

(一社) 日本建築材料協会 技術委員会

2024/12/9(月)
大阪府中央公会堂
B1F 大会議室

第64回建材情報交流会

中山寺五重塔再建工事 の構造計画について

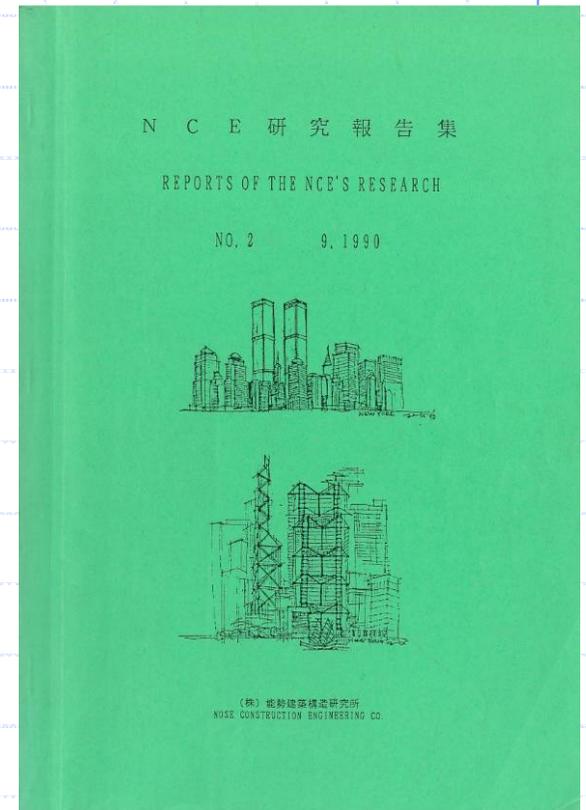
(公社) 大阪府建築士会
副会長 横田友行
(株) 能勢建築構造研究所

『五重塔の耐震性』諸説概観

第2回 能勢建築構造研究所研究報告会(1990)より



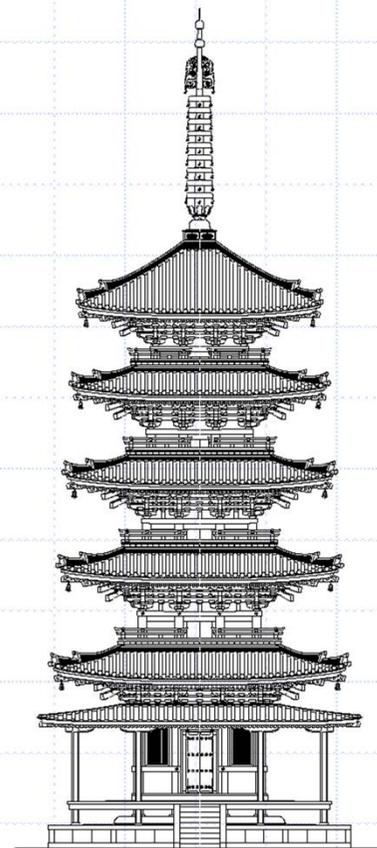
発表されている能勢善樹さん



- ・五重塔の固有周期は通常1秒以上の長い固有周期である.
- ・比較的良好な地盤に建てられることが多かったのでは。(地震波の周期が短い)
- ・初層以外は意外と壁が多く, 強固である.
- ・五重塔が不安定になるまでの変形限界が大きい。(傾斜復元力)
- ・接合部は貫・ほぞ・ダボ等で接合され, めり込み・回転・摩擦等で地震エネルギーを吸収する制震構造.
- ・平面形状がシンメトリーで荷重の偏在もなく, 捻じれ振動は生じない.

発表内容

- § 1 五重塔の概要
- § 2 建物概要
- § 3 構造計画概要
- § 4 荷重・外力
- § 5 限界耐力計算
- § 6 基礎設計
- § 7 評価委員会の部会での検討
- § 8 傾斜地盤における基礎の施工
- § 9 現場写真



中山寺五重塔のビデオ上映(約14分30秒)

§ 1 五重塔の概要

1.1 中山寺の歴史

- ◆ 約1400年前に聖徳太子によって創建されたと伝えられる日本最初の観音霊場
- ◆ 安産祈願のお寺として有名



阪急「中山観音駅」 ↓

- ◆ 戦国時代，有岡城主・荒木村重と織田信長との戦乱により焼き討ちにあい大半が焼失した。
- ◆ 跡継ぎのいない豊臣秀吉が中山寺で安産祈願をおこない淀君が懐妊したことで嫡男秀頼の中山寺に対する信心は深かった。



伽藍古絵図に描かれた五重塔

「中山寺HP」より

1.2 五重塔を建てる目的

- ・五重塔の原型はインドのサーンチーのストゥーパ（卒塔婆）で元々はお釈迦様のお墓を意味する。
- ・山地伽藍，新しい宗教の出現により，寺院建築としてのシンボルの意義が強くなり，眺望，象徴性が重要な目的となる。
- ・宮大工や職人にとって代々受け継がれてきた技術を耐えさせないように建築文化の継承を願う目的から建築主があえて木造五重塔での計画を推進。



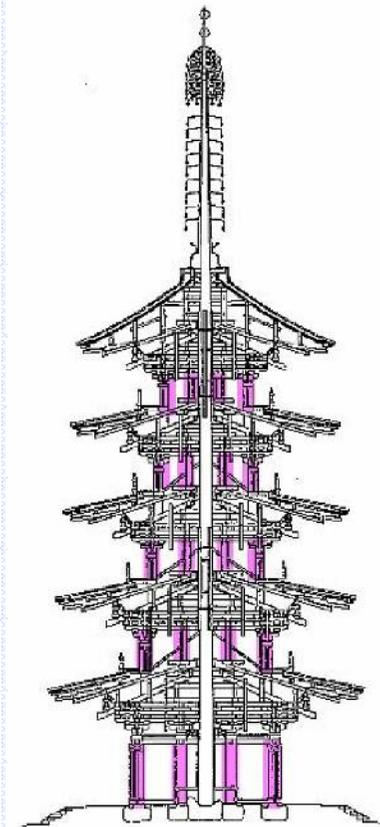
ストゥーパ

「世界遺産ガイドHP」より

1.3 組み上げ(塔身軸部の)構法の変遷

【積み重ね構法】

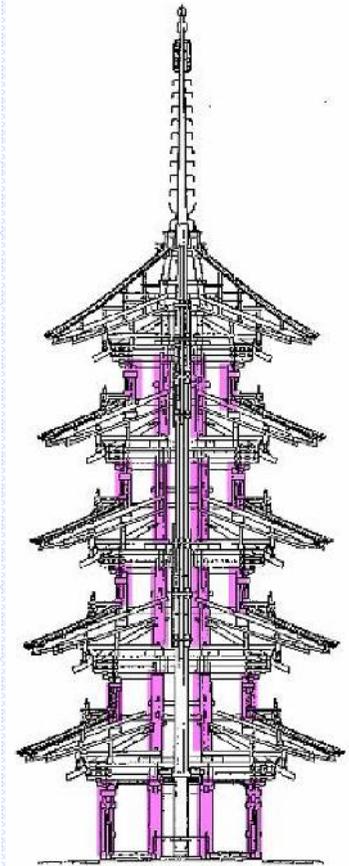
- ・最も古い構法で、柱と軒を支える部材が積み重なる構法。
- ・醍醐寺，法隆寺などで用いられている。
- ・初層に対する最上層の幅の比を逡減率というが，それが比較的小さい。
- ・初重と二重の高さの差が大きい。



【積み重ね構法】

【長柱構法】

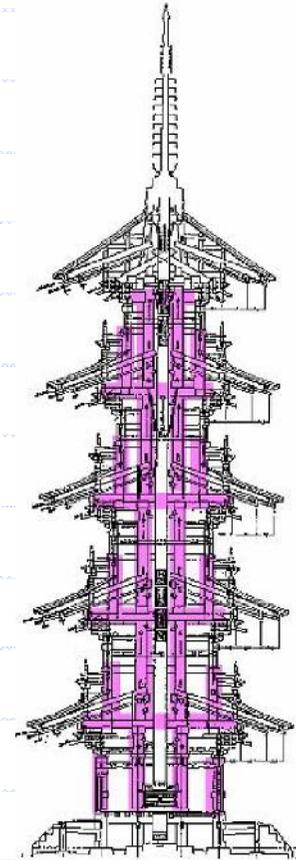
- **東寺, 法華経寺**など中世(平安時代)に多く, 四天柱が屋根を貫く構法.
- 積み重ね構法と同様, 平面の逓減率が比較的小さい.
- 四重は初重より横長で, 初重と二重の高さの差が大きい.



【長柱構法】

【櫓構法】

- ・江戸時代に現れた構法で、側柱，四天柱とも屋根を貫く構法。
- ・日光東照宮などで用いられている。
- ・平面透減率が比較的大きく，四重は初重より縦長となる。
- ・初重と二重の高さの差が比較的小さい。

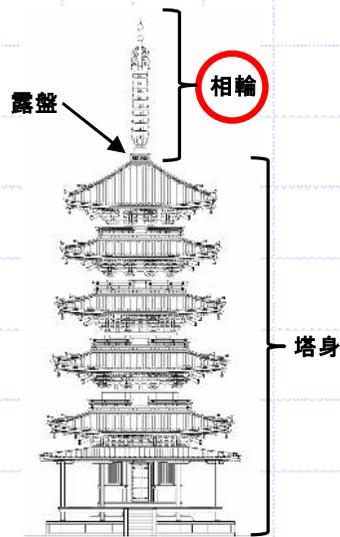


【櫓構法】

1.4 五重塔の被災履歴

■地震

歴史地震による被害は傾斜及び部分被害で、倒壊・大破には至っていない。また、部分被害の大半は相輪に集中している。



| 地震発生年 | 建物 | 被災内容 |
|-----------------------|-------|------------|
| 1361 | 法隆寺 | 相輪破損 |
| 1586 | 醍醐寺 | 軒が落ち、九輪が傾く |
| 1614 | 池上本門寺 | 傾く |
| 1662 | 海住山寺 | 傾き、瓦・水煙破損 |
| 1707 | 法隆寺 | 露盤・伏鉢破損 |
| 1823 1923 | 池上本門寺 | 傾く |
| 1853 1854? | 教王護国寺 | 相輪破損 |

正平地震(室町)

天正地震(戦国)

高田領大地震(江戸)

寛文近江・若狭地震(江戸)

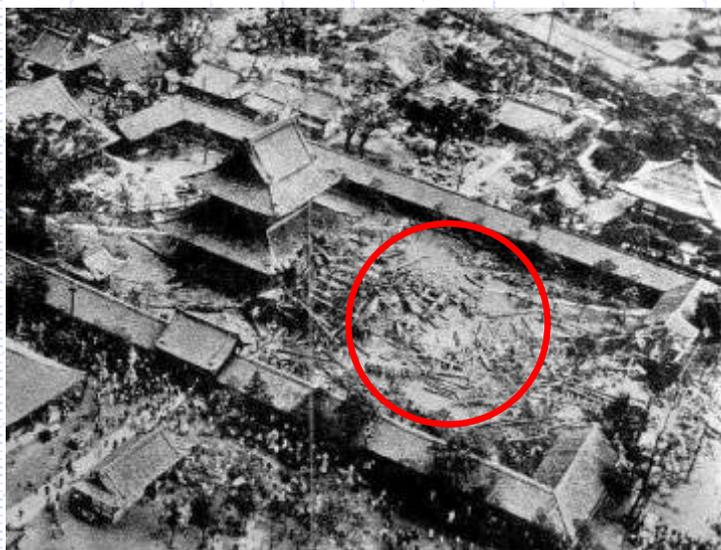
宝永地震(江戸)

関東大地震(大正)

安政南海地震(江戸)

■台風

- ・最も甚大な被害は、1934年の室戸台風により倒壊した**四天王寺五重塔**。
- ・1998年の台風第7号により、杉の巨木が強風で倒れかかり破損した**室生寺五重塔**。



「四天王寺図録伽藍編」より



「台風第7号による風害, 奈良県」より

■2018年台風第21号

- ・強風により中山寺五重塔の塔身は相当揺れたが、無損傷。
- ・関西空港で最大瞬間風速58.1m/sを観測。



多くの建物や電柱、信号機等が破損



関西空港連絡橋に衝突したタンカー

「BBC NEWS JAPAN」より

■落雷・焼失

- ・**興福寺五重塔**は、8世紀初めに創建されて以来五回焼失・再建を繰り返す。その内、三回は落雷によるもの。
- ・**教王護国寺(東寺)五重塔**は、9世紀に創建されて以来四回焼失・再建を繰り返す。その内、二回は落雷によるもの。

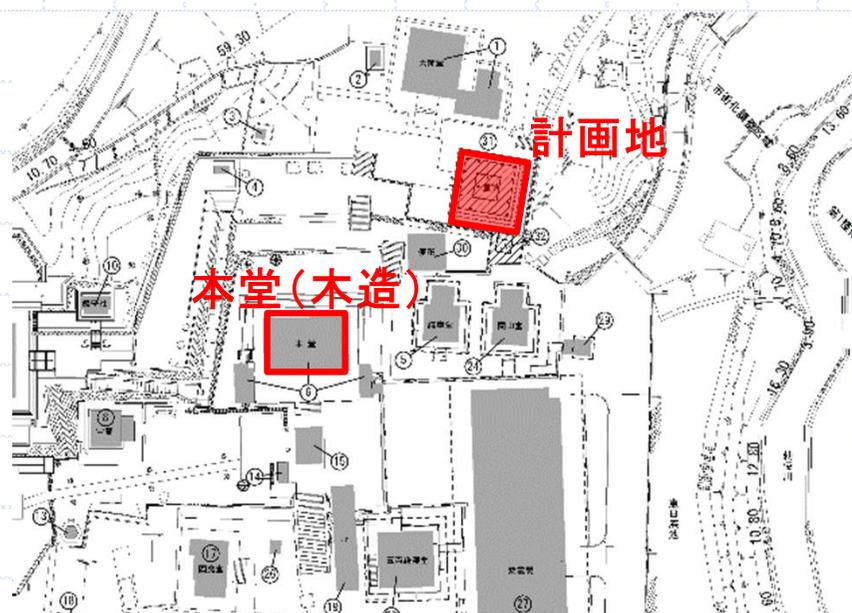
1.5 建設地周辺の地震被害

- ◆ 兵庫県南部地震では、JR中山寺駅付近の被害が大きく、現地調査の結果、震度7と認定されている。
- ◆ 建設地は、JR中山寺駅より約1km。



「気象庁HP」より

- ◆ 瓦屋根の崩落, 石積み擁壁の崩壊, 石柱の転倒, 一部の建物が倒壊.
- ◆ 五重塔の計画地に近い本堂は, ほぼ無被害.
- ◆ 平成10年までに倒壊寸前となった建物の再建, 寺務所(RC)の大規模な建設工事.



■被災状況

華蔵院

①



手水舎(てみずや)

②



絵馬堂

③



絵馬堂の柱

④



1.6 五重塔の一覧

■江戸時代以前の五重塔(22基)

- ・国宝に指定された五重塔は合計9基.

| | 名称 | 場所 | 構造 | 高さ(m) | 竣工(年) | 備考 |
|----|-------|----------|----|-------|---------|-------------|
| 1 | 法隆寺 | 奈良県生駒郡 | 木造 | 31.5 | 680頃 | 国宝, 世界最古 |
| 2 | 室生寺 | 奈良県宇陀市 | 木造 | 16.2 | 780~805 | 国宝, 高さが一番低い |
| 3 | 醍醐寺 | 京都府京都市 | 木造 | 37.4 | 951 | 国宝 |
| 4 | 海住山寺 | 京都府相楽郡 | 木造 | 17.7 | 1214 | 国宝, 裳階が取り付く |
| 5 | 明王院 | 広島県福山市 | 木造 | 29.1 | 1348 | 国宝 |
| 6 | 羽黒山 | 山形県鶴岡市 | 木造 | 29.2 | 1377 | 国宝 |
| 7 | 厳島神社 | 広島県佐伯郡 | 木造 | 28.4 | 1407 | |
| 8 | 興福寺 | 奈良県奈良市 | 木造 | 50.1 | 1426 | 国宝 |
| 9 | 法観寺 | 京都府京都市 | 木造 | 36.6 | 1440 | |
| 10 | 瑠璃光寺 | 山口県山口市 | 木造 | 31.2 | 1442 | 国宝, 最南端に位置 |
| 11 | 本門寺 | 東京都大田区 | 木造 | 29.5 | 1607 | |
| 12 | 妙成寺 | 石川県羽咋市 | 木造 | 34.2 | 1618 | |
| 13 | 法華経寺 | 千葉県市川市 | 木造 | 33.3 | 1622 | |
| 14 | 旧寛永寺 | 東京都台東区 | 木造 | 32.3 | 1639 | |
| 15 | 仁和寺 | 京都府京都市 | 木造 | 32.7 | 1644 | |
| 16 | 教王護国寺 | 京都府京都市 | 木造 | 54.8 | 1644 | 国宝, 木造最高高さ |
| 17 | 最勝院 | 青森県弘前市 | 木造 | 31.3 | 1666 | 最北端に位置 |
| 18 | 大石寺 | 静岡県富士宮上条 | 木造 | 33.4 | 1749 | |
| 19 | 興正寺 | 愛知県名古屋市 | 木造 | 30.0 | 1808 | |
| 20 | 日光東照宮 | 栃木県日光市 | 木造 | 31.8 | 1818 | |
| 21 | 妙宣寺 | 新潟県佐渡郡 | 木造 | 24.0 | 1825 | |
| 22 | 備中国分寺 | 岡山県総社市 | 木造 | 36.6 | 1844 | |

■明治・昭和に建設された木造の五重塔

- ・明治と昭和に建設された木造の五重塔は、わずか10基である。(明治:4基, 昭和:6基)
- ・明治はお寺の宗教的活動が制約され, 44年間で4基のみ.
- ・昭和はその他の構造種別による五重塔が19基と多い。(浅草寺, 四天王寺など)

| | 名称 | 場所 | 構造 | 高さ(m) | 竣工(年) | 備考 |
|----|---------|----------|----|-------|-------|------------|
| 1 | 善通寺 | 香川県善通寺市 | 木造 | 45.5 | 1884 | 相輪短い |
| 2 | 善宝寺 | 山形県鶴岡市 | 木造 | 36.0 | 1893 | 懸垂式心柱 |
| 3 | 本山寺 | 香川県三豊市 | 木造 | 35.0 | 1910 | |
| 4 | 龍口寺 | 神奈川県藤沢市 | 木造 | 30.0 | 1910 | |
| 5 | 長谷寺 | 奈良県桜井市 | 木造 | 21.4 | 1954 | |
| 6 | 耕三寺 | 広島県尾道市 | 木造 | 16.2 | 1955 | 室生寺似 |
| 7 | 志度寺 | 香川県さぬき市 | 木造 | 33.0 | 1975 | 伝統木造復興の先駆け |
| 8 | 竹林寺 | 高知県五台山 | 木造 | 31.2 | 1980 | |
| 9 | 夢の家「北原」 | 秋田県由利本荘市 | 木造 | 16.0 | 1985 | 個人所有 |
| 10 | 西方寺 | 宮城県仙台市 | 木造 | 32.0 | 1986 | |

■平成に建設された木造の五重塔

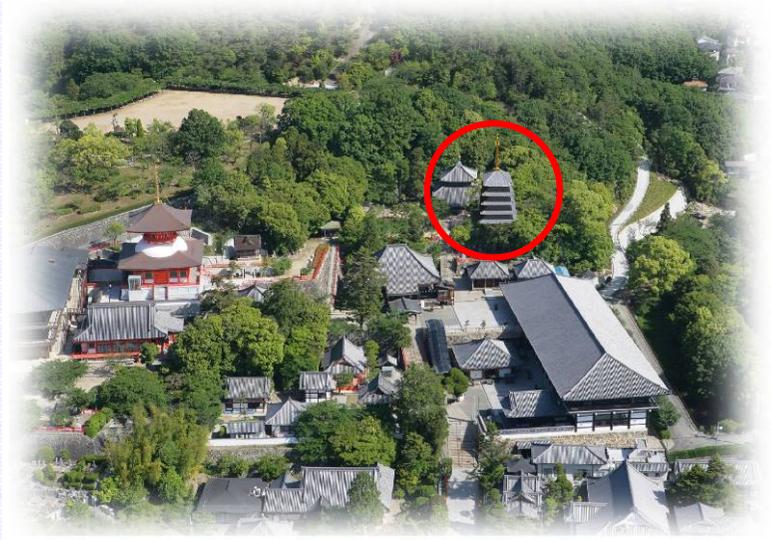
- ・平成に建設された木造の五重塔は20基と多い。阪神大震災を契機に木部材の仕口や壁の構造的な性能が定式化された。

| | 名称 | 場所 | 構造 | 高さ(m) | 竣工(年) | 備考 |
|----|------|---------|----|-------|-------|--------------|
| 1 | 法鷲院 | 茨城県日立市 | 木造 | 33.0 | 1989 | 醍醐寺がモデル |
| 2 | 長禅寺 | 山梨県甲府市 | 木造 | 30.7 | 1990 | |
| 3 | 福泉寺 | 岩手県遠野市 | 木造 | 25.8 | 1990 | 心柱はケヤキ |
| 4 | 光徳院 | 東京都中野区 | 木造 | 15.0 | 1995 | 心柱はステンレス |
| 5 | 大圓寺 | 福岡県福岡市 | 木造 | 26.5 | 1995 | 福岡県が初 |
| 6 | 青龍寺 | 青森県青森市 | 木造 | 39.0 | 1996 | |
| 7 | 誕生寺 | 熊本県玉名市 | 木造 | 33.3 | 1997 | |
| 8 | 成相寺 | 京都府宮津市 | 木造 | 33.0 | 1997 | |
| 9 | 日泰寺 | 愛知県名古屋市 | 木造 | 30.0 | 1997 | |
| 10 | 鳳台院 | 茨城県笠間市 | 木造 | 19.4 | 1998 | |
| 11 | 観音寺 | 三重県津市 | 木造 | 21.0 | 2001 | 海住山寺がモデル |
| 12 | 永明院 | 富山県氷見市 | 木造 | 21.5 | 2002 | |
| 13 | 孝勝寺 | 宮城県仙台市 | 木造 | 31.0 | 2002 | 心柱はケヤキ |
| 14 | 伝乗寺 | 東京都世田谷区 | 木造 | 15.0 | 2005 | |
| 15 | 無量寿寺 | 兵庫県加東市 | 木造 | 32.7 | 2008 | |
| 16 | 久遠寺 | 山梨県身延町 | 木造 | 38.2 | 2008 | |
| 17 | 法然寺 | 香川県高松市 | 木造 | 24.2 | 2010 | |
| 18 | 東長寺 | 福岡県福岡市 | 木造 | 26.0 | 2011 | |
| 19 | 願昭寺 | 大阪府富田林市 | 木造 | 37.0 | 2011 | |
| 20 | 中山寺 | 兵庫県宝塚市 | 木造 | 27.2 | 2016 | 海住山寺と明王院がモデル |

