[木材学会誌 Vol. 33, No. 6, p. 457-463 (1987) (論文)]

木材の疲れに関する研究（第4報）†

切欠材の疲れき裂伝ぱ挙動*1

今山 延洋*2

The Fatigue of Wood IV.†

The propagation of fatigue cracks in notched specimens*1

Nobuhiro IMAYAMA*2

Measurements of the propagation of a fatigue crack initiating at the root of a V-notch of a test specimen of the wood of Agathis sp. were made as the test proceeded. A bending moment was applied to the specimen as shown Figure 1. The results were as follows:

The process of crack propagation divided into three steps. (1) The crack generated at the root of the notched specimen grows rapidly. The number of cycles of Step I covers less than 5 percent of the life of crack propagation. (2) The crack propagates imperceptibly. The number of cycles of Step II covers about 75 percent of the life of the crack propagation. The crack length occupies about 30 percent of the specimen width. (3) The crack propagates rapidly, and then failure of the specimen occurs. The number of cycles of Step III covers about 20 percent of the life of the crack propagation.

V字形切欠を入れた年輪のない均一な材料に繰返し面外曲げ荷重を与え，一本のき裂を切欠先端より発生させ，疲れき裂が発生してから破断に至るまでのき裂の伝ぱ挙動について観察を行ない，次の結果を得た。

1) き裂発生繰返し数は，平滑材では繰返し応力の低下とともに増大するのに対して，切欠材ではき裂発生繰返し数はほとんど変化せず，早い繰返し数でき裂が発生する。2) き裂が発生してから破断に至るまでのき裂伝ぱ繰返し数は，切欠材と平滑材で差が認められなかった。3) 切欠材の破断に至る繰返し数は，実験を休止した場合と，休止せずに破断にまで至った場合とでは，両者を区別することが出来ず，き裂観察の為の実験休止によってき裂伝ぱ挙動に影響はないと思われる。4) き裂伝ぱの段階を次の三つの段階に分けることが出来た。(1) 第I段階　切欠先端より発生したき裂は短い繰返し数で急速に伝ぱする。(2) 第II段階　き裂伝ぱ寿命の約70%の繰返し数で，き裂はほぼ一定のき裂伝ぱ速度で定常的に伝ぱする。(3) 第III段階　き裂は，き裂伝ぱ寿命の残り約20%の繰返し数をかけて，試験片幅の残りの半分以上を伝ぱして，急速に破断に至る。5) き裂伝ぱの第II段階のき裂伝ぱ速度は，き裂伝ぱ繰返し数や繰返し応力と高い相関関係がある。

1. 緒　　言

木材の疲れ破壊は，金属[1]の疲れ破壊と同様に，き裂の発生およびき裂伝ぱのふたつの過程から成っていると考えられる[2]。木材については，このき裂発生とき裂伝ぱについての研究は，わずかに満久ら[3,4]がき裂の発生と伝ぱの観察を行い，また，著者ら[2]においてき裂が疲れ寿命の約50%で発生することが述べられているくらいである。き裂が発生してから破断に至るまでのき裂の伝ぱ挙動について，詳しい報告を見ることが出来ない。

そこで，本報告ではき裂が発生してから破断に至るまでのき裂伝ぱの全体的な挙動を明らかにすることを目的とした。

そこで，き裂の伝ぱ挙動の観察が容易なように，試験片にV字形切欠を入れ，この切欠先端よりき裂を一本発生させて，き裂伝ぱによって発達するき裂の長さとき裂の観察を行った。また，き裂伝ぱの経

† Report III: This Journal, **26** (9), 595-602 (1980)

*1 Received December 9, 1986. 本報の一部は，第33回日本木材学会大会（1983年3・4月）において発表した。

*2 静岡大学教育学部 Faculty of Education, Shizuoka University, Ohya 836, Shizuoka 422

路に材質の変動があると，均一な材質で得られるような標準的なき裂伝ぱ挙動が得られないと考えられる。そこで，試験片には半径方向に早材や晩材等の材質変動がみられない南洋材のアガシスを用いた。

