

文化財の保存を目的とした歴史的住宅建築の構造的補強法(新修理技法)の開発に関する研究；接合部の強度について(梗概)

伊藤 延男
西浦 忠輝 安藤 直人

I. 緒 言

現在、近世の住宅建築で文化財として保存の対象となっているものはかなりの数に上る。これらのうち重要な文化財に指定されたものは建築基準法の適用を除外され、従来の技法で修理することができる。しかし、その安全性については経験的判断以外に何らの基準もないのが実状である。また、建築基準法の適用を受ける建物の場合は、それに則って構造補強し修理しなければならないのであるが、この場合意匠とのかね合いが大きな問題である。この他にも歴史的住宅建築を保存するについては問題が山積している。本研究は、そのごく一部にすぎないが、日本の歴史的構造の良さを伝えながら改良を加えてゆくという大事業へ僅かながらも貢献せんとするものである。

本研究は、住宅建築全般についての伝統構法の見直しを行うものではなく、また、文化財建造物の構造特性を明らかにしその原理を追求するものでもない。本研究の目的は文化財建造物、特に構造耐力の比較的弱い住宅建築を対象に、その修理に際して現場技術者がその建物の構造的な強弱を大まかに知り、必要かつ適切な補強法を見出すための簡便な判定基準作成に向けての実際的な基礎データを得ることにある。

歴史的住宅建築の軸組は、ほとんどの場合角柱とぬき、それに桁で構成されている。従って、これらの接合部即ち柱にくさび締めしたぬき接合部の強度はその軸組の構造耐力に極めて大きな影響を与える。そこで昨年度はくさびの材質及び形状を変えてぬき接合部の強度を調べ、次には柱とぬき3段によって構成されている実大の構造体について同様の実験を行った。引続いて本年度は、ぬき接合部の繰り返し変形に対する強度性状を調べ、また、ほぞ接合部の強度試験も行い、更には、これらの結果と軸組全体の水平耐力との関係を解析し検討した。

II. 接合部の強度特性に関する実験的研究

1. ぬき接合部強度の耐久性

1. 1. 試験方法

断面103×103mmのヒノキ材(柱)に断面30×121mmのぬき穴をあけ、そこに断面29×100mmのヒノキ平角材(ぬき)

を通してくさび締めにより固定したものを試験体とした。くさびは通常短型(ヒノキ, ケヤキ, プラスチック), 長型(ヒノキ, ケヤキ)の5種類とした(図-1)。強度試験は、図-2に示すように、ぬきに柱と平行方向の荷重(P)を加え、柱とぬきとのなす角(θ)の変化(変形角)；

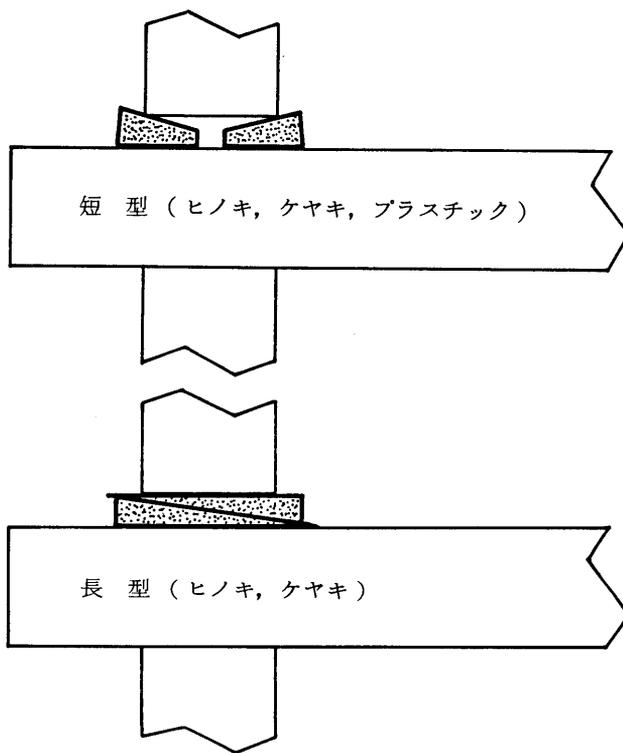


図-1 試験に用いたくさび

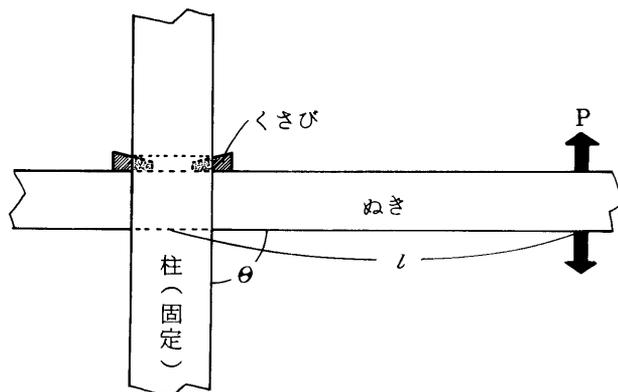


図-2 強度試験方法

$\Delta \theta$ とぬき接合部にかかる力(モーメント; $M=Pl$)との関係を調べるにより行った。

具体的な試験方法は次の通りである。

- i) くさび締め直後, 一方向に荷重を加え変形角 $\Delta \theta = 1/30$ rad に達したら荷重 (P) がゼロになるまで戻す。
 $P = 0$ になっても $\Delta \theta > 0$ であるが(残留変形), この時点で再び同方向に $\Delta \theta = 1/30$ rad になるまで荷重を加えてから $P = 0$ まで戻す。そして更にもう一度 $\theta = 1/30$ rad まで荷重してから $P = 0$ まで戻す。この場合の変形速度は一定 (1/540 rad/sec) とした。
- ii) $\Delta \theta = 0$ に戻してから, $\Delta \theta = \pm 1/30$ rad となるように連続的に両方向へ変形させる処理を施した。この場

