

平成29年度建築基準整備促進事業

(S25)

断面の大きい軸材料等を用いる 木造建築物の技術基準に関する検討

株式会社ドット・コーポレーション
京都大学 生存圏研究所

事業の背景と目的

調査の背景：

伝統的木造軸組構法は日本古来より伝わる構法で土塗壁等の特有の耐震要素から構成される。

しかし、建築基準法の仕様規定に適合しない耐震要素は限界耐力計算等の高度な構造計算が要求される。

そのため、壁量計算等で建築するための法令等の整備が求められている。

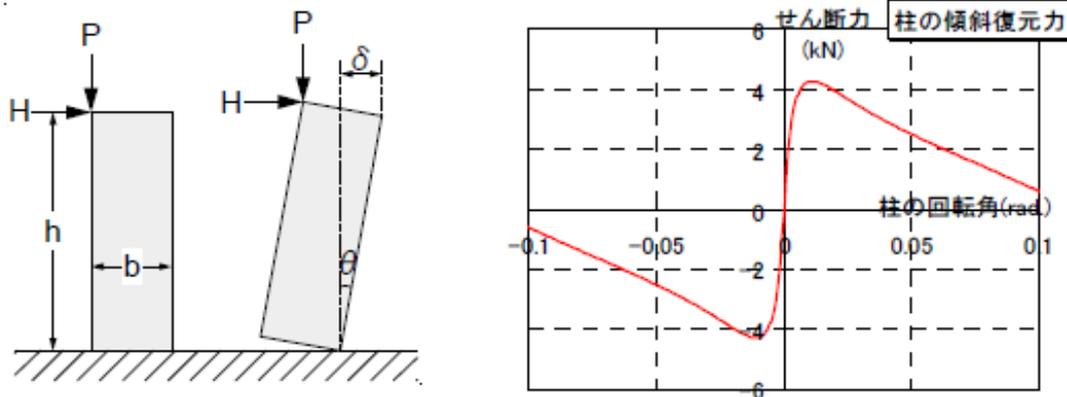
目的：

本調査では、現行の建築基準法令に適合しない構法について実験的・解析的検討により、告示等の基準案の提案を行うことを目的とする。

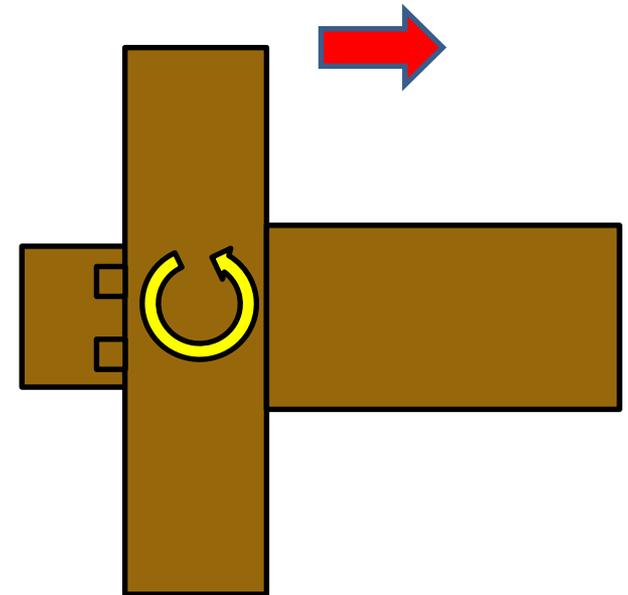
実施項目 1

(1) 断面の大きい軸材料の耐震性能に関する検討

既往の実験・解析的検討結果、設計式*1等を元に、断面の大きい柱の傾斜復元力（転倒抵抗モーメント）と断面の大きい柱及び横架材で構成される接合部の回転抵抗について、水平抵抗要素として考慮するための解析的検討を行い、木造建築物の耐震性能評価に用いるための設計値等の提案を行う。



傾斜復元力



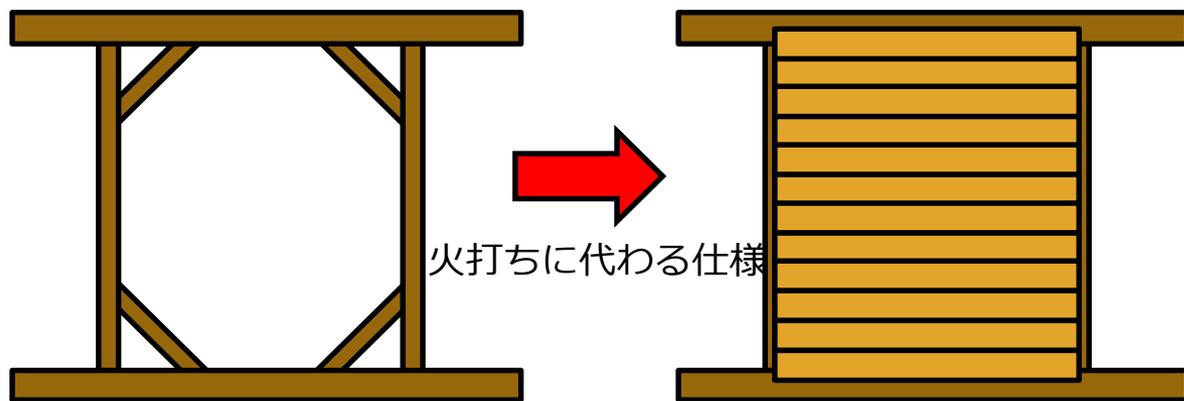
接合部の回転抵抗

*1 津和 佑子、加藤 圭、腰原 幹雄「組物を有する伝統木造社寺建築の構面振動台実験 その2 水平耐力要素のモデル化と考察」日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp. 45-46 (2008)

実施項目 2

(2) 小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

既往の実験結果や、平成26年度に検討した火打ちに代わる床水平構面の検討方法を参考に、伝統的構法による壁、平面プランを想定したパラメトリックスタディ等により、小屋ばり組の水平構面に必要とされる屋根面のせん断性能を明らかにし、火打ちに代わる仕様として用いる標準的な屋根面・小屋ばり組の仕様について検討を行う。



