

鋼板くぎ打ち接合部の疲労特性*

林 知行**・佐々木 光***

Fatigue Properties of Nailed Wood-Metal Joints

Tomoyuki HAYASHI** and Hikaru SASAKI***

Abstract

Repetitive loading (fatigue), constant loading (creep) and ramp loading tests in tension were made on the butt-jointed 2×4 sized spruce specimen with two flat metal plates (1.2×40×90 mm) nailed on both surfaces of the specimen with four common nails (ZN 40) each.

Performance of the joint under these three different types of loading was discussed on the relative displacement (opening of the butt-joint).

The results are summarized as follows:

- (1) The relationship between applied repetitive load (P_r) and number of cycles to failure (N) is expressed with a single continuous curve, and the fatigue limit of the joint is estimated at 23% of the standard static tensile strength (P_o).
- (2) The failure mode of the joint in ramp load tests is characterized by withdrawal of the nails. But in fatigue tests, it is classified into three categories same as already observed with metal plate connectors¹⁾. Nails are pulled out of the wood block by repetition of loading at relatively high levels ($P_r/P_o < 55\%$), but they are sheared off in fatigue at location 5-10 mm distant from the head at relatively low loading levels ($P_r/P_o < 30\%$). At intermediate loading levels, some nails are pulled out and the rest are sheared off.
- (3) The residual strength of unbroken joints does not decrease after repetition or duration of loading in the extent of this experiment.
- (4) The ultimate strength of the joint increases much with increasing loading rate in ramp load tests.
- (5) The relative displacement of the joint by repetitive or constant loading are roughly proportional to logarithm of number of cycles or loading time, respectively.
- (6) The relative displacement are remarkable when loads more than fifty percent level of the standard static strength are applied.

* 本報告の一部は第29回日本木材学会 (1979年7月, 北海道) において発表した。

** 農林水産省林業試験場 (Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba, Ibaraki 305)

*** 木質材料部門 (Research Section of Composite Wood)

摘 要

ツーバイフォーサイズのスプルース材を突付けにし、厚さ 1 mm、幅 40 mm、長さ 90 mm の鉄板 2 枚をその両側面に普通釘 (ZN 40) 8 本で打ちつけた接合試験体にくり返し (疲労) 荷重、一定 (クリープ) 荷重及び定速増加荷重の 3 種の荷重形式の下における変形と強度を調べた。結果は以下の通りである。

- (1) くり返し荷重の下では荷重と破壊までに要するくり返し数の関係は単一な疲労曲線を描き、疲労限度は静的強度のおよそ 23% である。
- (2) 定速増加荷重の下では接合は釘の引き抜けで破壊するが、くり返し荷重の下では荷重が大きい場合のみ釘の引き抜けで破壊し、荷重が低い場合は釘の頭から 5～10 mm の点が疲労破壊する。中間の荷重ではこれらが混在する。
- (3) くり返し荷重や一定荷重を与えた後の接合の静的耐力はこの試験の範囲では低下していない。
- (4) 定速増加荷重では荷重速度と共に接合の耐力が増す。
- (5) くり返し荷重または一定荷重の下では接合の相対変位 (開口量) は荷重のくり返し数の対数または負荷時間の対数に比例的である。
- (6) 接合の開口量はいずれの荷重形式の下でも静的耐力の 50% 以上の荷重に対して著しく増大する。

1. 緒 言

枠組壁工法 (ツーバイフォー工法) に用いられる接合金具は、そのほとんどが厚さ 1.2～3.2 mm の軟鋼板を使用部位に応じた形態に切断あるいは折り曲げ加工し、くぎ孔をあけたもので、ハリケンタイ、ハリケンストラップなど多くの種類がある。これらは寸法・形状に相違はあるが、複数の部材に跨がって用いられ、くぎ打ちによって部材相互を緊結し応力の伝達をはかる点が共通しており、その耐力機構はくぎの一面せん断耐力と鋼板自体の引張耐力とを利用したものである。

この種の金具を用いた接合部の性能研究は主として静的耐力と剛性に関するものであり、風、地震、人為的な振動等によって生ずるくり返し荷重を受ける際の挙動、すなわち疲労特性に関するものは全くみられない。しかしながら、地震が多く、毎年台風に襲われるというわが国の地理・気象条件を考慮すると、安全のためにこれら接合の疲労特性を明らかにしておく必要があると考えられる。

