

両端にホゾ接合を持つ実大柱の座屈挙動

秦 正徳¹⁾, 中谷 浩²⁾

(平成11年10月15日受理)

要 旨

実際の住宅と同様に柱頭および柱脚にホゾ接合を施工した実大の木造柱に、鉛直荷重を作用させて座屈試験を実施したところ、つぎの結果が得られた。

- 1) 柱端部の横架材へのめり込みが大きい。
- 2) 端部のめり込みによって使用限界が定まる。
- 3) 座屈荷重はオイラーの式を適用して求めることができる。
- 4) 柱の座屈によって終局限界が定まる。
- 5) 座屈に対して接合の拘束効果は認められない。
- 6) 柱の有効座屈長さは桁の上部と土台の下部までの長さとして定めることができる。

キーワード

木造架構、柱、座屈、オイラーの座屈式、めり込み、実大試験

1 はじめに

木材の物性上の特異性として、鋼に比べて破壊歪みが小さいこと、異方性による横方向のめり込みが過大であること、鋼に比べてヤング率が小さいこと、などが挙げられる。木材が示すこれらの特異性は材料試験によって解明されているが、木造架構に反映されたとき架構がどのような力学的挙動を現すかは未知であることが多い。

現在、木造軸組架構の柱は両端をピンと仮定して座屈長さを定め、オイラーの式を用いて座屈荷重を決めている。しかしながら、先にも述べたように鋼材と荷重変形曲線を異に

する木材にもこのオイラーの式が適応できるのか、また、両端に木造仕口を有する柱の座屈長さはどれくらいに見積もれるかについて、柱頭を桁に柱脚を土台にホゾ接合により連結された実大の木造柱を座屈試験に供して検討を加えた。

また、北陸地方においては、大きな積雪荷重による鉛直荷重を受けた柱が座屈を起こす危険が高いと考えられる。二間続きの広い座敷を持つプランの柱をはじめ、ピロティーや雁木などの独立柱においてはこの被害が考えられる。このような状況下にある柱の安全性能を見積もれる構造評価方法が望まれる。

¹⁾ 総合基礎グループ、²⁾ 富山県林業技術センター

2 実験概要

図1の長柱圧縮試験装置を用いて実大柱に鉛直加重する座屈実験を行った。供試した実大柱は両端にホゾ接合を施した木造軸組の鉛直荷重支持架構の一部である。柱の断面は北陸地方の木造軸組架構を想定して、120mm正角とした。接合は、長ホゾ、短ホゾとし、長ホゾにおいては込み栓を取り付けたものとなし、3仕様である。

2.1 実験目的

両端にホゾ接合を持った木造実大柱に鉛直荷重を加えて座屈実験を実施することにより、次のことを明らかにする。

- ①オイラーの座屈式による座屈荷重算出の可否
- ②座屈長さに対する接合剛性の効果
- ③柱の有効座屈長さの算定

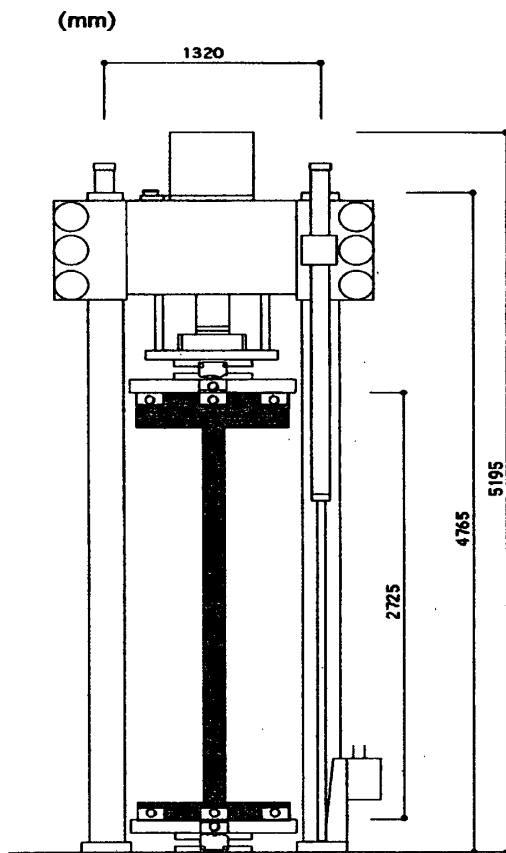


図1 試験装置外観

2.2 実験装置と測定方法

図1のような長柱圧縮試験装置を用いた。図中の網掛け部分は今回の実験に用いた試験体である。この試験体の加力はその上部にある油圧アクチュエータによって行われる。試験装置の概要は、

- 型式 サギノミヤ製作所
- 最大加力容量 200tonf
- 最大試験体長さ 4 m
- 試験体の最大幅 90cm

である。加力は、試験体上部に連結された油圧シリンダーの油圧源の圧力と油量をコンピュータで制御し、リアルタイムで変位と加重を表示しながら、加重速度5mm/minで最大荷重まで加力した。

