

静的くり返し曲げ荷重を受けた木材の力学的な挙動 と細胞壁の観察

北原, 龍士
九州大学農学部

堤, 壽一
九州大学農学部

松本, 昴
九州大学農学部

<https://hdl.handle.net/2324/19410>

出版情報 : 木材学会誌. 27 (1), pp.1-7, 1981. 日本木材学会
バージョン :
権利関係 :



静的くり返し曲げ荷重を受けた木材の 力学的な挙動と細胞壁の観察^{*1}

北原龍士^{*2}, 堤 壽一^{*2}, 松本 勲^{*2}

Observations on Cell Wall Response and Mechanical Behaviour in Wood Subjected to Repeated Static Bending Load^{*1}

Ryushi KITAHARA^{*2}, Juichi TSUTSUMI^{*2}
and Tsutomu MATSUMOTO^{*2}

Although many papers and reviews on the mechanism of fracture in wood have been reported by a number of researchers, there are still problem areas. Hence, the purpose of this study is to investigate: 1) the microscopic failure in the wood cell wall, which is due to repeated bending load, 2) the effects of loading levels on cell wall damage, and 3) the relationship between the cell wall damage caused by loading and the mechanical behaviour of wood.

The cell walls of the wood specimens were continuously observed during repeated bending, employing the techniques of scanning electron microscopy with filmy (acetyl cellulose) replica method. The test specimens were prepared from SUGI (*Cryptomeria japonica* D. Don)-wood and were conditioned to 12% M.C.

The results of the electron microscopic observations are summarised in Table 1. The wood subjected to bending loads less than the proportional limit exhibited microscopic crease-like compression failures (Fig. 3). These occurred to a slight degree in the cell walls in earlywood on the compression side of the wooden beams. These microscopic compression creases in cell walls were very closely correlated to the residual deformation of wood.

静的な単一の曲げ荷重と、くり返し曲げ荷重を受けた木材はりにについて、1)荷重を受けているときに生じる木材の細胞壁の変形、2)荷重が取り除かれたあとの細胞壁の変形の回復状態について、走査電子顕微鏡による観察を行った。さらに、3)荷重を受けたとき木材細胞壁に生じたmicroscopicな破壊と、木材の力学的挙動との関係についても検討を加えた。

木材が比例限荷重よりもはるかに小さな曲げ荷重を受けたときでも、木材はりの圧縮側縁面の早材部細胞壁にわずかながらシワ状の変形を残し、すでに細胞壁の破壊が始まっていることが認められた。また、この除荷後にも認められる細胞壁のシワは、木材の残留変形と密接に関係することがわかった。

1. ま え が き

静的な力を受けた木材の組織上の変化を木材内部に生じた応力あるいはひずみに関連づけた研究は、今までのところ必ずしも十分であるとは言いがたい。しかし、す

で1920年代に、Robinson¹⁾は力を受けた木材の挙動が、細胞壁の構造、細胞の形、さらに細胞の配列と密接に関係していることを示唆した。また、Dinwoodie²⁾は木材の物理的および力学的性質を検討するとき、木材の組織・構造をmacroscopic, microscopic, sub-microscopicおよびchemical (あるいはultrastructure)の4段階に分け、これらと関連づけて考えることを提唱した。

さて、木材の破壊機構について、これまでになされてきた数多くの研究が、佐伯³⁾や渡辺⁴⁾によって詳しく述べられている。そこでは、木材細胞内の破壊、木材細胞

^{*1} Received May 27, 1980. この研究のあらましは、第26回日本木材学会大会(1976年4月、静岡)で発表した。

^{*2} 九州大学農学部 Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

間の破壊, さらに細胞から細胞へと組織内を多数の細胞群にまたがって存在する破壊が指摘されている。そのような多くの研究の結果, 木材破壊に関することながら次第に明らかになり, 木材の破壊と木材細胞壁の破壊とのかかわりが論議されはじめたにもかかわらず, まだ未解決の部分が広く残されている。なお, この研究において“木材の破壊”とは, 木材が外力に対して抵抗できる最大応力を生じたときから起こるさまざまな結果をさし, その代表的なものとして木材の構造のmacroscopicな破壊をあげることができる。一方, “細胞壁の破壊”は, 木材が破壊しているとは実際の場合考えられないほど小さな荷重の範囲でさえも, 顕微鏡では認めることができるような破壊, すなわちmicroscopicな破壊を意味する。たとえば, 顕微鏡レベルで細胞壁に認められるような, 引張りによる破断のほか, シワなどの圧縮破壊をあげることができる。