合 $\Delta \theta = 0 \rightarrow +1/30 \rightarrow -1/30 \rightarrow 0$ (rad) のサイクルを5回繰り返し, 変形速度は一定 (1/108 rad/sec) とした。この後, (i) と全く同じ試験を行った。

- iii) (ii) の処理により緩んだくさびを締め直してから (i) と全く同じ試験を行った。

試験は5種類のくさび(短型ヒノキ: H, 短型ケヤキ: K, 短型プラスチック: P, 長型ヒノキ: HL, 長型ケヤキ: KL) についてそれぞれ5体ずつ合計25の試験体について行った。

1. 2. 試験結果

5種類のくさびについての測定結果(変形角—モーメント図)を1例ずつ図-3(i)(ii)に示す。

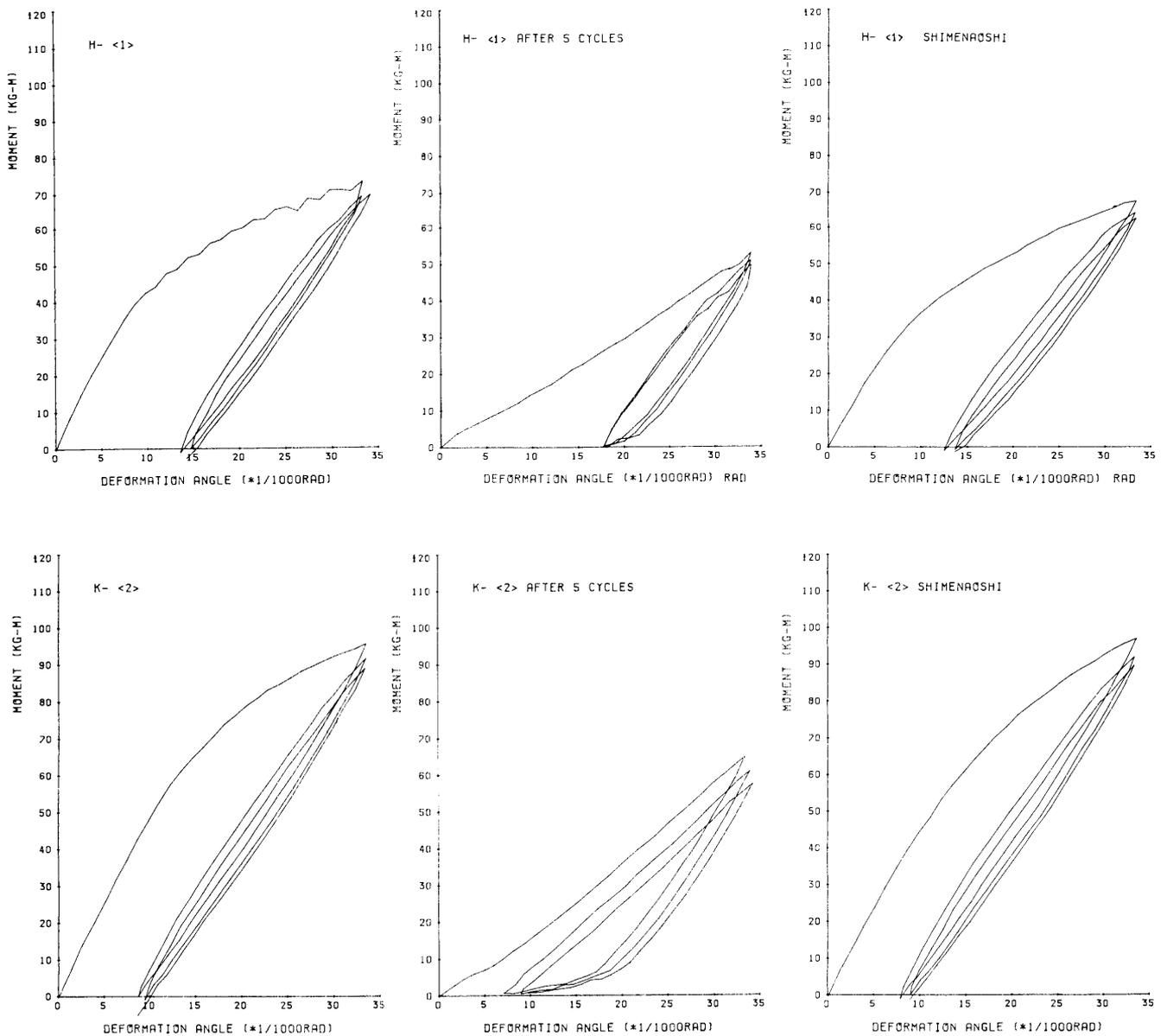


図-3 (i)ぬき接合部強度測定例(変形角—モーメント図)

