

丸亀城天守（建造物）耐震診断について

1. 診断方法

1) 限界耐力計算

・立体フレームモデルを構築し、各層の静的増分解析により荷重変形関係を算出し、限界耐力計算を実施する。

2) 時刻歴応答解析

・立体フレームモデルを構築し、時刻歴応答解析を実施する。

2. 設計水準

- ・目標とする耐震性能は、大地震動時に倒壊せず、生命に重大な危害を及ぼさない『安全確保水準』レベルとする。
- ・層間変形角の目安は 1/30 以下とする。ただし、柱の鉛直支持能力保持（柱の曲げ破壊なし）の確認ができれば、折損しない変形角までとし 1/15 程度まで許容する。

表 1 必要耐震性能設定の目安

		機能維持水準	安全確保水準	復旧可能水準
性能目標		大地震動時に要求される機能が維持できる。	大地震動時に倒壊せず、生命に重大な危害を及ぼさない。	大地震動時に倒壊の恐れがあるが、文化財としての主要な価値を損なうことなく復旧できる。
活用内容		現役の社会生活の基盤となる施設（インフラ施設）。災害時の防災拠点となるもの。不特定多数が常時利用する大規模な建造物で、特に必要と判断されるもの。	通常の用途に供しているもの。	ほとんど人が立ち入らないか、滞留時間が短いもの。
木造建築物状況の目安 (参考) 中地震動時	軸組	変形が生じる。	大きな変形が生じるが、倒壊しない（層間変形角 1/30 以下）。	倒壊する危険性がある。
	安全	安全	生命に重大な影響を及ぼさない。	危険
	機能	機能維持	機能喪失	機能喪失
	軸組	損傷なし。仕口の緩みが生じることがある。	変形が生じる。	大きな変形が生じるが、倒壊しない。
	雑作	一部が破損することがある。	破損・落下するおそれがあるが、再利用して復旧可能。	過半が損壊して、失われる可能性がある。
	土壁	ほとんど被害が生じない。	亀裂を生じ、塗り替えが必要となることがある。	落下し、壁下地も損壊する。
安全	安全	安全	生命に重大な危害を及ぼさない。	
機能	機能継続	機能維持	機能喪失	

文化庁文化財部 重要文化財（建造物）耐震診断指針より

3. 地盤調査

調査項目	個所数	備考
調査ボーリング（コアボーリング）	5 地点	B-1～B-4
標準貫入試験	5 地点	B-1～B-4
PS 検層	1 地点	B-1 ダウンホール法
土質試験	1 か所	B-5
スウェーデン式サウンディング試験	23 か所	S1、S2～23（2m ピッチ）

