木材の割裂破壊線とフラクトグラフィ

－鉄骨木質構造の研究 その6－

CRACKING PATH AND FRACTOGRAPHY OF SPLITTING FAILURE OF WOOD

－ Study on steel-framed timber structures Part 6－

桑村 仁*

Hitoshi KUWAMURA

Three-point bending tests were performed for beams made of Japanese cedar, in which the beam axis is inclined to the grain of the wood. Followings were observed with respect to the cracking path. Splitting starts at the point on the tension edge where the stresses satisfy the fracture criterion for orthotropic plates. When the beam is not restrained, in other words, the beam has an entirely free path of cracking, the crack suddenly propagates into the compression edge, resulting in the total failure of the beam. However, when plywood panels are attached to the sides of the beam in its half span in order to interrupt the anticipated cracking path, the splitting crack stops on its way and then bending failure is developed slowly. The first splitting, even when the cracking path is interrupted, can be initiated only if a small trigger length equivalent to the interval of annual rings is latent in the possible cracking path. From fractography by means of SEM, it was found that the initial crack of splitting is the fibrous crack with honeycomb patterns, which is followed by the progressive crack with split bamboo patterns.

Keywords : *Splitting, Wood, Crack propagation, Fractography, Fracture criteria*

割裂, 木材, き裂伝播, フラクトグラフィ, 破壊条件

1. はじめに

木材は繊維直交方向の引張強さと破壊靱性がともに小さいため、繊維方向にき裂が伝播しやすい。この破壊現象を割裂と呼んでいる。例えば、テーパー梁の割裂や円孔内に圧力を受ける板の割裂は図1に示すように、き裂が繊維の方向に一瞬に伝播して木材の分裂を引き起こす。このとき、テーパー縁や円孔縁の或る点の応力状態が異方性材料の破壊クライテリアを満たしたとき、その点（以下、危険点と呼ぶ）から瞬時にき裂が走る。その破壊クライテリアとして、テーパー梁では Tsai-Hill 式、円孔内圧板では Hoffman 式が当てはまることが既に知られている^{1), 2)}。

テーパー梁や円孔内圧板の場合は、図1の写真から明らかなように、割裂破壊線上に障害物、すなわちき裂の伝播を阻止する要因が全く無い。ところが、図2のような片持ち梁では様相が異なってくる。この片持ち梁は梁の軸線に対して木材の繊維が傾斜している。自由端に作用する鉛直荷重が下向き P_1 の場合と上向き P_2 の場合を考えてみる。鋼材のような等方性材料では、座屈が起きないとすれば、 P_1 に対しては A 点から破壊がスタートして破壊線は AB となり、 P_2 に対しては B 点から破壊がスタートして破壊線は BA となる。しかも、破壊するときの P_1 と P_2 の値は等しい（梁の断面は上下対称とする）。ところが、木材の場合には、そのような単純な状況にはならない。 P_1 に対しては、最も応力的に厳しい A 点から破壊が始まり、繊維方向にき裂が伝播して破壊線 AC が形成される。この場合

は、破壊線上に障害物が無いのでテーパー梁や円孔内圧板と状況は同じである。すなわち、危険点 A の応力状態が破壊のクライテリア（この場合 Tsai-Hill 式でよい）を満たした瞬間に割裂破壊することになる。ところが、 P_2 に対しては応力的に最も厳しい B 点から割裂しようとしても、固定端という障害物があるため、繊維方向の破壊線が形成できない。仮に、B 点から A 点に向かって破壊線

テーパー梁¹⁾円孔内圧板²⁾

図1 破壊線上に障害物が無い場合の割裂

図2 破壊線上に障害物がある場合の割裂モデル

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・Ph. D.

Prof., Dept. of Architecture, School of Engineering, The University of Tokyo, Ph. D.

が生じたとすると、その破壊線は木材の繊維を分断しなければなら
ないので、破壊させるには非常に大きな荷重を必要とする。そこで、 P_2 に対する破壊線として想像されるのは、図の DEA なる破壊線である。DE は繊維に平行な割裂破壊線で、EA は繊維を分断する曲
げ破壊線である。言い換えれば、割裂破壊が途中で停止し、その後、
曲げ破壊に移行するというものである。実際、本論の3点曲げ実験
でこれが現実のものとして観察される。すると、ここで、いくつか
の疑問が浮上する。まず、割裂がスタートする D 点は固定端から
いくら離れた位置となるかということである。さらに、割裂が起き
るときの荷重は梁の最大荷重となるのか、あるいは後続の曲げ破壊
による荷重のほうが大きくなるのか。もし、後者ならば、曲げ破壊
の進行中、すなわち荷重が上昇する過程で、2回目、3回目の割裂
が起きるかというような疑問である。これらの疑問に答えることが
本研究の目的である。