本報告では、この種の金具の最も基本的な形態の一例として、厚さ 1.2 mm、幅 40 mm、長さ 90 mm の平らな鋼板を 4 本の釘で固定するタイプの単純な接合金具を用いた木材接合試験体を作成し、この試験体の疲労試験結果から一般的な鋼板くぎ打ち接合部の疲労特性について検討を加えた。また、短時間のクリープ試験および荷重速度を種々にとったランプロード試験を実施し、疲労特性との関連性を検討した。さらに、これらの結果と既に明らかにされているメタルプレートコネクター接合部の疲労特性とを比較検討し、木材―金属接合系全般について、疲労特性の普遍性と独自性を明らかにした。

2. 試 験 方 法

2.1 試 験 体

試験体の形状および寸法を Fig. 1 に示す。用いた木材は気乾比重 0.43～0.45、含水率 11～13% のスプルース (Sitca Spruce, *Picea sitchensis* CARR) で、くぎ打ちによって割れを生じないために、予め所定の位置にドリルで径 3.0 mm、長さ 25 mm の導き孔があげられている。鋼板は JIS G3302 (亜鉛鉄板) に準拠した厚さ 1.2 mm のもので、幅 760 mm、長さ 1800 mm の原板から所定の寸法 (長さ 90 mm、幅 40 mm) に切り出したのち、所定の位置に径 3.2 mm のくぎ孔があげられている。くぎは枠組壁工法用 ZN40 (径 3.2 mm、頭径 7.1 mm、長さ 38 mm) で表面に薄くプラスチックコーティングされたものである。

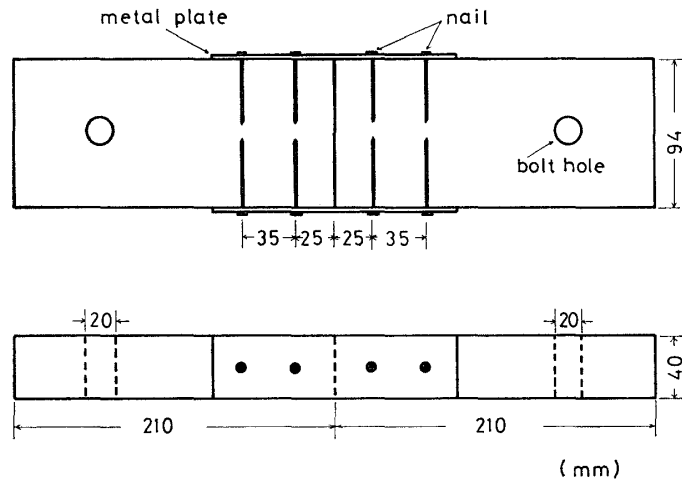


Fig. 1. Shape and size of the specimen.

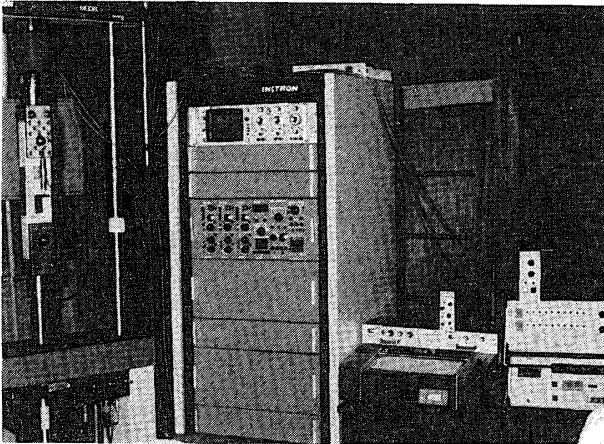


Fig. 2. Electronic controlled servohydraulic dynamic testing machine used.

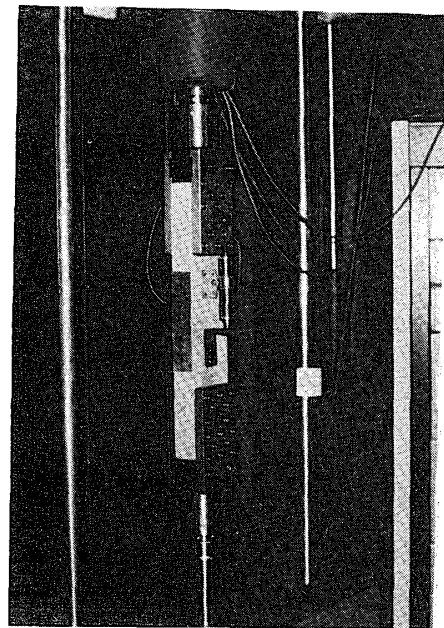


Fig. 3. Setting a specimen to the dynamic testing machine through especially designed clamps.

