



ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2600号

土木研究所資料

鋼製砂防施設部材の 衝撃応答実験報告書

昭和63年2月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

Copyright © (1988) 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、複写は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

鋼製砂防施設部材の 衝撃応答実験報告書

砂防研究室 室長 水山高久
主任研究員 石川芳治
鈴木浩之

要 旨 土石流対策用の砂防ダムに土石流が衝突する場合、砂防ダムがどのような挙動を示すかについてこれまでは、主にコンクリート製の砂防ダムについて調べてきた。最近、比較的短期間で簡単に施工できる鋼管を用いたスリットダムや鋼管を格子状に組んだ透過性の砂防ダムが施工されるようになってきた。しかしながら、ダムの設計に当たって最も重要な、土石流の先頭部に含まれる巨礫がダムに衝突する際の衝撃力とダム衝撃抵抗力の評価の方法が十分評価されていない。また、これまで行われてきた研究は、鋼製砂防施設全体の変形または局部変形のどちらかに注目していた。本報告書は、構造変形と局部変形の両方を考慮し、土石流中の巨礫が鋼製砂防施設にどのように作用し、どれだけのエネルギーに耐えられるかについて検討した研究の成果で、二ヶ年に渡って実施している。昨年度は直径の異なる鋼管について鋼管梁の衝撃曲げ破壊試験を実施し、鋼管梁の衝撃エネルギー吸収能を推定する手法を検討した。本年度は、昨年試験結果で解明できなかった不明な点を解決するための追加試験と、肉厚が管径に対して小さい薄肉管の試験、より実際の構造物の挙動に近いと考えられる鋼管のせん断試験を実施して、鋼管梁の衝撃エネルギー吸収能を推定する手法を検討し、鋼管梁の衝撃に対する破壊限界を推定する手法を提案した。

キーワード：土石流衝撃力、鋼製砂防施設、衝撃応答解析、土石流、衝撃力

An Experimental Study on the Impact Response of Steel Pipes used in the Sabo Facilities

by

Takahisa MIZUYAMA
Yoshiharu ISHIKAWA
Hiroyuki SUZUKI

Synopsis

Studies concerning how sabo dams, used as a debris-flow countermeasure, respond when they are hit by debris flows are conducted mainly on the sabo dams made of concrete. In recent years, permeable sabo dams such as slit dams and grating dams are being constructed using steel pipes which can be built easily in a relatively short period. However, in the design of dams, the method for estimating the impact force of huge boulders inside the front of debris flows and the impact resistance of dams has not been made clear. Studies so far have been taking note of either the deformation of the entire steel-made sabo structure or its partial deformation. This report aims at taking both into account by investigating how boulders inside a debris flow act on steel-made sabo structures and by examining the extent of force which the structure is able to resist. Last year, impact bending rupture tests were performed on steel beams of various diameters to obtain the method for estimating their impact force absorptivity. Supplementary experiments were carried out in the current year to review the said method and to propose a new method for predicting the breaking limit of steel beams due to impact. They are the tests on steel pipes with a small difference between their outer and inner diameters, and shear tests on these pipes to give a more accurate response of the actual structure.

KEY WORDS : Impact force of debris flow, steel-made sabo structures,
impact response analysis, Debris-flow, Impact force

は　じ　め　に

土石流対策用の砂防ダムに土流が衝突する場合、砂防ダムがどのような挙動を示すかについてこれまでは、主にコンクリート製の砂防ダムについて調べてきた。最近、比較的短期間で簡単に施工できる鋼管を用いたスリットダムや鋼管を格子状に組んだ透過性の砂防ダムが施工されるようになってきた。しかしながら、ダムの設計に当たって最も重要な、土石流の先頭部に含まれる巨礫がダムに衝突する際の衝撃力とダム衝撃抵抗力の評価の方法が十分評価されていない。これまでの研究は、鋼製砂防施設全体の変形または局部変形のどちらかに注目して行われてきた。

本報告書は、構造変形と局部変形の両方を考慮し、土石流中の巨礫が鋼製砂防施設にどの様に作用し、どれだけのエネルギーに耐えられるかについて検討した研究の成果で、関東地方建設局富士川砂防工事事務所より「鋼製砂防施設の部材試験」として二ヶ年に渡って依頼された課題の成果で、昨年度は直径の異なる鋼管について、鋼管梁の衝撃曲げ破壊試験を実施し、鋼管梁の衝撃エネルギー吸収能を推定する手法を検討した。本年度は、去年の試験結果で解明できなかった不明な点を解決するための追加試験と、肉厚が管径に対して小さい薄肉管の試験、より実際の構造物の挙動に近いと考えられる鋼管のせん断試験を実施して、鋼管梁の衝撃エネルギー吸収能を推定する手法を検討した。

昭和63年 2 月

目

次

はじめに

1. 実験の目的	1
2. 実験の概要	2
2.1 実験の種類	2
2.2 実験条件	2
3. 片持ばりの衝撃载荷実験	4
3.1 実験条件	4
3.2 実験設備	4
(1) 载荷装置	4
(2) 測定装置	5
3.3 試験体	7
3.4 実験結果	8
(1) 荷重, 衝突点の変位～時間曲線	8
(2) 荷重～衝突点の変位曲線	14
(3) 最大荷重, 収束荷重	16
(4) 終局変位	19
(5) 衝撃エネルギー吸収能	21
(6) 衝撃エネルギー吸収能の推定	23
3.5 ま と め	27
4. 単純ばりの衝撃载荷実験	28
4.1 実験条件	28
4.2 実験設備	28
(1) 载荷装置	28
(2) 測定装置	29
4.3 試験体	30
4.4 実験結果	31
(1) 荷重, 衝突点の変位～時間曲線	31
(2) 荷重～変位曲線	38
(3) 最大荷重	38
(4) 終局変位	41
(5) 衝撃エネルギー吸収能	41

(6) 局部エネルギー吸収能	47
(7) 衝撃エネルギー吸収能の推定	48
4.5 ま と め	50
5. 片持ばりのせん断実験	52
5.1 実験条件	52
5.2 実験設備	53
(1) 載荷装置	53
(2) 測定装置	53
5.3 試験体	54
5.4 実験結果	54
(1) 荷重～時間, 変位～時間曲線	54
(2) 荷重～変位曲線	60
(3) 最大荷重	64
(4) 終局変位	66
(5) 衝撃エネルギー吸収能	71
(6) 衝撃エネルギー吸収能の推定	74
5.5 ま と め	75
6. 解 析	77
6.1 衝撃曲げエネルギー吸収能	77
(1) 片持ばり	77
(2) 単純ばり	78
(3) ま と め	78
6.2 衝撃せん断エネルギー吸収能	79
(1) 静的せん断エネルギー吸収能 E_s	79
(2) 衝撃せん断エネルギー吸収能 E_D	79
(3) 破壊性状	80
6.3 鋼管ばりの衝撃破壊クライテリア	80
(1) 衝撃曲げ破壊クライテリア	80
(2) 衝撃せん断破壊クライテリア	81
7. 結論および今後の課題	82
おわりに	

1. 実験の目的

本実験は鋼製砂防構造物に土石流先頭部に含まれる巨礫が衝突する場合の巨礫の持つエネルギーが鋼製砂防構造物に及ぼす影響を明かにし、鋼製砂防構造物の衝撃耐力および変形性能を実験的に求め、鋼製砂防構造物の耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得るために行なったものである。

昨年度はその第1段階として、鋼製砂防構造物に用いられている鋼管部材を取り出し、これらの部材が使用されている部分の支持条件を考えその支持条件を満足するようなモデルとして簡単な単純ばりと片持ばりを考えた。この単純ばりと片持ばりの2つのモデルを用いて衝撃載荷実験を行い、衝撃曲げエネルギー吸収能を実験的に求め、さらに2質点系モデルを用いた衝撃応答解析を行い、計算により衝撃エネルギー吸収能を求め衝撃曲げエネルギー吸収能を推定する手法を提案した。

本年度は、昨年度の実験で生じた問題点を明かにするための補足実験を行い、衝撃曲げエネルギー吸収能の推定方法の検討を行った。さらに、実際の鋼管製砂防構造物の破壊形態がせん断破壊に近いと考えられることから衝撃せん断力が作用する場合の鋼管構造物の衝撃せん断耐力および衝撃せん断エネルギー吸収能を求める必要がある。その基礎的段階として、昨年度用いた片持ばりに衝撃せん断力が作用する場合の衝撃せん断耐力、せん断応答および衝撃せん断エネルギー吸収能を実験的に求め、鋼管構造物の耐衝撃設計法を検討するための基礎資料を得ることを目的とした。

実験の種類と目的を表 1.1 に示す。

表 1.1 実験の種類及び目的

実験の種類		目 的
補 足 実 験	片持ばりの 衝撃載荷実験	昨年度は片持ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能よりも過剰の衝突エネルギーを加えて、片持ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能を求めたが、本実験では片持ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能と同等の衝突エネルギーを加え、努めて他の逸散エネルギーを小さくして限界衝撃エネルギー吸収能を実験的に求める。また、昨年度測定できなかった荷重が0になるまでの荷重応答および変位応答を求めて、昨年度の実験で求めた衝撃曲げエネルギー吸収能と比較し、衝撃曲げエネルギー吸収能の算定法について検討する。
	単純ばりの 衝撃載荷実験	昨年度は単純ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能に比較すると過剰なエネルギーを加えており、減衰等の逸散エネルギーが大きく実験で求めた衝撃曲げエネルギー吸収能に逸散エネルギーの影響が含まれていると考えられるので本年度の実験では、昨年度求めた衝撃曲げエネルギー吸収能と同等の衝突エネルギーを加えて衝撃曲げエネルギー吸収能を求める。昨年度の実験で径厚比の影響により衝撃曲げエネルギー吸収能が変化することから局部エネルギー吸収能は無視できないと考えられ、本年度は径厚比の影響をより詳しく調べるために鋼管径が大きく肉厚の薄い薄肉管を試験体として用い、これに横衝撃を加えて衝撃曲げエネルギー吸収能を求める。
	衝撃めり込み 実験	衝撃実験と同じ薄肉管の試験体を用いてはりとしての応答をしないように試験体の下部を剛な固定床に設置して横衝撃を加え衝撃荷重と残留めり込み量を求め局部エネルギー吸収能を推定する。あわせて、静的めり込み実験を行い薄肉管の静的載荷荷重と局部めり込み量の関係を実験的に求め、局部変形によるエネルギー吸収能を算定する。
静的せん断実験		昨年度用いた片持ばり試験体を用いて、荷重載荷位置を固定端に近くすることによりせん断力が卓越する荷重条件を設定して、片持ばりに静的せん断力が作用する場合のせん断耐力およびせん断変形およびせん断エネルギー吸収能を実験的に求める。また載荷速度の影響がせん断耐力あるいはせん断エネルギー吸収能に及ぼす影響を調べるために載荷速度を変化させて動的せん断耐力およびせん断エネルギー吸収能を求める。
衝撃せん断実験		静的せん断実験に用いた試験体に実験条件を同じくして衝撃せん断荷重が作用する場合の衝撃せん断耐力および衝撃せん断エネルギー吸収能を実験的に求める。 この際、載荷速度が衝撃せん断耐力および衝撃せん断エネルギー吸収能に及ぼす影響を調べ、静的の場合と比較し載荷速度の影響を明らかにする。

2. 実験の概要

2.1 実験の種類

本研究は、衝撃力に対する鋼管ばりの限界性能（耐力、変形、エネルギー吸収能）について調べることを目的としている。このため実験では昨年度の衝撃曲げ破壊実験の補足実験に加え、本年度はせん断破壊実験を主体として鋼管径の相違および衝撃载荷速度の相違等が限界性能に及ぼす影響について検討したものである。また、ダムの耐衝撃設計に資する観点からは、衝撃に対する動的応答の情報を合理的に盛り込んだ上で従来の静的設計法と同様の形で取り扱えることが望ましいと考え、静的実験を併せて行い、衝撃载荷に対する結果との比較や静的取扱いの可能性等について検討を行った。

本研究では、鋼製スリットダムの1つに巨礫が衝突して構造物を破壊に至らしめる場合を想定している。したがって、実験に用いた試験体は昨年度同様鋼製スリットダム構造物の一部と全体を単純な形にモデル化した鋼管はり部材である。実際の構造物ではより複雑な構造条件と载荷条件の制約を受けるが、構造物と外力の関係を基本的に調べ、構造物が有する強度・変形およびエネルギー吸収能を推定することを目的とすることから、単純ばりと一端固定の条件を付した片持ばりにモデル化したものである。

2.2 実験条件

本年度は昨年度の問題点を明かにするための補足実験として単純ばりおよび片持ばりの衝撃载荷実験を行なった。単純ばりの補足実験は鋼管の径厚比が耐力・変形およびエネルギー吸収能に及ぼす影響を調べるために行なったものである。片持ばりの補足実験は昨年度測定できなかった破壊に至るまでの荷重応答および変位応答を測定し、片持ばりの衝撃エネルギー吸収能の検討をするために行なったものである。

本年度の研究の主目的は、実際の鋼製砂防ダムがせん断的な破壊形態を示していることから、せん断力に対する鋼管の耐力・変形およびエネルギー吸収能について調べることである。このため昨年度用いた片持ばりのモデルを用いて静的せん断実験および衝撃せん断実験を行なった。

静的载荷実験は、衝撃载荷実験に対する場合との比較検討のために行なうものであり、主として静的せん断耐力およびせん断吸収エネルギーを求めることを目的とした。

鋼管径および衝突速度が衝撃せん断耐力、衝撃せん断エネルギー吸収能に及ぼす影響を調べるため、鋼管径と衝突速度をパラメータとして衝撃せん断実験を行なった。

実験の種類と実験ケースを表2.1に示す。

表 2.1 実験ケース一覧表

実験の種類	鋼管径 φ (mm)	載荷速度 衝突速度 (m/s)	載荷位置 (cm)	CASE No.	測定項目	実験個数
片持ばりの 衝撃載荷実験	48.6	3.5	固定端から 90.0	CD-1	衝撃荷重 衝突点変位 ひずみ×2	6
		4.0		CD-2		
	60.5	3.8		CD-3		
		4.2		CD-4		
	89.1	4.0		CD-5		
		5.0		CD-6		
単純ばりの 衝撃載荷実験	89.1	3.5	スパン中央	SD-1	衝撃荷重 衝突点変位 ひずみ×2 残留めり込み量	6
		5.0		SD-2		
		5.5		SD-3		
	101.6	6.0		SD-4		
		7.0		SD-5		
		8.0		SD-6		
めり込み実験	101.6	6.0	スパン中央	DL-1	荷重, めり込み量	1
片持ばりの 静的せん断実験	48.6	-	固定端から 20.0	CS-1	静的荷重 載荷点変位 自由端変位 ひずみ×2	8
		2.0		CS-2		
		4.0		CS-3		
	60.5	-		CS-4		
		2.0		CS-5		
		4.0		CS-6		
	89.1	-		CS-7		
		2.0		CS-8		
		4.0		CS-9		
片持ばりの 衝撃せん断実験	48.6	4.0	固定端付近	CSD-1	衝撃荷重 衝突点変位 自由端変位 ひずみ×2	6
		8.0		CSD-2		
	60.5	4.0		CSD-3		
		8.0		CSD-4		
	89.1	4.0		CSD-5		
		8.0		CSD-6		

3. 片持ばりの衝撃載荷実験

昨年度行なった片持ばりの衝撃実験における問題点として以下の点が挙げられる。

- ① 片持ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能と比較して過剰の衝突エネルギーを与えているため、減衰力や慣性力によって逸散されるエネルギーが吸収能の中に含まれていることが考えられる。
- ② 衝撃荷重が0になる（すなわち破壊に至る）までの荷重応答および変位応答が測定されていないため、真の衝撃曲げエネルギー吸収能を求められなかった。

以上の2項目の問題点を明かにするため補足実験として衝撃載荷実験を行った。改善点として測定時間を昨年度より長くし、片持ばりが破壊に至るまでの荷重応答、変位応答を測定した。また、衝突エネルギーを昨年度求めた衝撃曲げエネルギー吸収能とほぼ同等になるようにして衝撃荷重を加え、逸散エネルギーが努めて小さくなるようにして片持ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能を求め、昨年度求めた衝撃曲げエネルギー吸収能と比較し、はりが破壊に至るまでの衝撃曲げエネルギー吸収能を正確に求めることを目的とした。

3.1 実験条件

実験に用いたパラメータは昨年同様鋼管径および衝突速度である。実験条件を表3.1に示す。

表 3.1 実験条件一覧表

CASE No	鋼管径 φ (mm)	衝突速度 V (m/sec)	落下高さ H (m)	重錘重量 W (kgf)	測定項目
CD-1	48.6	3.5	0.63	150.0	1. 衝撃荷重～時間
CD-2		4.0	0.82		
CD-3	60.5	3.8	0.74		2. 衝撃点変位 ～時間
CD-4		4.2	0.90		
CD-5	89.1	4.0	0.82		3. ひずみ～時間
CD-6		5.0	1.28		
合 計		6 ケース (試験体 6 体)			

3.2 実験設備

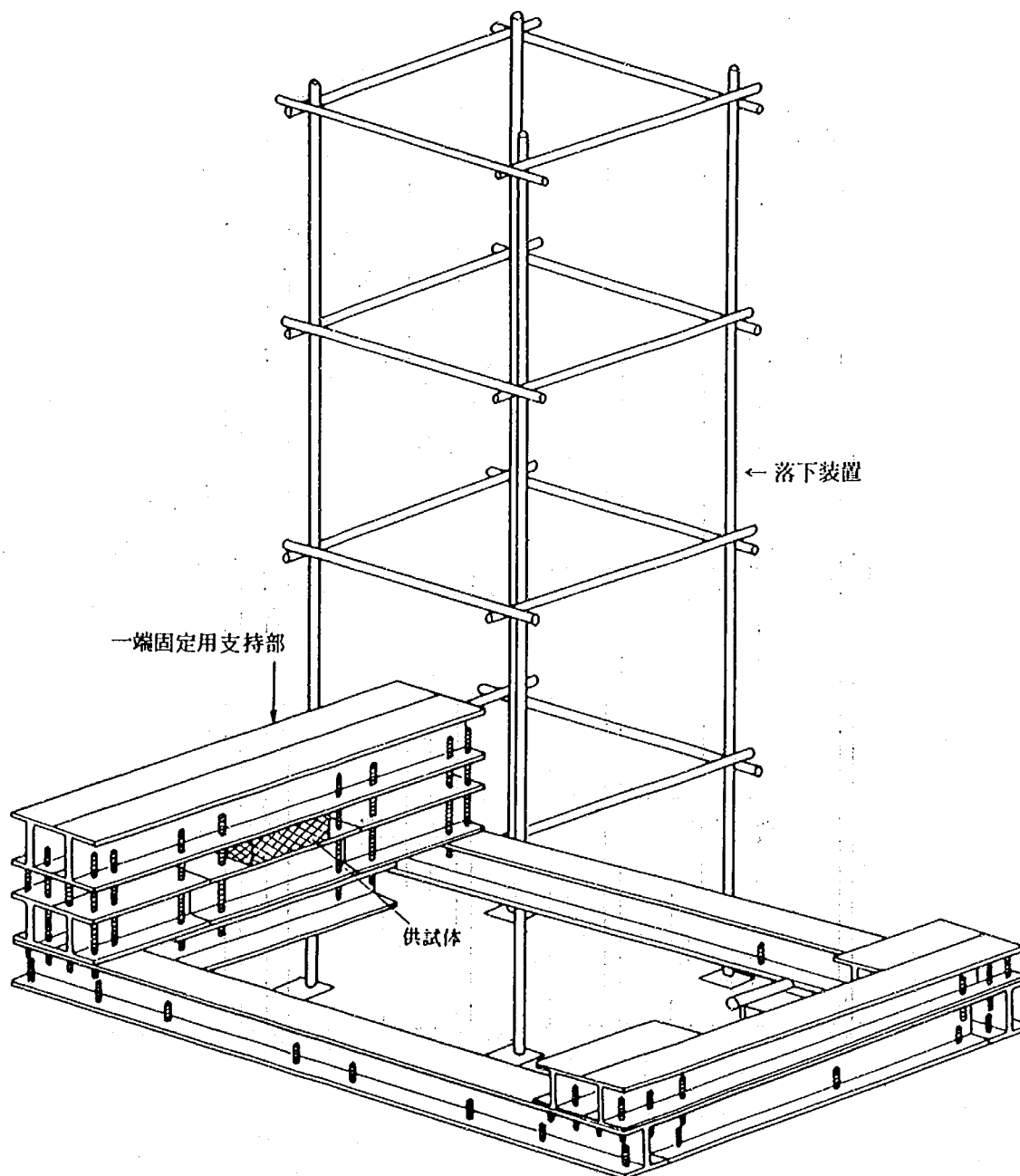
(1) 載荷装置

載荷装置は図3.1に示す昭和61年度に製作した衝撃載荷装置を用いた。載荷装置は図3.1(a), (b)に示すように試験体を固定する支点部、これを支える架台および落錘装置からなる。架台はアンカーボルト24本で床に固定されており、この架台上に一端固定用の支点部をボルトナットで固定する構造となっている。支点部は図3.2に示すように試験体の一端のコンクリートで固めた部分を上下からH型钢で挟み込みこれをボルトナットで固定し、固定端の条件を満足するような構造としたものである。落錘装置は足場パイプで1m×1mの正方形で高さ4mの枠組みを組みその内部に落錘用のガイドを取り付け、重錘が自由落下する際、所望の位置に落下するようにしたものである。重錘は電磁石によ

りつり上げられるようにし、電磁石をウィンチで巻き上げることにより重錘を吊り上げ、重錘の落下は電磁石のスイッチの開閉により行なった。

(2) 測定装置

本実験の測定項目は、衝突点の衝撃荷重～時間関係、衝突点変位～時間関係および固定端付近のひずみ～時間関係である。図 3.4 に計測装置の概要を示す。計測は、重錘下部に取り付けたロードセルにより衝突点の衝撃荷重を、固定端から90cmの位置（衝突点）の変位を光学式変位計で測定した。また、ひずみゲージによりひずみを測定した。データサンプリング用のトリガーとして加速度を用いた。



図－ 3.1(a) 実験装置の概要

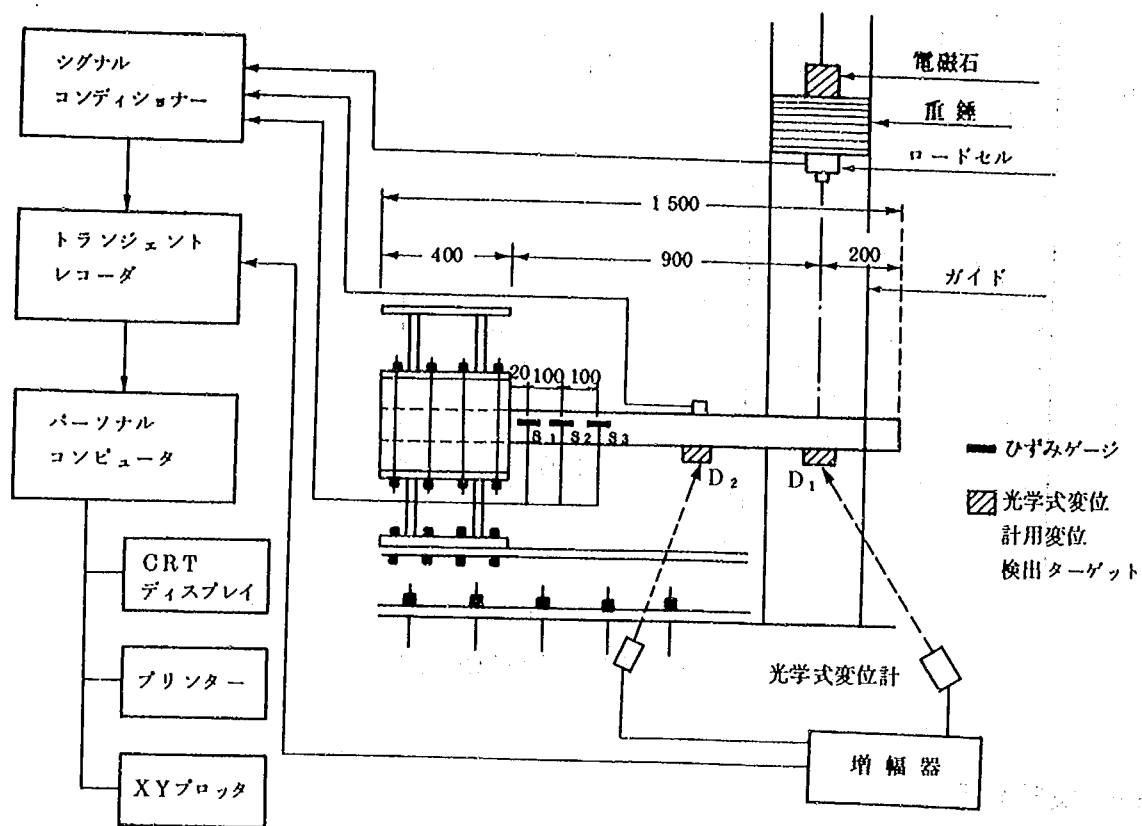


図- 3.2 計測装置の概要

3.3 試験体

実験に用いた試験体は昨年度と同じ鋼管で、鋼種 STK-41 の $\phi 48.6$ 、 60.5 、 89.1 mm の 3 種類である。鋼管の諸元を表- 3.3 に示す。

試験体は図- 3.3 に示すように全長 150 cm の鋼管の一端を厚さ 20 cm、幅 30 cm、長さ 40 cm の大きさにコンクリートで成形し固定端用の固定部を取り付けたものである。

表- 3.3 試験体の諸元

鋼管径 ϕ (mm)	48.6	60.5	89.1
肉 厚 t (mm)	3.2	3.2	3.2
降伏応力 (kg/cm ²)	3,600	3,900	3,900
引張強さ (kg/cm ²)	4,600	4,700	4,600
伸 び (%)	44	52	28
断 面 積 A (cm ²)	4.56	5.76	8.64
断面 2 次モーメント I (cm ⁴)	11.8	23.7	79.8
塑性断面係数 Z_p (cm ³)	6.6	10.6	23.7
単位重量 W (kg/m)	3.58	4.52	6.77

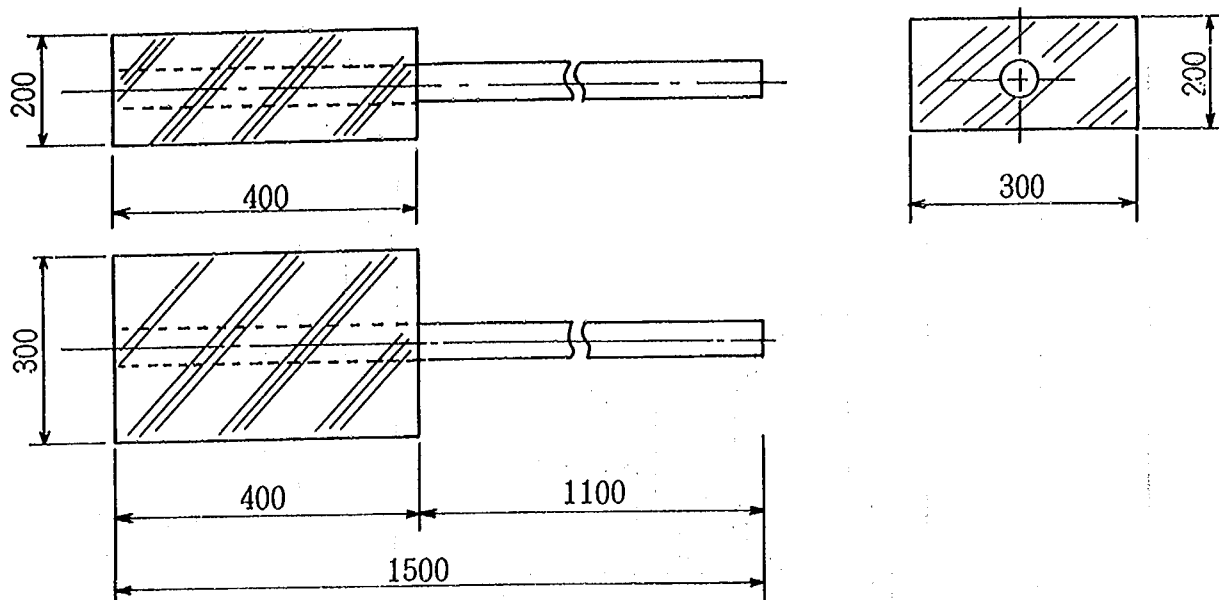


図-3.3 片持梁試験体

3.4 実験結果

(1) 荷重, 衝突点変位～時間曲線

計測された荷重～時間曲線（以下 $P \sim t$ 曲線）, 衝突点変位～時間曲線（以下 $\delta \sim t$ 曲線）の例を図-3.4に, 表-3.4に最大荷重 (P_{max}), 最大荷重までの時間 (T_0), 荷重持続時間 (T_c), 変位速度 (δ) を示す。図, 表より以下の特性が認められる。

- ① 図-3.4の $P \sim t$ 曲線の形状は, 昨年度と同様の形状で, 衝突直後にすどいピークが発生し, 振動しながらある一定値に収束し, 急激に低下している。振動の原因としては, はりの慣性力に密接に関連するはりの加速度波形と $P \sim t$ 曲線の波形がほぼ等しいことから, はりの慣性力, および局部応答と考えられる。また, 昨年同様, 荷重振動の中心は, 概ね静的最大荷重値に等しい。
- ② 昨年度不明であった荷重が0となるまでの時間（以下荷重持続時間 T_c ）を表-3.4に示す。片持ばりの固有周期 T と T_c を比較すると, $T_c/2T > 1$ となり, 強制振動である。
- ③ 荷重が最大に達しても, 変位応答は始まっていない。これは, 最大荷重は局部応答, はりの慣性力によるものであるため, はりの変位は生じないものと考えられる。

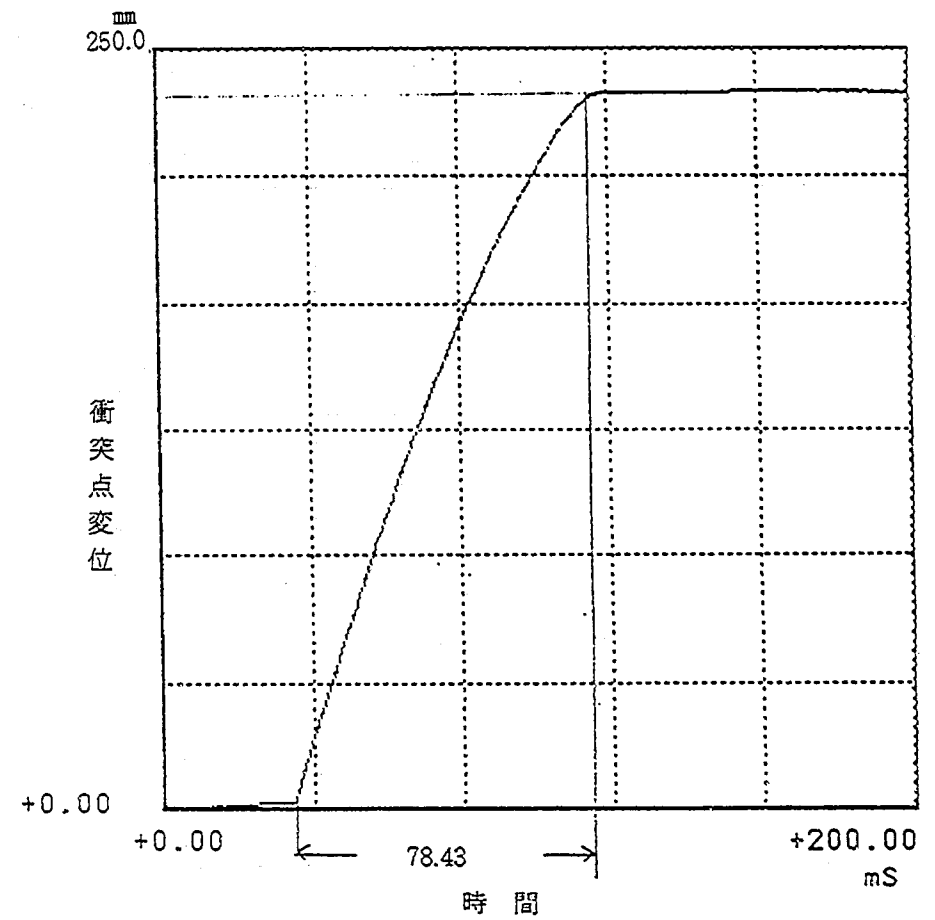
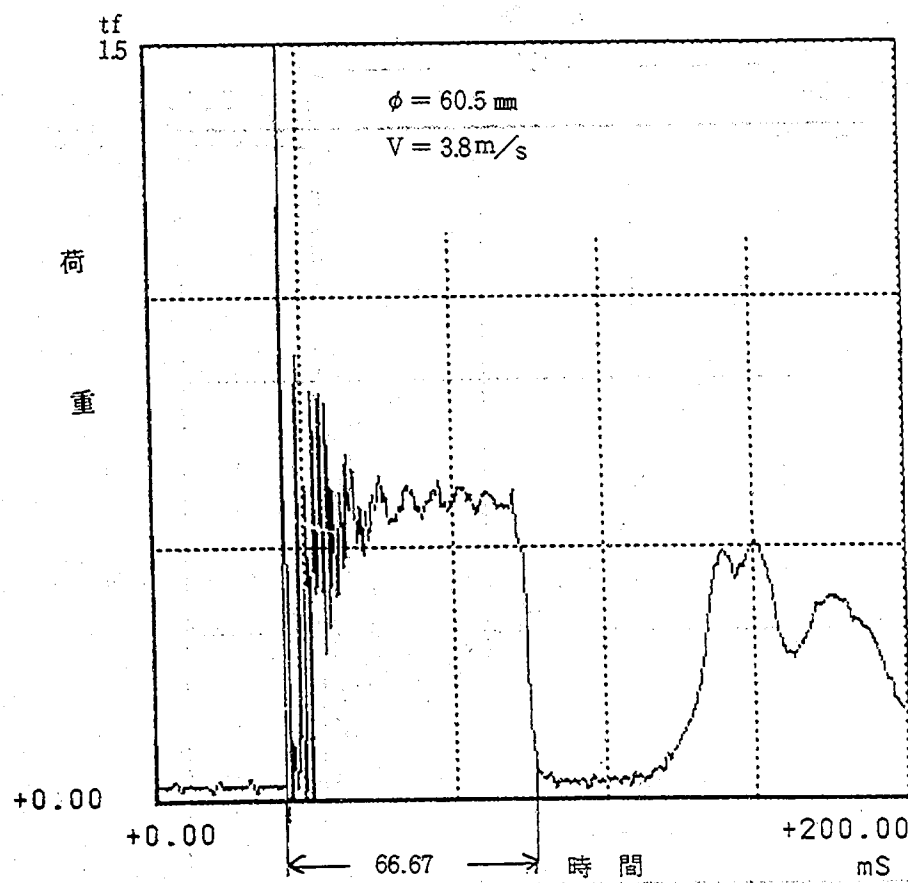


図 3.4(a) 荷重・衝突点変位～時間曲線
(復元力がなくなったケース)

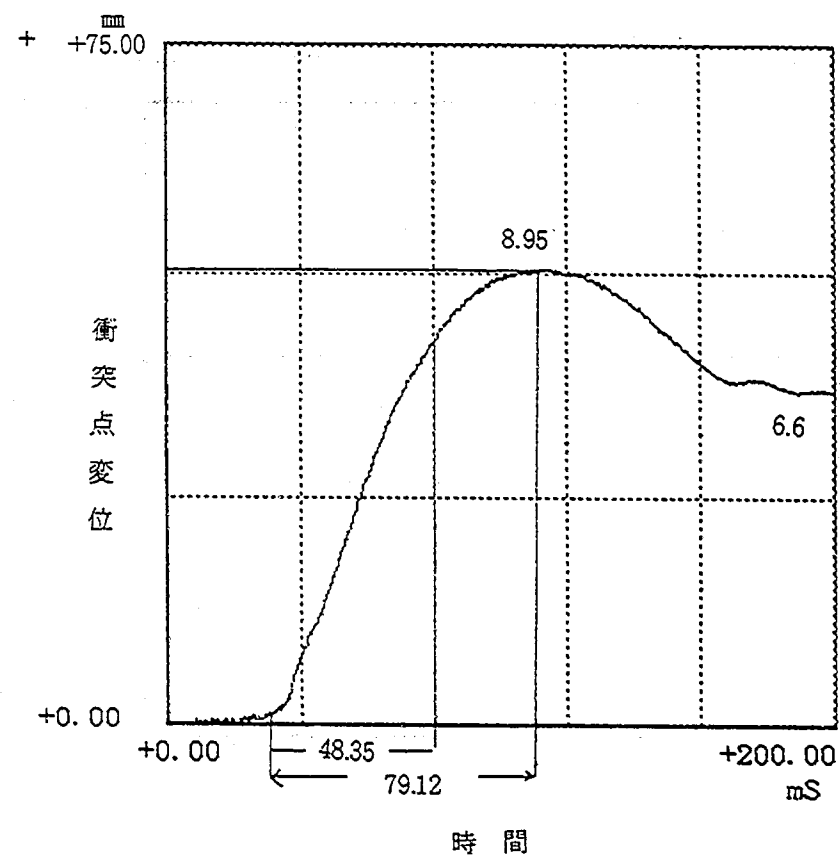
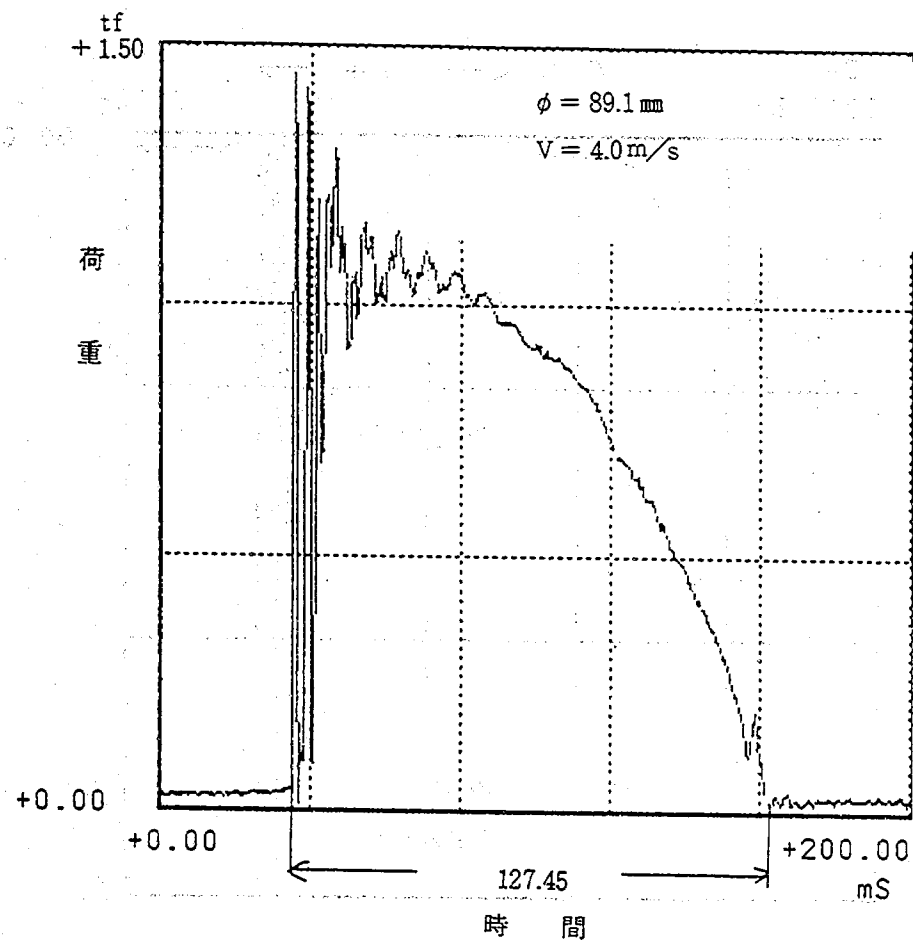


図 3.4(b) 荷重・衝突点変位～時間曲線
(復元力が残ったケース)

- ④ 昨年度のP～t曲線と本年度の実験で得られたP～t曲線で大きく異なっているのは、図－3.4(b)に示した $\phi 89.1$ V = 4 m/s の場合の例で、図－3.4(b)の荷重波形は、荷重が一定値に収束した段階（以下「収束荷重」という。）に達した後、他のケースと異なり荷重が、緩やかに減少する。また、 δ ～t曲線も最大変位に達した後、変形が減少している。これは、昨年度は、完全に破壊するエネルギーを与えて、全ケース破壊させたが、本年度は、これを破壊する限界のエネルギーを与えているため、塑性変形はおこしているものの、完全に破壊していないためである。したがって、はりの復元力は残っている。
- ⑤ 最大荷重に達するまでの時間 T_o は、管径によらずほぼ一定の値を示している。これは、衝突速度が比較的遅い範囲（昨年度に比べ）なので、局部応答の局部変形量が小さいため、局部変形に対する剛性は変形量が微小であれば、ほとんど管径によらず大きな差がないため、ほぼ一定となると考えられる。
- ⑥ 図－3.5に変位速度と鋼管径の関係を示した。図より昨年同様管径の大きいものほど変位速度は小さくなる傾向を示す。これは、はりの剛性が管径とともに大きくなるため、変形量が小さくなるためである。

