

論文

木質系材料の安全性に関する研究 (II)

precompression したコナラ材の強度的性質

金田 利之\*

古川 郁夫\*

作野 友康\*

岸本 潤\*\*

Studies on Safety in Timbers and Woody Materials (II)

The Effect of Precompression on Mechanical Properties  
of Konara Wood (*Quercus serrata* THUNB.)

Toshiyuki KANEDA\*

Ikuo FURUKAWA\*

Tomoyasu SAKUNO\*

Jun KISHIMOTO\*\*

Summary

Konara wood specimens were precompressed at three levels of loading and tested under longitudinal tension loading. From the experimental data on the longitudinal tensile strength, modulus of elasticity, and work to failure, the following conclusions were reached:

(1) As a result of precompression, the work to failure and the failing load were drastically reduced, while the modulus of elasticity was not significantly affected. That is to say, with the value of uncompressed control specimens taken as 100, the work to failure ratios were only 75, 67 and 24; and the failing load ratios, only 90, 81 and 43 for the wood precompressed at 50%, 85% and 100% levels, respectively.

\* 鳥取大学農学部 農林総合科学科 森林生産学講座

\* Department of Forestry Science, Faculty of Agriculture, Tottori University

\*\* 鳥取大学農学部 農林総合科学科 生存環境科学講座

\*\* Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University

On the other hand, the modulus of elasticity ratios were 106, 100, and 77 for the three levels of precompression, respectively.

(2) Since the effect of precompression on work to failure was clearly shown, it is proposed that this can be an index in the evaluation of the degree of wood damage. This will, therefore, be an important index in the evaluation for safety of wood materials for structural purposes.

## I 緒 言

木材および木質材料（木質系材料）を建築用構造材料として使用する場合、その安全性を正しく評価することは重要なことである。一般に安全性の評価には、引張り強度、圧縮強度、曲げ強度等の機械的諸特性が指標として用いられる。木材の機械的特性は、比強度が大きく、硬さが適度であり、靱性 (toughness) の高いことが特徴である<sup>1)</sup>。特に靱性は、プラスチック系複合材料のそれと同等の性能を有する。なかでも、木材繊維を横切って破断する時の破壊靱性 (fracture toughness) は著しく高い。これは繊維を横切って進行しようとするクラックの伝播に対して、木材が高い抵抗性を有することをあらわしている。このように優れた材料である木材も様々な原因 (劣化原因) により、その機械的諸特性が低下する<sup>2)</sup>。例えば、①腐朽菌などの酵素によるセルロース骨格物質の劣化 (生物的劣化)、②熱や紫外線によるセルロース骨格物質の劣化 (物理的劣化)、③酸やアルカリなどの化学薬品による加水分解や軟化 (化学的劣化) などがある。さらに、これらの他に木材の機械的特性を低下させる重要な原因として外力による劣化 (機械的劣化) がある。その例としては、樹木の生長応力や冠雪害などによって木材細胞壁中に発生する微小圧縮破損 (slip plane) による劣化がある。<sup>4)</sup> slip plane とは、繊維軸方向に圧縮 (縦圧縮) されたとき細胞壁中に発生するマイクロフィブリルの折れ曲がり部が面状に集合した部分である。slip plane の発生と木材の機械的性質の関係について調べた研究は、Dinwoodie による研究<sup>2~4)</sup> があるだけでほとんど行われていない。

前報においては、劣化していない正常な木材と熱、外力、化学薬品で劣化した木材の細胞壁レベルおよび高次構造レベルの破壊形態を比較検討することにより、これらの破壊形態の違いが材質劣化度を評価するうえで有効な指標となりうることを指摘した<sup>5)</sup>。本研究では、木材試験片に縦圧縮荷重を加え、人為的に細胞壁内に slip plane を生じさせた (以下これを precompression と呼ぶ) 後、この試験片を再び引っ張り、その時の破壊強度、弾性率、破壊までの仕事量を調べることにより、precompression と材質劣化の関連性について検討した。

## II 材料および方法

### 1. 供試材料

供試材として、鳥取大学蒜山演習林産のコナラ (*Quercus serrata* THUNB.) の成熟材部を用いた。

### 2. precompression 処理および強度試験

JIS Z 2111 (木材の圧縮試験方法) に準拠して、まず 2(R)×2(T)×8(L) cm のブロックを 20 個作製した。precompression をしない (無負荷) コントロール用のブロック 5 個を除くすべてのブロックにクロスヘッドスピード 1 mm/min で縦圧縮荷重を負荷した。まず 5 個のブロックを破壊まで縦圧縮することにより平均縦圧縮強度を求めた。つづいて、残りのブロックを半分に分け、それぞれのブロックに対して平均縦圧縮強度の 50% と 85% の荷重を負荷した。すなわち precompression の荷重レベルは、50%、85%、100% の 3 段階とした。