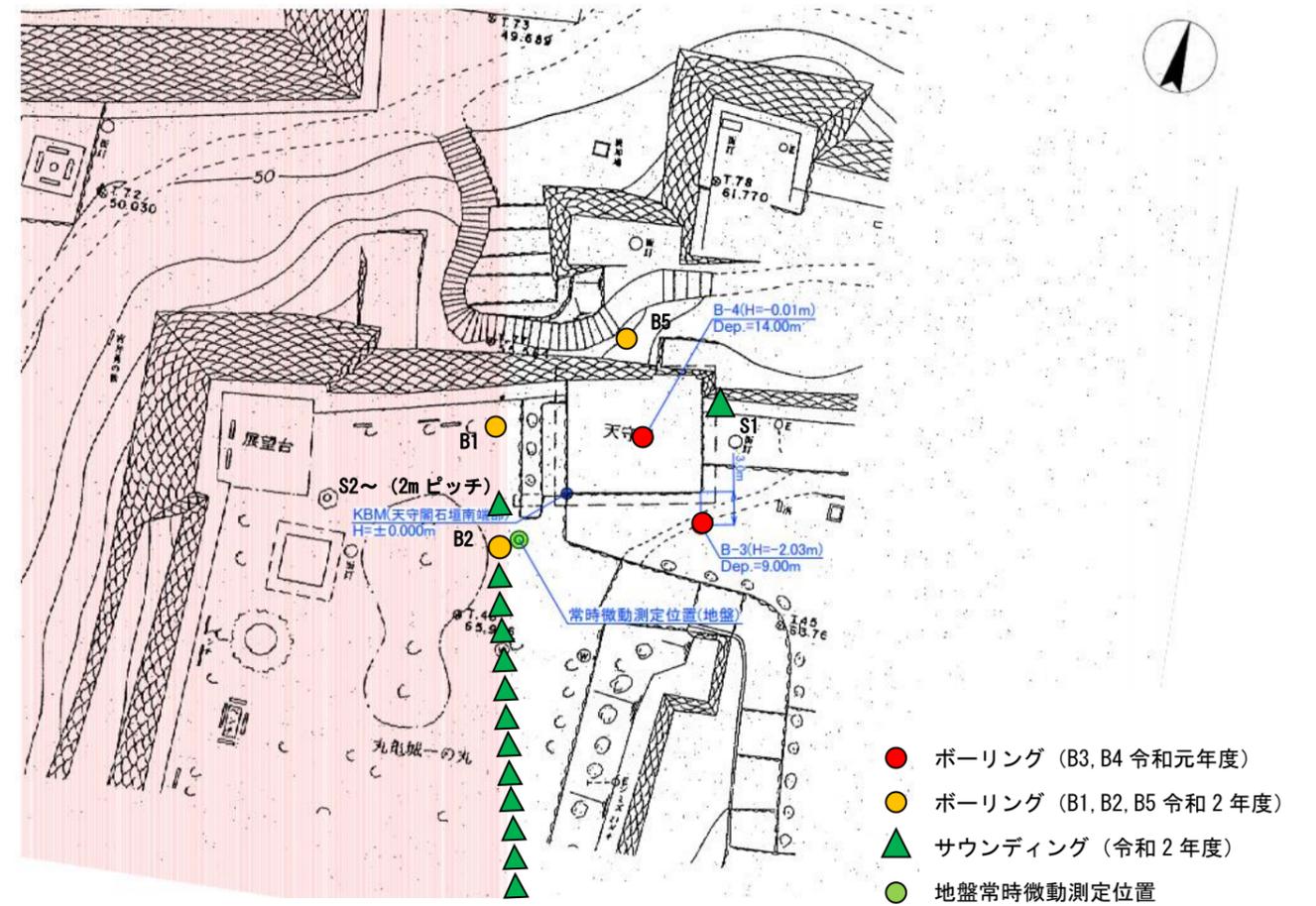


図 1 調査位置図

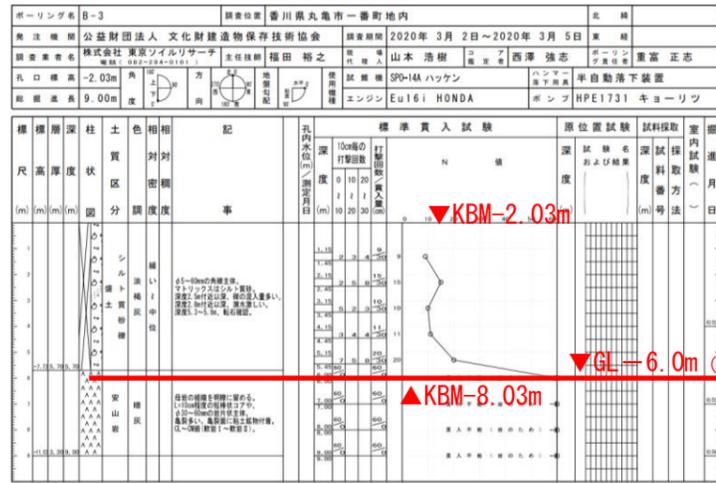


図2 (B-3) ボーリング柱状図

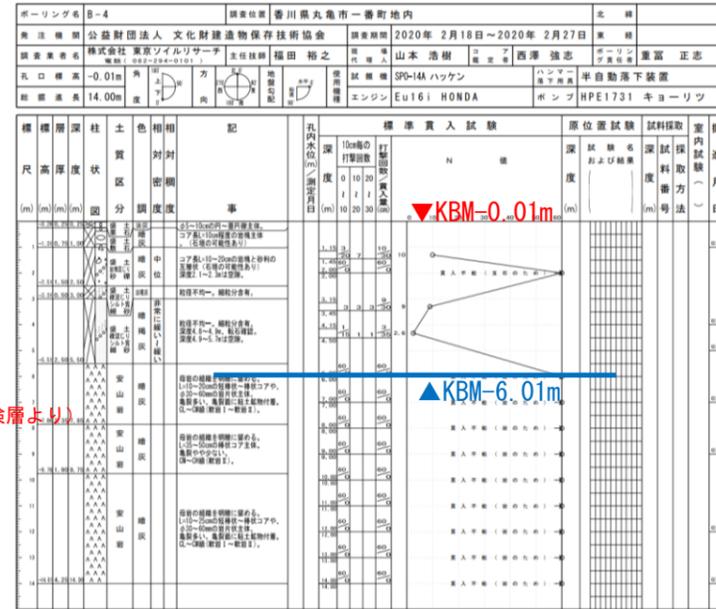


図3 (B-4) ボーリング柱状図

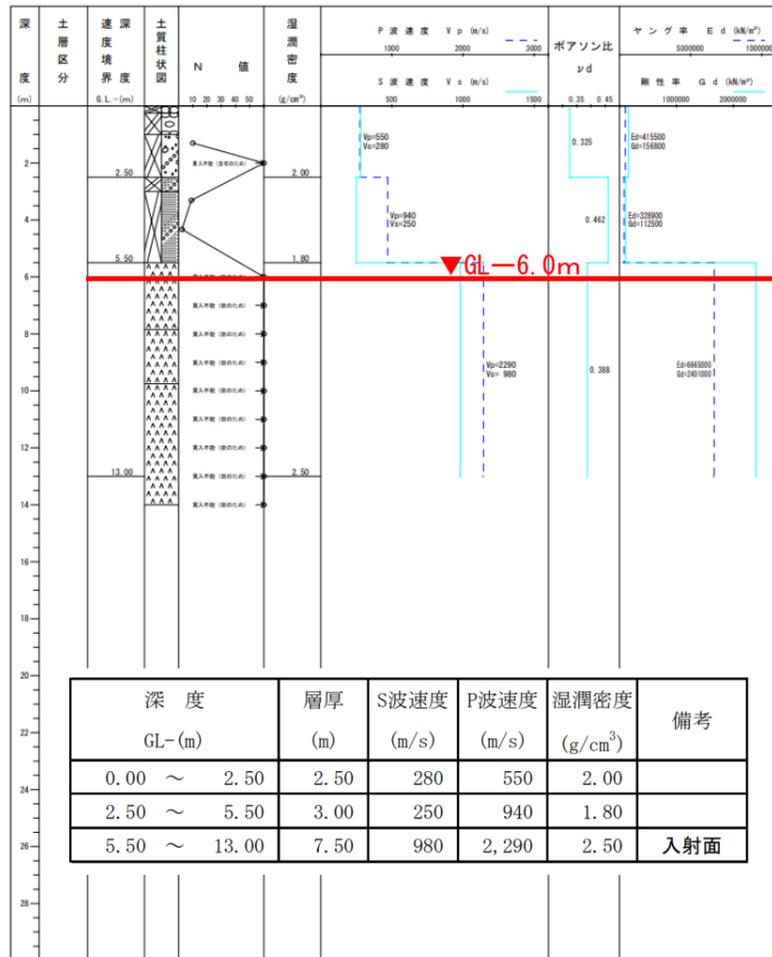


図4 PS検層測定結果 (B-4)

