

在来軸組構法におけるせん断パネルと軸材間の挙動

井戸田秀樹, 加藤 征宏*

社会開発工学科

(1998年9月4日受理)

Behavior between shearing panel and frame on conventional post and beam structures

Hideki IDOTA, Masahiro KATO*

Department of Architecture and Civil Engineering

(Received September 4, 1998)

The purpose of this paper is to investigate the shearing properties between roof panel and purlin on conventional post and beam structures. The modelled parts for the test are Roof panel - Purlin and Roof Panel - External wall. The test parameters are existence of the cleat, sectional size of rafter, and kind of wood. Static repeated loads are applied between the roof panel and purlin. Based on the test results, elasto-plastic bi-linear load-deformation relationships are presented for analytical models. Furthermore, the behavior between shearing panel and frame is discussed based on simple mechanical models considering rotation of rafters and pull-out of nails.

1. 序論

在来軸組構法に基づく木造骨組は、一般的に耐力壁や屋根面等のせん断要素を各軸材が結びつける形で全体として安定した構造体を構成している。したがって、各せん断要素や、軸材どうしの接合部についての力学的な挙動を把握することは、木質構造物全体の特性を評価する上で不可欠である。こうした背景から、せん断要素のせん断実験、あるいは接合部の耐荷力試験などは比較的多く実施され、実験的なデータもかなり系統的に整理されてきている¹⁾。

一方、せん断要素と軸材間の関係をみると、耐力壁と柱あるいは梁のようにせん断要素の面内に軸材が接合されているものだけではなく、たとえば屋根面と小屋組を構成する母屋の関係、あるいは床面と大引きの関係のように、各せん断要素は面内に存在しない軸材からも応力

を受ける。したがって、構造物全体の力学的な解析モデルを構築するためには、これらの間の力学的な関係を適切に評価する必要がある。

そこで本論文では、屋根部を想定したせん断パネルと軸材間のせん断実験を行い、その挙動について考察を行う。また、接合要素である釘のせん断および引き抜きの力学モデルを提示し、これを用いてせん断パネルと軸材間の挙動を力学的に説明する。

2. 試験体概要および実験方法

2-1 実験の基本概要

屋根面に作用する水平力は、垂木など屋根面を支える部材を介して小屋組や鉛直構面等の軸材に伝達される。特に、屋根面上の質点が地震等によって桁行方向の慣性力を受けた場合、屋根面と軸材間に垂木の倒れによる破壊モードが存在し、構造体全体の特性はこの挙動を考慮した上で評価する必要がある。そこで、屋根部試験体は

*愛知産業大学造形学部建築学科教授

Table 1 List of Specimens

Modelled Part	Specimen No.	Section of Purlin	Section of Rafter	Existence of Cleat	Section of Cleat	Kind of Woods	Number of Specimens
Roof Panel - Purlin (Rolling of Rafter)	RR45-0-s	115×180 (mm)	45×45 (mm)	×	-	Sugi	1 for Monotonic Loading 3 for Repeated Loading
	RR45-0-d			-	Douglas fir		
	RR45-1-s			○	45×30(mm)	Sugi	
	RR36-0-s		36×75 (mm)	×	-	Sugi	
	RR36-0-d			-	Douglas fir		
	RR36-1-s			○	30×45(mm)	Sugi	
Roof Panel - Purlin (Shearing deformation of Purlin)	RS45-0-s	115×180 (mm)	45×45 (mm)	×	-	Sugi	1 for Monotonic Loading 3 for Repeated Loading
	RS45-0-d			-	Douglas fir		
	RS45-1-s			○	45×30(mm)	Sugi	
	RS36-0-s		36×75 (mm)	×	-	Sugi	
	RS36-0-d			-	Douglas fir		
	RS36-1-s			○	30×45(mm)	Sugi	
Roof Panel of the First Floor - External Wall of the Second Floor (Rolling of Rafter)	L45-0-s	105×105 (mm)	45×45 (mm)	×	-	Sugi	1 for Monotonic Loading 3 for Repeated Loading
	L45-1-d			○	15×40(mm)	Douglas fir	
	L45-1-s			-	15×40(mm)	Sugi	
	L36-0-s		36×75 (mm)	×	-	Sugi	
	L36-1-d			○	15×75(mm)	Douglas fir	
	L36-1-s			-	15×75(mm)	Sugi	

屋根面のせん断要素と小屋組等の軸材との間の挙動を考察できるように設計する。また、軸材で構成された構面が外力によってせん断変形をする場合、野地板に固定された垂木はねじれ変形を生じ、前述の倒れによる破壊とは異なった破壊モードが存在する。したがって、こうした垂木のねじれのモードも考察できるような載荷も行おう。

