

I S S N 0386—5878

土 研 資 料 第1583号

土 木 研 究 所 資 料

富士山土石流衝擊力実験報告書(1)

昭和55年 3 月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

Copyright © 54年度 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 of P. W. R. I.

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

目 次

はじめに

1. 実験の概要	1
1.1 衝撃荷重実験	3
2. 破壊形態とその発生条件	7
3. 歪の解析と実験結果との比較	10
3.1 片持ち梁としての解析	12
3.2 マッシュなモルタル壁の局部変形としての解析	16
3.3 2質点バネ系としての解析	20
4. 結語と今後の問題点.....	31
参考文献	33
付表および付図	34

は　じ　め　に

富士山大沢川では、流出する土石流を制御するために砂防ダム等のコンクリート構造物が計画されている。その設計において土石流の衝撃力を算定する必要があるが、現在、マスコンクリートへの衝撃力の算定手法として確立されたものはない。

本報告は、昭和54年度建設省中部地方建設局富士砂防工事事務所から依頼された「土石流衝撃力に関する実験」の実験結果とその解析の結果をとりまとめたものであり、実験規模が小さいという問題はあるが、一般の土石流対策砂防施設の設計に対しても有益な情報になると考えている。

なお、参考のため土石流対策砂防施設の設計条件の検討手順を示すと次のようになる。

- ① 計画降雨の決定
- ② 計画流出土砂量（総量およびピーク）の決定
- ③ 流域としての砂防計画（施設計画）
- ④ 施設計画地点での土石流流速、波高、最大粒径の推定
- ⑤ 施設の種類、材料（マスコンクリート、鉄筋コンクリート、鉄、木材 etc）
に依じた土石流衝撃力の算定
- ⑥ 土石流衝撃力を含む安定計算
- ⑦ 施設の維持管理計画

昭和 55 年 3 月

土木研究所 砂防部砂防研究室

室 長 渡辺正幸

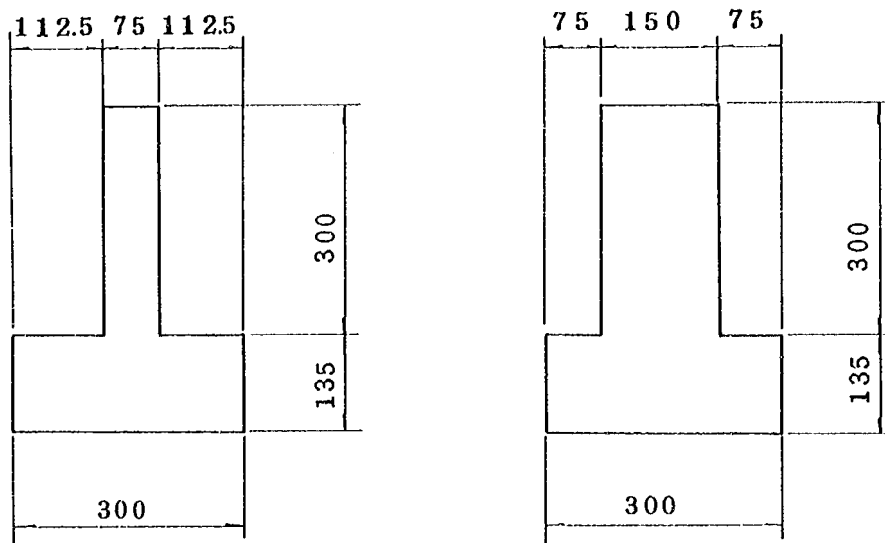
研究員 水山高久

伊巻幹雄

1. 実験の概要

土石流対策砂防施設を設計する場合，その手順としては，土石流衝撃力の算定を行なうことが第1段階となるが，算定された衝撃力が静荷重に換算すると何程かを知り設計する必要がある。

そこで本実験においては，衝撃荷重，実験を行ない，3章での静的，準静的な歪の解析から求まる計算値と実測値の比較，検討を行なった。なお，使用した供試体およびその材質については図-1.1，表-1.1に示すとおりである。



Aタイプ 巾200 mm

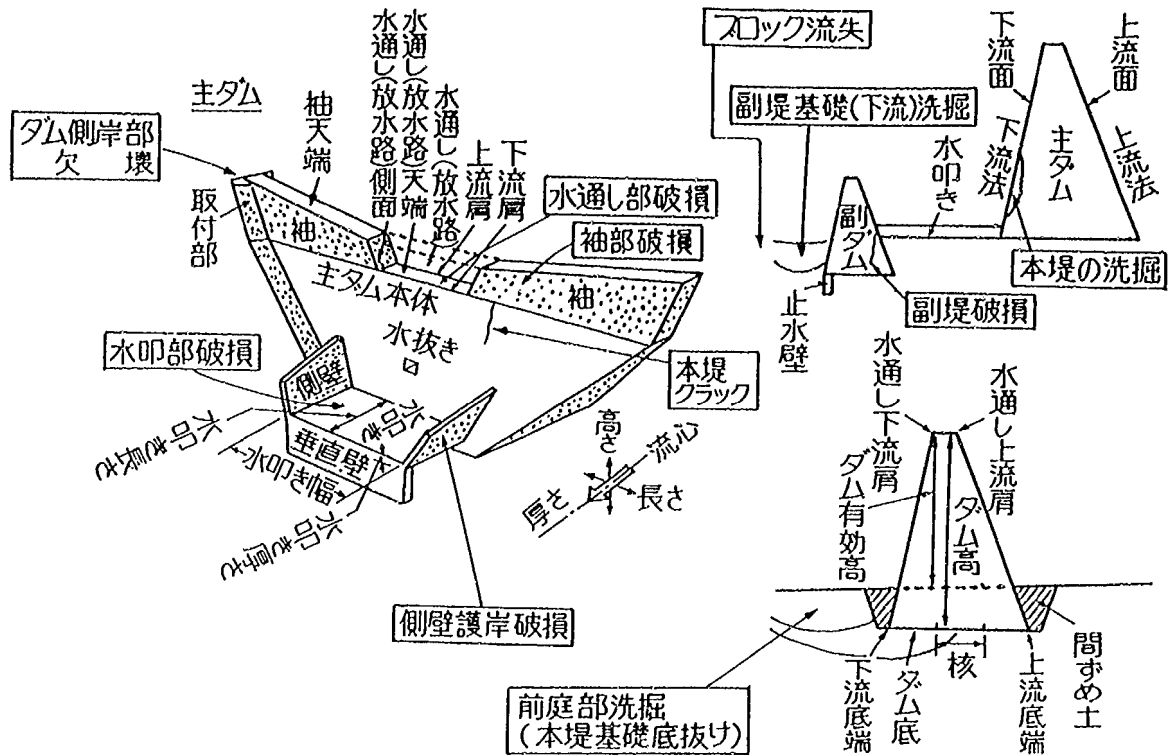
Cタイプ 巾400 mm

Bタイプ 巾400 mm

図-1.1 片持ばり供試体

表-1.1 モルタル配合

W/C	単位配合重量 Kg/m^3		
	水	セメント	砂
55%	254	461	1310



図－1.2 砂防，治山ダム各部の名称と破損位置

図－1.2 は，砂防，地山ダム各部の名称と土砂災害（土石流災害を含めた意味）によるダムの破損位置を示したものである。本実験は，

① 主としてダム載冠部に対する土石流荷重に関する資料を実験によって得ることを目的としていること。

② 計算のモデル化等がやりやすいこと。

また，ダム材料は一般的にはコンクリートであること。

③ 供試体が小さいこと。

④ コンクリートの場合骨材の影響が，ひずみ測定あるいは部材強度に現われると考えられること。

以上4点の理由により，形状は片持梁，材質はモルタルとした。

球体の寸法および材質については，

① 衝突させる球体をくり返して使用すること

② 予備実験（天端幅5cm，底幅10cm，球径6cm）のひずみが小さかったこと。

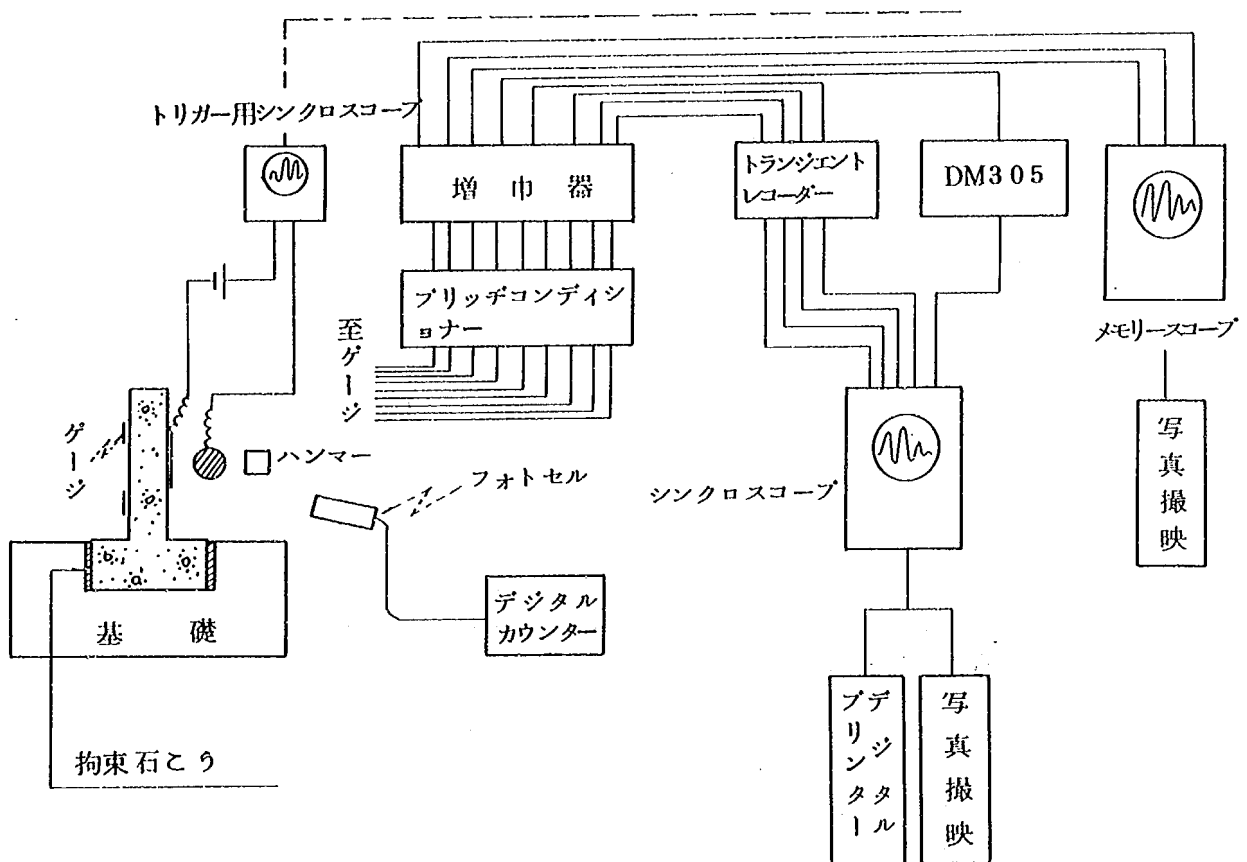
以上2点の理由により，材質は鋼製，寸法は直径10cmとした。

1.1 衝撃荷重実験

図－1.3は、衝撃荷重実験の測定設備概要図である。使用機械の使用目的については、表－1.2に示すとおりである。歪ゲージの位置および各々のゲージの計測目的については、図－1.4、表－1.3に示すとおりである。また、球体速度については、

- ① 一般に土石流の流速範囲が $2 \sim 10^m/sec$ が多いこと。
- ② $10^m/sec$ 付近でコンクリートあるいはモルタルの破壊条件が応力波の影響を受けるスキッピング（後述）等を生じること。

以上2点の理由により $v = 2 \sim 10^m/sec$ の範囲を行なうものとした。実験ケースは、表－1.5に示すとおりである。



図－1.3 衝撃荷重実験の測定設備概要

表 - 1. 2 使用機械と使用目的

品 目	製 品 名	使用目的
増 巾 器	NEFF MODEL 122-121	動ひずみ測定
シンクロスコープ	2 1 2 型	"
記 録 装 置	TRANGENT RECODER MODEL 805 D10	"
	DM305	"
	MEMORY SCOPE 2 1 4 型	"
速 度 計	フォトセル	球速の測定
	デジタルカウンタ	"
載 荷 装 置	空気式トーションバー載荷装置	球の加速

表 - 1. 3 ゲージの計測目的およびゲージの特性

ゲージ名	計 測 目 的
G 2, G 6, G 3, G 8	片持梁挙動としてのひずみ
G 4, G 5	打撃点の集中応力
G 1, G 7, G 5	半無限梁挙動としてのひずみ
G 7 (側面)	根元への応力伝ば速度

