

繰返し負荷に伴う有節材,フィンガー・ジョイント及びメタル・プレート・コネクタの熱画像変化

誌名	京都大学農学部演習林報告
ISSN	0368511X
著者名	増田,稔 高橋,信吾
発行元	京都大学農学部附属演習林
巻/号	69号
巻号補足	
掲載ページ	p. 114-128
発行年月	1998年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



繰返し負荷に伴う有節材, フィンガー・ジョイント 及びメタル・プレート・コネクタの熱画像変化

増田 稔・高橋 信吾

Change of Thermal Images of Lumber Including Knots, Finger Joints and Metal Plate Connectors

Minoru MASUDA and Shingo TAKAHASHI

要 旨

節は必ずしも応力集中部ではないが、節内部あるいは節周辺部に割れや目切れが存在すると応力集中が生じ、この部分が終局破壊の起点となる場合が多い。繰返し負荷を与えると応力集中部での応力-ひずみ曲線は繰返し負荷に対してヒステリシス・ループを描き、このループで囲まれるエネルギーは熱エネルギーに変換され、局部発熱が生じる。本研究では、有節材の繰返し曲げ及び圧縮試験を行ない、応力集中部において発熱の生じることを確かめた。また、ヒステリシスに基づく熱画像から、フィンガー・ジョイントやメタル・プレート・コネクタにおける応力分布の概要を知ることができることを明らかにした。メタル・プレート・コネクタでは、接合突きつけ部に近いほどネールの分担力が大きく、離れるほど分担力が小さくなる。このことは、熱弾性効果を用いた測定からも確かめることができた。

今回の一連の実験から、応力集中をもつ材ほど、荷重-変位曲線のヒステリシス・ループの大きいことが推測され、曲げヤング率と同時にヒステリシス・ループを測定すれば高速かつ精度のよいグレーディングが行なえる可能性が示唆された。

1. 緒 言

木材とは、かつて生き物であった樹木を人が切り倒し自分たちの都合のよいように利用しているものである。樹木の物性そのものは、樹木が自ら大きく成長するのに都合のよいように進化した結果であり、人が材料として使うのには必ずしも都合よくはできていない。例えば、節はもともと枝であり、それが成長とともに樹幹内へと入ってしまった部分である。枝の始まりは、樹の先端での葉のような小さな枝分かれであり、それゆえ節はピス（髓）から始まっている（Fig.1）。樹が大きく育つには四方八方に枝を出し光合成の場としての葉を茂らす必要がある。その結果、木に多くの節が存在するのは自然なことと言えよう。しかしながら節は強度的に欠点となる場合が多い。節そのものが弱いというのではなく、節（樹幹内の枝）の周りでは樹幹の繊維が迂回している。そのため製材品の材縁近くに節があると、迂回した繊維が目切れとなる。木材は繊維方向と繊維直角方向でおよそ15:1の強度比をもっており、10°以上に繊維が傾斜すると強度は急激に低下する。したがって目切れはクラックの起点となり、その進展方向によってはそのまま低い荷重で終局破壊に至ることがある。材縁ではなく中央に節のある場合には、力学的に影響力の小さい領域であること

と、迂回する繊維がむしろ補強効果をもつことから強度にはほとんど影響がない。

木材を建築物に使用する場合、安全を保証する観点から、材料強度の平均値ではなく下限値を用いて設計することになっている。下限値として通常は5%下限値を用いている。5%下限値とはそれより弱い可能性（危険率）が5%以下となる強度値であり、木材のようにばらつきの大きい材料では、平均値よりかなり低い値が設計値（許容応力度）として樹種群毎に規定されている。ばらつきが大きい場合の5%下限値であるから、ほとんどの材にとってかなり低く評価された値となっている。

そこで非破壊的に強度を予測し等級分けすることができるならば、強い材は強いと評価され、適材適所、適正断面寸法については木材資源の有効利用につながるであろう。非破壊グレーディング法としては、現在のところヤング率から強度を予測する方法が実用化されている。これは、ヤング率と強度の相関からヤング率の大きい材は強度も大きいだろうと推測して等級分けする方法である。しかしながら、ヤング率と強度の相関は必ずしも高いとは限らず、場合によっては相関係数が0.6程度しかない場合もある。例えば、芯持材ではこの相関係数がかなり低くなる。

ヤング率測定以外に何か欠陥や強度を正確に予測する方法はないのだろうか。そこで考えたのが、繰り返し負荷に伴う発熱を利用して欠陥部を見つける方法である。前報¹⁾ではカナダ産SPF (Spruce, Pine, Fir) 材のパイン (3 cm×8.5cm) を用いた曲げ繰返し負荷による節周辺の発熱について報告したが、ここではベイツガ (4.5cm×10.5cm, 柱半割材) を用いた繰返し曲げ及び縦圧縮試験を行なったので報告する。また、グレーディングとは直接関係しないが、フィンガー・ジョイントやメタル・プレート・コネクタによる接合部での発熱挙動についても観察したので報告する。

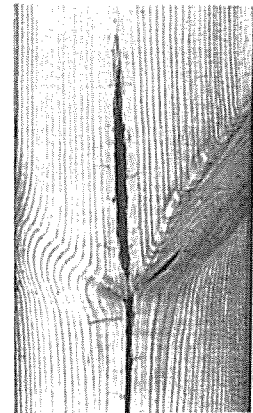


Fig. 1 節は枝の樹幹内部部分であり、枝すなわち節は髄から始まっていることを示す写真

A photo showing that a knot is a part of a branch enclosed into a trunk and a branch i.e. a knot starts from the pith.

2. 繰返し負荷に伴う有節材の熱画像変化

2. 1 曲げ負荷に伴う有節材の熱画像変化

2. 1. 1 測定方法

繰返し曲げ負荷は、デジタル油圧サーボ材料試験機（インストロン製、モデル8502）を用い、トータルスパン60cm, ロードスパン20cmのエッジワイズ4点曲げで行った（Fig. 2）。曲げ負荷は200kgfから開始し5 Hzで500回曲げた後、200kgfずつ荷重を上げていった。たわみ（すなわち、荷重）が大きくなるに従って、試験機の油圧容量の制限から周波数をFig. 3に示すように1 Hzまで順次下げた。温度分布（熱画像）測定はサーモトレーサ（日本電気三栄製、TH-1101）を用いて行なった。温度の分布を観察するのが主目的であるため温度測定にお

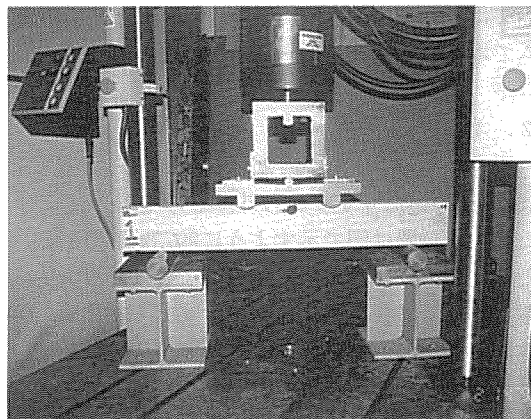


Fig. 2 有節材の繰返し4点曲げ試験の様子

A photo of four-point repeated bending of lumber including a knot.

