腐朽菌作用下での木質材料の曲げクリープ試験法[†]

今村 祐嗣* 西本 孝一*

Bending Creep Test of Wood-Based Materials under Fungal Attack

by

Yuji IMAMURA* and Koichi NISHIMOTO*

A testing method coupled with bending deformation and decay hazard was newly designed to evaluate mechanical performance of wood-based materials under fungal decay, and it was applied to plywood and particleboard as well as solid wood. The test specimens measuring 50×350 mm×(thickness) were subjected to bending creep tests under progressive fungal attack with a brown-rot fungus [*Tyromyces palustris* (Berk. et Curt) Murr.] and a white-rot fungus [*Coriolus versicolor* (L. ex Fr.) Quél.] in the decay apparatus. After fixation of loading, the deflection at the center of the span length (300 mm) was measured regularly as a criterion to determine its expected performance.

The difference in deflection between the inoculated specimen and the sterile sound control one was assumed to be due to strength reduction caused by the action of fungi, and the behavior of bending deformation varied depending on the durability of the specimens.

The method was shown to be particularly useful for the study of particleboard degradation in which high strength loss and large deflection in bending were occasionally observed at slight weight loss. It can be generally applied not only to untreated materials for estimation of their mechanical resistance to decay fungi, but also to treated ones for determination of their preservative efficacy.

キー・ワード：木質材料，腐朽，生物劣化，曲げクリープ，耐朽性評価

1 緒 言

生物劣化とくに腐朽による木質材料の強度性能の低下は、それらの耐用期間を考えるうえできわめて重要であり、従来から高い関心が払われてきた。しかし室内試験による耐朽性評価法としては、小型の試験体を特定の腐朽菌によって腐朽させ、それによって生じた重量減少率をもって判定する方法が一般的であり、各種の木質材料の耐朽性あるいは木材防腐剤の効力評価にも用いられている。

一方、強度性能の場合とくに実用的な見地からは、比較的大型の試験体による腐朽試験が必要であり、その方法の確立が望まれてきた。これに対しいくつかの手法が試みられているが、大型試験体の場合、結果の再現性、雑菌の混入防止、腐朽期間の長さなどの面で種々の困難さがあり、一般化されかつ簡便な試験法はみられない。

筆者らは、比較的大きな試験体を用い、腐朽による強度性能の変化を時間の経過に従って追求する方法として、腐朽菌作用下での曲げクリープ試験法を考案し防腐処理合板の耐朽性を評価する手段として試み有用な結果を得た⁴⁾。この報告では、試験時の荷重条件および腐朽菌の種類を変えたとともに、供試材として各種の木質材料を用いて曲げたわみの挙動を検討し、耐朽

性評価の試験法としての可能性を示した。

2 材料および試験方法

2・1 材料

実験材料として素材、合板およびパーティクルボードを供試した。素材には、耐朽性の低い樹種グループに属するエゾマツ (*Picea jezoensis* CARR.) とアスペン (*Populus tremuloides* MICHX.) の 12 mm 厚の板目板を用いた。合板は実験室的に製造した針葉樹合板で、原木樹種はベイツガ (Western hemlock) とベイマツ (Douglas-fir) の 2 種であり、メラミン樹脂接着剤 (MF) による 9 mm の 3 プライ等厚合板である。パーティクルボードは JIS A 5908 の規定に適合した 3 種類の市販製品で、いずれもラワンを主体とするチップを原料とした 3 層構成の 15 mm 厚のものであるが、ユリア・メラミン共縮合樹脂接着剤 (UMF) を用いた M1、M2 ボードの気乾比重はそれぞれ 0.75 と 0.78、フェノール樹脂接着剤 (PF) を用いた P ボードのそれは 0.78 である。M2 および P は曲げ強さ区分での 200 タイプで、含脂率 (表層 14%、内層 7%) ならびにパーティクル形状はそれぞれ同一であるが、M1 ボードは 150 タイプに属し、含脂率は表層 12%、内層 7% であつパーティクル形状は前 2 者に比べて大きい。

