

曲 げ ク リ ー プ に つ い て

佐 々 木 光*・満 久 崇 磨*

Hikaru SASAKI* and Takamaro MAKU* : The Creep of Glued Laminated Wood Beam.

は じ め に

集成材による構造物の安定性を考えるとき、最も重要な性質の一つは、その部材の粘弾性挙動であり、クリープの現象はその最も基本的な形の一つである。

近年、高分子物質のこの方面の研究と相まって木材の粘弾性の研究が盛んに行われているが、その成果を実際の構造物へ応用するためには、そこに介在する色々の因子の影響を明らかにする必要があり、研究も広範囲に亘り、現象的に得られた結果の解釈も困難なことが多い。このようなことから、この方面の研究報告は断片的に見られる程度であり、特に、実用的なスケールをもった材料の実際的環境の下での挙動を長年月かけて観察した結果は少ない。また、この方面の研究の進展は理論に先立つて少しでも多くのデーターを積み重ねることが先ず第一であると考え、われわれはその一端として、比較的实际に近い大寸法の集成材について、普通の使用環境の下で2年以上に亘ってクリープ試験を行ない、その時間強度と梁の安定性を調べた。この報告はその結果をとりまとめたものである。

材料と試験の方法

1. 材 料

前報¹⁾と同じ条件でタイワンヒノキ (*Chamaecyparis formosensis* MATSUM.) の 5-ply の集成材を7本製造し、その端部 3 cm を除外したものを Fig. 1 に示すような試験体を19本切り出し、内7本について接着層の残留応力を測定²⁾ し、残り12本についてクリープ試験を行なった。

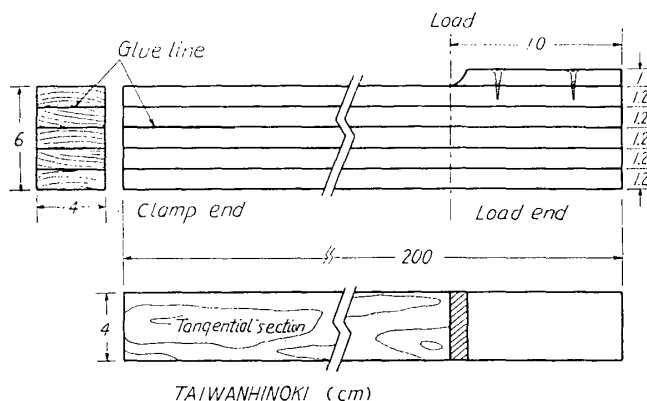


Fig. 1. Test specimen.

2. 試験の方法

実際の構造物の梁では接着層に多少とも、せん断を伴った応力が与えられるであろうから、ここでは、一般的な3点曲げを行なうことにした。3点曲げでは中央集中荷重が一般的であろうが、荷重の大きさ、スパンなどを考慮して Fig. 2A および Fig. 3 に示すような片寄った3点曲げを行なった。この形式は片持梁と似た形であるが、ク

* 木質材料研究部門, Div. of Composite Wood, Wood Res. Inst., Kyoto Univ.

ランプ条件の難しさを避ける意味で、この形式の方がよいと思われる。この梁系の P_2, P_3 (Fig. 2B) の点は曲率半径 10 cm 程度のレール材 (アングル枠に固定されている) に接し、先端 P_1 には、直径 20 mm の鋼管を通じてアングル台座とコンクリートブロックよりなる錘りが掛かる。 P_1 点における撓みの測定は、 P_1 点にのスケールを立て、柱間に張ったピアノ線を切る目盛りを目測することによつて、又は数日以内に破壊するものについては、上記のスケールにとりつけたペンによつて回転ドラムの上に直接記録させた。このようにして測定された撓み y_1 は $\overline{P_3P_2}$ 間に生じた撓みの効果を含んでいる。まぎらわしさを避けるために、以下 $\overline{P_3P_2}$ 間の撓みの効果を除きスパン $\overline{P_3P_1}(=150 \text{ cm})$ の片持梁が P_1 なる荷重を受けた場合の P_1 点の撓み y (Fig. 2C) で表現することにする。そのためには