寸 法 <i>mm</i>			抵 抗 値
ゲージ長	ゲージ幅	ゲージベース	
30	2	43×8	120±0.3 Ω

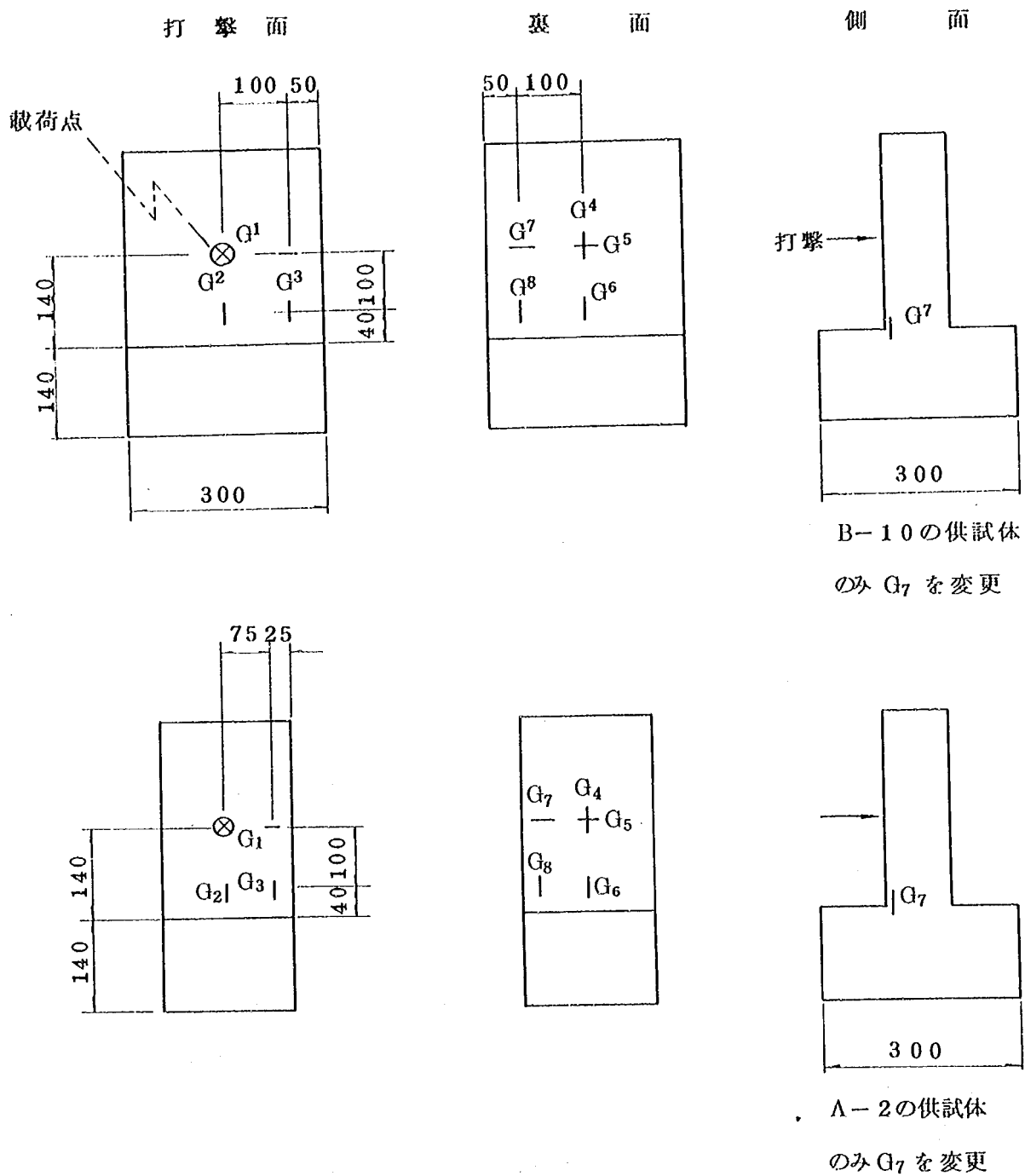


図 - 1.4 A, B, C 供試体のゲージ位置

表-1.5 実験ケース

№	試験体 №	試験条件	速 度 (m/s)	ひずみデ- ターの有無	破壊・非破壊
1	B-10	(1)	2.8	○	
2	B-10	(2)	2.6	○	
3	B-9	(2)	4.3	○	破
4	B-1	(2)	4.7	○	破
5	B-7	(2)	4.7	×	
6	B-5	(1)	5.2	×	
7	B-7	(1)	5.5	×	
8	B-8	(1)	5.5	○	
9	B-1	(1)	5.9	×	
10	B-8	(2)	6.2	○	破
11	B-2	(1)		×	破
12	B-3	(1)		×	破
13	C-2	(2)	4.6	○	
14	C-2	(1)	4.7	○	
15	C-2	(3)		×	
16	A-2	(1)	4.2	○	破
17	A-1	(1)	4.3	○	破
18	B-10	(3)	2.5	×	破

2. 破壊形態と発生条件

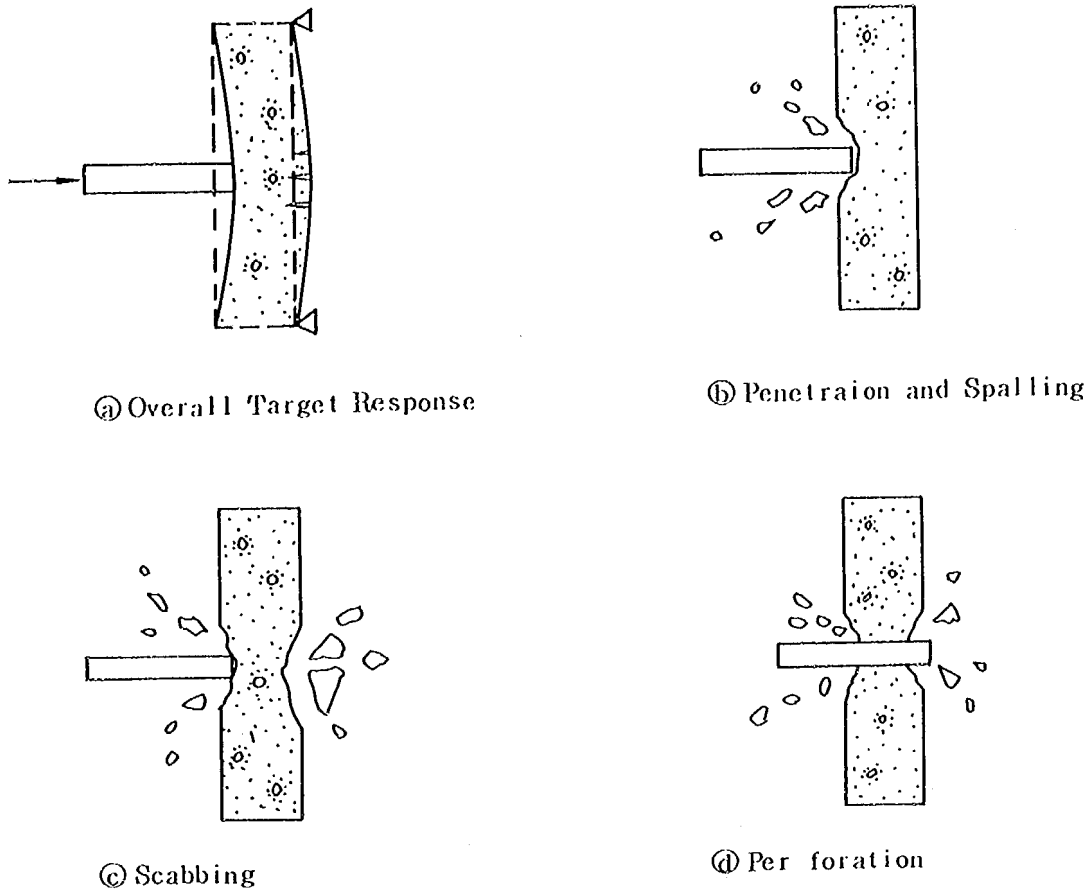


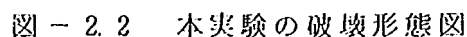
図 - 2.1 R. P. KENNEDY の衝撃荷重による破壊形態

一般にコンクリート部材が衝撃荷重を受けた場合の破壊の形態については、図 - 2.1 に示すような破壊形態をとることが報告されている。図の㉑→㉒→㉓→㉔は、速度の増加に伴って破壊形態が移行することを示している。

㉑～㉔までの各形態の現象について考察を加えると次のようになる。

- ㉑：衝突物の運動エネルギーが、コンクリート板の位置エネルギーに変換され、両者が等しくなるまで板は変形する。この場合、コンクリート板の許容曲げ応力度に対応する以上の運動エネルギーをもって物体が衝突するときに板は、曲げ破壊を生じる。
- ㉒：打撃面で発生した圧縮波が裏面の自由面に達しない程度の波を有するに必要な運動エネルギーをもって物体が衝突するときに板は、圧縮破壊を生じる。
- ㉓：打撃面で発生した圧縮波が裏面の自由面で反射して引張り波となり、この引張り波の干渉によりコンクリート板は、引張り破壊を生じる。
- ㉔：衝突物が板をつき抜けるもので R. P. KENNEDY の報告を参考にすると、衝撃を与える側のサイズと、衝撃を受ける側のその比に関係する。たとえば、衝撃を与える側が直径 d をもつ球体、受ける側が厚さ h をもつ板において㉔の発生条件は、 $h/d \leq 5$ の範囲で破壊する。

Ⅲ 放射状破壊とスキッピング



破壞 形態	供試体 №	球 速 m/s	破壞 形態	供試体 №	球 速 m/s
I	A - 2 (1)	4.3	II	B - 7 (2)	3.4
	A - 1 (2)	4.2		B - 8 (2)	6.2
	B - 10 (3)	2.5	III	B - 2 (1)	(10~15)
II	B - 9 (2)	4.3		B - 3 (1)	(")

- (1) 球速の増加に伴ない破壊形態がⅠ→Ⅱ→Ⅲと移行していくと考えられる。ⅠとⅡ，ⅡとⅢの球速による境界は，実験データが少なく明確ではないが，本実験条件においてそれぞれ $3 \sim 4 \text{ m/sec}$ ， 10 m/sec 程度と推測される。
- (2) Ⅰの破壊形態は，球速が小さく荷重の載荷状態も静的荷重に近い状態であり，局所の応力集中も加わり，引張応力度の最大となる載荷側の根元から曲げ破壊を生じるものと推定される。よって，Ⅰの破壊形態は，KENNEDYの報告による④ Overall Target Response に属すると考えられる。
- (3) Ⅱの破壊形態は，球速が増大し，衝突直後の片持梁の加速度，慣性力が大きくなって梁の固定端だけでなく自由端も載荷点に対して拘束されたような働きをするために周辺固定

に近いような破壊の形態をとるものと推定される。この形態は、供試体にクラックが入る程度であり、供試体の破片が飛びちるといったことがなかった。よって、Ⅱの破壊形態は、Ⅰのそれ同様に④ Overall Target Responseに属すると考えられる。

- (4) Ⅲの形態は、⑤ Scabbingに属するものと考えられる。このScabbing現象について、竹田、立川²⁾は、衝突時に発生する応力波の波形、打撃点と自由端までの距離、コンクリート内の応力伝播速度、応力波の減衰等がこの現象を支配するパラメータになると報告している。本実験において、Ⅲの形態を生じた実験ケースのひずみ測定ができなかった。そのため現象の特性については、わからないが、本実験条件では、球速が $10\sim 15\text{ m/sec}$ になるとScabbingが発生するものと推定される。

3. 歪の解析と実験結果との比較

モルタル片持板に鋼球が衝突した場合の相互作用を検討するにあたり、次の3通りのモデル計算を行い実測との比較を試みた。

- ① 片持梁の変形 : 運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ をもつ鋼球 (m : 質量, v : 速度) が片持梁に衝突し, 片持梁の変形エネルギー $\frac{1}{2}ky_{\max}$ (k : バネ定数, $y_{\max}$: 最大変位) とバランスするまで片持梁が変形するものとする。
- ② マッシブなモルタル壁の局部変形 : 運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ をもつ鋼球がモルタル壁にめりこみを生じ, その局部の変形エネルギーとバランスするまで鋼球のめりこみが生じるものとする。
- ③ 等価質点モデル : 片持梁の変形および局部めりこみが同時に発生するものとして, 片持のバネおよび接触点のバネをもった2質点系として振動するものとする。

ここで①～③の方法で求められるものは, 衝突時に発生する荷重P (③では片持梁に発生するバネ力 P_1) であり, 実測ひずみとの比較を行うにあたって図-3.2に示す換算を行なっている。この換算の仮定において, 試験体は片持梁として変形するものとしており, 図-2.2に示す1の破壊形態を示すような領域を対象として考えている。

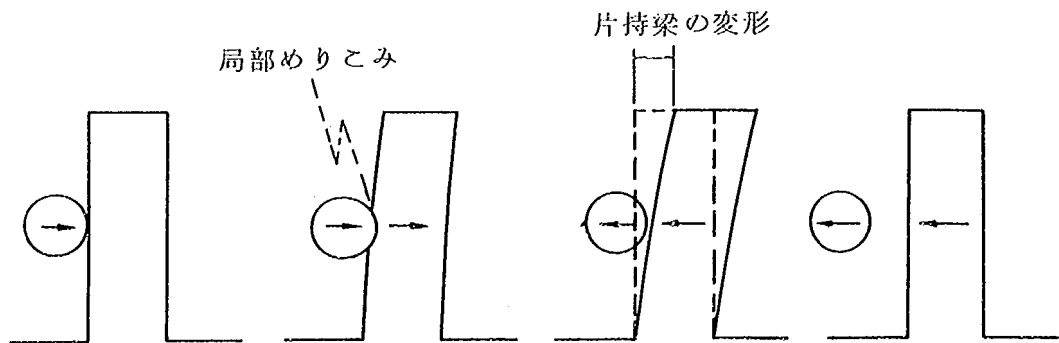
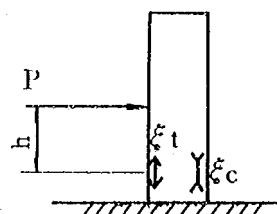
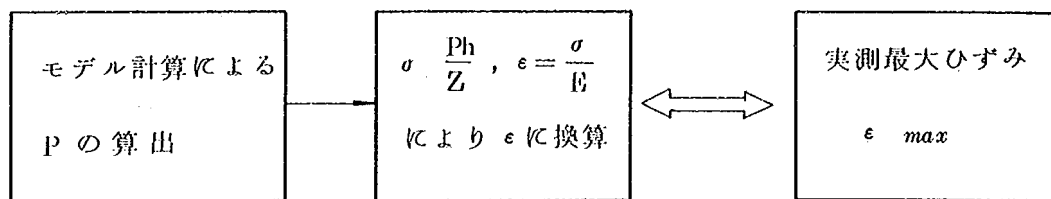


図-3.1 片持梁と鋼球の相互作用



Z : 断面係数

E : ヤング係数

図-3.2 モデル計算と実測ひずみの比較

モデル計算およびひずみ換算において使用する物理定数は下記の値を採用した。

(1) ヤング係数

本実験の範囲はひずみ速度で $10^5 \sim 10^6 \mu/\text{sec}$ ，荷重速度で $10^4 \sim 10^5 \text{ Kg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 程度であり，コンクリートのヤング係数が静的に比較して 20～30% 増加することから，標準供試体の結果をもとに下記のように定めた。

片持梁コンクリートのヤング係数

$$E_1 = 2 \times 10^9 \text{ Kg}/\text{cm}^2$$

衝突面局部のコンクリートの変形係数

$$E_1' = 5 \times 10^8 \text{ Kg}/\text{cm}^2$$

鋼のヤング係数

$$E_2 = 2 \times 10^9 \text{ Kg}/\text{cm}^2$$

(2) ポアソン比

ポアソン比も速度効果が表われるが，圧縮と引張でことなることもあり，これらを考慮して計算に入れることはむずかしいため，ここでは図-3.3 に示す値および標準圧縮試験をもとに決めた。

