

衝撃荷重を受ける平板及び防撓板の応力波形について

北村 茂*、佐久間正明*、前中 浩**

Stress Wave in Plain Plates and Stiffened Plates under Impact Loads

by

Shigeru KITAMURA*, Masaaki SAKUMA* and Hiroshi MAENAKA**

Abstract

A ship structure is mainly composed of plain plates and stiffened plates. It is important for a design of a ship to make clear the response of structural elements to impact force.

In this paper, the response of plain plates and stiffened plates loaded impulsively by a fallen cylindrical bar was investigated experimentally.

As a result, it is confirmed that stress wave occurred in cylindrical bar impacted specimens was classified to three mode dependent on the magnitude of impact load. Moreover, relationship between the deflection and the impact load was examined, which was affected by the bar falling height and the bar weight. Furthermore, dynamic load factor (DLF) was presented, besides the effect of a dead block, which is much used for easy analysis on such an impact test, was cleared up.

目 次

1. 緒言	34	3.3.4 力積	41
2. 実験方法	34	3.3.5 等価荷重と等価撓み	41
2.1 試験片	34	3.4 防撓板の衝撃応答	42
2.2 試験方法	34	3.4.1 打撃点が防撓材上の場合	42
2.3 荷重及び変位の計測方法	34	3.4.1.1 防撓材1本を溶接した防撓板	42
3. 実験結果及び考察	34	3.4.1.2 防撓材を十字に溶接した防撓板	42
3.1 打撃棒内の応力波形	34	3.4.2 打撃点が防撓材上でない場合	43
3.2 荷重及び撓み波形	36	3.4.2.1 防撓材を2本平行に溶接した	
3.2.1 打撃棒と平板の接触状況	36	防撓板	43
3.2.2 荷重及び撓みの時系列波形	37	3.4.2.2 防撓材を井形に溶接した防撓板	43
3.3 平板の衝撃応答	37	3.4.3 荷重と撓みの関係	44
3.3.1 荷重及び撓みの時系列波形	37	3.4.4 大変形時の力積	45
3.3.1.1 落下高さの影響	37	3.4.5 衝撃による振動の影響	47
3.3.1.2 打撃棒の重さの影響	38	3.5 緩衝材の影響	47
3.3.1.3 平板の大きさと板厚の関係	39	3.5.1 荷重、撓み及び歪の時系列波形	47
3.3.2 打撃棒の重さが最大荷重と撓みに		3.5.2 落下高さの影響	49
及ばず影響	40	3.5.3 打撃棒の重さの影響	49
3.3.3 動荷重係数 (DLF)	41	4. 結論	52
		参考文献	53

* 構造強度部

** 材料加工部

原稿受付 平成7年3月7日

審査済 平成7年11月1日

1. 緒 言

平板や防撓板などの船舶の基本的な構造要素が衝撃荷重を受けた場合の動的応答を把握することは強度設計上重要である。剛体と構造要素とが衝突すれば、両物体の衝突面には圧縮の接触応力が発生する。動的応答を把握するには、衝突面に発生する接触応力の分布とその大きさを知ること、即ち接触応力によって生ずる波動が要素内部を伝播し、構造要素各部に誘起される衝撃応力を明らかにすることが必要である。これらの動的応答に関しては、応力波の伝播理論を用いて解析する丸棒の縦衝撃により計測する方法^{1,2,3,4)}及びホプキンソンバー法^{5,6)}が従来から用いられている。また、構造要素の衝撃点近傍の剪断力から衝撃荷重を求める方法^{7,8)}さらに圧電素子を介して衝撃荷重を直接計測する方法⁹⁾等が提案されている。しかしながら、これらの計測法は実験室的で小型試験片によるものであり、大型の実構造物の荷重計測には殆ど用いられていない。

著者らは、従来より長尺の丸棒を用いた衝撃荷重の計測法について検討してきた；T型断面梁、平板(鋼)、フェロセメント、FRP及び防撓板の衝撃試験に於ける動的応答、さらに小型のフェロセメント船殻模型の衝撃強度についてである。^{10-15,19)}

本報告では、落錘として長尺の丸棒を用い、弾性波の伝播理論により構造要素に作用する衝撃荷重及びその応答について検討した結果を報告する。特に荷重波形と撓み波形に注目し、構造要素の剛性と損傷に至る過程での荷重波形の変化する状況を調べることを目的とした。

