

# ぬき接合部の強度とその改良 (第1報)

## くさびの材質と強度との関係

〔文化財保存を目的とした木造建築物の構造力学的研究；その1〕

西 浦 忠 輝

### 1. はじめに

貴重な文化遺産である社寺、民家等の木造古建築の保存を考える上で最も重要な点の一つはかかる古建築には現在とは異なる独得の構造法が用いられているという事である。即ち、現在の木構造理論では伝統的構造法を充分解明することができないのである。従って、現在、重要文化財建造物は建築基準法の適用除外となっている。然るに、最近になって町並保存地区内の伝統的建造物や国指定以外の文化財建造物のように、その修理に際し現行基準法の適用を受ける古建築が増加して来ており、従来構法の再評価と古式意匠を損なわない形での補強対策の開発が、文化財建造物の保存を計る上での緊急の課題となって来ているのである。

本研究は、かかる認識のもとに、文化財建造物に用いられている伝統的木構造技法を実験的手法により構造力学的に解析し、その評価を行い、更には、その有効な補強方法を検討し開発することを目的とするものである。

今回は、木造古建築の構造耐力に極めて大きな影響を与える貫(ぬき)接合部を取り上げ、その強度と補強方法について検討した。本報は、〔第1報〕として、ぬき接合部の強度と楔(くさび)の材質との関係についてその実験研究結果を報告するものである。

### 2. 試験材料

図一1に示すように、3寸4分角(103×103 mm)、1間2尺(2424 mm)長のヒノキ材(柱)に1寸×4寸(30×121 mm)のぬき穴を三ヶ所あけ、そこに断面9分5厘×3寸3分(29×100 mm)、長さ3尺5寸(1060 mm)のヒノキ平角材(ぬき)を通して、くさびで固定したものを試験体とした。

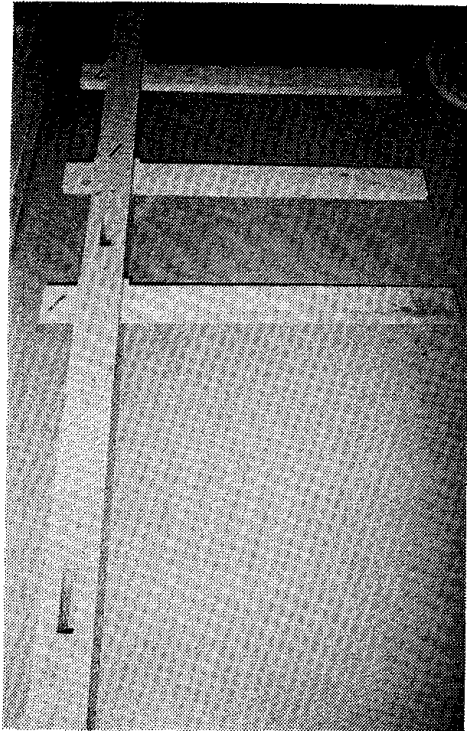
くさびは、ヒノキ、ケヤキ、鉄板貼りヒノキ、プラスチック(アクリル樹脂)の四種とし、寸法および木目どりは図一2に示す通りである。尚、鉄板貼りヒノキくさびは、ヒノキくさびを鉄板(2×23×50 mm)の厚み分だけ削り、エポキシ樹脂で接着したものである。

ぬきは、補強なし、アルミ板補強、鉄板補強の三種とした。アルミ板は1.5×23×300 mm、鉄板は2.0×23×300 mmのものをを用い、図一3に示す様に、金属板の厚み分だけ削った後、エポキシ樹脂にて接着した。

四種のくさびと三種のぬきの組合せで10種類の試験体について実験を行ったが、以下、本報告では、これらの試験体を表一1に示す通りに略記することとする。

### 3. 試験方法

試験装置は、島津製作所の協力を得て、本研究者が工夫し組立てたものである。図一4、5に示す様に、柱材を固定し、ぬき材の端部を引張りギヤーで柱材と平行方向に引張る。これに



