

## 繰返し負荷を受ける木質部材ボルト接合部のすべり挙動

藤元, 嘉安  
九州大学農学部林産学科

渡邊, 亜林  
九州大学農学部林産学科

又木, 義博  
九州大学農学部林産学科

<https://doi.org/10.15017/10931>

---

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 76, pp.49-61, 1997-03-28. 九州大学農学部附属演習林  
バージョン :  
権利関係 :

## 繰返し負荷を受ける木質部材ボルト接合部のすべり挙動\*

藤元 嘉安\*\*・渡邊 亜林\*\*・又木 義博\*\*

### 抄 録

ボルトによる木質部材接合部の疲労過程におけるすべり挙動について解明するための基礎的資料を得る目的から、ボルト接合部の圧縮型二面せん断の静的試験ならびに任意の荷重レベルにおける繰返し負荷試験が行われた。

この研究では、とくに、木質部材同士のボルト接合部における主材と側材の厚さ構成比が、疲労初期のすべり挙動におよぼす影響について検討された。その結果、以下のようなことが認められた。

1) いずれの厚さ構成比の試験体にも、圧縮型二面せん断の静的試験において、初期段階に剛性値が最大となる1次ピークが存在する。

2) 試験体全体の厚さに対する主材厚さの構成比が0.3と主材が薄い場合には、ピークを過ぎた後、急激に剛性が低下するのに対し、構成比0.4以上の場合はある程度剛性が残存するような比較的低い2次ピークが存在する。

3) 2次ピークの発現に関して、荷重の増大につれて生じるボルトの曲げ変形による座金の締付け作用が、主な要因の一つであると考えられる。

4) 繰返し負荷では、主材が厚く比較的大きな荷重が繰返し負荷される場合を除き、すべり挙動のほとんどが初回の負荷における最大すべり量により決定され、初回の最大すべりは静的試験におけるすべり挙動に相応する。

キーワード：木質部材ボルト接合、圧縮型二面せん断試験、すべり挙動、繰返し負荷

### 1. はじめに

木質部材同士のボルト・ナットによる接合は、中あるいは大規模木質構造物における主な接合方法の一つであり、例えば、小松(1992)あるいは平井(1994)の総説の一部に示されるように、その耐力特性あるいは変形特性について、これまでに数多くの研究報告がなされている。しかしながら、これらの研究のほとんどは静的負荷試験における接合部の強度性能に関するものであり、クリープ試験や繰返し負荷試験における接合部の変形挙動に関する報告は数少ない。構造物は、その使用状況下においては、自重等の長期継続的な負荷や、風や地震等の短期繰返し変動する負荷を受けており、安全性の面から連続的負荷あるいは繰返し負荷に対する接合部の疲労挙動を把握することは非常に重要である。木質部材ボルト接合部の疲労に関しては、Robert E. Abendrothら(1989)の行った割れを含む木材のボルト縦つき接合部の疲労特性についての研究報告等があるものの、系統的な研

\* FUJIMOTO, Y., WATANABE, A. and MATAKI, Y. : Slip Behavior of Bolted Wood-Joints under Cyclic Loading.

\*\* 九州大学農学部林産学科

Department of Forest Products, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-81

究例に乏しいのが現状である。

そこで、本研究では、木質部材ボルト接合部の繰返し負荷に対する変形挙動を解明する目的から、圧縮型の二面せん断試験体を用い、とくに、部材の厚さ構成比や繰返し荷重レベルのおよぼす影響について検討を行った。

まず、繰返し負荷する荷重のレベルを決定するため、主材の厚さ構成比を4段階に変化させ静的試験を行い、静的荷重に対するすべり挙動について検討した。繰返し負荷試験においては、一般的に、繰返し負荷に対する変形挙動は、とくに疲労初期に大きな変動を示すことから、本研究では負荷繰返し数100回までの疲労初期について検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1. 試験体

試験体は、図1に示すように、主材1枚と側材2枚をボルト・ナットによって接合した二面せん断試験体とした。供試材としては、主材、側材ともに気乾のスプルース (*Picea sitchensis Carr.*) を用いた。その基本的な性質を表1に示す。本実験では、ボルト接合部全体の厚さを10cmとし、主材の厚さを4段階(3, 4, 5および6cm)に変化させること