この様に，均一な材料に切欠を入れ，そこから発生する一本のき裂を用いて，き裂伝ぱの標準的な挙動を得ることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験片には半径方向に早材や晩材などの材質変動が見られない南洋材のアガシス（*Agathis* sp.）を用い，直径約 1.2 m の市販の丸太の外側部分約 25 cm から採取した。平均気乾比重は 0.43，平均含水率は 12.1%，三点曲げによる柾目面荷重の平均曲げ破壊係数は 744.0 kgf/cm²，平均曲げヤング係数は 3.25×10^5 kgf/cm² である。

試験片寸法を Fig. 1 に示す。V 字形切欠の寸法は，

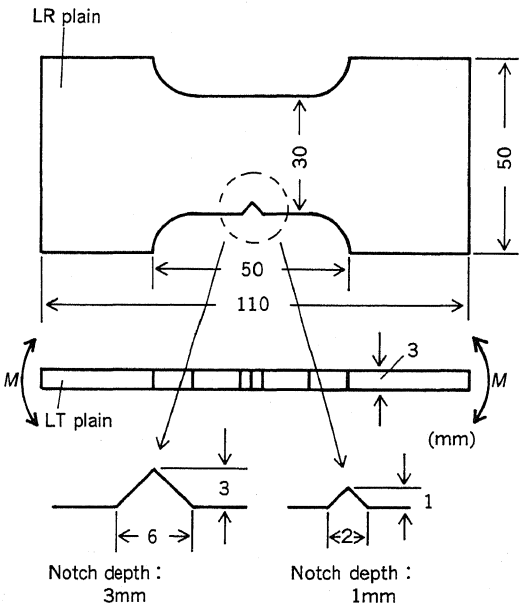


Fig. 1. Test specimen having V-notch for fatigue test. Legend : M : bending moment, L : longitudinal direction, R : radial direction, T : tangential direction.

主に深さ 3 mm，幅 6 mm，のタイプを用い，比較のために，深さ 1 mm，幅 2 mm，のタイプも用いた。切欠材の応力計算の際の断面は試験片中央における切欠先端からの最小断面を用いた。

この切欠先端から発生したき裂の長さを，実験を休止して試験機より取り外し読取顕微鏡で測定した。再び試験片を試験機に取り付ける時は，トルクレンチでボルトを常に一定に締め付けた。

2.2 実験方法

繰返し荷重は偏心重錘の遠心力を利用した Fig. 2 に示すような四点荷重方式による均一曲げモーメントを与える，平均応力がゼロで繰返し速度が毎秒 30 回の両振り繰返し面外曲げである。試験機は島津万能疲れ試験機 UF-20 である。このような負荷方法と試験片形状によって試験片の固定部分から破壊が生ずることを避けた。この実験方法は既報[5] と同じである。

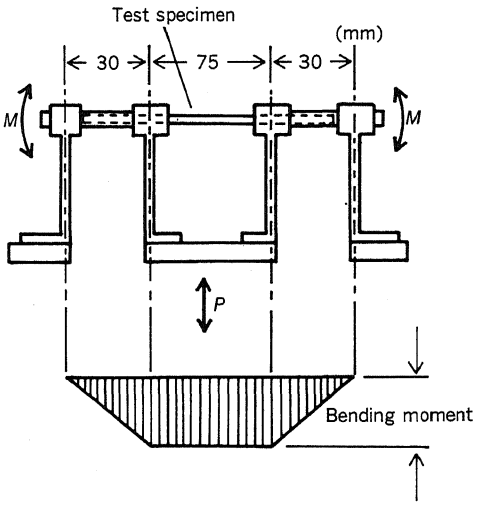


Fig. 2. Apparatus for fatigue test.
Legend : P : load, M : bending moment.

3. 結果と考察

3.1 平滑材と切欠材の比較

3.1.1 き裂発生時期

各種繰返し応力における平滑材および切欠材についての繰返し応力（σ_b）とき裂発生繰返し数（N_c）の関係を Fig. 3 に示す。き裂発生繰返し数の決定は応力繰返しに伴なう発熱温度曲線を用いて行われた[2]。平滑材は繰返し応力の減少とともにき裂発生繰返し数は急速に増加する。一方，切欠材においては繰返し応力が低下しても平滑材のようなき裂発生繰返し数の増加は見られず，大部分は 20 万回以下であり，その平均値は約 4.6 万回であった。切欠が存在する場合は，きわめて早い時期に切欠底にき裂が発生することが金属[6,7] で報告されている。

