

水浸木材の超音波物性

三 浦 定 俊

1. はじめに

長期間、土中に埋もれて発掘された水浸しの木材（以下、水浸木材と略記する）は、その構造が大きく変化し、物理的・機械的性質が健全材に比べて著しく異っている。同じ水浸木材においても、その埋蔵されていた環境条件や時間によって劣化の様子が違う。劣化の程度は外見から簡単に判別できないことが多く、見かけ上しっかりしていると思っても、手に取ってみるともろく、つぶれてしまいそうな水浸木材も多い。このため、物理的機械的性質を調べることにより、逆に水浸木材の健全さの程度を知ることができれば、保存修復処置をほどこす上で便利である。

この研究では、健全材（乾燥している材と水につけて湿らせた材の2種類）と水浸木材の超音波物性を比較することにより、水浸木材の構造劣化を推定することができるかどうかを調べてみた。結果は、水浸木材は健全材に比べて、特に木理の接線方向の音波の減衰が少ないことと、粘弾性に由来する音速度の増加（分散）が見られないことがわかった。いずれも、木材の構造劣化と結びつけて説明できることについて述べる。

2. 実験の方法

超音波の透過法によった。用いた周波数は、1, 2, 5 MHz の3通りで、パルス幅約2~3 μsec 、繰り返しの周期約2 msecである。試料中での音波の減衰等で、試料の大きさは制限されるが、周波数が高いこととパルス超音波であることによって、無限固体媒体中の平面波の伝播としての取扱いが近似的に成立する。

木材試片の形状は、おおむね、木理に対して（繊維方向） \times （半径方向） \times （接線方向）の寸法が、20 \times 20 \times 20, 20 \times 20 \times 10, 20 \times 20 \times 5（単位mm）の3通りである。

用いた木材の種類は、イ、杉・健全材・乾燥（含水率約7%）、ロ、杉・健全材・湿潤（水浸1ヶ月）、ハ、樹種不明・水浸木材（奈良時代）の3種類である。

音速と減衰率の測定は、木材試片の両側に超音波の探触子をあてて、パルスが透過するに要した時間と透過したパルスの山の高さをみることにより行った。濡れている試料については、付着している水がそのまま探触子を接触させる時の媒介剤となったが、乾燥している木材には、接触をよくするため薄く表面にグリースを塗った。なお、音速の分散には周波数だけでなく、温度も関係するが、この実験においては、木材試片を浸してある水の温度は15 $^{\circ}\text{C}$ でほぼ一定であった。

3. 実験の結果

3.1. 木材中の超音波の減衰

繊維方向の超音波の減衰率は、健全材（乾）、健全材（湿）、水浸木材の順に小さくなる傾向がみられるものの、際立った差はない。しかし、半径方向、接線方向の減衰率は、水浸木材が健全材にくらべて大変小さい。特に接線方向の音波の透過は、健全材において減衰がきわめて大きく、1MHzの音波をわずかに透過させるだけなのに対して、水浸木材は、1MHzから5

MHz まで他の2方向と同程度に、音波をよく通過させる。

このことは、水浸木材の減衰率が全体に小さくなったことを示すものではない。例えば、繊維方向の減衰率は上に述べたように、健全材にくらべそれほど変化していない。むしろ、水浸木材においては木材組織が劣化して繊維が分断され、全体に均質化することにより、繊維方向、半径方向、接線方向の異方性がなくなったためであると考えらるべきであろう。事実、実験で健全材では音速が、繊維方向の方が横方向よりはるかに大きい(2~3倍程度)のに、水浸木材ではほぼ近い値(1MHzで1.3~1.9km/sec)をしめした。

3.2. 木材中の音速度

下に、繊維方向の音速度について、1MHzの周波数における音速をそれぞれ1とした時の、2MHz、5MHzの周波数における音速の比を示す。

試料/周波数 (MHz)		1	2	5
イ, 健全材 (乾)	a	1	1.4	1.4
	b	1	1.5	1.5
	c	1	1.5	—
	d	1	1.3	—
ロ, 健全材 (湿)	e	1	1.3	1.9
	f	1	1.2	2.0
	g	1	1.1	1.6
	h	1	1.1	1.6
ハ, 水浸木材	i	1	1.1	1.2
	j	1	1.1	1.2
	k	1	1.2	1.1
	l	1	1.2	—

