平成30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。

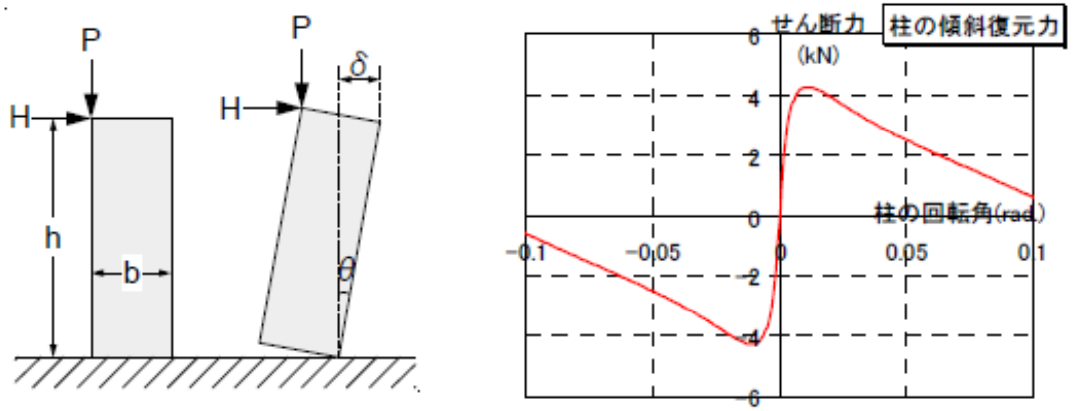
目的：

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。

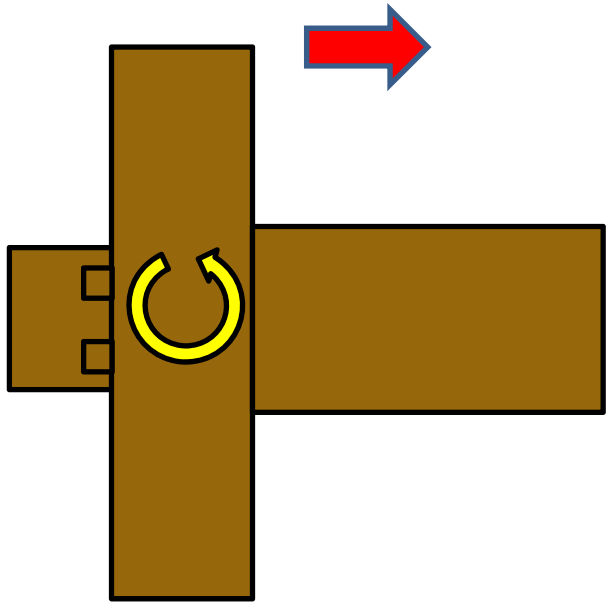
実施項目１

（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



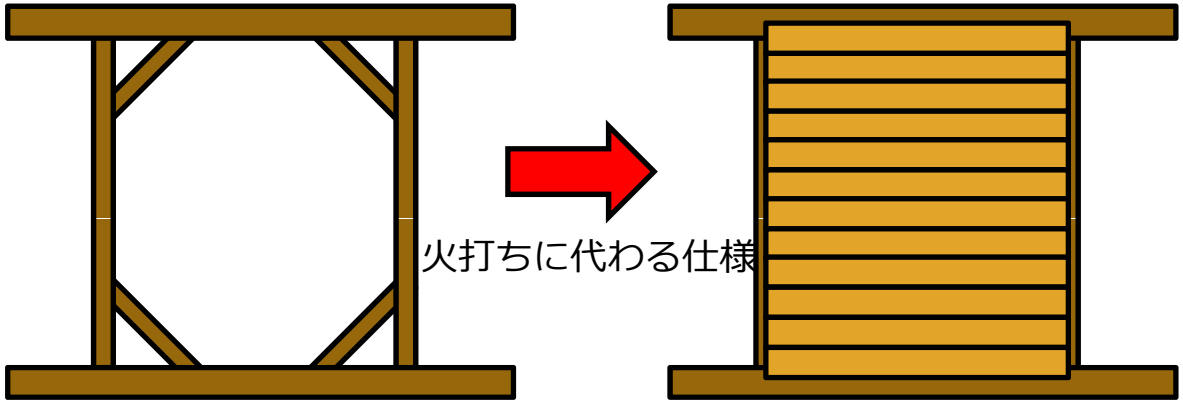
接合部の回転抵抗

*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、火打材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

実施体制

検討委員会

委員長	五十田博	京都大学
委　員	鈴木祥之	立命館大学、齋藤幸夫　齋藤建築構造研究室
	後藤正美	金沢工業大学、大橋好光　東京都市大学
	河合直人	工学院大学、槌本敬大　建築研究所
	秋山信彦	建築研究所
協力委員	荒木康弘	国土交通省国土技術政策総合研究所

軸材料の耐震性能検討WG

主　査	河合直人	工学院大学
委　員	藤田香織	東京大学
	瀧野敦夫	奈良女子大学
	佐藤弘美	金沢工業大学
	北守顕久	京都大学
	中川貴文	京都大学
	向坊恭介	鳥取大学
	秋山信彦	建築研究所
協力委員	荒木康弘	国総研
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	槌本敬大	建築研究所

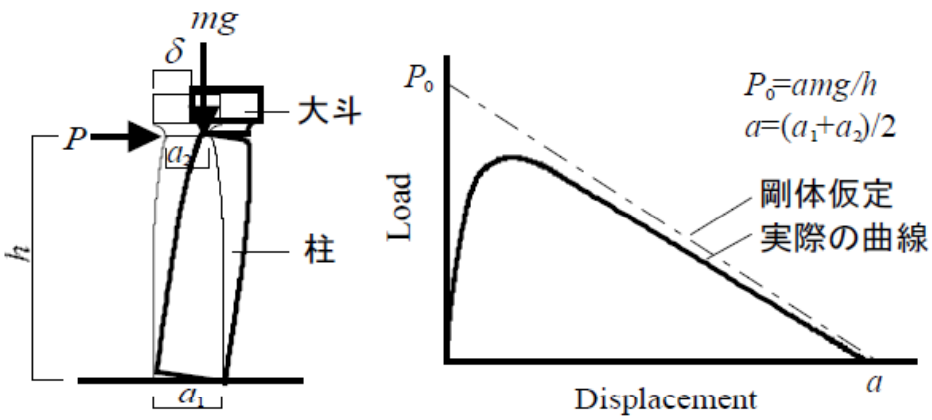
屋根面のせん断性能検討WG

主　査	五十田博	京都大学
委　員	山崎義弘	東京工業大学
	中川貴文	京都大学
協力委員	荒木康弘	国総研
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	槌本敬大	建築研究所

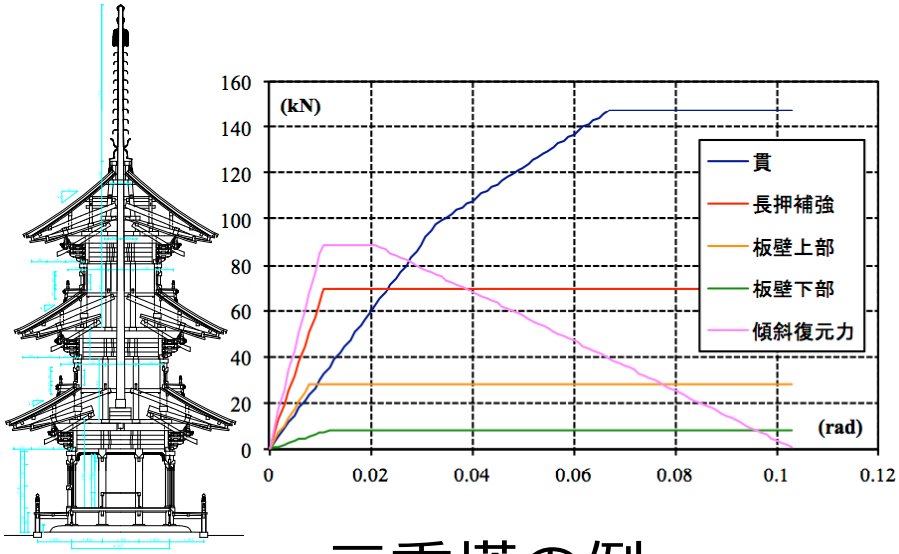
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討

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、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、以下の検討を行った

(1) 負担面積と柱軸力

壁量計算において、柱傾斜復元力を等価な壁量に置換して加算する方法、および、関連して柱軸力を簡易に柱の負担面積等から推定する方法を提案する。

(2) 建築物内での実際の挙動

壁等が取り付くことによる柱軸力の変動や、垂れ壁、腰壁等が取り付くことによる柱の曲げ変形の影響について、解析的に検討を加え、単純な累加の可能性を確認する。

(3) 荷重変形関係

柱の上部、下部に木材がある場合など、種々の条件下での荷重変形関係の把握のため、実験的な検討を行い、既往の計算式との照合を行う。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(1)

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

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

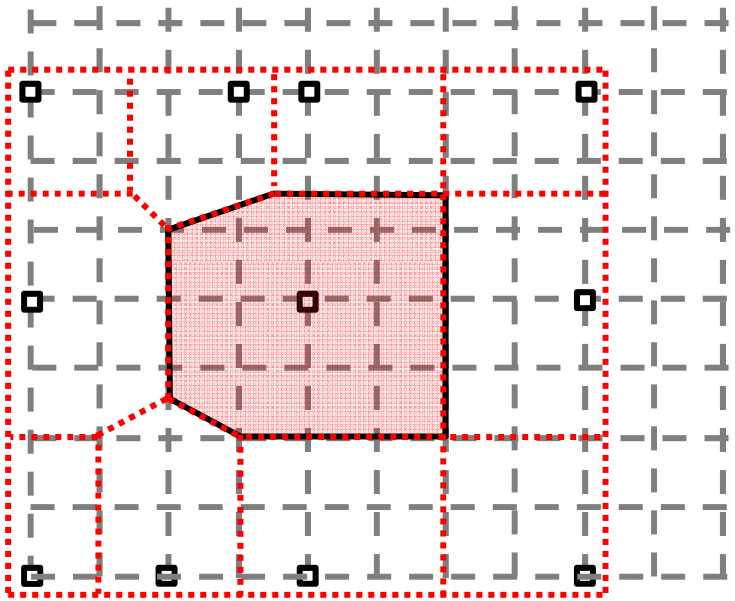
a ： 柱径
mg ：柱軸力
h ： 柱長

- 式中の α は、柱の断面形状、軸応力度、柱上下の部材などで決まり、柱の上下が剛体の場合 0.7～0.9 程度、柱の上下が木材の場合0.4～0.6 程度の数値となる。
- 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ろうが、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。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(1)

負担面積と上階からの荷重について

- 柱の負担面積としては、仕様規定において梁の掛かり方を考慮することまではできない、という前提であれば、下図のように隣接する柱との間の垂直二等分線で分割する方法が考えられる。
- 上階からの荷重についても、簡易な方法として、上階の負担面積は下階の負担面積と同一であると仮定する方法が考えられる。



断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(1)

簡易な柱軸力算出方法の素案

- 前述の簡易な方法による場合、2階建ての1階、2階の柱軸力は次式で算出される。

$$N_1 = A_1 \times (W_1 + W_2), \quad N_2 = A_2 \times W_1$$

ただし、 N_i ：i 階の柱の軸力

A_i ：i 階の柱の負担面積

W_1 ：平屋の階中央から上又は2階建ての2階中央から上の単位重量

W_2 ：2階建ての2階床を挟み1階中央から2階中央までの単位重量

i 階の単位重量

- ただし、１階柱の負担面積内に2階部分と１階屋根部分が含まれる場合は次式となる。

$$N_1 = A_1 \times W_1 + A_1' \times W_2$$

ただし、 A_1' ：1階の柱の負担面積内にある2階部分の面積

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(1)

