

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

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
1. 2 報告書の構成	3
2. 防災拠点建物の解析モデルの作成と LAN 地震計の設置	4
2. 1 建物概要	4
2. 1. 1 豊橋市役所 東館	
2. 1. 2 豊橋市役所 西館	
2. 1. 3 豊橋市中消防署	
2. 2 立体骨組モデルの作成	10
2. 2. 1 豊橋市役所 東館	
2. 2. 2 豊橋市役所 西館	
2. 2. 3 豊橋市中消防署	
2. 3 多質点系モデルの作成	27
2. 3. 1 豊橋市役所 東館	
2. 3. 2 豊橋市役所 西館	
2. 3. 3 豊橋市中消防署	
2. 4 LAN 地震計の設置	38
2. 4. 1 豊橋市役所	
2. 4. 2 豊橋市中消防署	
2. 5 LAN 地震計による実地震観測	41
2. 5. 1 豊橋市役所	
2. 5. 2 豊橋市中消防署	
3. 解析パラメータの最適化手法	44
3. 1 目的関数の定義	44
3. 2 応答曲面法	45
3. 3 ベイズ最適化	50
4. モニタリング建物の剛性分布の最適化	51
4. 1 豊橋市役所 東館	51
4. 2 豊橋市役所 西館	67
4. 3 豊橋市中消防署	79
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	89
5. 1 現行のリアルタイム耐震診断システム	89
5. 2 リアルタイム耐震診断システムのクラウド化	90
6. まとめ	93

1. はじめに

1. 1 研究目的

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。

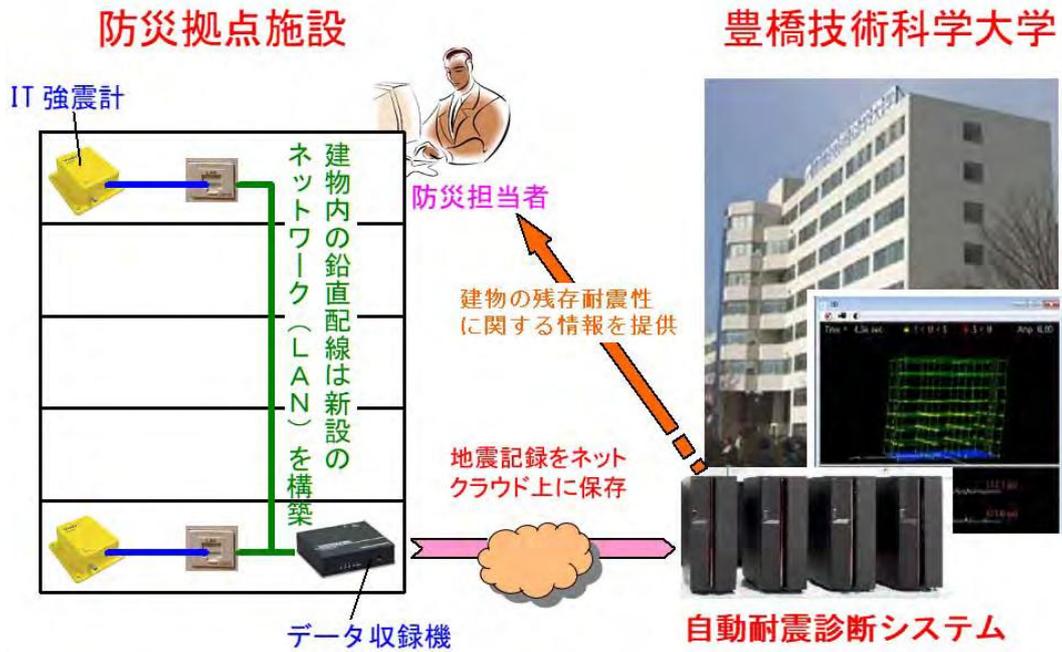


図 1.2 リアルタイム耐震診断システムのイメージ

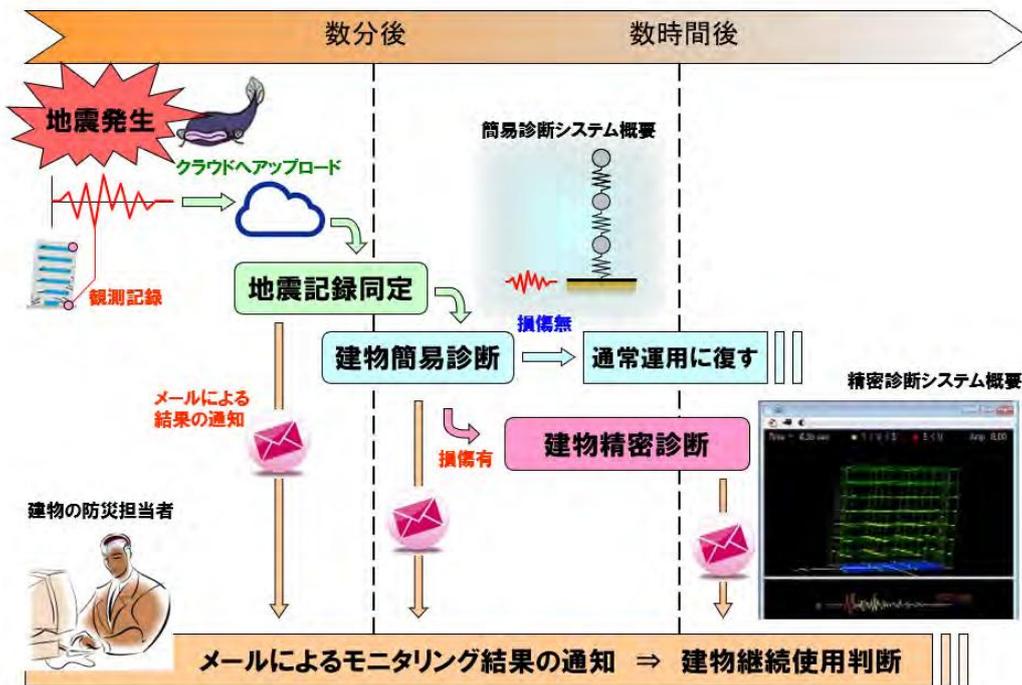


図 1.3 リアルタイム耐震診断の流れ

1. 2 報告書の構成

第2章では、豊橋市役所東館、西館および豊橋市中消防署を例に、解析モデルの作成と LAN 地震計の設置について述べる。

第3章では、観測地震記録に基づいた建物解析モデルのパラメータ最適化の手法として、応答曲面法とベイズ最適化の方法について述べる。

第4章では、豊橋市役所東館、西館および豊橋市中消防署について、パラメータ最適化手法を適用した結果について述べる。

第5章では、耐震診断システムのクラウド化について述べる。

第6章に、まとめとして、本研究の成果と今後の課題について述べる。

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 豊橋市役所 東館

本建物は、地上 13 階（塔屋 2 階），地下 3 階，軒高 55.55m の市庁舎である。

平面は 1 階 X 通り方向が 52.9m，Y 通り方向は 43.5m の長方形である。地上階には中央に 12.8m × 13.6m の吹き抜けが存在し東西軸，南北軸共におよそ正対称となる建物となっている。主体構造は鉄骨ブレース付ラーメン架構である。柱は鉄骨鉄筋コンクリート造とし大梁及びブレースは鉄骨造としている。PC 板の外壁および戸境壁等はすべて非構造材として扱うこととする。以下に東館の建物概要を示す。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 に基準階構造伏図及び東西方向軸組図，外観写真を示す。

名称	豊橋市役所東館
住所	豊橋市今橋町 1 番地
主要用途	事務室
建築面積	8362 m ²
建蔽率	51.4%
延床面積	60434 m ²
容積率	297.4%
階数	地上 13 階（塔屋 2 階），地下 3 階
軒の高さ	GL+55.55m
最高の高さ	GL+56.10m
基準階階高	3.90m
構造種別	地上 柱：鉄骨鉄筋コンクリート造、梁：鉄骨造 地下 鉄骨鉄筋コンクリート造 基礎 場所打コンクリート杭



図 2.1.1 周辺地図および敷地図

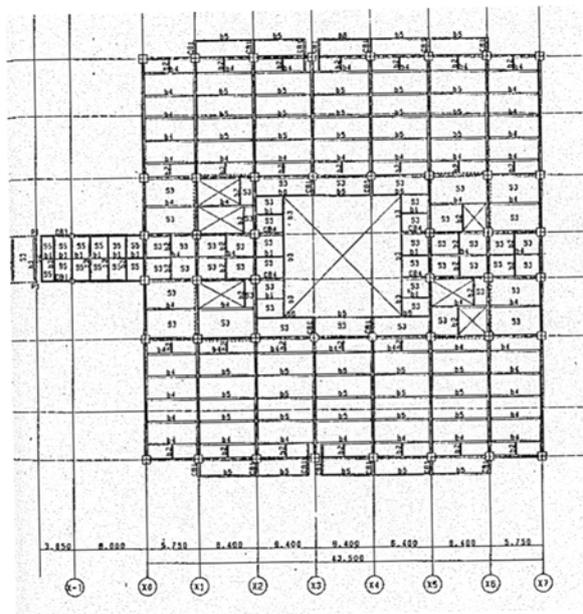


図 2.1.2 基準階構造伏図 (設計図書より)

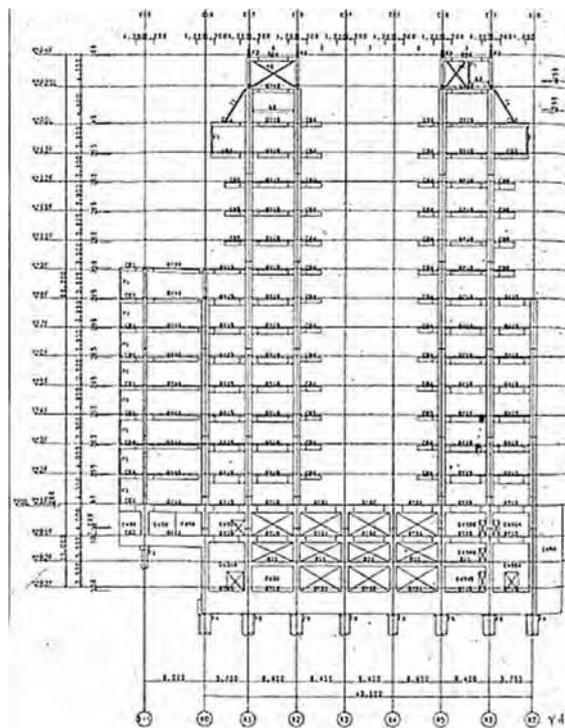


図 2.1.3 東西方向軸組図(設計図書より)



(a)市役所全体



(b)南側



(c)北東側

図 2.1.4 東館の建物外観

2. 1. 2 豊橋市役所 西館

本建物は、地上9階、地下1階、軒高38.3mの市庁舎である。

平面形は1階X通り方向が58.2m、Y通り方向は25.6mの長方形である。耐力壁が建物の両側に配置されコアが形成されている。さらに、そのコアと最上屋でこれらをつなぐトラス梁によって大架構形式の構造となっており、平面的に整形で偏心がほとんどなく、上下方向の剛性バランスも良好な建物である。

以下に建物概要を示す。また、図2.1.5～図2.1.7に基準階構造伏図及び東西方向軸組図、外観写真を示す。

名称	豊橋市役所西館
住所	豊橋市今橋町1番地
主要用途	事務室
建築面積	1799.51 m ²
延床面積	12991.73 m ²
階数	地上9階、地下1階
軒の高さ	GL+38.15m
最高の高さ	GL+38.30m
基準階階高	3.90m
構造種別	地上 柱：鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄骨造 梁：鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄骨造 地下 鉄骨鉄筋コンクリート造 基礎 鉄筋コンクリート造布基礎，場所打コンクリート杭

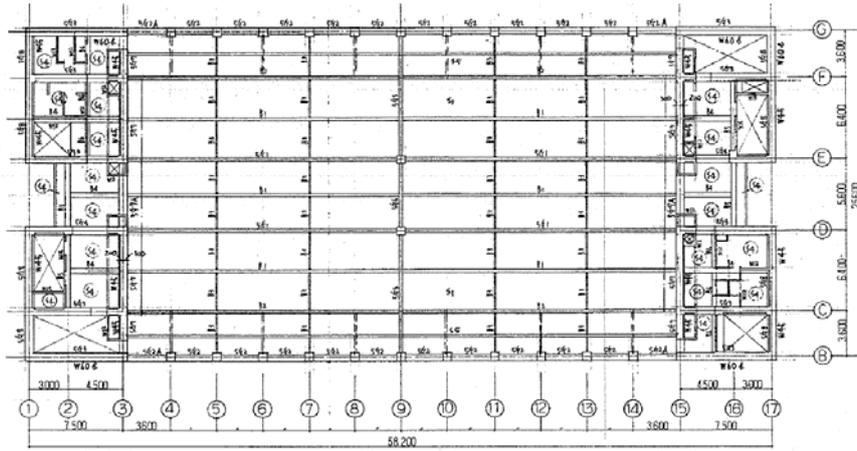


図 2.1.5 基準階構造伏図(設計図書より抜粋)

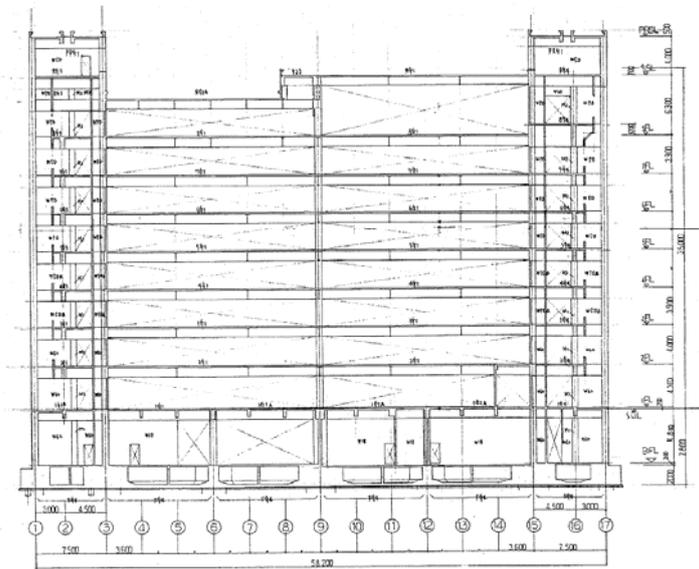
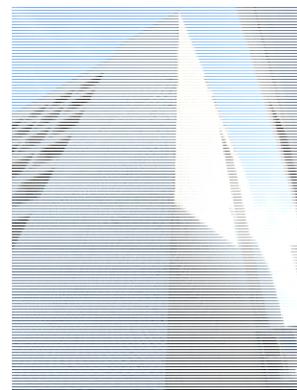


図 2.1.6 東西方向軸組図(設計図書より抜粋)



(a)南側



(b)北西側

図 2.1.7 西館の建物外観

2. 1. 3 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。スリットの立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2.1.8に周辺地図および敷地図、図2.1.9～図2.1.11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 ²
建蔽率	80%
延床面積	6741.326m ²
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

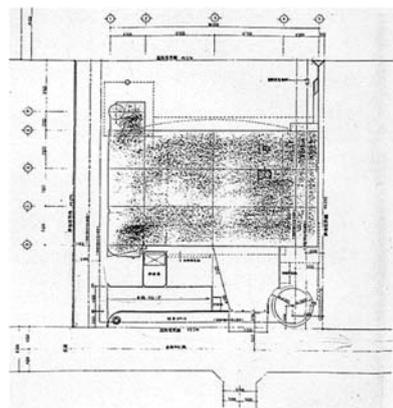


図 2.1.8 周辺地図および配置図

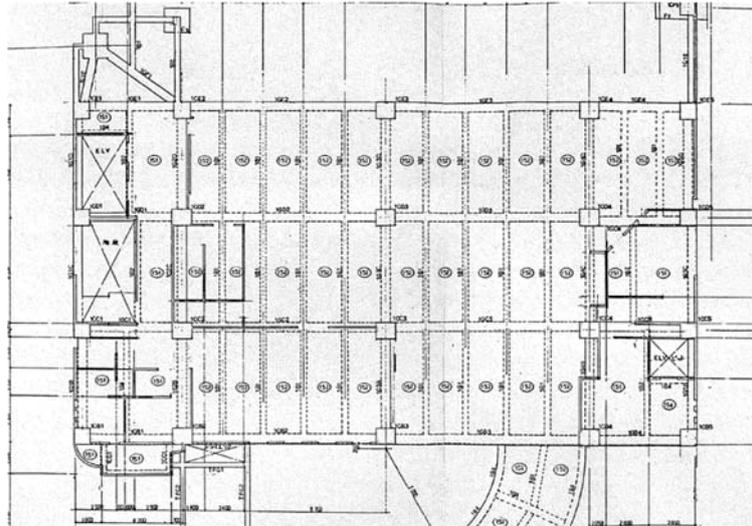


図 2.1.9 基準階構造伏図(設計図書より抜粋)

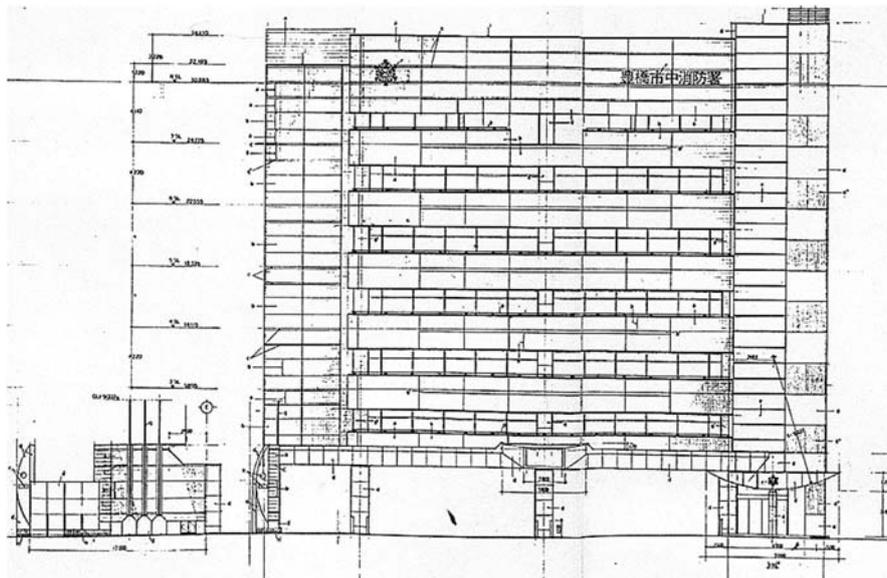


図 2.1.10 北立面図(設計図書より抜粋)



(a)北側



(b)北東側

図 2.1.11 中消防署の建物外観

2. 2 立体骨組モデルの作成

2. 2. 1 豊橋市役所 東館

リアルタイム耐震診断システムの2次診断に用いる立体骨組モデルの作成を行う。作成には豊橋技術科学大学 齊藤大樹教授が開発した非線形地震応解析ソフトウェア STERA_3D を用いる。

モデルの基本条件を以下に示す。

- ・床は剛床仮定
- ・柱梁接合部は剛域
- ・地盤バネ組み込み
- ・柱壁の軸・曲げ要素は MS モデル
- ・梁の端部は曲げバネ，中央部はせん断バネを有する部材モデル
- ・粘性減衰は初期剛性比例型

また，構造躯体に使用された材料を以下に示す⁹⁾。

主筋:	主筋量及び径は豊橋市庁舎東館構造図面より決定 主筋種別は豊橋市庁舎東館構造図面よりすべて SD345 とする
せん断補強筋:	せん断補強筋量及び径は豊橋市庁舎東館構造図面より決定 間隔についても豊橋市庁舎東館構造図面より全て 100mm とする
コンクリート:	軽量コンクリート 1 種 (豊橋市庁舎東館構造図面に準拠) Fc= 270 kg/cm ² (1 階～4 階) Fc= 240 kg/cm ² (5 階～9 階) Fc= 210 kg/cm ² (10 階～最上階)
鉄骨強度:	柱 SM520B (1 階～2 階) , SM490A (3 階～最上階) 大梁 SM490A ブレース SM490A SS400 (設計図書に準拠)
鉄骨寸法:	豊橋市庁舎東館構造図面より決定する。 厚さは 16mm～40mm とする。 厚さが X 方向, Y 方向で違う場合は断面積が小さいほうに統一する
鉄骨の形状:	豊橋市庁舎東館構造図面より決定

図 2.2.1 および図 2.2.2 に豊橋市役所東館の立体骨組モデルを示す。

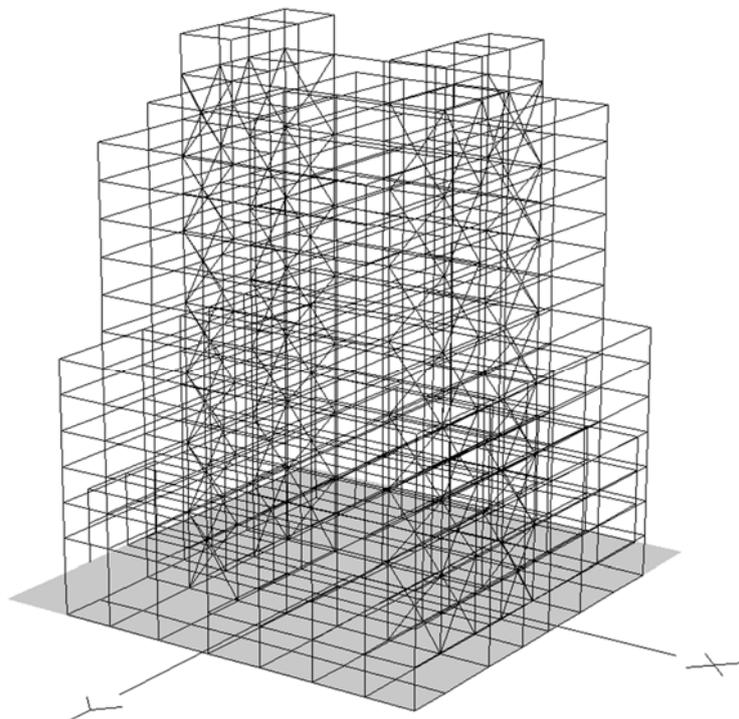


図 2.2.1 東館 立体骨組モデルの外観

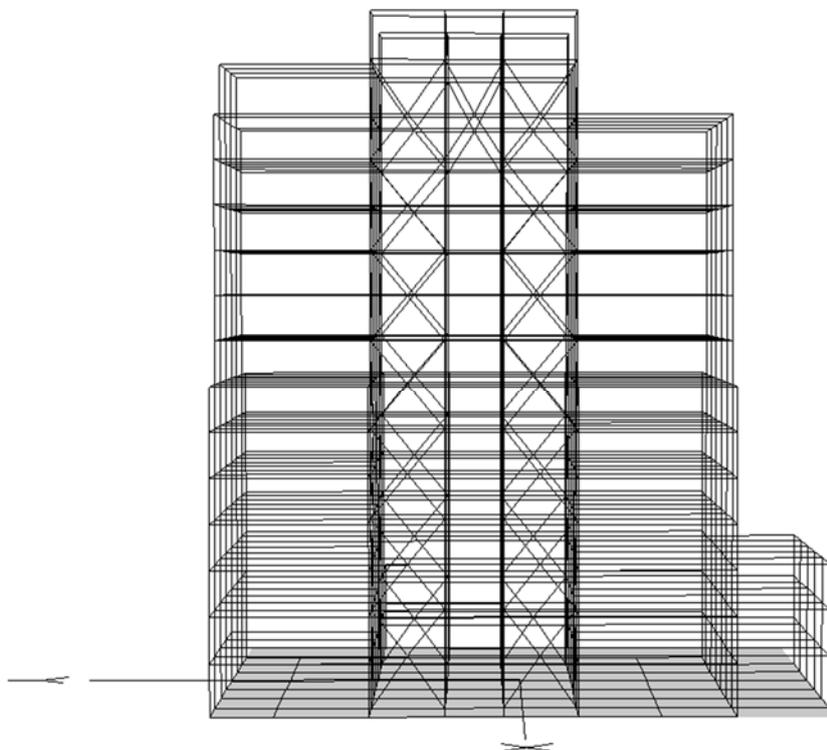


図 2.2.2 東館 東側から見た立体骨組モデル

・柱 (SRC 造)

SRC 造の柱を入力するにあたって寸法は B 及び D は豊橋市庁舎東館構造図面より決定。

かぶり厚さ d_1 及び d_2 はすべて 40mm とする。STERA 3D に実際に入力した柱のデータを表 2.2.1 に示す。C21 C22 C36 C37 C43 においては直径 1100mm 丸柱であるため、面積が等価の一边 974mm² の角柱に置換し、STERA 3D に入力している。

表 2.2.1 柱の入力データ

番号	全体		形状	鉄骨				鉄筋			コンクリート 強度F _c	備考
	B	D		d	tw	tf	材質	強度	本数	形状		
C1	900	900	⊕	300	16	25	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C2	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	27	
C3	1000	1000	⊕	300	22	32	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C4	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	27	
C5	1000	1000	⊕	300	16	28	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C6	1000	1000	⊕	300	16	28	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C7	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	27	
C8	1000	1000	⊕	300	22	32	SM490A	315	28-D29	SD345	27	
C9	1000	1000	⊕	300	22	32	SM490A	315	48-D29	SD345	27	
C10	1000	1000	⊕	325	22	32	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C11	1000	1000	⊕	300	22	36	SM520B	355	48-D32	SD345	27	D13-目-100
C12	900	900	⊕	300	19	28	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C13	900	900	⊕	300	16	25	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C14	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C15	900	900	⊕	325	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C16	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C17	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	27	
C18	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C19	750	750	⊕	250	12	22	SM490A	315	12-D29	SD345	27	
C20	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	21	
C21	974	974	⊕	300	16	26	SM490A	315	12-D29	SD345	27	○φ1100
C22	974	974	⊕	300	14	25	SM490A	315	12-D29	SD345	21	○φ1100
C23	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	24	
C24	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	21	
C25	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	24	
C26	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	21	
C27	900	900	⊕	300	19	28	SM490A	315	12-D29	SD345	24	
C28	900	900	⊕	300	16	25	SM490A	315	12-D29	SD345	24	
C29	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	24	
C30	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	21	
C31	900	900	⊕	325	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	21	
C32	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	21	
C33	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	21	
C34	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	24	
C35	900	900	⊕	300	14	22	SM490A	315	12-D29	SD345	21	
C36	974	974	⊕	300	16	26	SM490A	315	12-D29	SD345	24	○φ1100
C37	974	974	⊕	300	16	26	SM490A	315	12-D29	SD345	21	○φ1100
C38	500	500	⊕	300	14	22	SM490A	315	4-D25	SD345	27	
C39	900	900	⊕	300	14	22	SM520B	355	4-D25	SD345	27	
C40	1000	1000	⊕	300	22	32	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C41	900	900	⊕	300	14	22	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C42	750	750	⊕	250	12	22	SM520B	355	12-D29	SD345	27	
C43	974	974	⊕	300	16	26	SM520B	355	12-D29	SD345	27	○φ1100

・梁 (S 造)

豊橋市庁舎東館構造図面より H 型鋼の断面詳細を決定する。梁材は非線形曲げばね部材とし、材種は設計図書よりすべて SM490A とした。

鋼強度の増幅率を 1.1 倍、降伏強度以降の剛性比を 0.001、スラブ板厚による曲げ剛性の増幅率を 1.2 倍に定める。STERA 3D に実際に入力した梁データを表 2.5.1 に示す。

表 2.2.2 梁の入力データ

	D	B	t1	t2	材質	Fy(N/mm ²)
B1	1000	300	19	25	SM490A	356
B2	800	300	16	28	SM490A	356
B3	800	300	16	25	SM490A	356
B4	800	300	16	22	SM490A	356
B5	800	300	18	28	SM490A	356
B6	800	325	16	22	SM490A	356
B7	550	300	16	22	SM490A	356
B8	550	250	12	22	SM490A	356
B9	550	250	12	19	SM490A	356
B10	550	300	18	25	SM490A	356
B11	550	325	18	22	SM490A	356
B12	700	250	14	25	SM490A	356
B13	700	300	14	25	SM490A	356
B14	700	300	14	22	SM490A	356
B15	800	250	16	22	SM490A	356
B16	800	250	16	25	SM490A	356
B17	800	250	16	19	SM490A	356
B18	550	300	16	26	SM490A	356
B19	550	300	16	25	SM490A	356
B20	550	300	16	28	SM490A	356
B21	550	300	16	32	SM490A	356
B22	550	200	12	19	SM490A	356
B23	800	300	16	32	SM490A	356
B24	550	325	12	22	SM490A	356
B25	700	300	16	25	SM490A	356

・ブレース(S 造)

豊橋市役所東棟において耐力壁と認められるものはブレースのみであった。ブレースは全てシェブロン型である。STERA 3D に実際に入力したブレースデータを表 2.2.3 に示す。

梁断面積は豊橋市庁舎東館構造図面に記載されている断面寸法を基に決定した。鉄骨材料強度も豊橋市庁舎東館構造図面より SS400 および SM490A とした。強度の増幅率を 1.1 倍、降伏強度以降の剛性比を 0.001 と定めた。

表 2.2.3 ブレースの入力データ

	主材	断面積A(mm ²)	付属する梁	材種	ブレースの形	引張強さF(N/mm ²)	上部付属の梁
w1	BH-325*300*12*16	13260	B6	SM490A	K型 山	490	B6
w2	BH-300*300*14*16	13500	B7	SM490A	K型 谷	490	B7
w3	BH-300*300*14*19	15210	B7	SM490A	K型 山	490	B7
w4	BH-300*300*12*19	14690	B7	SM490A	K型 山	490	B7
w5	BH-300*300*14*16	13500	B7	SS400	K型 谷	400	B7
w6	BH-300*300*12*16	12960	B7	SS400	K型 谷	400	B7
w7	BH-300*300*14*16	13500	B11	SM490A	K型 山	490	B11
w8	BH-325*300*12*16	13260	B7	SM490A	K型 谷	490	B7
w9	BH-325*300*12*16	13260	B24	SM490A	K型 谷	490	B24
w10	BH-300*300*14*16	13500	B7	SM490A	K型 山	490	B7
w11	BH-300*300*14*16	13500	B7	SS400	K型 山	400	B7
w12	BH-300*300*12*16	12960	B7	SS400	K型 山	400	B7

2. 2. 2 豊橋市役所 西館

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 2.2.4, 図 2.2.5)。本解析モデルでは、全層に剛床仮定を適用し、パネルゾーンの剛域の長さは、フェースから柱せいの 1/4 だけ中に入った位置で設定した。梁部材は、両材端に弾塑性曲バネおよび部材中央に弾塑性せん断バネを有する部材モデルを使用した。柱部材は、軸力と曲げの非線形相互作用を考慮するため、両材端の断面内にそれぞれコンクリートと鉄筋の支配面積に応じた 5 つの非線形軸バネを配置し、部材中央に水平 2 方向の弾塑性バネを有する Multi-Spring Model(MS モデル)を使用した。地震応答解析に用いる減衰モデルは、初期剛性比例型とし、粘性減衰定数は一次モードに対して 3%とした。1 次固有周期は X 方向 0.437 秒, Y 方向 0.402 秒, 2 次固有周期は X 方向 0.137 秒, Y 方向 0.123 秒となった。

モデルの基本情報を以下に示す。

- ・コンクリート：普通コンクリート $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$ (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
- ・鉄筋： SD30 D16 以下 (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
SD35 D19 以上
- ・鉄骨： SM50A (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
- ・各階階高及び重量：図 2.2.3 に示す。 (豊橋市庁舎西館耐震診断計算書に準拠)

ただし、豊橋市庁舎西館耐震診断計算書はその階の下階をすべて累加しているため、その階より下階を引いて算出した。さらに、8 階にはトラス梁をモデル化するため、8 階の重量を 1/2 にすることで新たに 9 階(トラス梁の階)として挿入した。STERA 3D に実際に入力した各階の階高及び重量のデータを表 2.2.4 に示す。

FLOOR NAME	H (M)	W (T)
PR	38.100	
R	34.100	935.2
8	27.800	4198.0
7	23.900	6599.6
6	20.000	8553.1
5	16.100	10560.5
4	12.200	12515.3
3	8.300	14470.5
2	4.300	16657.6
GL.. 1	.000	18754.4
B	-6.000	22179.6

図 2.2.3 各階階高および重量

表 2.2.4 各階の階高及び重量の入力データ

階	階高(mm)	重量(kN)
10	4000	4114
9(トラス梁)	2300	11767.5
8	4000	11767.5
7	3900	19144
6	3900	19673
5	3900	19157
4	3900	19161
3	3900	21434
2	4000	21434
GL.1	4300	33567
B	0	63492

図 2.2.4 および図 2.2.5 に豊橋市役所西館の立体骨組モデルを示す。

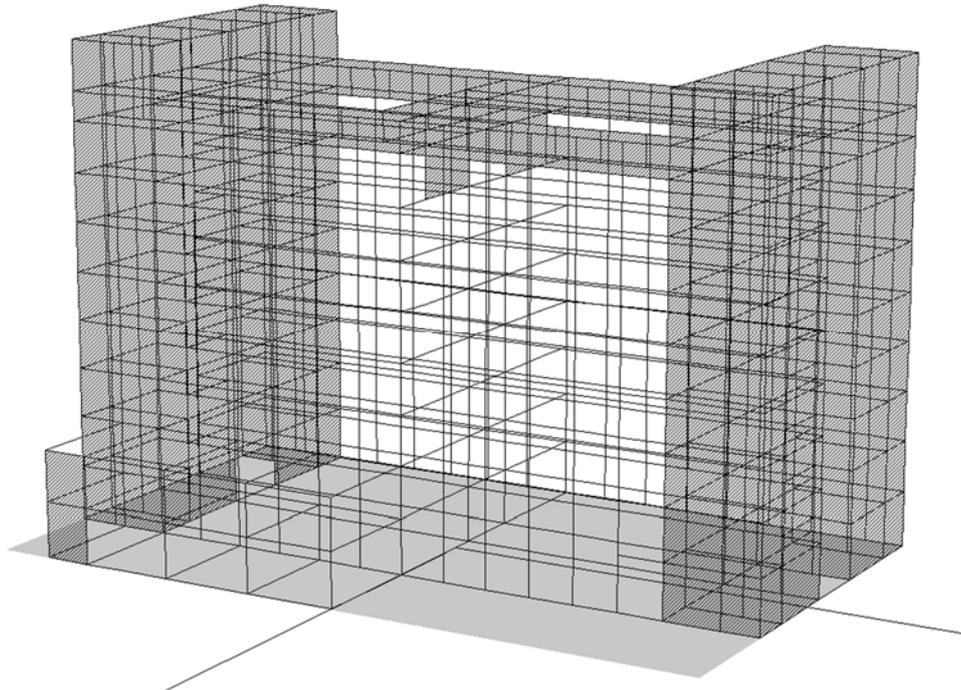


図 2.2.4 西館 立体骨組モデルの外観

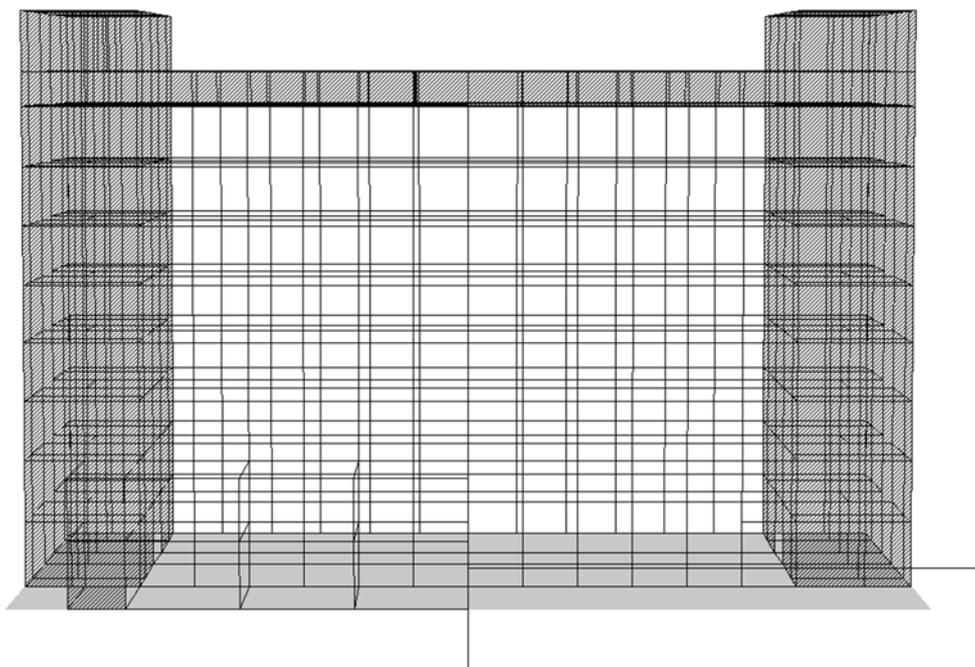


図 2.2.5 西館 大架構形式

・柱 (SRC 造)

