

I S S N 0386 — 5878

土木研究所資料 第1743号

マイクロフィルム 第 号

土 木 研 究 所 資 料

道路橋支承の耐震性に関する模型実験

— 下沓突起部の衝突実験 —

昭和56年11月

建設省土木研究所
耐震研究室

Copyright © 56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。

ま え が き

1978年宮城県沖地震による道路橋の被害の特徴の一つに、支承部の被害が多く見られたことが挙げられる。支承部は上部構造と下部構造の接点に位置し、地震時には荷重が集中的に作用する箇所であり、また施工継目となる箇所であることから弱点となりやすい部分である。

橋梁委員会・宮城県沖地震道路橋被害調査分科会^{1), 2)}の支承被害に関する調査結果によると、調査対象 318 橋 6,910 支承中 66 橋 442 支承に被害が生じており、被害形態別に見ると次の 4 形態が全体の約 90 %を占めている。

- (1) アンカーボルトの被害 (総被害数の 37.5 %)
- (2) 上査逸脱防止構造の被害 (総被害数の 22.4 %)
- (3) 沓座モルタルの被害 (総被害数の 17.5 %)
- (4) 沓座コンクリートの被害 (総被害数の 11.6 %)

アンカーボルトの被害については、道路橋耐震設計指針 (昭和 47 年) の施行以降に建設された橋では被害が無く、また日本道路公団ならびに首都高速道路公団によって行われたアンカーボルトの耐力試験、引抜試験の結果を参照すれば、現在の耐震設計規定に従って設計することによってアンカーボルトの破断、抜出しは防止できるものと考えられる。^{3), 4)}

上査逸脱防止構造の被害については、被害要因の一つに材質がぜい性的破壊を起こしやすい鋳鉄であったために被害が生じたものがあり、このような材質特性に起因する被害については、鋳鉄を使用しないでじん性に優れた鋼材などの材料を用いることによって対処できるものと考えられる。しかしながら、地震時にこの部分に作用する荷重ならびに部材の耐震性能については不明な点があり、今後解明していく必要がある。

沓座モルタルの被害については、施工不良、盛上げ高が高すぎるといったことがその主な原因であり、道路橋示方書に述べられているように無収縮モルタルによって確実な施工を実施し、盛上げ高については道路橋支承便覧施工編 (昭和 54 年) などに示されているように 3 cm 程度に低くおさえることによって対処できるものと考えられる。

沓座コンクリートの被害については、日本道路公団、首都高速道路公団によるアンカーボルトの支圧に関する実験^{3), 4)}、ならびに建設省土木研究所基礎研究室による支承下突起による荷重の伝達に関する実験の結果を参照すれば、道路橋示方書に規定されている支承縁端距離を確保することによって対処できるものと考えられる。¹⁾

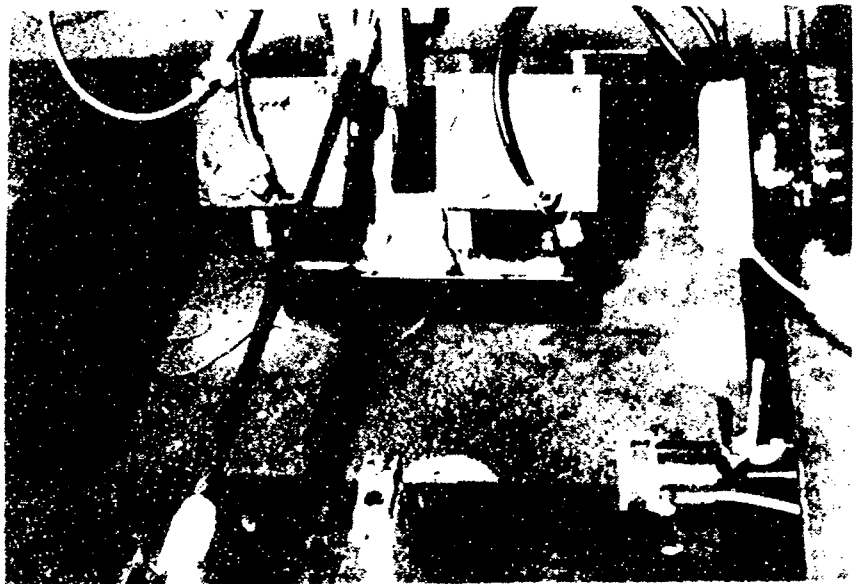
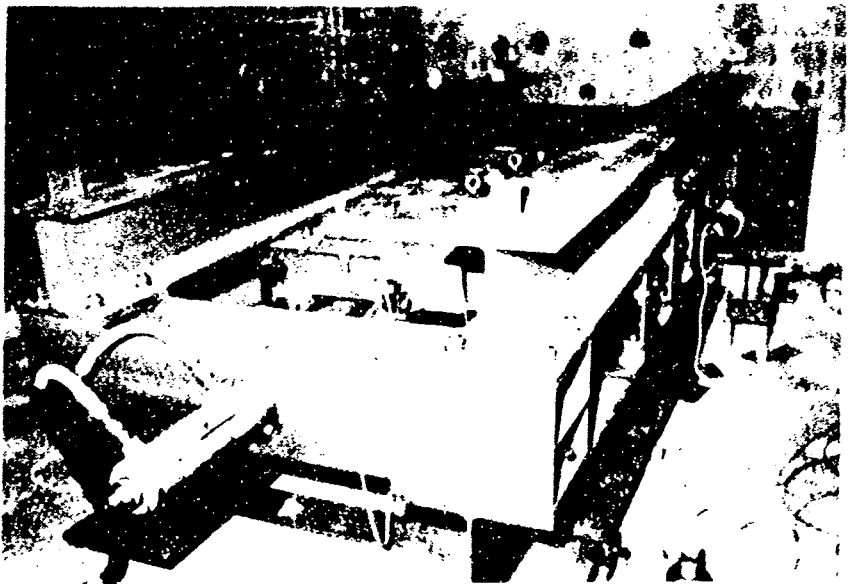
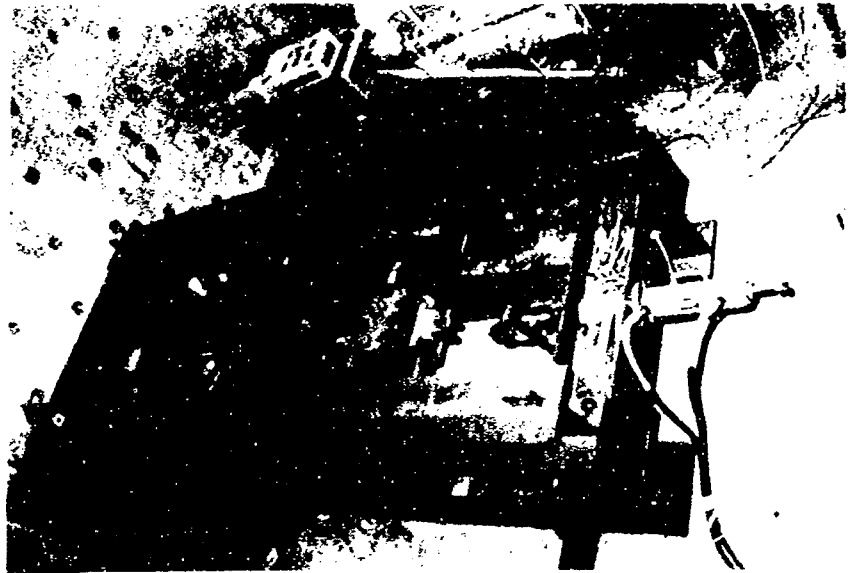
以上のような支承部分の耐震設計法の現在の進展状況を考慮すると、上査逸脱防止構造部分に作用する地震荷重ならびに部材の耐震性能について優先的に解明することが望まれる。本資料はこのような観点から上査逸脱防止のための下査突起部の模型衝突実験を行った結果を報告するも

のである。

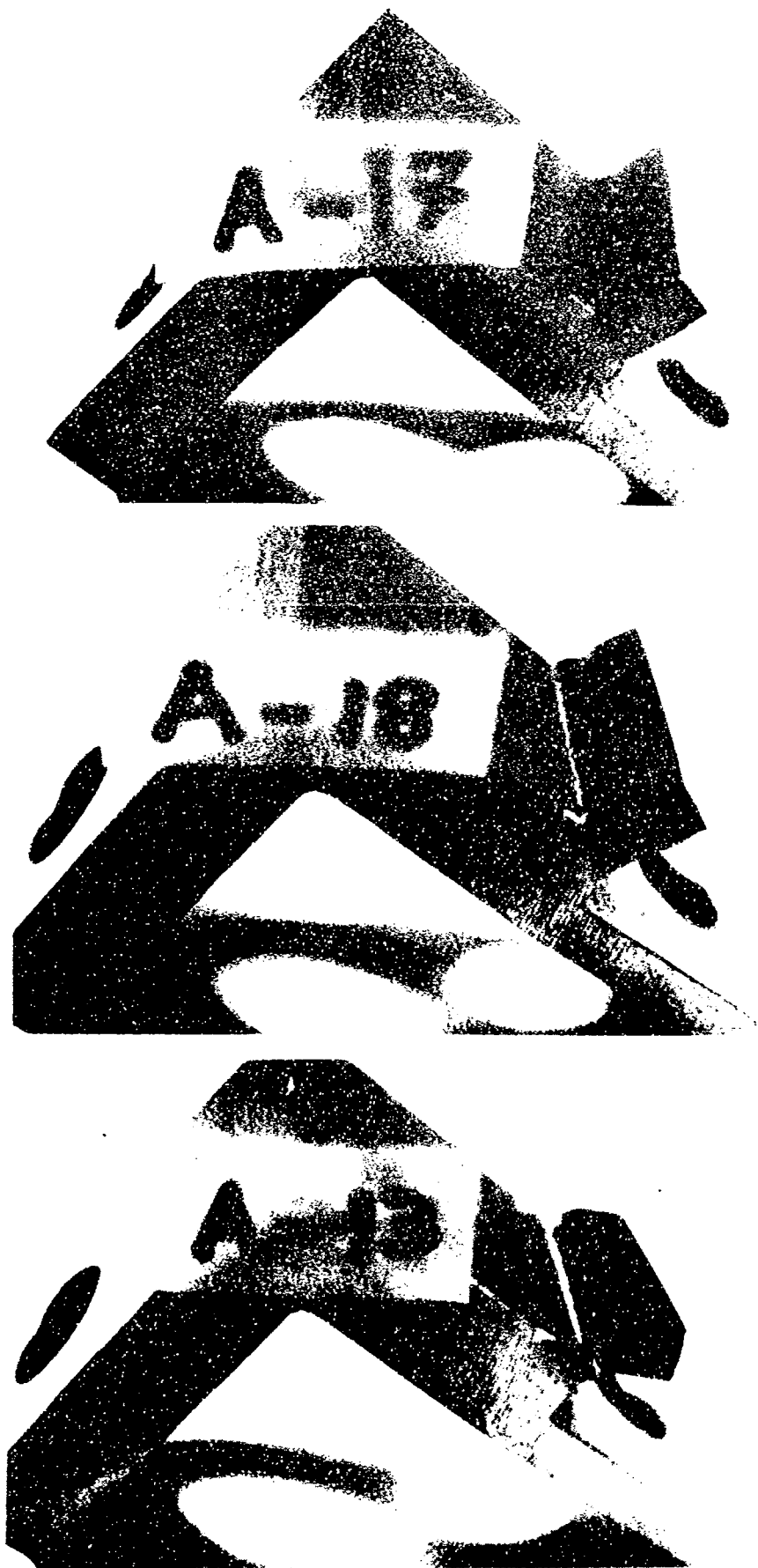
昭和56年11月

耐震研究室

元室長	上	田		治
研究員	萩	原	良	二
	小	山	達	彦



衝突實驗裝置



衝突実験後の下杵突起模型

目 次

まえがき	
1. 実験の概要	1
1.1 模 型	1
1.2 実験装置	3
1.3 実験内容	3
1.3.1 予備実験	3
1.3.2 静的载荷実験	3
1.3.3 衝突実験	3
2. 実験結果	11
2.1 予備実験結果	11
2.2 静的载荷実験結果	11
2.3 衝突実験(1)結果	12
2.4 衝突実験(2)結果	12
2.5 緩衝材実験結果	13
3. 実験結果の解析	39
3.1 衝突現象の解析（衝撃荷重の推定等）	39
3.2 衝 撃	41
3.3 破壊性状	50
3.4 終局耐力	50
3.5 吸収エネルギー	54
3.6 突起厚の影響	54
3.7 緩衝材の効果	57
4. 結 論	60
あ と が き	62
参 考 文 献	62

1. 実験の概要

1.1 模 型

日本道路協会標準すべり支承 B P - A 106 (鉛直反力 100 t) の下沓突起部を対象に、幾何形状を 15/100 (模型 A), 20/100 (模型 B), 25/100 (模型 C) の 3 種類に縮小した模型を用いて衝突実験を行った。15/100 模型については突起厚を 19% (模型 A 1) および 38% (模型 A 2) 増加させた場合についても実験を行った。模型の概要を表 1-1, 図 1-1 に示している。

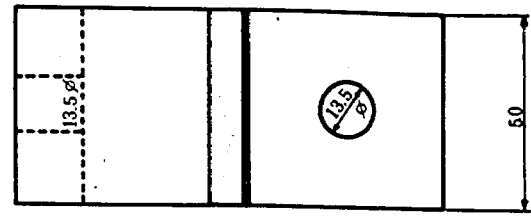
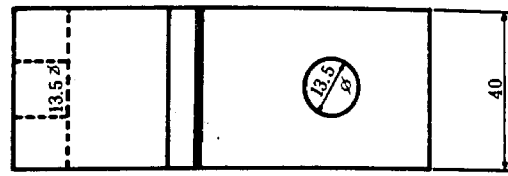
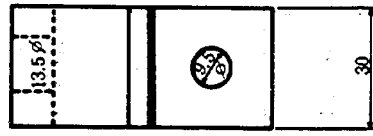
模型の材質は実物と同一の J I S 5101 炭素鋼鋳鋼品 3 種 SC 46 である。この材質の機械的性質は、J I S 規格によって表 1-2 のように定められている。

表 1-1 模 型 の 概 要

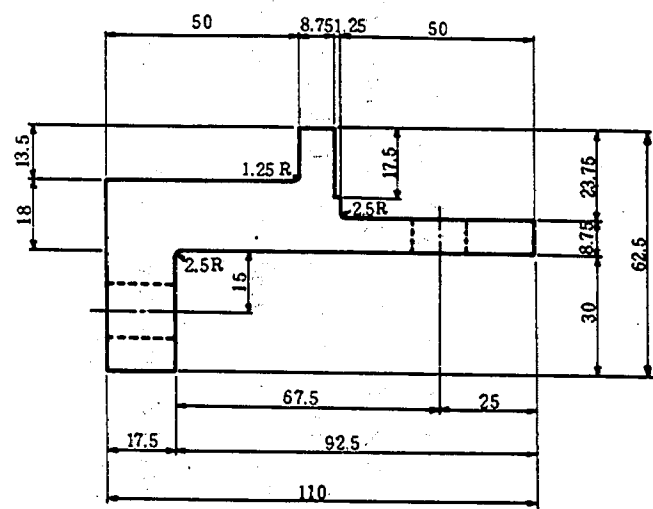
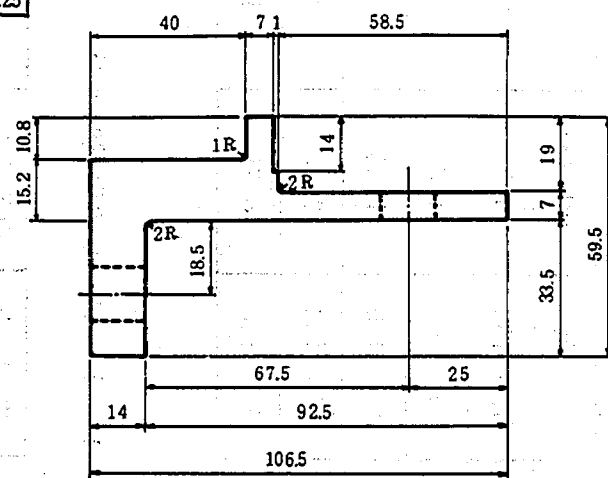
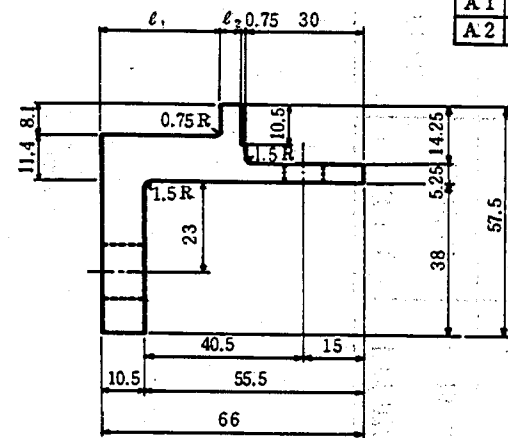
模 型	縮 尺	突起厚(mm)	個 数
A	15/100	5.25	28
A 1	15/100	6.25	6
A 2	15/100	7.25	6
B	20/100	7.10	10
C	25/100	8.75	10

表 1-2 SC 46 の機械的性質

種 類	記 号	降 伏 点 kg/mm ² (N/mm ²)	引張強さ kg/mm ² (N/mm ²)	伸 び %	絞 り %
3 種	SC 46	23 以上 (226 以上)	46 以上 (451 以上)	22 以上	30 以上



模型	ℓ_1	ℓ_2
A	30	5.25
A 1	29	6.25
A 2	28	7.25



模型A, A 1, A 2 ($S = 15 / 100$)

模型B ($S = 20 / 100$)

模型C ($S = 25 / 100$)

図 1-1 模 型 の 概 要

1.2 実験装置

下沓突起模型に衝撃力を加えるために、図1-2のような実験装置を製作した。この装置は、センターホールジャッキによってコイルばねを引込み、瞬間的に引込み力を解放した時のコイルばねの反発力を利用して重錘台車に設置した衝突板を下沓突起模型に衝突させる構造となっている。このような装置を用いた場合のばね引込み量と衝突速度の間には、次のような関係を仮定することができるものと考えられる。

$$\frac{1}{2} kx^2 - F(x+d) - \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 = 0 \quad (1-1)$$

ここに、

k : コイルばねのばね係数 ($= 110 \text{ kg/cm}$)

x : ばね引込み量 (cm)

F : 走行抵抗 (kg)

d : 重錘台車の自由滑動距離 ($= 32 \text{ cm}$)

W : 衝突重量 (重錘台車の重量) (kg)

g : 重力加速度 ($= 980 \text{ cm/sec}^2$)

v : 衝突速度 (cm/sec)

衝突位置は、図1-3のように衝突板下端の位置が上沓ソールプレート下端位置に等しくなるようにスペーサーを用いて調節した。

1.3 実験内容

1.3.1 予備実験

衝突実験に先立って、重錘台車の積載重量を変えて各衝突重量 (251 kg , 501 kg , 601 kg , 751 kg , $1,001 \text{ kg}$, $1,172 \text{ kg}$) ごとにばね引込み量を $40 \sim 90 \text{ mm}$ の間で変化させて、模型を設置しない状態で台車を発射し、ばね引込み量と台車の衝突速度の関係を調べた。

さらに、模型A 2体、B 1体、C 1体を用いて、衝突速度を $30 \sim 100 \text{ cm/sec}$ の範囲で変えて衝突実験を行い、衝突実験における衝突速度の設定、計測機器の追随性などの検討を行った。

1.3.2 静的载荷実験

模型A、B、C各3体を用いて油圧ジャッキによる静的载荷 (载荷速度 $200 \text{ kg/sec} \sim 400 \text{ kg/sec}$) を行い、各模型の耐力ならびに荷重～変位曲線を求めた。

1.3.3 衝突実験

模型A 23体、A 1、A 2、B、C各6体を用いて図1-2のような実験装置による衝突実験を行った。

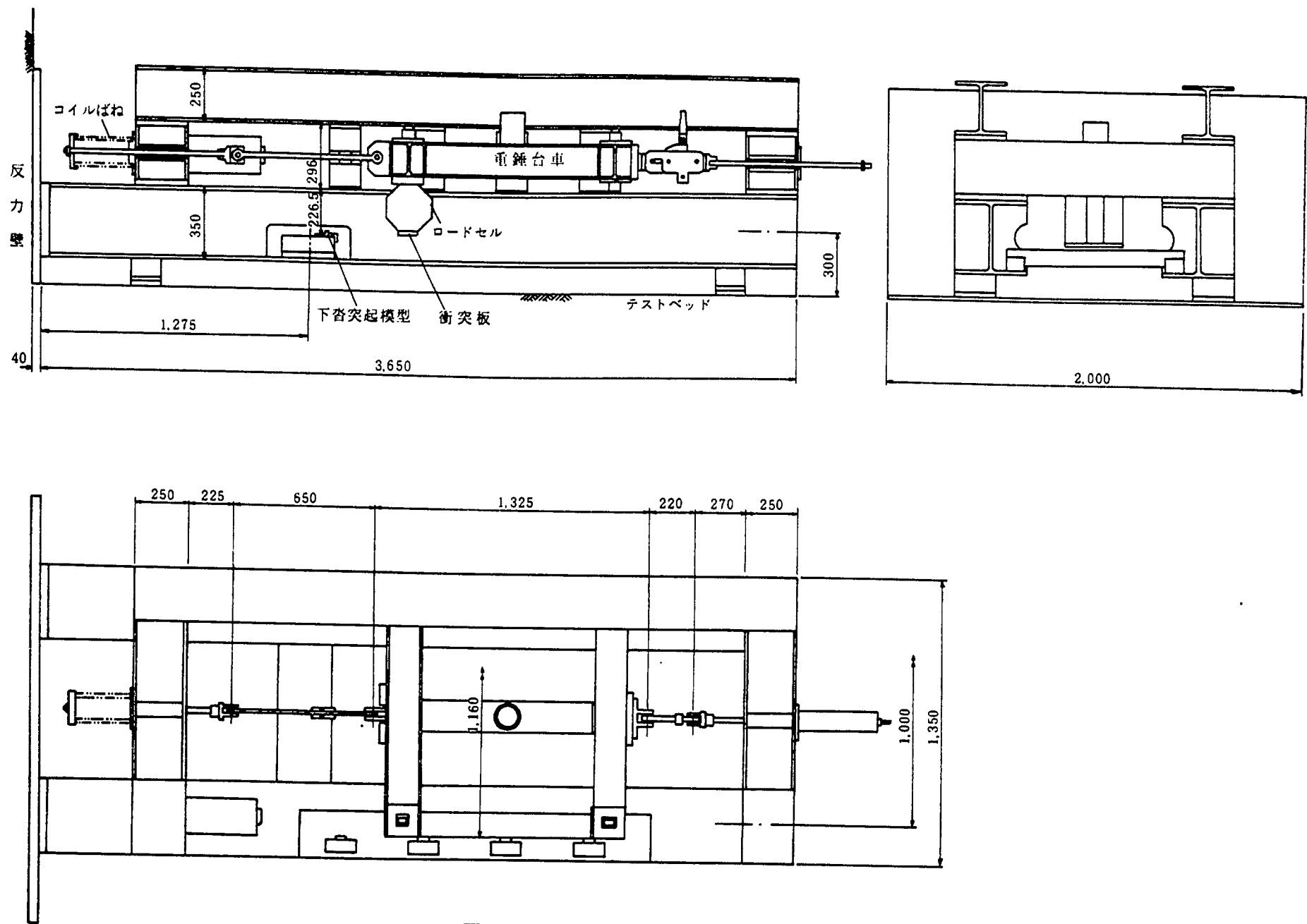


図 1 - 2 実 験 装 置 の 概 要

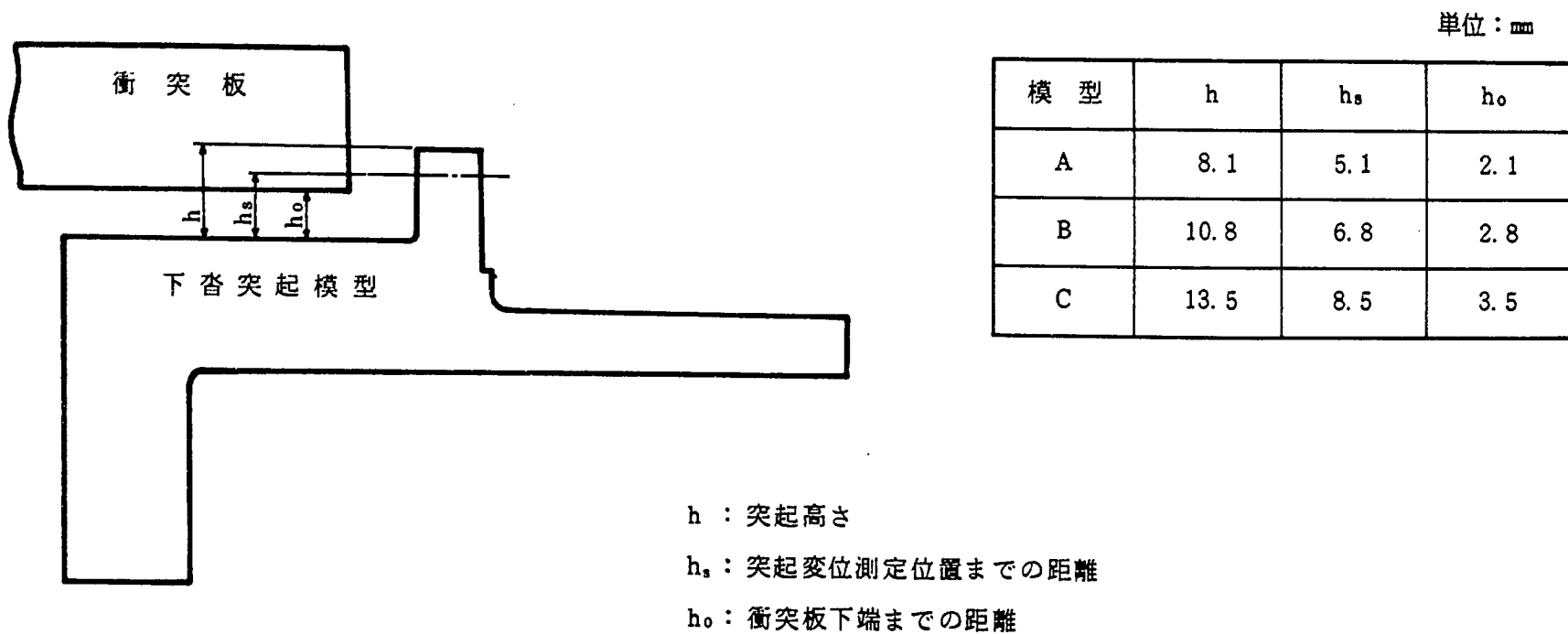


図 1 - 3 下沓突起模型への載荷位置

a 衝突実験 (1)

衝突重量を設計死荷重反力に相当する値（模型A，A 1，A 2：251 kg，模型B：601 kg，模型C：1,172 kg）に設定し，衝突速度の目標値を $v = 40, 50, 60, 70, 80, 90 \text{ cm/sec}$ と変化させて重錘台車を下沓突起模型に衝突させ，重錘台車の変位（衝突速度）および加速度，衝撃荷重，突起の変位を測定した（表1-3）。

b 衝突実験 (2)

