

作業道における丸太組工の桁丸太劣化度評価について

(独) 森林総合研究所 森林農地整備センター 松山水源林整備事務所
係員 脇坂 芳夫

はじめに

近年、間伐材の利用促進等の取り組みにより、木製構造物の利用拡大が全国的に進められています。当松山水源林整備事務所においても、急傾斜地における壊れにくい作業道づくりのための一工法として、平成4年度から作業道新設事業で丸太組工を導入しており、最大で設置後16年経過しています。木製構造物は木材利用促進につながり、最近ではカーボンニュートラルの観点から地球温暖化防止の一助にもなるという付加価値を伴うことで、今後ますます様々な用途で利用拡大されていくことと思われます。しかしながら、木材という素材の性質的な面からの問題点が指摘されています。それは、腐朽プロセス・耐久性やメンテナンスに関する情報が不足しているということです。木製構造物は永久構造物ではないため、どのようなプロセスで劣化していき、どれだけの期間求められる強度を保つことができるか、維持補修に必要な技術はどのようなもので、コストはどれくらいかかるのか、という情報を得ることが必須であり、現状ではそのような情報が整備されていないことから、現場が直面している問題に対応していくことは急務であると考えます。そこで本研究の目的は、丸太組工における桁丸太の劣化度を定量的に評価し、腐朽の進行過程を明らかにすることと、その進行過程を踏まえた上で、丸太の劣化と法面の健全性・耐用年数の関係について考察することとしました。

方法

-1. 木材劣化度診断について

ところで、木材劣化の診断方法は大きく分類すると3通りあるので、ここで簡単に紹介します(表-1)。それぞれ、メリット・デメリットがあります。

表-1 木材劣化度診断の3分類

す(表-1)。それぞれ、メリット・デメリットがあります。

「目視による6段階評価法(雨宮,1963)」は、非常に簡易な手法ですが、外観だけの評価で個人差があり、かつ、尺度が大雑把であるため、客観的な評価基準としては限界があります。

「超音波伝搬速度法」は、木材への外傷が無くヤング

診断方法	メリット	デメリット
目視による6段階評価法	・簡易である	・個人差 ・尺度が大雑把 ・外観だけの評価
超音波伝搬速度法	・木材への外傷がない ・ヤング率との相関に関する研究の進展	・専門的な知識・経験が必要 ・機器が高価 ・データの取扱いが難しい
一定応力によるピン貫入量測定法	・取扱いが容易 ・尺度としてわかりやすい ・外傷が少ない	・データの取扱いが難しい

率との相関等に関する研究が進められているため、立木状態での木材強度の推定等に利用することができます。しかし、専門的な知識・経験が必要となり、機器が高価で入手しづらく、測定部位による誤差等データの取扱いにおいて難しい面があります。

「一定応力によるピン貫入量測定法」については、取扱いが容易であり、尺度としてわかり

易く測定物の外傷が少ないというメリットが挙げられます。デメリットとしては超音波による診断法と同じく、測定部位による誤差や劣化度の判断基準が確立されていないことによる測定値の解釈の仕方等、データの取扱いの面です。本研究では、測定が容易で尺度としてわかりやすく、一般の土木施工者にとって十分に使用可能である「一定応力によるピン貫入量測定法」を採用しました。

-2. 測定機器

測定機器は、スイス proceq 社製のピロディン(6J-Forest、ピン直径 2.5mm、測定範囲 0~40mm)を使用しました(図-1)。測定メカニズムとしては、まず専用のローディング・ロッドで先端のピンを押し込み内部のバネを圧縮させます。この状態で測定対象物に設置し、トリガーを押し込みます。このとき、ピンが圧縮されたバネにより一定の力で測定対象物にリリースされ突き刺さります。この貫入量を mm 単位で読みとることで測定値とします。



図-1 ピロディンと測定の様子

-3. 対象路線と設置年度

対象路線は、愛媛県東温市の「第2本谷」線、伊予市の「タフロキ」線、鬼北町の「シャウタイ」「デンジロ」線、愛南町と高知県宿毛市の県境にある「後口」線の5路線を選択しました(図-2)。各路線と設置年度・経過年数との関係は表-2のとおりです。路線選択の方針としては、複数年度に渡って設置されており、かつ、経過年数の新旧バランスをとることと、作業効率の面から最少路線数となることを考慮して選択しました。