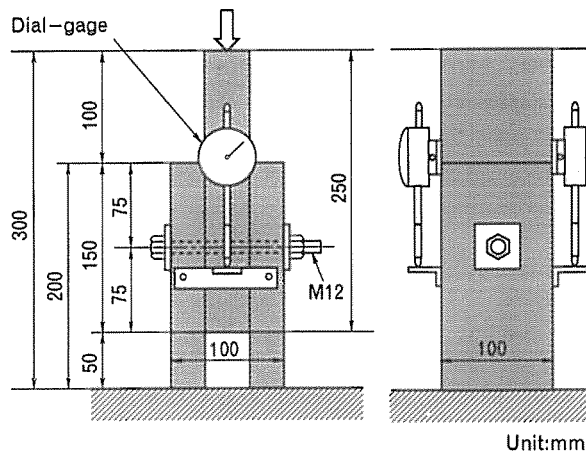


Fig. 1 Configuration of test specimen.  
図1 試験体の概略

表1 静的試験および繰返し試験に用いた木質部材の性質

Table 1 Physical properties of wood member used for static test and cyclic test.

Materials	Specific gravity	Moisture content (%)	Annual ring width (mm)
Average	0.42	13.33	1.41
Spruce			
Standard deviation	0.03	0.27	0.41

により、主材の厚さ構成比をそれぞれ 0.3, 0.4, 0.5 および 0.6 に設定した。いずれの部材も負荷方向が繊維方向となるように組立てた。また、横断面における年輪の走向角はボルト軸に対しほぼ  $60^\circ$  程度であった。供試ボルトとしては、公称直径 12mm、公称長さ 125mm のものを用いた。ボルト穴は直径 12mm のドリルによってあけ、座金は 40mm 角、厚さ 4mm の軟鋼平板を使用した。なお、ボルトの締付けは軽く指で行う Finger tight とした。

## 2.2. 静的試験

静的試験は、変形速度  $2\text{ mm/min}$  の圧縮型で行った。負荷は荷重が最大値を示すまで、あるいは、主材と側材とのすべりが約 20mm に至るまで行った。負荷に伴う主材と側材間のすべり量は、試験体両側面に取付けたダイヤルゲージにより測定し、それらの平均値を用いて評価を行った。

## 2.3. 繰返し試験

繰返し試験は、静的試験と同様、試験体に変形速度  $2\text{ mm/min}$  で所定の最大荷重まで負荷した後、最小荷重 10kgf になるまで除荷するという三角波の負荷サイクルを繰返すことによって行った。

繰返し最大荷重は、静的試験の結果を参考にし 400, 800, 1200kgf の 3 条件とした。なお、荷重繰返しは 100 回までとした。

また、繰返し試験においては図 2 に示すような、負荷繰返しに伴い累積する永久すべり量、各負荷 1 サイクル内の最大すべり量および最大荷重時における全すべり量の繰返し負荷に伴う推移について検討した。

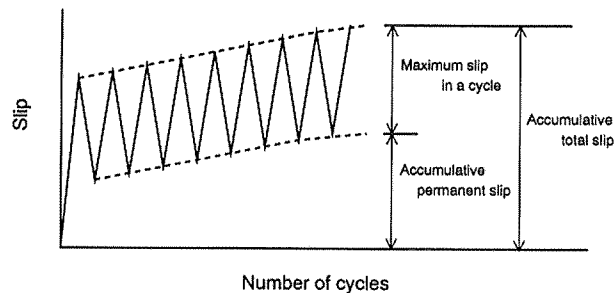


Fig. 2 Slip parameters evaluated in the cyclic test.

図 2 繰返し試験におけるすべり量

## 3. 結果および考察

### 3.1. 静的試験

#### 3.1.1. 負荷に伴うすべり挙動

すべり挙動におよぼす主材厚さ構成比の影響について、静的試験における荷重-すべり曲線の一例を図 3 の上段に示す。荷重約 1000kgf までの荷重域においては、厚さ構成比 0.6 の場合はすべりがやや大きいものの、その他の厚さ構成比においてはほぼ同様のすべり挙