既往の研究：板張りの床の検討

現実に近い等分布荷重での解析・実験（等分布）を実施



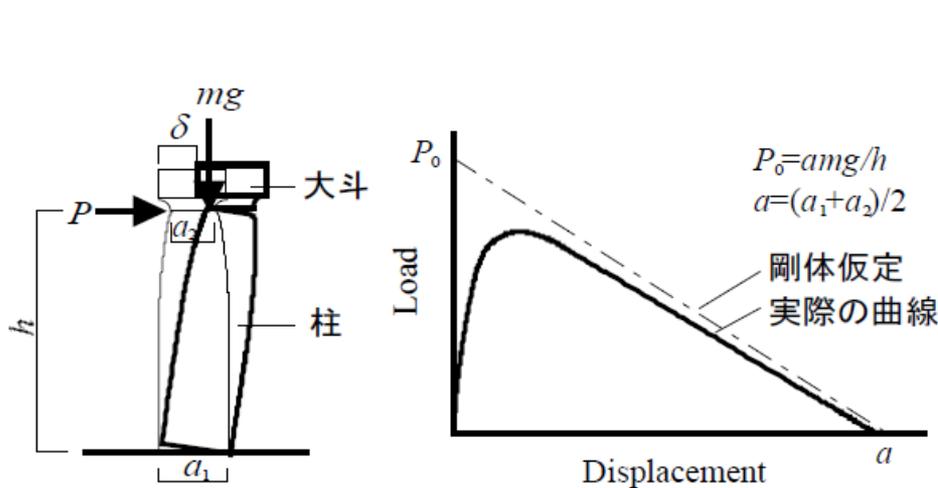
既往の研究：切妻屋根の実験

集中荷重で実験を実施

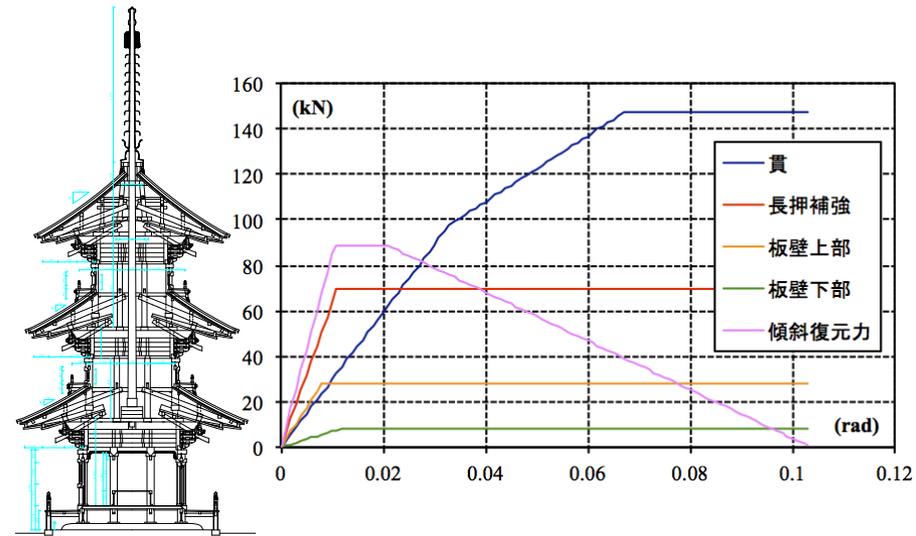
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

柱傾斜復元力とは・・・

- 伝統木造、特に古代建築においては、比較的太い柱に加わる鉛直荷重が柱の傾斜を減少させる側に働く、「柱傾斜復元力」が、耐震性能に関わる重要な要素と考えられている。
- 柱傾斜復元力が建築物の層のせん断耐力に占める割合は、柱長に対する柱径の比や、その比の大きい柱が負担する鉛直荷重の大きさによって変化する。



柱傾斜復元力の概念図



三重塔の例

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

柱傾斜復元力について残された課題は・・・

(1) 荷重変形関係：

上部に木材の梁等がある場合など、種々の条件下での荷重変形関係の把握が必要

(2) 負担面積と柱軸力

壁量計算ルートでは、負担面積等による柱軸力の推定を行い、等価な壁量への換算が必要

(3) 建築物内での実際の挙動

壁等（貫・板壁）が取り付くことによる柱軸力の変動、柱の曲げ変形などの影響を検討することも必要

構造設計法の提案に繋がる基礎資料を得ることを目的として、主に上の(2)、(3)の検討を行った。

負担面積を考慮した柱傾斜復元力の等価な壁量について 許容耐力と等価な壁量の考え方

- 柱傾斜復元力による柱1本当たりの許容耐力 P_a は次式で与えられる。

$$P_a = 0.5\alpha \frac{amg}{h}$$

α : 0.7程度の値

a : 柱径

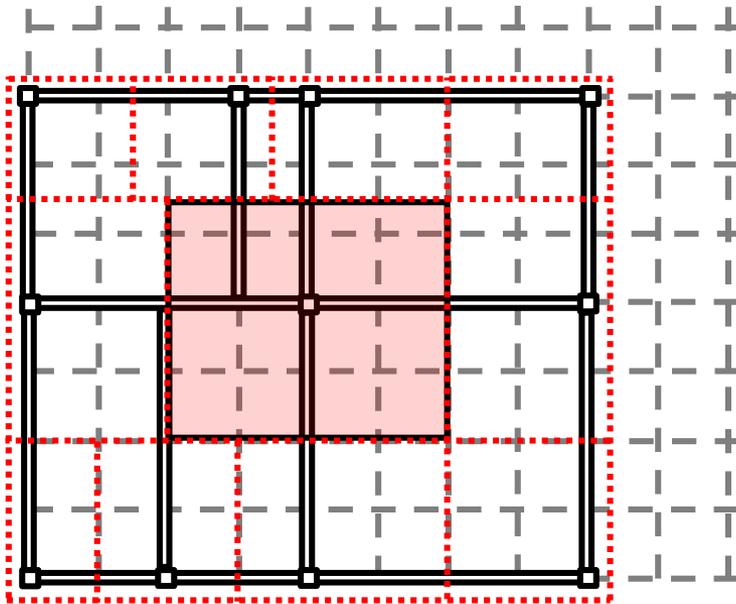
mg : 柱軸力

h : 柱長

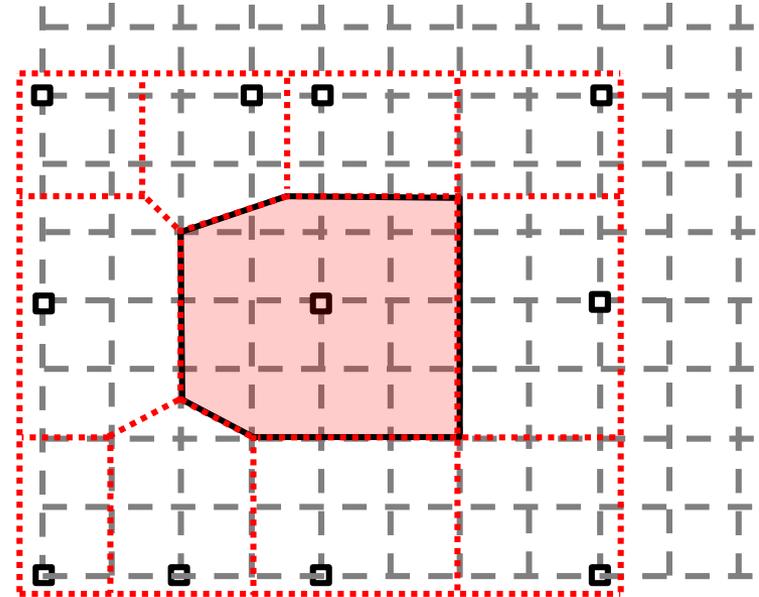
- 構造計算を行わない簡易な設計では、負担面積等を用いて柱軸力を推定することとなるが、上階からの荷重、建築物の用途等による差異も考慮する必要がある。