本稿では、割裂破壊線上にき裂の伝播を妨害する障害物が在る場
合の破壊線がいかなる形態をとるかを検討するために、ごく単純な
モデルすなわち繊維を材軸に対して傾斜させた梁を用いている。木
質構造において、割裂による急激な破壊を防止するために、様々な
工夫が行われるが、実は、これらは割裂破壊線上に障害物を設けた
ものとみなせるケースが多い。例えば、テーパー梁のテーパー縁に
ひき板を積層接着したり³⁾、応力集中部の周辺に繊維クロス等を接
着したりすることがある⁴⁾。また、繊維方向が互いに直交するよう
に積層した合板は、そのことによって割裂破壊線が板の厚さ方向に
伝播しないようにしているため割裂しにくい。このような木質構造
の割裂強さ向上の技術を理解するための基本的知識を得るのが本稿
の目的でもある。

2. 試験材（スギ）の材料特性

2.1 製材について

本研究に用いたのは木理通直な 1 本のスギ製材で、断面は厚さ
30mm、幅130mmである。幅方向は丸太の半径方向、厚さ方向は
年輪の接線方向となっている。密度は330kg/m³、含水率は9.5%、
製材の幅中央部で測定した平均年輪幅は1.8mmである。製材の幅
中央部が後述の各種試験片で破壊が生じる部分となる。

2.2 スギ材の力学的特性

上述のスギ製材から各種材料試験片を切り出し、材料試験を 3 本
ずつ行った。その結果を表 1 に整理しておいた。縦引張試験、横引
張試験、斜め45°引張試験では、それぞれ引張強さ F_x 、 F_y 、 F_{45} を求
めると同時に、試験片平行部に軸方向と軸直交方向それぞれ表裏に
ひずみゲージを貼付し、ヤング係数 E_x 、 E_y 、 E_{45} 、およびポアソン
比 ν_x 、 ν_y 、 ν_{45} を求めた。ここでは、繊維方向を x 、繊維直交方向（丸
太の半径方向）を y で表示してある。3 本の平均値を用いて、次式
で定義されるコンプライアンスの対称性指数 C_{sym} を計算したところ
1.16であった。1.0に近い値であるので、このスギ製材は直交異方
性板とみなしてよいであろう。

$$C_{sym} = \frac{E_x/\nu_x}{E_y/\nu_y} \quad (1)$$

表中のせん断弾性係数 G_{xy} は次の 2 つの式で計算した。 $C_{sym}=1$ の
とき、両者は等価である。

表 1 試験材（スギ製材）の材料特性

(1) 引張												
番号	弾性係数							強さ				
	Ex	Ey	E45	vx	vy	v45	Gxy	Csym	Fx	Fy	F45	
1	7250	740	1350	0.37	0.044	-0.010	—	—	62.0	4.81	5.91	
2	7680	700	1330	0.40	0.043	0.009	—	—	69.1	4.77	7.97	
3	7370	720	1360	0.36	0.043	-0.021	—	—	66.0	4.65	7.52	
平均	7400	720	1350	0.38	0.043	-0.007	(1) 650 (2) 680	1.16	65.7	4.74	7.13	

(2) せん断			(3) 横曲げ			(注記)
番号	強さ Fxy		番号	強さ Fby		
1	5.04		1	4.76		ヤング係数、せん断弾性係数、強さの単位はN/mm ² 。 Csymは本文(1)式による。 Gxyの(1)、(2)は本文(2)、(3)式による。
2	5.17		2	4.40		
3	5.12		3	4.67		
平均	5.11		平均	4.61		

表 2 早材と晩材の材料特性（繊維方向）

番号	早材					晩材				
	平行部寸法(mm)			ヤング 係数	引張 強さ	平行部寸法(mm)			ヤング 係数	引張 強さ
	厚さ	幅	長さ			厚さ	幅	長さ		
1	1.35	8.0	60	4500	40.7	0.16	7.7	60	30900	374
2	0.92	7.8	60	4630	36.4	0.15	7.8	60	27500	304
3	0.49	7.8	60	5240	33.0	0.15	7.6	60	29300	272
平均	-	-	-	4790	36.7	-	-	-	29200	317

(注記) ヤング係数、引張強さの単位はN/mm²。

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_x}{E_x} \quad (2)$$

$$G_{xy} = \frac{E_{45}}{2(1+\nu_{45})} \quad (3)$$

G_{xy} は(2)式によると650MPa、(3)式では680MPaとなり、あまり大
きな差はない。なお、45°引張試験でポアソン比 ν_{45} が負となる実験
データがあるが、これは理論上可能で、 $E_x \gg E_y$ のときしばしば観察
されることが知られている⁵⁾。

