

4. 木質系面格子壁の水平載荷試験による基本的構造特性に関する研究

Study on Basic Structural Characteristics for Timber Grid Wall

飛田 喜則*¹ 山内 豊英*¹ 老藤 慎也*¹ 森 浩二*¹

要 旨

近年、環境に配慮し、CO₂削減などを目的として木材利用が重要視されている。本実験は、木材の本来の性能を確認するために金物を使用しない伝統的なほぞや込栓などを利用した木質系面格子壁を作成し、その水平載荷試験を実施した。これによって木材の性質と面格子壁としての損傷状態を把握すること、それら木材の種類や機械的性質の違いが水平耐力に及ぼす影響について検討した。その結果、木材の機械的性質によって、面格子の水平耐力が大きく影響していること、接合部等のめり込みなどによる回転変形が生じることなどを把握することができた。

キーワード：木材／面格子／伝統構法／水平載荷実験

1. はじめに

近年、環境に配慮し、CO₂削減などを目的として木材を利用した構造物が多くなりつつある。その中で木材による壁形式の耐震要素はこれまで多くの実験がなされ、水平加力試験により耐力や壁率などが算定されている。これらに使用される木材の機械的性質は、その種類によって剛性や耐力が大きく異なり、かつそれらは材の方向や力のかかる方向によっても大きく異なるため、木材を利用した設計が困難である。一方、木造の在来構法にみられるように金物などを用いて接合部などを補強した場合、それらによって耐力等が決定されるため比較的構造計算が容易となるが、本来の木材の特性を生かした構造形式とは言い難く、伝統的な構法を用いた架構形式による木構造の可能性を検討することも重要である。たとえば、木造面格子はその意匠性は優れているものの、格子材の仕口部の耐力が小さいため耐力壁としての水平耐力が小さいことが欠点となっているが、これに対して工夫を施すことで、木材の特性を生かした耐震要素となる可能性に期待できる。

本実験は、金物を使用することなく、伝統的なほぞや込栓などを利用して接合した木材による面格子壁を作成し、その水平加力試験を行い、木材の性質と面格子壁としての損傷過程を把握すること、FEM解析等の諸条件の基本情報を収集することを目的として実施した。

今回した木材は、奈良県吉野で伐採・加工されたヒノキ材とスギ材を比較対象としており、まず小型の試験

片の軸方向圧縮試験および部分圧縮試験によって、使用する木材の機械的特性を把握し、次にヒノキ材とスギ材の同形状の面格子壁を作成し、水平載荷実験を行うことで、それら木材の種類や機械的性質の違いが水平耐力に及ぼす影響について検討した。

2. 試験体概要

2.1 試験体形状

試験体の構成を図-1に示す。試験体は、外枠と内側の面格子にて構成され、それらは上下の梁、横材をダボ等で結合することで、外枠にかかる水平力を伝達する。試験体形状および水平載荷装置を図-2に示す。外枠の断面サイズ(単位:mm)は、上下の梁がB×D:165×240、外枠の柱は120×120である(それぞれ外枠梁、外枠柱と称す)。外枠柱の端部は、外枠梁とほぞにて結合し、1本の込栓(カシ材:30×30)にて固定する。内側の面格子は、各部材の断面サイズが90×90であり、格子の交点が相欠き継手にて結合され、外端の格子材と内側の格子材はほぞにて結合されている(以降、格子の縦材を格子縦材、横材を格子横材と称す)。試験体に使用した材料の含水率は15%以下となるように乾燥させている。これらの接合部には金物などは使用していないが、作成初期に抜けやガタツキなどが生じないように熟練の大工によって組まれている。試験体の組み立ての様子を写真-1に示す。