本実験でも，特徴的なことは繰返し応力が低下し

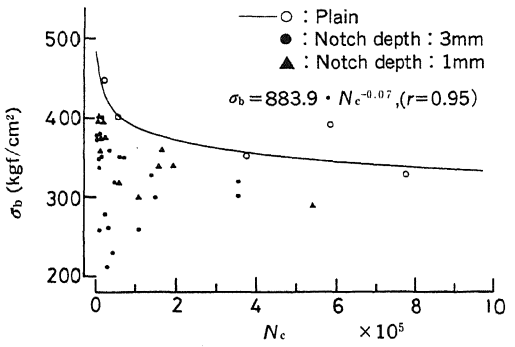


Fig. 3. Relationships between σ_b and N_c for plain specimens and notched specimens.
Legend : N_c : number of cycles at crack initiation, σ_b : amplitude of the alternative bending stress, r : correlation coefficient.

ても，き裂発生繰返し数はほとんど増加せず，早い繰返し数でき裂が発生することである。

3.1.2 き裂伝ぱ期間

次に，き裂が発生してから破断に至るまでのき裂伝ぱ繰返し数（N_{cp}）について，Fig. 4 において切欠

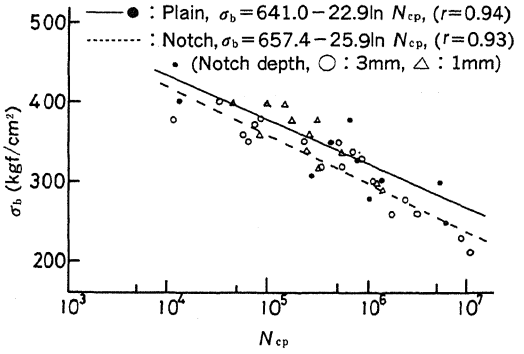


Fig. 4. σ_b-N_{cp} curves for plain and notched specimens.
Legend : N_{cp} : number of cycles of crack propagation, σ_p : amplitude of the alternative bending stress, r : correlation coefficient.

材と平滑材を比較してみる。実線が切欠材であり点線が平滑材である。図からわかるように，平滑材の方がやや強く見える。また，両者のデータは互いにバラついており，明確に区別するのは難しい。しかし，金属[8,9]では切欠底にクラックが発生した場合には，その進行速度が遅いことが明らかにされており，更に，詳しい検討が必要であろう。

次に，き裂発生繰返し数（N_c）が全寿命（N_f）の中で占める割合（N_c/N_f）を，平滑材と切欠材について比較し Fig. 5 に示す。図から明らかなように，平滑材では N_c/N_f が 0.4 から 0.8 に分布しているが，切欠材では N_c/N_f が 0.5 以下であり，多くは 0.2 以下である。特に低い繰返し応力では 0.05 以下である。

以上のように，平滑材は疲れき裂の発生時期は遅く，従って，き裂の伝ぱ過程が全寿命に占める割合は約半分になるが，切欠材では寿命の大部分がき裂の伝ぱ過程によって占められていることがわかる。これは金属でも同様である[10]。

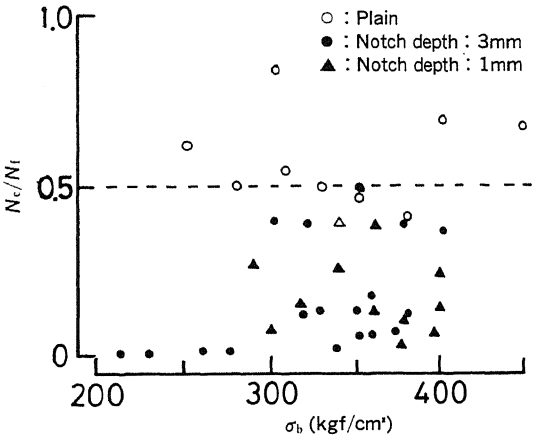


Fig. 5. Relationships between cycle ratio (N_c/N_f) and amplitude of the alternative bending stress (σ_b).
Legend : N_c : number of cycles at crack initiation, N_f : number of cycles to failure.

