

集成材梁とプレキャストコンクリート仕口のボルト接合部に関する 実験的研究

田原 健一 千濱 彬比古
石井 勝^{※1} 佐々木 聡^{※2}
桂 大輔^{※2} 大城 祐史^{※1}
藤田 有章 佐藤 幸博

概 要

本研究では木材とプレキャスト（以下、PCa）コンクリート部材を組み合わせた木-PCaハイブリッド構法を開発するために、PCa仕口と集成材の梁がボルト接合された梁端接合部について要素実験と実大加力実験を行った。

各実験により得られた知見を以下に示す。①集成材の表層ラミナのめり込み剛性は中間層より高かった。②めり込み剛性を木規準によるめり込み剛性と比較すると実験値は計算値を下回った。③ボルトのめり込みに対する降伏応力度を木規準とEurocode 5による基準支圧強度とすると繊維方向では実験値は計算値を上回った。繊維直交方向では木規準の計算値を上回ったがEurocode 5の計算値を下回った。④実大接合部の耐力は鋼板挿入型の接合部の式を準用して評価できた。⑤回転剛性の木規準式との対応を確認した。

Experimental study on bolted joints between laminated timber beams and precast concrete brackets

Abstract

In this study, for the development of a wood-PCa concrete hybrid construction method, element tests and full-scale loading tests were conducted on beam-end joints where laminated timber beams were bolted to precast (PCa) concrete brackets.

The findings obtained from each experiment are as follows:

- (1) The embedment stiffness of the surface laminate of the laminated timber was higher than that of the intermediate laminate.
- (2) When comparing embedment stiffness with the value calculated using the Japanese wood design standard, the experimental values were lower than the calculated values.
- (3) When taking the yield stress of the bolts against embedment as the reference bearing strength specified in the Japanese wood design standard and Eurocode 5, the experimental values in the fiber direction exceeded the calculated values. In the direction perpendicular to the fibers, the experimental values exceeded the computed values of the Japanese standard but were lower than those of Eurocode 5.
- (4) The strength of the full-scale joints could be evaluated by applying the formula for steel plate insertion-type joints.
- (5) The applicability of the Japanese wood design standard formula for rotational stiffness was confirmed.

キーワード：混合構造、集成材、PCaコンクリート
構造性能

※ 1 設計統括部
※ 2 建築技術統括部

§1. はじめに

近年、地球環境保全の観点から建築物への木材利用が推進されている。また、木材の利用促進を目的に「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材利用の促進に関する法律」が制定されたことで一層、建築物への木材利用の促進が図られている。

中高層建築物への適用を前提とすると広範な木材利用のためには木質構造材料の混合構造が有用だが、その多くの開発構法は鉄骨造との組み合わせであり、鉄筋コンクリートを組み合わせた混合構造は少ない。また、近年の建設労働人口の不足を鑑みると現場施工性に優れた構法の開発もまた求められる。

このような背景から、本研究は木材の利用に加え、施工現場での作業省力化に着目し、木質構造材料とプレキャストコンクリート（以下、PCa）部材を組み合わせた木-PCaハイブリット構法を開発するため、要素実験、実大サイズの梁端接合部実験を行い、構造性能を明らかにすることを目的とする。

§2. 接合部の要素実験

本研究の対象は図1に示す部材の内、①柱梁仕口PCa、②2本1組の集成材梁がbolt接合された架構である。

柱梁仕口PCaには図2に示すように両端に高ナットが取付く両ネジボルトを内蔵し、ブラケット側面でボルト孔を有する集成材を両ネジボルトとナットで両側に接合する。両ネジボルトの軸部と集成材は接しており、文献1に記載の曲げ降伏型接合具を用いた接合としている。

集成材梁とPCa仕口の接合部はPCa仕口から突出する両ネジボルトによって応力を伝達する。実大梁端接合部実験に先立って両ネジボルトと集成材のめり込み実験を行い、集成材のボルト接合のめり込み剛性、強度を確認した。

2.1 実験概要

図3に試験体概要、図4に加力状況を示す。

試験体は後述する実大梁端接合部実験に用いた試験体と同種の集成材（対称異等級E105-F300カラマツ）から採取した計24体で、パラメータは加力方向（2方向）と試験体採取位置（集成材表層、中間層）である。それぞれのパターンについて6体実施した。ボルト軸径は $\phi 16$ とした。