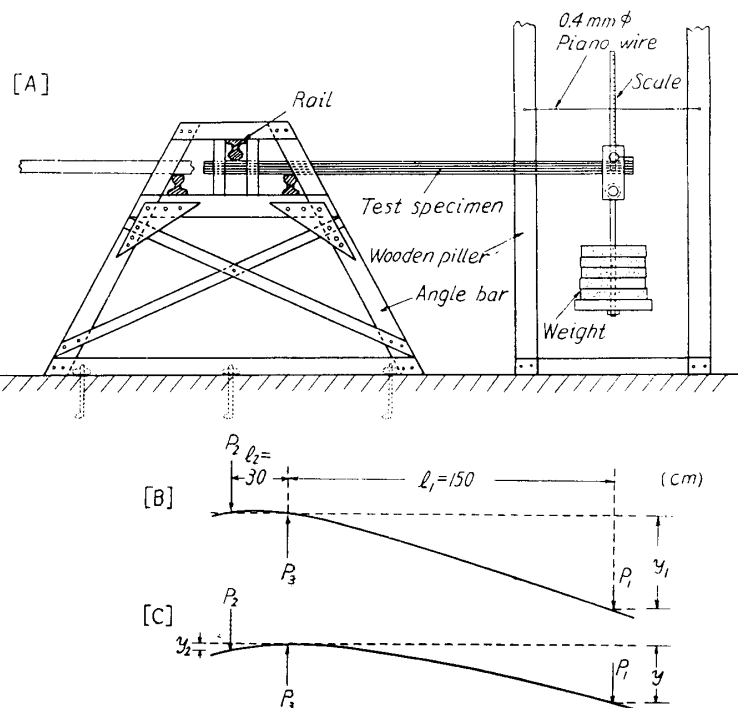


Fig. 2. Details of test apparatus.

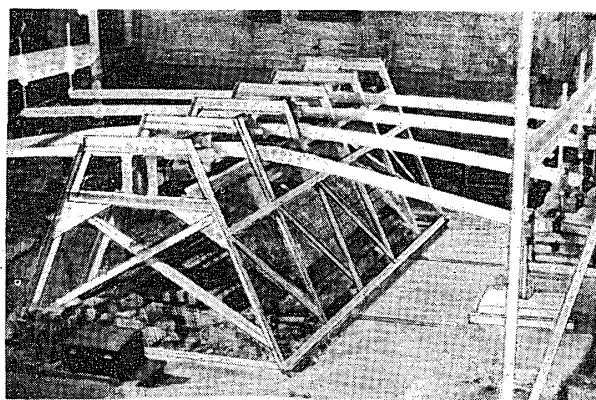


Fig. 3. Test apparatus.

$$y = \frac{l_1}{l_1 + l_2} y_1 \doteq 0.833 y_1$$

の換算をすればよい。

また、この撓みは、梁のスパン方向の縦ひずみによるもの y_n と、せん断によるもの y_s の合計である。この比は、梁のヤング率 E を $10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、剛性率 G を $5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ とすると、

$$y_s/y_n = 3Eh^2/10Gl^2 = 0.0096$$

となる。即ち、せん断による撓みは全撓みの約 1% に相当する。接着層の効果を考えると、接着層のヤング率が高いと y_n の値にきいてくるが、流動性の大きい場合には y_s の値にきいてくるであろう。素材の場合との比較は、この点を明らかにするもので、今後の問題点である。

クリープ試験に先立ち、供試素材について JIS-Z-2113 (1957) に準じて曲げ試験を行ない、荷重—撓み曲線および曲げ破壊係数を求めた。10本の結果の平均は、曲げ破壊係数 712 kg/cm^2 、曲げ弾性係数 $10.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ でその平均的な荷重—撓み線図は Fig. 4 に示した。

この図からわかるように、この材の比例限度は破壊係数の約半分である。クリープ試験の荷重の設定は、この結果を基礎にして次のように決めた。

応力レベル 1；破壊係数の84% (最大垂直応力 $\sigma = 600 \text{ kg/cm}^2$)

〃 2； 〃 70% ($\sigma = 500 \text{ kg/cm}^2$)

〃 3； 〃 56% ($\sigma = 400 \text{ kg/cm}^2$)

〃 4； 〃 42% ($\sigma = 300 \text{ kg/cm}^2$)