これらのことから, この研究では, 木材に与えられる荷重の変化に対応した木材細胞壁の局所的な変形や破壊が, 木材の変形や破壊とどのように関係しているかについて, 走査電子顕微鏡による観察と力学的な挙動の両面から検討を行った。すなわち, 静的な単一の曲げ荷重と, くり返し曲げ荷重を受けた木材はりについて, 1) 荷重を受けているときに生じる木材細胞壁の変形, 2) 荷重が取り除かれたあとの細胞壁の変形の回復の状態について観察を行った。さらに, 3) 荷重を受けたとき木材細胞壁に生じたシワと, 木材としての残留変形との関係についても検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 試験片

伐採のあと長期間にわたって室内に放置され, 十分に気乾状態に達したスギ材の成熟材部から, 長さ320 mm, 幅(はり幅)20 mm, 厚さ(はりせい)10 mm, つまりはりの長さ方向が繊維方向で, 荷重面がまき目面になるような曲げ試験片を作った。このとき, 長さ方向に隣りあって連続した2本組の試験片を作り, 一方を供試用試験片とし, 他方を対照材試験片とした。それは, 供試用試験片の力学的な性質を, 対照材試験片の静的曲げ試験によって推定するためである。

2.2 静的な単一の曲げ荷重とくり返し曲げ荷重の与え方

曲げ荷重は, オルセン型強度試験機を使い, Fig. 1に示すように, 4点荷重として与えた。なお, スパン中央における曲げたわみ速度(dy_s/dt)は, 2.26 mm/分であった。

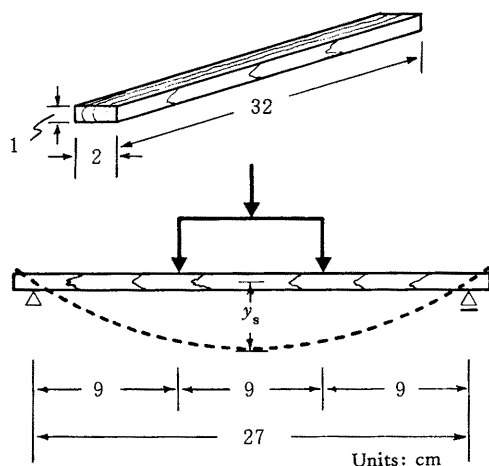


Fig. 1. Dimensions of bending test specimen and the method of loading.

2.3 木材細胞壁の観察

曲げ試験片のスパン中央部の圧縮側と引張り側の両縁面で, 木材細胞壁の電子顕微鏡による観察を行うために, 試験片が曲げ荷重を受けているとき, および荷重が取り去られたあと, すなわち実験の進行にともなって必要なとき, 試験片表面の形どりをを行った。形どりには電子顕微鏡観察用レプリカ作成に使われるアセチルセルロース・フィルムを使った。

なお, 試験片製作の過程, およびその他の原因によって細胞壁の破壊が生じていないことを確かめるために, 試験片を実験に供する前に, 試験片表面の細胞壁の状態を走査電子顕微鏡によってチェックして, 以後の観察に支障がないことを確かめた。

2.4 残留たわみとその回復の測定

静的な単一の曲げ荷重, あるいはくり返し曲げ荷重を与えたあと, 試験片を試験機から取りはずして無負荷の状態とし, 残留たわみが回復してゆく経過を約100日間にわたって, 1/1000 mm読み取りのコンパレーターを使って測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 木材細胞壁の走査電子顕微鏡による観察

3.1.1 曲げ荷重が取り除かれたあとののはりの圧縮側曲げ破壊係数の0.95に相当する荷重をくり返し5回与え, 荷重を取り除いたあとには, Fig. 2に示すように, 細胞壁に著しい変形が残っている。