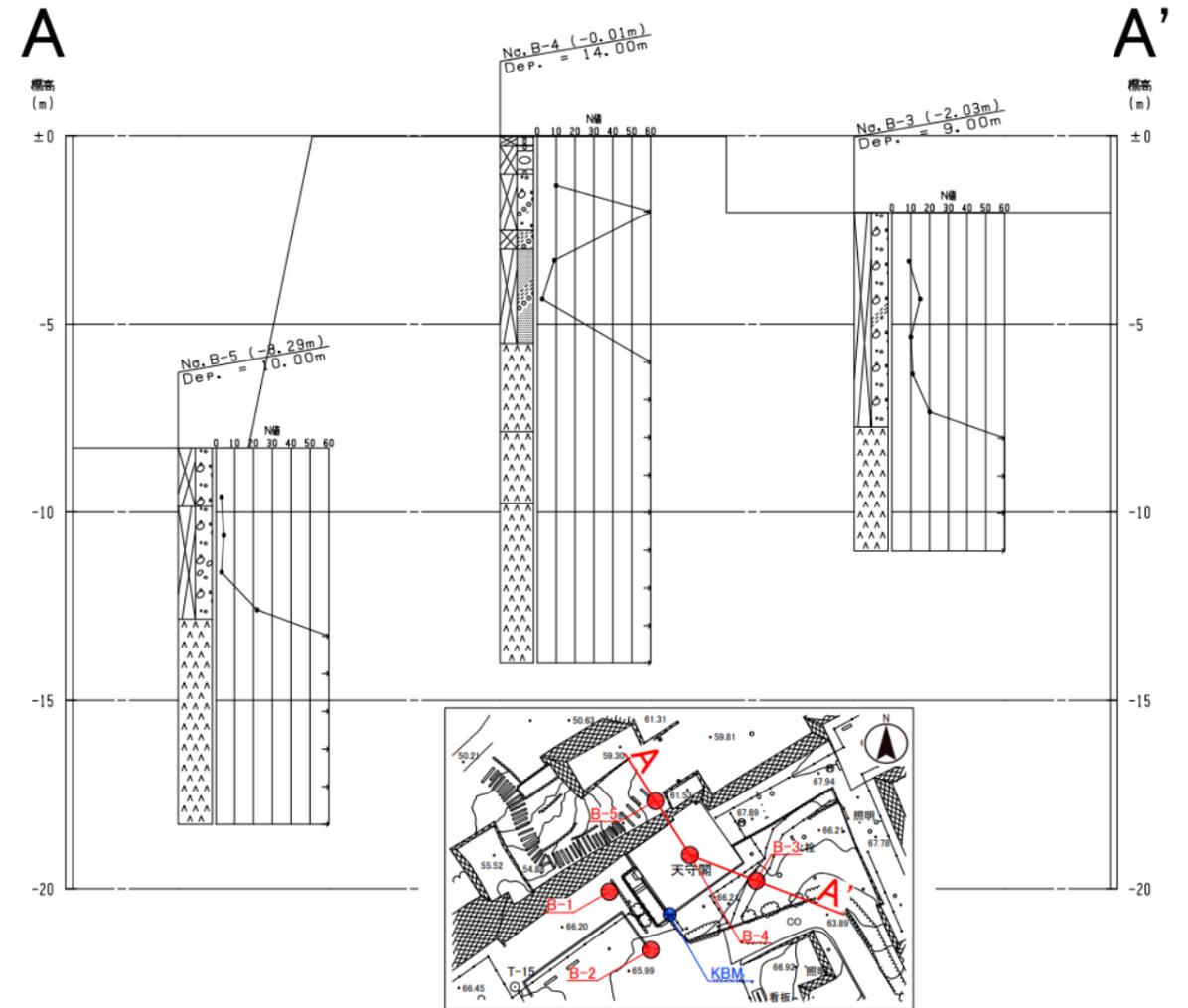


図5 調査位置図

表1 地層構成表

地質時代	地層名	記号	主な土質・岩質	主なN値	
現世	盛土層	砂礫層	Bg	L=10~20cmの岩塊主体(B-4で確認, 石垣と推定)	10
		砂礫・砂層	Bgs	砂礫~玉石混じり砂礫	3~26
新生代 第三紀	基盤岩(安山岩)	An	φ10~60mmの岩片状 L=5~20cmの短棒状~棒状コア	貫入不能	

4. 荷重について

1) 積載荷重

見学者および屋根部の点検などの実状を鑑み積載荷重を設定する。

(N/m²)

建築物の部分	床用	架構用	地震用
屋根	1000	0	0
全階 床	1800	1300	600

2) 積雪荷重

屋根勾配約30°とし勾配を考慮した積雪荷重を設定する。

香川県 建築基準法施工令第86条に基づく垂直積雪量より

香川県丸亀市

垂直積雪量 30 cm
 単位重量 20 N/cm/m²
 設計荷重 600 N/m²

3) 地震荷重

①限界耐力計算

必要性能スペクトルは、敷地内の地盤調査結果に基づいて表層地盤での加速度の増幅率を詳細検証しG_sとして採用する。検討用地震荷重は限界耐力計算結果におけるベースシア係数により算出する。

また、崖地の割り増し係数（1.3倍）を考慮した場合も検討する。詳細は以下に示す。

なお、香川県丸亀市の地域係数Z=0.9を考慮して算出するが、Z=1.0の場合も併せて検討を行うこととする。

②時刻歴応答解析

時刻歴応答解析に用いる検討用入力地震動は、告示波（八戸、神戸、乱数）3波とし、工学的基盤より上部の地盤形状を考慮し、上部構造検討用の地震波を作成する。

・GS算定

G_s（表層地盤による加速度の増幅率）については、作成した告示模擬地震動3波（八戸位相、JMA神戸位相、ランダム位相）の増幅率の最大を青色の線で示す。0.8秒以降は増幅率がほぼ見られない状態である。