模型A，A 1，A 2について衝突重量，衝突速度の両者を変化させて，試行錯誤的に突起を破断させるのに必要な衝突重量と衝突速度の組合せを調べた（表1-4）。

c 緩衝材実験

模型Aの突起衝突面に緩衝材を貼付け，衝突重量1,001 kg（設計死荷重反力の4倍に相当），目標衝突速度 70 cm/sec の条件の下で衝突実験を行い，緩衝材のない場合の実験結果との比較を行って緩衝材の効果を調べた（表1-5）。計測器の配置は図1-4のとおりである。

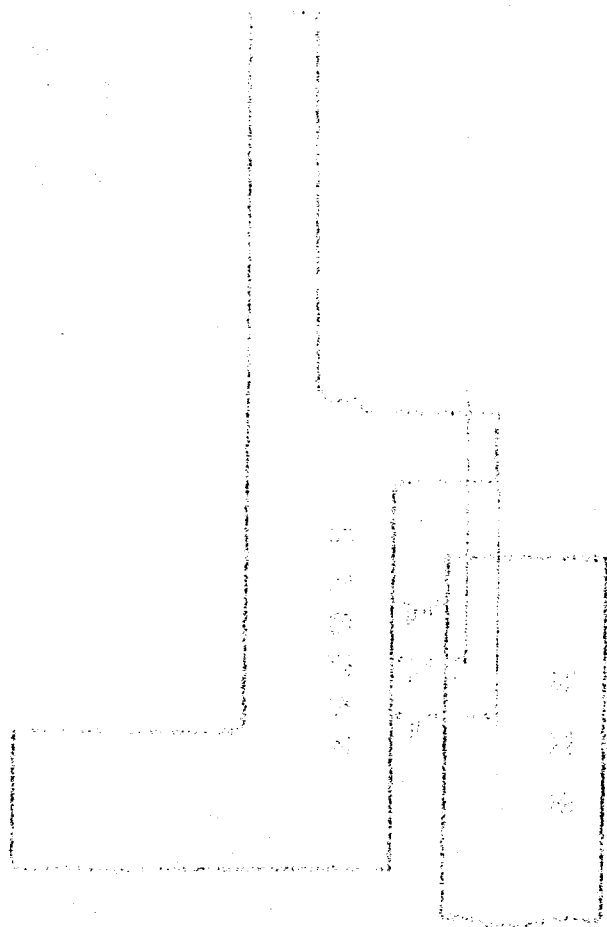


表 1-3 衝 突 実 験 (1)

模 型	実験No	衝 突 重 量 (kg)	衝突速度 (cm/sec)
A	1 - 1	251	23. 8
	1 - 2		49. 3
	1 - 3		61. 9
	1 - 4		67. 9
	1 - 5		75. 6
	1 - 6		85. 6
A 1	1 - 7	251	32. 1
	1 - 8		51. 3
	1 - 9		56. 6
	1 - 10		66. 6
	1 - 11		73. 5
	1 - 12		80. 1
A 2	1 - 13	251	38. 7
	1 - 14		47. 0
	1 - 15		56. 9
	1 - 16		69. 5
	1 - 17		77. 8
	1 - 18		79. 4
B	1 - 19	601	40. 5
	1 - 20		45. 6
	1 - 21		54. 9
	1 - 22		71. 5
	1 - 23		78. 0
	1 - 24		86. 7
C	1 - 25	1, 172	38. 0
	1 - 26		47. 2
	1 - 27		55. 8
	1 - 28		65. 6
	1 - 29		72. 9
	1 - 30		85. 6

表1-4 衝突実験(2)

模 型	実験No	衝突重量 (kg)	衝突速度 (cm/sec)	備 考
A	2 - 1	251	137.2	
	2 - 2 *		142.8	破 断
	2 - 3	501	83.4	
	2 - 4 *		93.8	破 断
	2 - 5		93.9	
	2 - 6 *		97.3	破 断
	2 - 7 *		99.4	破 断
	2 - 8		100.9	破 断
	2 - 9	751	76.5	
	2 - 10		78.3	
	2 - 11		80.7	破 断
	2 - 12	1,001	65.3	
	2 - 13 *		68.1	
	2 - 14 *		69.3	破 断
	2 - 15		72.7	破 断
	2 - 16		77.2	破 断
A 1	2 - 17 *	501	98.2	
	2 - 18 *		101.5	
	2 - 19 *		115.9	破 断
	2 - 20 *	1,001	71.5	
	2 - 21 *		76.3	
	2 - 22 *		80.2	破 断
A 2	2 - 23 *	501	100.3	
	2 - 24 *		114.8	
	2 - 25 *		130.0	破 断
	2 - 26 *	1,001	76.6	
	2 - 27 *		84.5	
	2 - 28 *		93.7	破 断

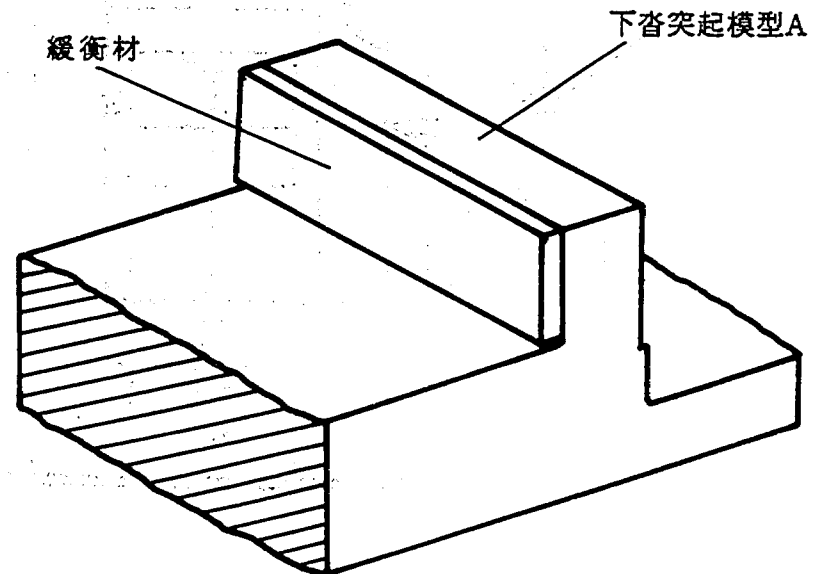
注：*は衝突実験(1)で一度使用した模型を用いている。

表1-5 緩衝材実験

模 型	実験No.	緩 衝 材	衝 突 重 量 (kg)	衝突速度 (cm/sec)	備 考
A	3-1	ブチルゴム ¹⁾ 1mm	1,001	65.8	
	3-2	ブチルゴム 3mm		69.3	
	3-3	ブチルゴム 5mm		69.3	
	3-4	鉛 板 1mm		70.7	破 断
	3-5	鉛 板 2mm		70.0	
	3-6	鉛板1mm+ブチルゴム1mm ²⁾		66.5	
	3-7	鉛板2mm+ブチルゴム1mm		68.6	

注： 1) $H_s = 65 \pm 5$ の硬度のもの

2) 鉛板の上にブチルゴムを重ねて貼りつけている。



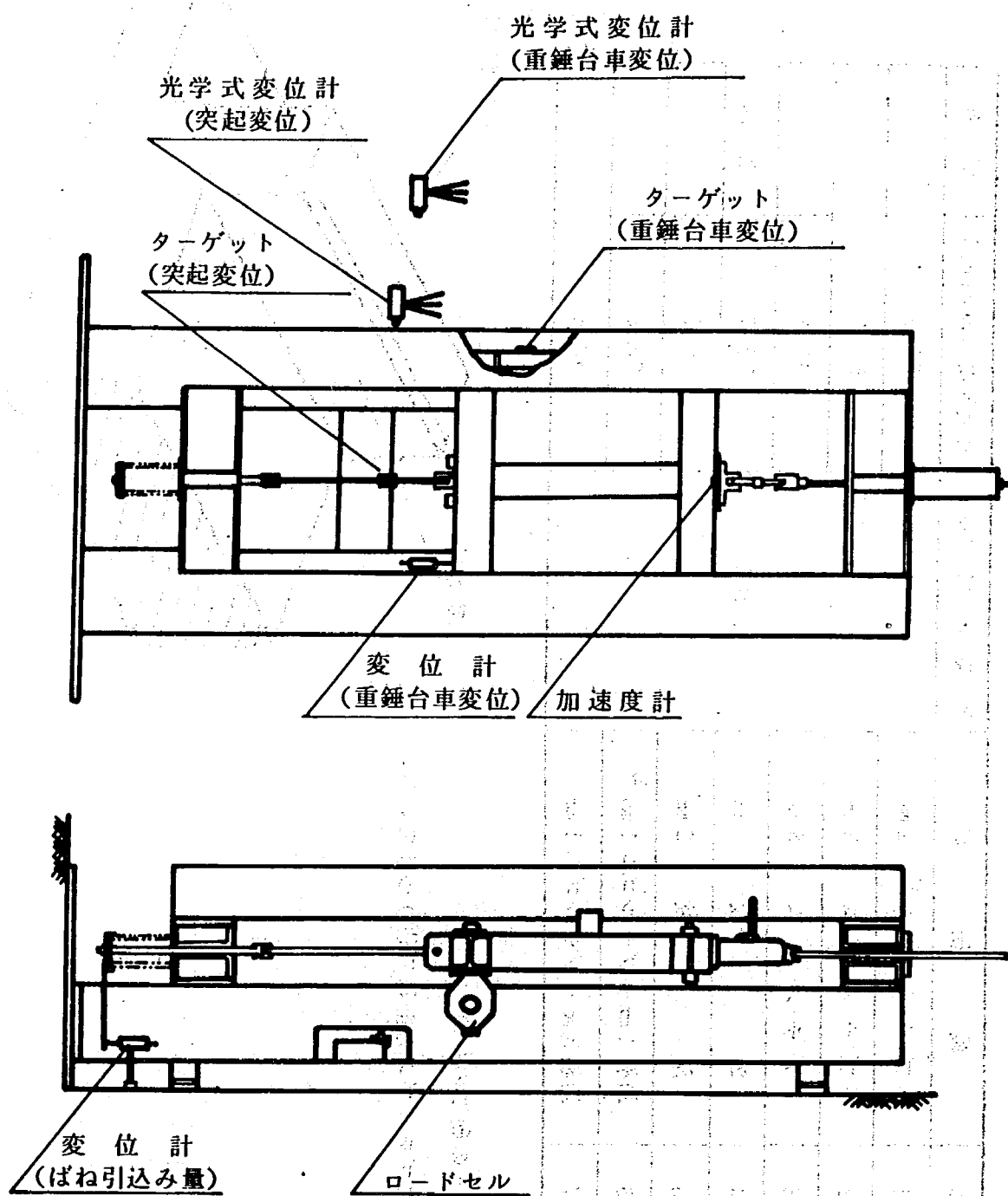


図 1-4 計測器の配置

2. 実験結果

2.1 予備実験結果

衝突実験における衝突速度を制御するために、衝突実験装置の重錘台車を発射させるためのばねの引込み量と模型設置位置での重錘台車の速度（衝突速度）の関係を、台車重量（衝突重量）ごとに調べた結果を表 2-1、図 2-1 に示す。表 2-1 には、ばね引込み量と衝突速度の測定値を式 (1-1) に代入して求めた走行抵抗と摩擦係数の値も示している。走行抵抗は衝突重量にはほとんど影響されないと考えられるが、衝突速度が大きくなると走行抵抗も大きくなる傾向が見られる。図 2-1 からばね引込み量と衝突速度はほぼ線形関係にあるものと考えられ、衝突実験に際してはこの図から目標衝突速度に対する所要ばね引込み量を決定した。

模型 A, B, C について、ばね引込み量（衝突速度）と衝撃荷重のピーク値の関係を表 2-2、図 2-2 に示す。ここで、図 2-2 における衝突速度は図 2-1 を用いてばね引込み量から推定した値を用いている。各模型において、衝突重量を一定とした場合、衝突速度の増加に比例して衝撃荷重も増加している。模型 A においては、衝突重量 751 kg、衝突速度 70 cm/sec 程度で突起が破断しており、これらの量が衝突実験において模型の破断に至らしめる限界量の一つの目安と考えられる。

模型材料（SC 46）の機械的性質を確認するために、模型と同一溶解の湯から採取した試験片 3 本に模型と同一の熱処理を施して材料引張試験を行った結果を表 2-3 に示す。ここで、試験片は JIS Z 2201 の 4 号試験片を使用し、試験方法は JIS Z 2241 の金属材料引張試験方法に基づいている。試験結果から、この材料の機械的性質が JIS 規格（表 1-2）を満足していることが確認された。

2.2 静的载荷実験結果

下沓突起模型 A, B, C に台車を介して荷重を静的に载荷して求めた荷重～変位曲線を図 2-3～図 2-8 に示す。また、その時の耐力ならびに破断変位を表 2-4、表 2-5 に示す。各模型の縮尺に応じて実物換算した静的耐力の値はほぼ一致している。静的破断変位も縮尺が大きい模型ほど大きくなっているが、縮尺との対応関係は静的耐力ほど明確でない。これは、模型取付部の変形等の突起部以外の模型部分の変形を完全に拘束することは困難であり、模型の固定条件に影響されているものと考えられる。

突起部および台車の荷重～変位曲線から求めた初期割線剛性と突起破断に至るまでの変形に要した仕事量を表 2-6、表 2-7 に示す。ここで、初期割線剛性は破断変位の 20% 変位での荷重／変位によって求めた。台車は剛体的に模型突起部に荷重を伝達することが望ましいと考えられたが、载荷板とロードセルを取付けている台車の変位は突起変位よりもかなり大きな

っており、台車の変位から求めた初期割線剛性は突起の変位から求めた初期割線剛性の $1/4$ 程度であった。突起の初期割線剛性は模型によって必ずしも一定していないが、これについても模型の固定条件の影響が若干現われているものと考えられる。一方、台車の初期割線剛性は各模型ともほぼ同一の値となっている。

2.3 衝突実験(1)結果

衝突重量一定の下で衝突速度を変化させた衝突実験(1) (表 1-3) の結果を表 2-8, 表 2-9 に示す。測定結果の整理に当たってはノイズ除去のために、80 Hz 以上の高周波成分をローパスフィルターによってカットした。ここで、反発係数 e は台車のはね返り速度を衝突速度で除したものと定義している。衝突実験(1)では模型突起部が破断に至るような大変形の生じたものはない。

図 2-9, 図 2-10 は衝突速度と衝撃荷重および衝撃加速度の関係、図 2-11, 図 2-12 に衝突速度と突起最大変位および突起残留変位の関係、図 2-13 に突起最大変位と衝撃荷重の関係を示す。衝撃荷重および衝撃加速度は衝突速度に比例して大きくなっている。突起厚を変えた模型 A, A1, A2 の測定結果については、図 2-9, 図 2-10 においてはほぼ同一直線上に並んでおり、本実験では突起厚の影響はとくに確認できなかった。衝突速度と突起変位の関係については、衝突速度が大きくなるにつれて突起変位も大きくなる傾向が見られる。しかしながら、実験においては突起部の変形とともに模型取付部の変形も生じており、両者が重ね合わさって突起変位として測定されているため、衝突速度と突起部の変形量との関係を明確に見出すことはできなかった。また、図 2-13 は衝突実験によって得られた衝撃荷重と突起変位の関係と、静的載荷実験によって得られた初期割線剛性の比較を行っており、衝撃荷重が大きくなるにつれて突起変位も大きくなる傾向は一致しているが、必ずしも両者の整合性は良くない。これは、突起変位に模型取付部の変形の影響が現われていることなどによるものと考えられる。

2.4 衝突実験(2)結果

突起破断前後の衝突重量、衝突速度による衝突実験(2) (表 1-4) の結果を、衝突実験(1)と同様の要領で整理したものを表 2-10, 表 2-11 に示す。

図 2-14 に衝突重量、衝突速度と衝撃荷重、突起破断の有無の関係を示す。衝撃荷重は、衝突速度が大きいほど、また衝突重量が大きいほど大きくなっている。突起の破断は一定の衝撃荷重 (衝撃破断荷重) に達した時に生じており、突起厚が大きいほど衝撃破断荷重が大きくなっている。また、表 2-11 において突起の破断が衝突する台車の運動エネルギーが一定の値以上となった時に生じていることから、横軸に衝突台車の運動エネルギー (衝突運動エネルギー) の平方根、縦軸に模型 A の静的破断荷重で無次元化した衝撃荷重の値をとったものを図 2-15

に示す。これから、突起の破断が一定の衝突運動エネルギーを境にして起こり、その際に生じる衝撃荷重はほぼ一定で、静的破断荷重の20%増程度の値であることがわかる。

図2-16、図2-17は衝撃加速度および衝突重量に衝撃加速度を乗じて荷重に換算したものについて整理したものであるが、換算荷重、衝突運動エネルギーと突起の破断の関係は、図2-14、図2-15における衝撃荷重、衝突運動エネルギーと突起の破断の関係と同様の傾向を示している。

2.5 緩衝材実験結果

7種類の緩衝材を模型A突起部に貼付けて、突起が破断に至る程度の衝突重量（1,001 kg）、目標衝突速度（70 cm/sec）の組合わせで衝突実験を行った結果を表2-12、表2-13に示す。これらの結果から、緩衝材による衝撃荷重の低減はわずかであり、緩衝材の効果は小さいものと考えられる。

表 2 - 1 ばね引込み量と衝突速度

衝突重量 W (kg)	ばね引込み量 x (mm)	衝突速度 v (cm/sec)	走行抵抗 F (kg)	摩擦係数 $\mu = F/W$
251	40	46.9	16.6	0.0661
	45	50.5	21.6	0.0806
	50	71.0	19.7	0.0785
	55	82.5	21.1	0.0841
	60	91.8	23.7	0.0944
501	40	35.5	15.5	0.0309
	50	52.0	18.5	0.0369
	60	67.0	21.9	0.0437
	70	82.5	24.5	0.0489
601	40	34.1	14.5	0.0241
	50	48.3	17.8	0.0296
	60	68.0	14.8	0.0246
	70	79.5	19.4	0.0323
751	50	41.2	19.6	0.0261
	60	55.5	21.0	0.0280
	70	69.0	22.3	0.0297
	80	79.5	27.5	0.0366
1,001	50	38.4	16.8	0.0168
	60	50.5	17.8	0.0178
	70	65.5	12.9	0.0129
	80	75.5	15.2	0.0152
1,172	50	35.5	16.8	0.0143
	60	46.2	18.5	0.0158
	70	59.0	15.7	0.0134
	80	69.5	15.8	0.0135
	90	81.0	13.0	0.0111

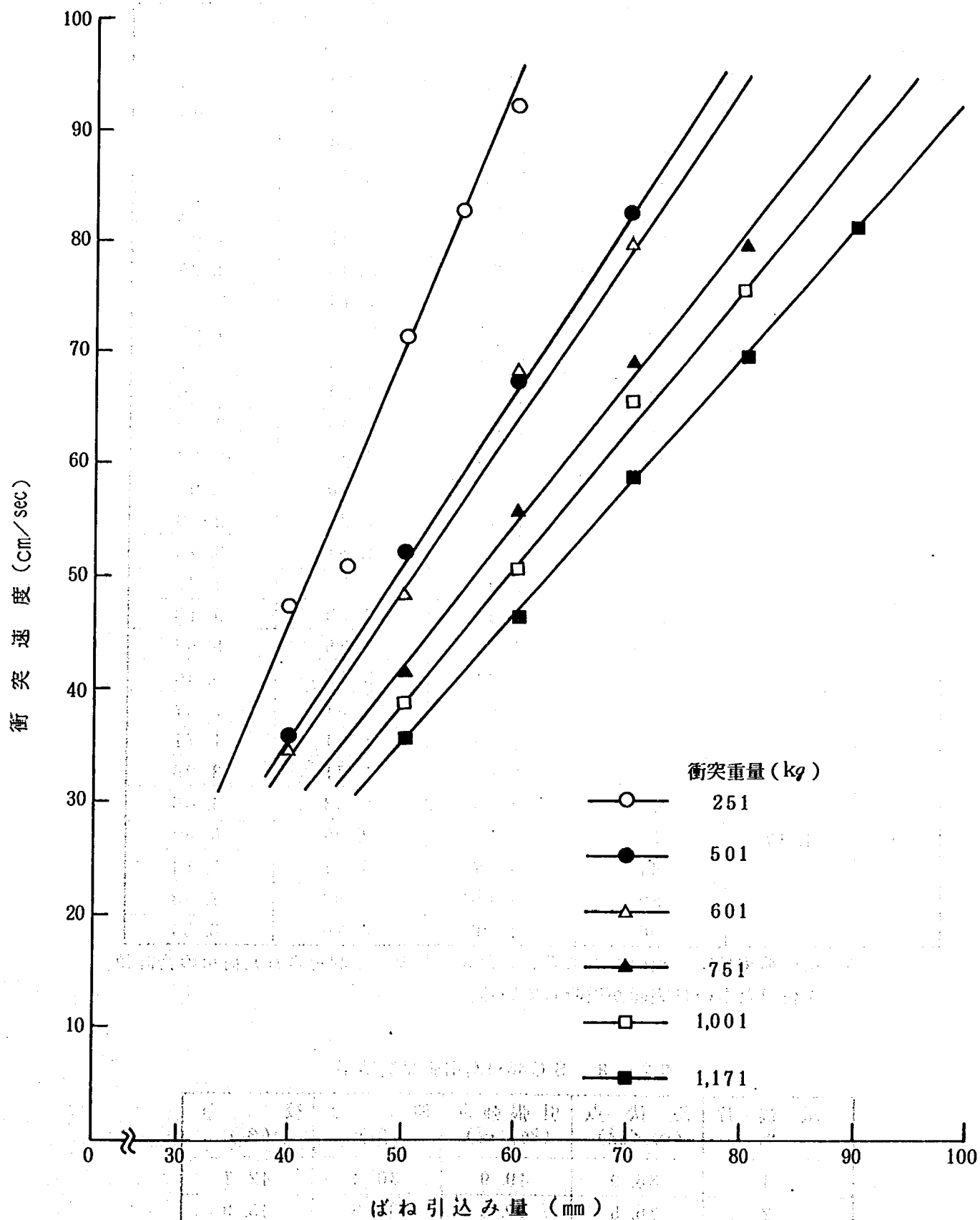


図 2 - 1 ばね引込み量と衝突速度の関係

表 2 - 2 ばね引込み量と衝撃荷重

模型	衝突重量 (kg)	ばね引込み量 (mm)	衝撃荷重 (ton)		
			ロードセル 1	ロードセル 2	合 計
A	251	37	0.72	0.72	1.44
		42	1.01	0.89	1.90
		46	1.52	1.39	2.91
		50	1.62	1.63	3.25
		54	1.84	1.88	3.72
		58	2.09	1.91	4.00
		62	2.22	2.03	4.25
	501	43	1.11	1.44	2.55
		62	2.54	2.19	4.63
	751	46	1.27	1.20	2.47
		71	2.76	2.34	5.10*
	1,001	54	1.59	1.40	2.99
		80	2.76	2.47	5.23*
B	601	37	0.87	1.10	1.97
		44	1.43	1.26	2.69
		51	1.59	1.81	3.40
		57	2.07	2.35	4.42
		64	2.54	2.59	5.13
		70	2.78	2.75	5.53
		77	3.34	3.06	6.40
		83	3.66	3.61	7.27
C	1,171	45	0.70	1.01	1.71
		54	1.55	1.71	3.26
		63	2.33	2.33	4.66
		72	2.87	2.95	5.82
		81	3.57	3.57	7.14
		89	3.80	3.88	7.68
		98	4.26	4.26	8.54

注：衝撃荷重は衝突板の左右に設置したロードセルで測定された荷重の合計値。

*を付けたものは突起が破断している。

表 2 - 3 S C 46 材料引張試験結果

試験片 No	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)
1	36.0	49.9	30.4	42.7
2	36.5	49.9	32.3	45.9
3	35.5	49.6	34.8	49.0
平均値	36.0	49.8	32.5	45.9

