メタルプレートコネクターを用いた 木材継手の回転曲げ疲労特性*

林 知 行** 増 田 稔*** 佐々木 光***

Rotating Bending Fatigue Properties of Timber Butt-Joint with Metal Plate Connectors

by

Tomoyuki HAYASHI, Minoru MASUDA and Hikaru SASAKI

(Wood Research Institute, Kyoto University, Uji)

Mechanical properties of timber joints with metal plate connectors have been tested so far mainly by static loading. Works on fatigue properties of the joints subjected to cyclic loading, which are needed for determining safe design loads and for predicting the safe service life of the joints, are scarce and the effect of moisture cycling on the fatigue properties of the joints has not been clarified at all.

Rotating bending fatigue tests were therefore carried out on the timber joints of air-dried, water-saturated or moisture-cycled specimens. The effects of moisture content and moisture cycling on the fatigue properties of the joints were discussed with considering the failure modes of the joints and the strain distribution in the metal plate connector.

The results obtained are as follows;

(1) The relationship between the applied bending moment and the cycles to failure was expressed as a single continuous curve. The fatigue limit of air-dried and water-saturated specimens are 9% and 11% of the static strength, respectively.

(2) The failure modes of joints in fatigue tests could be divided into three categories. All teeth were pulled out of the wood block at relatively high moment levels, but they were sheared off at the root of teeth at relatively low moment levels. At intermediate moment levels, some were pulled out and the rest were sheared off.

(3) The fatigue strength of the joints was much influenced by the pre-treatments of moisture cycling, while the static strength was rather insensitive to the treatments.

(Received Nov. 3, 1978)

キー・ワード：接合金物，木材継手，疲労，乾湿繰返し

1 はじめに

メタルプレートコネクター（以下，プレートと略称する）は，木構造用接合金物の中で，とくに耐力性能，経済性，施工性に優れており，最近プレファブ住宅や枠組壁工法住宅の接合部材に多く用いられるようになってきた。

この種のプレートを用いた接合部の強度特性に関する研究は数多く見られるが，その多くは静的強度についてのものであり，地震，台風，その他の振動によって生ずる繰返し荷重を受ける際の挙動，すなわち疲労

特性に関しては，わずかに，Sletteland³⁾の報告があるに過ぎない。また接合部の挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる湿度変化の影響についても，T.L. Wilkinson⁴⁾の研究の中で，静的強度に関してわずかに触れられている程度で，疲労特性に及ぼす影響については，これまでに研究がみられない。

本報告は，これらの点を考慮して，プレートを用いた木材接合部の疲労特性を明らかにするため，その手始めとして，単純突付け接合に繰返し荷重を与えた場合の実験結果と考察である。ここに用いた試験装置は小野式回転曲げ疲労試験機を，木材継手用に改造したものであり，この試験によって与えられる荷重状態は非常に複雑である。ここではまず，回転に伴うプレ-

* 原稿受理 昭和53年11月3日

** 学生会員 京都大学木材研究所 宇治市五ヶ庄

*** 正会員 京都大学木材研究所 宇治市五ヶ庄

ト内の各歯の分担力分布の変化を測定して荷重状態を推定したのち、疲労試験を行い、含水率、乾湿繰返し処理、試験速度が接合の疲労特性に及ぼす影響を明らかにした。

2 実 験

2・1 試験片

試験片の状態および寸法を Fig. 1 に示す。用いたプレートは、ギングネイル GN18-1×3.1 (U. S. A. ABC 社製) で、歯数20本、5行 (A, C, E 行は長歯, B, D行は短歯) のものである。また木材は、気乾比重 0.50 のシトカスプルス (*Picea sitchensis*) で、年輪幅の比較的狭いもの (0.5~1.5 mm) である。

Fig. 1. Diagram showing geometry of specimen.

