

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07522

研究課題名(和文) 重量測定を行わずに木材の密度とヤング率を求めるための振動試験方法の開発

研究課題名(英文) Development of the vibration testing method for density and Young's modulus of wood without weighing wood

研究代表者

久保島 吉貴 (KUBOJIMA, Yoshitaka)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：40353669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：錘の付着により打撃音の共振周波数が低下する現象を利用した、重量測定を行わずに木材の重量、密度およびヤング率が算出できる振動試験方法(質量付加振動法)の現場適用性を検討した。その結果、栈木の位置、錘の付着方法、錘の質量および付着面、試験体含水率、振動発生方法に関する適切な試験条件が明らかとなった。また、栈積み材および木製ガードレール横梁に質量付加振動法が適用できることが明らかとなった。さらに、推定精度の改善方法としてピーク付近の周波数の平均化を提案した。

研究成果の概要(英文)：By using the phenomenon that the resonance frequency of the striking sound becomes lower than when the weight is attached to the wood, it is possible to calculate the weight, density and Young's modulus of the wood without weight measurement using a vibration test method (mass addition vibration method) On the site was examined. As a result, appropriate experimental conditions on the location of the tree, the weight attachment method, mass and adhesion surface, test body moisture content, vibration generation method were clarified. In addition, it was revealed that mass addition vibration method can be applied to the piling material and wooden guardrail material. Furthermore, we proposed the averaging of the frequencies near the peak as a method for improving the estimation accuracy.

研究分野：木材物理学

キーワード：重量測定 密度 ヤング率 振動試験

1. 研究開始当初の背景

振動試験は、試験作業としては試験体を打撃して共振周波数を測定するだけで済み、簡便で優れたヤング率の非破壊測定法である。構造用製材の機械的等級区分などに応用されているが、同測定方法においては試験体の密度を求める必要があり、そのため重量測定においては、下記のように手間あるいは困難な状況が生じる場合がある。

製材工場では縦振動法などの非破壊ヤング率測定法を応用したグレーディングマシンが導入されている。国内には国産材を製材する中小製材工場が多数あるが、このような設備を導入するだけの経営体力がなく、また、グレーディングが必要な注文も現状は少ない。しかしながら、平成22年10月に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行されたことから、ヤング率を確認した材の受注が各地で断続的に発生することが見込まれる。また、建設現場での資材検品では、グレーディングマシンのような大型装置の利用は不可能である。このようなとき、従来の縦振動法を用いると、共振周波数の測定はパソコンとFFTプログラムで安価・簡便に実現可能であるが、個々の実大材の重量測定には大変な労力を要することになる。このため、棧積み状態のまま、試験体個々の重量を測定せずにヤング率を簡便に評価する方法が求められている。

また、平成10年に建設省によって「防護柵の設置基準」が定められて以来、道路施設として木製防護柵の設置例が増えている。安全管理上、その横梁（丸棒および角棒）の劣化に関する簡便な調査方法が求められており、たわみ振動試験が有望視されている。しかし、調査において横梁を支柱から取り外して重量を測定することは実務的に大変な手間である。

研究代表者は、これまでに縦振動およびたわみ振動における試験体内の密度の不均質性を考慮した振動数方程式を導出してその影響を補正する方法を提案し、不均質性の原因として節や樹脂などの影響を挙げた。これらの実験において、密度の不均質性をモデル的に表現するために試験体に集中質量を付着した。このことから、試験体に集中質量（錘）を加除した場合の共振周波数の相違および振動数方程式の解の相違を用いて、重量測定を行わずに木材の密度とヤング率を求めるための振動試験方法（質量付加振動法）に関する着想を得た。既に縦およびたわみ振動において、質量付加振動法の計算理論が正しいことを実証済みである。

2. 研究の目的

本研究では縦振動およびたわみ振動を対象とする。縦振動では、棧積み状態のまま、材個々のヤング率を重量測定することなく簡便に評価することが最終目標である。また、たわみ振動では、木製防護柵の横梁や建物の