図2に示すように、試験体に変位計を計11ヵ所、ひずみゲージを計12ヵ所取り付け、それぞれの変位・ひずみを測定した。測定した荷重、変位、ひずみは、東京測器研究所のデータロガーTDS-320を介して、パーソナルコンピュータNEC/RA250により一元的に収集される。

変位計は試験装置とは独立した支柱にマグネットスタンドを用いて図2に示す位置に取り付けた。これらの変位計によりそれぞれの位置の水平変位を測定した。用いた変位計は歪みゲージ式の高感度型変位計(DP200:東京測器研究所製)である。なお、柱の中央の横変位はワイヤー式変位計(東京測器研究所製)を用いて測定した。

これらの変位と同時に、ひずみゲージ(L-60-11:東京測器研究所製)を図3に示す位置に貼付し、軸歪みおよび曲げひずみを測定した。

2.3 試験体

試験体の形状は両端すなわち柱頭、柱脚に桁と土台を持つ長柱で、長さ(桁・土台を含む)3085mm、幅910mm、厚さ120mmである。試験体の種類は両端のほぞの形状および仕様

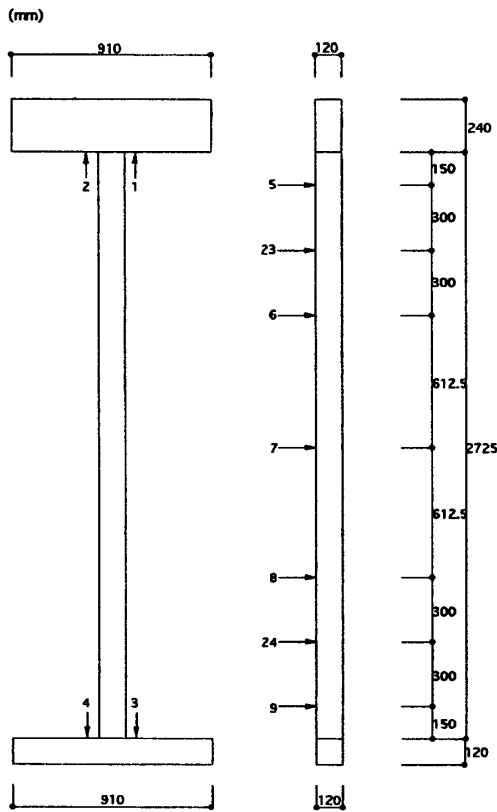


図2 変位計の取り付け位置

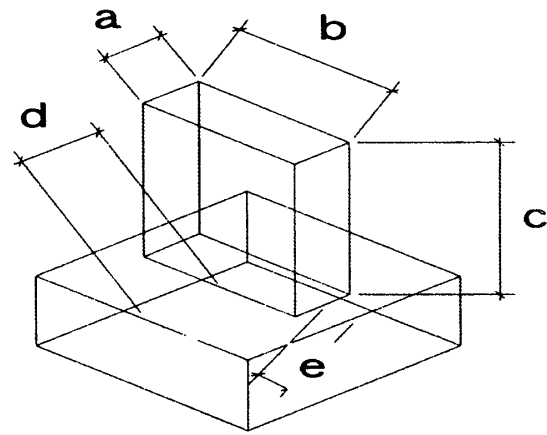


図4 ホゾの形状

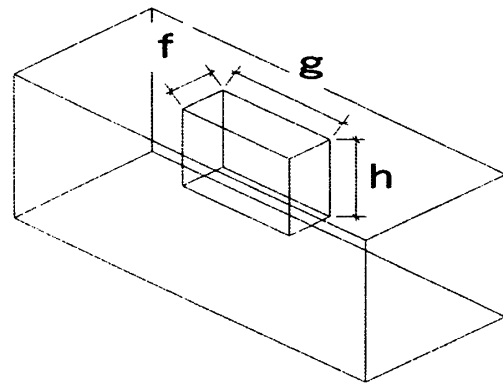


図5 ホゾ穴の形状

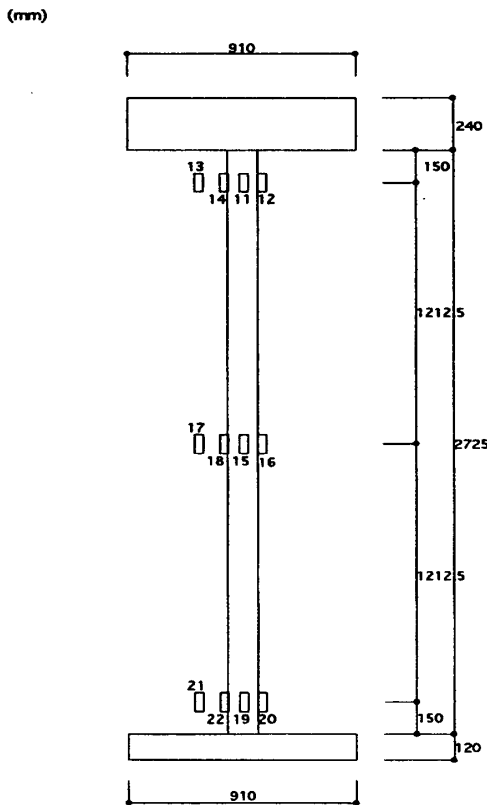


図3 歪みゲージの位置

によりつぎの3種類とした。

両端が長ほぞで込み栓を施した試験体L，長ほぞで込み栓のない試験体S，短ほぞの試験体Pである。これらのほぞおよびほぞ穴の形状と寸法をそれぞれ図4，図5，表1に示した。なお，ホゾ加工はL，S試験体は手加工，P試験体はプレカットによる。また，L試験体に用いた込み栓はケヤキ材で12mm角である。