§2 建物概要

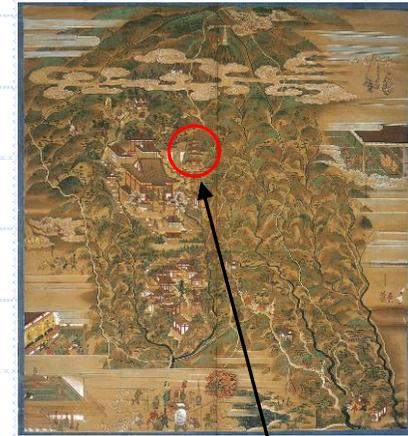
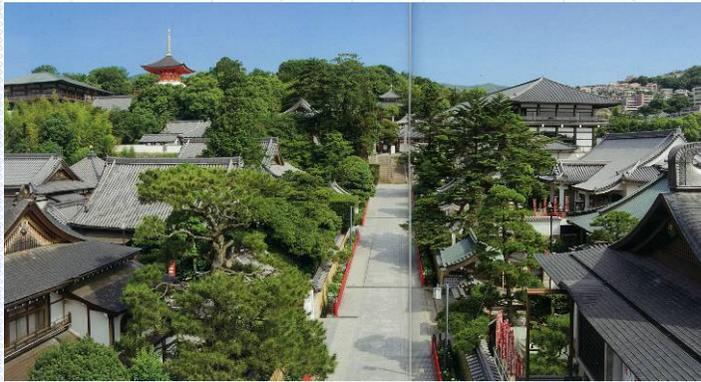
2.1 一般事項

- ◆ 建設地：宝塚市中山寺境内
- ◆ 用途：記念塔（塔婆）
- ◆ 申請：工作物
- ◆ 構造：木造
- ◆ 耐震設計ルート：限界耐力計算
（宝塚市に事前相談済み）
- ◆ 築造面積：161.50㎡
- ◆ 高さ：27.17m（礎石天端～相輪上端）
- ◆ 屋根仕上げ：土居葺き下地の上本瓦葺き
- ◆ 工期：H23.9～H25.2（設計），H25.11～H28.12（工事）

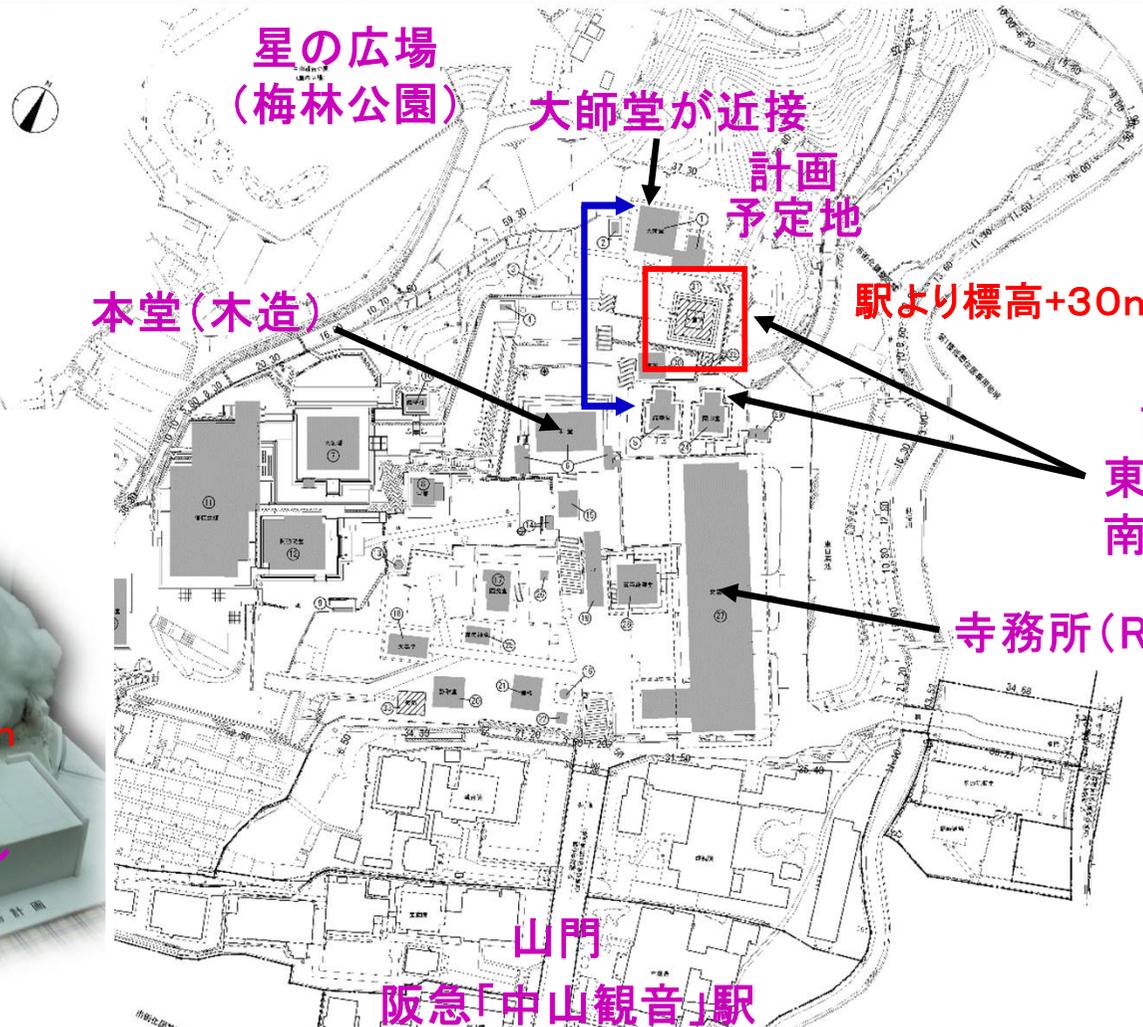


設計者：MIKI建築設計事務所
：能勢建築構造研究所
施工者：大成建設
木工事：團上工務店
：前田建築

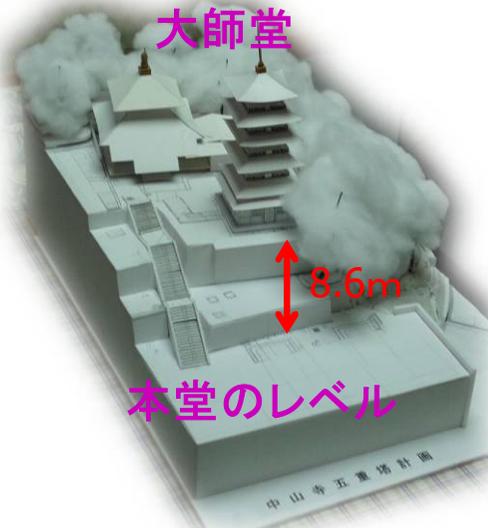
「中山寺のパフレット」より



敷地全体



中山寺五重塔
奈良時代に建立?



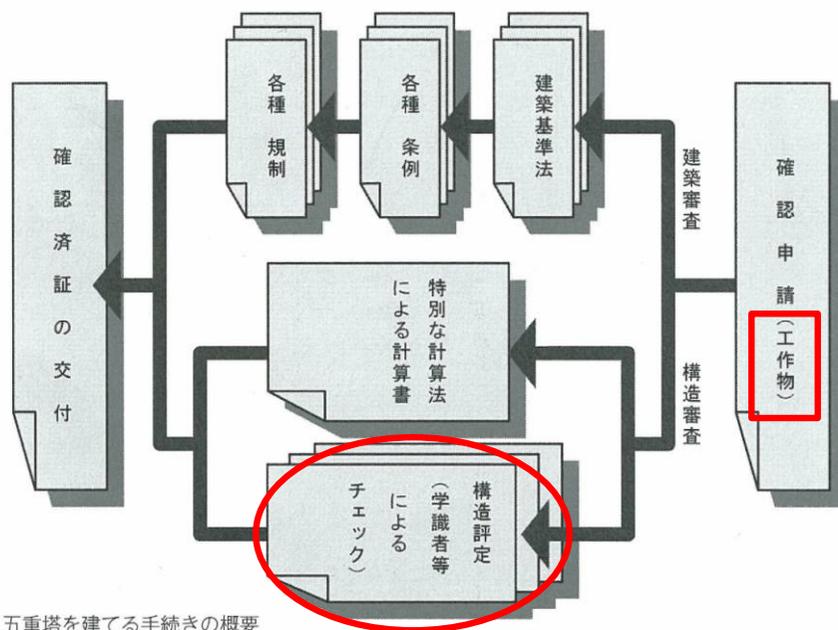
至「宝塚」



至「梅田」

■確認申請の流れ

本工作物は，日本建築総合試験所の建築構造性能評価委員会で，限界耐力計算による安全性の審査を受けた。



五重塔を建てる手続きの概要

- ・伝統構法による木造五重塔とする。
- ・現行法規の仕様規定に合わない。
→ 一般的な木造住宅を想定
土台を基礎に緊結…等
- ・限界耐力計算法により，耐力だけでなく変形性能も詳細に検討。

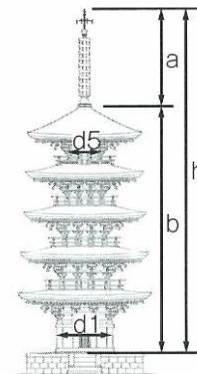
限界耐力計算法

「五重塔のはなし」より

2.2 計画概要

高さ比(イ)=b/h
 幅高さ比(ロ)=b/d1
 透減率(ハ)=d5/d1

(イ)=b/h
 (ロ)=b/d1
 (ハ)=d5/d1
 a : 相輪高さ
 b : 塔身高さ
 h : 総高さ
 d1 : 初重柱間
 d5 : 五重柱間



◆ 架構形式: 長柱構法を採用した
 木造伝統構法

◆ 参考モデル: プロポーションは京都の海住山寺
 「五重塔のはなし」より 組物や枝割り等は広島明王院

中山寺
 (イ)0.730
 (ロ)4.72
 (ハ)0.722

| 日光東照宮 | 本門寺 | 興福寺 | 明王院 南北朝時代(1348) | 海住山寺 桃山時代(1214) |
|-------|-------|-------|--------------------|--------------------|
| | | | | |
| 0.750 | 0.726 | 0.702 | 0.730 | 0.710 |
| 5.22 | 4.65 | 4.03 | 4.76 | 4.43 |
| 0.625 | 0.675 | 0.690 | 0.714 | 0.737 |

(イ)
 (ロ)
 (ハ)

特徴：
室生寺に次ぐ小塔，軒の出が小さい

■海住山寺(京都府木津川市)ーNO.1



裳階



■海住山寺(京都府木津川市)ーNO.2

舟肘木



基壇

高欄



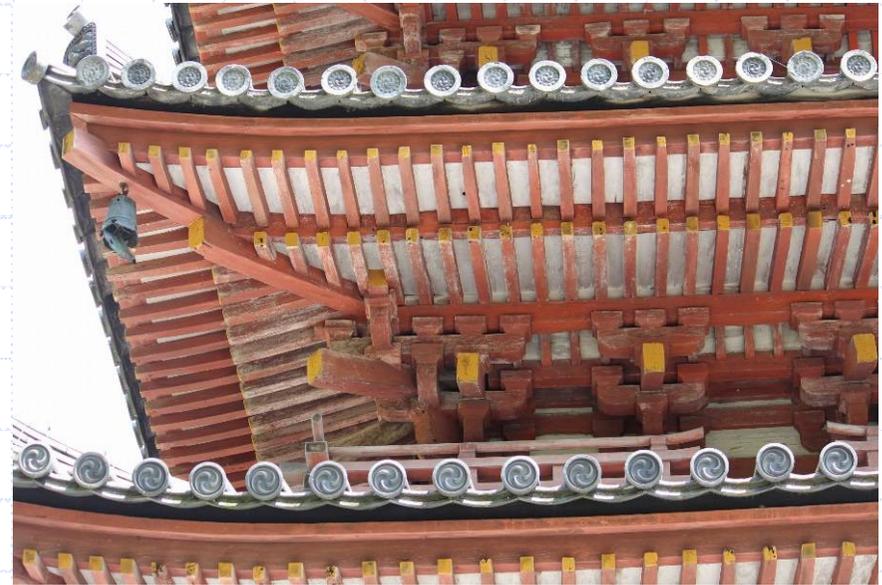
裳階と初重の屋根の重なり

■海住山寺(京都府木津川市)ーN0.3



ニ手先 一手先

組物(ニ手先)



軒先部分

■明王院(広島県福山市)

特徴：
透減率が大きく、軒の出が大きい

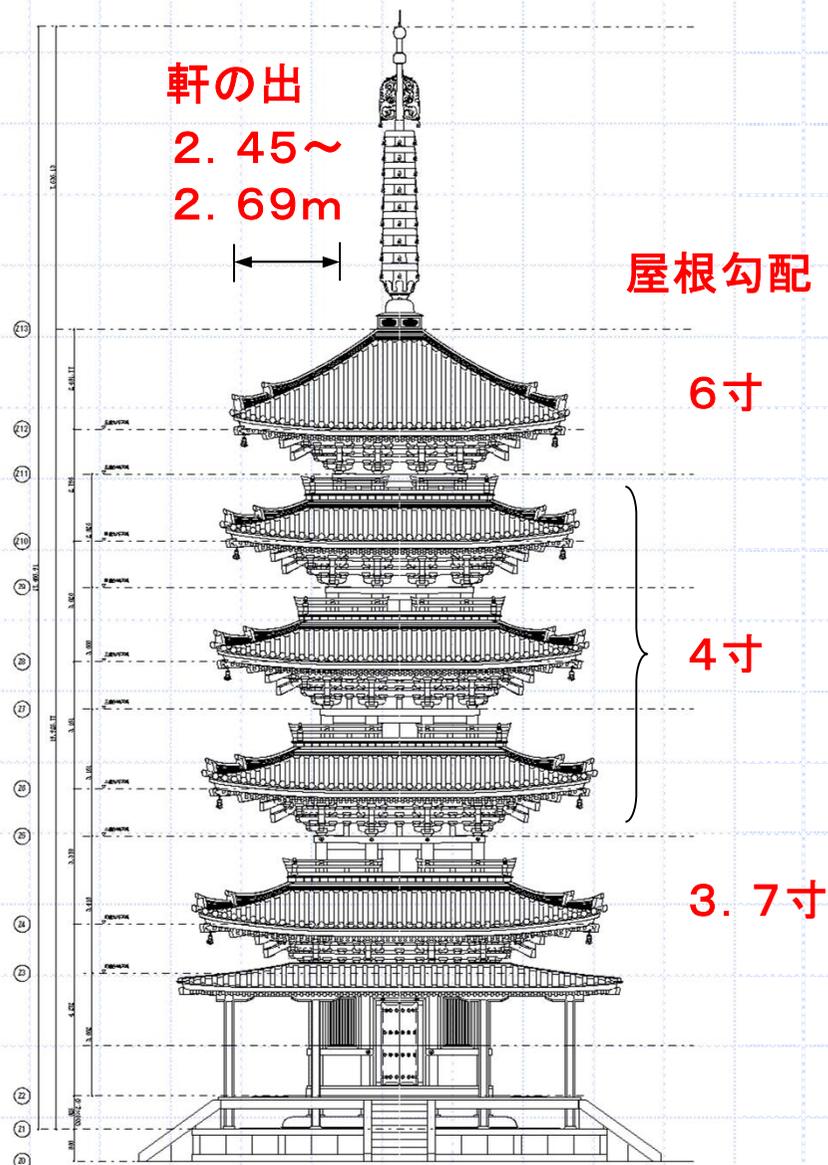


軒反り大



■ 立面図

総高さ 27.17m
塔身高さ 19.84m



平面形状: 初重 4.205m × 4.205m, 五重 3.036m × 3.036m

§3 構造計画概要

3.1 構造計画

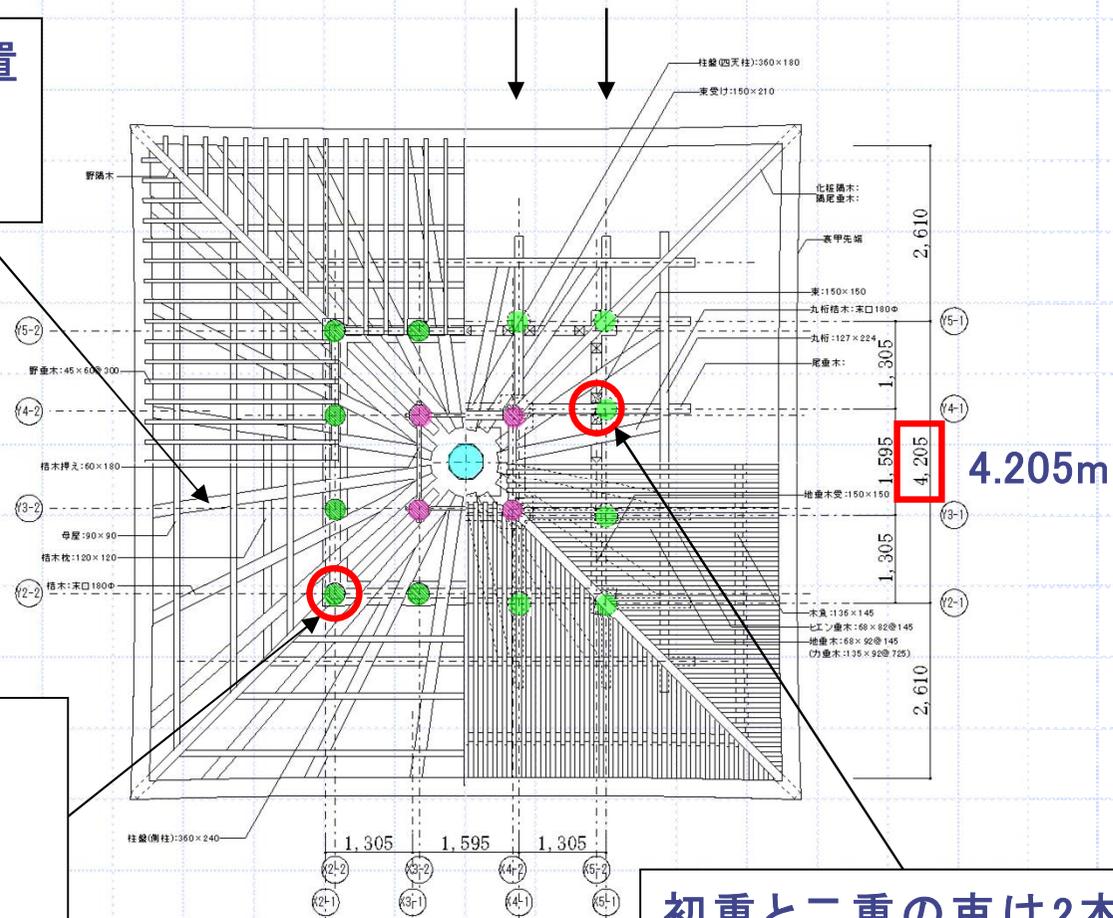
国産材を使用

- ・心柱:岡山県美作市ヒノキ
- ・全般:吉野ヒノキ
- ・大斗:ケヤキ

■初重小屋伏図

桔木を放射線状に配置し、軒の出を支持する。
(末口180φ)

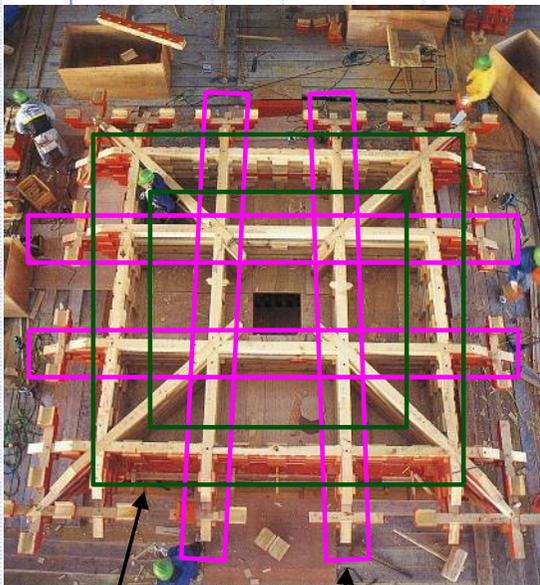
四天柱通り 側柱通り



四天柱:初重~二重360φ
三重330φ
四重~五重300φ
側柱:初重360φ, 二重330φ
三重~五重300φ
心柱:500φ~240φ(柱脚~露盤)

初重と二重の束は2本配置とし、束受け材のめり込み応力度を低減させる。

■軸組図 (四天柱通り)



通肘木

繋肘木

各重の水平構面は、4段の繋ぎ肘木と通肘木を合わせて「囲」の字形に組み、強固に構成される。

27.17m

19.84m

大地震時に相輪が損傷しないように、露盤付近で心柱の補強を行う。

2.5mを超える軒の出は、桔木、地垂木、丸桁桔木の「てこの原理」と三手先組みの「持ち送り」を利用して支持する。

丸桁127x224

三手先組

桔木(末口180φ)