〔I〕 Whole view

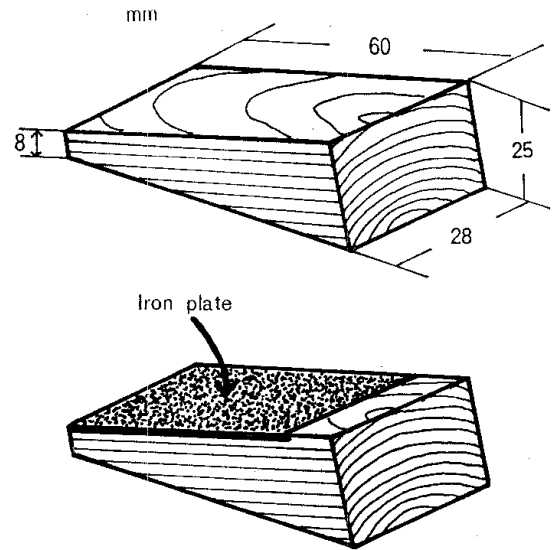
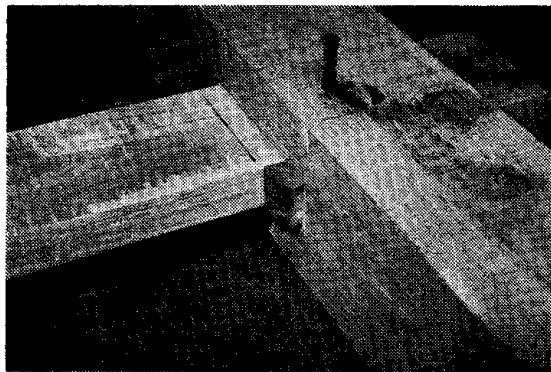


図-2 くさびの寸法, 木目取り及び鉄板貼りくさび

Fig. 2 Dimention and cutting of the wedge, and the reinforced one by iron plate



〔II〕 Joint part

図-1 試験体  
Fig. 1 Test piece

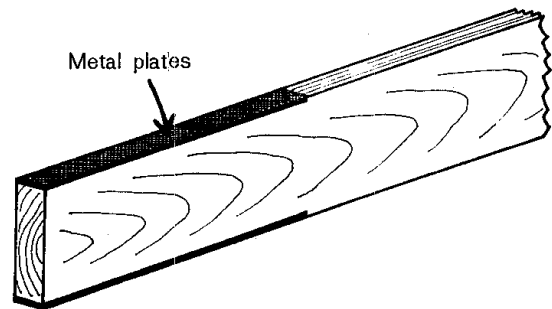


図-3 金属板補強ぬき

Fig. 3 Batten reinforced by metal plates

表-1 試験体の記号

Table 1 Code of the test pieces

くさび (Wedge) ぬき (Batten)	ヒノキ (Cypress)	ケヤキ (Zelkova)	鉄板貼り ヒノキ (C.R.I.P)*	プラスチック (Plastic)
補強なし (Unreinforced)	H	K	HI	P
アルミ板補強 (Reinforced by aluminium plates)	A・H	A・K	A・HI	A・P
鉄板補強 (Reinforced by iron plates)	—	I・K	—	I・P

\* (Cypress reinforced by iron plate)