実験は平板及び防撓板への丸棒の落下衝突により実施し、荷重と撓みの関係を求め、それらの波形を分類した。さらに、構造要素の動的応答及び損傷状況に至るまでの過程を解析し、動荷重係数(Dynamic Load Factor, DLF)^{16,17,18)}について検討した。また、衝撃試験では荷重波形に振動が重畳し、正確な荷重を求めることは難しいために緩衝材を用いることが多い。この研究では緩衝材を使用することによる結果への影響も併せて検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

実験は平板及び防撓板試験片で実施した。試験片の形状寸法を表-1と図-1に、強度特性を表-2に示す。

平板試験片は板厚3.0mmと5.5mmの熱間圧延軟鋼板(JIS G3131 SPHC)から作製した。平板試験片の表示は、例えば縦、横、板厚が750mm、750mm、5.5mmの場合、“正方形板(750,750,5.5)”とした。

防撓板試験片は板厚3.0mmの軟鋼(JIS G3101

SS400)の平板に板厚3mmで高さ(脚長)が40mmの防撓材を1本、2本平行、十字、井形に連続隅肉溶接で取り付て作製した。これらは625℃、1時間の応力除去焼鈍を施した。さらに、比較のため、防撓材が1本の場合について脚長20及び60mmの防撓材を用いた防撓板試験片及び枠(200mm×15tの軟鋼板)に平板を溶接した固定枠付防撓板試験片も準備した。防撓板試験片の表示は防撓材については1本(A type)、十字(B type)、2本平行(C type)、井形(D type)とし、枠については枠付き防撓板(F)、枠なし防撓板(P)試験片と区別した。

2.2 試験方法

衝撃試験には落錘試験装置を用いた。装置の概要を図-2に示す。落錘として長尺の打撃棒を使用し、試験片の中央にガイドレールに沿って、打撃棒を自然落下で衝突させ動的応答及び損傷状況を調べた。打撃棒の形状寸法及び特性の一覧を表-3に示す。打撃棒はRで示し、例えば直径20mm、長さ2000mmの場合“R22”のように表示した。棒の打撃面は角を取り焼入れ処理を行った。

打撃棒の落下高さ(h：打撃面から試験片までの距離)は100mmから3650mmまで{打撃速度(v)が0.99～8.5m/sec}である。

打撃棒の落下高さはhで表し、例えば100mmの場合は“h10”とした。各試験片について、軽い打撃棒を低い位置から落とし、順次棒の落下高さと重さを増して衝突させ、試験片に変形が残るまで実験を行った。打撃時に計測値に影響しない程度に平板の周辺を治具で押さえた。

2.3 荷重及び変位の計測方法

衝撃時に棒に生ずる歪みは打撃端から100mm離れた位置に貼付した歪ゲージ(ゲージ長10mm)より計測した。4枚の歪みゲージは長手方向及び円周方向に対称に貼付しブリッジを組んだ。この歪みに相当する荷重は計算により求めた。荷重と歪の較正はロードセルにより実施した。

試験片の打撃点裏面の撓み量を非接触式レーザ変位計(omron製)で、歪は2軸または3軸の歪ゲージで計測した。

平板の打撃点裏面の撓み量及び歪ゲージの出力は、トランジェント・レコーダ(オートニクス製)を経て、パソコンに記録した。

3. 実験結果及び考察

3.1 打撃棒内の応力波形

打撃棒を平板に落下衝突させると、棒の打撃面(端)には圧縮の応力波が生じ、この応力波が棒の内部を波動として速度C₀で伝播し、打撃棒の他端では引張の

表-1 平板試験片の形状寸法

名称	縦	横	板厚	支持間隔		曲げ剛性	撓み剛性	固有周期	
				A	B			T_{s1}	T_{s2}
P(a, b, t)	a mm	b mm	t mm	A mm	B mm	D kgfmm	K_s kgf/mm	T_{s1} msec	T_{s2} msec
P(1500, 1500, 5.5)	1500	1500	5.5	1300	1300	3.20E5	33.8	34.7	48.7
P(1500, 750, 3.0)	1500	750	3.0	1300	700	5.19E4	10.2	34.2	31.7
P(1500, 750, 5.5)	1500	750	5.5	1300	700	3.20E5	62.8	18.7	26.6
P(750, 750, 3.0)	750	750	3.0	700	700	5.19E4	18.9	18.4	20.5
P(750, 750, 5.5)	750	750	5.5	700	700	3.20E5	116.7	10.1	13.2