一方, 破壊係数の0.3に相当する小さな曲げ荷重を15回くり返し与えたとき, 荷重を取り除いても, Fig. 3に示すように, 早材部の細胞壁にはシワ状の変形を残している。この変形は, 大部分が塑性変形とみなしてもよい。

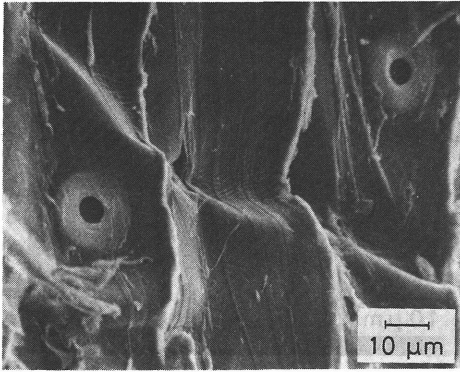


Fig. 2. Gross microscopic creases in the cell walls on the compression side of the wooden beam after the 5th of repeated bending loads (0.95 of the breaking load). Scanning electron micrograph of a micro-tomed radial-longitudinal surface.

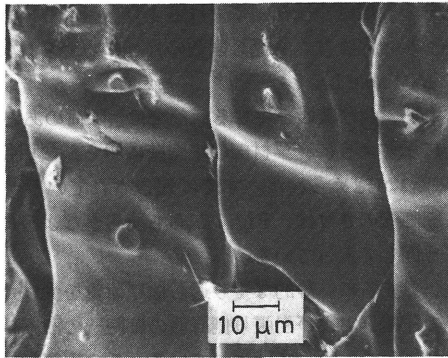


Fig. 3. Mild microscopic creases in the cell walls on the compression side of the wooden beam after the 15th of repeated bending loads (0.3 of the breaking load). Scanning electron micrograph of a filmy replica radial-longitudinal surface.

であろう。なお、木材が静的な縦圧縮荷重を受けたとき、比例限以上の荷重で細胞壁にシワを認めることは、すでに Wangaard⁵⁾によって指摘されているが、破壊強さのほぼ 0.3 に相当する荷重のもとで、Dinwoodie⁶⁾によってもこの圧縮によるシワが認められている。これらのことを考え合わせると、木材細胞壁の圧縮による microscopic な破壊(シワ)は、荷重～変形曲線図の直線域の範囲内の荷重、すなわち比例限荷重よりもはるかに小さな荷重レベルのもとでも生じ得るとされるであろう。

ところで、前述のように、破壊係数の 0.3 に相当する曲げ荷重を 15 回与えたとき、早材部の細胞壁にシワを残したのに対し、ただ 1 回の荷重を与えたあとでは、細胞壁にシワ状の変形を認めることができなかった (Table

1)。

3.1.2 曲げ荷重を受けているときのはりの圧縮側

破壊係数の 0.3 に相当する第 1 回目の曲げ荷重を加えている状態では、曲げの圧縮側縁面の早材部の細胞壁に、シワ状の変形をわずかに生じていた (Table 1)。一方、破壊係数の 0.6 に相当する荷重を与えると、第 1 回目の負荷で、Fig. 4 に示すように、試験片の圧縮側縁面の細胞壁に明らかなシワが認められた。このようなことから、破壊係数の 0.6 をこえて荷重を与えると、与える荷重の荷重レベルの上昇とともに、最初の負荷のもとでも、試験片の圧縮側縁面の細胞壁に極めて著しい破壊を受けることになる (Table 1)。また、Dinwoodie⁶⁾は圧縮強さの 0.65 以上に相当する縦圧縮荷重のもとで、いわゆる cell wall dislocation が細胞壁に残されるとともに、その数も著しく増えることを報告している。なお、Dinwoodie⁶⁾は cell wall dislocation を、シワや slip plane を含む意味で用いている。

いずれにしても、木材にくり返して曲げ荷重を与えると、荷重のくり返し回数が増えるにもなって、小さな荷重レベルのもとでも、試験片の圧縮側縁面の早材部細胞壁にシワが認められることがわかった。破壊係数の 0.6 をこえて荷重を与えると、荷重のくり返し回数の影響が、著しくなる傾向にあり、Fig. 5 に示すように、細胞壁に極めて著しいシワが認められた。