*¹ 技術研究所 建築構造研究グループ

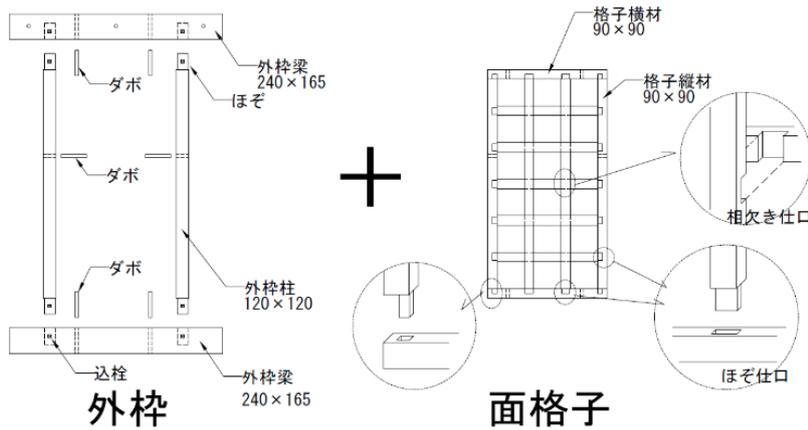


図-1 試験体の構成



写真-1 試験体の組み立て状況

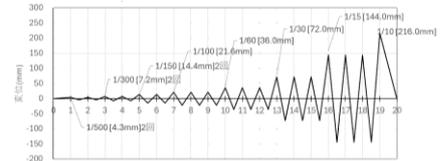


図-3 載荷スケジュール

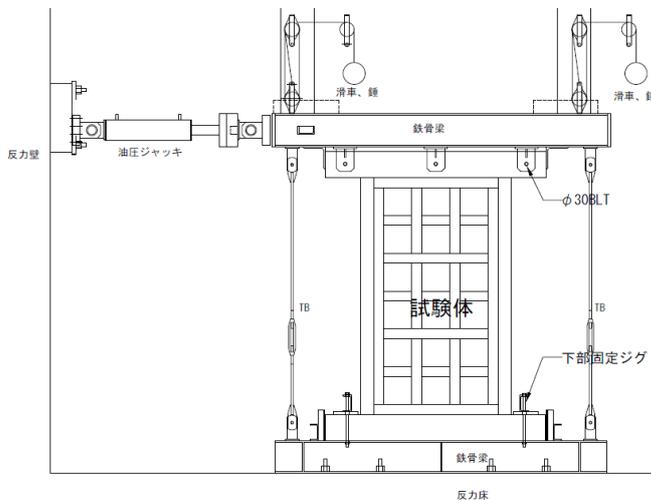


図-2 載荷装置



写真-2 試験体（ヒノキ材）の設置状況

2.2 試験体の設置と加力装置

試験体の設置状況を写真-2に、載荷装置の概要を図-2に示す。試験体への水平方向の載荷は、試験体の頂部に取り付けた鉄骨梁を介して油圧ジャッキにて行った。油圧式ジャッキ（100kN、ストローク±250mm）を用い、試験体の左から押し引きすることとした。

鉄骨梁と頂部外枠梁は、φ30のボルトが3本で結合され、さらに外枠梁の小口に鉄骨アングル材を設け、それにて水平力が伝達するようにしている。また、鉄骨梁と加力ジャッキの重さを取り除くために鉄骨梁を滑車を用いて吊り上げている。試験体の面外の変形は、外部の鉄骨柱から振れ止めを用いて拘束した。

脚部はコンクリート製の反力床に鉄骨梁をPC鋼棒で固定し、それと試験体脚部の外枠梁端部を鉄骨ジグにて水平方向および上下方向の変形を拘束した。

油圧ジャッキの加力により試験体に著しい曲げ変形が生じないように、加力用の鉄骨梁からターンバックルにて拘束するようにしたが、実験中に十分に拘束できておらず、試験体にやや曲げ変形が生じた。