where

$$K_s = 4Et^3/0.2444AB$$

$$T_{s1} = AB\sqrt{\gamma t/gD}/1.82\pi$$

T_{s2} = Measurement value

$$D = Et^3/12(1-\nu^2)$$

A, B: Supporting Span

t: Thickness

γ : Specific weight (kgf/mm³)

ν : Poisson's ratio

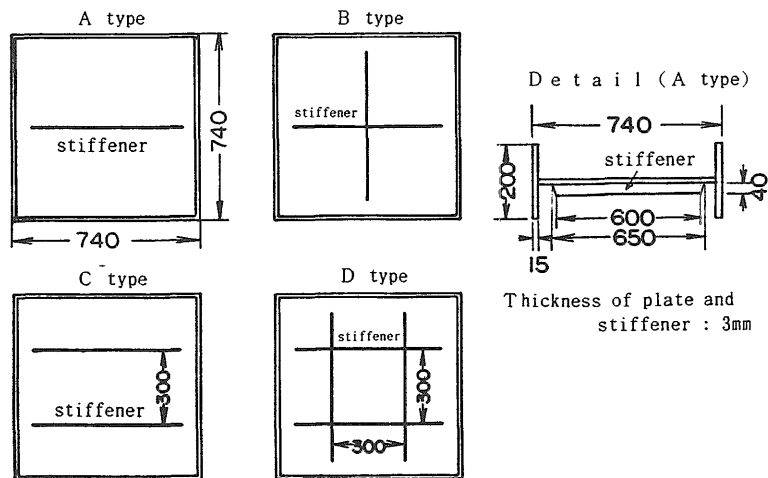
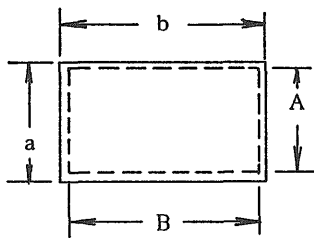


図-1 防撓板試験片の形状寸法

表-2 供試材の強度特性

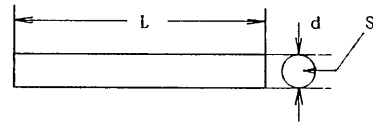
Plate

名称	上降伏応力 σ_{yu} kgf/mm ²	下降伏応力 σ_{yL} kgf/mm ²	最大応力 σ_u kgf/mm ²	伸び率 El %
3.0mm L-Direction	31.0	29.3	40.4	25.6
3.0mm C-Direction	31.7	30.3	40.2	24.3
5.5mm L-Direction	28.2		34.0	30.8
5.5mm C-Direction	28.8		33.5	29.3

Stiffened plate

名称	上降伏応力 σ_{yu} kgf/mm ²	下降伏応力 σ_{yL} kgf/mm ²	最大応力 σ_u kgf/mm ²	伸び率 El %
As Received L-D	31.5	29.0	39.0	24.8
As Received C-D	31.2	28.6	36.9	24.1
Str. Relieved L-D	36.7	29.5	37.1	25.3
Str. Relieved C-D	35.5	30.2	37.8	25.3

表-3 打撃棒の形状、寸法及び特性



名称	直径 d mm	長さ L mm	断面積 S mm ²	重量 W kgf	剛性 K _R kgf/mm	固有周期 T _R msec
R11	10	1000	78.5	1.417	1649	0.391
R12	10	2000	78.5	2.033	825	0.782
R14	10	4000	78.5	3.266	412	1.563
R22	20	2000	314.2	5.972	3299	0.782
R32	30	2000	706.9	13.047	7422	0.782
R42	40	2000	1257.0	21.990	13195	0.782
R62	60	2000	2827.0	47.220	29688	0.782

where W : include weight of supporter

$K_R = ES/L$ (kgf/mm)

$T_R = 2L/\sqrt{Eg/\gamma}$ (msec)