負担面積と上階からの荷重について

- 負担面積の求め方には、次の2つが考えられる。
 - (a) 梁の掛かり方を考慮した長方形分割
 - (b) 梁の掛かり方を考慮しない略算法



(a) 梁の掛かり方を考慮

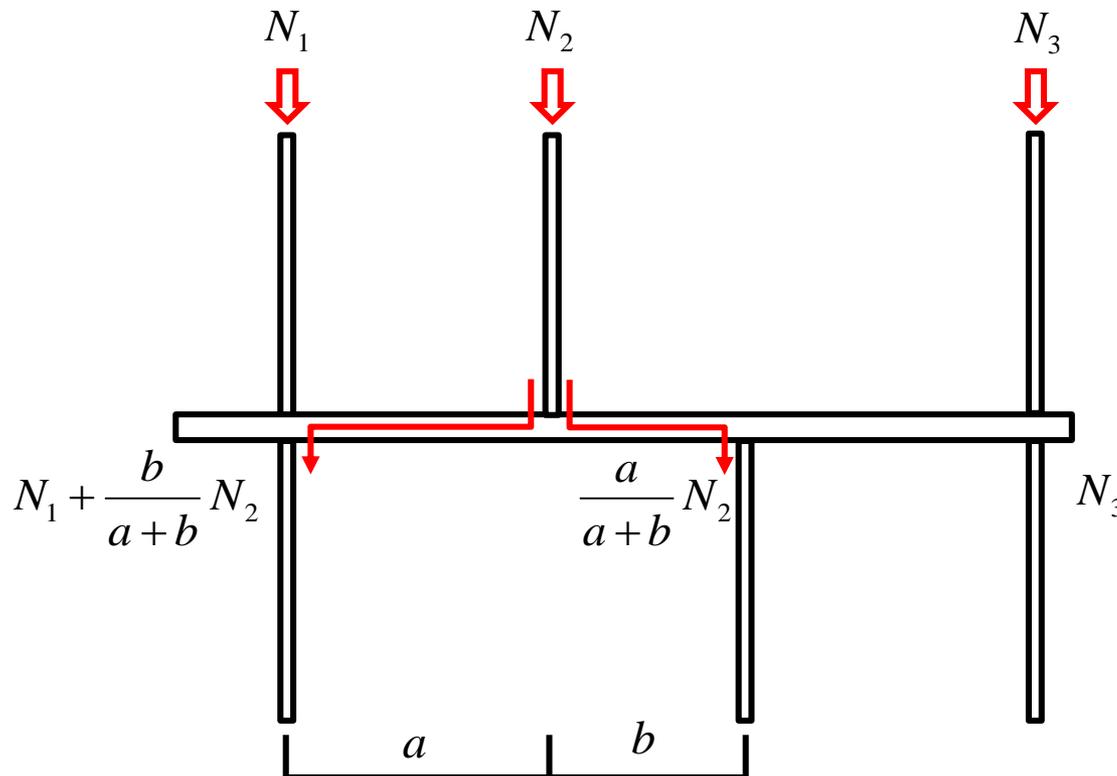


(b) 梁の掛かり方を考慮しない

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

負担面積と上階からの荷重について

- 上階からの荷重については、次の3つが考えられる。
 - (Ⅰ) 梁の掛かり方を考慮して上から落としていく方法
 - (Ⅱ) 下階柱の負担面積内の上階柱の軸力をすべて加算する方法
 - (Ⅲ) 上階の負担面積は下階と同一であると仮定する方法



上階からの荷重の伝達：
構造計算においては、
左図のように力の流れを
考慮する = 上記(Ⅰ)

簡易な柱軸力算出方法の素案

- 簡易な設計法としては、
負担面積の取り方は(b)梁の掛かり方を考慮しない方法
2階からの荷重は(Ⅲ)1階と同じ負担面積を用いる方法
とするのが現実的。
- 各階の単位重量としては、通常の住宅について、壁量規定の前提とされる次の質量による数値を用いる。

屋根（屋根面当たり）

軽い屋根の場合

60kg/m²

重い屋根の場合

90kg/m²

床固定荷重（床面積当たり）

50kg/m²

壁荷重（床面積当たり）

60kg/m²

積載荷重

60kg/m²

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

簡易な方法による柱軸力の計算例

- 文献1*のモデルプラン1階柱4本について、許容応力度計算による柱軸力と略算による柱軸力を比較した。
- 前述の単位重量を用いた場合、許容応力度計算での重量による単位重量を用いた場合（下表）、いずれも、略算による柱軸力は、小さめの値であった。
- 種々の形式建築物について同様の検討を進め、柱傾斜復元力の略算法の可能性を検討する必要がある。

柱番号	略算による柱軸力				許容応力度計算での柱軸力	
	面積	単位重量	バルコニー 考慮せず	バルコニー 考慮	積載荷重 1.3kN/m ²	積載荷重 0.6kN/m ²
	m ²	kN/m ²	kN	kN	kN	kN
X3Y2	2.376	7.82	18.6	22.1	23.1	19.1
X8Y2	2.018	7.82	15.8	18.1	41.9	36.8
X5Y6	1.242	7.82	9.7	9.7	23.8	18.2
X5Y2	1.548	7.82	12.1	15.6	46.8	39.6

貫および板壁を含む軸組構面における 柱の傾斜復元力特性に関する検討の目的

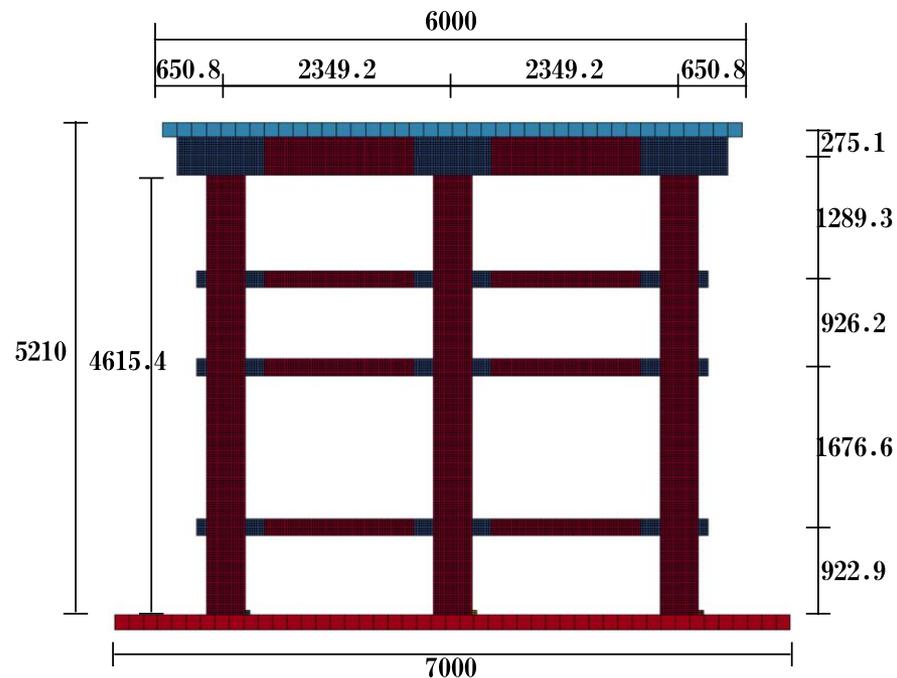
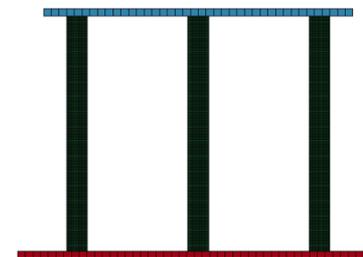
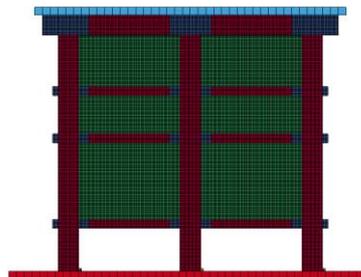
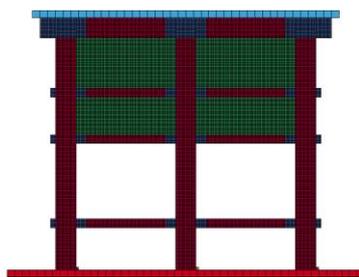
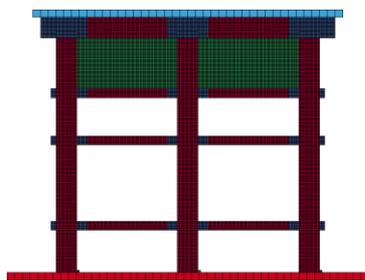
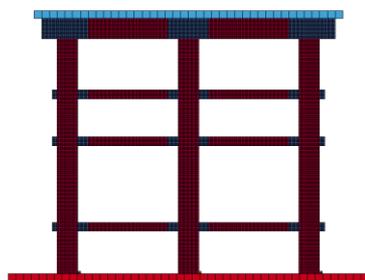
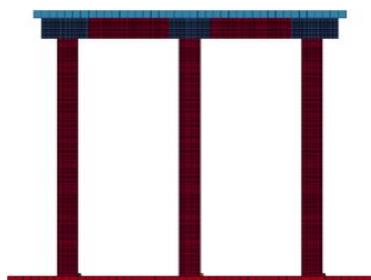
- 柱の傾斜復元力特性に関する実験や理論構築は既にいくつかの検討が行われているが、柱のみを用いた検討が多い。
- 一方で、実際の建物では貫や板壁など他の部材が複合的に構成されているが、柱の傾斜復元力特性を実験時に直接的に評価することが難しく、実際の状況下で耐震要素全体の復元力に対して柱の傾斜復元力特性の負担割合については不明な点が多い。
- そこで、柱のみならず貫や板壁を併用した場合における柱の傾斜復元力特性を把握することを目的として、3次元有限要素解析を用いた解析的検証を実施した。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

