

## 限界状態設計法における木材の経年劣化の取り扱い

The consideration of mechanical deterioration of timber on the Limit State Design

飯島泰男\*

IJJIMA Yasuo

\*農博 秋田県立大学木材高度加工研究所 (〒016-0876 能代市海詠坂 11-1)

**Keywords:** 限界状態設計法、強度的劣化、腐朽、クリープ変形、荷重継続時間効果  
*Limit State Design, mechanical deterioration, decay, creep-deformation, duration of load effect*

### 1. はじめに

日本建築学会では1997年から「木質構造限界状態設計法小委員会（主査：平嶋義彦名古屋大学教授）」を設置し、5年にわたって限界状態設計法の木質構造への適用に関する研究調査活動を行った。筆者は同小委員会に1998年から参加し、おもに、設計法確立に必要な木材・木質材料の性能評価について担当した。2002年10月にはその成果物として「木質構造限界状態設計指針（案）」の原稿を建築学会構造委員会に提出し、先頃、査読が終了した。そして、本年10月、出版に合わせた講習会が行われることになった。

本論は「限界状態設計法における木材の経年劣化の取り扱い」と題している。前記指針（案）において「劣化」という言葉について直接触れられているのは「304.1 基準強度特性値に対する調整係数」での「劣化影響係数（ $K_d$ ）」のみである。しかし、これは「接着して製造する一部の材料においては、接着部分が熱・温湿度繰返し・紫外線等によって劣化する」ことを想定した係数であり、木材そのものの腐朽や熱による劣化を考慮した係数は与えられていない。さらに、これと関連する項目として「306 使用環境区分」があり、「I：常時湿潤状態における環境、II：断続的に湿潤状態となる環境、III：通常の使用環境（使用環境IおよびII以外の環境）」に3つに区分している。土木構造物ではほとんどが「使用環境I」と考えられるが、ここでは、使用環境区分による低減係数は「劣化」ではなく「含水率調整係数」として取り扱い、強度では0.7、弾性係数では0.85を乗じて低減するものと考えている。

このほかに木材が荷重を受けることによって生じるクリープ変形および荷重継続時間（DOL）効果があるが、クリープ変形についてはとくに記載されておらず、DOL効果は「荷重継続期間影響係数（ $K_d$ ）」として、比較的詳しく述べている。

このような規準となった経過を含め、標記のテーマに関する現状について整理する。

### 2. 経年変化の原理

#### 2.1 老化と劣化

木材は環境条件によっては、時間の経過に伴って材質が変化することがある。この変化の度合いは材料に加わる外力の大きさと負荷時間および材料自体の抵抗性によってさまざまであるが、負荷時間との関係を総称して「経年変化」とよぶことが多い。

経年変化には「老化（aging）」と「劣化（deterioration）」がある。老化とは「常温において徐々に進行する材質の変化」、劣化とは「材料が時間の経過とともに、熱・水分・酸素・オゾン・紫外線・薬品・生物・荷重などの作用によって物理的・化学的変質を起こし、物性が低下する現象」である。木材では劣化が外部的要因の負荷条件によっては数年で急激に変化する場合もあるのに

対し、老化による材質変化は数百年が単位となる。

木材強度の老化現象については、図-1に示した小原のデータ<sup>1)</sup>がある。ここでは乾燥条件下にある木材（針葉樹）では、伐採後約200年にわたって強度が上昇し、その後徐々に低下していく傾向が示されており、通常のタイムスケールではほとんど問題とならないほど緩慢である。また、最近公表された杉原の研究<sup>2)</sup>によれば、築後125～290年で解体された3つの寺院から採取されたアカマツ材の曲げ強さは、含水率および密度が同等でも、新材より10～20%程度上昇していることが示されており、小原の結果を裏付けている。

一方、劣化の要因は、酸素、紫外線、熱、水、圧力、薬品などによる「物理・化学的劣化」、木材腐朽菌、シロアリなどによる「生物的劣化」および「力学的劣化」に分けられる。