次に各荷重レベルで precompression したブロックおよびコントロールブロックから、長さ 80 mm、幅 6 mm、厚さ 100  $\mu$ m の板目切片を切り出し、引張り強度試験用切片とした。切片は、各ブロックを飽水状態にした後、スライディングマイクロームで切削した。縦引張り強度試験は、標点間長さを 50 mm とし、クロスヘッドスピード 0.5 mm/min で行った。この時の破壊強度、弾性率、破壊までの仕事量を求めた。引張り試験は、コントロール 47 個、50% 荷重レベル 45 個、85% 荷重レベル 70 個、100% 荷重レベル 31 個の切片で行った。

なお、precompression 処理および強度試験には、鳥取大学農学部広葉樹生態情報総合解析設備の島津オートグラフ AG 5000A 型を用いた。

## III 結果および考察

### 1. 破壊強度

コントロールブロックおよび各荷重レベルで precompression したブロックの破壊強度の平均値と標準偏差を表 1 に示す。また、コントロールの値を 100 とした場合の各荷重レベルでの破壊強度を図 1 に示す。

破壊強度は、コントロールの値を 100 とした時、50% 荷重レベルでは 90 に、85% 荷重レベルでは 81 に、100% 荷重レベルでは 43 と、荷重レベルの増加とともに急激に低下した。これは、precompression によってセルロース分子が損傷したことによるものと考えられる。すなわち、precompression により細胞壁中に微小圧縮破損 (slip plane) が発生する。slip plane は剛直な結晶性セルロース・ミクロフィブリルが座屈したところであり、強度上の欠陥部と

表1 コントロール及び各荷重レベルで precompression した場合の縦張り強度特性

荷重レベル	破壊強度(kg/cm <sup>2</sup> )	弾性率(×10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	破壊までの仕事量(kg・mm/mm <sup>2</sup> )
コントロール	58.6 (96.7)	78.8 (12.8)	28.5×10 <sup>-3</sup> (7.7×10 <sup>-3</sup> )
50%	526.4 (112.6)	83.2 (13.8)	21.3×3 <sup>-3</sup> (7.8×10 <sup>-3</sup> )
85%	476.4 (118.4)	78.8 (13.9)	19.0×10 <sup>-3</sup> (7.9×10 <sup>-3</sup> )
100%	249.6 (36.9)	61.0 (11.1)	6.7×10 <sup>-3</sup> (1.8×10 <sup>-3</sup> )

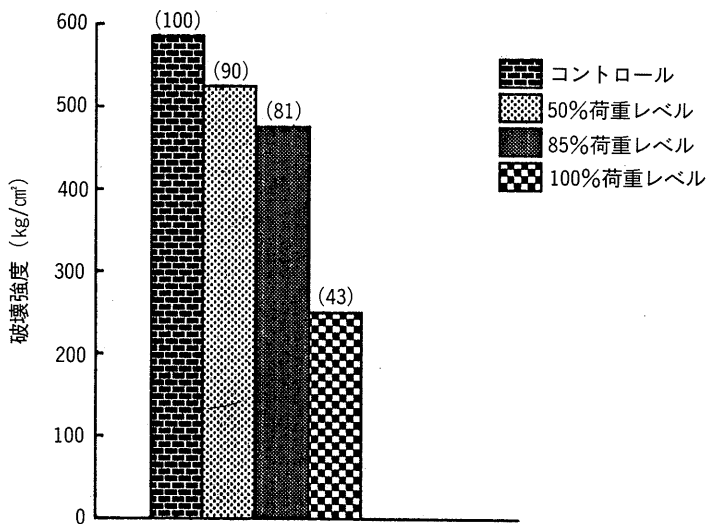


図1 コントロール及び各荷重レベルでprecompressionした場合の破壊強度

(注) ( ) 内はコントロールを100とした場合の各荷重レベルでの割合

なり得る。しかも、この slip plane は、破壊荷重の25%以下という低荷重レベルで発生し、precompression の荷重レベルの増加にともない、その数が増加し、巨視的な破損へと発達することが知られている<sup>2)</sup>。つまり、precompression 荷重レベルの増加にともなう引張り破壊強度の急激な低下は、強度上の欠陥部である slip plane の数の増加と巨視的な破損の発生により、その部分に応力集中が起こったためと考えられる。

## 2. 弾性率

コントロールブロックおよび各荷重レベルで precompression したブロックの弾性率の平均値と標準偏差を表1に示す。また、コントロールの値を100とした場合の各荷重レベルでの弾性率を図2に示す。