3.2 き裂伝ぱ

3.2.1 実験休止の影響

き裂長さの測定には，実験を休止し試験片を装置より取り外し，顕微鏡観察をおこなう必要がある。そこで，この実験休止の影響を調べた。つまり，実験を休止した場合と，休止せずに破壊まで至った場合の疲れ強さを比較し，Fig. 6 に示した。実験休止が，き裂長さの測定のために行われたので，実験休止の回数は各実験で異なっている。図からわかるように，両者はほとんど同じ線上にあり，またほとんど同じバラつきを示しており，両者を区別することは出来ない。このように，き裂伝ぱ過程では実験休止による影響はないと思われる。金属関係の疲れ実験についても，多くの場合実験休止は疲れ強さに影響を及ぼさないとされている[11-13]。

3.2.2 き裂長さの変化

試験片の両面においてき裂は切欠の先端からほぼ同時に発生する。Fig. 7 に試験片の両面におけるき

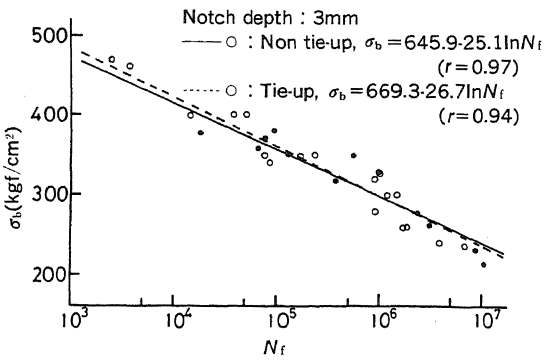


Fig. 6. Influence of tie-up of operation.
Legend : N_f : number of cycles to failure, σ_b : amplitude of the alternative bending stress, r : correlation coefficient.

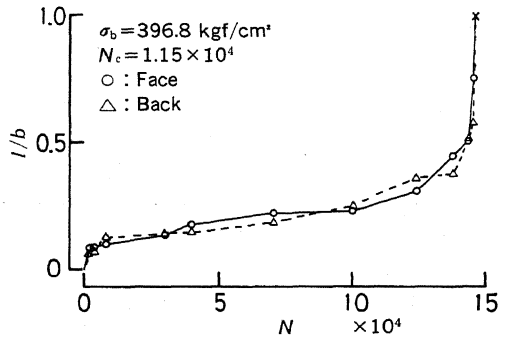


Fig. 7. Comparison of crack propagation of face of specimen with crack propagation of back of specimen.
Legend : l/b : ratio of crack length (l), b : width of specimen, N : number of cycles, N_c : number of cycles at crack initiation, σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

裂長さの変化の一例を示す。この関係は種々の場合があったが，両面の平均値を中心にして交互に変動しながら伝ぱしていく場合が典型的であった。以後のき裂長さは，両面のき裂長さの平均値を用いた。

Fig. 8 に，種々の応力について実験開始から破断までの応力繰返しに伴なうき裂長さの変化を示す。ここで，横軸は繰返し数 (N) の対数目盛りであり，縦軸のき裂長さ比 (l/b) は，試験片幅 (b) にたいするき裂長さ (l) の比 (l/b) として表示している。また，き裂長さ (l) は切欠先端からのき裂長さであり，試験片幅 (b) は切欠先端からの最小試験片幅である。

図のように，応力の大小にかかわらず，図(a)，(b)ともに各曲線はほぼ同じ形をしている。つまり，繰返し数の対数目盛りでは，始めは徐々に増加し，終わりは急に増加して破断している。ただし，図(a)の繰返し応力が 230 kgf/cm² の場合は，き裂伝ぱは途中でかなり長期間停滞し，その後再び伝ぱして破断した例である。破断繰返し数が 1000 万回前後になるとこのような例が見られるようになる。これは，き裂は発生するが，き裂の伝ぱは途中で止まって停留き裂になろうとした例であり，この停留き裂から再びき裂が伝ぱしなくなった場合も疲れ限度と考えられる。

