

平成2年度農林水産省補助事業
日本住宅・木材技術センター事業

住宅部材国産化緊急対策事業報告書(2)

「大規模ログハウス開発」

平成3年3月

財団法人 日本住宅・木材技術センター

まえがき

我国の木造住宅は、従来、在来軸組工法が主流を占め、それに対応した木材の供給が行われてきた。近年、住宅に対するニーズの多様化に伴い丸太組構法住宅（ログハウス）が伸長している。

これら、丸太組構法住宅の建設にあたっては、丸太組構法技術基準（昭和61年3月29日建設省告示）に基づき実施してきたところであるが、建築ニーズの多様化とともに告示の範囲を超えて建設したいとするものが増加したため、平成2年5月に告示の適用の拡大と基準の内容の合理化を図る改正が行われたところである。

本事業は、この度の改正で構造計算・実験による制限緩和事項についてその手法等が確立されていない事項を中心に実験等を踏まえて問題点を検討し、設計者が大規模ログハウスを設計しようとする場合に実務的に活用できる構造計算手法及び試験方法の基準化を図ろうとするものである。

事業の実施にあたっては、下記の委員会を設置し事業全体の計画立案、事業の進め方等についてご指導をいただき、今年度は、耐力壁線相互の距離が6mを超える場合及び1室の床面積が30㎡を超える場合の構造計算手法の基準化を図るため「丸太組構法耐力壁の座屈試験」等を行い検討した。

事業の実施にご尽力いただいた委員及び関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

大規模ログハウス開発委員会

委員長	室田達郎	建築研究所 第3研究部長
委員	平嶋義彦	静岡大学農学部 助教授
”	河合直人	東京理科大学工学部
”	大橋好光	東京大学工学部

平成3年3月

(財)日本住宅・木材技術センター

理事長 下川 英雄

目 次

第1章 丸太組構法耐力壁の座屈試験	1
1. はじめに	1
2. 実験方法	2
2. 1 試験体	2
2. 2 横圧縮試験によるヤング係数の測定	3
2. 3 座屈試験	4
(1) 座屈試験の条件	4
(2) 耐力壁の試験体の番号	4
(3) 試験体の組合わせ	5
(4) 試験方法	5
3 結果及び考察	7
3. 1 横圧縮試験	7
3. 2 座屈試験	9
(1) 座屈形態	9
(2) 偏心量を考慮した限界荷重	11
(3) 最大荷重及び最大応力について	13
(4) オイラーの座屈公式の適用について	18
(5) 耐力壁のヤング係数について	20

4. まとめ	25
第2章 大規模ログハウスのための座屈実験	26
1. 研究目的	26
2. 試験体	26
3. 実験方法	29
4. 実験結果	32
4.1 結果の概要	32
4.2 考察	35
5. 実験のまとめ	39

第 1 章 丸太組構法耐力壁の座屈試験

1. はじめに

丸太組構法は昭和61年にその技術的基準が建設省告示として公布され、平成2年には建物規模の拡大、規制緩和の方向で改正が行われている。

しかし階数2以下、延べ面積300㎡以下などといった規定により、ペンションやクラブハウス、レストランなど住宅以外の用途で望まれている大規模な建物の建設は不可能となっている。木造ではこのような制限があるのは丸太組構法だけである

これは、この構法が建設実績が少なく経験の蓄積に欠けることと、構造安全性を確認するための構造計算の手法がまだ確立されていないことによるものであろう。

大規模な丸太組構法建物の構造計算のなかでいまだその手法が確立されていないのは、耐力壁の座屈安定性の問題である。

丸太組構法建物の耐力壁で最も厳しい条件と考えられるのは、その両側に開口部があるような状態であろう。このように上下に圧縮力を受け、左右両辺では自由となっているような組積造耐力壁の座屈問題を取り扱った研究は殆どみあたらない。

そこで本研究ではこの問題に対処するため、木材を積みあげたモデルをいくつか作り、圧縮力を加えてそれらの座屈安定性について検討することとした。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体として用いた材は、「木構造計算規準・同解説」（日本建築学会）の規定する樹種グループJ1、J2、J3より、それぞれの代表的なベイマツ、ベイツガ、スギの三樹種を選んだ。試験体は、これら三樹種の集成材の角材とした。角材を用いたのは、荷重を加えたときの力の流れを単純化するためである。また、用いた木材は、ベイマツにまれに節や入皮などの欠点が見られたほかは、ほぼ無欠点のクリヤー材である。

試験体の形状は、図1に示すような、幅と厚さの等しい直方体である。

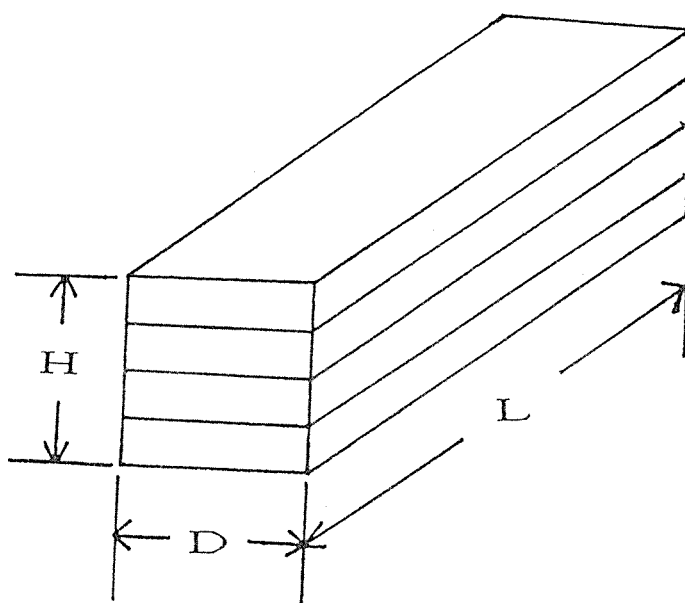


図1 試験体

L（長さ）は、すべて 500mmとし、H（厚さ）とD（幅）は、80mm、120mm、160mm、200mmの4通りとした。

これらの試験体は圧縮試験に先だち重さを測り比重を求めた。

2.2 横圧縮試験によるヤング係数の測定

試験体個々の、ヤング係数を得るため横圧縮試験を行った。

試験は、図2に示す方法で各樹種の許容応力度の範囲内で荷重をかけて、試験体を圧縮した。圧縮による変位は、2本の変位計で計測し、XYレコーダで 変位-荷重 のグラフを描きこのグラフに直線を引き、2つ傾きの平均値より、横方向のヤング係数を求めた。

この試験は、ベイツガ、スギについては、すべての試験体について行った。ベイマツについては、同一長尺集成材から採った2体の試験体のうち1体の試験を行い、2体とも同じヤング係数とした。

また、ベイツガのうち10体は、ひずみゲージをつけて試験を行い、そのうち1体は、圧縮による最大荷重を求めた。同様に、スギについても1体、最大荷重を求めた。

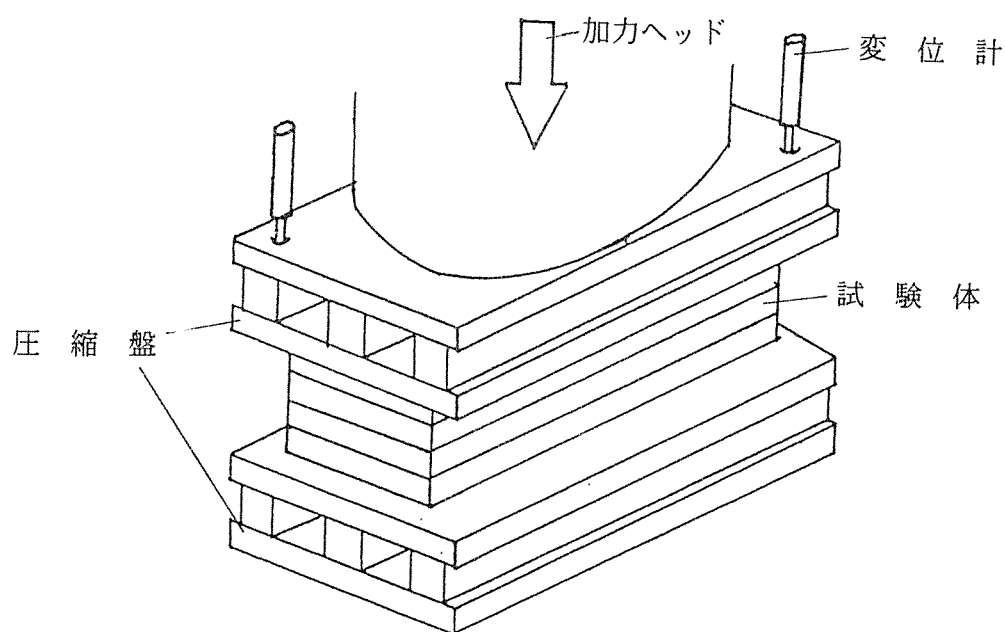


図2 横圧縮試験

2.3 座屈試験

(1) 座屈試験の条件

試験条件は、表1で上段マスに丸のついたところの条件について行った。

ベイマツについては、断面寸法を80mm、120mm、160mm、200mmの4種類とし、段数を6段、12段、14段、18段、24段、30段とかえて試験を行った。

また、樹種による違いをみるために、ベイツガ、スギについて、それぞれ断面寸法が120mmのもののみ、12段、18段、24段の3条件の試験を行った。

表1 座屈試験の試験条件

断面寸法 樹種 段数	80mm	120mm			160mm	200mm
	ベイマツ	ベイマツ	ベイツガ	スギ	ベイマツ	ベイマツ
6段	○	○				
	48cm	72cm				
12段	○	○	○	○	○	○
	96cm	144cm	144cm	144cm	192cm	240cm
14段						○
						280cm
18段	○	○	○	○	○	
	144cm	216cm	216cm	216cm	288cm	
24段	○	○	○	○		
	192cm	288cm	288cm	288cm		
30段	○					
	240cm					

(注) ・表中の丸のついた条件について、実験を行った。
 ・下段の数字は、その条件での壁の高さを表す。

(2) 耐力壁の試験体の番号

座屈試験を行った耐力壁には、樹種、断面寸法、段数、そして各条件での試験番号の組合せにより、次のように試験体番号をつけた。

例 D 120 18 . 1

はじめに記号は樹種、次に断面寸法、段数と続き、最後はその条件での試験番号で

ある。

ただし、D = ベイマツ、H = ベイツガ、S = スギを表している。

また、最後につく番号の1はヤング係数が中間のもの、番号2はヤング係数が小さいもの、番号3はヤング係数が大きいものである。ただし、D08006のみヤング係数は、1が小、2が大、3が中となる。以上より、例に挙げたものはベイマツで、断面寸法120mm、18段の1番目（ヤング係数が中）の試験体を表している。

(3) 試験体の組合せ

積み重ねる個々の試験体のヤング係数が近いもの同志が集まるよう次のような方法でマッチングを行った。

樹種、断面寸法別に、横圧縮によるヤング係数（以後単にヤング係数とする。）の小さいものから順に並べる。

一条件につき三回の試験を行うため、並べ変えた中から、ヤング係数の小さいもの、中間のもの、大きいものをそれぞれ積み重ねる個数だけ取り出して組み合わせた。

(4) 試験方法

図3に示すように、試験機の上下に取り付けた圧縮盤内に、ヤング係数の大きいものから順に、下から積み上げた。加力は、試験機の100tラムを用い、荷重とたわみをコンピュータ画面上にモニターしながら、最大荷重に達し荷重が低下し始めるまで行った。

この試験は、同一条件（樹種、断面寸法、段数が同じもの）につき、ヤング係数が大きいもの、中間のもの、小さいものの三回の試験を行った。このうち、ヤング係数の大きいものと小さいものは、変位計のみを付けて試験を行い、ヤング係数の中間のものは、変位計とひずみゲージを付けて試験を行った。

変位計は図4のように、上部圧縮盤の変位を測定するためのものを2本、上部の平行盤に、お互いが対角になるように取り付け、その他にたわみを測定するために、壁中央部に1本、上下から二段目（条件によっては一段目）に、それぞれ1本ずつ取り付けた。

ひずみゲージは、図4に示すように、中央の試験体と上下の平行盤からそれぞれ二段目の試験体に、それぞれ四枚ずつはって試験を行った。

これら変位とひずみ、および荷重のデータは、多点デジタル歪測定器で測定してパソコンのデータファイルに集録した。

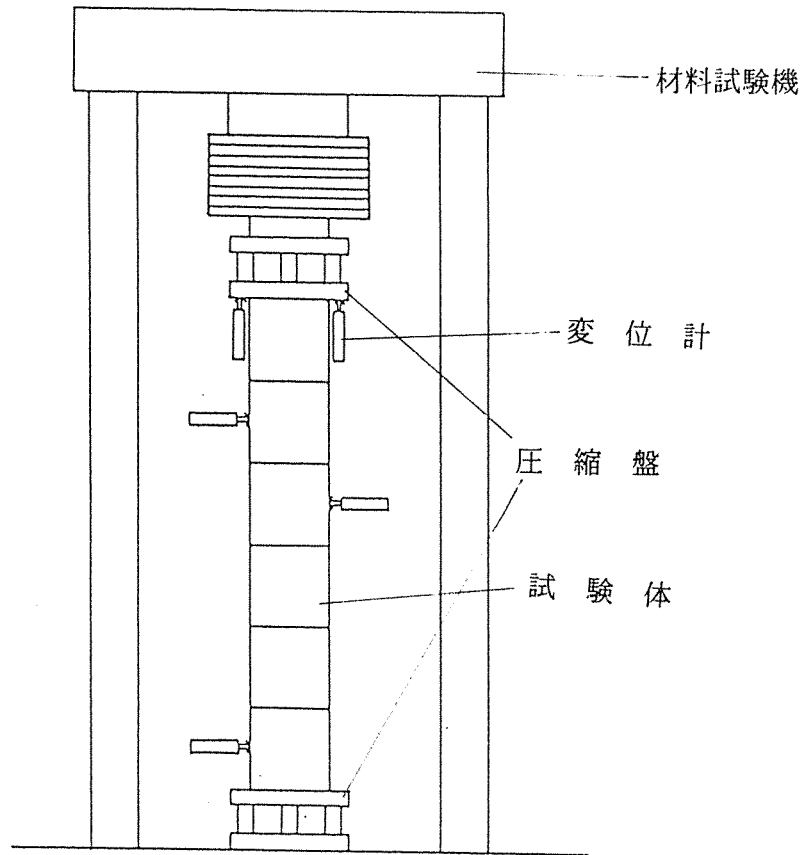


図3 座屈試験装置

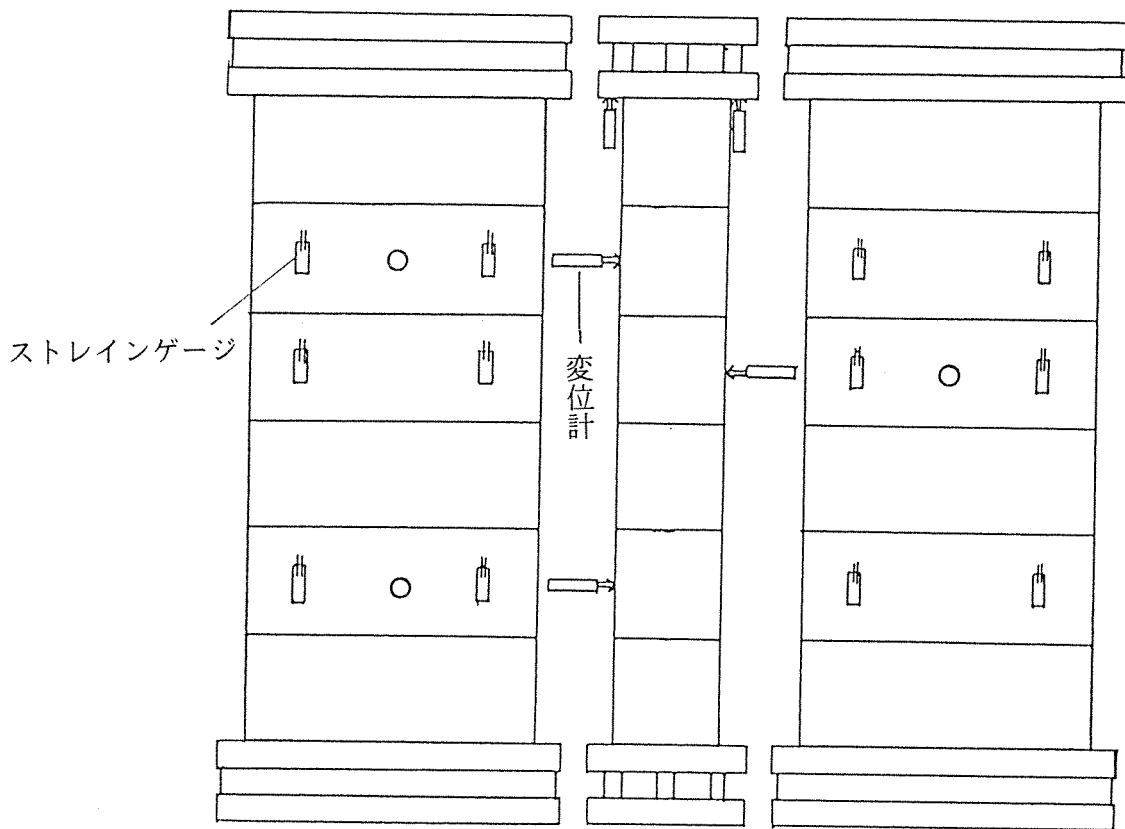


図4 計測器配置図

3. 結果及び考察

3.1 横圧縮試験

図5は、圧縮による変位を表したグラフであり、図6は、ひずみゲージで測定したひずみを表したグラフである。これらのグラフより得られた横圧縮のヤング係数を、試験を行った耐力壁ごとに平均した値を、表2に示した。