せん断試験は、半径方向に垂直な面（板目面）に繊維方向のせん
断力を作用させるもので、これによりせん断強さ F_{xy} を測定した。
横曲げ試験は JIS に規定されていないので、文献⁴⁾の方法を用いた。
横曲げ試験は、試験材の下縁（引張縁）が横引張試験と同様、半径
方向の引張となるような3点曲げ試験で、その意義は、横引張試験
では試験片の最弱年輪層の強さを抽出してしまうこと、および試験
片セット時に加わる不可避の曲げが影響して横引張強さが低めに検
出される可能性があるため、これを補うことにある。横曲げ試験で
は、荷重とたわみの関係が破壊まではほぼ直線関係にあることから、
破壊時の曲げモーメントを弾性断面係数で除して横曲げ強さ F_{by} を
求めた。今回の試験では、横引張強さ F_y と横曲げ強さ F_{by} に有意な
差は見られなかった。

ここで、直交異方性材料の破壊クライテリアの一つである Tsai-
Hill 式を使って、強さの相関関係を検討しておくことにする。Tsai-
Hill 式によると、材軸に対して繊維方向が θ 傾斜した木材の引張強
さは次式で表される¹⁾。

$$\frac{1}{F_{\theta}^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_x^2} + \frac{\sin^4 \theta}{F_y^2} + \left(\frac{1}{F_{xy}^2} - \frac{1}{F_x^2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (4)$$

上式の F_x 、 F_y 、 F_{xy} に表 1 の平均値を代入し $\theta=45^\circ$ として F_{45} を計算
すると、6.95MPa となる。45°引張試験による実験平均値7.13MPa
と比較すると誤差3%であり、よく合っている。

2.3 早材および晩材の強さとヤング係数

スギ製材から早材と晩材をそれぞれ慎重に切り出し、繊維方向の引張試験を行い、引張強さとヤング係数を測定した。その結果を試験片寸法とともに表2にまとめておいた。晩材は厚さが0.15~0.16 mmの非常に薄い試験片となる（後出の電子顕微鏡写真によると晩材の厚さは0.20mm程度であるが、切り出した試験片に付着している早材を完全にサンダーで除去する際にある程度晩材も落とさなければならないためその分薄くなる）。早材は晩材より厚い試験片が採取できるが、寸法効果の影響が懸念されるので、平行部にサンダーをかけ意図的に厚さを3段階にしてみた。結果的には、さほど顕著な寸法効果は見られなかった。ただし、このような薄い試験片では、ひずみゲージの接着により強化される可能性があり、特に、柔らかい早材のヤング係数が高めに検出されることは念頭に置いておく必要があるかもしれない（実際、早材は薄いほどヤング係数が少し高くなっている）。なお、引張破壊はひずみゲージから離れた平行部で起きたので、引張強さへの影響はないと考えてよい。

表2に示す平均値を見ると、晩材のヤング係数は早材の6.1倍、引張強さは8.6倍である。晩材の引張強さ317MPaは鋼材並みの強さである。ここで、少々乱暴ではあるが、スギ製材を早材と晩材の積層板と考えて、製材の繊維方向のヤング係数と引張強さを推定すると次のようになる。年輪幅を前述の1.8mmとし、そのうち早材が1.6mm、晩材が0.2mmを占めるものとした。

$$E_x = 4790 \times \frac{1.6}{1.8} + 29200 \times \frac{0.2}{1.8} = 4260 + 3240 = 7500 \text{ MPa}$$

$$F_x = 36.7 \times \frac{1.6}{1.8} + 317 \times \frac{0.2}{1.8} = 32.6 + 35.2 = 67.8 \text{ MPa}$$

前出表1より、製材の繊維方向のヤング係数は7400、引張強さは65.7であった。単純な複合則による計算値はこれによく一致している。

3. 巨視的割裂破壊線

3.1 検討方法

割裂破壊線上に障害物が無い完全フリーパス（free path）の場合に対して、障害物がある場合に破壊荷重および破壊線がどのような影響を受けるかを調べるために、図3に示す3点曲げ実験を行った。材軸に対する繊維の傾斜角 θ は、 $\tan\theta=0.2, 0.4, 1.0$ の3ケースとし、それぞれについて、支点間距離を $L=480, 240, 120\text{mm}$ とした。図の(a)は完全フリーパスの場合、(b)は(a)で生じた割裂起点から割裂破壊線の全域を拘束した場合（梁の両側面に厚さ3mmの合板を α -シアノアクリレートで接着）、(c)は割裂破壊線の反対側を拘束した場合である。(c)は無意味な拘束であるが、念のため各ケースについて

1体だけ試験し、(a)と(b)は3体ずつ実施した。序文では片持ち梁モデルをとり挙げたが、固定端に必要な強度を確保する接着方法が見当たらなかったため、3点曲げ梁とした。スパン中央の左右がそれぞれ片持ち梁となる。すなわち、図3(b)は前出図2の片持ち梁で上向き荷重 P_2 が作用する場合、図3(c)は下向き荷重 P_1 が作用する場合に相当する。