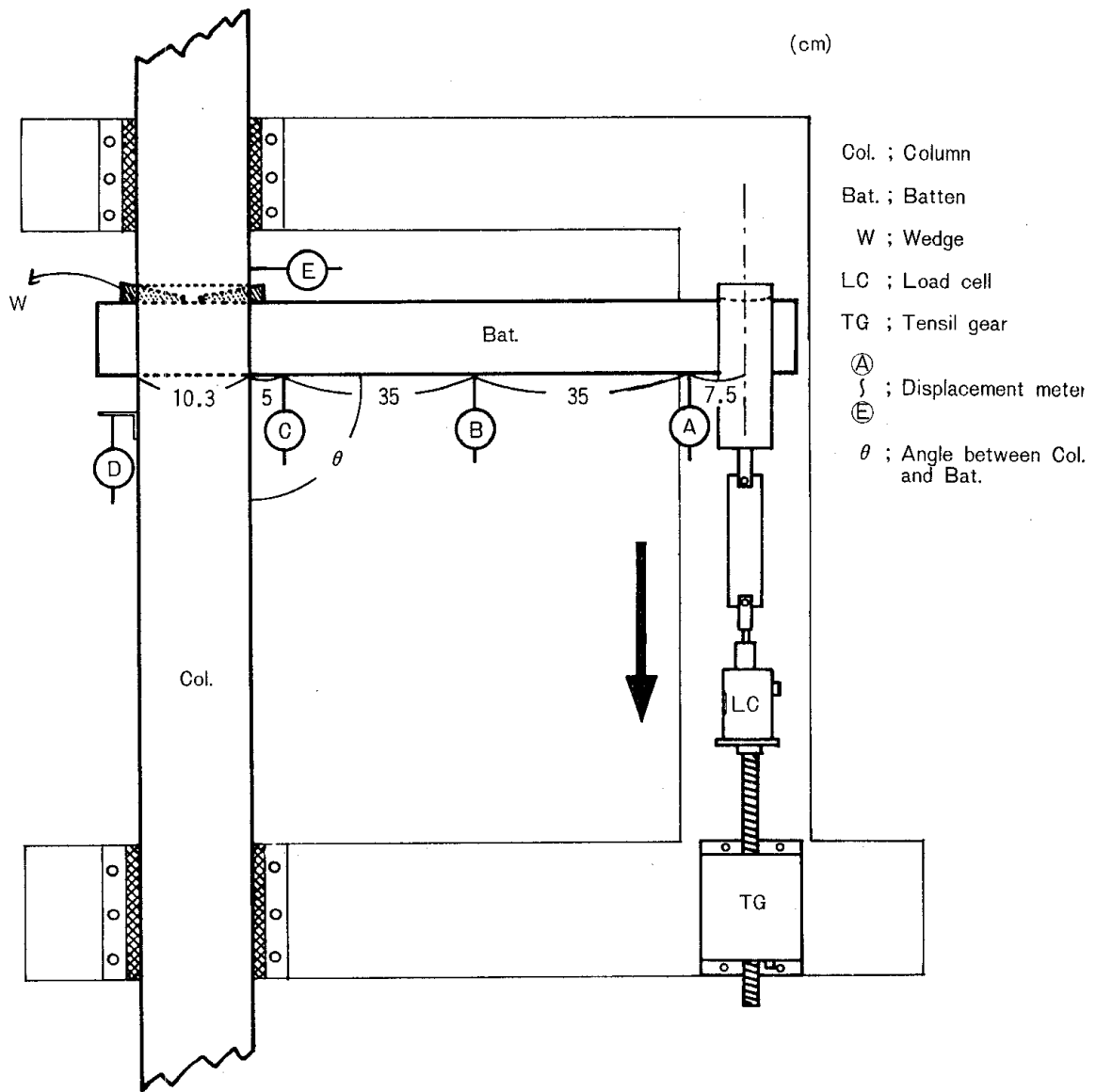


図-4 試験装置図  
Fig. 4 Testing apparatus

より生じた引張り応力を、ギヤーポンプと引張り治具との間にセットしたロードセルに感知させる。又、各所にセットした変位計 (A~E) に各部の動きを感知させる。センサー (ロードセル, 変位計) からの信号は、デジタル自動計測システム [共和電業製, UCAM-8] (図-6) に送って数値化し、更に、あらかじめセットしたプログラムに従って演算させて、次の値をプリントアウトさせた。

・ぬき接合部にかかる力 (モーメント);  $M(\text{kg}\cdot\text{m}) = P \times \left( \frac{0.103}{2} + 0.75 + \frac{0.075}{2} \right)$