部材の樹種は，柱：スギ，桁：ベイマツ，土台：カラマツである。いずれの試験体も，柱の断面寸法は120mm正角，桁のせい240mm幅120mmである。土台については，試験体LおよびSが高さ120mm，Pが100mmであり，幅はいずれも120mmである。各部材の含水率を高周波型含水率計（ケット株式会社製）により測定したところ，平均値

試験体		ほぞ					ほぞ穴		
		a	b	c	d	e	f	g	h
柱頭	L・S	30.82	90.82	108.2	45.02	14.58	30.24	90.68	109.2
	P	30.77	85.19	60.19	45.40	18.28	29.84	83.68	72.32
柱脚	L・S	29.21	89.67	92.79	44.55	15.65	31.66	89.74	93.82
	P	30.69	84.82	45.28	45.27	18.11	29.52	84.49	71.88

表1 ほぞ,ほぞ穴の寸法(図4,5参照)

は,試験体Lの柱27%桁31%土台41%,試験体Sの柱29%桁35%土台38%,試験体Pの柱20%桁28%土台81%であった。

表2に示した柱のヤング係数Eは,試験を実施する前にあらかじめ4点荷重曲げ試験により求めた値である。試験体L, Sに用いたスギ材とP試験体に用いたそれとは産地が異なるため,ヤング係数に差が見られる。

3 実験結果と考察

試験体の破壊状況は図6, 7, 8のとおりである。柱は図6にあるように湾曲して,座屈による破壊を示している。座屈の方向(湾曲する凸の方向)は特定されていない。L, S試験体においては面外が多く, P試験体においては面内が多く見られた。荷重の初期においては左右に振れることが多かった。

また,図7, 8には,柱が座屈するとともに生じる桁および土台の部分圧縮によるめり込みが看取される。めり込みは相当に大きく桁および土台の端から割裂が進展している。この割裂はすべての試験体の桁及び土台に見られた。その後,柱の座屈が進み終局をむかえるが,この過程の最大荷重を座屈荷重とした。

3.1 座屈挙動

柱のたわみを図9, 11, 13に,柱が湾曲する過程を鉛直加重ごとに示した。これらの図により柱が両端の接合を支点として座屈していることがわかる。柱頭の横変位は,桁を取