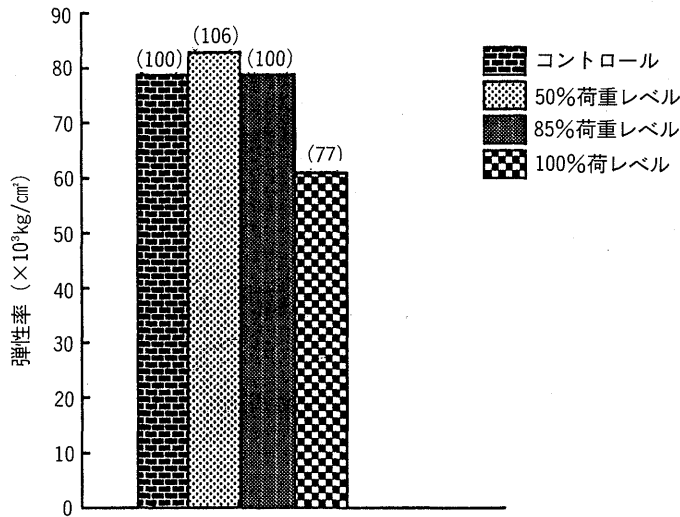


図2 コントロール及び各荷重レベルでprecompressionした場合の弾性率

(注) ( ) 内はコントロールを100とした場合の各荷重レベルでの割合

弾性率は、コントロールの値を100とした時、50%荷重レベルでは106に、85%荷重レベルでは100に、100%荷重レベルでは77となり、precompressionの影響を比較的受けないのが特徴であった。とくに50%荷重レベルで弾性率がやや増加した。その理由としては、precompressionにより木部繊維壁中のセルロース結晶化度が一時的に高くなったことが考えられる。すなわち、precompressionによる圧縮応力により、セルロース鎖状分子の配列が乱れている非結晶領域部分が応力集中を受け、その部分のセルロース鎖状分子が緩められ、再び引っ張られることにより、その部分の分子鎖が再配列する可能性がある。これにより、非結晶領域内のセルロース鎖状分子の横方向の結合数が増加し、非結晶領域の一部が結晶化することにより、結晶化度が増加すると考えられる。一般に、木材の結晶化度が高くなると、木材の密度、ヤング率、引張り強度、セルロース含有率、寸法安定性、硬さが増加し、逆に吸湿性、染料の収着、化学反応性、膨潤、伸び変形、靱性が減少するといわれている<sup>6)</sup>。つまり、50%荷重レベルでは、precompressionの影響が、弾性率ではマイナスの面ではなくプラスの面に作用したと考えられる。しかし、高荷重レベルでは、弾性率の減少がみられた。これは、高荷重レベルのprecompressionにより、マイクロフィブリルの激しい折れ曲がりやマイクロフィブリル間の結合の破断などの微視的な破損が多数生じ、この影響が微結晶再配列の効果をうまわったためと考えられるが、この点についてはさらに詳細な研究が必要である。

一方、precompressionとそれにつづく引張りにより結晶化度が高くなるなら、引張り強度にもその効果があらわれるはずである。しかし、前にも述べたように破壊強度は、

precompression の低荷重レベルから高荷重レベルにかけて急激な減少を示した。木材が劣化を受けた場合、その影響は、衝撃強度>曲げ強度>圧縮強度>弾性率の順に強くあらわれることが報告されている<sup>9)</sup>。すなわち、強度が弾性率よりも劣化の影響を強く受ける。このため、破壊強度の減少は、欠陥部である slip plane の存在の方が、一時的に結晶化度が高くなることによる効果をうわまわったためと考えられる。