・柱とぬきとの角度の変化 (変形角);  $\Delta\theta(\text{rad}) = \frac{a - d}{750}$

・ぬきの曲がり指標;  $B = \frac{a - c}{b - c}$

但し、Pはロードセルの測定値 (kg), a~eは変位計(A~E)の測定値である。

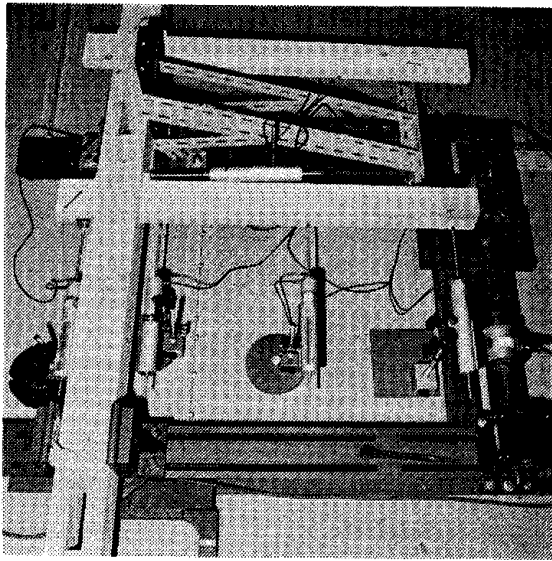


図-5 強度試験装置  
Fig. 5 Testing apparatus

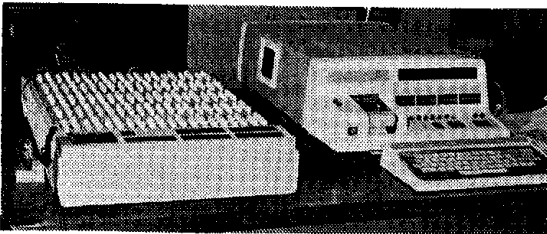


図-6 デジタル自動計測システム (UCAM-8)  
Fig. 6 Measuring instrument

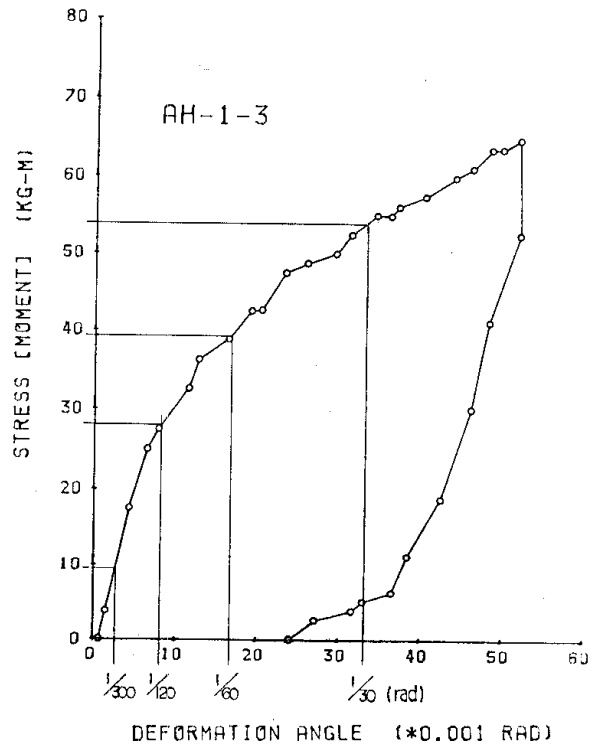


図-7 応力(モーメント)ー変形角曲線の例  
Fig. 7 Example of a Stress (Moment) — Deformation diagram

変形角  $\Delta\theta$  は、変位計④の変位から算出したのであるが、この場合、ぬき材自体の曲がりの影響がないかどうかを調べる為に、曲げ指標Bを算出した。その結果、 $\Delta\theta$  の増加に伴うBの有意の変化は見られず、ぬき材自体の曲がりは無視し得るものと判断した。又、固定した柱材が試験中に動いていないことを、柱と平行方向の動きを表わすd、及び時計方向の回転の動きを表わすeが試験中に有意な変化を示さなかったことから確認した。尚、特に問題となる柱と平行方向の動きについては、もしあってもその影響が演算の過程で消去されるようにプログラミングされている。

試験は、変形角 ( $\Delta\theta$ ) が 0 から 50/1,000 rad に至るまで連続的にギヤで引張り、一定時間 (5 秒) 毎にプリントアウトさせたデータをプロッターでプロットして得られた図、応力 (モーメント) ー変形角曲線 (図-7) から、変計角  $\Delta\theta=1/300, 1/120, 1/60, 1/30$  (rad) の時のモーメント  $M(\text{kg}\cdot\text{m})$  を求め、ぬき接合部の強度とした。

#### 4. 試験結果

##### 4-1 強度

試験結果を表-2, 図-8, 9に示す。

表-2, 図-8から明らかな様に、ぬき接合部の強度は、くさびの材質により大きく異り、プラスチック>ケヤキ>鉄板貼りヒノキ $\geq$ ヒノキの順である。ヒノキを鉄板貼りで補強した効果はほとんど見られない。

表-2 強度試験結果

Table 2 Stress (moment) on the specific deformation angles

Test piece (Number of pieces)	Deformation angle $\Delta\theta$ (rad)			
	1/300	1/120	1/60	1/30
H (5)	12.6 ( $\pm 2.8$ )	24.6 ( $\pm 4.4$ )	36.9 ( $\pm 2.8$ )	56.7 ( $\pm 2.5$ )
K (6)	15.8 ( $\pm 2.9$ )	31.9 ( $\pm 2.9$ )	49.1 ( $\pm 4.7$ )	71.2 ( $\pm 8.6$ )
HI (6)	13.2 ( $\pm 3.8$ )	26.1 ( $\pm 4.5$ )	37.8 ( $\pm 5.4$ )	52.1 ( $\pm 5.5$ )
P (9)	16.7 ( $\pm 2.6$ )	36.1 ( $\pm 3.2$ )	58.6 ( $\pm 4.0$ )	85.3 ( $\pm 6.9$ )
A · H (6)	12.7 ( $\pm 2.4$ )	23.5 ( $\pm 3.8$ )	36.1 ( $\pm 4.2$ )	51.2 ( $\pm 3.1$ )
A · K (6)	17.4 ( $\pm 2.9$ )	32.2 ( $\pm 4.6$ )	50.8 ( $\pm 5.8$ )	73.1 ( $\pm 6.6$ )
A · HI (3)	12.1 ( $\pm 1.6$ )	26.5 ( $\pm 0.8$ )	38.7 ( $\pm 0.8$ )	49.4 ( $\pm 2.7$ )
A · P (3)	21.2 ( $\pm 2.1$ )	45.6 ( $\pm 2.3$ )	73.5 ( $\pm 3.1$ )	100.5 ( $\pm 4.5$ )
I · K (3)	16.5 ( $\pm 1.9$ )	34.6 ( $\pm 3.6$ )	54.1 ( $\pm 5.3$ )	78.3 ( $\pm 6.9$ )
I · P (3)	20.7 ( $\pm 1.4$ )	45.7 ( $\pm 0.6$ )	77.8 ( $\pm 1.4$ )	113.6 ( $\pm 4.9$ )

kg·m (Standard deviation)