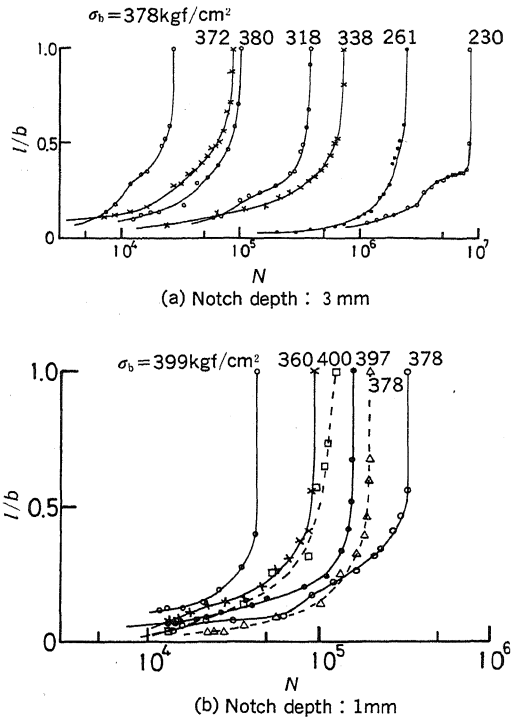


Fig. 8. Crack propagation curves for notched specimens.
Legend : l/b : ratio of crack length (l), b : width of specimen, N : number of cycles, σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

3.2.3 き裂伝ぱの三段階

き裂長さ (l/b) とき裂伝ぱ繰返し数比 (N/N_{cp}) との関係を種々の応力を変えて Fig. 9 に示した。ここで，き裂伝ぱ繰返し数比 (N/N_{cp}) は，き裂が発生してから破断に至るまでのき裂伝ぱ繰返し数 (N_{cp}) に対する応力繰返し数 (N) の比 (N/N_{cp}) である。

図からわかるように，図(a)，(b)ともに種々の応力の結果を一つのパターンとして見ることが出来る。つまり，図中に示すように，き裂伝ぱの曲線を三つの段階 (I，II，III) に分けることが出来る。

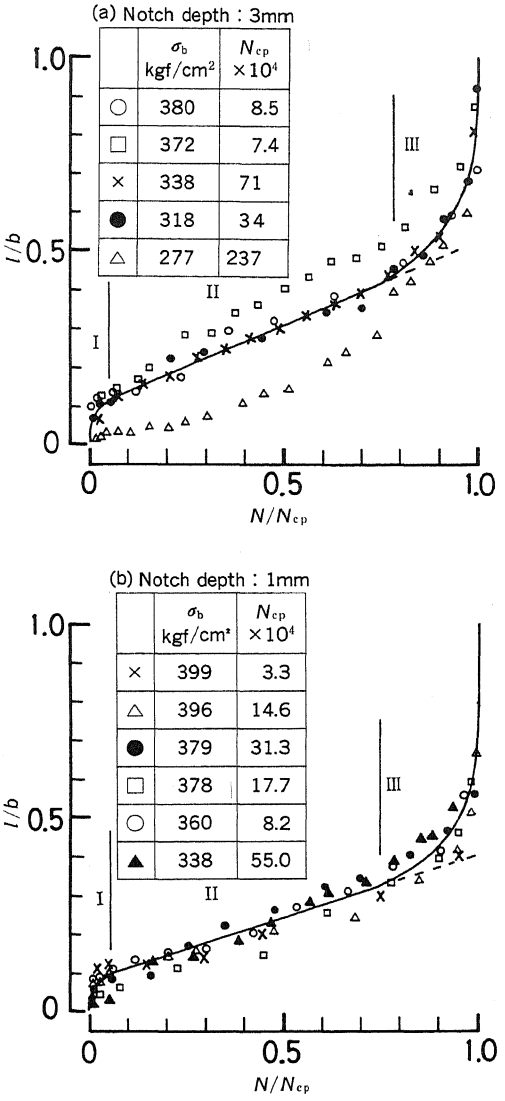


Fig. 9. Crack propagation curves for notched specimens.
Legend : l/b : ratio of crack length (l), b : width of specimen, N/N_{cp} : cycle ratio of crack propagation, N : number of cycles, N_{cp} : number of cycles of crack propagation, σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

第I段階はき裂伝ぱ寿命の5%以下であり，き裂長さは平均で約10%である。このように，切欠先端より発生したき裂は，最初短い期間に急速に伝ぱすることがわかる。これは初期き裂と呼ばれ，切欠による応力集中によって生じたものと思われる。

第II段階は図中の直線的な部分であり，き裂伝ぱの始めの約5%から約80%の範囲にあり，き裂伝ぱ寿命の約70～75%を占める。これはき裂伝ぱ寿命の大部分である。これに対応するき裂長さは約10%から約40%迄の約30%を占めている。

