

クレジット:

UTokyo Online Education 歴史的建築工学 2020 木林 長仁

ライセンス:

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。



2020.12.02

歴史的建築工学講義

歴史的木造建築と構造診断・補強

－ 古代建築の力学と現代技術 －



(一財) 日本建築センター
木林 長仁

歴史的木造建築と構造診断・補強

－ 古代建築の力学と現代技術 －

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術

歴史的建築・文化財の基本的考え方

文化庁, 「文化財建造物等の地震時における安全性確保に関する指針」, 1996年

文化財建造物：形式や価値の多様性

管理・活用法：ソフトウェアの対策

安全性の確保（人命保護）

被害最小化

維持管理や使用方法の改善
補強を伴う修理
周辺環境の整備
防災施設等の充実



文化財的価値の保存

補強小修理の遵守事項

主要部材（構造・意匠）を損傷しない
従来仕様の尊重
痕跡（証拠）の保存
付加的補強は将来撤去可能な方法



歴史的建築・構造改修の歴史

年 代	1850	1900	2000
大地震		1891 濃尾地震	1923 関東大震災 1946 南海地震 1948 福井地震 1968 十勝沖地震 1978 宮城沖地震 1995 阪神大震災 2011 東日本大震災
法令制定	1868 明治時代	1924 市街地建築法	1950 文化財保護法 建築基準法 1981 新耐震設計法 2001 木造診断法 2003 文化財診断法
改修と構造補強	部分的構造補強 劣化部位の改修が主	部分的構造補強 による復旧	耐震診断・補強普及 本格的構造解析適用
			

歴史的木造建築と構造診断・補強

- 古代建築の力学と現代技術 -

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術

古代伝統架構の力学機構

構造形式と力学機構

伝統建築の構造形式

大きな勾配屋根と深い軒構造

太径の天然木材（ヒノキ）を使用

梁と支持する斗組・柱の軸組で構成

力学機構

軸組は剛体抵抗的な積重ね構造

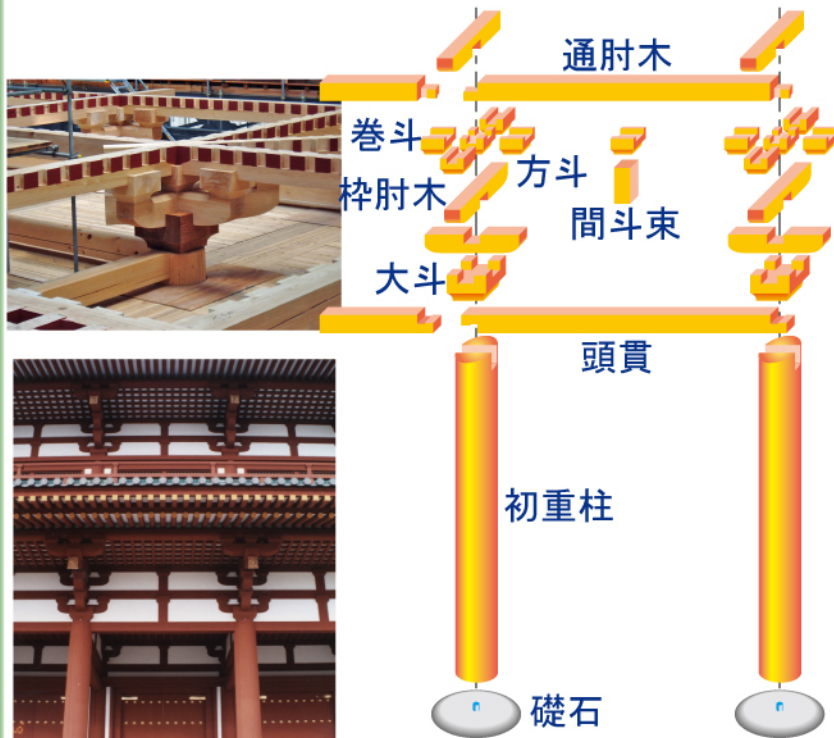
軒架構は跳出し梁構造

太径材の寸法により安定性確保



古代伝統架構の構造形式と力学機構

軸組架構



基本的に積重ね構造、嵌合継手

不具合事例



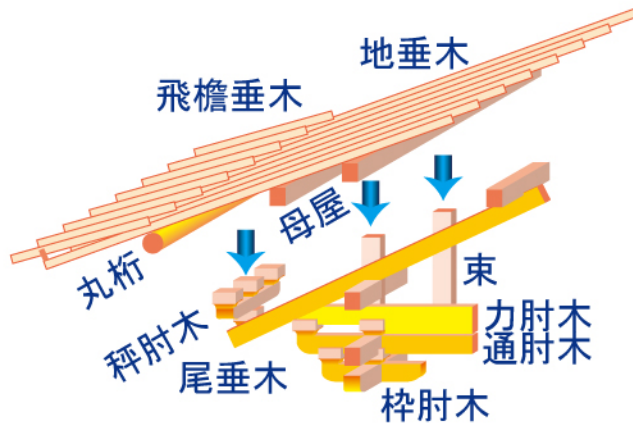
柱頭仕口の折損・釘孔腐食



柱脚底面の蒸れ腐り

歴史的木造架構の力学機構

軒架構の構成



基本的に単純梁・跳出し梁構造

不具合事例



軒先の垂下変形



隅軒の束補強

軒先の垂下変形が深刻→束補強

架構の力学メカニズム：法隆寺金堂



法隆寺金堂外観・南西面

建物形状



- ・ 入母屋造・本瓦葺（裳階付き）
- ・ 棟高さ：15.42m (50.05尺)
- ・ 5間(16.18m)×4間(10.79 m)
- ・ 床面積：16.18×10.79 = 175 m²
- ・ 670年頃？造営

架構の力学メカニズム：法隆寺金堂

隅軒の垂下：束補強の全景



- ・ 隅尾垂木を束で補強
- ・ 元禄(1698年)修理時
- ・ 隅尾垂木,隅木：一段
- ・ 配付無し

隅軒の垂下：詳細



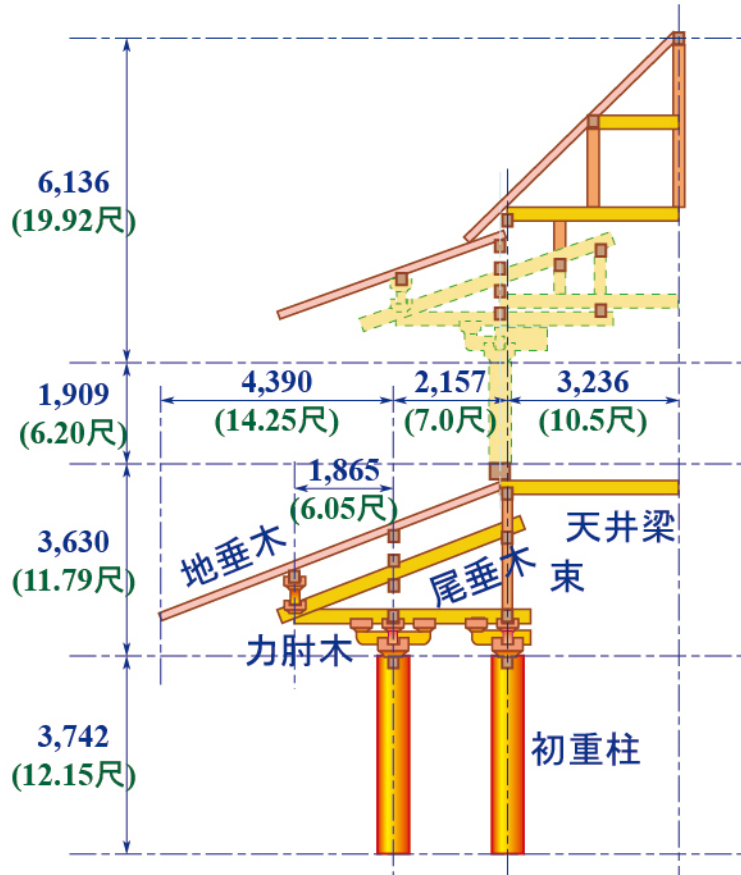
隅尾垂木,隅木は45° 方向一段のみ、配付無し



隅尾垂木を束で補強（龍の彫刻付き）

架構の力学メカニズム：法隆寺金堂

軒架構の力学モデル



軒架構の構成部材



- ・二手先組物・一軒
- ・軒寸法 : 4.39m
- ・初重柱高 : 3.74m
- ・二重柱高 : 1.91m
- ・柱径脚部 : ϕ 616

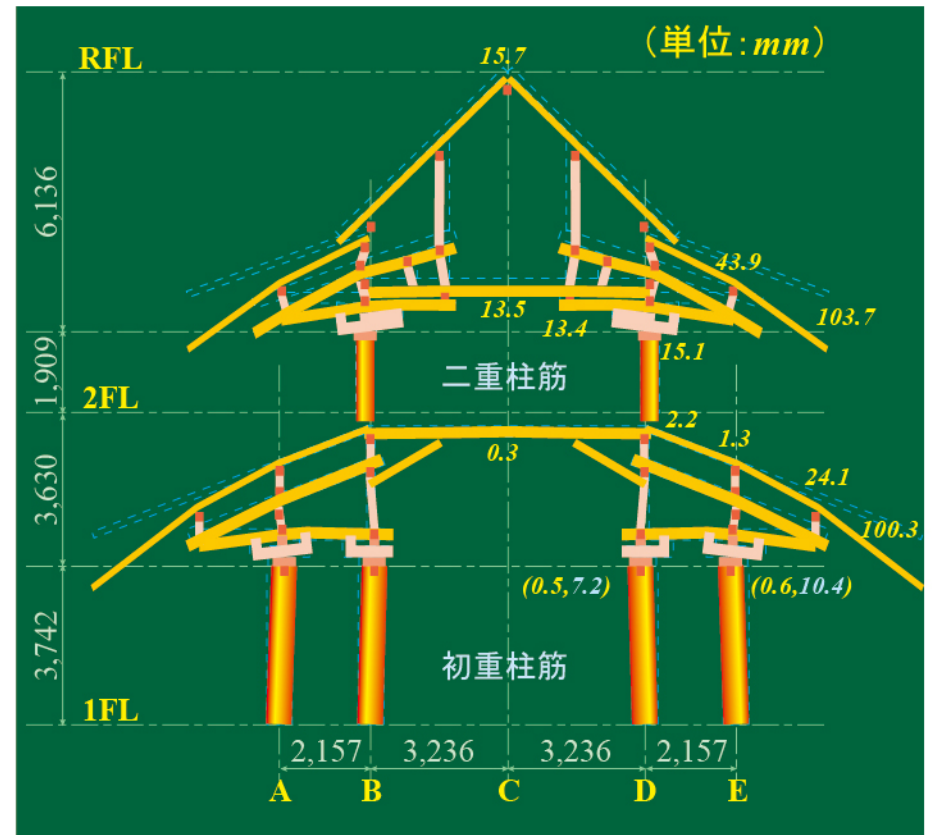
架構の力学メカニズム：法隆寺金堂

架構の解析モデル



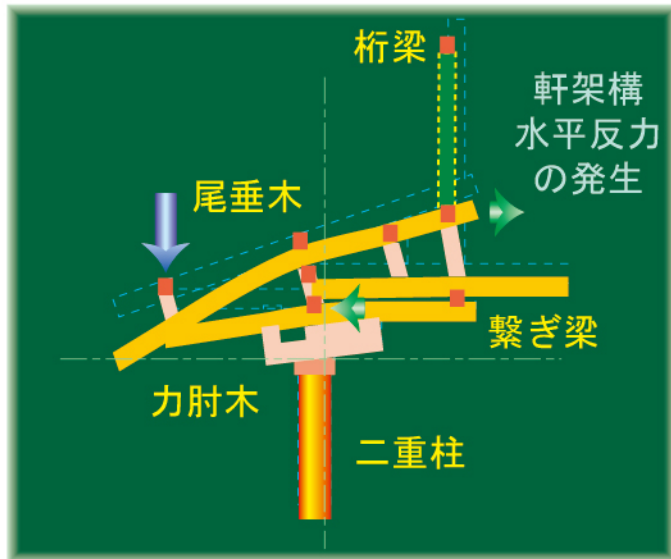
- ・全体的な変形量は比較的小
- ・二層の沈下変形は小
- ・垂木のたわみ変形は過大

軒架構の解析結果



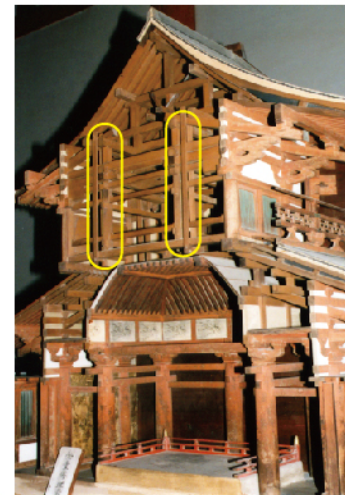
架構の力学メカニズム：法隆寺金堂

軒架構の変形解析



- ・二重尾垂木は天秤型で構造的には不安定
- ・斗組下部は繋ぎ梁により水平変形を拘束
- ・尾垂木尻は繋ぎ梁が無いいため水平移動

軒架構の垂下対策の歴史

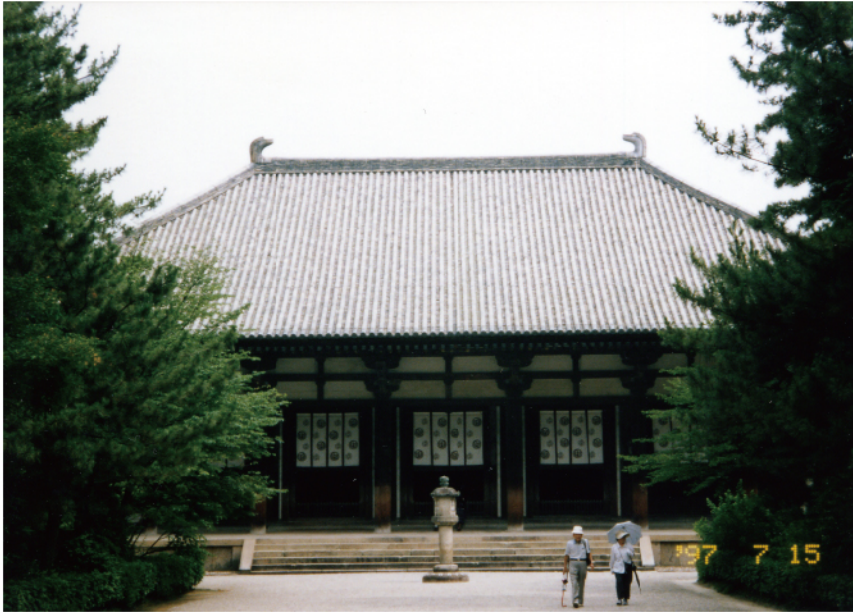


昭和修理以前は挟束補強（模型）

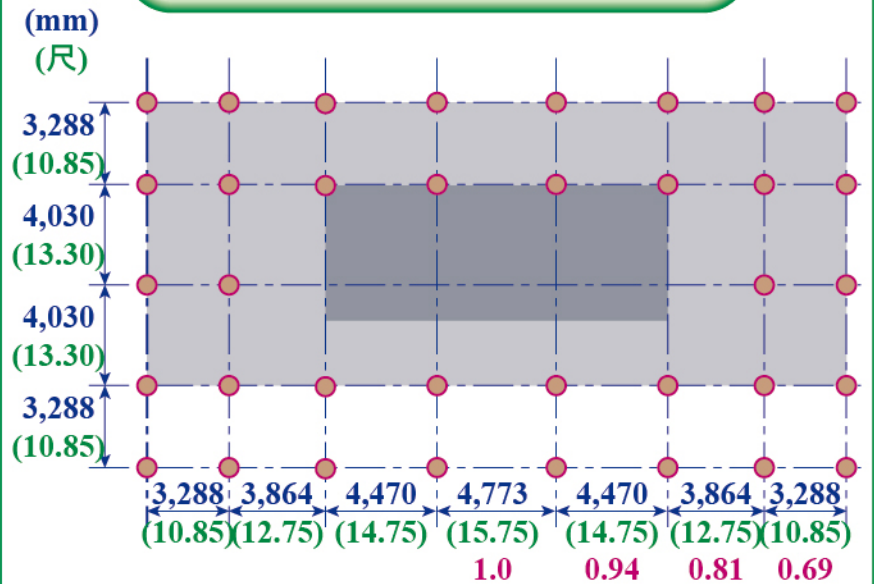


昭和修理でターンバックル補強

唐招提寺金堂：平成大修理



建物形状

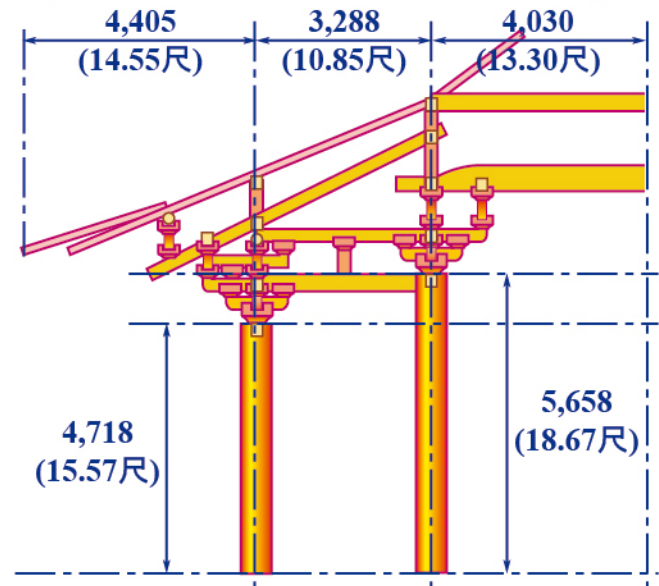


- ・ 寄棟造・本瓦葺
- ・ 棟高さ：15.66m (51.68尺)
- ・ 7間(28.01m)×4間(14.64 m)
- ・ 床面積：28.01×14.64 = 410 m²
- ・ 776年頃造営

唐招提寺金堂：平成大修理



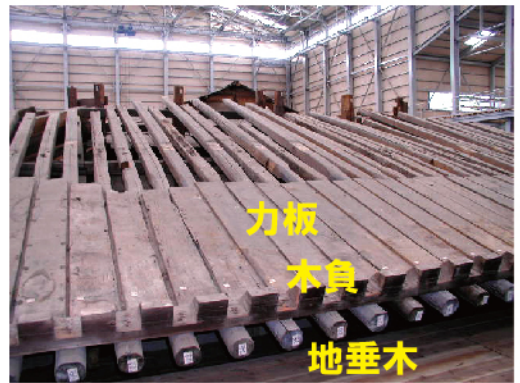
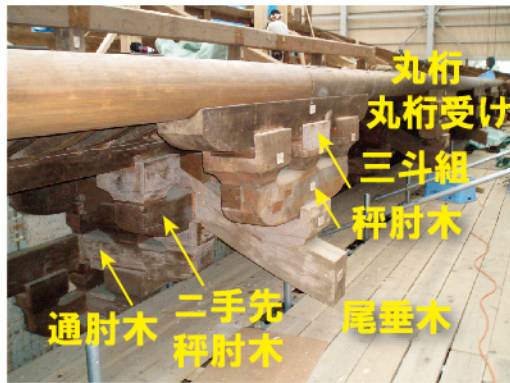
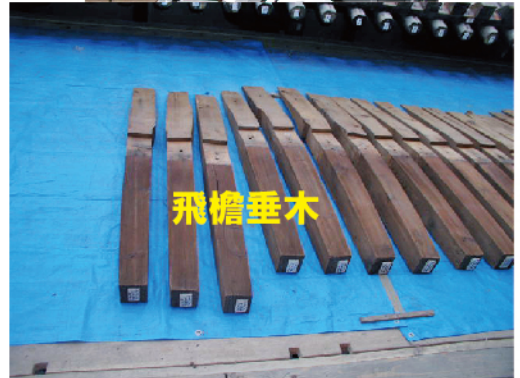
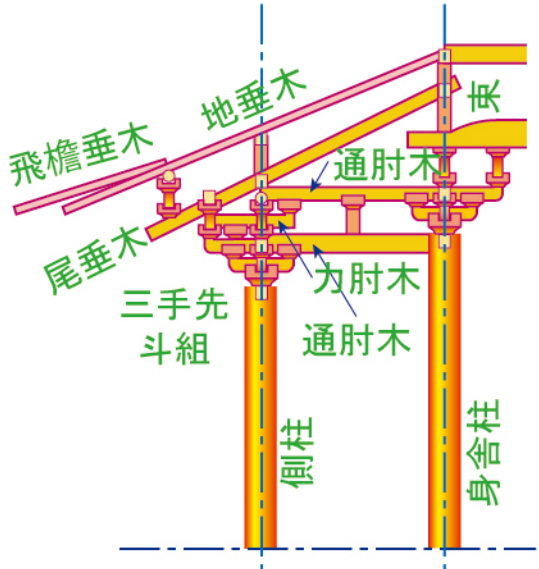
軒架構



- ・ 三手先組物・二軒
- ・ 軒寸法 : 4.40m (14.55尺)
- ・ 側柱高 : 4.72m (15.57尺)
- ・ 入側柱高 : 5.66m (18.67尺)
- ・ 柱径脚部 : ϕ 576 (1.9尺)