表2 座屈試験体のヤング係数（平均値）

試験体番号	ヤング係数 (kgf/cm ²)	試験体番号	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D08006.1	3543	D16012.1	3239
D08006.2	2865	D16012.2	2775
D08006.3	4582	D16012.3	3761
D08012.1	3540	D16018.1	3264
D08012.2	3183	D16018.2	3006
D08012.3	4033	D16018.3	3539
D08018.1	2644	D20012.1	3543
D08018.2	2175	D20012.2	2865
D08018.3	3678	D20012.3	4582
D08024.1	2679	D20014.1	3540
D08024.2	2295	D20014.2	3183
D08024.3	3299	D20014.3	4033
D08030.1	2692	H12012.1	3826
D08030.2	2447	H12012.2	2525
D08030.3	3040	H12012.3	5485
D12006.1	2962	H12018.1	3836
D12006.2	2196	H12018.1	3015
D12006.3	4633	H12018.2	5216
D12012.1	2984	H12024.1	3818
D12012.2	2320	H12024.2	3290
D12012.3	4307	H12024.3	4620
D12018.1	2970	S12012.1	2840
D12018.2	2464	S12012.2	1899
D12018.3	3797	S12012.3	4318
D12024.1	2966	S12018.1	2857
D12024.2	2636	S12018.2	2244
D12024.3	3347	S12018.3	3614
		S12024.1	2683
		S12024.2	2493
		S12024.3	3311

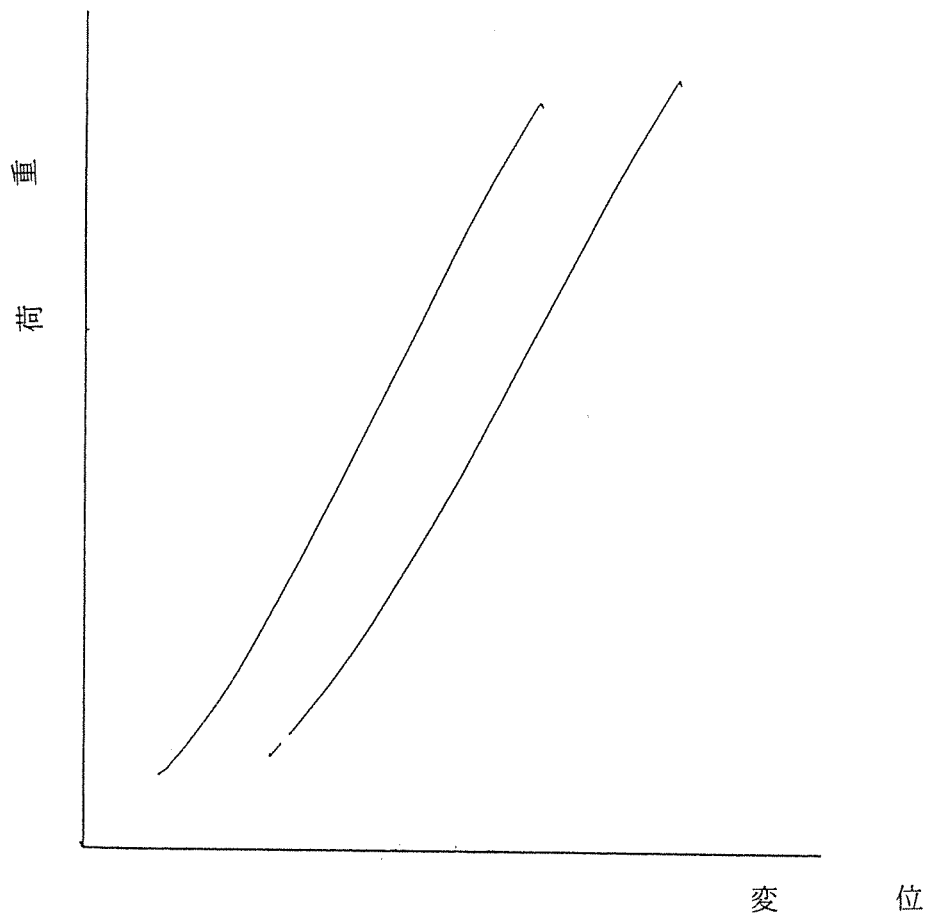


図5 横圧縮による変位と荷重の関係

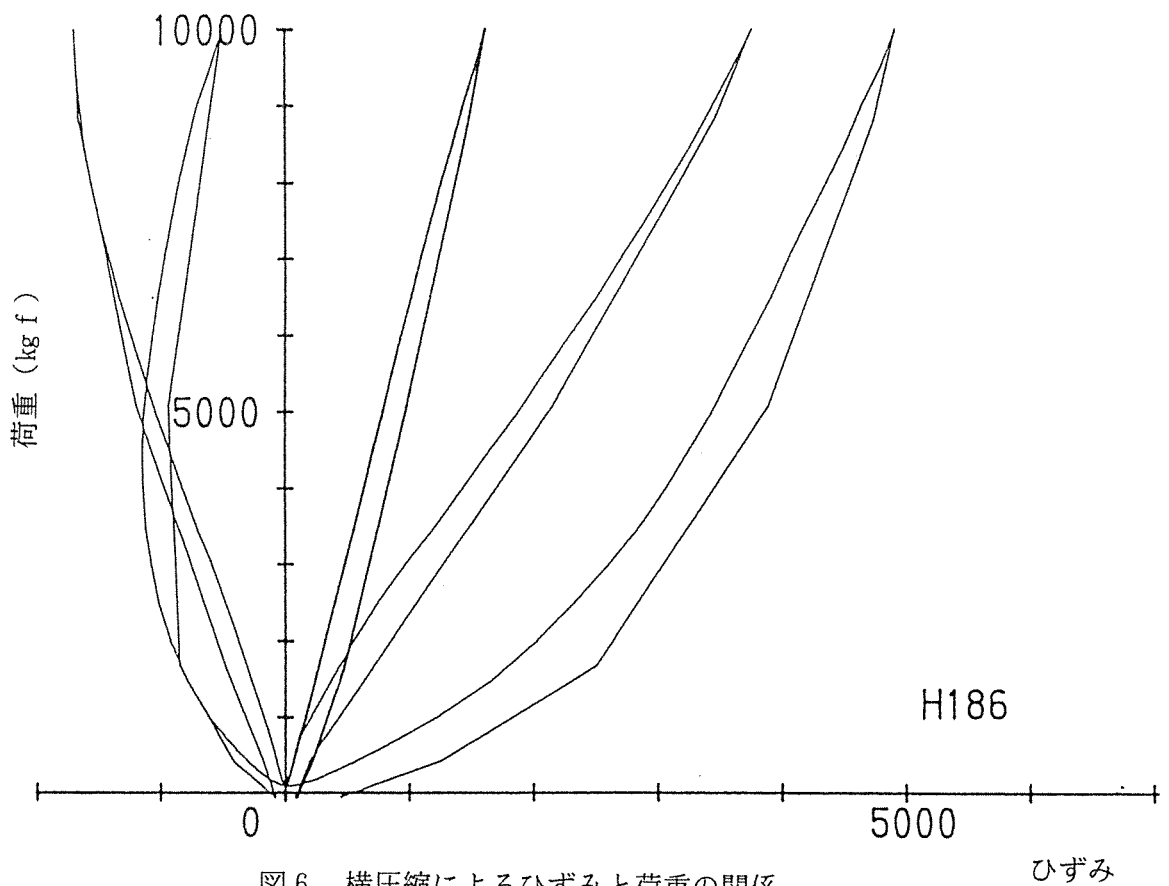


図6 横圧縮によるひずみと荷重の関係

3.2 座屈試験

(1) 座屈形態

19条件で57体の座屈試験を行ったが、座屈形態は、図7の(A)、(B)の2つのタイプに大別された。(A)は、段数が6段の少ない試験体(D08006、D12006)でみられた座屈形態で、壁中央部にたわみがほとんど生じることなく、壁の個々の校木が、圧縮により変形してひずみを生じた。また集成材のラミナには、(C)に示すように繊維にそって、ずれが生じるせん断破壊が起こった。(B)は、12段以上の試験体でみられた座屈形態で、壁中央部にたわみが生じる。両者とも、最大荷重に達し、荷重が低下し始めた後も荷重を加え続けると、壁が横に飛び出し崩壊する現象を呈した。

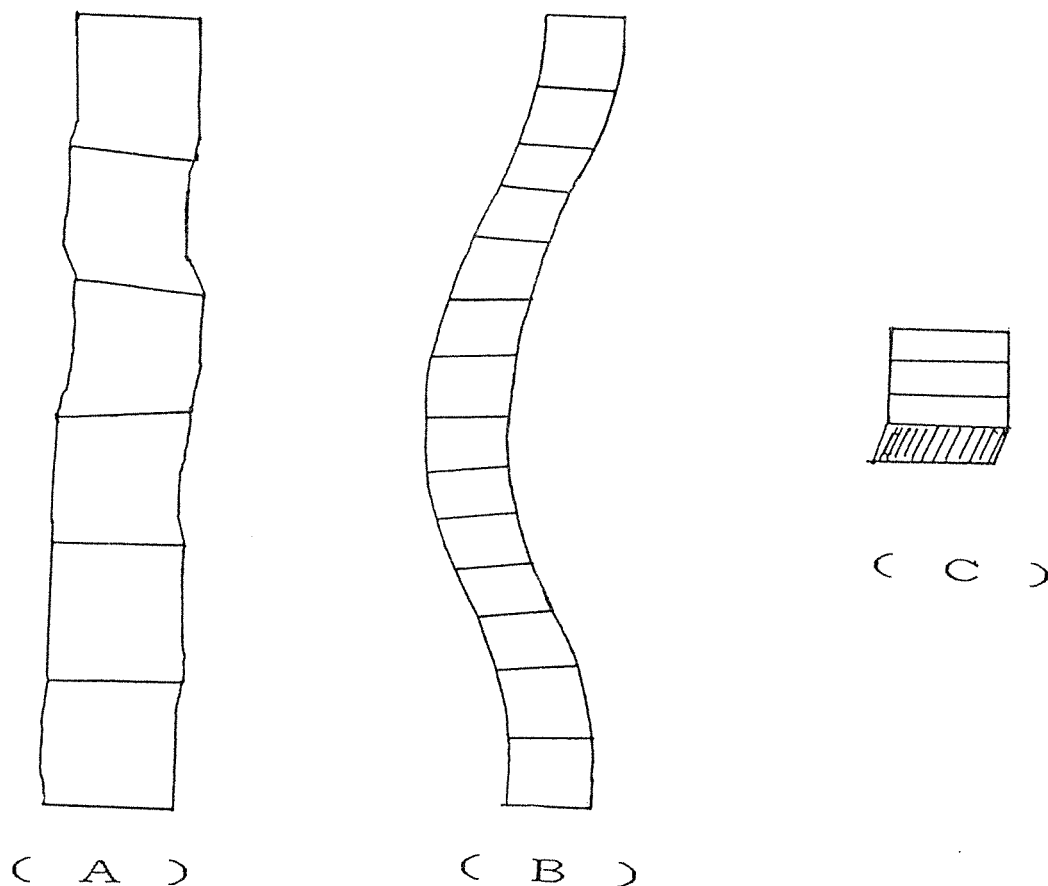


図7 座屈の形態

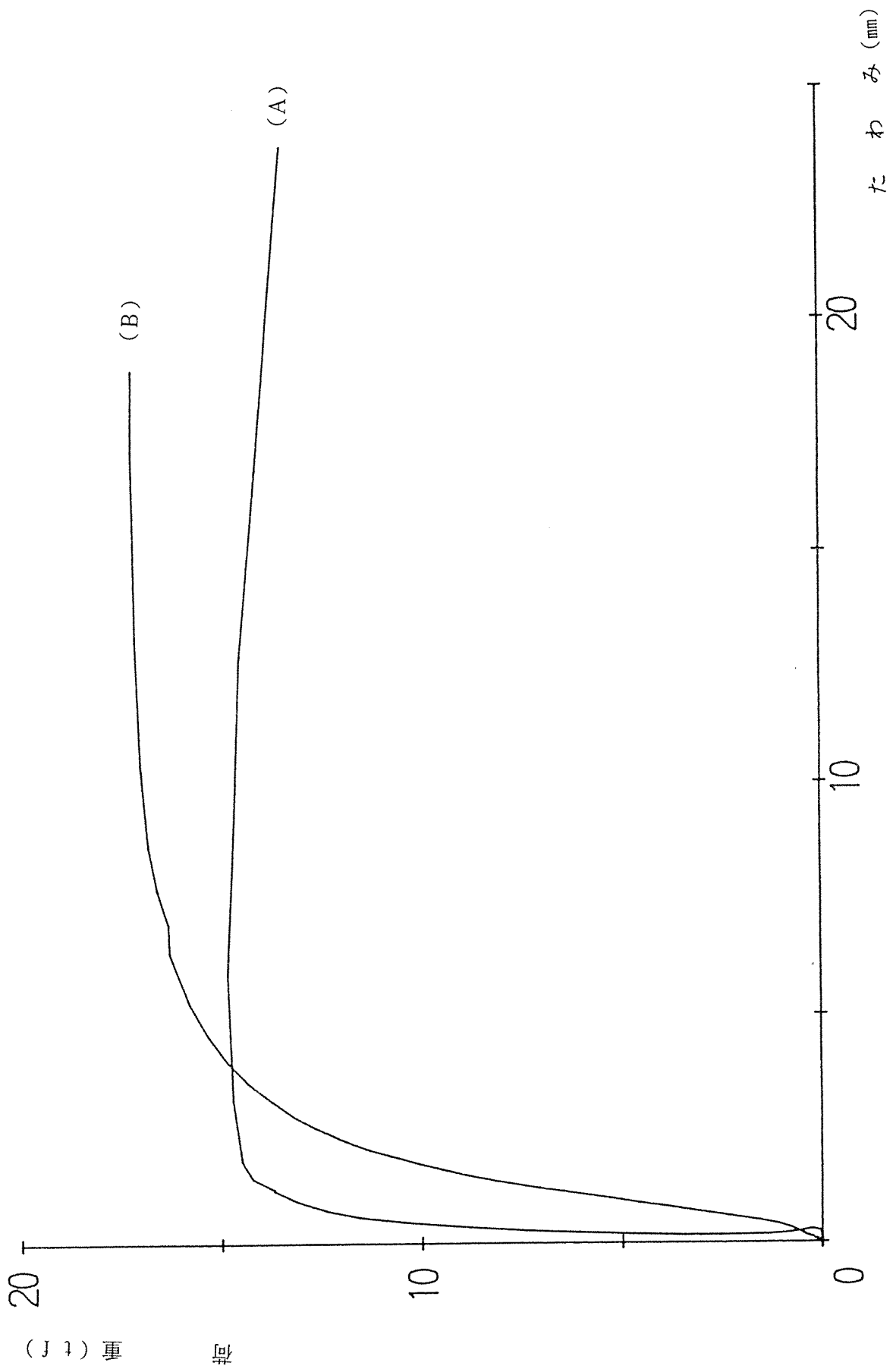


図8 座屈試験における荷重とたわみの関係

(2) 偏心率を考慮した限界荷重

壁中央部のたわみと荷重のグラフは、図8に示すような限界荷重近くまでほとんどたわみがないもの(A)と、はじめからたわみを生じるもの(B)の2通りに大別された。曲線(A)は荷重を増してもしばらくはたわみがほとんど見られないが、ある荷重で急激にたわみが起き始めた。曲線(B)は荷重を増すにしたがい、たわみが徐々に増加していった。この現象は、偏心に依存しているものと考えられる。

偏心がある場合、最大荷重は偏心率により偏心してない場合と比べて低下するので、ここではサウスウェルの定理を用いて最大荷重及び最大応力の値を補正して限界荷重を求めてみた。

サウスウェルの定理は、

$$\sigma / P \cdot P_{cr} - \sigma = e \pi^2 / 8$$

ここに P : 荷 重

P_{cr} : 限界荷重

σ : た わ み

e : 偏 心 量

縦軸に σ / P 、横軸に σ をとって、実験値をプロットすると、図9に示したような直線が引ける。この直線の傾きの逆数が求める限界荷重である。また偏心率eは、X切片の $e \pi^2 / 8$ より求められる。

