

〈総説・解説〉

土木用木質構造物の耐用年数評価について

飯 島 泰 男*

1. はじめに

本誌読者諸兄の中には、「こいつは誰だ?」と訝しく思っている方もおられるだろう。まずは、自己紹介代わりに、本稿の執筆経緯を述べよう。

筆者の木材学会大会での発表はもう30回くらいになる。そのほとんどは「木材強度・木質構造」の部門で、専ら製材・集成材等の強度評価に関するものであった。ところが、なぜか、1999年度、初めて木材保存部門で本稿に記す内容のことを発表することになってしまった。いつもと雰囲気の違い、随分緊張した。

木材・木質構造の耐久性については、これまで全く興味がなかったわけではない。それどころか、筆者が以前に在籍していた富山県林業技術センター時代から、同センターの長谷川益夫氏が進めてきたこの種の研究に、多少なりともつき合ってきたし、1995年の阪神大震災での被災状況をみて、この分野と筆者の本業(?)の関連の重要性を意識していた。そしてこれらをどう繋ぐか、について、こころばかり考えていた。

そこに、秋田県当局から「治山用木製構造物耐久性調査」の依頼が飛び込んできた。要するに「土木用木製構造物が何年くらい保つか調査しろ」というわけであるが、聞くと、「我々が現場で使えるような学術的バックアップ資料がなく、設計のとき苦労している。できれば設計マニュアルのような形で取りまとめてほしい」というのである。

困った、というか、筆者は「その道の専門家ではなし、当所にはかの土居修一という御仁も居るわけだし…」というわけで、彼にサポートを頼み

ながら、これを承ることにしたわけである。

以下、そのことを書く。ただ、ここで用いた方法はもとより不完全極まりないものであり、所期の目的は「このような考え方に対する読者諸兄のご意見を伺うこと」と思っている。

その意味では「総説」でも「解説」でもない。強いて言えば「ディスカッション用資料」か?

2. 課題設定と評価方法

2.1 課題の設定

先の県当局からの依頼は、あくまで「秋田県における治山用木製構造物の耐用限界」に関することであって、「木材の耐久(朽)性」に限定された話ではなかった。しかし、もし、建築物のような複雑なものではなく、比較的単純な土木用の杭列や柵工のような構造を対象に考えてみれば、その耐用年数は、材料の耐久(朽)性でほとんど決まることになる。そこで手始めとして、そのような構造物に用いられた材料群の使用限界に着目し、しかも「現場で使える設計マニュアル作成」を意識して試験を進めたわけである。

ここで課題として設定したのは、構造物の「耐用年数」を「施工目的ごとに要求される残存強度(この点は5.で述べる)が保証できる期間」と理解した上で、

① 構造物部材の使用可能率の経年変化から残存強度を推定し、これをもとに施工地および施工目的ごとの耐用年数を決定する、実用的に有効な方法はないか?

② 未経験者でも現場で比較的簡単に部材使用可否を判定できる評価方法が必要ではないか?

* 秋田県立大学木材高度加工研究所

の2点で、後者はメンテナンスや部材交換を念頭に置いたものである。

2.2 評価の方法

耐用限界の評価方法で重要なことは、現場では実際に作業する人が、必ずしも木材、とくに「木材保存分野」に習熟した人ばかりではない、ということである。

耐朽性調査で広く用いられている被害度判定法は、雨宮ら¹⁾の提案による方法であろう。これは、目視によって被害度を以下の0～5の6階級に分けている。すなわち、0:健全、1:部分的に軽度の被害、2:全面的に軽度の被害、3:2の状態の上に部分的に激しい被害、4:全面的に激しい被害、5:破壊、ということである。また、よく、その道の達人(?)が、千枚通しやドライバーで判定している風景も見かける。

しかしこのような木材保存を専門とする研究者の経験的判断基準は、そのまま現場で踏襲されるのだろうか? 五(六?)感以外の何らかのハンディな機器(道具)での、しかも2～3段階—たとえば、個別の材料では、安全、やや危険、危険といったような—の判定方法の採用が望ましいのではないかと考えたのである。

そこで、今回の調査ではスイスProceq社製のピロディン(PILODYN, ピン直径2.5mm)を用いた。他にさらに有効な機器があるかもしれないが、とにかくハンディであることを最優先して採用した。

まず、その原理や既往の研究をざっと見ておく必要はあろう。これはもともとと密度測定器として

開発されたもので、機構は図1のようにになっている。ここで、ピン打ち込み深さ(P_e)と木材の密度には一般に負の相関、かつ密度と強度の正の相関があるため、結果として強度は P_e 値からの推定が可能であろう、ということになる。このことに関しては、1980年代にデンマークのT.L.MADSEN²⁾、P.HOFFMEYER³⁾が気乾条件での健全材についての強度試験から「実用的な判断基準に使えるレベルにある」と報告している。

