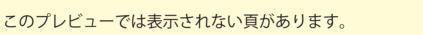
ティンバーメカニクス

木材の力学理論と応用

日本木材学会 木材強度・木質構造研究会 編編集代表 中村 昇・山﨑真理子・村田功二







写真提供:園田里見、村田功二

製材品の強度保証が選別によるのに対し て、ラミナや単板といったエレメントを再 構成した木質材料の多くは材料強度の設計 が可能である。さらに、エレメントの強度 特性の平均値やばらつきを考慮すると、材 料強度の信頼性も推定できる。例えば、集 成材は様々な設計法が提案されてきたが、

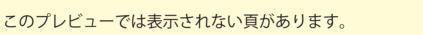
最近わが国ではモンテカルロシミュレー ションを用いて基準強度が算定された異樹 種集成材が製品化されている。確率・統計 論に基づいて設計された集成材の製品化は 世界的に例がなく、世界の最先端を行く技 術と言える。



▲集成材の強度試験



▲集成材の曲げ破壊

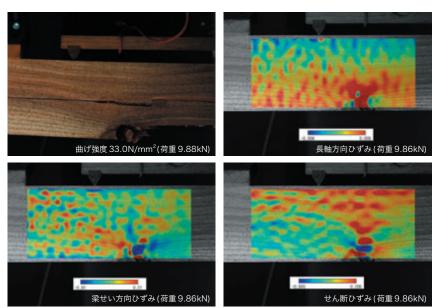


無欠点の木材の曲げ破壊は、まず圧縮側で破壊が生じて中立軸が移動し、最終的には引張側の破壊で破断に至るとされる。しかし有節材の場合には、その通りにはなら

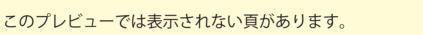
ない。下の例では、節の上側に大きな引張 ひずみとせん断ひずみが観察される。中立 軸近くの内側に生じたせん断破壊が起点と なって破断に至った可能性もある。



▲有節材の曲げ試験(3等分点4点荷重法)



▲節周辺の破壊形態と破壊直前のひずみ分布



生物劣化を受けた材料は、強度が低下することは容易に想像がつく。しかし、被害度と残存強度の関係は明らかにされておらず、その評価指標も確立されていないのが現状である。そのため、残存耐力を推定できること、それに伴い、取り替えるべきな

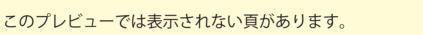
のか、補強でまかなうべきなのかを判断すること、補強を採用する場合にはどのような方法が良いのかを示すこと、すなわち、木材の生物劣化と強度の関係を明らかにすることは急務である。



▲シロアリ食害後の接合部実験



▲腐朽処理後の木ねじの引抜試験体



I-beamは、上下弦材(フランジ)と腹部 面材(ウェブ)をI字形に組み立てた木質構 造材料である。フランジが曲げ性能、ウェ ブがせん断性能を分担するように力学的役 割が明確かつ合理的であり、各部の材料強 度に応じた断面設計により、所定性能の横 架材を少ない材積で効率的に製造すること ができる。



▲I-beamのせん断試験(ウェブの水平せん断破壊)



▲製材と合板を組み合わせたI-beam

まえがき

木材や木質材料の力学的性能に関する解析は、古くから行なわれてきた。実 験的研究から木材固有の性質を見出し、そこに理論的背景を構築し、汎用性を 持たせてきたと考えられる。例えば、せいや幅が大きくなったり、長さが長く なったりすると強度が小さくなるが、これは「寸法効果」として製材の基準強 度に取り入れられている。この「寸法効果」に関する理論は脆性的な破壊理論 であるが、統計的強度理論とも呼ばれており最弱リンク理論に基づいている。 しかし、「最弱リンク理論に基づく強度は、指数関数タイプの累積確率関数で表 されること、また、一様あるいは異なる応力状態にある材料の強度はその体積 に依存する」という、約80年前の文献により示されたものである。また、もう 半世紀以上も前になるが、その名も Wood 氏が、当初は破壊しない応力であっ ても、継続的にかけ続けるといつかは破壊するというマジソンカーブを導いた。 これは、荷重継続時間の影響と呼ばれ、その後木材をクラックを有する線形粘 弾性体とし、クラックの先端が開口していく時間を推定する理論を用いて解析 されたり、ダメージが累積されることによりついには破壊してしまうというダ メージ累積理論を用いて解析されたりしている。マジソンカーブは、欠点のな い小さな試験体を用いて実験されたものであるが、理論は実大材にも適用・解 析されている。

また、合成高分子系の接着剤が開発され、集成材を始めとした様々な木質材料が製造されてきた。そもそも木材は材質にバラツキを有しており、思いのままに設計するということが難しい材料である。しかし、木材から小片や繊維等の比較的小さなエレメントを作成することにより均一化し、それらを接着剤で結合することにより、バラツキをコントロールし工業材料としてきた。木質材料の中で、集成材に関しては、ラミナの強度分布を基に確率統計学を用いた強度設計理論が確立されており、実際に異なった樹種にこの理論を適用し、設計された集成材が製造されている。このような設計理論は、今後構造用単板積層材にも用いられる可能性がある。