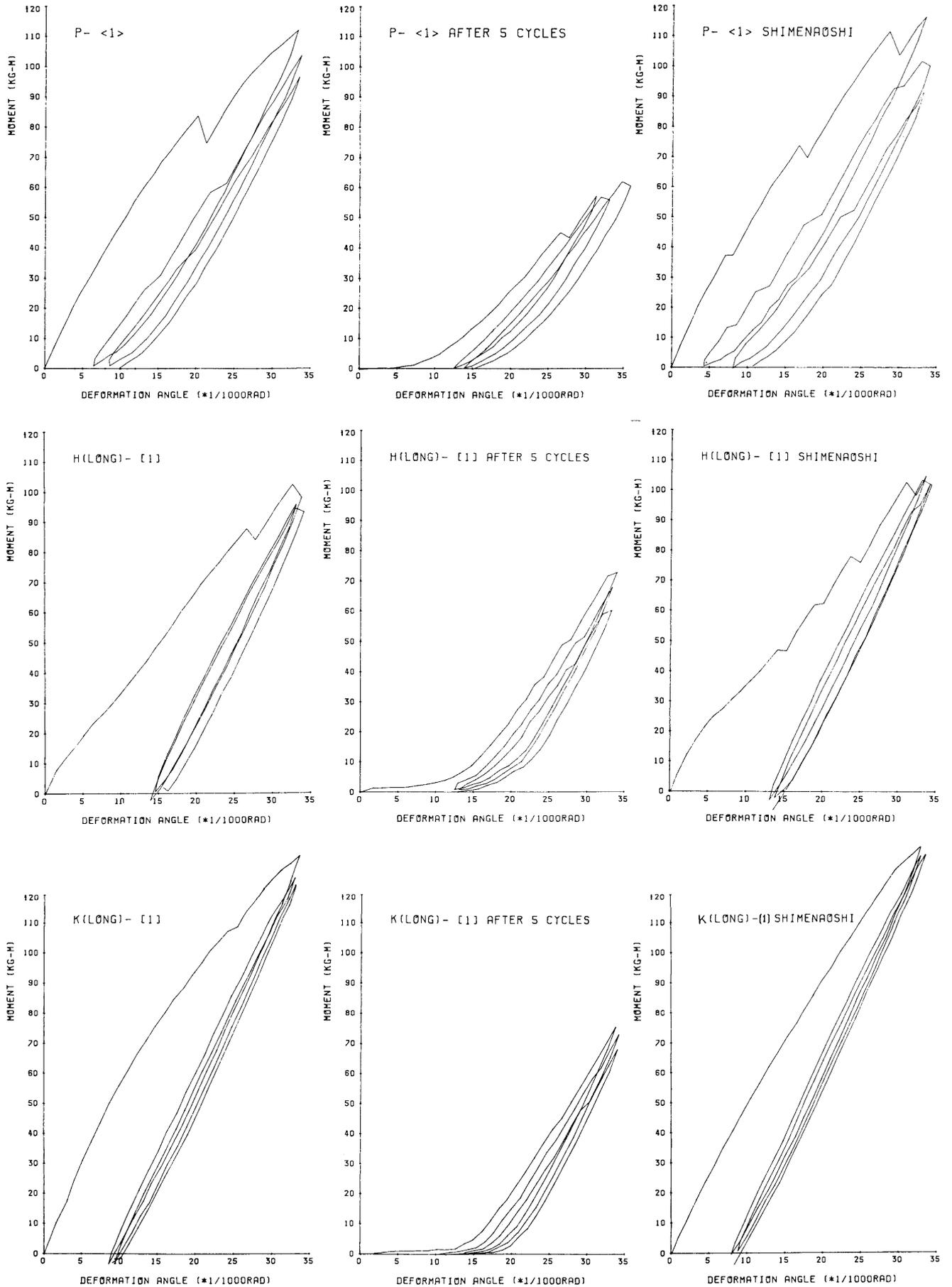


図-3(ii) むき接合部強度測定例(変形角-モーメント図)

各くさび5体ずつの測定結果を平均したものを表-1, 図-4に示す。表-1で〔B〕はくさび締め直後, 〔A〕は $\pm 1/30$ rad 5サイクル処理後, 〔R〕は締め直し後を意味し, ()内は各変形角におけるそれぞれのくさびの〔B〕の値を100とした時の百分比, < >内は各変形角における H〔B〕の値を100とした時の百分比である。又, RDC (Residual Deformation Coefficient)は第一回目の荷重→荷重解放時の残留変形角(rad)を $1/30$ radにおける応力(モーメント: $\text{kg} \cdot \text{m}$)で除した値である。

図-3, 4, 表-1から明らかのように, $\pm 1/30$ rad 5サイクル処理後の強度低下は長型くさびで著しく, 変形角 $1/120$ radにおける強度は5~10%に低下する。短型くさびの場合はプラスチックで20%に, ヒノキでは25%に低下するが, ケヤキは40%を維持している。一方, 締め直しによる強度回復は, 長型くさびと短型プラスチックくさびでは当初と同じ強度性状に戻るが, 短型ヒノキ, 短型ケヤキくさびは当初の強度に回復せず, 変形角 $1/120$

radにおける強度は当初の80%にとどまる。

5種のくさびによるぬき接合部の $\pm 1/30$ rad 5サイクル処理後での変形角 $1/120, 1/60$ radにおける絶対強度を比較すると次の順となる。

$$1/120\text{rad}; \quad K > P \geq HL \geq H > KL$$

$$1/60\text{rad}; \quad K > H > P > HL > KL$$

1. 3. 考察

$\pm 1/30$ rad 5サイクル処理による強度低下が長型くさびの場合に著しいのは, くさびのスベリ現象によるものである。長型くさびはくさび全体の締め, 即ちくさびどうしの, くさびとぬきの, そして, くさびと柱のぬき穴壁面との磨擦力によってぬきを固定しているの, スベリによるくさびの緩みがサイクル毎に拡大されて, その結果強度が大きく低下するものである。しかしながら, くさび自体には損傷(変形)が生じず, 従って, 締め直すことにより当初と同じ状態に復帰し得るのである。一方, 短型くさびの場合には, 図-5に示した①②③点特