3.2 繊維傾斜梁の応力

まず、材軸に対して繊維方向が傾斜した梁（以下、繊維傾斜梁）の応力分布について検討しておく。というのは、この繊維傾斜梁は、初等力学における平面保持仮定が成立しないため、注意が必要であるからである。図4のように梁の座標系 $u-v$ に対して直交異方性板の弾性対称軸 $x-y$ が時計回りに θ 傾斜しているとき、材軸方向の直応力度は倉西が応力関数法を用いて次のように導いている⁶⁾。

$$\sigma_u = \frac{(P/2)(L/2 \mp u)}{bh^3/12} \nu \mp \frac{\alpha_{16}}{\alpha_{11}} \frac{P/2}{bh^3} (h^2 - 12\nu^2) \quad (5)$$

上式の複号 $\mp$ は、 $-$ が梁の右半分($0 \leq u \leq L/2$)、 $+$ が左半分($-L/2 \leq u \leq 0$)に対応する。 P は中央集中荷重、 b は梁幅（厚さ）、 h は梁せい、 L は支点間距離である。 α_{11} 、 α_{16} はコンプライアンス係数行列の(1,1)および(1,6)成分で、 $l = \cos\theta$ 、 $m = \sin\theta$ とすると、次式で与えられる。

$$\alpha_{11} = \frac{l^4}{E_x} + \frac{m^4}{E_y} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_x}{E_x} \right) l^2 m^2 \quad (6)$$

$$\alpha_{16} = -\frac{2}{E_x} l^3 m + \frac{2}{E_y} l m^3 + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_x}{E_x} \right) (l^2 - m^2) l m \quad (7)$$

(5)式右边第1項は等方材の初等力学解と同じで、第2項は異方性によって付加される項である。なお、軸直交方向の直応力度 σ_v およびせん断応力度 τ_{uv} は等方材と同じである（もちろん、 $\sigma_v=0$ ）。上式に表1の弾性係数の平均値を代入すると、 $\tan\theta=0.2, 0.4, 1.0$

図4 繊維傾斜梁の解析モデルと応力分布

図3 繊維傾斜梁の試験体

図5 繊維傾斜梁の引張側最外縁の応力分布

に対して、それぞれ $\alpha_{16}/\alpha_{11}=1.25, 1.38, 0.85$ となる。ちなみに、 $\theta=0^\circ$ と 90° のとき、すなわち通常の曲げ試験と横曲げ試験のときは、 $\alpha_{16}=0$ となるので、異方性の影響がなくなる。

(5)式の応力分布を描くと図4の下段のようになる。スパンの右側では引張側最外縁(下縁)のほうが圧縮側最外縁(上縁)より σ_u の大きさが大きく、スパンの左側ではその逆になる。すると、スパン中央では左右の σ_u が一致しないという力学上の矛盾が生じる。これは、(5)式が片持ち梁の解として導かれたもので、3点曲げ梁については中央の境界条件を満たすことができないことによる。繊維が傾斜した3点曲げ梁については理論解が得られていないので、FEM⁷⁾で解き、(5)式と比較することにした。それを図5に示す。これは各ケースについて、 $P/bh=1\text{MPa}$ 、 $h=20\text{mm}$ として、引張側最外縁の応力分布を描いたものである。FEM 数値解はスパン中央付近で(5)式の片持ち梁の理論解と少しずれるだけである。最大引張応力度はスパン中央($u=0$)から右寄りの位置に生じる。これは、木材が強度的に均質ならば、割裂は荷重点右側の引張下縁から生じることを意味する。後述のように、実験結果もそのようになっている。図5より、理論解は中央での連続性を満たさないが、FEM と比べてさほど数値的な違いがないので、後述の破壊位置の応力算定には(5)式の理論解を用いることにする。

3.3 破壊形式

前出図3に示した繊維傾斜梁の実験結果を表3にまとめた。試験体記号は02-1a, 02-1bのように表示し、先頭の02は繊維傾斜勾配を表し、1a, 1bは同一シリーズ番号1のケース(a), (b)を表す。すなわち、1aの実験で得られた割裂発生位置 u_s に拘束板の端位置 d を合致させたのが1bである(図3参照)。ケース(c)は02-3cのように表記しており、シリーズ番号3の1体のみである。表中の耐荷曲線タイプは図6の通りで、タイプS, SB, SSBに分類される。実際の荷重-変形曲線は紙面の都合で割愛し、別途報告する^{注1)}。耐荷曲線のタイプ別の破壊形式を図7に写真で示した。

タイプSは引張縁(下縁)から割裂が生じ、き裂が一瞬で圧縮縁まで伝播するもので、多くの場合、試験体は吹き飛ぶ。ケース(a)と(c)の試験体はすべてこの破壊形式である。拘束のないケース(a)試験体は、応力解析の通り、すべて荷重点の右寄りから割裂がスタートし、繊維の方向すなわち左上方にき裂が伝播した。