もちろん、破壊係数の 0.6 をこえて荷重を数回与えたあと、荷重を取り去ったあとには、Fig. 6 に示すように、細胞壁に明りょうなシワが残されている。

ところで、木材が比例限荷重をこえて荷重を受けるとき、試験片の圧縮側縁面の早材部細胞壁では、著しい破

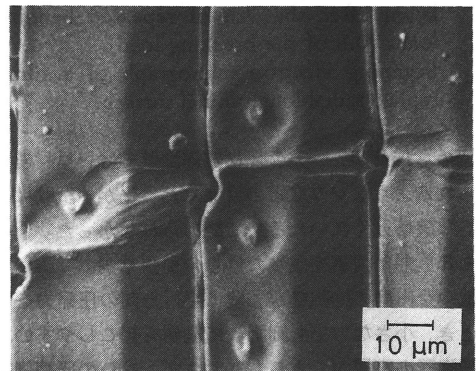


Fig. 4. Obvious microscopic creases in the cell walls on the compression side of the wooden beam under the 1st of repeated bending loads (0.6 of the breaking load). Scanning electron micrograph of a filmy replica radial-longitudinal surface.

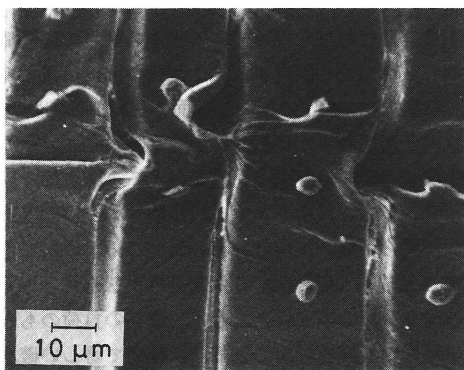


Fig. 5. Serious microscopic creases in the cell walls on the compression side of the wooden beam under the 7th of repeated bending loads (0.9 of the breaking load). Scanning electron micrograph of a filmy replica radial-longitudinal surface.

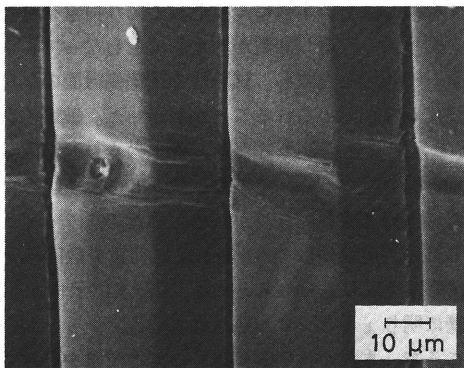


Fig. 6. Typical microscopic creases in the cell walls on the compression side of the wooden beam after the 7th of repeated bending loads (0.6 of the breaking load). Scanning electron micrograph of a filmy replica radial-longitudinal surface.

壊が認められたが、一方、晩材部細胞壁では、早材部に認められるようなシワなどの目立った変化が、試験片の最終的な破壊近くにいたるまで認められなかった。

3.1.3 曲げ荷重を受けたはりの引張り側

薄壁中空円筒の細胞壁が、壁に平行方向の圧縮力を受けるとき、小さな力でも細胞壁に座屈を起こしやすい。この細胞壁の座屈が、とりもなおさず、はりの圧縮側縁面の細胞壁のシワと結びつくと考えられる。一方、引張り側縁面の細胞壁では、圧縮側と異なった破壊の機構が働き、細胞壁に平行方向の引張り力によって破断を生じ、これにはシワを作るよりも大きな力を必要とするであろう。このようなことから、はりの引張り側縁面に現われ

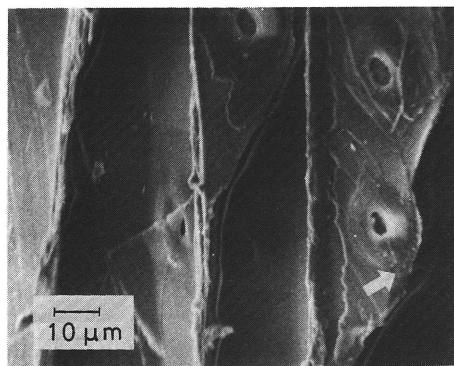


Fig. 7. Crack, which is indicated by an arrow, in the cell wall on the tension side of the wooden beam after the 5th of repeated bending loads (0.95 of the breaking load). Scanning electron micrograph of a micro-tomed radial-longitudinal surface.