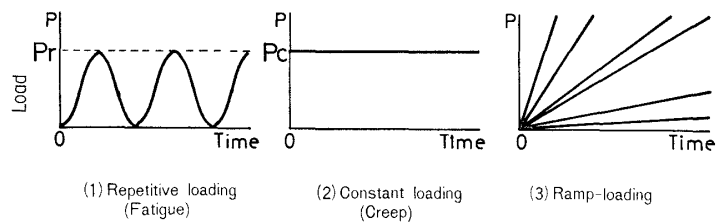


Fig. 4. Types of loading used.

試験体を作成する際には、中央の突き付け部分が十分に接合しゆるみが生じないように一对の角材を突き合わせ、端金を用いて後から圧しつけたのち、鋼板を所定の位置におき、くぎ孔をとおしてくぎをハンマーで打ち込んだ。

なお、試験体の相対変位を測定する場合には、一对のひずみゲージ変換式変位計を試験体の両面に木ネジを介して取り付けられた。

2.2 疲労試験

用いた試験機は最大容量5トンの電気油圧サーボ式疲労試験機である (Fig. 2)。試験体のセットについては、アクチエーター部とロードセル部とに取り付けられたアタッチメントに試験体の両端をボルトで装着した (Fig. 3)。

試験体には、荷重制御方式で正弦波形の片振り引張り返し荷重 (1000 cpm) を破壊に至るまで作用させたが、 10^7 回においても破壊しないものについては、その時点で試験を中止し、さらに静的試験を行って残存耐力を測定した (荷重形式は Fig. 4 の(1)を参照)。ただし、相対変位を測定する場合には、レコーダーの記録能力の関係から周波数を 100 cpm とし、 10^5 回までくり返し荷重を作用させた後、試験を中止し同様に残存耐力を測定した。

2.3 静的試験

疲労試験における時間強度および破壊形態の対照とするため、静的引張試験を行った。ここでは特に、破壊するまでに3～4分の時間を要する標準的な静的試験のほか、終局耐力に及ぼす荷重速度の影響を調べるために、5.6 kg/min から5600 kg/min までの速度範囲で荷重速度を変えて試験を行った (荷重形式は Fig. 4 の(3)を参照)。通常の万能試験機では、このような広範囲の荷重速度の試験は行えないため、疲労試験機に付属しているランプロードファンクションによって一定速度の上昇荷重を与えた。その際、クロスヘッドに取り付けられたロードセルから荷重を取り出し、直接レコーダーに記録した。なお、試験体のセットなどは疲労試験の場合と同様である。

2.4 クリープ試験

接合部の相対変位はくり返し荷重を作用させることにより増加してゆくが、その増加量が継続荷重によるそれと比較してどの程度であるかを調べるために、ここでは荷重継続時間1000分の範囲でクリープ試験を行い、相対変位を測定した (荷重形式は Fig. 4 の(2)を参照)。クリープ試験に引き続き残存耐力を測定するため、クリープ試験にも疲労試験機に付属しているコンスタントロードファンクションを用いて継続荷重を負荷した。1000分後破壊せずに残った試験体については、残存耐力を測定した。

3. 結果および考察

3.1 S-N曲線

くり返し荷重 (P_r) と破壊までに要するくり返し数 (N) との関係を図 5 に示す。図中の○→印は相対変位を測定するために、100 cpm の速度で行った試験結果で、 10^5 回において試験を中止したことを示している。同様に●→印は 10^7 回においても破壊に至らなかった試験体を示している。このくり返し荷重の変化は普通の荷重速度で表現すると、最も小さいものでも800 kg/min で ramp load test のそれに比べて非常に大きい。

各プロットはほぼ一本の直線上にあり、 P_r が高いほど N が小さく、逆に P_r が低いほど N が大きいことがわかる。また、 10^6 回を超えた付近から線の傾斜がゆるやかになり、疲労限度が200kg 付近に存在することがわかる。たて軸に荷重比 (くり返し荷重/静的引張耐力) をとってこの S-N 曲線をあらわせば、4 行