簡易な柱軸力算出方法の素案

- 通常の住宅では、各部の質量を次のように仮定する。

屋根（屋根面当たり）	軽い屋根の場合	60kg/m^2
	重い屋根の場合	90kg/m^2
床固定荷重（床面積当たり）		50kg/m^2
壁荷重（床面積当たり）		60kg/m^2
積載荷重		60kg/m^2

- 床面積と屋根面積の比を1.3とすると、各階の単位床面積当たりの質量は以下のように算出される。

$W_2 = 60 \times 1.3 + 60/2 = 108$（kg/m^2）←軽い屋根の場合

$W_2 = 90 \times 1.3 + 60/2 = 147$（kg/m^2）←重い屋根の場合

$W_1 = 50 + 60 + 60 \quad = 170$（kg/m^2）

- 各階の単位重量 W_i は、この各階の単位床面積当たりの質量に重力加速度$g = 9.8$（m/s^2）を乗じて算出する。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(1)

基準化に向けた課題・留意点

- 柱傾斜復元力を考慮する柱の「径／長さ」の比は、1/15以上とすることが適当と考えられる。
- 梁の掛かり方を考慮しない負担面積の算出方法は、平面図上の任意の点の荷重が最も近い柱に伝達されるという仮定で、定義は明快であり、簡易な計算ソフトによることもあり得る。
- 非住宅（主として社寺建築）については、固定荷重が住宅系と異なり、鉛直荷重の流れも複雑なケースがあることから、構造計算により柱軸力を算出するのが妥当と思われる。
- 社寺建築等を考えると、構造計算による柱軸力の詳細な算出方法を認めることも必要と思われる。
- 住宅系で登り梁、叉首（さす）を用いた構造など、屋根荷重が外周部に流れる構造の場合、内部の柱については、負担面積の考え方が危険側となる場合があるので注意が必要である。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(2)

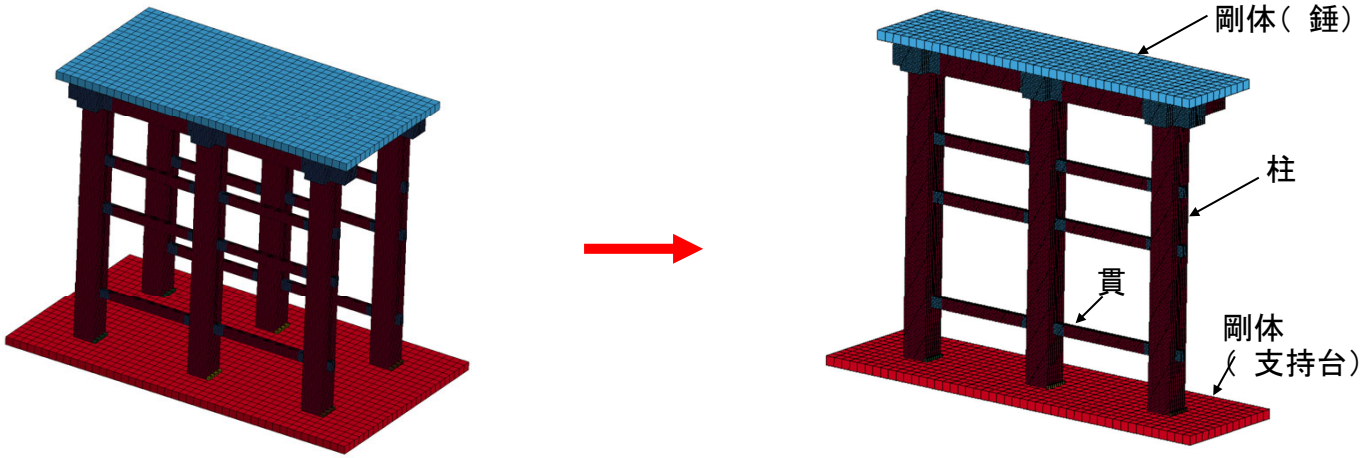
貫および板壁を含む軸組構面における柱の傾斜復元力特性に関する解析的検討の目的

- 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。

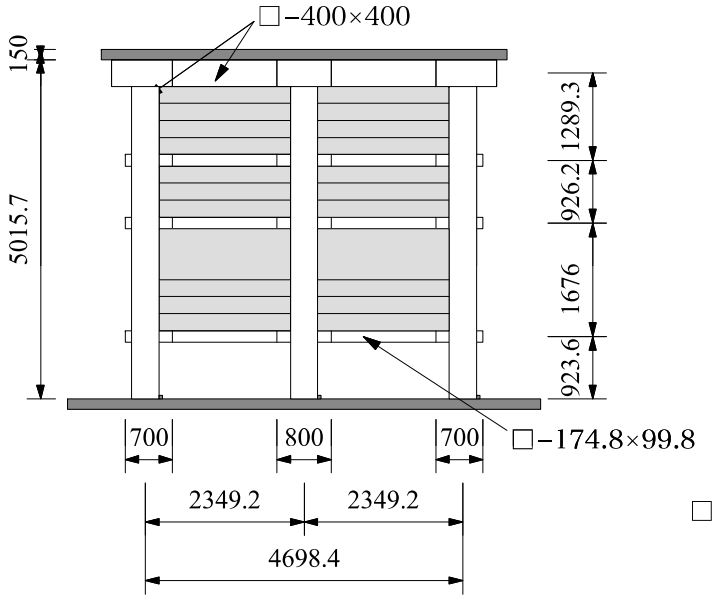
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(2)

解析モデル

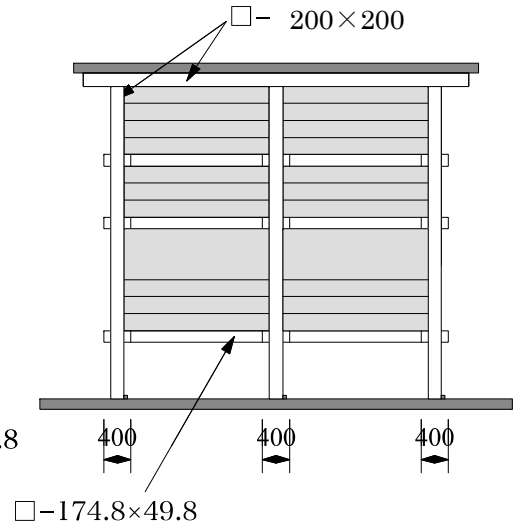
対称性を考慮して1/2モデルにて解析を実施



モデルA

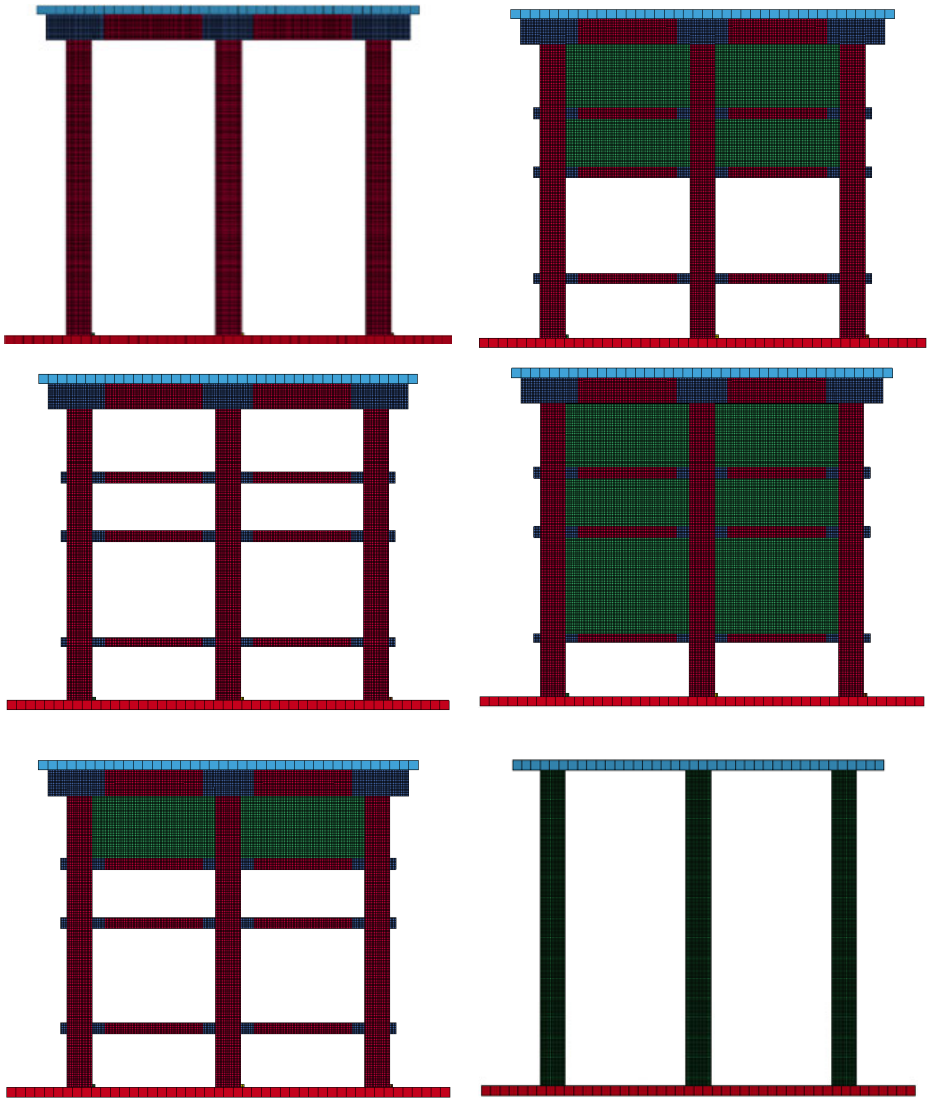


モデルB

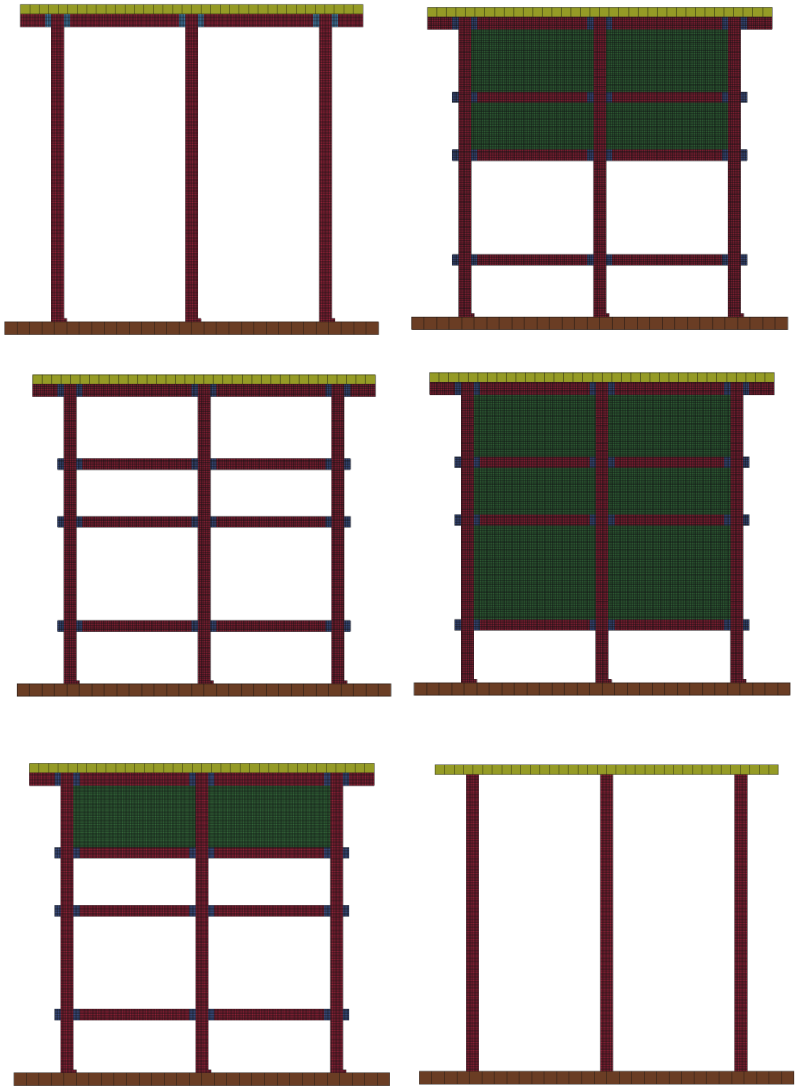


断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(2)