### 3. 破壊までの仕事量

コントロールブロックおよび各荷重レベルで precompression したブロックの破壊までの

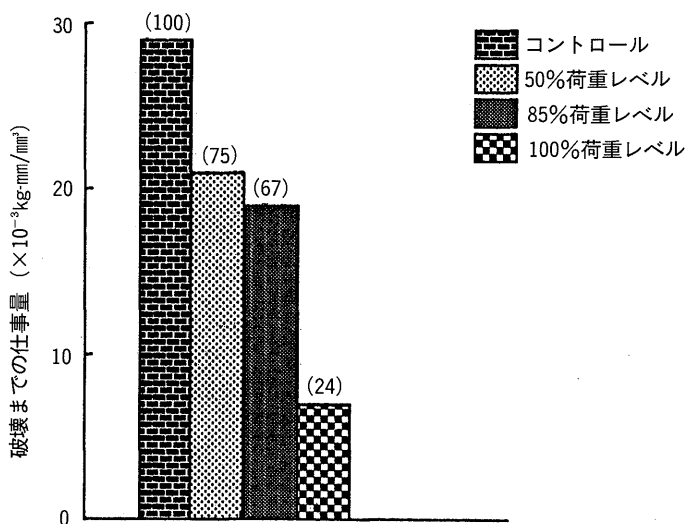


図3 コントロール及び各荷重レベルでprecompressionした場合の破壊までの仕事量

(注) ( )内はコントロールを100とした場合の各荷重レベルでの割合

仕事量の平均値と標準偏差を表1に示す。また、コントロールの値を100とした場合の各荷重レベルでの破壊までの仕事量を図3に示す。

破壊までの仕事量は、コントロールの値を100とした時、50%荷重レベルでは75に、85%荷重レベルでは67に、100%荷重レベルではわずか24であった。このように、仕事量は荷重レベルの増加にともなって著しく減少した。この理由としては、破壊強度の場合と同様、precompression によるセルロース分子の破損、すなわち slip plane が発生したことが主因と考えられる。破壊までの仕事量は、応力-ひずみ曲線とベースラインで囲まれる面積であらわされる。precompression により slip plane が発生し、破壊強度が著しく減少するとともに、それに加えて precompression と引っ張りにより細胞壁内の結晶化度がやや増加し、破壊までのひずみ量も減少すると考えられる。つまり、これら2つの要因（強度の減少とひずみ量の

減少)が相互に影響することによって、破壊までの仕事量が急激に減少したと考えられる。

一般に破壊までの仕事量は、靱性 (toughness) をあらわす指標の1つとして知られている<sup>4)</sup>。木材の結晶化度が高くなると引張り強度、弾性率は増加するが、靱性は逆に減少する。つまり、細胞壁内のセルロース骨格物質の結晶化度が高くなったことによる影響は、引張り強度と弾性率にはプラス面に働き、靱性にはマイナス面に働くと考えられる。このことから、靱性は破壊強度や弾性率よりも precompression の影響を強く受けると考えられる。このように、強度的諸特性の中で precompression の影響が最も強くあらわれるのは靱性であることから precompression すなわち微小圧縮破損 (slip plane) の混入による木材材質の劣化度は、破壊までの仕事量を指標にして評価するのが良いと思われる。一般に靱性 (toughness) が低下し、最終破断までに要するエネルギーが小さくなった状態を“くだけやすい”とか“もろい”状態と呼ぶ<sup>1)</sup>。このような状態の木材に応力を加えた時、突然、“もろく”破壊する<sup>1-4)</sup>。このような破壊を脆性破壊 (brittle fracture)<sup>4)</sup> と呼ぶが、木材以外の材料ではこのような破壊による事故の報告が数多くある。しかし、構造材料として木材や木質材料を使用する場合、これまで precompression の存否にはほとんど注意が払われていない。precompression による材質劣化度を評価することは、木材や木質材料の安全設計を実施する上で極めて重要であることを強調しておきたい。

#### IV 結 論

3段階の荷重レベルで precompression したコナラを再度、縦引張りした時の縦引張り強度、弾性率、破壊までの仕事量について調べた結果、以下の結論を得た。

(1) precompression することにより、破壊までの仕事量と破壊強度は著しく低下したが、弾性率はあまり変化しなかった。すなわち、precompression をしなかったコントロールの値を100としたとき、50%、85%、100%の precompression の荷重レベルでは、破壊までの仕事量は、75、67、24に、破壊強度は、90、81、43に、それぞれ著しく低下したが、弾性率は、106、100、77とあまり低下しなかった。

(2) precompression の影響は、破壊までの仕事量に最も強くあらわれることから、これを指標として材質の劣化度を評価できることがわかった。そして、これは構造材料として木材や木質材料を使用する場合、木材や木質材料の安全性を評価する上で重要な指標になるであろう。

#### 文 献

- 1) Dinwoodie, J. M. : Cause of Brashness in Timber, In *Wood Structure in Biological and Technological Research. Leiden Botanical Series Nr.3.* Edited by Baas, P., Bolton, A. J. and Catling, D.M., Leiden University Press, The Hague-The Netherlands, pp. 238~252 (1976)

- 2) Dinwoodie, J. M. : Failure in Timber. Part I. Microscopic Changes in Cell-Wall Structure Associated with Compression Failure, *Journal of the Institute of Wood Science*, **2** pp.37~53 (1968)
- 3) Dinwoodie, J.M. : Failure in Timber. Part II The Angle of Shear through the Cell Wall during Longitudinal Compression Stressing. *Wood Science and Technology*, **8** pp.56~67 (1974)
- 4) Dinwoodie J. M. : Failure in Timber. Part III The Effect of Longitudinal Compression on Some Mechanical Properties. *Wood Science and Technology*, **12** pp.271~285 (1978)
- 5) 古川郁夫：木質系材料の安全性に関する研究(I)フラクトグラフィック的手法による材質劣化度の評価，鳥取大学農学部演習林研究報告，No. 17 (1988)
- 6) 渡辺治人：木材理学総論，農林出版，東京 pp.154~614 (1978)