コンクリートのポアソン比 $\nu_1 = 1/6$

鋼のポアソン比 $\nu_2 = 1/3$

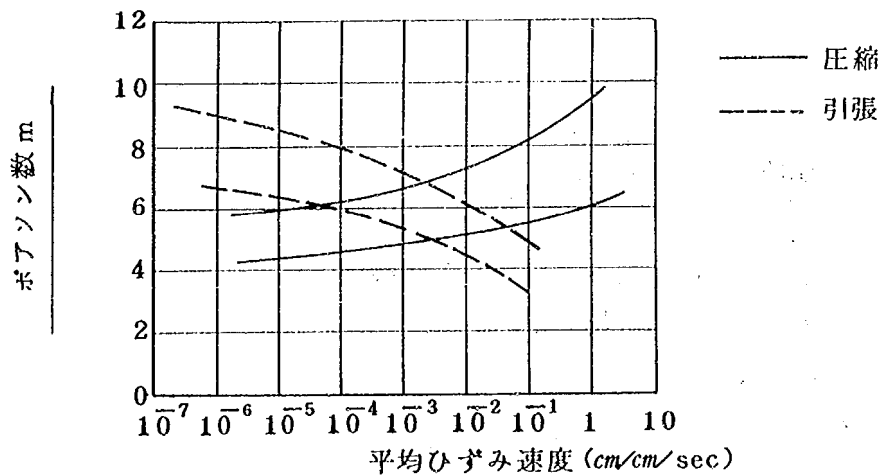


図-3.3 ポアソン数の速度効果

(3) 応力集中係数

低速，Aタイプ，Cタイプは一様片持梁として挙動するものとして扱うことが可能であることから応力集中を考えないものとした。また，片持梁根元における応力集中は当然考えられ，この点では破壊するものと考えられるが，実測のひずみとの比較においては，ゲージを根元から 5 cm 離していることから，この応力集中を受けないものとして検討した。

3.1 片持梁としての解析

(1) 片持梁の荷重とひずみ

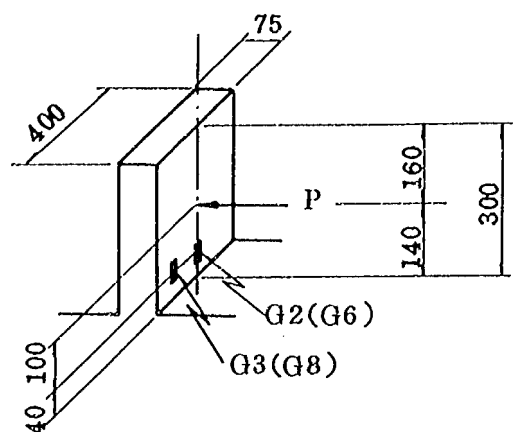


図 - 3.4 片持梁の変形

図 - 3.4 に示すように片持梁（有限巾）に集中荷重が作用した場合の，G 2，G 6，G 3，G 8 に生じるひずみを求める。

G 2，G 6，G 3，G 8 ゲージの位置におけるひずみと荷重 P の関係は，次のようになる。

$$M = 0.10 P$$

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

$$Z = \frac{Bd^2}{6}$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{0.1P}{\frac{Bd^2}{6} E} = \frac{0.6P}{EBd^2} \quad (3.1)$$

M：ゲージ位置における曲げモーメント（Kg・m）

σ ： “ 応力（Kg/m²）

Z：断面係数（m²）

ϵ ：ひずみ

(3.1) 式に E，B，d の値を代入すると (3.2) 式となる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Aタイプ} & \epsilon = 0.267 \times 10^{-6} P \\ \text{Bタイプ} & \epsilon = 0.133 \times 10^{-6} P \\ \text{Cタイプ} & \epsilon = 0.033 \times 10^{-6} P \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

(2) 応答計算

片持梁の変形エネルギーが鋼状の運動エネルギーに等しくなるところで最大応答荷重が発生し (3.3) 式で表わされる。

$$P = \sqrt{\frac{m v^2}{\frac{h^3}{3EI} + \frac{k h}{G A}}} \quad (3.3)$$

P : 最大荷重 K_g

m : 球の質量 $m = \frac{4}{3} \pi r^2 \times \frac{\rho}{g}$ K_g/m³/sec²

k : 断面形状係数 (k = 1.2)

G : $\frac{E}{2(1+\nu)}$

E : コンクリートヤング係数

I : 断面 2 次モーメント m⁴

A : 断面積 m²

v : 球速 m/sec

h : 作用点の高さ m

定数を代入すると (3.3) 式で表わされる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{A タイプ} & P = 2.23 \times 10^3 v \\ \text{B タイプ} & P = 2.86 \times 10^3 v \\ \text{C タイプ} & P = 5.57 \times 10^3 v \end{array} \right\} \quad (3.3')$$

(3.3') 式を (3.2) 式に代入して球速とひずみの関係を求めると (3.4) 式のとおりである。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{A タイプ} & \epsilon = 595 \times 10^{-6} v \\ \text{B タイプ} & \epsilon = 380 \times 10^{-6} v \\ \text{C タイプ} & \epsilon = 184 \times 10^{-6} v \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

(3.4) 式で算出したひずみと実測の G 2, G 6, G 3, G 8 との比較を表 - 3.1, 図 - 3.5 に示した。表 - 3.1 で試験体が破壊したものは, 計算値に対する実測値の比が小さい。特に A - 1, A - 2 はその傾向が著しく, 根元の応力集中により転倒破壊したためと思われる。

表-3.1 計算ひずみ-測定ひずみ (片持梁の変形)

試験体No	速 度 (m/s)	①計算ひずみ	測定ひずみ(μ)		比 較			測定ひずみ(μ)		比 較		
		μ	② G 2	③ G 6	$\frac{②}{①}$	$\frac{③}{①}$	$\frac{②+③}{2 \times ①}$	④ G 3	⑤ G 8	$\frac{④}{①}$	$\frac{⑤}{①}$	$\frac{④+⑤}{2 \times ①}$
B-10 (1)	2.8	1064	322	-312	0.30	0.29	0.30		-301		0.28	0.28
B-10 (2)	2.56	973	134	-179	0.14	0.18	0.16	171	-292	0.18	0.30	0.24
B- 8 (1)	5.5	2090	246	-321	0.12	0.15	0.14	325	-312	0.16	0.15	0.15
※ B- 9 (2)	4.32	1641	135	-343	0.08	0.21	0.15					
B- 1 (2)	4.7	1786	521	-473	0.29	0.26	0.28					
※ B- 8 (2)	6.15	2337	190	-370	0.08	0.16	0.12	168	-233	0.07	0.10	0.08
C- 2 (2)	4.57	841	107	-152	0.13	0.18	0.16	271		0.32		0.32
C- 2 (1)	(4.7)	865	107	-129	0.12	0.15	0.13	150	-176	0.17	0.20	0.19
※ A- 2 (1)	4.2	2499	232		0.09		0.09	212	-40	0.08	0.02	0.05
※ A- 1 (1)	4.3	2559	223	-383	0.09	0.15	0.12	324	-379	0.13	0.15	0.14

※は実験において試験体が破壊したものを示す。

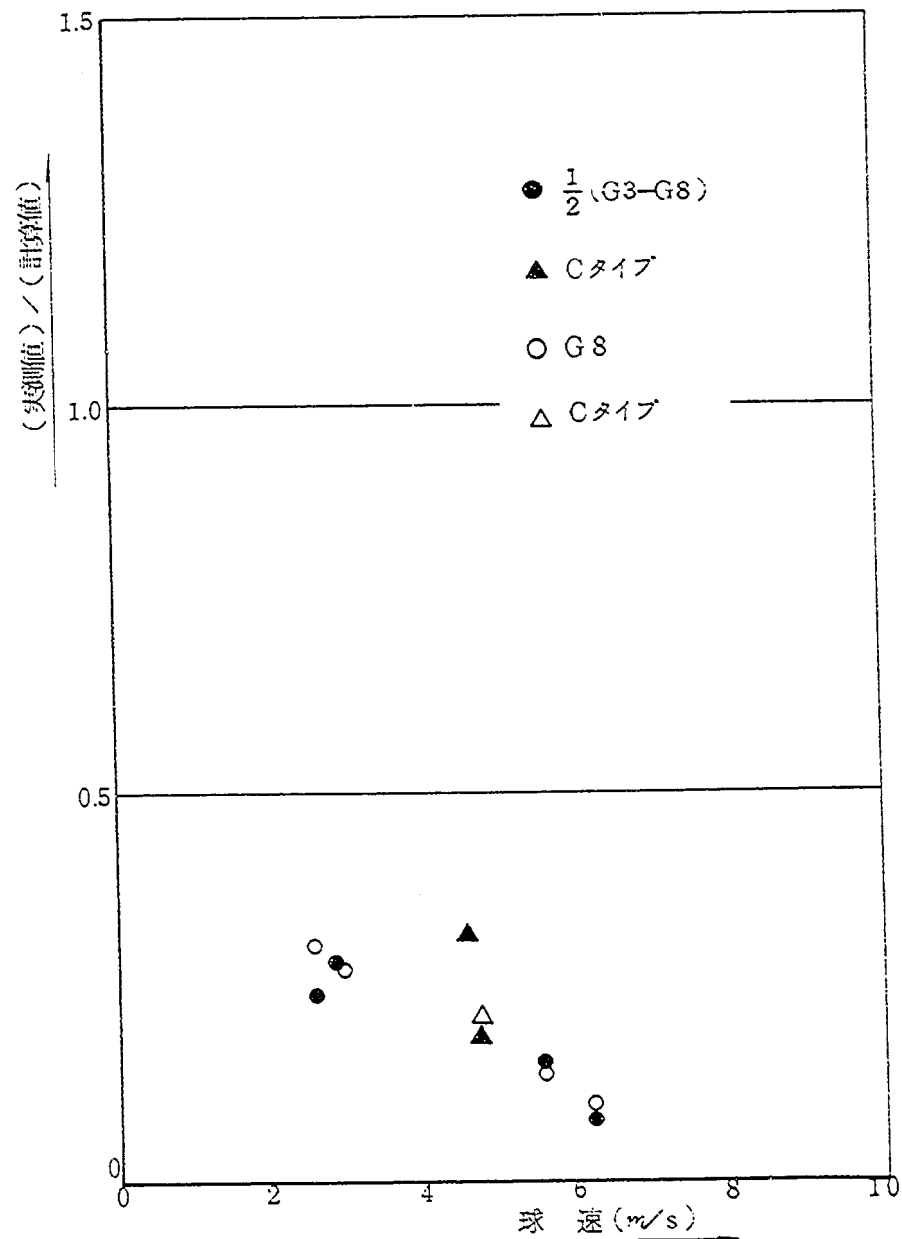
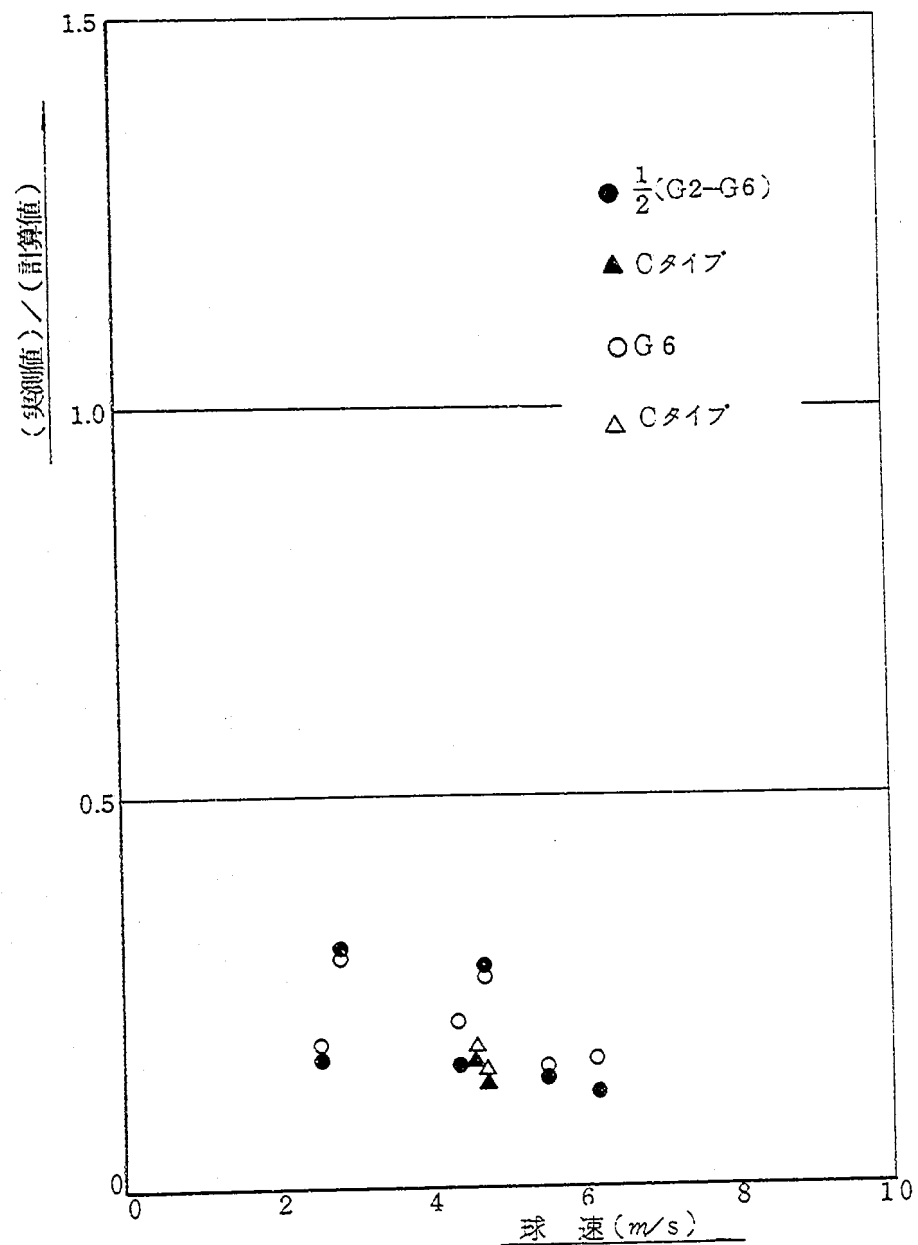


図 - 3.5 計算ひずみと実測の比較 (片持梁の変形)

3.2 マッシブなモルタル壁の局部変形としての解析

(1) 荷重・歪の計算

コンクリート体と球対間の相互作用は、マッシブなコンクリート体に鋼球が衝突したものとして考えるが、コンクリート体のひずみの計算は片持梁として考える。したがって荷重－歪の関係は、前節に示した(3.2)式で表わされる。

(2) 応答計算

コンクリート体をマッシブなものとした場合、球速－荷重は(3.5)式で求められる³⁾

$$\left. \begin{aligned} P &= n \alpha^{\frac{3}{2}} \\ n &= \sqrt{\frac{16 R_2}{9 \pi^2 (K_1 + K_2)^2}} \\ K_1 &= \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \\ \alpha &= \left(\frac{5 v^2}{4 n_1 n} \right)^{\frac{2}{5}} \\ n_1 &= \frac{1}{m_2} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