2.3 載荷計画

載荷スケジュールを図-3に示す。試験体の変形角（以降、単に試験体変形角と称す）は、可動域となる外枠梁間の内法寸法を基準高さとしてジャッキ変位をそれと除したものとし、1/500、1/300、1/150、1/100、1/60、1/30、1/15および1/10とした。載荷の繰り返し数は、変形角1/500～1/150で2回、変形角1/100～1/15で3回の繰り返し正負交番載荷とした。なお、1/10は正方向載荷時のみとした。

2.4 測定計画概要

計測位置を図-4に示す。図中で示すように、外枠柱の左から右にX1～X6軸、外枠梁の下から上にY1～Y9軸と称し、以降、各仕口部等の位置をそれらの符号にて示すこととする。計測項目は、外枠柱の脚部および頂部のほぞの抜け（相対変位）をひずみゲージ式変位計にて測定し、外枠柱および格子縦材の脚部の外柱の脚部に作用する曲げ、軸力を把握するために木材表面にひずみゲージを貼り付けてひずみ値を測定し、ジャッキの荷重と変位をジャッキに取り付けたロードセル

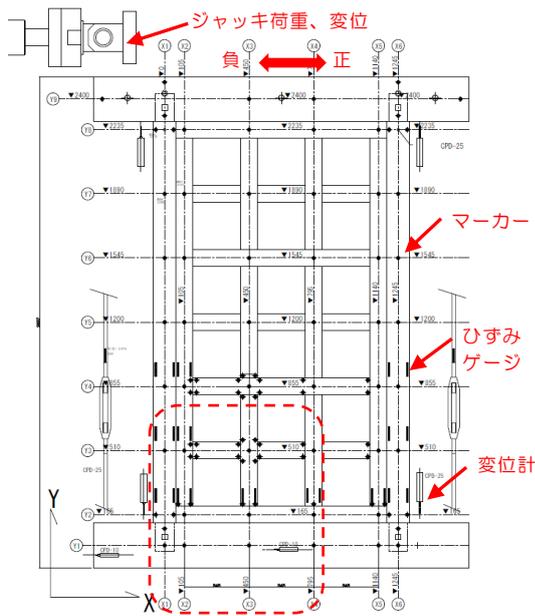


図-4 測定位置図

と巻取り式変位計にて測定した。各格子点の変位測定は、図-4の●で示す各格子点などに反射マーカーを取り付け、モーションキャプチャーシステム（以降、MCSと称す）を用いて測定した。特に、図-4の破線で示した範囲ではほぞの抜け、梁の曲げ変形、仕口のせん断変形角などを検出するために反射マーカーを密に配置して測定した。

3. 要素試験

水平載荷試験に先立ち、使用するヒノキ材およびスギ材の軸方向のヤング係数および降伏応力度を把握するために木材の繊維方向に圧縮させる軸方向圧縮試験、めり込み強度を確認するための繊維と直交方向に圧縮させる部分圧縮試験を JIS 規格¹⁾を参考に行った。

3.1 軸方向圧縮試験

軸方向圧縮試験片は、各試験で3体とし、断面の1辺が45mmの正方形とし、高さを90mmとした。試験片の1例およびその加力試験時の様子を写真-3に示す。

試験片上面から鉛直載荷し、その荷重をロードセルにて計測し、載荷荷重を断面積で除した応力度を算定した。鉛直変位は、試験体内の2点間測定する方法より簡易的にクロスヘッドの鉛直変位をひずみゲージ式変位計にて試験体周囲3点を測定し、それらの平均値とした。

鉛直ひずみと応力度の関係を図-5に示す。また、それらから算定したヤング係数および最大応力などの値を表-1に示す。ヤング係数は、応力-ひずみ関係が比例状態となる範囲において算定した。ヤング係数を算定した勾配を図-5内の赤線で示している。最大応力度は、ヒノキ材では応力度の最大点としたが、スギ材では見かけの降伏後にも荷重が増加し続けたため、ひずみ1.5%時の応力度を参考値として示した。