ところで、屋根面上の質点が地震等によって桁行方向の慣性力を受けた場合、屋根面と同様に、下屋面にも屋根面と軸材間の垂木の倒れによる破壊モードが存在する。下屋は垂木の片側が2階外壁内の柱に取り付けられた垂木受けに接合されているため、屋根面とは異なった実験モデルが必要となる。

2-2 試験体概要

試験体一覧を Table 1 に示す。いずれの試験体も実大モデルであり、在来の軸組構法として最も一般的に使われるディテールを考慮して設計した。以下に、各試験体の概要を述べる。

i) 屋根 (RR, RSシリーズ試験体)

1 スパン分の母屋、4 スパン分の垂木および野地板を試験体としてモデル化した。試験体の概要を Fig. 1 に示す。パラメータとしたのは垂木断面形状、転び止めの有無、および樹種である。各部材の接合には全て釘を用い、断面45×45mmの垂木はN90釘脳天打ち、36×75mmの垂木および転び止めはN75釘斜め打ちで母屋と接合した。RRシリーズは屋根面上質量の慣性力を想定した垂木回転形の載荷試験体、RSシリーズは軸材構面のせん断変形を想定した垂木ねじれ形の載荷試験体であ

り、試験体形状は全く同一である。

ii) 下屋 (Lシリーズ試験体)

下屋についても屋根同様一般的な在来軸組構法を想定し、2階の柱4スパン分を垂木、垂木受け、野地板とともにモデル化した。試験体の概要を Fig. 2 に示す。各部材の接合には全て釘を用い、断面45×45mmの垂木はN90釘脳天打ち、36×75mmの垂木はN75釘両側斜め打ちで垂木受けと接合した。また、転び止めはN75釘2本で垂木受けに斜め打ちとした。ただし、桁行き方向の挙動をねじれを伴わずに考慮するため、2階外壁との接合部部分を垂木の両側に設け、対称な形の載荷が可能のように工夫した。

2-3 載荷方法

屋根面と軸材間の挙動に関しては、2-1で述べたように屋根上の質量の慣性力を想定した場合と、軸材構面のせん断変形を想定した場合が考えられる。そこで、Fig. 3 に示すように2種類の載荷を行った。

屋根面上質量の慣性力を想定した載荷では、母屋2本を固定し、野地板に取り付けた加力芯を水平方向に加力することで屋根面と母屋間にせん断力を作用させた(RRシリーズ)。変位については、屋根面と母屋間の水平相対変位、および垂木の回転角を測定した。

軸材構面のせん断変形を想定した場合には、片側の母屋を固定し、他方の母屋に軸方向に載荷することで2本の母屋に軸方向の相対変位を与え、これによって生ずるせん断力を屋根面のせん断要素が負担する形の載荷を行った(RSシリーズ)。試験体設置時に、上側になる母屋に