〃 5； 〃 28% ($\sigma = 200 \text{ kg/cm}^2$)

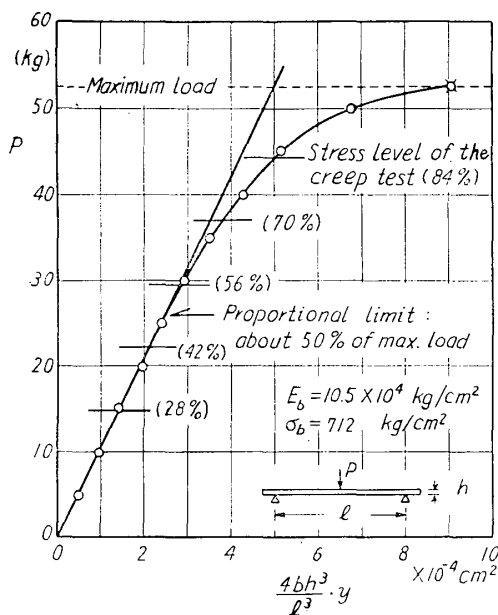


Fig. 4. Load-deflection curves of Taiwan cypress used in the present paper, in a standard test (JIS Z 2113 ((1957))).

Fig. 4 に示すように、応力レベル 1 は比例限をはるかに越えた値であり、応力レベル 5 は比例限の 1/2 程度である。

クリープ試験用の集成材試験体は各応力レベルについて 2 本で、予め小さな荷重を与えて先端の変位を読取顕微鏡で測定し、夫々の弾性係数を求めた。これらの結果は、ディメンジョンの測定結果などと共に Table 1 に示す。

クリープ試験の負荷は、1961年 2 月 13 日に一斉に行ない、先端撓みの測定と平行して、温度および湿度を記録し、試験体と同じ断面を有する長さ 20 cm の材を試験装置の傍らに置き、重量の変化を測定して含水率変化の参考資料とした。

試験の結果と考察

1. クリープ曲線について

Fig. 5A は、1961年 2 月から 1963年 5 月までの撓みの変化を時間の対数について描いたクリープ曲線である。図中の上向きの矢印は、その時刻のすぐ後で急激な撓み増加が生じ、試験体の破断がおこつたことを示すもので、曲線の途中に記した 2 本の斜線は、その間で巨視的な圧縮破壊線が認められたことを示す。また Fig. 5 B および C は、測定時刻の前後における平均的な温度および関係湿度であり、同 D は、含水率に関する参考資料である。

さて、曲線全体の形をみると、湿度の変化よりもむしろ室温の変化に伴なつて、曲線の傾斜が著しく変化し、単純なクリープ曲線を描かないが、比例限以上の応力レベルを与えたものでは、早かれ遅かれ第 3 期のクリープが現われるようで、このことは巨視的な圧縮破壊線の出現と対応するように思われる。また、比例限以下の応力レベルを与えたものでは、この測定時間内では第 3 期クリープは現われないうで、時間と共に撓みは一定の値に漸近し、安定化すると考えられる。

Table 1. Details of creep test and the specimens.

Specimen number	Width of specimen b (cm)	Hight of specimen h (cm)	Modulus of elasticity E_b (kg/cm ²)	Dead load applied		
				Weight (kg)	Max. normal stress σ_m (kg/cm ²)	σ_m in percent of ultimate strength* σ_m/σ_b
2-1	4.00	6.10	10.4×10^4	99	600	84
4-1	3.80	6.20	13.2	97	"	"
5-2	4.00	6.10	11.1	83	500	70
3-2	4.50	6.10	13.5	93	"	"
5-1	3.90	6.15	12.8	65	400	56
7-2	4.00	6.15	11.2	67	"	"
7-1	4.00	6.10	12.9	50	300	42
3-1	3.65	6.10	13.6	45	"	"
6-1	4.00	6.15	10.0	34	200	28
1-1	4.00	6.10	11.8	33	"	"

* Tested by a standard method JIS-Z-2113 (1957)