図-2 路線の位置

表-2 対象路線・設置年度・経過年数

設置年度	H19	H18	H17	H16	H15	H14	H13	H12	H11	H10	H9	H8	H7	H6	H5	H4
経過年数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
タフロキ		■	■												■	
後口		■	■	■	■	■	■	■								
第2本谷							■	■		■						
デンジロ										■	■	■	■			
シャウタイ							■	■	■							

-4. 測定方法

測定対象となるのは桁丸太（皮付きのスギ材、末口径約 18cm）です。測定する中で、激しい腐朽により剥皮・辺材部が剥落しているものが見受けられました（図-3）。ピロディンは材の外部から内部に向けての劣化度を測定する機器であるため、本来ピンが貫入すべき部分が剥落していれば皮付き材とは測定範囲が異なってしまうので、これらはデータを区別しました。この剥皮・剥落した材を、以下「剥離材」と記します。この剥離材と皮付き材との比較検討も行いました。



図-3 剥離材

測定部位は桁丸太の材長（約 3m）方向の中心部で、2 回測定しその平均値を 1 標本としました（図-4）。測定箇所・測定本数は、設置年度ごとに地形により尾根・谷・その他と分け、それぞれの箇所で桁丸太 5 組を測定しました。ここで、地形により 3 分類したので、貫入量に与える地形因子の影響も併せて検討しました。



図-4 桁丸太の測定部位

結果

-1. 丸太の腐朽プロセス

図-5は、横軸に経過年数・縦軸にピンの貫入量（以下、P値）をとった時の散布図です。かなりバラツキ具合が大きく、2年経過時点で、すでにP値の最大値である40mmが出現しました。また、頻度分布で表現して経年変化を見みると、図-7のようになります。2年経過時点では正規分布型ですが、4年目から40mmの頻度が最も大きく、8年目で50%を超えました。4年目から分布型としては逆L字型を示し、14年経過に向けて40mmに収束していくという傾向を示しました。なお、路線別に見ると、図-6のようになりました。縦軸は各経過年数に対応するP値の平均をとりました。このとき、経過年10年で「第2本谷」線では40mmの頻度がはじめて100%と