実験より得た最大荷重とサウスウェルの定理より求めた限界荷重の値を表3に示した。この表から、限界荷重は最大荷重より約10%程度大きいことがわかる。

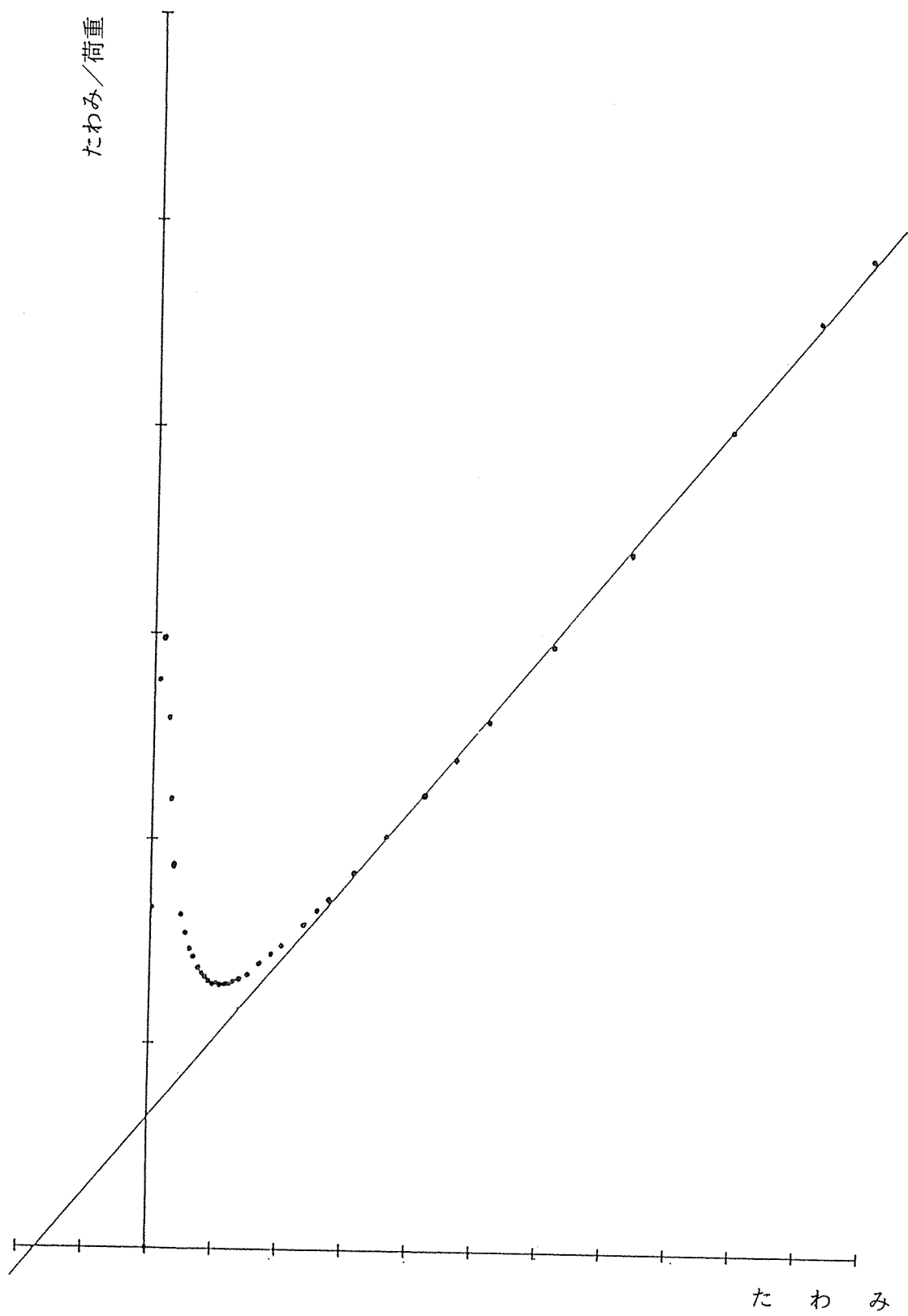


図9 サウスウェルの定理の直線

両者の差はそれ程大きいものでもないようなのでこれ以後は、実験より得た最大荷重値を用いて考慮を行うこととする。

表3 最大荷重と限界荷重

試験体番号	P max	P cr	Pcr/Pmax	e	試験体番号	P max	P cr	Pcr/Pmax	e
D08012.1	13000	10727	0.825	0.61	D20012.1	30940	32048	1.036	0.32
D08012.2	9328	9562	1.025	0.21	D20012.2	27660	29208	1.056	0.30
D08012.3	16548	17268	1.044	0.00	D20012.3	31390	34642	1.103	0.16
D08018.1	9956	10495	1.054	1.10	D20014.1	29970	32145	1.073	0.11
D08018.2	7552	7800	1.033	0.26	D20014.2	26500	30079	1.135	0.78
D08018.3	12616	12736	1.010	0.13	D20014.3	30330	33151	1.093	0.33
D08024.1	5456	6292	1.153	1.82	H12012.1	14840	15344	1.034	0.07
D08024.2	6056	6334	1.046	0.11	H12012.2	13780	14992	1.088	0.12
D08024.3	7752	8718	1.125	0.49	H12012.3	21000	20991	0.995	0.00
D08030.1	4084	5387	1.319	2.32	H12018.1	13164	14562	1.106	0.61
D08030.2	4072	4546	1.116	1.64	H12018.2	10964	12836	1.171	1.06
D08030.3	5516	5573	1.010	0.24	H12018.3	15480	17133	1.107	0.30
D12012.1	16850	17072	1.013	1.03	H12024.1	9752	11159	1.144	0.85
D12012.2	16640	18430	1.107	0.14	H12024.2	7984	10382	1.300	3.55
D12012.3	22500	22747	1.011	0.06	H12024.3	12004	12463	1.038	0.00
D12018.1	12840	15933	1.241	0.53	S12012.1	11210	14071	1.255	1.58
D12018.2	12064	12087	1.002	0.12	S12012.2	11380	12405	1.090	0.53
D12018.3	17208	18255	1.061	0.61	S12012.3	14980	17508	1.169	0.13
D12024.1	8652	9985	1.154	2.54	S12018.1	9232	9707	1.051	0.41
D12024.2	8980	9576	1.066	0.21	S12018.2	7596	8571	1.128	1.99
D12024.3	11492	12266	1.067	0.41	S12018.3	9068	10480	1.156	2.50
D16012.1	21360	22747	1.065	0.46	S12024.1	5310	5569	1.049	0.86
D16012.2	20640	23000	1.114	0.85	S12024.2	6472	6493	1.003	0.04
D16012.3	25340	29446	1.162	0.09	S12024.3	5978	7189	1.202	2.76
D16018.1	20230	24577	1.214	1.05					
D16018.2	20890	22257	1.065	0.14					
D16018.3	21910	25561	1.167	1.84					

(3) 最大荷重及び最大応力について

図10は、同一条件で行った3回の試験の最大荷重の平均値と段数の関係を、断面寸法ごとに表したものである。このグラフより、断面寸法をとわず、段数が多くなると最大荷重は低下していくことがわかる。また同じ段数においては、断面寸法が大きくなるにしたがい、最大荷重は高くなった。図11は、最大荷重を樹種ごとに表したものである。最大荷重は、ベイマツ、ベイツガ、スギの順で高く、樹種間で差が生じた。これらは断面寸法及び高さの条件がまったく同じであるため、この差はヤング係数の違いによるものと思われる。

また、最大荷重を圧縮応力表示として細長比との関係を、図12に示した。このグラフにおいても細長比が大きくなると最大応力が小さくなっていくことがわかる。また、

細長比が3の所の最大応力は、校木（試験体）単体を横圧縮によって、圧縮したときのベイツガとスギの最大応力であり、校木を積み重ねたときのベイツガとスギの座屈応力がそれぞれ、この値を超えることはないと思われる値である。また、ベイマツについては、横圧縮による最大応力を求めなかったが、ベイツガより少し高い値が最大座屈応力となるとと思われる。同じ細長比においては、スギ以外は、最大応力にさほど大きな差は見られなかった。

