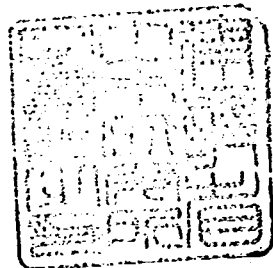


土木研究所資料

樹木の衝撃エネルギー吸収能に関する 基礎実験報告書



昭和62年1月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

Copyright © (1987) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

樹木の衝撃エネルギー吸収能に関する 基礎実験報告書

砂防研究室室長 矢澤昭夫
主任研究員 水山高久
鈴木浩之

要 旨

砂防ダムを建設する場合、これまではそのダムの堆砂域にある樹木を伐採して搬出して
いた。しかし、堆砂地内にある樹木に土石流の衝撃力を緩和する効果があれば、伐採せず
にこれを利用することによって砂防ダムを安全に機能させることができる。このためには、
樹木の衝撃緩和効果を定量的に評価することが必要となり、これが得られれば樹木を有効
に活用する方法も考えられる。

本報告は、立木の土石流衝撃エネルギー吸収能を検討するために、直径の異なるスパン
2 mの杉の皮付き生丸太の単純梁に重錘を自由落下させて木材の動的応答特性を調べる衝
撃载荷試験、静的载荷試験、シャルピー試験を実施した。その結果、衝撃エネルギー吸収
能は静的エネルギー吸収能と等しくなることが分かり、スパン2 mの杉生丸太単純梁の衝
撃エネルギー吸収能を求める実験式を提案した。この結果に基づき、任意のスパン、任意
の直径をもつ杉の単純梁の衝撃エネルギー吸収能を推定する手法を提案した。

キーワード：土石流、衝撃力、緩衝材、土石流緩衝樹林帯、衝撃応答解析

Basic Experimental Study of the Impact Force Absorptivity of Trees

by

Akio YAZAWA
Takahisa MIZUYAMA
Hiroyuki SUZUKI

Synopsis

In the construction of Sabo dams so far, trees inside the depositional area of those dams have been cut down and removed. However, if the trees inside the depositional area have the effect of mitigating the impact force of the debris flow, Sabo dams can be made to function safely by utilizing the unfelled trees. Therefore, it becomes necessary to estimate quantitatively the cushioning effect of trees in order to make the most effective use of them.

For the study of the impact force absorptivity of trees, this report carried out impact loading experiments, static loading experiments and the Charpy Test to examine the dynamic response records of trees. A weight was dropped freely on to some simple beams of green barked cedar logs of 2 m long and of various diameters. The results review that the impact force absorptivity amounts to the static force absorptivity. An empirical formula which calculates the impact force absorptivity of the simple beam of green cedar log of 2 m long was proposed as a method to presume the impact force absorptivity of a simple beam of cedar of any length and diameter.

KEY WORDS: Debris flow, Impact force, cushioning materials, Forest belt to absorb the impact of debris flow, impact response analysis

は　じ　め　に

土石流対策のダムについては土石流の衝突時に部分的に破壊されることがあり、補強、緩衝の方法を確立することが緊急に必要となっている。本報告書は、緩衝の一方法として考えられている土石流緩衝樹林帯のような樹木を利用した対策の効果についての基礎的な研究の成果で、東北地方建設局新庄工事事務所より「鋼製砂防ダム緩衝材試験」として依頼された課題である。

直径の異なる皮付き杉丸太について静的試験と衝撃試験を実施し、立木の衝撃エネルギー吸収能を推定した。

昭和 62 年 1 月

目 次

はじめに

1. 実験の目的	1
2. 実験の概要	2
3. 実験結果	4
3.1 衝撃実験	4
(1) 実験方法	4
(2) 実験条件	8
(3) 実験結果	10
3.2 静的載荷実験	31
(1) 実験方法	31
(2) 実験条件	32
(3) 実験結果	33
3.3 シャルピー試験	42
(1) 試験方法	42
(2) 試験条件	43
(3) 試験結果	44
4. 解 析	50
4.1 静的エネルギー吸収能	50
4.2 衝撃エネルギー吸収能	50
4.3 シャルピー試験値と衝撃エネルギー吸収能の比較	51
4.4 木材の衝撃エネルギー吸収能の推定方法	52
4.5 立木の衝撃エネルギー吸収能の推定方法	52
4.6 結 論	55
5. 今後の課題	56
参考資料集	57

1. 実験の目的

山岳地に砂防ダムを建設する場合、これまではそのダムの貯砂地内に生育している樹木を伐採して搬出していた。ところが、当該地から産出される木材は商品としての価値が低く、伐採、搬出、製材加工等にかかる経費を考慮すればそのまま放置しておく方が経済的には得であるという状況になっている。

一方、貯砂地内に自然のまま放置される樹木群が土石流の衝撃力を緩和する効果があれば、伐採するどころかこれを利用することによって砂防ダムを安全に機能させることができる。このためには、樹木の衝撃力緩和効果を定量的に評価するための指標が必要となり、これが得られれば立木を有効に活用する方法も案出できると考えられる。

ところが、木材は生育環境（寒暖、乾湿、日照、土壌など）の影響を強く受ける天然の材料であり、人工材料である鉄鋼やコンクリートと異なり材料が不均質（異方、異質）である。したがって、同一の樹種でも強度性状値のばらつきが極めて大きい。また、他の材料に比べてもろい、変形しやすいなどの特徴を有している。

このため、無欠点の小型試験体を対象とした標準試験の結果を用いて実際の立木の強度性状を評価する場合、どの程度の信頼度が見込めるかという問題がある。言い換えれば、樹種の違いや生育環境などの変化に起因する強度性状を統一的に、しかも定量的に把握することは不可能である。つまり、実際に生育している立木と、これを切り出した試験体との間には、含水率の差異や枝葉・根張りおよび寸法の影響など強さと剛性の上でかなりの相違が認められるはずである。しかしながら、木材の耐力・変形性状およびエネルギー吸収能などに影響を及ぼす支配的な要因を把握することができれば、近似的ではあっても立木の衝撃抵抗力を評価する一つの基準を設定することができる。

本報告は、その基礎的段階として立木一本の衝撃抵抗力を把握するために行った実験である。

同的生理特性。如多数(1)~(4)种野兔,在夏季产仔,产仔数1~4只,幼兔在夏季生长快,到秋季体重可达1000克以上,成年兔体重达2000克以上。而少数(5)~(7)种野兔,在春季产仔,产仔数1~2只,幼兔在春季生长快,到秋季体重可达1000克以上,成年兔体重达2000克以上。因此,在研究野兔的生理特性时,应结合其生活史,分析其生理特性,以便更好地利用野兔资源。

由の競争、すなわち利益競争が利益を包含する間の排他性一階級を反映する利益階級（利益）

2. 実験の概要

実験方法を決定するにあたり、土石流の立木に対する作用について考えてみた。

土石流は、集中豪雨等により、土中の水分が急増した場合に、水流が土や石礫を巻き込むような形で生起する。従って、その主成分は水、泥（土）、石礫である。

この土石流が立木に及ぼす影響について考えると以下の2点となる。

① 水+泥が立木に与える影響

土石流の中心である水と泥が立木に及ぼす影響は、その含水状態にもよるが、主は、水圧（土圧）である。斜面の勾配により、ある一定の速度で立木に衝突するが、立木の断面積が狭いので、ほとんどが立木の左右に分かれて進行していくので、立木を破壊する決定的な要因とはならないと思われる。

② 土石流中の石礫が立木に与える影響

土石流中に含まれる石礫は、主として土石流先頭部に多く含まれているが、土石流と同程度の速度をもって流下してくる。従って、この石礫が立木に衝突し、石礫のもつ運動エネルギーが立木のもつエネルギー吸収能より大きければ、立木は破壊すると考えられる。

破壊状態は、立木の根の状況等各種の要因があり、一概に決定できるものではないが、大きく分けて、根から掘り起こされる場合と立木の途中から折られる場合の2つが考えられ、いずれの場合も主な破壊原因は曲げ力によるものであると考えられる。

以上のことから立木の衝撃力緩衝効果の対象として考えられるのは主として石礫である。

従って、本実験では立木に石礫が衝突して衝撃力を受ける場合について考え、実験方法は、立木を単純梁に置換し、単純梁上に重錘（約 150 kgf, 200 kgf）を自由落下させて衝撃を加える方法とした。

これは、立木の破壊形態は、曲げによる破壊であり、単純梁に対する中央載荷形式は、最も簡単に曲げ破壊を生起するモデルであること、また、立木自体の強度、変形性能等が明らかでないこと、立木として実験をする場合、根による地面への固定状態等さらに複雑な要因が含まれ、実験が困難であるため、まず、天然の樹木（今回は最も一般的な樹種として杉材を使用した。）のもつ強度、変形性能等を明らかにし、樹木そのものがもつ衝撃エネルギー吸収能を推定することを主眼としたことによる。

衝撃実験は、既述したように単純支持した杉丸太材に重錘を自由落下させて横衝撃を加え、このとき発生する荷重 F 及び載荷点（中央点）の変位 δ を測定し、エネルギー吸収能（ E_{D1} ）を

$$\text{エネルギー吸収能} (E_{D1}) = \text{荷重}(F) \times \text{載荷点変位}(\delta)$$

より求め、この E_{D1} が衝突速度、木材の径によりどのように変化するかを検討した。

単純支持状態の木材の衝撃エネルギー吸収能（ E_{D1} ）は、静的エネルギー吸収能（ E_s ）と 載荷速度及び木材の直径の関数として表わされると仮定して、基礎となる静的エネルギー吸収能（ E_s ）を実験的に求めるため静的載荷実験を実施した。この際の実験のパラメーターは木材直径とし、3種類の径に大別して実施した。

さらに、載荷速度と衝撃エネルギー吸収能の関係を調べるために衝撃実験において、垂錘の衝

突速度をパラメーターとして実験を実施した。

木材は、同一の樹種で、同一地点から採取したものであってもその強度、変形性能等には、大きなバラツキがある。また、同じ木材の中でも、使用する場所によりバラツキが生じる。

従って、素材レベルでの強度、変形性能等のバラツキあるいは、エネルギー吸収能のバラツキの範囲を把握するためにシャルピー試験を実施した。

実験の種類を表2-1に示す。

表2-1 実験の種類

実験の種類	実験モデル	測定項目	目的
衝撃実験	単純ばり中央載荷	衝撃荷重 F_{D1} 載荷点変位 δ_{D1}	衝撃エネルギー 吸収能 E_{D1} を求める。 $E_{D1} = F_{D1} \cdot \delta_{D1}$
静的載荷実験	単純ばり中央載荷	静的荷重 F_s 載荷点変位 δ_s	静的エネルギー 吸収能 E_s を求める。 $E_s = F_s \cdot \delta_s$
シャルピー試験	JIS規格に基づく	試験体断面積 A 吸収エネルギー E	シャルピー衝撃値 E_{D2} を求める。 $E_{D2} = E / A$

3. 実験結果

3.1 衝撃実験

(1) 実験方法

① 実験装置

図3.1に示すような、H型鋼(H200mm×B200mm)で組んだ架合及び支点部と、図3.2に示すような高さ4mの落錘装置からなる。架合は、アンカーボルト24本で床に固定し、架合上にスパン2mの単純支持が可能な支点部を設置してある。支点部は、重錘衝突時の跳ね上がりを防止するため、上下方向から木材をはさみ込み、さらに、単純支持の条件を満足するように、木材の変形に伴い支点部が回転できる機構とした。

落錘装置は、足場パイプで一辺1mの正方形で高さ4mの枠組を組み、その内部に落錘用のガイドをとりつけ、重量150kgf～200kgfの重錘を電磁石(揚力250kgf)付のウインチで吊り上げる機構とした。重錘は、電磁石の電源を切ることにより落下させた。



写真3.1 実験装置

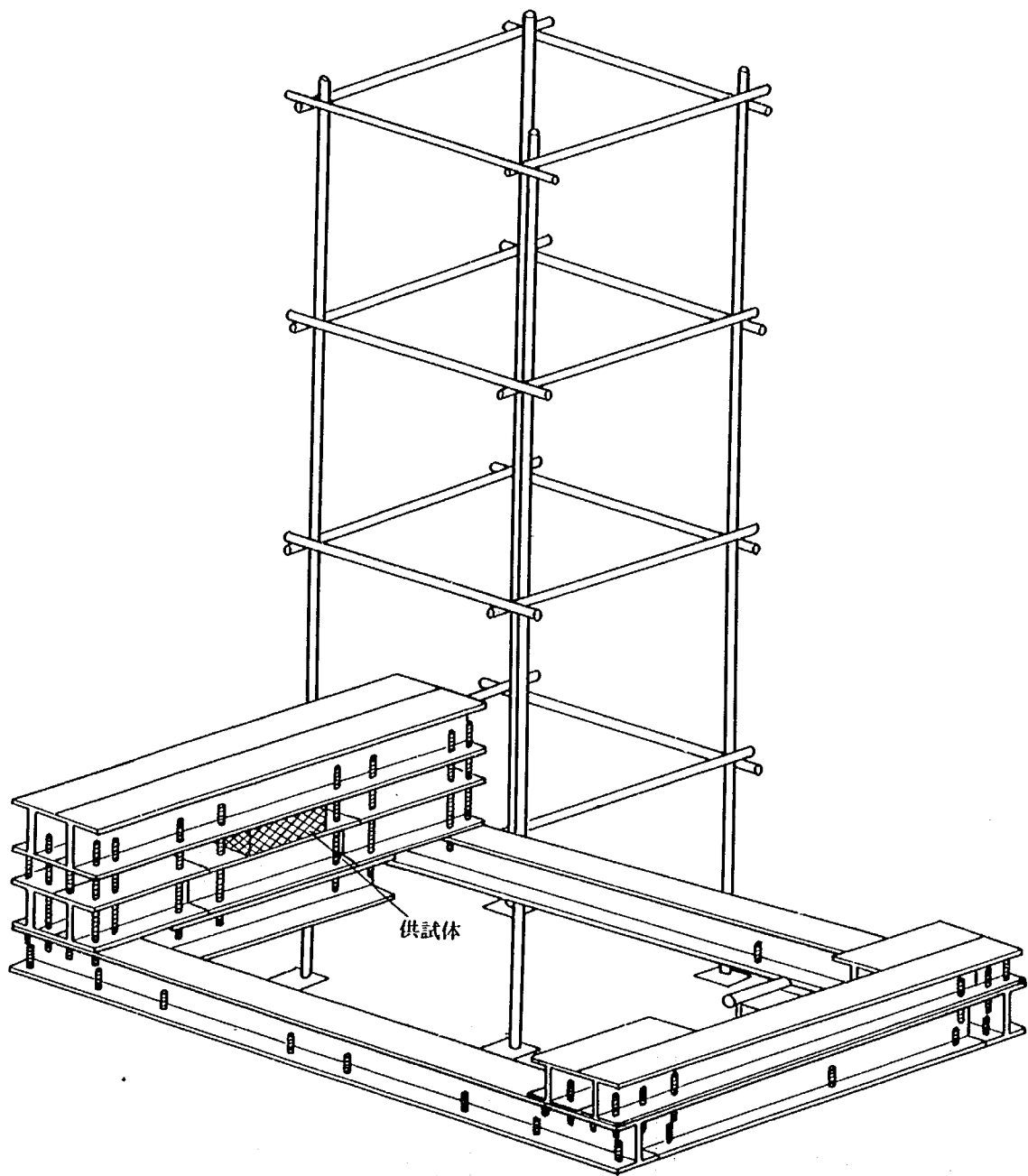


図 3.1 衝撃実験装置の概要（スパン 2 m の場合）

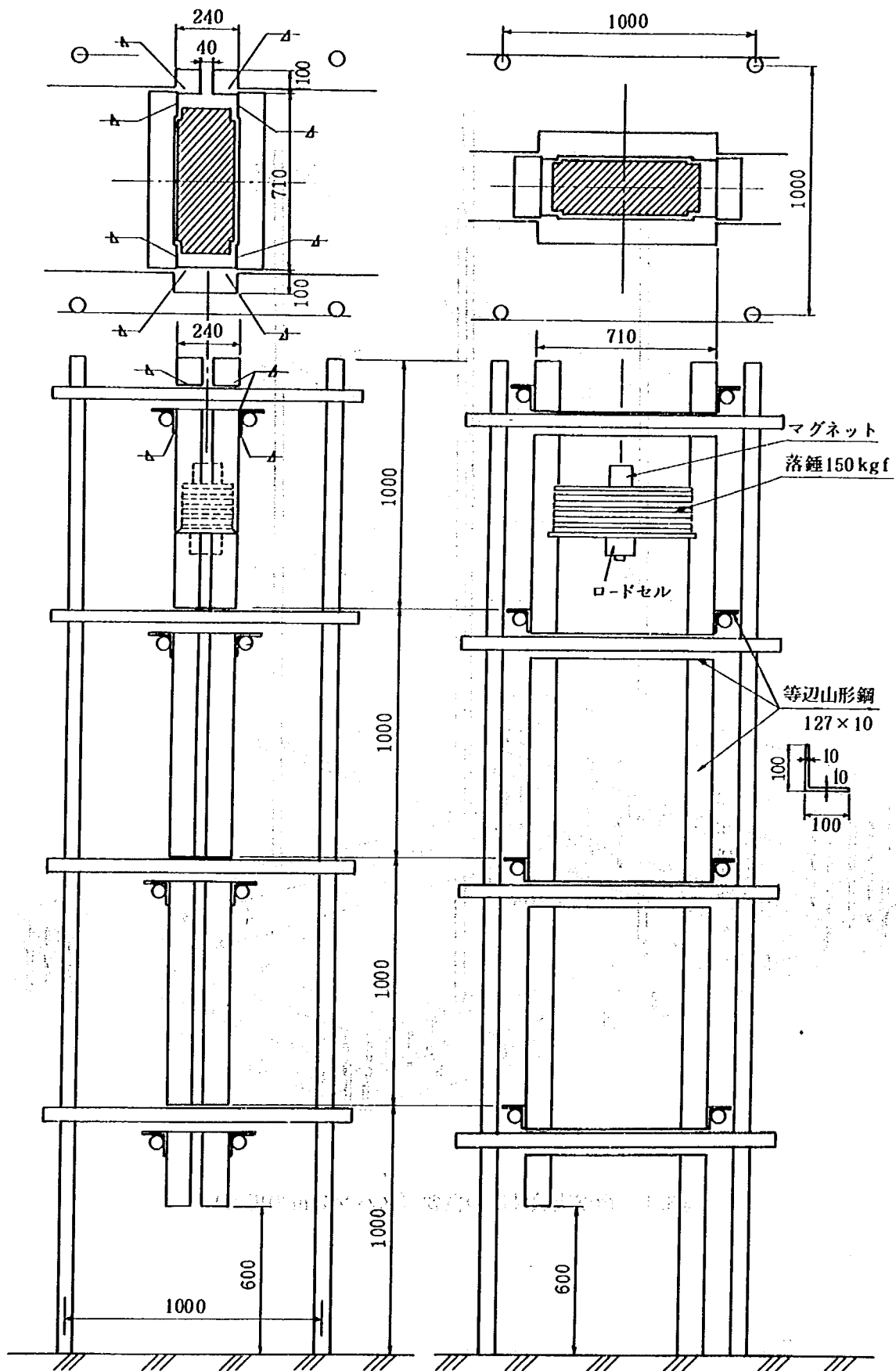


図 3.2 衝撃実験落錘載荷装置

② 計測装置及び計測項目

図 3.3 に計測装置の概要を示す。計測項目は、衝突時の荷重～時間関係及び載荷点の変位～時間関係である。計測は、重錘下部に取付けた荷重変換器により衝撃荷重を、載荷点下部に光学式変位計用のターゲットを取付け、光学式変位計により載荷点の変位を測定した。

計測値の取込みに際しては、木材の中央点より50 cm (1/4 点) の位置に取付けた加速度計により測定した木材の加速度をデータサンプリング用のトリガーとして用いた。

尚、本実験で用いた計測装置の概要を図 3.3 に示す。

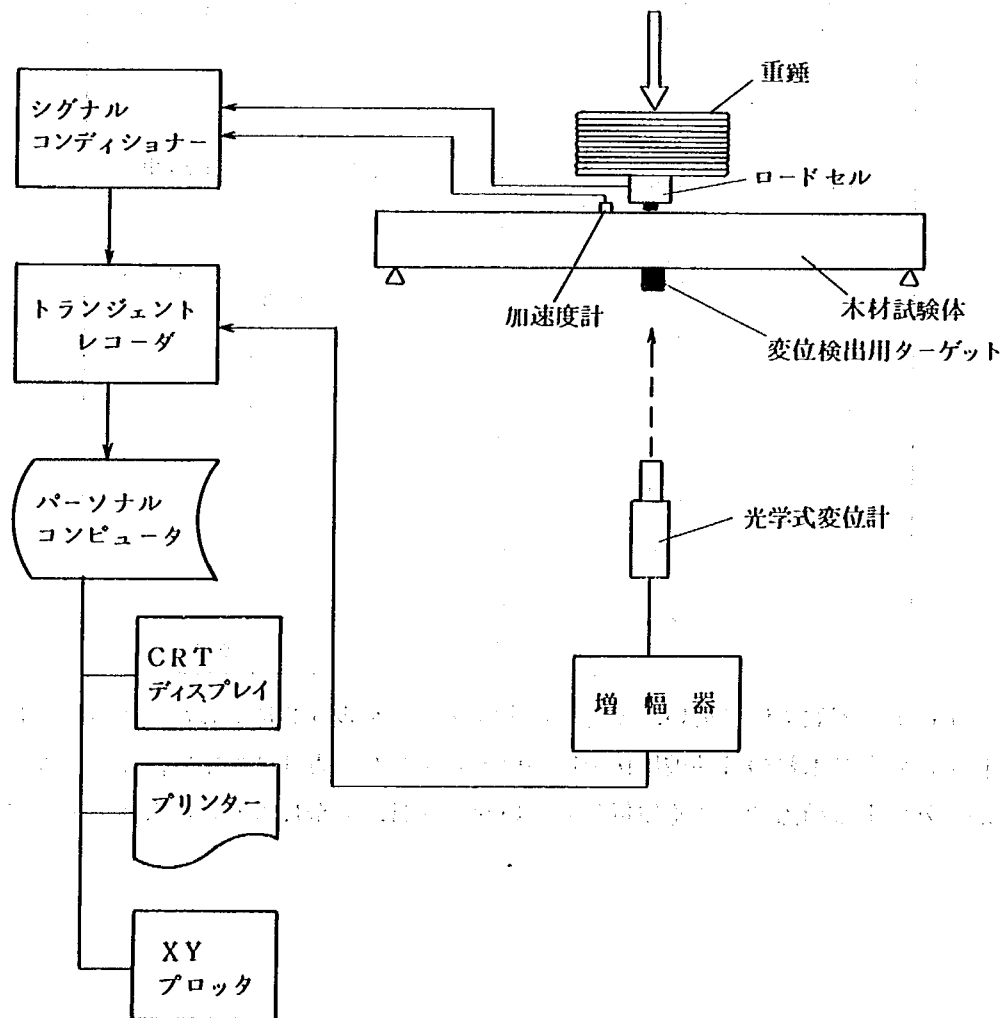


図 3.3 計測装置の概要

③ 試験体

木材は、茨城県筑波郡谷田部町産の杉材を使用し、自然状態に近い条件を得るため、実験日1週間以内に切出したものを使用した。この際、乾燥を防ぐために切出し時に切口に防乾用のペイントを施し、ビニールで覆う防乾処置を実施した。

木材は、自然材料をそのまま使用しているため、寸法、諸元を統一できないが、全長 240 cm、スパン長 200 cm とし、長さ方向で径があまり変化しないようなものを選び、木材の中央での直径が、10、13、15 cm の3種類に区分して実験を実施した。

(2) 実験条件

実験で用いたパラメータは、木材の中央径と重錘の落下高さ（衝突速度）である。実験条件と回数を表 3.1 に示す。

表 3.1 実験条件と回数

木材中央の径 (cm)	落下高さ (m)	データ個数	測定項目	備考
10.0	0.8	2	1. 荷重～ 時間 2. 変位～ 時間	重錘重量 W = 150 kgf
	1.0	3		
	1.5	4		
	2.0	4		
	2.5	1		
13.0	1.5	1		
	2.0	2		
	2.5	2		
	3.0	4		
15.0	2.5	3		
	3.0	5		W = 200 kgf
		4		

表 3.1 に示す実験条件に従い、実施した実験ケースを表 3.2 に示した。表 3.2 にはデータの有無、有用性および木材の寸法破壊状況についても示した。表 3.2 の中で、 $T-\delta$ が原点まで帰着し、かつ外観上載荷点で大きく屈折してないケースは、完全に破断されなかったと考えられる。

表 3.2 実験ケース

ケース No	実験の 区 分	重錘の 落下高	木 材 の 寸 法 等				データの有無		T- δ の 原点帰着	破断状況 (外観)	備 考
			中央径	断面積	断面係数	含水比	荷重	変位			
1	10.0	1.5	9.8	75.4	92.4	74.8	○	×			
2		1.0	10.0	78.5	98.2	71.2	○	×			
3		0.8	10.5	86.6	113.7	70.5	×	×			
4		1.0	11.0	95.0	130.7	70.3	×	○			
5	13.0	2.0	13.3	138.9	231.0	63.0	○	○			
6		1.0	9.5	70.9	84.2	59.6	△	○	帰着		
7		0.8	9.7	73.9	89.6	62.2	○	○	帰着	非破断	
8		1.5	10.0	78.5	98.2	54.3	○	○	帰着		
9	10.0	2.0	10.5	86.6	113.7	62.5	○	○	帰着		
10		2.0	10.6	88.2	116.9	88.9	△	○			
11		2.0	10.7	89.9	120.3	72.9	×	×			
12		2.0	11.4	102.1	145.5	74.6	×	○			
13	13.0	1.5	11.5	103.9	149.3	59.1	○	○			
14		2.0	13.3	138.9	231.0	70.1	○	○			
15		1.5	13.0	132.7	215.7	89.1	○	○			
16		2.5	12.5	122.7	191.7	70.8	○	○			
17	15.0	2.5	14.3	160.6	287.1	77.0	○	○		非破断	
18	10.0	2.5	11.5	103.9	149.3	86.5	○	○			
19	15.0	3.0	15.2	181.5	344.8	69.2	○	○			
20	13.0	2.5	12.3	118.8	182.7	72.3	○	○	帰着	非破断	
21		3.0	12.2	116.9	178.3	85.6	○	○			
22	10.0	1.5	11.8	109.4	161.3	68.5	○	×			
23	13.0	3.0	12.0	113.1	169.6	49.1	○	○			
24		3.0	13.6	145.3	247.0	68.2	○	○			
25		3.0	13.1	134.8	220.7	53.1	○	○			
26	15.0	3.0	15.2	181.5	344.8	57.1	○	○	帰着		
27	15.0	2.5	15.5	188.7	365.6	45.8	○	○	帰着	非破断	
28		3.0	15.5	188.7	365.6	45.8	○	○			ケース27と同一試験体
29		2.5	14.6	167.4	305.5	65.6	○	○	帰着	非破断	
30	15.0	3.0	14.6	167.4	305.5	65.6	○	○	帰着	非破断	ケース29と同一試験体
31		3.0	14.6	167.4	305.5	65.6	○	○			
32		3.0	14.7	169.7	311.9	82.9	○	○			2)
33	15.0	3.0	14.1	156.1	275.2	60.5	○	○			3)
34		3.0	16.2	206.1	417.4	49.9	○	○	帰着	非破断	
35		3.0	16.2	206.1	417.4	82.9	○	○			ケース34と同一試験体

注) ○データ有 ×データ無 △データは有るが使えない

注2) 破断の基準……載荷後載荷点で大きく屈折

注3) 重錘 200 kgf, 他はすべて重錘 150 kgf を用いた。

(3) 実験結果

① 時間～荷重, 時間～変位曲線

測定された時間～荷重曲線（以下、 $T-F$ Curve）及び時間～変位曲線（以下、 $T-\delta$ Curve）の例を図 3.4～図 3.7 に示す。全ケースの $T-F$ Curve, $T-\delta$ Curve を資料 1 に示す。

荷重持続時間 T_c , ピーク荷重 F_{max} , ピーク荷重時の変位 δ_{Fmax} , 時間 T_o 及び載荷点の変位速度 $\dot{\delta}$ を表 3.3 に示す。

表 3.3 及び $T-F$ Curve, $T-\delta$ Curve の図から以下の特性が認められる。

i 荷重の発生とともにひずみ応答は開始されるが、変位は、打撃面の局所変形、木材の慣性力のため若干遅れて増大する。また、荷重応答終了後も、衝突により木材に与えられた運動エネルギーが木材の破壊エネルギーより大きい場合は、木材は運動エネルギーを消費するまで変形を続ける（図 3.4, 3.5 及び写真 3.2）。逆に木材に与えられた運動エネルギーが木材の破壊エネルギーより小さい場合は、荷重応答終了後の木材は自由減衰振動を続ける（図 3.6）。図 3.7 は両エネルギーがほぼ等しく、木材は破壊するが、元の位置まで復元して止まった例と考えられる。

ii 杉丸太単純梁の固有周期 T を木材の一般的なヤング率 E ($E = 0.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$), 木材の密度 ρ ($\rho = 400 \text{ kg/m}^3$)¹⁾ を用いて求めると、杉丸太の径 10～15 cm では $T = 0.024 \sim 0.016 \text{ sec}$ となる。（資料 3 参照）。この梁の固有周期は図 3.6 の荷重応答終了後の自由振動周期からみても理解される。

これに対して荷重の作用時間 T_o は $0.05 \text{ sec} \sim 0.07 \text{ sec}$ となっている。（破断していない例の荷重作用時間）したがって $T_o / 2T \geq 1$ であり強制振動（Forced vibration）となり²⁾, 梁の変位応答は外力の位相と同じになる。

iii 上記のように強制振動であるので、梁の変位は荷重の変位と位相は同じになるはずである。しかし、実測結果の $T-F$, $T-\delta$ Curve は、Case - 20, 27, 29, 30, 34 にみられるように大きく異なる点がある。これは、図 3.8 に示すように $T-F$ のスタート直後にシャープな立上りをもつ波形が加わっている点である。

この荷重応答に現われているシャープな波形は、変位には現われていないので、梁に変形を生じさせるような外力ではなく、荷重計内での振動あるいは、衝突面等の局所的な荷重応答等が考えられる。

前者については、荷重計内に発生する弾性波、荷重計の自由振動が考えられるが、いずれも固有周期はそれぞれ $0.034 \times 10^{-3} \text{ sec}$, $0.13 \times 10^{-3} \text{ sec}$ となり（資料 3 参照）、実測されている波形とは周期がオーダー的に合わない。

後者については、木材の表面繊維の破断により瞬間的に抵抗力が低下し、次の繊維によって抵抗力が増大するために、 $T-F$ にシャープな F の低下を示す波形が表われることが考えられる。これは、 $T-F$ 波形の第一波のピーク荷重時の変位 δ_{Fmax} （表 3.3）が、下記の木材の比例限界ひずみより大きいケースが多いことから考えられる。

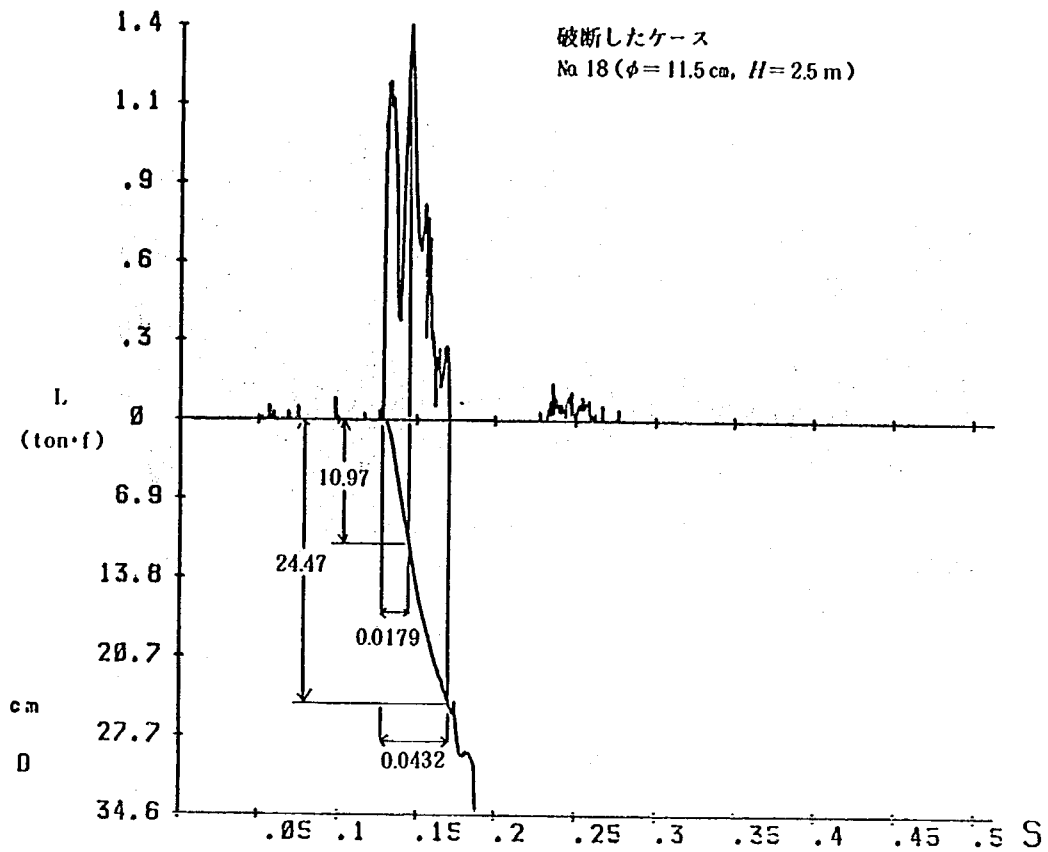


図 3.4 T-F, T- δ Curve の例

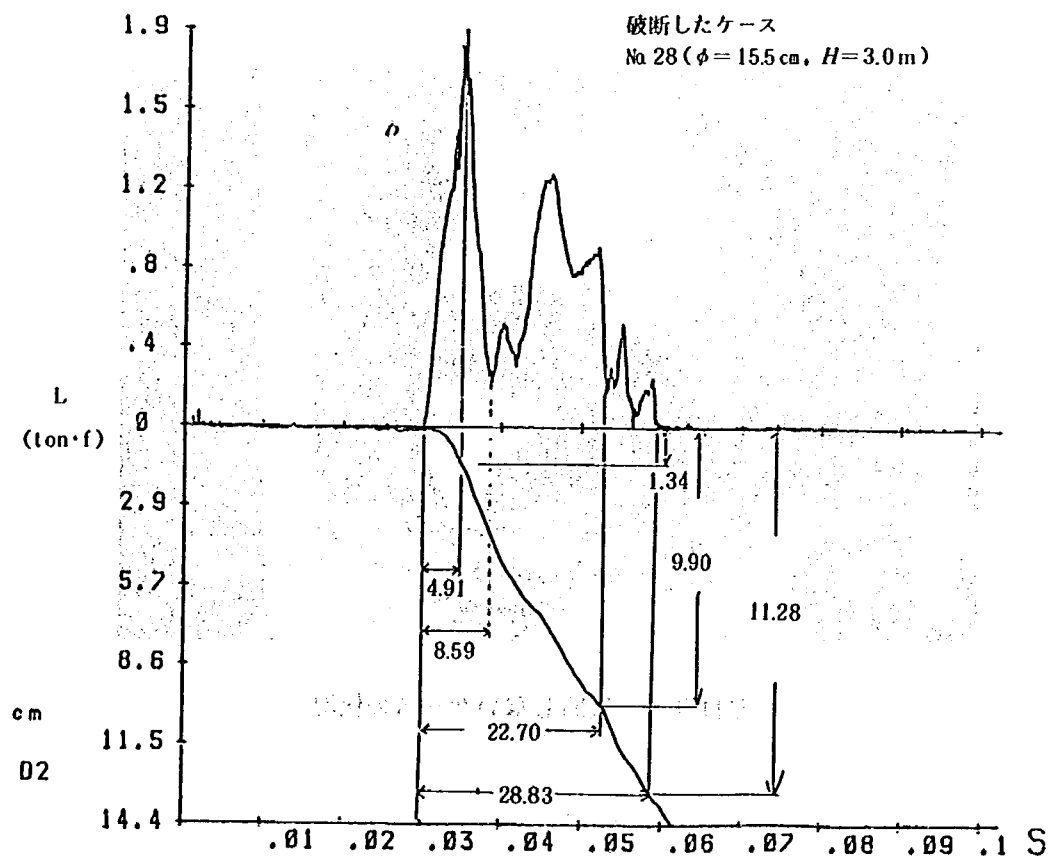


図 3.5 T-F, T- δ Curve の例

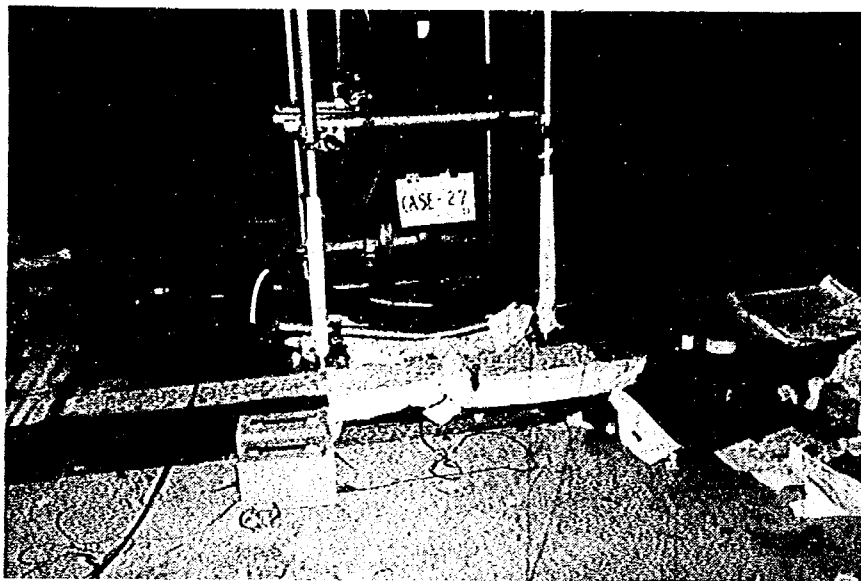


写真 3.2 破断したケースの状況

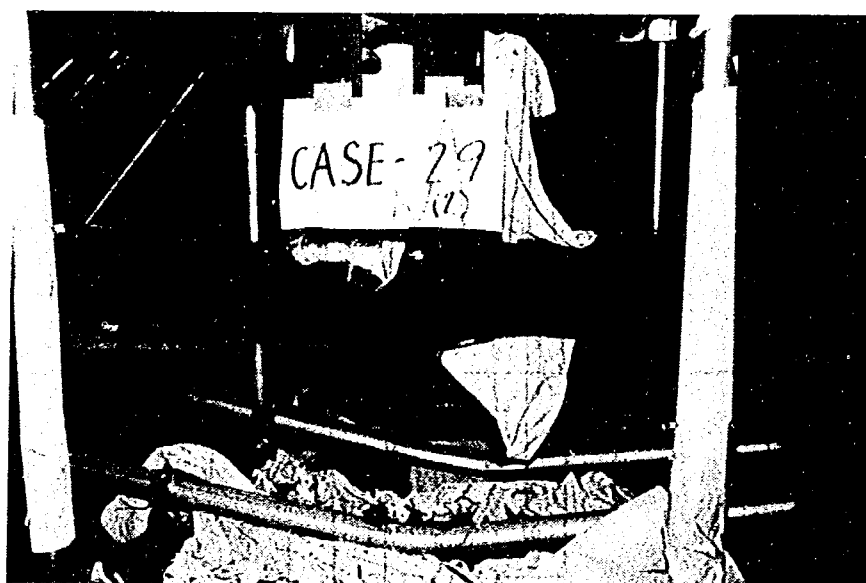


写真 3.3 破断しないケースの状況

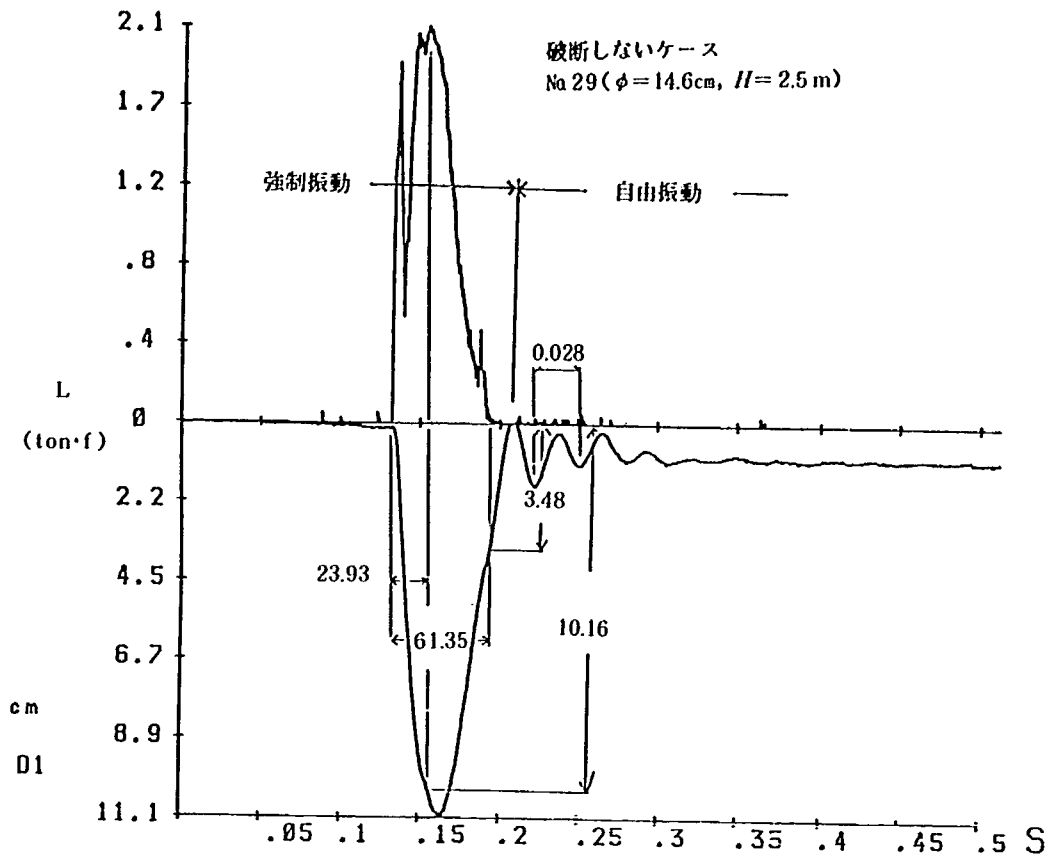


図 3.6 T-F, T- δ Curve の例

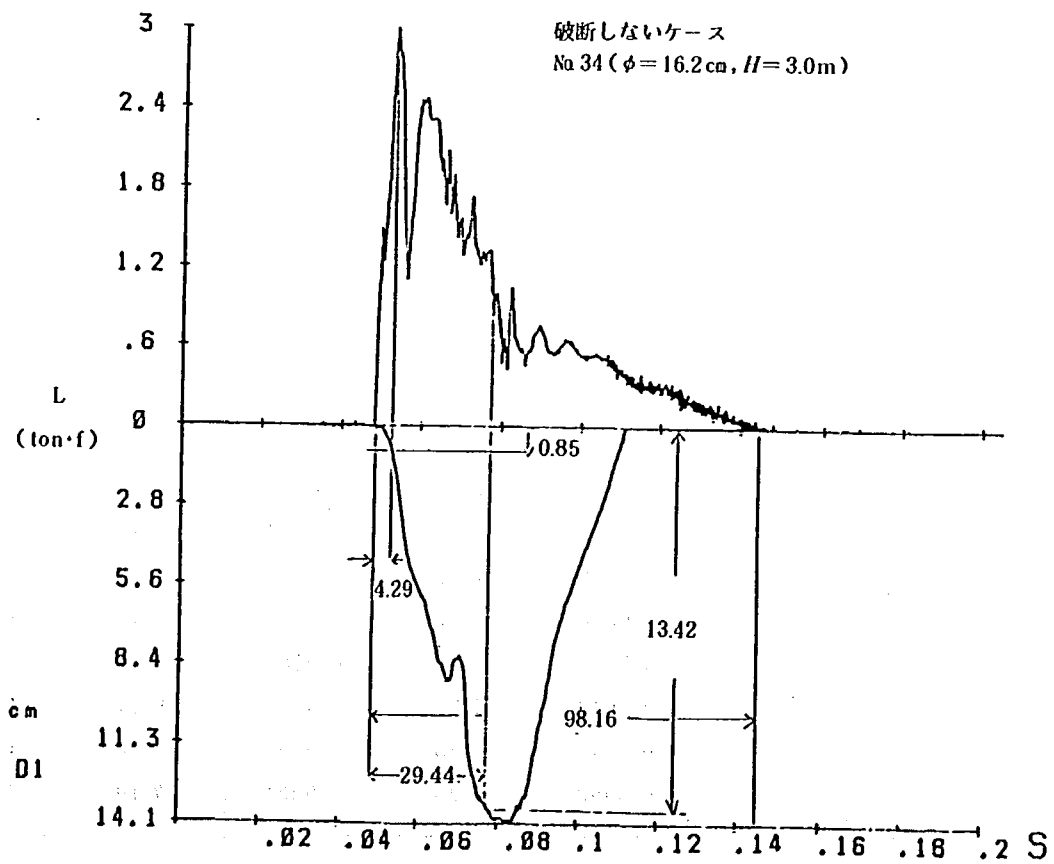


図 3.7 T-F, T- δ Curve の例

表 3.3 変位および変位速度

Case No	木材の中央径 ϕ (cm)	重錘の落下高 H (m)	ピーク荷重 $F_{\max}(\text{ton}\cdot\text{f})$	ピーク荷重までの時間 T_o (sec)	ピーク荷重時の変位 $\delta_{F\max}(\text{cm})$	荷重持続時間 T_c (sec)	荷重終了時の変位 $\delta_E(\text{cm})$	変位速度 $\dot{\delta}$ (m/s)
1	9.8	1.5	1.13	0.0169	—	0.0675	—	—
2	10.0	1.0	1.16	0.0184	—	0.0491	—	—
3	10.5	0.8	—	—	—	—	—	—
4	11.0	1.0	—	—	—	—	—	—
5	13.3	2.0	1.69	0.0062	3.85	0.019	9.95	5.24
6	9.5	1.0	0.40	—	—	—	—	—
7	9.7	0.8	1.16	0.0170	9.99	0.058	16.10	2.78
8	10.0	1.5	1.20	0.0185	4.31	0.0309	13.61	4.40
9	10.5	2.0	1.35	0.0062	2.145	0.0309	19.19	6.21
10	10.6	2.0	0.10	—	—	—	—	—
11	10.7	2.0	—	—	—	—	—	—
12	11.4	2.0	0.10	—	—	—	—	—
13	11.5	1.5	1.50	0.0090	3.40	0.026	13.61	5.23
14	13.3	2.0	1.16	0.0040	0.65	0.067	18.40	2.75
15	13.0	1.5	1.00	0.0056	0.74	0.0849	24.40	2.87
16	12.5	2.5	1.07	0.0185	10.50	0.0309	17.30	5.60
17	14.3	2.5	0.70	0.0031	—	0.0160	7.97	4.98
18	11.5	2.5	2.86	0.0179	10.97	0.0432	24.47	5.66
19	15.2	3.0	2.01	0.0154	8.69	0.0432	33.1	7.66
20	12.3	2.5	1.80	0.0117	—	0.0869	4.96	2.20
21	12.2	3.0	2.03	0.0055	1.93	0.0225	16.85	7.49
22	11.8	1.5	1.20	0.0169	—	0.0521	—	—
23	12.0	3.0	1.95	0.0046	0.46	0.0156	10.80	6.92
24	13.6	3.0	1.79	0.0068	3.99	0.0126	10.60	5.69
25	13.1	3.0	2.38	0.0043	1.07	0.0319	12.39	7.51
26	15.2	3.0	2.11	0.0031	0.50	0.0221	11.72	5.30
27	15.5	2.5	2.49	0.0049	0.80	0.0724	0.90	2.53
28	15.5	3.0	1.93	0.0049	1.34	0.0288	11.28	3.92
29	14.6	2.5	2.07	0.0239	10.16	0.0614	3.48	4.25
30	14.6	3.0	1.53	0.0086	1.21	0.1037	0	4.51
31	14.6	3.0	1.90	0.0058	2.07	0.0304	8.49	2.80
32	14.7	3.0	2.75	0.0061	—	0.0184	—	—
33	14.1	3.0	2.85	0.0043	0.56	0.0399	16.14	4.05
34	16.2	3.0	2.99	0.0043	0.85	0.0982	0	4.56
35	16.2	3.0	2.33	0.0052	0.95	0.0231	17.10	7.40

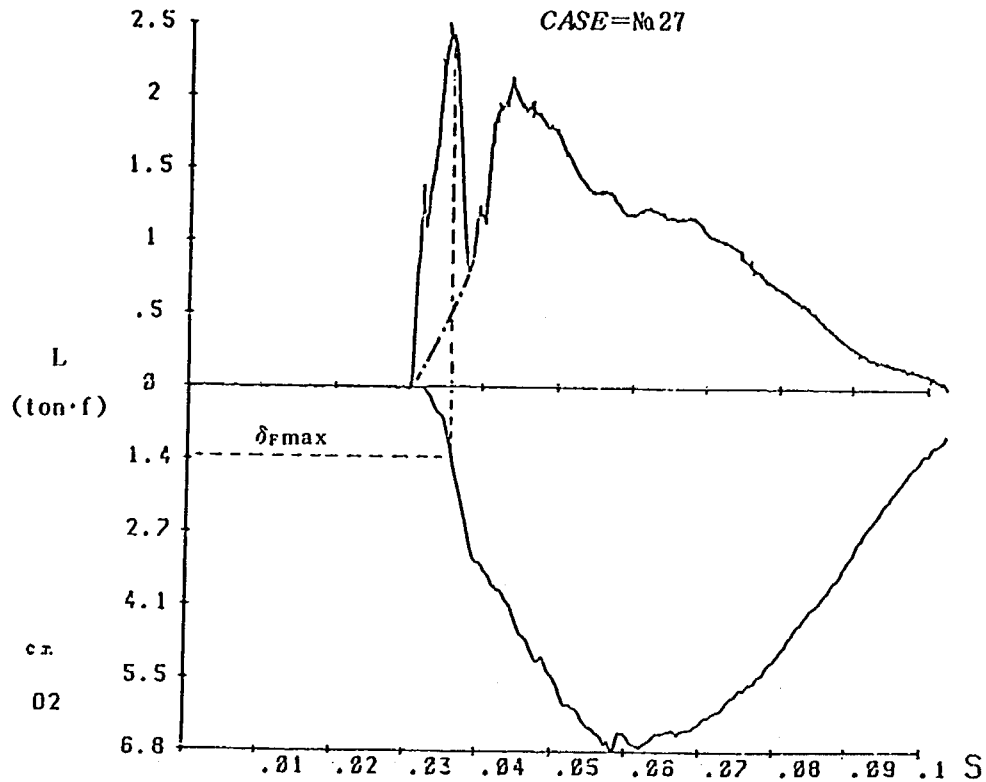


図 3.8 T-δ Curve の例

木材の径	$\phi = 11 \text{ cm}$	$\delta_{Fmax} = 3.8 \text{ cm}$	(資料 3 参照)
	$\phi = 13.8 \text{ cm}$	$\delta_{Fmax} = 2.8 \text{ cm}$	
	$\phi = 17.5 \text{ cm}$	$\delta_{Fmax} = 2.2 \text{ cm}$	