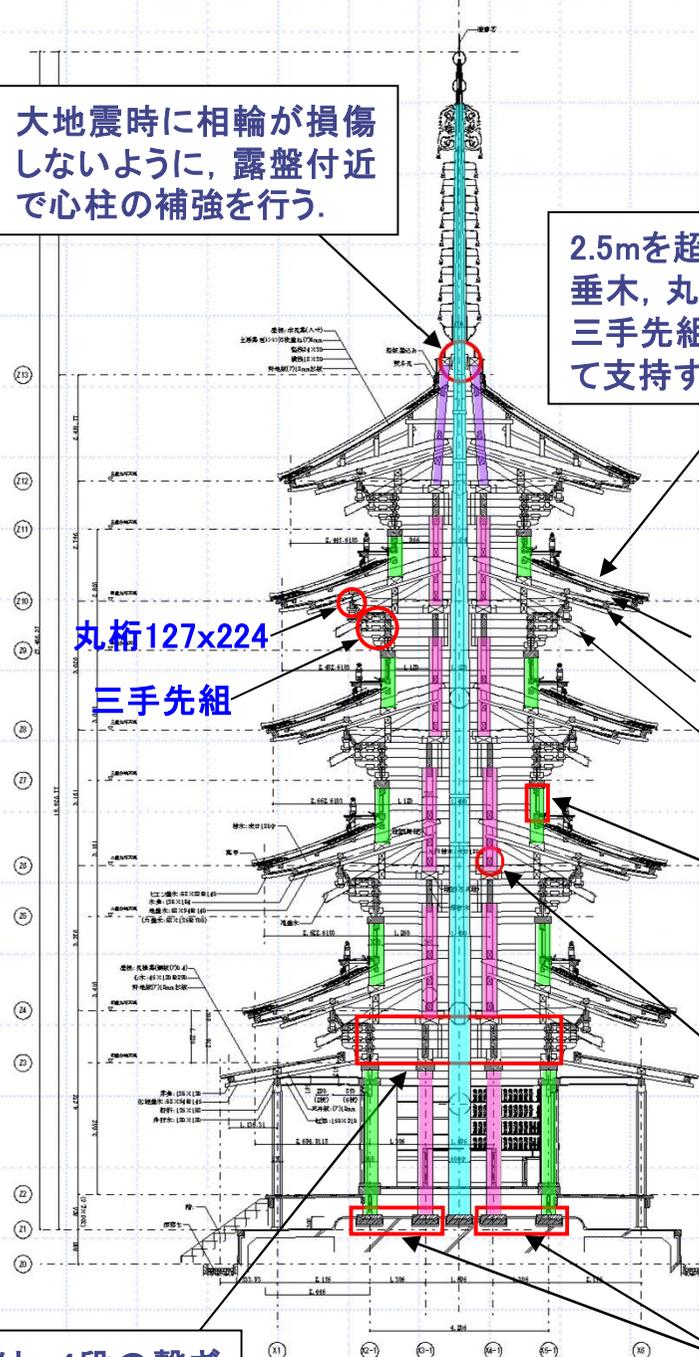
地垂木66x92~68x92

尾垂木

落とし込み板壁:耐震要素
初重t=45mm, 二重t=39mm
三重~五重t=30mm

貫:耐震要素
初重120x270
二重~五重120x120
~90x180

傾斜復元力:耐震要素
初重の四天柱と側柱のみ考慮。
柱脚と礎石の間にダボを配置し、横ずれを防止。



巻斗(まきと):
一方向切り欠き

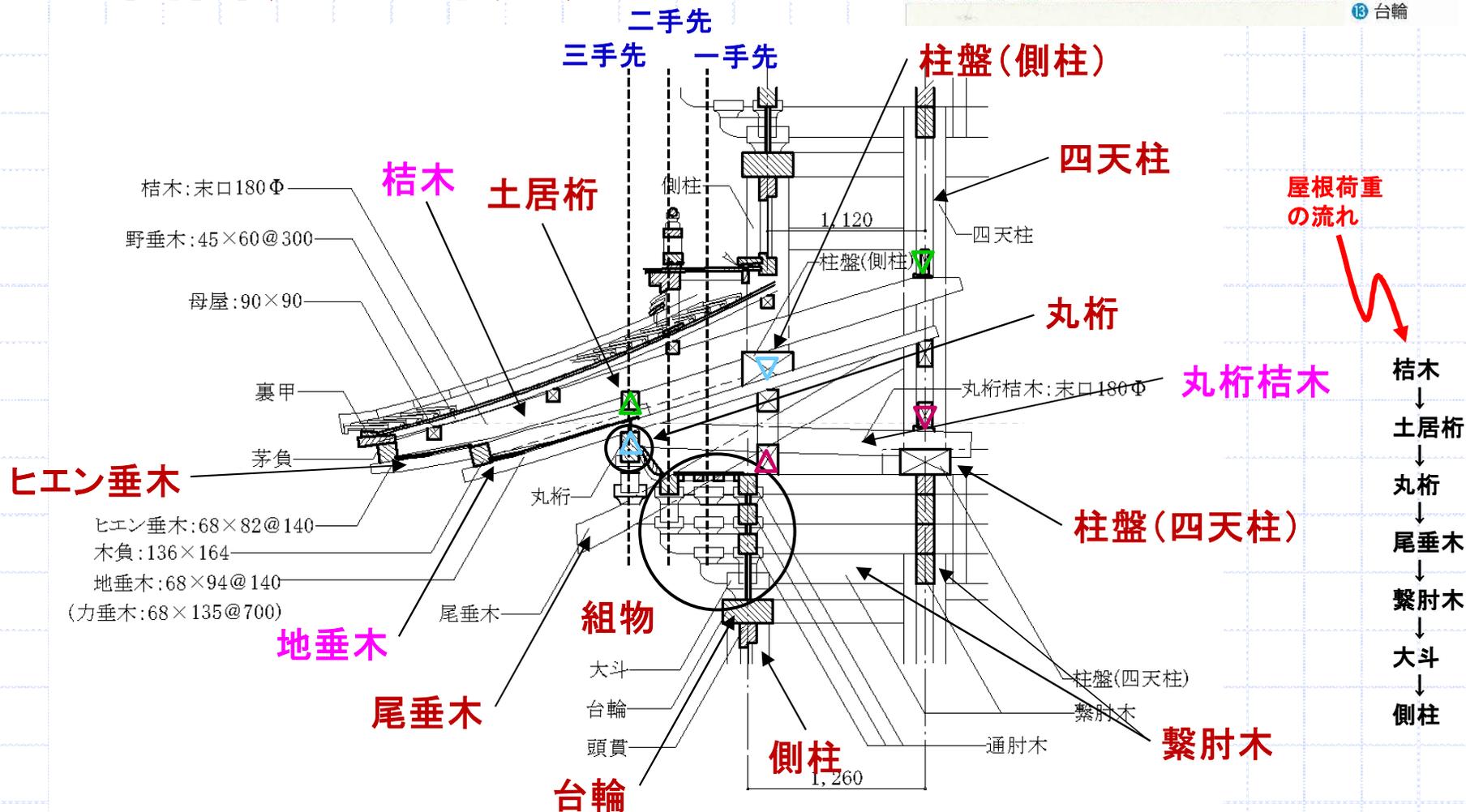


大斗(だいと):
方斗(ほうと):
二方向切り欠き



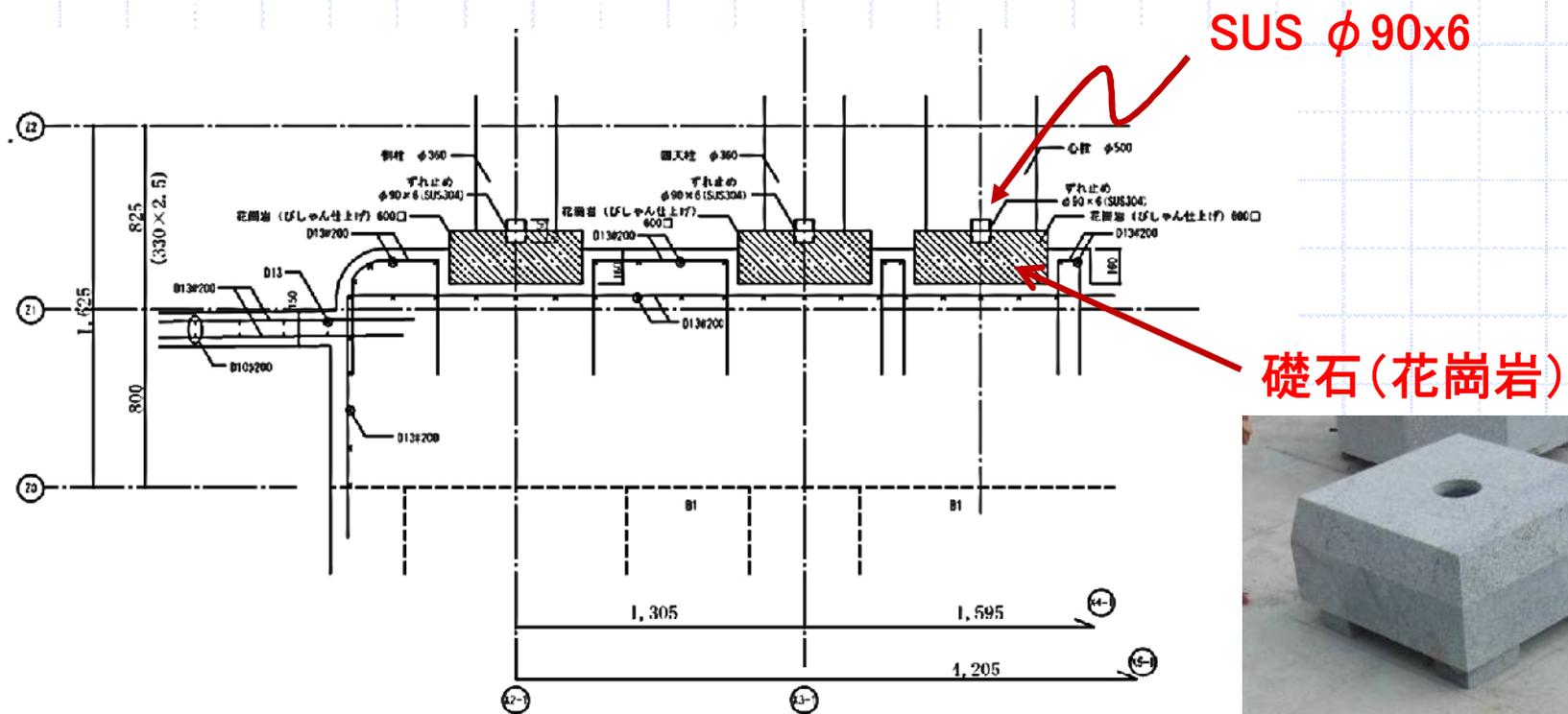
- ① 丸桁
- ② 巻斗
- ③ 秤肘木
- ④ 尾垂木
- ⑤ 鬼斗
- ⑥ 大斗
- ⑦ 支輪
- ⑧ 小天井
- ⑨ 巻斗
- ⑩ 通し肘木
- ⑪ 間斗束
- ⑫ 秤肘木
- ⑬ 台輪

■断面図(二重部分)



■柱脚部

- ・礎石立ち. (花崗岩) ※固定されていない.
- ・ステンレス製のダボを設置. (施工時ずれ止め)
- ・地震時に滑らないことを確認.



礎石まわり詳細図 1:30



3.2 構造設計方針

■耐震性能目標

| 地震動レベル | | 損傷限界レベル (稀に発生する地震動) | 安全限界レベル (極めて稀に発生する地震動) |
|----------|-------|--------------------------|---------------------------|
| 上部 構造 | 部材 | 短期許容応力度以内 ^{*1)} | 材料強度以内 |
| | 層間変形角 | 1/120 以内 | 1/30 以内 ^{*2)} |
| 基礎 | | 短期許容応力度以内 | 短期許容応力度以内 |

*1) 尾垂木の損傷は許容する。

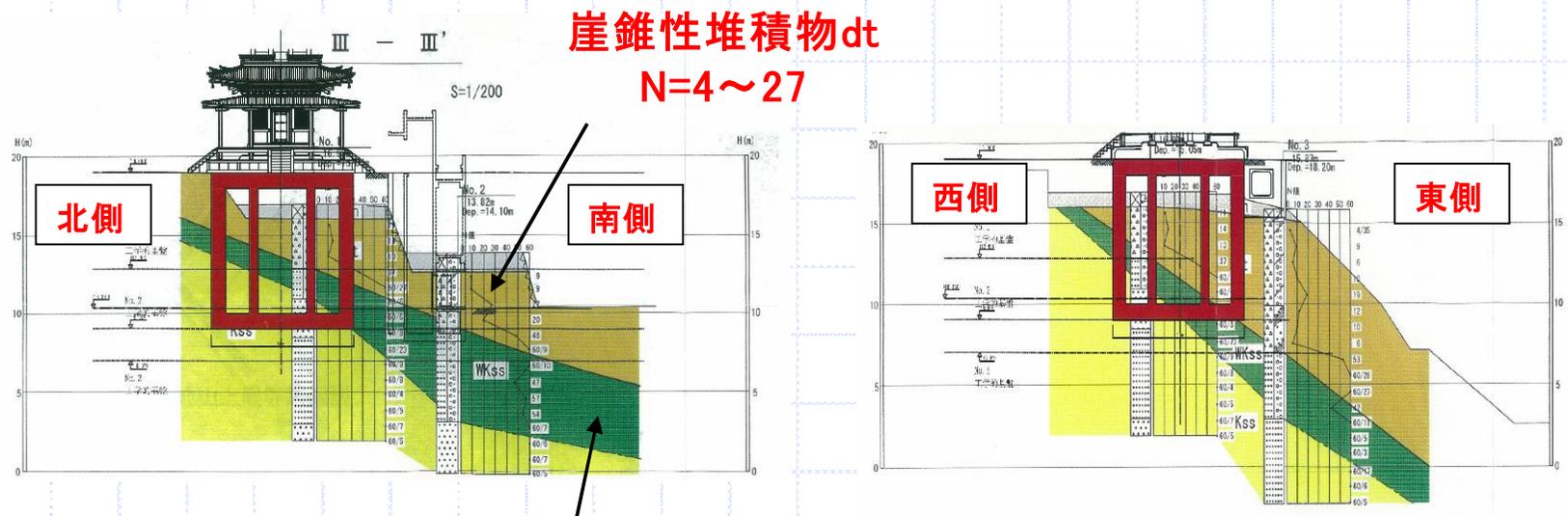
*2) 参考として行う応答解析は、1/20 程度以内を目標とする。

■耐震・耐風設計方針

- ・損傷限界レベルの地震動，風圧力に対して許容応力度設計を行い，損傷しないことを確認。
- ・安全限界レベルの地震動，風圧力に対して工作物が倒壊，崩壊しないことを確認。

■基礎設計方針

- ・約20～40度の傾斜地.
- ・N値60以上の神戸層群WKss(洪積層)を支持層(緑色の地層)とする直接基礎(高さ10m)を構築する.
- ・支持層=工学的基盤とする.(PS検層:Vs=402m/s)
- ・傾斜の影響の考慮.(支持力, 地震動)



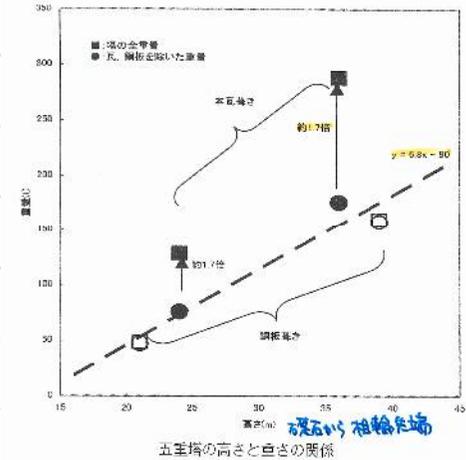
神戸層群WKss(風化砂岩・礫岩)=工学的基盤

§ 4 荷重・外力

4.1 固定荷重

■ 固定荷重のまとめ

$$\begin{aligned}
 Y &= 1.7(6.8 \times H - 90) \\
 &= 1.7(6.8 \times 27.2 - 90) \\
 &= 162 \text{ t} \rightarrow 1589 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



「五重塔のはなし」より

本瓦葺き
265kg/m²

| 部位 | 荷重 | 計 | 割合 |
|----|-----------|-----------|--------|
| 相輪 | 18.0 kN | 33.7 kN | 0.9% |
| 心柱 | 15.7 kN | | 0.8% |
| 軸組 | 900.6 kN | 2013.6 kN | 44.0% |
| 瓦 | 1113.0 kN | | 54.4% |
| 合計 | 2047.4 kN | 2047.4 kN | 100.0% |

| 部位 | 塔身 | 割合 | 心柱 | 計 |
|-------|-----------|--------|---------|-----------|
| 露盤 | 23.5 kN | 1.2% | 3.4 kN | 26.9 kN |
| 五重 | 329.2 kN | 16.8% | - | 329.2 kN |
| 四重 | 331.1 kN | 16.9% | - | 331.1 kN |
| 三重 | 356.8 kN | 18.2% | - | 356.8 kN |
| 二重 | 381.2 kN | 19.5% | - | 381.2 kN |
| 初重(上) | 536.5 kN | 27.4% | - | 536.5 kN |
| 小計 | 1958.3 kN | 100.0% | 3.4 kN | 1961.7 kN |
| 初重(下) | 73.3 kN | - | 12.4 kN | 85.7 kN |
| 建屋合計 | 2031.6 kN | - | 15.7 kN | 2047.4 kN |

瓦の荷重は、五重塔全体の半分以上を占める。

4.2 地震荷重

五重塔に作用する地震荷重は、 A_i 分布に基づき算定する。

| 層 | $W_i(\text{kN})$ | $\Sigma W_i(\text{kN})$ | α_i | A_i | C_i | $Q_i(\text{kN})$ | $P_i(\text{kN})$ |
|----|------------------|-------------------------|------------|-------|-------|------------------|------------------|
| 露盤 | 26.9 | 26.9 | 0.014 | 5.287 | 0.663 | 17.8 | 17.8 |
| 五重 | 329.2 | 356.0 | 0.181 | 2.088 | 0.262 | 93.3 | 75.4 |
| 四重 | 331.1 | 687.2 | 0.350 | 1.673 | 0.210 | 144.2 | 50.9 |
| 三重 | 356.8 | 1044.0 | 0.532 | 1.421 | 0.178 | 186.1 | 41.9 |
| 二重 | 381.2 | 1425.2 | 0.726 | 1.225 | 0.154 | 218.9 | 32.8 |
| 初重 | 536.5 | 1961.7 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 246.0 | 27.2 |

$$C_b = 0.125 \times 1.5 = 0.188$$

| | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| | | 第1種地盤 | |
| $h = 19.63(\text{m})$ | $T_c = 0.4(\text{sec})$ | $T = 1.021(\text{sec})$ | |
| $R_t = 0.627$ | $Z = 1.0$ | $C_o = 0.20$ | |

$$T = 0.052h (\text{sec})$$

大場他「微動測定に基づく木造多層塔の振動特性、五重塔5分の1模型振動実験およびシンポジウム資料、2004/12」

木造の D_s が接合部種別SA(めり込み破壊)の場合の一般値で0.3であることより、本建物の安全限界時目標ベースシア係数は、 A_i 分布の1.5倍を満足する $C_b = 0.20$ 程度とする。

4.3 風圧力

五重塔に作用する風圧力は、令82条の5二号で定められた方法によって設定する。

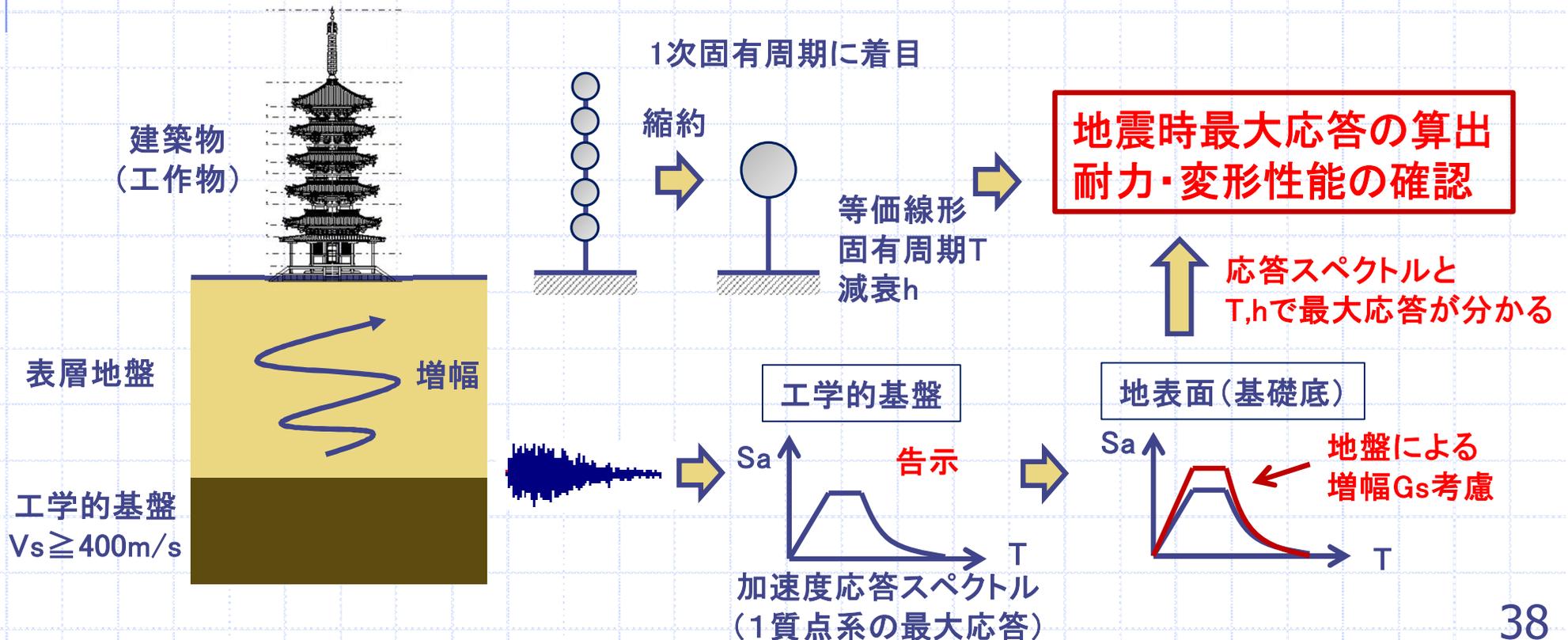
| 部位 | 位置 | 階高H(m) | 高さZ(m) | C_f | $q(N/m^2)$ | 受風面積 $A(m^2)$ | 風圧力 $W(kN)$ | 風圧力 $\Sigma W(kN)$ | ① $1.6 \times \Sigma$ $W(kN)$ | ② $1.74 \times$ $\Sigma W(kN)$ | ② $1.74 \times$ $\Sigma W(kN)$ の 45° 方向 |
|-----|-------|--------|--------|-------|------------|------------------|----------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| 壁 面 | 露盤 | 7.54 | 28.27 | 1.000 | 1379 | 5.4 | 7 | 7 | 12 | 13 | 18 |
| | 五重 | 3.60 | 20.73 | 1.000 | 1379 | 19.4 | 27 | 34 | 55 | 60 | 84 |
| | 四重 | 2.83 | 17.12 | 1.000 | 1379 | 17.7 | 24 | 59 | 94 | 102 | 144 |
| | 三重 | 3.05 | 14.30 | 1.000 | 1379 | 19.6 | 27 | 86 | 137 | 149 | 211 |
| | 二重 | 3.16 | 11.25 | 1.000 | 1379 | 21.1 | 29 | 115 | 184 | 200 | 282 |
| | 初重(上) | 8.09 | 8.09 | 1.000 | 1379 | 36.4 | 50 | 165 | 264 | 287 | 406 |
| | | | | | | | | | | | |

- ・風力係数は、興福寺五重塔の1/75模型を用いた風洞実験による風力係数を採用した。
- ・余裕度算定用として、再現期間1000年の風荷重(風速1.32倍)も計算した。

§5 限界耐力計算

5.1 限界耐力計算法

- ◆ 等価線形化法と応答スペクトル法による地震時最大応答の確認.
- ◆ 地震動に表層地盤による増幅率 G_s を評価できる.