さらに、木材の腐朽が進行し、材の密度が低減していくと、ピンがより深く材中に入っていく。そこで、木材の腐朽程度を P_e 値で評価し、さらに木材強度に関連づけることができるのではないかと、ということになる。この考え方による実験結果は、国内では既に田中ら^{4)~6)}がいくつか報告している。ただ、それらは実験室レベルに留まっており、今回のような現場条件への適用までは言及していない。

3. 健全材での実験

耐用年数調査の対象としたのは森林土木事業等による木製構造物に使用した木材であるが、その前に材の初期強度とその評価にピロディンが使えるかどうか、の確認のため、健全材の実験を行った。

供試材は、市販されているスギの円柱加工材($\phi=9\sim 17\text{cm}$, $l=180\text{cm}$)とし、計100本である。その測定項目は、

- ・試験材の寸法等: 重量/寸法/木口年輪数(両木口の平均)/含水率(2試料の平均、全乾法による)
- ・物理的特性: 縦振動法によるヤング係数(E_d)/ピロディン打ち込み深さ(P_e)/曲げ強さ(MOR)である。

材はすべて未乾燥材、平均含水率MCは22.8～123.5%であり、この含水率区間における曲げ強度性能(MOR, E_d)が含水率による影響を受けないことを確認した上で、これらと密度とピロディン打ち込み深さの関係を検討した。

まず、角材の含水率30%時の密度(R_{30})を次式によって推定した。

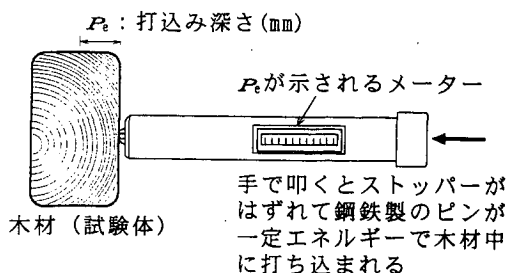


図1 ピロディンの模式図

$$R30 = 1.3 \times W_0 / V$$

ただし, W_0 : 試験体の全乾時推定重量

$$(\text{= } W / (1 + MC / 100))$$

W, V : 試料の試験時重量, 体積

ついで, 目的変数を Pe (なお, Pe 値は最大 40 であるが, 測定結果はいずれも 40 未満であった), 説明変数を試験時含水率 (MC), 含水率 30% 時密度 ($R30$), 重量, 年輪数, 平均年輪幅, 直径とし, 変数減少法によって最良重回帰式を探索した。その結果, 最良重回帰式は, $R30$ と MC を説明変数とした,

$$Pe = 39.8 - 47.56(R30) + 0.0545(MC)$$

$$(R^2 = 0.487)$$

となった。したがって, Pe は測定含水率の範囲では, 含水率 1% について 0.0545 mm の変化をしていることが分かる。この結果から各試験体の標準含水率を, 現地の木製構造物の含水率に近い値と思われる [30%] とした時の, ピロディン打ち込み深さ ($P30$) を次式によって調整した。

$$P30 = Pe - 0.0545 (MC - 30)$$

以上の結果, $P30$ は平均 19.47, 標準偏差 3.485, 変動係数 17.9% となった。

表 1 には各測定値間の単相関係数を一覧した。結果から, 健全材でかつ未乾燥材の場合, 以下のことがいえるであろう。

- ① ピロディン打ち込み深さの実測値 (Pe) は, MOR に対しては実用的には概ね十分の精度で予測は可能 (図 2 参照)。 Ed との相関はやや弱い。密度に関しては含水率で調整した場合 ($R30$) のみ有効で, 実測値 (R) とは無相関。
- ② 含水率によって調整したピロディン打ち込み深さ ($P30$) は, R に対するもののみを除いて,

表 1 各測定値間の単相関係数 ($n=100$)

	MOR	Ed	MC	R	R30	Pe	P30
MOR	1						
Ed	0.689	1					
MC	0.026	-0.030	1				
R	0.524	0.369	0.723	1			
R30	0.707	0.547	-0.224	0.508	1		
Pe	-0.312	-0.240	0.422	-0.088	-0.645	1	
P30	-0.349	-0.253	0.134	-0.333	-0.632	0.955	1