部材を構造から取り外すことなく簡便にヤング率を評価することが最終目標である。そこで本研究では、上記の理論研究で実証された質量付加振動法を実際の現場に適用するにあたり、想定される問題点を解決するための試験条件を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本方法を棧積みした材料へ適用する場合、様々な事柄を検討する必要がある。例えば棧積み材には棧木を介して上に積まれた材の荷重がかかる。そこで縦振動における棧木位置の影響について検討した。試験体には断面105mm角、長さ1600mm、含水率12%程度の無欠点材を用いた。図1のように、試験体を振動の腹の位置（振幅が最大の位置）および節の位置（振幅が0の位置）で支持し、材料試験機によって上から4点曲げ試験と同じ要領で試験体に加力した。試験体端部に錘を加除し、試験体木口面をハンマーで打撃して縦振動試験を行い、質量付加振動法により試験体質量、密度およびヤング率を算出した。

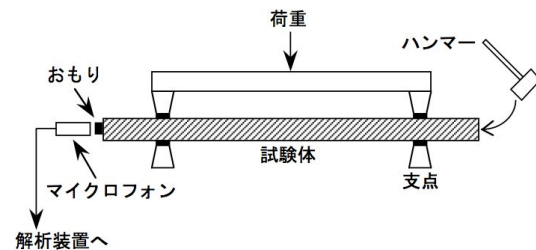


図1 棧積みモデル

ここで、質量付加振動法の実験および計算手順について記す。まず、木材に錘を付着した状態と付着しない状態で打撃したときの共振周波数をそれぞれ測定する。この共振周波数の比（錘有/無）を、錘の位置と質量が打撃音に与える影響に関する振動数方程式に代入する。すると、質量比（錘質量/試験体質量）が求められる。従って、予め錘の質量を測定しておけば木材の質量が計算できる。また、木材の質量と寸法（実用的な場面では注文した寸法を使用するか、数体の寸法を測定して平均する方法などが考えられる）から密度が計算できる。ヤング率は、木材の寸法、密度そして錘を付着せずに打撃したときの共振周波数から計算できる。この一連の作業の中で、木材の質量は一度も測定していない。この測定方法を「質量付加振動法」と名付けることにした。質量付加振動法による試験体質量、密度およびヤング率の推定精度は、質量付加振動法による推定値を常法すなわち秤で測定した試験体質量と錘を付着せずに測定した共振周波数を用いる方法による値で除した比で表す。比の値は、質量、密度およびヤング率において互いに等しい。

(2) 質量付加振動法を実用化するにあたり、

錘の適切な質量と合理的な付着方法を検討した。試験体には断面 105mm 角, 長さ 1600mm, 含水率 12% 程度の無欠点材を用い, 5 段階の質量の鉄板を木ねじ留めおよび粘着テープ (両面テープ) 留めにより試験体木口面に付着した。試験体木口面をハンマーで打撃して両端自由縦振動試験を行い, 質量付加振動法により試験体質量, 密度およびヤング率を推定した。

(3) 高含水率試験体に対して質量付加振動法を適用した。幅 30mm, 厚さ 5mm, 長さ 300mm, 含水率 12% 程度の試験体を水浸して高含水率状態にした試験体を乾燥させながら両端自由条件で縦および曲げ振動試験を行い, 錘を試験体端部に付着し, 質量付加振動法により試験体質量, 密度およびヤング率を推定した。

(4) 目視等級区分されたスギ柱材に質量付加振動法を適用しその実用性を検討した。節などが集中質量として影響することに配慮し, JAS の目視等級区分に基づいて格付けした断面 120mm 角, 長さ 3000mm, 含水率平均 20% 程度のスギ柱材を等級毎に 3 本用意し, 試験体とした。木口が未仕上げの状態とクロスカットソーで切断した仕上げ状態の両方の状態で供試した。錘には板厚が異なる 6 種類の 70mm 角鋼板を用い, 木口面に錘の板厚の 2 倍以上の長さの木ねじ 4 本で付着した。両端自由縦振動試験を行い, 質量付加振動法により試験体質量, 密度およびヤング率を推定した。