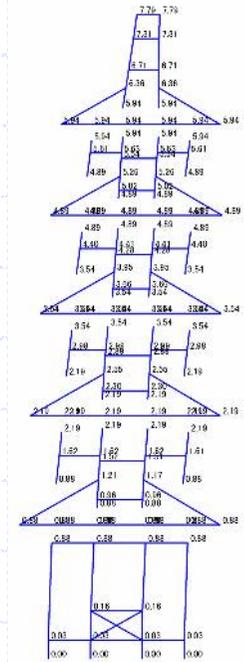
5.2 解析モデル

応力解析は，初重柱脚から左義長天端までを平面並列骨組にモデル化し，静的非線形増分解析を行っている．ここで，増分解析モデルに用いる荷重は，地震力(Ai分布)とする．

■外力に対する抵抗機構

- ①柱一通し貫接合部の半剛接合ラーメン
- ②板壁のせん断力
- ③初重柱脚における傾斜復元力
- ④尾垂木のトラス効果

心柱と裳階部分は，重量のみ考慮する．

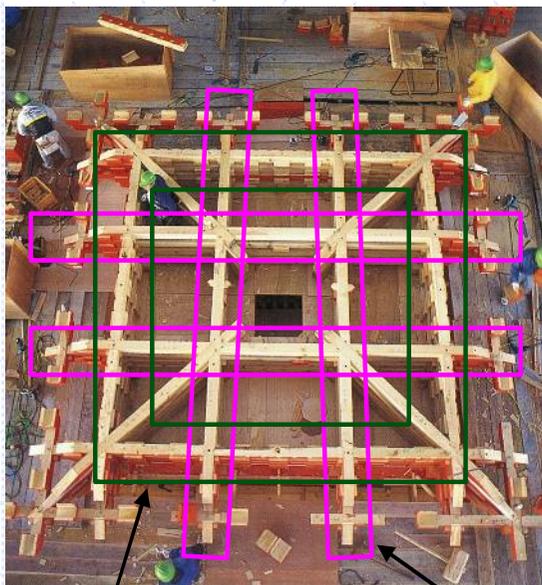


四天柱通り

- ・柱と貫は線材にモデル化
- ・板壁はブレース置換

■解析モデル(1)

繫肘木は4段に材を重ねるため材せいが大きく、通肘木と合わせて「囿」の字形状、かつ、隅肘木が四隅に組み合わさることから、水平方向の剛部材とする。



通肘木

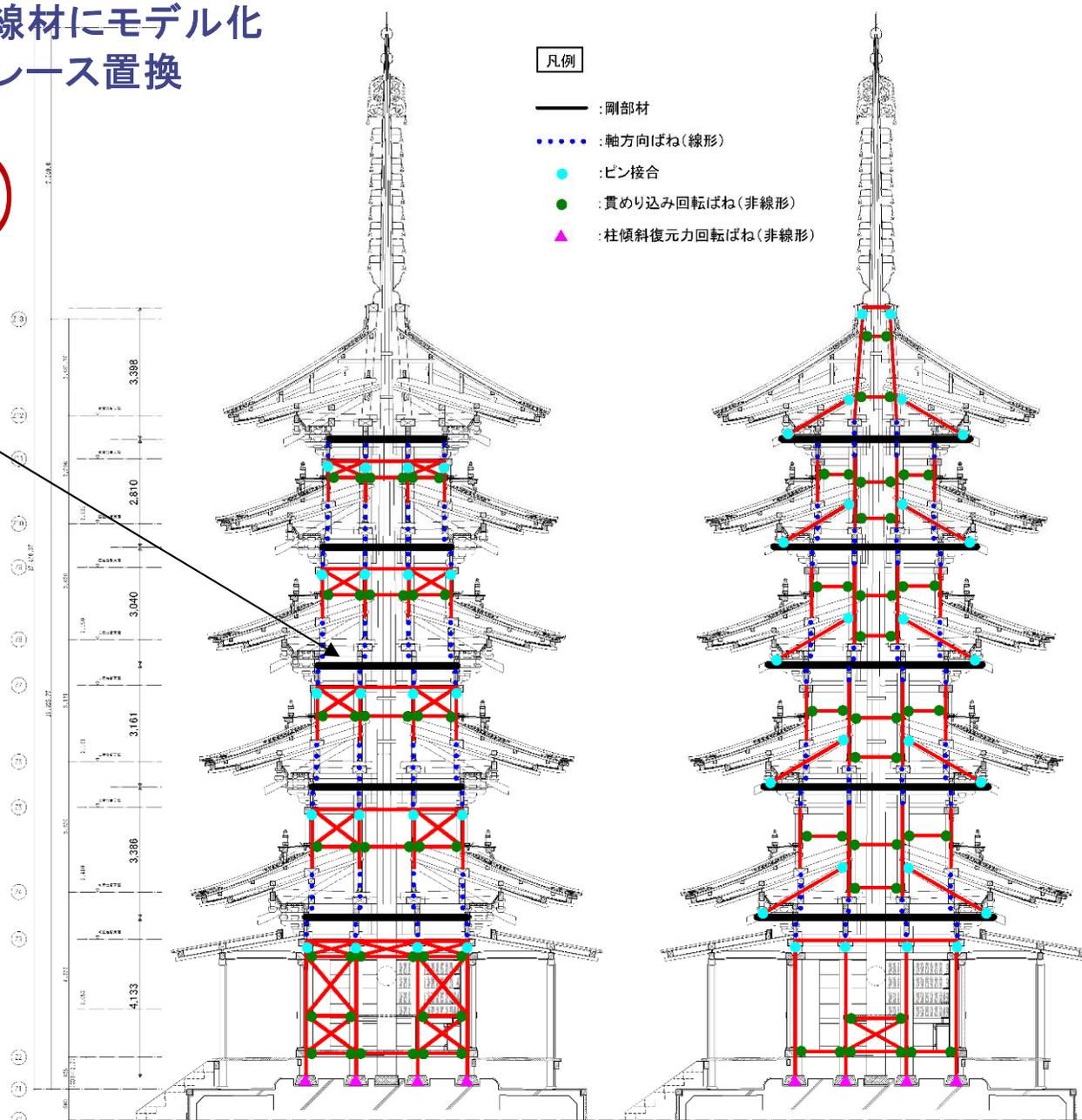
繫肘木

側柱通り

四天柱通り

凡例

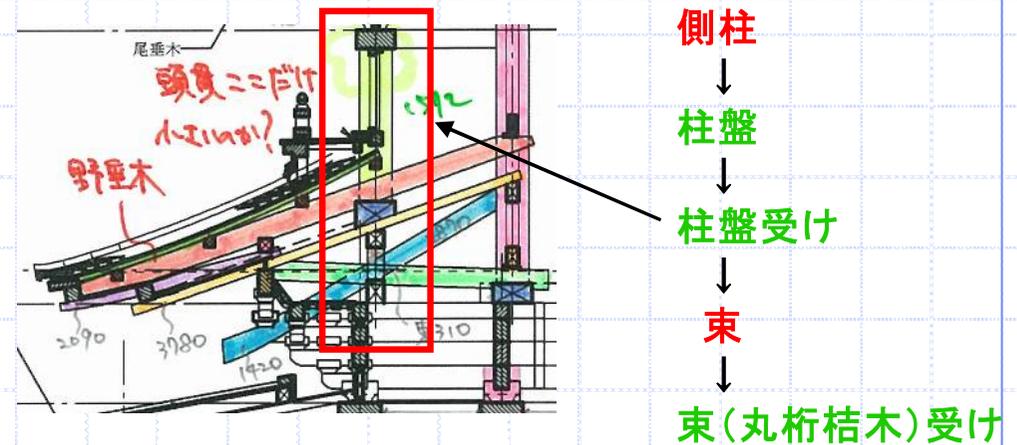
- : 剛部材
- : 軸方向ばね(線形)
- : ピン接合
- : 貫めり込み回転ばね(非線形)
- ▲ : 柱傾斜復元力回転ばね(非線形)



側柱通り

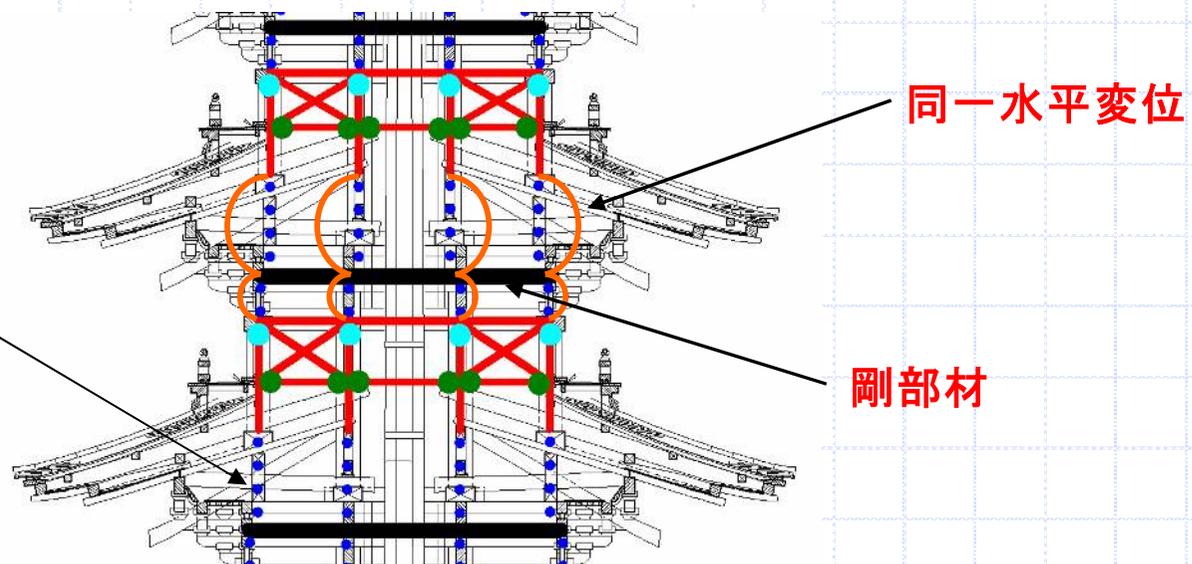
四天柱通り

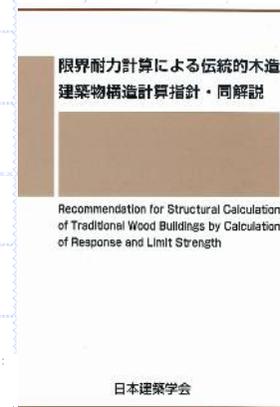
■解析モデル(2)



- ・剛部材とした繋肘木と柱頭，柱脚は同一水平変位と仮定する.
- ・小屋組から高欄レベルは，側柱の水平変位を拘束すると考えられるが，ここではその効果を考慮しない.

斗組や繋肘木，束受け材等の横架材の繊維直交方向めり込み剛性を考慮して，剛性を繊維方向の $1/50$ とした鉛直方向線形ばねに置換する.



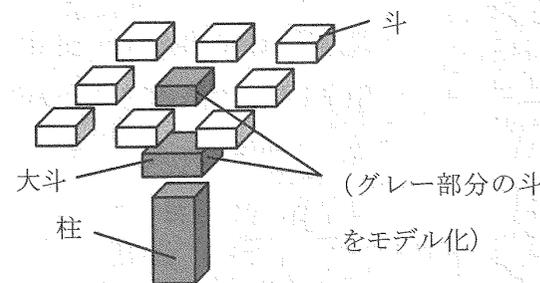


「限界耐力計算による伝統的木造建築物構造計算指針・同解説」AIJ(2013)

(b) 斗拱

上記(a)項で示したように小屋組と下部構造の境界部分を構成する部材設計は重要である。斗拱は柱上に設けられ軒を支持するように方形の斗と多段の肘木により構成されている。図5.6はその形式のひとつである三手先組である。屋根架構は垂木、小屋梁、小屋束などから立体的に構成されておりその水平方向は剛体として扱ってよいと考えられる。鉛直方向は第4章で述べられたように、圧縮バネとしてモデル化することが一般的である。

(f) 組物 積み重なっている斗の集合体であり、力学的に不明確な点が多くモデル化することが難しいと考えられているが、斗の配置を上から見たときに、柱の直上のみにある部材(斗)を軸ばねとしてモデル化すれば安全側の評価となることが知られている。



(f)組物

鉛直方向の組物のモデル化

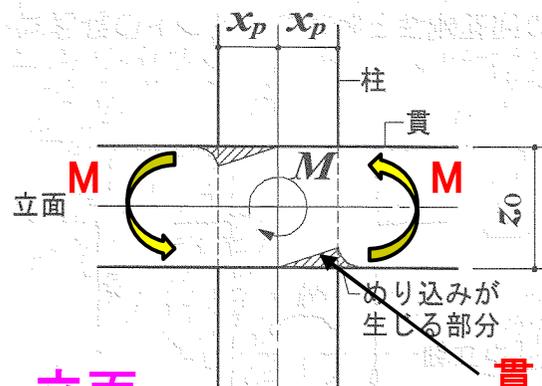


この本の旧版 (2001)

■各部のモデル化

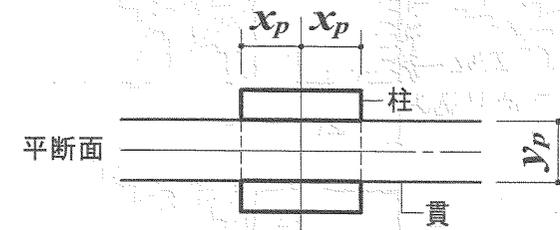
1) 柱一貫接合部

- ・柱と通し貫接合部は貫のめり込み回転効果を考慮し、回転剛性と降伏モーメントを算定して、バイリニア型の非線形ばねとする。
- ・算定式は、「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」日本住宅・木材センターによる。

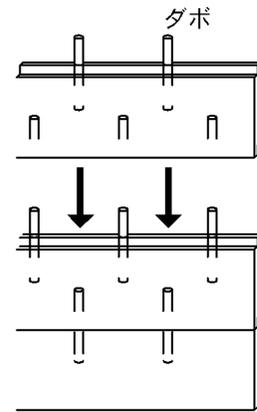


立面

貫にめり込みが生じる



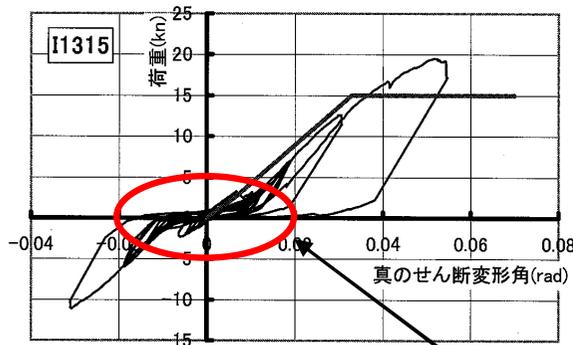
平断面



上下の板壁をダボで止める

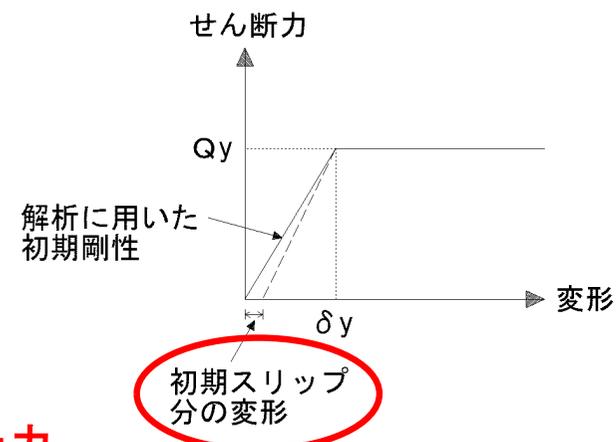
2) 板壁

- ・落とし込み板壁を採用. 板のせん断剛性, ダボのせん断剛性, および板の面内トラス効果を評価したバイリニア型の非線形ばねとし, ブレース置換して, モデル化する.
- ・算定は, 「土塗り壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率に係る技術解説書」日本住宅・木材センターによる.

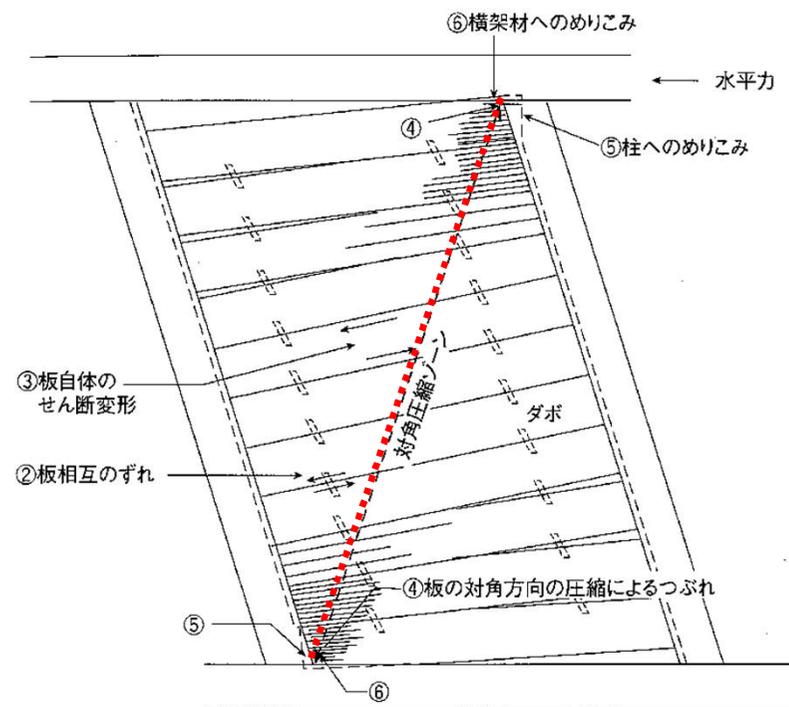


復元力の実験結果一例

スリップ型の復元力



- ・落とし込み板壁による付加せん断力は，図に示すとおり，対角圧縮ゾーンを形成する柱梁仕口部分に作用する。



【抵抗要素】

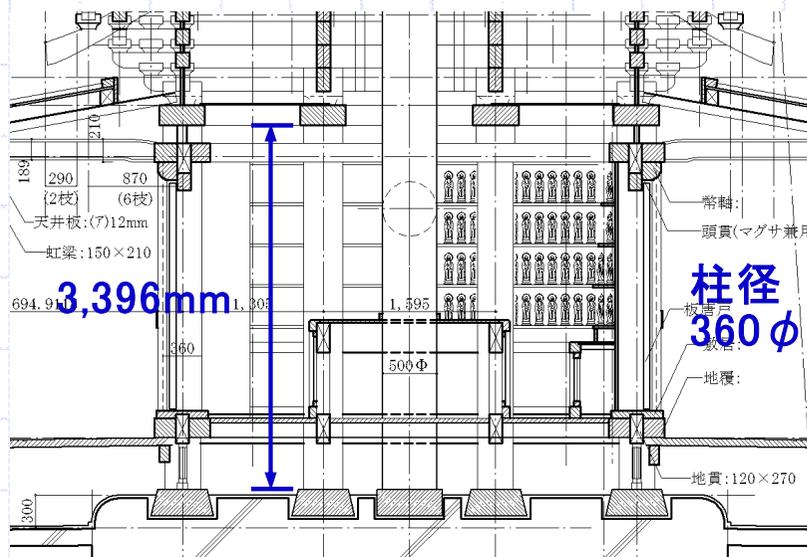
- ②板相互のずれ
- ③板自体のせん断変形
- ④板の対角方向の圧縮によるつぶれ
- ⑤柱へのめり込み
- ⑥横架材のへのめり込み

圧縮筋かいのように内側で突っ張ることにより抵抗する耐力壁

文化庁で
入手可能

3) 柱の傾斜復元力(初重)

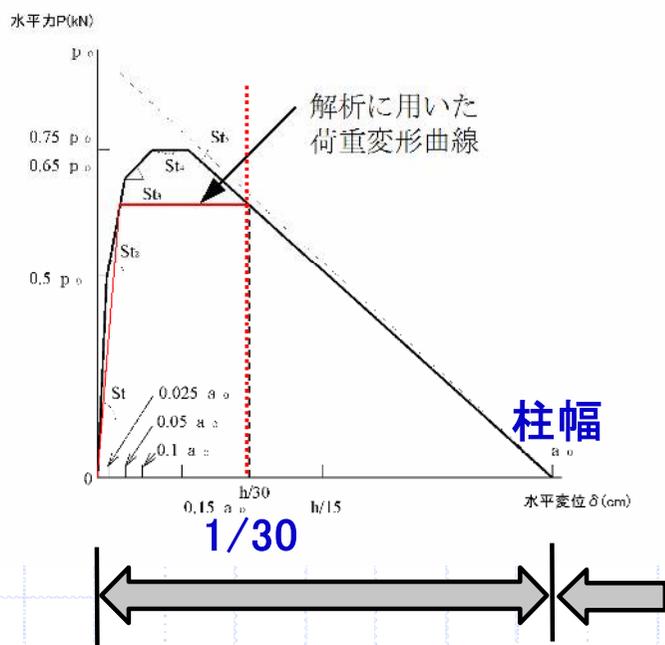
- 「重要文化財(建築物)耐震診断」文化庁文化財部により、柱のロッキング抵抗の荷重変形関係を算出する。



初重部分の柱径と柱長さ

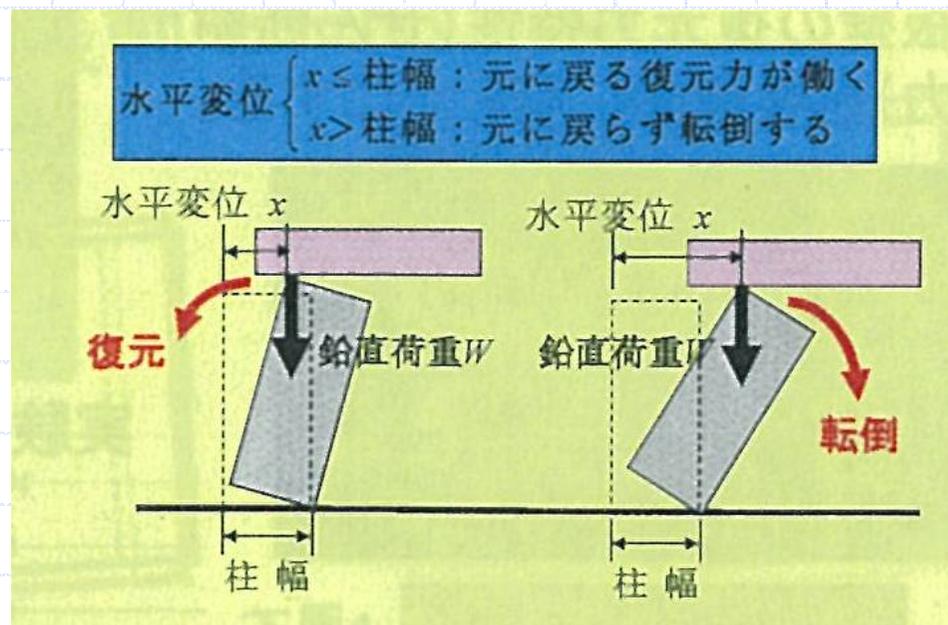
- 柱の長さに対して、柱の径が大きい
$$\text{柱径} / \text{柱長さ} = 360 / 3396 = 1 / 9.4$$
- 鉛直荷重と柱幅が大きくなれば、傾斜復元力は大きくなる