図－3.6に変位速度と載荷速度（衝突速度）の関係を示す。図中には参考のため、昨年度の実験値もあわせて示した。図より、変位速度 $\dot{\delta}$ は載荷速度が速くなるにつれ、速くなる傾向を示している。

表－3.4 実験結果（最大荷重および載荷速度）

CASE No.	鋼管径 ϕ (cm)	衝突速度 V (m/s)	重錘重量 W (kg f)	載荷位置 (cm)	最大荷重 Pmax (tf)	荷重持続時間 Tc (msec)	最大荷重までの時間 T_o (msec)	変位速度 (衝突点) $\dot{\delta}$ (m/s)
CD-1	48.6	3.5	150.0	90.0	1.06	80.31	0.60	1.46
CD-2	48.6	4.0	150.0	90.0	1.17	98.04	0.40	2.54
CD-3	60.5	3.8	150.0	90.0	1.52	66.67	0.40	2.86
CD-4	60.5	4.2	150.0	90.0	1.49	51.96	0.60	2.21
CD-5	89.1	4.0	150.0	90.0	1.45	127.45	0.40	2.29
CD-6	89.1	6.0	150.0	90.0	2.15	39.22	0.40	2.92

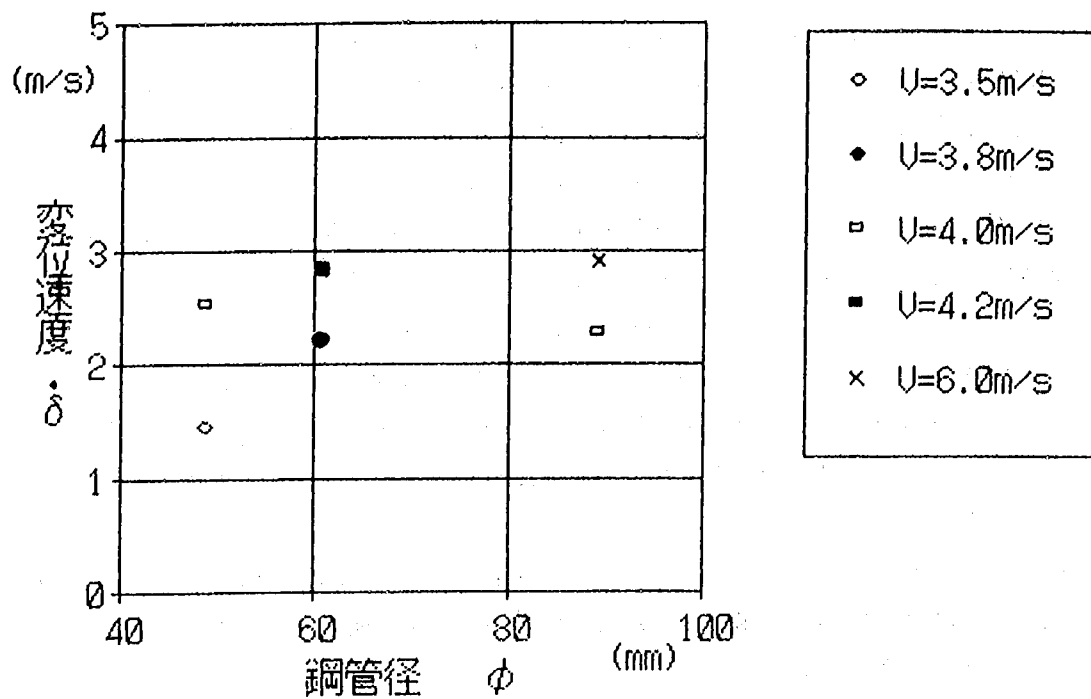


図-3.5 変位速度 $\dot{\delta}$ ~ 鋼管径

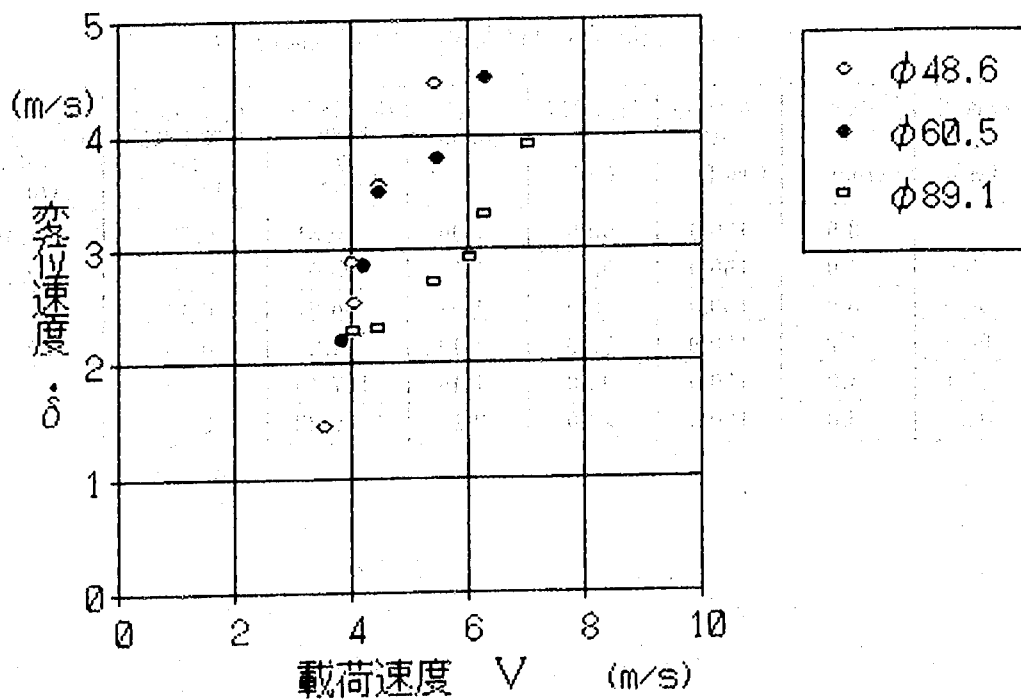


図-3.6 変位速度 ~ 载荷速度

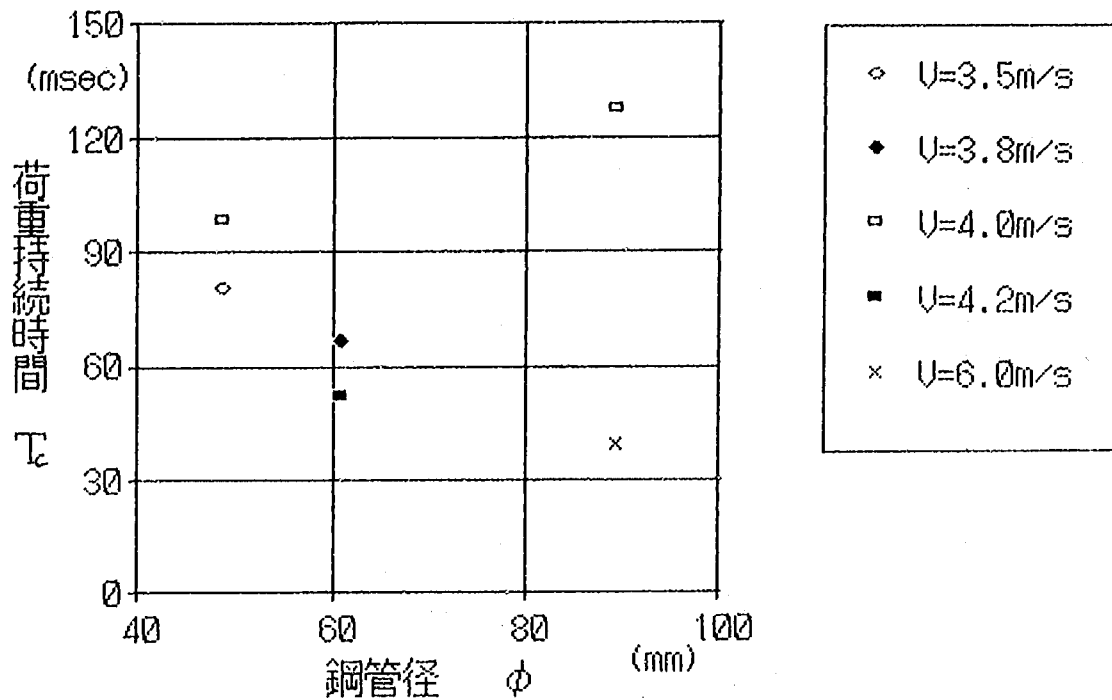


図- 3.7 荷重持続時間～鋼管径 ϕ

これは、載荷速度（衝突速度）が速くなるにつれ、衝突エネルギーが大きくなり、はりの復元力として抵抗する力（または、エネルギー）とはりの運動によって消費するエネルギーによりこの衝突エネルギーを吸収すると考えられるが、はりの復元力により吸収するエネルギーは、載荷速度の増大にともない、ひずみ速度効果等により若干は大きくなるが、ほぼ一定と考えられる。したがって、復元力で吸収するエネルギーを除いた衝突エネルギーははりの運動エネルギーとして消費されるため、衝突速度が速くなるにつれ、はりの変位速度も大きくなる。

なお、変位速度 $\dot{\delta}$ は、 $\delta \sim t$ 曲線の平均勾配 ($\frac{2\delta}{t}$) として求めた。

⑦ 図- 3.7, 3.8 に鋼管径と荷重持続時間の関係および載荷速度と荷重持続時間の関係を示す。

図- 3.7 より、荷重持続時間 T_c は鋼管径 ϕ が大きくなるにしたがい、小さくなる傾向を示す。これは、固定端部での局部座屈が生じやすい ϕ の大きい場合、 T_c が短くなるためである。

ϕ 89.1, $V = 4$ m/s の場合は完全に破壊せず、局部座屈等の現象が生じないため、 T_c が長い。

図- 4.8 に載荷速度 V と T_c の関係を示したが、破壊に至っている場合は、速度が速くなるにつれ、 T_c は短くなる。これは、載荷速度 V が速くなると変位速度も速くなるため、終局状態に速く達するため、 T_c が短くなると考えられる。

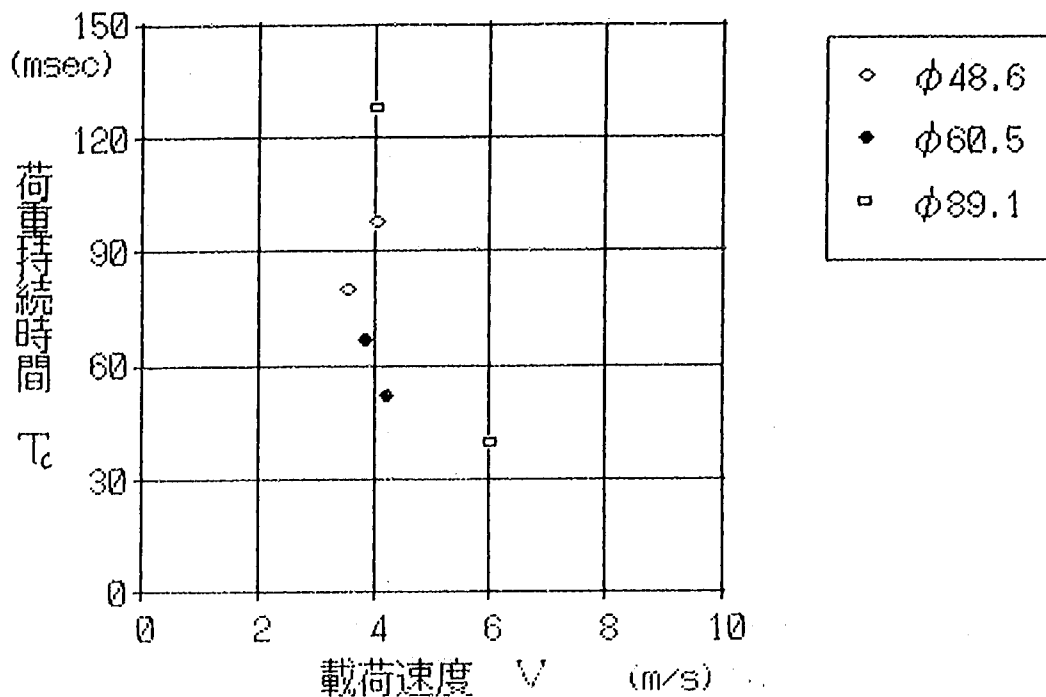


図-3.8 荷重持続時間 T_c ～ 載荷速度 V

(2) 荷重～衝突点の変位曲線

測定された $P \sim t$, $\delta \sim t$ 曲線から t 軸を消去して荷重～変位曲線 ($P \sim \delta$ 曲線) を作成した。その一例を図-3.9に示す。図-3.9より以下の特性が認められる。

- ① $P \sim \delta$ 曲線は、 $P \sim t$ 曲線の荷重波形とほぼ同様の形状で、シャープな立上がりを持ち、振動する波形となる。これは、 δ が時間とともに単調増加するためである。

$\phi 89.1$, $V = 4 \text{ m/s}$ の破壊していないケースでは、荷重の減少とともに変位も減少している。この $P \sim \delta$ 曲線において荷重が0になったときの変形量が塑性変形 (残留変形) 量である。重錘の運動エネルギーは、この塑性変形量とほりの運動エネルギーにより消費されたことになる。

- ② 図中に静的実験で得られた $P \sim \delta$ 曲線を点線で示した。図より衝撃の $P \sim \delta$ 曲線は、静的の $P \sim \delta$ 曲線を中心として振動している形状となることから、衝撃エネルギー吸収能をこの衝撃実験で得られた $P \sim \delta$ 曲線を用いて求めることにする。

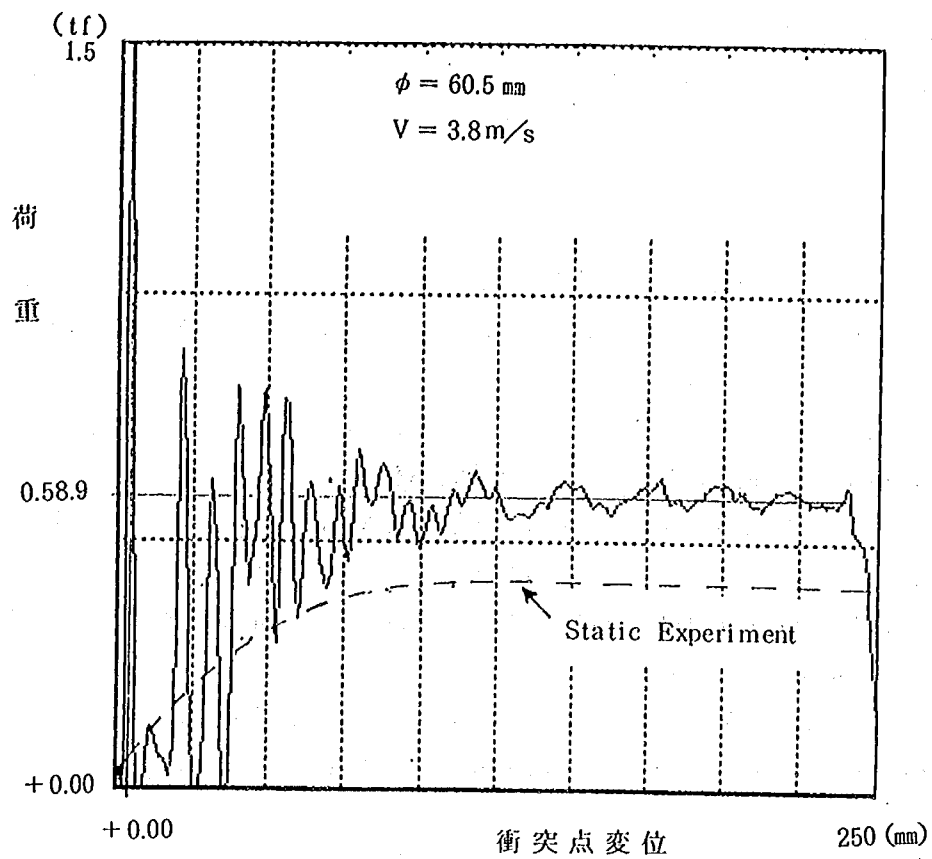


図- 3.9 (a) 荷重～変位曲線
(復元力がなくなったケース)

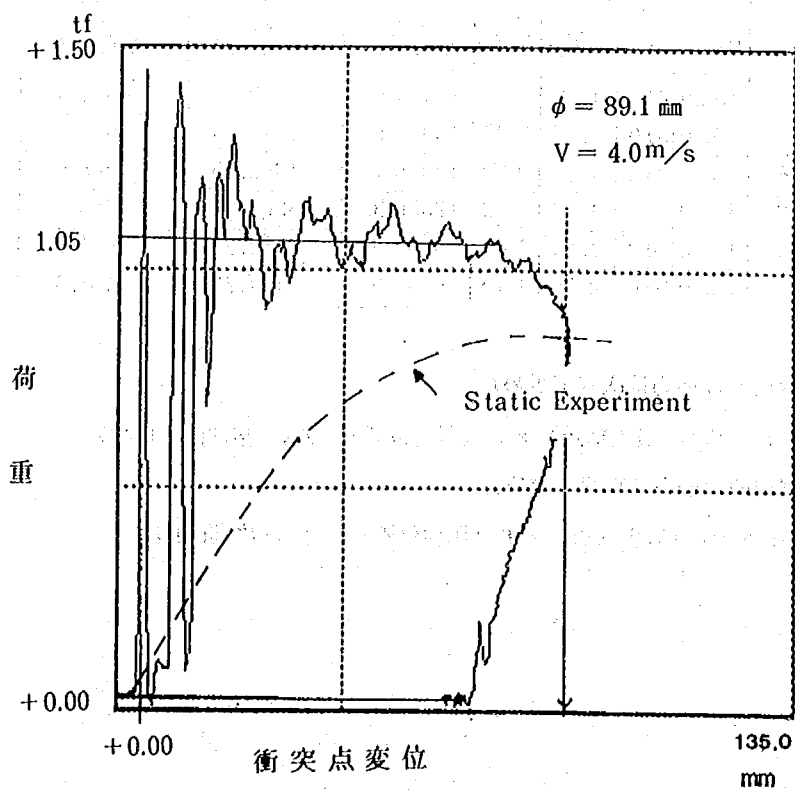


図- 3.9 (b) 荷重～変位曲線
(復元力が残ったケース)

(3) 最大荷重, 収束荷重

最大荷重 P_{max} は $P \sim \delta$ 曲線における最大値を, 収束荷重 P_c は, $P \sim \delta$ 曲線において荷重の大きな振動が消え, ほぼ一定となったときの値と定義する。

表-3.5 に P_{max} , P_c と実験条件を, P_{max} と ϕ および V の関係を図-3.10, 図-3.11 に P_c と ϕ , および V の関係を図-3.12, 図-3.13 に示す。図より以下の特性が認められる。

- ① P_{max} は, ϕ 48.6 の場合を除き, ϕ と無関係ではほぼ一定である。昨年度の実験結果では ϕ 48.6 mm, $V = 4.0$ m/s の場合の P_{max} の平均値は, 約 1.5 (tf) 程度であり, 本実験の ϕ 60.5, ϕ 89.1, $V = 4.0$ m/s の場合の P_{max} とほぼ等しい。

ϕ 48.6 の P_{max} が小さくなった原因として, 本年度用いた鋼管のうち, ϕ 48.6 のみが ϕ 60.5, ϕ 89.1 に比べ降伏応力, 引張応力が小さいためと考えられる。

P_{max} は, 静的な最大荷重 (耐力) の 2 ~ 4 倍と大きく, はりそのものの耐力ではなく, 局部応答により生じる荷重と考えられる。局部の剛性は, ϕ が大きくなるほど小さくなるが, 局部の変形量が微小範囲であれば, ϕ による局部の剛性の差は非常に小さく, ϕ にかかわらず, ほぼ一定の値を示すと考えられる。

- ② 図-3.11 より P_{max} は V が速くなるにつれ, 大きくなる傾向を示す。これは, V が速くなるにつれ慣性力が大きくなり, 局部応答の変形量が大きくなるためである。

表-3.5 衝撃曲げ応力

CASE No.	鋼管径 ϕ (cm)	衝突速度 V (m/s)	重錘重量 W (kgf)	載荷位置 (cm)	最大荷重 P_{max} (tf)	収束荷重 P_c (tf)	衝撃曲げ応力 σ_{max} (kgf/cm ²)	収束曲げ応力 σ_c (kgf/cm ²)	静的曲げ応力 σ_s (kgf/cm ²)	降伏応力 σ_y (kgf/cm ²)
CD-1	48.6	3.5	150.0	90.0	1.06	0.35	14454.5	4772.73	4621.0	3900.0
CD-2	48.6	4.0	150.0	90.0	1.17	0.35	15954.5	4772.73	4621.0	3900.0
CD-3	60.5	3.8	150.0	90.0	1.52	0.59	12905.7	4992.45	4245.5	3900.0
CD-4	60.5	4.2	150.0	90.0	1.49	0.59	12650.9	5000.94	4245.5	3900.0
CD-5	89.1	4.0	150.0	90.0	1.45	1.05	5506.3	3987.34	3481.0	3900.0
CD-6	89.1	6.0	150.0	90.0	2.15	1.10	8164.6	4177.22	3481.0	3900.0

注) 1) 衝撃曲げ応力は次式で求めた。

$$\sigma_{max} = P_{max} (\text{最大荷重}) \times \ell (\text{載荷位置}) / Z_p (\text{塑性断面係数})$$

2) 収束曲げ応力は次式で求めた。

$$\sigma_c = P_c (\text{収束荷重}) \times \ell (\text{載荷位置}) / Z_p (\text{塑性断面係数})$$

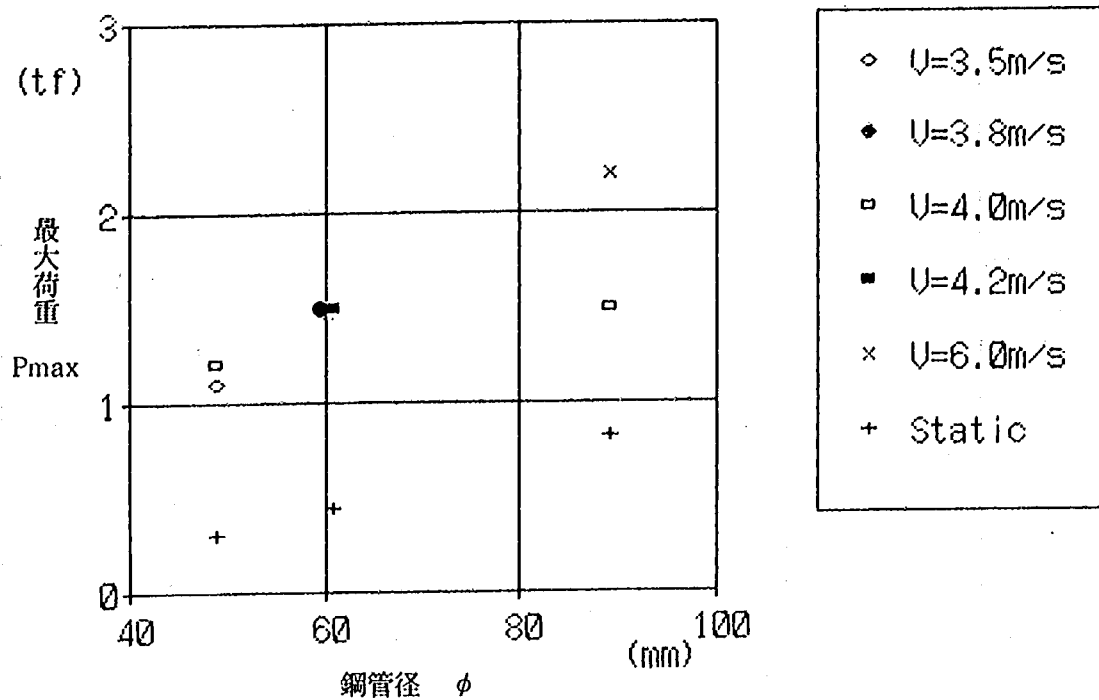


図-3.10 最大荷重～鋼管径

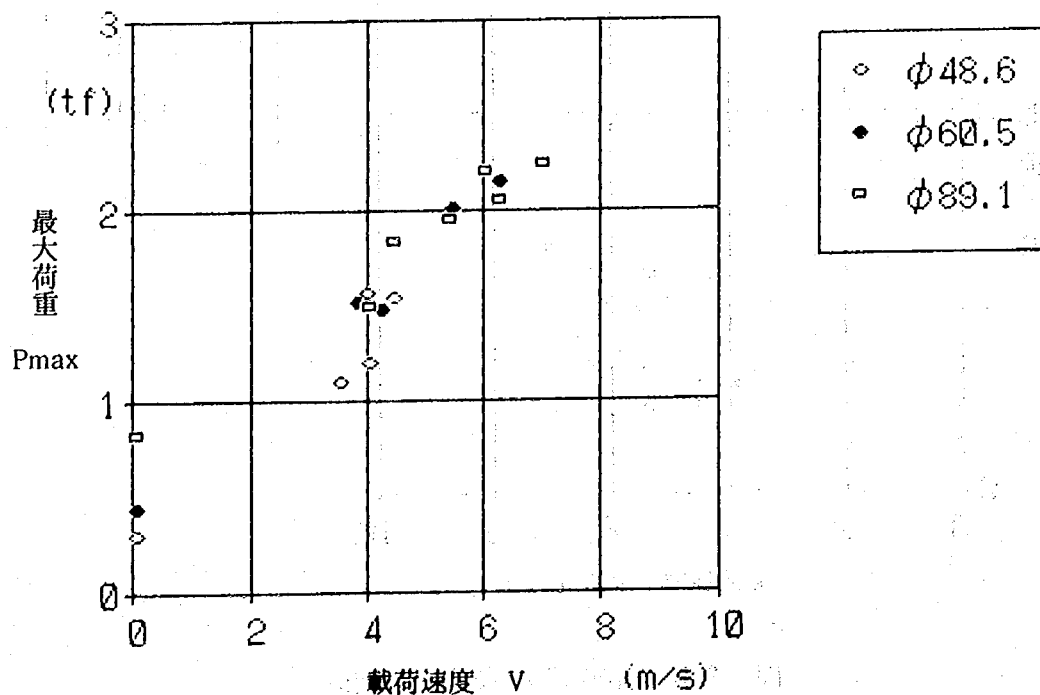


図-3.11 最大荷重～载荷速度

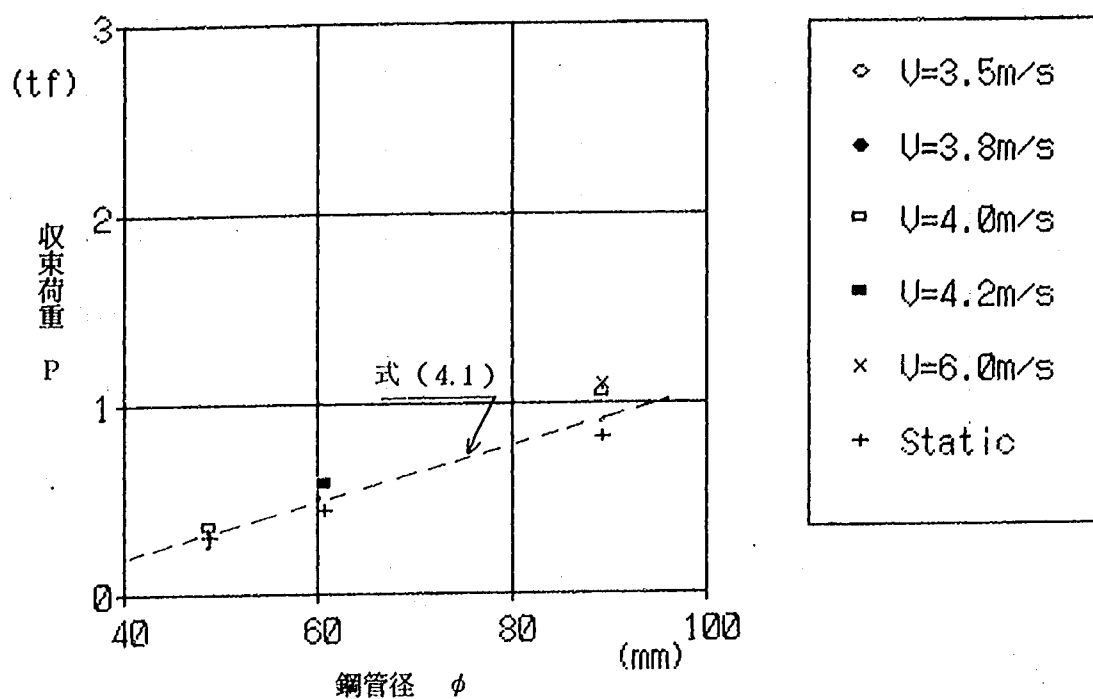


図 - 3.12 収束荷重～鋼管径関係

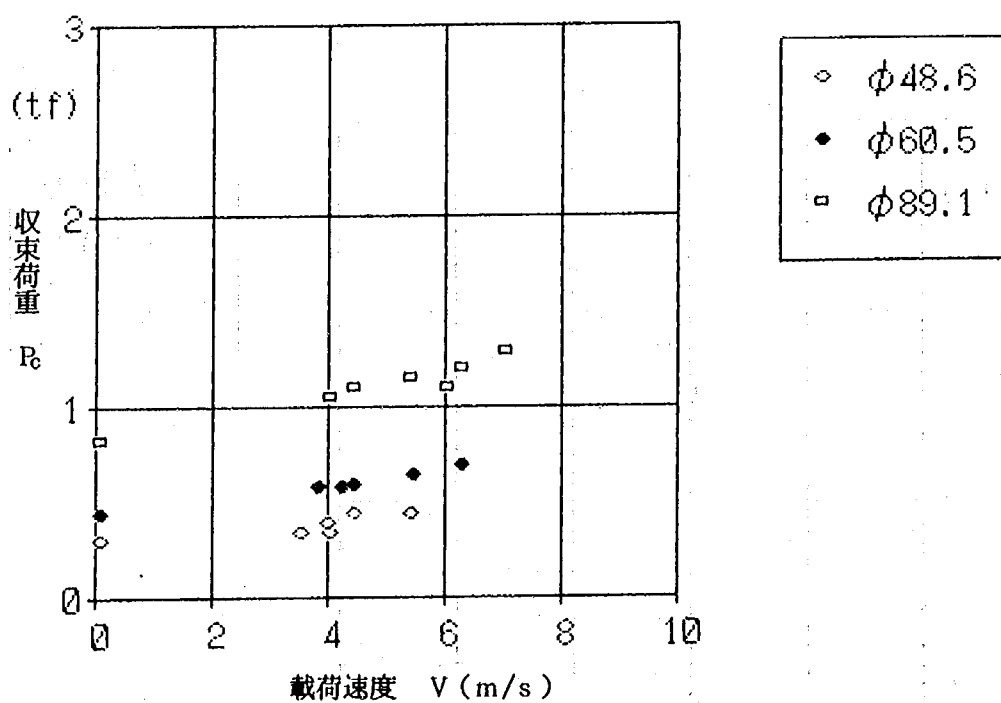


図 - 3.13 収束荷重～載荷速度関係

- ③ 図-3.12より P_c は ϕ とともに大きくなり、ほぼ静的最大荷重に等しいことがわかる。

片持ばりの降伏荷重は、降伏応力を σ_y (kgf/cm²)、荷重作用点までの固定端からの距離を ℓ とし、断面係数を Z_p とすれば

$$P_c = \frac{\sigma_y Z_p}{\ell} \quad (3.1)$$

で求められる。式(3.1)を用いて、 $\ell = 90$ (cm)、 $\sigma_y = 3900$ (kg/cm²) の場合の降伏荷重 P_c を求め、図3.12に点線で示した図より、ほぼ計算値と P_c 、静的最大荷重はほぼ等しい。

計算値に比べ静的実験値が若干小さいのは、固定端部の局部座屈により、断面定数が小さくなるためであり、 ϕ が大きいものほど、すなわち ϕ/t が大きいものほど局部座屈をおこしやすくなるため、静的最大荷重は計算値より小さくなる。

- ④ 図-3.13より P_c は載荷速度とともに大きくなる傾向が認められる。これは、ひずみ速度効果により耐力が上昇しているためと考えられる。
- ⑤ 片持ちばりの実験では、残留局部変形はほとんど生じていないことから、はりの全体応答としてエネルギーを吸収していると考えられるので、実験で得られた $P \sim \delta$ 曲線からエネルギー吸収能を求めて良いと思われる。
- ⑥ 表-3.5に衝撃曲げ応力 (P_{max} のときの曲げ応力) と収束曲げ応力 (収束荷重のときの曲げ応力) を示す。衝撃曲げ応力 σ_{max} は応力 σ_y 、静的曲げ応力 σ_s よりかなり大きくなっていることが認められるが、これは、 P_{max} ははりの耐力とは無関係に局部応答と慣性力によって生じるためである。これに対して、収束曲げ応力 σ_c は、ひずみ速度効果により若干 σ_s より大きい値を示しているが、比較的近い値となっている。また、 σ_c は ϕ が大きくなると逆に小さくなる傾向を示している。これは、 ϕ が大きくなる (ϕ/t が大きくなる) につれ、固定端部の局部座屈により P_c は低下するが、 r_c を算出する上でこの局部座屈による断面係数の低下を考慮せず Z_p は一定として、 σ_c を求めたためと考えられる。

ここで、 r_c は次式で求めた。

$$r_c = \frac{P_c \ell}{Z_p} \quad (3.2)$$

r_c : 収束曲げ応力, P_c : 収束荷重, ℓ : スパン, Z_p : 塑性断面係数

(4) 終局変位

図3.9の $P \sim \delta$ 曲線において、荷重が0になったときの変位を終局変位 δ_u と定義した。

図3.14, 3.15に $\delta_u \sim \phi$ 関係、 $\delta_u \sim V$ 関係を示す。なお、写真-3.1, 3.2に実験後の試験体の状況を示す。

図より下記の特性が認められる。

- ① 図-3.14より、 δ_u は ϕ が大きくなるにつれ、逆に小さくなる傾向を示す。昨年度は、真の δ_u を求めることができなかったため、 δ_u を仮定して求めたが、推定した結果と同様の結果を示しており、昨年度の結果を確かめることができた。

終局変位は、静的解析によれば、次式で求められる

$$\delta_u = \frac{P_c \ell^3}{3EI} = \frac{\sigma_y Z_p}{3EI} \ell^2 \quad (3.3)$$

ここで σ_y : 降伏応力, Z_p : 塑性断面係数, I : 断面 2 次モーメント, E : ヤング率, ℓ : 荷重荷位置までの固定端からの距離。

式 3.3 より, E , σ_y , ℓ は定数で ϕ にかかわらず一定であるから δu は, (Z_p/I) の関数である。 Z_p は ϕ の 3 次関数であり I は ϕ の 4 次関数であるから, δu はほぼ ϕ とともに小さくなる傾向を示すことがわかる。

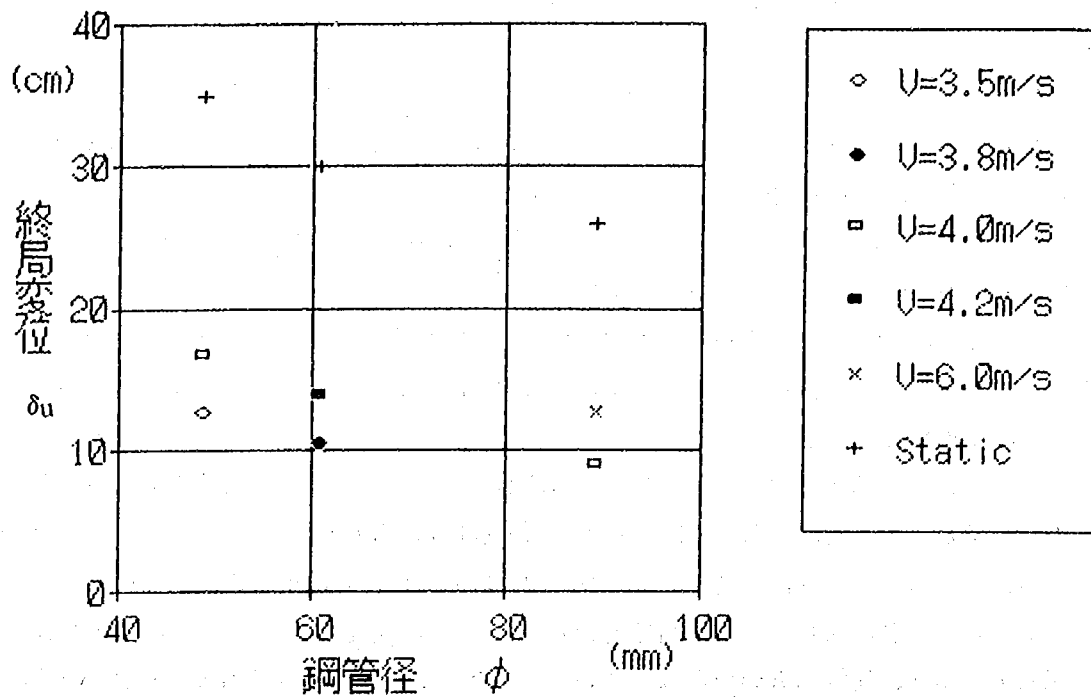


図 - 3.14 終局変位関係

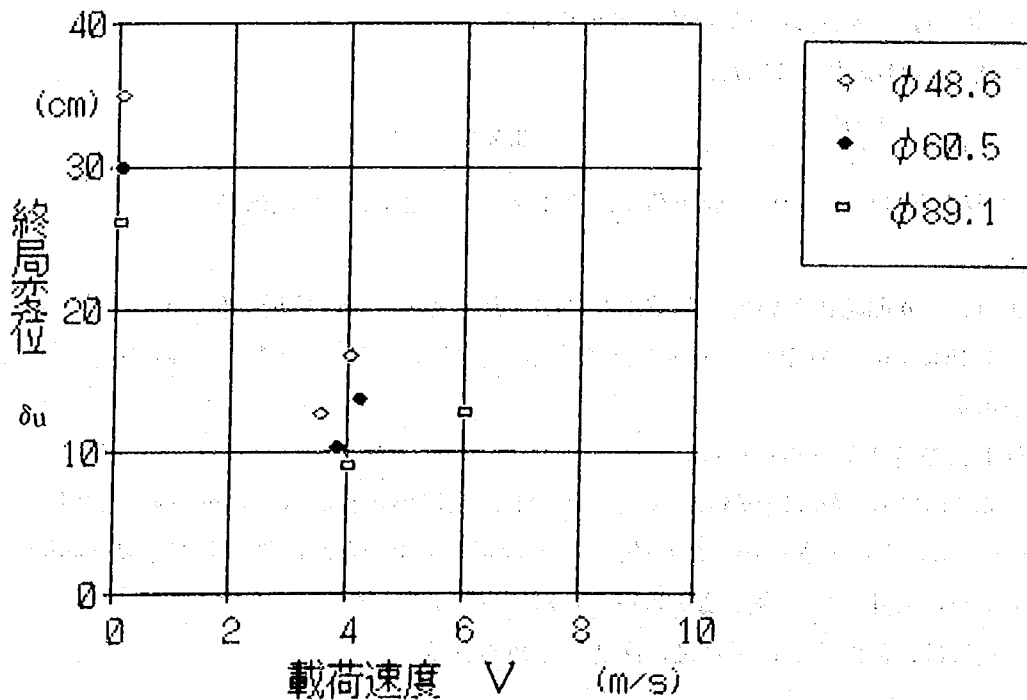
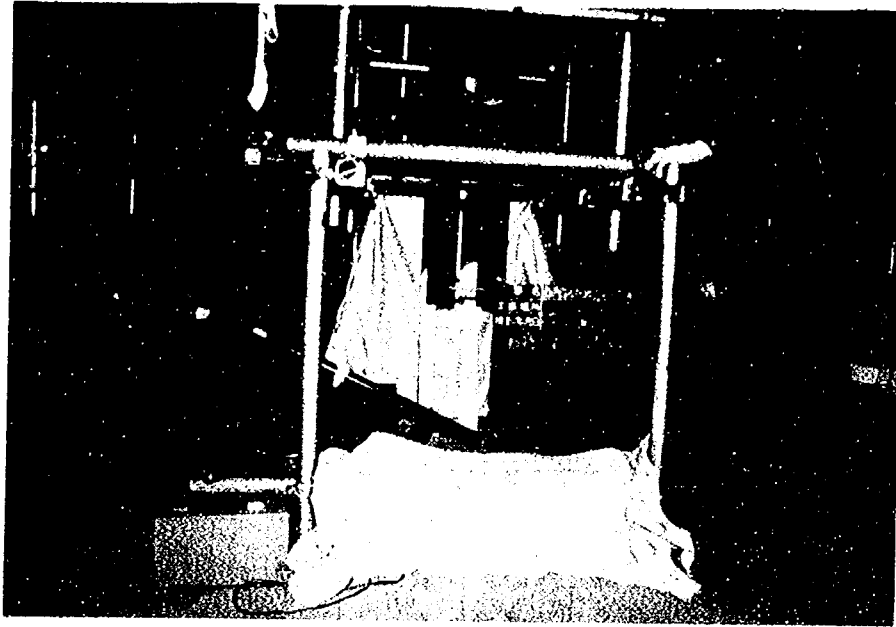
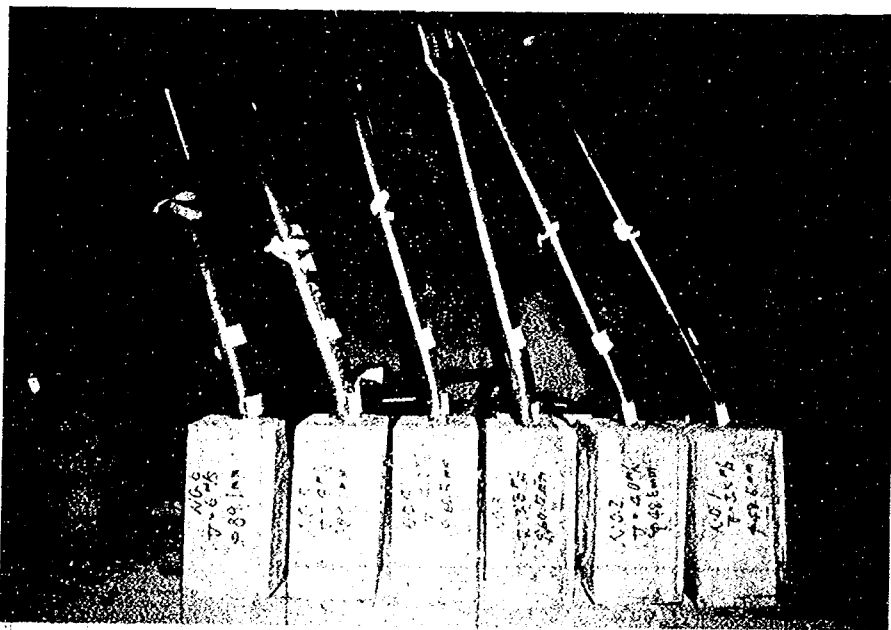