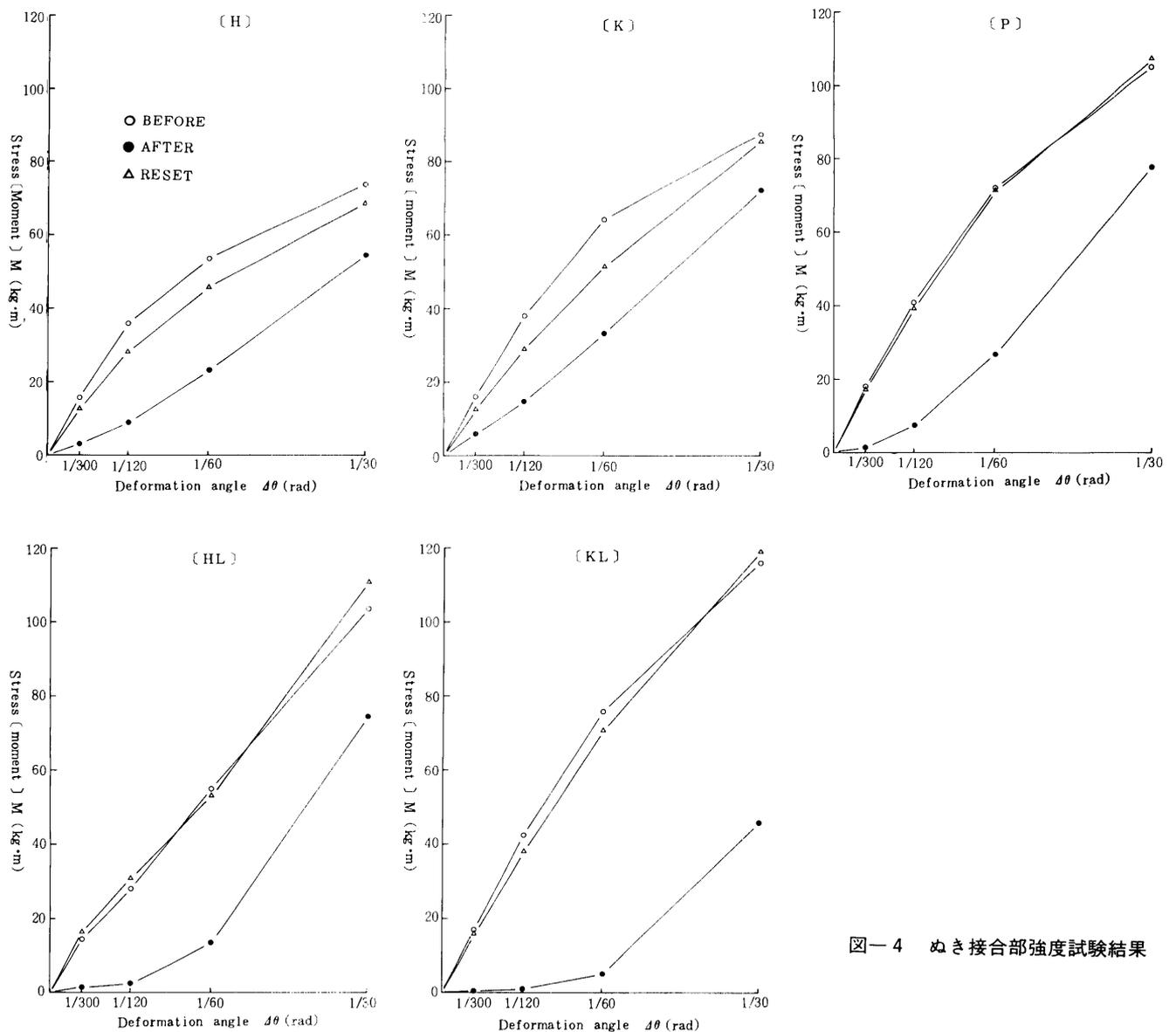


図-4 ぬき接合部強度試験結果

表-1 むき接合部強度試験結果

		Deformation angle Δ (rad)				RDC ($\times 10^{-5}$)
		1/300	1/120	1/60	1/30	
H	[B]	15.9 (100) <100>	35.8 (100) <100>	53.6 (100) <100>	73.8 (100) <100>	16.7 <100>
	[A]	3.3 (21) <21>	9.1 (25) <25>	23.1 (43) <43>	54.4 (74) <74>	
	[R]	12.7 (80) <80>	28.4 (79) <79>	45.6 (85) <85>	68.7 (93) <93>	
K	[B]	16.1 (100) <101>	38.1 (100) <106>	64.3 (100) <120>	87.6 (100) <119>	12.4 <74>
	[A]	6.4 (40) <40>	14.8 (39) <41>	33.4 (52) <62>	72.2 (82) <98>	
	[R]	13.0 (81) <82>	29.0 (76) <81>	51.4 (80) <96>	85.4 (97) <116>	
P	[B]	17.3 (100) <109>	41.1 (100) <115>	72.1 (100) <135>	105.2 (100) <143>	6.4 <38>
	[A]	1.3 (8) <8>	7.4 (18) <21>	26.8 (37) <50>	77.8 (74) <105>	
	[R]	18.0 (104) <113>	39.3 (96) <110>	71.4 (99) <133>	107.4 (107) <146>	
H L	[B]	14.4 (100) <91>	28.0 (100) <78>	55.0 (100) <133>	103.5 (100) <140>	13.9 <83>
	[A]	1.5 (10) <9>	2.5 (9) <7>	13.6 (25) <47>	74.4 (72) <101>	
	[R]	16.4 (114) <103>	30.9 (110) <86>	53.0 (96) <99>	110.8 (107) <150>	
K L	[B]	17.0 (100) <107>	42.4 (100) <118>	75.9 (100) <142>	116.1 (100) <157>	7.7 <46>
	[A]	0.3 (2) <2>	0.9 (2) <3>	5.1 (7) <10>	45.8 (39) <62>	
	[R]	15.7 (92) <99>	38.0 (90) <106>	70.8 (93) <132>	119.4 (103) <162>	

に④点に応力が集中し、この部分のへこみ（ヒノキ、ケヤキの場合）によって応力が緩和される形となる。従って、 $\pm 1/30\text{rad}$ 5 サイクル処理の1回目においてくさびのへこみ変形はほぼ最大に達し、サイクル毎に拡大していくことはなく、又、へこみ変形後も木材の弾性はある程度残されているので、強度低下は長型くさびに比べて小さい。しかし、長型くさびの場合と違ってくさび自体が損傷（変形）してしまうので、締め直しによって当初の強度性状に戻すことは不可能であり、80%程度の強度回復にとどまる。短型くさびでもプラスチックの場合はヒノキ、ケヤキと異った挙動を示す。硬いプラスチック