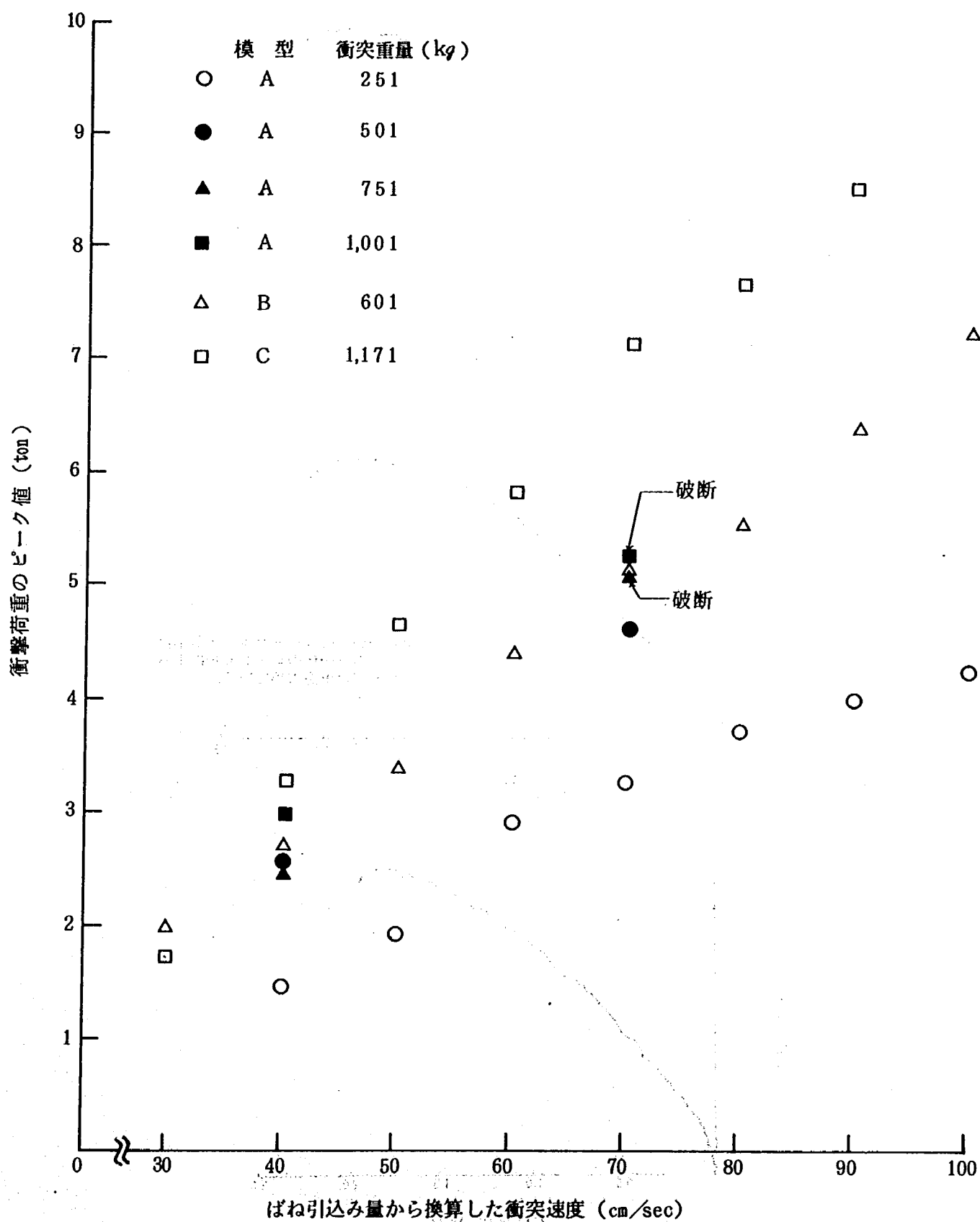


図 2-2 衝突速度と衝撃荷重の関係

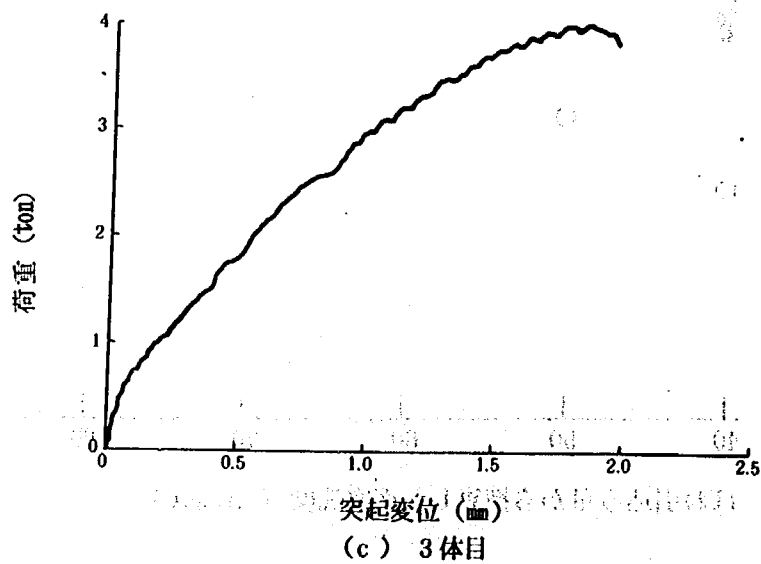
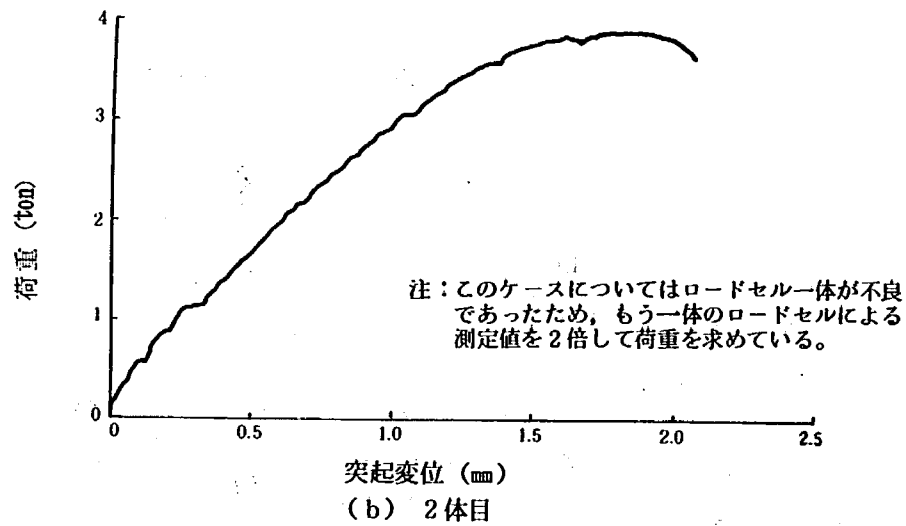
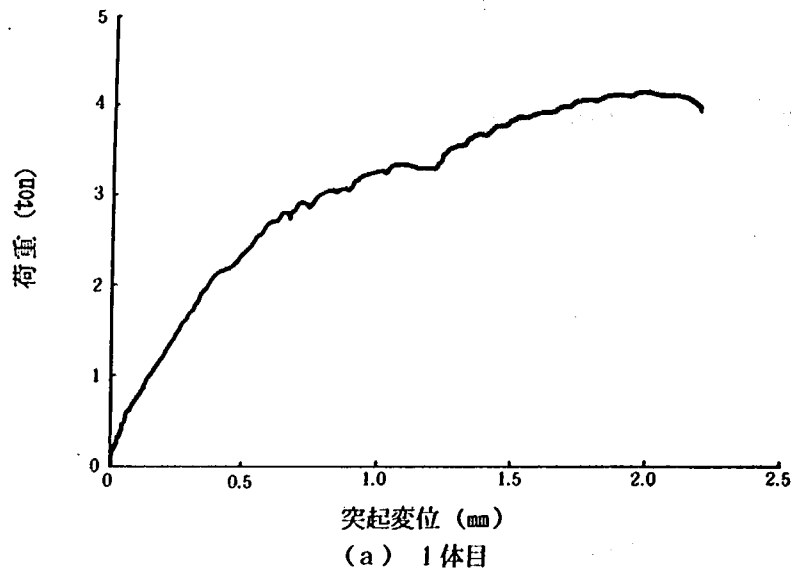


図 2 - 3 静的載荷による突起部の荷重～変位曲線 (模型 A)

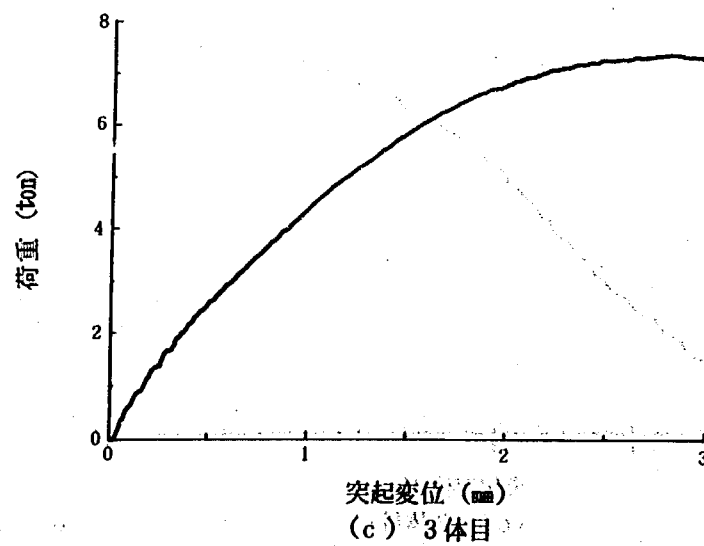
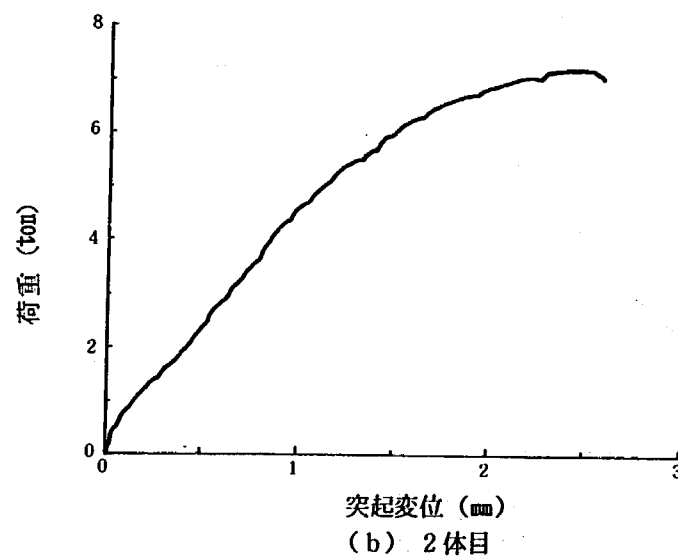
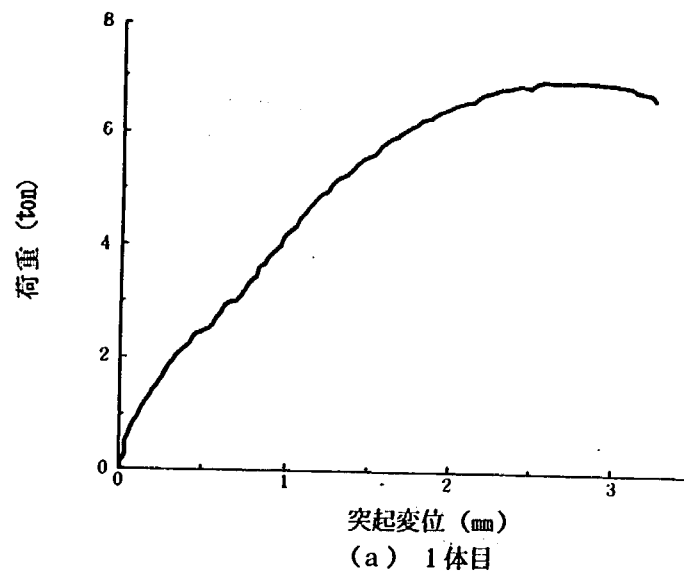


図2-4 静的載荷による突起部の荷重～変位曲線（模型B）

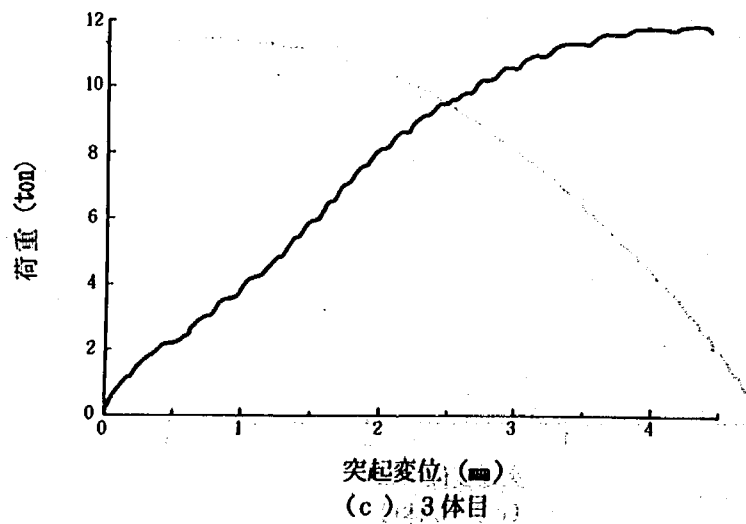
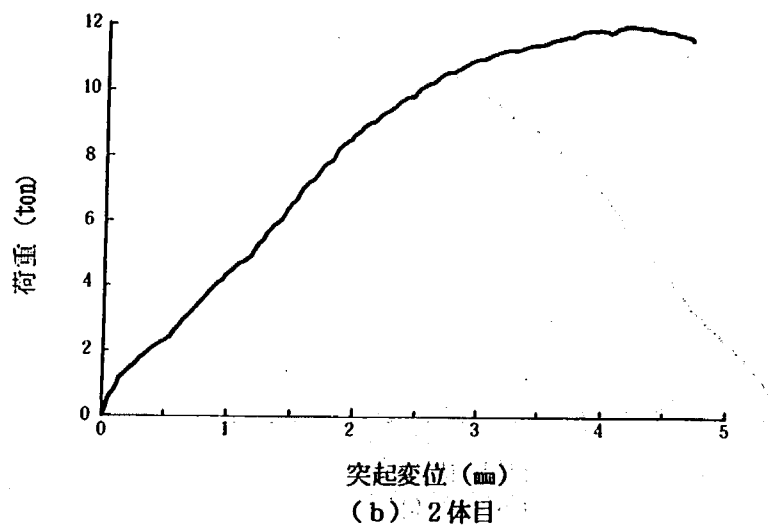
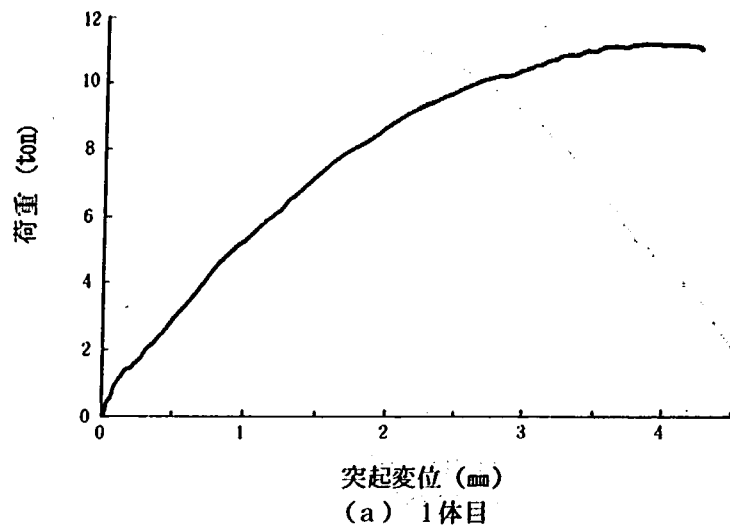


図 2-5 静的載荷による突起部の荷重～変位曲線 (模型 C)

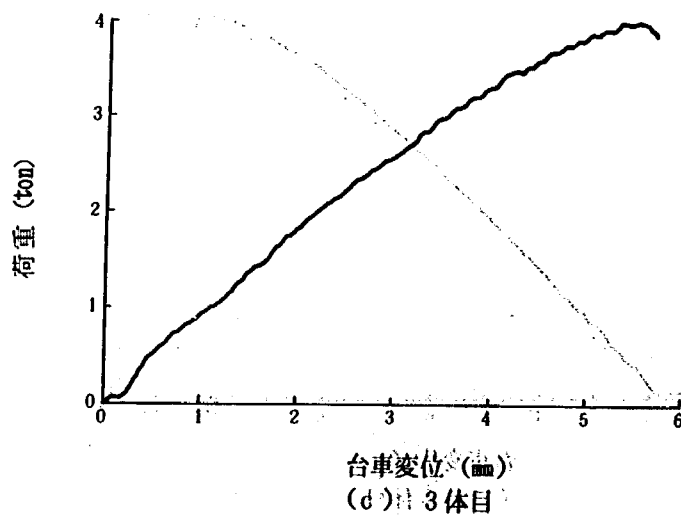
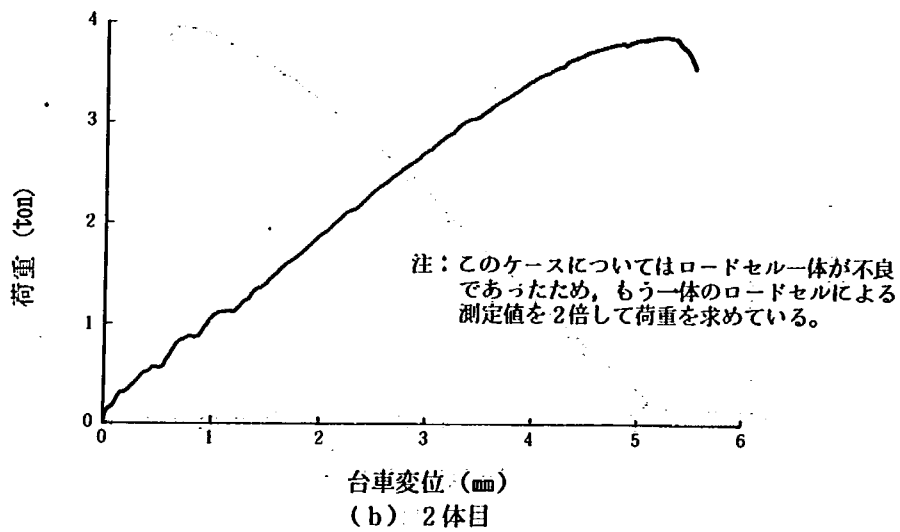
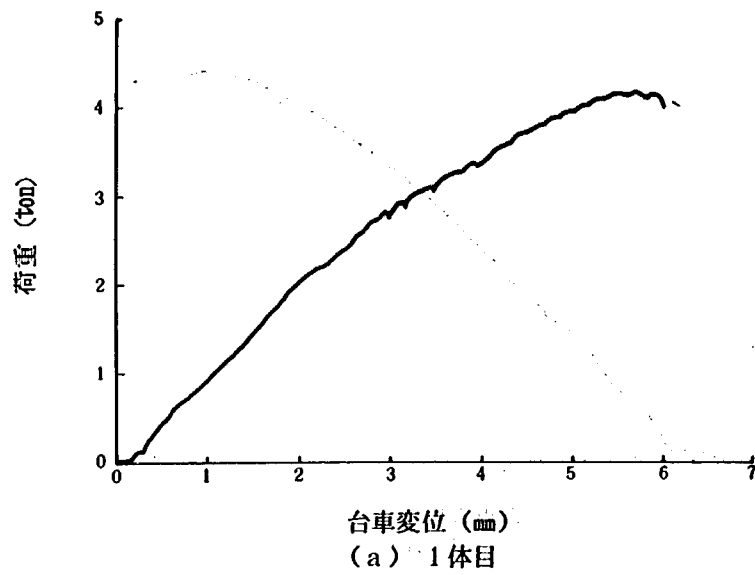


図2-6 静的載荷による台車部の荷重～変位曲線（模型A）

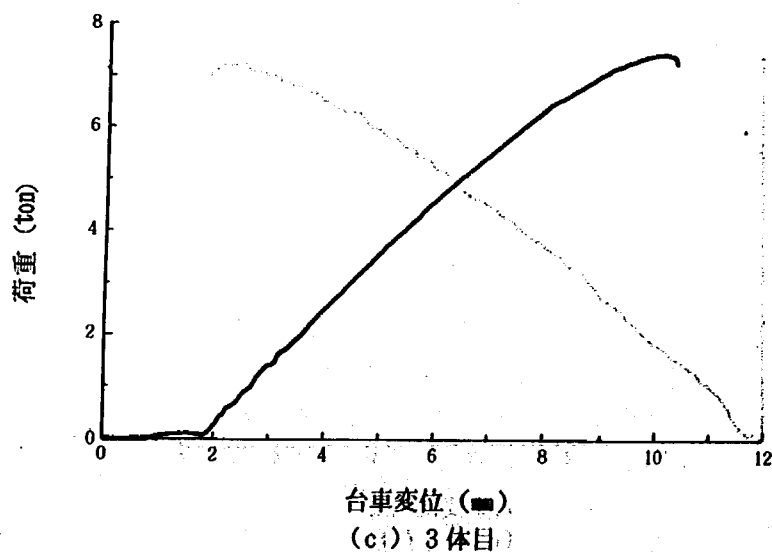
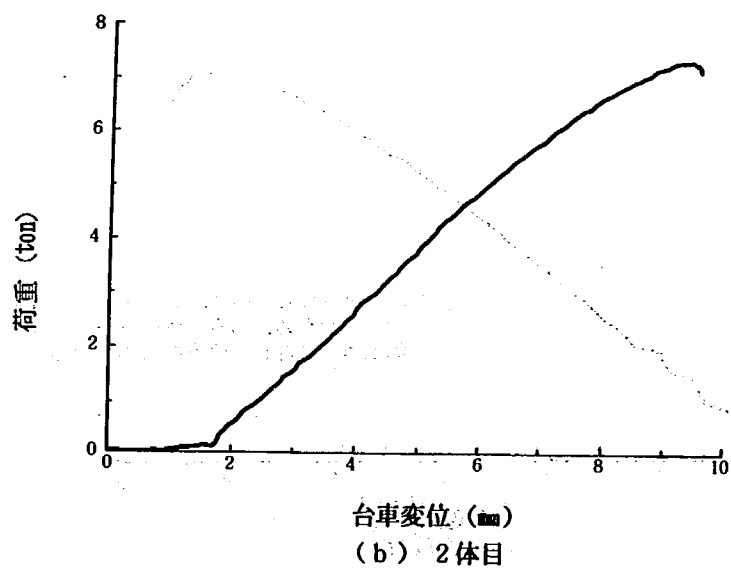
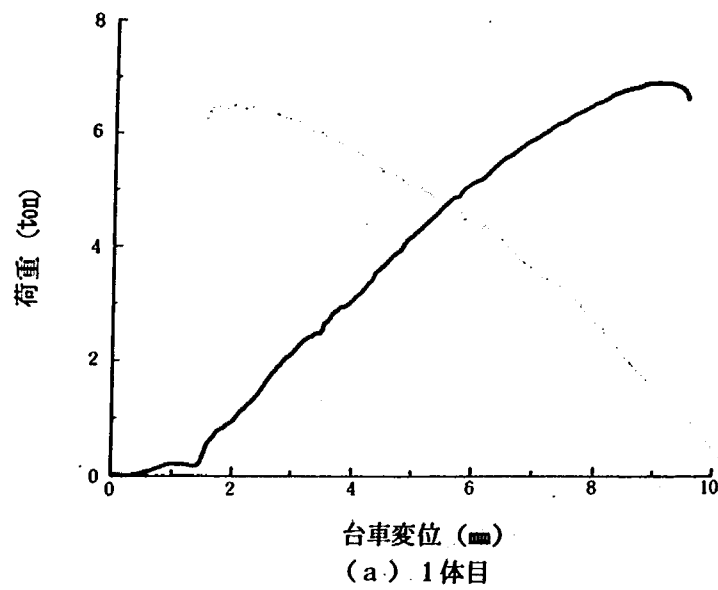


図 2-7 静的載荷による台車部の荷重～変位曲線 (模型 B)

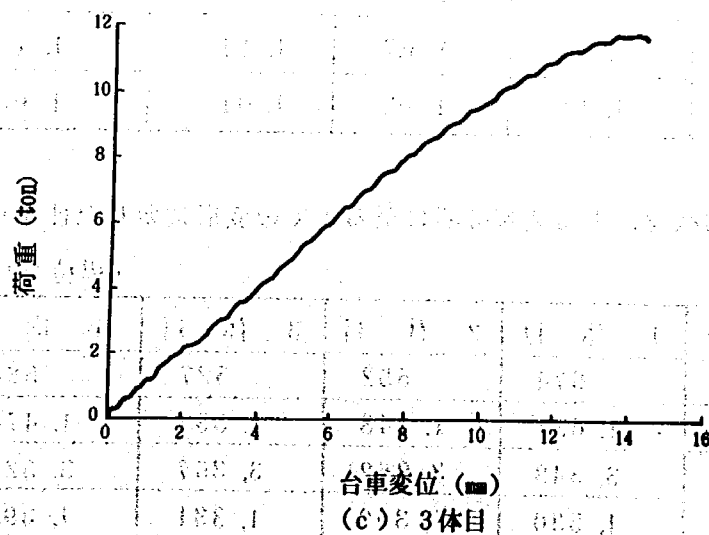
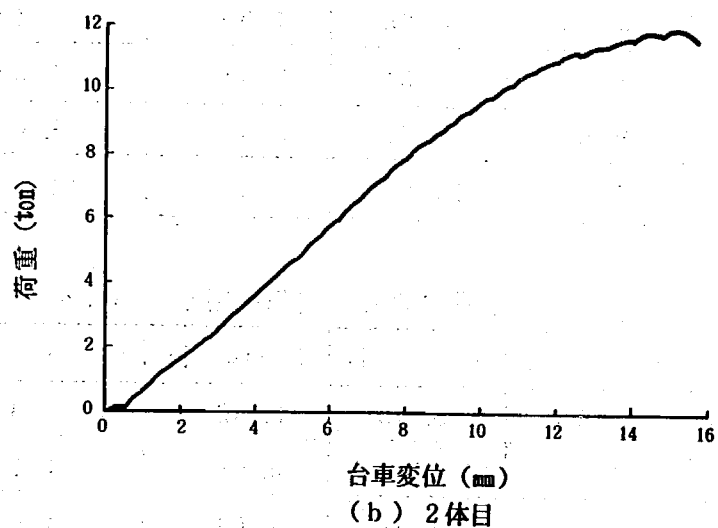
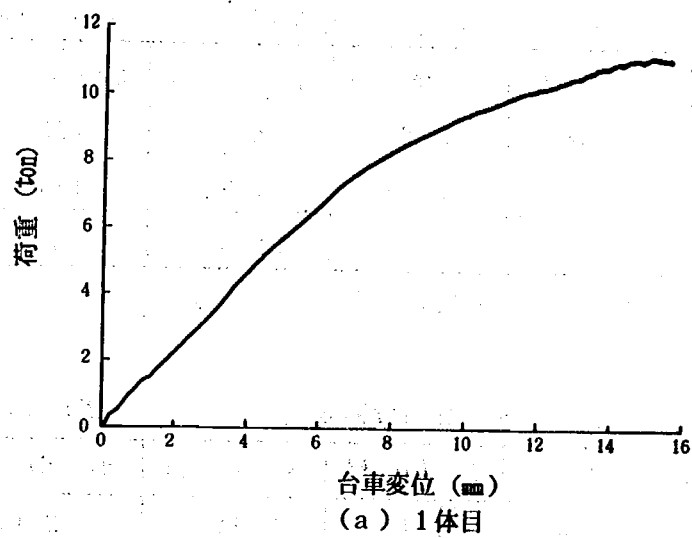


図2.18 静的載荷による台車部の荷重～変位曲線 (模型C)

表 2 - 4 静的耐力 (最大荷重) (単位: ton)

模 型	1 体 目	2 体 目	3 体 目	平 均 値	実物換算値*
A	3.92	3.88	3.88	3.89	173
B	6.66	7.02	7.13	6.94	174
C	10.9	11.7	11.8	11.5	184

注: *実物換算値は、平均値 / (縮尺)² で算出している。

表 2 - 5 静的破断変位 (単位: mm)

変 位	模 型	1 体 目	2 体 目	3 体 目	平 均 値
突起部	A	2.14	2.06	1.94	2.05
	B	3.02	2.57	2.98	2.92
	C	4.25	4.65	4.39	4.43
台 車	A	5.67	5.51	5.41	5.53
	B	8.03	7.79	8.45	8.09
	C	15.4	15.0	14.4	14.9

表 2 - 6 静的載荷による初期割線剛性 (単位: ton/mm)

変 位	模 型	1 体 目	2 体 目	3 体 目	平 均 値
突起部	A	5.05	3.39	3.82	4.09
	B	4.61	4.73	4.98	4.77
	C	5.45	4.46	4.01	4.64
台 車	A	1.05	1.00	1.04	1.03
	B	1.35	1.07	1.14	1.19
	C	1.11	1.02	1.01	1.05

表 2 - 7 静的載荷による突起破断に至るまでの変形に要した仕事量

(単位: kg・cm)

仕事量	模 型	1 体 目	2 体 目	3 体 目	平 均 値
突起部	A	674	552	527	584
	B	1,621	1,248	1,552	1,474
	C	3,348	3,862	3,357	3,522
台 車	A	1,530	1,309	1,331	1,390
	B	3,446	3,347	3,740	3,511
	C	11,242	11,105	9,804	10,717