図 - 3.15 終局変位～載荷速度関係



写真－ 3.1 実験終了後の試験体の状況



写真－ 3.2 全ケースの終了後の試験体の状況

(5) 衝撃エネルギー吸収能

衝撃エネルギー吸収能 E_D を終局変位に至るまでの外力仕事量と定義し、図－ 3.9 に示した $P \sim \delta$ 曲線の面積から求めた。 E_D の算定にあたっては、昨年度、 $P \sim \delta$ 曲線の振動を排除し、その中心点を結んで求めても、振動を含んだ $P \sim \delta$ 曲線から直接求めても大きな相違は生じないという結論を得ているので、本実験では、中心線を結んだ簡略法を用いて E_D を求めた。

E_D と ϕ および E_D と V の関係を図－ 3.16，図－ 3.17 に示す。

- ① 図-3.16より、昨年の結果同様、 E_D は ϕ にほぼ比例して大きくなる傾向が認められた。これは、 ϕ の増大に伴い曲げ剛性が大きくなるため、耐力が増大するためである。しかし、同一速度付近での E_D は、管径にかかわらずほぼ一定の値を示している。これは $\phi 89.1$ の場合完全に破壊に至っていないこと、 $\phi 60.5$ の場合は、破壊限界付近で破壊しているため、同一エネルギーを受けた場合、許容エネルギー吸収能以内であれば、ほぼ管径によらず吸収エネルギーは等しくなるためと考えられる。
- ② 図-3.17より、 E_D は載荷速度とともに大きくなる傾向を示している。これは、本実験は破壊に至るか至らないかの境界付近の範囲で行っているため、破壊に至っていない場合のエネルギー吸収能は、破壊に至るまでの間は増加するためと考えられる。

表-3.6 衝撃エネルギー吸収能

CASE No.	鋼管径 ϕ (cm)	衝突速度 V (m/s)	重錘重量 W (kgf)	載荷位置 (cm)	最大荷重 P_{max} (tf)	終局変位 δu (cm)	衝撃エネルギー吸収能 E_D (tf·cm)	重錘の運動エネルギー U (tf·cm)	静的エネルギー吸収能 E_{Ds} (tf·cm)
CD-1	48.6	3.5	150.0	90.0	1.1	12.7	5.2	9.4	9.3
CD-2	48.6	4.0	150.0	90.0	1.2	16.8	8.3	12.2	9.3
CD-3	60.5	3.8	150.0	90.0	1.5	10.4	6.0	11.1	11.5
CD-4	60.5	4.2	150.0	90.0	1.5	13.8	7.9	13.5	11.5
CD-5	89.1	4.0	150.0	90.0	1.5	9.0	8.7	12.6	18.5
CD-6	89.1	6.0	150.0	90.0	2.2	12.7	13.7	27.2	18.5

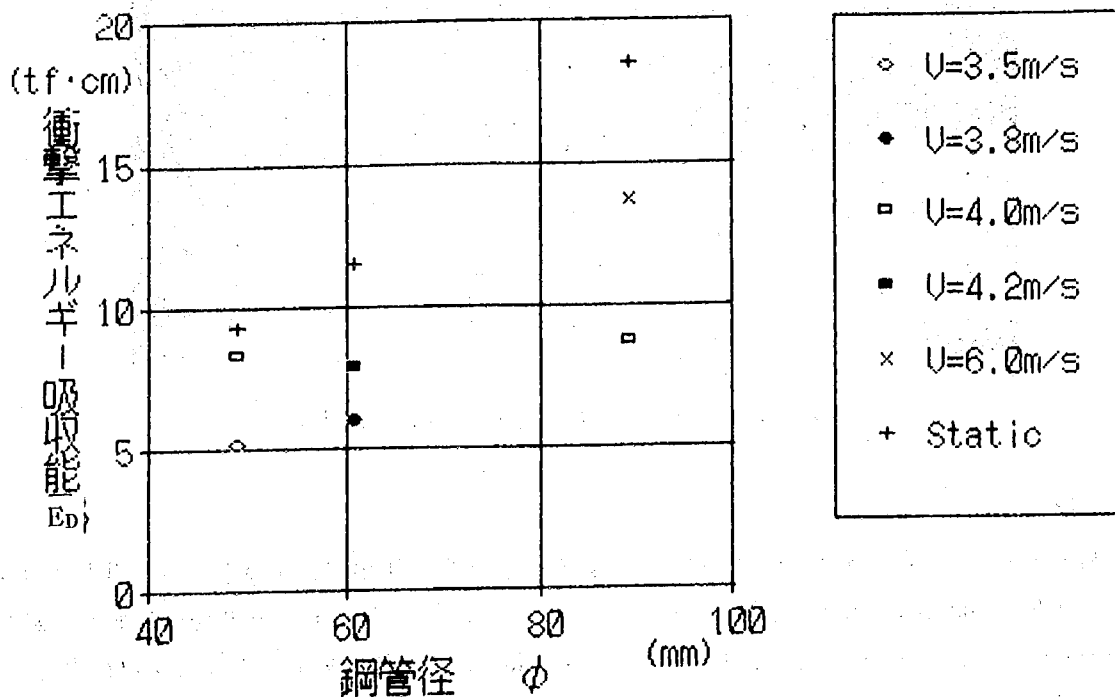


図-3.16 衝撃エネルギー吸収能～鋼管径

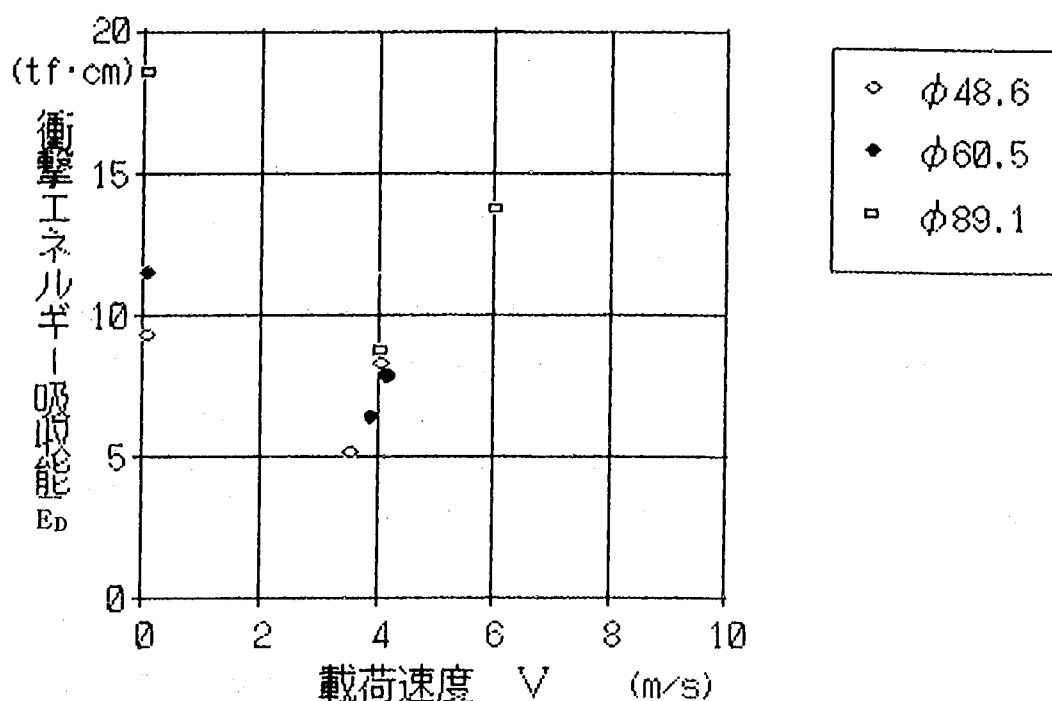


図-3.17 衝撃エネルギー吸収能～載荷速度

(6) 衝撃エネルギー吸収能の推定

a. 昨年度の実験結果との比較

図-3.18に昨年度と本年度の実験から求めた $E_D \sim \phi$ 関係を示す。比較のため、本年度の実験で用いた速度にほぼ等しいケースの E_D を示している。

図より、昨年度の E_D は、荷重が0となるまでの荷重および変位応答が測定されていないため、本年度の実験で求めた E_D より小さい値となっていることがわかる。

b. 静的エネルギー吸収能 E_S と E_D の比較

昨年度行った衝撃実験では、荷重が0となるまでの荷重および変位応答が測定されておらず、全ケースで $E_D < E_S$ の結果を得たが、単純ばりの $\phi 48.6$ 、 $\phi 60.5$ の場合は、ほぼ $E_D \doteq E_S$ となったことから、片持ばりの場合も $E_D \doteq E_S$ と推定した。しかし、図-3.16に示すように、本実験においても全ケースで $E_D < E_S$ となっている。この原因は以下のように考察される。

① 片持ばりと単純ばりの支持条件の相違により、片持ばりの変形量は単純ばりに比較して非常に大きな値となる。この静的 $P \sim \delta$ 曲線から得られる終局変位（荷重が完全に0になるまでの変位の測定ができなかったため、最大荷重の80%まで低下した時点の変位と定義した） δ_{us} と衝撃実験で得られた δ_{ud} の比較を表-3.7に示しているが、 δ_{us} は δ_{ud} の約2～3倍となっており δ_{us} の方が δ_{ud} に比べ非常に大きな値となっている。これに対して、静的最大荷重 P_{smax} と衝撃実験の収束荷重 P_c を比較すると、 P_c の方がやや大きいもののほぼ等しいとみなすことができ、 $E_S = \int_0^{\delta_{us}} P \delta$ 、 $E_D = \int_0^{\delta_{ud}} P \delta$ で求めた E_S, E_D を比較すれば、 $E_S > E_D$ となる。

② 重錘のもつエネルギーとはりの系のエネルギーのつり合いを考えると次式で表わされる。

$$U = E_D + E_{DL} + E_O \quad (3.4)$$

ここで、 U : 重錘のもつ運動エネルギー

E_D : はりの全体応答で吸収するエネルギー

E_{DL} : はりの衝突点の局部応答で吸収するエネルギー

E_O : その他のエネルギー (はりの運動エネルギー, 減衰等の逸散エネルギー等)

式 (3.4) において, 本実験では, 局部めり込みがほとんどなかったことから $E_{DL} \approx 0$ とみなせるので, 運動エネルギー U は, E_D と E_O で吸収されることになる。実験後の観察結果から, はりには表-3.8 に示すような終局変位以上の残留変形が残る。また, $P \sim t$ 曲線と $\delta \sim t$ 曲線を比較すると, $P = 0$ となっても変形は続いていることが認められる。すなわち, はりは荷重が 0 となった後も重錘とともに変形しており, 衝撃実験の場合はこのはりの運動エネルギーにより, 吸収されるエネルギー E_D が E_O に対して大きくなってくると考えられる。

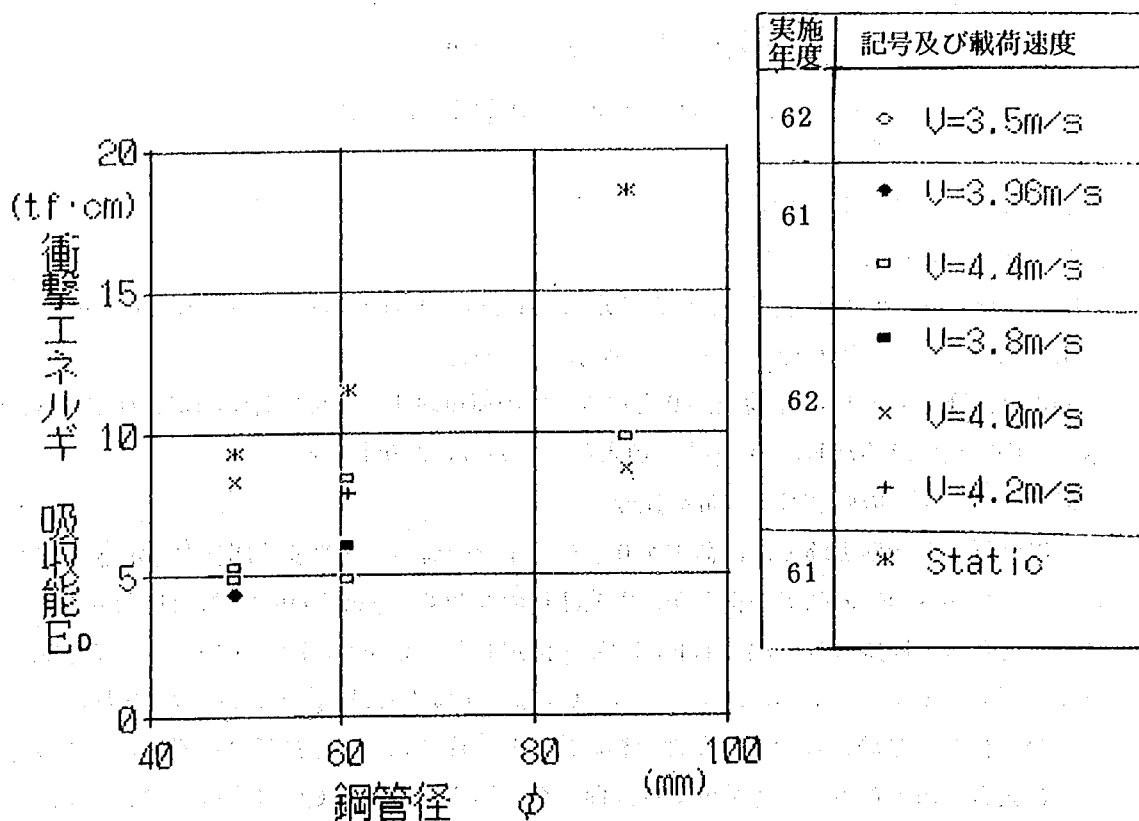


図-3.18 衝撃エネルギー吸収能～鋼管径

表- 3.7 静的実験結果と衝撃実験結果の比較

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	衝速 突度 V (m/s)	重 重 量 W (kgf)	載 荷 位置 (cm)	終 局 変 位 δ_{up} (cm)	終 局 変 位 δ_{us} (cm)	比 率 $\frac{\delta_{us}}{\delta_{up}}$	衝撃エネルギー 吸 収 能 E_D (tf・cm)	静的エネルギー 吸 収 能 E_S (tf・cm)	比 率 $\frac{E_D}{E_S}$ (%)
CD-1	48.6	3.5	150.0	90.0	12.7	39	3.1	5.2	9.3	55.91
CD-2	48.6	4.0	150.0	90.0	16.8	31	1.8	8.3	9.3	89.25
CD-3	60.5	3.8	150.0	90.0	10.4	30	2.9	6.0	11.5	51.83
CD-4	60.5	4.2	150.0	90.0	13.8	30	2.2	7.9	11.5	68.35
CD-5	89.1	4.0	150.0	90.0	9.0	26	2.9	8.7	18.5	46.97
CD-6	89.1	6.0	150.0	90.0	12.7	26	2.1	13.7	18.5	74.05

表- 3.8 残 留 変 形 量

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	衝速 突度 V (m/s)	重 重 量 W (kgf)	載 荷 位置 (cm)	長 径 a (cm)	短 径 b (cm)	へこみ α (cm)	変位1 δ_1 (cm)
CD-1	48.6	3.5	150.0	90.0	5.34	4.26	0.01	31.1
CD-2	48.6	4.0	150.0	90.0	5.34	4.08	0.01	29.0
CD-3	60.5	3.8	150.0	90.0	6.30	5.64	0.00	16.3
CD-4	60.5	4.2	150.0	90.0	6.60	5.05	0.00	20.3
CD-5	89.1	4.0	150.0	90.0	10.47	6.14	0.20	6.6
CD-6	89.1	6.0	150.0	90.0	10.24	6.48	0.13	18.2

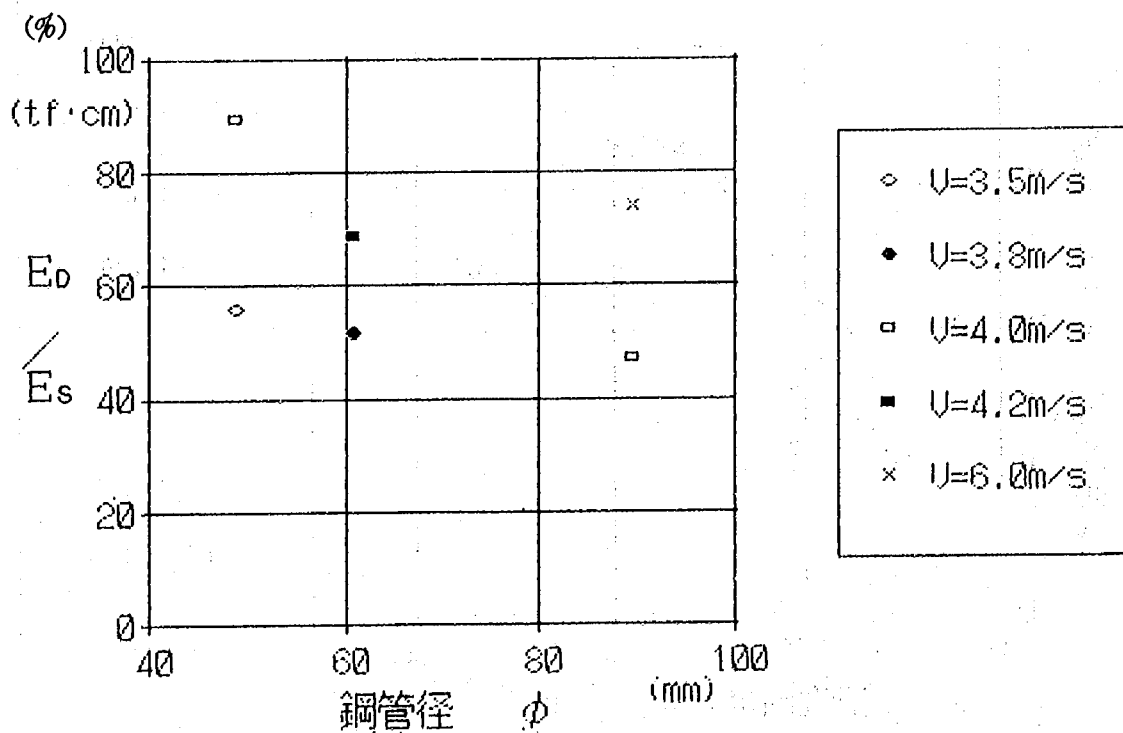


図- 3.19 エネルギー吸収能の衝撃・静的比～鋼管径

c. 昨年度提案した E_D の算定式の適用性の検討

昨年度の E_D の算定式は, $E_D \doteq E_S$ の推測のもとに, E_S の近似式から求めたものであり, 次式で表わされる。

$$E_D = 2.75 \left(\frac{Z_p^2}{I} \right) - 1.00 \quad (\text{tf} \cdot \text{cm}) \quad (3.5)$$

ここで, Z_p : 塑性断面係数 $(= \frac{4}{3} \{ (\frac{\phi^3}{2}) - (\frac{d^3}{2}) \}) (\text{cm}^3)$, I : 断面2次モーメント

$(= \frac{\pi}{64} (\phi^4 - d^4)) (\text{cm}^4)$, ϕ : 外径 (cm), d : 内径 (cm)

図-3.20 に塑性断面係数 Z_p と E_D の関係を示す。図中に式 (3.5) を実線で示した。図より, 式 (3.5) はほぼ E_S に等しいが, 実験結果は, $E_D < E_S$ となっているため, 推定式は, E_D を過大評価してしまうことになる。b) 項で述べたように破壊する場合の E_D は今回の実験範囲では, E_S の約 70 % となっている。

よって式 (3.5) に係数を付加し次式のように書き直す。

$$E_D = \alpha \left(2.75 \left(\frac{Z_p^2}{I} \right) - 1.00 \right) \quad (\text{tf} \cdot \text{cm}) \quad (4.6)$$

式 (3.6) を図中に点線で示した。今回の実験範囲では, α は 0.7 となっている。

図 E_D は, この α が求められれば, 式 (3.6) で推定できる。この α の推定方法とその値は今後の研究によって検討する必要がある。

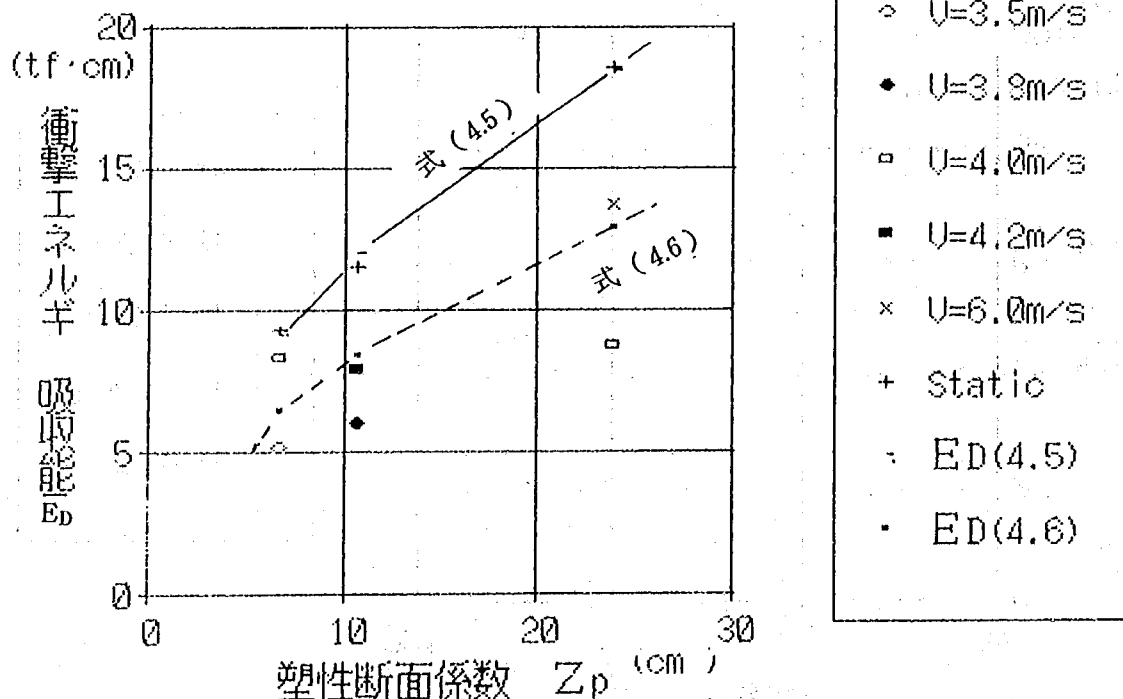


図-3.20 衝撃エネルギー吸収能～塑性断面係数

3.5 まとめ

本実験の成果および問題点をまとめると以下ようになる。

(1) $P \sim t$ 曲線, $P \sim \delta$ 曲線は, 昨年度の実験結果と同様の傾向を示し, 衝突直後から荷重波形は減衰振動となり, 静的最大荷重値付近に収束する。

(2) 荷重持続時間は, 衝突速度が速くなるにつれ短くなり, 鋼管径が大きくなるほど小さくなる。

(3) 最大荷重 $P_{\max}$ は, 鋼管径にかかわらずほぼ一定の値となる。また $P_{\max}$ は載荷速度が速くなるにつれ, 大きくなる傾向を示す。

収束荷重 P_c は, ほぼ静的最大荷重に等しく, 鋼管径とともに大きくなる。また載荷速度が速くなるにつれ, ひずみ速度効果の影響によりやや大きくなる。

(4) 終局変位 δ_u は, 静的終局変位 δ_{us} と比較すると約 $\frac{1}{2}$ と小さくなる。

(5) 衝撃エネルギー吸収能 E_D は静的エネルギー吸収能 E_S に比べ小さく, 今回の実験の範囲では E_S の約 70 % 程度である。この α の値がどの程度になるかは今後の検討が必要である。

E_D は, 鋼管径 ϕ とともにほぼ比例的に大きくなる。また, 載荷速度が速くなるにつれ, 本実験の速度範囲内では, やや大きくなる傾向を示す。

(6) $E_D < E_S$ となる原因は, 衝撃実験の終局変位が静的終局変位に比べると約 $\frac{1}{2}$ 以下と小さくなっているためである。また, 片持ばりの変形量は非常に大きく, 荷重が 0 となっても変形を続けていることから, はりの運動エネルギーとして吸収するエネルギーが大きくなっていることが考えられる。

(7) 昨年度の推定式は, $E_D \doteq E_S$ として, E_S の近似式から求めたが, 本年度の実験結果の範囲では $E_D < E_S$ となり, E_D は E_S の約 70 % となるので, 推定式に係数 α を付加する。

$$E_D = \alpha \left\{ 2.75 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) - 1.00 \right\} \quad (\text{tf} \cdot \text{cm})$$

(8) E_D の推定式, α の値, E_D と E_S の相関を求めるにあたり, データ個数が少ないためどの程度の精度となっているかが不明である。したがって, さらに追加実験を行い, 精度を向上させる必要がある。この他に, シュミレーション解析を実施し, E_D のパラメトリックスタディーを行い, E_D と E_S の相関を求める必要があると思われる。

4. 単純ばりの衝撃載荷実験

昨年度行なった単純ばりの衝撃載荷実験における問題点として以下の点が挙げられる。

① 単純ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能に比較して過剰の衝突エネルギーを与えているため、減衰力や慣性力によって逸散されるエネルギーが実験から求めた衝撃曲げエネルギー吸収能の中に含まれていることが考えられる。

② 径厚比が大きくなる（薄肉管になる）と衝撃曲げエネルギー吸収能が小さくなる傾向を示す。これは局部のエネルギー吸収能 E_{DL} がはりの全体応答としてのエネルギー吸収能 E_D に対して大きくなり、 E_{DL} を無視することができなくなるためであり、昨年度のように単純ばりの衝撃曲げエネルギー吸収能 E_D としてはりの全体応答のみを算定することには問題がある。そこで、 E_{DL} が径厚比が大きくなるにつれどの様に変化するのかを明かにする必要がある。

以上の2項目を明らかにするための補足実験として単純ばりの衝撃載荷実験を行なった。本実験では、薄肉管の局部応答によるエネルギー吸収能を求めるため径厚比の大きな試験体を用いて径厚比と衝撃曲げエネルギー吸収能および局部エネルギー吸収能の関係を調べることを目的とした。局部エネルギー吸収能の算定に必要な資料を得るため、併せて衝撃めり込み実験を行い、衝撃荷重と残留めり込み量の関係を調べる。

4.1 実験条件

径厚比および衝突速度が衝撃荷重、変形、衝撃エネルギー吸収能に与える影響を明らかにするため、実験では径厚比と衝突速度を変化させて実験を行なった。実験条件を表 4.1 に示す。

表-4.1 実験条件

CASE No.	鋼 管 径 ϕ (mm)	衝突速度 V (m/sec)	落下高さ H (m)	重錘重量 W (kgf)	測 定 項 目
SD-1	89.1	3.5	0.63	150.0	1. 衝撃荷重～時間 2. 衝突点変位～時間 3. ひずみ～時間
SD-2		5.0	1.28		
SD-3		5.5	1.54		
SD-4	101.6	6.0	1.84		荷重, めり込み量
SD-5		7.0	2.50		
SD-6		8.0	3.27		
DL-1		6.0	1.84		
合 計		7 ケース (試験体 7 体)			

なお、表中の実験ケース SD は単純ばりの衝撃載荷実験を表し、DL は衝撃めり込み実験を表している。

4.2 実験設備

(1) 載荷装置

載荷装置は図-4.1 に示す昭和61年度に製作した衝撃載荷装置を用いた。載荷装置は図-4.1(a)に

示すように試験体を固定する支点部これを支える架台および落錘装置からなる。供試体は架台上に単純支持用の支点部をボルトナットで固定する構造となっている。支点部は試験体の両端を上下から鋼棒で挟み込みこれをU字ボルトで締め付けて固定した。支点の構造は単純支持の条件を満足するように上下方向の跳ね上がりを防止するとともに試験体の変形に伴い回転できる構造となっている。落錘装置は足場パイプで $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形で高さ 4m の枠を組み、その内部に落錘用のガイドを取り付け、重錘が所望の位置に落下するようにしたものである。重錘は電磁石とウィンチ吊り上げ、磁石スイッチの開閉により落下させた。

衝撃局部めり込み実験では単純ばり試験体の下部に剛なH形鋼で支持台を作成し、はりとしての応答をできないよう固定した。

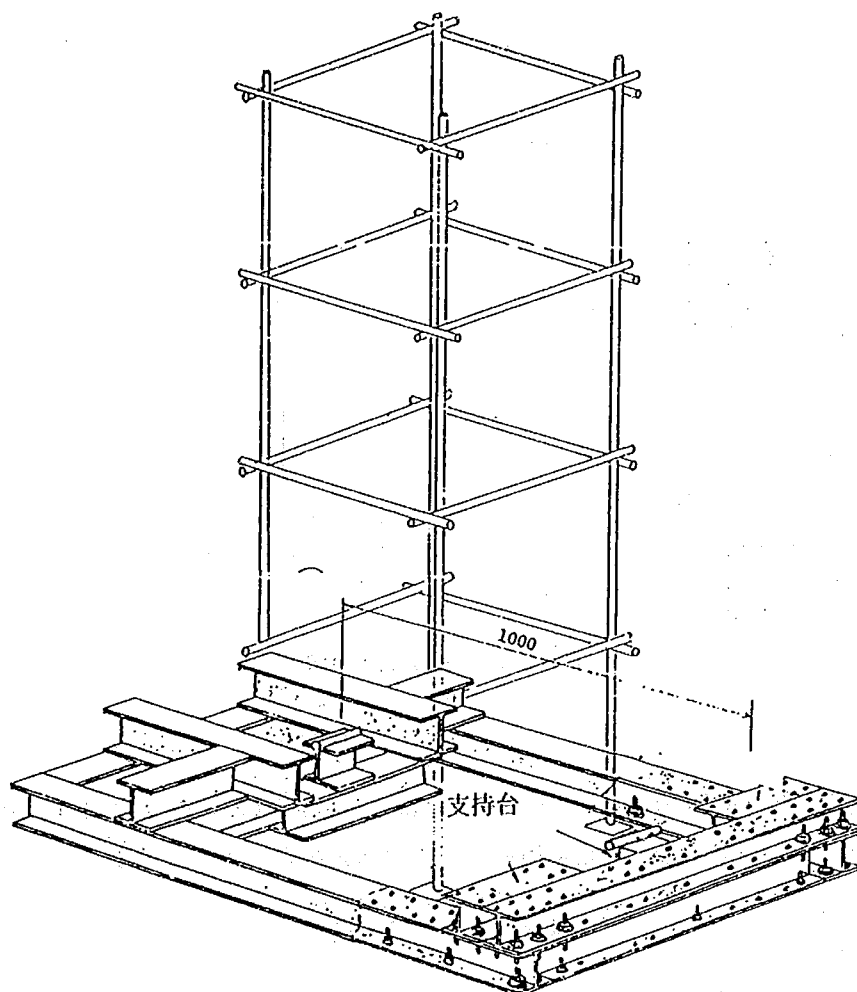


図-4.1 実験装置の概要

(2) 測定装置

単純ばりの衝撃载荷実験の測定項目は、衝突点の衝撃荷重～時間関係、衝突点変位～時間関係および固定端付近のひずみ～時間関係である。図-4.2に計測装置の概要を示す。

衝撃めり込み実験における計測項目は衝撃荷重～時間関係および残留めり込み量である。

計測は、重錘下部に取り付けたロードセルで衝突点の衝撃荷重を、光学式変位計でターゲットを追跡

して衝突点の変位を測定した。また、ひずみゲージによりひずみを測定した。データサンプリング用のトリガーとして加速度計を用いた。

衝撃めり込み実験では重錘下部に取り付けたロードセルにより衝撃荷重を実験後残留めり込み量をノギスにより測定した。

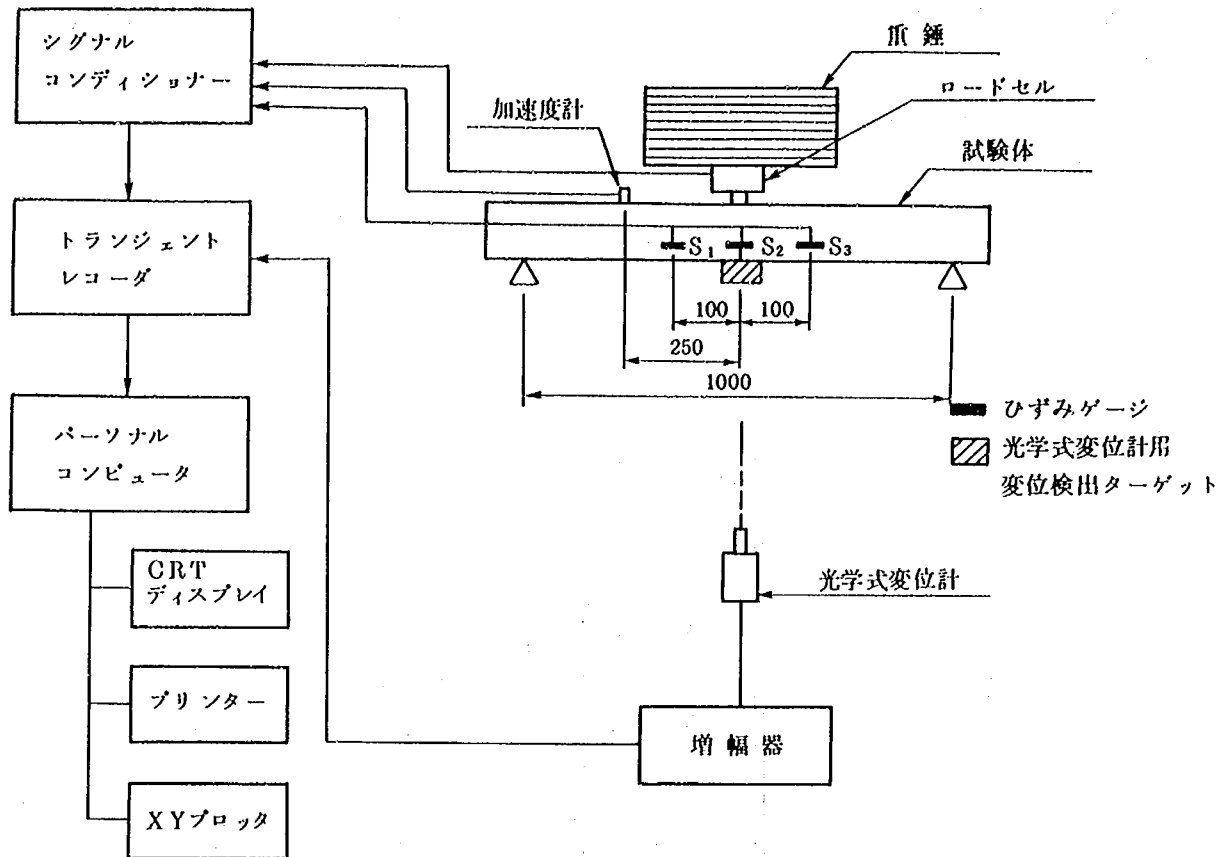


図-4.2 計測装置の概要

4.3 試験体

実験に用いた鋼管は、全長120.0cm、スパン長100.0cmの鋼種STK-41の $\phi 89.1$, 101.6mmの2種類で、肉厚はいずれも3.2mmである。実験に用いた鋼管の諸元を表-4.2に示す。

表-4.2 鋼管の諸元

鋼管径 ϕ (mm)	89.1	101.6
肉厚 t (mm)	3.2	3.2
降伏応力 σ_y (kg/cm ²)	3,900	3,400
引張強さ σ_u (kg/cm ²)	4,600	4,300
伸び (%)	28	51
断面積 A (cm ²)	8.64	9.89
断面2次モーメント I (cm ⁴)	79.8	119.9
塑性断面係数 Z_p (cm ³)	23.7	31.0
単位重量 W (kg/m)	6.77	7.76

4.4 実験結果

(1) 荷重，衝突点変位～時間曲線

計測された荷重～時間曲線（以下 $P \sim t$ 曲線），衝突点変位～時間曲線（以下 $\delta \sim t$ 曲線）の例を図－4.3に示す。表－4.3に最大荷重 P_{max} ，最大荷重に達するまでの時間 T_o ，衝突点の変位速度および実験条件をまとめて示した。図4.3表4.3より以下の特性が認められる。

- ① 図より $P \sim t$ 曲線の荷重波形は，昨年度の実験結果の $\phi 89.1$ の場合の荷重波形と同じ傾向を示し，シャープに荷重が立上がり，最大に達した後，急激に減少に転じ，0になる放物線の形状に微振動を加えたような形状となっている。
- ② 昨年度の実験では，ほぼ全ケースではりは完全に破壊していたため，はりの変位 δ は時間とともに単調増加していたが，本実験では，完全に破壊する限界付近のエネルギーを与えて実験を行っているため，破壊に至らず，変形が残留変形を残し，弾性変形の部分が復元した例がみられる。

表－4.3 実験結果（最大荷重および載荷速度）

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	衝突速度 V (m/s)	重錘量 W (kgf)	スパン長 (cm)	最大荷重 P_{max} (tf)	荷重持続時間 T_c (msec)	最大荷重までの時間 T_o (msec)	変位速度 (衝突点) $\frac{\delta}{t}$ (m/s)
SD-1	89.1	3.5	150.0	100.0	2.57	37.75	7.84	1.28
SD-2	89.1	5.0	150.0	100.0	2.78	21.57	5.88	1.46
SD-3	89.1	5.5	150.0	100.0	2.90	13.73	6.86	2.16
SD-4	101.6	6.0	150.0	100.0	2.70	13.73	3.43	1.71
SD-5	101.6	7.0	150.0	100.0	2.91	10.78	3.92	1.88
SD-6	101.6	8.0	150.0	100.0	3.13	7.84	3.43	2.43
DL-1	101.6	6.0	150.0	100.0	3.72	26.47	4.90	1.31