モデルA

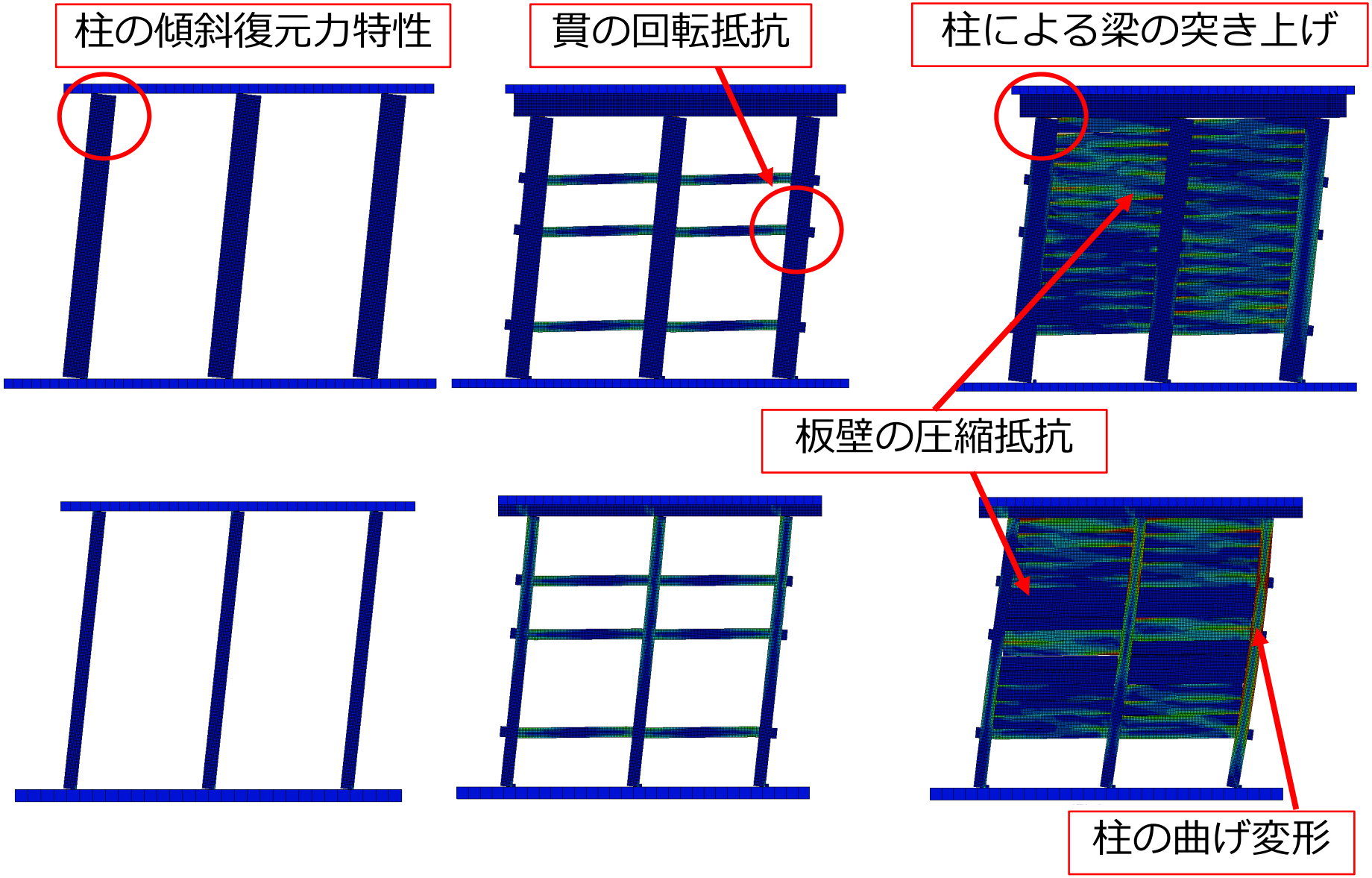


モデルB



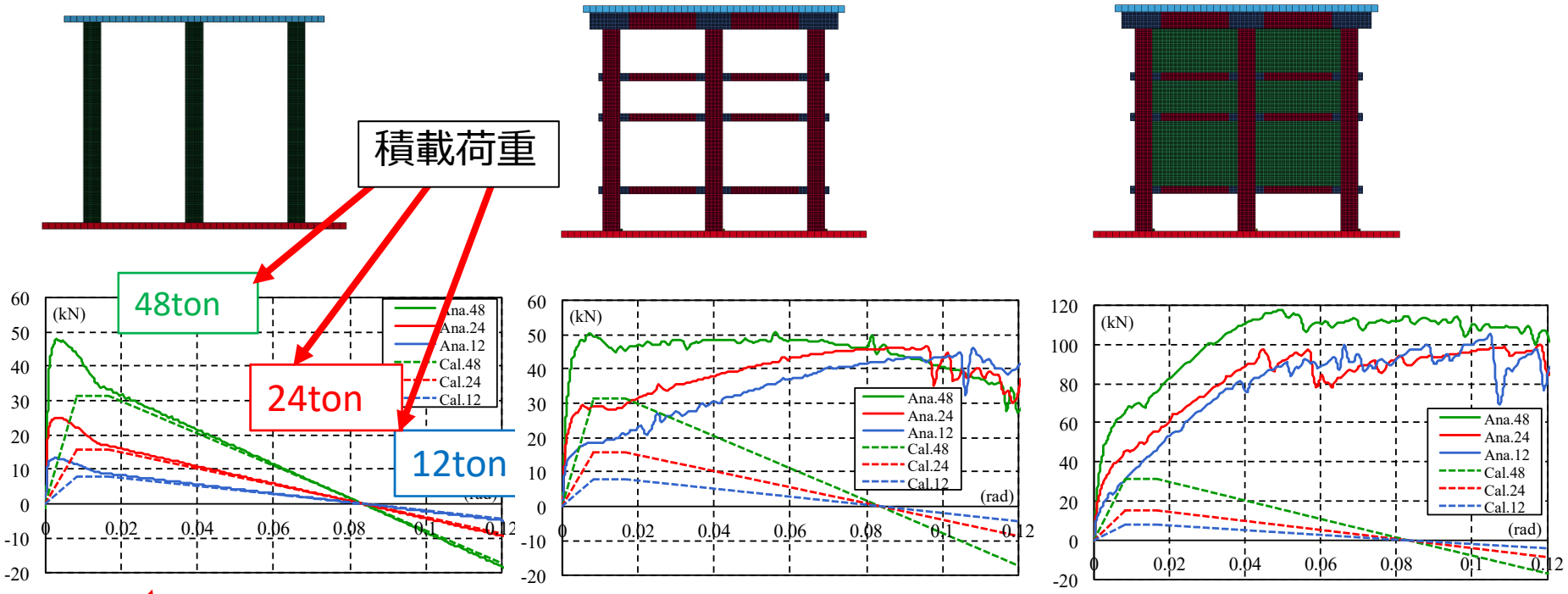
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(2)

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(2)

解析結果（荷重－せん断変形角関係）

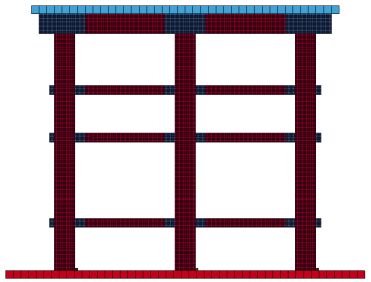


・柱のみ
→剛体により理論式に合致
（解析の妥当性を確認）

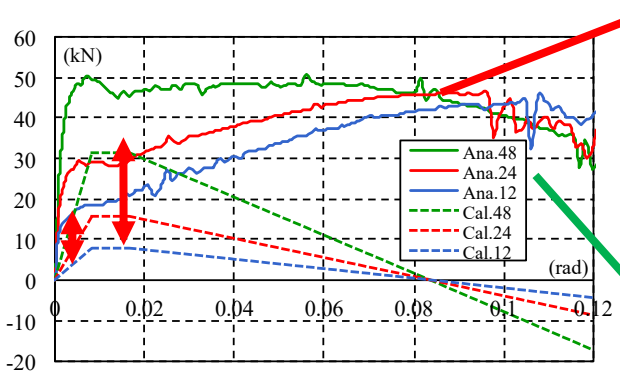
・貫や板壁を含む構面
→柱の傾斜復元力特性以外の耐力が発現されるため
荷重上昇が見られる。
→柱の傾斜復元力特性の直接的な評価が難しい。

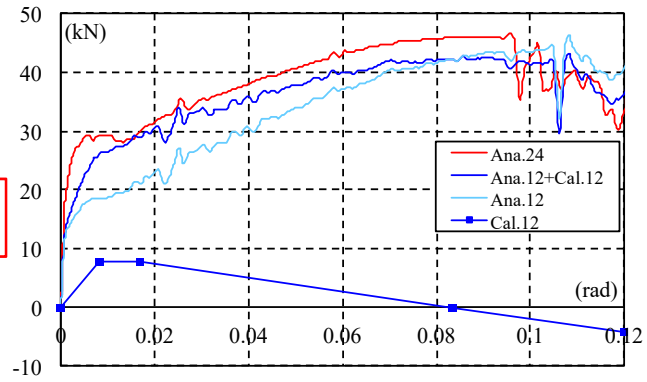
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(2)