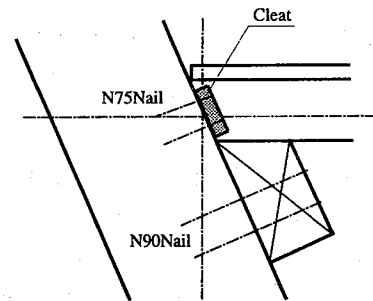
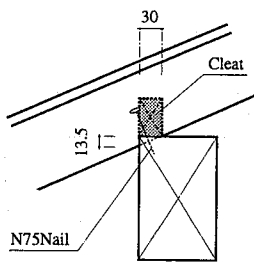
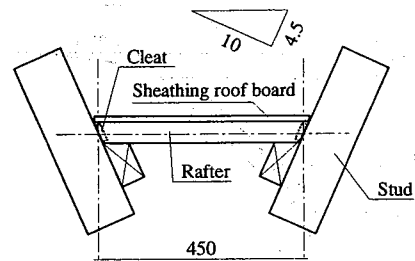
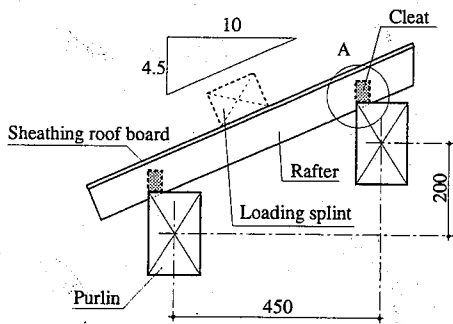
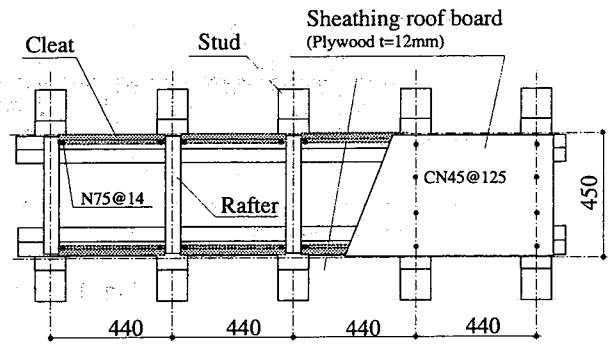
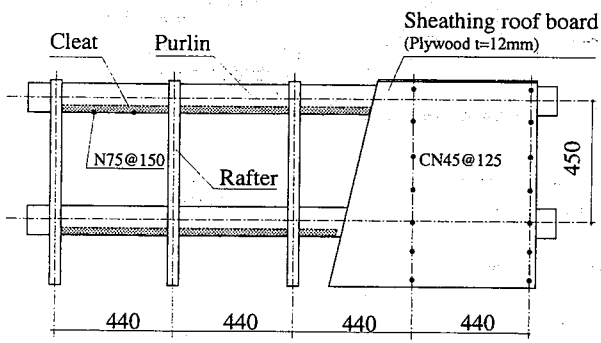
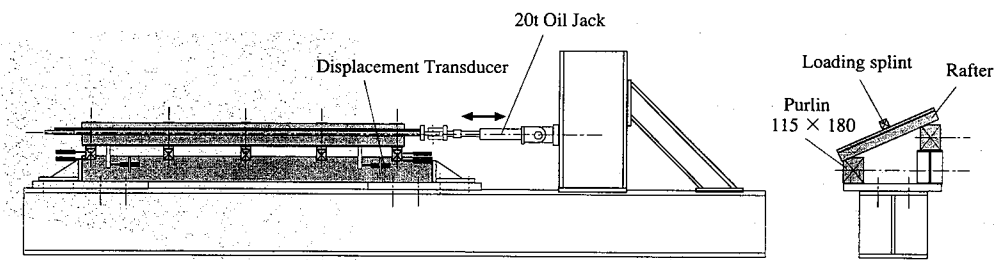
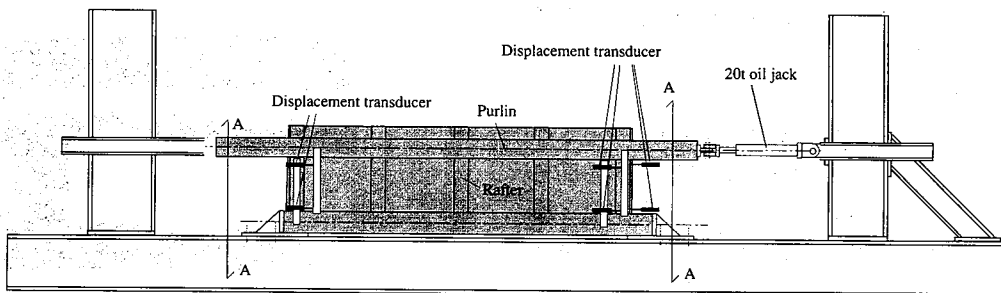


Fig. 1 Details of Test Specimen (RR, RS type)

Fig. 2 Details of Test Specimen (L type)



(a) RR series



(b) RS series

Fig. 3 Test Setup

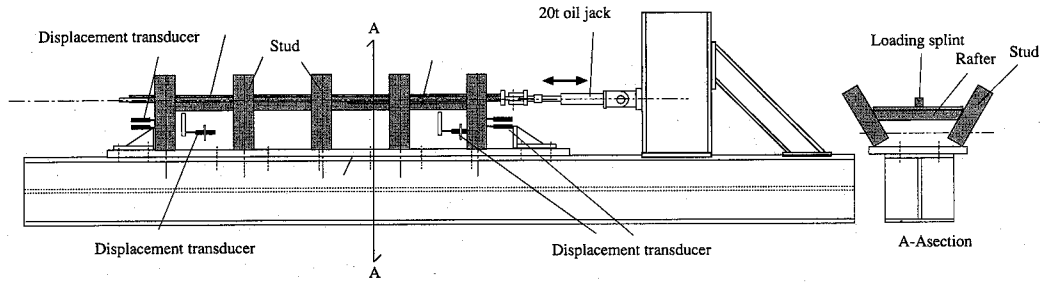


Fig. 4 Test Setup (L series)