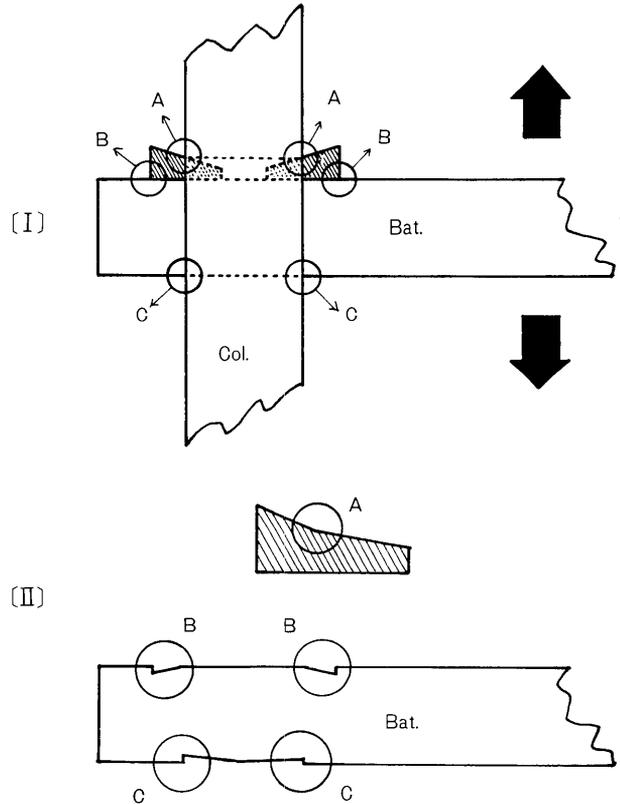


図-5 短型くさびによるむき接合部の変形時応力集中点と部材変形

(アクリル樹脂) くさびは、図-5の④点におけるへこみ変形を生じないが、磨擦係数が小さいのでスベリが起こり、 $\pm 1/30\text{rad}$ 5 サイクル処理による強度低下は大きい。しかし、一方、くさびの損傷（変形）がないので、締め直しによって当初の強度はほぼ完全に回復する。

上で述べた $\pm 1/30\text{rad}$ 5 サイクル処理による強度低下性状の違いは、"くさび締め直後変形角 $\pm 1/30\text{rad}$ 5 サイクル連続試験（変形速度 $1/108\text{rad/sec}$ ）"により確認された。本試験による各くさびの測定結果（変形角—モーメント図）を1例ずつ図-6に示す。H L, K Lではサイクル毎に強度が低下して行くことが、又、それに対してK, H特にKでは最初の1サイクルで低下後はほとんど低下しないことが、そしてPの場合には両者の中間的な挙動を示すことが良くわかる。

2. ほぞ接合部の強度

2. 1. 試験方法

図-7に示す柱、桁、3段のぬきだけで構成された実大軸組壁体（III参照）における柱と桁との接合部（ほぞ接合）の強度を調べるために図-8に示す試験体を作り、桁に相当する部分(A)を固定し、柱に相当する部分(B)の端部にAと平行方向に荷重を加えて変形角 $\Delta \theta$ と応力（モーメント）との関係を調べた。試験体は、ほぞ突出部に割りくさびを入れたもの(WK)、鼻せんを入れた