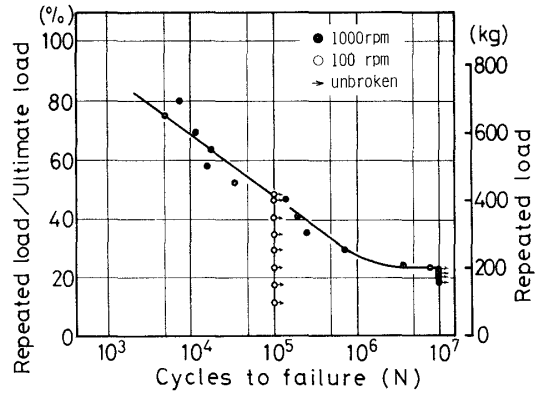


Fig. 5. Relation between repetitive load and cycles to failure of specimen (S-N curve).

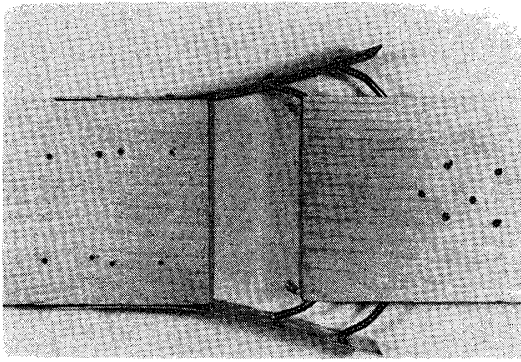


Fig. 6. Specimen failed through withdrawal of nails which is observed in repetition of load higher than a certain level and ramp-load test (perhaps also in creep test).

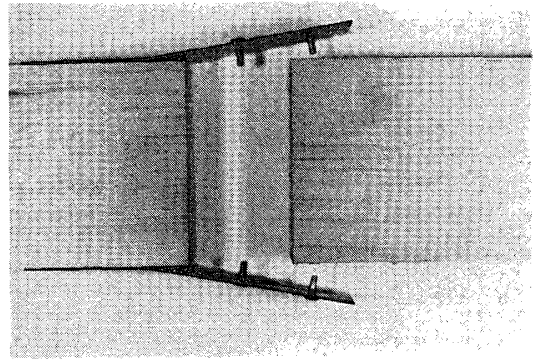


Fig. 7. Specimen failed through fatigue of nails at a location 5~10 mm from the nail head, which is observed in repetition of load lower than a certain level.

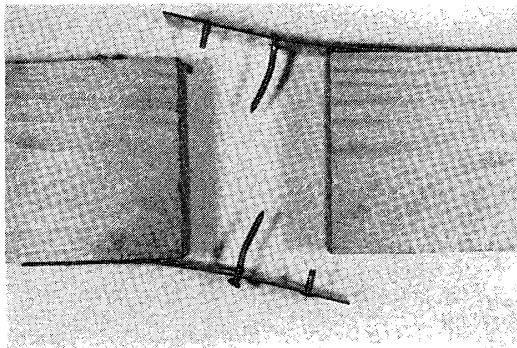


Fig. 8. Specimen failed through mixture of withdrawal and fatigue of nails, which is observed in repetition of the mediate load.

5列のメタルプレートコネクター*を用いた接合部の引張片振り試験¹⁾におけるS—N曲線とほぼ一致し、これら両者の疲労破壊の経過が同様であることが推察される。

3.2 破壊形態

静的試験における試験体の破壊形態は全てくぎの引き抜けであり、一方疲労試験におけるそれは3種類に分類される。すなわち、高荷重下（荷重比 $>55\%$ ）ではくぎが4本とも引き抜けることによって破壊が生じ（Fig. 6）、低荷重下（荷重比 $<30\%$ ）ではくぎの頭から5～10 mm離れた部分が4本とも疲労破壊し（Fig. 7）、両者の中間の荷重下では両者が混在する状態で破壊する（Fig. 8）。このように破壊形態が荷重の値によって異なる傾向はメタルプレートコネクター接合の場合¹⁻³⁾においても観察されており、破壊形態が移行する荷重比の値は異なるが、木材—金属接合系に共通するものであると考えられる。すなわち、一般に静的耐力に近い高荷重の下では木材組織の圧潰とそれに伴う圧入された金属部分の変形が生じ、その結果として引き抜けによる接合の破壊が生じ、疲労限度に近い低荷重の下では圧入金属の付根部分の疲労破壊が生じ、中間の荷重の下では両者の混在する破壊が生じるものと考えられる。ただし、静的試験においてプレートの中央部分が引張破壊するようなもの⁴⁾、例えば、8行5列のメタルプレートコネクターなどでは歯が引き抜ける以前にプレートが切断してしまうので上記の傾向は観察されない。