さらに、木材や木質材料は構造材料として用いられることが多いが、構造物 を構成するためには、接合が必ず必要である。最近では、接合金具を用いたものや接着剤を用いたものなど、様々な接合部が開発されている。接合部の性質 は、部材と接合具の性質により決定されることは自明である。接合部の強度についても、木材特有の性質を用いて理論解析されてきたものも少なくない。例 えば、木材のめり込み強度を用いたヨーロッパ型降伏理論は設計規準に取込まれている。

以上のように、木材や木質材料の強度は多くの研究者により力学的に理論付けされ、それをもとに工学的に考察されたものを規基準や実務設計に適用してきた。「ティンバーエンジニアリング」は、洋書にも和書にも書名として多数使われているが、本書は木材の力学に主眼をおき、「ティンバーメカニクス」とし、既往の文献をもとに、これまでの理論をまとめ、学生や実務者の方に資することを目的に編集されたものであり、ここに刊行されたことは編集者一同望外の喜びである。また、執筆者に対し、厚く御礼を申し上げる次第である。

2015年9月

編集者代表 中村 昇

ティンバーメカニクス

木材の力学理論と応用



本文中で今を肩付した用語は巻末の 「索引・用語解説」に解説を掲載した

まえがき.		1
第1章 2	k材の成り立ちと強度のクライテリア	11
1.1 木	対および構成要素の弾性特性	11
1.1.1	細胞を構成する化学物質のヤング率	11
1.1.2	木材の細胞構造と力学特性	12
1.1.3	木材の弾性特性	12
1.1.4	構造用木材	15
1.2 木	オ強度に及ぼす含水率の影響	15
1.3 寸	去効果	18
1.3.1	寸法効果とは	18
1.3.2	最弱リンク理論に基づく寸法効果	19
1.3.3	木材における寸法効果	21
1.3.4	き裂先端の応力緩和領域の影響	23
1.4 木木	オおよび木質材料の破壊条件および材料非線形特性	
1.4.1	破壊条件	26
1.4.2	材料非線形発生後の木材および木質材料の変形挙動	28
1.5 複	合応力による木材の破壊	29
1.6 有領	節材の強度	33
1.6.1	日本農林規格	33
1.6.2	節径比や節面積比の影響	34
1.6.3	有節材の強度予測	37
1.7 木公	質構造を対象とした有限要素解析	38
1.7.1	有限要素解析の現状	38
1.7.2	異方弾性体の基礎方程式(S.A.アムバルツミャン 1975)	39
1.7.3	異方性における降伏条件	40
1.7.4	有限要素解析の応用事例	41

第2章	時間軸を考慮した力学的性質の変化	50
2.1 レ	オロジー的性質	50
2.1.1	粘弾性(レオロジー)の基礎	50
2.1.2	レオロジーのモデル化	51
2.1.3	ボルツマンの重ね合わせの原理	52
2.1.4	木材のクリープ	53
2.1.5	ひずみ速度一定および応力速度一定で負荷されたときの応力	_
	ひずみ曲線(桑村 2011)	54
2.1.6	木材の応力緩和は線形粘弾性か非線形粘弾性か?	56
2.2 木	材の疲労強度	57
2.2.1	疲労挙動と実験に基づくモデル化	57
2.3 古	材の強度	63
2.3.1	古材無欠点小試験片の力学性能	63
2.3.2	古材実大材の曲げ強度	66
2.3.3	古材のめり込み・横圧縮特性	66
2.4 生	物劣化と強度	70
2.4.1	生物劣化の要因	70
2.4.2	生物劣化と強度の関係	71
第3章 2	水・熱と木材の物理的性質	79
3.1 水	分と木材	79
3.1.1	様々な水分状態の木材	79
3.1.2	収縮・膨潤およびその異方性	81
3.1.3	含水率と木材の力学的性質	82
3.2 熱	と木材	84
3.3 水	分及び熱と木材	86
3.4 木	材の乾燥	87
3.4.1	天然乾燥と人工乾燥	87
3.4.2	乾燥スケジュール	88

6

3.4.3	高温乾燥による木材の物理的性質の変化	88
3.5 木	材の熱力学的性質	89
3.5.1	木材の物理的性質への履歴の影響	89
3.5.2	木材の物理的性質の変化に対する熱力学的考察	91
第4章	波壊力学と木材	98
4.1 線	形破壊力学	98
4.2 非	線形破壊力学	103
4.2.1	き裂先端付近の塑性域とき裂先端開口変位(CTOD)	103
4.2.2	J 積分	105
4.2.3	仮想き裂モデル (Fictitious Crack Model)	106
4.3 破	壊力学の設計への応用	109
4.3.1	破壊力学を応用した設計方法・耐力式	109
4.3.2	構造計算への適用例	111
4.4 破	懐力学とひずみ解析	115
4.4.1	応力塗膜法	115
4.4.2	光弹性皮膜法	115
4.4.3	デジタル画像相関法(DIC)	118
4.4.4	デジタルスペックル写真法(DSP)	119
第5章	無欠点小試験体からの各種許容応力度の誘導	129
5.1 AS	TM による許容応力度の誘導方法	130
5.2 我	が国の曲げ、縦圧縮、縦引張りの基準強度の誘導方法	135
5.3 我	が国のせん断、めり込み基準強度の誘導方法	137
5.3.1	せん断の基準強度	137
5.3.2	めり込みの基準強度	138
5.4 我	が国の許容応力度の誘導方法	139
第6章	実大材からの各種基準強度の誘導	144
61 宝	大材の強度収集データと解析	145