気乾試験片および乾湿繰返し処理試験片に用いた木材は、含水率12%の状態、また飽水試験片に用いた木材は、水を減圧注入して飽水状態にした状態で、おのおの Fig. 1 に示す寸法の一対の角材に切り揃えられた。次いで、この一対の材がゆるみなく突き合わされるように、その両端を端金で圧縮し、手動油圧プレスを用いて、上下両板面にプレートを圧入した。乾湿繰返し試験片については、この後60℃の恒温器に4日間、60℃恒温器内に設けた密閉飽湿器内に3日間の乾湿繰返しサイクルを1~15サイクル繰返した後、20℃、65%RHの恒温恒湿室内にて調湿し、含水率約12%となった後、試験を行った。なお、この吸放湿処理過程における含水率は、乾燥処理後 $4 \pm 1\%$ 、吸湿処理後 $15 \pm 1\%$ であった。

2・2 回転曲げ疲労試験機

用いた疲労試験機は、通常、金属丸棒の疲労試験に用いられる小野式回転曲げ疲労試験機である (Fig. 2)。

Fig. 2. Rotating bending fatigue test machine.

本試験では、Fig. 1 に示した試験片を取付けるため、架台部を200 mm 延長するとともに、内部が正方形断面 (50×50 mm) にくり抜かれたカップ形の特製アタッチメントを考案し、これに試験片がゆるみなく入るように工夫した。試験片の固定はこのアタッチメントに左右各24個の孔をあけ、外から木ネジを締込むことによって行われた。

試験片とくにプレートに作用する荷重は、丸棒の場合のように、回転に伴って単純な正弦波の曲げが繰返されるのではなく、プレートが上下面にある場合 (Flatwise)、上面のプレートには圧縮力が、下面のプレートには引張力が作用し、ついで、90° 回転して、プレートが両側面の位置にきた場合 (Edgewise)、プレートは面内の曲げ荷重を受け、上部は圧縮、下部は引張力を受けることになる。

試験機の回転速度は、1000 rpm を標準とし、回転速度の影響を調べるために、100 rpm の試験速度を一部採用した。

試験環境は、20℃、65%RH の恒温恒湿とした。ただし、飽水試験片については、試験中含水率を常に繊維飽和点以上に保つため、試験片の周囲を飽湿ボックスで覆った。

2・3 静的曲げ破壊試験

疲労試験における時間強度および破壊形態の対照として、オルゼン型万能試験機を用いて、静的曲げ試験を行った。プレートを用了接合部の曲げ試験には、前述の Flatwise の場合と Edgewise の場合とが考えられるが、Edgewise の場合の強度は、Flatwise の場合のそれに比して明らかに低く、疲労試験における破壊に対してもより支配的であると考えられるので、ここでは、Edgewise の場合の静的曲げ強度を求め、対照とした。

試験片の数は、気乾試験片および飽水試験片については、おのおの5個、乾湿繰返し処理試験片については、乾湿繰返しサイクルが、1, 2, 3, 6, 9, 12, および15回のものを各1個ずつ計7個とした。

2・4 各歯の分担力分布の推定

試験片に与えられる曲げモーメントはプレートの各

歯で分担され、その分担力に応じて根元のわん曲部が曲げ変形を受ける (Fig. 3(a)). 予備試験の結果、わん曲部の変形は、Fig. 3 (b)に示すように歯の分担力にほぼ比例することがわかったので、プレート内のすべての歯のわん曲部にゲージ長1mmのストレインゲージを計20枚貼付し、上記の疲労試験装置にとりつけ、荷重を与えながら静かに回転させて、回転位置による各歯の分担力分布の変化を観察した。

この方法は、わん曲部の曲率および貼付されたゲージの位置の相違などに伴い、歯の分担力とひずみの関係に多少の相違があるため、厳密な分担力分布の測定方法ではないが、その概略を推定するには充分であると考えられる。