さらにパーティクルボードについては、防腐処理し

[†] 原稿受理 昭和59年11月19日 Received Nov. 19, 1984

* 正 会 員 京都大学木材研究所 宇治市五ヶ庄, Wood Research Institute, Kyoto University, Gokanoshō, Uji

たものも供試した。処理ボードは、エゾマツのプレーナーチップを使用し、ユリア・メラミン共縮合樹脂接着剤中に防腐薬剤を混入し（糊液に対する薬液割合は8%）、12 mm 厚の単層ボードを実験室的に製造した。防腐薬剤は IF-1000（P-クロルフェニール-3-ヨードプロパギルホルマル）および EBIP（3-エトキシカルボニルオキシ-1-プロム-1, 2-ジヨード-1-プロペン）で、いずれもトルエンで希釈後対ボード体積当り薬剤純量 1.0 kg/m^3 の目標値で接着剤中に混入した。このボードの含脂率は8%、気乾比重は0.72、気乾状態での曲げ強さは 152 kg/cm^2 である。

試験体の形状は、 $50 \times 350 \text{ mm} \times$ （試料の厚さ）としたが、この寸法はわが国における木質ボードの曲げ強度試験法でのそれに対応しており、静的強度との対比を考えて採用したものである。いずれの試験体とも両端 50 mm の部分にはエポキシ樹脂塗料を塗布し、腐朽菌の端面表面からの侵入を防いだ。したがって腐朽菌接種表面は、中央の 250 mm の部分である。

2・2 試験方法

腐朽菌として、わが国での腐朽試験に一般的に用いられている褐色腐朽菌のオオウズラタケ [*Tyromyces palustris* (BERK. et CURT.) MURR.] と白色腐朽菌のカワラタケ [*Coriolus versicolor* (L. ex FR.) QUÉL.] を使用した。まず液体培地（マルト、ペプトン、グルコース、KおよびMg塩の水溶液）を用いた振とう培養で増殖させた腐朽菌の菌糸粒をクリーンベンチ上

Fig. 1. A testing device of bending creep measurement coupled with fungal attack. Mycelial fragments prepared from shake culture were spread on the bottom tension surface of the sterilized specimen. Weight was hung from the outside of the decay chamber consisting of a wire frame and a polyethylene bag.

で液体培地から網ですくい、エチレンオキシドガスで滅菌した試験体の表面にふりかけ、滅菌水の入った容器とともにポリエチレンフィルムで包んだケースに入れ、シリコンラバーで栓をした (Fig. 1)。菌糸が生長し試験体の表面を被覆し始めるまで2〜3日静置し、その後菌糸粒付着面を引張側にしてクリーブ台に設置し、スパン 300 mm で中央に荷重をかけ、中央たわみを経時的に測定した。なお、クリーブ試験は菌の生育に適した26℃の環境室で行った。

腐朽菌を接種せず滅菌水を吸水させたコントロール試験体の含水率は約35%に調製したが、これは褐色腐朽菌のオオウズラタケを作用させて破壊した場合、試験体含水率が30〜40%であったことにもとづいている。湿潤状態での静的曲げ強度を求める際も同様の吸水処理を行った。

3 試験結果と考察

3・1 試験条件の検討

エゾマツ丸太の隣接部位から採取し、材質がほぼ同一と考えられる試料を用い、オオウズラタケを作用させた場合のたわみ変化のようすを Fig. 2 に示す。負荷した荷重は、湿潤状態での静的曲げ強さに対して10%、15%、20%に相当する大きさとした。

腐朽菌が接種された試験体のたわみ増加曲線のパターンは、負荷開始直後のたわみ増加期、漸増期、その後の急激な増加から破壊に至る変化を示すが、そのあらわれ方は荷重比で異なっている。一方、腐朽菌は作

Fig. 2. Deflection-time curves of spruce wood in creep tests under exposure to *T. palustris* (•) and sterile wet controls (◦). The number in the parenthesis indicates the stress ratio of loading relative to the static bending strength, and wl shows the value of weight loss of the tested specimen at time of fracture (shown by arrows).