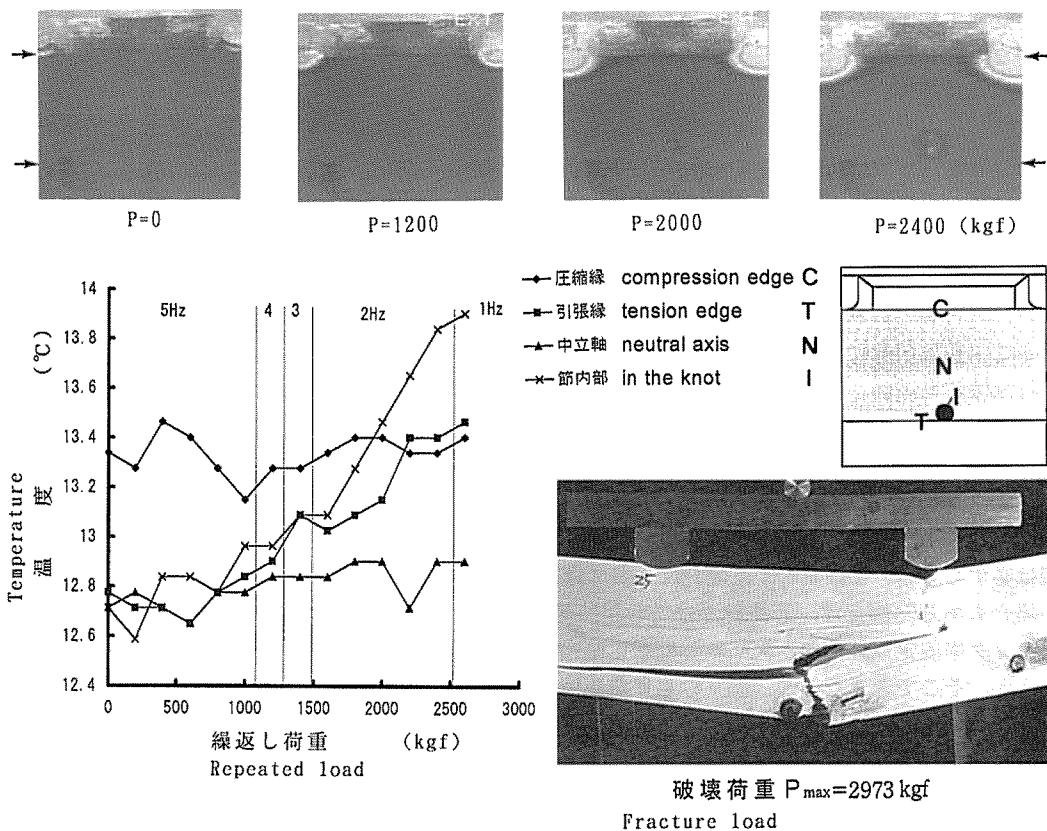


Fig. 3 引張側外縁近くに節がある場合の繰返し曲げに伴う温度変化と静的曲げ破壊の形態
→は材縁位置を示す。

Photos of temperature changes of a lumber including an edge knot at the tension side in repeated four point-bending, and a photo of its failure in static bending.
Arrows indicate positions of lumber edges.

いては便宜上、試験体の放射率を1.00として計測した。また、画質を改善するため0.25秒/フレームで取り込んだ4フレームを平均した値を用いた。

2. 1. 2 測定結果

測定結果の代表的な例をFig. 3及び4に示す。Fig. 3は外縁節 (edge knot) (死節) の例である。1000kgfのあたりすなわち外縁応力で $120\text{kgf}/\text{cm}^2$ のあたりから節のある引張外縁で発熱が観察された。終局破壊は図で示すように2973kgfで節周りの目切れから生じ、MORは約 $360\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。上部荷重部での部分圧縮による繊維直角方向の圧縮潰れに伴う発熱部の方が温度が高く顕著に観察される。横圧縮に対しては $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ くらいで塑性変形に入るので低い外力で発熱が生じる。熱画像を利用した非破壊検査の実用化に際しては、荷重部の横圧縮による発熱が欠陥の判定から除外されるようにプログラムを組む必要がある。

Fig. 4は中央節 (center knot) の例である。中央節では節周りの応力は小さく、低い荷重では節周りでの発熱は観察されなかった。外力3000kgfすなわち外縁応力で $360\text{kgf}/\text{cm}^2$ においてようやく節や材縁において温度上昇が見られた。このように中央節は熱画像的にも検出されず、熱画像による

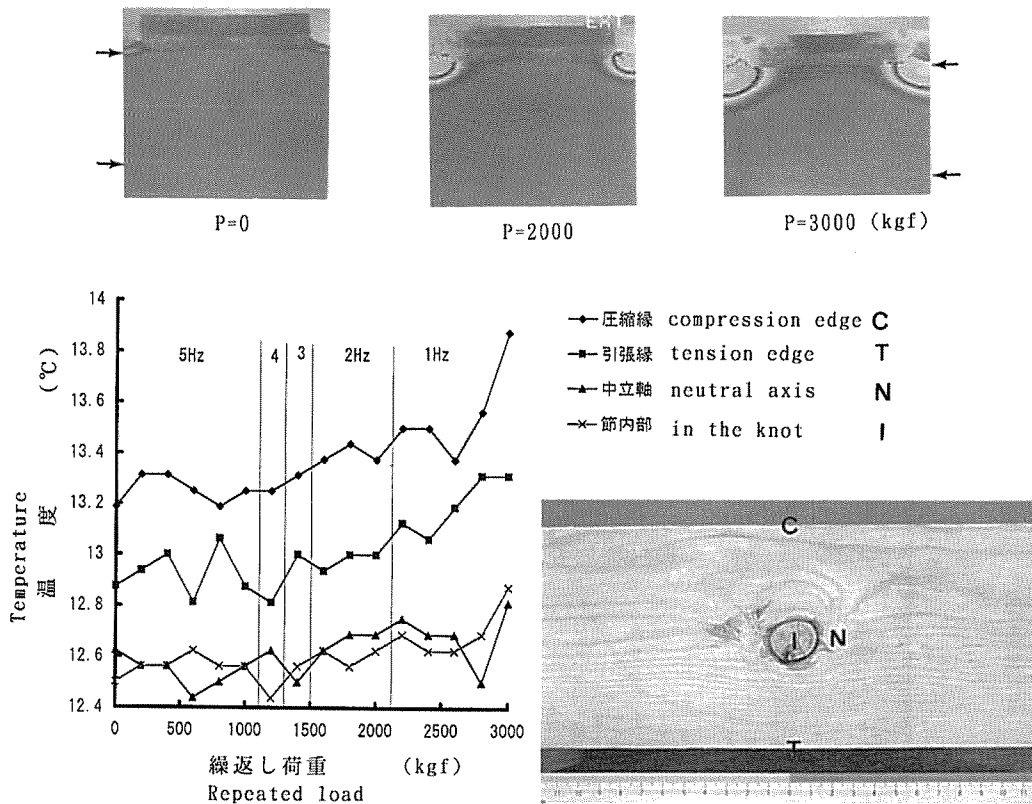


Fig. 4 中央節がある場合の繰返し曲げに伴う温度変化

Photos of temperature changes of a lumber including a central knot in four point-bending.