「物理・化学的劣化」と「生物的劣化」は相互に関連する。たとえば、木材を屋外に使用した場合、木材は太陽光に含まれる紫外線によって、表面のリグニンなどの成分が分解されて纖維状になり、そこにさまざまな塵埃が沈着するため変色する。また熱と雨水の影響によって含水率が変動するため、収縮膨潤を繰り返し、部分的に割れを生じる。ただしこの段階では、木材の強度に決定的なダメージを与えない。しかし、ここに雨水が滞留しやすい状態になると、木材腐朽菌が繁殖しやすくなっている木材本体の成分が分解を始め、やがて強度的に問題のある状態に陥る。

以上のうち重要な生物的劣化と力学的劣化については後述するが、それ以外では熱の影響が重要である。木材の温度が70℃程度まで上昇すると木材中のリグニンの可塑化によって強度性能が変化し、変形が大きく、かつ強度性能が低下する。これは材の含水率の条件によっても異なり、含水率の高い材ほどその影響が大きい。強度変化の度合いは樹種・荷重条件によっても異なるが、縦圧縮強度の例では気乾含水率条件の材で1℃あたり0.5～1%の変動がある。100℃を大きく超えるような高温が加わった場合には木材中のヘミセルロースなどの成分が変化し、材がもろくなる傾向がある<sup>3)</sup>。

## 2.2 腐朽と蟻害

生物的劣化で重要なものには腐朽（decay）と蟻害（termite attack）がある。

腐朽は微生物によって、木材の主成分が分解され、化学・物理的性質が大きく変化する劣化現象を指す。腐朽の形は、白色腐朽、褐色腐朽、軟腐朽の3種類に分けられる。白色腐朽は主としてリグニンが分解され腐朽材が白色になるもの、褐色腐朽は主としてセルロースが分解され腐朽材が褐色になるもの、軟腐朽は表面が黒く軟らかくなるものをいっている（図-2）。木材の腐朽の程度は重量減少率で表わされることが多く、重量減少率に対する強度低減率の比は、白色腐朽、褐色腐朽、軟腐朽の順に大きくなっていく。しかし、これらの定量的な判定は現在のところ難しく、木材のJAS規格では定性的な表現にとどまっている。

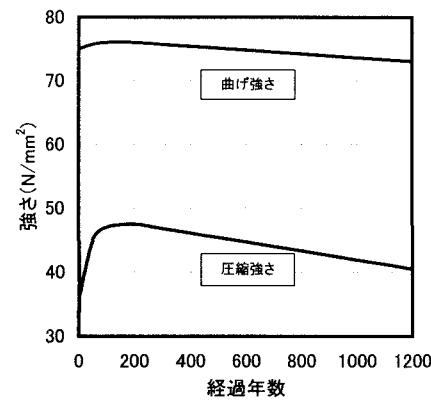


図-1.木材強度の経年変化  
(小原<sup>1)</sup>の文献をもとに作成)

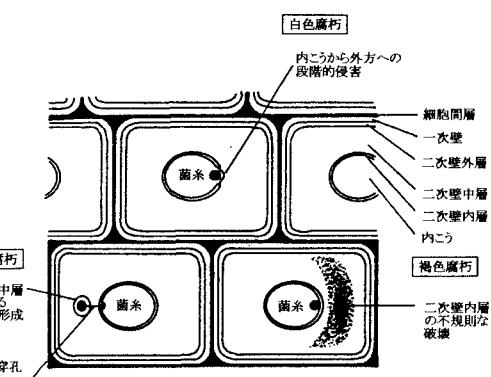


図-2.代表的な腐朽様式とそれにかかる菌  
(高橋旨象：キノコと木材、1989、築地書院)

この微生物の主役はシイタケなどの担子菌（木材腐朽菌ともいう）で、これが成長するためには、栄養源である木材、酸素、適当な温度（5~40°C程度）、水分（含水率20%以上）の4つの要素が不可欠である。これらの要素がすべて揃って、そこに担子菌などが住み着くと、新しい木材であっても腐朽しはじめる。したがって、これらの要素のうちどれか1つを除外できるようすれば、木材は半永久的に使用できる。しかし通常の建築物では酸素・温度の遮断は難しく、腐朽を防止するには木材そのものを防腐処理等によって栄養源とならないようにするか、あるいは木材中の含水率を20%以下の状態に保つか、というのが最良の方法になる。