表 2 - 8 衝突実験(1)測定結果その 1

模型	衝突重量 (kg)	実験 No	衝突速度 (cm/sec)	衝撃荷重 ピーク値 (ton)	衝撃荷重 波形周期 (sec)	衝撃加速度 ピーク値 (G)	突起変位 (mm)	
							ピーク値	残留値
A	251	1-1	23.8	0.96	28.8	5.3	—	—
		1-2	49.3	2.12	28.8	12.1	—	—
		1-3	61.9	2.56	31.3	14.0	0.93	0.47
		1-4	67.9	2.60	30.0	15.3	0.88	0.49
		1-5	75.6	2.97	30.0	16.9	1.05	0.62
		1-6	85.6	3.31	30.0	18.7	1.23	0.79
A 1	251	1-7	32.1	1.30	28.8	7.6	0.49	0.14
		1-8	51.3	2.06	30.0	11.2	0.79	0.46
		1-9	56.6	2.37	31.3	13.1	—	—
		1-10	66.6	2.71	31.3	15.0	1.28	0.56
		1-11	73.5	3.01	29.4	17.0	1.46	0.79
		1-12	80.1	3.28	30.0	18.1	1.37	0.87
A 2	251	1-13	38.7	1.64	30.0	6.5	0.67	0.25
		1-14	47.0	1.92	29.4	10.8	0.76	0.31
		1-15	56.9	2.47	29.4	13.8	0.87	0.33
		1-16	69.5	2.99	30.0	16.2	1.12	0.60
		1-17	77.8	3.28	30.0	17.6	1.48	0.85
		1-18	79.4	3.28	30.0	17.8	1.61	0.92
B	601	1-19	40.5	2.96	45.7	6.0	0.54	0.24
		1-20	45.6	3.42	43.8	7.2	0.72	0.30
		1-21	54.9	4.16	43.8	8.8	0.81	0.35
		1-22	71.5	5.23	43.8	11.1	1.58	0.99
		1-23	78.0	5.51	45.0	12.2	1.43	0.82
		1-24	86.7	6.25	45.0	13.4	1.53	0.92
C	1,172	1-25	38.0	3.73	65.0	3.5	0.75	0.33
		1-26	47.2	4.54	63.2	5.1	1.00	0.45
		1-27	55.8	5.93	63.8	5.9	1.16	0.63
		1-28	65.6	7.11	63.8	7.7	1.53	0.88
		1-29	72.9	8.08	62.5	8.0	1.63	0.93
		1-30	85.6	8.84	62.5	9.1	2.01	1.36

表 2-9 衝突実験(1)測定結果その2

模 型	衝突 重量 W (kg)	実 験 No	衝突速度 v (cm/sec)	運動量 $\frac{W}{g} \cdot v$ (kg·sec)	運動エネルギー $\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2$ (kg·cm)	反発係数 e	衝 撃 (kg·sec)		吸収エネルギー $\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 (1-e^2)$ (kg·cm)
							$\frac{W}{g} v (1+e)$	衝撃荷重波 形の積分値	
A	251	1-1	23.8	6.1	72.5	0.731	15.7	9.2	33.8
		1-2	49.3	12.6	311.3	0.763	22.3	19.7	130.1
		1-3	61.9	15.9	490.7	0.727	27.4	25.4	231.3
		1-4	67.9	17.4	590.4	0.701	29.6	26.8	300.3
		1-5	75.6	19.4	731.9	0.687	32.7	30.2	386.5
		1-6	85.6	21.9	938.4	0.638	35.9	35.0	556.4
A1	251	1-7	32.1	8.2	132.0	0.794	14.7	12.4	48.8
		1-8	51.3	13.1	337.0	0.702	22.4	21.1	170.9
		1-9	56.6	14.5	410.3	0.724	25.0	24.9	195.2
		1-10	66.6	17.1	568.0	0.721	29.4	27.3	272.7
		1-11	73.5	18.1	691.8	0.667	31.4	29.4	384.0
		1-12	80.1	20.5	821.6	0.657	34.0	32.5	467.0
A2	251	1-13	38.7	9.9	191.8	0.778	17.6	16.2	75.7
		1-14	47.0	12.0	282.9	0.732	20.8	17.8	131.3
		1-15	56.9	14.6	414.6	0.773	25.8	24.0	166.9
		1-16	69.5	17.8	618.6	0.753	31.2	29.4	267.8
		1-17	77.8	19.9	775.1	0.698	33.8	33.2	397.5
		1-18	79.4	20.3	807.3	0.700	34.6	34.0	411.8
B	601	1-19	40.5	24.8	503.0	0.748	43.4	43.1	221.6
		1-20	45.6	28.0	637.6	0.776	49.7	46.9	253.7
		1-21	54.9	33.7	924.2	0.761	59.3	57.7	389.0
		1-22	71.5	43.8	1567.6	0.713	75.1	71.6	770.7
		1-23	78.0	47.8	1865.6	0.710	81.8	78.4	925.1
		1-24	86.7	53.2	2304.9	0.706	90.7	86.4	1156.1
C	1,171	1-25	38.0	45.4	862.7	0.734	78.7	78.1	397.9
		1-26	47.2	56.4	1331.0	0.750	98.7	97.8	582.3
		1-27	55.8	66.7	1860.2	0.758	117.2	115.2	791.4
		1-28	65.6	78.5	2571.0	0.739	136.3	139.1	1166.9
		1-29	72.9	87.2	3175.1	0.738	151.4	154.1	1445.8
		1-30	85.6	102.4	4377.7	0.697	173.6	168.2	2251.0

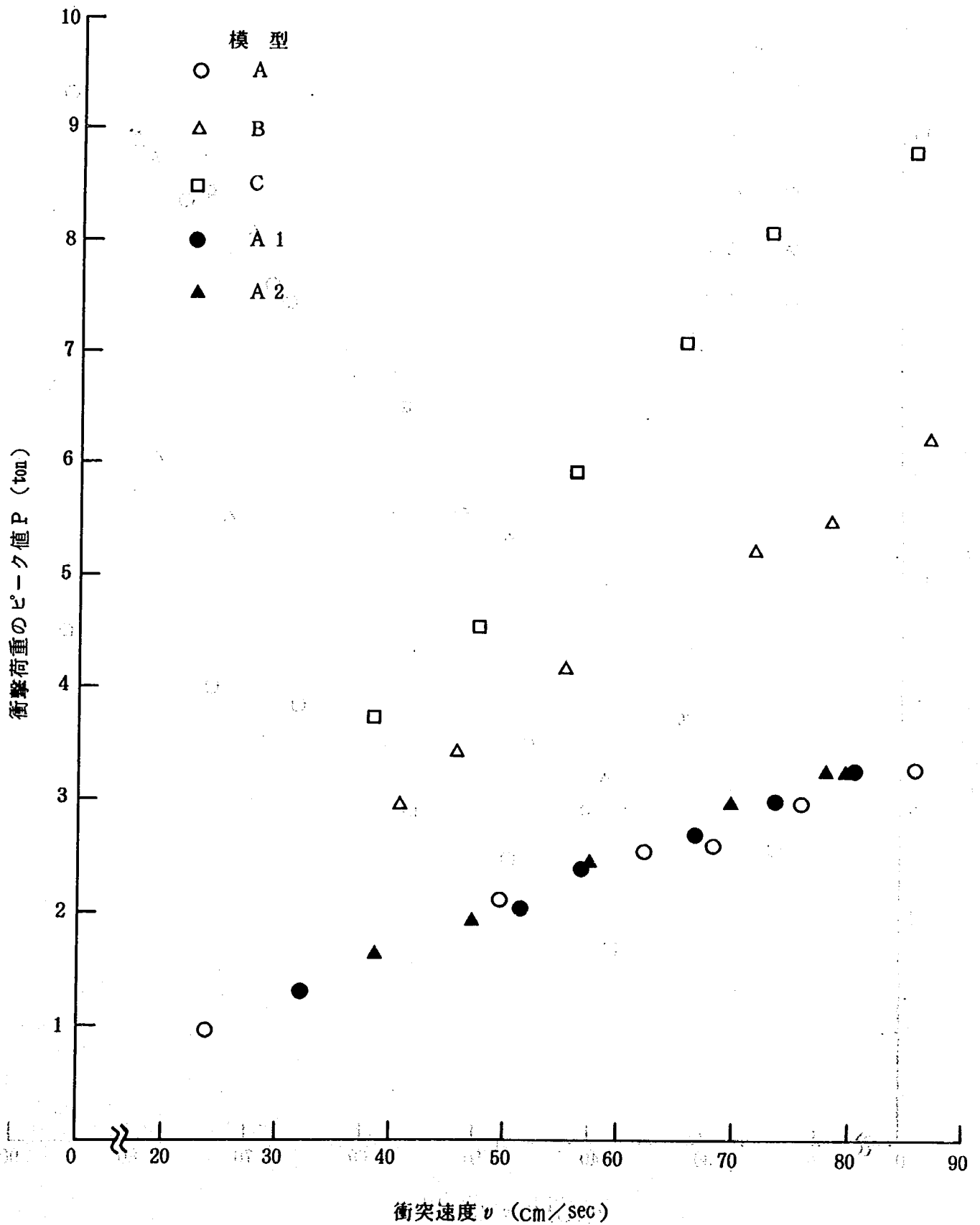


図 2 - 9 衝突速度と衝撃荷重 (衝突実験(1))

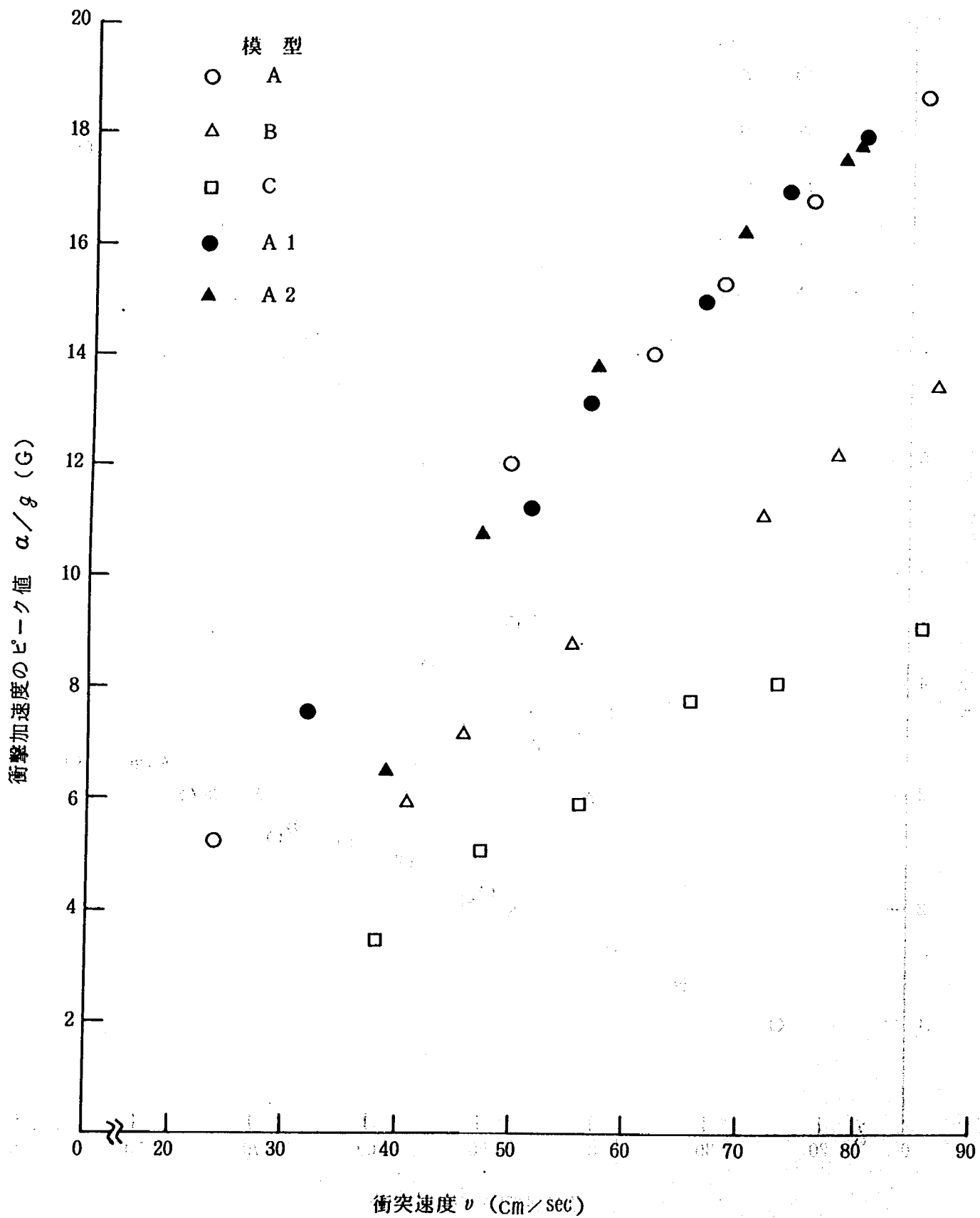


図 2-10 衝突速度と衝撃加速度 (衝突実験(I))

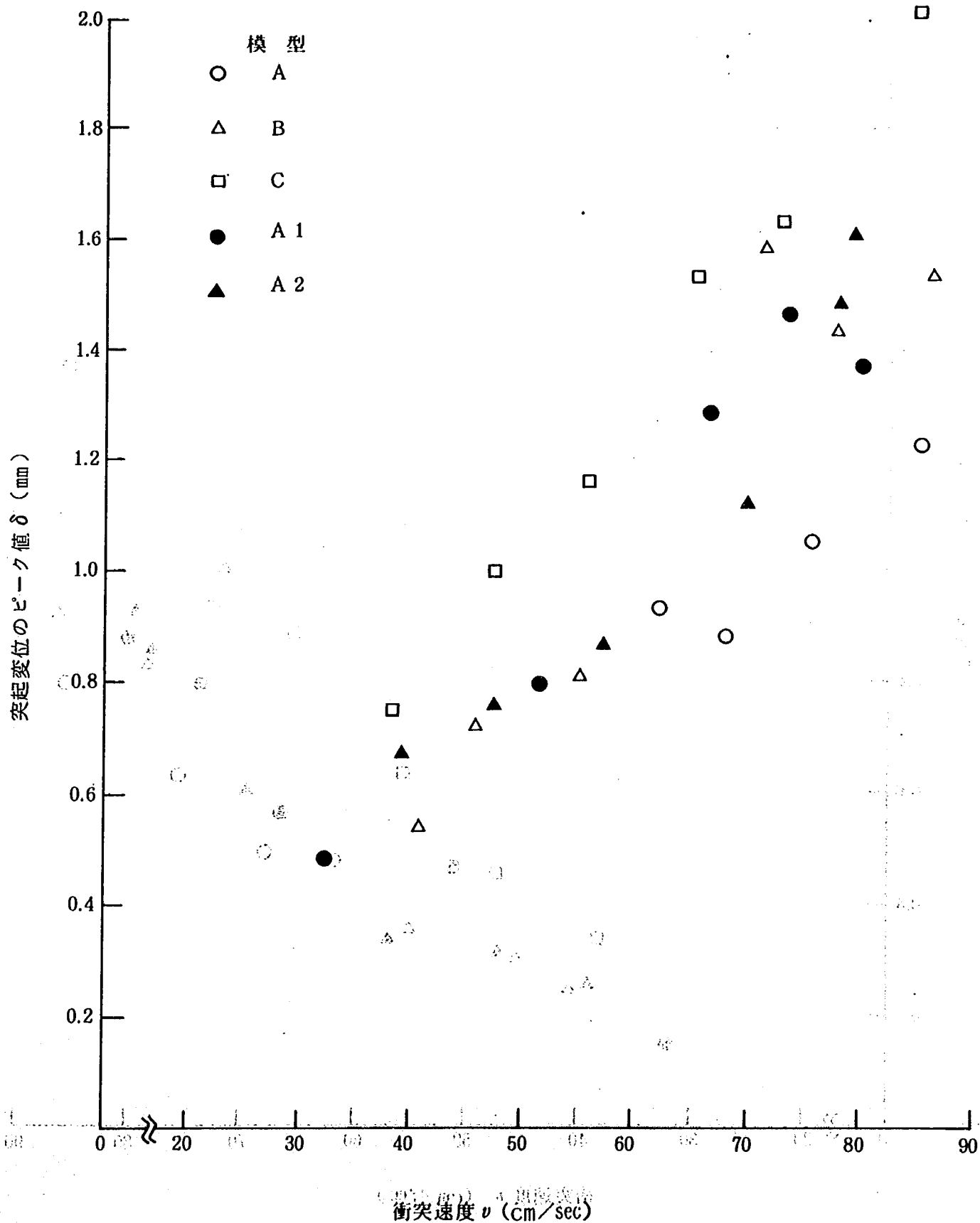


図2-11 衝突速度と突起最大変位（衝突実験(I））

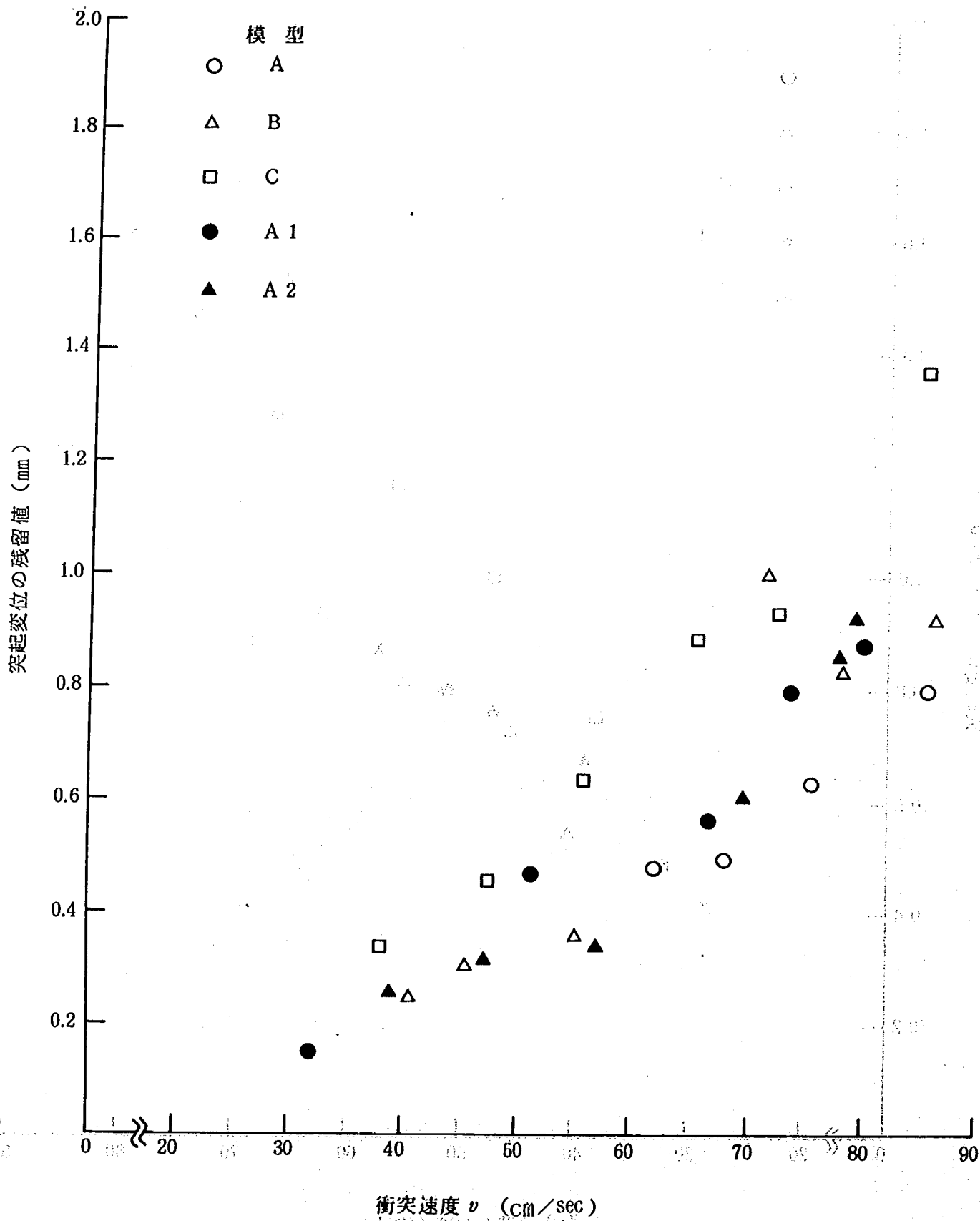


図 2-12 衝突速度と突起残留変位 (衝突実験(I))

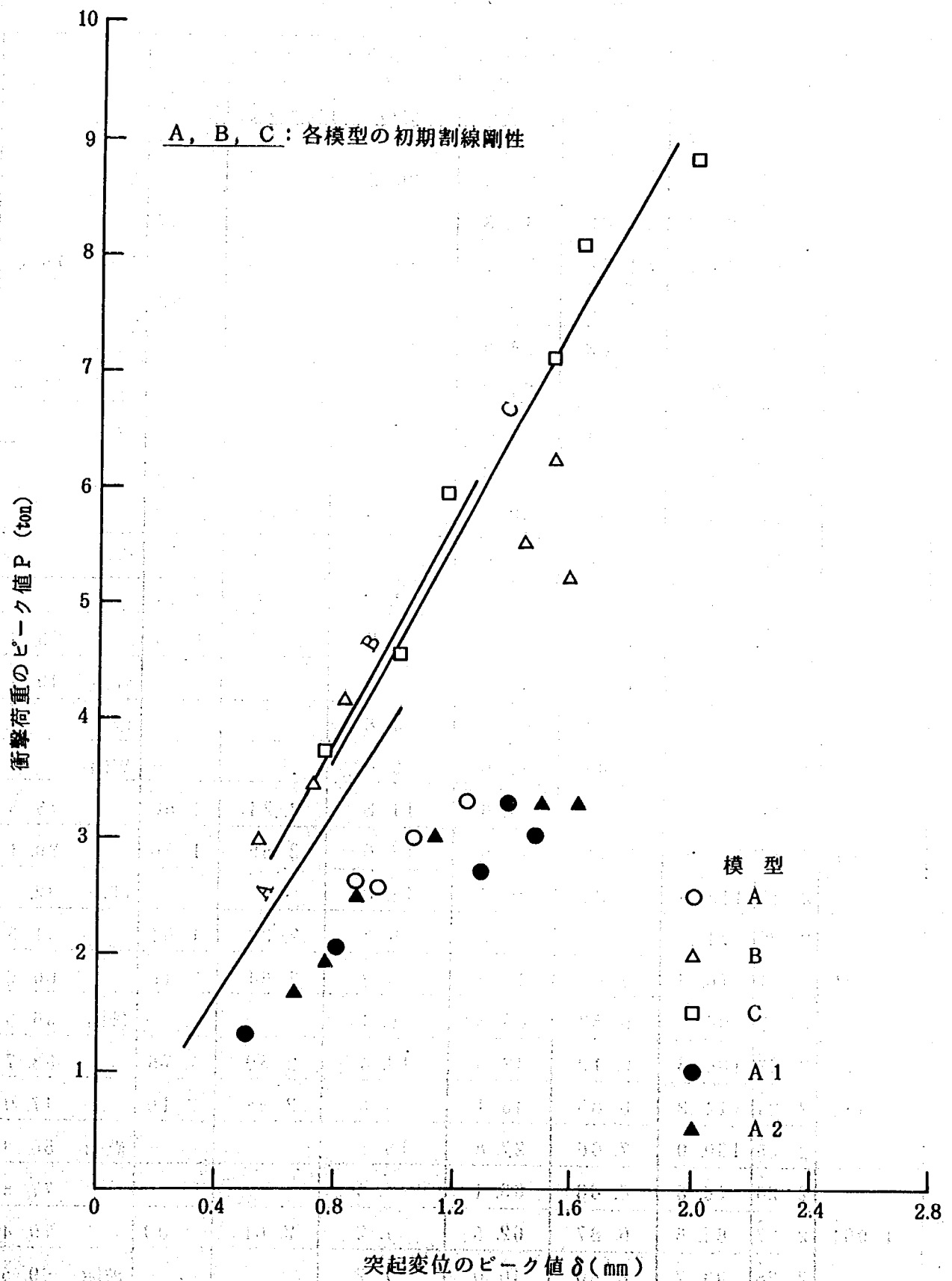


図2-13 突起最大変位と衝撃荷重 (衝突実験(1))

表 2-10 衝突実験(2)測定結果その 1

模型	衝突重量 (kg)	実験 No	衝突速度 (cm/sec)	衝撃荷重 ピーク値 (ton)	衝撃荷重 波形周期 (sec)	衝撃加速度 ピーク値 (G)	突起変位 (mm)		備 考
							ピーク値	残留値	
A	251	2-1	137.2	4.66	26.9	19.8	3.16	2.53	
		2-2*	142.8	4.82	25.0	20.3	—	—	破断 23.8
	501	2-3	83.4	4.36	43.8	9.7	2.05	1.47	
		2-4*	93.8	4.69	28.1	10.2	—	—	破断 75.6
		2-5	93.9	4.48	45.6	9.9	2.89	2.30	
		2-6*	97.3	4.63	28.8	10.4	—	—	破断 67.9
		2-7*	99.4	4.60	31.3	10.2	—	—	破断 61.9
		2-8	100.9	4.51	26.9	10.2	—	—	破断
	751	2-9	76.5	4.70	57.8	6.8	2.86	2.24	
		2-10	78.3	4.58	58.8	6.5	3.38	2.82	
		2-11	80.7	4.55	30.6	6.0	—	—	破断
	1,001	2-12	65.3	4.66	65.6	4.8	2.78	2.21	
		2-13*	68.1	4.75	64.6	5.0	2.37	1.87	85.6
		2-14*	69.3	4.72	38.1	4.5	—	—	破断 49.3
		2-15	72.7	4.64	45.0	4.8	—	—	破断
		2-16	77.2	4.98	31.6	5.0	—	—	破断
A 1	501	2-17*	98.2	5.57	41.6	11.8	2.24	1.58	73.5
		2-18*	101.5	5.76	42.8	12.6	2.56	1.86	80.1
		2-19*	115.9	5.85	28.8	12.8	—	—	破断 32.1
	1,001	2-20*	71.5	5.57	62.5	5.7	2.37	1.81	51.3
		2-21*	76.3	5.66	42.5	5.8	2.64	2.19	66.6
		2-22*	80.2	5.83	63.8	6.1	—	—	破断 56.6
A 2	501	2-23*	100.3	6.19	42.5	13.4	2.39	1.75	38.7
		2-24*	114.8	6.83	43.1	15.0	2.88	2.16	47.0
		2-25*	130.0	7.06	27.8	15.5	—	—	破断 56.9
	1,001	2-26*	76.6	6.68	63.1	6.9	—	—	77.8
		2-27*	84.5	6.87	62.5	7.2	2.61	2.00	79.4
		2-28*	93.7	6.90	40.0	7.2	—	—	破断 69.5