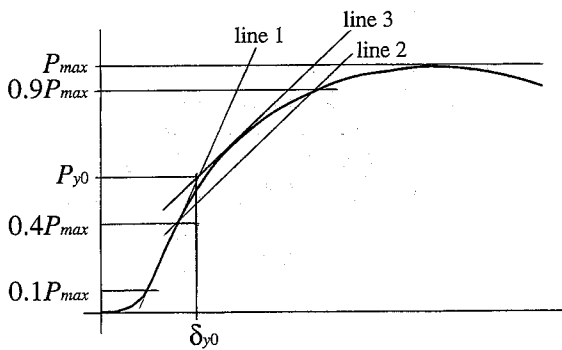


Fig. 5 Target yield displacement δ_{y0}

は面外変位を拘束する振れ止めを設け、2本の母屋が常に同一面内にあるようにした。変位は母屋の相対変位および垂木の材長方向のねじりを対象に測定した。

下屋については屋根面上質量の慣性力を想定した荷重のみを行った (Fig. 4)。

繰り返し荷重は、予備試験体から求めた目標降伏変位 δ_{y0} に基づいてプログラムした。 δ_{y0} は下記の方法で求めた (Fig. 5 参照)。

- 1) 単調荷重の荷重変形曲線上において $0.1 P_{max}$ と $0.4 P_{max}$ を通る直線を引く (第1直線)。
- 2) 単調荷重の荷重変形曲線上において $0.4 P_{max}$ と $0.9 P_{max}$ を通る直線を引く (第2直線)。
- 3) 第2直線を平行移動し、荷重変形曲線に接するところを第3直線とする。
- 4) 第1直線と第3直線の交点の荷重を P_{y0} とし、荷重変形曲線における P_{y0} のときの変位を δ_{y0} とする。

こうして求められた目標降伏点変位 δ_{y0} に対し、変位振幅が $1/4, 1/2, 1, 2, 2 \dots$ 倍と等比間隔になるように設定し、1サイクル内の最大荷重が経験最大荷重の80%を下回った段階、あるいはRR, Lタイプでは屋根面と母屋の相対変位が30mmを越えた段階、RSタイプ試験体では軸組構面のせん断変形角が $1/30$ を越えるサイクルを終えた時点で荷重を終了した。

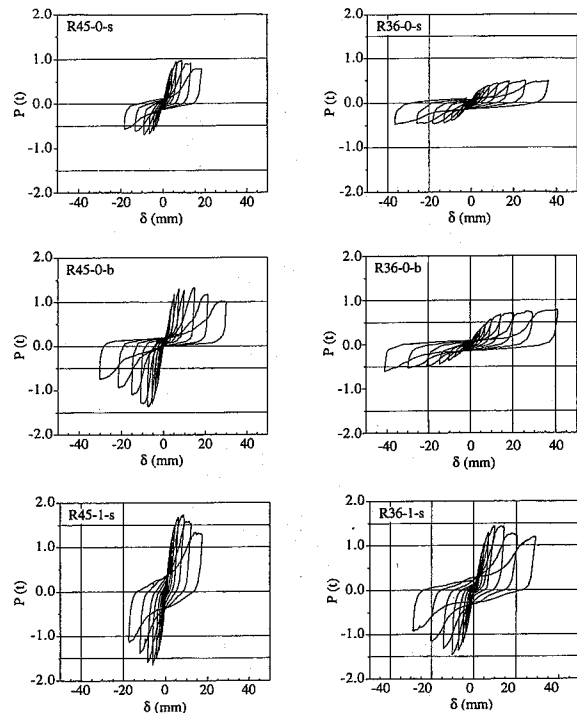
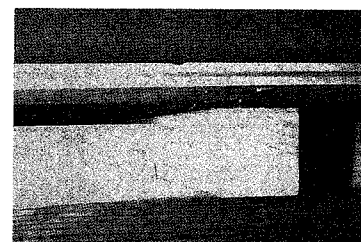


Fig. 6 P - δ curves (RR series)



(a) RR36-0-d



(b) RR45-1-s

Fig. 7 Failure conditions (RR series)