限界耐力計算（告示平12建告第1457号第10）の加速度増幅G_s算出した精算値のグラフを赤色の線で併記する。こちらの方が前項を包絡する形状となっている。

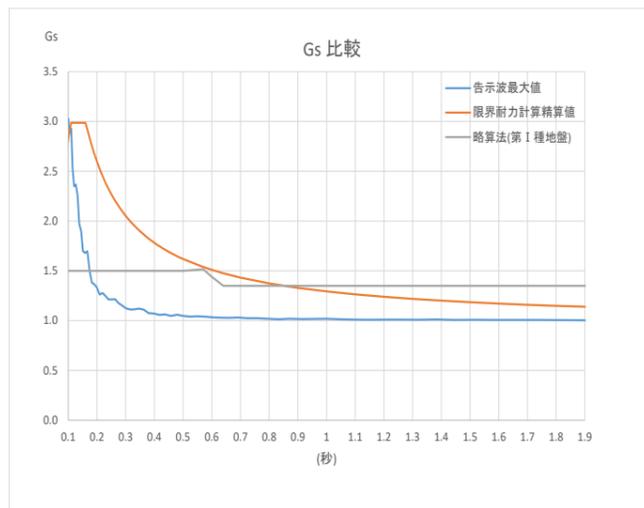


図6 加速度増幅率

4) 風荷重

風圧力は、建築基準法及び告示により算定して結果を以下に示す。

粗度区分はII、石垣の高さとしては周辺状況を考慮した立ち上がりの高さを採用するなど厳しい条件で設定する。

$$P=Cfxq \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$q=0.6xExV0^2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$E=Er^2xGf$$

$$Er=1.7(H/ZG)^{\alpha}$$

基準風速 V0= 34 (m/s)
 稀 1.0 34
 極稀 1.6 54.4

地表面粗度区分	I	II	III	IV
Zb(m)	5	5	5	10
ZG(m)	250	350	450	550
α	0.10	0.15	0.20	0.27
Gf(H=10m)	2.0	2.2	2.5	3.1
Gf(H=40m)	1.8	2.0	2.1	2.3

地表面粗度区分	II	建物高さ	石垣高さ
最高高さ(m)	32.03	13.743	18.287
高さと軒高さ平均H(m)	14.08		
Zb(m)	5		
ZG(m)	350		
α	0.15		
Er	1.19		
Gf(H=10m)	2.20		
Gf(H=40m)	2.00		
Gf	2.15		
E	3.03		
q稀	2100	2200	
q極稀	5376	5400	
石垣上kz	0.85		
最高部kz	1.00		

X方向 東立面図		見付面積 (m ²)	風力係数	稀風圧力 (kN)	極稀風圧力 (kN)
階	地盤面からの高さ(m)				
①傾斜部	33.60	11.5	0.70	17.7	43.5
②傾斜部	31.13	6.5	0.70		
③	31.13	7.5	1.41		
④傾斜部	31.13	9.0	0.70		
⑤	31.13	4.0	1.41	59.7	146.5
⑥	26.71	14.0	1.37		
⑦傾斜部	26.71	13.0	0.70		
⑧	26.71	13.0	1.37	101.4	248.8

Y方向 北立面図		見付面積 (m ²)	風力係数	稀風圧力 (kN)	極稀風圧力 (kN)
階	地盤面からの高さ(m)				
①	33.60	9.0	1.44	28.5	69.9
②傾斜部	31.13	7.0	0.70		
③	31.13	14.5	1.41		
④傾斜部	31.13	12.0	0.70		
⑤	31.13	5.0	1.41	90.0	220.8
⑥	26.71	14.0	1.37		
⑦傾斜部	26.71	14.5	0.70		
⑧	26.71	15.5	1.37	111.2	273.0

