

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2276号

土木研究所資料

鋼管に対する土石流衝撃力実験報告書

昭和61年3月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

Copyright © (1986) 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。

鋼管に対する土石流衝撃力実験報告書

砂防研究室 矢澤 昭夫
水山 高久
下東 久巳

要旨

鋼管を主要な構成部材とした透過型の砂防ダムが土石流対策施設として各地で、計画・施工されている。しかし、衝撃力に対する鋼管の局部的または全体的な変形特性は十分に解明されていない。そこで、静的実験により衝撃応答解析の基礎資料を得た後、径の異なる3種類の鋼管と緩衝材を付けた鋼管に鋼球を衝突させる実験を行い動的応答特性を調べた。その結果、局部変形、慣性力、減衰力、鋼のひずみ速度効果を取り入れた2質点弾完全塑性振動モデル計算により、現象を比較的良好に説明できることがわかり、衝撃曲げ耐力設計手法を提案した。

キーワード：鋼製砂防施設、土石流、衝撃力、緩衝材、動的応答解析

**Experimental Study of the Impact Force
of Debris Flow on Steel Pipes**

by

Akio Yazawa

Takahisa Mizuyama

Hisami Shimohigashi

Synopsis

Steel made permeable sabo structures have been tested in the field, which are expected to check and control debris flow. Some of the design methods, however, are not still made clear. Some study is required especially on the detail of local and overall deformation due to the impact of large stones in the debris flow snout.

Two kinds of experiments, statistical loading experiments and dynamic loading experiments, were carried out on steel pipes of three different diameters and on pipes with shock absorbents. The data including dynamic response records were analyzed and an two mass points elastic plastic compound model was obtained taking local deformation, inertia force, damping and the effect of strain rate into consideration. The model shows a good agreement with the experimental results.

A new desing method on impact bending strength was proposed based on the dynamic response model.

Key words : Saba structures of steel type, Debris flow, Impact force, Cushioning materials, Dynamic response analysis

は　じ　め　に

土石流発生頻度の少ない地域等の砂防ダムでは、下流に流しても問題はない、或は流すべきと思われるような常時の低流量で運ばれてくる比較的細かい土砂により貯砂容量が減少する場合がある。そこで、平時の細粒土砂は通過させ貯砂容量を確保し土石流発生時には巨礫や多量の土砂を捕捉できるような透過型の砂防ダムが各地で計画または試験的に施工されている。その部材としては施工性等により鋼管が注目されている。ところが、標準的なタイプの鋼管製砂防ダムを構造系全体として実験的に調べたものや、局部的な鋼管の変形のみを調べたものはあるが、鋼管を全体的かつ局部的に調べたものがない。

本報告は、東北地方建設局新庄工事事務所、関東地方建設局富士川砂防工事事務所の依頼によって実施した鋼管に対する土石流衝撃力実験とその解析結果をとりまとめたものである。

実験は、鋼管製土石流対策施設の設計手法と緩衝材の効果に関する資料を得るために行った。まず、静的実験により局部変形（へこみ）と外力の関係、降伏点応力、弾性係数を求め、礫のかわりに使用した鋼球の速度と鋼管の径を変化させ、緩衝材としてゴムを鋼管に巻いた場合も含めて、衝撃力に対する鋼管の動的応答特性を調べた。

実験結果は、エネルギーの釣合いを考慮したモデルと、2質点弾完全塑性振動モデルにより解析した。緩衝材を含めた単純梁鋼管に鋼球が衝突する時の衝撃応答は後者のモデルにより比較的よく説明できた。さらに、上述のモデルを用いて、鋼管梁の衝撃曲げ耐力設計手法を提案した。

昭和 6 1 年 3 月

砂 防 研 究 室 長	矢 澤 昭 夫
主任研究員	水 山 高 久
	下 東 久 巳

目 次

は じ め に

1. 実験の目的	1
2. 実験の位置づけ	2
3. 実験および解析の概要	3
3.1 実験の種類と解析	3
3.2 測定項目	4
4. 実験装置と材料諸元	5
4.1 静的実験装置	5
4.2 衝撃応答実験装置	6
4.3 衝撃曲げ破壊実験装置	8
4.4 実験材料諸元	8
5. 静的実験	9
5.1 実験ケース	9
5.2 実験結果	9
5.3 静的実験結果の考察	20
6. 衝撃応答実験	24
6.1 実験ケース	24
6.2 実験結果と考察	24
7. 衝撃応答解析	40
7.1 構造モデル A	40
7.2 構造モデル B	42
7.3 構造モデル C	55
8. 衝撃曲げ破壊実験	61
8.1 実験ケース	61
8.2 実験結果と考察	61

9. 衝撃力による曲げ破壊限界と曲げ耐力設計法	71
9.1 衝撃における鋼材の応力－ひずみ曲線	71
9.2 鋼材降伏点のひずみ速度効果	72
9.3 実験結果による曲げ破壊限界	73
9.4 衝撃曲げ耐力設計法	75
10. A型スリット砂防ダムの耐力設計方法の提案	78
10.1 A型スリット砂防ダムの耐力設計に関する既存研究	78
10.2 耐力設計手法の提案	78
10.3 具体的な設計式の提案	79
11. ま と め	81
12. お わ り に	83
参 考 文 献	83
資 料 集	85
写 真 集	113

1. 実験の目的

鋼管製土石流対策施設が、土石流に含まれる巨石の衝突により局部的、全体的にどのように変形するのか、また、どのような条件で破壊するのかを調べるため、基礎的実験として下記の実験を行った。

衝撃応答実験……………単純支持の鋼管に土石流の巨石のかわりに鋼球を衝突させて、鋼管の衝撃応答解析を行う。

衝撃曲げ破壊実験……上記と同一条件で、鋼球の衝突を同一鋼管にくり返し加えて、曲げ破壊の限界を求める。

上記の衝撃応答実験においては、緩衝材としてゴムを衝突面に設置したケースの実験を行い、緩衝材の効果についても調べた。

次に、上記実験結果をもとに、単純梁鋼管の耐衝撃設計方法について検討を行った。

さらに、上記の研究成果をもとに、A型スリット砂防ダムの耐衝撃設計方法に関して概略検討を行った。

2. 実験の位置づけ

土石流による鋼管製砂防施設の破壊は、既存の調査・研究から曲げ応力、軸力、せん断力および曲げ応力・軸力の組合せにより引き起こされると考えられる。実用的な構造物の耐衝撃設計手法を確率するためには図-2.1のような手順が必要と思われるが、今回の実験および解析は同図の□の範囲について調べたものである。

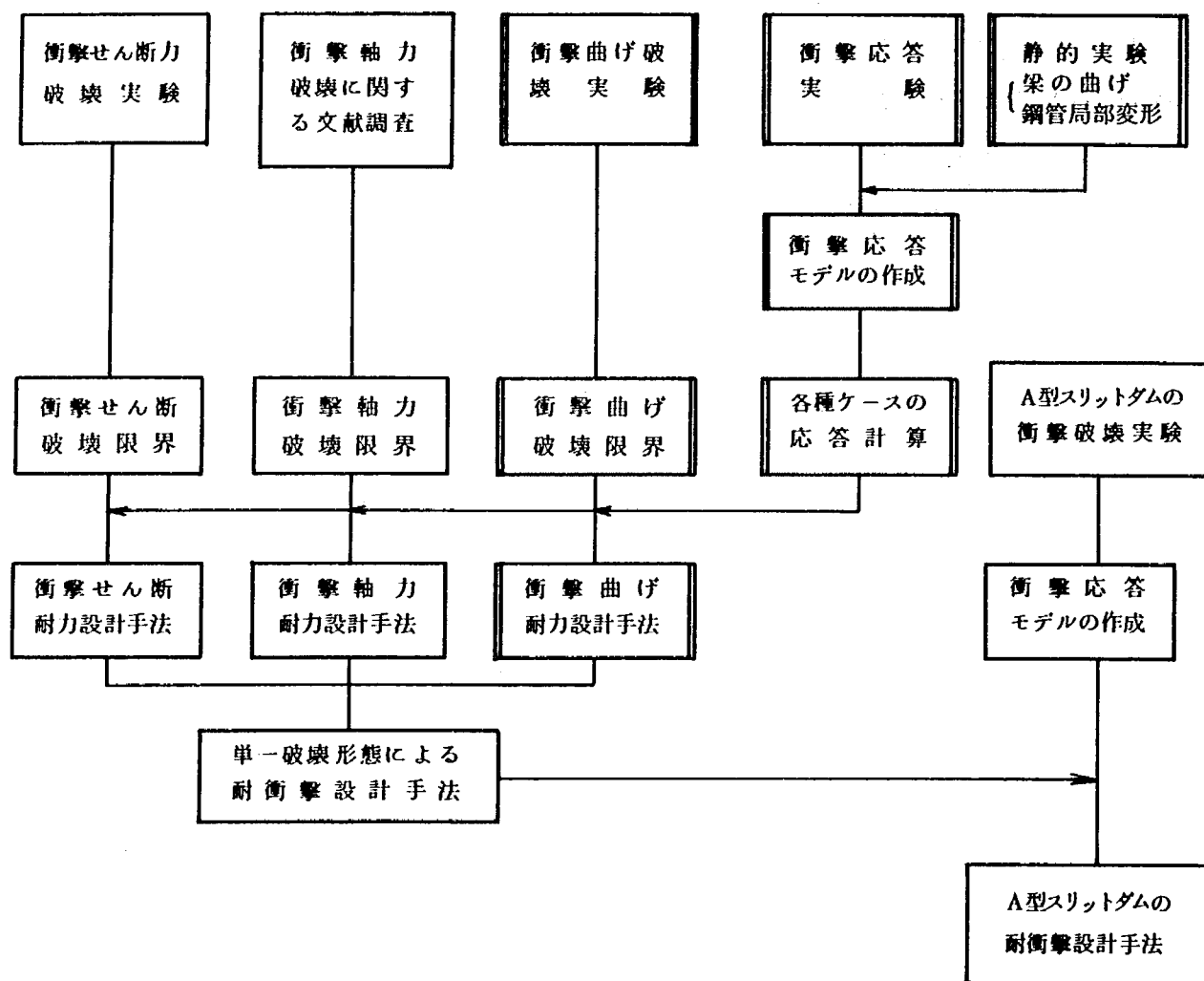


図-2.1 鋼製砂防施設の耐衝撃設計手法のフローチャート

3. 実験および解析の概要

3.1 実験の種類と解析

実施した実験およびその解析の目的は以下に示すとおりである。

表-3.1 実験の種類と解析目的

実験の種類	シリーズ名	解析の目的
静的実験 単純梁の曲げ実験	S B	$P_1 = f(Y_1)$ 式 曲げ破壊限界
〃 鋼管の局部変形実験	S L	$P_2 = f(Y_2 - Y_1)$ 式
単純梁の衝撃応答実験	D	衝撃応答モデル
単純梁の衝撃曲げ破壊実験	D F	衝撃曲げ耐力設計手法 曲げ破壊限界

R_1 : 梁のバネ力 P_2 : 衝撃点のバネ力

Y_1 : 梁の断面図中心位置における中央の曲げ変位

Y_2 : 接触点の初期位置に対する鋼球接触点の変位 (以下接触点の変位と呼ぶ)

上記実験は, 単純梁に鋼球が衝突する現象を図-3.1に示すように2質点の衝撃応答モデルにモデル化し, これを用いて衝撃曲げ耐力の設計手法を明らかにする事をねらいとしている。シリーズSB, SLで2質点の力と変位の関係を明らかにし, これを用いてシリーズDで衝撃応答モデルを作成し検証する。さらに, その衝撃応答モデルを用いてシリーズDFでは, 衝撃曲げ耐力設計手法を明らかにし, A型スリット砂防ダム設計法の概略検討を行う。

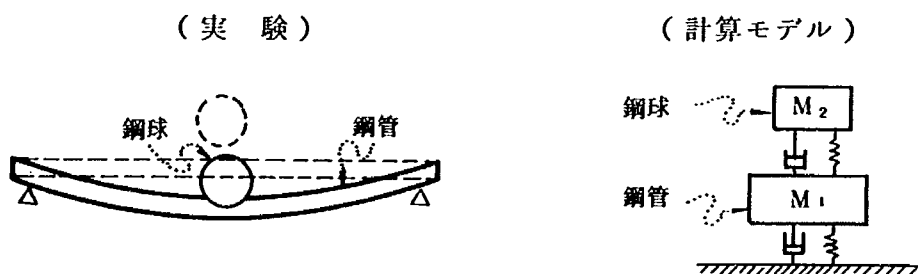


図-3.1 実験とモデル化

3.2 測定項目

表－3.1に示した各実験における測定項目と測定点数を表－3.2に示した。

表－3.2 測定項目

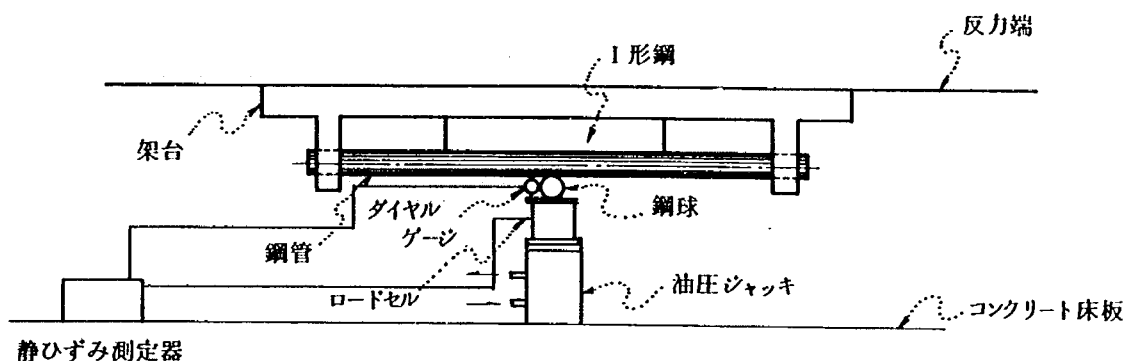
シリーズ	実験の種類	測定項目	測定点数
S B	静的 単純梁の曲げ実験	梁中央の変位	1
		梁表面ひずみ	5
		荷重	1
		残留変位	1
S L	静的 鋼管の局部変形実験	鋼管の局部変位	1
		荷重	1
		残留局部変位	1
D	単純梁の衝撃応答実験	梁中央の変位	1
		梁表面のひずみ	5
		鋼球衝突速度	1
		残留変位	1
		残留局部変位	1
D F	単純梁の衝撃曲げ破壊実験	梁中央の変位	1
		残留変位	1
		残留局部変位	1

4. 実験装置と材料諸元

4.1 静的実験装置

(1) 鋼管の局部変形試験

鋼管の局部変形試験における試験体は、図－4.1に示すように架台に鋼管をセットし鋼管が全体変形しないようにI形鋼を鋼管の上側にセットする。荷重は下側からジャッキで作用させ、ジャッキの上にロードセルを乗せその上に衝撃応答実験に用いた鋼球を乗せ鋼管の中心にセットした。



図－4.1 測定装置

変位はダイヤルゲージをロードセルの頭の部分に取り付け、局部変位量を測定した。測定はロードセル、ダイヤルゲージの端子を静ひずみ測定器に接続して荷重を制御して測定を行った。荷重は油圧ジャッキで作用させ油圧ポンプを手動により操作した。

測定に用いた器械の諸元は表－4.1に示す通りである。

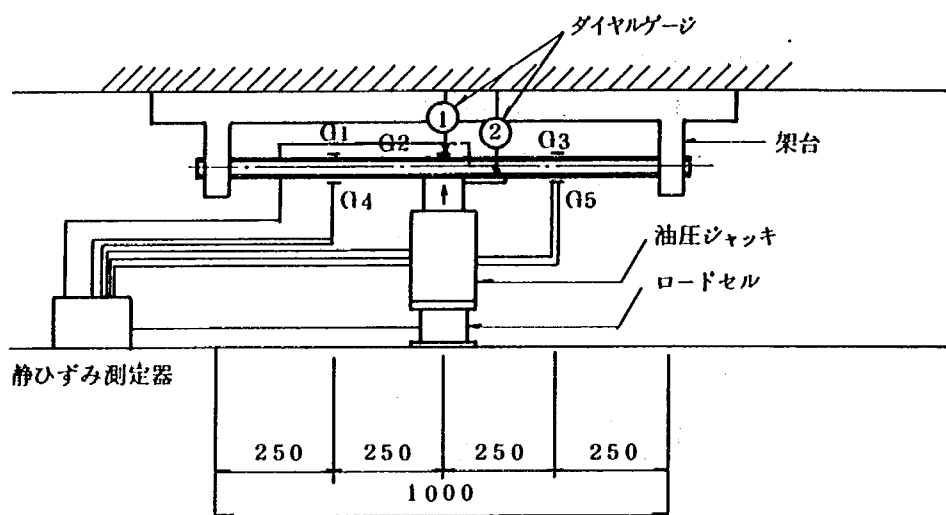
表－4.1 器械諸元

名 称	機 種	仕 様
静ひずみ測定器	東京測器 TDS-301	10点内蔵
変 位 計	共和電業 DT-20D	ダイヤルゲージ変位形 1/100 mm
ロ ー ド セ ル	東京測器 KC-10A	容量 10tf
油 圧 ジャ ッ キ	O X ジャ ッ キ RM-306	揚量 30ton
“ ポ ン プ	“ HPW-5	最高圧力 800kgf/cm ²

(2) 鋼管単純梁の曲げ試験

鋼管の単純梁曲げ試験は、図－4.2に示すように架台に鋼管を取り付け油圧ジャッキで鋼管に荷重を直接作用させた。荷重を作用させた位置は単純梁の中央($L/2 = 0.5\text{ m}$)で、変

位の測定は荷重作用地点の真裏（単純梁の中央）で行った。ひずみは、荷重作用地点から左右それぞれ 0.25 m 離れた位置の上・下側と中央の荷重作用位置の裏側の 5 ケ所で測定を行った。



図－ 4. 2 測 定 装 置

測定に用いた器械の諸元は、表－ 4. 1 に示す通りである。図－ 4. 2 においてダイヤルゲージの位置は取り付けスペースの問題から $\phi 48.6 \text{ mm}$ ， $\phi 60.5 \text{ mm}$ では①の位置， $\phi 89.1 \text{ mm}$ では②の位置とした。

4. 2 衝撃応答実験装置

鋼管単純梁に対する衝撃応答実験は、図－ 4. 3 に示すように鋼管パイプで足場を組み中央に塩ビパイプ（ $\phi_e = 75 \text{ mm}$ ， $t_e = 5.5 \text{ mm}$ ）を鉛直に固定し、塩ビパイプの下に鋼管を架台に取り付けて床板にアンカーボルトで 6 ケ所固定し鋼球の落下によって生ずる衝撃力によって架台が床から離れないようにした。

単純梁であるので鋼管の両端は固定する必要がないが、鋼球の落下によって生ずる衝撃力によって鋼管がはねあがり、測定ができなくなるので架台を作成し、架台に鋼管を取り付けて支持はボルトによって 3 点支持とした。

衝撃応答実験の測定項目は単純梁の中央の変位（最大変位）1 ケ所とひずみとして中央部 1 ケ所，中央からそれぞれ 0.25 m 離れた位置の上・下側の 4 ケ所の測定を行った。

衝撃力はやぐらの真中に設けた硬質塩ビ管をガイドとして鋼球（ $\phi_s = 70 \text{ mm}$ ）を自由落下させた。

測定に用いた器械の諸元は表－ 4. 2 に示す通りである。

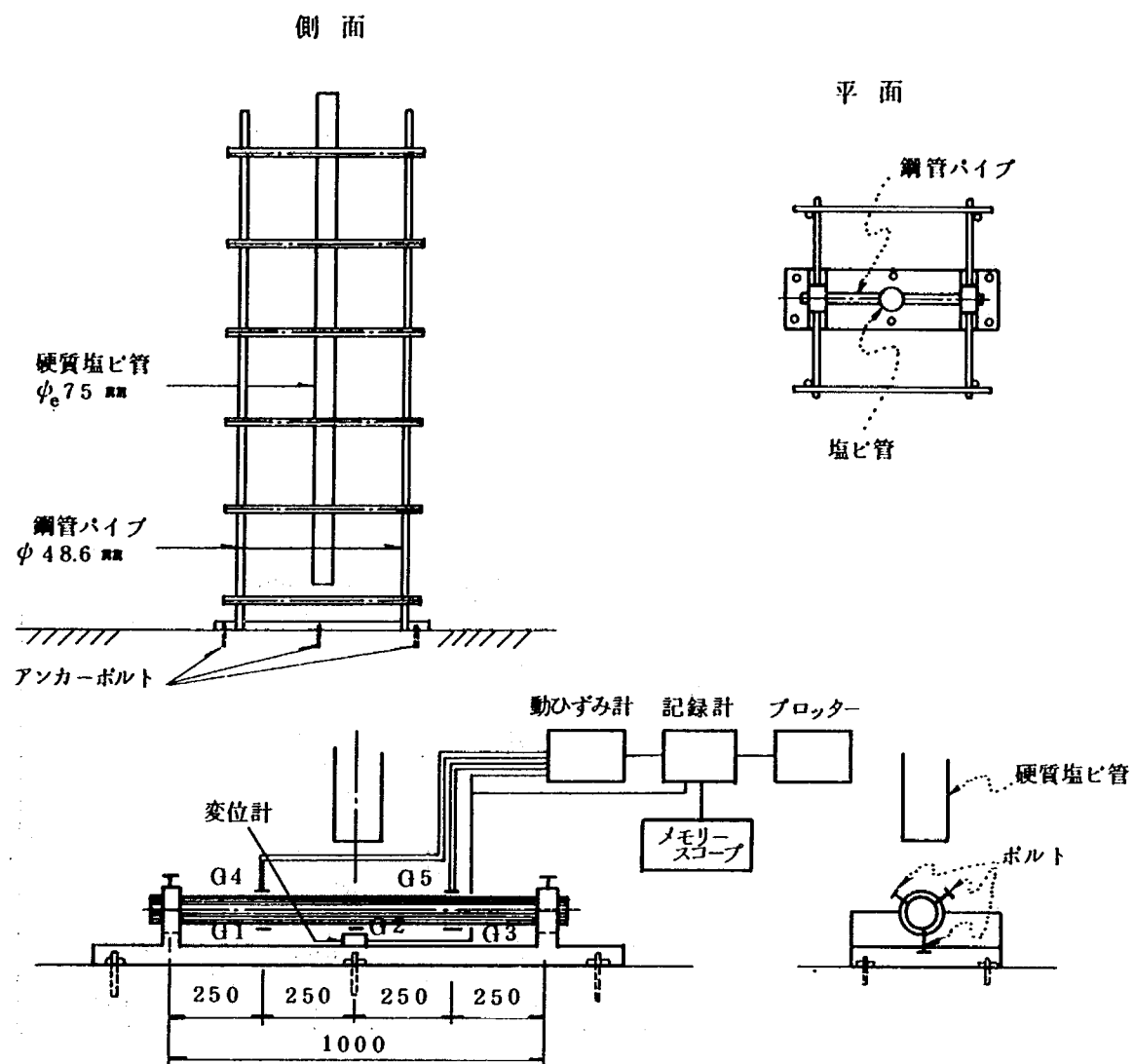


図-4.3 実験装置

表-4.2 器械諸元

測定項目	名称	機種	数量
動ひずみ	動ひずみ計	CDV 230	6 ch
	記録計	DM 7100	6 ch
	プロッター	WX 4421	1 台
	ブリッジヘッド	—	5 ch
	オシロスコープ	MS-5511	1 台
変位	KAMAN Measuring Systems	KD-2300	1 台
鋼球速度	高速ビデオカメラ	SONY	1 台
変形状況	変位範囲の測定・写真		

4.3 衝撃曲げ破壊実験装置

衝撃曲げ破壊実験は衝撃応答実験装置を用いて鋼球を落下させ落下回数と単純梁の全体変位量、接触点の局部変位量の測定を行った。但し実験装置のうち、鋼球が落下するのをガイドする塩ビ管を $\phi_e = 100 \text{ mm}$, $t_e = 6.6 \text{ mm}$ に、鋼球を $W = 3 \text{ kgf}$ ($\phi_s = 90 \text{ mm}$) にかえた。

4.4 実験材料諸元

(1) 鋼材の諸元

実験に用いた鋼管の諸元は表-4.3に示す通りである。

表-4.3 鋼 管 の 諸 元

	$\phi = 48.6 \text{ mm}$	$\phi = 60.5 \text{ mm}$	$\phi = 89.1 \text{ mm}$
厚 さ t_p (mm)	3.2	3.2	3.2
降 伏 点 σ_y' (kgf/cm ²)	4000	3800	3900
引 張 強 さ (kgf/cm ²)	4800	4700	4600
伸 び (%)	46	51	28
断 面 積 A (cm ²)	4.562	5.760	8.636
断面二次モーメント I (cm ³)	11.8	23.7	79.8
断 面 係 数 Z (cm ³)	4.86	7.84	17.9
単位長重量 W (kgf / m)	3.58	4.52	6.78

品名：一般構造用炭素鋼鋼管

規格：JIS G 3444 STK 41

(2) 鋼球の諸元

$\phi_s = 70 \text{ mm}$ $W = 1.4 \text{ kgf}$

$\phi_s = 90 \text{ mm}$ $W = 3.0 \text{ kgf}$

(3) 緩衝材諸元

鋼管の表面に巻いた緩衝材のゴムの諸元は次の通りである。

品名：ネオプレンCF

厚さ t_p 2 mm, 5 mm

弾性係数 $E_r = 2.3 \times 10^6 \text{ kgf/m}^2$ ³⁾

5. 静 的 実 験

5.1 実験ケース

鋼球の鋼管に対する衝突現象を解析する基礎資料とするために、衝撃実験と同じ鋼管の局部変形実験および梁の曲げ実験を行った。実験ケースは表－5.1に示すとおりである。

表－5.1 静的実験ケース

区分	CASE	鋼 管	載 荷 条 件			測 定 項 目		
			スパン (cm)	載 荷 点	載荷ヘッド	管表面 のひずみ	変位or 局部変位	残留変位
局 部 変 形 実 験	SL-1	$\phi 48.6 \text{ mm}$ $t_p 3.2 \text{ mm}$	床に固定		直径7 cm 鋼 球		○	○
	SL-2	$\phi 60.5 \text{ mm}$ $t_p 3.2 \text{ mm}$	"		"		○	○
	SL-3	$\phi 89.1 \text{ mm}$ $t_p 3.2 \text{ mm}$	"		"		○	○
	SL-4	"	"		"		○	○
曲 げ 実 験	SB-1	$\phi 48.6 \text{ mm}$ $t_p 3.2 \text{ mm}$	100	梁 中 央	平面のピストンヘッド	○	○	○
	SB-2	$\phi 60.5 \text{ mm}$ $t_p 3.2 \text{ mm}$	"	"	"	○	○	○
	SB-3	$\phi 89.1 \text{ mm}$ $t_p 3.2 \text{ mm}$	"	"	"	○	○	○

5.2 実験結果

(1) 鋼管の局部変形実験

実験で測定した荷重 p と局部変位 δe の関係を図－5.1，図－5.2，図－5.3に示した。これらの図から明らかなように、除荷時の $p - \delta e$ の軌跡はほぼ垂直であり、最高荷重時の局部変位のほとんどが残留変位として残る。載荷時の p はほぼ $\sqrt{\delta e}$ に比例しており、図中の実験近似式は $p - \sqrt{\delta e}$ を一次式で表したものである。詳細は5.3節で述べる。

(2) 鋼管単純梁の曲げ実験

荷重 p とひずみ ϵ との関係を図－5.4～図－5.6に示した。この $p - \epsilon$ 関係から鋼管単純梁の曲げ変形について下記の特性がみられる。

- ① 載荷側のひずみ (G4, G5) は圧縮を、反対側は引張りを示し、載荷点に近い点のひずみが最も大きい値を示す。すなわち、これは梁の曲げ特性を示している。
- ② $\phi = 48.6 \text{ mm}$ と $\phi = 60.5 \text{ mm}$ ではG1とG4, G3とG5のように表裏となる点のひずみは符号が逆ではほぼ等しい値を示しているが、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ 鋼管は引張側の方が圧縮側の約1.8倍程度大きくなっている。
- ③ G2と他のひずみ (G1, G3, G4, G5) の比 r は理論的には $r = 2.0$ であるはずで

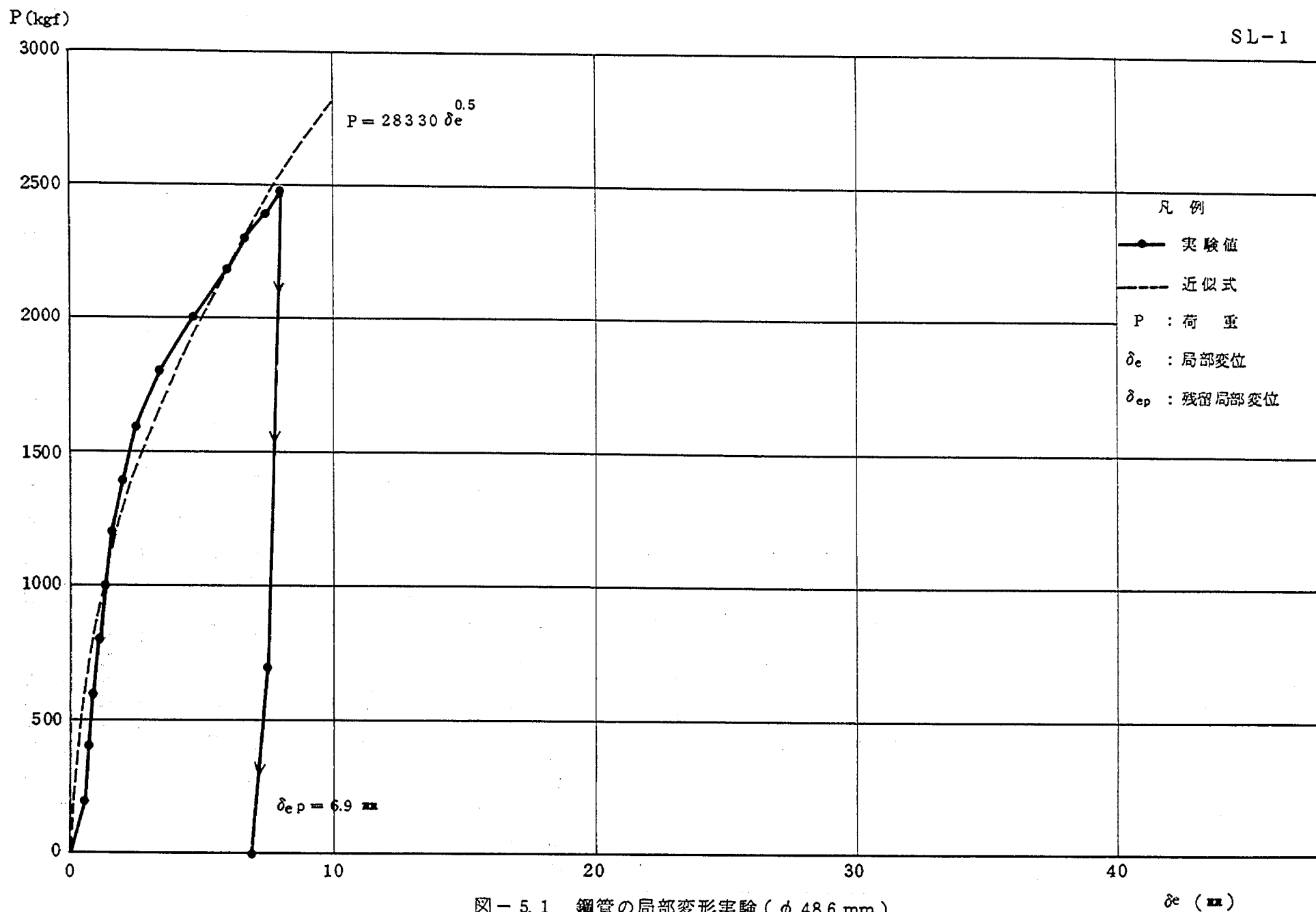


図-5.1 鋼管の局部変形実験 (φ 48.6 mm)

 δ_e (mm)

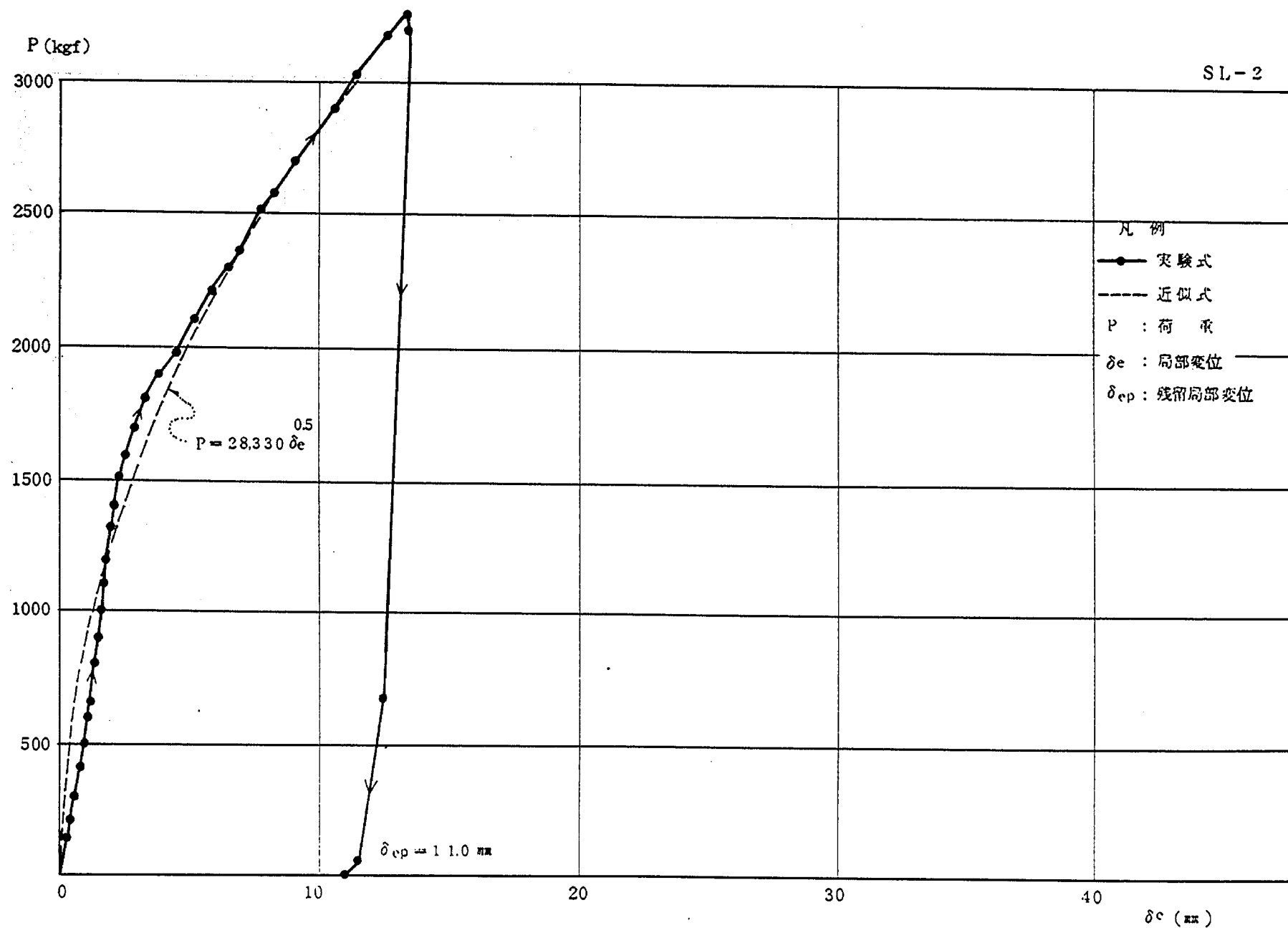


図 - 5.2 鋼管の局部変形実験 (ϕ 60.5 mm)

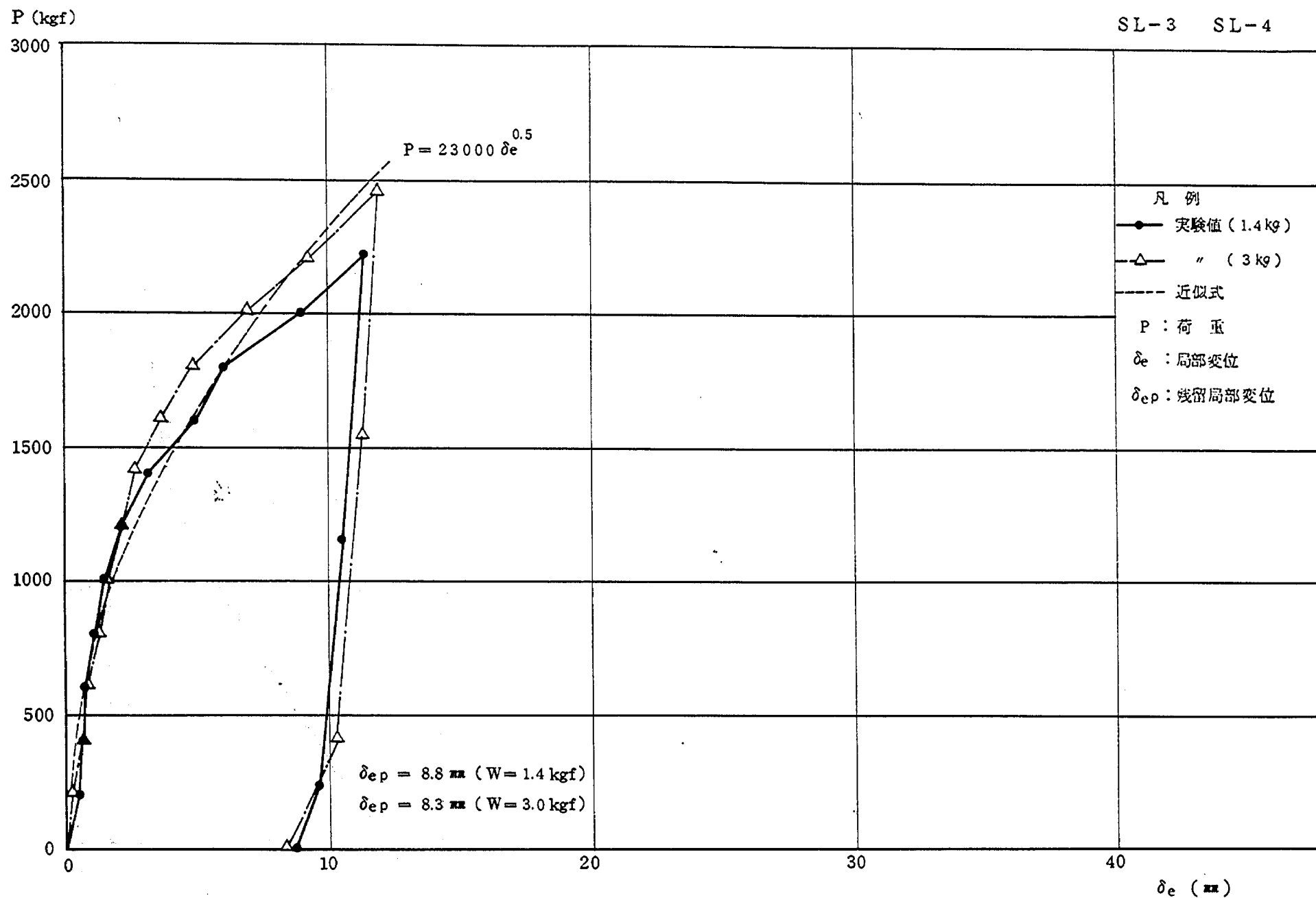


図 - 5. 3 鋼管の局部変形実験 ($\phi 89.1 \text{ mm}$)

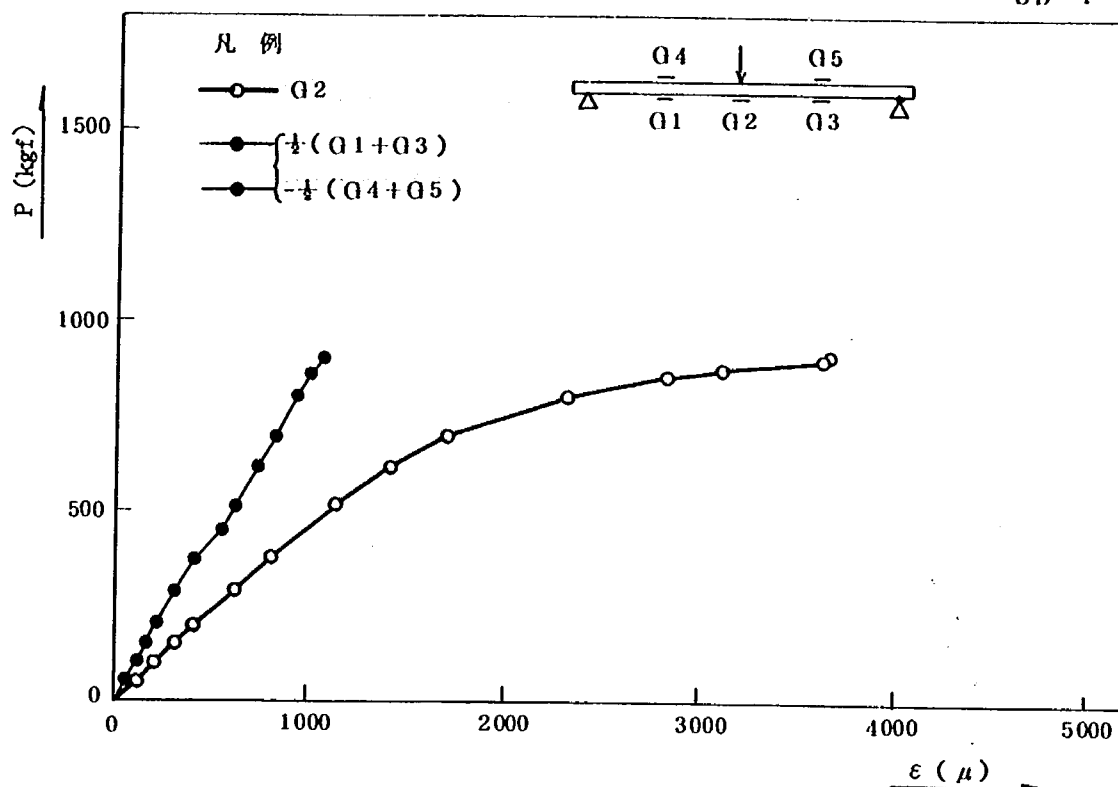


図-5.4 鋼管単純梁の曲げ実験P- ϵ 曲線 (ϕ 48.6 mm)

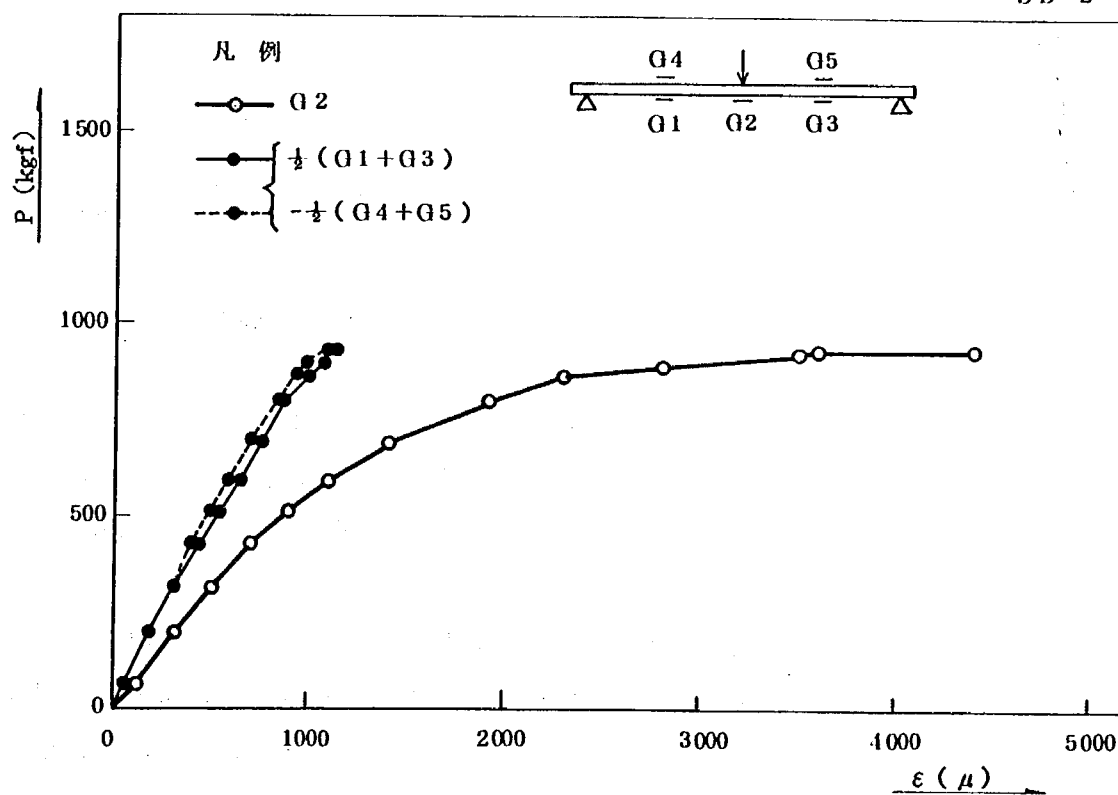


図-5.5 鋼管単純梁の曲げ実験P- ϵ 曲線 (ϕ 60.5 mm)

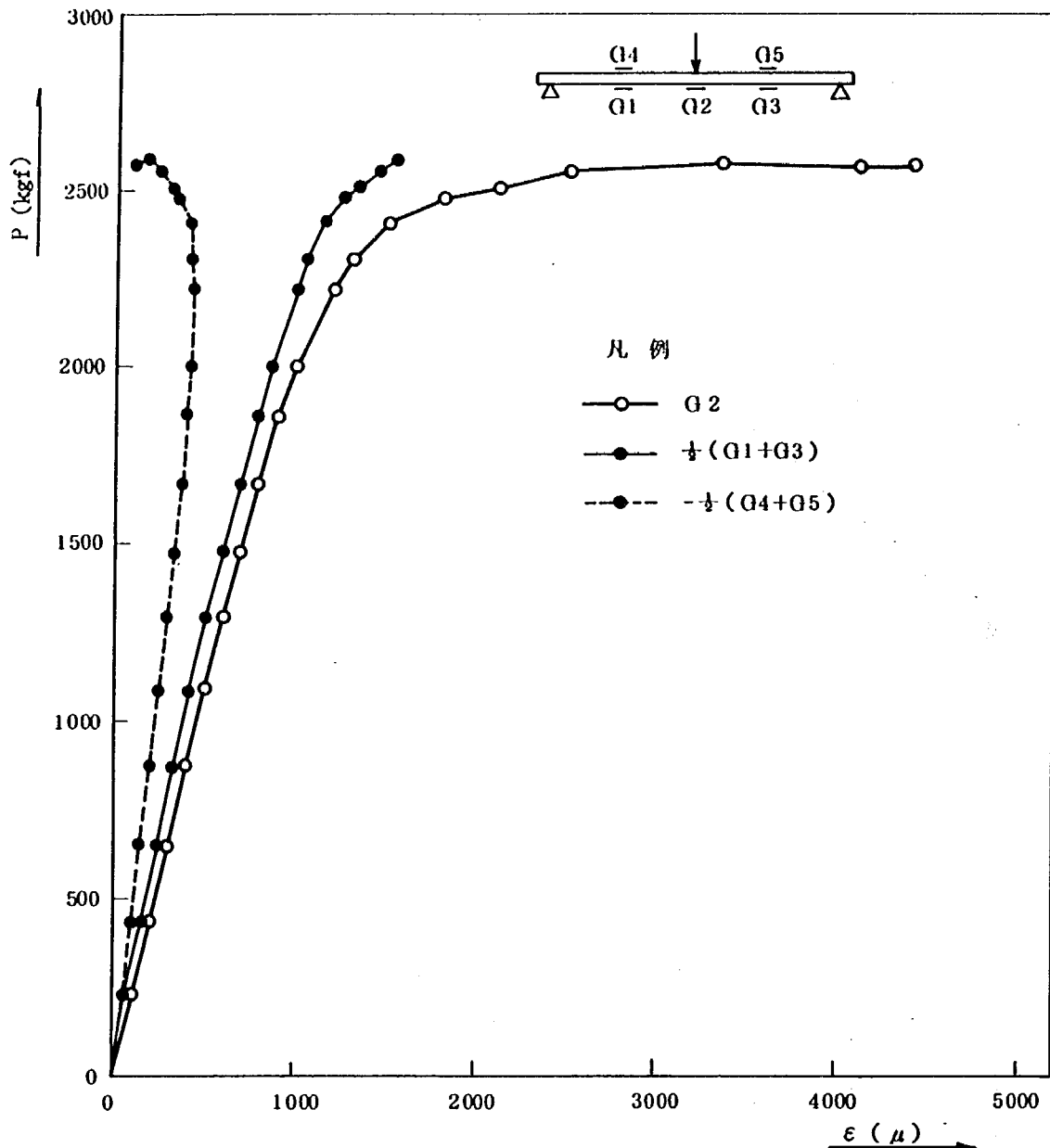


図 - 5.6 鋼管単純梁の曲げ実験 $p - \epsilon$ 曲線 ($\phi 89.1 \text{ mm}$)

あるが、 $G2$ の比例範囲内では、図 - 5.7 に示すように $\gamma = 1.5 \sim 2.0$ である。そして γ の値は鋼管の径が大きいほど小さくなる。 $G2$ が塑性域に入ると γ の値は急増する。

- ④ $p - \epsilon$ の直線性があるのは、 $\epsilon < 1000 \sim 1200 \mu$ の範囲であり、 $\epsilon > 2500 \mu$ となると完全に塑性域に入る。

上記のうち②に示した圧縮側と引張側のひずみが異なるのは、載荷点の局部変形の影響が $G4$ 、 $G5$ に及んでいる事が原因と考えられる。③の原因も局部変形による管の円周方向のひずみ発生と考えられる。上記のように理論通りでない面もあるが、全体的には単純梁の曲げ変形特性を示している。