- ・建物の変形性状を考慮し，初重の層間変形角が $1/30$ となる水平力でバイリニア型の非線形ばねとしてモデル化する。



元に戻る範囲 転倒する範囲

荷重—変形曲線



1/10の傾斜角でも傾斜復元力は負にならない。

様々な本に掲載
されています

4) 軸方向ばね

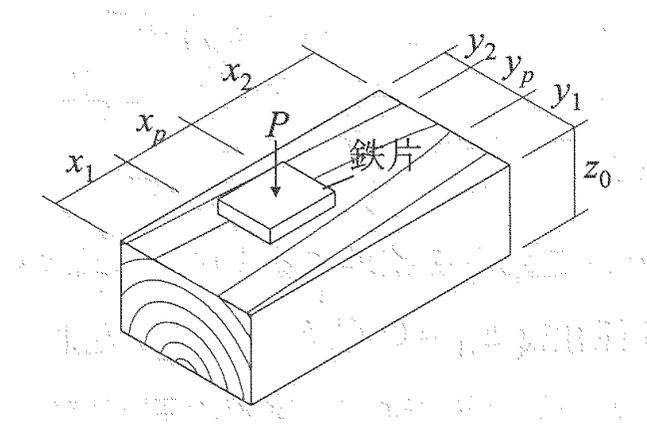
- ・台輪上柱～柱盤下端までの軸方向ばねの算定は、「木質構造基礎理論(2010)」日本建築学会の等変位めり込み基準式による。

弾性域の荷重－変位関係

$$P(kN) = \frac{x_p \cdot y_p \cdot C_x \cdot C_y \cdot E_{\perp}}{Z_0} \cdot \delta$$

降伏変位 δ_y

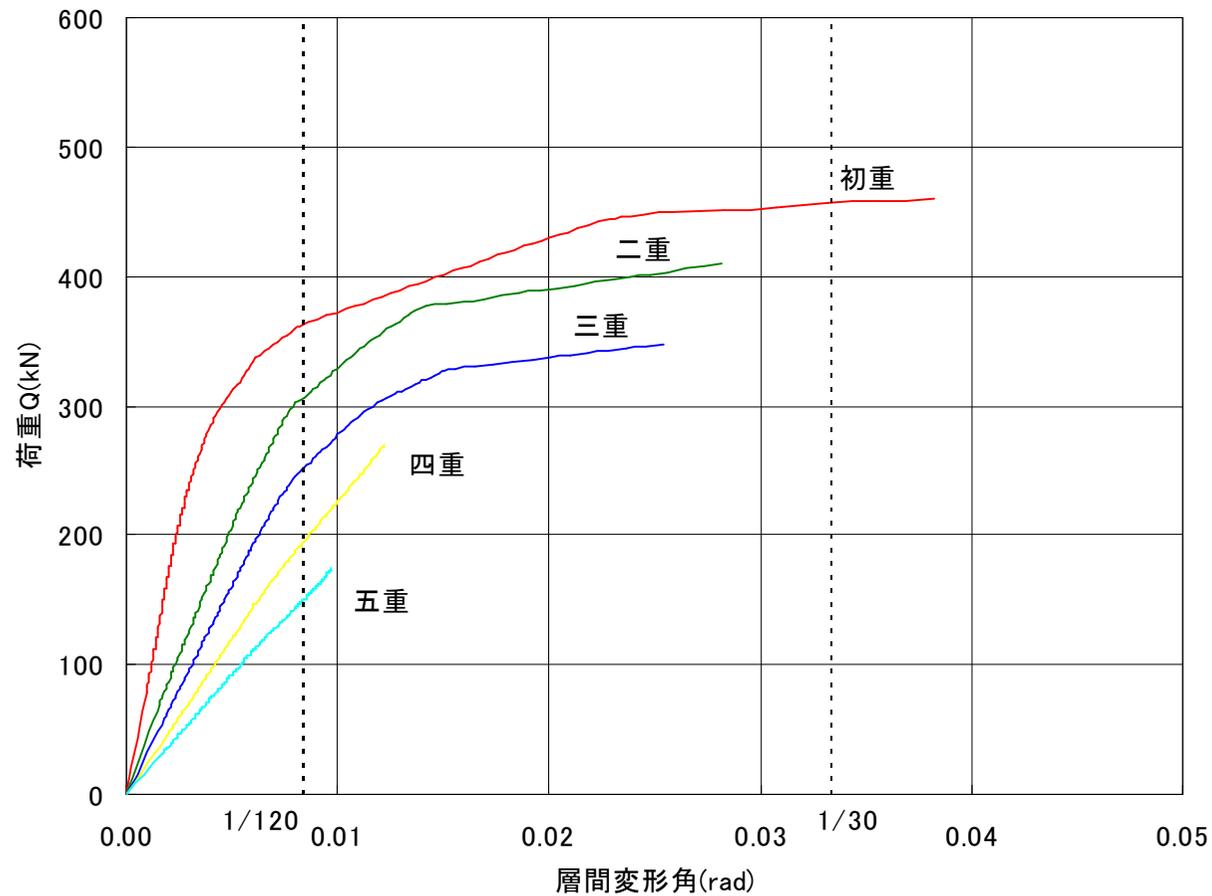
$$\delta_y(cm) = \frac{Z_0 \cdot F_m}{E_{\perp} \sqrt{C_x \cdot C_y \cdot C_{xm} \cdot C_{ym}}}$$



等変位めり込み

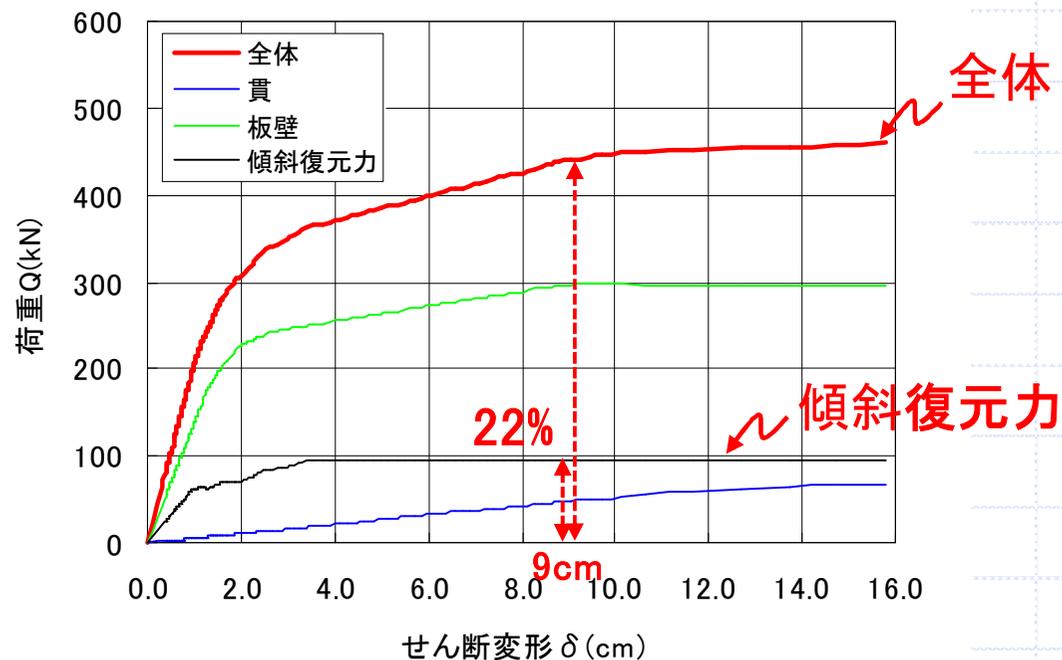
5.3 解析結果

増分解析により得られた荷重－変形角関係を
下図に示す。



初重の各耐震要素の復元力を下図に示す。
例えば、せん断変形9cmの時の全体復元力に
対する割合は、以下のとおりとなる。

板壁67%，傾斜復元力22%，貫11%



5.4 限界耐力の確認

■限界耐力計算について(1)

- ・限界耐力計算は前頁の荷重－変形角関係に基づき、市販のプログラムを用いて限界耐力を算定する。なお、限界耐力は収斂計算を行い算定するため、必要限界耐力とほぼ等しい値となる。
- ・地盤の増幅率 G_s は、損傷限界時を**1.35**、安全限界時を**1.23**に設定する。
 - 工学的基盤の傾斜による地盤増幅の影響は、別途検討を行った。

5度以下の傾斜であること。ただし、特別な調査又は研究の結果に基づき傾斜する工学的基盤からの地震動の増幅と同等以上の増幅を計算できる場合にあつては、この限りでない。

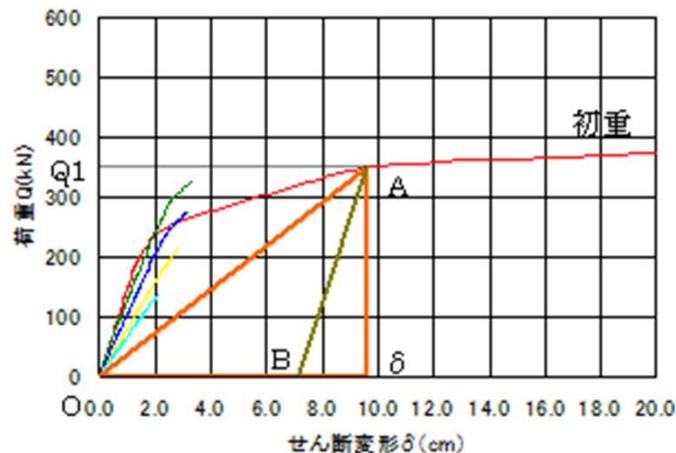
$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (1)$$

$$h_1 = \gamma (1 - 1/\sqrt{Df}) + 0.05 \quad (2)$$

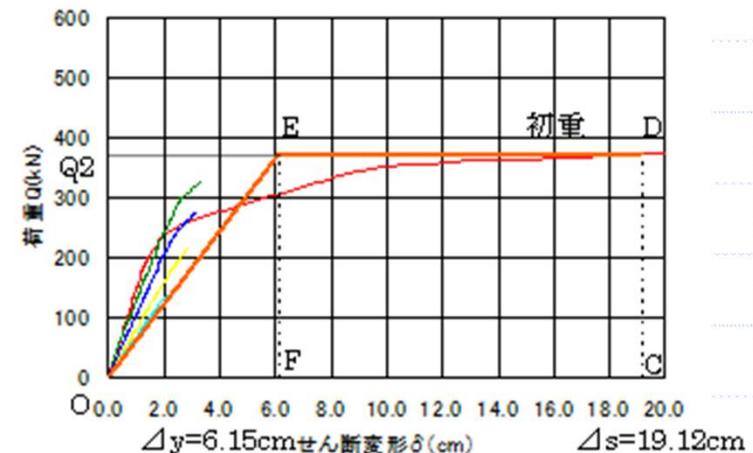
$$h = \min((1)\text{式}, (2)\text{式})$$

■限界耐力計算について(2)

- 減衰定数は、傾斜復元力特性を除いた初重の荷重-変形曲線から(1)式により算出した等価粘性減衰定数と告示第1457号第9の2項三号に記載の(2)式から算出した減衰定数の小さい方を採用する。

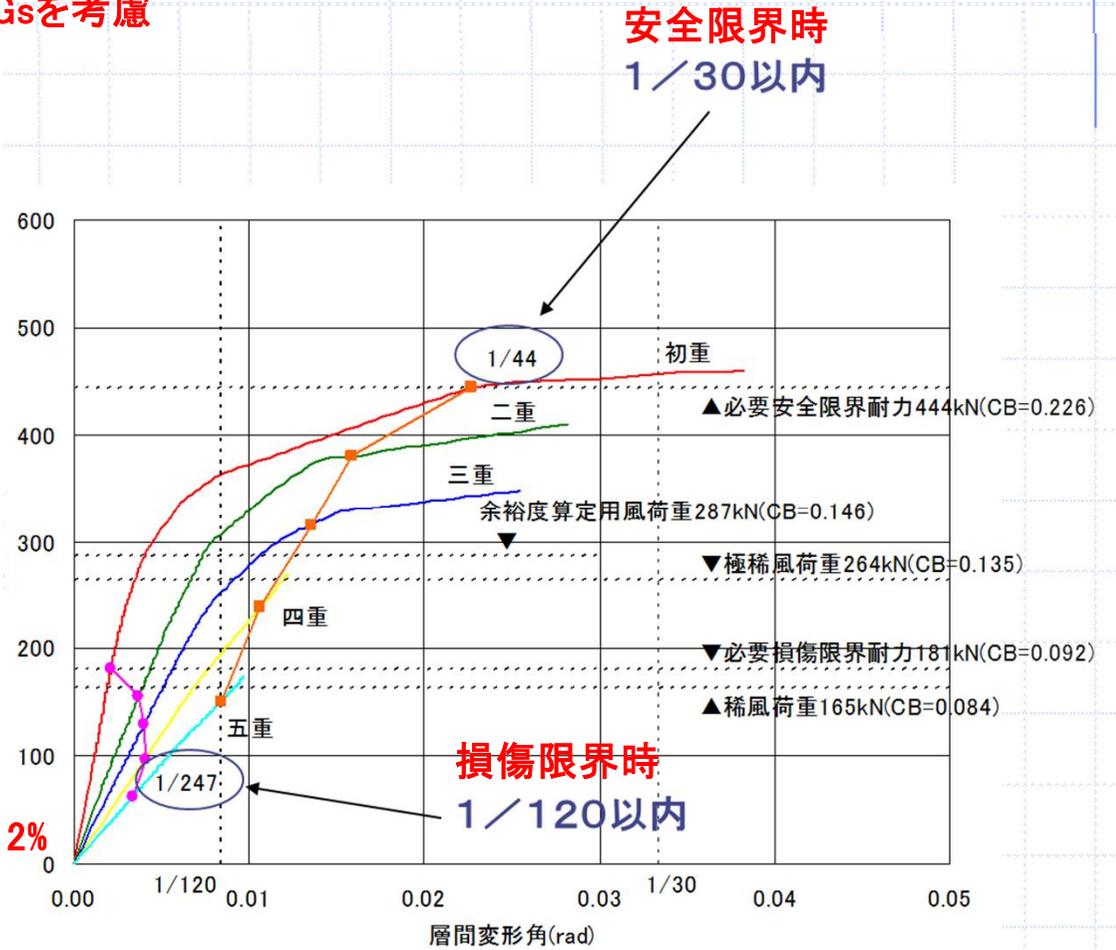
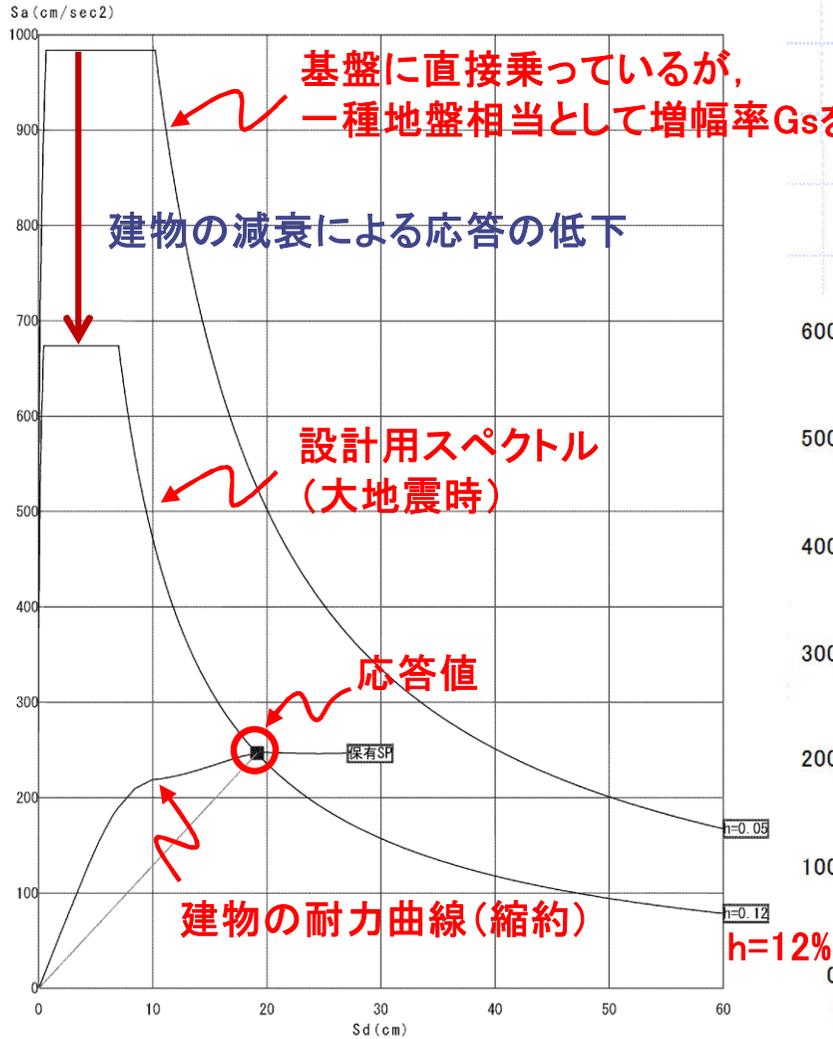


(1)式算定用



(2)式算定用

安全限界時(大地震時)



■ 保有安全限界値
● 必要安全限界値

5.5 各部材の検討

■ 損傷限界時

全ての部材が許容応力度以内に納まることを確認した。

■ 安全限界時

一部の貫を除き、材料強度以内に納まることを確認した。板壁の付加軸力によるせん断でNG。

- ・ 四天柱に取りつく足固め貫
- ・ 側柱に取り付く内法貫，腰貫，足固め貫



PL補強SUS304 (t=6mm)を行う。

5.6 その他の部材の検討

増分解析モデルに含まれない以下の部材について、検討を行った。

- ①野垂木
- ②桔木, 地垂木
- ③丸桁
- ④卷斗, 尾垂木
- ⑤束, 束受け
- ⑥大斗
- ⑦心柱

■相輪部分の心柱の設計

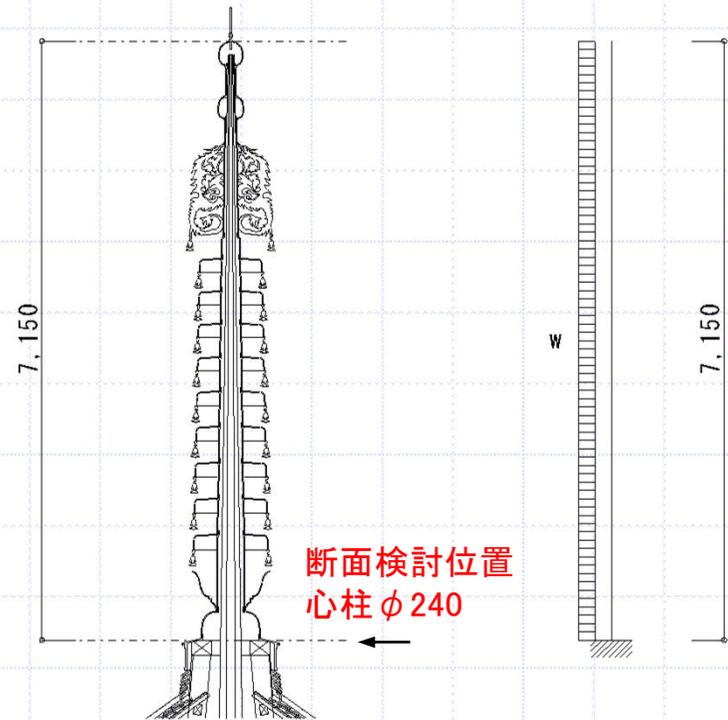
露盤受け上端位置を固定とした片持梁として
検討を行った。

ここで、設計荷重は
相輪重量に対して、
水平方向に1.7G
の外力を想定した。



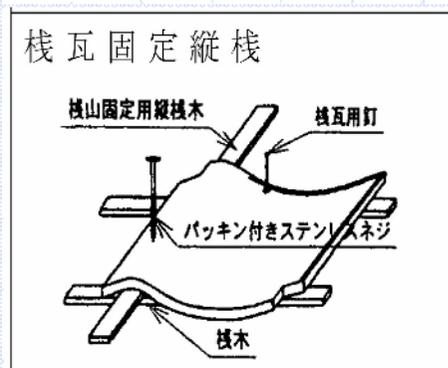
露盤位置での心柱の鋼管
補強を行う。

$\phi 267.4 \times 12$ (SUS304A)



5.7 屋根葺き材の検討

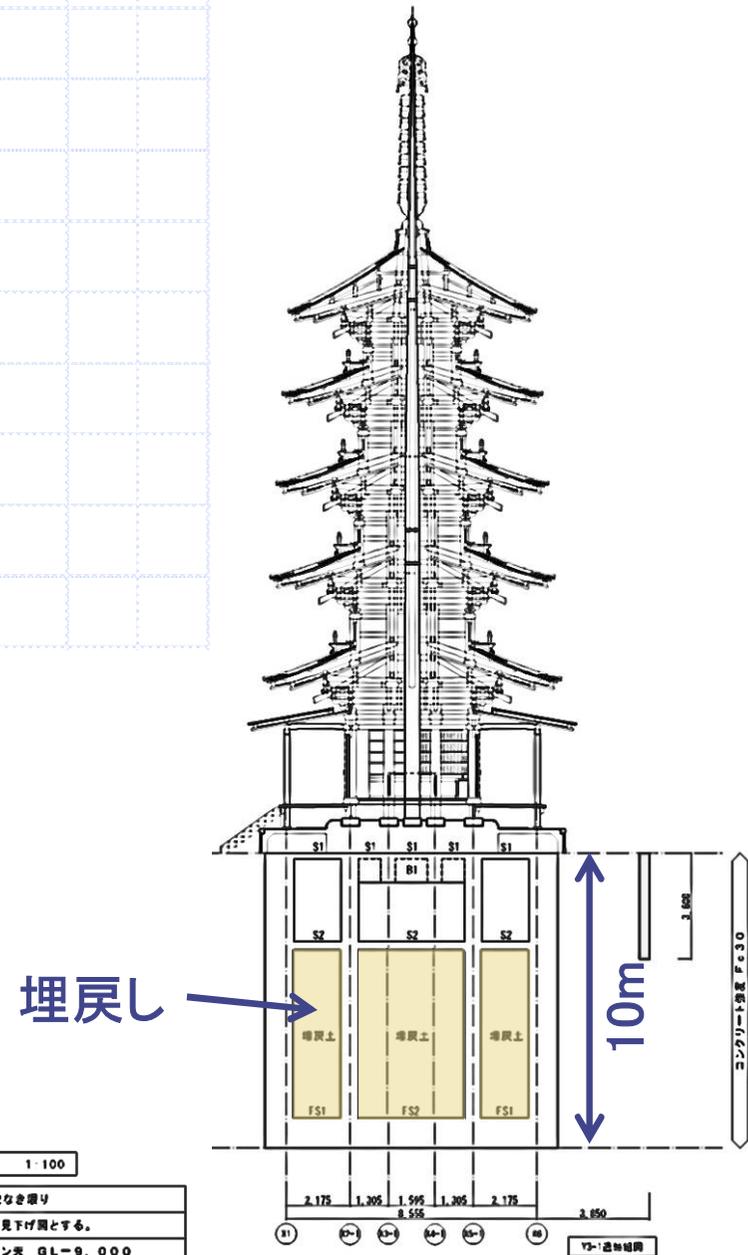
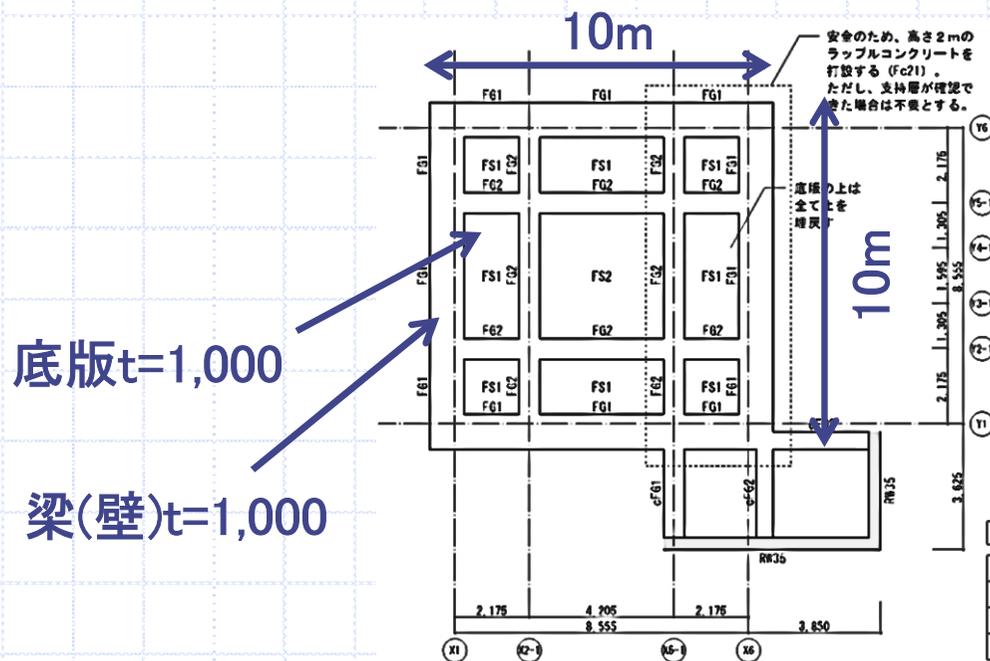
- ・本瓦の工法については、「瓦屋根標準設計・施工ガイドライン」全日本瓦工事業連盟を参考にした。
- ・本瓦はJIS規格外であるため、平部分の工法はJ形棧瓦にならない棧山固定縦棧工法(2枚毎補強)とした。