3 結果および考察

3.1 回転に伴う分担力分布の変化

回転に伴う歯の根元のひずみ分布の変化の一例を Fig. 4 に示す。縦軸はひずみの量、横軸は試験片が一回転する間の角変化 (プレートの位置)、斜軸はプレートの横方向の位置を表している。ひずみ量は、各行内での平均ひずみ量である。なお、(A, C, E行)と(B, D行)では歯の長さが異なるため、ここでは(A, C, E行)についてのみ示した。

プレートが上部にある場合においては、各行は一樣な圧縮、両側面にある場においては、上の行は圧縮、下の行は引張り、すなわち曲げの状態にあり、プレートが下部にある場合においては、一樣な引張りとなるようすが示されている。また、A行とE行は位相が180°ずれ、かつ逆転していることがわかる。ひずみ量の最大値はプレートが側面と下面の中間位置のA, またはE行に生じており、破壊はこれらの歯から始ま

Fig. 3. Load distribution measurement with strain gauge.

- (a) Schematic diagram showing location of strain gauge and relation of load to reaction force.
- (b) Relation of the force to the strain.

Fig. 4. Variations of strain distribution in the plate during rotation at moment level 626 kg·cm.

Fig. 5. Diagram showing strain distribution in the plate in edgewise bending.

Fig. 6. Diagram showing strain distribution in the plate in flatwise bending.

るものと考えられる。Fig. 4 は、モーメントが 626 kg·cm の場合であるが、モーメントを変化させても定性的な傾向は変わらない。

プレートが側面にあつて、モーメントが 326 kg·cm および 626 kg·cm の場合のひずみ分布を Fig. 5 に示す。またプレートが上下にある場合のそれらを Fig. 6 に示す。

いずれの場合も、モーメントの増加とともに、下側（引張側）の分担力が大きくなっている。これは、モーメントが増加すると、試験片の突き付け部分において木材と木材とが押し合つて圧縮力を分担し、プレートの圧縮分担量が小さくなることに起因している。したがって、突き付け部を密着させず、そこに間げきを設けた場合には、上記と異なるひずみ分布（分担力分布）

になるものと思われる。

3・2 含水率の影響

3・2・1 静的試験 気乾試験片の静的破壊時の最大モーメントは、平均 2920 kg·cm、飽和試験片のそれは 1850 kg·cm であった。また、これら両者の破壊形態はともに、Fig. 7 に示すように、歯の引き抜けによるもので、プレート自体または歯の破断は生じなかった。

Fig. 7. Failure in static bending test showing teeth pulled out of wood block.

3・2・2 疲労試験 与えられたモーメントと破壊までの繰返し数との関係を Fig. 8 に示す。測定はなだらかな曲線上にあり、この曲線は 10^6 回以降において水平に近づいている。厳密な意味の疲労限は不明であるが、 10^7 回に達しても破壊に至らない場合の最大のモーメントを疲労限とすれば、気乾材のそれは 266 kg·cm、飽和材のそれは 206 kg·cm となり、この値を静的破壊時の最大モーメントに対する比率で表せば、それぞれ 9% および 11% となる。

Fig. 8. Relation between applied bending moment and cycles to failure.

本試験と同一のプレート、同一の木材を用いた引張圧縮疲労試験の場合には、疲労限が静的引張強度の約 20% であるのに比べて、この値はその約半分に過ぎない点が注目される。この違いは、(1) 疲労限付近の破壊形態（歯の根元すなわち金属の疲労破壊）が静的試験のそれ（歯の引き抜け）と異なるため、疲労限の静的強

1* 林, 増田, 佐々木, 未発表

度に対する比が試験片の形状や樹種、載荷形式などにより相違すること、(2)後に回転速度の影響の項で詳述するように、この種の回転曲げ疲労試験においては、“重すいの上下運動に伴う慣性の影響”のために、静的に算出されるものより過大な曲げモーメントが与えられていることなどが考えられる。

