

日本の在来(軸組工法)におけるヘムファーの工学特性

F. Lam, J.D. Barrett, and S. Nakajima 2000年3月1日

概要

日本の在来工法で使用されているヘムファー(ウエスタンヘムロックおよびアマビリスファー)の実材の曲げ強度特性を確定する研究を行った。本論文は、105x105、90x90、45x105、30x105、45x90mmの試験結果について曲げ強度と曲げヤング係数をまとめたものである。実大試験の結果は、日本の建築基準における現行のヘムファーの許容応力度の設定値は低めの数値であることを示唆している。

背景

日本には、建築に木材を使用する根強い伝統があり、千年以上も経っている寺社建築が珍しくない。日本の戸建て住宅の一般的な工法のひとつは、在来の軸組工法である。この工法では、柱と土台の断面寸法は105x105mmであり、母屋、土台用材は90x90mm、筋かいは45x90mm、間柱は27x105mm、根太は45x105mmが一般的だ。国内産の杉(*Cryptomeria japonica*)と輸入材であるヘムファーがこれらの部材によく使用されている。ヘムファーとは、ウエスタンヘムロック(*Tsuga heterophylla*)とアマビリスファー(*Abies amabilis*)の樹種組み合わせとなっている。

カナダおよびその他諸国は、建築基準に性能基準を採用しつつある。これらの新しい基準の最大の特徴は、等級区分された実大材を試験した測定値を基にして、構造設計のための特性値を出していることだ。この種の試験データこそ、木質構造材の許容応力度を特定するうえで最も信頼性が高く、公正な根拠となる。最近、日本も性能基準の作成にかかっており、木材の強度特性を確定するうえで実大試験データを盛り込む可能性がある。

カナダの木材製品業界は、カナダ木材格付機関、NLGAの格付規則(NLGAルール)によって格付けした構造用小断面ディメンションランバーの工学強度については、大がかりなデータベースを有している(Barrett and Lau, 1994)。しかしながら、新しい日本農林規格(JAS143)に基づく針葉樹構造用材や、BC州の大手生産業者が採用した軸組工法用材の、新しい「顧客に特化した」格付規則にしても、これに対応する構造強度の技術データは存在しない。

本研究の目的は、現行の針葉樹の構造用製材の日本農林規格(JAS143-1991年制定、1994年改正)とカナダBC州沿岸地域の団体が自主設定した在来品質保証規則(ZQA)(在来木材協議会製品情報委員会1997年)に基づいて格付けされたヘムファー材の工学的な設計強度を確定することにある。

試験材料および試験方法

ヘムファーの試験体は、日本市場向けに在来工法用材を生産しているBC州沿岸部の全製材工場の生産のなかから抽出した。サンプリングは、全生産量に対する各製材工場あたりの生産量割合に応じて行い、工場に出向き、その場で未乾燥の製材から選定した。工場で、目視による基本的な格付けを行い、研究の対象である各等級につき200本以上の試料が必ず揃うようにした。詳細な試料抽出に関する報告書は、カナダBC州林産業審議会にて入手されたい(Iwasaki, 1998)。

試験体の一覧は次表、表1のとおりである。

表1 試験体一覧表

製品名	試験体寸法 (mm)	試験体本数(n)
土台 柱 (上記プレカット材も含む)	105x105	1900
土台 母屋	90x90	367
間柱	30x105	637
筋かい	45x90	350
根太	45x105	1351

試験体は人工乾燥させたが、乾燥工程はおだやかなものを利用して、約18%の平均含水率とした。そして、ブリティッシュコロンビア大学の木質構造工学研究所に搬入後、平衡含水率である約15%に調整した。試験体は一本ずつJAS143 甲種構造材Ⅱと乙種構造材の規定に基づいて格付けした(農林水産省、1994年改正)。また、NLGAの目視等級格付規則に基づき、セレクトストラクチャル、ナンバー1、ナンバー2、格落ち(NLGA、1998)に格付けした。

JAS143は、木口の短辺が36mm未満の材は甲種構造用Ⅰに基づいて格付けするように規定しているが、本研究では間柱は甲種構造用Ⅱに基づいて格付けし、種類の異なる製品の間でも材寸が構造強度にどのように関連しているかを評価できるように、一貫性のあるデータベースを構築することにした。そのうえで、在来品質保証格付規則に基づいて格付けを一本ずつ行った(在来木材協議会製品情報委員会、1997)。