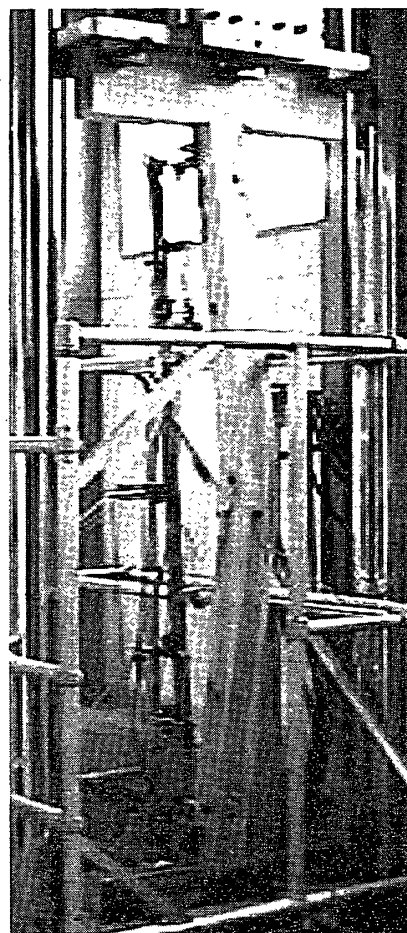


図6 柱の座屈

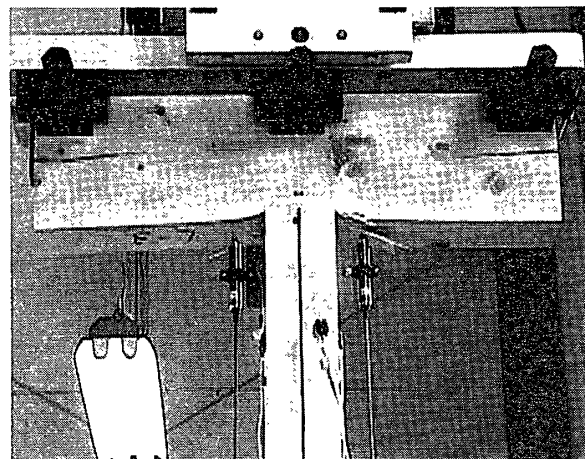


図7 桁のめり込み

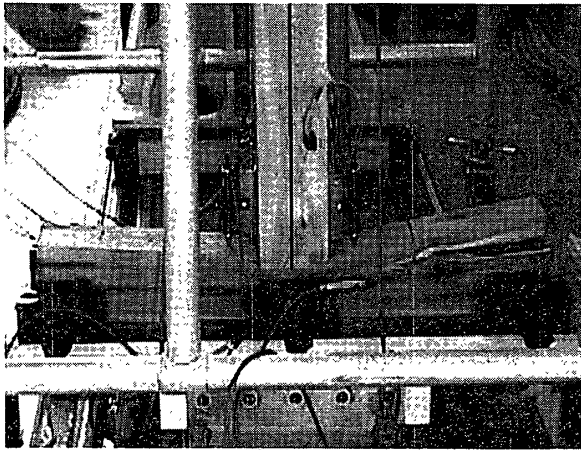


図8 土台のめり込み

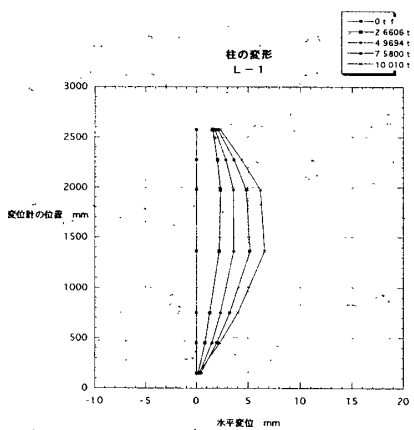


図9 柱の変形 (L-1)

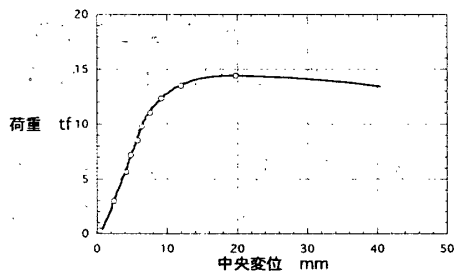


図10 荷重と中央水平変位 (L-1)

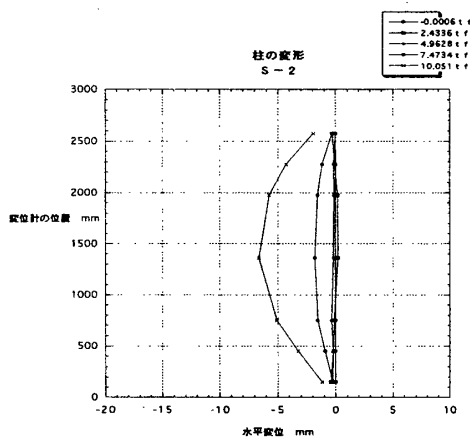


図11 柱の変形 (S-2)

り付けるクランプが桁のせいにして短いで、桁が柱の湾曲に伴って面外に転んだことによると考えられる。試験体の取り付け方法の改善が望まれよう。この転びを考慮すると、図11, 12には、鉛直荷重に伴って中央変位が増加し最大荷重付近で変形が急激に進んでいる典型的な座屈挙動が見られる。

柱の中央の横変位と鉛直荷重の関係を図10, 12, 14に示す。これらの図では、先に述べた桁の転びによる横変位が中央変位に加算されたことにより鉛直加重と中央変位の関係が座屈が生じる最大荷重付近の傾きが初期の傾きとは異なるのが見られる。

図10は長ホゾ込み栓入りの接合を持つ試験体 (L-1) の結果である。中央水平変位と鉛直荷重は直線的に最大荷重付近まであがっている。最大荷重付近で傾きに変化が現れるのは、柱中央部に塑性ヒンジが形成された可能性を示していると考えられる。後述する柱中央部の曲げひずみも非線形を示していることにも関連している。

図12は長ホゾ込み栓なしの接合を持つ試験体 (S-2) の結果である。初期において中央水平変位は、図11にも示されているように湾曲する方向が手前から後方へと変化している。その結果、初期の中央水平変位が小さくなっている。このような湾曲する方向が初期に定まらない試験体はその他にも見られ、接合部近傍の横架材の繊維走行とめり込みにより、柱の端部が不安定になるのではないかと考えられる。