材が腐朽し、図-3の状態になってしまったときは、いわば手遅れである。したがってメンテナンス時に、何らかの方法で腐朽の進行度合いを、非破壊的にチェックすることも重要である。木材は腐朽の進行に伴って密度（重さ）が低減する傾向があるため、このことを利用したいいくつかの器械が市販されている。比較的よく用いられているのは、鉄針を材に打ち込んだときの貫入深さから推定するものである。

なおシロアリによる被害も無視できないが、シロアリは腐朽材、とくに褐色腐朽材を好む（腐朽による軟化、または腐朽菌がシロアリの誘因物質をつくるため、といわれている）ことが知られている。したがって、シロアリの害を防ぐには、まず、木材が腐朽する条件を与えないことが先決となる。

### 2.3 クリープ・DOL

木材に一定の荷重を載せたままにしておくと、変形が徐々に増加していく現象が生じる。これを「クリープ（Creep）」とよぶ。木材のクリープは材の含水率や温湿度などの環境条件に影響されるという特徴があり、気乾材での最終的な変形量は初期の弾性変形の1.6倍~2.0倍である。そして、荷重を取り除けば変形は徐々に回復していく（図-4）。

しかし、負荷荷重がある水準を超えると、比較的穏和な雰囲気条件下でも、木材細胞内には全体の破壊には至らない程度の微少な損傷が発生する。しかし、そしてこの荷重条件が続くと時間の増加に伴って損傷が増え続け、最終的に材は破壊する。それ以下の荷重条件では、クリープたわみは進行するものの最終的な破壊はおこらない。「クリープ限界」とはこの限界となる荷重条件のことと、通常の実験での破壊荷重の50~60%である。

クリープ限界以上の荷重条件では、荷重水準によって破壊までの時間が異なる。図-5は米国Forest Products LaboratoryのWood等の実験から予測した結果を図示したもので、これから破壊荷重の55%負荷時の破壊所要時間は

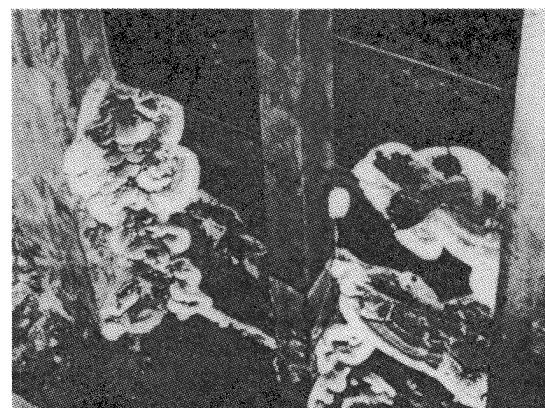


図-3 住宅内に侵入して成長したナミダタケ  
(土居修一氏提供)

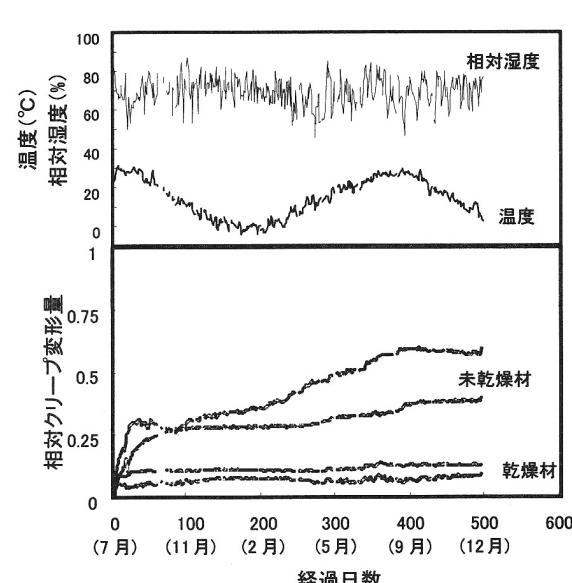


図-4 クリープ変形実験結果の例  
(岡崎泰男氏提供による)

約50年、80%負荷時では約3日となることが分かる。荷重の継続時間と破壊荷重水準の関係をDOL (Duration of Load、荷重継続時間) 効果といい、現行の許容応力度体系ではこの影響を考慮に入れている。