加力にはアムスラー試験機を用い、後述する実大実験で使用したボルトと同一ロットのボルトを加工した

加力治具をクロスヘッドに取り付けて加力した。試験体上部に加力治具径+2 mmの半穴をあけて支承面全体に荷重が作用するようにした。めり込み変位はアムスラー試験機の盤間変位を計測した。

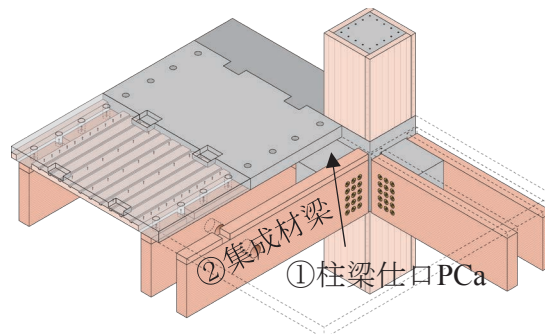


図1 構法の構成

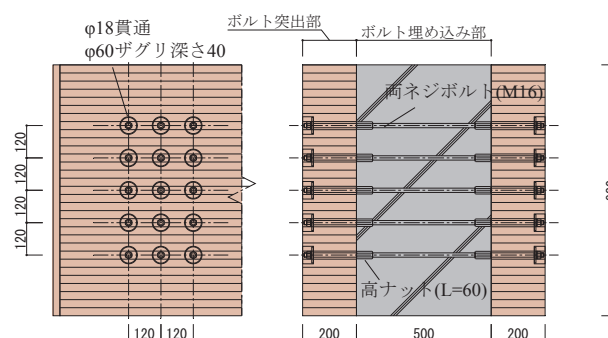


図2 開発構法の接合部

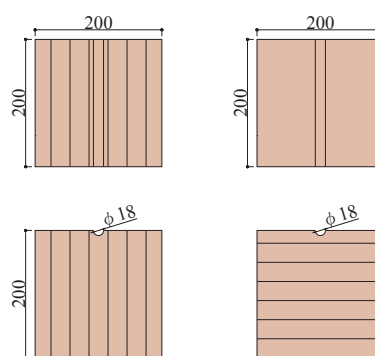


図3 試験体概要



図4 加力状況

2.2 使用材料の機械的性質

使用材料の機械的性質を表1に示す。

テストピースは集成材の表層に用いるラミナと中間層に用いるラミナで製作し、それぞれ繊維方向（//）、繊維直交方向（⊥）で各6体行った。

2.3 実験結果

図5に応力度—変形関係を示す。

繊維方向は表層ラミナ、中間層ラミナ共に降伏後あまり耐力上昇せず変形が進行した。繊維直交方向では表層ラミナ、中間層ラミナ共に降伏後も耐力が上昇し、耐力低下が生じないまま実験を終了した。

表2に実験から得られためり込み剛性のまとめを示す。めり込み剛性と降伏応力度はオフセット法¹⁾（図6）で求め、剛性は初期勾配（接線）とオフセット線との交点への割線の両方を示した。表中のめり込み剛

性の計算値は木質構造設計規準・同解説²⁾（以下、木規準）に記載の計算値である。以下に示す。

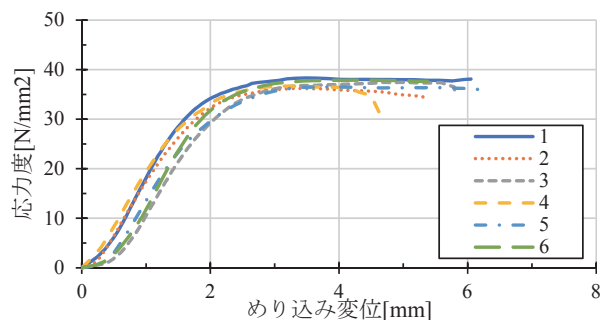
$$k_0 = E_0 / (31.6 + 10.9d)$$

$$k_{90} = k_0 / 3.4$$

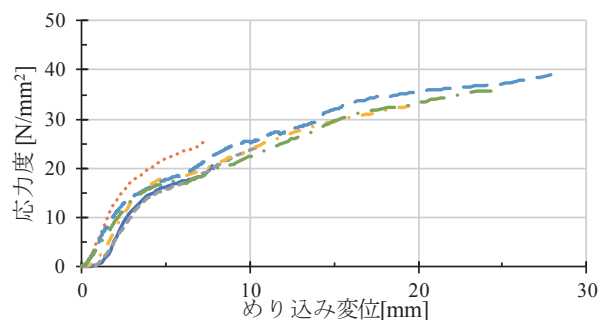
ただし、 k_0 ：繊維方向めり込み剛性、 k_{90} ：繊維直交方向めり込み剛性、 E_0 ：基準弾性係数、 d ：接合具径