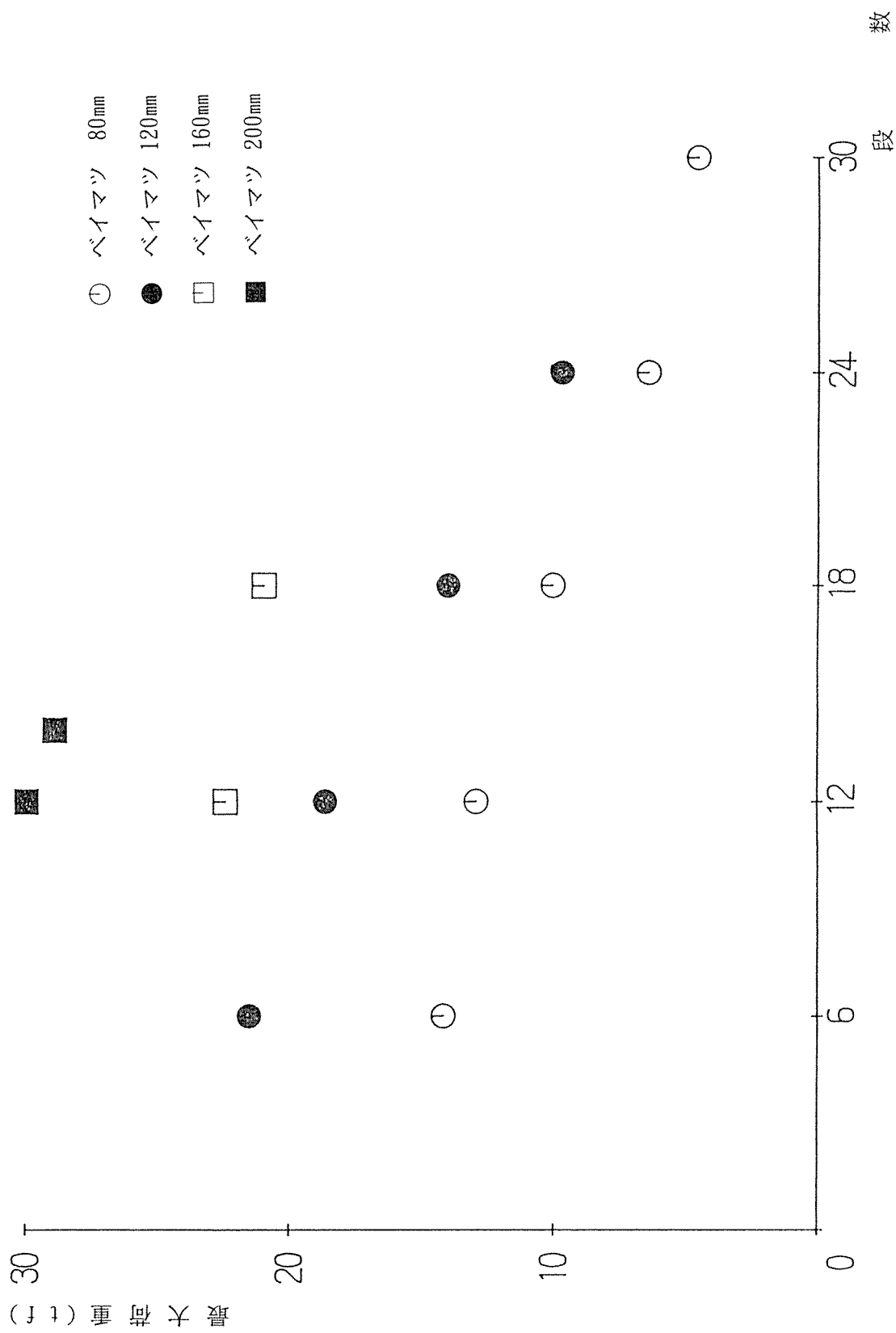


図10 断面寸法、段数と最大荷重の関係

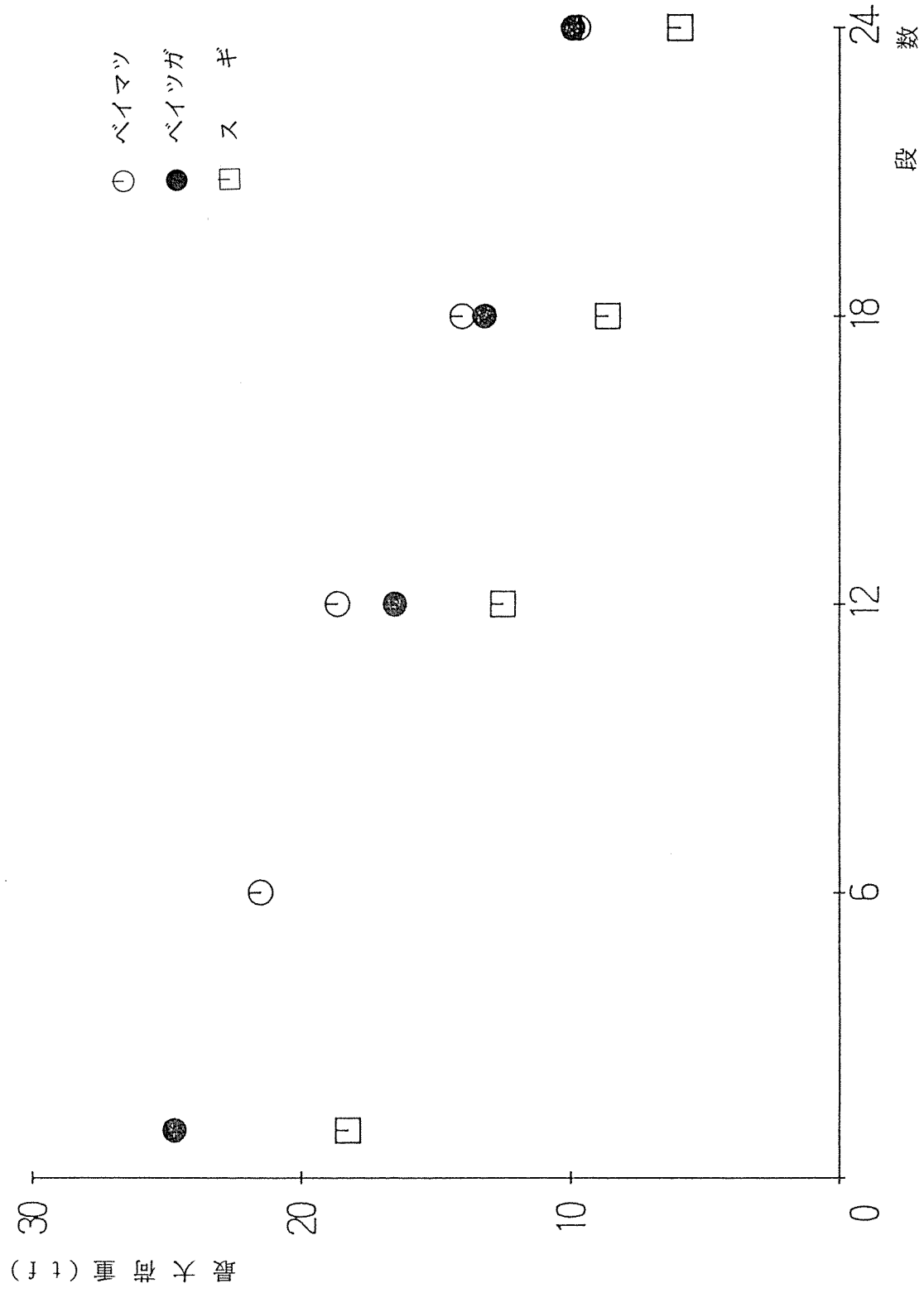


図11 樹種、段数と最大荷重の関係

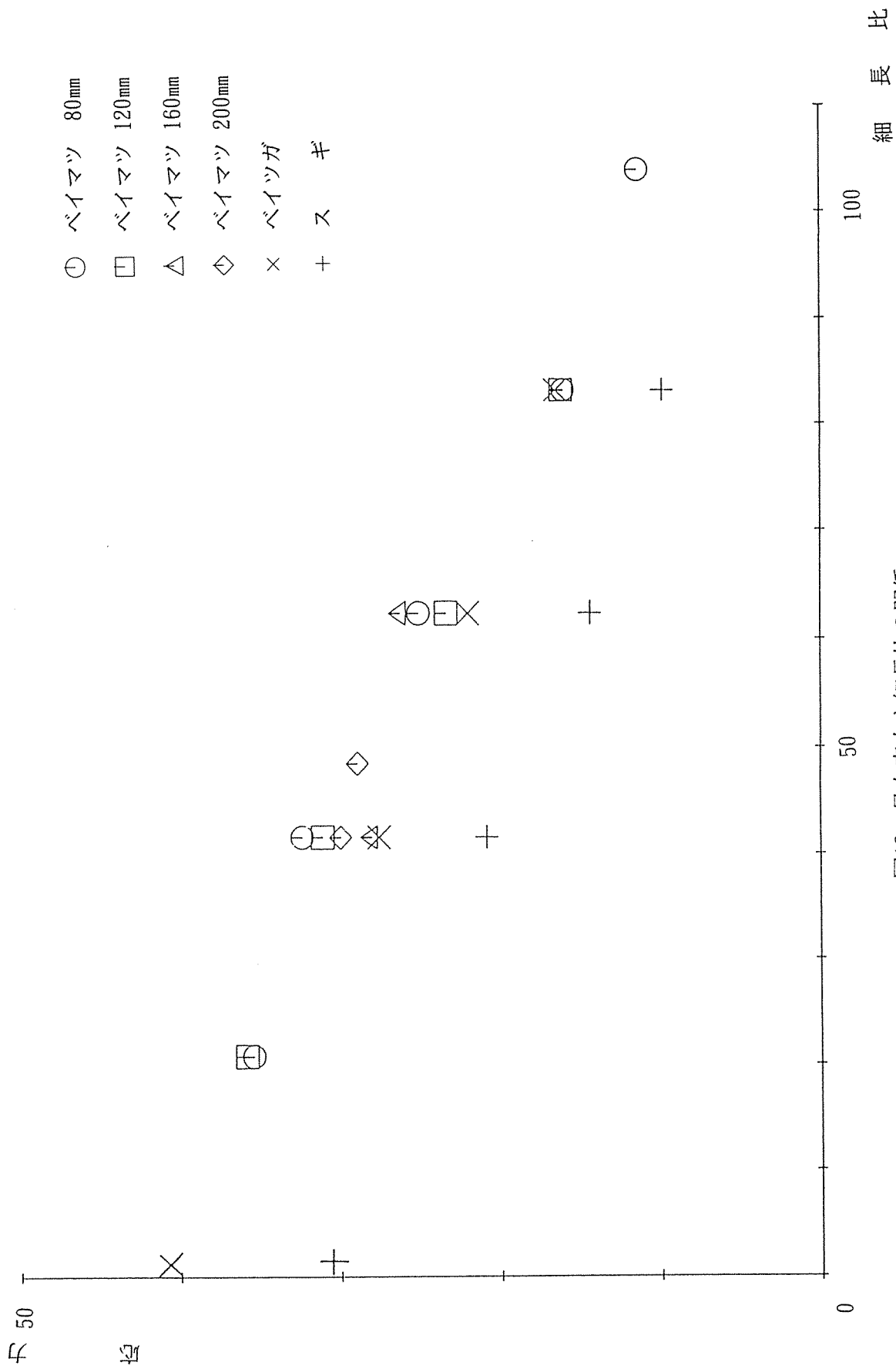


図12 最大応力と細長比の関係

(4) オイラーの座屈公式の適用について

今回の実験条件は、上下圧縮盤に接する材は、たわみ角を生じないと考えられるので両端固定に近いものと考えられる。両端固定における座屈荷重 P_b は、

$$P_b = \frac{4 \pi^2 E I}{L^2}$$

座屈応力 σ_b は、

$$\sigma_b = \frac{4 \pi^2 E}{\lambda^2}$$

ここに E : 横圧縮ヤング係数

I : 断面二次モーメント

L : 高さ

λ : 細長比 ($\lambda = L/r$)

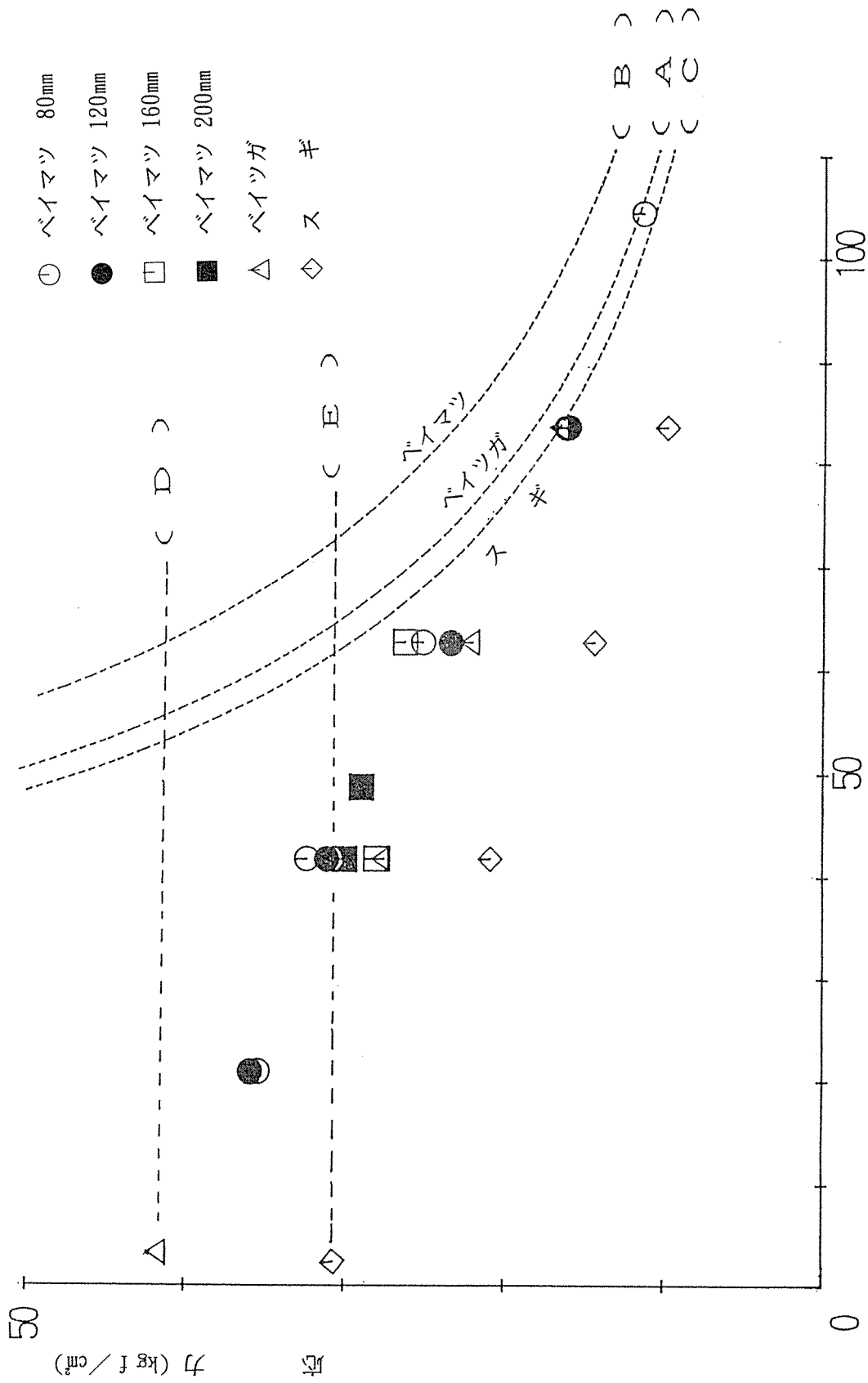
両端をピン支持と考えると P , σ は、それぞれ $1/4$ になる。

この公式が、校倉の耐力壁実験にも適用できるかどうか検討することにする。

図13の曲線 (A), (B), (C) は、オイラーの公式に、それぞれベイマツ、ベイツガ、スギの校木の横圧縮ヤング係数の平均値と細長比を代入して求めた座屈応力である。直線 (D), (E) は、それぞれベイツガ、スギの校木の横圧縮による最大応力であり、ベイツガ、スギではこの値が座屈応力の上限となると思われ、ベイマツにおいては、座屈応力の上限值は、ベイマツより少し高い値になると思われる。

このグラフにおいて、オイラー座屈応力と最大応力は、細長比が90以上で、ほぼ同じ値になっている。また、柱の座屈における中間柱の範囲 (細長比 $30 \leq \lambda < 100$) では、実験より得た壁の最大応力は、ほぼ直線上に存在していることがわかる。

したがってこのグラフでみる限り、上記の2点のことから丸太組構法耐力壁の座屈についても柱の座屈と同じ現象を示す可能性が考えられる。細長比が大きいところについても、オイラーの座屈公式を適用できる可能性がもたれる。



細長比

図13 オイラー応力と最大応力の関係

(5) 耐力壁のヤング係数について

図14から図19は、横軸に壁を構成する個々の校木の横圧縮ヤング係数を平均した値をとり、縦軸に、壁の沈み込みの変位から求めたヤング係数をとったものを、断面寸法及び樹種別に表したものである。これらのグラフより言えることは、ベイマツの160mm角以外の樹種及び断面寸法において、両者の間には、高い相関性がみられた。ベイマツの160mm角については、18段に積んだときの変位によるヤング係数が非常に高く、そのため相関性が低くなったと思われる。これは、図10の最大荷重と段数のグラフにおいても、他とは別の傾きをしていることと関係があると思われる。また、各グラフについて、 $Y = X$ の直線（横圧縮の平均ヤング係数と変位によるヤング係数が同値となる直線）を引いてみると、ベイマツの80mm、120mm、とスギは、 $Y = X$ の近くに点在していて、両者の値が比較的近いことがわかる。またベイマツの160mm、200mmとベイツガは、すべての点が $Y = X$ より上にあり、変位によるヤング係数の方が大きいことがわかる。このことを、試験の全てをプロットした図20で見ると、ほとんどの点が $Y = X$ より上の領域にあり、全体的に変位によるヤング係数の方が、大きいという結果が得られた。

次に、図21は、横軸に壁を構成する校木につけたひずみゲージから求めたヤング係数で、縦軸に変位から求めたヤング係数をとったものであるが、このグラフを見る限り、両者の間に相関性は、ほとんど見られない。また、プロットされた点は、ほぼ $Y = X$ より下の領域にあり、ひずみから求めたヤング係数の方が、大きい結果が得られた。両者の値の差は、かなり大きく、中には2倍、3倍になるものもあった。

これらの差は、変位を測定した荷重の大きさの範囲（応力レベル）の違いも考えられたが、応力レベルはほぼ同じであったため、応力レベルによる差はないと思われる。そのため、この差がどうして生じたのか、現時点では、はっきりしたことは不明である。

変位によるヤング係数

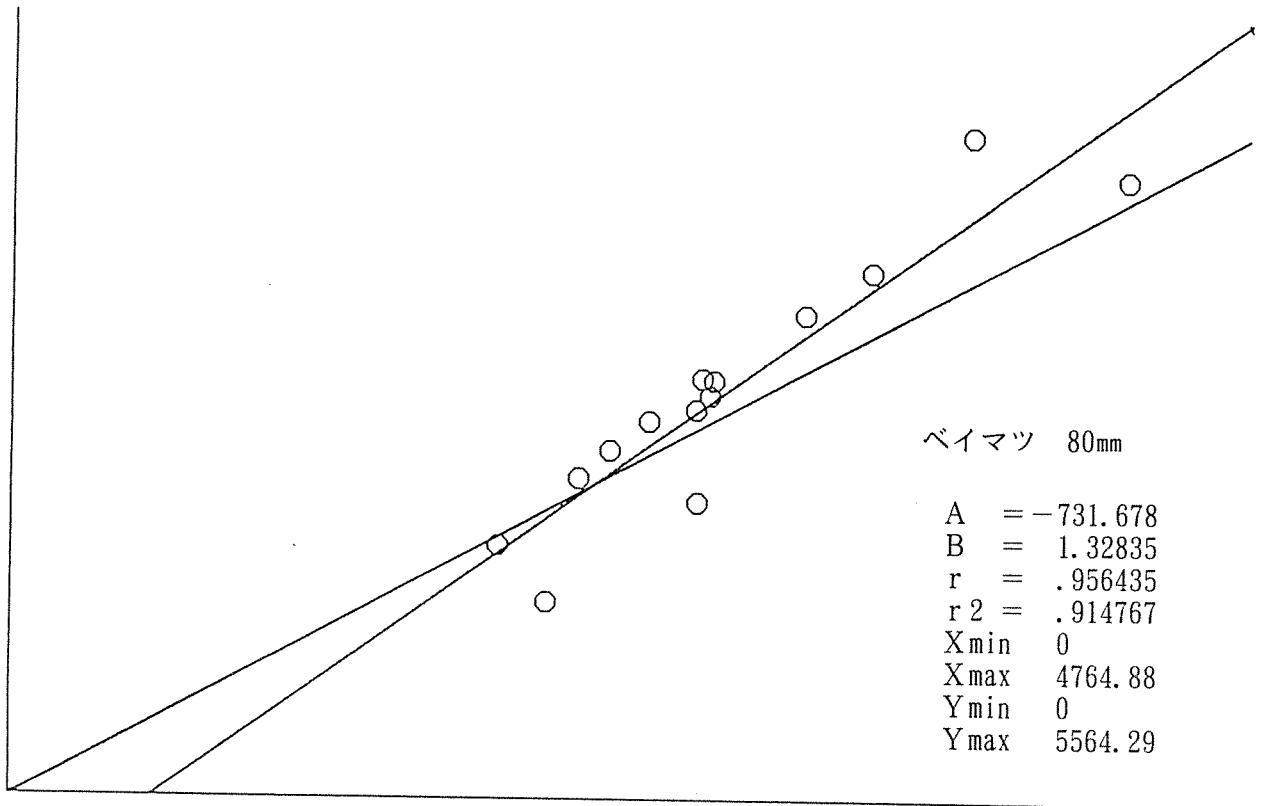


図14 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係 横圧縮によるヤング係数

変位によるヤング係数

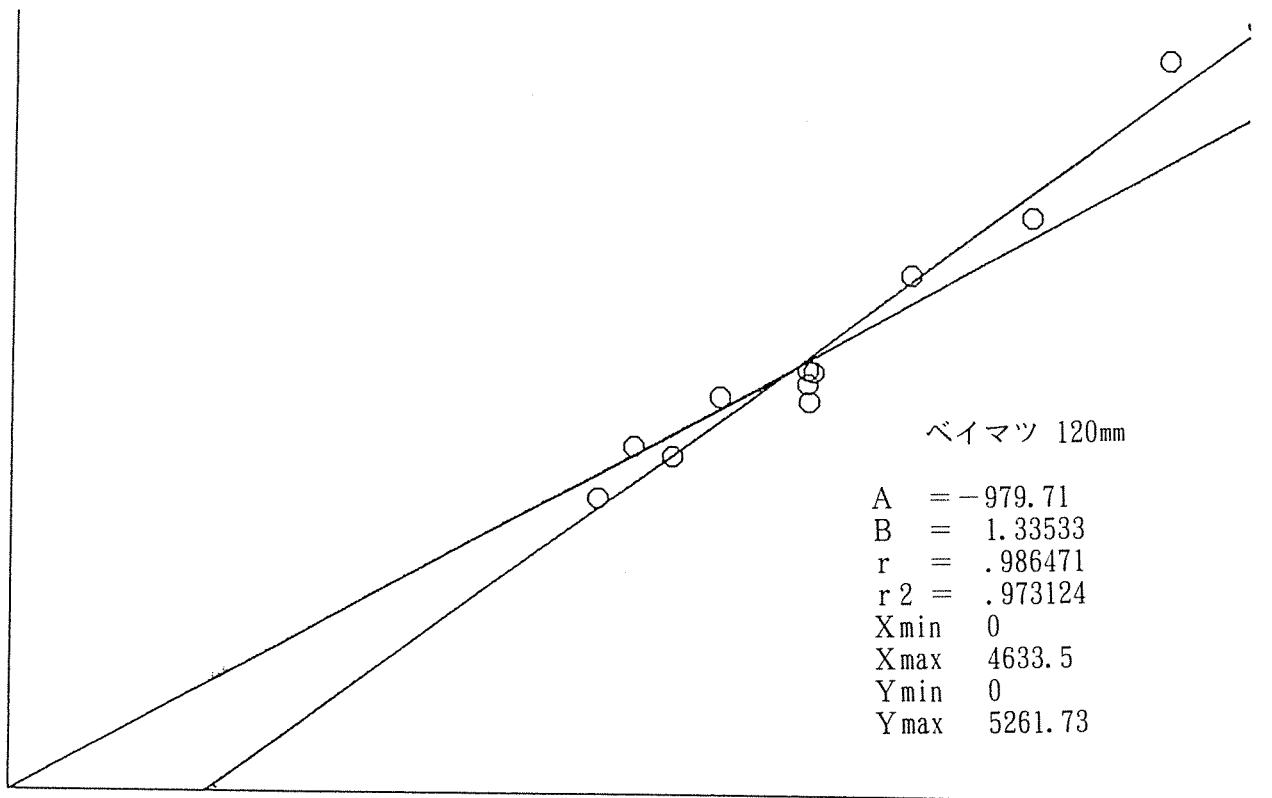
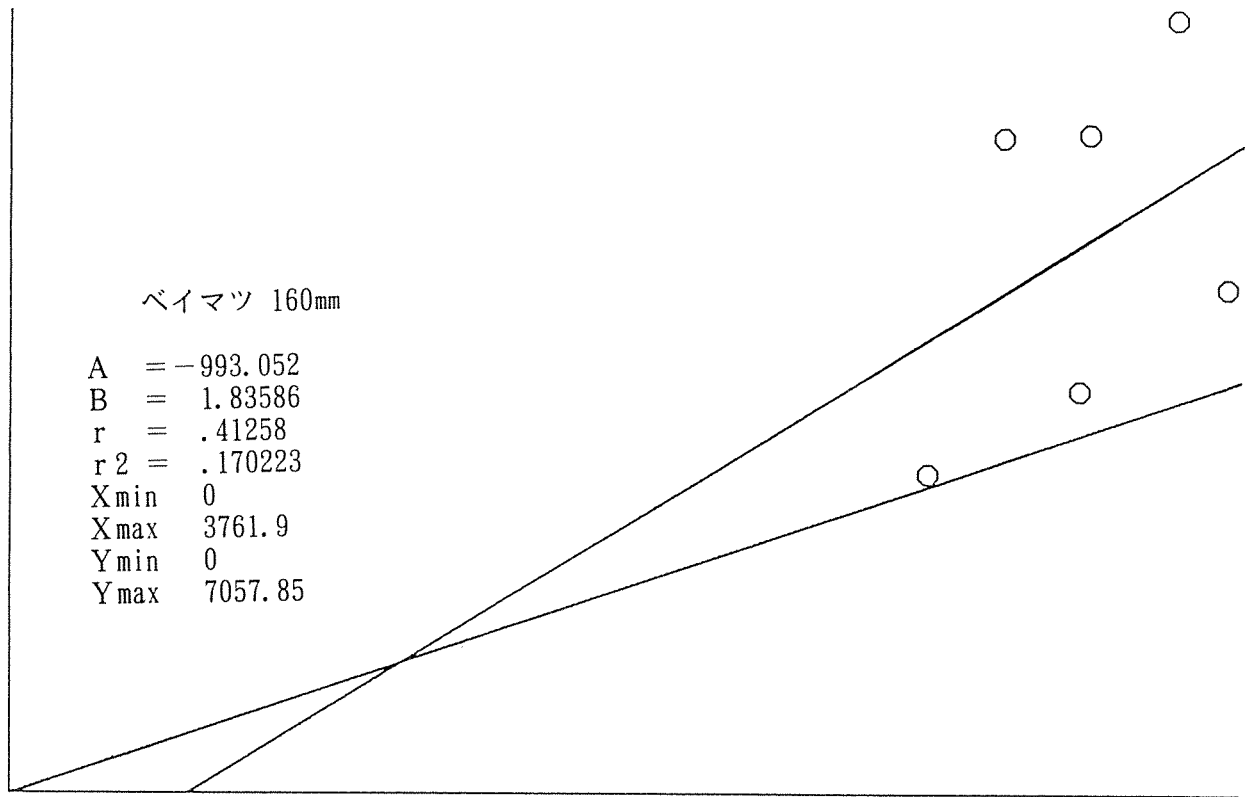