6.1.1	実大材の強度データの収集	145
6.1.2	統計的解析方法	146
6.2 機材	或等級区分材における基準強度の算定	152
6.2.1	非正規同時確率密度関数による基準強度の算定(中村ら 2007).	153
6.3 各和	重係数に関する研究の進展	156
6.3.1	荷重継続時間影響 (Duration of Load Effect: DOL) 係数	156
6.3.2	寸法効果(Size Effect)係数	163
第7章 ラ	- パー梁に関する理論	170
7.1 初等	等力学解析による解析	170
7.2 梁(こ関する理論	172
7.2.1	ひずみの仮定	173
7.2.2	変位成分とひずみ分布	174
7.2.3	平面保持の法則は成り立たないのか?	175
7.3 応	 力関数による応力の算定(桑村 2009)	176
第8章 コ	ニンジニアードウッドの強度設計	185
8.1 集月	艾材の断面設計理論	185
8.1.1	クライテリアとシミュレーション	185
8.1.2	破壊クライテリア	192
8.1.3	集成材の JAS 規格のクライテリア	195
8.1.4	集成材の強度シミュレーション	
0.1.1	从内心	195
	文材の日本農林規格(JAS 規格)	
		198
8.2 集月	艾材の日本農林規格(JAS 規格)	198 198
8.2 集月 8.2.1 8.2.2	戈材の日本農林規格 (JAS 規格) 集成材の JAS 規格の変遷 構造用集成材の基準強度の算出 反積層材 (LVL) におけるエレメントの推定	198 198 199 200
8.2 集月 8.2.1 8.2.2	対材の日本農林規格(JAS 規格) 集成材の JAS 規格の変遷 構造用集成材の基準強度の算出	198 198 199 200
8.2 集月 8.2.1 8.2.2 8.3 単和	戈材の日本農林規格 (JAS 規格) 集成材の JAS 規格の変遷 構造用集成材の基準強度の算出 反積層材 (LVL) におけるエレメントの推定	198 198 199 200 201
8.2 集月 8.2.1 8.2.2 8.3 単和 8.3.1	集成材の JAS 規格の変遷 構造用集成材の基準強度の算出 反積層材 (LVL) におけるエレメントの推定 エレメントの強度分布推定手法	198 198 199 200 201

8

8.3.5	推定された分布	203
第9章 オ	、質構造接合部の強度特性	209
9.1 弾性	生床上の梁理論によるピン接合部の剛性	209
9.1.1	弾性床上の梁理論	209
9.1.2	ピン接合部の剛性係数	211
9.2 ヨー	-ロッパ型降伏理論	213
9.2.1	はじめに	213
9.2.2	材料と接合具の降伏モード	215
9.2.3	鋼板を側材とする1面せん断接合形式における降伏耐力	216
9.2.4	木材-木材の1面せん断接合形式における降伏耐力	217
9.2.5	2面せん断接合形式	220
9.3 貫村	構造のめり込み	221
9.3.1	等変位(均等)めり込み	222
9.3.2	回転めり込み	225
佐 10 辛	1+ ** 1+ 0 + FT !	000
第 10 章	接着接合を用いた複合材の強度理論	232
	接看接台を用いた複合材の強度埋論 peam	
		232
10.1 I-l	peam	232
10.1 I-l	peam I-beam の概要と特徴 I-beam の応力計算法	232 232
10.1 I-l 10.1.1 10.1.2 10.1.3	Deam	232 232 233
10.1 I-l 10.1.1 10.1.2 10.1.3	peam I-beam の概要と特徴 I-beam の応力計算法 I-beam のたわみ計算法	232 232 233 236
10.1 I-l 10.1.1 10.1.2 10.1.3 10.2 Gl	Jeam の概要と特徴	232 232 233 236 237
10.1 I-I 10.1.1 10.1.2 10.1.3 10.2 GI 10.2.1 10.2.2	ream	232 232 233 236 237 238 244
10.1 I-l 10.1.1 10.1.2 10.1.3 10.2 Gl 10.2.1 10.2.2 10.2.3	I-beam の概要と特徴	232 233 236 237 238 244
10.1 I-I 10.1.1 10.1.2 10.1.3 10.2 GI 10.2.1 10.2.2 10.2.3	J-beam の概要と特徴 I-beam の応力計算法 I-beam のたわみ計算法 Jued-In Rod (GIR) の強度に関する理論的解析 棒とシェアラグ層による破壊力学モデル (Johan et al. 1996) ティモシェンコ梁理論によるシェアラグ層破壊モデル その他の解析	232 233 236 237 238 244 253