検出は応力等級区分の考えになっっている。

2. 2 繰返し縦圧縮に伴う有節材の熱画像変化

曲げ負荷は変位量が大きく、繰返し速度を上げるには動的試験機のオイルポンプの容量を大きくする必要がある。これに対して縦圧縮は変位量が小さくて大きな応力を与えることができ、高速での繰返し負荷が容易である。Fig. 5 に示す方法で繰返し縦圧縮負荷を行い熱画像変化を観察した。Fig. 6 に材縁近くに節が存在する場合の温度変化を示す。6000kgfすなわち平均圧縮応力 127kgf/cm^2 辺りから材縁節において温度上昇が観察された。Fig. 7 に中央に節のある場合を示す。Fig. 6 に比較して温度上昇は少し小さいが、7000kgfのあたりすなわち 150kgf/cm^2 から節周りにおいて顕著な温度上昇が観察された。圧縮においては、中央節でも節周りでの温度上昇が見られる点が曲げ試験と異なる。このことは、曲げ負荷のかかる用途に使用される材は曲げ負荷でグレーディングを行なう

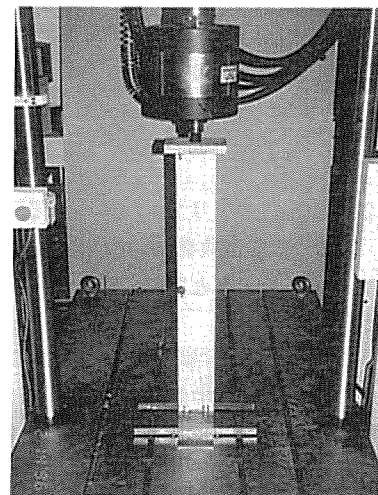


Fig. 5 繰返し圧縮負荷の様子

A photo of repeated compression loading of a lumber including a knot.

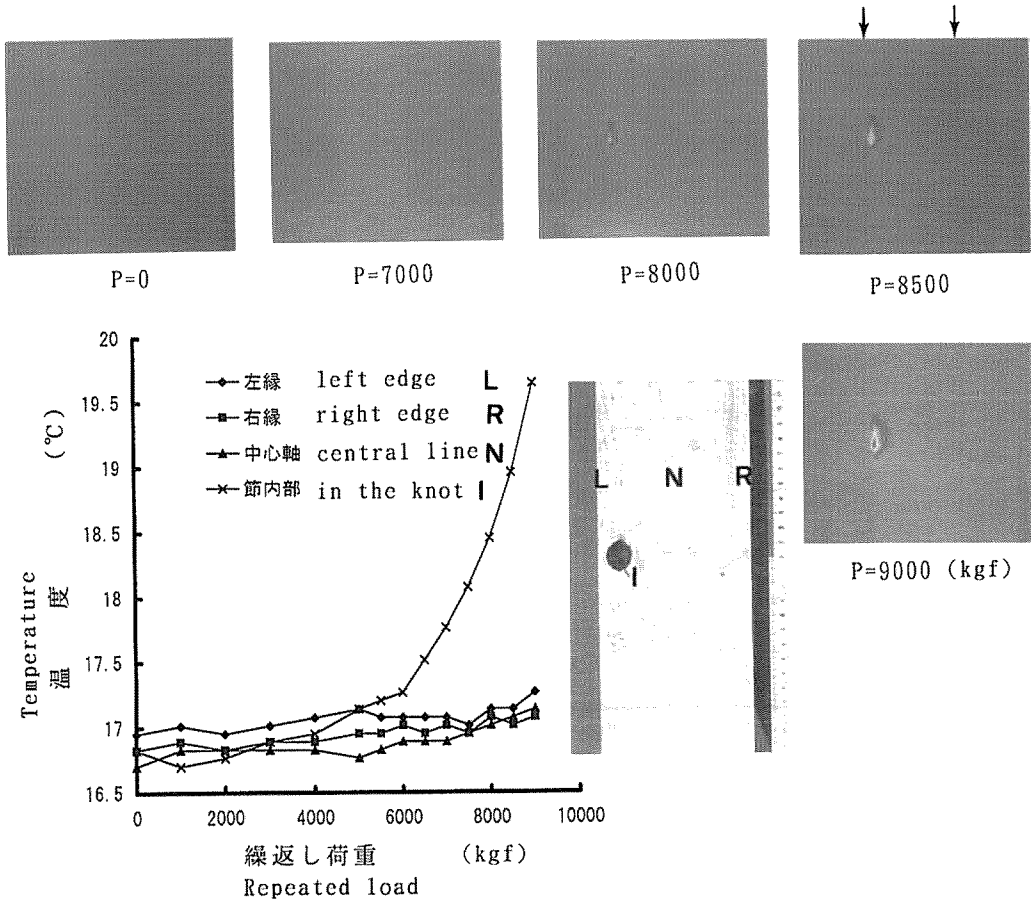


Fig. 6 繰返し縦圧縮負荷における材縁節での温度変化

→は材縁位置を示す。

Photos of temperature changes of lumber including an edge knot under longitudinal compression.
Arrows indicate positions of lumber edges.

方がよいことを示唆している。

2. 3 ヒステリシス・ループと発熱

Fig. 8 に曲げ負荷における荷重-変位曲線の例を示す。負荷と除荷によって表される曲線をヒステリシス・ループと呼び、ループで囲まれたロス・エネルギーは主として熱エネルギーに変換されることが考えられる。

Fig. 9 ~ 11 に “荷重-変位曲線のヒステリシス・ループより求めた繰返し負荷に伴うロス・エネルギー” と “応力集中部での上昇温度 (試験前との温度差)” との関係を示す。Fig. 9 は有節材の曲げ試験における静的負荷-除荷で求めた 1 回当りのループ内エネルギーと上昇温度の関係を示す。ループによるロス・エネルギーが大きいほど温度が高くなることがわかる。

また、Fig. 10 及び 11 に、繰返し縦圧縮におけるループ内エネルギーと温度上昇の関係を示す。Fig. 10 の横軸は、静的な負荷で求めた 1 回分のループ内エネルギーであり、Fig. 11 の横軸は動的に負荷して求めた 1 回分のループ内エネルギーである。両者はよく似た傾向を示し、さほど大きな違いは認められ