る細胞壁の破壊は、圧縮側におけるよりも、より大きな荷重レベルと大きくなり返し回数のときに認められるようになる (Table 1)。

すなわち、曲げ破壊を生じる直前では、除荷のあとも、Fig. 7 に示すように、早材部の細胞壁に明らかな引張り破壊 (破断) が認められた。すでに報告されている^{7,8)}ように、細胞壁のさけは、Fig. 7 から明らかなように、壁孔をう回して入っている。

以上、要するに、静的なくり返し曲げ荷重を受けた木材はりの圧縮、および引張り側縁面の細胞壁の観察結果が、Table 1 に一括して示されている。この観察結果から、木材中に生じる応力の種類と大きさが、細胞壁の変形や破壊に著しい関係を持っていることが認められる。

3.2 残留たわみとその回復

木材組織の観察の結果、破壊係数の 0.3 に相当するような小さな曲げ荷重であっても、荷重が加えられているとき、圧縮側縁面の細胞壁にわずかながらシワ状の変形を認めることができ、負荷のくり返し回数の増加および荷重レベルの増大にともなって、除荷のあとも、細胞壁にシワを残すようになった。したがって、この除荷後にも認められる細胞壁のシワは、残留たわみと密接に関係することが推定できる。

ところで、負荷と除荷がくり返し行われたあとの木材の残留変形については、これまでも報告されている^{9~13)}が、くり返し荷重を受けた木材の残留変形と木材細胞壁の破壊とのかかわりについては、ほとんど明らかにされていない。

さて、第 1 回目の曲げ荷重を受けたあと、スパン中央

Table 1. Electron microscopic observations on the cell wall in wood subjected to repeated static bending loads.

P_{sn}/P_b	n	Under loading		After unloading	
		Comp.	Tens.	Comp.	Tens.
0.3	1	±	—	—	—
	3	±	—	—	—
	7	±	—	—	—
	12	±	—	—	—
	15	+	—	+	—
0.6	1	+	—	±	—
	3	+	—	+	—
	7	+	—	+	—
0.7	1	+	—	—	—
	3	+	—	+	—
	7	+	±	+	—
0.8	1	+	±	+	—
	3	+	±	+	—
	7	+	±	+	±
	12	+	±	+	±
0.9	1	+	+	+	—
	3	+	+	+	±
	7	+	+	+	±
0.95	1	+	+	+	±
	3	+	+	+	±
	5	+	+	+	+

P_{sn} : the repeated static bending loads applied to test specimen.

P_b : the breaking load determined in a static standard bending test.

n : the number of repeated bending loads.

Comp.: on the compression side of the wooden beam.

Tens. : on the tension side of the wooden beam.

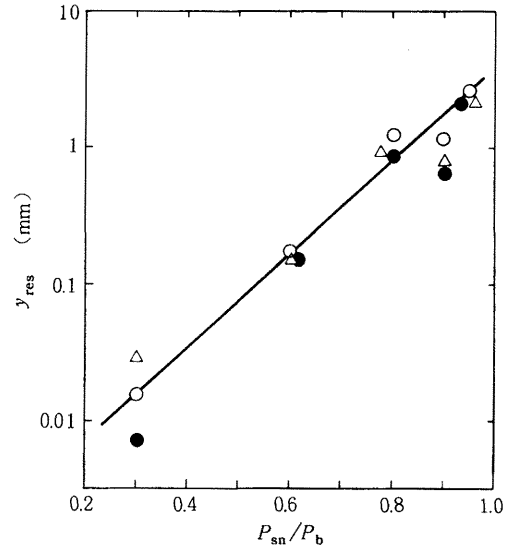
+: some change in appearance of the cell wall was obviously observed.

