

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

芝浦工業大学 小澤雄樹



はじめに

・木質ラーメン構造 平面自由度の高い開放的な空間を構成可能

一般的な木造ラーメン 接合部に金物を利用

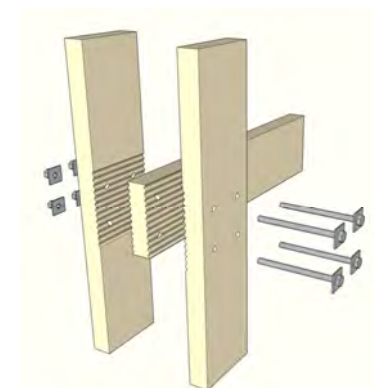
剛性の高い金物を介して応力が伝達されるため、金物と接する部分に応力が集中



局所的な損傷がシステム全体の耐力を決定

研究代表者らは、これまで
柱梁の接触面に設けた溝同士を噛み合わせることで
応力を伝達するシステムを提案

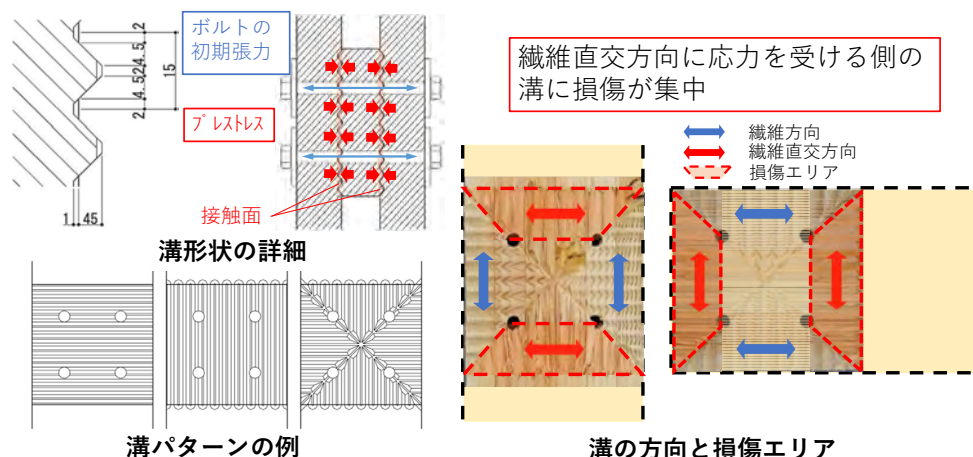
- ・ボルトはプレストレスを導入するために利用
→初期ガタの無い接合部を実現可能
- ・金物を介さず、木材から木材へ直接応力が伝達



接合部に溝を用いたシステム

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

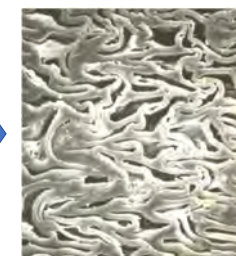
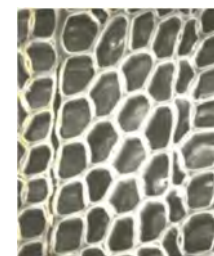
芝浦工業大学 小澤雄樹