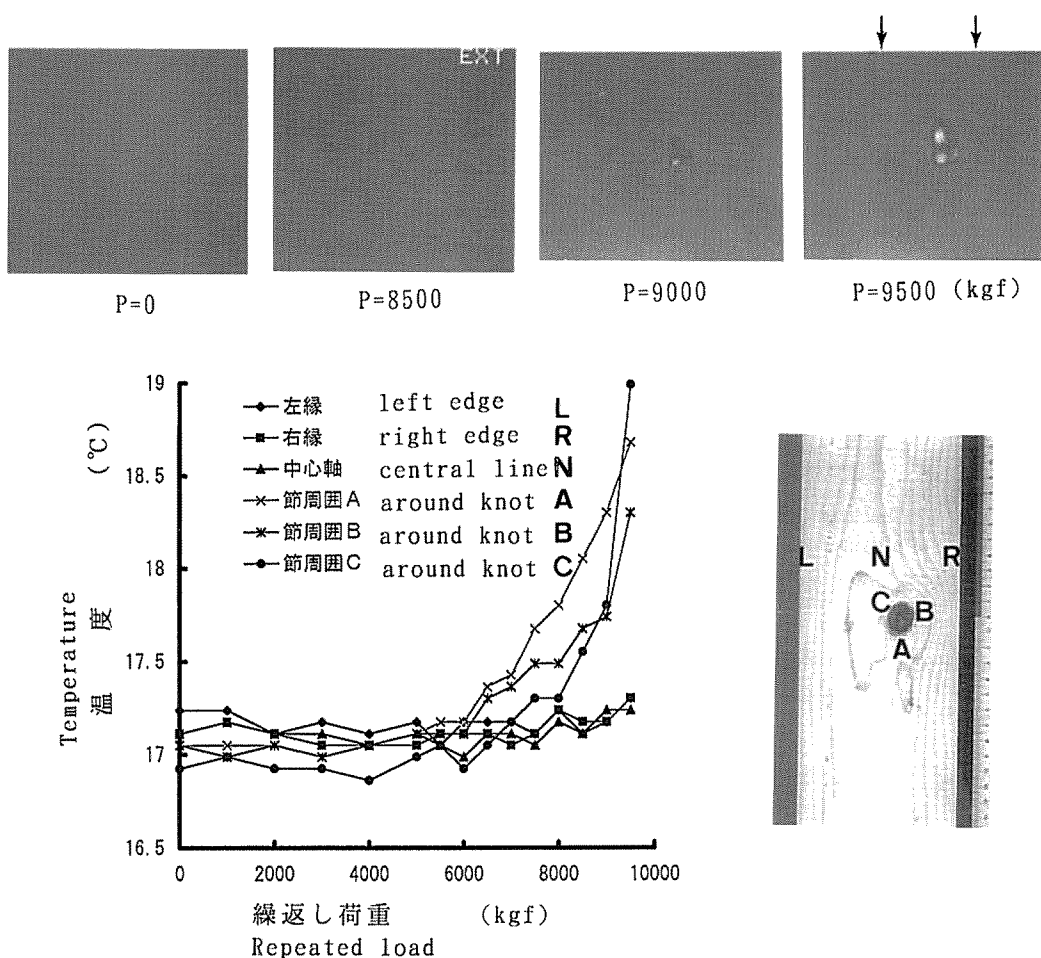


Fig. 7 繰返し縦圧縮負荷における中央節での温度変化

Photos of temperature changes of lumber including a center knot under longitudinal compression.

ないが、曲げに比較すると圧縮の方が同一ループ内のエネルギーに対する温度上昇が大きい。これは、曲げに比較して圧縮の方が、同一荷重に対する変位量が小さく高速（5 Hz）で負荷することができたので、単位時間当たりの発熱が増した割には放熱の増加が相対的に小さかったためと考えられる。曲げにおいては、圧縮に比較すると荷重の割にたわみが大きく、低荷重において5 Hzで負荷していても、高荷重では試験機の油圧容量の制限から5 Hzが維持できず、荷重増加とともに周波数を順次1 Hzまで下げている。そのため、圧縮に比較すると発熱量の割に放熱量が大きく、上昇温度が小さくなっている。このことから熱画像を解析する際には熱拡散現象が考慮すべき重要因子であることがわかる。

ヒステリシス・ループによるロス・エネルギーと発熱との相関が高いことから、逆に発熱を測定する代わりに、荷重-変位曲線のヒステリシス・ループを調べることにより等級分けをすることも不可能でないことが示唆された。すなわち、曲げヤング率とヒステリシス・ロス・エネルギーの両者を用いて強度を予測し、前者のみによるグレーディングの欠点を補う方法である。今後の詳細な検討が期待される。

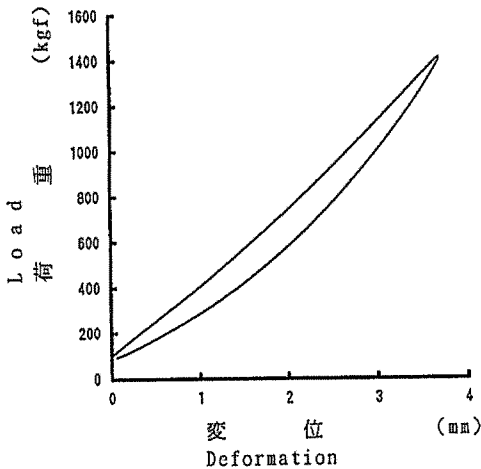


Fig. 8 荷重-変位曲線のヒステリシス・ループ
An example of a hysteresis loop of a load-deflection curve.

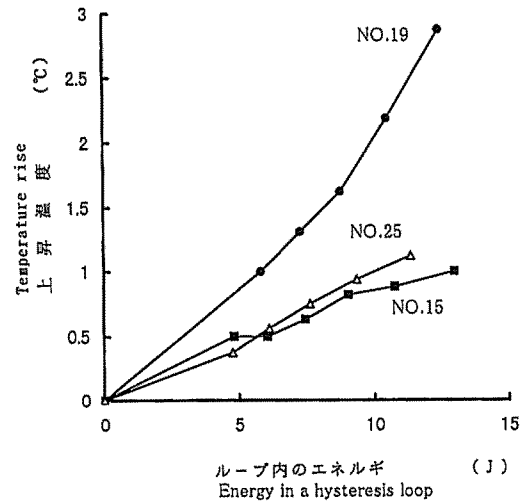


Fig. 9 荷重-変位曲線のループ内エネルギーと応力集中部の温度の関係 — 繰返し曲げ負荷, 荷重-変位曲線を静的に求めた場合
図中の数字は試験体番号を表す。No.25はFig. 3に示す試験体と同一である。

Relationships between "temperature rise in repeated bending" and "energy loss by a hysteresis loop of a load-deflection curve obtained in static bending".

Numbers in the figure indicate specimen numbers. No.25 is the same specimen as that shown in Fig.3.

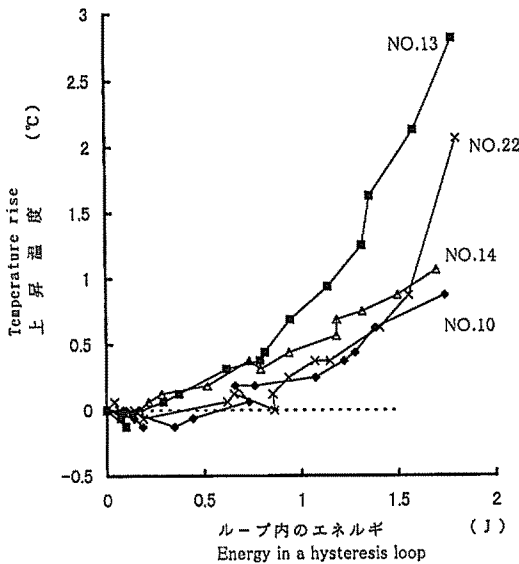


Fig. 10 各荷重レベルにおける荷重-変位曲線のループ内エネルギーと応力集中部の温度の関係 — 繰返し縦圧縮負荷の場合 — 荷重-変位曲線を静的に求めた場合

No.13及び22はそれぞれFig.6及び7と同一試験体である。

Relationships between "temperature rise in repeated longitudinal compression" and "energy loss by a hysteresis loop of a load-deflection curve obtained in static compression".

No.13 and 22 are the same specimens as those shown in Fig.6 and 7, respectively.

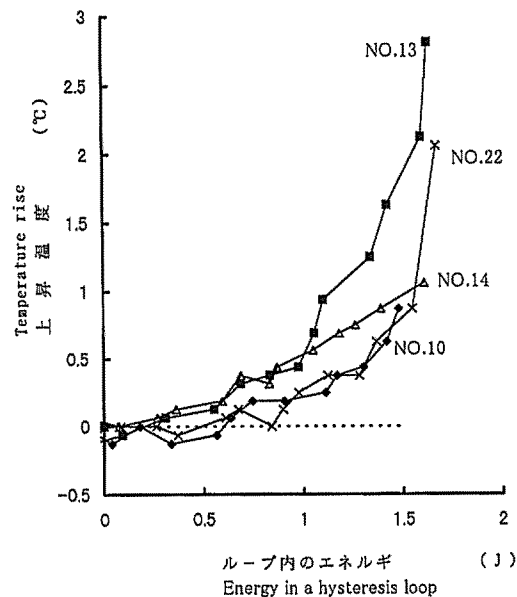


Fig. 11 各荷重レベルにおける荷重-変位曲線のループ内エネルギーと応力集中部の温度との関係 — 繰返し縦圧縮負荷の場合 — 荷重-変位曲線を繰返し負荷中に求めた場合
Fig.10 参照。

Relationships between "temperature rise in repeated longitudinal compression" and "energy loss by a hysteresis loop of a load-deflection curve obtained in dynamic compression".