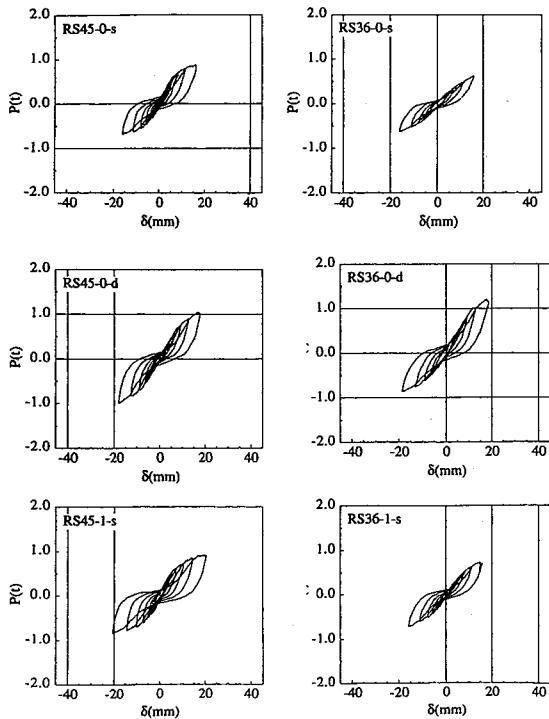


Fig. 8 P-δ curves (RS series)

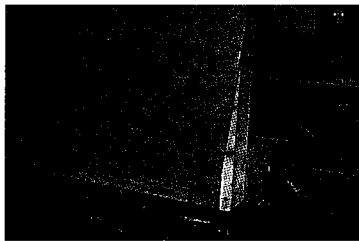


Fig. 9 Failure conditions (RS series)

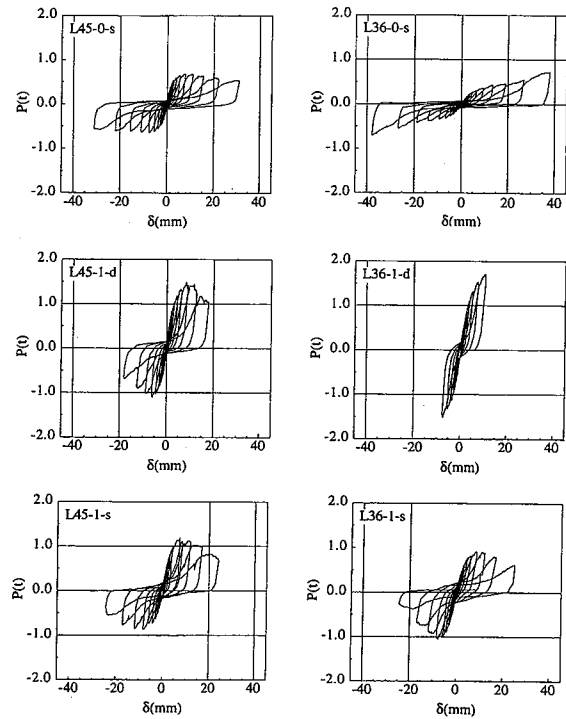


Fig. 10 P-δ curves (L series)



Fig. 11 Failure conditions (L series)

3. 実験結果および考察

3-1 屋根 (RR, RSシリーズ)

Fig. 6 ~ Fig. 9 に各試験体における代表的な荷重変形関係および最終破壊状況の写真を示す。

RRシリーズ試験体では、転び止めの無い試験体では、垂木の回転移動に伴い生ずる釘の引き抜けによって破壊が生じ (Fig. 7(a)), 転び止めを付けた試験体では垂木の回転移動が拘束されているため、垂木と屋根面材間の釘の一面せん断による釘の引き抜けで耐力が決定された (Fig. 7(b))。転び止めの無い試験体はいずれも大きなスリップ性状を示し、早い段階から剛性の低下が顕著であった。また、垂木せいの高いRR36シリーズでは母屋と屋根面の相対変位が30mmを越えても耐力低下が認められなかった。

RSシリーズ試験体では、転び止めの有無と垂木せいによる顕著な差異はほとんど見られず、どの試験体もかなり近い形状の荷重変形関係となった。これは、破壊形式がいずれの試験体も野地板に打たれたくぎの一面せん