±: it is difficult but possible to observe the changes in appearance of the cell wall.

—: no change in appearance of the cell wall was observed.

の位置でもとめた残留たわみ量 y_{res} と荷重レベル P_{sn}/P_b との関係を示したのが Fig.8 である。破壊係数の 0.3 に相当する小さな荷重においても、つまり比例限荷重よりもはるかに小さいと考えられる荷重であっても、わずかながら残留たわみを認めることができた。

なお、残留変形は、小さな圧縮荷重によっても認められることを、北原¹⁰⁾や沢田¹¹⁾が報告しているが、後者は断片的にふれる程度であり、また前者は実験にあたって、光学顕微鏡観察に用いた切片の作成に問題点を含み^{14,15)}、荷重を受けることによって生じた細胞壁の破壊と、残留変形とのかかわりとを正しく説明するには無理

Fig. 8. Effect of the levels of applied load (P_{sn}/P_b) on the residual deflection (y_{res}).

The number of repeated bending loads (n): 1.

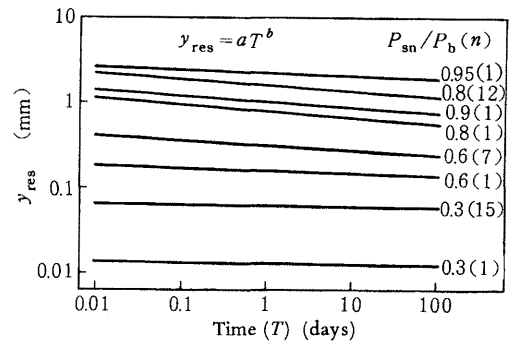
After unloading; ○: 0.01, ●: 7, △: 14 (days).

P_{sn} : the repeated static bending loads applied to test specimen.

P_b : the breaking load determined in a static standard bending test.

があるように思われる。

つぎに、残留たわみの回復を 100 日間にわたって測定し、その結果を Fig.9 に示している。それぞれの直線 ($y_{res} = aT^b$, T : 日数, a : 定数) の傾き b , すなわち残留たわみの回復の速さをもとめ、さらに傾き b と荷重レベルとの関係を Fig.10 に示している。すなわち、図中の横軸 P_{sn}/P_b で示した荷重レベルが大きくなるにとも

Fig. 9. Residual deflection (y_{res}) as a function of time (T).

a : the constant,

b : the gradient of straight line.

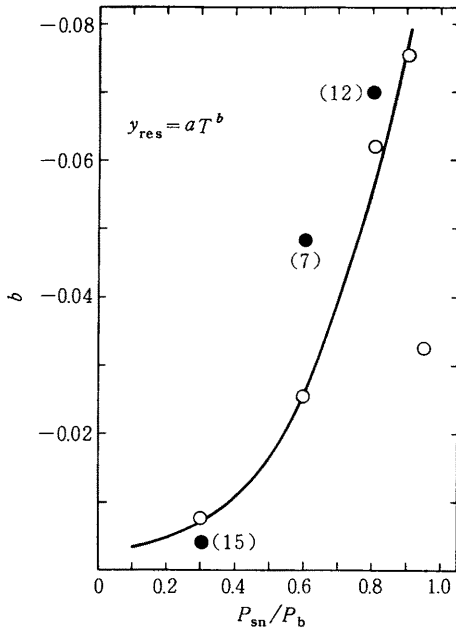


Fig. 10. Effect of the levels of applied load (P_{sn}/P_b) on b representing the velocity of residual deflection recovery.

b : the gradient obtained from the straight line shown in Fig. 9.

The number of repeated bending loads;

○: 1, ●: (n).