以上のようなクリープおよびDOL効果といった力学的条件による材質変化は木材の組織構造に由来するものであるため、構造物に何らかの荷重量が負荷される場合、避けられないものである。

### 3. 構造設計において「経年変化」をどう捉えるか

#### 3.1 現行の建築法規における取り扱い

日本の現行の建築法規では、施行令第36条2項で「耐久性関係規定」が示されている。このうち木質構造に直接関連するものは第41条（木材の品質）、第49条（防腐措置）のみで「物理・化学的劣化」「生物的劣化」についての特段の規定ではなく、一定の水準を超える材料の品質（樹種・防腐処理・寸法等）のものであれば、劣化は無視しているような表現になっている。これは、材を劣化しやすい環境におくこと自体を避けるべきである、あるいは使用材料の対劣化性能を向上させるか、定期的なメンテナンス等によって劣化しないようにする、ということを前提としている、ということであろう。このような表現をせざるを得ない理由は、劣化の進行が環境と材料の条件によって実にさまざまであり、大量のデータをもとに統計解析を行わない限り、現在の状況では数値化することが難しいということでもある。

一方、クリープとDOLについては実験データをもとにして、いくつかの数値化が行われている。曲げクリープについては平成12年5月31日に発令された建設省告示第1459号「構造物の使用上の支障が起こらないことを確かめる必要がある場合及びその確認方法を定める件」の第2で、建築物のはりのたわみ計算法が明記され、このなかで、たわみ制限はスパンの1/250とし、木造に対する「変形増大係数」を「2」（ただし「載荷実験により求めた場合は、当該数値を用いることができる」としている）、すなわち初期たわみをスパンの1/500として設計することとしている。しかし、クリープたわみ進行状況の測定結果からは、施工時の材料含水率によって変形増大係数はかなり異なることが分かってきている。

また、木材の設計用許容応力度は建築基準法施行令89および95条から、表-1のようになる。表中の「短期」「長期」といった区分は、木材のDOL効果を考慮したもので、荷重時間がきわめて短い場合（数分、短期）を1とすると、荷重負荷時間が3日（積雪短期）、3ヶ月（積雪長期）、50年以上（長期）に対してそれぞれ0.8、0.7、0.55となることから誘導され、これに安全係数として2/3を乗じたものである。

なお、設計用積雪荷重Sは「年最大積雪深」に密度を乗じた値から誘導され、限界耐力計算のとき1.4S、許容応力度計算のとき一般地ではS（短期）、多雪区域では0.7S（長期）と設定されている。

多雪区域で許容応力度計算のときに積雪荷重を低減しているのは、積雪期間中の平均積雪荷重に調整するための措置である。

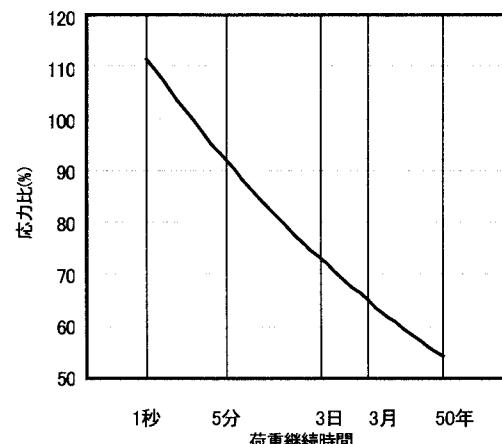


図-5 DOL 効果曲線

表-1 基準強度と設計用許容応力度の関係  
(建築基準法施行令第89および95条から作成)

基準強度 (5%下限値)	積雪 (限界耐力計算)	短期	積雪 (許容応力度計算)		長期
			短期	長期	
F	4F/5	2F/3	1.6F/3	1.43F/3	1.1F/3