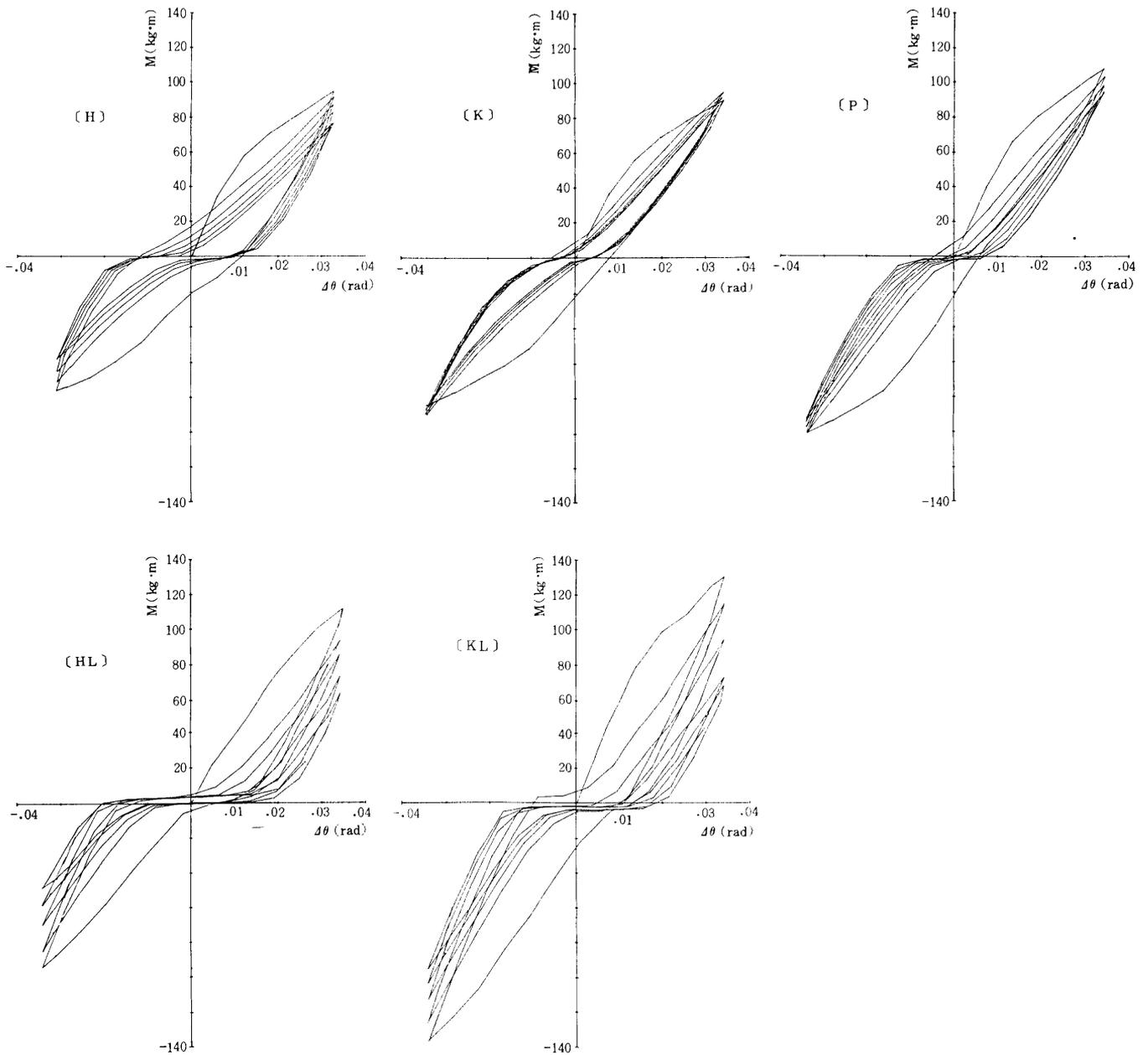


図-6 変形角 $\pm 1/30$ rad 5 サイクル連続試験測定例 (変形角—モーメント図)

もの (HS), 何もしないもの (N) の三種類で (図-9), それぞれ 3 体ずつとし, 1.1.1) と同様の条件で試験を行った。

2. 2. 試験結果

各試験体の測定結果 (変形角—モーメント図) を 1 例ずつ図-10 に示す。又, 各 3 体の測定結果を平均したものを表-2, 図-11 に示す。表-2 の () 内は N の各変形における強度及び RDC の値を 100 とした時の百分比, < > 内は短型ヒノキくさびによるぬき接合部の各変形角における強度 (表-1, H(B)) を 100 とした時の百分比である。

表-2, 図-10, 11 から明らかなように, 本試験体の

ほぞ接合部の強度は小さい。変形角 $1/120$ rad における強度は短型ヒノキくさびによるぬき接合部に比べて, 最も強い HS でもその 30% にすぎず, N の場合は僅か 10% である。

割りくさび, 鼻せんの効果は小変形時において顕著である。これは, 緩いほぞ接合部がある程度締めつけられたためであるが, いずれにしても強度自体は小さい。

2. 3. 考察

本実験は軸組壁体全体としての水平耐力と個々の接合部の強度との関係を解析することを目的として行ったものであり, この点については III で考察することとする。

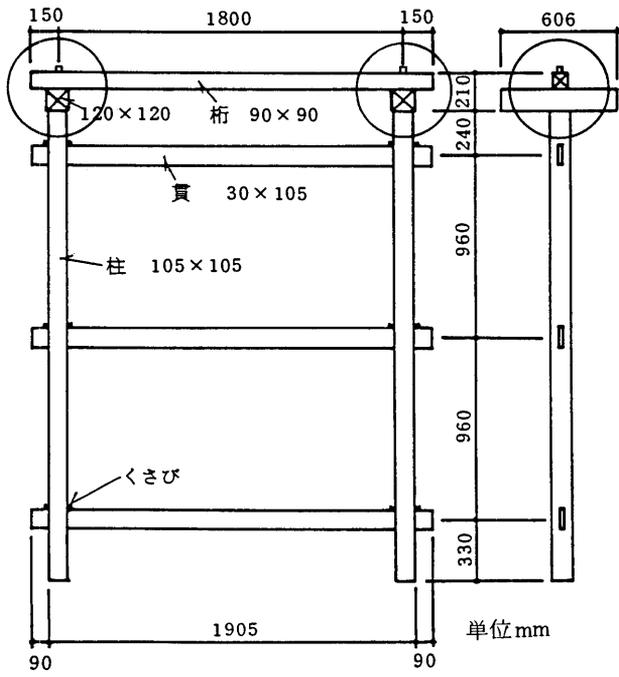
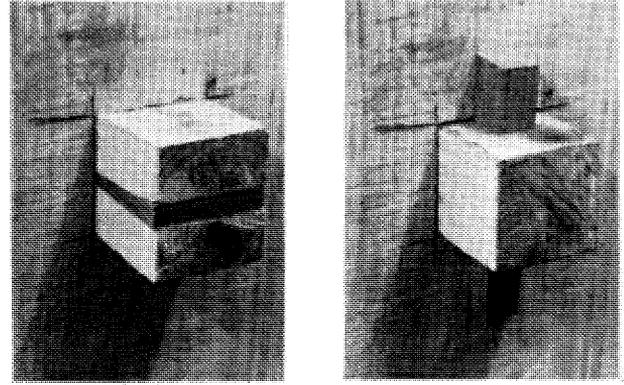


