

3D プリンタ利用を前提とした，多数の部材が 接続するかぶら束型接合部の設計手法

A Design Method for Cover-Bundle Type Joint with Multiple Components on the Use of a 3D Printer

○三宅 一步^{*1}，満田 衛資^{*2}
Kazuho MIYAKE^{*1}，Eisuke Mitsuda^{*2}

*1 京都工芸繊維大学大学院生
Graduate Student, Kyoto Institute of Technology

*2 京都工芸繊維大学 教授・博士(工学)
Prof, Kyoto Institute of Technology, Dr Eng

キーワード：3D プリンタ；木質構造；継手・仕口

Keywords: 3D printer; Wood structure; Joint, connection .

1. はじめに

日本に存在する木造建築の多くが木造軸組工法（在来工法）と呼ばれる工法であり，直交グリッドの接合を標準として，プレカット加工機が発展し，それに合った接合金物も多く開発されてきた。

一方，最近では3DCAD や構造解析ソフトなどの3D設計技術が利用しやすくなり，自由度の高い木構造建築物の設計が行いやすくなった。しかし，部材の取り合いが任意の角度を有する場合（一つの接合部に対して複数本の部材を接合する場合も含む）では，プロジェクト毎に接合部の設計を行うことが多く，設計者の悩みの種となっている。また，先に述べた通り部材の取り合いが複雑な角度を有する場合は，部材の材端形状がプレカット加工機に対応していないことが多く，大工が自ら墨出しを行い手刻みで部材を加工する，あるいは，鉄骨ファブにおいてプレートの切

り出しと溶接により特殊な接合金物を製作することとなるため，直交グリッド系のプレカット加工に対し膨大な時間とコストを要する。

プレカット加工による合理化が進めば進むほど，直交グリッド系か否かのコスト差は開くばかりで，任意の角度で設計される木構造建築物が敬遠されてしまう状況となっている。

これらを踏まえ，筆者らは，内田らによる継手・仕口を構成する基本形についての研究¹⁾²⁾をもとに，形状の複雑さの影響を受けにくい3Dプリンタ利用を前提とした木構造接合部の設計手法の開発を進めている。既報³⁾において，かぶら束部に腰掛け鎌継ぎを利用した例を提示している。

本報告では，かぶら束形状の決定手法を示す他，新たに金輪継ぎを利用した場合の継手寸法決定手法について詳述し，本設計の汎用性の高さを示す。

名称	突付け	略鎌	目違い	ほぞ	鎌	腰掛け	縫栓(込栓・鼻栓)
略図							
負担できる応力	圧縮力	圧縮力 引張力 せん断力 曲げ	ズレ止め 狂い止め 開き止め 割れ止め	圧縮力 せん断力 曲げ 鉛直荷重	圧縮力 引張力	せん断力 鉛直荷重 (ズレ止め)	引張力 曲げ せん断力
接合箇所	梁-梁 梁-柱	梁-梁 梁-柱	梁-梁 梁-柱	梁-梁 梁-柱	梁-梁 梁-柱	梁-梁	梁-梁 梁-柱

図1 基本形

2. 接合部設計手法と設計アルゴリズム

文献より提案された2種類の設計手法と設計アルゴリズムを示す(図2).

・手法1

既に広く普及している直交グリッド系のプレカット技術を活用することを意図した接合部設計手法である. この手法では部材同士の複雑な交わりについては3Dプリンタで成形を行い, 継手・仕口の加工についてはプレカット加工機を用いる. 詳細寸法を決定する際, 木質構造接合部設計マニュアル³⁾に記載されている継手・仕口の各部寸法の比率を使用することで汎用技術に対応させる. 設計応力に対応した母材寸法と継手・仕口の詳細寸法が決定される.