木材の繊維直交方向の材料性能の低さがさらなる性能改善を目指す上で障壁となっていた。

圧縮木材とは

木材の細胞壁間にある空隙を圧縮により消失させることで高密度化し、木材の強度や材面の硬さなどの性能向上を図る技術



圧縮木材の細胞壁の様子



圧縮率の異なる圧縮木材

提供：名古屋木材株式会社

日本国内では小物などに使われることが多く、構造材としての利用は殆どない。

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

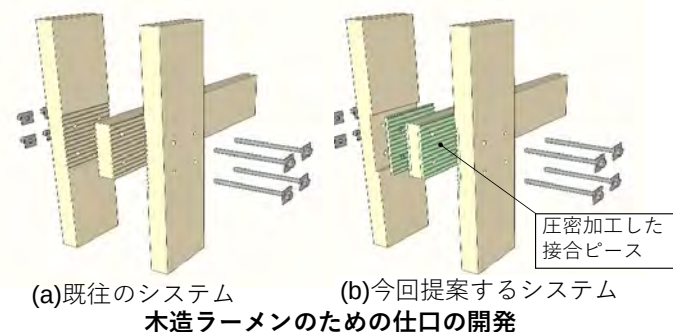
芝浦工業大学 小澤雄樹

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

芝浦工業大学 小澤雄樹

研究の目的

圧密加工技術により高強度化した木質ピースを接合部に組み込むことで構造性能の向上を図った新しいタイプの木質ラーメン構造を提案する。



応力の集中する接合部をパースナルに強化することで、高剛性かつ材料効率の良いシステムの実現が可能になる。

研究の方法

- (1) 圧縮木材に関する予備調査
海外視察、関連する実験の概要
- (2) 簡易法による圧縮木材製造と材料実験
マイクロ波照射、材料実験
- (3) 高圧水蒸気プレス法による圧縮木材の構造特性
高圧水蒸気プレス法、圧縮率と強度・ヤング係数の関係
- (4) 接合部曲げ実験
終局時までの挙動の確認、既往研究との比較
- (5) 接合部の非線形解析
接触を考慮した非線形解析、実験結果との比較

圧縮木材に関する予備調査

・海外視察



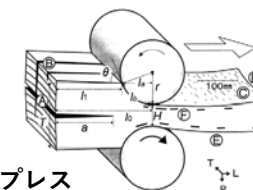
訪問先：ドレスデン工科大学
Prof. Peer Haller
Head of Chair Institute of Steel and Timber Construction



海外視察の様子

圧縮木材の製造工程

- (1) 可塑化
木材の微小細胞構造を破壊せず座屈させるために、軟化処理を施すことであり、薬品を用いた化学処理や、マイクロウェーブオーブンをを用いた加熱や高圧水蒸気を用いた加熱などの物理処理によって達成される。
- (2) 圧縮成形
主には平板プレスとロールプレスがあるが、今回は平板プレスを用いる。
- (3) 形状固定
木材が変形回復しないよう永久固定することである。圧縮変形を与えた木材は乾燥状態では一時的に固定されるが、吸水により弾性回復を示す。一般的に熱処理や水蒸気処理の高温圧縮によって行われる。

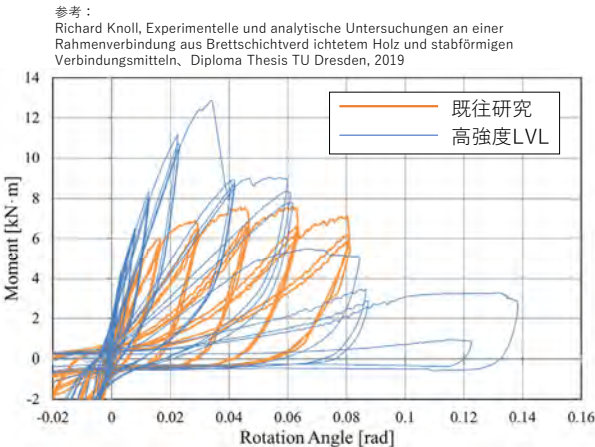


ロールプレス

高強度LVLパネルを用いた実験



高強度LVLパネルの製造



既往研究と高強度LVLパネルを使った実験の比較

圧縮木材の製造方法

本研究では圧縮木材の製造方法として、以下の2種類を検討する。

- ①簡易法
- ②高圧水蒸気プレス法

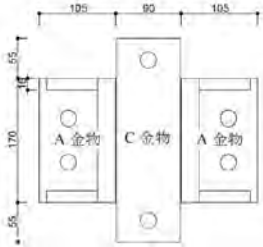
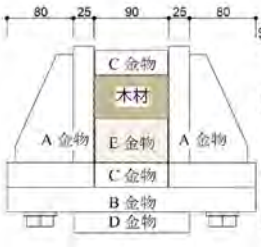
①簡易法
可塑化のための熱処理にマイクロウェーブオーブンをを用いる方法であり、木材を加熱後ただちに圧縮成形用の治具にセットし、圧縮試験機等で圧縮処理する方法である。汎用のオーブンを利用するため、大型の木材は成形できないが、**小部材であれば極めて容易に圧縮木材製造が可能**である。