図-7 柱、桁、ぬきのみからなる実大軸組壁体試験体



割りくさび 鼻せん

図-9 試験体ほぞ突出部補強

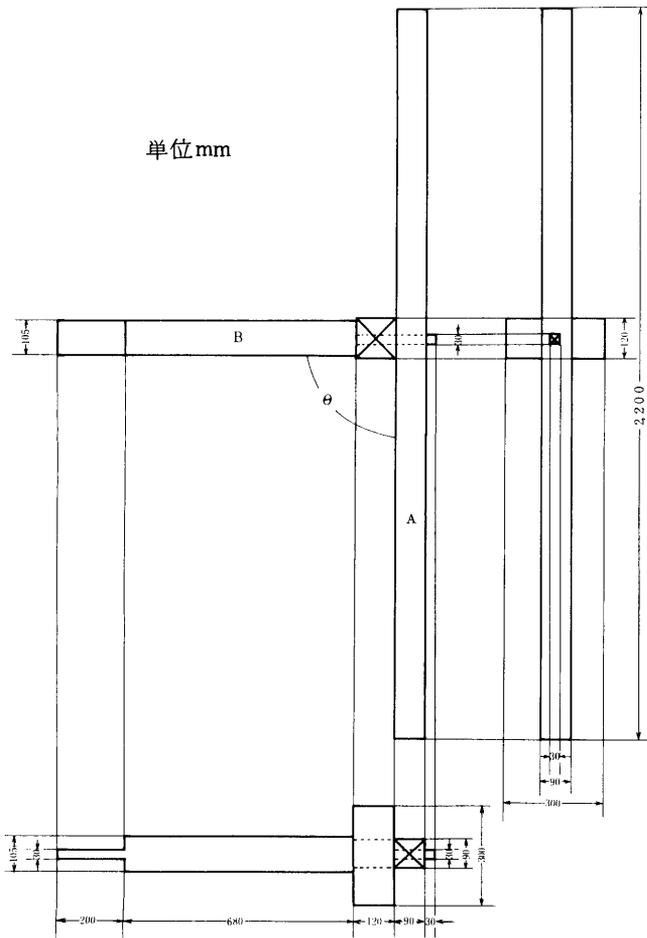


図-8 ほぞ接合部強度試験体

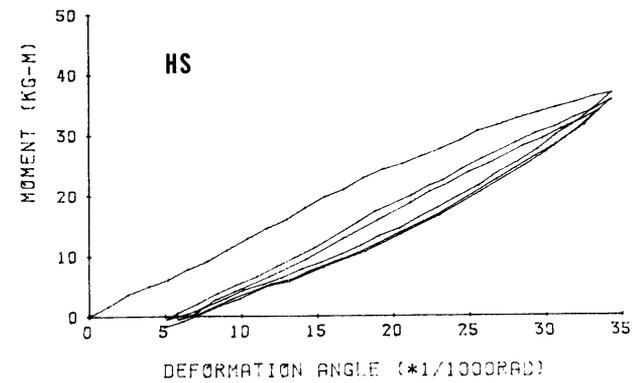
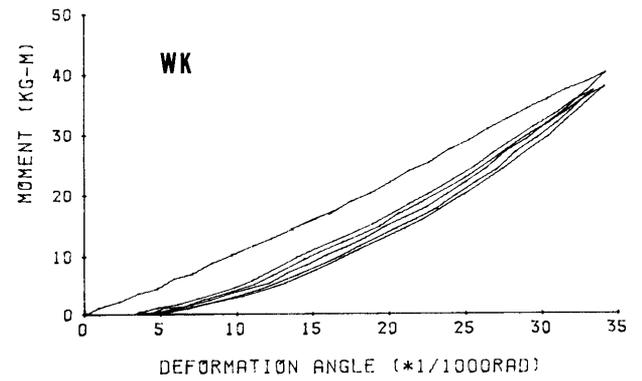
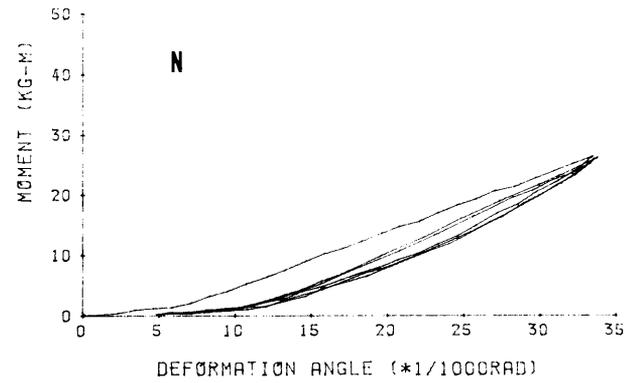


図-10 ほぞ接合部強度測定例

表-2 ほぞ接合部強度試験結果

	Deformation angle $\Delta\theta$ (rad)				RDC ($\times 10^{-5}$)
	1/300	1/120	1/60	1/30	
N	0.9 (100) <6>	3.7 (100) <10>	11.2 (100) <21>	26.7 (100) <36>	20.2 (100)
WK	3.2 (355) <20>	8.1 (219) <23>	17.2 (154) <32>	34.0 (127) <46>	17.9 (89)
HS	4.9 (544) <31>	10.5 (284) <29>	20.0 (179) <37>	35.1 (131) <48>	14.1 (70)

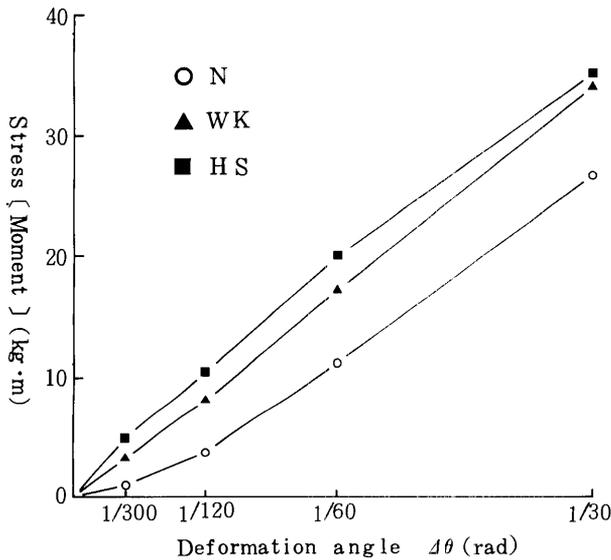


図-11 ほぞ接合部強度試験結果

III. 柱とぬきからなる軸組の水平耐力発現機構

1. 軸組試験体の水平耐力

図-7に示す軸組を構成する各接合部の強度性状についてIIで詳述した。一方、軸組の水平耐力に関する実験については既報¹⁾に示されているので参照されたい。

本研究では個々に調べられた接合部の強度性状と、軸組全体のせん断変形性状とを比較検討することを目的としている。

柱とぬきからなる図-7の軸組について見ると、柱とぬきの接合部6ヶ所、柱と桁の接合部2ヶ所の計8ヶ所が水平せん断荷重に対する抵抗要素と見なし得よう。ところで、軸組全体の水平耐力を調べる目的で行われた実験方法は図-12に示す通りで、軸組に鉛直ロッドを掛け、さらに加力側の柱脚に羽子板ボルトを取り付けて軸組の浮き上がりを抑止する方法を採用している。また、2本の柱の両脚部には鉄製のストッパーを設置し、水平荷重に対して軸組の支点としたものである。