又、表-2、図-9から明らかなように、くさびがヒノキ、鉄板貼りヒノキ、ケヤキの場合には、ぬき材を補強することによるぬき接合部の強度増大効果は、ほとんど見られないが、プラスチックくさびの場合には明らかな増強効果が見られる。

#### 4-2 部材変形

モーメント荷重に対するぬき接合部における応力集中点は、図-10 (I) に示すA、B、Cの三点であり、図-10 (II) に示す変形（凹み）が生じる。これらは、鋭角的な部分圧縮を受けた結果である。ぬき材を金属板貼り補強した場合に接着が充分でないと、B、C点を起点とした金属板の剝離が生じることがある。

## 5. 考 察

通常伝統構法では、くさびにはぬき材と同種の材（ヒノキ造りの場合はヒノキ）を使うのが普通である。しかし、文化財建造物等特に重要なものについては、ケヤキに代表される堅木が用いられることも多い。本研究の結果、柱、ぬきがヒノキ材の場合、くさびをヒノキからケ

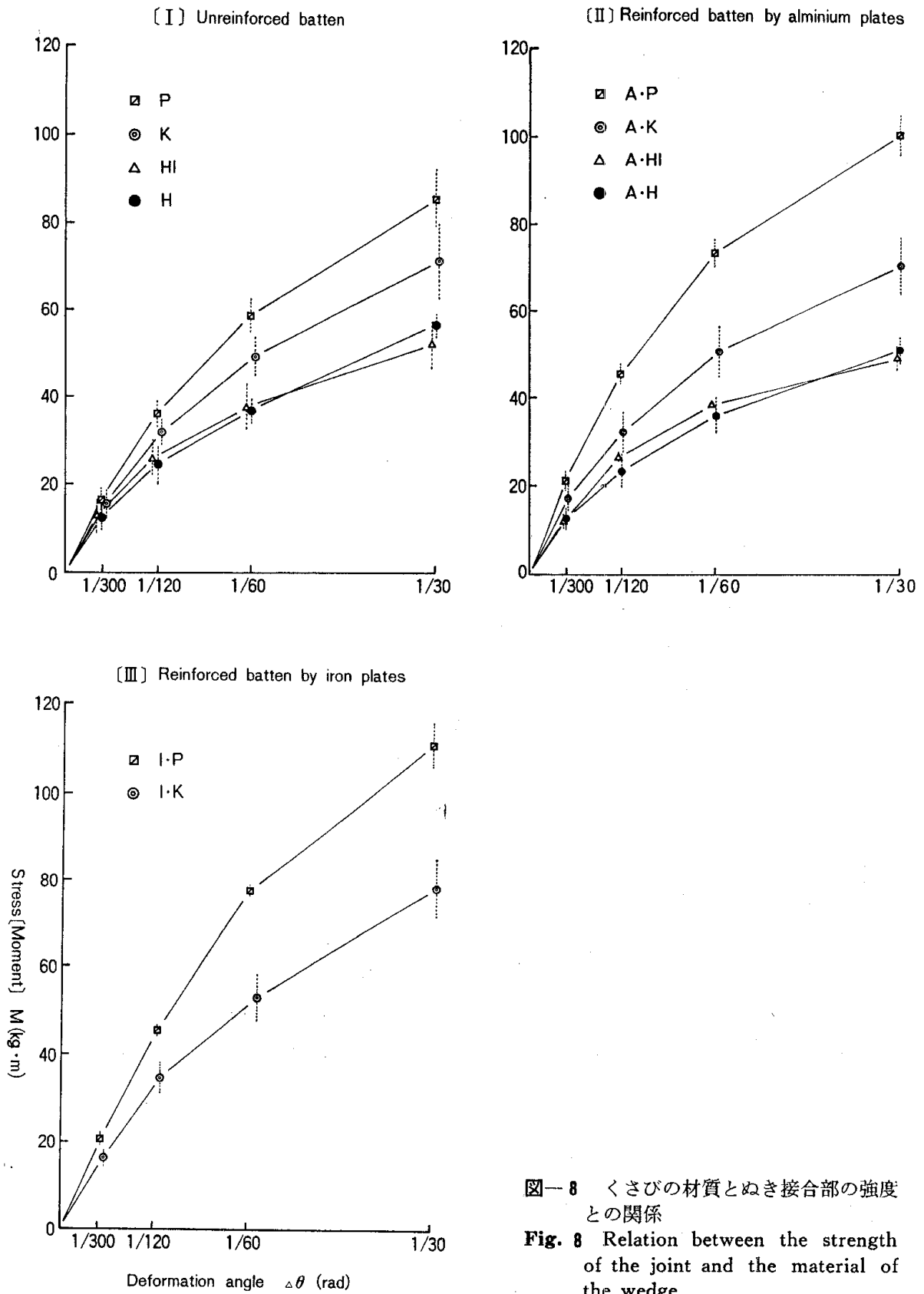
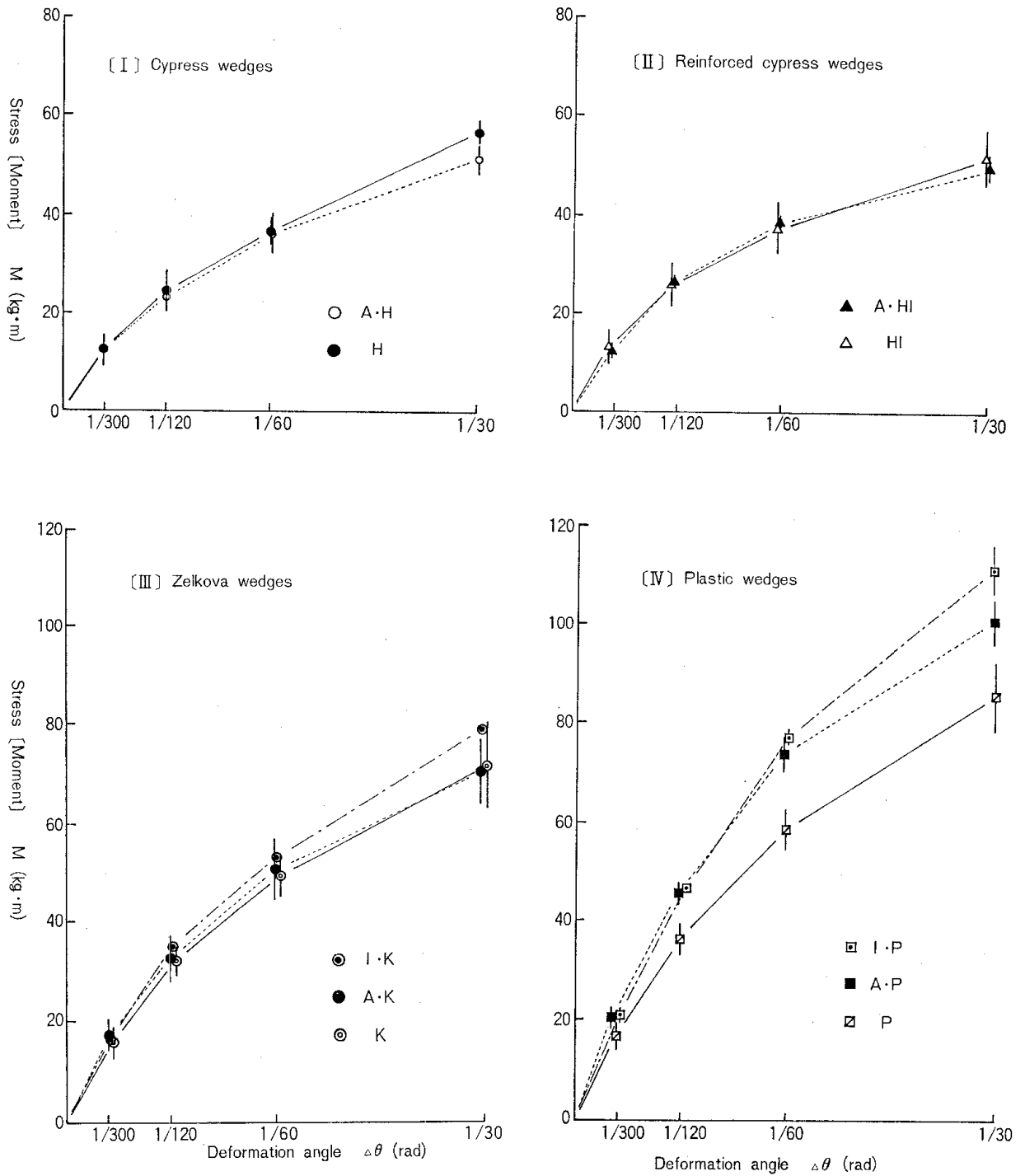


図-8 くさびの材質とぬき接合部の強度との関係  
 Fig. 8 Relation between the strength of the joint and the material of the wedge