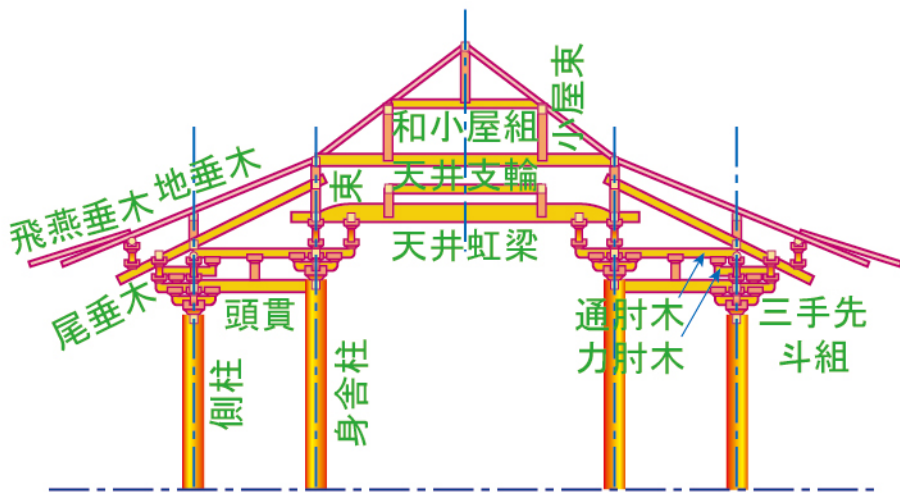
唐招提寺金堂：平成大修理

軒架構の構成



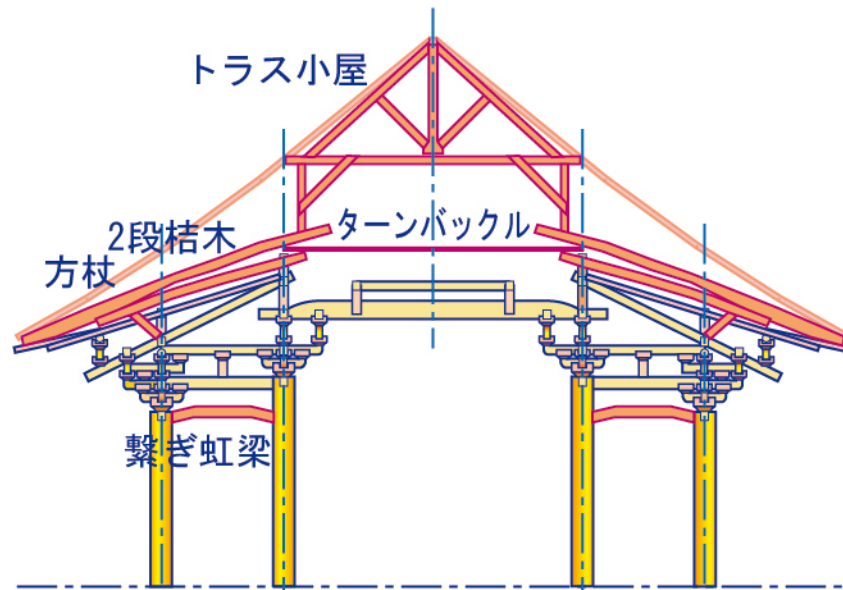
唐招提寺金堂：平成大修理

当初の架構形状



軒架構
1/10模型

修理前の架構形状



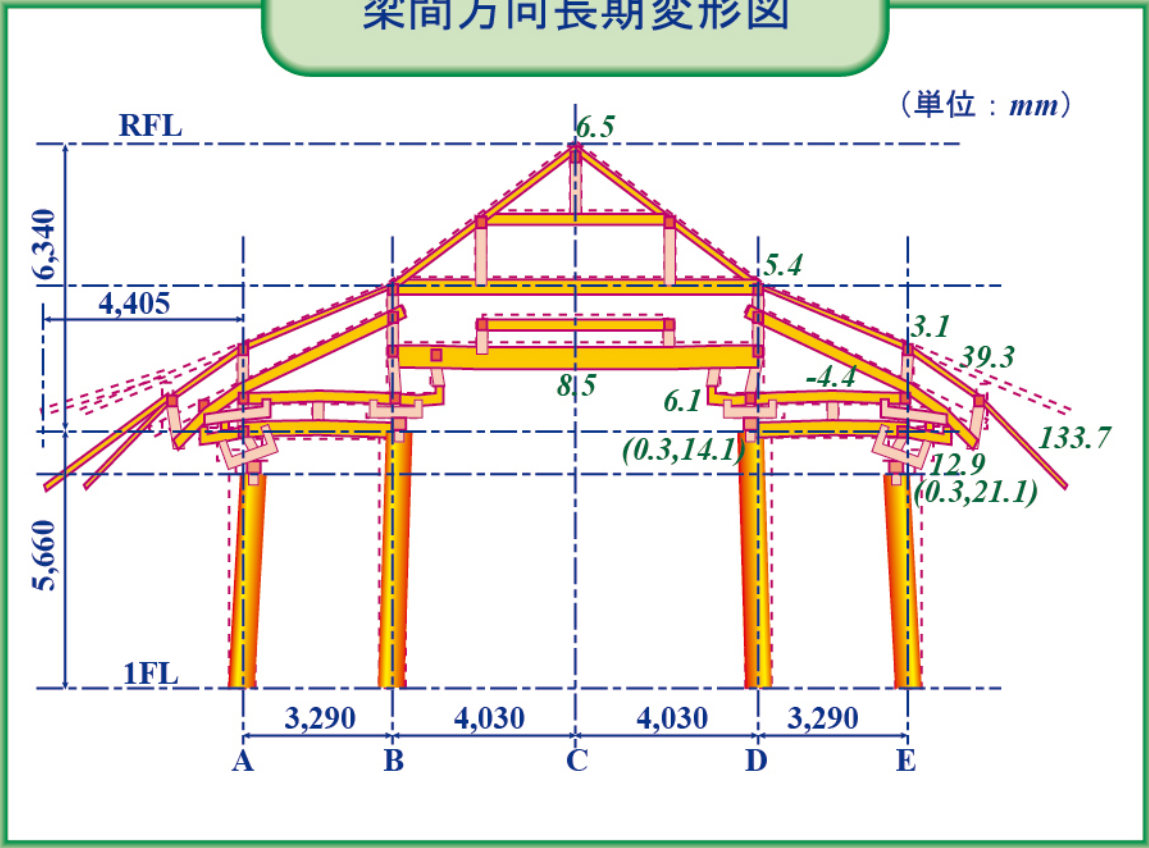
全体架構
1/10模型

唐招提寺金堂：平成大修理

解析モデル図

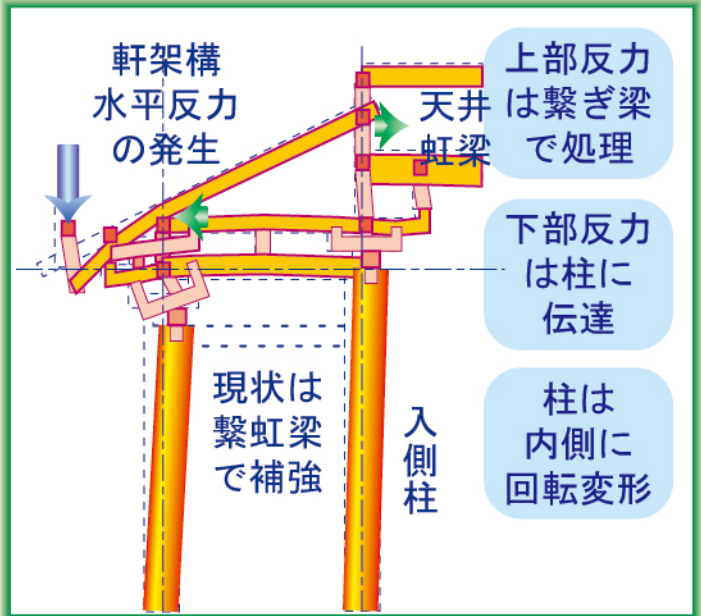
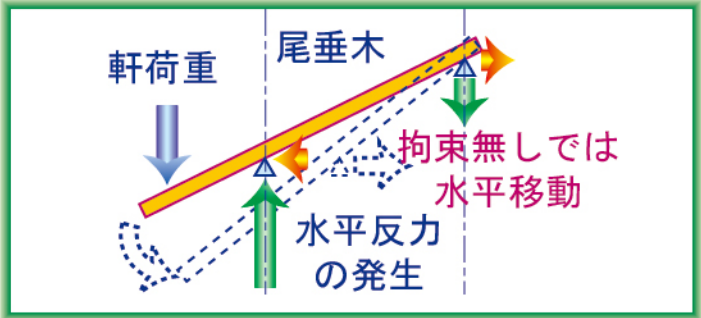


梁間方向長期変形図



唐招提寺金堂：平成大修理

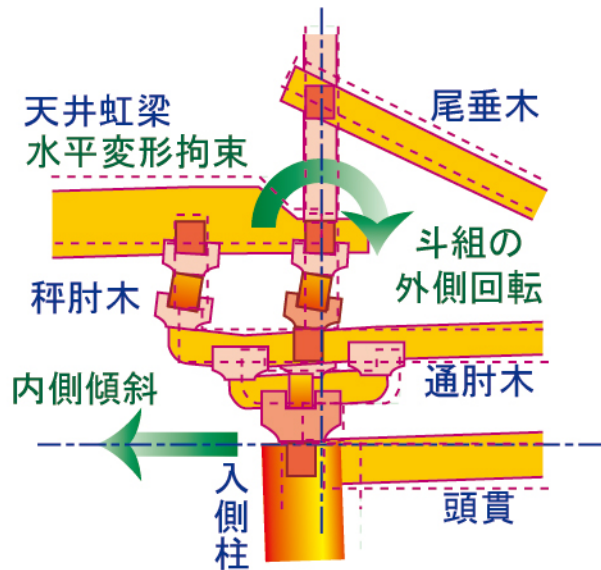
軒架構と柱傾斜変形



- ・ 軒架構支点のレベル差により水平反力発生
- ・ 柱は内側に倒れ変形
- ・ 斗組は外側に回転

唐招提寺金堂：平成大修理

天井虹梁支持部の変形



- ・斗組上部は天井虹梁により水平変形を拘束

- ・柱の内側傾斜により斗組下部は水平移動

- ・斗組は回転変形を発生



- ・天井虹梁支持斗組の内側への迫り出し



- ・斗組および小壁の外側回転

歴史的木造建築と構造診断・補強

－ 古代建築の力学と現代技術 －

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術

木造軸組架構の耐震力学特性

圧縮筋違の変形性状

一般に座屈強度まで弾性を保持

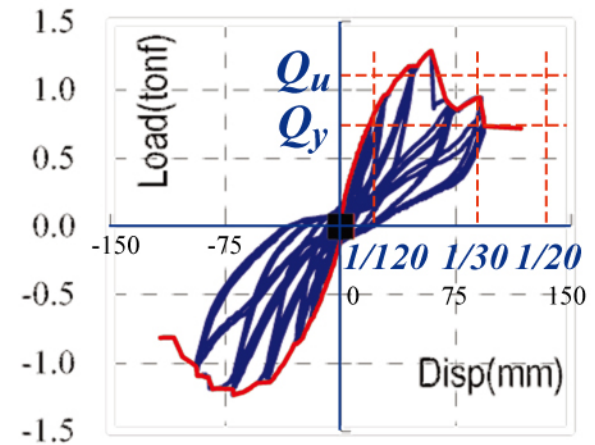
圧縮部材に直交する土台・梁の
圧縮めり込みが卓越する場合
バイリニア型の復元力特性



接合金物

圧縮筋違の座屈による面外変形

復元力特性



座屈曲げ破断



引張破断

木造軸組架構の耐震力学特性

せん断部材の変形性状

一般に接合釘の変形性状に依存
接合間隔等が確保されていると
靱性に富む変形性状

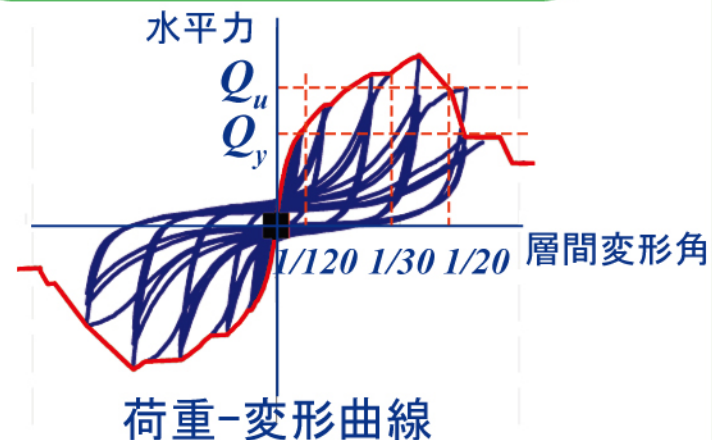
釘接合では初期ガタがなく
初期の段階から有効に働く



合板耐震壁の適用事例

合理的な耐震補強方法
伝統的な仕上げ仕様にも対応

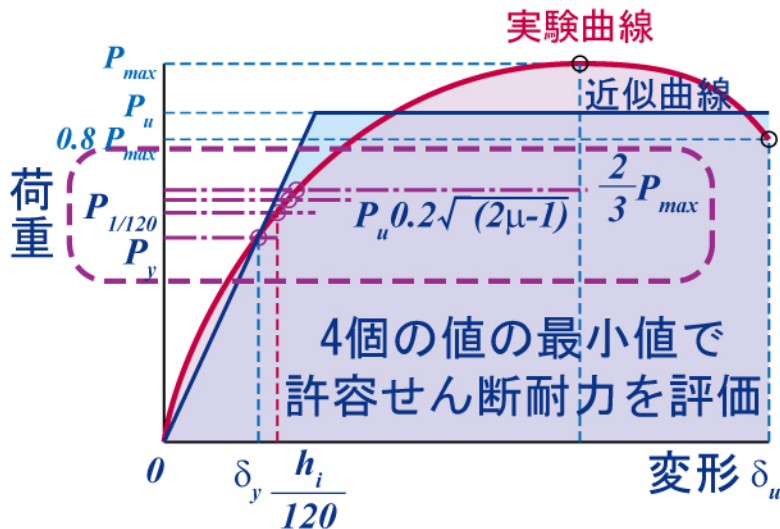
復元力特性



合板耐震壁・釘の変形状態 ($R=50 \times 10^{-3}$)

耐震要素の壁倍率と許容耐力

耐震要素の許容耐力



- ① 最大耐力の2/3 : $\frac{2}{3} P_{max}$
- ② 1/120変形時の強度 : $P_{1/120}$
- ③ 近似曲線の降伏強度 : P_y
- ④ Dsで換算した強度 : $0.2/Ds P_u$

単位長さ許容耐力
= 低減係数 $\times \text{Min.}\{P_1 \sim P_4\}/L$

耐震要素の壁量

壁倍率 = 単位長さ許容耐力 / 1.96 kN/m

壁量 = 壁倍率 \times 壁長さ

許容層せん断耐力 = Σ 壁量 $\times 1.96 \text{ kN/m}$

許容層せん断耐力
 \geq 層せん断力の確認

木造軸組架構の耐震力学特性

主な耐震要素と壁倍率

筋違断面	接合金物	壁倍率
30×90	Zマーク同等品	1.5
45×90	Zマーク同等品	2.0

合板断面	接合金物	壁倍率
$t \geq 9$ 片面	N50-@150	2.5
$t \geq 9$ 両面	N50-@150	5.0



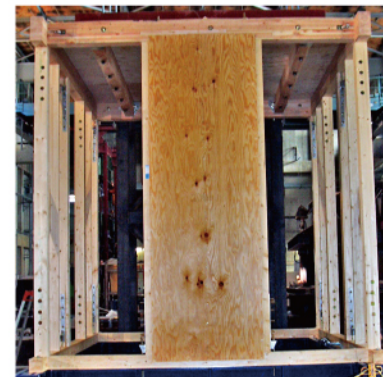
筋違架構



接合金物



併用架構



合板壁架構



接合クギ

歴史的木造建築と構造診断・補強

－ 古代建築の力学と現代技術 －

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

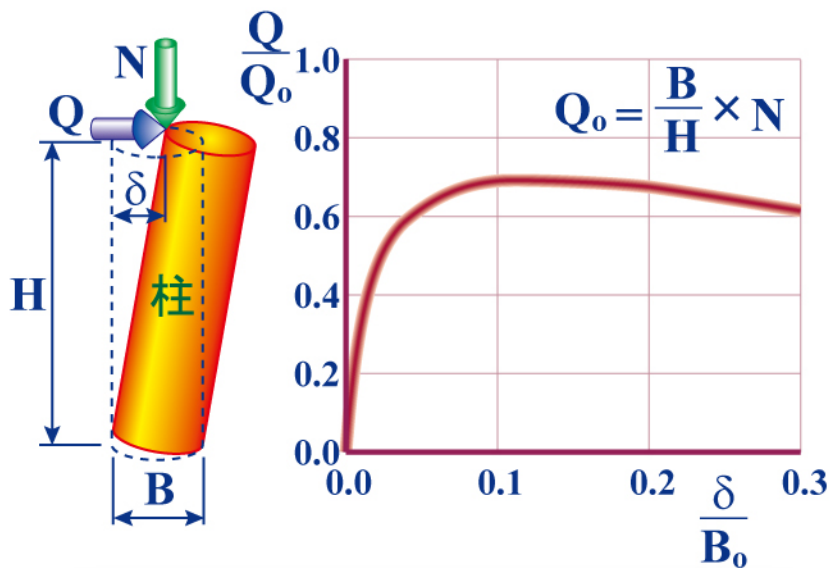
1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術

歴史的木造架構の耐震力学機構

柱の傾斜復元力特性

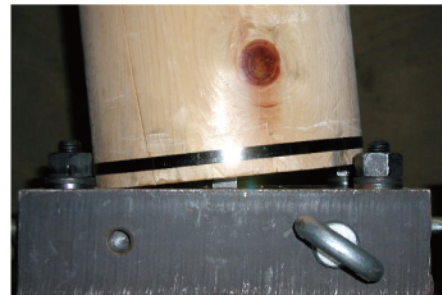
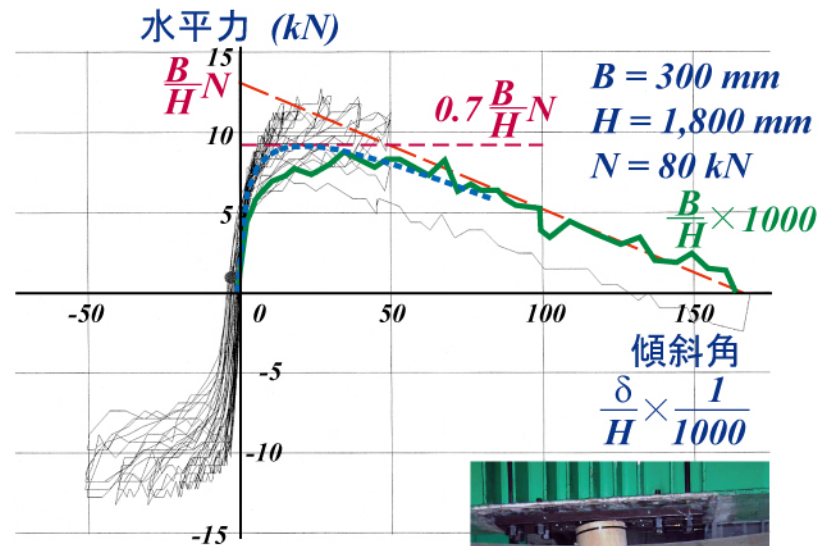


太径柱は大変形時で安定した性状

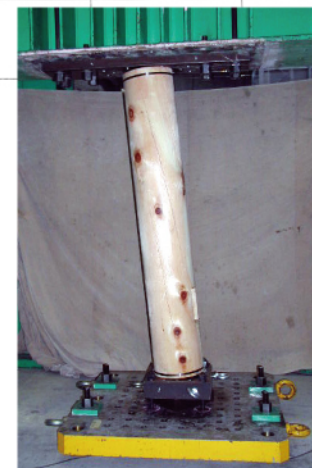
弾性非線形特性で、塑性化は局所

水平抵抗力は0.1 N程度

実験結果



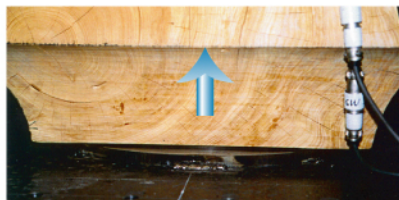
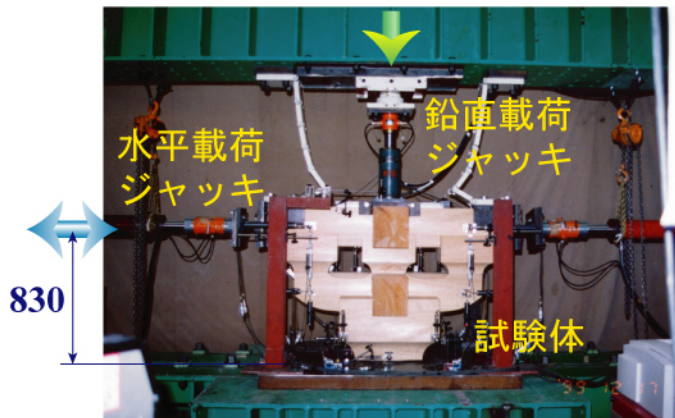
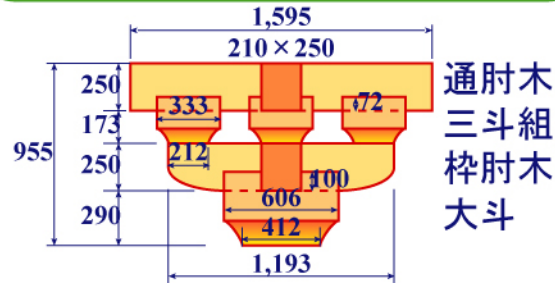
柱脚浮上り



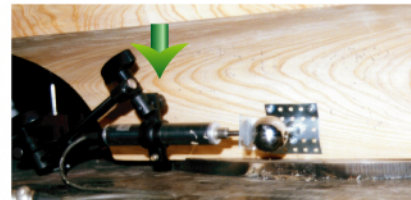
最大強度時変形

傾斜復元力を中心とした耐震力学機構

斗組の傾斜復元力特性

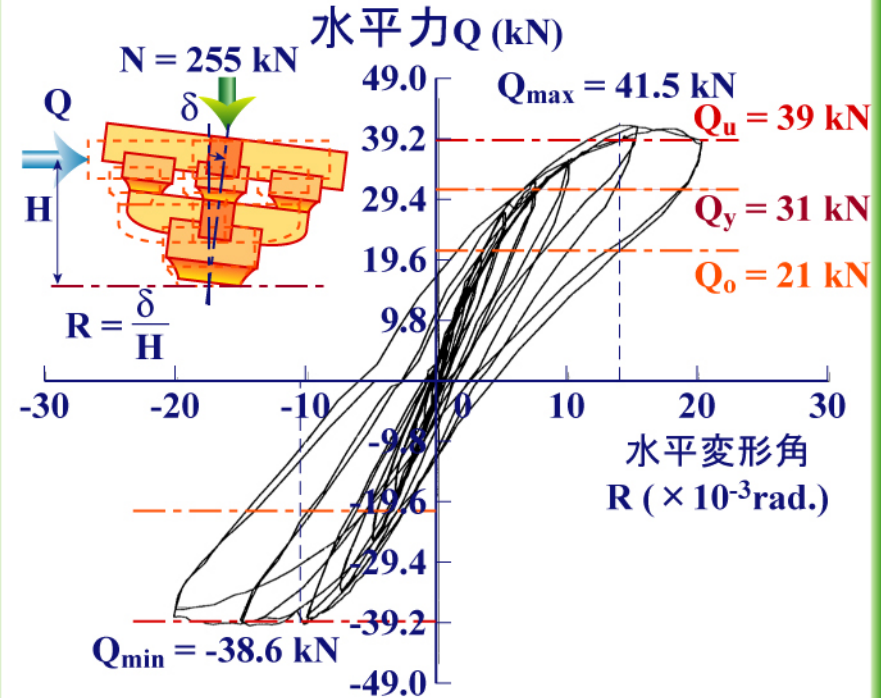


浮上り部



圧縮側めり込み部

実験結果



構成部材せいが低く、紡錘型ループ

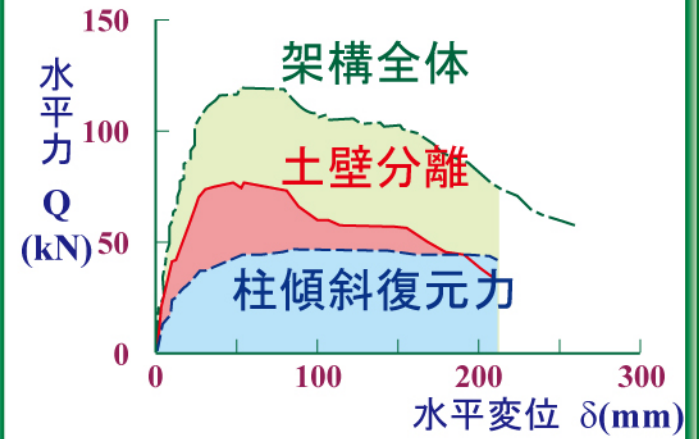
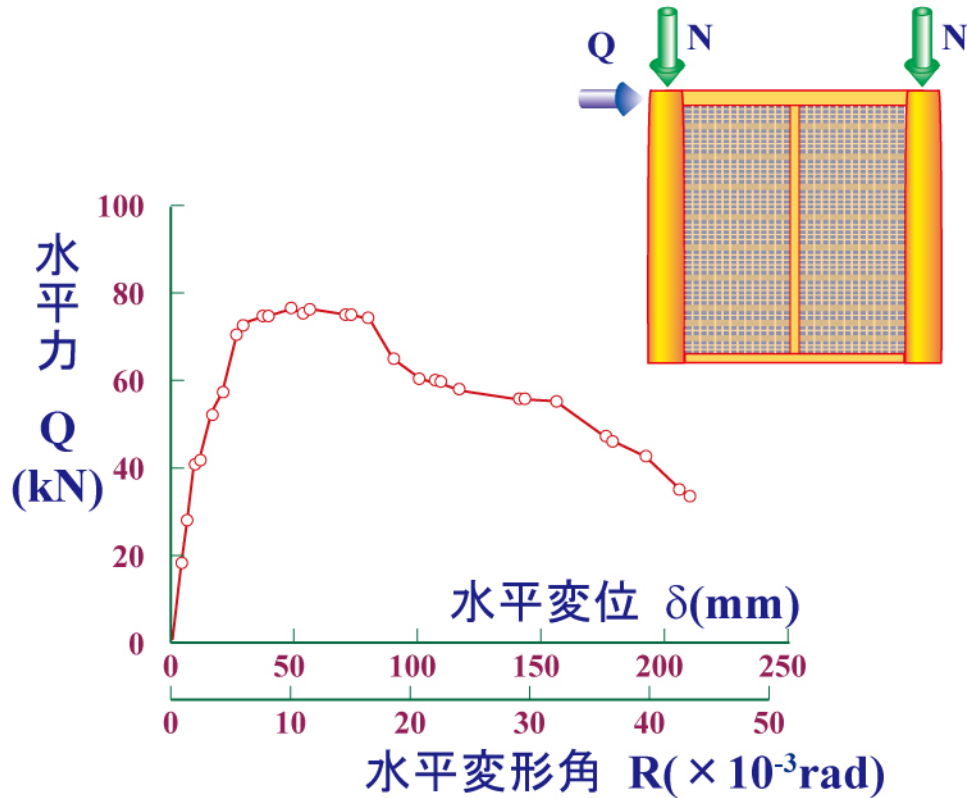
傾斜復元力による強度評価と対応