ヤング係数の平均値は、ヒノキ材が約7700N/mm²、ス

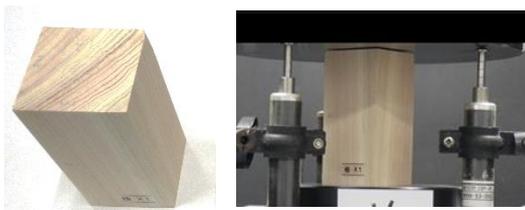


写真-3 軸方向圧縮試験片例と加力状況



写真-4 部分圧縮向圧縮試験片例と加力状況

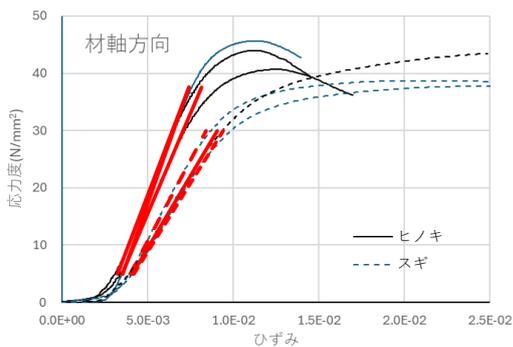


図-5 軸方向圧縮試験結果

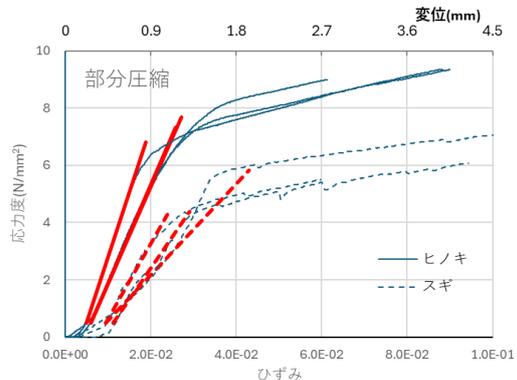


図-6 部分圧縮試験結果

表-1 圧縮試験結果一覧表

材種	試験体 No.	軸圧縮試験					部分圧縮試験						
		初期剛性		最大応力度			初期剛性		第2剛性		降伏点応力度		
		N/mm ²	平均	N/mm ²		平均	N/mm ²	平均	N/mm ²	平均	ε	N/mm ²	平均
ヒノキ材	1	8373	7727	45.6		43.4	340	379	38	36	2.71%	7.68	7.27
	2	7022		43.9			344		32	(0.09)	2.57%	7.31	
	3	7786		40.7			452		38	1.89%	6.81		
スギ材	1	5063	5152	33.3	37.9	31.7 (ε=1%)	261	212	34	30	2.39%	4.29	4.83
	2	5594	(0.67)	31.3	39.4	37.7 (ε=1.5%)	159		28	(0.14)	4.30%	5.82	
	3	4798		30.4	35.9		216		29		2.91%	4.39	
備考		():ヒノキ材に対する比		ε=1%時	ε=1.5%時	():初期剛性に対する比							

ギ材が 5100N/mm² であり、ヒノキ材に比べてスギ材が低い値となった。ヒノキ材の軸方向の平均最大応力度は約 44N/mm² であるが、図-5 に示したように、いずれの試験片も軸歪が 1%程度から耐力低下がみられた。一方、スギ材は、ヒノキ材に比べて早期に剛性が低下するが、ひずみ 1%時で約 32N/mm²、1.5%時で 38N/mm² となり、ひずみ 1%以降も応力度が増加する傾向を示した。

