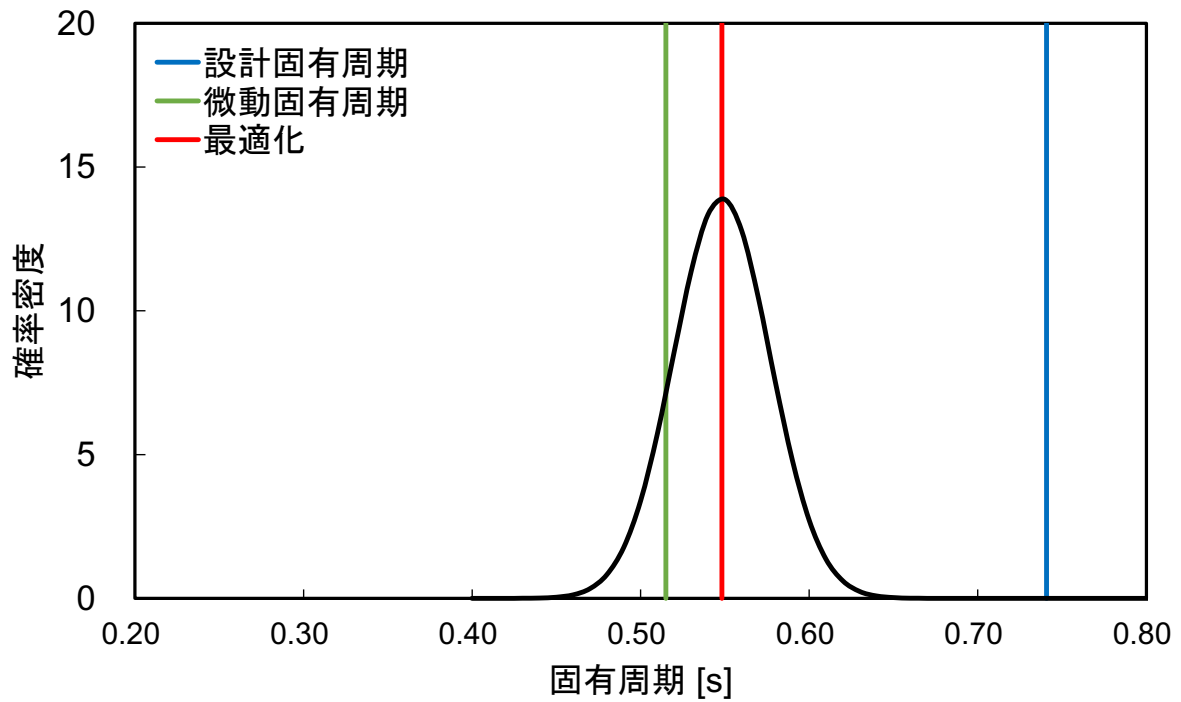
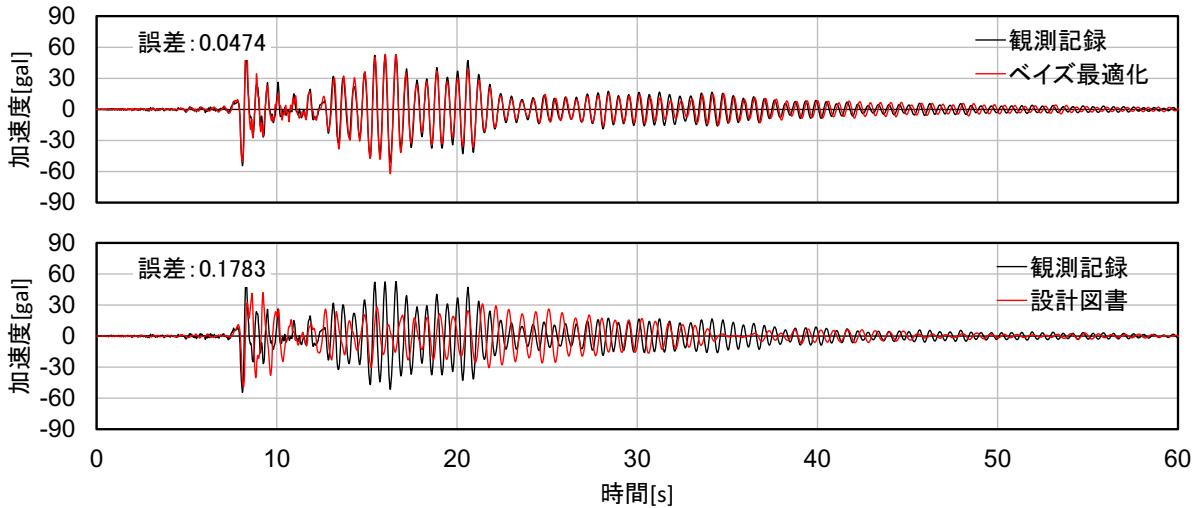