※ 棒の打撃端は焼入れ処理

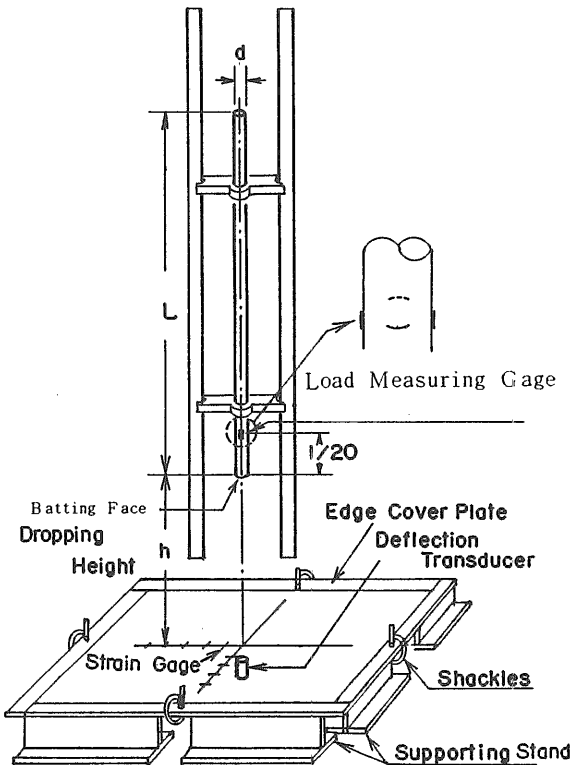


図-2 落錘試験装置の概要

応力波となり反射する。そして棒の打撃端と平板の接触部では透過、反射が起こり、平板の裏面及び接触部からの反射応力波は打撃棒に再侵入し、打撃時の圧縮応力波にスリット状あるいはパルス状に表れ、棒内を何回か往復する^{3,4)}。その間隔は打撃棒の長さ(L)により異なり、棒内を往復する時間は $2L/C_0$ で示される。即ちR11、R12、R14では0.31、0.69、1.46msecとなった。(関連図は図-16~19)

3.2 荷重及び撓み波形

3.2.1 打撃棒と平板の接触状況

打撃棒と平板が接触している時だけ通電する回路で接触、非接触の状況を確認した。平板の撓み波形と接触状況の例を図-3に示す。棒と平板が接触しているときはある荷重の値を示し、離れているときは荷重は概ねゼロとなる。しかし、衝突による応力波の伝播と平板の振動により、負荷中でも瞬時に非接触の状態になることがあり、荷重波形は複雑に変化した。

正方形板(1500,1500,3.0)に打撃棒R42を落下させた場合、撓みの大きさは落下高さを増せば大きくなるが、撓みの周期及び棒と平板の接触時間は図-3(左)のように短くなった。打撃棒をR12、R22、R32、

R42と重量を増した場合、正方形板(1500,1500,5.5)の撓みは比例して大きくなった。負荷中に接触、非接触を繰り返し、その周期は長くなったが、撓みの周期と接触時間とは必ずしも一致しなかった。荷重が大きいかほど非接触時間は短くなった。

3.2.2 荷重及び撓みの時系列波形

打撃棒の重さと落下高さにより、荷重、撓みの時系列波形は図-4に示すように3種類の波形モードに分類された。

モード1：打撃棒が比較的軽く、落下高さが低い時は衝突と同時に荷重は最大値を示した。その後減少過程を経て、打撃棒と平板とが押し合いながら撓み、撓みが最大値に達する前に、平板の高次の振動による局部的な撓みの戻りと棒の反力により、棒が平板から離れ、非接触の状態になり荷重はゼロになる。再接触時には荷重は初めの値より小さくなる。

モード2：モード1の場合より打撃棒が重く、落下高さが高い時は衝突と同時に荷重波形は増加し最大値に達する。撓み波形が最大値に達する前に平板と棒が離れ、荷重はゼロ(低下)になり、再接触による荷重

が打撃時の荷重より大きくなる。即ち、平板の高次の振動と打撃棒の反力により、荷重波形の増加過程で「窪み」として現れる。撓み波形の最大値の発生時刻は荷重の最大値より遅れる。