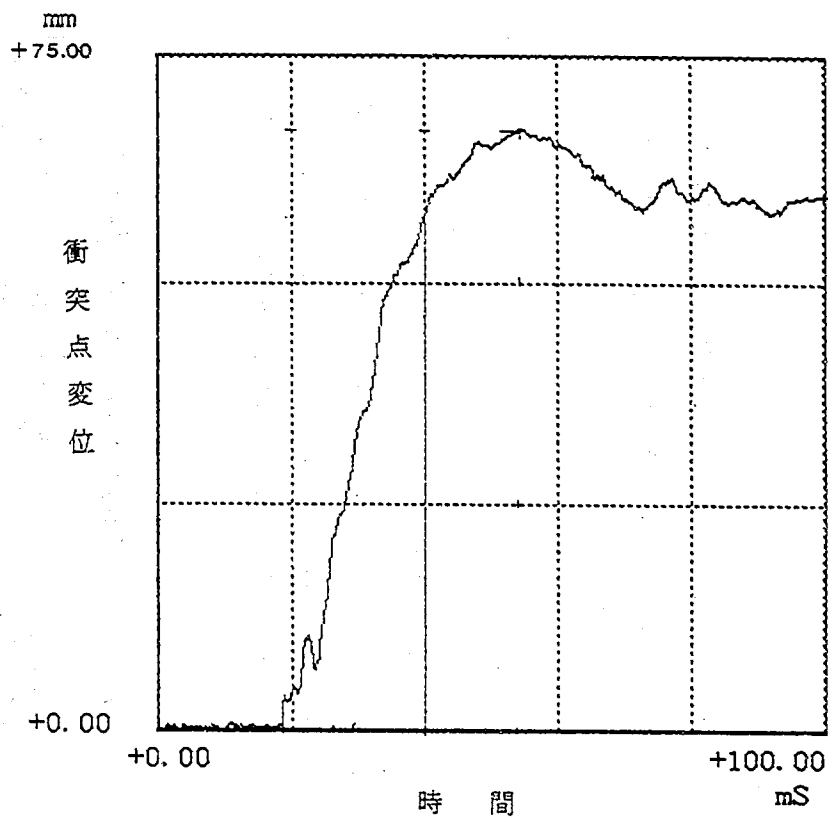
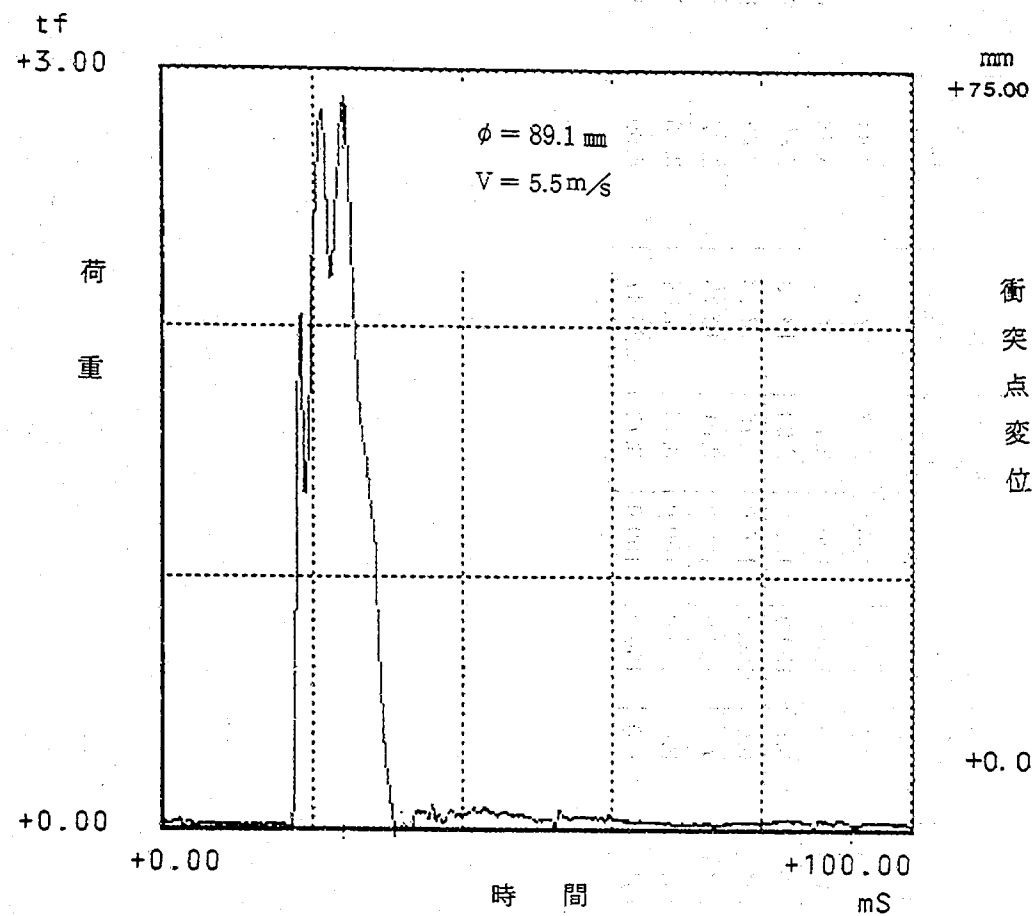


図-4.3(a) 荷重・衝突点変位～時間曲線
(復元力を残さない例)

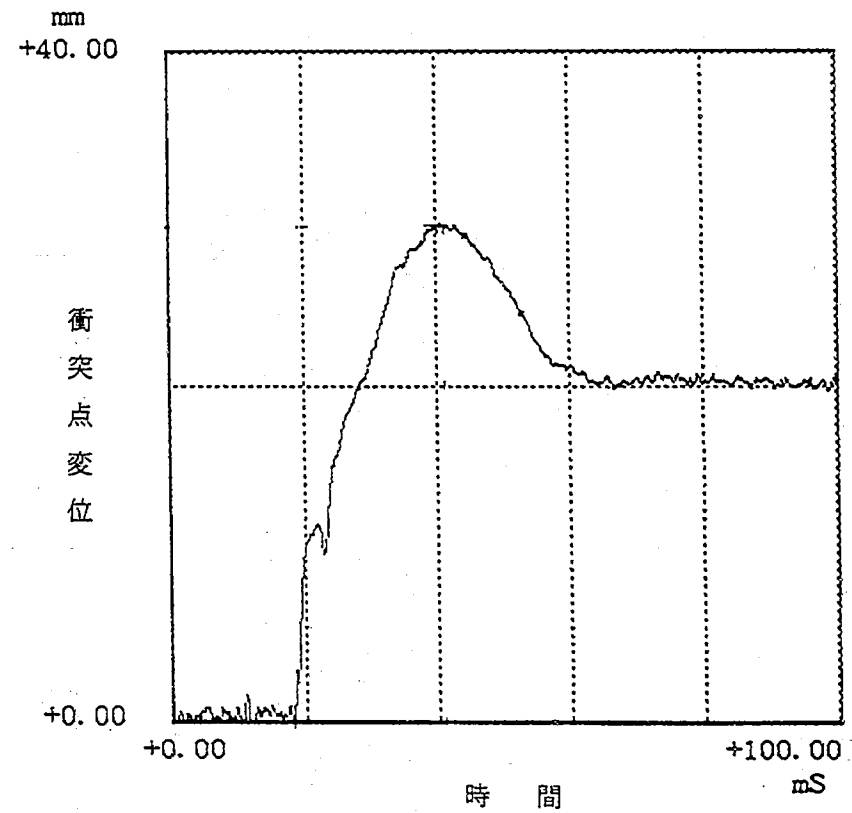
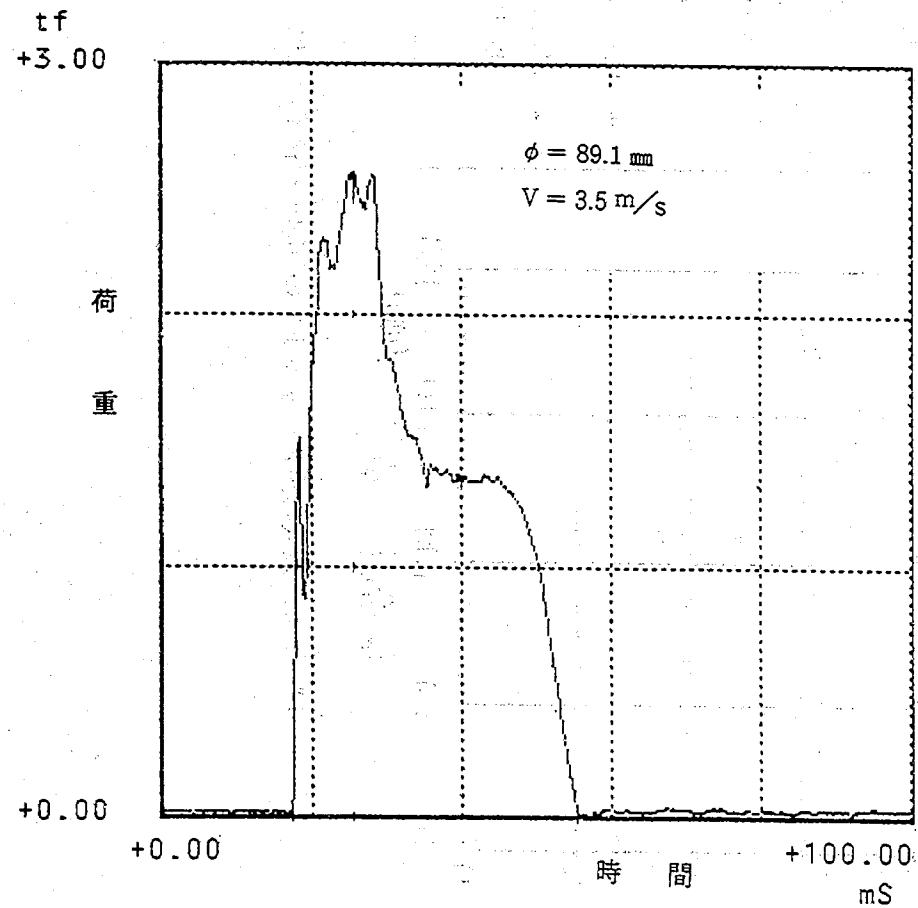


図-4.3(b) 荷重・衝突点変位～時間曲線
(復元力を残した例)

③ 最大荷重に達するまでの時間 T_0 と鋼管径 ϕ の関係を図-4.4に示す。図より昨年度の結果と異なり管径が大きくなるにつれ、 T_0 は小さくなっている。これは、 $\phi 89.1$ の場合は、最大荷重が全て第3ピークで発生しているためであり、昨年度の実験結果では、ほとんど第2ピークで最大となっているため、その平均値は約3.4 msecであり、 $\phi 101.6$ mm (3.6 msec) の場合よりやや短かく、昨年度の傾向と変らない結果となる。

この原因として、本実験は、昨年度の実験に比べると $\phi 89.1$ mm の場合は衝突速度が遅くなっているため、衝突直後の慣性力は昨年より小さくなっており、局部応答と慣性力によって生じる荷重応答の振幅が小さくなり、はりの耐力が大きくなってくる第3ピークで最大となるためと考えられる。

図-4.5に載荷速度 V と T_0 の関係を示す。 $\phi 89.1$, $\phi 101.6$ mm のいずれの場合も、 V が速くなるにつれ、やや T_0 は短くなる傾向を示すが、ほぼ一定の値となっている。これは、昨年度の傾向と同じであるが、上述したように、 V がある一定値以上に小さくなれば、局部応答による荷重が小さくなるため、はりの耐力が生じてくる後半部に最大荷重が生じてくるため、 T_0 はその段階で変化することになる。言い換えれば、局部応答の固有周期 T_L (msec) の分のずれが生じることになる。

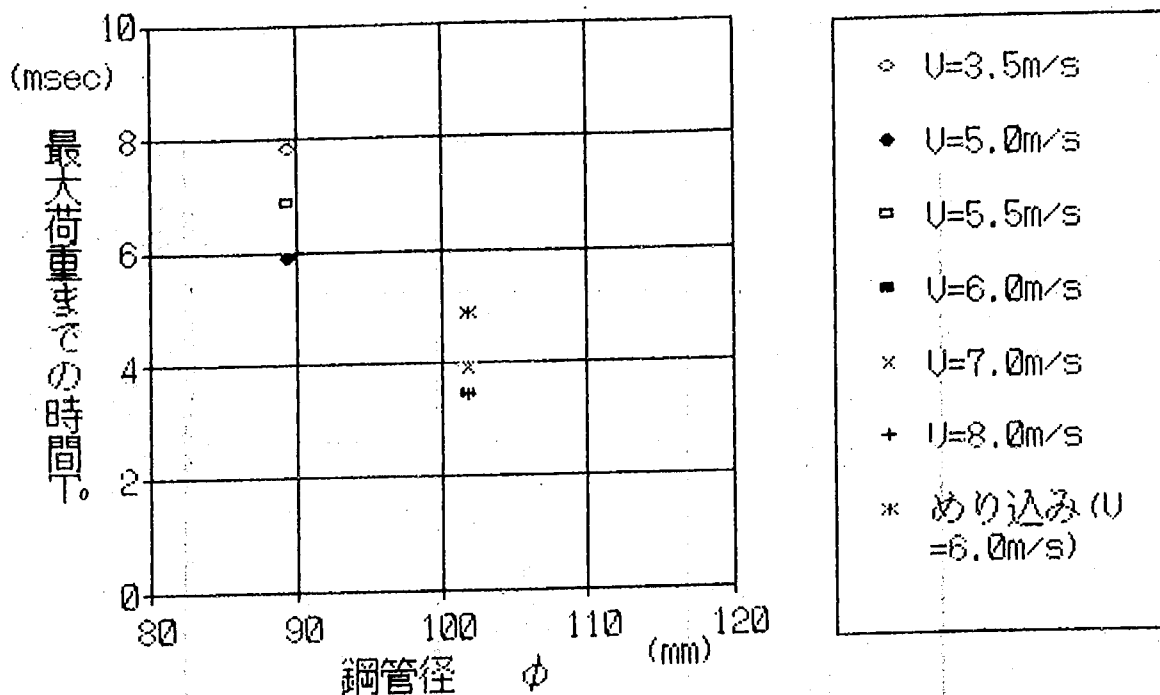


図-4.4 最大荷重に達するまでの時間～鋼管径の関係

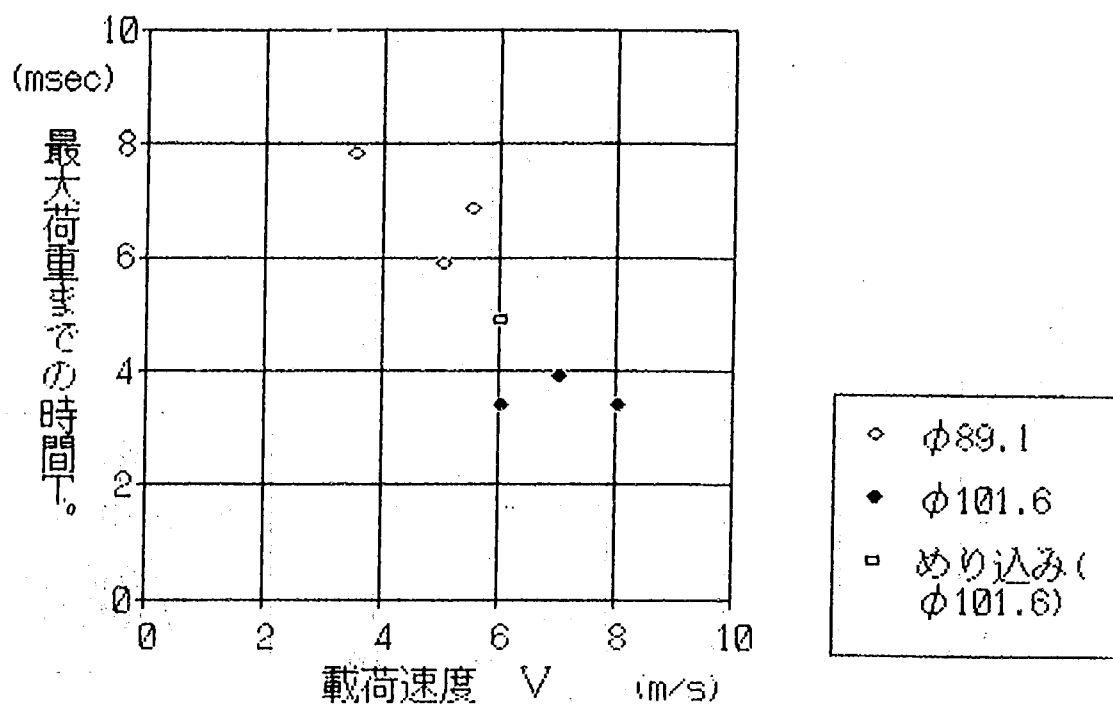


図-4.5 最大荷重に達するまでの時間～載荷速度の関係

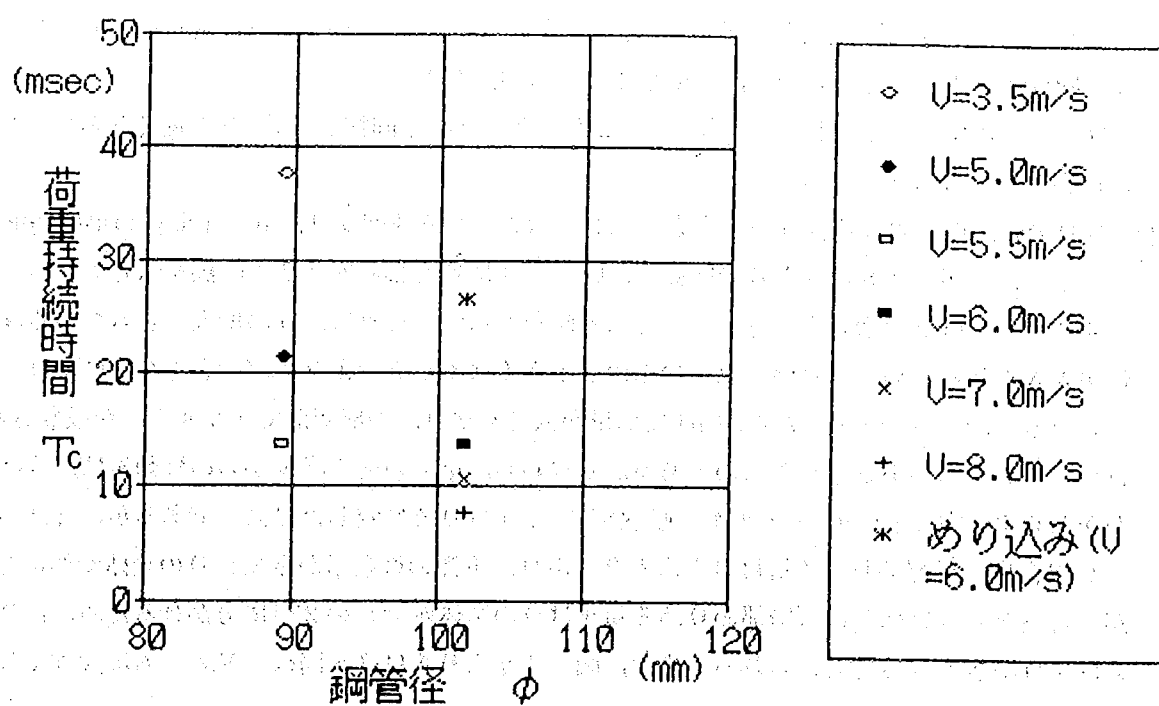


図-4.6 荷重持続時間～鋼管径の関係

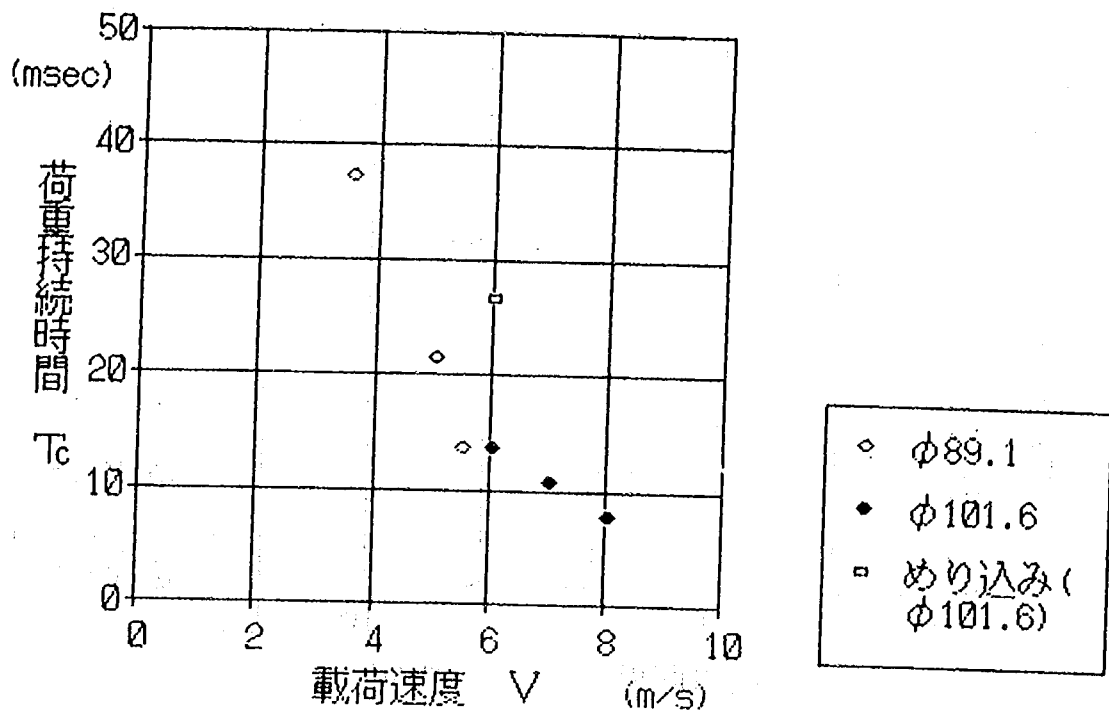


図-4.7 荷重持続時間～載荷速度の関係

④ 荷重持続時間 T_c と鋼管径 ϕ の関係を図-4.6 に示す。図より、同一速度付近での T_c は 昨年と同様 ϕ が大きくなるにつれ、やや小さくなる傾向がある。

図-4.7 に T_c と載荷速度 V の関係を示した。図より昨年同様 T_c は、 V が速くなるにつれ、逆に小さくなる傾向がある。

⑤ はりの載荷点における変位速度を表-4.3 に示す。変位速度 $\dot{\delta}$ は、 $\delta \sim t$ 曲線の平均勾配として求めた。図-4.8 に $\dot{\delta}$ と ϕ の関係を、図-4.9 に $\dot{\delta}$ と載荷速度 V の関係を示している。図-4.8 より $\dot{\delta}$ は ϕ の増大とともに小さくなる傾向を示す。これは、 ϕ の増大にともない曲げ剛性が大きくなるため、はりの変位そのものが小さくなることおよび ϕ が大きくなるにつれ、径厚比 (ϕ/t) が大きくなるため、局部変形量が大きくなり、局部変形でエネルギーが吸収され、はり全体の変形が小さくなるためである。すなわち、重錘の衝突直後からの移動量は、管径にかかわらず一定（同一のエネルギー吸収能をもつ はりで比較した場合）であるが、管径が小さい場合は、局部めり込み量はほとんど 0 であり、重錘の移動量が全てはりの全体変形になるが、管径が大きい場合は（局部めり込み量+はりの全体変形）の 2 つに分かれるため、はりの変形量は小さくなると考えられる。また、図-4.9 より $\dot{\delta}$ は昨年同様、 V とともに大きくなる傾向がある。

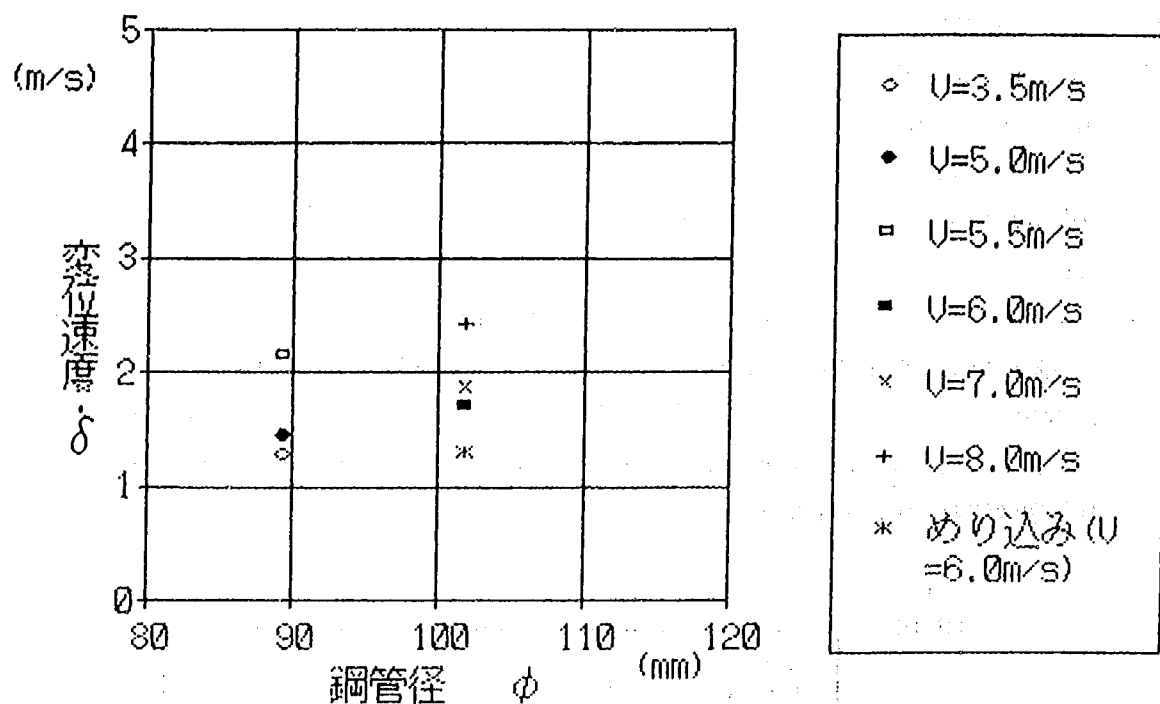


図-4.8 変位速度～鋼管径の関係

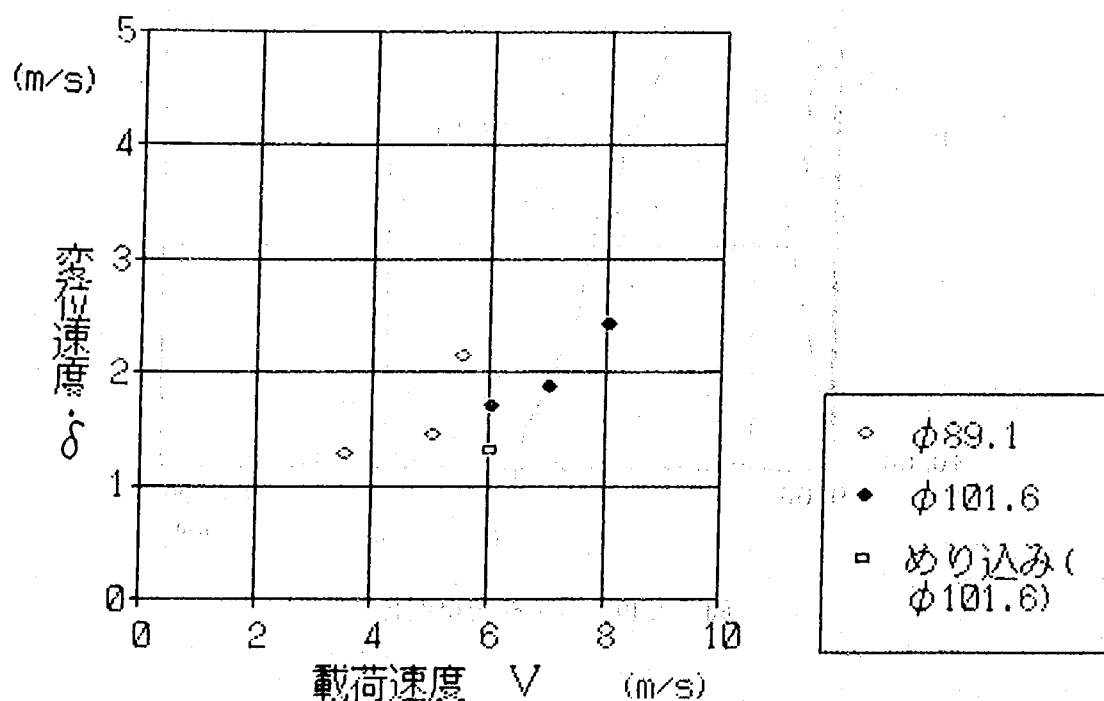
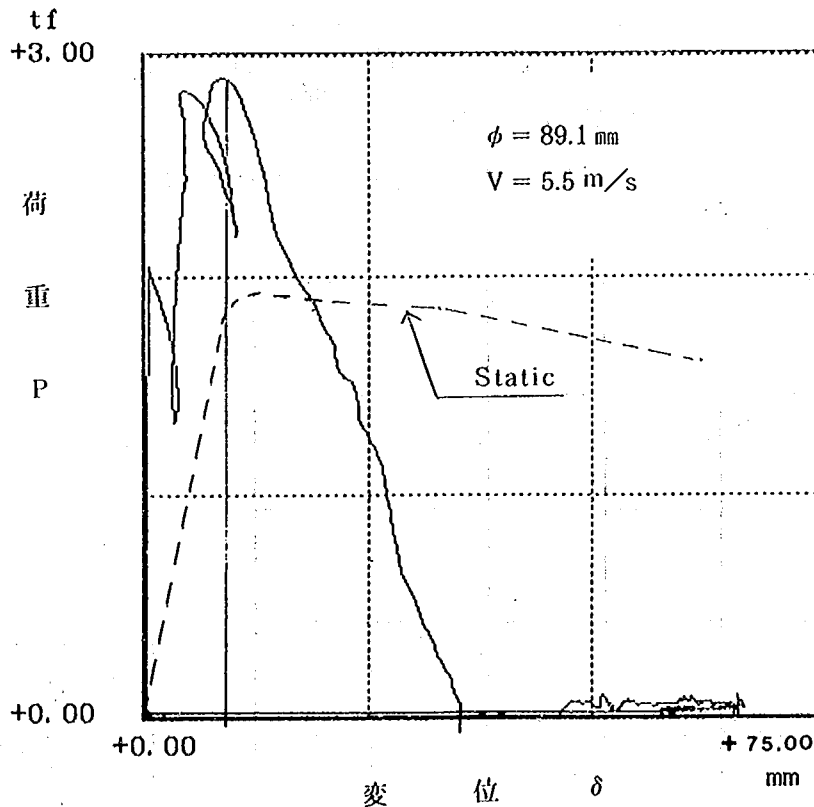


図4.9 変位速度～載荷速度の関係

(2) 荷重～変位曲線

計測された $P \sim t$, $\delta \sim t$ 曲線から t 軸を消去して、荷重～変位曲線（以下 $P \sim \delta$ 曲線）を作成した。その例を図－4.10に示す。図－4.10 より以下の特性が認められる。

- ① $P \sim \delta$ 曲線は、昨年度行った静的実験の $P \sim \delta$ 曲線と比較すると荷重の立上がりが大きく、微小振動を含んだ形状となっており、静的 $P \sim \delta$ 曲線より荷重が大きく、変位が小さい形状を示している。
- ② 管径が太い場合の $P \sim \delta$ 曲線は、管径が細い場合の $P \sim \delta$ 曲線と異なり、最大荷重に達した後急激に荷重が低下する傾向を示す。これは、管径が太い場合は局部めり込み量が大きく、局部座屈を生じ、破壊してしまうためと考えられる。管径が小さい場合は、局部めり込みがほとんど生じないため、局部座屈は生じないので、最大荷重に達した後も荷重は、ほぼ一定となり、塑性流れのような現象が生じていると考えられる。



図－4.10 荷重～変位関係

(3) 最大荷重

図－4.11に $V \cong 6.0 \text{ m/s}$ としたときの最大荷重 P_{max} と ϕ の関係を、図－4.12に P_{max} と塑性断面係数 Z_p との関係を、図－4.13に、図－4.14に P_{max} と V の関係を径厚比 (ϕ/t) と P_{max} の関係を示す。

- ① 図－4.11より昨年度同様 P_{max} は ϕ が大きくなるにつれ、緩やかではあるが、ほぼ比例的に増加する傾向がある。図－4.12より P_{max} は Z_p とともに緩やかではあるが大きくなる傾向を示している。静的に最大荷重 P を求めれば次式で求められる。

$$P_{max} = 4 \cdot \sigma_y \cdot Z_p / \ell \quad (4.1)$$

ここで σ_y : 降伏応力 (kg/cm^2), Z_p : 塑性断面係数 (cm^3), ℓ : スパン長 (cm) である。
 式 (4.1) を図-4.12 中に実線で示した。式 (4.1) は, 静的実験結果よりも大きくなっているが, これは, 実験値は載荷点の局部めり込みにより断面係数が低下しているためである。
 よって, 管径の大きいものほど計算値との差が大きくなっている。

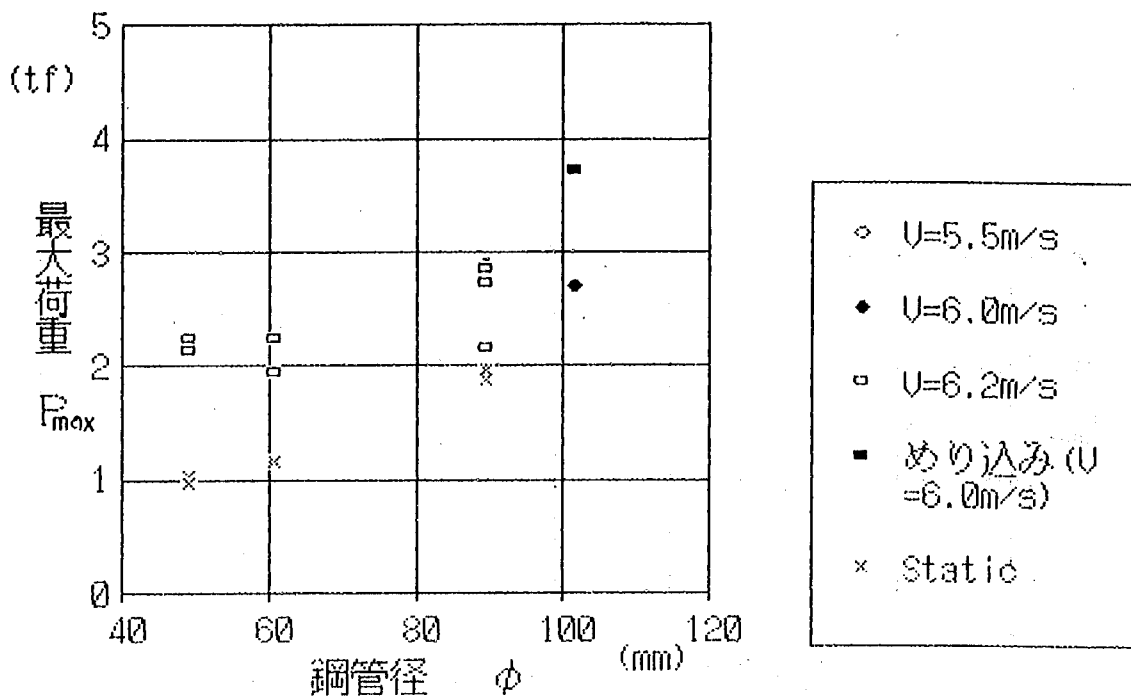


図-4.11 最大荷重～鋼管径の関係

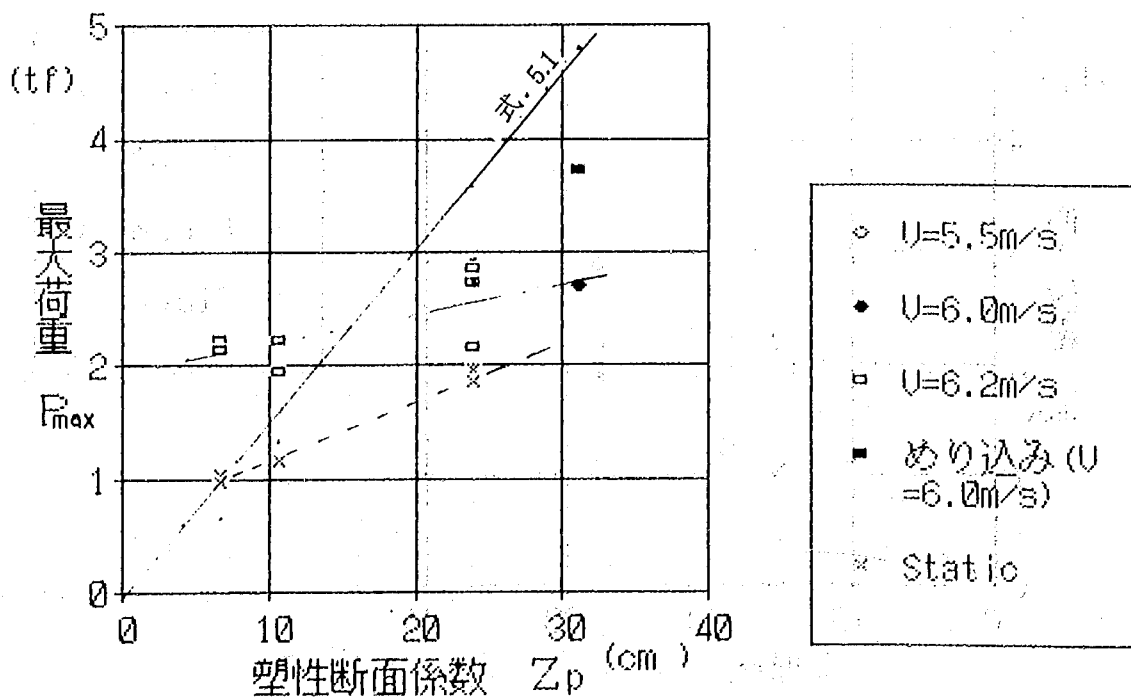


図-4.12 最大荷重～塑性断面係数の関係

② 図- 4. 13 より, P_{max} は本年度の実験範囲内では, V とともに大きくなる傾向がある。しかし昨年度の実験結果では, $\phi 89.1$ mm の場合, V が大きくなるにつれ P_{max} が小さくなる現象がみられた。 $\phi 89.1$ mm の場合のみを図中で比較すると, $V = 6$ m/s 付近から P_{max} は V が大きくなるにつれ小さくなる傾向を示していることがわかる。

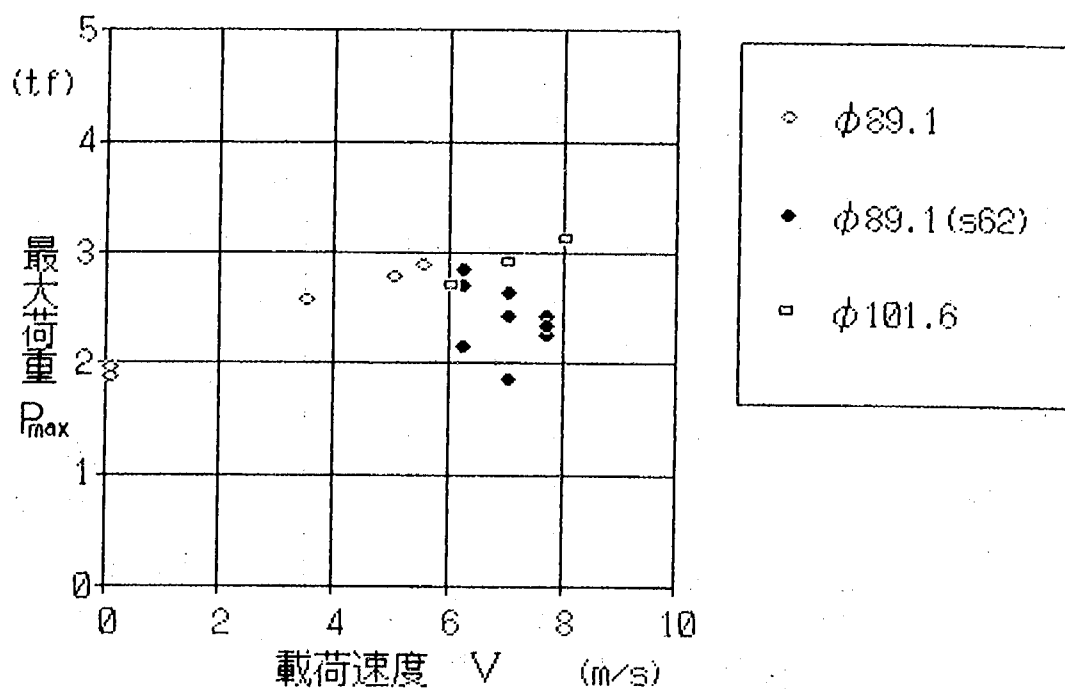


図- 4. 13 最大荷重～载荷速度の関係

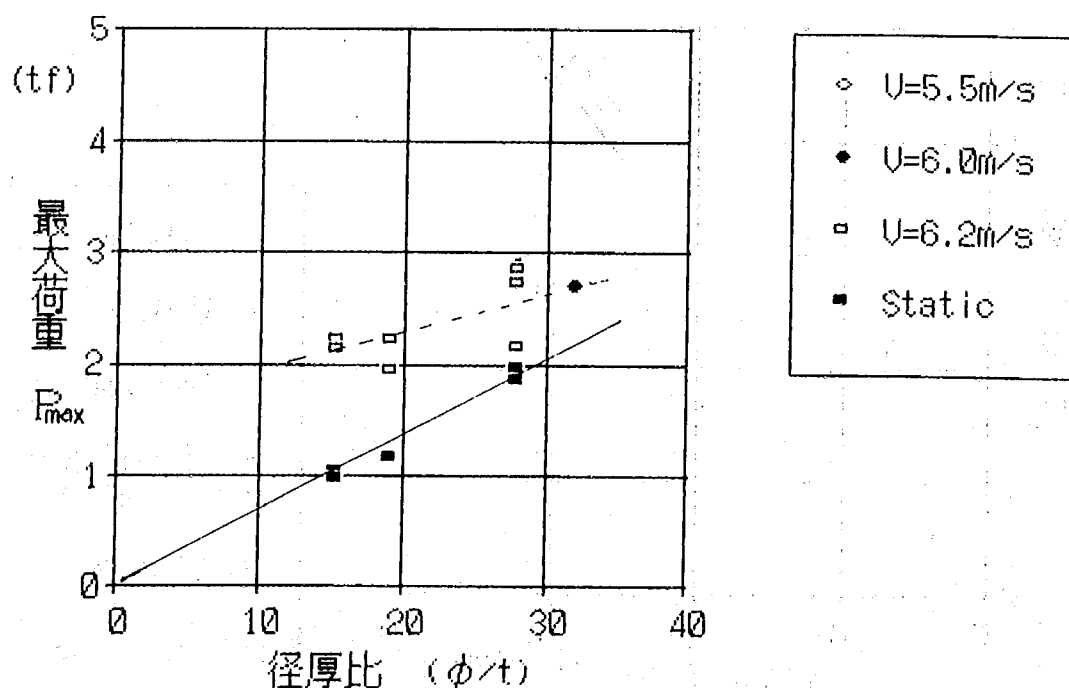


図- 4. 14 最大荷重～径厚比の関係

この結果から、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ の場合は $V = 6 \text{ m/s}$ 付近が破壊限界と考えられ、完全破壊に達してしまうような過剰エネルギーがはりに作用した場合、局部めり込みにより局部座屈が生じ、はりの耐力は小さくなるものと考えられる。管径が大きく、 ϕ/t が大きいはりに過剰エネルギーが作用した場合、はりの抵抗力が小さくなってしまうことが考えられるので、危険な状態となる。よって、速度 V の影響は非常に大きな要因となる。