§ 6 基礎設計

6.1 基礎の構造

- ◆ 支持層：神戸層群(洪積層)
- ◆ 基礎コンクリート Fc30
 - 耐久性に配慮
 - 水セメント比50%以下



6.2 主な検討内容

■ 接地圧の検討

- ・長期は片土圧によるモーメント，短期は片土圧に加えて五重塔と基礎部分の転倒モーメントによる接地圧を加味して検討を行った。

■ 滑動，転倒の検討

- ・長期は片土圧，短期は片土圧と五重塔，基礎部分に働く慣性力の合計に対して検討を行った。



何れの検討に対して，問題ないことを確認した。

6.3 支持力の算定

◆ 液状化は発生しないと判断

- 崖錐と風化岩で構成され，地下水位が低い。

◆ 長期許容支持力

告示第1113号

$$\text{長期 } qa = \frac{1}{3}(ic \alpha cNc + ir \beta \gamma_1 B Nr + iq \gamma_2 DfNq)$$

N値 60 (φ=49.6度:大崎式)

長期 $qa=1606\text{kN/m}^2 \rightarrow 500\text{kN/m}^2$

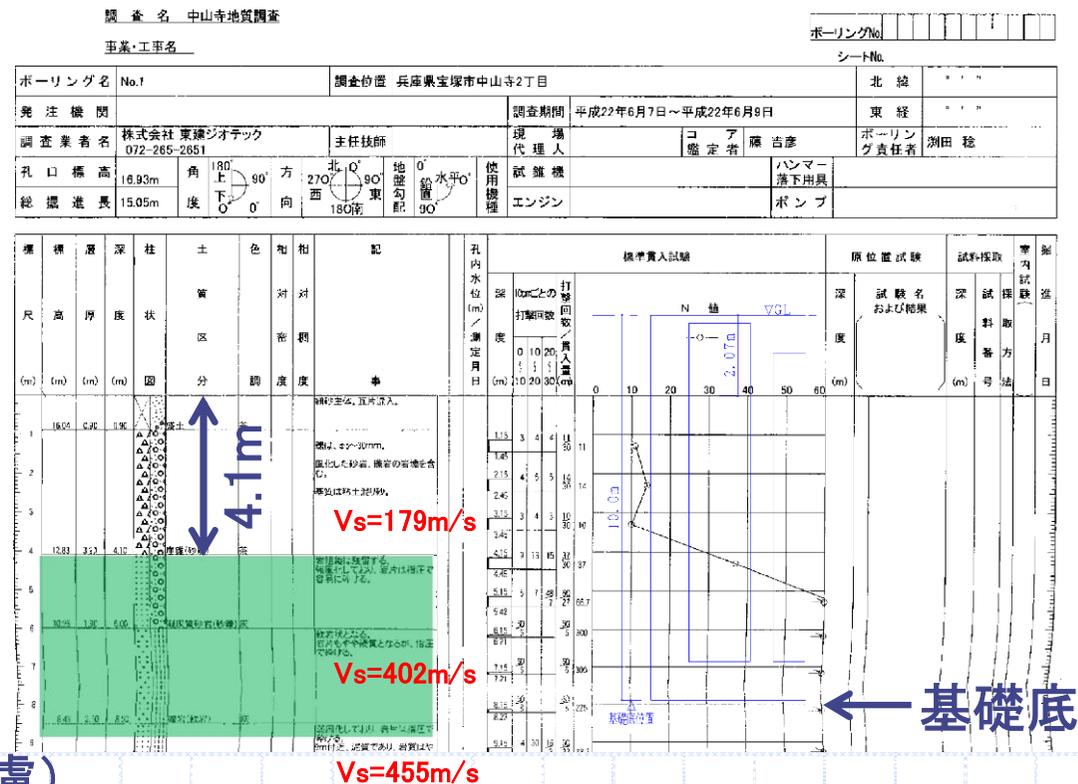
総重量 25,469kN

(五重塔本体:2,050kN…全体の8%)

(五重塔本体の50%以上が瓦重量)

長期接地圧 $\sigma L=443\text{kN/m}^2$ (土圧考慮)

< 500kN/m²



< 直下のボーリング >

6.4 傾斜の影響を考慮した支持力の算定

◆ 傾斜の影響を考慮した支持力式

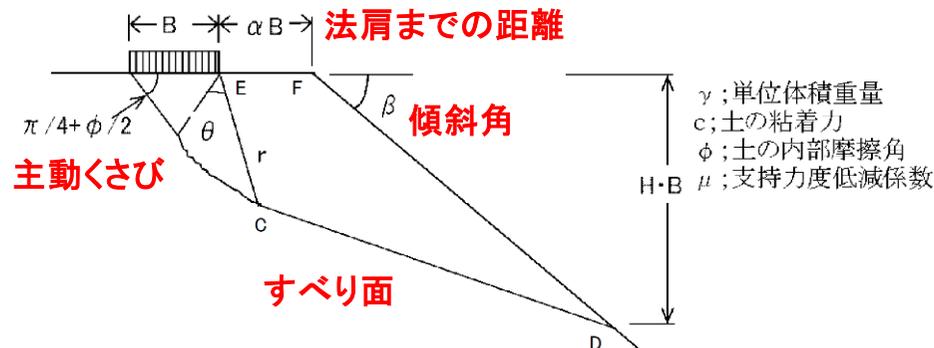
$$q_{slopes} = \mu \times q_{Lim}$$

ここで, q_{Lim} : 平らな地盤の終局支持力度で, 文献¹⁾より算出する.

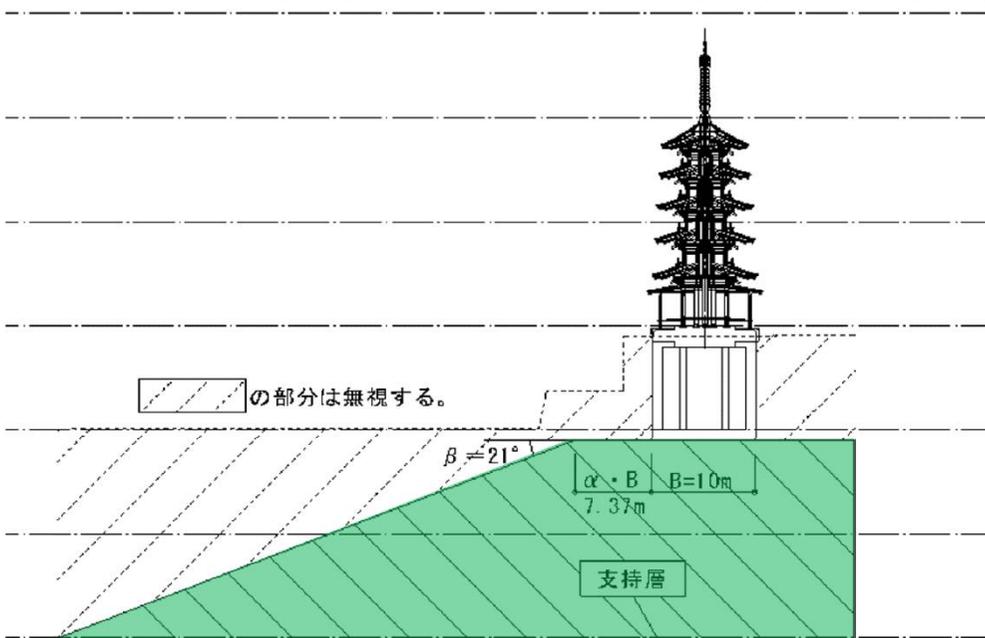
q_{slopes} : 傾斜地盤の終局支持力度

μ : 斜面の影響を考慮した支持力度低減係数で, 文献¹⁾より算出する.

$$\mu = c \left[\frac{\cos \phi + \{\exp(2\theta \tan \phi) - 1\} \cot \phi}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} + \frac{l_{CD} \exp(\theta \tan \phi) \cos \phi}{B \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} \right] + \frac{\gamma B}{2} \left[-\frac{1}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) - \frac{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \theta\right)}{B^2 \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} \cdot \exp(\theta \tan \phi) \cdot S_{CDFE} \right. \\ \left. - \frac{\exp(3\theta \tan \phi) \left\{ 3 \tan \phi \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \theta\right) + \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \theta\right) \right\} - \left\{ 3 \tan \phi \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right\}}{4 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) (9 \tan^2 \phi + 1)} \right] / q_{Lim}$$



(参考文献) 土と基礎 1985年2月
 日下部治「斜面上直接基礎の支持力評価に関する計算」



検討図

$$\begin{aligned} \phi &= \sqrt{(20 \cdot N) + 15} \\ &= \sqrt{(20 \cdot 50) + 15} \\ &= 46.6 \rightarrow 45^\circ \\ \gamma &= 20 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

| | | |
|------------------------------|--|-------|
| 符号 | | |
| 位置 | | |
| B (m) | | 10 |
| α | | 0.737 |
| β (°) | | 21 |
| γ (t/m ³) | | 2 |
| c (t/m ²) | | 0 |
| ϕ (°) | | 45 |
| θ (°) | | 63.00 |
| r (m) | | 39.23 |
| H | | 3.574 |
| μ | | 0.396 |

低減係数 $\mu = 0.396$

• 平らな地盤の終局支持力度 q_{Lim}

$$q_{Lim} = 0 + \frac{1}{2} \times 20 \times 10 \times 93.7 = 9370 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

• 傾斜地盤の終局支持力度 q_{slopes}

$$q_{slopes} = \mu \cdot q_{Lim} = 0.396 \times 9370 = 3710 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$



• 許容支持力度 ${}_Lq_a, {}_sqa$

$${}_Lq_a = q_{slopes} \times \frac{1}{3} = 3710 \times \frac{1}{3} = 1236 \text{ kN/m}^2 > 500 \text{ kN/m}^2$$

告示第1113号により設定した
500kN/m²で問題なし

§7 評価委員会の部会での検討

7.1 指摘事項

- 1) 工学的基盤の傾斜の影響を考慮した地盤増幅率の算出
- 2) 柱脚部分の応力伝達について
- 3) 貫のせん断力負担割合と木材のばらつきの影響について
- 4) 振動解析による応答値の確認
- 5) 限界耐力計算の再確認

6) 各層の転倒の検討と補強について

7) 層間変形角の再確認

8) 斜面の影響を考慮した基礎の検討

9) 柱脚部分の滑動の検討

10) 建物の剛性をパラメータとした時の応答値
の傾向

7.3 振動解析による応答値の確認

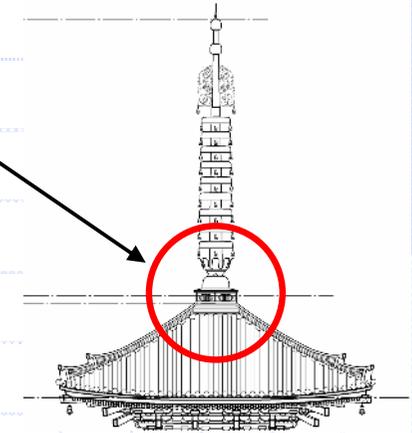
■検討内容

五重塔の被害は、2次モードの影響も大きいと言われている。



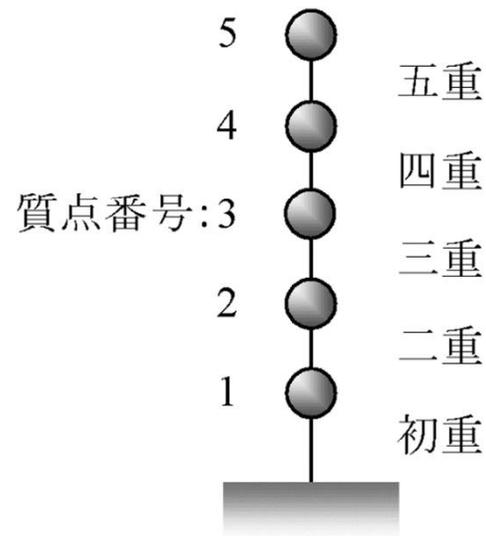
- ・質点系モデルによる振動解析を行い、各種応答値が設計クライテリアを満足するかどうかの確認を行う。
- ・心柱が塔身の応答に与える影響を確認する。
(限界耐力計算では考慮できない。)

露盤



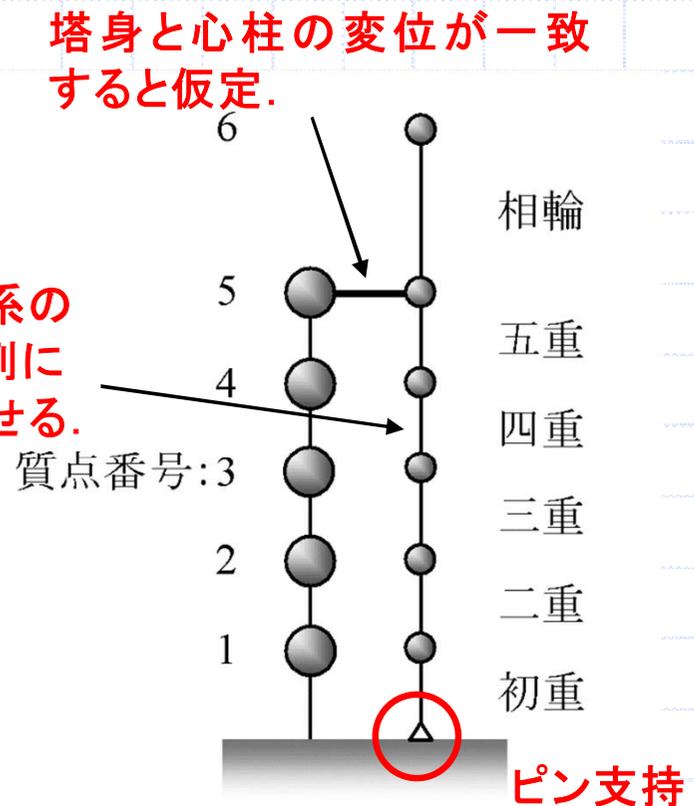
■解析モデル

解析モデルは、塔身のみと塔身+心柱の2ケースを作成する。



【塔身のみ(CASE1)】

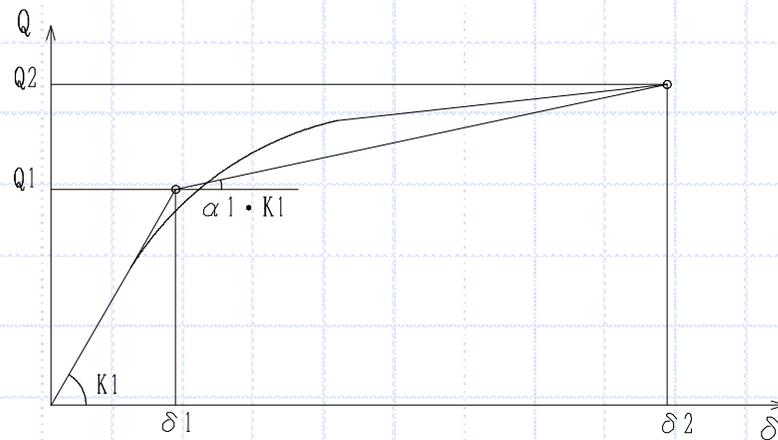
曲げ要素系の
心柱を並列に
組み合わせる。



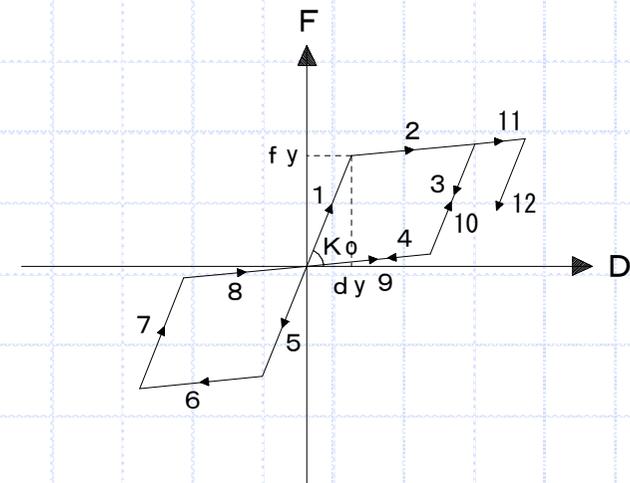
【塔身+心柱(CASE2)】

■解析条件

- ・各重の復元力特性は，静的荷重増分解析結果を基に，Bi-Linear型にモデル化する。
- ・内部粘性減衰は，1次固有周期に対して2%の初期剛性比例型。



復元力特性:Bi-Linear型



履歴法則:スリップ型

■固有値解析

- ・心柱の影響を考慮したCASE2は、塔身のみ
のCASE1と比較して長周期化しており、1次
と2次の固有周期が近接している。
- ・CASE2の等価質量比は、2次モードの占め
る割合が1次モードのそれより大きい。

固有周期および等価質量比

| | 固有周期(sec) | | |
|-------|-----------|-------|-------|
| | 1次 | 2次 | 3次 |
| CASE1 | 1.179 | 0.466 | 0.303 |
| CASE2 | 1.302 | 1.027 | 0.455 |

| | 等価質量／全質量 | | |
|-------|----------|------|------|
| | 1次 | 2次 | 3次 |
| CASE1 | 0.75 | 0.16 | 0.06 |
| CASE2 | 0.10 | 0.67 | 0.13 |

(参考)大阪大学 宮本研究室実測 1次:0.92(sec), 2次:0.32(sec)
大場先生提案式 $T=0.052h=1.021(sec)$

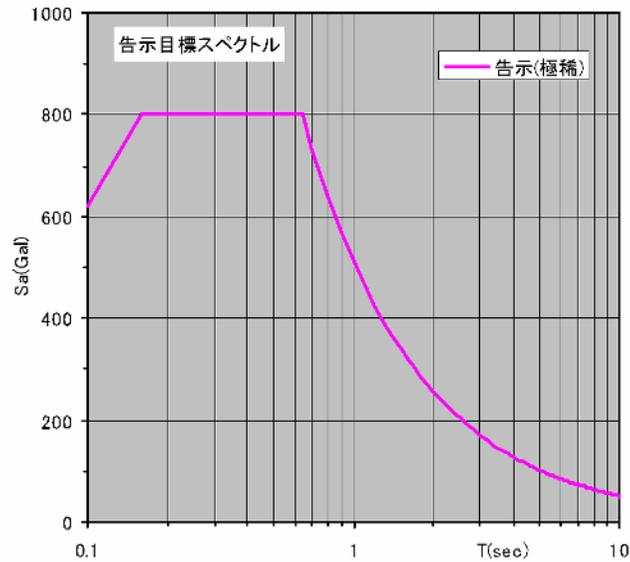
■設計用入力地震動

設計用入力地震動は、告示波3波(乱數位相2波とJMA神戸位相)と観測波3波の合計6波とする。

解放工学的基盤面での波形

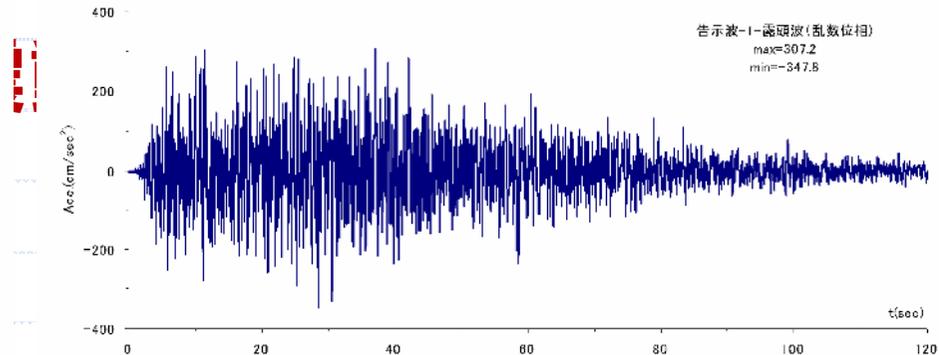
| 地震動レベル | 地震波 | 加速度 (cm/sec ²) | 速度 ^{*2)} (cm/sec) | 継続時間 (sec) | |
|----------------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|---------------|-----|
| 極めて稀に発生 する地震動 (レベル2) | 告示波 | 告示波-1 | 347.8 | 61.2 | 120 |
| | | 告示波-2 | 332.3 | 38.7 | 120 |
| | | 告示波-3 | 380.1 | 56.6 | 120 |
| | 観測波 | El Centro NS | 510.8 | 50 | 53 |
| | | Taft EW | 496.6 | 50 | 54 |
| | | Hachinohe NS ^{*3)} | 358.3 | 50 | 120 |

地震動波形

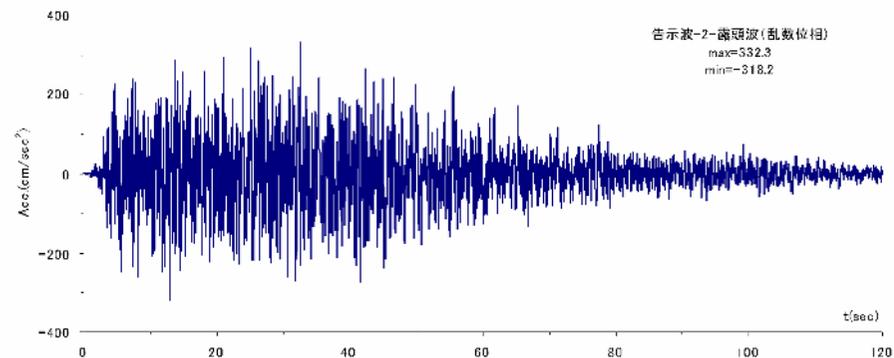


告示波の目標スペクトル(LV2)
(告示第1461号)