SRC 造の柱を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

全体寸法	: B 及び D は豊橋市庁舎西館構造図面より決定。
かぶり厚さ	: d1 及び d2 はすべて 40mm とする。
主筋	: 主筋量及び径は豊橋市庁舎西館構造図面より決定。 主筋種別は, D22 と D25 を使用しているためすべて SD35 とする。
せん断補強筋	: せん断補強筋量及び径, 間隔は豊橋市庁舎東館構造図面より決定。 せん断補強筋種別は, すべて D13 を使用しているため SD30 とし, 間隔はすべて 100mm とする。
コンクリート強度	: 普通コンクリート $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
鉄骨強度	: SM50A (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
鉄骨寸法	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。
鉄骨のタイプ	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。

・柱 (S 造)

S 造の柱を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

鉄骨寸法	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。
鉄骨強度	: SM50A (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
鉄骨のタイプ	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。 すべて箱型のため Box とする。

STERA 3D に実際に入力した柱データを表 2.2.5 に示す。

表 2.2.5 柱の入力データ

No. N	構造		全体				形状	鉄骨				鉄筋				コンクリート 強度(N/mm ²)	
	B(mm)	D(mm)	d1(mm)	d2(mm)	dl(mm)	形状		h1(mm)	b1(mm)	tw(mm)	tf(mm)	強度(N/mm ²)	主筋	SD(N/mm ²)	せん断補強筋		SD(N/mm ²)
1	S					Box	40	600	600	40	40	325					
2	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	25	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
3	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	25	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
4	SRC	650	650	40	40	40	2	400	200	9	12	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
5	SRC	650	650	40	40	40	4	300	200	9	12	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
6	SRC	650	650	40	40	40	4	300	300	6	22	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
7	SRC	650	600	40	40	40	5	300	200	16	25	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
8	SRC	650	600	40	40	40	3	400	200	16	25	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
9	SRC	550	550	40	40	40	2	300	200	9	12	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
10	S					Box	40	600	600	35	35	325					
11	SRC	550	550	40	40	40	2	300	200	9	12	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
12	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	19	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
13	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	19	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
14	SRC	650	650	40	40	40	2	400	200	6	9	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
15	SRC	650	650	40	40	40	4	300	200	6	9	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
16	SRC	650	650	40	40	40	4	300	300	6	22	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
17	SRC	650	600	40	40	40	5	300	200	14	19	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
18	SRC	650	600	40	40	40	3	400	200	14	19	325	12-D25	345	2-D13@100	295	295
19	S					Box	40	600	600	28	28	325					
20	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	19	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
21	SRC	650	650	40	40	40	4	275	200	16	19	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
22	SRC	650	650	40	40	40	2	400	200	6	9	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
23	SRC	650	650	40	40	40	4	300	200	6	9	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
24	SRC	650	650	40	40	40	4	300	300	6	22	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
25	SRC	650	600	40	40	40	5	300	200	14	19	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
26	SRC	650	600	40	40	40	3	400	200	14	19	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
27	S					Box	40	600	600	19	19	325					
28	SRC	650	650	40	40	40	4	300	300	12	22	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
29	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	19	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
30	SRC	650	600	40	40	40	4	275	200	16	19	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
31	SRC	650	600	40	40	40	5	300	200	14	22	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295
32	SRC	650	600	40	40	40	3	400	200	14	22	325	12-D22	345	2-D13@100	295	295

・梁 (SRC 造)

SRC 造の梁を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

全体寸法	: B 及び D は豊橋市庁舎西館構造図面より決定。
かぶり厚さ	: d1 及び d2 はすべて 40mm とする。
主筋	: 主筋量及び径は豊橋市庁舎西館構造図面より決定。 主筋種別は、すべて D25 を使用しているためすべて SD35 とする。
せん断補強筋	: せん断補強筋量及び径、間隔は豊橋市庁舎東館構造図面より決定。 せん断補強筋種別は、すべて D13 を使用しているため SD30 とし、間隔はすべて 100mm とする。
コンクリート強度	: 普通コンクリート $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
鉄骨強度	: SM50A (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)
鉄骨寸法	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。
鉄骨のタイプ	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。

・梁 (S 造)

S 造の梁を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

鉄骨寸法	: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。
鉄骨強度	: SM50A (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)

STERA 3D に実際に入力した梁データを表 2.2.6 に示す。

表 2.2.6 梁の入力データ

No.	構造		全体				鉄骨				鉄筋				コンクリート	
	B(mm)	D(mm)	d1(mm)	d2(mm)	H(mm)	B(mm)	tw(mm)	tf(mm)	強度(N/mm ²)	上端筋(本)	下端筋(本)	SD(N/mm ²)	せん断補強筋	SD(N/mm ²)	スラブ筋(mm ²)	SD(N/mm ²)
1	S		900	250	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
2	SRC	450	900	125	12	12	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
3	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
4	S		900	300	9	22	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
5	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
6	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
7	SRC	400	900	125	9	11	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
8	SRC	550	900	200	6	12	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
9	SRC	500	900	200	6	12	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
10	SRC	450	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
11	SRC	600	900	250	12	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
12	S		900	250	6	12	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
13	SRC	450	900	125	12	12	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
14	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
15	S		900	300	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
16	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
17	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
18	SRC	450	900	200	9	19	325	2-D25	2-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
19	S		900	250	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
20	S		900	300	9	22	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
21	SRC	600	900	250	12	22	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
22	SRC	600	900	250	12	22	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
23	SRC	600	900	250	12	22	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
24	S		900	250	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
25	SRC	600	900	200	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
26	S		900	250	9	22	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
27	SRC	600	900	200	16	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
トラス梁																
28	SRC	600	900	250	16	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
29	SRC	600	900	250	16	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
30	S		900	250	16	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
31	SRC	600	900	250	16	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
32	S		900	250	9	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
33	S		900	250	9	25	325	4-D25	4-D25	345	2-D13@100	295	1-D10@150	295	21	
小梁																
34	SRC	400	900	200	6	16	325	4-D25	4-D25	345	2-D10@200	295	1-D10@150	295	21	
35	S		900	250	9	19	325	4-D25	4-D25	345	2-D10@200	295	1-D10@150	295	21	

・耐力壁(SRC 造)

SRC 造の耐力壁を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

寸法: 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。

せん断補強筋: せん断補強筋量及び径, 間隔は豊橋市庁舎東館構造図面より決定。

せん断補強筋種別は, D16 以下の場合 SD30, D19 以上の場合 SD35 とし, 間隔は寸法 150mm の場合 150mm, それ以外は 200mm とする。

コンクリート強度: 普通コンクリート $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

(豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)

鉄骨ブレース: 鉄骨面積は豊橋市庁舎西館構造図面より決定。

ブレースの角度は耐力壁の長さ高さより算出する。

鉄骨強度: SM50A (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)

・耐力壁(RC 造)

RC 造の耐力壁を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

寸法 : 豊橋市庁舎西館構造図面より決定。

せん断補強筋 : せん断補強筋量及び径, 間隔は豊橋市庁舎西館構造図面より決定。

せん断補強筋種別は, D16 以下の場合 SD30, D19 以上の場合 SD35 とし, 間隔は寸法 150mm の場合 150mm, それ以外は 200mm とする。

コンクリート強度 : 普通コンクリート $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (豊橋市庁舎西館構造図面に準拠)

STERA 3D に実際に入力した耐力壁データを表 2.2.7 に示す。

表 2.2.7 耐力壁の入力データ

No.	構造	寸法		鉄骨			鉄筋	せん断補強筋	コンクリート 強度(N/mm ²)	角度 R(deg)
		t(mm)	bx(mm)	dx(mm)	twx(mm)	tfx(mm)				
1	RC	150						1-D10@200	21	
2	RC	600						2-D13@200	21	
3	RC	500						2-D13@200	21	
4	RC	600						2-D19@200	21	
5	RC	450						2-D13@200	21	
6	RC	600						2-D16@200	21	
7	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	30
8	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	27
9	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D16@200	21	27
10	SRC	600	200	200	9	9	5238	2-D16@200	21	27
11	SRC	600	200	200	9	9	5238	2-D13@200	21	27
12	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	55
13	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	52
14	SRC	500	200	200	9	12	6384	2-D16@200	21	52
15	SRC	500	200	200	9	9	5238	2-D16@200	21	52
16	SRC	500	200	200	9	9	5238	2-D13@200	21	52
17	SRC	500	200	200	9	9	5238	2-D13@200	21	37
18	SRC	500	200	200	9	9	5238	2-D13@200	21	65
19	SRC	500	200	200	9	9	5238	2-D13@200	21	57
20	SRC	600	200	200	9	14	7148	2-D19@200	21	34
21	SRC	600	200	200	9	14	7148	2-D19@200	21	31
22	SRC	500	200	200	9	14	7148	2-D16@200	21	31
23	SRC	500	200	200	9	12	6384	2-D13@200	21	31
24	SRC	450	200	200	9	12	6384	2-D13@200	21	34
25	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D13@200	21	36
26	SRC	600	200	200	9	16	7912	2-D13@200	21	39
27	SRC	500	200	200	9	12	6384	2-D13@200	21	51
28	SRC	500	200	200	9	16	7912	2-D13@200	21	54
29	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	63
30	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	66
31	SRC	600	200	200	9	14	7148	2-D16@200	21	31
32	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D16@200	21	31
33	SRC	450	200	200	9	12	6384	2-D13@200	21	51
34	SRC	450	200	200	9	16	7912	2-D13@200	21	55
35	SRC	600	200	200	9	12	6384	2-D19@200	21	63
36	RC	500						2-D16@200	21	

トラス壁

37	SRC	600	200	200	9	9	5238	2-D16@200	21	17
38	SRC	600	200	200	9	9	5238	2-D16@200	21	16
39	SRC	150	200	200	9	9	5238	1-D10@150	21	17
40	SRC	600	200	200	9	9	5238	2-D16@200	21	16
41	SRC	150	200	200	9	9	5238	1-D10@150	21	14
42	SRC	150	200	200	9	9	5238	1-D10@150	21	18

2. 2. 3 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 2.2.6，図 2.2.7）。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。

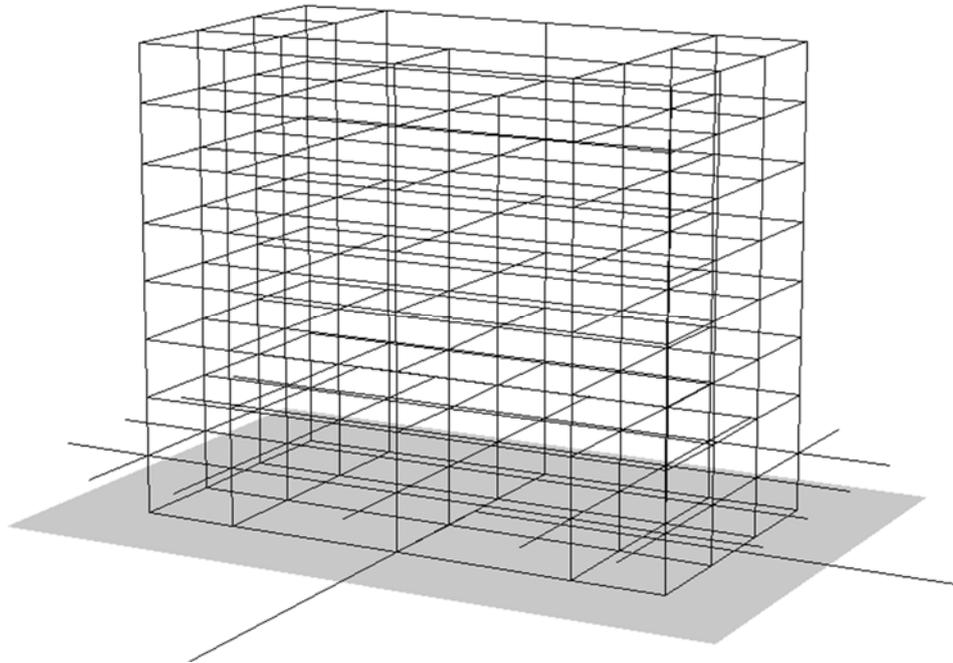


図 2.2.6 中消防署 立体骨組モデルの外観

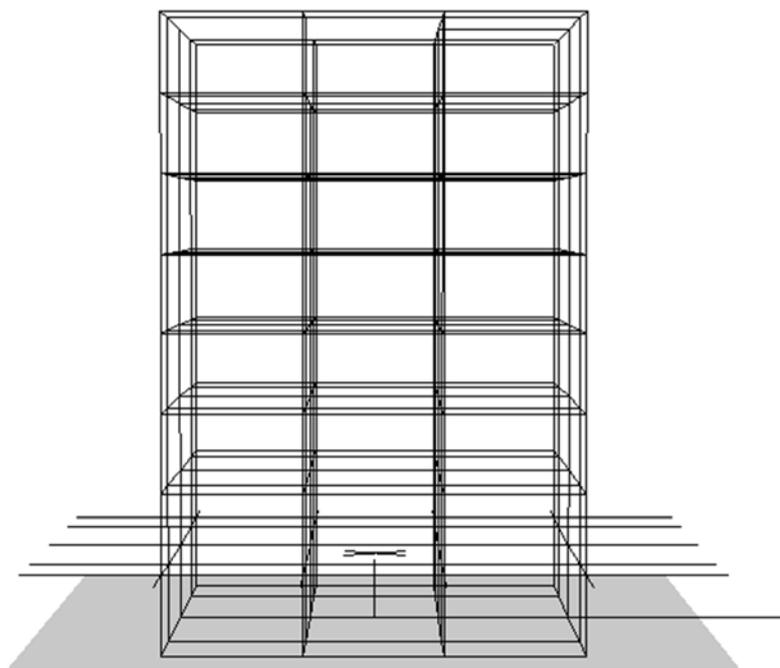


図 2.2.7 中消防署 東側から見た立体骨組モデル

・柱 (SRC 造)

SRC 造の柱を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

全体寸法	: B 及び D は中消防署構造図面より決定。
かぶり厚さ	: d1 及び d2 はすべて 40mm とする。
主筋	: 主筋量及び径は中消防署構造図面より決定。 主筋種別は, SD295 (D16 以下) と SD345 (D19 以上) を使用している。
せん断補強筋	: せん断補強筋量及び径, 間隔は中消防署構造図面より決定。 せん断補強筋種別は, すべて D13 を使用しているため SD30 とし, 間隔はすべて 100mm とする。
コンクリート強度	: 普通コンクリート $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (中消防署構造図面に準拠)
鉄骨強度	: SM490 (中消防署構造図面に準拠)
鉄骨寸法	: 中消防署構造図面より決定。
鉄骨のタイプ	: 中消防署構造図面より決定。

また, STERA 3D に実際に入力した柱データを表 2.2.8 に示す。ただし, C20 においては直径 1016mm 丸柱であるため, 面積が等価の一辺 1107.5mm の角柱に置換し STERA 3D に入力している。

表 2.2.8 柱入力データ

部材番号		寸法	鉄骨		鉄筋		コンクリート
STERA	設計図書	B×D	X方向	Y方向	主筋	帯筋	強度Fc[kN]
C1	1CC1	1000×1000	H-750×250×12×22	H-750×250×12×25	18-D25	D13 @100	21
C2	1CC5、1CE1	1000×1000	H-750×250×12×22	H-750×250×12×25	18-D25	D13 @100	21
C3	1CE2	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	20-D25	D13 @100	21
C4	1CE3	1200×1000	BH-950×250×12×28	H-750×250×12×25	22-D25	D13 @100	21
C5	1CE4	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	14-D25	D13 @100	21
C6	1CE5	1000×1000	H-750×250×12×22	H-750×250×12×25	8-D25	D13 @100	21
C7	1CC2、1CC4、1CD2、1CD4	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	24-D25	D13 @100	21
C8	1CB1、1CB5	1000×1000	H-750×250×12×22	H-750×250×12×25	10-D25	D13 @100	21
C9	1CB2	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	18-D25	D13 @100	21
C10	1CB4	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	12-D25	D13 @100	21
C11	1CC3	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	8-D25	D13 @100	21
C12	1CD1	1000×1000	H-750×250×12×22	H-750×250×12×25	18-D25	D13 @100	21
C13	2CB2、2CB3、2CB4、2CC2、2CC3 2CC4、2CD1、2CD2、2CD3、2CD4 2CE2、2CE3、2CE4	1000×1000	H-750×200×12×22	H-750×200×12×22	8-D25	D13 @100	21
C14	2CB1、2CB5、2CE5	1000×1000	H-750×200×12×22	H-750×200×12×22	8-D25	D13 @100	21
C15	2CC1、2CD5	1000×1000	H-750×200×12×22	H-750×200×12×22	8-D25	D13 @100	21
C16	2CC5、2CE1	1000×1000	H-750×200×12×22	H-750×200×12×22	8-D25	D13 @100	21
C17	3CB2、3CB3、3CB4、3CC1、3CC2 3CC3、3CC4、3CD1、3CD3、3CD4 3CD5、3CE2、3CE3、3CE4	1000×1000	H-750×200×12×19	H-750×200×12×19	8-D25	D13 @100	21
C18	3CB1、3CB5、3CE5	1000×1000	H-750×200×12×19	H-750×200×12×19	8-D25	D13 @100	21
C19	3CD2	1150φ	H-750×200×12×19	H-750×200×12×19	12-D25	D13 @100	21
C20	3CC5、3CE1	1000×1000	H-750×200×12×19	H-750×200×12×19	8-D25	D13 @100	21
C21	4CB2、4CB4、4CC2、4CC4、4CD1 4CD3、4CD4、4CE4	900×900	H-650×200×9×19	H-650×200×9×19	8-D25	D13 @100	21
C22	4CE3	900×900	H-650×200×12×22	H-650×200×9×19	8-D25	D13 @100	21
C23	4CB1、4CB5、4CE5	900×900	H-650×200×9×19	H-650×200×9×19	8-D25	D13 @100	21
C24	4CC3、4CD2	1050φ	H-650×200×9×19	H-650×200×9×19	12-D25	D13 @100	21
C25	4CB3	900×900	H-650×200×12×22	H-650×200×9×19	8-D25	D13 @100	21
C26	4CC1、4CD5	900×900	H-650×200×9×19	H-650×200×9×19	8-D25	D13 @100	21
C27	4CC5、4CE1	900×900	H-650×200×9×19	H-650×200×9×19	8-D25	D13 @100	21
C28	4CE2	900×900	H-650×200×9×19	H-650×200×9×19	10-D25	D13 @100	21
C29	5CB4	900×900	H-650×200×9×16	H-650×200×9×16	10-D25	D13 @100	21
C30	5CB2、5CB3、5CC2、5CC3、5CC4 5CD1、5CD2、5CD3、5CD4、5CE3 5CE4	900×900	H-650×200×9×16	H-650×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C31	5CB1、5CB5、5CE5	900×900	H-650×200×9×16	H-650×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C32	5CC1、5CE2、5CD5	900×900	H-650×200×9×16	H-650×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C33	5CC5、5CE1	900×900	H-650×200×9×16	H-650×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C34	6CB2、6CB3、6CC4、6CD1、6CD4 6CE2、6CE3、6CE4、7CB3、7CB4 7CC3、7CC4、7CD1、7CD4	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C35	6CB1、6CB5、6CE5、7CB1、7CB5 7CE5	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C36	6CC2、6CC3、7CC2、7CD2、7CE3	920φ	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	12-D25	D13 @100	21
C37	6CB4	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	12-D25	D13 @100	21
C38	6CC1、6CD5、7CC1、7CD5	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C39	6CC5、6CE1、7CC5、7CE1	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	8-D25	D13 @100	21
C40	6CD2、6CD3	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	10-D25	D13 @100	21
C41	B1CC5、B1CE1	1000×1000	H-750×250×14×25	H-750×250×14×25	8-D25	D13 @100	21
C42	B1CB2、B1CB4、B1CB3、B1CC2、B1CC4 B1CC3、B1CD2、B1CD3、B1CD4、B1CE2 B1CE3、B1CE4	1200×1000	BH-950×250×12×25	H-750×250×14×25	10-D25	D13 @100	21
C43	B1CB1、B1CB5、B1CE5、	1000×1000	H-750×250×14×25	H-750×250×14×25	8-D25	D13 @100	21
C44	B1CC1、B1CD5	1000×1000	H-750×250×14×25	H-750×250×14×25	8-D25	D13 @100	21
C45	B1CD1	1000×1000	H-750×250×14×25	H-750×250×14×25	8-D25	D13 @100	21
C50	1CB3	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	24-D25	D13 @100	21
C51	1CD5	1000×1000	H-750×250×12×22	H-750×250×12×25	16-D25	D13 @100	21
C52	1CD3	1200×1000	BH-950×250×12×22	H-750×250×12×25	14-D25	D13 @100	21
C53	7CB2、7CE2、7CE4	800×800	H-550×200×9×16	H-550×200×9×16	10-D25	D13 @100	21

・梁 (SRC 造)

SRC 造の梁を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

全体寸法	: B 及び D は中消防署構造図面より決定。
かぶり厚さ	: d1 及び d2 はすべて 40mm とする。
主筋	: 主筋量及び径は中消防署構造図面より決定。 主筋種別は, SD295 (D16 以下) と SD345 (D19 以上) を使用している。
せん断補強筋	: せん断補強筋量及び径, 間隔は中消防署構造図面より決定。 せん断補強筋種別は, すべて D13 を使用しているため SD30 とし, 間隔はすべて 100mm とする。
コンクリート強度	: 普通コンクリート $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$ (中消防署構造図面に準拠)
鉄骨強度	: SM490 (中消防署構造図面に準拠)
鉄骨寸法	: 中消防署構造図面より決定。
鉄骨のタイプ	: 中消防署構造図面より決定。

・梁 (RC 造)

RC 造の梁を入力するにあたって各値は以下のように決定した。

全体寸法	: B 及び D は中消防署構造図面より決定。
かぶり厚さ	: d1 及び d2 はすべて 40mm とする。
主筋	: 主筋量及び径は中消防署構造図面より決定。 主筋種別は, SD295 (D16 以下) と SD345 (D19 以上) を使用している。
せん断補強筋	: せん断補強筋量及び径, 間隔は中消防署構造図面より決定。 せん断補強筋種別は, すべて D13 を使用しているため SD30 とし, 間隔はすべて 100mm とする。
コンクリート強度	: 普通コンクリート $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$ (中消防署構造図面に準拠)

STERA 3D に実際に入力した梁データを表 2.2.9 に示す。

表 2.2.9 梁入力データ

部材番号	設計図書	寸法	鉄骨	主筋		帯筋	スラブ補強筋	コンクリート
				上端	下端			
STERA		B×D		上端	下端			強度F _c [kN]
B1	1GB1, 1GB4, 1GC1, 1GC4, 1GD1, 1GD4, 1GE1, 1GE4	600×750	BH-500×300×12×28	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B2	1GB2, 1GB3, 1GE2, 1GE3	550×1300	BH-1050×300×12×25	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B3	1GC2, 1GC3, 1GD2, 1GD3	550×1300	BH-1050×300×12×25	5-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B4	1G1B, 1G1C, 1G1D, 1GSB, 1GS, 1GSD	500×950	BH-750×250×12×32	6-D25	6-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B5	1G2B, 1G2C, 1G2D, 1G3B, 1G3C, 1G3D, 1G4B, 1G4C, 1G4D	500×1000	BH-750×250×12×32	6-D25	6-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B8	2G3B, 2G3D, 2G4B, 2G4D	550×950	BH-700×300×12×32	6-D25	6-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B9	2G5B, 2G5D, 2G1B, 2G1D	500×900	BH-650×250×12×32	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B12	2GB1, 2GE4, 2GB4, 2GC1, 2GC4, 2GD1, 2GE1	600×750	BH-500×300×12×28	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B13	2G1C	500×900	BH-650×250×12×32	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B14	3G2C, 3G3C	500×900	BH-650×250×12×28	6-D25	6-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B15	3G3B, 3G4B, 3G4D	500×900	BH-650×250×12×28	5-D25	5-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B16	3G5B, 3G5D, 3G5C	500×850	BH-600×250×12×28	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B17	3GB1, 3GD1, 3GD4, 3GE4, 3GB4, 3GC1	600×700	BH-450×300×12×28	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B18	3GC2, 3GC3, 3GD2, 3GD3	550×1200	BH-950×300×12×28	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B20	3G2B, 3G2D, 3G3D	500×850	BH-650×250×12×28	5-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B21	4G3B, 4G4B, 4G4D	500×900	BH-650×250×12×28	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B22	4G5B, 4G5D	500×850	H-600×250×12×25	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B23	4GB1, 4GB4	600×700	BH-450×300×12×25	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B24	4GC1, 4GC4, 4GD1, 4GD4, 4GE4	600×700	BH-450×300×12×25	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B25	4GB2, 4GE2, 4GE3, 4GB3, 5GB2, 5GB3, 5GE2, 5GE3	550×1100	BH-850×300×12×28	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B26	4GC2, 4GD2, 4GD3, 4GC3	550×1100	BH-850×300×12×28	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B27	4G1B, 4G1D, 4G2B, 4G2D, 4G3D, 5G3C, 5G2C	500×850	H-600×250×12×25	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B28	4G5C, 5G4B, 5G4D	500×850	H-600×250×12×25	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B29	5G1C	500×800	H-550×250×12×25	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B30	5GB1, 5GC1, 5GC4	600×650	BH-400×250×12×25	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B31	5GB4	600×650	BH-400×250×12×25	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B32	5G1B, 5G1D	500×800	H-550×250×12×25	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B33	6G2B, 6G2D	450×850	H-600×200×12×25	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B34	6G5B, 6G5D	450×800	H-550×200×12×22	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B35	6GB1, 6GD1, 6GD4, 6GE4, 6GB4, 6GC1, 6GC4	600×650	H-400×200×12×22	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B36	6GB2, 6GB3, 6GE2, 6GE3	550×1000	BH-750×300×12×28	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B37	6G1B, 6G1D	450×800	H-550×200×12×22	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B38	7G2B, 7G3B, 7G3C, 7G3D, 7G4B, 7G4D	450×750	H-500×200×12×22	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B39	7G5C, 7G5D, 7G1B, 7G1D, 7G5B	450×700	H-450×200×9×22	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B40	7GB1, 7GC1, 7GD1, 7GD4, 7GE4	600×600	H-350×200×12×22	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B41	7GB2, 7GE2, 7GE3	500×900	H-650×250×12×25	5-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B42	7GB4, 7GE1	600×600	BH-350×200×12×22	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B43	7GC2, 7GC3, 7GD2, 7GD3	500×900	H-650×250×12×25	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B44	RG3B	450×750	H-500×200×9×19	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B45	RG4B	450×750	H-500×200×9×19	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B46	RGB1, RGC1, RGE4, RGB4, RGC4, RGD4, RGE1	600×600	BH-350×200×9×19	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B47	RGB2, RGE2, RGE3, RGC2, RGC3	450×900	H-650×200×12×22	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B48	RGD1	600×600	BH-350×200×9×19	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B49	RG1C, RG1D, RG5B, RG5C, RG5D	450×700	H-450×200×9×12	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B50	RG2B, RG2C, RG2D, RG4C, RG4D	450×750	H-500×200×9×16	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B60	2GB2, 2GB3, 2GE2, 2GE3, 2GC2, 2GC3, 2GD2, 2GD3	550×1300	BH-1050×300×12×28	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B61	2GD4	600×750	BH-500×300×12×28	4-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B62	2G2B, 2G2D	550×950	BH-700×300×12×32	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B63	2G2C	550×950	BH-700×300×12×32	5-D25	5-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B64	2G3C, 2G4C	550×950	BH-700×300×12×32	5-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B65	2G5C	500×900	BH-650×250×12×32	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B66	3GC4, 3GE1	600×700	BH-450×300×12×28	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B67	3GB2, 3GB3, 3GE2, 3GE3	550×1200	BH-950×300×12×28	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B68	3G1B, 3G1D	500×850	BH-600×250×12×28	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B69	3G1C	500×850	BH-600×250×12×28	4-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B70	3G4C	500×900	BH-650×250×12×28	5-D25	5-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B71	4GE1	600×700	BH-450×300×12×25	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B72	4G1C	500×850	H-600×250×12×25	4-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B73	4G2C	500×900	BH-650×250×12×28	5-D25	5-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B74	4G3C, 4G4C	500×900	BH-650×250×12×28	5-D25	4-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B75	5GD1, 5GD4, 5GE1, 5GE4	600×650	BH-400×250×12×25	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B76	5GC2, 5GC3, 5GD2, 5GD3	550×1100	BH-850×300×12×28	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B77	5G5D, 5G5B, 5G5C	500×850	H-550×250×12×25	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B78	5G2B, 5G3B, 5G3D	500×850	H-600×250×12×25	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B79	5G2D	500×850	H-600×250×12×25	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B80	5G4C	500×850	H-600×250×12×25	4-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B81	6GE1	600×650	H-400×200×12×22	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B83	6GC2, 6GC3, 6GD2, 6GD3	550×1000	BH-750×250×12×28	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B84	6G1C	450×800	H-550×200×12×22	4-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B85	6G2C, 6G3C	450×850	H-600×200×12×25	5-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B86	6G3B, 6G4B, 6G4D	450×850	H-600×200×12×25	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B87	6G4C	450×850	H-600×200×12×25	4-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B88	6G3D	450×850	H-600×200×12×25	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B89	6G5C	450×800	H-550×200×12×22	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B90	7GC4	600×600	BH-350×200×12×22	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B91	7GB3	500×900	H-650×250×12×25	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B92	7G1C	450×700	H-450×200×9×22	3-D25	3-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B93	7G2C	450×750	H-500×200×12×22	4-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B94	7G2D	450×750	H-500×200×12×22	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B95	7G4C	450×750	H-500×200×12×22	3-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B96	RGB3	450×900	H-650×200×12×22	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21
B97	RG1B	450×700	H-650×200×9×19	2-D25	2-D25	2-D13 @100	1-D13 @100	21

2. 3 多質点系モデルの作成

2. 3. 1 豊橋市役所 東館

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。

豊橋市役所東館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。

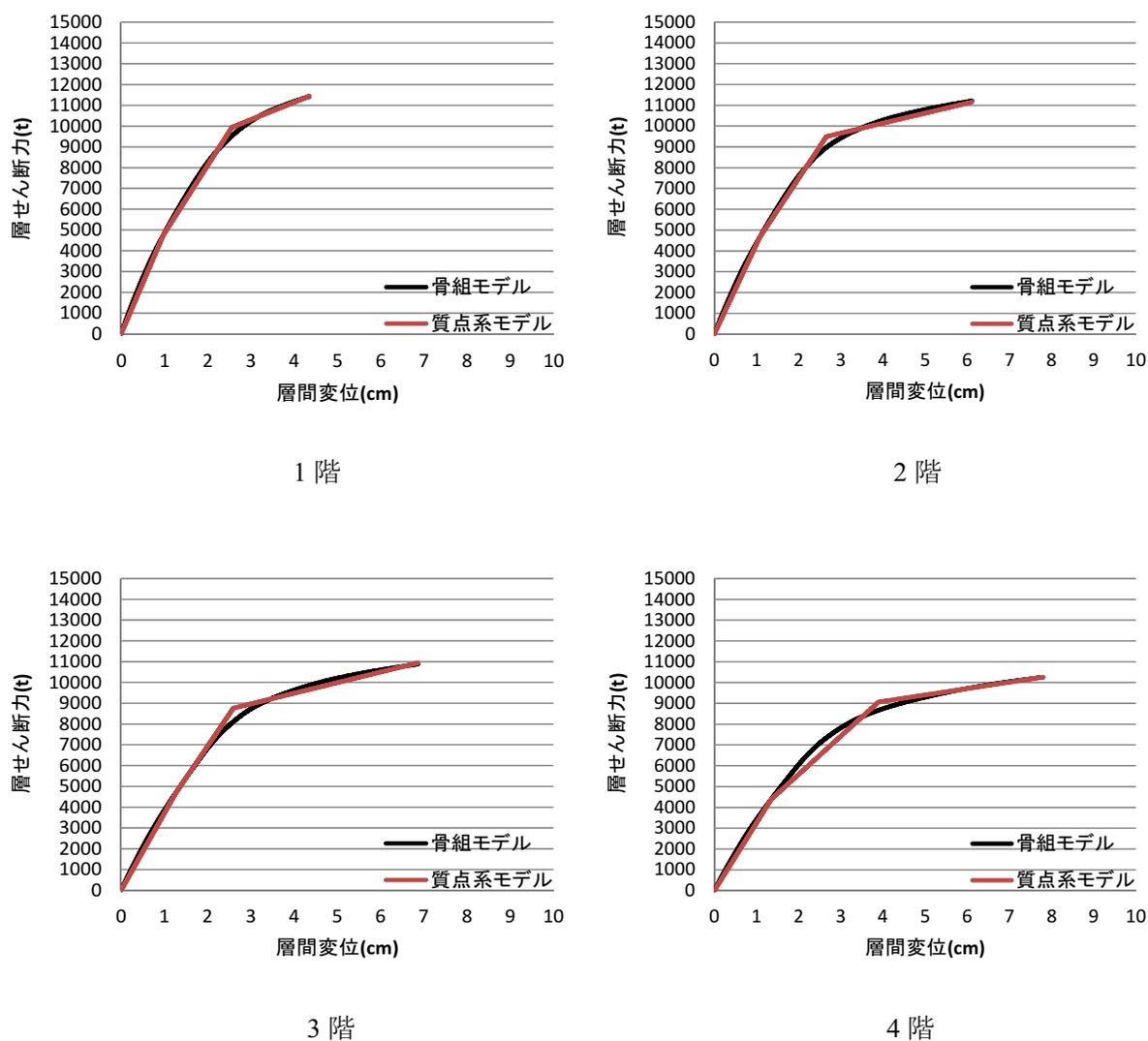
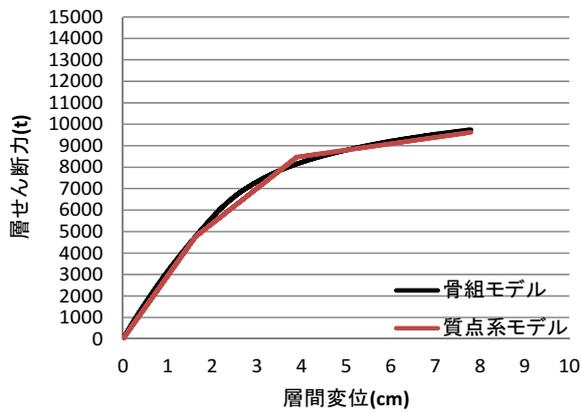
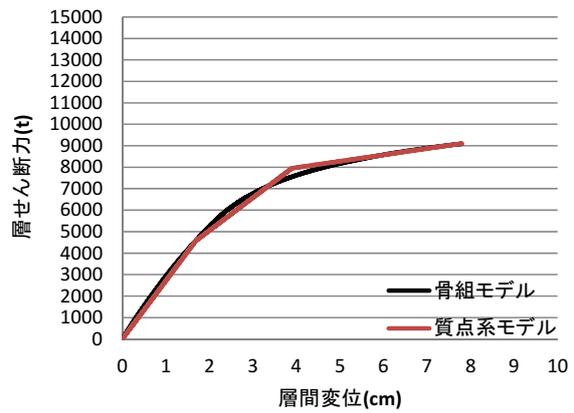


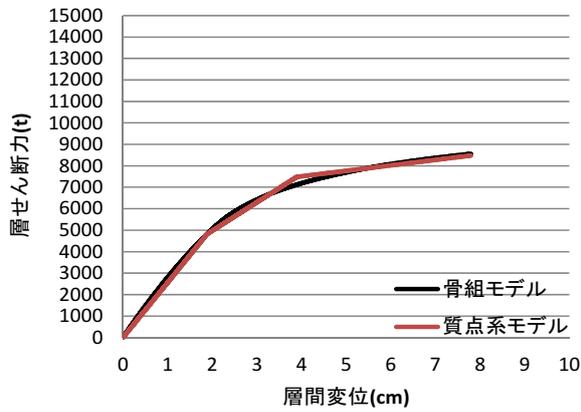
図 2.3.1 (1) 東館 X 方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