3.2 部分圧縮試験

部分圧縮試験は、試験片の断面が 1 辺 45mm の正方形とし、その長さを 180mm とした。加力点には厚さ 9mm、幅 45mm の鉄板を加圧板として、その上面を単調載荷した。試験片の例、および加力試験時の写真を写真-4 に示す。変位計は軸圧縮試験と同様にクロスヘッドの 3 点を測定し、その平均値をめり込み変位 δ とし、それを加圧面の高さ (45mm) で除して見かけひずみとして算定した。また、載荷荷重を断面積 (45×45mm) で除して応力度とした。見かけひずみと応力度の関係を図-6 に示す。図の横軸には下にひずみを、上に変位を示す。

これより、弾性域の剛性を初期剛性、塑性域の剛性を降伏後剛性とし、それら 2 直線の交点を見かけの降伏点 (σ_y、ε_y) とした。

ヒノキ材とスギ材の初期剛性の平均値はそれぞれ 379N/mm²、212N/mm² であり、めり込み時の σ_y はそれぞれ約 7.27N/mm²、4.83N/mm² であった。その後、めり込み量 1mm 程度から塑性域となり、大きな変形 (ひずみ) 時まで安定した伸びを示し、その剛性が初期剛性に比べ約 1/10 となった。

4. 水平載荷実験

4.1 せん断力-変形角関係

試験体の水平耐力を確認するため、水平載荷実験を行った。実験によって得られたせん断力-変位角の関係を図-7 に示す。いずれの材でも、せん断耐力は、変形角の増加に伴い増加するが、繰り返しの低下がみられ、それらはスリップ型の復元力特性を示した。載荷

中、試験体のほぞ部分の抜けや、めり込みが各所に生じ、特にヒノキ材の負荷荷 20/1000rad 付近で右外枠柱脚部の込栓の損傷と考えられる外枠柱の抜けが目視で確認できたが、最大変形角 1/10rad まで各部材に脆性的な破壊が生じなかった。

変形角 1/10rad 時の最大荷重は、ヒノキ材が 27.6kN、スギ材は 18.4kN であり、ヒノキ材に比べて約 0.67 倍となった。これは、スギ材のヤング係数がヒノキ材の 0.67 倍であったことから、材料のヤング係数等による材料特性の違いが試験体のせん断耐力に大きく影響していると考えられた。以下の報告では、ヒノキ材とスギ材は、耐力や剛性などの違いがあるが同様の傾向を示したため、ヒノキ材の試験体について述べる。

4.2 変形図

MCS によって得られた変位値から幾何学的に作成した変形図を図-8 に示す。図-8 (a) は正加力の変形角 1/15rad 時における試験体の変形を示す。図中の赤枠で囲った部分の拡大図を図-8 (b) ~ (d) に示し、併せて試験時の写真を示す (ただし図-8 (c) の写真は変形角 1/10rad のものを代用している)。図中の▲印は、接合する部材間でめり込みや抜きが生じたと推定される箇所を示し、図中の数値はそれらの相対変位値を示している。なお、本図は MCS 変位値から幾何学的に推定して