図14は短ホゾ込み栓なしの接合を持つ試験体 (P-1) の試験結果である。この場合も初期の湾曲方向と最終的な座屈を起こした方向とは異なっている。図13によると柱頭ばかりでなく柱脚の水平変位も不安定となっている。柱のヤング係数が小さいので柱中央の水平変位も大きくなっている。

座屈荷重はこれらの図の最大荷重と定めた。柱の湾曲の過程 (図9, 11, 13) と考え

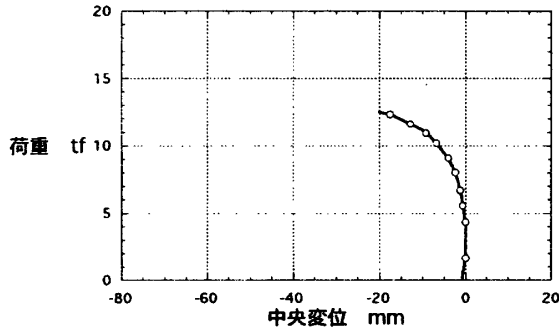


図12 荷重と柱の中央変位 (S-2)

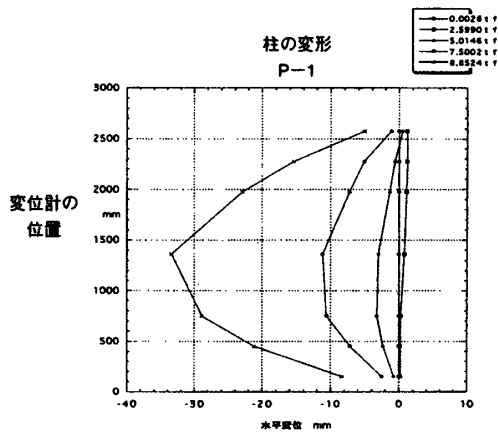


図13 柱の変形 (P-1)

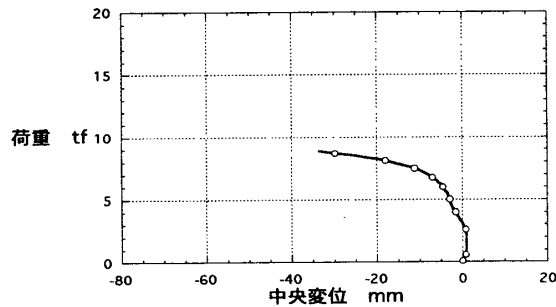


図14 荷重と柱の中央変位 (P-1)

あわせると、柱は両端ピンの座屈挙動を示していると思われる。実験により求めた座屈荷重は表2の最大荷重として示す。この値についてみると、込み栓がある長ほぞが込み栓のない長ほぞに比べて値が若干大きいが顕著な差は認められない。一方、長ほぞと短ほぞを比べると座屈荷重の値に明確な差を認めるこ

とができる。表2に示した座屈長さ係数に差がないことから、接合剛性による柱の両端の拘束条件の差はあまりないものと考えられる。長ほぞ (L, S) と短ほぞ (P) の柱のヤング係数に大きな差があるのでこの影響であろう。すなわち、今回の実験では座屈荷重に対するほぞの形状の影響は認められず、ヤング係数の影響が大きいと考えられる。

3. 2 柱中央のひずみ

図3に示した位置に貼付したひずみゲージの実験値を、軸力によるひずみと曲げによるひずみの値に、次の式を用いて分割する。

$$\epsilon_1 = -\epsilon_b + \epsilon_n$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_b + \epsilon_n$$

これらより、 ϵ_b および ϵ_n は次のようになる。

$$\epsilon_b = |-(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2|$$

$$\epsilon_n = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$$

ここに、

ϵ_1 : 圧縮側の実験値

ϵ_2 : 引張側の実験値

ϵ_b : 曲げによるひずみ

ϵ_n : 軸力によるひずみ

実大柱の座屈実験結果より、上述の計算で求めた柱中央のひずみと鉛直荷重の関係を図15, 16に示す。

これらの図によると、柱の軸力ひずみは、鉛直荷重の増加とともに、ほぼ直線的に増加して座屈荷重に至っている。曲げひずみにおいても、鉛直荷重とともに初期は直線的に増加しているが、軸歪みに比べると全体として非線形を呈している。この傾向は柱のヤング係数が小さい短ほぞ試験体に見られる。試験体の含水率が27~30%と高い値であることから、ヤング率の低いものは含水率が高く、柱材そのものが塑性変形をしていると考えられる。これらのことから、ヤング率の低い短ほぞの柱の曲げひずみにおいて非線形挙動が顕