表1 使用材料の機械的性質

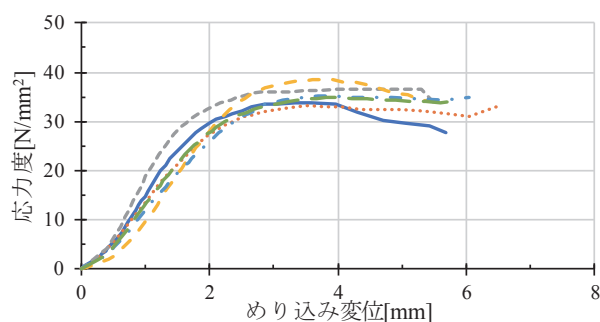
部位	方向	ヤング率	降伏応力度	最大応力度
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
表層	//	9350	59.7	61.7
	⊥	445	4.21	9.17
中間層	//	5913	42.1	44.8
	⊥	360	2.94	5.14



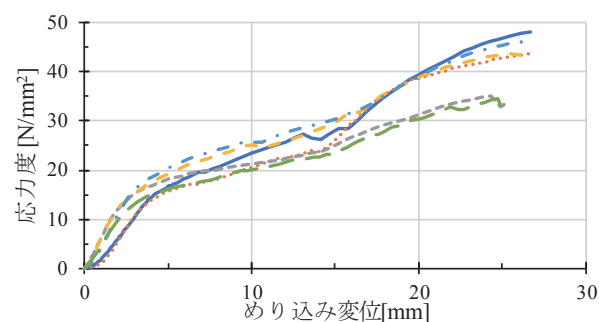
(a) 表層, 繊維方向



(b) 表層, 繊維直交方向



(c) 中間層, 繊維方向



(d) 中間層, 繊維直交方向

図5 応力度—変形関係

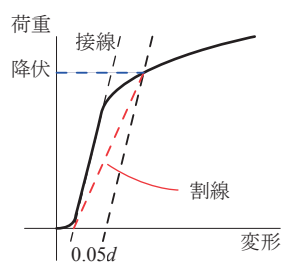


図6 剛性と降伏

表2 試験結果

		めり込み剛性			降伏応力度			最大応力度
		[N/mm ³]			[N/mm ²]			
		割線	接線	計算値	実験	計算値Fe1	計算値Fe2	
表層	//	15	23.5	51	36.2	25.4	28.9	37.2
中間		13.1	19.8		34.8			35.3
表層	⊥	4.87	6.7	15	16.2	12.7	18.2	32.2
中間		4.58	6.28		15.9			41.9

表中の降伏応力度の計算値は木規準²⁾に記載の基準支圧強度、Eurocode 5³⁾(以下、EC5)に記載の基準支圧強度である。以下に示す。

$$F_{e//1} = 60.68r$$

$$F_{e\perp 1} = 0.5F_{e//1}$$

$$F_{e//2} = 82(1 - 0.01d)r$$

$$F_{e\perp 2} = F_{e//} / (1.35 + 0.015d)$$

ただし、 r : 基準比重

めり込みによる接線剛性、割線剛性は繊維方向、繊維直交方向共に表層のラミナのほうが大きく、計算値を大きく下回った。

降伏応力度は繊維方向、繊維直交方向ともに表層のラミナのほうが大きく、木規準計算値に対する実験値

の割合は、繊維方向の表層で1.42倍、中間層で1.37倍、繊維直交方向の表層で1.28倍、中間層で1.25倍となり、実験値は計算値を上回った。EC5計算値は実験値に対し、繊維方向(表層)で1.25倍、繊維方向(中間層)で1.20倍となり、実験値は計算値を上回った、繊維直交方向(表層)で0.89倍、繊維直交方向(中間層)で0.87倍となり、実験値は計算値を下回った。

§3. 梁端接合部の実大加力実験

3.1 実験概要

図7に試験体概要、図8に加力方法、図9に加力装置を示す。

試験体は3体で集成材梁2本と柱梁仕口PCaを模擬したスタブ付きブラケットにボルト接合した部分架構試験体であり、実大スケールで製作した。各部材の形状、柱梁仕口PCa内の配筋は共通である。集成材梁には対称異等級E105-F300カラマツを用いた。