岩谷ら[14]の円孔切欠を有するアルミニウムに面外曲げ荷重を与えた結果によると，「試験片幅の15～20%近くまではき裂長さはゆっくり上昇か，直線的に上昇と見なすことが出来る。」としている。また，小西ら[15]は試験片中央平行部に微小円孔を有するアルミ合金に本実験と同じ面外曲げ荷重を与え，き裂伝ぱの大部分を占める定常的な段階においてき裂伝ぱ速度が一定の結果を得ている。更に，小林ら[16]，中沢ら[17]は鋭い切欠を持った炭素鋼に回転曲げ荷重を与え，3つの段階を得，その中の第II段階がき裂伝ぱ速度が一定の結果を得ている。

このように，第II段階はき裂伝ぱの速度がほぼ一定と見なすことが出来る定常的なき裂伝ぱ期間であろう。

つまり，第II段階は約30%のき裂長さの伝ぱに，き裂伝ぱ寿命期間の約70～75%の繰返し数を要して，一定のき裂伝ぱ速度のもとで緩やかなき裂伝ぱを行う過程である。

次に，第III段階はき裂伝ぱ寿命の最後の約20%であり，き裂長さは残りの約55～60%である。この段階ではき裂は急速に伝ぱして破断に至る。

De Lange[18]はレプリカ技術を応用した非破壊試験によって，種々異なる負荷条件下で実験した試験片表面のき裂の伝ぱについて検討を行った。これによるとCr鋼でもAl合金でも，材料の種類にかかわらずき裂の伝ぱには段階的に3つの相が認められる。また，平ら[19]は，低炭素鋼のV字形切欠試験に面内曲げ応力を加えた実験において，「き裂伝ぱ速度（1回の応力繰返しによって伝ぱするき裂の長さ）が極めて大きく漸次減少する第I期とほぼ一定の速度を有する第II期，及び伝ぱ速度が増大する第III期とに分けられる。」と報告している。あるいは，鈴木ら[20]はFRPを用いた実験によって，本実験と同様な三つの段階を得ている。

3.2.4 き裂伝ぱ速度

以上のことから，き裂伝ぱ曲線の第II段階は，き裂伝ぱ過程の中心的な段階であり，ほぼ直線と見なすことが出来る。この直線の傾きは1サイクル当りのき裂長さの増加分，つまりき裂伝ぱ速度を表している。

この第II段階のき裂伝ぱ速度（R）と，き裂の発生から破断までに要したき裂伝ぱ繰返し数（N_{cp}）の関係をFig. 10に示す。図に示すように，両者は両対数グラフ上で相関係数−0.99という非常に高い負の相

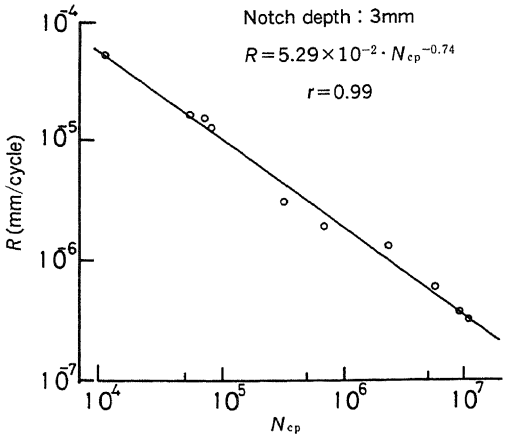


Fig. 10. Relationship between rate of crack propagation (R) and number of cycles of crack propagation (N_{cp}).
Legend : r : correlation coefficient.

関関係を有していることが分かる。また，Fig. 11 に繰返し応力とき裂伝ぱ速度の関係を示す。図から明らかなように，き裂伝ぱ速度は繰返し応力の増加に伴って，指数関数的に急速に上昇する。

このように，第II段階のき裂伝ぱ速度と，き裂伝ぱ繰返し数や繰返し応力の間には高い相関が得られた。

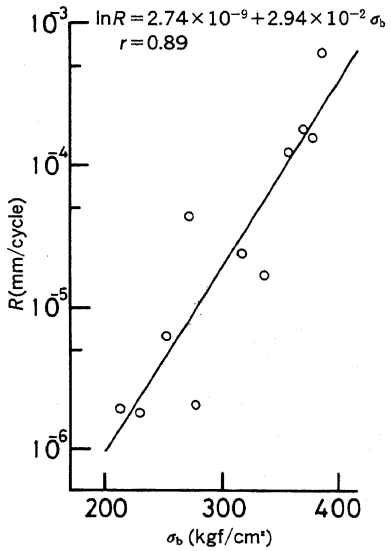


Fig. 11. Relationship between rate of crack propagation (R) and amplitude of the alternative bending stress (σ_b).
Legend : r : correlation coefficient.