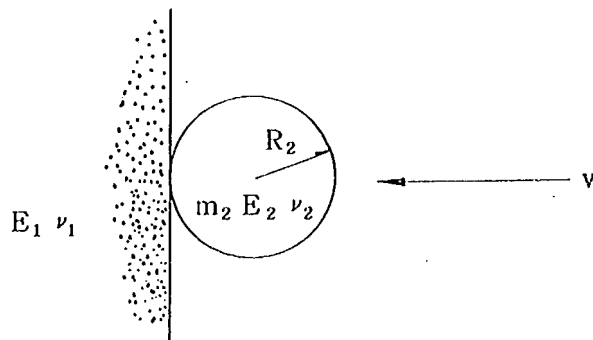
E : ヤング係数 Kg/m^2

ν : ポアソン比

m : 質 量 $Kg/m^2/sec^2$

R : 半 径 m

サフィックス : 1 はコンクリート体, 2 は球体を表わす。



(3.5) 式に定数を代入すると (3.6) 式, (3.7) 式となる。

$$P = 2.30 \times 10^3 R^{\frac{1}{5}} v^{\frac{6}{5}} \quad Kg \quad (3.6)$$

$R = \frac{0.1}{2} m$ を代入すると

$$P = 1.26 \times 10^3 v^{1.2} \quad Kg \quad (3.7)$$

(3.2) 式に (3.7) 式を代入すると球速－ひずみの関係が (3.8) 式で表わされる。

$$\begin{array}{ll}
 \text{Aタイプ} & \varepsilon g = 336 v^{12} \mu \\
 \text{Bタイプ} & \varepsilon g = 167 v^{12} \mu \\
 \text{Cタイプ} & \varepsilon g = 42 v^{12} \mu
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Aタイプ} \\ \text{Bタイプ} \\ \text{Cタイプ} \end{array}} \right\} (3.8)$$

(3.8)で求めたはずみと実測値の比較を表-3.2, 図-3.6に示した。この結果から試験体の大きいC, B, Aの順で実測値の計算値に対する比が大きく, 当然のことながら, コンクリート体が球体に対して大きくなるほど本計算の仮定が現実に近いものとなる傾向が現れている。

表-3.2 計算ひずみ-実測ひずみの比較 (マシッポ)

試験体No	速 度 (m/s)	①計算ひずみ μ	測定ひずみ (μ)		比 較			測定ひずみ		比 較		
			② G2	③ G6	$\frac{②}{①}$	$\frac{③}{①}$	$\frac{②-③}{2 \times ①}$	④ G3	⑤ G8	$\frac{④}{①}$	$\frac{⑤}{①}$	$\frac{④+⑤}{2 \times ①}$
B-10(1)	2.8	574	322	-312	0.56	0.54	0.55		-301		0.52	0.52
B-10(2)	2.56	515	134	-179	0.26	0.35	0.30	171	-292	0.33	0.57	0.45
B-8(1)	5.5	1292	246	-321	0.19	0.25	0.22	325	-312	0.25	0.24	0.25
※ B-9(2)	4.32	967	135	-343	0.14	0.35	0.25					
B-1(2)	4.7	1070	521	-473	0.49	0.44	0.47					
※ B-8(2)	6.15	1477	190	-370	0.13	0.25	0.19	168	-233	0.11	0.16	0.14
C-2(2)	4.57	260	107	-152	0.41	0.58	0.50	271		0.32		0.32
C-2(1)	(4.7)	269	107	-129	0.40	0.48	0.44	150	-176	0.56	0.65	0.61
※ A-2(1)	4.2	1880	232		0.12		0.12	212	-40	0.11	0.02	0.07
※ A-1(1)	4.3	1934	223	-383	0.12	0.20	0.16	324	-379	0.18	0.20	0.19

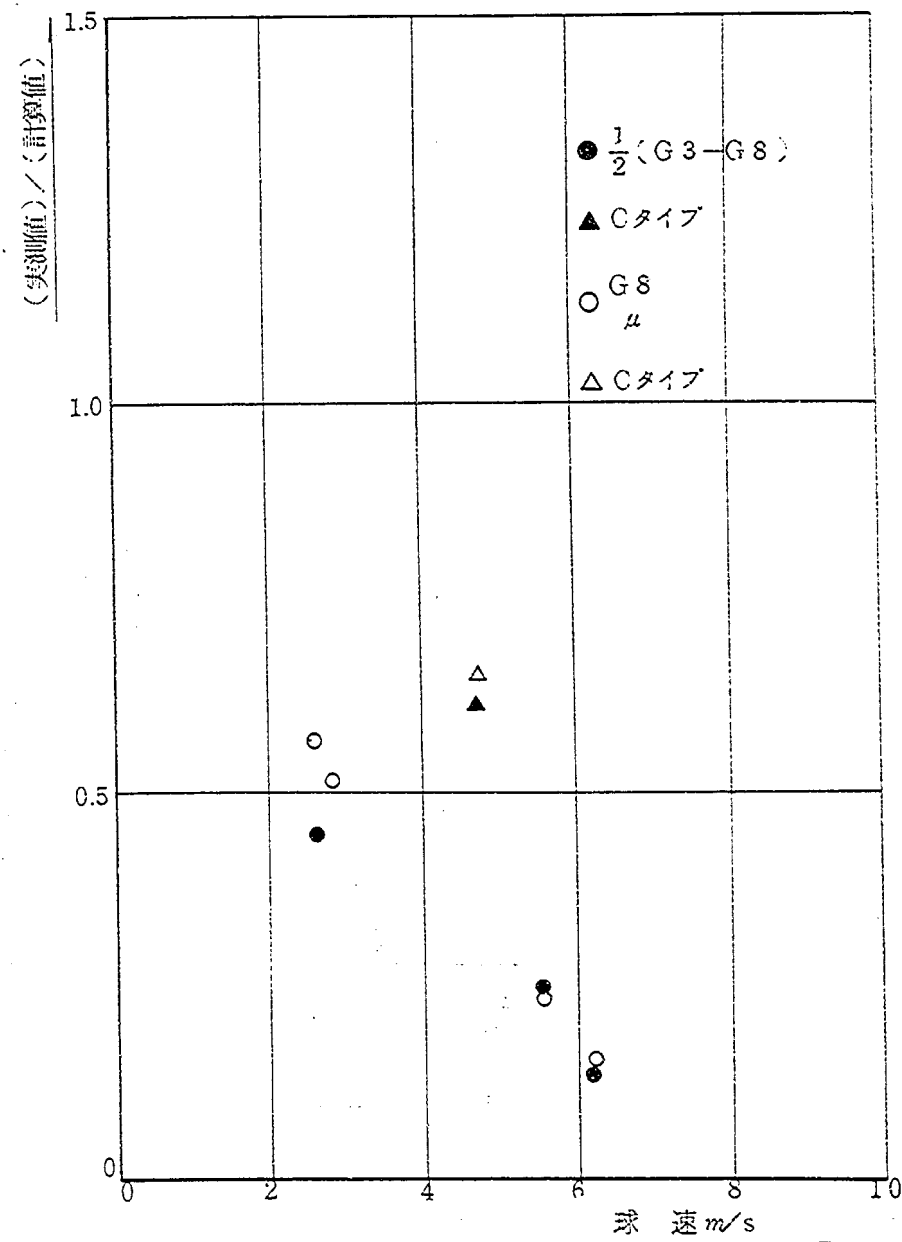
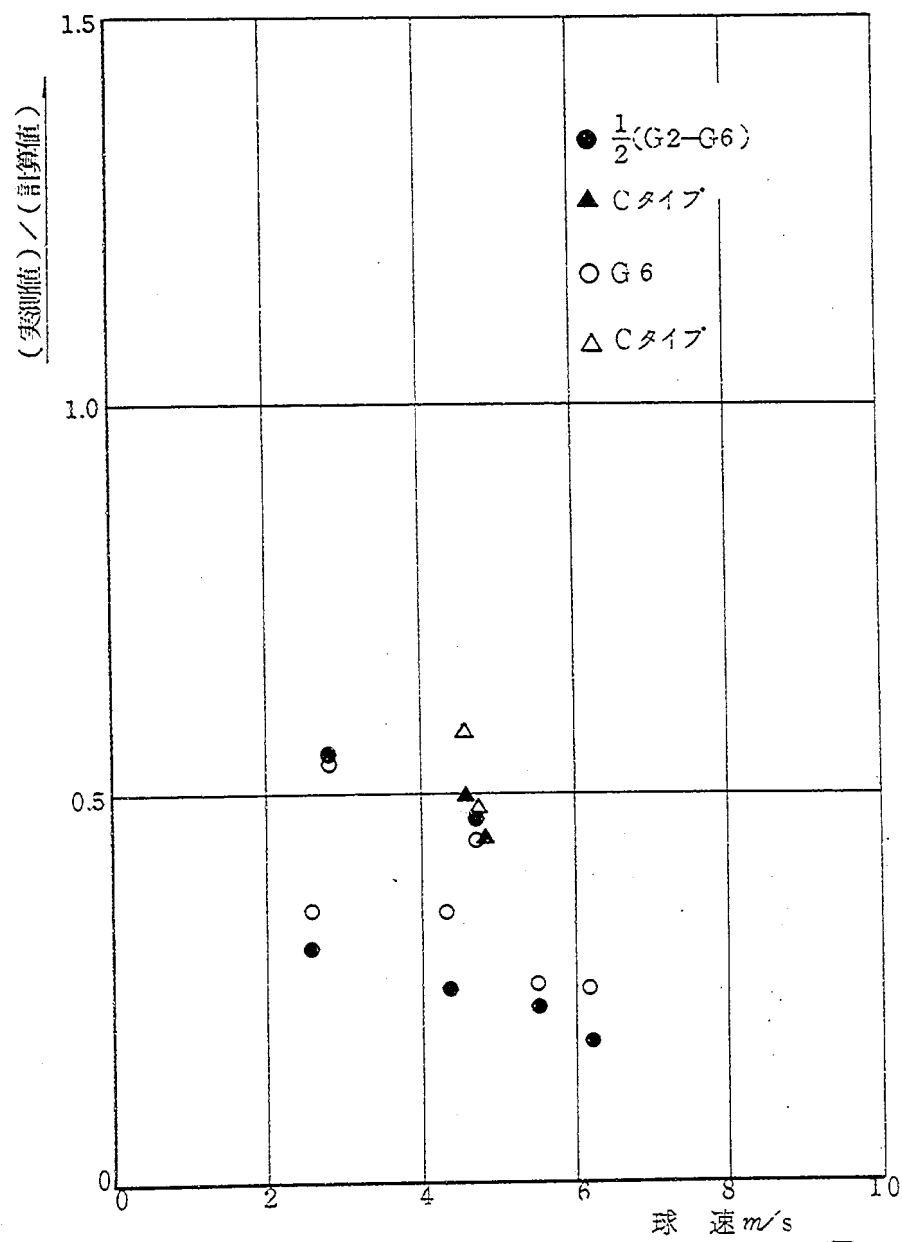


図-3.6 計算ひずみ-実測ひずみ比較 (マッシュなモルタルに対するめり込み)

3.3 二質点バネ系としての解析

(1) 計算モデル

力の方向は y , $\dot{y} > 0$ の時の方向を示す。

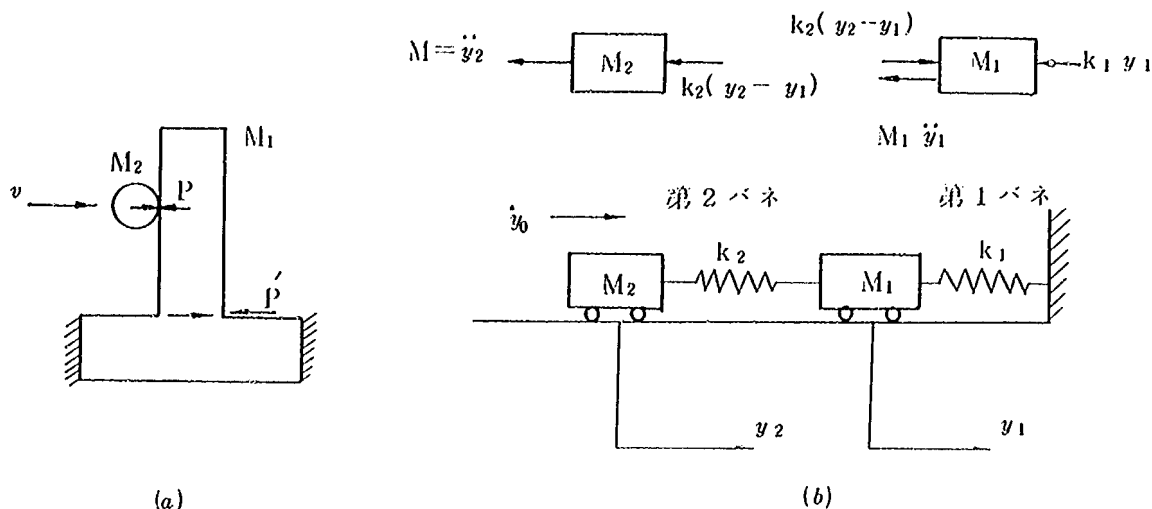


図 - 3.7 等価質点モデル

図 - 3.7(a)に示したようにコンクリート壁に衝突した鉄球の間の相互作用についてモデル計算を行なった。計算にあたっては、図 - 3.7に示す(a)と(b)のように質点モデルを仮定した。同図の中に示す記号は下記のとおりである。

M_2 : ボールの質量	$\ddot{y}_2$: ボールの加速度
M_1 : 片持梁の等価質量	$\ddot{y}_1$: 片持梁載荷点の変位加速度
y_2 : ボールの変位	k_2 : ボールと片持梁接点のバネ定数
y_1 : 片持梁載荷点の変位	k_1 : 片持梁の " (載荷点における)
$\dot{y}_2$: ボールの速度 ($= v$)	
$\dot{y}_1$: 片持梁載荷点の変位速度	

これらの記号を使って力の均合いを表わすと次の2式のようなになる。

$$M_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) = 0 \quad (3.9)$$

$$k_2 (y_2 - y_1) - M_1 \ddot{y}_1 - k_1 y_1 = 0 \quad (3.10)$$

(2) 定数の決定

① ボールと片持梁接触点のバネ定数

(3.5) 式においてアプローチ $\alpha = y_2 - y_1$ とする

$$P = 6.7 \times 10^8 R_2^{\frac{1}{2}} (y_2 - y_1)^{\frac{3}{2}} - k_2 (y_2 - y_1) \quad (3.11)$$

$$k_2 = 6.7 \times 10^8 R_2^{\frac{1}{2}} (y_2 - y_1)^{\frac{1}{2}}$$

(3.11) 式に $R_2 = \frac{0.1}{2} m$ を代入すると (3.11)' となる。

$$k_2 = 1.50 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)'$$

② 片持梁のバネ定数

図-3.8 に示すように片持梁の荷重の作用点における変位と力の関係を求める。

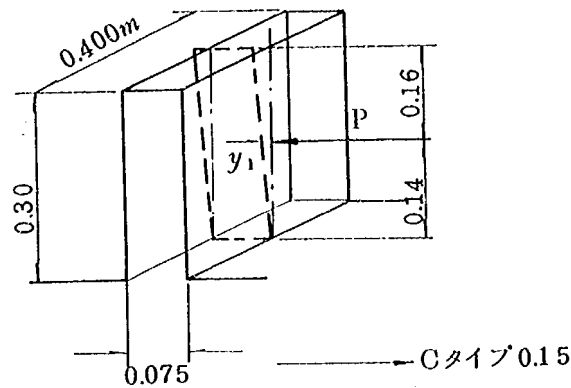


図-3.8 片持梁のバネ定数

$$y_1 = \left(\frac{h^3}{2EI} + \frac{kh}{GA} \right) P \quad (3.12)$$

ここで, y_1 : 荷重作用点における変位量 (m)