後者の原因として考えられるもう一つは、衝撃面の局所的変形応答による荷重応答が、梁全体の変形に先だって表われることが考えられる。下記の理由からこの局所変形応答に起因する可能性は高い。

- 図 3.8 で、T-F を第一波のシャープな波形を単純にカット (-----に示す線) すると、T-F と T-δ の位相はほぼ似たようなかたちになる。
- 図 3.9 及び図 3.10 に示すように油圧ピストンを用いた高速載荷実験 (衝突にみられる局所の荷重応答が現れない) の T-F, T-δ においては T-F にシャープな立上りが見られない。

ただし、上記の 2 つの理由のいずれであるかは、今回の実験データでは明確にすることはできない。

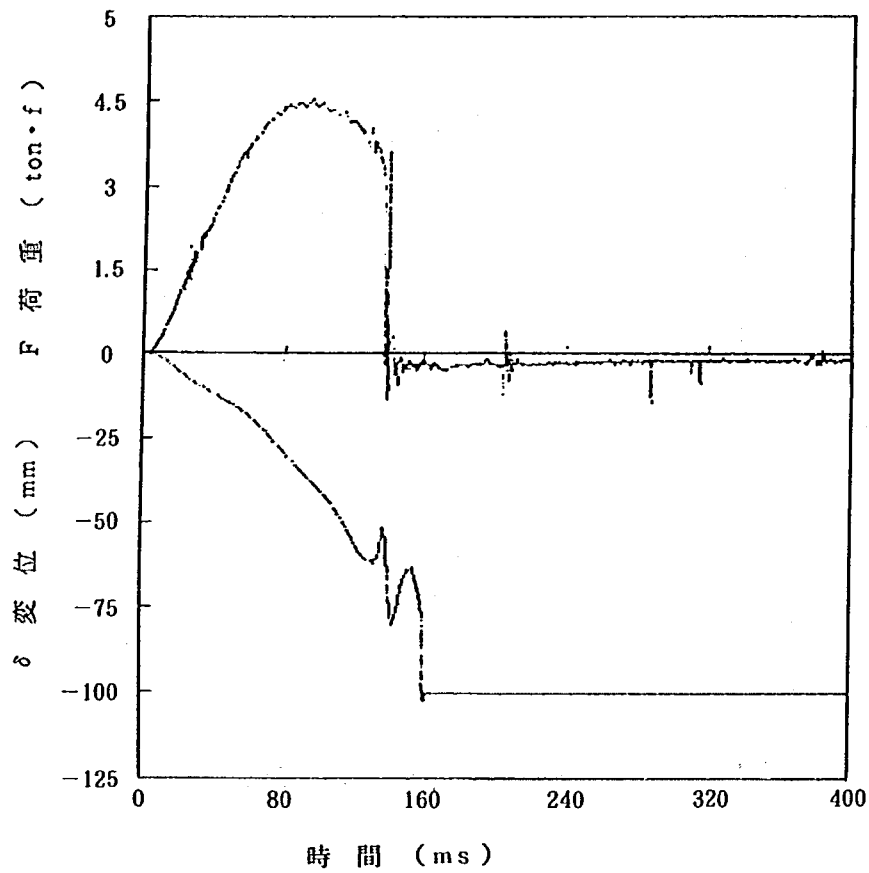


図3.9 油圧ピストンによる高速載荷実験のT-F, T- δ curve

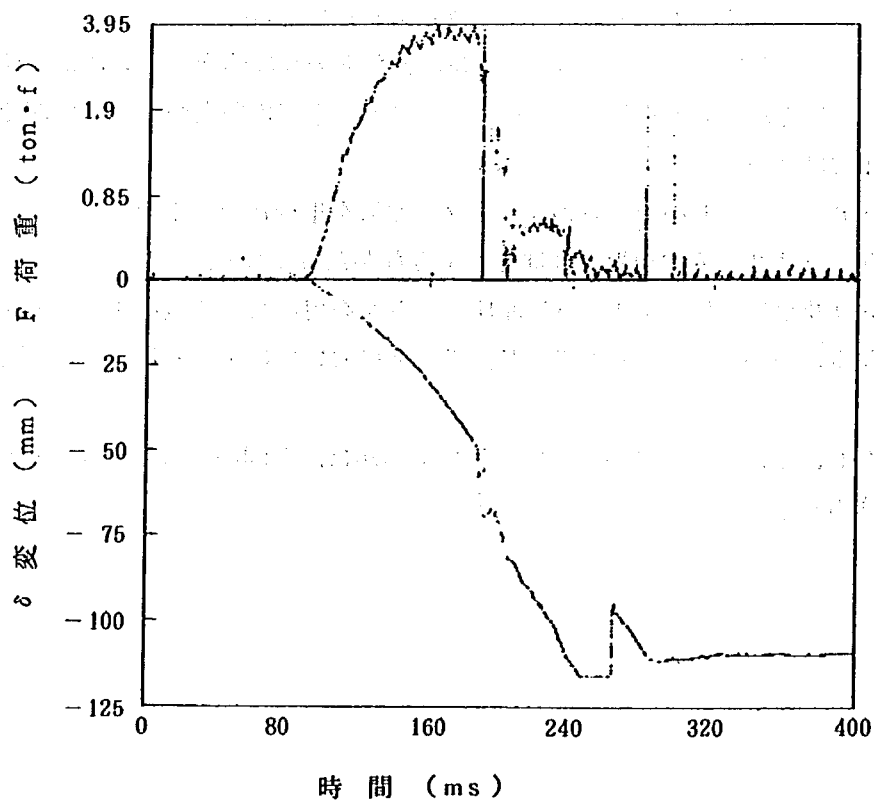


図3.10 油圧ピストンによる高速載荷実験のT-F, T- δ curve

上記のように、 $T-F$ curve の最初に現われるシャープな波形は、荷重計自身の応答ではなく、また、梁の変形に寄与する外力ではない木材に起因するものであると考えられるので、最大荷重および吸収エネルギー等の計算は測定された $T-F$ 、 $T-\delta$ を用いて行うものとする。

- IV 最大荷重に達するまでの時間 T_0 は実験ケースによってバラツキが大きい、図 3.11 に示すように重錘の落下高さ H が大きいほど、即ち衝突速度が速いほど小さい傾向を示す。また、図 3.13 に示すように木材の径が大きい方が T_0 が小さくなる傾向を示す。

バラツキが大きいのは、重錘の衝突する部分の木材表面の硬さにバラツキが大きいことと衝突時の角度・位置（中心かどうか）等が各ケースにより一定でないこと等が考えられる。

衝突速度が速いと T_0 が小さくなるのは、衝突直後の木材の加速度が大きくなるので、慣性力が大きくなり、見かけ上梁の剛性が大きくなったのと同じ効果があるためと考えられる。

また、木材の径が大きくなると梁の剛性が大きくなったのと同じ効果があるためと考えられる。

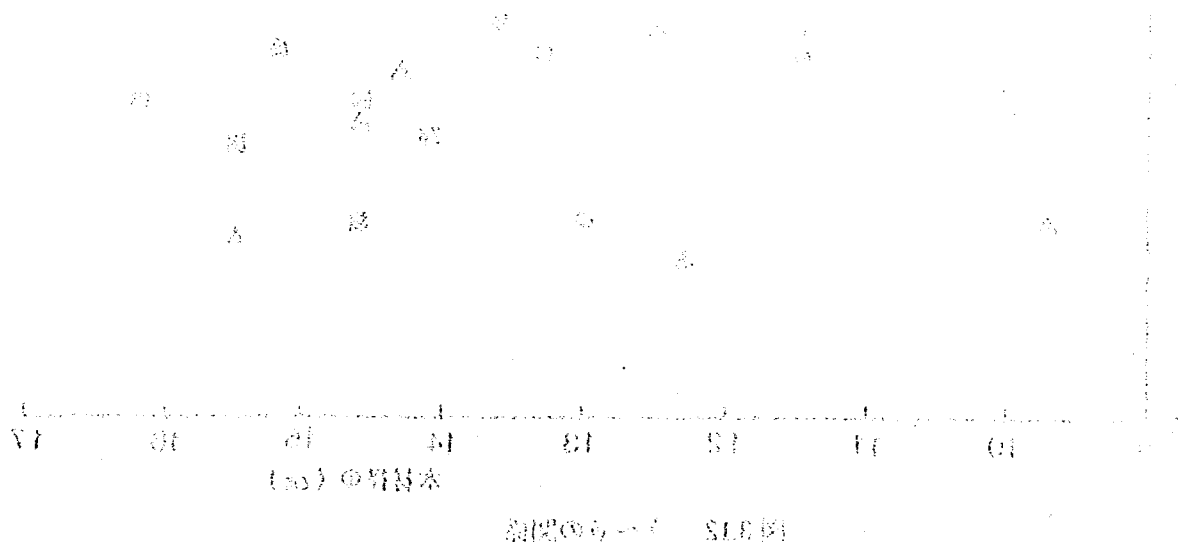
- V 荷重が最大値を示した後も変位は増大しつづけ、むしろ、最大荷重以後の変位が全変位のほとんど占める。これは、木材が破壊強度に達した後、すぐに破断するのではなく徐々に曲げ引張力が増大することから繊維の破壊が進行し耐力が減少していくためと考えられる。

従って、最大荷重以後においても木材はエネルギー吸収能をもち続けており、この値が大きいことを示している。

- VI はり中央点の変位速度を表 3.3 に示す。この変位速度は荷重終了までの荷重持続時間 T_0 で荷重終了時の変位 δ_e を除して平均変位速度として求めたもので、荷重持続時間、中央点変位に大きく依存している。従って、梁の曲げ剛性、载荷速度の影響が含まれている。

図 3.11 に中央点変位速度と木材径（ $\delta \sim \phi$ ）の関係を示す。図でみるように δ はバラツキが大きく木材の径の違いによる変化はみられない。図 3.14 には δ と落高 H の関係を示したが、 H が大きくなるほど、変位速度も大きくなる傾向を示すことがわかる。

- VII 荷重が最大値のときの変位を表 3.3 に示しているが、実験ケースにより大きな差があることがわかる。この原因は、 $T-F$ curve で見るように荷重が発生し増加した後、荷重が振動するという傾向を示していることから、荷重の最大値が第一波のピークで生じているか、第二波のピークで生じているかで対応する変位の最も大きく変化するためであると考えられる。



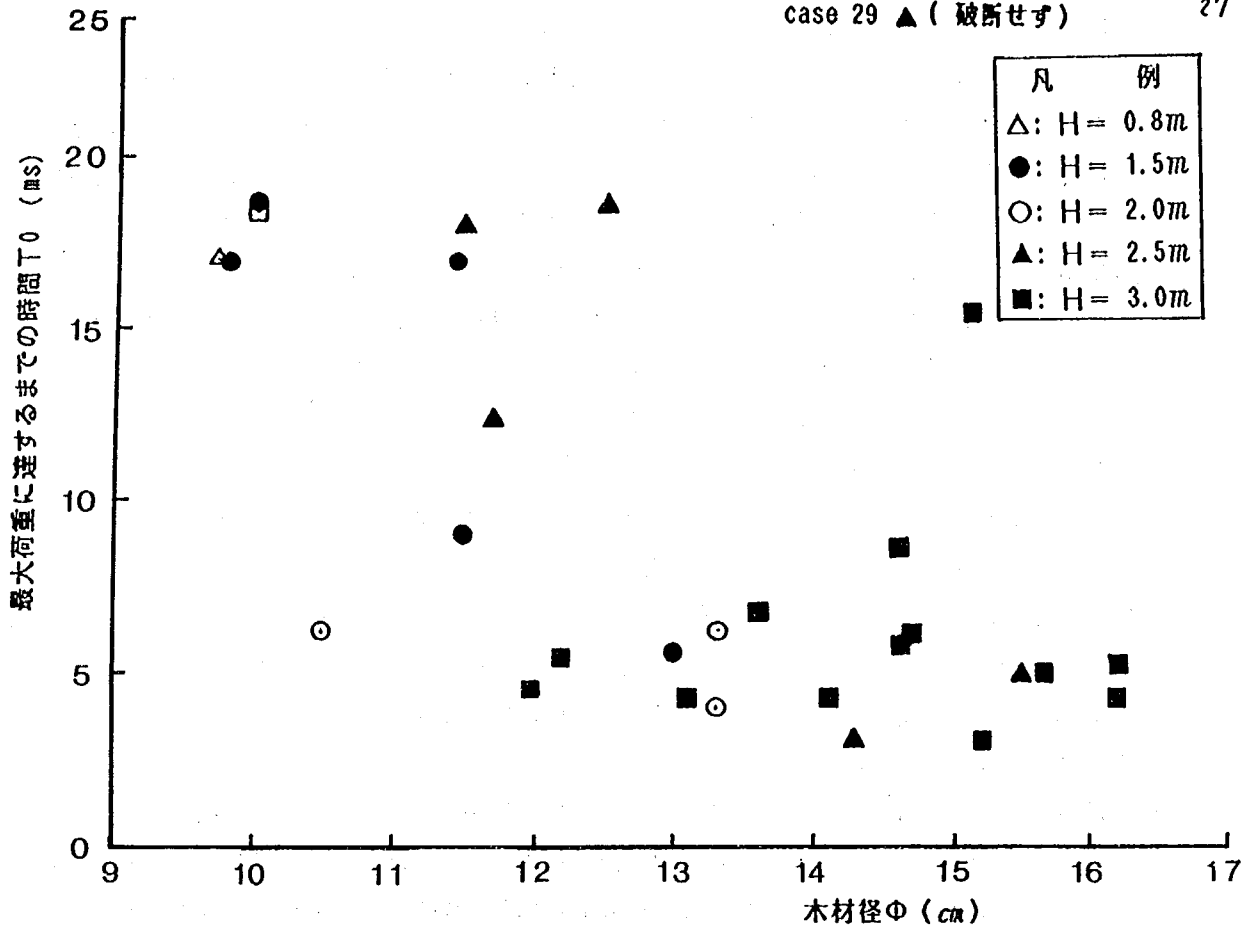


図 3.11 $T \sim \phi$ の関係

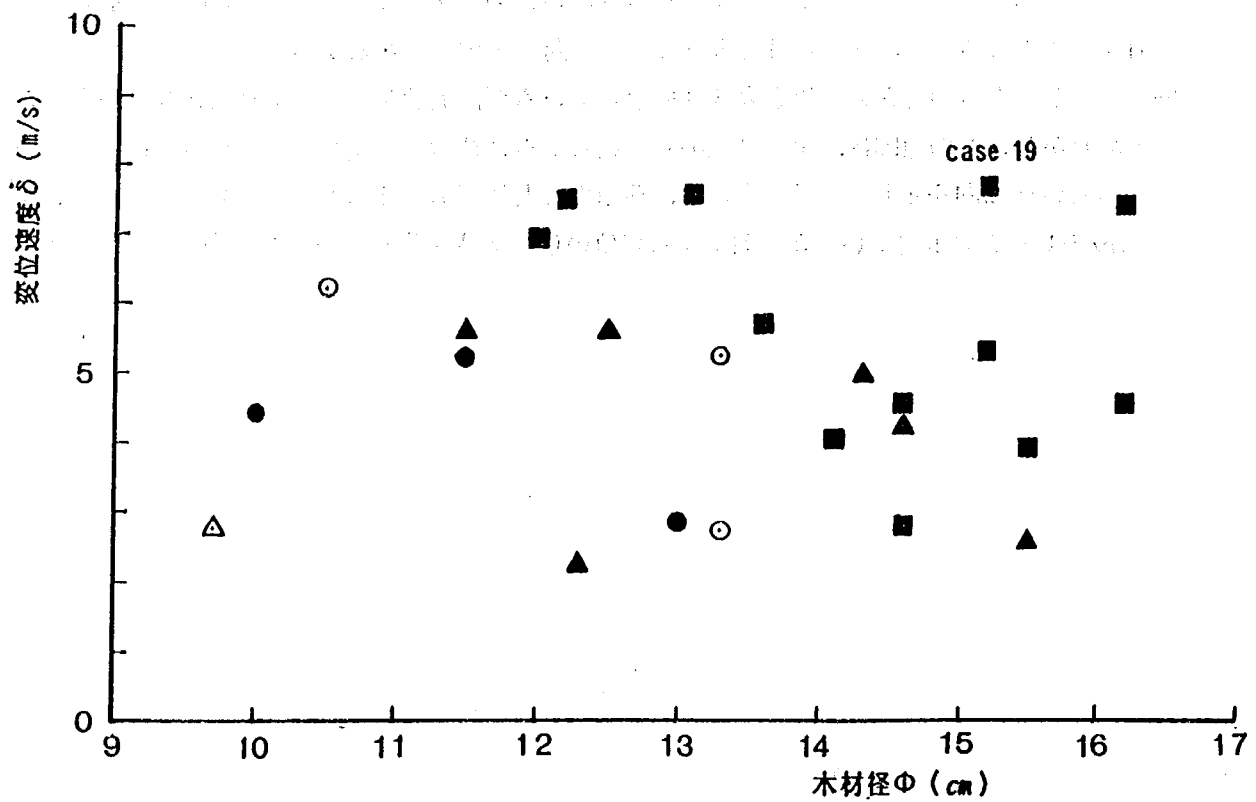


図 3.12 $\delta \sim \phi$ の関係

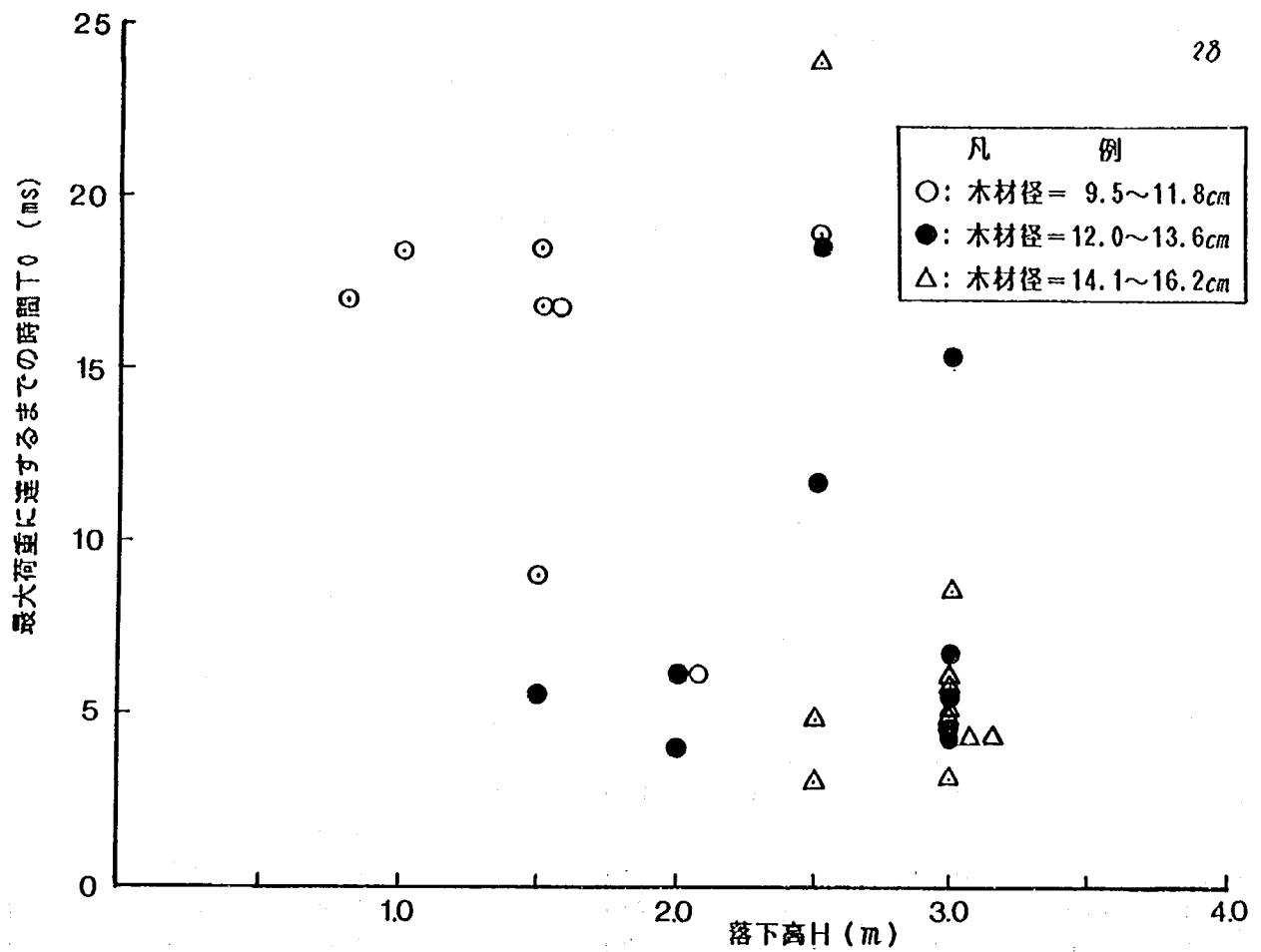


図 3.13 H ~ T₀ の関係

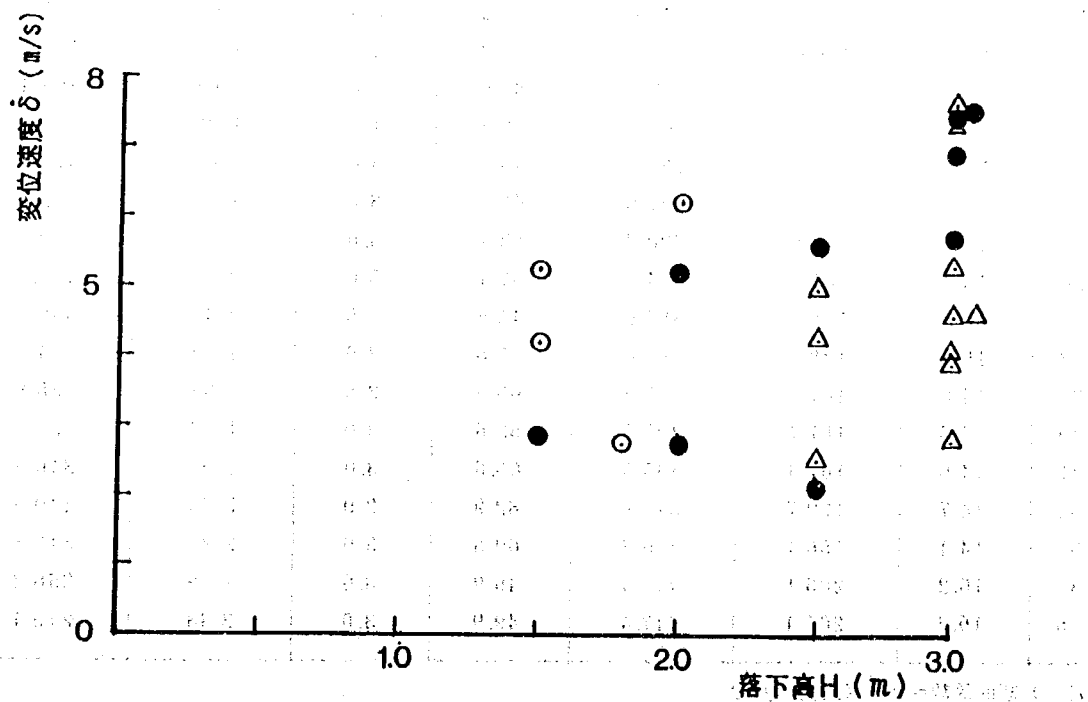


図 3.14 H ~ δ-dot の関係

② 最大衝撃荷重と最大曲げ応力

測定されたデータ（荷重～時間，中央点変位～時間）は，全てパーソナルコンピュータを介してフロッピーディスクに収録した。表 3.4 に試験体諸元および最大衝撃荷重，最大衝撃曲げ応力を示す。

表 3.4 最大衝撃荷重

RUN No	木材中央 の 径 (cm)	断面積 (cm ²)	断面係数 ¹⁾ (cm ³)	含水比 (%)	重錘の 落下高 (m)	衝撃荷重 (ton)	衝撃 ²⁾ 曲げ応力 (kg/cm ²)	備考
1	9.8	75.4	92.4	74.8	1.5	1.13	611.5	
2	10.0	78.5	98.2	71.2	1.0	1.16	590.8	
3	10.5	86.6	113.7	70.5	0.8	0.00	0.0	
4	11.0	95.0	130.7	70.3	1.0	0.00	0.0	
5	13.3	138.9	231.0	63.0	2.0	1.69	365.8	3)
6	9.5	70.9	84.2	59.6	1.0	0.20	118.8	3)
7	9.7	73.9	89.6	62.2	0.8	1.16	647.3	
8	10.0	78.5	98.2	54.3	1.5	1.20	611.2	
9	10.5	86.6	113.7	62.5	2.0	1.35	593.9	
10	10.6	88.2	116.9	88.9	2.0	0.10	42.8	3)
11	10.7	89.9	120.3	72.9	2.0	0.00	0.0	
12	11.4	102.1	145.5	74.6	2.0	0.10	34.4	3)
13	11.5	103.9	149.3	59.1	1.5	1.50	502.3	
14	13.3	138.9	231.0	70.1	2.0	1.16	251.1	
15	13.0	132.7	215.7	89.1	1.5	1.00	231.8	
16	12.5	122.7	191.7	70.8	2.5	1.07	279.0	
17	14.3	160.6	287.1	77.0	2.5	0.70	121.0	
18	11.5	103.9	149.3	86.5	2.5	2.86	957.7	
19	15.2	181.5	344.8	69.2	3.0	2.01	291.5	
20	12.3	118.8	182.7	72.3	2.5	1.80	492.6	
21	12.2	116.9	178.3	85.6	3.0	2.03	569.4	
22	11.8	109.4	161.3	68.5	1.5	1.20	372.0	
23	12.0	113.1	169.6	49.1	3.0	1.95	574.7	
24	13.6	145.3	247.0	68.2	3.0	1.79	362.4	
25	13.1	134.8	220.7	53.1	3.0	2.38	539.2	
26	15.2	181.5	344.8	57.1	3.0	2.11	306.0	
27	15.5	188.7	365.6	45.8	2.5	2.49	340.5	
28	15.5	188.7	365.6	45.8	3.0	1.93	264.0	
29	14.6	167.4	305.5	65.6	2.5	2.07	338.8	
30	14.6	167.4	305.5	65.6	3.0	1.53	250.4	
31	14.6	167.4	305.5	65.6	3.0	1.90	310.9	
32	14.7	169.7	311.9	82.9	3.0	2.75	440.9	
33	14.1	156.1	275.2	60.5	3.0	2.85	517.8	
34	16.2	206.1	417.4	49.9	3.0	2.99	358.2	
35	16.2	206.1	417.4	49.9	3.0	2.33	279.1	

注1) 断面係数 = $\pi \times (\text{直径})^3 / 32$

注2) 衝撃曲げ応力 = (スパン長 ℓ × 衝撃荷重 (kgf)) / (4 × 断面係数)

注3) T-F curve の形状より判断して，衝撃荷重の最大値を示していないと判断される。

I 最大衝撃荷重

最大衝撃荷重と木材径の関係を、重錘の落下高 $H = 0.8 \sim 1.5 \text{ m}$, $H = 2.0 \sim 2.5 \text{ m}$ および $H = 3.0 \text{ m}$ の3つに区分して、それぞれ図 3.12～3.14に示した。また、衝撃吸収エネルギーと運動エネルギーを表 3.5に示した。なお、最大衝撃荷重に達していないと判断される測定値（Case No 5, 6, 10, 12）は除外した。

図 3.18に全ケースをまとめて示した。これらの図から最大衝撃荷重は、木材径に比例して大きくなることがわかる。

また、実験においてほとんどの木材は破壊しているので、最大衝撃荷重は、木材の最大耐力に等しいと考えられる。従って、木材の耐力は直径に比例して大きくなると考えられる。

実験後、みかけ上破断していない木材においても Case - 27, 29, 34を除いて、木材の引張側に繊維と直角方向に割れが生じており、最大耐力を越えた荷重が作用したと考えられ、2回目以降の最大衝撃荷重は1回目の最大衝撃荷重よりも小さな値を示している。従って、1回目で既に破壊したとみなせる。

図 3.19に、重錘の落下高と最大衝撃荷重との関係を示した。図から、重錘の落下高が高くなるにつれて、すなわち、衝突速度が大きくなるに従い最大衝撃荷重は大きくなる傾向を示すことがわかる。先に述べたように最大衝撃荷重は、木材の最大耐力を示していると考えられるので、木材の最大耐力は、重錘の落下高が大きくなるにつれ、つまり衝突速度が大きくなるにつれて増加する傾向を示していることから木材においてもコンクリートや鋼材のようなひずみ速度効果³⁾による耐力の上昇が認められる。

ii 最大曲げ応力

表 3.4の衝撃曲げ応力について、荷重データの取れなかったケース、T-F curveから判断して明らかに計測上問題があると判断されるケース、第2回目载荷および破断していないと判断される下記のケースを除外して検討する。

荷重データがない又は、 計測上問題があるケース	CASE - 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12
破断していないと判断されるケース	CASE - 7, 17, 27, 29, 30, 34
第2回目载荷ケース	CASE - 28, 30, 31, 35

上記のケースを除外した場合の衝撃曲げ破壊応力は 478 kg/cm^2 となり、杉材の破壊応力の一般的な値 400 kg/cm^2 より、少し大きい。¹⁾ これは、①項で述べたように、载荷速度効果による部材の強度上昇のためと考えられる。

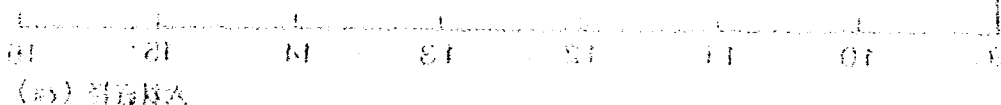


図 3.18 最大衝撃荷重と木材径の関係

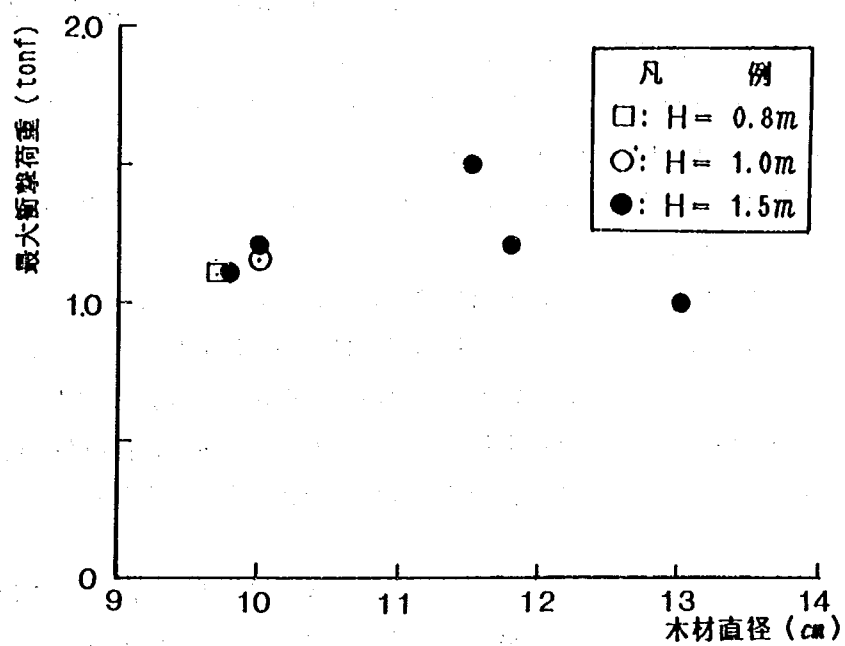


図 3.15 木材径と最大衝撃荷重

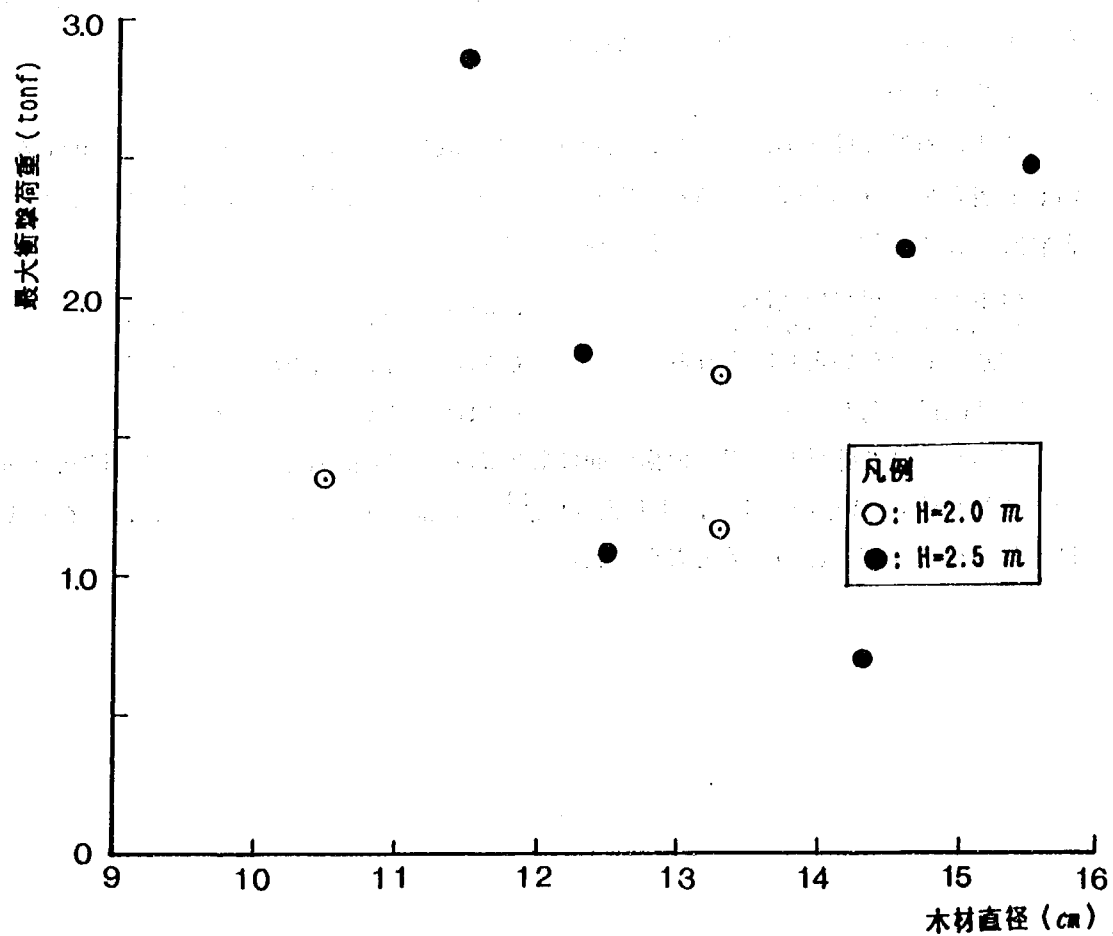


図 3.16 木材径と最大衝撃荷重

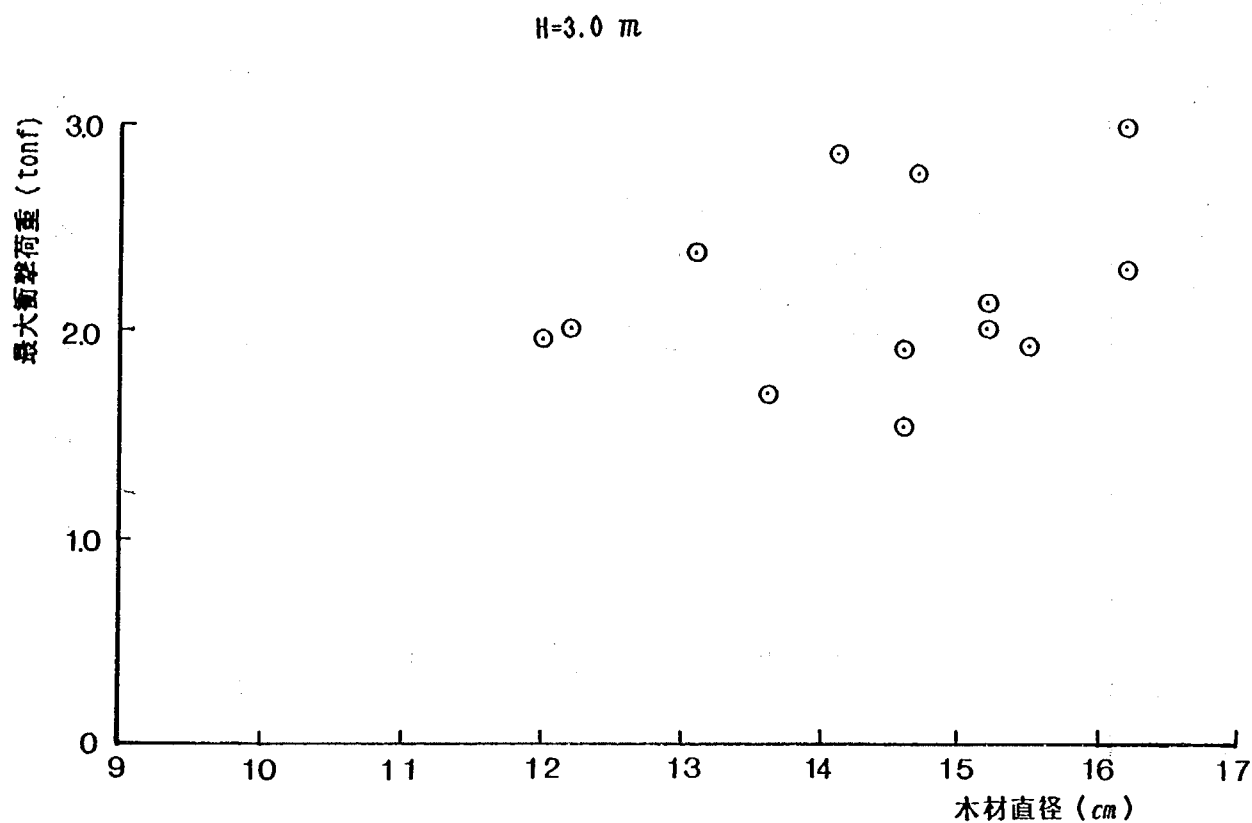


図 3.17 木材径と最大衝撃荷重

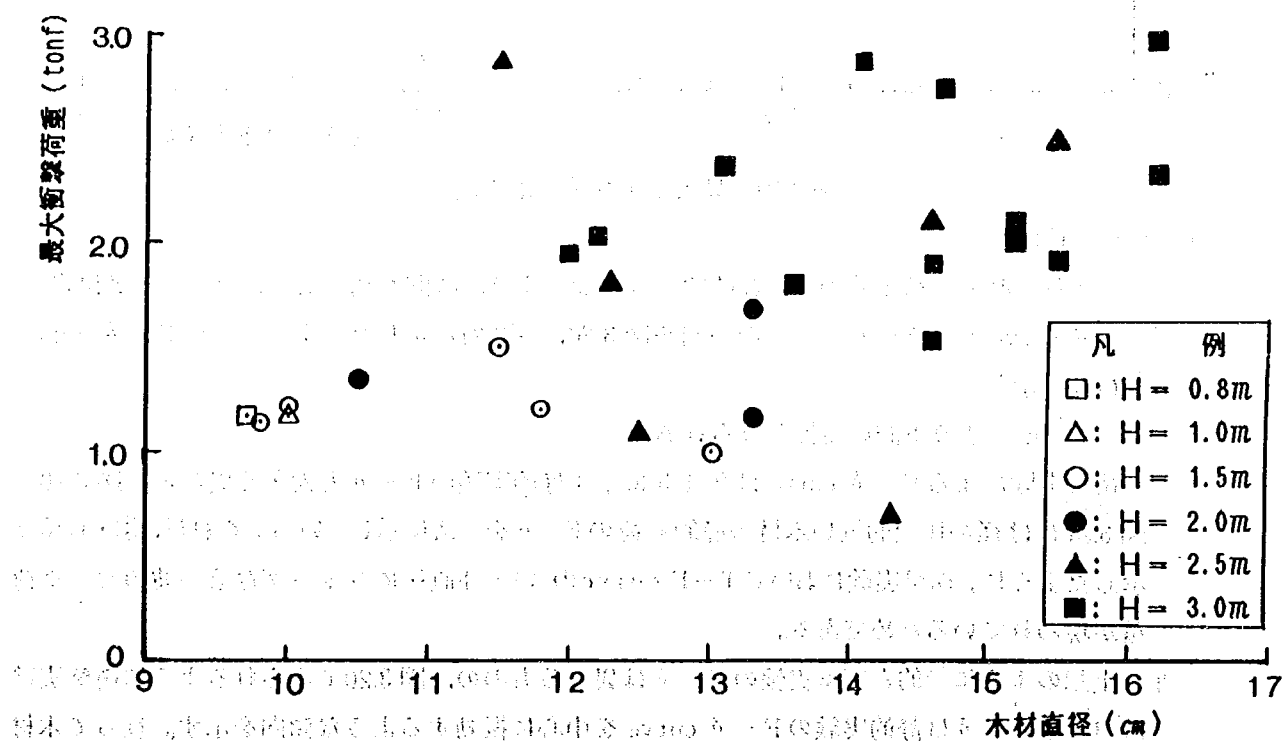


図 3.18 木材径と最大衝撃荷重 - 年輪の成長と関係

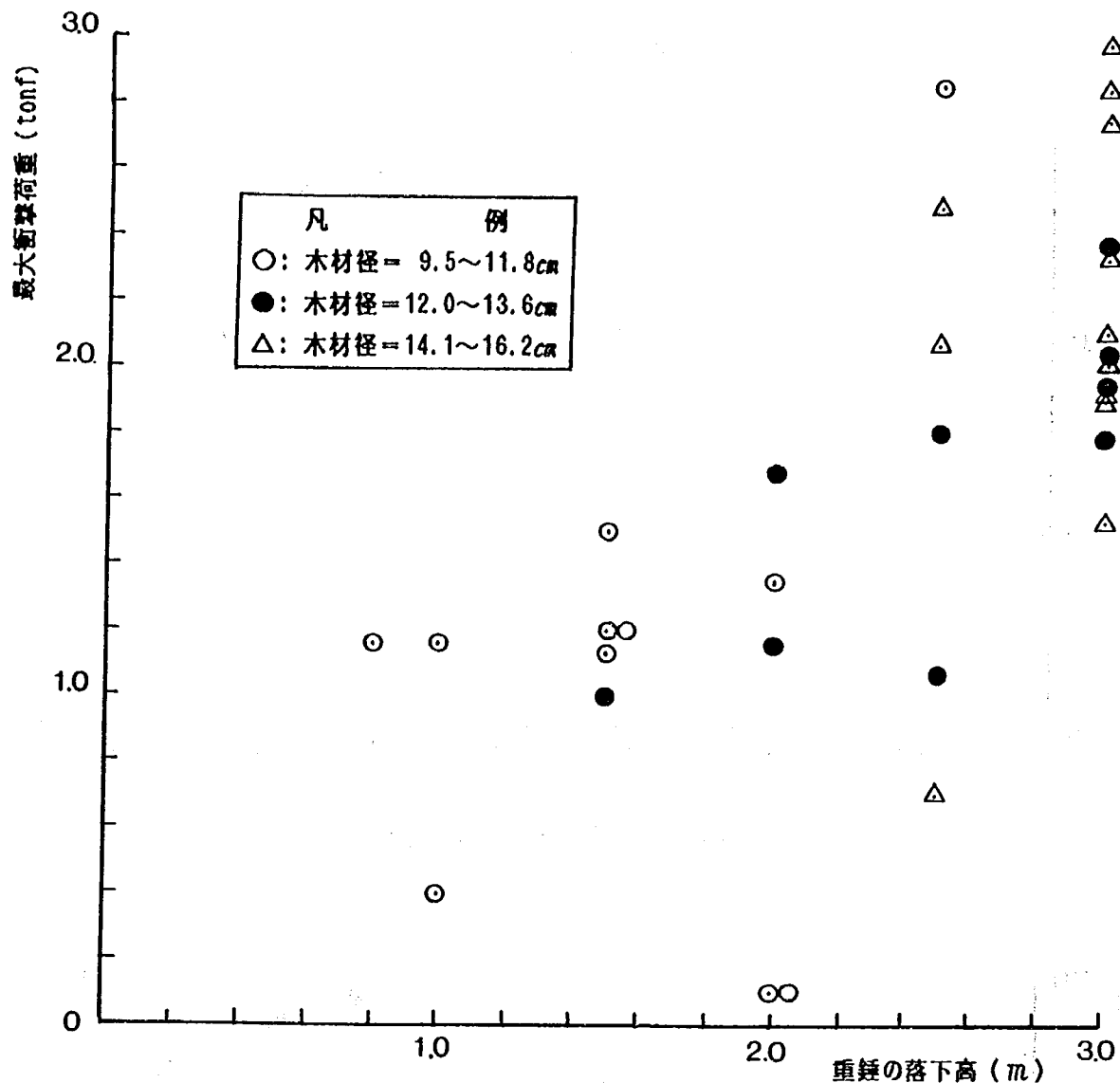


図 3.19 最大衝撃荷重～落下高

③ 荷重変位曲線

測定された時間－荷重曲線および時間－変位曲線より，時間を消去して，荷重－変位曲線（ $F-\delta$ curve）を作成した。その一例を図 3.20，図 3.21 に示した。全ケースの $F-\delta$ curve は資料 2 に示した。

$F-\delta$ curve より下記の特性がみられる。

- Ⅰ 衝撃実験による $F-\delta$ curve は表 4.3 に示す静的実験の $F-\delta$ と大きく異なる。図 3.20，図 3.21 には径の比較的近い木材の静的載荷の $F-\delta$ を一諸に示している。これは，①・Ⅲ項で示したように，衝撃実験において $T-F$ curve のスタート直後にシャープな第一波のピーク荷重が現われているためである。
- Ⅱ 上記のように静的と衝撃実験の $F-\delta$ は異なるものの，図 3.20 でみられるように衝撃実験における $F-\delta$ は静的実験の $F-\delta$ curve を中心に振動するような傾向を示す。従って木材梁の衝撃吸収エネルギーを求めるには，概略値を求めるのであれば測定された $F-\delta$ curve を用いて求めることができると考えられる。

- iii $F-\delta$ curve が終局変位 δu ($F-\delta$ curve が最後のピーク値を過ぎて急激に F が低下するか F がピークの50%以下まで低下した時の変位とする) を求め、木材の径～終局変位 ($\phi-\delta u$ curve) および重錘の落高～終局変位 ($H-\delta u$ curve) を図 3.22 と図 3.23 にそれぞれ示した。これらの図より δu は木材の直径が大きくなるほど、又、衝突速度が大きくなるに従い小さくなる傾向を示す。しかし、 δu の値そのものは、静的実験の終局変位の平均値 11.7 に近い値を示している。

(4) 衝撃エネルギー吸収能 E_{D1}

衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} は、終局変位までの外力仕事量として表し、その結果を表 3.5 に、衝撃エネルギー吸収能 (E_{D1}) ～木材径 (ϕ) の関係を図 3.24 に示す。また、衝撃エネルギー吸収能 (E_{D1}) ～重錘の落下高 (H) の関係を図 3.25 に示す。

これらの図表より以下の特性が認められる。

- i 衝撃エネルギー吸収能 (E_{D1}) は、かなりのバラツキがあるが一般的に木材径に比例して大きくなる傾向を示している。図 3.24 において、 $\phi 15$ cm 付近の E_{D1} が小さいのは、 $\phi 15$ cm 付近の木材は 1 度で破壊せず 2 度・3 度の繰返し载荷を実施したため、木材の強度、曲げ剛性が著しく低下しているためと思われる。破壊しなかった実験ケースにおける E_{D1} を加えた値を E_{D1}' として図中に示してあるが、この値は既ね全般的傾向に一致している。従って、1 回目の衝撃が加えられた際に木材は、エネルギーを消費しており繰返し载荷に対して次第に弱くなっていくものと考えられる。
- ii 図 3.25 より衝撃エネルギー吸収能 (E_{D1}) は H が大きくなるにつれてやや大きくなる傾向を示していることがわかるが、バラツキが大きいことと $\phi 10$ cm と $\phi 15$ cm の場合には実験を行なった H の範囲が狭かったこと等の理由から明確ではない。最大荷重におけるひずみ速度効果が、吸収エネルギーに見られないのは、衝撃速度に伴い最大荷重は大きくなるが、終局変位は逆に小さくなる傾向を示しているため、両者の積の形として表される衝撃エネルギー吸収能は、相殺して衝撃速度による変化があまり見られないためと考えられる。
- iii 木材の衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} のバラツキは相当大きい。この理由として、下記の原因が考えられる。

- 木材自体の強度のバラツキ
- 衝撃現象の再現性が低い：例えば、衝突速度の若干の相異、衝突面の硬度の相異など。
- 測定装置の特性：光学式変位計は周囲の光度及び電流の影響を受けやすいため測定値には各ケースの実験条件による影響が含まれる。また、荷重計に現われるシャープな第一波は梁の変位とは直接関係ないものと思われることも測定装置の問題と考えられる。

- iv 衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} と重錘によって木材に与えられた運動エネルギー E_I の比較を表 3.5 及び図 3.26 に示した。また、図 3.27 に木材径と E_{D1}/E_I の関係を示したが、ほとんど $E_{D1}/E_I = 20 \sim 40\%$ の範囲にある。これは木材固有の E_{D1} に対して与えた運動エネルギーが十分大きいものであったことを示している。