- ③ 図-4.14より、静的 P_{max} は径厚比(ϕ/t)とともにほぼ比例的に大きくなる傾向を示している。衝撃実験の P_{max} は ϕ/t とともに緩やかではあるが、ほぼ比例的に大きくなる傾向を示している。

(4) 終局変位

図-4.10に示した $P \sim \delta$ 曲線において、荷重が0になった時点での変位を終局変位 δ_u と定義する。表-4.4に終局変位を示す。図-4.15に δ_u と ϕ の関係を、図-4.16に δ_u と V の関係を示す。なお、写真-4.1、4.2に実験後の試験体の状況を示す。

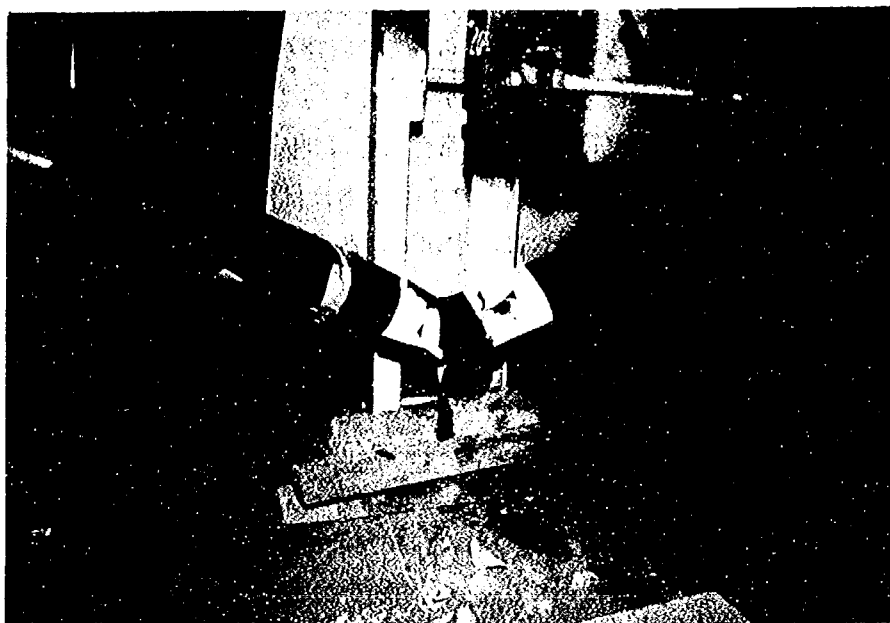
- ① 図より昨年同様管径が大きくなるにつれ、終局変位は小さくなる傾向を示す。
- ② δ_u は、 V が速くなるにつれやや大きくなる傾向を示す。昨年度の実験結果では、データのバラつきが大きいためはっきりとは認められないが、やや大きくなる傾向は認められた。しかし、増加の割合は小さく、ほぼ一定とみなしても良いと考えられる。
- はりのエネルギー吸収能よりも非常に大きなエネルギーを加えた場合は、はりの変位は小さくなる傾向を示すが、データ個数が少ないため確定できない。この傾向が実際の現象でみられるかどうかは、さらに速度が速い場合の実験を行い確認する必要がある。
- ③ 昨年度の静的実験の δ_u と本実験の δ_u を比較すると $\phi 89.1 \text{ mm}$ の場合、静的な δ_u の方が大きくなっている。これは、本実験では速度が遅い場合完全に破壊していないケースがありこの場合の終局変位は限界に達していないためである。
- ④ 図中に $\phi 100.6 \text{ mm}$ 、 $V = 6.0 \text{ m/s}$ の衝撃めり込み実験から求めた終局めり込み量を示しているが、めり込み量は 4.5 cm と大きく、ほぼはりの全体変形量に等しい。よって ϕ が大きい場合局部めり込み量を考慮すべきと考えられる。

(5) 衝撃エネルギー吸収能

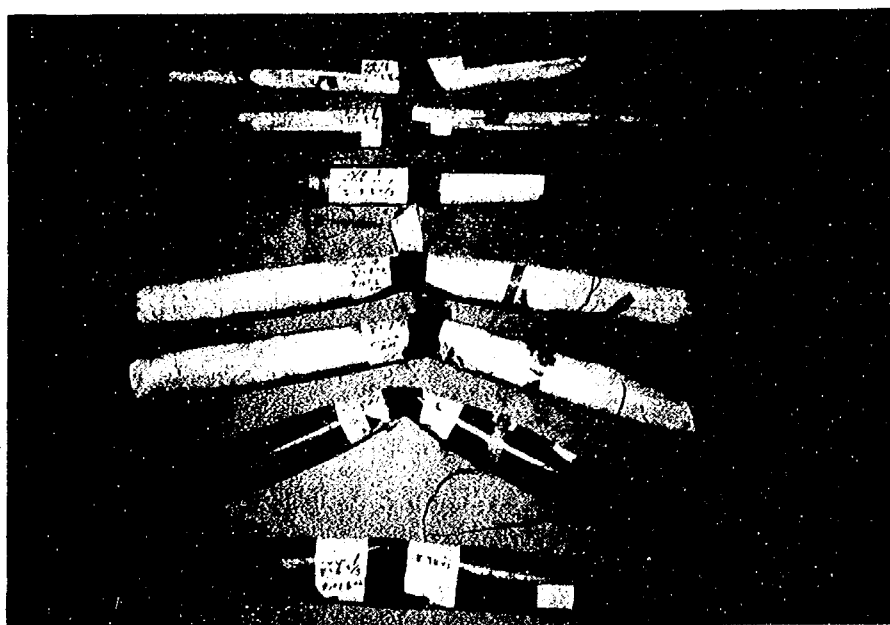
図-4.10に示した $P \sim \delta$ 曲線において、衝撃エネルギー吸収能 E_D を終局変位 δ_u に至るまでの外力仕事量と定義した。 E_D を表-4.4に、図-4.17に E_D と ϕ の関係を、図-4.18に E_D と V の関係を、図-4.19に E_D と ϕ/t の関係を示す。

- ① 図-4.17より、静的エネルギー吸収能 E_S は ϕ が大きくなるにつれ、大きくなる傾向を示しているが、 E_D は、昨年度の実験結果では、 ϕ が大きくなるにつれ、小さくなる傾向を示した。しかし、本実験では、昨年度の V よりも遅い速度、すなわち、重錘の運動エネルギーを小さくして実験を行った結果、破壊点付近のエネルギーが与えられたと考えられ、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ の場合も $\phi 48.6$ 、 $\phi 60.5 \text{ mm}$ の場合の E_D とはほぼ等しい値が得られ、管径にかかわらずほぼ一定の値となった。したがって、鋼管径によらず $E_D \doteq E_S$ とみなして良いと考えられ、限界衝撃エネルギー吸収能 E_D はほぼ E_S として求めて良いと思われる。

$\phi 101.6$ の E_S は不明なので、 E_D との比較はできないが、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ の E_S よりやや大きい程度と予想されるので、 $E_S \doteq E_D$ ($V = 7.0 \text{ m/s}$ の場合)とみなしても良いと思われる。



写真－ 4.1 実験後の変形状況



写真－ 4.2 全ケースの実験後の状況

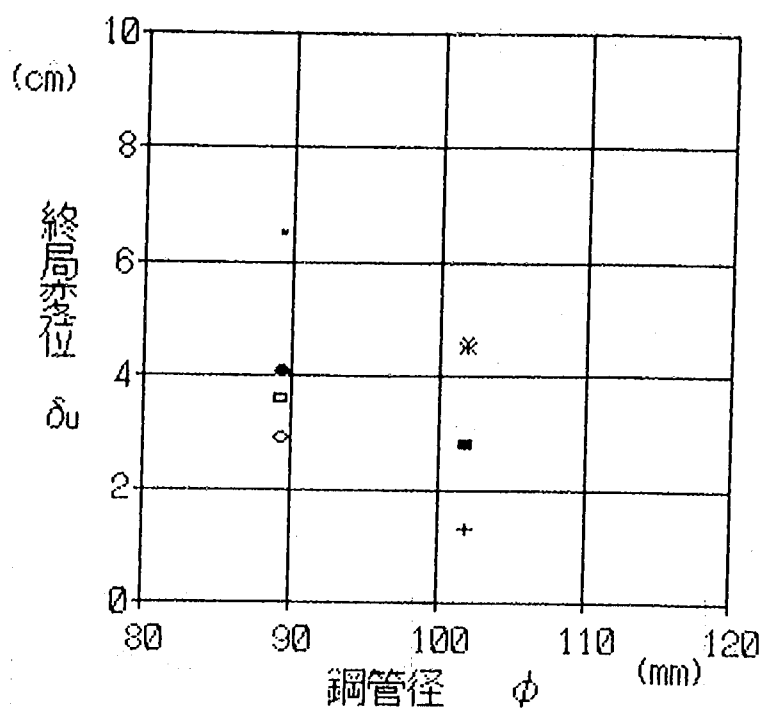


図-4.15 終局変位～鋼管径の関係

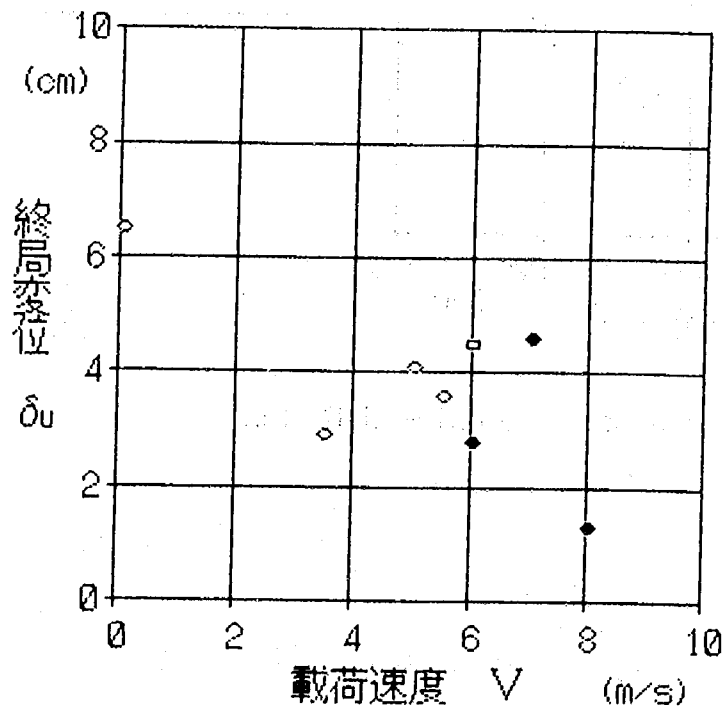


図-4.16 終局変位～載荷速度の関係

表-4.4 衝撃エネルギー吸収能

CASE No.	鋼管径 ϕ (cm)	衝突 速度 V (m/s)	重錘 重量 W (kgf)	スパン長 (cm)	最大 荷重 P_{max} (tf)	終局 変位 δ_u (cm)	衝撃エネルギー 吸収能 E_D (tf·cm)	重錘の運動 エネルギー U (tf·cm)	静的エネルギー 吸収能 E_S (tf·cm)
SD-1	89.1	3.5	150.0	100.0	2.6	2.9	5.4	9.4	10.2
SD-2	89.1	5.0	150.0	100.0	2.8	4.1	6.5	19.1	10.2
SD-3	89.1	5.5	150.0	100.0	2.9	3.6	8.7	23.2	10.2
SD-4	101.6	6.0	150.0	100.0	2.7	2.8	5.8	27.6	
SD-5	101.6	7.0	150.0	100.0	2.9	4.6	9.7	37.5	
SD-6	101.6	8.0	150.0	100.0	3.1	1.3	3.6	49.0	
DL-1	101.6	6.0	150.0		3.7	4.5	13.2	27.6	

備考 CASE, DL-1 は衝撃めり込み実験結果を示す。

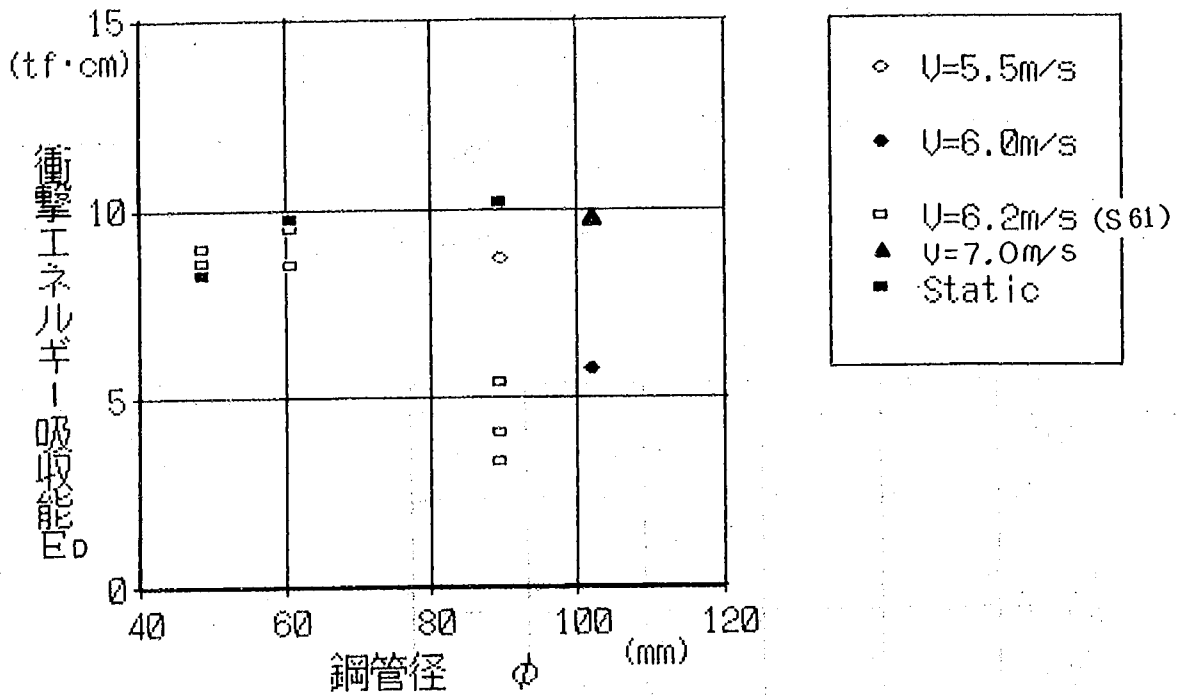


図-4.17 衝撃エネルギー吸収能～鋼管径の関係

② 図-4.18より、昨年同様 E_D は V とともに大きくなる傾向を示す。また、本実験で求めた E_D は、昨年度求めた E_D よりも大きな値となっている。本年度の実験は、破壊しない段階から破壊する限界までの運動エネルギーを与えているが、昨年度は、この限界以上のエネルギーを与えて完全に破壊させた。このことから、限界以上のエネルギーを与えた場合、 E_D は小さくなると考えられる。つまり、破壊限界を境界として E_D は大きく変化するものと考えられる。この原因として、以下のことが考えられる。

(i) P_{max} は、 $V = 6.0$ m/s 付近を境界として、増加傾向から減少傾向に移行している ($\phi 89.1$ mm の場合)。また δ_u は V とともにやや大きくなる傾向を示すものの、ほぼ一定とみなせるため、 $E_D = \int P \cdot \delta$ より求めた E_D は P の影響を強く受け、 $V = 6.0$ m/s 付近で E_D が変化する。

(ii) V が大きくなるにつれ、局部めり込み量が大きくなり、断面係数が著しく低下するため、はりの耐力が急激に低下すると考えられる。よって、はりの破壊は一定のめり込み量以上のめり込み量に達すると耐力が著しく低下するため急激に破壊に達すると考えられる。

③ 図-4.19より、 E_D は ϕ/l にかかわらずほぼ一定の値を示している。ただし、速度が速くなると E_D は ϕ/l が大きくなるにつれ、小さくなる傾向を示す。これは、 ϕ/l は l が一定であるので、 ϕ と傾向が同じであり、 $E_D \sim \phi$ と同様の傾向を示すことになる。 ϕ/l が E_D に大きく影響を与える要因は、局部応答に関する事項であり、局部の剛性およびめり込み量が ϕ/l の影響を受けると考えられる。表-4.5に残留変形量を示しているが、同一速度 ($V = 5.5$ m/s, $V = 6$ m/s) の $\phi 89.1$ mm と $\phi 101.6$ mm の残留へこみ α を比較すると $\phi 101.6$ mm の方が大きく、このときの残留変位は、6.0 cm で両者とも等しい値となっている。このことから ϕ/l が大きいものほどめり込み量が大きくなることが分かる。昨年度行なった静的実験においても ϕ が大きいものほどめり込み量が大きくなっている。

表-4.5 残留変形量

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	衝突速度 V (m/s)	重錘重量 (kgf)	スパン長 l (cm)	長径 a (cm)	短径 b (cm)	へこみ α (cm)	へこみ範囲 Δ (cm)	変位 δ_1 (cm)
SD-1	89.1	3.5	150.0	100.0	9.60	7.05	1.90	8.80	1.3
SD-2	89.1	5.0	150.0	100.0	10.70	5.85	2.60	12.35	4.5
SD-3	89.1	5.5	150.0	100.0	11.10	4.70	2.60	12.90	6.0
SD-4	101.6	6.0	150.0	100.0	13.25	4.60	3.60	15.00	6.0
SD-5	101.6	7.0	150.0	100.0	14.50	3.30	6.00	16.48	9.9
SD-6	101.6	8.0	150.0	100.0	15.38	1.85	8.00	14.45	19.3
DL-1	101.6	6.0	150.0		13.50	4.35	2.90	16.05	

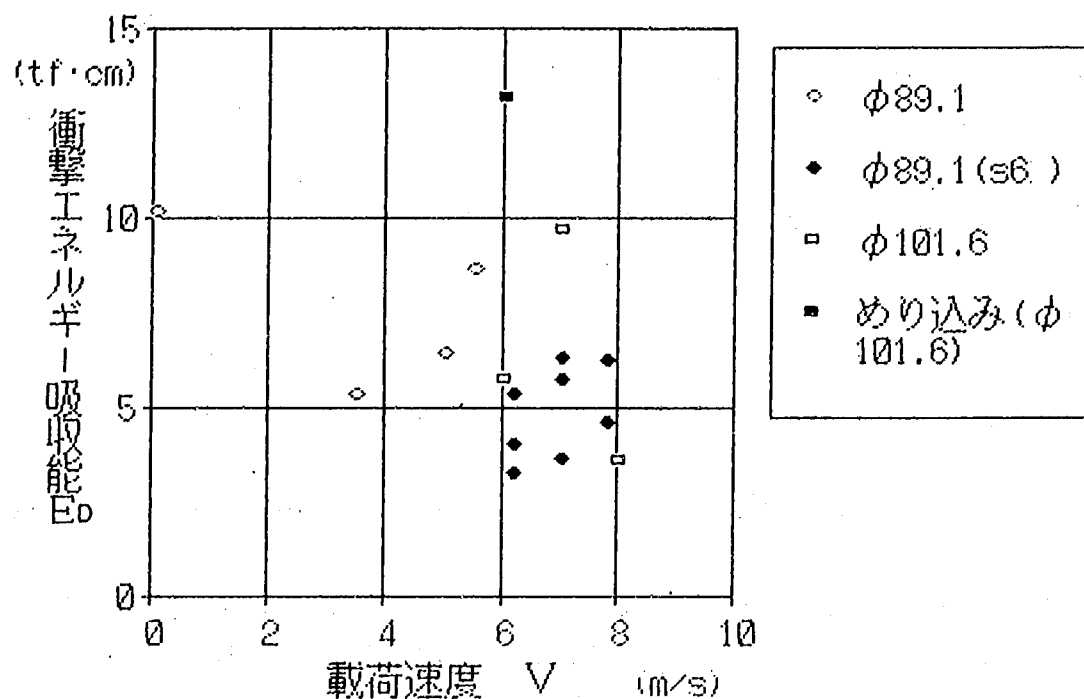


図-4.18 衝撃エネルギー吸収能～載荷速度の関係

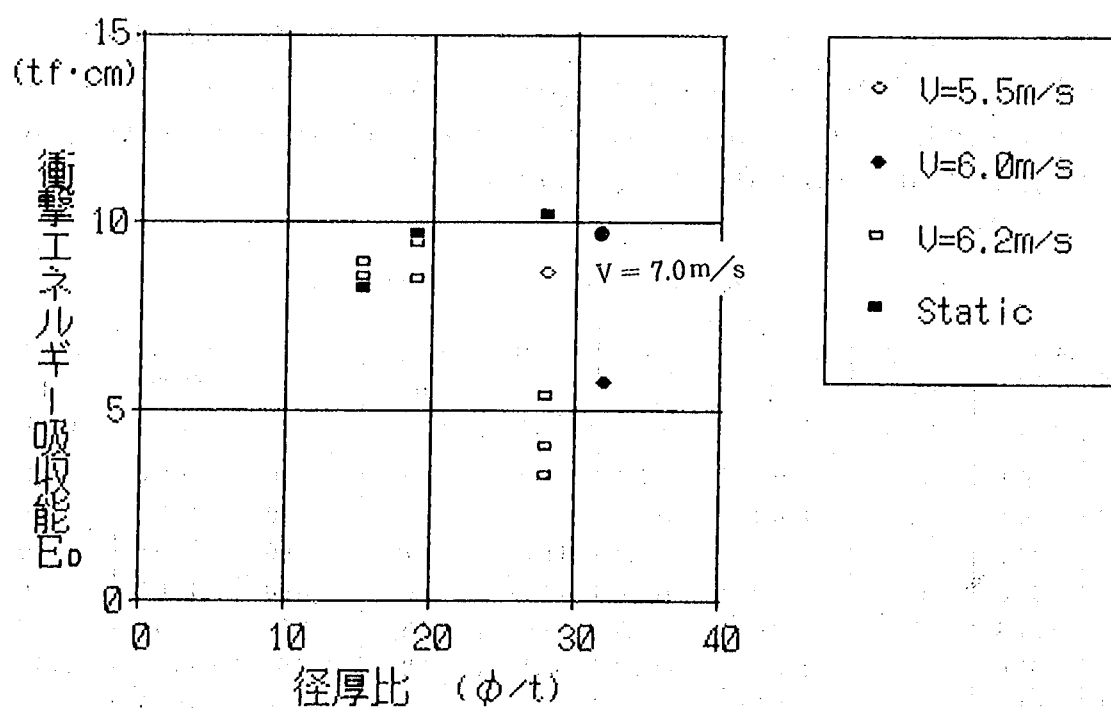


図-4.19 衝撃エネルギー吸収能～径厚比の関係

(6) 局部エネルギー吸収能

実験結果から直接局部エネルギー吸収能を求めることはできないので、局部エネルギー吸収能 E_{DL} は計算で推定するか、残留変形から推定する必要がある。

衝撃局部めり込み実験結果で得られた $P \sim \delta$ 曲線を図 4.20 に示す。 $P \sim \delta$ 曲線はほぼ単純ばりの $P \sim \delta$ 曲線と同様の形状を示している。この $P \sim \delta$ 曲線から、 $P = 0$ となる時点までの外力仕事量として、 E_{DL} を求めた結果を表 4.6 に示す。表 4.6 より E_{DL} は、同一速度、同一管径で実施した単純ばりの全体応答として吸収するエネルギー E_D と比較すると約 2 倍の大きさとなっている。

このことから、 ϕ/t が大きく局部めり込みを生じやすい ϕ の大きい梁については、局部エネルギー E_{DL} が大きく、はりの全体応答として吸収できる能力 E_D に比較して無視できないと考えられる。よって、 ϕ/t が大きくなった場合は、 E_{DL} を正しく評価する必要がある。本実験では、衝撃めり込み実験は、1 ケースしか行っていないので、 ϕ 、 V 、あるいは、 ϕ/t などとの関係を明らかにすることはできない。しかし、図 4.21 に示すように、 ϕ を一定としたとき、 V を大きくすれば、残留局部めり込み量は大きくなる傾向を示している。よって E_{DL} は V につれて大きくなると考えられる。同様に V を一定としたとき、局部めり込み量は ϕ とともに大きくなる傾向を示しているので、 E_{DL} も ϕ につれて大きくなると考えられる。

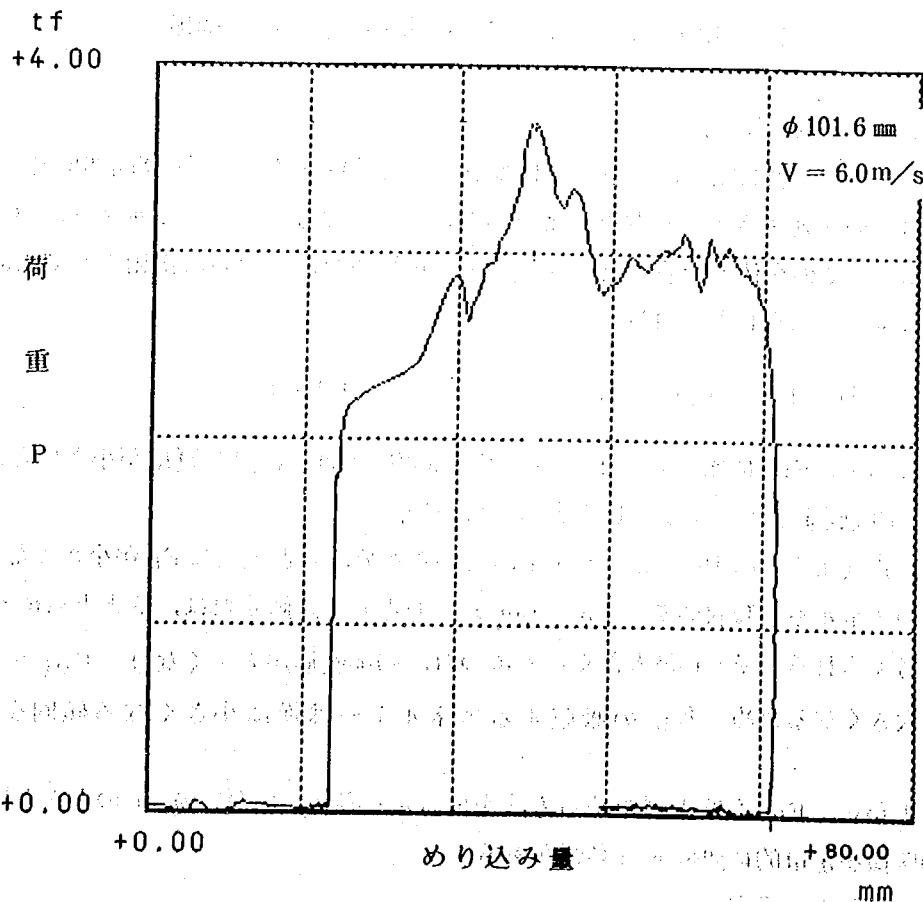


図 4.20 荷重～局部めり込み曲線の一例

これは、昨年度行なったシミュレーション解析においても ϕ が大きくなるにつれ、 E_{DL} が大きくなる傾向を示しており、この傾向が裏付けられている。しかし、定量的に E_{DL} を評価することは、本実験の結果のみからでは行えないので、追加実験によりデータ個数を増やして評価する必要がある。

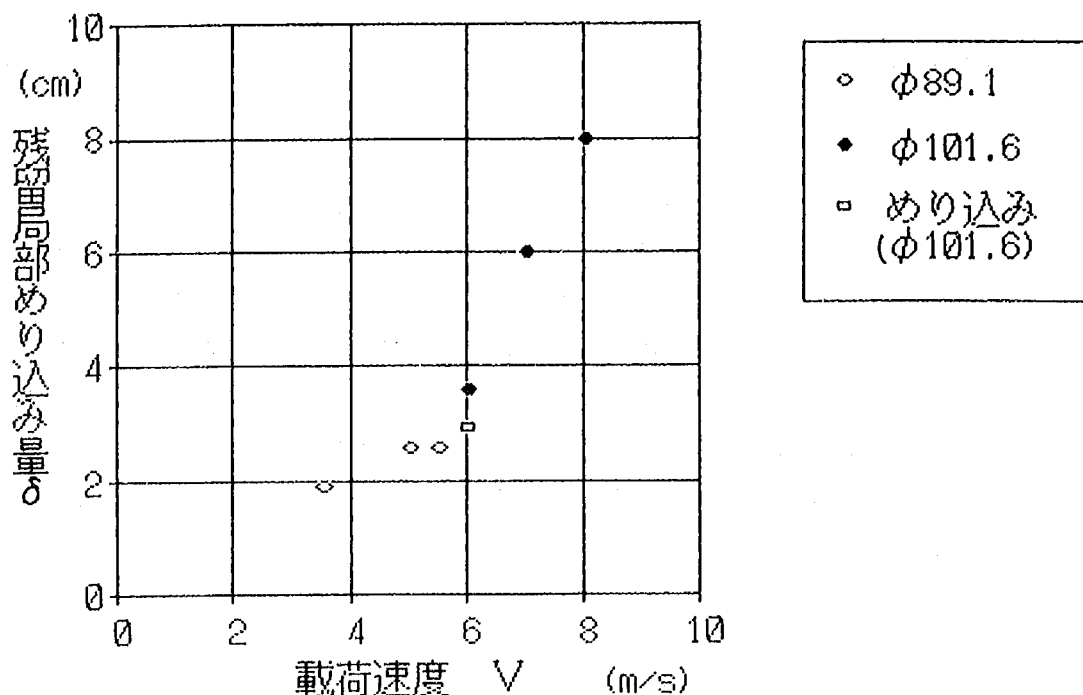


図-4.21 残留局部めり込み量～载荷速度の関係

(7) 衝撃エネルギー吸収能の推定

はりの衝撃エネルギー吸収能は、はりの全体応答として吸収する E_D および局部応答により吸収する E_{DL} ならびにはりの運動エネルギーなどに変換され、あるいは逸散するエネルギー E_0 に分けられる。よってはりの系としての全体で吸収できるエネルギーの総量は、これらの総和として求められることになる。このエネルギーを U とすれば、

$$U = E_D + E_{DL} + E_0 \quad (4.2)$$

ここで、 E_0 は、 E_D 、 E_{DL} に比較して小さいので（本実験では、はりの質量が小さいため）無視すれば、 E_D と E_{DL} で吸収するエネルギー量を求めれば良い。

本実験では、式(4.2)の中の E_D のみを求めているため、 ϕ とともに E_D が小さくなる傾向を示す。しかし、はりのエネルギー吸収能を $(E_D + E_{DL}) = U$ として評価すれば、 ϕ とともに U は増加する傾向を示すと考えられる。 ϕ/t が大きくなるにつれ、局部変形が大きくなり、 E_{DL} として吸収するエネルギーが大きくなるため、 E_D の吸収するエネルギーは逆に小さくなる傾向を示すと思われる。

これらのことから、 E_{DL} を確実に求める方法を検討する必要があり、 ϕ/t の大きさによる E_{DL} の変化、 V との関係を定量的に把握する必要がある。

① 実験結果からの推定

(5)項で示したように、破壊限界付近でのエネルギー吸収能 E_D は、ほぼ静的エネルギー吸収

能 E_S に等しくなることから、簡略的に E_D を求めるのであれば、 $E_D \doteq E_S$ として、 E_D を推定することが可能である。実際のはりの系としてのエネルギー吸収能は本来は $E_D \doteq E_L$ の形で評価されるべきものであるので、ここで求めた E_D は、はりの系として求められる U よりも小さく評価されている。

今 $E_D \doteq E_S$ としてはりのエネルギー吸収能を求めれば、昨年度の近次式により次式を用いて E_D を求めることができる。

$$E_D = 0.57 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 6.30 \quad (4.3)$$

② 任意のスパンに対する E_S の推定

昨年度の静的実験で得られた $P \sim \delta$ 曲線を図-4.22に示すように完全弾塑性型の $P \sim \delta$ 曲線にモデル化する。

単純ばり、中央載荷の場合の最大荷重 P_{max} およびそのときの変位 δ_e は次式で求められる。

$$P_{max} = \frac{4\sigma_y Z_P}{\ell} \quad (4.4)$$

$$\delta_e = \frac{P_{max} \ell^3}{48EI} \quad (4.5)$$

はりのエネルギー吸収能 E_S は、図-4.21において $P \sim \delta$ の積分値で表わされるので次式となる。

$$\begin{aligned} E_S &= \frac{1}{2} P_{max} \delta_e + P_{max} \delta_p \\ &= P_{max} (0.5 \delta_e + \delta_p) \end{aligned} \quad (4.6)$$

ここに、 σ_y : 降伏応力 (kgf/cm^2)
 Z_P : 塑性断面係数 (cm^3)
 I : 断面2次モーメント (cm^4)
 E : 鋼材のヤング係数 (kg/cm^2)
 ℓ : スパン長 (cm)
 δ_e : 弾性限界変位
 δ_p : 塑性変位

靱性率を μ とすれば δ_p は、次式となる。

$$\delta_p = \mu \delta_e \quad (4.7)$$

式(4.7)を式(4.6)に代入すれば

$$E_S = P_{max} \delta_e (0.5 + \mu) \quad (4.8)$$

式(4.8)に式(4.4)(4.5)を代入

すると

$$\begin{aligned} E_S &= \left(\frac{4\sigma_y Z_P}{\ell} \right) \cdot \frac{\ell^3}{48EI} (0.5 + \mu) \\ &= \frac{\sigma_y^2 Z_P^2}{3EI} \ell (0.5 + \mu) \end{aligned} \quad (4.9)$$

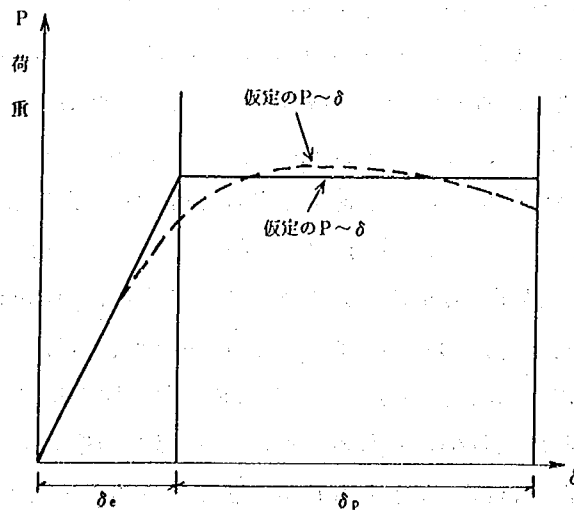


図-4.22 完全弾塑性型の荷重～変位関係

ここで静的実験から得られる $\sigma_{y1}\mu$ ，鋼管の諸元を用いて E_s を求めた結果を表-4.6に示す。ただし， $\ell = 100$ (cm)， $E = 2.1 \times 10^6$ (kg/cm²) を用いた。

表-4.8には，実験結果の E_s もあわせて示している。表より式(4.9)により求めた E_{sc} と実験値 E_s はほぼ等しいことから，式(4.9)により E_D を推定できると考えられる。

はりの全体変形として吸収するエネルギー量 E_D は，薄肉管 (ϕ/t が大きい) の場合， V が大きくなるにつれ，全体変形よりも局部めり込みが卓越し，局部めり込みによって吸収するエネルギー量 E_{DL} が大きくなるため，小さくなる傾向を示す。したがって， ϕ/t が大きい場合， V の影響を考慮する必要がある。この問題は，はりのエネルギー吸収能を $E_D + E_{DL}$ の形で評価すれば， ϕ/t の影響は排除されると考えられる。

表-4.6 静的エネルギー吸収能

鋼管径 ϕ (cm)	降伏応力 σ_y (kg/cm ²)	塑性断面係数 Z_p (cm ³)	断面2次 モーメント I (cm ⁴)	靱性率 μ	静的エネルギー 吸収能 E_{sc} (tf·cm)	静的エネルギー 吸収能 E_s (tf·cm)
48.6	3900.0	6.6	11.8	9.8	8.3	8.2
60.5	3900.0	10.6	23.7	9.0	9.7	9.7
89.1	3900.0	23.7	79.8	6.5	10.2	10.2
101.6	3900.0	31.0	119.9	6.0	10.6	

4.5 まとめ

本章での成果および問題点をまとめれば，以下のようになる。

(1) $P \sim t$ ， $P \sim \delta$ 曲線の形状は，ほぼ似かよった形状を示す。 $P \sim \delta$ 曲線は静的 $P \sim \delta$ 曲線に比較すると P が大きく δ が小さい形状となり，これに慣性力，局部応答による微振動が加わった波形となっている。特に ϕ/t が大きくなるにつれ， P_{max} に達した後の荷重低下が著しくなり， ϕ/t が小さい場合にみられた塑性流れと考えられる平衡状態がなくなっている。

(2) P_{max} は， ϕ 又は Z_p とともに大きくなる傾向を示すが，本実験で測定している P_{max} は，慣性力および局部応答による荷重であり，はりの耐力に等しい静的実験の P_{smax} よりも大きくなっている。

また， P_{max} は載荷速度 V が速くなるにつれ大きくなる傾向を示すが，ある一定速度以上になると，局部めり込み量が大きくなることにより断面係数が著しく低下し小さくなる。したがって， ϕ/t が大きく，めり込みを生じやすい薄肉管では，速度の影響について十分考慮する必要がある。

(3) δ_u は， ϕ が大きくなるにつれ，局部めり込み量が大きくなること，およびはりの剛性が増すことにより小さくなる。また， δ_u は V の増大にともないやや大きくなる傾向を示すが，増加の割合は小さくほぼ一定とみなせる。衝撃めり込み実験で得られためり込み量は，はり全体の変位量と比較すると大きく，無視できないことが分かった。よって局部エネルギー吸収能についても正しく評価する必要がある。

(5) 破壊限界付近の E_D は， ϕ にかかわらずほぼ一定となっている。また， E_s も同様に ϕ とともに緩やかに大きくなる傾向を示すが，増加の割合は小さく， $E_D \approx E_s$ とみなせる。これより E_D を推定するには，式(4.3) および式(4.9)を用いれば E_D を求められる。

(6) E_D は破壊限界に達するまでは、全てのエネルギーをはりが吸収するため、 V とともに大きくなる傾向を示すが、破壊限界を越えた速度になると E_D は小さくなる。これは、衝突直後のはりの応答は局部応答が先行し、はりの全体応答は遅れて生じるため、 ϕ/l が大きく速度が速い場合局部めり込み量が卓越し、局部座屈が生じて急速に破壊状態に達するためと考えられる。

(7) 局部エネルギー吸収能 E_{DL} は、 ϕ/l が大きくなるにつれ無視できないほど大きくなるため、はりのエネルギー吸収能を評価するには、 $(E_D + E_{DL})$ の形で評価することが望ましい。 $(E_D + E_{DL})$ の形の評価では、 ϕ が大きくなるにつれエネルギー吸収能が小さくなるような矛盾した結果は生じないと考えられる。 E_{DL} は (ϕ/l) が大きいほど大きくなり、 V が大きいほど大きくなる傾向を示す。次に本実験で問題が明らかになった事項として、

① ϕ/l が大きい薄肉管の場合、 E_{DL} が大きくなることが予想されたが、実験上求められなかったため、 E_{DL} が明らかにされていない。単純ばりとして、 E_{DL} 、 E_D を直接的に実験から求めるためには、せん断実験で用いた高速変形負荷装置を用いて実験を行い局部めり込み量を求める必要がある。また、シュミレーション解析により E_D と E_{DL} の比率を求める方法もある。 E_{DL} と E_D の相関あるいは E_{DL} の推定を行う必要があるため、実験または解析のいずれかを行わねばならない。