P : 荷重 (Kg)

h : 荷重の作用位置 (m)

E : $2 \times 10^9 \text{ Kg/m}^2$

I : 断面 2 次モーメント (m^4)

G : $\frac{E}{2(1+\nu)}$ 剪断弾性係数

ν : ポアソン比 ($= 1/6$)

k : 断面形状係数 長方形 $k = 1.2$

A : 断面積 (m^2)

である。

(3.12) 式に定数を代入すると (3.12)' となり, 片持梁のバネ定数は (3.13) 式のとおりとなる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Bタイプ} & P = 0.195 \times 10^8 y_1 \\ \text{Cタイプ} & P = 0.742 \times 10^8 y_1 \end{array} \right\} \quad (3.12)'$$

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Bタイプのバネ定数} & k_1 = 0.195 \times 10^8 \\ \text{C} & k_1 = 0.742 \times 10^8 \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

③ ボールの質量

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{4}{3} \pi R^3 \times \frac{7850}{9.8} \\ &= \frac{4}{3} \pi \times 0.05^3 \times \frac{7850}{9.8} = 0.419 \quad [\text{MKS}] \end{aligned}$$

④ 片持梁の質量

図-3.9に示すように片持梁を質点系にモデル化する場合には，作用点の変位 y_1 で梁の質量 M_1 が一様に運動するものとして式をたてている。しかし片持梁の変位および変位速度は位置によりことなるので，エネルギーを取り扱う場合に $\frac{1}{2} \dot{M}_1 \dot{y}_1^2$ (M_1 片持梁の真の質量) とはことなってくる。すなわち片持梁の運動エネルギーは $T = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l \dot{y}_1^2 dx$ (ρA : 梁の単位長あたりの質量) で表わされる。

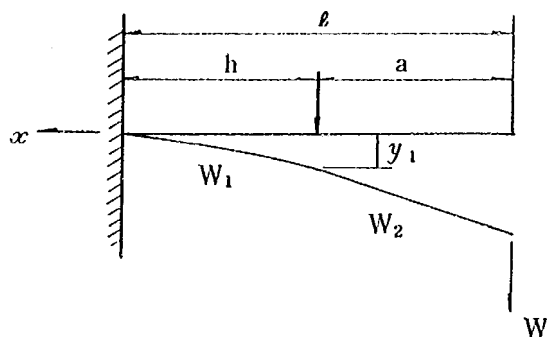


図 3.9 片持梁のたわみ

ここで y_1 の変位を使って運動方程式を作る場合，運動エネルギーが等しくなるように等価質量 M_1 の考え方をとる。

梁のたわみは作用点の左側 W_1 右側 W_2 と別々に次の式で表わされる。

$$W_1 = \frac{P l^3}{6 E I} \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \left\{ 3 \left(\frac{h}{l} \right) - 1 + \frac{x}{l} \right\} \quad (3.14)$$

$$W_2 = \frac{P l^3}{6 E I} \left\{ - \left(\frac{h}{l} \right)^3 + 3 \left(\frac{h}{l} \right)^2 - 3 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \left(\frac{x}{l} \right) \right\} \quad (3.15)$$

$$y_1 = \frac{P h^3}{3 E I} \quad (\text{作用点の変位}) \quad (3.16)$$

ここで梁の運動エネルギーは

$$T = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A \int_0^a \left(\frac{\partial w_2}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \rho A \int_a^l \left(\frac{\partial w_1}{\partial t} \right)^2 dx \quad (3.17)$$

(3.14) (3.15) を変形すると (3.14)' (3.15)' となる。

$$W_1 = \frac{\rho h^3}{3EI} \left(\frac{\ell}{h} - \frac{x}{h} \right)^2 \left\{ 1.5 - 0.5 \frac{\ell}{h} + 0.5 \frac{x}{h} \right\} \quad (3.14)'$$

$$W_1 = y_1 \left(\frac{\ell}{h} - \frac{x}{h} \right)^2 \left(1.5 - 0.5 \frac{\ell}{h} + 0.5 \frac{x}{h} \right)$$

$$W_2 = \frac{\rho h^3}{3EI} \left\{ -0.5 + 1.5 \frac{\ell}{h} - 1.5 \frac{x}{h} \right\} \quad (3.15)'$$

$$W_2 = y_1 \left(-0.5 + 1.5 \frac{\ell}{h} - 1.5 \frac{x}{h} \right)$$

(3.14)' (3.15)' 式に $\ell = 0.3 \text{ m}$ $h = 0.14 \text{ m}$ を代入して、これを (3.17) 式に代入し $a = 0.16 \text{ m}$, $\ell = 0.3 \text{ m}$ とすると (3.18) 式となる。

$$T = \frac{1}{2} \rho A \dot{y}_1^2 (0.588 + 0.031) = \frac{1}{2} \rho A \dot{y}_1^2 \times 0.619 \quad (3.18)$$

ここで片持梁の真の質量 $\dot{M}_1 = 0.3 \rho A$ であるから (3.18) は (3.18)' 式となり、本実験の片持梁の等価質量は (3.19) 式で表わされる。

$$T = \frac{1}{2} \dot{M} \times 2.06 y_1^2 \quad (3.18)'$$

$$\text{等価質量} \quad M = 2.06 \dot{M} \quad (3.19)$$

コンクリートの単重を 2350 Kg/m^3 とすると B, C タイプの等価質量は (3.19)' となる。

$$\text{B タイプ等価質量} \quad M = 2.06 \times 0.3 \rho A = 4.45 \text{ Kg/m}^2/\text{sec}^2$$

$$\text{C} \quad \quad \quad M = 2.06 \times 0.3 \rho A = 8.89 \quad \quad \quad "$$

(3) モデル計算

① B タイプの計算式

(3.9) (3.10) 式に(2)の定数を入れる。

$$\begin{cases} 0.419 \ddot{y}_2 + 1.5 \times 10^3 (y_2 - y_1)^{15} = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} 1.5 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} - 4.45 \ddot{y}_1 - 0.195 \times 10^8 y_1 = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

上式を変形すると

$$\begin{cases} \ddot{y}_2 = -3.58 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} \end{cases} \quad (3.20)'$$

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 = 0.337 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} - 4.38 \times 10^6 y_1 \end{cases} \quad (3.21)'$$

(3.20)' (3.21)' から y_1 y_2 を求めるにあたって、 Δt 毎に分割する差分法を用いる。
時刻 S から $S + \Delta t$ の間は $\ddot{y} = \text{constant}$ とすれば次式が成立する。

$$\dot{y}_{s+1} = \dot{y}_s + \ddot{y}_s \Delta t \quad (3.22)$$

$$y_{s+1} = y_s + \frac{\dot{y}_s + \dot{y}_{s+1}}{2} \Delta t \quad (3.23)$$

(3.20)' (3.21)' (3.22) (3.23) 式を用いて各時刻の y $\dot{y}$ $\ddot{y}$ を求めることができる。

次に相対変位 $y_2 - y_1 \leq 0$ になる時点でボールは梁から離れ、梁の運動の式は下の式で表わされる。ボールは梁と離れる時の速度で等速運動することになる。

$$y_1 = -4.38 \times 10^6 y_1 \quad (3.24)$$

$$M_1 y_1 \longrightarrow \boxed{M_1} \longleftarrow k_1 y_1$$

② C タイプの計算式

C タイプについても同様に (3.9) (3.10) 式に定数を代入する。

$$0.419 \ddot{y}_2 + 1.5 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} = 0$$

$$1.5 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} - 8.89 y_1 - 0.742 \times 10^8 y_1 = 0$$

上の2式を変形すると

$$y_2 = -3.58 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} \quad (3.25)$$

$$y_1 = 0.169 \times 10^8 (y_2 - y_1)^{15} - 8.35 \times 10^6 y_1 \quad (3.26)$$

$y_2 - y_1 \leq 0$ になる点で

$$y_1 = -8.35 \times 10^6 y_1 \quad (3.27)$$

③ 計算ケースと結果

B タイプ、C タイプについて球速 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 m/s について計算を行なった。

図-3.10には $v = 2$ m/s の計算例を示した。

計算から得られた y_1 から G 2 G 6 (又は G 3, G 8) のひずみを計算する。

(3.2) 式, (3.12) 式から B, C タイプについて求めると (3.28) (3.29) 式となる。

$$\begin{aligned} \text{B タイプ} \quad P_1 &= 0.195 \times 10^8 y_1 \\ \epsilon &= 0.133 \times 10^{-6} P_1 = 0.0259 \times 10^2 y_1 \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \text{C} \quad P_1 &= 0.742 \times 10^8 y_1 \\ \epsilon &= 0.033 \times 10^{-6} P_1 = 0.0245 \times 10^2 y_1 \end{aligned} \quad (3.29)$$

表-3.3, 3.4 には計算結果の $y_1 \max$ とその場合の G 2, G 6 (G 3, G 8) におけるひずみを示した。またこれらの計算結果を図-3.11に示した。図-3.11には先の結果も合せて示した。

図-3.11に示した計算結果を、実測ひずみの比較を表-3.5, 3.6, 図-3.12に示した。

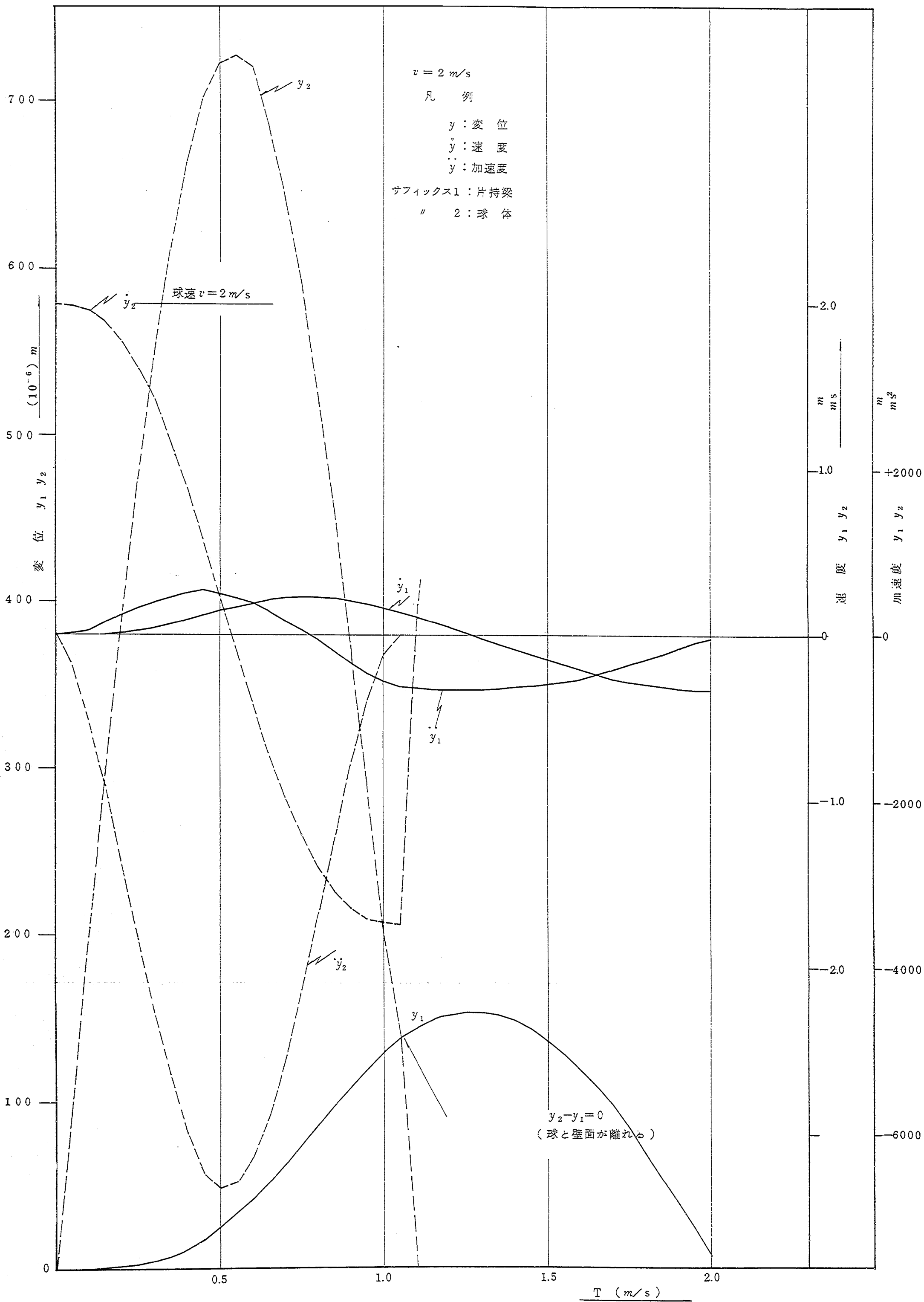


図 - 3.10 質点モデル計算

表-3.3 $v-y_1-\epsilon$ (Bタイプ)

球速 (m/s)	y_1^{max} ($10^{-6}m$)	P_1 (kg)	ϵ_1 (10^{-6})
2	154	3003	400
3	234	4563	607
4	315	6143	871
5	395	7703	1024
6	476	9282	1235
8	639	12461	1681
10	801	15620	2078

表-3.4 $v-y_1-\epsilon$ (Cタイプ)

鋼球初速 v_2 (m/s)	y_1^{max} ($\times 10^{-6}m$)	P_1 (kg)	ϵ_1 ($\times 10^{-6}$)
2	54	4007	132
3	83	6159	203
4	112	8310	274
5	141	10462	345
6	171	12688	419
8	231	17140	566
10	291	21592	713