・手法2

今後, 加工の自由度が高まっていく近未来的状況を想定し, 母材端部加工寸法を操作できる場合の接合部設計手法である. 一般的にABS樹脂の材料強度が木材よりもはるかに大きいので, 手法1では男木側の耐力が接合部の耐力となるのに対し, 強度に余裕のある女木側のボリュームを小さくし男木側のボリュームを大きくすることで, 結果的に接合部としての耐力を上昇させることを意図したのがこの手法2である. 手法1同様に複雑な交わりについては3Dプリンタで成形を行うが, 継手・仕口の各部寸法についてはマニュアルの比率を使用せず任意に決定する. その際に, 3Dプリントの製作上の最小寸法を満たしつつ, 設計応力に対応した範囲で総体積を小さくする.

金輪継ぎを例に, 手法1と手法2をそれぞれ用いた場合の詳細寸法の決定, 最大耐力の算定式は図3のようになる.

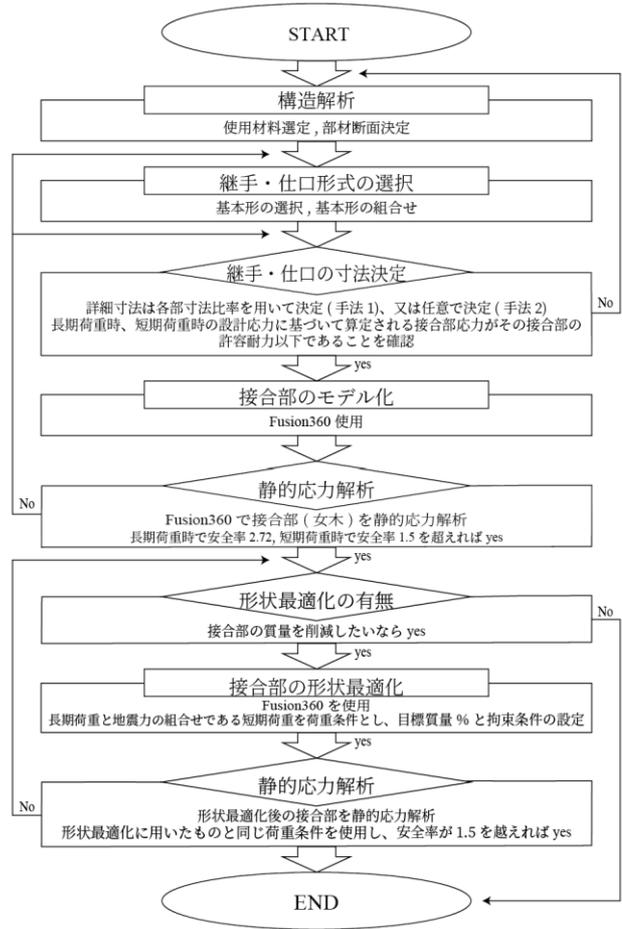
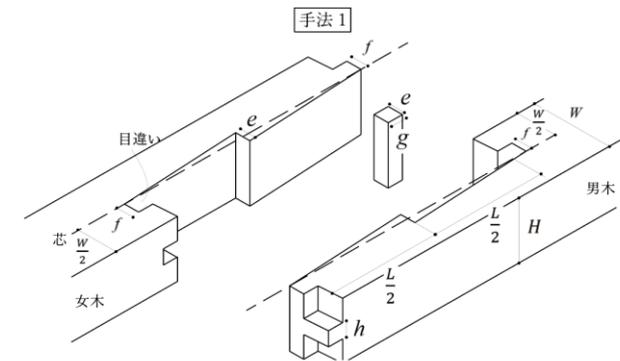


図2 設計アルゴリズム



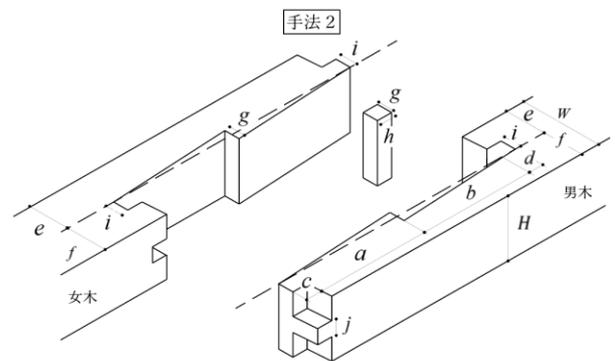
・寸法決定

$L = 2H \sim 3H, H \geq W, e = 15\text{mm}$ ないし $\frac{L}{20} \sim \frac{L}{15}, f = 15\text{mm}$ 程度. 込栓については, カシ, ナラ, ケヤキ等の堅木を用い, $d = \frac{W}{8} \sim \frac{W}{6}$ の角栓とする.