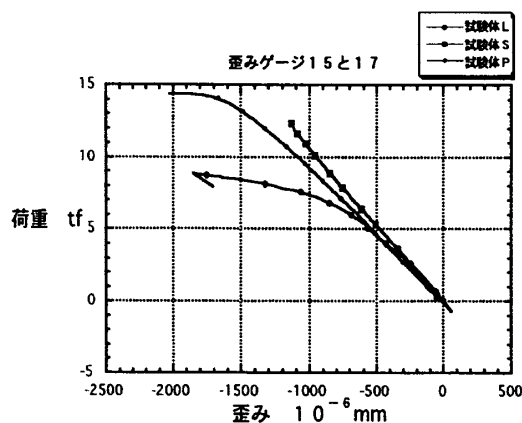


図15 柱中央の軸ひずみ

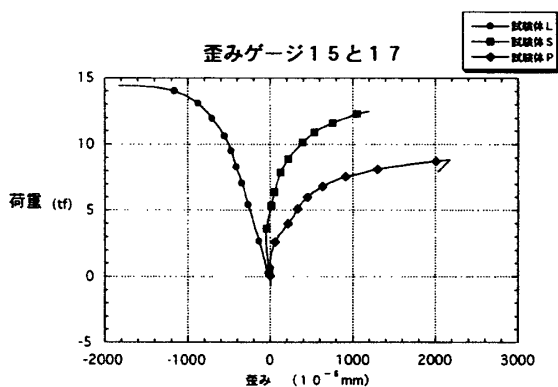


図16 柱中央の曲げひずみ

著に現れているといえよう。

図15の軸ひずみから柱のヤング係数を大まかに推定すると、

L試験体では、

$$E = 11 \text{ (軸力:tf)} / 144 \text{ (断面積:cm}^2\text{)} / 1000 \times 10^{-6} \approx 76 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$$

S試験体では、

$$E = 9.5 \text{ (軸力:tf)} / 144 \text{ (断面積:cm}^2\text{)} / 1000 \times 10^{-6} \approx 66 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$$

P試験体では、

$$E = 7.5 \text{ (軸力:tf)} / 144 \text{ (断面積:cm}^2\text{)} / 1000 \times 10^{-6} \approx 50 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$$

となり、実測したそれぞれの試験体のヤン

グ係数 75 tf/cm², 74 tf/cm², 57 tf/cm² に対応した値となっている。このことから座屈が部材の弾性範囲内で起こっている可能性が高いと考えられる。

また、試験終了後L, S, P試験体の柱から無欠点の小試験体(断面2×2 cm長さ、6 cm)を切り出して圧縮試験を実施して求めた比例限度の値と座屈荷重から求めた応力度の比は、表2に示すように、いずれの試験体においても0.4程度である。

これらのことを総合して、弾性の範囲内で定義されたオイラーの座屈式を適用してよいと考えられる。

3.3 柱頭, 柱脚のめり込み

接合部近傍のめり込みと鉛直荷重の関係を図17, 18, 19に示す。これらの図によると、土台のめり込み量は桁のそれよりも大きい。言い換えれば、桁の部分圧縮剛性の方が土台のそれより大きいといえる。桁はベイマツであり土台はカラマツであるので、樹種の異なるものと考えられる。さらに、それぞれの図の荷重とめり込み量の間を見ても、初期の勾配とその後の勾配が異なっている。初期の勾配はいずれもめり込み量として1~2 mm, 荷重として4~5 tf以下の範囲である。