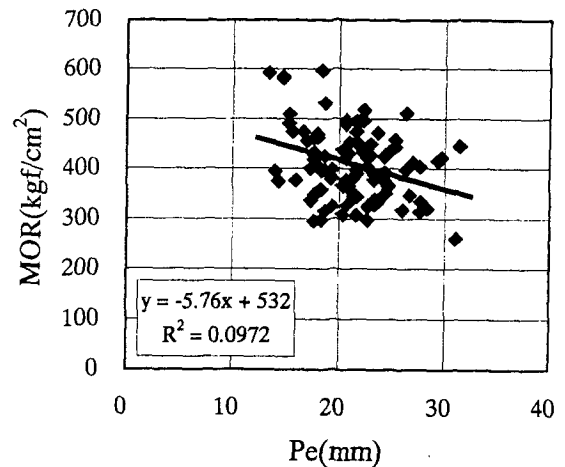


図 2 Pe と MOR の関係

Pe の場合とはほぼ同様の予測精度。

したがって, もし材の含水率が常に FSP 以上であるならば, $Pe < 40$ の場合に限って, この関係から MOR を Pe から予測することは可能である, といえる。

4. 施工地の材について

4.1 測定項目と数値化

施工地における材の耐用年数調査では, 経過年数 1~12 年の範囲にある秋田県内 181 の土木事業工事地点を選んだ。そして現場の技術担当者が, 木製構造物に実際に用いられた材のデータを採取し, そのデータを基に, 筆者が経年劣化状況についての解析を行った。なお, 木材はすべて, スギ材である。

データ解析のため, 調査項目のうちのいくつかを選んで数値化 (大部分は二値化) を行った。その方法とそれらの算術平均値, 標準偏差は以下のとおりである。

- ・施工後の経過年数 (YEAR): 平均 5.35, 標準偏差 3.07。

- ・円柱加工の有無 (MT): 丸太を 0, 円柱加工材を 1。平均 0.348, 標準偏差 0.476。

- ・海岸線からの距臨 (DIST): 調査位置を地図上にプロットして概算。ここでは, 潮風の影響を考慮し, 海

岸部(沿岸から約500m以内)のみ0, それ以外は1としている。平均0.912, 標準偏差0.284。

- 施工地の標高(HGT): 0~400mを0, 400m以上を1。平均0.055, 標準偏差0.229。

- 施工地の傾斜(ICN): 日照時間による区分を考慮し, 斜面の方向が北~北東・北西を0, 東・西~南を1。平均0.680, 標準偏差0.467。

- 施工地の水分状況(WATER): 常時冠水を2, 湿潤を1, 乾燥を0。平均0.243, 標準偏差0.500。

- 施工地の土質: 粘土・レキ・砂の各成分有無によって, 有を1, 無を0(粘土成分-SN, レキ成分-SR, 砂成分-SS)。たとえば「砂質粘土層」 $\langle SR=0, SN=1, SS=1 \rangle$, 「砂層」 $\langle SR=0, SN=0, SS=1 \rangle$, 「レキ交じり粘土層」 $\langle SR=1, SN=1, SS=0 \rangle$, といった表現とする。平均, 標準偏差の順に, SNでは0.845, 0.362, SRでは0.591, 0.492, SSでは0.227, 0.419。

- ピロディン打ち込み深さ(PO): 各調査地について任意に9本を選び, 1本について地際, 地際から30cm, 1m高の3カ所を各3回測定しているが, ここでは, 各試料ではば最大値を示した地際部での値を使用している。平均29.89, 標準偏差9.05。

ここには, 本来, 最重要視すべき気象データ(温度, 降雨量)が含まれていない。その理由の一つは時間的余裕がなかったことではあるが, かりにAMEDASデータ等が得られたとしても, 各試料採取地に対する値は推定することになるであろうし, 同一県内であるため, 温度等は施工地の位置で代表できるものと考えた。

4.2 重回帰分析による影響因子の検討

目的変数をPO(mm, ただし, 最大40), 説明変数を先に示した計9因子とした線形重回帰分析によって最良回帰式を変数減少法で探索し, PO値に及ぼす環境因子の影響を検討した。

ただ, この方法の欠点は,

① PO値が打ち切りデータであること。つまり, 40が表示最大値であるため, 本来40以上であっても「PO=40」と表示されてしまうわけである。今回のデータでは全体の1/3, 546試料がそれにあた

っており, 9年目以降では3/4以上にもなる。

② PO値とそれぞれの変数値が線形関係にあるとは限らない。とくにPOとYEARは明らかに非線形である。

の2点であり, その意味では統計学的には必ずしも適当な方法ではない。そこで, PO=40の出現比率が20%を超えない範囲として, 経過年数7年目までの1206データ(PO=40の出現比率19.9%)のみを用いて計算を行い, 因子の影響度に関する考察を行った。