- ① 片持梁の変形
- ② モルタル壁の局部変形
- ③ 等価質点モデル

—— B タイプ
 ---- C //

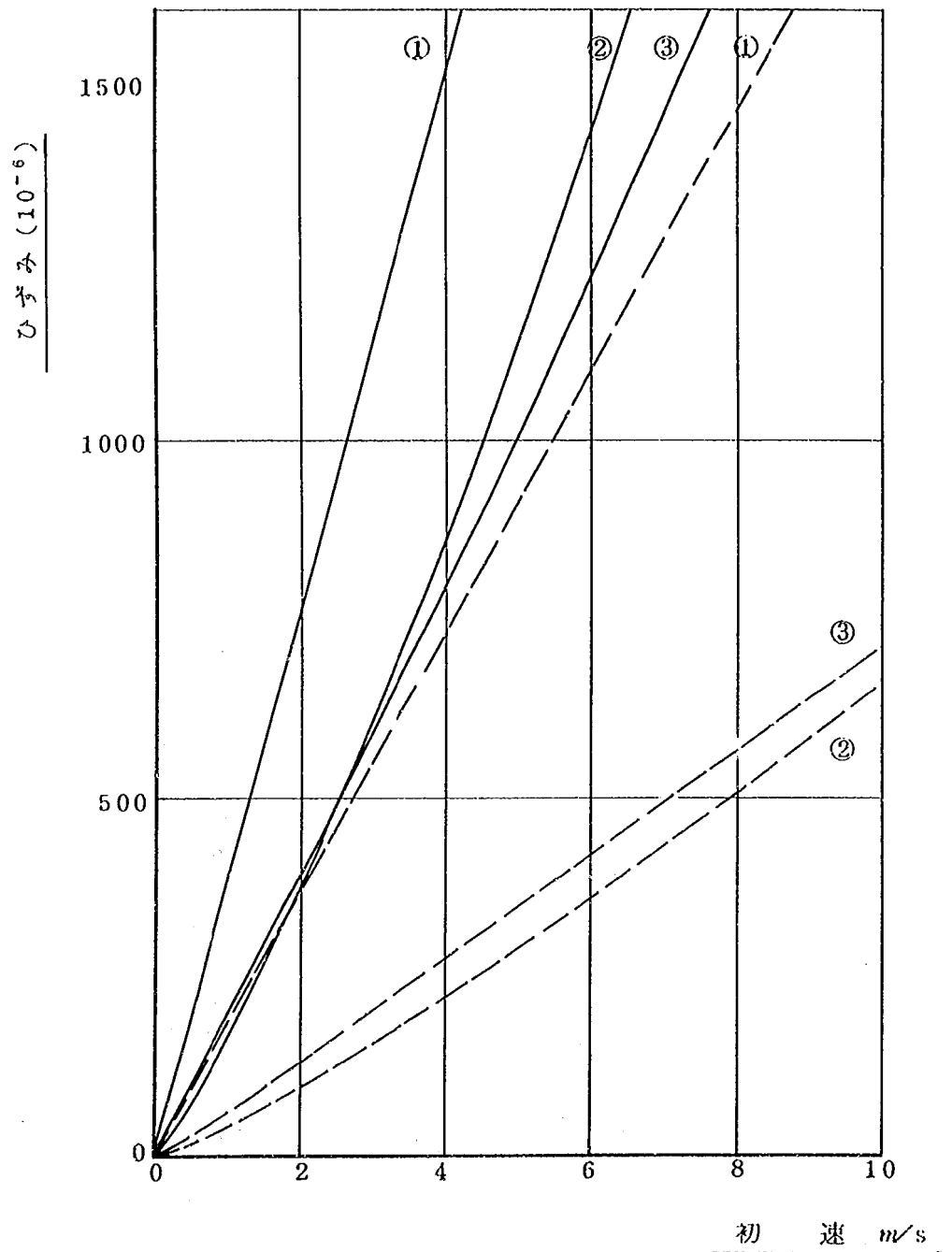


図-3.11 G2, G6, G3, G8の計算ひずみ

表 - 3.5 質点モデル計算と実測値

	$\dot{y}_2^0$ (初速)	① 計 算 値	② G_2	③ G_e	② — ①	③ — ①	② + ③ — 2 × ①
B - 10(1)	2.8	560	322	-312	0.58	0.56	0.57
B - 10(2)	2.56	505	134	-179	0.27	0.35	0.31
B - 8(1)	5.5	1120	246	-321	0.22	0.29	0.25
B - 9(2)	4.32	870	135	-343	0.16	0.39	0.28
B - 1(2)	4.7	950	521	-473	0.55	0.50	0.52
B - 8(2)	6.15	1270	190	-370	0.15	0.29	0.22
C - 2(2)	4.57	315	107	-152	0.34	0.48	0.41
C - 2(1)	4.7	325	107	-129	0.33	0.40	0.37

表 - 3.6 質点モデル計算と実測値

	$\dot{y}_2^0$ (初速)	① 計 算 値	② G_s	③ G_s	② — ①	③ — ①	② + ③ — 2 × ①
B - 10 (1)	2.8	560		-301		0.54	0.54
B - 10 (2)	2.56	505	171	-292	0.34	0.58	0.46
B - 8 (1)	5.5	1120	325	-312	0.29	0.28	0.29
B - 9 (2)	4.32	870					
B - 1 (2)	4.7	950					
B - 8 (2)	6.15	1270	168	-233	0.13	0.18	0.16
C - 2 (2)	4.57	315					
C - 2 (1)	4.7	325	150	-176	0.46	0.54	0.50

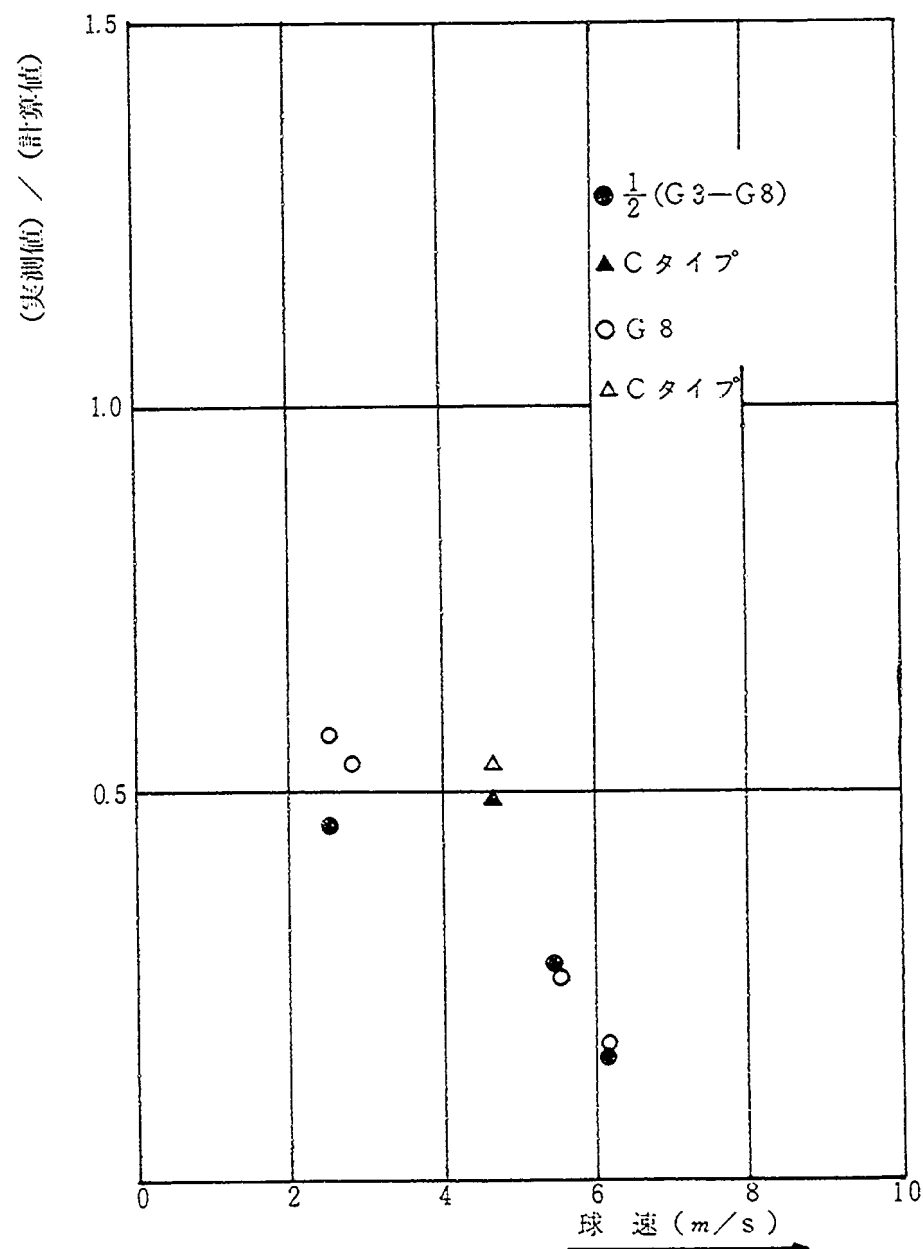
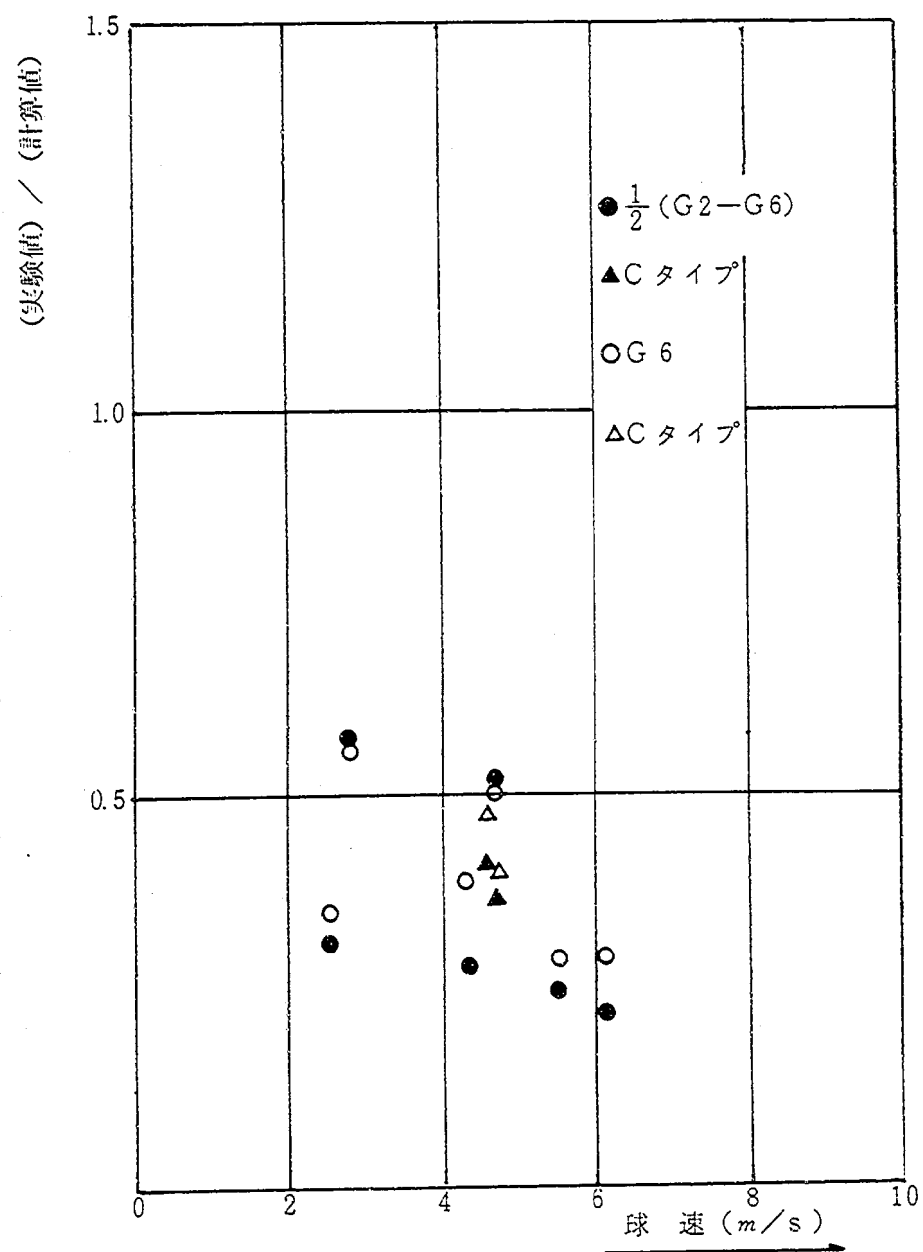


図 - 3.12 計算ひずみ - 実測ひずみ比較

4. 結 語 と 今 後 の 問 題 点

(1) 結 語

モルタル片持梁に対する鋼球の衝突模型実験を実施し、鋼球速度および片持梁のひずみを測定して計算モデルとの比較を行なったが、質点モデル計算が最もよく衝突現象を表わすことができるものと考えられる。しかし、実測ひずみと計算ひずみの比が0.2～0.6程度とモデルとしての精度が悪くかつバラツキも大きい。

鋼球の衝突によるモルタル板の破壊形態は衝突速度により変化する。破壊の形態は速度の違い方から転倒、放射状破壊、スキッピングの順に発生するものと考えられる。それぞれの境界速度については、実験条件により異なるものと考えられるが、本実験に限定すれば、3～4 m/S、10 m/S程度がそれぞれの境界と考えられる。転倒破壊は静的な破壊の延長であり、曲げ破壊と考えられる。放射状破壊は球速が大きい場合、衝突直後の片持梁の慣性力も大きくなり、周辺固定に似た拘束条件となるためと考えられる。

スキッピング破壊については、ひずみ測定ができなかったが、既往文献等から応力波の影響で発生するものであり球速がさらに速い場合に発生するものといえる。

(2) 今後の問題点

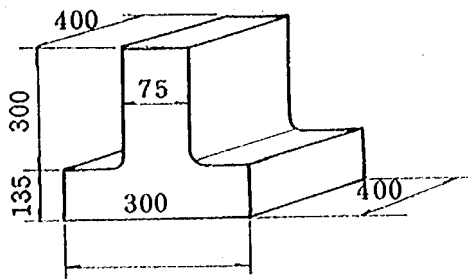
今回の実験は球速のみを変化させて、2種類の形状の片持梁について実施しモデル計算との対比を行なったが、実測と計算の比が0.2～0.6と小さくかつバラつきが大きいので球径についても変化させて検討する必要がある。

また実測とモデル計算の比が0.2～0.6と小さいのはコンクリート内部における応力の減衰、モデル化における変形特性の仮定のちがい等があるためと考えられ、これらの問題を現段階で解決するのはむずかしいものと考えられる。したがって、実際のダム袖部の実物大の実験を実施して、砂防ダムの設計で使用できるようなスケールの計算値に対する修正係数を求めることが実用的な方策と考えられる。

