

木材の引張クリープにおける破壊時間依存性

藤田 晋輔^{※1}・高橋 徹^{※1}・桜井 敏夫^{※1}

Shinsuke FUJITA,^{※1} Akira TAKAHASHI,^{※1} and Toshio SAKURAI^{※1}

On the Time-Dependence of Fracture in Tensile-Creep of Wood

1. 緒 言

木材の乾燥に際して乾燥応力が発生する。この乾燥応力の発生起因には乾燥過程の不均等な水分分布にもとづく木材の収縮差および組織相互間の収縮差があげられる。しかも、この乾燥応力は長時間木材中に存在し、木材にクリープおよび緩和現象をひきおこす。よって、乾燥応力によるひずみの経時変化は水分非平衡下のクリープおよび応力緩和のレオロジー現象と密接な関係にある。

一方、乾燥応力により発生する乾燥割れを水分非平衡状態下のクリープ破壊におきかえ究明することは乾燥割れの研究を進めるにあたり妥当と思われる。そこで、この報告は水分非平衡下のクリープ破壊を検討するための基礎として、まず水分平衡状態下における引張クリープの破壊時間について、確率過程論を利用して、検討した。

2. 破壊現象に関する理論⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾

2. 1. 破壊現象の特徴

一般に、破壊とは応力により物体が二つ以上に分離する現象である。機械的破壊あるいは絶縁破壊などの破壊現象は非再現性、時間的な大きなバラツキなどのいくつかの特徴があり、“破壊現象とは統計的な物理現象である”と定義されている。

破壊強さの観測は物質構成部分の平均強さでなく、最も弱い構成部分である。したがって、測定データから破壊現象の本質を究明することは困難なことである。

ガラスの割れ目発生位置は必ずしも最大の応力点とは一致せず、観測された割れ目の個数は単純な Poisson⁽¹⁵⁾分布にしたがう。すなわち、ガラスにどの程度の応力を

加えたときに、どこにどれだけの割れ目が発生するかは全く確率だけの問題となる。同様に、木材の場合、何らかの力学的な実験条件（実験装置、木材の方向と不均質性など）によって、木材のどこにひずみが集中して、やがてそれが増大して木材の破壊発生点となることが光弾性皮膜法による観察から理解出来る。

巨視的にはほぼ一定と考えられる測定条件のもとでも、破壊強さや破壊時間は著しい変動をとまなうために、物質固有値とみなせないもので、統計的な物理量として、定義する必要がある。

このように内部に存在する割れ目や欠陥の空間的分布および材質の不均質性が直接実験結果に反映する。すなわち、破壊現象は微視的变化が急激に拡大して巨視的变化を生じ測定値に反映する。この場合、固体の破壊強度とその弱点の破壊強度と応力集中の関係を知れば、弱点の分布から破壊強度の変動を統計的に推定することが出来る。

2. 2. 破壊までのクリープ時間

個々の試片がほとんど同じ性質（比重、弾性係数）をもっている場合でも、破壊強度や破壊までのクリープ時間は大きなばらつきをもつ。このことはガラス、金属、⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾木材等について指摘されている。

以上述べたように、ガラス、金属および木材などのぜい性破壊においては破壊強度の寸法効果が統計現象として極値論より説明される。⁽¹⁰⁾

一方、破壊現象が時間依存性（荷重速度による強度値の変化、クリープ破壊における荷重と時間の関係など）であり、また確率過程論によりクリープ破壊時間の統計処理でよく説明されている。⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

破壊までのクリープ時間は通常の静的破壊強度よりもはるかに大きいばらつきがある。この破壊時間のばらつきは著しい特徴的な変数分布を示している。平田らによ

※1 木材加工学研究室
Laboratory of Wood Science and Engineering

れば、ガラスの割れ目の発生の時間分布は正規分布をもち、指数関数的に単調に減少する。

このように、破壊の時間依存性は確率過程理論でまず平田により取り扱われ、横堀、堀、角谷などによりガラス、金属、コンクリート、木材などの固体材料が検討された。

いま、負荷開始時を原点にとり確率過程より

- $m(t)$: 時刻 t において破壊の発生する確率
- $q(t) dt$: 割れ目が t と $(t+dt)$ の間に発生する確率
- $P(t)$: 割れ目が発生するまでの時間のおくれが t より大となる確率 (すなわち、 t まで割れ目が発生しない確率)