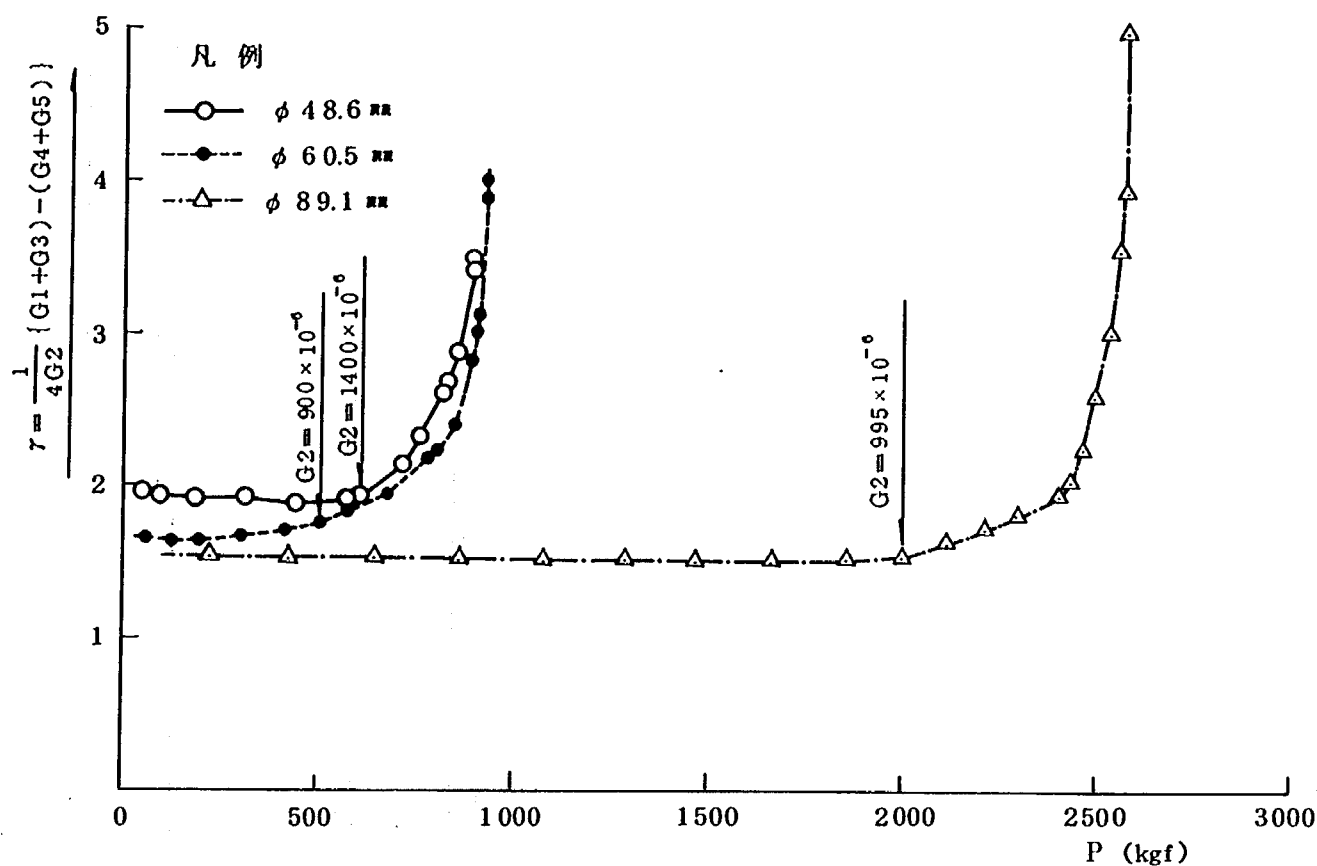


図-5.7 鋼管単純梁の曲げ実験（ひずみ比）

次に、衝撃応答計算モデル作成のために、鋼管単純梁の変形を表す定数を求める。計算モデルにおいては梁中央の載荷点の力と変位の関係が必要であるので、単純梁の中央載荷実験でも、荷重と梁中央のひずみ（ G_2 ）および変位の関係を整理し、図-5.8～5.10に示した。

図-5.8～5.10において、 G_2 のひずみ ϵ_z および載荷点の変位 δb と荷重 p の関係で、塑性域に入った後除荷した場合の $p-\epsilon_z$ および $p-\delta b$ は載荷時と同様の勾配を示す。この性質は鋼の一般的に示す性質⁹⁾である。

次に、弾性範囲における $\epsilon_z-\delta b$ 関係は（5.1）式、（5.2）式から（5.3）式が導かれる。

$$\epsilon_z = \frac{P L}{4 E Z} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\delta b = \frac{P L^3}{48 E I} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\delta b = \frac{L^2}{6 D} \epsilon_z \quad \text{or} \quad \epsilon_z = \frac{6 D}{L^2} \delta b \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

E ：鋼の弾性係数（ kgf/cm^2 ）， L ：スパン長（ cm ）， D ：鋼管外径（ cm ）

完全塑性域になると、梁の曲げ応力分布が矩形分布に変わり、（5.3）式は成立しなくなる。したがって、弾性範囲内における δb ， ϵ_z の測定結果の整合性を調べると表-5.2のよ

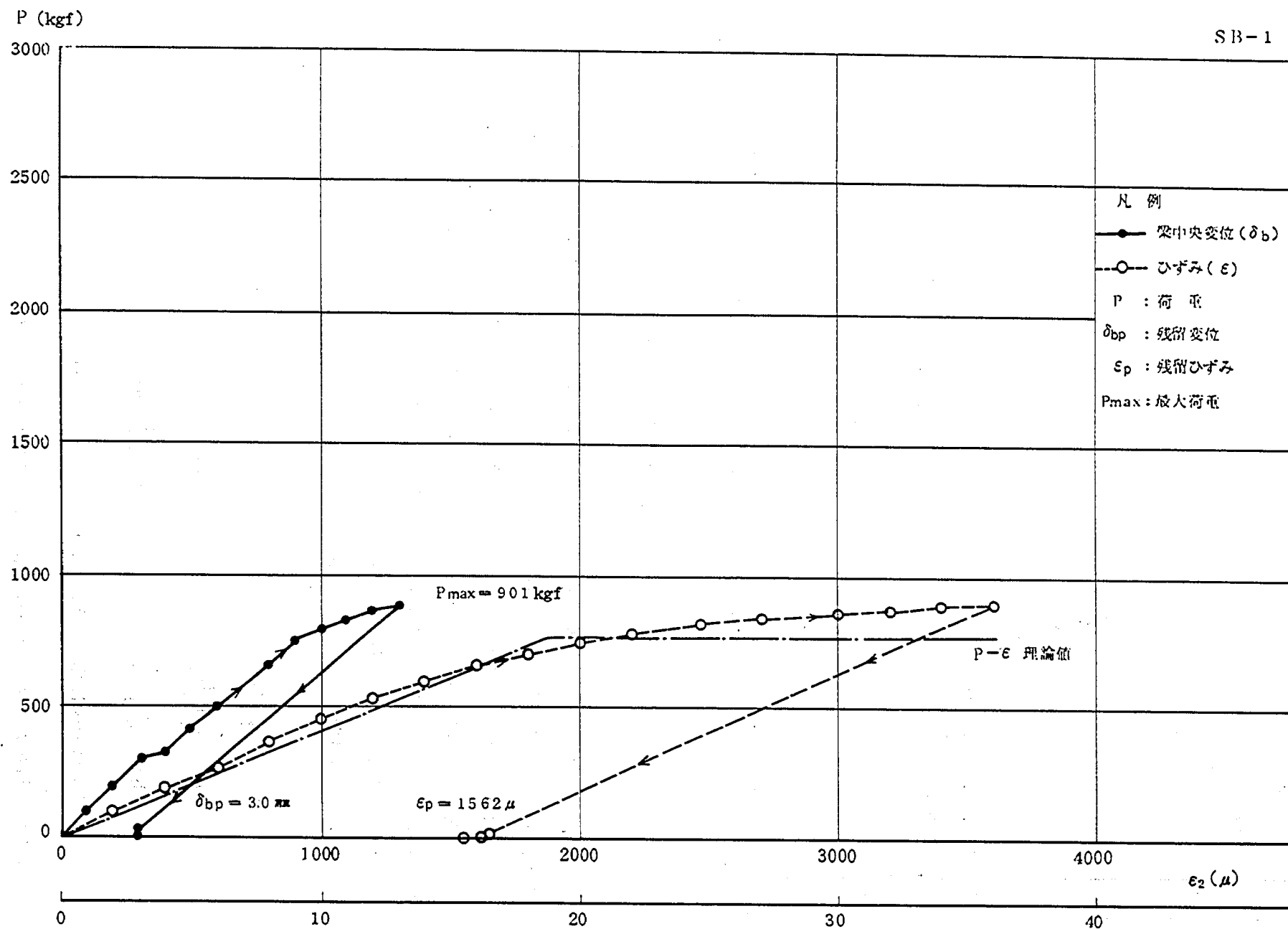


図-5.8 鋼管単純梁の曲げ実験 ($\phi 48.6 \text{ mm}$)

δ_b (mm)

P (kgf)

SB-2

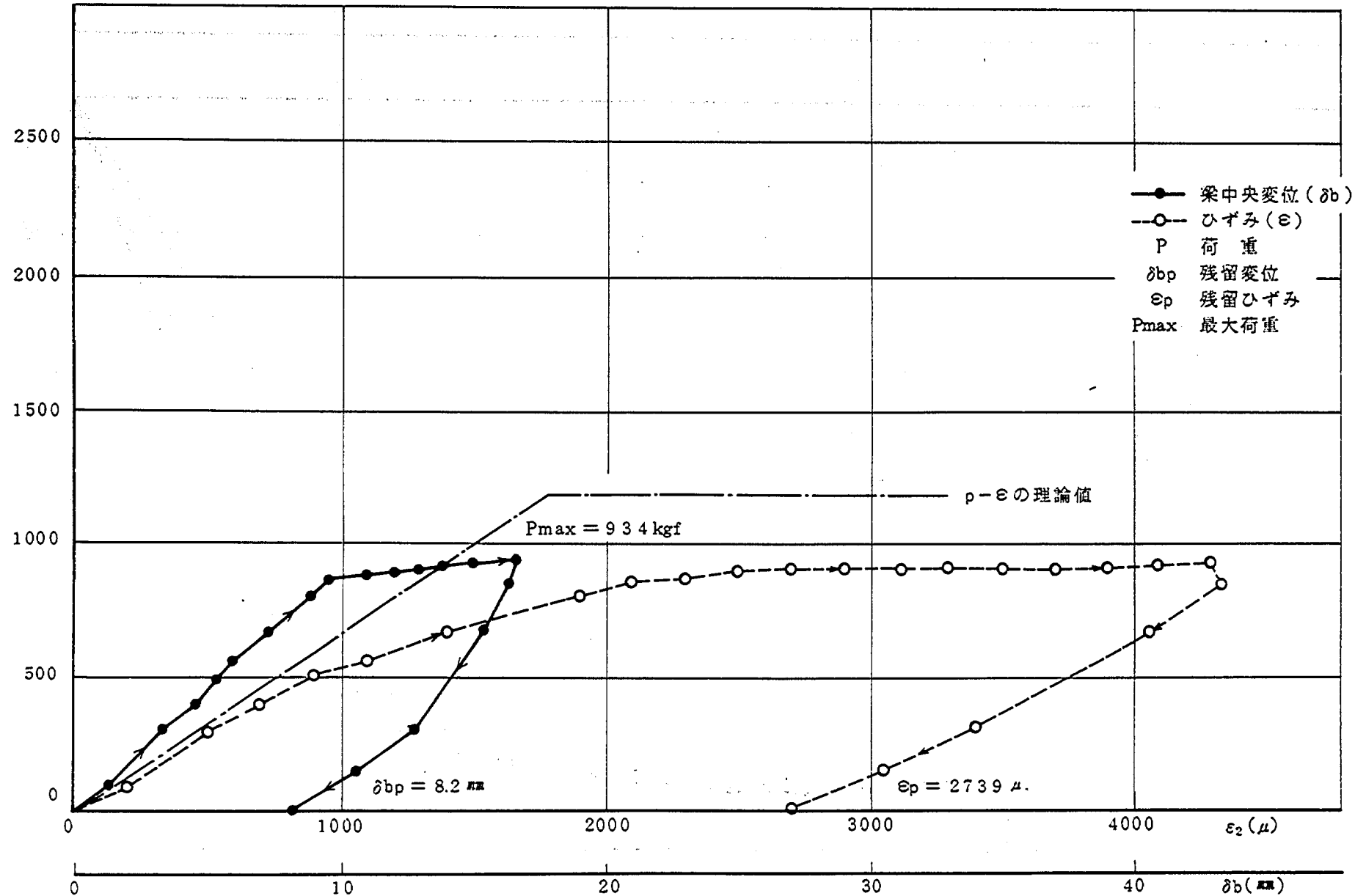


図-5.9 鋼管単純梁の曲げ実験 ($\phi 60.5 \text{ mm}$)

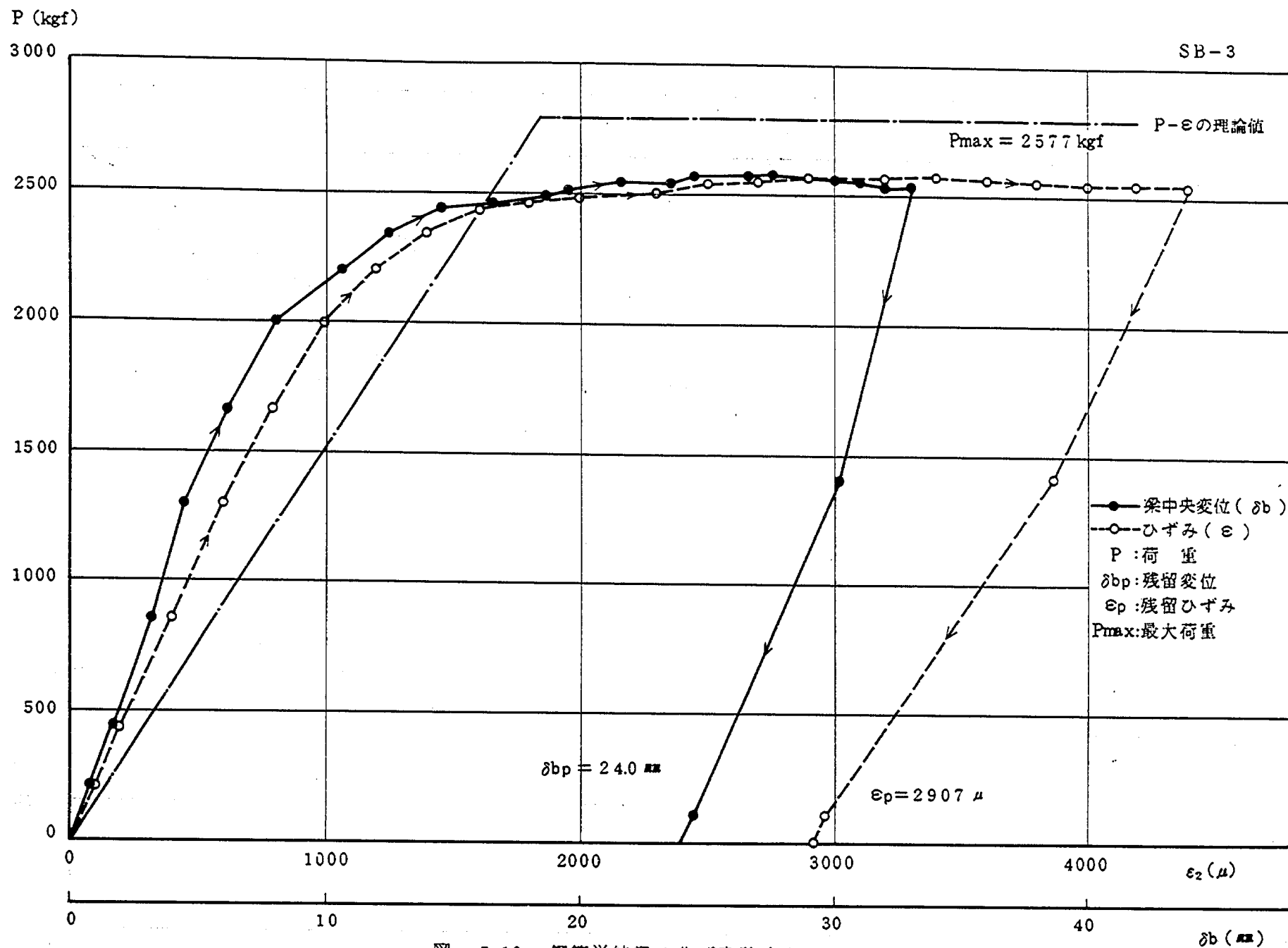


図-5.10 鋼管単純梁の曲げ実験 ($\phi 89.1 \text{ mm}$)

表-5.2 測定値 δ と ϵ_z の整合性

鋼 管	測 定 値			(5.3)式より求めた ϵ_z' , δ'	
	p kgf	ϵ_z μ	δb mm	ϵ_z' μ	δ' mm
ϕ 48.6 mm	238	504	2	583	1.7
	537	1200	6	1750	4.1
ϕ 60.5 mm	312	500	3.38	1227	1.4
	588	1103	6.19	2247	3.0
ϕ 89.1 mm	1083	501	3.85	2058	0.9
	2003	995	8.13	4346	1.9

うになる。表-5.2において ϵ_z の測定値から理論式を用いて求めた変位 δ' と実測 δb を比較すると下記のとおり。

$$\begin{aligned} \phi 48.6 \text{ mm 鋼管は} & \quad \delta b = 1.3 \delta' \\ \phi 60.5 \text{ mm} \quad & \quad \delta b = 2.3 \delta' \\ \phi 89.1 \text{ mm} \quad & \quad \delta b = 4.3 \delta' \end{aligned}$$

上記の ϵ_z と δb の関係が理論式通りにならないのは、梁の曲げ試験で図-5.11に示すように鋼管の断面形状の変形があるからと推測される。断面形状の変形の影響は鋼管径が大きくなるほど（肉厚は同じ）、大きくなることが推測され、前述の $\delta b/\delta'$ が鋼管径が大きくなるに従い増大しているのはこのためと考えられる。特に $\phi 89.1 \text{ mm}$ 鋼管では図-4.2に示したように載荷面の鋼管の変位を測定しているので、他よりも $\delta b/\delta'$ が大きくなる原因となっている。

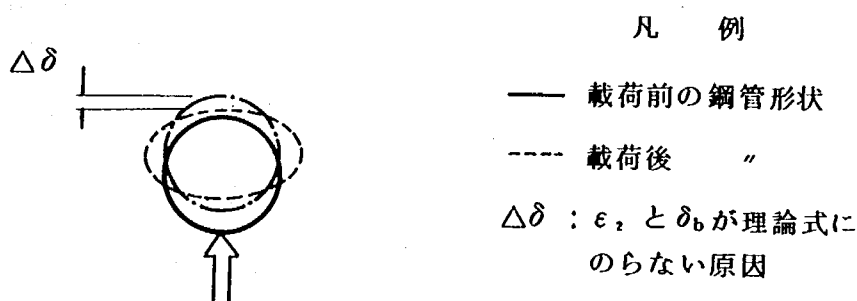


図-5.11 単純梁鋼管の曲げ実験における断面変形の影響

上記のように単純梁鋼管の曲げ実験で測定した δb には、鋼管の断面形状の変形が含まれており、正しい $p - \delta b$ の関係を示していないとの判断から、以降の解析における単純梁鋼管の曲げ変形特性は実測の $p - \epsilon_z$ 関係を用いる。

5.3 静的実験結果の考察

(1) 局部変形に関する考察

鋼管の局部変形（へこみ）と外力の関係は既存の研究から（5.4）の式で表される。⁴⁾

$$P = \frac{1}{4} \alpha \sigma_y' \cdot t_p^2 \left(\frac{\delta e}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (5.4)$$

P : 外力 (kgf)

σ_y' : 材料の降伏点応力 (kgf/cm²)

t_p : 鋼管厚 (cm)

δe : 局部変位 (cm)

D : 鋼管外径 (cm)

α : 実験定数 ($\alpha = 150$)

（5.4）式はナイフエッジによる載荷であるのに対し、今回の実験は $\phi = 70$ mm の鋼球によって載荷した点異なる。しかし、外力 p と局部変位量 δe の測定結果を整理した図－5.12 をみると、p はほぼ $\sqrt{\delta e}$ に比例しており（5.4）式は α を修正するだけで使える。

実験結果をもとに p - δe の関係を各鋼管毎に求めると表－5.3 のとおりとなる。表－5.3 に示すように実験定数 α は既存実験とは大巾に異なる。これは載荷条件のちがい等が原因となっているものと思われる。本実験結果から求められる α の値は $\alpha = 61 \sim 68$ の範囲であり、ほぼ同じ値を示すとみることができる。

$\phi 89.1$ mm の鋼管に対しては直径 70 mm と直径 92.6 mm の鋼球による局部変形実験を行ったが、鋼球径による差はあまりみられない事が図－5.12 からみられる。

表－5.3 鋼管の局部変位と外力の関係

区 分	p - δe	α	原式に対する α の 比 率
原 式	$p = \frac{1}{4} \alpha \sigma_y' t_p^2 \left(\frac{\delta e}{D} \right)^{\frac{1}{2}}$	150	100 %
$\phi 48.6$	$p = 28330 \delta e^{\frac{1}{2}}$	61	41 %
$\phi 60.5$	$p = 28330 \delta e^{\frac{1}{2}}$	68	45 %
$\phi 89.1$	$p = 23000 \delta e^{\frac{1}{2}}$	67	45 %
計 算 条 件	$\sigma_y' = 4000 \text{ kgf/cm}^2 \quad t_p = 0.32 \text{ cm}$		

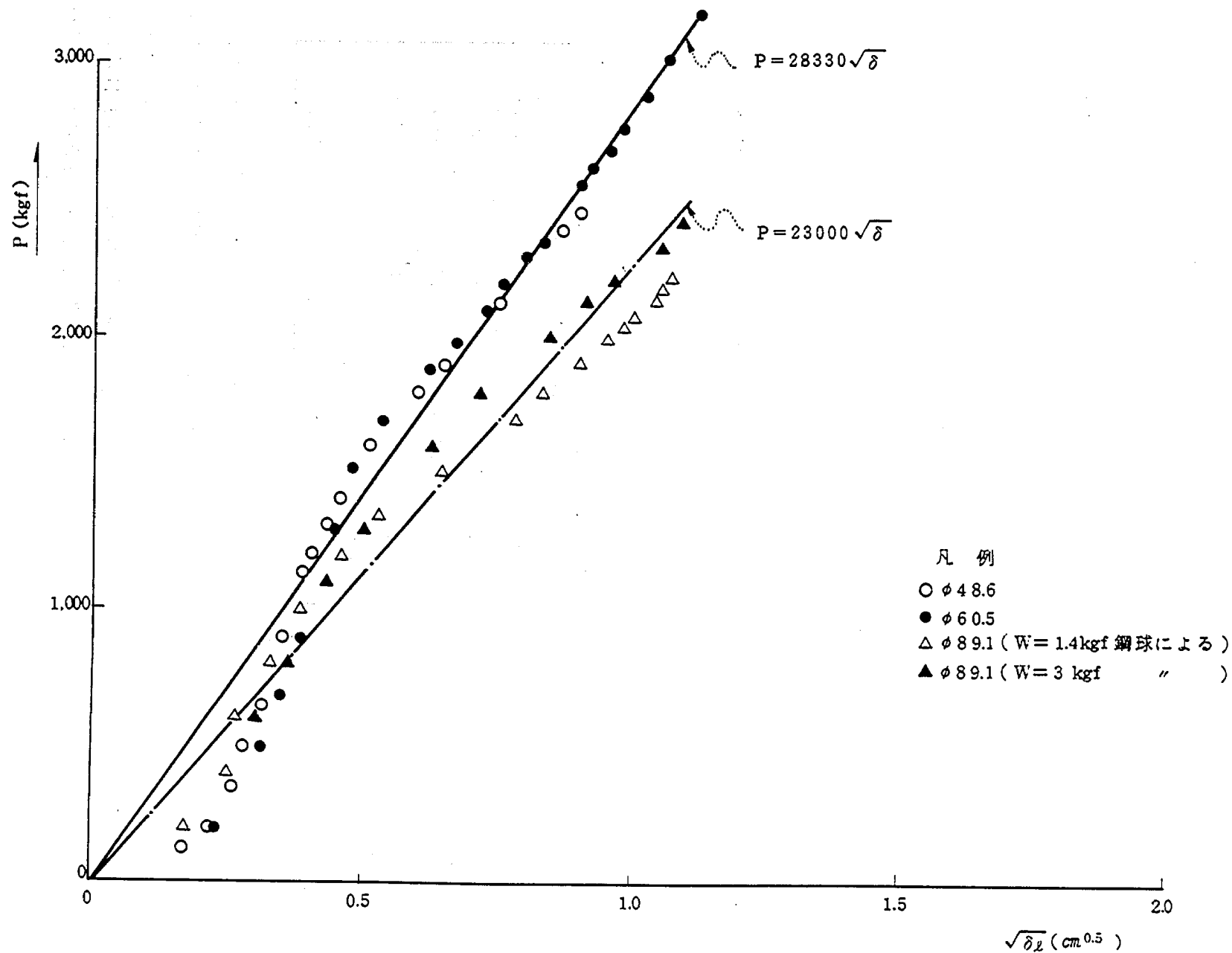


図 - 5. 12 鋼管の局部変位と外力の関係図

(2) 梁の曲げ試験結果の考察

単純梁の中央載荷における，中央点のひずみと変位の理論値を計算して，図－5.8～図－5.10の実測値と比較する。理論値は（5.5）式，（5.6）式から求めたものである。

$$\epsilon_2 = \frac{P L}{4 Z E} \dots\dots\dots (5.5)$$

$$\delta b = \frac{P L^3}{48 E I} \dots\dots\dots (5.6)$$

ϵ_2 : 中央点ひずみ

L : スパン長 (cm)

P : 荷重 (kgf)

Z : 断面係数 (cm³)

E : 鋼の弾性係数 (kgf/cm²)

I : 断面 2 次モーメント (cm⁴)

δb : 中央点変位 (cm)

図－5.8～5.10 から降伏点応力，降伏点ひずみを表－5.4 に整理した。降伏点は，図－5.13 により決定した。

表－5.4 単純梁曲げ実験結果

測 定 項 目	分 類	φ 48.6 鋼管	φ 60.5 鋼管	φ 89.1 鋼管
降 伏 点 応 力 $\sigma_y \cdot \sigma_y' \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	① 実測 σ_y	4420	2870	3540
	②*理論 σ_y'	4000	3800	3900
	① / ②	1.105	0.755	0.908
降 伏 点 ひ ず み $\epsilon_y \cdot \epsilon_y' \text{ (}\mu\text{)}$	① 実測 ϵ_y	2900	2900	2450
	② 理論 ϵ_y'	1905	1810	1860
	① / ②	1.522	1.602	1.317

* 鋼管試験成績表による。

表－5.4 から，φ 60.5 mm 鋼管の降伏点応力が理論値よりも小さい事，降伏点ひずみに関しては全鋼管とも理論値よりも大きい値を示しているが，これは先の図－5.11 に示したように，鋼管の断面変形が生じ，これが断面特性に変化を起しているのが原因と考えられる。

動的解析を行うために，鋼管の曲げにおける $\sigma - \epsilon_2$ を弾完全塑性に近似して，弾性係数および降伏点応力を求めると表－5.5 となる。弾性係数および降伏点応力の計算においては荷重 p から（5.7）式を用いて降伏点応力 σ_y に換算している。

$$\sigma_y = \frac{P L}{4 Z} \dots\dots\dots (5.7)$$

表-5.5 梁の曲げ試験から求められる降伏点応力, 弾性係数

鋼 管	$\phi 48.6$	$\phi 60.5$	$\phi 89.1$	平 均
降伏点応力 σ_y (kgf/cm ²)	4420	2870	3540	3610
弾 性 係 数 E (kgf/cm ²)	2.28×10^6	1.76×10^6	2.88×10^6	2.31×10^6

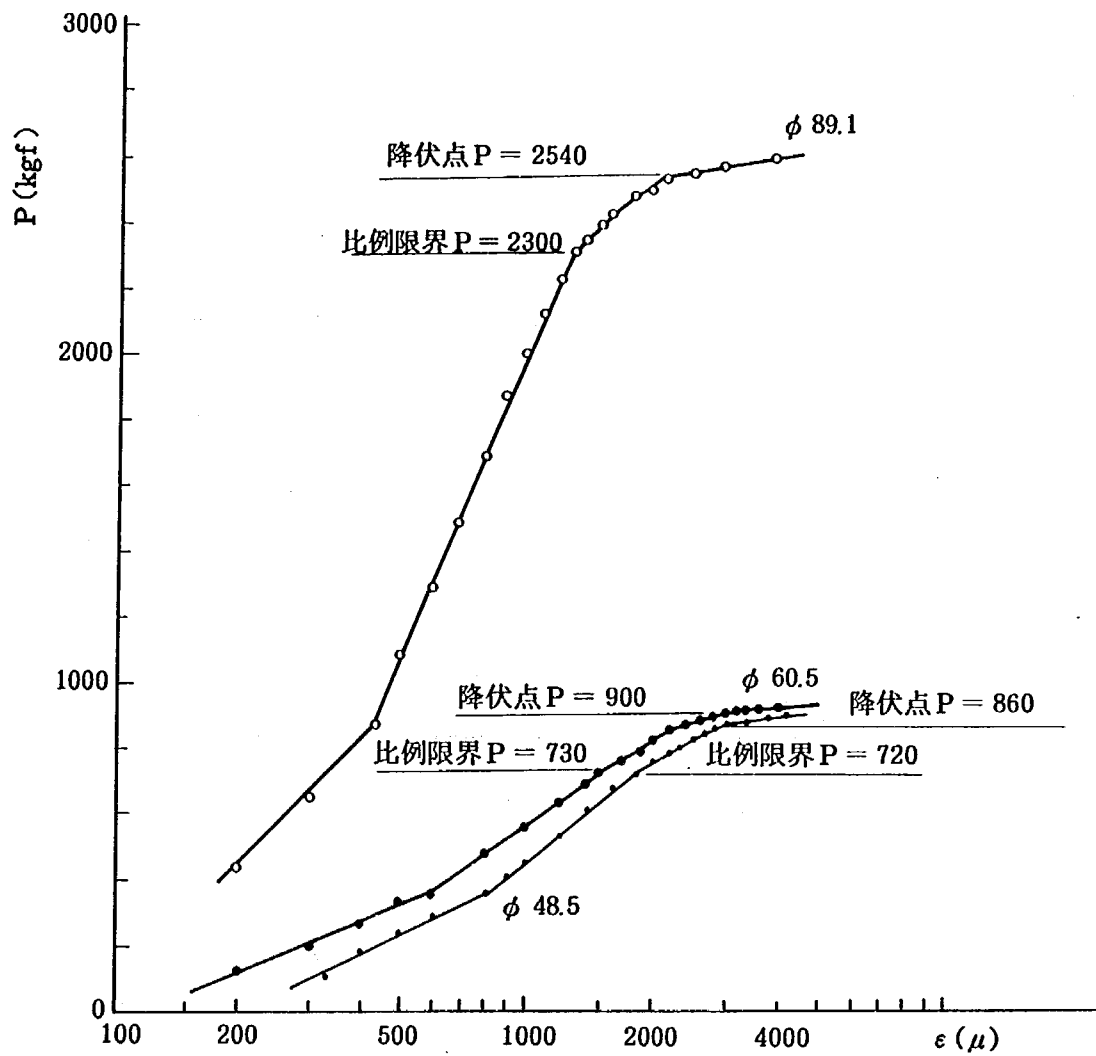


図-5.13 梁の曲げ試験による $p - \log \epsilon$

6. 衝 撃 応 答 実 験

6.1 実験ケース

鋼管単純梁に対する衝撃力実験は、表－6.1に示すように鋼管に緩衝材を設置した場合と、設置しなかった場合の計25ケースについて行った。

表－6.1 実 験 ケ ー ス

CASE	衝突速度 v (m/s)	落 高 H (m)	鋼 管 径 φ (mm)	鋼 球 W (kgf)	ゴ ム 厚 tr (mm)	CASE	衝突速度 v (m/s)	落 高 H (m)	鋼 管 径 φ (mm)	鋼 球 W (kgf)	ゴ ム 厚 tr (mm)
D－1	2	0.2	48.6	1.4	なし	D－14	8	3.27	48.6	1.4	2.0
D－2	4	0.82	"	"	"	D－15	4	0.82	"	"	5.0
D－3	6	1.84	"	"	"	D－16	8	3.27	"	"	"
D－4	8	3.27	"	"	"	D－17	4	0.82	48.6	"	なし
D－5	2	0.20	60.5	"	"	D－18	4	0.82	60.5	"	2.0
D－6	4	0.82	"	"	"	D－19	8	3.27	60.5	"	"
D－7	6	1.84	"	"	"	D－20	4	0.82	60.5	"	5.0
D－8	8	3.27	"	"	"	D－21	8	3.27	60.5	"	"
D－9	2	0.20	89.1	"	"	D－22	4	0.82	89.1	3.0	なし
D－10	4	0.82	"	"	"	D－23	8	3.27	89.1	"	"
D－11	6	1.84	"	"	"	D－24	4	0.82	89.1	"	"
D－12	8	3.27	"	"	"	D－25	8	3.27	89.1	"	"
D－13	4	0.82	48.6	"	2.0						

6.2 実験結果と考察

6.2.1 時間－ひずみ ($t - \epsilon$) 曲線, 変位 ($t - \delta b$) 曲線

図－6.1, 6.2は $t - \epsilon$, $t - \delta b$ 曲線の一例を示す。この図に代表されるように本実験における鋼管表面の $t - \epsilon$ 曲線は下記の特性を示す。なお全ケースの $t - \epsilon$, $t - \delta b$ 曲線は資料集に示してある。

- ① 打撃面側のひずみG4, G5は圧縮ひずみとなり、打撃面から支点方向に同じ距離であれば同じ大きさを示している。
- ② 打撃面の裏のひずみG1, G2, G3は引張ひずみとなり、G4, G5と表裏をなすG1, G3はほぼ対称な派形となっている。打撃点から支点方向に同じ距離であれば、ほぼ同一値を示している。
- ③ 鋼球衝突の第1波がピーク値を示し、第2波以降は自由振動となるが、その減衰定数 $h = 0.025$ はコンクリート壁等に比較し小さい。
- ④ 打撃面にゴムを緩衝材として設置しても上記①～③の特徴がみられる。
- ⑤ 第1波のピークひずみが降伏点ひずみ ($\epsilon_y = 2400 \sim 2900 \mu$)を超えるようなものが発

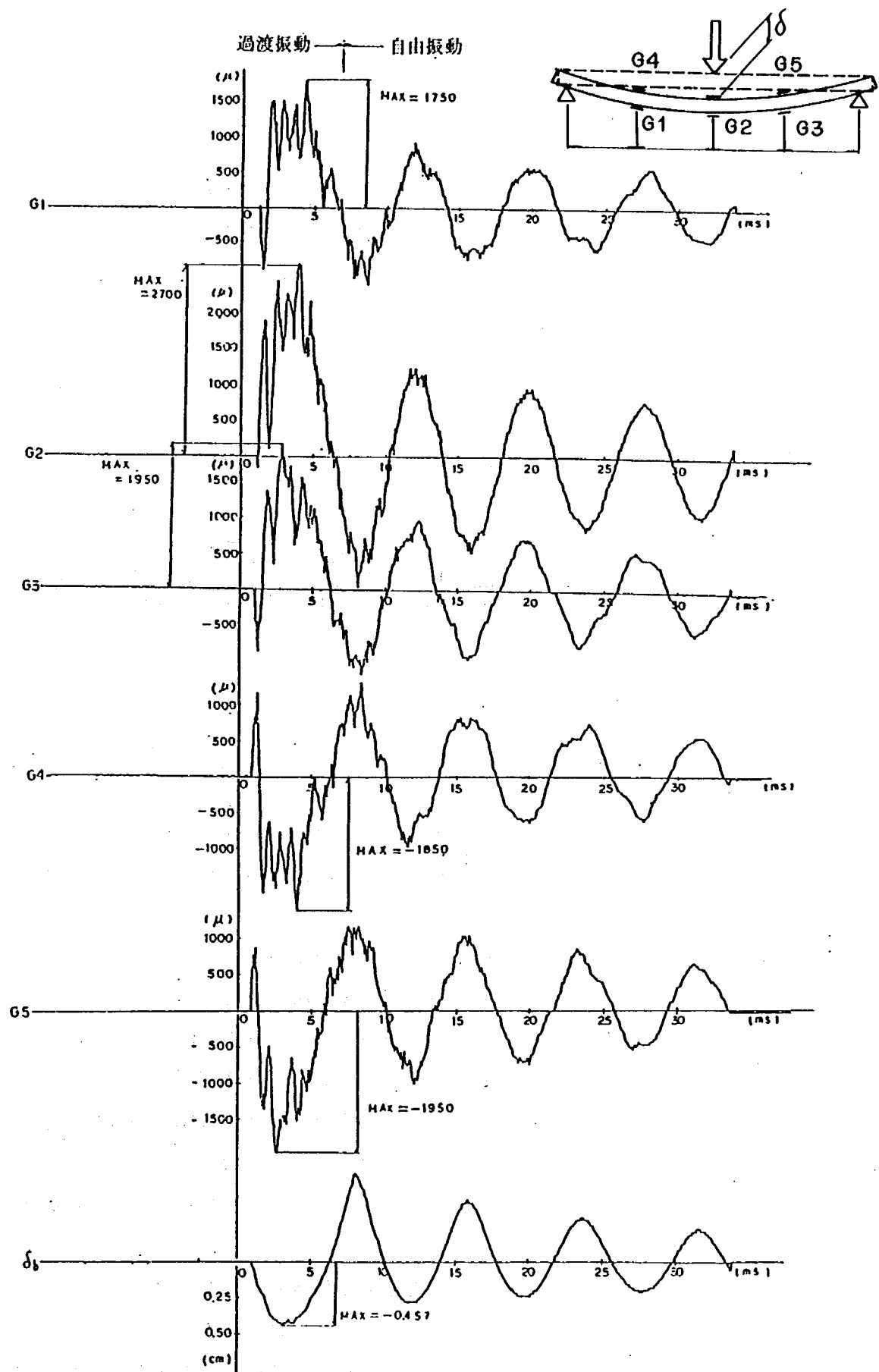


図-6.1 $t-\epsilon$, $t-\delta_b$ 曲線の一例 (ケース 17, $\phi 48.6$ mm, $v=4$ m/s)

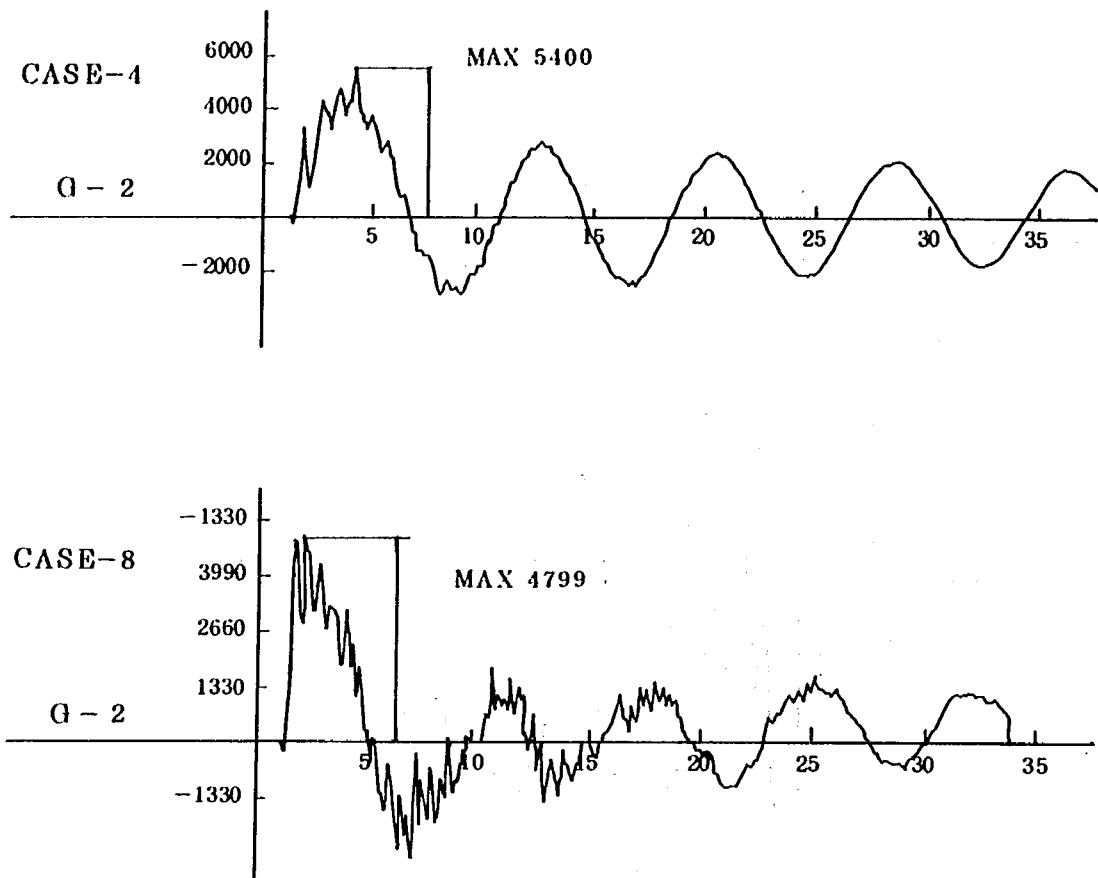


図-6.2 降伏点を超えるひずみを示す $t - \epsilon$ カーブの一例

生じた場合の $t - \epsilon$ カーブの例を図-6.2に示しているが、第2波以降の自由振動のピークはほぼ降伏点ひずみ以下に減少している。即ち、自由振動においては弾性範囲内となっている。

さらに、第1波で降伏点ひずみを越えているにもかかわらず、第2波以降の零ポジションはほとんど変わっていない。これについては、8.2節(2)で述べる。

⑥ 図-6.3にはゴムを緩衝材として用いた場合の $t - \epsilon$ 曲線 (G2) と $t - \delta b$ 曲線の一例を示す。ゴムを設置した場合の $t - \epsilon$ 、 $t - \delta b$ 曲線は下記の特性を示す。

㊸ ゴムを設置しない場合 $t - \epsilon$ 曲線は高い振動数の波が低い振動数の波に重複するようにあらわれるが、ゴムを設置すると高い振動数の波がなくなる。

㊹ $t - \epsilon$ 、 $t - \delta b$ 曲線の立上りからピークに達し0にもどるまでの時間 (T_p) はゴムを設置してもかわらない。

㊺ 同一衝突速度であれば、ゴムを緩衝材として取付けると、ピークひずみ、ピーク変位は小さくなる。さらにこれらの減少率は速度が大きいほど大きい。

上記の㊸に関しては、測定された $t - \epsilon$ には下記の3種の現象が重なっているが、このうち緩衝材により㊹が消滅すると考えられる。

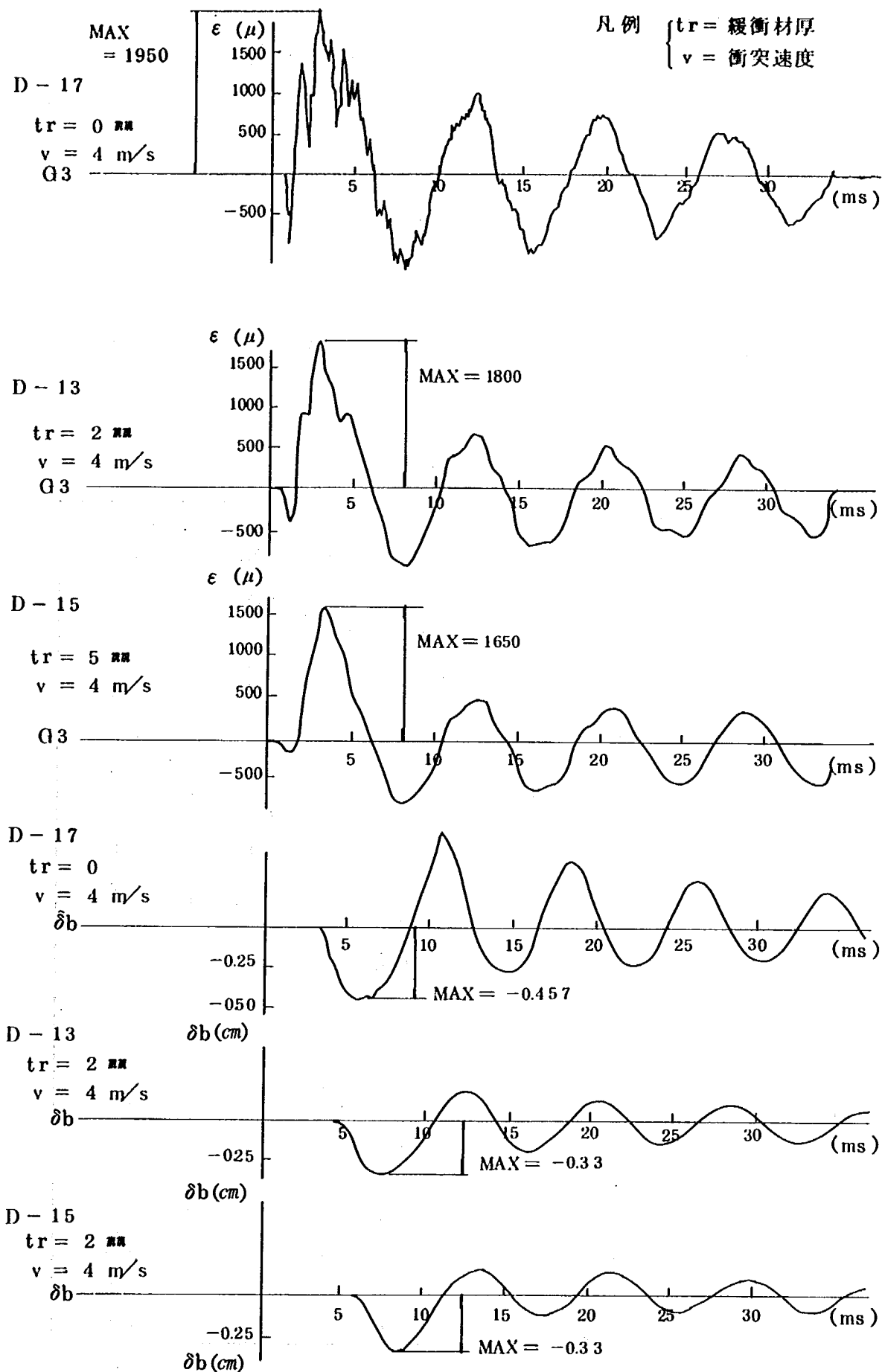


図-6.3 緩衝材の有無による $t-\epsilon$, $t-\delta b$ カurveの相異 ($\phi 48.6 \text{ mm}$)

⑦ 梁全体の曲げ変形……………周期は最長

④ 梁の固有周期に対して外力の作用時間が短い事による過渡振動現象……………周期は⑦

⑦の中間

② 衝突時に発生する応力波……………周期は最短

次に⑥の現象は衝突面に発生する力の作用時間 ΔT と梁の固有周期 T_0 の関係が $\Delta T < \frac{T_0}{2}$ であるので、第 1 波の 1/2 周期は梁の固有周期に支配される（若干、固有周期より長くなる）。したがって緩衝材による T_p の変化はない。

最後に③は緩衝材による効果があることを示している。

⑦ 鋼球の衝突によって発生する $t - \epsilon$ 曲線の 1 周期を鋼管の径毎、鋼球の衝突速度毎に第 1 波から第 3 波までを表 - 6.2 に示す。

表 - 6.2 最大ひずみの周期時間 (G 2 ゲージ)

鋼 管	衝突速度 波	v = 2 (m/s)		v = 4 (m/s)		v = 6 (m/s)		v = 8 (m/s)	
$\phi = 48.6$	第 1 波	8.6		8.6	9.1	9.2		9.3	
	第 2 波	7.8		7.8	7.9	7.7		7.9	
	第 3 波	7.5		7.6	7.8	7.7		7.9	
$\phi = 60.5$	第 1 波	6.8		7.5		7.7		8.6	
	第 2 波	6.1		6.5		6.7		5.8	
	第 3 波	6.6		6.5		6.7		7.3	
$\phi = 89.1$	第 1 波	—		6.0		5.2		5.5	
	第 2 波	—		4.9		4.9		4.8	
	第 3 波	—		4.9		4.8		3.8	
$\phi = 48.6$ $t_r = 2$	第 1 波			9.7				9.4	
	第 2 波			8.2				8.2	
	第 3 波			8.3				8.7	
$\phi = 48.6$ $t_r = 5$	第 1 波			10.1				9.9	
	第 2 波			8.3				8.3	
	第 3 波			8.2				8.7	
$\phi = 60.5$ $t_r = 2$	第 1 波			7.8				7.9	
	第 2 波			6.6				7.0	
	第 3 波			6.7				6.8	
$\phi = 60.5$ $t_r = 5$	第 1 波			8.5				8.0	
	第 2 波			6.7				7.3	
	第 3 波			6.8				6.9	

表－6.2において第1波とそれ以降の波の周期が明らかに異なっている。これは第1波は過渡振動であるため、梁の固有周期より長くなっているものである。第2波以降の周期は衝突速度に影響されずほぼ一定の値となっているが、これは第2波以降が梁の自由振動となっているため、梁の固有周期となっている。梁の剛性が大きくなるほど周期は短くなっており、表－6.3に示すように理論値と同様の傾向を示す。

表－6.3 梁の自由振動周期の理論値，実験値

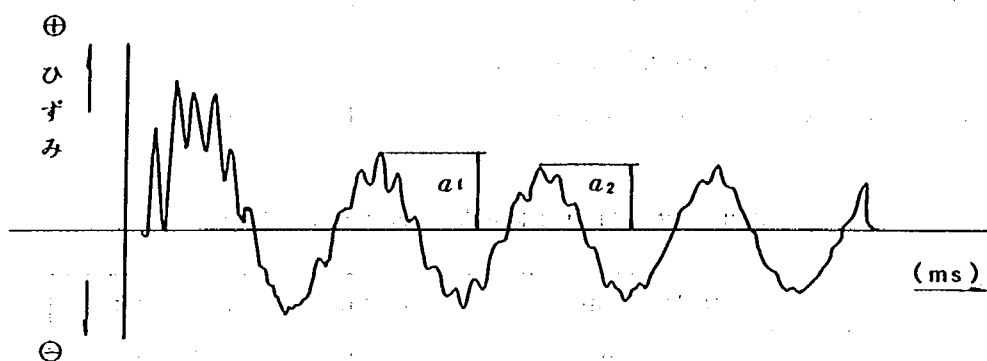
区分	鋼管	ϕ 48.6 mm	ϕ 60.5 mm	ϕ 89.1 mm
実 験 値		7.76 ms	6.53 ms	4.68 ms
理 論 値		7.35 "	6.64 "	3.47 "

⑧ 鋼球の衝突によって発生する $t - \epsilon$ 曲線の振幅について各径毎，衝突速度毎にまとめると表－6.4に示す通りである。自由振動となった第2波以降も振幅は減少しつつけ，減衰振動であることを示している。