歴史的木造架構の耐震力学機構

伝統土壁の復元力特性

$$Q_{\max} = 75.5 \text{ kN}$$
$$\tau_{\max} = 0.074 \text{ N/mm}^2$$

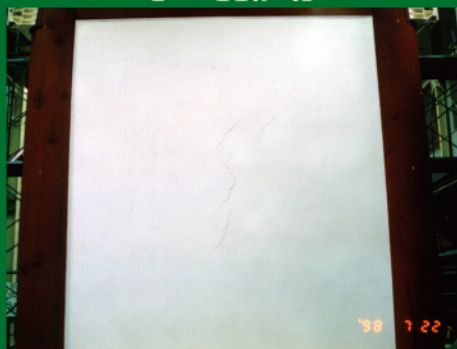
$R = 6 \sim 15 \times 10^{-3}$ は
安定した降伏領域



歴史的木造架構の耐震力学機構

$$R = 10 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$P = 11.9 \text{ tf}$$



間柱上から
縦せん断ひびわれ発生

$$R = 15 \times 10^{-3} \text{rad}$$

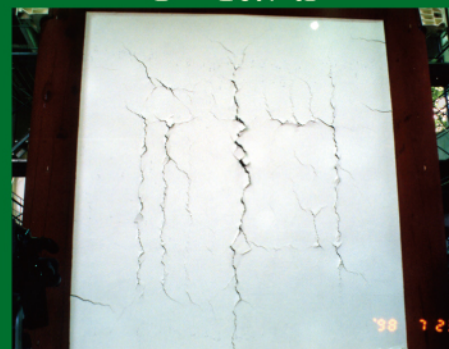
$$P = 10.9 \text{ tf}$$



縦木舞に沿った割れ
+ 斜め割れ+曲げひび割れ発生

$$R = 20 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$P = 10.7 \text{ tf}$$



せん断ひび割れ進展
間柱・縦木舞上が顕著

$$R = 30 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$P = 10.1 \text{ tf}$$



中塗り壁の一部崩落

$$R = 40 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$P = 8.0 \text{ tf}$$



耐力低下顕著

$$R = 50 \times 10^{-3} \text{rad}$$

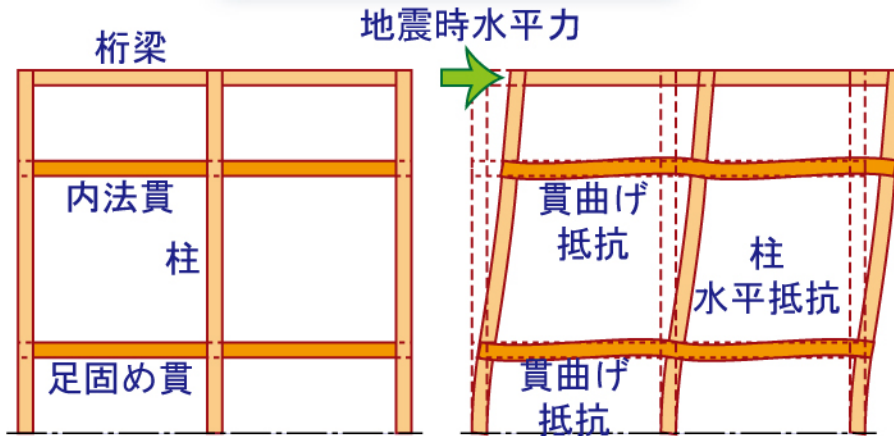
$$P = 5.8 \text{ tf}$$



中塗り壁の崩落最終状態

木造貫架構補強-1

貫架構の力学原理



柱を貫通する貫のめり込み抵抗

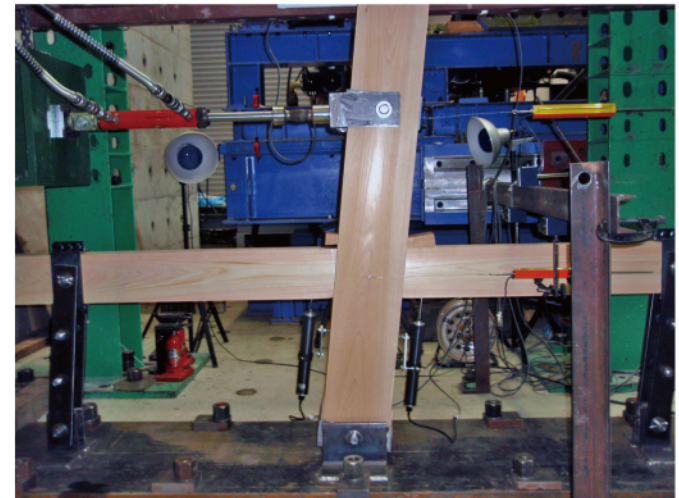
大開口を有する架構補強に最適

大変形域(1/10)まで安定した特性

クサビの材種(強度)に依存

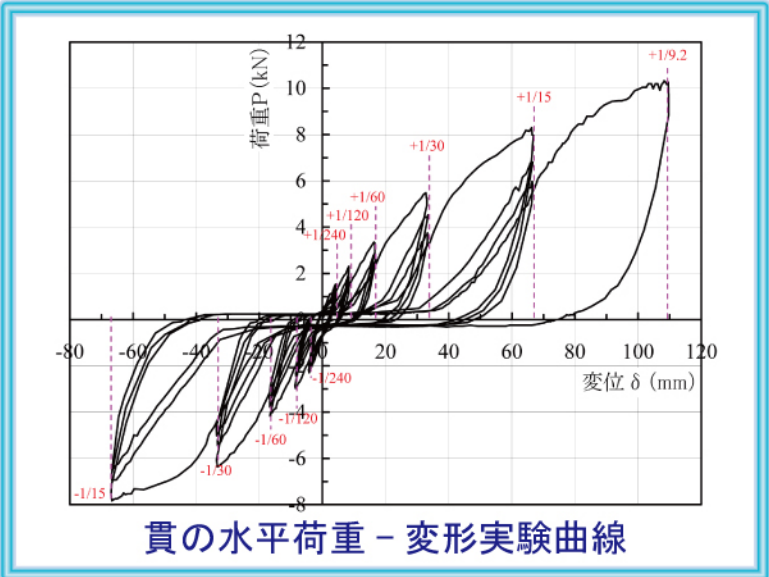


貫架構の施工例



貫架構の実験時変形

木造貫架構補強-2



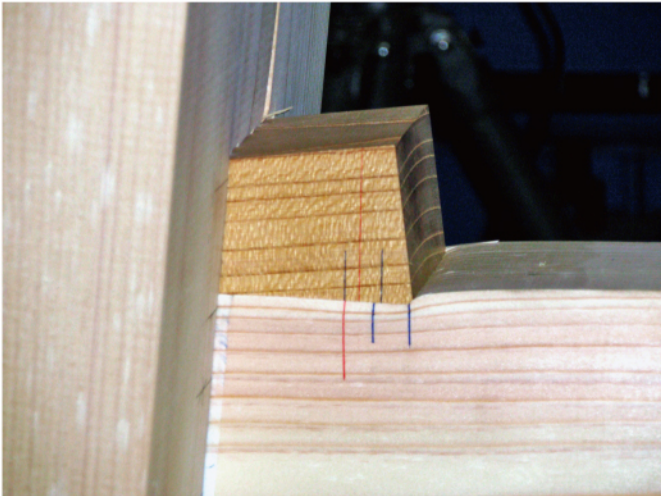
貫架構仕口の終局時変形モード



既存分離型クサビ・ヒノキ



改良全接触型クサビ・ケヤキ



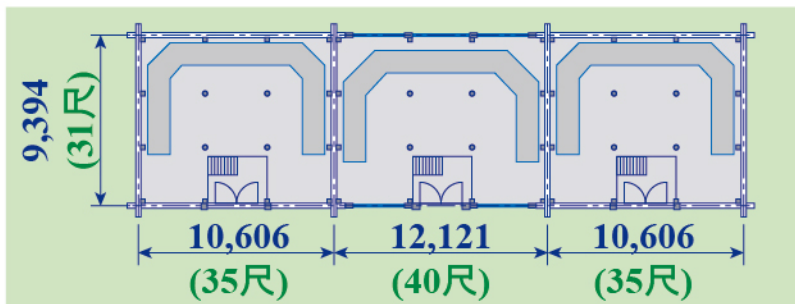
クサビ接触面の貫めり込み変形・右側

高床式校倉造り構造の耐震機構

校倉造り建築概要



建物外観・東面



1階床平面図

- ・ 高床式校倉造り
- ・ 寄棟本瓦葺
- ・ 床面積：9.39 × 33.33 = 313.1m²
- ・ 756年頃造営

校倉壁と柱



初重柱

初重は柱のみ
(4列 × 10列 = 40本)

柱は円柱 (φ2尺 × 7.5尺)
礎石に直置き

頭貫は梁間方向のみ
(0.7尺 × 0.7尺)

校倉壁端部

二重は校倉壁
宝庫は3分割

積層壁は三角形断面材
(1尺 × 1尺) : 20段積み

受け梁は扁平断面材
(2尺 × 0.7尺)

高床式校倉造り構造の耐震機構

柱の傾斜復元力特性



初重柱

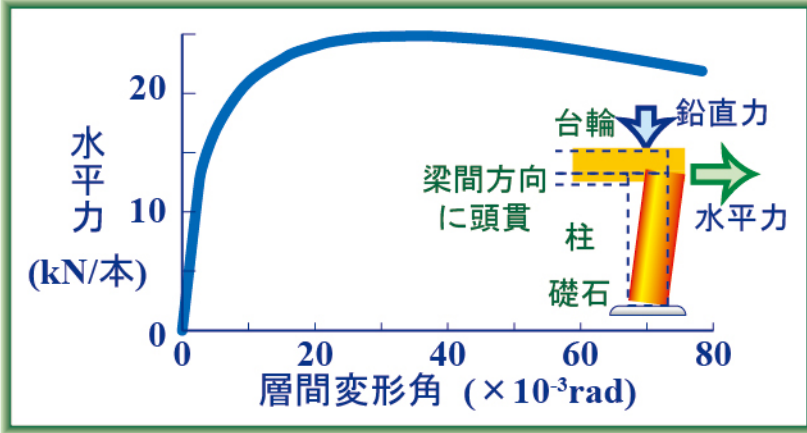


台輪 扁平断面 $2R \times 0.7R$

頭貫

台輪底面-柱の移動痕跡

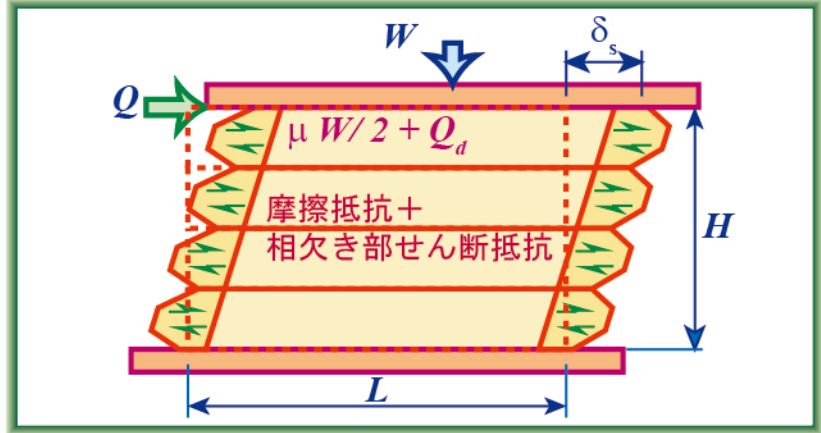
柱は円柱 ($\phi 2R \times 7.5R$)
礎石 (自然石) に直置き



校倉壁の力学特性

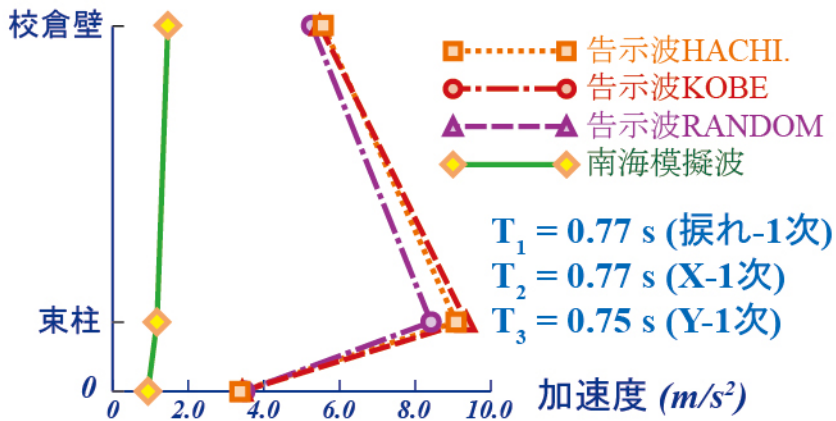
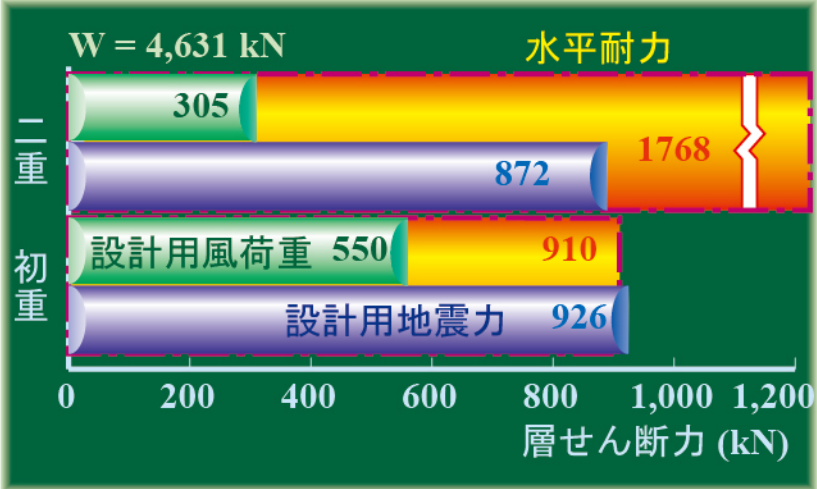


校倉壁外観・東面北倉
積層壁は台形断面
($1R \times 1R$): 20段積み

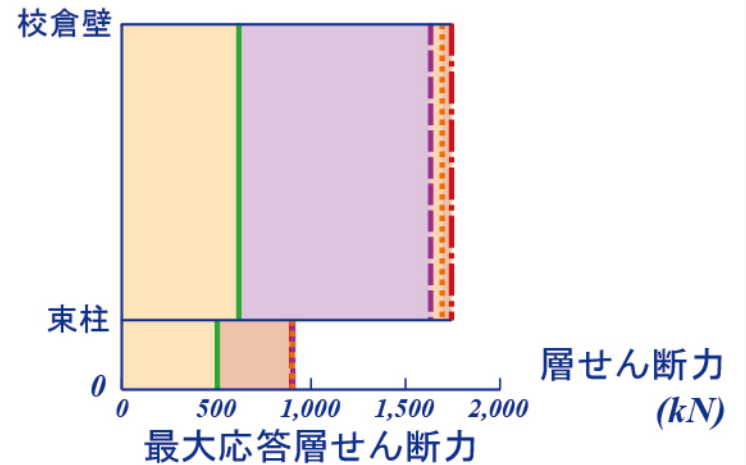
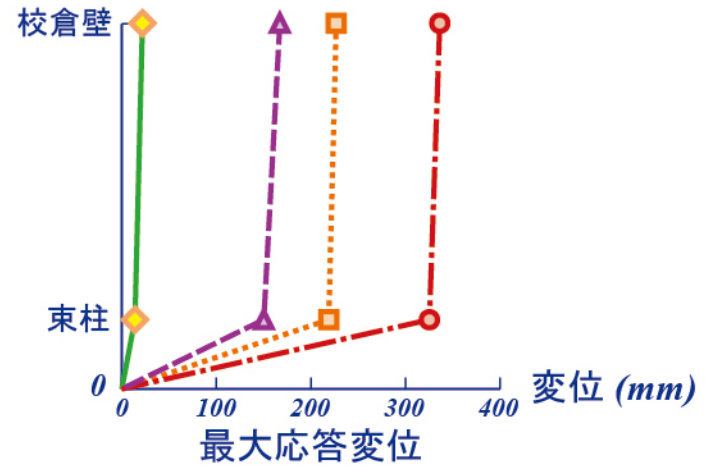


高床式校倉造り構造の耐震機構

設計用水平力と水平耐力



短辺方向地震時最大応答



古代ギリシア建築の力学機構

ギリシア神殿の構造形式

石積壁式構造の身舎と外周柱廊

柱：円柱ドラム+木製ダボの積上げ

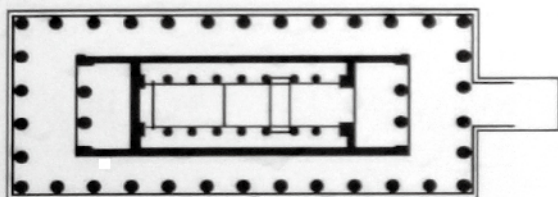
屋根：木造トラス+石板葺き

力学機構

身舎：石積み壁式構造

外周柱：剛体抵抗的な積重ね構造

屋根：近代建築と同様（残らない）



オリンピア ゼウス神殿平面図



オリンピア ゼウス神殿復原模型

建物規模：27.7m×64.1m×H20.3m
柱列数：6列×13列（34本）
建設年代：BC470-457年
建築家：リボン
建物倒壊：AD522, AD551の地震

著作権等の都合により省略しました

オリンピア遺跡 上空写真

BC200頃：ゼウスを祭る神域
BC800：オリンピック開催地
AD393：オリンピック廃止で衰退
1900末：ドイツが発掘

オリンピア遺跡俯瞰・Google Earth

古代ギリシア建築の力学機構

ゼウス神殿の柱詳細



柱のキャピタル:ドーリス式、脚部:ダボ無し
外周フルーティング,



柱の中間部分ドラム・木柱ダボ穴付き

地震被害遺構



ゼウス神殿の柱倒壊遺構・南方向へ倒壊



倒壊柱の復元



ゼウス神殿の柱倒壊遺構と復元柱

歴史的木造建築と構造診断・補強

- 古代建築の力学と現代技術 -

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術

木造耐震診断・補強のフロー

START

建築主と事前打合せ

耐震改修の考え方, 耐震調査の方針,
改修や補強の方針, 予算等

図面調査・現地調査

耐震壁仕様と配置, 地盤状況, 屋根仕様

材料劣化・架構変形調査

架構変形状況, 基礎沈下状況
材料劣化状況, 接合方法

耐震診断

補強有/無の決定

補強案の立案

補強メニューと予算

補強方針の決定

改修施工

施工前・施工中の確認

材料劣化状況, 接合方法,
補強材配置の可否と接合方法

設計変更や施工監理

END

木造建物劣化調査・留意点

調査項目	基礎沈下	床・柱の傾斜変形	木材腐食
不具合			
内容	基礎の不同沈下	床や柱の傾斜による建具隙間	外部土台木材の腐食
調査項目	小屋裏・天井漏水	外壁劣化	屋根葺き材・下地
不具合			
内容	天井や小屋裏の漏水痕跡	外壁劣化や下地腐食	屋根葺き材の乱れや下地劣化