タイプSBは割裂が発生した後、直ちに、き裂が拘束板によって停止し、その後、曲げ破壊に移行するものである。割裂破壊の発生直後に荷重は急降下し、その後、ある程度の荷重を維持しながら緩やかに崩壊していく。このとき、梁と合板の接着層のせん断破壊を

表3 繊維傾斜梁の実験結果一覧表

実験条件							実験結果				
勾配 tanθ	破壊線の拘束 拘束状態	位置 d (mm)	試験 体記 号	寸法 (mm)			耐荷 曲線 のタ イプ	割裂状況			
				厚さ b	せい h	スパン L		us (mm)	Ps (N)	σs (MPa)	us-d (mm)
0.2	無し case (a)	—	02-1a	8.5	20.3	480	S	25	112	21.5	—
		—	02-2a	8.5	20.2	480	S	24	110	25.7	—
		—	02-3a	8.5	20.2	480	S	2	140	29.8	—
	破壊線 拘束 case (b)	25	02-1b	8.5	20.3	480	SSB	30	111	20.8	5
		24	02-2b	8.5	20.1	480	SB	61	124	19.9	36
		2	02-3b	8.5	20.1	480	SB	37	149	27.6	13
	逆側拘束 case (c)	2	02-3c	8.5	20.1	480	SSB	2	124	26.7	0
		—	—	—	—	—	—	17	138	27.8	15
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	無し case (a)	—	04-1a	9.3	20.0	240	S	13	162	15.1	—
		—	04-2a	9.2	20.2	240	S	19	165	14.5	—
		—	04-3a	9.2	20.1	240	S	18	179	16.0	—
	破壊線 拘束 case (b)	13	04-1b	9.3	20.3	240	SSB	13	209	19.1	0
		19	04-2b	9.0	20.2	240	SB	21	225	19.1	8
		18	04-3b	9.2	20.1	240	SB	29	217	17.8	10
	逆側拘束 case (c)	18	04-3c	9.3	20.1	240	S	31	221	17.5	13
		—	—	—	—	—	—	18	174	15.4	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	無し case (a)	—	10-1a	8.7	20.5	120	S	9	164	7.6	—
		—	10-2a	8.6	20.5	120	S	7	126	6.2	—
		—	10-3a	8.7	20.5	120	S	9	164	7.6	—
	破壊線 拘束 case (b)	9	10-1b	8.6	20.6	120	SB	9	230	10.7	0
		7	10-2b	8.6	20.4	120	SB	22	199	7.3	15
		9	10-3b	8.7	20.3	120	SB	16	264	11.0	7
	逆側拘束 case (c)	9	10-3c	8.7	20.6	120	S	11	147	6.6	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(注) 耐荷曲線のタイプSSBのPsは上段がPs1, 下段がPs2 (図6参照)。

図6 荷重-変形曲線の種類

伴う。この破壊形式SBは割裂破壊線を予め全域に渡って拘束したケース(b)の多くで観察され、特に、繊維傾斜角の大きい $\tan\theta=1.0$ の試験体では、割裂破壊後の梁の回転を拘束する接着層の面積が小

図7 破壊形式 (S : Split, B : Bending)

図8 割裂の最小起動長さ

さくなるため、ケース(b)はすべてSBであった。

タイプSSBは2回にわたって割裂破壊が起きた後、曲げ破壊により崩壊していくものである。第1割裂の後、荷重の急降下が起こるが、残存曲げ抵抗によって、第1割裂荷重を上回るまで荷重が回復し、2回目の割裂が起きる。図7の写真にあるように、第1割裂は拘束板の端近傍で起き、第2割裂はそれより離れた位置で起きる。第2割裂が起きると、荷重が低下するので、第1割裂のき裂は閉じてしまう。この破壊形式SSBは表3に示すように、ケース(b)の試験体に生じ、 $\tan\theta=0.2$ では3体中2体、 $\tan\theta=0.4$ では3体中1体に観察された。 $\tan\theta=1.0$ では上で述べたように、接着層が弱いため耐力の回復が不足し、第2割裂は起きなかった。

ここで、表3に示す σ_s について考察してみる。これは、(5)式に同表の割裂荷重 P_s 、割裂位置 u_s 、試験体寸法等を代入し、 $v=h/2$ として計算したもので、割裂発生点の曲げ応力度(引張最外縁の直応力度)である。 σ_s の値は $\tan\theta=0.2, 0.4, 1.0$ 毎にだいたい同程度の値となっており、その範囲は、それぞれ20~30, 14~19, 6~11MPaである。前出(4)式に表1の材料強度の平均値を代入して、斜め引張強さ(繊維方向から傾斜した方向の引張強さ)を $\tan\theta=0.2, 0.4, 1.0$ について求めると、それぞれ24, 14, 7MPaとなり、 σ_s と同等の値となっていることがわかる。これはテーパー梁の割裂荷重が斜め引張強さから予測できること¹⁾と同じ意味合いを持っている。なぜなら、テーパー梁のテーパー縁と繊維傾斜梁の下縁はいずれも引張応力で目切れ状態になっているからである。