3. 構造用木材の強度試験マニュアル(平成23年3月(財)日本住宅・木材	•
技術センター)	265
4. ISO 13910: 2005 (E) Structural timber - Characteristic values of strength-	
graded timber – sampling, full-size testing and evaluation	266
5. 破壊力学に適用する破壊エネルギーを求めるための試験	266
索引・用語解説	. 269
コラム	
1:木材を力学的に視る楽しさ	48
2:木材とその老化―木材だって年をとる?―	77
3:曲木とわっぱ	96
4:航空機と木材その1	127
5:係数には要注意	142
6:いかなる式にもきちんとした理由がある!	168
7:航空機と木材――その2	182
8:わが国で木質新軸材料は開発されるであろうか?	207
9: 航空機と木材その3	230
10: 力学性能から見た生産と利用とのマッチング	255

第1章 木材の成り立ちと強度のクライテリア

木材の本質は、構造的な不連続性を有した不均質性である。このような木材の持つ特徴や性質は、化学的な構成成分と言った非常にミクロなレベルから、連続体挙動として扱えるマクロな塊としての木材のレベルまで、様々に概念化されたりモデル化されたりする。しかし、工学的な視点から木材を扱う技術者は、木材や木質材料の性質に関して、解析的な簡便性のために仮定を設けるのが普通である。つまり、木材は、物理的な構造や性質が明確に方向に依存している、連続した弾性体と仮定する。もっとも、それがどのような状況でも成り立つということではない。つまり、節、年輪の変動、丸太の細りや曲りのような構造上局部的な乱れがあれば仮定は成り立たなくなるし、応力の変化や置かれた温度や湿度が変われば歪みが蓄積されるが、その挙動は非線形である。本節では、連続体としての木材を中心に、力学的性質に影響を及ぼす水分や節の扱いについて紹介する。

1.1 木材および構成要素の弾性特性

1.1.1 細胞を構成する化学物質のヤング率

木材は樹種によってその力学特性が大きく異なるが、その主成分は多糖類であるセルロースとへミセルロースおよび高分子フェノール物質であるリグニンである。

セルロース結晶は鎖状(伸びきり鎖結晶)で、水分変化に影響を受けづらく、 直交異方性を示すが面内等方性である。伸びきり鎖結晶の長手方向のヤング率 は約 140 GPa である(Cave 1976; Smith *et al.* 2003)。 へミセルロースも鎖状を基 本としているが、結晶構造を取りづらく、水分変化の影響が顕著である。また、 弾性特性はセルロース同様に面内等方性であり、気乾状態における長手方向の

第2章 時間軸を考慮した力学的性質の変化

木材は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンといった高分子からなる材料である。セルロース、ヘミセルロースはそれを構成する分子が鎖状に長いために、低分子物質には見られない多くの興味ある力学的性質を示す。その一つが粘性と弾性を合わせ持つ、粘弾性である。粘弾性は、時間が関与した物性である。また、木質構造物には、長期にわたり外力や荷重といった力学的な作用が加わることはもちろん、腐朽菌やシロアリなどの生物的な作用も加わり、その結果疲労や劣化を引き起こす。これらの時間軸を考慮した力学的性質については、これまで実験的・理論的に多くの研究が行われており、本章ではこれらについて紹介する。

2.1 レオロジー的性質

2.1.1 粘弾性(レオロジー)の基礎

応力が長時間存在するときは、時間の要素を入れた変形またはひずみを考えなければならない。時間とともに変形が増大するのは液体の性質であり、液体の粘性によって左右される。また、材料の変形を考える場合には、荷重をかけた直後の変形も加えなければならない。すなわち、弾性と粘性流動の両者の性質を同時に当てはめて考えなければならない。これを粘弾性(レオロジー)という。材料に応力 σ が加えられた瞬間には ε なる弾性ひずみが生じ、弾性率をEとすれば $\varepsilon = \sigma/E$ または $d\varepsilon = d\sigma/E$ なる関係がフックの法則から求められる。この両辺をdtで割れば、

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \tag{2.1.1}$$

が得られる。ここに、 $d\varepsilon/dt$ はひずみ速度であり、 $d\sigma/dt$ は応力の変化速度であ

第3章 水・熱と木材の物理的性質

木材は一般的に軽くて強く、構造材としては非常に優れた性能を持つ材料であると認識されているが、その力学的・物理的性質は水や熱の影響を受けて大きく変化する。そのため、安全性を確保しつつ適切な使い方をするためには、これらの性質を理解し利用することが極めて重要である。ここでは、まず水や熱が関わる木材の物理的性質について基礎的な概要と、それらに基づいた実用的な技術として木材の乾燥について述べる。さらに、本章の最後に、近年その重要性が認識されつつある木材の熱力学的観点からの物性研究について紹介する。

3.1 水分と木材

3.1.1 様々な水分状態の木材

木材は吸湿性材料であり、周囲の環境(温度や湿度)によって吸湿あるいは脱湿して含水率(moisture content)が変化する。木材の含水率 U (%)は全乾木材質量あたりの含有水分質量の百分率で示される。ここで、 W_U は含水率 U(%)の時の木材質量(g)、 W_0 は全乾質量(g)である。

$$U = \frac{W_U - W_0}{W_0} \times 100(\%)$$

木材中の水はその存在状態の違いから結合水 (bound water) と自由水 (free water) に区別される。結合水とは、細胞壁中に存在し、水素結合により強く木材に結合している水分である。含水率 5~6%以下の水は木材の内部表面と水素結合で結合し、単分子層吸着水 (monomolecularly adsorbed water) として保持される。それ以上の含水率の水は、単分子層吸着水表面上に順次層数を増加する多分子層吸着水 (polymolecularly adsorbed water) として保持される。結合水は木材