この初期の傾きの上限を許容範囲(使用限界)と仮定すると、めり込み許容量は桁と土

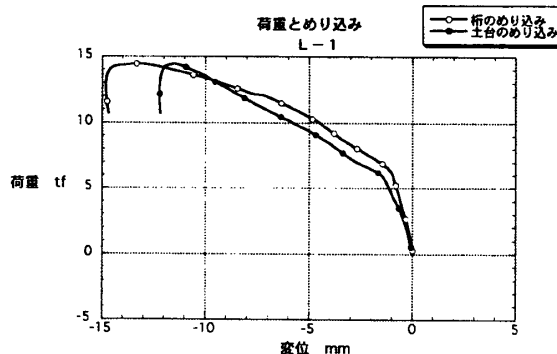


図17 長ホゾ込み栓あり(L-1)の荷重とめり込み

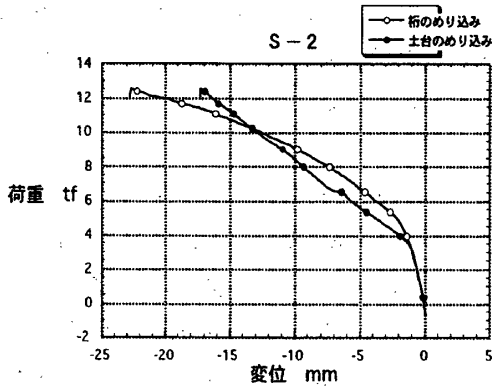


図18 長ホゾ込み栓なし (S-2) の荷重とめり込み

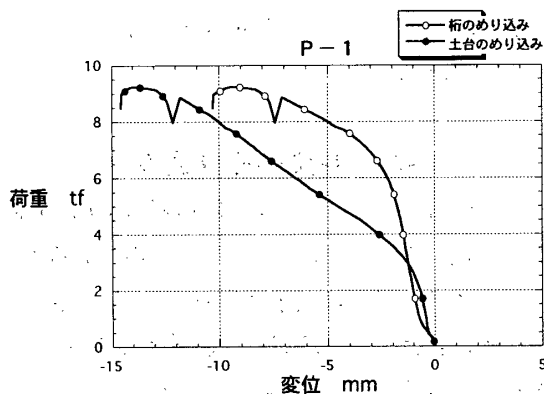


図19 長ホゾ込み栓あり (P-1) の荷重とめり込み

台のそれぞれを加算した 5 mm と考えられる。すなわち桁と土台の沈み量がこの値であるとき使用限界とすることができる。図17, 18, 19より桁と土台の沈み量の和がこの値と

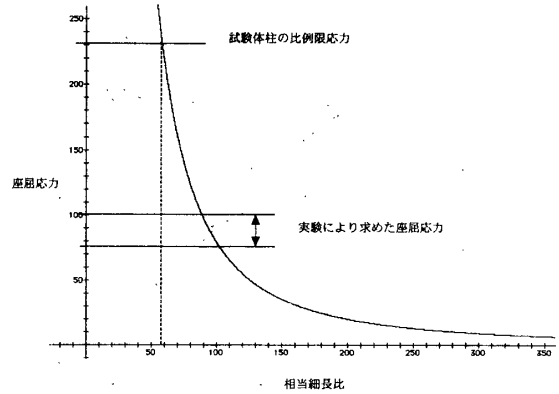


図20 オイラー曲線図

なる鉛直荷重の値を読みとると約 5 tf である。この値は表 2 の座屈荷重に比べてきわめて低い。したがって、使用限界は柱の端部のめり込みにより決定されるといえよう。

3. 4 有効座屈長さ と 接合部の拘束条件

さきの 3. 2 においてもオイラーの式(1)の適用について述べたが、図20に示すオイラー曲線における座屈応力と柱の比例限応力との関係からも、オイラーの座屈式の適用が可能なが判明する。図のオイラーの曲線はヤング係数 (E) を 80tf/cm²、柱の両端支持をピンとして描いている。すなわち、ここに示したオイラー曲線は、今回の実験に供試した柱の標準的な物性を反映したものである。図から、比例限応力に対応する細長比を60付近

表 2 座屈計算結果

項目	試験体L	試験体S	試験体P
B (cm)	12.10	12.15	12.10
H (cm)	12.02	12.03	12.06
I (cm ⁴)	1750	1763	1769
ヤング係数E (×10 ³ kgf/cm ²)	88.6	80.5	60.4
最大荷重 Pmax (kgf)	14861	14605	10796
最大軸応力 σy (kgf/cm ²)	103.2	101.4	75.00
試験体の圧縮比例限応力Pp (kgf/cm ²)	258.4	243.8	212.8
σy/Pp	0.40	0.42	0.352
座屈長さ Lk (cm)	321	309	310
座屈長さ係数K	1.04	1.00	1.01
算定座屈荷重Pc (両端ピン)	16078	14717	11225
Pmax/Pc	0.92	0.92	0.95

$P_c = \pi^2 E I / L_k^2$ オイラーの座屈式

ここに、Pc: 座屈荷重

E: 柱のヤング係数

I: 柱の断面 2 次モーメント

Lk: 座屈長さ

と定めること出来る。この値より柱の細長比が大きければオイラーの式が適用出来ることになる。

今回の試験に供試した柱の座屈荷重から求めた座屈応力は、試験体の圧縮比例限応力の1/2以下のところに位置する。このときの相当細長比は95付近となる。供試した柱の測定値から求めた値の86.6であるのでオイラーの曲線に乗っていると考えられる。

これらのことから、今回座屈試験に供試した試験体はオイラーの式によって、その座屈荷重が予測できることとなる。また、そのときの拘束条件は両端ピンと考えられる。

オイラーの式を適用して座屈長さを計算した結果を表2に示す。表のヤング係数は座屈試験を実施する前にそれぞれの柱に4点曲げ試験を行って実測したものである。L、S試験体の柱材とP試験体のそれとは産地が異なるのでヤング係数の値が異なっている。

表の最大荷重は今回の実験で求めた座屈荷重に相当する。これらの値を用いて次のオイラーの式によって座屈長さを計算し、実測値との比を座屈長さ係数とした。

$$P_c = \pi^2 E I / L_k^2 \quad \dots\dots\dots \text{オイラーの座屈式}$$

ここに、 P_c ：座屈荷重

E ：柱のヤング係数

I ：柱の断面2次モーメント

L_k ：座屈長さ

座屈長さを試験装置のクランプ間距離とすると表2のように座屈長さ係数が1.0付近になることから、柱の両端の接合がどの試験体においても同じ程度の拘束効果を発揮したと考えられる。