解析モデル



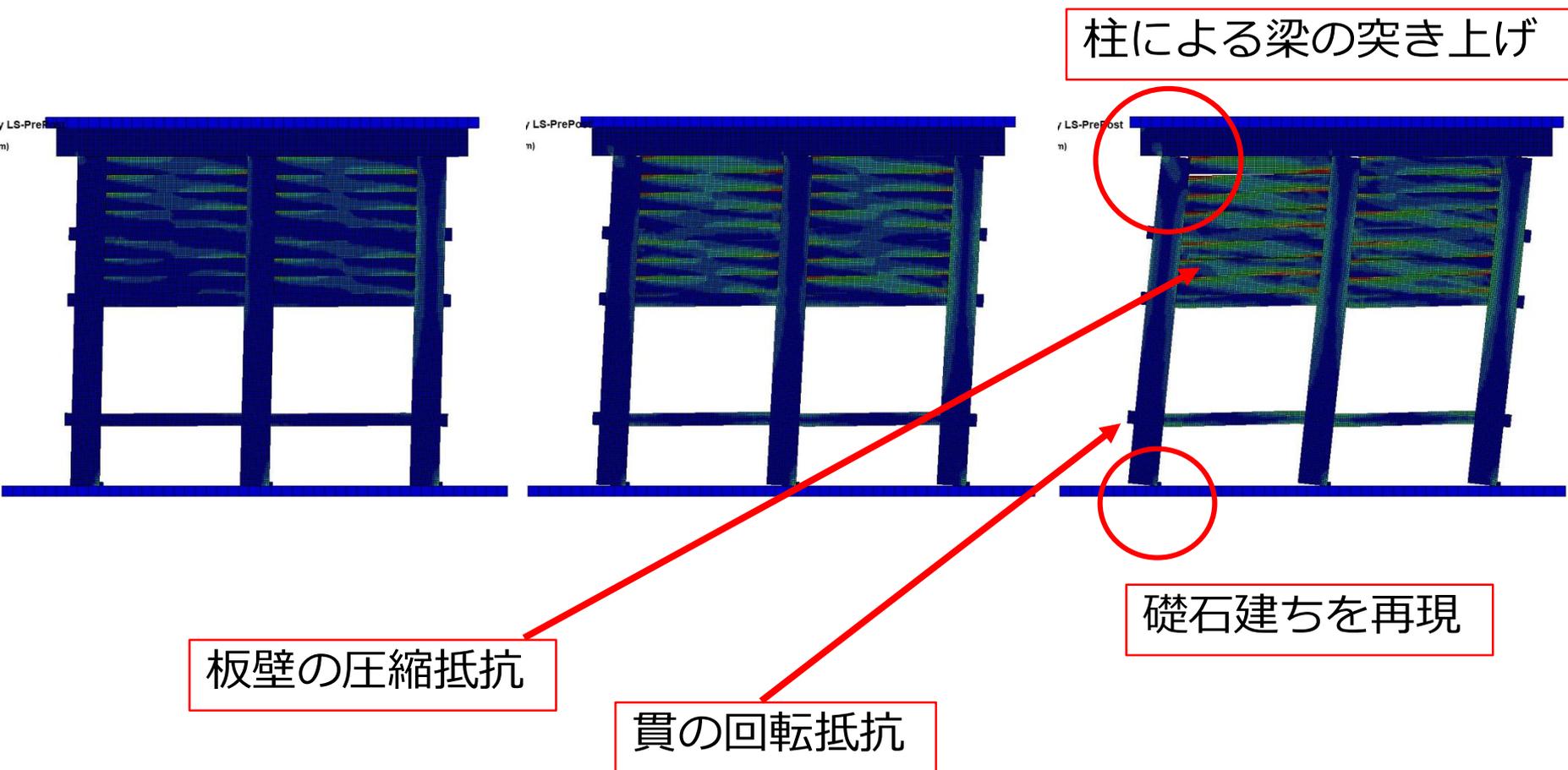
対称性を考慮して1/2モデルにて解析を実施



【基準寸法】

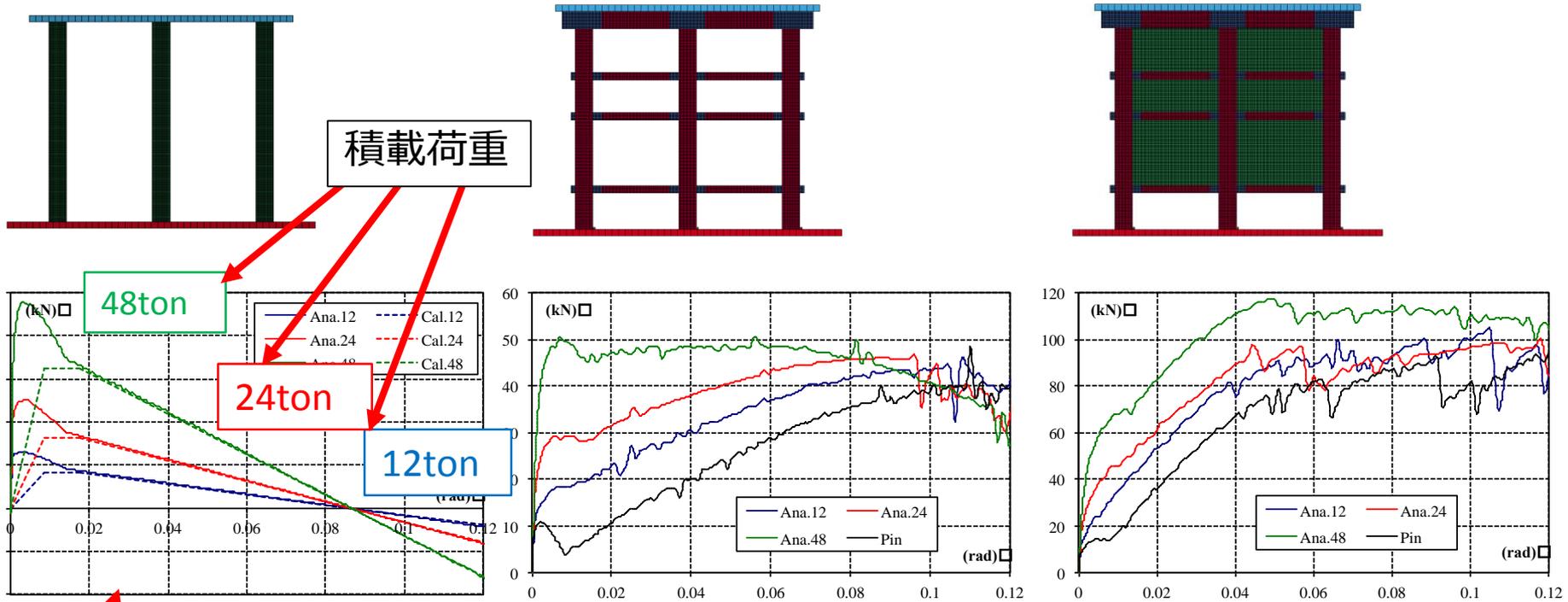
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