(5) 質量付加振動法では縦振動よりも曲げ振動の方が推定精度が高いことが理論的および実験的に示されている。よって質量付加振動法を積積みされた状態の木材に適用する際には縦振動よりも曲げ振動を行うことによってより高い精度の推定結果を得られるが, 積積み内部の木材に曲げ振動を発生させることは難しい。そこで, 質量付加振動法において曲げ振動を発生させる方法について検討した。幅 30mm, 厚さ 5mm, 長さ 300mm の試験体木口面を打撃して発生させた曲げ振動の共振周波数を通常の曲げ振動による共振周波数と比較した。含水率 12% 程度の気乾材と含水率 100-130% 程度の生材を用い, 温度 20℃, 相対湿度 65% の条件で試験体端部に錘を加除して両端自由曲げ振動試験を行い, 質量付加振動法により試験体質量, 密度およびヤング率を推定した。

(6) 木製ガードレールモデルを用い, 支柱に取り付けられた横梁の質量, 密度およびヤング率を質量付加振動法で求め, その精度を検証した。木製ガードレール横梁用の直径 200mm, 長さ 1980mm, 含水率 12% 程度の円柱状のスギ心持ち試験体を木製ガードレール用支柱に取り付け, 試験体中央部に錘を加除して曲げ振動試験を行い, 質量付加振動法により試験体質量, 密度およびヤング率を推定

した。

(7) 質量付加振動法の実大積積みモデルへの適用性を検討することを目的とした。断面 120mm 角, 長さ 3000mm, 含水率 12% 程度のスギ製材を 3 列 3 段に積積みし, 積積み上部から鉄板を積載し, 試験体木口面に錘を加除して縦振動試験を行い, 質量付加振動法により試験体質量, 密度およびヤング率を推定した。載荷量は最大 13 段積みに相当した。

4. 研究成果

(1) 積木位置に関して, 振動の節の位置で試験体を拘束した条件で質量付加振動法により求めた値と錘を付加せず両端自由条件などから求めた値とを比較検討した結果, 両者がほぼ一致した。一方, 振動の腹の位置で試験体を拘束すると試験体の変形を拘束するため共振ピークが現れず, 共振周波数を測定することができなかった (図 2)。従って, 積木を振動の腹の位置に配置するよりも節の位置に配置する方が, 質量付加振動法の推定精度が高いと考えられた。

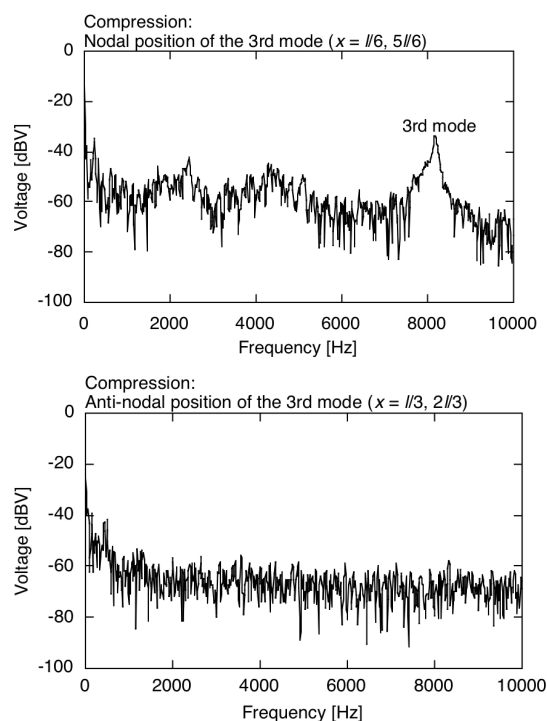


図 2 打撃位置による周波数波形の相違
 上図: 3 次振動の節の位置を拘束
 下図: 3 次振動の腹の位置を拘束

(2) 錘の付着方法に関して, 木ねじ留めと粘着テープ留めを比較した結果, 両者とも試験体の質量に対する錘の質量の比 (質量比) μ が 2% 程度までは質量付加振動法の推定精度が高かったが, 質量比が 5% 以上では粘着テープ留めの場合周波数波形が緩やかとなり, 共振周波数ピークの同定が困難で質量付加振動法の評価精度は低下した (図 3)。従って,

質量比 2%程度までの付加質量が適当であると考えられた。また、木ねじ留めは、試験体にねじ穴が空くものの、付着・脱着操作は簡便で、質量比の影響を受けにくかったが、粘着テープ留めは、錘と粘着面積の関係にもよるが、質量比 2%程度までであれば実用的な測定が可能であることが示唆された。