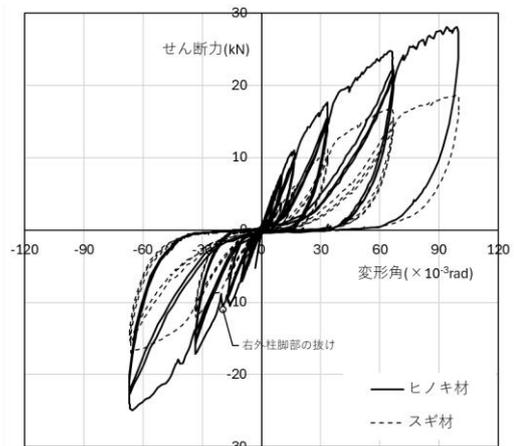


図-7 試験体のせん断力-変形角関係

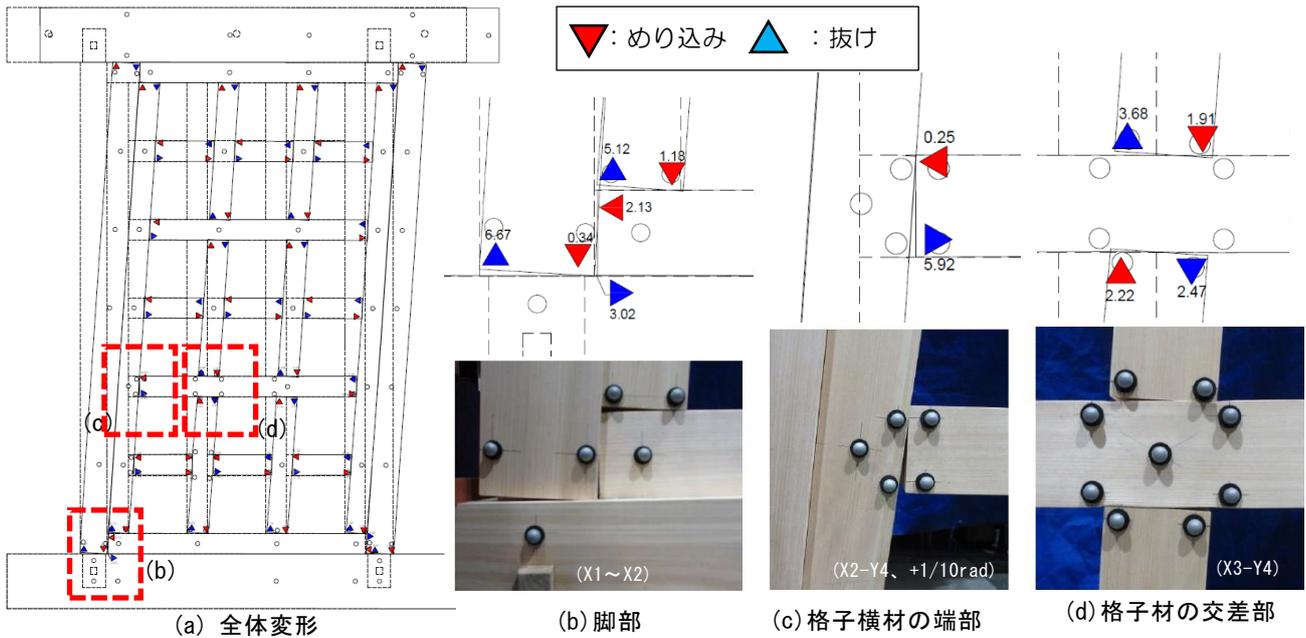


図-8 試験体の変形図

いるため実際の値と異なるが、写真と比較すると概ね状況と整合しており、MCS の利用によって各点の変位測定が有効に活用できている。

図-8 (a)より、試験体は水平せん断力に対してほぼ平行四辺形の形状で変形している。鉛直の材は脚部ほどの抜けとめり込み等により回転変形するが、中間部分で局所的な変形が見られない。水平材である格子横材は、柱の回転変形により端部に抜け等が生じるが、鉛直方向への変形や大きな曲げ変形が少ないうえに水平方向に移動する。

図-8 (b)より、脚部では外枠柱が下部の外枠梁にめり込み、加力方向と反対側では相対変位 6.6mm の抜けが生じている。この値は、柱横に取り付けたひずみゲージ式変位計の測定値とほぼ一致していることを確認している。また、外枠柱の回転変形によって格子横材の小口面にめり込みと抜けが生じており、面格子の格子縦材と下部の格子横材でもめり込みと抜けが生じている。これらの状況も概ね実験時の写真と整合している。このとき、MCS より算定した脚部の回転角は、約 $1/15\text{rad}$ であり、これは試験体変形角とほぼ一致する。このように、試験体の変形とともに、柱脚部ではめり込みと抜けによって回転変形が生じることを確認した。

図-8 (c)より、格子縦材が傾斜するために格子横材の端部では上端が格子縦材にややめり込み、下端では抜けが生じているが、格子横材の端部自体の回転変形角が少なく、材自体の鉛直方向への変形も見られない。