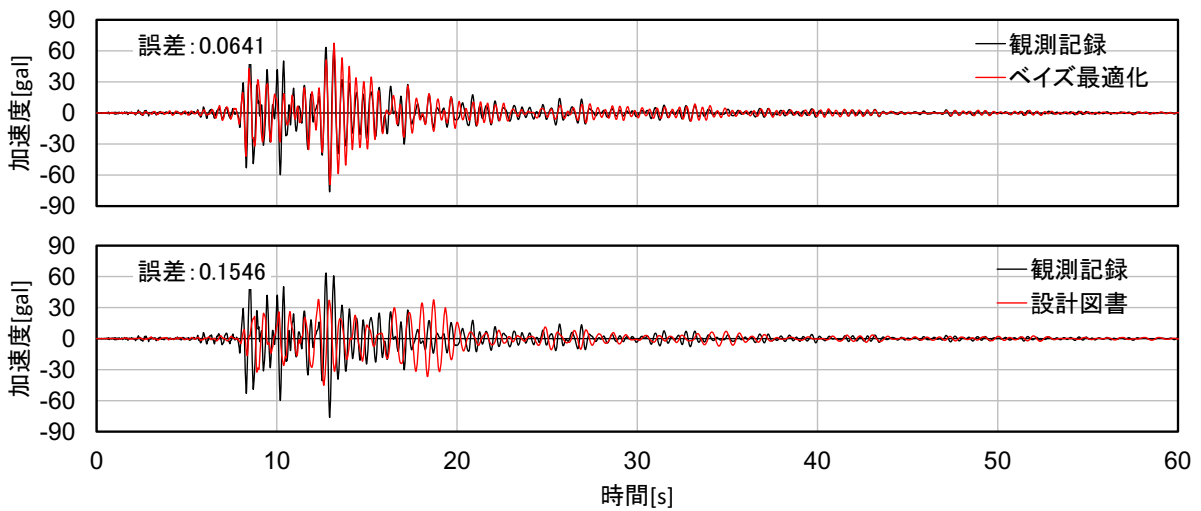
図 4.1.4 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

#### 4. 1. 2 ベイズ最適化

図 4.1.5 に観測記録とベイズ最適化による最適化モデルとの比較を示す。最適化モデルの加速度応答波形は観測記録と一致しており、誤差においても応答曲面法より良い精度となった。

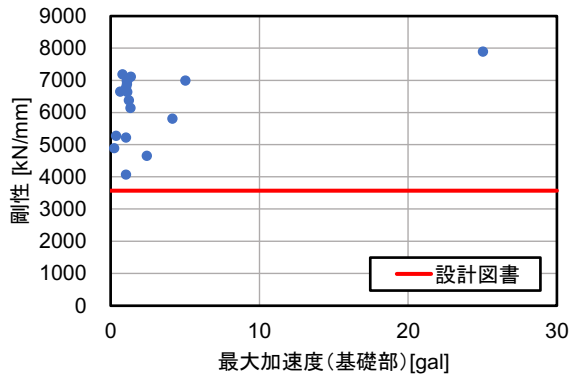


東西方向

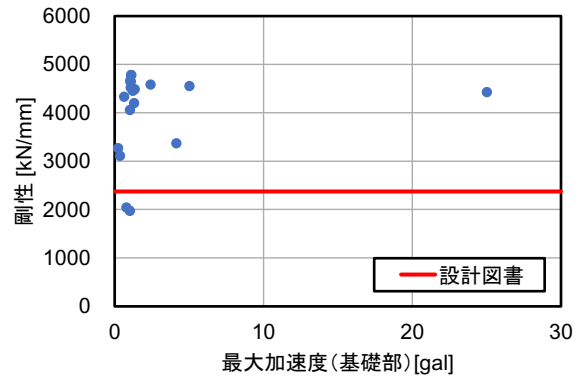


南北方向

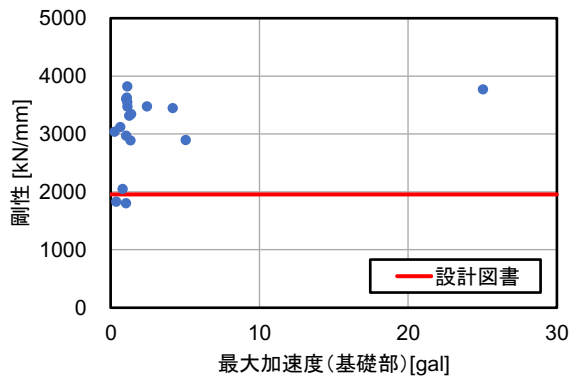
図 4.1.5 観測記録と最適化モデルの比較（上）、観測記録と設計図書モデルの比較（下）