Refer to Fig.10.

3. 繰返し負荷に伴うフィンガー・ジョイントの熱画像変化

前述の有節材の繰返し荷重下における熱画像観察において、応力-ひずみの関係が非線形となる部分で発熱が観察されたが、このことを応用すればフィンガー・ジョイント（以下では、FJと略す）における応力集中部がどこであるのか、調べる事が可能と考えられる。以下、曲げ及び圧縮における熱画像変化を観察したので報告する。

3. 1 繰返し曲げ負荷に伴うFJの熱画像変化

Fig.12に今回測定に用いたFJの写真を示す。写真に見えるところが側面となるようにして、高さ75mm、幅35mmの試験体を、トータル・スパン60cm、ロード・スパン30cmで4点曲げ試験を行なった。繰返し曲げ負荷（900kgfまでは5 Hz、1000kgf以上では4 Hz）を加えると、Fig.13に示すように、引張側外縁近くの少し内部に入ったところのフィンガー部で接着剥離が起こり、大きな発熱が生じたことが観察される。ついで圧縮側外縁近くでのフィンガーで接着剥離が起こり発熱が生じている（Fig.14）。外縁に近いほどミニ・フィンガーの接着部に加

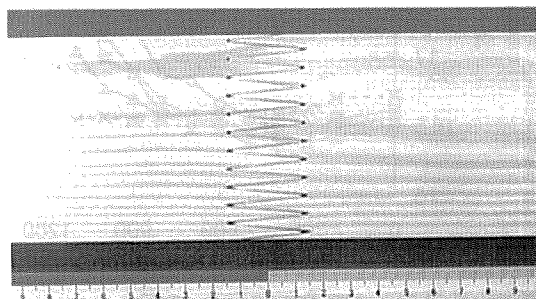


Fig. 12 実験に用いたフィンガー・ジョイント (FJ)
ベイマツ, 高さ:75mm, 厚さ:35mm
A photo of a finger jointed lumber(FJ) used for the experiment.
Douglas fir, height:75mm, thickness:35mm

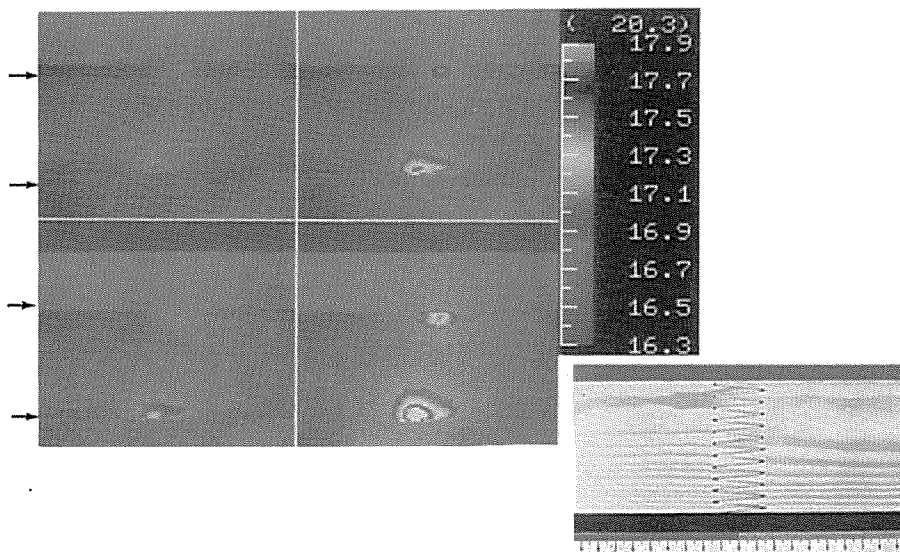


Fig. 13 繰返し曲げ負荷に伴うFJの熱画像変化
曲げ荷重 — 左上:800kgf(183kgf/cm²), 左下:900kgf(206kgf/cm²), 右上:1000kgf(229kgf/cm²), 右下:1100kgf(251kgf/cm²)。括弧内の数字は外縁応力を示す。
→は材縁位置を示す。

Photos of temperature changes of the FJ in repeated bending.

Bending load--upper left:800kgf(183kgf/cm²), lower left:900kgf(206kgf/cm²), upper right:1000kgf(229kgf/cm²), lower right:1100kgf(251kgf/cm²). Figures in parentheses indicate stress at the edge.
Arrows indicate positions of lumber edges.

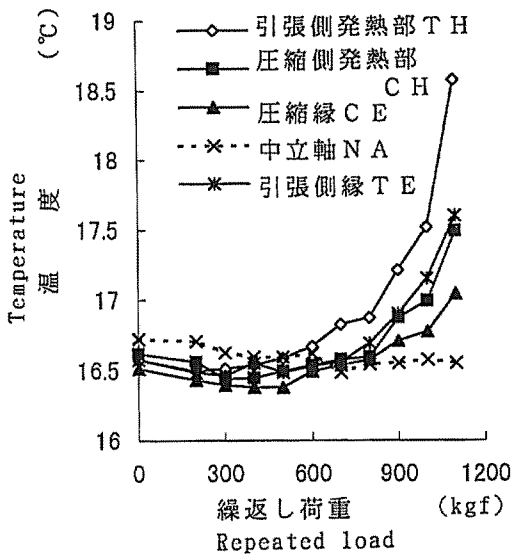


Fig. 14 繰返し曲げ荷荷に伴うFJの温度変化例1
Fig. 13と同じ試験体

An example of temperature change of different portions of FJ in repeated four point-bending.

The same specimen as Fig. 13.

TH:hot portion at tension edge, CH:hot portion at compression edge, CE:compression edge, NA:neutral axis, TE:tension edge

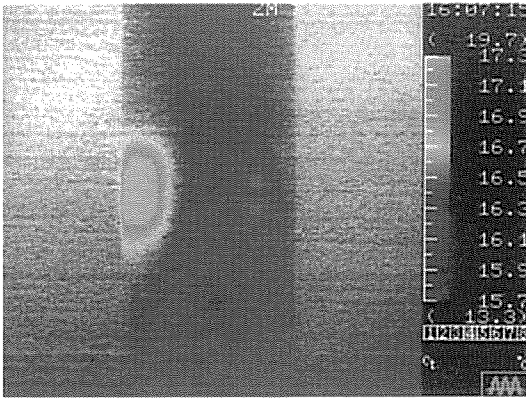


Fig. 16 繰返し圧縮荷荷に伴うFJの熱画像例

A photo of temperature distribution of a FJ in repeated compression.

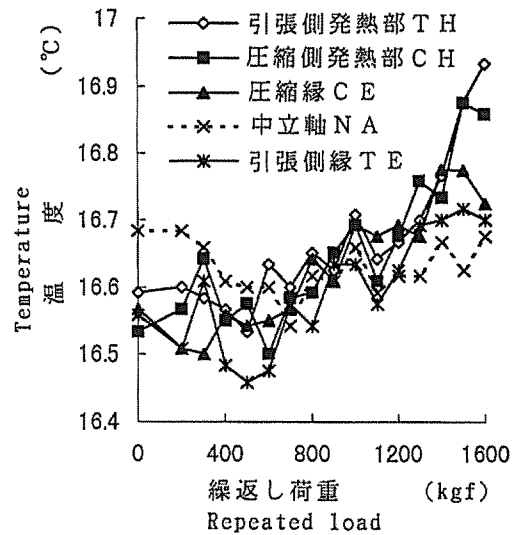


Fig. 15 繰返し曲げ荷荷に伴うFJの温度変化例2
(FJの接着が良好な場合)

Another example of temperature changes of different portions of FJ in repeated four point-bending.