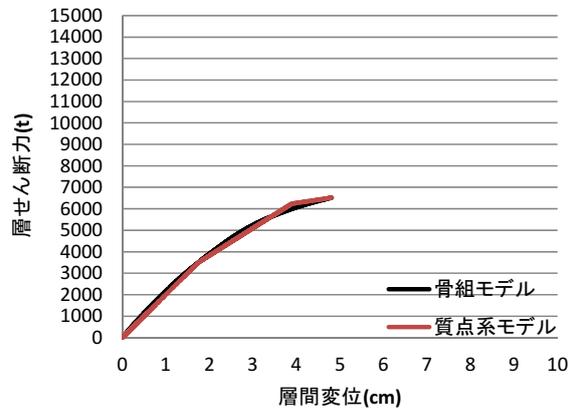
5階



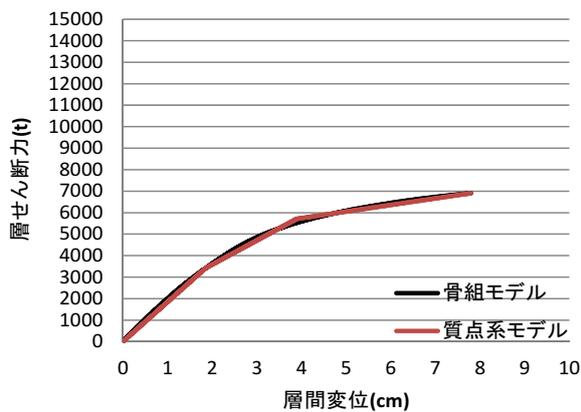
6階



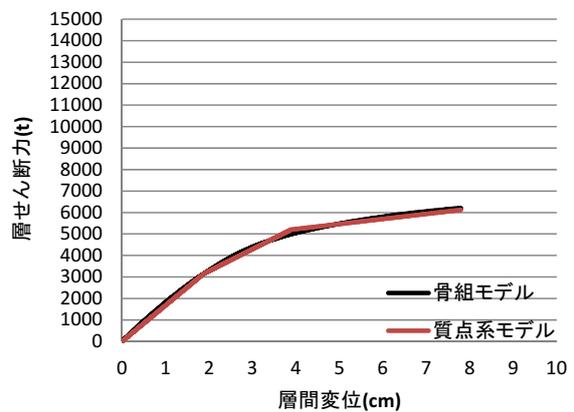
7階



8階

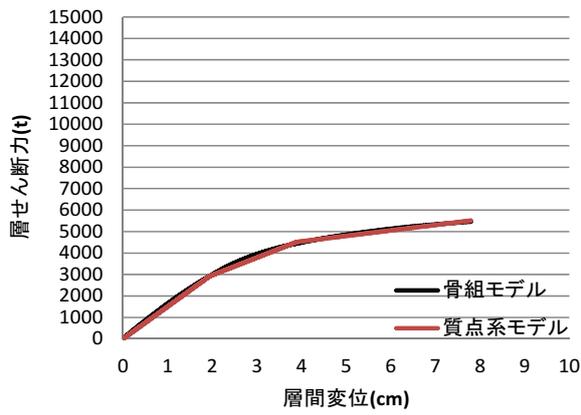


9階

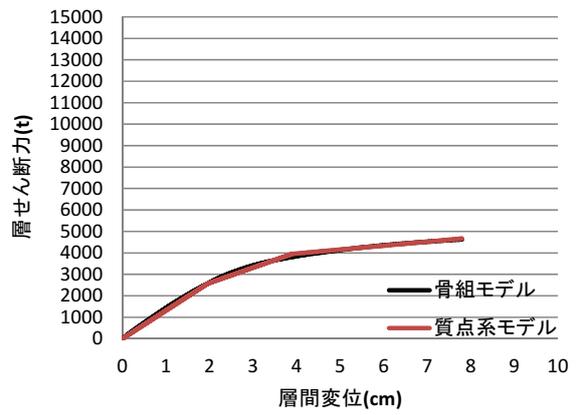


10階

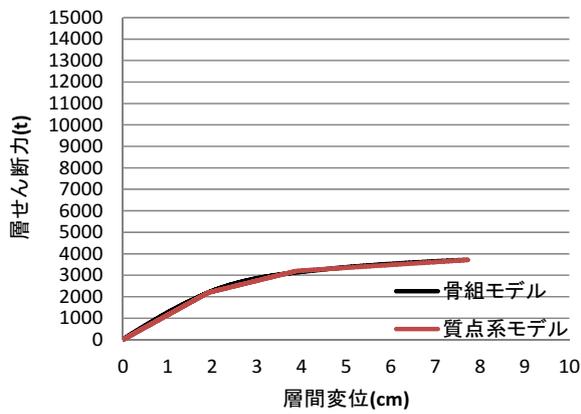
図 2.3.1 (2) 東館 X方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



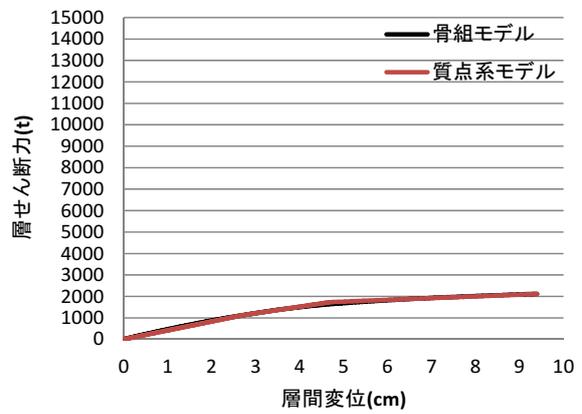
11 階



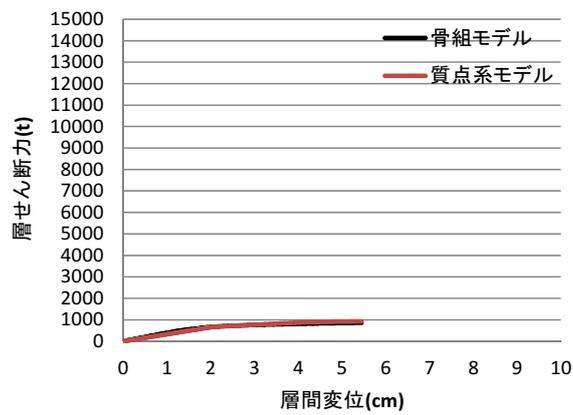
12 階



13 階

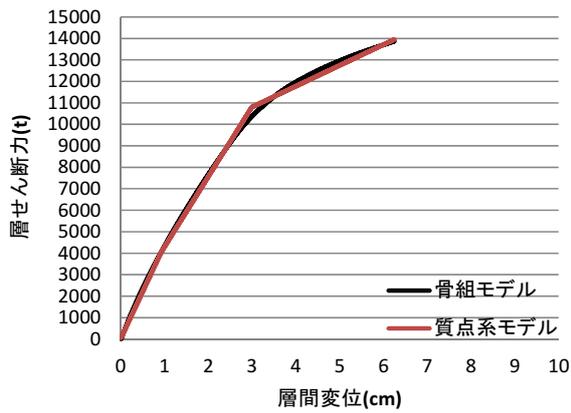


14 階

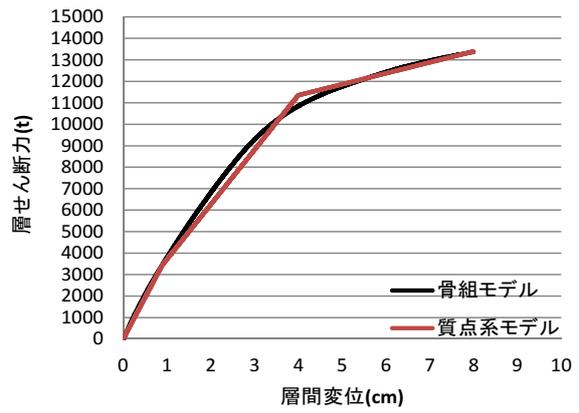


15 階

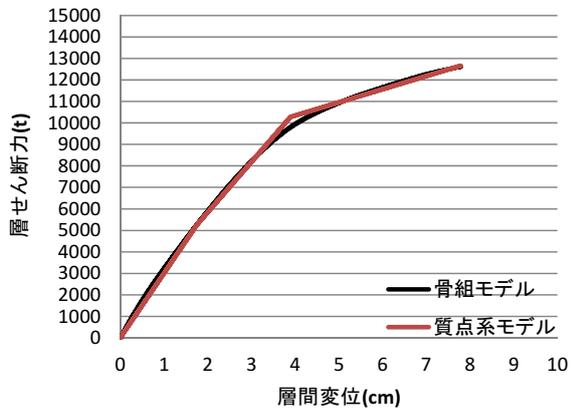
図 2.3.1 (3) 東館 X 方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



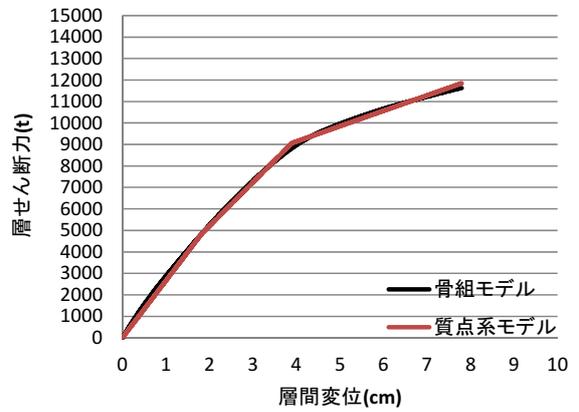
1階



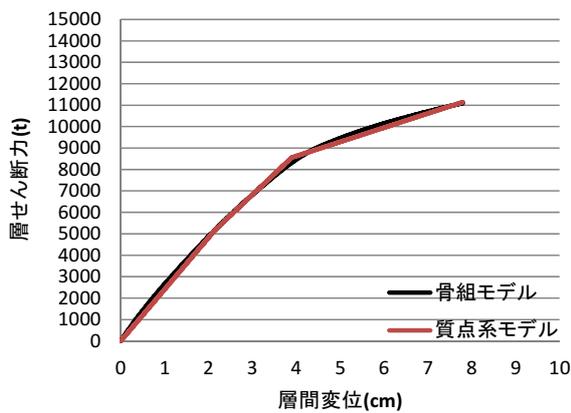
2階



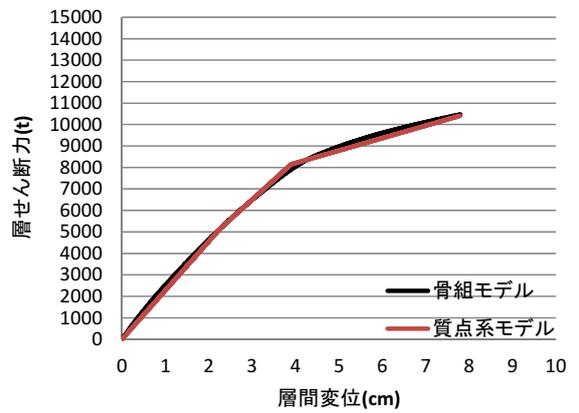
3階



4階

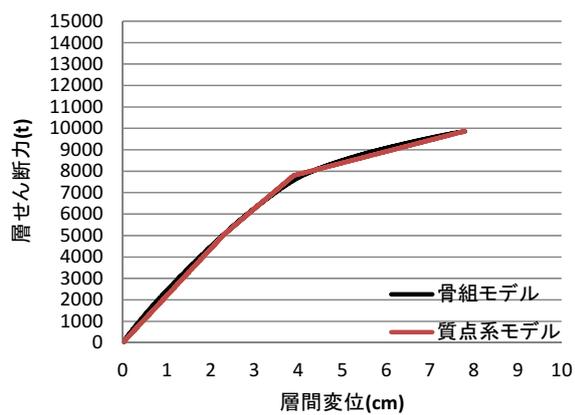


5階

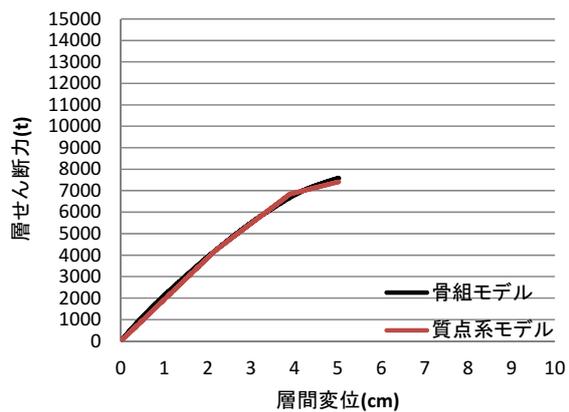


6階

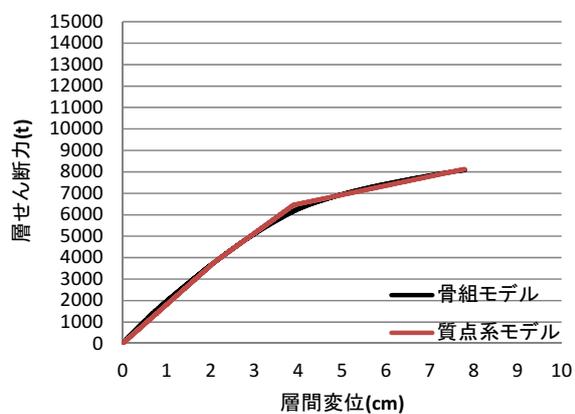
図 2.3.2 (1) 東館 Y方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



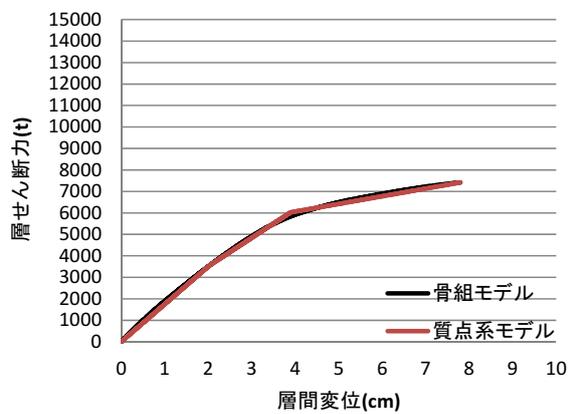
7階



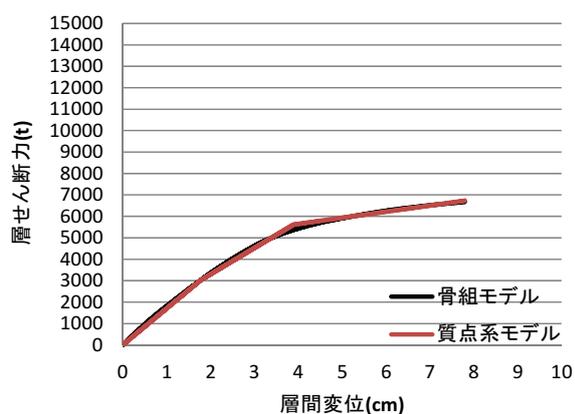
8階



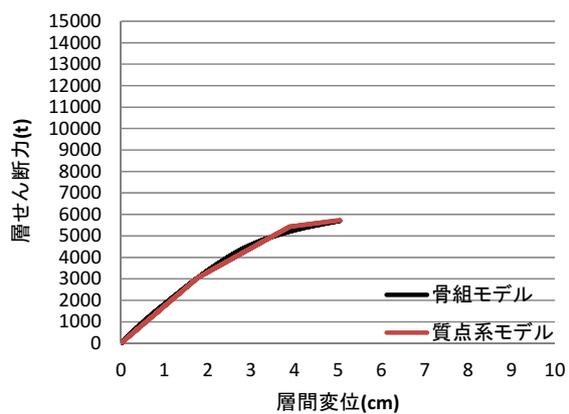
9階



10階

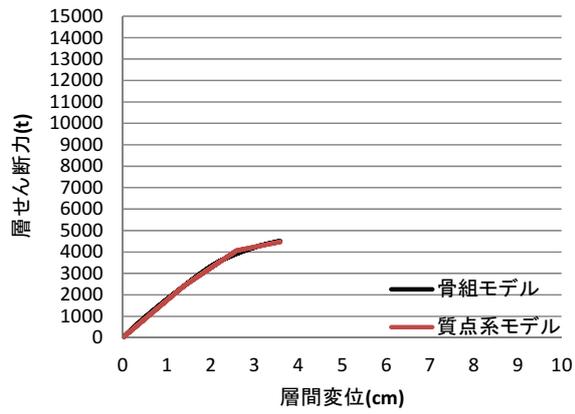


11階

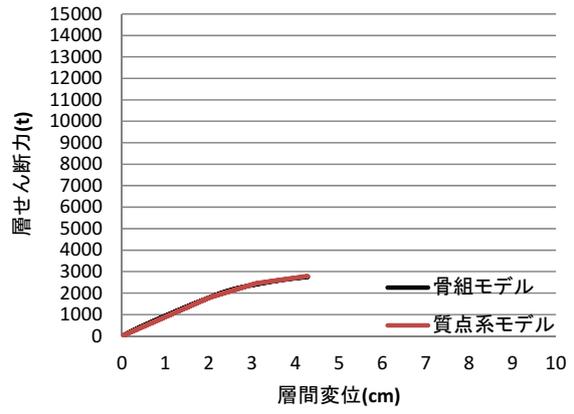


12階

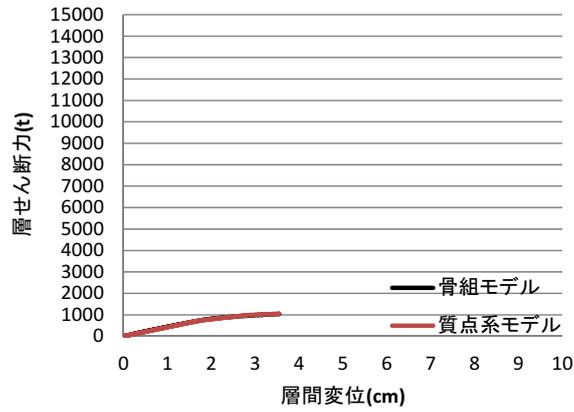
図 2.3.2 (2) 東館 Y方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



13 階



14 階



15 階

図 2.3.2 (3) 東館 Y 方向の耐力曲線およびトリリニアモデル

2. 3. 2 豊橋市役所 西館

豊橋市役所 西館の多質点系モデルも 2.3.1 の東館と同様に武田モデルを用いる。

図 2.3.3～図 2.3.4 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。

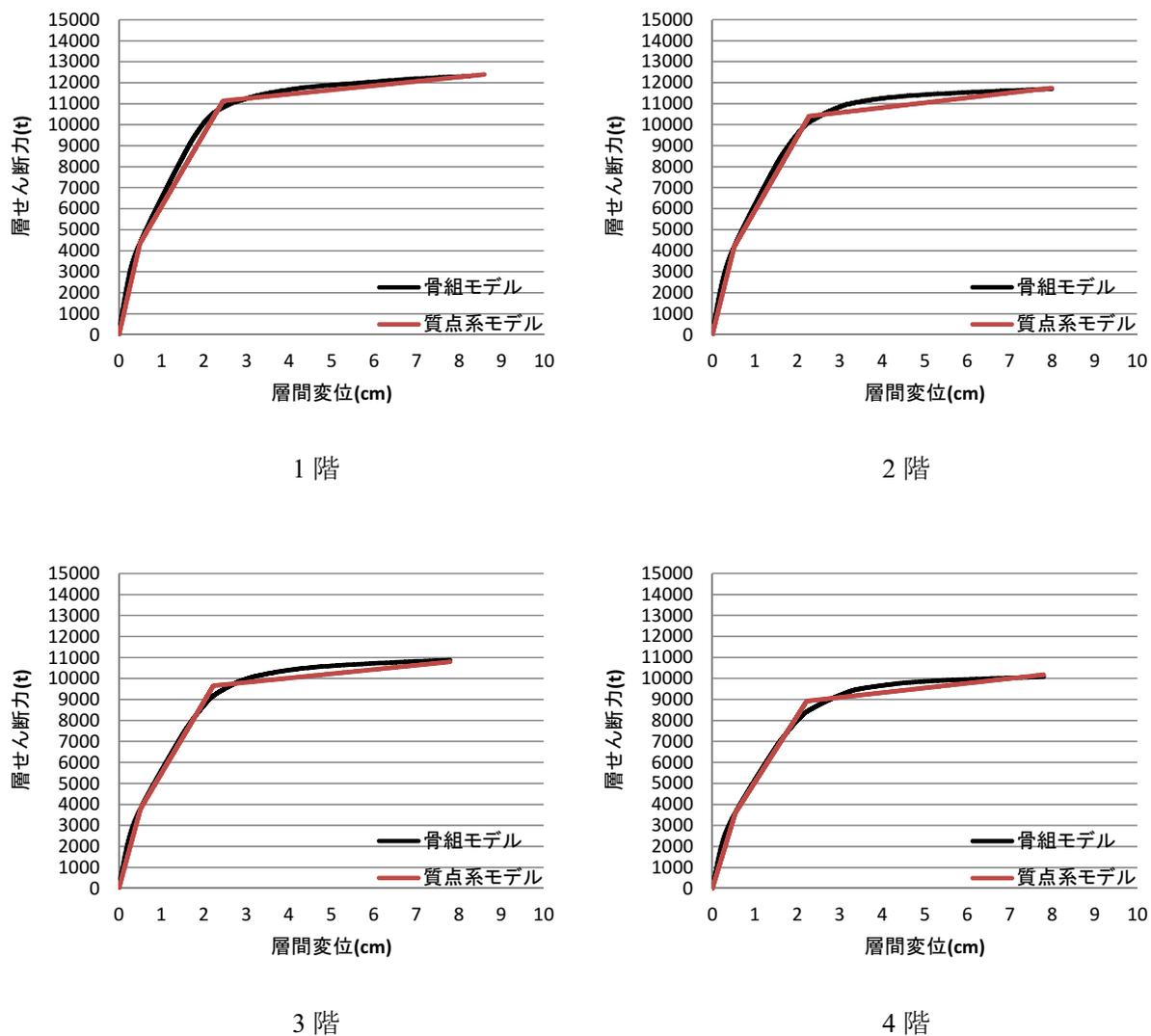
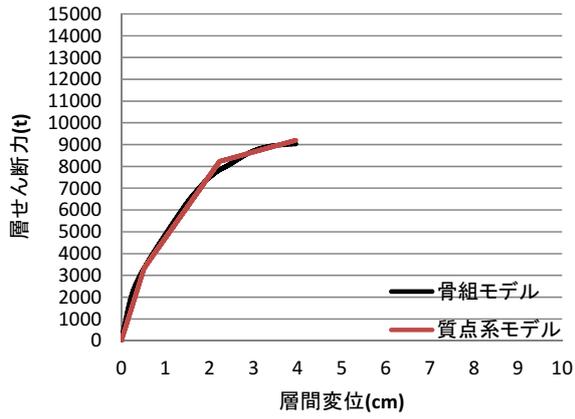
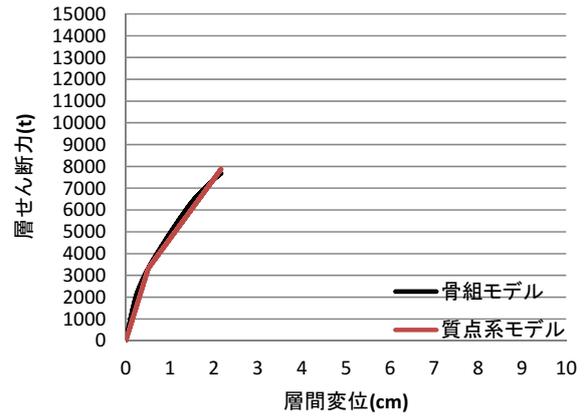


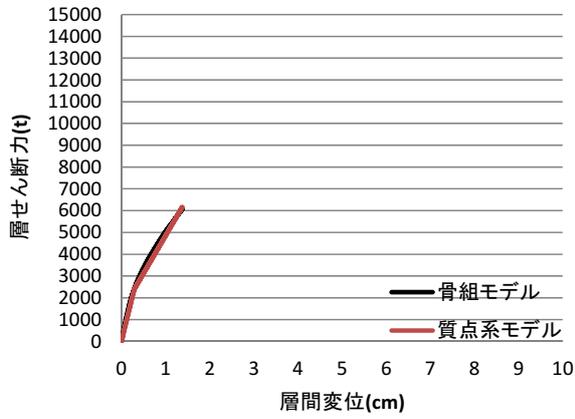
図 2.3.3 (1) 西館 X 方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



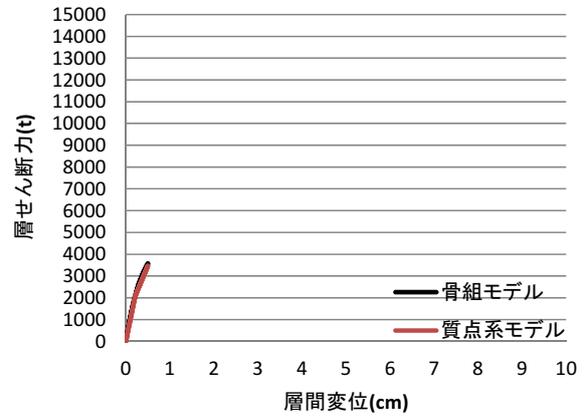
5階



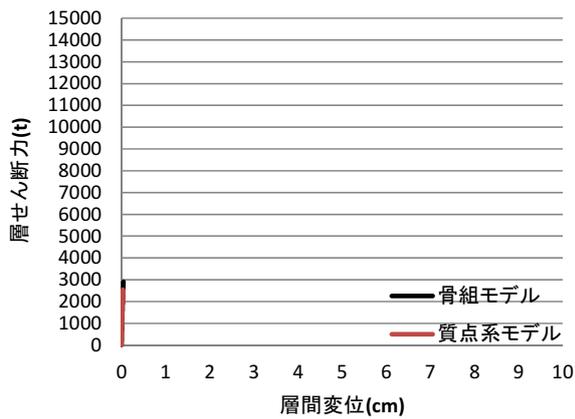
6階



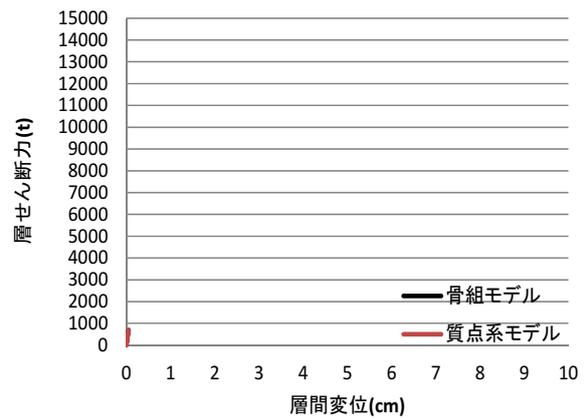
7階



8階

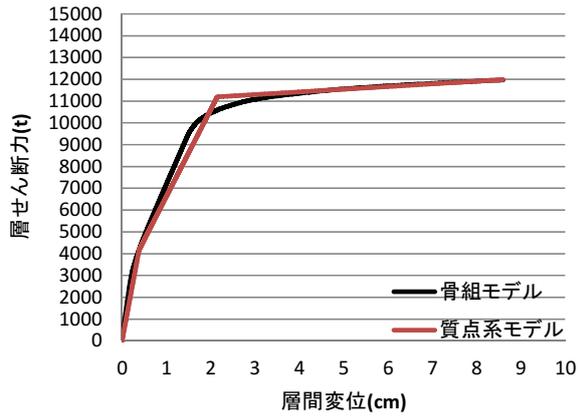


9階

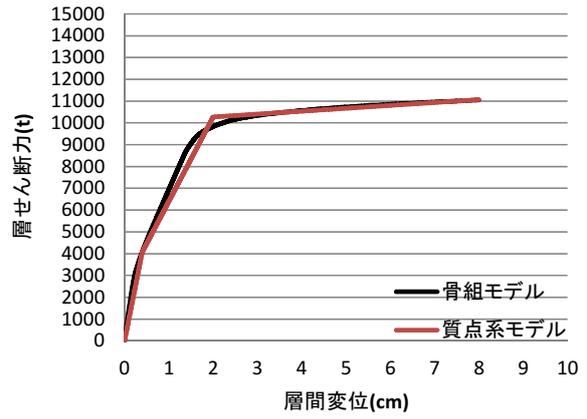


10階

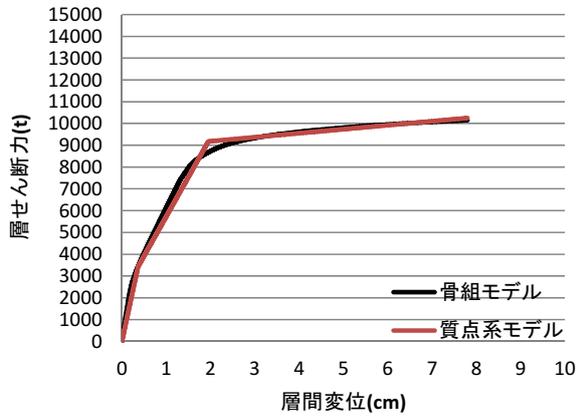
図 2.3.3 (2) 西館 X 方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



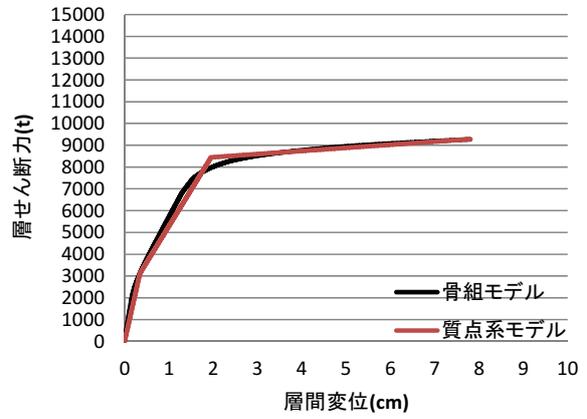
1 階



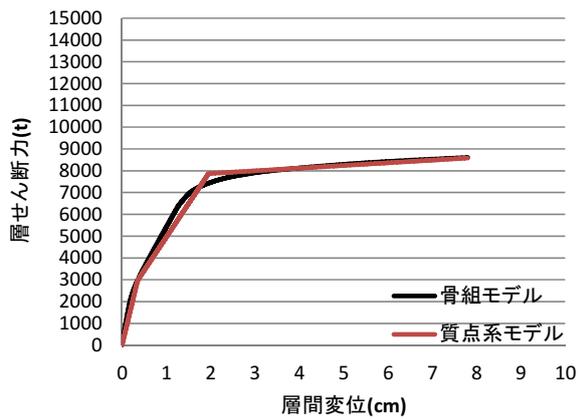
2 階



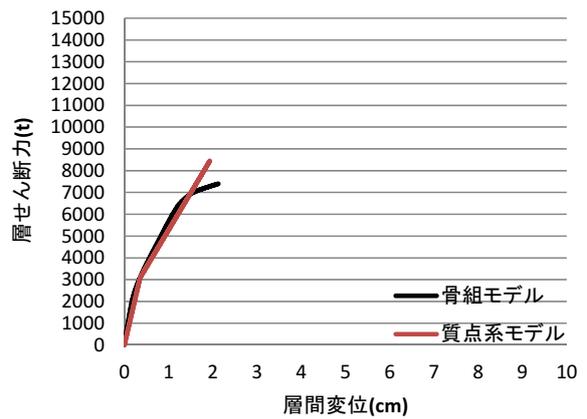
3 階



4 階

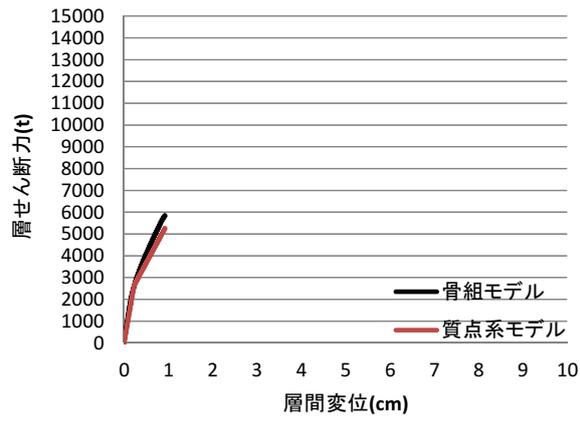


5 階

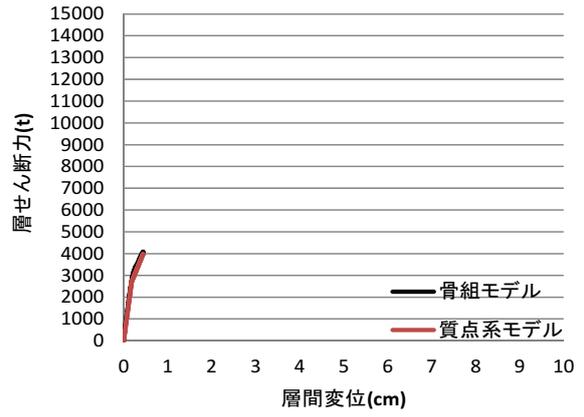


6 階

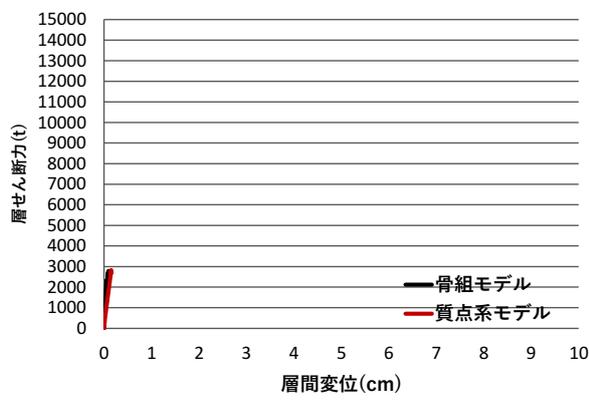
図 2.3.4 (1) 西館 Y 方向の耐力曲線およびトリリニアモデル



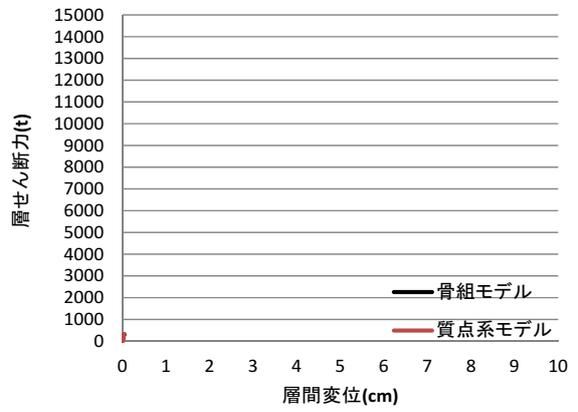
7階



8階



9階



10階

図 2.3.4 (2) 西館 Y方向の耐力曲線およびトリリニアモデル

2. 3. 3 豊橋市中消防署

豊橋市中消防署の多質点系モデルも 2.3.1, 2.3.2 の豊橋市役所 両館と同様に武田モデルを用いる。図 2.3.5～図 2.3.6 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。

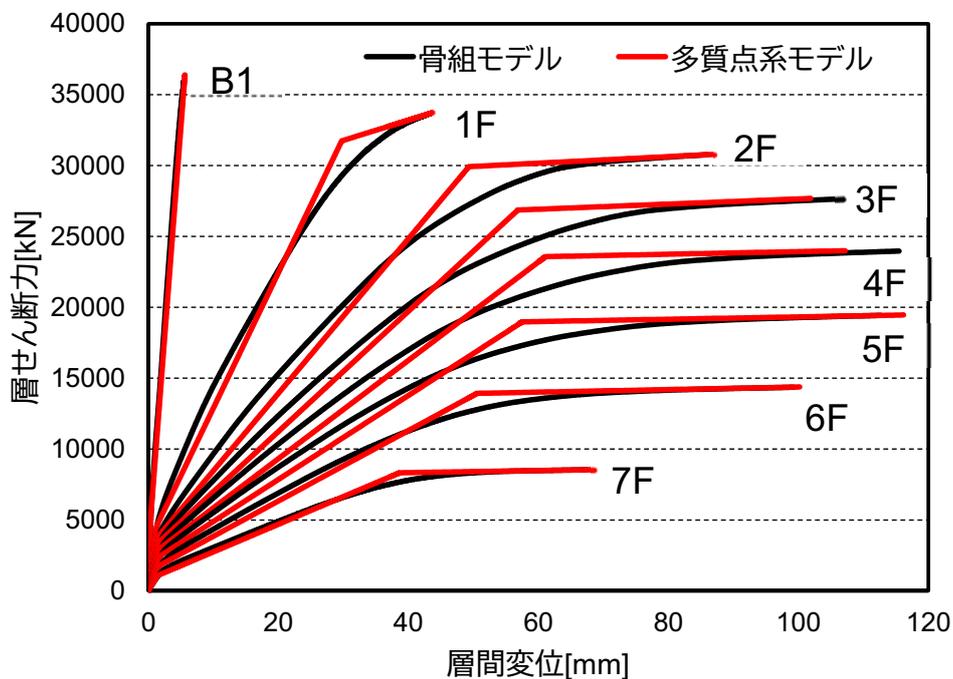


図 2.3.5 東西方向の耐力曲線とトリリニアモデル

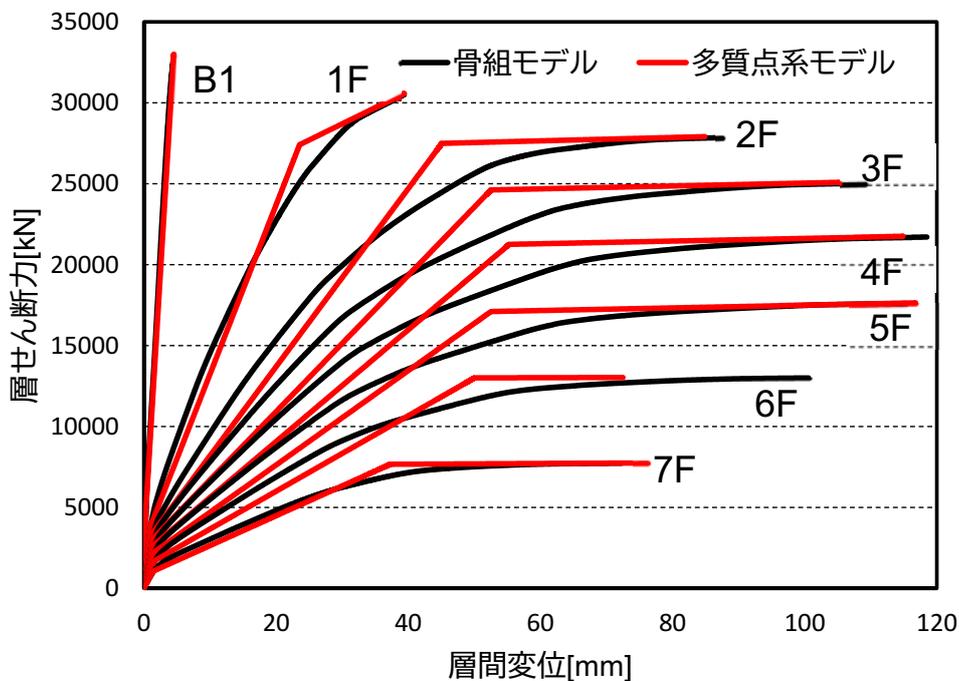


図 2.3.6 南北方向の耐力曲線とトリリニアモデル

2. 4 LAN 地震計の設置

2. 4. 1 豊橋市役所

建物の耐震性能をモニタリングするため、LAN 地震計を設置した。LAN 地震計は、電源ケーブルを使用せずネットワークケーブルのみで給電を行えるなど、設置が容易なセンサである。得られたデータは5分間分の加速度データとして、クラウドにアップロードされる。