モード3：さらに打撃棒が重く、落下高さを高くすると、時系列波形でモード2の荷重波形の増加過程の「窪み」部分がなくなり、撓みの最大値と荷重の最大値の発生時刻とがほぼ一致する。撓み波形はゼロに戻らず、打撃位置に局部的な塑性変形が残る。

3.3 平板の衝撃応答

3.3.1 荷重及び撓みの時系列波形

3.3.1.1 落下高さの影響

正方形板(750,750,3.0)の中央に打撃棒R12をh10、h20、h40、h60mmの高さから落下衝突させた時の荷重及び撓みの時系列波形を図-5に示す。この場合の荷重波形はモード1を示し、波形の形状は落下高さを変えても概ね変わらなかった。撓み波形の最大値は落下高さを増すと大きくなった。正方形板(750,750,5.5)で、h20の時系列波形について、荷重と撓み波形を太い実線で図-5(左下)に示した。荷重が最大値を示してから、撓みは遅れて最大値を示した。撓みが最大値のときは荷重はゼロとなり、再接触による荷重波形は板厚3.0mmの方が大きくなった。荷重波形上にスリットが等間隔に表れるのは、打撃棒内を応力波が伝播し、透過反射を繰り返すためである。^{3,4)}

正方形板の打撃位置0点からX軸上100mm(1_X点)、200mm(2_X点)、X軸200mm、Y軸200mmの点(3_{XY}点)(裏面)に貼付した歪ゲージの歪波形を求めた結果を写真-1に示す。打撃時の打撃位置は局部的に凹状になるために、打撃位置0_X点の歪は引張歪となり、それ以外では圧縮歪となった。打撃位置より離れるに従って歪波形は複雑に変化した。^{11,19)}

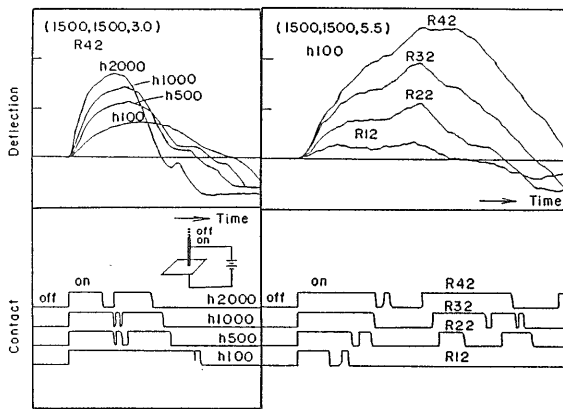


図-3 撓みの時系列波形、打撃棒と平板の接触状況

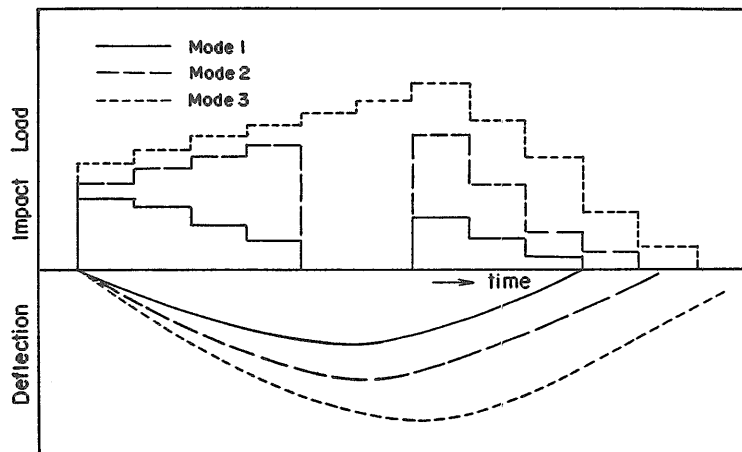


図-4 荷重波形と撓み波形の分類

打撃時の荷重、歪波形及び打撃棒の接触状況の時系列波形を写真-2に示す。打撃位置裏面の歪ゲージ0_{XY}点では歪波形は荷重波形に概ね対応し、歪と荷重の最大値の出現時刻は一致した。打撃位置よりX軸400mm、Y軸400mm離れた位置の歪ゲージ3_{XY}点では、3_{XY}点の歪ゲージの最大値は0_{XY}点より0.28msec遅れた。打撃時に正方形板の平面方向の歪波の伝播速度は2021m/secとなった。鋼中の波の伝播速度は鋼5200m/secであるので、衝撃により生ずる波は平面方向に直進せず、板厚方向への伝播、反射を繰り返して平面方向に進んでいるものと思われる。