第4章 破壊力学と木材

材料力学はルネサンス期に多用されたが、19世紀あたりから鉄鋼が増産され、構造物は巨大化していった中で材料力学の問題点が浮上してきた。当時は、大きな構造物はリベット・継手で接合されていたため、構造物全体が損傷することは稀であった。しかし、20世紀中頃から溶接構造が広く使われるようになり、一箇所で発生したき裂が溶接部を通り構造物全体に波及する事故が多発するようになった。脆性破壊について最初に研究したのは、イギリスの科学者グリフィス(Alan Arnold Griffith)である。第二次世界大戦下で米国が建造していたリバティ船が多数脆性破壊で損傷したことにより、グリフィスの脆性破壊の研究が脚光をあびた。さらにこの分野の確立に決定的であったのはアーウィン(G.R. Irwin)の応力拡大係数の導出であり、これによりエネルギー理論から応力理論への橋渡しが完成し、材料力学との比較も用意になったことによりこの学問分野は破壊力学の名称が与えられた。

木材は繊維方向に割裂しやすいため、破壊力学の適用が期待されていたが、 欧州では実際に設計規準に取り入れられており、今後研究の進展が望まれてい る。ここでは、破壊力学の基礎と応用について紹介する。

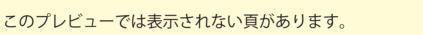
4.1 線形破壊力学

材内に欠陥を持たない材料の強度特性は、負荷した荷重を断面積で除することで得られる引張強さや初等はり理論から得られる曲げ強さなどで評価される。しかし、材料の破壊はしばしば内在する欠陥から進展することが多く、このような単純な強度論で強度特性を評価することが困難である場合が多く、欠陥を持つ材料の評価法が必要となる。その中で、材料に鋭いき裂がある場合は本項で述べる線形破壊力学による評価が有効である。

第5章 無欠点小試験体からの各種許容応力度の誘導

構造物の設計においては、構造物に加わる外力を求め、その外力を十分に支持できる強度を持った部材を用いる必要がある。そのため、設計に用いる各部材の強度値が明確に定められていなければならない。木材は生物材料であるため、たとえ無欠点小試験体であっても、強度にばらつきを持つことは避けられない。実際に部材として使用されることになる実大材には、節や繊維傾斜などの欠点が含まれているため、これらの欠点による強度の低下を十分に考慮しなければならない。また、木材は含水率により強度が変化する。さらには、木材に荷重を加える時間によっても、木材の強度は変化する。以上の点をふまえると、設計値として定められる木材の強度は、強度試験を行った場合に測定される強度よりも、十分安全を見越した数値である必要がある。この設計値として用いられる値を許容応力度と呼んでおり、樹種、等級、強度の種類などによって様々な値が定められている。

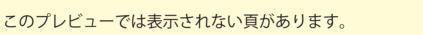
許容応力度の誘導方法には大きく分けて、無欠点小試験体からの誘導、実大材からの誘導の2つの方法があるが、本章では無欠点小試験体からの各種許容応力度の誘導について解説する。無欠点小試験体からの許容応力度の誘導は、無欠点小試験体の強度値に対して、実大材で存在する基本的に目視によって判別できる欠点等の影響を低減係数として乗じることによって実大材の強度を推測できるという思想に基づいている。また、欠点、荷重継続時間、寸法効果などの係数をそれぞれ無欠点小試験体の強度値に乗じる方法を取っているが、それはこれらの条件が独立して木材に影響を及ぼしているとみなしていることとなる。



第6章 実大材からの各種基準強度の誘導

許容応力度は、基準強度に各種係数を乗じて算定される。各種係数には、第 5 章で紹介したように、荷重継続時間影響係数、含水率影響係数、寸法効果係 数、強度比、安全率がある。このような係数が、製材=実大材に対しても適用 可能か、カナダ UBC (University of British Colombia) のマドセン (Madsen) 教授は 検討を加えた (Madsen 1992)。つまり、上記5つの係数のうち4つを固定し、実 大材の強度実験を行うことにより、一つ一つ係数を見直していったのである。 その結果、各種係数は、実大材には適さないことが分かった。また、同教授は、 "Timber is as different from wood as concrete is different from cement."という言葉 も残している。これは、次に示すような意味である。無欠点小試験体の曲げ試 験による初期破壊は、もめが圧縮側で生じ、中立軸が移動し、引張側で最終的 な破壊に進展する。一方、製材は節などの成長に起因する欠点を含み、繊維に 直交する横引張によるクラックが生じ、引張側での複合的な破壊モードに進展 する。圧縮側強度が引張側強度より小さな無欠点小試験体(defect-free wood)と 圧縮側強度が引張側強度より大きな製材(timber)では、異なる材料なのである。 各種調整係数を見直し、製材に適用できるように改善すべきであるという意見 もあるが、defect-free wood と timber では破壊の論理が異なり、試験体系を変え た方がいいのである。defect-free wood は木材科学者(wood scientist)にとっては 恰好の材料であるが、構造材を扱う技術者的な観点からは信頼できるデータを 与えてくれない。それは、コンクリートの強度を知りたければ、セメントだけ の試験によらないのと同じなのである。