注：*は衝突実験(1)で一度使用した模型を用いている。備考欄に衝突実験(1)での衝突速度 (cm/sec) を示している。

表 2 - 11 衝突実験(2)測定結果その 2

模 型	衝突重量 W (kg)	実 験 No	衝突速度 v (cm/sec)	運動量 $\frac{W}{g} \cdot v$ (kg・sec)	運動エネ ルギー $\frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} v^2$ (kg・cm)	反発係数 e	衝 撃 (kg・sec)		吸収エネ ルギー $\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 (1-e^2)$ (kg・cm)	備 考
							$\frac{W}{g} v(1+e)$	衝撃荷重波 形の積分値		
A	251	2-1	137.2	35.1	2403.6	0.450	50.9	49.3	1916.9	
		2-2*	142.8	36.6	2618.7	0.120	41.0	39.7	2581.0	破断238
	501	2-3	83.4	42.6	1777.9	0.565	66.7	66.8	1210.4	
		2-4*	93.8	48.0	2249.0	-0.012	47.4	49.7	2248.7	破断75.6
		2-5	93.9	48.0	2253.0	0.464	70.3	68.7	1768.6	
		2-6*	97.3	49.7	2420.0	-0.019	48.8	50.9	2419.1	破断67.9
		2-7*	99.4	50.8	2525.5	0.038	52.7	53.5	2521.9	破断61.9
		2-8	100.9	51.6	2607.5	-0.121	45.4	46.2	2569.3	破断
	751	2-9	76.5	58.6	2242.4	0.546	90.6	91.2	1573.9	
		2-10	78.3	60.0	2349.1	0.489	89.3	91.1	1787.4	
		2-11	80.7	61.8	2495.4	-0.252	46.3	51.4	2336.9	破断
	1,001	2-12	65.3	66.7	2177.7	0.580	105.4	106.7	1445.1	
		2-13*	68.1	69.6	2368.5	0.543	107.3	106.0	1670.2	85.6
		2-14*	69.3	70.8	2452.7	-0.075	65.5	68.3	2438.9	破断49.3
		2-15	72.7	74.3	2699.3	0.048	77.8	84.6	2693.1	破断
		2-16	77.2	78.9	3043.8	-0.364	50.2	56.4	2640.5	破断
A1	501	2-17*	98.2	50.0	2464.9	-	-	76.5	-	73.5
		2-18*	101.5	51.6	2607.5	0.606	82.9	84.3	1649.9	80.1
		2-19*	115.9	59.3	3439.5	-0.033	57.3	60.3	3435.8	破断32.1
	1,001	2-20*	71.5	73.0	2610.9	0.617	118.1	119.3	1617.0	51.3
		2-21*	76.3	77.9	2973.2	0.519	118.4	120.4	2172.4	66.6
		2-22*	80.2	81.9	3284.9	0.065	87.2	93.1	3271.1	破断56.6
A2	501	2-23*	100.3	51.1	2556.1	0.634	83.5	86.4	1528.7	38.7
		2-24*	114.8	44.5	3380.5	0.574	70.0	96.8	2266.7	47.0
		2-25*	130.0	66.5	4319.9	-0.015	65.5	69.1	4318.9	破断56.9
	1,001	2-26*	76.6	78.2	2996.7	0.637	128.1	140.2	1780.7	77.8
		2-27*	84.5	86.3	3646.6	0.562	134.8	146.6	2494.9	79.4
		2-28*	93.7	95.7	4483.9	0.000	95.7	105.2	4483.9	破断69.5

注：*は衝突実験(1)で一度使用した模型を用いている。備考欄に衝突実験(1)での衝突速度
(cm/sec)を示している。

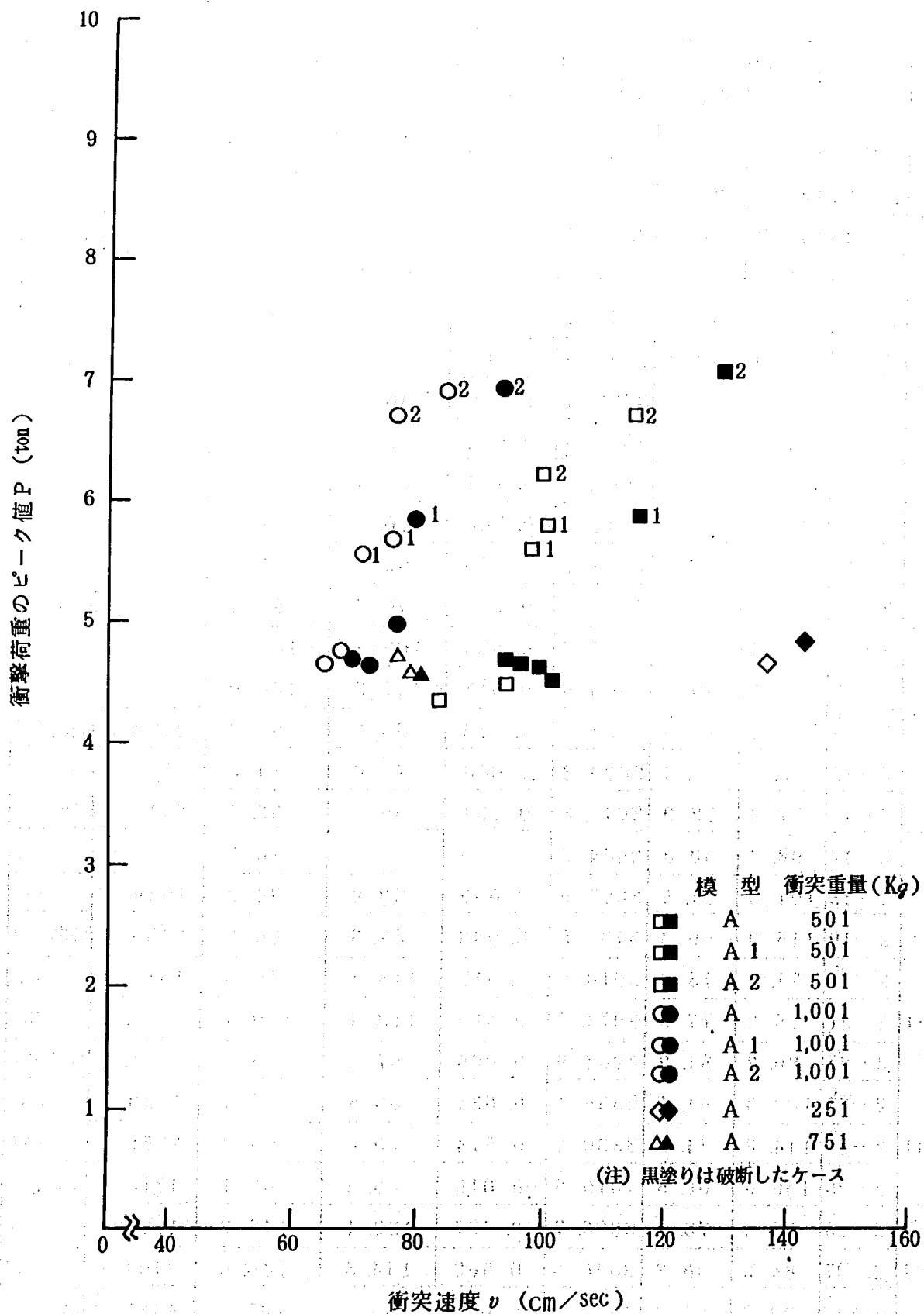


図 2-14 衝突速度と衝撃荷重 (衝突実験(2))

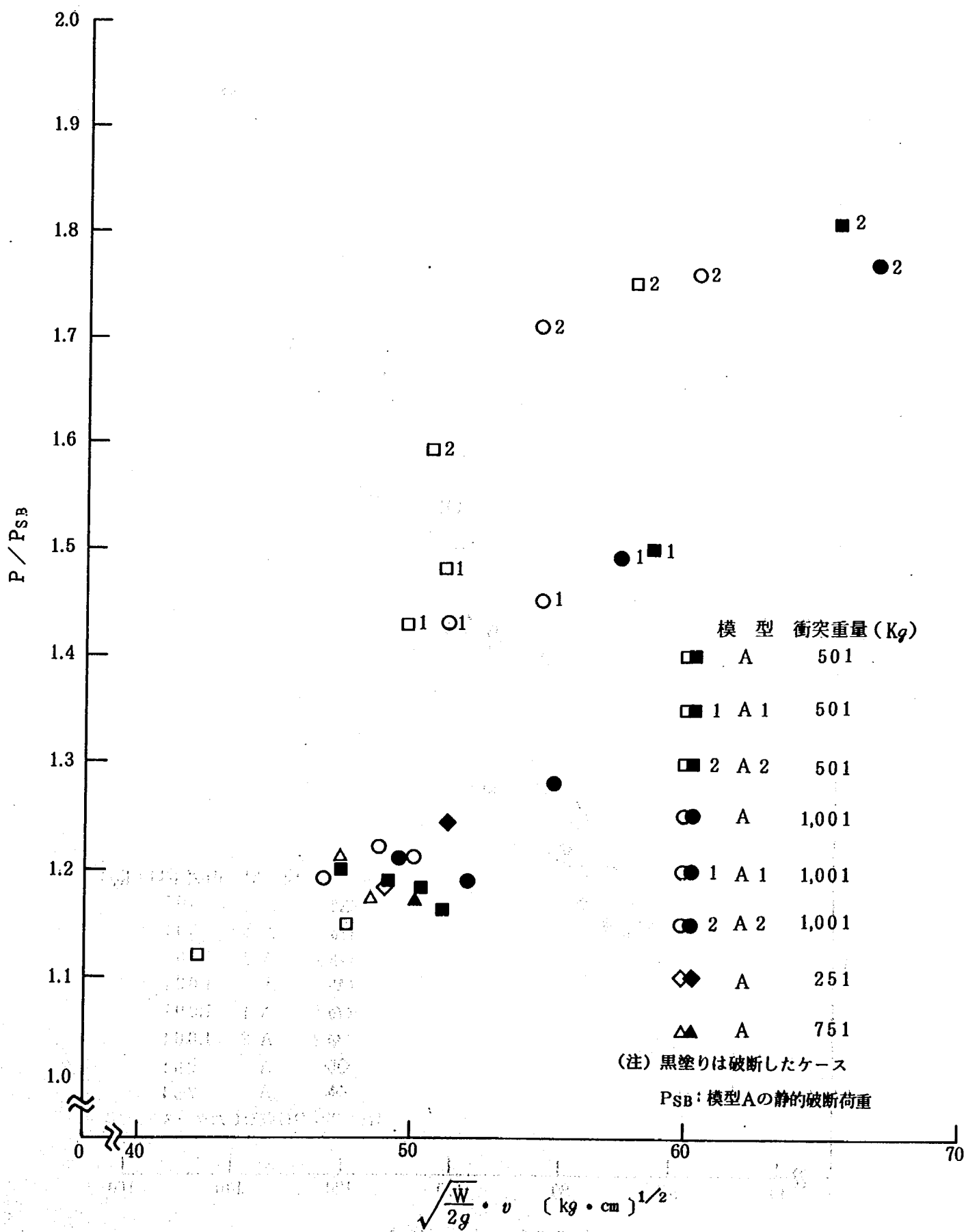


図 2-15 $\sqrt{\frac{W}{2g}} \cdot v$ と P/P_{SB} の関係

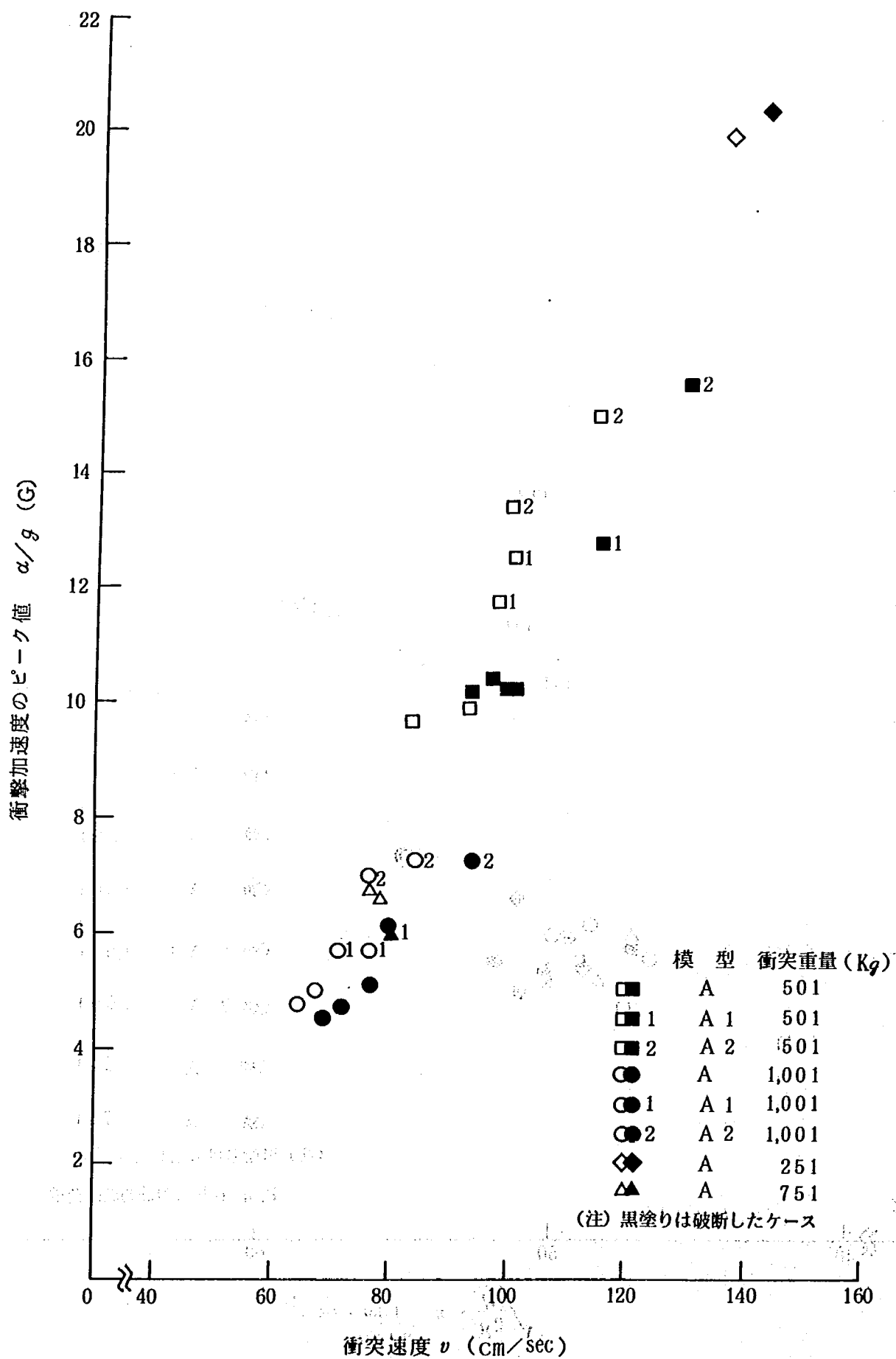


図 2 - 16 衝突速度と衝撃加速度 (衝突実験(2))

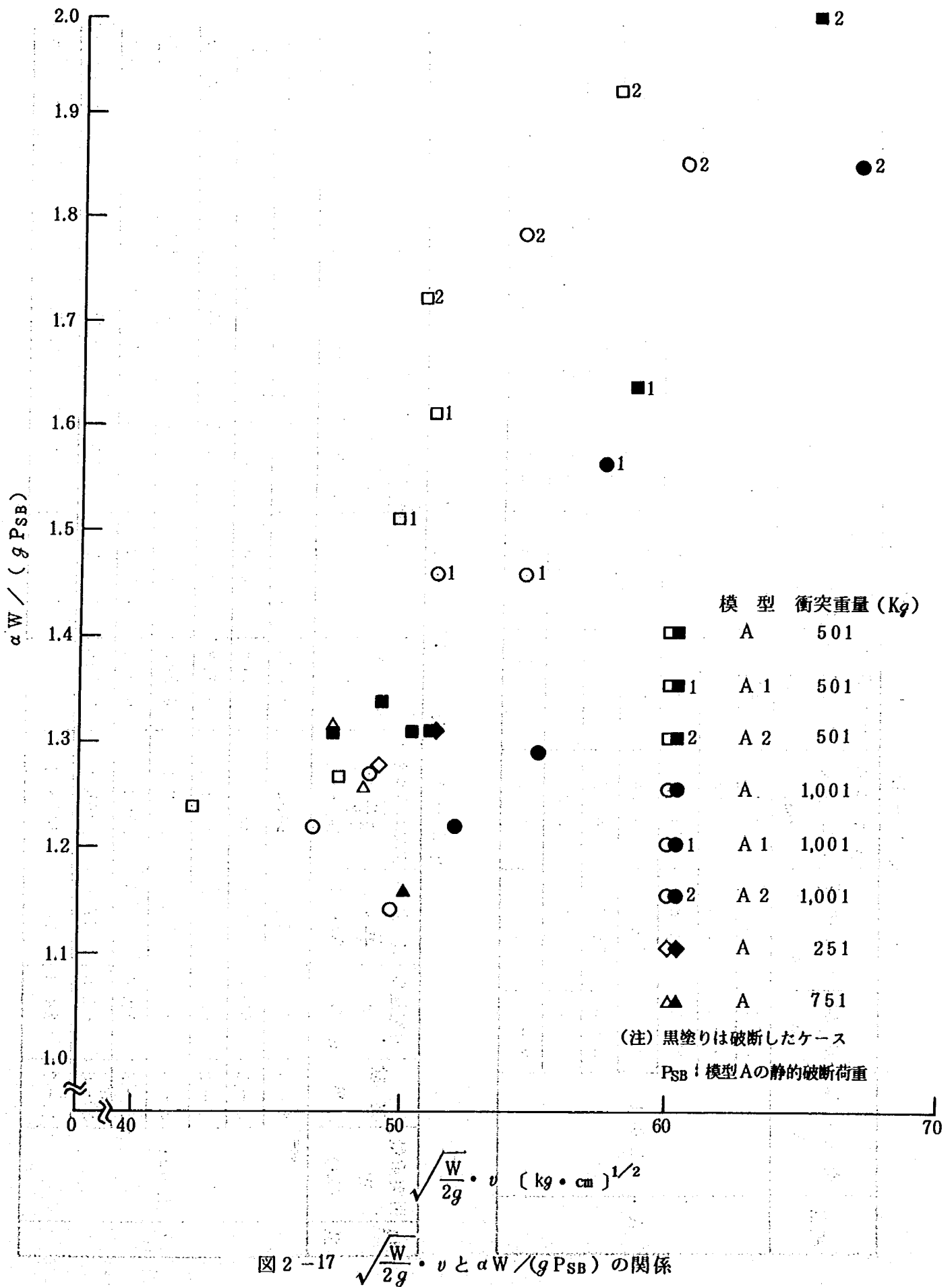


表 2 - 12 緩衝材実験測定結果その 1

模型	衝突重量 (kg)	実験 No.	衝突速度 (cm/sec)	衝撃荷重 ピーク値 (ton)	衝撃荷重 波形周期 (sec)	衝撃加速度 ピーク値 (G)	突起変位 (mm)		備 考
							ピーク値	残留値	
A	1,001	3-1	69.3	4.42	40.0	4.6	2.52	1.93	ゴム 1 mm
		3-2	69.3	4.54	73.5	4.6	2.80	2.22	ゴム 3 mm
		3-3	65.8	4.57	67.8	4.6	2.77	2.21	ゴム 5 mm
		3-4	70.7	4.66	41.6	4.6	-	-	破断 鉛 1 mm
		3-5	70.0	4.72	71.6	4.3	2.77	2.19	鉛 2 mm
		3-6	66.5	4.42	71.6	4.9	2.66	2.07	ゴム 1 mm + 鉛 1 mm
		3-7	68.6	4.42	74.7	4.3	2.73	2.14	ゴム 1 mm + 鉛 2 mm

表 2 - 13 緩衝材実験測定結果その 2

模 型	衝突重量 W (kg)	実 験 No.	衝突速度 v (cm/sec)	運 動 量 $\frac{W}{g} \cdot v$ (kg·sec)	運動エネルギー $\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2$ (kg·cm)	反発係数 e	衝 撃 (kg·sec)		吸収エネルギー $\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 (1-e^2)$ (kg·cm)	備 考
							$\frac{W}{g} v (1+e)$	衝撃荷重波 形の積分値		
A	1,001	3-1	69.3	70.8	2452.7	0.505	106.5	107.8	1827.2	ゴム 1 mm
		3-2	69.3	70.8	2542.7	0.505	106.5	109.0	1827.2	ゴム 3 mm
		3-3	65.8	67.2	2211.2	0.553	104.4	103.7	1535.0	ゴム 5 mm
		3-4	70.7	72.2	2552.8	-0.089	65.8	69.2	2532.6	破断 鉛 1 mm
		3-5	70.0	71.5	2502.5	0.430	102.2	109.4	2039.8	鉛 2 mm
		3-6	66.5	67.9	2258.5	0.526	103.7	106.2	1633.6	ゴム 1 mm + 鉛 1 mm
		3-7	68.6	70.1	2403.4	0.520	106.5	108.2	1753.5	ゴム 1 mm + 鉛 2 mm

3. 実験結果の解析

3.1 衝突現象の解析（衝撃荷重の推定等）

衝突実験(1)によって、突起模型に生じる塑性変形が比較的小さな範囲においては、衝撃荷重および衝撃加速度は衝突速度に比例することが確認された。

本実験における衝突系を図 3-1 のように仮定した場合の運動方程式は、式 (3-1) で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{W}{g} \ddot{x} + Kx &= 0 \\ \frac{1}{K} &= \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

ここに、

W : 衝突重量（上部構造の重量）

K : 衝突系の全体剛性（ばね係数）

x : 台車の変位（上部構造の変位）

g : 重力加速度（= 980 cm/sec）

k_1 : 台車載荷部の剛性（上沓を含む上部構造の剛性：ばね係数）

k_2 : 下沓突起部の剛性（ばね係数）

k_3 : 模型取付部の剛性（下沓を含む下部構造の剛性：ばね係数）

初期条件 $t = 0$ で $x = 0$, $\dot{x} = v$ （衝突速度）の下に式 (3-1) を解くと、式 (3-2) が求まる。

$$x = \sqrt{\frac{W}{gK}} \cdot v \sin \sqrt{\frac{gK}{W}} t \quad (3-2)$$

これより、衝撃荷重のピーク値 P 、衝撃加速度のピーク値 α 、衝撃波形周期 T は次のように表わされる。

$$P = \sqrt{K} \cdot \sqrt{\frac{W}{g}} \cdot v \quad (3-3)$$

$$\alpha = \sqrt{K} \cdot \sqrt{\frac{g}{W}} \cdot v \quad (3-4)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \quad (3-5)$$

衝突実験(1)の結果を、横軸 $\sqrt{W/g} \cdot v$ 、縦軸に衝撃荷重 P をとってプロットしたものを図 3-2、横軸に $\sqrt{g/W} \cdot v$ 、縦軸に衝撃加速度 α をとってプロットしたものを図 3-3 に示している。これらの図において、測定データはほぼ一直線上に並んでおり、式 (3-3)、式 (3-4) とよく整合している。ここで、測定データは模型の種類に拘らずほぼ一直線上に並んでおり、本実験においては式 (3-6) のような条件であったことから、衝撃荷重および衝撃加速度に対する下沓突起部の剛性 k_2 、模型取付部の剛性 k_3 の影響が小さいものと考えられる。

$$\frac{1}{K} \approx \frac{1}{k_1} \gg \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (3-6)$$

図 3-2、図 3-3 から式 (3-3)、式 (3-4) の関係にもとづいて求めた衝突系の全体剛性 K の値 ($\sqrt{K} = 103 \text{ (kg/cm)}^{1/2}$) は、静的载荷による荷重と台車変位の関係から求めた初期割線剛性の値 ($\sqrt{K} = 104 \text{ (kg/cm)}^{1/2}$: 表 2-6 参照) とほぼ等しくなっている。また、表 2-6 の初期割線剛性の値を用いて式 (3-3)、式 (3-5) から衝撃荷重と衝撃波形周期を計算した値と、実測値の比較を図 3-4、図 3-5 に示しており、両者はよく一致している。

衝突実験(2)によって、突起模型の破断が一定の衝撃荷重もしくは衝突運動エネルギーで生じることが確認された。

模型 A の衝突実験(1)、(2)の全測定データを、横軸に衝突運動エネルギーの平方根 $\sqrt{W/(2g)} \cdot v$ 、縦軸に静的破断荷重によって無次元化した衝撃荷重 P/P_{SB} をとってプロットしたものを図 3-6 に示す。式 (3-1) の運動方程式から導かれた衝撃荷重(式 (3-3))は $\sqrt{W/g} \cdot v$ に比例することから、衝撃荷重は衝突運動エネルギーの平方根 $\sqrt{W/(2g)} \cdot v$ に支配されるものと考えられ、図 3-6 においても衝撃荷重と衝突運動エネルギーの平方根は比例関係にあり、一定の衝撃荷重もしくは衝突運動エネルギーを境にして突起が破断している。図 3-7 は横軸に衝突運動量 $(W/g) \cdot v$ 、縦軸に P/P_{SB} をとって測定データをプロットしたものであるが、衝突運動量と突起破断の有無の間には明確な関係は見出せない。したがって衝突時の衝撃荷重および突起破断の有無は、衝突運動エネルギーに支配されるものと考えられる。

図 3-8 は、横軸に衝突運動エネルギーの平方根 $\sqrt{W/(2g)} \cdot v$ 、縦軸に衝突重量に衝撃加速度を乗じて換算した荷重を静的破断荷重で無次元化したもの $\alpha W/(g P_{SB})$ をとって測定データをプロットしたものであり、図 3-6 と同様の傾向を示している。図 3-8 の換算荷重 $\alpha W/(g P_{SB})$ は図 3-6 のロードセルで直接測定した衝撃荷重よりやや大きめの値となっているが、この理由としては台車重量が全て有効な衝突重量として寄与していないことが考えられる。これは、図 3-4 において台車全重量を有効衝突重量として計算した衝撃荷重の方が実測

衝撃荷重よりもやや大きめの値となっていることから推測される。

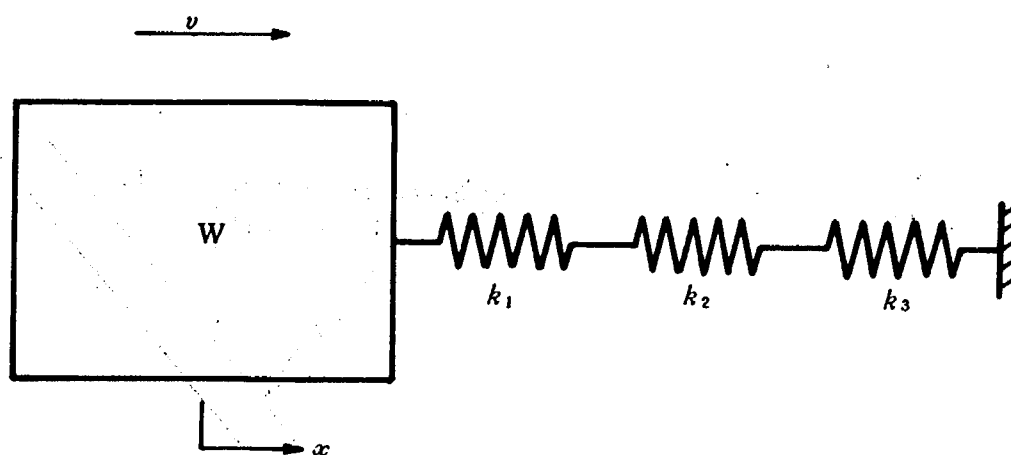


図 3-1 衝突系モデル

3.2 衝 撃

衝突時に生じる衝撃 I は、衝突継続時間 T における衝撃荷重 $P(t)$ を積分したもので、式 (3-7) によって求められる。

$$I = \int_0^T P(t) dt \quad (3-7)$$

式 (3-7) にもとづいて衝突実験による測定データから求めた衝撃の値は、表 2-9、表 2-11 に示されている。この衝撃と運動エネルギーおよび運動量の関係を、図 3-9、図 3-10 に示す。これらの図において、衝撃は運動エネルギーよりも運動量との間に明確な比例関係が見られる。ただし、突起が破断した場合は破断以降において荷重が零となることから式 (3-7) の積分値が零となり、結果的に衝撃の値が小さくなっている。

衝撃 I は運動量の変化として反発係数 e を用いて式 (3-8) によっても求められる。

$$I = \frac{W}{g} v (1 + e) \quad (3-8)$$

式 (3-8) にもとづいて、衝突実験による測定データから求めた衝撃の値も表 2-9、表 2-11 に示されている。式 (3-7) および式 (3-8) によって求めた衝撃値の比較を、横軸に運動量をとって図 3-11 に示しているが、両者はよく一致している。