表－6.4 $t - \epsilon$ 曲線の振幅

		(μ)						
衝突速度	区分	緩 衝 材 無			ゴ ム tr = 2 mm		ゴ ム tr = 5 mm	
	鋼管	ϕ 48.6	ϕ 60.5	ϕ 89.1	ϕ 48.6	ϕ 60.5	ϕ 48.6	ϕ 60.5
v = 2 m/s	第 1 波	1300	1000	750	—	—	—	—
	第 2 波	750	370	750	—	—	—	—
	第 3 波	630	320	750	—	—	—	—
	第 4 波	600	280	400	—	—	—	—
v = 4 m/s	第 1 波	2700	2250	1600	2300	1900	2350	2550
	第 2 波	1200	670	820	1000	830	830	820
	第 3 波	900	520	470	600	610	650	530
	第 4 波	700	500	250	420	510	600	360
v = 6 m/s	第 1 波	4200	3400	2600	—	—	—	—
	第 2 波	2000	1500	1300	—	—	—	—
	第 3 波	1700	1100	400	—	—	—	—
	第 4 波	1300	1000	0	—	—	—	—
v = 8 m/s	第 1 波	5400	4800	2800	3400	3900	4200	2500
	第 2 波	2600	1730	1200	1600	1600	1900	1350
	第 3 波	2400	1370	400	2600	1000	1100	670
	第 4 波	2000	1330	400	1900	600	900	500

⑨ 時間－ひずみ曲線から減衰定数 h を求め表－6.5 に示す。



図－6.4 減衰定数 h の算出

表－6.5 減衰定数 h

		緩 衝 材 無			ゴ ム $tr = 2 \text{ mm}$		ゴ ム $tr = 5 \text{ mm}$	
		$\phi 48.6$	$\phi 60.5$	$\phi 89.1$	$\phi 48.6$	$\phi 60.5$	$\phi 48.6$	$\phi 60.5$
$v = 2$	h_1	0.028	0.023	0				
	h_2	0.008	0.021	0.100				
$v = 4$	h_1	0.037	0.040	0.088	0.081	0.049	0.039	0.069
	h_2	0.031	0.006	0.100	0.057	0.028	0.013	0.061
$v = 6$	h_1	0.026	0.049	0.184				
	h_2	0.043	0.015	—				
$v = 8$	h_1	0.013	0.037	0.172	0.077	0.075	0.087	0.111
	h_2	0.029	0.005	0	0.050	0.081	0.032	0.047
平 均 値		0.027	0.025	0.130	0.063	0.058	0.043	0.072

減衰定数 h は (6.1) 式で表される。

$$\frac{Y_m}{Y_m + 1} = e^{2\pi h / \sqrt{1 - h^2}} = \frac{a_1}{a_2} \quad (6.1)$$

ゆえに

$$\frac{2\pi h}{\sqrt{1 - h^2}} = \log_e \left| \frac{a_1}{a_2} \right| \quad (6.2)$$

鋼鉄の衝突によって発生するひずみの第1波は過渡振動であり、減衰定数は自由振動区間で求めるものとし第2波以降で計算を行った。 h_1 は第2波と第3波の比、 h_2 は第3波と第4波の比である。緩衝材を設けた時に減衰定数が大きくなるのは、コンクリート壁の

衝撃応答時と同じである。⁵⁾

6.2.2 最大ひずみおよび変位

(1) 最大ひずみ

各実験ケースのG1～G5の最大ひずみを表-6.6に示している。

表-6.6 最大ひずみ

CASE	鋼球の 衝突速度 v(m/s)	鋼 管		最 大 ひ ず み $\epsilon_{\max} (\mu)$					
		ϕ (mm)	緩衝材の有 無	G 1	G 3	G 4	G 5	平 均	G 2
D - 1	2.0	48.6	無	750	1100	⊖ 850	⊖ 1050	940	1300
D - 2	4.0	"	"	1050	1450	⊖ 1050	⊖ 1400	1240	1700
D - 3	6.0	"	"	2600	3200	⊖ 2700	⊖ 2900	2850	4200
D - 4	8.0	"	"	3000	3400	⊖ 3200	⊖ 3800	3350	5400
D - 5	2.0	60.5	"	750	750	⊖ 600	⊖ 600	680	1000
D - 6	4.0	"	"	1600	1850	⊖ 1550	⊖ 1750	1690	2250
D - 7	6.0	"	"	2400	2700	⊖ 2600	—	(2670)	3400
D - 8	8.0	"	"	2667	3333	⊖ 2667	—	(2900)	4800
D - 9	2.0	89.1	"	500	600	⊖ 500	⊖ 600	550	750
D - 10	4.0	"	"	1100	1150	—	⊖ 1300	(1180)	1600
D - 11	6.0	"	"	1700	2100	—	⊖ 1400	(1700)	2600
D - 12	8.0	"	"	1900	2000	—	⊖ 1400	(1760)	2800
D - 13	4.0	48.6	tr = 2mm	1350	1800	⊖ 1350	⊖ 1800	2100	2300
D - 14	8.0	"	"	2000	2800	⊖ 1800	⊖ 2800	2350	3400
D - 15	4.0	"	tr = 5mm	1500	1650	⊖ 1550	⊖ 1650	1590	2350
D - 16	8.0	"	"	2600	3400	⊖ 2600	⊖ 3400	3000	4200
D - 17	4.0	"	無	1750	1950	⊖ 1850	⊖ 1950	1880	2700
D - 18	4.0	60.5	tr = 2mm	1250	1500	⊖ 1250	⊖ 1400	1350	1900
D - 19	8.0	"	"	2400	3100	⊖ 2400	⊖ 2900	2700	3900
D - 20	4.0	"	tr = 5mm	1800	1650	⊖ 1600	⊖ 1650	1680	2550
D - 21	8.0	"	"	1700	1600	⊖ 1550	⊖ 1550	1600	2500
D - 22	4.0	89.1	無	1750	1800	⊖ 1400	⊖ 1250	1550	2400
D - 23	8.0	"	"	2900	3000	⊖ 2400	⊖ 2250	2640	4400
D - 24	4.0	"	"	1700	1800	⊖ 1400	⊖ 1500	1600	2550
D - 25	8.0	"	"	2800	3300	⊖ 2300	⊖ 2600	2750	4400
鋼球の重量 W		ケース 1～21 : W = 1.4 kgf , ケース 22～25 : W = 3 kgf							

* ⊖は圧縮ひずみを示す。

(2) 最大変位

各実験ケースの最大変位 $\delta_{\max}$ を表-6.7 に示している。

表-6.7 最大変位 $\delta_{\max}$

CASE	鋼球の 衝突速度 v (m/s)	鋼管		最大変位 $\delta_{\max}$ (mm)	CASE	鋼球の 衝突速度 v (m/s)	鋼管		最大変位 $\delta_{\max}$ (mm)
		ϕ (mm)	緩衝材の有無				ϕ (mm)	緩衝材の有無	
D-1	2	48.6	無	2.0	D-14	8	48.6	tr=2mm	4.6
D-2	4	"	"	2.0	D-15	4	"	tr=5mm	3.3
D-3	6	"	"	4.5	D-16	8	"	"	4.6
D-4	8	"	"	12.7	D-17	4	"	無	4.6
D-5	2	60.5	"	1.0	D-18	4	60.5	tr=2mm	2.4
D-6	4	"	"	2.6	D-19	8	"	"	4.5
D-7	6	"	"	3.8	D-20	4	"	tr=5mm	3.1
D-8	8	"	"	5.8	D-21	8	"	"	2.7
D-9	2	89.1	"	0.6	D-22	4	89.1	無	3.3
D-10	4	"	"	1.3	D-23	8	"	"	5.3
D-11	6	"	"	2.0	D-24	4	"	"	3.1
D-12	8	"	"	2.7	D-25	8	"	"	4.9
D-13	4	48.6	tr=2mm	3.3	鋼球の重量		ケース1~21		1.4 kgf
							ケース22~25		3 kgf

(3) 鋼球の衝突速度と梁中央の最大ひずみ，変位の相関

表-6.6，6.7 から鋼球の衝突速度に対する梁中央の最大ひずみ (G_2)，変位をそれぞれ図-6.5，図-6.6 に示した。これらの図には緩衝材の無い場合のみを示している。ケース D-2 はこれと同一条件で実施したケース D-17 と測定値が大幅に異なり，他のケースからみると特異点となるので，図には D-17 のデータをプロットした。

図-6.5，図-6.6 から，梁中央の最大ひずみ変位は鋼球の速度に比例し直線的に増大し，鋼管の径が小さいほど（肉厚を一定）大きい事が明確である。これらの図で下記の3点が特異と思われる値を示している。

ケース D-12 の最大ひずみ $\epsilon_{\max}$

ケース D-3 の最大変位 $\delta_{\max}$

ケース D-4 の最大変位 $\delta_{\max}$

上記の点はいずれも，変位あるいはひずみは妥当と思われる値を示しており，その値から特異点と思われる方を理論式で求めることにした。弾性範囲内における δ_b と ϵ_2 の関係

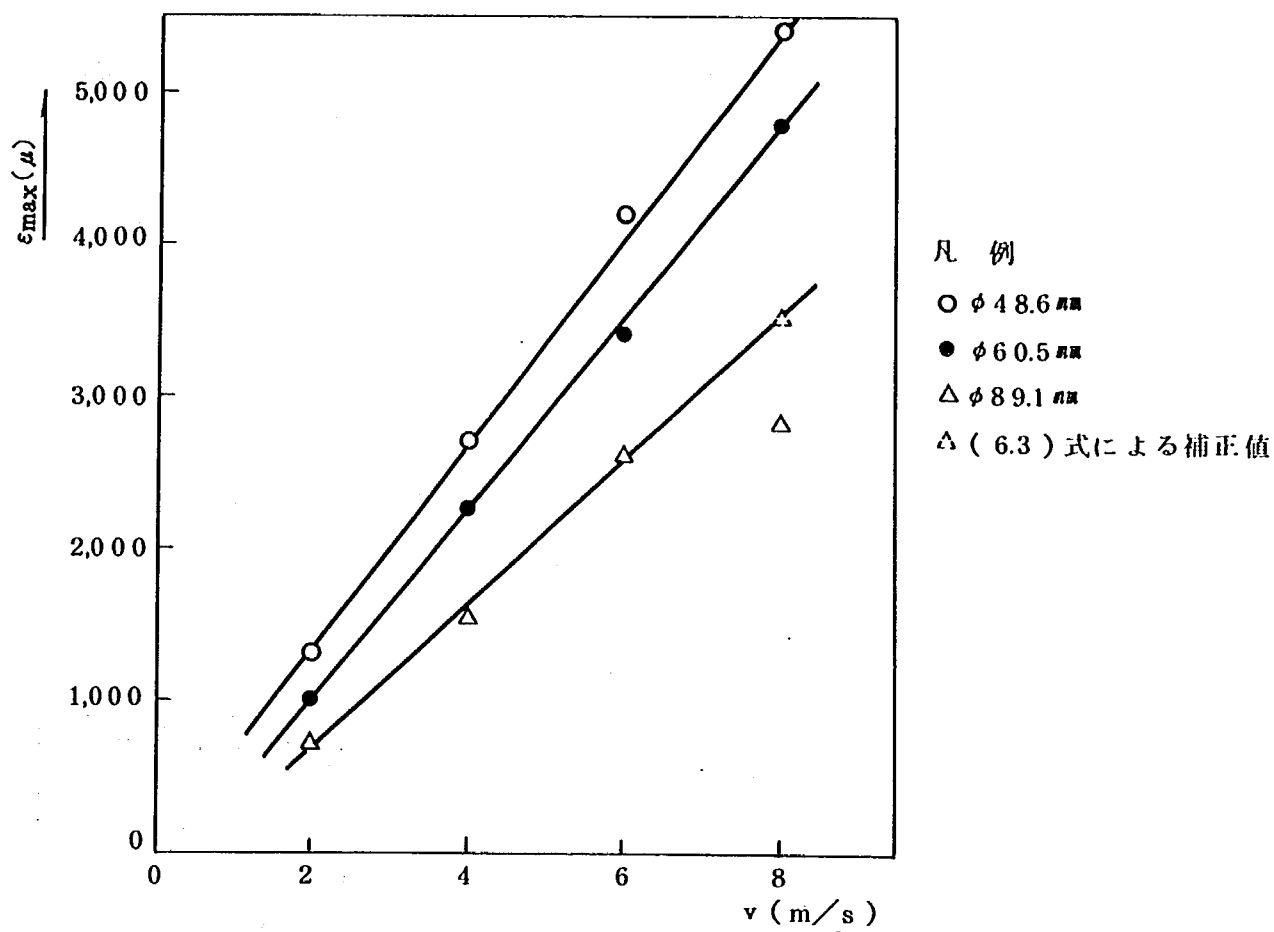


図- 6. 5 中央点の最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ (緩衝材なし)

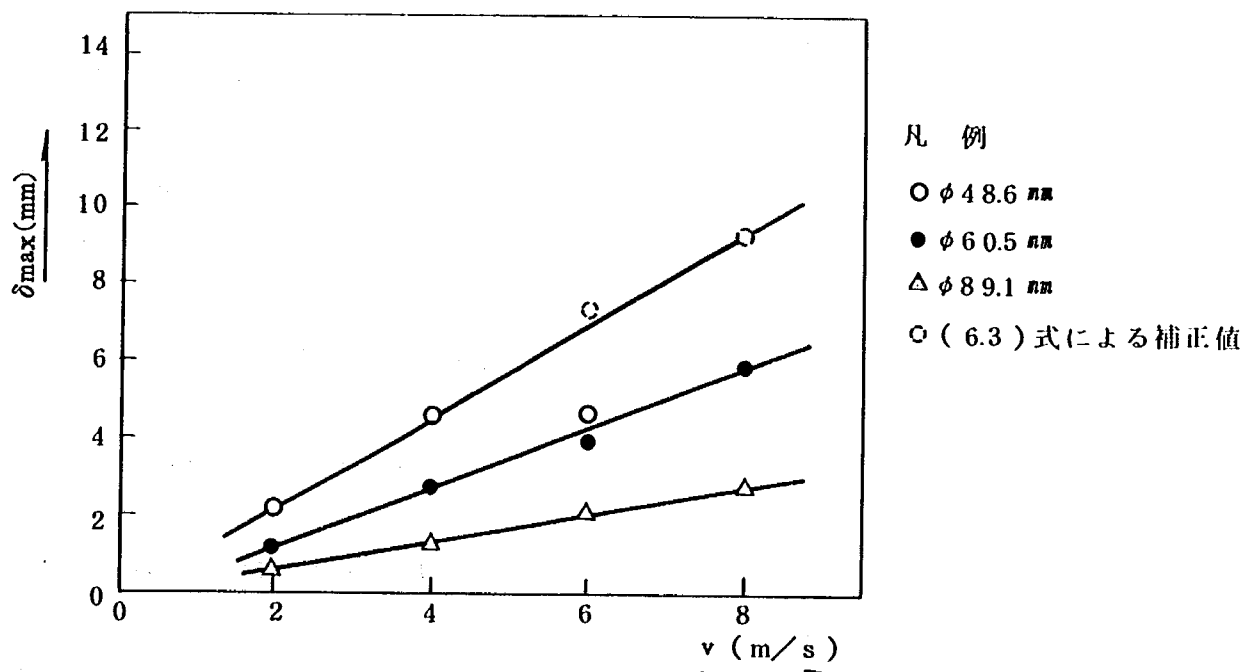


図- 6. 6 中央点最大変位 $\delta_{\max}$ (緩衝材なし)

理論式は(5.3)式となるが、応力およびひずみが塑性域に入っているとこの関係式が成立たなくなるので、便宜的には(6.3)式に示すように(5.3)式に定数Kを導入して用いる。このKは速度が1ランク下の速度の実測から逆算して用いた。

$$\epsilon \max = K \frac{6D}{L^2} \delta \max \dots\dots\dots (6.3)$$

$\epsilon \max$: 梁中央最大ひずみ

$\delta \max$: 梁中央最大変位 (mm)

D : 鋼管外径 (mm)

L : 梁のスパン長 (mm)

K : 実験定数 $\begin{cases} \phi 48.6 \text{ mm} : K = 2.00 & (\text{ケース D-17 より}) \\ \phi 89.1 \text{ mm} : K = 2.43 & (\text{ケース D-11 より}) \end{cases}$

表-6.8 特異点の検討

ケース	鋼管 (mm)	球速 (m/s)	実測類異点	他方の実測値 ($\epsilon \max$ or $\delta \max$) から(6.3)式で求めた値
D-12	$\phi 89.1$	8	$\epsilon \max = 2800 \mu$	$\epsilon \max = 3510 \mu$
D-3	$\phi 48.6$	6	$\delta \max = 4.6 \text{ mm}$	$\delta \max = 7.2 \text{ mm}$
D-4	$\phi 48.6$	8	$\delta \max = 12.7 \text{ mm}$	$\delta \max = 9.3 \text{ mm}$

(4) 緩衝材の効果

緩衝材を取りつけた実験は $\phi 48.6 \text{ mm}$ と $\phi 60.5 \text{ mm}$ の鋼管について実施した。緩衝材のあるケースと無いケースとの最大ひずみおよび最大変位の比較を図-6.7, 図-6.8に示した。

図-6.7, 6.8において $\phi 60.5 \text{ mm}$ 鋼管のゴム厚 $t_r = 5 \text{ mm}$ で $v = 4.0 \text{ m/s}$ のケースではゴム無しの場合に比較してひずみ, 変位共に大きくなっているが, これは実験上の誤差と考えられる。

図-6.7, 6.8から緩衝材の効果について下記の傾向がみられる。

- ① 鋼球の衝突速度が大きいほど緩衝材の効果は大きい。
- ② 衝突速度が大きい場合 ($v = 8 \text{ m/s}$) における厚さ $t_r = 2 \sim 5 \text{ mm}$ のゴムのピークひずみ, 変位に対する緩衝効果は 20 ~ 50 % である。
- ③ ゴム厚による衝撃緩衝効果は実験数が少ないこともあり明確にできない。

(5) 鋼球の大きさによる影響

$\phi 89.1 \text{ mm}$ の鋼管については, 鋼球は $W = 1.4 \text{ kgf}$ と, $W = 3 \text{ kgf}$ の2種類の実験を行った。その比較を図-6.9に示した。鋼球が大きくなるとその衝撃エネルギーは大きくなるので当然, 梁に発生する最大ひずみ, 最大変位は大きくなる。さらに, $W = 3 \text{ kgf}$ の場

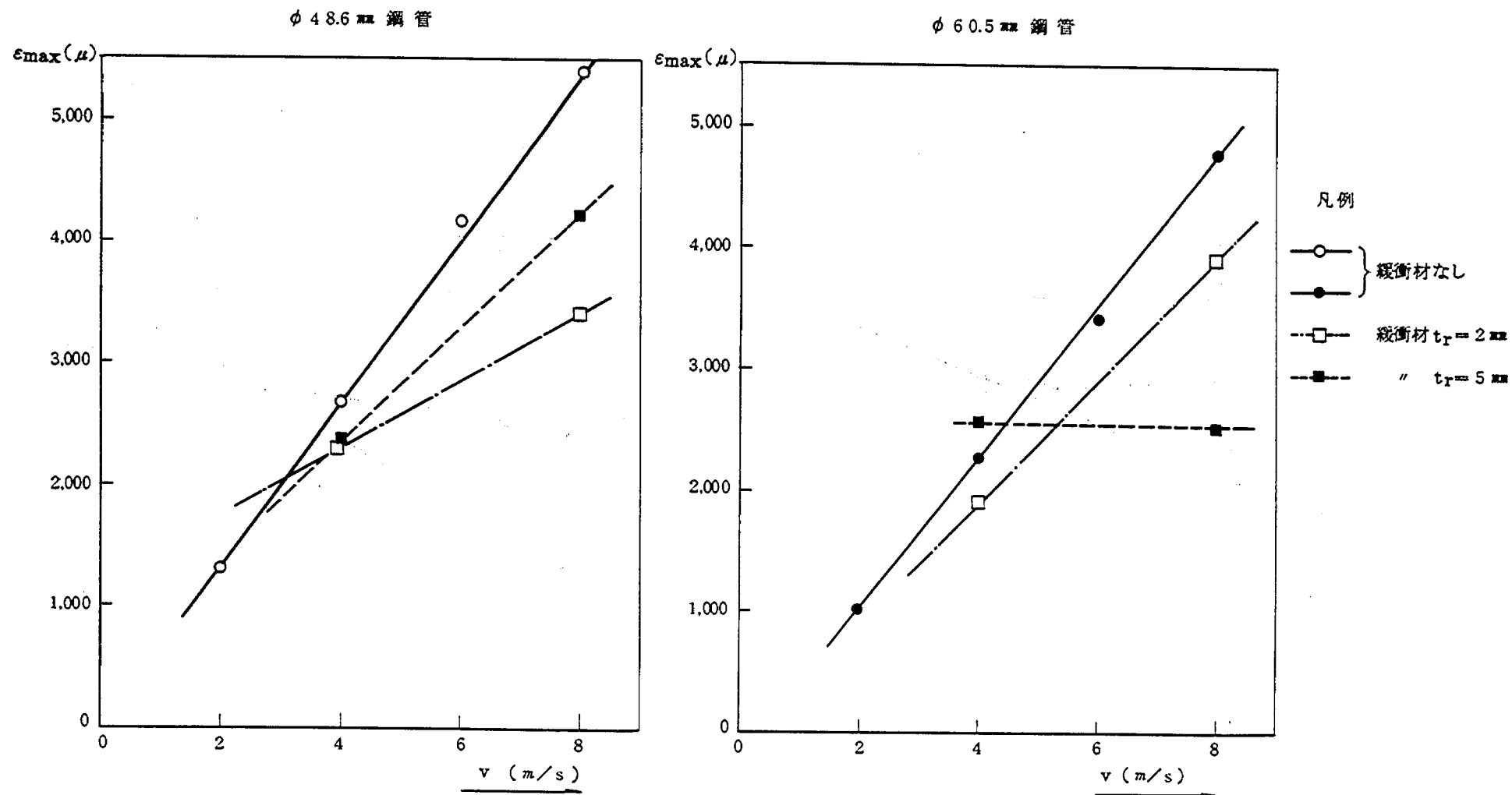


図-6.7 中央点の最大ひずみに対する緩衝材の効果

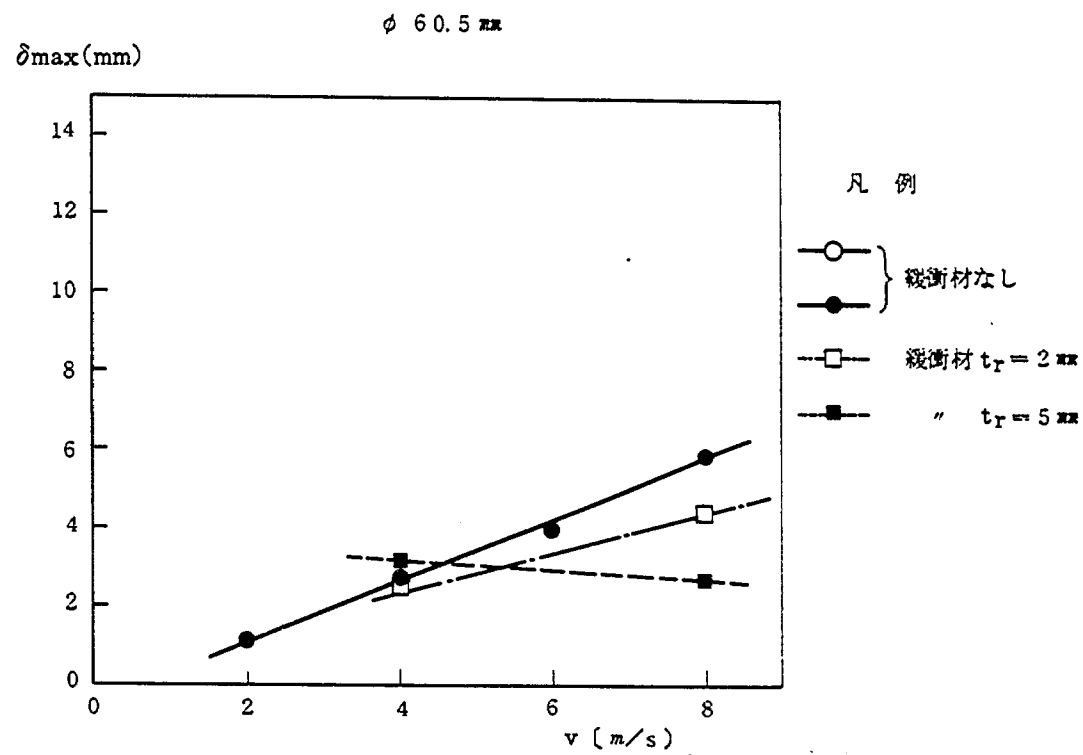
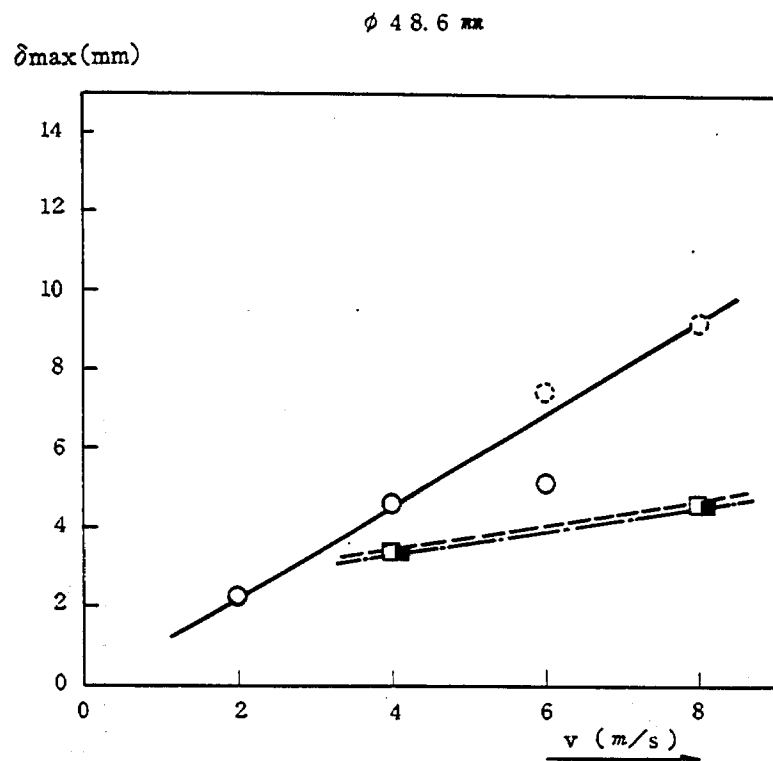
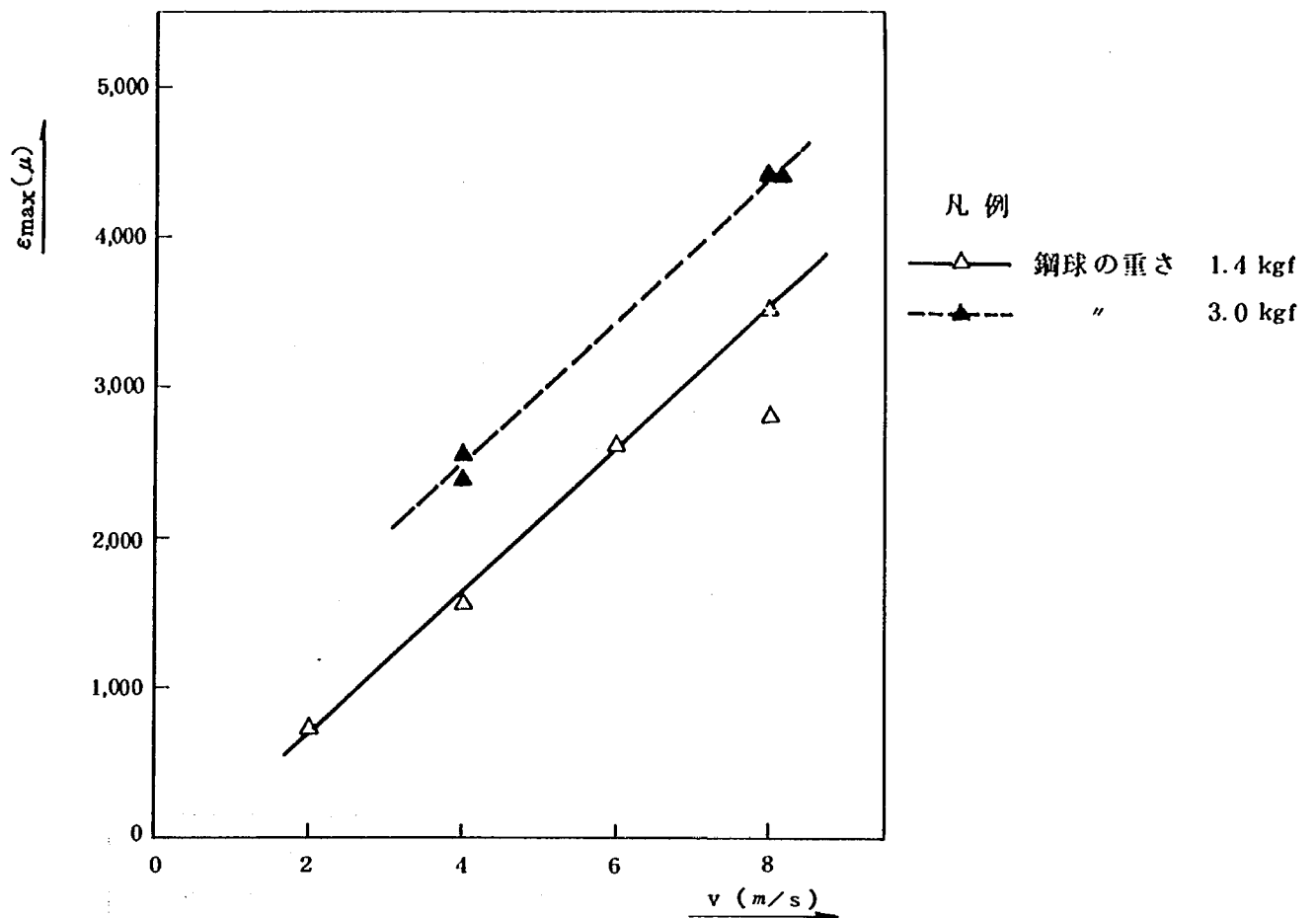
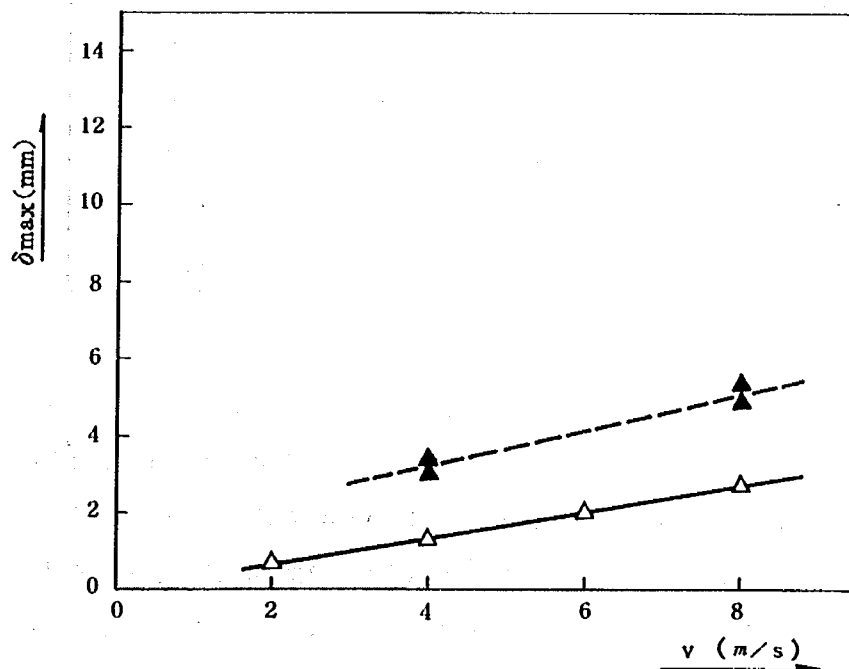


図 - 6. 8 中央点の最大変位に対する緩衝材の効果



(中央点の最大ひずみ $\epsilon_{\max}$)



(中央点の最大変位 $\delta_{\max}$)

図-6.9 鋼球の大きさによる影響 ($\phi 89.1$ 鋼管)

合も $W = 1.4 \text{ kgf}$ の場合と同様に，速度の増加にともない発生最大ひずみ，最大変位も直線的に増加し，その増加率も同じである。

上記のように鋼球の大きさと衝突速度の両方が変化するのを鋼球の衝突時の運動エネルギー（以下衝突エネルギーと略）の変化として表して，この衝突エネルギー（ E_n ）に対する梁の応答変位（ δ ），ひずみ（ ϵ ）の相関を求める。

鋼球の衝突エネルギーは（6.4）式で表される。

$$E_n = \frac{1}{2} m_2 v^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 \dots\dots\dots (6.4)$$

E_n ：鋼球の衝突エネルギー（ $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ）

m_2 ：鋼球の質量（ $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ）

W ：鋼球の重量（ kgf ）

v ：鋼球の衝突速度（ m/s ） $v = \sqrt{2gH}$ H ：落高（ m ）

各実験ケースの衝突エネルギーは表－6.9 のようになる。

表－6.9 鋼球の衝突エネルギー

鋼球重量 (kgf)	実験ケース	鋼 管	落 高 (m)	球 速 (m/s)	衝突エネルギー ($\text{kgf} \cdot \text{m}$)
1.4	D－9	$\phi 89.1 \text{ mm}$	0.20	2	0.28
	D－10	〃	0.82	4	1.15
	D－11	〃	1.84	6	2.58
	D－12	〃	3.27	8	4.58
3.0	D－22	〃	0.82	4	2.46
	D－23	〃	3.27	8	9.81
	D－24	〃	0.82	4	2.46
	D－25	〃	3.27	8	9.81

衝突エネルギー（ E_n ）と梁中央の最大ひずみ（ ϵ_{max} ），および最大変位（ δ_{max} ）の関係を図－6.10，図－6.11 にそれぞれ示した。これらの図から $\phi 89.1 \text{ mm}$ の鋼管の場合 ϵ_{max} ， δ_{max} は $\epsilon_{\text{max}} = 1458\sqrt{E_n}$ ， $\delta_{\text{max}} = 1.524\sqrt{E_n}$ の関係で表される。実験個数が少なく明確ではないが，鋼球の大きさに関係なく同一の関係式で表されるようである。これは，図－5.3 で示した鋼管の局部変形実験で鋼球の大きさによる $p - \delta_e$ 関係が変わらないという現象と一致する。

上記の事は，鋼球と鋼管の相互作用において，鋼管の局部変形も，鋼管の梁としての曲げ変形も，鋼球の大きさに関係なく，鋼球の衝突エネルギーに主として影響されると考え

ることを示している。ただし、この特性を判断するには実験数が少ないので、今後鋼球の径を数種変えて実験を行い確かめる必要がある。

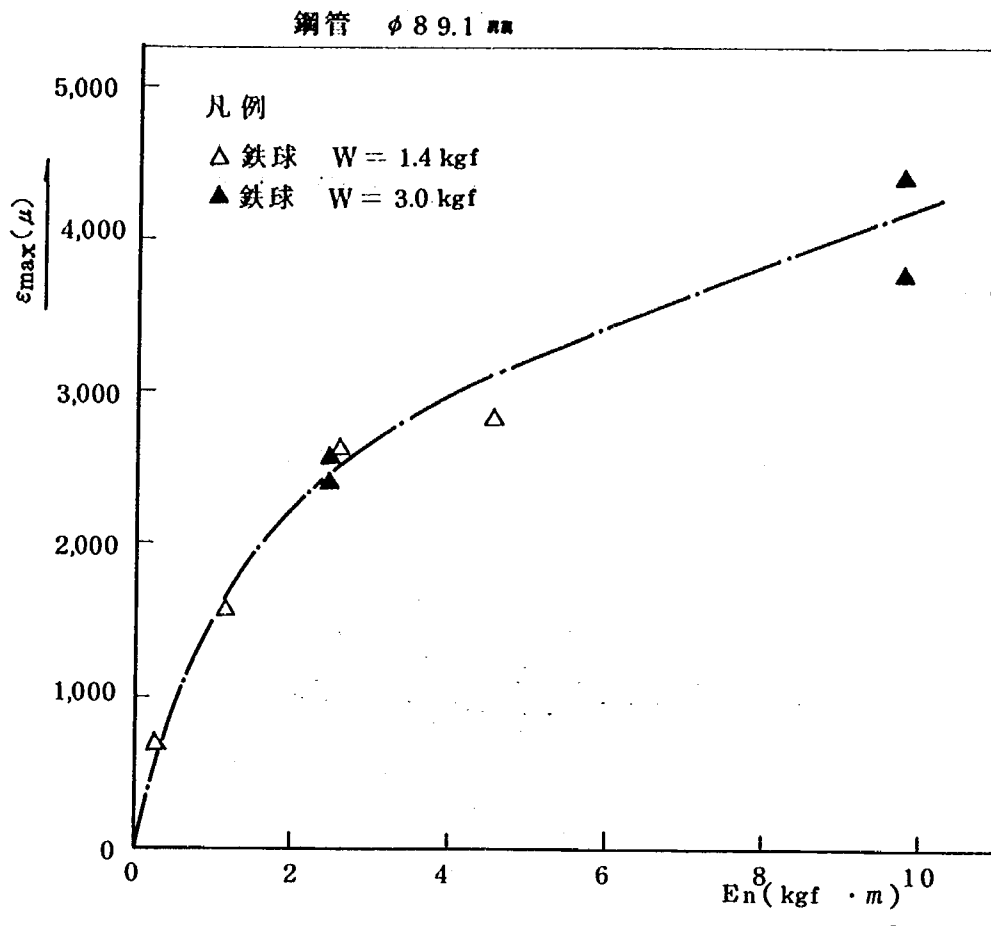


図-6.10 衝突エネルギー (E_n) と中央点の最大ひずみ ($\epsilon_{\max}$)

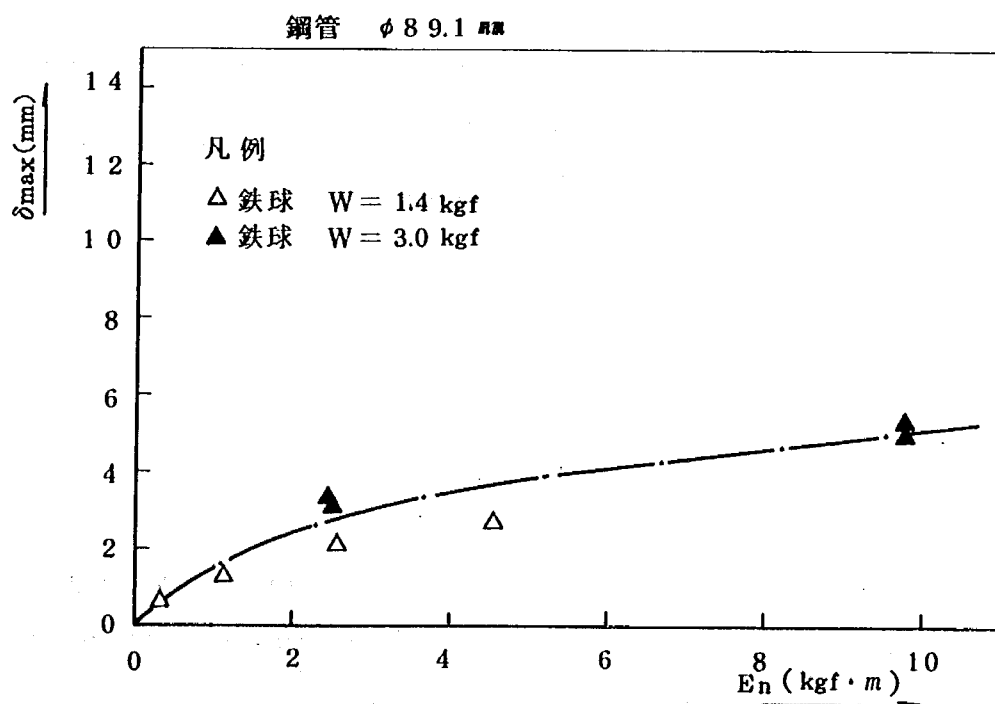


図-6.11 衝突エネルギー (E_n) と中央点の最大変位 ($\delta_{\max}$)

7. 衝撃応答解析

鋼管に対する鋼球の衝突現象を下記の3つの衝撃応答解析モデルによってシュミレートする。

構造モデルA …… エネルギーの釣合い

構造モデルB …… 2等価質点減衰振動モデル

構造モデルC …… 緩衝材の効果を加えた2等価質点減衰振動モデル

7.1 構造モデルA

(1) 鋼管の全体変形特性

実験に用いた鋼管は単純梁に対する中央載荷であるので、全体の変形特性は図-7.1のようになり、荷重と変位の関係は(7.1)(7.2)式で表される。

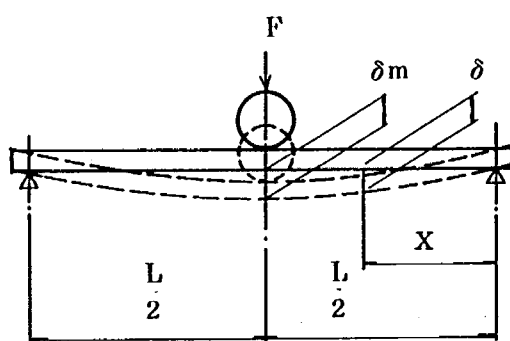


図-7.1 鋼管の全体変形

$$\text{中央点の変位} \quad \delta_b = \frac{F L^3}{48 E I} \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

$$\text{任意点の変位} \quad \delta = \delta_b \frac{3 L^2 X - 4 X^3}{L^3} \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

F : 鋼球の衝突により発生する衝撃荷重 (kgf)

L : スパン長 (cm)

δ_b : 中央点の変位 (cm)

δ : 任意点の変位 (cm)

E : 鋼の弾性係数 (kgf/cm²)

I : 鋼管の断面2次モーメント (cm⁴)

X : 任意点の距離 (cm)

(7.1)式, (7.2)式においてはせん断変位は無視している。なぜなら曲げ変位に比較してせん断変位は極めて小さいからである。以下に $\phi 60.5 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ cm}$, $t_p = 3.2 \text{ mm}$ の中央載荷における中央点の曲げ変位とせん断変位を示す。⁷⁾

$$\text{曲げ変位} \quad \delta b = \frac{F L^3}{48 E I}$$

$$\text{せん断変位} \quad \eta m = \frac{Ck FL}{4 A G}$$

$$G : \text{せん断弾性係数 (kgf/cm}^2\text{)} \quad G = \frac{E}{2 (1 + \nu)}$$

ν : ポアソン比

A : 断面積 (cm^2)

$$Ck : \text{形状係数} \quad Ck = \frac{4 (r_2^2 + r_2 r_1 + r_1^2)}{3 (r_2^2 + r_1^2)}$$

$2 r_2$: 鋼管の外径

$2 r_1$: 鋼管の内径

ここで $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ (一般値)

$\nu = 0.3$ (一般値)

$I = 23.7 \text{ cm}^4$, $A = 5.76 \text{ cm}^2$, $r_1 = 3.025 \text{ cm}$, $r_2 = 2.705 \text{ cm}$

$$G = \frac{2.1 \times 10^6}{2 (1 + 0.3)} \approx 0.808 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

$$Ck = \frac{4 (2.705^2 + 2.705 \times 3.025 + 3.025^2)}{3 (2.705^2 + 3.025^2)} = \frac{98.60}{49.40} = 2.0$$

$L = 100 \text{ cm}$

$$\text{したがって} \quad \delta b = \frac{F \times 100^3}{48 \times 2.1 \times 10^6 \times 23.7} \approx 0.419 \times 10^{-3} F \text{ cm}$$

$$\eta m = \frac{2.0 \times F \times 100}{4 \times 5.76 \times 0.808 \times 10^6} \approx 0.0107 \times 10^{-3} F \text{ cm}$$

$$\eta m / \delta b = 0.025$$

(2) 鋼管の局部変形

物体の衝突による鋼管の局部変形を実験的に検討したものから、外力と鋼管の局部変形の関係は (7.3) 式で表される⁴⁾。

$$F = \frac{1}{4} \alpha \sigma y' t p^2 \left(\frac{\delta e}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (7.3)$$

F : 外力 (kgf)

$\sigma y'$: 材料の公称降伏点応力 (kgf/cm^2)

$t p$: 鋼管厚 (cm)

δe : 局部変位 (cm)

D : 鋼管の外径 (cm)

α : 実験定数

(7.3) 式はナイフエッジのもので荷重をかけた場合であり、球による荷重とは若干異なる。

と思われるが、本研究では(7.3)式はそのまま適用し、 α は5.3節で実験的に求めた値を用いる。この際降伏点応力は公称値 $\sigma_y' = 4000 \text{ kgf/cm}^2$ を用いている。

(3) エネルギーの釣合い

鋼球の運動エネルギーが鋼管の全体変形と局部変形エネルギーに変換されるとするとエネルギーの釣合式は下記ようになる。

$$\frac{1}{2} m_2 v^2 = \frac{1}{2} (Fm + 0) (\delta b + \delta e) \dots\dots\dots (7.4)$$

m_2 : 鋼球の質量 ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$) $m = W/g$

W : 鋼球の重さ (kgf)

v : 鋼球の衝突速度 (m/s)

Fm : 最大衝撃荷重 (kgf)

(7.4)式においては慣性力、減衰力を無視し、かつ局部変形と全体変形のピークが同時に発生すると仮定している。

(7.4)式に(7.1)、(7.3)式を代入すると

$$\frac{1}{2} m_2 v^2 = \frac{F}{2} \left\{ \frac{FmL^3}{48EI} + \frac{16Fm^2D}{\alpha^2 \sigma_y'^2 t p^4} \right\}$$

$$\frac{16D}{\alpha^2 \sigma_y'^2 t p^4} Fm^3 + \frac{L^3}{48EI} Fm^2 - m_2 v^2 = 0 \dots\dots\dots (7.5)$$

(7.5)式において Fm 以外の定数は既知であるから、鋼球の質量 m_2 衝突速度 v に対して発生する最大衝撃力 Fm が求められる。

(7.5)式から最大衝撃力 Fm を求め、さらに(7.1)式から梁中央変位の最大値を求めて実験値と比較して図-7.2に示した。

図-7.2から、モデルAによる最大変位の計算値は

$\phi 48.6 \text{ mm}$ 鋼管		速度の大きいところで実験値より小さい
$\phi 60.5$	"	} 実験値より大きい
$\phi 89.1$	"	

結果となっており、モデルAにより衝撃応答を求めるのは改良の余地がある。

7.2 構造モデルB

(1) モデルAとの相異

構造モデルAにおいては、エネルギーの釣合いにより衝撃ピーク荷重を求めたが、このモデルAでは慣性力、減衰力を無視し、かつ局部変形と全体変形が同時に最大値をとると仮定している。

ここで検討するモデルBでは、これらの慣性力、減衰力を加えた力の釣合いを考慮した質

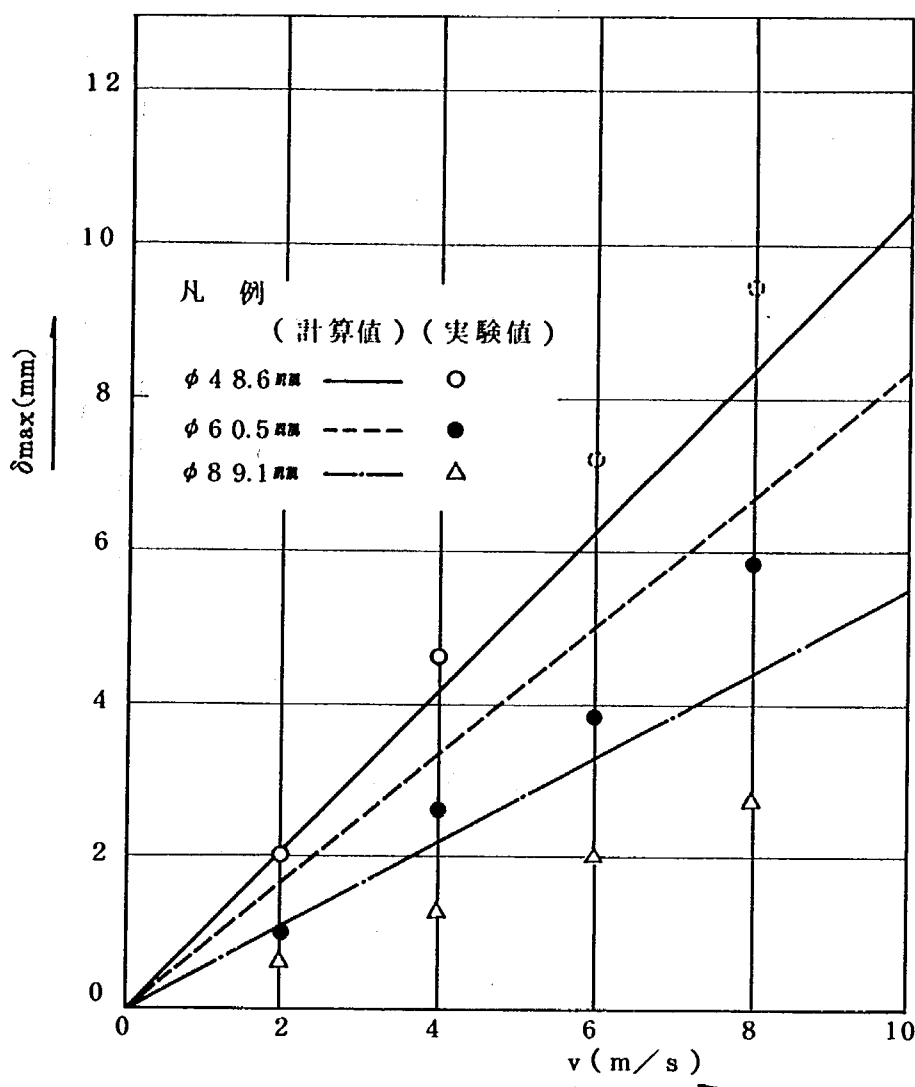


図-7.2 モデルAによる梁の最大変位の計算値

点モデルとして、局部変形と全体変形を別々に計算するものである。局部変形、全体変形と外力の関係はモデルAと同じ式となる。

(2) 力の釣合式

モデルBでは鋼球と鋼管単純梁を図-7.3のようにバネとダッシュポットをもった2質点系の構造モデルとした。バネ定数 K_2 ダッシュポットの減衰係数 D_2 は局部変形地点(鋼球と梁の接触点)に関するものであり、 K_1 および D_1 は梁の全体変形に関するものである。