3.3 終局耐力および残存耐力

接合部の静的耐力Pは10体の平均で870 kg、その標準偏差 σ は30 kgであった。また、くり返し荷重を 10^5 回および 10^7 回作用させたのち破壊しなかった試験体の残存耐力は、8体の平均で856 kg、 $\sigma=40$ kgであった。くり返し荷重による耐力の低下は平均値で2%以内であり、ばらつきを考慮すると、接合部にくり返し荷重が作用してもその履歴は静的耐力を減少させないことがわかる。これらの結果とメタルプレートコネクター接合部においてなされた筆者らおよび徳田らの結果^{3,5,6)}とを総合すると、一般に木材—金属接合系においては、金属側に明らかな損傷（くぎや歯の根元にクラックが生じる）が見られない限り、そこにくり返し荷重の履歴が存在しても、接合部の静的耐力はほとんど減少しないと考えられる。破壊までに要するくり返し数に対して何%程度のくり返し数を与えると静的耐力の顕著な低下が生じ始めるのかという問題については今後の研究にまたねばならないが、メタルプレートコネクター接合部の場合⁵⁾から推察すれば、およそ80%以上にその点があると考えられる。

クリープ試験後、破壊しなかった試験体の残存耐力は10体の平均で883 kg、 $\sigma=28$ kgであり、残存耐力が1%強増加しているが、これもばらつきを考慮すればほとんど影響されていないものと考えてよいであろう。メタルプレートコネクター接合部においても、継続荷重の履歴が静的耐力に影響を及ぼさないことが徳田ら⁵⁾によって報告されており、この特性もまた、木材—金属接合系に共通するものと考えられる。

接合部の終局耐力に及ぼす荷重速度の影響を調べるために、静的試験において荷重速度を5.6 kg/min から5600 kg/min まで変化させて終局耐力を測定した。結果を Fig. 9 に示す。図中のたて軸は終局耐力、よこ軸は荷重速度である。標準試験（破壊まで3～4 min）における荷重速度は約 2×10^2 kg/min で、その終局耐力は10体の平均で870 kg、 $\sigma=30$ kg である。図の右にこの値を100とした場合の強度比が目盛られている。荷重速度の終局耐力に及ぼす影響はくり返し荷重や継続荷重の履歴が終局耐力にほとんど影響を及ぼさないことに比べてはるかに顕著である。例えば、5.6 kg/min の場合の終局耐力は770 kg であり、標準速度の場合における終局耐力（870 kg）に比べて12%程度低い。図中の曲線は適当なあてはめ曲線であるが、この形から標準速度以上の試験における終局耐力は多少ばらつきがみられるものの、標準速度のそれとほとんど変わらないように思える。一方、標準速度より低い荷重速度の範囲では終局耐力の低下が顕著であ

* 長手方向に4組、幅方向に5組の歯がならぶメタルプレートコネクター、文献⁴⁾参照

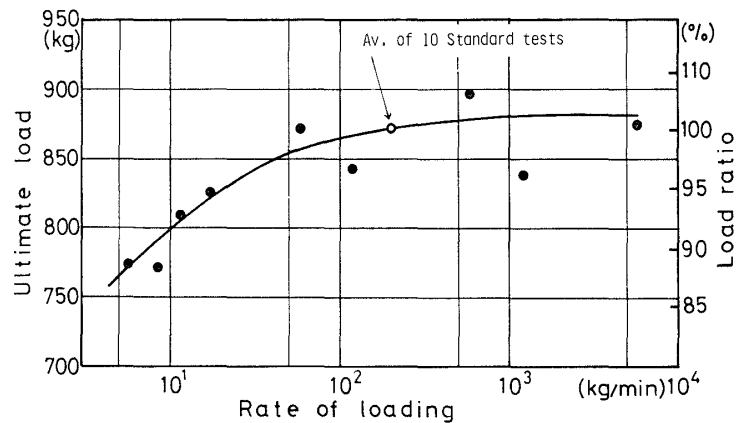


Fig. 9. Relation between ultimate load and rate of loading in ramp-load (static) test. "Load ratio" means ratio to the ultimate load in the standard test (rate of loading: 200 kg/min).