下図に城山地盤の断面模式図を示す。採用する風荷重検討用の石垣の立ち上がり高さは、下図に示す「b：石垣下部」からの立ち上がり高さ（H=18.287m）とした。

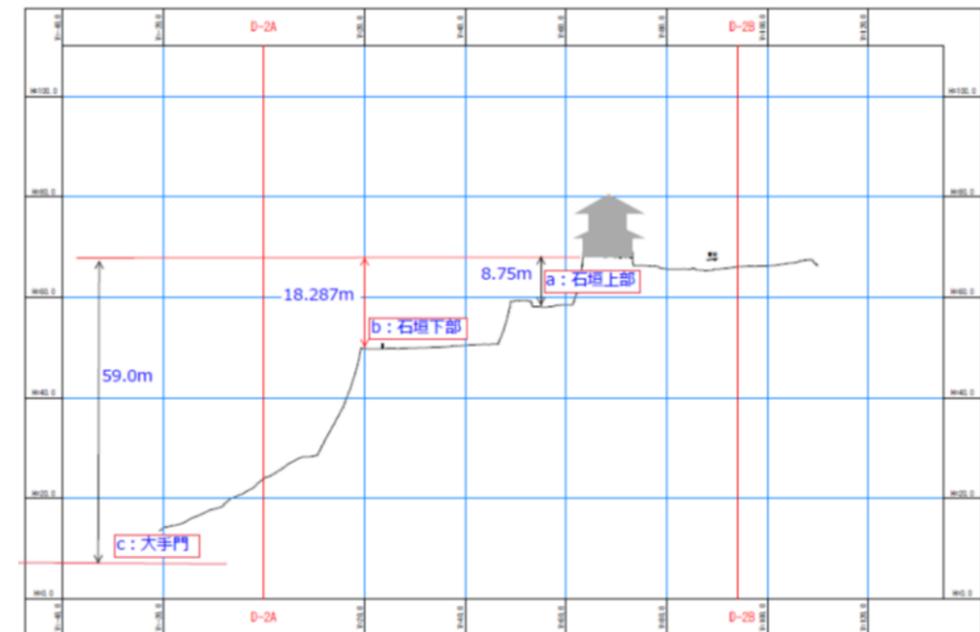


図7 風荷重算定の高さ設定

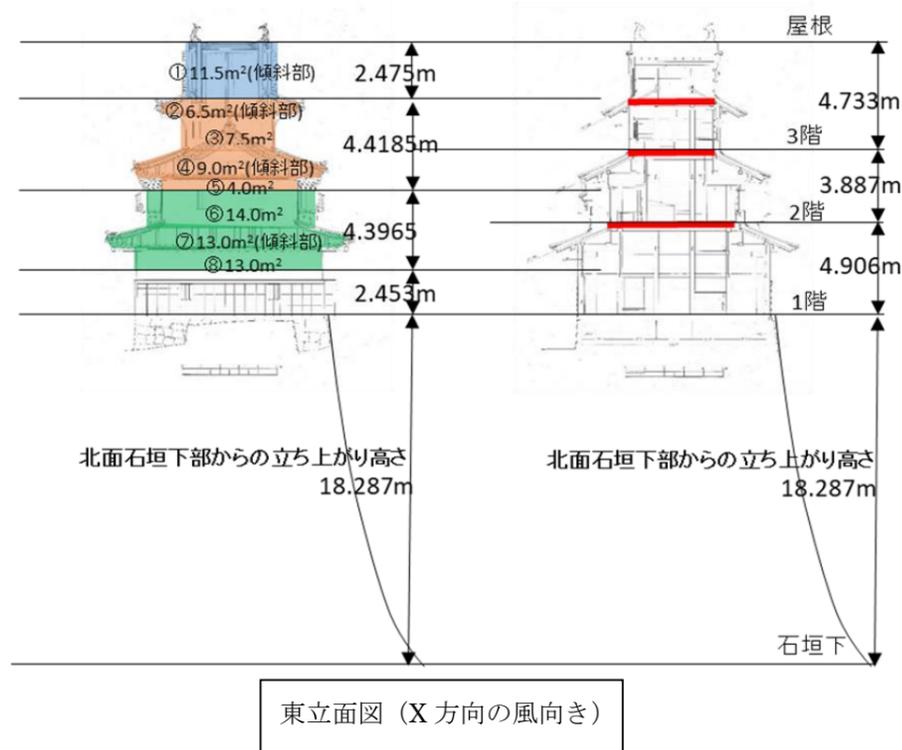
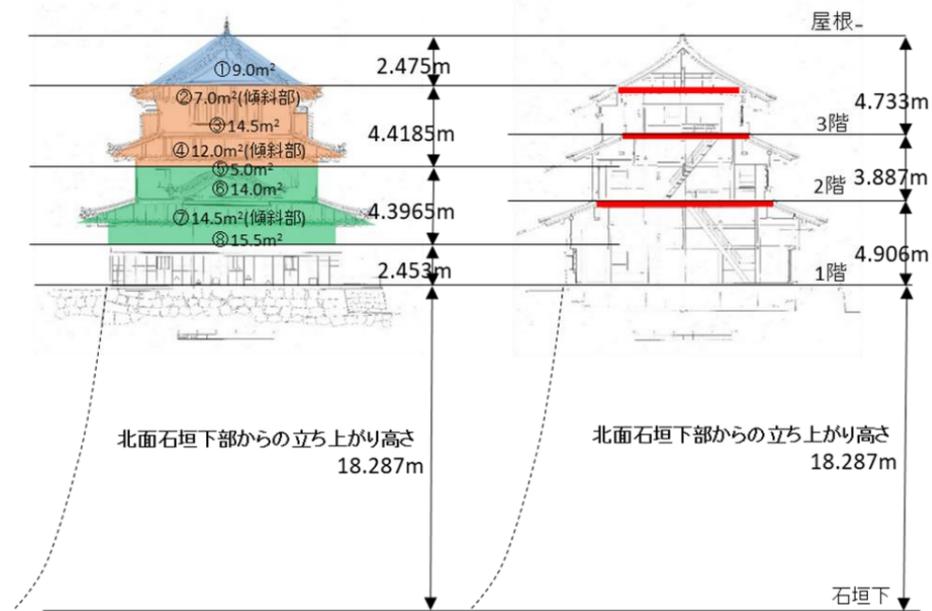


表 2 風荷重

東立面 (X 方向風向き)

稀風圧力	崖下より(kN)	崖無(kN)	(%)
3階	28.5	20.7	73
2階	90.0	65.4	73
1階	111.2	80.9	73

北立面 (Y 方向風向き)

極稀風圧力	崖下より(kN)	崖無(kN)	(%)
3階	69.9	53.1	76
2階	220.8	167.7	76
1階	273.0	207.2	76

5. 解析モデルについて

- ①主架構の構成要素を柱、横架材及び土壁として解析を行う。
- ②主架構の解析はコンピュータによる。利用するソフトを以下に示す。
MIDAS (立体フレーム静的弾塑性解析)
MIDAS (立体フレーム動的弾塑性解析)
- ③架構のモデル化は、小屋組も含む主要部材で構成される立体架構フレームモデルを構築する。
屋根面の羽出しは負担面積に合わせた荷重に置き換え、柱、梁は主架構としてモデル化を行う。
- ④立体架構の動的弾塑性増分解析を行い、部材レベルで連続的な変位・応力を確認する。
- ⑤柱および桁・梁は、線材に置換する。
- ⑥土壁 (全壁・腰壁・垂壁) は、ブレースに置換する。
- ⑧屋根面、床面の面内剛性を考慮して、全体非剛床解析法を採用する。