②高圧水蒸気プレス法
プレス部を内蔵した大型の耐圧容器内で**(1)可塑化と(2)圧縮処理及び(3)形状固定の一連のプロセスを連続的に行う方法**である。可塑化には高圧水蒸気を用い、十分な処理を行うことで、**安定的な品質の圧縮木材を得ることが可能**である。

簡易法による圧縮木材の作成

実験パラメーター一覧

圧縮率	0%	30%	40%	50%
圧縮変位	0mm	31.5mm	42.0mm	52.5mm
加熱		有	無	有
固定時間		24h	24h	72h



圧縮木材製造用治具



Panasonic NE-711G (業務用) 使用したマイクロウェーブ オブ

縦圧縮試験結果

縦圧縮実験結果

	圧縮率								
	0%				30%		50%		
	試験体名	圧縮強度 [N/mm2]	ヤング係数 [kN/mm2]	試験体名	圧縮強度 [N/mm2]	ヤング係数 [kN/mm2]	試験体名	圧縮強度 [N/mm2]	ヤング係数 [kN/mm2]
加熱なし	Hn-C0-1	40.69	9.85	Hn-C30-1	42.60	8.37	Hn-C50-1	47.10	14.08
	Hn-C0-2	44.79	9.69	Hn-C30-2	34.11	10.81	Hn-C50-2	55.62	16.34
	Hn-C0-3	34.98	7.98	Hn-C30-3	48.54	16.75	Hn-C50-3	47.70	20.62
	Hn-C0-4	38.96	8.75	Hn-C30-4	46.14	9.63	Hn-C50-4	59.78	16.62
	Hn-C0-5	43.80	8.40	Hn-C30-5	53.67	11.22	Hn-C50-5	62.69	13.85
	平均	40.64	8.93	平均	45.01	11.36	平均	54.58	16.30
加熱あり				Hy-C30-1	43.82	15.37	Hy-C50-1	54.71	14.63
				Hy-C30-2	49.00	11.95	Hy-C50-2	59.81	18.36
				Hy-C30-3	60.06	13.90	Hy-C50-3	66.09	19.82
				Hy-C30-4	37.18	11.18	Hy-C50-4	52.62	13.35
				Hy-C30-5	83.82	12.21	Hy-C50-5	56.60	25.07
				平均	54.77	12.92	平均	57.97	18.25

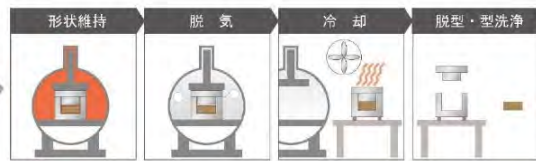
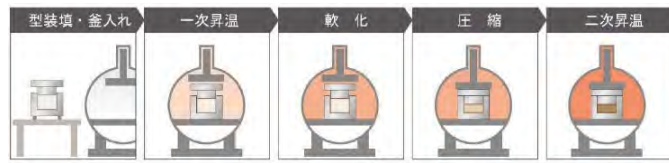


脆性的な破壊性状の例

簡易法による製造のまとめ

圧縮試験機と汎用のマイクロウェーブオーブンをさえあれば、極めて簡易に製造可能である。ただし、材料の均質性と、終局時に脆性的な破壊性状を示す点で課題を残す。

高圧水蒸気プレス法による圧縮木材

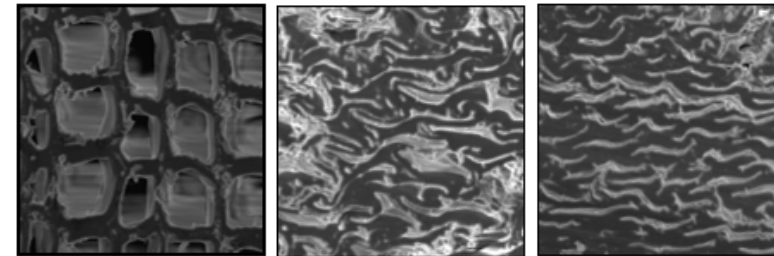


高圧水蒸気プレス法による圧縮木材の製造工程
(名古屋木材HPより)