この場合のように、高い応力レベルを与え、しかも長時間の挙動を扱う場合は、もはや理論の上で線型性を仮定することは困難で、非線型の扱いが必要である。

非線型粘弾性に関する研究は、まだ充分なされておらず、理論的な確立をみていないが、その中の最も有望とされているものの一つである TOBOLSKY-EYRING³⁾ の理論を手がかりにして、上のデータを整理してみよう、すなわち、上の変形過程を G_1 なる弾性係数をもつスプリングと直列に、 G_2 なる弾性係数をもつスプリングと EYRING type の粘性を示すダンシュポットが並列に組まれている系が連結されているような3要素模型をあてはめて考察してみよう、即ち

$$(i) \quad \frac{ds}{dt} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{df_1}{dt}, \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(ii) \quad \frac{ds}{dt} = \frac{1}{G_2} \cdot \frac{df_2}{dt} + A_2 \sinh (B_2 \cdot f_2). \quad \dots\dots\dots (2)$$

これらの系に具体性をもたせるならば (i) は繊維素分子内の1次結合などで代表されるような変形機構に、(ii) は繊維相互間の2次結合のすべりなどで代表されるような変形機構に対応させて考えることもできよう (このように考えると G_1 , G_2 の order はそれぞれ 10^{11} および 10^7 dyne/cm² 程度となろう)。木材をこのように (i) (ii) の変形機構だけで扱うことは segment motion の効果などを考えると不備はまぬがれないが、ここでは複雑化を避けて一つの試みとして (i) (ii) の機構にまとめて考えることにしよう。

式 (1) および (2) において、 $f_i (i=1, 2)$ は (i) 又は (ii) の変形機構のになう応力、 G_i は (i) 又は (ii) の変形機構の弾性率、 s は変形、 t は時間、 A_2 , B_2 は

$$A_2 = n_2 \lambda_2 \left(\frac{kT}{h} \right) \exp \left(- \frac{\Delta F_2^*}{kT} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$B_2 = \frac{\lambda_2}{2N_2 kT} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で示される値で、この式中 n_2 は、応力方向の単位長さに含まれる (ii) 型流動単位の数、 N_2