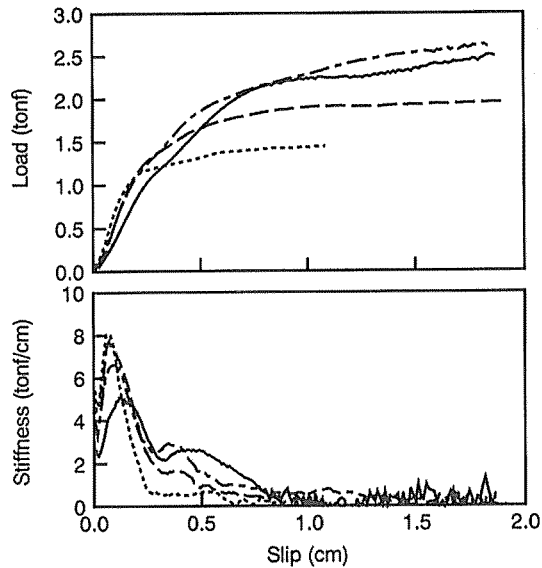


Fig. 3 Load-slip and stiffness-slip curves in static test.  
 Legend : Thickness ratio of main member  
 ----- : 0.3  
 ----- : 0.4  
 - · - · - : 0.5  
 \_\_\_\_\_ : 0.6

図3 静的試験の荷重—すべり曲線および剛性—すべり曲線

動を示した。それ以上の荷重域においては厚さ構成比により終局耐力が異なるため、異なるすべり挙動を示した。なお、厚さ構成比 0.5 と 0.6 は同程度の終局耐力を示した。

### 3. 1. 2. すべりの進行に伴う剛性の推移

静的試験における荷重に伴うすべり挙動について詳細に検討するために、荷重—すべり曲線をすべり量で微分し、単位すべり量に要する荷重、すなわち剛性を求めた。荷重過程のすべりの進行に伴う剛性の推移を示す、剛性—すべり曲線の一例を図3の下段に示す。

いずれの厚さ構成比においても、すべり量が 2 mm 以内、荷重 400kgf 前後の初期段階に剛性値が最大となる 1 次ピークが存在することが認められた。1 次ピークにおける剛性は厚さ構成比が増すほど低い値を示し、1 次ピークにおける荷重およびすべり量は厚さ構成比が増すほど大きい値を示す傾向にあった。

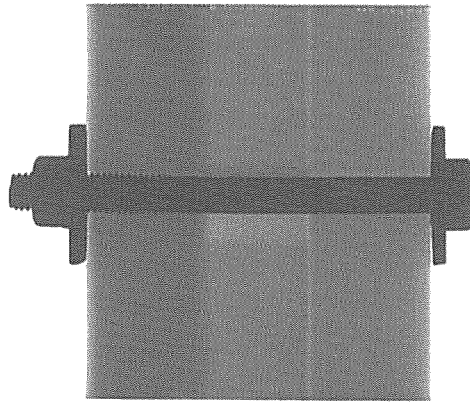
また、厚さ構成比 0.3 の場合は、ピークを過ぎた後、急激に剛性が低下し、およそ 1200kgf 以降の荷重域では、低レベルの剛性のまますべりが進行した。これに対し、厚さ構成比 0.4 以上の場合は、1 次ピーク以降の荷重域においてもある程度剛性が残存し、比較的低い剛性を示す 2 次ピークの存在が認められた。1 次ピーク後の荷重域における剛性の残存の程度は、厚さ構成比が大きいものほど大きい傾向にあった。

以上の結果をもとに、繰返し試験における荷重レベルを設定した。すなわち、初期段階に剛性値が最大となる荷重に近い 400kgf、厚さ構成比が大きい場合において、ピークを過

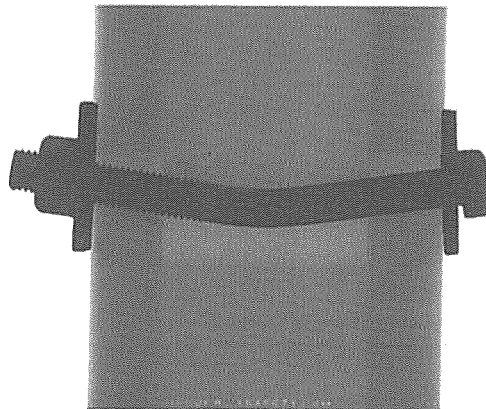
ぎた後、再び剛性が大きくなり始める荷重に近い 1200kgf およびその中間の 800kgf の 3 条件とした。