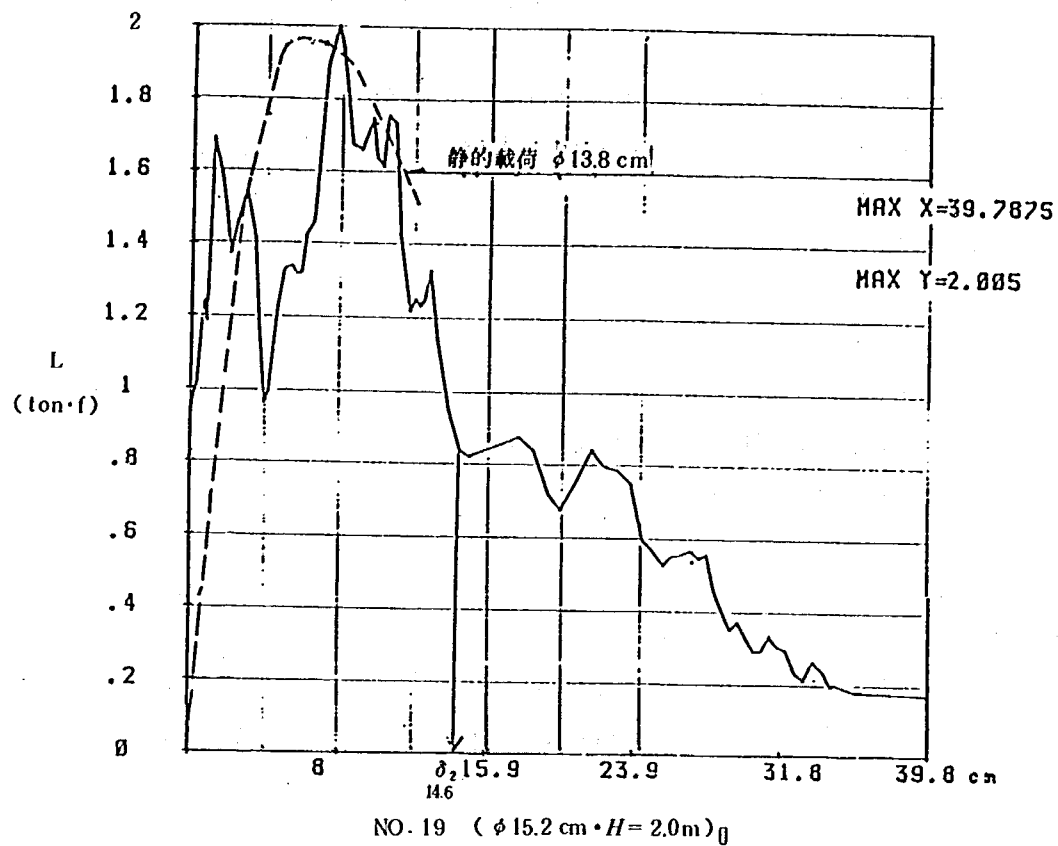


図 3.20 荷重～変位曲線の例

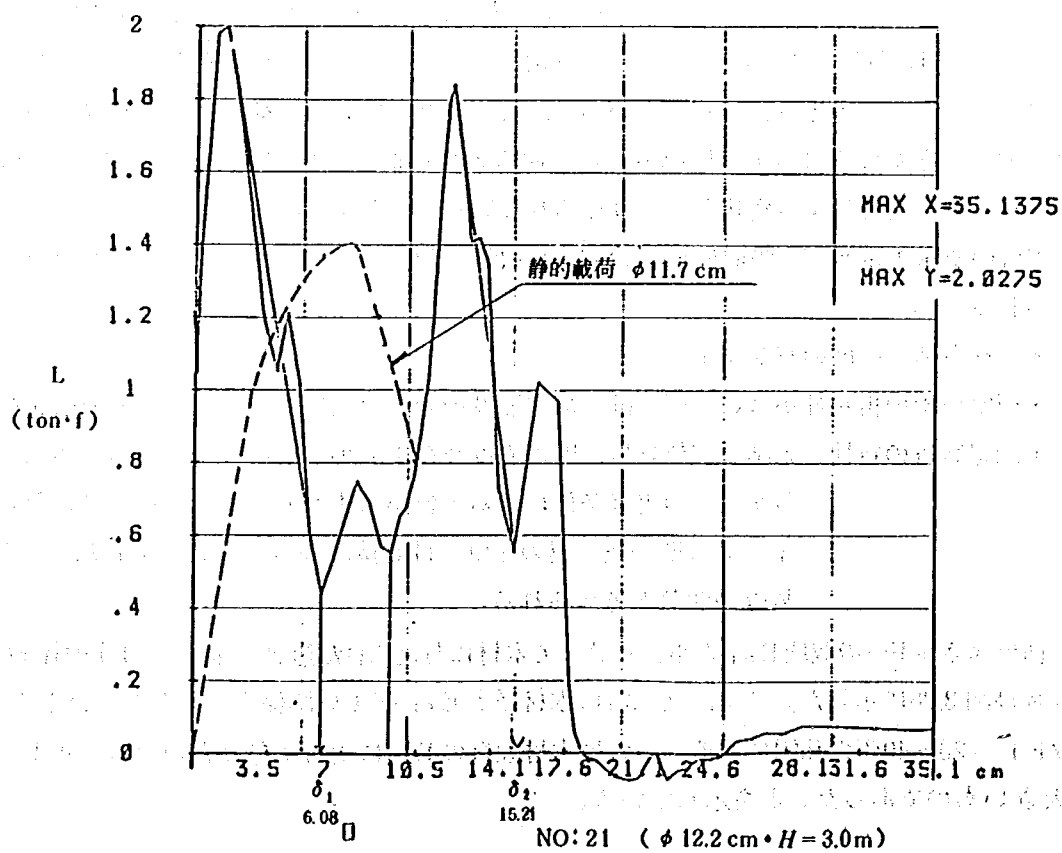


図 3.21 荷重～変位曲線の例

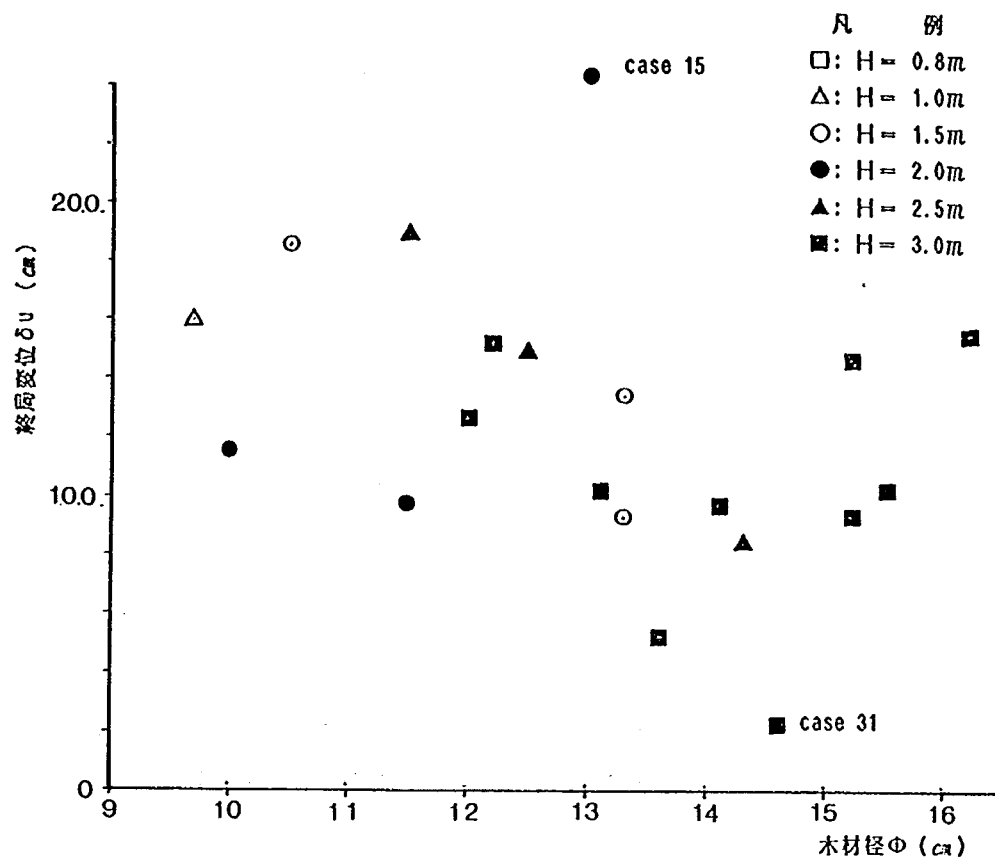


図 3.22 木材径～終局変位

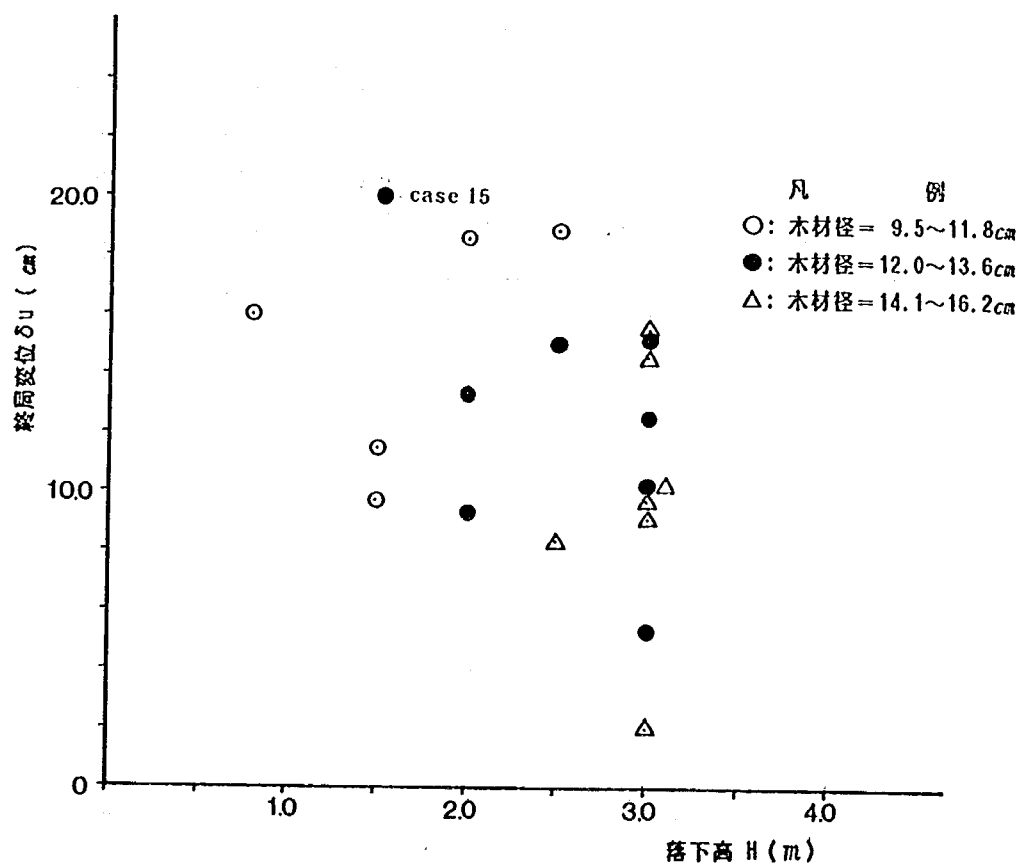


図 3.23 木材径～終局変位 δu

表 3.5 衝撃エネルギー吸収能と運動エネルギー

ケースNo	木材の径	落下高	重錘重量	重錘のもつエネルギー	衝撃荷重最大値	衝撃エネルギー吸収能	終局変位	E_{d1}^2/EI	備 考
5	13.3	2.0	150	0.300	1.69	0.107	9.27	0.367	
7	9.7	0.8	150	0.120	1.16	0.111	16.00	0.925	
8	10.0	1.5	150	0.225	1.20	0.092	11.51	0.409	
9	10.5	2.0	150	0.300	1.35	0.134	18.60	0.447	
13	11.5	1.5	150	0.225	1.50	0.142	9.74	0.631	
14	13.3	2.0	150	0.300	1.16	0.050	13.38	0.167	
15	13.0	1.5	150	0.225	1.00	0.045	24.41	0.200	
16	12.5	2.5	150	0.375	1.07	0.095	14.99	0.253	
17	14.3	2.5	150	0.375	0.70	0.008	8.40	0.021	
18	11.5	2.5	150	0.375	2.86	0.297	18.89	0.792	
19	15.2	3.0	150	0.450	2.01	0.202	14.60	0.449	
21	12.2	3.0	150	0.450	2.03	0.166	15.21	0.369	
23	12.0	3.0	150	0.450	1.95	0.133	12.60	0.296	
24	13.6	3.0	150	0.450	1.79	0.072	5.30	0.160	
25	13.1	3.0	150	0.450	2.38	0.172	10.23	0.382	
26	15.2	3.0	150	0.450	2.11	0.092	9.13	0.204	
28	15.5	3.0	150	0.450	1.93	0.091 (0.177)	10.21	0.202 (0.393)	2回目 (0.177)
31	14.6	3.0	150	0.450	1.90	0.038 (0.207)	2.02	0.084 (0.460)	3回目 (0.207)
33	14.1	3.0	200	0.600	2.85	0.157	9.72	0.262	
35	16.2	3.0	200	0.600	2.33	0.095 (0.235)	15.5	0.158 (0.392)	2回目 (0.235)

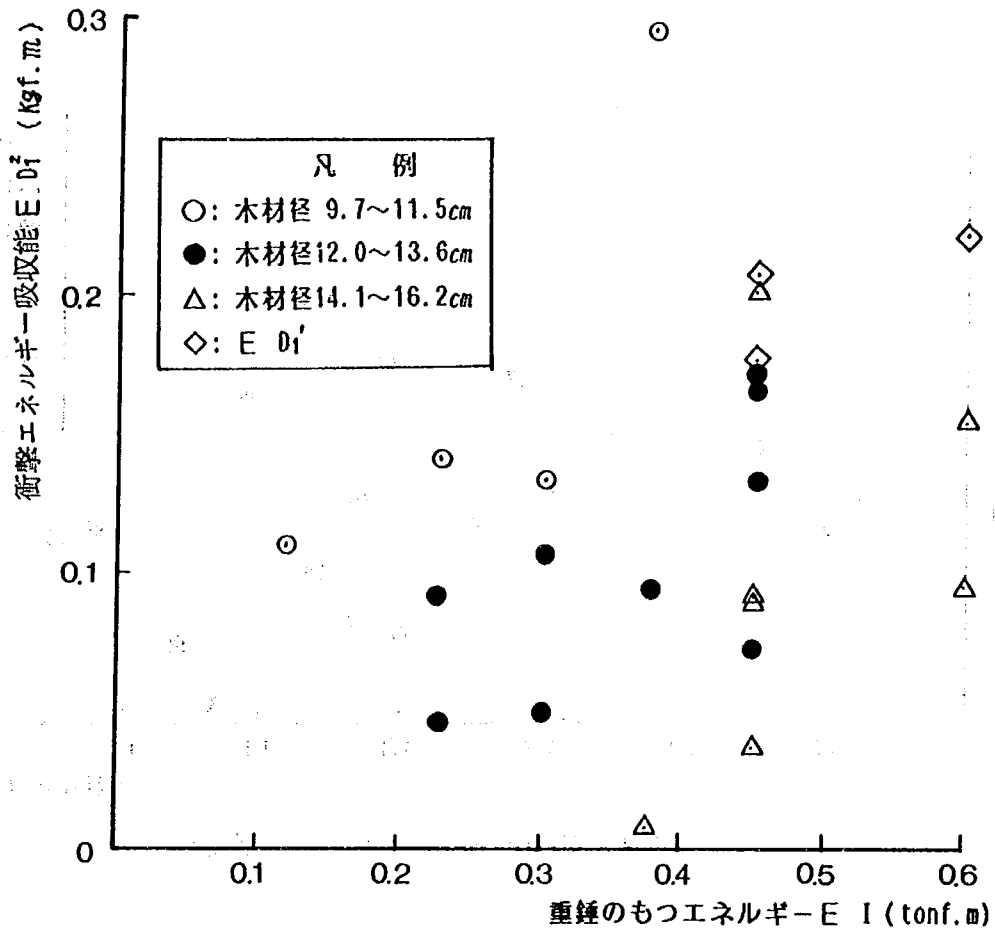


図 3.26 重錘のもつエネルギーと衝撃エネルギー吸収能

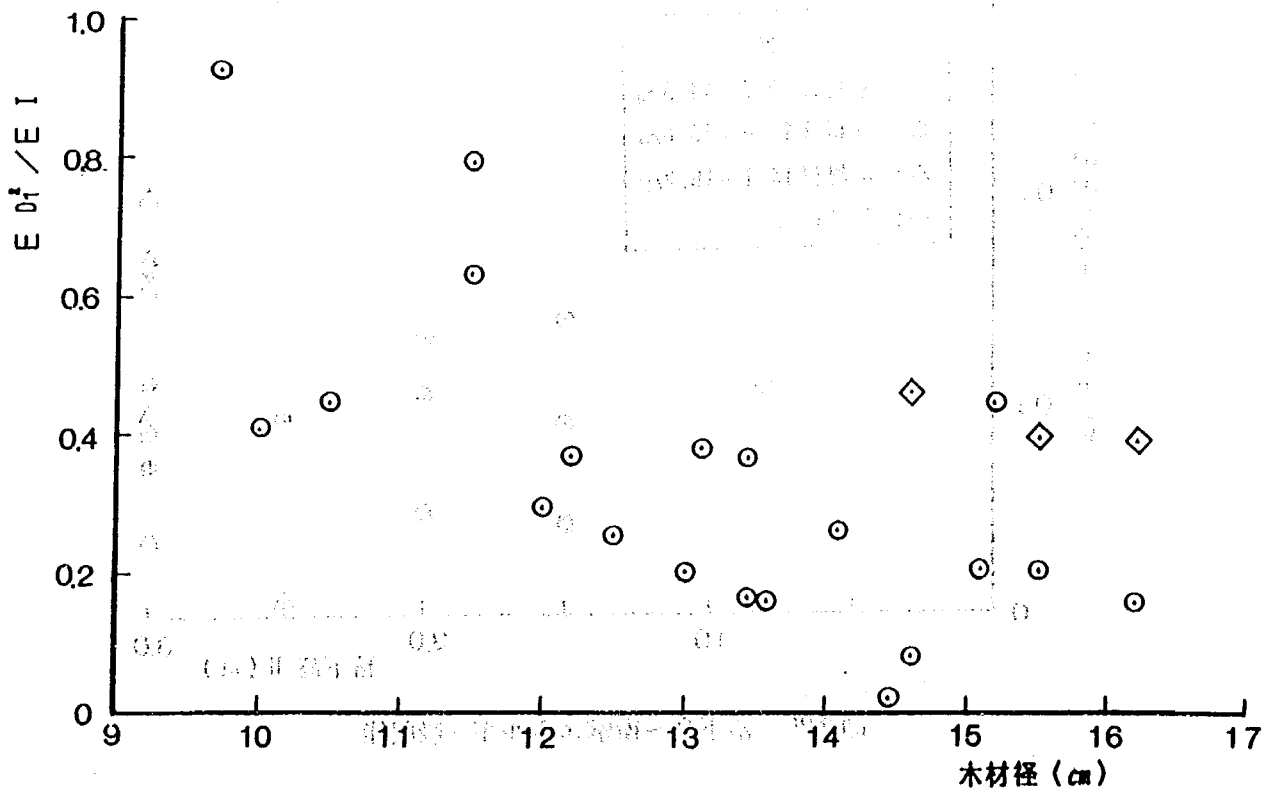


図 3.27 木材径 $\sim E_{d1}/EI$

3.2 静的載荷実験

(1) 実験方法

① 実験装置

実験装置は、200 t アムスラー型試験装置を用いて実施した。実験装置の概要を図 4.1 に示す。試験体のスパン長は 2.0 m で載荷形式は 1/2 分割点（中央点）への集中載荷とし、平均載荷荷重速度は、100 kgf/分とした。

② 計測装置

計測項目は、静的荷重及び載荷点変位である。荷重はアムスラー試験装置の荷重計で、載荷点の変位は載荷点下部に設置した接触式変位計（ダイヤルゲージ）により測定した。アムスラー試験装置の最大測定荷重は 25 tonf、1 目盛は 100 kgf である。また、ダイヤルゲージの測定範囲は最大 80 mm で、80 mm を越える変位は、ダイヤルゲージの設置高さを変えて連続的に測定した。

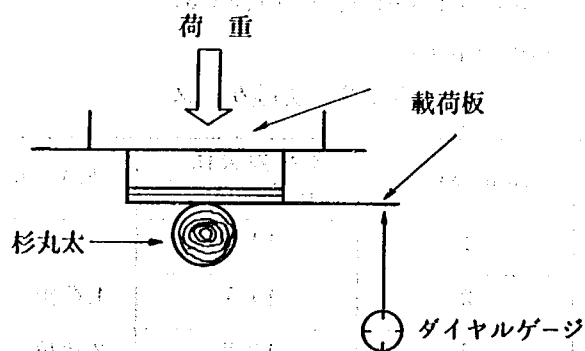
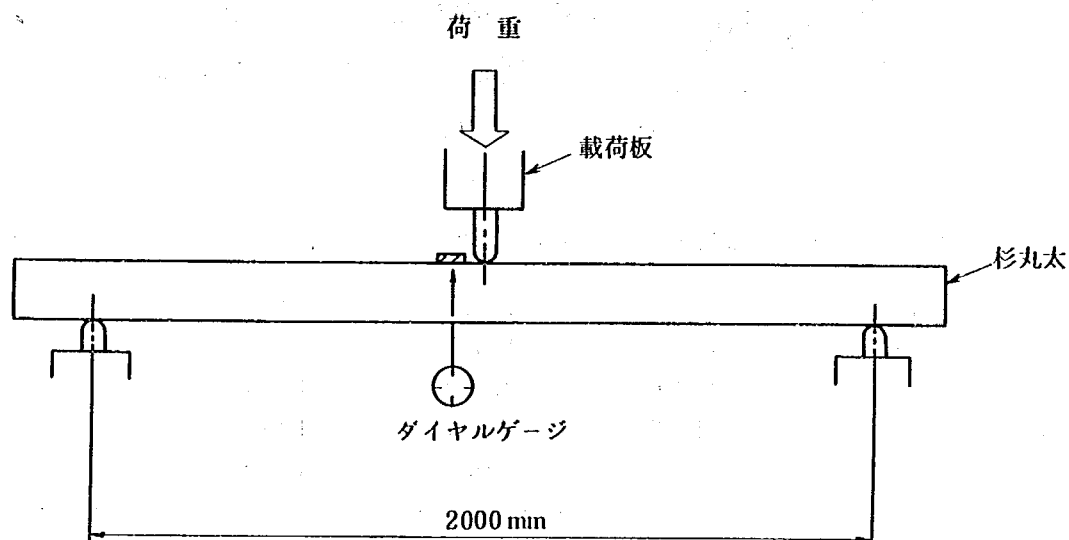


図 4.1 実験装置

③ 試験体

試験体は、衝撃実験で使用した木材と同様の茨城県谷田部町産の杉材を使用した。切出し時に防乾処置を施し、全長 240 cm で中央部径を 10 cm, 13 cm, 15 cm の 3 種類に区分して実施した。表 4.1 に木材の諸元を示す。

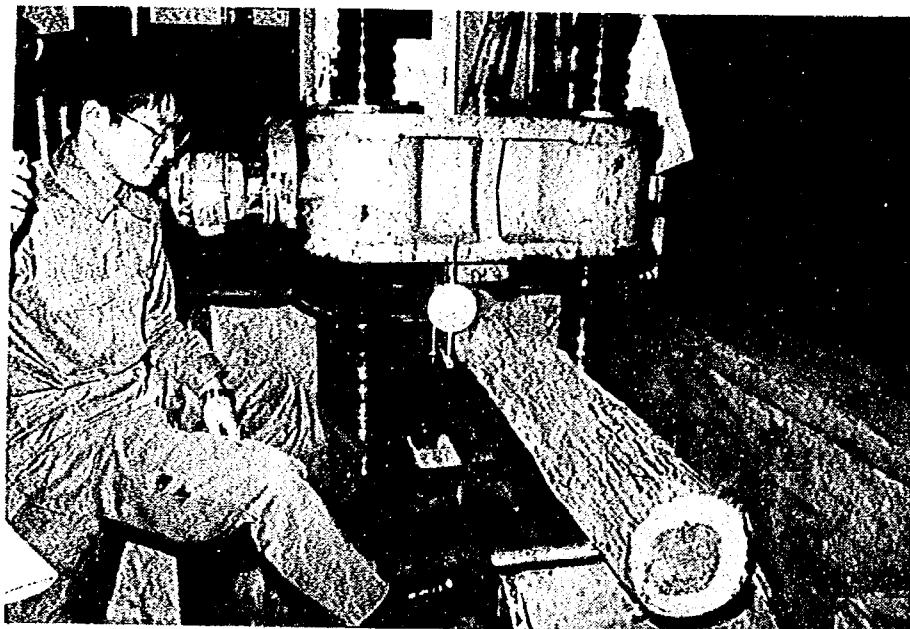


写真 4.1 静的载荷試験

表 4.1 木材の諸元

caseNo	中央部径 ϕ (cm)	断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)	含水比 W (%)	備 考
1	11.0	95.0	130.7	121.0	
2	11.7	107.5	157.2	118.5	
3	13.8	149.6	258.0	124.5	
4	13.9	151.7	263.7	125.0	
5	17.5	240.5	526.2	119.8	

(2) 実験条件

実験で用いたパラメータは、木材の中央部の直径である。

表 4.2 に実験ケースと回数を示す。

表 4.2 実験ケース

木材の径の種類 (cm)	case No	木材の実径 ϕ (cm)	測定項目	備 考
10.0	1	11.0	1.荷重 2.変位	
	2	11.7		
13.0	3	13.8		
	4	13.9		
15.0	5	17.5		

(3) 実験結果

① 荷重～変位曲線

測定された荷重～変位曲線の例を図 4.2 に示す。また測定された全ケースの荷重～変位曲線を図 4.3～4.5 に示す。

木材径と最大荷重の関係を図 4.6 に、木材径と終局変位の関係を図 4.7 に示す。また、静的試験結果を表 4.3 に示す。

図および表より以下の特性が認められる。

- i 荷重～変位曲線は、ほぼ同じ形状を示している。比例限界変位、最大荷重に対する変位は ϕ 11.7 cm が特異点を示している他はほぼ同じ値を示す。これは木材の破壊が強度だけでなく、変形形状に支配されることを示している。
- ii 実験から得られた木材の弾性係数と木材径の関係を表 4.3、図 4.8 に示す。これらの図、表から木材個々の弾性係数はバラツキが大きいことがわかる。また、表 4.5 に示す一般的な杉材の弾性係数 $7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ より小さい値となっている。これは実験条件で示している木材の直径には、皮の厚みを含んでいるためで、皮の厚さを一律 4 mm と仮定すると、実験による弾性係数は $E = 3.4 \sim 8.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ となり一般値に近くなる。
- iii $F - \delta$ から比例限界における梁のバネ定数を $F - \delta$ から求め、木材径とバネ定数の関係を図 4.9 に示した。バネ定数は木材径に比例して大きくなる傾向を示している。しかし単純梁のバネ定数は下記のように理論的には木材の半径（又は直径）の 4 乗に比例することを考えると、データーのバラツキが大きいことに起因する偶然の傾向と考えた方が妥当である。

$$P = \frac{48EI}{L^3} \cdot \delta = \frac{48}{L^3} \cdot \frac{\pi(2r)^4}{64} \cdot E \cdot \delta = 12\pi \frac{r^4 E}{L^3} \cdot \delta \dots\dots\dots (4.1)$$

- iv 最大荷重は図 4.6 に示すように木材の直径に比例して大きくなる傾向を示している。しかし、理論的には下記のように木材の半径（又は直径）の 3 乗に比例するものであり、さらに実験数を多くしてチェックする必要がある。

$$P = \frac{4\sigma z}{L} = \frac{4\sigma}{L} \cdot \frac{\pi}{32} (2r)^3 = 3.14 \times \frac{\sigma}{L} \cdot r^3 \dots\dots\dots (4.2)$$

(4.2) 式に表 4.4 の一般的な杉の強度 $\sigma f = 400 \text{ kg/cm}^2$ を代入して $L = 2.0 \text{ m}$ の杉の最大荷重を推定すると下表のようになる。実験値はこれに対して若干小さいものの、比較的近い値を示している。

L = 2.0 m の杉梁の最大強度（一般値）

ϕ (cm)	9	10	13	15	17
最大荷重 (kg)	572	785	1725	2649	3857

- v 表 4.3 に示すように、実験で用いた杉の曲げ応力強度は平均値で 384 kg/cm^2 となっており一般的な値（表 4.4）の 576 kg/cm^2 より小さい。しかし、弾性係数の場合と同様に杉の皮が 4 mm あるとして、曲げ応力強度を計算しなおすと 464 kg/cm^2 （資料 3 参照）となり、若干一般値に近い値となる。

表 4.3 静的実験結果

Case No	木材径 ϕ (cm)	断面積 A(cm ²)	断面係数 Z(cm ³)	断面 2 次 モーメント I (cm ⁴)	最大荷重 Fmax(tonf)	比例限度 荷 重 Fe ℓ (tonf)	最大荷重時 の 変 位 $\delta F \cdot \max$ (cm)	終局変位 δu^2 (cm)	曲げ応力 強 度 σu (kgf/cm ²)	比例限度 曲げ応力 σel (kgf/cm ²)	曲げ弾性 係 数 E(10 ⁴ kgf/cm ²)	静的エネル ギー吸収能 Es(tonf·m)	バネ定数 k(kgf/cm)
1	11.0	95.0	130.7	718.7	1.00	0.64	7.93	12.00	382.6	244.8	5.40	0.085	232.6
2	11.7	107.5	157.2	919.8	1.40	1.00	7.62	10.30	445.3	318.1	6.59	0.115	363.6
3	13.8	149.6	258.0	1780.3	1.94	1.52	6.60	11.70	376.0	294.6	4.67	0.173	498.8
4	13.9	151.7	263.7	1832.4	2.10	1.94	11.20	12.71	398.2	367.8	2.67	0.216	293.6
5	17.5	240.5	526.2	4603.9	3.35	2.80	8.00	11.69	318.3	266.1	3.12	0.303	861.9

- 注) 1. 比例限度荷重は、荷重～変位曲線より求めた。
 2. 終局変位は、最大荷重に達した後、比例限度荷重まで低下したときの変位として、 δu として表わしている。
 3. 静的エネルギー吸収能は、終局変位に至るまでの仕事量として求めた。
 4. 曲げ応力強度(スパン長 $\ell \times$ 荷重F)/(4 $\times$ 断面係数(Z))より求めた。
 5. 曲げ弾性係数は、次式より求めた。

$$\text{曲げ弾性係数(E)} = \frac{(\text{比例限度内の上限荷重と下限荷重の差}) \times (\text{スパン長}\ell)^3}{48 \times \text{断面 2 次モーメント(I)} \times (\text{比例限度内の上限荷重と下限荷重に対応する変位差})}$$

6. バネ定数kは(48 $\times$ 弾性係数(E) $\times$ 断面 2 次モーメント(I))/(スパン長 ℓ)³

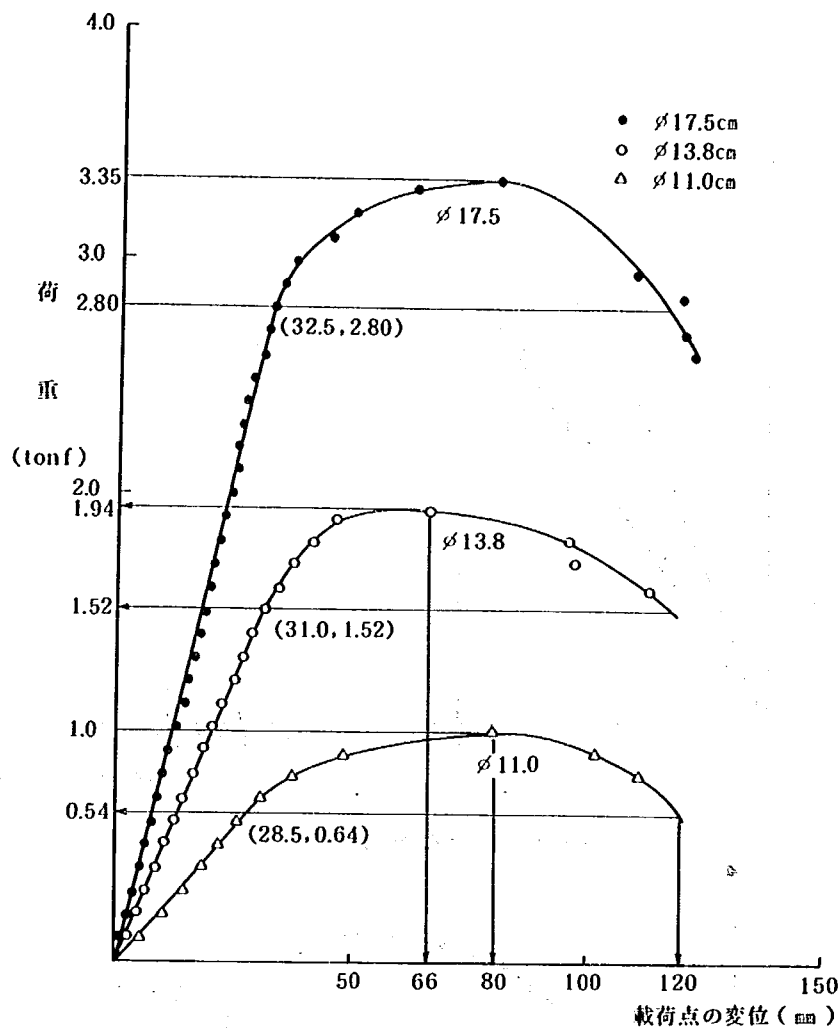


図 4.2 荷重と載荷点の変位の関係

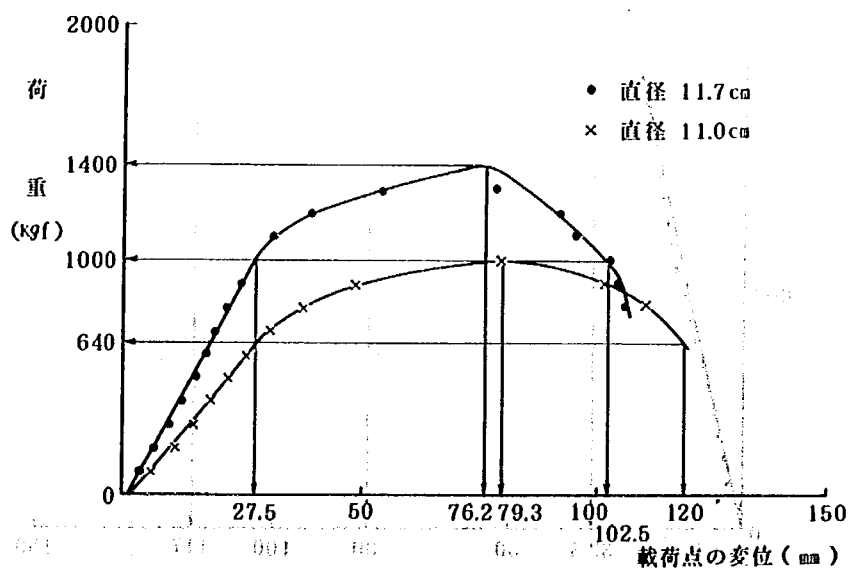


図 4.3 荷重と載荷点の変位

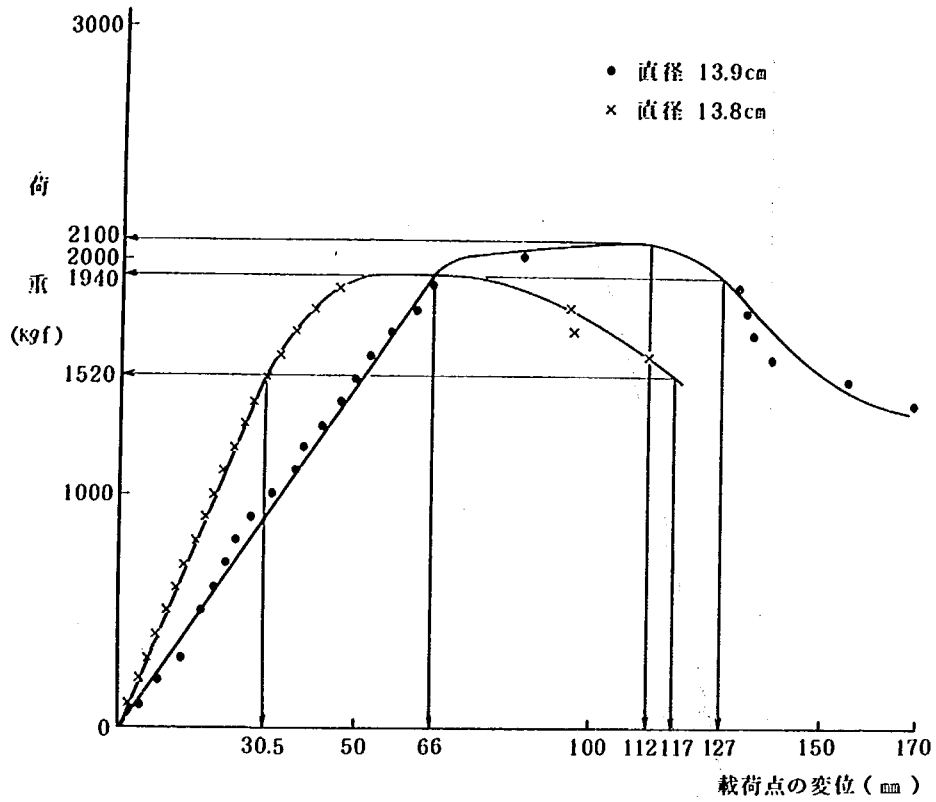


図 4.4 荷重と載荷点の変位

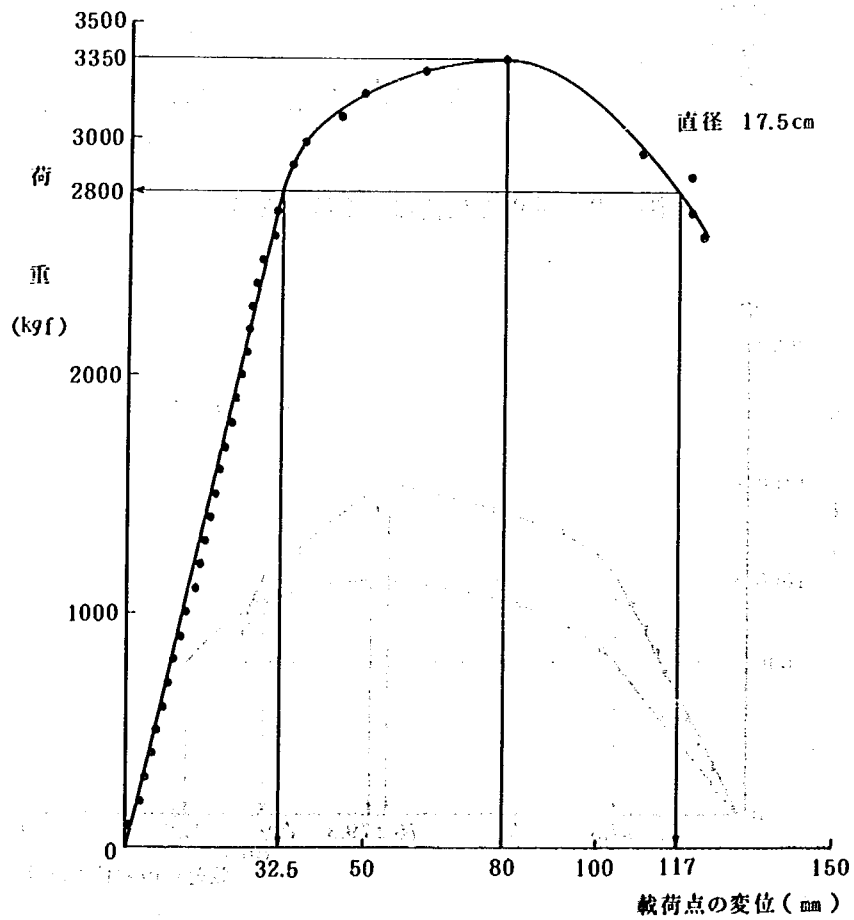


図 4.6 荷重と載荷点の変位

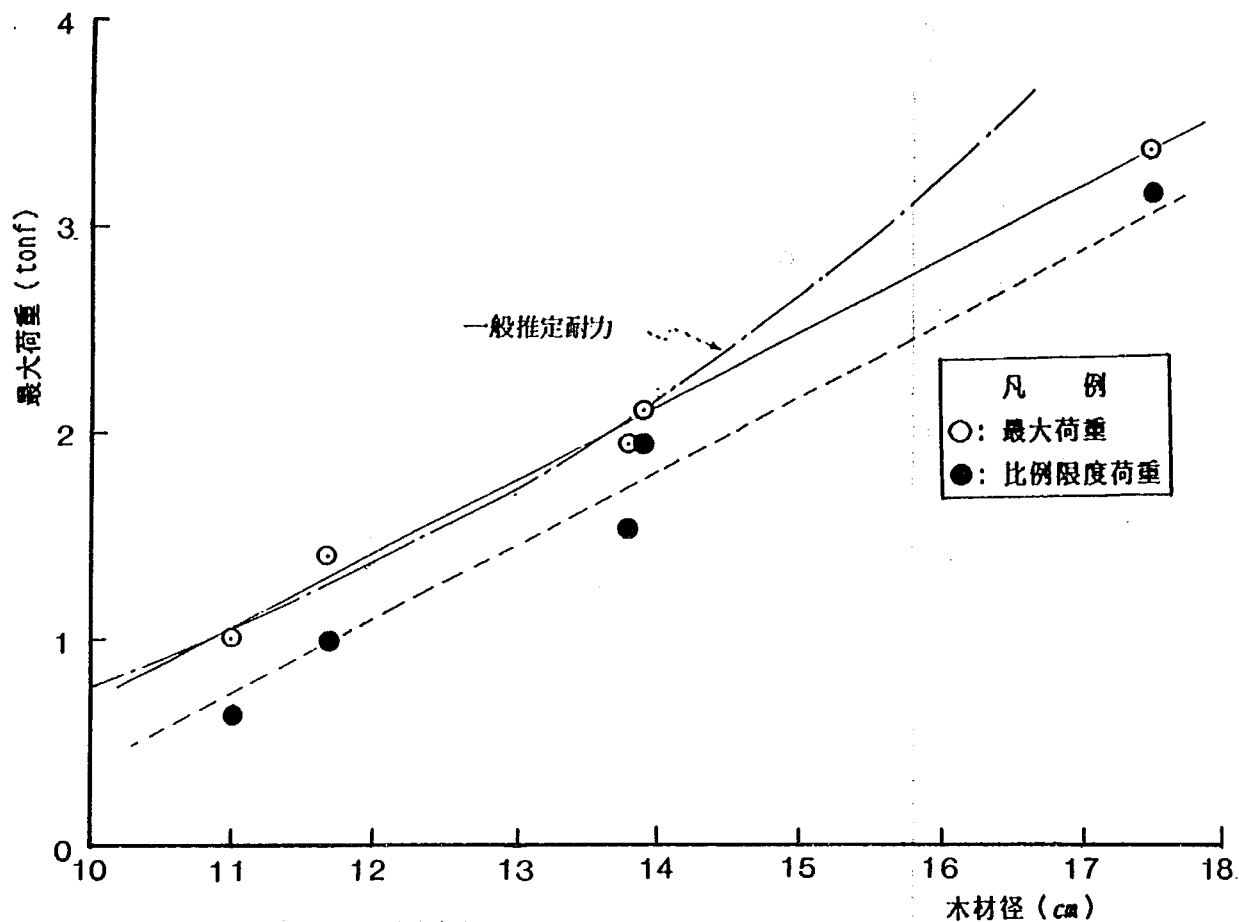


図 4.6 木材径と最大荷重

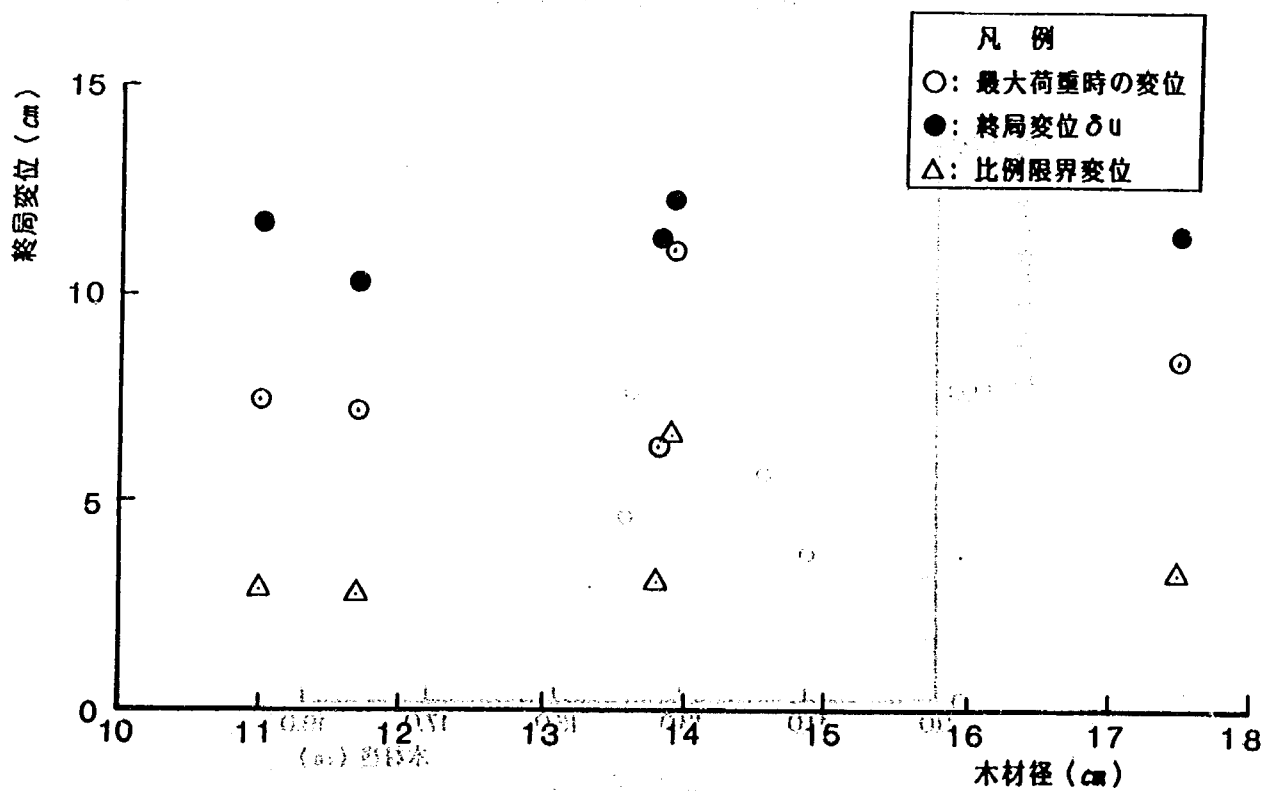


図 4.7 木材径と終局変位

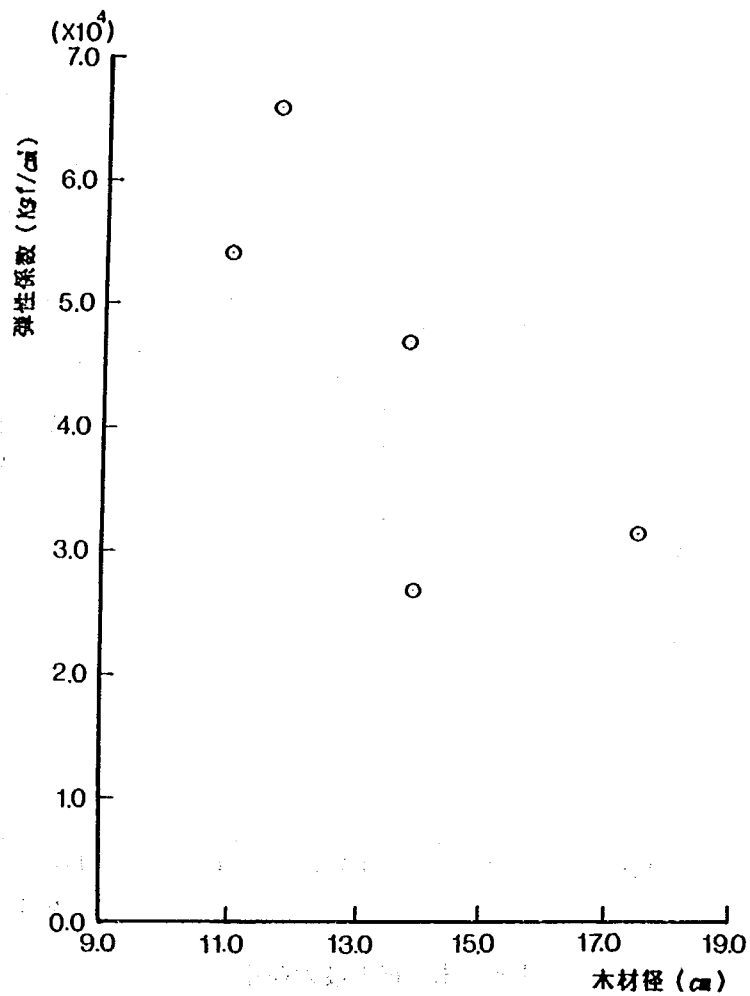


図 4.8 木材径と弾性係数

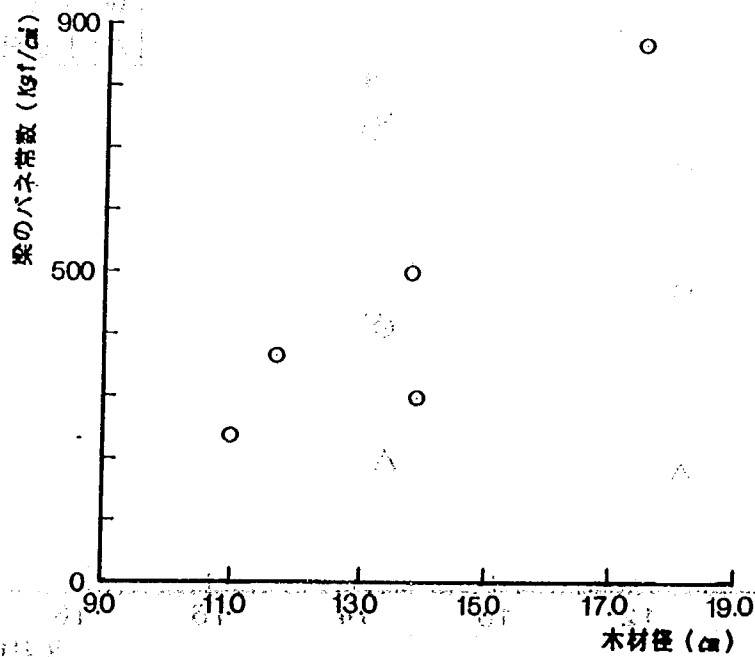


図 4.9 木材径とバネ定数

表 4.4 木材の強さ試験成績例（ただし繊維方向負荷）¹⁾

樹 種		比 重	引張強さ (kg/cm ²)	圧縮強さ (kg/cm ²)	曲げ強さ (kg/cm ²)	せん断強さ (kg/cm ²)
針 葉 樹	す ぎ	0.39	447	400	576	52
	ひ の き	0.46	573	517	804	72
	べ い ひ	0.53	502	480	621	86
	あ か ま つ	0.53	574	515	734	82
	べ い ま つ	0.48	490	456	760	68
	え ぞ ま つ	0.41	461	458	593	59
	ひ ば	0.43	553	380	603	72
広 葉 樹	な ら	0.80	901	459	786	79
	し ら が し	0.99	1,250	641	1,180	126
	け や き	0.68	878	526	874	97
	か え で	0.72	821	564	910	114
	し お じ	0.65	934	512	823	87
	ラ ワ ン	0.59	815	413	869	79