以上より、製材に対する許容応力度を算定するには、無欠点小試験体を用いる試験体系ではなく、製材用の試験体系が必要であり、それが、In-Grade Testing Program である。したがって、In-Grade の理念は、基本的には、最終的に製材品が使われる状態にできるだけ近い状態で試験すべきであるということである。



第7章 テーパー梁に関する理論

テーパー梁の強度に関しては、古くから理論的、実験的に研究されてきた。 しかし、最近、これらの理論が誤りではないかという研究がされている。これ まで行なわれてきたのは、主に初等力学に基づいた解析であり、そもそも曲げ を受ける梁には適用できず、応力関数を用いた解析を行なう必要がある。本章 では、応力関数を用いたテーパー梁の強度に関する理論および実験を紹介する。

7.1 初等力学解析による解析

「梁」に関する理論は後述し、まず初等力学解析によるテーパー梁の応力解析を紹介する。

マキら (Maki and Kuenzi 1965) 、沢田ら (1970) が、**図 7-1-1** に示すようなテーパーのついた対称な梁について応力解析を行なっている。中央集中荷重であるが、一般的な梁への展開が可能なので、まず、これを用いた力解析を示す。ただし、b = 梁幅、 h_a = 中央の最大せい、 h_0 = 支持上のせい

$$\tan \alpha = \frac{h_a - h_0}{\ell / 2}$$

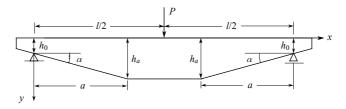
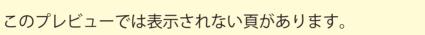


図 7-1-1 対称なテーパー梁

Fig. 7-1-1 Symmetrical taper beam.



第8章 エンジニアードウッドの強度設計

エンジニアードウッドは、構成要素の材質を用いることにより、強度設計が可能な木質材料である。例えば、集成材についてはこれまで様々な設計法が提案されてきたが、最近わが国ではシミュレーションを用いて基準強度が算定された異樹種集成材が製品化されている。このように、確率・統計論に基づいて設計された集成材の製品化は、世界的にみてもわが国だけであり、世界の最先端をいっていると言っても過言ではない。本章では、シミュレーションを用いた集成材の強度設計理論を紹介するとともに、現行の日本農林規格(JAS規格)における規定についても述べる。また、単板積層材(LVL)もエンジニアードウッドの一つであるが、接着層付きの単板が構成エレメントと考えられ、その材質などが分らず、これまで設計法は示されていないのが現状である。しかし、最近、構成エレメントを間接的に求める手法が開発されたので紹介する。

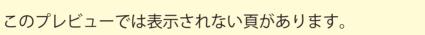
8.1 集成材の断面設計理論

8.1.1 クライテリアとシミュレーション

8.1.1.1 任意等級ラミナで構成された集成材の剛性

等級区分したひき板(ラミナ)を接着し、主として構造物の耐力部材として用いられる構造用集成材が、JAS 規格で定められている。ラミナ配置として、同じ等級のみを用いる同一等級構成、積層方向の両外側ほど高い等級を配置する異等級構成があるが、曲げを受ける梁桁材には最外層に最大応力が発生するため、異等級構成が合理的である。ここでは、異なる等級のラミナを任意に組み合わせた集成材の剛性の求め方を説明する。

図 8-1-1 に集成材の断面諸量の定義を示す。以降、幅 b、厚さ t、断面積 A、断面二次モーメント I、ヤング係数 E、曲げモーメント M、縦ひずみ E、応力 σ



第9章 木質構造接合部の強度特性

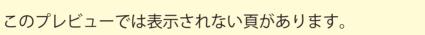
これまで材料に関する理論を中心に紹介してきた。しかし、木質構造物を設計するためには、どうしても接合部が必要である。木質接合部には、伝統的な継ぎ手・仕口からボルト・ドリフトピンなどのダウエル型金物を用いたものなど多種多様であり、それが木質構造の特徴でもあるが、一方汎用性に欠ける要因になっている。本章では、理論的解析が確立されているダウエル型金物を用いた接合部について、剛性および降伏耐力に関する代表的な理論を紹介する。また、木材のめり込み特性をモデル化し、それを用いて伝統的な貫構造の回転に関する理論的な解析も紹介する。

9.1 弾性床上の梁理論によるピン接合部の剛性

9.1.1 弾性床上の梁理論

ピン接合部(dowel-type joint)はせん断力を受けるとすべり変形が生じ、微小変形領域内のすべり挙動は弾性床上の梁理論(Theory of beam on the elastic foundation)を用いて計算することができる。クエンツィー(E. W. Kuenzi)の著書(Kuenzi 1955)によると、弾性床上の梁理論は 1867 年にウィンカー(E. Winkler)によって初めて紹介され、1946 年にヘテニー(M. Hetényi)が有限長の梁の解法を示したとある。クエンツィーは 1955 年に弾性床上の梁理論を釘やボルトを用いた木材添え板接合部に適用している。我が国における弾性床上の梁理論を扱った研究は、1951 年に原田(原田 1951)が釘接合部を対象に行っており、沢田の研究(沢田 1976)以降は多くの報告が見られる(日本木材学会 1994、日本建築学会 2010: 87-92)。