使用した LAN 地震計は、白山工業社 SV501WP を使用した（図 2.4.1）。



図 2.4.1 LAN 地震計本体

豊橋市役所では、西館地下1階1点、西館8階1点、東館13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て設置した。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 2.4.3、立面におけるLAN地震計設置位置を図 2.4.4 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)
E	東館 13 階	E_EW	E_NS	E_UD
W	西館 8 階	W_EW	W_NS	W_UD
B	西館地下 1 階	B_EW	B_NS	B_UD

● : LAN 地震計

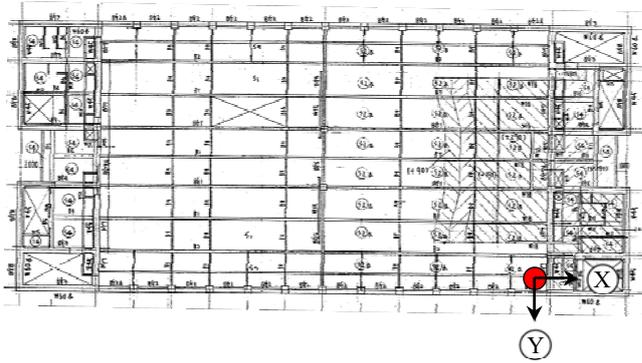


図 2.4.2 LAN 地震計設置位置 (西館 8 階)

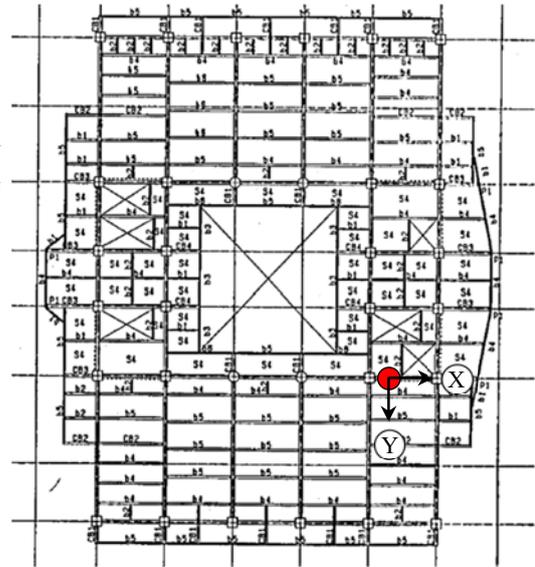


図 2.4.3 LAN 地震計設置位置 (東館 13 階)

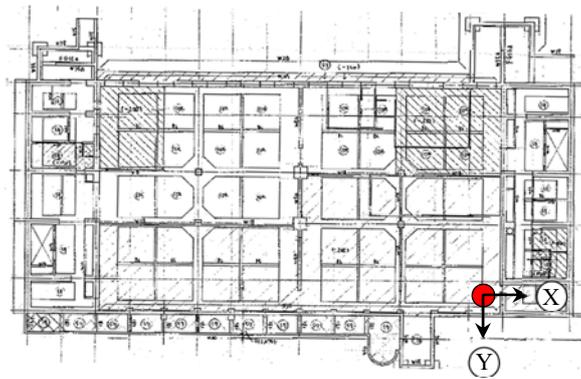


図 2.4.4 LAN 地震計設置位置 (地下 1 階)

● : LAN 地震計
 ● : ルーター
 ● : ハブ
 ● : ハブ, 記録機器, UPS

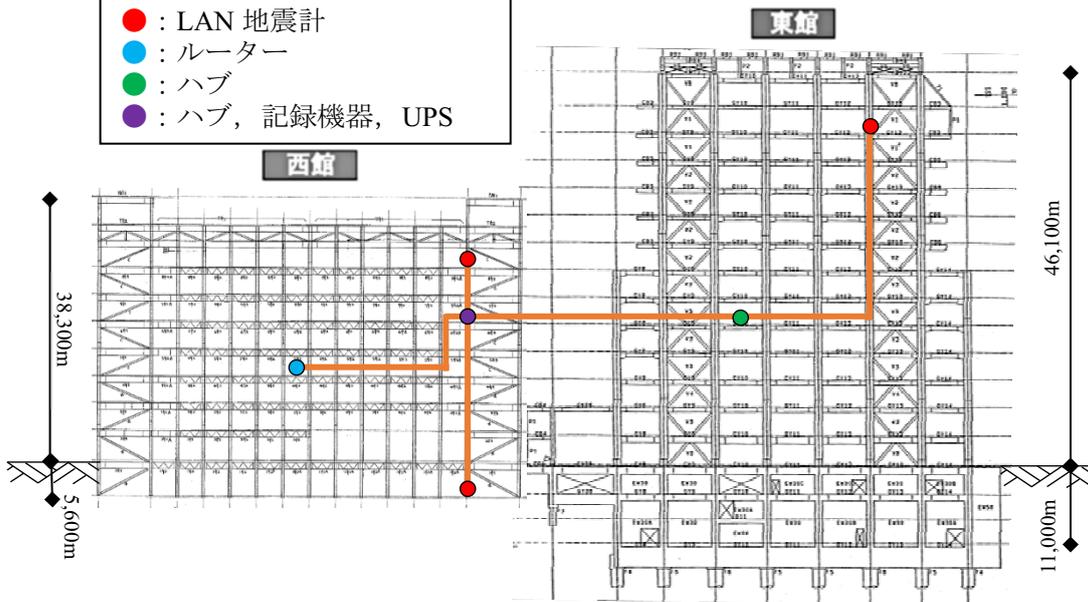


図 2.4.5 LAN 地震計設置位置 (東西方向軸組図)

2. 4. 2 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2.4.2に示す。また、平面におけるLAN地震計設置位置を図2.4.6～図2.4.7、立面におけるLAN地震計設置位置を図2.4.8に示す。

表 2.4.2 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

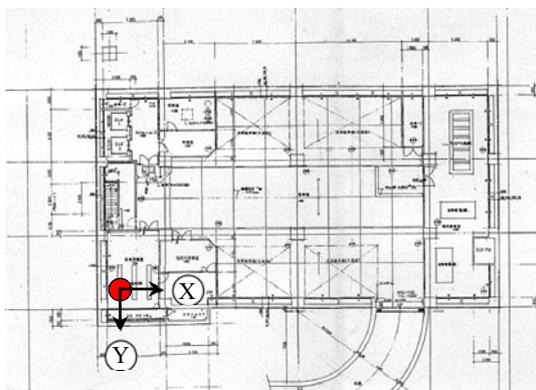


図 2.4.6 LAN 地震計設置位置 (地下1階)

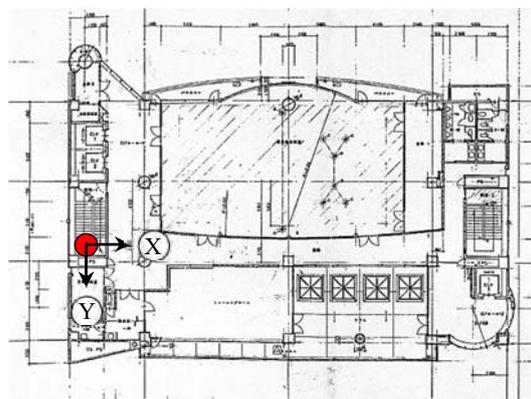


図 2.4.7 LAN 地震計設置位置 (地上7階)

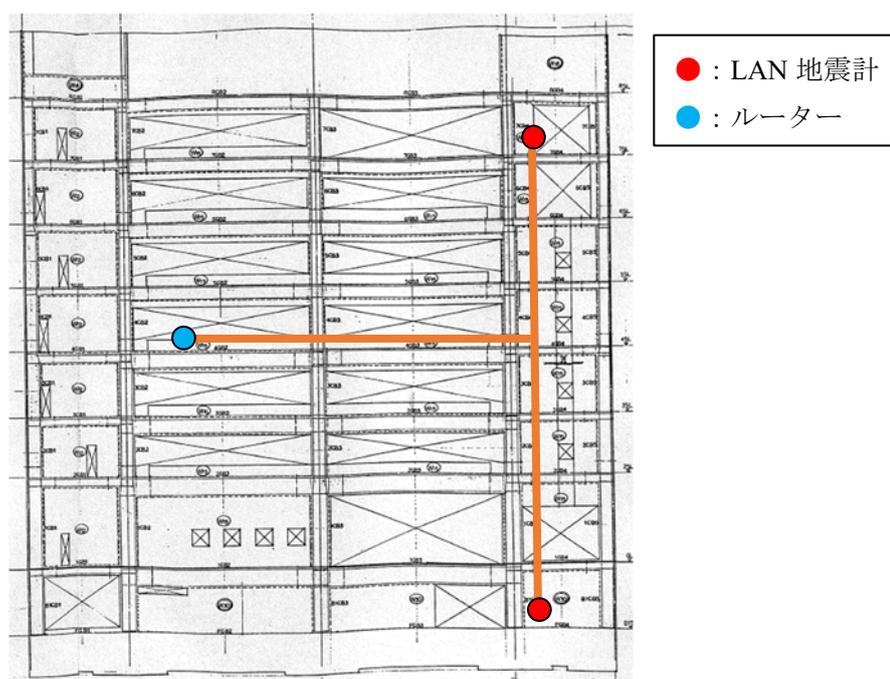


図 2.4.8 LAN 地震計設置位置 (東西方向軸組図)

2. 5 LAN 地震計による実地震観測

2. 5. 1 豊橋市役所

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。豊橋市役所では 2016 年から強震観測を行っており、現在まで 25 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。また、豊橋市役所の観測波形を図 2.5.2～図 2.5.4 に示す。



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）

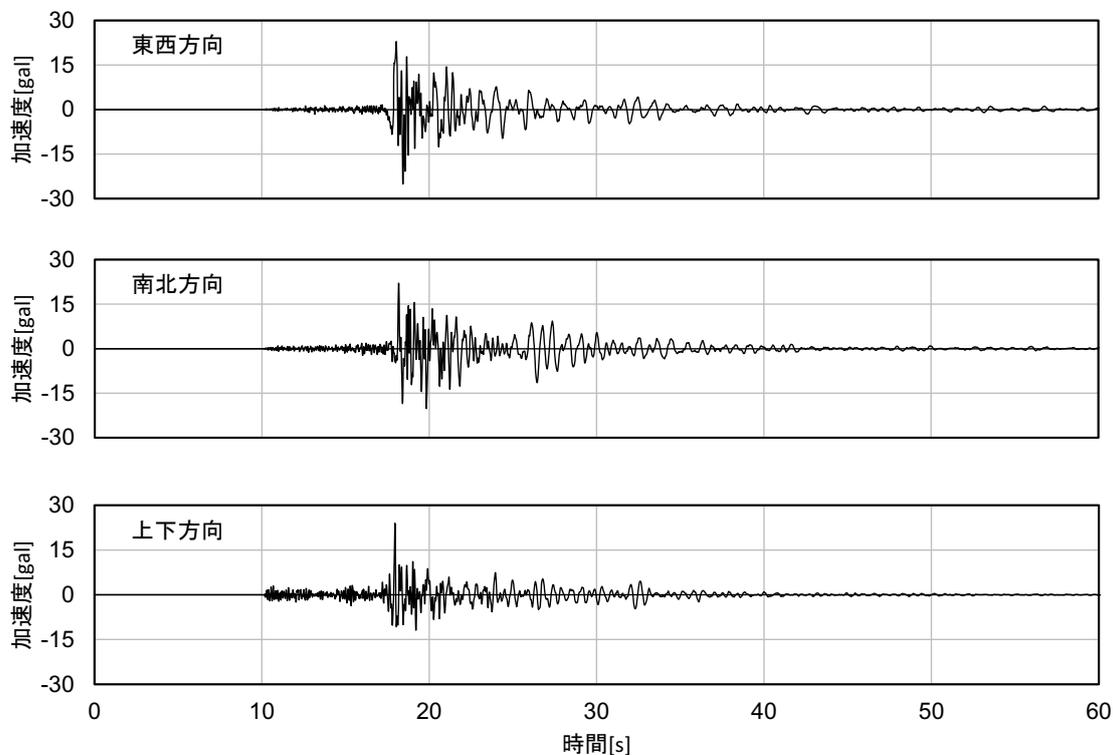


図 2.5.2 静岡県西部地震（地下 1 階）

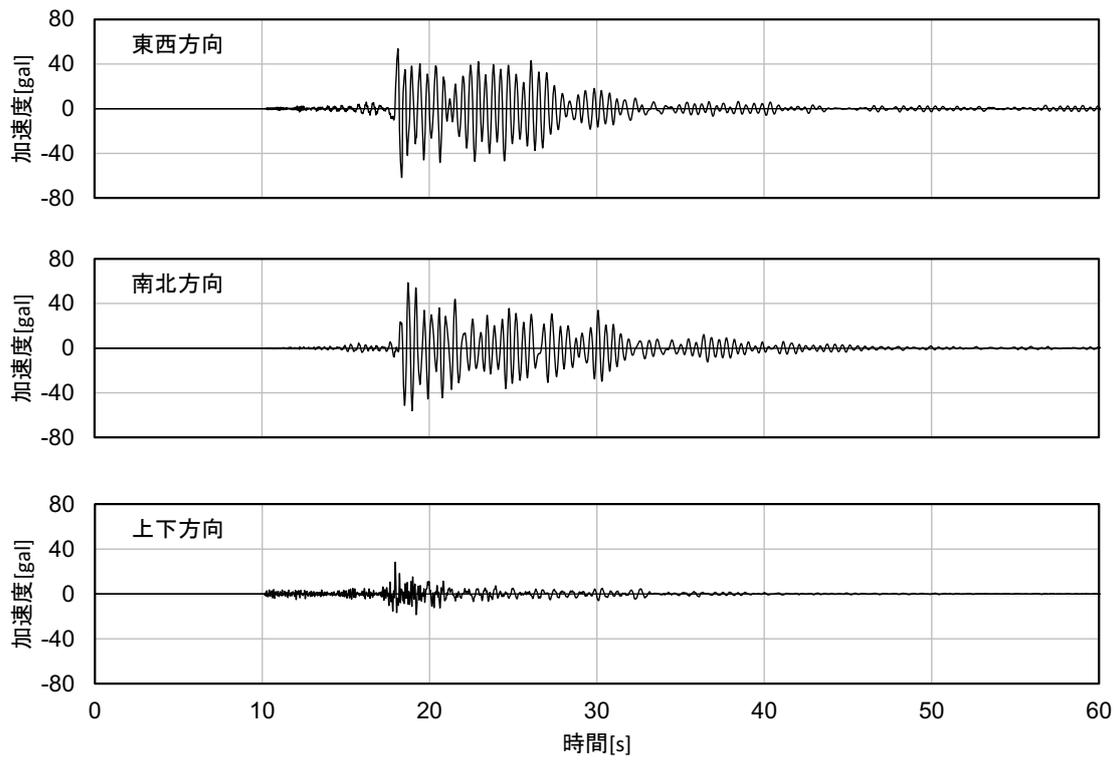


図 2.5.3 静岡県西部地震（西館 8 階）

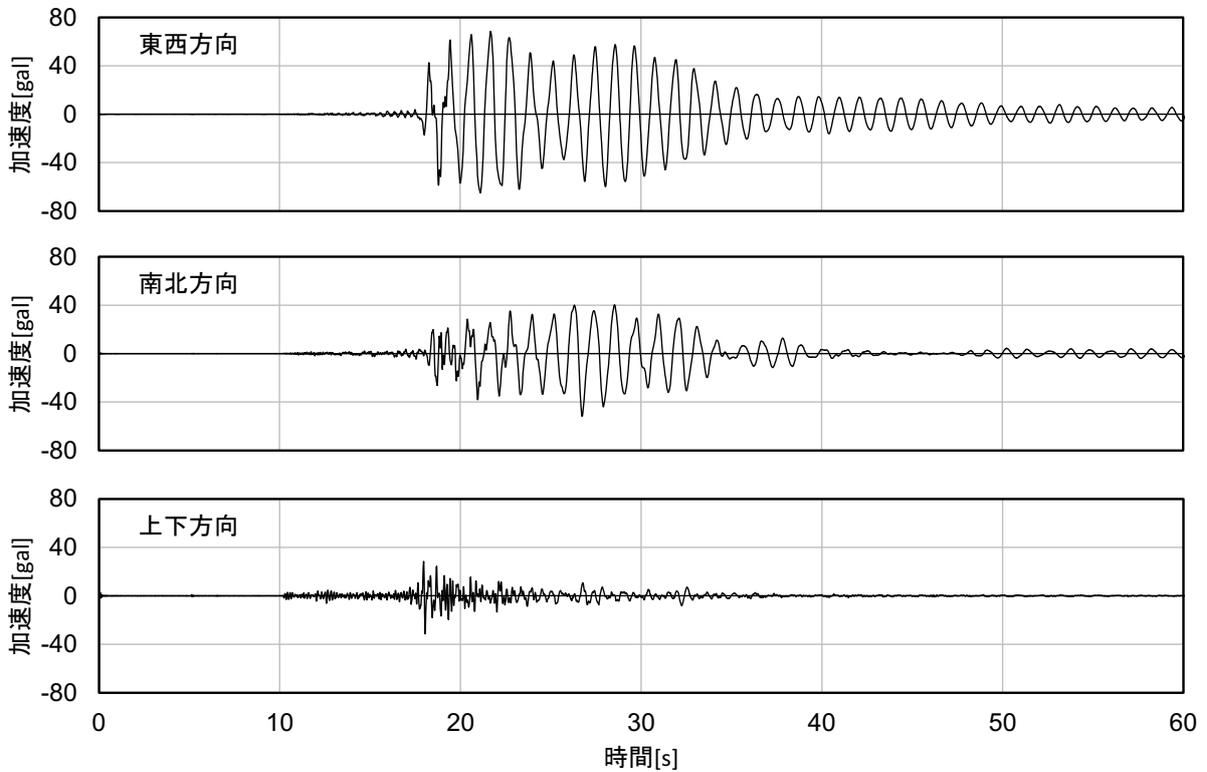


図 2.5.4 静岡県西部地震（東館 13 階）

2. 5. 2 豊橋市中消防署

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 の地震データを入手した。最も大きい地震は 2.5.1 の豊橋市役所と同じく静岡県西部地震であった。図 2.5.5～図 2.5.6 に豊橋市中消防署の観測波形を示す。

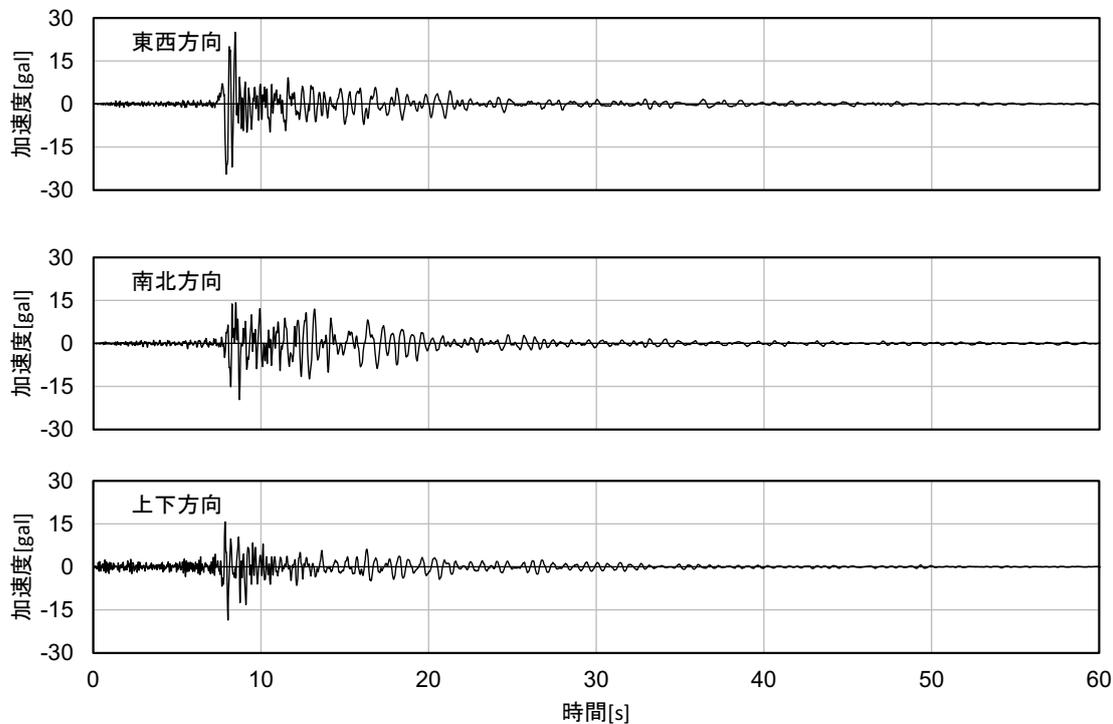


図 2.5.5 静岡県西部地震（地下 1 階）

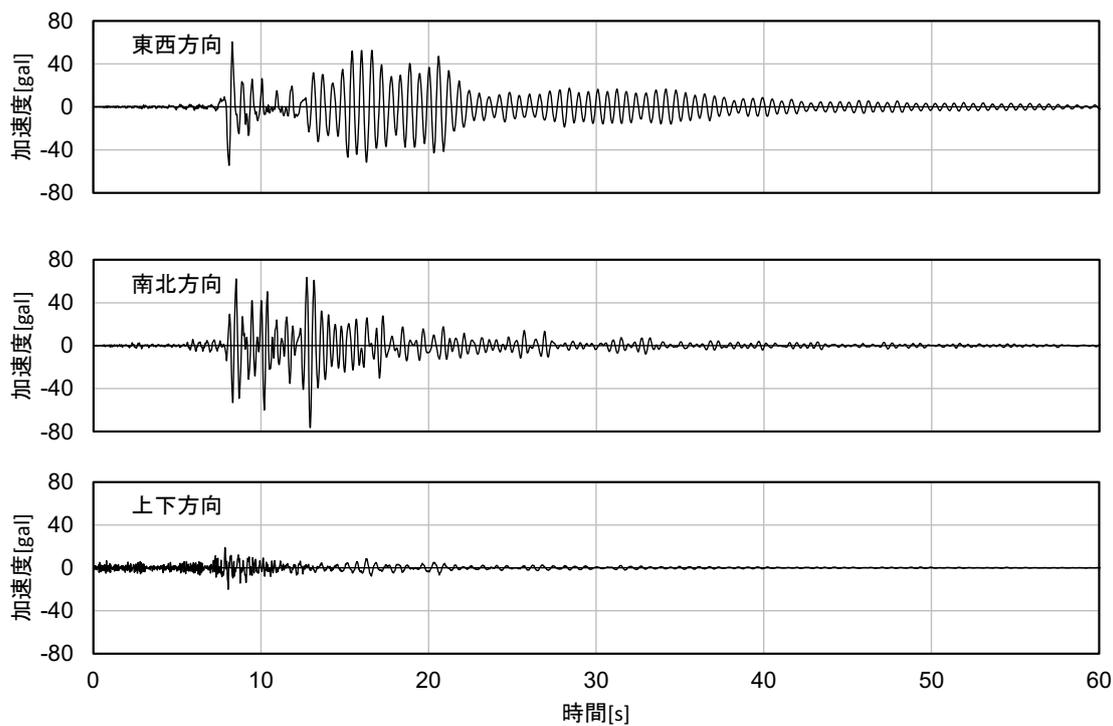


図 2.5.6 静岡県西部地震（地上 7 階）

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。

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

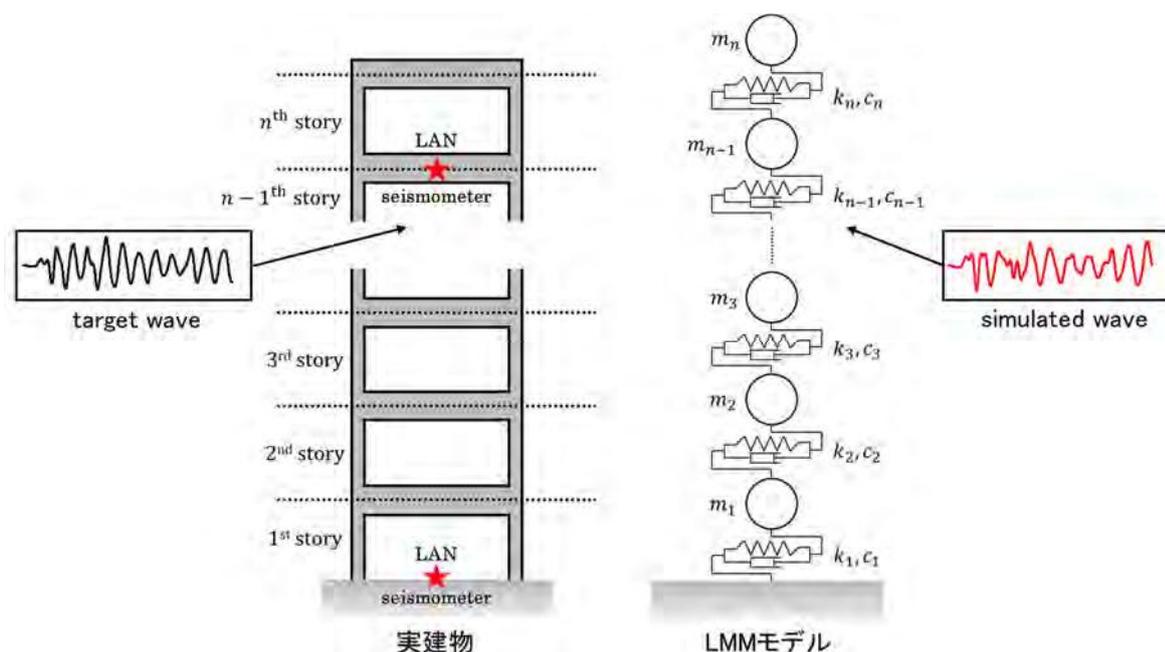


図 3.1.1 最適化問題の目的関数

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、応答量を個の設計変数の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。

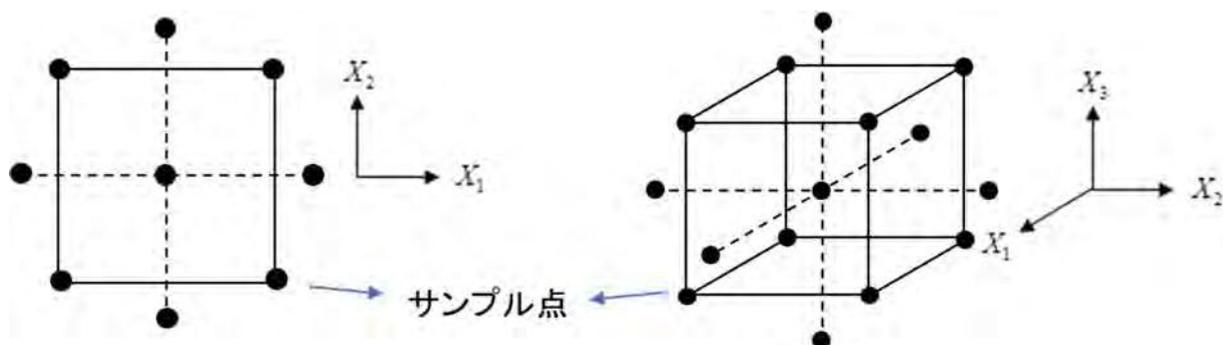


図 3.2.1 中心複合計画

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。

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

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & {}_1X_1 & \cdots & {}_1X_N & {}_1X_{11}X_2 & \cdots & {}_1X_{N-11}X_N & {}_1X_1^2 & \cdots & {}_1X_N^2 \\ 1 & {}_2X_1 & \cdots & {}_2X_N & {}_2X_{12}X_2 & \cdots & {}_2X_{N-12}X_N & {}_2X_1^2 & \cdots & {}_2X_N^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & {}_MX_1 & \cdots & {}_MX_N & {}_MX_{1M}X_2 & \cdots & {}_MX_{N-1M}X_N & {}_MX_1^2 & \cdots & {}_MX_N^2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

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

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。

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

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

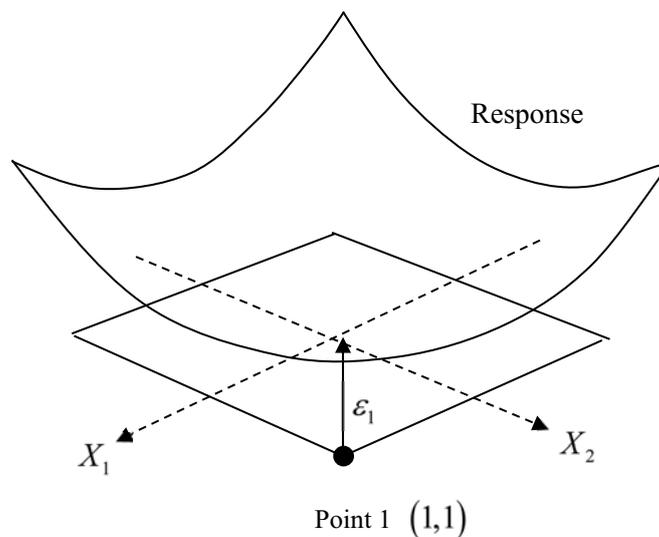


図 3.2.2 応答曲面の概念図

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 α 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。

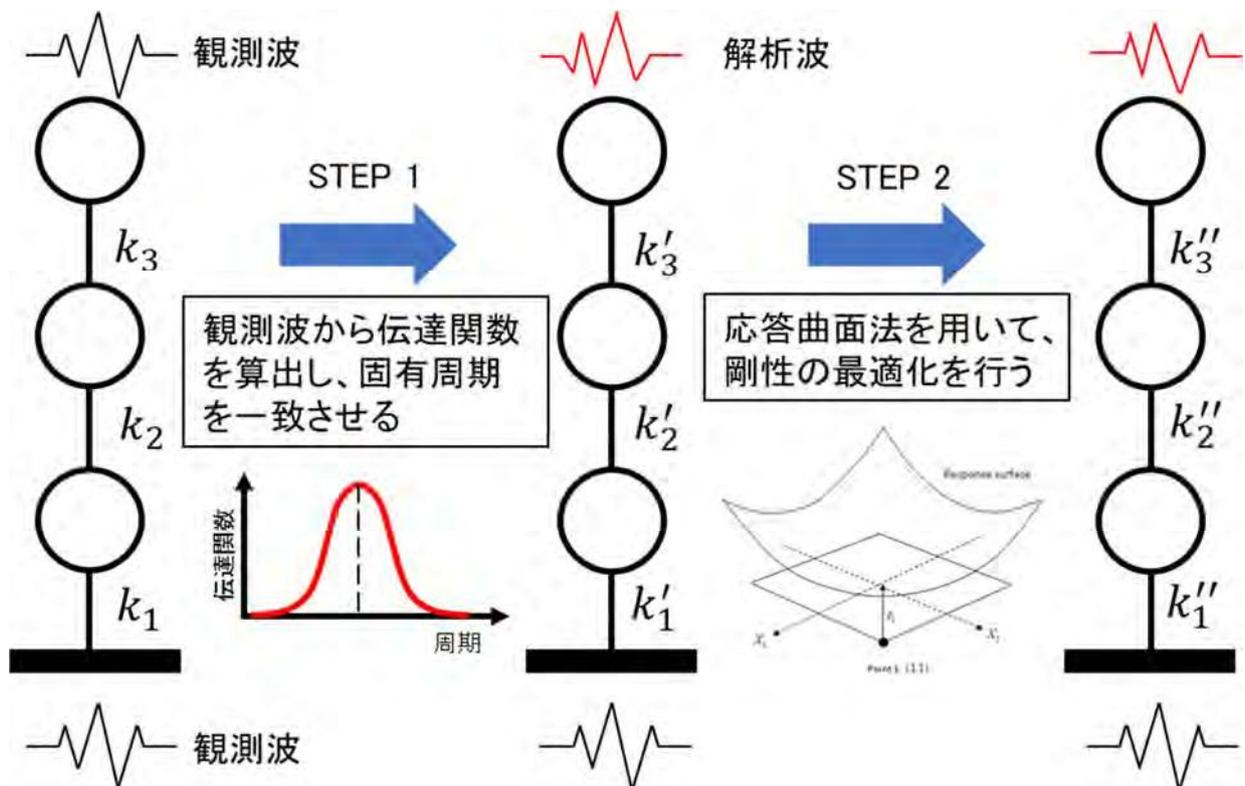


図 3.2.3 応答曲面法を用いた最適化の概念図

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。

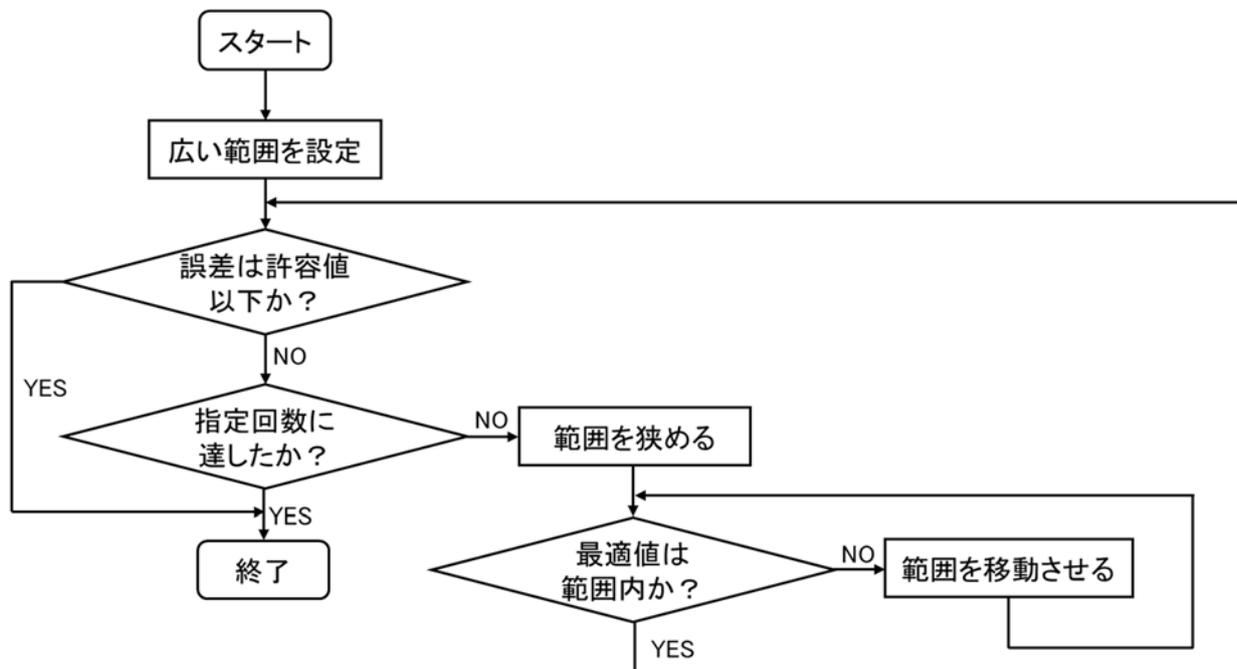


図 3.2.4 応答曲面法による最適値の探索フロー

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。

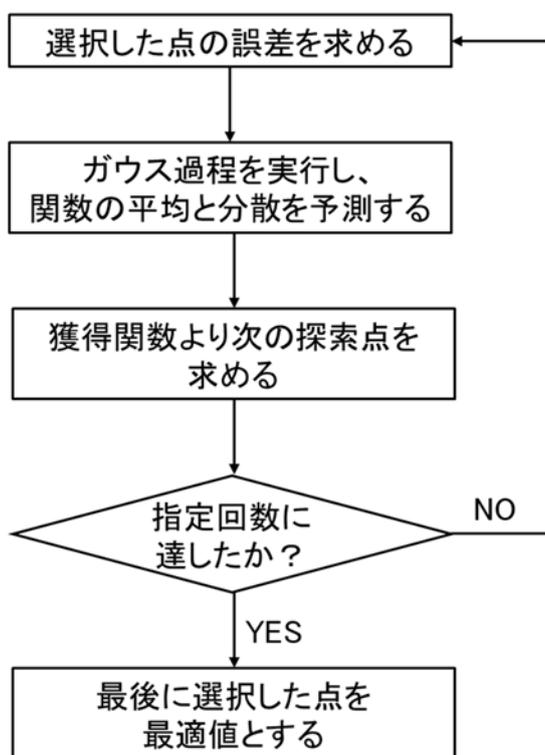


図 3.3.1 ベイズ最適化のフローチャート

4. モニタリング建物の剛性の最適化

4. 1. 豊橋市役所 東館

4. 1. 1 応答曲面法

3章で提案した手法を用いて、豊橋市役所東館の解析モデルの最適化を行った。建物重量および減衰定数の数値は固定し、初期剛性のみを最適化対象とする。使用する地震動は2.5節で述べたLAN地震計から観測した全データとする。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。