ここにみるように、湿った健全材の場合、周波数の増加にともない音速が増加する傾向がみられるが、水浸木材では、あまりその傾向がみられない。このように、周波数の増加にともない音速が増加する現象を「分散」とよぶ。分散は高分子物質によくみられる現象で、その原因は媒質の粘性(粘弾性)によるとされている¹⁾。

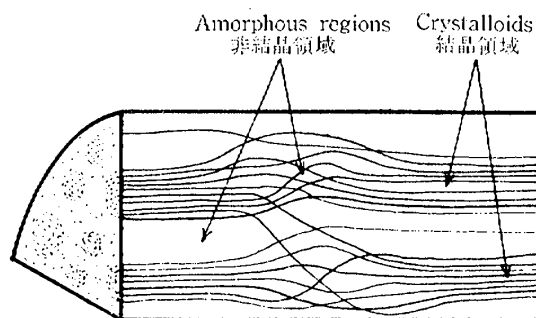
木材の場合、粘弾性は、長時間荷重をかけておいた時に変形が時とともにしだいに増加していく、いわゆるクリープ現象でわれわれの目にかかることが多い。今の場合、クリープ変形のように長時間かけてあらわれる現象ではなく、数MHzの高振動に対応する 10^{-6} sec程度のごく短い時間にあらわれる現象であるが、やはりこれも、木材の示す粘弾性のためであると、解釈するのが妥当であろう。先の表で乾燥した健全材をみた時、湿った健全材ほど周波数と速度との間に顕著な因果関係が認められない。このことも、木材のクリープたわみが、含水率に支配されるという他の実験の報告²⁾と合致して、分散が木材の粘弾性に関係することを裏付ける。

分散が木材の粘弾性によるとすれば、水浸木材に分散がみられないということは、劣化により木材の粘弾性を示す機構が失われたためだ、ということになる。しかも、その失われた機構が数MHzの振動に対応した、 10^{-8} sec程度以下の短い緩和時間を持っているということは、それが、木材の微細構造に由来することを予想させる。

4. 木材の粘弾性

木材の構造は、微細にみれば図-1のように、1本1本の繊維素(フィブリル)がセルロースの長い鎖状分子からできていて、セルロースの配列の具合により、結晶領域と非結晶領域に分類される。このような構造は、総状ミセル構造とよばれる³⁾。

乾燥した木材が水分とであった時、繊維飽和点までは結合水として、ミセル構造の非結晶領域に吸収される。この結果、木材は膨潤し、物理的、機械的性質が吸収された水分量、すなわち含水率に応じて変化する。しかし、木材を水につけるなどして繊維飽和点（含水率約30%）以上にまで水分を吸収させても、細胞内腔、細胞間隙などの空隙に自由水として入るだけで、木材の性質を変えることはない³⁾。



図—1 繊維のミセル構造

今、木材が吸湿して、ミセル構造の非結晶領域に水分が浸入したとしよう。そうすれば、今までたがいにからまりあって動きにくい状態にあったセルロース分子同士が、膨潤して、全体として結合がゆるやかになり、動きやすくなる。これが、木材が含水率がふえるにしたがい、粘性をより強く示すようになる理由である。このように、一般の高分子物質の粘弾性が、その分子構造に支配されるように、木材の粘弾性もこの微細なミセル構造に支配される。

それでは、何故水浸木材の場合、粘弾性を示さないのだろうか。古材においてはミセル構造を構成するセルロース分子の結晶化がすすむ一方、鎖状分子のつながりが切れて、バラバラになっている。この結果、結晶領域同士をつなぐ非結晶領域がほとんど存在しない。このため、たとえ水分がミセル構造内に浸入していても、粘性を示さないのだと考えられる。また音速についても、水浸木材は、水の中に結晶化したセルロース分子が切れ切れに存在するような状態であるから、水浸木材の音速（繊維方向の平均音速、約1.5km/sec）は、水の音速（15℃で約1.47km/sec⁴⁾）にほぼ等しくなる。

5. 粘性による音速度の分散

粘性のない場合、音波の1次元の波動方程式は次の式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

θ : 媒質の変位

V : 音速度

粘性 η がある時には、媒質の密度を ρ として

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{4}{3} \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)$$

となる。右辺の第2項が、粘性の影響を示す。この式が、粘性によって減衰する平面波の解をもつとして解いた時、音速 V は近似的に、音波の周波数を f Hz として

$$V = V_0 \left[1 + k \frac{\eta^2}{\rho^2} \frac{f^2}{V_0^4} \right]$$

という式で与えられる¹⁾。ここで、 V_0 は粘性がない場合の音速、 k は定数である。右辺の第2項が、粘性による音速度の分散をあらわしている。周波数 f が2乗で音速 V に影響することがわかる。