用せず滅菌水のみ吸水させた試験体では、20%の荷重比であっても負荷後数日を経過すると、たわみの増加は安定した。したがって、腐朽菌接種試験体と滅菌・湿潤試験体のたわみ増加の差異は、腐朽劣化による材料の強度低下にもとづくと考えられる。腐朽初期の漸増期における接種試験体のたわみ増加は直線的で、わずかながら曲げ剛性が低下していていることを示している。急激なたわみ増加は、試験体の劣化が進行して荷重比が相対的にクリープ限度を越えたためと推定されるが、破壊までの期間は通常のクリープ試験の場合に比べてきわめて短く、この期間においても劣化による強度低下が生じており、破壊時にはそれぞれの荷重比近くまで初期強度が低下していると思われる。

破壊時の重量減少率は荷重比の低下につれて増加しているが、図中に **wl** で示したように、この供試材の場合荷重比が20%で重量減少率は13.8%、荷重比10%で22.0%であった。腐朽劣化をうけた木材の重量減少率と強度低下の程度との関係は共通するものではなく、木材の樹種や材質あるいは対象とする強度性能によって変化するものであるが、5~10%の重量減少率で曲げ強さは50~70%低下するといわれており、このいわゆる初期腐朽における強度性能の挙動の把握は材料性能を知るうえで重要である。破断は荷重比10%でも荷重点下で一直線状に生じ、破壊面はささくれたたずぜい性破壊の特徴を示しており、とくに圧縮側、引張側をとわず平滑な断面形状を呈していた。

Fig. 3 は荷重比を一定 (10%) にし、あらかじめ小型試験片のソイルブロックテストによって耐朽性が相違することが分っている試験体 (重量減少率は $A > B > C$) を同一の操作で曲げクリープ試験した結果である。3種類の試験体とも滅菌・吸水の場合の挙動はもちろん接種試験体での負荷直後のたわみは同一である

Fig. 3. Deflection-time curves of spruce wood infested by *T. palustris*. The stress ratio was fixed at 10%, and the specimens of different durabilities were tested in the same manner.

が、その後の増加挙動はA, B, Cによって異なり、Aでは20日経過後からたわみ急増期に入り、約60日後に破壊した。一方、BはAに比べてたわみ増加の傾向は緩やかで、破壊時期も約40日遅れた。破壊時の重量減少率は前述と同様20%前後であるが、破壊時期は大いに異なる。さらにCでは100日経過してもたわみ量は少なくかつ破壊に至らず、劣化がゆっくり生じていることが予測される。この図に示したように、たわみ増加の挙動は供試木材の耐朽性の相違を明確に反映しており、腐朽による強度性能の低下に対応しているといえる。かつソイルブロック法に比較して早い腐朽期間で差異をとらえることができた。

ところで、本試験法において荷重のとり方として荷重比を用いると、試験体の厚さによって初期たわみあるいはその後の挙動が変動し、またあらかじめ静的曲げ強度を測定しておく必要がある。そこでより簡略にするため一定の瞬間弾性たわみとして、スパン長の1/300 (ここでは1 mm) を与える荷重を負荷することにした。供試材料の種類によって相違するが、構造用材として使用される木材および木質材料ではこのたわみ量は10~15%の荷重比の負荷をした場合にほぼ該当する。

Fig. 4 はアスペン材を用い、腐朽菌の種類を変えて劣化させた場合のたわみ増加のようすを示す。負荷した荷重は両者共瞬間たわみ1 mm を与える大きさである。腐朽初期のたわみ増加のようすは、褐色腐朽菌のオオウズラタケおよび白色腐朽菌のカワラタケとも同様の挙動を示すが、前者の場合約70日で破壊し、一方後者では破壊に至るまではほぼその2倍の期間を要した。かつカワラタケではオオウズラタケに比較して、徐々にたわみが増加している傾向がうかがえ、急増期の出現時のようすも歴然としない。アスペン材から小型の

Fig. 4. Deflection-time curves of aspen wood in creep tests under progressive fungal attack by two different types of the fungus species of *T. palustris* (●) and *C. versicolor* (○). Load was fixed at an arbitrary value which caused 1 mm initial deflection.