格付け中、一本毎に最大強度低減欠点要因(MSRD)を特定した。人工乾燥材の目視検査に

より、干割れが原因で一部の材は等級が下がることが判っていた。したがって、干割れを無視した目視検査による格付けも同時に行うことにした。等級決定の要因となった特徴と MSRD を記録した。材の各面を番号で特定し、MSRD の位置を測定して、材面番号で記録した。一本毎に寸法を測定し記録した。

試験体はまず、実大材全長の振動特性に基づくヤング係数を確定するために、Metriguard Model 340 Transverse Vibration E-Computer(横振動ヤング係数測定器)を使用して非破壊試験で測定した。この E-Computer は、試験実施前に基準器の分銅とアルミニウムバーを使用して、毎日、目盛調整を行った。

曲げ試験では使用する試験体の引っ張り力のかかる面をどれにするかで、その試験体の曲げ応力が大きく影響されうる(Leicester et.al, 1996)。試験体の引っ張り面は、国際的な試験方法にしたがい、任意に選定した。90x90 や 105x105mm の材で、干割れが大きく生じている場合には、干割れの入っている面が曲げ試験時に圧縮側にくるように配置した。

強度特性試験は、ASTM D 4761、「木材および木質構造材料の強度特性試験の標準方式」の手順にしたがって、一本ずつ、ヤング係数と破壊強度を測定した。曲げ試験の強度は、試験スパンの中のどこに MSRD が位置しているかで変わることが予想される。本研究では、MSRD は試験スパン全長のなかに任意に位置するように配置した。(図1、中央集中荷重方式(3点)、スパン対はりせい=18:1)。試験スパンからはみだした部分は試験実施前に切り落とした。試験体からは含水率と比重測定用にブロック状に木片をとった。試験はたわみ量を制御して荷重を測定する方式をとり、90x90mm の場合は 18.2mm/秒、その他の寸法の場合は 21.2mm/秒とした。

含水率と比重測定用木片は、各試料の含水率と比重を確認するために試験した(ASTM D 2395)。ヤング係数値は、ASTM D 2915「構造用木材の許容応力評価のための標準方式」に基づいて、データ解析の際に標準含水率 15%に調整した。破壊強度は線状表面モデル(Linear Surface Model)による含水率調整法(Barrett and Lau, 1994)を使って標準含水率 15%に調整した。試験体の等級毎にそれぞれ、含水率調整後の強度特性を、ASTM D 1990「目視格付けディメンションランバーの実大等級試験による許容応力度確定のための標準方式」にもとづき、ヘムファー材について確定していった。

MSRD は、曲げ試験において、最低の強度を出すと予想される欠点要因。
MSRD の位置は任意。スパン中央部にたわみ量測定装置を設置

結果および分析

等級区分実大試験によって得られたデータを表 2 から6までにまとめた。これらの表は等級と寸法毎にヤング係数と破壊強度を示す。図 2 から 11 は、JAS 甲種Ⅱと乙種に基づいて格付けされた試験体のヤング係数と破壊強度の一般的な確率累積分布度数(CDF)を示す。

表2 ヘムファー105x105mm の統計表

	JAS 甲種Ⅱ			JAS 乙種			在来		
	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)
	1 級			1 級			色柱		
総数	352	352	352	593	593	593	1426	1424	1425
平均	11.6	12.85	61.21	11.4	12.57	57.90	10.8	11.95	51.38
標準偏差	2.1	2.17	14.00	2.1	2.21	14.53	2.1	2.29	16.16
5%下限値	8.05	9.10	38.55	7.99	9.05	34.34	7.58	8.39	24.87
	2 級			2 級			プレカット		
総数	445	443	445	515	512	514	1489	1487	1488
平均	11.2	12.28	53.94	10.8	11.81	50.31	10.8	11.94	51.26
標準偏差	2.1	2.43	15.70	2.1	2.41	16.02	2.1	2.31	16.23
5%下限値	8.01	8.61	28.28	7.55	8.15	24.90	7.57	8.37	24.91
	3 級			3 級			土台		
総数	553	552	552	582	582	582	287	286	287
平均	10.6	11.64	47.98	10.3	11.32	44.87	10.5	11.38	48.48
標準偏差	2.0	2.16	15.02	2.0	2.16	15.46	2.2	2.33	16.06
5%下限値	7.71	8.08	24.10	7.22	7.99	21.99	7.00	7.71	23.03