② 荷重測定にロードセルを用いているが、管径の大きい管ではめり込み量が大きくなるため、荷重を測定する感知部以外のロードセルの肩部で荷重を受け、実荷重よりも荷重を小さく評価している可能性もあるため、ロードセル以外の荷重測定方法を用いて荷重の検証を行うことが望ましい。

5. 片持ばりのせん断実験

鋼管製砂防ダム（A型スリットダム）の破壊は既存の調査・研究から曲げ応力，せん断力，軸力および曲げ応力・軸力の組合せにより引き起こされると考えられる。曲げ応力による破壊は，既に昨年度の実験研究により検討し，衝撃曲げエネルギー吸収能の推定式を提案した。

本年度は，実際の破壊事例においてせん断力により破壊されているケースが報告されていることからせん断力に対する検討を行なう。

図－5.1 (a)に示すようなA型スリットダムに対する巨礫の衝突現象を図－5.1 (b)に示すような簡単な片持ばりに対する巨礫の衝突現象にモデル化し，この片持ばりに対する巨礫の衝突現象を実験的に再現し，衝撃せん断耐力・変形およびせん断エネルギー吸収能を調べ，鋼管のせん断抵抗力の検討を行なうことを目的とした。

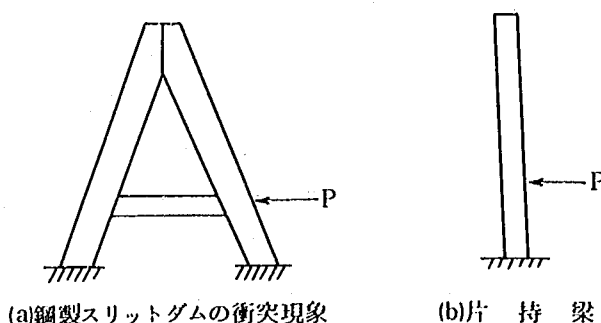
鋼管のせん断抵抗力を求めるにあたり，静的せん断実験を行い静的せん断耐力・変形および静的せん断エネルギー吸収能を求め，衝撃せん断耐力・変形および衝撃せん断エネルギー吸収能と比較し衝撃に対するせん断抵抗力が静的取扱ができるかどうか検討する必要がある。そのため静的せん断実験を行い，衝撃の場合との比較資料を得ることを目的とした。

静的せん断実験では，衝突による衝撃せん断実験に比較して慣性力の影響が比較的小さい変位制御による高速载荷実験を行い，動的せん断耐力・変形および動的せん断エネルギー吸収能を求め，静的せん断耐力・変形およびせん断エネルギー吸収能と比較し载荷速度の影響について調べた。衝撃実験において鋼管径および衝突速度が衝撃せん断耐力・変形および衝撃せん断エネルギー吸収能に及ぼす影響を明かにするため鋼管径および载荷速度をパラメータとして実験を行った。衝撃実験から求めた衝撃せん断耐力・変形および衝撃せん断エネルギー吸収能と静的せん断耐力・変形および静的せん断エネルギー吸収能を比較し，衝撃せん断耐力および衝撃せん断エネルギー吸収能が静的取扱ができるかどうかを検討する。また，慣性力が衝撃せん断耐力および衝撃せん断エネルギー吸収能に及ぼす影響を調べるため，動的せん断耐力および動的せん断エネルギー吸収能と比較する。

5.1 実験条件

鋼管径及び载荷速度がせん断耐力・変形およびせん断エネルギー吸収能に及ぼす影響を調べるため，実験は鋼管径および载荷速度をパラメータとして行なった。

実験条件を表－5.1に示す。



図－5.1 鋼製スリットダムの衝突現象とモデル化

表- 5.1 (a) 静的実験ケース

CASE No.	鋼管径 φ (cm)	載荷速度 V (m/s)	載荷位置 (cm)	測定項目
CS-1		STATIC	20.0	1. 荷重～ 時間 2. 変位～ 時間 3. ひずみ ～時間
CS-2		2.0		
CS-3		4.0		
CS-4		STATIC		
CS-5		2.0		
CS-6		4.0		
CS-7		STATIC		
CS-8		2.0		
CS-9		4.0		
合 計		9 ケース (試験体 9 体)		

表- 5.1 (b) 衝撃実験ケース

CASE No	鋼管径 φ (cm)	衝突速度 V (m / s)	載荷位置 (cm)	測定項目
CSD-1	48.6	4.0	20.0	1. 荷重～ 時 間 2. 変位～ 時 間 3. ひずみ～ 時 間
CSD-2		8.0		
CSD-3	60.5	4.0		
CSD-4		8.0		
CSD-5	89.1	4.0		
CSD-6		8.0		
合 計		6 ケース (試験体 6 体)		

5.2 実験設備

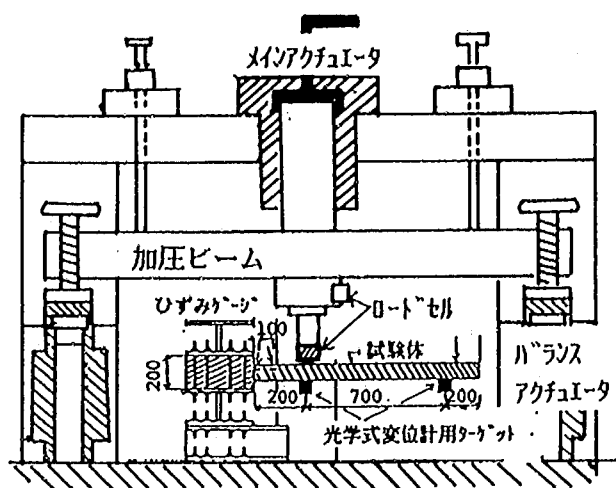
(1) 載荷装置

載荷装置の概要を図- 5.2 に示す。静的実験に用いた載荷装置は、高速変形負荷装置である。この装置による試験体の最大変形速度は 4.0 m/s である。衝撃実験は、単純梁の衝撃実験で使用したのと同じ装置を用いて行った。

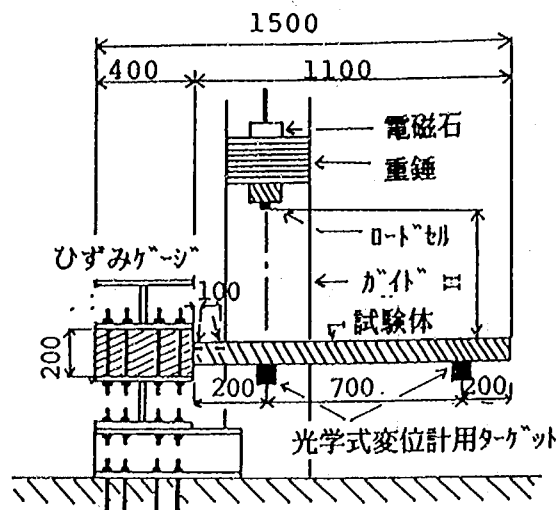
試験体のセット方法を図- 5.2 に示す。試験体は衝撃載荷実験に用いた試験体と同一規格の片持ばりである。荷重載荷にあたっては衝撃せん断実験と実験条件を等しくするため試験体と載荷用のパンチの間にロードセルを挿入し、ロードセルに荷重を載荷することにより試験体に荷重を載荷した。試験体を固定する支点部分は図- 5.2 に示すように固定端の条件を満足するようコンクリートで固められた試験体の固定部を上下から十分な剛性を持つ H 形鋼で挟み込み、これをボルトナットで固定した。

(2) 測定装置

本実験における計測項目は、静的せん断実験においては荷重～載荷点変位関係、荷重～ひずみ関係であり、動的せん断実験においては荷重～時間関係、載荷点変位～時間関係、ひずみ～時間関係である。載荷荷重は試験体と載荷用パンチの間に挿入したロードセルにより、変位は載荷点下部および載荷点から 90 cm の位置に取り付けた光学式変位計用のターゲット追跡することにより測定した。また図- 5.2 に示す位置に取り付けたひずみゲージを用いて鋼管のひずみを測定した。併せて、載荷速度を確認するために高速変形負荷装置に付属している変位計を用いて装置の加圧ビームの変位量を測定した。計測値の取り込みに際して高速変形負荷装置の加圧ビームの変位量をサンプリングデータ用のトリガーとして用いた。計測されたデータは、すべて一時的にトランジェントレコーダに記録され、このデータを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保存した。



(a) 高速せん断



(b) 衝撃せん断

図- 5.2 試験装置の概要

5.3 試験体

実験に用いた試験体は、片持ばりの衝撃載荷実験に用いた試験体と同一規格のものであり、全長 150.0 cm、鋼管部 110.0 cm、コンクリート固定部長さ 40.0 cm、幅 30 cm、厚さ 20.0 cm の鋼種 STK-41 の $\phi 48.6$ 、60.5、89.1 mm の 3 種類である。試験体諸元は第 3 章表- 3.3 に示している。

5.4 実験結果

(1) 荷重～時間、変位～時間曲線

高速および衝撃実験で計測された $P \sim t$ 、 $\delta \sim t$ 曲線の例を図- 5.4 に示す。表- 5.2 には、荷重持続時間 T_c 、最大荷重 P_{max} 、最大荷重までの時間 T_o 、載荷点の変位速度 δ_1 および自由端の変位速度 δ_2 を示す。図- 5.4、表 5.2 より以下の特性が認められる。

- ① 高速、衝撃の $P \sim t$ 曲線は、いずれも片持ばりの衝撃載荷実験等とは異なり、荷重の振動は極めて小さく、衝撃曲げ実験でみられたような短周期の大振動はみられない。これは、曲げ実験では、はりの耐力が小さかったため、局部応答の振動が荷重波形に大きな影響を与えていたが、本実験では、はりの耐力が大きかったためはりの変形は小さく、局部めり込みは一方に強制的に変位する形で生じるため、振動を生じていない。単純ばりの ϕ の大きい場合のように、曲げ剛性が大きい場合も、振動が小さくなっている。
- ② 荷重の発生後も、変位は若干遅れて発生する。これは、最初に局部応答による荷重が発生し、はりの全体応答が局部応答よりも遅れて生じるためである。
- ③ 高速と衝撃の $P \sim t$ 曲線を比較するとやや衝撃の P が大きくなっている。これは、衝撃実験には衝突直後の慣性力の影響が含まれているためであり、高速の場合この慣性力が比較的小さいためである。

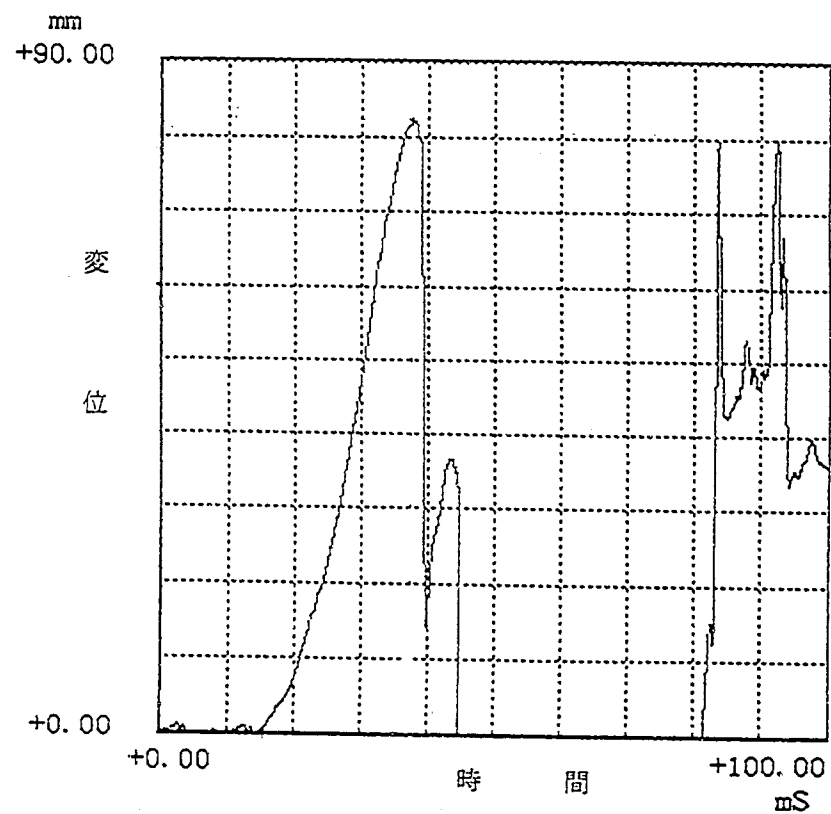
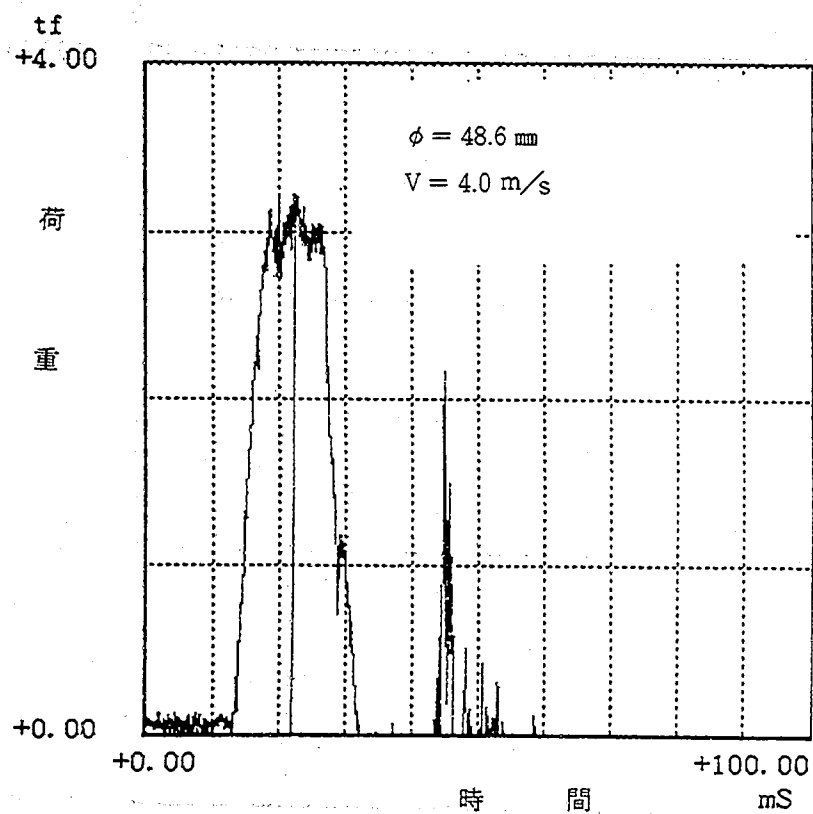
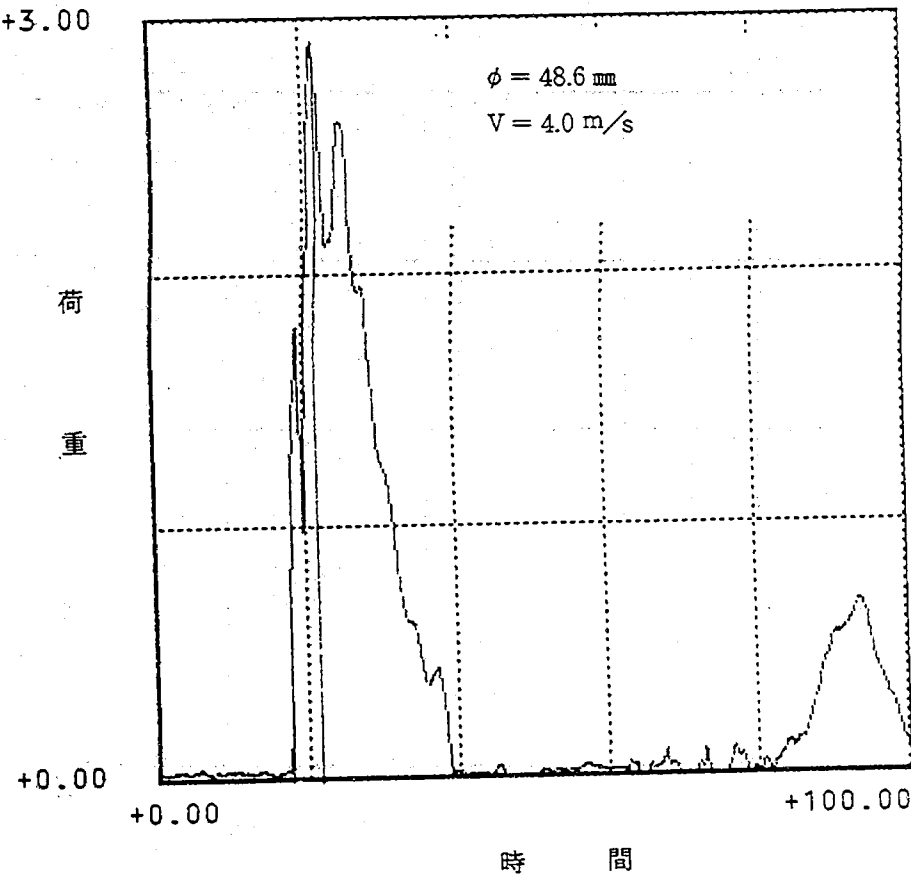


図- 5.4 (a) 高速せん断実験における荷重・変位～時間関係

tf
+3.00

荷
重



mm
+175.00

変
位

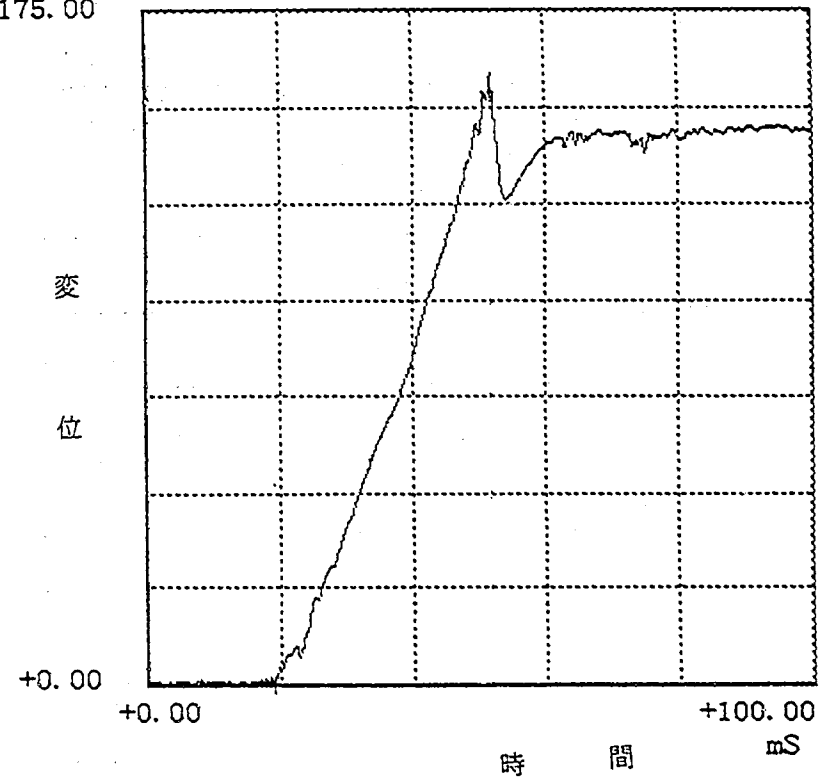


図-5.4(b) 衝撃せん断実験における荷重・変位～時間関係

表- 5.2 (a) 衝撃実験結果 (最大荷重および載荷速度)

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	衝突 速度 V (m/s)	重錘 重量 W (kgf)	載荷 位置 (cm)	最大 荷重 P_{max} (tf)	荷重持続 時間 T_c (msec)	最大荷重 までの時間 T_o (msec)	変位 速度	
								載荷点 δ_1 (m/s)	自由端 δ_2 (m/s)
CSD-1	48.6	4.0	220.0	20.0	3.8	20.59	3.92	3.83	6.83
CSD-2	48.6	8.0	220.0	20.0	4.0	13.73	3.90	7.29	8.17
CSD-3	60.5	4.0	220.0	20.0	4.1	20.10	6.67	1.88	3.34
CSD-4	60.5	8.0	220.0	20.0	3.1	10.79	2.45	6.79	9.59
CSD-5	89.1	4.0	220.0	20.0	5.0	50.49	9.80	1.30	1.84
CSD-6	89.1	8.0	220.0	20.0	5.5	10.78	3.92	4.69	4.93

表- 5.2 (b) 高速実験結果 (最大荷重および載荷速度)

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	載荷 速度 V (m/s)	載荷 速度 V' (m/s)	載荷 位置 (cm)	最大 荷重 P_{max} (tf)	荷重持続 時間 T_c (msec)	最大荷重 までの時間 T_o (msec)	変位 速度	
								載荷点 δ_1 (m/s)	自由端 δ_2 (m/s)
CS-1	48.6	static		20.0	1.46				
CS-2	48.6	2.0	1.80	20.0	3.11	29.12	8.79	1.71	
CS-3	48.6	4.0	4.20	20.0	3.22	18.68	8.79	3.93	6.50
CS-4	60.5	static		20.0	2.64				
CS-5	60.5	2.0	1.80	20.0	4.00	28.12	9.87	1.80	
CS-6	60.5	4.0	4.08	20.0	4.08	19.78	9.89	3.20	6.07
CS-7	89.1	static		20.0	3.54				
CS-8	89.1	2.0	1.76	20.0	4.62	35.16	10.99	1.76	3.03
CS-9	89.1	4.0	3.97	20.0	4.66	27.47	9.00	3.10	8.26

④ ピーク荷重までの時間 T_o と鋼管径 ϕ の関係を図- 5.5 に, T_o と載荷速度 V の関係を図- 5.6 に示す。図- 5.5 より速度が遅い場合は, T_o はほぼ ϕ に比例して大きくなる傾向を示すが, 速度が速くなるにつれ, T_o はほぼ一定値になる傾向を示す。これは V が遅い範囲では, 局部応答による荷重応答が小さく, はりの耐力の影響が大きくなるが, 速度 V が速くなるにつれ, 局部応答による荷重応答が大きくなるため, ϕ に無関係にほぼ一定の値となるためと考えられる。また, 衝撃実験と高速実験の $V = 4.0 \text{ m/s}$ の場合の T_o を比較すると, 衝撃実験の方が短い。これは, 高速実験では慣性力の影響が小さくほぼはりの耐力が最大となったときに P_{max} が生じるが, 衝撃実験の P_{max} は慣性力が含まれているため, 必ずしも耐力が最大となったときに P_{max} が生じているわけではなく, 衝突直後の慣性力が最大となった時点で P_{max} が生じているためである。

図- 5.6 より V が速くなるにつれ, いずれの管径においても T_o は比例的に小さくなる傾向がある。これは, 曲げ実験では V にかかわらず T_o はほぼ一定の値を示す異なった結果を示している。曲げ実験では, P_{max} は慣性力と局部応答によって生じていたが, 本実験のようにはりの曲げ耐力が大きくなってくると, 速度が遅い場合は, 慣性力や局部応答の荷重応答よりもはりの耐力の荷重応答が卓越するため, T_o は長くなるが, V が速くなるにつれ局部応答による荷重は応答が卓越すること, およびはりの耐力の荷重応答も速くなるため T_o は短くなると考えられる。応

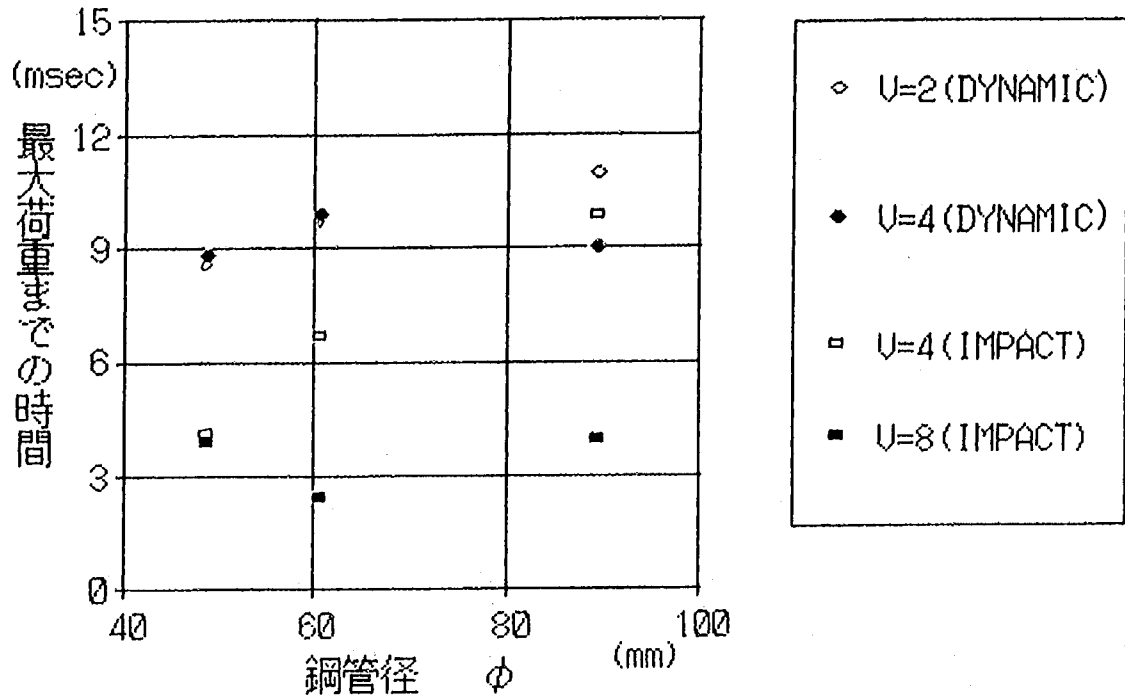


図-5.5 最大荷重に達するまでの時間～鋼管径関係

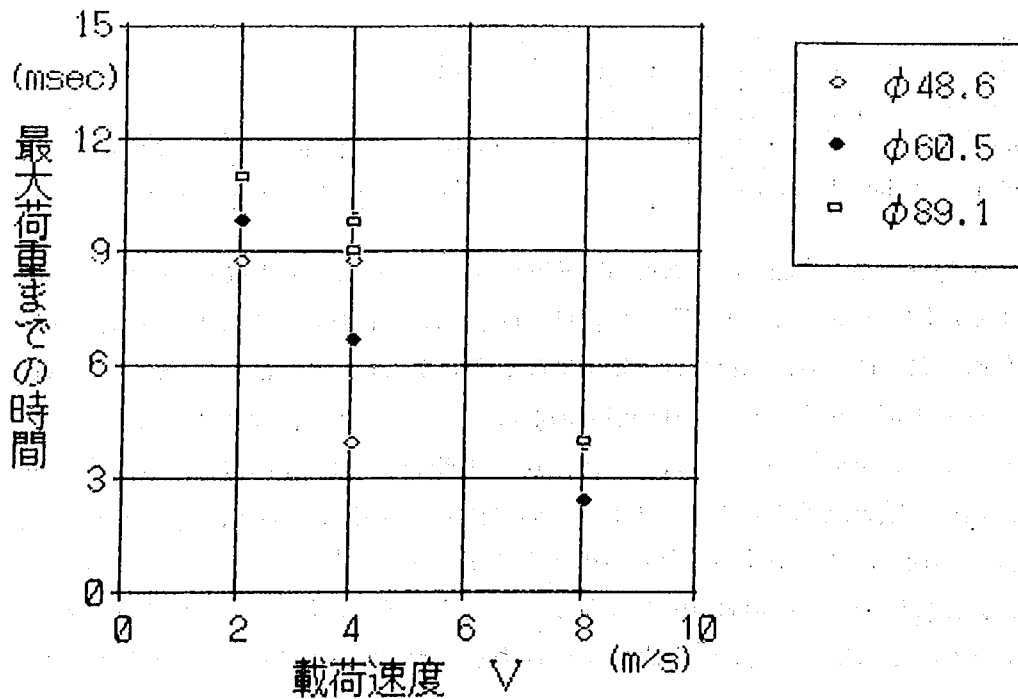


図-5.6 最大荷重に達するまでの時間～載荷速度関係

⑥ 荷重持続時間 T_c と ϕ , V の関係を図-5.7, 5.8 に示す。

図-5.8 より高速の場合の T_c は ϕ が大きくなるにつれ、やや長くなる傾向を示す。これに対して、衝撃の場合は V によって T_c の傾向が変わっている。 $V = 4 \text{ m/s}$ では、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ の T_c は非常に長い、これは $V = 4 \text{ m/s}$, $\phi 89.1 \text{ mm}$ の場合は破壊していないためである。

$V = 8 \text{ m/s}$ では、 ϕ が大きくなるにつれ、 T_c はやや短くなる傾向を示す。これは、 V が速くなるにつれ、破壊形態が曲げ型からせん断型に変化するためである。つまり、 V が大きくなるにつれ局部応答が卓越し局部めり込み量が大きくなるため、局部めり込みによる断面係数が著しく低下し、破壊状態に至るためである。

図-5.8より、 V が大きくなるにつれ、 T_c は短くなる傾向を示す。これは、 V が速くなるにつれ、終局状態に達する時間が短くなることおよび、破壊モードが曲げ型からせん断型に移行するためである。なお、曲げ型破壊とせん断型破壊の破壊形態の違いを写真-5.1に示す。

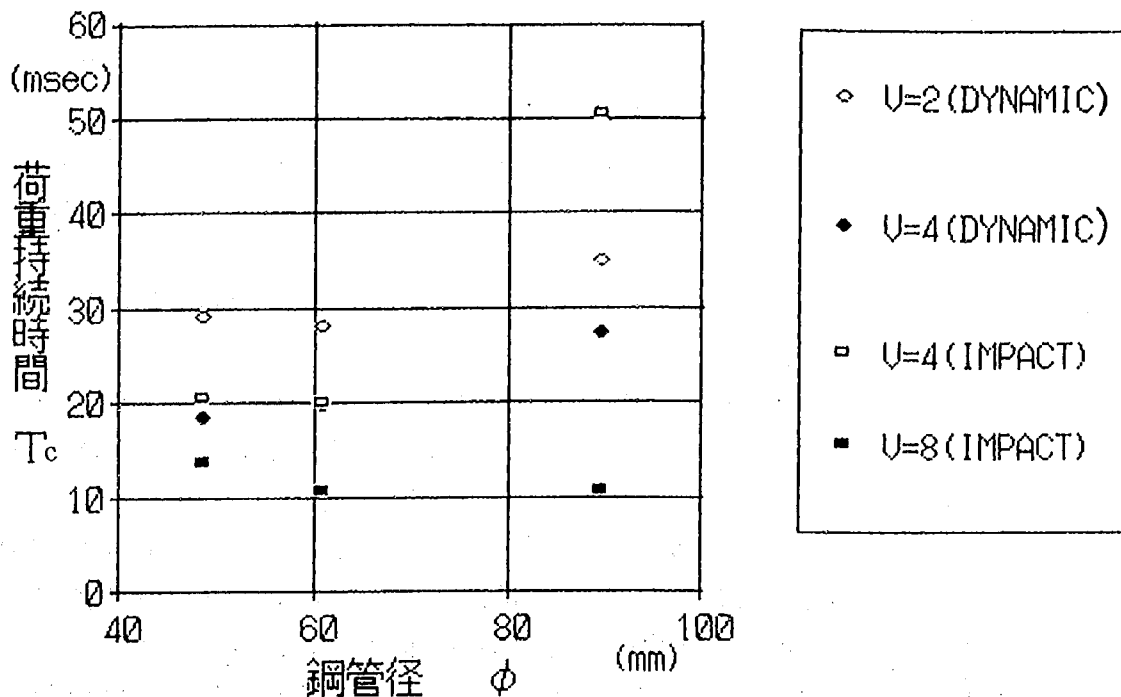


図-5.7 荷重持続時間～鋼管径関係

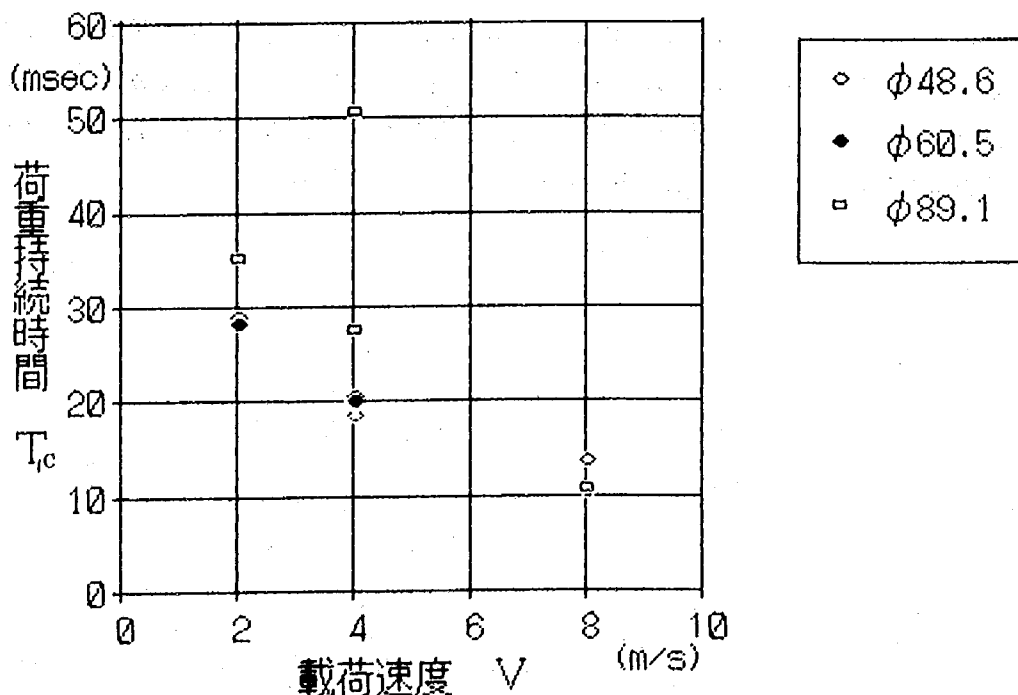


図-5.8 荷重持続時間～載荷速度関係

⑥ 載荷点の変位速度 $\dot{\delta}$ と ϕ , V の関係を図-5.9, 5.10に示す。

図-5.9より、高速実験の場合は、はりの耐力にかかわらず、載荷速度をほぼ一定とするので、はりの変位速度 $\dot{\delta}$ も大きく変化することはないが、 ϕ が大きくなると $\dot{\delta}$ はやや小さくなる傾向を示す。これは、 ϕ が大きくなるにつれめり込み量が大きくなるため、若干 $\dot{\delta}$ が小さくなるためである。これに対し、衝撃実験の場合は ϕ が大きくなるにつれ、 $\dot{\delta}$ はほぼ比例的に小さくなる傾向を示す。これは、衝撃実験では有限の運動エネルギーをはりに与えるため、はりの耐力によって変形量に差が生じることおよび、 ϕ/l が大きいほどめり込みを生じやすいことにより、載荷点下部の変位はめり込みの分少なくなるためである。

図-5.10より $\dot{\delta}$ はいずれの鋼管径においてもほぼ V に比例して大きくなる傾向を示す。これは、高速実験の場合強制的にある速度で変位させているためである。衝撃実験の場合は、衝突直後のエネルギーの力のつり合いを考え、はりの復元力により吸収されるエネルギーをほぼ不変とすれば、はりの運動エネルギーが大きくなるとはりの変位速度が大きくなるためである。

(2) 荷重～変位曲線

$P \sim t$, $\delta \sim t$ 曲線から t 軸を消去して、 $P \sim \delta$ 曲線を作成した。その例を図-5.11に示す。

図より以下の特性が認められる。

① $P \sim \delta$ 曲線の形状は、 $P \sim t$ 曲線の形状とほぼ同様である。これは、 $\delta \sim t$ 曲線が t にほぼ比例して単調増加する傾向を示すためである。よって、 $P \sim \delta$ 曲線の形状特性はほぼ $P \sim t$ 曲線と同様である。

② 図には、静的、高速、衝撃の3種の実験結果をあわせて示しているが、静的の $P \sim \delta$ 曲線は、 ϕ が小さい $\phi 48.6$, $\phi 60.5$ の場合は、塑性流れ状態が生じており、 P_{max} に達した後、平衡状態がみられる。しかし、 $\phi 89.1$ の場合は、 P_{max} に達した後、荷重 P は急激に低下している。これは、 $\phi 89.1$ の場合は、局部めり込みが大きくなり、断面係数が低下するため、耐力が小さくなっているためと考えられる。よって、 ϕ が大きくなると靱性が低下することになる。衝撃、高速実験の $P \sim \delta$ 曲線はほぼ似た形状を示す。高速実験と衝撃実験の相違は、衝撃実験の場合は慣性力の影響が大きいため、その振動が含まれていることである。しかしながら、 $\phi 89.1$ の場合は、高速、衝撃実験の $P \sim \delta$ 曲線は大きく異なる。これは、衝撃実験の $V = 4 \text{ m/s}$ は、完全に破壊していないため、変位が戻る現象を示しているためである。