- (1)可塑性
 - (2)圧縮処理
 - (3)形状固定
- の一連のプロセスを連続的に
行うことが可能
ただし、**材料費は高価**

電子顕微鏡による細胞壁の観察

作成した圧縮木材試験体を薄く切り出し、電子顕微鏡により断面の細胞壁の状況を観察した。



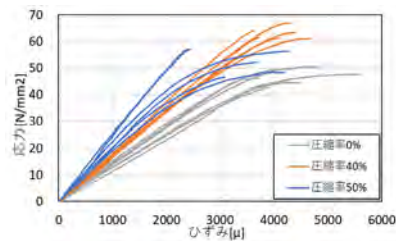
(a)圧縮率0% (b)圧縮率40% (c)圧縮率50%
電子顕微鏡で観察された細胞壁の様子



JEOL/JSM-6010LV
走査電子顕微鏡

細胞壁が座屈変形して畳み込まれ、空隙が減少している様子が観察される。

繊維方向

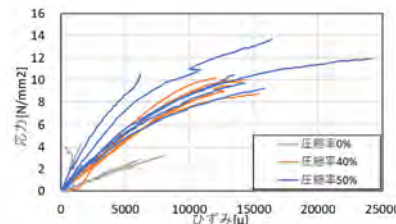


縦圧縮試験結果（応力度-ひずみ関係）

縦圧縮試験結果まとめ

圧縮率		密度	縦圧縮強さ	縦圧縮ヤング係数
		[g/cm ³]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
0%	平均	0.52	47.32	13.28
	標準偏差	0.01	2.12	1.15
	0%に対する倍率	1.42	(1.33)	(1.33)
40%	平均	0.74	63.00	17.69
	標準偏差	0.02	2.12	0.53
	0%に対する倍率	1.42	(1.33)	(1.33)
50%	平均	0.99	52.87	22.26
	標準偏差	0.02	4.24	2.70
	0%に対する倍率	1.90	(1.12)	(1.68)

繊維直交方向

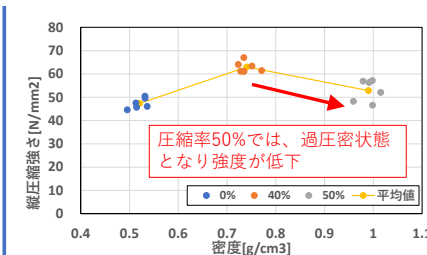


横圧縮試験結果（応力度-ひずみ関係）

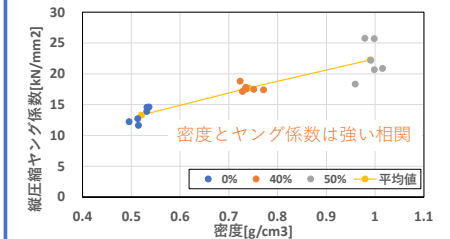
横圧縮試験結果まとめ

圧縮率		密度	横圧縮強さ	横圧縮ヤング係数
		[g/cm ³]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
0%	平均	0.52	6.30	0.45
	標準偏差	0.00	0.49	0.04
	0%に対する倍率	1.48	(1.52)	(2.29)
40%	平均	0.77	9.58	1.02
	標準偏差	0.01	0.51	0.11
	0%に対する倍率	1.48	(1.52)	(2.29)
50%	平均	1.00	12.01	1.30
	標準偏差	0.01	1.26	0.39
	0%に対する倍率	1.92	(1.91)	(2.93)