解析結果（変形の様子）



断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

解析結果（荷重－せん断変形角関係）

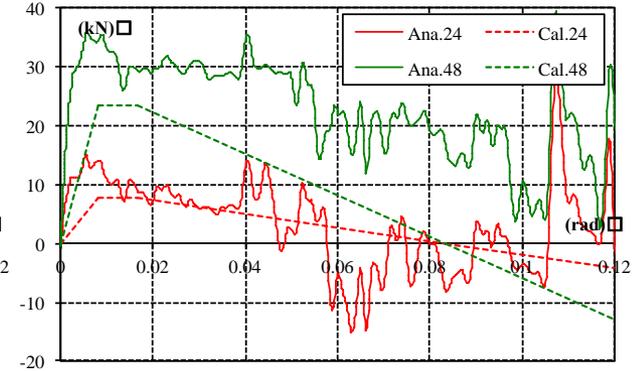
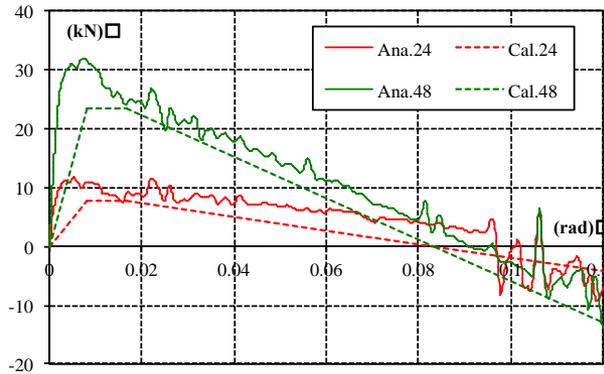
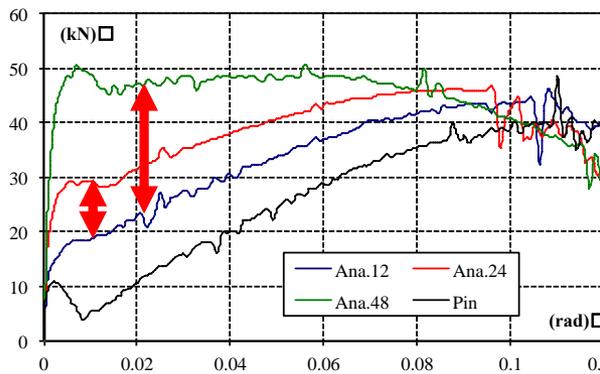


・ 柱のみ
→剛体により理論式に合致
(解析の妥当性を確認)

・ 貫や板壁を含む構面
→柱の傾斜復元力特性以外の耐力が発現されるため
荷重上昇が見られる。
→柱の傾斜復元力特性の直接的な評価が難しい。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

柱の傾斜復元力特性の抽出

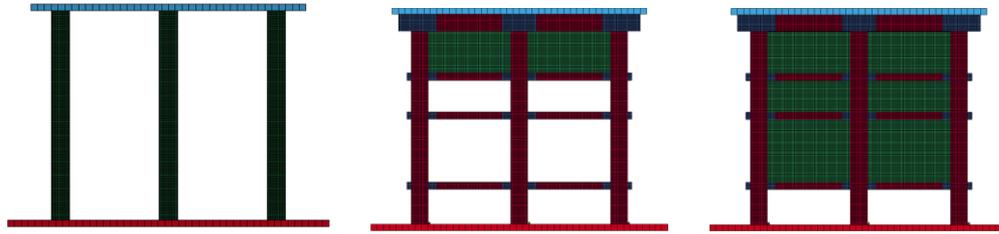


• 解析結果の差分
→柱の傾斜復元力特性の抽出

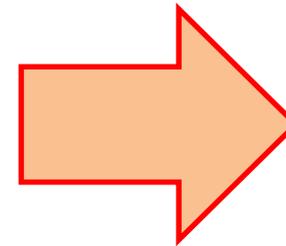
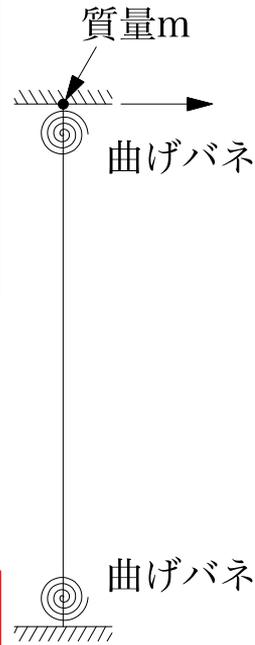
• 貫や板壁を含んだ構面でも柱の傾斜復元力特性がほぼ理論通りに再現されていることを確認

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

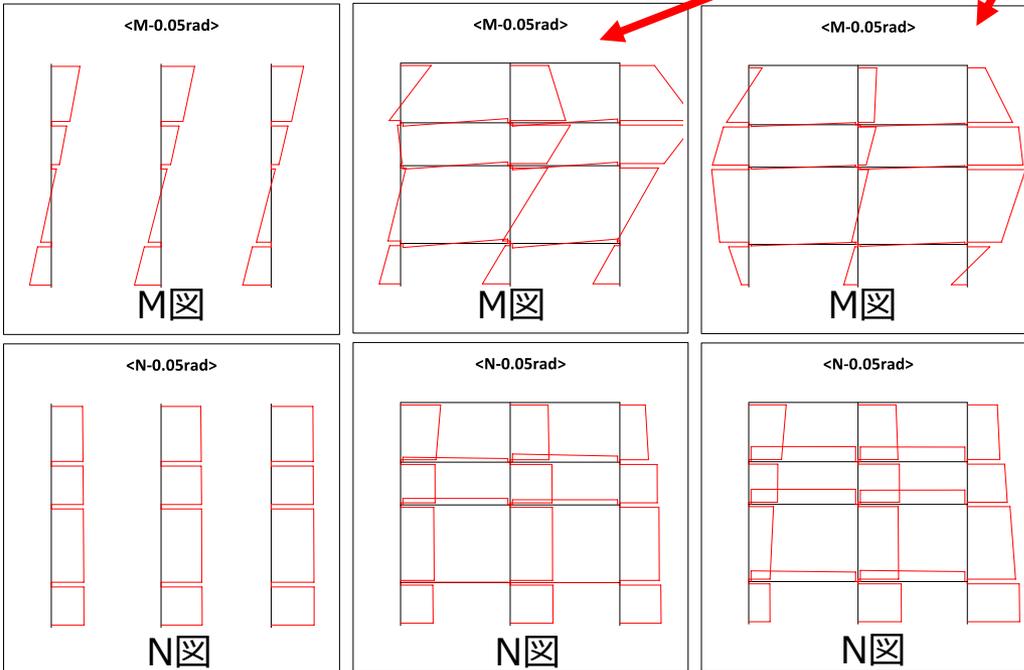
曲げモーメント図および軸力図



・板壁の圧縮抵抗により生じた柱の曲げモーメントと柱の傾斜復元力特性による曲げモーメントの加算が成立している。



・複合部材においても柱頭柱脚の曲げバネを設定すれば力学モデルで考慮可能



断面の大きい軸材料の接合部の回転抵抗に関する検討

伝統構法の柱-梁接合部のモーメント拳動により、断面が大きい場合には構面の水平せん断耐力に加算しうる耐力を有する。

差し鴨居-垂れ壁構面の耐力性能を計算及び数値解析によって求める手法を検討した。

- ① 力学モデルに基づく接合部耐力の評価手法の確認
- ② 差し鴨居構面耐力に及ぼす接合部性能の影響に関する解析的検討
- ③ 垂れ壁付き差し鴨居構面耐力に及ぼす接合部性能の影響に関する解析的検討