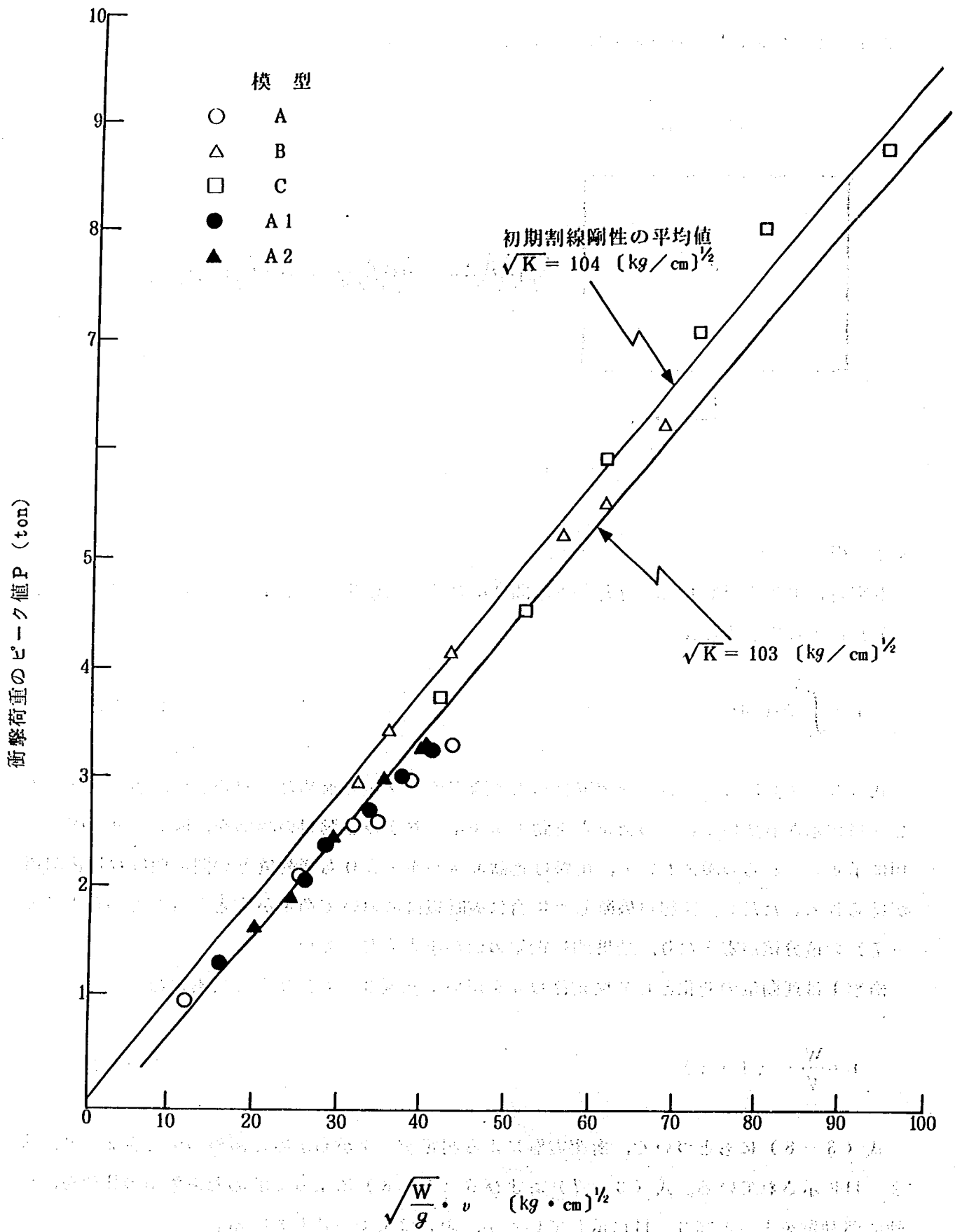


図 3 - 2 衝撃荷重 P と $\sqrt{\frac{W}{g}} \cdot v$ の関係

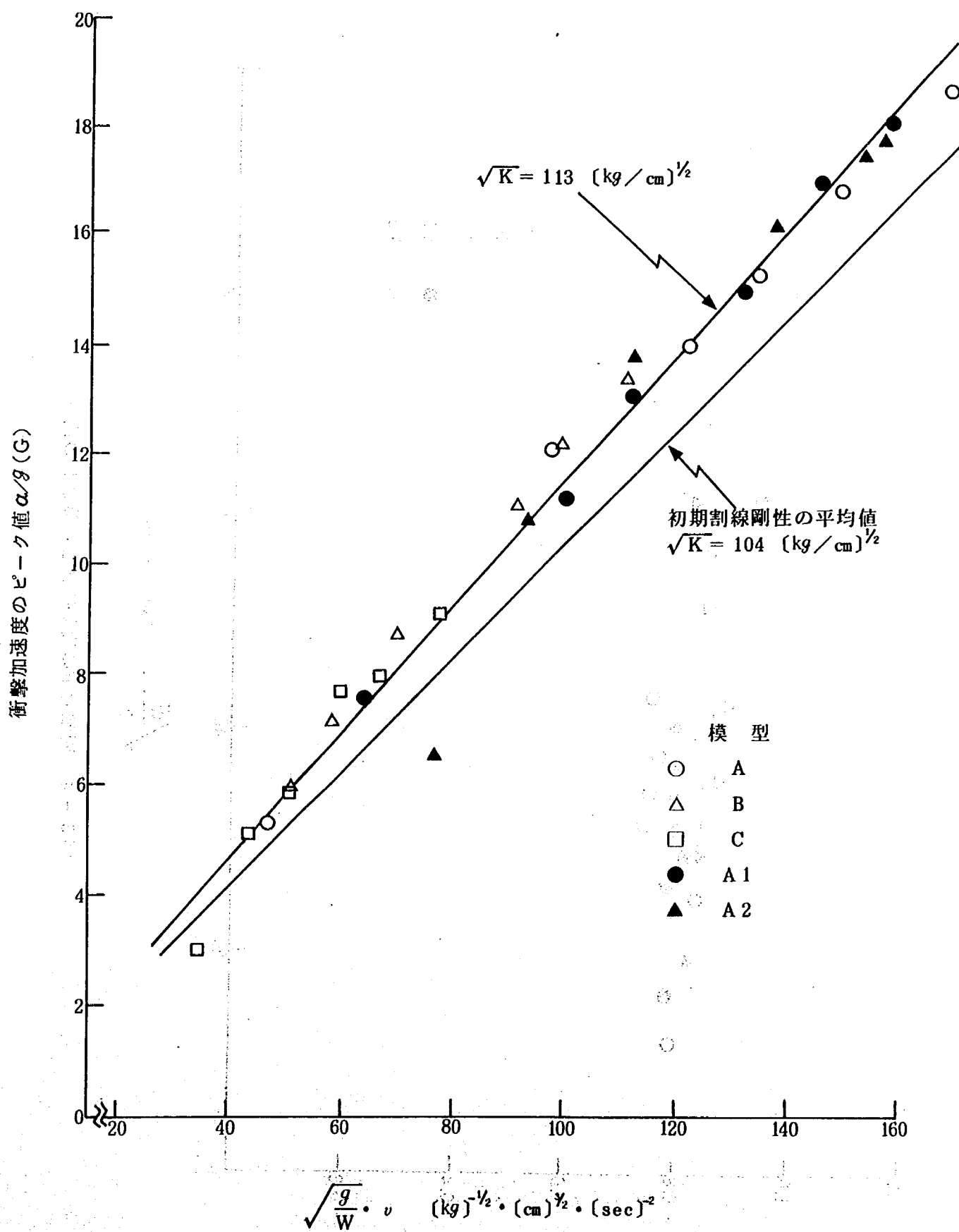


図3-3 衝撃加速度 a と $\sqrt{\frac{g}{W}} \cdot v$ の関係

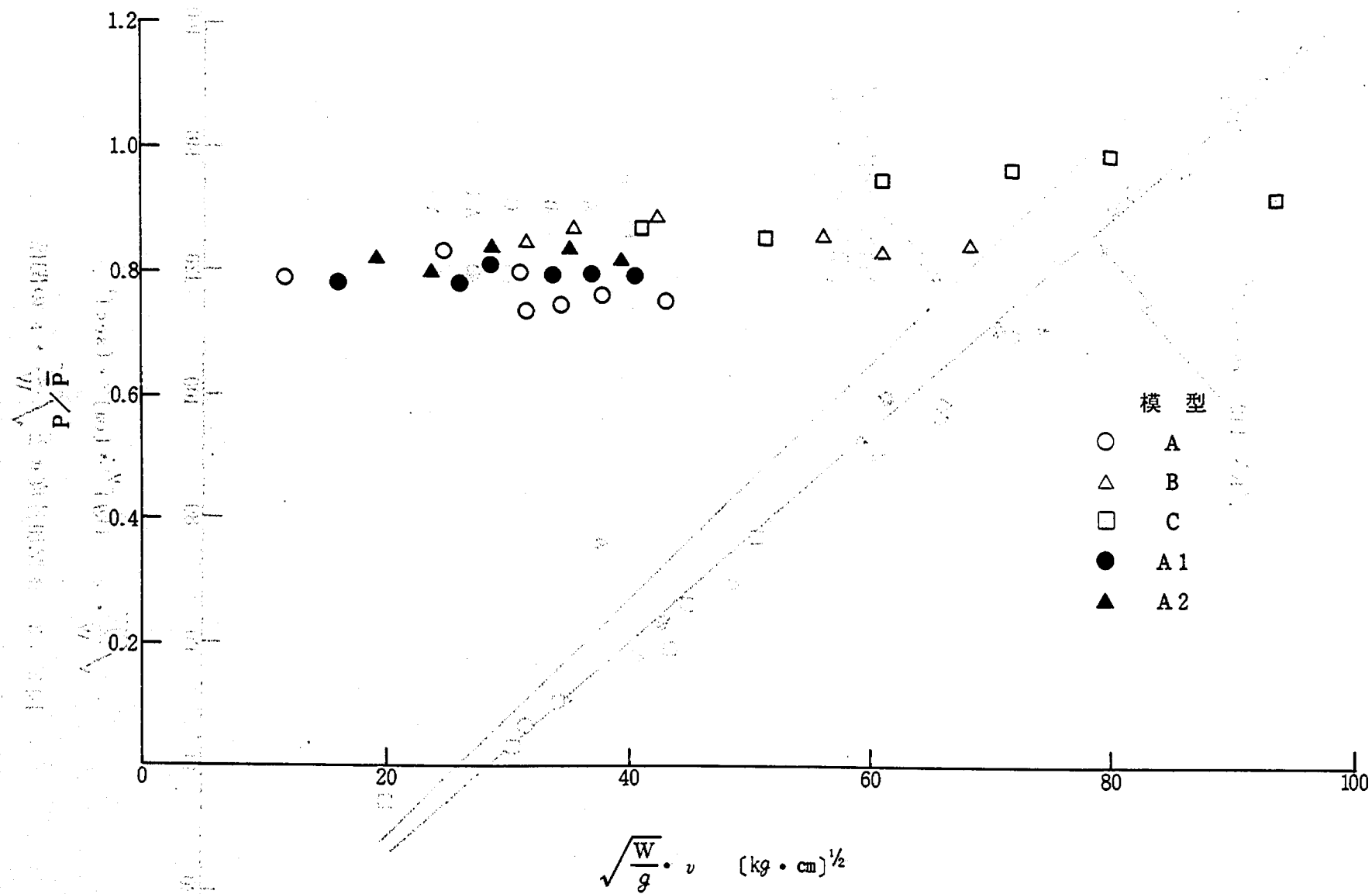


図 3-4 衝撃荷重の実測値 P と計算値 $\bar{P}$ の比較

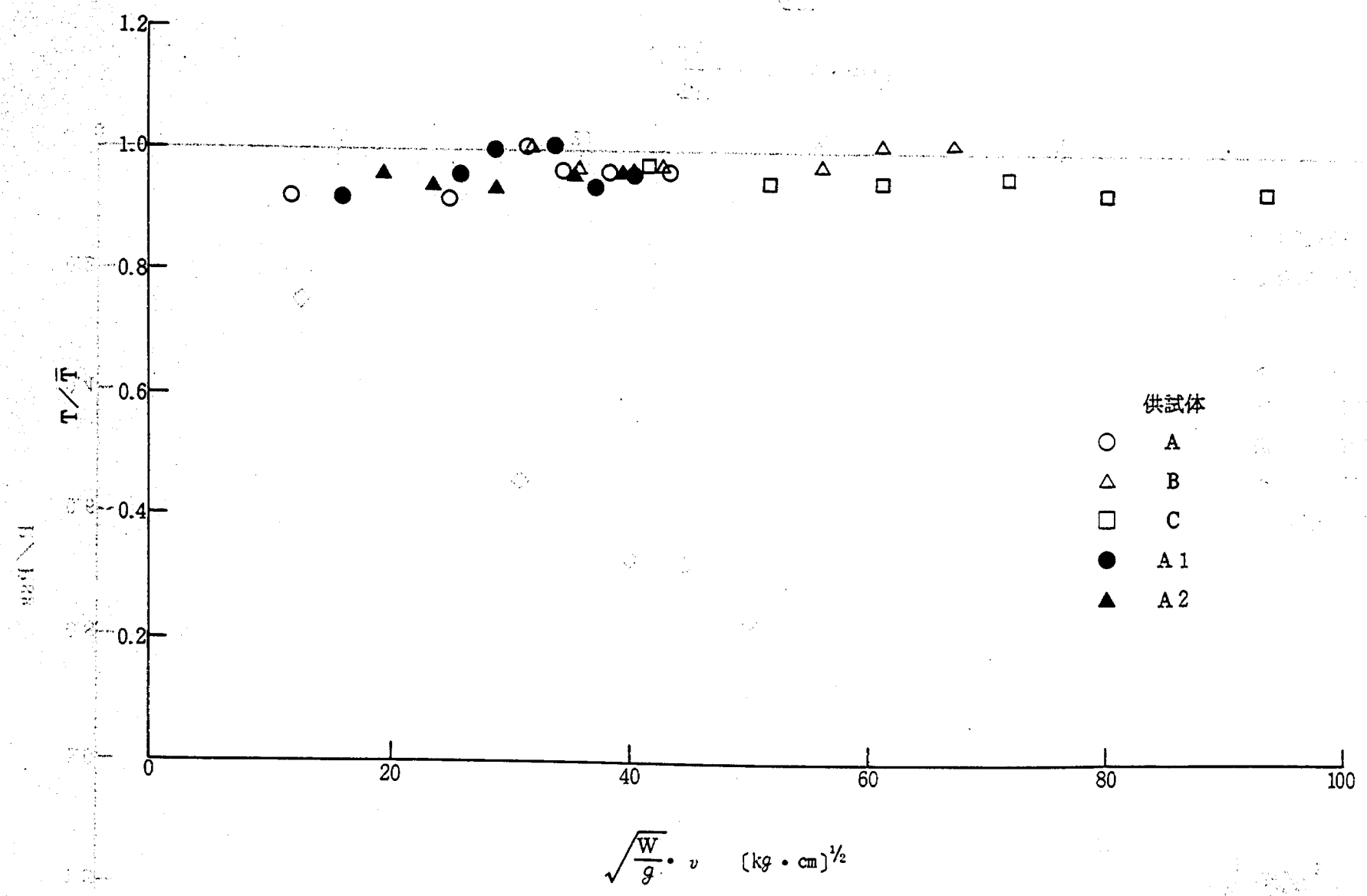


図 3 - 5 衝撃波形周期の実測値 T と計算値 $\bar{T}$ の比較

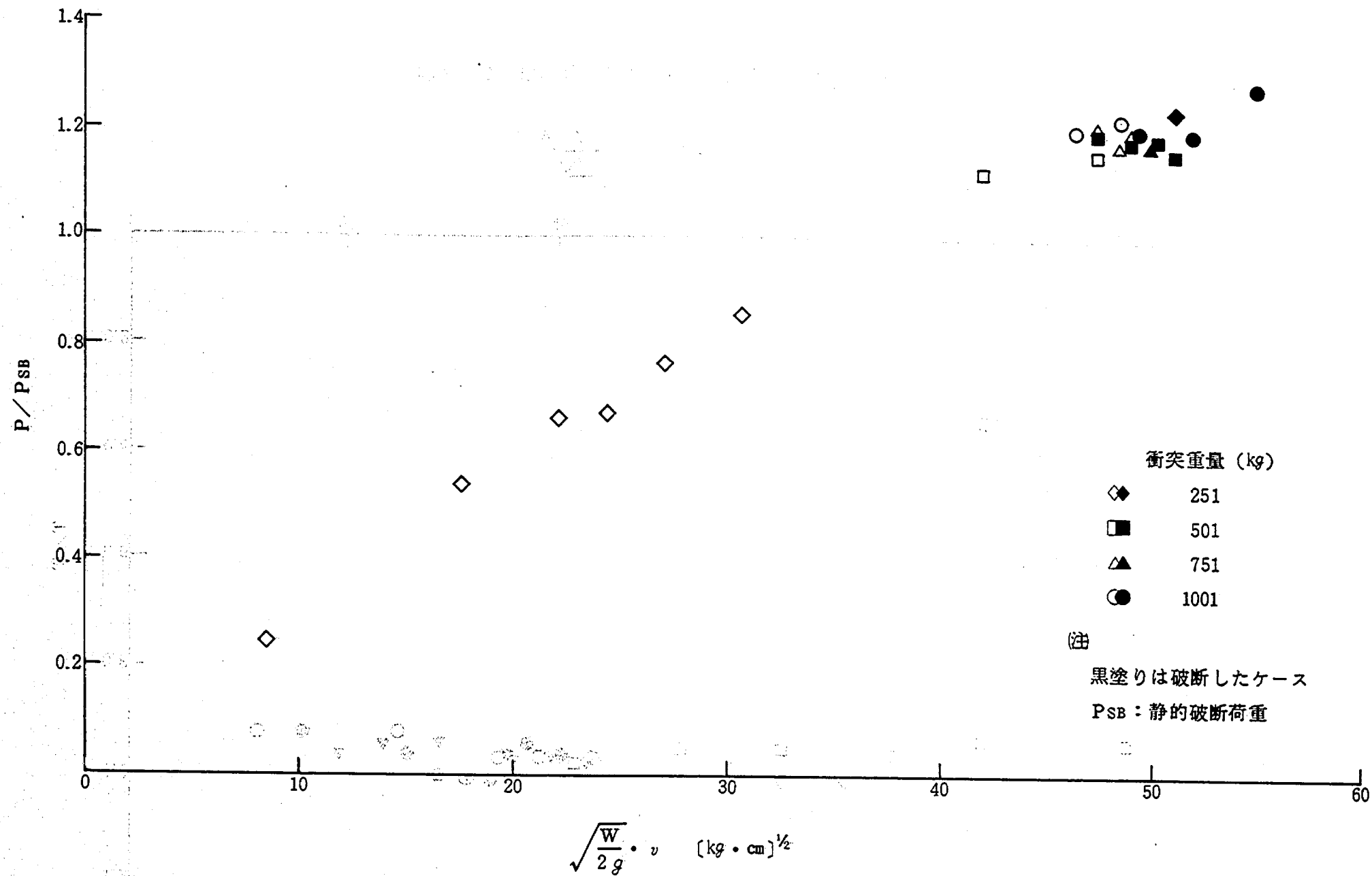


図 3-6 P/P_{SB} と $\sqrt{\frac{W}{2g}} \cdot v$ の関係 (模型 A)

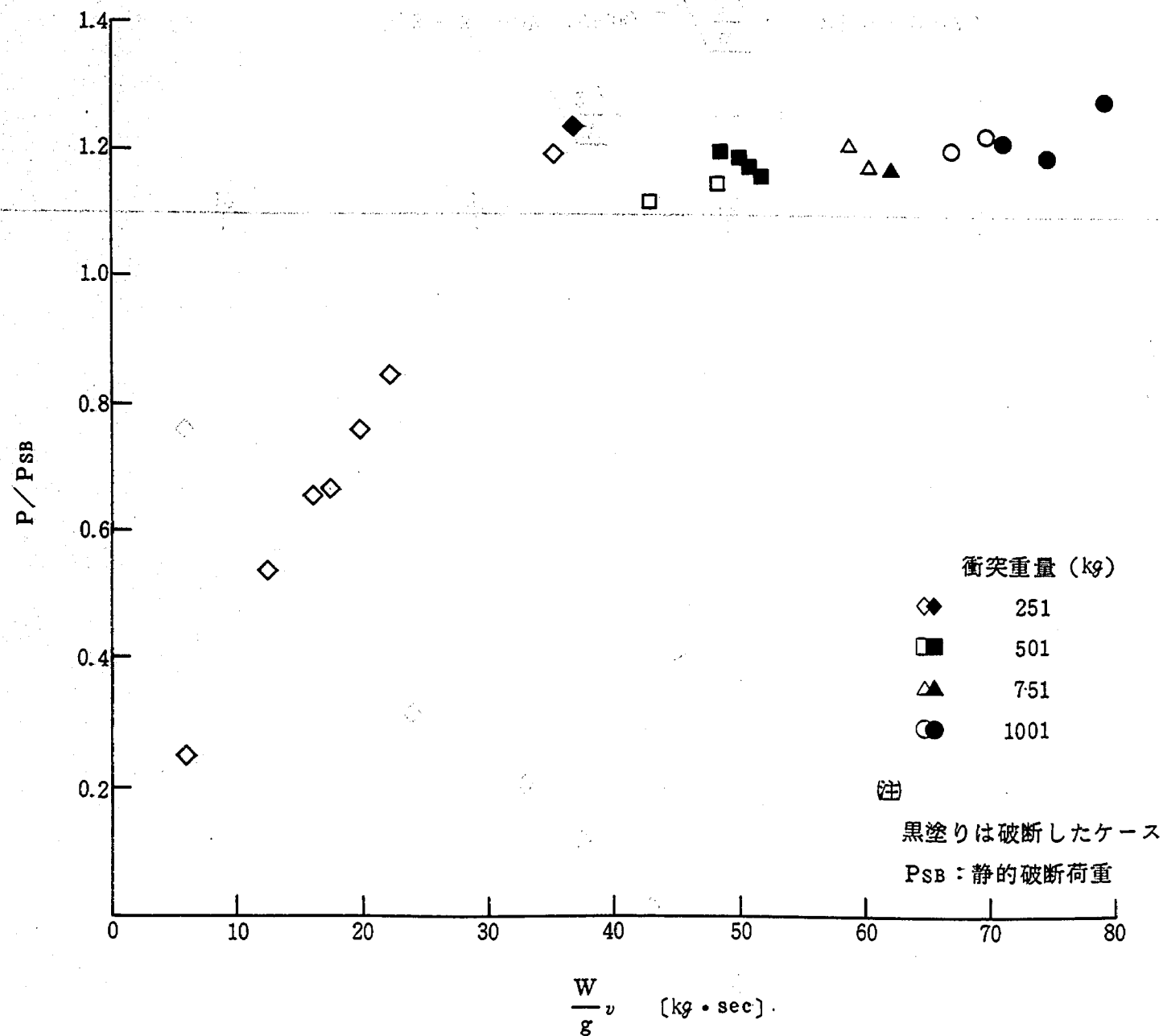


図 3 - 7 $\frac{P}{P_{SB}}$ と $\frac{W}{g} \nu$ の関係 (模型 A)

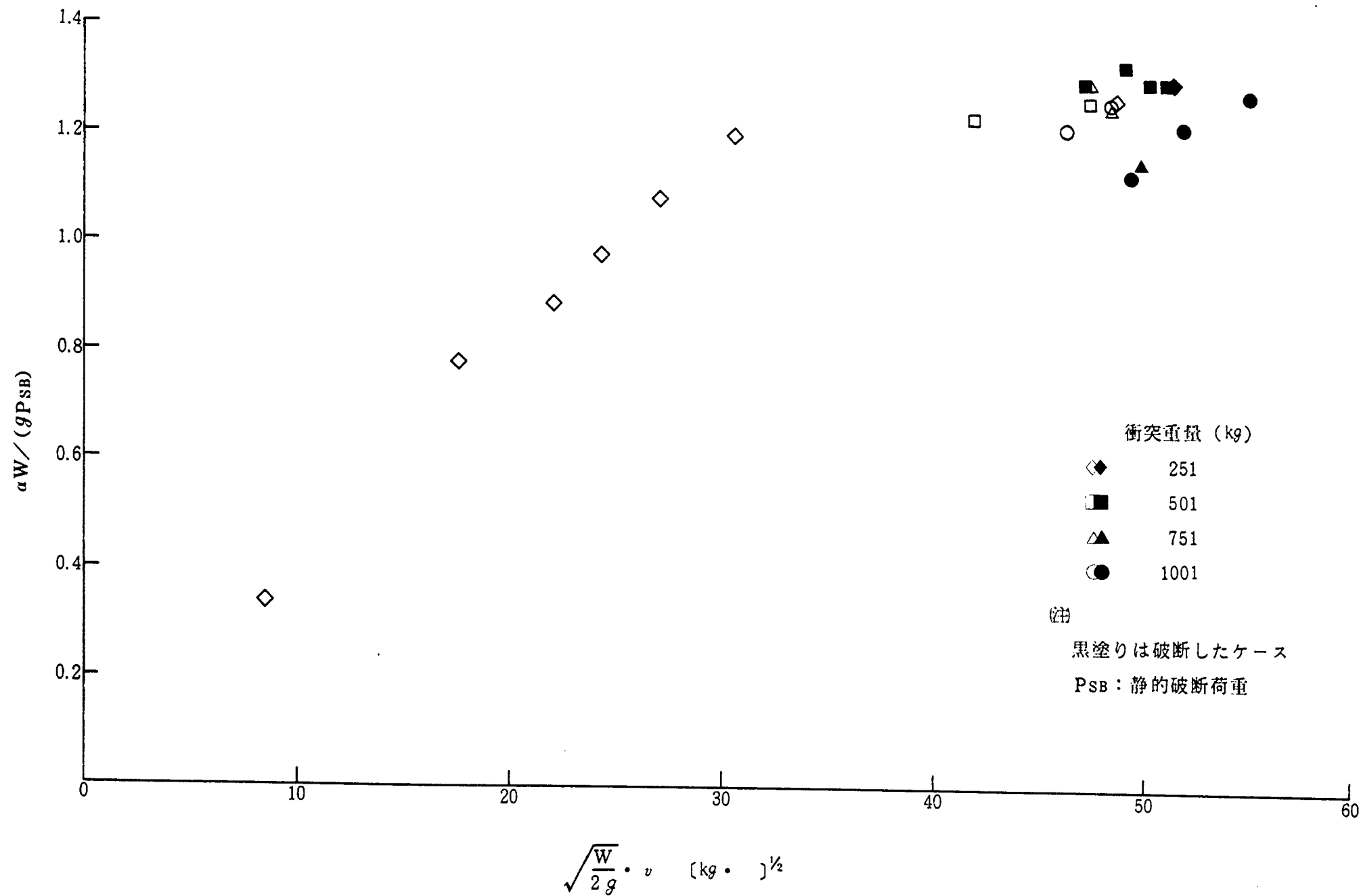


図 3 - 8 $\alpha W / (g P_{SB})$ と $\sqrt{\frac{W}{2g}} \cdot v$ の関係 (模型 A)