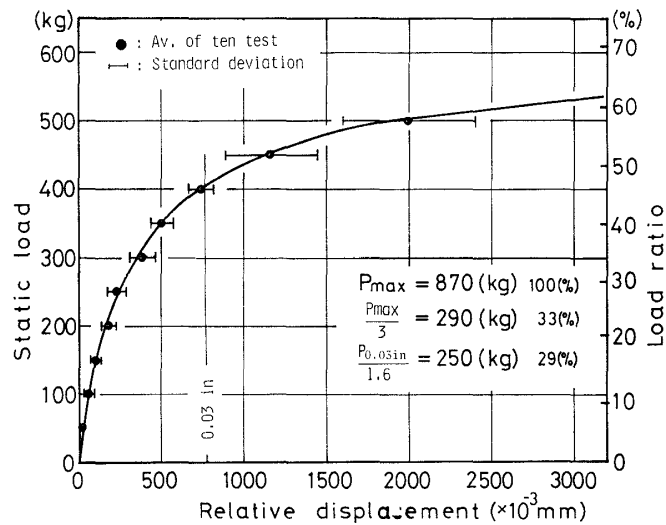


Fig. 10. Relation between load and relative displacement (opening at the butt joint) observed in the standard ramp-load test.

って、破壊近傍の荷重における木材-金属界面の木材組織のレオロジカルな性質が接合の耐力に影響していることが推測される。

3.4 相対変位

標準速度の静的試験で得られた荷重-変形曲線を Fig. 10 に示す。プロットは10体の試験体について測定された相対変位の平均値である。図中の \pm 印はその標準偏差を示している。図から明らかなようにこの荷重-変形曲線は非線形をなし、明確な比例限度をもたない。このような非線形の関係は接合金具を用いた場合のみならず、既往の木材、木材と木質材料のくぎ接合の荷重-変形曲線の全般を通じて観察される⁷⁾。この原因は接合部に荷重が作用すると、くぎや歯をしめつけている木材部分に塑性的な圧潰が生じるとともに、金属の側でも非線形の構造変形や部分的な塑性変形が生じ、これらが複合された形で全体の変形が構成

されているためであると考えられる。

木材—金属接合系の設計許容耐力を規格に採用している NLMA⁸⁾、CS⁹⁾ および ASI¹⁰⁾によれば、金具を用いた接合部の許容耐力は終局耐力の1/3の値、あるいは相対変位0.762 mm (0.03 inch)における荷重を1.6で除した値のうち低い方の値を採用するように規定されている。この評価法を用いると、本試験体の許容耐力はメタルプレートコネクタ—接合部⁴⁾のように終局耐力の1/3の値 (=290 kg)ではなく、相対変位0.762 mm における荷重を1.6で除した値 (=250 kg)となる。また、(財)日本住宅・木材技術センターの定めるZN40くぎの一面せん断許容耐力¹¹⁾ (S.P.F 材でくぎ1本当たり、長期23 kg)から本試験体の許容耐力を求めれば、92 kg (23 kg×4本)となる。これら2つの許容耐力値における接合部の寿命(破壊までに要するくり返し数N)を Fig. 5 から推定すると、前者は約 7×10^5 回、後者は 10^7 回以上(疲労限度以下)となる。前者の場合でも、一般的な使用においては十分な寿命を有すると思われ、後者の場合は少し低く評価されすぎの傾向にあると判断される。

疲労試験で得られたくり返し回数と相対変位の増加量の関係をくり返し荷重をパラメーターにとって示すと、Fig. 11 のようになる。たて軸はくり返しn回目の負荷における相対変位から1回目の負荷における相

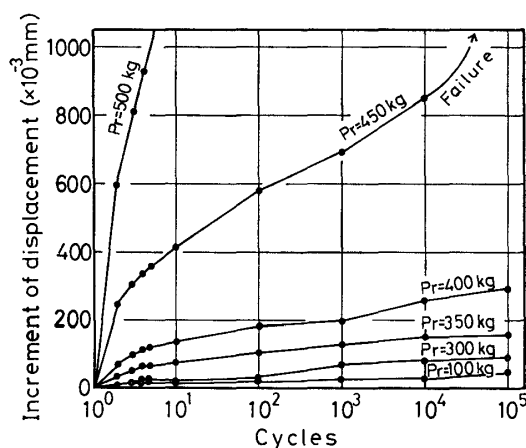


Fig. 11. Increment of relative displacement as a function of loading cycle in fatigue tests.