質点における力の釣合いは図-7.3に示すようになる。 M_2 、 M_1 に関する釣合いから下記の式が得られる。

$$\ddot{Y}_2 = -\frac{K_2}{M_1}(Y_2 - Y_1) - \frac{D_2}{M_2}(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) \quad (7.6)$$

$$\ddot{Y}_1 = \frac{K_2}{M_1}(Y_2 - Y_1) + \frac{D_2}{M_1}(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) - \frac{K_1}{M_1}Y_1 - \frac{D_1}{M_1}\dot{Y}_1 \quad (7.7)$$

($Y_2 - Y_1 > 0$ の時)

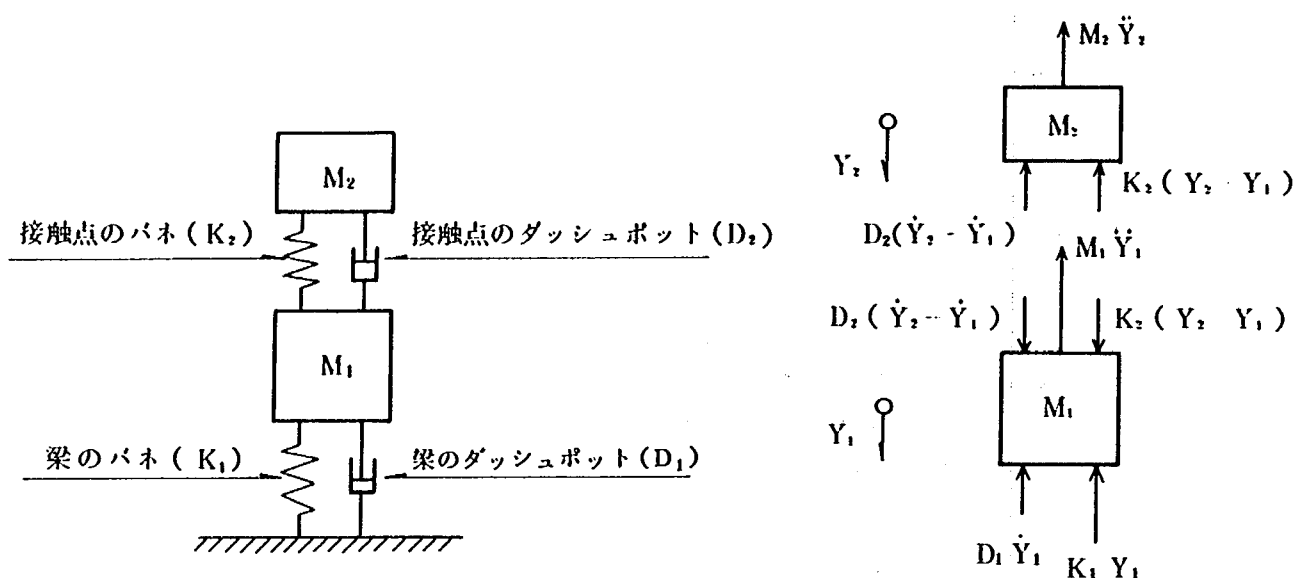


図-7.3 質点モデルと力の釣合い

$$\ddot{Y}_1 = -\frac{K_1}{M_1} Y_1 - \frac{D_1}{M_1} \dot{Y}_1 \quad (Y_2 - Y_1 \leq 0 \text{ の時}) \dots\dots\dots (7.8)$$

M_1, M_2 : 梁および鋼球の等価質量 (kgf・s²/m)

K_1, K_2 : 梁および接触点のバネ定数 (kgf/m)

D_1, D_2 : 梁および接触点の減衰係数 (kgf・s/m)

Y_1, Y_2 : 梁の中央および接触点の変位 (m)

$\dot{Y}_1, \dot{Y}_2$: 梁の中央および接触点の変位速度 (m/s)

$\ddot{Y}_1, \ddot{Y}_2$: 梁の中央および接触点の変位加速度 (m/s²)

(3) 定数

① 等価質量

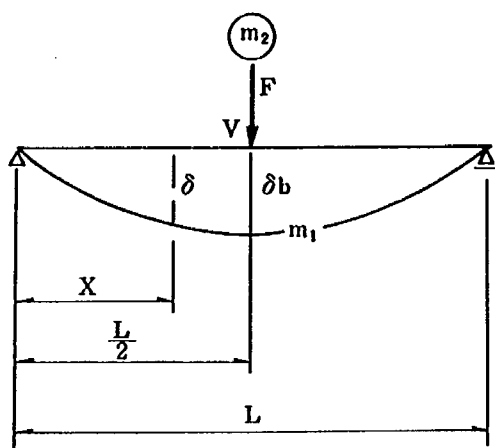
鋼球は重心に質量が集中しており、重心の変位が Y_2 に等しいので等価質量 $M_2 = m_2$ (実質量) でよい。これに対して梁は中央と両端では変位が異なるので重心の変位 Y_1 で梁全体の変位を表す場合、等価質量 M_1 は m_1 (実質量) とは異なる。単純梁の中央点に外力が作用した場合、梁の等価質量は次のようになり、(7.9) 式で表される。

1) 力の釣合い

$$\delta b = \frac{F L^3}{48 E I}$$

$$\delta = \frac{F}{12 E I} X \left(\frac{3}{4} L^3 - X^2 \right)$$

$$\delta = \frac{F L^3}{48 E I} \cdot \frac{3 L^3 X - 4 X^3}{L^3} = \delta b \frac{3 L^2 X - 4 X^3}{L^3}$$



δ_b : 中央点の変位 (m)
 δ : 任意点の変位 (m)
 F : 外力 (kgf)
 ρ : 梁の密度 (kgf・s²/m⁴)
 E_t : 運動エネルギー (kgf・m)
 $\dot{\delta}_b$: 中央点の変位速度 (m/s)
 m_1 : 梁の実質量 (kgf・s²/m)
 m_2 : 鋼球の実質量 (kgf・s²/m)

2) エネルギーの釣合い

$$E_t = \frac{1}{2} m_2 v^2 = \frac{1}{2} \rho A \int_0^L \left(\frac{\partial \delta}{\partial t} \right)^2 dX$$

ビームが左右対象であることから

$$\begin{aligned}
 E_t &= \rho A \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{\partial \delta}{\partial t} \right)^2 dX = \rho A \int_0^{\frac{L}{2}} \dot{\delta}_b^2 \frac{(3L^2X - 4X^3)^2}{L^6} dX \\
 &= \frac{\rho A \dot{\delta}_b^2}{L^6} \int_0^{\frac{L}{2}} (9L^4X^2 - 24L^2X^4 + 16X^6) dX \\
 &= \frac{\rho A \dot{\delta}_b^2}{L^6} \left[3L^4X^3 - \frac{24}{5}L^2X^5 + \frac{16}{7}X^7 \right]_0^{\frac{L}{2}} \\
 &= \frac{\rho A \dot{\delta}_b^2}{L^6} \left(\frac{3}{8} - \frac{3}{20} + \frac{1}{56} \right) L^7 = \frac{17}{70} \rho A L \dot{\delta}_b^2 = \frac{17}{70} m_1 \dot{\delta}_b^2 \\
 &\quad \text{(実質量 } m_1 \text{)} \\
 &= \frac{1}{2} M_1 \dot{\delta}_b^2
 \end{aligned}$$

$$M_1 = \frac{17}{35} m_1 \quad \dots\dots\dots (7.9)$$

② バネ定数

梁全体の変形を表すバネ定数 K_1 は、7.1 節で示したようにせん断変形がきわめて小さいので無視して曲げ変位を示す (7.1) 式から (7.10) 式で表される。

$$K_1 = \frac{48 E I}{L^3} \quad (\sigma < \sigma_y \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (7.10)$$

(7.10) 式の E は 5 章で実施した梁の曲げ試験によって得られた表-5.5 の弾性係数を用いる。この場合、(7.10) 式の L は 100 cm、 I は鋼管の固有値 (表-4.3) とした。 E は、図-5.8 ~ 5.10 に示すようになだらかな曲線区間を含んでいるが、 $\sigma - \epsilon$ 曲線を図-7.4 に示すように弾完全塑性として取扱った。

さらに図-7.4 に示す降伏点応力はひずみ速度が増大するに従い大きくなる事 (ひずみ速度効果) が認められている。⁸⁾

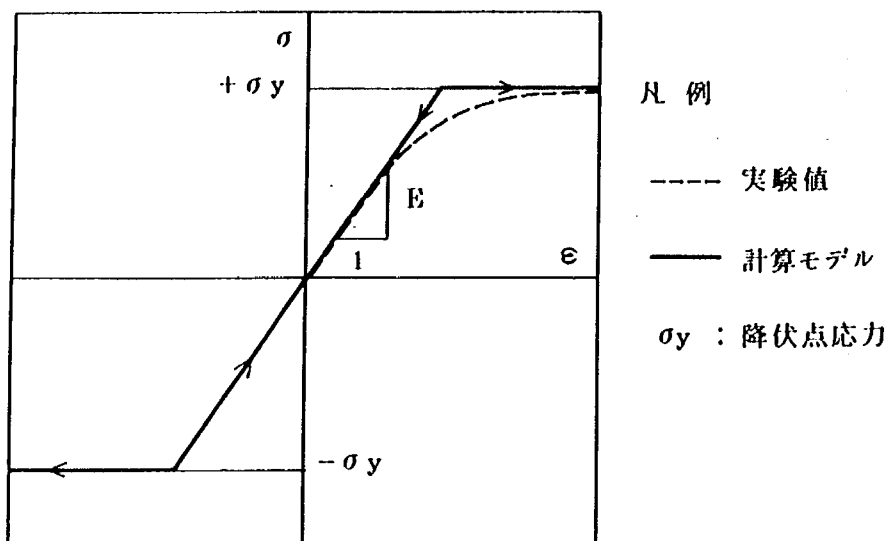


図-7.4 鋼材の $\sigma - \epsilon$ 曲線 (弾完全塑性)

ひずみ速度は、時間-ひずみ曲線より求めた最大ひずみの周期時間と最大ひずみ値から求めた。

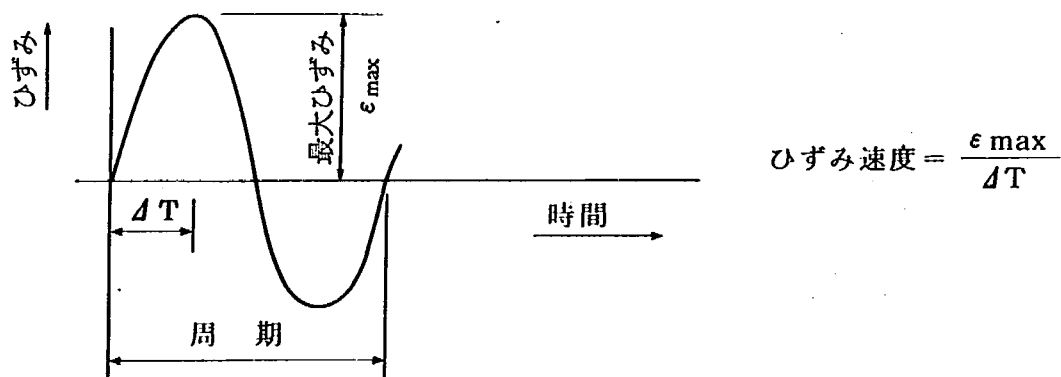


表-6.2の周期時間は1周期であるのでひずみ速度を求める時は第1波の1/4の値を用いた。最大ひずみは表-6.4の第1波の値を用いた。各径毎、衝突速度毎のひずみ速度を求めると表-7.1に示す通りである。

実験結果から求めたひずみ速度は、管径による違いが少ないので管径毎の区別は行わないものとする。よってひずみ速度は $\dot{\epsilon} = 1/3 \times (1485 + 1447 + 1701) \approx 1.54 (1/\text{sec})$ となる。

表-7.1の中で $\phi = 89.1 \text{ mm}$, $v = 2 \text{ m/s}$ のひずみ値は他のゲージと傾向が違っているため除外した。

ひずみ速度効果が降伏点応力に及ぼす影響については9.5節で述べるが、既往資料⁸⁾を参考にすると、ひずみ速度が 1.54 1/sec 程度の場合、降伏点応力の増加率は約30%である。

したがってモデル計算における σ_y は、静的実験で求められた表-5.5の値の30%増の値とする。

表-7.1 平均ひずみ速度

(m/s)		$\phi = 48.6 \text{ mm}$	$\phi = 60.5 \text{ mm}$	$\phi = 89.1 \text{ mm}$
$v = 2$	$\Delta T \text{ (ms)}$	2.15	1.70	—
	$\epsilon \text{ max } (\mu)$	1300	1000	—
	$\epsilon \text{ (1/ms)}$	605	588	—
$v = 4$	$\Delta T \text{ (ms)}$	2.275	1.875	1.50
	$\epsilon \text{ max } (\mu)$	2700	2250	1600
	$\epsilon \text{ (1/ms)}$	1187	1200	1067
$v = 6$	$\Delta T \text{ (ms)}$	2.30	1.925	1.30
	$\epsilon \text{ max } (\mu)$	4200	3400	2600
	$\epsilon \text{ (1/ms)}$	1826	1766	2000
$v = 8$	$\Delta T \text{ (ms)}$	2.325	2.150	1.375
	$\epsilon \text{ max } (\mu)$	5400	4800	2800
	$\epsilon \text{ (1/ms)}$	2323	2233	2036
平均ひずみ速度 (1/ms)		1485	1447	1701

※ ΔT の単位はミリ秒である。

塑性域においては降伏点応力 σ_y でひずみが増大するものとし、下記の (7.11) 式のように塑性ひずみに関係のない一定力を与える。

$$K_1 Y_1 = \frac{4Z}{L} \sigma_y \quad (\sigma \geq \sigma_y \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (7.11)$$

$K_1 Y_1$: 梁のバネ力 (kgf)

Z : 断面係数 (cm^3)

σ_y : 降伏点応力 (kgf/cm^2)

局部変形のパネ定数 K_2 は (7.3) 式において $\delta e = Y_2 - Y_1$ とした (7.12) 式を用いる。
この式中の α は表-5.3 に示す実験結果を、 σ_y' は公称値を用いる。

$$K_2 = \frac{1}{4} \alpha \cdot \sigma_y' \cdot t p^2 \cdot D^{-\frac{1}{2}} \cdot (Y_2 - Y_1)^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (7.12)$$

③ 減衰係数

梁の全体変形、局部変形における減衰係数 D_1 、 D_2 は計算結果と実測値と比較して、計算を実測値に合わせるように実験結果より求める。

D_1 は衝撃応答実験より求めた鋼管径別の減衰定数 h の平均値 (表-6.5 参照) を用いて各鋼管毎 (7.13) 式によって求めた。

$$D_1 = 2h \sqrt{M_1 K_1} \quad \dots\dots\dots (7.13)$$

D_1 : 梁の減衰係数 (kgf・s/m)

M_1 : 梁の等価質量 (kgf・s²/m)

K_1 : 梁のバネ定数 (kgf・/m)

h : 減衰定数

(4) 速度，変位の差分式

計算を微小時間 Δt 毎に行うとして，この Δt 間は加速度一定と仮定すると速度，変位は (7.14) (7.15) 式で表される。

$$\dot{Y}_S + 1 = \dot{Y}_S + \ddot{Y}_S \Delta t \quad \dots\dots\dots (7.14)$$

$$Y_S + 1 = Y_S + \frac{\dot{Y}_S + \dot{Y}_{S+1}}{2} \Delta t \quad \dots\dots\dots (7.15)$$

$S, S+1$: Δt 離れた任意の時刻，梁と接触点に適用

Δt : 計算時間刻み

(5) 計算式のまとめ

モデル B においては下記に示す (7.6)，(7.7)，(7.8)，(7.10)，(7.11)，(7.12)，(7.14)，(7.15) 式で Δt 時間毎， $\ddot{Y}_1$ ， $\dot{Y}_1$ ， Y_1 ， $\ddot{Y}_2$ ， $\dot{Y}_2$ ， Y_2 を順次計算する。

$$\ddot{Y}_2 = -\frac{K_2}{M_1} (Y_2 - Y_1) - \frac{D_2}{M_2} (\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) \quad \dots\dots\dots (7.6)$$

$$\ddot{Y}_1 = \frac{K_2}{M_1} (Y_2 - Y_1) + \frac{D_2}{M_1} (\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) - \frac{K_1}{M_1} Y_1 - \frac{D_1}{M_1} \dot{Y}_1 \quad \dots\dots\dots (7.7)$$

($Y_2 - Y_1 > 0$ の時)

$$\ddot{Y}_1 = -\frac{K_1}{M_1} Y_1 - \frac{D_1}{M_1} \dot{Y}_1 \quad (Y_2 - Y_1 \leq 0 \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (7.8)$$

$$K_1 = \frac{48 E I}{L^3} \quad (\sigma < \sigma_y \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (7.10)$$

$$K_1 Y_1 = \frac{4 Z}{L} \sigma_y \quad (\sigma \geq \sigma_y \text{ の時}) \quad \dots\dots\dots (7.11)$$

$$K_2 = \frac{1}{4} \alpha \cdot \sigma_y' \cdot t p^2 \cdot D^{-\frac{1}{2}} \cdot (Y_2 - Y_1)^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (7.12)$$

$$\dot{Y}_S + 1 = \dot{Y}_S + \ddot{Y}_S \Delta t \quad \dots\dots\dots (7.14)$$

$$Y_S + 1 = Y_S + \frac{\dot{Y}_S + \dot{Y}_{S+1}}{2} \Delta t \quad \dots\dots\dots (7.15)$$

梁の減衰係数 D_1 の計算結果は下記のようなになる。

ϕ 48.6 mm 鋼管	$h = 0.027$ (実験値)	$D_1 = 8.17 \text{ kgf} \cdot \text{s/m}$
ϕ 60.5 mm 鋼管	$h = 0.025$ (")	$D_1 = 10.59$ "
ϕ 89.1 mm 鋼管	$h = 0.13$ (")	$D_1 = 158.3$ "

接触点の減衰係数 D_2 については以下のように考える。応力-ひずみまたは変位関係と減衰定数は次のように表されている¹¹⁾。

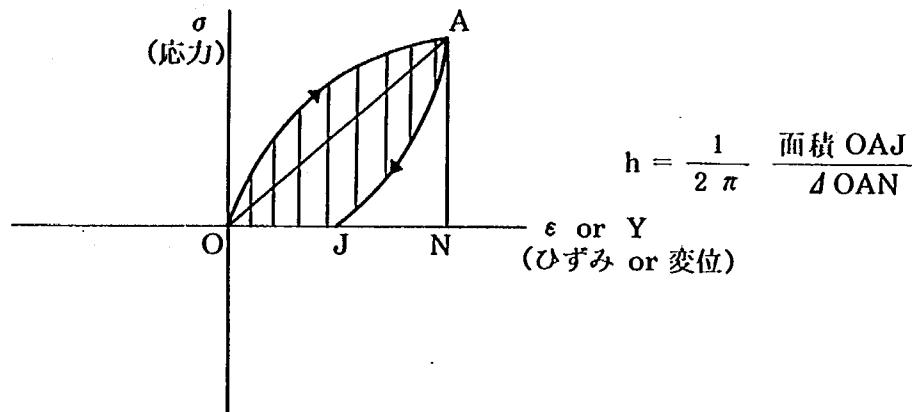


図-5.1 から図-5.3 に示すように鋼管の静的局部変形実験において、最大荷重載荷後はほとんど局部変位の回復がなかった。よって、減衰定数 h を、

$$h = \frac{1}{2\pi} \times 1.0 \approx 0.16$$

として D_2 を求めた。計算結果は以下に示すとおりである。

ϕ 48.6 mm 鋼管	$h = 0.16$	$D_2 = 20.3 \text{ kgf} \cdot \text{s/m}$
ϕ 60.5 mm 鋼管	"	$D_2 = 20.3$ "
ϕ 89.1 mm 鋼管	"	$D_2 = 18.3$ "

(6) 計算ケース

計算ケース、計算条件は表-7.1 に示すとおりである。計算時間刻みは小さいほど精度は良いが、同一条件で 10^{-4} sec と 10^{-5} sec について試算した結果、大きな差が見られなかったため、基本的には $\Delta t = 1 \times 10^{-4} \text{ sec}$ としたが、CAL-13~CAL-15 は波形のピークを捉えずに発散する結果となったため、 $\Delta t = 1 \times 10^{-5} \text{ sec}$ とした。

CAL-4~6 は前述の「(3)定数」に示した定数を用いて、静的実験結果等に忠実に定数を定めたケースである。これに対して CAL-1~3, CAL-7~15 は各種定数の変化による衝撃応答への影響を見るために実施したものである。

CAL-1~3 : 減衰、ひずみ速度効果が無いとしたケース

CAL-7~9 : ひずみ速度効果が無いとしたケース

CAL-10~12 : 減衰が無いとしたケース

CAL-13~15 : 局部変形が無視できるほど微小であるとしたケース

表-7.2(1) 計算 ケース

定数	単位	CAL-1	CAL-2	CAL-3	CAL-4	CAL-5	CAL-6	CAL-7	CAL-8	CAL-9
D	m	0.0486	0.0605	0.0891	0.0486	0.0605	0.0891	0.0486	0.0605	0.0891
M ₁	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	0.177	0.224	0.336	0.177	0.224	0.336	0.177	0.224	0.336
E	kgf/m ²	2.28×10 ¹⁰	1.76×10 ¹⁰	2.88×10 ¹⁰	2.28×10 ¹⁰	1.76×10 ¹⁰	2.88×10 ¹⁰	2.28×10 ¹⁰	1.76×10 ¹⁰	2.88×10 ¹⁰
L	m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
tp	m	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
σ _y	kgf/m ²	4.42×10 ⁷	2.87×10 ⁷	3.54×10 ⁷	5.75×10 ⁷	3.73×10 ⁷	4.60×10 ⁷	4.42×10 ⁷	2.87×10 ⁷	3.54×10 ⁷
D ₁	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$	0	0	0	8.17	10.59	158.3	8.17	10.59	158.3
M ₂	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142
α		61	68	67	61	68	67	61	68	67
σ _y '	kgf/m ²	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷
D ₂	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$	0	0	0	20.3	20.3	18.3	20.3	20.3	18.3
初期 条件 球速 v	m/s	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10

表-7.2(2) 計算 ケース

定数	単位	CAL-10	CAL-11	CAL-12	CAL-13	CAL-14	CAL-15	CAL-16	CAL-17	CAL-18
D	m	0.0486	0.0605	0.0891	0.0486	0.0605	0.0891	0.0486	0.0605	0.0891
M ₁	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	0.177	0.224	0.336	0.177	0.224	0.336	0.177	0.224	0.336
E	kgf/m ²	2.28×10 ¹⁰	1.76×10 ¹⁰	2.88×10 ¹⁰	2.28×10 ¹⁰	1.76×10 ¹⁰	2.88×10 ¹⁰	2.28×10 ¹⁰	1.76×10 ¹⁰	2.88×10 ¹⁰
L	m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
tp	m	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
σ _y	kgf/m ²	5.75×10 ⁷	3.73×10 ⁷	4.60×10 ⁷	5.75×10 ⁷	3.73×10 ⁷	4.60×10 ⁷	5.75×10 ⁷	3.73×10 ⁷	4.60×10 ⁷
D ₁	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$	0	0	0	8.17	10.59	158.3	8.17	10.59	158.3
M ₂	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.306	0.306	0.306
α		61	68	67	1000	1000	1000	61	68	67
σ _y '	kgf/m ²	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷	4×10 ⁷
D ₂	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$	0	0	0	20.3	20.3	18.3	29.8	29.8	26.8
初期 条件 球速 v	m/s	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10	1~10	8.6	8.6	8.6

CAL-16～18は第8章で示す衝撃曲げ破壊実験のシュミレーションである。

(7) 計算結果

計算における梁中央の変位 Y_1 ，接触点の変位 Y_2 ，梁の受けた力 F_1 ，接触点を受けた力 F_2 の時間的变化の一例を図-7.5に示した。以下，計算モデルBの精度，定数依存度について検討しているが，結論として慣性力，局部変形，減衰およびひずみ速度効果の衝撃応答に与える影響は無視できないほど大きく，これらの現象は計算に取り入れられるべきであることが明らかとなった。これらの考えられる現象を取り入れたCAL-4，5，6では，実験値と比較的良好に一致する結果となった。但し， $\phi 48.6\text{ mm}$ の鋼管に高速で衝突させた場合の計算値と実験値の差は大きく，計算条件および実験値信頼性・精度の両面からさらに検討を要する。

① 実験値との比較

図-7.6は静的実験に忠実に定数を定めた計算ケース（以下「原案ケース」と略する。）を実験値と比較したものである。 $\phi 48.6\text{ mm}$ 鋼管の衝突速度の速いところを除くと，ほぼ実測値に近い値となっている。したがって，モデルBは鋼管単純梁の衝撃応答モデルとして利用できるものとする。

但し，前述のように実測値との差の最も大きい $\phi 48.6\text{ mm}$ 鋼管， $v = 8\text{ m/s}$ については，実測変位も，今回測定機として用いた変位計の測定可能保証範囲を越えているので，追加実験により確認が望まれる。

次にモデルAに対してどの程度改良されたかを，図-7.7に示した。モデルAで実測値より計算値が大きくなっていた $\phi 60.5\text{ mm}$ と $\phi 89.1\text{ mm}$ のケースは十分に改良されている。

② 減衰，ひずみ速度効果の衝撃応答に及ぼす影響

局部振動，梁の全体振動における減衰を無視したケース（CAL-10～12）の衝撃応答計算結果を図-7.8に示した。この図によると，減衰を考慮しない場合最大変位 $\delta_{\max}$ の増加する割合は下記程度である。

$\phi 48.6\text{ mm}$ ， $\phi 60.5\text{ mm}$ 鋼管	3～5 %
$\phi 89.1\text{ mm}$ 鋼管	20 %

減衰の影響は，衝突速度が大きいほど，管径が大きくなるほど大きくなっている。

次に鋼材のひずみ速度効果を無視したケース（CAL-7～9）を同じく図-7.8に示した。ひずみ速度効果は降伏点が応力（or ひずみ）で約30%程度大きくなるのであるから，図-7.8に示すように降伏点より大きい変位の発生する範囲でひずみ速度効果の影響が表われている。同図で $\phi 89.1\text{ mm}$ は降伏点範囲内しか計算していないので，この影響は表れていない。ここで計算を実施している範囲では，ひずみ速度効果の影響は最大でも10%程度であるが，衝突エネルギーが梁の強度に対して相対的に大きくなるともっと大きい影響を与えるようになると推定される。

減衰とひずみ速度効果を無視したケース（CAL-1～3）と原案を比較すると図-7.9

*** トビリウ ムツク・リウク ムツガン ムミレ・ラン ケイザン ムツクン *** CAL-1

[ヲツン]

(1) M1 = 1.77000E-01 (kg/m³)
 (2) E1 = 2.28000E+10 (kg/m²)
 (3) L = 1.00000E+00 (m)
 (4) D = 4.86000E-02 (m)
 (5) T = 3.20000E-03 (m)
 (6) I = 1.18176E-07 (m⁴)
 (7) SGY1 = 4.42000E+07 (kg/m²)
 (8) Y1.YE = 6.64814E-03 (m)
 (9) K1 = 1.29332E+05 (kg/m)
 (10) D1 = 0.00000E+00 (kg²/m)

[ケイザン ムツクン]

(16) V = 8.00000E+00 (m/s)
 (17) THETA = 1.40000E+00
 (18) DT = 100 (mcs)=(μs)
 (19) NT = 999
 (20) NPT = 2
 (21) INTS = 2 (Y0INT / ヲツン = Δツク)

[ヲツン ヲツン]

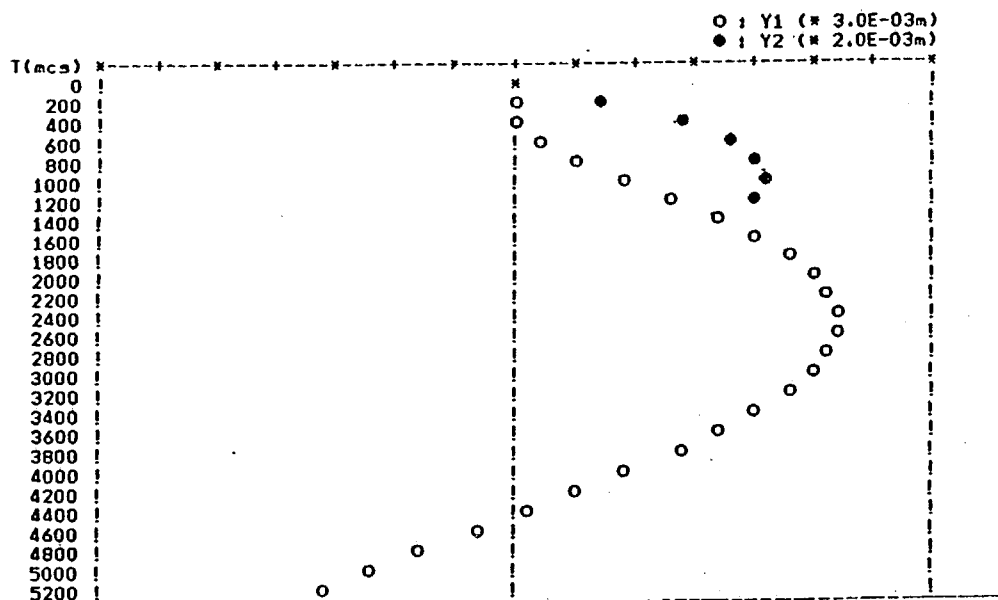
(11) M2 = 1.42000E-01 (kg/m³)
 (12) ALPHA = 6.10000E+01
 (13) SGY2 = 4.00000E+07 (kg/m²)
 (14) K2 = 2.83343E+04 (kg/m)
 (15) D2 = 0.00000E+00 (kg²/m)

[ケイザン ヲツン] process time = 00:01:31

Y1 MAX = -8.20749E-03 m (T = 6400 mcs)
 Y2 MAX = 4.21703E-03 m (T = 900 mcs)
 F1 MAX = -8.59816E+02 kg (T = 14900 mcs)
 F2 MAX = 1.58844E+03 kg (T = 400 mcs)

*** トビリウ ムツク・リウク ムツガン ムミレ・ラン ケイザン ヲツン ***

(1) ケイザン ケース : CAL-1
 (2) ズノツキ : T - Y1.Y2



*** トビリウ ムツク・リウク ムツガン ムミレ・ラン ケイザン ヲツン ***

(1) ケイザン ケース : CAL-1
 (2) ズノツキ : T - F1.F2

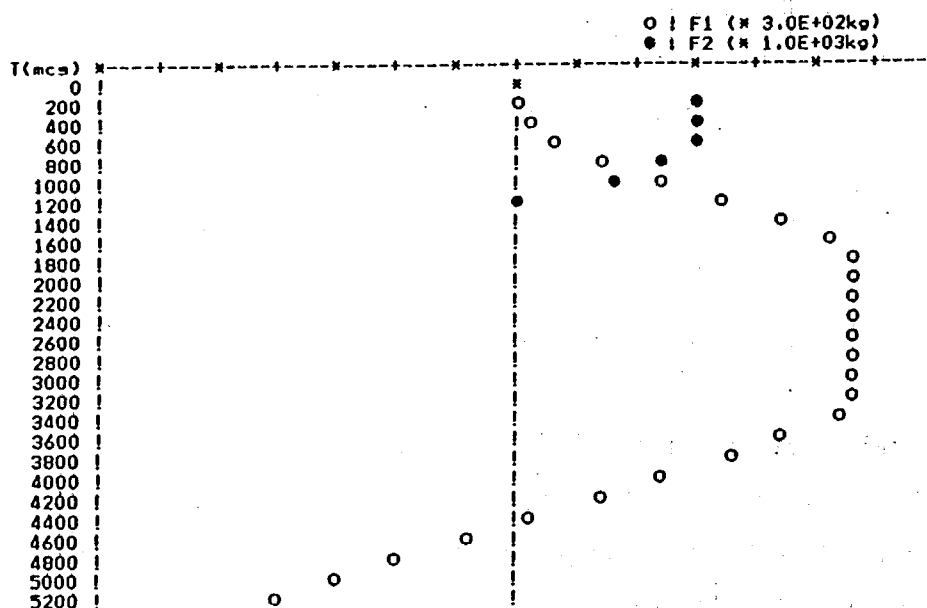


図- 7. 5 モデルBによるシュミレーション結果 (φ 48.6 mm 鋼管)

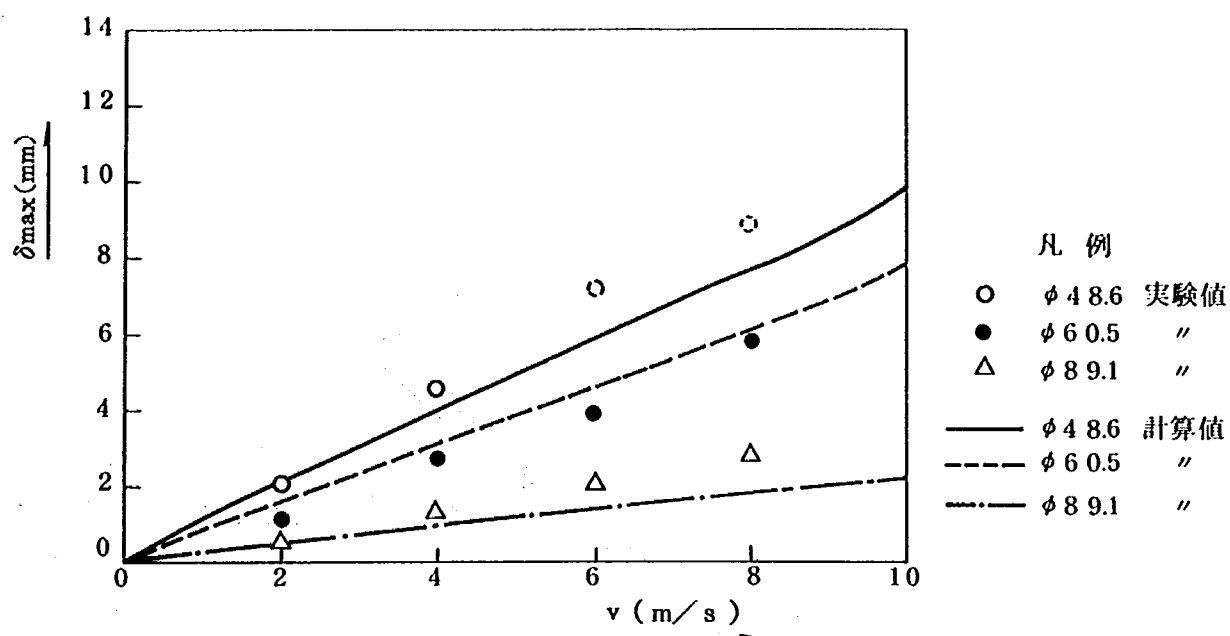


図-7.6 実験値と計算値の比較（衝突速度－最大変位）

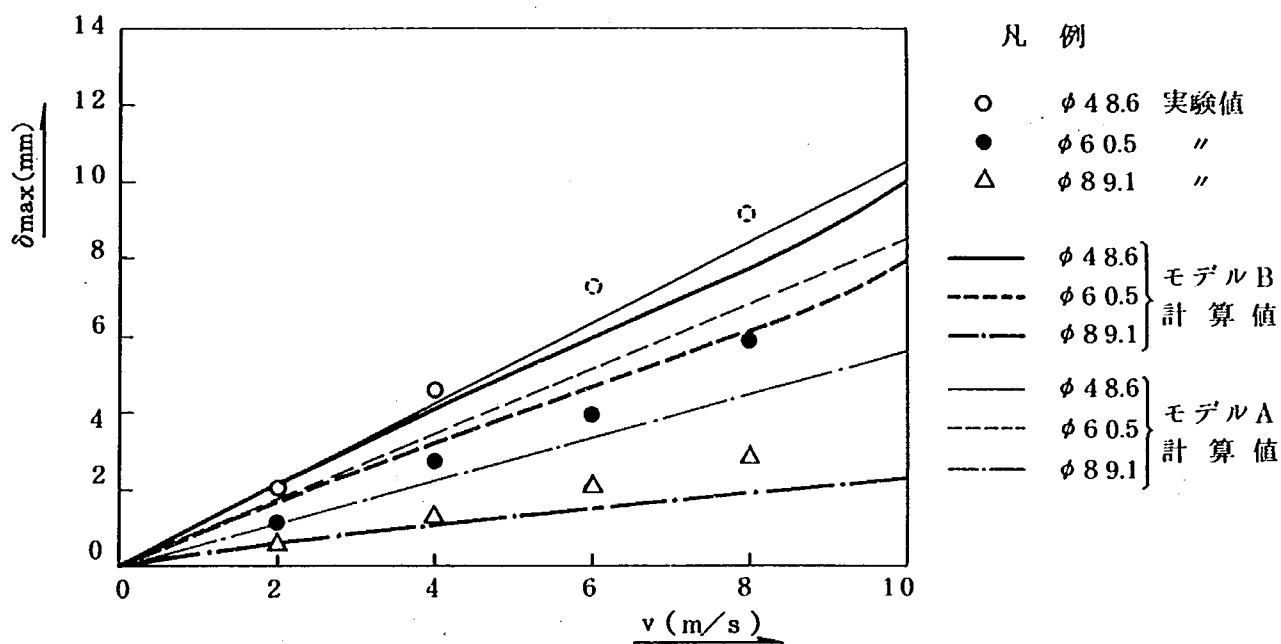


図-7.7 モデルAとモデルBの比較

のとおりである。減衰とひずみ速度効果を考慮しない $v = 10 \text{ m/s}$ の場合では、 $\delta_{\max}$ が 14～20%程度原案より大きくなっている。これら2つの現象の影響は本計算条件の範囲ではあまり大きくないが、前述のように衝撃エネルギーが梁の強さに対して相対的に大きくなると大きい影響を与えることが予想されるので重要な要因と考える。

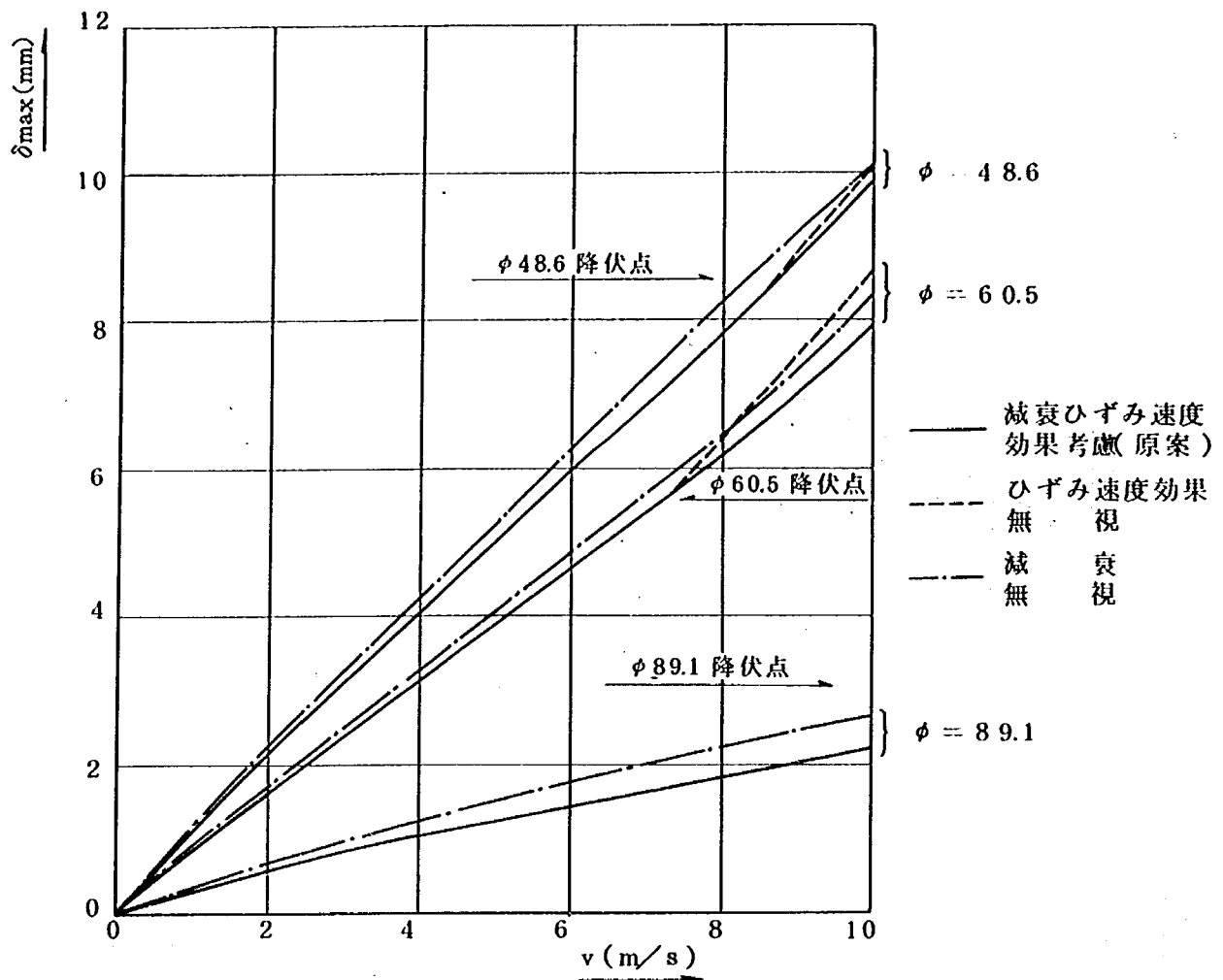


図-7.8 計算最大変位に対する減衰またはひずみ速度効果の影響

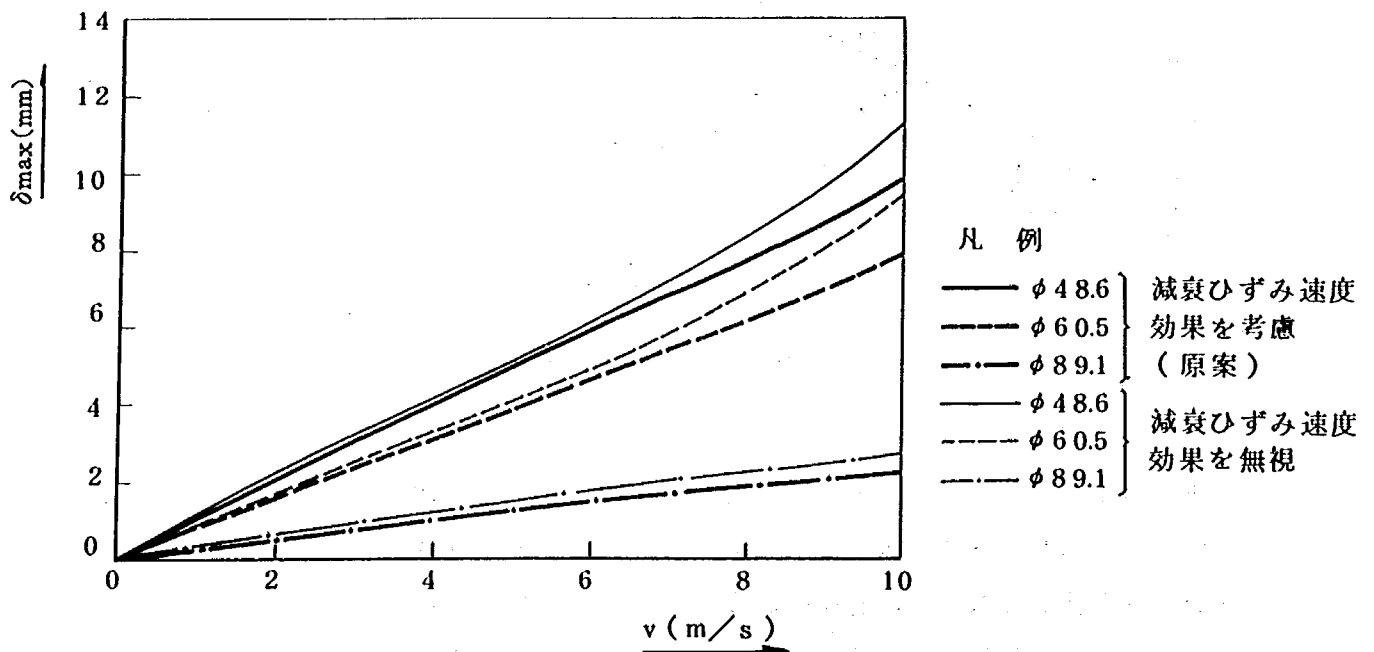


図-7.9 計算最大変位に対する減衰とひずみ速度効果の影響

③ 局部変形の衝撃応答に及ぼす影響

局部変形が無視できるほど微小であると仮定したケース (CAL-13~15) と原案の比較を図-7.10に示した。局部変形は最大変位を小さくする効果があり、鋼管の局部剛性と梁全体の剛性の比が小さくなるほど、つまり鋼管厚に対して鋼管径が大きくなるほど影響は大きくなる。各鋼管における局部変形の最大変位を小さくする効果は下記のとおりである。

ϕ 48.9 mm 鋼管	約 20 %
ϕ 60.5 mm "	約 25 %
ϕ 89.1 mm "	約 35 %

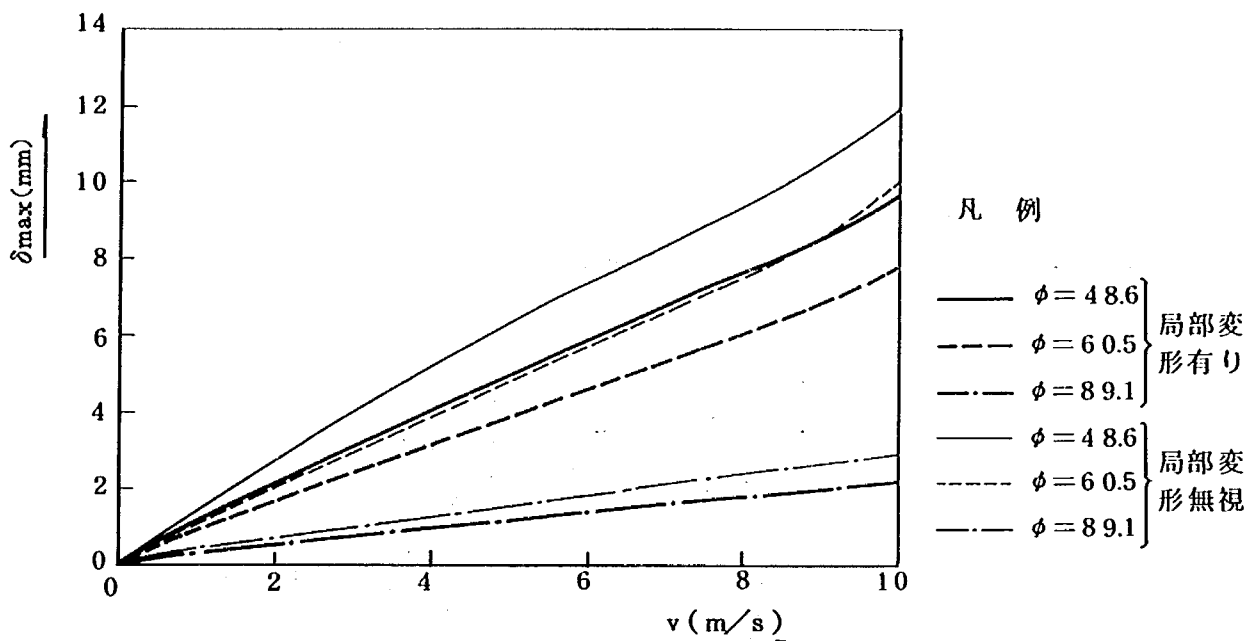


図-7.10 計算最大変位に対する局部変形の影響

7.3 構造モデルC (緩衝材効果を考えた衝撃モデル)

(1) モデルBとの相異

構造モデルCは、鋼管の外側に緩衝材を巻いた単純梁を2質点系にモデル化するもので、構造モデルBと異なるのは局部変形に関するバネ定数と、緩衝材を取りつけたための減衰係数の変化である。他の関係式はモデルBと全く同じである。

以下、接触点のバネ定数 K_2 、減衰係数 D_1 、 D_2 の設定を以下に示す。

(2) 局部変形に関するバネ定数

鋼球が鋼管に衝突して発生する鋼管の局部変形は、今回の実験の範囲では鋼管の径と比較して小さかったので衝突点付近の形状を図-7.11のように仮定する。

局部変形と外力 F の関係は次のようになり (7.16) 式で近似的に表される。

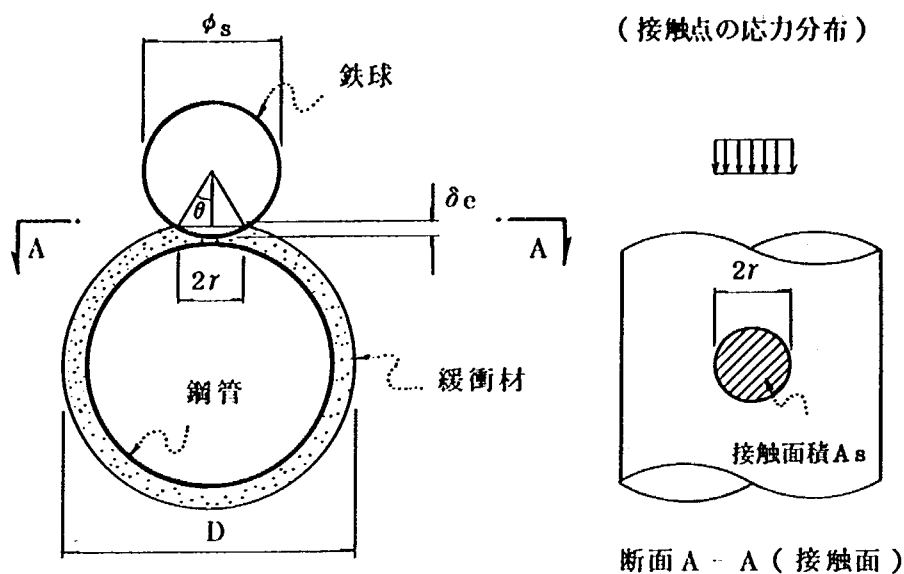
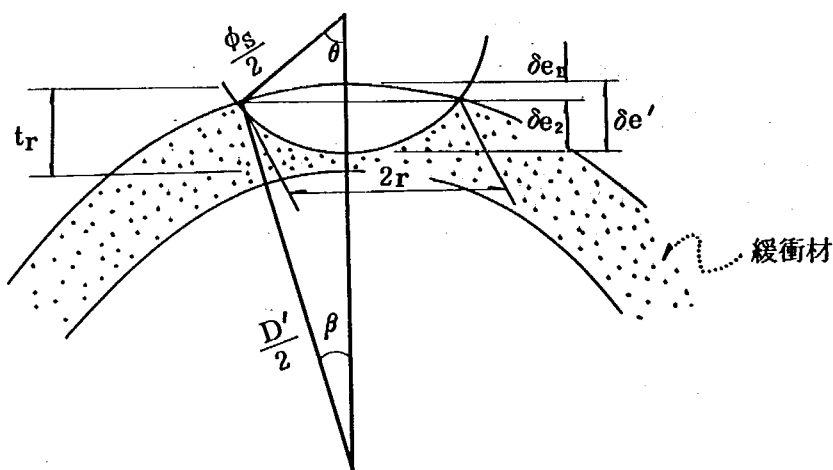