・最大耐力 P_u

- ① 栓の全面横圧縮降伏 $P_{ycv} = F_{ef} \times e \times H$
 - ② 顎から先のせん断破壊 $P_{us} = \frac{1}{2} \times F_s \times (L - g) \times H$
 - ③ 目違いの開きによる割裂破壊 $P_{uk} = \frac{2 \times F_s \times L \times A_e}{3 \times (\frac{e}{2} \times \frac{L}{4})}, A_e = \frac{(\frac{L-f}{2})^2}{W} \times H$
- $\therefore P_u = \min.(P_{ycv}, P_{us}, P_{uk})$

(F_{ef} : 栓の繊維直交方向のめり込み強度, F_s : 男木(母材)のせん断強度)



・寸法決定

3Dプリントの製作上の最小寸法を満たしつつ, 設計応力に対応した範囲で総体積を小さくするように, 任意に決定する.

・最大耐力 P_u

- ① 栓の全面横圧縮降伏 $P_{ycv} = F_{ef} \times g \times H$
 - ② 顎から先のせん断破壊 $P_{us} = F_s \times a \times H$
 - ③ 目違いの開きによる割裂破壊 $P_{uk} = \frac{2 \times F_s \times (a+b) \times A_e}{3 \times (\frac{L}{2} \times \frac{L}{2})}, A_e = \frac{(\frac{L-l}{2})^2}{W} \times H$
- $\therefore P_u = \min.(P_{ycv}, P_{us}, P_{uk})$

図3 金輪継ぎを例にした詳細寸法の決定と最大耐力の算定式

3. 試設計

2種類の設計手法を用いて、かぶら東型接合部の試設計を行う。試設計モデルは文献¹⁾と同じものを使用する(図4)。

3.1. 構造解析

使用材料の選定、部材断面の算定を行う。

構造解析の結果(図5)より、使用材料は米松、部材断面は120mm×120mmとした。また、かぶら東接合部には長期と短期ともに、圧縮力とせん断力が生じる。

3.2. 継手・仕口形式の選択

ここでは存在応力に応じて基本形を選択し、それらの合成形、又は、基本形単体を継手・仕口形式とする。

本試設計では、圧縮を負担する「略鎌」、せん断力を負担する「腰掛け」、ずれ止め・開き止めの「縫栓」と「目違い」を使用し、これらの合成形である金輪継ぎを使用し、角栓に用いる樹種はナラとした。

3.3. 継手・仕口形式の寸法決定

ここで継手・仕口形式の詳細寸法を決定する。手法2では任意に詳細寸法を決定するが、手法1では母材寸法が決定されれば自動的に詳細寸法と最大耐力が決まる。

各手法で決定した金輪継ぎの詳細寸法と最大耐力 P_u を表1と表2にそれぞれ示す。各手法共に、栓の全面横圧縮降伏で最大耐力が決まる。

3.4. 接合部のモデル化

Fusion360を用いて接合部のモデル化を行う。モデル化の手順については各手法共通して(1)~(3)のように行う。この3Dモデルの作成が、3Dプリンタにて成型する接合部のモデルデータそのものであり、成型品の精度にも影響を与えるため、寸法誤差が発生しないように注意深くモデリングを行う。

(1)部材の交わりをモデリングし余分な部分を除去する

異なる断面寸法を有する部材の交わりを作成する場合は、柱勝ちや梁勝ち等を考慮してモデリングを行い(図6-①)、交わりの余分な部分を除去する(図6-②)。

(2)部材と接合部の芯となる部分を分割

余分な部分を除去した後、接合部とする部分(女木側)と男木に分割する。

本設計では各部材が他の部材と交わり始める場所で垂直に分割(図6-③、赤線部)し、できるだけ接合部の総体積を抑えた設計を行う為、接合部の芯とする部分の六角錐を除去(図6-④)した。