表 4.5 木材のヤング係数¹⁾

樹 種		E (kg/cm ²)	樹 種		E (kg/cm ²)
針 葉 樹	す ぎ え ぞ ま つ と ど ま つ と う ひ べ い す ぎ	70,000	広 葉 樹	べ い ま つ	110,000
				く り	75,000
				な ら ぶ な	90,000
				け や き あ か が し し ら が し	110,000
	ひ ば ひ の き あ か ま つ く ろ ま つ べ い ひ	85,000		気乾状態，応力の方向が繊維方向に平行の場合	
	つ が べ い つ が	90,000			

② 静的エネルギー吸収能

重錘が木材に衝突してから、終局変位に致るまでの仕事量を静的エネルギー吸収能 E_s として求め表 4.3 に示した。 E_s と木材の直径の関係を図 4.10 に、 E_s と最大荷重の関係を図 4.11 に示した。図 4.10、4.11 には最大荷重に達するまでの間の仕事量（即ち最大荷重に達するまでの静的エネルギー吸収能） $E_{s'}$ も一緒に示している。

図 4.10、図 4.11 から E_s 、 $E_{s'}$ は木材の径、最大荷重に比例して大きくなる特性をもっていることがわかる。

最大荷重までの変位 $\delta u'$ に対応する静的エネルギー吸収能 $E_{s'}$ は静的エネルギー吸収能 E_s の約 60～70% 程度となり、 E_s の半分以上を占める。また $E_{s'}$ はバラツキが大きい、 E_s はそれほど大きなバラツキを示さない。これは、最大荷重付近では $P-\delta$ 曲線はフラットな値となり、 δ_{Fmax} の値の幅が大きいため読み取り時に誤差が生じるものと考えられる。

E_s は木材が破壊するまでに吸収できるエネルギーと考えられるので、 E_s が木材の直径の一次関数で表わされれば、立木のエネルギー能の推定が簡単になる。

しかしながら、最大荷重やバネ定数が理論と異なる傾向を示すため、今後実験データを追加する必要がある。追加する実験は、木材の直径の小さいケースと同直径における実験個数を増やすことを主眼に行うことが提案される。

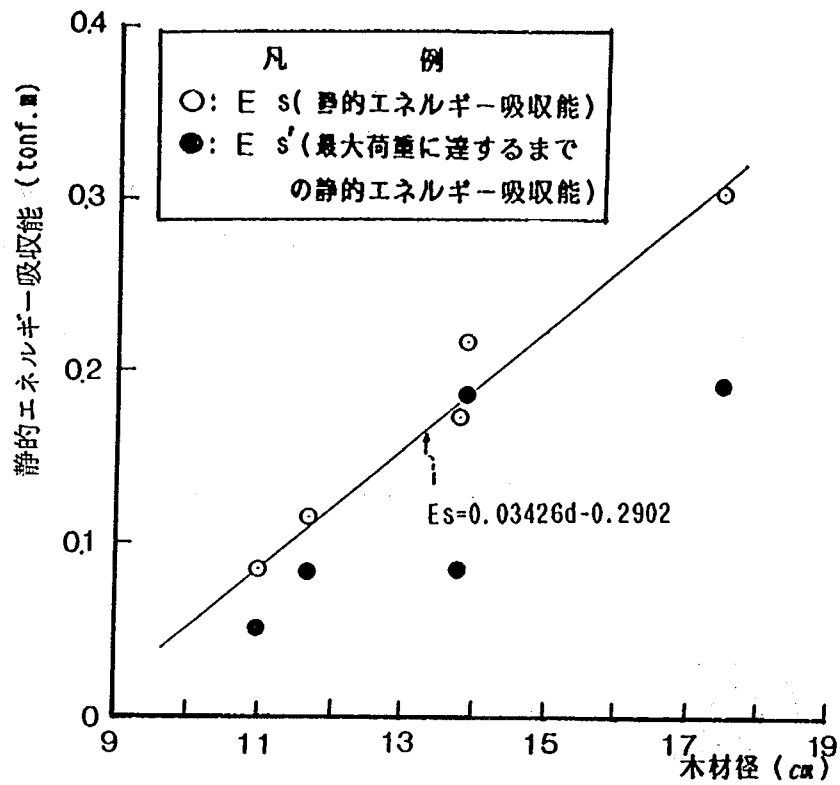


図 4.10 木材径と静的エネルギー吸収能

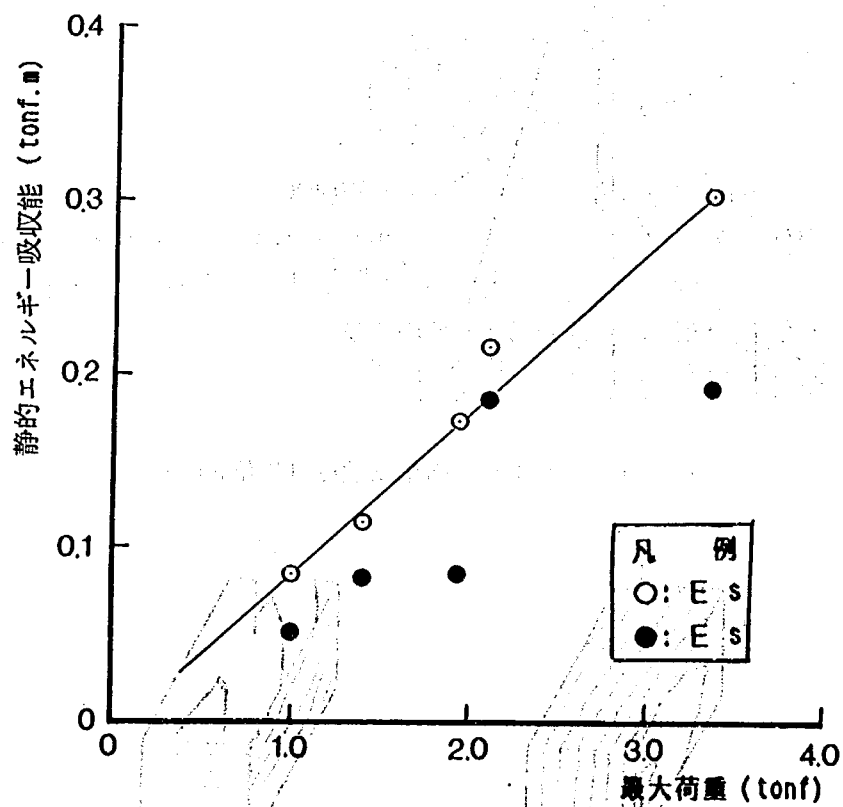


図 4.11 最大荷重と静的エネルギー吸収能

3.3 シャルピー試験

(1) 試験方法

① 試験装置

シャルピー試験は、図 5.1 に示すようなシャルピー衝撃試験機を用いて一辺 2 cm の正方形断面をもつ全長 30 cm の試験片を試験片支持台上に設置し、振り型ハンマーで曲げ衝撃を与えて 1 回で切断し、切断に費やしたエネルギーを求めるものである。

ハンマー重量 W は、14.746 kgf、ハンマー回転中心からハンマーの重心までの距離 R は 0.4312 m、振上げ角度 $\alpha = 128.9^\circ$ で実験を実施した。

衝撃方向による木材の強度の差を調べるため、繊維方向と直角方向（板目）及び、繊維方向（まさ目）の 2 方向から衝撃を加えた。また、今実験で使用した試験片は全て二方材として採取加工したものである。

図 5.1 (b) に衝撃方向を示す。

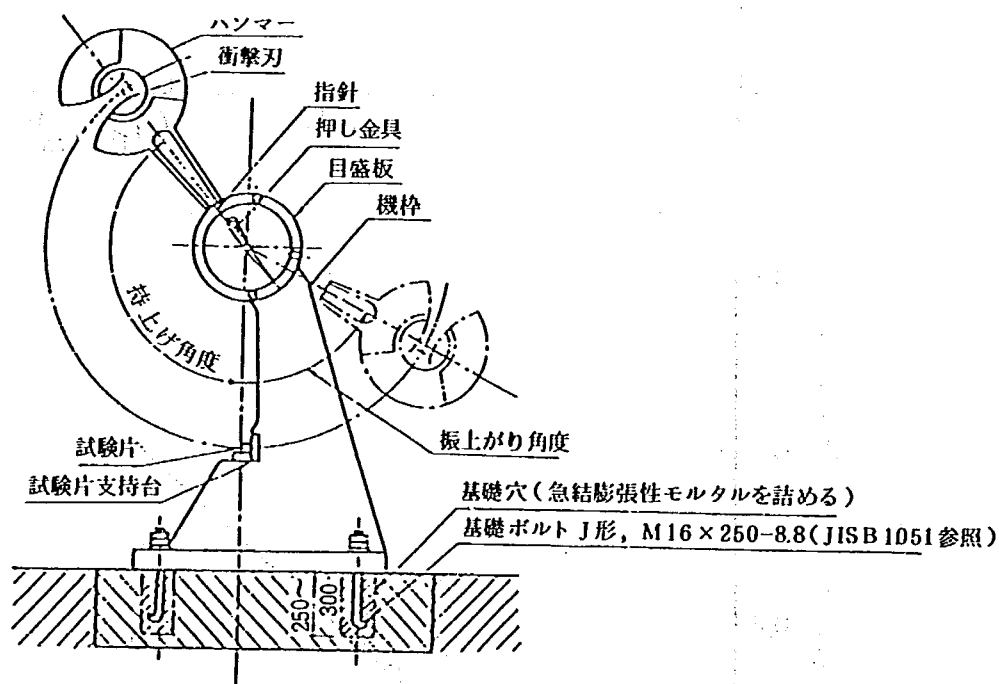


図 5.1 シャルピー衝撃試験機 (単位 mm)

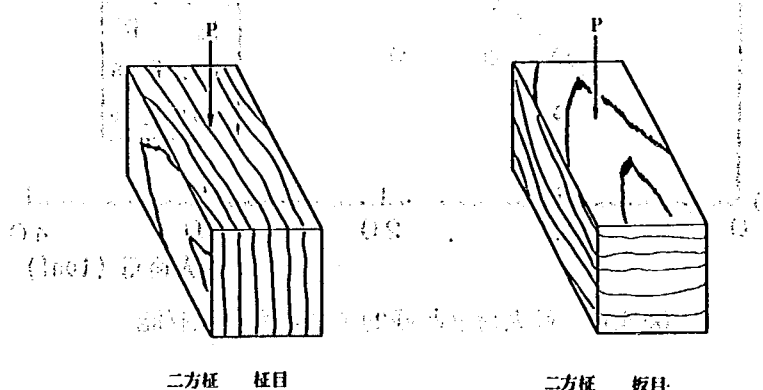


図 5.1(b) 衝撃方向

② 計測項目

最初に持上げた振上角度 α （本実験では一定とした。）と切断後余ったエネルギーで反対側に振り上がる角度 β を測定し、吸収エネルギー E を次式より求める。

$$E = WR (\cos \beta - \cos \alpha) \dots\dots\dots (5.1)$$

W ：ハンマー重量

R ：ハンマーの回転半径（回転中心からハンマー打撃点までの距離）

この E を試験片の断面積 A で割った値をシャルピー衝撃試験値とする。

③ 試験片

シャルピー試験で用いた試験片は、衝撃実験で使用した試験体から任意抽出した試験体より採取したもので、衝撃実験で用いた試験体の強度のパラツキを把握できるようにした。

試験片は、衝撃実験で破断した試験体の元口（根に近い方）から約1mの部分を選択したもの。この際、含水率が変化しないように切断部に防乾処置を実施するとともに、採取直後に試験を実施した。

(2) 試験条件

試験に用いたパラメータは、衝撃方向である。表5.1に試験ケースを示す。

表 5.1 実験ケース

試験片を採取した木材		衝撃方向	回 数	計 測 項 目	備 考
CaseNo	木材径 (cm)				
1	9.8	板 目	3	1. 試験片 断面積 2. 振上り角 β 3. 含水比	
		まさ目	3		
5	13.3	板 目	3		
		まさ目	3		
6	9.5	板 目	3		
		まさ目	3		
8	10.0	板 目	3		
		まさ目	3		
10	10.6	板 目	2		
		まさ目	2		
14	13.3	板 目	3		
		まさ目	3		
16	12.5	板 目	3		
		まさ目	3		
24	13.6	板 目	4		
		まさ目	3		
25	13.1	板 目	4		
		まさ目	3		
26	15.2	板 目	4		
		まさ目	3		
27	15.5	板 目	3		
		まさ目	3		
35	16.2	板 目	3		
		まさ目	3		

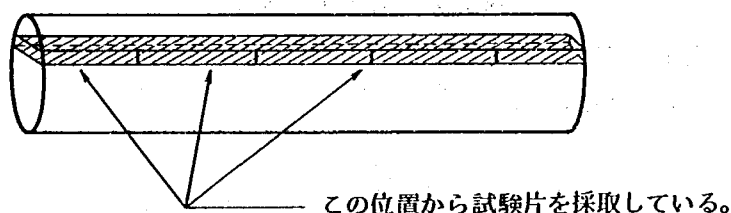
(3) 試験結果

試験結果を表 5.2 に示す。試験片を採取した木材の径をパラメータとして、衝撃方向を板目及びまさ目とした場合の結果をそれぞれ図 5.2、図 5.3 に、両者を合わせた全ケースの場合を図 5.4 に示す。

また、試験結果のバラツキを調べるため、各ケースの平均値、標準偏差等を表 5.3 に示す。表及び図より、以下の特性が認められる。

- i 同一木材より採取した試験片においても、シャルピー衝撃値はバラツキが大きく、素材レベルでの強度が均一ではないことを示している。今回の実験では、採取する位置は努めて同一位置に近い状態とするため、素材の採取位置を限定して行ったが、それでもバラツキが大きくでているということは、木材の部分部分で相当の強度のバラツキがあることを示していると考えられる。

試験片は、下図に示すように直径方向の位置を一定として、長さ方向に位置を変化させて採取したものであり、長さの変化に伴い直径が変化し、年輪幅密度等も変化するためにバラツキが大きく生じたものと思われる。



シャルピー試験結果は、静的曲げ実験の結果と比較するとバラツキが大きいことから、上記の素材のバラツキ以外に衝撃という現象そのものにもバラツキを大きくする要因を含んでいるものと考えられる。

- ii 衝撃方向によるシャルピー衝撃値を比較すると板目の方がまさ目よりも大きくなる傾向を示す。

これは、板目の方が変形性能を十分発揮でき、まさ目では、変形性能を制限されるため吸収エネルギーそのものが小さくなるものと考えられる。これは、板目では変形により破壊しないケースが6回ほど生じており、まさ目では、一回しか生じていないことから変形性能の優劣が考えられる。

板目及びまさ目ごとのバラツキをみると、板目の方がまさ目よりもバラツキが大きい。これは繊維そのものの強度が大きくバラツキしているため、その影響を直接受けるためと考えられる。

表 5.2 シャルピー試験結果(1)

Case No	試験体 No	断面積 A (cm ²)	含水比 W (%)	衝撃方向	吸収エネルギー E (kgf・m)	衝撃曲げ吸収エネルギー E _{D2} (kgf・m/cm ²)	平均値 E _{D2} (kgf・m/cm ²)
1 (φ 9.8)	1	4.18	51.4	板 目	—	—	2.244
	2	4.28	51.4	〃	—	—	
	3	4.10	61.8	〃	9,201	2,244	
	4	4.26	51.4	まさ目	5,042	1,182	1.595
	5	4.12	61.8	〃	6,167	1,497	
	6	4.12	61.8	〃	8,680	2,106	
5 (φ 13.3)	1	4.17	83.8	板 目	—	—	1.637
	2	4.16	83.8	〃	8,680	2,086	
	3	4.20	83.8	〃	4,987	1,187	
	4	4.14	83.8	まさ目	3,108	0.750	0.836
	5	4.13	83.8	〃	3,328	0.806	
	6	4.13	83.8	〃	3,937	0.953	
6 (φ 9.5)	1	4.18	68.0	板 目	—	—	1.271
	2	4.10	68.0	〃	4,436	1,082	
	3	4.15	58.3	〃	6,603	1,460	
	4	4.18	58.3	まさ目	5,206	1,245	0.901
	5	4.11	58.3	〃	4,325	1,052	
	6	4.23	68.0	〃	1,714	0.405	
8 (φ 10.0)	1	3.96	68.3	板 目	3,438	0.869	0.772
	2	4.13	68.3	〃	3,053	0.739	
	3	4.08	68.3	〃	2,888	0.708	
	4	4.08	68.3	まさ目	3,273	0.802	0.773
	5	3.93	68.3	〃	3,053	0.777	
	6	4.05	68.3	〃	2,998	0.740	
10 (φ 10.6)	1	4.14	64.2	板 目	2,400	0.580	0.728
	2	4.31	55.9	〃	3,771	0.876	
	3	4.29	55.9	まさ目	2,725	0.634	0.607
	4	4.24	55.9	〃	2,454	0.579	
14 (φ 13.3)	1	4.19	73.9	板 目	4,877	1,163	0.733
	2	4.19	73.9	〃	2,562	0.611	
	3	4.16	40.9	〃	1,766	0.424	
	4	4.21	40.9	まさ目	2,780	0.660	0.582
	5	4.21	40.9	〃	2,454	0.583	
	6	4.24	40.9	〃	2,133	0.503	
0.580		0.590	0.595	0.595	0.595	0.595	0.595
0.580		0.590	0.595	0.595	0.595	0.595	0.595
0.580		0.590	0.595	0.595	0.595	0.595	0.595

表 5.2 シャルピー試験結果(2)

Case No	試験体 No	A (cd)	W (%)	衝撃方向	E (kgf・m)	E _{D2} (kgf・m/cd)	E _{D2} (kgf・m/cd)
16 (φ 12.5)	1	4.24	60.6	板 目	6.978	1.644	1.428
	2	4.26	60.6	"	5.206	1.211	
	3	4.21	71.8	"	—	—	
	4	4.24	71.8	まさ目	—	—	0.924
	5	4.25	71.8	"	4.214	0.911	
	6	4.25	60.6	"	3.992	0.936	
24 (φ 13.6)	1	4.20	62.6	まさ目	2.508	0.597	0.534
	2	4.20	62.6	"	2.347	0.558	
	3	4.31	60.9	"	1.922	0.446	
	4	4.35	62.6	板 目	3.328	0.766	0.617
	5	4.39	60.9	"	2.779	0.633	
	6	4.26	60.9	"	2.779	0.652	
	7	4.24	60.9	"	1.776	0.416	
25 (φ 13.1)	1	4.31	74.2	板 目	3.660	0.850	0.835
	2	4.26	74.2	"	3.771	0.884	
	3	4.22	74.2	"	3.882	0.919	
	4	4.20	93.7	"	2.888	0.687	
	5	4.26	93.7	まさ目	2.725	0.639	0.590
	6	4.24	93.7	"	2.347	0.553	
	7	4.15	74.2	"	2.400	0.578	
26 (φ 15.2)	1	4.16	96.9	まさ目	2.998	0.720	0.753
	2	4.18	96.9	"	3.163	0.756	
	3	4.18	96.9	"	3.273	0.783	
	4	4.17	96.9	板 目	—	—	1.063
	5	4.16	96.9	"	5.151	1.238	
	6	4.14	96.9	"	4.048	0.977	
	7	4.16	96.9	"	4.048	0.973	
27 (φ 15.5)	1	4.22	56.4	板 目	7.994	1.893	1.703
	2	4.20	56.4	"	5.369	1.278	
	3	4.19	56.4	"	8.122	1.938	
	4	4.24	56.4	まさ目	3.826	0.902	1.154
	5	4.15	56.4	"	4.877	1.175	
	6	4.22	56.4	"	5.822	1.386	
35 (φ 16.2)	1	4.22	106.4	板 目	2.834	0.671	1.169
	2	4.18	106.4	"	7.026	1.680	
	3	4.12	111.1	"	4.767	1.157	
	4	4.16	111.1	まさ目	3.163	0.760	0.840
	5	4.12	111.1	"	4.436	1.076	
	6	4.22	106.4	"	2.888	0.684	

表 5.3 シャルピー衝撃値のパラッキ

(1) 衝撃方向による違い

衝撃方向	平均値 (kgf・m/c㎡)	標準偏差	分散	備考
板目	1.078	0.486	0.236	
まさ目	0.845	0.345	0.119	
板目 +まさ目	0.958	0.432	0.187	

(2) 木材径による違い

木材径 (cm)	衝撃方向	平均値 (kgf・m/c㎡)	標準偏差	分散	備考
9.5 } 10.6	板目	1.070	0.546	0.298	
	まさ目	1.002	0.489	0.238	
	合計	1.029	0.497	0.247	
12.5 } 13.6	板目	0.942	0.457	0.209	
	まさ目	0.677	0.166	0.027	
	合計	0.843	0.377	0.142	
15.2 } 16.2	板目	1.312	0.438	0.192	
	まさ目	0.914	0.241	0.058	
	合計	1.113	0.399	0.159	

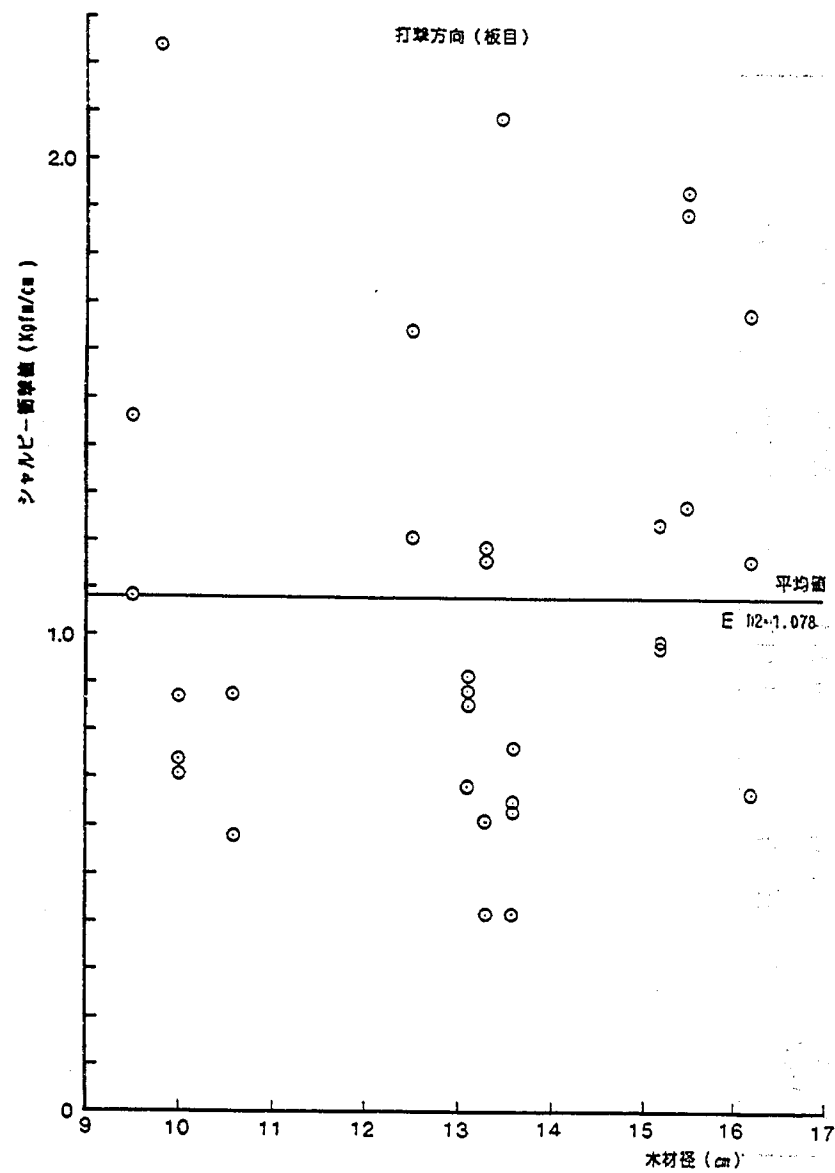


図 5.2 木材径～シャルピー衝撃値

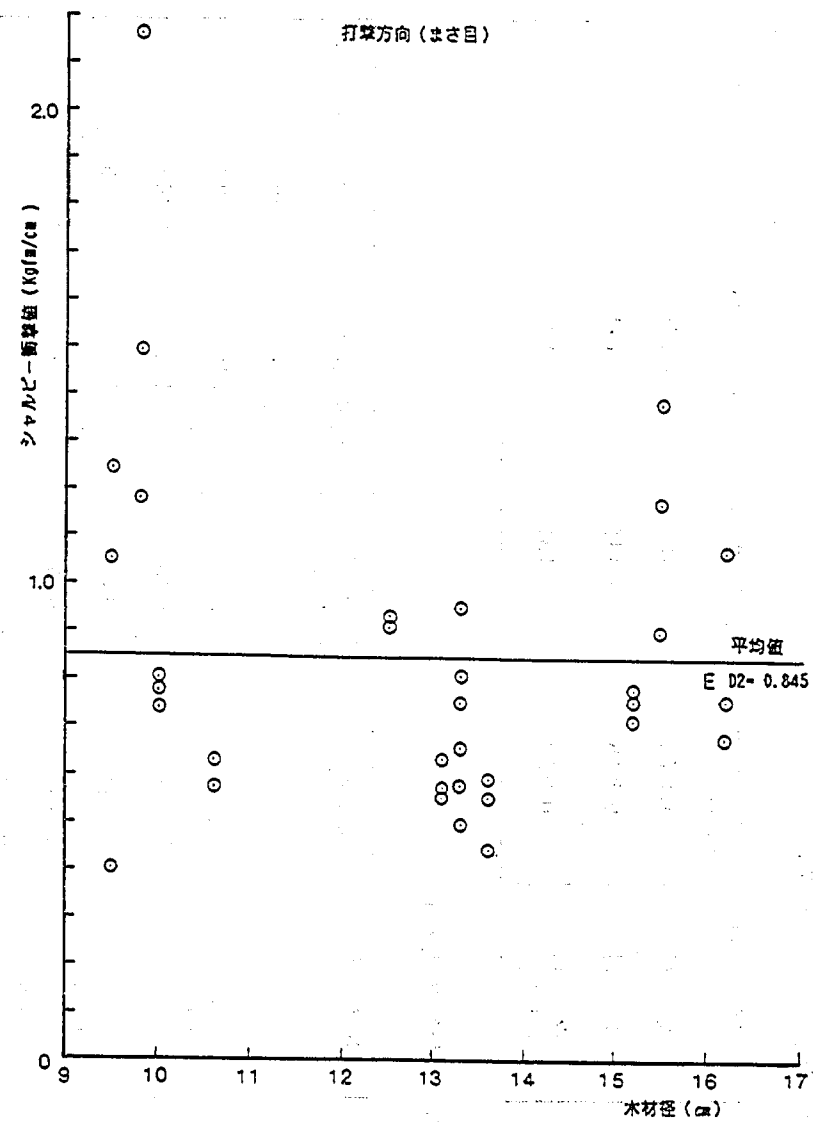


図 5.3 木材径～シャルピー衝撃値

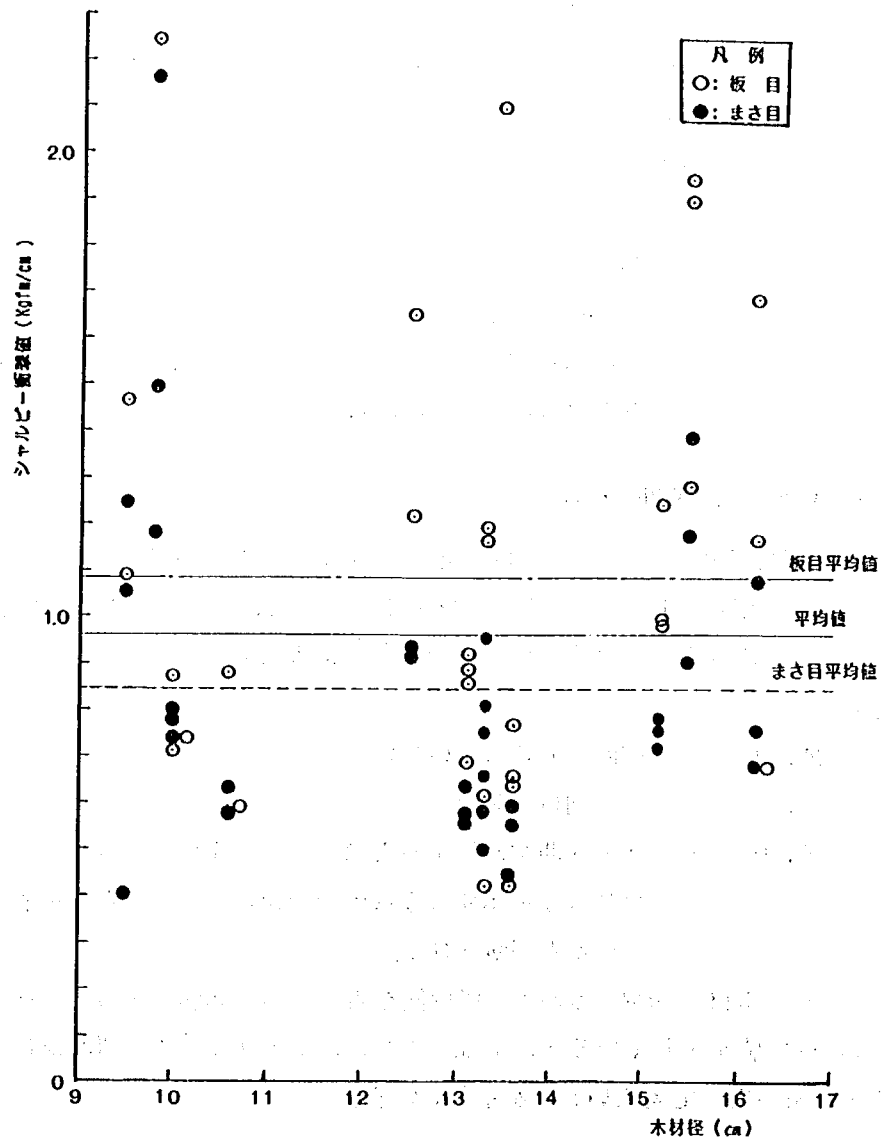


図 5.4 木材径～シャルピー衝撃値

4. 解 析

4.1 静的エネルギー吸収能 E_s

本実験におけるスパン $\ell = 2.0$ m の単純支持杉材の静的エネルギー吸収能 E_s は下記のように木材の直径 d の一次関数として表わす事ができる。

$$E_s = 0.03426 d - 0.2902 \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

d : 木材の直径 (cm)

E_s : 静的エネルギー吸収能 (tf・m)

但し、上記の式は原点 ($d = 0$, $E_s^2 = 0$) に帰着しないことおよび、上式の前データとなっている最大荷重の実験値が理論と若干異なる傾向を示していることから、さらに実験を広い範囲の d について実施して、上記の問題点を解明する必要がある。

4.2 衝撃エネルギー吸収能 E_{D1}

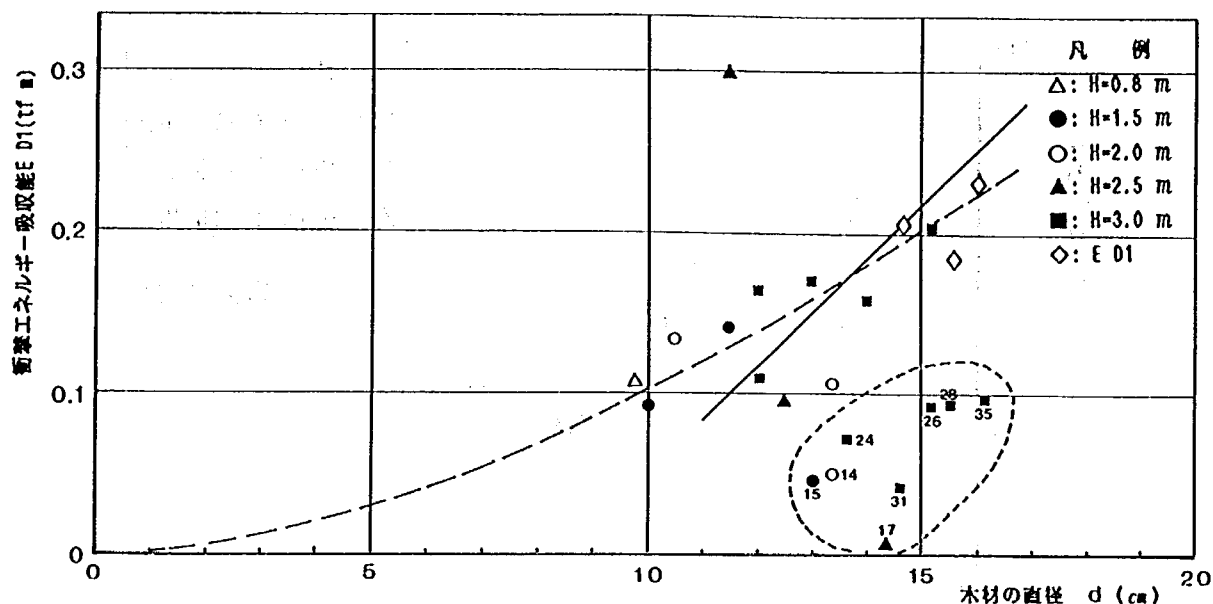
測定値より求められた衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} のグラフに上記の静的エネルギー吸収能の式 (6.1) を重ねてみると図 6.1 のようになる。図 6.1 において、 E_s よりも小さい値を示す E_{D1} が相当数ある。この図で E_{D1} が極端に小さい値を示す○に入る実験データを再チェックすると次のことが判明する。

CASE = 24, 26 : 破断まで致っていない

CASE = 31, 35 : 第 2 回目の载荷

CASE = 14, 15, 17 : T-F 曲線が第 1 波と第 2 波に完全に分かれており、荷重 F の測定値に 3 章に示すような梁の変位に関係ない荷重応答が大きく影響していると判断される。

以上のデータとして木材の衝撃エネルギー吸収能を表わすのに問題のあるデータを除外すると、 E_{D1} はほぼ E_s に近い値を示していると言える。これは、衝撃エネルギー吸収能は静的エネルギー吸収能そのまゝの値を用いてもよいことを示している。



注) E D1は同一試験体に連続して 2回載荷した
ケースの合計の吸収エネルギーを示している。

図 6.1 衝撃エネルギー吸収能

4.3 シャルピー試験値と衝撃エネルギー吸収能の比較

衝撃実験で求めた E_{D1} を梁の載荷点の断面積で割って、シャルピー試験値と同様に単位面積当りのエネルギー吸収能を求めて図 6.2 に示した。この値を等価シャルピー換算値 E_{D1}' と呼ぶとすれば、バラツキはあるものの $E_{D1}' = 1.27 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ となり、シャルピー試験値 E_{D2} に近い値を示している。しかし、シャルピー値は梁のスパン長によって変わるものと考えられるので (資料 3 参照)、この E_{D2} と E_{D1}' の一致はむしろ、シャルピー試験と今回の衝撃実験の条件の相似を表わしていると考えられる。しかし、木材の衝撃エネルギー吸収能は素材あるいは衝撃現象そのものの特性により非常にバラツキが大きいと言える。したがって、出来るだけ多くの実験データをもって、 E_{D1} の推定を行うことが望まれる。

表 6.1 衝撃試験値とシャルピー試験値の比較

この表は、衝撃試験値とシャルピー試験値の比較を示している。衝撃試験値は、衝撃試験機を用いて測定された値であり、シャルピー試験値は、シャルピー試験機を用いて測定された値である。

この表は、衝撃試験値とシャルピー試験値の比較を示している。衝撃試験値は、衝撃試験機を用いて測定された値であり、シャルピー試験値は、シャルピー試験機を用いて測定された値である。

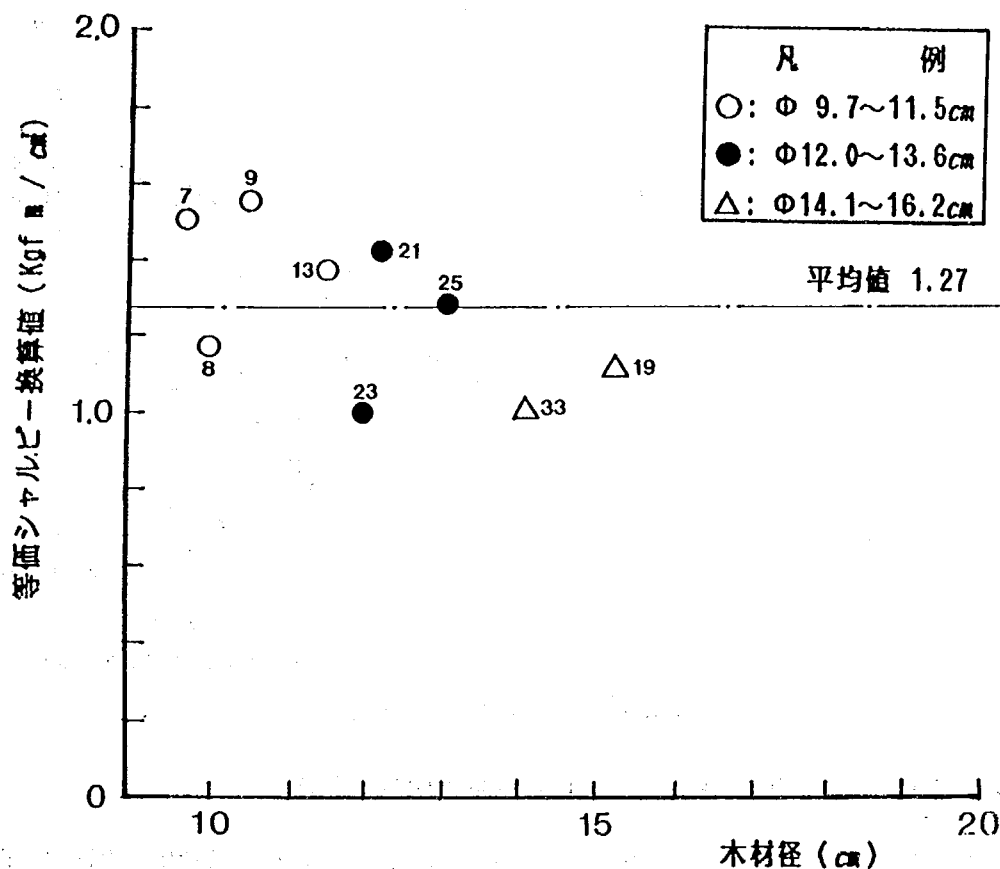


図 6.2 等価シャルピー値

4.4 木材の衝撃エネルギー吸収能の推定方法

本実験におけるスパン=2 mの杉の単純梁の衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} は、先に示したように、静的な値 E_s にほぼ等しい。従ってスパン2 mの単純梁杉材の衝撃エネルギー吸収能は下記の式で表わされる。

$$E_{D1} = E_s = 0.03426d - 0.2909 \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

但し、この推定方法は木材の直径が比較的狭い範囲 ($\phi = 10 \sim 16$ cm) の実験データにもとづくものであり、今後広い範囲の直径をもつ木材についてチェックする必要がある。

さらに、最大荷重にみられたひずみ速度効果は E_{D1} にはないと考えているが、図3.22の $\phi = 12.0 \sim 13.6$ cmの例のように若干速度効果と思われる現象もある。今後、衝突速度についても、広い範囲の実験を行い上記の式のチェックを行う必要がある。

4.5 立木の衝撃エネルギー吸収能の推定方法

本実験では立木が土石流中の石礫の衝突を受けた場合、単純梁として応答すると仮定し、さらに単純梁のスパンが2 mのケースに関して実験を行い、衝撃吸収エネルギー E_{D1} は静的吸収エネルギー E_s に等しいという結論を得た。

立木の衝撃エネルギー吸収能を推定するためには、図6.3に示すように、今回の実験結果を任意のスパンに適用できるように整理することと、実際の立木が何mのスパンの単純梁と仮定されるかの検

討が必要である。後者に関しては、今回の実験で求めることは出来ないで、今後の野外での実物実験にゆずるとし、前者について検討する。

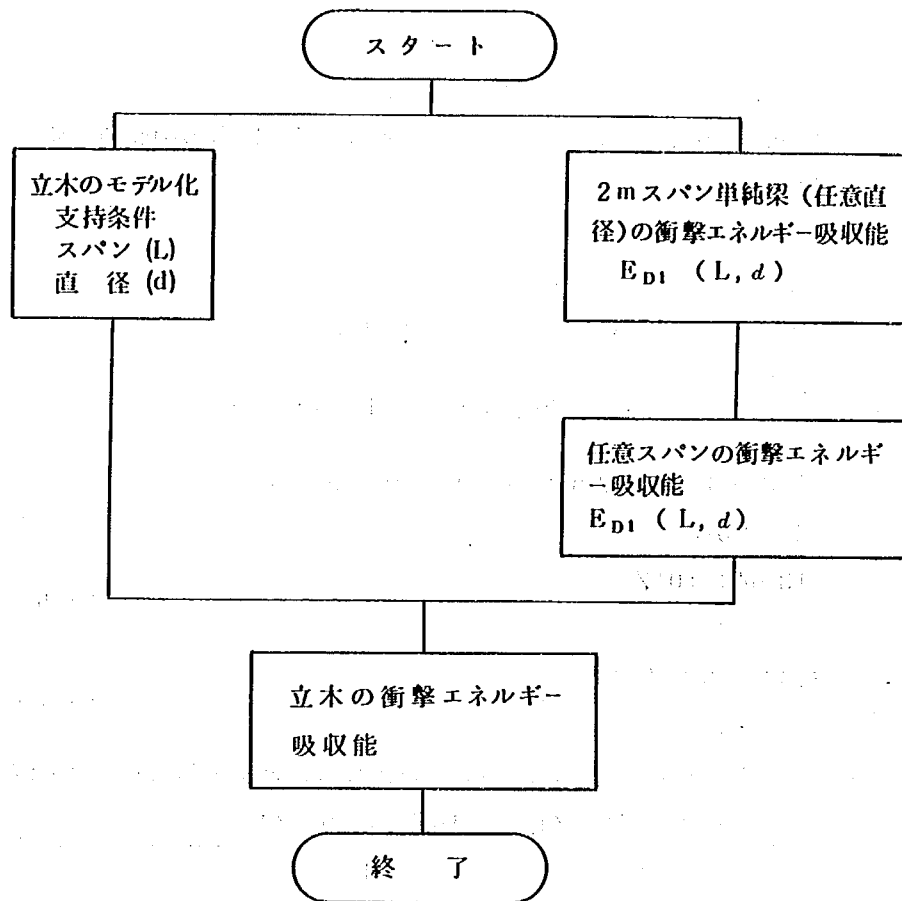


図 6.3 立木の衝撃エネルギー検討フロー

実験の結果から $E_{D1} = E_s$ と見なしてよいので、静的実験の $F - \delta$ Curve の結果から任意スパンに対する E_s を求める。まず、木材の応力～ひずみ関係を完全弾塑性と仮定すると、単純梁・中央載荷の荷重、変位は下記のように表わされる。

$$F_{max} = \frac{4 Z \sigma}{L} \dots\dots\dots (6.3)$$

$$\delta_e = \frac{(F_{max} \cdot L^3)}{48 EI} \dots\dots\dots (6.4)$$

梁の吸収エネルギー E_s は、図 6.4 に示すように $F - \delta$ の積分値で表わされるから下記の値となる。

$$\begin{aligned}
 E_s &= F_{max} \delta_p + \frac{1}{2} F_{max} \delta_e \\
 &= F_{max} (\delta_p + 0.5 \delta_e) \dots\dots (6.5)
 \end{aligned}$$

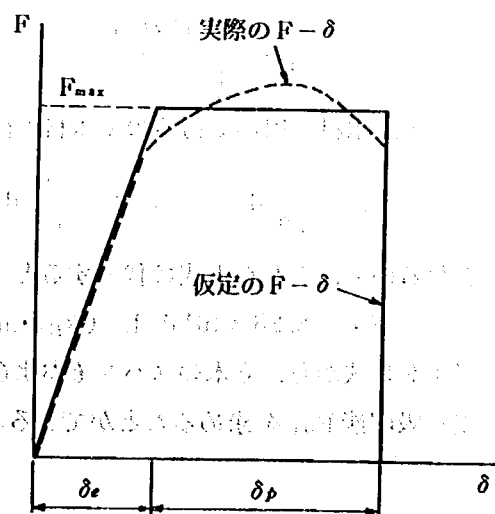


図 6.4 $F - \delta$ Curve

$F_{\max}$: 最大荷重 (kgf) 実験結果から比例限界荷重と最大荷重の中間値とする。

δ_e : 弾性ひずみ (m)

δ_p : 塑性ひずみ (m)

$$\sigma : \text{曲げ応力強度 (kgf/cm}^2\text{)} \quad \sigma = \frac{\sigma_u + \sigma_{ce}}{2}$$

$F_{\max}$ と同様, 実験結果の比例限度応力と最大応力の中間値とする。

L : 梁のスパン (m)

E : 木材の弾性係数 (kgf/cm²)

I : 断面 2 次モーメント (m⁴)

表 4.3 から σ , E を全ケースの平均値とすると下記のようになる。

$$\sigma = \frac{384 + 298}{2} = 341 \text{ kgf/cm}^2 = 3.41 \times 10^6 \text{ kgf/m}^2$$

$$E = 4.49 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2 = 4.49 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$$

(6.3), (6.4) 式から

$$F_{\max} = \frac{13.64 \times 10^6 Z}{L} \dots\dots\dots (6.6)$$

$$\delta_e = \frac{6.33 \times 10^{-4} Z \cdot L^2}{I} \dots\dots\dots (6.7)$$

次に δ_p は実験結果より $\delta_p = \alpha \delta_e$ の関係で表わされる。表 4.3 から $\alpha = 2.61$ となる。従って,

$$\delta_p = 2.61 \times \frac{6.33 \times 10^{-4} Z L^2}{I} = \frac{16.52 \times 10^{-4} Z L^2}{I} \dots\dots\dots (6.8)$$

(4.6), (4.7), (4.8) 式を (4.5) に代入して

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{13.64 \times 10^6 Z}{L} \left(\frac{16.52 \times 10^{-4} Z}{I} + 0.5 \times \frac{6.33 \times 10^{-4} Z}{I} \right) L^2 \\ &= \frac{2.69 \times 10^4 Z^2 \cdot L}{I} \end{aligned}$$

ここで, 木材は円形であるので木材の径を d (m) として,

$$Z = \frac{\pi}{32} d^3, \quad I = \frac{\pi}{64} d^4$$

となるので, これを上式に代入すると

$$E_s = 5.28 \times 10^3 d^2 L \text{ (kgf} \cdot \text{m)} \dots\dots\dots (6.9)$$

(6.9) 式から, 立木のスパン l および直径が決まれば静的エネルギー吸収能, 即ち衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} を求めることができる。

4.6 結論

本実験では、立木の土石流衝撃エネルギー吸収能を検討するために、立木の衝撃応答を単純梁と仮定して、スパン 2 m の生杉丸太に 150 kg (一部 200 kg) の重錘を落下させて、その衝撃エネルギー吸収能を求めた。その結果は衝撃エネルギー吸収能は静的エネルギー吸収能に等しく、スパン 2 m の杉材では (6.10) 式で表わされることがわかった。

$$E_{D1} = 0.03426 d - 0.2902 \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

E_{D1} : スパン 2 m の単純梁の衝撃エネルギー吸収能 (tonf・m)

d : 杉材の直径 (cm)

次に、任意スパン、任意の直径をもつ杉材の衝撃エネルギー吸収能が (6.11) 式で表わされることを実験データを使い理論に従い導いた。

$$E_D = 5.28 \times 10^3 d^2 L \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

E_D : 単純梁の衝撃エネルギー吸収能 (kgf・m)

d : 杉材の直径 (m)

L : スパン長 (m)