断面の大きい軸材料の接合部の回転抵抗に関する検討

①力学モデルに基づく接合部耐力の評価手法の確認

接合部回転性能評価式

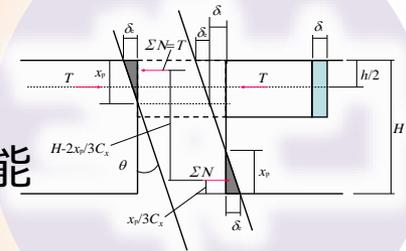
変数	片差し差し鴨居形式	両差し雇いほぞ形式	両差し差し鴨居形式
変数 a	$a = \frac{y_p C_y E_{\perp}}{Z_0} \frac{1}{K_T}$		$a = \frac{1}{2} \frac{y_p C_y E_{\perp}}{Z_0} \frac{1}{K_T}$
変数 b	$b = 1 + \left\{ \frac{2Z_0}{3} \left(1 - e^{-\frac{3x_p}{2Z_0}} \right) \right\} \times a \geq 1 + \frac{2Z_0}{3} a$		
変数 c	$c = 2(H - h/2)$	$c = H$	
めり込み長 xp	$x_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 + ac}}{a}$		
余長効果係数	$C_x = 1 + \frac{4Z_0}{3x_p} \left(1 - e^{-\frac{3x_p}{2Z_0}} \right) \geq 1 + \frac{4Z_0}{3x_p}$		
初期剛性	$K_{\theta} = \frac{x_p^2 y_p C_x C_y E_{\perp}}{2Z_0} \times \left(H \right)$	$K_{\theta} = \frac{x_p^2 y_p C_x C_y E_{\perp}}{2Z_0} \times \left(H - \frac{2x_p}{3C_x} \right)$	
降伏モーメント	$M_y = N_y \times \left(H - h/2 - \frac{x_p}{3C} \right)$	$M_y = N_y \times \left(H - \frac{2x_p}{3C_x} \right)$	
降伏軸力	$N_y = \min[\Sigma N_y, T_{y1}, T_{y2}]$ など		
めり込み降伏耐力	$\Sigma N_y = \frac{x_p y_p F_m}{2} \sqrt{\frac{C_x C_y}{C_{xm} C_{ym}}}$		
降伏後	めり込み降伏が先行する場合、剛性を 1/6 に減じる。その後接合具の降伏耐力に達するまで。接合具の降伏に達した後、 Δ /梁せい rad の変形が可能。 $\Delta = 20\text{mm}$ (込栓、鼻栓), 10mm(車知栓)		

K_T : ほぞ-柱接合部の引張剛性 (複数接合具の場合は全体の値)

T_y : ほぞ-柱接合部の引張 (降伏) 耐力 (複数接合具の場合は全体の値)

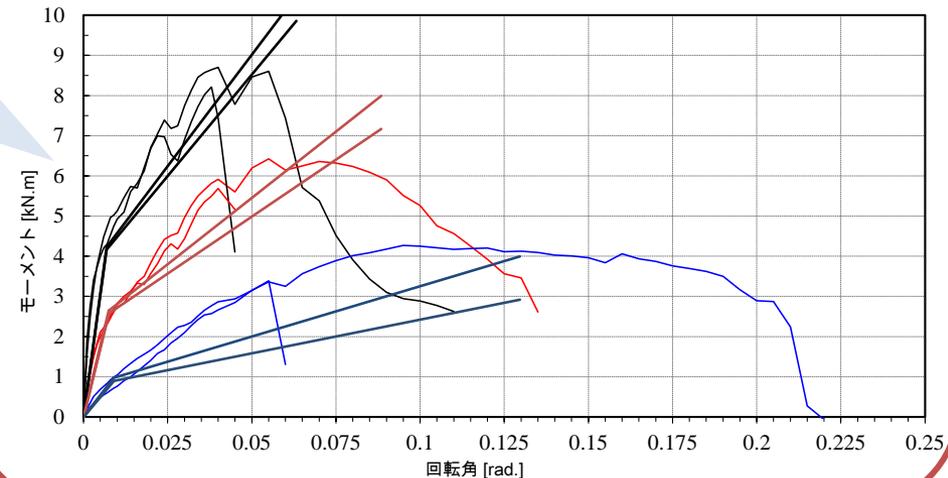
任意の接合仕様/断面寸法/樹種の接合部

- 単位接合具の引張性能
- 部材材質特性値
- 寸法条件



力学モデル

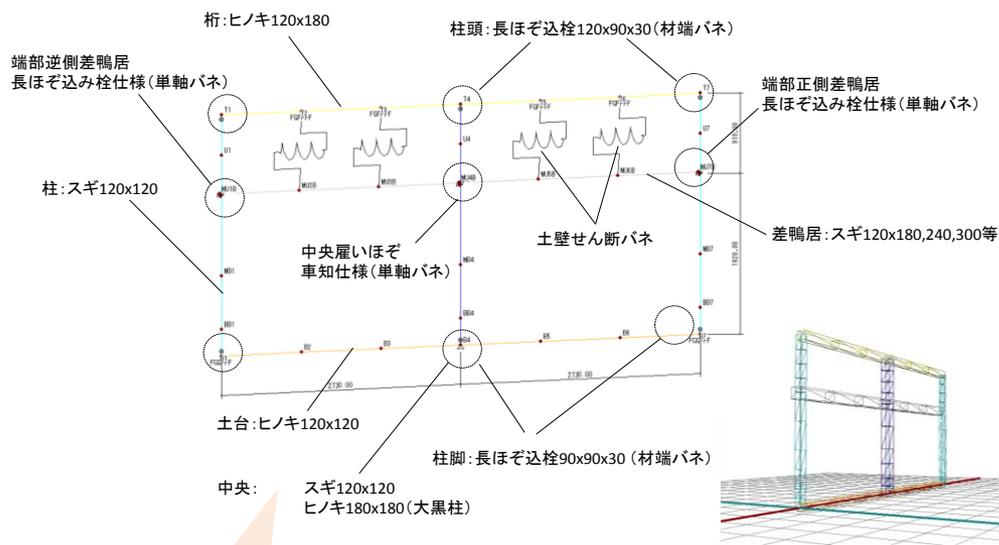
接合部回転性能の推定



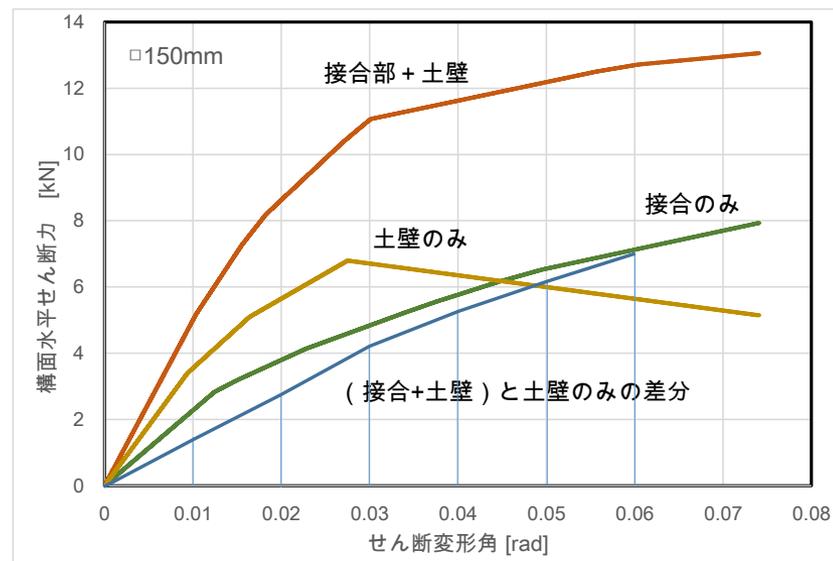
断面の大きい軸材料の接合部の回転抵抗に関する検討

②③（垂れ壁付き）差し鴨居構面耐力に及ぼす接合部性能の影響に関する解析的検討

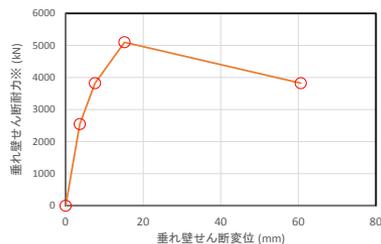
垂れ壁付き構面のモデル化



SNAP ver.7による非線形増分解析



土壁バネ：既往実験式



- 接合バネ：耐力性能推定値

- 接合部の耐力性能が構面の耐力に占める割合は大きい。
- 垂れ壁と共同すると接合部の負担する初期剛性がやや低下する。

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

- ・ 伝統的仕様の小屋ばり組は、屋根面（野地板）の面内せん断性能が低く、火打ちも用いられないため、剛性・耐力の低い、いわゆる柔床である
- ・ 平成26年度に実施した火打ちに代わる板張り仕様床構面の検討方法を参考に、小屋ばり組に要求されるせん断性能を明らかにし、標準的な小屋ばり組の仕様について検討を行った