図一 ぬき材の補強とぬき接合部の強度との関係

Fig. 9 Relation between the strength of the joint and the reinforcement of the batten

ヤキに替えることによって、ぬき接合部の強度が約30%増大することが明らかとなり(表一3)、くさびに堅木を用いることは、ぬき接合部の強度を高める為の有効な処置であることが立証された。

他の条件が同じで、くさびがヒノキからケヤキに替ったことによって、ぬき接合部の強度が増大した要因として、くさび材の圧縮強度、表面硬度の違いが考えられる。そこで、更に圧縮強度の強いものとしてプラスチック(アクリル樹脂)くさびを、又、圧縮強度は変わらず、表面硬度のみを高めるものとしてヒノキに鉄板を貼り付けたくさびを用いて、同様の試験をした結

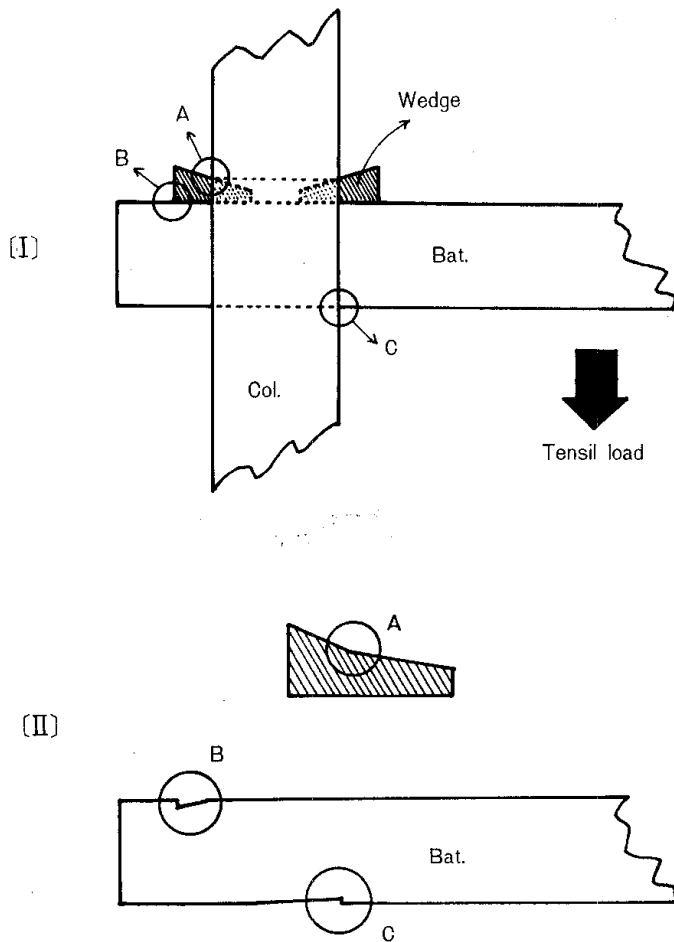


図-10 応力集中点と変形材部  
 Fig. 10 Concentration points of the stress, and the deformation of the parts

果、プラスチックくさびでは、ヒノキくさびに比して50%近く的大幅な強度増加が見られたが、一方、鉄板貼りヒノキくさびでは、強度増加はほとんど見られなかった(表-3)。この結果から、ぬき接合部の強度は、ほとんどくさび材の圧縮強度に由来するものと判断出来よう。

さて、ここで、モーメント荷重に対するぬき接合部の変形形状を見てみると、図-10に示したように、A点のくさびの変形の他に、B点、C点において、ぬき材の部分圧縮による変形(凹み)が見られ、これらA、B、C三点に応力は集中している。従って、A点を強化する手段であるくさびの改質とともに、ぬきのB点、C点を強化することは、当然、ぬき接合部の強度を高める為に効果的であるはずである。ところが、試験結果によれば、表-3からも明らかなように、くさびがヒノキ、鉄板貼りヒノキ、ケヤキの場合には、ぬきをアルミニウム板で補強してもぬき接合部の強度はほとんど変ら

ず、鉄板で補強した場合でも、ケヤキくさびの場合は若干の増強効果があっただけである。しかし、くさびがプラスチックの場合には、ぬきをアルミニウム板で補強することによって約25%、鉄板補強では約30%の強度増加が見られた。この結果から考察するに、ぬき接合部における応力集中は、図-10のA点、即ち、くさび部分に優先的に起こり、付随的にB点、C点で起こるものと考えられる。従って、くさび材の圧縮強度が或る程度以上の場合にのみ、ぬき材補

表-3 無補強ぬき-ヒノキくさび(H)を100とした時の各強度の比較  
 Table 3 Comparison of the strength (H=100)