繊維方向

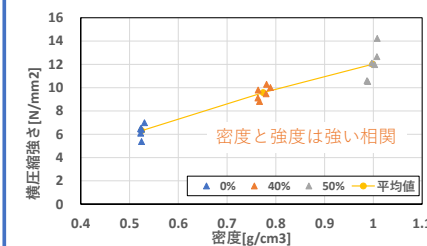


圧縮率50%では、過圧密状態となり強度が低下

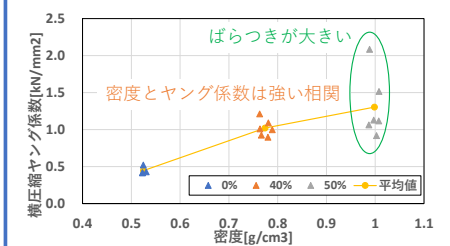


密度とヤング係数は強い相関

繊維直交方向



密度と強度は強い相関



ばらつきが大きい

密度とヤング係数は強い相関

密度-縦圧縮強さ関係

密度-横圧縮ヤング係数関係

接合部曲げ実験

・圧縮木材パネルと柱梁母材の接着

使用接着剤：

水性高分子ーイソシアネート系接着剤 ピーアイボンド5340W+H50



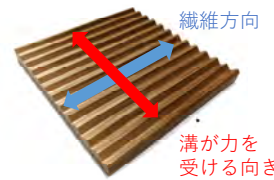
(a)主材と架橋剤を配合し、200～300g/m²を圧縮木材パネルにローラーで塗布する。



(b)硬化を始める時間内ですばやくパネルと母材を順番に重ねていく。

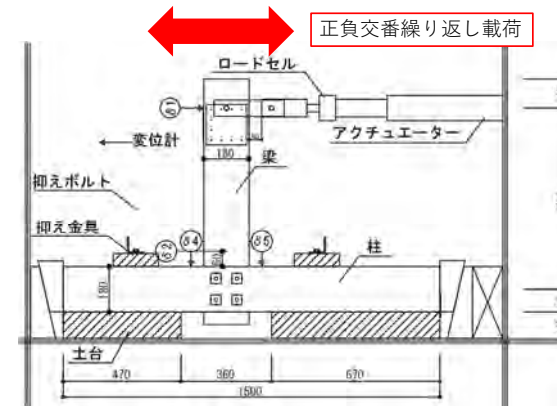


(c)60分以上圧縮を行い、治具を外す。その後、1週間養生。



パネルと母材の接着の様子

柱梁接合部曲げ実験概要



ステップ数	1	2	3	4	5
見かけの変形角	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75
変形量[mm]	2.4	3.6	4.8	7.2	9.6
載荷速度[mm/s]	0.04	0.06	0.08	0.12	0.16

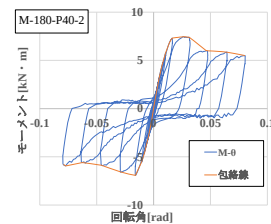
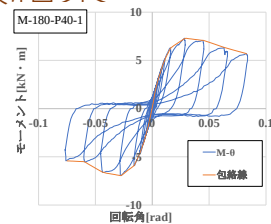
	6	7	8	9	10	押切り
	1/50	1/30	1/20	1/15	1/12	1/6
	14.4	24	36	48	60	120
	0.24	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0

載荷スケジュール

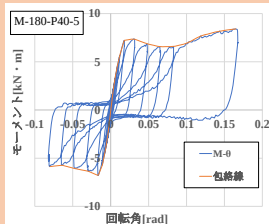
接合部曲げ実験の実験装置概要と載荷スケジュール

実験結果

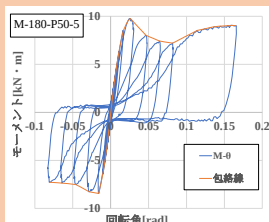
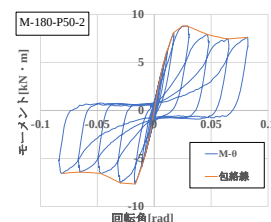
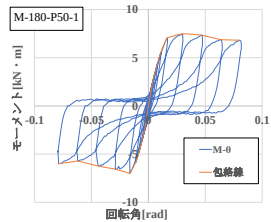
P40