弾性床上の梁理論は、弾性体で支えられた梁のたわみ曲線を微分方程式で表 したものであり、加力下にある梁は長さ方向に連続的な反力を受け、梁や反力



第10章 接着接合を用いた複合材の強度理論

接着接合を用いた複合材は枚挙にいとまがない。しかし、それらの強度を理論的に論じたものはそれほど多くない。基本的には、剛性は、接着接合により部材同士は強固に接合されているという仮定に基づいて設計されているが、接着接合は脆性的な破壊が多く、理論的な解析が難しいという点があげられる。本章では、代表的なI-beam(I型梁)とGlued-In Rodについて理論解析を紹介する。

10.1 I-beam

10.1.1 I-beam の概要と特徴

I-beam は、上下弦材(フランジ)と腹部面材(ウェブ)をI字形に組み立てた木質構造材料である(図 10-1-1)。フランジが曲げ性能、ウェブがせん断性能を分担するように力学的役割が明確かつ合理的であり、各部の材料強度に応じた断面設計により、所定性能の横架材を少ない材積で効率的に製造することができる。同程度の曲げ性能を有する矩形断面の製材等と比べて軽量で、ウェブ面材の特性により梁せい方向の寸法変化が小さいといった利点があり、主に木造住宅の床根太や屋根垂木として利用されている(図 10-1-2)。近年の断熱性や気密性の高い木造住宅では、含水率の高い材料を床組に用いると、床面の不陸や建具開閉の不具合などが生じるおそれがあるため、とりわけ床根太に梁せいの大きな製材を多用する枠組壁工法においてI-beam の利用が進んでいる。

I-beam を構成する材料のうち、曲げ性能を担うフランジ材としては、強度のばらつきが少ない材料が有用であり、節などの欠点が除去・分散された単板積層材やたて継ぎ製材が用いられる。せん断性能を担うウェブ材料としては、せん断弾性係数とせん断強度が高い面材料が有用であり、構造用合板や構造用ボードが用いられる。フランジとウェブの接合部は、両者を一体化して高い曲げ性能とせん断性能を得る

APPENDIX

本書で述べて来たように、木材や木質材料、あるいは接合部の強度は含水率や大きさ、試験方法など様々な要因によって影響を受けるため、標準的な試験方法やデータの統計的な処理方法などが必要になる。ここではこれまで使われてきたいくつかの標準的な木材の試験方法の規格(standard)を紹介する。当初、試験体の寸法等を中心に記述しようと考えていたが、ASTMの内容を見て、規格作成の経緯の重要性をあらためて認識し、そういった情報を中心に紹介することにした。読者には、是非 ASTM を一読することを勧める。

木材や木質材料の様々な試験法に関する規格の中で、特に ASTM は重要である。その理由は、ASTM には、木材や木質材料に関する用語の解説や、節径の測り方、曲げや圧縮の破壊の様子などが記述されており、これはちょうど木材関係の JIS と JAS を包含したようなものであるからである。したがって、以下、ASTM を中心に述べる。

1. JIS Z 2101

木材に関する、わが国の最も標準的な試験方法である。本規格は、木材の標準試験体による試験方法について規定している。標準試験体であるため、試験体は無欠点小試験体である。つまり、「あて・腐れ・節・もめ・きず・割れ・ぜい(脆)心材などの欠点が含まれないようにし、(中略)できるだけ正確な板目またはまさ(柾)目に木取りした試験体を作成する。試験体の年輪はほぼ等しく、木理の正常なものでなければならない。」とある。内容は ASTM を踏襲していると思われる。

本規格で規定する試験項目は、(1)平均年輪幅、含水率及び密度の測定、(2)収縮率試験、(3)吸水量試験、(4)吸湿性試験、(5)圧縮試験、(6)引張試験、(7)曲げ試験、(8)せん断試験、(9)割裂試験、(10)衝撃曲げ試験、(11)硬さ試験、(12)クリープ試験、(13)くぎ引抜き抵抗試験、(14)摩耗試験、(15)耐朽性試験、(16)着炎性試験である。

索引·用語解説

本文中で今を肩付した用語に解説を付した。

略語

ARF: area reduction factor / 36 → 節面積 低減因子

CDF: cumulative distribution function 20 → 累積分布関数

CMOD: crack mouth opening displacement 105→き裂肩口開口変位

COD: crack opening displacement / 105 →き裂任意点開口変位

CTOD: crack tip opening displacement/ 103→き裂先端開口変位

CV: coefficient of variation 148→変動係 数

DCB: double cantilever beam 24, 100 → 双片持ちばり試験

DIC: digital image correlation 24, 37, 118 →デジタル画像相関法

DSP: digital speckle photography / 120 → デジタルスペックル写真法

EPM: elasto-plastic Pasternak model (弾 塑性パステルナーク・モデル) / 68, 221 Pasternak model は、Winkler model の離散型バネ相互をせん断作用にて連続させることで、連続体のめり込み変位を表現する力学モデルで提案者のPasternak, P. L. (1954) に由来する。Elasto-plastic Pasternak model は Pasternak model を直交異方性木材の弾塑性横圧縮に拡張した力学モデルで、めり込み部材内部のひずみ分布と横圧縮