試験片の破壊形態は、与えられたモーメントの段階によって異なる。Fig. 8 に示されるように、静的強度に近い、高いモーメントの下では、歯の引き抜けによって破壊し (Fig. 9)、疲労限に近い低いモーメントの下では、歯の根元の疲労破壊が生じ (Fig. 10)、これらの中間のモーメントの下では、両者の混在した破壊形態 (Fig. 11) が見られた。この傾向は、引張圧縮繰返し疲労試験の場合と全く同様である。

このような破壊形態の相違は、次のように説明できる。今、1本の歯について考えれば、いわゆる弾性床

(木材) 上のはり (歯) の問題として扱うことができる⁶⁾。高いモーメントの下では、材の変形量が大きくなり、それに伴って歯の根元の変形量も増加し、引き抜け方向の分力が保釘力をしのぐ値に増大した時点で、静的 (引き抜け) 破壊が生じる。とくに、疲労試験の場合には、外力の繰返しにより、歯をしめつけている木材組織に疲労が生じ保釘力が低下し、静的破壊よりも低い荷重で引き抜けが生じる。

気乾材と飽水材について考えると、同一モーメントの下であっても、飽水材の方が弾性床としての弾性係数が小さいため、歯の根元の変形量が大きく、かつ歯の締めつけ力 (保釘力) が小さいため寿命が短くなる。

一方、低いモーメントの下では、歯の根元の変形量が小さいため、引き抜き方向の分力が低く、保釘力がこれに優るため、歯が引き抜けるには至らず、したがって、歯の根元の金属は長時間の繰返し変形を強いられる結果、疲労破壊する。

また、中間のモーメントの下では、最初いずれの歯に生ずる分担力も引き抜けを生ずるほどには大きくないが、その中でまず分担力の大きい歯が疲労破壊し、それに伴って、他の歯の分担力が増加し、それが保釘力を上まわるために引き抜けが生じ、その結果、両者の混在した破壊形態になる。

3・3 試験速度の影響

Fig. 8 に示したように、いずれのモーメントにおいても、低速回転の場合の寿命は、高速回転の場合のそれよりも幾分長いように思われる。この傾向は次の理由によるものと考えられる。すなわち、プレートが上下にある場合、曲げ剛性は側面にある場合のそれよりも約15%程度大きく、したがって、前者のたわみ量は、後者のそれより小さくなり、結果として重すいは、試験片の回転とともに上下に運動することになる。しかしその運動は、重すいのもつ慣性のため、試験片の回転に伴う剛性の周期と位相のずれを生じ、試験速度が高速になるほど大きな慣性力が生じて、試験片に過大な曲げモーメントを与えることになる。

3・4 乾湿繰返し処理の影響

本実験の乾湿繰返し処理条件の下では、2～3回の乾湿繰返し処理によって、プレート表面に亜鉛の酸化物である白さびが発生し、また点状に鉄の赤さびが広がった。この乾湿繰返し処理が静的曲げ強度に及ぼす影響を Table I に、また、与えた曲げモーメントをパラメータとし、乾湿繰返し処理のサイクルと、破壊までに要した曲げモーメントの繰返し数の関係を Fig. 12 に示した。Fig. 12 の曲線は最小二乗法により2次式をあてはめたものである。

Fig. 12 から乾湿繰返し処理のサイクルが増すにつ

Fig. 9. Failure in fatigue test at relatively high moment level showing teeth pulled out of wood block.

Fig. 10. Failure in fatigue test at relatively low moment level showing teeth sheared off at root.

Fig. 11. Failure in fatigue test at intermediate moment level showing mixture of pulled-out and sheared teeth.

*2 林, 増田, 佐々木未発表

Table I. Static strength of moisture cycled specimens.

Wet-dry cycle	0	1	2	3	6	9	12	15
Static strength M_{max} ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$)	2.92	2.90	2.82	2.71	2.78	2.72	2.82	2.68
Ratio of static strength to the initial strength (%)	100	99	97	93	95	93	96	92

Fig. 12. Relation between moisture cycles and moment cycles to failure.