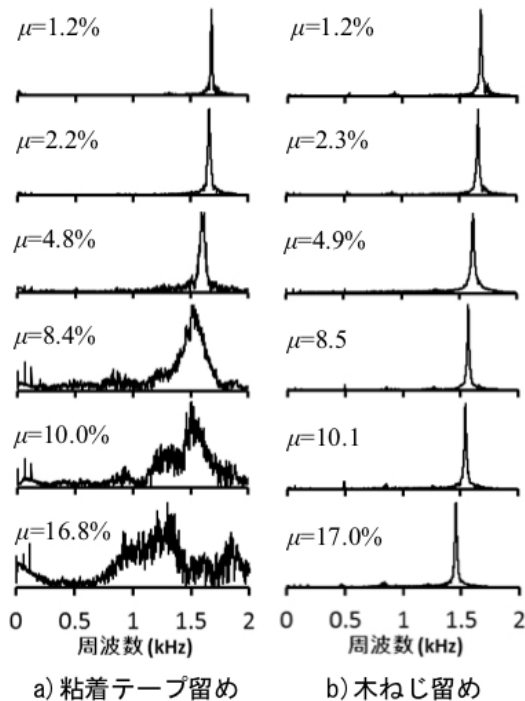


図3 周波数波形の例

(3) 試験体含水率に関して、質量付加振動法の推定精度は、乾燥過程での試験体の重量減少により振動試験中に共振周波数が上昇することの影響を受けた。すなわち、試験体に錘を付着しない通常の方法で共振周波数を測定した後に錘を付着して共振周波数を測定すると、後者/前者の比が過大になり十分な推定精度が得られなかった。一方、錘あり、なしの順番で測定すると十分な推定精度が得られた。また、曲げ振動の方が縦振動よりも共振周波数の測定誤差の影響が小さく、質量付加振動法の推定精度が高いことが理論的および実験的に明らかとなった。

(4) 錘の付着面性状に関して、質量付加振動法の推定精度は、錘を付着する木口面が未仕上げの材では錘の質量が大きい方が、木口面が仕上げられた材では錘の質量がより小さい方が高かった。木口面が未仕上げの材では、木口面が傾斜しかつ粗いためと考えられた。また、目視等級が上位の材は他の等級の材よりも誤差が小さかった。木口面の不齊により錘の付着箇所での減衰が生じ、共振周波数の低下によって推定値が減少した。木口を仕上げない場合は、錘の付着方法に改善の余地があると考えられた。一方、木口が仕上げられた柱材なら、密度およびヤング率の非破壊評価

法として質量付加振動法が適用できると考えられた。さらに、桟木が振動の節の位置からずれたとしても桟木1本分程度であれば質量付加振動法の推定精度に影響を与えないことが示された。なお、周波数波形のピークがわずかに真の共振周波数と差を生じることによる測定誤差の改善方法として、ピーク付近の周波数の平均化を提案した。

(5) 振動発生方法に関して、木口面打撃により正確な曲げ振動の共振周波数が得られた。従って、質量付加振動法において試験体の木口面を打撃して曲げ振動を発生させることが有効であることが明らかとなった。

(6) 木製ガードレール横梁に関して、質量付加振動法の推定精度を示す比の値は 0.96~1.09 であった。従って、特定の型の木製ガードレールの横梁では、支柱への取り付けを多少緩めると質量付加振動法により正確に質量、密度およびヤング率を推定可能であると考えられた。

(7) 実大積積みモデルに関して、錘を付着しない場合、積載荷重が大きくなるほど、1次の共振周波数が数%程度大きくなる傾向がみられた。また、他の次数に比べ2次の共振周波数は安定していた。錘を付着した場合も概ね同様の傾向がみられた。従って、積積み状態の試験体に縦振動法を適用する場合には、桟木の配置による共振周波数の変化を考慮し、その影響の少ない振動モードで測定することが好ましいと考えられた。