その結果, 有意水準0.1%レベルで採用されたのは, 偏回帰係数t値の高い順に, YEAR($t=22.34$), MT($t=-6.08$), WATER($t=-6.12$), DIST($t=4.92$), HGT($t=-3.96$)であり, 回帰式は以下のようになった。このときの自由度調整済 $R^2=0.3520$, 推定値の標準誤差は6.9675である。

$$PO = 16.5 + 2.49(YEAR) - 2.58(MT)$$

$$- 2.60(WATER) + 3.39(DIST) - 3.74(HGT)$$

ここで分かるのは, YEARが飛び抜けてt値が高く(単相関係数で0.543, $R^2=0.2947$, 標準誤差7.2693), その他では円柱加工無, 標高が低い, 海岸からの距離が遠い, 水分が無いものほどPO値が大きくなり, そのほかの条件については, 効果が無視しうる程度といえる, ということになる。なお, 有意水準を1%にすると「傾斜($t=2.75$)」が有意となるが, 土壌条件は5%水準でも採択されない。

また「円柱加工の有無」が効いているのも興味を引く。今回調査した材料の加工度は, 「皮付き丸太」「皮剥丸太」「円柱加工材」の3種類である。しかし, 「皮付き丸太」に関しては, 施工後2~3年で剥皮されたのと同じ状態になってしまうため, ここでは「皮付き丸太」「皮剥丸太」を一括して「丸太材」として扱っている。この結果は, 円柱加工材では耐久性の低い辺材部分がカットされる確率が高いことによるものと思われるが, その他の因子も含め, 専門家のご意見を伺いたいところである。

ただ, 実用的な点から見れば, 設置条件等には一切目をつぶって, 経過年数と材の加工条件のみ

(この場合の推定値の標準誤差は7.1549) からPO値を判断しても、以上の全因子を入れた場合と推定誤差はそれほど変わらない。

無論、この結論は秋田県内に限定したときの話であり、これを全国的なレベルに拡張して適用することはできない。

4.3 腐朽・虫害の程度

さて、現地調査の際、検査員が肉眼的に腐朽・虫害の有無を判定しているが、この調査結果を少し眺めておこう。

まず腐朽に関しては、素人目で単純に「腐朽しているか否か」の2段階法によった。しかし、これが先の雨宮ら¹⁾による被害度判定法のどこにあたるか、というのは難しいところである。ただ、一見して「材が腐朽している」と判断されるのは、部分的にでも激しい被害があった場合であろうから、概ね「被害度3」—すなわち「全面的に軽度の被害、部分的に激しい被害」—以上に相当する、と見なして大過ないと思う。

また、虫害は激、中、微、無の4段階評価であるが、その方法はかなり主観的なものであり、かつ虫害の種類の記載がないため、耐久性とは直接関係ないものもカウントしているおそれがある。そのためであろうか、腐朽と虫害の相関係数は0.548と、統計的には高度に有意ではあるが、意外に低い値を示している。そこで、ここでは単に激～微を「有」と考えることにする。

円柱加工の有無ごとに、被害材出現率の経年変

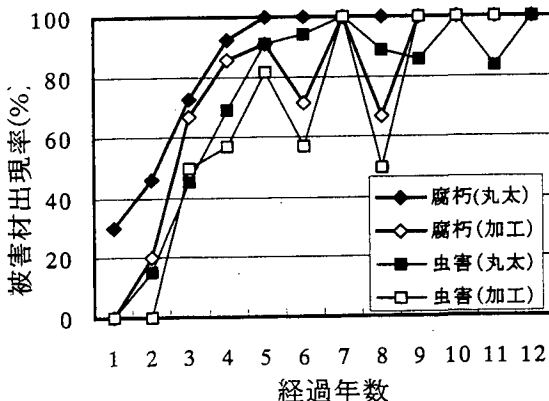


図3 現場の判定による被害材出現率

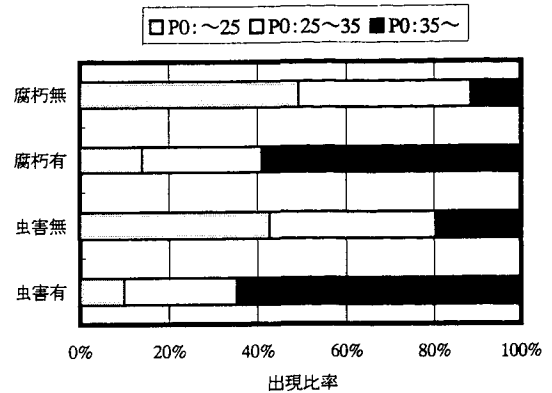


図4 PO値の出現比率

化を示すと、図3のようになる。腐朽ではかなり早い段階から高い値を示し、4年目で80%を超えている。また、虫害ではこれを追いかけるような形になっている。そして、いずれの場合も被害の進行度は、丸太の方が加工材に比べてやや早いような印象を受ける。

また、被害状況別のPO値の出現比率は図4に示す。ここでは腐朽または虫害有と判定された材の約60%が $PO \geq 35$ で、見かけの被害度によるPO値分布の差はかなり明らかであろう。