Deformation angle (rad)	Strength (H=100)		
1/120	H (100)	A · H ( 96)	—
	HI (106)	A · HI (108)	—
	K (130)	A · K (131)	I · K (141)
	P (147)	A · P (185)	I · P (186)
1/60	H (100)	A · H ( 98)	—
	HI (102)	A · HI (105)	—
	K (133)	A · K (138)	I · K (144)
	P (159)	A · P (199)	I · P (211)



強の効果が現われるものと推察される。

ぬき接合部の強度（初期剛性）に最も大きな影響を与えるもの、即ち、応力—変形角曲線における立ち上りを決定するのは、くさびの締り具合、言い替えれば、くさびの打込み強さである。現在の建築基準法では、構造耐力として、変形角  $1/120 \text{ rad}$  という初期の変形時における耐力を基準にしているので、この、くさびの打ち込み強さは極めて重要な因子である。本研究では、種々の方法によるぬき接合部の強度の改良を目的としており、従って、くさびの打込みは、ハンマーにより通常なし得る範囲内で出来るだけ強く行うものとした。又、くさびのはみ出し部分の長さも一定とした。

## 6. 結 論

ヒノキ材によるぬき接合部の強度、即ち、剪断モーメントに対する剛性は、くさびの材質、特にその圧縮強度に極めて大きな影響を受ける。変形角  $1/120 \text{ rad}$  における強度は、ヒノキくさびを 100 とした場合、ケヤキくさびでは 130 となり、更に圧縮強度の高いプラスチック（アクリル樹脂）くさびでは 147 まで高まる。

剪断モーメントに対するぬき接合部での応力集中は、図—10の A, B, C 点で起こり、中でも A 点に最も優先的に集中する。従って、ぬき材を補強しても、くさびがヒノキ、ケヤキの場合には、ほとんどぬき接合部の強度増加に寄与せず、圧縮強度の非常に高いプラスチックくさびを使った場合に初めてその効果が現れた。

## 7. 謝 辞

本研究の企画、立案、実行全てに渡り、終始懇切な御指導を賜った、東京国立文化財研究所、伊藤延男所長、及び、実験を進めるに当り種々御指導頂いた、東京大学農学部林産学科木質材料学研究室、杉山英男教授、同、安藤直人助手、又、実験装置、測定システムの作成やデータ処理の方法について多くのアドバイスを頂いた、東京国立文化財研究所保存科学部物理研究室、三浦定俊研究員の各氏に対し深く感謝致します。

尚、本研究は、文部省科学研究費補助金にて行われた。記して深謝致します。

## Experimental Study on the Strength of a Column-batten Joint with Wedges and Its Improvement [ I ]

### Relation between the Strength of a Joint and the Material of Wedges Used

(Studies on Historic Wooden Buildings in Structural Mechanics for the  
Conservation of Cultural Monuments ; 1)

Tadateru NISHIURA

It is very important to make scientific researches into traditional wooden structural techniques in order to develop the restoration techniques for the conservation of historic wooden buildings. As one of these researches, the author has been experimentally studying the strength of a column-batten joint with wedges and its improvement. In this first report, the experimental method and the results of the study on the relation between the strength of the joint and the material of wedges used are described :

#### 1) Test pieces

Columns and battens are made of *HINOKI* (Japanese cypress) which is mostly used for Japanese historic wooden buildings (Fig. 1, 4). Four kinds of wedges were prepared. These wedges were the same size but made of four different materials, that is, *HINOKI*, *HINOKI* reinforced by iron plates, zelkova and plastic (acrylic resin) (Table 1, Fig. 2). Three kinds of battens, that is, reinforced ones by aluminium plates and by iron plates and unreinforced ones were used (Fig. 3). By combination of these four kinds of wedges and three kinds of battens, ten kinds of joints were made for the experiment (Table 1).

#### 2) Experiment

The stress against a shearing moment was measured using a test apparatus designed by the author (Fig. 4). The strength of the joints were quantitatively estimated by the stress values (moment) at the fixed deformation angles (1/300, 1/120, 1/60, 1/30 rad) between a column and a batten.

#### 3) Results

There existed an obvious relation between the strength of a column-batten joint and the material (i. e., compressive strength) of wedges used (Fig. 8). The strength of a joint with zelkova wedges was about 30 per cent stronger than with *HINOKI* ones. And the strength with plastic wedges was about 50 per cent stronger than with *HINOKI* ones (Table 3).

The stress concentrated at the certain points (A, B and C in Fig. 10). Among these three points, A seemed to be prior to the other two points. This presumption was led by the fact that the reinforcement of battens did not improve the strength of a joint except when plastic wedges were used, which has a very high compressive strength (Fig. 9).