(6.11) 式は、材種が変わった場合は、それらの弾性係数、最大荷重がデータとして得られれば、定数の項を変えれば応用できる。

5. 今 後 の 課 題

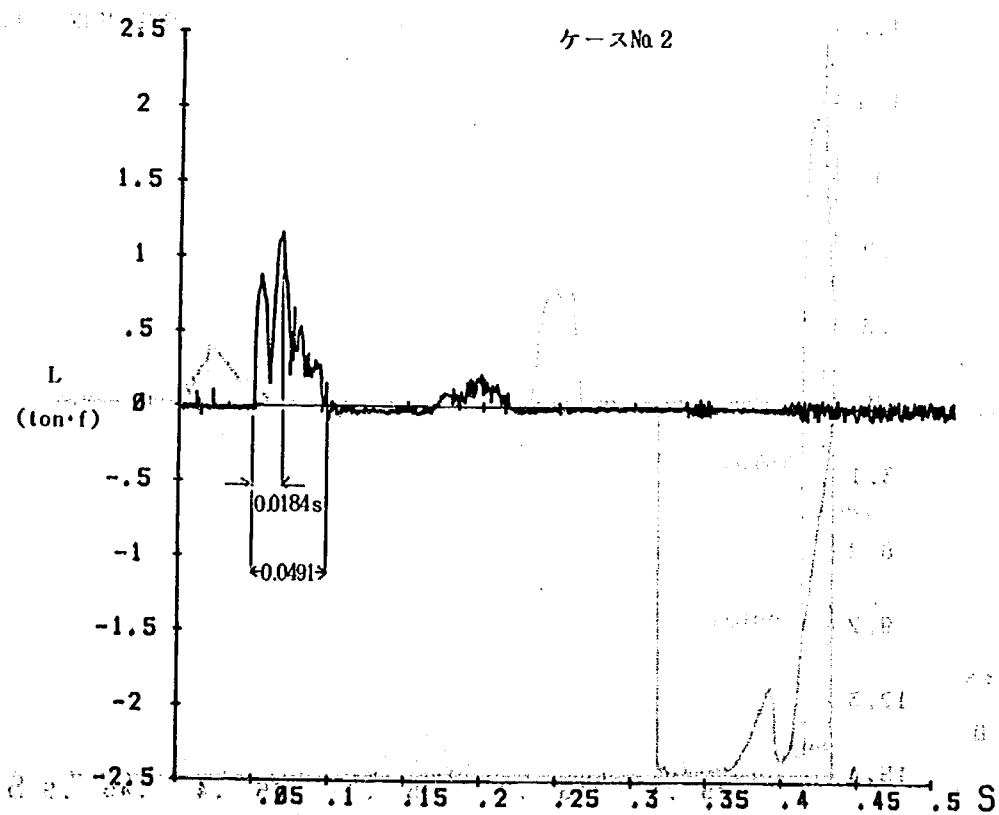
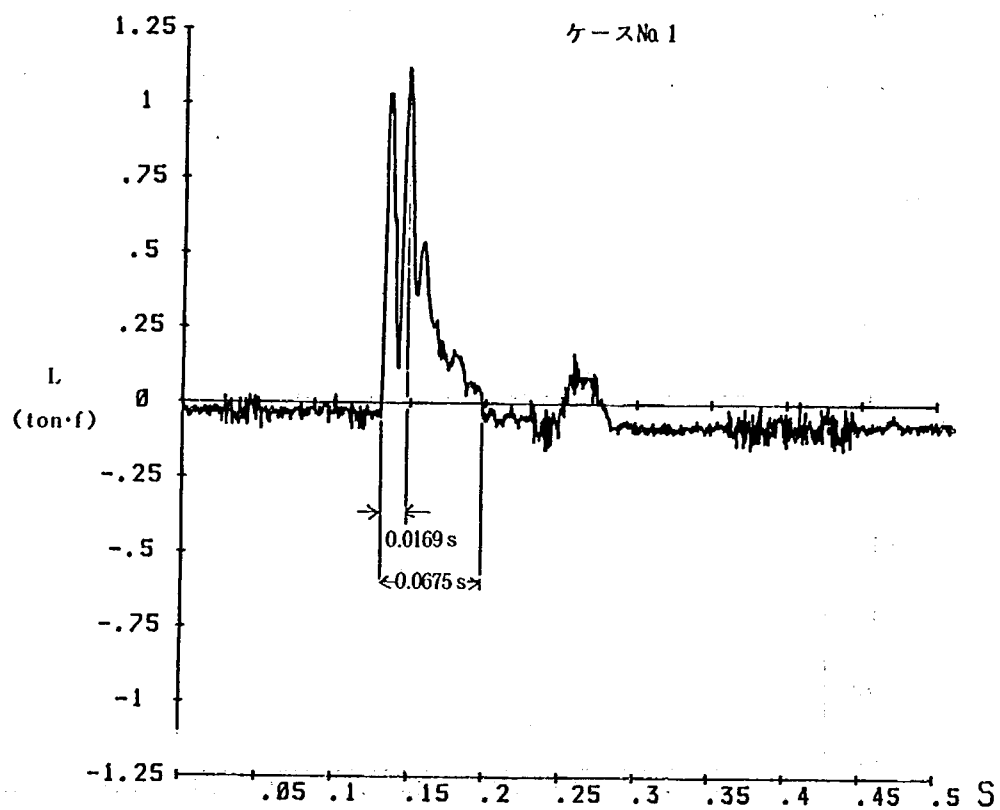
結論に致るまでの解析で問題となった事項および仮定事項で、立木の衝撃エネルギー吸収能を推定するうえで確認および検討されなければならない事項を以下に示す。

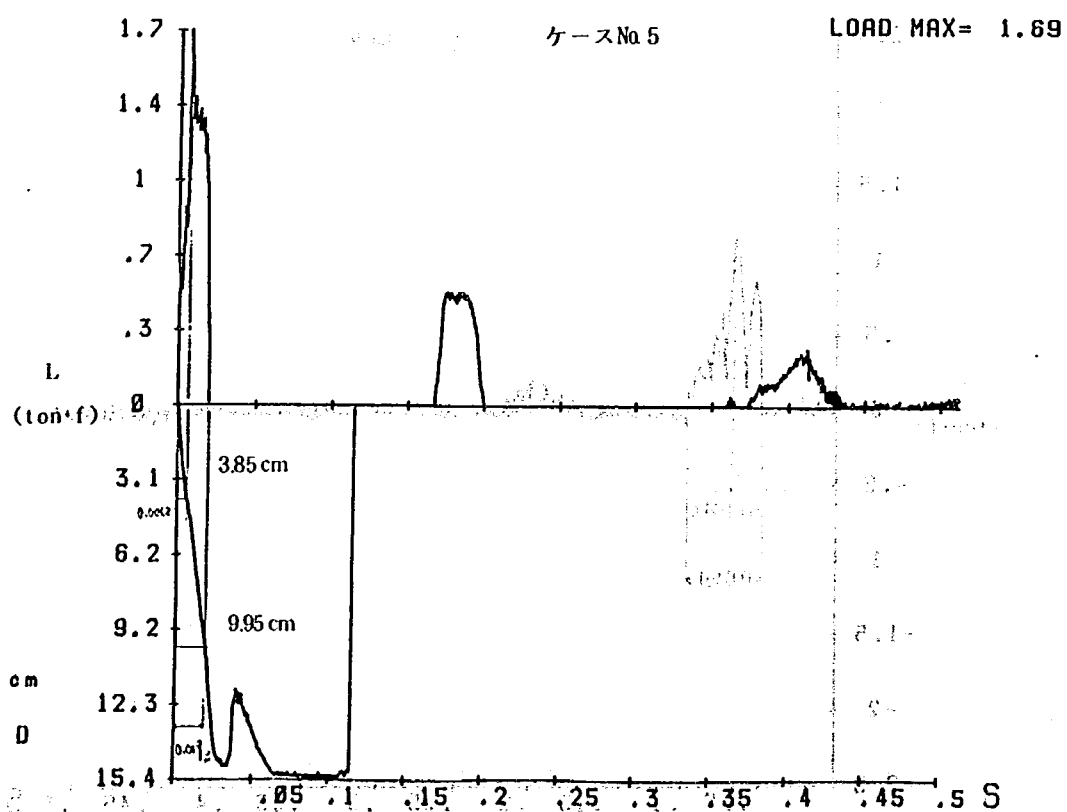
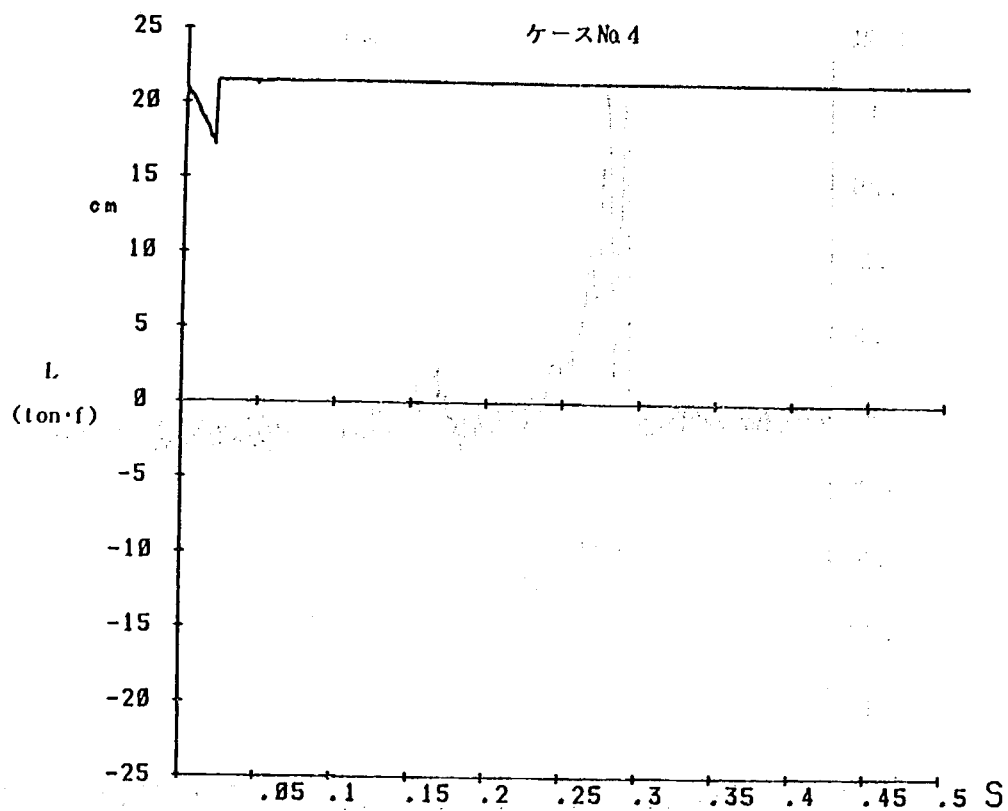
- (1) 衝撃実験における荷重波形の立上り時の乱れの原因および、それにともない荷重－変位曲線が静的実験と異なる原因を究明し、正しい荷重－変位曲線を設定する必要がある。
- (2) 衝撃エネルギー吸収能に対する载荷速度（又は変位速度）効果に関して、本実験では明確にできなかったので、広い範囲の速度による衝撃実験を行い検討を加える必要がある。
- (3) 提案された(6.11)式は木材の直径 d が $10\text{ cm} < d < 15\text{ cm}$ の狭い範囲の実験であり、もっと広い範囲の直径に関して実験を行い(6.11)式を修正する必要がある。これは、理論的には(6.11)式に示すようにエネルギー吸収能は直径の2乗に比例するためである。
- (4) 木材の衝撃応答はバラツキが大きいのので、実験箇数をさらに追加して、より精度の高い推定式に改良することが望まれる。
- (5) 本実験では立木に土石流の石礫が衝突する場合の立木の応答特性を単純梁に仮定している。今後、この仮説の証明および、そのスパンの決め方と野外実験等によって行う必要がある。

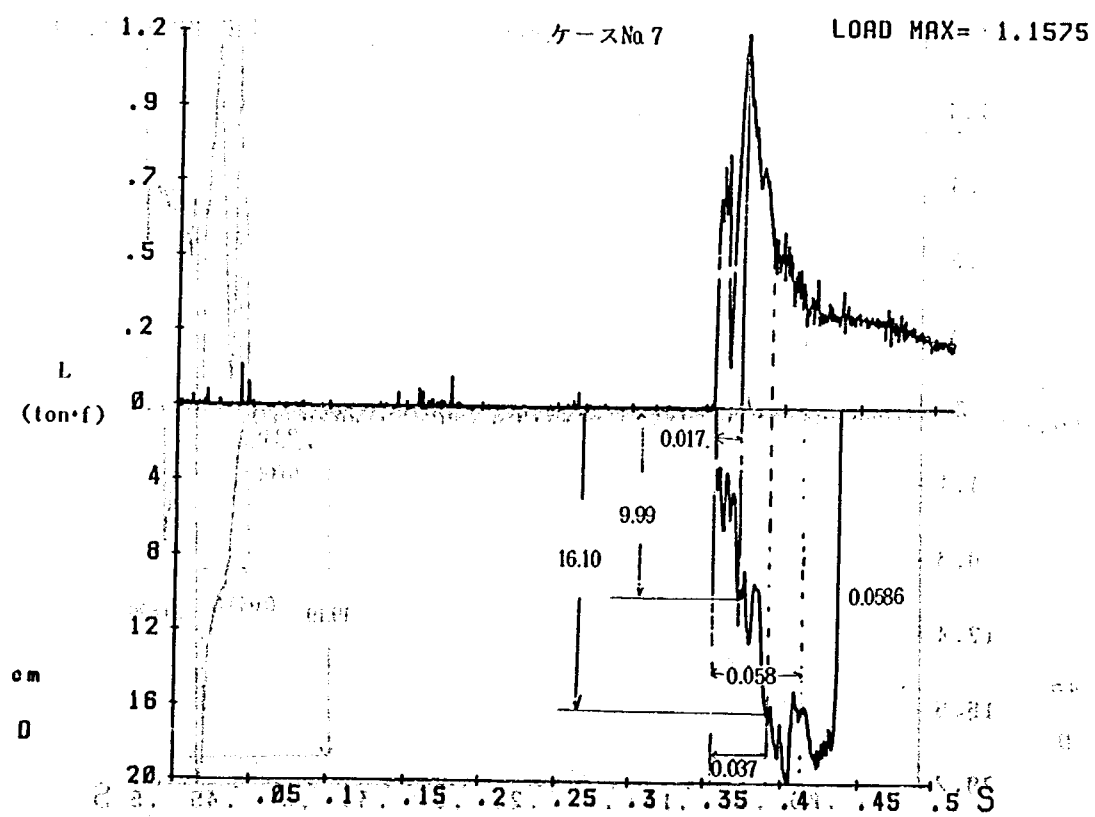
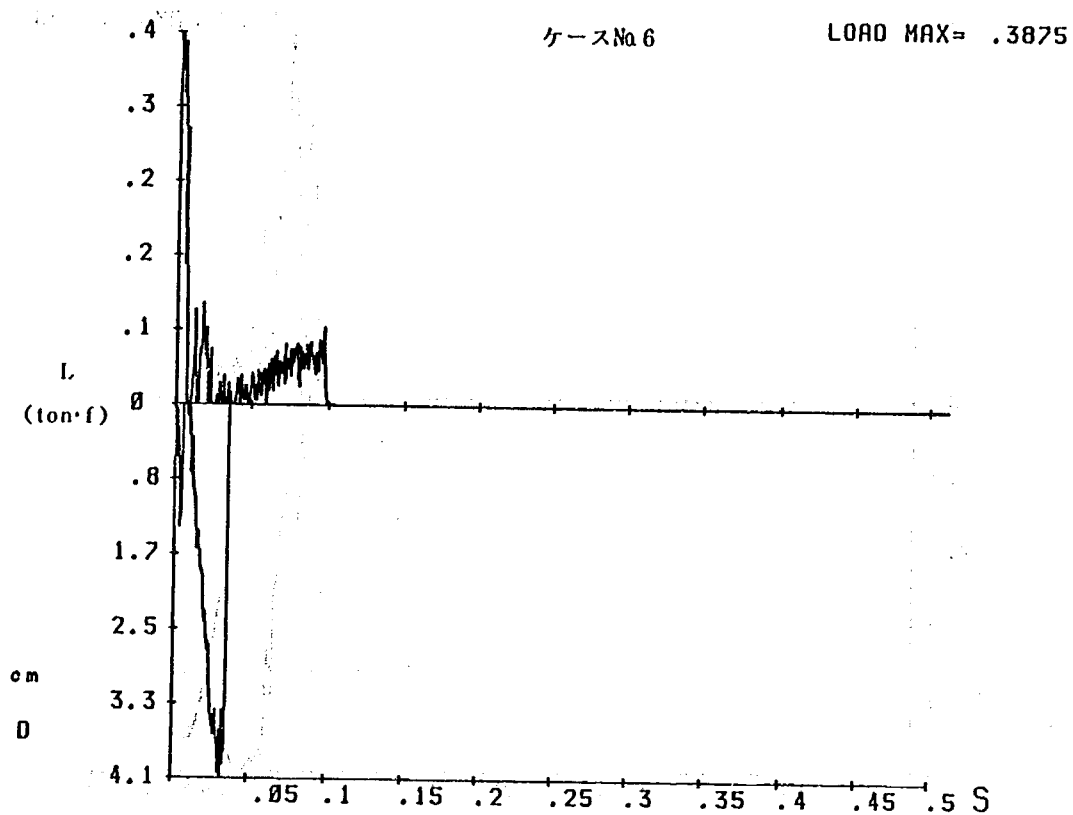
資料－Ⅰ

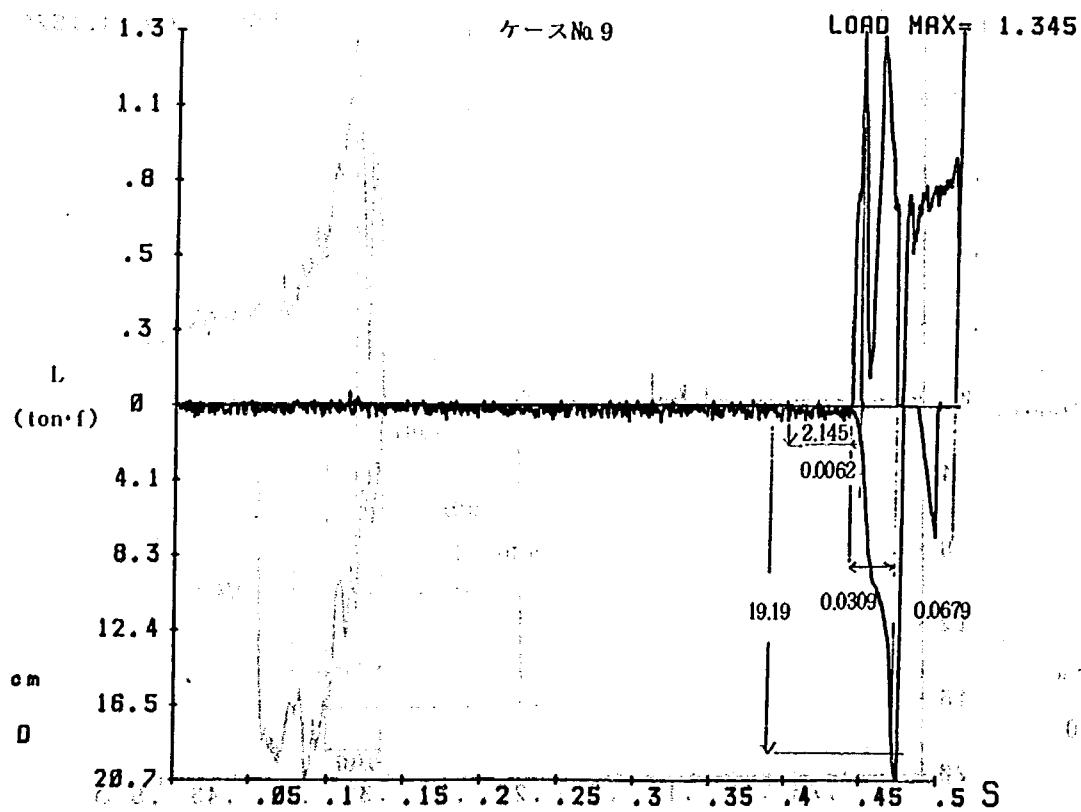
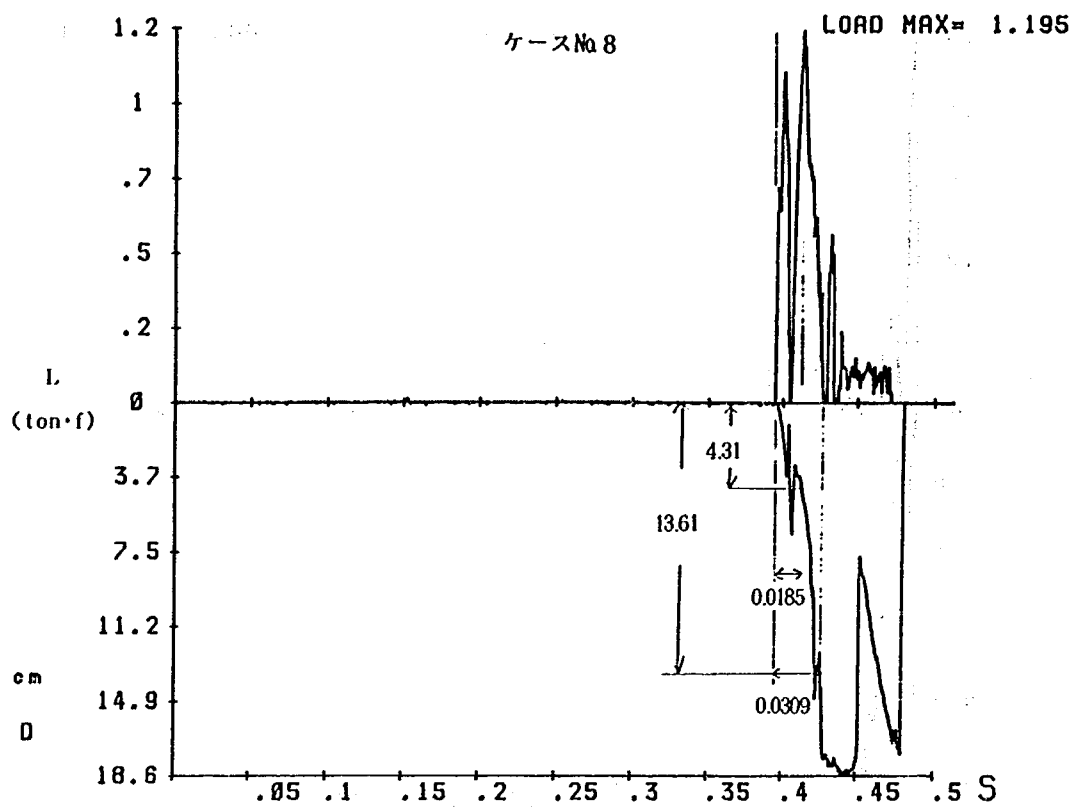
衝撃実験のT-F, T- δ 曲線

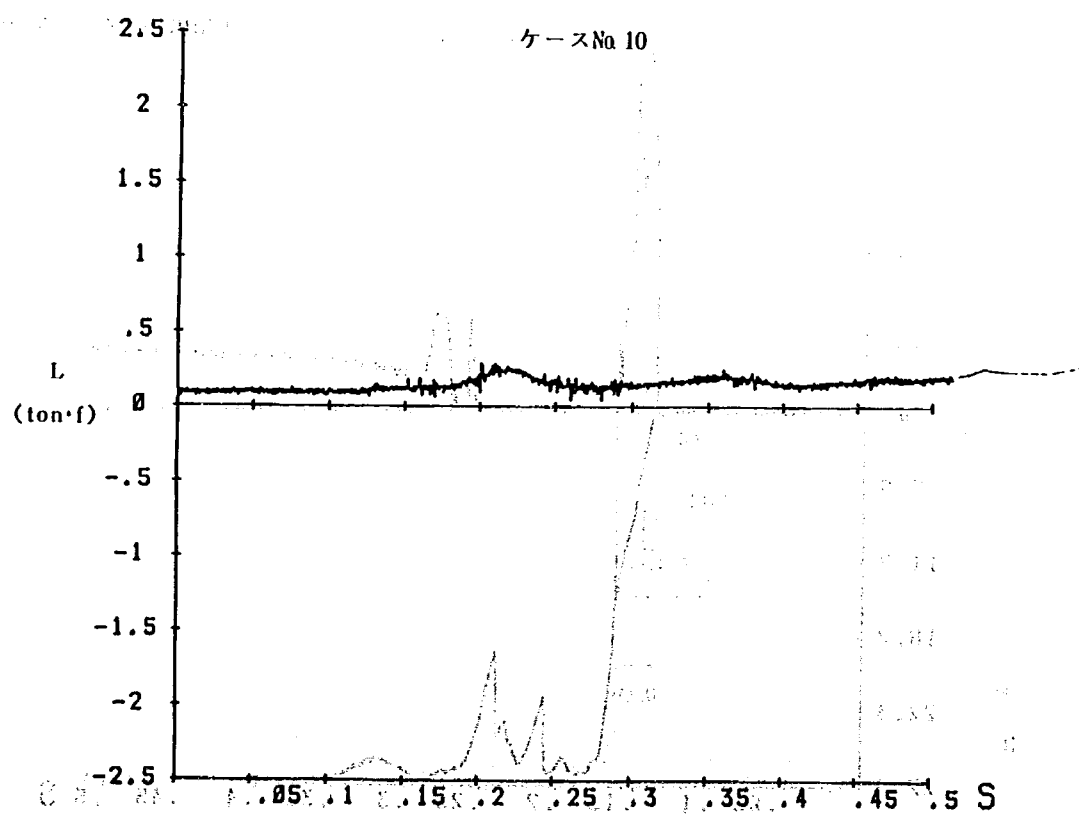
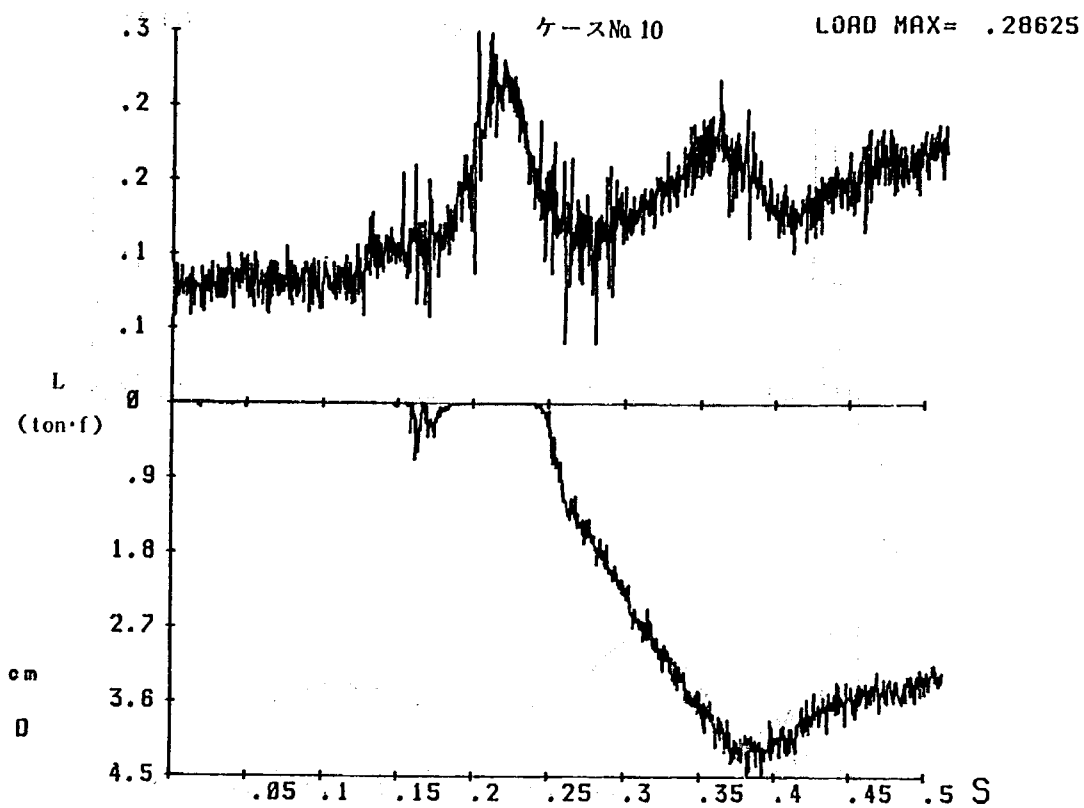
WILLIAM T. H. DAVENPORT

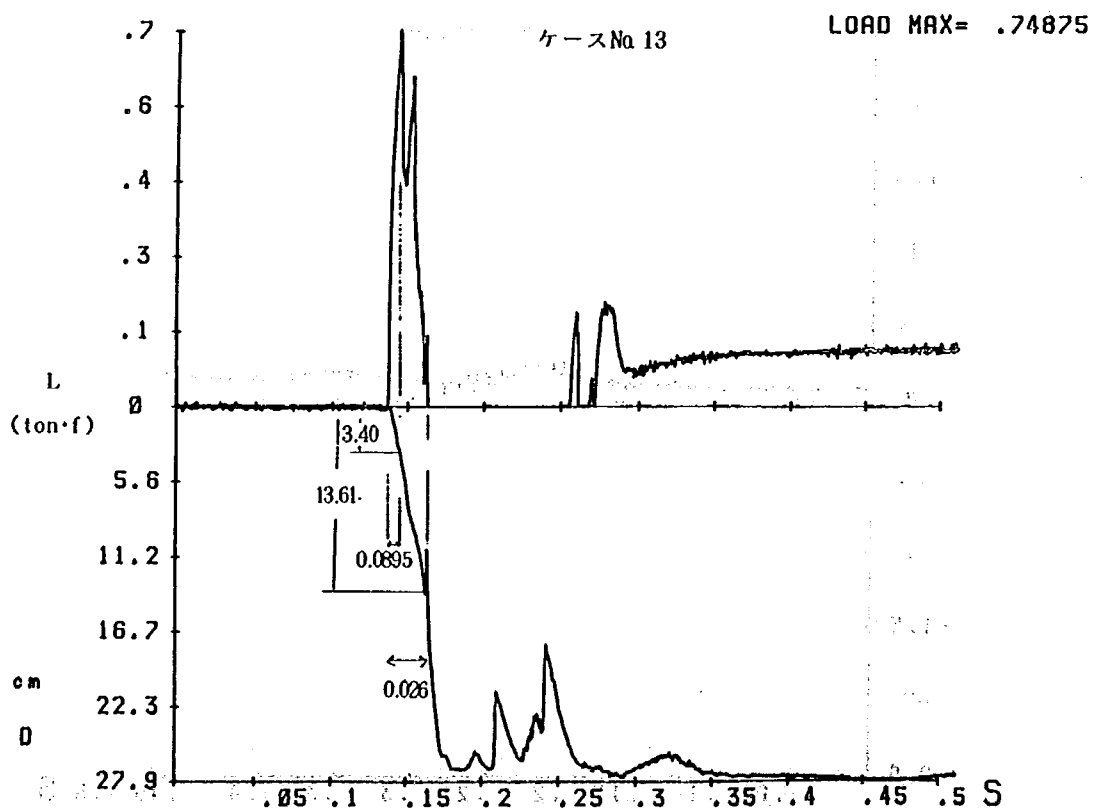
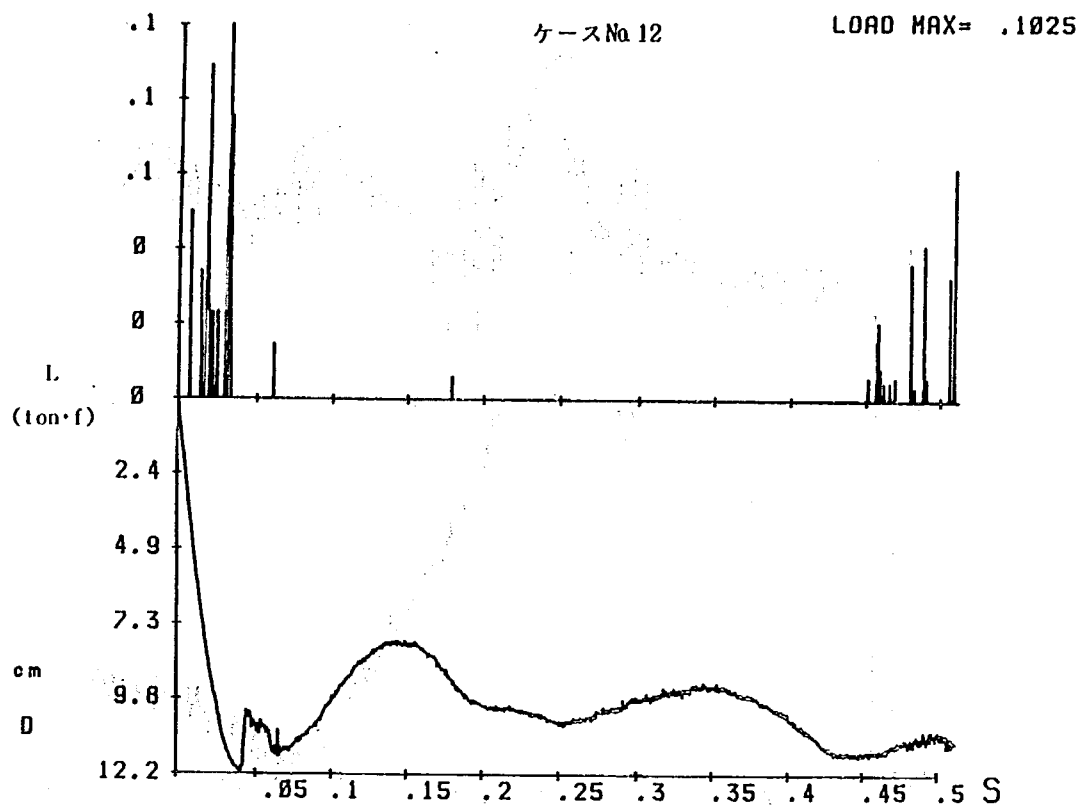


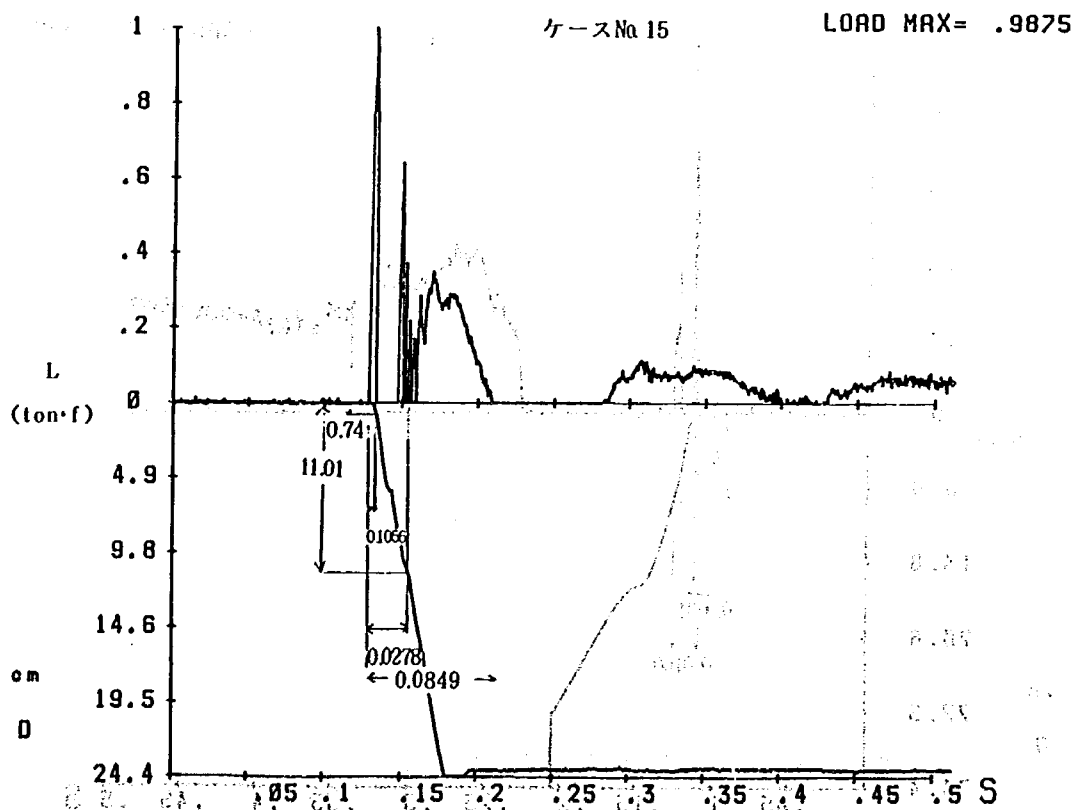
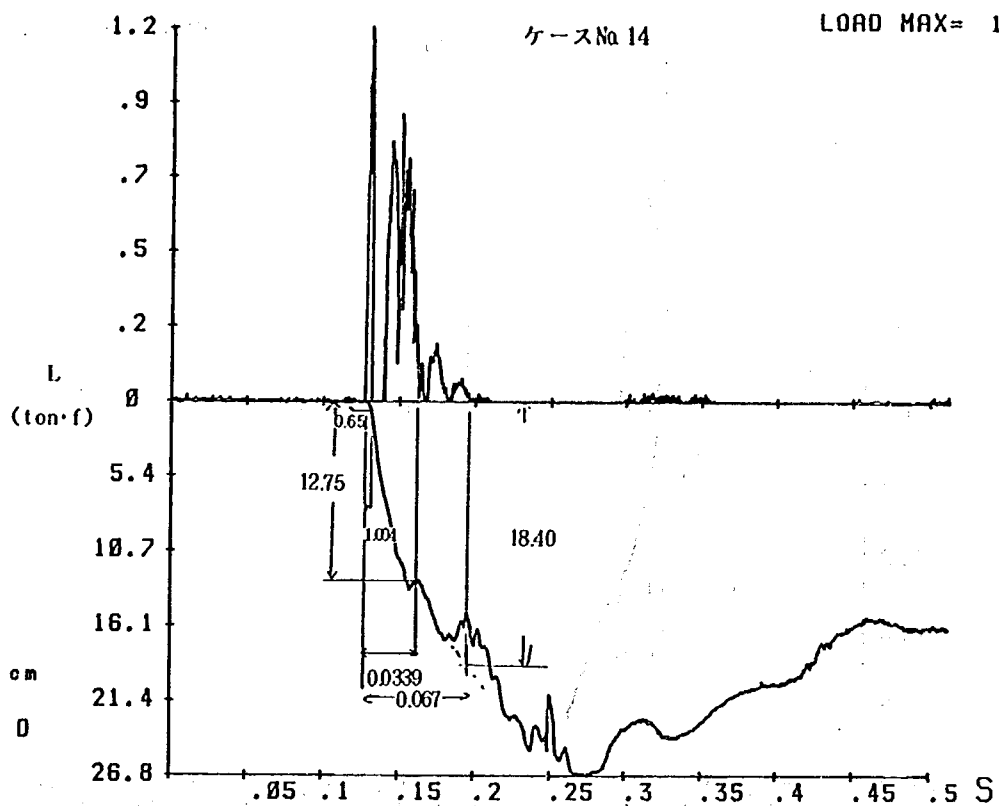


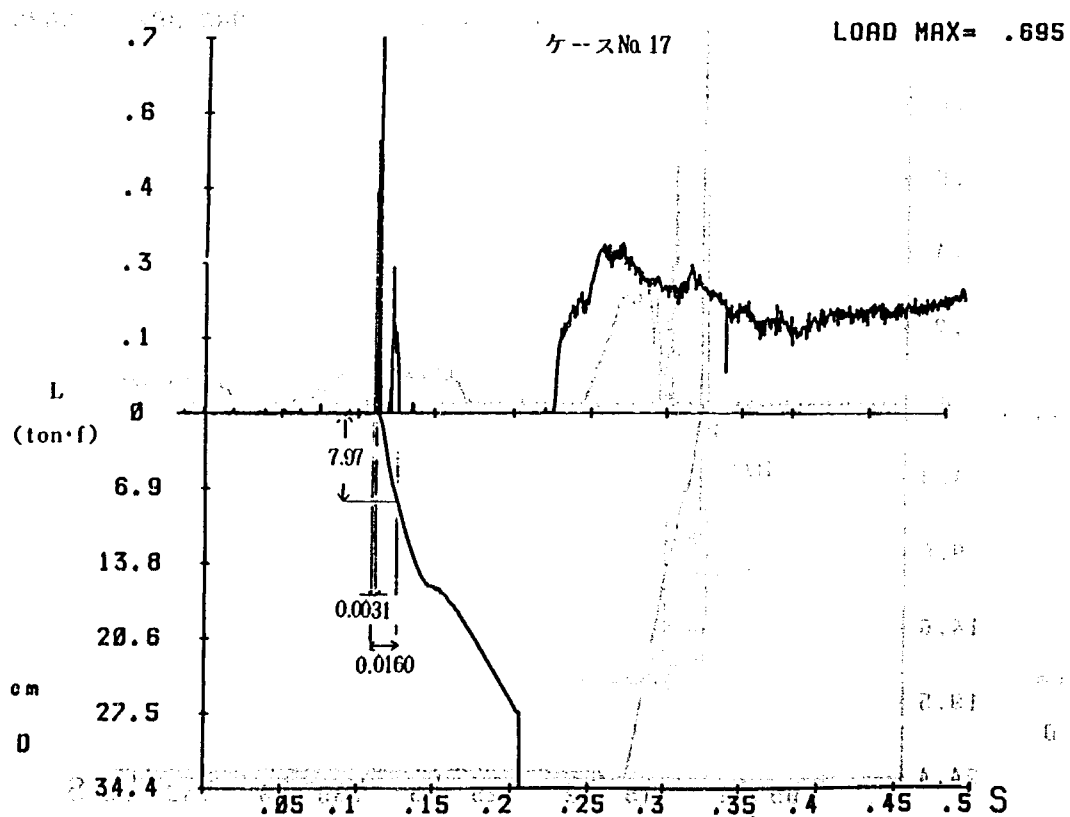
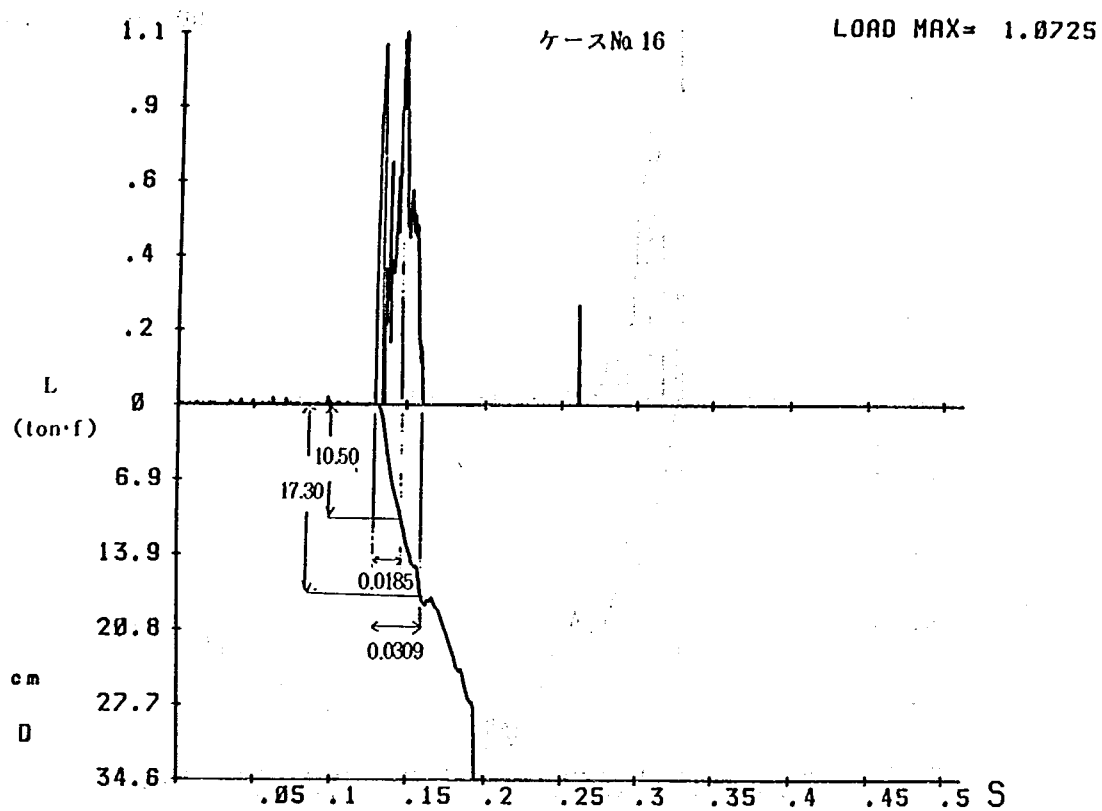


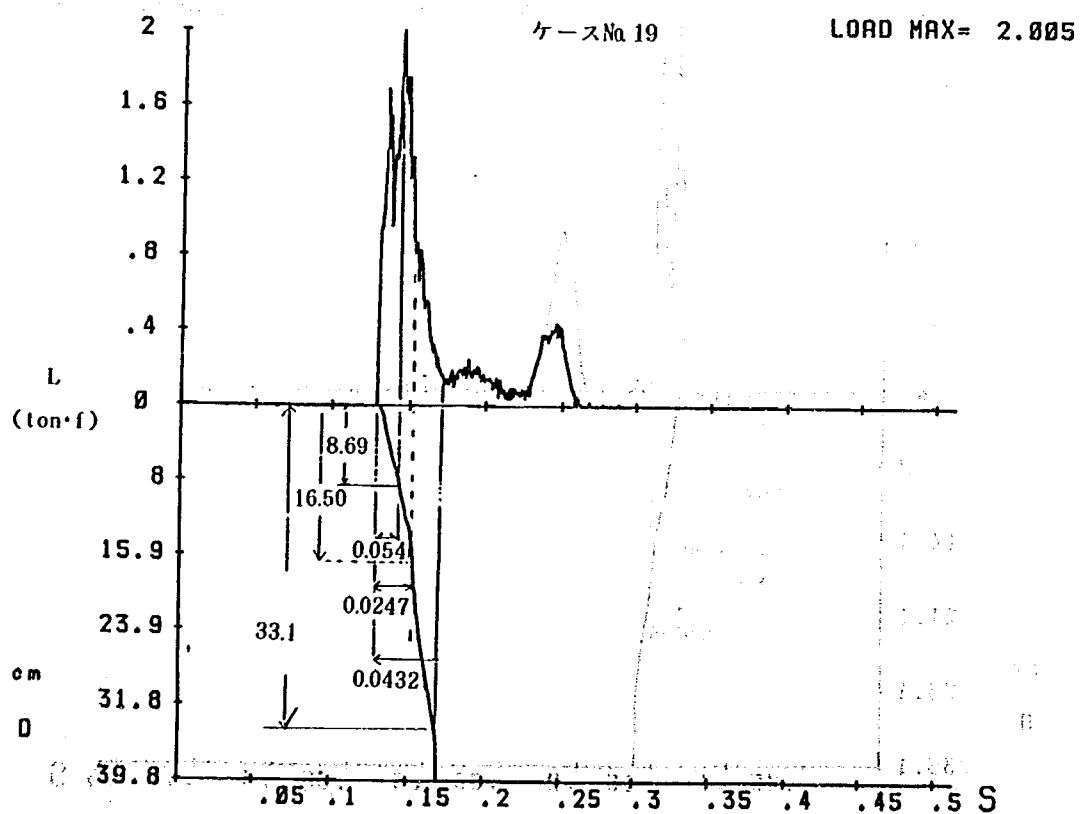
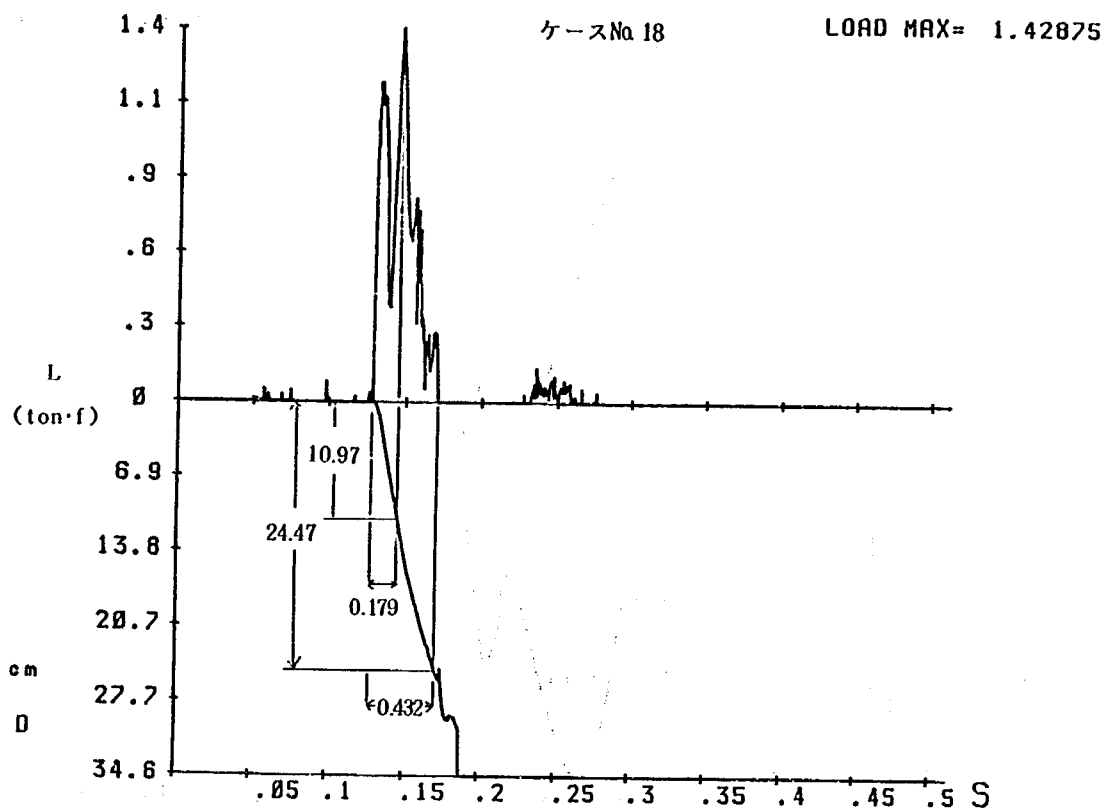