とすれば、時間 t まで割れ目が発生しないで、次の dt 時間内にはじめて割れ目の発生する確率は

$$P \cdot m dt \quad (1)$$

であり、また、これは $-dp$ に等しいから

$$P \cdot m dt = -dp \quad (2)$$

したがって、

$$m = -d(\log P)/dt \quad (3)$$

一方、定義によって、

$$P(t) = \int_0^t q(t) dt \quad (4)$$

$$P(0) = 1 \quad (4')$$

であるから、試片総数を N_0 とすれば、

$$N_0 P(t) = N_0 \int_0^t q(t) dt \quad (5)$$

となる。そこで、 $N_0 P$ の対数を時間 t に対して、プロットすれば、その傾斜の符号を逆にしたのが、 m をあらわすことになる。

今、ガラスについての実験結果から $\log N_0 P(t)$ は t に対して直線となる。すなわち、一定荷重の場合には m が t に関せず一定である。荷重の増加にしたがって、 m は急激に増加し、破壊に要する時間 t も急激に減少する。ここで、ガラスの場合には破壊までの伸びがほとんど無視される。これに対し、金属や木材には破壊までかなりの伸びがある。金属における m の値は破壊まで一定でなく、時間経過とともに漸増する。(logp-t 曲線のこう配が増す。) 一方、高分子の m の変化は金属同様と推測されている。⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾

ところで、確率 m は割れ目ないシクラックの平均発生速度に相当する。(時間の単位によっては単位時間あたり 1 より大きくなってよい。)

この m の式は上述した確率過程から理解出来ない。これは破壊の種類、形式、材料組織学、その他の面から明らかにすべきものである。

3. 供試材料と実験方法

3.1. 供試材料

材料は厚さ 0.16mm のスギ *Cryptomeria japonica* D. Don) スライスド単板 (柎目板) である。試料の形状は厚さをのぞいて、JIS 規格に類似の横引張試験体である (Fig.1)。

試料の作成にあたっては年輪走向が荷重方向に対して直角となるようにした。実験以前に比重、含水率をチャックの余剰部分で測定し、平均値に近い試料をそろえて実験供試片とした。

3.2. 実験方法

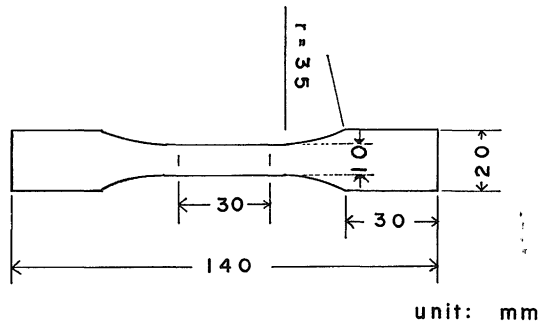


Fig. 1. Shape and dimension of test specimen

3.2.1. 横引張強度

破壊までのクリープ時間を測定するに先だて、クリープのための荷重を決定するために、静的横引張試験をおこなった。試料は全試料中から任意に30枚をとり出し、Fig. 1の直線部分についておこない、その結果を算術平均した。試験機は新興通信工業KK製 TOM-5000 D型万能引張・圧縮試験機である。引張速度は 2mm/min. である。試料の寸法測定には読取顕微鏡 (幅) および安立電気KK製差動電子式マイクロメータ (厚さ) を使用した。試験はすべて 20°C, 60% R.H. の恒温恒湿実験室においておこなった。

3.2.2. クリープ試験

実験装置は Photo. 1 に示す。天秤 (精度 20mg) のビーム支持点を下げ、試片に衝撃を与えないように注意し負荷した。

クリープ破壊時間の測定にはストップウォッチおよび天秤の一端に結線された電気時計を用いて、一定荷重をかけた瞬間から破壊までの時間を測定した。破壊までのクリープ量の測定には差動トランスを天秤の一端に組み