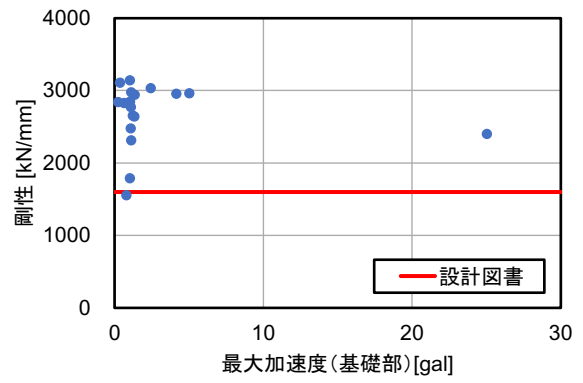
1 階



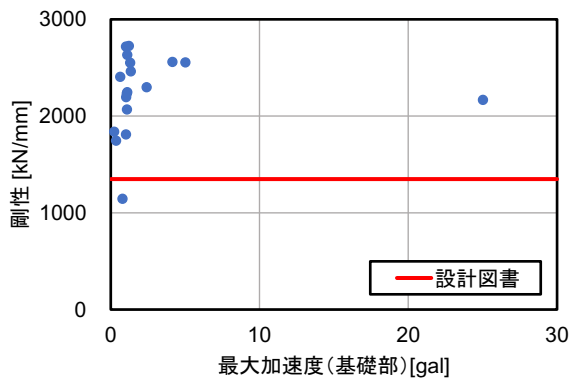
2 階



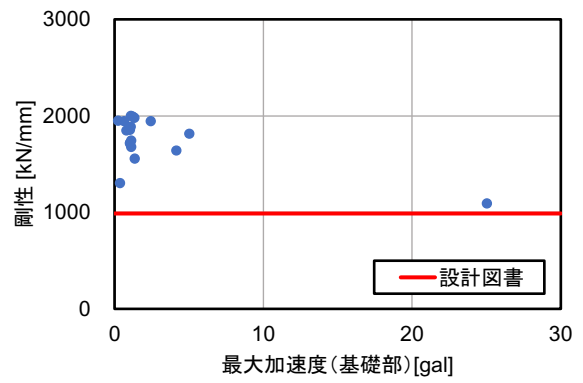
3 階



4 階

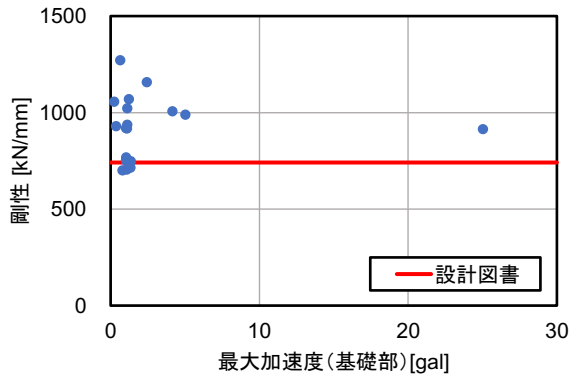


5 階



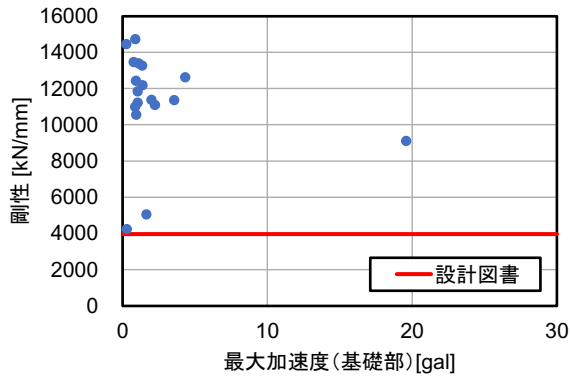
6 階

図 4.1.6 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)

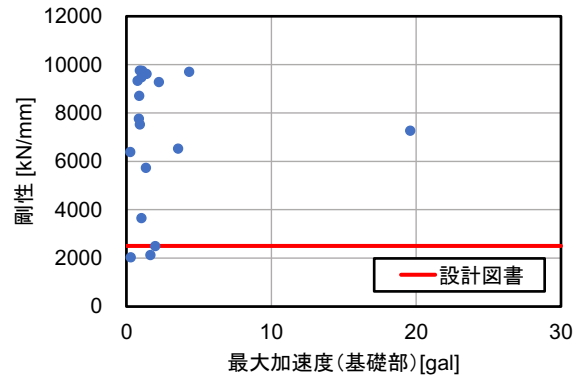


7階

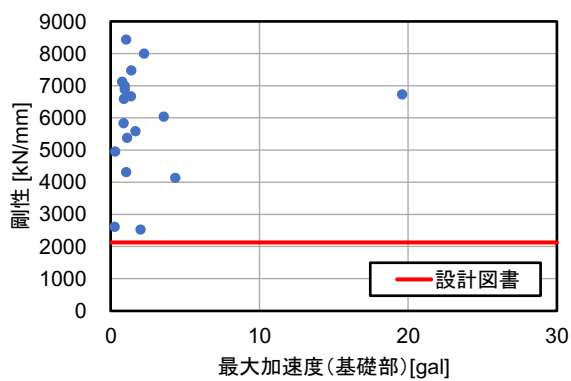
図 4.1.6 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