既存木造建物・劣化調査の留意点

耐震要素仕様・配置の確認



下見板外し筋違の確認事例



筋違接合部突付き仕口の事例

耐力壁仕様・配置の確認

耐力壁仕様：筋違、合板、土壁、腰壁・垂壁
平面配置：平面配置、立面配置

接合部仕様の確認

釘・カスガイ打ち、ボルト接合、突付き仕口
耐力壁の脚部・頂部の状況

劣化性状の確認

軸組木材、土壁等の劣化
接合金物の劣化



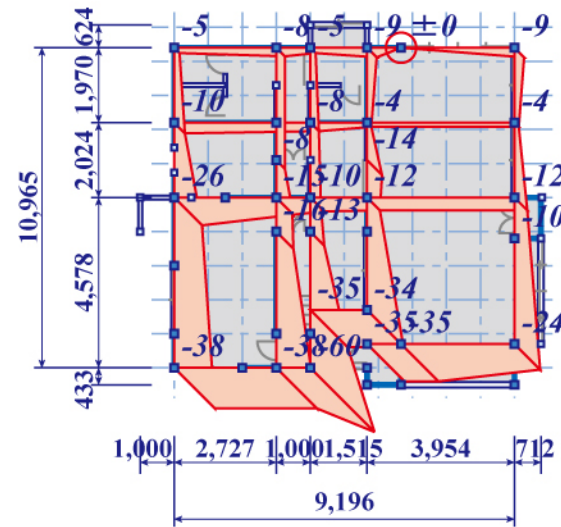
耐震要素の確認が必要

地盤・建物の変形調査

基礎の不同沈下・軸組の変形を測量

基礎・軸組改修計画の立案

適用事例

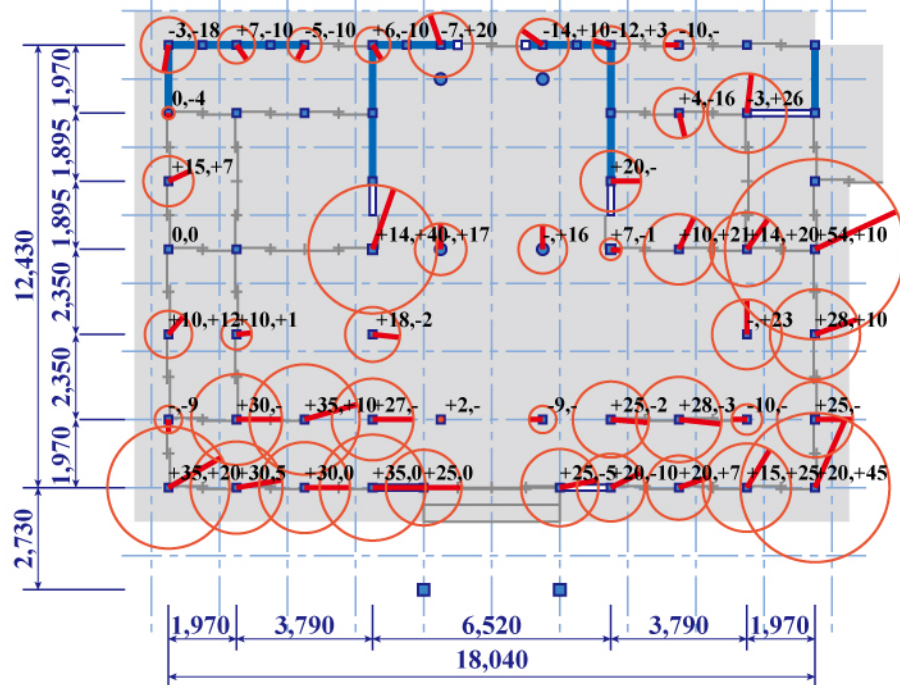


軸組柱の変形調査

軸組柱の傾斜変形を測量

軸組改修計画の立案

適用事例



柱の傾斜→変形修正

木材の劣化・腐朽度試験

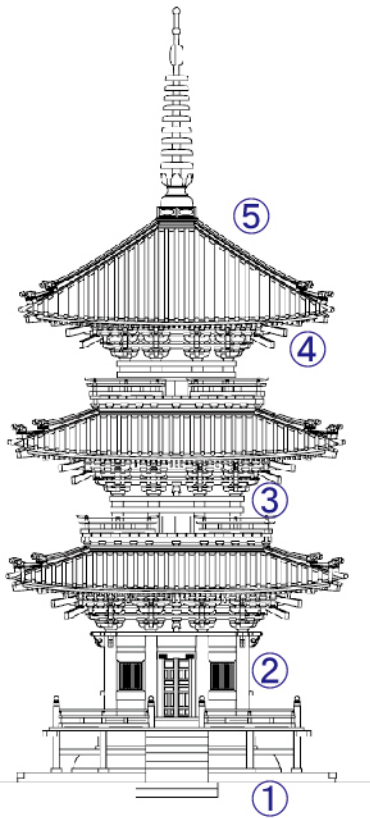
非破壊検査による物理的評価法を適用

含水率・ドリル貫入量・ファイバースコープ
を組合わせて評価

試験法	含水率測定法	レジストグラフ貫入測定法	ファイバースコープ
測定機器			
測定原理	腐朽菌の発生に不可欠な水分比率を電気抵抗で測定	腐食するとドリル貫入抵抗が低くなることを応用	該当箇所を直接に観察
評価基準	含水率 > 20% : 腐食発生	貫入抵抗比 < 0.2 : 腐食発生	画像判断

三重塔の構造調査

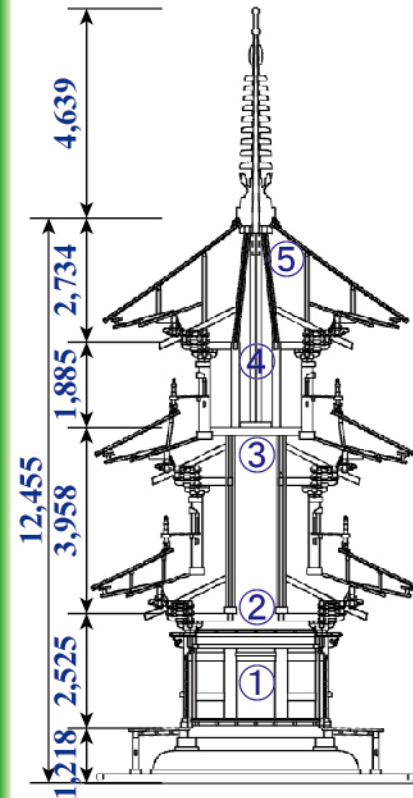
外周骨組形状の特徴



三重塔外観・南東面

- ⑤三重屋根は勾配が強く高い
- ④斗組は大斗上に三段構成
- ③外周中間柱は外周梁で支持
- ②一階外周柱は窓の上下に貫構造
- ①柱基礎は亀腹に設置

内部骨組形状の特徴

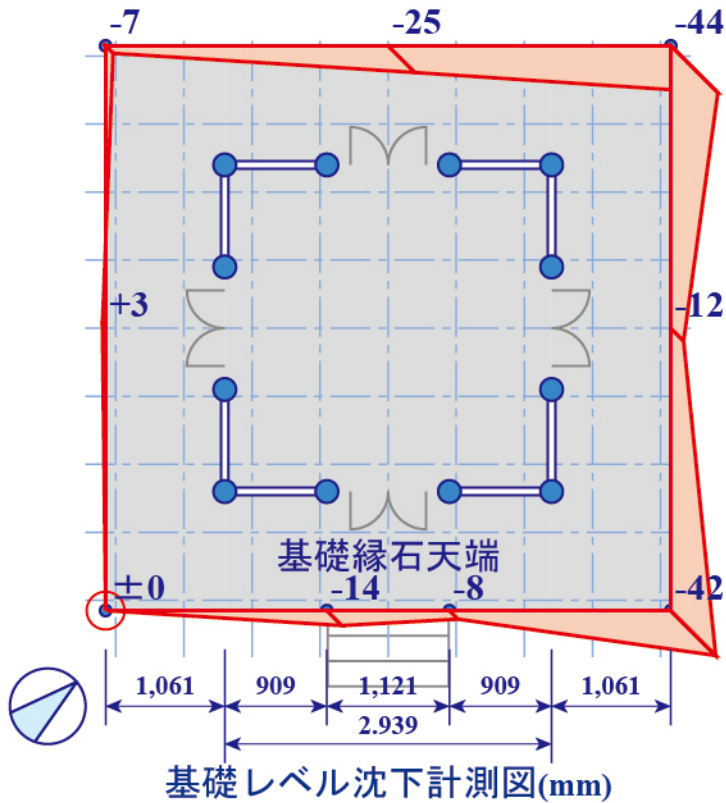


三重塔・断面図

- ⑤相輪の心柱は角材と丸材接合
- ④三階の心柱は二本の角材で構成
- ③三階の心柱は三階床交差梁で支持
- ②四天柱は二階床梁で支持
- ①一階には四天柱がない

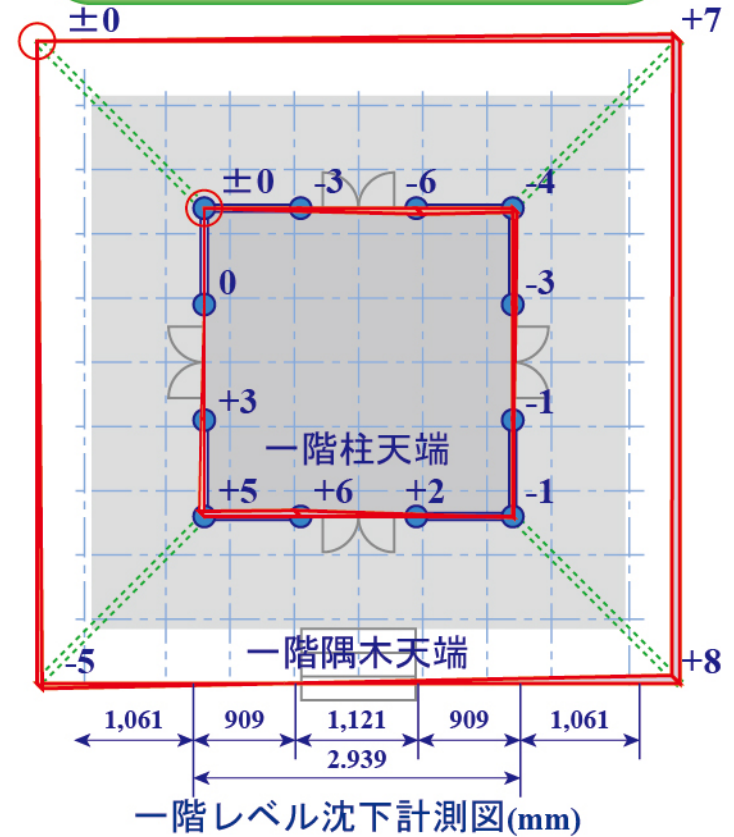
三重塔の構造調査

基礎レベル沈下計測



基礎は北隅・東隅の沈下が大きい
一階柱への影響は少ない

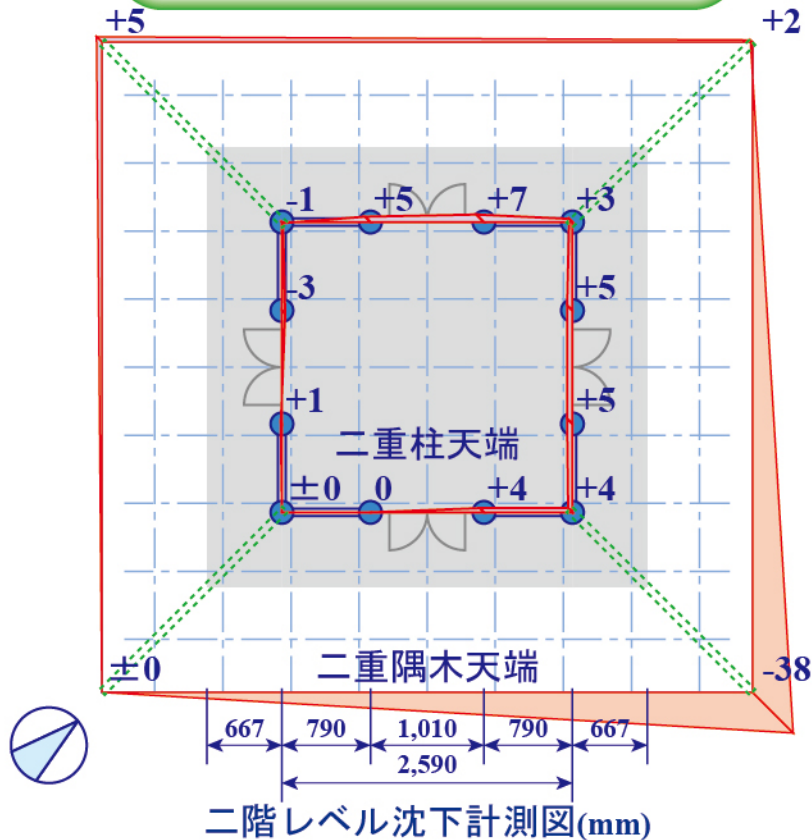
一階レベルの沈下計測



隅木は南隅の沈下が若干発生
一階柱は西隅の沈下が若干発生

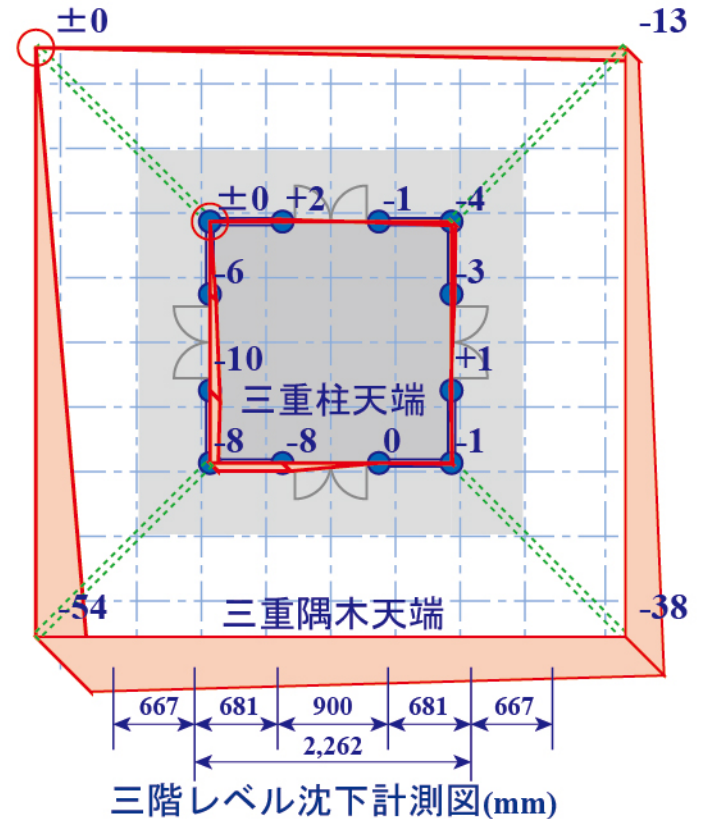
三重塔の構造調査

二階レベル沈下計測



隅木は東隅の沈下が大きく
二階屋根が東隅に傾斜

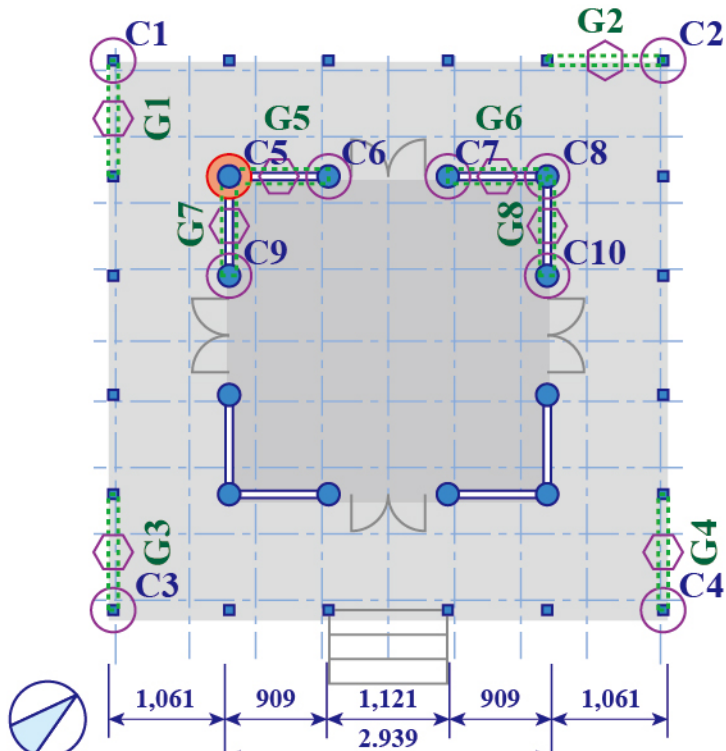
三階レベル沈下計測



隅木は南隅・東隅の沈下が大きく
三階屋根が南側に傾斜

三重塔の構造調査

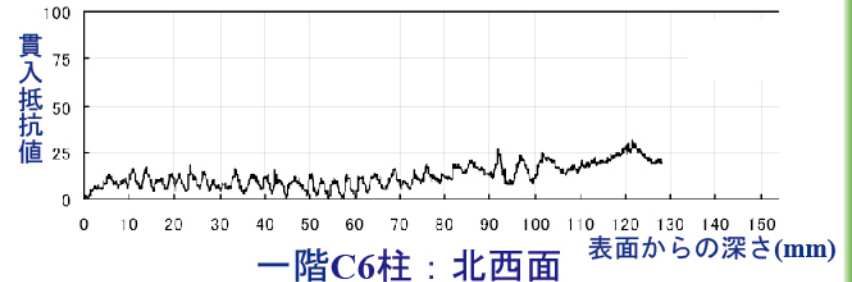
木材の劣化調査



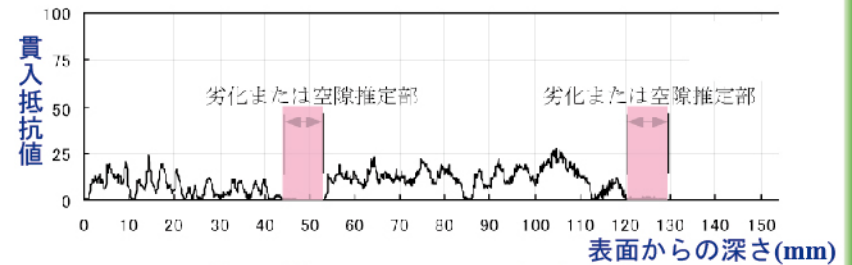
木材の腐朽試験部材・一階

- ◇ 木材腐朽試験位置
- 木材腐朽劣化確認

木材の劣化調査



一階C6柱：北西面



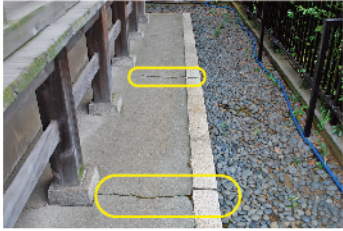

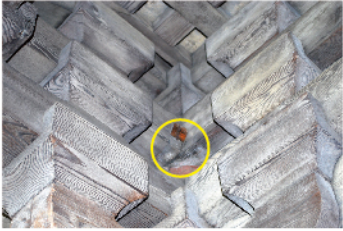




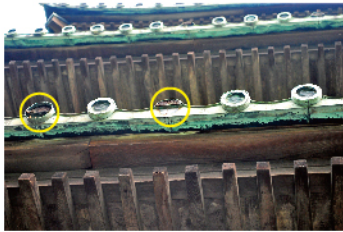
一階C5柱：西隅（一部劣化）

レジストグラフ試験結果（ドリル貫入抵抗値）

- ・ 一階柱の一部（C5）で劣化観察、他の36箇所の部材は健全
- ・ 含水試験結果は9～24%で、一部20%を超える箇所もあったが、比較的乾燥状態
- ・ 目視では、浜縁の東柱脚部の一部で表面の劣化も観察

三重塔の構造調査

不具合箇所

部 位	基礎	一階軸組	一階斗組	浜縁
写 真				
劣化状況	基壇土間沈下・割れ	接合部の破損・埋木	破損落下や変形	高欄の劣化・変形
部 位	二・三階軸組	二・三階軒架構	二・三階浜縁	屋根葺き材
写 真				
劣化状況	隅柱沈下・長押割れ	丸桁の隅部沈下変形	床トタン貼り補修	銅板劣化・巴の脱落

三重塔の構造調査

一般的五重塔と比較

部 位	四天柱支持梁	四天柱上の梁	外周中間柱の支持	軒垂木の支持
本三重塔				
備 考	二本梁で四天柱支持	交差梁で心柱を支持	柱盤の中間支持無し	垂木半数が軒先止り
一般的五重塔				
備 考	井桁梁で四天柱支持	梁や貫と四天柱接合	東と柱盤受け垂木	心柱手前まで垂木