試験片を作製し、日本木材保存協会規格の木質材料の耐朽性試験方法 (JWPA-第3号 1979) に準じ、ソイルブロック法で強制腐朽させたところ、8週間および12週間目の重量減少率は、オオズラタケで24%と32%、カワラタケで26%と37%でありほぼ同程度の重量減少が生じているといえる。ところがクリープ試験における破壊時の重量減少率は、オオズラタケの場合14.7%、カワラタケでは41.6%であり、同一の荷重条件にもかかわらず後者ではきわめて大きな重量減少を必要とした。一般的に褐色腐朽菌は比較的小さな重量減少率でも大きな強度低下をもたらすといわれており、これは褐色腐朽菌が木材強度を主体的に維持しているセルロースを主として分解し、一方白色腐朽菌ではセルロースをはじめ多糖のほかリグニンの分解も重量減少にかかわっているため、同一の重量減少率の場合褐色腐朽菌による強度低下がより著しいためであろう。

上記のようにオオズラタケの場合、強度性能に与える影響が大きくかつ雑菌の混入に対して抵抗性があるなど腐朽操作も容易なため、本実験においては主としてオオズラタケを作用させて試験を行った。

3・2 各種の木質材料への適用

針葉樹合板にオオズラタケを作用させた場合のたわみ増加のようすを Fig. 5 に示す。負荷条件は前述

Fig. 5. Deflection-time curves of Western hemlock and Douglas-fir plywood (MF resin, 9 mm thickness) infested by *T. palustris*. The value of loading was set as described in Fig. 4.

に従って初期たわみ1 mmを与える荷重比を採用した。試験体の長尺方向は表層単板の繊維方向であるが、供試合板が3層構成であり、菌糸がコア単板の木口から侵入して中層のみ率先して劣化するのを防ぐため、中央の切断面をも両端同様エポキシ樹脂塗料で被覆した。Fig. 5 のたわみ増加のようすを素材の場合に比較すると、漸増期間が長くかつ急増期のあらわれ方も顕著ではなく急増時から破壊までの期間は短い。これは供試合板のプライ数が少なく、単板ごとの耐朽性も相違するため素材に比べ劣化の進行が均一的ではないためであろう。

前出と同様の小型試験片を用いたソイルブロックテストでの12週間の強制腐朽による重量減少率は、ベイツ合板がベイマツ合板に比べやや大きい極端な差異はみられない。しかしたわみの変化で相違が著しいことは、重量減少の速度に比較して強度低下への劣化の影響の度合いがベイツ合板でより大きいと考えられる。

Fig. 6 は無処理の市販パーティクルボードを供試した結果である。前述のように、スパン長の1/300に相当する1 mmの初期たわみを与える荷重を荷重したが、これは応力としてM2, Pでは約19 kg/cm², M1では15 kg/cm²に該当する。パーティクルボードでは、原

Fig. 6. Deflection-time curves of three types of commercial particleboards bonded with PF resin (P) and UMF resin (M1 and M2). M1 board has larger particles and lower density as compared to M2 board. Each board conforms to JIS A 5908.

料パーティクルの樹種や形状、接着剤の種類や添加量あるいは比重などのボード材質が耐朽性に影響するといわれている。M2とPボードでは、接着剤の種類を除き、他の製板条件や材質はほぼ同一であり滅菌・吸水ボードのたわみ挙動は類似している。一方、オオズラタケ接種の各ボードのたわみ増加をみると、M2ボードの方がより早く急増期に入り破壊までの期間も短い。このようにM2, Pボード間に耐朽性にもとづくたわみ挙動の差異がみられたことは、接着剤の種類によって腐朽菌のボードへの侵入、劣化の程度が異なり、ユリア・メラミン共縮合樹脂接着剤を用いた場合でより激しいことを示しており、既報の腐朽試験の結果を裏づけている。

M1ボードにおけるたわみ増加は、PボードはもちろんM2に比べて著しくかつ破壊時期も極端に早い。これは、M1ボードのタイプが150Mで他の2種のボードに比較して強度が低いことおよび原料となるパーティクルの形状が大きく、かつ接着剤の添加率も低い