### 3.1.3. 軟X線による破壊形態の観察

試験体の破壊形態を観察するために試験後に軟 X 線写真撮影を行った。その一例として、厚さ構成比 0.3 と 0.6 の場合を図 4 に示す。厚さ構成比 0.3 の場合は破壊のほとんどがボルトによる木材の圧潰であり、ボルトの変形はほとんどみられない。一方、厚さ構成比が 0.6 の場合はボルトの曲げ変形が大きくなっており、座金上部の木材へのめりこみが認められた。ボルトの曲げ変形は、厚さ構成比が大きくなるほど顕著であった。このように、主材の厚さ構成比が大きくなるとボルトの曲げ変形により座金の締付作用が生じるため、比較的高い荷重域において剛性が残存する部分が現れるものと考えられる。



Thickness ratio of main member : 0.3



Thickness ratio of main member : 0.6

Fig. 4 Soft X-ray photographs of bolted joints after static test.

図 4 静的試験後のボルト接合部の軟 X 線写真

### 3. 1. 4. 座金の締付け作用

ボルトの曲げ変形による座金の締付け作用が接合部のすべり挙動におよぼす影響について検討するため、図5に示すような側材の上部を取り除いた試験体を作製し、静的試験と同様な比較実験(1)を行った。供試材には同じく気乾のスプルースを用いたが、その材質は表2に示すように静的および繰返し試験に供試したものよりも比重は小さく、年輪幅が大きいものであった。そのため、本比較実験において接合部のすべり量は相対的に大きく、やや劣る強度性能を示した。荷重-すべり曲線および剛性-すべり曲線を、それぞれ図6上、下段に示す。とくに剛性-すべり曲線において、厚さ構成比0.4以上の場合に静的試験でみられたような高荷重レベルでの2次ピークは認められず、厚さ構成比0.3の場合と同様のすべり挙動を示した。このことから、荷重の増大につれて発生する座金締付け作用が、2次ピークの発現に大きく関与していることが確認された。

なお、参考として、図7に示すような側材のボルト穴上端から1 cmを残した試験体についても同様の比較実験(2)を行った。その結果、図8に示すように厚さ構成比が0.5, 0.6の場合には1次ピーク後の剛性の存続部分が認められ、側材が完全な状態の場合に近い荷重-すべり曲線を示し、側材上部に座金が圧縮できる木材の部分がある程度存在することによりボルトの曲げ変形に起因する座金締付け作用が発生することが確認された。

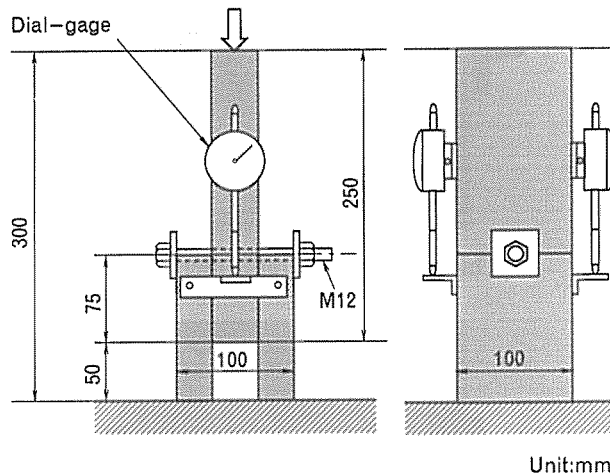


Fig. 5 Configuration of specimen for comparative test (1).

図5 比較試験(1)の試験体概略

表2 比較試験(1), (2)に用いた木質部材の性質

Table 2 Physical properties of wood member used for comparative test (1), (2).

Materials	Specific gravity	Moisture content (%)	Annual ring width (mm)
Average	0.39	12.75	2.68
Spruce			
Standard deviation	0.01	0.28	0.61