柱の傾斜復元力特性の検証

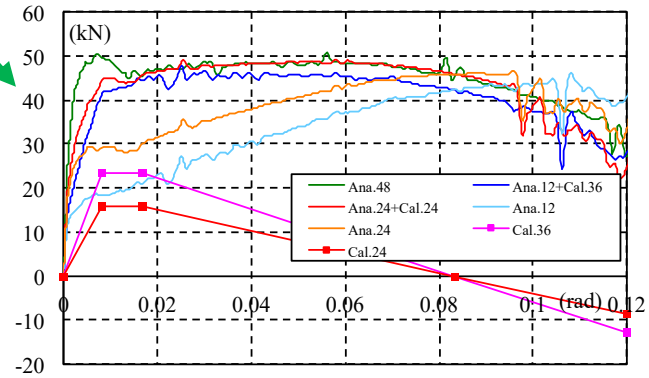


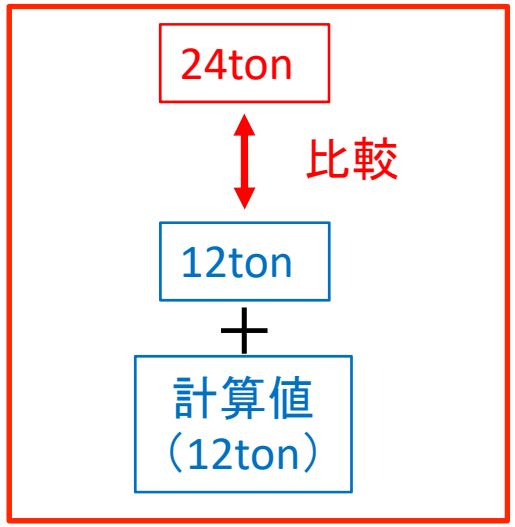
24tonの比較

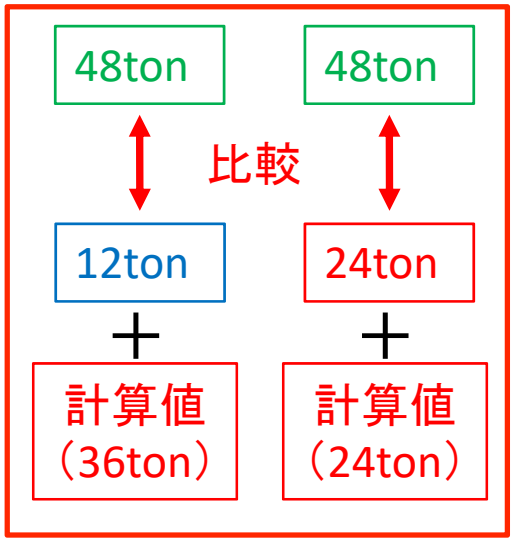




48tonの比較

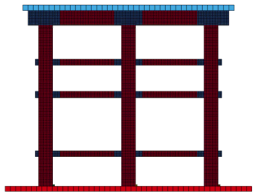


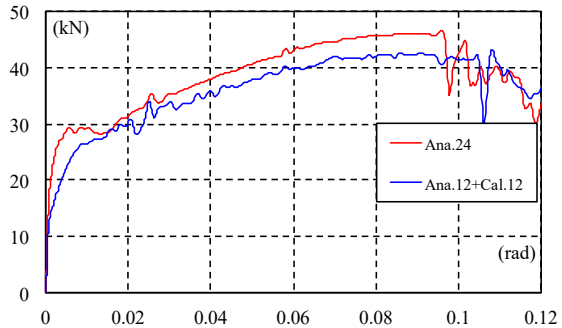


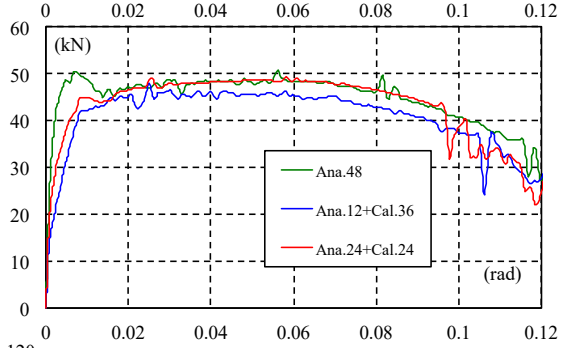


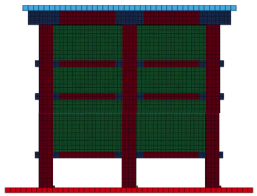
12tonと24tonの解析結果にそれぞれ12,24,36tonの計算値を加算することで、柱の傾斜復元力特性を検証する。
→柱の傾斜復元力特性の抽出

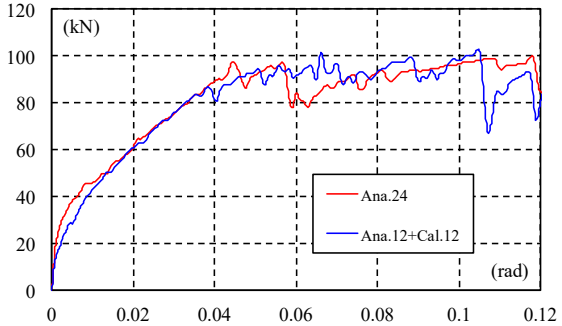
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(2)

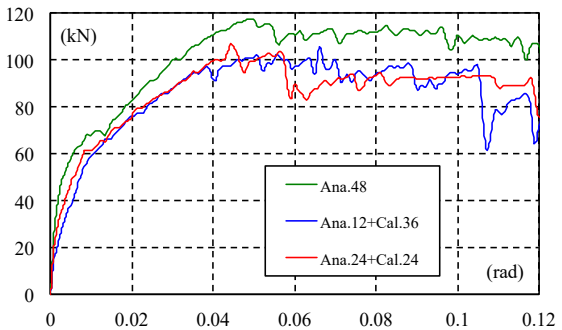


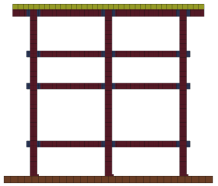


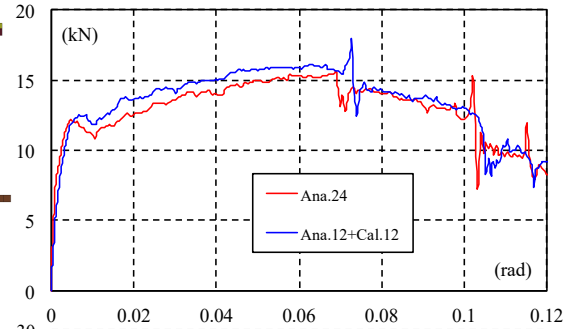


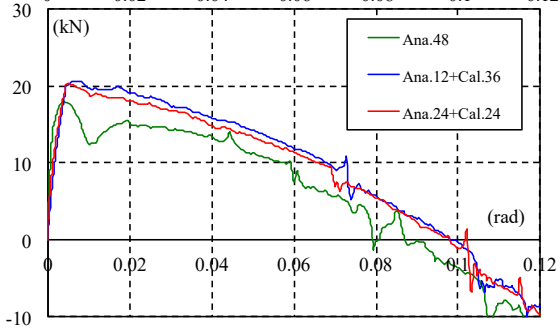


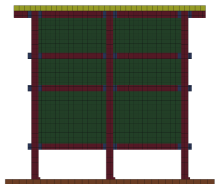


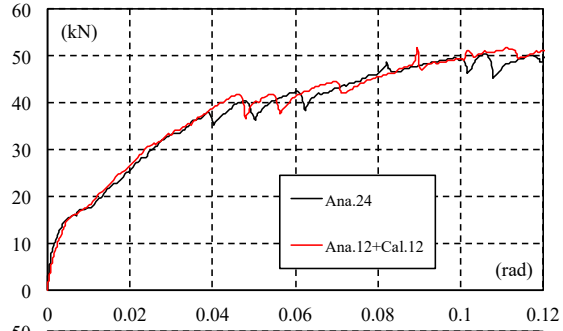


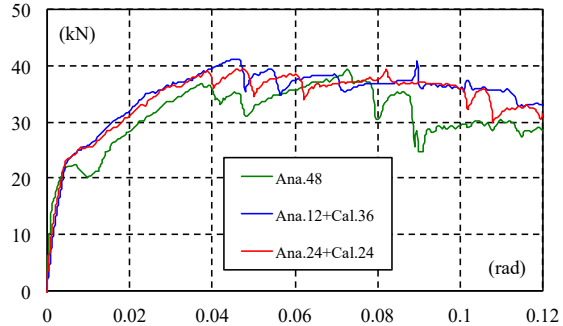












解析結果は概ね合致している。
複合要素に対しても柱の傾斜復元力の加算が成立

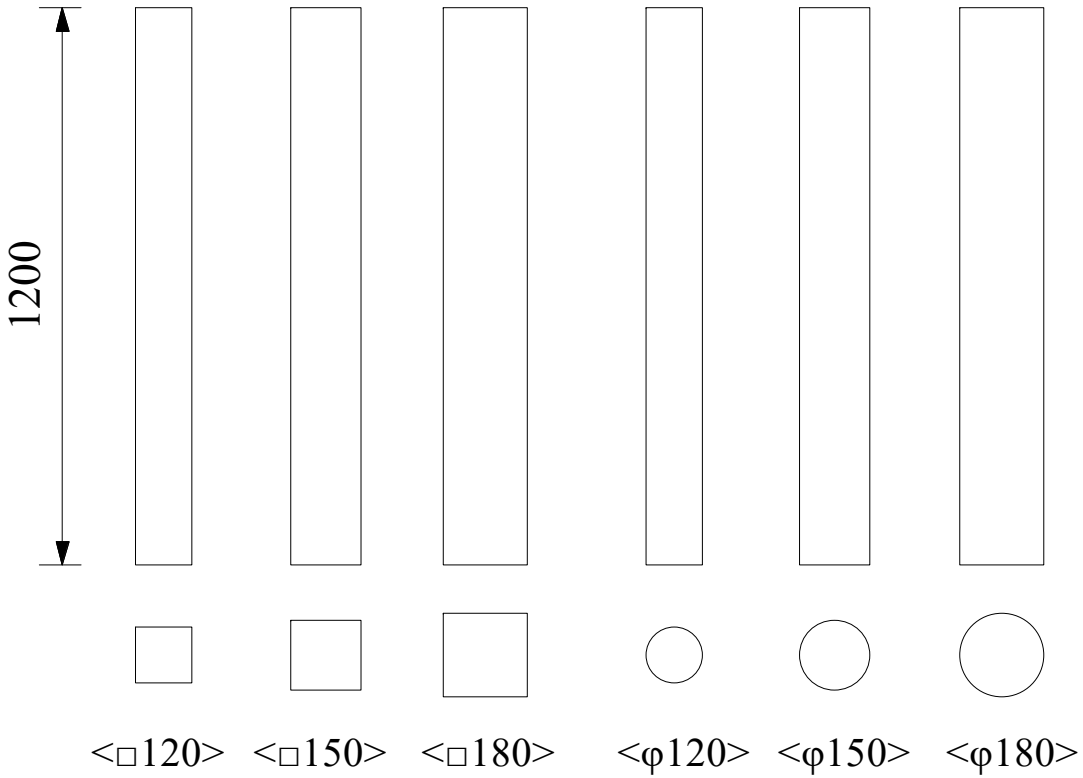
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(3)

柱の傾斜復元力特性の検証実験

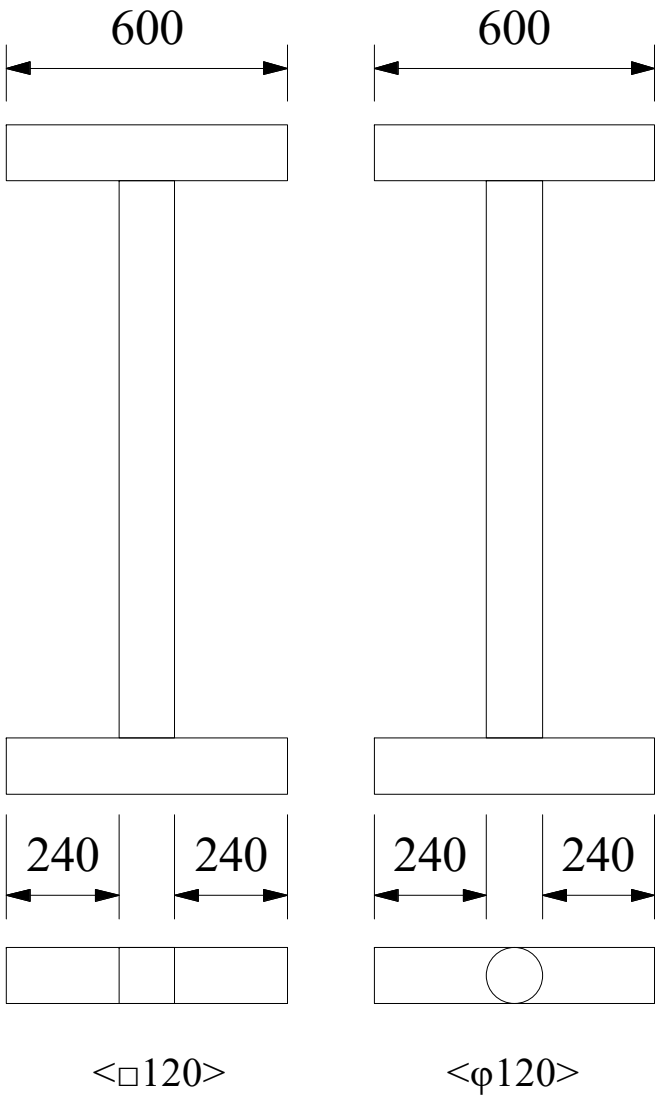
- 前の解析ではメッシュサイズの問題から柱頭柱脚の圧壊を再現することができなかったが、実際には木材の木口端部における弾性変形や圧壊が生じる。
- また、実建物においては、地震時挙動における軸力変動や、上部に梁などの横架材が設置されていることも考えられる。
- そこで、柱の傾斜復元力特性を検証するために、断面や軸力変動の有無、横架材の有無などをパラメータに柱単体の実験を実施し、破壊性状や荷重−変形関係について検証する。
  また、板壁を含む軸組構面についても実験を実施し、柱の傾斜復元力特性の加算が成立するかの検証も併せて実施する。