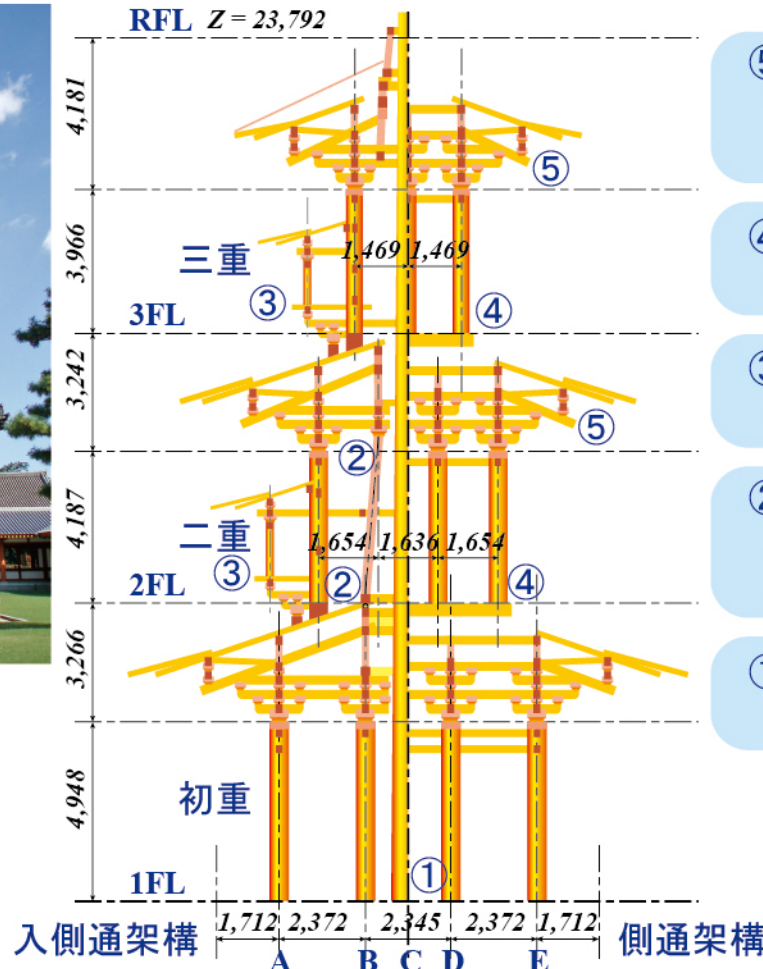
裳階付き三重塔の構造概要

骨組形状の特徴



建物外観・西面

- ・和様・本瓦葺
- ・裳階付き三重塔
- ・造営：730年
- ・高さ：34.1m



⑤側柱の斗組
側柱・台輪・斗組・丸桁
三手先組物

④側柱の支持
地垂木上の柱盤にホゾ差し

③裳階の支持
側柱からの貫と地垂木

②四天束の支持
二重は斜束で四天柱が支持
三重は四天束無し

①心柱の支持
柱脚部が腐食し礎石で支持

- 基準部材：212×242
 尾垂木：212×258
 心柱：φ924～533
 側柱：φ530～461
 斜束：242×242

歴史的木造建築と構造診断・補強

- 古代建築の力学と現代技術 -

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術

歴史的木造建築の耐震補強メニュー

強度補強

壁補強

合板耐震壁
筋違

鉄骨骨組補強

鉄骨筋違
鉄骨フレーム

外付架構補強

外付耐震架構
木造ラーメン

架構の増設

バットレス増設

地震力の低減

重量の低減

屋根瓦空葺き
部分撤去

免震補強

基礎免震

制震補強

履歴系ダンパー
粘性系ダンパー

歴史的木造建築の耐震補強メニュー

強度補強

耐力壁補強

合板耐力壁

筋違



鉄骨骨組補強

鉄骨筋違

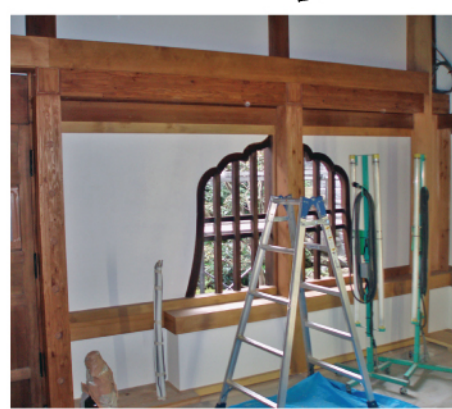
鉄骨ラーメン



外付架構補強

外付架構

木造ラーメン



架構の増設

バットレス



歴史的木造建築の耐震補強メニュー

地震力の低減

建物重量低減

瓦空葺き

部分撤去

免震補強

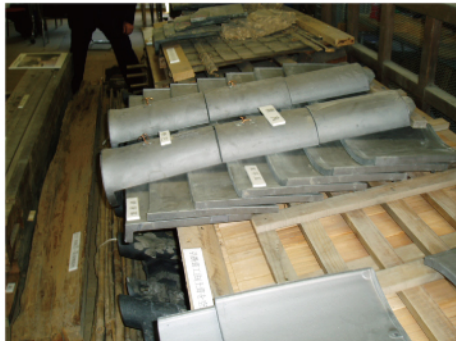
基礎免震

中間階免震

制震補強

粘性ダンパー

鋼材ダンパー



歴史的木造建築の耐震改修事例

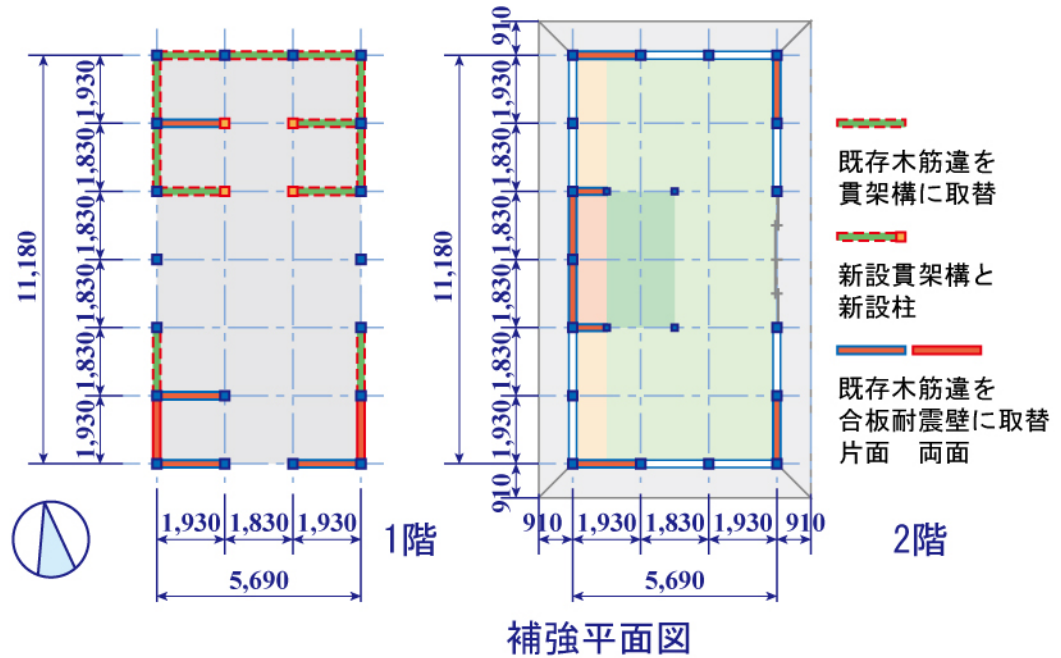
- 貫架構による耐震改修の概要 -



木造貫架構補強-3



寂光院随求堂外観・北東面



随求堂1階筋違とS造バットレス・西面

建設地：愛知県犬山市
 軒高：5.64 m
 平面規模：5.69 × 11.18 m
 屋根形式：入母屋造 瓦葺
 構造種別：木造・伝統軸組構法
 設計施工：竹中工務店（12代目）
 創建：1879年, 1961年改修

木造貫架構補強-4

既存筋違架構



随求堂1階筋違とS造バットレス・西面南側



随求堂1階筋違と柱ボルト接合・北西隅



随求堂補強筋違と貫・東面



随求堂1階柱と貫仕口・西面中央

木造貫架構補強-5

貫架構改修



随求堂1階貫架構・東面北側



随求堂1階貫架構仕口段違い・北西隅



随求堂1階新設貫架構・東側内側北方向



随求堂1階柱と貫仕口・北側中央追加柱

木造貫架構補強-6



随求堂1階改修前・北面



随求堂1階改修前・北方向



随求堂1階貫架構改修後・北面



随求堂1階貫架構改修後・北方向

木造貫架構補強-7



随求堂1階改修前・西面南方向



随求堂2階改修前・西面中央



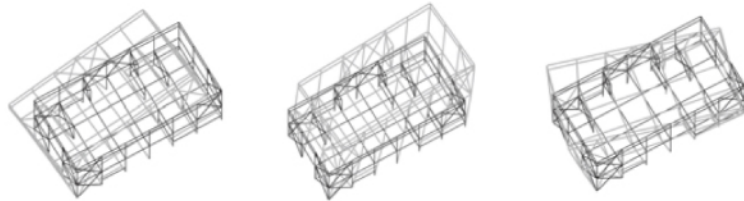
随求堂1階貫架構改修後・西面南方向



随求堂2階合板壁改修後・西面中央

地震応答解析結果

固有振動モード図

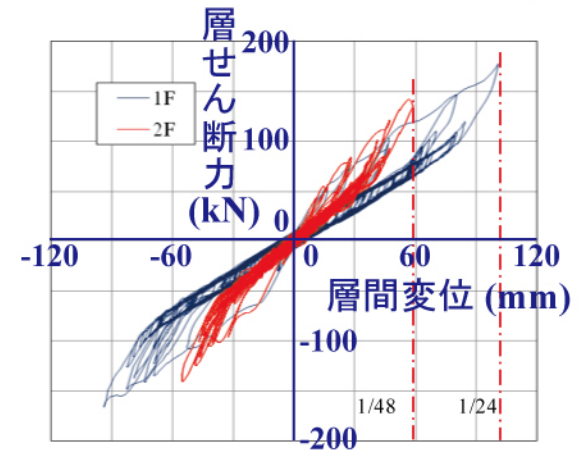


1次	2次	3次
X方向+振れ	Y方向	振れ
1.56 Hz	1.62 Hz	2.12 Hz

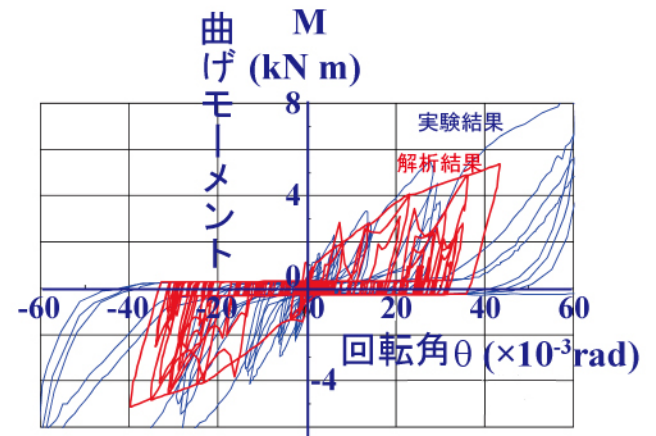
応答解析結果のまとめ

- 最大層間変形角応答は1/24で、安全限界変形角(1/15)以下
- 貫接合部のM- θ 曲線応答も、実験曲線の範囲内にある

最大応答結果



層せん断力-層間変位応答・Y方向



貫接合部のM- θ 曲線応答

歴史的木造建築と構造診断・補強

- 古代建築の力学と現代技術 -

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術 (免震補強)

免震構造とは

建物を地盤から絶縁

- ・地震力が入らない：浮いた状態
- ・日常は安定が必要：堅固に支持

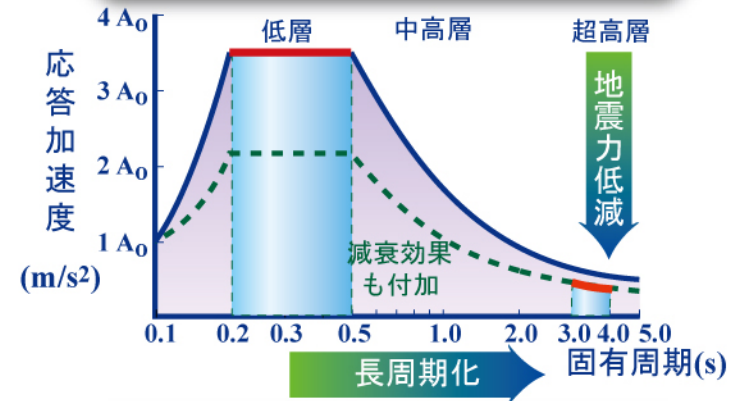
免震支承部材

- ・水平方向には、柔らかく変形
- ・鉛直方向には、堅固に支持

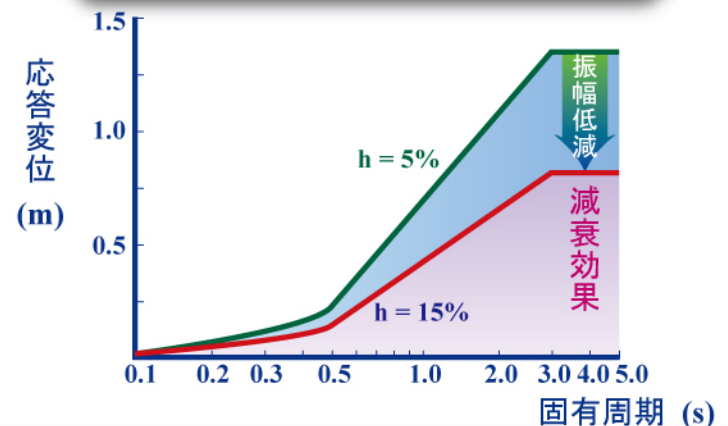
免震ダンパー

- ・水平変形の抑制
- ・地震後揺れを早期に吸収

長周期化すると地震力が低減



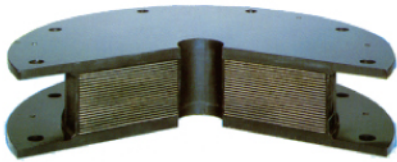
長周期化すると応答変位は増大



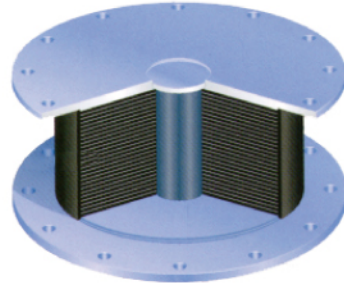
免震主要部材

免震支承部材

- ・ 水平方向には、柔らかく変形
- ・ 鉛直方向には、堅固に支持



天然ゴム系積層ゴム
高減衰積層ゴム



鉛プラグ入り積層ゴム



PTFE系低摩擦支承



リニアスライダー支承

免震ダンパー

- ・ 水平変形の抑制
- ・ 地震後揺れを早期に吸収



U字形鋼棒ダンパー



鉛ダンパー



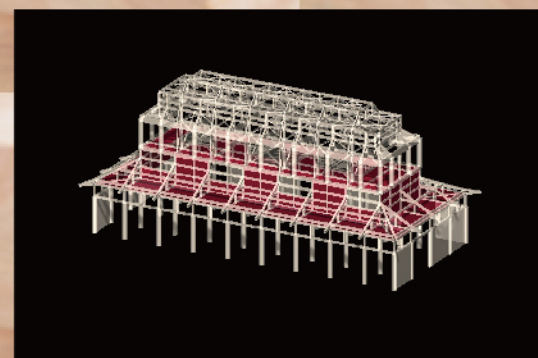
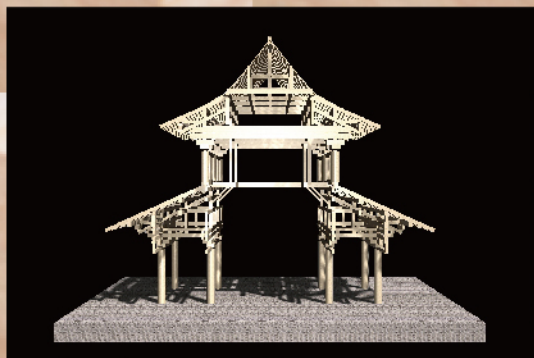
オイルダンパー



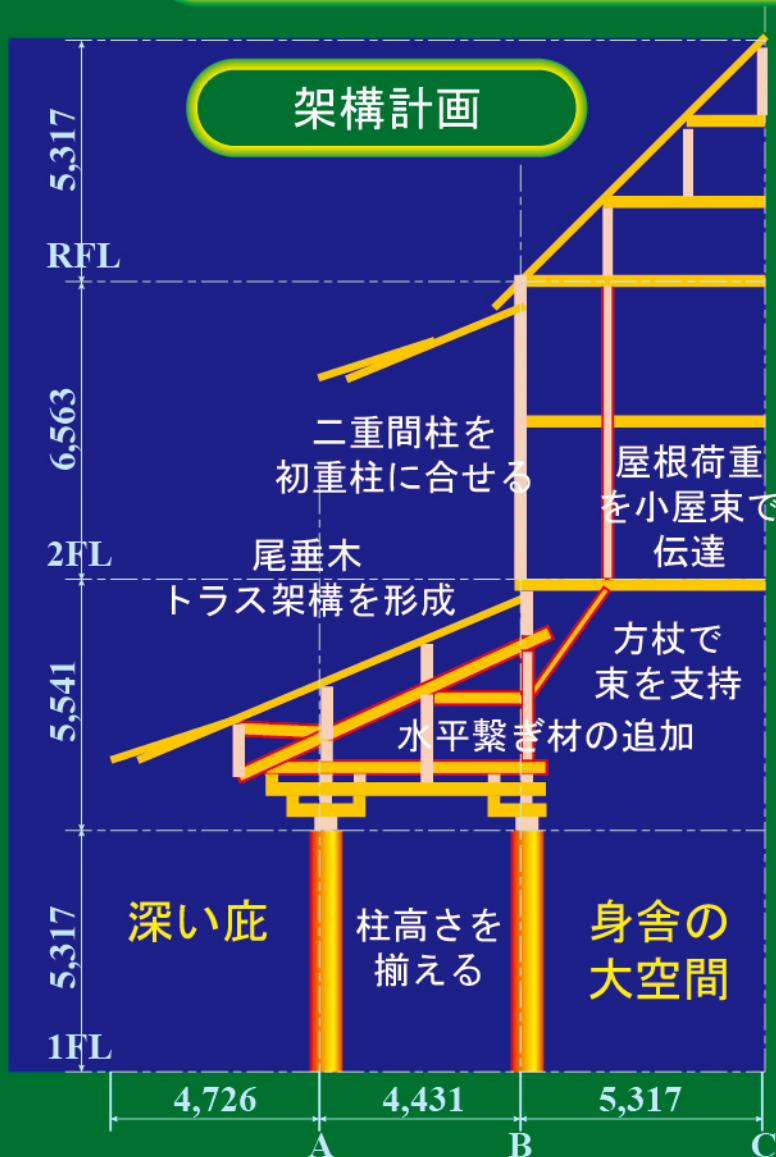
高分子系粘性ダンパー

2020.12.02

宮殿建築復原の免震構造事例



宮殿建築復原設計-長期応力架構計画検討



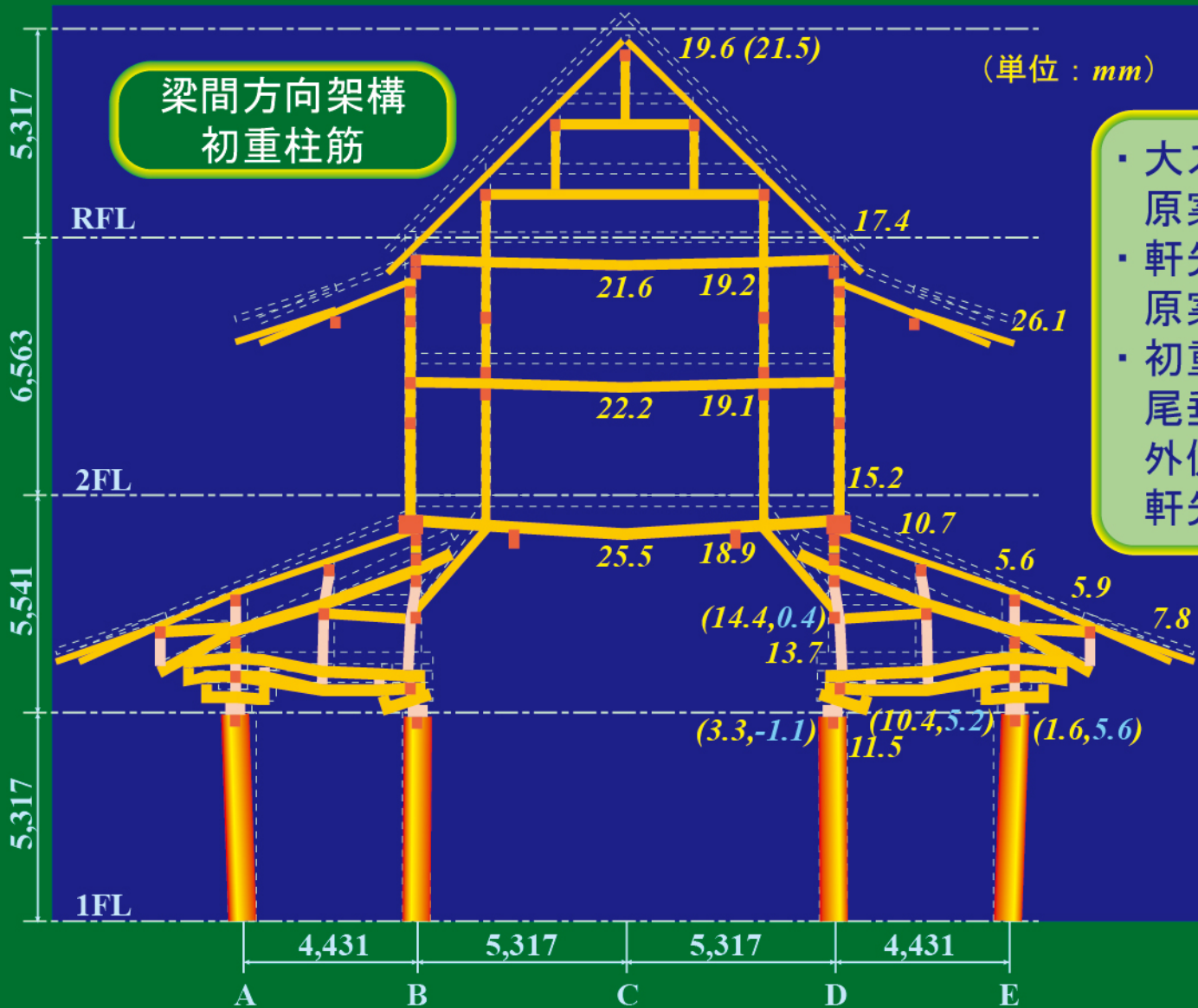
課題

- ・ 古代の架構様式を再現
- ・ 身舎大空間の確保(木造)
10.6m大スパン&天井高さ10.8m
- ・ 庇の跳出し長さは4.73mと大

対策

- ・ 天井支輪を方杖として活用
- ・ 小屋束で屋根荷重を方杖に伝達
- ・ 方杖端部に水平繋ぎ補強
- ・ 尾垂木はトラス架構を形成
(初重柱高さを揃える)
- ・ 二重間柱位置は初重柱に合わせる

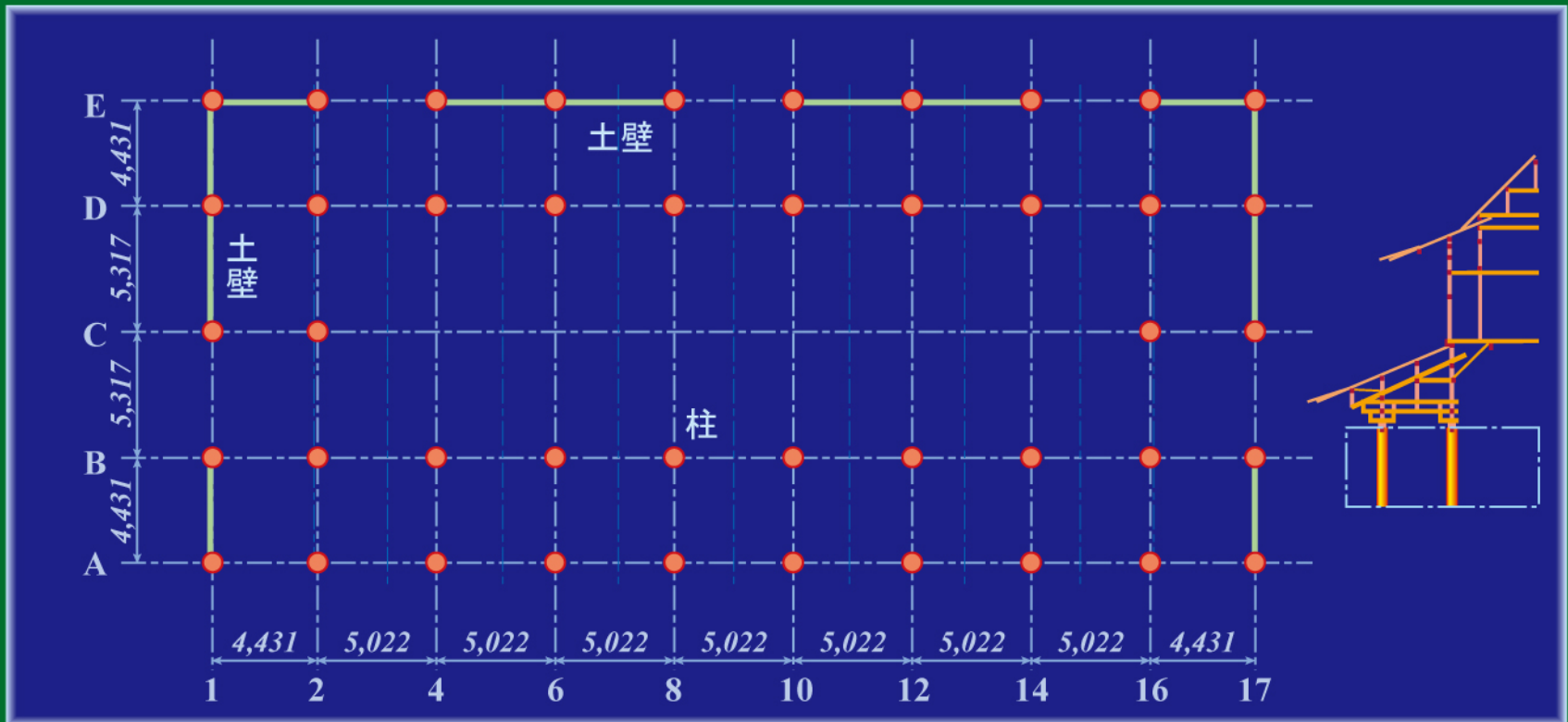
宮殿建築復原設計-長期荷重時架構変形図



- ・ 大スパン虹梁変形は、原案の70%程度
- ・ 軒先端の変形は、原案の25%程度
- ・ 初重柱は、方杖反力や尾垂木トラスにより外側へ傾斜して、軒先端の変形を抑制