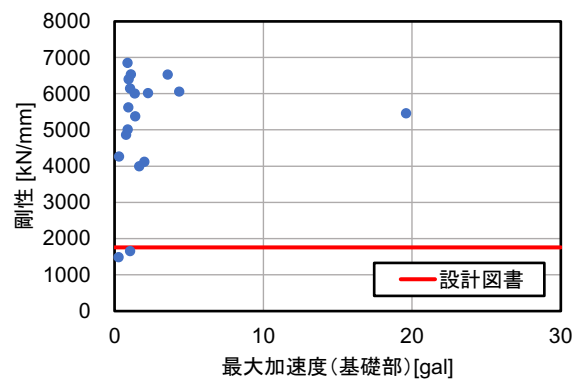
1階



2階



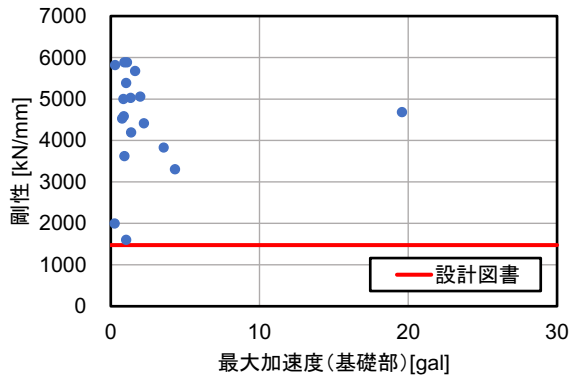
3階



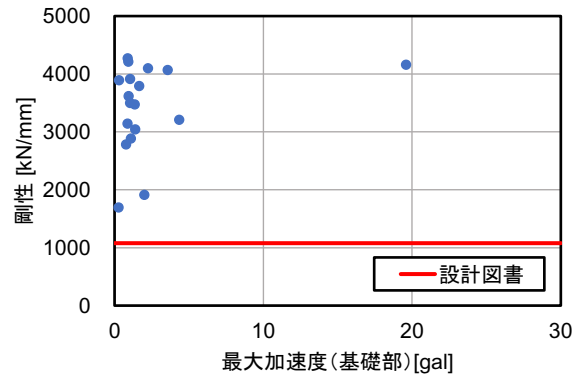
4階

図 4.1.7 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)

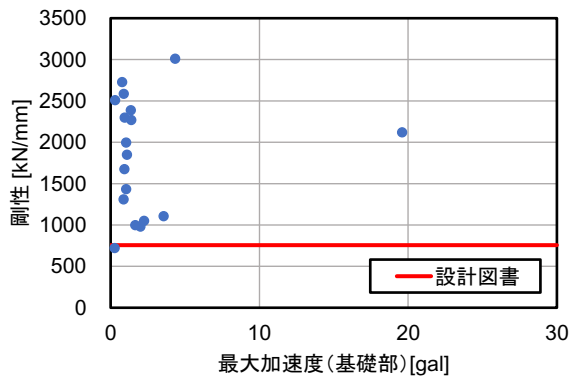




5 階



6 階



7 階

図 4.1.7 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)

図 4.1.8 に全地震データから算出した最適化モデルの固有周期の正規分布と 2.3 節で作成した多質点系モデルの固有周期（設計固有周期）および微動記録の固有周期の比較を示す。