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(3)

試験体



【柱のみ試験体】



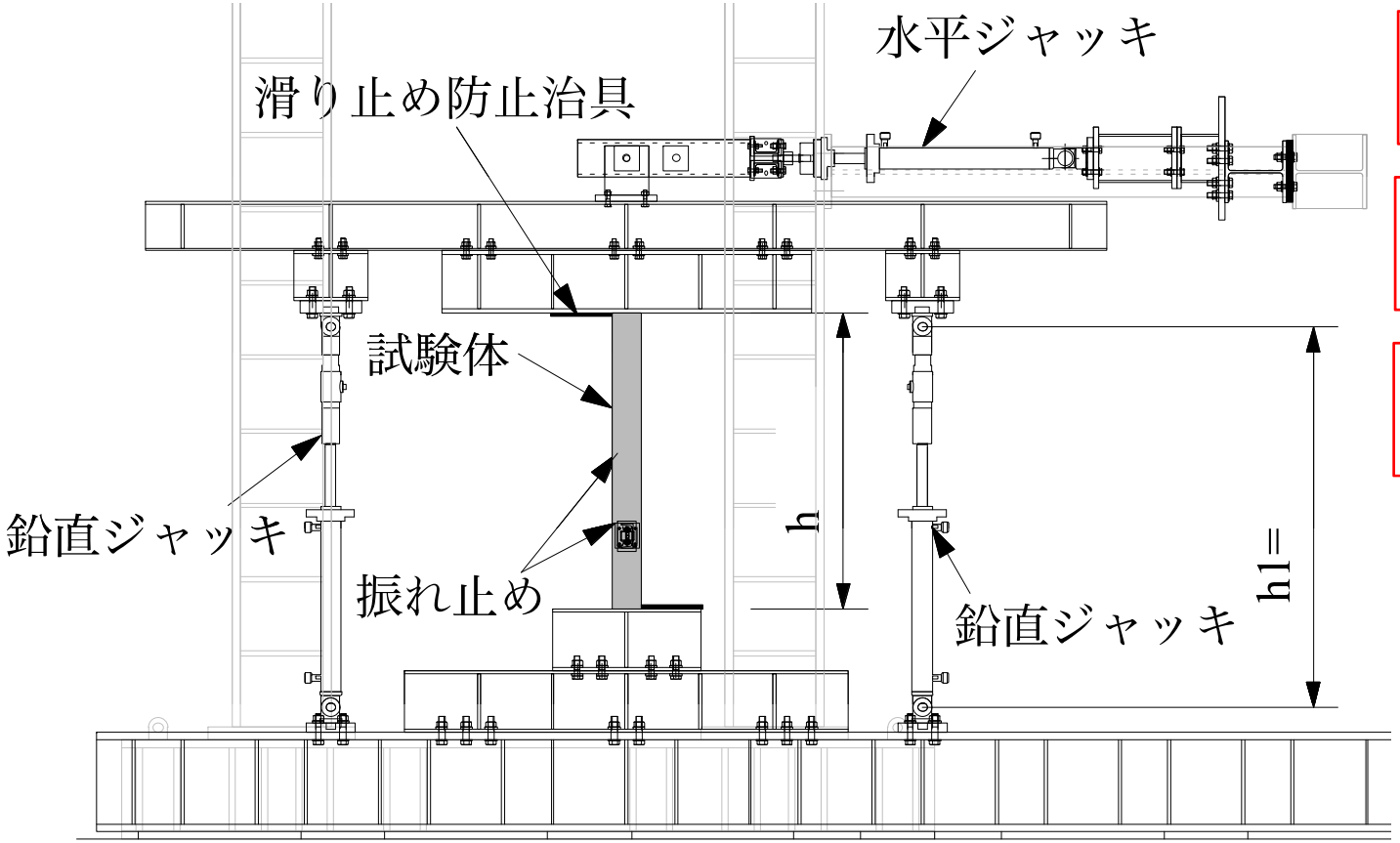
【柱+横架材試験体】

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(3)

加力方法　【軸力をパラメーターに実施】

軸力の求め方　N=α×Fc×A×n

N：軸力、α：係数、Fc：繊維に直交方向の基準材料強度（部分圧縮）スギ：6.0N/mm2、A：柱の断面積、N：柱の本数



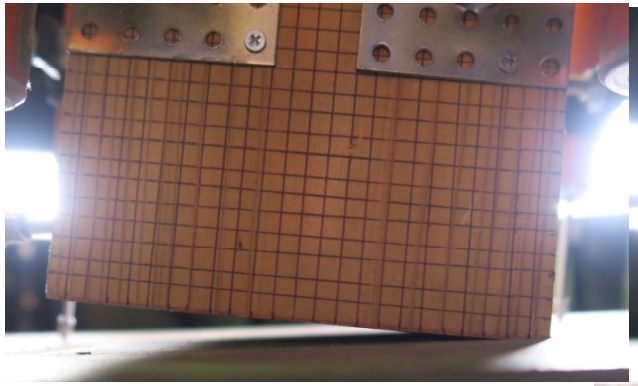
一定軸力
（α=0.5）

一定高軸力
（α=1.0）

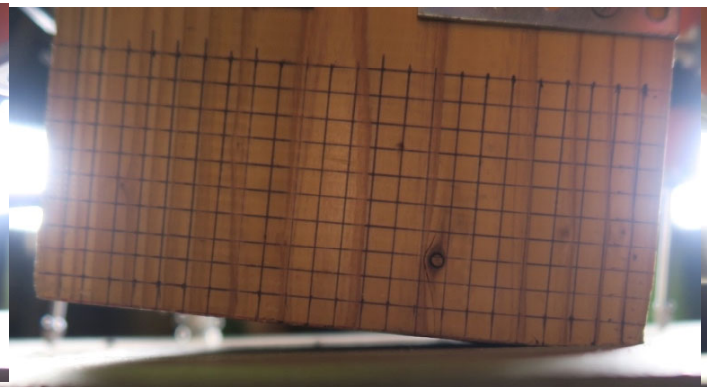
変動軸力
（α=0.5～1.0）

断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(3)

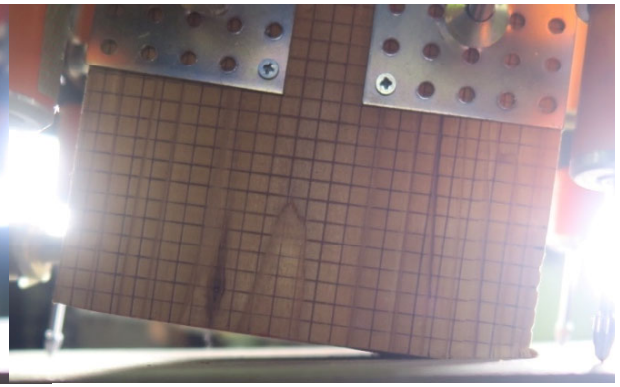
破壊の様子



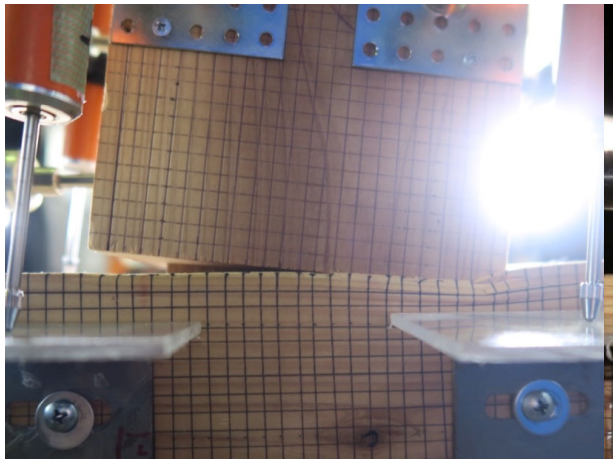
【一定軸力（基準値）】



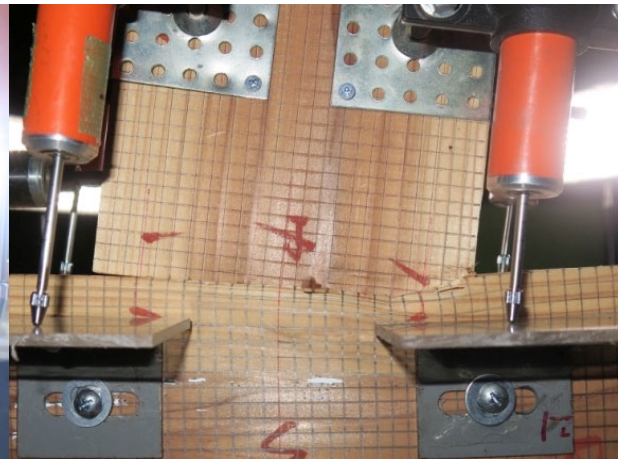
【一定高軸力】



【変動軸力】



【一定軸力（基準値）】

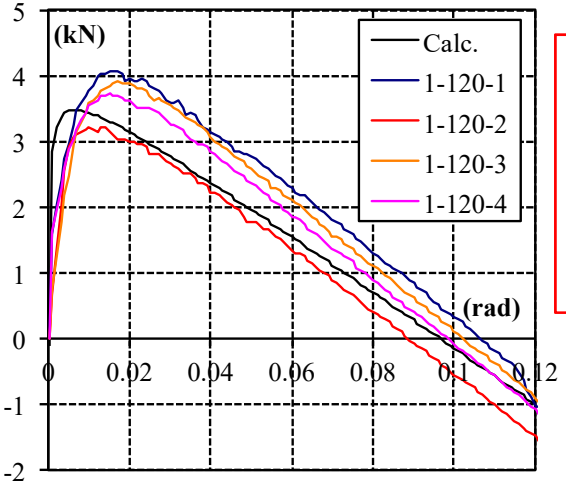


【変動軸力】

・軸力が大きくなると木口端部の圧壊範囲が広がる。
・横架材ありの場合、めり込み破壊が生じ、変動軸力の場合に顕著である。

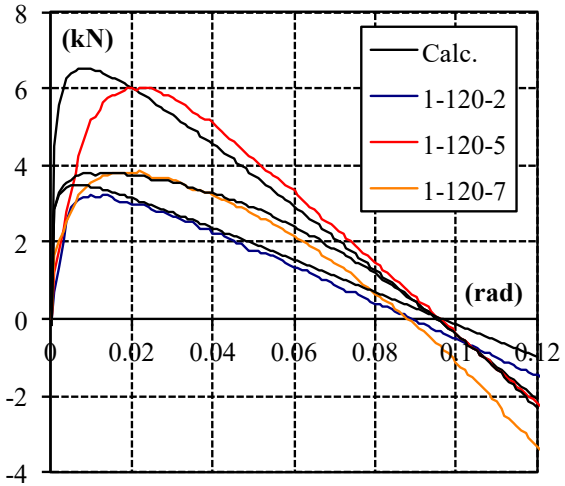
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(3)