Table 2 Percentage of water content and specific gravity

	Purlin		Rafters		Cleat	
	Percentage of water content	Specific gravity	Percentage of water content	Specific gravity	Percentage of water content	Specific gravity
RR45-0-s	17.50	0.39	10.50	0.43	-	-
RR45-0-d	17.50	0.39	10.50	0.43	-	-
RR45-1-s	20.50	0.39	10.30	0.45	10.25	0.45
RR36-0-s	12.75	0.42	9.50	0.45	-	-
RR36-0-d	20.50	0.60	11.80	0.55	-	-
RR36-1-s	23.00	0.44	14.00	0.42	10.88	0.40
RS45-0-s	24.63	0.45	9.60	0.44	-	-
RS45-0-d	14.31	0.49	6.33	0.47	-	-
RS45-1-s	24.44	0.48	12.58	0.45	10.08	0.41
RS36-0-s	21.69	0.46	14.33	0.42	-	-
RS36-0-d	15.17	0.62	11.73	0.44	-	-
RS36-1-s	25.25	0.50	15.60	0.42	10.28	0.37
L45-0-s	16.13	0.38	10.48	0.44	-	-
L45-1-d	18.00	0.46	9.10	0.49	8.73	0.50
L45-1-s	17.00	0.36	11.90	0.43	13.03	0.41
L36-0-s	17.00	0.37	15.73	0.38	-	-
L36-1-d	13.50	0.43	16.13	0.50	10.80	0.43
L36-1-s	16.17	0.37	16.47	0.39	11.65	0.36

断による引き抜けによるためである。

3-2 下屋 (Lシリーズ)

Fig. 10~11にLシリーズ試験体の荷重変形関係およ

Table 3 Parameters of perfect elasto-plastic models

	$P_{max}(t)$	$P_y(t)$	$\delta y(mm)$	$K(t/mm)$	$P_u(t)$	$\delta u(mm)$	$\delta v(mm)$	$\delta u/\delta v$
RR45-0-s	0.86	0.49	1.95	0.28	0.78	21.89	3.01	7.71
RR45-0-d	1.27	0.72	2.95	0.25	1.16	21.73	4.73	4.59
RR45-1-s	1.72	1.04	2.18	0.50	1.58	16.72	3.26	5.20
RR36-0-s	0.47	0.27	4.14	0.07	0.44	40.39	6.82	5.98
RR36-0-d	0.68	0.44	6.77	0.07	0.64	40.29	9.81	4.44
RR36-1-s	1.49	0.85	3.77	0.23	1.36	26.11	5.99	4.36
RS45-0-s	0.79	0.45	4.47	0.10	0.70	15.85	6.94	2.28
RS45-0-d	1.03	0.52	6.30	0.08	0.91	17.63	11.08	1.60
RS45-1-s	0.92	0.49	4.41	0.11	0.83	20.53	7.45	2.77
RS36-0-s	0.71	0.35	5.38	0.06	0.61	16.16	9.40	1.75
RS36-0-d	1.03	0.54	6.47	0.08	0.89	18.69	10.69	1.75
RS36-1-s	0.79	0.39	4.70	0.08	0.68	15.96	8.09	1.97
L45-0-s	0.67	0.41	1.77	0.23	0.67	31.00	2.88	10.89
L45-1-d	1.36	0.74	1.91	0.39	1.25	17.88	3.22	5.55
L45-1-s	1.06	0.56	1.81	0.31	0.98	16.92	3.15	5.39
L36-0-s	0.62	0.30	6.43	0.05	0.47	37.14	10.10	3.73
L36-1-d	1.56	0.86	2.71	0.32	1.40	13.28	4.38	3.07
L36-1-s	1.03	0.54	2.19	0.24	0.93	16.88	3.81	4.41

び最終破壊状況の写真を示す。軸材と屋根面の力学的関係は屋根と同様であるため、転び止めのない試験体では垂木の回転に伴う釘の引き抜いで、転び止めのある試験体では釘の一面せん断による引き抜いで最大耐力が決定されている。ただし、転び止めのない試験体では垂木せいによる影響は屋根ほど顕著ではなかった。また、転び止め寸法の差から、L36-1試験体では繰り返し加力後も高い剛性が確認された。

なお、各試験体の比重および含水率は Table 2 に示すとおりである。

4. 実験に基づく弾塑性解析モデルの提示

在来軸組構造の構造解析を行うには、実験で観測された部材の挙動を表現する荷重-変位関係の解析モデルが必要となる。そこで、簡便な数値解析を想定し、本実験結果に基づいた屋根面材と軸材間の完全弾塑性モデルの提示を行う。

4-1 完全弾塑性モデル置換法

Fig. 12 に示すように、繰り返し載荷実験結果から荷重-変形曲線の包絡線を作成し、単調載荷実験から目標降伏点を求めたのと同じ方法で点 (δ_y, P_y) を求め、この点と原点を結ぶ直線を初期剛性 K とする。また、 K の線分と X 軸と終局変位 δ_u ($0.8P_{max}$ まで耐力が低下した時点での変位、または最終載荷ループでの経験最大変位) 時の線分および仮想降伏点荷重 P_u で囲まれた面積が、包絡線と X 軸と δ_u の線分に囲まれた面積と同じになるように P_u を設定した。