3. 3. 1. 2 打撃棒の重さの影響

落下高さがh20、打撃棒R22、R32、R42の場合の波形を図-6に示す。この場合の荷重波形はモード2を示した。撓みの最大値は荷重の最大値の発生時刻より

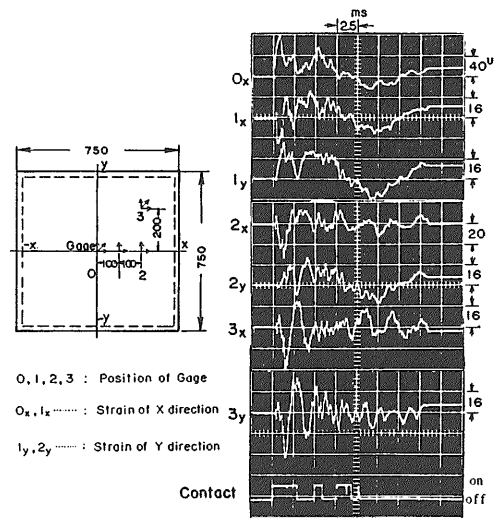


写真-1 平板の横衝撃による歪の波形

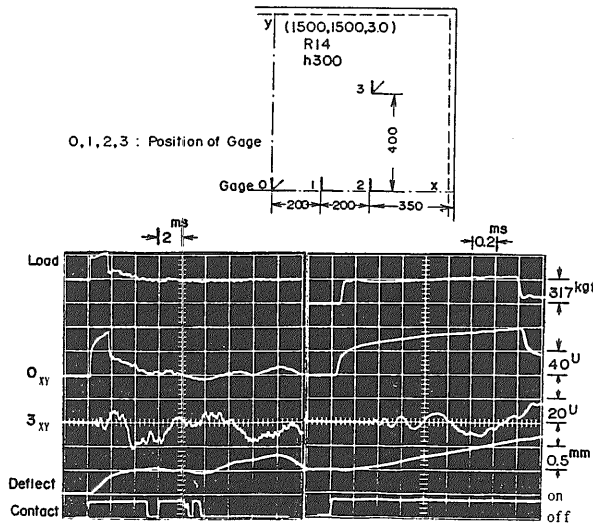


写真-2 平板各点の荷重波形、歪波形および打撃棒の接触状況

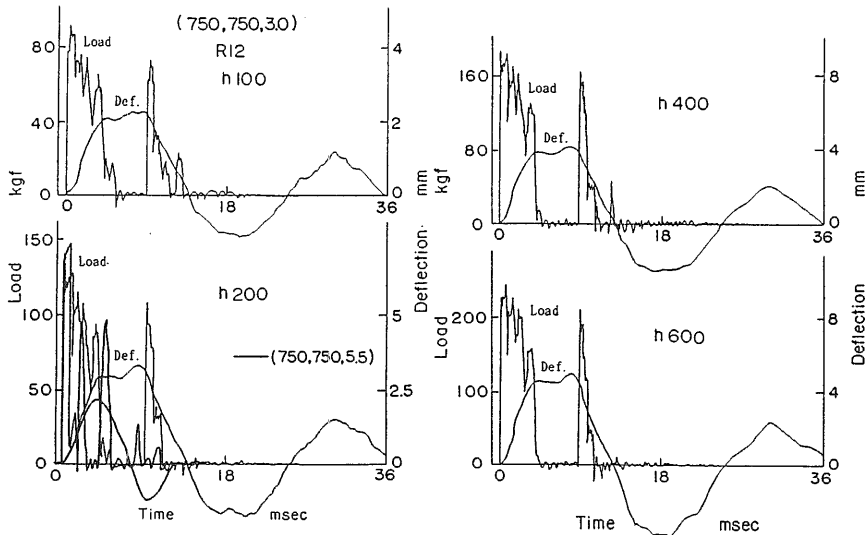


図-5 荷重と撓みの時系列波形 (h100、h200、h400、h600)