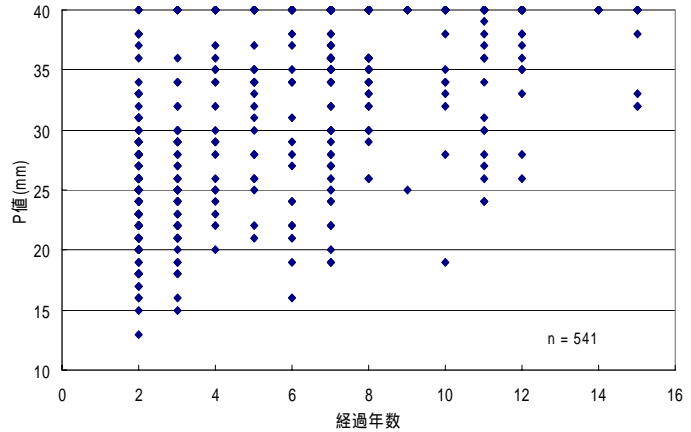


図-5 P値と経過年数

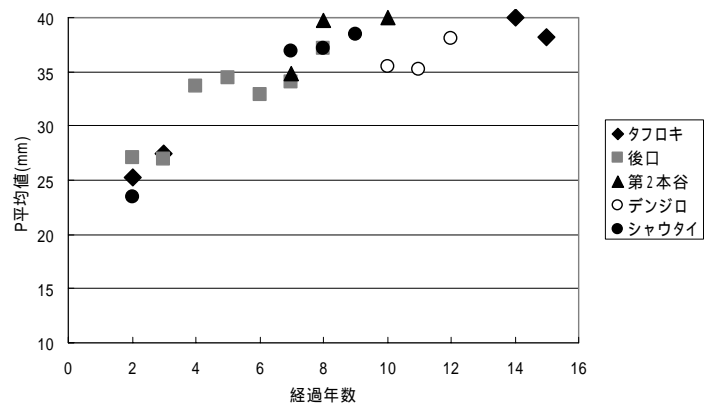


図-6 路線別 P 平均値と経過年数

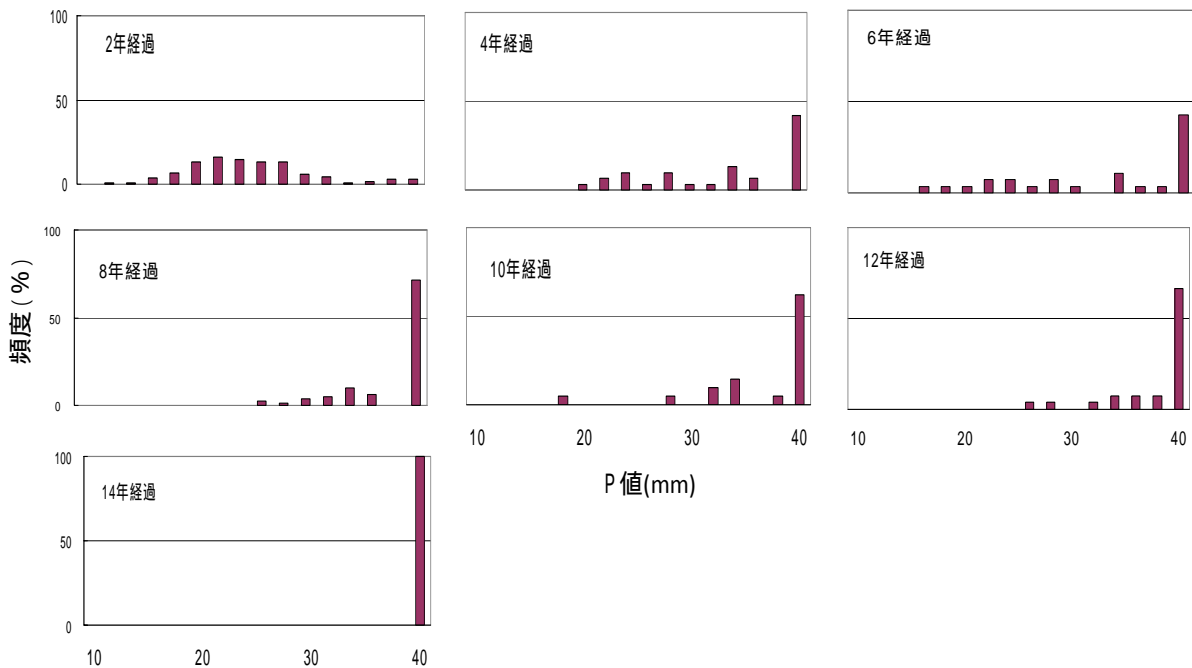


図-7 頻度分布の経年変化

なりました。

P 値は 40mm までの打ち切りデータであるため、10 年目以降はピロディンによって劣化度を定量的に評価することは難しいと考えられます。そこで、経過年数 9 年までに限定してデータを見直しました（図-8）。経過年数と P 値の関係を直線近似すると、ある程度の正の相関が認められました。また、図-6 から路線が異なっても P 平均値にはそれほど大きな差は無いことがわかります。そこで、P 値を平均値として見た場合は、路線の違いによる影響は少ないと仮定し、各経過年数に対応する全ての P 値の平均をとると図-9 のような相関図が描かれます。このとき、経過年数と P 平均値は、強い正の相関を示しました。近似直線式から、一年経過するごとに 1.8mm ずつ P 平均値が増加することが示唆されました。