4-2 完全弾塑性モデルの考察

実験から得られた完全弾塑性解析モデルの各パラメー

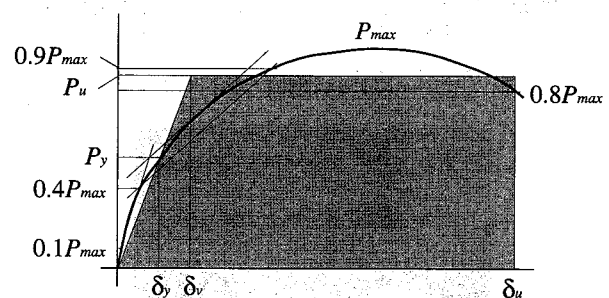


Fig. 12 Elasto-plastic Models

タを Table 3 に示す。

i) 屋根

RRシリーズの耐力に関しては転び止めの効果が大きく現れており、すぎどうしで比較すると P_{max} 、 P_y 、 P_u ともにRR45で約2倍、RR36で約3倍の耐力上昇が確認できた。また、垂木せいによる影響も大きく、転倒モーメントの大きいRR45の方が約2倍高い耐力を示した。なお、樹種ごとの比較では、全体的にすぎよりもべいまつの方が高い値を示した。初期剛性に関しては転び止めの影響は非常に大きく、RR45で約2倍、垂木せいの高いRR36では3倍の上昇が見られた。一方、変形に関しては δ_y 、 δ_u 、 δ_v に関しては垂木せいの高いRR36シリーズが全般的に大きくなっているが、塑性率 δ_u/d_u では、転び止めの有無や垂木せいによる有意な傾向は見られなかった。

RSシリーズ試験体の耐力・剛性・変形量に関してはRRシリーズで見られたような転び止めの有無や垂木せいの影響はほとんど見られず、樹種による最大耐力の差のみがRS45、RS36シリーズに共通の傾向として確認された。

ii) 下屋

荷重変形関係の考察で述べたとおり、下屋の破壊性状は基本的に屋根のRRシリーズと同様であるため、各実験パラメータの影響もRRシリーズとほぼ同様の傾向が見られた。 P_{max} , P_y , P_u に関しては、L45, L36シリーズともに転び止めによる上昇が約1.5倍、樹種による差もほぼ1.5倍となっている。

5. 垂木の回転を考慮した解析モデル

転び止めのある試験体やRSシリーズの試験体は基本的に破壊性状が釘の一面せん断に伴う引き抜けのため、釘の一面せん断挙動でせん断パネルと軸材間の挙動も概ね説明できる。しかし、転び止めのない部材では垂木の回転と、それに伴う釘の引き抜けが同時に発生するため、この2つの挙動を考え合わせる必要がある。

せん断パネルと軸材間に作用したせん断力 P によって垂木が θ 回転した状態を考えると、垂木の回転モーメントに関して次のつり合い式が成立する (Fig. 13参照)。

$$P \sin \theta' \cdot \sqrt{b^2 + h^2} = (T_1 + T_2) \cdot \frac{b}{2} \quad (\theta' < 90^\circ) \quad (1)$$

$$P \sin \theta = \min(T_1, T_2) \quad (\theta' > 90^\circ)$$

ここに

- b : 垂木幅
- h : 垂木せい
- θ' : 垂木の対角線と屋根面のなす角度
- T_1 : 垂木上面に打たれた釘の引き抜き力
- T_2 : 垂木下面に打たれた釘の引き抜き力

である。釘の引き抜きに対する抵抗力については、釘が木材と接する面積にほぼ比例することが報告されており²⁾、これに基づき Fig. 14 に示すような荷重変形関係で T をモデル化する。図中 δ_y はくぎ接合部分の初期のがたを考慮した初期変形量、 L_n は釘の打ち込み長さである。 δ_y はCN45釘に対して 5 mm、CN90釘に対して 2 mmと設定した。釘の引き抜き長さ δ_n と、母屋に対する屋根面の相対変位 δ の間には変形の適合条件から

$$\delta_n = \sin^{-1} \frac{\delta \cdot b}{h} \quad (2)$$

の関係がある。(1)(2)式より得られる P と δ の関係を試験体 R45-0-b と R36-0-b について実験結果とともに示したものが Fig. 15 である。実験結果については、単調荷重と繰り返し荷重両方を併記した。R45-0-b に関しては初期剛性、最大耐力ともに単調荷重時の実験結果と解析結果は良い対応を示しており、垂木の回転とそれに伴う釘の引き抜けを考慮することで屋根面と軸材間のせん断挙動を概ね説明できる。また、R36-0-b に関しては、