図 - 7.11 鋼球と緩衝材の接触面形状

① 緩衝材部の局部変形

接触面は下図のようになり、その関係は以下のように示される。



1) 緩衝材 (ゴム) の変位

$$A_s = \pi r^2$$

$$r = \frac{\phi_s}{2} \sin \theta = \frac{D'}{2} \sin \beta$$

$$\delta e' = \delta e_1 + \delta e_2 = \frac{D'}{2} (1 - \cos \beta) + \frac{\phi_s}{2} (1 - \cos \theta)$$

$$\sin \beta = \frac{\phi_s}{D'} \sin \theta$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \quad \text{より}$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{\phi s^2}{D'^2} \sin^2 \theta}$$

$$\delta e' = \frac{\phi s}{2} (1 - \sqrt{1 - \sin^2 \theta}) + \frac{D'}{2} (1 - \sqrt{1 - \frac{\phi s^2}{D'^2} \sin^2 \theta})$$

$$\text{ここで } \sin \theta = \frac{2r}{\phi s}, \quad \sin \beta = \frac{2r}{D'} \quad \text{を代入すると}$$

$$\delta e' = \frac{\phi s}{2} (1 - \sqrt{1 - \frac{4r^2}{\phi s^2}}) + \frac{D'}{2} (1 - \sqrt{1 - \frac{4r^2}{D'^2}})$$

$$(\phi s + D' - 2 \delta e') = \sqrt{\phi s^2 - 4r^2} + \sqrt{D'^2 - 4r^2}$$

$$\phi s^2 + D'^2 + 4 \delta e'^2 + 2 \phi s D' - 4 (\phi s + D') \delta e'$$

$$= 2 \sqrt{\phi s^2 D'^2 - 4 (\phi s^2 + D'^2) r^2 + 16 r^4} + \phi s^2 - 4 r^2 + D'^2 - 4 r^2$$

$$(2 \delta e'^2 + \phi s D' - 2 (\phi s + D') \delta e' + 4 r^2)^2 = \phi s^2 D'^2 - 4 (\phi s^2 + D'^2) r^2 + 16 r^4$$

$$\phi s, D' \gg \delta e' \quad \text{とすると}$$

$$2 \delta e'^2 = 0$$

$$(\phi s D' - 2 (\phi s + D') \delta e' + 4 r^2)^2 = \phi s^2 D'^2 - 4 (\phi s^2 + D'^2) r^2 + 16 r^4$$

$$(\phi s + D') \{ \phi s + D' - 4 \delta e' \} r^2 = (\phi s + D') \delta e' \{ \phi s D' - (\phi s + D') \delta e' \}$$

$$r^2 = \frac{\phi s D' - (\phi s + D') \delta e'}{\phi s + D' - 4 \delta e'} \delta e'$$

2) 力-変位関係

応力分布が接触面に一様とすると

$$\sigma = \frac{F}{As} = \frac{F}{\pi r^2} = \frac{(\phi s + D' - 4 \delta e') F}{\pi \{ \phi s D' - (\phi s + D') \delta e' \}} \cdot (\delta e')^{-1}$$

$$\frac{\delta e}{tr} = \epsilon = \frac{\sigma}{Er} \quad \text{より}$$

$$\delta e' = \frac{(\phi s + D' - 4 \delta e') F}{\pi Er \{ \phi s D' \delta e' + (\phi s + D') \delta e'^2 \}} \cdot tr$$

$$\delta e' = \frac{\left\{ \frac{1}{D'} + \frac{1}{\phi s} - \frac{4 \delta e'}{\phi s D'} \right\}}{\pi Er \left\{ \delta e' + \left(\frac{1}{D'} + \frac{1}{\phi s} \right) \delta e'^2 \right\}} F tr$$

$$\phi s, D' \gg \delta e' \quad \text{とすると}$$

$$\frac{4 \delta e'}{\phi s D'} \approx 0 \quad \left(\frac{1}{D'} + \frac{1}{\phi s} \right) \delta e'^2 \approx 0$$

$$\delta e' = \frac{D' + \phi s}{(\pi E_r D' \phi s) \delta e} F \text{ tr}$$

$$F = \frac{\pi E_r D' \phi s}{(D' + \phi s) \text{tr}} \delta e'^2 \quad (\delta e' < \text{tr})$$

② 鋼管の局部変形

鋼管の局部変形の式は下記の式がすでに求められている。

$$F = K a \delta e^{\frac{1}{2}}$$

$$K a = \frac{1}{4} \alpha \sigma_y' t_p^2 \left(\frac{1}{D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

③ 鋼管に緩衝材（ゴム）を巻いた時の局部変形

同一の F に対して緩衝材（ゴム）の変位と鋼管の局部変位を加えたのが全体の変位（局部変位）となる。

したがって

$$\delta e' = \left\{ \frac{(D' + \phi s) \text{tr} F}{\pi E_r D' \phi s} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\delta e' < \text{tr})$$

$$\delta e = \left(\frac{F}{K a} \right)^2$$

より

$$\Sigma \delta e = \left(\frac{F}{K a} \right) + \left\{ \frac{(D' + \phi s) \text{tr} F}{\pi E_r D' \phi s} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

となり、緩衝材を巻いた鋼管の局部変位は（7.16）式で表される。

$$\delta e = \left(\frac{1}{4} \alpha \sigma_y' t_p^2 D^{-\frac{1}{2}} \right) F^2 + \left\{ \frac{(D' + \phi s) \text{tr}}{\pi E_r D' \phi s} \right\}^{\frac{1}{2}} F^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (7.16)$$

δe : 接触点の局部変位 (m)

σ_y' : 鋼材の公称降伏点応力 (kgf/m²)

t_p : 鋼管厚 (m)

D : 鋼管径 (m)

D' : 緩衝材の厚さを含んだ鋼管径 (m)

ϕs : 鋼球径 (m)

F : 接触点の発生荷重 (kgf)

E_r : 緩衝材（ゴム）の弾性係数 (kgf/m²)

tr : 緩衝材（ゴム）厚 (m)

(3) 減衰定数

緩衝材を取りつけた場合の梁の曲げ変形における減衰定数は、衝撃応答実験結果（表－6.5）から表－7.3に示す値を用いる。減衰係数は（7.13）式を用いて、その減衰定数から求めた。局部変形における接触点の減衰係数 D_2 は、緩衝材を取りつけた実験で得られた最

大変位の値 $\delta_{\max}$ に計算値が合うように試算で定めた。

表-7.3 緩衝材をつけた場合の減衰

鋼 管	梁 の 曲 げ 変 形		局 部 変 形	
	減衰定数 h	D ₁ (kgf・s/m)	減衰定数 h	D ₂ (kgf・s/m)
φ 48.6 mm	0.053	16.04	0.50	200
φ 60.5 mm	0.065	27.54	0.50	200

表-7.3の梁の曲げ変形における減衰定数は $t_r = 2 \text{ mm}$ と $t_r = 5 \text{ mm}$ で明確な差がないので両方の平均値としている。

(4) 計算ケース

緩衝材を取付けたケースの衝撃応答計算は表-7.4に示すケースについて実施した。

表-7.4 緩衝材付き衝撃応答計算ケース

定 数	单 位	CAL-19	CAL-20	CAL-21	CAL-22
D	m	0.0486	0.0486	0.0605	0.0605
M ₁	kgf · s ² /m	0.177	0.177	0.224	0.224
E	kgf/m ²	2.28 × 10 ¹⁰	2.28 × 10 ¹⁰	1.76 × 10 ¹⁰	1.76 × 10 ¹⁰
L	m	1.0	1.0	1.0	1.0
tp	m	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
tr	m	0.002	0.002	0.005	0.005
σ _y	kgf/m ²	5.75 × 10 ⁷	5.75 × 10 ⁷	3.73 × 10 ⁷	3.73 × 10 ⁷
D ₁	kgf · s ² /m	16.04	16.04	27.54	27.54
M ₂	kgf · s ² /m	0.142	0.142	0.142	0.142
α	—	61	61	68	68
φ _s	m	0.007	0.007	0.007	0.007
σ _y '	kgf/m ²	4 × 10 ⁷	4 × 10 ⁷	4 × 10 ⁷	4 × 10 ⁷
D ₂	kgf · s ² /m	200	200	200	200
Er	kgf/m ²	2.3 × 10 ⁶	2.3 × 10 ⁶	2.3 × 10 ⁶	2.3 × 10 ⁶

D : 鋼管外徑

 M_1 : 鋼管の等価質量

E : 鋼管の弾性係数

L : スパン長

tp : 鋼管厚

 σ_y : 鋼管の降伏点応力

D_1 : 梁の減衰係数

M_2 : 鋼球の質量

α : 局部变形定数

 σ_y' : 局部変形に対する鋼材の公称降伏点応力 D_2 : 接触点の減衰係数

tr : 緩衝材厚

E_r : 緩衝材(ゴム)の弾性係数

 ϕ_s : 鋼球の直径

(5) 計算結果と考察

緩衝材の効果を取入れたモデルCによる計算結果を実測値と比較して図-7.12に示した。モデルCは衝突速度が大きくなるに従い緩衝材の効果が大きくなる傾向を十分に表現できるとは言えないが、ほぼ実験値に近い結果を得る事ができる。なお、モデルCでは局部変形の減衰係数を実測値に合うように定めており、減衰定数に換算すると $h = 0.50$ となり、緩衝材の無いケース $h = 0.16$ に比較して相当大きい値となっている。

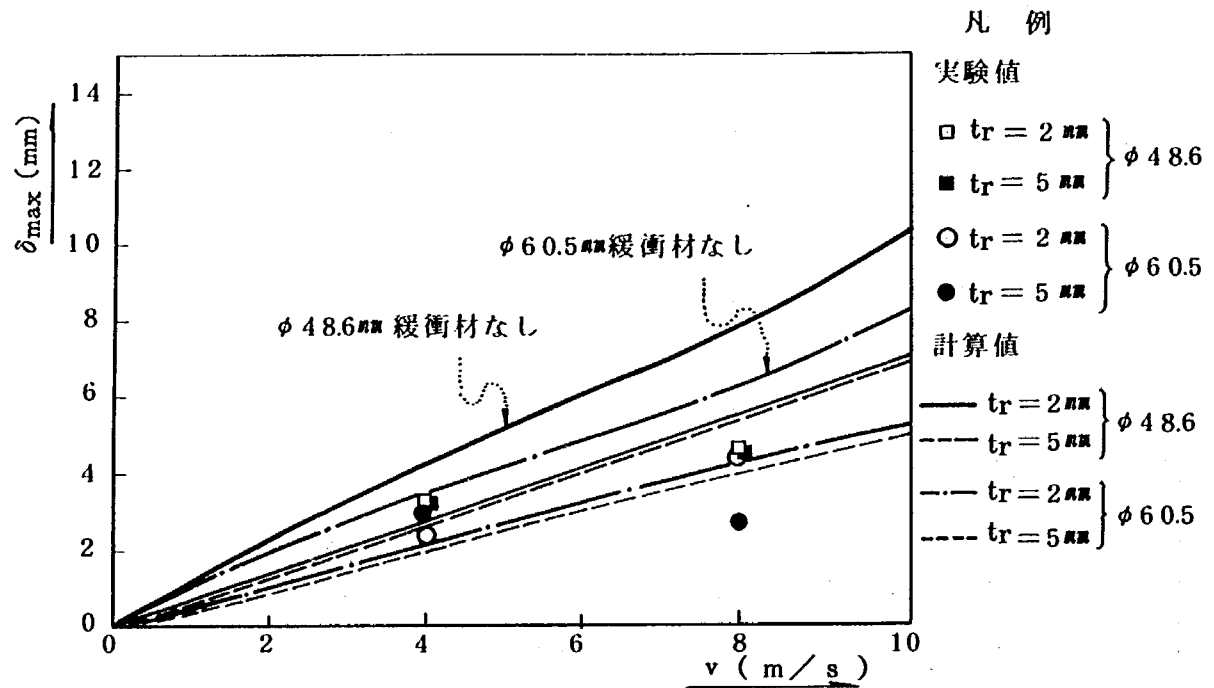


図-7.12 緩衝材の効果の計算結果

8. 衝撃曲げ破壊実験

8.1 実験ケース

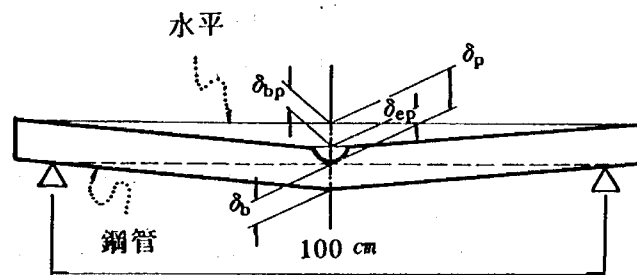
単純梁鋼管の衝撃曲げ実験は、表－8.1に示すように $\phi 48.6 \text{ mm}$, $\phi 60.5 \text{ mm}$, $\phi 89.1 \text{ mm}$ の各1本ずつ、中央点の変位が破壊変位（スパン長の約2%と定義する）になるまで鋼球落下による衝撃をくり返した。但し、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ は局部変形だけで梁全体の残留変位は得られなかった。測定項目は残留変位、残留局部変位、梁中央の変位応答、鋼球速度である。

表－8.1 実験ケース

CASE	衝突速度 v (m/s)	落 高 H (m)	鋼 管 径 ϕ (mm)	鋼球重量 W (kg)	衝 撃 回 数 (回)	備 考
DF－1	8.6	3.8	48.6	3.0	16	
DF－2	"	"	60.5	"	32	
DF－3	"	"	89.1	"	84	局部変形のみ

8.2 実験結果と考察

1回の衝撃により鋼の降伏点ひずみ $\epsilon_y \approx 3000\mu$ の約2倍以上の最大ひずみを発生するような衝撃をくり返し加えて、その時の梁の変化応答および打撃面残留変位（局部変位と梁の曲げ変位の合計値）等を測定した。以下には図－8.1に示す δ_p （打撃面残留変位）と δ_{ep} （残留局部変位）および δ_{bp} （梁の残留曲げ変位）の測定結果を示す。



δ_p : 打撃面の残留変位
 δ_{bp} : 梁の残留曲げ変位
 δ_{ep} : 残留局部変位
 δ_b : 梁中央の変位

図－8.1 衝撃曲げ破壊実験の測定値の定義

(1) 残留変位

打撃面の残留変位 δ_p 、残留局部変位 δ_{ep} を表－8.2に示した。ここで δ_p は図－8.1に示すように梁の残留曲げ変位 δ_{bp} と δ_{ep} を含んでいるから、下記の式で δ_{bp} が求められる。

$$\delta_{bp} = \delta_p - \delta_{ep} \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

δ_{bp} : 梁の残留曲げ変位

δ_p : 打撃面の残留変位

δ_{ep} : 残留局部変位

(8.1) 式で求められる δ_{bp} も表 - 8.2 に示している。

表 - 8.2 残留変位

D F - 1					D F - 2					D F - 3				
ϕ 48.6 mm					ϕ 60.5 mm					ϕ 89.1 mm				
N	W (kgf)	δ_p (mm)	δ_{ep} (mm)	δ_{bp} (mm)	N	W (kgf)	δ_p (mm)	δ_{ep} (mm)	δ_{bp} (mm)	N	W (kgf)	δ_p (mm)	δ_{ep} (mm)	δ_{bp} (mm)
1	3	未測定	未測定	—	1	3	2	2	0	10	3	11	10	1
2	"	"	"	—	6	"	9	5	4	20	"	15	14	1
6	"	16	5	11	11	"	16	9	7	25	"	17	16	1
10	"	25	8	17	16	"	21	11	10	35	"	19	18	1
11	"	27	10	17	22	"	27	13	14	44	"	20	19	1
16	"	36	13	23	27	"	32	15	17	54	"	22	21	1
					32	"	33	16	17	64	"	23	23	1
										74	"	23	23	1
										89	"	23	23	1

N : 落下回数 (回) W : 鉄球の重さ (kgf) δ_p : 打撃面の残留変位 (mm)

δ_{ep} : 残留局部変位 (mm) δ_{bp} : 梁の残留曲げ変位 (mm)

鋼球の落下高 $H = 3.80$ (m)

鋼球の衝突速度 $v = \sqrt{2gH} = 8.63$ (m/s)

鋼球の衝突エネルギー
(1 回あたり) $En = \frac{1}{2} m_2 v^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2$

$En = 11.4$ (kgf · m)

累積衝突エネルギー $\Sigma En = En \cdot N$ (kgf · m)

鋼球の 1 回衝突する時の衝撃エネルギーは、下記の式で求められる。

$$En = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

この梁に加える衝撃エネルギーを指標として表 - 8.2 に示した残留変位をプロットして図 - 8.2 に示した。

ϕ 48.6 mm 鋼管では、残留変位としては梁の変位の方が大きい、管径が大きくなるに従い (管肉厚は同じ) 局部変位の方が大きくなる。 ϕ 89.1 mm 鋼管ではほとんど局部変形である。これは梁全体の曲げ剛性が、局部変形に対する強さに比較して相対的に強くなると、鋼球の衝突エネルギーは局部変形で吸収される分が多くなる事を示している。逆に言えば、梁の曲げ変形によるエネルギー吸収率は梁の剛性と局部の剛性の相対的な比によって変化し、前者が小さくなると梁の曲げ変形によるエネルギー吸収率は大きくなる。

図 - 8.2 の ϕ 89.1 mm 鋼管において、局部変形が衝撃回数がある限度を越えると増加しな

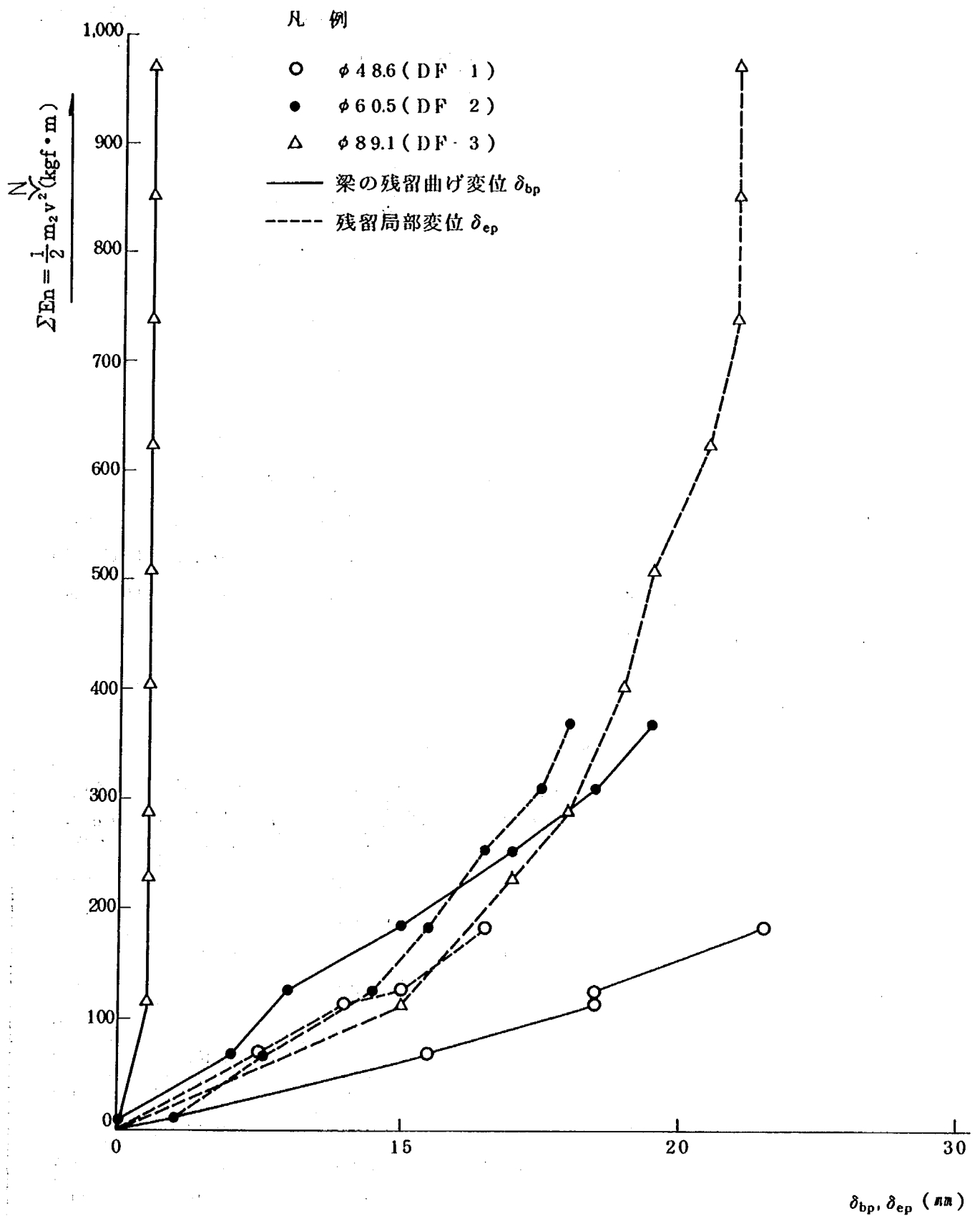
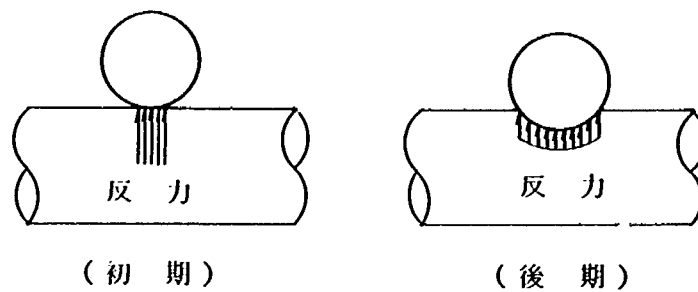


図 - 8.2 衝突エネルギーと残留変位

いのは以下の現象と考えられる。すなわち，図－8.3に概念図として示すように局部変形が大きくなり，鋼球の衝突する面が広がると， $W=3\text{ kgf}$ $V=8.6\text{ m/sec}$ 程度の衝撃エネルギーはこの広がった面の弾性変形範囲内で吸収できるようになる。



図－8.3 打撃面における力の概念図

(2) 梁の変位応答

残留変位の他に梁底面の変位（＝梁の変位）の時間的な変化を測定した。

梁の変位のピーク値 $\delta_{\max}$ を表－8.3に示した。表－8.3には表－8.2の梁の残留曲げ変位を衝撃回数1回当たりに換算して一諸に示している。梁の最大変位 $\delta_{\max}$ に対する衝撃1回当たりの残留曲げ変位 $\delta'_{b,p}$ の比率は小さく下記のようになる。この残りは弾性曲げ変位 $\delta_{b,y}$ として回復していると考えられる。

表－8.3 梁の変位のピーク値

CASE	鋼 管	衝撃回数	梁の最大変位 $\delta_{\max}$ (mm)	衝撃1回当たりの 梁の残留曲げ 変位 $\delta'_{b,p}$ (mm)	弾 性 曲 げ 変 位 $\delta_{b,y} = \delta_{\max} - \delta'_{b,p}$ (mm)	$\frac{\delta'_{b,p}}{\delta_{\max}}$ (%)
DF－1	$\phi 48.6$	RUN 1	9.53	(1.83)	7.7	19.2
		2	11.13	(1.83)	9.3	16.4
		6	12.07	1.83	10.24	15.2
		11	10.80	1.00	9.80	9.3
		16	8.57	1.20	7.37	14.0
DF－2	$\phi 60.5$	1	8.89	0	8.89	0.0
		6	6.99	0.80	6.19	11.4
		11	11.43	0.60	10.83	5.2
		16	8.89	0.60	8.29	6.7
		22	5.72	0.67	5.05	11.7
		27	8.26	0.60	7.66	7.3
		32	9.20	0	9.20	0
DF－3	$\phi 89.1$	84	梁の残留曲げ変形はなく，残留局部変形だけ			

※ $\phi 48.6\text{ mm}$ における () 内数値は， $N=6$ のときの $\delta'_{b,p}$ をスライドさせたものである。

$$\phi = 48.6 \quad \delta'_{bp} / \delta \max \approx 15\%$$

$$\phi = 60.5 \quad \delta'_{bp} / \delta \max \approx 6\%$$

$$\phi = 89.1 \quad \delta'_{bp} / \delta \max = 0\% \quad (\delta \max \text{ の測定は実施していないが } \delta'_{bp} \approx 0)$$

上述のように、発生ひずみは降伏点ひずみ $\epsilon_y \approx 3000\mu$ を大巾に越えているのに、残留変形がきわめて少ない理由は、図-8.4 に示すようにひずみ（ひずみが発生しているということは荷重が作用していると置きかえてもよい）が極めて瞬時的であるために、塑性ひずみエネルギーとして消費される分が少ないからと考えられる。

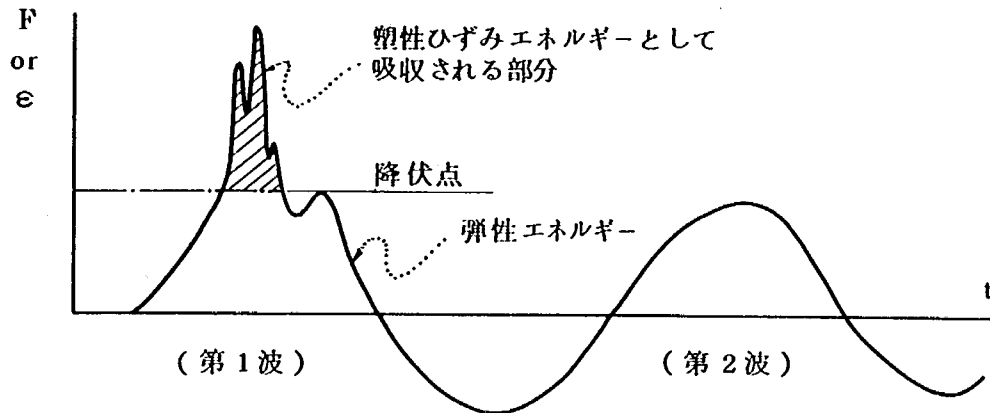


図-8.4 弾性ひずみエネルギーと塑性ひずみエネルギー

このことは、6.2節で示した $t-\epsilon$ 曲線で、第2波以降は0ポジションが変わらないで自由振動をくり返していることから理解できる。

測定した $t-\delta$ 曲線より第1波のピークに達するまでの時間を整理すると表-8.4 のようになる。表-7.1 の衝撃応答実験値より約25%程度長くなっている。

表-8.4 ピーク到達時間 (ΔT)

ϕ 48.6 mm		ϕ 60.5 mm		ϕ 89.1 mm	
RUN	ΔT (ms)	RUN	ΔT (ms)	RUN	ΔT (ms)
1	2.87	1	2.5	10	未測定
2	2.75	6	2.75	20	
6	3.12	11	2.75	25	
11	3.25	16	2.25	35	
16	3.00	22	2.50	44	
		27	2.75	54	
		32	2.25	64	
平均	3.00		2.53		—

(3) 変形エネルギー

実験的に測定した梁の曲げ変位および局部変位から変形エネルギーと計算し、鋼球の運動エネルギーがどのような変形エネルギーに換えられたかを検討する。梁の衝撃曲げにおいて

は、鋼球の運動エネルギーは梁の変位の第1波がピークに達した時点では下記の4つのエネルギーに変化していると考えられる。

- ①梁の塑性曲げ変形エネルギー
- ②梁の弾性曲げ変形エネルギー
- ③局部塑性変形エネルギー
- ④局部弾性変形エネルギー

実験においては、表-8.2、表-8.3に示したように塑性曲げ変形（残留曲げ変位 δ_{bp} ）、弾性曲げ変形（弾性曲げ変位 δ_{by} ）および塑性局部変形（残留局部変位 δ_{ep} ）を測定しており、これらの変位量から変形エネルギーを求める。

①梁の塑性曲げ変形エネルギー

梁の塑性曲げ変形エネルギーは、残留曲げ変位の測定結果をもとに（8.3）式で求められる。

$$U_{bp} = F_y \times \delta_{bp} \quad \dots\dots\dots (8.3)$$

U_{bp} : 梁の塑性曲げ変形エネルギー (kgf・m)

F_y : 梁の降伏点荷重 (kgf)

δ_{bp} : 梁の残留曲げ変位 (mm)

F_y は静的な梁の曲げ試験結果（図-5.13）に30%のひずみ速度効果（9.2節参照）を見込むと

$$\phi 48.6 \text{ mm} \quad F_y = 860 \times 1.3 = 1118 \text{ kgf}$$

$$\phi 60.5 \text{ mm} \quad F_y = 900 \times 1.3 = 1170 \text{ kgf}$$

$$\phi 89.1 \text{ mm} \quad F_y = 2540 \times 1.3 = 3302 \text{ kgf}$$

のようになる。この値と表-8.2の残留曲げ変位から（8.3）式で求めたものを表-8.5に示す。

表-8.5 梁の塑性曲げ変形エネルギー

$\phi 48.6 \text{ mm}$				$\phi 60.5 \text{ mm}$				$\phi 89.1 \text{ mm}$			
N	δ_{bp} (mm)	ΣEn (kgf・m)	U_{bp} (kgf・m)	N	δ_{bp} (mm)	ΣEn (kgf・m)	U_{bp} (kgf・m)	N	δ_{bp} (mm)	ΣEn (kgf・m)	U_{bp} (kgf・m)
1	(1.8)	11.4	2.0	1	0	11.4	0	10	1	114.0	3.3
2	(3.7)	22.8	4.1	6	4	68.4	4.7	20	"	228.0	"
6	11	68.4	12.3	11	7	125.4	8.2	25	"	285.0	"
10	17	114.0	19.0	16	10	182.4	11.7	35	"	399.0	"
11	17	125.4	19.0	22	14	250.8	16.4	44	"	501.6	"
16	23	182.4	25.7	27	17	307.8	19.9	54	"	615.6	"
				32	17	364.8	19.9	64	"	729.6	"
								74	"	843.6	"
								84	"	957.6	"

※ $\phi 48.6 \text{ mm}$ における（ ）内数値は、 $N=6$ の δ_{bp} の値を用いて1回当たりの δ_{bp} として求めたものである。

ΣEn : 累積運動エネルギー、 N : 衝撃回数(回)、 $\Sigma En = \frac{1}{2} \times \frac{3}{9.8} v^2 \cdot N$ (kgf・m)

②梁の弾性曲げ変形エネルギー

弾性曲げ変形エネルギーは、図-9.6の $\triangle ABC$ の面積で、衝撃回数くり返されるので、下記の式となる。 δ_{by} は表-8.3の弾性曲げ変位を用いる。

$$U_b = \sum_N \left(\frac{1}{2} F_y \cdot \delta_{by} \right) \dots\dots\dots (8.4)$$

U_b : 弾性曲げ変形エネルギー (kgf・m)

δ_{by} : 弾性曲げ変位 (m)

N : 衝撃回数 (回)

F_y は①と同様ひずみ速度効果による30%上昇を見込む。計算結果は表-8.6示すとおりである。

表-8.6 梁の弾性曲げ変形エネルギー

ϕ 48.6 mm				ϕ 60.5 mm				ϕ 89.1 mm			
N	δ_{by} (mm)	$\sum En$ (kgf・m)	U_b (kgf・m)	N	δ_{by} (mm)	$\sum En$ (kgf・m)	U_b (kgf・m)	N	δ_{by}^* (mm)	$\sum En$ (kgf・m)	U_b (kgf・m)
1	7.7	11.4	4.3	1	8.89	11.4	5.2	10	5.40	114.0	89.2
2	9.3	22.8	9.5	6	6.19	68.4	23.3	20	"	228.0	178.3
6	10.24	68.4	32.4	11	10.83	125.4	55.0	25	"	285.0	222.9
10	—	114.0	—	16	8.29	182.4	79.2	35	"	399.0	312.0
11	9.80	125.4	59.8	22	5.05	250.8	96.9	44	"	501.6	392.3
16	7.37	182.4	83.6	27	7.66	307.8	119.3	54	"	615.6	481.4
				32	9.20	364.8	146.2	64	"	729.6	570.6
								74	"	843.6	659.7
								84	"	957.6	748.9

※梁の時間的応答の測定をしなかったため、CASE D 22~D 25の結果から推定した。図-6.11参照。

③局部塑性変形エネルギー

局部変形による $F-\delta_{ep}$ の関係が(7.3)式で表わされるとし、 α は静的実験結果を用いると、各鋼管の $F-\delta_{ep}$ 関係は次のようになる。

$$F = \frac{1}{4} \times \alpha \times 4000 \times 10^4 \times t_p^2 \left(\frac{\delta_{ep}}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (8.5)$$

$$D = 48.6 \text{ mm}, \quad t_p = 3.2 \text{ mm}, \quad \alpha = 61, \quad F = 28330 (\delta_{ep})^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 60.5 \text{ mm}, \quad t_p = 3.2 \text{ mm}, \quad \alpha = 68, \quad F = 28330 (\delta_{ep})^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 89.1 \text{ mm}, \quad t_p = 3.2 \text{ mm}, \quad \alpha = 67, \quad F = 23000 (\delta_{ep})^{\frac{1}{2}}$$

局部塑性変形エネルギーは(8.5)式による荷重 F と、その回の衝撃により生じた新たな局部塑性変位 $\Delta\delta_{ep}-(\delta_{ep}-\text{前回の}\delta_{ep})$ の積として求められる。さらに各回までの合計

局部塑性変形エネルギー U_{ep} は上記の和として (8.6) 式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 U_{ep} &= \sum_N (F \cdot \Delta \delta_{ep}) \\
 &= \sum (28330 \delta_{ep}^{0.5} \cdot \Delta \delta_{ep}) \quad (\phi 48.6 \text{ mm 鋼管}) \\
 &= \sum (28330 \delta_{ep}^{0.5} \cdot \Delta \delta_{ep}) \quad (\phi 60.5 \quad \text{ " } \quad) \\
 &= \sum (23000 \delta_{ep}^{0.5} \cdot \Delta \delta_{ep}) \quad (\phi 89.1 \quad \text{ " } \quad)
 \end{aligned}$$

表- 8.7 局部塑性変形による吸収エネルギー

$\phi 48.6 \text{ mm}$				$\phi 60.5 \text{ mm}$				$\phi 89.1 \text{ mm}$			
N	δ_{ep} (mm)	ΣE_n (kgf・m)	U_{ep} (kgf・m)	N	δ_{ep} (mm)	ΣE_n (kgf・m)	U_{ep} (kgf・m)	N	δ_{ep} (mm)	ΣE_n (kgf・m)	U_{ep} (kgf・m)
1	(0.83)	11.4	0.7	1	2	11.4	2.5	10	10	114.0	16.4
2	(1.67)	22.8	1.7	6	5	68.4	7.7	20	14	228.0	26.5
6	5	68.4	7.4	11	9	125.4	17.4	25	16	285.0	32.2
10	8	114.0	14.4	16	11	182.4	23.2	35	18	399.0	38.2
11	10	125.4	20.1	22	13	250.8	29.3	44	19	501.6	41.3
16	13	182.4	29.3	27	15	307.8	36.1	54	21	615.6	47.8
				32	16	364.8	39.6	64	23	729.6	54.7
								74	23	843.6	
								84	23	957.6	

※ $\phi 48.6 \text{ mm}$ における () 内数値は、 $N = 6$ の δ_{ep} の値を用いて 1 回当たりの δ_{ep} として求めたものである。

④局部弾性変形エネルギー

局部弾性変形は測定されていないので、未知数とする。

以上①～④の変形エネルギーを整理し表- 8.8 に示した。

図- 8.5 には鋼球の衝突エネルギー ΣE_n と未知数である④局部弾性変形エネルギーを除いた①～③の合計変形エネルギー ($\Sigma U - U_e$) および①の梁の塑性曲げ変形エネルギー (U_{bp}) の関係を示した。

ΣE_n と ΣU の差は局部弾性エネルギー (U_e) としてたくわえられ、鋼球をはね返す力を生み、鋼球の反発運動エネルギーとして放出される。

表- 8.8 によると、下記のように相当のエネルギーが U_e に変換される結果となっている。

$$\phi 48.6 \text{ mm 鋼管} \quad U_e \approx 0.3 \Sigma E_n$$

$$\phi 60.5 \quad \text{ " } \quad U_e \approx 0.4 \Sigma E_n$$

$$\phi 89.1 \quad \text{ " } \quad U_e \approx 0.1 \Sigma E_n$$

鋼球の衝突エネルギーは位置エネルギーに換算すると、

$$E_n = \frac{1}{2} m_2 v^2 = \frac{1}{2} m_2 \cdot (\sqrt{2gH})^2 = m_2 gH \quad \dots\dots\dots (8.6)$$

で表わせるから、高さ H から落下した鋼球は $0.3H$ 、 $0.4H$ 、 $0.1H$ の高さまではね返ることを示している。このことは、 $\phi 89.1 \text{ mm}$ 鋼管の場合、現象としてはありうると思われる。(測定

表-8.8 変形エネルギー

鋼管 (mm)	衝撃 回数 N	鋼球の衝突 エネルギー ΣE_n (kgf·m)	変形エネルギー (kgf·m)					$\frac{\Sigma U - x'}{\Sigma E_n}$
			U_{bp}	U_b	U_{ep}	U_e	ΣU	
$\phi 48.6$	1	11.4	2.0	4.3	0.7	x'	7.0 +x	0.61
	2	22.8	4.1	9.5	1.7	"	15.3 "	0.67
	6	68.4	12.3	32.4	7.4	"	52.1 "	0.76
	10	114.0	19.0	—	14.4	"	"	—
	11	125.4	19.0	59.8	20.1	"	98.9 "	0.79
	16	182.4	25.7	83.6	29.3	"	138.6 "	0.76
$\phi 60.5$	1	11.4	0	5.2	2.5	"	7.7 "	0.66
	6	68.4	4.7	23.3	7.7	"	35.7 "	0.52
	11	125.4	8.2	55.0	17.4	"	80.6 "	0.64
	16	182.4	11.7	79.2	23.2	"	114.1 "	0.63
	22	250.8	16.4	96.9	29.3	"	142.6 "	0.57
	27	307.8	19.9	119.3	36.1	"	175.3 "	0.57
	32	364.8	19.9	146.2	39.6	"	205.7 "	0.56
$\phi 89.1$	10	114.0	3.3	89.2	16.4	"	108.9 "	0.96
	20	228.0	"	178.3	26.5	"	208.1 "	0.91
	25	285.0	"	222.9	32.2	"	258.4 "	0.91
	35	399.0	"	312.0	38.2	"	353.5 "	0.89
	44	501.6	"	392.3	41.3	"	436.9 "	0.87
	54	615.6	"	481.4	47.8	"	532.5 "	0.87
	64	729.6	"	570.6	54.7	"	629.6 "	0.86
	84	957.6	"	748.9	54.7	"	806.9 "	0.84

は実施していないが、速度測定のためのビデオから、 $H = 3.8$ m から落下した場合、0.3 m 以上反発しているのがみられる)。しかし、 $\phi 48.6$ mm, $\phi 60.5$ mm 鋼管の場合、(8.6) 式より得られる $0.3 H$ から $0.4 H$ 、つまり 1 m 以上はね上がる現象は考えにくい。

又、図-8.5 には梁の曲げ破壊に直接結びつく(9章参照)塑性曲げ変形エネルギー U_{bp} を示したが、 ΣE_n を示したが、 ΣE_n に対する比率は鋼管の種類によって異なる。 ΣE_n のうち U_{bp} に変換される率の高いのは $\phi 48.6$ mm, $\phi 60.5$ mm, $\phi 89.1$ mm の順であり梁の強度に対する衝撃外力の比が大きく、かつ、梁の曲げ剛性に対する局部変形剛性の比が大きい順序となっている。

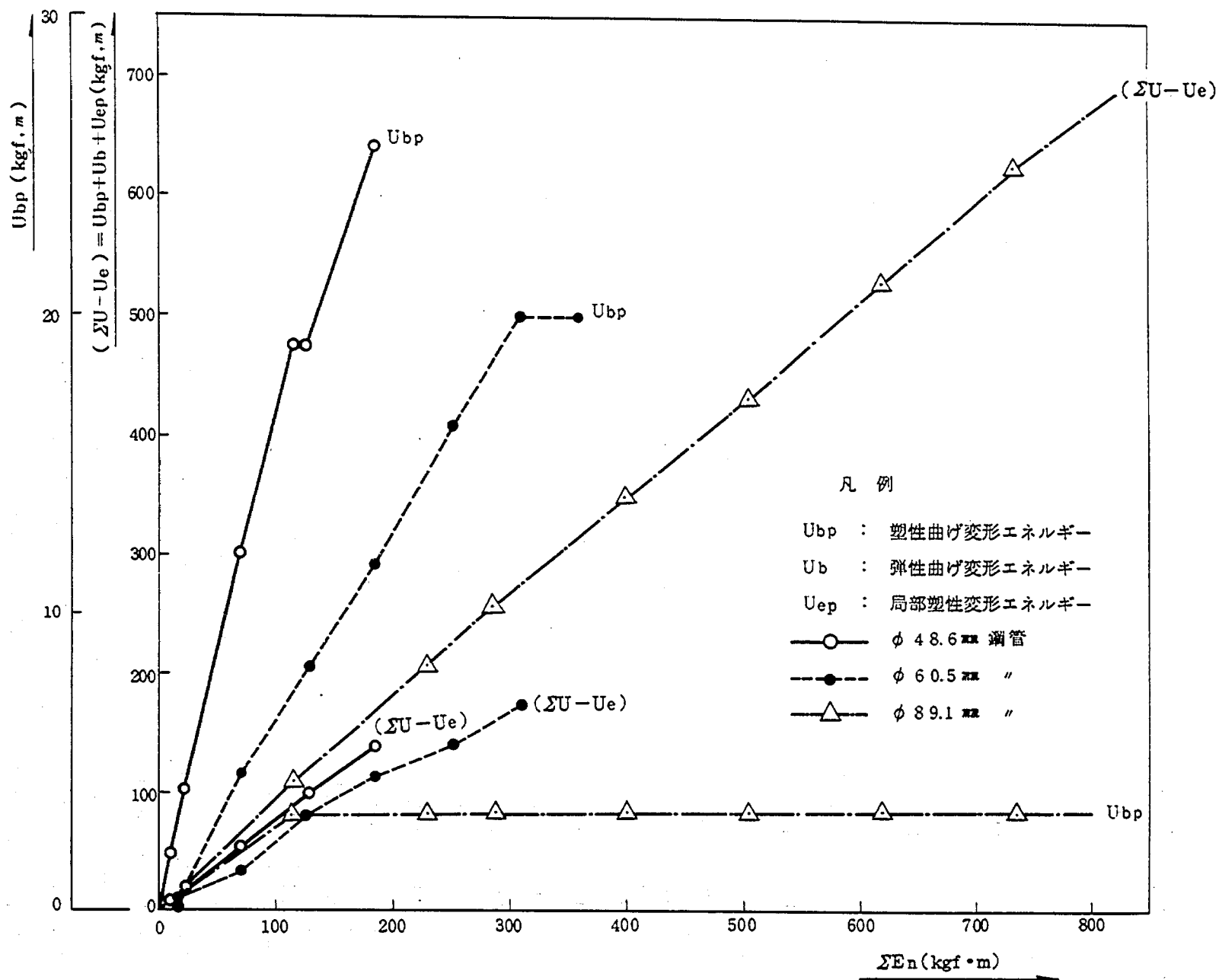


図-8.5 衝突エネルギーと変形エネルギー

9. 衝撃力による曲げ破壊限界と曲げ耐力設計法

9.1 衝撃における鋼材の応力-ひずみ曲線

鋼材の一軸応力あるいは曲げ応力-ひずみ履歴は図-9.1に示すように降伏点(A)を越えるC点まで載荷した後、除荷(C→D)し、再び載荷する(D→C')すると、降伏点(F)は初期の降伏点(A)より大きくなり、その後は処女載荷の応力-ひずみ曲線と同じ曲線をたどる性質(ひずみ硬化 strain hardening)をもっている。⁹⁾

この性質は衝撃応力-ひずみ関係についても表れる事がCampbell(図-9.2), Taylor(図-9.3)により確かめられている。¹⁰⁾ 図-9.2において(a)~(c)と(e), (d)が異なる $\sigma-\epsilon$ 曲線上にあるのは、(a)~(c)にはひずみ速度効果(Strain rate effect)による降伏点応力の増大が含まれているからである。

このように、くり返し衝撃によるひずみは、動的な $\sigma-\epsilon$ 曲線に沿って変化して破壊まで致るので、土石流のくり返し衝撃による鋼材の破壊は、図-9.3に示すような動的な $\sigma-\epsilon$ 曲線の積分値として得られる吸収エネルギーとして定義することができる。

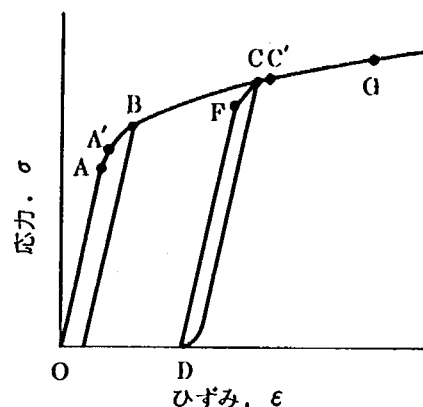


図-9.1 応力を中断したときの応力-ひずみ曲線

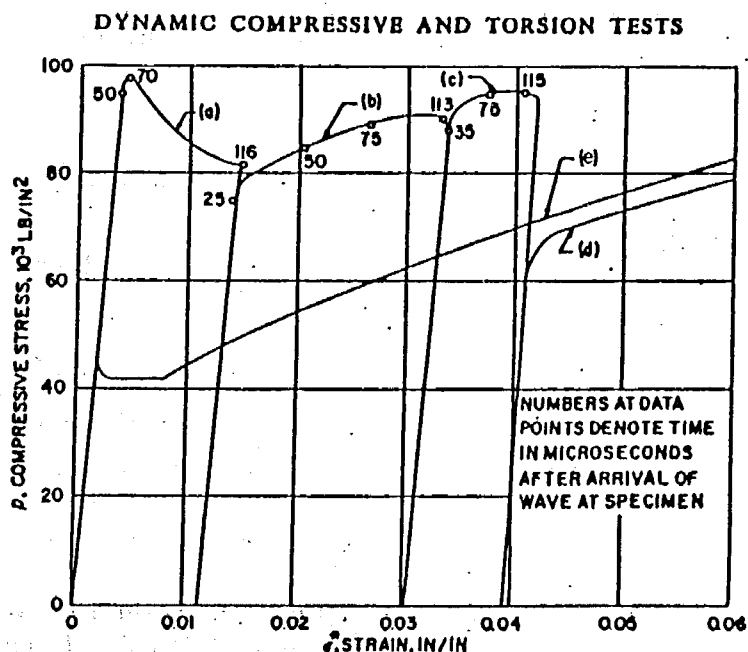


図-9.2 Static and Dynamic Compressive Stress-Strain Curves for a 0.32% Carbon

- (a) First Impact with an Initial Velocity of 430 in/sec
- (b) Second Impact with an Initial Velocity of 430 in/sec
- (c) Third Impact with an Initial Velocity of 430 in/sec
- (d) Static Tests after Three Impacts on the Specimen
- (e) Static Tests on Annealed Specimen

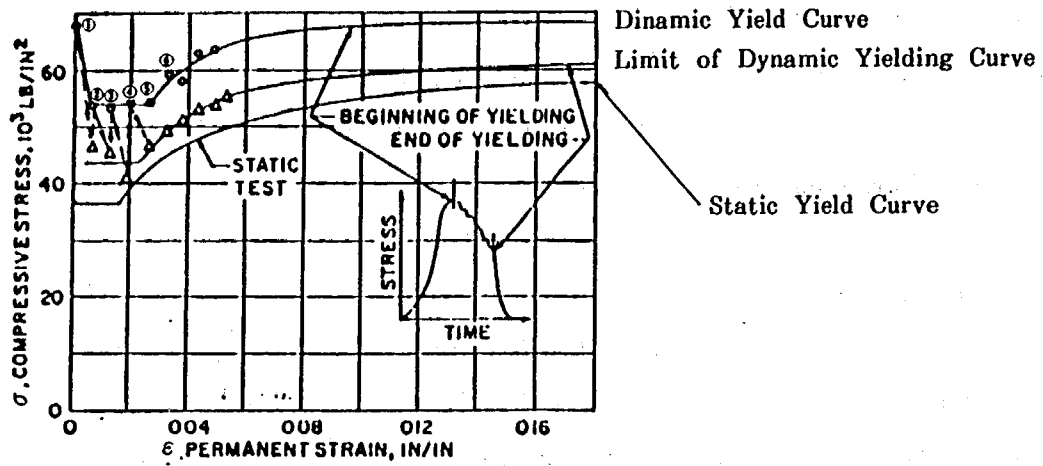


図 - 9.3 Static and Dynamic Compressive Stress- Strain Curves for Mild Steel Containing 0.14% Carbon
Dynamic Tests Performed by Repeated Impact

9.2 鋼材降伏点のひずみ速度効果

軟鋼の降伏点はひずみ速度に依存し、図-9.4に示すように、衝撃荷重等のようにひずみ速度が大きくなると降伏点は大きくなる事が知られている。¹⁰⁾ この現象をひずみ速度効果 (Strain rate effect) と言っており、図-9.5に軟鋼のひずみ速度効果の研究例を示した。⁸⁾

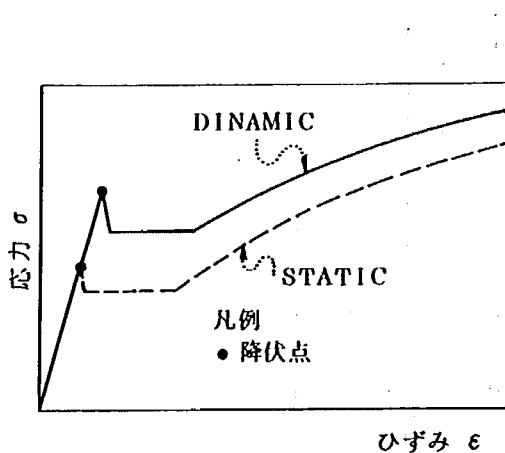


図 - 9.4 ひずみ速度効果

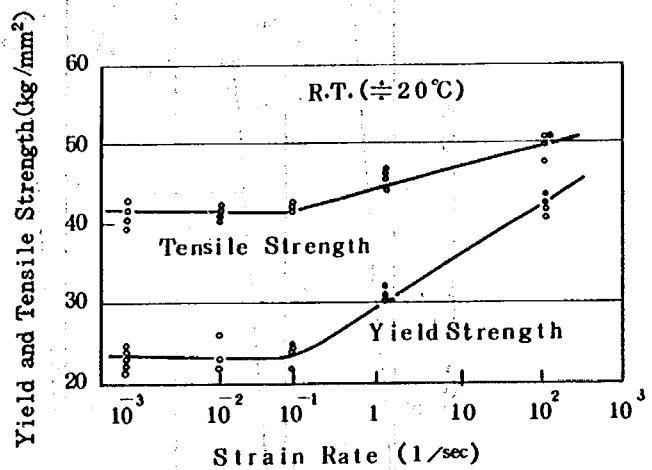


図 - 9.5 Effect of strain rate on the lower yield and tensile strength at room temperature.