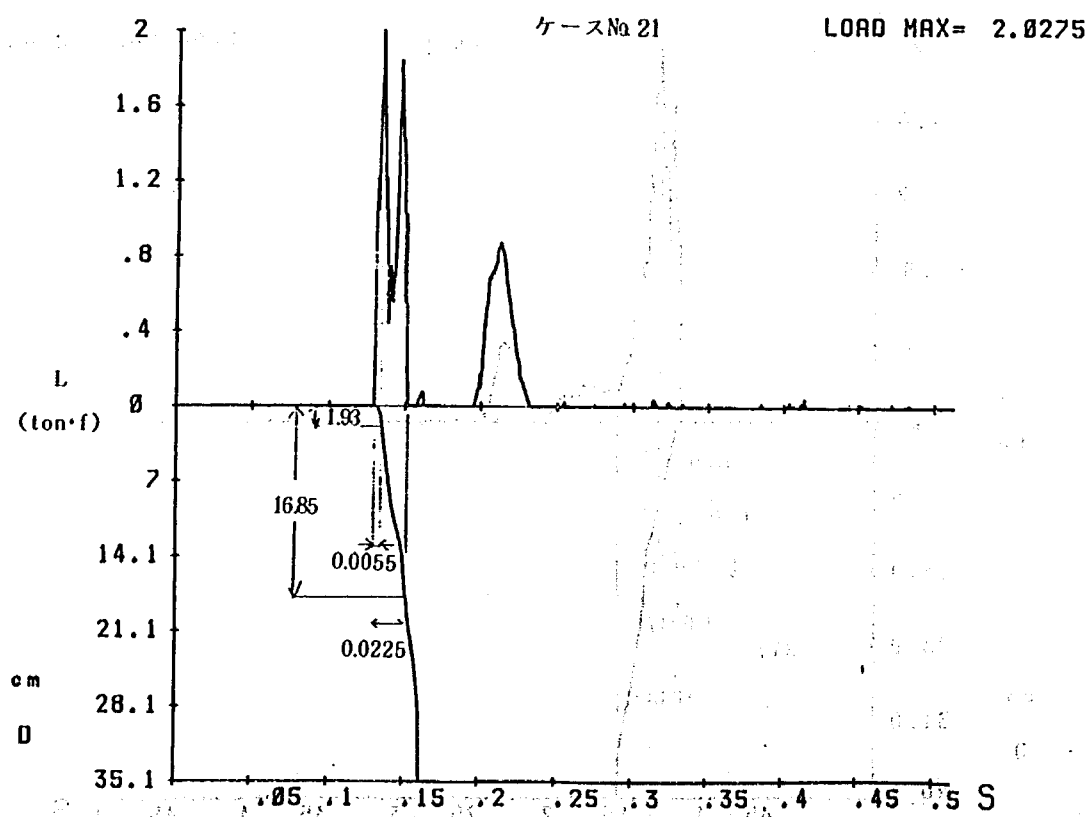
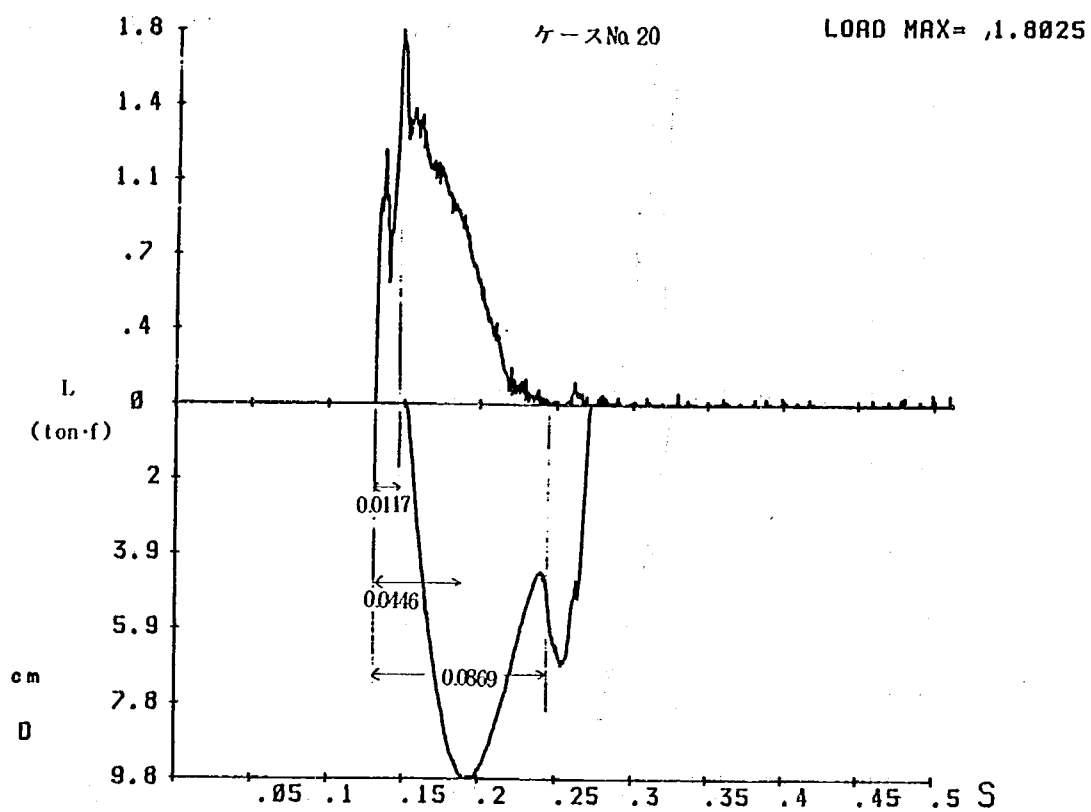


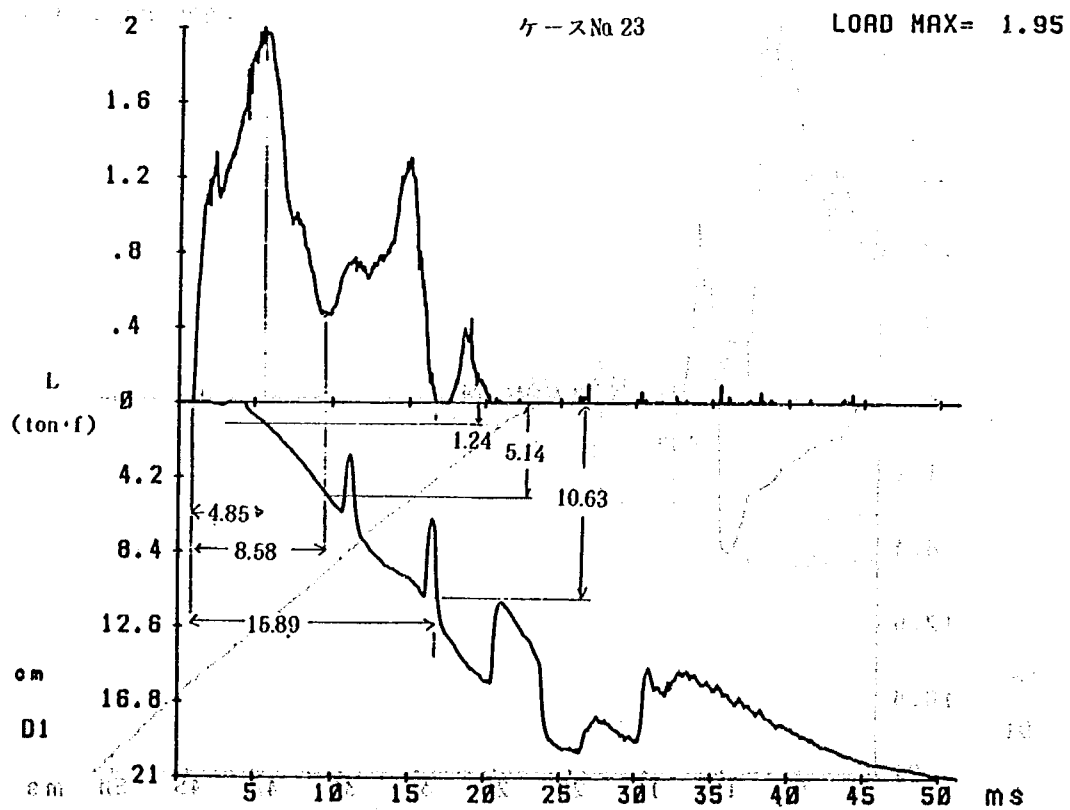
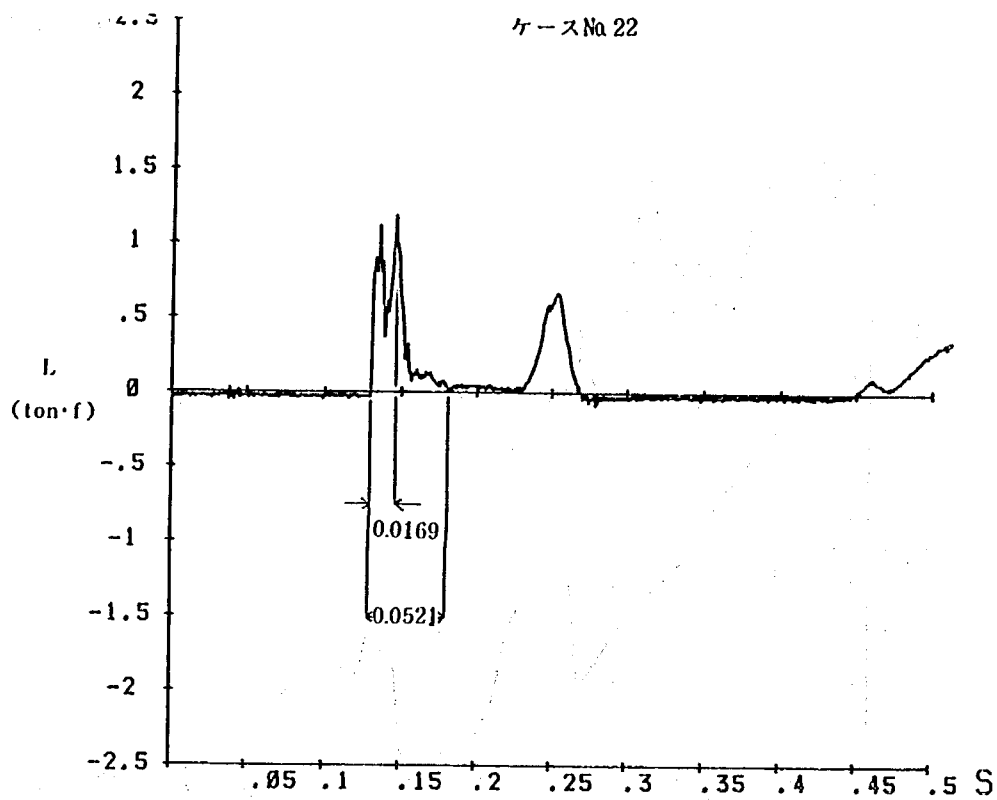


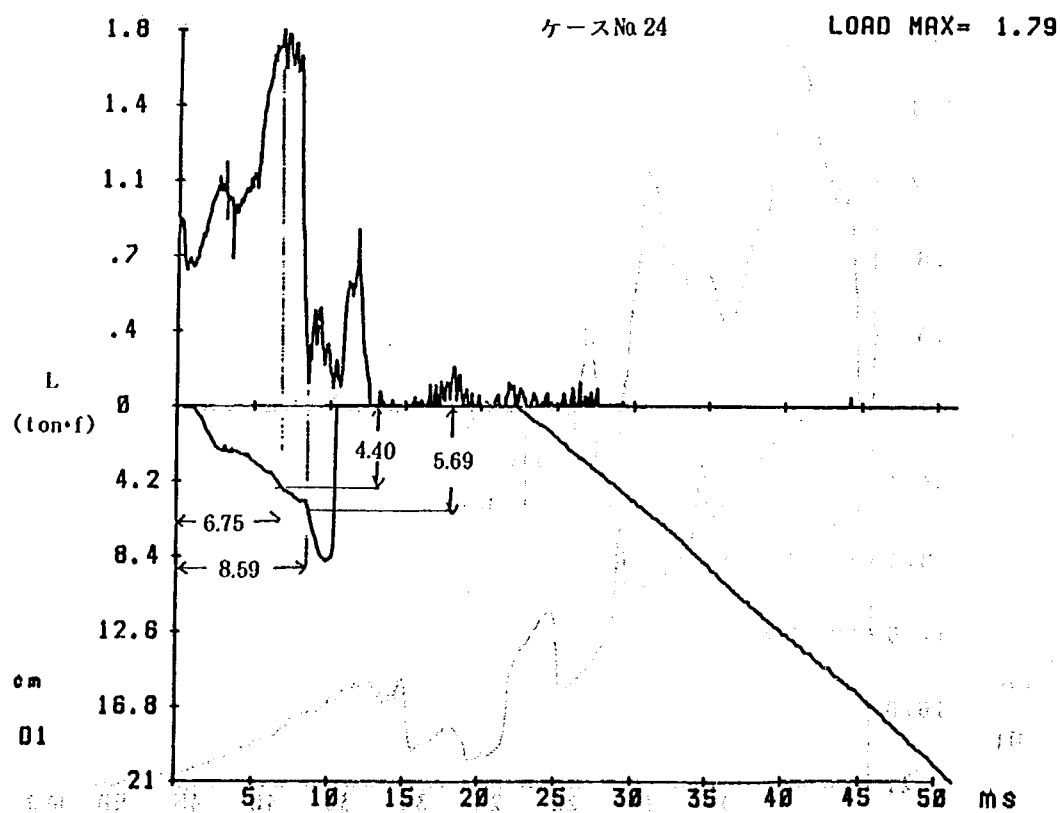
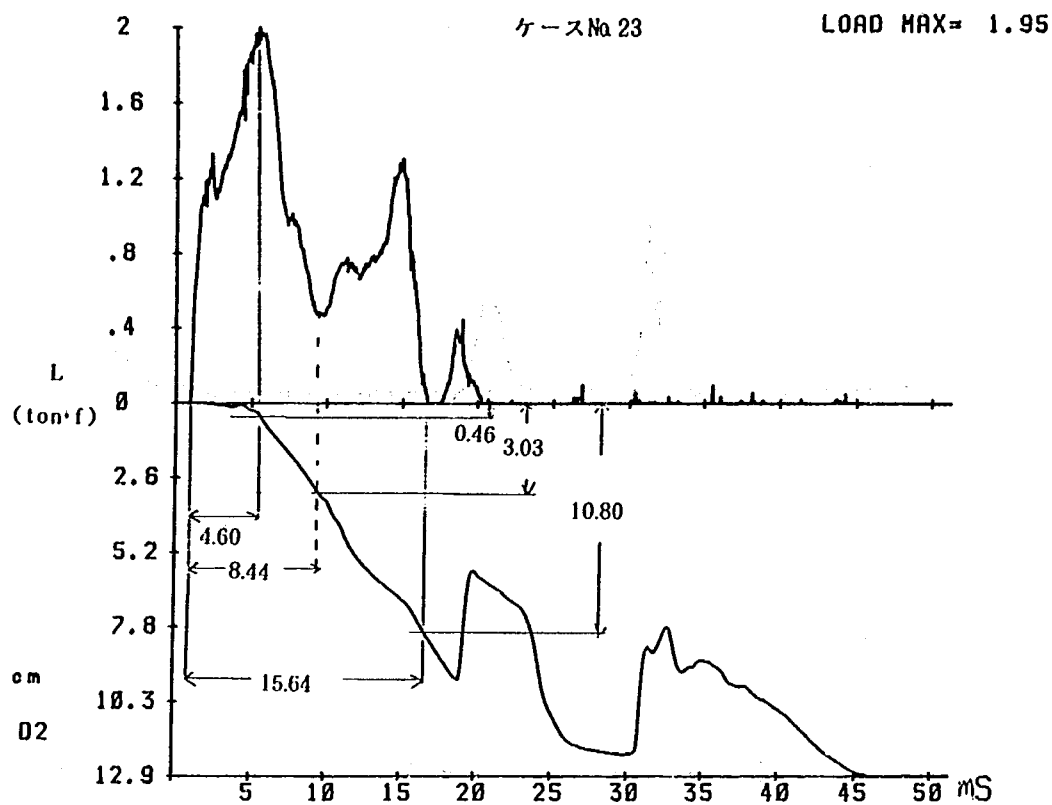


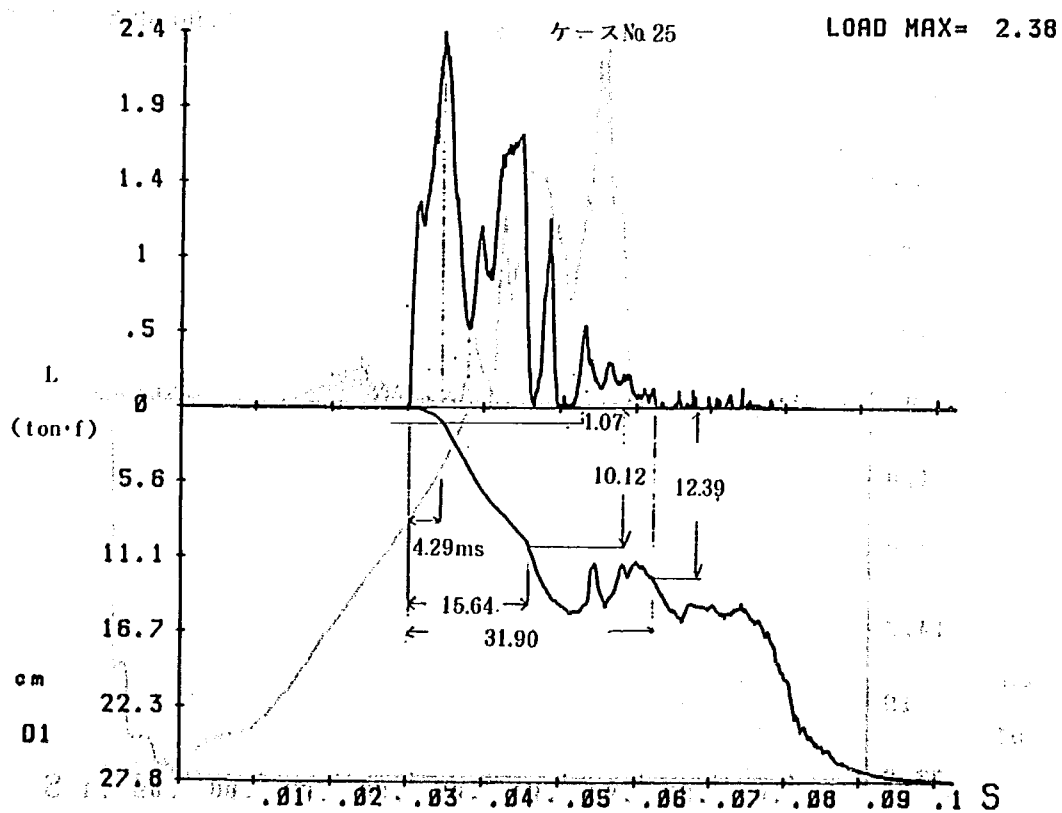
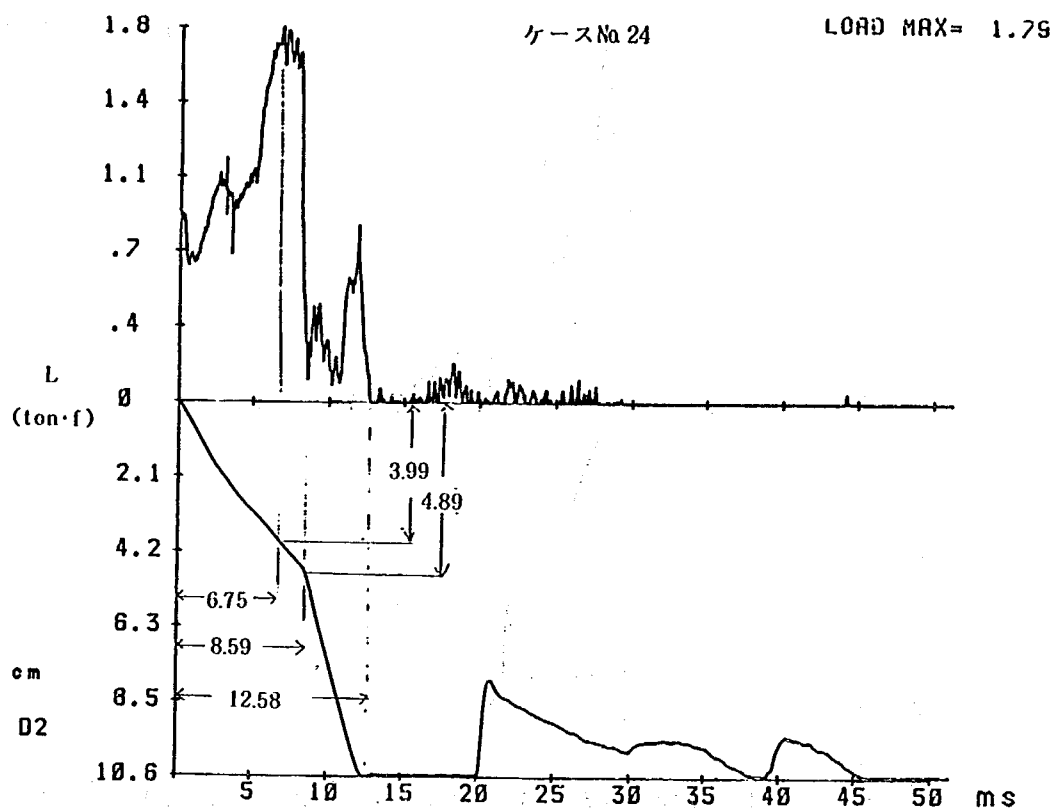


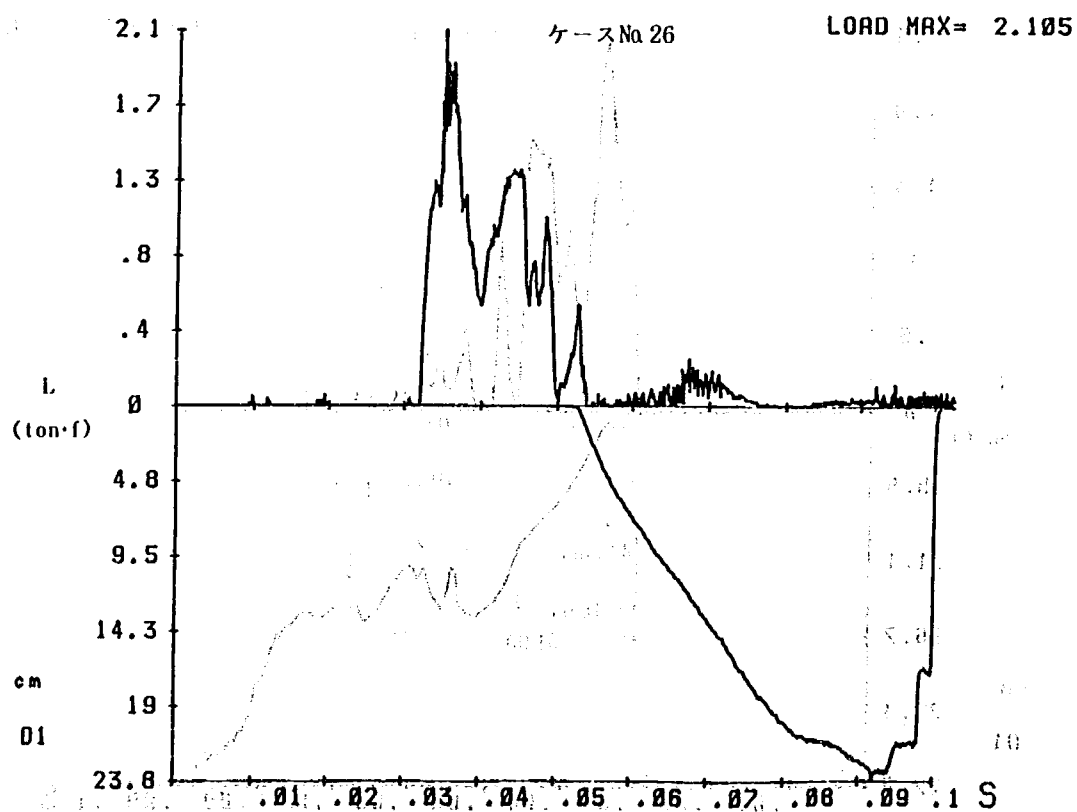
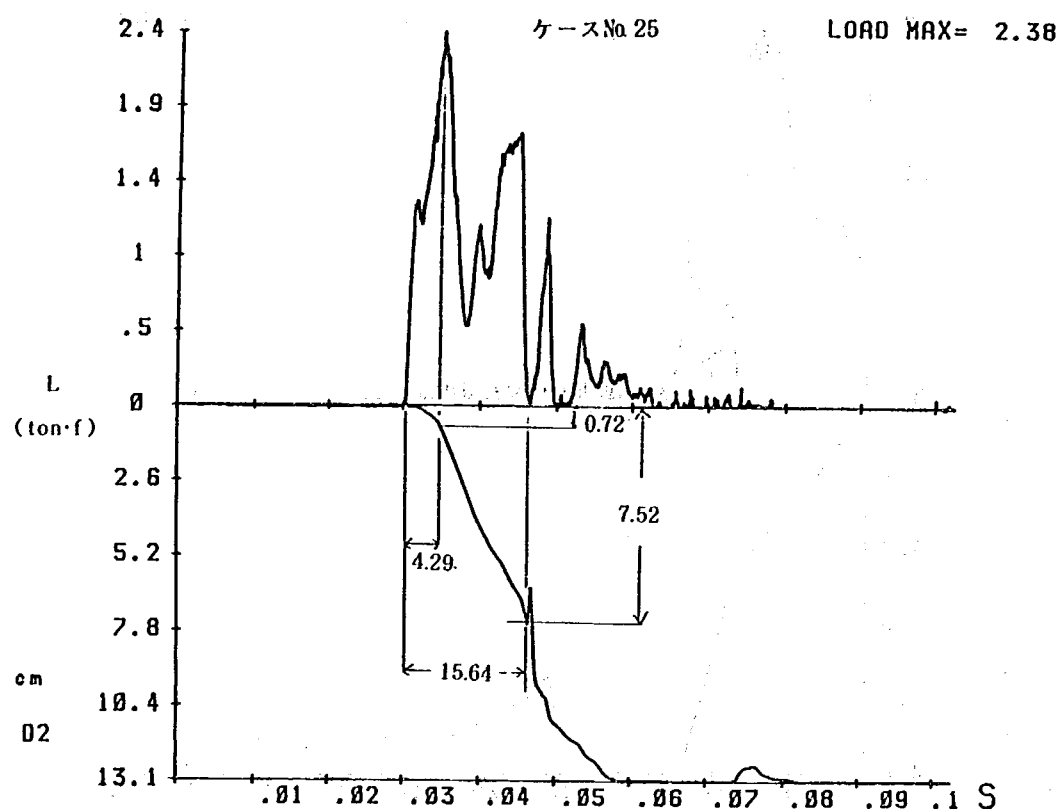


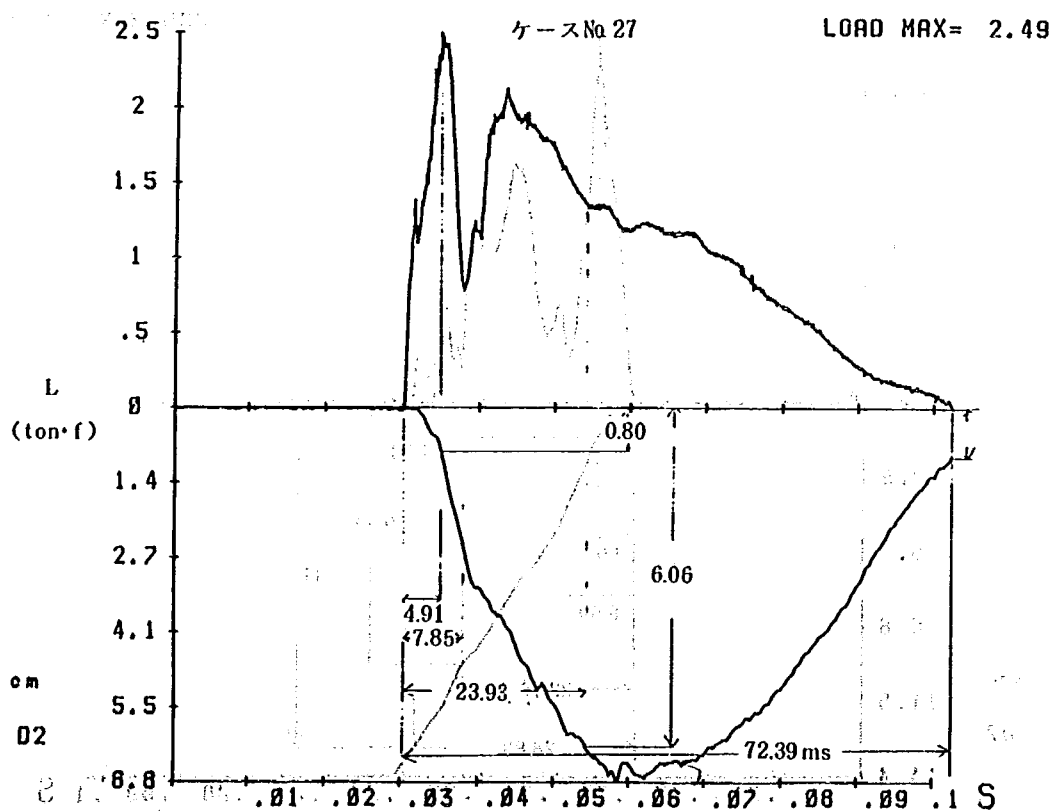
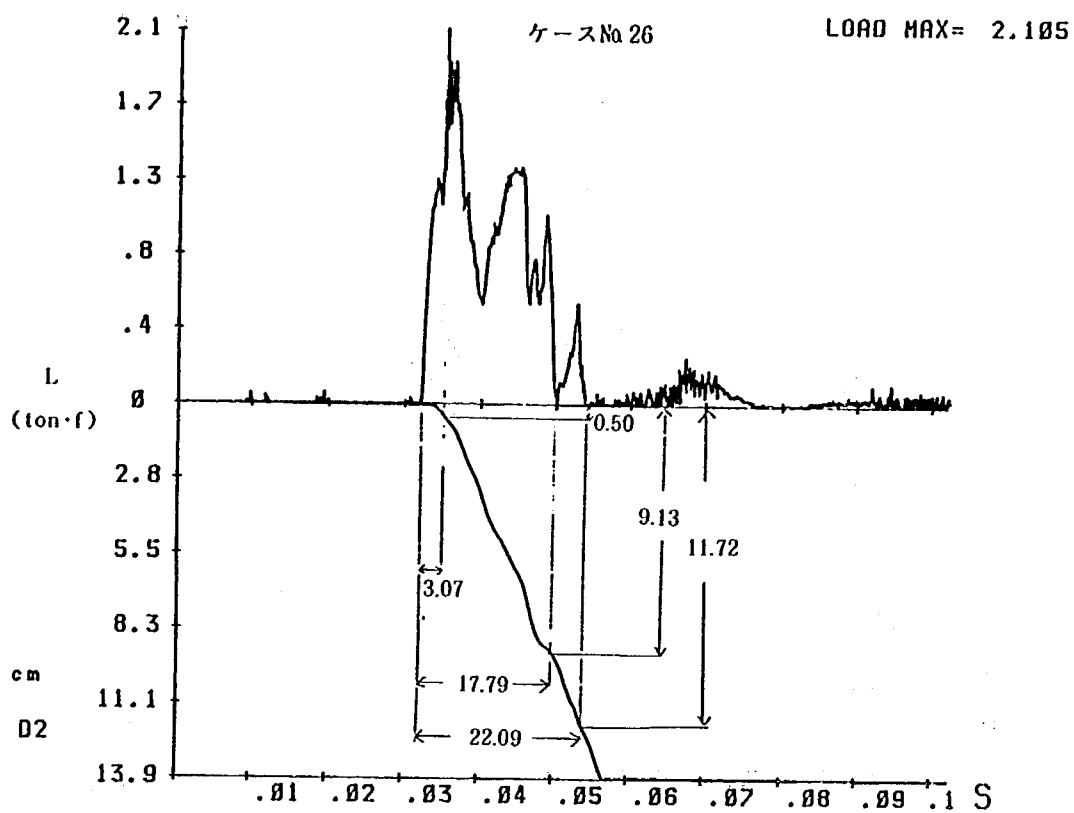


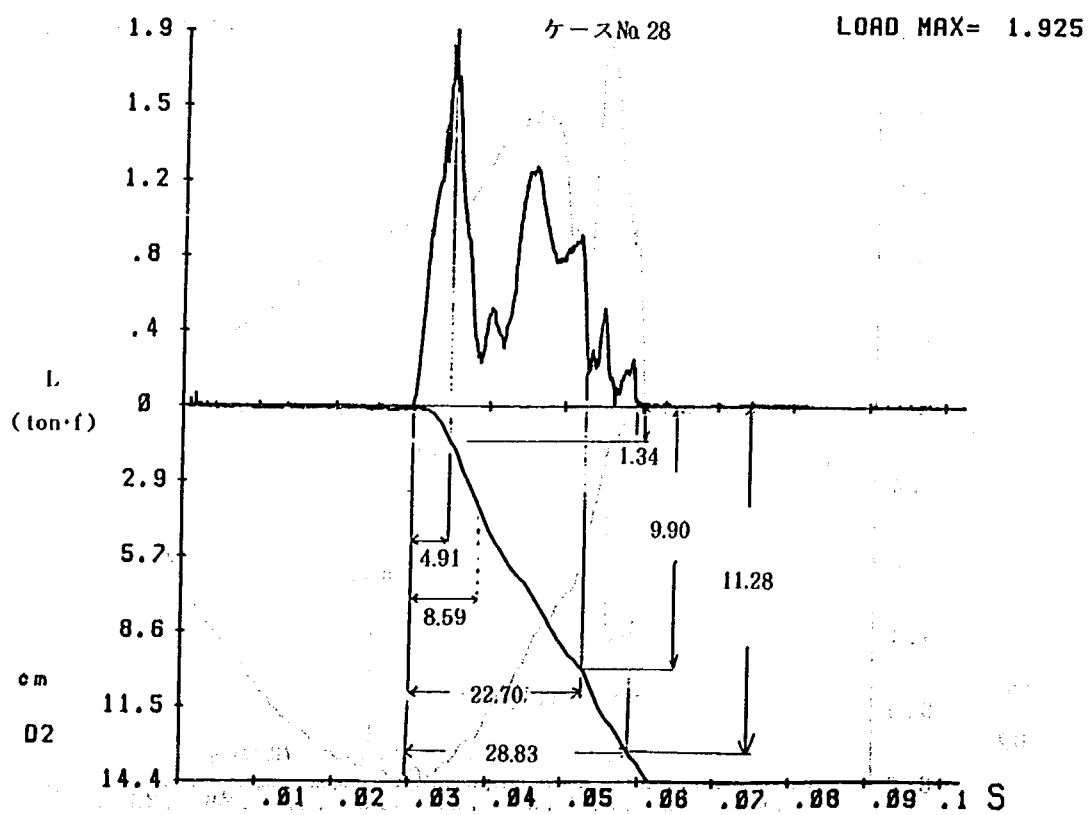
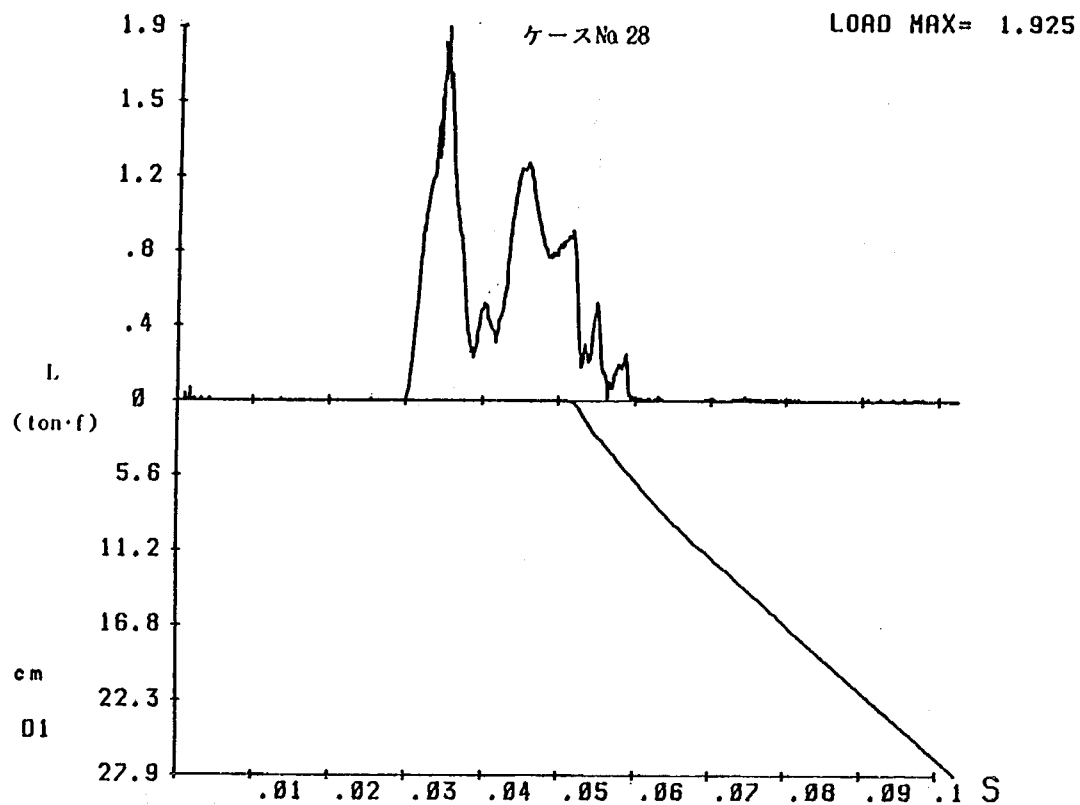


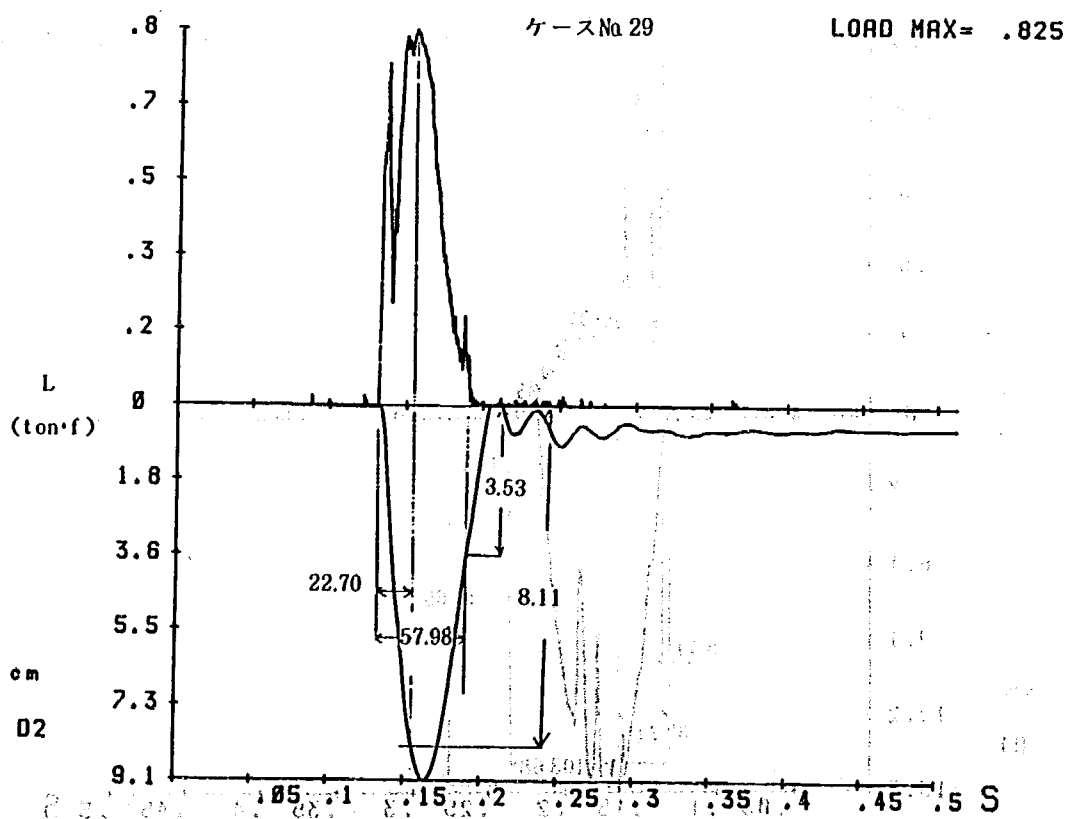
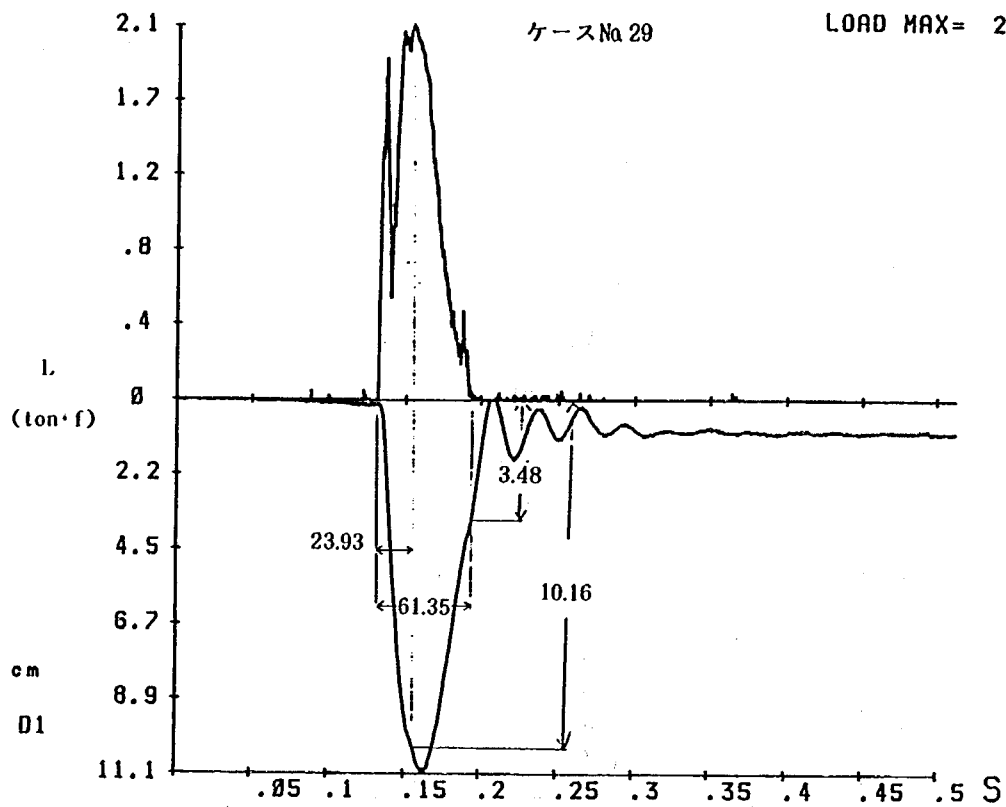


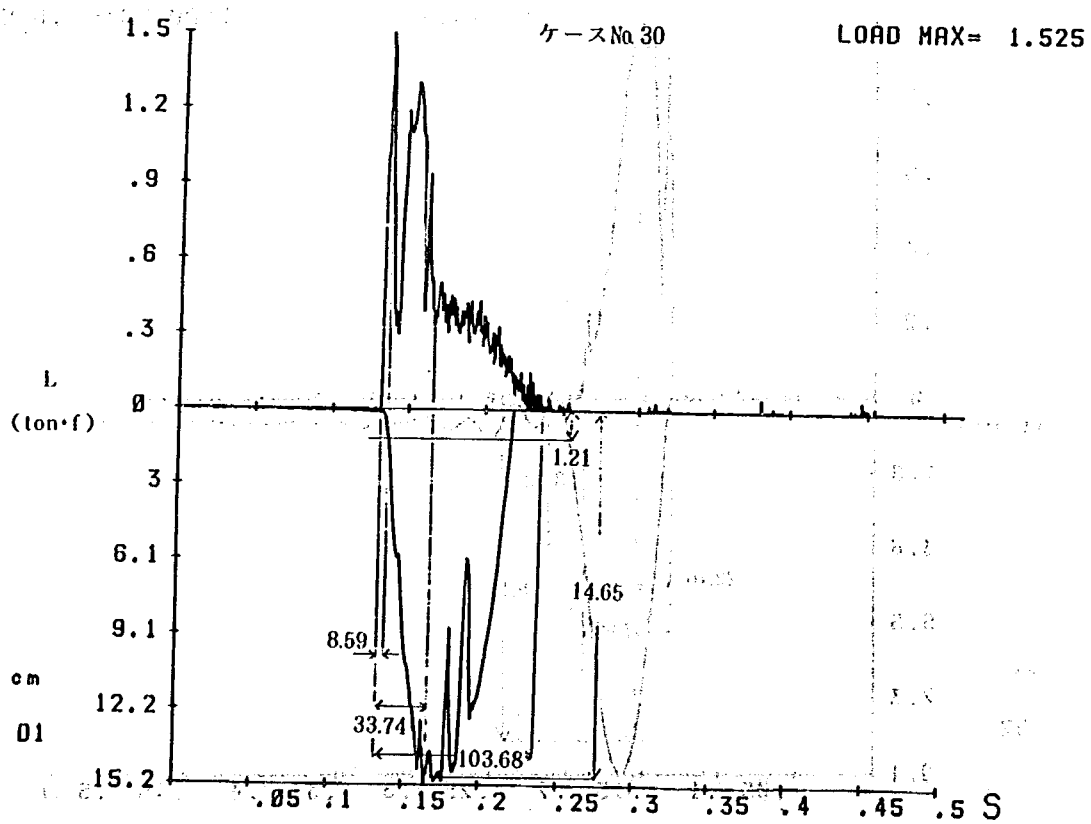
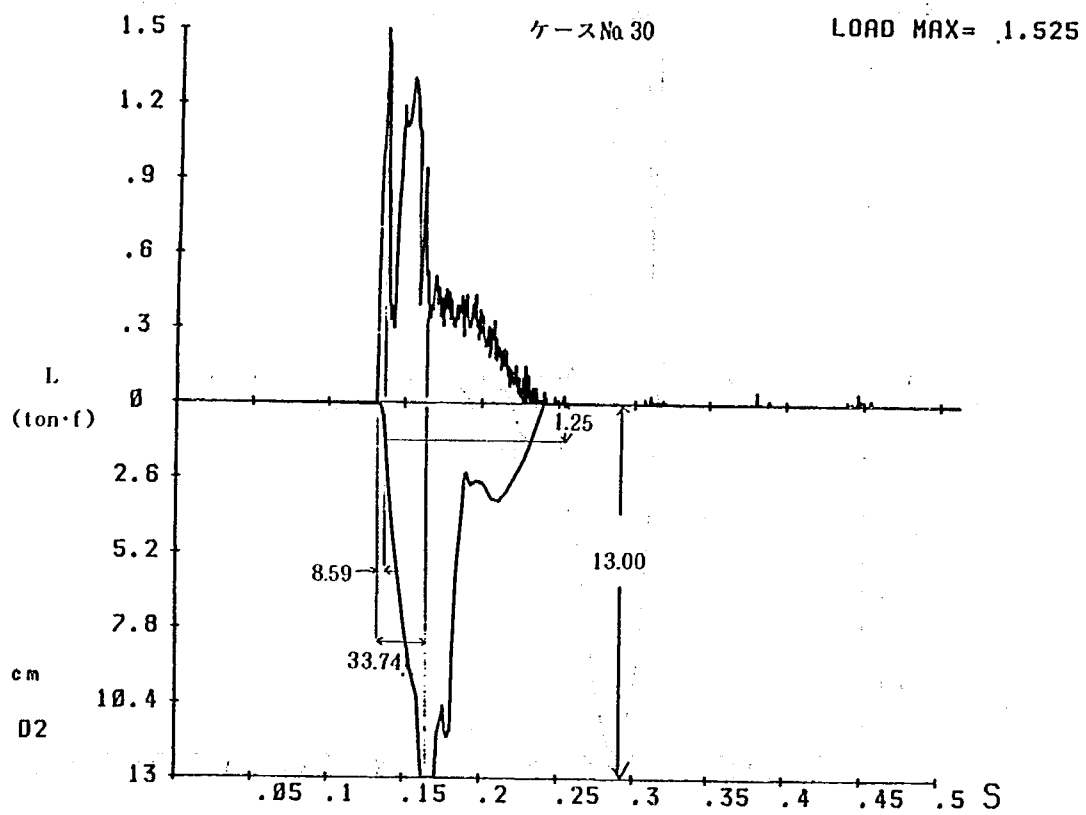


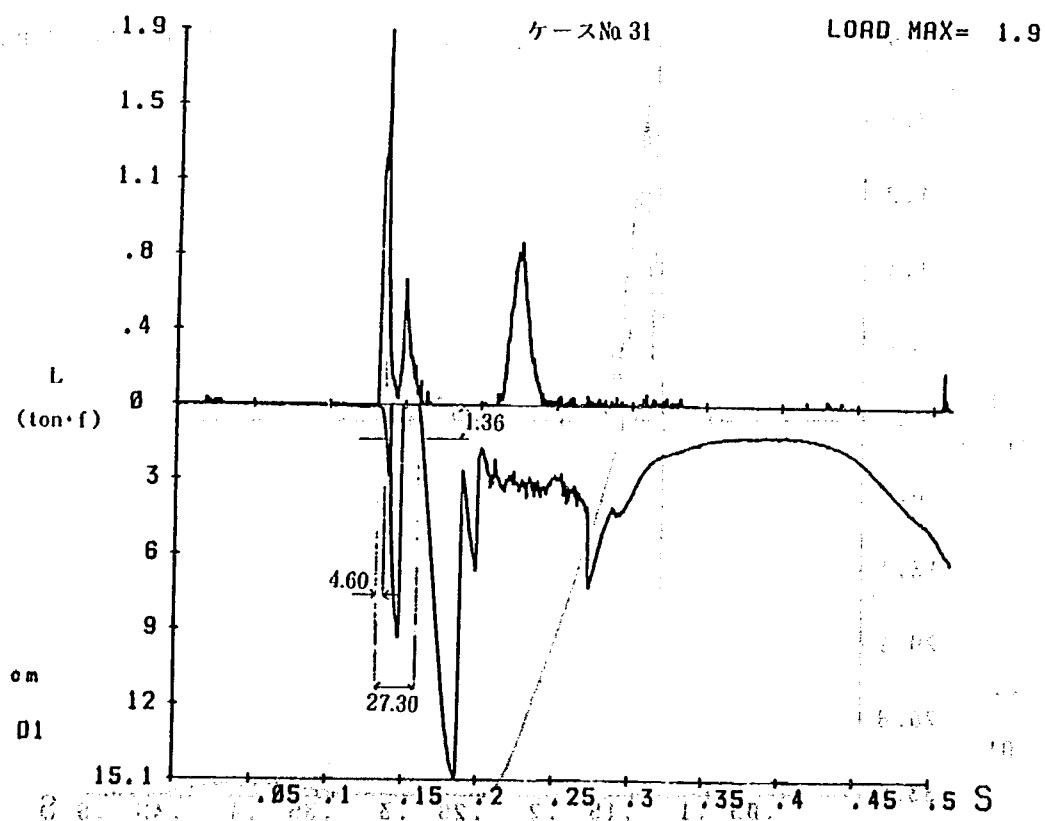
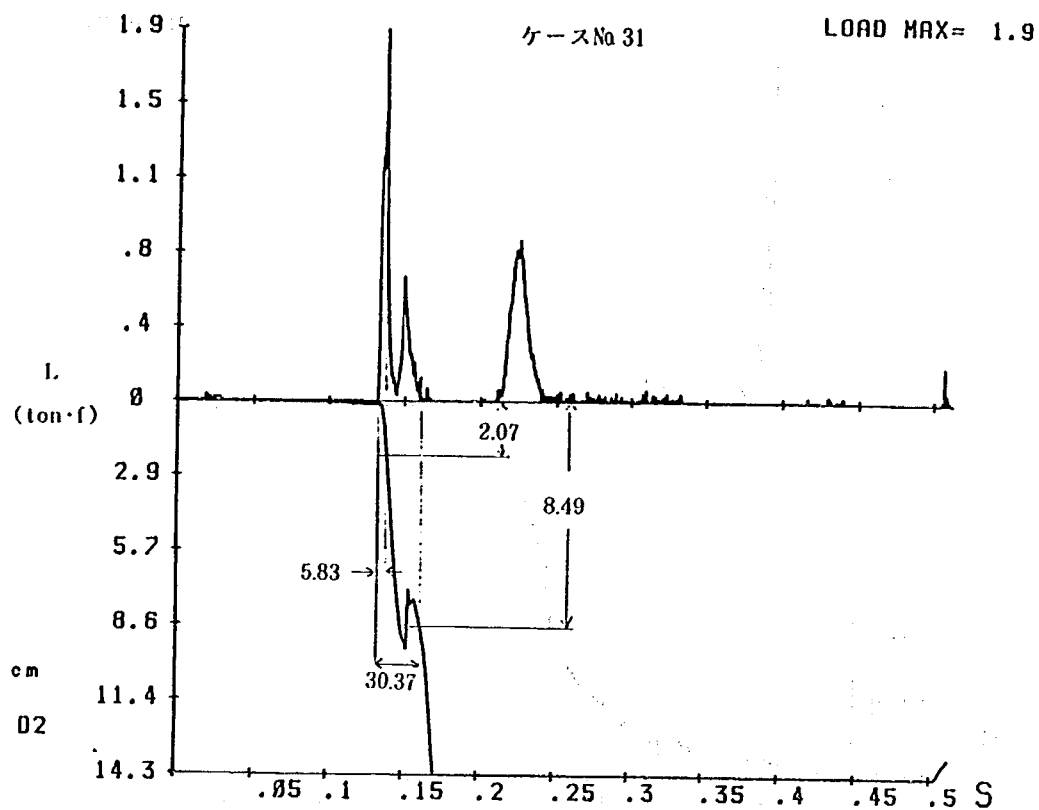