【主な検討内容】

① 対象とする屋根形式の選定と力学モデル化

桁行方向に水平荷重を受ける切妻屋根を対象とした

② 屋根構面と小屋ばり構面の床倍率の加算則

屋根構面と小屋ばり構面の床倍率の加算が概ね成立することを確認した

③ 許容せん断耐力の評価方法

大地震の安全性担保に特化した評価法とした

④ 水平荷重下での小屋ばり組の降伏条件

種々のクライテリアに対する最大スパンの試算を行った

⑤ その他

各部の性能を担保するために付随的に必要となる仕様規定を検討した



伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会
平成23年度事業報告書より

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

採用する検討手法

・平成26年度基整促で実施した、板張り床の検討で行った手法を採用。

- ① 両端耐力壁に支持された水平構面の固定荷重や積載荷重は床面内に均等にあることが想定されるため、従来の頂部集中荷重形式だけでなく、等分布荷重形式による面内せん断試験を実施。
- ② 等分布荷重下では、床構面の降伏耐力が局所的な最大せん断力ではなく、スパン内での平均せん断力と対応することを①より確認し、床倍率0.5相当とした。
- ③ これに合わせ、降伏算定式を見直し（せん断力分布を表す α の見直し）、耐力壁線間隔距離と床のアスペクト比の制限の緩和を提案。

建築基準法施行令46条第3項の改正

- ・床組及び小屋組の隅角に求められる火打ち材と同等の性能を有する板張り床の仕様が示された。
- ・床の仕様は、板厚・幅、留め付け方法、耐力壁線の相互の間隔等が示されている。

	床区画の両側が耐力壁線	床区画の片側が耐力壁線
平屋	10.0	5.0
2階建ての2階	6.6	3.3
2階建ての1階 (床区画上で上階に耐力壁線なし)	8.6	2.2
2階建ての1階 (床区画上で上階に耐力壁線あり)	4.3	2.2

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

対象とするモデルと検討方針

・ 桁行き方向の水平荷重を受ける切妻形式屋根

→ 屋根面（野地板）のせん断性能が支配的で、脆性的な破壊を起こさないことを既往研究により確認

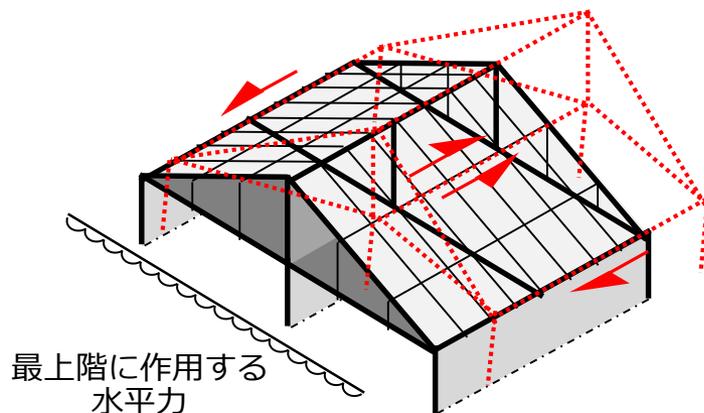
・ 小屋ばり組の必要性能

(a) 最上階の水平構面としての面内せん断性能

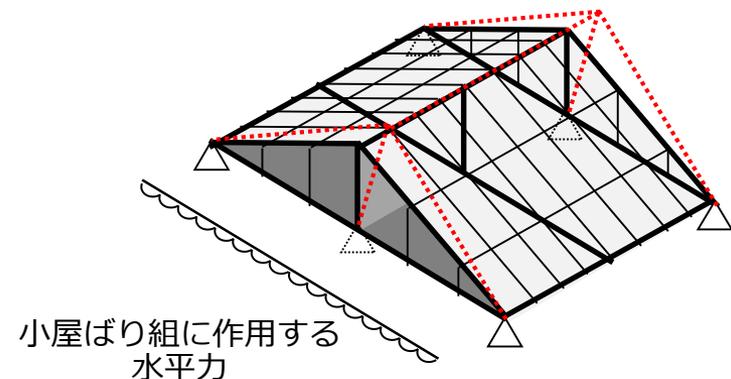
→ **最上階に作用する水平力**に対し、**水平構面に発生する存在応力**から安全性を確認