3.4 割裂が起動する最小破壊線長さ

割裂が発生するために必要な破壊線長さはいくらか必要であるかについて検討してみる。想定される破壊線を全長にわたって予め拘束した図3(b)の試験体について、割裂起点が拘束板の端からいくらか離れているかを表3の u_s-d の欄に記載した。この中に、0値をとる試験体が3体あることは重要である。これは、図8に模式的に示すように、拘束板の端から割裂がスタートし、梁幅中央付近のき裂最前線がすぐ隣の晩材手前で停止したことを表している。すなわち、き裂の進行方向に僅か1年輪幅(2mm程度)の破壊線長さがあれば割裂は起動することになる。この場合、き裂の伝播長さは非常に短い、パシッという撥音とともに、荷重-変形曲線においても明瞭な荷重の急降下が観察される。しかしながら、このような拘束下での割裂は、運動的許容状態が満たされない(この場合、

き裂の開口に伴う梁の回転運動が妨げられるので)、き裂はすぐさま停止する。

4. 微視的割裂破壊線

4.1 木材破面のフラクトグラフィ

木材の組織構造については走査型電子顕微鏡(SEM)による解剖学的知見が蓄積されており名著^{8),9)}も刊行されているが、力学的に破壊した組織についてはまだ体系化されていないようである。そこで、鋼構造分野で確立されているフラクトグラフィ¹⁰⁾の手法を用いて木材の破面解析を行うことにする。後述のように、鋼材の破面と類似した形態が観察される。その類似性は、木材と鋼材の組織構造がいずれも単位要素、すなわち木材では細胞、鋼材では結晶粒子により構築されていることに由来していると思われる。

まず初めに、2.2節で説明した縦引張試験、横引張試験、せん断試験、横曲げ試験の破面を100倍(一部500倍)で観察したSEM写真を図9に示す。図9(1)の縦引張試験片の破面には多数の仮道管の横断面が拡がっており、個々の仮道管の内部(内腔)が見える。仮道管は半径方向(R方向)に直線状の列をなして並んでいる。写真中央にある縦の帯状部分は仮道管が密集している晩材で、晩材の幅(厚さ)はおおよそ0.2ミリである。その両サイドは仮道管径の大きい早材部分である。この破面形態を蜂の巣模様(honeycomb pattern)と呼ぶことにする。ただし、蜂の巣は正六角形が規則正しく整列したものであるが、仮道管は五角形や四角形を含むやや不規則な配列である。仮に仮道管を金属(多結晶体)の結晶粒子になぞられると、この蜂の巣模様は金属の延性マイクロ破面で見られるデンプル模様(dimple pattern)¹¹⁾と類似したものと言える。いずれの破壊も、仮道管の管内、結晶粒の粒内で起きている点が共通している。金属ではこの延性き裂を繊維状き裂(fibrous crack)とも呼んでいるが、語義からするとこの用語はむしろ木材に相応しいと言える。同図(2)は早材部分の破面を倍率500に拡大して斜め方向から観察したもので、仮道管の内腔が明瞭に観察される。ところどころに、そろばん玉の形をした有縁壁孔(細胞間で通水の役目をする孔)も見られる。破面がこの壁孔を必ずしも通過していないことから、細胞壁を構成するセルロースマイクロフィブリルと呼ばれるフィラメントとリグニンと呼ばれるマトリックスが壁孔の周辺をしっかりと補強している組織構造¹²⁾が有効に働くものと想像される。これ

(1) 縦引張試験片の破面 (×100)

(2) 縦引張試験片の早材破面 (×500)

(3) 横引張試験片の破面 (×100)

(4) 横曲げ試験片の破面 (×100)

(5) セン断試験片の破面 (×100)

図9 スギ材料試験片のSEM ミクロ破面

は、鉄骨梁が設備配管と干渉する位置でウェブに明けられる貫通孔の周辺を銅板やスリーブ管で補強する形態と似ている。

図9(3)の横引張試験片の破面には、仮道管が縦方向に引き裂かれ、仮道管の内壁が露出している様子が観察される。すなわち、隣り合う仮道管と仮道管を接着している境界層（細胞間層と呼ばれる）は破壊せず、この場合も管内破壊であることがわかる。この破面形態を割竹模様（split bamboo pattern）と呼ぶことにする。これも金属破面と対比すると、脆性ミクロ破面に見られるリバー模様（river pattern）¹¹⁾と類似している。なお、破面のところどころに、小さい孔が1列に並んだ部分があるが、これは放射組織の横断面である。放射組織は仮道管に比べ少量であるので、その力学的寄与は小さいと考えてよいであろう。

図9(4)の横曲げ試験片の破面は、破壊がスタートする引張縁周辺を見たものである。引張縁には、この切断による細胞壁の毛羽立ち状の損傷があるが、破面の形成は引張縁から直ちに割竹模様になっ