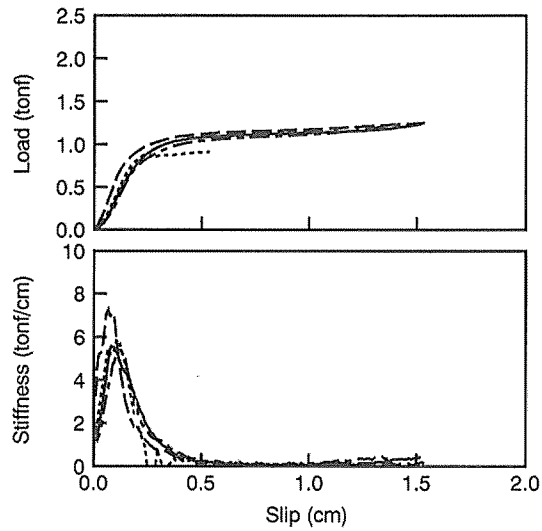
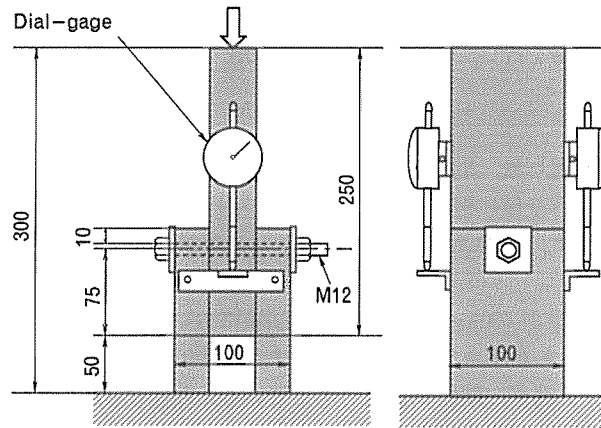


Fig. 6 Load-slip and stiffness-slip curves in comparative test (1).  
Legend : See Fig. 3.

図6 比較試験（1）における荷重—すべり曲線および剛性—すべり曲線



Unit:mm

Fig. 7 Configuration of specimen for comparative test (2).

図7 比較試験（2）の試験体概略



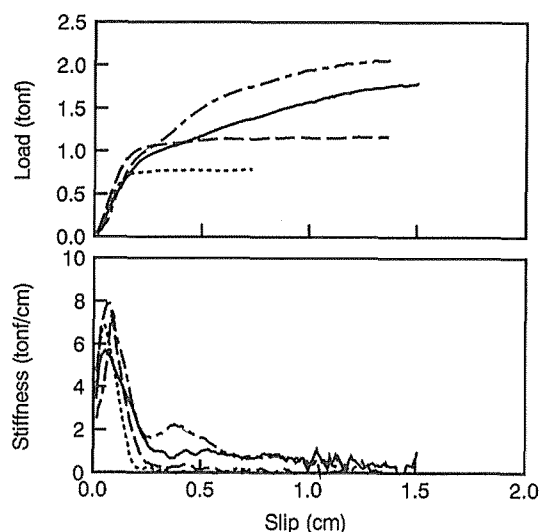


Fig. 8 Load-slip and stiffness-slip curves in comparative test (2).

Legend : See Fig. 3.

図8 比較試験(2)における荷重—すべり曲線および剛性—すべり曲線

## 3.2. 繰返し負荷試験

### 3.2.1. 永久すべり量の推移

繰返し負荷に伴う永久すべり量の累積におよぼす荷重レベルの影響について、その一例を図9に示す。いずれの条件においても、永久すべり量のほとんどが初回の負荷において生じ、その後の負荷繰返しにおいては漸増する傾向を示した。

また、負荷繰返し数の対数と永久すべり量とは直線関係にあることが認められたため、次式によって直線回帰を行い、係数 $a_p$ 、 $b_p$ を求めた。

$$S_p = a_p + b_p \log N \quad (1)$$

ここで、 $N$ は負荷繰返し数、 $S_p$ は負荷繰返し $N$ 回の時の永久すべり量、係数 $a_p$ は初回の負荷における永久すべり量に相当する値、 $b_p$ は永久すべり量の増加割合に相当する値である。結果を表3に示す。 $a_p$ および $b_p$ ともに繰返し荷重が大きなものほど増大する傾向にあった。

$a_p$ については、荷重が400kgfの場合、静的試験においてその荷重レベルで剛性が高かった厚さ構成比0.3のものが小さな値を示した。また、800および1200kgfの場合、厚さ構成比0.3は1次ピークを過ぎ、剛性の低減が生じているため他に比べて大きな $a_p$ の値を示した。

$b_p$ については、荷重が400kgfのときは厚さ構成比による差はあまり認められないが、荷重が800、1200kgfの場合には、厚さ構成比0.6のものは他の厚さ構成比のものに比べて大きな値を示し、繰返し負荷に伴う永久すべりの累積が進行しやすい傾向にあった。主材が厚く、荷重レベルが比較的高い場合には、繰返し負荷に伴うボルトの曲げ変形の累積が、部材間の永久すべりの進展に寄与しているものと思われる。