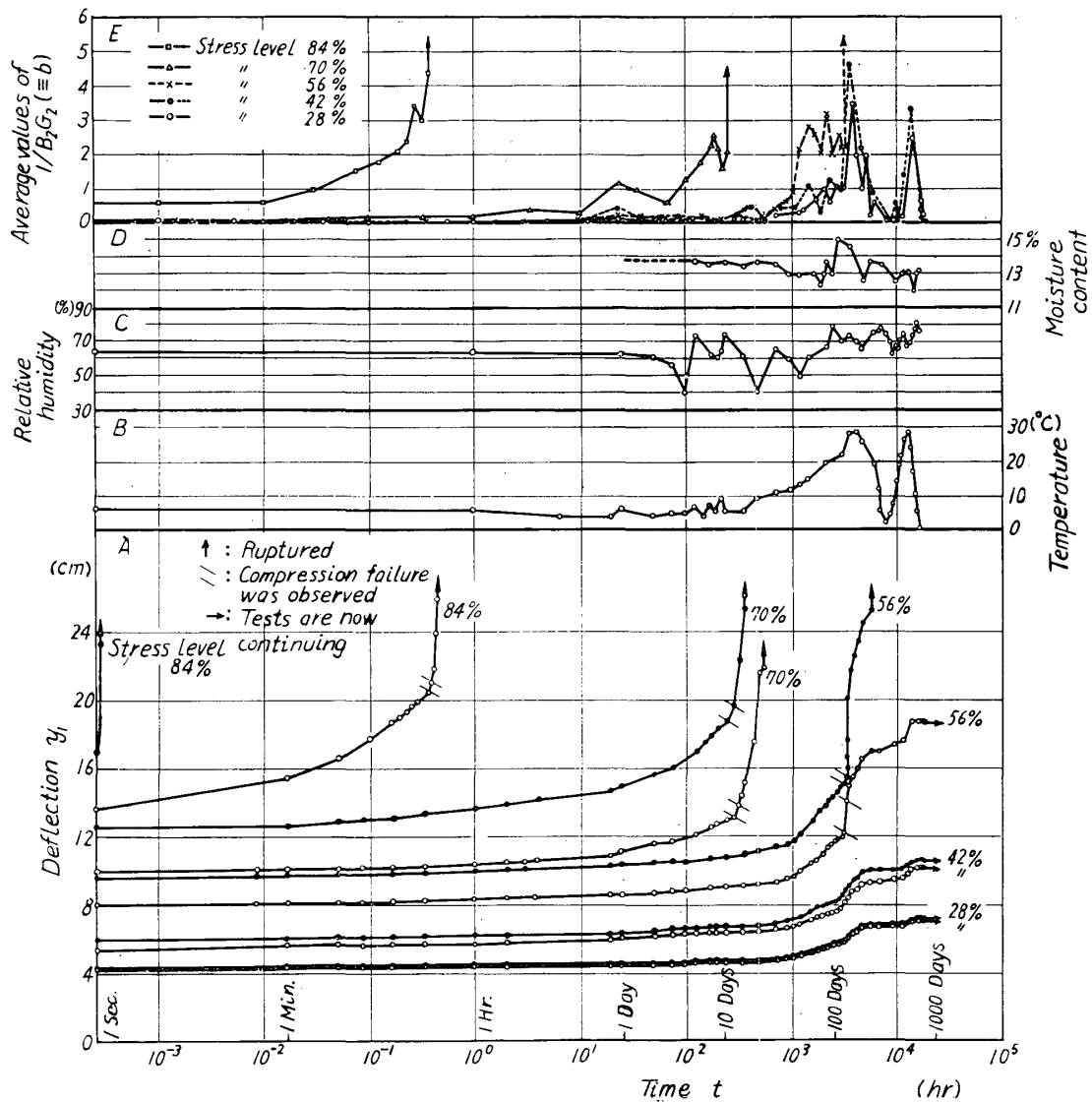


Fig. 5. Creep curves with references of temperature, relative humidity, etc.

は応力に直角な方向の単位面積に含まれる (ii) 型流動単位の数, λ_2 は (ii) 型流動単位の平衡位置間の距離の応力方向の正射影, ΔF_2^* は (ii) 型流動に対する活性化エネルギー, h は PLANCK の定数, k は BOLZMANN の定数である。

1) 2) 式を荷重一定, $f_1 + f_2 = f^0$ の条件で積分し, $f_2^0 > f_2 > 1/2B_2$ の範囲で近似を行なうと (但し, f_2^0 は (ii) 型機構の初期応力),

$$s = \frac{f^0}{G_1} + \frac{1}{B_2 G_1} \ln (A_2 B_2 G_\mu) + \frac{1}{B_2 G_1} \ln t \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\equiv a + b \ln t \equiv a + 2.303b \log t \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わすことができる⁹⁾。ここに $G_\mu = 1/G_1 + 1/G_2$ であり, a, b は constant である。この式からわかるように, 一定応力の下で一定温度の試験を行なえば, t が十分に大きい場合は s は $\ln t$ あるいは $\log t$ に比例することになる。

Fig. 5E は、それぞれの応力レベルについての b の平均値と時間の関係を示すもので、これから温度および応力レベルによるクリープ曲線の傾きの変化が推測できる。

これを詳しく調べるために、 b と温度（絶対温度 T ）の関係をそれぞれの応力レベルについて描いてみると、Fig. 6 のようになり、 $278^\circ\text{K} < T < 300^\circ\text{K}$ では、大ざっぱにみて直線関係が成り立つと考えよう。

このことは、実際には、 $T < 278^\circ\text{K}$ まで引延ばすと $b > 0$ となり全く不合理であつて、直線関係を仮定するより指数曲線をあてはめる方がよいが、簡単に傾向をみるため、 $278^\circ\text{K} < T < 300^\circ\text{K}$ の範囲で第1次近似をとることとする。即ち、

$$b = a_1 + \beta_1 T \quad (278 < T < 300) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 a_1, β_1 は応力レベル S に関する定数である。

まず、 β_1 と S の関係を求めるために縦軸に β_1 の対数を、横軸に応力レベル S をとつてみると Fig. 7 に示すように、大体、直線的と考えてよい。すなわち、