回転角1/6まで押切り

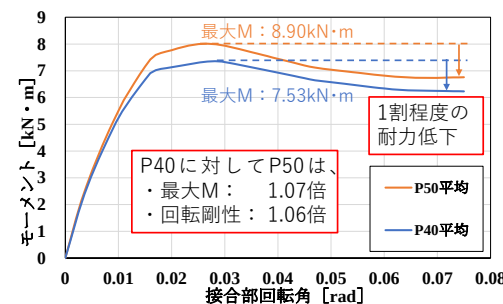


P50



接合部曲げ実験結果（モーメントー回転角関係）

実験結果まとめ



平均化した包絡線による比較

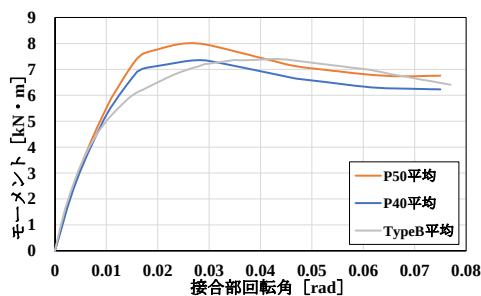
- 両者の実験結果は非常に類似している。
- 終局時には最大耐力時より1割強程度の低下を示すものの、急激な耐力低下は生じなかった。
- 破壊性状そのものはやや脆性的であるものの、接合部全体としては靱性をたもったまま挙動することが分かる。

破壊性状の例（柱側が破壊した場合）



P40、P50共に溝が根元から剥離するような破壊が発生

既往研究との比較

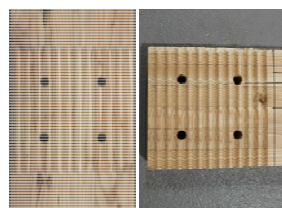


既往研究との比較

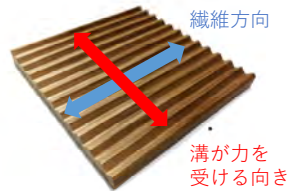
P40の耐力・剛性は既往研究と同等程度、P50は若干上昇

さらなる剛性・耐力の向上を図るために

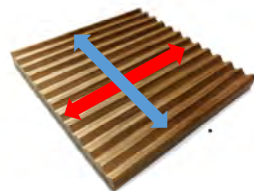
繊維方向と溝の向きを直交させたモデルについては、
2022年10月後半より実施予定。



TypeB (カラマツ集成材)