考えようによっては、かなり「いい加減な」腐朽や虫害による判定でも、いかにも「もっともらしい」結果が出てきているのは、興味深い。

5. 土木用杭丸太の耐用限界の評価

5.1 構造物の耐用限界

「構造物の耐用限界」についての筆者の考え方はおおそ以下のようなになる。

構造設計というのは、予め使用予定期間を決めておき、この期間内に起こりうる外力(荷重)が構造物に加わっても、被害がある限度を超えないように構造物の耐力を調整する、ということになる。つまり、構造物設計とは「使用予定期間」「起こりうる外力」「被害レベル」の3つの要因から、構造物の使用目的ごとに、それらの相互関連で「構造物耐力」の最適条件を求めていくこと、といえる。

さらに、このようにして決定された「構造物耐

力」は、多かれ少なかれ、ある確率分布、すなわち「ばらつき」をもっている。そして、それは時間に伴って何らかの耐力劣化（あるいは「回復」もあるかもしれない）が進行し、分布形が刻々と変化していく、ということになる。

以上のような前提に基づいて「耐用限界」を考えてみる。なお、ここに「起こりうる外力も、ある確率分布をもつ」との概念を持ち込めば、「限界状態設計法」の範疇になるわけであるが、混乱を起こす恐れがあるので、ここでは触れない。興味のある方はたとえば林の著書⁷⁾を参照されたい。

この言葉を言い換えると「構造物が使用に耐えられなくなる時点までの経過時間」ということになるであろうが、これは上記の「使用予定期間」とは必ずしも等価ではない。考え方としては「起こりうる外力」「被害レベル」「構造物耐力」の3条件から決定された結果、というべきもので、最適設計がされたときには「耐用限界到達期間 \geq 使用予定期間」では過剰設計、「耐用限界到達期間 $<$ 使用予定期間」では過小設計、ということになる。

図5がそのイメージである。ここでは、起こりうる外力が一定、初期の構造物耐力が同じ分布をもったものとし、使用目的を、人命に直接関わるようなもの（遊具・道路用施設・木橋など）をA、それ以外のものをBとした場合を想定している。そして、設計時に想定した耐力を下回る確率を「耐用限界確率」と定義し、この値が、Aでは0.5%、Bでは25%、といったようにおけば、これを超えた時点を耐用限界として決定できることになる。な

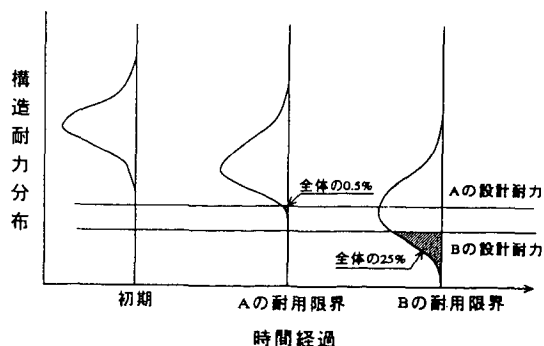


図5 構造物の耐用限界のイメージ

お、設計耐力をABとも同じとし、Bの耐用限界確率（たとえば、50%とか）を変更する方法もある。

もちろん、上記の数値は「たとえば」の話である。何百年に1回あるかないかの災害でもビクともしない（原子力発電所など）、数十年に1回程度の災害で人命に関わるような被害が起らない（通常の建築物など）、さらには、とにかく崩壊しなければよい、といったように、使用目的と予め想定している使用期間によって耐用限界確率のレベルはかなり異なることになる。

この考え方は、一応理解はしていただけたと思う。しかし、実際には時間経過に伴う構造物の耐力分布自体が不確定要素を多分に含んでいるため、個々の材料・部材レベルではともかく、構造物になるとイメージの域を出ず、かなりの工学的判断で決定しているのが現状である。

たとえば、現在具体化が進んでいる建築基準法でも、時間（劣化）係数は、ほぼ現行方式を踏襲し、荷重の方で調整することになるようである。さらに、設置条件が極めて多様な、屋外の暴露条件にある土木用構造物の場合では、耐力分布の評価は一般構造物などとは段違いに難しく、木橋では「安全係数」のような形で、30年間で下限値が初期の80%というように設定しているが、国内でこれを追跡確認したデータはない。

したがって、本来、構造物を構成する「材料（木材）」そのものと「接合部分（金属、場合によっては接着剤も）」に分けて考えたうえで、それを再統合し、施工法やメンテナンスも加味した評価、提案をすべきなのであろう。また、最終的にそこに至らなければ、この種の研究の工学的意味は薄い、といったいいかもしれない。

5.2 使用不能材の基準

4.で考察したのは「土木用木材」全般ではなく、実際には杭丸太の地際部の劣化度に関するものである。しかし、通常、土木用構造物の耐用限界は、部材の地際部で決まることが多いであろうから、このデータから検討を進めても良いように思われる。