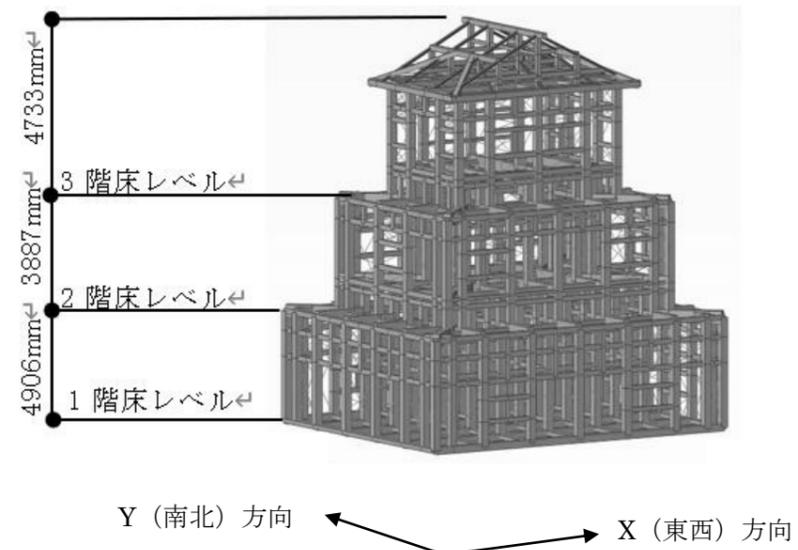


図 8 解析モデル

表 3 建物重量

	屋根部	3階床レベル	2階床レベル	合計
各階重量 (kN)	365.10	630.08	844.11	1839.29
Σ W (kN)	365.10	995.18	1839.29	
各階面積 (m ²) : 解析用	26.73	60.48	108.18	
各階単位重量 (kN/m ²)	13.66	10.42	7.80	
階高 (m)	4.733	3.887	4.906	13.526

6. 耐震要素のモデル化

・柱貫接合部の回転剛性

柱貫接合部のめり込み剛性をめり込み理論式に基づき下記設定より評価する。

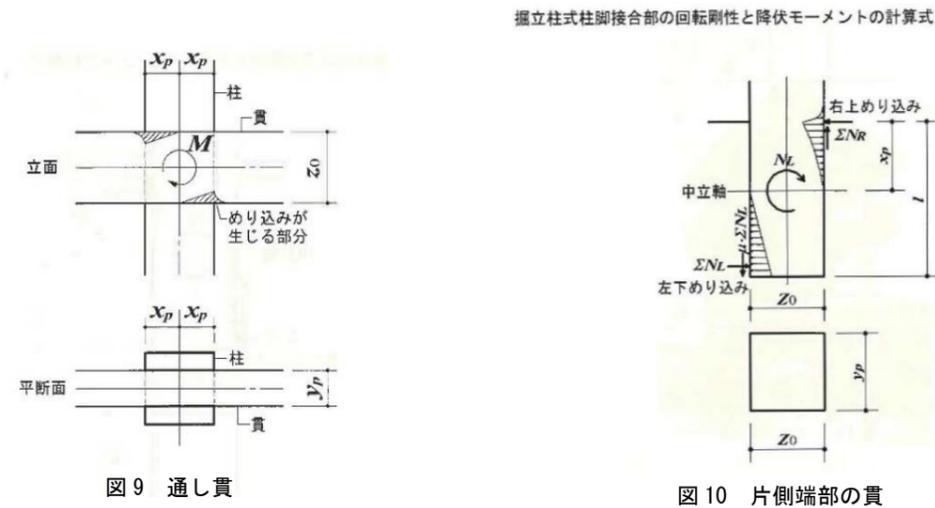


図9 通し貫

図10 片側端部の貫

・土壁

文化庁指針により厚さ（1階90mm、2階129mm、3階112mm、内壁52mm）をかけて算定する。

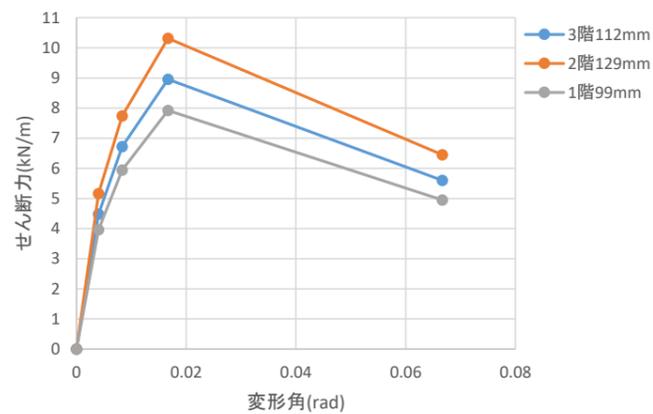


図11 土壁の復元力特性

・水平構面

「限界耐力計算による伝統的木造建築物構造計算指針・同解説」（日本建築学会）、「重要文化財（建造物）耐震診断指針 参考資料集」（文化庁文化財保護部建造物課）、既往の実験結果をもとに設定する。

① 屋根面

・瓦屋根とし、降伏耐力は $10.09/1.81=5.6\text{kN} \rightarrow 5\text{k kN/m}$

・屋根面の剛性は $328.2/1.81=181.3\text{ kN/m/rad}$

ただし、経年劣化や滝野らによる釘せん断実験と理論的考察を参照し、比較的大きな変形を想定し屋根面剛性は 50 kN/m/rad とする。

② 床面

・杉材相当とし、せん断弾性係数=繊維方向のヤング係数 $\times 1/15=6860 \times 1/15=457\text{ (N/mm}^2)$

・床面剛性は、屋根面と同様に経年劣化等を考慮し、 100 kN/m/rad と設定とする。

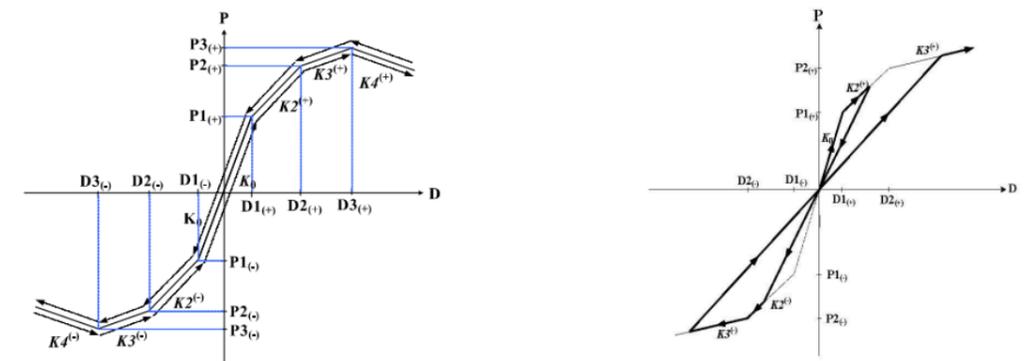
7. 時刻歴応答解析のモデル

・解析モデルは、静的造部解析で用いた立体フレームと同様とし、部材モデル型立体フレームモデルとする。

・解析自由度は、 $X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ の6自由度とする。

・部材モデルの復元力特性の概要は下表の通り。

構造	部位	検討応力	復元力特性	
			スケルトン曲線	履歴則
上部架構	柱	曲げ せん断 軸	ポリリニア バイリニア リニア	非線形弾性型*1 — —
	横架材	曲げ（面内、面外） せん断 軸	バイリニア バイリニア リニア	— — —
	土壁	面内せん断	トリリニア	時刻歴応答解析： 原点指向型*2
	屋根・床	面内せん断	リニア	—
支点	1階柱支点	浮き上がり考慮	—	—