(a) 今回のモデル



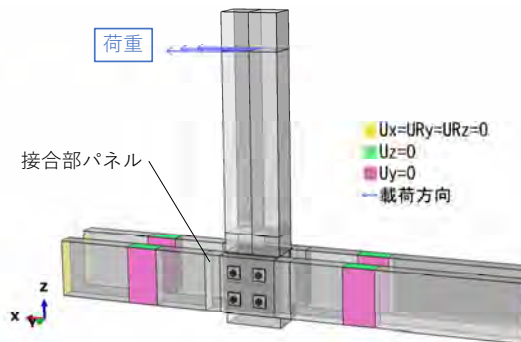
(b) 次回実施予定のモデル

繊維方向と溝の関係

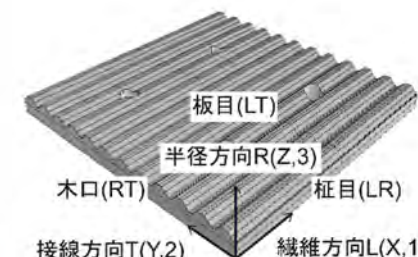
接合部の非線形解析

木材のめり込みと溝斜面の接触・滑り摩擦を考慮した接合部の非線形解析を行う。

・使用ソフト：汎用有限要素法プログラム「Abaqus」



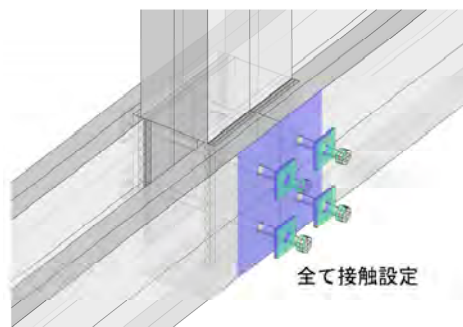
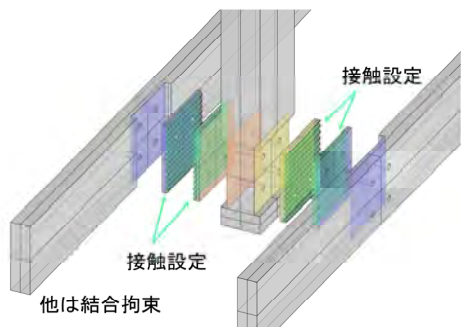
解析モデル



接合部パネルの各方向の設定

解析の諸条件

接触接線方向：ペナルティ法 摩擦係数0.5
接触方向：剛接触
接着箇所：結合拘束を用いて並進・回転自由度を結合

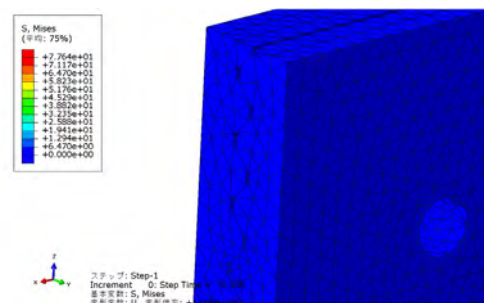


接触条件の設定

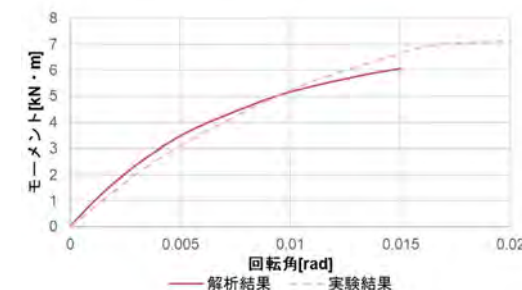
- ステップ1：ボルト荷重8kN
- 初期増分値0.01 最小1E-5 最大1

- ステップ2：24mmの強制変位
- 自動増分機能を用いる

解析結果まとめ



溝部分の解析の様子



解析結果と実験結果の比較

- 実験結果と解析結果はよく一致
- 解析手法は溝形状や溝配置の検討に有効

- モデルの妥当性を確認
- 今後、最適な溝形状・配置を検討

まとめ

本研究では圧密加工技術により製造された圧縮木材パネルを用いた木質ラーメン構造の新しい接合方法を提案し、その有効性を実験的・解析的に検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 圧縮木材を製造方法として①簡易法は容易に製造可能であるが、材料が脆性的になり易い点で課題を残した。一方、②高圧水蒸気プレス法は、剛性、強度共に比較的安定した性能を示した。
- 圧縮率40%、50%共に、圧縮なしの試験体と比較して剛性・強度共に大幅に向上した。ただし、圧縮率50%では過圧密状態となり、40%と比較して縦圧縮強度が低下する傾向が見られた。
- 接触・摩擦を考慮した非線形解析により、実験結果を精度よく再現可能である。
- 本手法は応力の集中する接合部を局所的に強化することが出来、現時点では比較的高価な圧縮木材を効率的に利用可能である。

課題と今後の予定

- 曲げ実験結果は靱性的な挙動を示したが、今回の実験ではパネルの溝を繊維と並行な方向としたため、剛性・耐力の向上と言う点では課題を残した。今後、繊維直交方向に溝を掘った場合の実験を実施予定である。
- 今回実施した数値解析手法により、より有効な溝形状・溝配置について検討していく。

最後に

コロナ禍で研究期間の1年延長を認めていただき、3年間の研究期間となりました。木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への適用に向けて、多面的に検討することが出来、今後の展開に繋がる有意な知見を得られました。

助成頂いたことにあらためて感謝申し上げます。