以下、補足実験、実物大実験に関する案を示す。

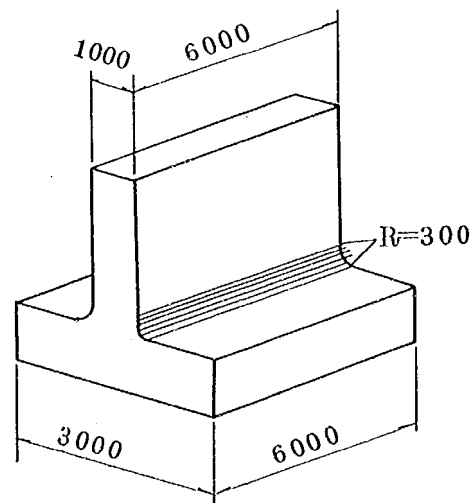
補 足 実 験

ケース	球 径 (cm)	球 速 (m/S)	片持梁形状
1	10	静 的	下 図
2	6	1	
3	//	3	
4	//	6	
5	//	10	



実物大実験

実験ケース	球質	球径 (<i>cm</i>)	球速 (<i>m/S</i>)	片持梁の形状
1	鉄球	40	1	下図
2	//	//	5	
3	//	//	10	
4	//	60	5	
5	石	$\phi > 60$	//	



参 考 文 献

- 1) R. P. Kennedy : A Review of Procedures for Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact effects. Nuclear Engineering and Design 37 (1976) 183 - 203
- 2) 竹田仁一, 立川博之 : 高速圧縮, 引張りおよび曲げをうける各種コンクリートの力学的性質, 日本建築学会論文報告集, 第77号 S 37. 9
- 3) Werner Goldsmith : Impact (The Theory and Physical Behavior of Colling Solids), Edward Arnold LTD. 1960

附表および附図

1. モルタルの物理的性質

(1) 配合表（セメントは、普通ポルトランドを使用）

附表－1 モルタル配合

W/C	単位配合重量 Kg/m^3		
	水	セメント	砂
55%	254	461	1310

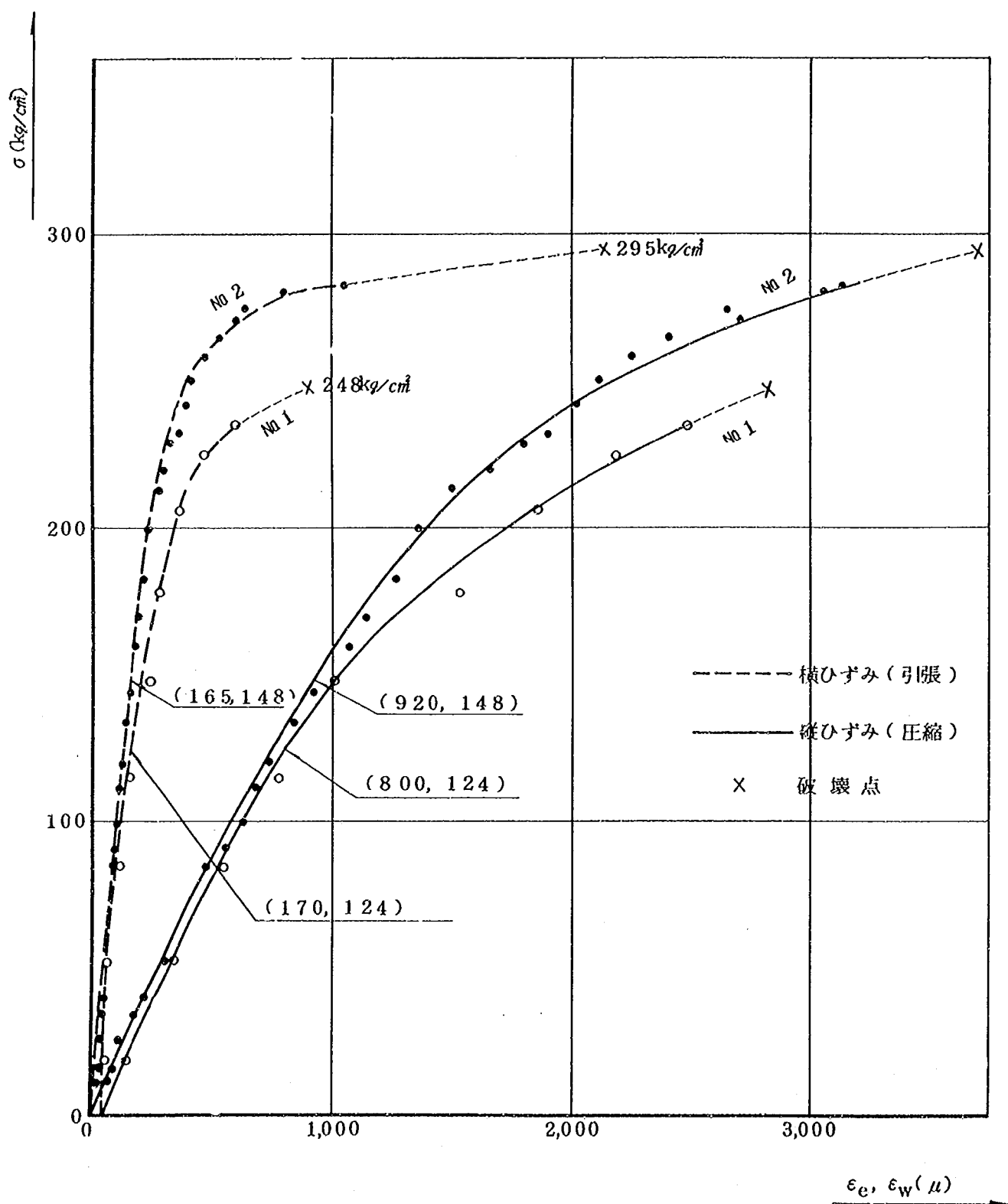
(2) 標準供試体の圧縮強度試験

標準供試体（ $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ）は供試体打設の前中後段にそれぞれ1本ずつ計3本を作成し材令95日で圧縮試験を実施した。

試験結果は附図－1に示すとおりであり、強度特性等は下記のようになる。

附表－2 圧縮強度試験結果

項 目	単 位	No. 1 試験体	No. 2 試験体
破壊強度	Kg/cm^2	248	295
$\frac{1}{2}$ 強度の割線弾係数 $E_{\frac{1}{2}}$	〃	1.55×10^5	1.61×10^5
$\frac{1}{2}$ 強度のポアソン比 $\nu_{\frac{1}{2}}$		$\frac{1}{4.7}$	$\frac{1}{5.6}$



附図-1 圧縮試験結果

2. 計測データ一覧表

附表-3 計測データ一覧表

No.	試験体 No.	ひずみ データ								球 速		打撃点の へこみ
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	載荷装置 圧 力	球 速	
1	B-10 (1)	○	○		○	○	○	○	○	○	○	
2	B-10 (2)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	B-9 (2)		○		○		○	○		○	○	
4	B-1 (2)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5	B-7 (2)									○	○	
6	B-5 (1)									○	○	
7	B-7 (1)									○	○	○
8	B-8 (1)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	B-1 (1)									○	○	○
10	B-8 (2)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	B-2 (1)											
12	B-3 (1)											
13	C-2 (2)		○	○	○		○	○		○	○	
14	C-2 (1)	○	○	○		○	○	○	○	○		○
15	C-2 (3)									○		
16	A-2 (1)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
17	A-1 (1)	○	○	○	○	○	○	○	○		○	
18	B-10 (3)									○	○	

3. 時間 — ひずみ曲線

附表3で、ひずみデーターが計測できたものについて附図2から附図4に整理した。図において、ひずみ出力がでる前に1周期8 μ sec程度の振動がみられるが、これはトリガーとして使用している電気信号によるものと考えられる。なお、打撃時に生ずる応力波の伝播速度は、縦波、横波それぞれ(1)式、(2)式から求められ、これらが反射面で反射して振動を示すものとするとその周期は、附図5に示すように縦波で約50 μ secであり上記の振動とは関係ないと思われる。

また、G2、G6、G3、G8において応答の初期（応答の始まりから100～200 μ sec）に大きな出力がみられる。これはこれらのゲージまでの最短距離を横波あるいはレーレー波（ポアソン比0.2程度の場合のレーレー波速度は0.9Vs程度である。）が伝播するものとした時の時間60 μ s、200 μ secに近いものであり、球体衝突時の応力波によることが想像される。

$$\text{縦波の速度} \quad V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$\text{横波} \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

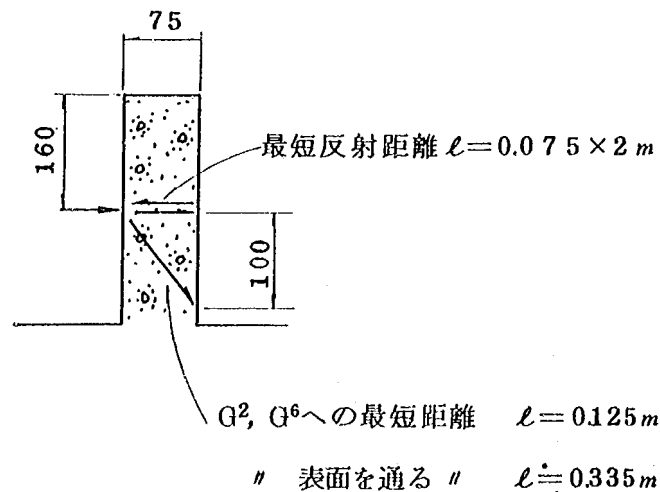
$$E : \text{ヤング係数} \quad E = 2 \times 10^9 \text{ Kg/cm}^2$$

$$U : \text{ポアソン比} \quad U = 1/6$$

$$\rho : \text{密度} \quad \rho = \frac{2300}{9.8} \text{ Kg/m}^2 \text{ s}^2$$

$$V_p \doteq 3000 \text{ m/s}$$

$$V_s \doteq 1900 \quad "$$



附図-5 応力波の伝ば

凡 例 G2 ———

G6 - - - -

$v = 2.6$
B-10(2)

134

-179

$v = 2.8$
B-10(1)

322

-312

$v = 4.3$
B-9(2)