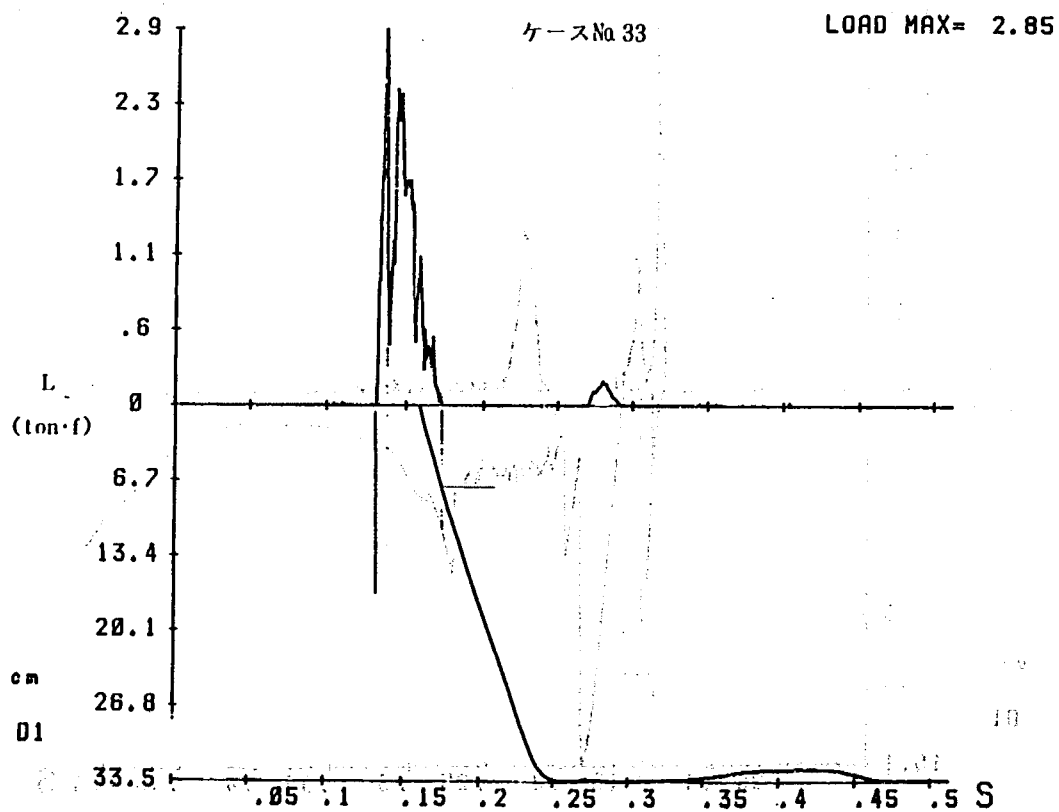
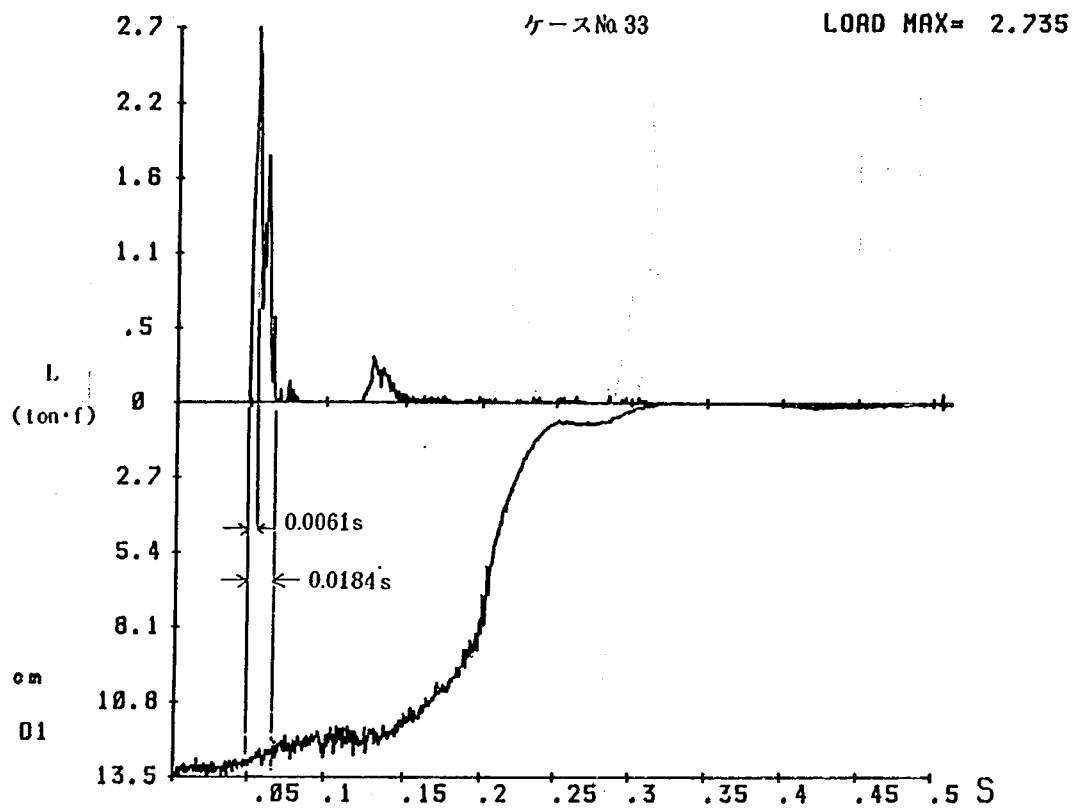


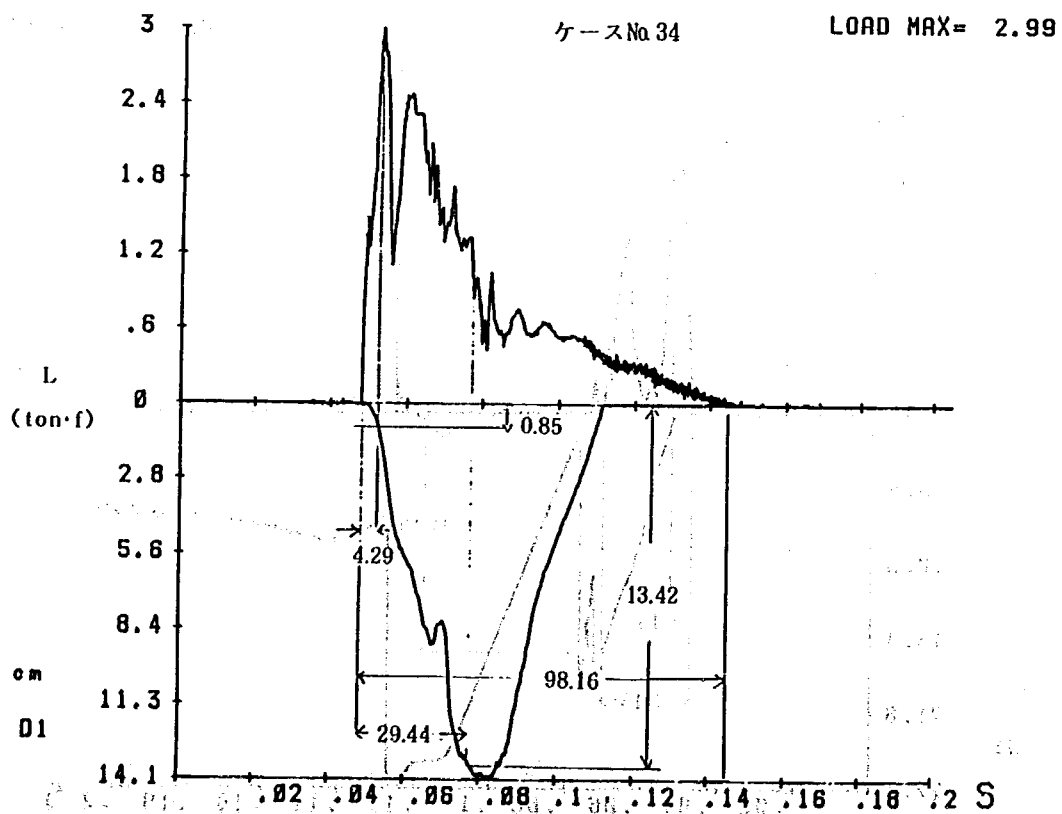
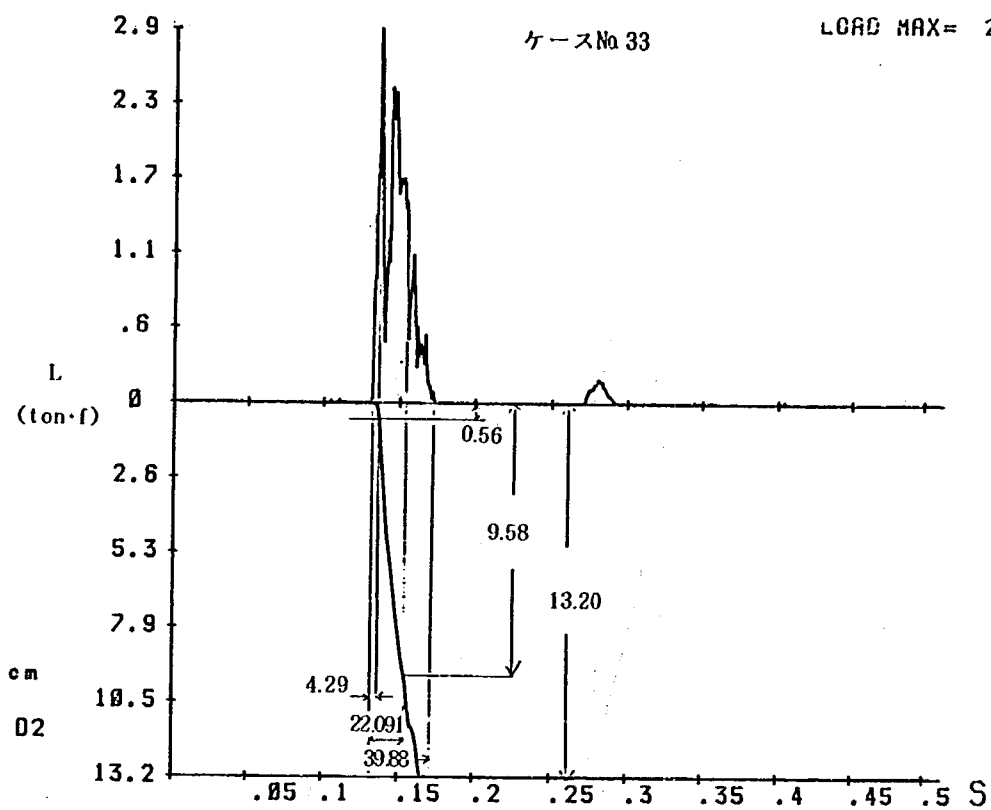


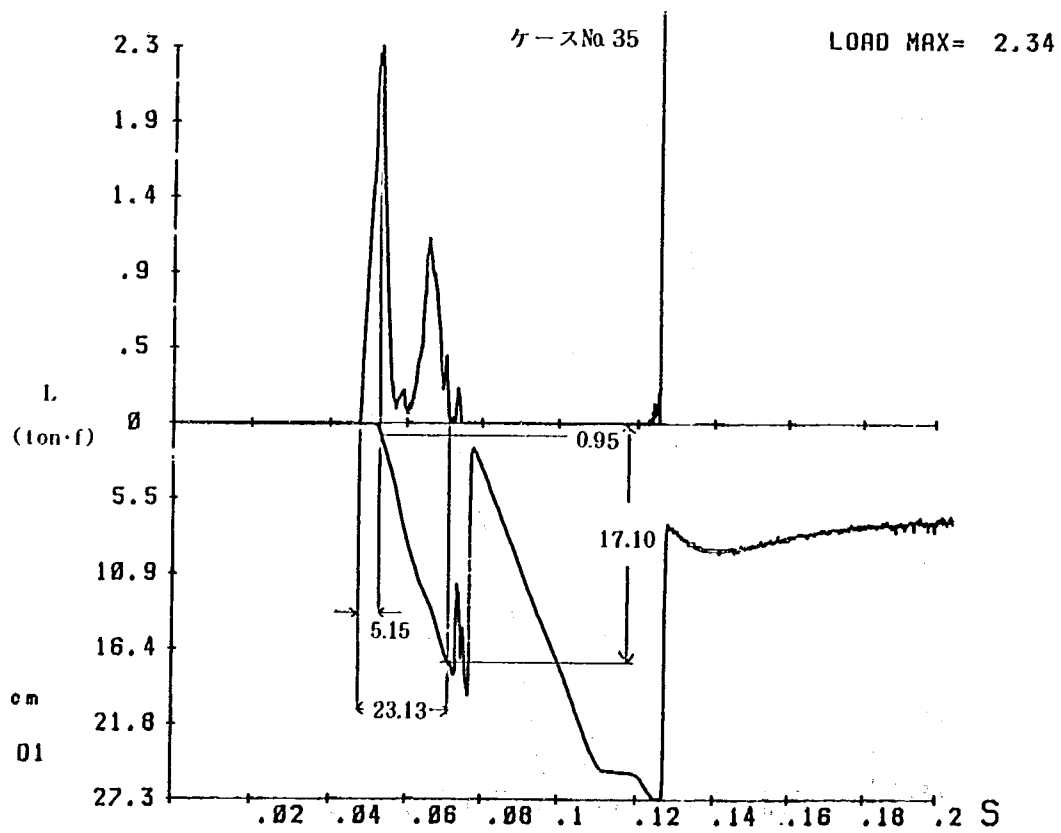
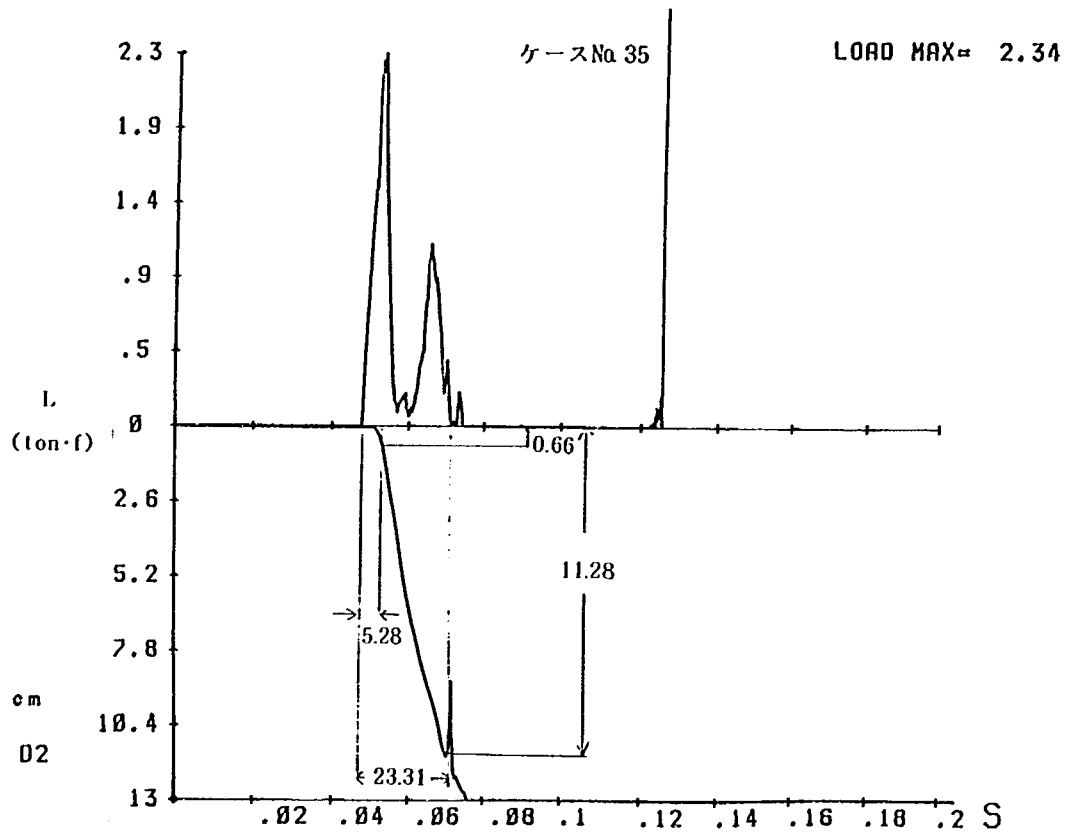








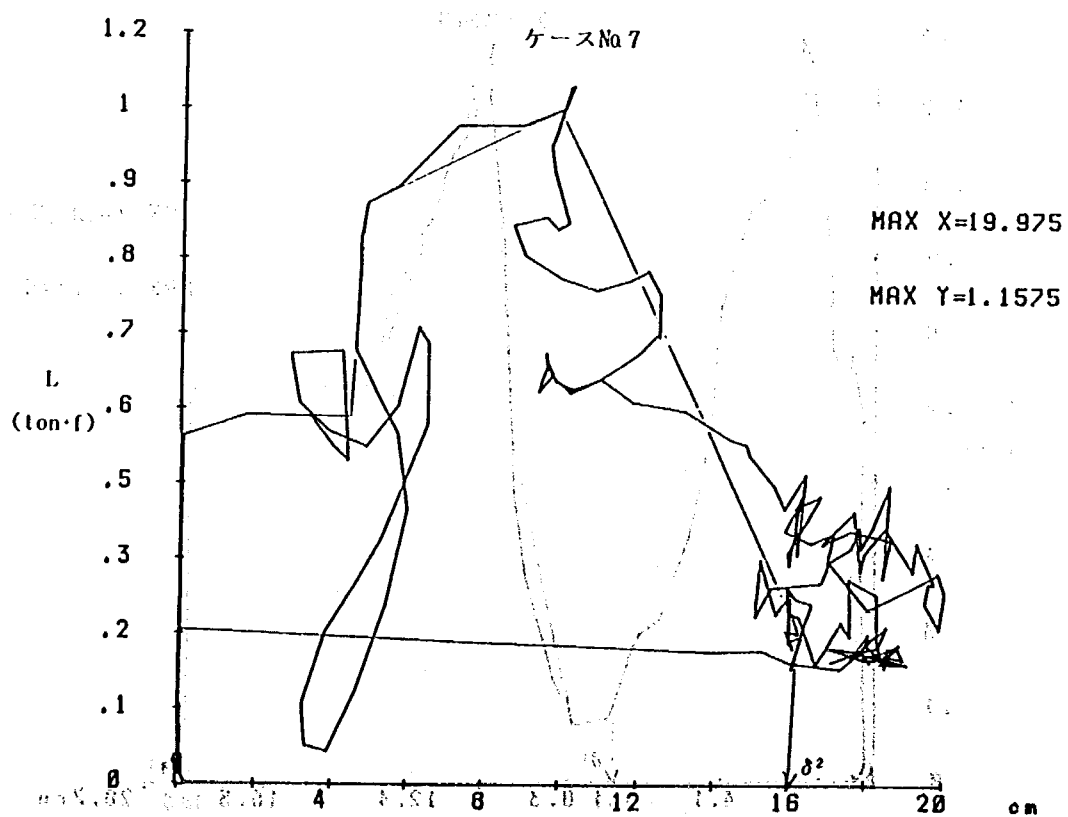
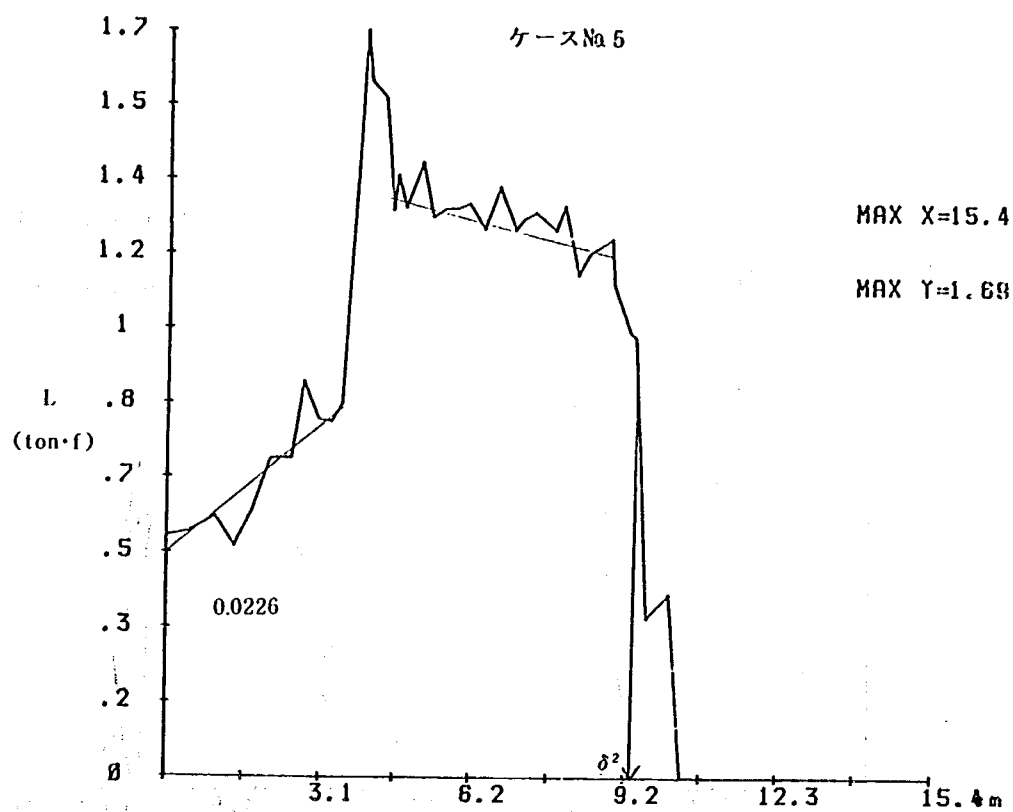


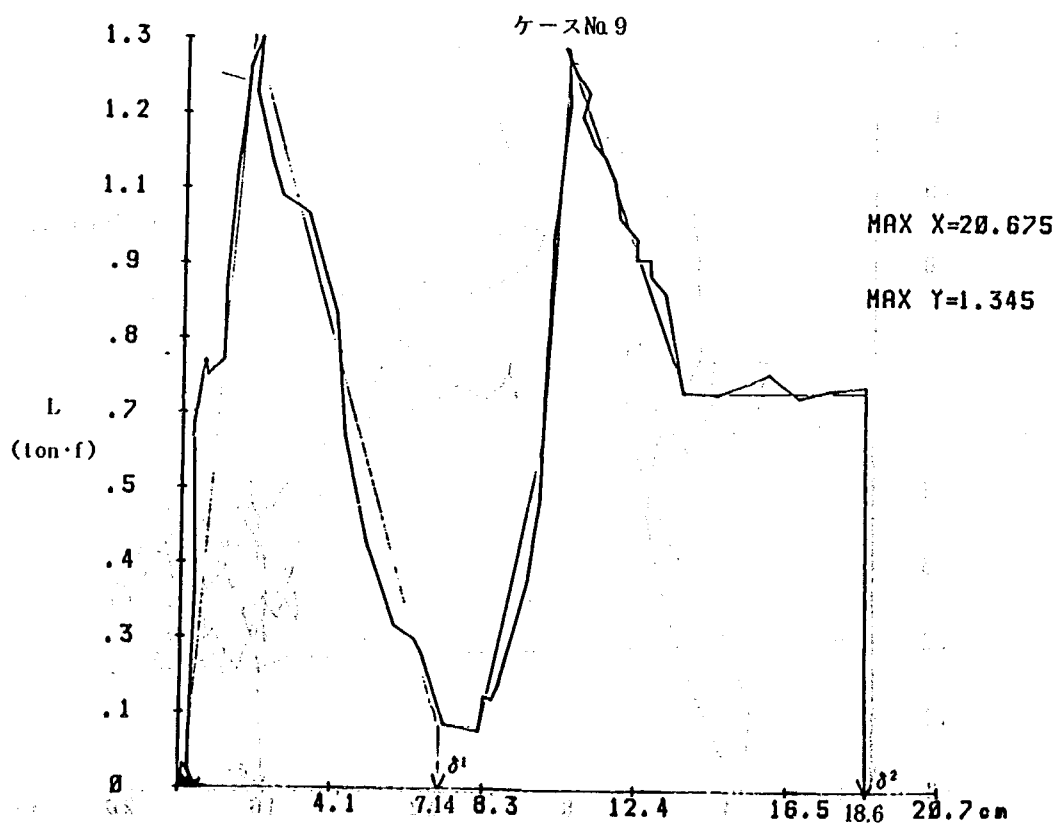
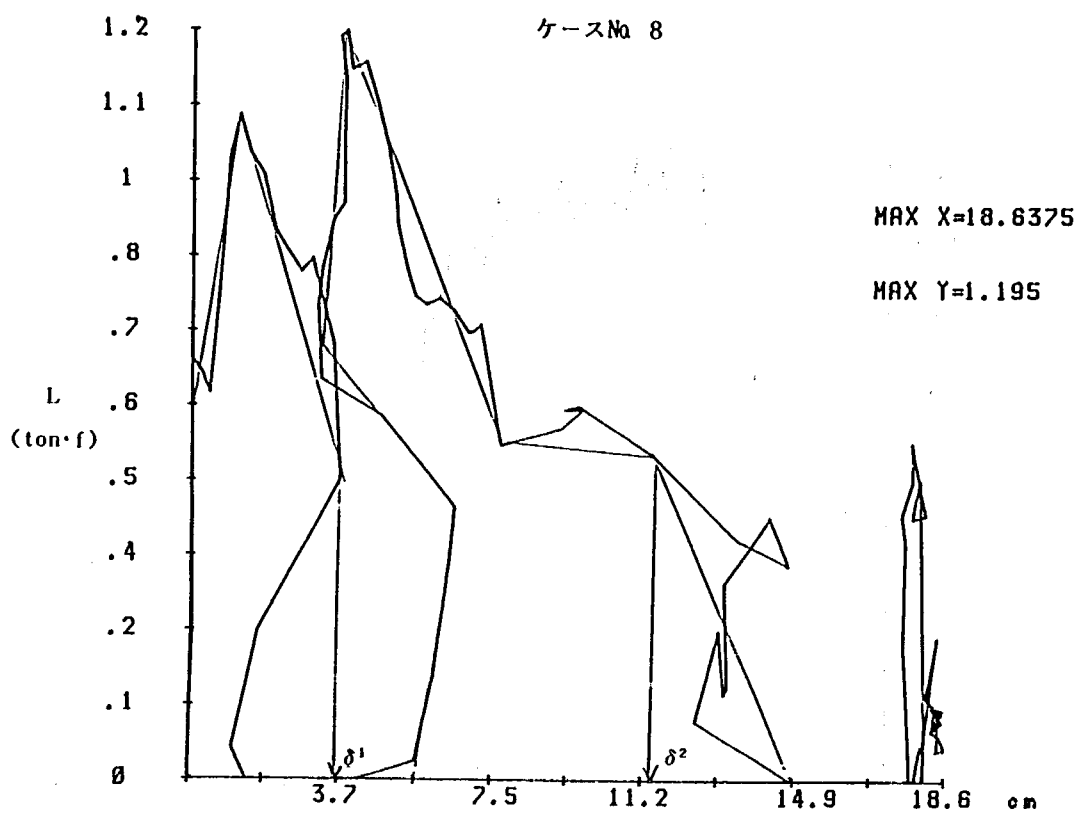


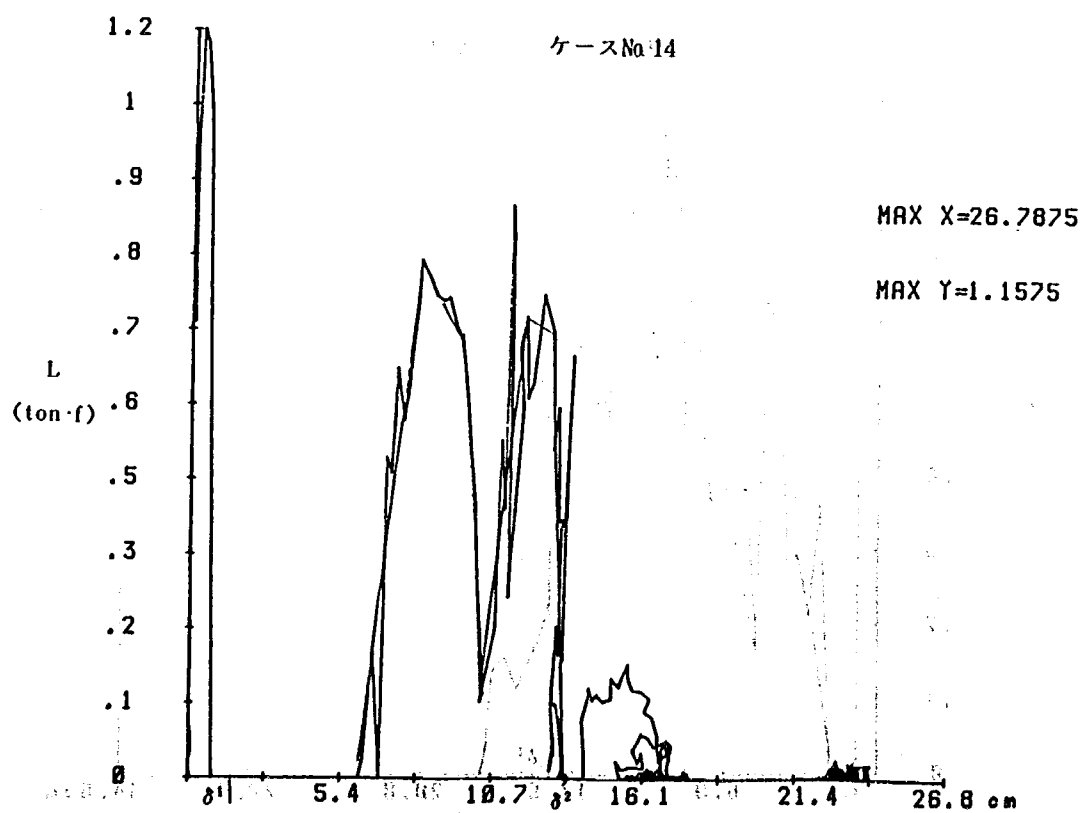
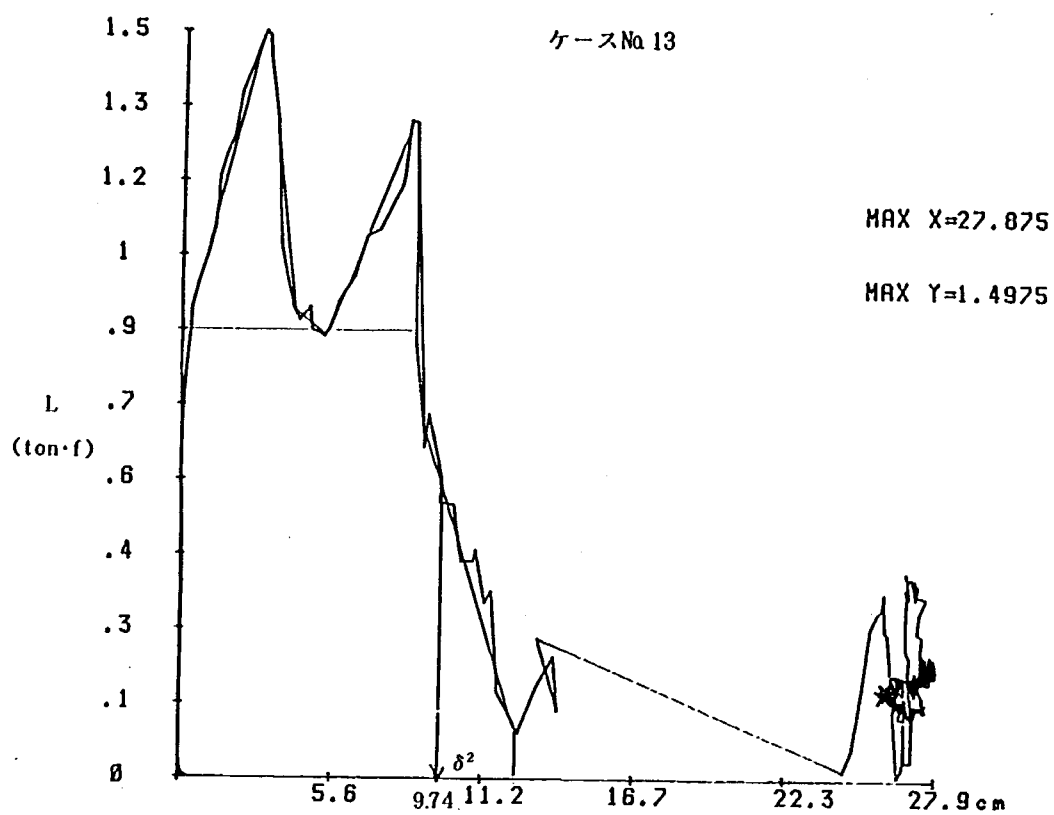
資料－2

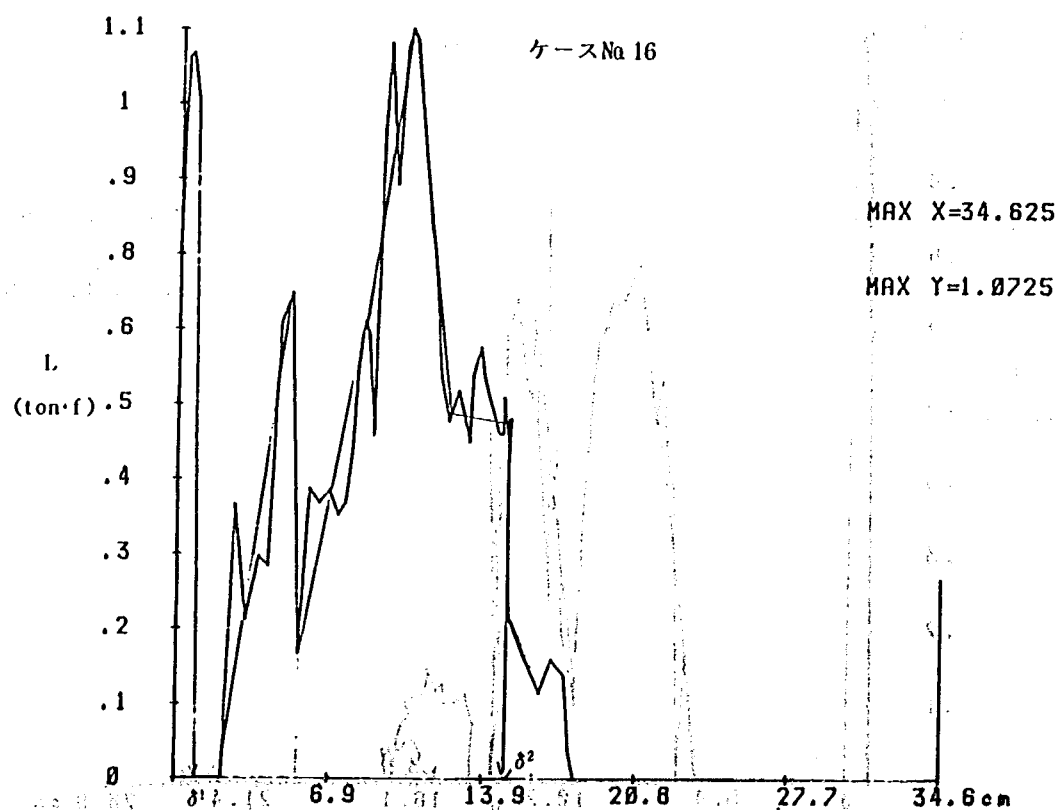
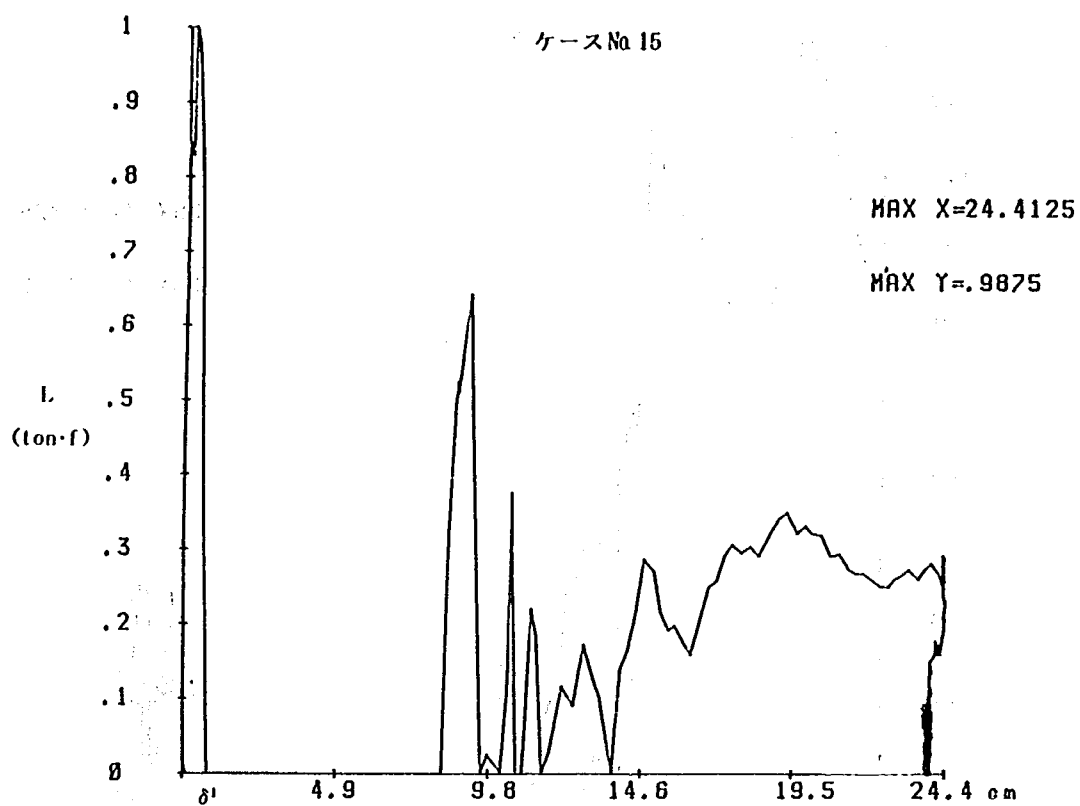
衝撃実験のF- δ 曲線

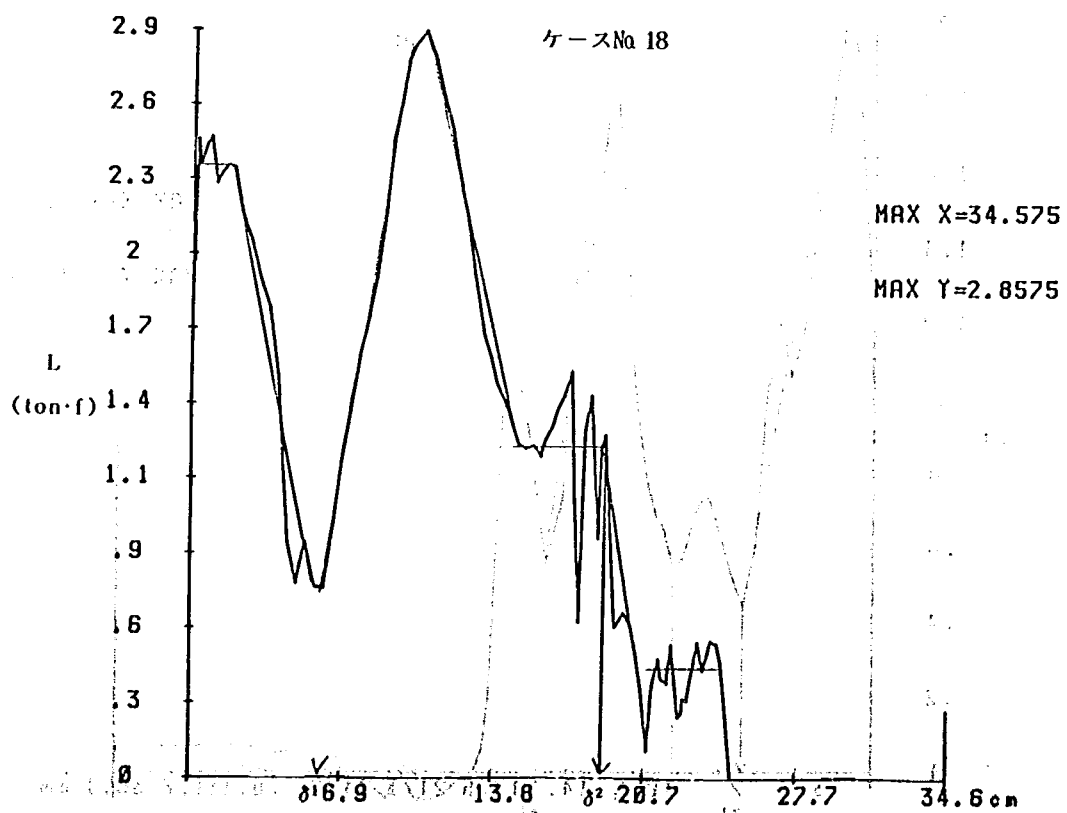
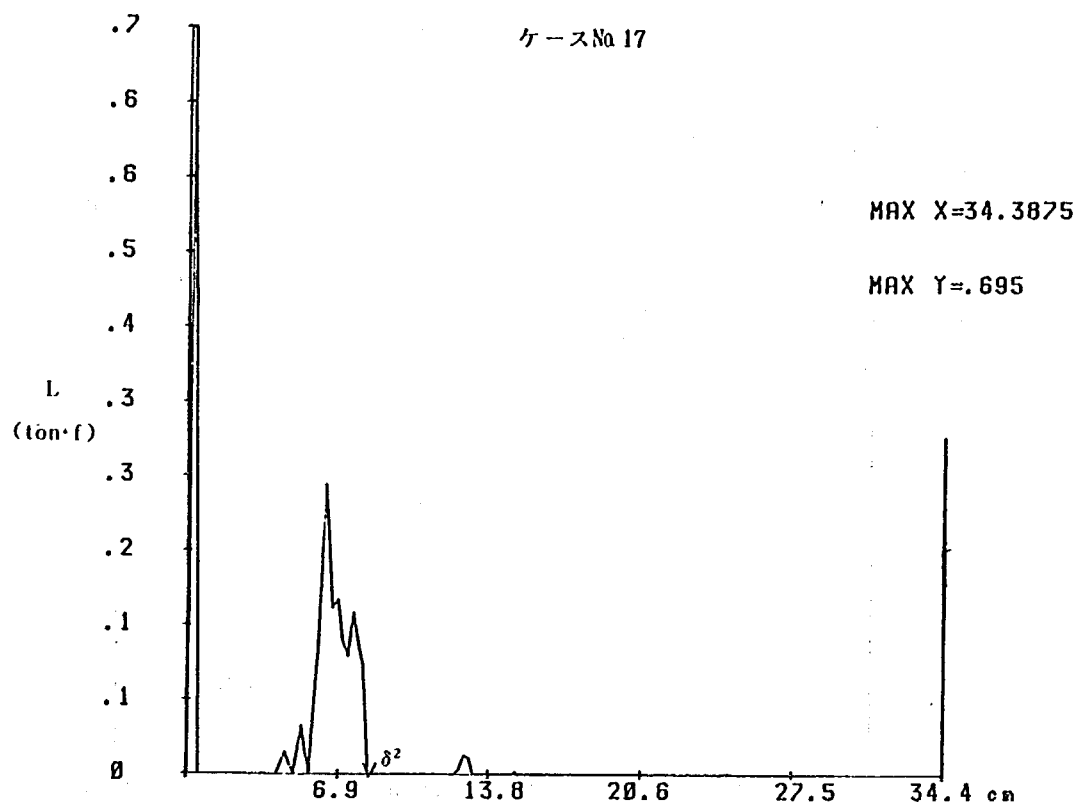
1941-1942

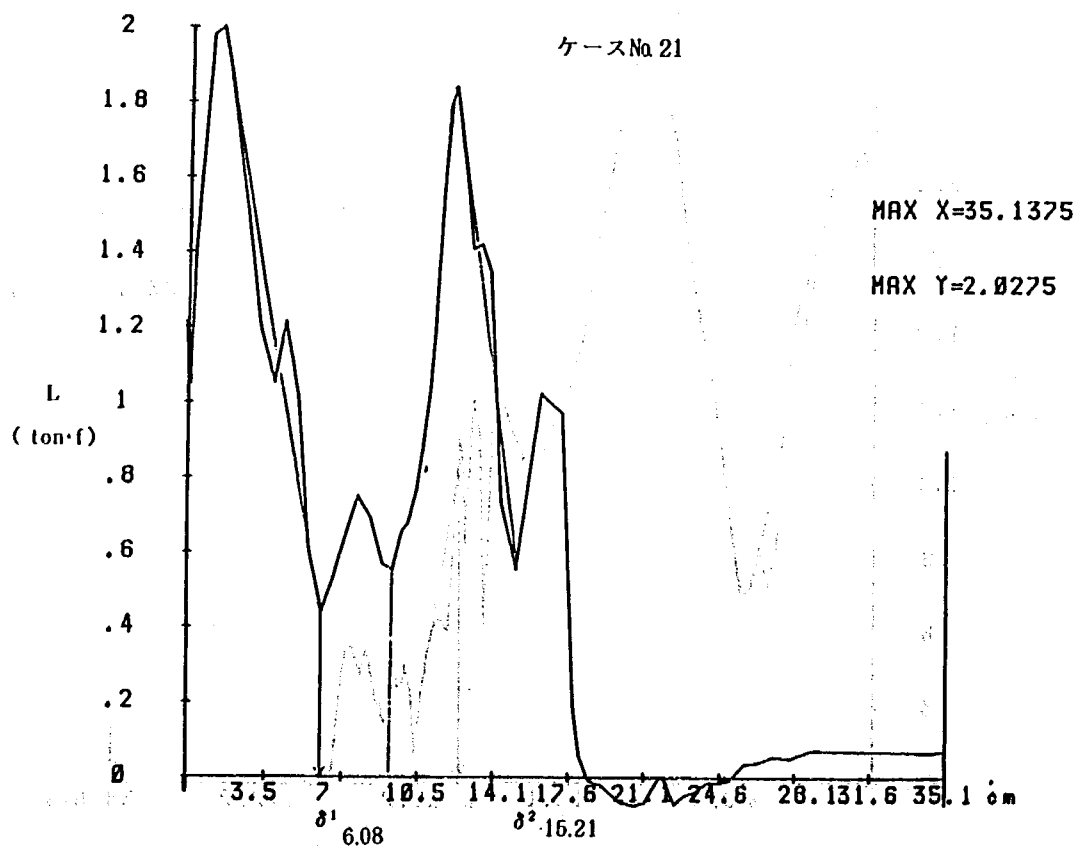
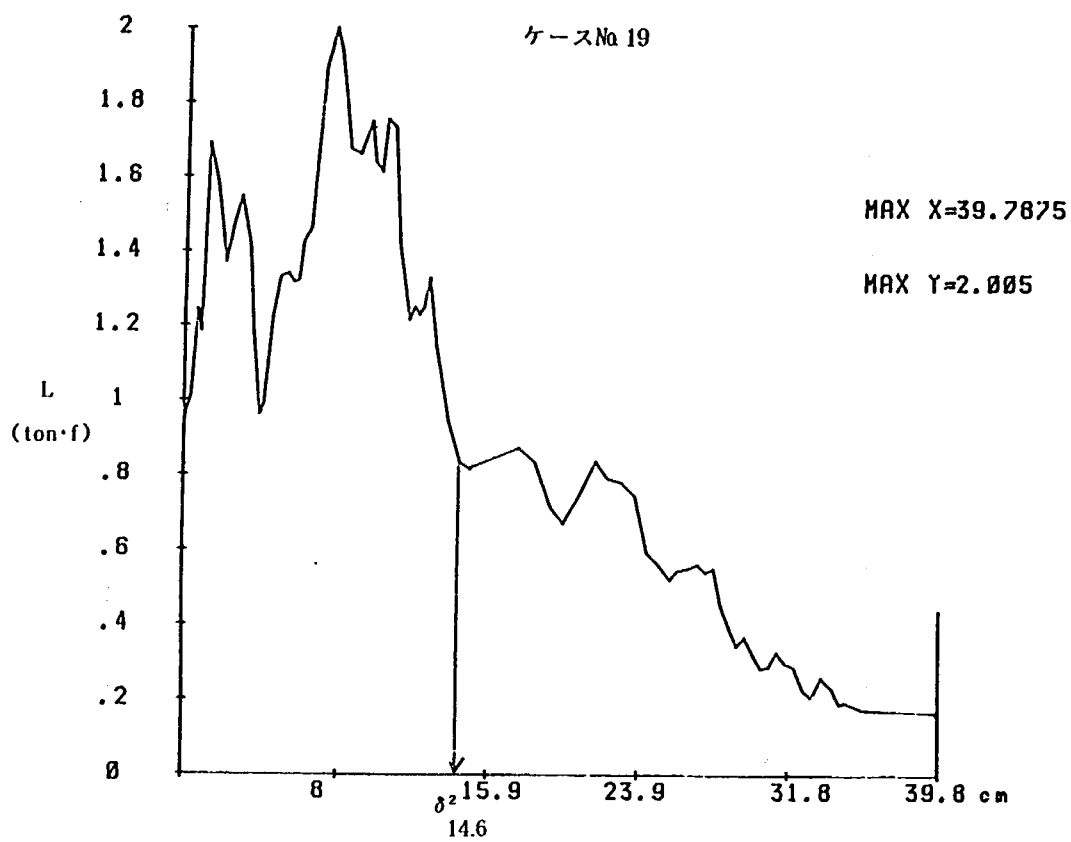