図15 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係 横圧縮によるヤング係数

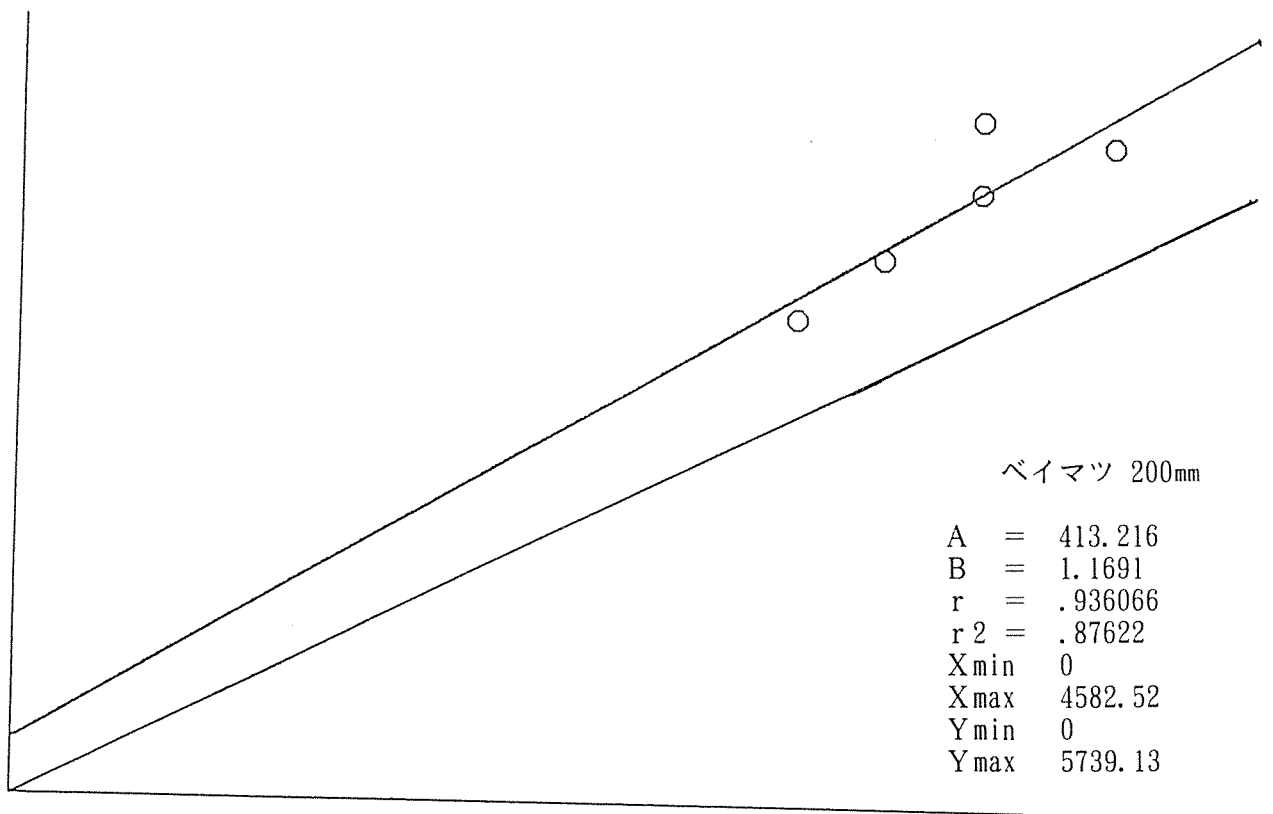
変位によるヤング係数



横圧縮によるヤング係数

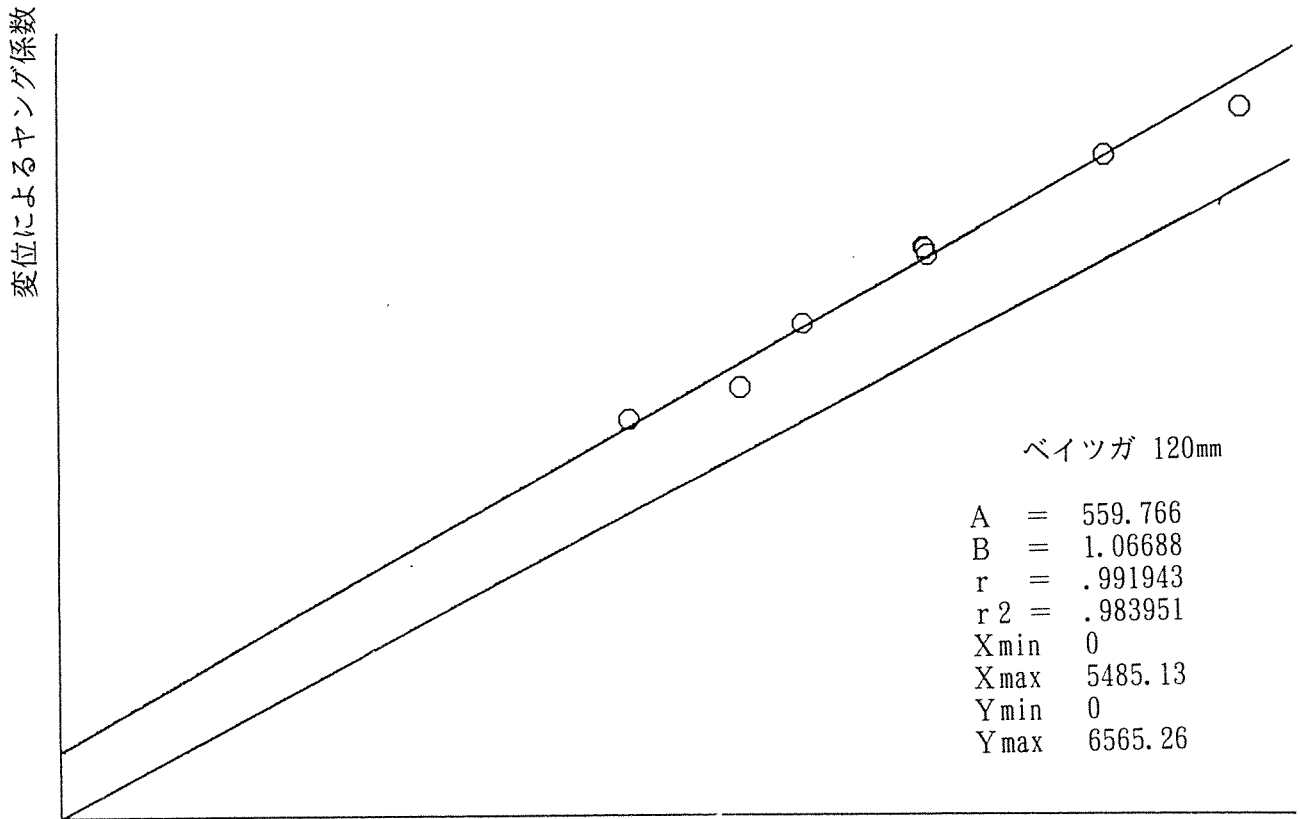
図16 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係