Adhesion of this FJ specimen was better than that of Fig. 14.

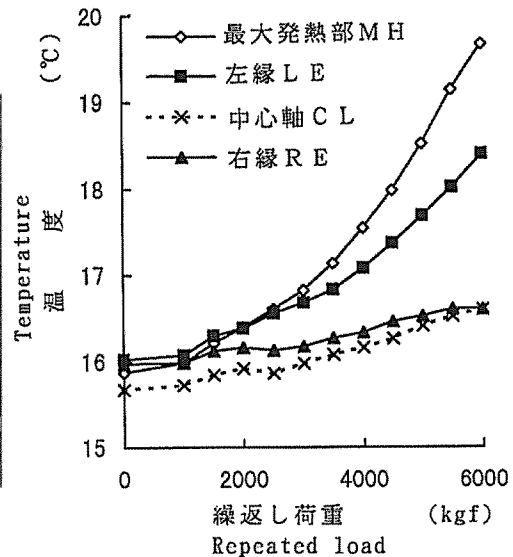


Fig. 17 繰返し圧縮荷荷に伴うFJの温度変化例

An example of temperature change of different portions of FJ in repeated compression.

The same specimen as Fig. 16.

MH:hottest portion, LE:left edge, CL:center line, RE:right edge

わる応力が大きく、局所的な剥離に伴って発熱が生じていることがわかる。Fig.15は別の試験体の測定結果であるが、フィンガーの接着が強く、大きな荷重まで耐えた例である。1400kgfになってようやく部位による温度上昇の差異が明確になり始めている。

3. 2 繰返し縦圧縮負荷に伴うFJの熱画像変化

Fig.16にFJの繰返し縦圧縮（5 Hz）によって生じた顕著な発熱の例を示す。左の外縁より少し入ったところで、フィンガー接着部の局部せん断剥離による発熱が観察された。せん断による発熱の場合は引張剥離と異なり急激な発熱ではなく徐々に温度が上がって行く様子がFig.17より見て取れる。同様の別の試験体においても、似た現象が観察された。

以上、いずれの場合においても熱画像観察は、応力分布の観察というよりは、剥離の始まり部分の観察に適していると言えよう。

4. 繰返し負荷に伴うメタル・プレート・コネクタの熱画像変化

今回の実験において用いたメタル・プレート・コネクタ（以下ではMCと略す）による接合例をFig.18に示す。用いたMCはマイテック社（旧ギャンゲネイル社）製、M20（幅71mm，長さ178mm，厚さ0.95mm，亜鉛メッキ鉄板，打ち抜き歯長8.5～9.0mm）である。黒く写っているのは、MCの金属面での反射を抑えるため、表面に艶消し黒ペイントをスプレーしたためである。ここでも温度測定においては便宜上、物体の放射率を1.00として計測し、画質を改善するため0.25秒／フレームで取り込んだ4フレームを平均した値を用いている。

スプリースの2×4材（38mm×89mm）をMCで接合し、MCがエッジワイズになる方向に4点曲げ（トータル・スパン50cm，ロード・スパン20cm）にて繰返し曲げを加えた結果，Fig.19に示すような熱画像が得られた。荷重増加に伴う温度変化はFig.20に示す通りであり，外縁ほど発熱は大きく，中立軸付近の温度は相対的に低い。また，引張側の外縁の方が圧縮側より少し高い温度となっており，圧縮側は材どうしが当たるため，MCによる圧縮力分担が小さいことを示唆している。また，MCの長さ方向では突きつけ部分に近いほど力の分担は大きく，突きつけ部から離れるほど分担力は小さくなり，発熱も小さくなる。同様の別のMCにおいてもよく似た温度分布が観察された（Fig.21）。いずれのグラフにおいても繰返し荷重の増加とともに徐々に温度が上昇しており，ある荷重から急に発熱が始まるというタイプの発熱ではなく，低い荷重においても発熱分布が観察された。各歯とそのめり込んだ木材内部との間で応力－ひずみのヒステリシス・ループが低い荷重下においても生じていると推測でき，温度分布がちょうど各歯の接合力分担割合を表していると思えることができる。金属の熱拡散率は大きい，結果的には歯と木材で生じた発熱量の各部位における違いがこれらの熱画像に表れていると考えられる。

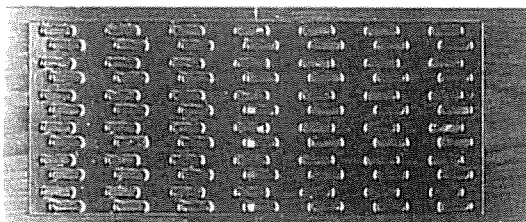
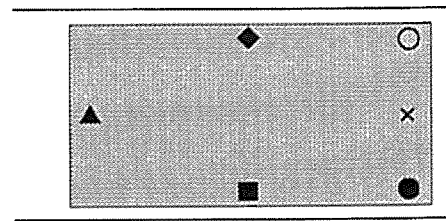
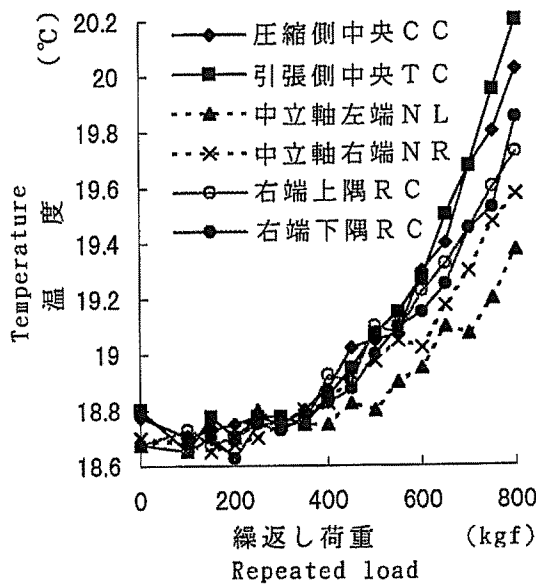


Fig.18 実験に用いたメタル・プレート・コネクタ（MC）
用いた材はスプリースの2×4材（38mm×89mm）。MCの寸法は71mm×178mm×0.95mm（厚さ）。歯の長さは8.5～9.0mm，歯の幅は3.3mm。

A photo of a metal plate connector(MC) coated with black mat paint for uniform high heat radiation.

Lumber was 2×4 spruce(38mm×89mm). Size of MC was 71mm×178mm×0.95mm(thickness). The tooth length was 8.5～9.0mm and the tooth width was 3.3mm.