込み、真空管電圧計で出力を検知し、これと並列に結線されたペンレコーダー（渡辺測器工業製）により変形量を出力電圧として自記させた。

4. 実験結果と考察

4. 1. 横引張強度

本実験にもちいた試験片の性質および引張強度、破壊ひずみ等の平均値を Table. 1 に示した。

これらの結果から、クリープ試験に使用する荷重を決定した。すなわち、横引張強度の荷重を求め、その値を最高に 7.5g 間隔で、それぞれ 325g, 317.5g, 310g (222.8g/mm², 201.4g/mm², 185.0g/mm²) をクリープ試験の荷重とした。

4. 2. クリープ破壊に要する時間

破壊までのクリープ時間と試片の平均年輪幅などを Table. 2 に示した。

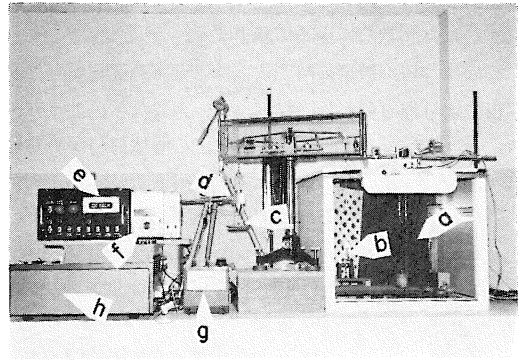
本報では、含水率 (11.8%) を一定にし、比重は平均比重 ($\gamma_0=0.38$) に近似のもののみを抽出、実験に供した。なお、年輪幅と破壊までのクリープ時間を併記したのは両者の関係について調べようという意図にもとづくものである。Fig. 2, Table 2 に示すように、伸び—時間において、破壊までのクリープ時間は著しい変動を

Table 1. Tensile strength and some characters in Sugi wood by loading at constant rate of deformation (Crosshead speed = 2mm/min.)

| Number of specimens | M.C. (%) | Mean of annual ring breadth (mm) | $\sigma_{max.}$ (g/mm ²) | $\epsilon_{max.}$ of breaking load (%) | Degree of breaking load (g) |
|---------------------|----------|----------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| 30 | 18.8 | 3.0 | 214.7 | 4.71 | 325.1 |

Table 2. Time elapsed till occurrence of fracture under a constant load and structure-insensitive characters of their specimens

| Stress on tensile side (g/mm ²) | Number of specimens | Annual ring breadth (mm) | | | Time elapsed till the occurrence of fracture (sec) | | |
|---|---------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|--|--------------------|------------------------------|
| | | Mean | Standard deviation | Coefficient of variation (%) | Mean | Standard deviation | Coefficient of variation (%) |
| 185.0 | 72 | 2.57 | 0.265 | 7.4 | 515.4 | 940.82 | 182.5 |
| 201.4 | 94 | 2.97 | 0.274 | 9.2 | 225.4 | 473.65 | 210.1 |
| 222.8 | 93 | 2.81 | 0.190 | 6.8 | 151.4 | 473.78 | 312.9 |



a: regulated thermostat box
 b: specimen
 c: constant load
 d: linear variable differential transformer
 e: electric clock
 f: vacuum tube voltmeter
 g: voltmeter
 h: pen-writing recorder

Photo. 1 Apparatus for creep failure test

示している。すなわち、破壊時間のばらつきは変動係数であらわして、なお 180~300% におよんでいる。破壊時間のばらつきはガラス、金属などの物質と同様に強度のばらつきに比較して非常に大きい。この大きなばらつきは、もはや平均的性質の試験片間でも存在するし、木材の引張クリープ破壊の時間依存性は統計現象としてとりあつかわなければならないことを示している。

次に破壊時間におよぼす年輪幅の影響について検討するため、年輪幅を独立因子として、分散分析（一元配置法）をおこなった。その結果、いずれの荷重の場合にも、平均年輪幅への影響は危険率 5% であらわれなかった。すなわち、これは年輪幅が破壊時間に対して、影響しないことを示す。これらは曲げについての同様な実