変位によるヤング係数



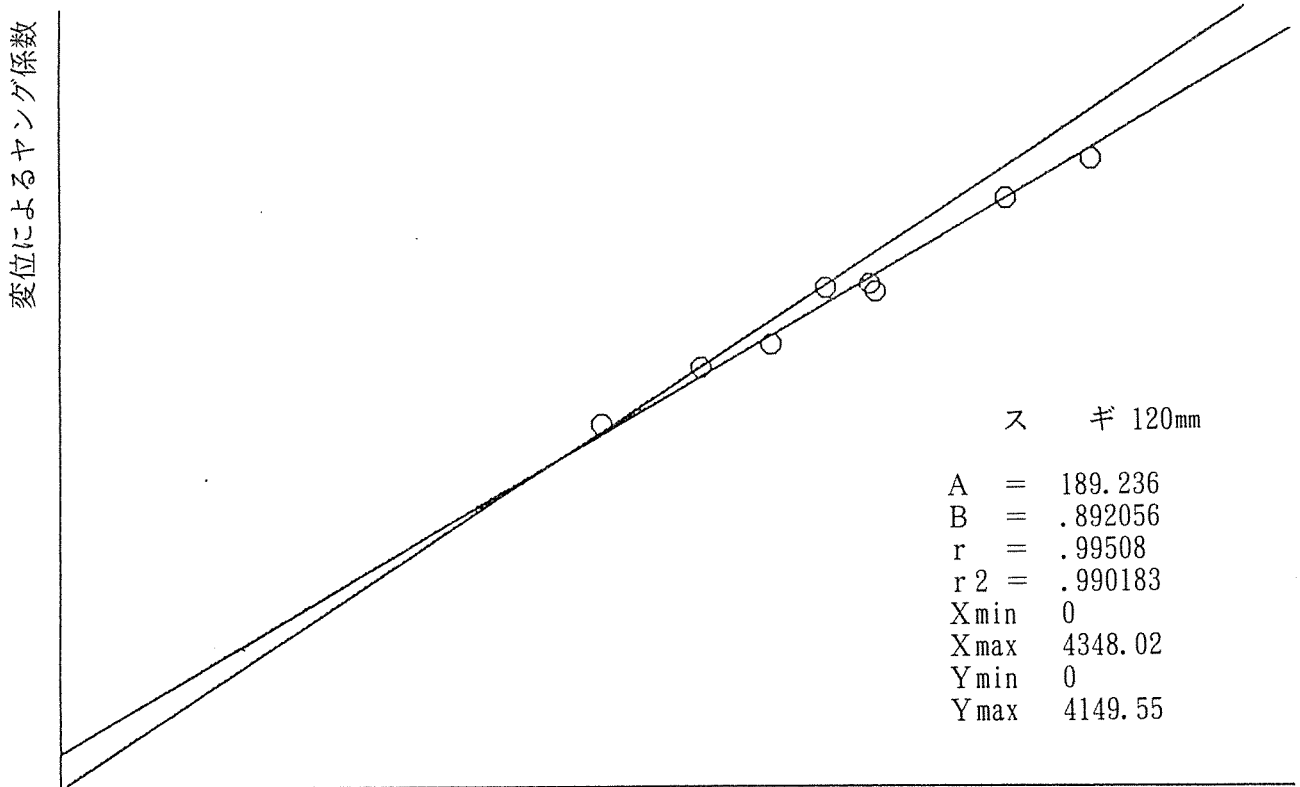
横圧縮によるヤング係数

図17 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係



横圧縮によるヤング係数

図18 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係



横圧縮によるヤング係数

図19 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係

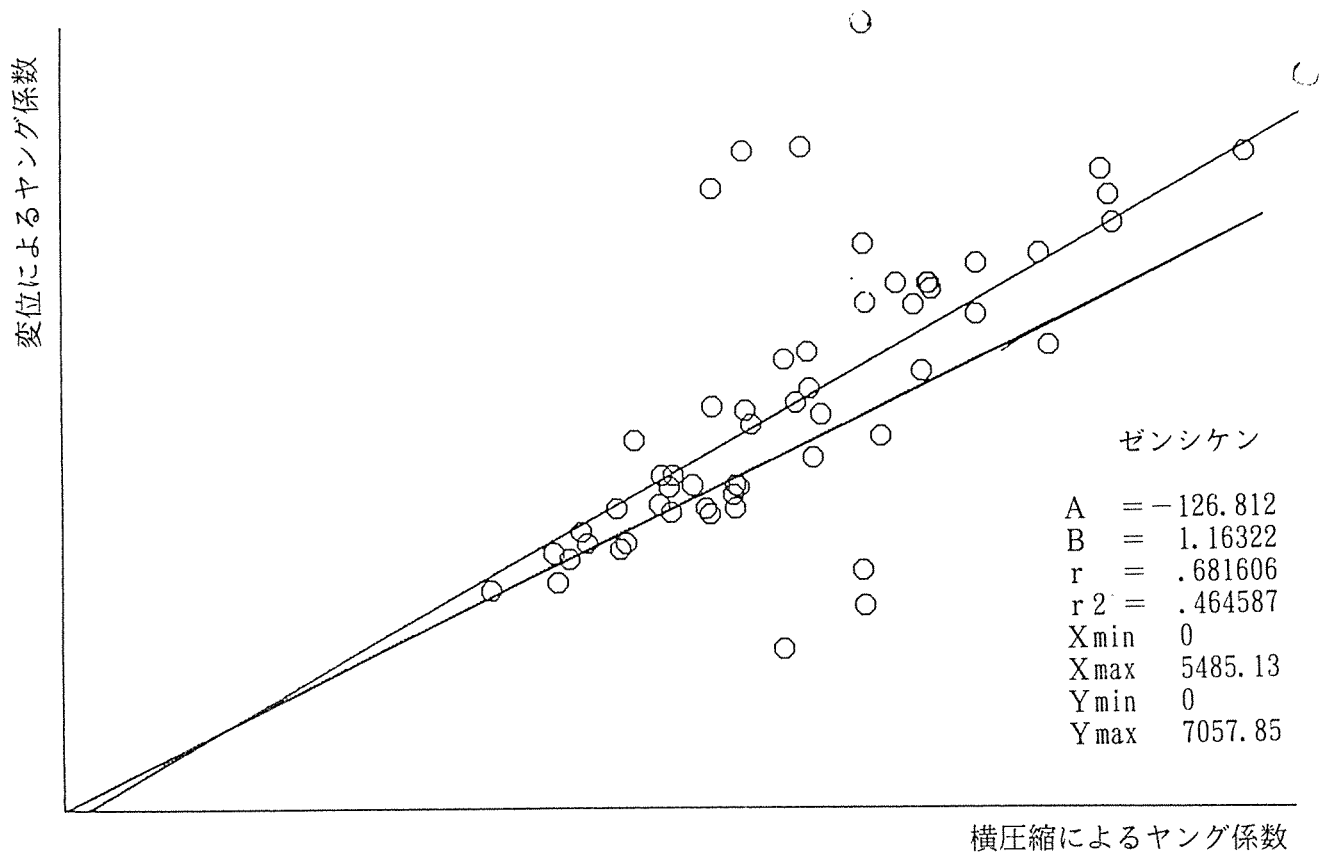


図20 変位によるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係

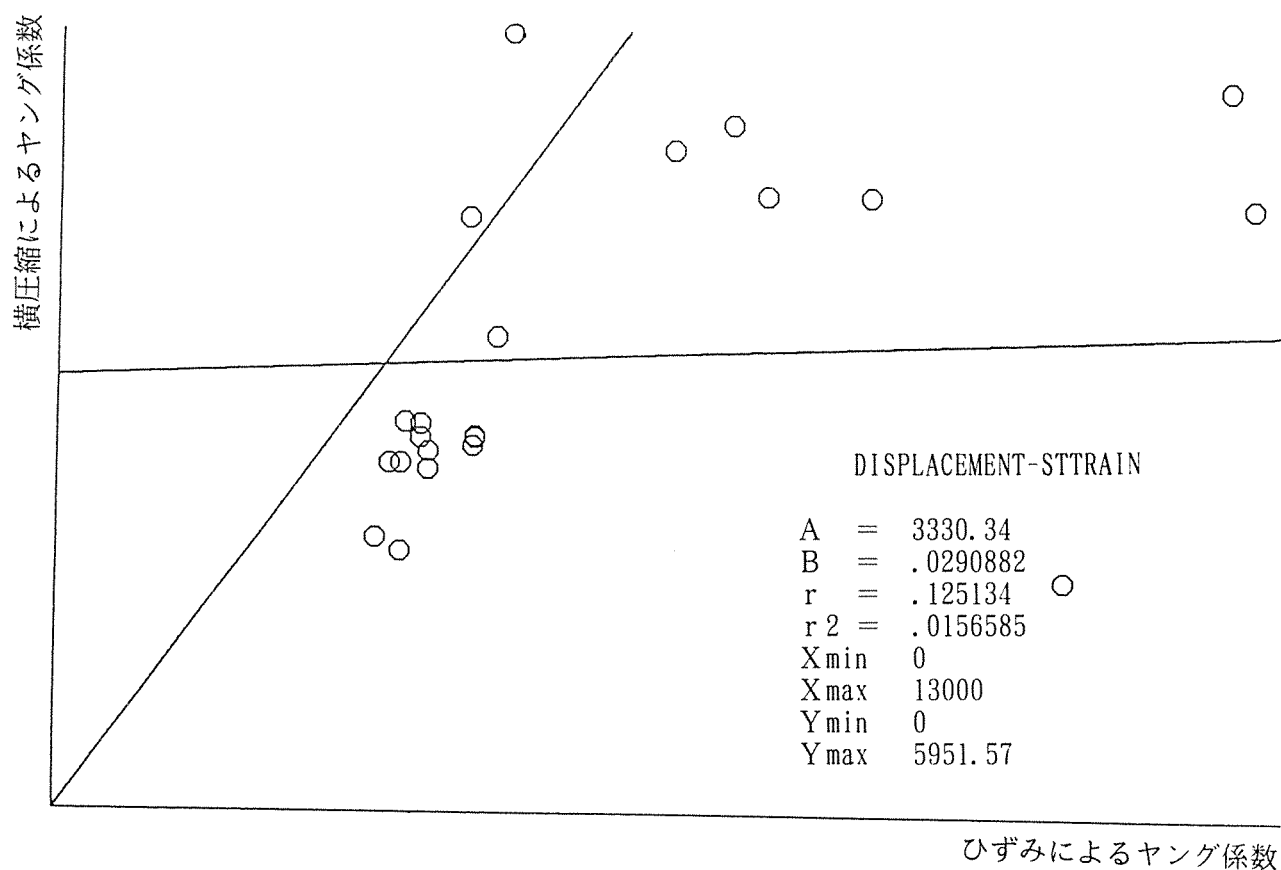


図21 ひずみによるヤング係数と横圧縮によるヤング係数の関係

4. ま と め

耐力壁の座屈についても、柱と同じ座屈現象を示す可能性が考えられ、細長比 100以上では、オイラーの座屈公式が、適合する可能性がもたれる。

第2章 大規模ログハウスのための座屈実験

1 研究目的

比較的大規模なログハウスを実現するためには、いくつかの技術的問題点を解明、あるいは、実験的に検証しておかなければならない。その一つに、木材を積み重ねた場合の「座屈」の問題がある。現行の「丸太組構法技術基準・同解説1990年版」（日本建築センター）によれば、最高高さ8.5m、あるいは耐力壁高さ4mを越えるようなものは、建築基準法38条に基づく認定を必要としている。また、耐力壁高さが4mを越えなくとも、例えばドア型開口に挟まれた壁部分で、直交壁の備わっていないような箇所の座屈性状は、必ずしも解明されてはいない。

本実験は、未解明な部分も多いログハウスの座屈問題を明らかにするために実施するものである。特に、これまで座屈問題は一本もののいわゆる「長柱」を対象としてきたが、ここでは、羊羹のような直方体の物体が積み重なった場合の座屈現象を、一本ものと同様に扱ってよいかどうかを実験的に検討するものである。

2 試験体

試験体は、鋼製の直方体を積み重ねて、所定の高さにしたものである。試験体は、大きく2つに分かれている。1つは、弱軸方向になる幅が20mmのもの（Aシリーズ）及び40mmのもの（Bシリーズ）である。Aシリーズは、試験体の全体高さを576mmとし、これを、1本ものから、2等分、3等分、6等分、12等分、24等分になるように製作した。また、Bシリーズは、当初、同じ576mmで幅40mmを計画したが、試験機の容量不足が判明したため、変更して全体高さを768mmとした。そして、この高さを、4等分、8等分、16等分、32等分の4種類とした。Aシリーズは各3体ずつ計18体。Bシリーズは2体ずつ8体。合計26体である。試験体の一覧を図2.1に示す。

なお、試験体はS S 4 1、表面は6面全てVVVの仕上げとした。また、1個当たりの高さ方向の寸法精度は ± 0.02 で製作した。

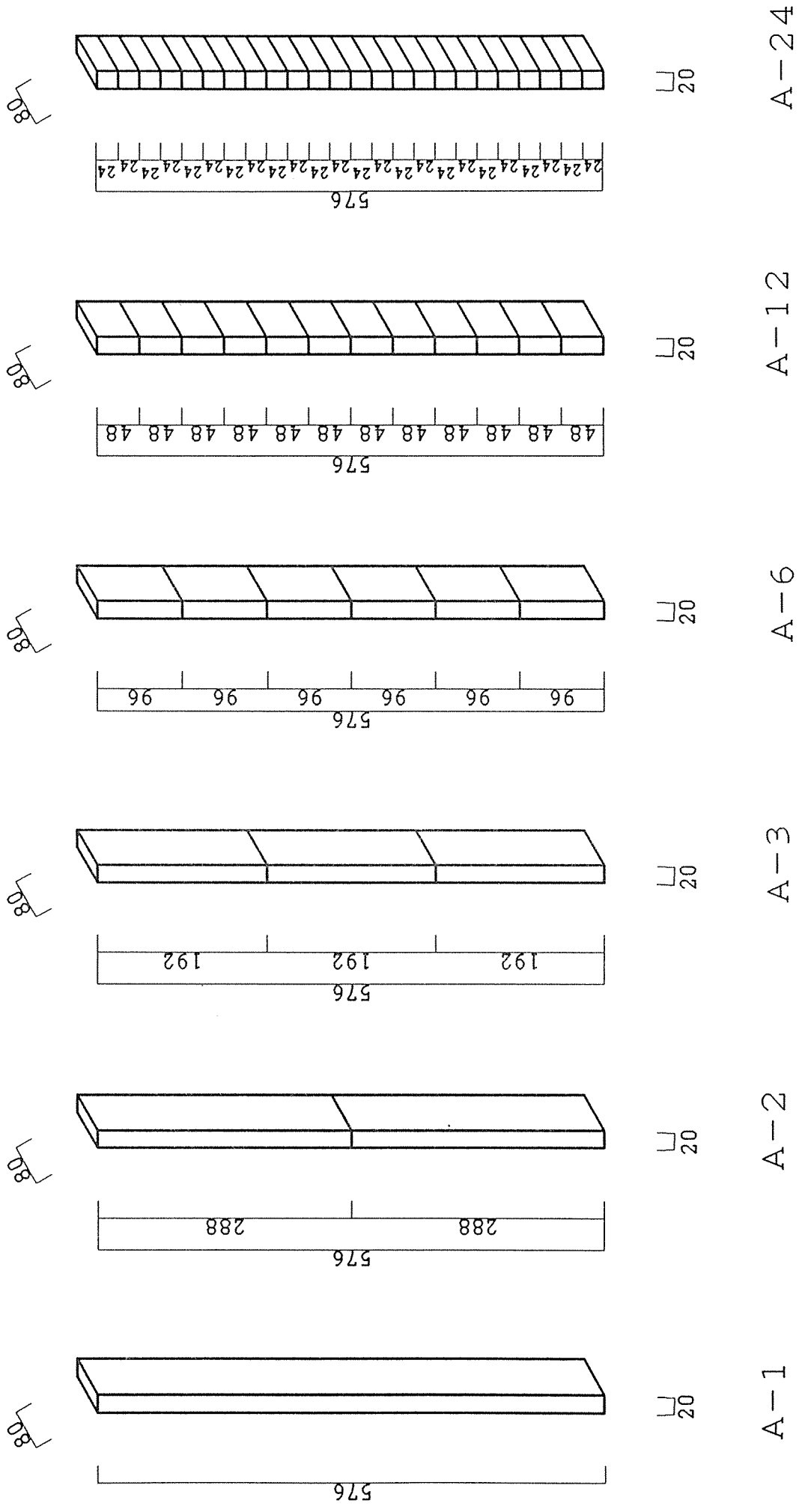
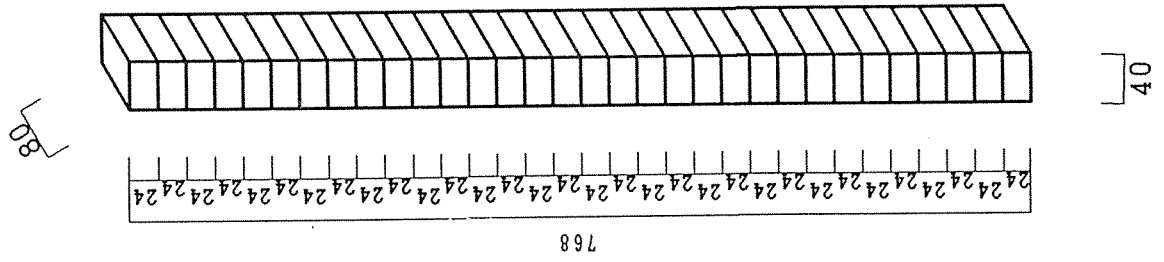
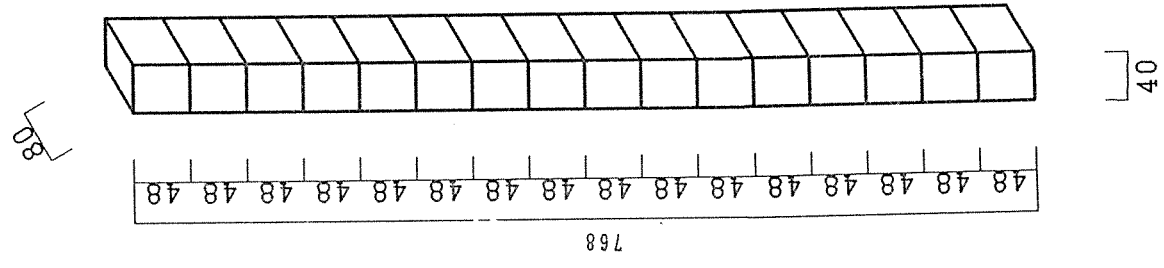


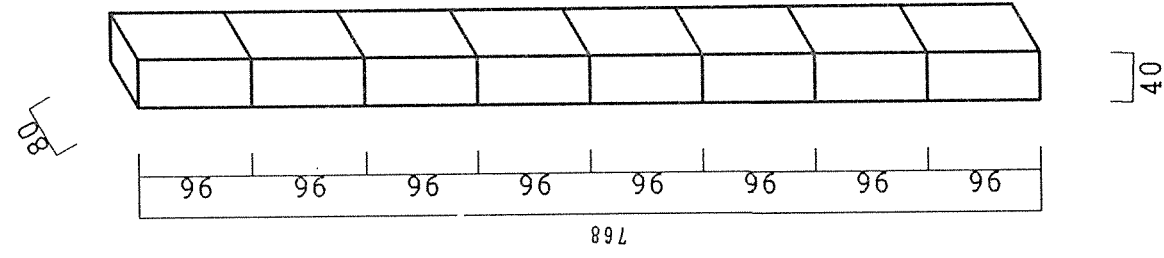
図2.1(a) 試験体一覧 (その1)



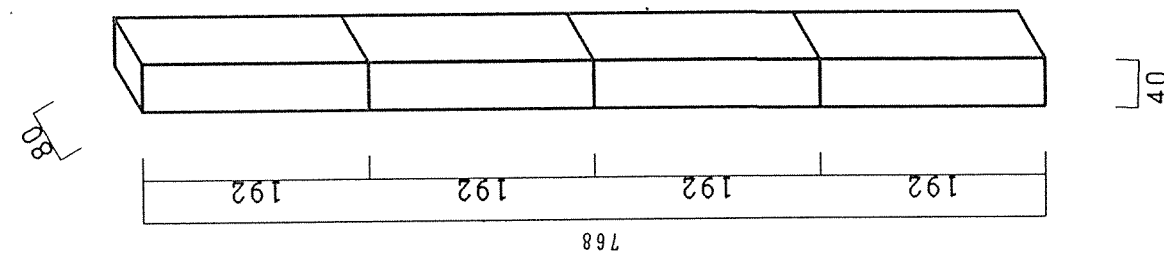
B-32



B-16



B-8



B-4

図2.1(b) 試験体一覧 (その2)

3 実験方法

実験は、図3.1に示すように、上下にピン支承をもつ試験体を、油圧式の圧縮試験機で毎分0.5mmの速度で試験体に座屈が起こるまで加力した。ピン支承とするためのカップラーは、図3.2のようなもので、これを試験体の上下にかぶせるように取り付け、これを介して加力した。従って、支点間の距離は「試験体の実寸+上下のカップラー寸法」になる。なお、荷重の大きくなるBシリーズでは、このカップラー自身が、加力によってかなり変形してしまったので、そのデータは参考程度と考えるべきであろう。

また、試験体の積み上げは人手によっており、特殊な治具は用いていない。従って、積み重ねに多少の不陸は生じていると考えられる。

また、応力の偏心を防ぐために、高さの中間地点にいちするピースにストレインゲージを貼って、歪を測定した。ストレインゲージは、図3.3のように4点としたが、2等分、6等分などのように中間点に積み重ね面が位置する場合には、上下のブロックに各4点ずつの合計8点とした。ストレインゲージの値は、加力の際に、測定値の最大・最小が20%の範囲内に入るように心掛けたが、加力とともにカップラーが変形してしまったために、これを満足するのは不可能であった。座屈の直前で極端に不揃いでなければ、問題ないと見なした。

荷重は、Aシリーズでは、試験体の下に置いた200tロードセルと、試験機直読の両方でモニターしたが、ほとんど差はなかった。そこで、試験結果としては試験機の読み値を採用した。また、Bシリーズでは、試験体の寸法からロードセルをセットできなかったため、試験機の読み値とした。歪はマイクロコンピュータで収録した。