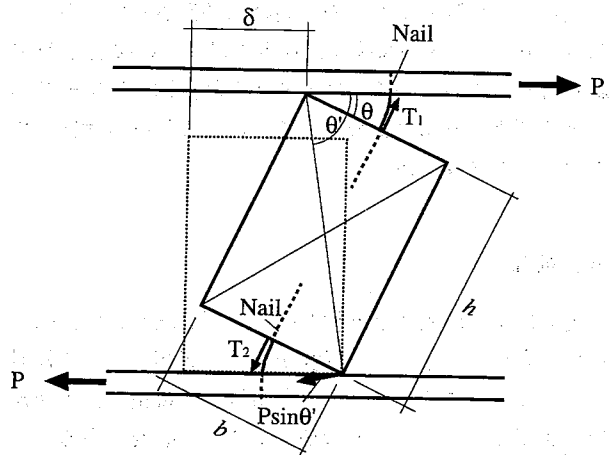


Fig. 13 Analytical model for rotation of rafter

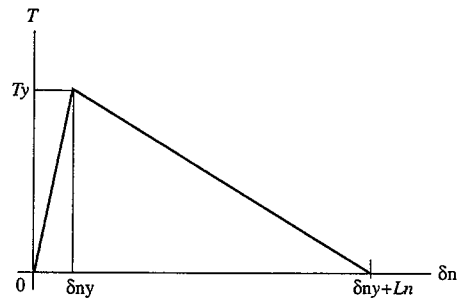
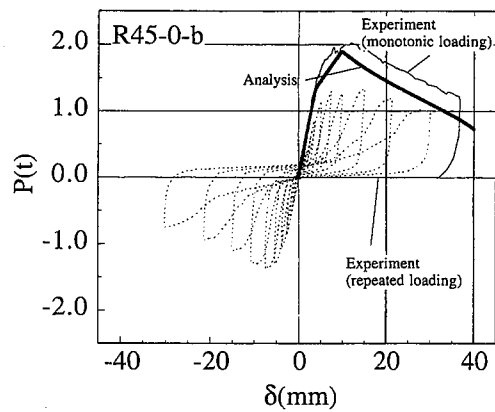
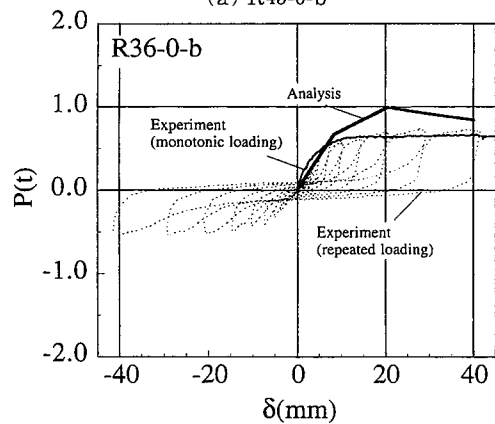


Fig. 14 Pull-out strength and displacement for nail



(a) R45-0-b



(b) R36-0-b

Fig. 15 Analytical and experimental results

最大耐力が実験値よりもやや高めに評価されている。これはR36シリーズの試験体は垂木の母屋への接合が釘の斜め打ちによっているためと考えられ、R36シリーズの結果を評価するには斜めうちされた釘の挙動も考慮したモデル化が必要である。

6. 結論

実験により屋根面と軸材間のせん断実験を行い、転び止めの有無、垂木寸法、樹種が及ぼす影響について検討した。今後、こうしたデータを系統的に蓄積し、木造建物の簡便な解析モデルを構築することが必要である。

謝 辞

本実験は、(財)日本住宅木材技術センター木質資材利用合理化委員会(委員長:稲山正弘氏)の活動の一環として行われたものである。実験計画にあたり各委員より意見を頂いた。また、実験の実施にあたっては名古屋工業大学社会開発工学科卒論生佐藤英二君、中坪克己君、愛知産業大学建築学科卒論生角三満君、田中博規君の協力を得た。ここに付して感謝いたします。

参考文献

- 1) 木質構造設計規準・同解説:日本建築学会, 1997年
- 2) 有馬孝礼:ボード類の釘接合耐力—はく離抵抗—, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.341-344, 1982