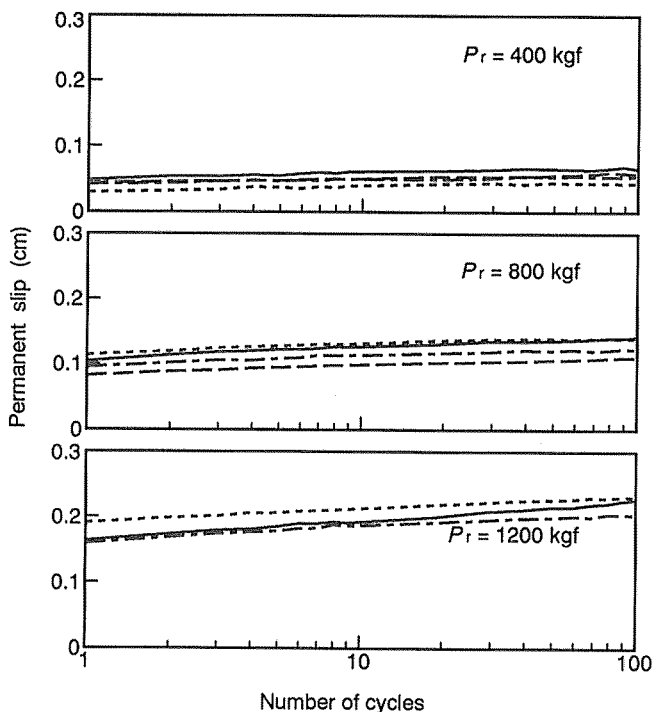


Fig. 9 Permanent slip in cyclic test.

Legend : See Fig. 3.

Note :  $P_r$  means repetitive load.

図9 繰返し負荷に伴う永久すべり量の推移

表3 式(1)における係数  $a_p$  および  $b_p$   
Table 3 Coefficients  $a_p$  and  $b_p$  in equation (1).

Coefficient	$a_p$			$b_p$			
Cyclic load (kgf)	400	800	1200	400	800	1200	
Thickness ratio of main member	0.3	0.031	0.118	0.192	0.007	0.012	0.020
	0.4	0.042	0.085	—	0.008	0.013	—
	0.5	0.042	0.099	0.164	0.006	0.013	0.021
	0.6	0.050	0.109	0.164	0.009	0.017	0.030

### 3. 2. 2. 最大すべり量の推移

負荷1サイクル内における最大すべり量の繰返し負荷に伴う変化を図10に示す。なお、負荷1回目および2回目のサイクル内における最大すべり量を表4に示す。いずれの条件においても2回目の負荷サイクル内における最大すべり量は1回目に比べ大きく減少し、それ以降はわずかながら低減する傾向にあった。1回目と2回目の最大すべり量の差は繰返し荷重が大きなものほど大きくなる傾向にあった。1回目のサイクル内における最大すべり量は静的試験におけるすべり挙動に相応し、厚さ構成比の違いにより異なる値を示したが、2回目以降のすべり量は厚さ構成比による差異がほとんど認められなかった。負荷1回目に