なお、実験は、座屈の瞬間には試験体が飛散して危険なため、飛散防止用の「籠」で囲って実施した。そして、座屈の瞬間はビデオで記録した。

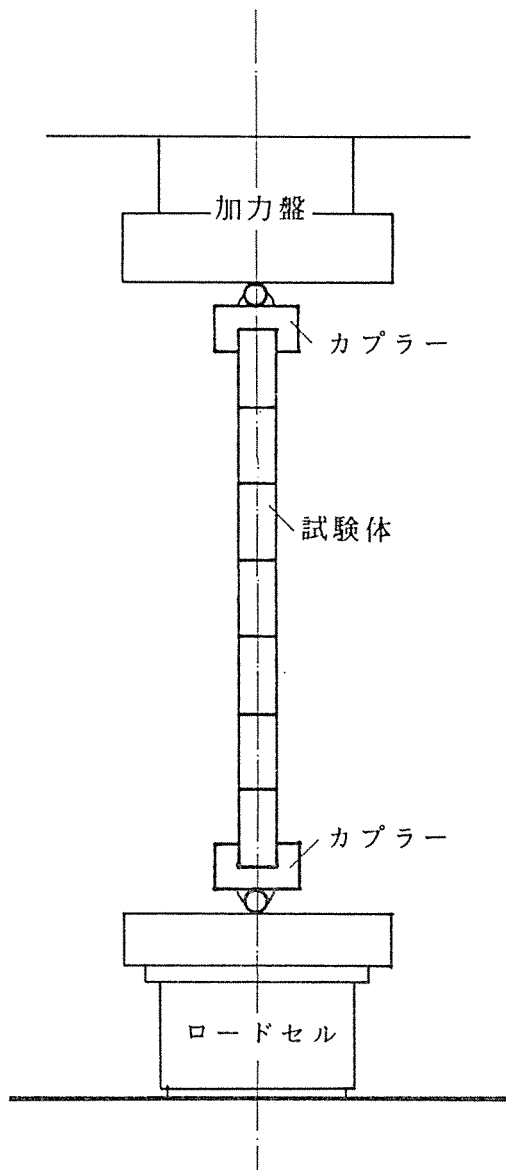


図3.1 試験装置

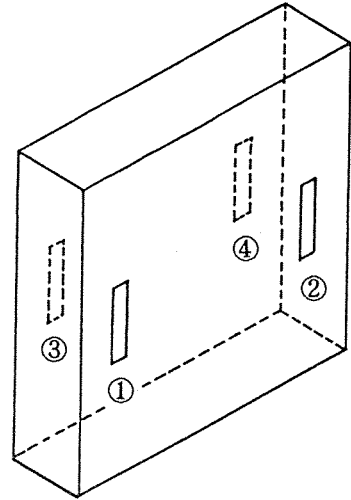


図3.3 ストレンゲージの配置

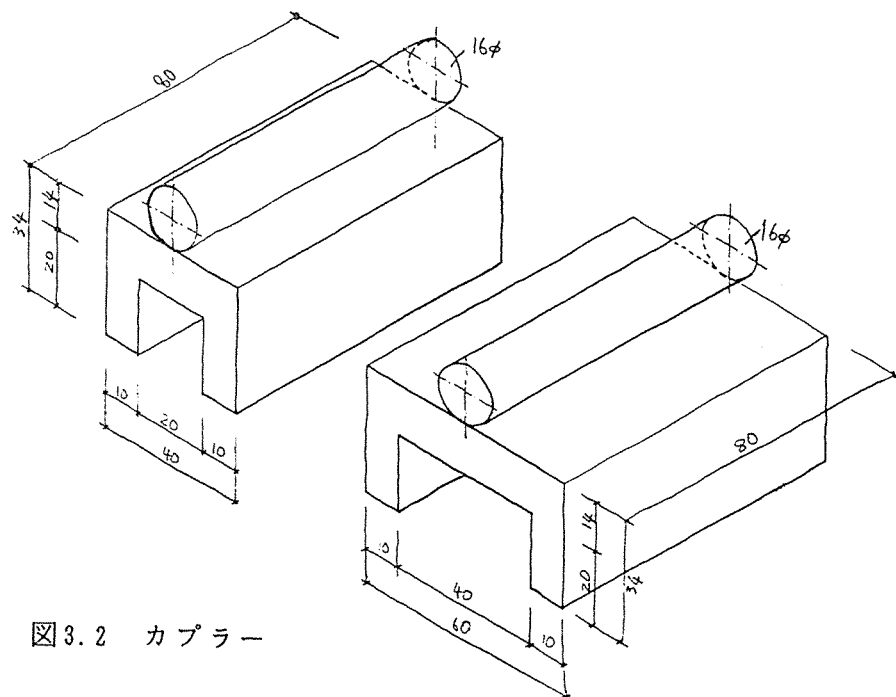
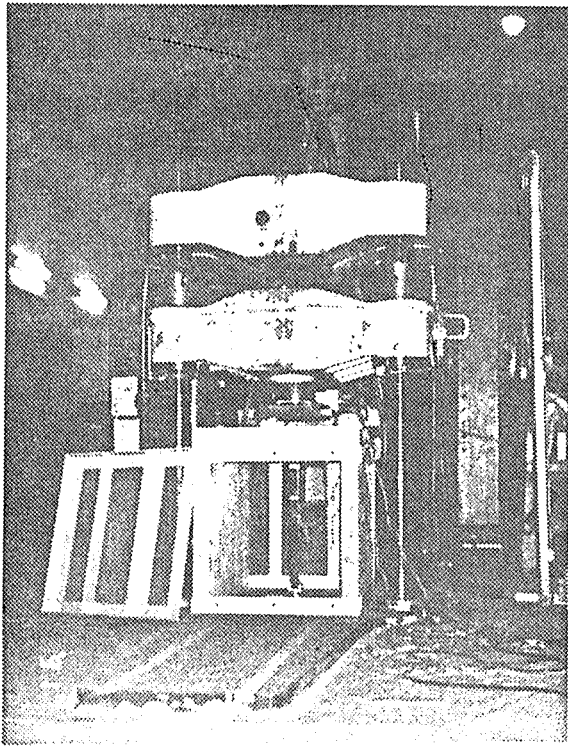
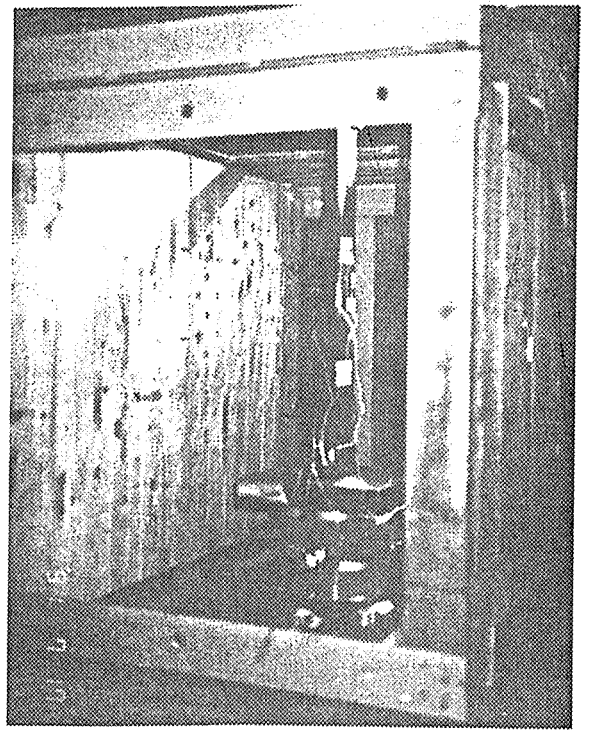


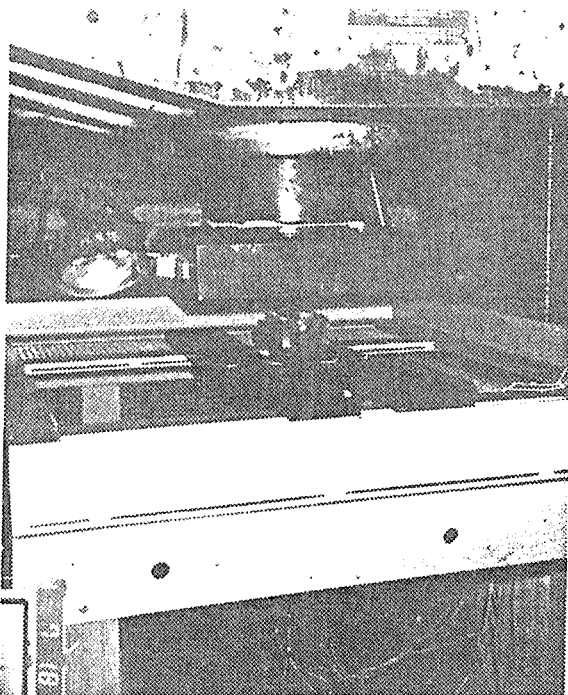
図3.2 カプラー



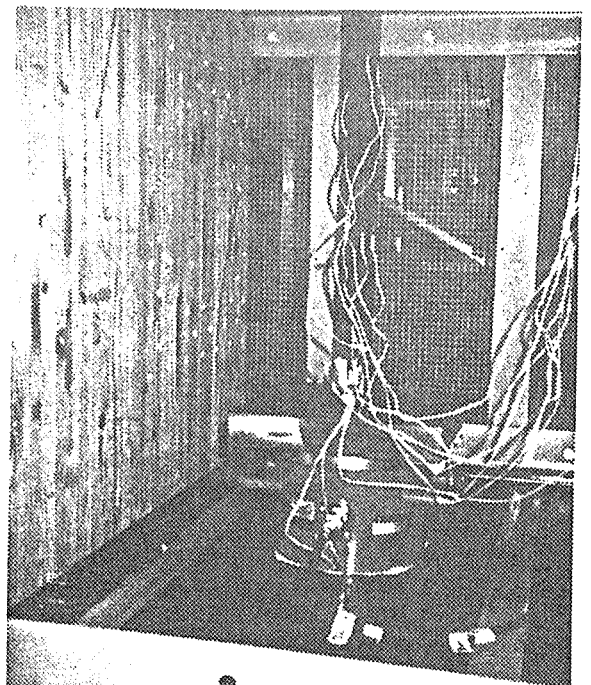
試験装置全景。飛散防止用の囲いを付けている。



Aシリーズのセット状況。ロードセルの上に載せている。



上部加力部分。Bシリーズのカプラーは加力でかなり変形してしまっている。



Aシリーズのセット状況。座屈すると、ドカンという音と共に左右のいずれかの壁に激突する。

4 実験結果

4.1 結果の概要

実験結果の一覧を表4.1及び図4.1～2に示す。

Aシリーズの1体もの(A1)は、加力していくと、荷重の上昇が止まり、横にはらみ出してくる。これによって、座屈したことが判明する。荷重もこのはらみ出しを契機に低下していく。

一方、それ以外の分割した試験体は、荷重が上昇しなくなって後、突然、ドカンと片方向に座屈・飛散した。いずれの試験体も、座屈箇所は中間部分であった。A1では、加力後、試験体が曲がっているのが観察されたが、それ以外では、図4.3のように、座屈の生じたピース(直方体)の接触面の角に、三角形のつぶれた跡が観察された。これは、つぶれた三角形の大小にばらつきはあるものの、Aシリーズ・Bシリーズともに共通した現象であった。

なお、図4.4にAシリーズ各試験体の歪の変化を示した。座屈の方向の歪の差(①と②、③と④の差)は途中までは小さく保たれたものの、長手方向(①③に対して、②④の値)でかなり異なった値を示している。

表4.1 実験結果(座屈強度)一覧(ton)

	1体目	2体目	3体目	平均
A1	29.1	33.1	28.1	30.1
A2	27.0	26.4	26.5	26.6
A3	26.1	29.6	25.3	27.0
A6	31.4	25.2	28.5	28.4
A12	(22.3)	31.2	33.4	32.3
A24	(22.5)	25.7	27.5	26.6
B4	107.5	104.5		106.0
B8	99.2	83.3		91.3
B16	78.5	79.0		78.8
B32	61.0	76.0		68.5

注) 括弧付きは偏心加力のため不採用。平均値は、この括弧付きを除いて算出した。

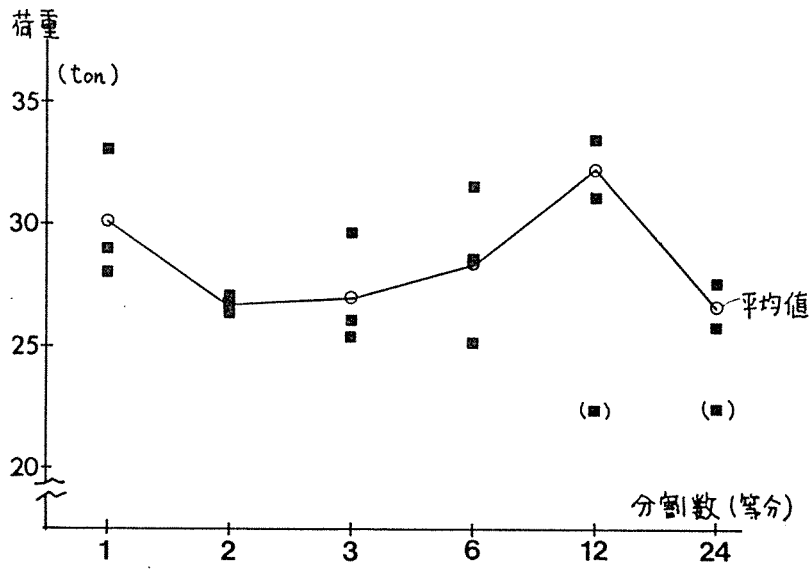


図4.1 Aシリーズの座屈荷重

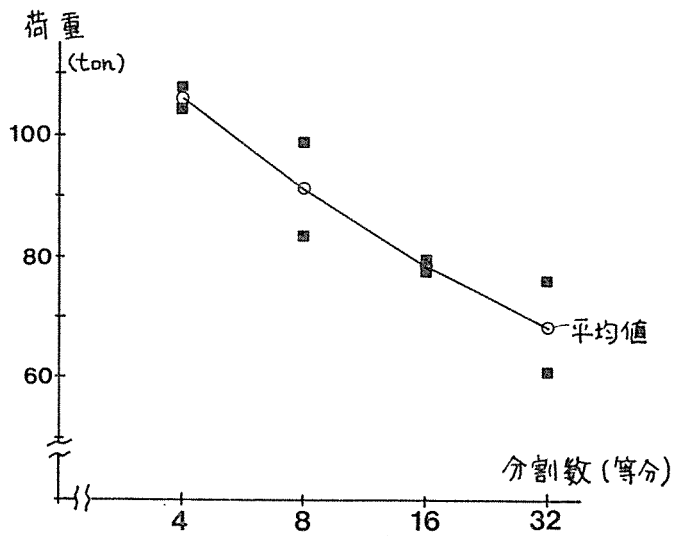


図4.2 Bシリーズの座屈荷重

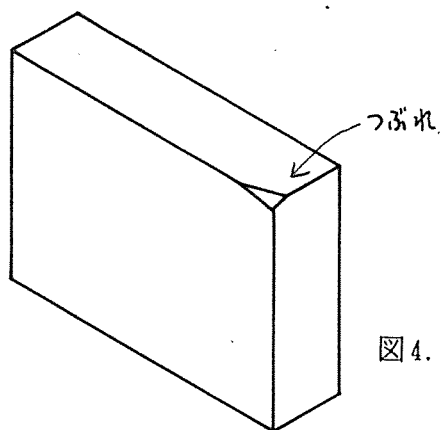


図4.3 座屈箇所のスケッチ

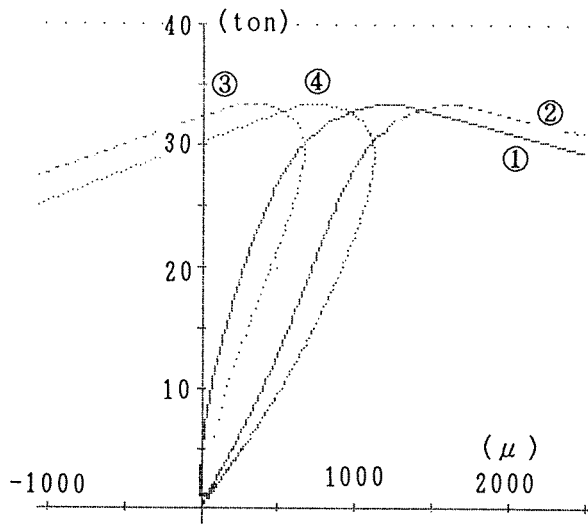


図4.4(a) 歪の変化 (A 1 - 2)

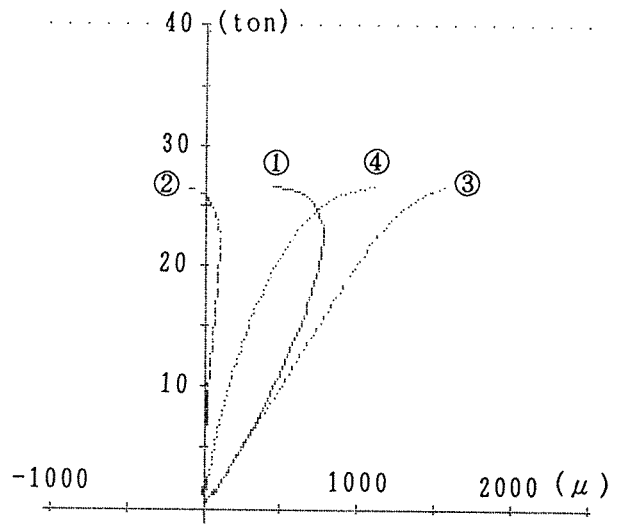


図4.4(b) 歪の変化 (A 2 - 2)

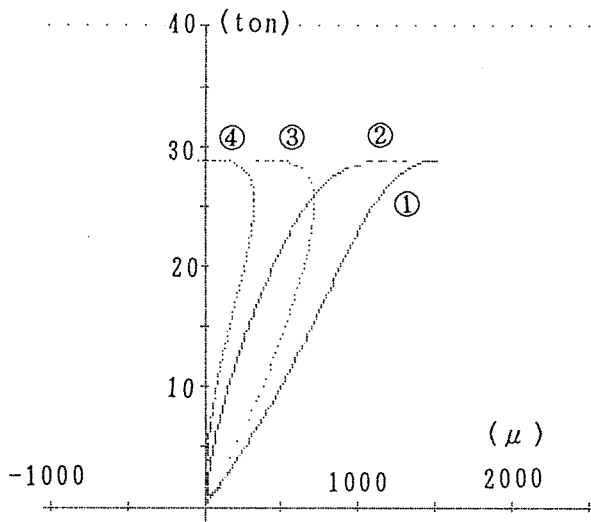


図4.4(c) 歪の変化 (A 3 - 2)

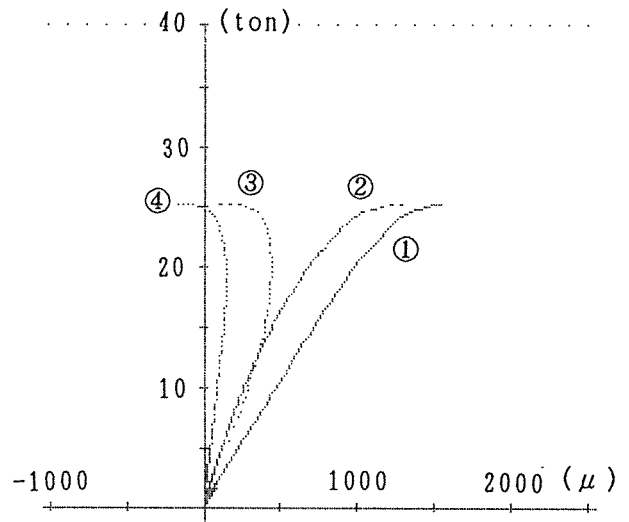


図4.4(d) 歪の変化 (A 6 - 2)