(3)接合部の芯に女木を作成

3.3で選択した継手・仕口形式の女木を、接合部の芯に対して部材が入る角度に配置する。

男木の継手形状をモデリングし(図6-⑤)、部材の入る角



図4 試設計モデル(左:全体 右:かぶら東型接合部)

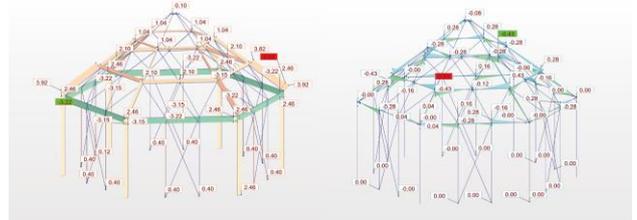


図5 解析結果

表1 手法1による詳細寸法(mm)と最大耐力 P_u (kN)

W	H	L	e	f	g	h	P_u
120	120	60	15	15	15	15	15.5

表2 手法2による詳細寸法(mm)と最大耐力 P_u (kN)

W	H	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	P_u
120	120	90	20	30	10	30	90	20	10	10	40	20.7

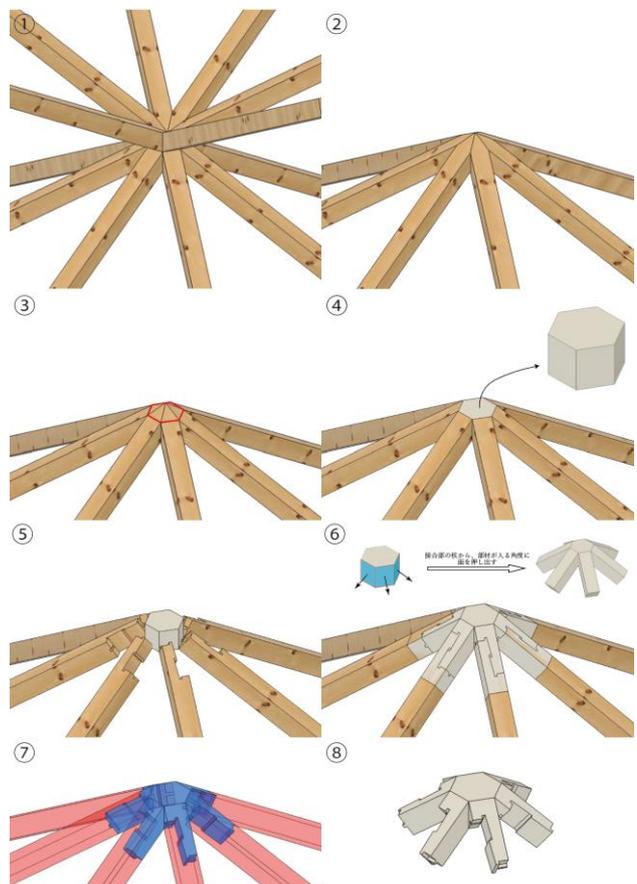


図6 Fusion360を用いたモデル化手順

度に合わせて面を押し出した接合部と男木を重ね合わせ(図6-⑥)、接合部をターゲットボディ、男木をツールボディとして切り取り(ブーリアン演算の差)を実行する(図6-⑦)。正確にブーリアン演算を行う為、面の押し出し寸法は男木の継手形状の全長以上とする。

本試設計での男木の継手形状のモデリング手順を図7で示す。男木の上面にスケッチツールを用いて継手の概形線を作図し(図7-①)、その概形線をもとに押し出しツールなどで余分な部分を除去する。目違いの下部が接合部の芯に干渉するが、今回は男木勝ちとした。