表 3. ヘムファー90x90mm の統計表

	JAS 甲種 II			JAS 乙種			在来		
	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)
	1 級			1 級			もや		
総数	40	40	40	84	84	84	356	356	356
平均	12.3	13.22	65.23	12.0	12.79	61.70	11.2	11.96	52.09
標準偏差	2.3	2.13	16.56	2.2	2.03	16.58	2.0	2.06	17.36
5%下限値	8.41	9.47	37.87	8.38	9.47	33.94	8.33	8.97	26.02
	2 級			2 級			土台		
総数	73	73	73	101	101	101	357	357	357
平均	11.8	12.63	60.15	11.3	11.87	50.95	11.3	11.97	52.15
標準偏差	1.9	1.83	15.21	1.9	1.97	16.31	2.0	2.07	17.37
5%下限値	9.40	9.83	33.23	8.71	8.99	27.33	8.34	8.97	26.03
	3 級			3 級					
総数	121	121	121	144	144	144			
平均	11.0	11.72	50.17	10.9	11.62	48.51			
標準偏差	2.0	2.09	15.98	1.9	2.04	16.60			
5%下限値	7.88	8.54	26.07	8.27	8.61	24.63			

表 4. ヘムファー45x105mm の統計表

	JAS 甲種 II			JAS 乙種			在来		
	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷重 MOE (GPa)	MOR (MPa)
	1 級			1 級			根太		
総数	358	358	358	504	504	504	1077	1077	1077
平均	13.4	12.98	64.34	13.3	12.75	61.64	12.7	12.20	56.20
標準偏差	2.3	2.16	12.84	2.3	2.17	14.19	2.3	2.24	16.23
5%下限値	9.88	9.50	41.71	9.78	9.31	37.26	8.98	8.77	28.70
	2 級			2 級					
総数	356	356	356	327	327	327			
平均	12.9	12.47	58.00	12.6	12.12	55.58			
標準偏差	2.3	2.16	15.49	2.2	2.25	16.33			
5%下限値	9.86	9.51	32.44	9.58	8.77	28.87			
	3 級			3 級					
総数	330	330	330	341	341	341			
平均	12.1	11.59	50.55	11.8	11.39	48.76			
標準偏差	2.2	1.97	14.66	2.2	2.11	15.53			
5%下限値	8.58	8.39	25.89	8.40	7.94	24.61			

表 5. ヘムファー30x105mm の統計表

	JAS 甲種 II			JAS 乙種			在来		
	振動	集中荷重	MOR	振動	集中荷重	MOR	振動	集中荷重	MOR
	MOE (GPa)	MOE (GPa)	(MPa)	MOE (GPa)	MOE (GPa)	(MPa)	MOE (GPa)	MOE (GPa)	(MPa)
	1 級			1 級			Mabashira Grade		
総数	77	77	77	249	249	249	537	537	537
平均	12.3	12.92	65.49	12.1	12.22	57.19	11.9	12.03	54.40
標準偏差	2.8	2.64	15.93	2.5	2.34	16.75	2.7	2.52	17.78
5%下限値	7.66	8.92	40.20	8.12	8.76	29.68	7.42	8.20	23.69
	2 級			2 級					
総数	360	360	360	243	243	243			
平均	12.1	12.19	55.28	12.0	12.18	54.34			
標準偏差	2.7	2.35	15.47	2.8	2.52	16.81			
5%下限値	7.48	8.73	29.54	7.21	8.54	25.76			
	3 級			3 級					
総数	71	71	71	53	53	53			
平均	11.4	11.52	47.51	11.2	11.32	46.83			
標準偏差	2.4	2.38	18.75	2.9	3.15	20.66			
5%下限値	6.99	7.78	17.55	6.66	5.25	14.08			