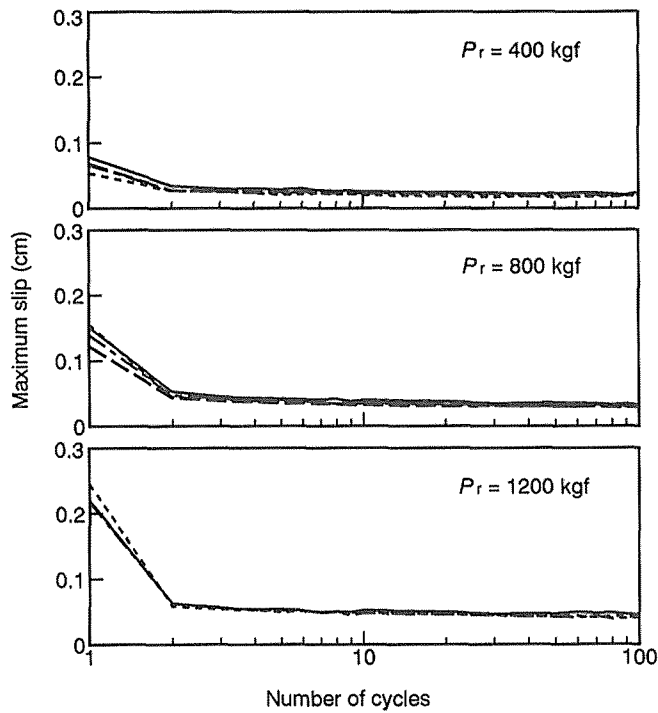


Fig. 10 Maximum slip in cyclic test.  
Legend : See Fig. 3.  
Note : See Fig. 9.

図10 繰返し負荷に伴う最大すべり量の推移

表4 負荷1回目および2回目のサイクル内における最大すべり量  
Table 4 Maximum slips in 1st and 2nd loading cycle.

Number of cycles	1			2			
Cyclic load (kgf)	400	800	1200	400	800	1200	
Thickness ratio of main member	0.3	0.049	0.148	0.246	0.031	0.058	0.075
	0.4	0.066	0.127	—	0.023	0.052	—
	0.5	0.063	0.139	0.219	0.034	0.053	0.084
	0.6	0.079	0.151	0.217	0.030	0.055	0.083

Note : The unit of maximum slip is centimeter.

おける最大すべり量とその時残留する永久すべり量との関係を図11に示す。本実験における荷重範囲では、初回の負荷による永久すべり量は最大すべり量の大きさにほぼ比例しており、荷重レベルや厚さ構成比に関わらず、1回目の最大すべり量のおおよそ6割程度が永久すべり量として残留するものと思われる。1回目の最大すべり量は静的試験におけるすべり挙動に大きく依存しているため、初回の負荷において残留する永久すべりも同様に静的試験におけるすべり挙動に大きく依存するものと思われる。

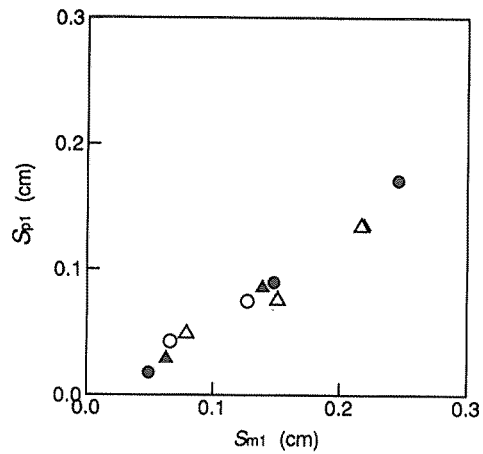


Fig. 11 Relationship between  $S_{pt}$  and  $S_{mt}$ .  
 Legend : Thickness ratio of main member  
 ● : 0.3 ○ : 0.4 ▲ : 0.5 △ : 0.6  
 Note :  $S_{pt}$  : Permanent slip after first loading cycle.  
 $S_{mt}$  : Maximum slip in first loading cycle.  
 図 11 負荷 1 回目における最大すべり量とその時残留する永久すべり量との関係

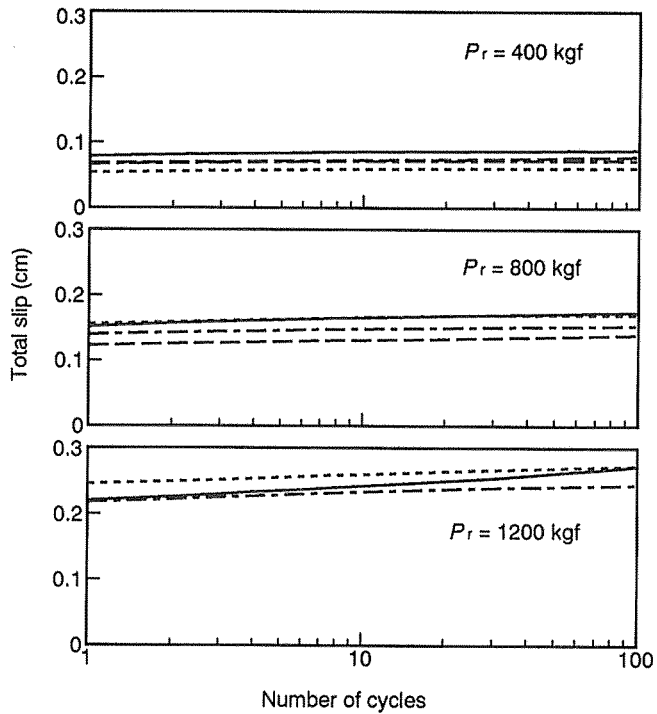


Fig. 12 Total slip in cyclic test.  
 Legend : See Fig. 3.  
 Note : See Fig. 9.  
 図 12 繰返し負荷に伴う全すべり量の推移