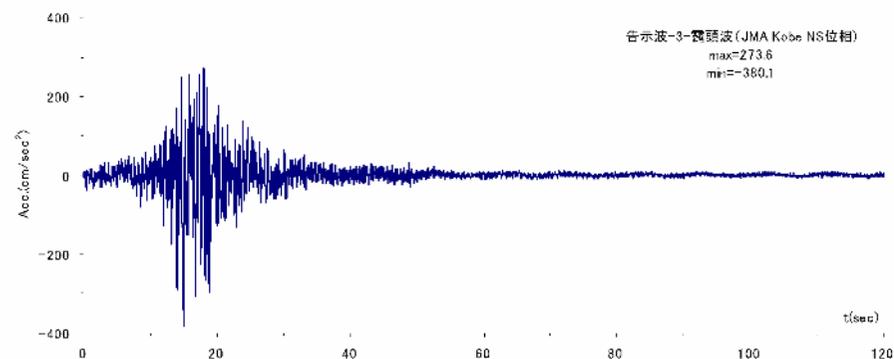
基盤に接地しているので
原波で応答解析



告示波1
(乱数位相)



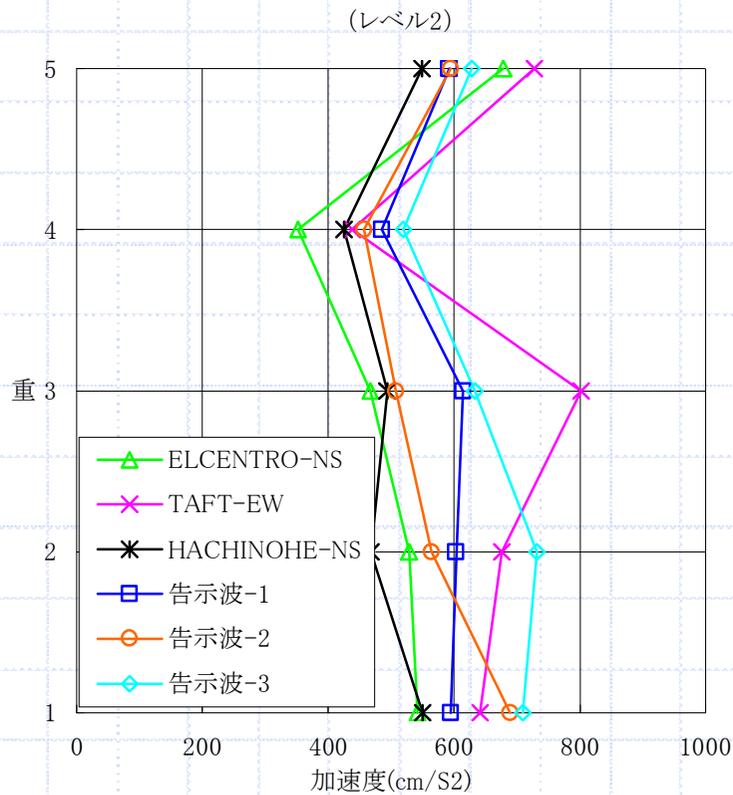
告示波2
(乱数位相)



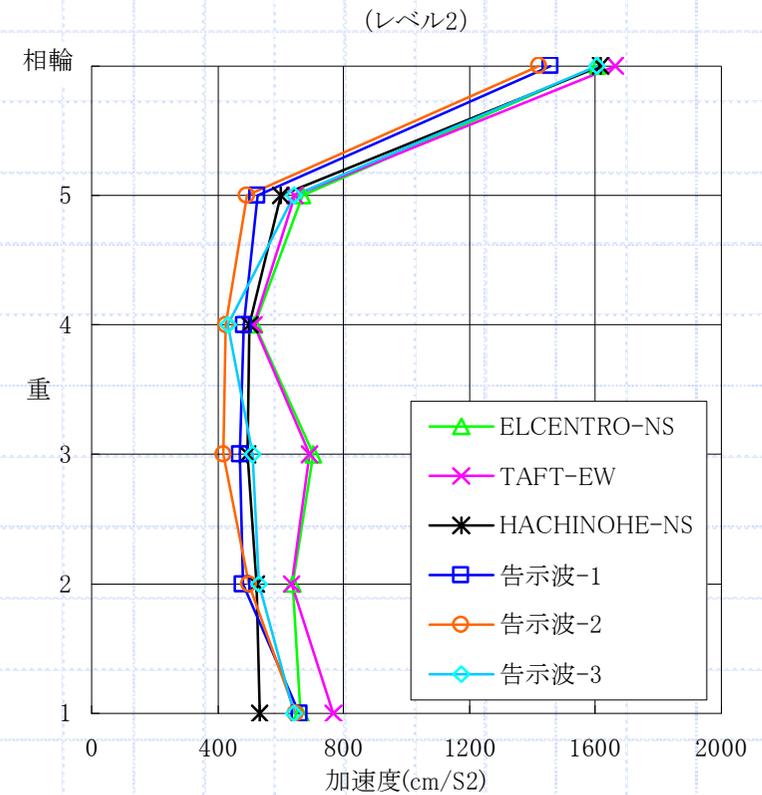
告示波3
(JMA神戸位相)

■解析結果(1):応答加速度

相輪は最大1.65G程度
→設計は1.7Gの外力を想定

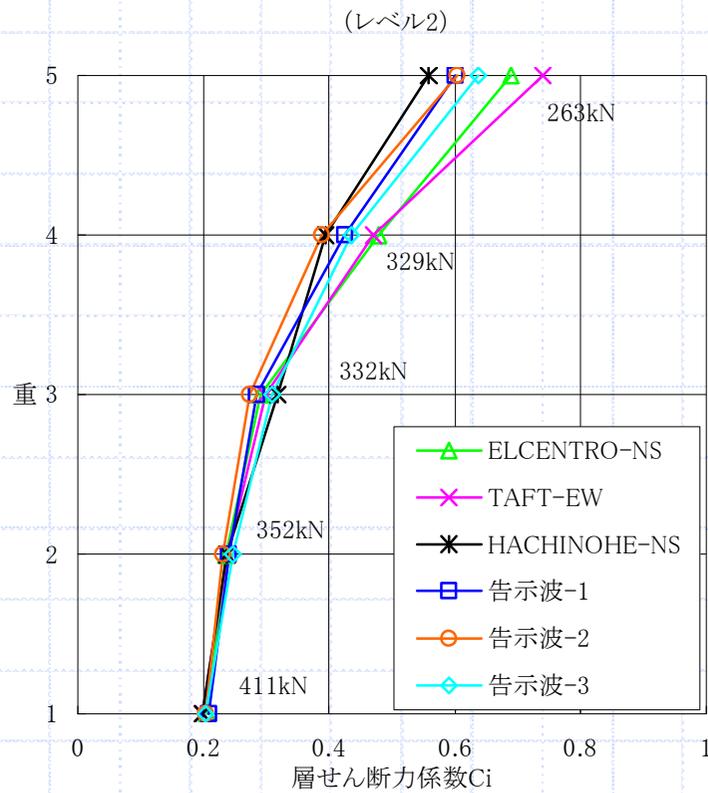


【塔身のみ(CASE1)】



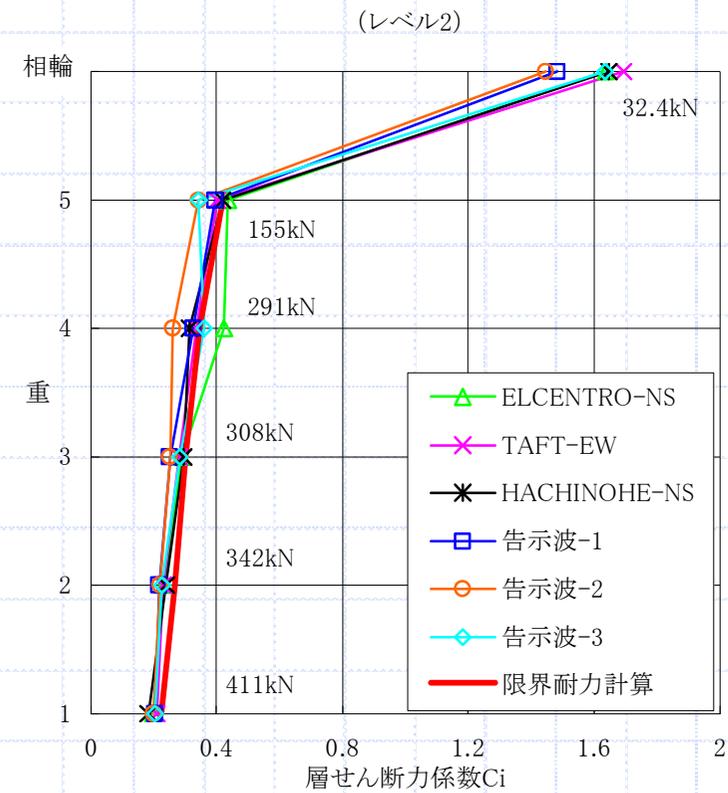
【塔身+心柱(CASE2)】

■解析結果(2):応答層せん断力係数



CB=0.209

【塔身のみ(CASE1)】

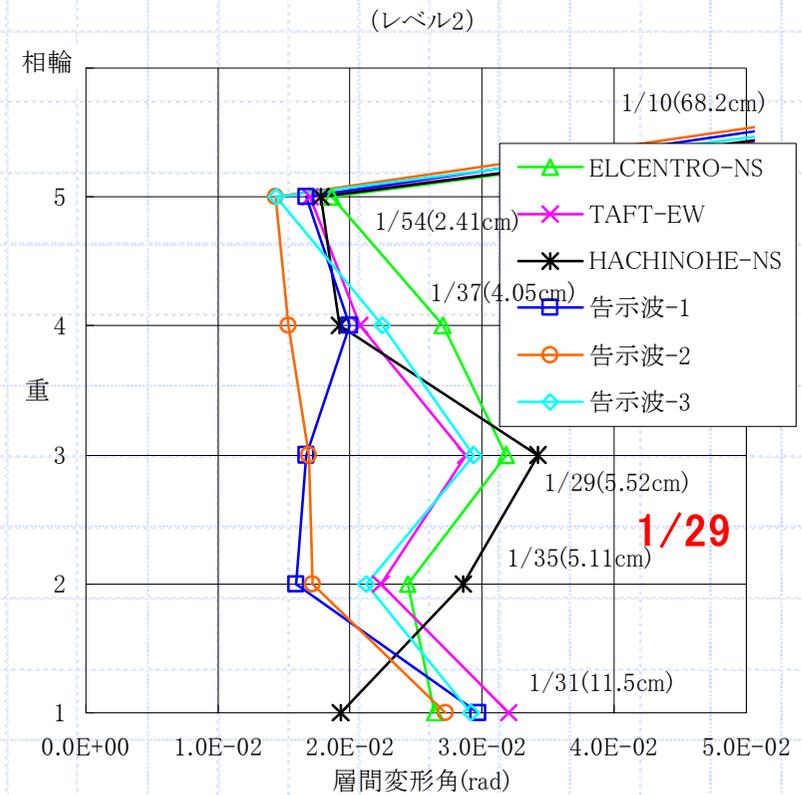
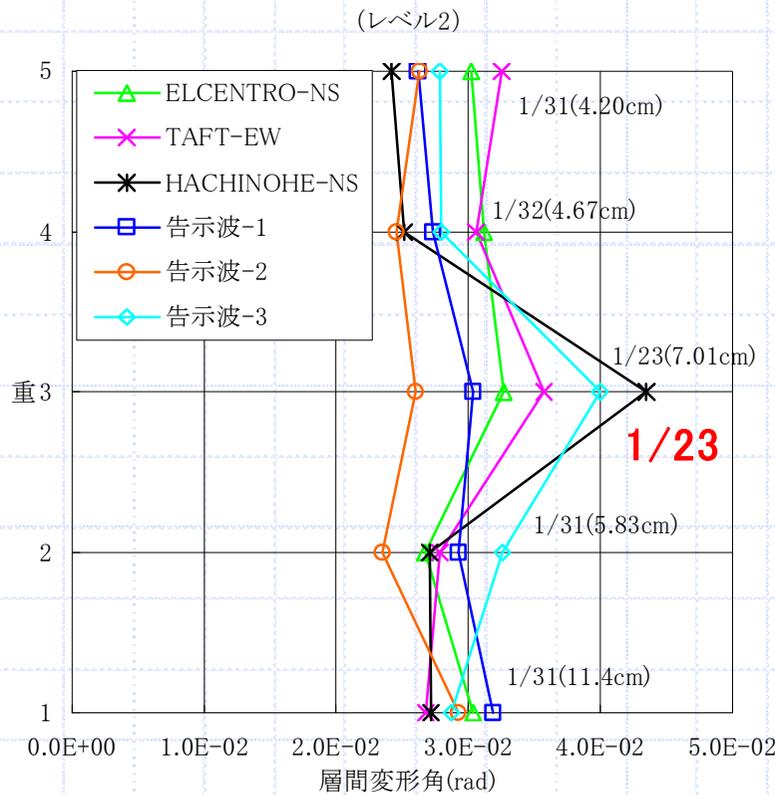


CB=0.210

【塔身+心柱(CASE2)】

■解析結果(3):応答層間変形角

相輪は最大1/10



【塔身のみ(CASE1)】

【塔身+心柱(CASE2)】

■解析結果のまとめ

- ・心柱を塔身のみモデルに付加することにより、建物の応答と変形は全体的に小さくなり、**心柱による制振効果が現れた。**
- ・心柱を塔身に付加したモデルでは、1)固有周期の長周期化、2)2次モードの卓越、3)1次固有周期と2次固有周期の近接といった傾向がみられた。
- ・レベル2応答時の建物の周期は、1.7～2.0秒の範囲にあることを確認した。(弾性時1.2秒)

7.4 各層の転倒の検討と補強について

■検討内容

建物に作用する地震力と風圧力によって、各層が転倒するかどうかの検討を行う。

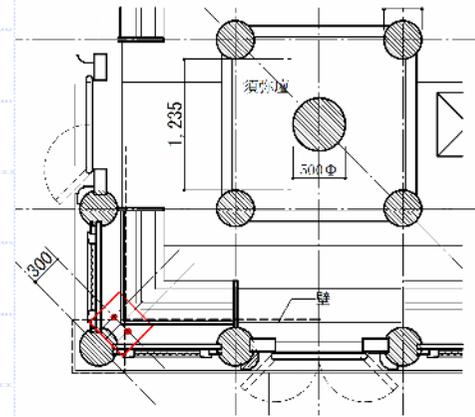
■検討結果

限界耐力計算と応答解析共に、初重～四重で地震時の転倒モーメントが建物の抵抗モーメントを上回り、引抜力が発生する。

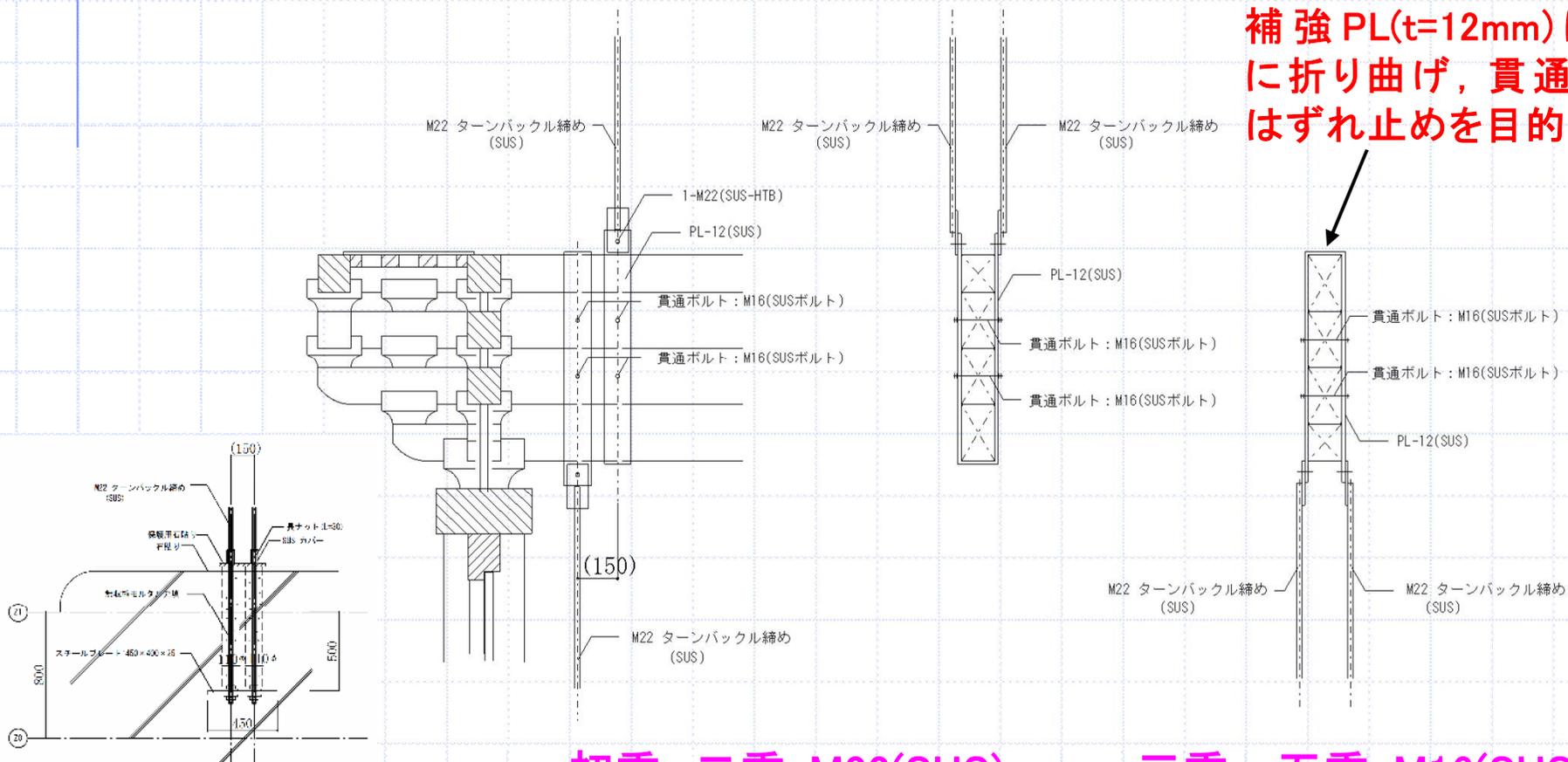


ターンバックルによる補強を行う。

■補強詳細図



隅繋肘木位置にターンバックル補強を行う。



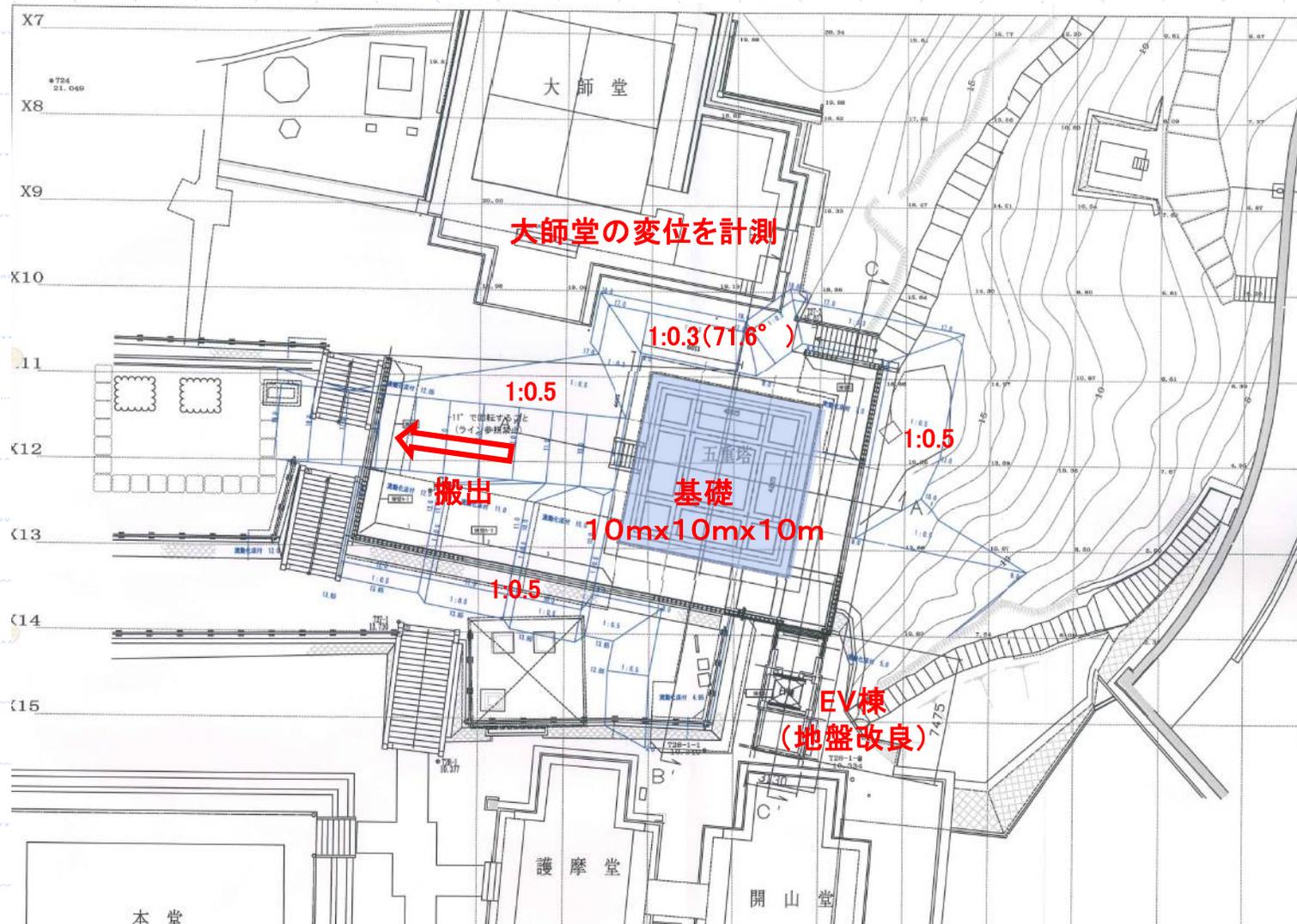
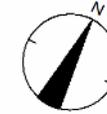
初重, 二重:M22(SUS)

三重~五重:M16(SUS)