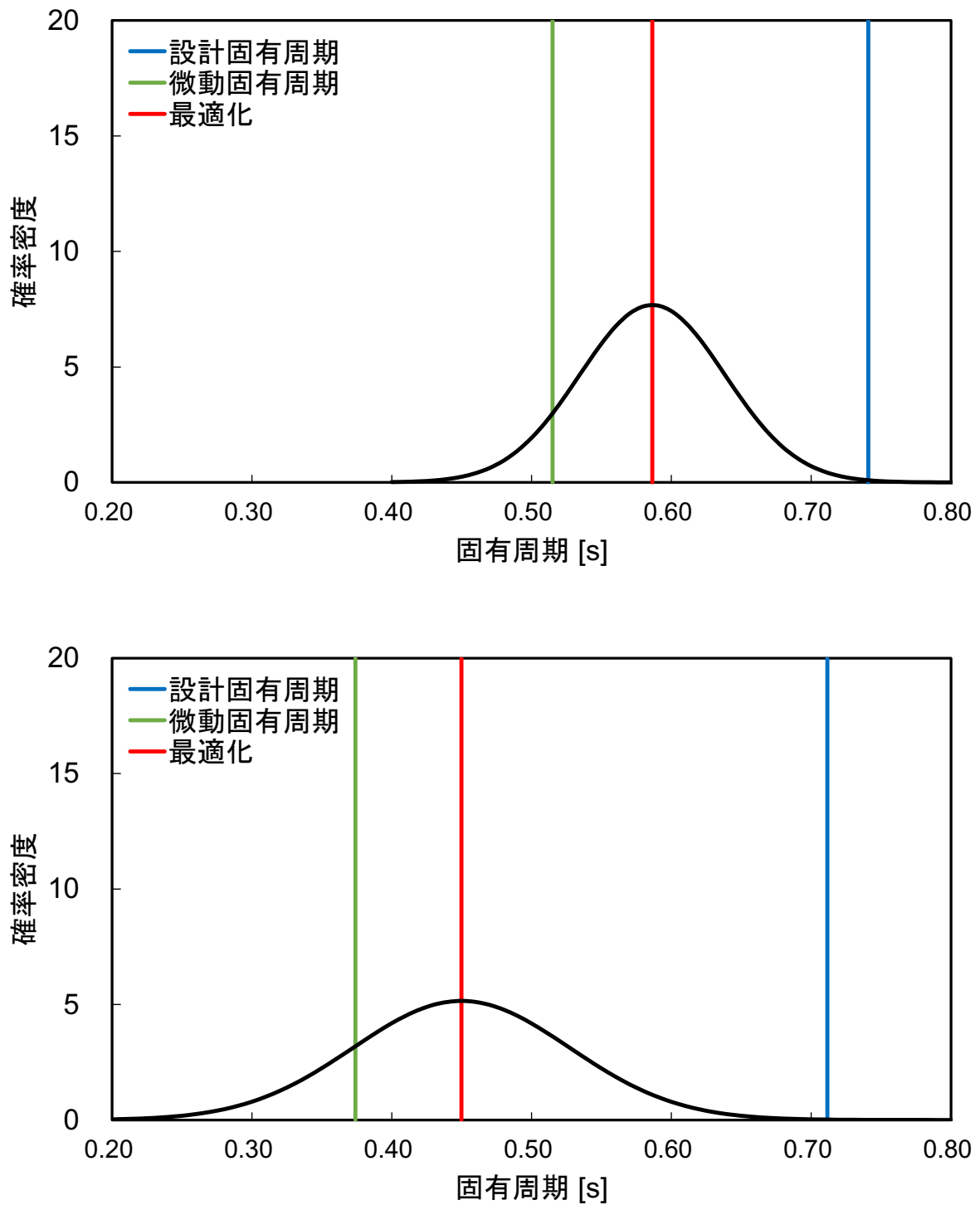


図 4.1.8 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

## 5. クラウドコンピューティングを用いたリアルタイム耐震診断システムの開発

### 5. 1 現行のリアルタイム耐震診断システム

巨大地震等の発生に備え、豊橋市にある防災拠点建物に建物の耐震診断を自動で実施するシステムを実施している。リアルタイム耐震診断システムは、「地震波の抽出」「1次耐震診断」「2次耐震診断」の3段階からなる。1次耐震診断は2.3節で作成した多質点系モデルを使用したリアルタイム簡易評価である。その結果が一定以上の損傷のときに2.2節で作成した立体骨組モデルを使用した詳細な耐震診断である2次診断が行われる。

自動耐震診断システムのフローチャートを図5.1.1に示す。プログラム言語はRubyとFortranを併用し、Rubyにはシステムの基幹部（全体進行、地震波の抽出、1次診断と2次診断の実行命令、診断結果のメール配信）をFortranには1次診断と2次診断の建物地震応答解析を行わせる。

また、図5.1.1にリアルタイム耐震診断システムの概念図を示す。自動耐震診断システムは、常時地震観測を行うLAN地震計（地震センサー）、地震記録データの収録機、自動耐震診断システムからなる。この内、LAN地震計とデータ収録機は対象とする防災拠点建物内に設置し、自動耐震診断システムは豊橋技術科学大学内のコンピュータが管理運営する体制となっている。

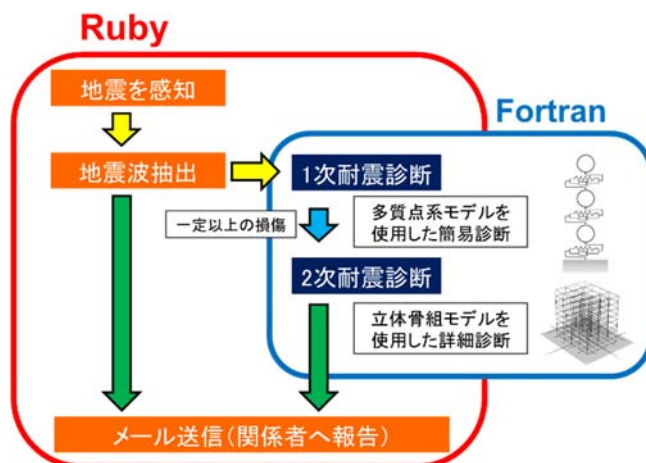


図 5.1.1 耐震診断システムのフローチャート図

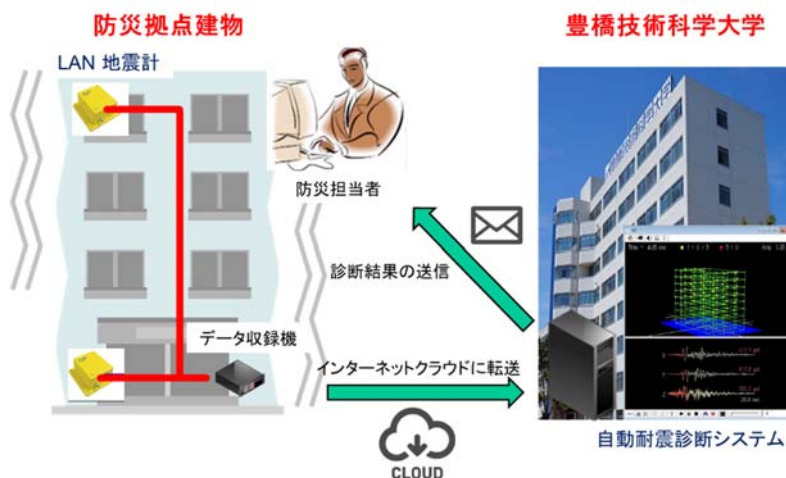


図 5.1.2 現在のリアルタイム耐震診断システム

## 5. 2 リアルタイム耐震診断システムのクラウド化

現行のリアルタイム耐震診断システムは、豊橋技術科学大学内に設置されているコンピュータで実施されている。そのため大学が被災し、停電またはインターネットが断線してしまった場合、診断システムが機能しなくなる。この課題の解決案として、大学で運営しているコンピュータの代わりに、クラウドコンピューティングを用いてシステムを構築し、遠隔での管理を可能にする。