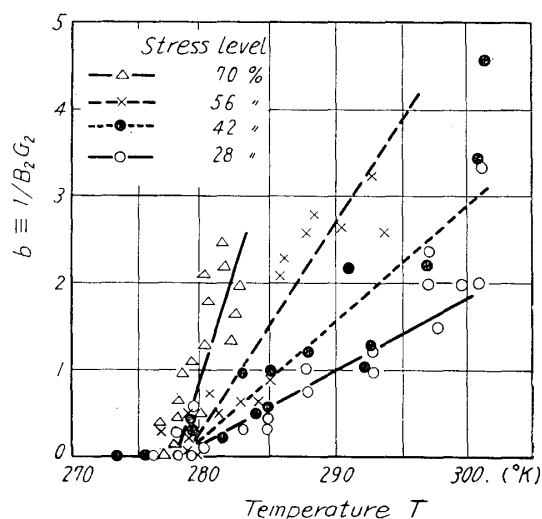


Fig. 6. Tangent of creep curves ($b=1/B_1G_2$) as functions of absolute temperature.

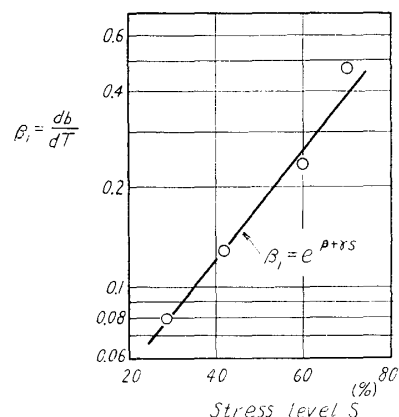


Fig. 7. β_1 as a function of stress level S .

$$\beta_1 = \exp(\beta + \gamma S) \quad \dots\dots\dots(8)$$

の形で示すことができる。ここに β, γ は温度にも応力にも無関係な定数である。

次に、 a_1 と S の関係であるが、これは Fig. 6 において直線群が大体 ($b=0, T=278^\circ\text{K}$) に集まることから、

$$a_1 = -278 \beta_1 = -278 \exp(\beta + \gamma S) \quad \dots\dots\dots(9)$$

(8), (9) を (7) に代入して、

$$\begin{aligned} b &= -278 \exp(\beta + \gamma S) + T \exp(\beta + \gamma S) \\ &= (T - 278) \exp(\beta + \gamma S), \quad (278 < T < 300) \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

これと (5), (6) 式から

$$B_2 = 1/(T - 278) G_1 \exp(\beta + \gamma S), \quad (278 < T < 300) \quad \dots\dots\dots(11)$$

これを (4) 式に入れて整理すると、

$$N_2 = \frac{\lambda_2 G_2}{2k} \left(1 - \frac{278}{T}\right) \exp(\beta + \gamma S), \quad (278 < T < 300) \dots\dots\dots (12)$$

今、かりに、この実験の温度範囲では温度効果による 2 次結合の切断が著しくないと考え、また、第 2 期クリープまでの範囲では応力による 2 次結合の切断も著しくないと考えるならば、 λ_1 は温度にも応力にも依存しない定数と考えてよい。

また、 G_2 は、繊維方向の弾性率の温度変化を測定した例⁹⁾ から、この温度範囲では、あまり変化しないと考えるとよいから、これらを定数と置いて (12) 式は、

$$N_2 = C \left(1 - \frac{278}{T}\right) \exp(\beta + \gamma S), \quad (278 < T < 300) \dots\dots\dots (13)$$

となる。(13) 式から、応力レベル S および絶対温度 T の増加に伴って流動単位の数が増し、梁の内部は滑りやすくなることが結論される。

この結果を、綿糸の応力緩和実験から導いた藤田、岸本の結論⁹⁾ と比較してみると、応力効果については一致しているが、温度効果については、逆の結果である。

この原因についての考察は、今後の数多くの実験結果をまつてなされるべきもので、この他、この変形過程に要するエネルギーなどの興味ある諸問題と共に、今後の研究課題である。

2. 時間強度について

巨視的な圧縮破壊の現われる直前において、クリープ曲線の傾きは平坦になり、撓みが幾分、安定化するように思われる。このことから、ひずみ硬化の現象が想像される。巨視的な圧縮破壊が生ずると、その部分が挫屈して撓みは大きく進行するようである。