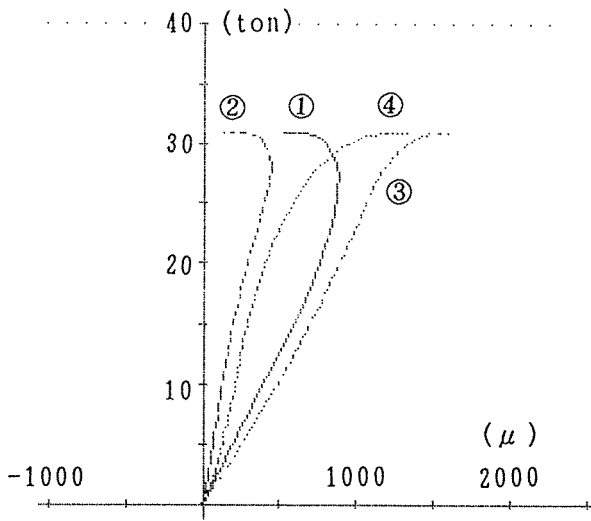


図4.4(e) 歪の変化 (A 1 2 - 2)

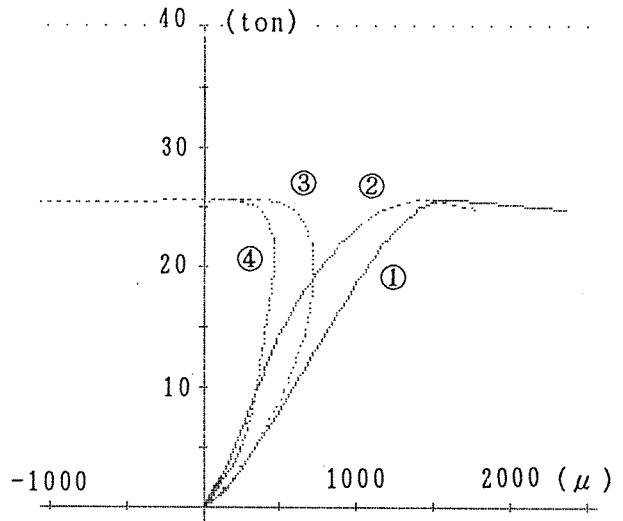


図4.4(f) 歪の変化 (A 2 4 - 2)

4. 2 考察

さて、図4.1及び図4.2より、幅20mmのAシリーズでは、「分割の影響はない」と言えそうであるし、一方、Bシリーズからは「分割数が多くなるに従って、座屈強度は小さくなる」と異なった結論が導き出される。

この解釈としては、まず第一は、データの信頼性の問題である。前述のように、Bシリーズでは試験体上下のカプラーがかなり変形してしまっている。支点となる円の底面がつぶれて、数mmから1cmくらいの幅を有するようになっていた。従って、支点の条件をピンと仮定できない可能性がある。Bシリーズのデータは、信頼性の点ではAシリーズに劣る。

次に考えられる解釈は、「細長比の大きな場合には（Aシリーズのような）分割の影響はなく、細長比が小さい場合（Bシリーズ）には、分割数が多くなるほど座屈強度は小さい。」というものである。

オイラーの座屈式によれば、両端ピンの場合の座屈荷重は、

$$P_b = \pi^2 E I / l^2$$

ここで、 P_b : 座屈荷重
 E : 縦弾性係数
 I : 断面二次モーメント
 l^2 : 座屈長さ

A、B両シリーズとも一本もの、また、 $E = 2,100,000 \text{ kg/cm}^2$ とすれば、座屈荷重は、

$$\begin{array}{ll} \text{Aシリーズ} & P_b = 27.3 \text{ ton} \\ \text{Bシリーズ} & P_b = 128.9 \text{ ton} \end{array}$$

と、求まる。実験結果と比較すると、Aシリーズはほぼ計算値とおりのA値を示したが、Bシリーズでは実験値の方が下回った。

ところで、細長比を求めてみると、

$$\text{細長比 } \lambda = l_x / i$$

ここで、

$$\begin{aligned} l_x &= \text{座屈長さ} \quad (\text{両端ピンの場合は実長}) \\ i &= \text{断面2次半径} = \sqrt{I/A} \\ &= h / 3.46 \quad (\text{長方形断面の場合: } h \text{ は弱軸方向一辺の長さ}) \end{aligned}$$

$$\therefore \text{A シリーズ } \lambda = 63.6 / (2/3.46) = 110.0$$

$$\text{B シリーズ } \lambda = 82.8 / (4/3.46) = 71.6$$

従って、Bシリーズの細長比は、オイラーの式の適用範囲（概ね λ が100以下）よりも小さい。実験値が計算値を下回っているのは理解できる。

細長比の小さな柱の座屈については、次頁に示すようないくつかの実験式が提案されており、日本建築学会「木構造計算規準・同解説」では、次頁のような線分を定めている。

それぞれの式に当てはめたBシリーズ（1本ものとして）の座屈荷重は、次の通りである。

(1) ランキンの式 64.6ton

(2) テトマイヤーの式 73.1ton

圧縮降伏点強度を、 $3,000\text{kg/cm}^2$ とすると

(3) J. B. ジョンソンの式 78.2ton

比例限強度を、 $3,000\text{kg/cm}^2$ とすると

(4) T. H. ジョンソンの式 92.2ton

これらの値と今回の実験値を比較すると、今回の実験値は、8体の平均でも86.1tonを示している。分割してあるにも関わらず、全体的にかなり大きな値になっていることが分かる。ちなみに、座屈による影響を考慮しない場合の降伏点荷重は、 $3,000\text{kg/cm}^2 \times 32\text{cm}^2 = 96\text{ton}$ で、これよりも大きな値を示したものも見られたことになる。

一方、今回のBシリーズの実験値は、図4.5に示すように、両対数グラフに載せるとかなりよい相関を示している。座屈荷重を y (ton)、分割数を x とすると、

$$y = 141.8 x^{-0.212}$$

で、相関係数 $r = 0.919$ である。この式からは、一本ものの時の荷重は141.8tonと求まり、やはり、前述のいくつかの実験式や96tonよりもかなり大きな値になってしまう。材料試験が必要かもしれない。

従って、今回のBシリーズの実験データはやはり参考程度と考えたい。ただし、以上のように、「細長比の小さい柱では、分割数が大きくなると座屈荷重は小さくなる」可能性は残っている。

(1) Rankine (ランキン) の式

$$\sigma_k = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha \lambda^2} \quad (11.4)$$

ここに σ_k : 座屈応力 [kg/cm²] $\lambda = l/k$: 細長比
 σ_0, α : 実験から求めた定数。表 11.2 に示す。

(2) L. v. Tetmajer (テトマイヤー) の式

$$\sigma_k = \sigma_0(1 - \alpha\lambda + \beta\lambda^2) \quad (11.5)$$

ここで σ_k : 座屈応力 [kg/cm²] $\lambda = l/k$: 細長比
 σ_0, α, β : 実験から求めた定数。表 11.3 に示す。

表 11.2

材 料	σ_0 kg/cm ²	α	λ の範囲
鑄 鉄	5600	1/1600	< 80
鍛 鉄	2500	1/9000	< 110
軟 鋼	3400	1/7500	< 90
硬 鋼	4900	1/5000	< 85
木 材	500	1/750	< 60

なお、Euler, Rankine, Tetmajer の各式に対して、座屈応力 σ_k と細長比 l/k の関係を図示すれば、図 11.1 に示すような曲線となる。

(3) J. B. Johnson (ジョンソン) の放物線式

$$\sigma_k = \sigma_0 - \frac{\sigma_0^2}{4\pi^2 E} \lambda^2 \quad (11.6)$$

ここに σ_k : 座屈応力 [kg/cm²] $\lambda = l/k$: 細長比 σ_0 : 圧縮降伏点または圧縮強さ [kg/cm²] E : 縦弾性係数 [kg/cm²]

この放物線式は、図 11.2 に示すように、Euler の曲線に接する放物線 PQ を表わす

表 11.3

材 料	σ_0 kg/cm ²	α	β	λ の範囲
鑄 鉄	7760	0.01546	0.00007	5~80
鍛 鉄	3030	0.00426	0	10~112
軟 鋼	3100	0.00368	0	10~105
硬 鋼	3350	0.00185	0	< 90
木 材	293	0.00626	0	1.8~100

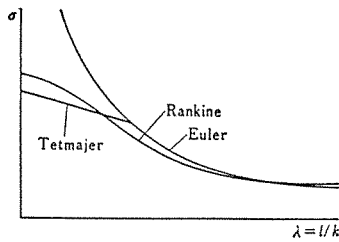


図 11.1

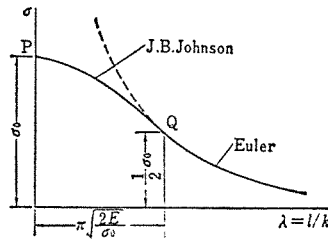


図 11.2

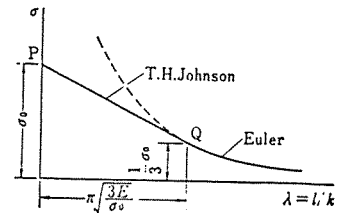


図 11.3

もので、細長比 λ が

$$\lambda < \pi \sqrt{\frac{2E}{\sigma_0}}$$

に対して適用される。

(4) T. H. Johnson (ジョンソン) の直線式

$$\sigma_k = \sigma_0 - \frac{2\sigma_0}{9\pi} \sqrt{\frac{3\sigma_0}{E}} \lambda \quad (11.8)$$

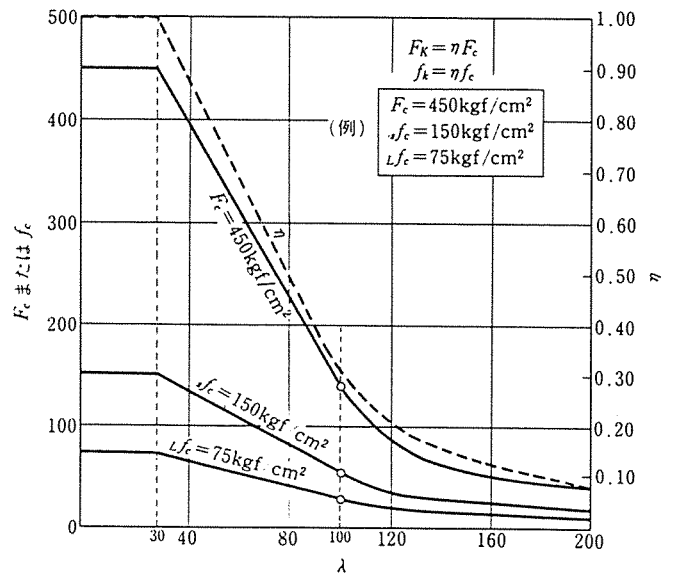
ここに σ_k : 座屈応力 [kg/cm²] $\lambda = l/k$: 細長比 σ_0 : 比例限度 [kg/cm²] E : 縦弾性係数 [kg/cm²]

この直線式は、図 11.3 に示すように、Euler の曲線に接する直線 PQ を表わすもので、細長比 λ が

$$\lambda < \pi \sqrt{\frac{3E}{\sigma_0}} \quad (11.9)$$

に対して適用される。

齊藤他「詳解 材料力学演習」共立出版、より



細長比と許容座屈応力度、座屈低減係数との関係

日本建築学会「木構造計算規準・同解説」、より

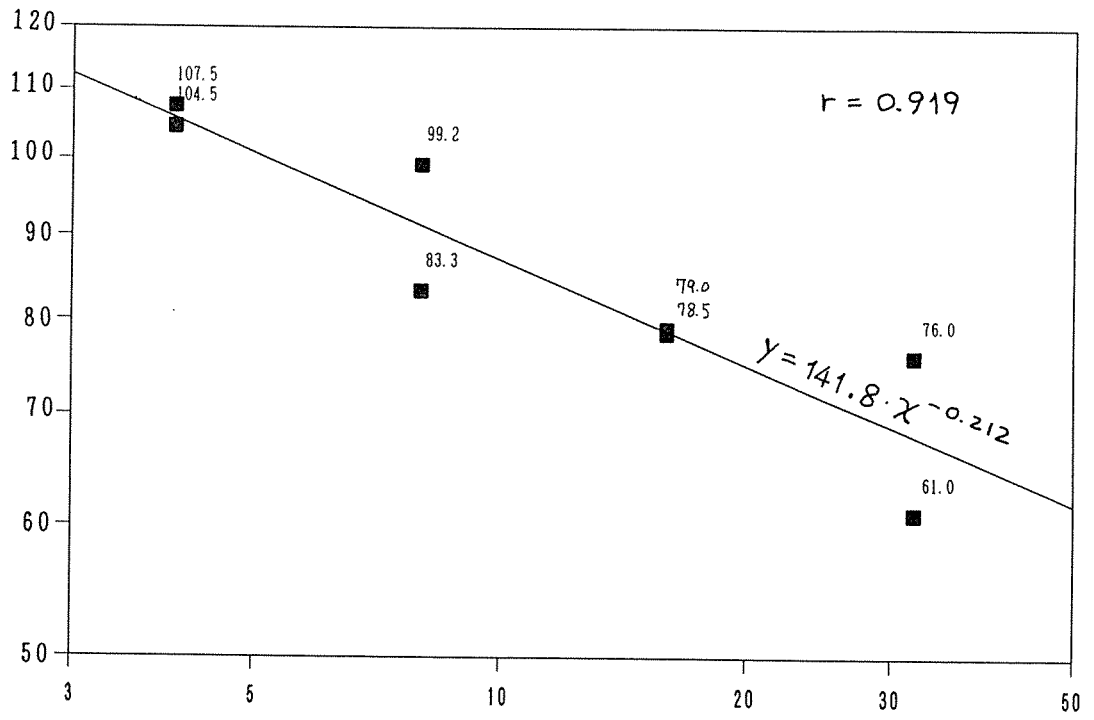


図4.5(a) Bシリーズの座屈荷重（両対数グラフ）

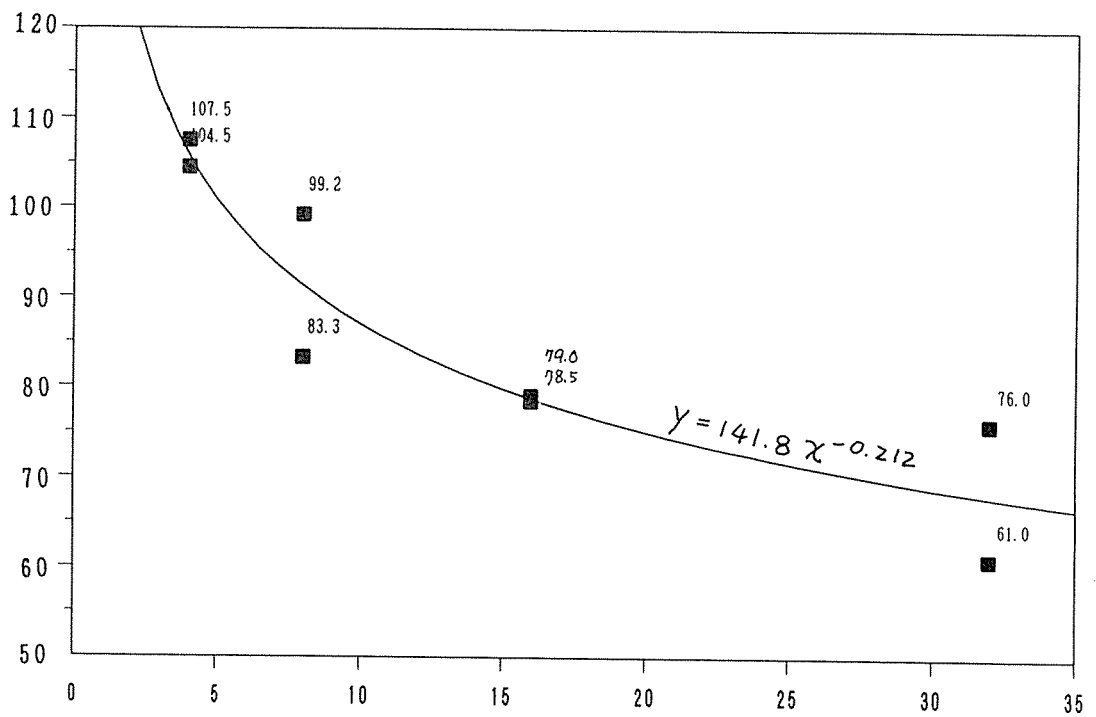


図4.5(b) Bシリーズの座屈荷重

5 実験のまとめ

ログハウスを想定して、鋼製の直方体を積み重ねた試験体を製作し、その座屈実験を実施した。その結果、オイラーの座屈式の適用に関して、細長比が 110 の A シリーズでは「分割の影響は見られなかった」。一方、細長比が約 72 の B シリーズからは、「分割数が多くなるに従って、座屈強度は小さくなる」傾向が示されたが、従来の実験式との対応はよくない。実験データの信頼性に問題があるなど、こちらのデータは参考程度と考えるべきであろう。