各手法を用いて設計したかぶら束型接合部を図8に示す。

3.4. 接合部の静的応力解析・形状最適化

モデル化した接合部に対して、Fusion360のシュミレーション機能である静的応力解析を行う。安全率は長期の場合であれば2.73、短期で1.5を超えれば良い。接合部は塊でモデル化されているため、静的応力解析の結果は十分にゆとりのある場合が多く、接合部の質量(使用する樹脂量)を削減する場合は形状最適化を行う。

各手法で設計した接合部に対し、長期・短期それぞれの静的応力解析を行った結果(図9)、設定しているABSの許容応力度に対し十分な安全率を持つ事が分かった。また、本試設計では形状最適化は行わない判断を下した。

3.5. まとめ

本報告では文献と同じ試設計モデルを用い、かぶら束型接合部の試設計を行った。継手・仕口形式の選択では、腰掛け鎌継ぎと異なる基本形の組み合わせを持つ金輪継ぎを選択し、手法1と手法2を用いて、それぞれ継手の詳細寸法を決定した。手法2では詳細寸法を任意に決定した結果、手法1と比較して接合部体積の削減、男木の最大耐力が上昇した。Fusion360を用いたモデル化を経て、接合部の静的応力解析の結果、存在応力に対して十分な安全率を持つ事が分かった。

各手法を用いて設計したかぶら束型接合部の最大耐力、安全率(短期時)、質量を表3に示す。

4. 結論

本報告では、腰掛け鎌継ぎと異なる基本形の組み合わせを持つ金輪継ぎを使用した。異なる継手・仕口形式を選択した場合でも、難なく接合部の設計を行えることが分かり、文献で示すことのできなかった設計手法の汎用性を示した。

参考文献

- 1) 内田 祥哉：在来工法の研究 -木造の継手仕口について-，財団法人住宅総合研究財団，1993
- 2) 藤田 克典：伝統的木造における構造要素の力学特性の

解明と構造設計法への適応，東京大学博士学位論文，2012

- 3) 三宅 一步，満田 衛資：3D デジタル技術を用いた木構造接合部の設計手法の開発，日本建築学会近畿支部研究報告集 2021, p120
- 4) 社団法人 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル，丸善株式会社，2009

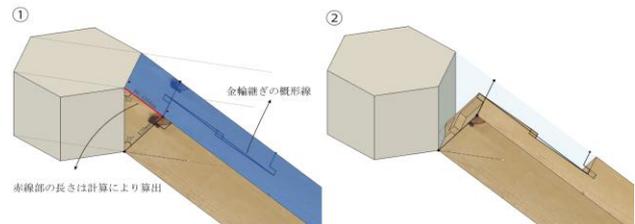


図7 男木の継手形状作成

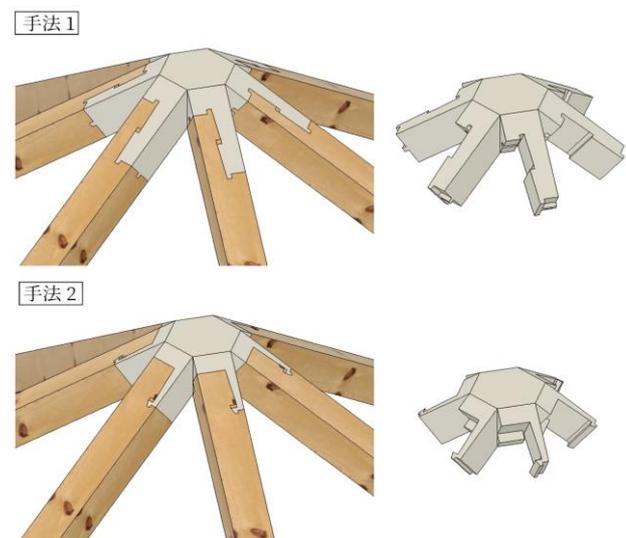


図8 各手法で設計したかぶら束型接合部



図9 接合部の静的応力解析

表3 各設計手法で設計した接合部の比較

	最大耐力 Pu(kN)	安全率	質量(kg)
手法1	15.5	2.643	18.7
手法2	20.7	3.065	9.9