応力が小さいと、圧縮破壊が生じた後も梁は直ちに破断することなく、ひずみ硬化と挫屈の平衡現象が持続されるもののようである。

梁が破断するときの最終的な撓みの大きさは、破壊法則として興味ある問題である。Fig. 5A の上向きの矢印は必ずしも破断時の撓みの値を示すものではない。例えば、応力レベル 84% のものでは、撓み変化の目測が可能な最終値であり、70 および 56% のものでは、破断前 15 時間以内の値である。しかし、共通して云えることは、いずれの最終測定値も、その直後では曲線は全く縦軸に平行になると考えてよいことである。

YLINEN⁷⁾ の Kiefer 素材における短時間試験の結果では、ST. VENANT の仮説が成り立つとされている。即ち、破壊は変形量が一定の値に達したときに生ずるという。しかし、パーティクル・ボードの場合について、クリープ変形の量が一定値に達したときに破壊するという観察結果⁸⁾ もある。

上の結果に対して、最終測定値が近似的に破断時の最終撓み量を表わすものと仮定すると、ここでは、やはり、ST. VENANT の仮説が成り立ちそうに思われる。

一方、圧縮側の巨視的な破壊線を生ずる時の撓みに着目するならば、それはむしろ、クリープひずみの量がある一定値になつた時に、破壊が生ずると解釈できよう。

応力と破断までの経過時間の関係 (curve of duration of load) は、時間軸を対数で表わすと Fig. 8 のようになる。図中の矢印は、1963 年 5 月現在、破断せずに持続していることを

示すものである。

同図 から， 大体において， 強度は時間の対数について直線的（測定数が少ないのではつきりいえないが）に低下することがわかる。そして， 2年3カ月経過した現在の時間強度は， 大体55%と考えられる。

YLINEN⁹⁾ は， ST. VE-NANT の仮説の下に MAXWELL model から導いた耐久曲線式が， 実験とよく合うことを示し， 耐久限度 σ_w と短時間強度 σ_b の比は， 平衡弾性率 E_∞ と， 瞬間弾性率 E_0 の比に等しいとし， Kiefer に対し $\sigma_w/\sigma_b = E_\infty/E_0 = 0.59$ を導いている。また， カナダにおける試験結果¹⁰⁾は， 耐久限度を standard test の結果から割り出す係数として， 9/16を示している。即ち， $\sigma_w/\sigma_b = 0.56$ である。

Fig. 8 の結果において， standard test の曲げ強さは 712 kg/cm^2 であり， 2年における時間強度は約 400 kg/cm^2 である。2年における時間強度をもつて耐久限度とすれば， その値は， これらの諸結果によく一致するけれども， われわれが観察する限りでは， Fig. 5A にも明らかのように， $\sigma_w/\sigma_b = 0.56$ の梁のうち， まだ破断していないものにおいても， すでに圧縮側に巨視的な破壊線が見られることから， 真の耐久限度はさらに低い値であろうと思われる。また， 現在のところでは， 比例限以下の応力レベルのものでは， クリープ曲線がかなり安定化しているように思われることから， 耐久限度は比例限応力あたりにあるものと思われる。尚， この比例限応力の値も standard test において認められた値であつて， 荷重速度を変えれば変動するものであろうから耐久限度を比例限応力にとることは， すべての樹種に共通ではないかも知れない。この点については， さらに多くの研究結果にまたねばならない。

最後に， クリープ曲線の考察その他に御教示を頂いた山田正博士ならびに実験とデータ整理に協力頂いた勝山夫人に心から感謝する。

摘 要

実際に近い寸法の集成材の実際的な環境におけるクリープ挙動ならびに破壊の観察結果である。用いた樹種は¹⁾タイワンヒノキで， 尿素樹脂冷圧により Fig. 1 のような試験体を作り， Fig. 2, Fig. 3 に示すような片寄つた3点曲げクリープ試験を行なつた。結果を要約すると次のようである。