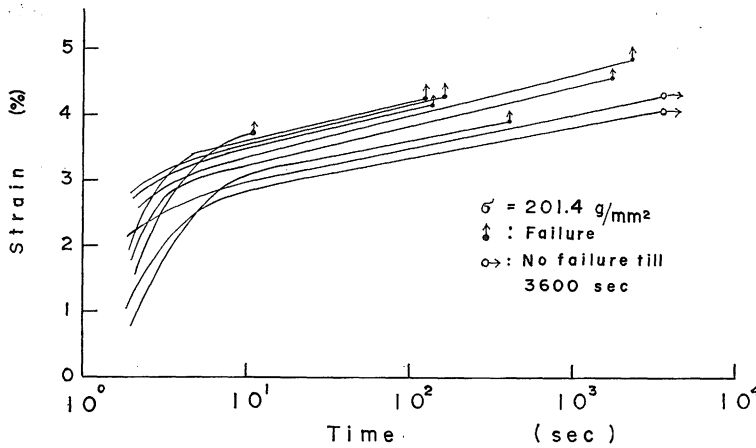


Fig. 2. Relation between strain and time under a constant load

そこで、まずクリープ試験において、負荷した時から破壊のおこるまでの時間の頻度分布を Fig. 3 に示す。

同図において、特徴ある分布を示した。(ここで、 N は破壊の出現する個数である。)

2. 2の(4)式より P を求める。破壊時間 t の頻度分布図 (Fig. 3) から、各時間について、 $\log P(t)$ を計算し、破壊時間 t に対してプロットすればよい。

Fig. 4 は $\log P-t$ 図である。

ただし、試片数が少ないので、 P は次の近似計算を用いた。すなわ

ち、 N 個の試片を破壊時間の小さい方から、順に $t_1, \dots, t_v, \dots, t_N$ のように並べたときの V 番目の非破壊平均頻度の式で示される。

$$P \approx 1 - \left(\frac{V}{N_0 + 1} \right) \dots \dots \dots (6)$$

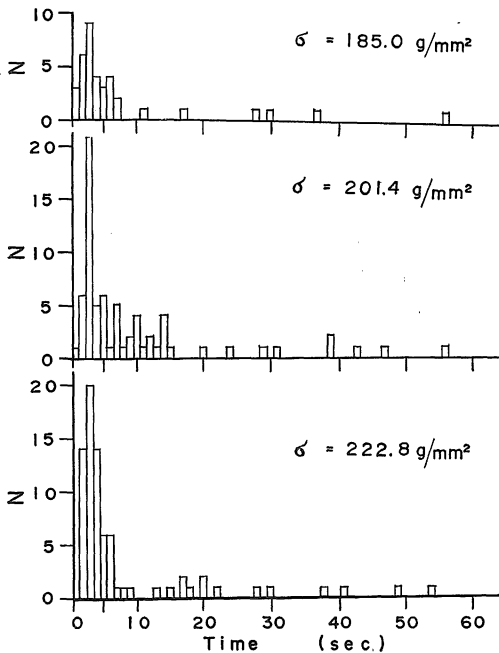


Fig. 3. Frequency distribution of time to failure of Sugi wood under constant tensile stress

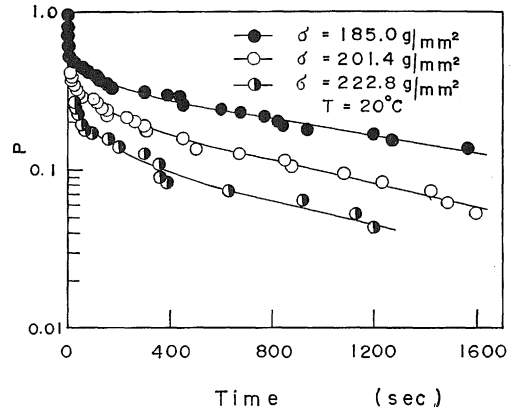


Fig. 4. $\log P-t$ diagram

Fig. 4 よりクリープ破壊時間の木材に対する m の値ははじめ時間とともに急に減少するが、ある時間後にはほぼ一定とみることが出来る。換言すれば、負荷の初期においては破壊する確率が高いが、その割合は時間とともに減少し、ある時間経過後、単位時間⁽⁷⁾に破壊の起る数は同程度になる。この傾向は角谷によって行われた木材の曲げ破壊における破壊時間のばらつきに対する考察においても同様な結果を得ており、金属⁽²⁰⁾、ガラスなどとは著しく異なり、木材特有の曲線を示し、 m の値が時間の経

⁽⁸⁾ 験結果とは異なる。

以上のように、木材の破壊時間の変動が大きく、そのばらつきは確率論より統計的に処理し、クリープ破壊時間の確定値を検討する必要が出てくる。

過とともに減少するという結果が得られた。天然高分子物質である木材はその破壊過程において、破壊進行を阻止する方向にミセル配列などの内部構造に変化が起こると推測されているが、本実験結果からは明らかに出来ない。