ており、上述の横引張と同じである。

図9(5)のせん断試験片（イス型）の破面は、支持側（背側）の破面を初期切込み面を含んで観察したものである、せん断破壊がスタートする縁から直ちに割竹模様になっており、横引張と同じ破壊形態である。

以上のように、スギ材の破面形態は蜂の巣模様と割竹模様に大別され、この破壊形態が破壊強さと相関を持つと考えられる。縦引張と横引張は破壊力学的にはいずれもモードⅠ（開口型）であるが、破面形態に違いがあるため、破壊強さに大きな差が生じるものと考えられる（表1より縦引張強さ65.7MPa、横引張強さ4.74MPa）。一方、横引張と横曲げはモードⅠで、せん断はモードⅡ（面内せん断型）であるが、破面形態は三者とも割竹模様となるので、破壊強さに大差が生じないと考えられる（表1より横引張強さ4.74MPa、横曲げ強さ4.61MPa、せん断強さ5.11MPa）。これはスギに限ったことではなく、せん断強さ（板目面）と横引張強さ（半径方向）は

(1) 割裂破壊起点周辺の側面

(2) 割裂破壊起点周辺の破面

図10 繊維傾斜梁の割裂破壊起点周辺のマクロ観察

a: 初期き裂（蜂の巣模様）

b: 蜂の巣模様から割竹模様への移行部

c: 脆性き裂（晩材側）

d: 脆性き裂（早材側）

図11 繊維傾斜梁の割裂破壊のSEM ミクロ破面

多くの木材で同等の値をとる。

さて、本稿で問題としている繊維傾斜梁の破面を観察してみる。繊維傾斜が0.2の梁の破壊起点を少し拡大した概観を図10に、その中にSEM観察点を記号a, b, c, dで示し、対応するSEM写真（倍率100）を図11に掲載した。まず、図10を見ると、破壊は晩材Lが梁の引張下縁と交差する鈍角側の早晩材境界から発し、当該早材層Eをき裂が横断しつつ、少しずつ隣の晩材L'の方向に向きを変え、最終的に晩材L'と早材Eの境界を伝播していることがわかる。このような伝播経路はすべての繊維傾斜梁に観察された。初期き裂が晩材L'を貫通できないのは、表2で見たように、晩材の引張強さが早材よりずっと大きいと考えられる。図11の写真aは初期き裂の破面で蜂の巣模様となっており、仮道管の横断面が破壊したことがわかる。写真bはき裂が向きを変える位置を観察したもので、破壊形態が蜂の巣模様から割竹模様に移り変わっている。写真cは早晩材の境界を走るき裂破面の晩材側を見たもので、写真dは早

材側を見たものである。この部分は割竹模様となっているが、破壊した仮道管の細胞壁のヒダが早材側に多く残っていることから、相対的に強固な晩材側が弱い早材側を剥ぎ取ったと推定される。

このように、繊維傾斜梁の割裂破壊の様式が蜂の巣模様から割竹模様に移行する様子は、鋼構造の脆性破断が延性き裂（ディンプル模様）から脆性き裂（リバー模様）に移行する形態¹¹⁾とそっくりである。鋼構造の場合、延性き裂は応力三軸度が高くひずみが集中する箇所（ホットスポットと呼ばれる）に選択的に発生し、その後、荷重と変形が増大する過程で延性き裂が成長し、最終的に、延性き裂がある限界サイズに達した瞬間に脆性き裂に転化して脆性破断することが知られている¹¹⁾。このことを木材に当てはめると、ホットスポットは図10の晩材が引張縁と交差する箇所の鈍角側の早晩材境界にあると考えられ、ここに蜂の巣模様を呈する繊維状破壊が生じて初期き裂となる。次に、この初期き裂が晩材境界付近まで成長したところで、割竹模様を呈する脆性破壊に転化し、一気にき裂が伝

播するのではないかと想像される。しかしながら、今回の実験では初期き裂の発生から脆性き裂への転化に到るまでに荷重や変形の増加があるのかどうかについては確認できなかった（目視と聴覚ではき裂発生と伝播は同時としか捕えられなかった）。このことは、破壊力学的には重要であるので、センサーの開発も含めて、今後の課題となるであろう。仮に、初期き裂の発生が直ちにき裂の急激な伝播を引き起こすとすれば、き裂を前提とする破壊力学は通用しないことになる。逆に、初期き裂の発生後、荷重が増加してから不安定破壊に到るとすれば、破壊荷重（割裂荷重）は破壊力学で説明できることになる。