(1) クリープ曲線—TOBOLSKY-EYRING の理論を手がかりに変形機構を繊維分子内の1次

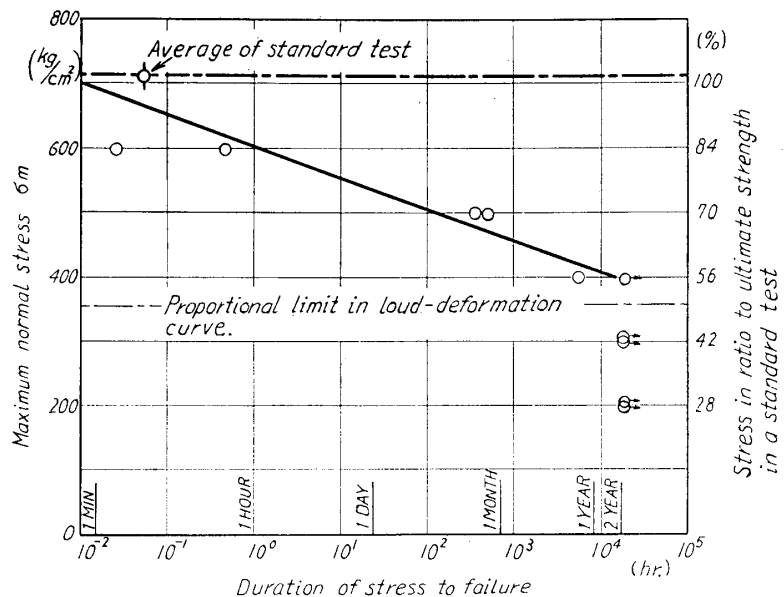


Fig. 8. Stress reductions according to length of time the load has been applied (obtained as of May 1, 1963)

結合の変形と、繊維間の2次結合のすべりなどに対応させて考察したところ、応力および温度が増すと、応力に直角な方向の単位面積に含まれる2次結合の流動単位の数が増加が推測される。

(2) 時間強度—梁の破断には、ST. VENANT の仮説が成り立つようであるが、巨視的な圧縮側破壊線は、クリープ変形が一定値になると、おこるように思われる。また、時間強度は2年3カ月で、短時間強度の55%程度であり、耐久限度は、大体、この材料の比例限度応力に近いと推定される。(この値は短時間強度の50%である)。

Summary

Creep and rupture of glued-laminated wood beams have been observed for about two years.

Plates of TAIWANHINOKI (*Chamaecyparis formosensis* MATSUM.) were bonded by cold set of urea resin and shaped into specimens shown in Fig. 1. Test method is shown in Figs. 2 and 3, and dead load applied was 84, 70, 56, 42 and 28 per cent of the ultimate strength in a standard test.

Results summarized are as follows.

(1) Creep curve :

The data were discussed under assumption that creep of the beams is produced by deformation of the primary bonds and slippage of the secondary bonds of cellulose and others, and these are shown by equations for elastic deformation (eq. (1)) and deformation rate of TOBOLSKY-EYRING's type (eq. (2)), respectively. And it was concluded that the number of flow unit of the secondary bonds in a unit area perpendicular to stress increases with stress and temperature.

(2) Rupture :

Rupture of the beams appears to be conformed to the ST. VENANT's hypothesis, but local compression failure seems to take place when the creep deflection reaches a definite value. The fatigue strength on the 820th day is 55 per cent of the ultimate strength in a standard test, and the endurance limit will be approximately equal to the stress at the proportional limit of the beams.

文 献

- 1) 満久, 佐々木 : 木材研究 No. 31 : 23 (1963)
- 2) 浅野, 都築, 鷺見 : 木材研究 No. 31 : 50 (1963)
- 3) TOBOLSKY, A. and H. EYRING : J. Chem. Phys. 11 : 125 (1943)
- 4) 後藤, 平井, 花井 : レオロジーとその応用, 共立, 東京 : 188 (1962)
- 5) KOLLMANN, F. u. F. SCHULZ : — KOLLMANN, F. : Techn. d. Holzes u. Holzwerkstoffe, 2 Aufl. 1 : 610 (1951)
- 6) 藤田, 岸本 : J. Soc. Cell. Text. Ind. Japan, 9 : 74 (1953)
- 7) YLINEN, A. : — KOLLMANN, F. : Techn. d. Holzes u. Holzwerkstoffe, 2 Aufl. 1 : 783 (1951)
- 8) BRYAN, E. L. : For. Prod. J. 10 : 200 (1960)
- 9) YLINEN, A. : Holz als Roh- u. Werkstoff 15 : 213 (1957)
- 10) MADSEN, B. : For. Prod. J. 12 : 497 (1962)