荷重－せん断変形角関係



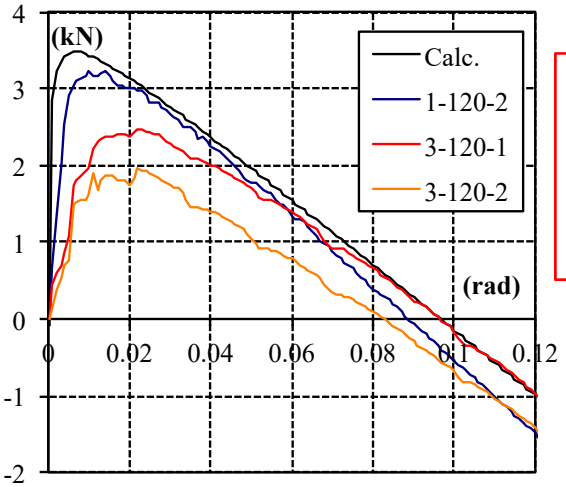
・ほぼ同じ条件での実験。結果のばらつきは材料のバラツキによる。

【柱のみ：一定軸力（基準値）】



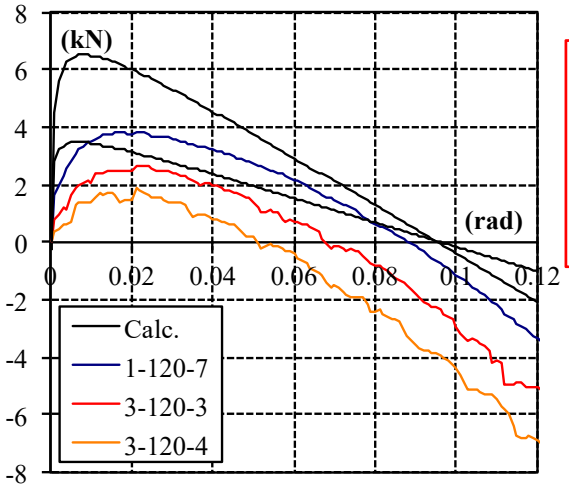
・高軸力の場合、最大荷重が少し低下する。
・変動軸力の場合、荷重喪失時の変形角が小さい。

【柱のみ：一定高軸力・変動軸力】



・横架材ありの場合、柱のみと比べて5、6割の耐力となる。

【横架材あり：一定軸力（基準値）】

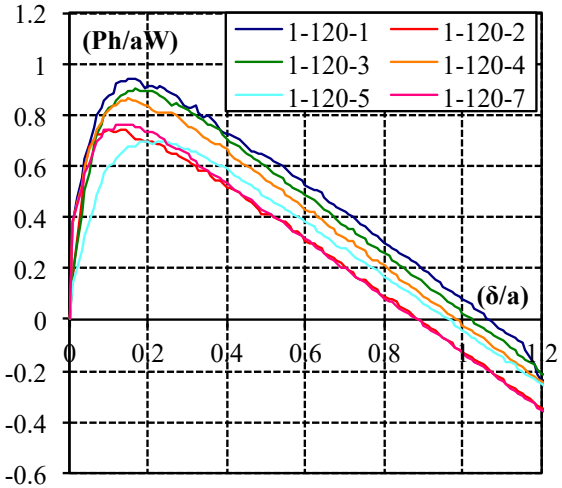


・横架材ありで変動軸力になるとさらに耐力低下が著しい。

【横架材あり：変動軸力】

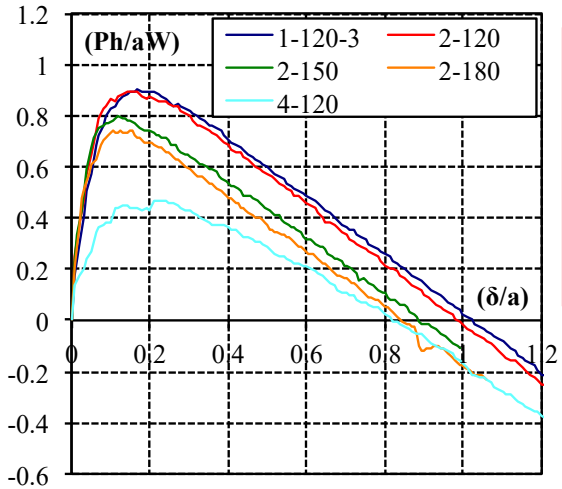
断面の大きい軸材料の傾斜復元力に関する検討(3)

荷重－せん断変形角関係（無次元化比較）



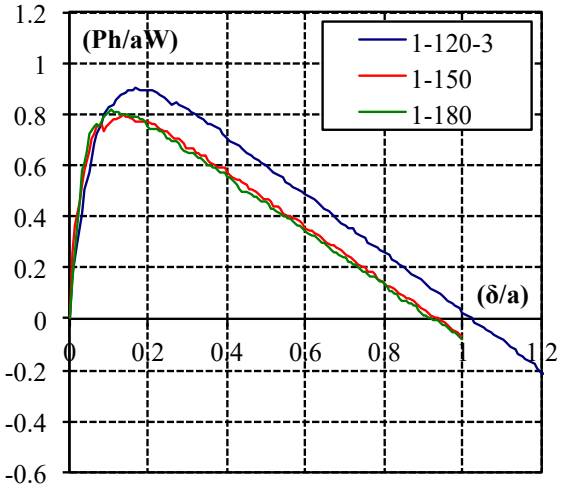
・軸力変動、高軸力の試験体で耐力低下が見られるも、バラツキの範囲内。

【120×120角（柱のみ）】



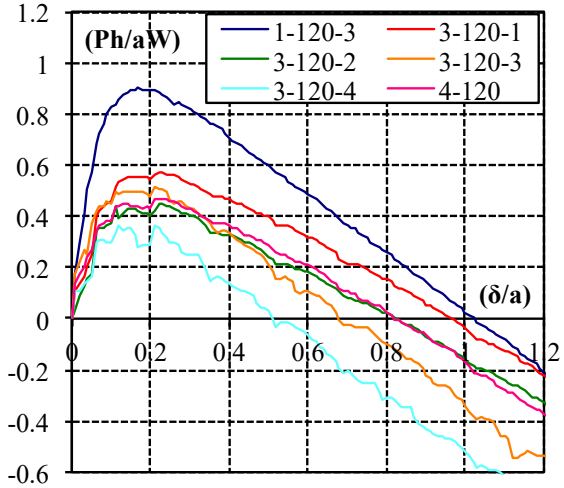
・断面が大きくなると耐力低下が見られる。
・横架材ありの耐力低下が顕著。

【円形断面比較（φ120・φ150・φ180）】



・断面が大きくなると耐力低下が見られる。

【角材比較（120角・150角・180角）】



・横架材ありの耐力低下が大きく、変動軸力の場合が顕著である。

【横架材あり】

断面の大きい軸材料の接合部の回転抵抗に関する検討

昨年度の検討等より、以下のことが明らかとなっていた。

- 伝統構法の柱-梁接合部はモーメント抵抗型の回転挙動を示すため、その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性能を有する可能性がある。
- 一方、告示で規定されている垂れ壁付き独立柱の記述は、差し鴨居等の軸組と土壁を書き分けられてはおらず、加算を行うためにはこれらを明確化することの必要性が指摘された。

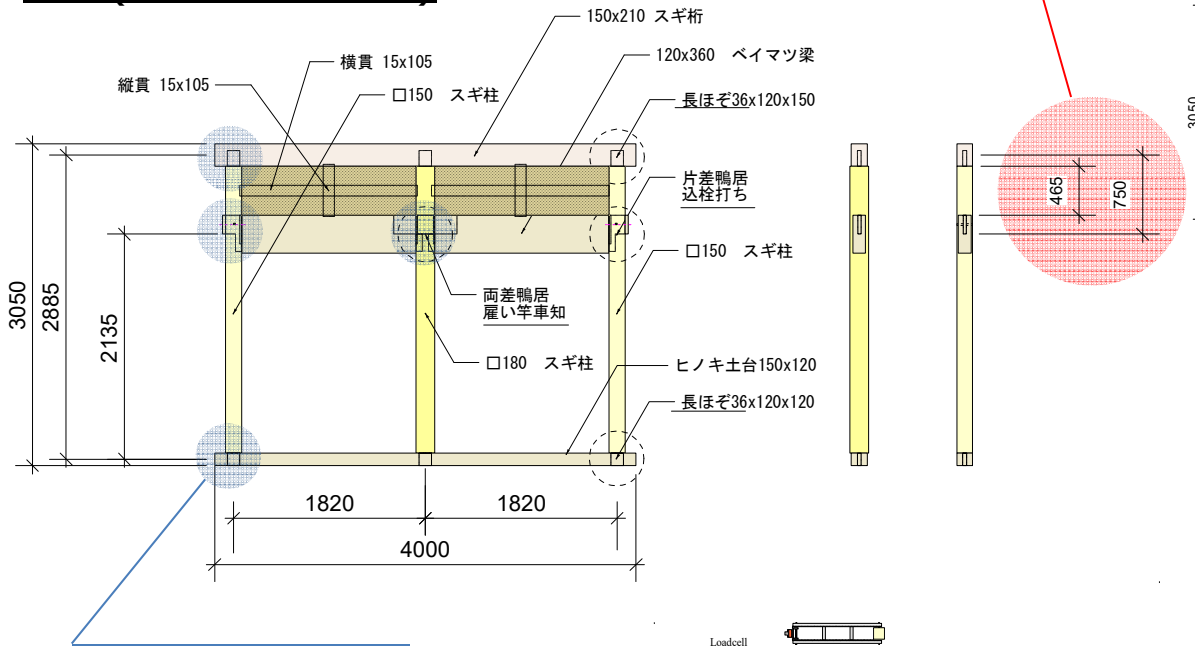
今年度は、土塗り小壁を有するフレームの水平載荷実験をおこない、接合部の要素試験の結果と比較することで土塗り壁の性能と接合部の性能との加算則が成り立つかを確認した。

断面の大きい軸材料の接合部の回転抵抗に関する検討

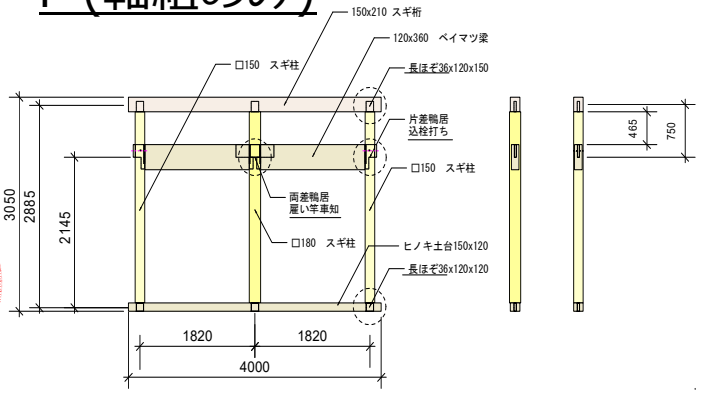
✓ 試験体

✓ 小壁寸法：告示最小寸法
(芯々750mm, 内法実寸465mm)

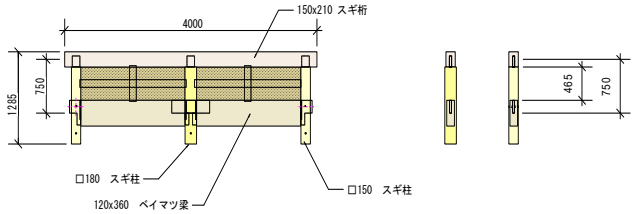
FM (小壁付き軸組)