表2 経過年数によるPO値の出現比率
(健全材ではP30を用いた)

経過 年数	PO (mm)						
	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40
健全材	0.0	18.0	62.0	20.0	0.0	0.0	0.0
丸	1	0.0	5.6	45.6	26.7	12.2	5.6
	2	2.6	4.3	41.0	27.4	16.2	6.0
	3	2.0	6.1	21.2	19.2	17.2	9.1
	4	0.9	0.9	16.2	14.5	23.1	8.5
	5	1.0	4.0	10.1	17.2	14.1	14.1
	6	0.0	0.7	3.3	5.9	17.0	13.7
	7	0.0	2.8	4.2	15.3	11.1	18.1
太	8	0.0	0.0	4.9	6.2	9.9	14.8
	9	0.0	0.0	4.8	3.2	6.3	3.2
	10	0.0	0.0	1.6	1.6	3.2	7.9
	11	0.0	0.0	1.9	7.4	7.4	3.7
	12	0.0	0.0	0.0	1.9	3.7	0.0
円 柱 加 工 材	1	0.9	10.2	48.1	36.1	3.7	0.9
	2	0.0	6.7	48.9	35.6	6.7	0.0
	3	0.0	9.3	33.3	29.6	16.7	7.4
	4	1.6	11.1	23.8	20.6	22.2	6.3
	5	0.0	4.0	15.2	17.2	22.2	13.1
	6	0.0	1.6	11.1	15.9	22.2	15.9
	7	0.0	0.0	11.1	0.0	14.8	29.6
	8	0.0	5.6	9.3	13.0	14.8	9.3
	9	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	16.7
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	11	0.0	0.0	0.0	22.2	0.0	0.0

まず、木材の種類を円柱加工の有無によって「丸太」と「円柱加工材」に分け、経過年数によるPO値の出現比率を眺めてみよう(表2)。ここでは参考値として、先に述べた健全材のデータ(P30)を示しておいた。

このP30値の分布からみると、未乾燥材の場合、 $PO \leq 30$ の材は、まず健全材、すなわち初期強度を保持している、とみて良さそうである。ちなみに図2に示したスギ材のデータからは、 $Pe=30$ のときのMOR平均値は 360 kgf/cm^2 (約36MPa)、下限値(材料強度)は 240 kgf/cm^2 (約24MPa)程度となり、かなり妥当な値といえる。

ついで、もっとも問題になるのは、一体どのあたりを「使用不能限界」とするか、である。しか

し残念ながら、これを実験的に押えているわけではないので、現時点では推定せざるを得ない。とくに、使用条件における木材の含水率が不明なのは最大の難点である。ただ、もともと、用いたピロディンの表示値が最大40なのであるから、これを使うとしたら「35」か「40」ということになるだろう。

そして、ここでは使用条件における木材含水率をすべて未乾燥材と見なし、「 $PO \geq 35$ 」を一つの基準と考えた。これも、いわゆる「工学的判断」というものであるが、その根拠とした傍証は、以下のようなものである。

① 現地での測定時に「腐朽している」と判断された材では $PO \geq 35$ の材が60%であったこと。

② 仮に、材腐朽の有無に関わらず、MORとPOが図3に示した式で表されるなら、 $PO=35$ のとき、MOR平均値は 330 kgf/cm^2 (約33MPa)、下限値は 220 kgf/cm^2 (約22MPa)程度で、 $PO=30$ のときの90%程度は維持していることになるが、単純にい

ってスギ製材の現行の材料強度 225 kgf/cm^2 (約22.5MPa)を下回っている。

上記の基準設定方法は、いずれ実験的に確かめる必要はあるだろう。しかし、腐朽材ではかなり実質的な断面欠損が進み、しかも脆くなっているであろうから、強度は②での概算値よりさらに低下するはずである。事実、田中のスギ気乾70mm角材のデータ³⁾によると、被害度3,4,5でのMORは健全材の約50,40,15%となっている。また、長谷川らが行った富山県の治山木杭の耐久性調査結果⁸⁾では、スギの縦圧縮強さは被害度の増加につれて直線的に減少し、被害度3では初期強度の約40%となる、といっている。

5.3 耐用限界計算方法について

耐用限界を以下の方法にしたがって実際に試算してみた。

① POの実験データは、構造物の設置条件が様々であるので、4.2で求めた回帰式を用いて、POをWATER=HGT=0, DIST=1の最悪条件時、つまり安全側の値に調整し、さらにMT=0と1のときの各値を求める。