図 5.2.1 にリアルタイム耐震診断システムのクラウド化の概念図を示す。大学内のシステムをクラウドコンピューティングに置き換えた形となっている。これによって、地震データの取得から担当者へのメール送信までの全てをインターネット上で行うことができる。

クラウドコンピューティングには、Amazon Web Services（通称、AWS）<sup>6)</sup>を用い、Linux OS のコンピュータでシステムの構築を目指す。図 5.2.2 に AWS のインスタンスの管理画面を示す。インスタンスとはインターネット上で起動する仮想的なコンピュータである。

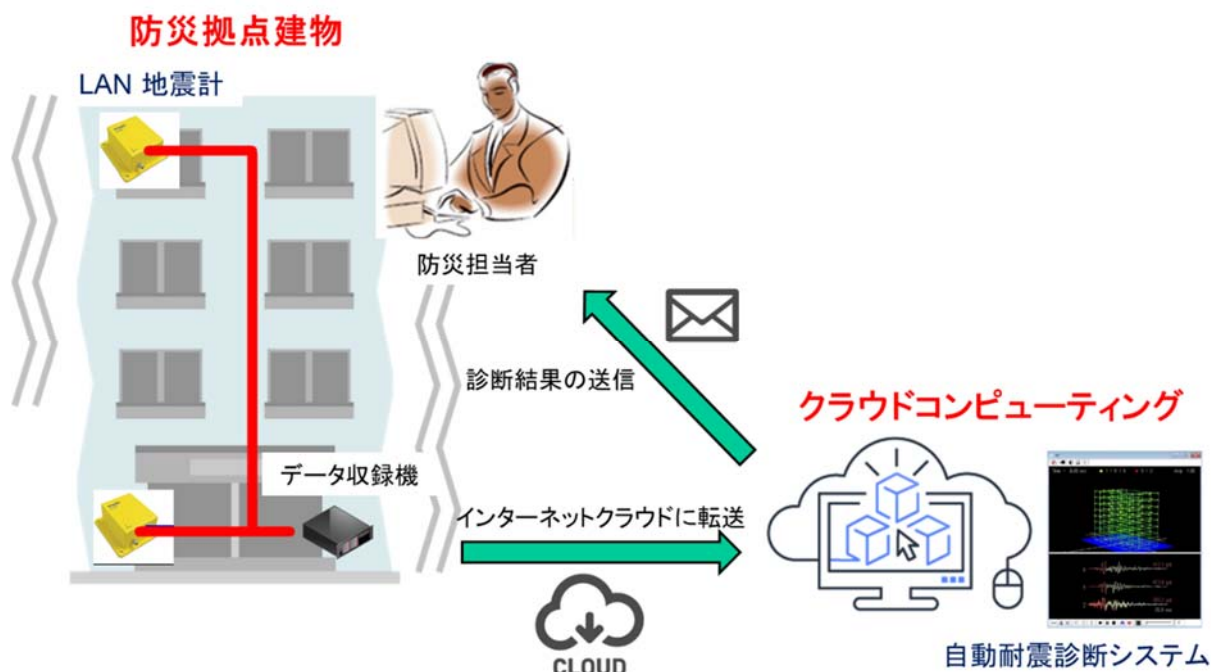


図 5.2.1 リアルタイム耐震診断システムのクラウド化

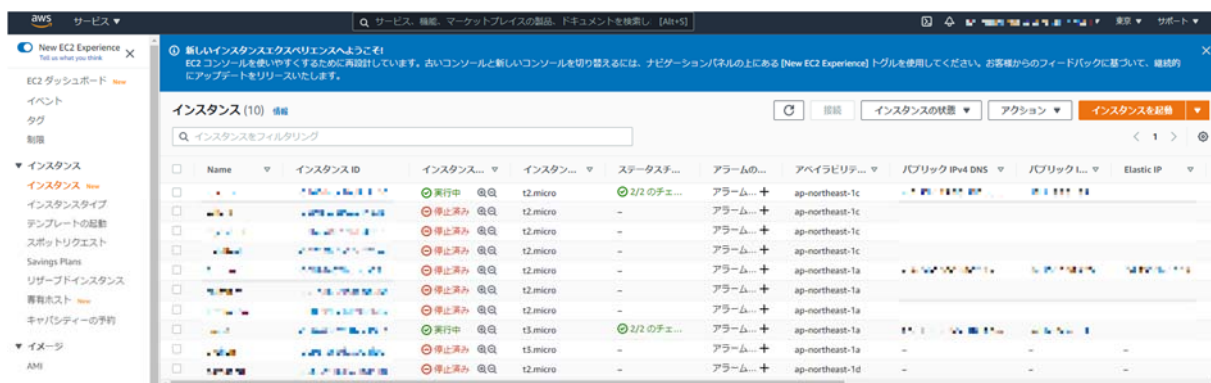


図 5.2.2 AWS インスタンス管理画面

図 5.2.2 に示す管理画面はインスタンスの起動および停止を実行するためのものである。実際にクラウドコンピューティングで作業を行う場合は、Windows のソフトウェアである PuTTY<sup>7)</sup>および WinSCP<sup>8)</sup>を用いる。PuTTY はコマンドラインの役割をもっておりプログラムのインストールおよび実行を行う。また、WinSCP はファイルのやり取りを行うためのソフトウェアである。図 5.2.3 および図 5.2.4 に PuTTY および WinSCP の画面を示す。