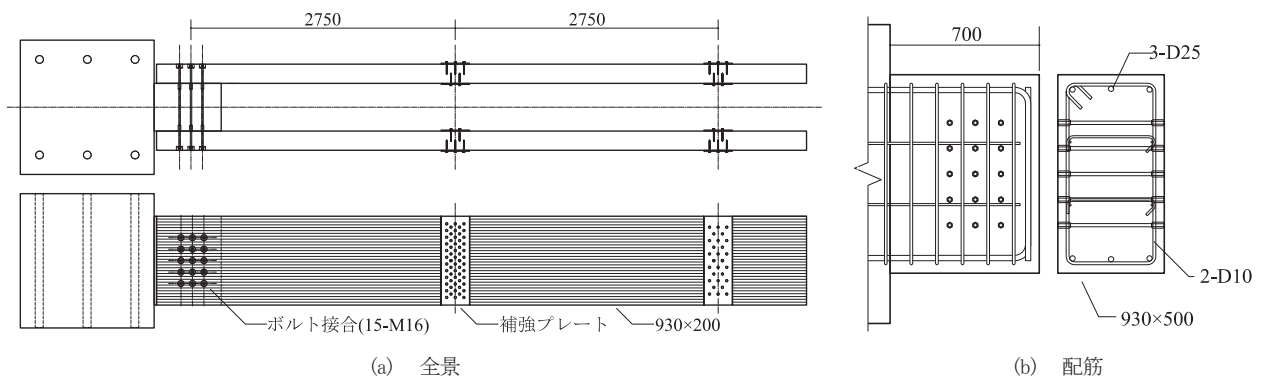


図7 試験体概要

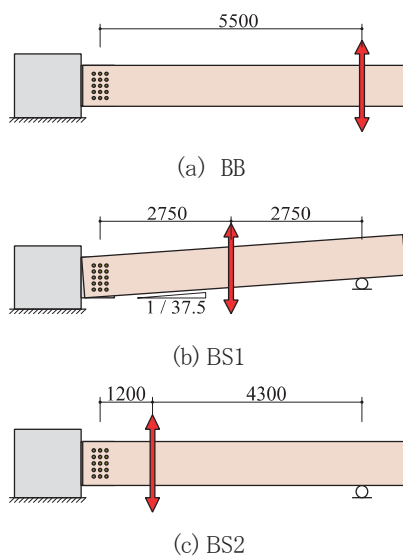


図8 加力方法

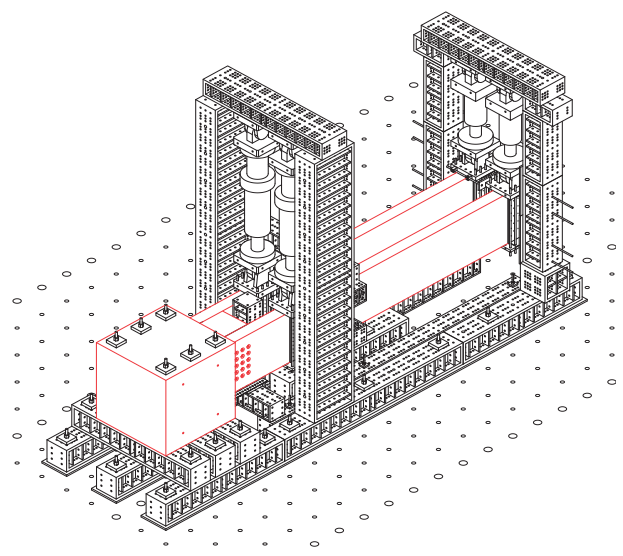


図9 加力装置

集成材梁の下孔径は両ネジボルト軸径に対して+2 mmとした。

実験パラメータは加力方法であり、反力床にスタブを固定した後に ①BB試験体では集成材梁の先端（接合部中心、即ち5×3本のボルトのうち、中央のボルトの位置から5500mm地点）を加力した。②BS1試験体では集成材梁の先端に強制変位（層間変形角1/50時に生じる部材角を想定した1/37.5）を与えたのち集成材梁中央部を加力した。③BS2試験体では集成材梁の先端をローラー支持し、接合部中心から1200mm地点を加力した。

上記の加力方法は①では接合部の回転性能、②では変形時の荷重支持能力、③では接合部の終局耐力の確認を目的としている。加力中は油圧ジャッキで2本の梁を個別に加力および先端の支持をした。また、加力点には補強プレートをコーチボルトで留めつけて局所的な破壊を防止した。