4.2 早晚材から成る積層梁としての応力

上で見たように、繊維傾斜梁では、晩材が梁の引張縁と交差する位置の鈍角側にある早材からき裂がスタートし、早材を横切った後、晩材との境界を伝播することが分かった。これは、早材と晩材の力学的性質の違いがそのような破壊線を支配していると考えられる。そこで、早材と晩材が層を成している積層板として梁の応力解析をFEM⁷⁾で行った。早晚材はとりあえず均質等方とし、ヤング係数は表2の値、ポアソン比は0.4とした。 $\tan\theta=0.4$ の場合について梁の下縁近傍の応力分布状況を図12に示す。これは破壊に最も大きな影響をもたらす繊維直交方向の応力度 σ_y の大きさを濃淡で表したものである。図のA点に応力集中が見られ、そこから斜め右上方に応力レベルの高い領域が観察される。逆に、鋭角側のB点では応力は小さい。また、図13にAB線上の直応力度 σ_u の分布を示す（このときの荷重は表3の無拘束での P_s の平均値とした）。グラフの横軸の原点がA点に対応しており、カーブの右端の横座標がB点である。 $\tan\theta$ が0.2、0.4、1.0いずれの場合もA点に大きな応力が生じており、ここからき裂が生じる力学的必然性が確認される。

5. 結論

材軸に対して繊維を傾斜させたスギ材梁の曲げ実験を行い、割裂破壊線と破面形態について調査した。主な結果は次の通りである。

(1)き裂の進行方向に障害物を設けない完全フリーパス（free path）の場合、引張下縁に発生するき裂が直ちに圧縮側まで伝播し、梁は一瞬にして破断する。(2)完全フリーパスの場合に生じた破壊線の全域を合板接着で拘束しても、合板の端から離れた位置から割裂が生じる。このとき、1年輪幅すなわち2mm程度の破壊線が確保されていれば割裂が起こりうる。すなわち、割裂に必要な最小起動長さは1年輪幅相当である。ただし、き裂は合板の拘束によって直ちに停止し、その後、曲げ破壊に移行する。その曲げ破壊抵抗の過程で第1割裂荷重を超えた場合、合板の端からさらに離れた位置から第2割裂が起こりうる。(3)完全フリーパスの場合も拘束されている場合も、割裂が起動するとき、き裂発生点の応力は直交異方材料の破壊条件として知られているTsai-Hill式を概ね満たしている。(4)割裂破壊の起点ではマイクロ破面形態が蜂の巣模様であるが、晩材に沿ってき裂が進行する部分では割竹模様に移行する。蜂の巣模様は縦引張試験片の破面に見られるもので、割竹模様は横引張およびせん断試験片の破面に見られるものである。(5)早材と晩材のヤング係数と引張強さには大きな違いが見られ、それが割裂破壊点の微視的な位置および破壊線の経路に影響を与えている。

図12 梁下縁近傍の応力分布状況 ($\tan\theta=0.4$)

図13 梁下縁早材の直応力度分布（破壊荷重時）

謝辞

本稿の有限要素解析において加藤太一君（東京大学大学院学術研究支援員）の協力を得た。

参考文献

- 1) 桑村 仁：テーパー木梁の破壊荷重から導かれる木材の割裂条件－鉄骨木質構造の研究 その4－，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第641号，pp.1295-1302，2009.7.
- 2) 桑村 仁：円孔内圧による木材の割裂－鉄骨木質構造の研究 その5－，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第647号，pp.175-184，2010.1.
- 3) 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－（第4版），東京，2006.
- 4) 桑村 仁：くさび押込み試験による木材の割裂補強の研究－鉄骨木質構造の研究 その2－，日本建築学会構造系論文集，第73巻，第632号，pp.1779-1786，2008.10.
- 5) 林 毅：直交異方性板の弾性係数と剛性に就て，日本航空学会誌，第8巻，第79号，pp.1131-1156，1941.11.
- 6) 倉西正嗣：弾性学（機械工学講座Ⅲ-3），日本機械学会，p.587，1948.12.
- 7) ABAQUS, Inc.: ABAQUS (ver. 6.9) Analysis User's Manual, Pawtucket, RI, USA, 2006.
- 8) 島地 謙ほか：木材の構造（木材の科学-1），文永堂，2002.3.
- 9) 佐伯 浩：走査電子顕微鏡図説－木材の構造－，日本林業技術協会，1982.8.
- 10) 北川英夫，小寺沢良一：フラクトグラフィ（破壊力学と材料強度講座-15），培風館，1979.4.
- 11) 桑村 仁：鋼構造の性能と設計，共立出版，p.275，2002.11.
- 12) 古野 毅，澤辺 攻：木材科学講座2 組織と材質，海青社，1994.4.

注

注1) 桑村 仁：鉄骨木質構造の発展に向けた木材の割裂に関する研究（その10. スギ材の破壊強さとフラクトグラフィ），（その11. 繊維傾斜梁の応力解析と破面解析），（その12. 繊維傾斜梁の破壊線と割裂強さ），2009年度日本建築学会関東支部研究報告集，2010.2.

（2009年10月6日原稿受理，2010年1月8日採用決定）