なって、 b の値は急激に大きくなる傾向がある。また、荷重レベルが0.95では、それ以下の荷重レベルにおける場合は不連続的に、 b の値が急に小さくなっている。このことは、木材の組織の破壊が極めて著しくなったことから、残留たわみの回復を起こすだけの反発力を減少したためと考えられる。

さて、残留変形を持つはりの状態を模式的に Fig. 11 で示す。図に示すようなシワと変形が木材中に生じたとき、シワや変形をもとの状態にもどそうとする仕組みが働く。すなわち、図に示すような引張り側変形の回復が、圧縮側のシワや変形の回復をうながす結果となる。つまり、この現象が残留変形の回復を起こす原因の一つとして働くことが考えられよう。

ところで、北原¹⁰⁾や Kellogg^{12,13)}によると、残留変形を生じる原因は、木材が力を受けることによって、木材を構成する主要成分のセルロース分子に配列の変化を起こさせることにあるとしている。さらに、Kollmann¹⁶⁾は木材が力を受けたことによって生じる木材組織の微細構造の変化にその原因をもとめ、粘弾性的な観点から説明を試みている。しかし、この研究の結果、比例限荷重よりもはるかに小さな荷重であっても、細胞壁にわずか

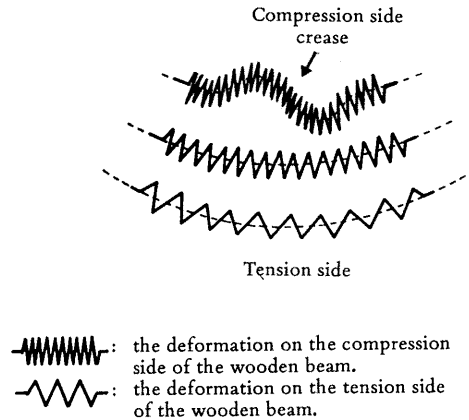


Fig. 11. Schematic illustration of the condition of the wooden beam containing residual deflection.

ながらシワ状の変形を残し、すでに細胞壁の破壊が始まっていることを実験的に確かめることができた。つまり、光学顕微鏡によっても認められるような構造の範囲での検討をも、あわせて行うことが必要と考える。

4. 結 論

木材が比例限付近の曲げ荷重を受けたとき、木材はりの圧縮側縁面の細胞壁に著しいシワを認め、荷重を取り去ったあとも、細胞壁に明らかなシワを残した。一方、比例限荷重よりもはるかに小さな荷重でも、早材部の細胞壁にわずかながらシワ状の変形を残し、すでに細胞壁の破壊が始まっていることがわかった。このようなことから、木材の変形や破壊は、木材細胞壁の局所的な変形や破壊と密接に関係づけて論じなければならないと考えられる。

(この研究の一部は、昭和50年度文部省科学研究費総合研究(A)(代表者: 東大・農・杉山英男教授)によって行われた。)

文 献

- 1) W. Robinson: *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **B210**, 49 (1920)
- 2) J. M. Dinwoodie: *J. Microscopy*, **104** (1) 3 (1975)
- 3) 佐伯 浩: 材料, **22**(241)894 (1973)
- 4) 渡辺治人: "木材理学総論", 農林出版, p.522 (1978)
- 5) F. F. Wangaard: "The Mechanical Properties of Wood", John Wiley and Sons, Inc., N.Y., p. 120 (1950)
- 6) J. M. Dinwoodie: *J. Inst. Wood Sci.*, **21**, 37 (1968)

-
- 7) H. Garland: *Ann. Missouri Bot. Gard.*, **26** (1) 1 (1939)
 - 8) 古川郁夫, 佐伯 浩, 原田 浩: 材料, **24** (264) 855 (1975)
 - 9) W. J. Kommers: U.S. For. Prod. Lab. Rep. 1320, Madison (1943)
 - 10) 北原覚一, 蕪木自輔, 村木正男: 東大農演報, 47 号, 1 (1954)
 - 11) 沢田 稔: 林試研報, No.108, 115 (1958)
 - 12) R. M. Kellogg: *For. Prod. J.*, **8**, 301 (1958)
 - 13) R. M. Kellogg: *ibid.*, **10**, 586 (1960)
 - 14) J. M. Dinwoodie: *Nature*, **212**, (5061) 525 (1966)
 - 15) C. T. Keith and W. A. Côté Jr.: *For. Prod. J.*, **18**, 67 (1968)
 - 16) F. F. P. Kollmann and W. A. Côté Jr.: "Principles of Wood Science and Technology 1, Solid Wood", Springer-Verlag, Berlin, p. 315 (1968)