対変位を差し引いた値 (Δn)である。以下この値を相対変位の増加量という。相対変位の測定は試験機をとめて手動で荷重を与えたため測定に多少の時間を要し、特にくり返し数2～5回における測定値には多少の誤差を含んでいる。しかし10回以後では測定値の信頼度は高いと考えられる。この範囲において、くり返し荷重 P_r が小さければ、相対変位は荷重のくり返し数の対数に比例して直線的に増加するのが観察される。この直線関係は試験体が破壊する少し手前までは成り立つが、 $P_r=450$ kg の場合のように破壊の直前では相対変位が急激に増加し、成り立たなくなる。また図から、直線の傾き(変位の増加率)が $P_r=450$ kg から急激に大きくなることが観察され、疲労による塑性変形が $P_r=450$ kg 付近から生じやすくなることがわかる。

クリープ試験で得られた時間と相対変位の増加量の関係を Fig. 12 に示す。たて軸は七分後の相対変位から荷重をかけた瞬間(ここでは便宜的に約10秒後としている)の相対変位を差し引いたもの (Δt)である。以下この値を相対変位の増加量という。実験の範囲(1000 min)において相対変位の増加量は時間の対数に比例することが観察される。この関係は疲労におけるくり返し数と相対変位の増加量との関係と同じ傾向を示している。すなわち、相対変位の増加量は疲労の場合くり返し数の対数に対して、クリープの場合継続時間の対数に対して、共に正比例の関係にある。また、直線の傾き(変位の増加率)も疲労の場合と同

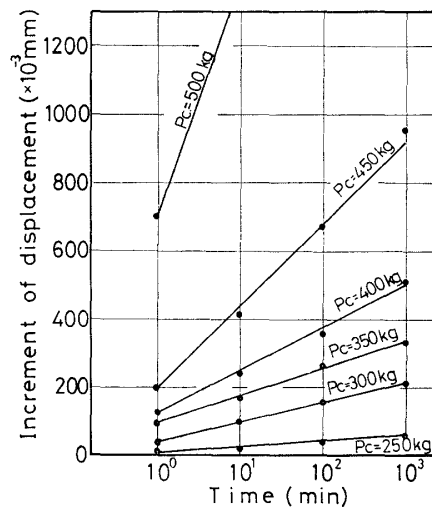


Fig. 12. Increment of relative displacement as a function of loading time in creep tests.

様に $P_c=450 \text{ kg}$ から増加する傾向を示し、塑性変形がこの付近の値から増加しやすくなっていることがわかる。この値はまた Fig. 10 において、静的荷重に対する変位の増加率が急激に増加する点に相当しており、相対変位 0.762 mm における荷重値をくぎ接合のおよその比例限度と考えることの妥当性⁷⁾を示しているものと考えられる。

相対変位の増加量に及ぼすくり返し荷重および継続荷重の影響を比較考察した結果は以下の通りである。

今、くり返し荷重が正弦波で与えられていることに着目し、その時間効果を試験時間の1/2に見積ると(通常、正弦波のくり返し荷重における effective value は $1/\sqrt{2}$ が用いられているが、ここではより短時間側に見積った)、疲労試験のくり返し速度が 100 rpm であるから Fig. 11 における 10^2 、 10^3 、 10^4 及び 10^6 サイクルはそれぞれ Fig. 12 における 5×10^{-1} 、 5×10^0 、 5×10^1 及び $5 \times 10^2 \text{ min}$ に相当することになる。このような換算をして両者を比較すると興味ある事実が認められる。

疲労試験における負荷初期の変位の測定値は操作上不正確さがあるので論外であるが、荷重 400 kg 以下の場合、一般にくり返し荷重による相対変位の増加率は同じ荷重を継続的にかけた場合の相対変位の増加率より著しく小さいことがわかる。

これに反して 450 kg 以上の荷重の場合、くり返し荷重による相対変位の増加量は同じ荷重を継続的にかけた場合の相対変位の増加量より著しく大きくなっていることがわかる。このような繰返し荷重における相対変位の増加量と継続荷重におけるその関係が逆転するあたりの荷重 ($400 \sim 450 \text{ kg}$) は Fig. 10 で見ると静的荷重試験における荷重-変位曲線が急激に横に傾きはじめる点に相当し、このあたりで接合系が塑性的な挙動を顕著に示しはじめていくことがわかる。