3.2 使用材料の機械的性質

各使用材料の機械的性質を表3、表4に示す。なお、集成材梁の機械的性質は前述したとおりである。

3.3 実験結果

表5に実験結果一覧、図10に各試験体の荷重変形関係、図11に破壊状況を示す。

表3 コンクリートの機械的性質

	材齢	圧縮強度	割裂引張強度
		[MPa]	[MPa]
BB	49	20.9	2.32
BS1	110	23.9	2.72
BS2	97	24.9	2.66

表4 鋼材の機械的性質

	鋼種	径	降伏強度	引張強さ	伸び
			[MPa]	[MPa]	[%]
補強筋	SD295	D10	344.2	444.4	14.1
主筋	SD345	D25	359.7	538.5	16.5
ボルト	4.6	M16	321.8	457	30.1

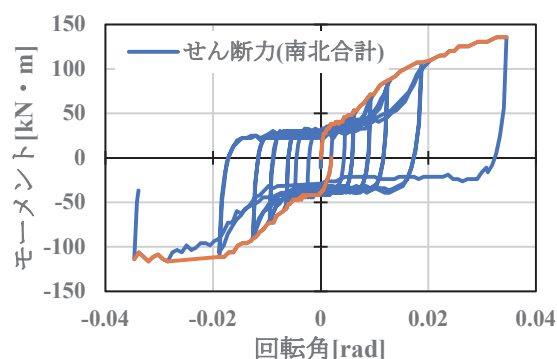
表5 実験結果

		BB	BS1	BS2
最大荷重	南	—	298.1 kN	588.7 kN
	北	—	296.6 kN	575.7 kN
破壊状況	南	ボルトめり込み	FJ破壊	接合部の割裂
	北	ボルトめり込み	梁中央に割裂	ボルトめり込み

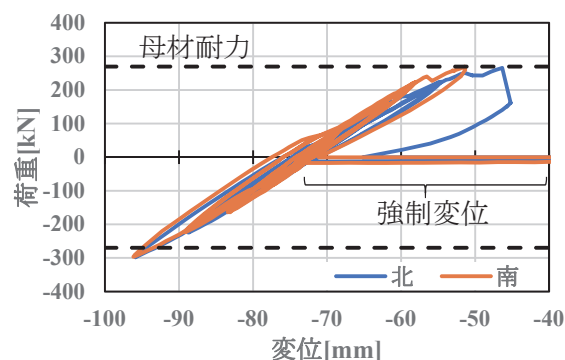
*FJ：フィンガージョイント

図10 (a) はBB試験体の接合部周りのせん断力（南北の梁の合計）と加力点変位の関係である。低い荷重で安定的に接合部が回転性能を有していることがわかる。終了後に集成材梁の接合端部を観察すると、外周部のボルト孔が、接合部中心に対して円周方向に変形していた。

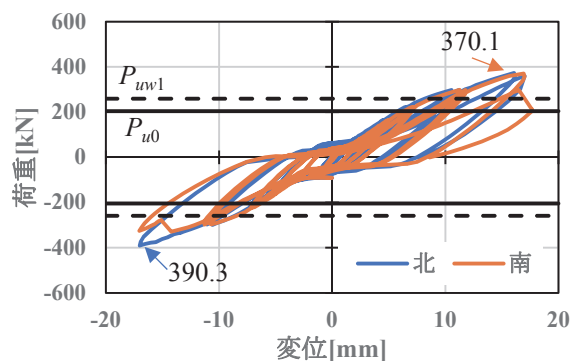
図10 (b) はBS1試験体の南北の集成材梁それぞれの接合部でのせん断力と加力点変位の関係である。BS1試験体では部材角1/37.5に相当する強制変位を梁先端に与えたあとに集成材梁中央部を加力したが、接合部には大きな損傷はみられず、集成材梁中央部の曲げ破壊により最大耐力を迎えた。図10 (b) 中の黒破線は集成材梁の曲げ耐力時のせん断力であるが、接合