4. ま と め

V字形切欠を入れた年輪のない均一な材料に面外曲げ繰返し荷重を与え，一本のき裂を切欠先端より発生させ，き裂が発生してから破断に至るまでのき裂の伝ぱ挙動について観察を行い，次の結果を得た。

1) き裂発生繰返し数は，平滑材では繰返し応力の低下とともに増大するのに対して，切欠材ではき裂発生繰返し数はほとんど変化せず，早い繰返し数でき裂が発生する。

2) き裂が発生してから破断に至るまでのき裂伝ぱ繰返し数は，切欠材と平滑材で差が認められなかった。

3) 切欠材の破断に至る繰返し数は，実験を休止した場合と，休止せずに破断にまで至った場合とでは，両者を区別することが出来ず，き裂観察の為の実験休止によってき裂伝ぱ挙動に影響はないと思われる。

4) き裂伝ぱの段階を次の三つの段階に分けることが出来た。

(1) 第I段階　切欠先端より発生したき裂は短い繰返し数で急速に伝ぱする。

(2) 第II段階　き裂伝ぱ寿命の約 70% の繰返し数で、き裂はほぼ一定のき裂伝ぱ速度で定常的に伝ぱする。

(3) 第III段階　き裂伝ぱ寿命の残り約 20% の繰返し数をかけて，試験片幅の残りの半分以上を伝ぱして，急速に破断に至る。

5) き裂伝ぱの第II段階のき裂伝ぱ速度は，き裂伝ぱ繰返し数や繰返し応力と高い相関関係がある。

文　献

1) 中沢　一，小林英男：機械の研究，**20** (1), (1968)-**21** (3) (1969).
2) 今山延洋，松本　勗：木材学会誌，**20** (2), 53-62 (1974).
3) 満久崇麿，佐々木光：木材研究，31 号，1-10 (1963).
4) 満久崇麿，佐々木光：同上，31 号，23-40 (1963).
5) 今山延洋：木材学会誌，**26** (9), 595-602 (1980).
6) Fenner, A. J.; Ouen, N. B.; Phillips, C. E.: *Engineering*, **171**, 637-638 (1951).
7) Cazaud, R. 他著，舟久保熙康他訳："金属の疲れ"，丸善，1973. p. 29 〔Hyler, W. S. *et al.*: *National Advisory Committee for Aeronatics* (NACA), Technical Note, 3685, juin, (1956)〕.
8) Hempel, M.: *Mitt Kais Wilh Inst Eisenforsch*,

21, 147 (1939).
9) Davidenkov; Schwandin, E.: *Metallwirtschaft*, **10**, 710 (1931).
10) 中沢 一: 機械の研究, **20** (1), 55-59 (1968).
11) 日本材料学会編: "疲れ試験便覧", 養賢堂, 1968. p. 46.
12) 西原利夫, 河本 実: 日本機械学会論文集 (第1部), **10** (38), 27-30 (1944).
13) 河本 実, 他: "金属の疲れと設計", コロナ社, 1972. p. 85.
14) 岩谷隆史, 他2名: 沼津工業高専研究報告, 18号, 19-25 (1983).
15) 小西一良, 他3名: 東京都立工科短期大研究報告, 7号, 23-27 (1979).
16) 小林英男, 他2名: 日本機械学会論文集 (第1部), **36** (288), 1238-1246 (1970).
17) 中沢 一, 他3名: 同上 (第1部), **37** (301), 1645-1652 (1971).
18) De Lange, R. G.: *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, **230** (4), 644-648 (1964).
19) 平 修二, 林 建吉: 日本機械学会論文集 (第1部), **33** (245), 1-10 (1967).
20) 鈴木 恵, 他4名: 同上 (第1部), **37** (299), 1280-1286 (1971).