### 3.2 限界状態設計法と経年変化

ここでは経年変化に対する限界状態設計法での取り扱いについての一般論をまとめておく。

構造設計とはいくつかの荷重が構造物に加わったとき発生する荷重効果 $S_L$ を、材料側の耐力 $S_R$ と比較し、 $S_R \geq \sum S_L$ となるように材料側の断面等を調整することである。このとき、 $S_L$ 、 $S_R$ ともいろいろな不確定要因（ばらつき）を含んでいる。限界状態設計法（Limit State Design、LSD）は、構造物の安全性や機能性を確保するための不確定要因である $S_L$ 、 $S_R$ を「確率値」のまま計算を進める方法で、よく図-6のようなL-R（Load-Resistance）モデルを用いて説明される。ここでLoadは荷重効果、Resistanceは材料の耐力で、荷重、耐力の両方にばらつきがあるから、それを確率密度分布の形で描くと図の形になる。LSDの詳細についてはここでは省略するが、端的に言えば図でのLとRの重なり具合が大きいほど安全性が低くなることになる。

ところで、我が国では、通常、許容応力度設計法（Working Stress Design、WSD）を前提に論を進める。このWSDとLSDは一見異なった考え方のようにも見えるが、WSDでも図-6に示したようなL、Rの不確定要因を考慮に入れた確定値を工学的判断によって決定し、その値によって構造計算を行っている。すなわちWSDでは、通常、荷重に対してはそれぞれの分布の上限値付近、耐力は分布の下限値付近の「確定値」を考える。そして、それぞれに不確定要因を考慮した適当な係数 $\alpha$ を乗じ、 $\alpha_R S_R \geq \sum \alpha_L S_L$ なる規範式の形に置き換えて照査を進めているのである。この場合、 $S_R$ 、 $S_L$ は観測結果から一応の特定は可能であるが、 $\alpha$ はこれまでの経験をもとに誘導されていることが多い。そして、計算された $\alpha_R S_R$ 、 $\alpha_L S_L$ が図-6のような位置関係にあれば、OKとなる。

以上のように構造耐力と荷重効果の関係を定義しておくと、構造耐力の劣化度と構造物の安全性の関連が見えやすくなる。すなわち、図-7のように構造耐力の分布が「初期耐力」から、ある時間が経過し、何らかの劣化を生じた後の「劣化耐力」に変化したとすると、荷重効果は変化しないわけであるから、当然、劣化によって構造物の安全性が低下する、ということになる。ただし、耐力側は「初期耐力」はともかく、「劣化耐力」については、様々な劣化要因があって、現在のところ分布形が特定できないのが現状である。

ちなみにカナダではダメージ累積モデルを用いて、荷重継続期間の影響を確率論的に解析し、荷重継続期間影響係数を算定しているが、今回の限界状態設計法の指針（案）ではDOLについて、

『材料強度の時間依存性を確率過程として扱うのはなかなか難しく、わが国ではまだモデル化や定式化には至っていないのが現状である。そこで本指針ではこの現象を確定論的に取り扱い、「木質構造設計規準・同解説」の考え方方に準拠することとした。

同規準では、強度比と荷重継続期間の関係を図304.1（注：図-5と同じグラフ）のように、250年と10分（標準材料試験時間）を直線で結び、250年を1.0、10分を2.0として考慮する荷重継続期間の強度比をこの直線から読みとっている。本指針では組合せ荷重のうちの主の荷重の平均作用時間を10分、1日、3日、3ヶ月、50年とし、10分すなわち標準材料試験時間で得た基準強度特性値を基準としてこれを強度比