(b) 小屋ばり組単体の水平抵抗性能

→ **小屋ばり組に作用する水平力**に対し、**小屋ばり組が倒壊しないことを確認**（有効な振れ止めとしての機能）



(a) 最上階の水平構面としての面内せん断性能



(b) 小屋ばり組単体の水平抵抗性能

小屋ばり組に要求される構造的な性能に関する検討

小屋ばり組に生じるせん断力分布のモデル化

品確法の必要床倍率算定式における、境界条件に応じた係数 α の見直し

〔平成26年度基整促「垂れ壁付き独立柱・だぼ入れにより水平方向のみ拘束した柱脚等で構成された木造建築物の設計基準に関する検討」と同様の手法〕

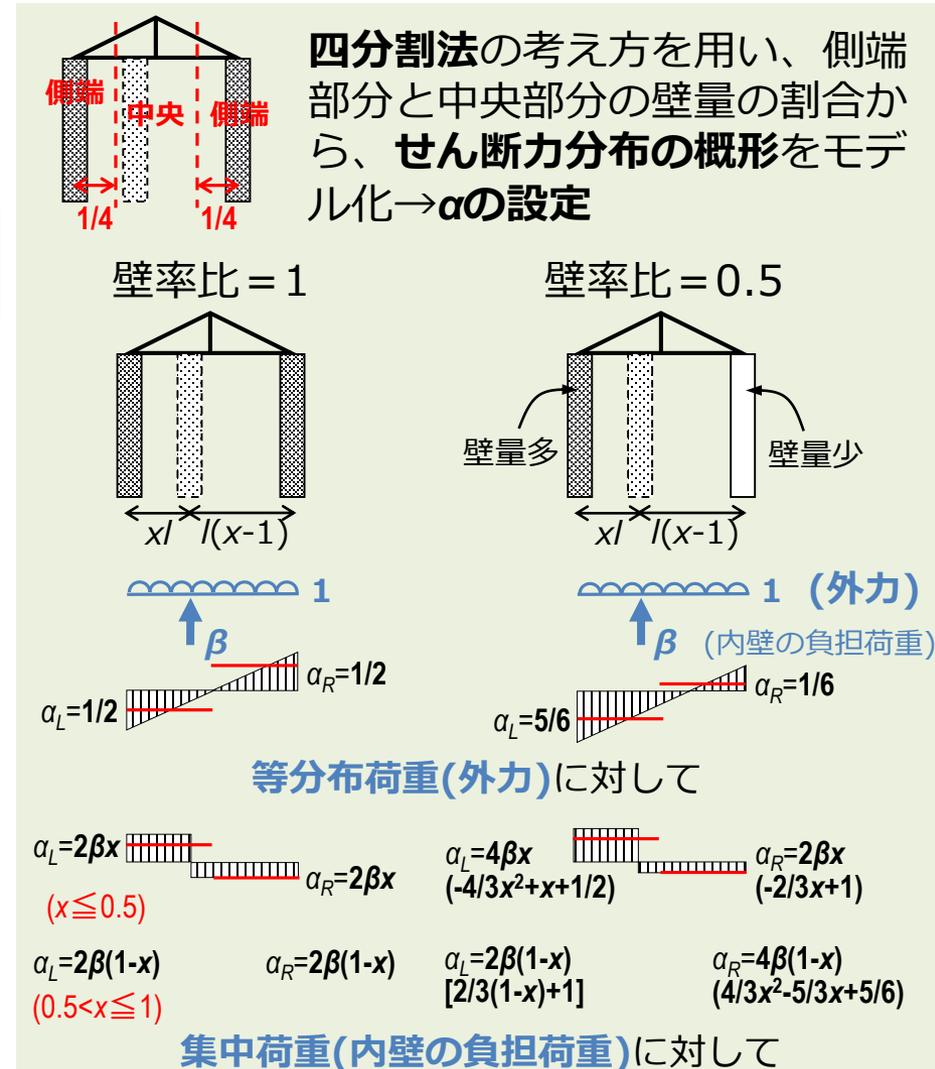
耐力壁線間距離に関する条件

$$l = \frac{200 \times \text{床倍率}}{\alpha \times \text{地震力に対する床面積あたり必要壁量}}$$

床のアスペクト比に関する条件

$$\frac{l}{L} = \frac{\text{床倍率}}{\alpha \times \text{風圧力の係数}}$$

必要壁量：品確法の等級2の値の1/1.25倍
 風圧力の係数：品確法の $V_0 = 32\text{m/s}$ による等級2の風荷重を1/1.2倍（等級1相当）
 境界条件に応じた係数 α ：右図の α の重ね合わせにより



床倍率は本年度に実施する実験により設定し直し、内壁の負担割合 β と位置 x は更なる調査を踏まえて妥当な数値を設定する必要がある

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

最大スパンの試算結果

種々のクライテリアに対して、最大スパンを試算

① 許容耐力で決まるスパン (許容応力度計算法を参考)

重い屋根で等級1相当を想定、

床倍率=0.53, $D_s=0.33$, 内壁の負担割合 $\beta=0$, 位置 $x=0.5$ (中央)と仮定

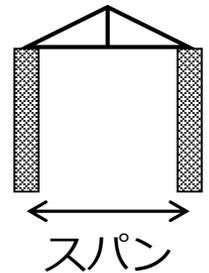
② 変形制限から決まるスパン (品確法の耐力壁線間距離の制限値を参考)

鉛直構面の仮想降伏変形角 $R_v=1/80\text{rad}$, 終局変形角 $=1/20\text{rad}$, 塑性率 $\mu=4$, 階高 $H=2.7\text{m}$, 水平構面の限界変形角 $R_0=0.02\text{rad}$ と仮定

③ 小屋ばり組自体の水平耐力で決まるスパン (許容応力度計算法を参考)

重い屋根の総2階建を想定、床倍率=0.53, $D_s=0.33$ と仮定

* 床倍率は既往実験の参考値



最大スパンの最大値の試算結果 (単位: m)

クライテリア	最大スパン
① 許容耐力から決まるスパン (平屋)	6.4(3.8)
① 許容耐力から決まるスパン (2階建)	4.6(2.8)
② 変形制限から決まるスパン	10.0
③ 小屋ばり組自体の水平耐力から決まるスパン	7.2

内壁の負担割合 $\beta=0$ としており、現状やや厳しめ
 $\beta=0.2$ とすれば、**6.4→9.9, 4.6→7.3**
括弧書きは壁率比=0.5の場合

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

実験計画

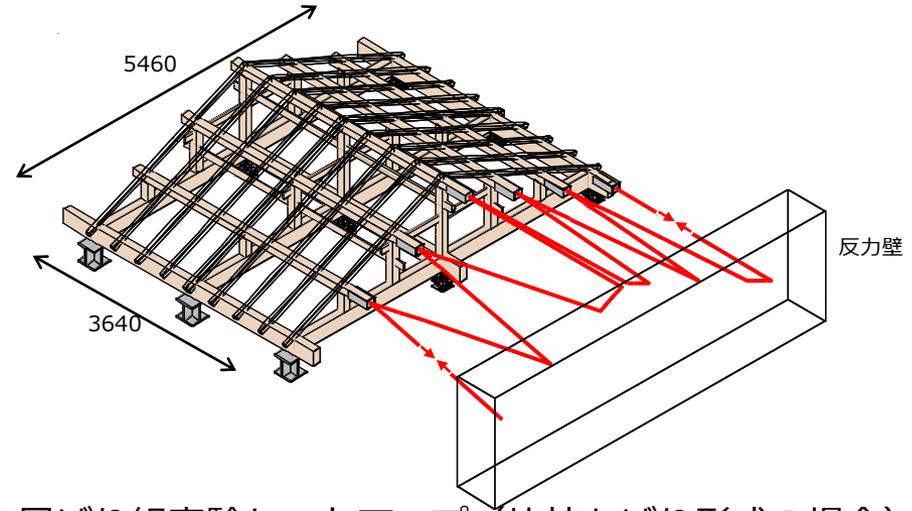
1) 要素実験

屋根構面、小屋ばり構面、鉛直構面の各要素の面内せん断実験を実施し、各部の仕様がおよぼす影響を把握する。

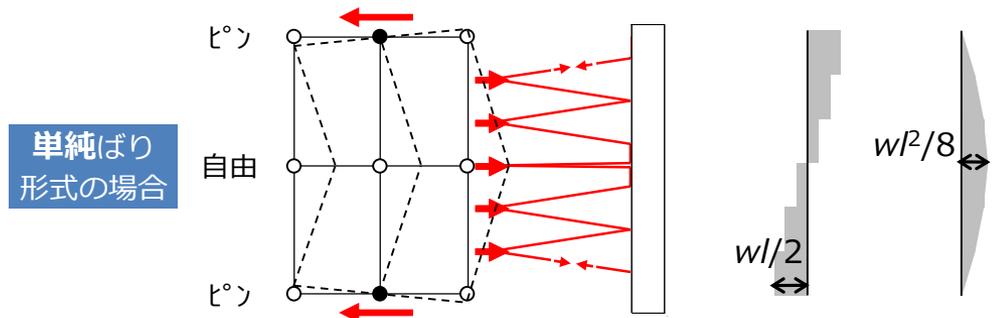
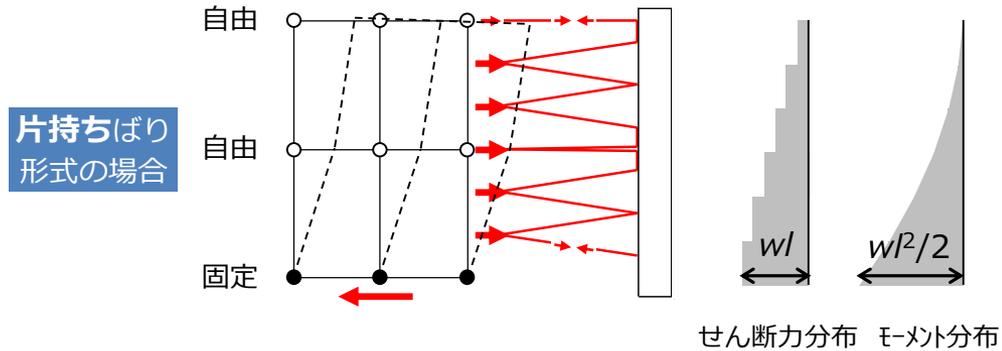
2) 小屋ばり組実験

桁行方向への等分布荷重を再現する。様々なせん断力分布を考慮するため、向かい合う軒桁の支持条件を、(a)片持ちばり形式、(b)単純ばり形式の2種類で実験を行う。

→ 現実的な荷重・境界条件に対する、小屋ばり組の降伏条件を検討するとともに、大地震時の建物の安全性を担保するために、小屋ばり組に求められる仕様を決定する



小屋ばり組実験セットアップ (片持ちばり形式の場合)



2種の境界条件による変位モードと応力分布