5. おわりに

木材の横引張クリープにおいても、その破壊時間はガラス、金属などと同様に統計現象としてあらわされることが認められた。

破壊時間の確率過程論的考察の結果、負荷後、わずかの時間内(2~3秒)ではガラス、金属など他の物質と同様に m の値ははじめ時間とともに急に減少するが、ある時間後にはほぼ一定とみなしうようになる。このことは負荷後、わずかな時間を経過すると、破壊を阻止しようとする木材の内部構造に関係する何らかの変化が起こるのかもしれない。

これらの結果からは破壊の確率 m が本質的にどのような意義をもつかは定義づけられないけれども、今後、試験時の環境、材料の含水率などを変えることによって、明らかにされなければならない。

破壊までに要するクリープ時間は主として初期割れ目の発生に要する時間と同じであることが理解され、木材に対する初期割れ目の発生過程を速度論的に取扱う必要がある。

謝辞

本実験をおこなうにあたっては角谷の報告⁽⁶⁾の示唆によるところ大である。また、本実験に必要な試料提供下さった内外木材工業 KK および実験に際して、終始御援助願った島根農科大学学生・高木新太郎氏(現・山陽木材防

腐 KK)に、またデータ処理に対して、島根大学農学部・作野友康氏にお世話になった。感謝の意を表す。

6. 引用文献

1. 平田森三, 寺尾宣三, 応用物理, 20: 234, 1951
2. 横堀武夫: 応用物理, 24: 351, 1955
3. 横堀武夫: 機械の研究, 6: 335, 1954
4. 横堀武夫: 機械の研究, 6: 431, 1954
5. 横堀武夫: 機械の研究, 6: 531, 1954
6. 角谷和夫, 杉原彦一: 木材誌, 7: 167, 1961
7. 角谷和夫, 杉原彦一: 木材誌, 3: 168, 1957
8. 角谷和夫: 木材研究, No.24: 46, 1960
9. 角谷和夫: 木材研究, No.26: 1, 1961
10. 横堀武夫: 材料強度学: 1961, 技報堂, 東京, P. 3, 48
11. 川田雄一他: 材料強度学ハンドブック: 1966, 朝倉, 東京, P. 1
12. 根岸卓郎: 理論応用統計学: 1966, 養賢堂, 東京, P. 432
13. 藤田晋輔, 高橋徹: 島根大農研報, 1: 100, 1967
14. 日本物理学会編: 高分子の物理: 1963, 朝倉, 東京, P. 244
15. 堀素夫: 応用物理, 36: 1471, 1967
16. 藤田晋輔, 高橋徹: 島根大農研報, 1: 116, 1967
17. 高分子学会編: 高分子の物性(I): 1958, 共立出版, 東京, 198, 199
18. 堀素夫: 応用物理, 27: 690, 1958
19. T. Yokobori: J. Phys. Soc. Japan, 6: 78, 1951

Summary

The fluctuation phenomena were investigated experimentally on the tensile creep fracture in Sugi wood (*Cryptomeria japonica* D. DON.)

The size and shape of our specimens and experimental apparatus were shown in Fig. 1 and Photo. 1 respectively. The tensile creep test of about 90 specimens were measured by three constant load (222.8 g/mm², 201.4g/mm² and 185.0 g/mm²). Experimental temperature were 20 ± 1 °C.

From the standpoint of stochastic process, the probability of occurrence of fracture in unit time after the lapse of time t , $m(t)$, are given by tangent of log P-t diagram, when $P(t)$ is probability of occurrence of fracture after t . See Eqs. (3) and (4). Fig. 2 shows log P-t diagram in the limited case of our creep test.

The elapsed time until fracture occurs under constant load were measured by a

stop-watch and electrical-clock. Our experimental results in tensile strength and creep test are shown in Table 1 and 2, respectively. As the results of analysis of variance, it became clear that fluctuations of fracture time in creep are not attributed to the fluctuations of annual ring breadth between each specimen. From the result in Fig. 2, we may say that the value of m under the constant load decreases rapidly in the beginning of loading and approaches to an almost constant value.