F (軸組のみ)

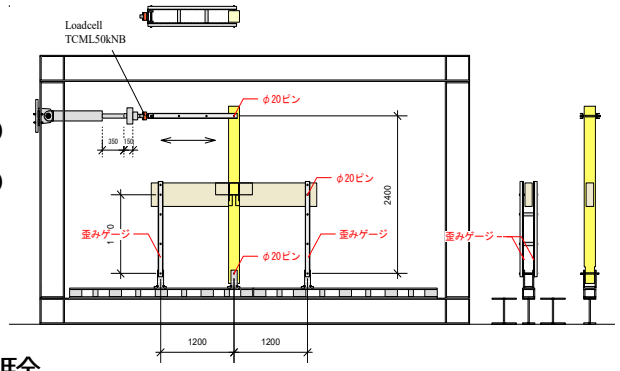


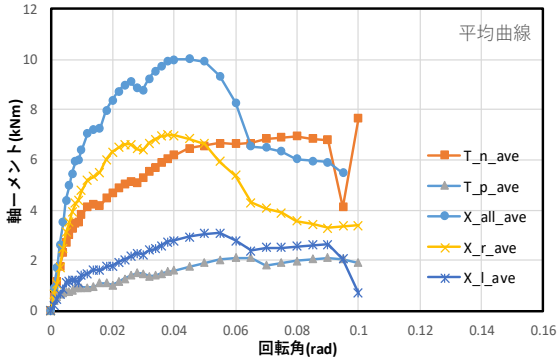
M (小壁部のみ)