§ 8 傾斜地盤における基礎の施工

8.1 掘削工事

◆ 掘削平面



◆ ソイルネイルによる法面補強

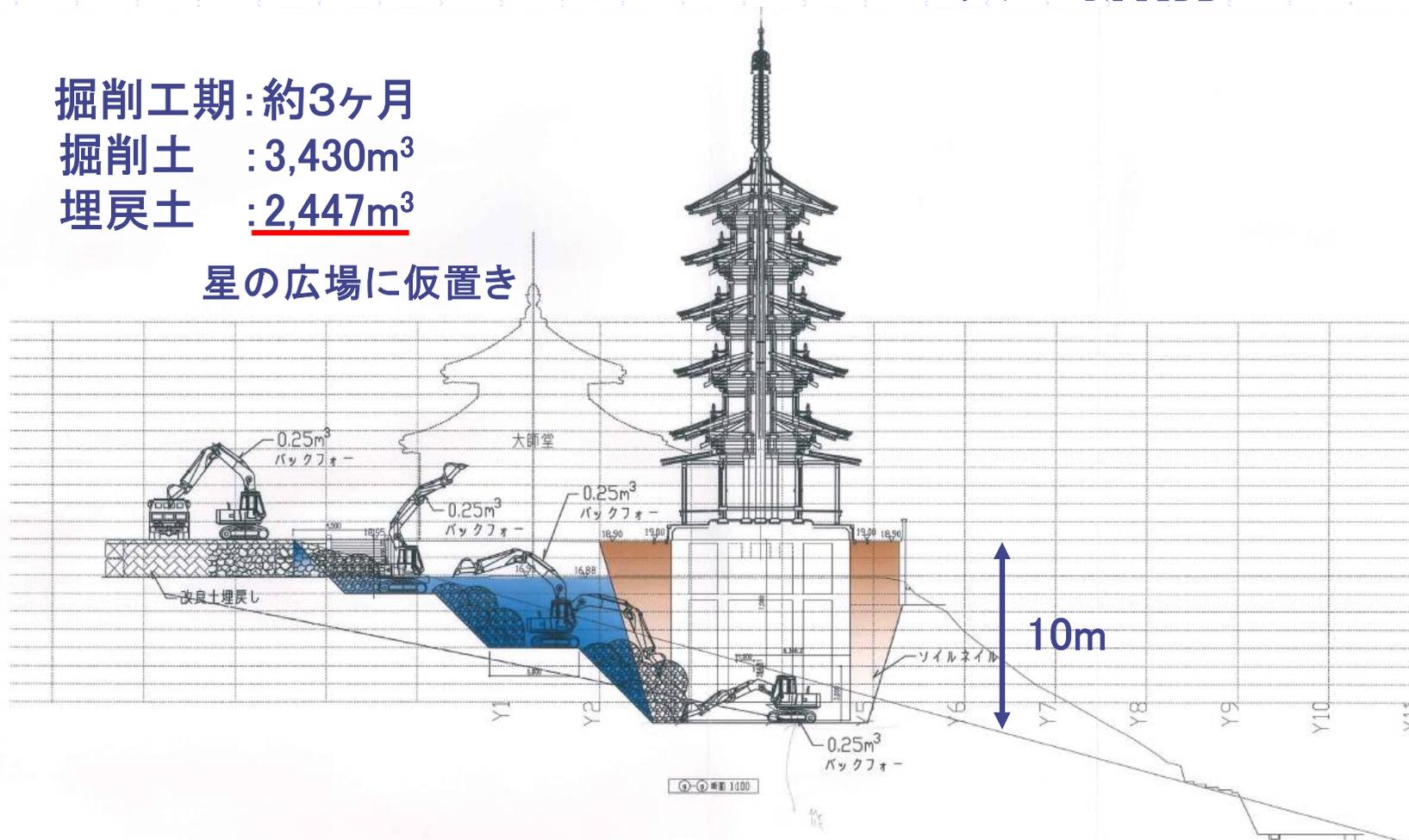
◆ バックフォーによる1.5m × 7次の掘削

掘削工期：約3ヶ月

掘削土：3,430m³

埋戻土：2,447m³

星の広場に仮置き



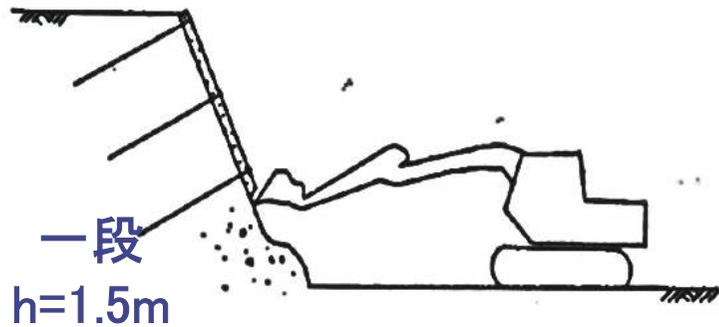
8.2 切土法面補強

◆ ソイルネイリング工法を採用

- 境内で高さ10mの施工実績（寺務所建設時）
- 小型重機・地形の険しい場所で有効
- 作業の騒音・振動が少ない
- 地盤そのものを壁体として利用
 - ◆ 補強された土が重力式擁壁のような働きをして、法面を安定させる。
 - ◆ 法勾配を立てることができる
 - ◆ ネイルは施工後も残留する



◆ 手順



①掘削・法面整形



②金網設置・モルタル吹付

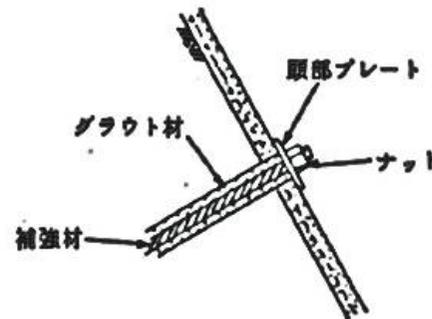


③削孔(φ65)



④セメントグラウト注入

早強セメント
圧縮強度 18N/mm²



⑤鋼棒挿入・締付・頭部処理

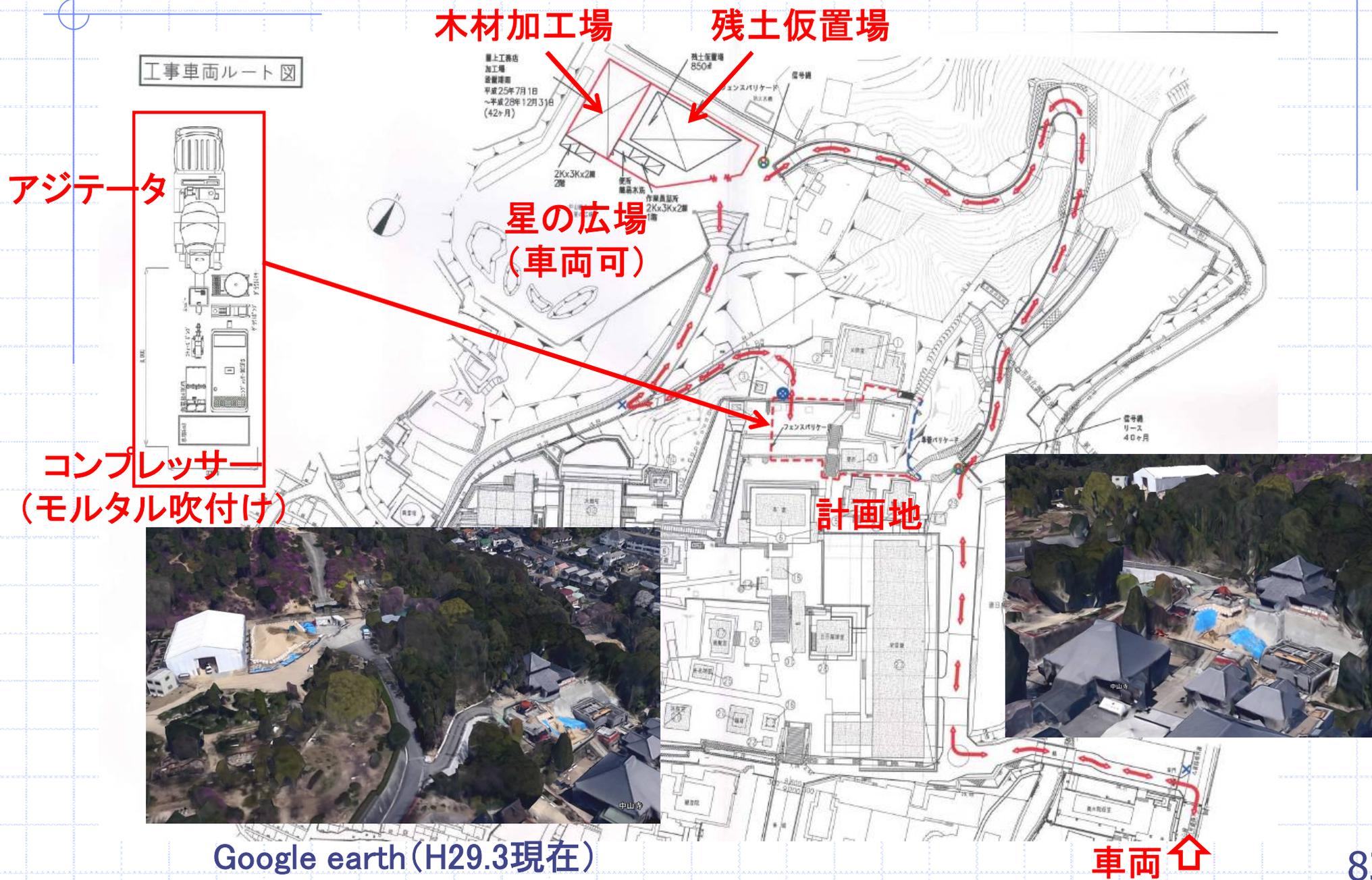
- 溶接金網 3.2mm 100x100
- 吹付モルタル t=7cm以上
- 鋼棒(ネイル) ねじ節鉄筋
D22(SD345)
- 頭部プレート スペーサー取り付け
150x150x9(SS400)
- 水抜きパイプ 3m²/個

◆ 施工管理基準

| 工種 | 管理項目 | 管理基準値 | 備 考 |
|--------|------------|----------------------------------------------|-------------------------------|
| 法表面保護工 | アンカーピン設置本数 | φ16×400 3本/10㎡以上 φ9×200 15本/10㎡以上 | |
| | 金網重ね寸法 | 10cm 以上 | |
| | 水抜きパイプ設置 | 1箇所/3㎡以上 | VP40 |
| | 吹付モルタル強度 | 圧縮強度試験※ <u>σ7 ≥ 15N/mm² 以上</u> | 供試体(φ50×100) 1回/500㎡(3本/回) |
| 鉄筋挿入工 | ネイル材長さ | 設計長以上 | |
| | 削孔位置 | 上下左右 100mm 以内 | |
| | 削孔角度 | 設計値±2° 以内 | |
| | 削孔長 | 設計長以上 | |
| | 注入材の強度 | 圧縮強度試験※ <u>σ3 ≥ 18N/mm² 以上</u> | 供試体(φ50×100) 1回/段(3本/回) |

※圧縮強度試験実施施設

8.3 工事車両ルート

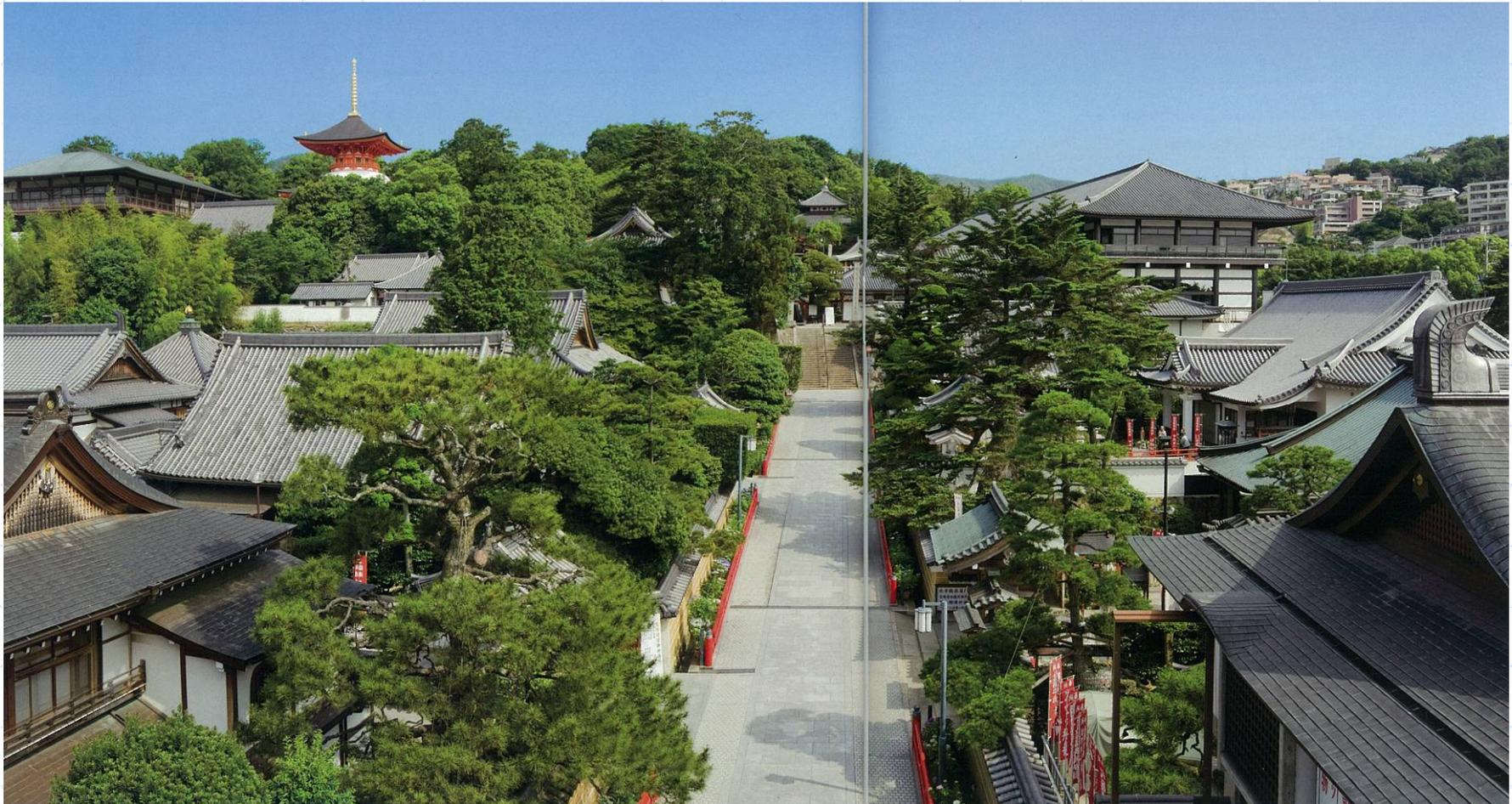


Google earth (H29.3現在)

§9 現場写真

■中山寺ー山門より山内を望む

「中山寺のパフレット」より



■根切り工事 (13/12/12時点)

①



②



③



④



SGL-約3m掘削

東側斜面

■資材置場-星の広場(13/12/12時点)

①



②



③



④



四天柱・側柱

背割り

■現場状況 (14/02/17時点)

SGL-約10m掘削(ほぼ完)

①



②



③



ソイルネイルの残骸

④



SGL-約10m掘削

■現場状況

基礎床付け

①



基礎配筋

②



コンクリート打設

③



埋戻し

④



■現場状況

基壇配筋

①



素屋根

②



初重組立

③



心柱

④



■現場状況

初重の柱と板壁

①



初重頭貫

②



初重台輪

③



台輪上の大斗

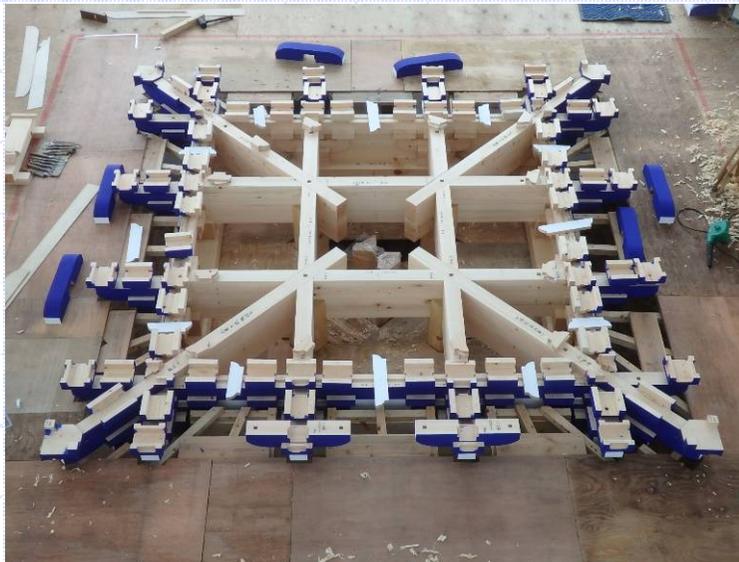
④



■現場状況

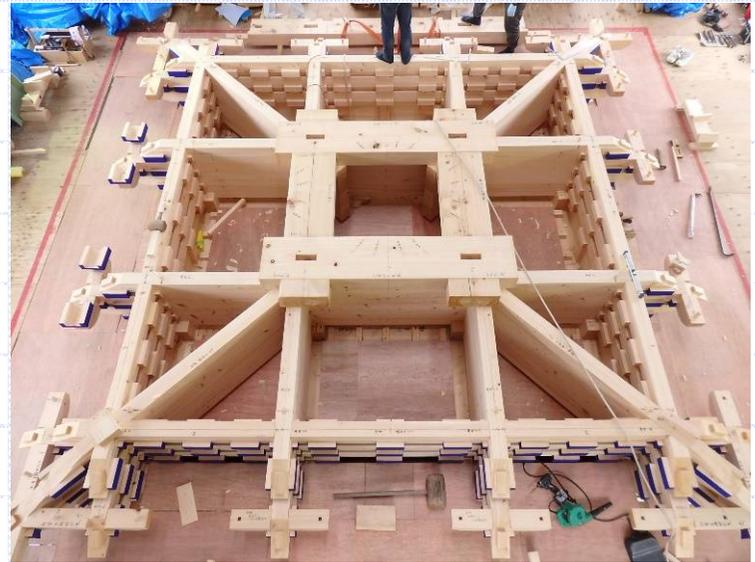
4段の肘木

①



四天柱の柱盤

②



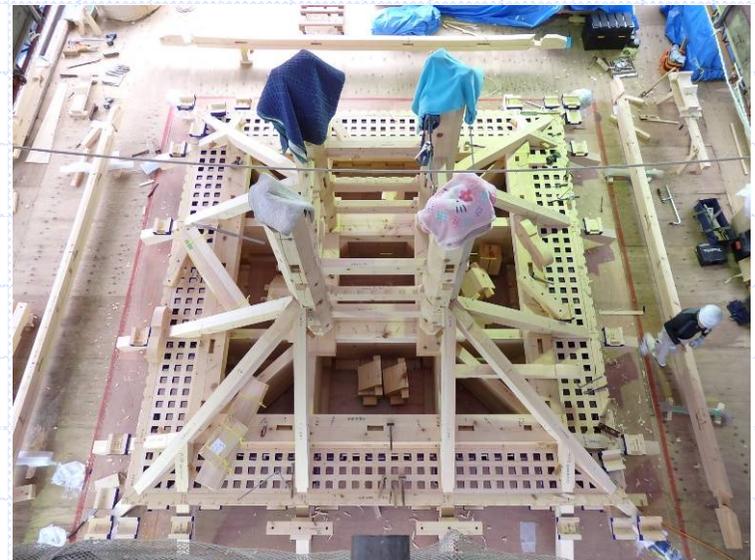
柱盤上の四天柱

③



尾垂木

④



■現場状況

丸桁と丸桁桔木

①



地垂木と化粧隅木

②



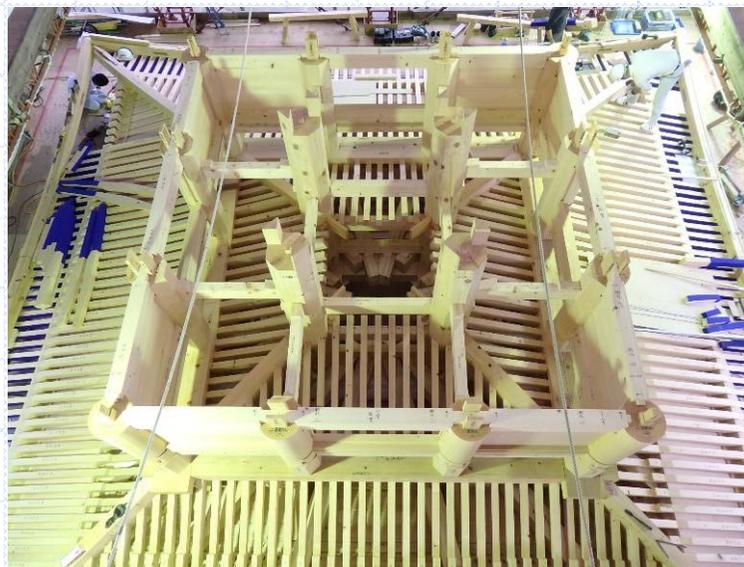
側柱の柱盤

③



二重の柱と板壁

④



■現場状況

① 桔木と野垂木



② 野地板



③ 土居葺



④ 瓦葺き



■記名板



五重の小屋組

■竣工直前 (16/7/10時点)

① 極彩色(台輪)



② 群青色(アクリル塗料)



③ 様々な生き物の飾り瓦



④ 風鐸



■竣工直前 (16/7/10時点)

①



②



③



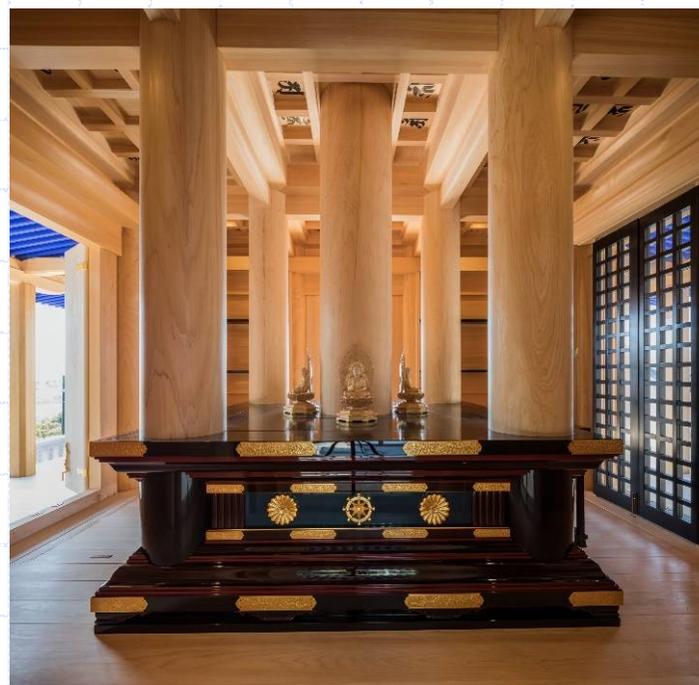
④



固有周期計測
大阪大学 宮本先生
奈良女子大 瀧野先生

軒先の瓦細工

■竣工



ご清聴ありがとうございました。
引き続き、ビデオをご覧ください。