（すなわち荷重継続期間影響係数）1.0と

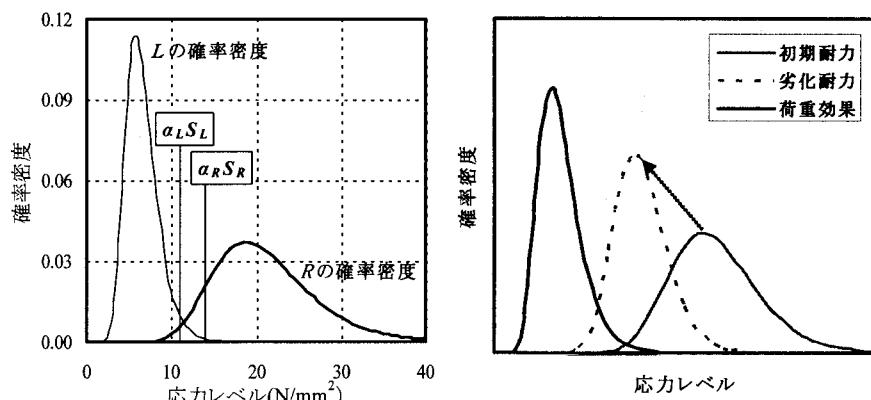


図-6 L-R モデル

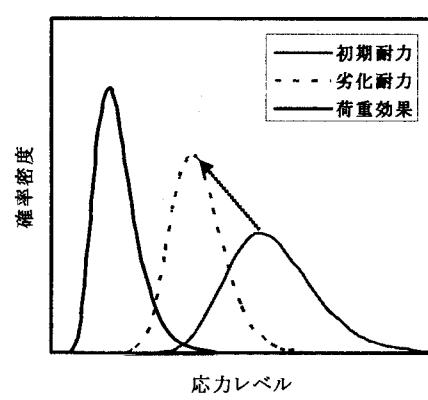


図-7 耐力劣化モデル

し、以下該当する期間に対応する値を図の破線より読みとりこれを荷重継続期間影響係数とした。限界状態設計における荷重継続期間が強度に与える影響に対する考え方方は次のとおりである。

一般に限界状態設計では、荷重・耐力係数を用いて設計することにより構造物に目標信頼性指標 $\beta$ に基づく構造信頼性を付与できる。しかし材料強度に時間依存性があつて、時間経過とともに強度が減少していくような場合には、構造物の破壊確率は当初設定した値より増大してしまう。そこで耐力の公称値に強度低下を表す指標である荷重継続期間影響係数を乗じて公称値を低減し、これによって部材の寸法を大きくして目標信頼性指標を基準期間中確保しようとするものである。』

という記述を行うに止まっている。

#### 4. おわりに

木質構造物の「変形・耐力」が時間経過に伴って変化（劣化）することは、現象としては、誰もが認めていることであり、この変化過程を科学的に明らかにし、工学的な設計技術に適用できるようにすることが求められている、と考える。

しかし、冒頭にも述べたように「限界状態設計法指針（案）」では「建築基準法例」および「木質構造設計規準・同解説」との整合性の考慮したこともあるが、時間依存性を確率過程として扱うことが難しさ、よるものである。また、DOLについては、その基礎データになったものは各単位材料の曲げが中心であり、他の荷重条件（引張・圧縮・せん断等）、さらに接合部全体でのデータは少ない、というのが現状であるため、暫定的に確定値を決めて記述せざるを得なかつた、ということになろう。

「変形・耐力」の時間経過に伴う変化過程を、周囲の環境変動を考慮しながら解析することは非常に複雑で、まさに「これから」という状態にはあるが、ひとまず、これを単純化して、劣化を数学的な関数モデルに置き換えてみてはどうだろうか、と思っている。

ただ、このような数学的モデルに置き換えることができたとしても、単純に「劣化耐力」＝「劣化係数」×「初期耐力」、のような形に置き換えて考察することには問題が残る。なぜなら、「劣化後の構造モデル」は構造計画によっては「初期の構造モデル」は同じにならないからである。すなわち、当初「並列モデル」だったものが、時間経過に伴って「直列化」する可能性である。あるいは、構成要素のダクタイル型からブリットル型への変化、といつてもいいかもしれない。

住宅の場合では、阪神大震災のとき「軸組部材の解離」による倒壊例が多くあつた。これは、筋かい型壁構造は「直列モデル」と考えてよく、筋かいが破壊する、横架材を突き上げるといった木材部の損傷、さらに、本来ダクタイル型の挙動を示すはずの金属接合部が物理的劣化によってブリットル型へ変化し、接合部が引き抜ける等々、というようなことが複合して起こったものと考えることができる。

いずれにしても、木材本体の経年劣化だけではなく、構造計画全体から見た耐久性の保証も重要である、ということである。

#### 参考文献

- 1) 小原二郎：木材の老化、満久崇麿編「木材工学」、p.314、養賢堂、1961
- 2) 杉原未奈、平嶋義彦ほか：古材の強度的性質、木材学会要旨集、E221145、2003
- 3) 飯島泰男ほか：スギ材の材質変化に及ぼす乾燥条件の影響（II）力学的性能について、木材学会要旨集、PF02、2003