(a) BB 荷重変形関係



(b) BS1 荷重変形関係



(c) BS2 荷重変形関係

図10 荷重変形関係

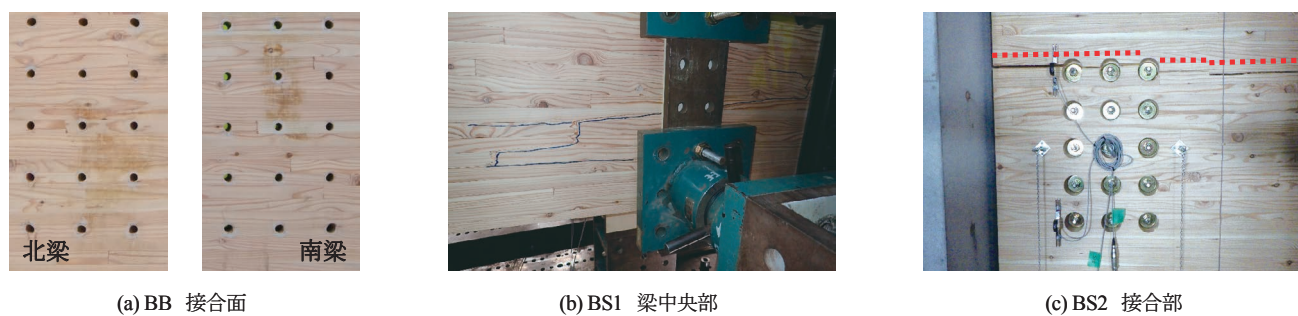


図 11 破壊状況

部に回転が生じた状態でも接合部には集成材梁の曲げ耐力に対して十分な荷重支持能力があった。図10 (c) はBS2試験体の南北の梁の接合部でのせん断力と加力点変位の関係である。およそ安定的な挙動を示し、ボルト列を通る割裂により最大耐力を迎えた。図10 (c) 中の黒実線は木基準により求めた接合部全体の基準終局せん断耐力 P_{u0} （めり込み耐力の値は木規準¹⁾）、黒破線は接合部の割裂破壊による終局耐力 P_{uw} であるが、実験最大値はいずれより大きかった。

3.4 回転剛性の評価

図12に回転剛性の評価を示す。図中にはBB試験体の正側、負側とBS1試験体で最初に強制変位を与える際に得られたモーメント—回転角関係を包絡線で示した。

いずれも30 kN・m程度まで線形的に上昇したのち剛性低下した。図中の黒線は木規準¹⁾に記載の「曲げ降伏形接合具を用いた接合」に関する剛性の計算式（鋼板挿入型）より求めた計算値である。めり込み剛性に、木規準による値と、前述しためり込み試験結果を用いた場合を示す。木規準値を用いた剛性は包絡線の初期の勾配と対応し、めり込み実験の結果を用いた剛性はそれより低かった。

§ 4. まとめ

柱梁仕口PCaにボルト接合された集成材の梁について要素実験と実大加力実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- ①集成材梁の表層に用いるラミナのめり込み剛性は中間層に用いるラミナより高かった。
- ②めり込み剛性を木規準によるめり込み剛性と比較すると実験値は計算値を下回った。
- ③ボルトのめり込みに対する降伏応力度を木規準とEurocode 5による基準支圧強度と比較すると、繊維方向の実験値は2式を上回った。繊維直交方向では木規準の値より高く、Eurocode 5の値より低く

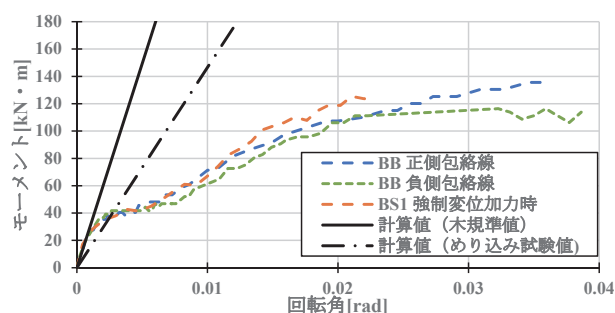


図 12 回転剛性の評価

なった。

- ④ボルト接合部の耐力、荷重支持性能を確認した結果、耐力の評価には鋼板挿入型の接合部の式で評価できた。
- ⑤回転剛性実験値は木規準計算値と対応した。

本構法の接合部の回転剛性はおよそピン接合と見なせるレベルだが今後の展望としては半剛接合タイプの接合部の開発を行いたい。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法、2006
- 2) 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル、p.317
- 3) Eurocode 5 1995-1-1

ひとこと

木質構造の技術開発はフジタにとっても新しい挑戦でした。たくさんの木材の試験体が放つ木の香りに包まれた実験室は、フジタ技術センターの新たなステップを象徴するようでした。



田原 健一