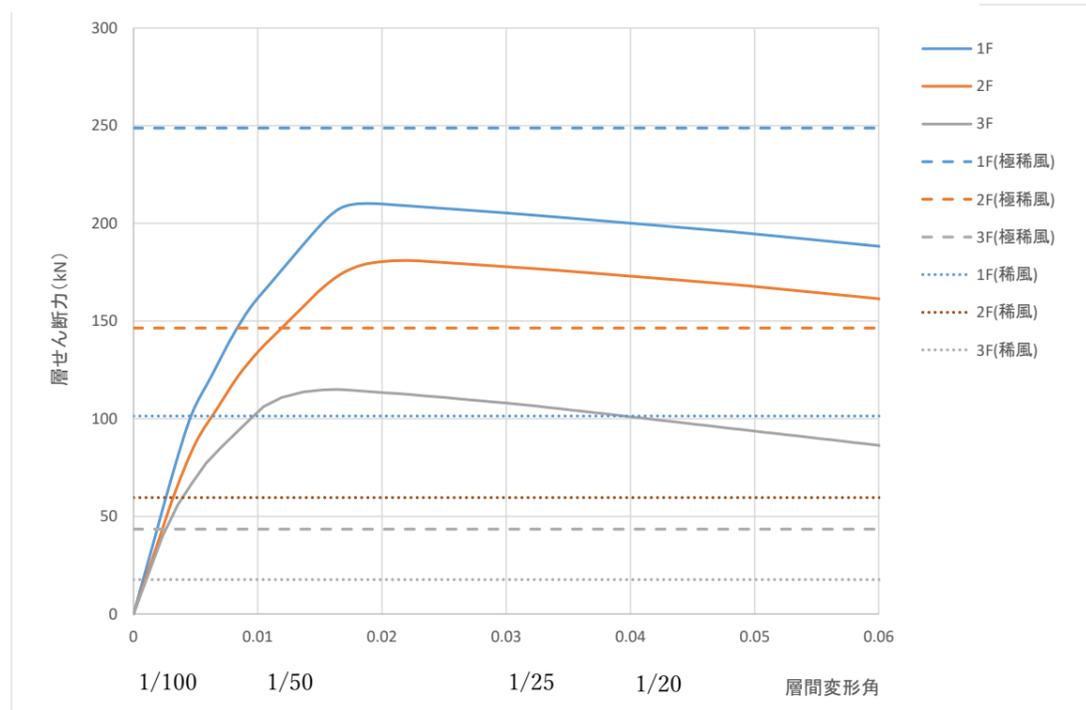
*1 非線形弾性型/テトラリニアの履歴曲線

*2 原点指向型/トリリニアの履歴曲線

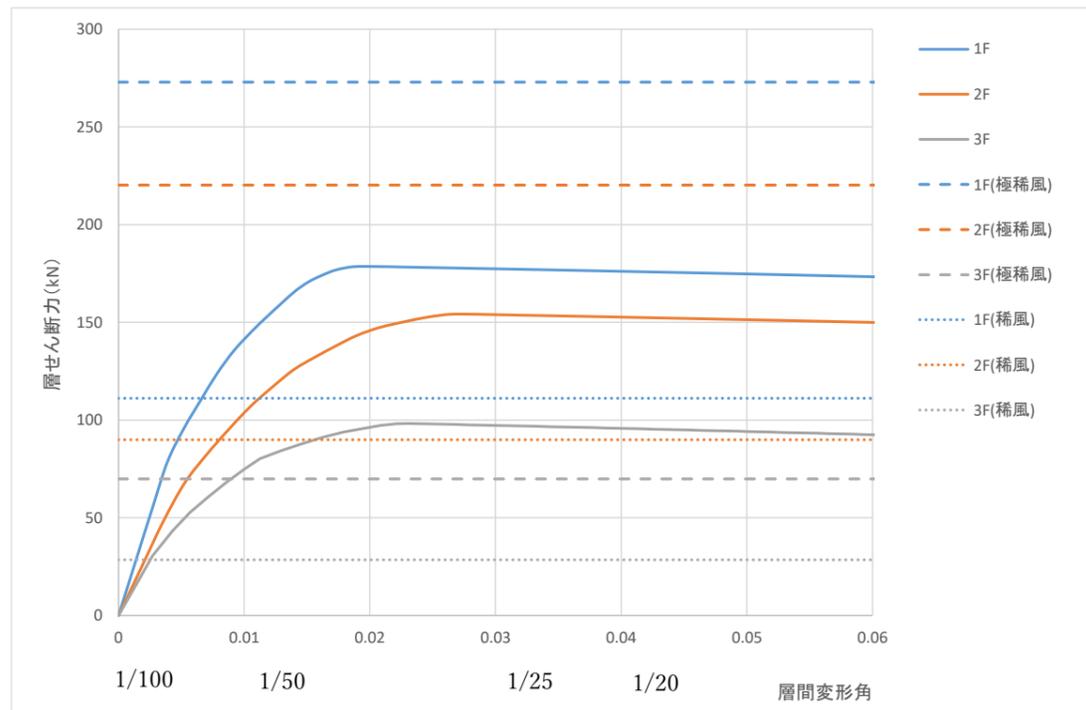
・減衰は、丸亀城天守地常時微動測定において、人力加振による波形の分析より減衰定数が $h=2.0\%$ であったことに基づき、瞬間剛性比例型減衰 $h_1=2\%$ とする。