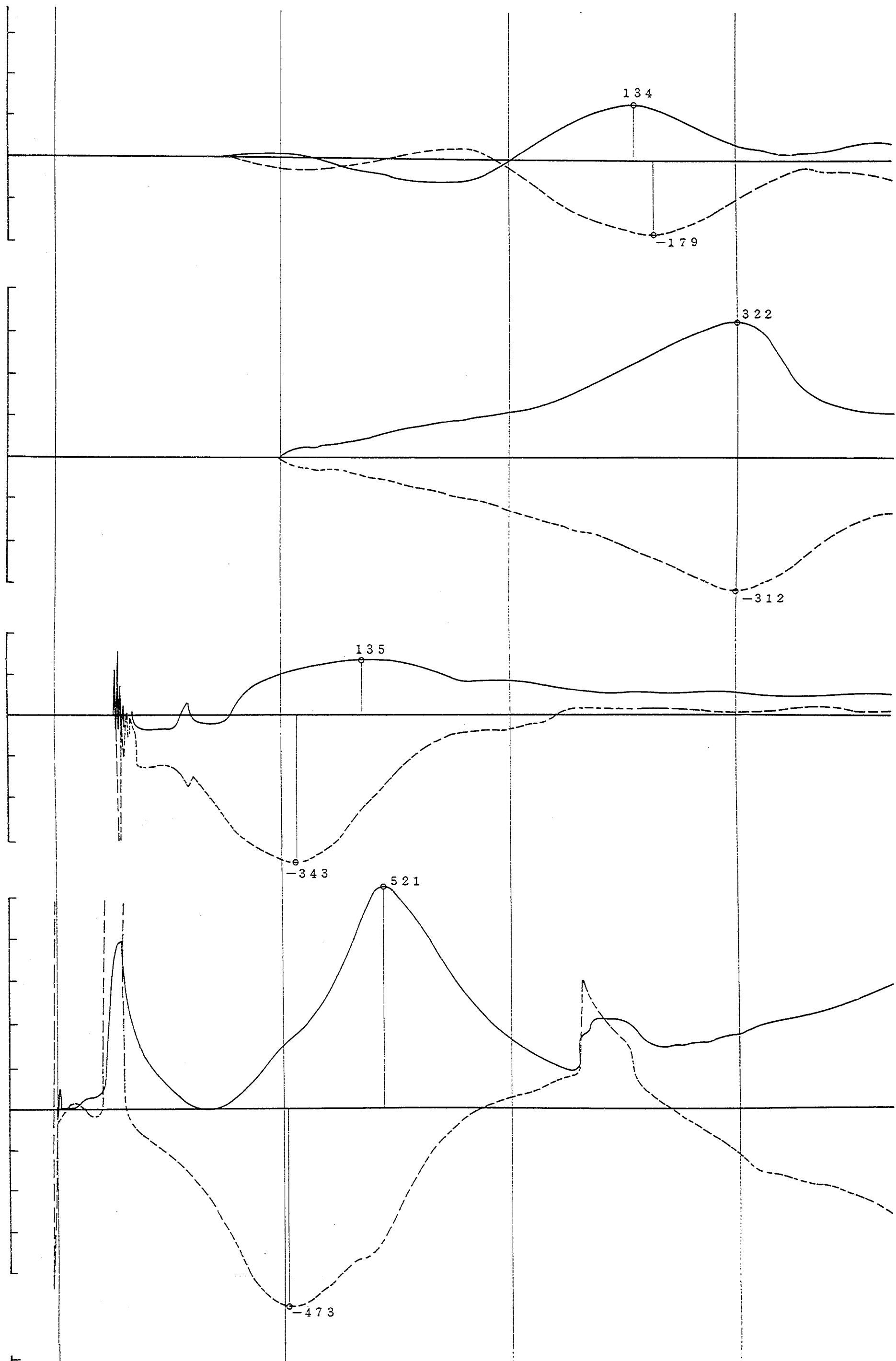
135

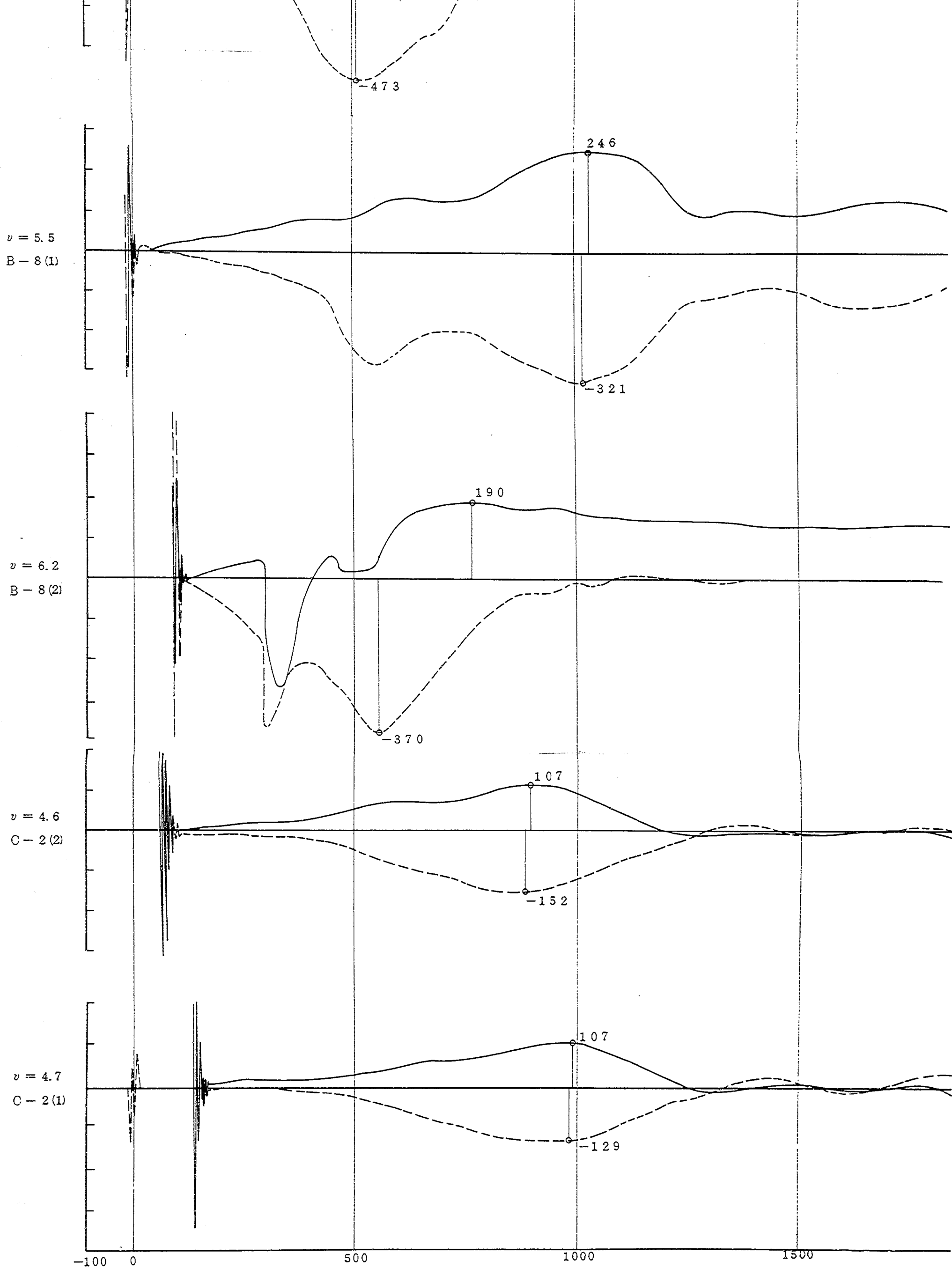
-343

521

$v = 4.7$
B-1(2)

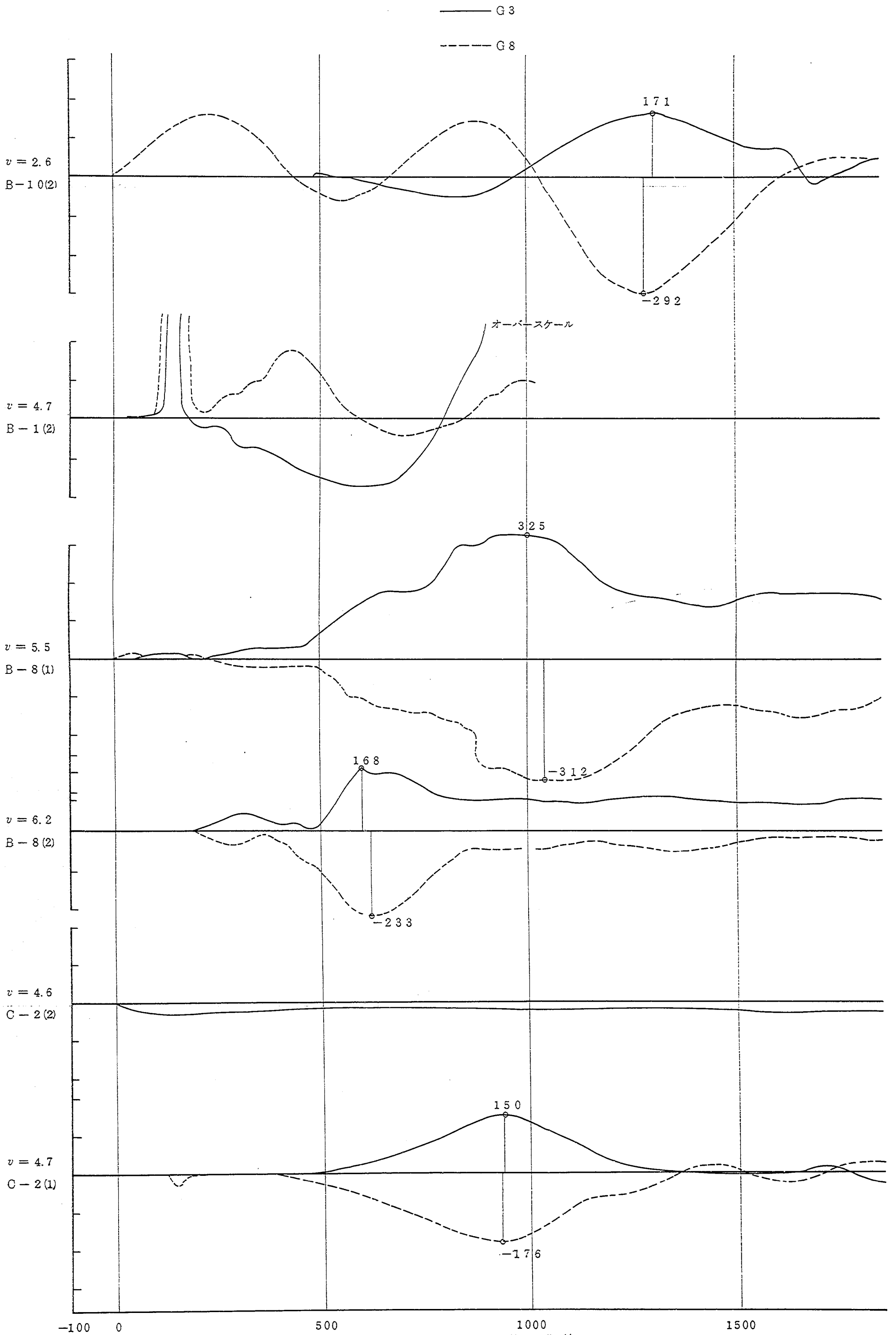
-473





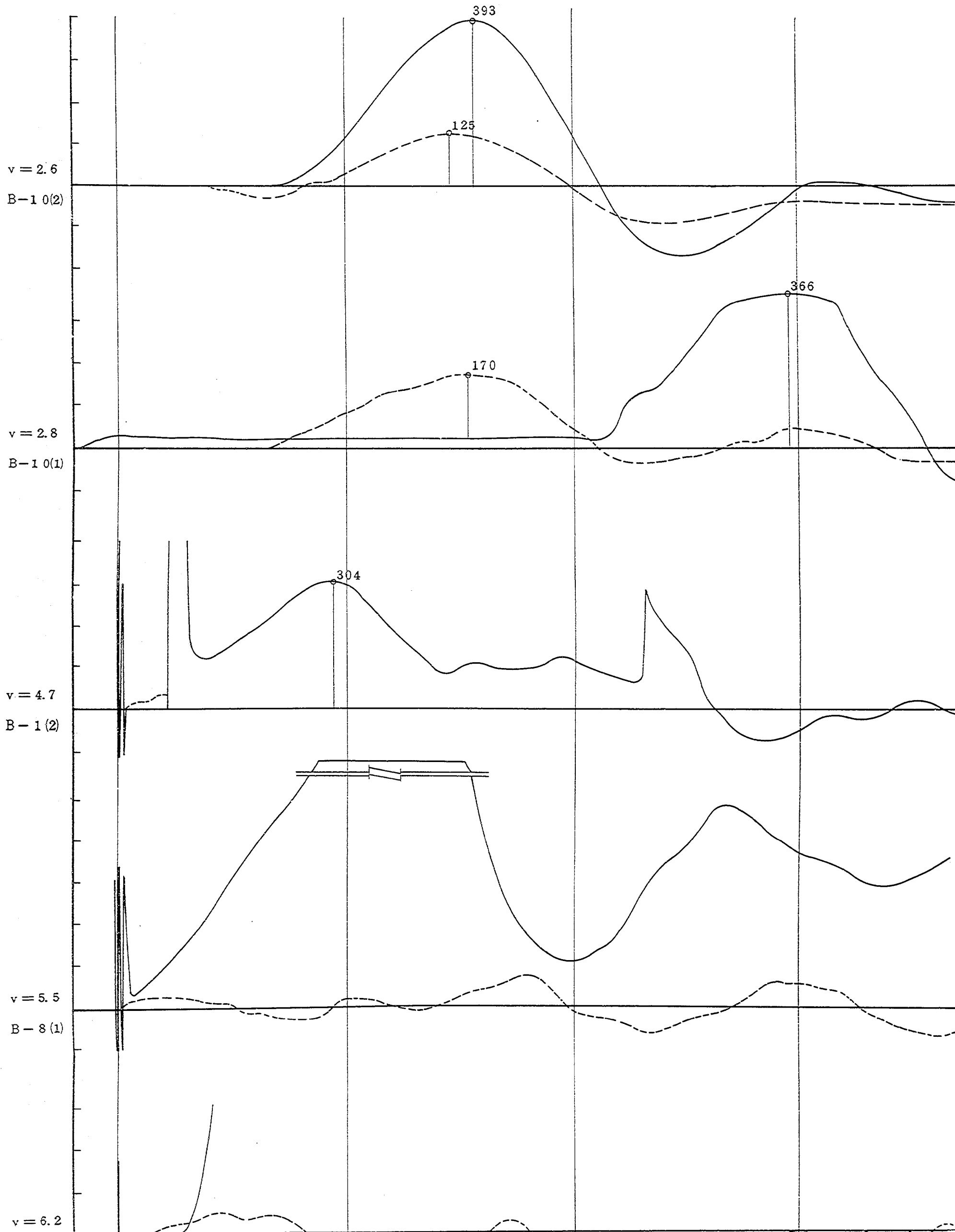
附図-2. 時間-ひずみ曲線

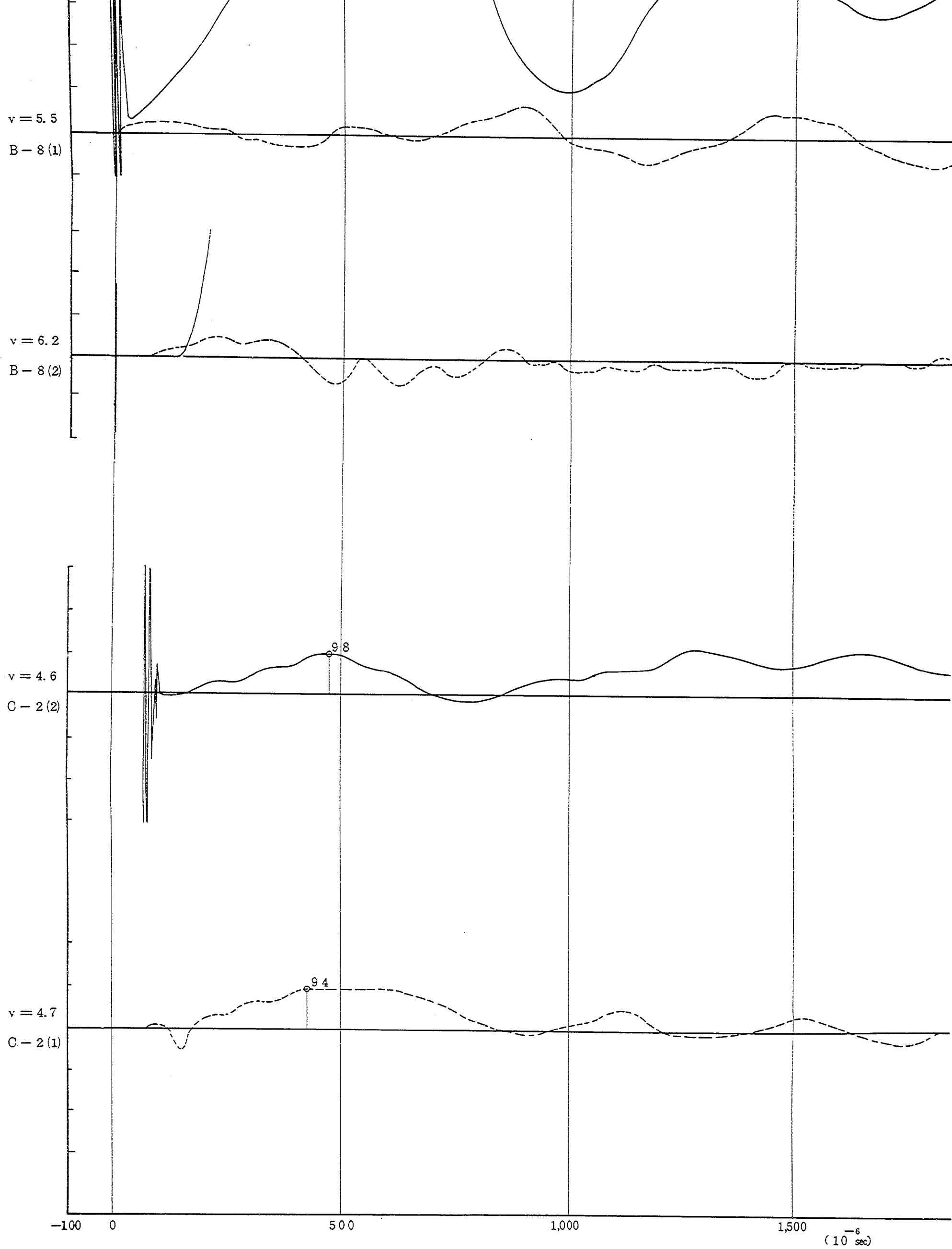
(10^{-6} sec)



附図-3. 時間-ひずみ曲線

凡例 G4 ———
G5 - - - -





附図 - 4 時間 - ひずみ 曲線

富士山土石流衝撃力実験報告書(1)

土研資料 第1583号
昭55.3月(1980)

キーワード 土石流, 砂防ダム, 衝撃力 水 山 高 久

要 旨

昭和54年度建設省中部地方建設局富士砂防工事事務
所から依頼された「土石流衝撃力に関する実験」の実
験結果とその解析の結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

20円切手
をはいて
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. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第1583号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