宮殿建築復原設計-耐震・耐風架構計画

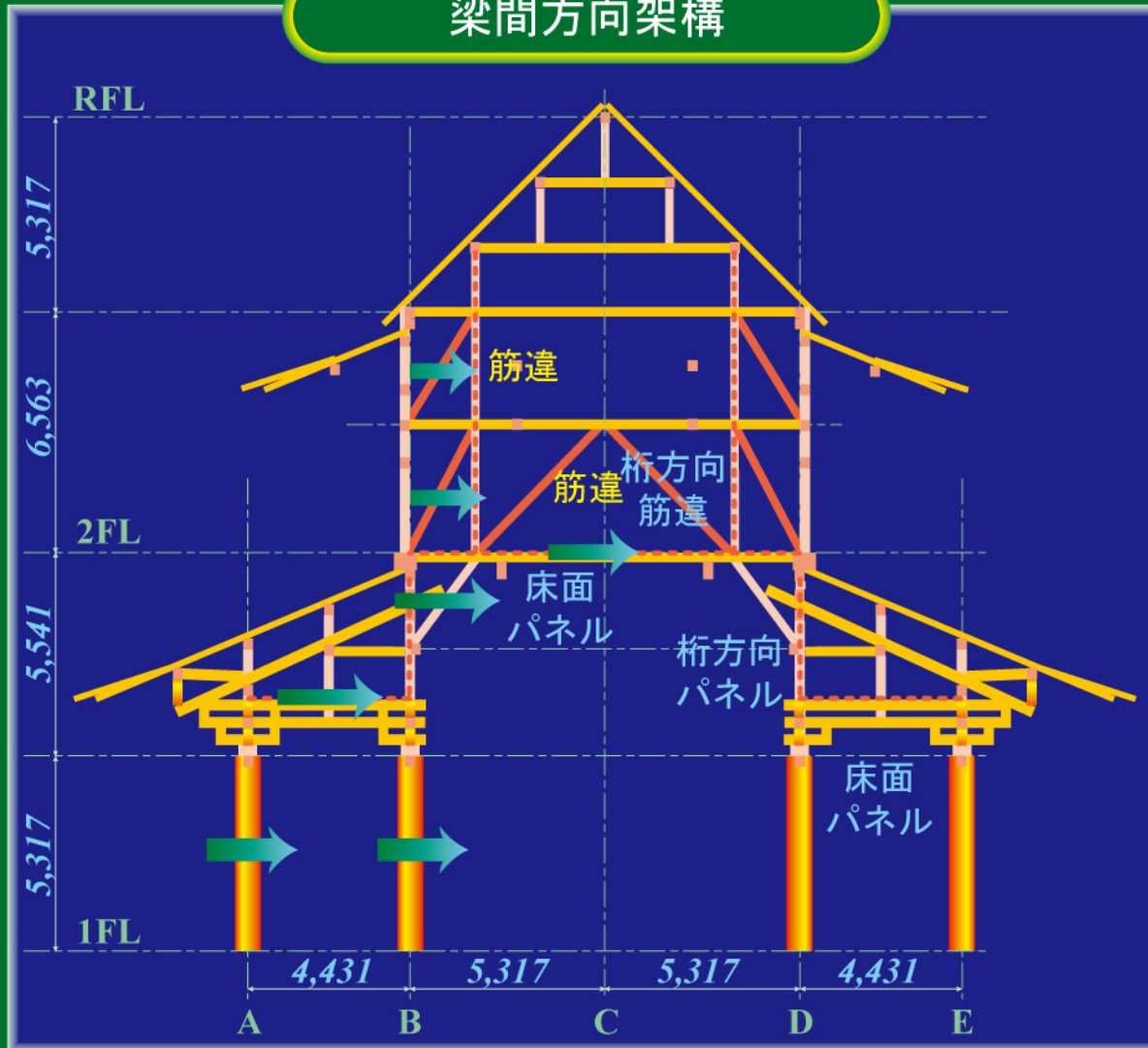
初重・土壁配置



- ・ 柱：10列×5列 44本
- ・ 桁行方向土壁：北面のみ6面
- ・ 梁間方向土壁：両妻面に6面

宮殿建築復原設計-耐震・耐風架構計画検討

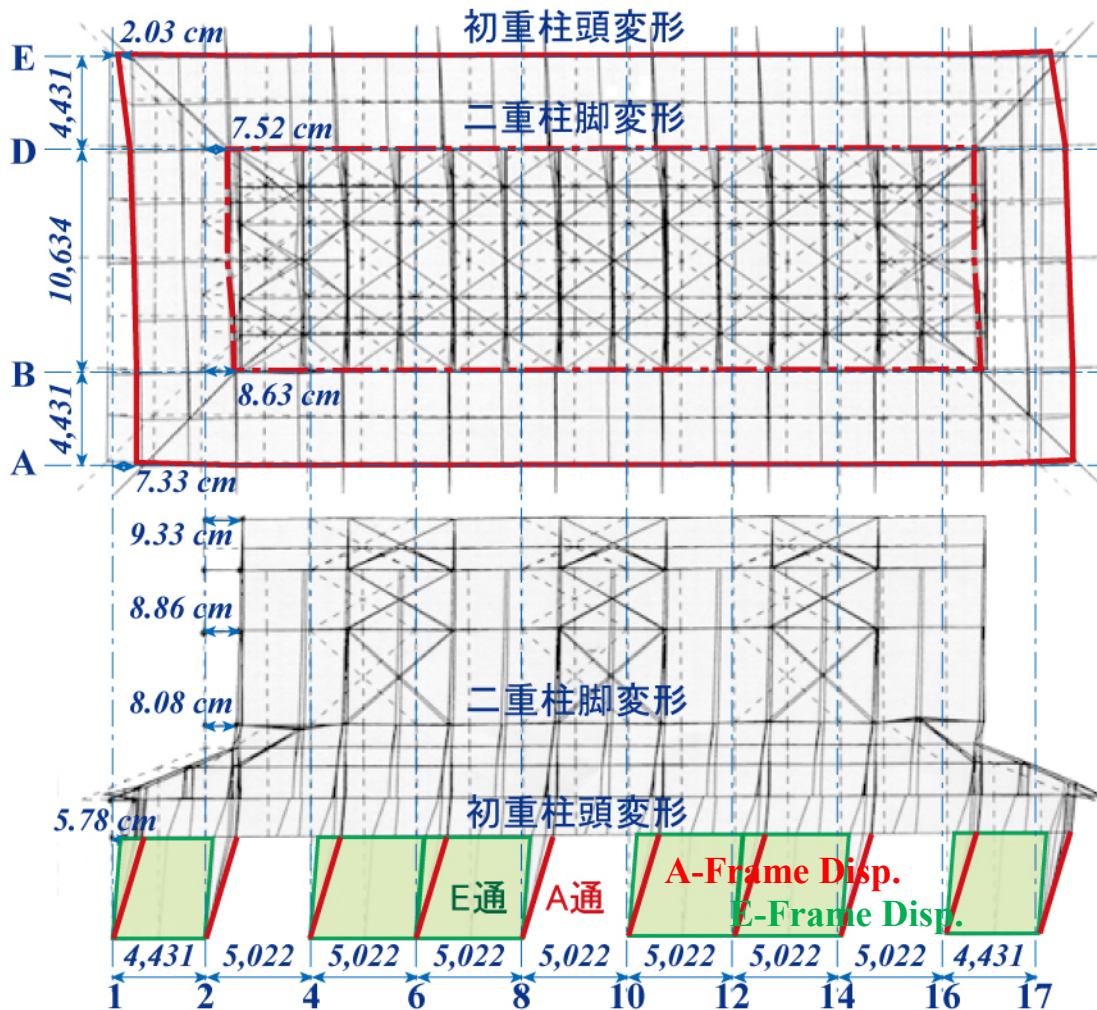
梁間方向架構



- ・ 二重層に筋違を設置
- ・ 端部東-間柱間は6列に配置
中央東-東間は4列に配置
- ・ 床面は、身舎・庇天井部にパネルを配置

宮殿建築復原設計-耐震・耐風架構計畫

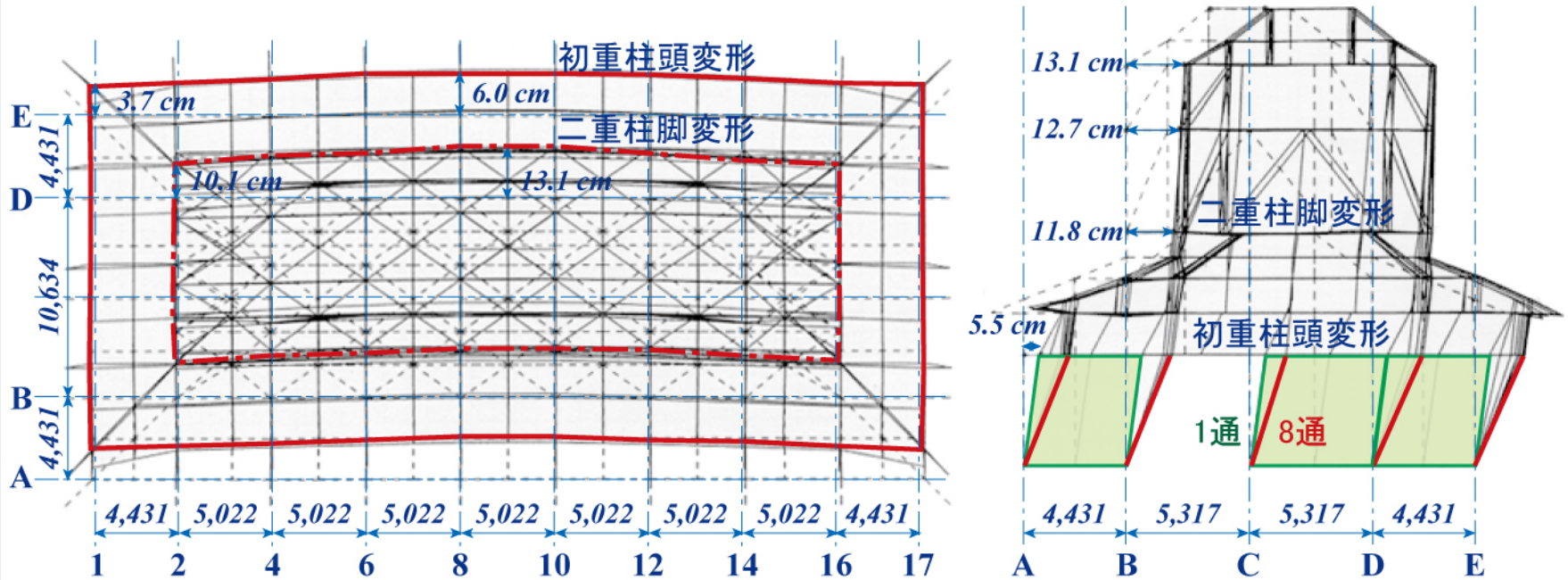
X方向地震時變形圖 (tf)



- ・ 初重平均變形角
1/87
- ・ 二重平均變形角
1/536
- ・ 初重捩れ變形大
A通 = 3.6 × E通

宮殿建築復原設計-耐震·耐風架構計畫

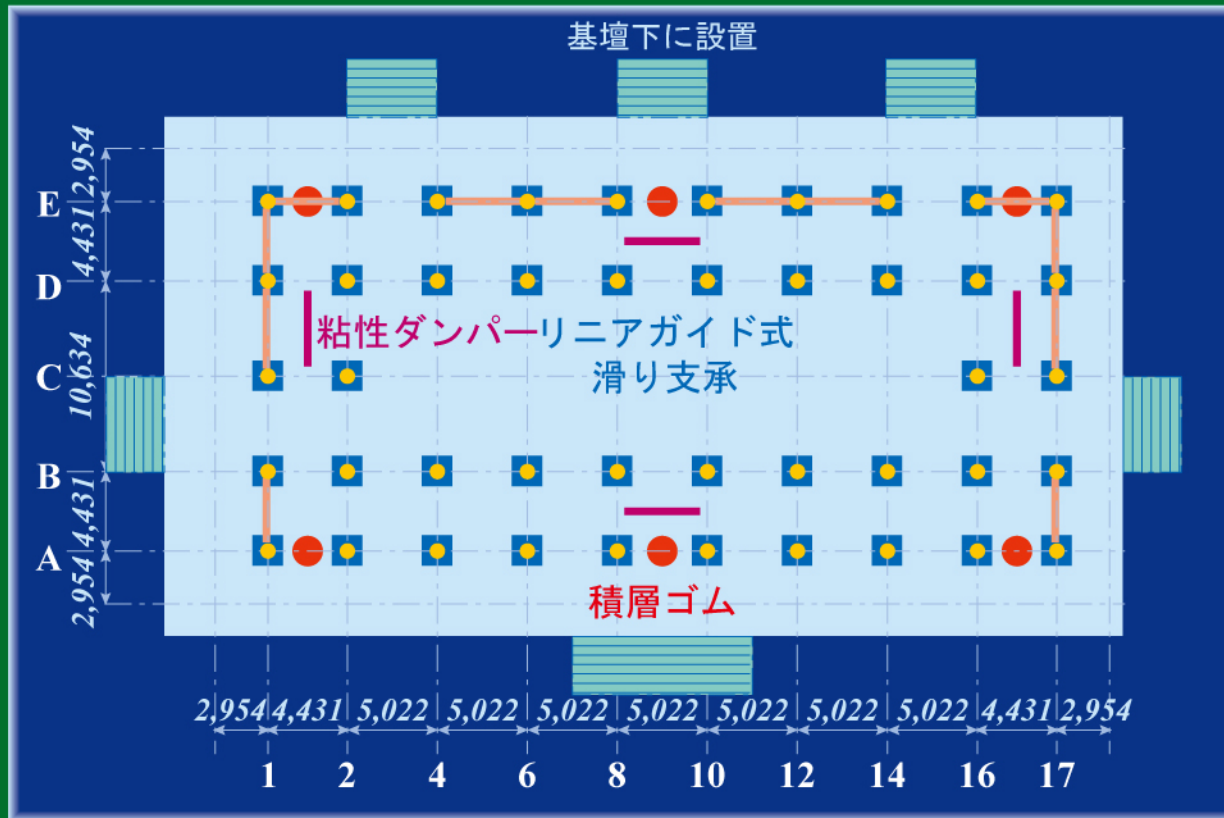
Y方向風荷重時變形圖



- 初重平均層間變形角：1/91
- 二重平均層間變形角：1/469
- 初重灣曲變形大：8通 = 1.6 × 1通

宮殿建築復原設計-免震装置計画

免震装置の配置計画



積層ゴム



滑り支承

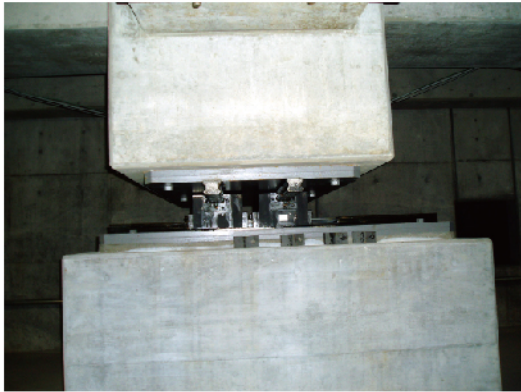


粘性ダンパー

- ・ バネ：積層ゴム (φ600) 6箇所
- ・ 減衰：粘性ダンパー 8箇所
- ・ 一般部：滑り支承 (L1200) 44箇所

- ・ 免震層の設計周期： $T = 4.43 \text{ s}$
- ・ 上部構造周期： $T_S = 1.22 \text{ s}$
- ・ 最大変位限界： 40 cm

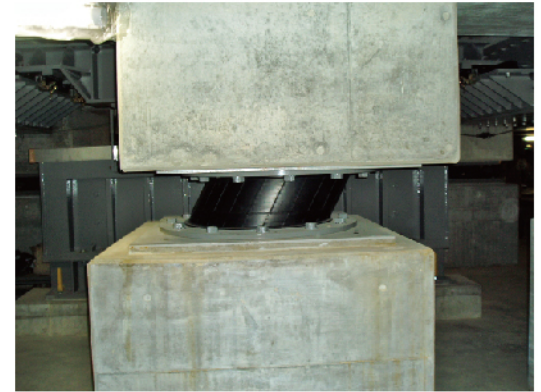
宮殿建築復原：免震装置



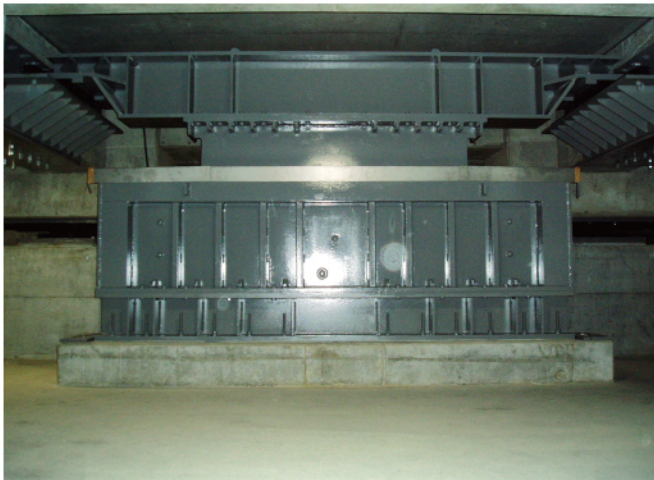
リニアスライダー (■)



免震装置全景・南西方向



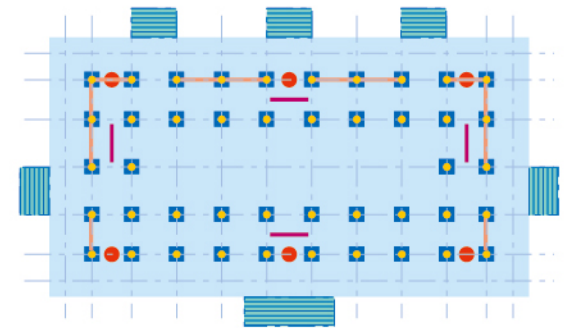
天然ゴム系積層ゴム (●)



壁型粘性ダンパー (—)

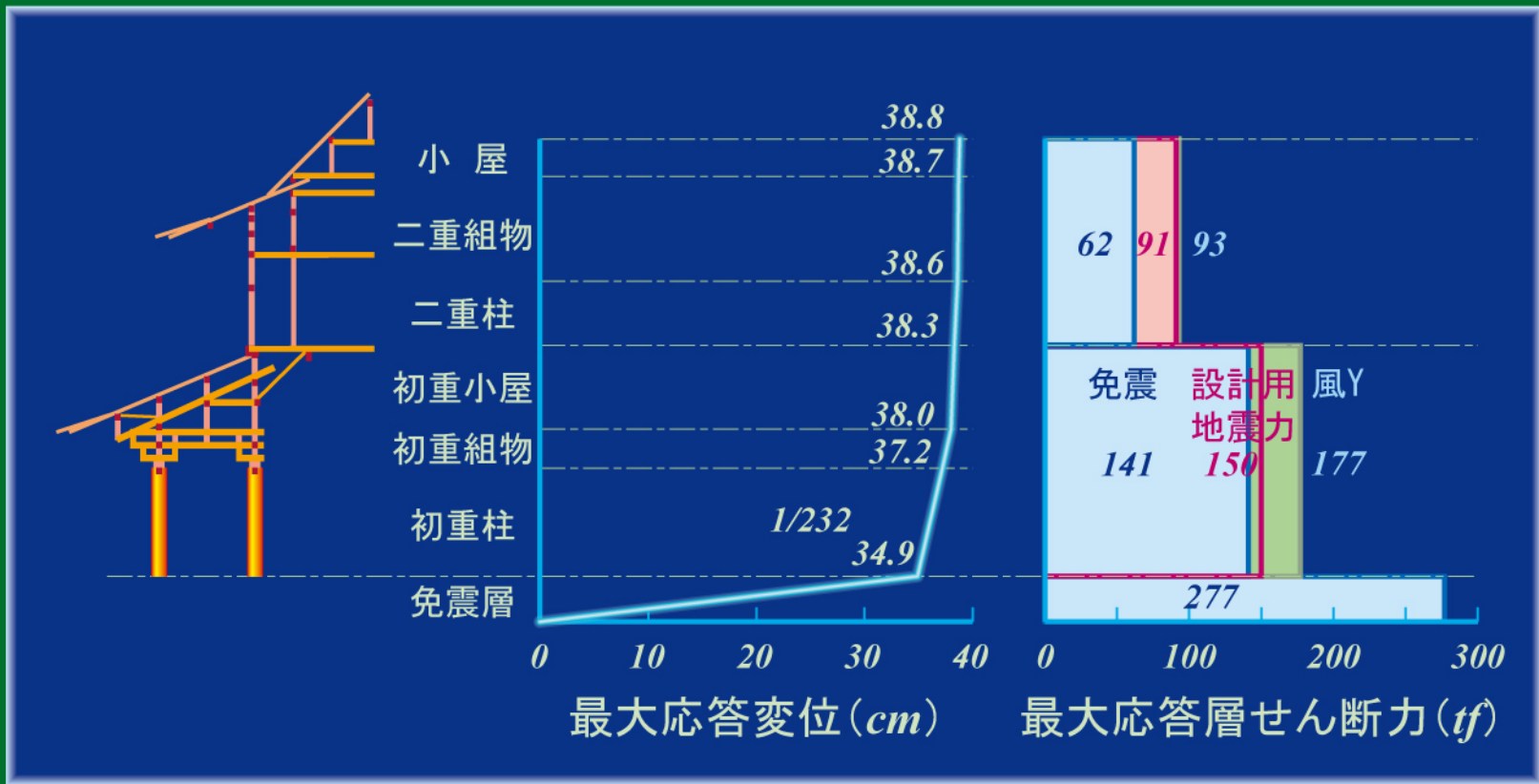


粘性ダンパー面外変形追従機構



宮殿建築復原設計-免震効果検討

免震構造の地震応答解析結果



・ 免震層の設計周期 : $T = 4.43 \text{ s}$
 上部構造周期 : $T_S = 1.22 \text{ s}$

・ 上部の層せん断力 : 非免震の55%
 ・ 上部の層間変形角 : 1/232
 ・ 免震層の最大変位 : 34.9cm

歴史的木造建築と構造診断・補強

- 古代建築の力学と現代技術 -

第1章 歴史的建築の力学機構と課題

1. 文化財建造物の耐震改修の考え方
2. 長期的な変形性状と力学機構

第2章 歴史的建築の耐震要素と力学性状

1. 現代木造建築の耐震要素と力学性状
2. 歴史的木造建築の耐震要素と力学性状

第3章 歴史的建築の耐震補強技術

1. 構造診断・調査の留意点
2. 強度補強型の耐震補強技術
3. 応答制御型の耐震補強技術 (制振補強)