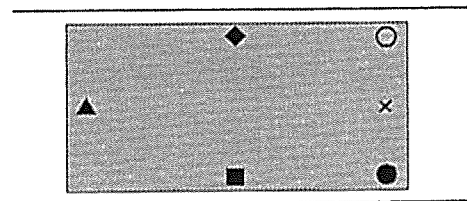
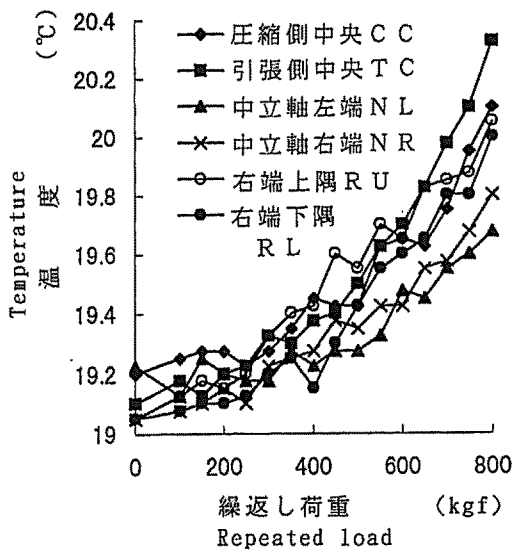
- ◆ 圧縮側中央 C C
- 引張側中央 T C
- ▲ 中立軸左端 N L
- × 中立軸右端 N R
- 右端上隅 R C
- 右端下隅 R C

Fig. 20 繰返し曲げ荷重に伴うMCの温度変化例 1

Fig. 19と同じ試験体

An example of temperature change of different portions of MC in repeated bending.

The same specimen as Fig. 19 (color).



- ◆ 圧縮側中央 C C
- 引張側中央 T C
- ▲ 中立軸左端 N L
- × 中立軸右端 N R
- 右端上隅 R U
- 右端下隅 R L

Fig. 21 繰返し曲げ荷重に伴うMCの温度変化例 2

Another example of temperature change of different portions of MC in repeated bending.

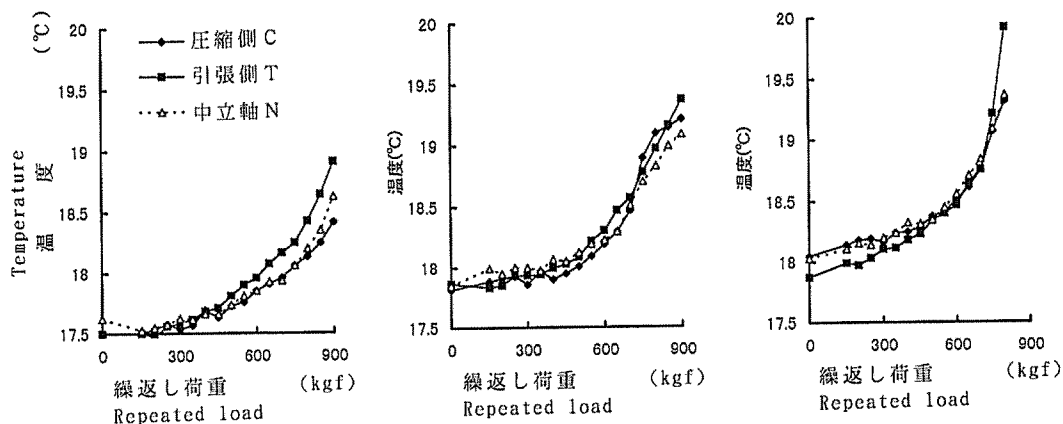


Fig. 22 繰返し曲げ荷重に伴うMCの温度変化 — 材の突きつけ部にギャップがある場合

Temperature change of different portions of MC with a gap between lumbers in repeated bending.

左図：ギャップなし，中央図：ギャップ1mm，右図：ギャップ2mm

Left figure: with no gap, center figure: with 1mm gap, right figure: with 2mm gap

C: compression edge, T: tension edge, N: central line

接合部において材間にギャップを設けた場合についても発熱を観察した (Fig.22)。ギャップが大きいほど材端の突きつけによる圧縮力分担が小さくなるため、歯の分担力が増加し、昇温量が大きくなっていることが見て取れる。

ギャップのないMC接合を繰返し縦引張（5 Hz）した場合の熱画像及び温度変化をFig.23 (color) 及び24に示す。やはり突きつけ端に近いほど発熱が大きく、MCの端ほど温度上昇が小さかった。縦引張においても突きつけ部分に近い歯（中央付近）ほど大きな力がかかっていることがわかる。

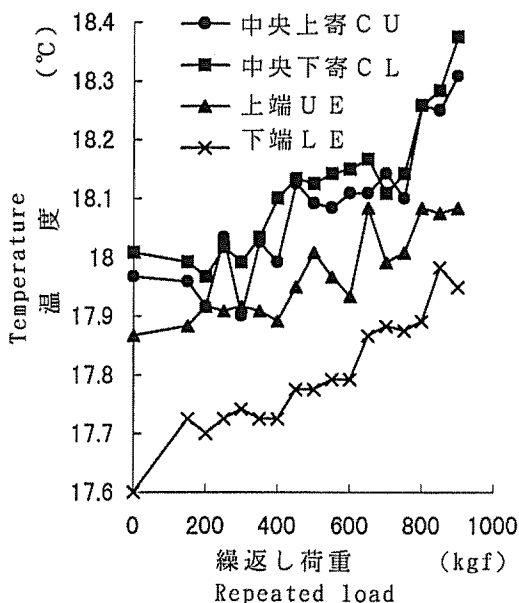


Fig. 24 繰返し縦引張荷重に伴うMCの温度変化例

An example of temperature change of different portions of MC in repeated tension.

CU: a little upper from the center, CL: a little lower from the center, UE: upper end, LE: lower end

5. 熱弾性効果を用いたメタル・プレート・コネクタの応力分布測定

5. 1 測定方法

以上の実験では主として応力-ひずみ曲線のヒステリシスによって生じる発熱を観察したが、ここでは、弾性範囲内での熱弾性効果によって生じる可逆的な極わずかの発熱・吸熱変化を毎回測定し、それを多数回積算することによって応力分布を測定しようする方法²⁾を試みた。繰返し荷重試験機は前述と同じであるが、荷

のタイミングと同期を取りながら弾性応力変化に対応する温度変化を測定し積算する装置として赤

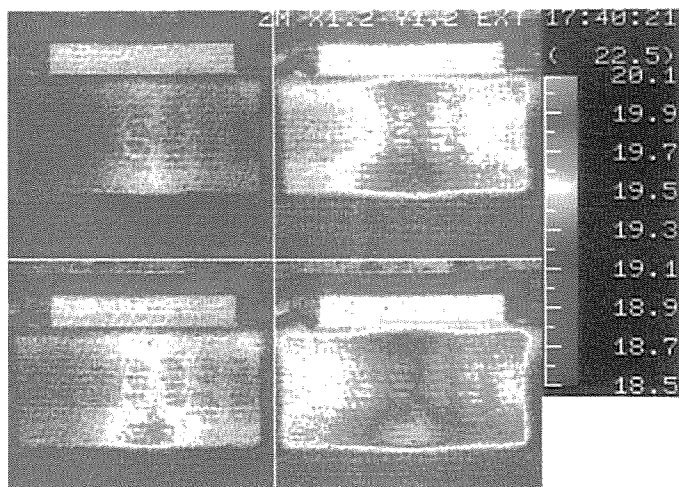


Fig. 19 繰返し曲げ荷重に伴うMCの熱画像変化

曲げ荷重 — 左上:650kgf, 左下:700kgf, 右上:750, 右下:800kgf。

Photos of temperature changes of the MC in repeated bending.

Bending load--upper left:650kgf, lower left:700kgf, upper right:750kgf, lower right:800kgf

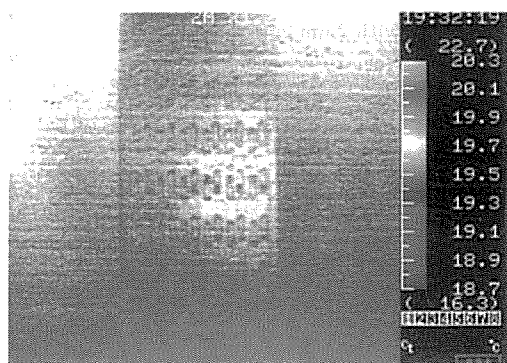


Fig. 23 繰返し引張荷重(800kgf)を加えた場合のMCの熱画像

突きつけ部に近いほど発熱が大きい。

Photos of temperature distribution at MC in repeated tension(800kgf).