両端自由条件に比べ、積積み載荷状態では質量付加振動法の推定値の平均値は大きくは変わらないものの、推定値のバラツキがやや大きくなる傾向がみられた。これは、桟木の拘束の影響により振幅が小さくなり、しばしば周波数波形のピークが弱くなり、推定精度に影響したものと考えられる。ただし、このような影響の載荷荷重、試験体の積積み位置、錘の質量の大きさ等との関係は明確には見だせなかった。

一方、載荷条件に関係なく極端に質量付加振動法の推定精度が低いケースがみられた。これらは、測定によって得られた共振周波数が各錘の条件に合致していないことを示しており、特に理論値と異なる共振周波数が観測された場合にしばしばみられた。このような問題に対しては、例えば異なる錘毎のデータを用いた回帰法といった改善方法が考えられる。質量付加振動法の推定精度の改善については、錘付着部の減衰の影響、試験体の材質の不均質性の影響、頑健な推定手法などいくつかのアプローチが考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

Yoshitaka Kubojima, Satomi Sonoda, Hideo Kato, Practical techniques for the vibration method with additional mass: bending vibration generated by tapping cross section, Journal of Wood Science, 査読有, 64(1), 16-22 (2018)

Yoshitaka Kubojima, Satomi Sonoda, Hideo Kato, Practical techniques for the vibration method with additional mass: effect of specimen moisture content, Journal of Wood Science, 査読有, 63(6), 568-574 (2017)

Yoshitaka Kubojima, Satomi Sonoda, Hideo Kato, Practical techniques for the vibration method with additional mass: Effect of crossers' position in longitudinal vibration, Journal of Wood Science, 査読有, 63(2), 147-153 (2017)

久保島吉貴, 重量測定を行わずに木材の重量, 密度およびヤング率を求めるための振動試験方法 -縦振動-, 木材工業, 査読有, 72(8), 329-331 (2017)

久保島吉貴, 木材の新しいヤング率測定手法の開発 -質量付加による方法-, NPO 木の建築, 査読有, 44, 30-33 (2017)

〔学会発表〕(計8件)

久保島吉貴, 園田里見, 加藤英雄, 質量付加振動法の木製ガードレール用横梁の非破壊検査への適用, 第68回日本木材学会大会, D15-P-15, 2018

園田里見, 久保島吉貴, 加藤英雄, 質量付加振動法の実大材への適用 -積み実大材における縦振動-, 第68回日本木材学会大会, D14-04-1530, 2018

久保島吉貴, 園田里見, 加藤英雄, 質量付加振動法の実大材への適用 -試験体含水率の影響-, 第67回日本木材学会大会, C18-P1-15, 2017

園田里見, 久保島吉貴, 加藤英雄, 質量付加振動法の実大材への適用 -柱材への適用-, 第67回日本木材学会大会, D17-07-1515, 2017

Yoshitaka Kubojima, Satomi Sonoda, Hideo Kato, Practical techniques for the vibration method with additional mass Part 1: Effect of crosser's positions in longitudinal vibration, World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), August 22-25, 2016

Satomi Sonoda, Yoshitaka Kubojima, Hideo Kato, Practical techniques for the vibration method with additional mass Part 2: Experimental study on the additional mass in longitudinal vibration test for timber measurement, World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), August 22-25, 2016

久保島吉貴, 園田里見, 加藤英雄, 質量付加振動法の実大材への適用 -縦振動におけ

る積木位置の影響-, 第66回日本木材学会大会, C28-P-02, 2016

園田里見, 久保島吉貴, 加藤英雄, 質量付加振動法の実大材への適用 -縦振動における錘の質量と付着方法の検討-, 第66回日本木材学会大会, D27-07-0915, 2016

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保島 吉貴 (KUBOJIMA, Yoshitaka)
国立研究開発法人・森林研究・整備機構・
森林総合研究所・主任研究員等
研究者番号: 4 0 3 5 3 6 6 9

(2) 研究分担者

園田 里見 (SONODA, Satomi)
富山県農林水産総合技術センター・木
材研究所・木質構造課・副主幹研究員
研究者番号: 8 0 4 4 6 6 4 0

(3) 連携研究者

加藤 英雄 (KATO, Hideo)
国立研究開発法人・森林研究・整備機構・
森林総合研究所・主任研究員等
研究者番号: 6 0 3 7 0 2 7 7