8. 診断結果

(1) 荷重変形関係



(X 方向)



(Y 方向)

図 12 建物全体の復元力特性および検討用風時風荷重との比較

(2) 限界耐力計算と地震応答解析の最大層間変形角の比較

① GS 精算値、地域係数 $Z=0.9$

算定条件 $Z=0.9$

$G_s=1.23$ $G_s=1.23 \times 1.3$

X方向	限界耐力計算	限界耐力計算	時刻歴解析		
			八戸	JMA神戸	ランダム
1質点縮約	1/37	1/25	八戸	JMA神戸	ランダム
3階	1/47	1/35	1/62	1/46	1/56
2階	1/33	1/23	1/28	1/33	1/27
1階	1/35	1/24	1/23	1/36	1/22

Y方向	限界耐力計算	限界耐力計算	時刻歴解析		
			八戸	JMA神戸	ランダム
1質点縮約	1/33	1/22	八戸	JMA神戸	ランダム
3階	1/35	1/28	1/34	1/42	1/32
2階	1/26	1/20	1/23	1/28	1/24
1階	1/31	1/22	1/22	1/32	1/20

いずれの場合も、柱に折損は生じず、変形能力を有することが確認できた。

② GS 精算値 崖地考慮、地域係数 $Z=1.0$

算定条件 $Z=1.0$

$G_s=1.23$ $G_s=1.23 \times 1.3$

X方向	限界耐力計算	限界耐力計算	時刻歴解析		
			八戸	JMA神戸	ランダム
1質点縮約	1/32	1/22	八戸	JMA神戸	ランダム
3階	1/44	1/33	1/62	1/46	1/56
2階	1/30	1/21	1/28	1/33	1/27
1階	1/32	1/22	1/23	1/36	1/22

Y方向	限界耐力計算	限界耐力計算	時刻歴解析		
			八戸	JMA神戸	ランダム
1質点縮約	1/28	1/19	八戸	JMA神戸	ランダム
3階	1/28	1/22	1/34	1/42	1/32
2階	1/21	1/15	1/23	1/28	1/24
1階	1/23	1/16	1/22	1/32	1/20

いずれの場合も、柱に折損は生じず、変形能力を有することが確認できた。

(3) まとめ

以上より、現状の性能は、安全確保水準を満足する。

ただし、小壁の下端にある貫や横架材には、引抜が生じ大地震時に部材の引き抜け等が考えられるため、横架材端部の引抜防止の補強（金物等の追加）が必要である。

また、風に対しては、X方向3階、Y方向2階、3階において、極稀風荷重が建物耐力を上回るが、スーパー台風など事前に気象情報等により予測可能なため、スーパー台風などの際は、建物に入らない、近付かないようにソフト面に対応する。

9. 補強案

小壁の下端にある貫や横架材の端部の引抜防止の補強（金物等の追加）を行う。
補強の詳細位置は、実施設計の際に検討する。

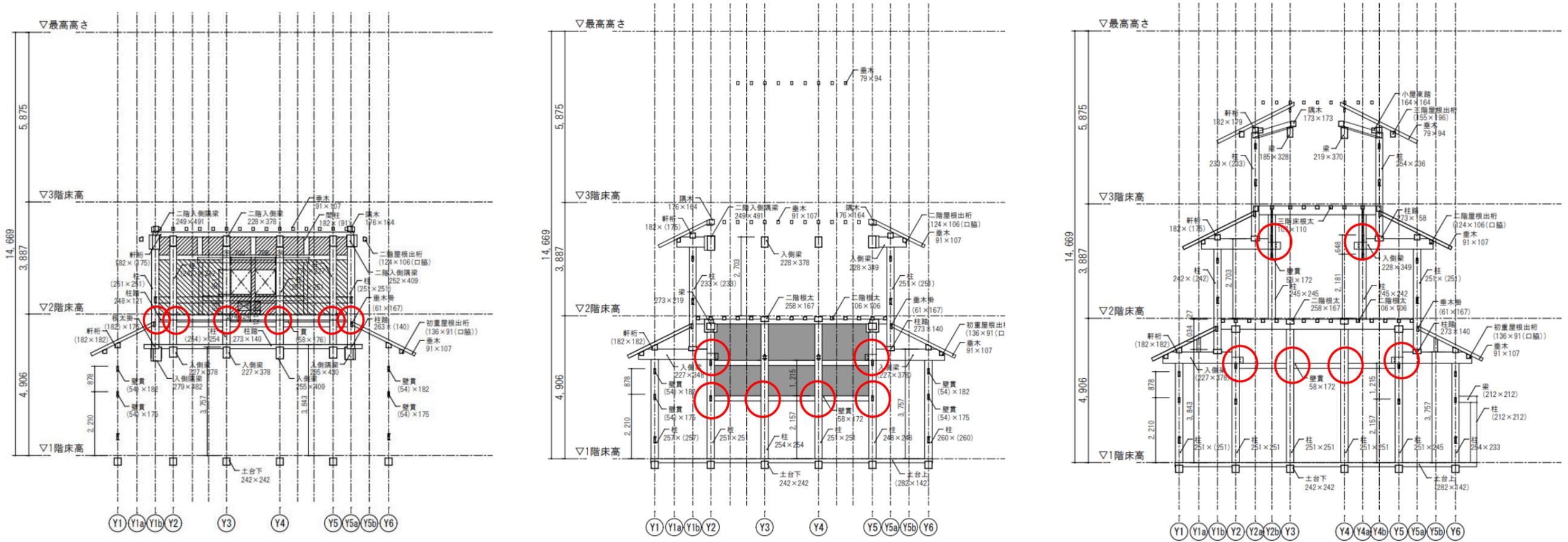


図 13 接合部補強箇所の例（赤丸箇所の接合部の補強）