400 kg 以下の荷重の場合、くり返し荷重による変位が継続荷重による変位よりも著しく小さい現象は次のように説明される。すなわち、くり返し荷重は継続荷重の上に逆方向の等価な荷重を断続的に加えたものと考えられるが、この逆方向の荷重の変位に及ぼす効果は正の方向の荷重のそれより優位に働くため、くり返し荷重の時間効果を試験時間の1/2に見積っても継続荷重よりも変位が進まないのと考えられる。しかし、逆方向の荷重が正の方向の荷重より変位に対し優位に働くようなメカニズムは、釘と木材組織の界面において具体的にどのようなことをさすのか不明である。

一方、荷重が 450 kg 以上の場合に、くり返し荷重による変位の増加が継続荷重によるそれよりも著しく大きくなる理由は次のように考えられる。すなわち、この荷重ではくぎによる木材組織の圧潰が進み、くぎ

が傾くため、くぎの引抜け方向の分力が増加し、木材—金属界面における摩擦抵抗との釣合いが限界に近づいており、くり返し荷重のような荷重の変動刺戟に対して非常に敏感になっているためと考えられる。

以上のように、静的試験における荷重—変位曲線の急に倒れるあたりの荷重は重要な意味をもっていると考えられる。その値はここでは400～450 kgで、これは静的な標準試験強度の約1/2に相当する。徳田ら^{6,12)}がメタルプレートコネクターについて提唱しているクリープ限度及びくり返し引張荷重限度（疲労限度とは異なる）の推定値が荷重比40～60%であることなどを考え合せると、一般に釘の類による木材接合の実用上の耐久性の目安は荷重比50%あたりにあるものと結論される。

4. ま と め

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

鋼板くぎ打ち接合部のS—N曲線はメタルプレートコネクターのそれと同じ傾向を示し、その疲労限度は荷重比（くり返し荷重／静的耐力）で23%に相当する。また破壊形態もメタルプレートコネクターの場合と同様に高荷重の下ではくぎの引き抜け、低荷重の下ではくぎの疲労破壊、中間の荷重の下では両者の混在する破壊の3つに分類される。

くり返し荷重や継続荷重は残存耐力を低下させないが、ランプロード試験における荷重速度が終局耐力に及ぼす影響は大きく、標準試験速度の3%程度の速度で試験すると終局耐力は標準試験の場合に比べ12%程度低下する。しかし、標準試験速度以上ではほぼ一定の終局耐力となる。

相対変位の増加量は疲労試験の場合くり返し数の対数（log N）に、またクリープ試験の場合継続時間の対数（log t）にほぼ比例するが、変位の増加割合はいずれの場合も荷重比50%付近を境として急激に増加する傾向を示す。疲労による変位の増加量は荷重比50%未満ではクリープによるそれに比して小さいが、荷重比50%以上では大きくなる。

文 献

- 1) T. HAYASHI, H. SASAKI and M. MASUDA: For Prod. Jour., **30**, 49 (1980)
- 2) 林 知行, 増田 稔, 佐々木 光: 材料, **28**, 623 (1979)
- 3) 林 知行, 佐々木 光: 材料, **30**, 697 (1981)
- 4) T. HAYASHI and H. SASAKI: Wood Research, **68**, 22 (1982)
- 5) 林 知行: 京都大学博士論文, 52 (1982)
- 6) 徳田 迪夫, 竹下 昌彦, 杉山 英男: 木材学会誌, **25**, 399 (1979)
- 7) U. S. Dept. of Agric.: "Wood Hand Book" U. S. Gov. Print. Office, 7 (1974)
- 8) National Lumber Manufacturers Association: National Design Specifications for Stress-grade Lumber and its fastening (1973)
- 9) Canadian Standard Association: CSA Standard 086-1970 (1970)
- 10) Australian Standards: AS-A188 (1972)
- 11) (財)日本住宅・木材技術センター: 枠組壁工法用Cマーク表示金物, 使い方シリーズ1, (1982)
- 12) 徳田 迪夫, 竹下 昌彦, 杉山 英男: 木材学会誌, **25**, 408 (1979)