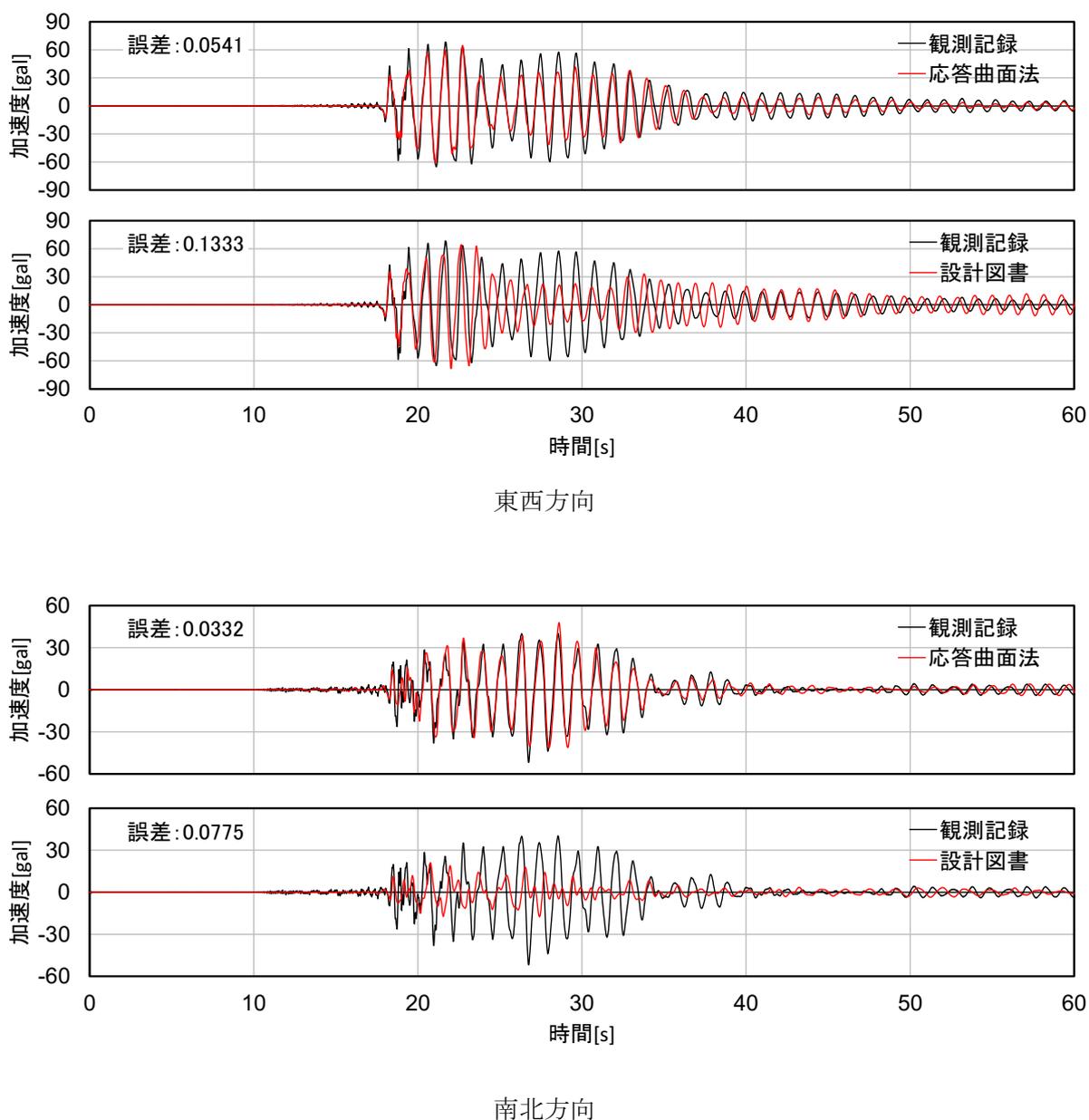


図 4.1.1 観測記録と最適化モデルの比較 (上)、観測記録と設計図書モデルの比較 (下)

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。各階において一定の値を示している。これは STEP1 で 1 次固有周期が一致するように補正しており、その値の近くのパラメータを探索しているためであると考えられる。

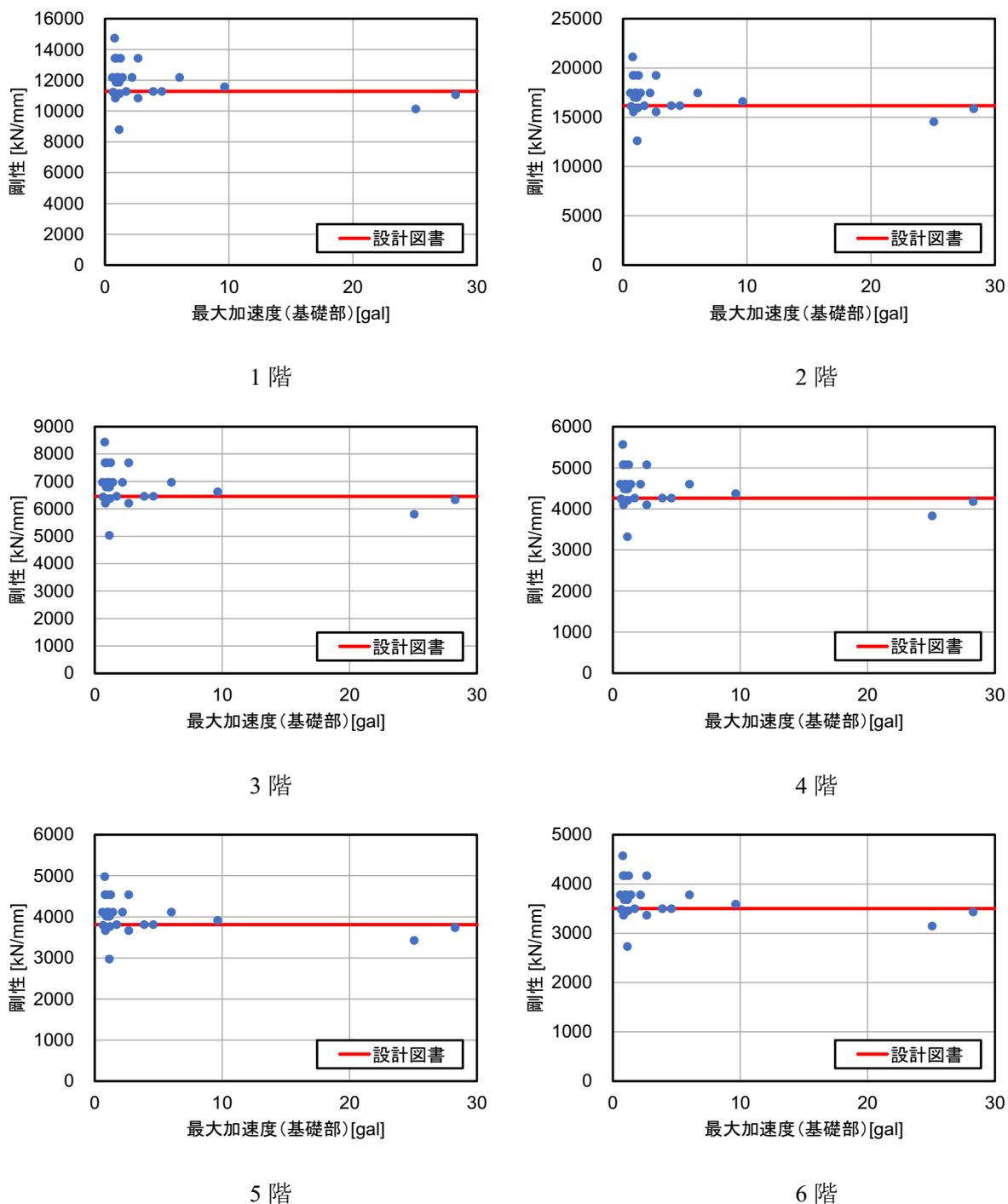
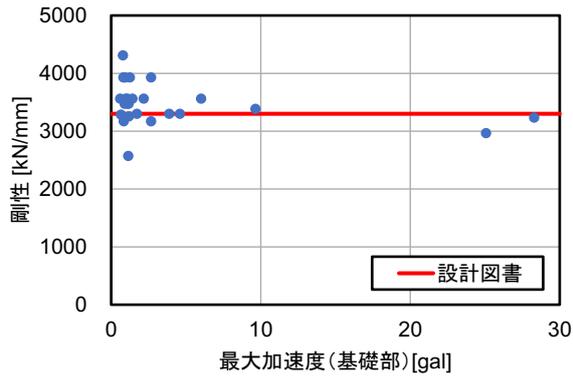
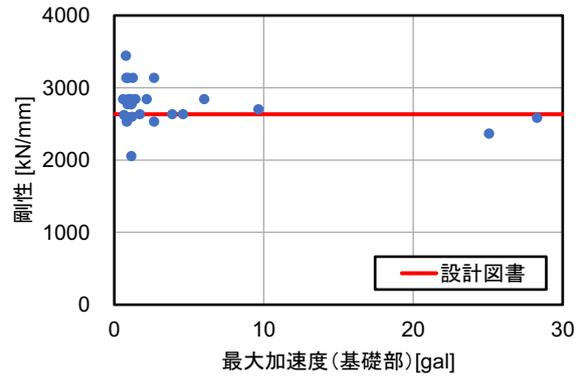


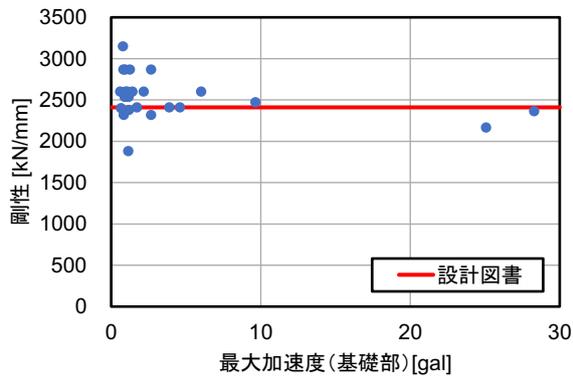
図 4.1.2 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



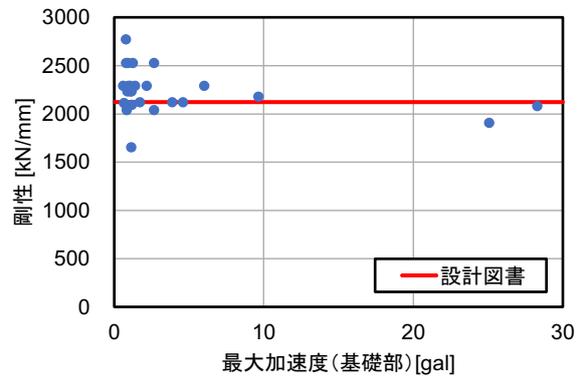
7階



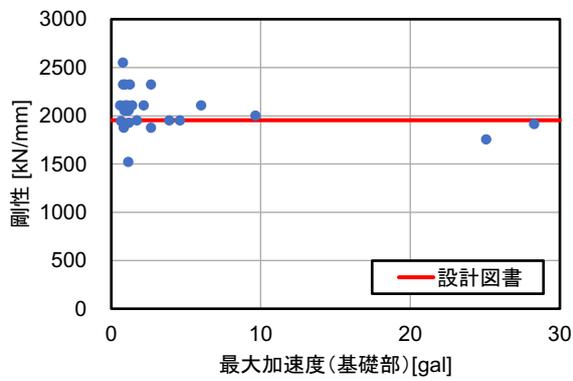
8階



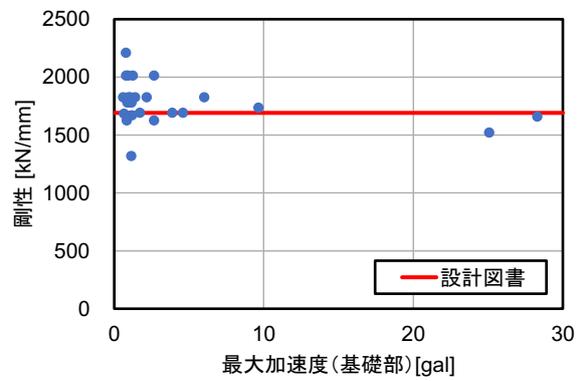
9階



10階



11階



12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)

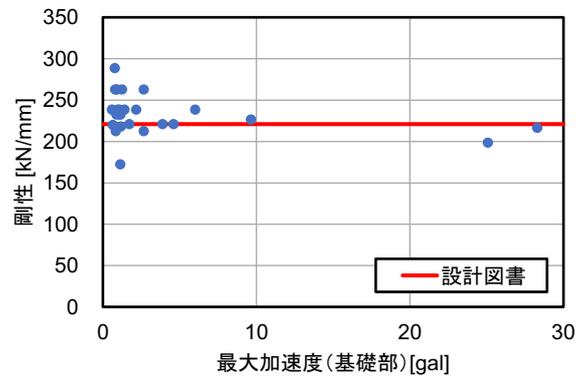
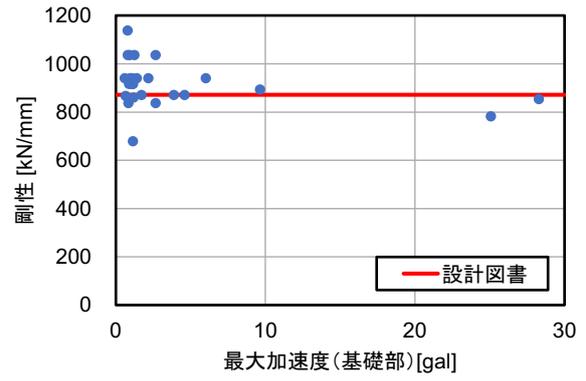
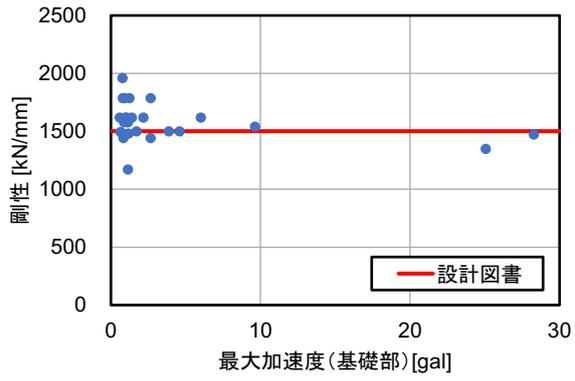
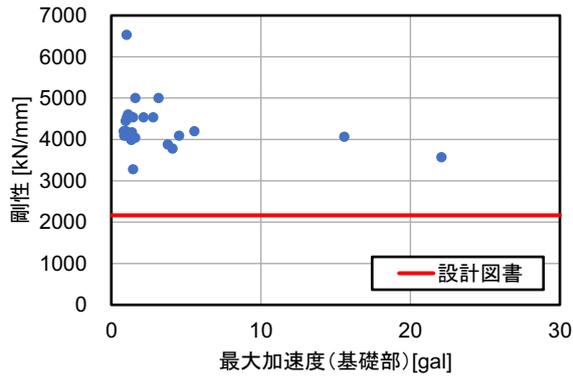
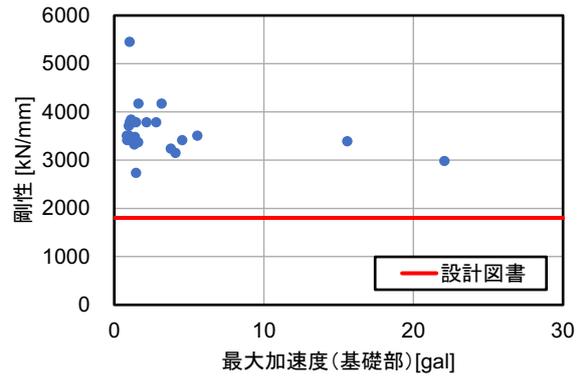


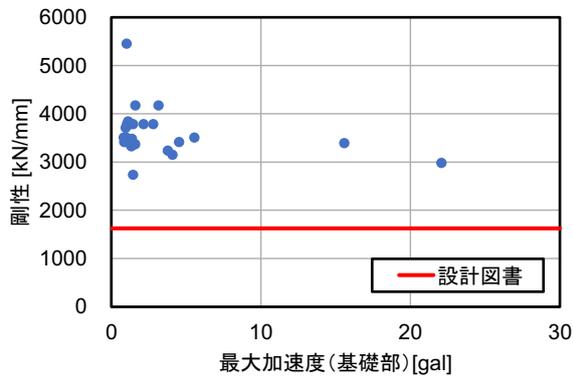
図 4.1.2 (3) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



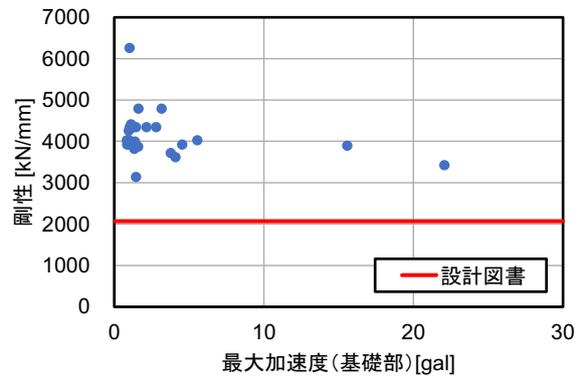
1 階



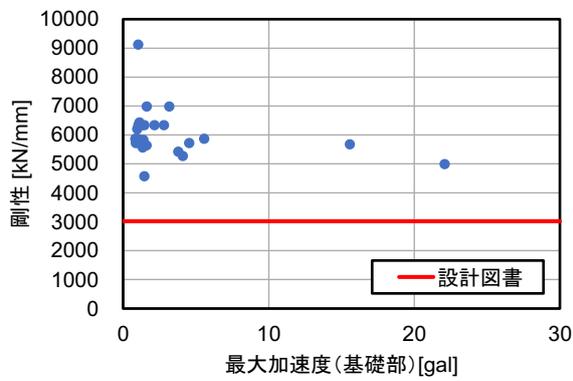
2 階



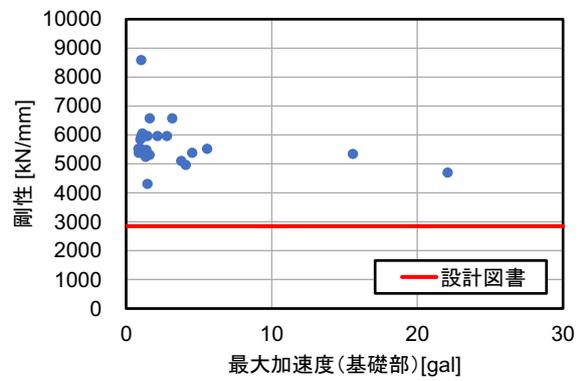
3 階



4 階

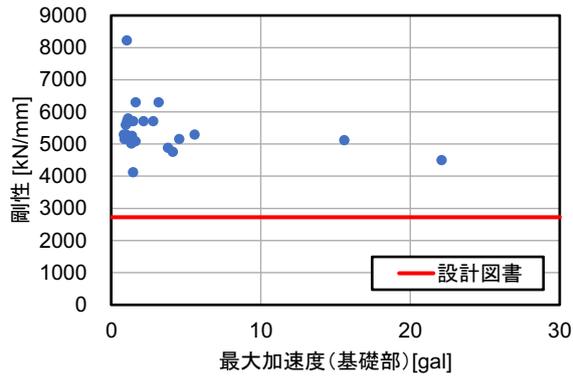


5 階

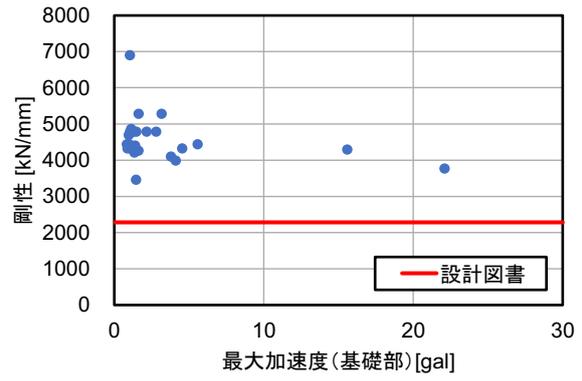


6 階

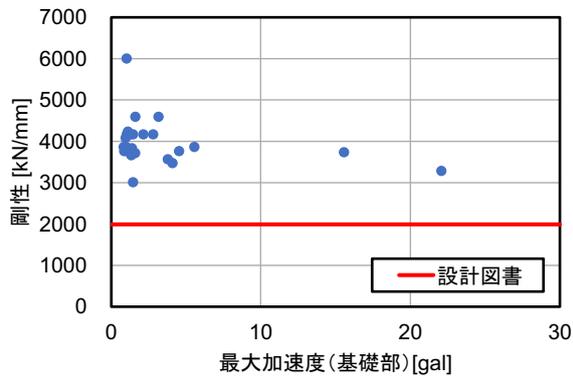
図 4.1.3 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



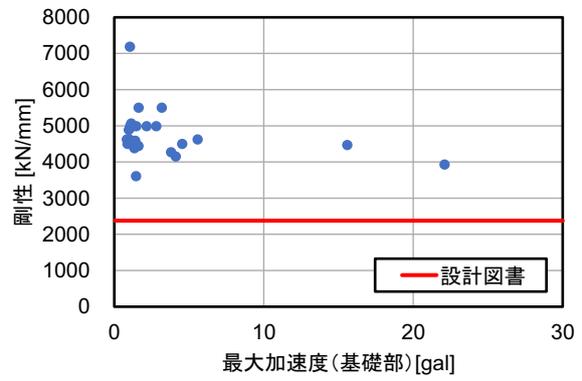
7階



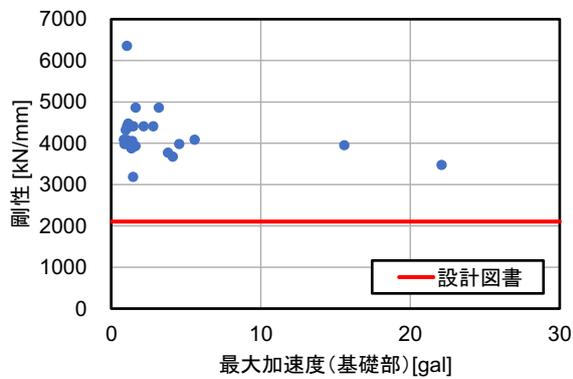
8階



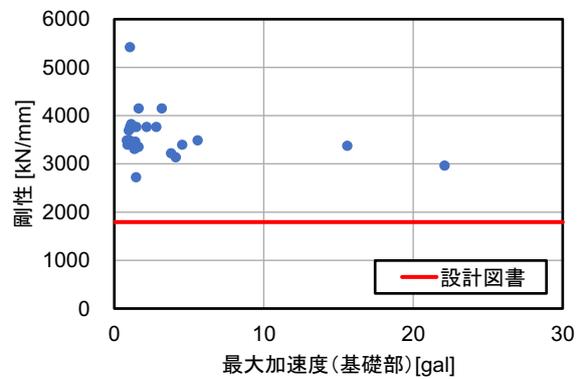
9階



10階



11階



12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)

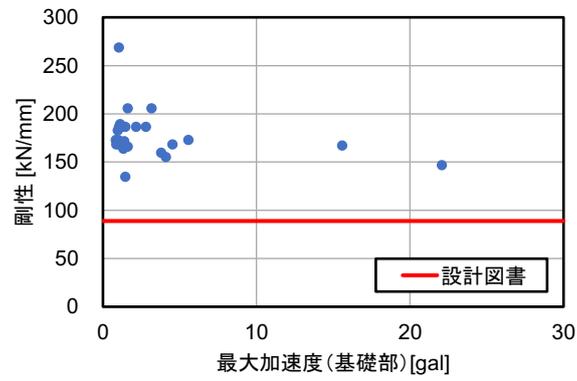
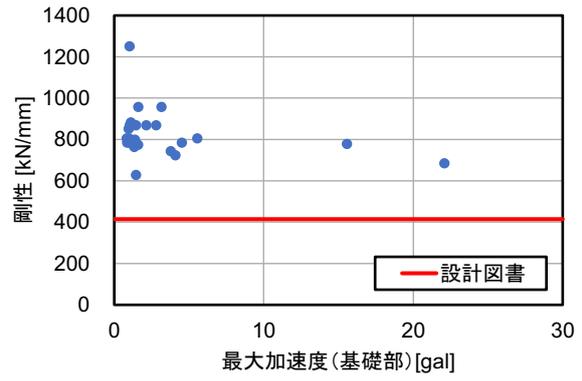
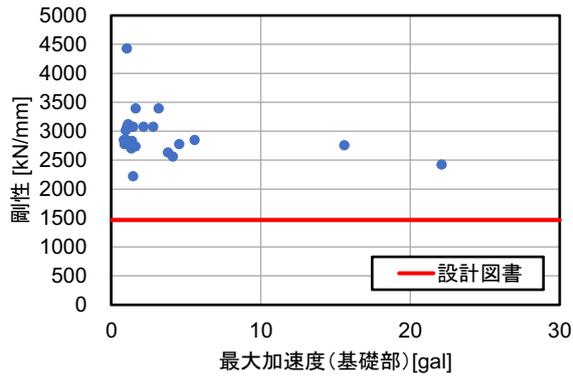


図 4.1.3 (3) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)

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。設計固有周期は立体骨組モデルを縮約して作成したため、実建物より剛性は小さく、固有周期は大きくなる。固有周期は設計 < 最適化モデル < 微動記録の順番となっており理論通りの結果を示している。

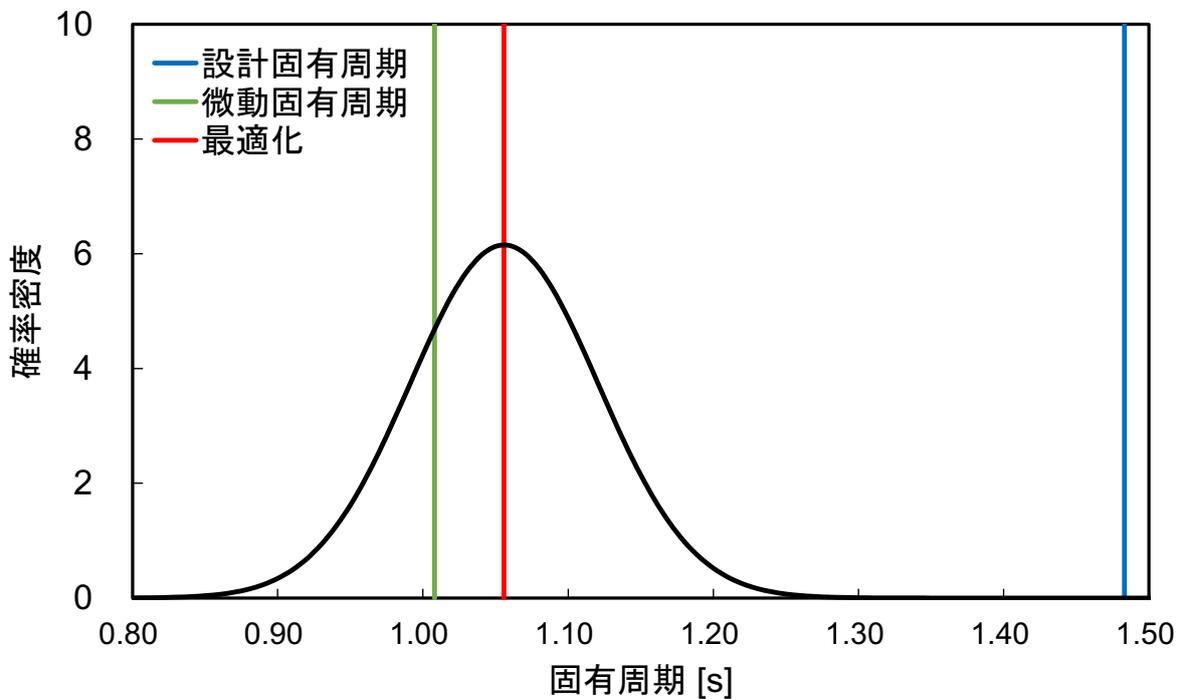
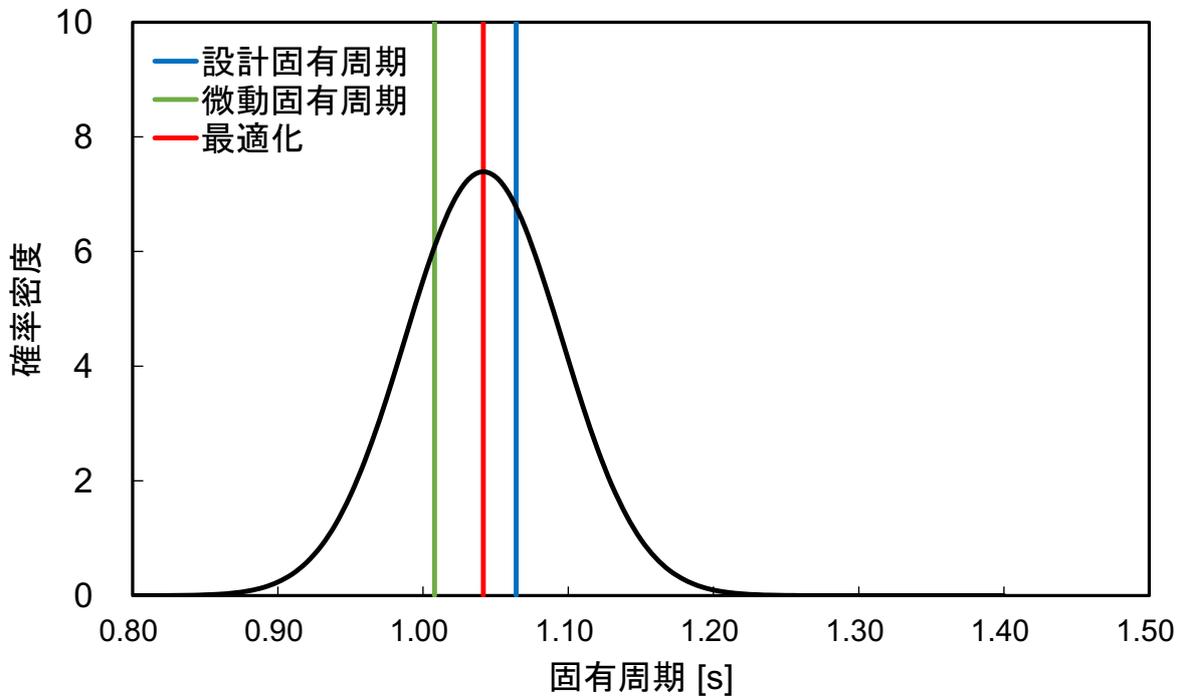


図 4.1.4 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

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。

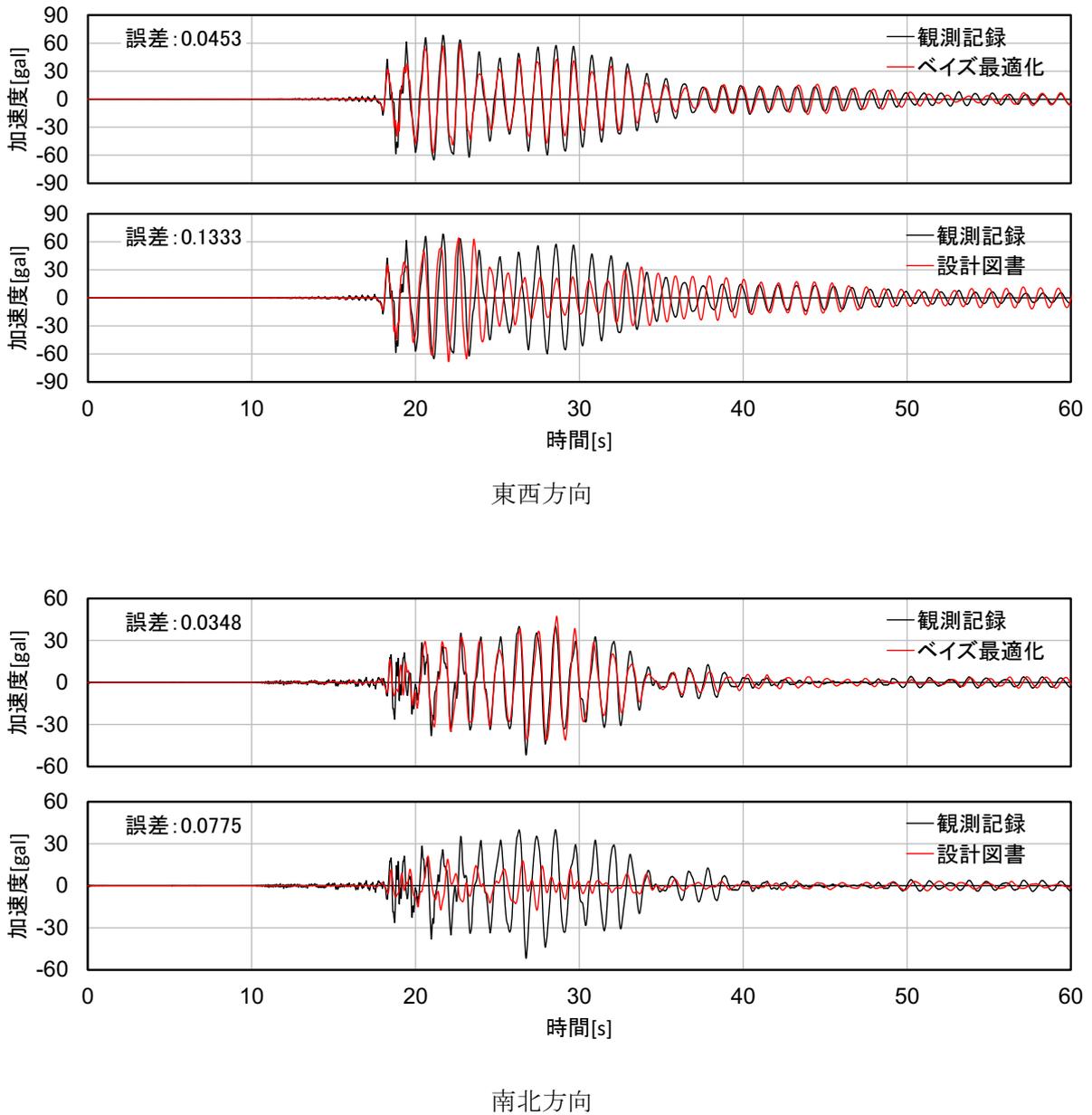


図 4.1.5 観測記録と最適化モデルの比較（上）、観測記録と設計図書モデルの比較（下）

図 4.1.6～図 4.1.7 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。各階において大きなバラつきが見られた。