れて疲労寿命が減少し、無処理の場合に疲労限以下のモーメントであった 226 kg・cm のモーメントにおいても、処理によってモーメント繰返し数が 10^7 回に到達する以前に破壊が生ずるようになる。また、モーメント繰返し数 3×10^5 回における時間強度を例にとって乾湿繰返し処理の影響を見ると、無処理のそれは 426 kg・cm であるのに対し、乾湿処理サイクル 8 回におけるそれは約 320 kg・cm、処理サイクル 15 回におけるそれは約 280 kg・cm と低下している。これらはそれぞれ無処理の場合の 75% および 66% に相当する。一方、Table I において、静的強度は乾湿繰返し処理によってもあまり低下せず、処理サイクル 15 回においても、無処理の場合の 92% の静的強度を保持していることと比べると、疲労強度については、乾湿繰返し処理の影響が、著しく大きいことが注目される。

つぎに、静的試験の場合の破壊形態は、いずれも引き抜けであり、疲労試験の場合のそれは、曲げモーメント 526 kg・cm 以上においては引き抜け、276 kg・cm 以下においては歯の根元の疲労破壊、426 から 326 kg・cm の間においては両者の混在した形態が見られる。これらの結果は無処理の気乾材の疲労試験結果と比較して、幾分引き抜けやすい傾向を示している。しかしながら、乾湿繰返し処理によって、静的強度がそれほど低下しないことを併せ考えると、乾湿繰返し処理はプレート内の歯の周囲の木材部分にある種の材質変化（おそらくは、Compression shrinkage による弾性の低下あるいは塑性化）をもたらし、静的荷重に対してよりも繰返し荷重に対して著しく保釘力を低下させる特殊な条件を生じているものと考えられる。

4 ま と め

メタルプレートコネクターを用いた木材継手の回転曲げ疲労試験を行い、回転曲げ疲労特性に及ぼす、含水率、乾湿繰返し処理および試験速度の影響を検討した。また、同時に回転中に生じる各歯の分担力分布を歯の根元に貼ったストレインゲージにより推定し考察を加えた。得られた結果を要約すると以下のごとくである。

(1) 与えた曲げモーメントと破壊に至るまでの繰返し数との関係はなだらかな曲線となり、疲労限を静的強度に対する比率で表せば、気乾材のそれは 9%，飽水材のそれは 11% であった。

(2) 破壊形態は、静的強度に近い高いモーメントを与えた場合、歯の引き抜け、疲労限に近い低いモーメントを与えた場合、歯の根元の疲労破壊、これらの中間のモーメントを与えた場合、両者の混在したものであった。

(3) 本試験のように回転角度によって剛性の変化する試験の場合には、重すいの振動による付加的モーメントの影響を受けて、回転速度が増すと時間強度が幾分低下する傾向が見られる。

(4) 乾湿繰返し処理によって、静的強度はほとんど低下しないのに反して、疲労強度が著しく低下する事実、実用上の重要な知見と考えられる。また、疲労寿命は、乾湿繰返し処理サイクルの増加とともに減少する。

本研究の計画にあたり、メタルプレートコネクターに関する貴重な資料を提供された、関東ギャングネイルトラス(株)竹村義弘氏に深く感謝の意を表する。

(昭和52年4月2日 第27回日本木材学会大会；昭和53年4月3日 第28回日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 金谷紀行, 木材工業, **31**, 375; 423 (1976).
- 2) たとえば, Reardon, G. F., Lab. Rep., No. 1 CSIRO (1966).
- 3) Sletteland, N. T., Master Thesis, North Dakota Univ. (1976).
- 4) Wilkinson, T. L., FPL. 67, U. S. For. Prod. Lab. (1966).
- 5) 日本材料学会, 金属材料強度試験便覧, p. 254 (1977) 養賢堂
- 6) チモシェンコ, 材料力学中巻, 第一章 (1962) 東京図書