軸組のせん断耐力を既報¹⁾のデータから抜粋すると表-3の通りである。但し、表-3の数値は真のせん断

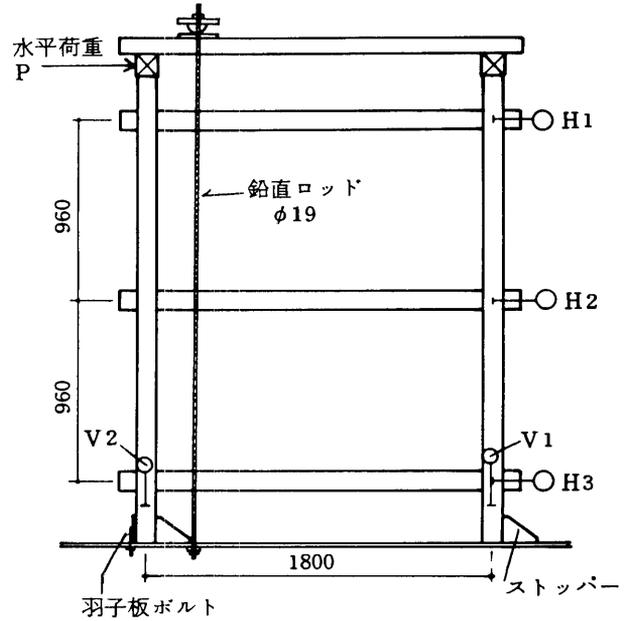


図-12 一方方向繰り返し加力による軸組のせん断試験方法

表-3 特定の真のせん断変形角 γ_0 に対する軸組のせん断耐力 (実験値)

(単位: kg)

試験体 (くさびの 種類)	1/300 (rad)	1/120 (rad)	1/60 (rad)
ヒノキ	47	103	158
ケヤキ	52	113	184
プラスチック	52	121	164

変形角 γ_0 が1/300, 1/120, 1/60rad 時の軸組に加わっている水平荷重 (単位: kg) を示している。軸組は柱心々寸法1800mmのもので、柱とぬきの接合部に用いたくさびの種類を変えた3種類の軸組の結果である。

2. 接合部の強度性状と軸組の水平耐力の関係

柱とぬきの接合部に関する強度性状は表-1に、柱と桁の接合部については表-2に示されている。表-1および表-2中の数値はモーメント (単位: kg·m) で表わされているので、前者を M_A 、後者を M_B と呼ぶと、軸組全体のせん断耐力 P_{cal} は次式で表わすことができる。

$$P_{cal} = \frac{6M_A + 2M_B}{h}$$

ここに、 h は柱の下端から水平荷重の作用点までの距離で、本実験では $h=2.55$ (m) であった。3種類のくさび (H, K, P) のそれぞれの結果を表-4に示す。表-4中には表-3の実験値との比 R も合わせて示している。

表-4を眺めると、プラスチックくさびの1/60 (rad)

表-4 接合部の強度性状と軸組のせん断耐力の推定

くさびの種類		1/300	1/120	1/60
		(rad)	(rad)	(rad)
ヒノキ (H)	M _A (kgm)	15.9	35.8	53.6
	M _B (kgm)	0.9	3.7	11.2
	P cal (kg)	38	87	135
	R	0.81	0.84	0.85
ケヤキ (K)	M _A (kgm)	16.1	38.1	64.3
	M _B (kgm)	0.9	3.7	11.2
	P cal (kg)	39	93	160
	R	0.75	0.82	0.87
プラスチック (P)	M _A (kgm)	17.3	41.1	72.1
	M _B (kgm)	0.9	3.7	11.2
	P cal	41	100	178
	R	0.79	0.83	1.09

$$R = P cal / \text{実験値}$$

時を除いて軸組のせん断耐力の推定値は実験値を下廻っている。 $\gamma_0=1/120$ (rad) 時についてみると、推定値は実験値の82~84%を示し、くさびの種類によらず比Rはほぼ一定と見なし得よう。推定値と実験値の差については軸組全体のせん断実験時に、接合部以外の拘束力が軸組に働いていること、あるいは柱とぬきの接合部についてみると、軸組ではぬきの両端が柱と接合されており、ぬき自体の曲げ変形の違いが影響している点等が考えられる。特に、前節で述べたように軸組を壁としてせん断実験する際には柱脚部を拘束しており、主としてその影響が推定値と実験値の間に10数%の差を生じたものと思われる。

しかし、接合部単独の実験から軸組全体の耐力の傾向を推定することは可能と言えよう。本実験ではくさびの種類を変えて軸組の耐力を比較したが、ヒノキ、ケヤキ、プラスチックのくさびの差は接合部単独の実験結果の傾向と一致している点は注目に値する。

3. まとめ

IIでは柱とぬきの接合部について、くさびの材質および形状を変えて接合部のみの部分実験を詳細に検討したが、その一部の仕様について軸組壁のせん断実験結果と比較した結果、接合部の部分実験によって、軸組のせん断耐力の傾向を知ることが可能であることが明らかになった。実大の壁での実験に替えて、接合部のみの部分実験で構造耐力を推定することは必ずしもできないが、実大実験に供する仕様を決定するための予備実験としては部分実験の果たし得る役割は大きいと言えよう。また、多数回の繰返し試験等について部分実験から得られた実

験的傾向は貴重であり、ぬき構造の構造耐力の信頼性を検討する上での参考となろう。

文献

- 1) 伊藤延男, 西浦忠輝, 安藤直人: 住宅建築研究所報 No. 11 pp43~53, (1984)

〈研究組織〉

主 査 伊藤延男 東京国立文化財研究所 所長
西浦忠輝 同, 修復技術部 主任研究官
安藤直人 東京大学農学部林産学科助手