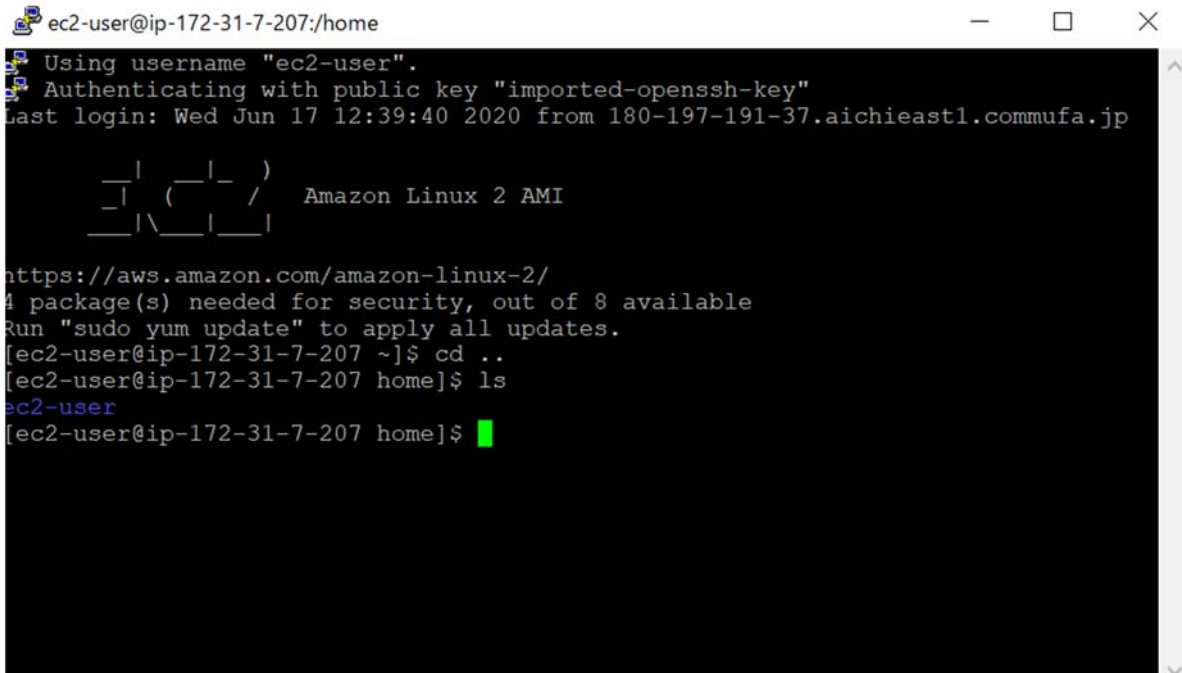


図 5.2.3 PuTTY のコマンドライン画面

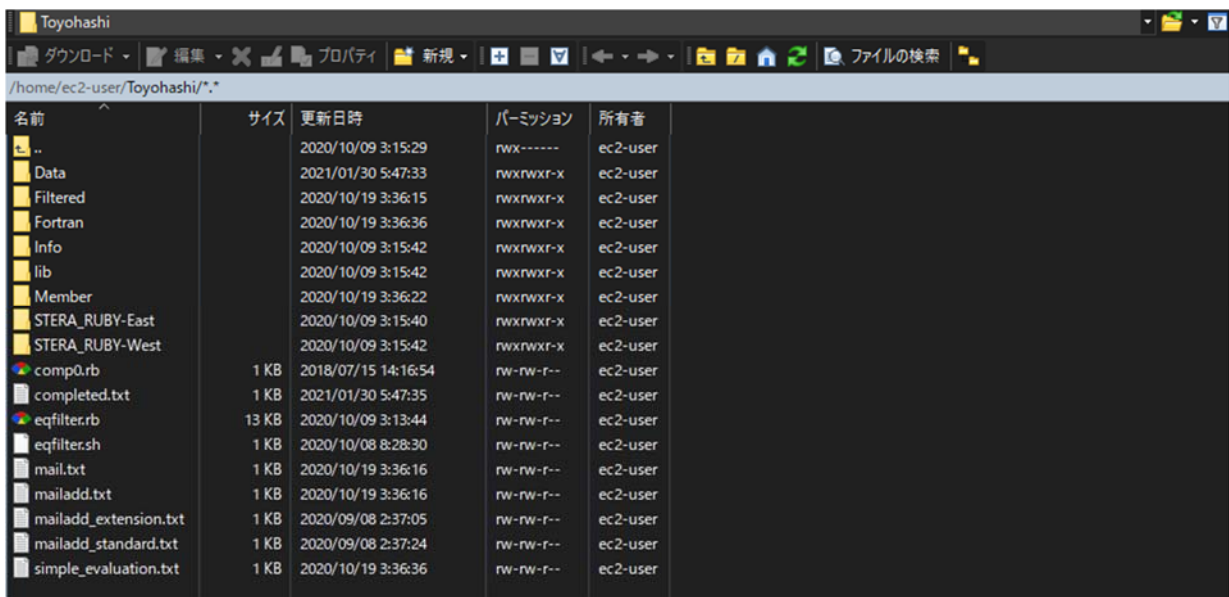


図 5.2.4 WinSCP 画面

ここで、クラウドコンピューティングについて説明する。クラウドコンピューティングとはコンピューティングサービスであるサーバー、ストレージ、データベース、ネットワークおよびソフトウェアをインターネットクラウド経由で配信し、迅速なイノベーション、柔軟なリソースを提供することができるものである。通常は使用するクラウド サービスに対してのみ支払い、運用コストを削減し、インフラストラクチャをより効率的に実行し、ニーズの変化に合わせてスケーリングするのに役立つ。

表 5.2.1 にクラウドコンピューティングの利点および欠点を示す。クラウドコンピューティングの利点は、クラウドサービスを提供する業者が用意したサーバーやソフトウェア、アプリケーションを使用するため、サーバーを買い揃える必要がなくコストを大幅に抑えることができる。また、サービスの不具合対応やメンテナンスはすべて提供する業者が対応してくれる。

一方、クラウドコンピューティングの欠点はコンピュータの構築の複雑さである。コンピュータを立ち上げるためには専門の知識が必要であり、素人には扱いづらい点がある。また、セキュリティ面の不安も見逃せない。クラウドではインターネット上でデータベースなどのサービスを利用しているため、悪意ある第三者の介入などで、データが流出する危険も高い。

表 5.2.1 クラウドコンピューティングの利点および欠点

利点	欠点
<ul style="list-style-type: none"> <li>・コストを抑えられる</li> <li>・メンテナンスの必要がない</li> <li>・複数の端末で利用できる</li> <li>・サービスの選択肢が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・専門の知識が必要</li> <li>・セキュリティ</li> </ul>

様々な利点・欠点があるクラウドコンピューティングであるが、防災の面で非常に有効である。自然災害でサーバーの物理的な破損がもし起これば、新しいサーバー調達、データの復元まで時間がかかる。地理的に現場に行くことが早急にできるのかなどの問題もある。また復旧作業の間はシステムを利用することができず、業務の遂行に大きな影響を及ぼす。こうした災害リスクを回避できる対策として、注目を集めているのがクラウドの活用である。