今回の実験のひずみ速度範囲は $10^{-1} \sim 1$ 1/sec 程度の範囲であり、図-9.5 からするとひずみ速度効果が 0~30% 程度表れる領域である。

9.3 実験結果による曲げ破壊限界

(1) 曲げ破壊限界の考え方

9.1 節で示したように、衝撃応力が発生する場合においても静的応力が発生する場合と同じような $\sigma - \epsilon$ 関係が成立し、ひずみ硬化もみられる。よって、衝撃応力が発生する場合の鋼の破壊限界としては、 $\sigma - \epsilon$ カーブの積分値であるところの鋼管の許容変形エネルギーと定めることができる。この $\sigma - \epsilon$ 曲線は静的実験で定めたものに衝撃時のひずみ速度効果を考えに入れる必要がある。

梁全体の変形エネルギーを求めるには、荷重 F - 変位 δ の関係にする必要があるが、 F と σ および δ と ϵ は(9.1)，(9.2)式に示すような関係式で定義されるので、 $\sigma - \epsilon$ 関係と $F - \delta$ 関係に置き変える事ができる。

$$\begin{aligned} \text{単純梁曲げにおける } F - \sigma \\ \text{および } \delta - \epsilon \text{ の関係} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} F = \frac{4Z}{L} \sigma \quad \dots\dots\dots (9.1) \\ \delta = \frac{L^2}{6D} \epsilon \quad \dots\dots\dots (9.2) \end{array} \right.$$

Z : 断面係数 (m^3) , L : スパン長 (m) , D : 鋼管外径 (m)

$F - \delta$ 関係から破壊に致るまでの梁の変形エネルギーを求めるに当たり、これら変形エネルギーには図-9.6に示すように弾性変形と塑性変形があり、このうち弾性変形は衝撃終了後回復するので、くり返し衝撃において蓄積されない。したがって、各鋼管について全体曲げ変形による破壊塑性変形(残留変形)エネルギーを静的実験から求めてこれを破壊限界とする。

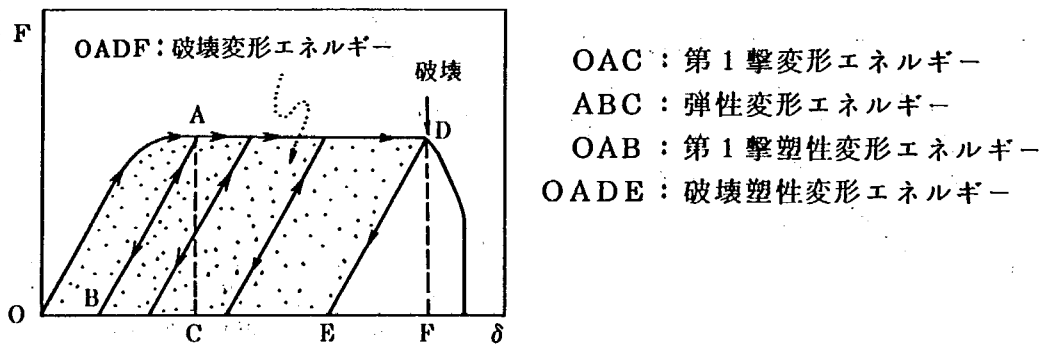


図-9.6 変形エネルギー

(2) 静的載荷実験から求められる曲げ破壊限界

5.2 節に示した実験結果の荷重 - 変位関係に、 $\epsilon = 1.54 \text{ 1/sec}$ のひずみ速度効果、(30%の降伏点増大)を考慮して、各鋼管単純梁の衝撃時の破壊変形エネルギーを求めると表-9.1のようになる。

表-9.1を梁の受ける力(F)と曲げ変位(δ)の関係で表すと図-9.7のとおりとなる。この中で $\phi 89.1 \text{ mm}$ 鋼管の破壊変形エネルギーを1とすると $\phi 60.5 \text{ mm}$ 、 $\phi 48.6 \text{ mm}$ それぞれ $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{1}{20}$ となる。

表-9.1 曲げ破壊変形エネルギー

鋼管径	降伏点荷重 (kgf)		③降伏点変位 (mm)	④塑性変位 (mm)	⑤破壊変形 エネルギー (kgf・m)
	①測定値	②ひずみ速度効果を 考慮した値			
φ 48.6	860	1118	11	3.9	4.4
φ 60.5	900	1170	12.8	10.8	12.6
φ 89.1	2540	3302	20.7	26.4	87.2

① 図-5.13による。

② ①×1.3

③ 図-5.8, 5.9, 5.10で①の荷
重の時の変位

④ 図-5.8, 5.9, 5.10の残留変
位とする。但し変化過程を直線的に
修正した値

⑤ =②×④

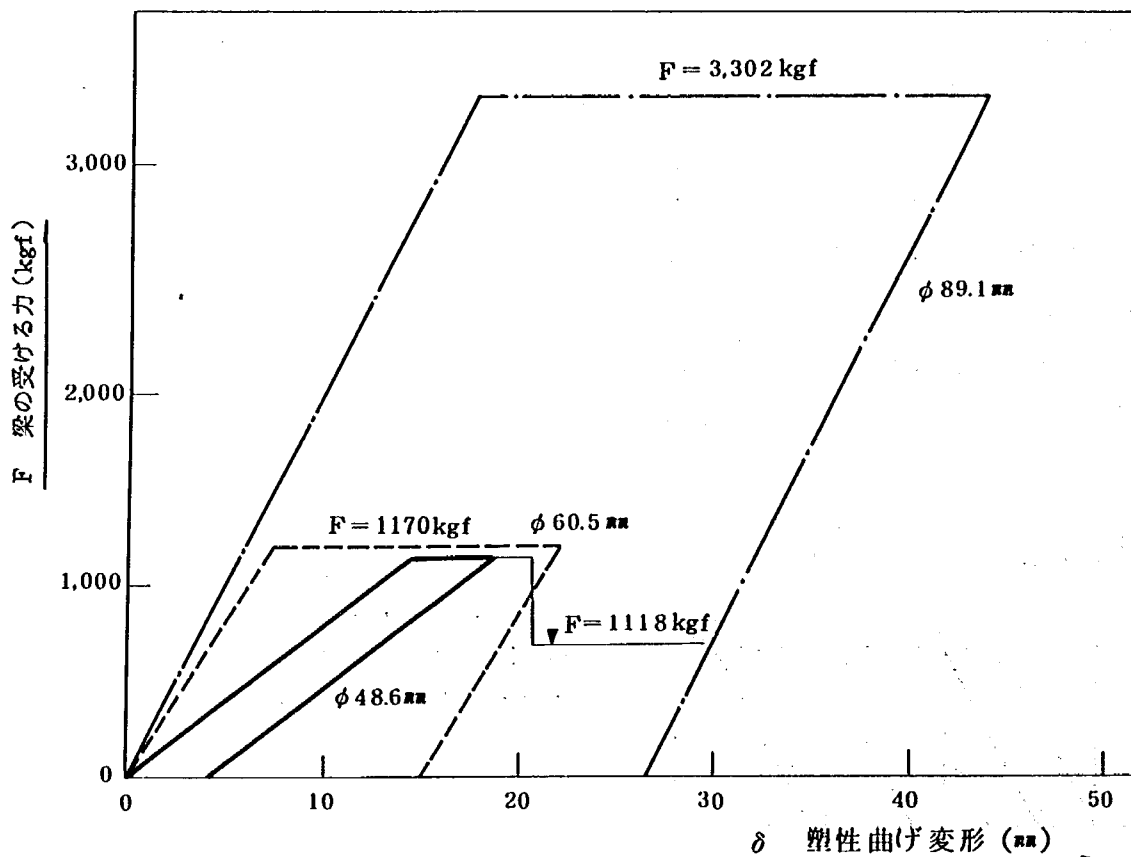


図-9.7 破壊変形エネルギー

(3) 衝撃曲げ破壊実験による破壊限界の適用

表-8.5の値を用いて、表-9.1の破壊変形エネルギーにはほぼ達する時の衝撃回数 ($W=3 \text{ kgf}$ $V=8.6 \text{ m/s}$) を表-9.2に示した。

表-9.2でφ 89.1 mm 鋼管では、今回の実験では外力が小さく塑性変形がほとんど発生しない状態であった。その他の鋼管では $W=3 \text{ kgf}$, $V=8.6 \text{ m/sec}$ の鋼球の衝突による破壊回数 N は下記のようになる。

ϕ 48.6 mm N = 2 回

ϕ 60.5 mm N = 16 回

表－9.2 破壊限界の検証

鋼 管	破 壊 限 界		衝 撃 曲 げ 破 壊 実 験		
	破 壊 変 形 エ ネ ル ギ ー (kgf・m)	残 留 変 位 (mm)	塑 性 曲 げ 変 形 エ ネ ル ギ ー (kgf・m)	残 留 曲 げ 変 位 (mm)	衝 撃 回 数
ϕ 48.6 mm	4.4	3.9	4.1	3.7	2
ϕ 60.5 "	12.6	10.8	11.7	10.0	16
ϕ 89.1 "	87.2	26.4	3.3	1.0	N>84

表－9.2の破壊限界は、静的実験で表れたような梁の中央載荷を行った場合に変位が急激に大きくなる点（油圧ポンプで一定荷重の保持が不可能となる点）を「破壊」と定義したものである。

9.4 衝撃曲げ耐力設計法

9.3節では、衝撃曲げ破壊実験により残留曲げ変位を測定して、これをもとに塑性曲げ変形エネルギーを求め、このエネルギーが破壊変形エネルギーに達するまでの衝撃の許容回数を求めた。

本節では7章に示した衝撃応答モデルを用いて、衝撃許容回数を求める方法および ϕ 48.6 mm、 ϕ 60.5 mm、 ϕ 89.1 mm鋼管に $w = 3$ kgfの鋼球が $v = 8.6$ m/sで衝突するときの衝撃許容回数を求める例を示す。

(1) 設計手順

設計の手順を図－9.8に示す。

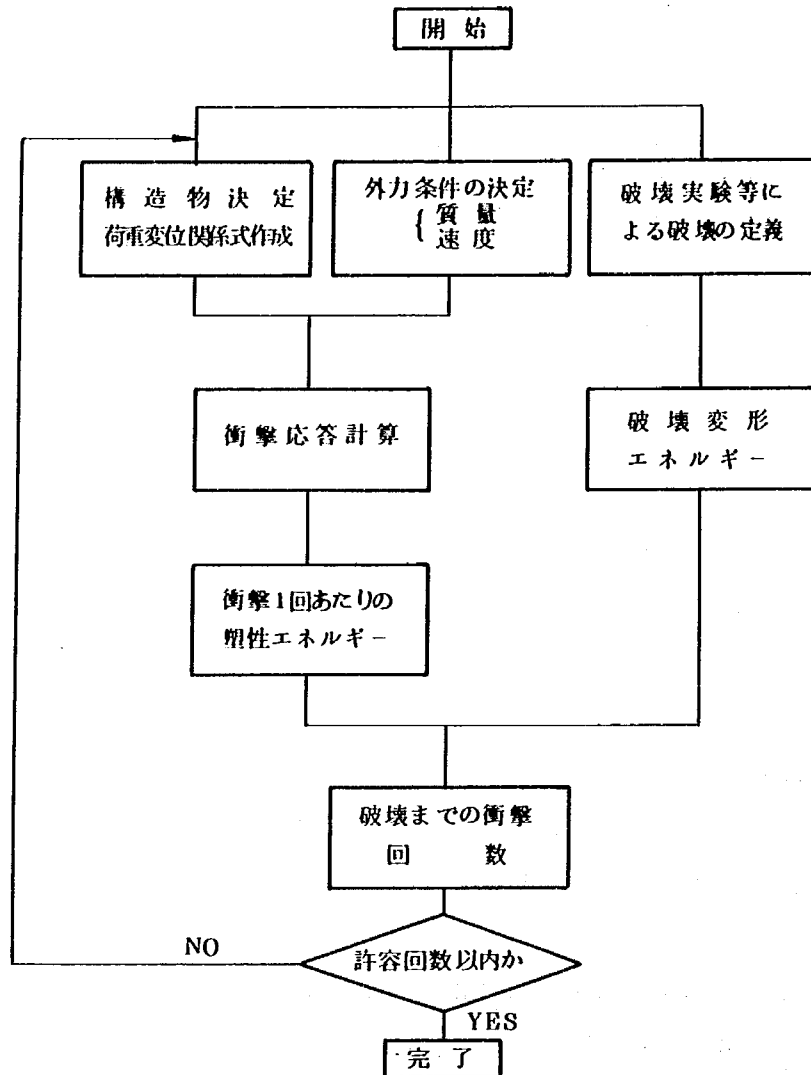


図-9.8 衝撃耐力設計手順

(2) 設計条件

① 構造物の荷重変位関係式

7章の $\phi 48.6 \text{ mm}$, $\phi 60.5 \text{ mm}$, $\phi 89.1 \text{ mm}$ のスパン長 $L = 1 \text{ m}$ の構造物とし, 荷重変位関係式は7章のとおりとする。

② 外力条件

衝突する鋼球の条件

$$W_2 = 3 \text{ kgf} \quad (M_2 = 0.306 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m})$$

$$V = 8.6 \text{ m/s}$$

③ 破壊の定義

表-9.1 に示す破壊変形エネルギーを破壊の限界とする。

(3) 応答計算

応答計算の条件は先に示した表－7.2(2)のCAL-16, 17, 18である。計算結果を表－9.3に示した。

表－9.3 衝撃曲げ破壊実験に対する計算値

項目 鋼管	鋼球が持っている エネルギー $\frac{1}{2} M_2 V^2$ ①	梁の最大変位 $Y_1 \max$ ② (m)	梁の降伏点応力 時の変位 Y_1' ③ (m)	梁の塑性曲げ 変位 $Y_1 \max - Y_1'$ ②－③＝④ (m)	梁の塑性曲げ 変形エネルギー $④ \times F^*$ (kgf・m)
φ 48.6mm	11.3	1.290×10^{-2}	8.649×10^{-3}	4.251×10^{-3}	4.7
φ 60.5mm	"	1.153×10^{-2}	5.838×10^{-3}	5.692×10^{-3}	6.7
φ 89.1mm	"	2.652×10^{-3}	2.988×10^{-3}	0	0

* Fは図－5.13の降伏点荷重にひずみ速度効果(30%増)を加えた値である。

表－9.3に示した衝撃1回当たりの塑性曲げ変形エネルギー、および表－9.1に示した破壊変形エネルギーより、破壊に達する衝撃回数を求めると表－9.4のとおりとなる。

表－9.4 破壊までの衝撃回数

鋼管径	破壊変形エネルギー ① (kgf・m)	衝撃1回あたりの塑性 曲げ変形エネルギー ② (kgf・m)	破壊までの衝撃回数 ①÷②
φ 48.6 mm	4.4	4.7	1
φ 60.5 mm	12.6	6.7	1.9
φ 89.1 mm	87.2	0	∞

表－9.4で、φ 89.1 mmでは塑性変形が残らず、 $W = 3 \text{ kgf}$, $V = 8.6 \text{ m/s}$ では何回衝撃を加えても破壊に致らないという結論は、表－9.2の実験結果と変わらないが、他は衝撃回数が異なる。特にちがいの大きいのはφ 60.5 mm鋼管であり、この原因は、静的単純梁曲げ実験で求めた弾性係数Eが小さく、降伏点応力 σ_y が小さかったこと等が考えられる。こうした静的载荷実験の再検討も含めて、衝撃曲げ耐力設計法のチェックが必要と考える。

10. A型スリット砂防ダムの耐力設計方法の提案

10.1 A型スリット砂防ダムの耐力設計に関する既存研究

A型スリット砂防ダムの耐力設計に関しては、新日鉄(株)において実施されており(以下新日鉄方式と略)、その設計概念は、9.4節に示したものとほぼ同じである。即ち、A型スリットの破壊変形エネルギーを破壊の限界として定め、1回の衝撃による塑性変形エネルギーを等価質点モデルにより求めて、前述の2つのエネルギーから破壊に至るまでの衝撃回数を求めている。

上記の設計概念は、今回の考え方と類似していると思われるが、設計手法の細部について問題点と考えられるところがあり、以下、この問題点について示す。

(1) エネルギー吸収率を一定としている点

新日鉄方式では、ある範囲内の外力条件で求めた衝撃エネルギーに対する残留変形エネルギーの比をエネルギー吸収率 α としてこれを Constantとして設計を提案している。このエネルギー吸収率は8.2節に示すように、衝撃エネルギーの大きさと構造物の変形特性の相対的關係により決まるものであり、外力条件等が異なるものには適用できず一般性に欠ける。

(2) 局部変形を考慮していない点

7章に示したように、全体の梁の剛性に対して局部変形の剛性が小さくなると、局部変形の影響は大きくなり(梁の曲げ変位を小さくする効果)、設計上は局部変形させる構造とし、エネルギーを吸収するようにした方がよい。

(3) ひずみ速度効果が考慮されていない。

ひずみ速度効果は、第7章で示したように、衝撃エネルギーが大きくなると、相当大きい影響をもつようになると考えられるので、設計上取り入れた方がより経済的な設計となる。

10.2 耐力設計手法の提案

10.1節のような問題点は残されているが、A型スリット砂防ダムは下記の手順で設計することができる。

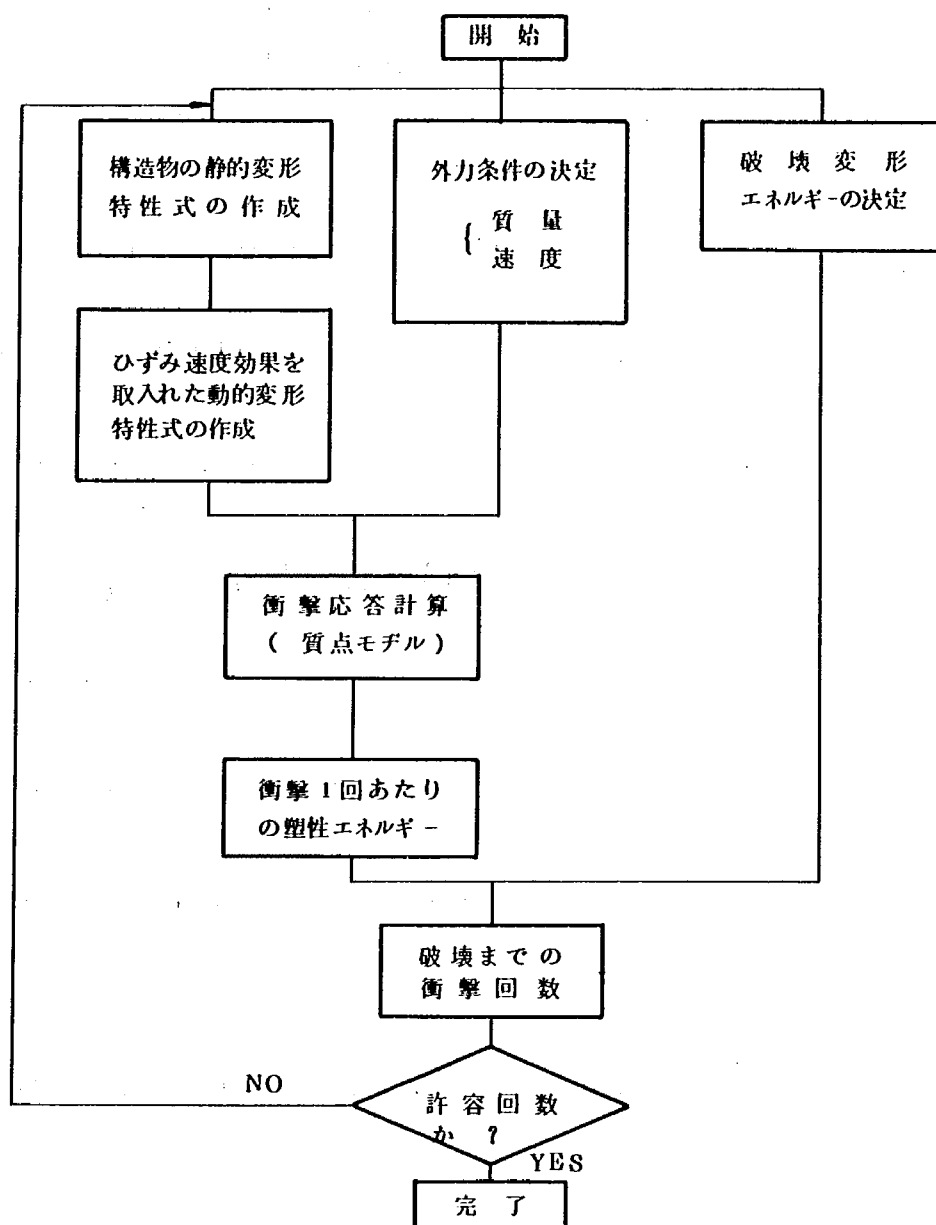


図- 10.1 設計手順

10.3 具体的な設計式の提案

新日鉄方式で改良を要するのは、等価質点モデルに局部変形の質点とバネを付加することと、応答モデル解析で得られる塑性変形から、衝撃に対する構造物の破壊変形エネルギーを求めることの2点である。

(1) 質点運動方程式

質点の運動方程式としては、新日鉄方式の構造物の質点数 N に鋼球と局部変形の質点・バネを1ヶ追加した $(N+1)$ 個の質点、バネからなる運動方程式 (10.1) 式を作る。

$$[M] \{\ddot{\phi}\} + [D] \{\dot{\phi}\} + [K] \{\phi\} = \{f\} \quad \cdots \cdots \cdots (10.1)$$

$[M]$: 質量マトリックス $\{\ddot{\phi}\}$: 加速度ベクトル $\{f\}$: 外力ベクトル
 $[D]$: 減衰係数マトリックス $\{\dot{\phi}\}$: 速度ベクトル
 $[K]$: バネ定数マトリックス $\{\phi\}$: 変位ベクトル

(10.1) 式の解法はウィルソン θ 法によるものとし, (10.2) ~ (10.5) 式によって行う。

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{6}{(\theta \Delta t)^2} [M] + \frac{3}{\theta \cdot \Delta t} [D] + [K] \right) \{\phi\}_{t+\theta \Delta t} = \left(\frac{6}{(\theta \Delta t)^2} [M] + \frac{3}{\theta \Delta t} [D] \right) \{\phi\}_t \\
 & + \left(\frac{6}{\theta \cdot \Delta t} [M] + 2 [D] \right) \{\dot{\phi}\}_t + \left(2 [M] + \frac{\theta \Delta t}{2} [D] \right) \{\ddot{\phi}\}_t + \{f\}_t + \theta \left(\{f\}_{t+\Delta t} \right. \\
 & \left. - \{f\}_t \right) \dots\dots\dots (10.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \{\ddot{\phi}\}_{t+\Delta t} &= \frac{6}{\theta^2 \Delta t^2} \left(\{\phi\}_{t+\theta \Delta t} - \{\phi\}_t \right) - \frac{6}{\theta^2 \Delta t} \{\dot{\phi}\}_t + \left(1 - \frac{3}{\theta} \right) \{\ddot{\phi}\}_t \\
 &\dots\dots\dots (10.3)
 \end{aligned}$$

$$\{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\phi}\}_t + \frac{\Delta t}{2} \left(\{\ddot{\phi}\}_{t+\Delta t} + \{\ddot{\phi}\}_t \right) \dots\dots\dots (10.4)$$

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} = \{\phi\}_t + \Delta t \{\dot{\phi}\}_t + \frac{\Delta t^2}{6} \left(\{\ddot{\phi}\}_{t+\Delta t} + 2 \{\ddot{\phi}\}_t \right) \dots\dots\dots (10.5)$$

(2) 局所変形のパネ定数

追加する局所変形に関する諸定数は以下のように定める。まず, バネ定数は (5.4) 式から (10.6) 式となる。

$$K = \frac{1}{4} \alpha \cdot \sigma_y' \cdot t_p^2 \cdot D^{-\frac{1}{2}} \cdot \delta_e^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (10.6)$$

減衰係数 D は模型実験により, 実験的に求めることとなる。

11. ま と め

単純梁鋼管に対する鋼球の衝撃に関する実験的研究を実施した結果、得られた結論と残された今後の研究課題について以下に整理する。

- (1) スパン 1 m の 3 種の単純梁鋼管 (ϕ 48.6 mm, ϕ 60.5 mm, ϕ 89.1 mm, 厚さはいずれも 3.2 mm) に鋼球を衝突させて、その衝撃応答を測定した結果は以下の通りである。
 - ① 測定された各点のひずみ、中央点の変位は (5.3) および (6.3) 式で示すような単純梁の曲げ変形特性を示す。
 - ② ひずみ、変位の衝撃応答波形の第 1 波は過渡振動のため第 2 波以降の振動周期と比べて若干長い。第 2 波以降は理論値より若干長いがほぼ同じ波長となり自由振動を繰り返す。
 - ③ 衝撃応答波形の減衰定数は、平均的に $h \approx 0.025$ (ϕ 48.6 mm, ϕ 60.5 mm), $h = 0.13$ (ϕ 89.1 mm) となりコンクリート片持梁³⁾と比較して非常に小さい。
 - ④ 衝突速度が大きくなるに従い、発生する最大ひずみ、変位はほぼ直線的に大きくなる。
 - ⑤ 鋼管の表面に $t_r = 2$ mm および $t_r = 5$ mm の硬質ゴムを緩衝材として取り付けたケースは、実験の数が少なくて明確ではないが、その緩衝効果は衝突速度が大きいほど大きくなる。衝突速度 $V = 8$ m/s での緩衝効果は、緩衝材の厚さに関係なく 20 ~ 50 % 程度である。
 - ⑥ 鋼球の大きさが変わっても、衝突時の鋼球のもつ運動エネルギー (衝突エネルギー) が等しければ、鋼管に発生するひずみおよび変位は同じとなるようである。
- (2) 単純梁鋼管に鋼球が衝突する時の梁の衝撃応答は、局部変形、慣性力、減衰力、鋼のひずみ速度効果を取り入れた 2 質点弾完全塑性振動モデル計算により、比較的良好に再現できる。

上記振動モデル計算により、鋼管梁の最大曲げ変形に与える各要素の影響度について検討した結果、本実験の範囲の外力条件では、局部変形、減衰、ひずみ速度効果の順で大きいことがわかった。しかし、外力がさらに大きくなると、ひずみ速度効果の影響度が大きくなることが予想される。
- (3) 鋼管の表面に緩衝材を取りつけた場合の衝撃応答を(2)と同じ 2 質点弾完全塑性振動モデルにより計算したところ、実験値と計算値が合うためには、局部変形による減衰定数が $h = 0.5$ と大きくなる。
- (4) スパン 1 m の 3 種の単純梁鋼管に重さ 3 kgf の鋼球を高さ 3.8 m より落下衝突させ、梁が曲げ破壊に至るまで繰り返し荷重を加えたところ、鋼管の曲げ剛性が大きくなるに従い梁の曲げ変形に対する局部変形の割合は次第に大きくなる。梁の曲げ変形は、曲げ剛性が大きくなると小さくなる。

さらに梁の塑性曲げ変形エネルギーとして梁に蓄積される変形エネルギーの衝突エネルギーに対する比は、鋼管梁の強さが強くなるほど小さくなる。本実験の範囲では ϕ 48.6 mm 鋼管で 14 %, ϕ 60.5 mm 鋼管で 5 %, ϕ 89.1 mm 鋼管では 0 % であった。
- (5) 梁の衝撃曲げ破壊の限界は、動的な荷重-変位曲線から梁が破壊に至るまでの塑性曲げ変形

エネルギーとして求められる。この動的な荷重－変位曲線は既存の研究^{9), 10)}から、静的なものにひずみ速度効果（降伏点荷重の上昇）を考慮して求められる。

- (6) 鋼管梁の衝撃曲げ耐力設計手法として、図－9.8の方法が提案されるが、今回の実験に適用したところ、概略の傾向としては合うが、一部実験結果と設計結果が大きく異なるケースが生じた。この原因の1つとして実験の信頼性（今回は実験数が少なかった）があげられる。

12. おわりに

今回の実験的な研究は、単純梁の衝撃曲げ応答解析、衝撃曲げ破壊限界の設定を実験的に確かめるとともに、衝撃曲げ耐力設計手法を提案したものである。

実用的な鋼製砂防施設の衝撃耐力設計手法を確立するためには、今後衝撃せん断耐力設計手法および衝撃軸力設計手法について研究し、これらと今回の実験的研究を合わせ、総合的な組合せ応力状態における衝撃耐力設計手法を確立しなければならない。

但し、鋼管の衝撃曲げ耐力設計に関しても、下記の点の実験が必ずしも十分でなく、追加実験により、手法の再チェックが望まれる。

- ① 緩衝材を取付けたケースの衝撃応答実験
- ② 鋼球の径を変化させた場合の衝撃応答実験
- ③ 衝撃曲げ破壊実験

参 考 文 献

- 1) 鋼製スリットダムの崩壊事故までの経緯と極限耐力について、昭和57年3月、新日本製鉄株式会社建材部
- 2) 鋼製スリットダムの極限耐力に関する検討、昭和56年7月、新日本製鉄株式会社
- 3) 土石流衝撃力に対する緩衝材に関する実験および解析報告書、土木研究所資料第2169号、建設省土木研究所、昭和60年3月
- 4) Charles P. ELLINAS & Alastair C. WALKER ; Damage on offshore Tubular Bracing Members ,
- 5) 水山高久, 下東久巳, 下田義文; 緩衝材を付けたコンクリート構造物に対する土石流衝撃力に関する研究, 新砂防 vol 38 No 3 , 昭 60. 9, p 3 ~ p 11.
- 6) 構造力学公式集, 土木学会, S. 49. 12, p 147.
- 7) 小池晋; 実用構造力学, 理工図書, p 181.
- 8) 大森正信, 吉永芳豊, 武井英雄; 軟鋼の引張性質におよぼす変形速度の影響, 日本金属学会誌, 29 巻, 1965 , p 1087 ~ p 1093.
- 9) 太田俊昭; 土木学会編 新体系土木工学 8. 構造物の非弾性解析, 技報堂出版, 1980. 1. 15 , p 21.
- 10) Werner Goldsmith ; Impact (The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids , Edward Arnold Publishers LTD. 1960 , p 330 ~ p 337.
- 11) 金井清・田治見宏・大沢胖・小林啓美; 建築構造学大系・地震工学 彰国社, 1945 年 12 月, p 145.

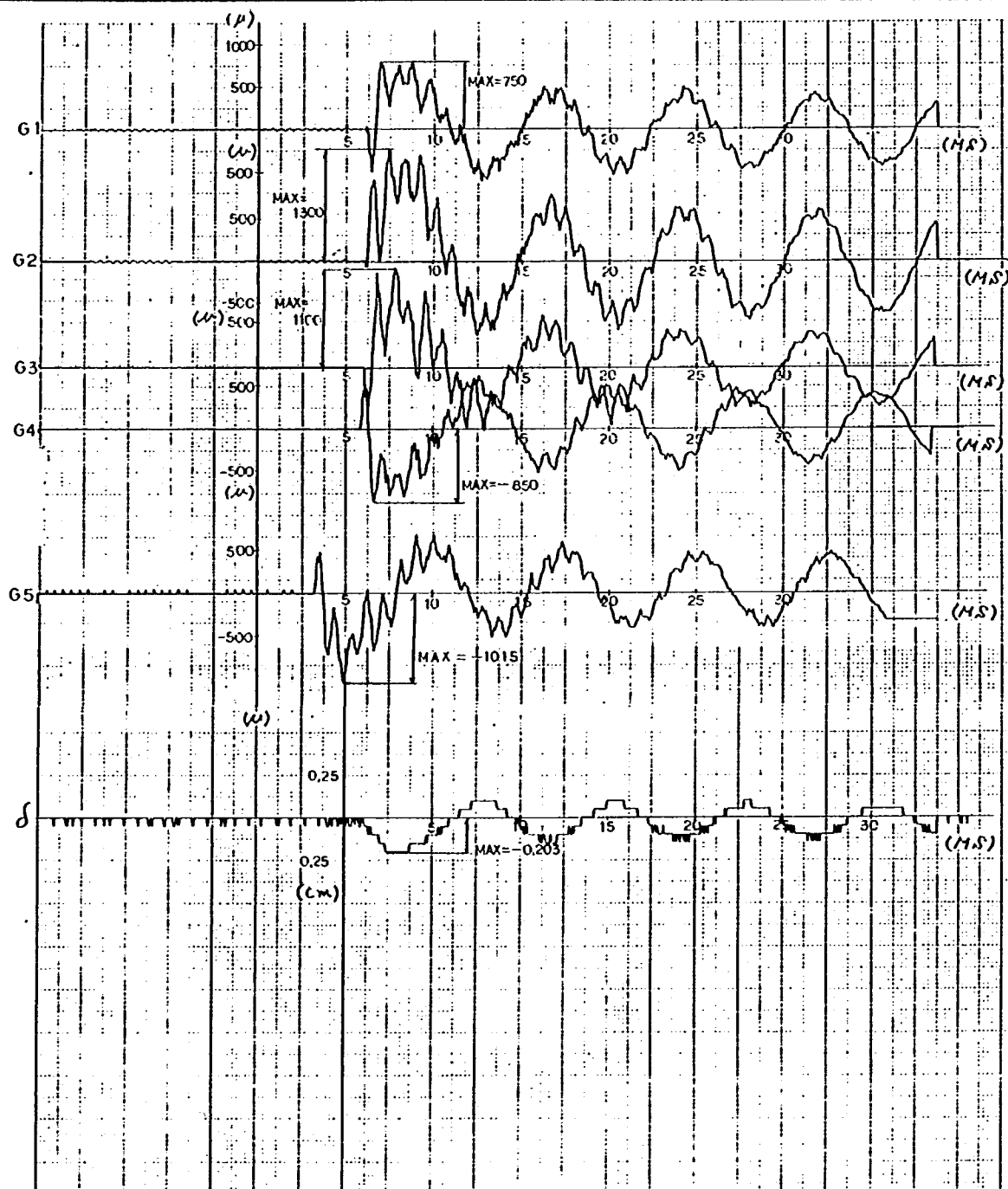
資 料 集

時間—ひずみ，時間—変位曲線

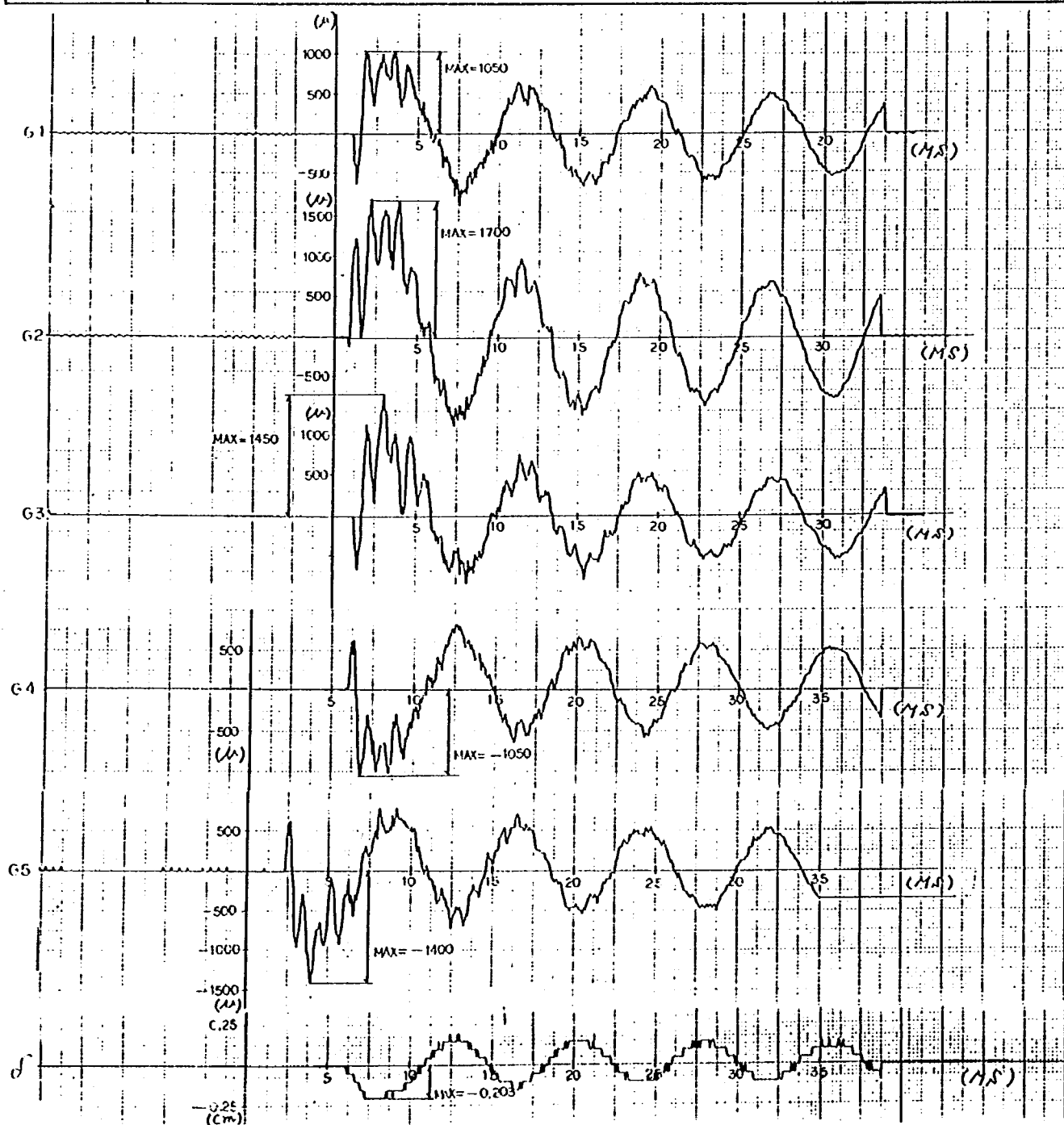
12

12

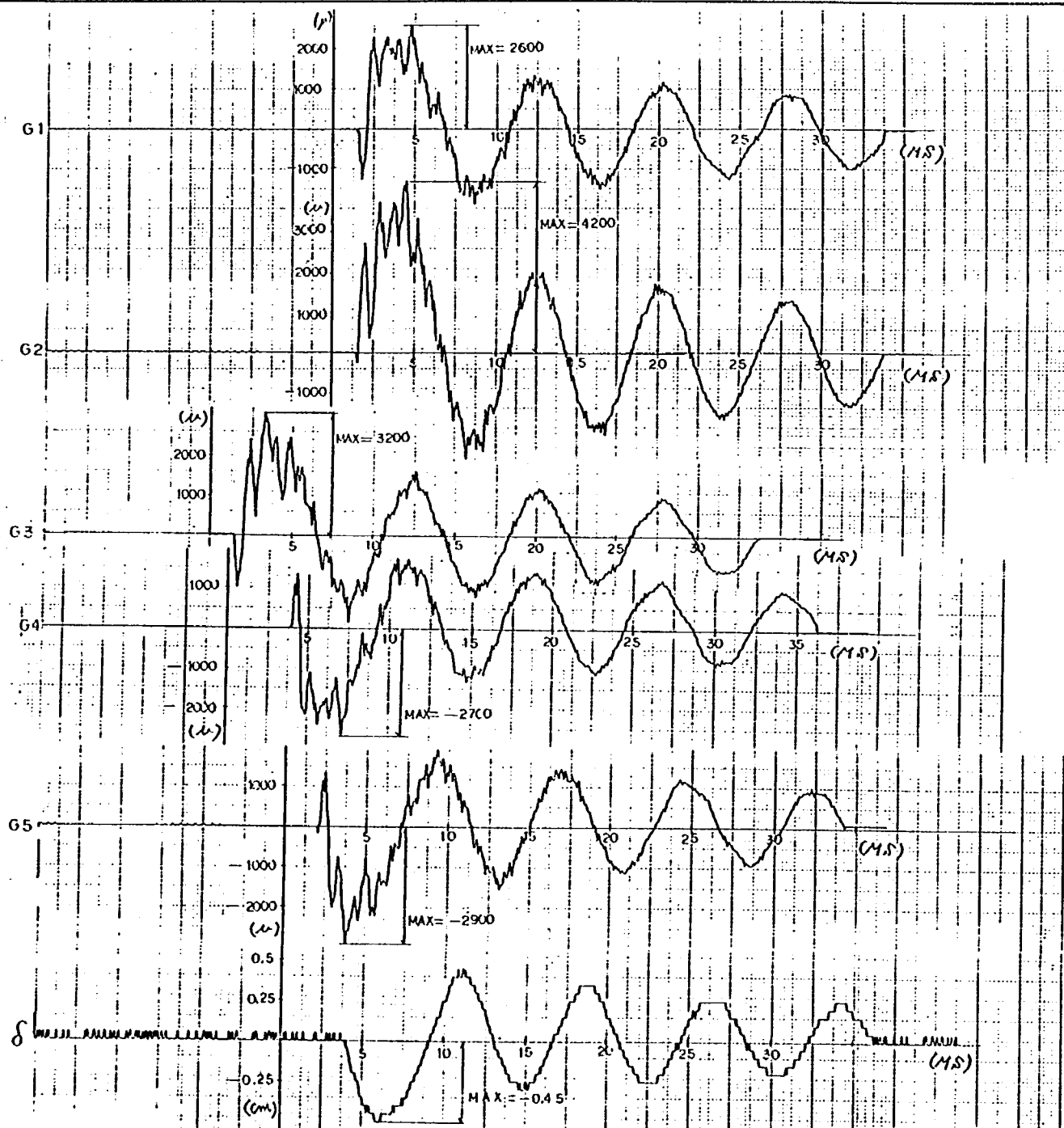
実 験 No	CASE - 1		実 験 日 時		昭和 60 年 8 月 10 日			
球 の 落 高	0.20 m		球速(ビデオカメラによる)		2 m/sec			
DM7100の ディレーワード	-1400 m		緩 衝 材		な し			
ゲ ー ジ No	CDV 230 の 校 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最 大 ひ ず み
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5VFS	0.2cm/s	—	50 mv/cm	1.5cm 750 μ E
G 2	"	"	"	"	"		"	2.6cm 1.300 μ E
G 3	"	"	"	"	"		"	2.2cm 1.100 μ E
G 4	"	"	"	"	"		"	-1.7cm -850 μ E
G 5	"	"	"	"	"		"	-2.1cm -1.050 μ E
変 位	1 V 1.27cm	"	"	"	"		200 mv/cm	-0.8cm -0.203 cm
破 壊 状 況								



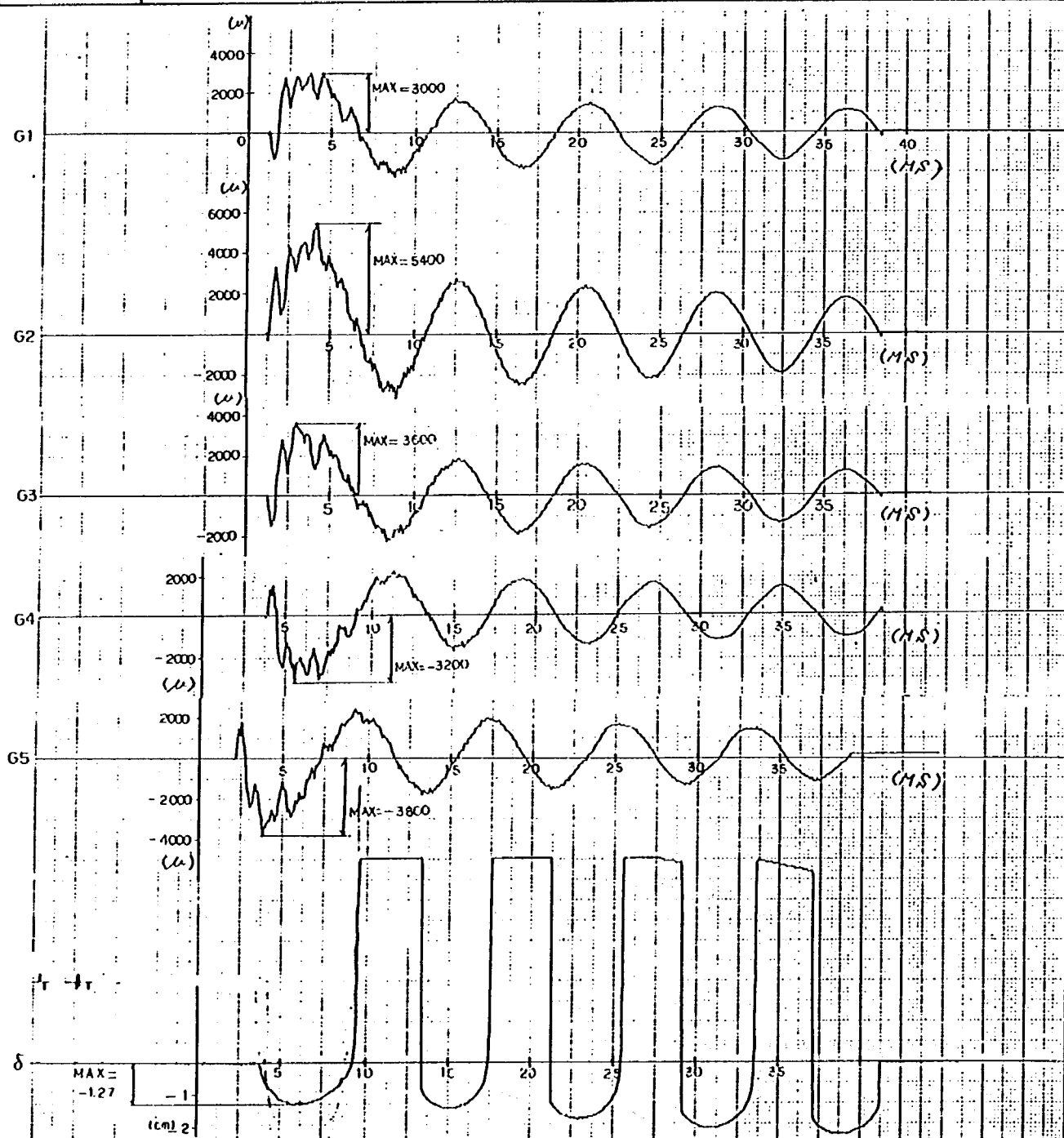
実 験 №	CASE - 2		実 験 日 時	昭和 60 年 8 月 10 日				
球 の 落 高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100 の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ №	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	2.0cm 1050 μ ε
G 2	"	"	"	"	"		"	3.4cm 1700 μ ε
G 3	"	"	"	"	"		"	2.9cm 1450 μ ε
G 4	"	"	"	"	"		"	-2.1cm - 1050 μ ε
G 5	"	"	"	"	"		"	-2.8cm - 1400 μ ε
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	"	"	—	200 mv/cm	-0.8cm -0.203 cm
破 壊 状 況								



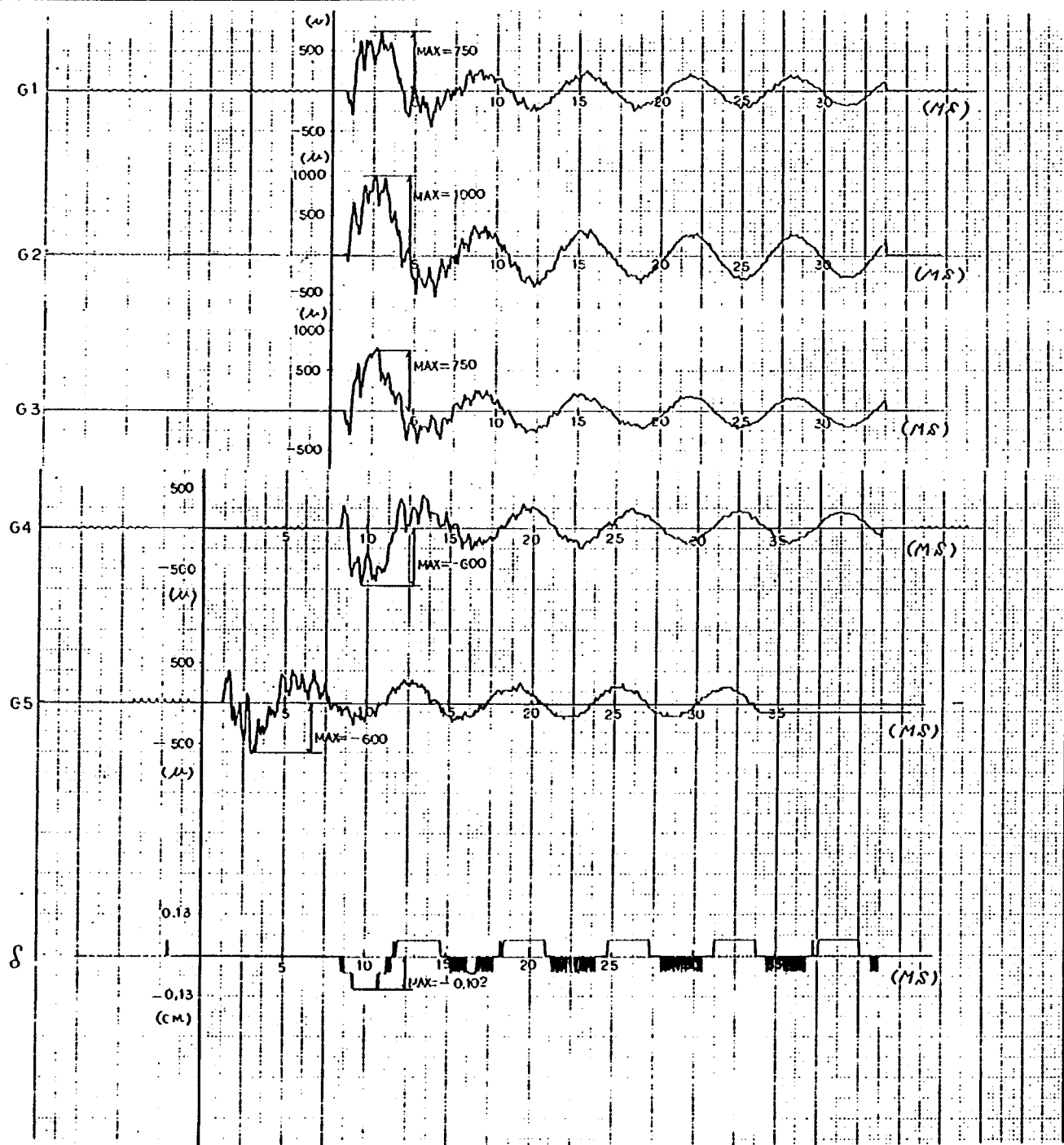
実験 No	CASE-3		実験日時	昭和60年8月10日				
球の落高	1.84 m		球速(ビデオカメラによる)	6 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材					
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	1000 mv/cm	2.6 cm 2600 μ E
G2	"	"	"	"	"		"	4.2 cm 4200 μ E
G3	"	"	"	"	"		"	3.2 cm 3200 μ E
G4	"	"	"	"	"		"	⊖2.7 cm -2700 μ E
G5	"	"	"	"	"		"	⊖2.9 cm -2900 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	"	"		200 mv/cm	⊖2.0 cm -0.45 cm
破壊状況	8.5 × 5 mm のへこみ 曲り区間 25 mm							