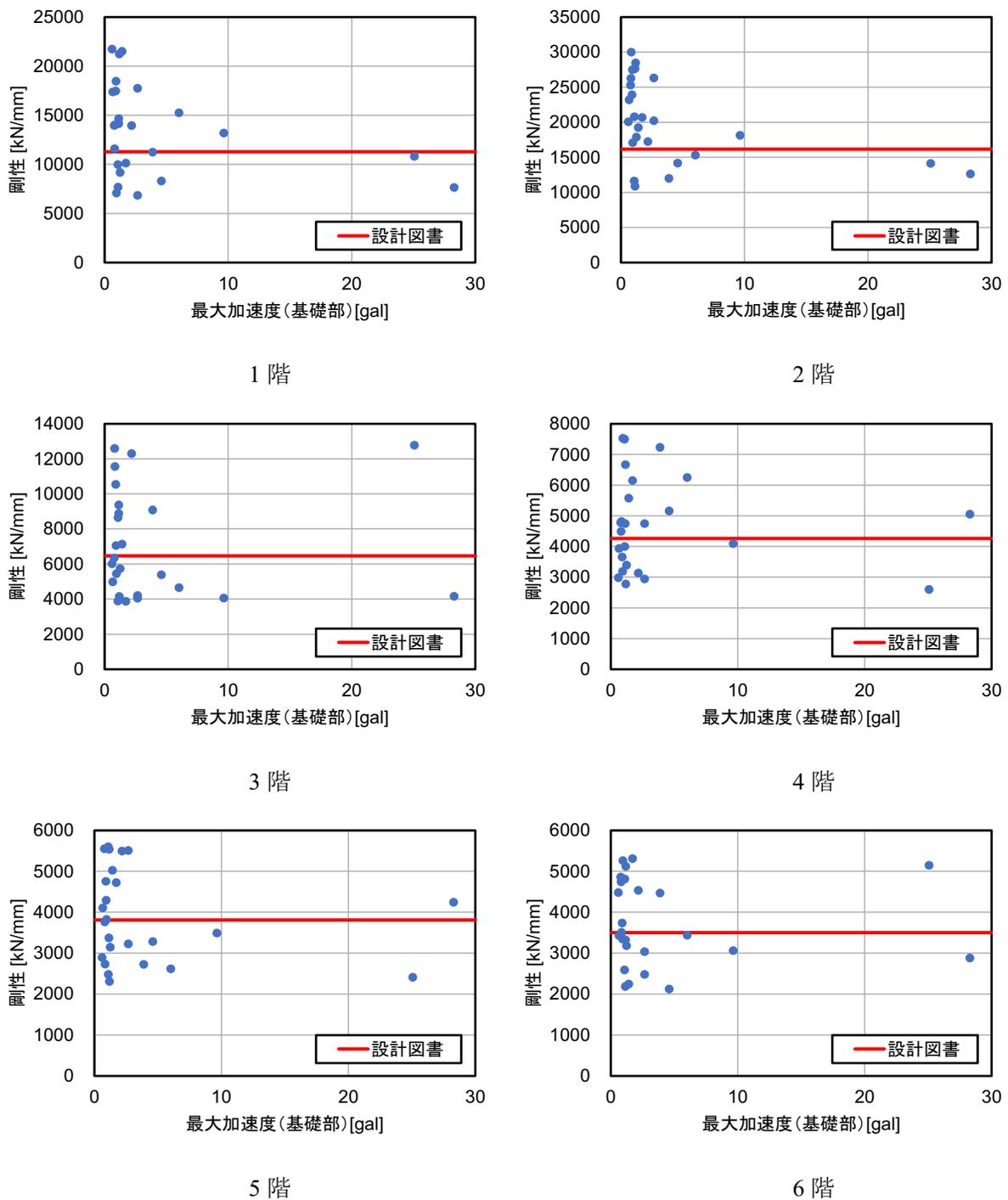
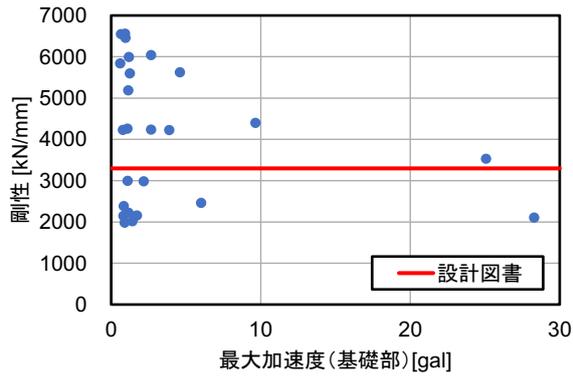
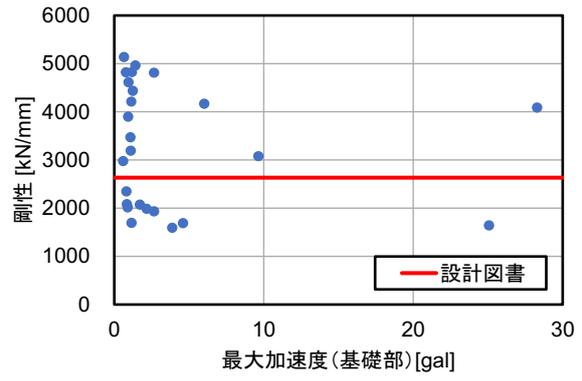


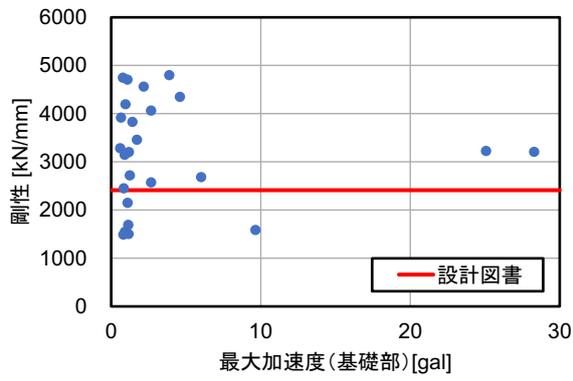
図 4.1.6 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



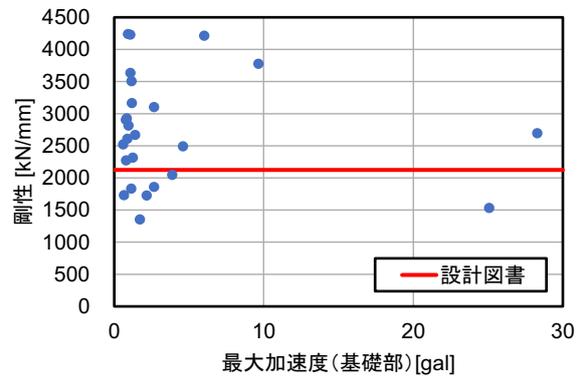
7階



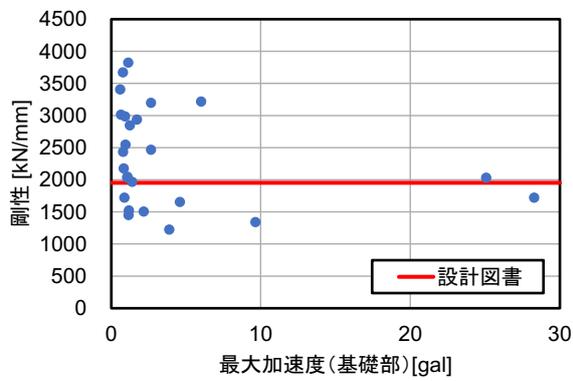
8階



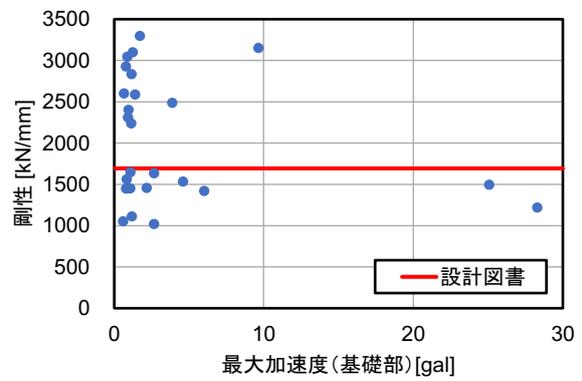
9階



10階



11階



12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)

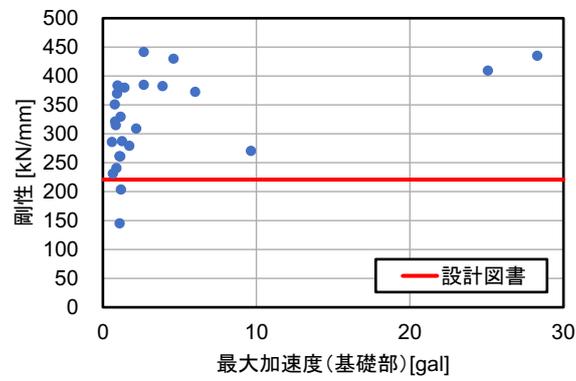
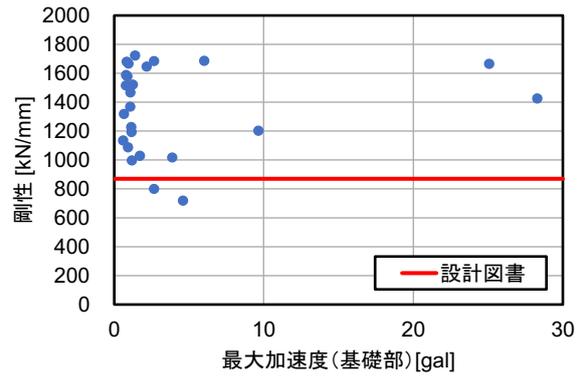
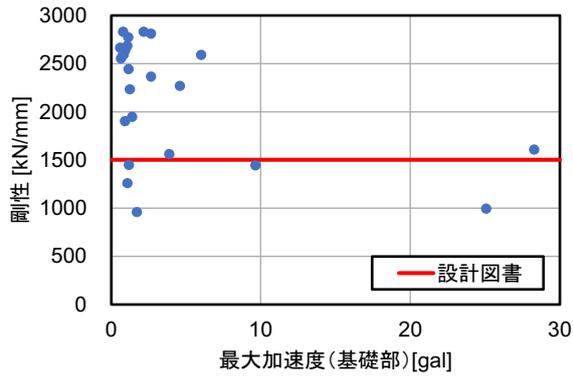
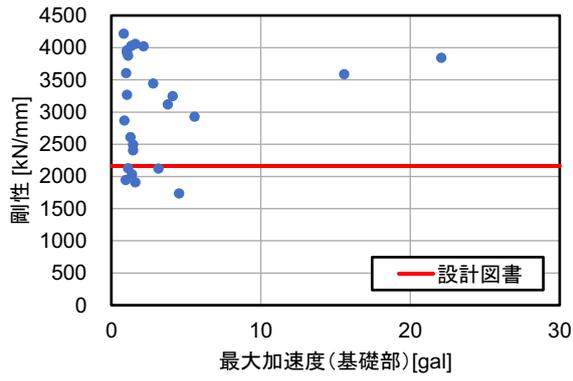
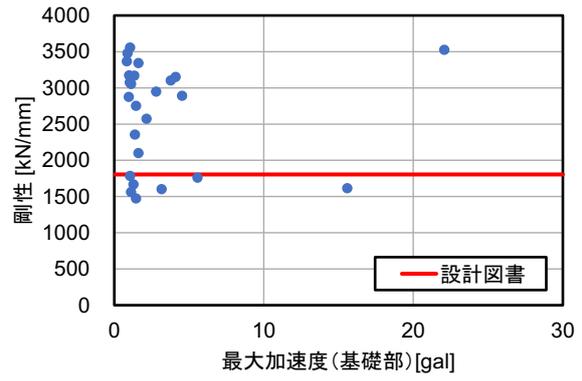


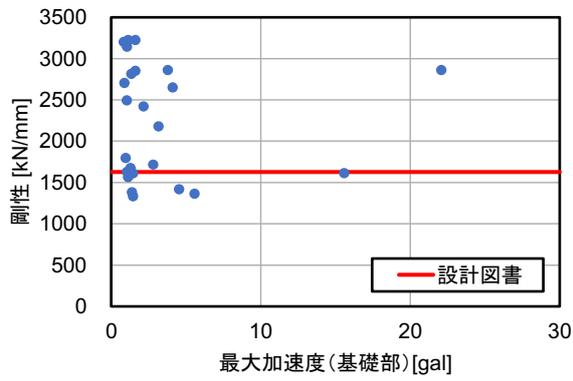
図 4.1.6 (3) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



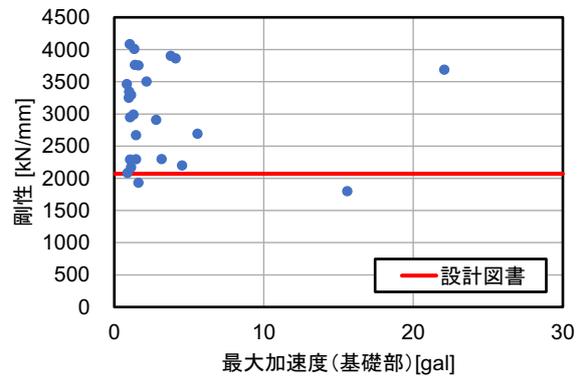
1 階



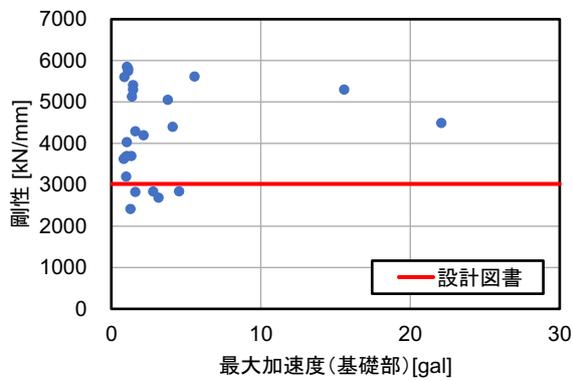
2 階



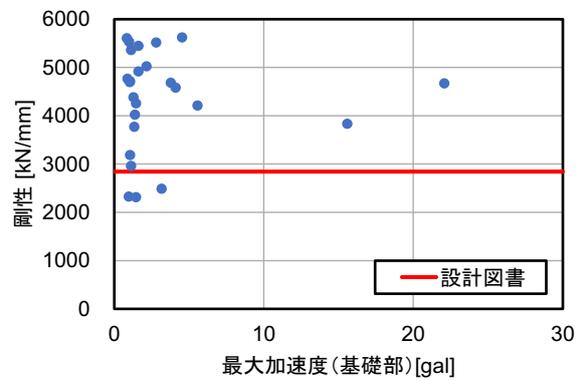
3 階



4 階

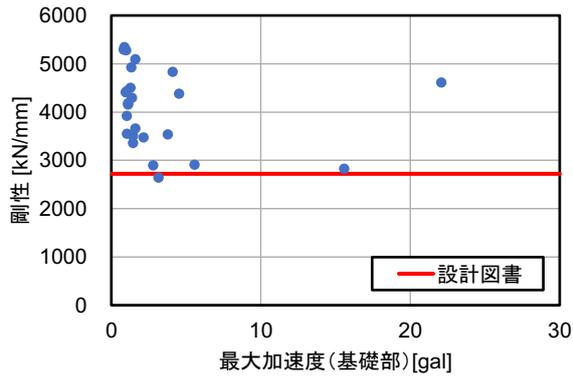


5 階

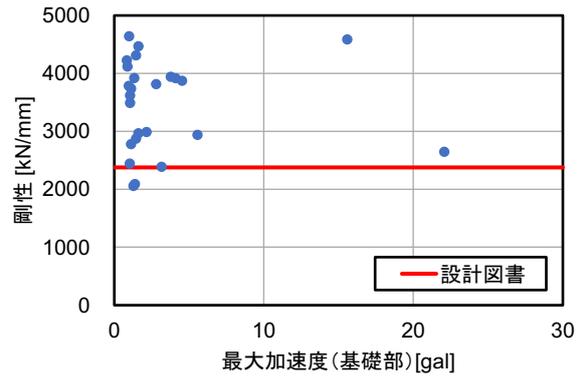


6 階

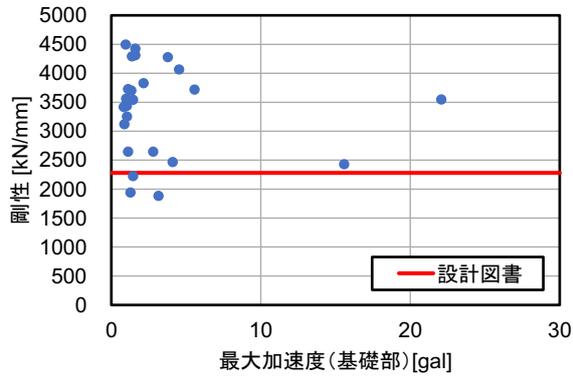
図 4.1.7 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



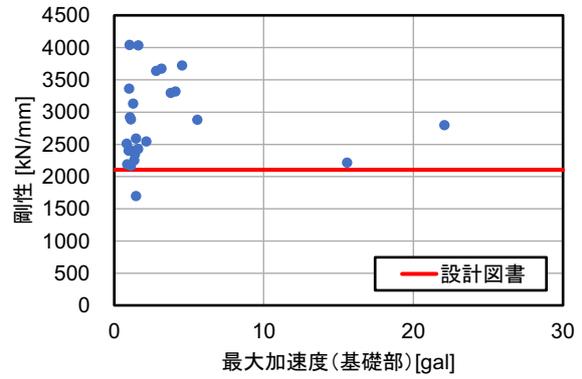
7階



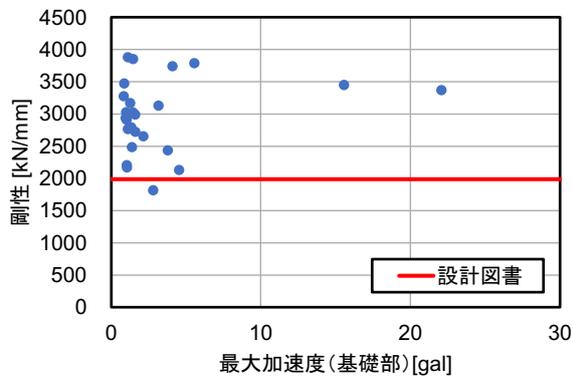
8階



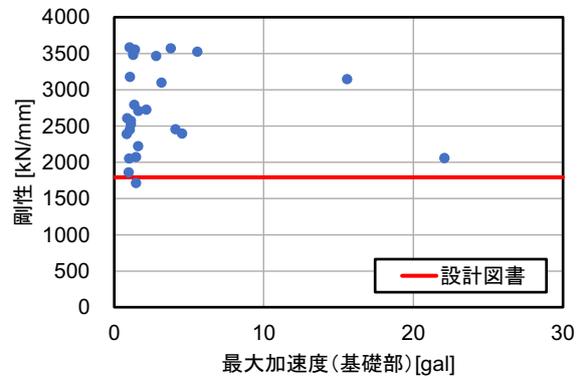
9階



10階



11階



12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)

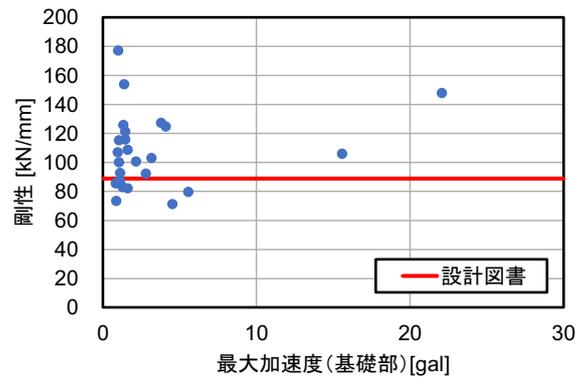
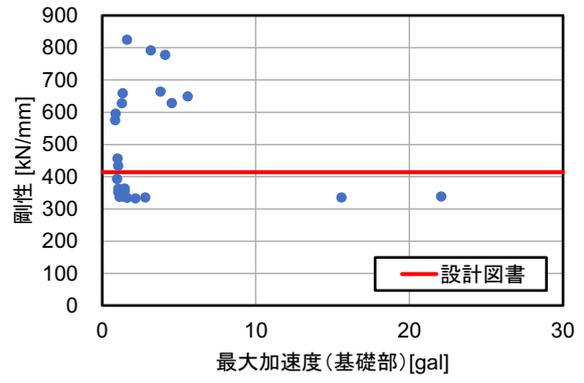
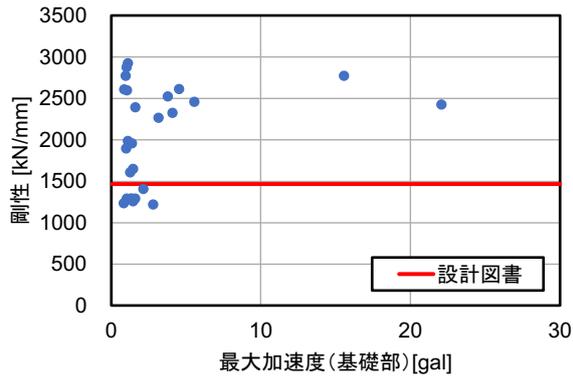


図 4.1.7 (3) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)

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。

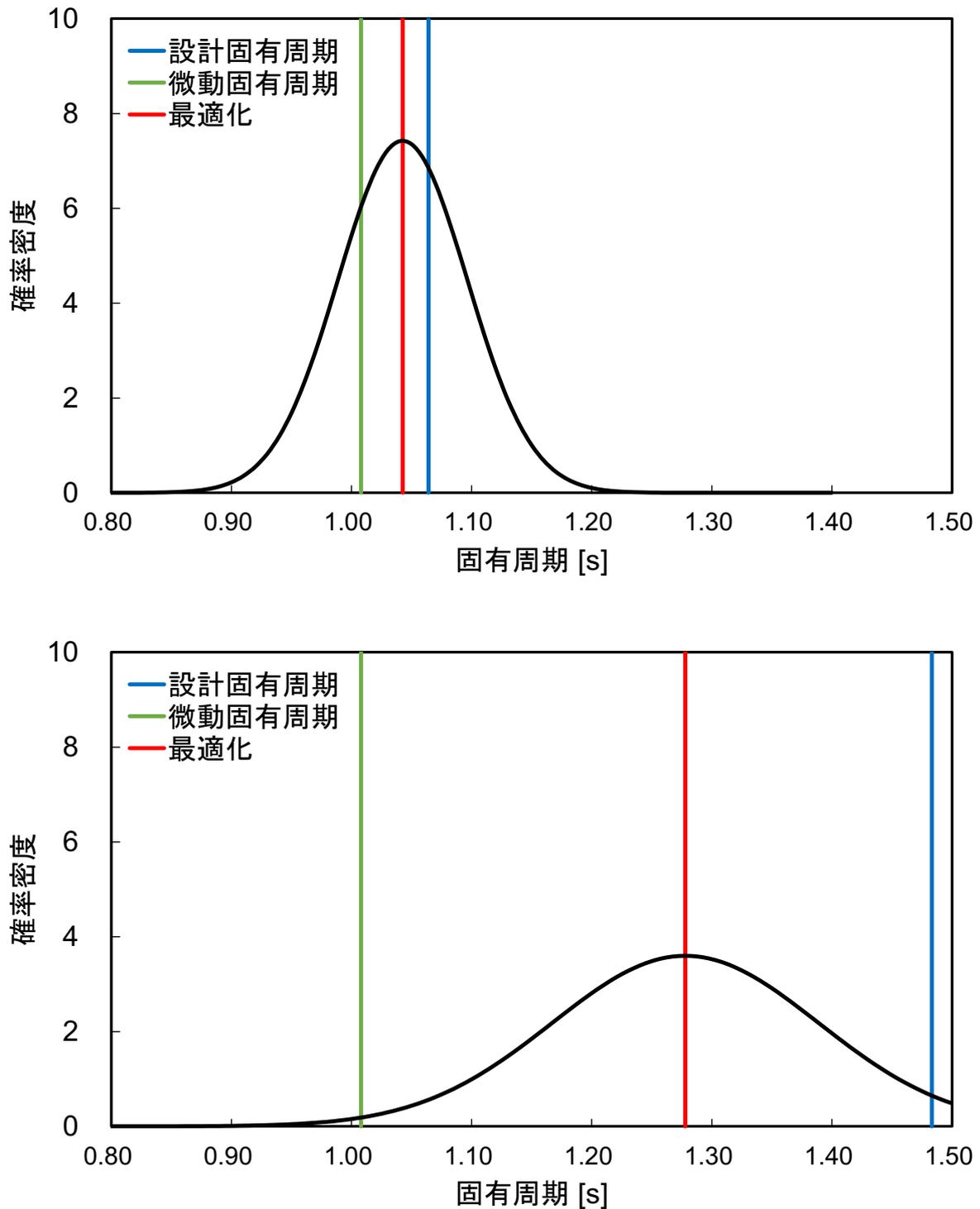
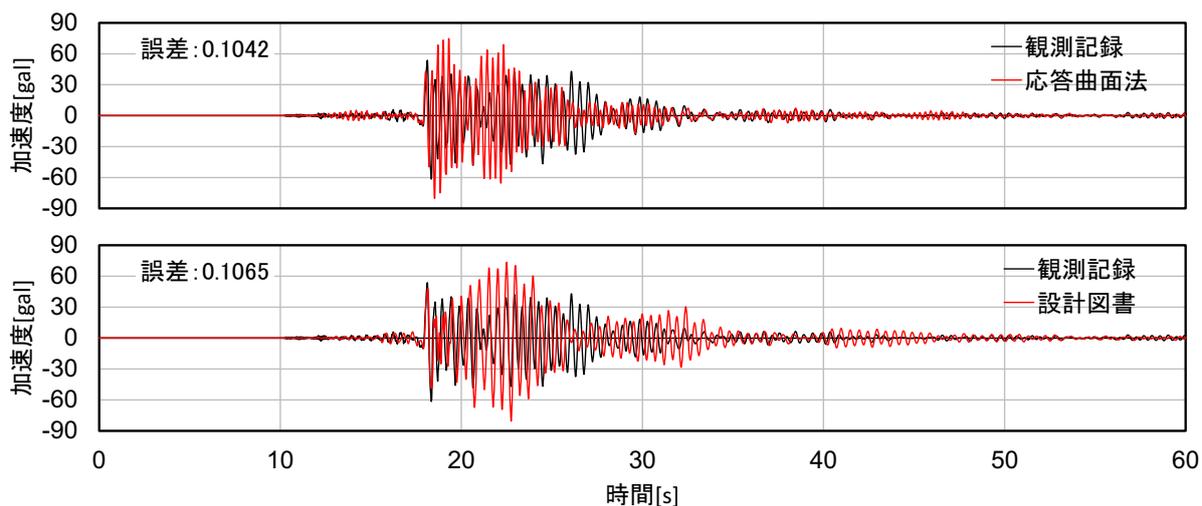


図 4.1.8 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

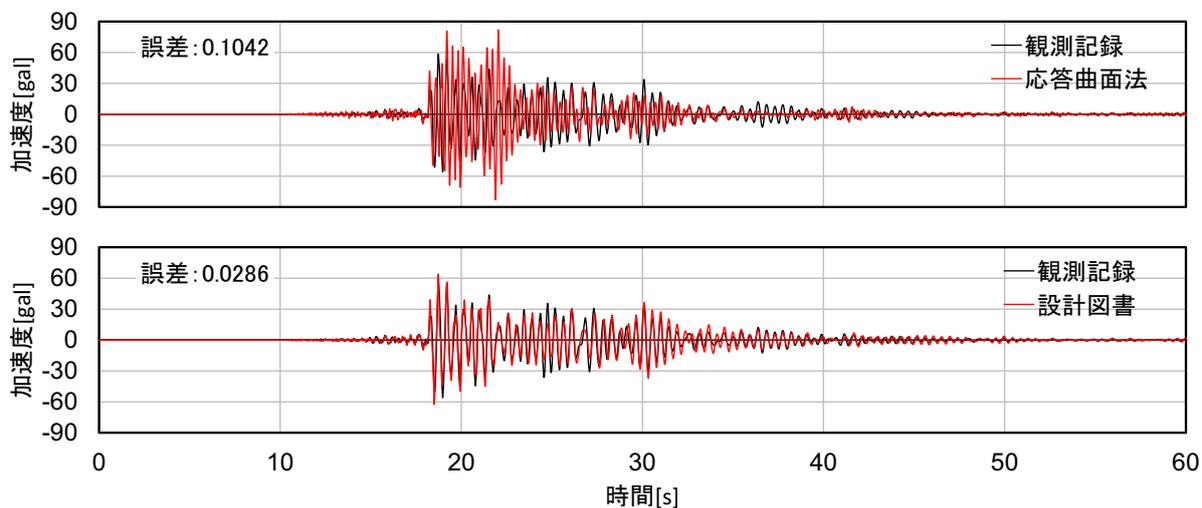
4. 2. 豊橋市役所 西館

4. 2. 1 応答曲面法

同様に豊橋市役所西館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4.2.1)。東西方向では、誤差は設計図書モデルとほぼ同じ値を示し、応答波形も大きな差異が見られた。南北方向では設計図書モデルと観測記録がほぼ一致しており、応答曲面法の精度が悪くなる結果となった。



東西方向



南北方向

図 4.2.1 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。

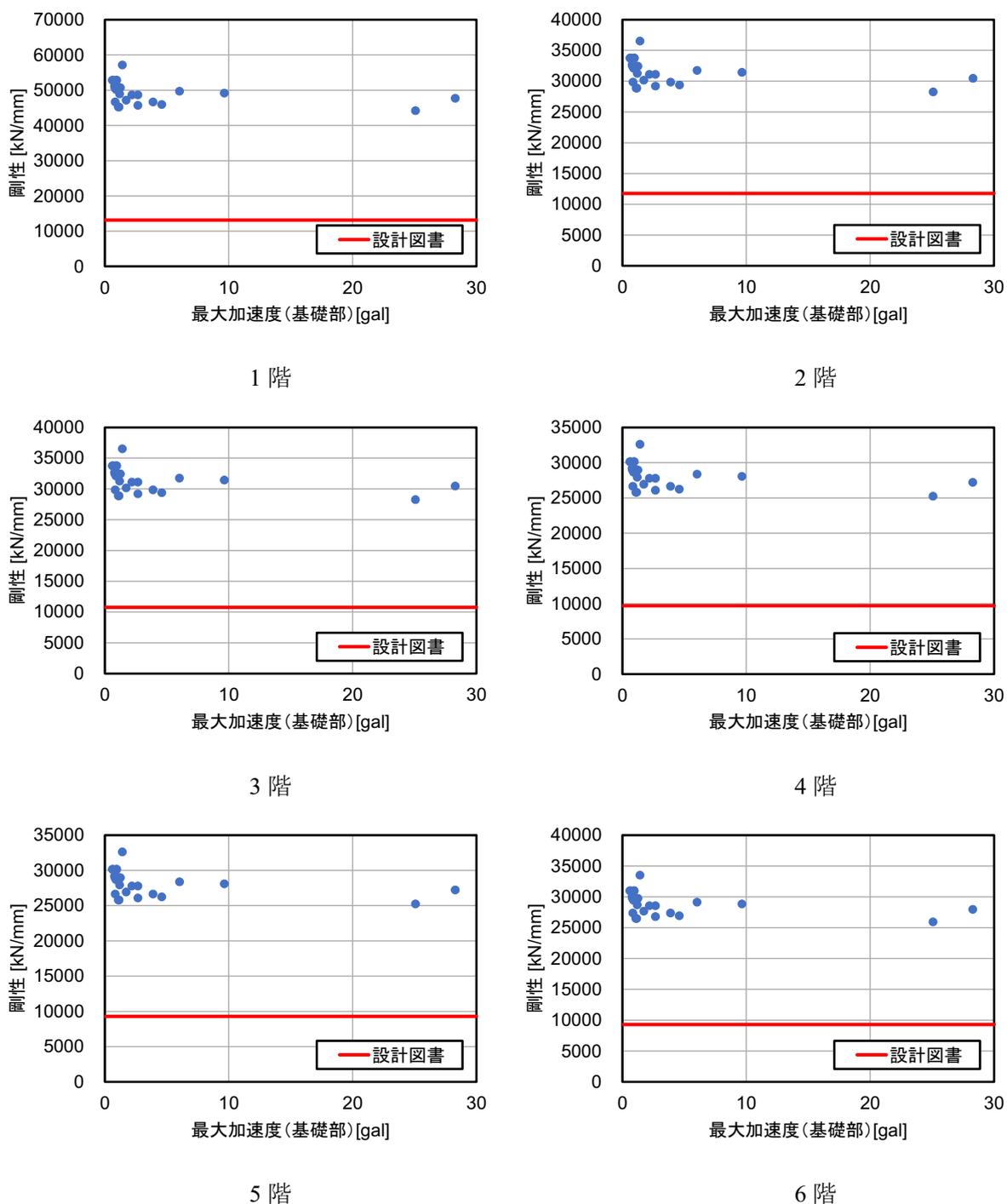
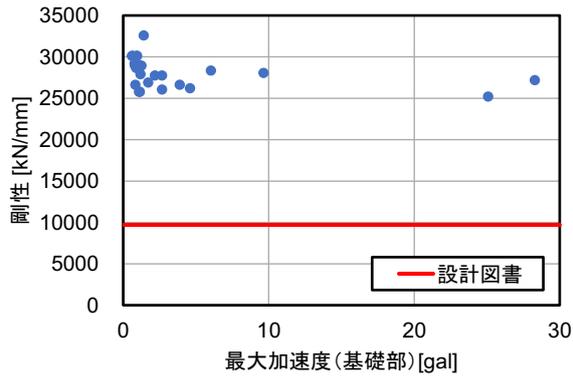
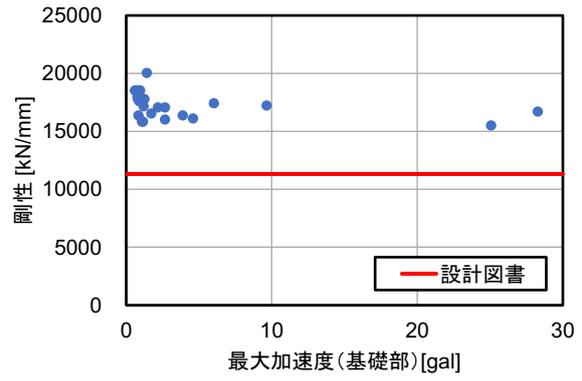


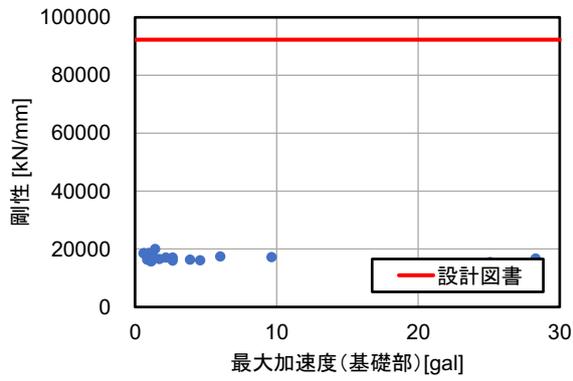
図 4.2.2 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



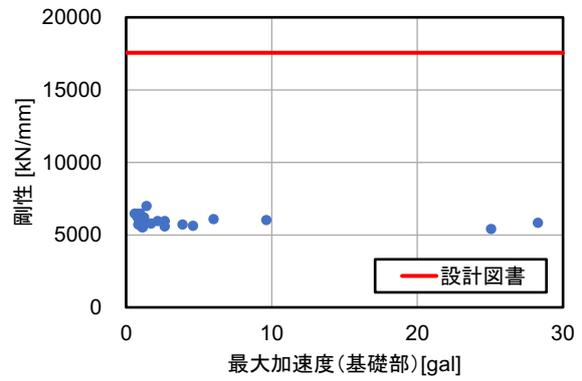
7階



8階

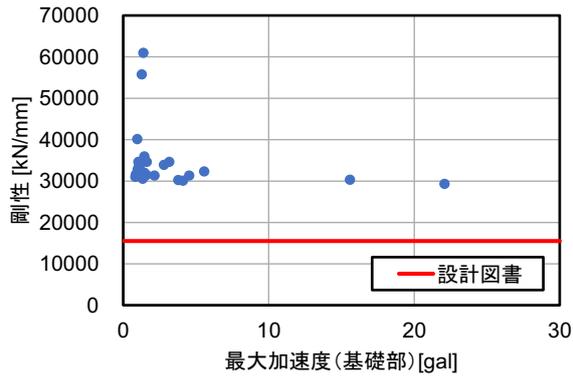


9階

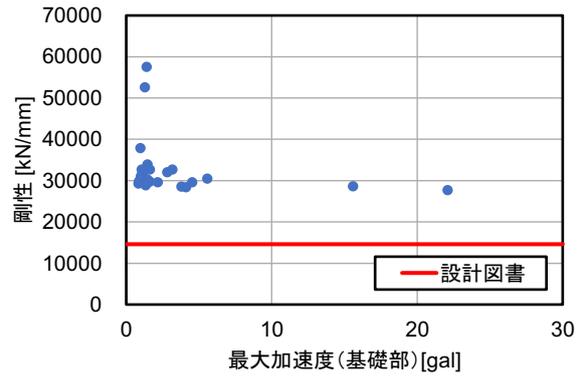


10階

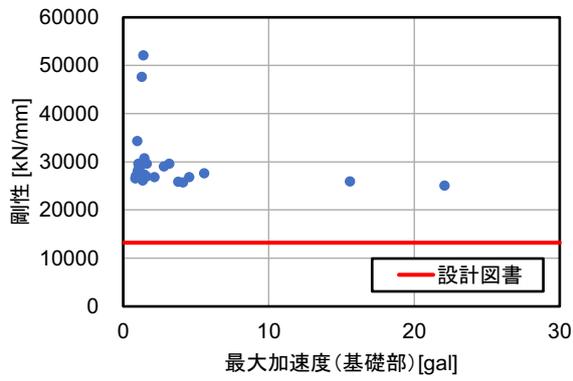
図 4.2.2 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