特有のひずみ硬化挙動に基づいて弾塑性めり込み特性を表現する力学モデルであり、棚橋ら(2006)による。[大岡]

ESPI: electronic speckle pattern interferometry 120 →電子スペックル干渉 法

EYT: European yield theory 213 →ヨーロッパ型降伏理論

FEM: finite element method ∕ 37 → 有限要素法

FPZ: fracture process zone ∠23, 103, 108 →破壊進行領域

FSAFC: finite small area fracture criteria /24 →有限小領域理論

FSP: fiber saturation point 16, 80 →繊維 飽和点

GIR: glued-in rod/232, 237 部材に孔を空け、ボルトや異形鉄筋あるいは木製ダボなどを挿入し、クリアランス部分にエポキシ樹脂などの接着剤を充填する。「中村

KAR: knot area ratio / 36 → 節面積比

LEFM: linear fracture mechanics 103 → 線形破壞力学

LVL: laminated veneer lumber 185, 200 → 単板積層材

MOE: modulus of elasticity / 142, 152 → 曲げヤング係数

MOR: modulus of rupture 17, 142, 194 → 曲げ強度

SPF: spruce-pine-fir/56 カナダでは、ス

執筆者紹介(五十音順)

*印は編集者、()は執筆担当

井道	Hirofumi 裕史	森林総合研究所材料接合研究室主任研究員	(5.1, 5.2, 5.3, 5.4)
UKYO 宇京	Seiichiro 斉一郎	森林総合研究所木質構造居住環境研究室主任研究	
OOKA 大岡	Yu 優	都城工業高等専門学校建築学科講師	(2.3.3)
OHASHI 大橋	Yoshinori 義徳	北海道立総合研究機構林産試験場主査	(10.1)
KAMBE 神戸	Wataru 渡	関東学院大学建築・環境学部専任講師	(4.3)
KOBAYASHI 小林		静岡大学学術院農学領域助教	(9.2)
SAWATA 澤田	Kei	北海道大学大学院農学研究院講師	(9.1)
SUGIMOTO 杉本	工 Takanori 貴紀	あいち産業科学技術総合センター計測分析室主任	,
SONODA 東田	Satomi 里見	富山県農林水産総合技術センター木材研究所副主	(=,=,
TAKINO 瀧野	ェル Atsuo 敦夫	奈良女子大学生活環境学部講師	(1.7)
TANAHASHI 棚橋		立命館大学客員研究員	(9.3)
NAKAMURA 中林		秋田県立大学木材高度加工研究所教授	(7.5)
ተግ	71	7,7,2,7,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,4,	10.2, C3, C5, C6, C8)
NAGAO	Hirofumi	(2.1, 0.2, 0.3, 7, 8.3,	10.2, C3, C3, C6, C8)
長尾 HIRAMATSU	博文 Yasushi	森林総合研究所強度性能評価担当チーム長	(5.1, 5.2, 5.3, 5.4)
平松	靖	森林総合研究所積層接着研究室長	(8.2)
FURUTA 古田	Yuzo 裕三	京都府立大学大学院教授 ((3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5)
三好	Yuka 由華	京都府立大学大学院博士課程 ((3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5)
MORI 森	Takuro 拓郎	京都大学生存圈研究所助教	(2.4)
MORITA 森田	Hideki 秀樹	宮崎県木材利用技術センター主任研究員	(8.1)
MURATA 村田	Koji 功二*	京都大学大学院農学研究科助教 (1.3, 1.6,	, 4.2, 4.4, C4, C7, C9)
YAMASAKI 山崎	Mariko 真理子*	名古屋大学農学系研究科准教授 (1	1.2, 1.5, 2.3, C1, C10)
YOKOYAMA 横山	Misao 操	京都大学大学院農学研究科研究員	(C2)
YOSHIHARA 吉原	Hiroshi 浩	島根大学総合理工学部教授	(1.1, 1.4, 4.1)

Timber Mechanics: Theory and Applications

ティンバーメカニクス

─ 木材の力学理論と応用─

発 行 日 — 2015 年 10 月 20 日 初版第1刷 者 ———— 日本木材学会 木材強度·木質構造研究会

編集代表 — 中 村

山 崎 真理子 村田功二

発行者—— 宮内 久



〒520-0112 大津市日吉台2丁目16-4 Tel. (077) 577-2677 Fax (077) 577-2688 海青社 Tel. (077) 577-2677 Fax (077) 57 Kaiseisha Press http://www.kaiseisha-press.ne.jp 郵便振替 01090-1-17991

- 定価はカバーに表示してあります。落丁乱丁はお取り替えいたします。
- 本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられて います。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することはたとえ個人 や家庭内の利用でも著作権法違反です。
- © 2015 NAKAMURA Noboru. Printed in Japan
- ISBN 978-4-86099-289-7 C3052