### 3.2.3. 全すべり量の推移

繰返し荷に伴う全すべり量の推移の一例を図12に示す。任意の荷繰返し数における全すべり量は、荷1サイクル内の最大すべり量と、それまでに残留した永久すべり量との和として考えられる。永久すべり量は初回の荷によりそのほとんどが生じ、以降は漸増する傾向を示した。荷サイクル内の最大すべり量は初回に比べ2回目に大きく減少し、その後漸減する傾向を示したことから、繰返し荷に伴う全すべり量は初回の荷における最大すべり量で決定され、2回目以降の全すべり量の増加の度合いは非常に小さいオーダーであると思われる。また、初回の最大すべり量は静的試験の結果に相応していることから、繰返し荷に伴う全すべり量は静的試験におけるすべり挙動に依存するものと思われる。

## 4. 結 論

木質部材ボルト接合部のすべり挙動について、圧縮型二面せん断試験体を用い検討を行った結果、まず、静的試験においては、いずれの厚さ構成比のものにおいても荷重400kgf前後の比較的荷重域において、すべり剛性の最大となる1次ピークの存在が確認された。さらに、主材厚さが大きなものでは、荷の増大につれてボルトの曲げ変形による座金締付け作用に起因すると思われる2次ピークの存在が確認された。

繰返し荷試験においては、初回の荷における永久すべりは初回の最大すべりに応じて残留し、初回の最大すべり量は静的試験におけるすべり挙動に準じることが確認された。2回目以降の繰返し荷においては、永久すべりは漸増し、荷サイクル内の最大すべりは、木質部材の圧密化により漸減する傾向を示した。したがって、両すべりの和で示される全すべりはわずかに漸増する傾向にあり、繰返し荷に伴う全すべり量の推移は、静的試験におけるすべり挙動に大きく依存するものと考えられる。なお、主材が厚く比較的大きな荷重が繰返し荷される場合には、ボルトの曲げ変形の累積により部材間の永久すべりの蓄積が増大するものと思われる。

## 引 用 文 献

平井卓郎 (1994) : 木材接合部の耐力特性と許容耐力の考え方, 木材工業 49 : 248-252

小松幸平 (1992) : 集成材骨組み構造における接合の研究, 木材学会誌 38 : 975-984

ROBERT E. ABENDROTH, TERRY J. WIPH *et al.* (1989) : Cyclic load behavior of bolted timber joint. Journal of structural Engineering 115 : 2496-2510

(1996年12月13日受付; 1997年1月20日受理)

## Summary

Bolted joints have been used as one of the most typical joints on the comparatively heavy timber construction. However, on the fatigue behavior of them, few systematic studies have been conducted. In this report, the static compressive test and cyclic compressive test of shear-in-two-

planes specimen of bolted wood-joints were carried on, to investigate and to get the basic data for the loose bolted wood-joints in the process of fatigue, especially a behavior of slip.

In this study, we evaluated the effect of thickness ratio of main member to whole thickness and amplitude of cyclic loading on the slip behavior at the early stage of fatigue process. Results are summarized as follows;

1) In stiffness-slip curves for all thickness ratio of main member, the first peak, the stiffness attained to maximum value, was existed in comparatively lower load level.

2) The stiffness was declined rapidly after the first peak in the case of thickness ratio of 0.3, while the comparatively low second peak was existed in the case of thickness ratio of 0.4 or more.

3) It was considered that the second peak was due to the compressive effect by washers, which was generated with bending deformation of a bolt with increase of applied load, considering the results of soft X-ray photographs and comparative test.

4) In the cyclic test, most of slip behavior was decided by the slip behavior in static test, except for thickness ratio of 0.6 and comparatively higher cyclic load level.

**Key words** : bolted wood-joints; compressive test of shear-in-two-planes specimen; slip behavior; cyclic loading.