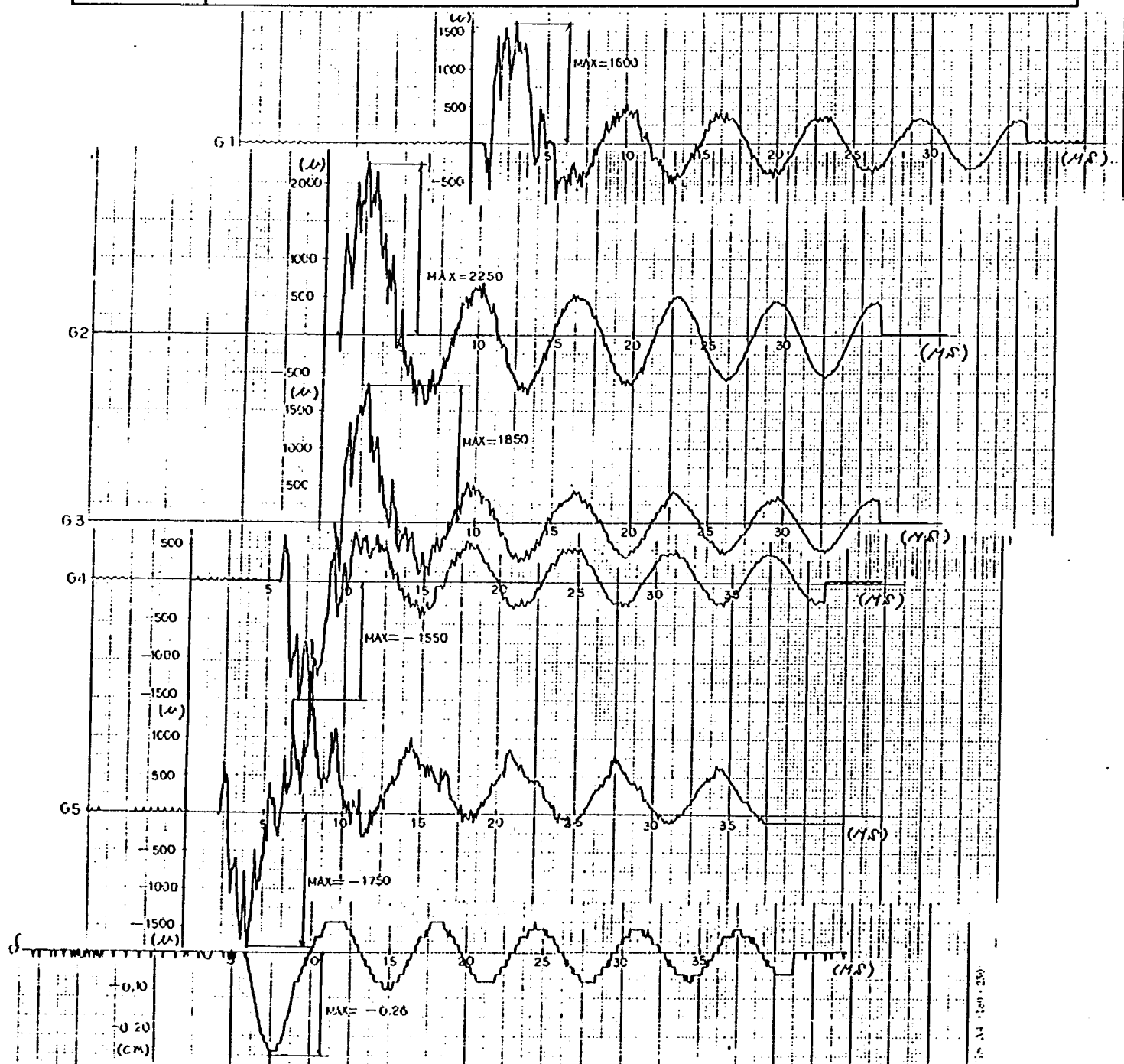
実験 No	CASE - 4		実験 日 時	昭和 60 年 8 月 10 日				
球 の 落 高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100 の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100 の Crock Rate	DM7100 の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	-	1000 mv/cm	1.4 cm 3000 μ E
G 2	"	"	"	"	"	"	"	2.7 cm 5400 μ E
G 3	"	"	"	"	"	"	"	1.7 cm 3600 μ E
G 4	"	"	"	"	"	"	"	$\ominus$ 1.5 cm -3200 μ E
G 5	"	"	"	"	"	"	"	$\ominus$ 1.7 cm -3800 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	"	"	"	1000 mv/cm	$\ominus$ 1.0 cm -1.27 cm
破壊 状 況	1.2 cm $\times$ 0.6 cm のめりこみ 曲り範囲 45 mm							



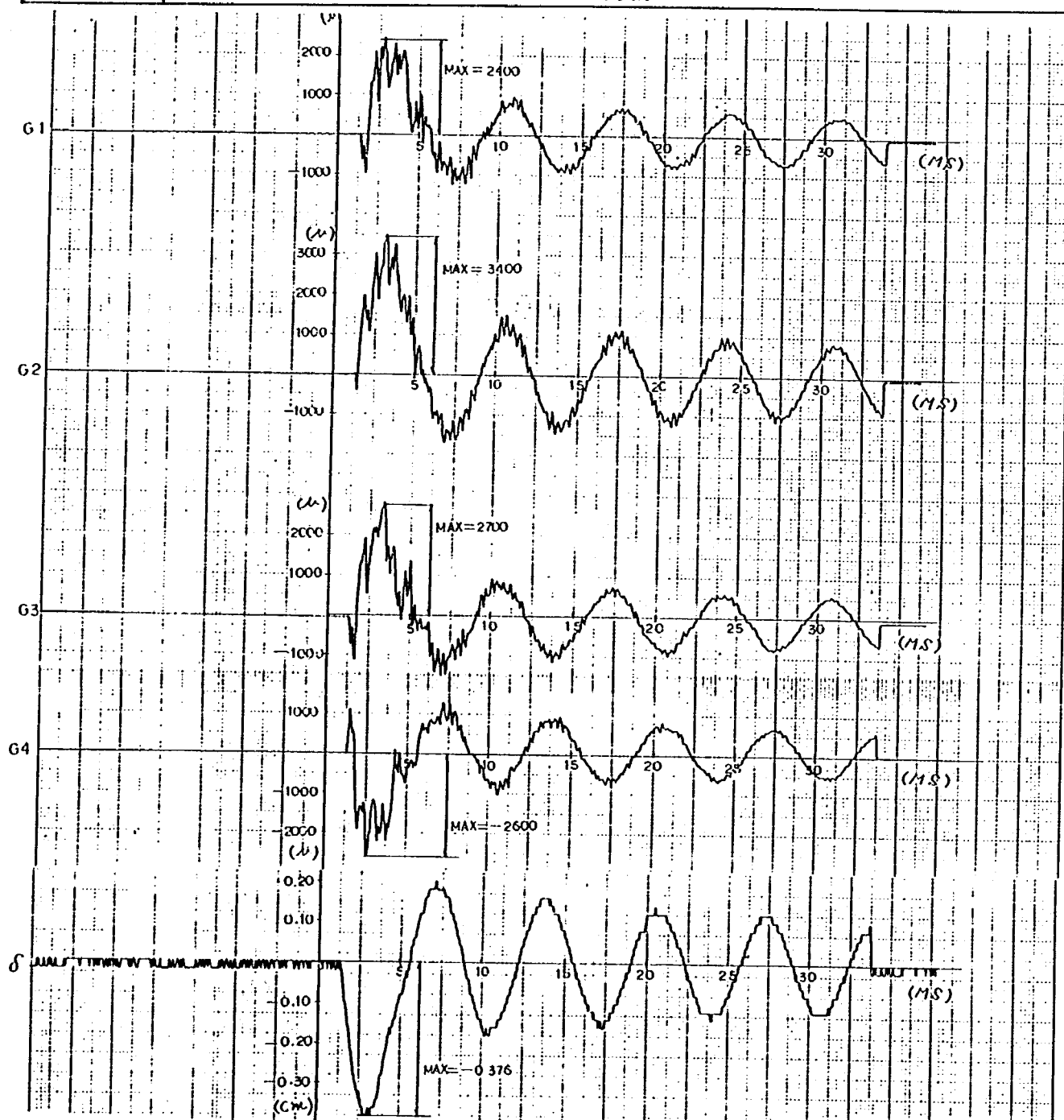
実験 No	CASE-5		実験日時	昭和60年8月10日				
球の落高	0.20 m		球速(ビデオカメラによる)	2 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材					
ゲージ No	CDV 230 の校正值	CDV 230の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	1.4 cm 750 μ E
G2	"	"	"	"	"	"	"	1.9 cm 1000 μ E
G3	"	"	"	"	"	"	"	1.5 cm 750 μ E
G4	"	"	"	"	"	"	"	⊖1.3 cm -600 μ E
G5	"	"	"	"	"	"	"	⊖1.2 cm -600 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	"	"	"	100 mv/cm	⊖0.8 cm -0.102 cm
破壊状況								



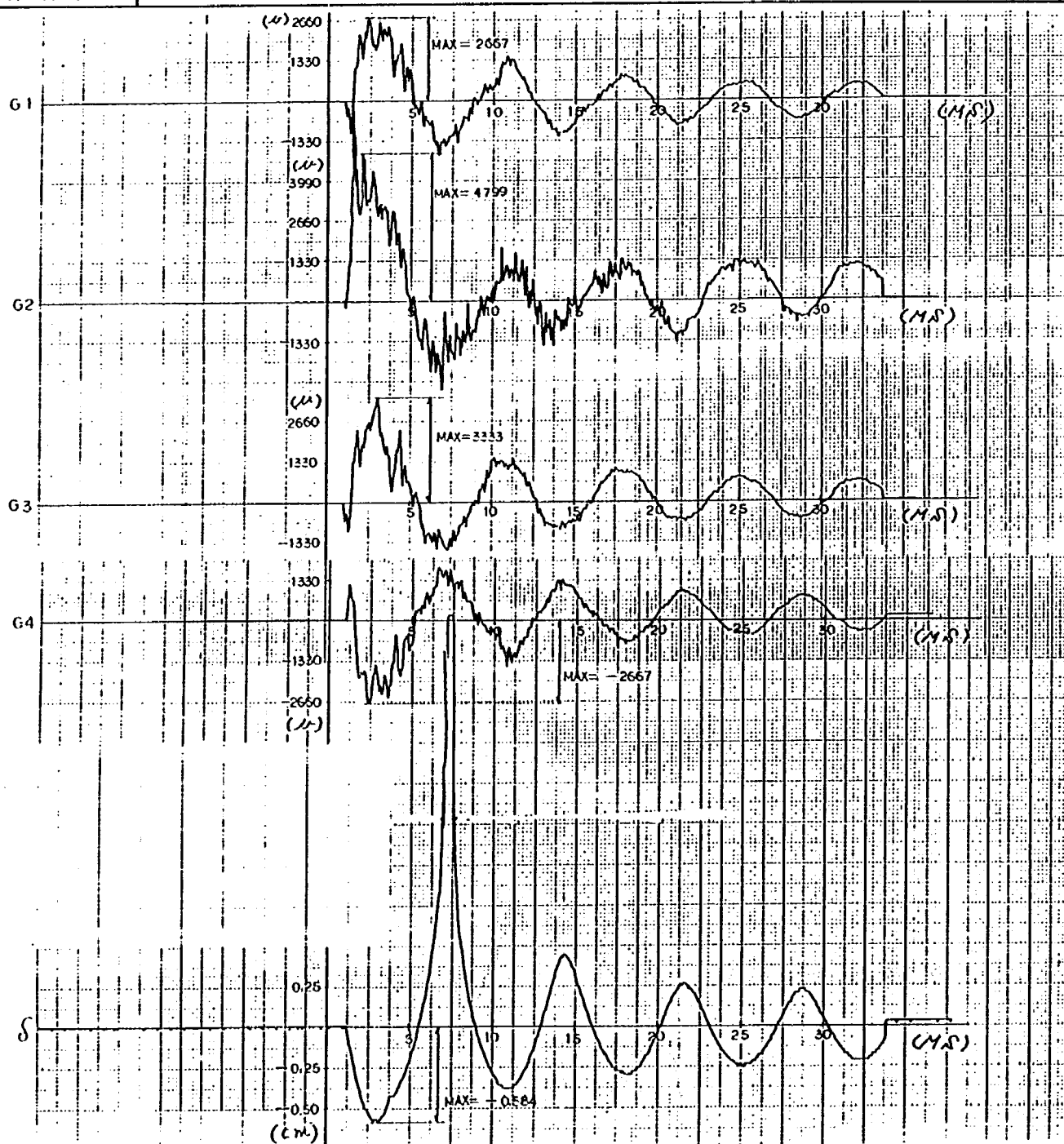
実験 No	CASE - 6		実験 日 時	昭和 60 年 8 月 10 日				
球 の 落 高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100 の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ No	CDV 230 の 校 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100 の Crock Rate	DM7100 の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	3.2 cm 1600 μ E
G 2	"	"	"	"	"	—	"	4.5 cm 2250 μ E
G 3	"	"	"	"	"	—	"	3.5 cm 1850 μ E
G 4	"	"	"	"	"	—	"	⊖3.1 cm -1550 μ E
G 5	"	"	"	"	"	—	"	⊖3.5 cm -1750 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	—	200 mv/cm	⊖2.6 cm -1.26 cm
破壊 状 況								



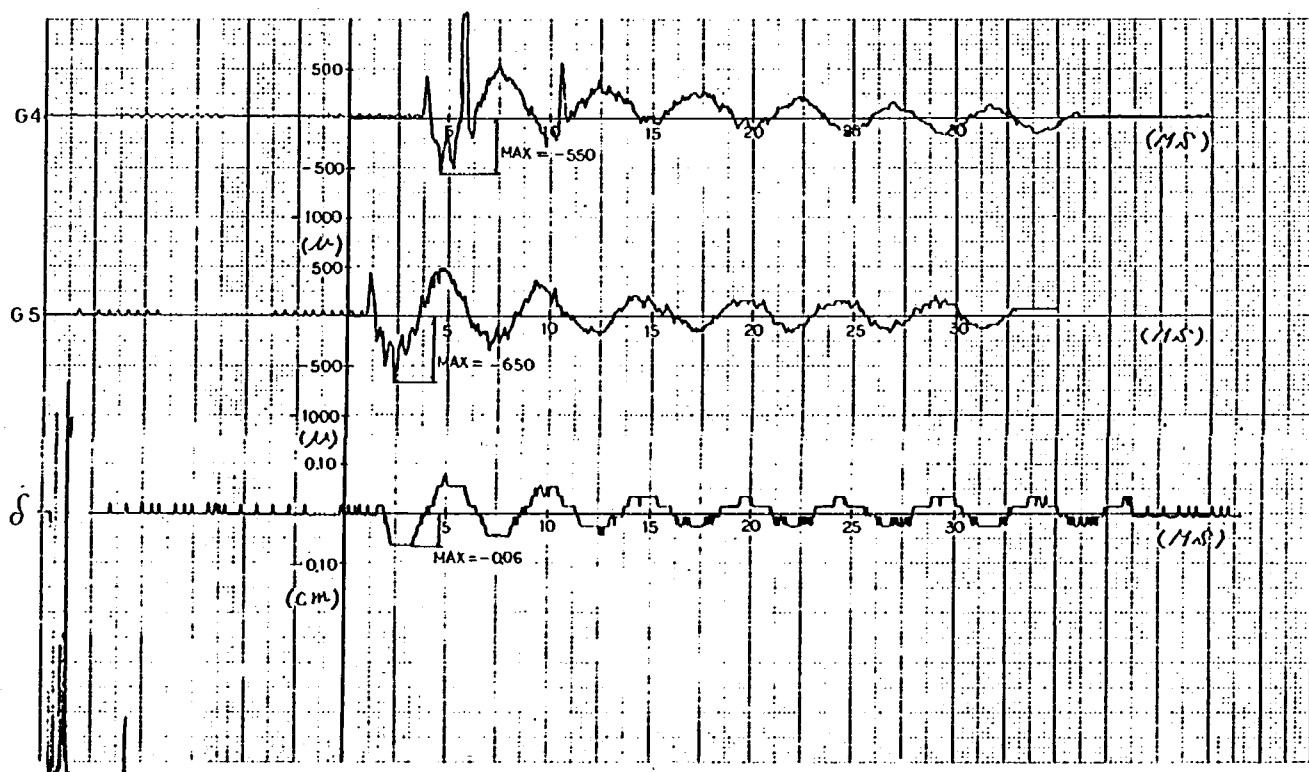
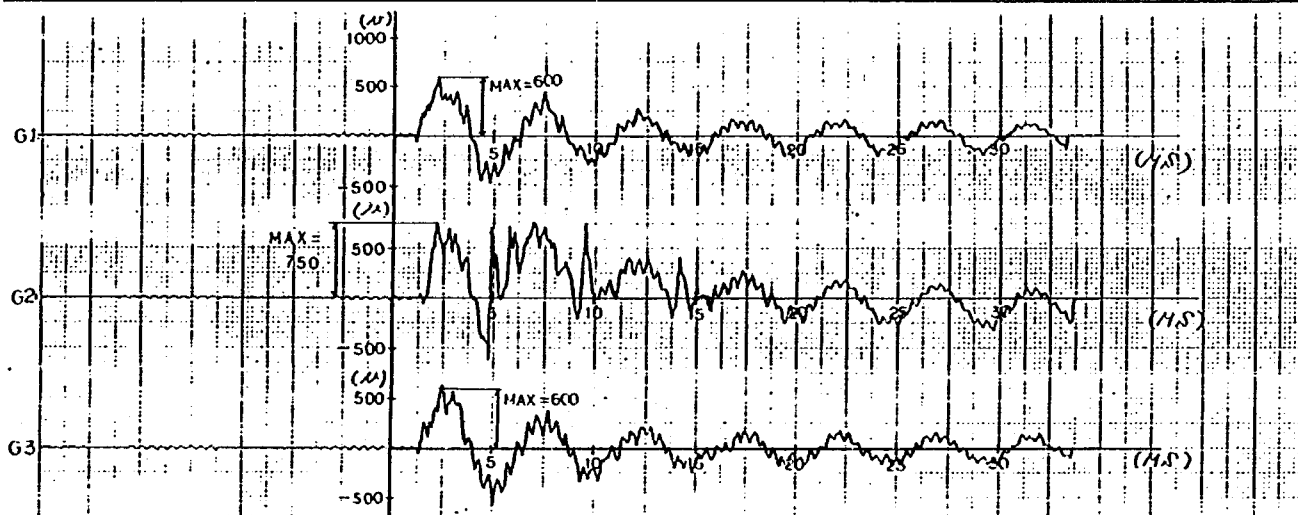
実験 No	CASE-7		実験日時	昭和60年8月10日				
球の落高	1.84 m		球速(ビデオカメラによる)	6 m/sec				
DM7100のディレーワード	-1400		緩衝材					
ゲージ No	CDV 230の校正値	CDV 230のCut off Freq	DM7100のCrock Rate	DM7100のVFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	1000 mv/cm	2.4 cm 2400 μ E
G2	"	"	"	"	"	—	"	3.4 cm 3400 μ E
G3	"	"	"	"	"	—	"	2.7 cm 2700 μ E
G4	"	"	"	"	"	—	"	⊖2.6 cm -2600 μ E
G5	"	"	"	"	"	—	"	不能 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	—	200 mv/cm	⊖3.7 cm -0.376 cm
破壊状況	11 mm × 6 mm のめりこみ 45 mm の範囲が曲り変形							



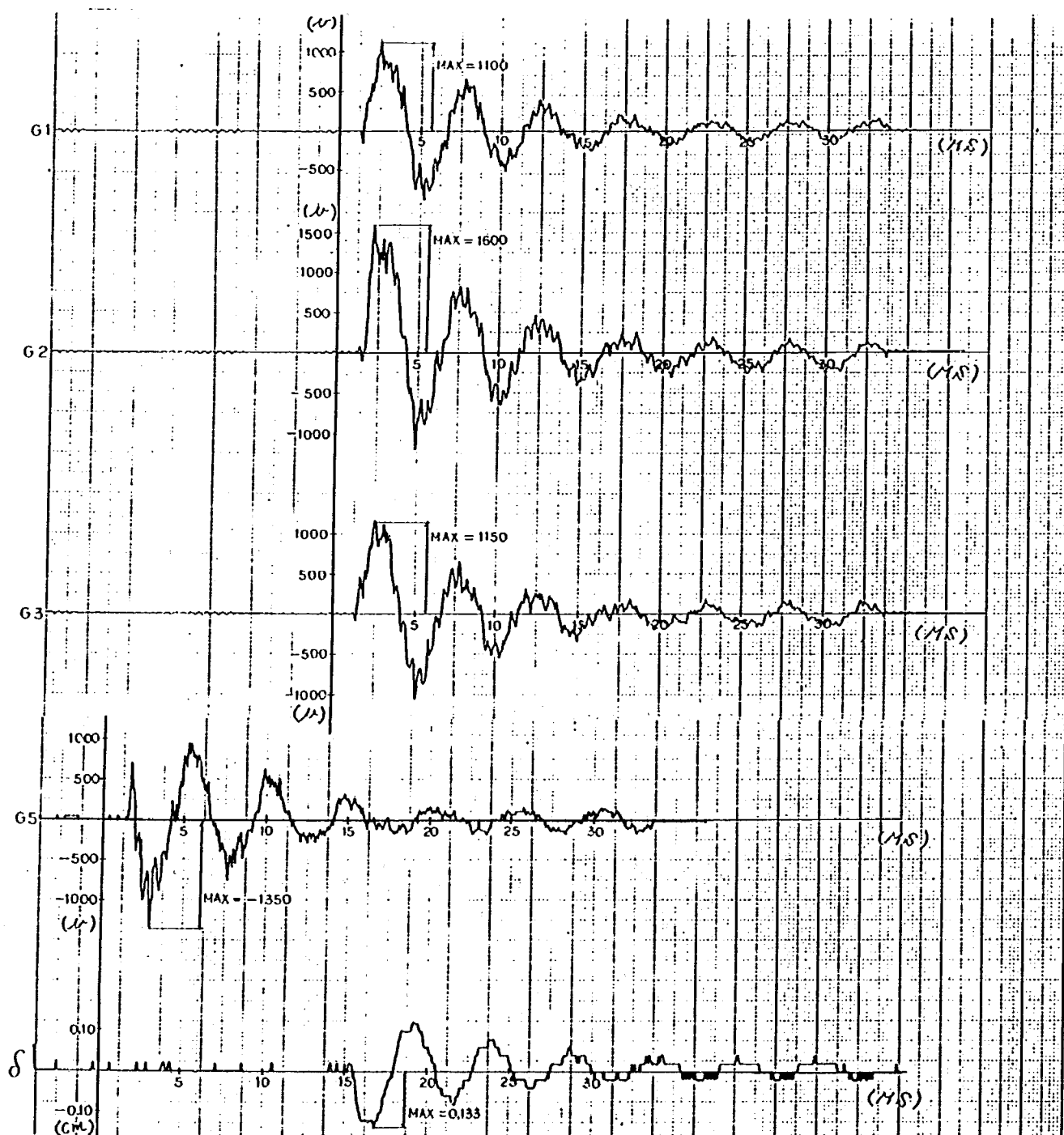
実 験 №	CASE - 8		実 験 日 時	昭和 60 年 8 月 10 日				
球 の 落 高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100 の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ №	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	1.5V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5VFS	0.2cm/s	—	1000 mv/cm	2.0 cm 2667 μ ε
G 2	"	"	"	"	"	—	"	3.6 cm 4799 μ ε
G 3	"	"	"	"	"	—	"	2.5 cm 3333 μ ε
G 4	"	"	"	"	"	—	"	2.0 cm 2667 μ ε
G 5	"	"	"	"	"	—	"	不能 μ ε
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2VFS	"	—	500 mv/cm	2.5 cm 0.584 cm
破 壊 状 況								



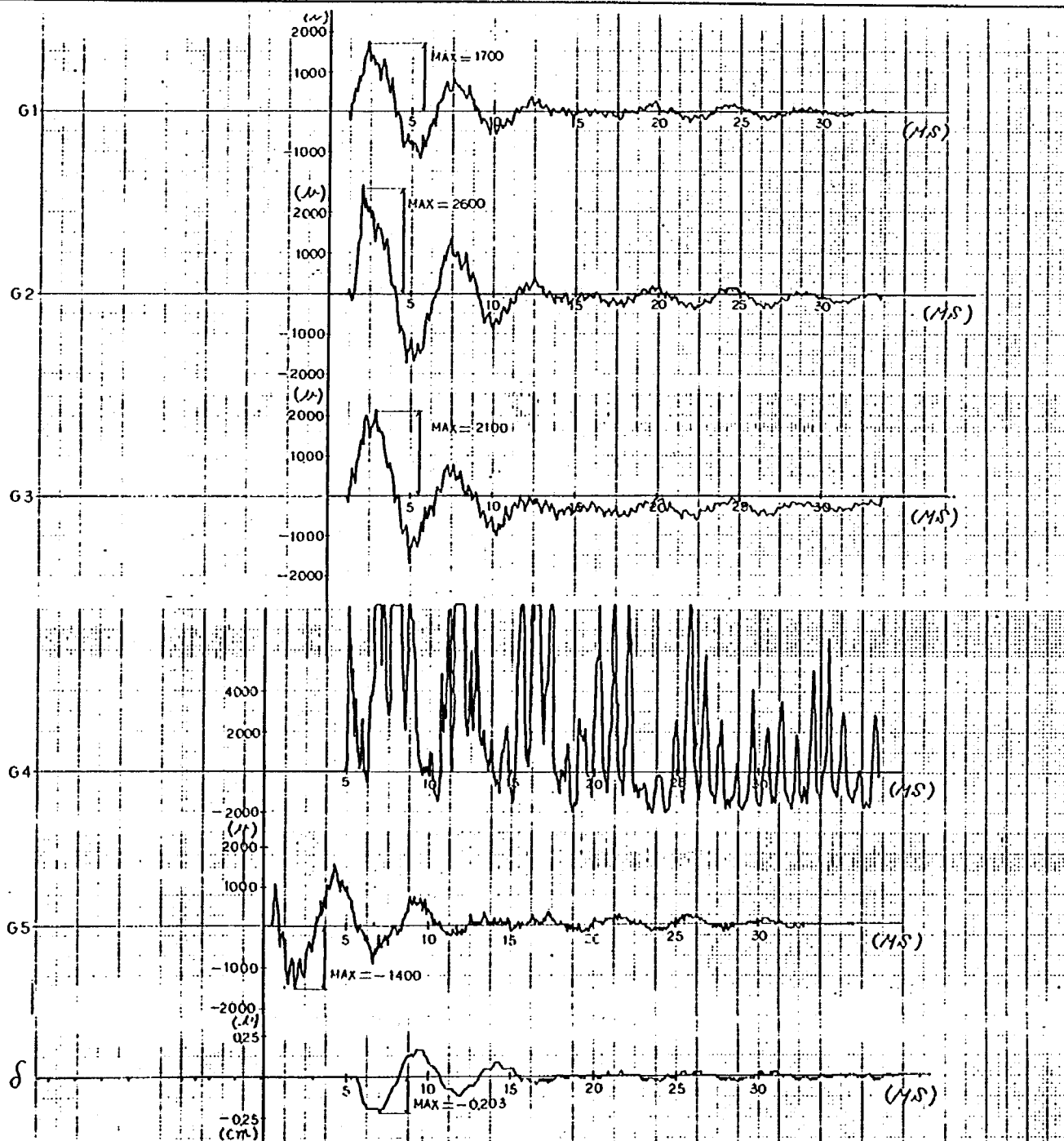
実 験 №	CASE - 9		実 験 日 時		昭和 60 年 8 月 11 日			
球 の 落 高	0.20 m		球速(ビデオカメラによる)		2 m/sec			
DM7100の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲ ー ジ №	CDV 230 の較正值	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最 大 ひ ず み
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10KHz	50 μ s/w	5VFS	0.2cm/s	—	500 mv/cm	1.2 cm 60 μ E
G 2	"	"	"	"	"	—	"	1.5 cm 750 μ E
G 3	"	"	"	"	"	—	"	1.2 cm 600 μ E
G 4	"	"	"	"	"	—	"	⊖1.1 cm -550 μ E
G 5	"	"	"	"	"	—	"	⊖1.2 cm -650 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2VFS	"	—	200 mv/cm	⊖0.6 cm -0.06 cm
破 壊 状 況								



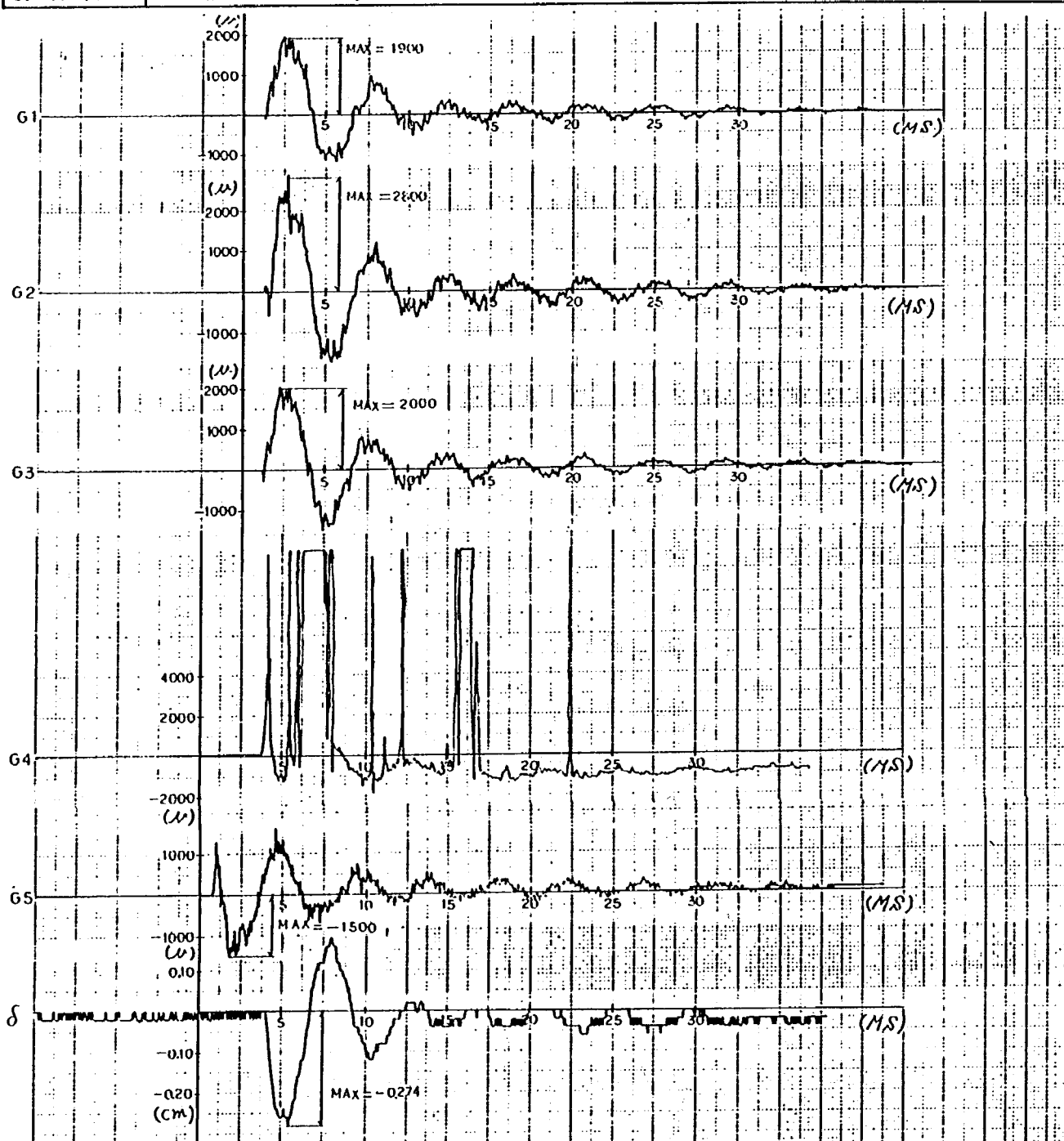
実験 No	CASE-10		実験日時	昭和60年8月11日				
球の落高	0.82m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100のディレーワード	-1400		緩衝材					
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G1	2V 2000 μ	10KHz	50 μ s/w	5VFS	0.2cm/s	—	500mv/cm	2.2cm 1100 μ E
G2	"	"	"	"	"	"	"	3.2cm 1600 μ E
G3	"	"	"	"	"	"	"	2.3cm 1150 μ E
G4	"	"	"	"	"	"	"	不能 μ E
G5	"	"	"	"	"	"	"	-2.7cm -1350 μ E
変位	1V 1.27cm	"	"	2VFS	"	"	200mv/cm	-1.3cm -0.133cm
破壊状況	8mm $\times$ 6mmのめりこみ		30mmの曲り範囲					



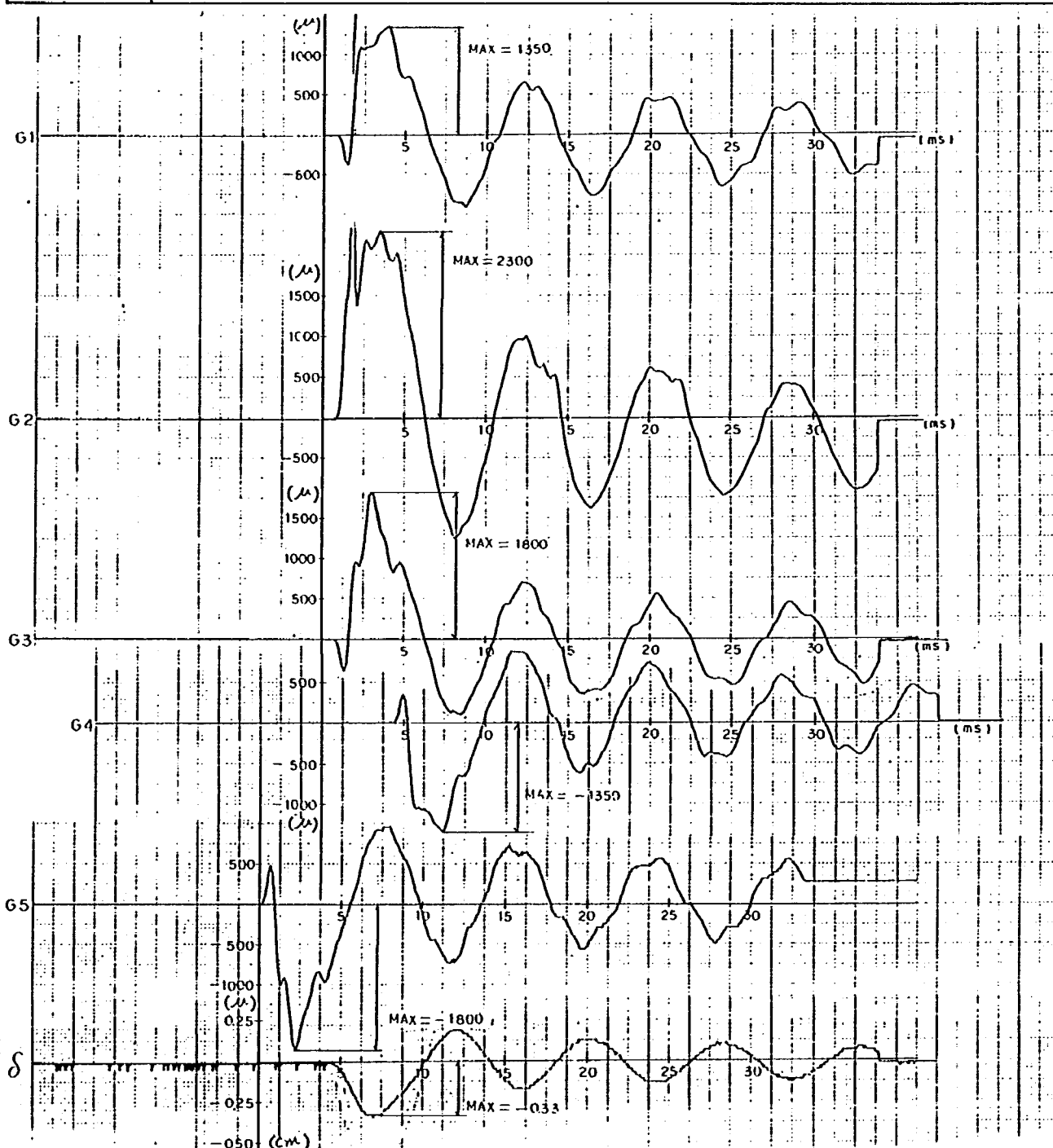
実験 No	CASE - 11		実験 日 時	昭和 60 年 8 月 11 日				
球 の 落 高	1.84 m		球速(ビデオカメラによる)	6 m/sec				
DM7100 の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ No	CDV 230 の 較 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	1.7 cm 1700 μ E
G 2	"	"	"	"	"		"	2.6 cm 2600 μ E
G 3	"	"	"	"	"		"	2.1 cm 2100 μ E
G 4	"	"	"	"	"		1000 mv/cm	μ E
G 5	"	"	"	"	"		500 mv/cm	-1.4 cm -1400 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"		500 mv/cm	-0.8 cm -0.203 cm
破壊 状 況								



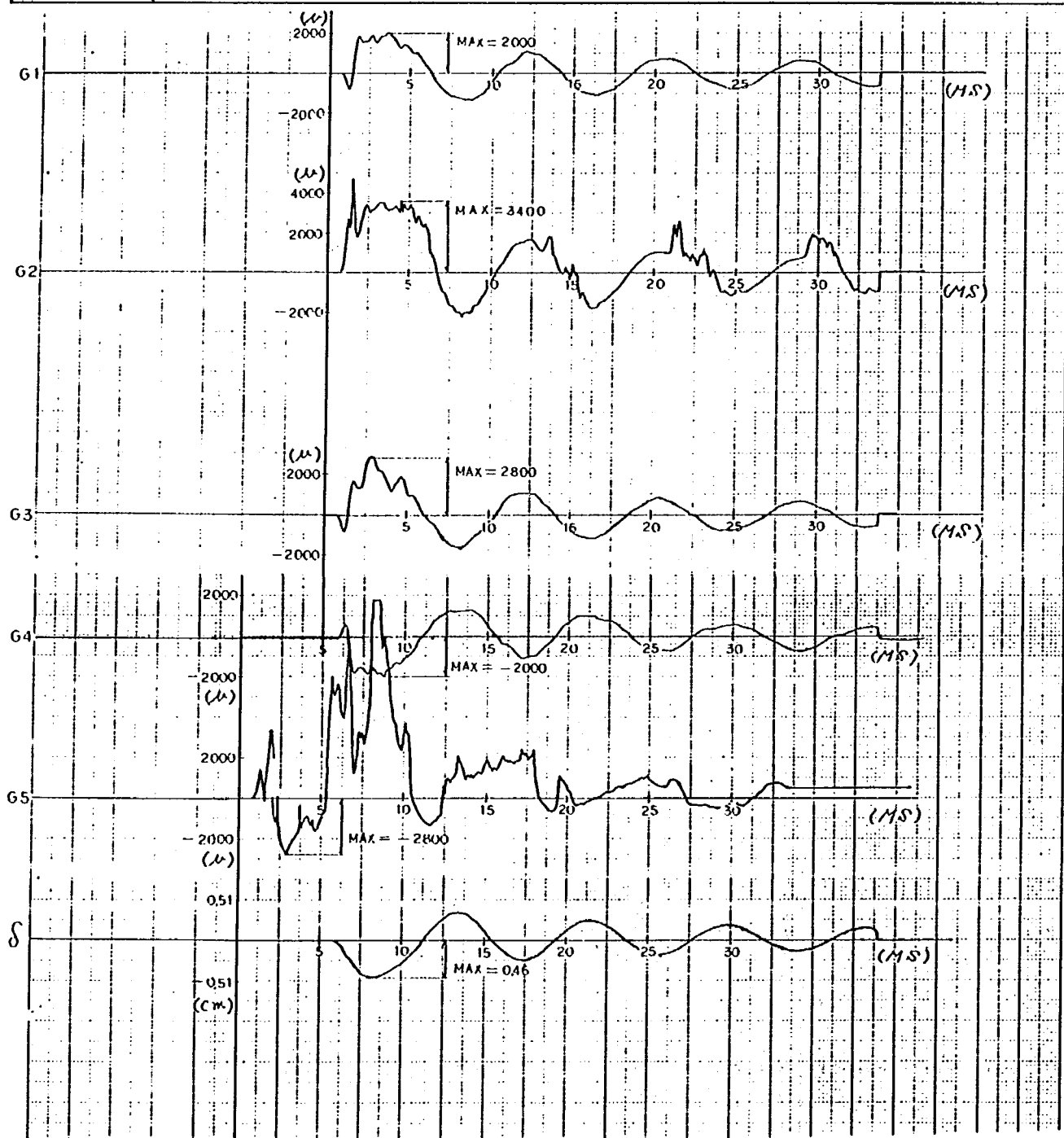
実験 No	CASE -12		実験 日 時	昭和 60 年 8 月 11 日				
球 の 落 高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100 の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大 ひ ず み
					Time	X	Y	
G 1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	1.9 cm 1900 μ E
G 2	"	"	"	"	"		"	2.8 cm 2800 μ E
G 3	"	"	"	"	"		"	2.0 cm 2000 μ E
G 4	"	"	"	"	"		1000 mv/cm	μ E
G 5	"	"	"	"	"		500 mv/cm	-1.5 cm -1500 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"		200 mv/cm	⊖2.7 cm -0.274 cm
破 壊 状 況	10 mm × 7 mm のめりこみ 45 mm の曲りの変形範囲							



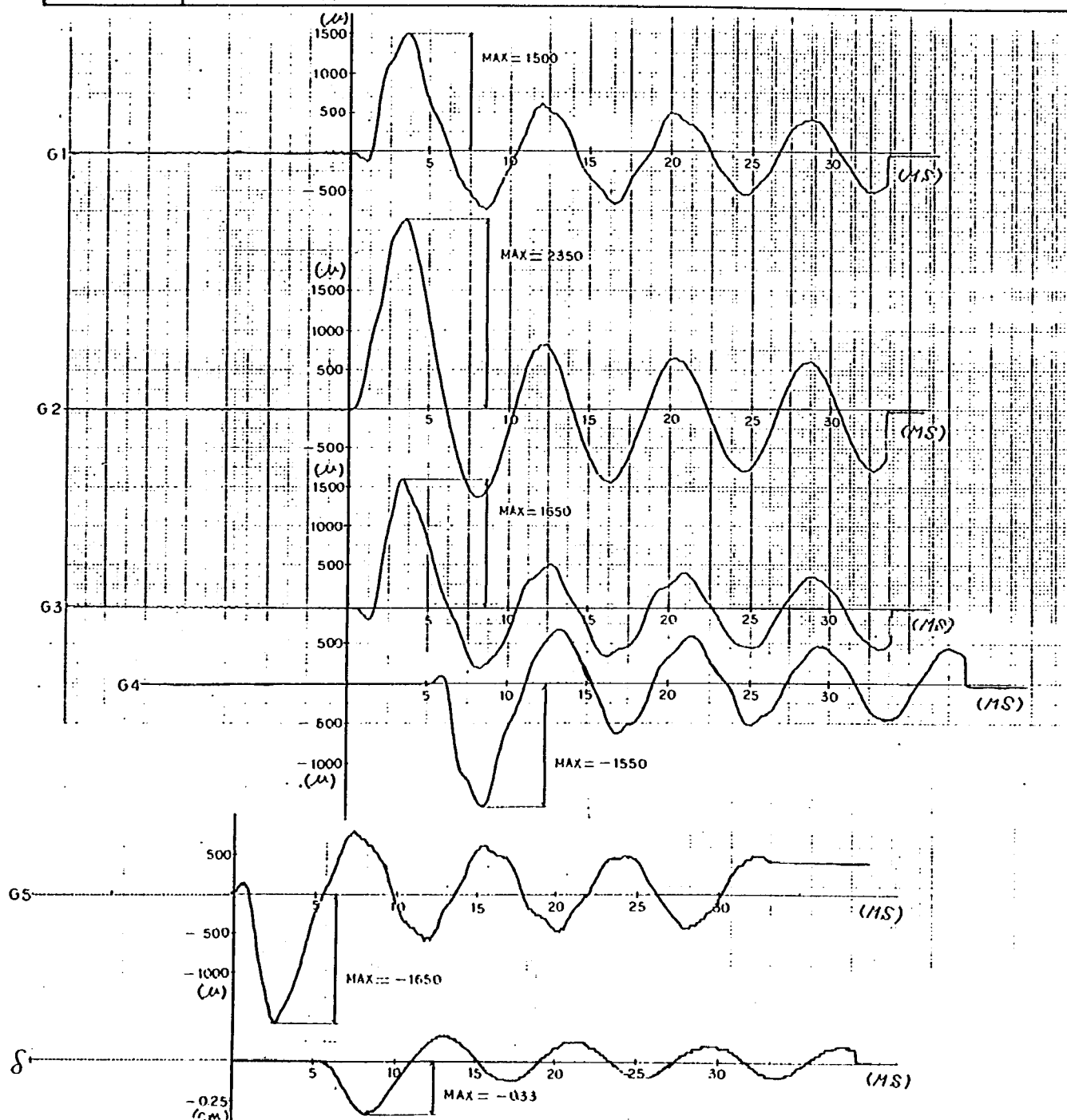
実験 No	CASE - 13		実験 日 時	昭和 60 年 8 月 11 日				
球 の 落 高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩 衝 材					
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	2.7 cm 1350 μ E
G 2	"	"	"	"	"	"	"	4.6 cm 2300 μ E
G 3	"	"	"	"	"	"	"	3.6 cm 1800 μ E
G 4	"	"	"	"	"	"	"	-2.7 cm -1350 μ E
G 5	"	"	"	"	"	"	"	-3.6 cm -1800 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	"	500 mv/cm	-1.3 cm -0.33 cm
破壊 状 況								



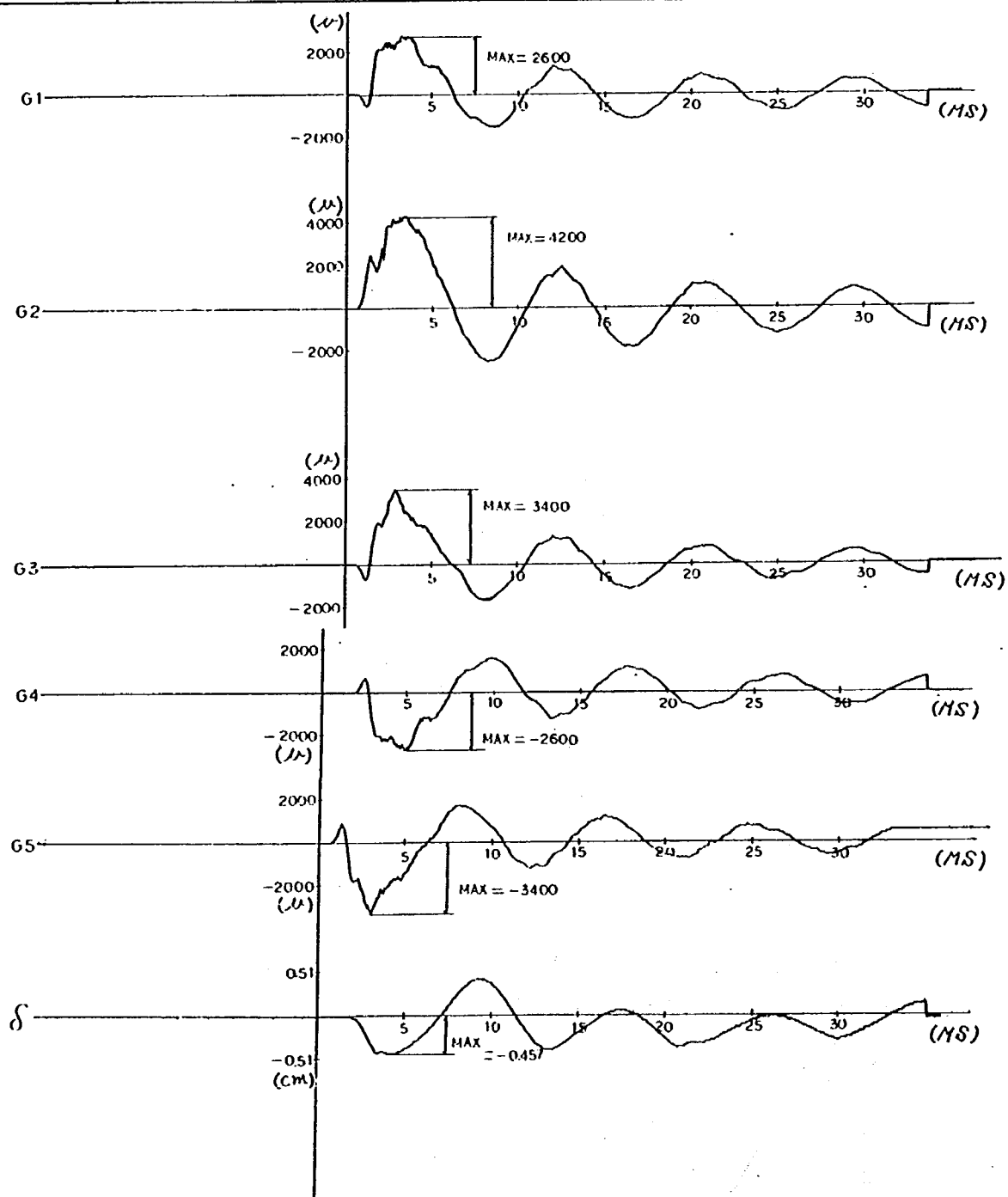
実験 No	CASE - 14		実験 日 時	昭和 60 年 8 月 11 日				
球 の 落 高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100 の ディレーワード			緩 衝 材	t = 2 mm D 48.6 mm				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100 の Crock Rate	DM7100 の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	1000 mv/cm	1.0 cm 2000 $\mu\epsilon$
G 2	"	"	"	"	"	"	"	1.7 cm 3400 $\mu\epsilon$
G 3	"	"	"	"	"	"	"	1.4 cm 2800 $\mu\epsilon$
G 4	"	"	"	"	"	"	"	-1.0 cm -2000 $\mu\epsilon$
G 5	"	"	"	"	"	"	"	-1.4 cm -2800 $\mu\epsilon$
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	"	1000 mv/cm	-0.9 cm -0.457 cm
破 壊 状 況	20 mm $\times$ 15 mm の打撃あと 6 mm の切断							