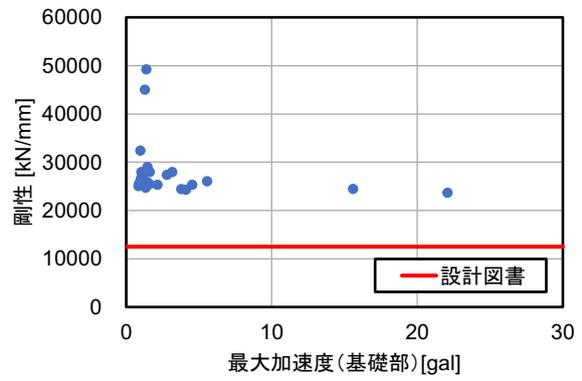
1 階



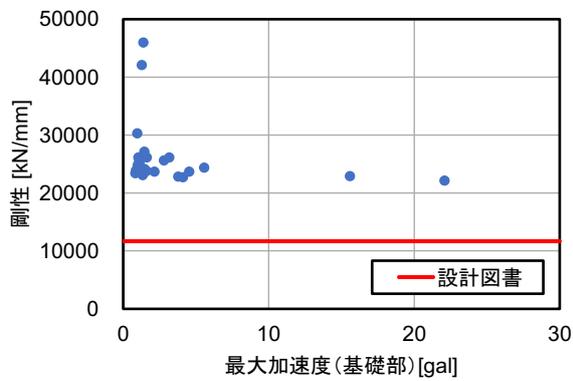
2 階



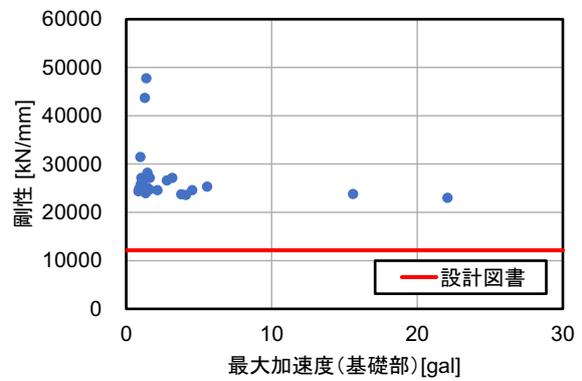
3 階



4 階

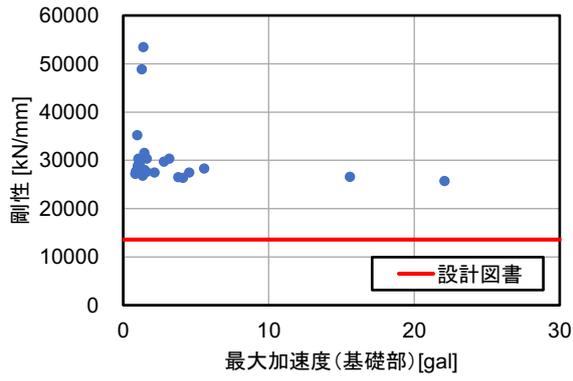


5 階

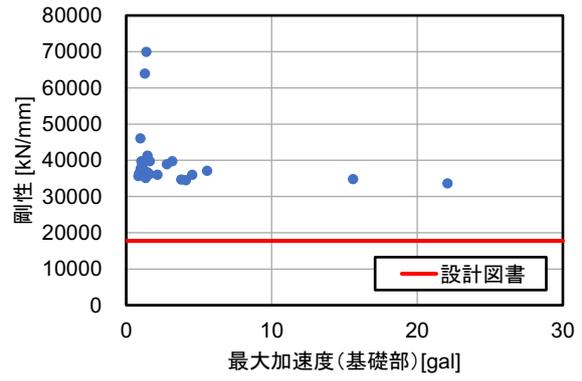


6 階

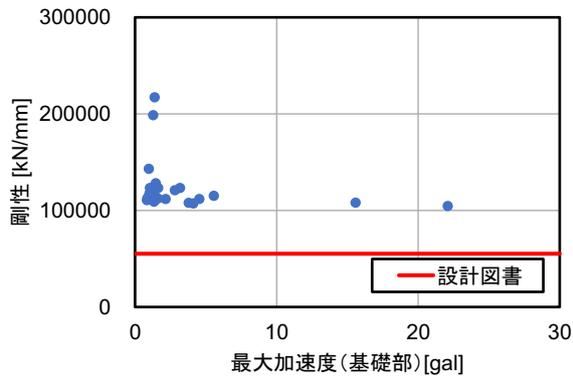
図 4.2.3 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



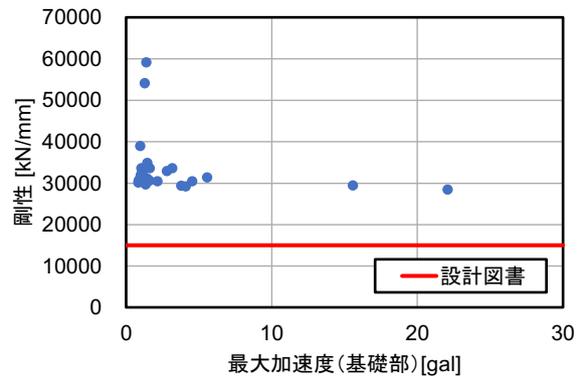
7階



8階



9階



10階

図 4.2.3 (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 4.2.4 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。

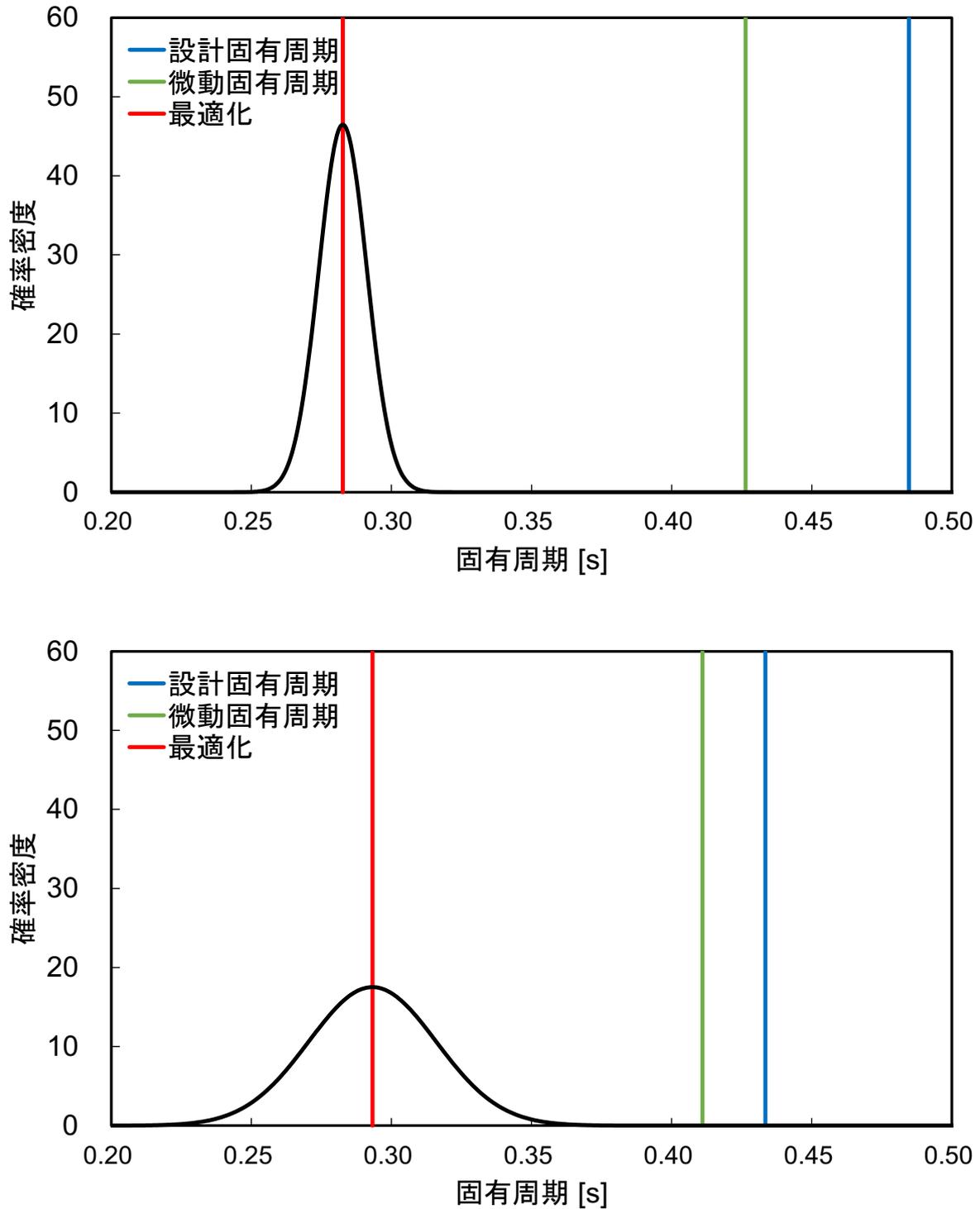


図 4.2.4 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

4. 2. 2 ベイズ最適化

図 4.2.5 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。

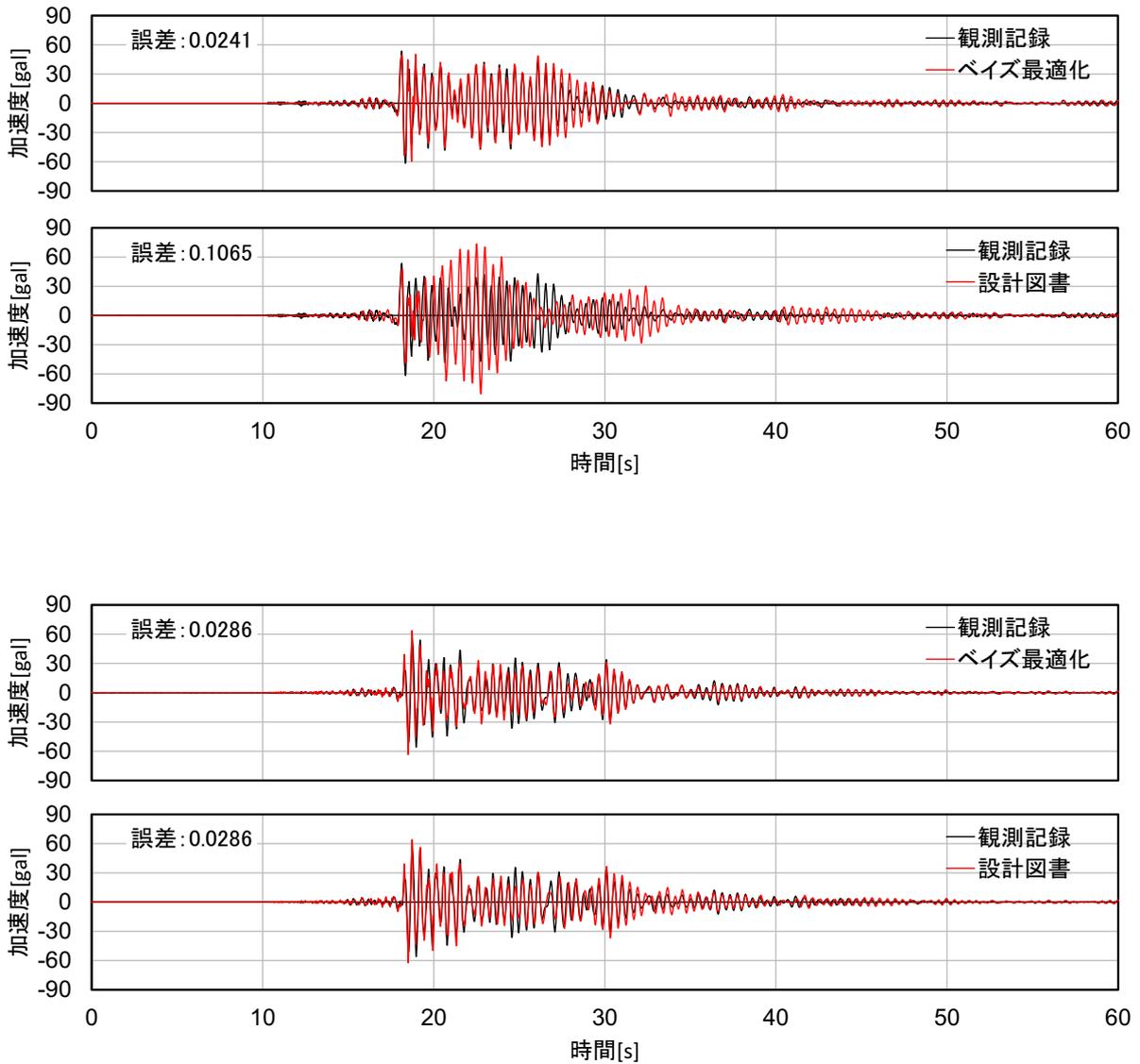


図 4.2.5 観測記録と最適化モデルの比較（上）、観測記録と設計図書モデルの比較（下）

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。

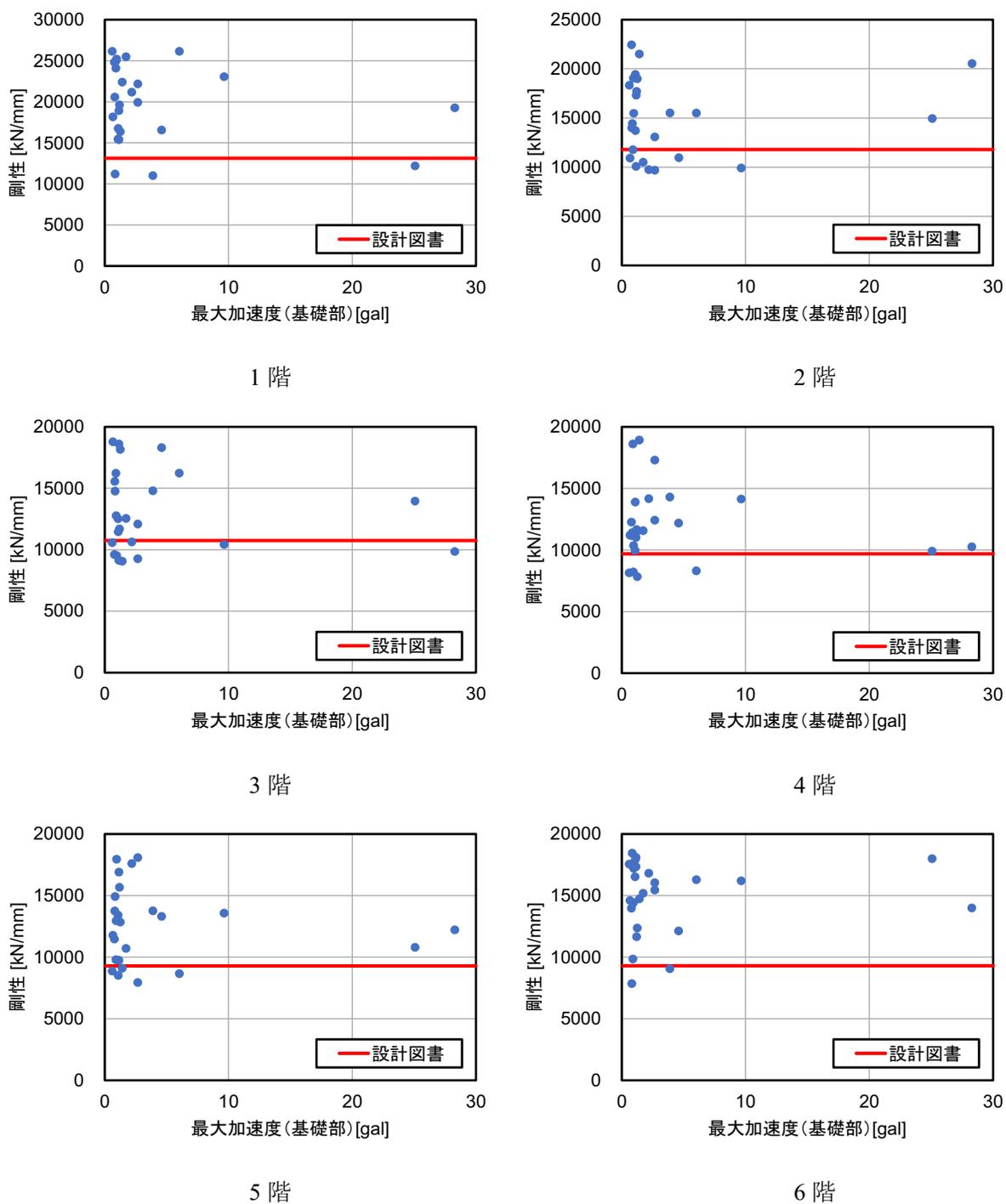
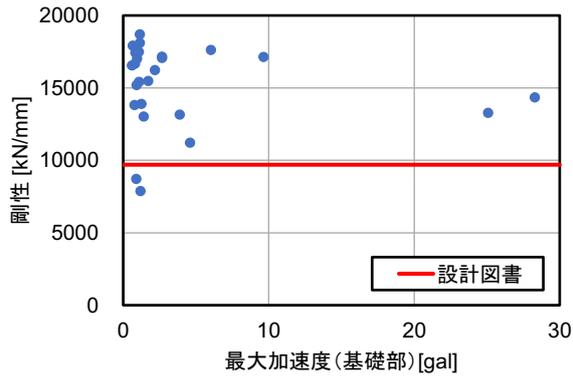
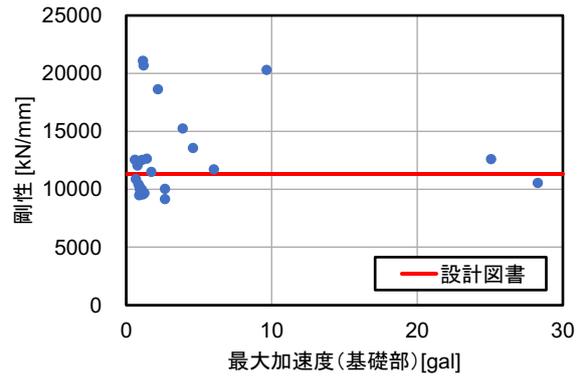


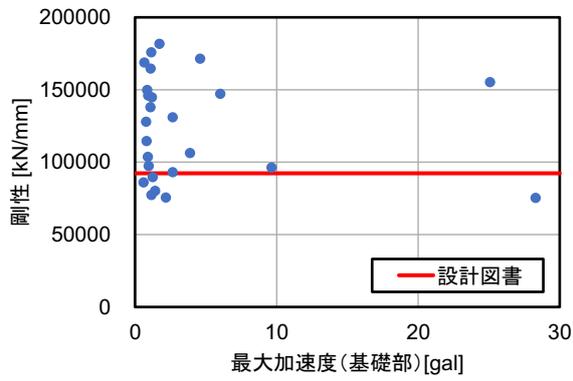
図 4.2.6 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



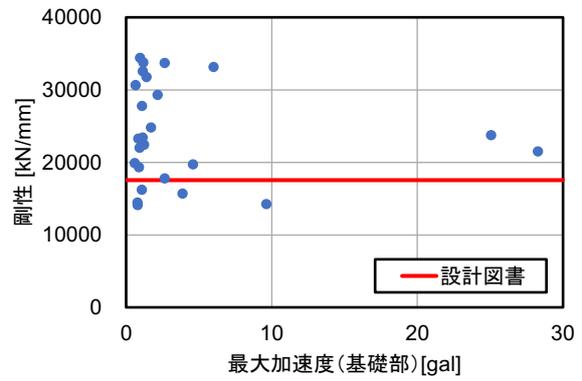
7階



8階

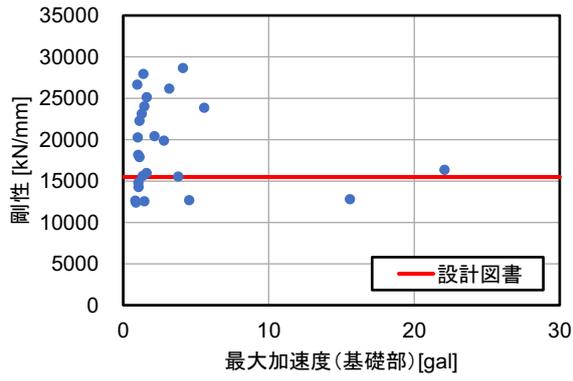


9階

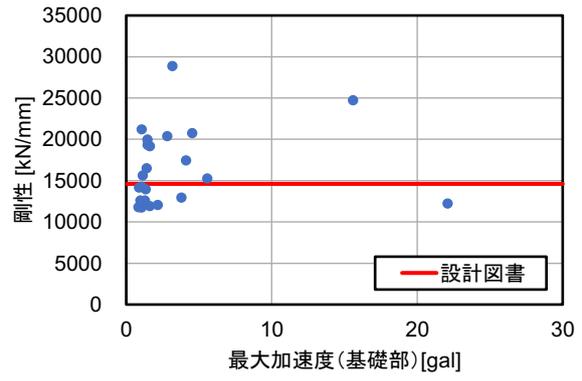


10階

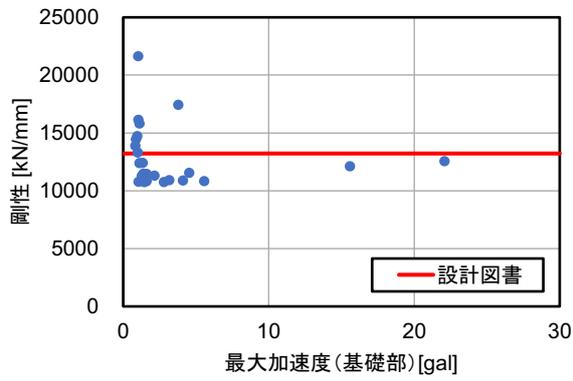
図 4.2.6 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



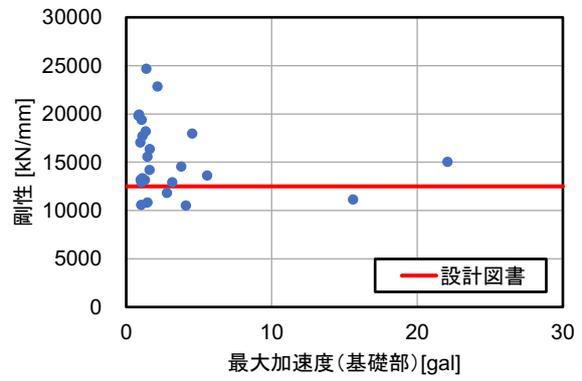
1 階



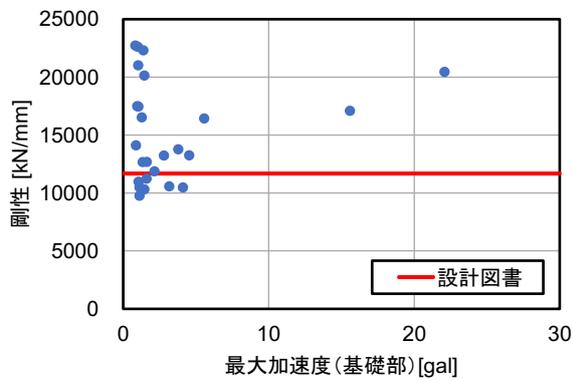
2 階



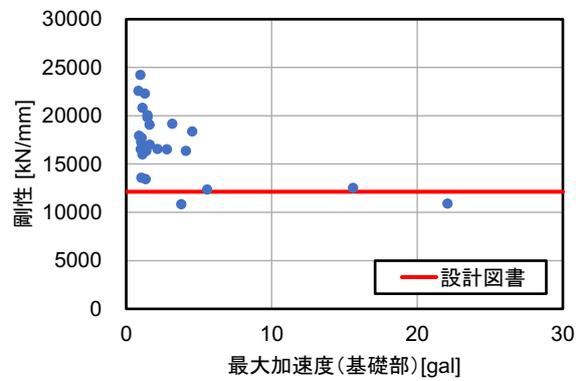
3 階



4 階

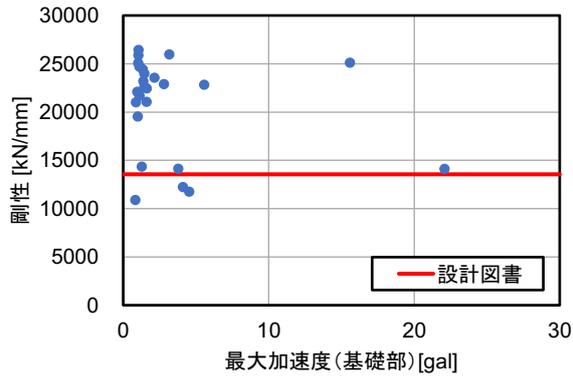


5 階

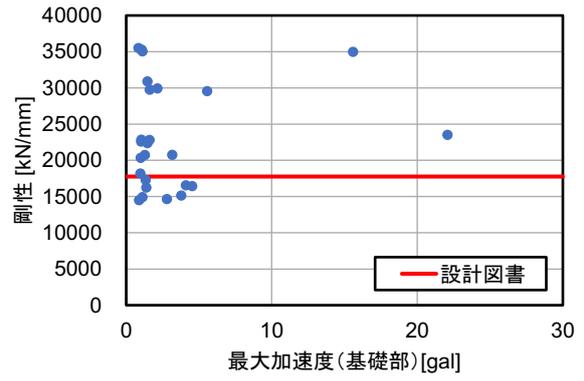


6 階

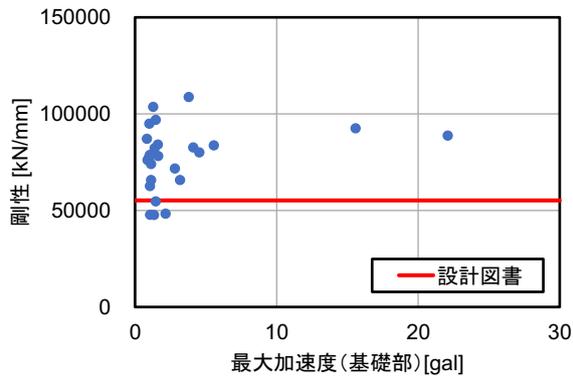
図 4.2.7 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



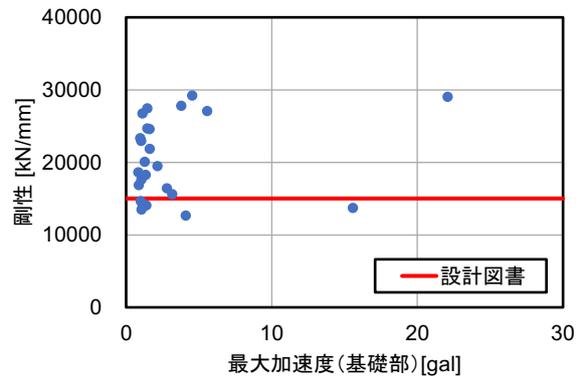
7階



8階



9階



10階

図 4.2.7 (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 4.2.8 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。

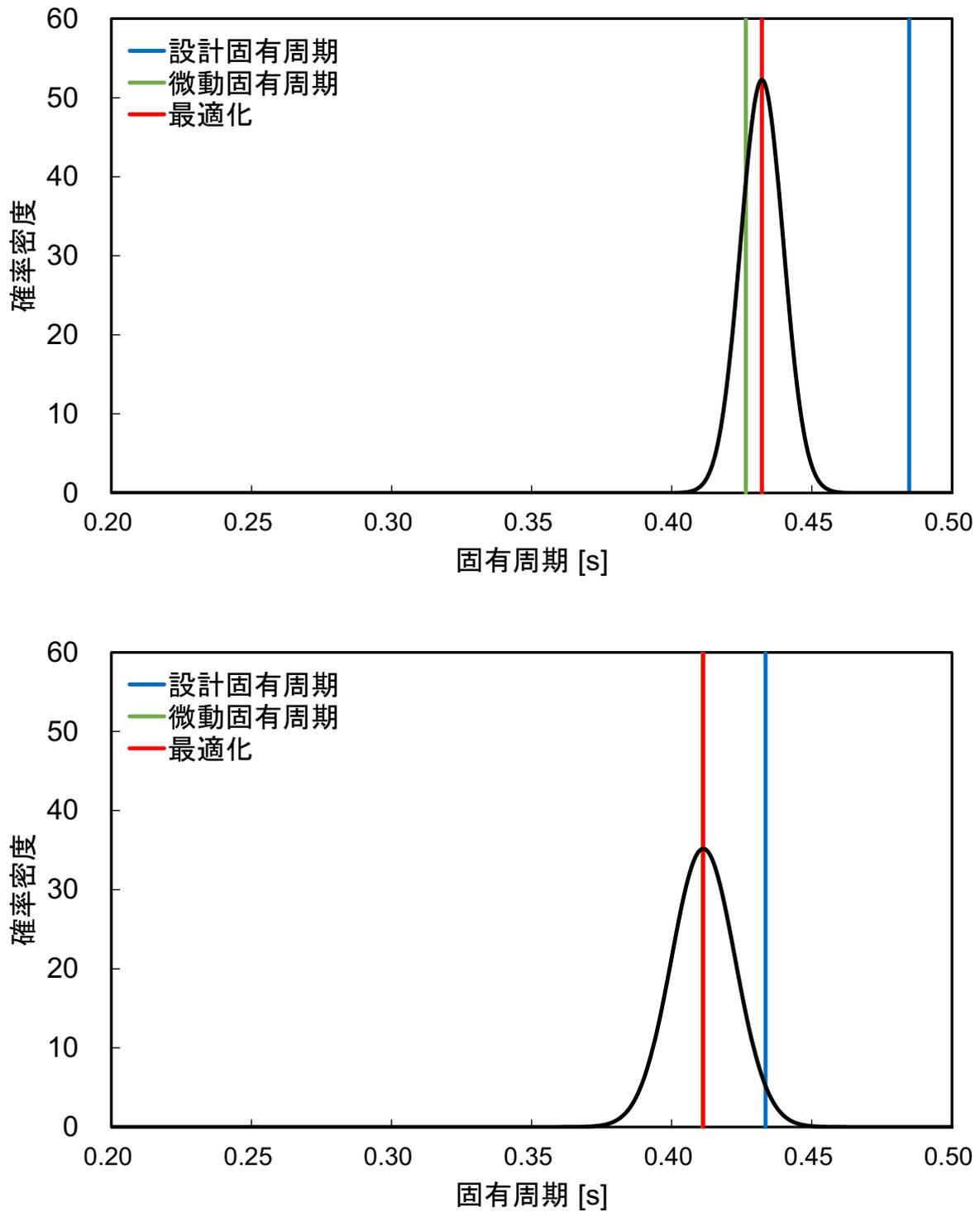
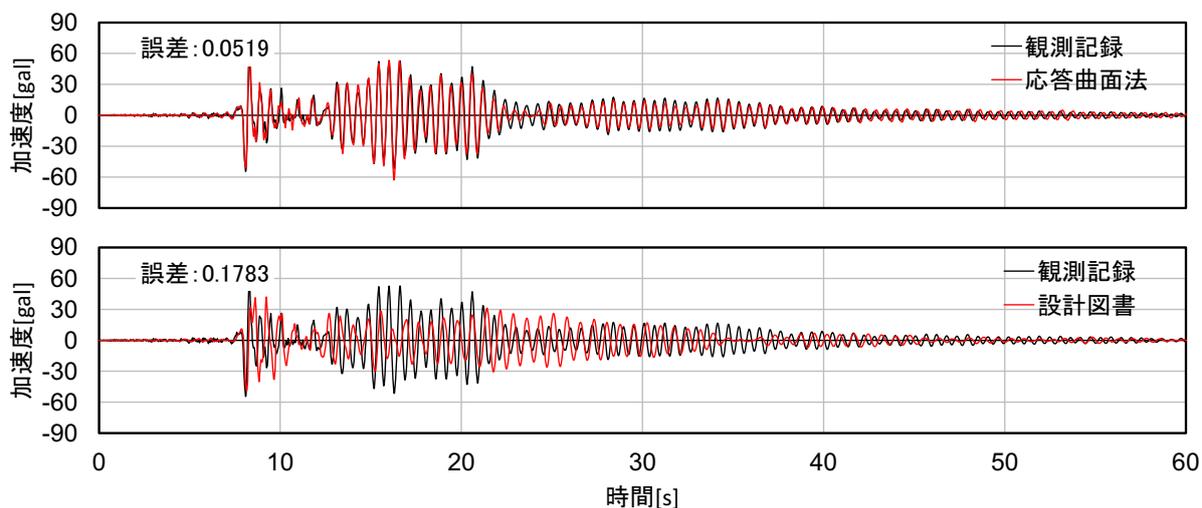


図 4.2.8 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

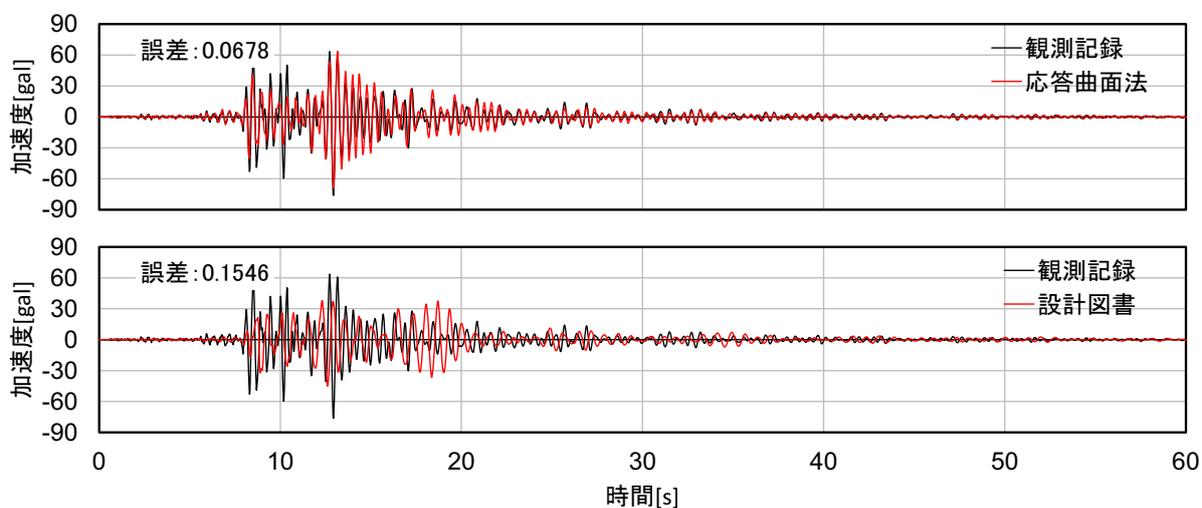
4. 3. 豊橋市中消防署

4. 3. 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4.3.1)。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 4.3.1 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 4.3.2～図 4.3.3 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。

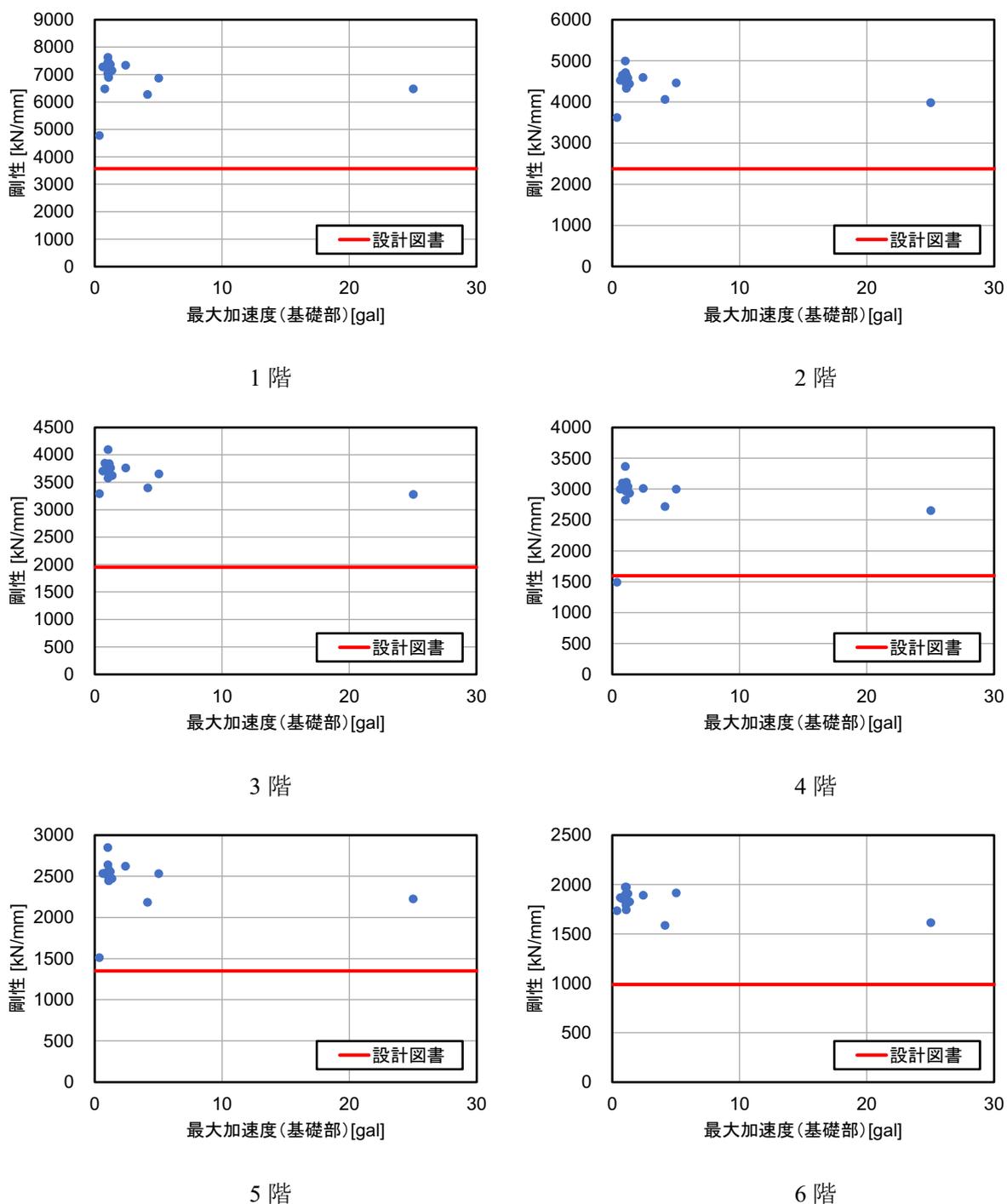
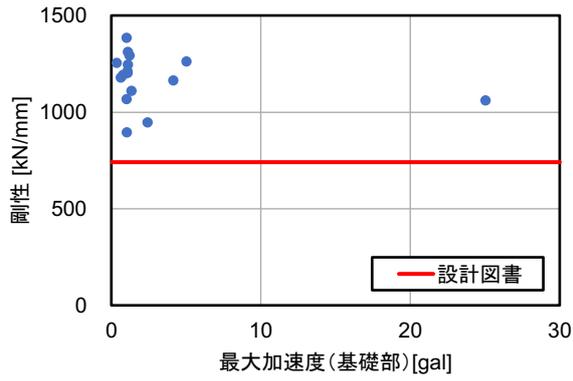
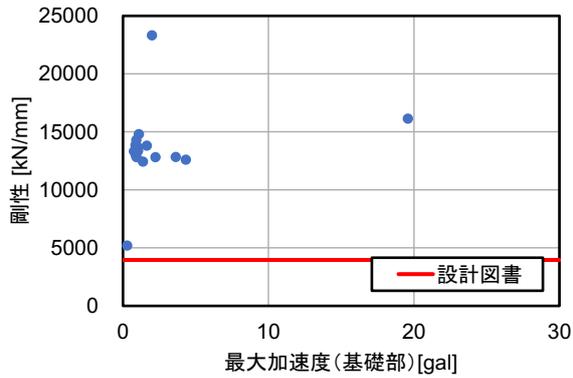