The nearer the nails were located to the lumber end of the butt joint, the higher the rise of temperature.

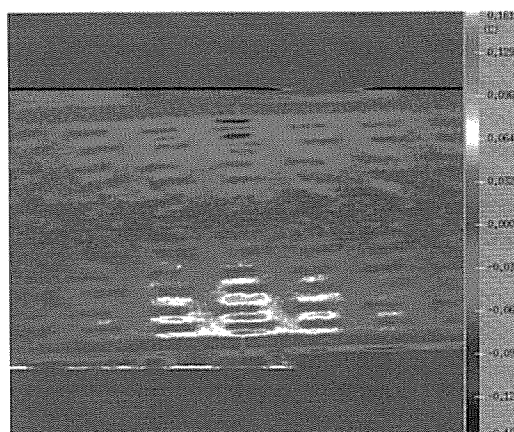


Fig. 25 熱弾性効果により求めたMCの曲げ荷重時と除荷時の温度差分布 — 材の突きつけ部にギャップのない場合

この分布から主応力方向(水平方向)の応力分布の概略を知ることができる。

Distribution of temperature difference between loading and unloading of MC in bending measured using thermo-elastic effect--no gap at the connection.

This distribution is thought to be almost the same as that of stresses in horizontal direction.

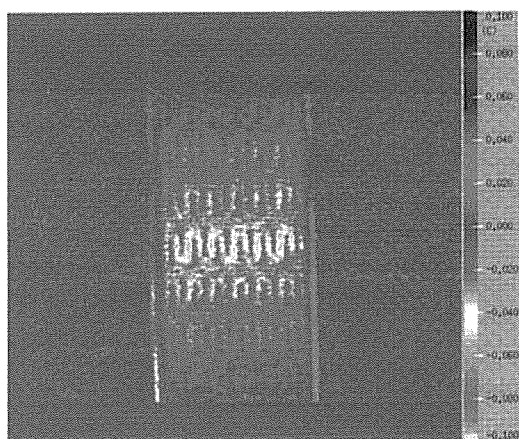


Fig. 26 熱弾性効果により求めたMCの引張荷重時と除荷時の温度差分布

この分布から主応力方向(鉛直方向)の応力分布の概略を知ることができる。

Distribution of temperature difference between loading and unloading of MC in tension measured using thermo-elastic effect.

This distribution is thought to be almost the same as that of stresses in vertical direction.

外線応力画像システム（日本電子製JTG-8010）を使用した。この測定の基本原理は、気体と同様、固体においても体積変化が断熱的に行われると吸熱・発熱による温度変化が生じるであろうと仮定した熱弾性効果によっており、金属のような等方性材料に対しては、次式が成り立つとしている²⁾。

$$\Delta T = -kT \Delta \sigma$$

ここに、 ΔT ：温度変化量

k ：熱弾性係数

T ：試験体の絶対温度

$\Delta \sigma$ ：主応力の変化量

この方法を用いて前述と同様、MC接合されたスプルー材を用い、4点曲げ試験と引張試験を行った。

5. 2 測定結果

Fig.25にギャップのないMCの曲げにおける、負荷時と除荷時の温度差分布を示す。前章と同様の結果が観察される。また、引張における負荷時と除荷時の温度差分布をFig.26に示す。この場合もまた前章と同じ結果が得られた。

この熱弾性効果による応力分布の測定は、金属のように均一な材料に対しては有効な方法であるが、木材のように方向によって弾性率や熱拡散率が異なり、また、早晚材により密度の異なる材料では、温度分布から応力分布やひずみ分布を予測するには、方向により異なるいくつかの熱弾性係数 k 、弾性係数 E 及び熱拡散率を求める必要がある。結局、一方向のみの応力分布が卓越している場合のみ、温度分布から一方向の概略的な応力分布を求めることが可能であると考えられる。したがって、この測定装置は、一方向のみの応力が卓越した場合の、木材の応力分布測定などに使える可能性は残されているが、現状でグレーディングに適用するには計測に時間を要し過ぎて無理がある。ちなみに、今回の測定では一測定当たり10分程度を要した。これに対して、ヒステリシスに基づく熱画像測定では、グレーディング荷重のある荷重、例えば短期許容応力度レベルに設定し、10～50回程度繰返し負荷を行えば等級分けが可能であり、高速荷重試験機及び高精度の熱画像装置を用いれば1～5秒程度でグレーディングが可能である。とはいえこの場合も時間の短縮が実用化への大きな課題となろう。

6. 結 言

以上、繰返し負荷に伴う発熱に関する基礎的な測定を行ない、熱画像によるグレーディングの可能性を検討した。その結果、高速で大きな繰返し変位を与えることが実用化に向けての課題であり、縦圧縮の方が曲げよりも小さな繰返し変位で大きな見かけの応力を与えることができる点で実用化に適している。しかし実際のラインでは材長が約4m程度あり、たわみ防止の支持を設けるとか、連続的にライン上で圧縮負荷する方法など検討すべき点が多い。一方、今回の一連の実験から、荷重・変位曲線のヒステリシス・ループを計測し曲げヤング率と併用すれば高速かつ精度のよいグレーディングが可能であることが示唆された。今後の検討が期待される。

謝 辞

最後に、上記の研究において何かと協力いただいた生物材料設計学研究室の仲村匡司講師並びに当研究室の諸氏に対し謝意を表する。また、第5章の熱弾性効果に伴う熱画像測定には日本電子

(株)の増喜彰久氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表したい。なお、本研究は平成7年度及び8年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))「振動負荷に伴う熱画像変化を利用したグレーディング」(研究代表者 増田 稔)³⁾を受けて行なったものである。

文 献

- 1) 増田 稔・藤本清彦・瀧野眞二郎・佐道 健(1995) 繰返し曲げに伴う有節材の熱画像変化. 京都大学農学部演習林報告. No.67. 167-173
- 2) 増喜彰久・森下侑一(1996) 赤外線応力測定技術とその応用. 非破壊検査. 45(11). 798-805
- 3) 増田 稔(1997) 振動負荷に伴う熱画像変化を利用したグレーディング. 平成8年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(A)(2)) 報告書(研究代表者 増田 稔). 1-21

Summary

A knot itself is not a portion of stress concentration. But a crack often exists in a knot or around a knot, and bending and/or compression stresses will propagate the crack which will often become the origin of ultimate failure. Stress-strain relationship at stress concentrated portion shows a hysteresis loop. And heat is generated according to the loss energy of the hysteresis loop. In this study heat generation was observed at crack tips around knots and other defects of lumber in bending and also in compression using infrared thermography. The amount of the generated heat can be magnified by increasing of repetition number of loading.

An outline of stress distribution can be observed using this hysteresis heat generation thermography, and the stress distribution in a metal plate connector(MC) was observed in bending and also in tension. The nearer a nail of MC is located from the butt joint, the greater the share of load transmission distributes. This was also observed by another thermographical technique under repeated load using thermo-elastic effect.

According to the results of this series of tests lumbers including defects with high stress concentration showed large hysteresis loss energy in their load-deformation curves both in bending and compression. This fact suggests that measuring not only Young's modulus but also hysteresis loop(loss energy) will give more accurate stress grading.