② $PO \geq 35$ の材の残存耐力を田中のデータ³⁾から初期耐力の15%と考える。 $PO < 35$ の材の残存耐力については議論があるところであるが、とりあえず初期の $\alpha\%$ とする。このようにおけば、杭列のような構造の場合、これを構成する部材のうち $n\%$ 、(以下、これを「使用不能率」と呼ぶ)が $PO \geq 35$ になったとすれば、このときの構造体としての残存耐力率 $\beta(\%)$ は、

$$\beta = (1 - n/100)\alpha + 15n/100$$

となる。

③ 構造体の初期耐力分布を $N_0(\mu, \sigma)$ 、②の条件での耐力分布を $N_1(\beta\mu, \beta\sigma)$ のそれぞれ正規分布と考える。

④ 設計用の許容耐力 f は、通常、荷重期間に応じて計算される。ここでは長期と短期の中間として、短期許容応力度の70%くらいに考えれば、

$$f = (\mu - 1.645\sigma) \times (2/3) \times 0.7$$

で、 σ/μ をスギ材の実験結果を参考に0.2とみると、 $f=0.3\mu$ 程度となる。

なお、この件に関しては、「樹種に関わらず $f=100\text{kgf/cm}^2$ (約10MPa)が適当」という提案⁹⁾がある。曲げの短期許容応力度—上記の $(\mu - 1.645\sigma) \times (2/3)$ に相当—はスギの場合 150kgf/cm^2 (約15MPa)であるから、これからみると f を短期許容応力度の70%と考えて、概ね妥当といえる。

⑤ したがって、上記②の条件での構造体に設計時に想定した荷重が加わったときの耐用限界確率は、 $N_1(\beta\mu, \beta\sigma)$ が、 $f=0.3\mu$ を下回る確率として求めればよい。すなわち、

$$0.3\mu = \beta\mu - K\beta\sigma$$

とおいたときの係数 K を求めれば正規分布表から確率は求まる。そこで、両辺を $\beta\mu$ で除し、 $\sigma/\mu =$

0.2とみて、

$$0.3/\beta = 1 - 0.2K$$

ここで、仮に $\alpha=90\%$ とおいたときの、耐用限界確率と n の関係を表3に示した。同表から、たとえば n が60%になったとき、設計値レベルの荷重が加われば、約5%は破壊する、ということになる。

表3 耐用限界確率と使用不能率(n)の関係

耐用限界確率(%)	K	$\beta(\%)$	$n(\%)$
0.1	3.090	78.5	15.3
0.5	2.575	61.9	37.5
1	2.330	56.2	45.1
5	1.645	44.7	60.4
10	1.180	39.3	67.6
25	0.675	34.7	73.8
50	0.000	30.0	80.0
75	-0.675	26.4	84.8
99.5	-2.575	19.8	93.6

以上の仮定に基づいて、土木用杭丸太の許容限界を試算した結果は次のとおりである。

まず、5.2の④の方法にしたがい、「丸太」と「円柱加工材」の各年ごとの「使用不能率」計算結果にロジスティック回帰モデルに当てはめたものを図6(なお、本図は筆者らの木材学会研究発表要旨¹⁰⁾の図3とは、環境条件による標準化の方法がやや異なっている)に示した。なお、ここで用いた「ロジスティック回帰モデル」の関数式は以下ようになる。

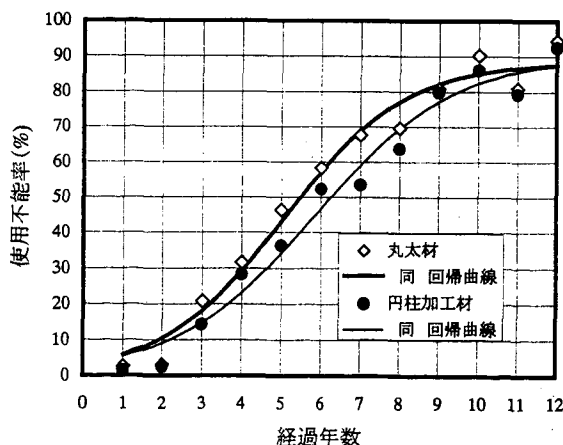


図6 経過年数と使用不能率の関係

$$y = b_0 + b_1 (\exp(f(x)) / (1 + \exp(f(x))))$$

y : 使用不能率

$f(x)$: $a_0 + a_1 (\text{YEAR})$

したがって、使用目的ごとに耐用限界確率を決めて表3から使用不能率 n を求め、さらに図6から n に対応する経過年数(耐用年限)が分かる、ということになる。

たとえば、耐用限界確率を仮に0.5, 5, 50%といたったようにおくと、それぞれに対して $n=35, 60, 80\%$ 、経過年数(この場合は「安全側」であるが)は丸太材では4.5, 6, 8.5年であり、円柱加工材ではこれより少し長い5, 7, 9.5年となる。これと同じことを各材の設置された環境条件に応じて計算すればよいわけである。