制振構造の概要-2

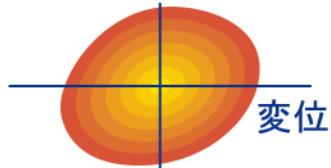
粘性減衰型の制振構造

各階に設置

粘性係数で調整

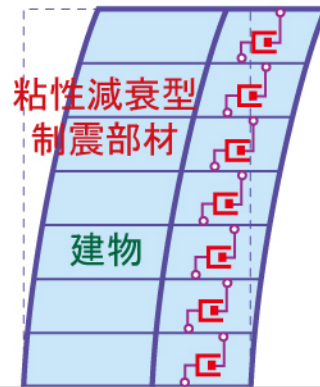
オイルダンパー
粘性ダンパー

減衰抵抗力



制振部材

粘性抵抗エネルギー消散により
建物揺れを制御



大地震時の建物安全性の確保

小～大地震時の揺れを20～30%低減

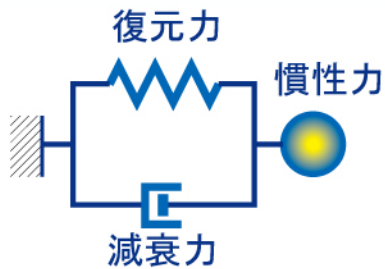
制振部材にエネルギー分散

速度に比例する減衰抵抗力

安定したエネルギー消散

応答制御構造の力学原理

一質点系応答スペクトル曲線



変位スペクトル S_D

擬似速度スペクトル

$$S_{pV} = (2\pi/T) S_D$$

擬似加速度スペクトル

$$S_{pA} = (2\pi/T)^2 S_D$$

T_S : 上部構造固有周期

h_S : 上部構造減衰定数

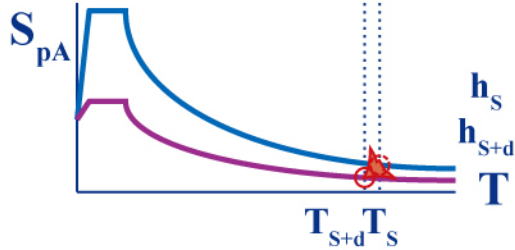
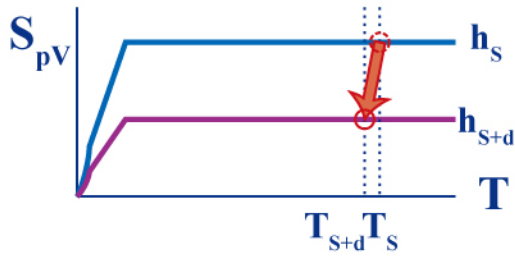
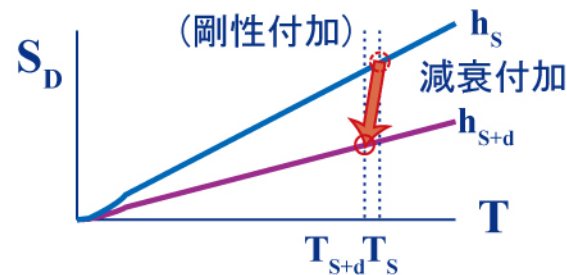
T_{S+d} : 制振構造等価固有周期

h_{S+d} : 制振構造等価減衰定数

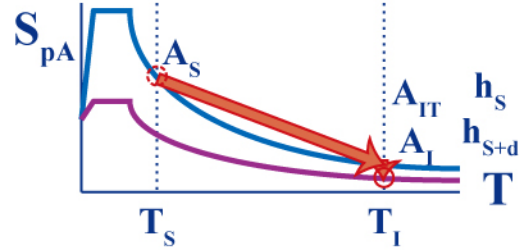
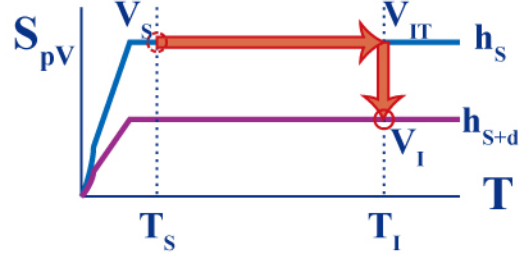
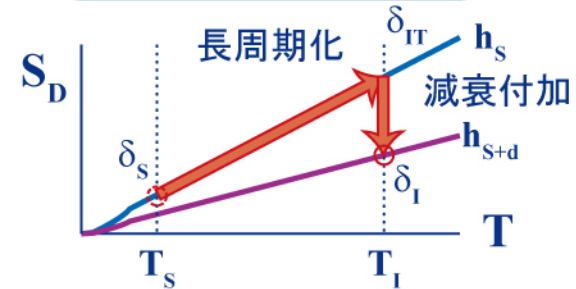
T_I : 免震構造等価固有周期

h_I : 免震構造等価減衰定数

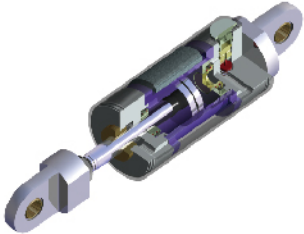
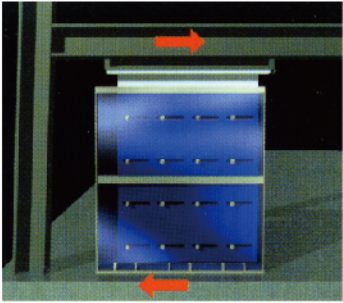



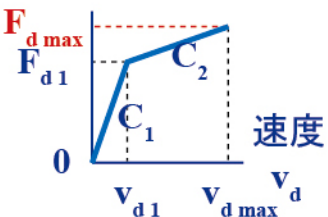
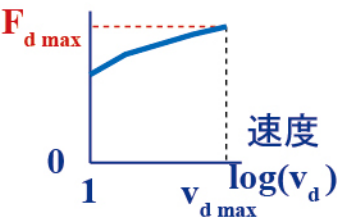
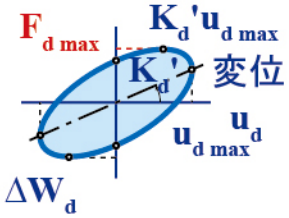
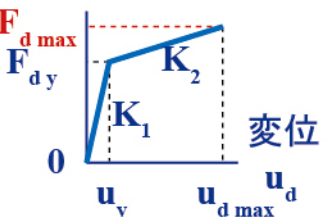
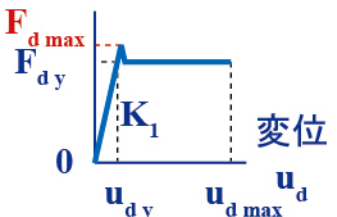
制振構造



免震構造



制振ダンパーの種別

オイルダンパー	粘性ダンパー	粘弾性ダンパー	鋼材ダンパー	摩擦ダンパー
				
<p>減衰抵抗力 F_d</p> 	<p>減衰抵抗力 $\log(F_d)$</p> 	<p>減衰抵抗力 F_d</p> 	<p>ダンパー抵抗力 F_d</p> 	<p>ダンパー抵抗力 F_d</p> 
<p>$F_d = C(v_d) f(v_d)$ F_d-u_d曲線: 楕円, 超楕円 オイル 流れ絞り抵抗型 筒型</p>	<p>$F_d = C v_d^\alpha$ F_d-u_d曲線: 楕円+四辺形 高分子化合物 せん断/流動抵抗型 面型、筒型</p>	<p>$F_d = K(\omega) u_d + C(\omega) v_d$ F_d-u_d曲線: 傾斜楕円 アクリル, ギン等化合物 せん断抵抗型 筒型、面型</p>	<p>$F_d = K(u_d) f(u_d)$ F_d-u_d曲線: バイリニア 鋼材 塑性履歴抵抗型 筒型、面型</p>	<p>$F_d = K(u_d) f(u_d)$ F_d-u_d曲線: バイリニア 摩擦材 摩擦抵抗型 筒型、面型</p>

建築概要

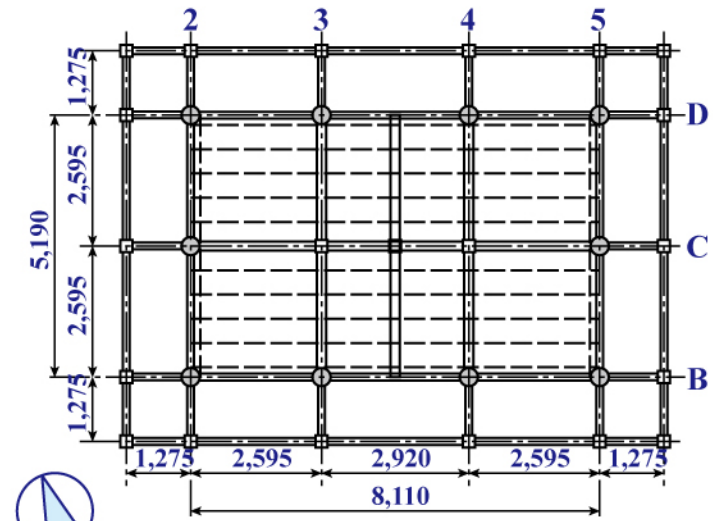


神社舞殿外観・南面

建築地：神奈川県
規模：1階建
延床面積：約83m²
屋根形式：入母屋造・銅板葺
構造種別：伝統軸組構法
建設経緯：1193年（創建）
火災や地震で度々被災
1923年（震害）
2006年 耐震補強コンペ

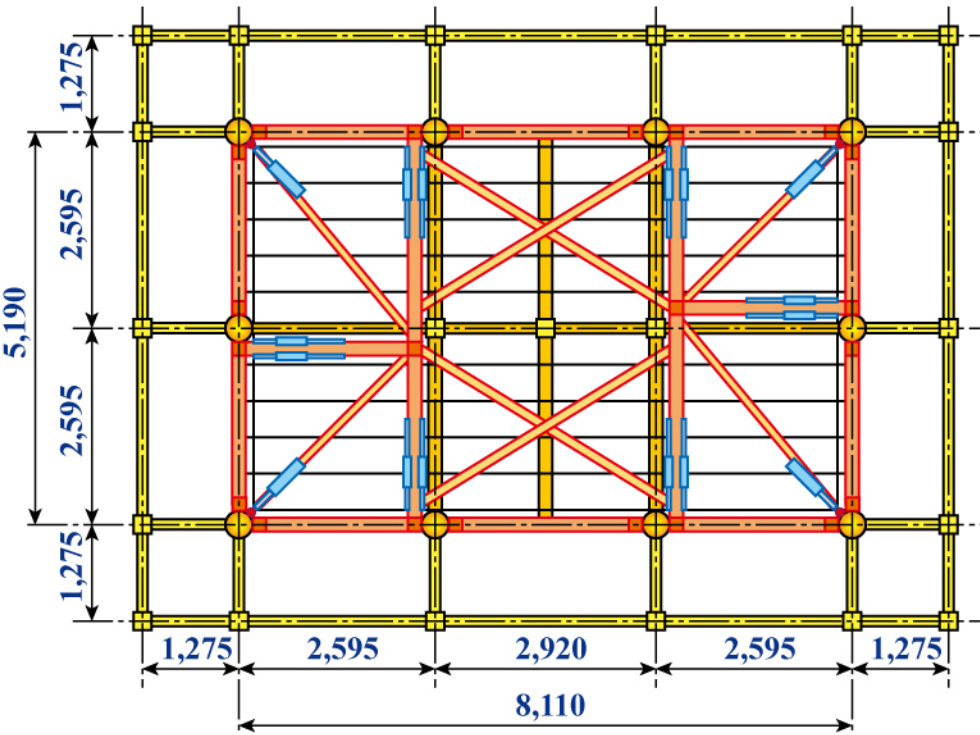


1923年関東大震災時に倒壊



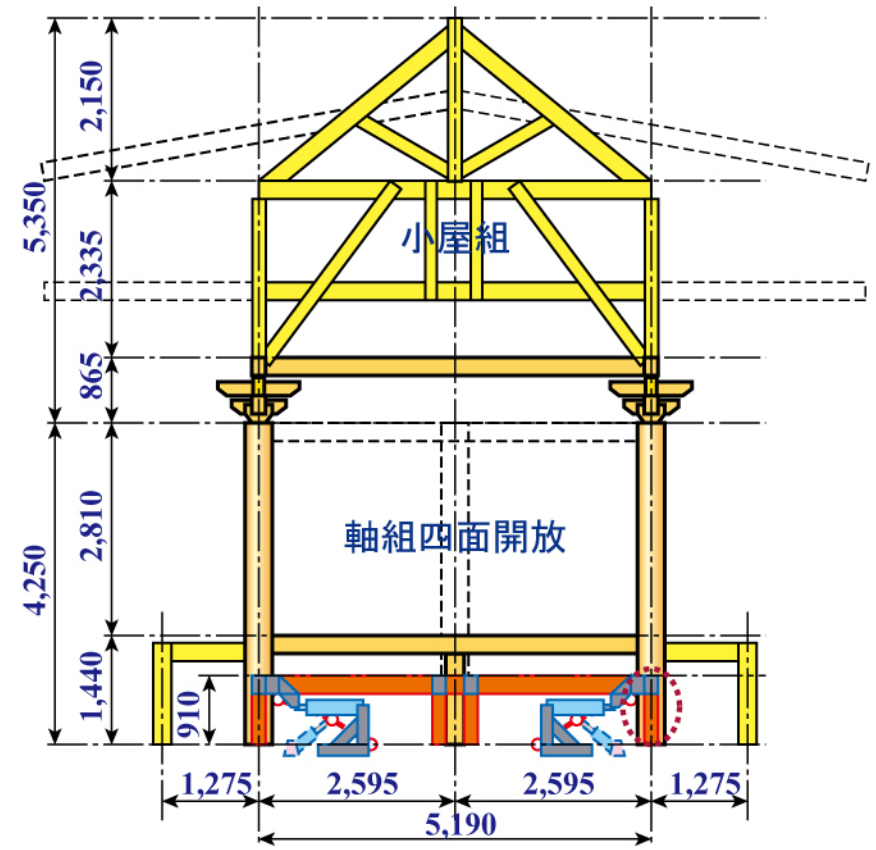
神社舞殿平面図

耐震補強概要



-  木造ラーメン
-  オイルダンパー
-  水平筋違

平面図

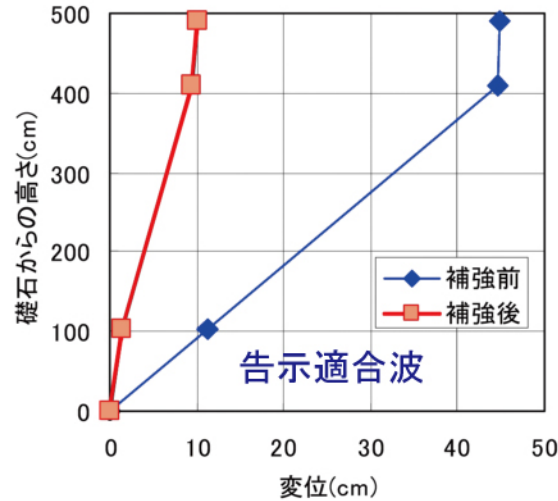
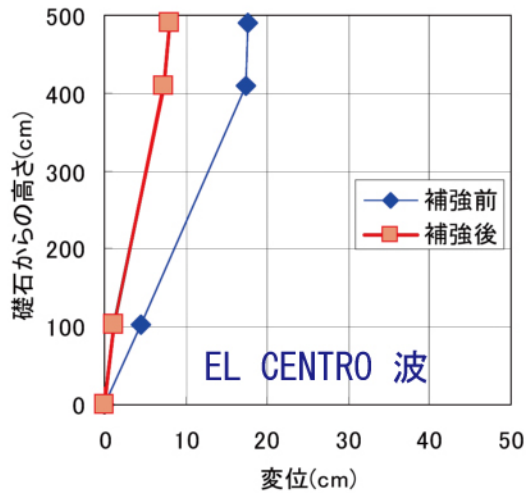
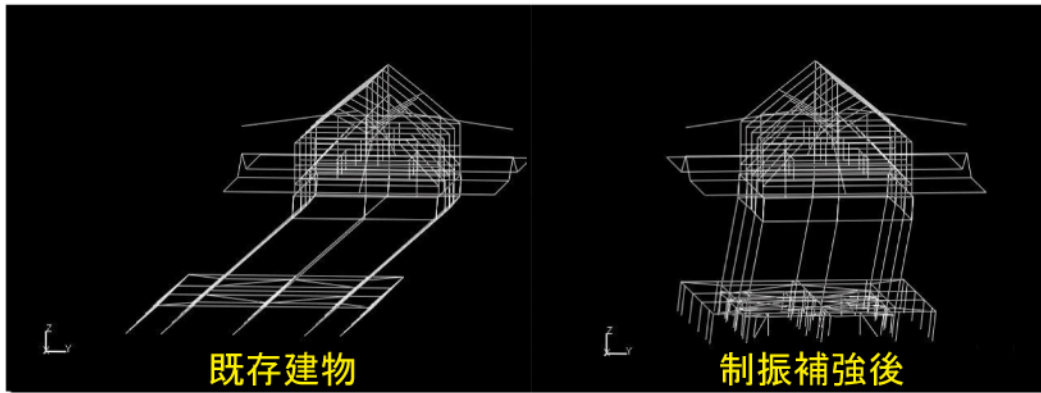