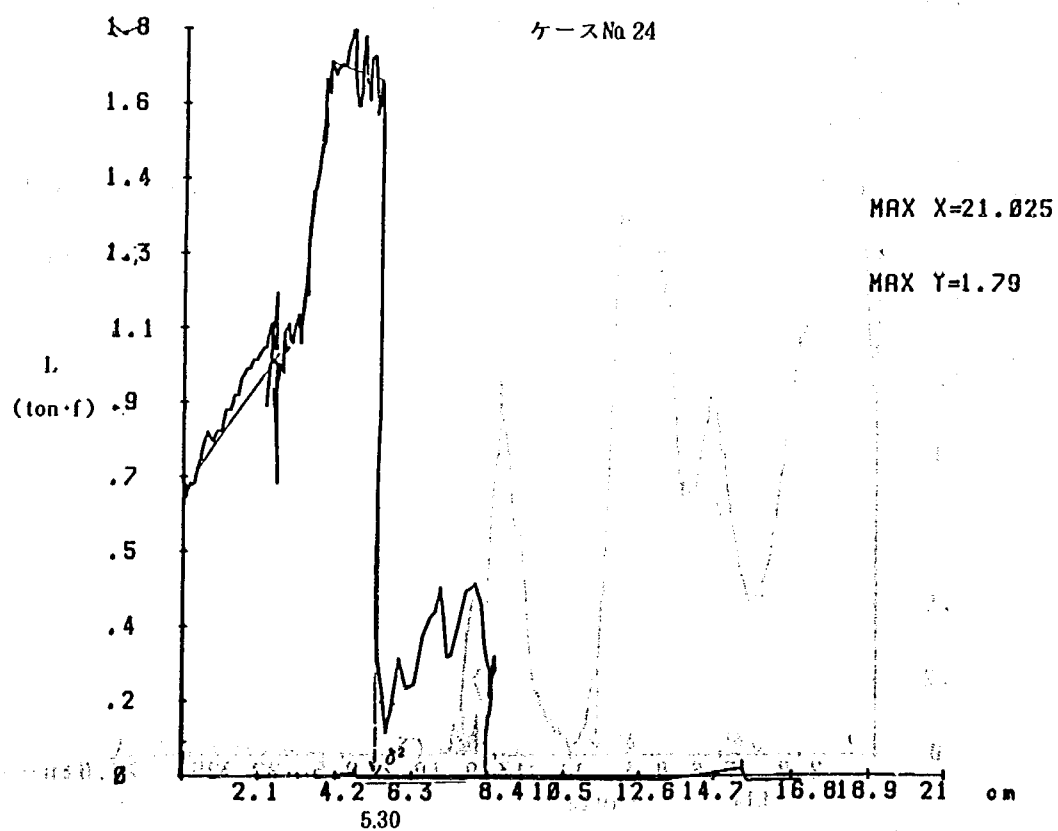
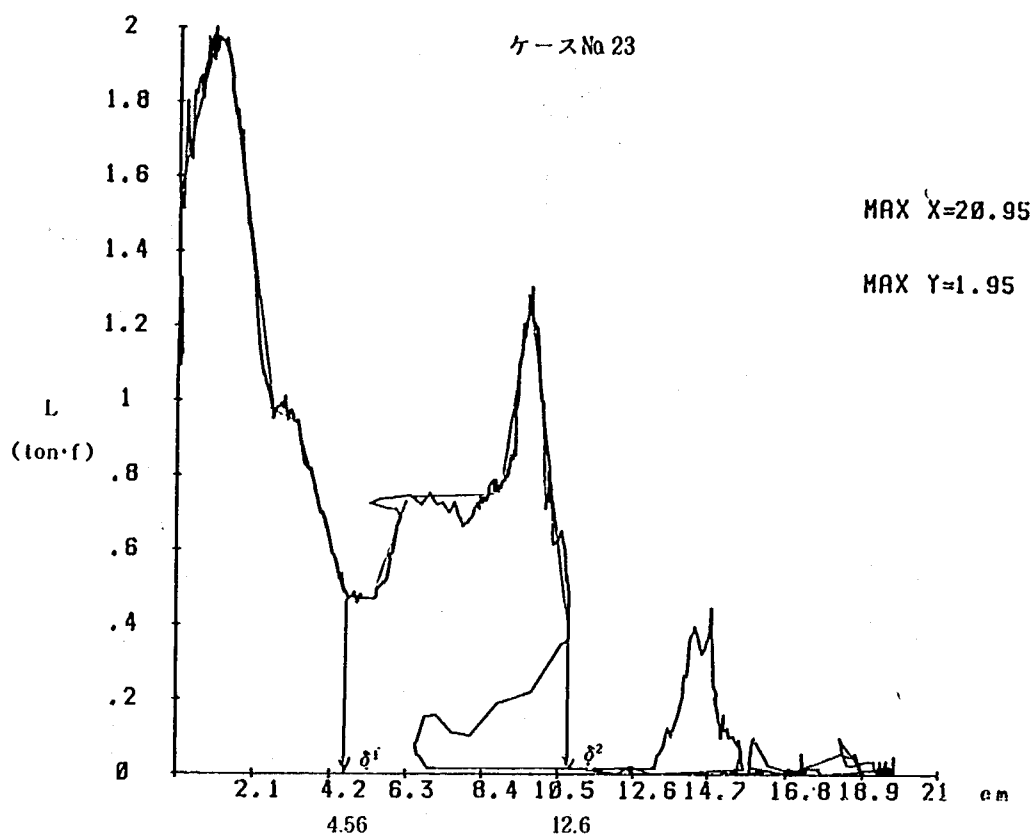


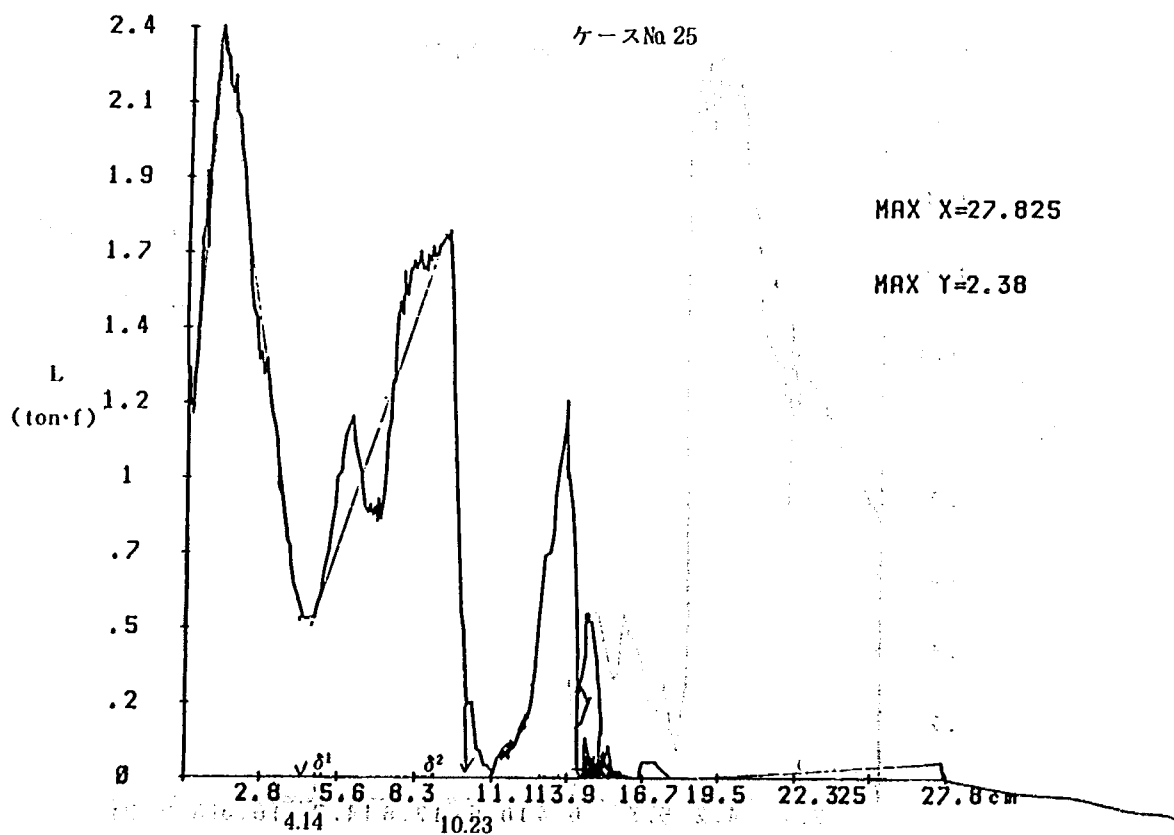
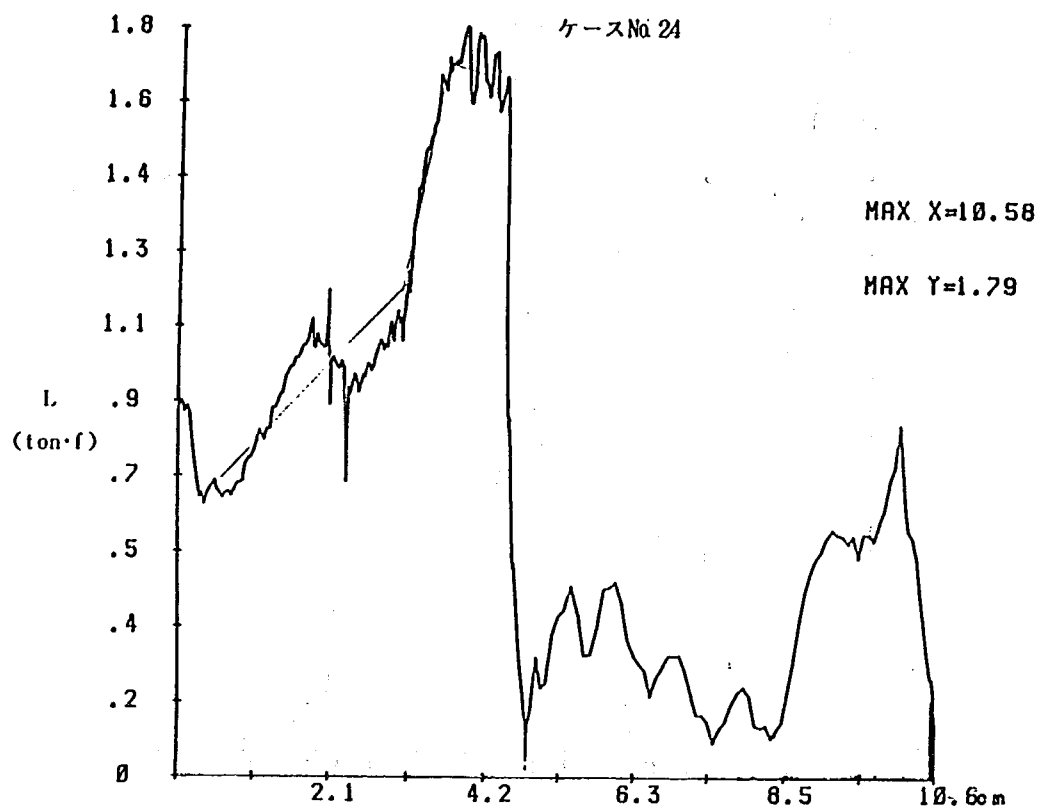


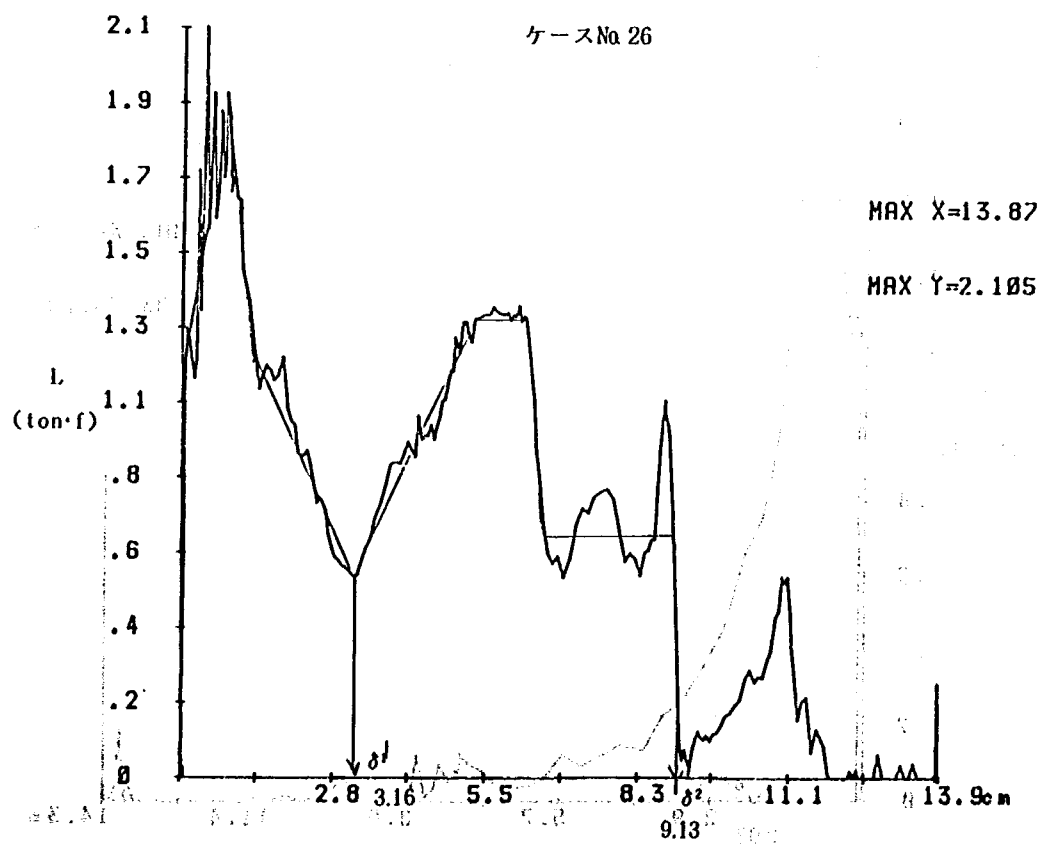
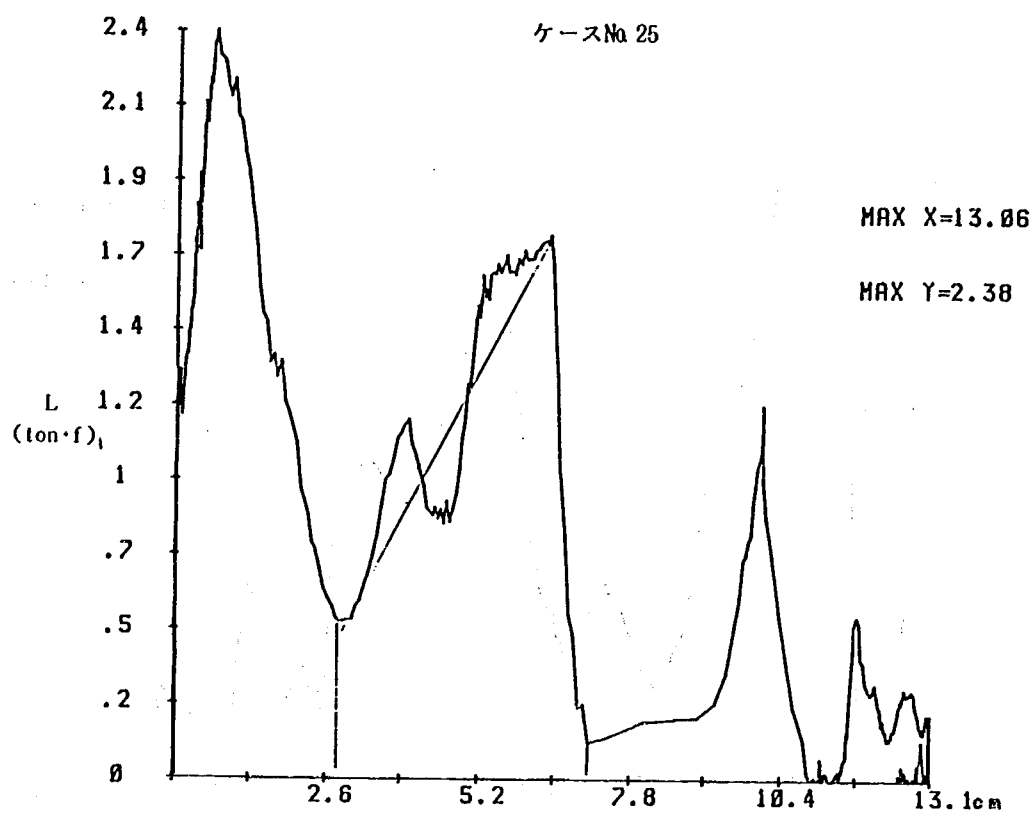


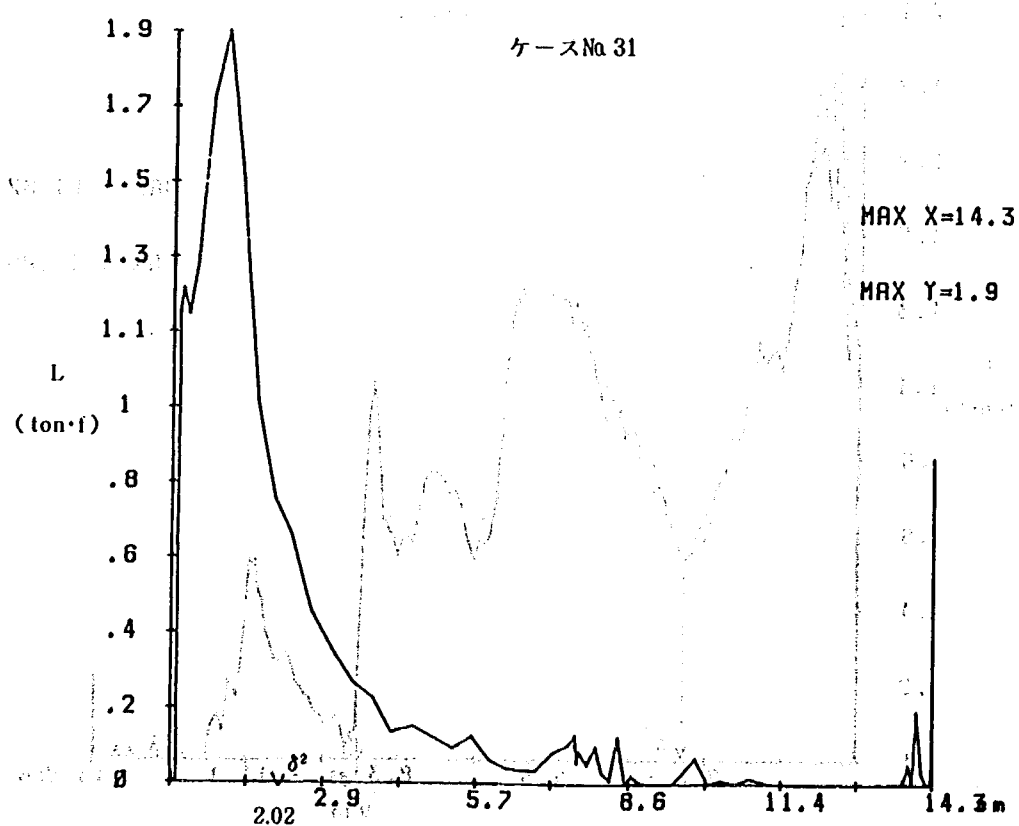
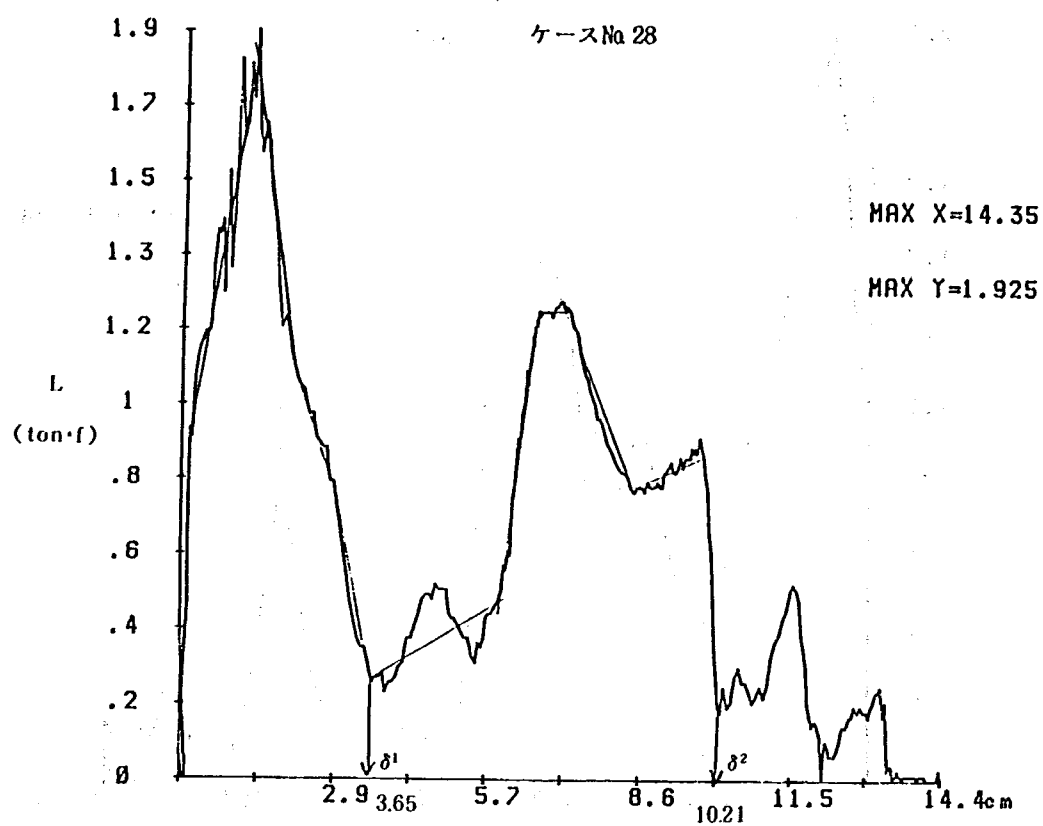


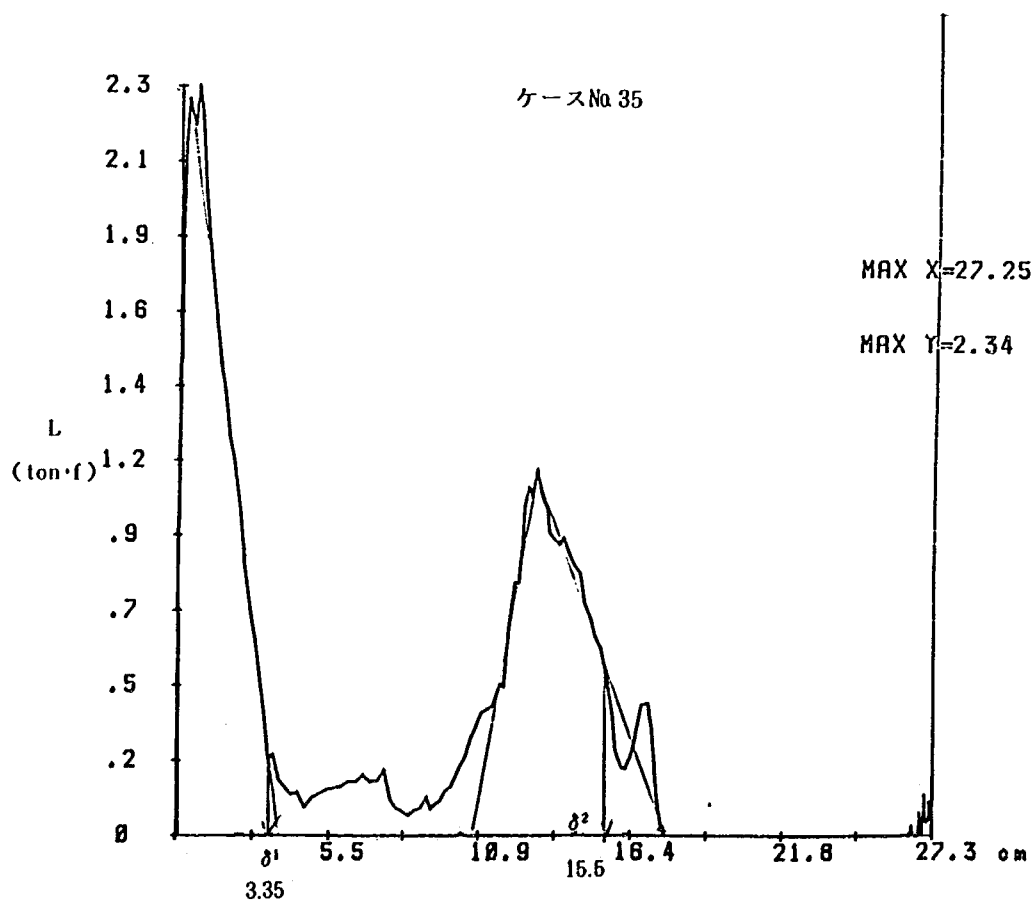
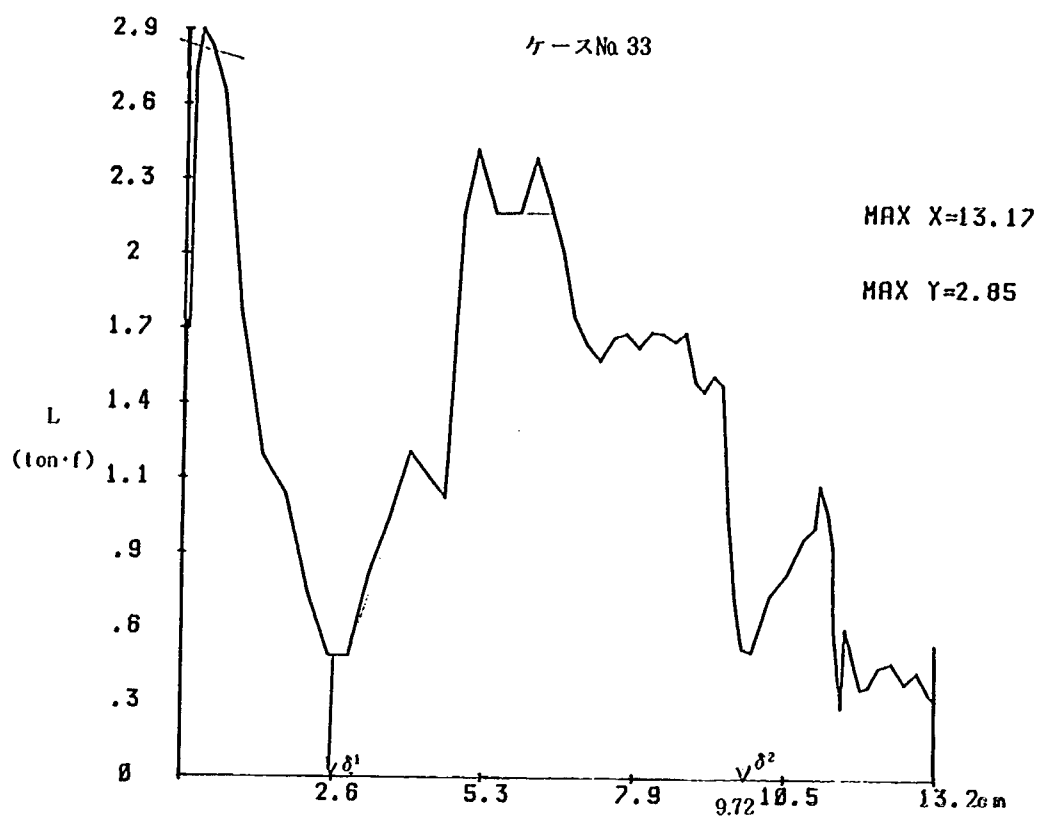












資料－3

解 析 計 算 書

1. 梁の固有周期の計算
2. 荷重計の固有周期の計算
3. 荷重計の発生する弾性波の周期の計算
4. 木材ヤング率の推定値
5. 木材の比例限界ひずみ
6. 木材の耐力の推定値
7. 木材の曲げ応力強度の計算
8. 等価シャルピー値に影響を与えるパラメーター

目 次

（第1章）概説	1
（第2章）概説	5
（第3章）概説	2
（第4章）概説	5
（第5章）概説	2
（第6章）概説	3
（第7章）概説	1
（第8章）概説	3

1. 梁の固有周期の計算

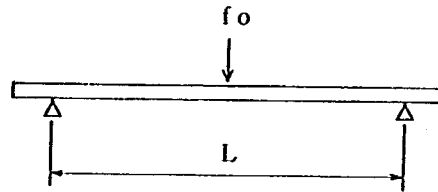
1.1 計算式

$$T = 1 / f_o$$

$$f_o = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} / 2\pi$$

$$K_1 = \frac{48EI}{L^3}$$

$$M_1 = \frac{17}{35} \cdot \frac{W}{9.8}$$



1.2 定数の仮定

$$E = 0.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 = 0.7 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$$

$$L = 2.0 \text{ m}$$

$$W = \pi r^2 \cdot L \cdot \rho = 3.14 \times 2.0 \times 400 r^2 = 2512 r^2$$

$$I = \frac{\pi}{64} (2r)^4 = 0.785 r^4$$

1.3 計算

$$K_1 = \frac{48 \times 0.7 \times 10^9 \times 0.785 r^4}{2^3} = 3.297 \times 10^9 r^4$$

$$M_1 = \frac{17}{35} \times \frac{2512 r^2}{9.8} = 124.5 r^2$$

$$f_o = \sqrt{\frac{3.297 \times 10^9 r^4}{124.5 r^2}} / 2\pi = 819.4 r$$

$$T = 1.22 \times 10^{-3} r^{-1} \text{ sec}$$

ϕ (cm)	9	10	11	13	15	17
T (sec)	0.027	0.024	0.022	0.019	0.016	0.014

2. 荷重計の固有周期の計算

2.1 計算式

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\frac{P}{A}}{E} = \frac{P}{AE}$$

$$\delta = \epsilon \ell = \frac{\ell}{AE} P$$

$$P = \frac{AE}{\ell} \cdot \delta \rightarrow K = \frac{AE}{\ell}$$

$$m = A \ell \cdot r / g$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \sqrt{1-h^2}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K}{m}} \sqrt{1-h^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{AE}{\ell} \cdot \frac{g}{A \ell r}} \sqrt{1-h^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{Eg}{\ell^2 r}} \sqrt{1-h^2}}$$

ϵ : ひずみ

E : 弾性係数 (kg/m^2)

P : 荷重 (kg)

A : 断面積 (m^2)

δ : 変位 (m)

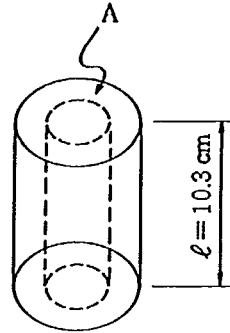
ℓ : 荷重計の長さ (m)

r : 荷重計素材の比重 (kg/m^3)

K : バネ定数 (kg/m)

h : 減衰比

m : 荷重計の質量 ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)



2.2 定数の仮定

$$\ell = 0.103 \text{ m}$$

$$E = 2.1 \times 10^{10} \text{ kg}/\text{m}^2$$

$$r = 7850 \text{ kgf}/\text{m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$$

$$h = 0.15 \quad (\text{実験値より概略推定})$$

2.3 固有周期

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2.1 \times 10^{10} \times 9.8}{0.103^2 \times 7850}} \sqrt{1-h^2}} = 0.13 \times 10^{-3} \text{ s}$$

3. 荷重計に発生する弾性波の周期の計算

弾性体に物が衝突すると弾性波が発生し弾性体内を伝搬する。

この中で体積変化に関係する疎密波 (Compressional Wave Primary wave) は、ひずみゲージによってその大きさをとらえることができる。したがって、ひずみゲージタイプのロードセルはこのP波が計測される。P波の伝搬速度は木材E, ν , ρ により決まるもので種々の木材のP波の伝搬速度は下記のとおりである。

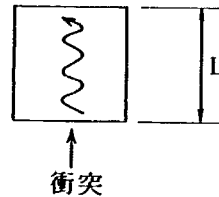
鉄	$V_p = 5950$	m/s
花崗岩	$V_p = 4000 \sim 5700$	"
コンクリート	$V_p = 3100$	"

このP波は自由端で反射するとき、位相が逆転して伝搬する。即ち圧縮は引張りに、引張りは圧縮になる。

今、ロードセルの打撃面で発生する弾性波がロードセルの他端に伝えられるまでの時間 (t_1) と、圧縮・引張りを1波長として周期 t_p を求めると次のようになる。

$$t_1 = \frac{L}{V_p} = \frac{0.103}{5950} = 0.17 \times 10^{-4} \text{ sec}$$

$$t_p = 0.034 \times 10^{-3} \text{ sec}$$



4. 木材ヤング率の推定値

4.1 計算式

静的実験で得られた $P - \delta$ 関係から木材のヤング率を推定する。推定の方法は、比例限界においては、 $P - \delta$ が理論式に従うものと仮定する。

$$P = \frac{48EI}{L^3} \delta$$

$$I = \frac{\pi}{64} (2r)^4$$

P : 荷重 (kgf)

E : ヤング率 (kgf/cm²)

I : 断面2次モーメント (cm⁴)

r : 木材の半径 (cm)

δ : 中央載荷による中央点のたわみ (cm)

L : 単純梁のスパン (m) $L = 200$ cm

$$P = \frac{48E\delta}{L^3} \cdot \frac{\pi (2r)^4}{64} = \frac{48E\delta \times \pi \times 16r^4}{200^3 \times 64} = 4.71 \times 10^{-6} r^4 E \delta$$

4.2 計算

木材の径 ϕ (cm)	皮厚を考慮せず		皮厚を 4 mm と仮定	
	$4.71 \times 10^{-6} r^4 E$	E	$4.71 \times 10^{-6} r^4 E$	E
11.0	224.6 kg/cm	5.21×10^4 kg/cm ²	224.6 kg/cm	7.05×10^4 kg/cm ²
11.7	363.6	6.59×10^4	363.6	8.75
13.8	490.3	4.59×10^4	490.3	5.83
13.9	293.9	2.67×10^4	293.9	3.39
17.5	861.5	3.12×10^4	861.5	3.76

5. 木材の比例限界ひずみ

5.1 計算式

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{PL}{4Z}, \quad P = \frac{4\sigma Z}{L} = \frac{\pi\sigma r^3}{L}$$

$$\delta = \frac{4\sigma ZL^3}{48EI \cdot L} = \frac{\sigma ZL^2}{12EI}$$

$$Z = \frac{\pi}{32}(2r)^3, \quad I = \frac{\pi}{64}(2r)^4$$

$$\delta = \frac{\sigma L^2 \frac{\pi}{32}(2r)^3}{12E \frac{\pi}{64}(2r)^4} = \frac{\sigma L^2}{6E(2r)} = \frac{L^2\sigma}{12Er}$$

δ : 載荷点のたわみ (cm)

L : スパン長 (cm)

σ : 最大応力 (kg/cm²)

Z : 断面係数 (cm³)

E : ヤング率 (kg/cm²)

I : 断面2次モーメント (cm⁴)

r : 木材の半径 (cm)

5.2 定数の仮定

$\sigma = 400 \text{ kg/cm}^2$, $E = 0.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とする。

(比例限度応力)

5.3 計算

$$\delta = \frac{200^2 \times 400}{12 \times 0.7 \times 10^5} \frac{1}{r} = \frac{19.05}{r} \text{ cm}$$

$$\phi 11 \text{ cm } (r = 5.5 \text{ cm}) \cdots \cdots \delta = 3.8 \text{ cm}$$

$$\phi 13.8 \text{ cm } (r = 6.9 \text{ cm}) \cdots \cdots \delta = 2.8 \text{ cm}$$

$$\phi 17.5 \text{ cm } (r = 8.75 \text{ cm}) \cdots \cdots \delta = 2.2 \text{ cm}$$

6. 木材耐力の推定値

外力が作用したときの木材の応力は下記の式で求める。

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{PL}{4}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} (2r)^3 = 0.785 r^3$$

$$\sigma = \frac{PL}{4 \times 0.785 r^3} = \frac{P \times 2.0}{4 \times 0.785 r^3} = 0.637 \frac{P}{r^3}$$

$$P = 1.57 \sigma r^3$$

ここで、杉材の強度は

$$\sigma_{ac} = 400 \text{ kg/cm}^2 = 4 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad (\sigma_{at} = 447 \text{ kg/cm}^2)^{1)}$$

木材の耐力

ϕ (cm)	9	10	13	15	17
P (kg)	572	1045	1725	2649	3857

7. 木材の曲げ応力強度の計算

7.1 計算式

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{PL}{4}$$

$$Z = \frac{\pi \phi^3}{32}$$

$$\sigma = \frac{PL}{48}$$

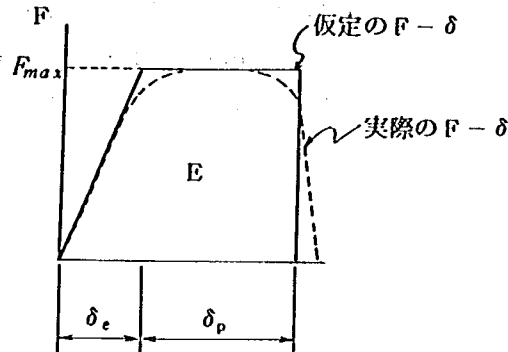
σ : 応力 (kg/cm²)
 P : 荷重 (kg)
 L : スペン (cm)
 ϕ : 木材の径 (cm)
 Z : 断面係数 (cm⁴)

7.2 計算

木材の直径 ϕ (cm)	最大荷重 P (kg)	皮厚を考慮せず		皮厚を4 mmと仮定	
		断面係数 Z (cm ⁴)	曲げ応力 σ (kg/cm ²)	断面係数 Z (cm ⁴)	曲げ応力 σ (kg/cm ²)
11.0	1,000	130.7	382.6	104.1	480.3
11.7	1,400	157.2	445.3	127.1	550.7
13.8	1,940	258.0	376.0	215.6	449.0
13.9	2,100	263.7	398.2	220.6	476.0
17.5	3,350	526.2	318.3	457.0	366.5
平均	—	—	386.1	—	464.4

8. 等価シャルピー値に影響するパラメーター

梁の $F - \delta$ を下図のように塑性領域では Bilinear に仮定する。



さらに $\delta_p = \alpha \delta_e$ で表わされると仮定する。

$$\begin{aligned} E &= F_{\max} (\delta_e + \delta_p) - \frac{1}{2} F_{\max} \delta_e \\ &= F_{\max} \left(\delta_p - \frac{1}{2} \delta_e \right) = F_{\max} (\alpha - 0.5) \delta_e \end{aligned}$$

$$\delta_e = \frac{F_{\max} L^3}{48 E I}, \quad F_{\max} = \frac{4 Z \sigma}{L}$$

$$E = \frac{16 E^2 \sigma^2}{L^2} \cdot \frac{L^3 (\alpha - 0.5)}{48 E I} = \frac{(\alpha - 0.5) \sigma^2}{3 E} \cdot \frac{Z^2 L}{I}$$

等価シャルピー値

$$E_{D2}' = \frac{E}{A} = \frac{(\alpha - 0.5) \sigma^2}{3 E} \cdot \frac{Z^2 L}{I A}$$

断面を直径 d の円形とすると

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad I = \frac{\pi d^4}{64}, \quad Z = \frac{\pi d^3}{32}$$

$$E_{D2}' = \frac{(\alpha - 0.5) \sigma^2}{3 E} \cdot \frac{64 \times 4 \times \pi^2 d^6 \times L}{\pi d^4 \times \pi d^2 \times 32^2} = \frac{(\alpha - 0.5) \sigma^2 L}{12 E}$$

E_{D2} : 等価シャルピー値 (kgf・m/cm²)

σ : 曲げ応力強度 (kgf/cm²)

E : 弾性係数 (kgf/cm²)

L : スパン長 (m)

参 考 文 献

- 1) 西林新蔵, 土木材料, 朝倉書店 昭和52年3月20日
- 2) 本書編集委員会編, 振動工学ハンドブック, 養賢堂 昭和56年6月10日
- 3) Werner Goldsmith; Impact (The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids), Edward Arnold (Publishers) Ltd., London

写真集



写真-1

木材の破壊状況

ケースNo 9

$H = 2.0 \text{ m}$

$\phi = 10.5 \text{ cm}$



写真-2

完全に切断された例

ケースNo 23

$H = 3.0 \text{ m}$

$\phi = 12.0 \text{ cm}$

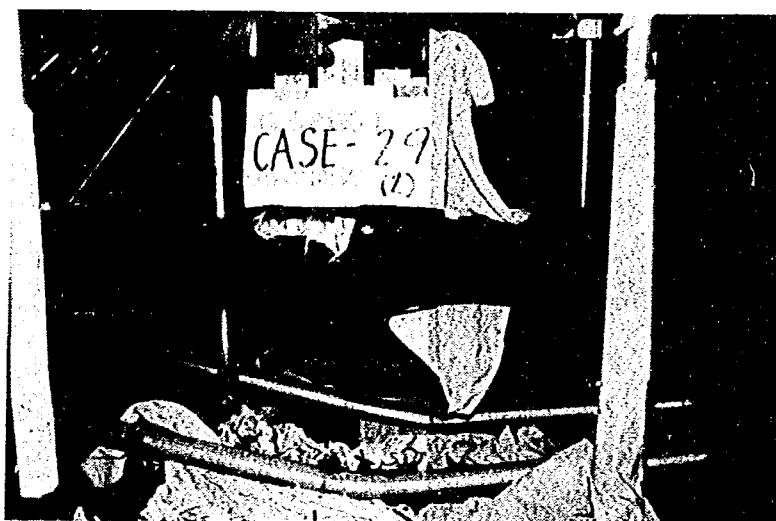


写真-3

破壊されなかった例

ケースNo 29

$H = 3.0 \text{ m}$

$\phi = 14.6 \text{ cm}$



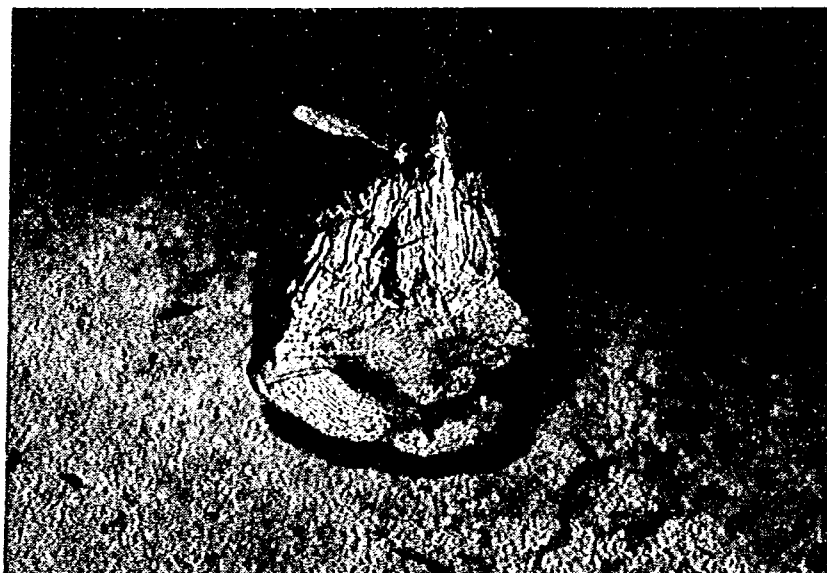
写真－４

破壊した木材の断面の状況
引張り側にひび割れが生
じている。



写真－５

木材の断面の状況
（完全に切断された例）



写真－６

木材の断面の状況
（破壊されなかった例）
表面の繊維組織が破壊さ
れている。

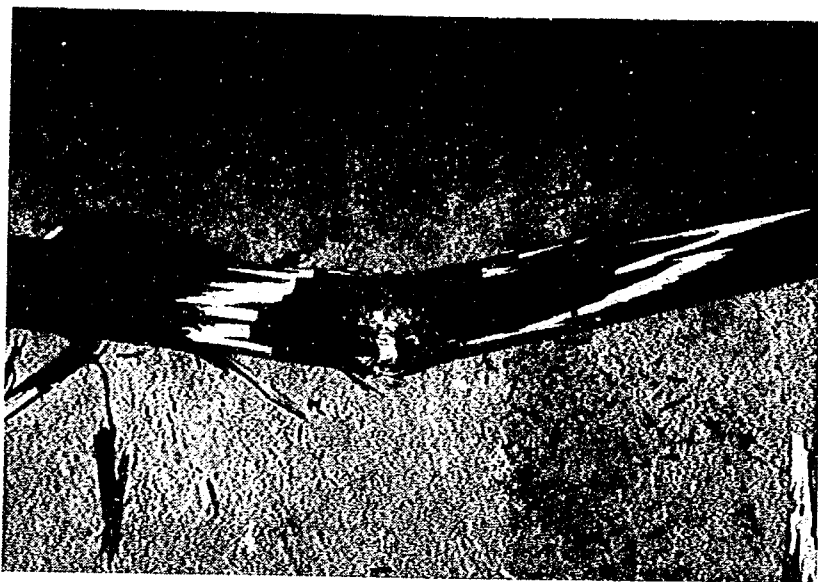


写真-7

破壊された木材のひび割れ状況
状況

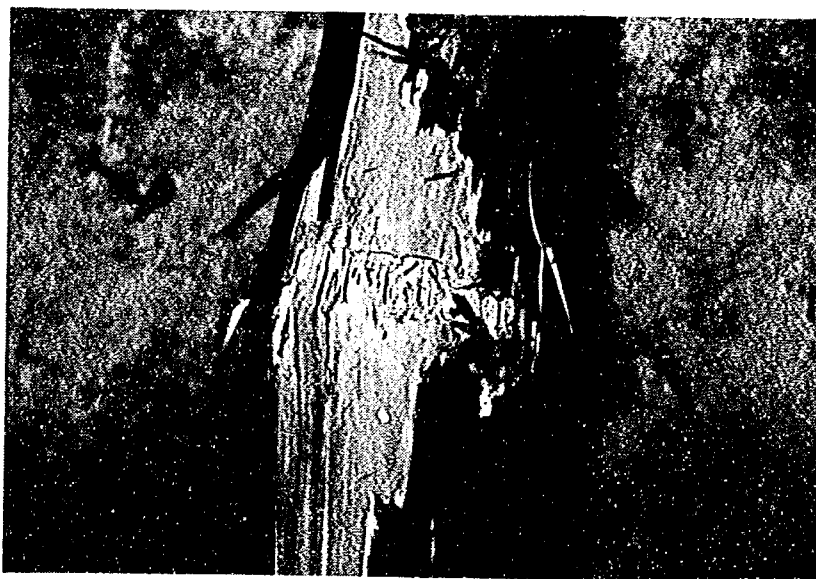


写真-8

打撃点の裏側の状況
曲げ引張による繊維の破
断がみられる。



写真-9

破壊されなかった例の打撃の
状況

ロードセルのめり込みによ
るへこみがみられる。

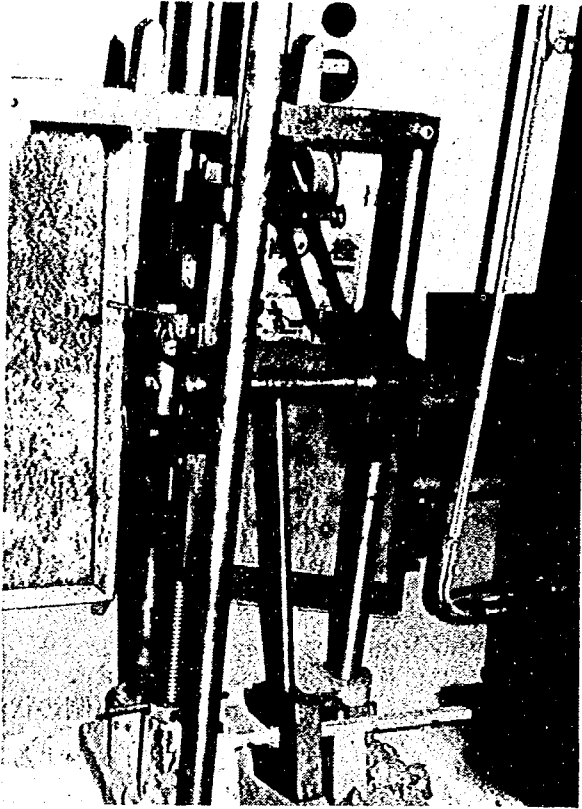


写真-10
シャルピー試験装置

樹木の衝撃エネルギー吸収能
に関する基礎実験報告書

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2430号

昭和62年1月(1987)

建設省土木研究所砂防部砂防研究室 矢澤昭夫

水山高久

要 旨 杉の皮付き生丸太に対して土石流衝撃力実験を行い静的及び動的応答特性を調べ、立木の衝撃エネルギー吸収能を推定する実験式の提案を行ったものである。

キーワード：土石流衝撃力，緩衝材，土石流緩衝樹林帯
衝撃応答解析，鋼製砂防施設