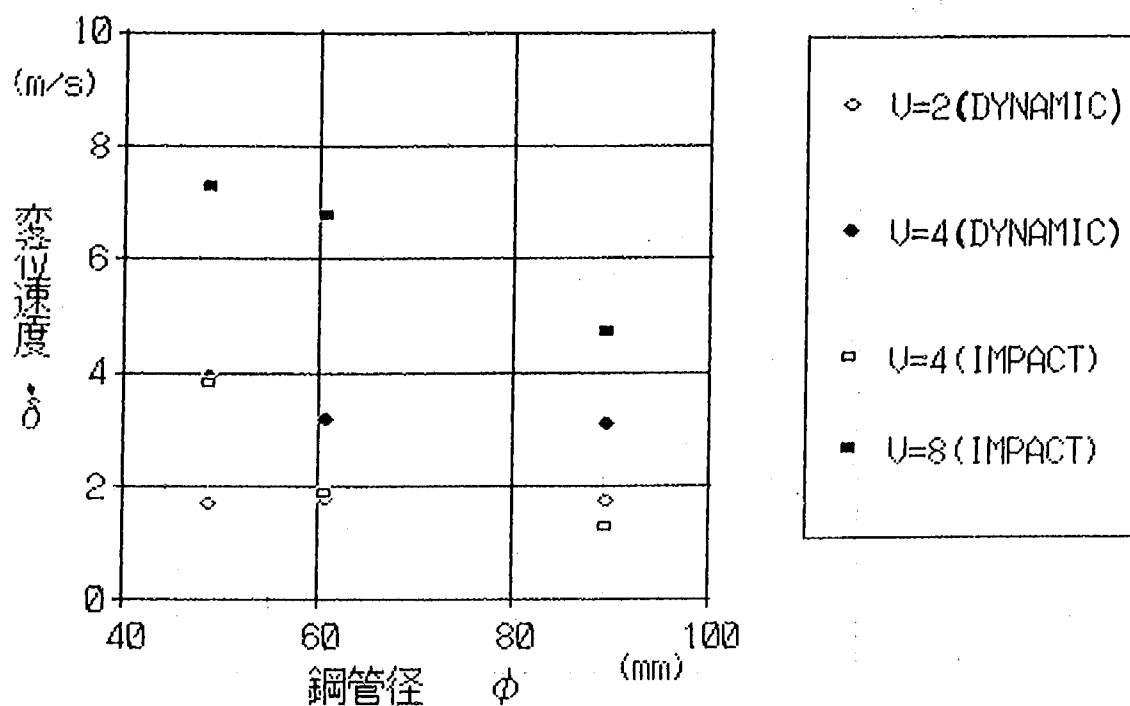


図 - 5.9 変位速度～鋼管径の関係

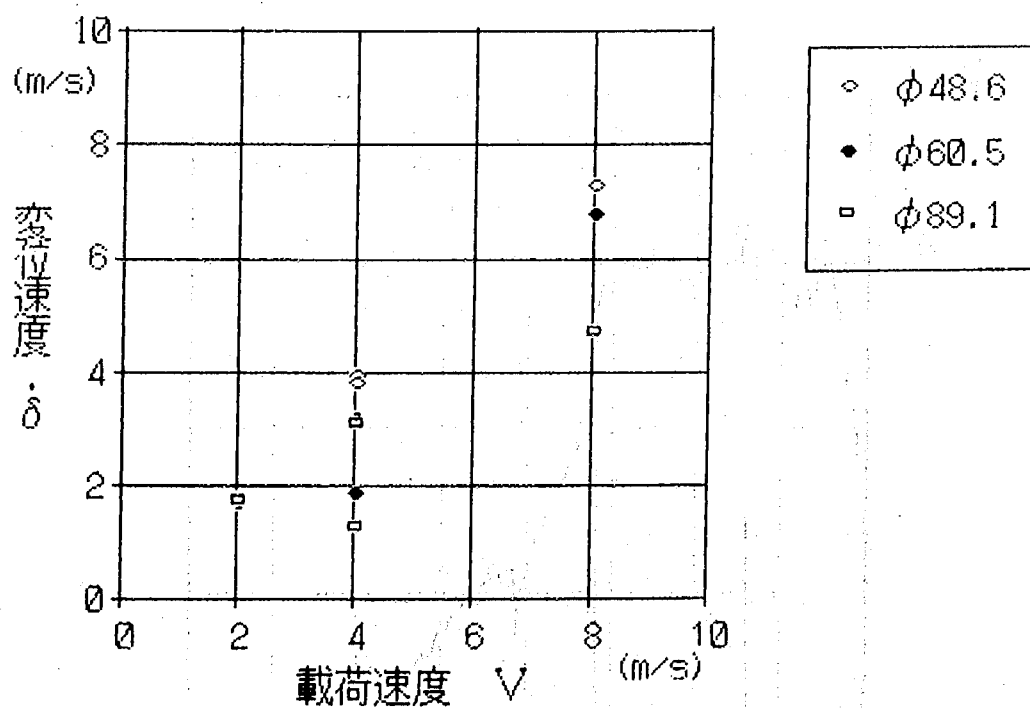
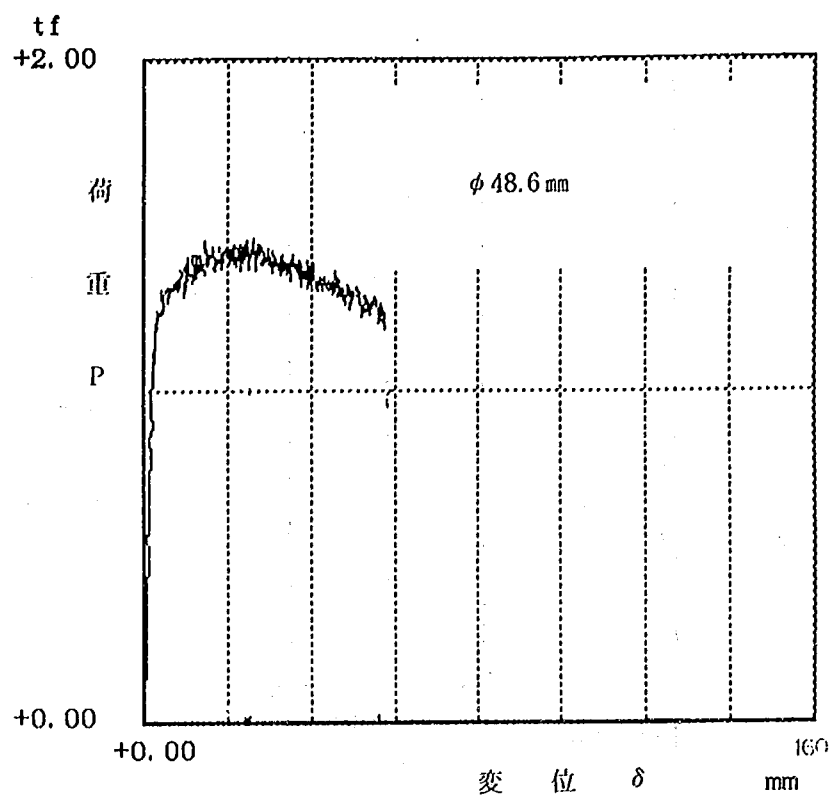
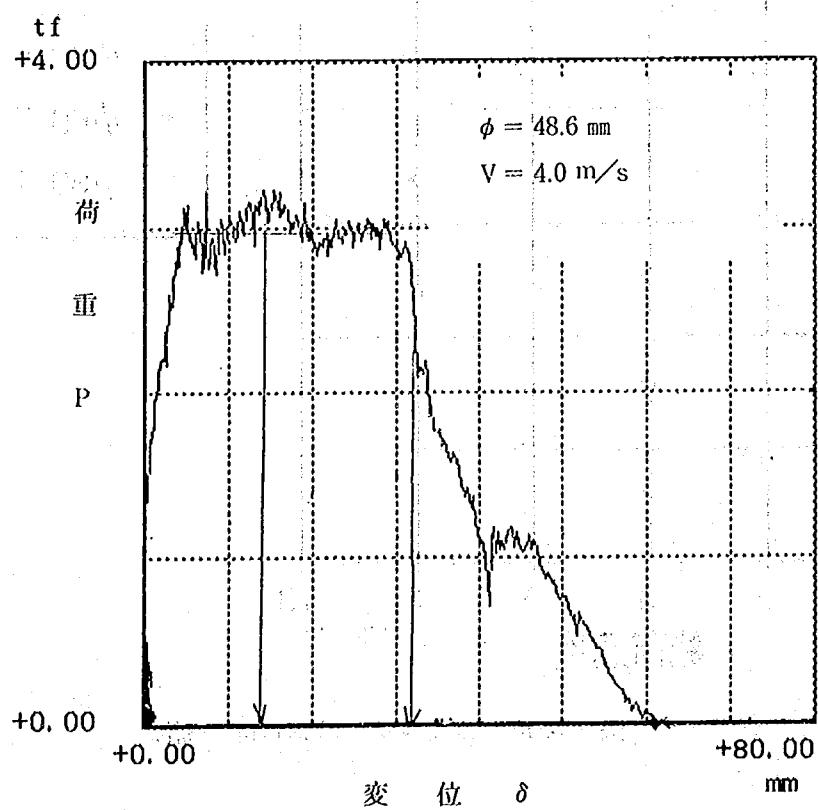


図 - 5.10 変位速度～載荷速度の関係



図－ 5.11(a) 静的せん断実験における荷重～変位関係



図－ 5.11(b) 高速せん断実験における荷重～変位関係

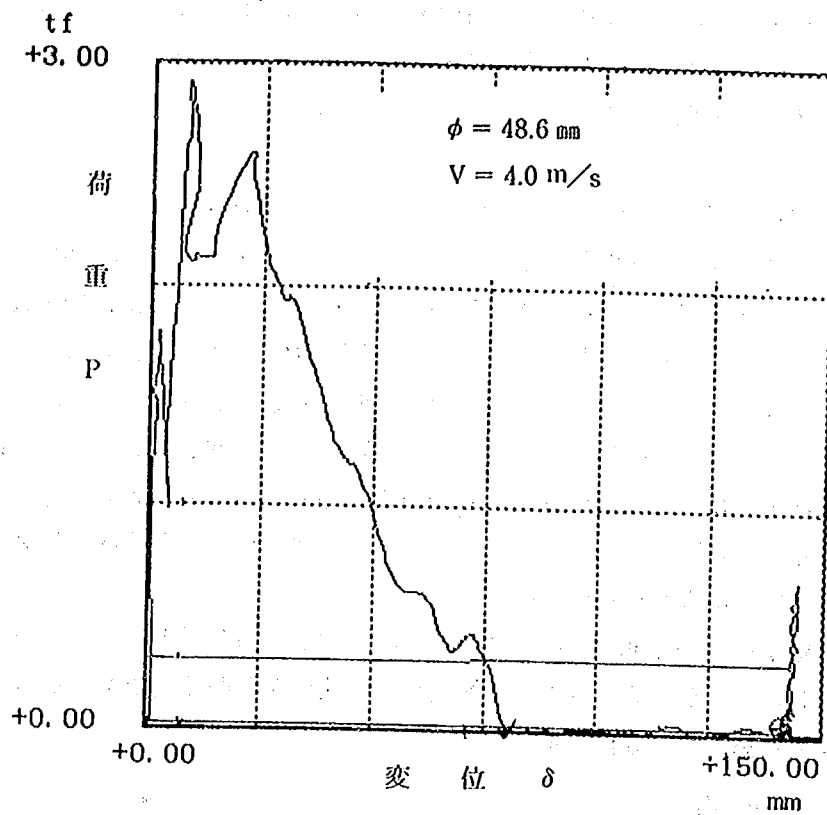


図- 5.11(c) 衝撃せん断実験における荷重～変位関係

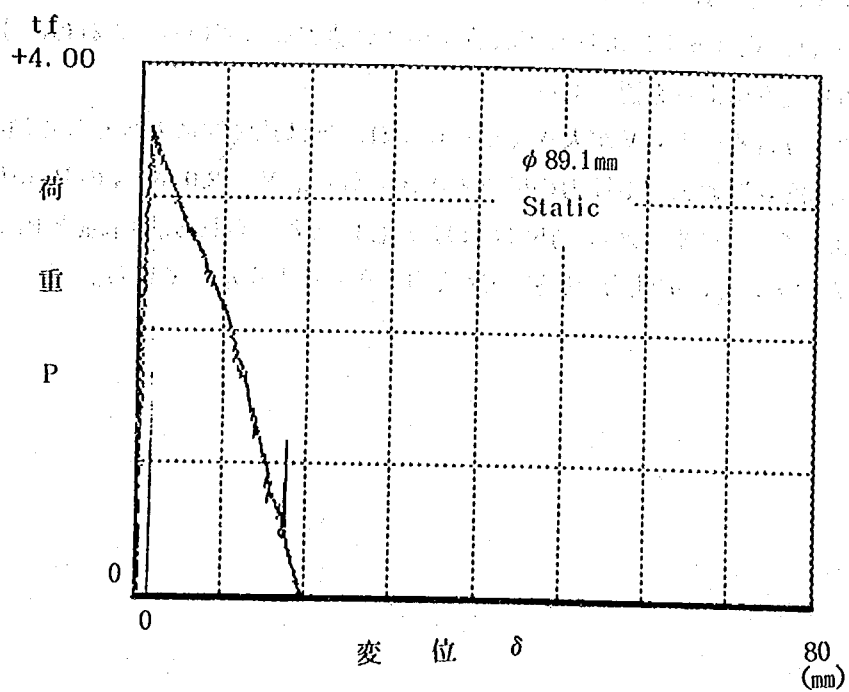


図- 5.11(d) 荷重～変位曲線の一例

- ③ ②で述べたように衝撃実験の $P \sim \dot{\delta}$ と高速実験の $P \sim \dot{\delta}$ 曲線はほぼ等しいことから、衝撃実験の $P \sim \dot{\delta}$ 曲線もほぼはりの耐力によって生じていると思われるので、衝撃のエネルギー吸収能 E_D も計測した $P \sim \dot{\delta}$ 曲線より求めてよいと考えられる。

(3) 最大荷重

最大荷重 P_{max} と ϕ の関係を図-5.12に P_{max} と V の関係を図-5.13に示す。

- ① 図-5.12より静的な最大荷重 P_{smax} 、高速実験の最大荷重 P_{Dmax} 、衝撃実験の最大荷重 P_{imax} はいずれも ϕ が大きくなるにつれ大きくなる傾向を示す。しかし、 P_{smax} と P_{Dmax} の増加傾向はほぼ等しく ϕ が大きくなるにつれ、 P_{smax} と P_{Dmax} の増加割合が小さくなる。これは、 ϕ が大きくなるにつれ局部めり込み量が大きくなるため、断面係数が小さくなり、耐力が低下するためである。これに対し、 P_{imax} は ϕ にほぼ比例して大きくなる傾向を示す。これは、 P_{imax} は慣性力、および局部応答による荷重応答がはりの耐力に加わっているためである。

P_{Dmax} と P_{imax} を比較すると P_{smax} の方がやや大きい傾向を示す。これは、 P_{imax} には慣性力の影響が含まれているためと考えられる。

図-5.14に P_{smax} と塑性断面係数 Z_P の関係を示す。図-5.14より P_{smax} と Z_P の関係は、ほぼ $P_{smax} \sim \phi$ 関係に等しいことが認められる。静的実験の破壊形態が曲げ破壊型となっているので、曲げ耐力を次式で求め、図-5.14に示した。

$$Z_P = \frac{\sigma_y \cdot Z_P}{\ell} \quad (5.1)$$

ここに、 σ_y : 降伏応力, ($= 3900 \text{ kg/cm}^2$) Z_P : 塑性断面係数 (cm^3)

ℓ : 荷重載荷点から固定端までの距離 ($= 20 \text{ cm}$)

図より、式(5.1)は、 ϕ が小さい場合は、ほぼ実験値に近い傾向を示すが、 ϕ が大きい場合 ($\phi 89.1 \text{ mm}$) は、式(5.1)よりも実験値は小さい値となっている。これは、すでに述べたように局部めり込みによる影響である。

- ② 図-5.13より各管径とも V が大きくなるにつれ、ほぼ比例的に大きくなる傾向を示す。これは、ひずみ速度効果および慣性力の影響と考えられる。 $V = 2.0 \text{ m/s}$ の P_{Dmax} はほぼ等しく、この範囲の速度でのひずみ速度効果はほぼ等しいと考えられる。 P_{Dmax} と P_{imax} は同じ速度でも P_{imax} の方が大きく、慣性力の影響が比較的大きいことを示している。

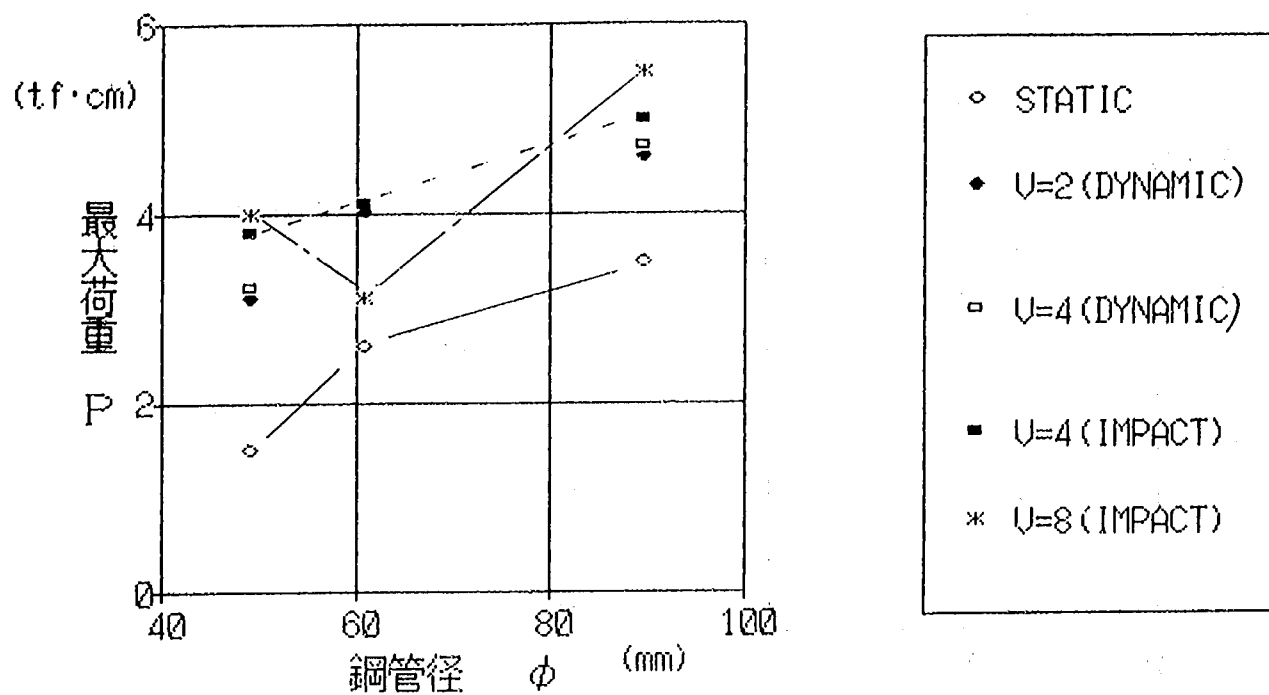


図-5.12 最大荷重～鋼管径関係

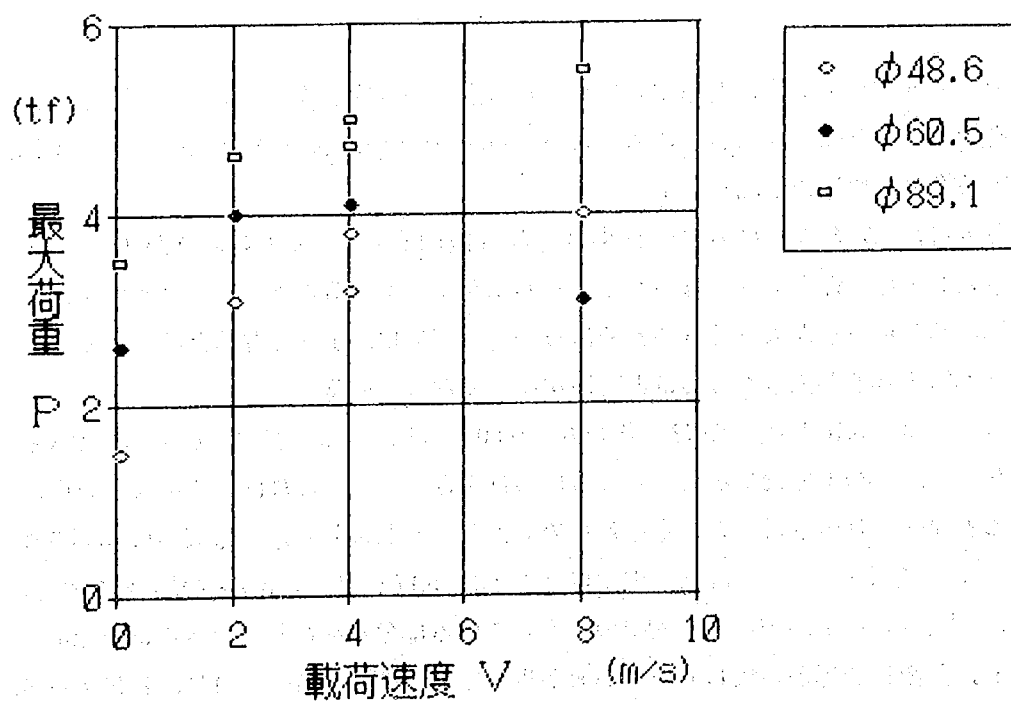


図-5.13 最大荷重～載荷速度

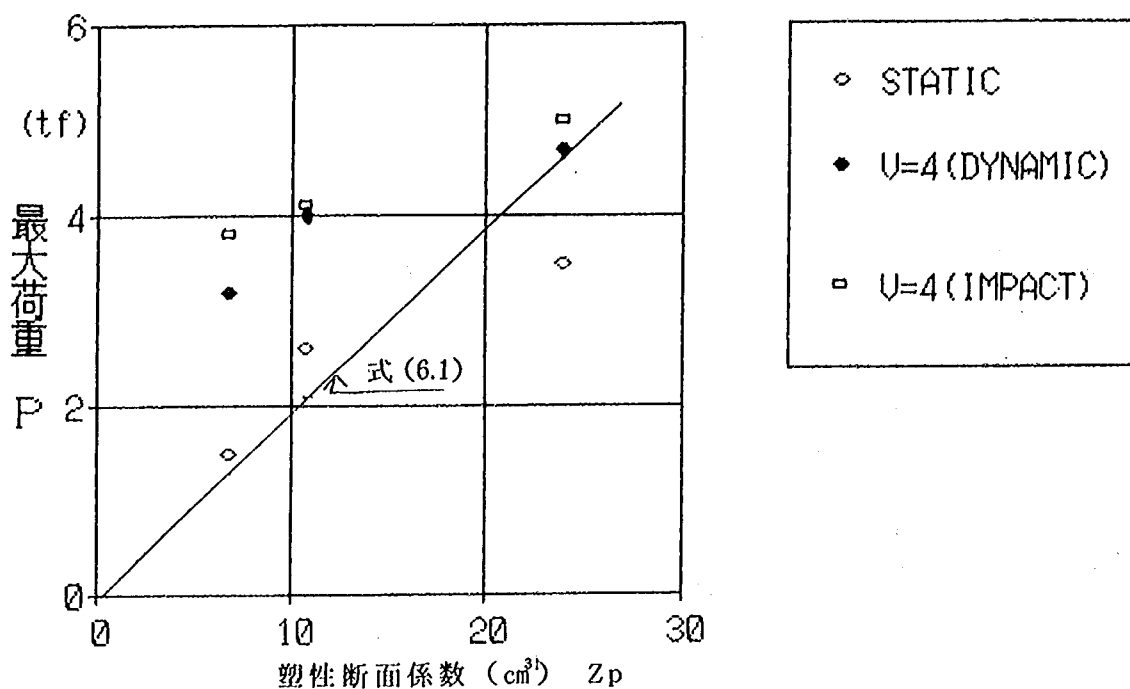


図- 5.14 最大荷重～塑性断面係数

(4) 終局変位

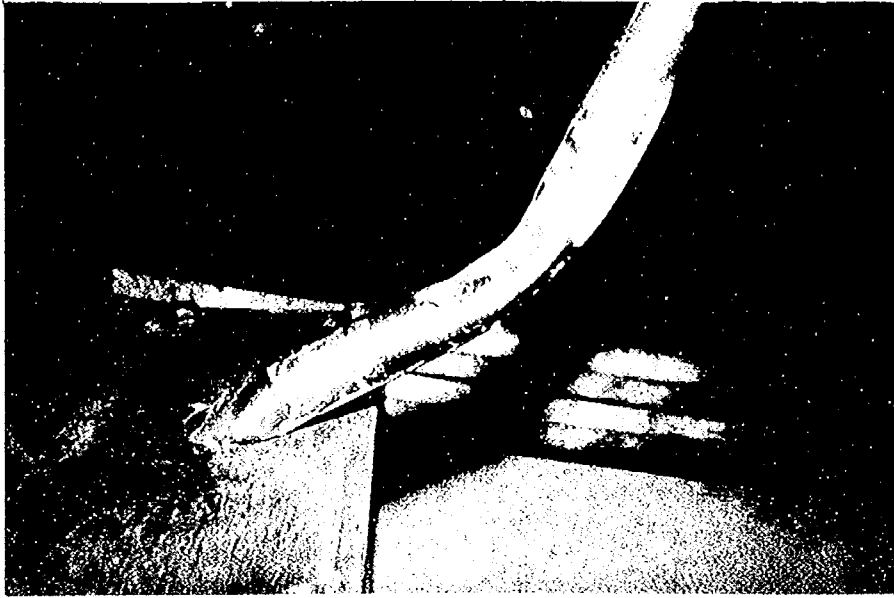
図- 5.11 に示した $P \sim \delta$ 曲線において、荷重が 0 になった時点での変位を終局変位 δ_u と定義した。表- 5.3 に終局変位を示す。また図- 5.15 および図- 5.16 に $\delta_u \sim \phi$ 関係、 $\delta_u \sim V$ 関係を示す。なお、写真- 5.1, 5.2 に実験後の試験体の状況を示す。

- ① 図- 5.15 より δ_u は ϕ が大きくなるにつれ小さくなる傾向を示す。これは、 ϕ が大きくなるにつれ、はりとしての剛性が大きくなるため、変形量が小さくなること、および ϕ が大きくなるにつれ、局部めり込み量が大きくなるためはりの全体変形量が小さくなるためである。

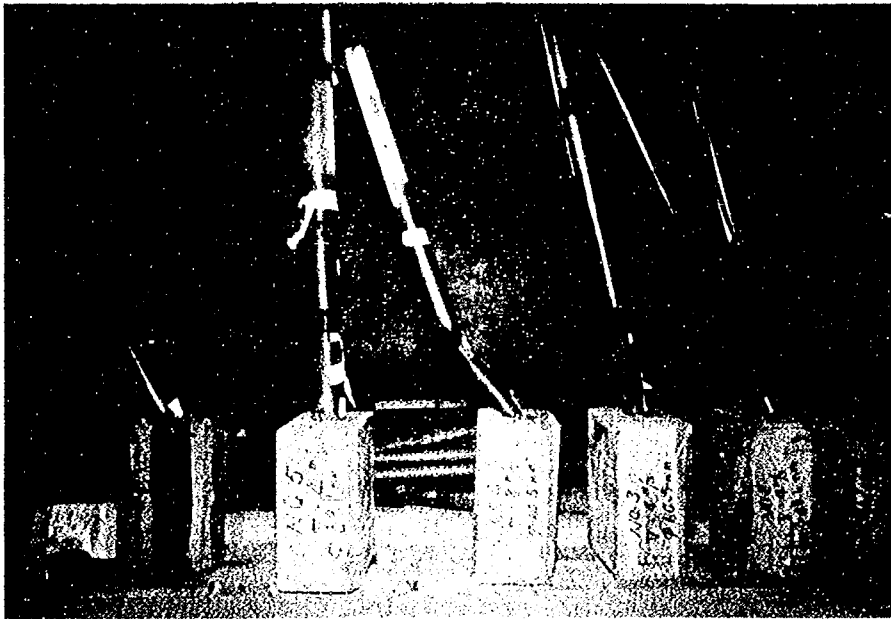
また、 $P \sim \delta$ 曲線より ϕ が大きくなるほど靱性が小さくなっている。

- ② 図- 5.15, および図- 5.16 より、 δ_u は、 $\phi 48.6$, $\phi 60.5$ の場合、高速実験では V に無関係にほぼ一定となるが、 $\phi 89.1$ では V が大きくなるにつれ小さくなる。これは、 ϕ が大きい場合 V が大きくなると局部めり込み量が大きくなるためである。これに対し、衝撃実験の δ_u は高速の δ_u に比べ一般に大きくなっている。この原因として図- 5.17 に $V = 8 \text{ m/s}$ の場合の $\delta \sim t$ 曲線を示すが、図より $\delta \sim t$ 曲線には、勾配の急変している部分が存在していることが認められる。すなわち、急激に変形が増大している部分が生じているのである。これは、特に $V = 8 \text{ m/s}$ の場合破壊形態がせん断型に変化していることから、この変位の急増部分が破壊形態に影響を及ぼしているものと考えられる。

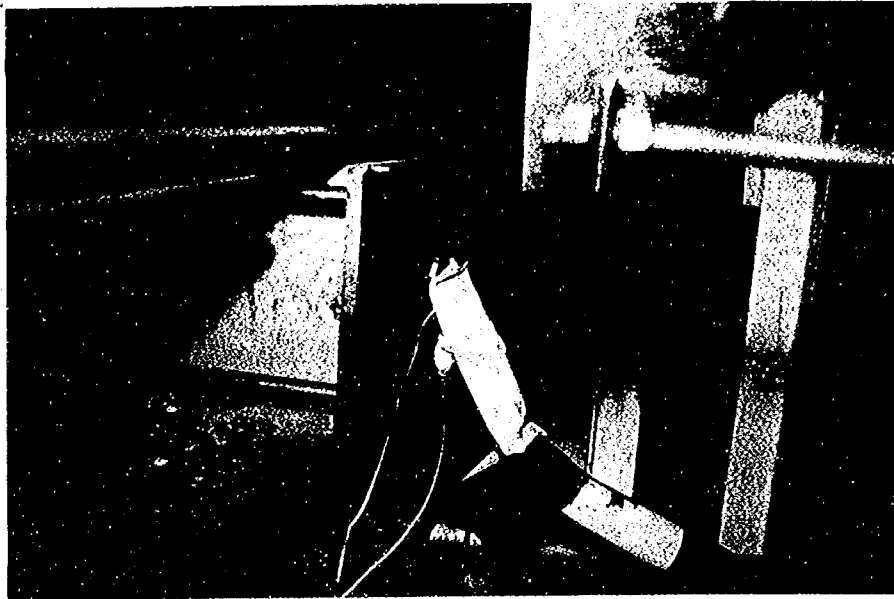
今回の実験では、この変形がせん断による影響かどうかを確かめることはできないので、今後追加実験をすることにより確認する必要がある。



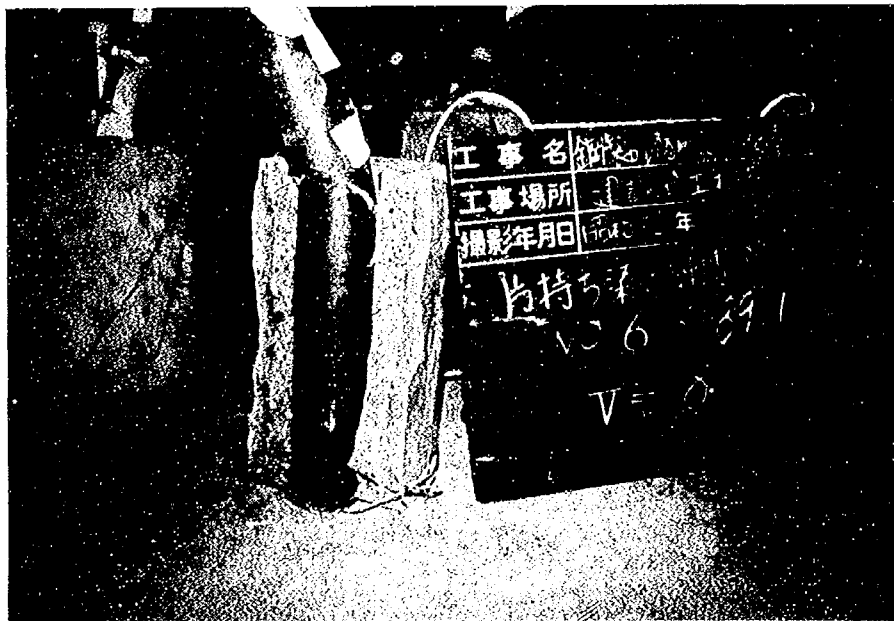
写真－ 5.1 試験体の変形状況



写真－ 5.2 全ケースの試験体の状況



写真－ 5.3 根元付近の変形状況



写真－ 5.4 固定部と根元の状況

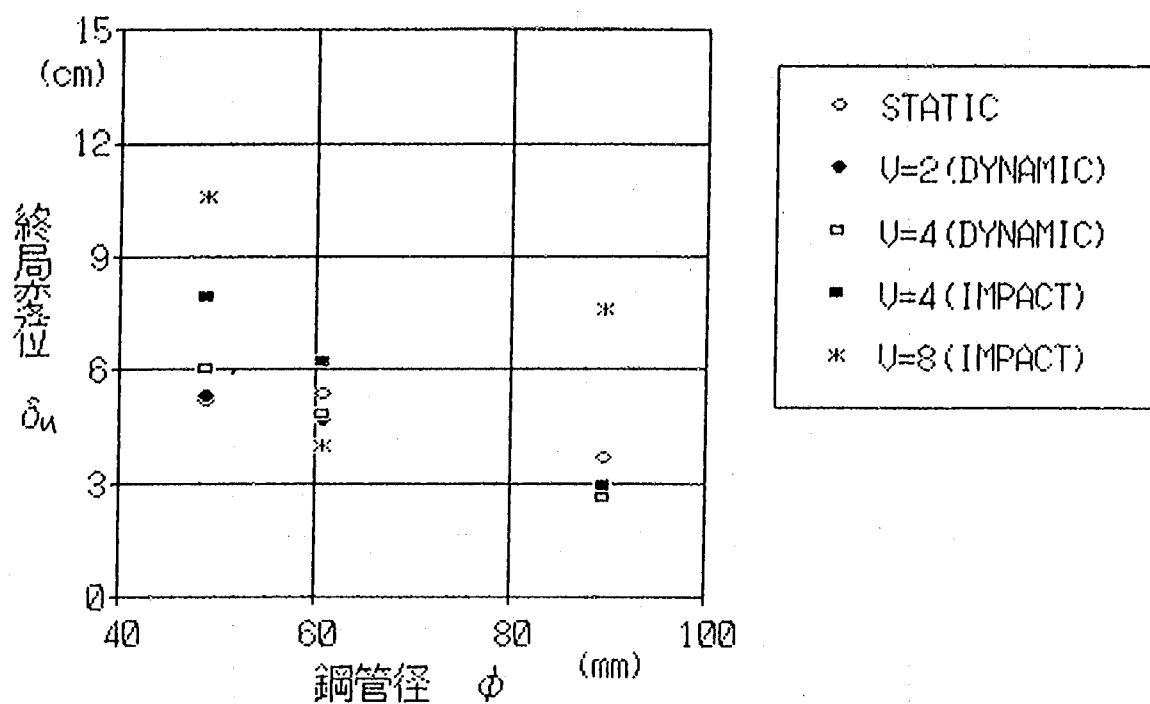


図- 5.15 終局変位～鋼管径関係

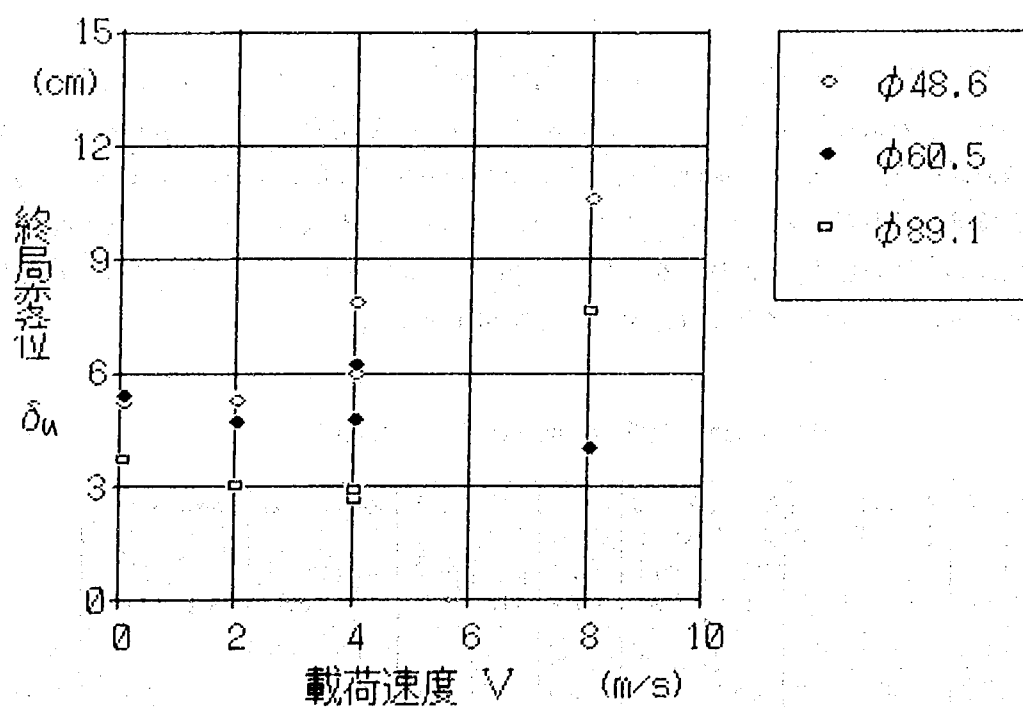


図- 5.16 終局変位～載荷速度関係

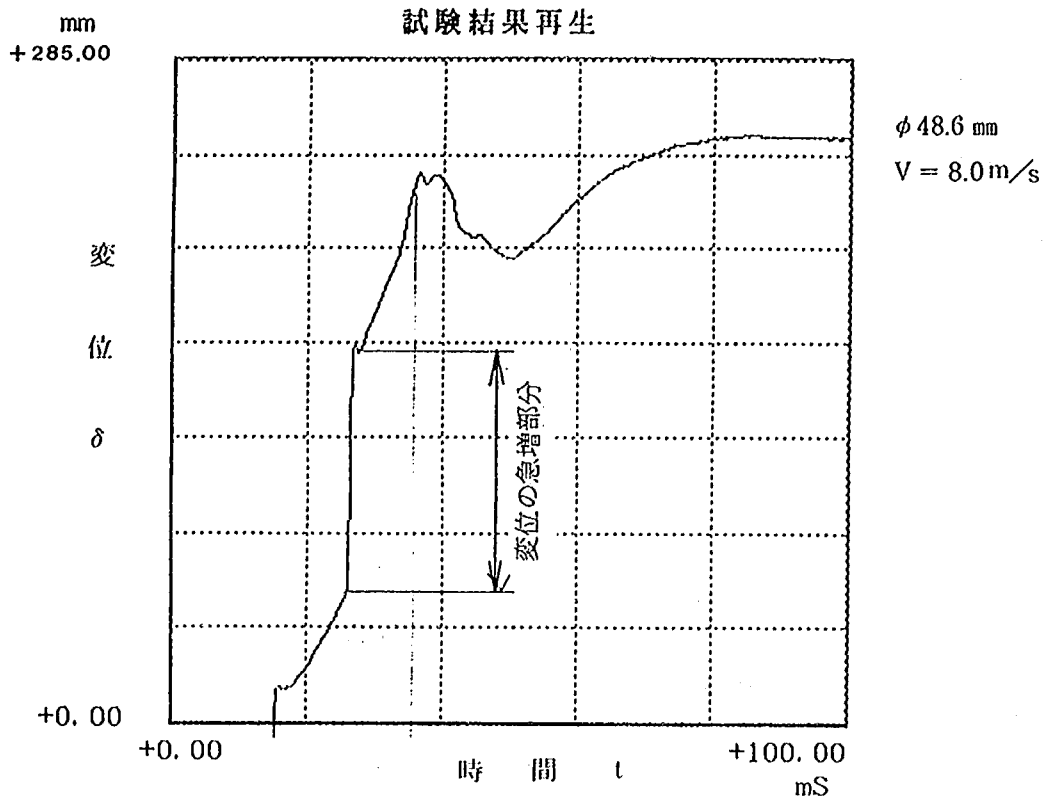


図- 5.17 変位～時間曲線の一例

高速載荷実験では、局部めり込み量とはりの全体変形を合わせた変位が載荷板の変位として求められる。この載荷板の変位と荷重 P を用いて得られた終局変位を表- 5.3 に示す。表- 5.3 より載荷板変位から求めた終局変位 δ_{u1} と、載荷点変位 (局部めり込み量を除く) から求めた終局変位 δ_{u2} を比較すると ϕ が大きいほど δ_{u1} と δ_{u2} の差が大きくなる。この $(\delta_{u1} - \delta_{u2})$ の値が局部めり込み量 δ_{ui} であり、 ϕ が大きくなるほど局部めり込み量が大きくなることがわかる。また δ_{ui} は V が大きくなるほど大きくなる傾向を示す。

表- 5.3 (a) 動的せん断エネルギー吸収能

CASE No.	鋼管径 ϕ (cm)	載 速 V (m/s)	荷 度 V (m/s)	載 位 (cm)	荷 置 P_{max} (tf)	最 大 終 局 変 位 δ_{u1} (cm)	終 局 変 位 δ_{u2} (cm)	動的せん断 エネルギー 吸収能 ED1 ED2 (tf・cm)		静的せん断 エネルギー 吸収能 ES1 ES2 (tf・cm)		局部めり込み エネルギー 吸収能 EDL (tf・cm)	破壊形態
CS-1	48.6	static		20.0	1.5	5.3	5.2			7.3	7.3	0.0	曲げ型
CS-2	48.6	2.0	1.8	20.0	3.1	4.7	5.3	9.1	9.0			0.1	曲げ型
CS-3	48.6	4.0	4.2	20.0	3.2	6.7	6.0	12.5	12.1			0.3	曲げ型
CS-4	60.5	static		20.0	2.6	5.8	5.4			11.2	11.1	0.1	曲げ型
CS-5	60.5	2.0		20.0	4.0	5.4	4.7	13.0	11.8			1.2	曲げ型
CS-6	60.5	4.0	4.1	20.0	4.1	6.3	4.8	15.0	12.7			2.3	曲げ型
CS-7	89.1	static		20.0	3.5	6.1	3.7			14.0	6.6	7.5	曲げ型
CS-8	89.1	2.0	1.8	20.0	4.6	6.0	3.0	18.0	7.0			11.0	曲げ型
CS-9	89.1	4.0	4.0	20.0	4.7	9.2	2.6	18.6	4.4			14.2	曲げ型

表-5.3(b) 衝撃せん断エネルギー吸収能

CASE No	鋼管径 ϕ (cm)	衝突 速度 V (m/s)	重錘 重量 W (kg f)	載荷 位置 (cm)	最大 荷重 P_{max} (tf)	終局 変位 δ_u (cm)	衝撃せん断 エネルギー 吸収能 E_D (tf・cm)	重錘の運動 エネルギー U (tf・cm)	静的せん断 エネルギー 吸収能 E_S (tf・cm)	破壊形態
CSD-1	48.6	4.0	220.0	20.0	3.8	7.9	13.2	18.0	7.3	曲げ型
CSD-2	48.6	8.0	220.0	20.0	4.0	10.6	22.1	71.8	7.3	せん断型
CSD-3	60.5	4.0	220.0	20.0	4.1	6.2	12.9	18.0	14.0	曲げ型
CSD-4	60.5	8.0	220.0	20.0	3.1	4.0	8.3	71.8	14.0	せん断型
CSD-5	89.1	4.0	220.0	20.0	5.0	2.9	9.8	18.0	6.6	曲げ型
CSD-6	89.1	8.0	220.0	20.0	5.5	7.6	16.9	71.8	6.6	曲げ型

(5) 衝撃エネルギー吸収能

図-5.11において、荷重が0となったときの変位を δ_u としてこの δ_u までの外力仕事を衝撃エネルギー吸収能と定義した。表-5.3に衝撃実験の衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} 、高速の衝撃エネルギー吸収能 E_D 、静的エネルギー吸収能 E_S 、載荷板の変位と荷重の関係の $P \sim \delta$ 曲線を用いて求めた衝撃エネルギー吸収能 E_{DD1} を示す。また、図-5.18, 5.19に $E_D \sim \phi$, $E_D \sim V$ の関係を、 $E_{DD1} \sim \phi$, $E_{DD1} \sim V$ の関係を図-5.20, 図-5.21に示す。