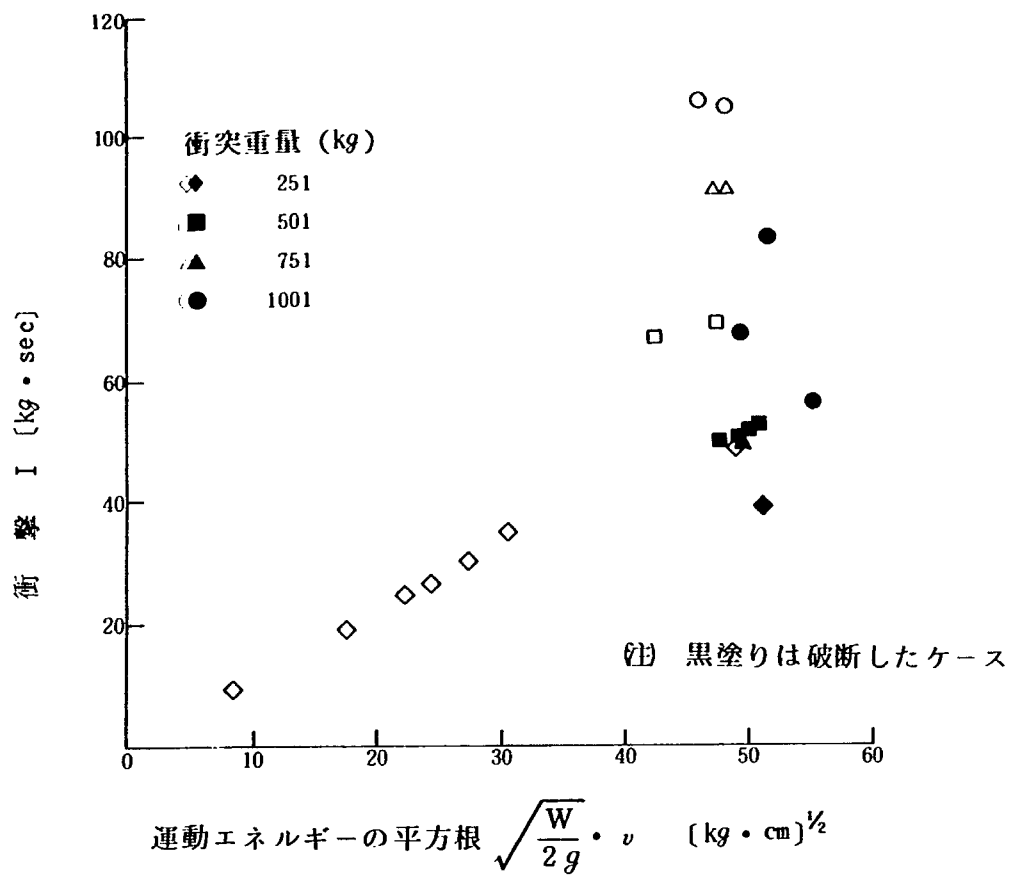


図 3 - 9 運動エネルギーと衝撃の関係 (模型 A)

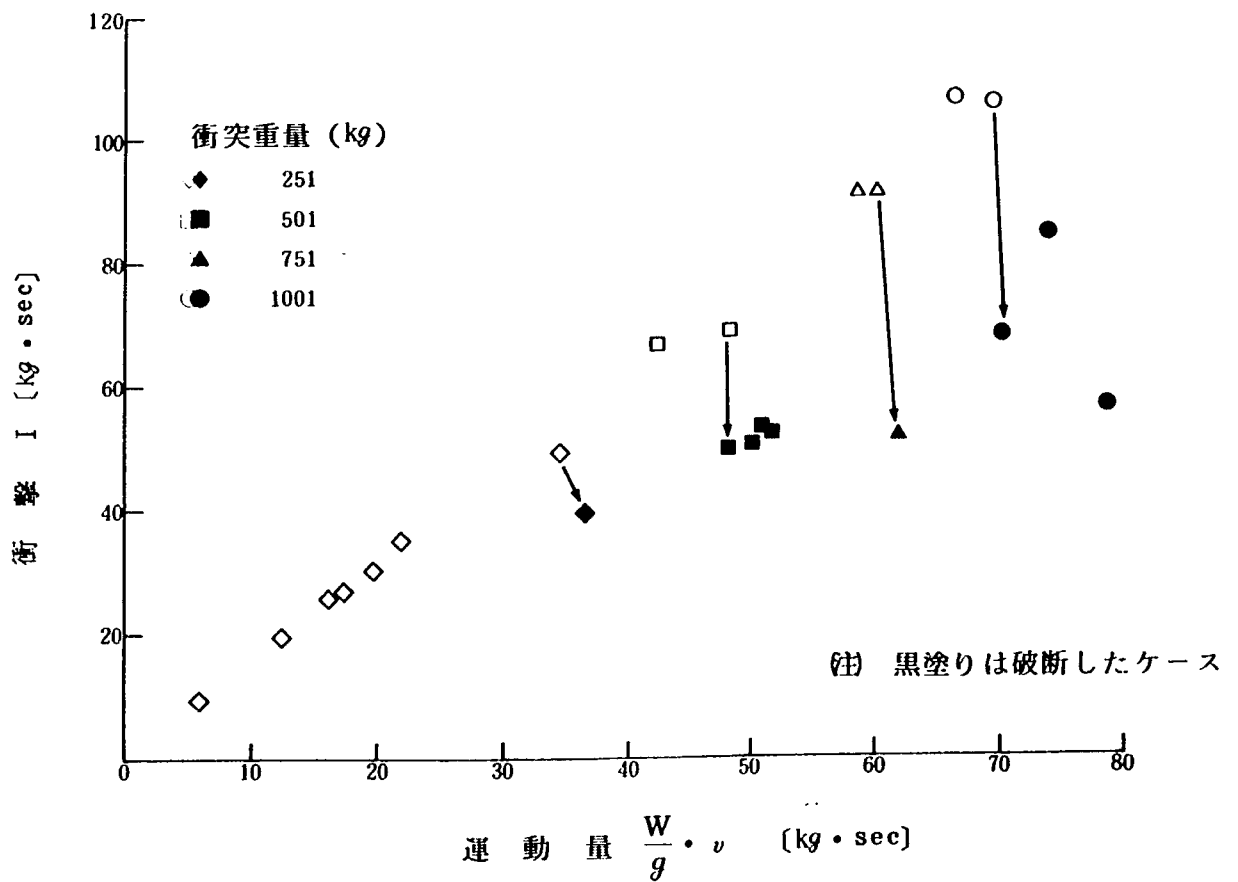


図 3 - 10 運動量と衝撃の関係 (模型 A)

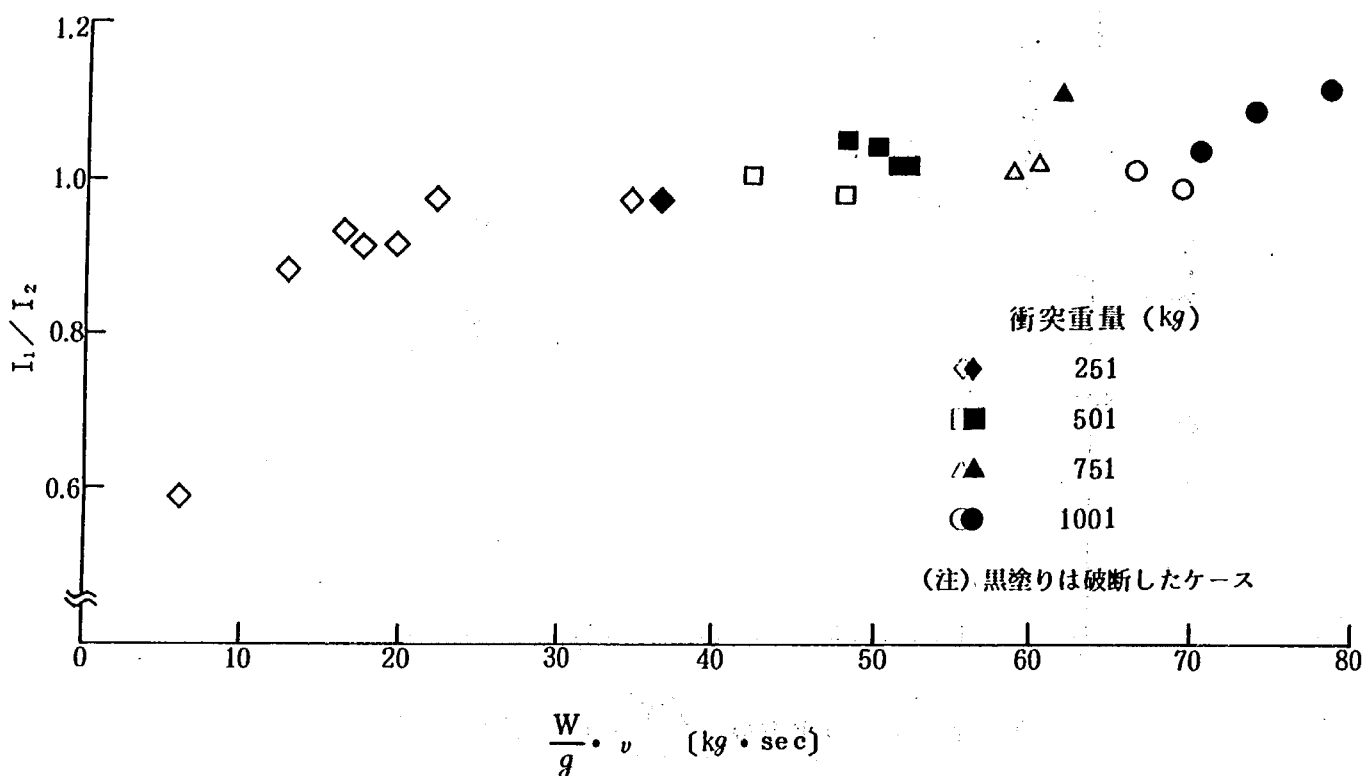


図 3 - 11 式 (3 - 7) による衝撃値 I_1 と式 (3 - 8) による衝撃値 I_2 の比較 (模型 A)

3.3 破壊性状

模型の破壊状況を図 3 - 12 に示す。破断クラックは突起下端の曲線 R 部上端から発生し、背面の断面変化部のやや上に貫通している。破断面の観察によって破壊の進展機構を推測すると、図 3 - 13 に示すように、R 部付近に引張応力によってクラックが発生し、クラックが進行する過程でせん断による滑りが生じて破断に至ったものと考えられる。静的載荷による 3 種類の模型 A (15 / 100 模型)、B (20 / 100 模型)、C (25 / 100 模型) の破壊性状は同様であり、また模型 A の静的載荷および衝突による破壊性状もとくに差は見られなかった。

模型破断面を観察すると全断面に延性破壊を生じていたが、これは、日本道路公団試験所による実物沓の破壊実験において R 部近傍を除いたほとんどの断面でぜい性破壊を生じた結果とは異なっている。この破壊性状の相違は供試体の規模の相違に起因しているものと考えられ、本実験においては実物沓の破壊性状を必ずしも忠実に再現していないものと考えられる。

3.4 終局耐力

模型縮尺の異なる 3 種類の模型 A、B、C の静的載荷実験によって得られた各終局耐力を、縮尺に応じて実物換算した値はほぼ一致しており、相似性が見られた (表 2 - 4 参照)。また、模型 A の静的載荷実験および衝突実験によって得られた終局耐力の値を比較すると、衝突時の

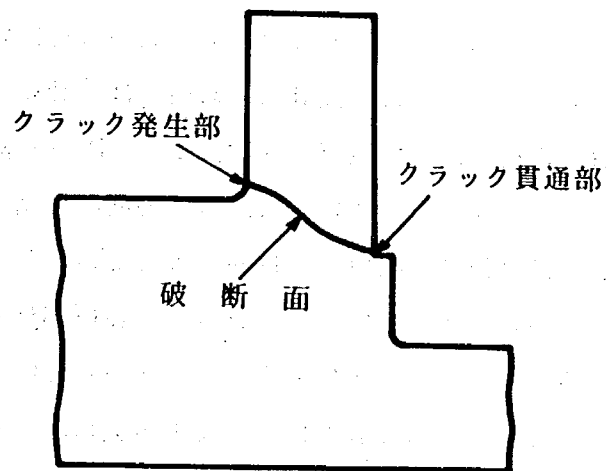


図 3 - 12 模型の破壊状況

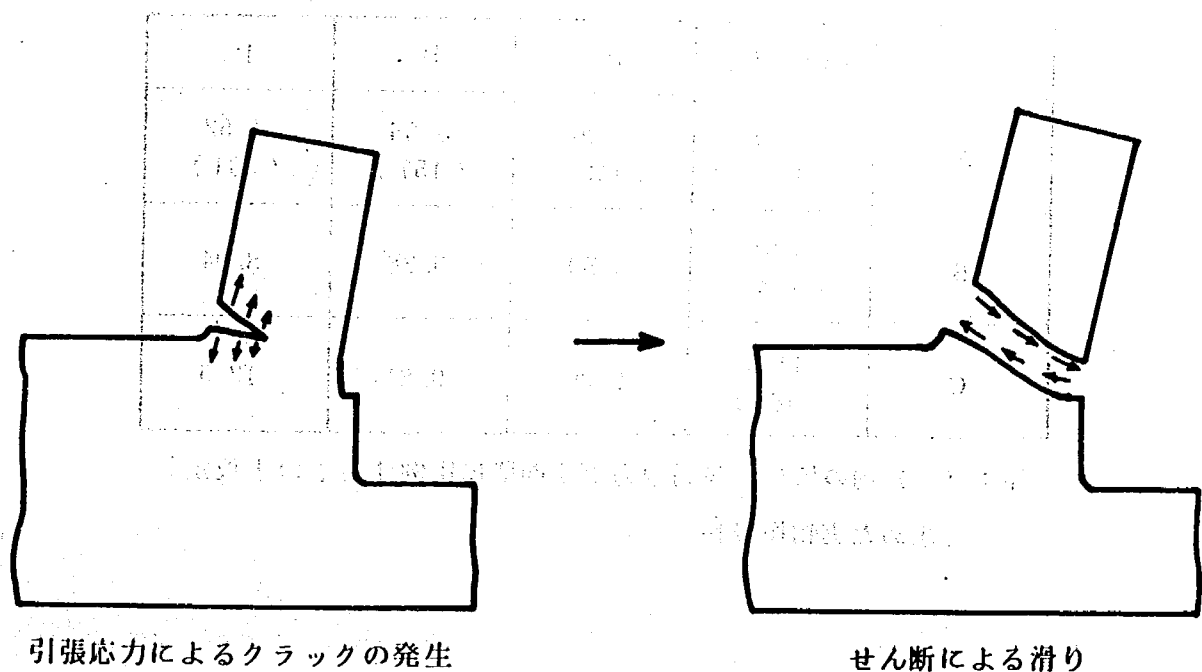


図 3 - 13 破壊の進展状況

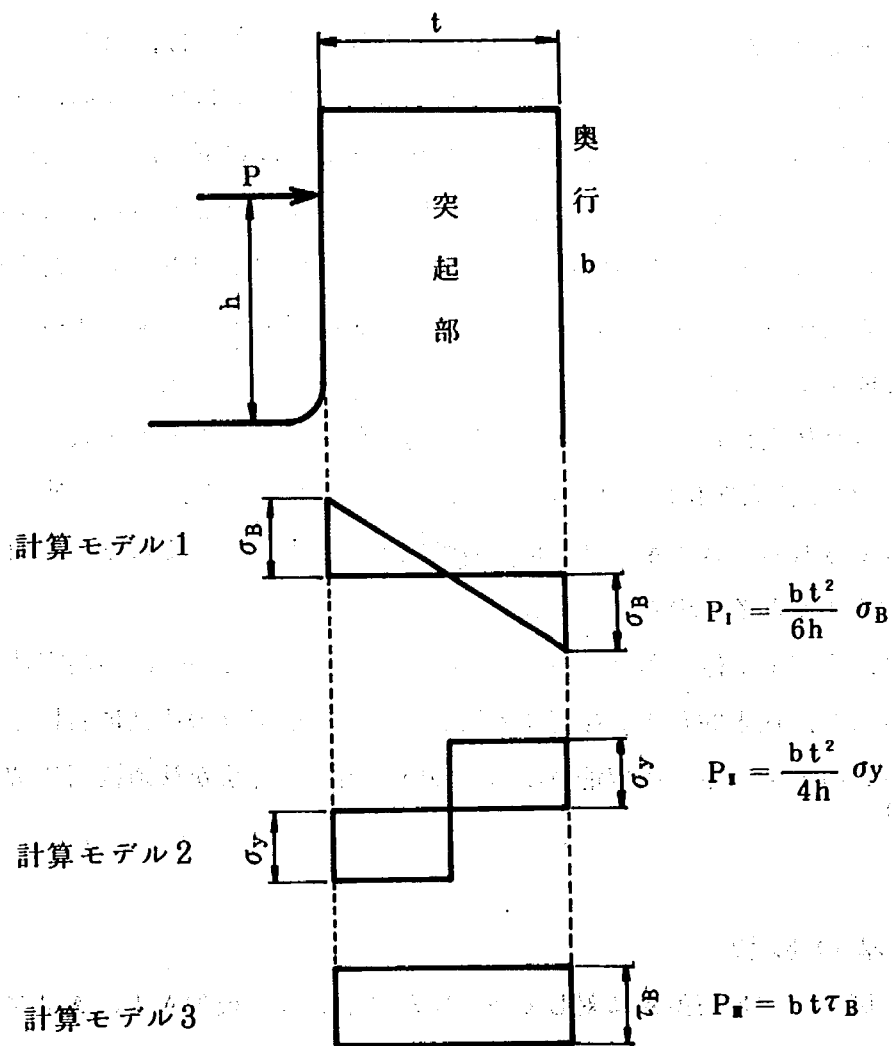
終局耐力は静的終局耐力を20%程度上回っていた（図2-15参照）。しかしながら、実物沓と模型沓では前者がぜい性破面、後者が延性破面を呈していたことなどから、本模型実験の結果から単純に相似比によって実物沓の終局耐力を推定することには無理があるように思われる。

図3-14のような3種類の計算モデルによって終局耐力を推定し、実測値との比較を行った結果を表3-1に示している。現行の設計法においては、計算モデル1および3によって σ_B 、 τ_B の代わりに許容応力度 σ_a 、 τ_a を用いて P_1 および P_3 を算出し、両者のうちの小さい方が設計荷重を下回らないことを照査している（許容応力度の割増しを行っている）。本実験においては各モデルによる計算値は実測値と比較的一致しているが、実物沓実験では計算値と実測値が大きく異なることが報告されている。これは、細長い部材の微小変形に適用される梁理論を、下沓突起部のようなマッシブな部材の大変形に適用していることに起因しているものと考えられる。このことから、現行の設計法における下沓突起部の地震荷重に対する耐力の計算精度は必ずしも良いとは言えないが、実際の耐力よりも一般に小さめの値を与えており、安全側の設計になっている。

表3-1 終局耐力の実測値と計算値の比較

模 型	平均実測値	P_1	P_2	P_3
A	3.89 (173)	3.26 (145)	3.54 (157)	4.52 (201)
B	6.94 (174)	5.80	6.28	8.04
C	11.5 (184)	9.06	9.81	12.6

注：（ ）内の値は、終局耐力が断面積に比例するものと仮定して求めた実物換算値



σ_B : 引張強さ
 σ_y : 降伏点強度
 τ_B : せん断強さ ($= \sigma_B / \sqrt{3}$)

図 3-14 下沓突起部の耐力計算モデル

3.5 吸収エネルギー

下沓突起模型の衝突実験によって、衝突時に突起に作用する衝撃荷重の大きさおよび突起破断の有無は衝突運動エネルギーの大きさに支配されることが確認された。

模型Aの突起の破断に至る限界の衝突運動エネルギーは、約 $2,500 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ であった。一方、静的载荷によって模型Aの突起が破断するまでの吸収エネルギーは、荷重～変位曲線から求めると $500 \sim 700 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ であった。ただし、突起変位には模型取付部の変形などの影響も含まれているため、突起部のみの吸収エネルギーは $500 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 程度以下であったものと考えられる。静的载荷と衝突による破断状況にはとくに差が見られなかったことから、衝突の際に突起の破断に費やされたエネルギーは全衝突運動エネルギーの20%程度以下であったものと考えられる。

支承部の衝突機構は式(3-1)で表現され、衝突時に下沓突起部に作用する衝撃荷重は式(3-3)で推定できることがわかった。式(3-3)から、衝突運動エネルギーが同じであっても衝突系の全体剛性Kが大きくなるほど突起に作用する衝撃荷重が大きくなり、相対的に突起の剛性 k_2 の全体剛性Kに対する比 k_2/K が小さくなるほど、衝突運動エネルギーが突起部の変形に費やされるエネルギー(突起部の吸収エネルギー)に変換される割合が高くなって、突起が破断しやすくなるものと考えられる。

このように、衝突系全体における各部分の剛性関係によって突起部の耐震性が左右されるものと考えられるが、代表的な諸元を有する橋を対象に支承部分の特性に着目して、突起部(鋼角ストッパー)のエネルギー吸収能力にもとづいた耐震設計法が鉄道技術研究所によって提案されている。¹¹⁾

3.6 突起厚の影響

図3-15、図3-16に模型Aに対して突起厚だけが異なる模型A1、A2について、横軸に衝突運動エネルギーの平方根、縦軸にロードセルで直接測定した衝撃荷重および衝撃加速度から換算した衝撃荷重を、それぞれ模型Aの静的破断荷重で無次元化したものをもって、衝突実験による測定データをプロットしたものを示している。また、表3-2に模型A1、A2の模型Aに対する突起破断時の衝撃荷重、衝突運動エネルギーの増加割合を示している。これらから、突起厚が増加すると突起破断時の衝撃荷重および衝突運動エネルギーも増加しており、突起部の耐力が増大していることがわかる。しかしながら、突起厚の増大によって剛性が大きくなり、それに伴って衝撃荷重が大きくなることなども考えられ、突起厚を大きくすることが一概に耐震性の向上につながるものとは言いがたい。

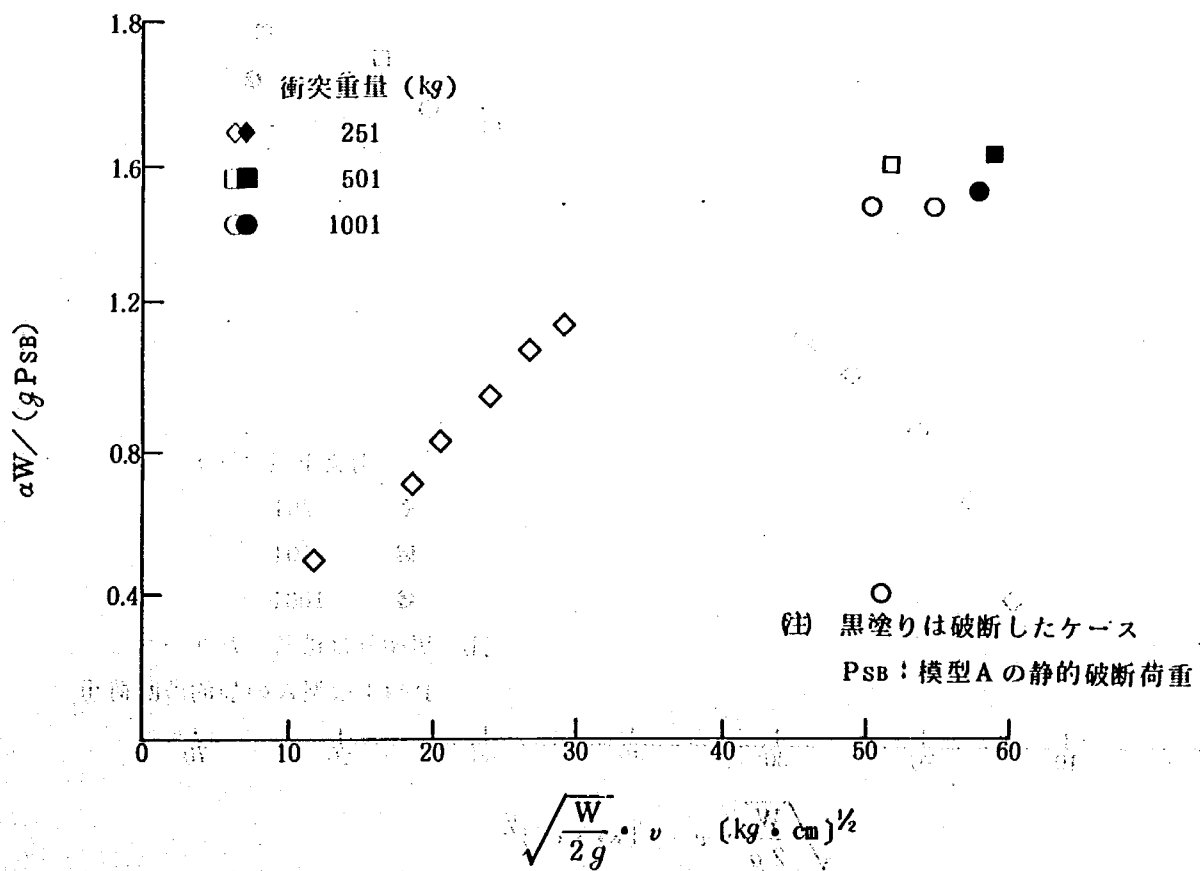
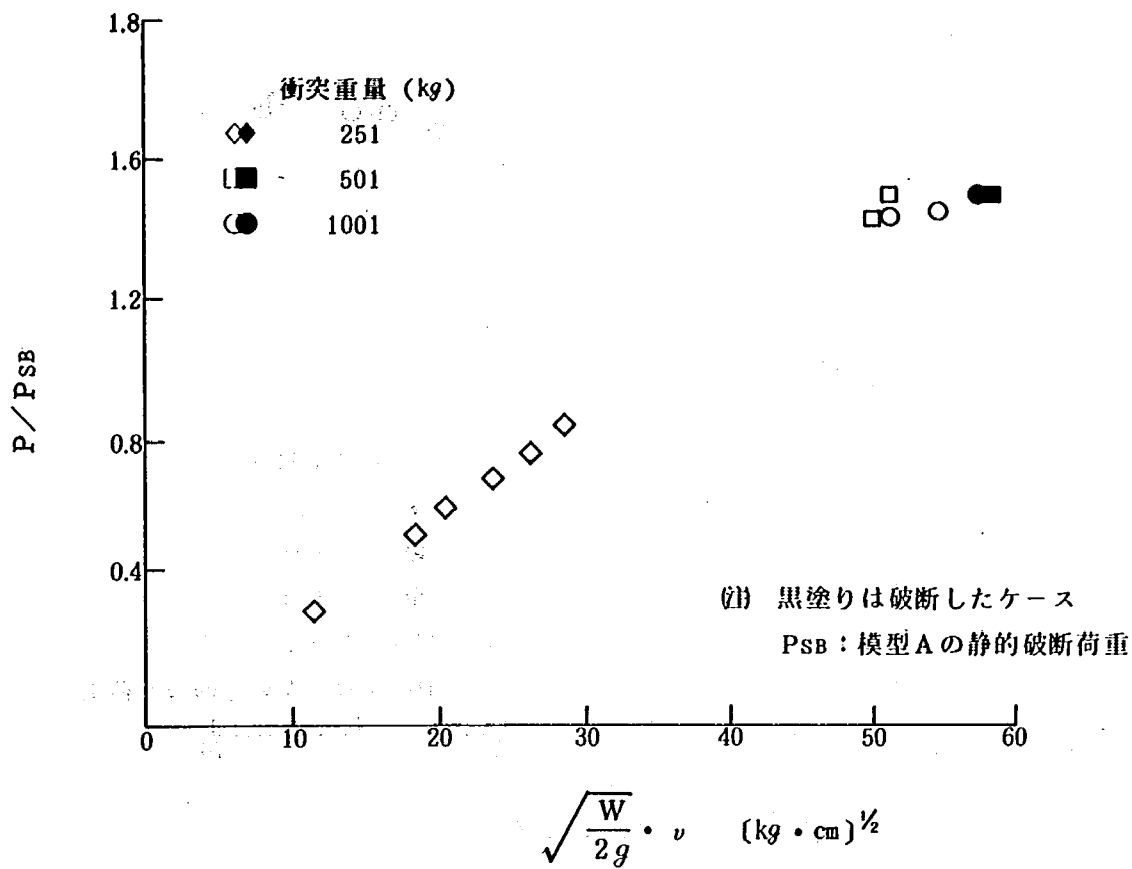