改修前床下架構と格子壁

床下に耐震補強を集中配置

耐震補強：木造ラーメン+オイルダンパー

耐震補強効果の解析



木造制振ラーメン



オイルダンパー

制振補強により変形を1/2に低減

大地震時でも倒壊防止を確認

改修施工：補強架構設置



基礎スラブとアンカーボルト・西面



補強金物取付け・中央部

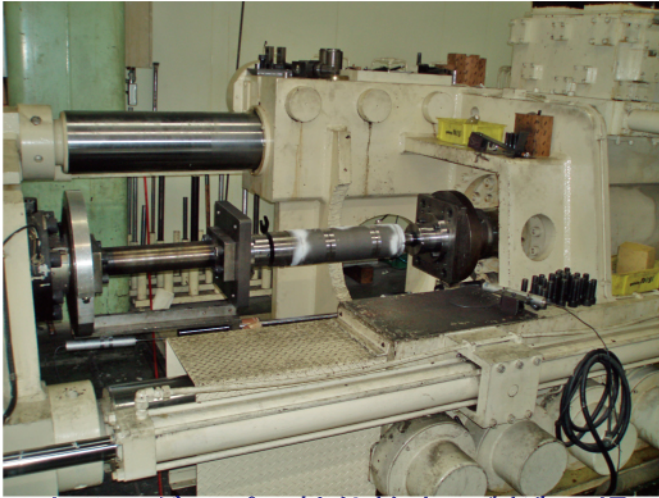


木造ラーメン架構組立・北面中央部

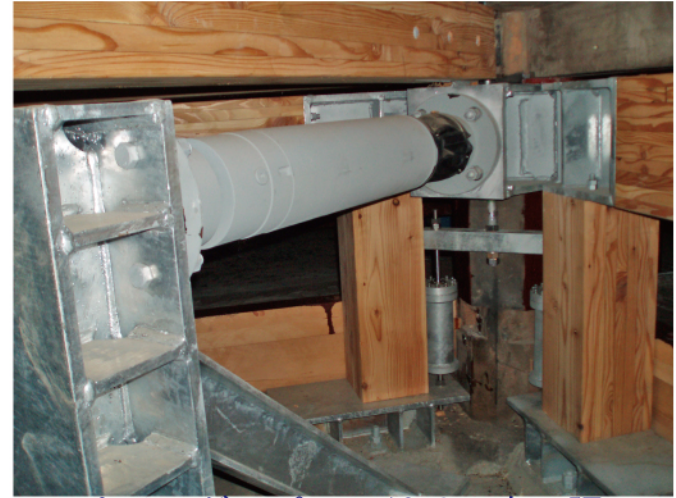


既存柱と木造ラーメン架構接合・西面中央

改修施工：ダンパー設置



オイルダンパー性能検査・製造工場



オイルダンパー取付け・南西隅



木造ラーメンと水平筋違接合・中央列西側



既存架構と補強架構・南面東方向

改修施工：改修完了外觀



竣工時外觀・南面



外觀・西面



軸組・南西面



床下格子と耐震補強部・北面

2020.12.02

重要文化財丸岡城天守の構造調査

主催：福井県坂井市教育委員会



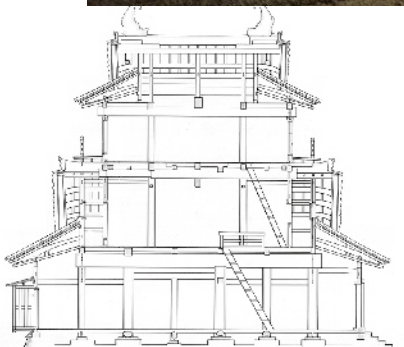
 PUBLIC DOMAIN

著作権等の都合により
省略しました

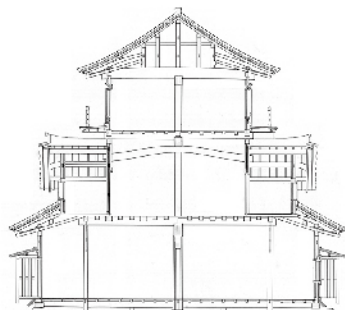
丸岡城の写真

丸岡城天守の形状と骨組配置

丸岡城天守の形状



(a) 東西方向に通り

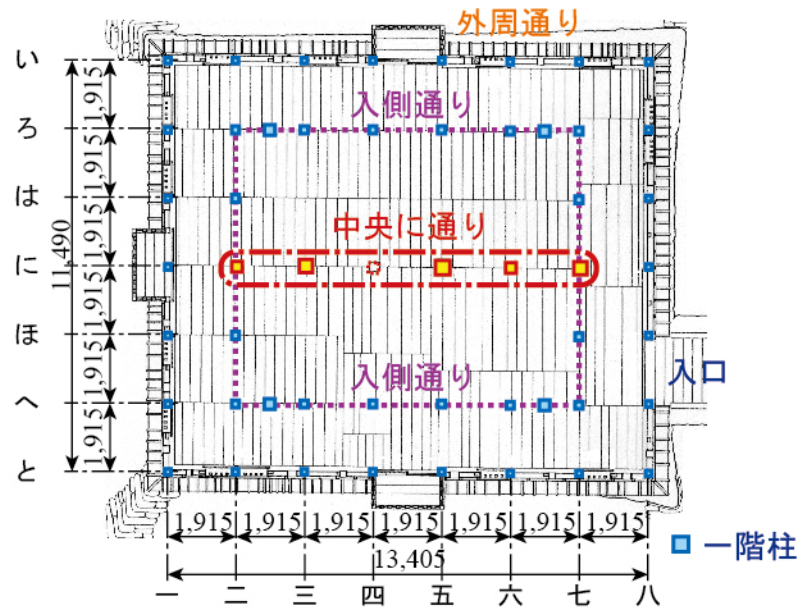


(b) 南北方向四通り

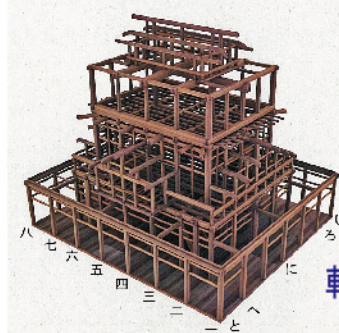
丸岡城天守断面図S30年 ©坂井市

注) ©坂井市 福井県坂井市教育委員会提供資料を示す

骨組配置平面図



一階平面図S30年 ©坂井市

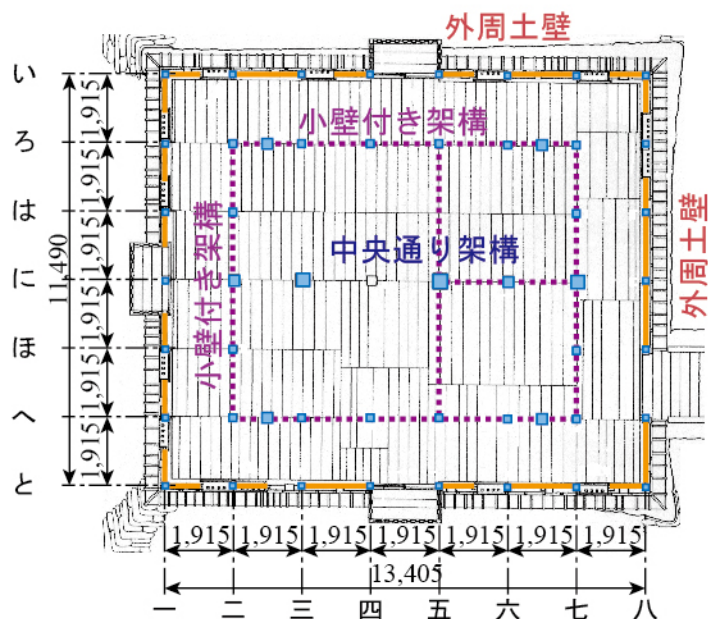


軸組3DCG図

©坂井市

丸岡城天守の骨組形式と課題

耐震要素の平面配置



丸岡城天守の主要な耐震要素・一階^(c) 坂井市

小壁付き架構と土壁の組合せは一般的
次年度以降の耐震解析で補強検討

耐震要素の各階配置状況



(a) 中央通りと小壁付き架構



(b) 外周土壁と小壁付き架構

著作権等の都合により
省略しました

二階外周土壁の写真

(c) 二階外周土壁

著作権等の都合により
省略しました

三階外周土壁の写真

(d) 三階外周土壁

丸岡城天守の主要な耐震要素配置状況^(c) 坂井市

丸岡城天守の骨組形式と課題

土壁の仕様



(a) 土壁の竹木舞と藁縄



(b) 土壁塗り仕様

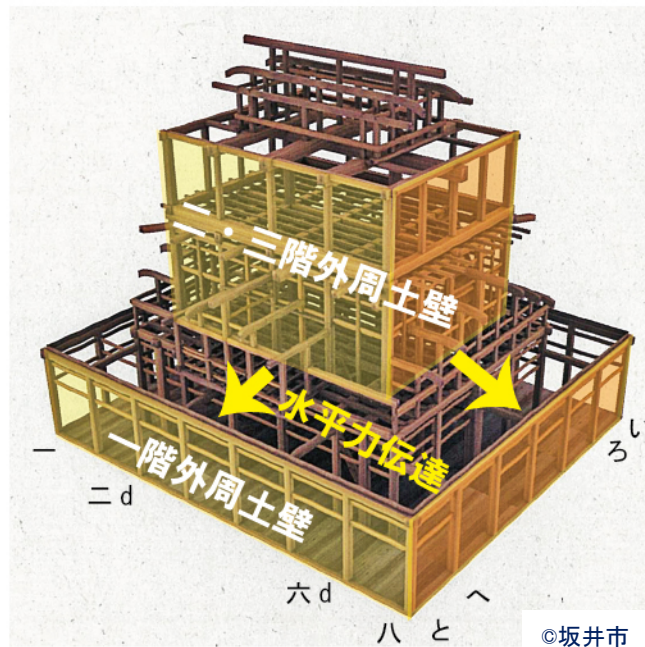


(c) 土壁の断面・外側のみ土塗で中間空洞

土壁の仕様S17年 ©坂井市

土壁は、外側のみ土塗となっており、耐震壁の両面塗り仕様より性能が低い

耐震要素の立体配置

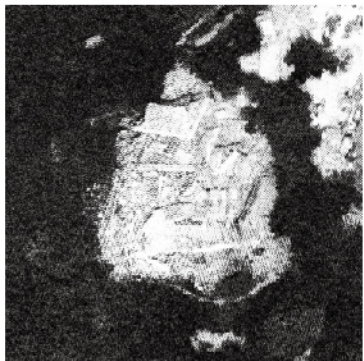


二・三階外周土壁から1階外周土壁への水平力伝達

一階と二・三階では外周土壁位置が異なり、水平力伝達に課題

丸岡城天守の骨組形式と課題

地震被害の歴史



(a) 米軍航空写真
北北西方向に崩落



(b) 東面石垣崩壊

丸岡城天守の地震被害写真・福井地震 ©坂井市

丸岡城天守の主要な地震被害

年代	1858年4月 安政-飛越地震	1948年6月 福井地震
震度	推定震度5-(6)	震度6強-(7)
被害	鯨や石瓦の落下 石垣の部分崩壊	建物倒壊 石垣の全面崩壊

建物の地震被害状況



(a) 三階屋根の形状・東妻面



(b) 一階外周壁と二階出部屋の形状・南面
建物部分の被害写真：福井地震 ©坂井市

三階屋根部は形状を留める
一階土壁も板壁と一体で形状を留める

丸岡城天守の骨組形式と課題

石垣の地震被害



(a) 石垣の崩壊・北面東側

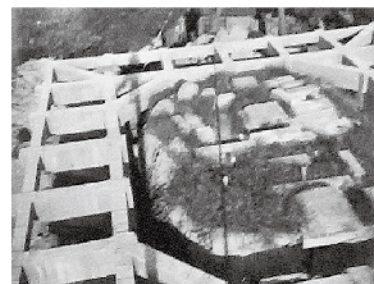


(b) 石垣の崩壊・東面階段

丸岡城天守台石垣の崩壊・福井地震⁽¹⁾ ©坂井市

福井地震1948年：石垣が全面的に崩壊
安政-飛越地震1858年：石垣の一部崩壊

石垣の地震後補強



(a) 補強RC架構平面・東方向



(b) 補強RC架構立面・南面



(c) 補強RC架構・基礎柱配筋



(d) 補強RC架構梁面・南面

補強RC架構建設状況：S30年 ©坂井市

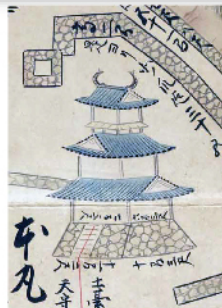
補強RC架構の設計図書が不明であり
写真から設計寸法等を読み取り

丸岡城天守の望楼型と骨組形状

丸岡城天守の望楼形式

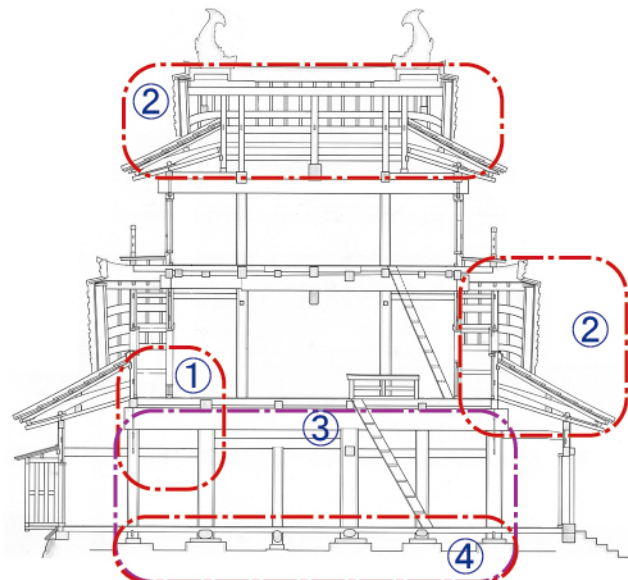


大屋根上に望楼が載る形式



正保城絵図 1644年・丸岡城天守 ©坂井市

骨組形状の特徴



丸岡城天守S29年・東西断面図 ©坂井市

①一階柱の通りと
二階・三階柱がずれる

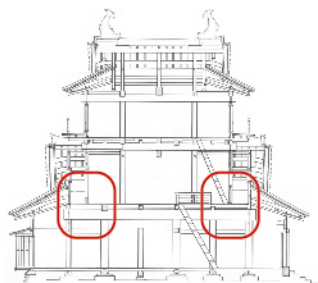
②石瓦葺き屋根と
二階屋根は外側付足し

③一階中央筋に
太い柱-梁設置

④一階柱の脚部は
一部が掘立て柱

丸岡城天守の骨組形式と課題

骨組形式：①柱通りのずれ



丸岡城天守S29年・東西断面図 @坂井市

①一階柱通りと
二・三階柱がずれる



一階柱通りと二階・三階柱通りのずれS17年 @坂井市

①柱通りのずれと課題



一階柱通りと二階・三階柱通りのずれ：南列西側

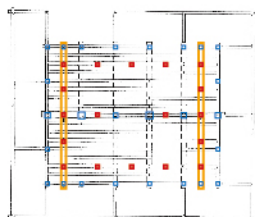
日本の伝統的建築では、
上階と下階での柱通りずれは一般的

力学的には、上階を支える力の流れに
無理が生じ上階柱受け大梁が厳しい

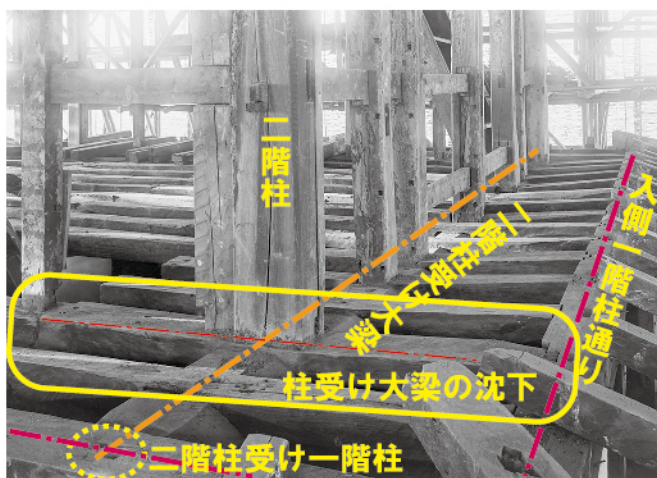
丸岡城天守の入側一階柱は、
下屋の屋根と二階床重量の支持が中心

丸岡城天守の骨組形式と課題

①柱通りのずれと課題



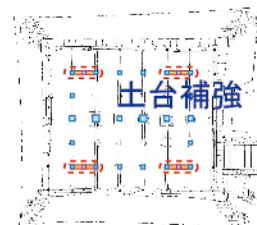
- 二階柱受け大梁
- 二階柱
- 一階柱



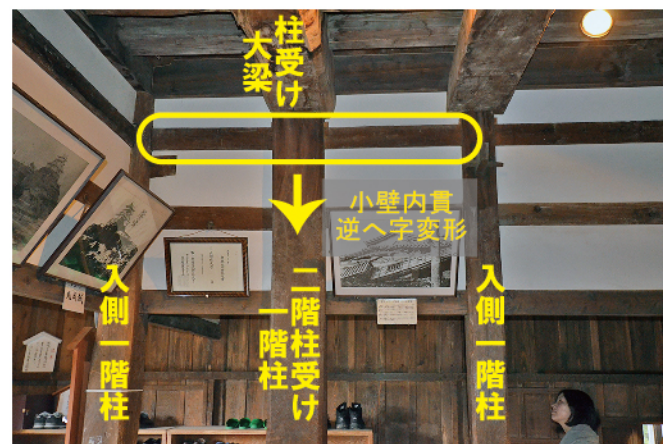
二階柱を受ける大梁の沈下変形S17年 ©坂井市

二階柱を支える柱受け大梁に力が集中し、大きな沈下変形が発生

①柱通りのずれと課題



- 一階柱
- 二階柱受け一階柱

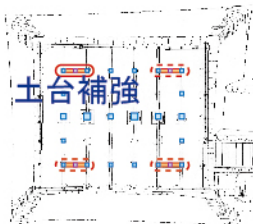


二階柱受け一階柱の沈下:南列東側

二階柱受け一階柱脚部は、礎石ではなく土台で支持され^{S30年}、沈下発生

丸岡城天守の骨組形式と課題

①柱通りのずれと課題



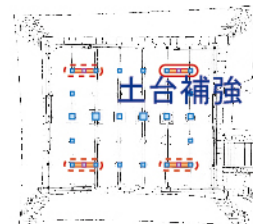
- 一階柱
- 二階柱受け一階柱



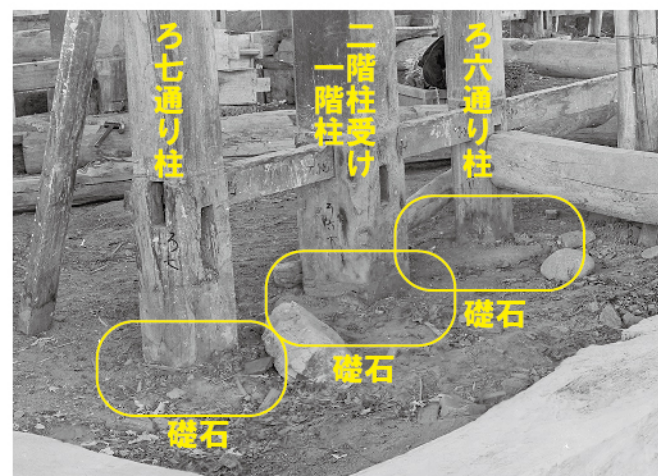
二階柱受け一階柱脚部の土台の沈下：北列西側 ©坂井市

柱脚部を礎石ではなく、土台で支持し
土台の撓み等で、沈下変形が発生

①柱通りのずれと課題



- 一階柱
- 二階柱受け一階柱



二階柱受け一階柱脚部の礎石S17年：北列東側 ©坂井市

二階柱受け一階柱脚部は、
S17年には礎石で直接支持されていた

丸岡城天守の骨組形式と課題

②屋根石瓦葺き変更



(a1) 柿葺き残置S17年 @坂井市

(b1) 石瓦葺きS30年 @坂井市



著作権等の都合により
省略しました

石瓦葺きの写真

(a2) 柿葺きの仕様 (b2) 石瓦葺きの仕様S29年

丸岡城天守の屋根葺き材変更

屋根葺き材: 柿葺きから石瓦葺きに変更
 本多入城(1613年)以降だが, 歴史資料無し
 →構造的影響は極めて大きい

②屋根石瓦葺きの影響

屋根葺き材による重量比較 (単位面積あたり)

屋根葺き材	柿葺き	石瓦葺き
屋根仕様	薄い杉等板を 十枚程度重ね	葺き土の上に 本瓦葺き石瓦
屋根重量	0.3 kN/m ²	2.4 kN/m ² 8~10倍
建物重量	≒2.8 kN/m ²	≒5.0 kN/m ² 1.7~2倍

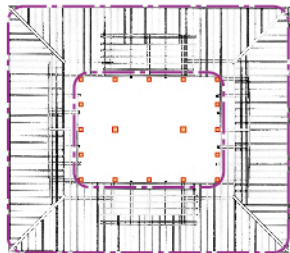


石瓦総重量S30年
570 kN (58.2 t) @坂井市

貞享5年(1688年)改修の歴史資料
 中央通り柱: 断面増・差替え等の記録
 木材年代(1620-26年)から短期間で改修

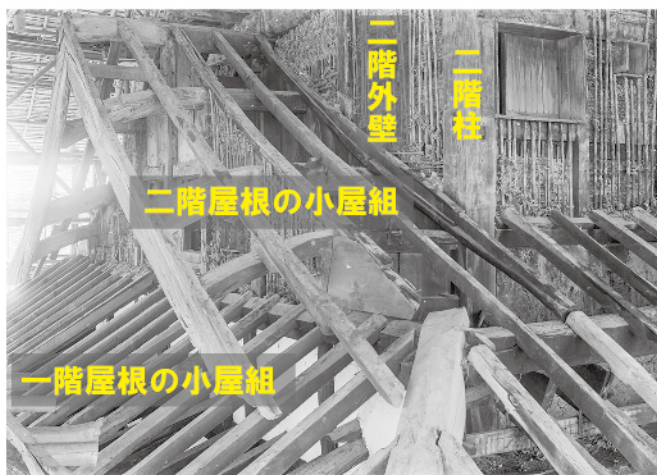
丸岡城天守の骨組形式と課題

②二階屋根の小屋組の特徴



②二階屋根は
二階柱外に付け足し

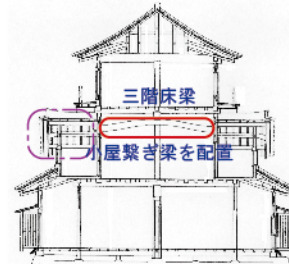
□二階柱



二階屋根の小屋組S17年：西妻面 ©坂井市

2階屋根の小屋組は、
2階柱の外側に付け足す骨組形式
小屋組の上に軸組を載せる形式ではない

②二階屋根の小屋組の特徴



南北断面図

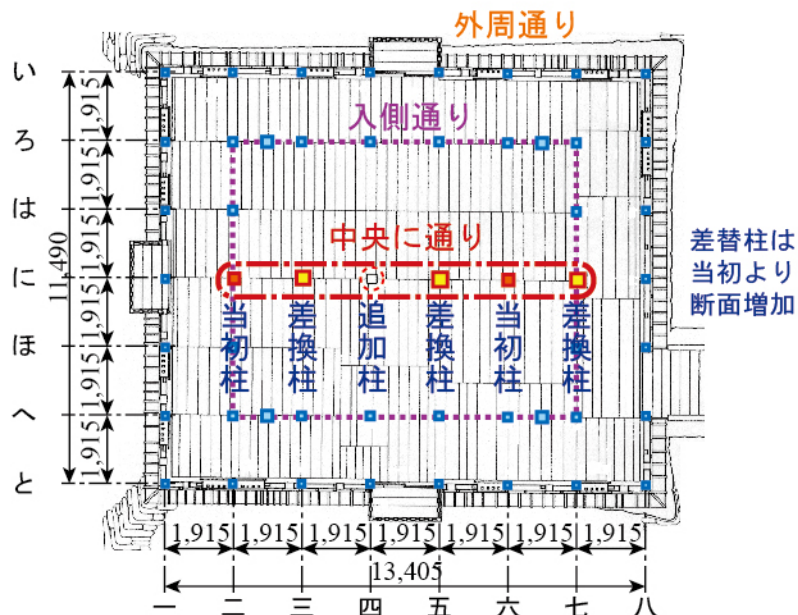


二階屋根棟木位置の繋ぎ梁：南端東方向

2階屋根小屋組は、部屋で分断されるが、
繋ぎ梁を配置して一体性を確保

丸岡城天守の骨組形式と課題

③中央桁通り架構の特徴

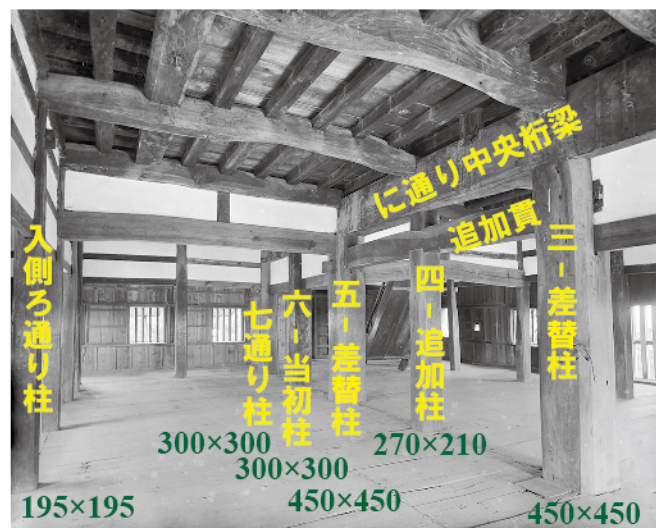


一階平面図柱位置S30年 ④坂井市 ■一階柱

1階柱は、桁方向（東-西）中央に通りの柱・大梁断面が大きい

中央に通りは、二・六通り：当初柱，
三・五・七通り：差替え柱，四通り：追加柱

③中央桁通り架構の特徴



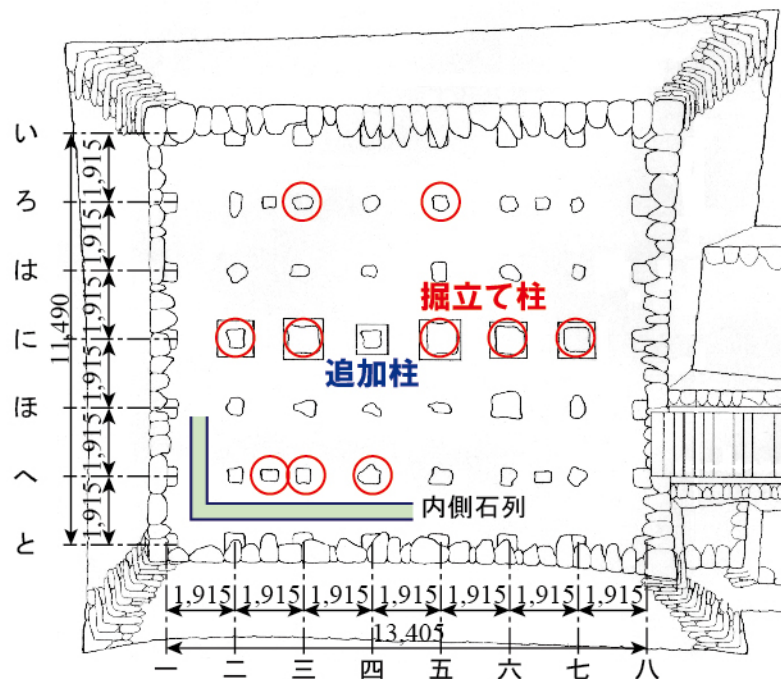
中央に通りに柱S17年：東方向 ④坂井市

中央に通り架構で主に建物を支え、
入側通り架構で両側を囲む構造形式

外周通り架構は、1階屋根のみを支え
1階外壁（土壁）を支持する柱

丸岡城天守の骨組形式と課題

④掘立て柱の特徴



基礎伏図-礎石配置図 ©坂井市、吉田

中央に通り・入側通りの一部柱は、掘立て柱で、地盤中に埋込まれていた

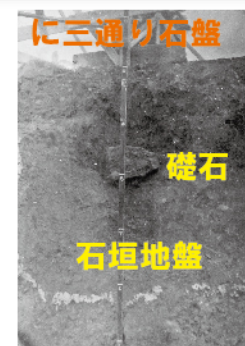
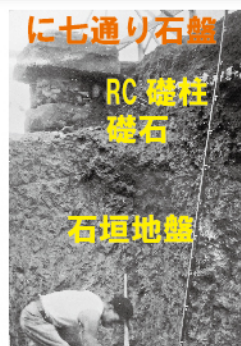
埋込み深さが600mm程度で、伝統的建築の本格的な掘立て柱の性能より低下

④掘立て柱脚の課題



中央に通り柱等の埋込み部をRCに置換えS17年 ©坂井市

掘立て柱の脚部の腐食劣化が激しく、S12年にRC礎柱に置換え



礎石部の地盤掘削調査写真S27年 ©坂井市

丸岡城天守の骨組形式と課題

④掘立て柱の歴史



平城宮の掘立て柱:平城宮発掘遺構展示室

千三百年前の平城宮遺構で、楼閣用の掘立て柱を発掘（深さ約1,200mm）



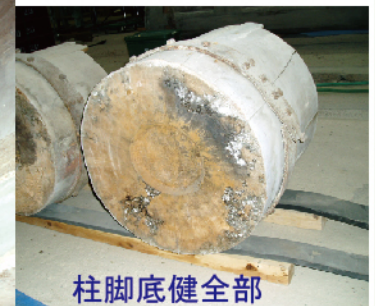
伊勢神宮等の神社でも、
主な社殿は掘立て柱形式を採用

④掘立て柱の柱脚の課題



大鳥居の掘立て柱脚部の腐食 瀧川寺社建築

掘立て柱の脚部は、地表面付近で
腐朽菌に適した水分-酸素-温度で腐食



柱脚底健全部

唐招提寺金堂柱は礎石立ち・柱脚底蒸れ腐り

2020.12.02

歴史的建築工学講義

歴史的木造建築と構造診断・補強

- 古代建築の力学と現代技術 -



END



ご清聴有難うございました