図 4.3.2 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)

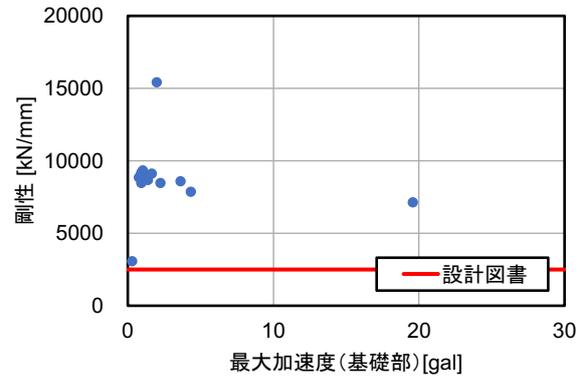


7階

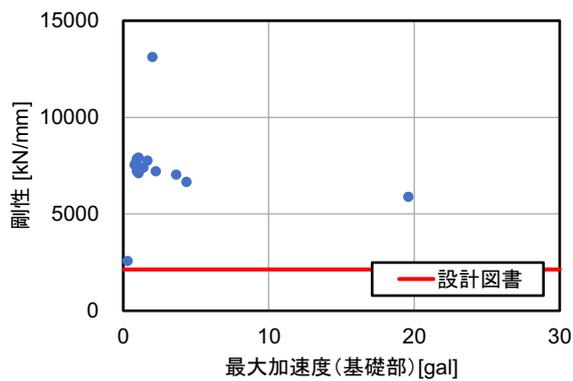
図 4.3.2 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



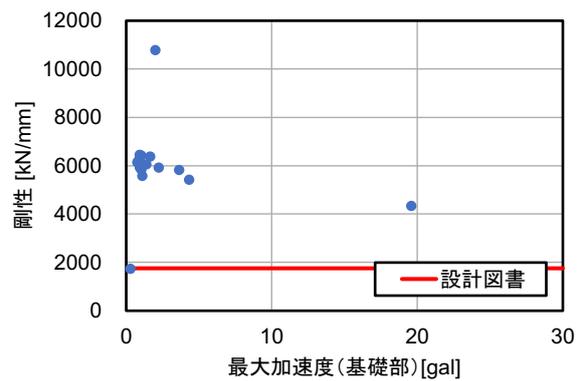
1階



2階

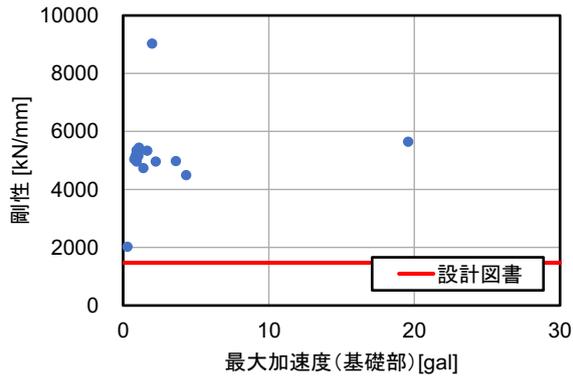


3階

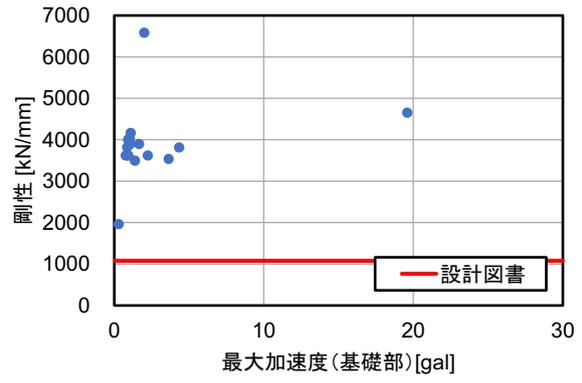


4階

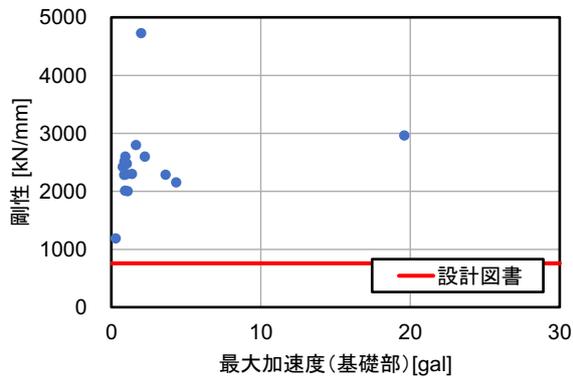
図 4.3.3 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



5 階



6 階



7 階

図 4.3.3 (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 4.3.4 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。

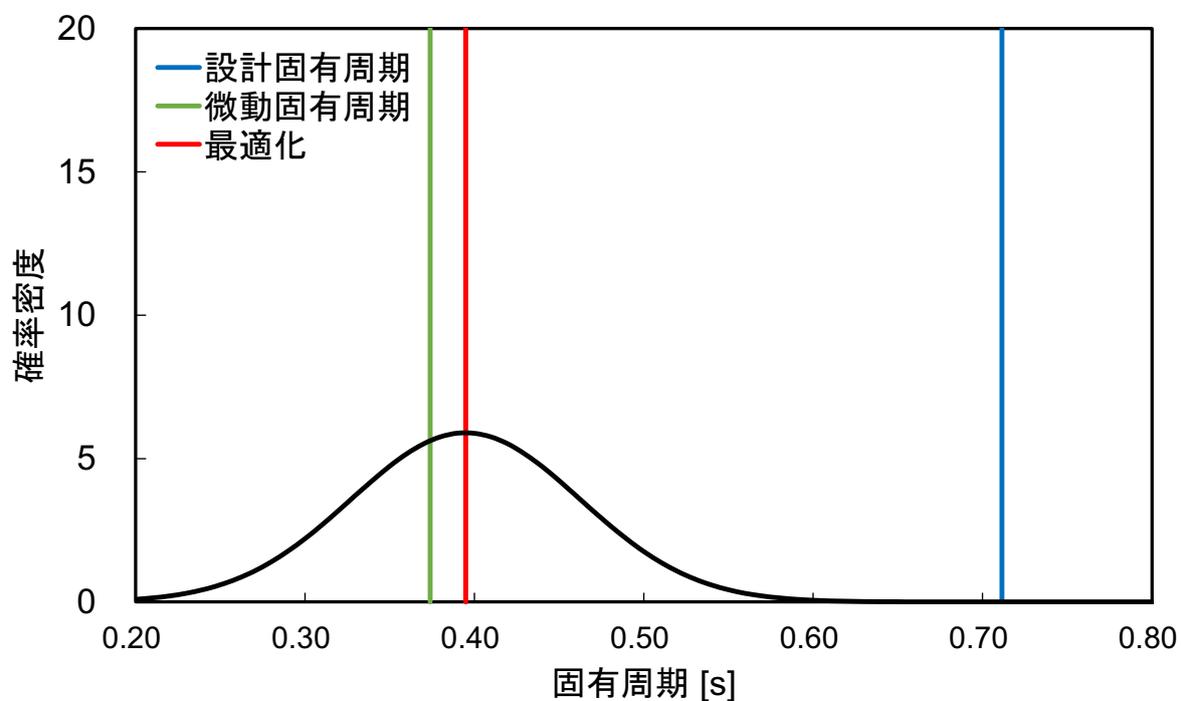
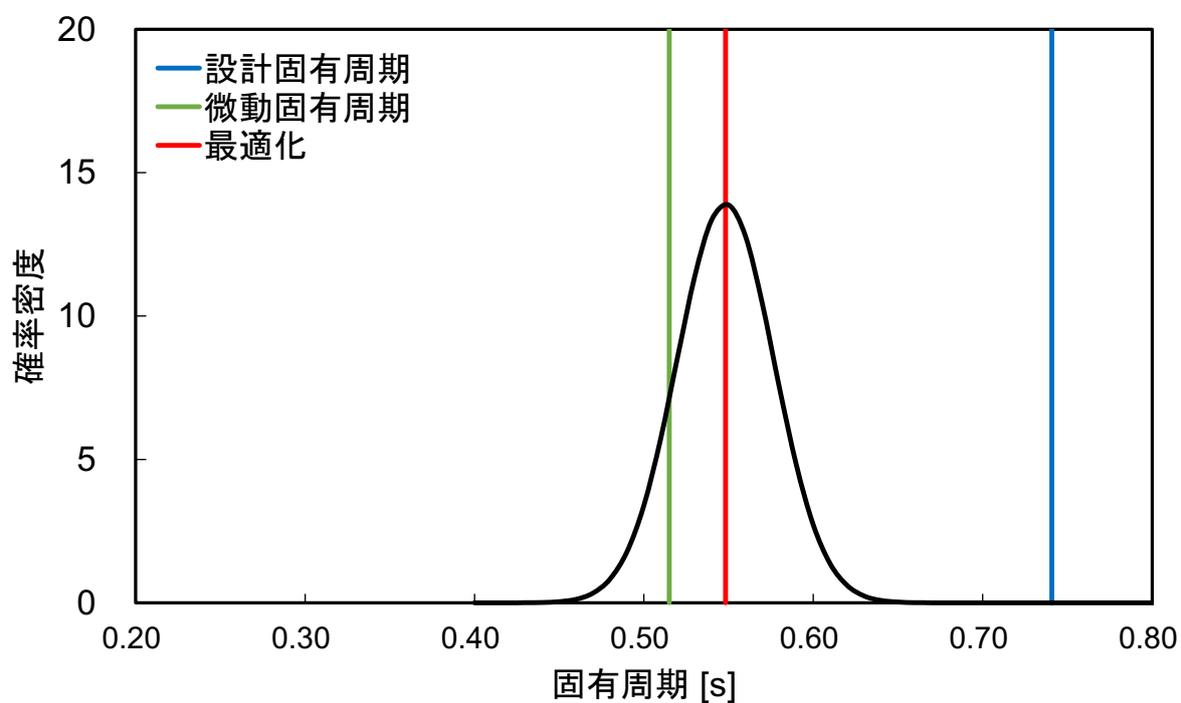
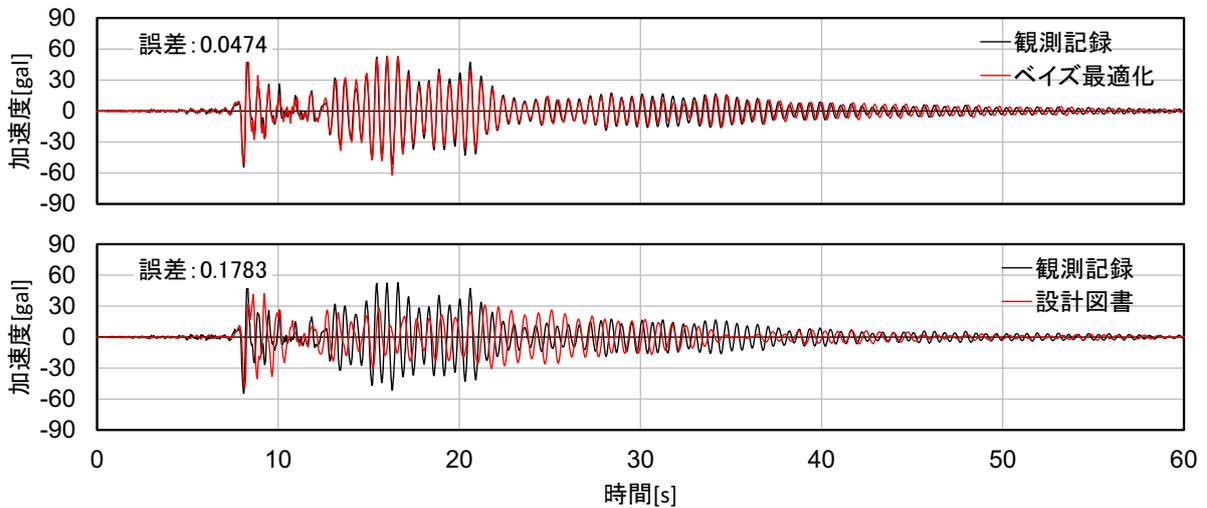


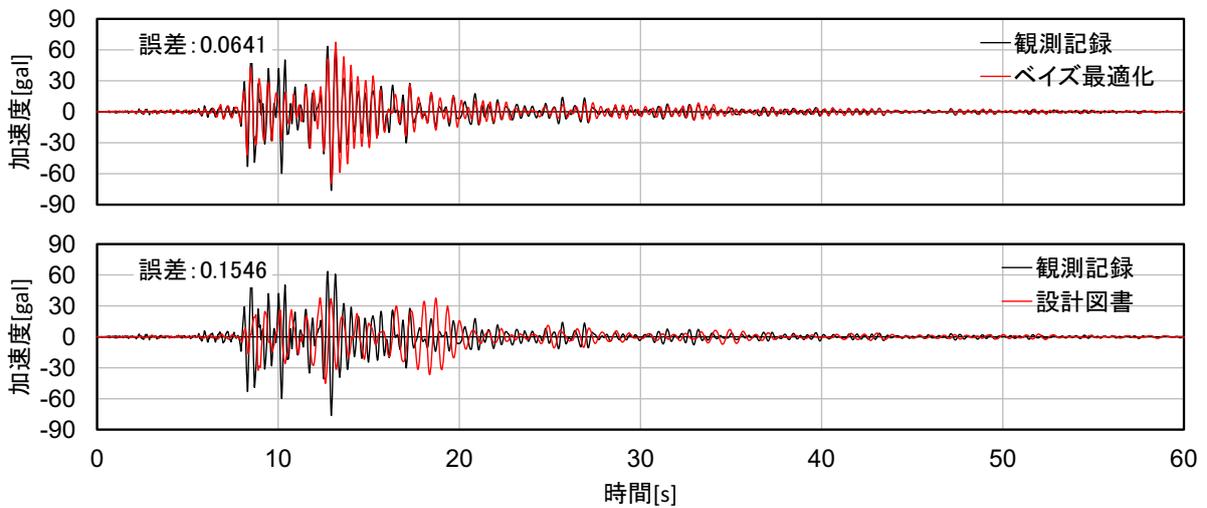
図 4.3.4 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

4. 3. 2 ベイズ最適化

図 4.3.5 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。

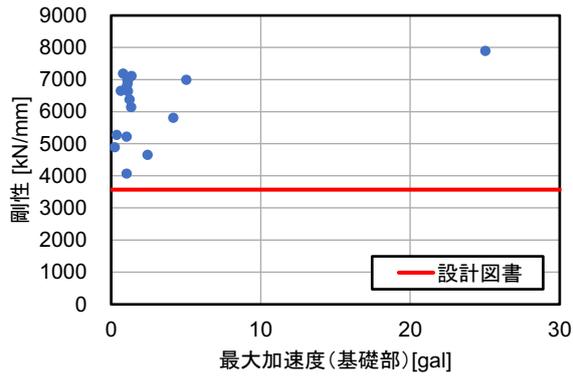


東西方向

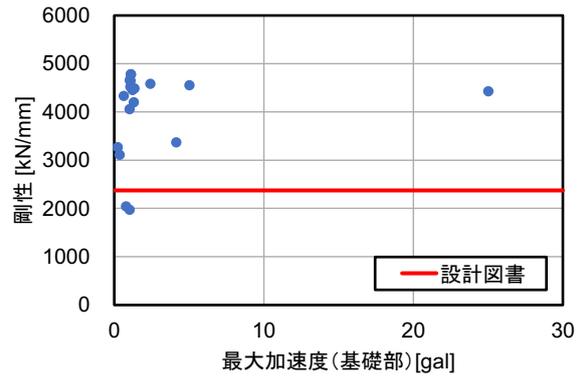


南北方向

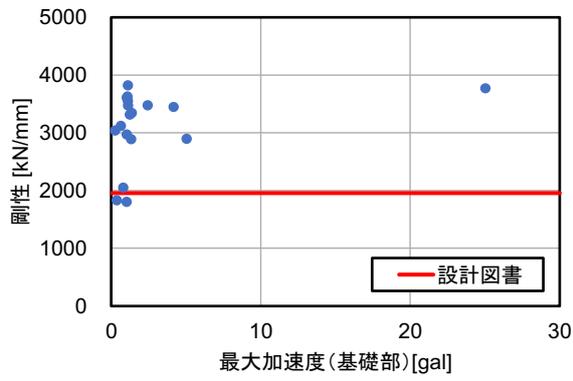
図 4.3.5 観測記録と最適化モデルの比較（上）、観測記録と設計図書モデルの比較（下）



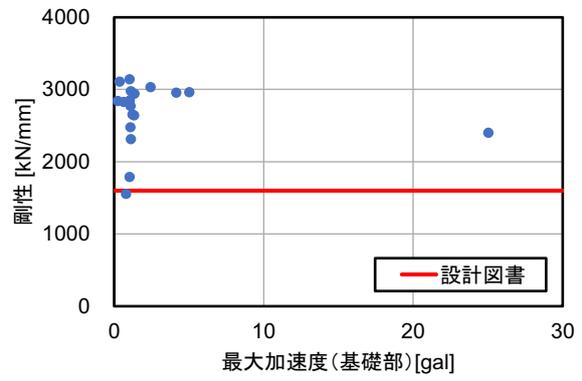
1 階



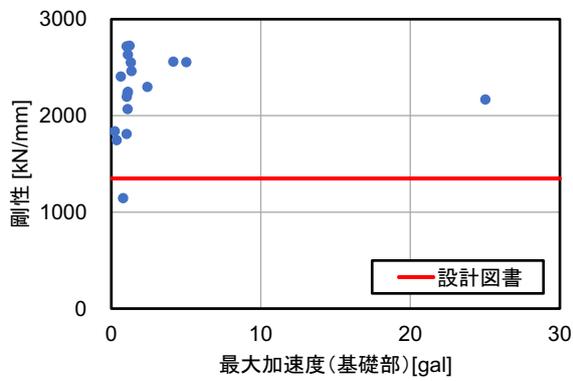
2 階



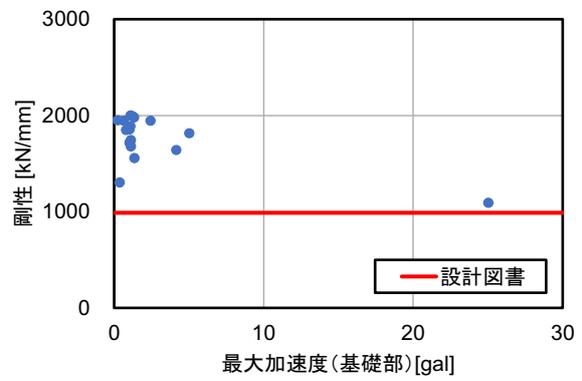
3 階



4 階

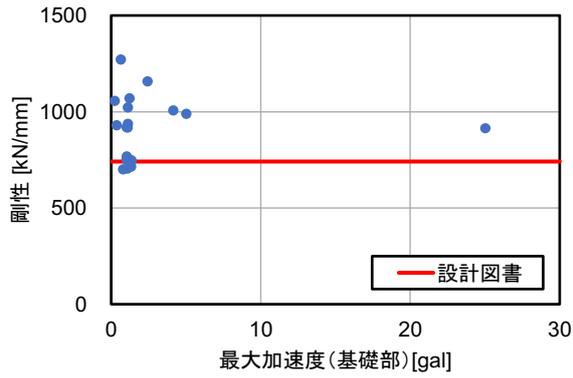


5 階



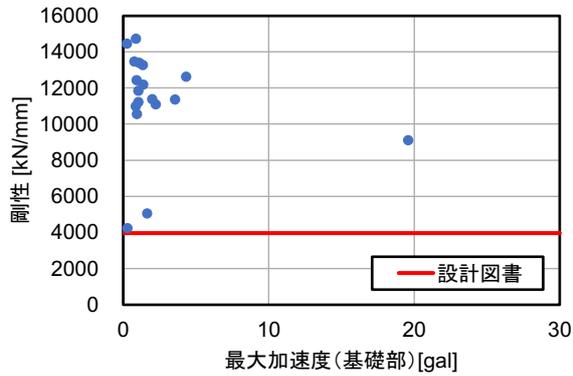
6 階

図 4.3.6 (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)

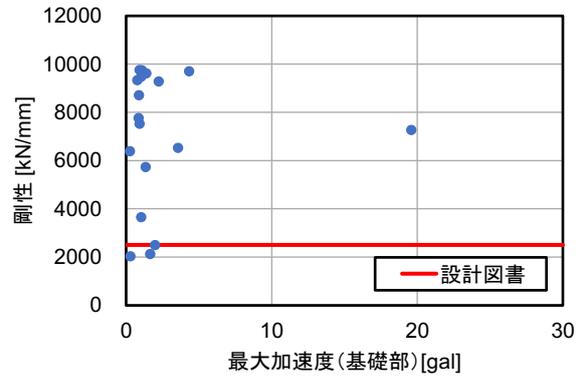


7 階

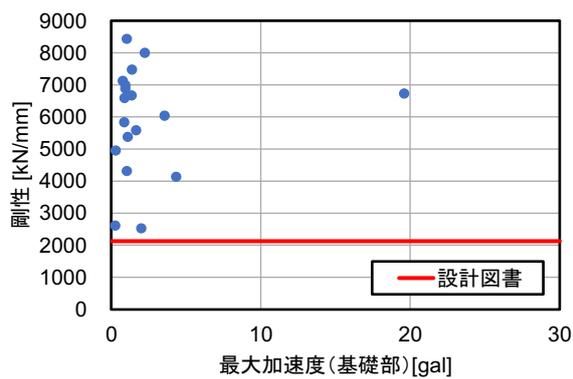
図 4.3.6 (2) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (東西方向)



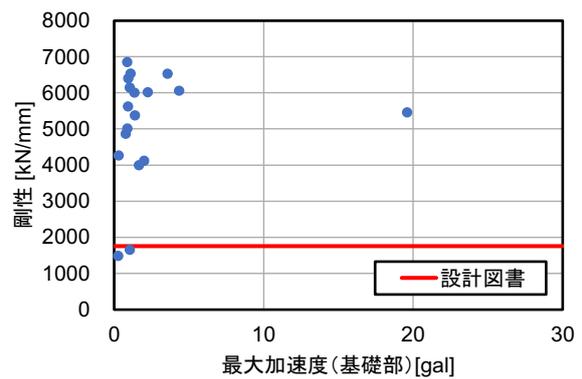
1 階



2 階

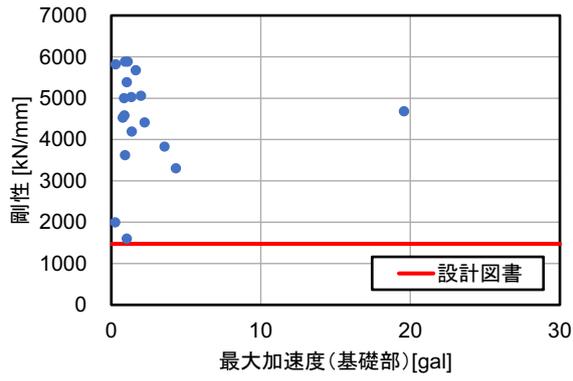


3 階

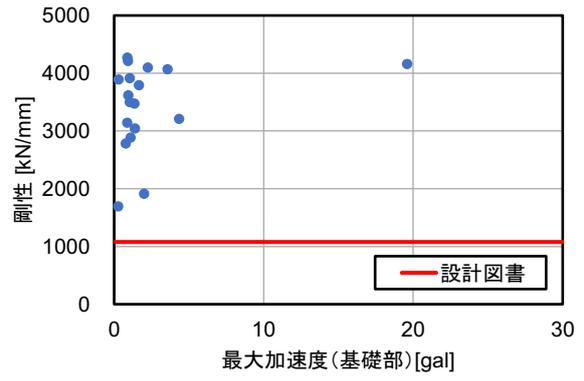


4 階

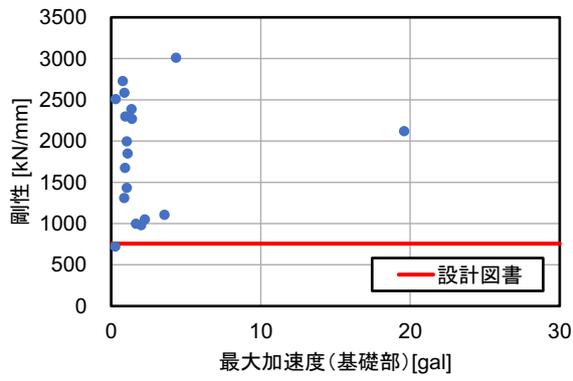
図 4.3.7 (1) 各階における最大加速度と最適化した剛性の関係 (南北方向)



5 階



6 階



7 階

図 4.3.7 (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 4.3.8 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。

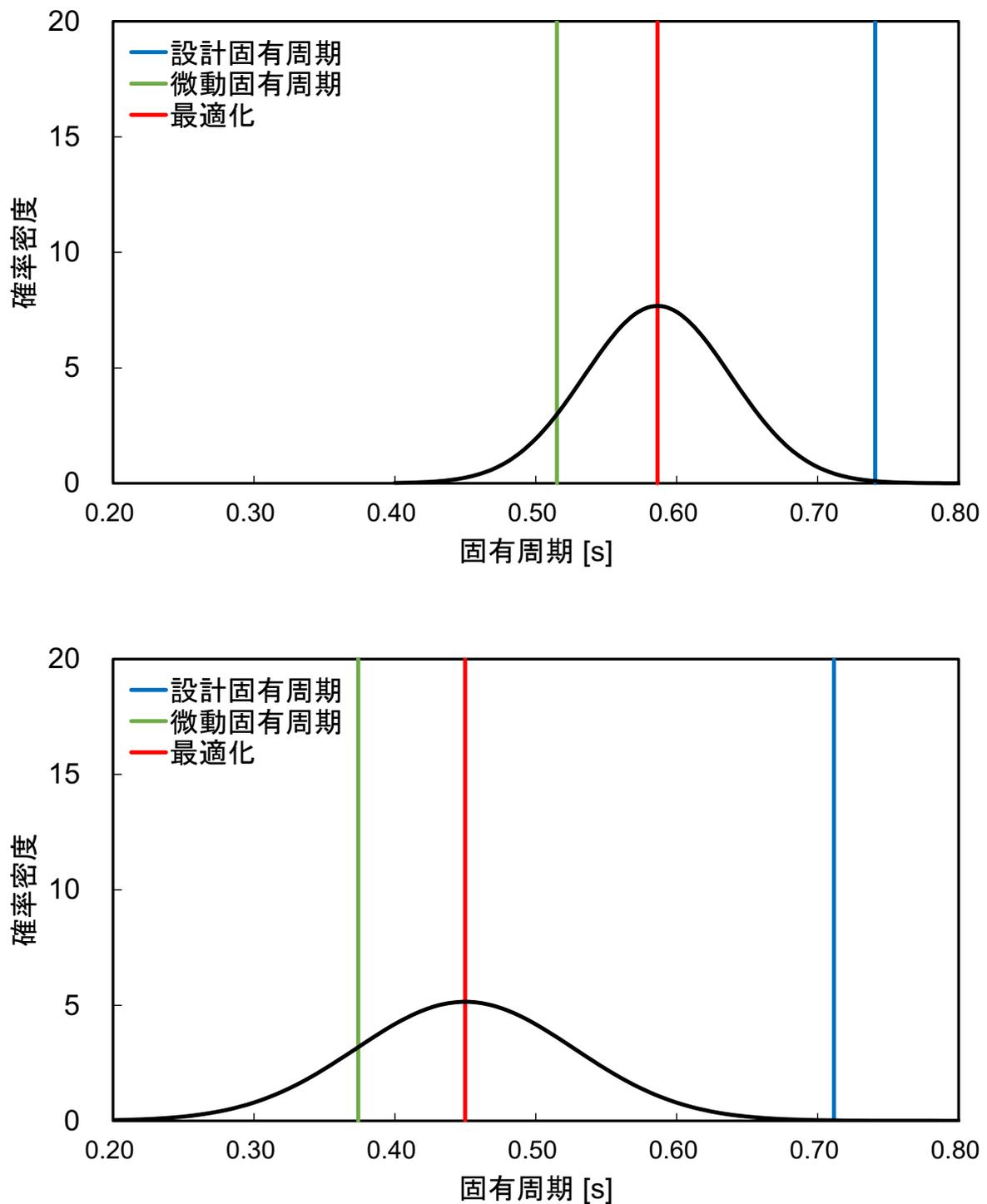


図 4.3.8 最適化モデルの固有周期の正規分布（上：東西方向、下：南北方向）

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形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。

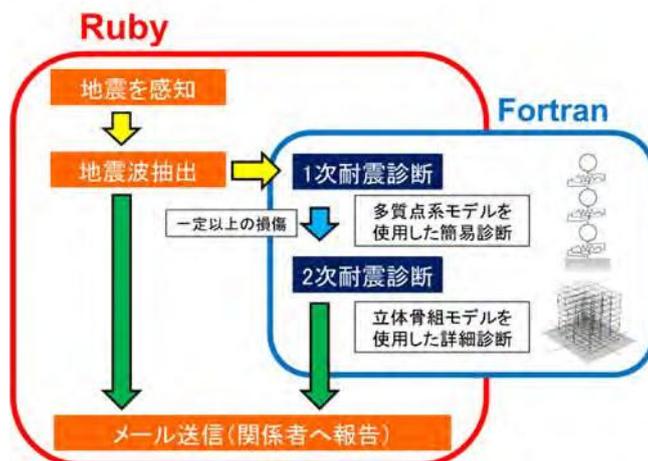


図 5.1.1 耐震診断システムのフローチャート図

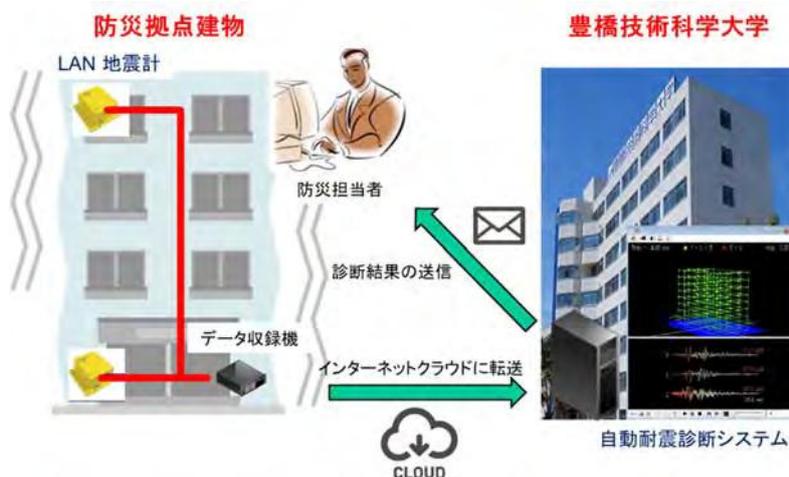


図 5.1.2 現在のリアルタイム耐震診断システム

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）⁶⁾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。

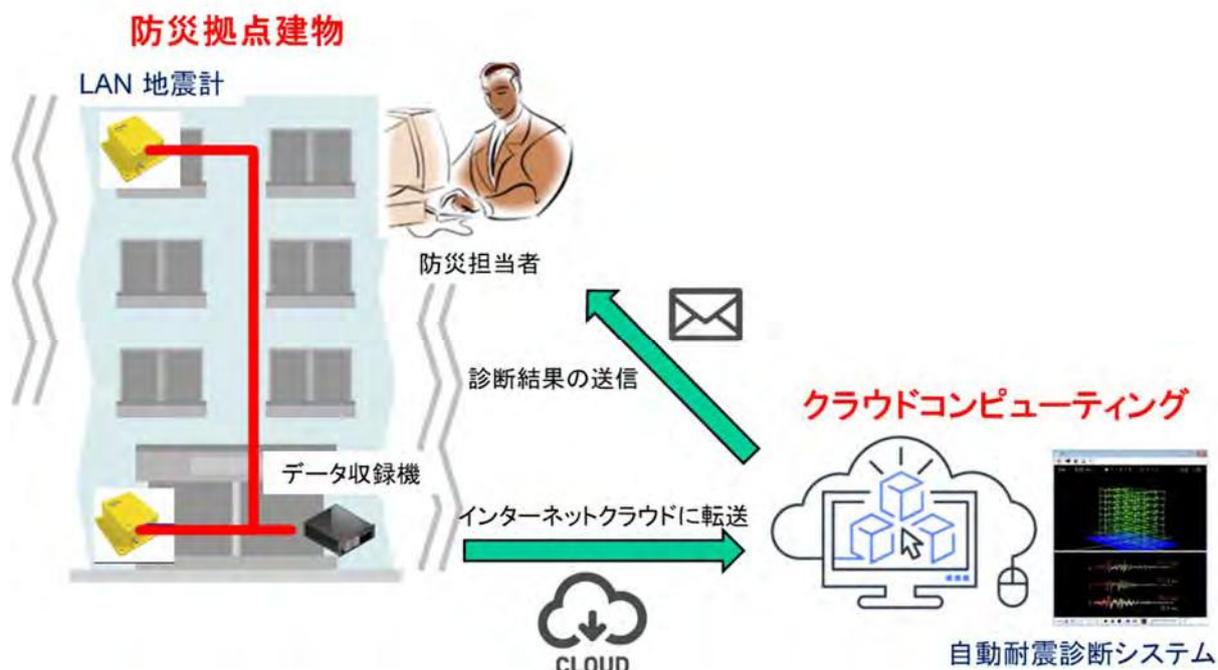


図 5.2.1 リアルタイム耐震診断システムのクラウド化



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 PuTTY⁷⁾および WinSCP⁸⁾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

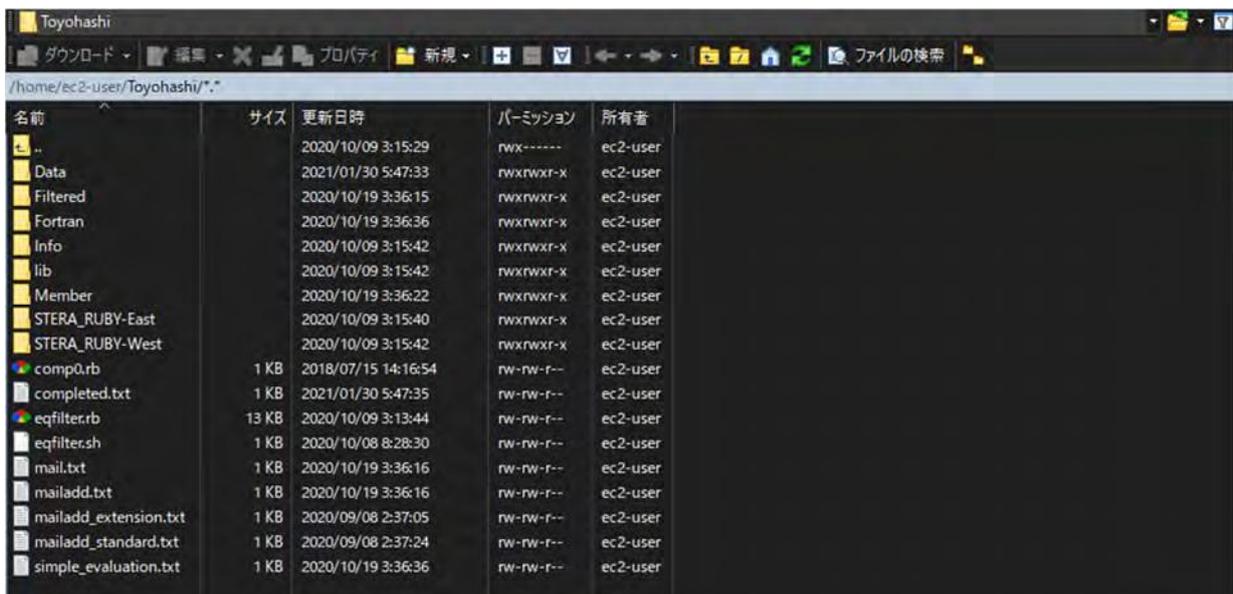


図 5.2.4 WinSCP 画面

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

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。