ことから腐朽劣化をうけやすいためであろう。

ところで、腐朽菌が作用したパーティクルボードでは、初期の段階からたわみの増加が素材などに比較して著しく、破壊に至る変形量も大きい。またこの傾向はユリア・メラミン共縮合の樹脂接着剤を用いたボードで、より顕著である。破壊時の重量減少率も同一の初期たわみを与えた他の材料に比べ小さい。パーティクルボードの場合、木材自体の劣化に先だって、腐朽菌糸がパーティクルの接着相互間に侵入して接着劣化をひき起していることが予想され、その様子は走査電子顕微鏡による破断面の観察からも示されている。すなわちパーティクルボードでは、腐朽初期のわずかな重量減少率であってもかなりの強度低下と大きなたわみが生じる場合があり、このような時間の経過に従ってたわみ挙動を追跡できる本試験法を用いることによって明らかにできる。

接着剤中に防腐剤を混入して製造した処理ボードの耐朽性をみるため、オオウズラタケを作用させ、たわみ測定を行った結果が Fig. 7 に示されている。混入した防腐剤によって、静的曲げ性能、はく離強さあるいは吸水厚さ膨張率など物理的性質はほとんど影響されないことが分っている¹⁰⁾ので、たわみ変化の挙動は腐朽菌の劣化作用の程度に支配されるといえる。製造したボードはエゾマツを原料とし、接着剤としてユリア・メラミン共縮合樹脂を用いた単層構成であるた

Fig. 7. Deflection-time curves of untreated (○) and treated particleboards (□, △) infested by *T. palustris*. Treatment was conducted by incorporation of fungicides in the glue at the retention level of 1kg/m³. Codes of IF-1000 and EBIP show the glue-additive chemicals of organiodine- and trihaloaryl compound, respectively.

め、無処理試験体の耐朽性は低く30日過ぎに破壊した。一方2種の処理ボードは200日経過しても破壊せず、負荷初期を除きたわみの増加傾向もきわめて低く、高い耐朽性を付与できたといえる。処理ボードのたわみ増加が滅菌・湿潤ボードより大きいのは、後者では腐菌朽の試験体下面への接種によってボードが水分の非定常状態になるためであり、劣化作用によるものではない。

4 結 言

腐朽劣化による木質材料の機械的性質の変化を知る手段として、曲げ変形と腐朽菌の作用とを複合した試験方法を考案し、各種の木質材料に適用した。腐朽菌作用下でのたわみ変化の挙動は、腐朽による強度性能の低下に対応しており、供試材料の耐朽性を反映した。

この試験方法では、比較的大型の試験体を用いて、強度劣化を時間の経過に従って追跡することができる。また振とう培養で得た菌糸粒を直接試験体に振りかけるため、培養基の組成や菌糸の生長状態による試験結果の変動が少なく、きわめて再現性の良いことが認められた。ただ比較の厚い材料を試験する場合あるいは水分要求度の高いカワラタケを用いる際は、あらかじめ試験体を吸水させるなどの処置が必要である。

パーティクルボードにみられたように低い重量減少率で、高い強度低下と大きな曲げたわみが腐朽によって生じる場合には、とくにこの試験方法が耐朽性評価法としてすぐれており、有用な知見を得ることができる。

(昭和58年3月31日 日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 松岡昭四郎, 木材工業, **35**, 53 (1980).
- 2) M. Gersonde and G. Becker, Holz als Roh- und Werkstoff, **16**, 346 (1958).
- 3) 檜垣宮都, 第29回日本木材学会大会要旨集, p. 362 (1979).
- 4) 高橋旨象, 第31回日本木材学会大会要旨集, p. 302 (1981).
- 5) W.W. Wilcox, Wood & Fiber, **9**, 252 (1978).
- 6) 原口隆英, "木材保存", p. 53 (1982) 文教出版.
- 7) E.R. Tool and H.M. Barnes, For. Prod. J., **24**(10), 55 (1974).
- 8) H. Willeitner, Holz als Roh- und Werkstoff, **22**, 264 (1965).
- 9) 今村祐嗣, 西本孝一, 木材学会誌, **30**, 1027 (1984).
- 10) 今村祐嗣, 高橋旨象, 西本孝一, 川井秀一, 佐々木光, 第33回日本木材学会大会要旨集, p. 339 (1983).