データセンターに使われる建物は、地震や水害、火災などさまざまなリスクを想定して建てられているほか、停電に備えて大型の UPS (Uninterruptible Power Supply : 無停電電源装置) や自家発電装置を備えている。このため、オフィス内のサーバールームで運用するよりもはるかに安全にシステムを運用することが可能となる。したがって堅牢なデータセンターで運営されている、クラウドサービスは災害対策として有効となる。



## 6. まとめ

本研究で開発したリアルタイム耐震診断システムは、これまでに愛知県東三河地域の5つの市（豊橋市、豊川市、田原市、蒲郡市、新城市）の市庁舎および豊橋市中消防署に実装を終えている。小さい地震ではあるが、すでに複数の地震発生時に本システムが自動的に稼働し、診断結果を防災担当者に送付することに成功している。



図 6.1 東三河地域のリアルタイム耐震診断システムの実装状況

本システムの特徴として、従来の技術が目視による診断が主であったのに対して、インターネットを介して安全かつリアルタイムに診断ができ、システムが自動化されている点が挙げられる。

また、当初、大学内のコンピュータで行っていた 1) クラウド上の観測データからの地震波の抽出、2) 耐震診断の実行、3) 診断結果のメール配信の3つのプロセスを、すべてクラウドコンピュータで行えるようにした。これにより、耐震診断を行うコンピュータが被災するリスクがなくなり、安定的な運用が可能となった。

さらに、解析モデルと実際の建物の地震応答が一致するように解析モデルを最適化する手法についても検討し、応答曲面法よりも機械学習を用いたベイズ最適化法が適していることを明らかにした。今後、ベイズ最適化法を自動診断システムに組み込む予定である。

将来的には、モニタリング対象とする防災拠点建物を順次追加し、耐震診断結果を地域で共有して、被災後の自治体による防災対策への利用が可能になるようにしていきたいと考えている。

## 謝辞

本研究は、東三河地域防災協議会の委託研究として行われたものです。ここに謝意を表します。また、最適化手法による解析と耐震診断システムのクラウド化は、豊橋技術科学大学修士2年生の堀岡知樹君の修士研究として実施されました。協力に感謝します。