✓ 5種類の単位要素接合部
差鴨居中柱：雇い竿車知栓どめ
差鴨居側柱：小根ほぞ込栓留め
柱頭　　：長ほぞ
柱脚　　：長ほぞ

→それぞれ単位接合部の性能試験

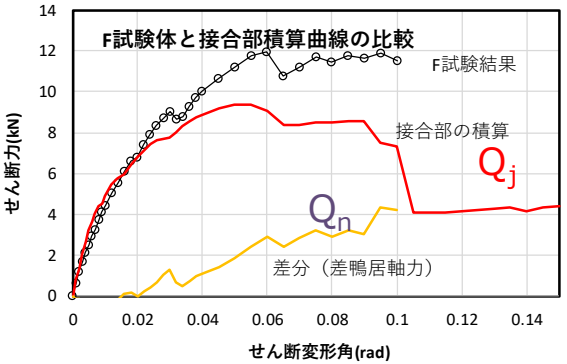




単位接合部の平均骨格曲線

断面の大きい軸材料の接合部の回転抵抗に関する検討

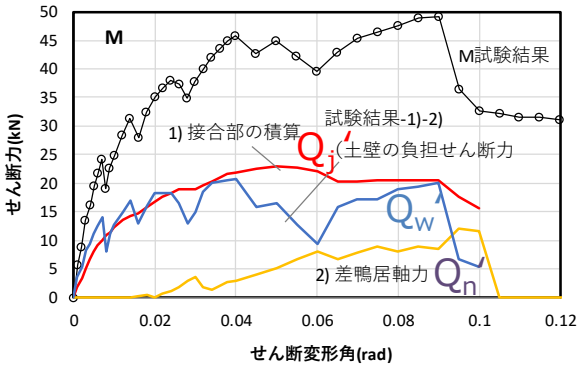
✓ 試験結果の重ね合わせ



①**軸組試験結果F**　と　接合部試験結果の加算Q_{jf}の比較
初期弾性域において良く一致。大変形時に適合性小

→差分から差鴨居軸力成分Q_nとして定義

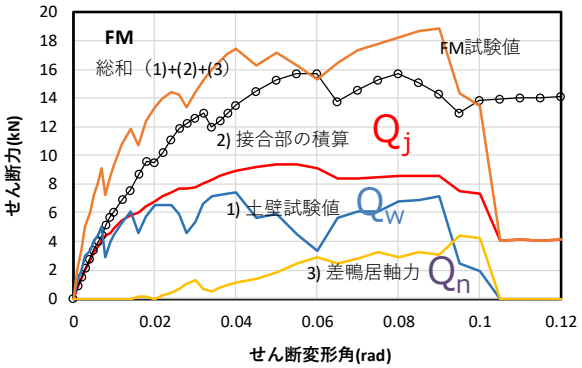
軸組のみの場合、接合要素の重ね合わせで初期の耐力性能を推定可能



②**小壁試験結果M**　と
接合部試験結果の加算Q_j'＋差鴨居軸力成分Q_n'の比較

→差分から小壁負担せん断力成分Q_w'を定義

※各記号に'（ダッシュ）が付いているのは、小壁の高さ比で算出しているもの。



③**小壁付き軸組試験結果FM**　と　全ての要素成分の加算（接合部試験結果の加算Q_j ＋差鴨居軸力成分Q_n ＋小壁負担せん断力成分Q_w）の比較

→加算値は全体に大きくなり、加算則が成り立たない。

垂れ壁と組み合わせると部材曲げ変形や差鴨居の軸抵抗などの要素が加わるため、単純加算則が成立しない。

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　小屋ばり組の各構成要素の実験

基本的要素である「屋根構面」、「小屋ばり構面」、「鉛直構面」の性能確認を行った

②　伝統的仕様小屋ばり組切妻屋根の実大水平加力実験

地震や風等を想定した等分布荷重を小屋ばり組に与え、各要素実験結果から予測される性能との整合性を確認した

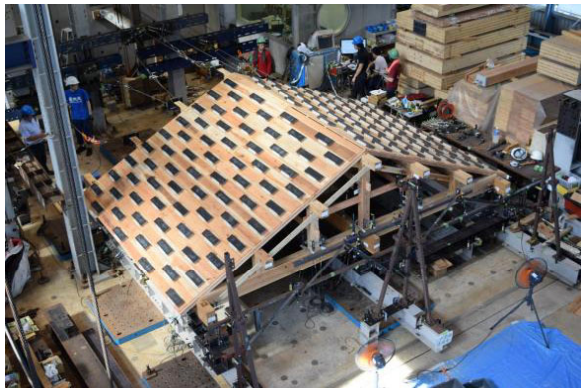
③　簡易モデルによる数値解析

鉛直構面の仕様を変動要因としたパラメトリックスタディを実施した

④　小屋ばり組の各部仕様規定の提案

①～③の成果に基づき、各部仕様規定の提案を行った

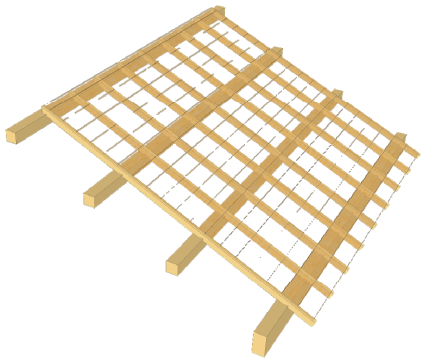
①屋根構面の要素実験



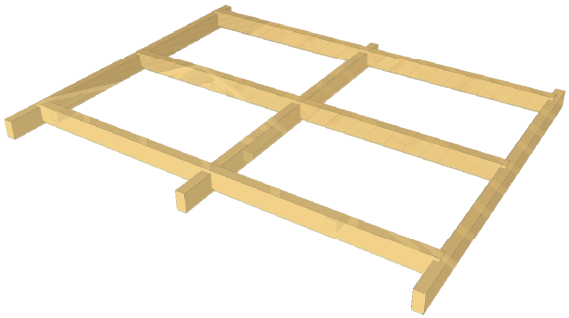
②小屋ばり組切妻屋根の実大水平加力実験

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

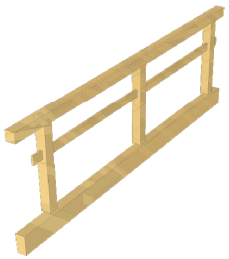
① 小屋ばり組の各構成要素の実験



屋根構面



小屋ばり構面

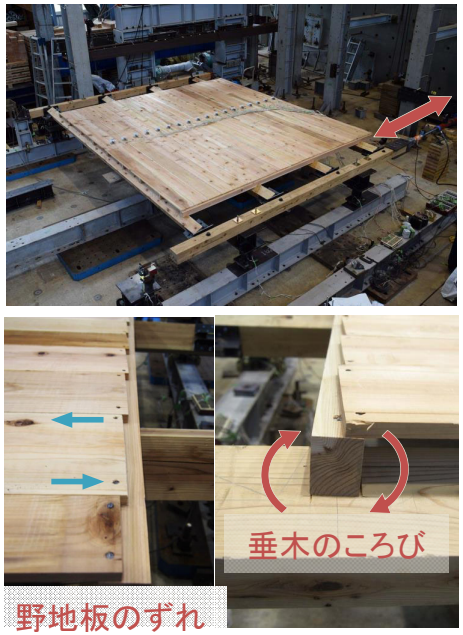


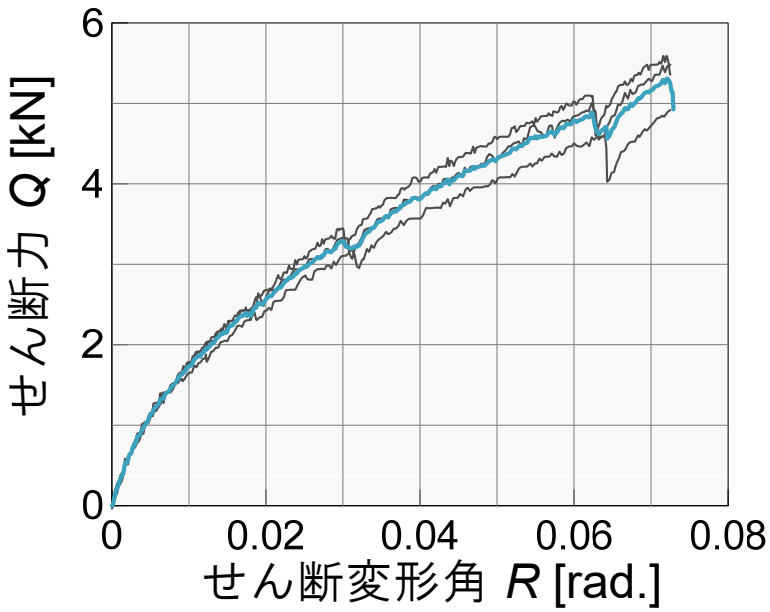
鉛直構面

屋根構面の実験

・スギの野地板(15x180mm)を垂木に2-N50で接合した仕様

・現行の評価法による床倍率は**0.28**相当

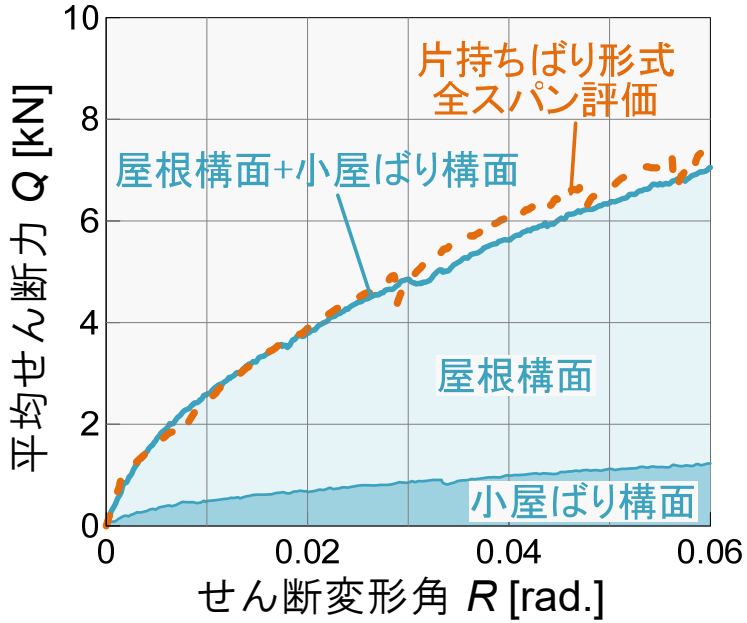


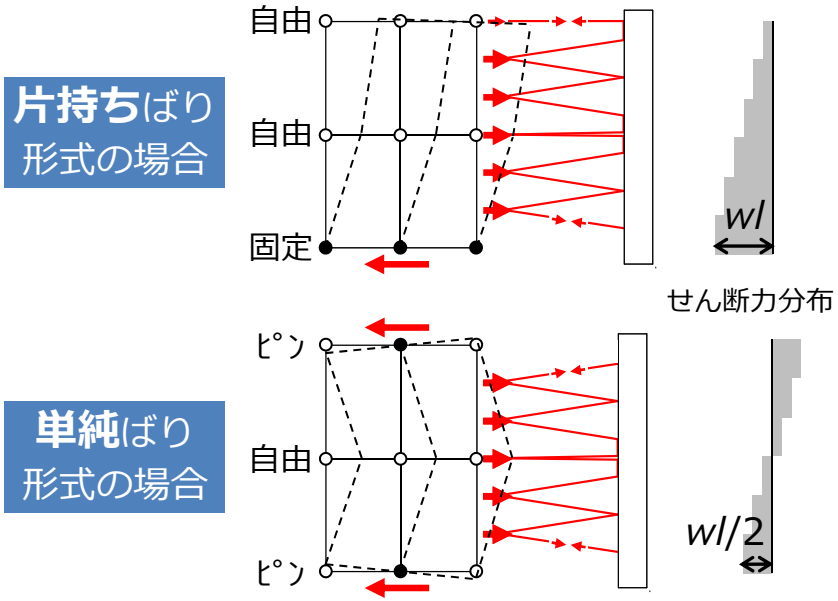


小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

② 伝統的仕様小屋ばり組切妻屋根の実大水平加力実験

滑車治具にワイヤーを通して巻き上げることで等分布荷重を再現

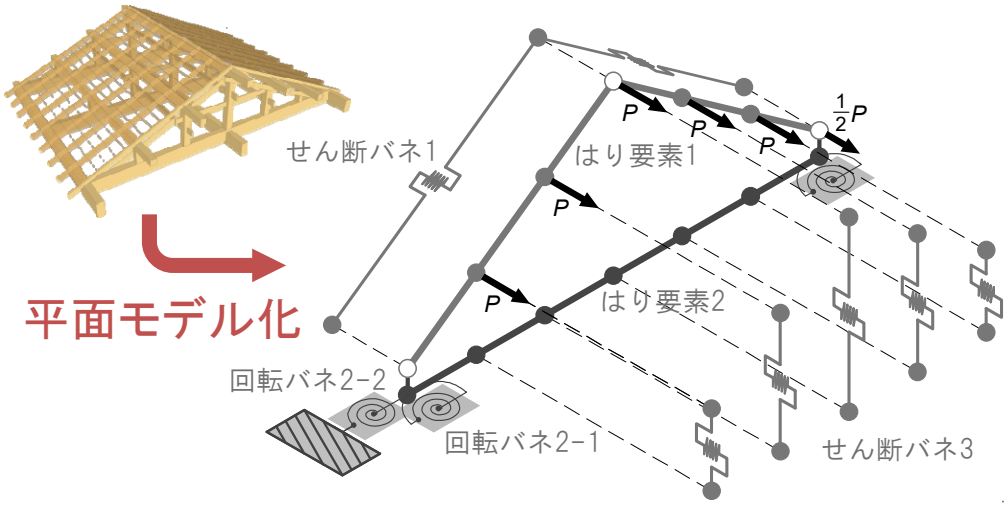




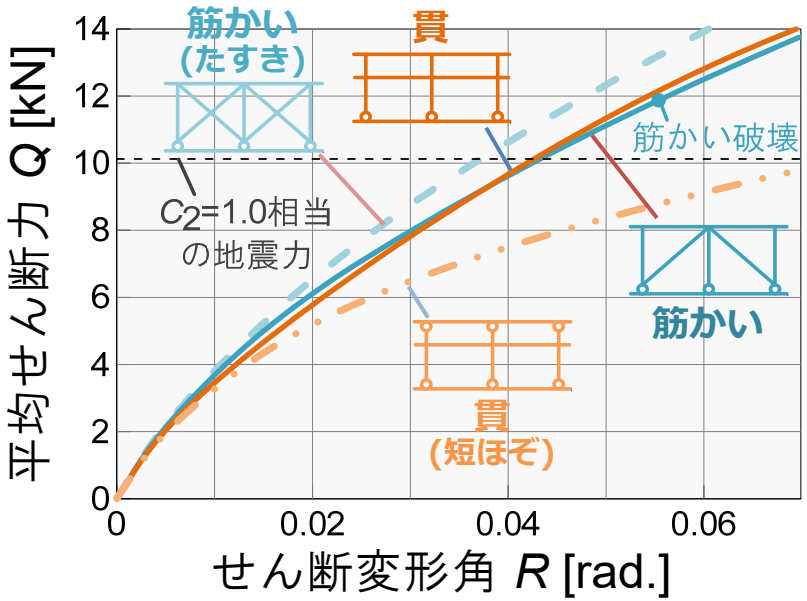
- 片持ちばり形式の結果は、要素実験結果の**単純加算で予測可能**（床倍率**0.29**相当）
- 単純ばり形式では、**小屋ばりの曲げ抵抗**により、片持ちばり形式より**性能が向上**することを確認した

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

③ 簡易モデルによる数値解析



単純ばり形式の場合



- 要素実験結果に基づいて平面解析モデルを作成し、**鉛直構面の仕様**を変動要因とした性能比較を行った
- 単純ばり形式では鉛直構面の仕様が全体性能に影響をおよぼし、**小屋貫or小屋筋かい**を取り付けた上で、**小屋束は長ほぞ差し**とすることが望ましいことがわかった

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

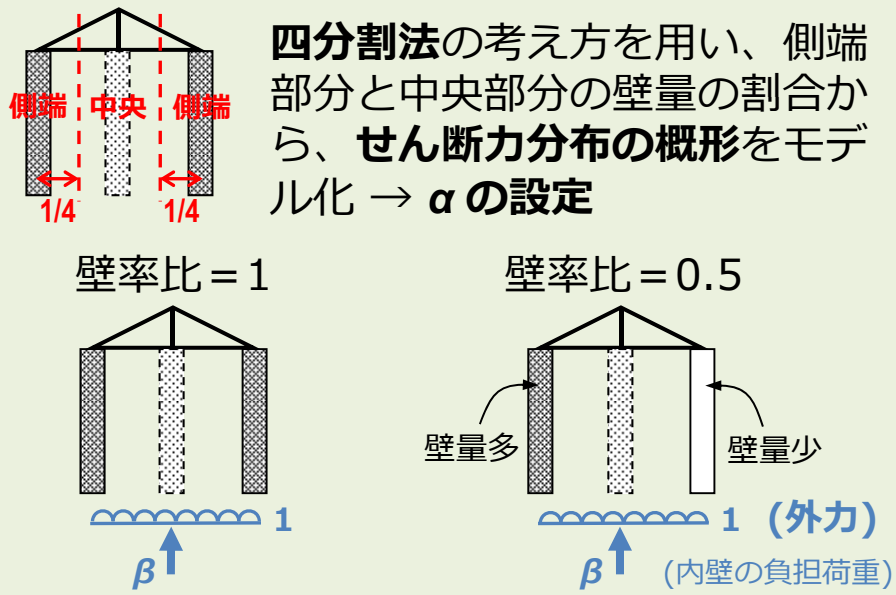
④ 小屋ばり組の各部仕様規定の提案

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

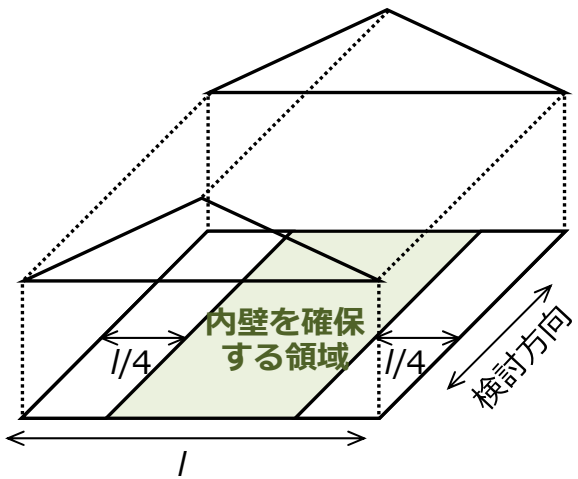
（平成26年度基整促「垂れ壁付き独立柱・だぼ入れにより水平方向のみ拘束した柱脚等で構成された木造建築物の設計基準に関する検討」および昨年度の検討と同様の手法）

“小屋ばりスパンごとに必要とされる内壁の負担割合”として整理した

→ **スパンが長く**、**壁配置が悪い**ほど、ある程度の**内壁量を確保**する



四分割法の考え方を用い、側端部分と中央部分の壁量の割合から、**せん断力分布の概形**をモデル化 → **α の設定**



小屋ばりスパンごとに必要とされる内壁の負担割合

小屋ばりスパン(m)	平屋		2階	
	偏心なし (壁率比=1)	偏心あり (壁率比=0.5)	偏心なし (壁率比=1)	偏心あり (壁率比=0.5)
3.64	–	–	–	**0.15**
5.46	–	**0.2**	**0.1**	**0.3**
7.28	**0.1**	**0.3**	**0.2**	**0.4**

小屋ばり組に要求される構造性能に関する検討

④ 小屋ばり組の各部仕様規定の提案

1） 最大スパンと内壁量

はり間（小屋ばりが掛かる）方向は**最大7.28m**までとする。また、小屋ばりスパン、建物階数、桁行き方向耐力壁の偏心の有無（壁率比）に応じて、桁行き方向の**両側端部分を除いた建物内部に、表（前ｽﾗｲﾄﾞ）に示す割合の壁量を当該小屋ばり組がかかる階の桁行き方向に確保**する。

ただし、内壁を過剰に配置すると建物外周部の壁量が不足する可能性があるため、両側端部にも全体の25%以上の壁量をそれぞれ確保することが望ましい。

2） 各部詳細

2-1） 屋根構面：**野地板（幅180mm, 厚さ15mm）**を垂木（45x60mm, 継手がある場合は乱になるように）に対して、**2-N50（間隔135mm）**で接合する。あるいは、**床倍率が0.28以上**であることを確認した仕様とする。垂木は釘N75で両面から斜め打ち、軒桁にはあおり止め金物を設ける。

2-2） 小屋ばり構面：小屋ばりと軒桁の接合は、**かぶとあり掛け、羽子板ボルト締めと同等以上**の耐力を有する仕様で緊結する。

2-3） 鉛直構面（桁行）：**小屋束は棟木・母屋（上部）に長ほぞ差し両面かすがい打ち**、小屋ばり（下部）に短ほぞ差し両面かすがい打ちで接合する。**振れ止めとして小屋貫（27x105mm）または小屋筋かい（15x90mm, 2-N50）を設ける**（小屋束上下の横架材芯々間距離が600mm以下の場合は不要）。

2-4） 鉛直構面（はり間）：妻壁あるいは小屋筋かいを設ける。