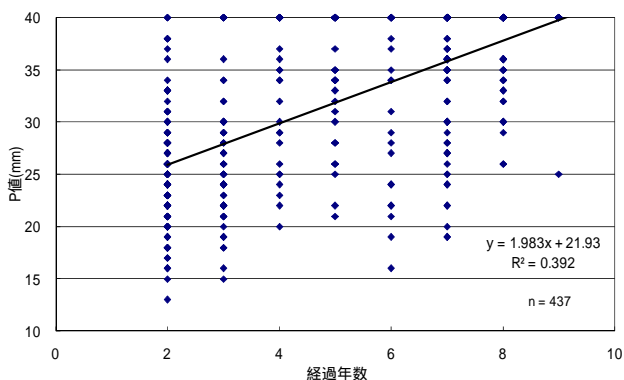


図-8 P 値と経過年数（9 年まで）

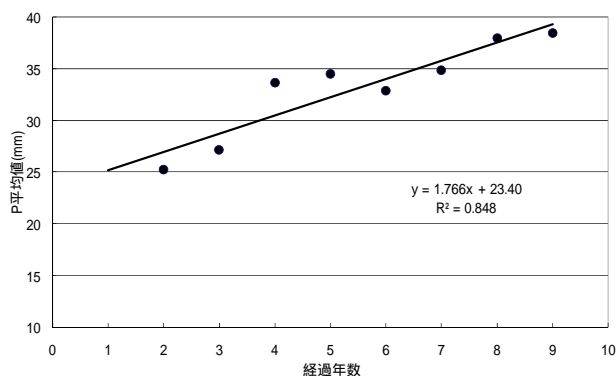


図-9 P 平均値と経過年数（9 年まで）

-2. 皮付き材と剥離材の比較

剥離材は標本数を見てわかるとおり非常に少なく（図-10）、安易に皮付き材と比較することはリスクを伴います。しかしながら、剥離材の P 平均値は明らかに皮付き材に比べて低い値を示しており、材の中心部の劣化の進行速度が遅い可能性があるかと推察されました。

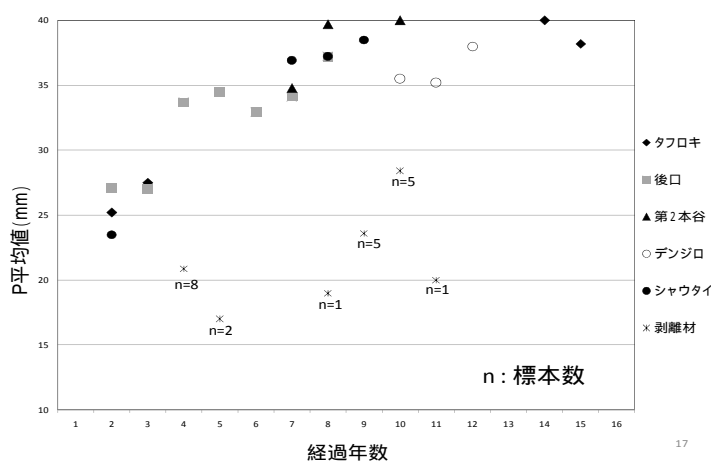


図-10 剥離材と皮付き材の比較

-3. 地形因子の影響の検討

地形による影響があるかどうかを検定するに当たって、まず標本の選別を行いました。その際、同一路線の単年度設置延長において、尾根・谷・その他の全ての測定箇所を調査

されたデータのみを抽出しました。例えば、単年度設置延長の中で尾根らしい尾根が無かったり、谷部に丸太組が施工されていなかったりした場合は、その他の地形でデータが取れたとしても全て検定対象外としました。標本抽出後、それぞれの地形で正規性・等分散性を調べました。その結果、P 値は正規分布を示さなかったため、本研究ではノンパラメトリック検定の一つである Kruskal-Wallis 検定を行いました。検定にあたって前提条件となる帰無仮説は、「地形によって P 平均値には差がない」というもので、有意水準は 5%と設定しました。次式により検定統計量 S_x を求めました。今回は標本に順位付けしていったときに同順位の数が多かったので、補正係数 C により検定統計量の補正值 S_0 を求めました。

$$S_x = \frac{12 \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j}}{n(n+1)} - 3(n+1)$$

N: 標本総数 (162)
 k: グループ数 (3)
 n_j : 各グループの標本数(54)
 R^2 : 各グループの順位之和
 ($R_1=4516$ $R_2=4784$ $R_3=3903$)

$$C = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)}{n(n^2 - 1)}$$

m : 同順位の数 (22)
 t_j : 同順位の個数

$$S_0 = S_x / C$$

計算式から、 S_0 は 3.584 と求められました。この S_0 は自由度 2 の 二乗分布に従います。二乗分布表を参照すると、棄却限界値は 5.991 であるので、有意確率 P は、 $P = P_r \{ \chi^2 \geq 3.584 \} > 0.05$ と表されます。よって帰無仮説を採択し、地形によって P 平均値に差はないということがわかりました。

考察

-1. 丸太の腐朽プロセス・剥離材との比較検討について

P 値の 40mm 出現頻度から、経過年数 8 年以上では腐朽がかなり進行している状態にあると考えられます。また、ピロディンの測定範囲の限界から、10 年目以降の定量的な評価は難しいということが示唆されました。定量的な評価が可能であった範囲内では、P 平均値と経過年数に強い正の相関関係が認められ、一年で 1.8mmP 平均値が増加する傾向を示しました。