- ① 図-5.18より E_D は、単純ばりの場合と同様な傾向を示し、 $\phi 60.5$ までは、増加傾向を示すが、 $\phi 89.7$ の場合は逆に小さくなる。これは、単純ばりの場合と同じく、局部めり込み量が大きくなるにつれ局部めり込みにより吸収するエネルギー吸収量が大きくなるためである。

表-5.3に載荷板の変位 δ_1 を用いて求めた E_{S1} と載荷点の変位 δ_2 を用いて求めた E_{S2} の差、すなわち、局部めり込みにより吸収されるエネルギー E_{SL} を示している。表より ϕ が大きくなるほど E_{SL} が大きくなっているのが認められる。

図-5.20に示した E_S と ϕ の関係をみると、 ϕ が大きくなるにつれ、 E_S はほぼ比例的に大きくなる傾向を示している。これは、はりの系として吸収できる能力すなわち、 $(E_S + E_{SL})$ を評価しているためであり、この $(E_S + E_{SL})$ として評価する方が、本来の鋼管部材のエネルギー吸収量を評価する上で適当であると思われる。

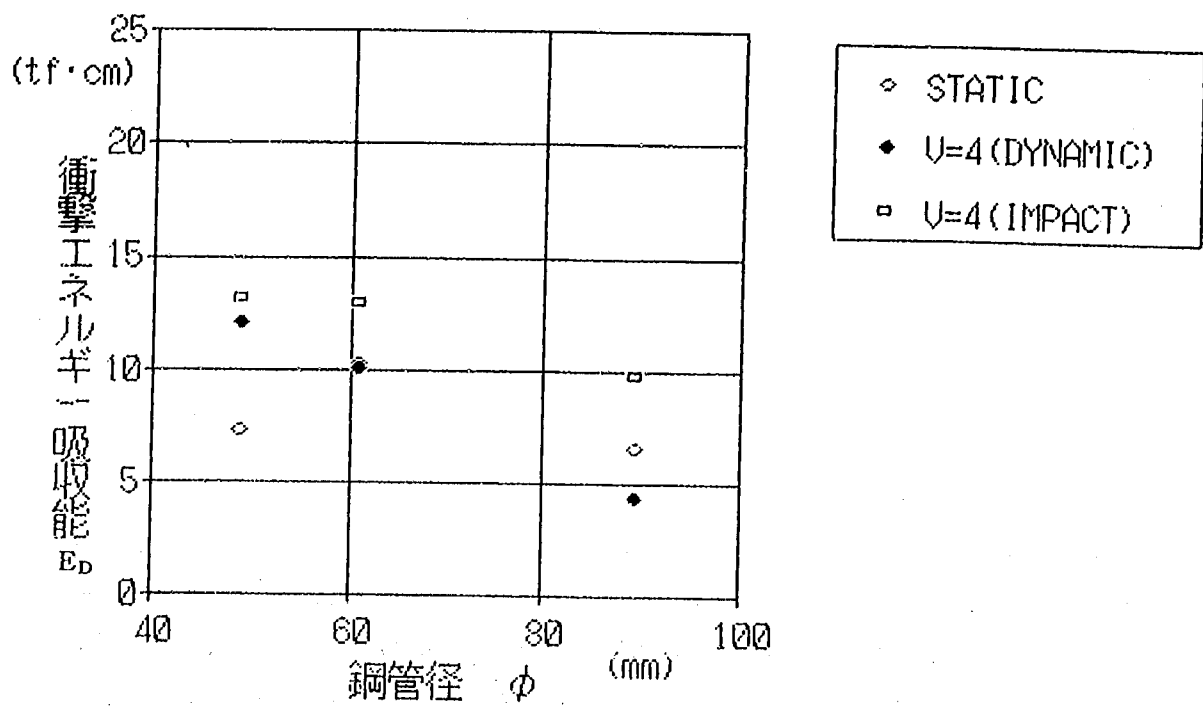


図- 5.18 衝撃エネルギー吸収能～鋼管径関係

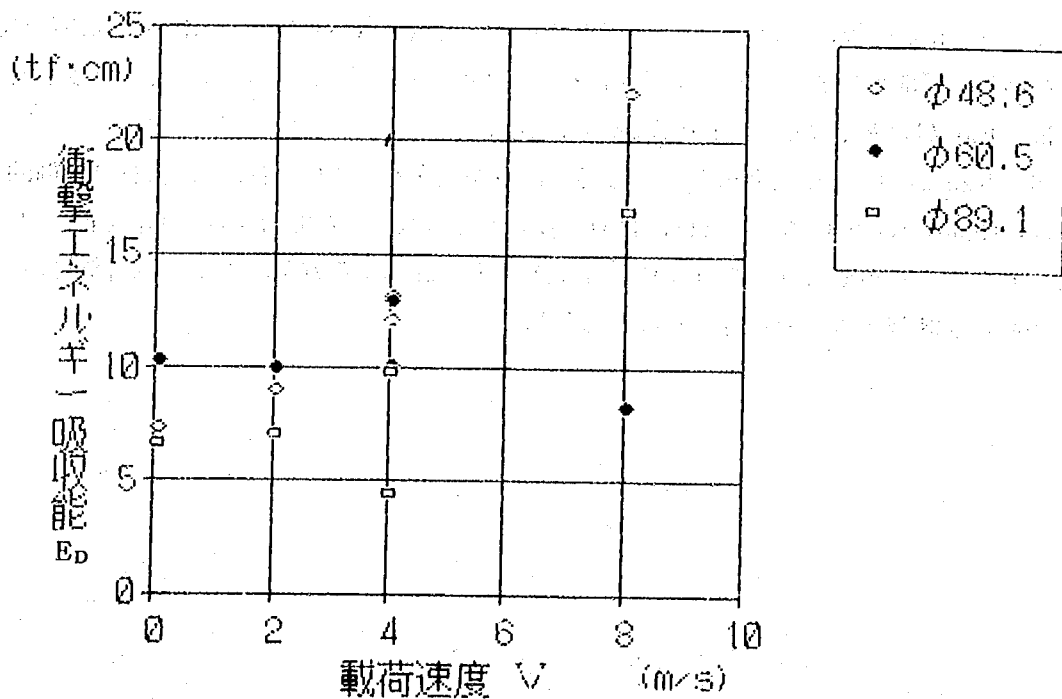


図- 5.19 衝撃エネルギー吸収能～載荷速度

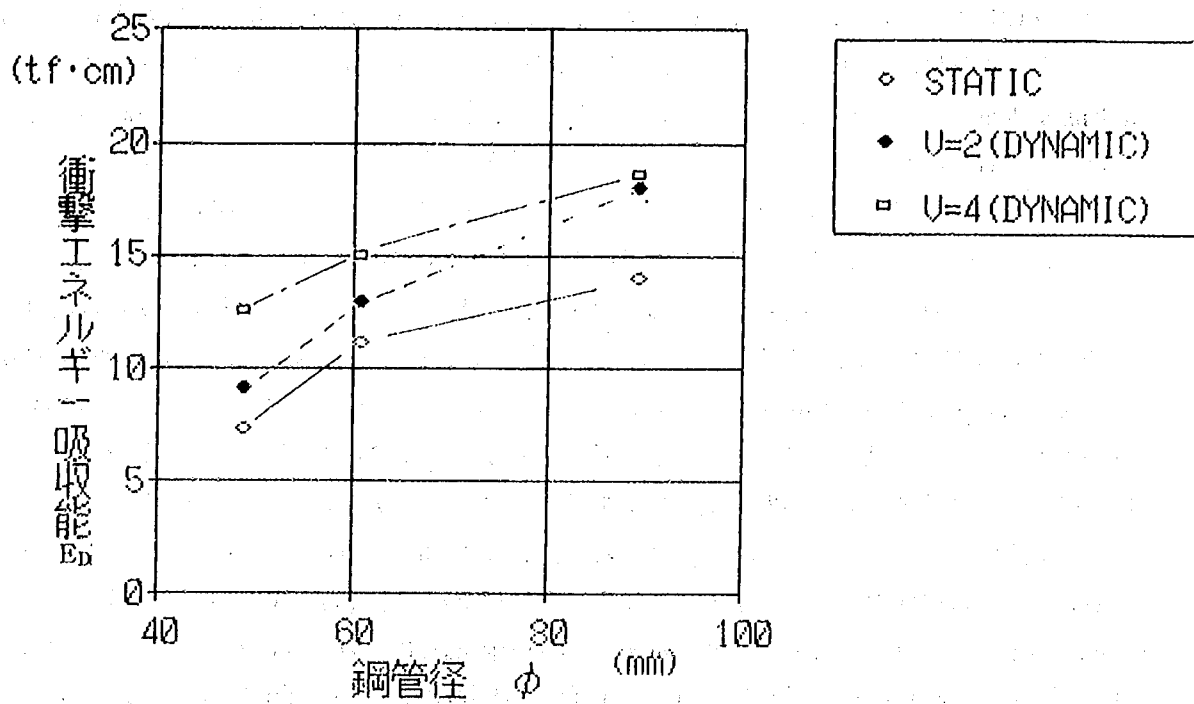


図- 5.20 衝撃エネルギー吸収能～鋼管径関係

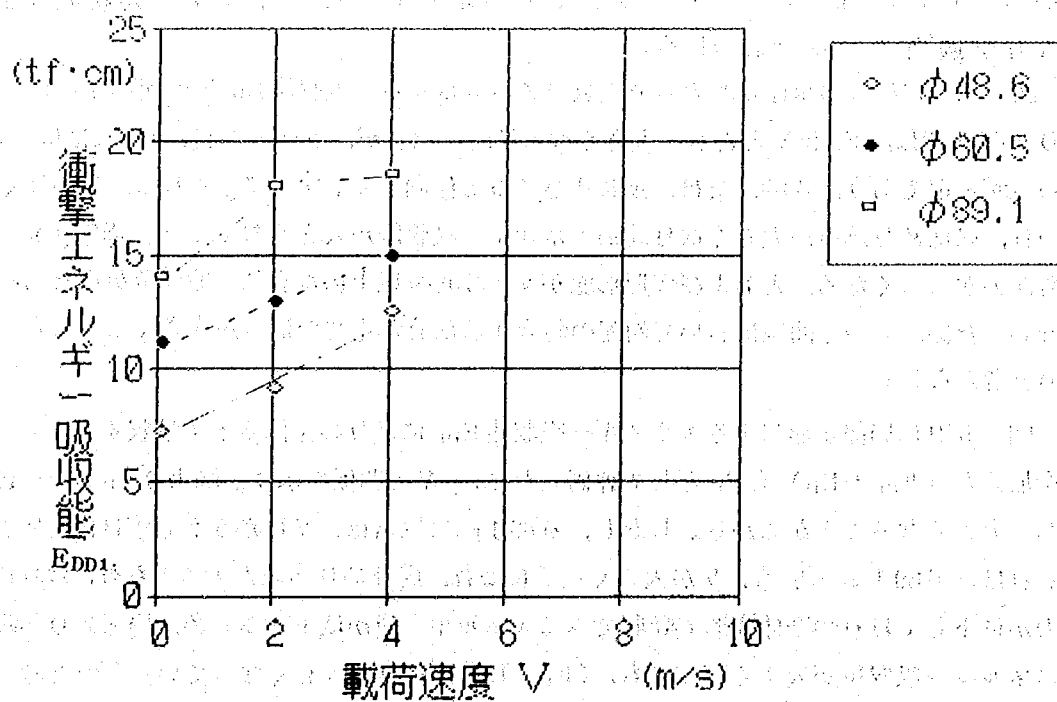


図- 5.21 衝撃エネルギー吸収能～載荷速度関係

② 図-5.18において、 E_D 、 E_i は ϕ が大きくなるにつれ、ほぼ比例的に小さくなる傾向を示している。これは、 E_S 同様 ϕ が大きくなるにつれ、局部めり込みにより吸収するエネルギー量 E_{DL} が大きくなるためである。また、 E_D と E_i を比較すれば、 E_i の方が大きい傾向を示している。これは、 E_i を算出した荷重 P に慣性力の影響が含まれているためである。

次に、 E_S と E_D を比較すると、 $\phi 48.6$ の場合は $E_S < E_D$ であるが $\phi 60.5$ では $E_S \approx E_D$ であり、 $\phi 89.1$ では逆に $E_S > E_D$ と管径により3様の結果を示している。本来は、速度が速くなることによりひずみ速度効果によるはりの耐力が大きくなるため、管径にかかわらず $E_S < E_D$ となるはずである。しかし、速度が速くなるにつれ ϕ が大きい場合は局部めり込み量が大きくなる傾向があり、局部めり込み量が大きくなるにつれ断面係数が小さくなるため、はりの耐力そのものは低下してゆき、速度が速く、 ϕ が大きくなると破壊形態が全体破壊から局部破壊に変化すると考えられ、局部で吸収するエネルギーが大きくなるため、全体応答としての E_D は小さくなると考えられる。 E_S と E_i を比較すると、 E_{Di} の方が大きくなっている。これは、 E_{Di} は慣性力およびひずみ速度効果により荷重が大きくなっているためである。

③ 図-5.20に局部エネルギー吸収能 E_{DL} にはりの全体応答により吸収するエネルギー量 E_D を加え($E_D + E_{DL}$)として評価した衝撃エネルギー吸収能 E_D と ϕ の関係を示す。図より E_{DD} 、 E_i いずれの場合も ϕ が大きくなるにつれ、大きくなる傾向を示している。

また、 E_S と E_D 、 E_i を比較すると、 $E_D > E_S$ となっている。これは、ひずみ速度効果などにより荷重が静的実験よりも高速、衝撃実験の方が大きくなっていること、終局変位が、静的、高速、衝撃実験いずれの場合もほとんど等しいことにより、荷重の大きさによってエネルギー吸収能の大きさが決定されているためである。この結果から($E_D + E_{DL}$)として、はり全体の系としてのエネルギー吸収能を評価する方が適当であると思われる。

④ 図-5.19にはりの全体変形のみで吸収できるエネルギー吸収能 E_D と V の関係を示す。図より $\phi 48.6$ では、 E_D は V とともに大きくなる傾向を示すが、 $\phi 60.5$ では、 E_D はほぼ V にかかわらず一定であり、 $\phi 89.1$ では、逆に小さくなる傾向を示している。これは、 V が速くなるにつれ、局部めり込みが大きくなり局部エネルギー吸収能が大きくなること、衝撃実験の場合、慣性力が大きくなることおよび変形形態が $V = 8\text{m/s}$ 以上になると、曲げ型からせん断型に移行するため、 $\delta \sim t$ 曲線において勾配の急変する部分が生じ変形量が大きくなることによるものと考えられる。

⑤ 図-5.21に局部変形によるエネルギー吸収能 E_{DL} にはりの全体変形で吸収するエネルギー量を加えた($E_{DL} + E_D$)を E_D として評価した $E_D \sim V$ の関係を示す。図より E_D は V にほぼ比例して大きくなることがわかる。しかし、 $\phi 89.1\text{mm}$ の場合は、 V にかかわらずほぼ一定となる。これは、 $\phi 89.1\text{mm}$ の場合、 V が大きくなるにつれ、局部めり込みが大きくなり、はり自体の耐力が低下してはりの全体変形で吸収できるエネルギー量が低下するため、局部めり込みによるエネルギー吸収量が大きくなっても、($E_D + E_{DL}$)はほぼ等しくなっているものと考えられる。

(6) 衝撃エネルギー吸収能の推定

(5)項で述べたように、衝撃エネルギー吸収能 E は、局部エネルギー吸収能 E_{DL} とはりの全体変形によるエネルギー吸収能 E_D を加えた形 $E = E_{DL} + E_D$ として評価した方が適当であると考えら

られる。よってここでは、 E_{DL} と E_D を加えた E として衝撃エネルギー吸収能を定義し、 E を推定する。

E は(5)で述べたように ϕ とともにほぼ比例的に大きくなることおよび、衝撃実験の E は常に静的実験の E より大きくなっていることから、静的な E を評価基準とすれば、安全側の評価となるものと考えられる。そこで、ここでは、まず静的な E を推定し、これを衝撃の E の推定値とすることにする。

図-5.20において E は ϕ とともに大きくなる傾向を示している。また、静的実験の破壊形態は曲げ破壊型であるので、曲げ型の衝撃エネルギー吸収能として、 E を求めれば、片持ばりの衝撃実験結果より、 E は (Z_P^2/I) に比例する。図-5.22に E と (Z_P^2/I) の関係を示す。図-5.2より、近似直線を求めれば、次式となる。

$$E = 2.05 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 0.20 \quad (5.2)$$

ここに、 E ：衝撃エネルギー吸収能 ($E_D + E_{DL}$)、 Z_P ：塑性断面係数、 I ：断面二次モーメントである。式(5.2)を図-5.22に実線で示した。概略の E の値は式(5.2)により求められる。

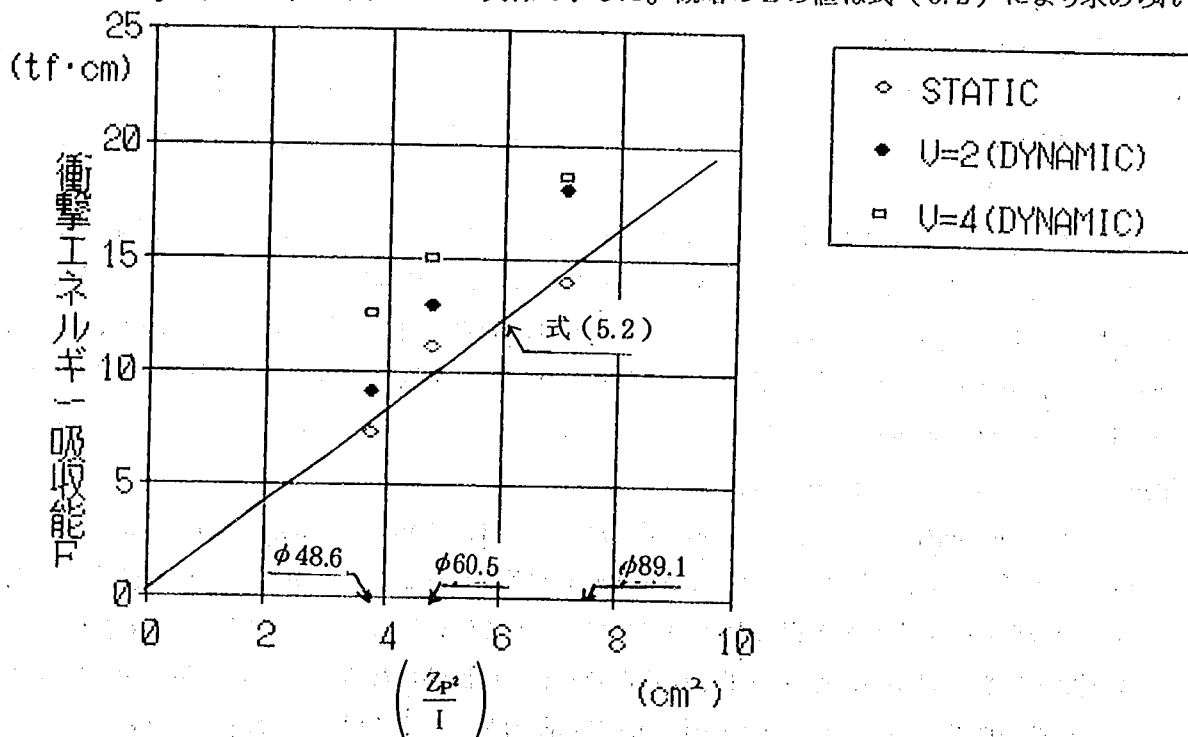


図-5.22 衝撃エネルギー吸収能 $\sim \frac{Z_P^2}{I}$ の関係

5.5 まとめ

本章での成果および問題点をまとめると以下ようになる。

- (1) $P \sim t$ 曲線と $P \sim \delta$ 曲線の形状はほぼ等しい。高速実験の $P \sim \delta$ 曲線と衝撃実験の $P \sim \delta$ 曲線を比較すると、衝撃実験には慣性力の影響が含まれているため、振動が現われている。
- (2) 最大荷重 P_{max} は、静的、高速、衝撃実験のいずれの場合も管径とともに大きくなる傾向を示す。静的、高速実験の場合は、 ϕ が大きくなると局部めり込みが大きくなり、はりの耐力が小さくな

るため P_{max} の増加率は小さくなる。

また、静的、高速、衝撃実験の順に P_{max} は大きくなる。これは、ひずみ速度効果、慣性力の影響によるものである。 P_{max} は、ひずみ速度効果、慣性力の影響により速度が速くなるにつれ、大きくなる傾向を示す。

- (3) 速度が速く ($V = 8.0 \text{ m/s}$) 管径が小さい場合は、破壊形態が曲げ型からせん断型に移行している。これは、速度の影響が破壊形態におよぼす影響が非常に大きいことを示しているものである。
 - (4) はりの全体変形から求めた終局変位は、 ϕ が大きくなるにつれ局部めり込み量が大きくなることおよび剛性が大きくなることにより、はりの変位そのものが小さくなるため小さくなる傾向を示す。また、 ϕ が小さい場合は载荷速度が大きくなるにつれ、 V とともに大きくなるが、 ϕ が大きい場合は、局部めり込みが卓越するため δ_u は V が大きくなるにつれ逆に小さくなる傾向を示す。
 - (5) はりの全体変形から求めた衝撃エネルギー吸収能 E_D は ϕ が大きくなるにつれ小さくなる傾向を示す。これは、局部めり込み量が大きくなり局部エネルギー吸収能 E_{DL} が大きくなるためであり、破壊形態が局部破壊に移行するためである。
 - (6) はりの衝撃エネルギー吸収能 E は、局部エネルギー吸収能 E_{DL} とはりの全体変形によるエネルギー吸収能 E_D を加え、両者の総和として評価する方がはりの系としてのエネルギー吸収能を正しく評価できるので適当と思われる。
- E は ϕ とともに大きくなる傾向を示し、 E_D のみの場合のように ϕ が大きくなるにつれ小さくなる現象は生じない。 E は V が大きくなるにつれ、ほぼ比例的に大きくなる傾向がある。
- (7) 衝撃実験および高速実験のエネルギー吸収能 E は、静的実験の場合の E よりもやや大きく、静的の E を評価基準とすれば安全側の評価になる。静的の E を推定する近似式として、式 (5.2) を用いれば、ほぼエネルギー吸収能を推測できる。

問題点として、以下のことが挙げられる。

- ① 本実験の範囲内では、せん断破壊に至ったケースは、 $\phi 48.6$, $\phi 60.5 \text{ mm}$ の $V = 8 \text{ m/s}$ の場合のみと考えられ、他のケースでは曲げ破壊と考えられる。したがって、せん断の影響に関する実験結果はほとんど得られていないので、せん断の影響について明らかにできなかった。本実験の実験結果から、速度が速くなるとせん断型の破壊になることが明らかになったので、さらに速い速度での衝撃载荷実験を行い、せん断力が卓越する場合の検討が必要である。
- ② 本実験より、はりのエネルギー吸収能 E は、局部エネルギー吸収能およびはりの全体変形のエネルギー吸収能の総和として評価する方が、はりのエネルギー吸収能を正しく評価できるものと考えられる。よって、衝撃実験においても局部めり込み量を測定する必要がある。

6. 解 析

本実験は、鋼製砂防ダムの土石流に対する抵抗力を定量的に把握するとともに耐衝撃設計に資する情報を得るために行った実験である。

本実験では、昨年度の衝撃曲げ破壊実験に引続き、衝撃せん断抵抗力を把握するため、片持ばりの根元部分に衝撃荷重を作用させる衝撃せん断実験、および慣性力の影響の比較的小さい高速せん断実験を行い、鋼管径、載荷速度と衝撃せん断抵抗力の関係について実験的に調べた。また、衝撃せん断抵抗力と静的せん断抵抗力の関係を調べるため、静的せん断実験をあわせて行った。さらに、昨年度の衝撃曲げ破壊実験で問題となった事項を明らかにするための補足実験を行った。これらの実験結果をまとめると以下ようになる。

6.1 衝撃曲げエネルギー吸収能

(1) 片持ばり

昨年度は、衝撃実験において荷重応答が現象終了まで完全に測定されていなかったため、正確な衝撃曲げエネルギー吸収能 E_D を評価することができなかった。本実験では、この問題点を解決するため荷重応答が終了するまで測定し、正確な衝撃曲げエネルギー吸収能 E_D を求めた。

昨年度行った静的実験から求めた静的エネルギー吸収能 E_S は鋼管径 ϕ とともに線形的に増大する傾向を示したが、本実験の結果から E_D も E_S 同様 ϕ とともに線形的に増大する傾向があることがわかった。これは、衝撃実験の $P \sim \delta$ 曲線が短周期の大振動を含んでいるものの、静的な $P \sim \delta$ 曲線を中心に振動する形となっているためであり、鋼管のエネルギー吸収能が鋼管の断面諸定数（降伏点、引張強さ、管径、肉厚等）によって定まることが示しているものと考えられる。

静的エネルギー吸収能 E_S は、昨年度の実験結果から次式で求められる。

$$E_S = 2.75 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) - 1.00 \quad (\text{tf} \cdot \text{cm}) \quad (6.1)$$

$$\text{ここに } Z_P = \frac{4}{3} \left\{ \left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{d}{2} \right)^3 \right\} \quad (\text{cm}^3)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (\text{cm}^4)$$

Z_P : 塑性断面係数 (cm^3)

I : 断面2次モーメント (cm^4)

D : 鋼管の外径 (cm)

d : 鋼管の内径 (cm)

衝撃エネルギー吸収能 E_D は、昨年度求めた E_D よりも大きくなっているが、 E_S と比較すると常に $E_S > E_D$ となっている。これは、 E_D と E_S の終局変位 δ_{UD} と δ_{US} を比較した場合に、常に $\delta_{UD} < \delta_{US}$ となっており、衝撃の場合荷重が0となった以降の変形が大きくなっているためである。これは、鋼管の耐力・変形で吸収するエネルギー量すなわち、 E_D の他にはりの運動エネルギーにより吸収するエネルギー量が大きくなっているためと考えられる。

本実験の範囲では、 E_D と E_S の比 (E_D/E_S) は約 0.7 であり、管径にかかわらずほぼ一定であることから、 E_D は E_S より推定することができ、式 (6.2) 中の α を決定すれば、概略の E_D を求めることができる。

$$E_D = \alpha \left\{ 2.75 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) - 1.00 \right\} \quad (\text{tf} \cdot \text{cm}) \quad (6.2)$$

また、 E_D は本実験の範囲内では載荷速度の影響を受け、 V が大きくなるにつれ大きくなる傾向を示した。昨年度はデータのバラつきが大きく V の影響はみられなかったが、本年度は破壊限界付近で行っているため、 V の影響が表われているものと考えられる。

(2) 単純ばり

昨年度の実験結果で、 ϕ/l が大きく (薄肉管) となると E_D が小さくなる傾向を示したため、この点を明らかにするために、本年度は薄肉管を用いた実験を行った。また、昨年度は全ケースで破壊に至る大きなエネルギーを加えていたが、本実験では、破壊限界付近のエネルギーを加えてエネルギー吸収能を求めた。

- i) 昨年度の実験結果から求めた E_S は、鋼管径 ϕ とともにやや大きくなる傾向を示し、推定式として次式を提案した。

$$E_S = 0.57 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 6.30 \quad (\text{S 61 年度の提案式}) \quad (6.3)$$

$$E_S = \frac{\sigma_y^2 Z_P^2}{3EI} \ell (0.5 + \mu) \quad (6.4)$$

ここに Z_P : 塑性断面係数、 I : 断面 2 次モーメント、 σ_y : 降伏応力、 E : 鋼材のヤング率
 ℓ : スパン長、 μ : 靱性率

σ_y 、 E は鋼管の諸元より求められ、静的実験より μ を求めれば式 (6.2) で E_S をほぼ推定できる。

- ii) 衝撃エネルギー吸収能 E_D は、昨年度の実験結果では ϕ が大きくなるにつれ、小さくなる傾向を示していたが、本年度の実験結果では、破壊限界付近での E は管径 ϕ にかかわらずほぼ一定の値を示した。この破壊限界付近での E_D はほぼ E_S に等しく、 $E_D \doteq E_S$ として E_D を推定することができる。よって、 E_D の推定式として、式 (6.3) (6.4) を適用できる。

- iii) 衝撃めり込み実験で得られた局部エネルギー吸収能 E_{DL} は、同一径のはりの全体変形としてのエネルギー吸収能 E_D に比較すると約 2 倍と大きな値を示すことが分かった。

本実験結果から、 E_{DL} と ϕ あるいは V の関係を明らかにすることはできないが、 ϕ が大きくなるにつれ E_{DL} が大きくなることが予想され、 E_{DL} を正しく評価することが必要である。

- iv) E_D は、 V が速くなるにつれ小さくなる傾向を示すが、 E_{DL} は大きくなると予想されることから、はりの衝撃エネルギー吸収能 E_D の評価法として $E_D + E_{DL}$ の総和として評価できる $E (= E_D + E_{DL})$ が望ましいと考える。

- v) E_D は、昨年度のシミュレーション解析で求めることができるので、このシミュレーション解析を用いれば、 E を正しく評価できる。

(3) まとめ

昨年度問題となった事項は、本実験によりほぼ明らかにされた。外力として構造物に与えられる

エネルギー U は、式 (6.5) に示すように、はりの全体応答として吸収するエネルギー量 E_D と局部応答により吸収されるエネルギー量 E_{DL} 、さらにはりの運動エネルギー等によって吸収されるエネルギー量 E_0 によって吸収される。

$$U = E_D + E_{DL} + E_0 \quad (6.5)$$

支持条件、鋼管の断面係数等によって、これら3種の E の分担率が変化するため、みかけ上、その1つである E_D のみを取りあげて比較すると相違がみられることになる。したがって、特に鋼管の諸元等によって決まる E_D と E_{DL} に着目し、衝撃エネルギー吸収能 E を $E = E_D + E_{DL}$ の形で評価すれば、全体破壊、局部破壊の区分をすることなく統一的に評価できる。

6.2 衝撃せん断エネルギー吸収能

本実験では、A型スリットダムの根元部分に巨礫が衝突する場合を想定して、鋼管片持ばりの根元部分に重錘を衝突させ、せん断力が卓越する場合の鋼管抵抗力を実験的に求めようとしたものである。

(1) 静的せん断エネルギー吸収能 E_s

実験による変形形状は、曲げ変形型であり、載荷点に残留局部めり込みが認められた。静的せん断エネルギー吸収能 E_s は、 ϕ が小さい範囲では ϕ とともに増大する傾向を示すが、 ϕ が大きく薄肉になるにつれ逆に小さくなる傾向がある。これは単純ばりの項で述べたように、薄肉管になると局部めり込みが大きくなり、局部エネルギー吸収能が大きくなるためである。したがって、はりの全体変形によるエネルギー吸収能 E_s のみを比較した場合、管径が大きくなると（薄肉管の場合）、曲げ剛性等が大きくなるにもかかわらずエネルギー吸収能は小さくなるという矛盾した結果となる。これは、薄肉管の場合破壊形態が全体破壊ではなく局部破壊となるため、全体変形で吸収するエネルギー量は小さくなるためである。

以上のことから、全体変形と局部変形の総和により吸収するエネルギー吸収能を E_s と定義した方がはりの抵抗力を正しく評価することになると考えられる。

この新たに定義した E_s は、管径 ϕ とともに増大する傾向を示す。 E_s は、静的理論に従えば、 (Z_P^2/I) に比例することから次式で近似できる。

$$E_s = 2.05 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 0.20 \quad (\text{tf} \cdot \text{cm}) \quad (6.6)$$

Z_P : 塑性断面係数 (cm^3) , I : 断面2次モーメント (cm^4)

(2) 衝撃せん断エネルギー吸収能 E_D

E_D もはりの全体変形のみで評価した場合、先の E_s 同様、薄肉管となる ϕ が大きい場合は小さくなる傾向を示すことから、 E_s 同様局部エネルギー吸収能 E_{DL} とはりの全体変形のエネルギー吸収能 E_D の総和を E_D と定義し直して評価することが望ましい。

新たに定義した E_D は、ほぼ E_s と同様の傾向を示し、 E_s よりやや大きい値となっている。 E_D を推定する指標として E_s を用いれば、常に $E_s > E_D$ となっており、安全側の評価となると考えられる。

本実験の範囲内では、 E_D は載荷速度の影響を受け、 V が速くなるにつれ E_D も大きくなる傾向がある。これは、ひずみ速度効果および慣性力による耐力の上昇によるものである。

以上のことから、衝撃エネルギー吸収能 E_D の推定式として、式 (6.6) を用いることにより求め

ることができる。

(3) 破壊性状

実験後の破壊性状を観察すると、載荷速度が遅い場合はほとんど曲げ破壊と考えられる形状を示しており、せん断型の破壊形態と考えられるのはわずかに $\phi 48.6$, 60.5 mm の $V = 8 \text{ m/s}$ の場合のみであった。したがって、衝撃せん断実験から求めた衝撃エネルギー吸収能 E_D および静的エネルギー吸収能 E_S は曲げ型のエネルギー吸収能と考えられる。本実験は、(曲げ+せん断) 荷重が作用する場合の衝撃抵抗力を求めたものであり、純粋なせん断抵抗力を求める場合には実験方法を変更しなければならない。純粋な衝撃せん断抵抗力を求めるには衝撃ねじり実験を行う必要がある。しかし、本実験結果から、衝突速度が速くなるにつれ破壊性状が変化するという注目すべき成果が得られた。土石流の一般的な想定衝突速度は、本実験の最大衝突速度 8 m/s よりも速い 10 m/s であり、せん断力が卓越するためせん断破壊を生ずると考えられる。

6.3 鋼管ばりの衝撃破壊クライテリア

(1) 衝撃曲げ破壊クライテリア

衝撃曲げ破壊クライテリアとして、衝撃曲げエネルギー吸収能を求めたが、単純ばりと片持ばりの支持条件の相違により下記の異なる傾向を示している。

単純ばりでは、

- ① 破壊限界付近の E_D は、ほぼ管径にかかわらず $E_D \div E_S$ となる。
- ② 載荷速度が速くなるにつれ、全体破壊から局部破壊に破壊形態が移行するため E_D は小さくなる。

片持ばりでは、

- ③ E_D は載荷速度の影響を受けて V が速くなるにつれ大きくなるが、常に $E_D < E_S$ である。
- ④ E_D は鋼管径または断面係数に比例して大きくなる。

鋼管ばりの衝撃破壊クライテリアとして、はりの曲げエネルギー吸収能のみで評価する場合、薄肉管になると全体破壊よりも局部破壊となるため評価基準としてふさわしくない。よって、全体破壊、局部破壊を統一して評価できるよう両者の総和として評価する方が適当である。

以上をまとめると、鋼管ばりの衝撃曲げ破壊クライテリアとして、局部エネルギー吸収能と曲げエネルギー吸収能の総和として評価するのが適当と考えられる。局部エネルギー吸収能についての検討が不十分であるが、本実験から破壊クライテリアを求めれば以下ようになる。

本実験の範囲では、単純ばりの場合 $E_D \div E_S$ であり、片持ばりの場合 $E_D \div 0.7 E_S$ であるので、 E_D はほぼ E_S から求めることができる。

鋼管ばりの衝撃曲げ破壊クライテリアとして、次式が提案される。

$$E_{DC} = 0.57 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 6.30 \quad (\text{単純ばり})$$

$$E_{DC} = \alpha \left(2.75 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) - 1.00 \right) \quad (\text{片持ばり})$$

または

$$E_{DC} = \alpha \frac{\sigma_y^2 Z_P^2}{3EI} \ell (0.5 + \mu)$$

単純ばり $\alpha = 1.0$

片持ばり $\alpha = 0.7$

ここに E_{DC} : 衝撃曲げエネルギー吸収能 ($t \cdot f \cdot cm$)

Z_P : 塑性断面係数 (cm^3)

I : 断面 2 次モーメント (cm^4)

σ_y : 降伏応力 (t/cm^2)

E : 鋼材のヤング率

ℓ : スパン長 (単純ばり), 荷重載荷点から固定端までの距離 (片持ばり) (cm)

μ : 鋼管の靱性率

α : 静的実験によって求められた E_s と衝撃実験によって求められる E_D の比 $\frac{E_D}{E_s}$

(2) 衝撃せん断破壊クライテリア

衝撃せん断破壊クライテリアとして、衝撃せん断エネルギー吸収能を求めたが、下記の特性を有する。

① E_D は鋼管径が大きくなるにつれ、局部めり込み量が大きくなるため、小さくなる傾向を示す。

② E_D は、 E_s よりもやや大きい傾向を示すが、 $\phi 89.7$ の場合のみめり込み量が大きくなるため小さくなる。

この問題を解決するため、全体破壊と局部破壊を統一的に評価できるように $E_{DL} + E_D$ として E を定義すると以下の特性となる。

③ E は ϕ とともに増大する傾向を示す。

④ E は衝撃の場合の方が静的の場合より大きく、載荷速度が大きくなるにつれ大きくなる傾向を示す。

全体変形と局部変形の両者を統一的に評価した E を破壊クライテリアとすれば、常に衝撃の E の方が静的の E よりも大きいことから、静的の E を評価基準とすれば安全側の破壊クライテリアとなり、次式が提案される。

$$E_{DC} = 2.05 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 0.20$$

E_{DC} : 衝撃せん断エネルギー吸収能

Z_P : 塑性断面係数

I : 断面 2 次モーメント

7. 結論および今後の課題

7.1 結 論

鋼管製の単純梁、片持梁に破壊に必要なエネルギーを持つ重錘を衝突させて単純梁、片持梁の衝撃曲げ破壊クライテリアを検討した。また、片持梁の根元部に重錘を衝突させて片持梁の衝撃せん断破壊クライテリアを検討し、以下の結論を得た。

(1) 梁の衝撃曲げ破壊クライテリアとして、衝撃曲げエネルギー吸収能を、梁の衝撃せん断破壊クライテリアとして衝撃せん断エネルギー吸収能を用いるのが適切と考えられる。

(2) 衝撃曲げエネルギー吸収能 (E_{DSC})、衝撃せん断エネルギー吸収能 (E_{DBC}) を求める式として、静的エネルギー吸収能 (E_S) を基準とした、下記の式を提案する。

$$\text{衝撃曲げエネルギー吸収能 } (E_{DSC}) = 0.57 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 6.30 \quad (\text{単純梁})$$

$$\text{衝撃曲げエネルギー吸収能 } (E_{DSC}) = 1.93 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) - 0.70 \quad (\text{片持梁})$$

または

$$\text{衝撃曲げエネルギー吸収能 } (E_{DSC}) = \alpha \frac{\sigma_y^2 Z_P^2}{3EI} l (0.5 + \mu) \quad \begin{array}{ll} \text{単純梁} & \alpha = 1.0 \\ \text{片持梁} & \alpha = 0.7 \end{array}$$

$$\text{衝撃せん断エネルギー吸収能 } (E_{DBC}) = 2.05 \left(\frac{Z_P^2}{I} \right) + 0.20$$

$$Z_P = \frac{4}{3} \left(\left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{d}{2} \right)^3 \right)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

ここに、 Z_P : 塑性断面係数、 I : 断面二次モーメント、 σ_u : 降伏応力、 E : 鋼材のヤング率、

l : スパン、 μ : 靱性率、 D : 鋼管の外径、 d : 鋼管の内径である。

(3) 巨礫の運動エネルギー (E_k) は、梁全体の変形によるエネルギー吸収能 (E_D) と局部エネルギー吸収能 (E_{DL}) その他のエネルギー (E_o) に変換され、構造、断面諸定数によりその分担率が変化し、このため構造形式、载荷条件により破壊形態が変化することが分かった。

7.2 今後の課題

今後検討を必要とする事項は、下記の通りである。

(1) 薄肉管の局部エネルギー吸収能に関する補足実験

(2) 鋼管の純せん断耐力および変形形態に関する検討

以上は本年度の実験で解明できなかった事項であり、耐衝撃せん断設計を確立する上で必要な検討事項である。また、鋼管製の透過型ダムの耐衝撃設計法を確立するためには、さらに次の2項目の検討が必要である。

(1) 衝撃軸応力応答と破壊クライテリアの検討

(2) 鋼管製の透過型ダムの構造物全体としての衝撃応答の検討

お　わ　り　に

本研究を進めるにあたり多くの方々の協力があつた。防衛大学校土木工学科石川信隆教授には実験および解析について、貴重な示唆を頂いた。防衛大学校土木工学科齊藤英明研究生、八千代エンジニアリング㈱の松永繁氏には実験およびそのとりまとめを手伝って頂いた。記して謝意を表します。

鋼製砂防施設部材の
衝撃応答実験報告書

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2600号

昭和63年2月(1988)

建設省 土木研究所砂防研究室 水山高久
石川芳治

要 旨 鋼管製の単純梁と片持ち梁に対して衝撃曲げ破壊および衝撃せん断実験を主体とした実験を行い、静的及び動的応答特性を調べ、鋼管製土石流対策施設の設計のための検討を行ったものである。

キーワード：鋼製砂防施設、土石流、衝撃力、動的応答解析

郵便はがき

は40円
切手を
貼って
下さい

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
砂防研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

土研資料第2600号

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2600号
鋼製砂防施設部材の衝撃
応答実験報告書 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印