図-8 (d)より格子仕口部 (相欠き継手) では、格子縦材の端部が格子横材にめり込みと抜けによって回転変

形が生じている。この時、めり込み量が 1mm 以上あり、図-6 に示したように塑性域である可能性が高い。

これらの現象について、以降では試験体変形角との関係についてより詳細に検討する。

4.3 縦材の回転角と試験体変形角

試験体変形角と、X1・X6 軸の外枠柱、X2・X5 軸の格子縦材の脚部の回転角の関係を図-9 に示す。これより、それぞれの脚部の回転角は試験体変形角とほぼ同じ角度で推移していることが確認できる。なお、スギ材でもほぼ同様の傾向であった。次に、外枠柱脚部の鉛直変位との関係を図-10 に示す。左図が試験体 X1 軸の脚部、右図が X6 軸の脚部である。これより、試験体変形角の増大に伴い、鉛直変位が増加していることがわかる。X1 軸の脚部では、試験体変形角と比例的な増減を繰り返す、正載荷最大変形角時にめり込み量は少ないため最大 9mm 程度抜きとなり、負載荷時には最大 3mm 程度の抜けとめり込みが生じている。一方、X6 軸の脚部では、正載荷時には抜きとめり込みがみられるが、負載荷時には脚部全体が引き抜かれている。これ