表 6. ヘムファー45x90mm の統計表

	JAS 甲種 II			JAS 乙種			在来		
	振動 MOE (GPa)	集中荷 重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷 重 MOE (GPa)	MOR (MPa)	振動 MOE (GPa)	集中荷 重 MOE (GPa)	MOR (MPa)
	1 級			1 級			Sujikai Grade		
総数	56	56	56	86	86	86	360	360	360
平均	12.8	12.64	66.64	12.4	12.19	64.24	12.1	11.78	56.28
標準偏差	2.5	2.86	16.46	2.4	2.71	15.96	2.3	2.43	17.77
5%下限値	9.48	8.98	36.22	9.07	7.95	37.12	8.63	7.98	26.14
	2 級			2 級					
総数	110	110	110	124	124	124			
平均	12.6	12.42	63.37	12.4	12.17	59.66			
標準偏差	2.4	2.40	14.91	2.5	2.53	17.81			
5%下限値	9.09	8.82	38.52	8.35	7.99	30.20			
	3 級			3 級					
総数	118	118	118	113	113	113			
平均	11.6	11.08	51.27	11.7	11.21	49.89			
標準偏差	2.2	2.17	16.85	2.0	2.11	16.25			
5%下限値	8.03	7.53	23.69	8.46	7.80	23.88			

JAS143 で格付けしたヘムファーに関し、日本の建築基準で定めている曲げ許容応力度を表 7 と 8 に示す。本件の強度特性試験データに基づけば、カナダ産ヘムファーの設計強度特性を次のように新たに算出することができる。

MOR 許容誤差 5% = MOR0.05 (5%下限値)より 5%の低減率を乗じた数値

安全係数 = 3.0

MOR0.05 = 第 5%下限値の曲げ強度

以上とすれば、

許容応力度=(MOR 許容誤差 5%)

安全係数 [1]

MOR5%下限値の 5%許容誤差の下限値は、第 2 式により低目に見積もることができる (Leicester, 1986)。

MOR 許容誤差 5% = MOR 0.05 (1-2.7V)

\sqrt{n} [2]

この場合、V=変動係数

n = 各マトリックスの試験体実数

表7と8においては、カナダ産ヘムファーの許容応力度推定値を、現行の許容応力度と対比させてある。全体的に、本研究のカナダ産ヘムファーの許容応力度算出値は、現行の日本の建築基準の許容応力度に適合するか、これを超えていた。甲種Ⅱの許容応力度にいたっては、JASの1級、2級、3級において、それぞれ、32%から62%、8%から45%、6%から20%も低く設定されている。また、乙種の許容応力度は、JASの1級、2級、3級において、それぞれ、37%から76%、16%から36%、31%から45%も低く設定されている

表 7. JAS 143 and ZQA 等級の実大試験に基づく MOR の許容応力度-中間報告

格付規則	等級	現行許容応力度(MPa)				ヘムファー実大データ(MPa)				
		ダグラス ファー	ひの き	スギ	ヘム ファー	105 x 105 mm	90 x 90 mm	45 x 105 mm	30 x 105 mm	45 x 90 mm
JAS 143	1 (全)	10.79	12.27	8.83	8.34	12.43	11.26	13.51	12.40	11.00
JAS 143	2 (全)	7.36	11.29	8.34	8.34	9.08	10.19	10.40	9.45	12.06
JAS 143	3 (全)	5.40	9.32	7.36	6.87	7.75	8.01	8.26	5.11	7.25
JAS 143	1 (B)	8.83	9.81	6.87	6.87	11.13	10.42	12.08	9.40	11.48
JAS 143	2 (B)	5.89	8.83	6.38	6.87	7.99	8.33	9.20	8.13	9.34
JAS 143	3 (B)	4.42	7.36	5.89	5.40	7.05	7.58	7.82	3.93	7.30
ZQA	柱	-	-	-	-	8.10	-	-	-	-
ZQA	プレカット材	-	-	-	-	8.12	-	-	-	-
ZQA	土台	-	-	-	-	7.27	8.26	-	-	-
ZQA	母屋	-	-	-	-	-	8.26	-	-	-
ZQA	その他	-	-	-	-	-	-	9.34	7.60	8.32