図 3-15 突起厚の影響 (模型A 1)

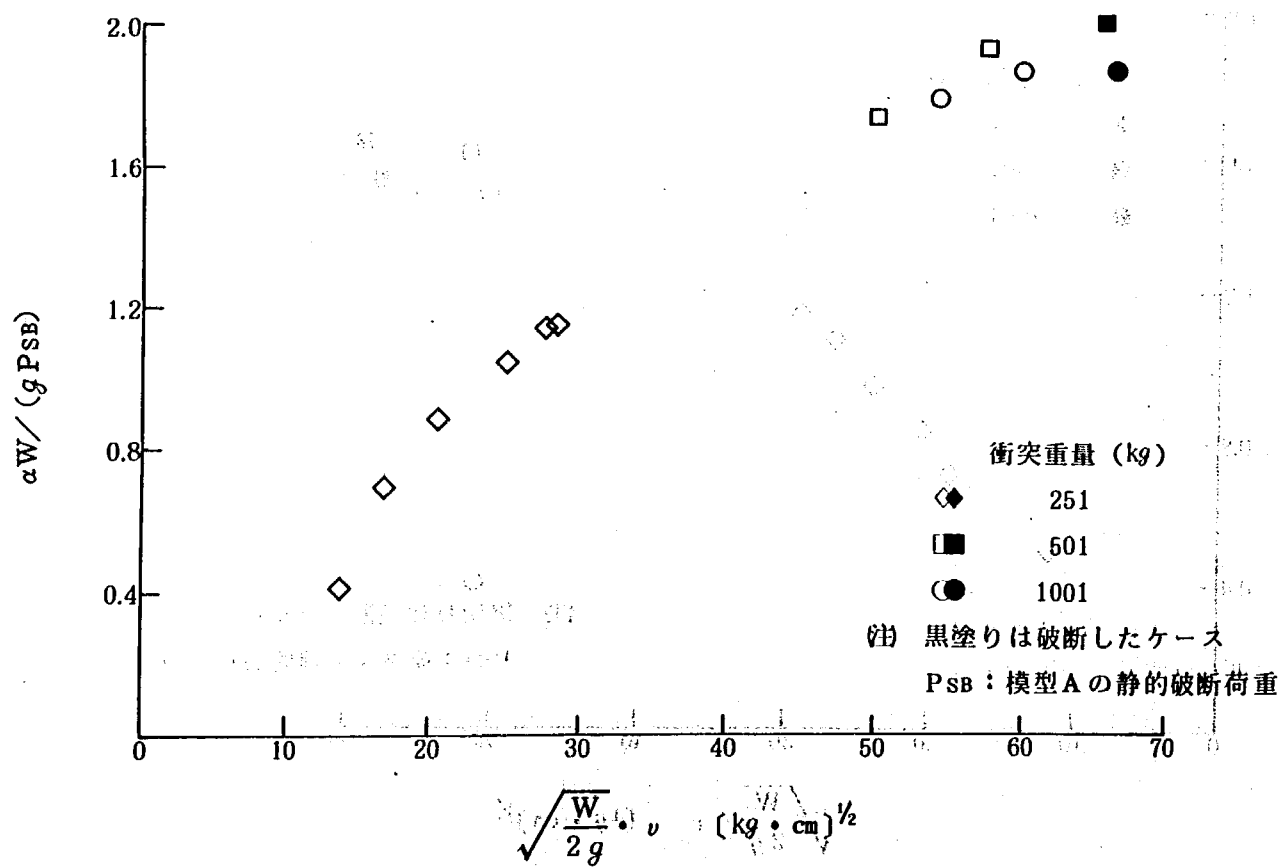
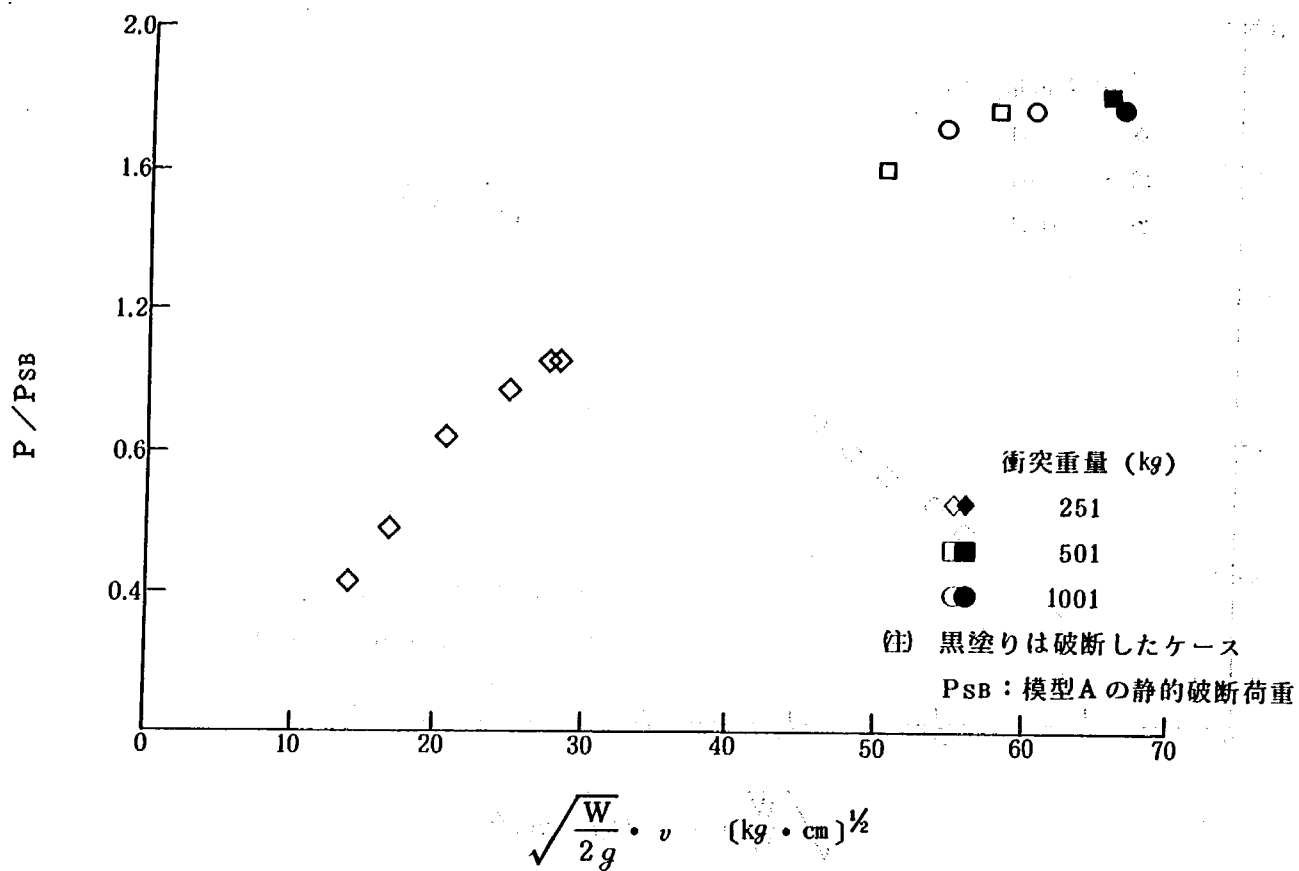


図3-16 突起厚の影響 (模型A 2)

表 3 - 2 突起厚の影響（模型A に対する増加割合）

模 型	突起厚の増加 (%)	突起破断時の 衝撃荷重の増加 (%)	突起破断時の 運動エネルギーの増加 (%)
A 1	19	25	25 ~ 35
A 2	38	40 ~ 50	60 ~ 75

3.7 緩衝材の効果

図 3 - 17～図 3 - 20に、突起部に緩衝材の有る場合と無い場合の衝撃荷重、衝撃波形周期、衝撃加速度、および突起変位の比較を行っている。衝撃波形周期は緩衝材を設置することによって長くなる傾向が見られるが、緩衝材による衝撃荷重の低減効果は緩衝材の種類に拘らず小さなものとなっている。したがって、実物沓に緩衝材を設置して衝撃荷重を低減しようとする場合には、かなり大がかりな緩衝材を設置する必要があるものと考えられる。

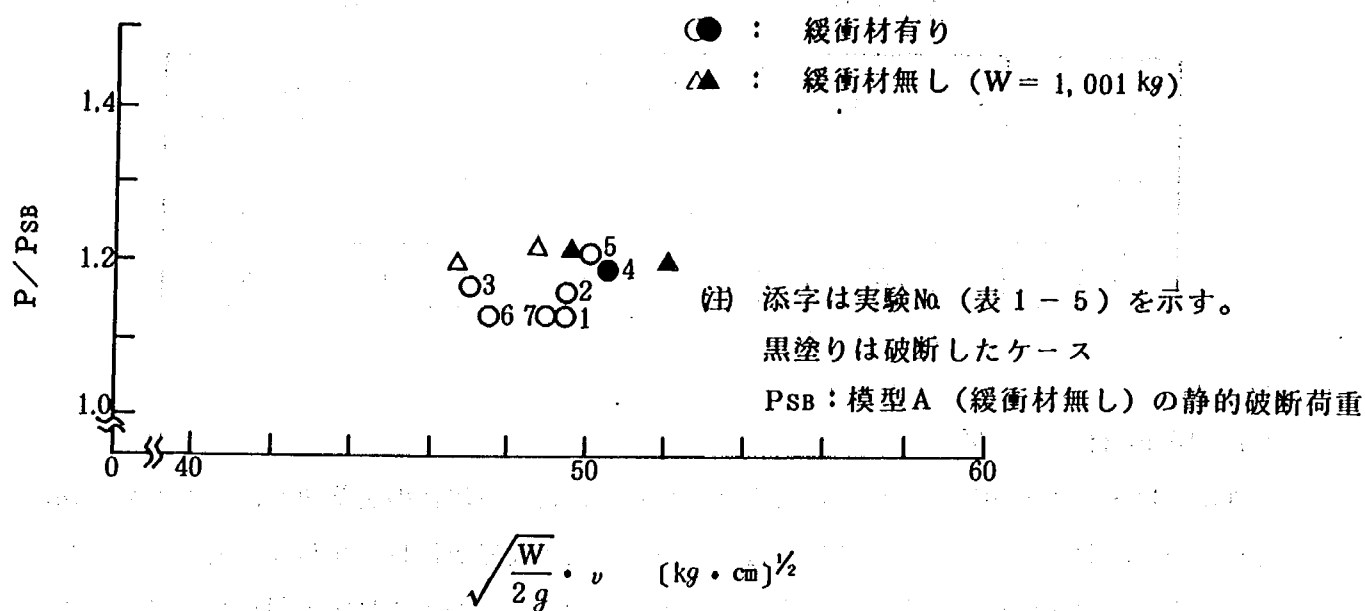


図 3 - 17 緩衝材の有無による衝撃荷重の比較 (模型A)

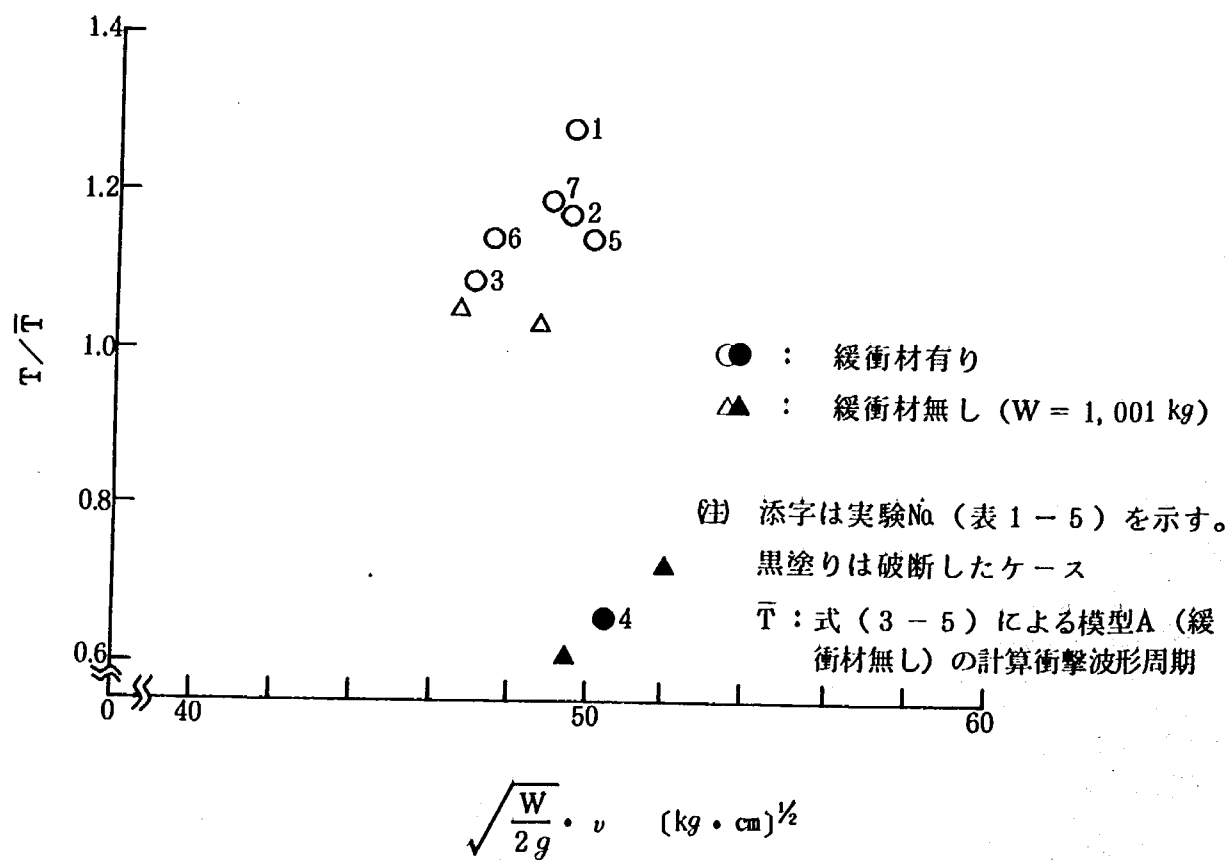


図 3 - 18 緩衝材の有無による衝撃波形周期の比較 (模型A)

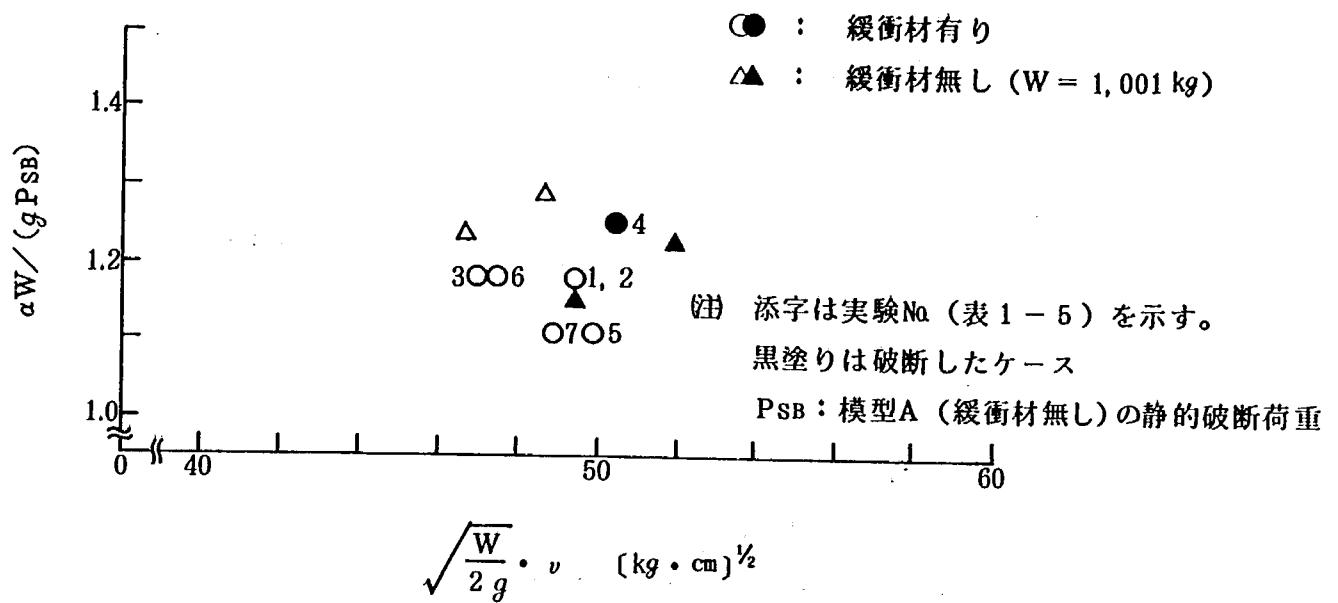


図 3-19 緩衝材の有無による衝撃加速度の比較 (模型A)

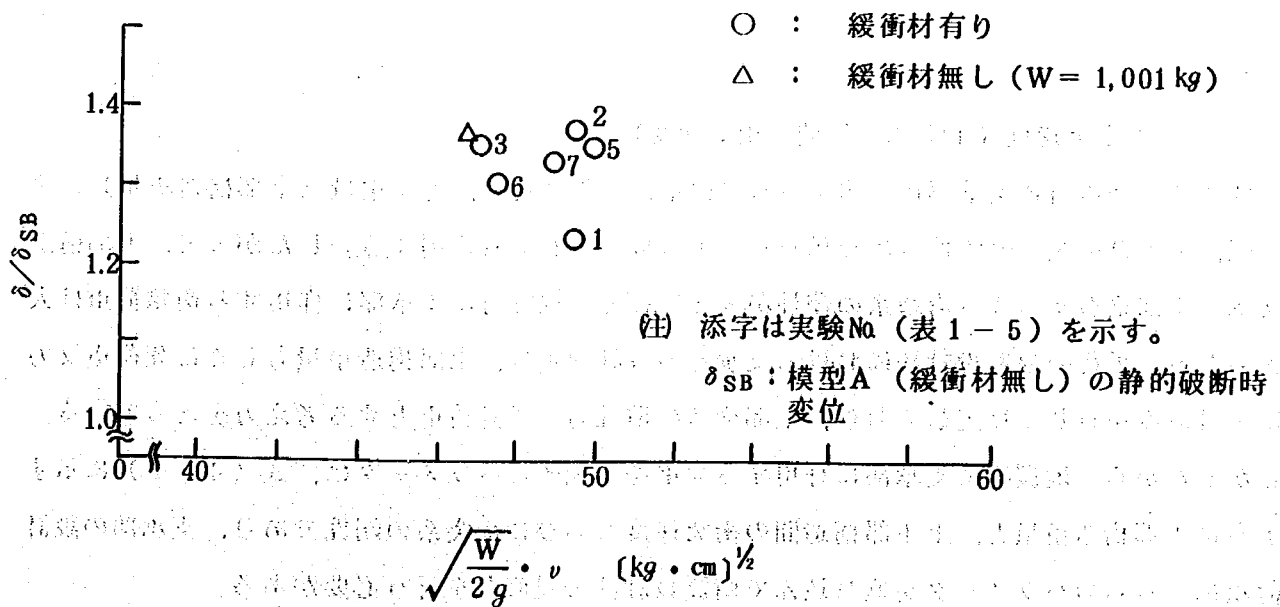


図 3-20 緩衝材の有無による突起変位の比較 (模型A)

4. 結 論

本実験結果をまとめると次のとおりである。

(1) 支承部における地震時の衝突現象は次式で表現される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{W}{g} \ddot{x} + K x &= 0 \\ \frac{1}{K} &= \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

ここに、

W : 衝突重量 (上部構造の重量)

K : 衝突系の全体剛性 (ばね係数)

x : 上部構造の変位 (下部構造下端に対する相対変位)

g : 重力加速度 (= 980 cm/sec)

k_1 : 上部構造の剛性 (ばね係数)

k_2 : 支承部の剛性 (ばね係数)

k_3 : 下部構造の剛性 (ばね係数)

これより、地震時に支承部に作用する衝撃荷重 P は次式によって推定される。

$$P = \sqrt{K} \cdot \sqrt{\frac{W}{g}} \cdot v \quad (4-2)$$

ここに、

v : 衝突速度 (上下部構造間の相対速度)

ゆえに、地震時に支承部に作用する衝撃荷重は、衝突速度、衝突重量 (上部構造重量) の平方根、および衝突系の剛性 (ばね係数) の平方根にそれぞれ比例する。したがって、上部構造、支承、下部構造から成る構造系の剛性が大きいほど、地震時に支承部に作用する衝撃荷重は大きくなる。現行の耐震設計法における支承部の設計荷重は、上部構造重量もしくは死荷重反力に設計震度を乗じて算定しており、上部構造の慣性力を設計荷重とする考え方をとっている。しかしながら、地震時に支承部に作用する荷重を支配するパラメータは、式 (4-2) に示すように上部構造重量と、上下部構造間の衝突速度ならびに衝突系の剛性であり、支承部の設計荷重にこれらのパラメータを盛り込んで耐震設計法の見直しを行う必要がある。

(2) 本実験において、下沓突起部に作用する衝撃荷重は衝突物の運動エネルギーの平方根に比例し、ある一定の運動エネルギーを境にして突起が破断することが確認された。この実験結果

は式(4-1)と整合しており、地震時に支承部に作用する衝撃荷重および下沓突起の破断は、衝突系の運動エネルギー(上部構造の下部構造に対する運動エネルギー)と剛性によって決定される。

(3) 本実験における下沓突起模型の破壊は、破断クラックが突起下端の曲線R部上端から発生し、それが背面まで貫通して起きている。この場合の破壊の進展は、まず突起下端R部付近に引張応力によるクラックが生じ、クラックが進行する過程でせん断による滑りが生じて破断に至ったものと考えられる。本実験における模型の破断面はいずれも延性破面となっていたが、供試体の規模によって破壊性状が異なってくるものと考えられ、実物沓ではよりぜい性的な破壊性状となるものと考えられる。

(4) 本実験では、下沓突起模型の衝撃破断荷重は静的破断荷重の20%増程度の値であった。本実験のように、突起部の破壊性状(延性破壊)が载荷速度によって変化しない場合には、荷重が衝撃的に作用した場合の方が破断荷重は大きくなる傾向があるものと考えられる。しかしながら、载荷速度によって破壊性状が変化する(延性破壊→ぜい性破壊)ような場合には、荷重が衝撃的に作用した場合に破断荷重が低下することも考えられるため、突起部の終局状態を把握するには実物沓を用いた载荷実験を行うことが望ましい。

(5) 現行の支承の耐震設計法における下沓突起の耐力の計算法は、細長い部材の微小変形に適用される梁理論を、マッシブな部材の大変形に適用しているために、計算精度は必ずしも良くないが、実際の耐力よりも一般に小さめの値を与えており、耐力の計算に関しては安全側の設計になっている。

(6) 衝突運動エネルギーが下沓突起部の破断に費やされるエネルギーに変換される割合は、衝突系各部の剛性の大小関係によって変化し、下沓突起の剛性に対して支承取付部を含む上下部構造の剛性が大きくなるほどその割合は大きくなり、突起の破断が生じやすくなる。

(7) 突起厚を大きくすることによって下沓突起部の耐力も増大するが、剛性が大きくなることによって衝撃荷重も大きくなるため、構造系全体としての耐震性を考慮して突起厚を選定する必要がある。

(8) 本実験では下沓突起部に設置した緩衝材の効果は小さく、緩衝材によって衝撃荷重を低減させようとする場合には、かなり大がかりな緩衝材を設置する必要があるものと考えられる。

あ と が き

現行の支承部の耐震設計法において、とくに検討すべき項目としては、支承部に作用する衝撃荷重（設計荷重）の算定法、および部材の耐震性能の評価方法が挙げられる。

本実験によって、地震時の支承部における衝突機構を把握することができ、支承部に作用する衝撃荷重の推定方法を導くことができた。ここで導いた推定方法によって衝撃荷重すなわち設計荷重を求めるためには、地震時の支承部における衝突速度、衝突系の剛性、および有効衝突重量について調査し、これらの量を合理的に設定する必要がある。

本実験では模型規模が小さいことから、必ずしも実物沓の破壊性状を再現していないため、支承部材の耐震性能をより詳細に把握するためには実物沓の載荷実験を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) 宮城県沖地震道路橋被害調査分科会：宮城県沖地震による道路橋の被害ならびに支承部の耐震性に関する調査報告書，日本道路協会，昭和55年3月
- 2) 川島一彦，西川和廣：宮城県沖地震による道路橋の支承被害，土木技術資料第22巻第10号，昭和55年10月
- 3) 荒川直士：アンカーボルトの耐力試験
- 4) 寺内常晃，椎泰敏，大塚昭夫：アンカーボルトの支圧に関する基礎実験
- 5) 斉木三郎：支承の耐震性について，1979年
- 6) 松下博通：無収縮グラウト材の模型注入試験と疲労強度，橋梁と基礎，1979年3月
- 7) 日本支承協会：宮城県沖地震における支承部の被害，プレストレストコンクリート Vol. 21, No. 4, 1979年8月
- 8) 上田治，萩原良二，津村直宜：道路橋支承の耐震性に関する模型衝突実験，第16回地震工学研究発表会講演概要，1981年7月，pp. 269～272
- 9) 一條昌幸，安岡富夫，町田富士夫：シュ－の破壊試験報告，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第1部，昭和55年9月，pp. 540～541
- 10) 石原静夫，中村正人，福永幸正：支承の地震時耐荷力に関する研究，第14回日本道路会議一般論文集，昭和56年10月，pp. 519～520
- 11) 日本国有鉄道鉄道技術研究所：桁式コンクリート鉄道橋支承部の耐震設計に関する研究，鉄道技術研究報告第1175号，1981年3月
- 12) 日本道路協会：道路橋支承便覧，昭和48年4月

道路橋支承の耐震性に関する模型実験
—下沓突起部の衝突実験—

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第1743号
マイクロフィルム第 号
昭和56年11月(1981)

上田 治, 萩原良二, 小山達彦

キーワード 道路橋支承, 耐震性, 模型実験

要 旨

本報告書は, 道路橋支承の下沓突起部の模型
衝突実験を行い, その地震時挙動を調査した結
果をとりまとめたものである。

○

郵便はがき

3 0 5 □ □

40円切手
をはって
下さい。

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室 御中

No 196

No 196

配布先氏名

配布先住所

○

○

土木研究所資料第 1743 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

印

○