この式をもとに、先の実験結果について調べてみよう。ある周波数における音速を基準に、音速度の比をとった時、上の式から比は次のようにあらわされる。

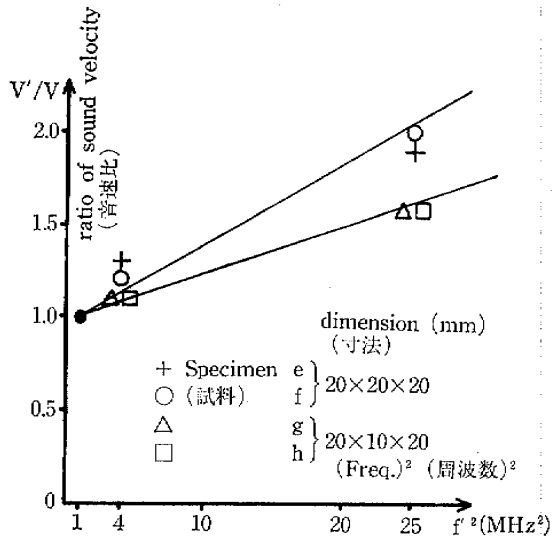


図-2 湿った健全材中の音速の分散

$$\frac{V'}{V} = \frac{1 + k\eta^2 f'^2 / \rho^2 V_0^4}{1 + k\eta^2 f^2 / \rho^2 V_0^4} = a (1 + bf'^2)$$

ただし、 a 、 b ともに（木材の比重 ρ が同じであるとして）定数である。これから、音速度の比 V'/V を縦軸に、周波数の2乗 f'^2 を横軸にとった時、両者の関係は直線であらわされることになる。

用いた超音波測定装置が1、2、5 MHzしか発生できないため測定値にとびができてしまうが、先の式にしたがって直線をひいてみると、図-2のように2本の線に分れる。これは、試料の大きさの違うと考えられる。おそらく、試料の大きさの違いが、含水率に影響して、同じ木材でも比重の違いをもたらしたのではないだろうか。

6. あとがき

以上みてきたように、木材の音速度の分散は、木材の微細構造に由来する粘弾性のためであることがわかった。そして、水浸木材で分散がみられない原因は、木材の構造の劣化により、粘性が失われたためであることが、明らかになった。これから、音速度の分散の様子をしらべることにより、木材の構造の劣化の程度を推測することが考えられるが、水浸木材の試料数を多くして木材の材種（特に針葉樹と広葉樹）や比重による違いを明らかにし、測定の精度を向上するなど、今後の研究に待つところが多い。

文 献

- 1) 熊本乙彦・生嶋明・鳥飼安生『音波物性とその応用（物性工学講座11）』第1、2章 p1~65 オーム社 1969年
- 2) 鈴木寧 日本林学会誌 31巻p188 1949年
- 3) 北原覚一『木材物理（実用木材加工全書別巻）』第1、2章 p1~78 森北出版 1967年
- 4) 実吉純一・菊池喜充・熊本乙彦『超音波技術便覧』p.1194~1199 日刊工業新聞社 1960年

Ultrasonic Characteristic of a Waterlogged-wood

Sadatoshi MIURA

Measurements of ultrasonic velocities, using pulse waves of 1, 2 and 5 MHz, were made for three kinds of woods, that is, a new dry wood, a new damp wood and a waterlogged-wood. Although ultrasonic waves could hardly be transmitted in the tangential direction to the grain of the new woods, they easily passed through the waterlogged-wood in every direction. This is by reason of the homogenization of wood tissue by aging. While the sound velocity in the new damp wood increased with a function of the frequency, such a correlation was not observed in the case

of the waterlogged-wood. The frequency dependence of sound velocity is caused by the viscosity of wood due to its micro structure called "micell structure" (Fig. 1). In the case of the waterlogged-wood, the micell structure is destroyed by deterioration, so that the sound velocity loses the frequency dependence. The solution of the theoretical wave equation gives a linear relationship between the sound velocity V and square of the frequency f , as shown in Fig. 2. The existence of two lines in Fig. 2 may be interpreted in terms of the different specific gravities in connection with the water contents of the specimens.