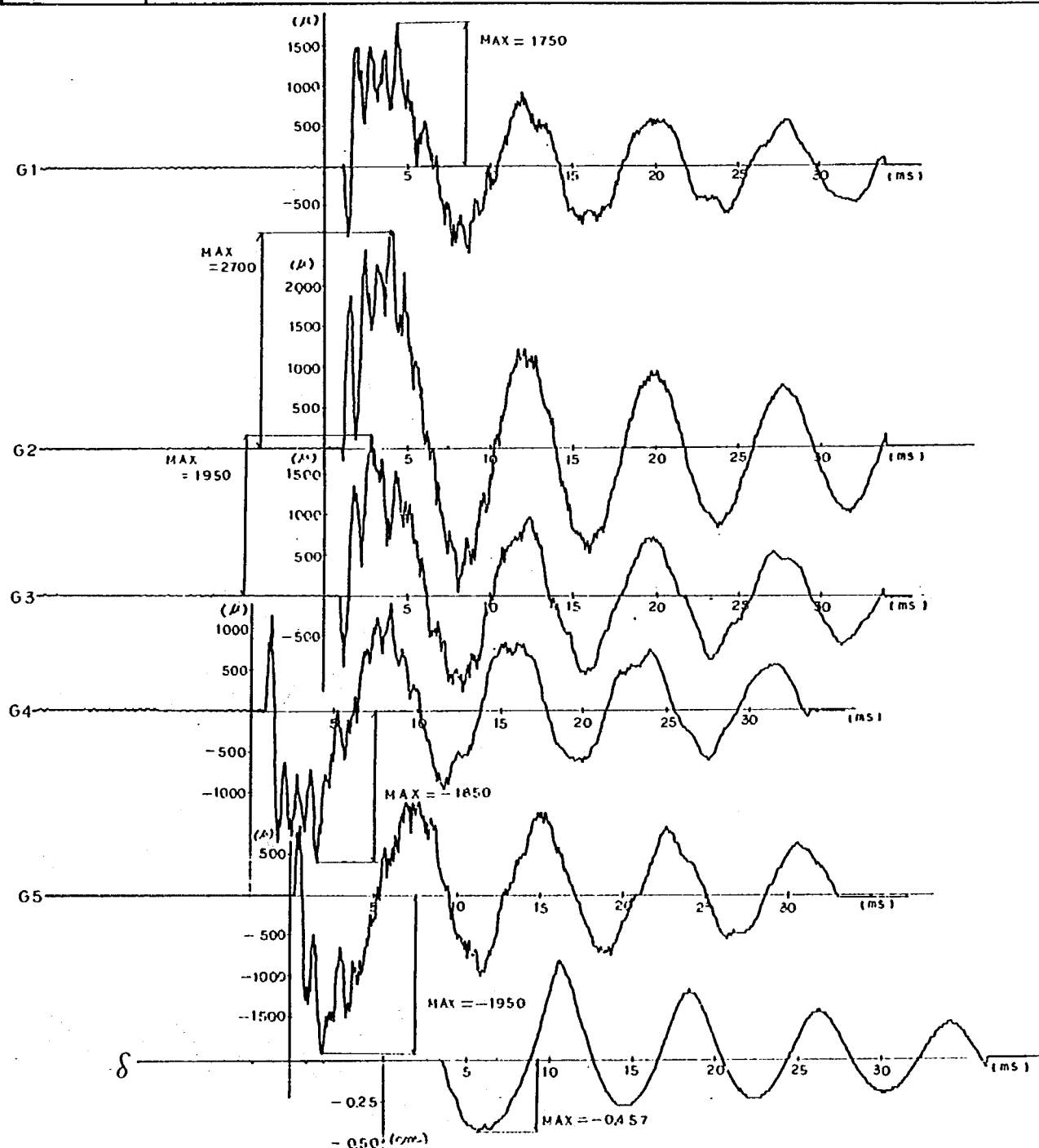
実験 No	CASE-15		実験日時	昭和60年8月11日				
球の落高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材	t = 5 mm D = 48.6				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	-	500 mv/cm	3.0 cm 1500 μ E
G2	"	"	"	"	"	"	"	0.7 cm 2350 μ E
G3	"	"	"	"	"	"	"	3.3 cm 1450 μ E
G4	"	"	"	"	"	"	"	-3.1 cm -1550 μ E
G5	"	"	"	"	"	"	"	-3.3 cm -1450 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	"	500 mv/cm	-1.3 cm -0.330 cm
破壊状況								



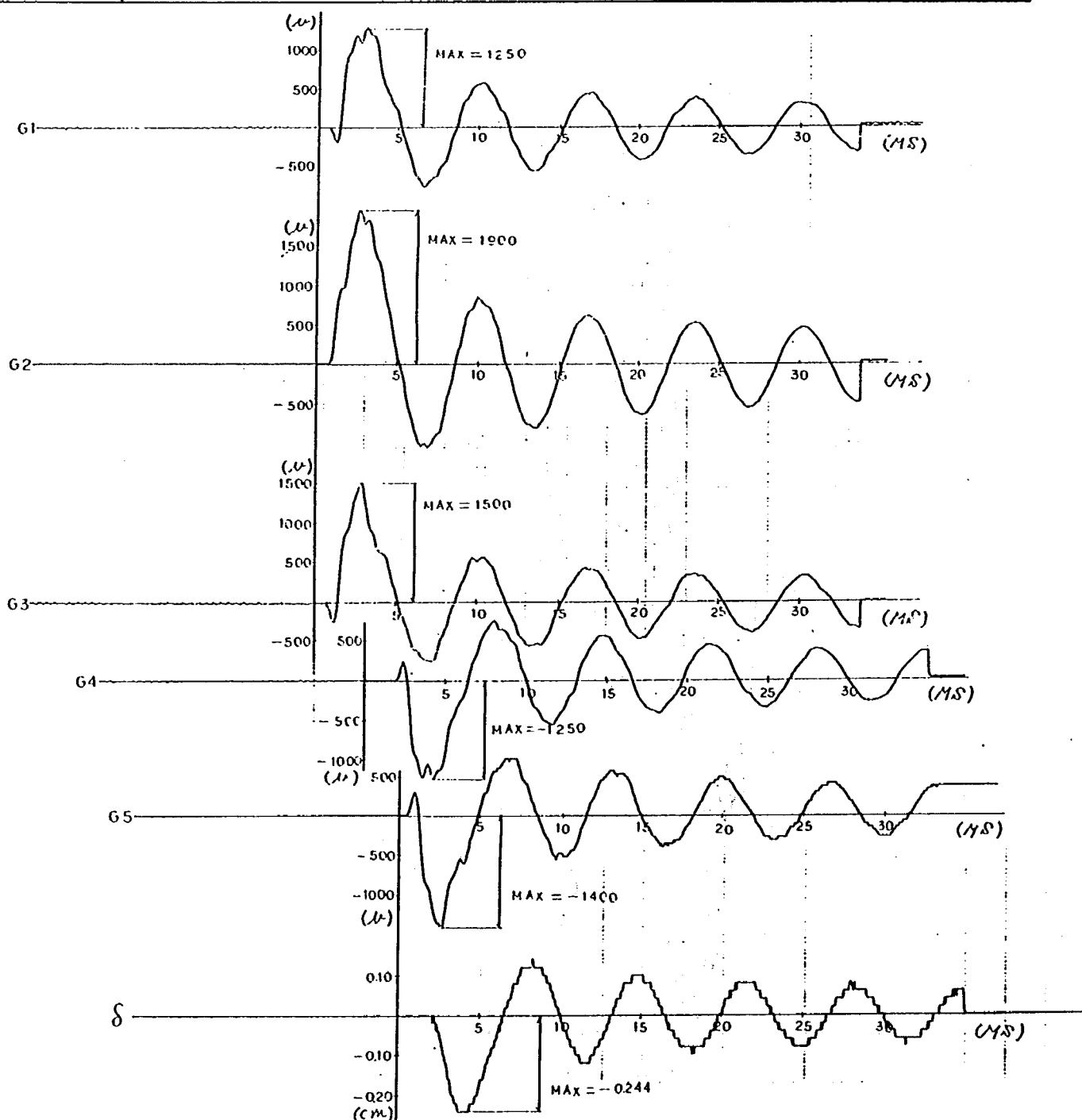
実験 No	CASE-16		実験日時	昭和60年8月11日				
球の落高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材	$t = 5 \text{ mm}$ $D = 48.6$				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s		1000 mv/cm	1.3 cm 2600 μ E
G 2	"	"	"	"	"		"	2.1 cm 4200 μ E
G 3	"	"	"	"	"		"	1.7 cm 3400 μ E
G 4	"	"	"	"	"		"	-1.3 cm -2600 μ E
G 5	"	"	"	"	"		"	-1.7 cm -3600 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"		1000 mv/cm	-0.9 cm -0.457 cm
破壊状況	24 mm $\times$ 12 mm の打撃あと							



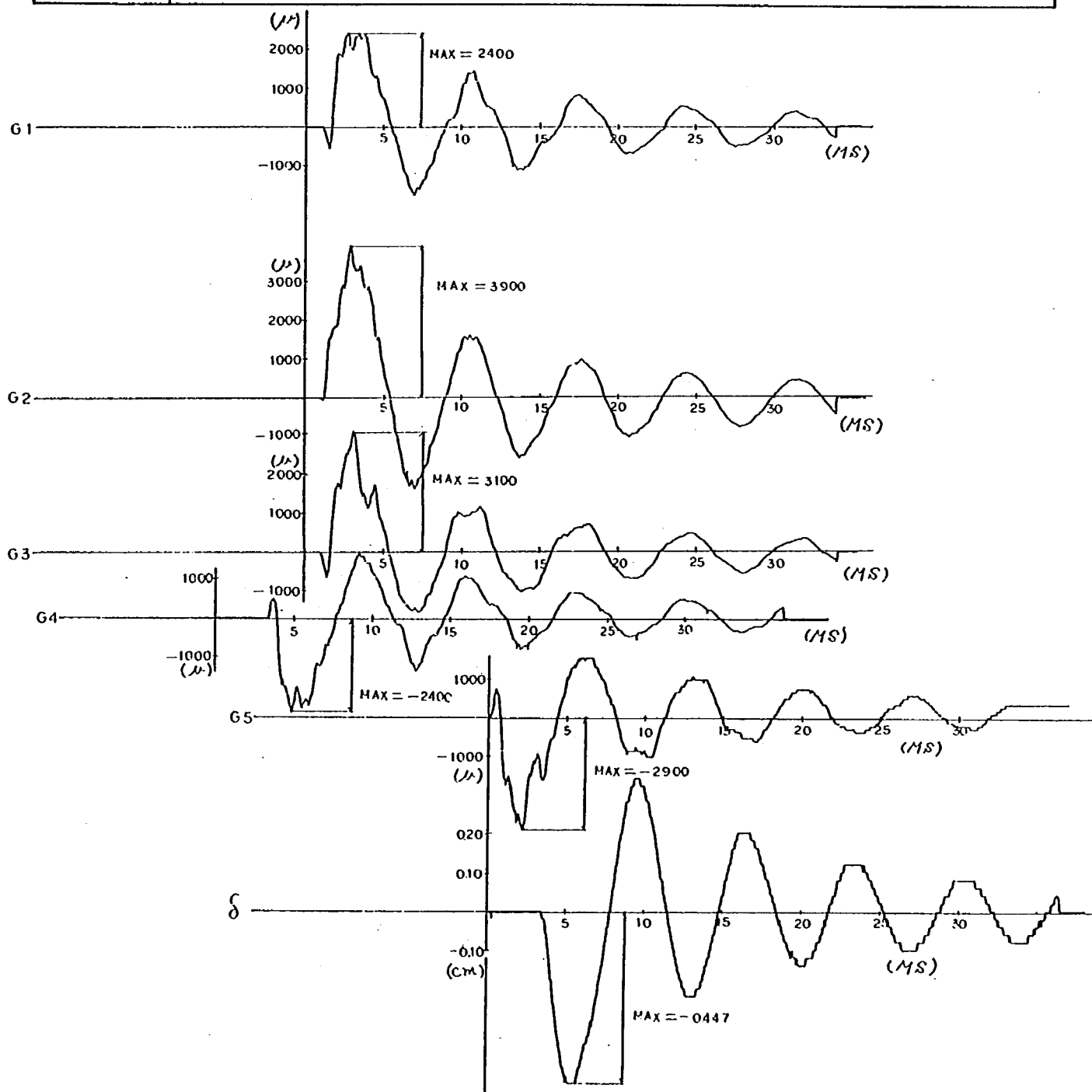
実験 No	CASE-17		実験日時	昭和60年8月12日				
球の落高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100の ディレーワード			緩衝材	なし ϕ 48.6				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	3.5 cm 1750 μ E
G 2	"	"	"	"	"	"	"	5.4 cm 2700 μ E
G 3	"	"	"	"	"	"	"	3.9 cm 1950 μ E
G 4	"	"	"	"	"	"	"	-3.7 cm -1850 μ E
G 5	"	"	"	"	"	"	"	-3.9 cm -1950 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	"	500 mv/cm	-1.8 cm -0.457 cm
破壊状況	4 mm $\times$ 3 mm のめりこみあと							



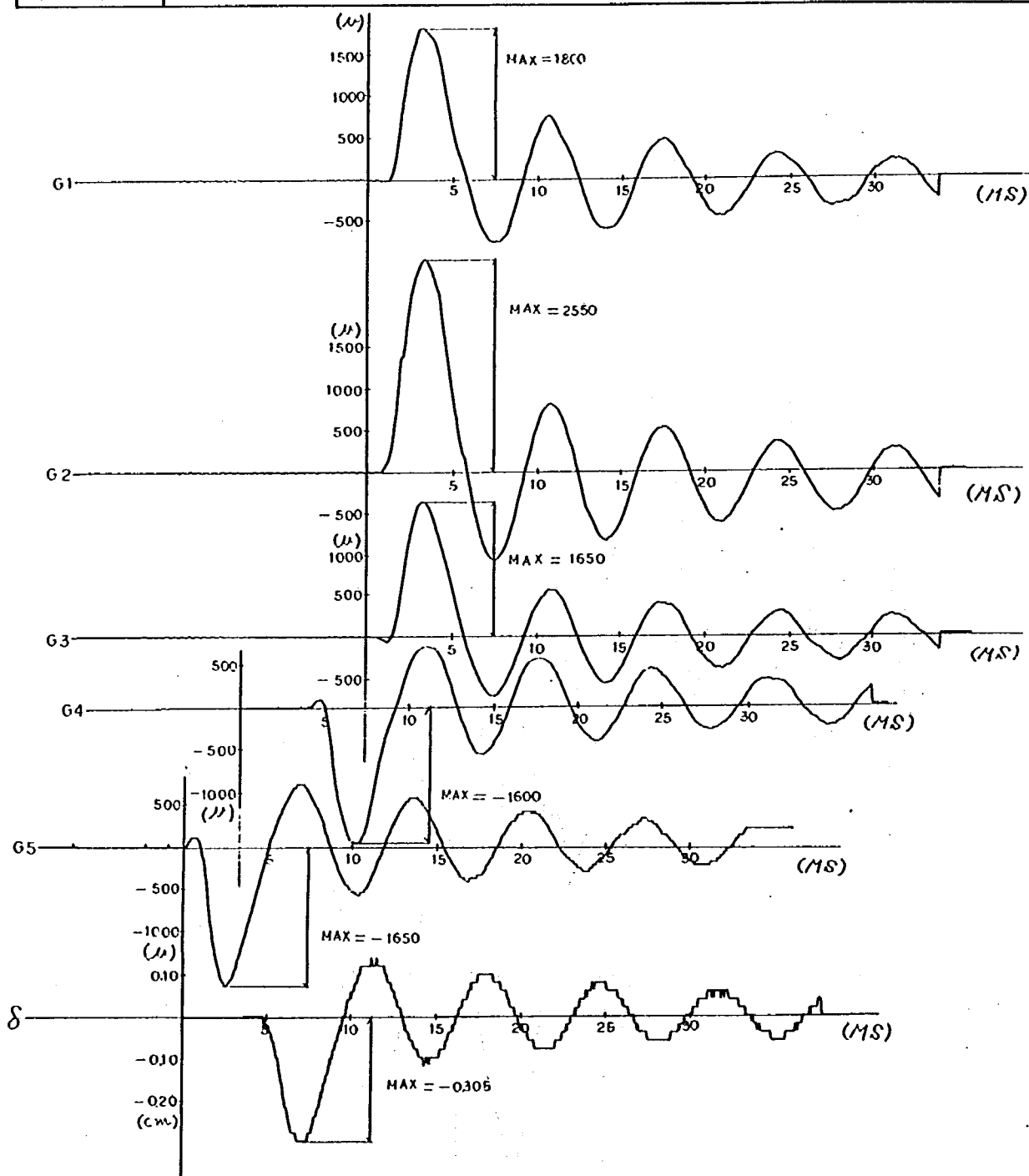
実験 No	CASE - 18		実験日時	昭和60年8月12日				
球の落高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材	ゴム $t = 2\text{ mm}$ $D = 60.5$				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 $\mu\text{s/w}$	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	2.5 cm 1250 $\mu\epsilon$
G 2	"	"	"	"	"	—	"	3.8 cm 1900 $\mu\epsilon$
G 3	"	"	"	"	"	—	"	3.0 cm 1500 $\mu\epsilon$
G 4	"	"	"	"	"	—	"	-2.5 cm -1250 $\mu\epsilon$
G 5	"	"	"	"	"	—	"	-2.8 cm -1400 $\mu\epsilon$
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"	—	200 mv/cm	-7.4 cm -0.244 cm
破壊状況								



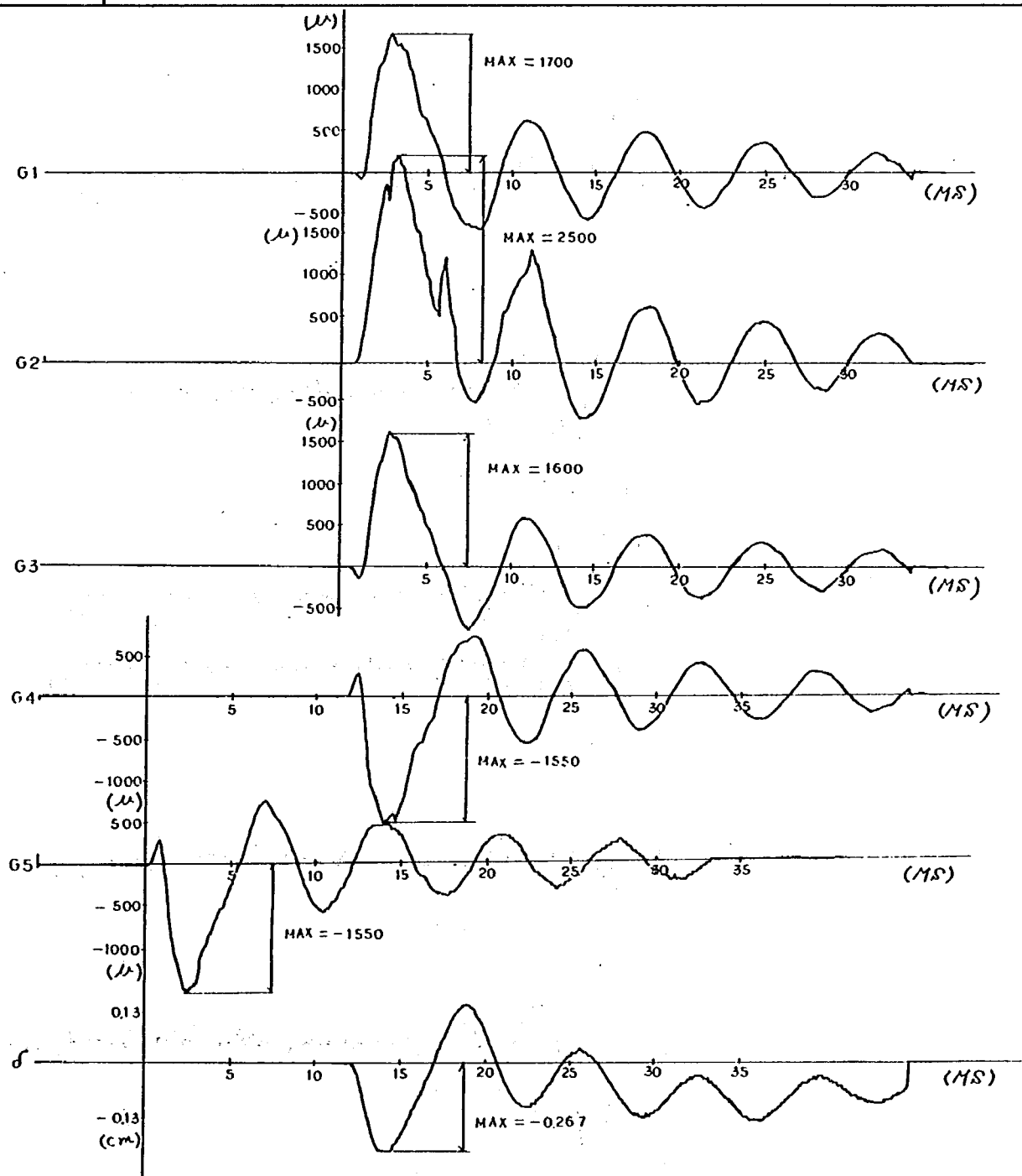
実験 No	CASE-19		実験日時	昭和60年8月12日				
球の落高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材	ゴム $t = 2\text{ mm}$ $D = 60.5$				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM 7100 の Crock Rate	DM 7100 の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 $\mu\text{s/w}$	5 VFS	0.2 cm/s	—	500 mv/cm	2.4 cm 2400 $\mu\epsilon$
G 2	"	"	"	"	"		"	3.9 cm 3900 $\mu\epsilon$
G 3	"	"	"	"	"		"	3.1 cm 3100 $\mu\epsilon$
G 4	"	"	"	"	"		"	-2.4 cm -2400 $\mu\epsilon$
G 5	"	"	"	"	"		"	-2.9 cm -2900 $\mu\epsilon$
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"		200 mv/cm	-4.4 cm -0.447 cm
破壊状況								



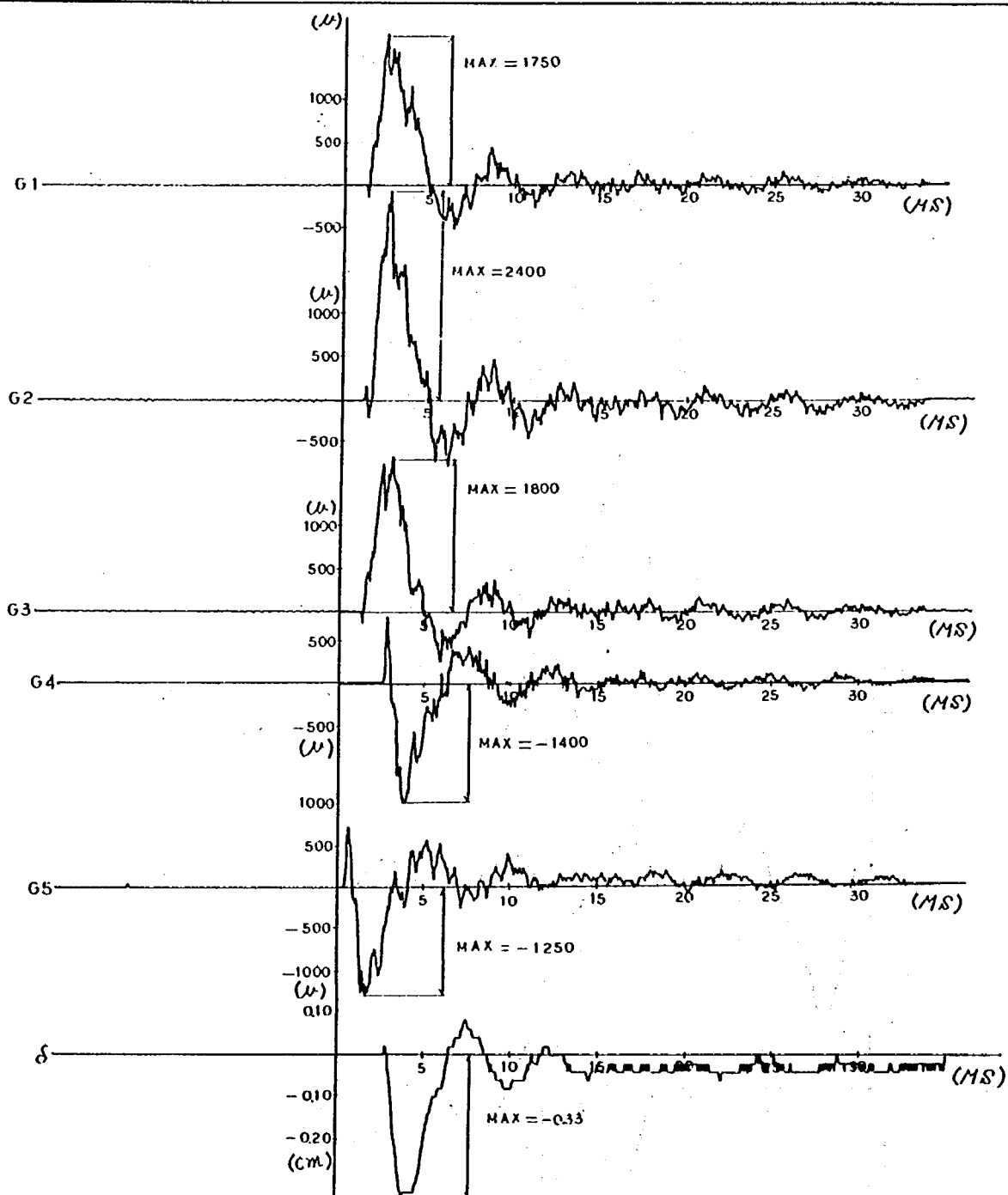
実 験 No	CASE-20		実 験 日 時		昭和 60 年 8 月 12 日			
球 の 落 高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)		4 m/sec			
DM7100の ディレーワード	-1400		緩 衝 材		ゴム t=5mm D=60.5			
ゲ ー ジ No	CDV 230 の 校 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	X Y レコーダーの感度			最 大 ひ ず み
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000μ	10KHz	50μs/w	5VFS	0.2cm/s		500mv/cm	3.6cm 1800μϵ
G 2	"	"	"	"	"		"	5.1cm 2550μϵ
G 3	"	"	"	"	"		"	3.3cm 1650μϵ
G 4	"	"	"	"	"		"	⊖3.2cm -1600μϵ
G 5	"	"	"	"	"		"	⊖3.3cm -1650μϵ
変 位	1 V 1.27cm	"	"	2VFS	"		200mv/cm	-3.0cm -0.305cm
破 壊 状 況								



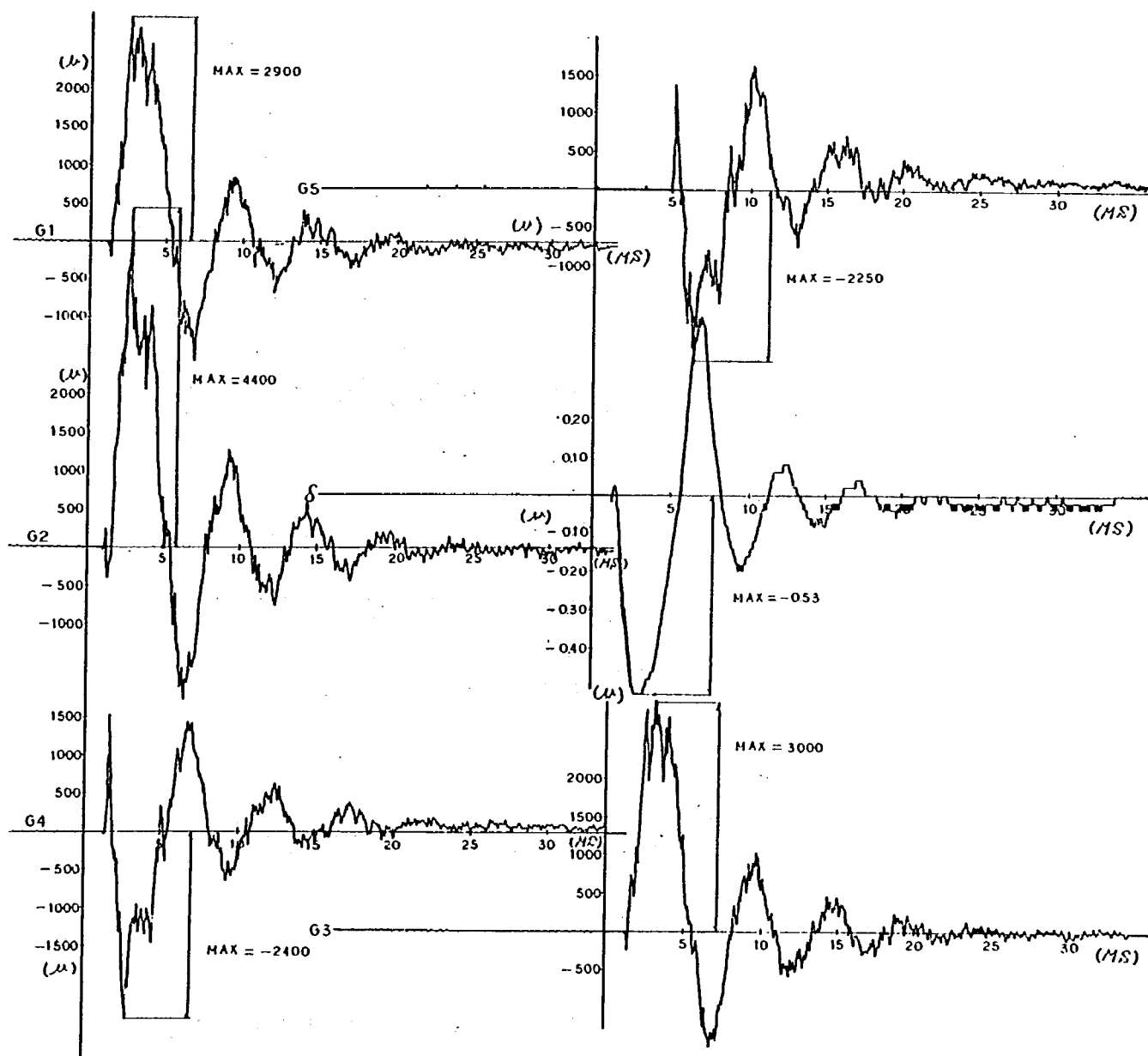
実験 No	CASE - 21		実験 日 時		昭和 60 年 月 日			
球 の 落 高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)		8 m/sec			
DM7100の ディレーワード	-1400		緩 衝 材		t = 5 mm D = 60.5			
ゲ ー ジ No	CDV 230 の 校 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最 大 ひ ず み
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2cm/s	—	500mv/cm	3.4cm 1700 μ E
G 2	"	"	"	"	"		"	5.0cm 2500 μ E
G 3	"	"	"	"	"		"	3.2cm 1600 μ E
G 4	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 3.1cm $\ominus$ 1550 μ E
G 5	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 3.1cm $\ominus$ 1550 μ E
変 位	2 V 1.27cm	"	"	2VFS	"		500mv/cm	$\ominus$ 2.1cm -0.267cm
破 壊 状 況								



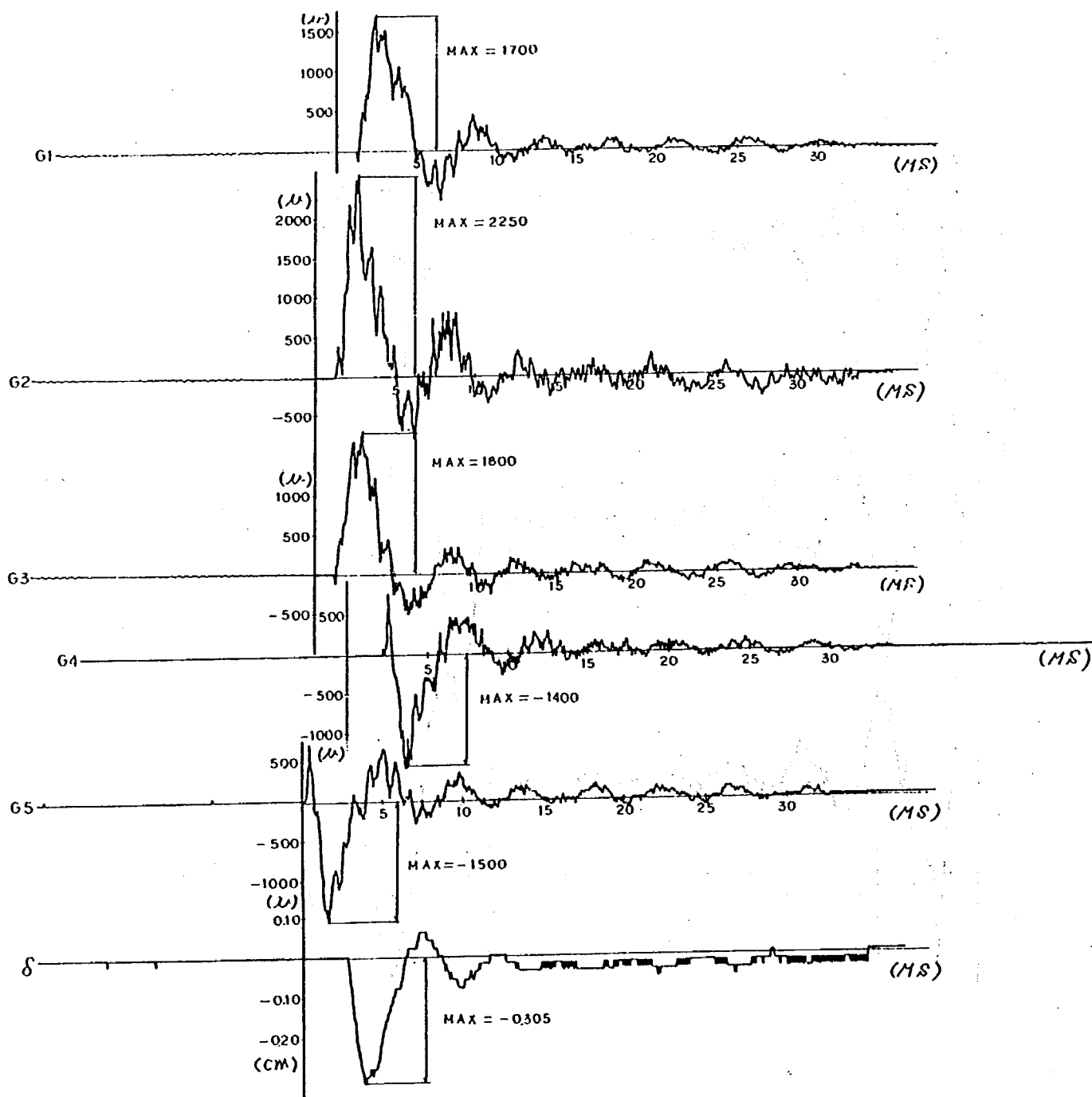
実験 No	CASE-22		実験日時	昭和60年8月13日				
球の落高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)	4 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材	なし D=89.1 mm W=3 kgf				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s		500 mv/cm	3.5 cm 1750 μ ε
G 2	"	"	"	"	"		"	4.8 cm 2400 μ ε
G 3	"	"	"	"	"		"	3.6 cm 1800 μ ε
G 4	"	"	"	"	"		"	⊖2.8 cm -1400 μ ε
G 5	"	"	"	"	"		"	⊖2.5 cm -1250 μ ε
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"		200 mv/cm	⊖3.2 cm - 0.30 cm
破壊状況								



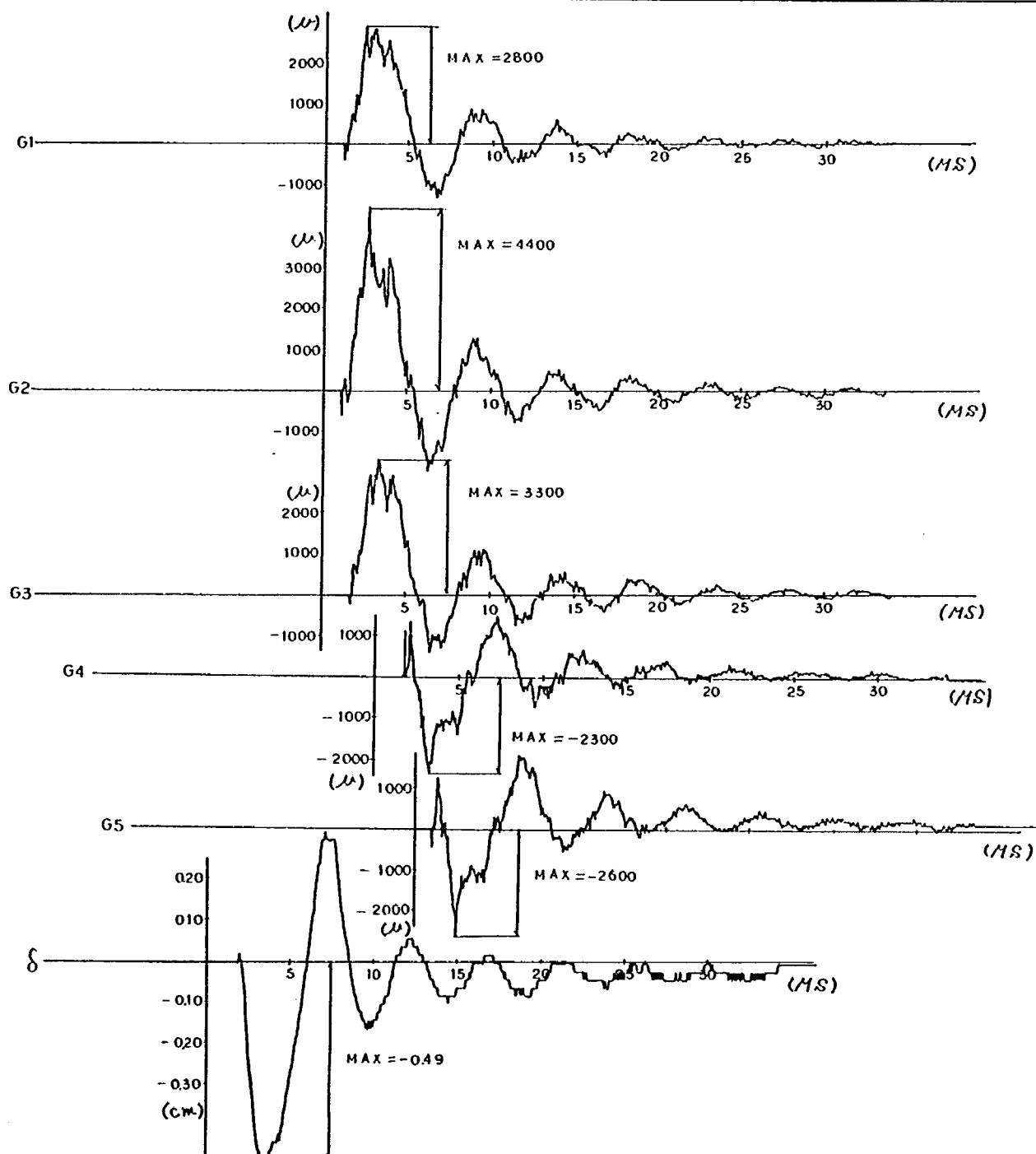
実 験 №	CASE- 23		実 験 日 時	昭和 60 年 8 月 13 日				
球 の 落 高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩 衝 材	な し $\phi=89.1\text{mm}$ W=3 kgf				
ゲ ー ジ №	CDV 230 の 校 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM 7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最 大 ひ ず め
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10KHz	50 $\mu\text{s/w}$	5VFS	0.2cm/s		500 mv/cm	5.8cm 2900 μE
G 2	"	"	"	"	"		"	8.8cm 4400 μE
G 3	"	"	"	"	"		"	6.0cm 3000 μE
G 4	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 4.8cm - 2400 μE
G 5	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 4.5cm - 2250 μE
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2VFS	"		200 mv/cm	$\ominus$ 5.2cm - 0.53 cm
破 壊 状 況								



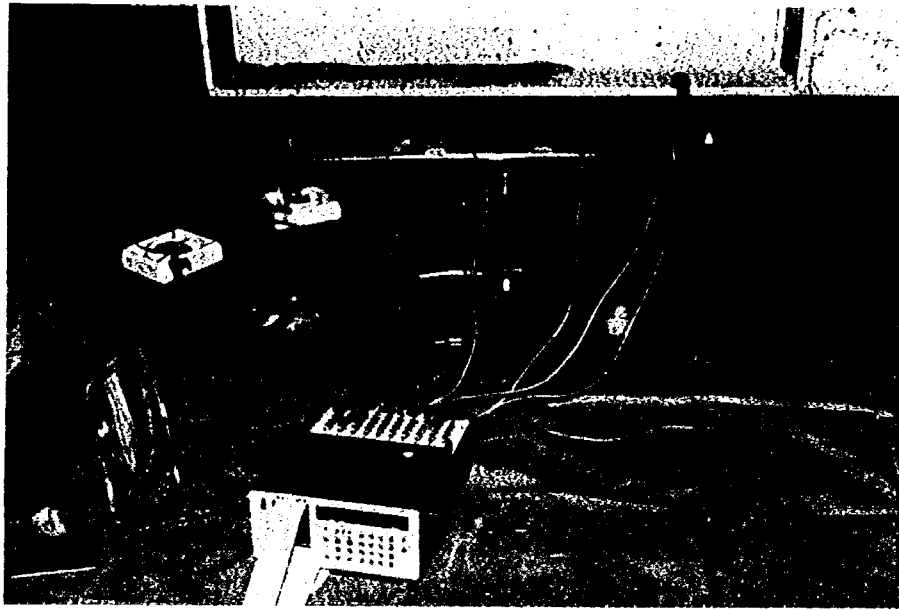
実 験 No	CASE - 24		実 験 日 時		昭和 60 年 8 月 13 日			
球 の 落 高	0.82 m		球速(ビデオカメラによる)		4 m/sec			
DM7100の ディレーワード	-1400		緩 衝 材		な し $\phi = 89.1 \text{ mm}$			
ゲージ No	CDV 230 の 校 正 値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G 1	2 V 2000 μ	10KHz	50 μ s/w	5VFS	0.2cm/s		500mv/cm	3.4cm 1700 μ E
G 2	"	"	"	"	"		"	5.1cm 2550 μ E
G 3	"	"	"	"	"		"	3.6cm 1800 μ E
G 4	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 3.8cm - 1400 μ E
G 5	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 3.0cm - 1500 μ E
変 位	1 V 1.27 cm	"	"	2VFS	"		200 mv/cm	$\ominus$ 3.0cm - 0.305 cm
破 壊 状 況								



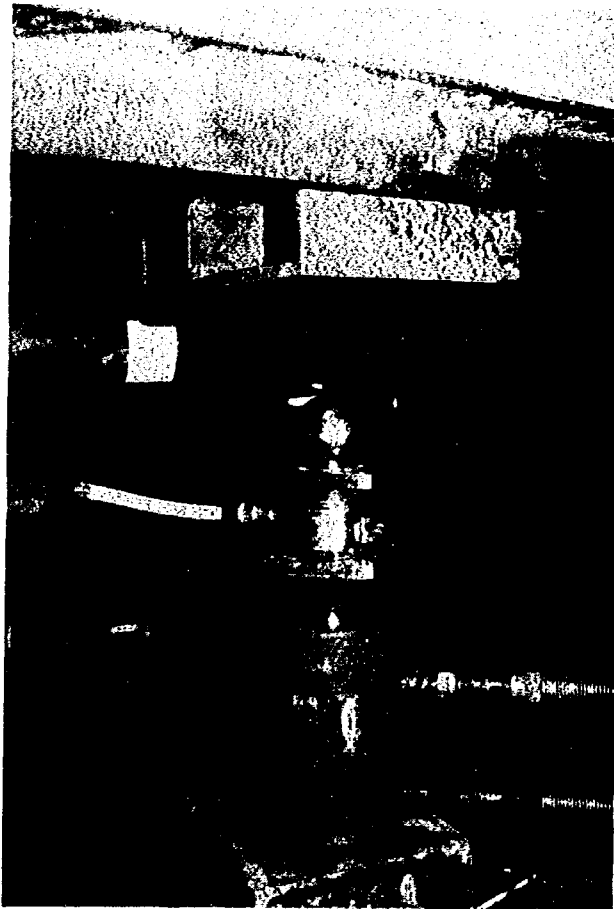
実験 No	CASE-25		実験日時	昭和60年8月13日				
球の落高	3.27 m		球速(ビデオカメラによる)	8 m/sec				
DM7100の ディレーワード	-1400		緩衝材	なし $\phi = 89.1$ mm				
ゲージ No	CDV 230 の校正値	CDV 230 の Cut off Freq	DM7100の Crock Rate	DM7100の VFS	XYレコーダーの感度			最大ひずみ
					Time	X	Y	
G1	1 V 2000 μ	10 KHz	50 μ s/w	5 VFS	0.2 cm/s		500 mv/cm	2.8 cm 2800 μ E
G2	"	"	"	"	"		"	4.4 cm 4400 μ E
G3	"	"	"	"	"		"	3.3 cm 3300 μ E
G4	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 1.3 cm -2300 μ E
G5	"	"	"	"	"		"	$\ominus$ 2.6 cm -2600 μ E
変位	1 V 1.27 cm	"	"	2 VFS	"		200 mv/cm	$\ominus$ 4.8 cm -0.49 cm
破壊状況								



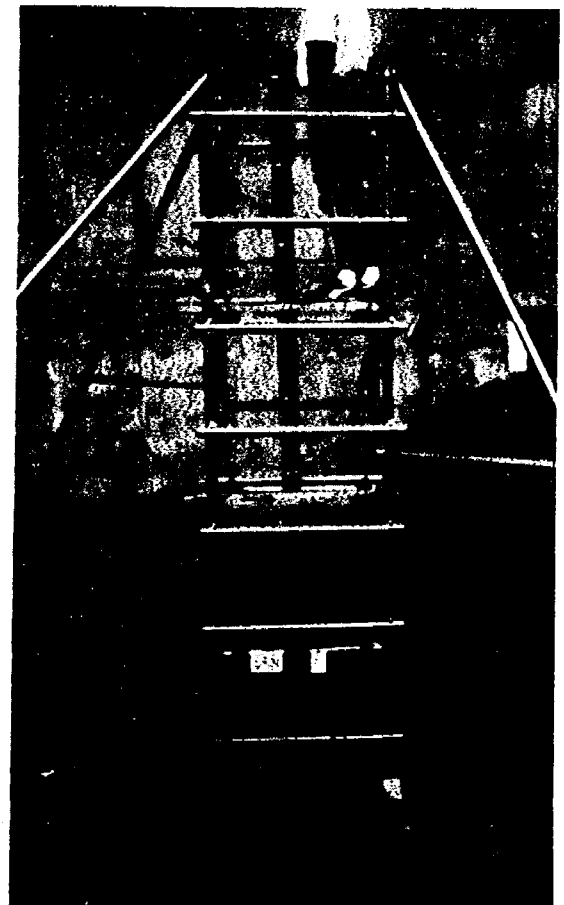
写 真 集



単純梁の曲げ実験（静的実験）



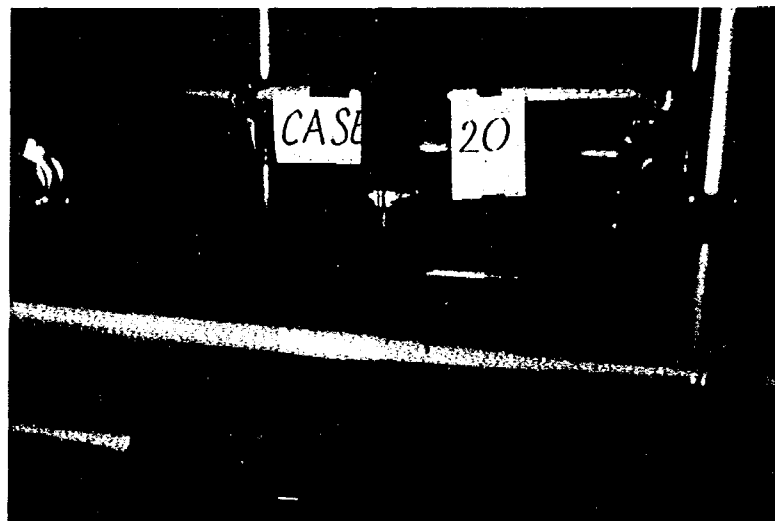
鋼管の局部変形実験（静的実験）



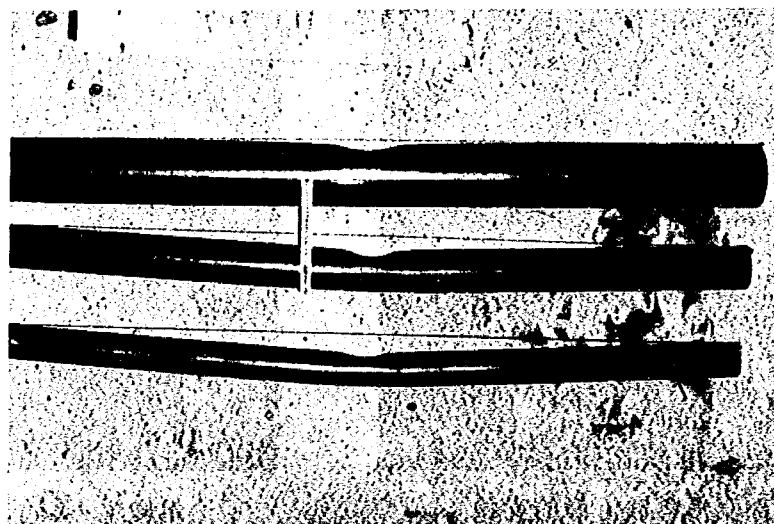
単純梁の衝撃応答実験および
衝撃曲げ破壊実験



単純梁鋼管の衝撃応答実験



緩衝材を巻いた鋼管の衝撃応答実験



衝撃曲げ破壊実験による各鋼管の変形状況

鋼管に対する土石流衝撃力
実験報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 2276 号
昭和 61 年 3 月 (1986)

建設省 土木研究所砂防研究室 水山高久

要 旨

鋼管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、鋼管製土石流対策施設の設計方法の提案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，緩衝材，動的応答解析

郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
砂防研究室 御中

No. _____

No. _____

土研資料第 2276 号

配布先住所

配布先氏名



土木研究所資料第2276号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印