柱が面外に座屈したとき、試験体の桁・柱・土台が一体となった挙動を示したと考えられる。すなわち、接合は強固であったということになる。一方、面内に座屈を起こした試験体についても同様に座屈長さ係数が1.0付近であることから、面外方向の桁あるいは

土台付近の拘束効果を認めることは出来ない。

しかし、既往の報告では座屈長さ係数を接合の仕様によっては0.3~0.7としてよいとされている²⁾。この相違点については、桁の面外への転びを拘束した試験を待たねばならないが、拘束点付近、すなわち桁あるいは土台近傍では過大なめり込みや繊維走行による力の伝達が複雑に乱れていると考えられる。したがって、接合部近傍を大まかな一体として捉え、座屈荷重を算出する際にはピンとして取り扱うことが合理的と考えられる。

木構造において通常採用されている両端回転端とし、座屈長さを横架材間の上面と下面の距離を長さとして、オイラーの座屈式により算出した座屈荷重を表2では算定座屈荷重 P_c として示す。 P_{max} と P_c との比をみるといずれの場合も0.9程度で、通常の座屈評価³⁾で予測できるといえる。桁の面外への転びや柱両端のめり込みにより柱の端部が移動するので座屈荷重はオイラーの式による計算値以上にはなり得ないので、危険側となり長柱の設計では注意を要する。

4 おわりに

木造柱の座屈についてオイラーの式の適応を実験的に検証するとともに木造柱の有効座屈長さの算定方法を提案したが、仕口接合の設計をはじめ貫の効果などを含めた木造軸組架構の構造設計法の確立が今後待たれるところである。

本研究で得られた結果を以下に列記する。

①柱の座屈荷重はオイラーの式を適用して求められる。

最大荷重に到達するまでの軸歪みと鉛直荷重の関係がほぼ直線的であること、座屈応力が無欠点小試験体の圧縮比例限応力の40%程度であること、から柱の座屈は柱の弾性範囲で発生していることが確認されたのでオイラー

の式を適用して差し支えない。

②接合の拘束効果は認められない。

オイラーの式を適応して座屈長さを求め座屈長さ係数を算定すると1.0付近となる。この値は両端が回転端とした柱の座屈長さの係数の値である。このことから、両端にホゾ接合を持つ実大柱は、接合剛性の影響を受けていないことが判明した。本実験では桁が面外に転んでいるので、横架材の厳密な固定により接合剛性の影響が現れる可能性が残された。

③柱端部の横架材へのめり込みが大きい。

柱の座屈が始まったことを示す柱の側方へのたわみが目視で確認される前に、柱両端部の横架材へのめり込みが顕著にあらわれる。

このめり込み量の許容量を定めなければならないが、通常横部分圧縮の限界とされている横架材のせいの20%の2/3とすると、座屈荷重の50%程度でこの値に達する。両端が横架材とホゾで連結された柱の使用限界は柱端部の横架材へのめり込みで規定するのがよいと考えられる。

④柱の有効座屈長さは桁の上部と土台の下部までの長さとする。

実験結果より有効座屈長さを求めたところ、横架材を含めた試験体全体の長さに等しくなる。すなわち、試験体全体の長さを実際の長さとする座屈長さ係数は1.02が得られる。

謝 辞

本研究を進めるに当たって、実験及びデータのとりまとめに協力して下さった金沢工業大学工学部建築学科の筏井正臣君、湯田坂昌城君、福井大学工学部環境設計工学科安藤祥幸君、修士課程石井隆史君の各君に感謝します。

参考文献

- 1) 竹園茂雄著：基礎材料力学，朝倉書店，pp.133-141，1994
- 2) 久田俊彦ほか7名著：建築学大系15木構造・特殊構造，彰国社，p.93，1969
- 3) 後藤一雄：木構造の計算，鹿島出版会，p.234，1980

Buckling Behavior of Full Size Wooden Pillar with Tenon Joints on Each End

Masnori HATA¹⁾ and Hiroshi NAKATANI²⁾

(Received October 15, 1999)

ABSTRACT

In this study, ordinary construction-grade wood pillars with end tenons were subjected to vertical load buckling tests. As a results the following became clear:

- 1) The quantity inclined to the grain of horizontal member was excessive.
- 2) The serviceability limits occur according to the quantity inclined to the grain.
- 3) The strength limit states occur by buckling of a pillar.
- 4) The buckling load of wooden pillars can be calculated by Euler's formula.
- 5) Restriction effect of joints for buckling are not recognized.
- 6) Effective buckling length of wooden pillars is pursued as length from the upper part of a girder to the lower part of a base.

KEYWORDS

wooden construction, pillar ,backling load, Euler's formula, incline to the grain, full size test