表 8. JAS 143 and ZQA 等級の実大試験に基づく MOE 許容応力度-中間報告

格付け	等級		現行許容応力度(Gpa)				ヘムファー 実大データ(GPa)				
			ダグラス ス ファー	ひのき	スギ	ヘム ファー	105 x 105 mm	90 x 90 mm	45 x 105 mm	30 x 105 mm	45 x 90 mm
JAS 143	Upper	1 (甲 II)	10.79	9.81	7.85	8.83	12.85	13.22	12.98	12.92	12.64
JAS 143	Normal	2 (甲 II)	9.81	8.83	6.87	7.85	12.28	12.63	12.47	12.19	12.42
JAS 143		3 (甲 II)					11.64	11.72	11.59	11.52	11.08
JAS 143	Upper	1 (乙)	10.79	9.81	7.85	8.83	12.57	12.79	12.75	12.22	12.19
JAS 143	Normal	2 (乙)	9.81	8.83	6.87	7.85	11.81	11.87	12.12	12.18	12.17
JAS 143		3 (乙)					11.32	11.62	11.39	11.32	11.21
ZQA		柱	-	-	-	-	11.95	-	-	-	-
ZQA		プレカット 材	-	-	-	-	11.94	-	-	-	-
ZQA		土台	-	-	-	-	11.38	11.96	-	-	-
ZQA		母屋	-	-	-	-	-	11.97	-	-	-
ZQA		その他	-	-	-	-	-	-	12.20	12.03	11.78

*日本建築学会

材厚の曲げ強度に対する効果は、90mmと105mmのはりせいで評価した。結果を図12と13に示す。評価の対象とした寸法においては、曲げ強度は材厚に応じてわずかに上昇した。ヤング係数と材厚の相関関係では(図14と15)、同一等級内であればヤング係数は基本的に材寸と無関係であった。これらは、構造用製材の強度特性のこれまでの等級区分実大試験結果と一致している。

JAS143 の針葉樹材の許容応力度は、JAS143 に記載されている木口寸法の全域に適用されるものである。したがって、本研究におけるカナダ産ヘムファーの実大試験の結果から導かれる結論を、他の木口寸法に適用するのは、材寸の考えられうる影響が確定されるまで待つ方が妥当であろう。現在行われている本試験プロジェクトとその結果は、日本の建築基準における許容応力度の見直しにとって重要かつ有用なデータベースを構成することになる。

結果

本論文は、日本の色々な在来工法で使用されている材寸と等級で生産されたヘムファー材の曲げ強度とヤング係数を包括的に評価する初めての試みの結果を提示するものである。曲げ強度とヤング係数のデータを、JAS143 甲種構造用 II と乙種、また、BC 州沿岸部の主要林産企業群により作成された在来木材協議会品質保証等級によって格付けされた製材から集計した。

JAS143 に基づいて等級区分された製材品では、曲げ強度とヤング係数は、品質が高いほど増大した。曲げ強度は、本研究が対象とした材寸においては厚くなるほど上昇する傾向を示した。ヤング係数は、同一等級内では材厚によっては変化を見せなかった。

JAS 等級におけるヘムファーの許容曲げ応力度の推定値は、日本の建築基準法が規定する現行の許容設計強度に適合するか、これを超えていた。ヤング係数は、日本建築学会がヘムファーに設定しているヤング係数を超えていた。

全体的にいて、本研究のヘムファーの実大試験の結果からすれば、現行の日本の建築基準法に記載されている許容応力度は、本件で評価した材寸に関しては、低めであるようだ。

参考文献

「ASTM 規格年報 第 4 章 建設編 04.10 木材」*American Society of Testing and Materials -ASTM (1999 年)*, *Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction Volume 04.10 Wood*. 米国、ペンシルバニア州 West Conshohocken

「カナダ製材品の特性」Barrett J.D. and Lau W. (1994 年) *Canadian Lumber Properties 1 Canadian Wood Council*, E.D. Jones 編 カナダ、オタワ

「カナダ産ヘムファー実大試験の試験体抽出に関する報告書」Iwasaki K.M. (1998 年) *In-grade test sampling program for Canadian Hem-fir* カナダ、バンクーバーのカナダ林産業審議会に対する報告書

「特性推定値の信頼性」Leicester, R.H. (1986 年) *Confidence in Estimates of Characteristic*

Values. CIB-W18 第 19 回会議 紀要 イタリア、フィレンツェ

「実大試験基準の同等性」Leicester, R.H., H.O. Brerteringer and H.F. Fordham (1996 年).
Equivalence of IN-grade Testing Standards CIB-W18 第 29 回会議紀要 フランス、ボルドー

「針葉樹構造用材日本農林規格」農林水産省 (1991 年、1994 年第 1 次改正) 日本

「カナダ製材格付規則」National Lumber Grades Authority (1998 年) *Standard Grading Rules for Canadian Lumber*. カナダ、バンクーバー

「在来格付規則」在来木材協議会製品情報委員会(1997 年) *Zairai Grading Rules* カナダ