一方、剥離材は皮付き材と比較して低い値を示しました。このことは、より心材部に近い範囲を測定することができたことが影響していると考えられます。一般に心材部は辺材部に比べて含水率が低く、腐朽に強いと言われており、心材部を含めた材の中心部は、ピロディンで測定可能な範囲とは異なる腐朽プロセスを辿ることが示唆されます。岩川 (1993) は、大代国有林の木堰堤・丸太積工として 15~18 年使用したヒノキ丸太の材質劣化について報告しています。丸太にとっての横圧縮負荷を横圧縮ヤング係数 (t_f/m^2) により評価し、「辺材部における横圧縮強さの減少はかなり大きいですが、心材部はそれほど劣化しておらず、むしろ基準材に近い状態で保全されていた。」と結論付けています。

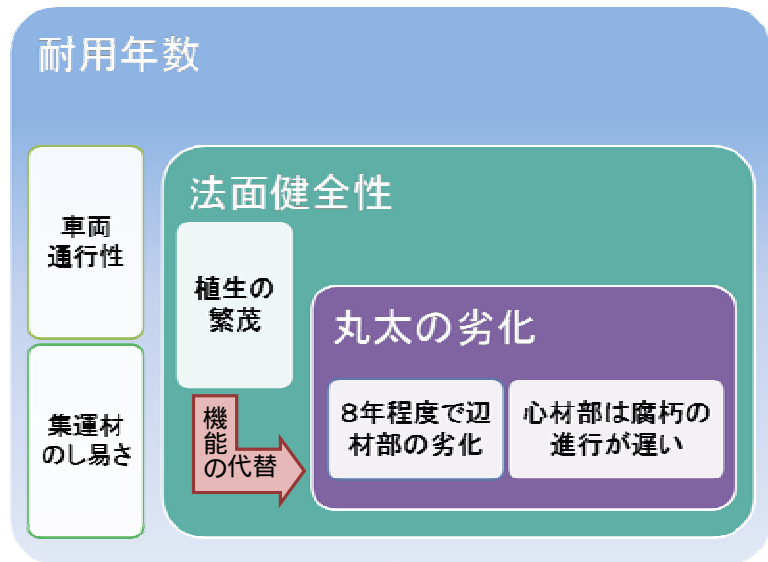
-2. 地形因子の影響について

本研究において、地形（尾根・谷・その他）によるP平均値の差は認められませんでした。路線による差も小さかったので、P値は経過年数に強く影響を受けると考えられます。

経過年数をはじめとして、P値に影響を与える因子には、樹種・径級・年輪幅・含水率・標高・傾斜・地質・気象・加工方法等が挙げられます。このそれぞれの因子が相互に関連しながらP値に影響を与えていると考えられることから（大橋ら,2005、津島,2002）、影響因子の検定・評価については安易な解釈を避け精査する必要があると思います。

-3. 劣化・法面健全性・耐用年数との関係について

丸太の劣化・法面健全性・耐用年数の3者は、図-11のような包含関係にあると思います。丸太組工は作業道の主に盛土法面保護のための構造物であり、耐用年数を考える場合は、作業道の設置目的である車両通行性・集運材のし易さを中心に検討すべきです。本研究によって、丸太は8年程度で辺材部の劣化が進んだ状態になるということと、心



材部を含んだ中心部は腐朽の進行が遅いということが示唆

図-11 劣化・法面健全性・耐用年数の関係

されました。したがって、材の外部からの腐朽が認められても、それが直接的に即時的に耐用年数と結びつくということではないと考えられます。また一方では、劣化が進むまでの間に、植生の繁茂により法面保護機能の代替・補完が見られます。以上のことから、丸太組工の設置の際には安定勾配で設置することや転圧を丁寧に加えること等の基本事項に加えて、丸太の長期的な強度に期待するのではなく、腐朽する特徴を活かして自然に返していく工法を開発していくことが重要だと思えます。

引用文献

- ・雨宮昭二（1963） 浅川実験林苗畑の杭試験（1） 杭の被害程度を評価する方法. 143-156p. 林業試験場研究報告 150
- ・岩川治（1993） 民有林作業道-今日的課題とその選択-.115p. 静岡県山林協会
- ・大橋一雄・多田野修（2005）
ピロディンおよび目視被害度を用いたカラマツ杭材の耐用年数評価.36-39p. 岩手県林業技術センター研究報告 No.13
- ・津島俊治（2002） ピロディン打込み深さに影響を与える諸要因.192-195p. 九州森林研究 No.55