また、先に述べた長谷川らの報告⁸⁾では、「杭列の折損率は被害度3を超えると顕著になる傾向があり、折損率10%を耐用限界とすると、被害度3.4(経過年数7~7.5年)に相当する。」と述べている。ここでいう折損率を「耐用限界確率」と読み替えると、耐用限界確率10%時の使用不能率は65%くらいであるから、図では6.5~7.5年程度となる。富山県と秋田県の気象条件はやや異なるので断定的なことはいえないが、結果的にはきわめて良く一致しているといえるであろう。

無論、この計算結果には、たとえば、環境条件の取り扱い、施工地における木材の含水率、 α の値、③の条件における分布 $N_1(\beta\mu, \beta\sigma)$ 、許容応力度の設定方法など、かなりの仮定が入っている。また、部材が多数並べられているような、Multiple-member-systemに対する耐力割り増し係数(Load sharing factor)の検討も必要であろう。しかし、これらの数値を実験的に確かめ、耐用限界確率を工学的判断で基準化することができるなら、以上の考え方は十分に成立するものと思う。

6. おわりに

編集委員から依頼されたときの原題は「無処理スギ杭丸太の腐朽速度に関する検討」というものであった。最初にも述べたが、筆者はもとより「そ

の道」の専門家ではないので、題を変更させていただいた。

実は、県当局に提出した報告書には、今回の解析結果からの結論の概要として、

① ピロディン打ち込み深さから強度を推定することは、十分実用的に意味がある。現場では、35mmを超えるものがほぼ被害度3以上の使用不能域に達していると思なすことが可能である。

② 木材の耐久性に最も関与しているのは経過年数、ついで円柱加工の有無であり、ほかの項目は実用的には無視しうる。

③ 耐用年数は丸太材6年、円柱材8年程度が妥当なところと思われる。

というようなことを記載している。

しかし、本稿に述べた内容は、かなり「未完成」で至る所に仮定が入っていることは、お分かりの通りであろう。とくに、環境因子と「腐朽速度」の関連、さらには「耐用限界確率」への影響については、議論を深めていく必要がある。具体的には、ピロディン打ち込み深さと施工地における木材の含水率および強度の相互関係、防腐処理木材の効果についての検討、さらには「日本におけるクライメイト・インデックス^{11)~12)}の確立」、シロアリの問題、あたりのことになろうが、それとあわせて、構造物の耐力の経時変化と荷重変動や構造耐力の確率的な考えを組み合わせた研究が重要なのだ、と思っている。そして、やはりこのテーマは、かなり広い範囲の「地域」を対象に、共通の手法で、かつ、様々な専門分野の研究者と実務者によるプロジェクトを組まない限り、結論は見えてこないだろう。

また、その結果によって「実務現場で使えるような設計マニュアルのようなもの」をつくっていく必要性も大きい。確かに、先の報告書での結論は、「その道」の専門家の目から見ると、かなり大胆に過ぎるかもしれないが、実際、「木橋」の分野では、土木工学研究者がイニシアチブをとり、木材学の専門家をも交えたグループも結成されているという。また、建築の分野でも「気候」と「建築手法」の関わりが論議されている。そういうこ

とが要請されている時代である。

文 献

- 1) 雨宮昭二ほか：林試研報，150，145～155 (1963)
 - 2) T.L.MADSEN: "The Efficiency of Visual and Mechanical Stress Grading of Norway Spruce Timber, and the Possibilities of Improving the Methods by Means of the Pilodyn Instrument or Additional Annual Ring Width Limit", Paper presented at the IUFRO Division 5 Conference, Oxford (1980)
 - 3) P.HOFFMEYER: "Improving the Efficiency of Visual Stress Grading by Means of the Pilodyn Wood Tester", Prepared for the Timber Engineering Group at the IUFRO World Conference, Kyoto, Japan (1981)
 - 4) 田中俊成・中井孝：第33回日本木材学会大会研究発表要旨集，京都，p. 223 (1983)
 - 5) 田中俊成・中井孝：第34回日本木材学会大会研究発表要旨集，名古屋，p. 32 (1984)
 - 6) 田中俊成・中井孝：第35回日本木材学会大会研究発表要旨集，東京，p. 330 (1985)
 - 7) 林知行：“エンジニアードウッド”，日刊木材新聞社，1998，21-41
 - 8) 長谷川益夫・飯島泰男ほか：木材保存，19(1)，13-22 (1993)
 - 9) (財)林業土木施設研究所：“林道施設の簡易構造物に関する調査委託報告書”，1989，21-22
 - 10) 飯島泰男・土居修一ほか：第49回日本木材学会大会研究発表要旨集，東京，p. 420 (1999)
 - 11) 長谷川益夫・飯島泰男：木材保存，15(4)，9-17 (1989)
 - 12) 長谷川益夫：木材保存，22(5)，2-9 (1996)
- (1999. 7. 19 受理)