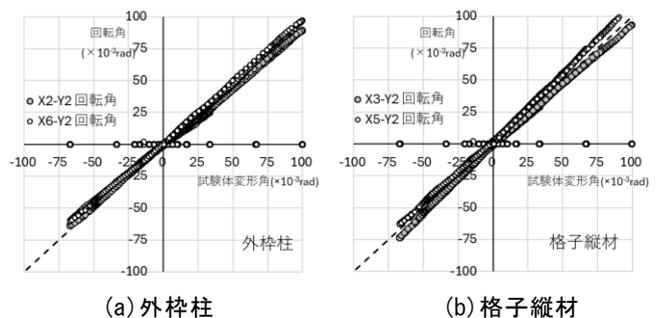


図-9 脚部回転角と試験体変形角の関係

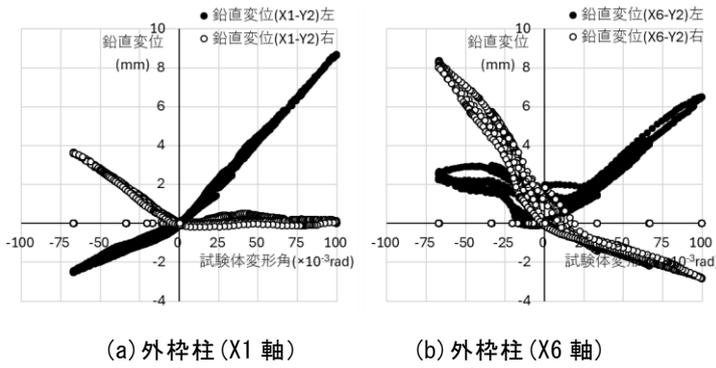


図-10 脚部回転角と試験体変形角の関係

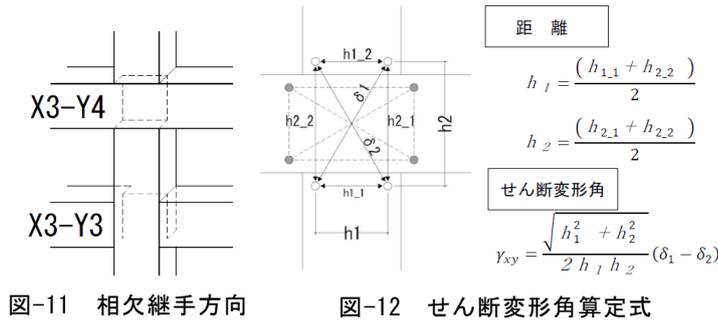


図-11 相欠継手方向

図-12 せん断変形角算定式

は前述したように、試験体変形角-20/1000rad 時の脚部の込栓が損傷したことが原因と考えられる。

4.4 格子仕口部の変形角と試験体変形角の関係

格子の縦材と横材の仕口は、例えば図-11 に示すように、試験体正面から見て Y3 軸で格子縦材通し、Y4 軸で格子横材通しのように、相欠き継ぎ手の向きが高さ毎で交互となっている。ここでは、これら格子縦材と横材のせん断変形角の違いについて検討する。仕口部のせん断変形角は各部材に取り付けた反射マーカーの4点の変位より図-12 で算定した。

試験体変形角と仕口部 (X3-Y3、X3-Y4) のせん断変形角との関係を図-13 に示す。図-13(a) は X3-Y4 位置、図-13(b) は X3-Y3 位置の仕口を示し、図中の○は縦格子材のせん断変形角を、●は横格子材のせん断変形角を示している。

図-13(a) より、仕口 X3-Y4 では試験体変形角に従って縦格子材のせん断変形角が大きくなるが、横格子材は比例的にやや増加するものの縦格子材と比較すると小さい。一方、図-13(b)によると、試験体変形角の増加に伴い、仕口 X3-Y3 のせん断変形角は、縦格子材にほとんど見られず、横格子材で大きくなっている。これは、図-8 (d) に示したように、木材の繊維方向となる軸剛性が高い部材が、繊維と直交方向の強度が弱い部分にめり込み、かつ塑性化し、反対側が離間していることと大きく関係していると考えられ、これらの状況

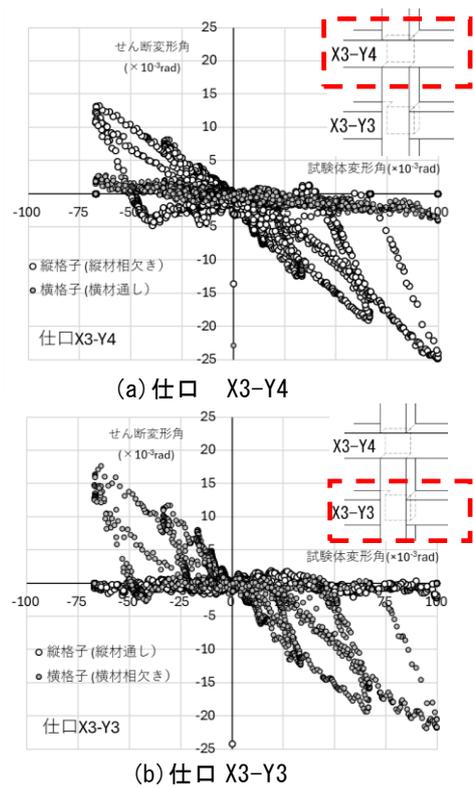


図-13 仕口のせん断変形角と試験体変形角の関係

と試験体変形角との関係を把握することができた。

5. まとめ

本報告は、ヒノキ材とスギ材を利用した面格子の水平載荷実験を行い、基本的な特性について検討した。

その結果、変形角 1/10rad 時まで脆性的な損傷がなかったが、荷重-変形角の関係では、各部で抜けやめり込みが生じ、スギ材の最大耐力がヒノキ材に比べて約 0.67 倍となり使用材料の機械的性質が大きく影響した。また、各部の変位値から、相欠き継ぎ手とした仕口部で交差している縦材と横材の変形角が大きく異なることなどが把握できた。

今後、より詳細な分析を行い、有限要素法などでこれらの非線形性を考慮したモデルの検討を行う予定である。

【謝辞】

本試験体の製作にあたり、吉野銘木製造販売株式会社 貝本拓路氏をはじめ関係諸氏には多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本規格協会：JIS Z 2101 (木材の試験方法)、2009