も、R22では多少速く、R32ではほぼ同時に、R42では遅れて現れた。打撃棒を重くすると、棒の反発力は小さくなり、荷重の増加過程の「窪み」部分は小さく

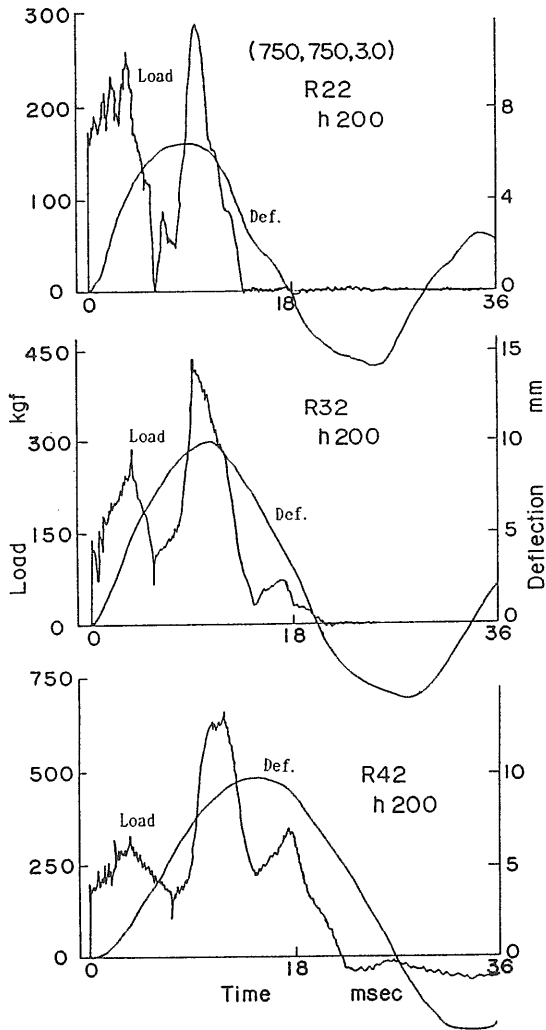


図-6 荷重と撓みの時系列波形 (R22、R32、R42)

なり、撓み波形の周期は長くなった。

打撃棒の重さと最大荷重の関係を図-7に示す。打撃時の荷重の最大値 (○印) と再接触時の荷重の最大値 (●印) はR12ではモード1を示すが、R22ではモード1と2の過渡的な荷重波形を示した。R32、R42ではモード2を示した。モード2では打撃時の荷重の最大値はほぼ一定値であるが、再接触時の荷重の最大値は棒が重くなれば大きくなった。

3. 3. 1. 3 平板の大きささと板厚の関係

打撃棒R12、落下高さh20の荷重と撓みの関係を、長方形板 (1500,750,3.0/5.5)、正方形板 (1500,1500,5.5) について図-8に示した。打撃時の荷重波形の最大値は、板厚の厚い方が大きくなった。平板の

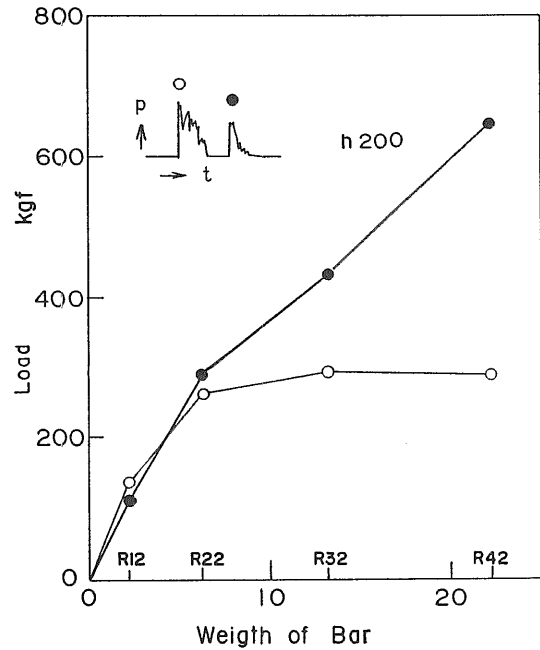


図-7 荷重ピーク値と打撃棒の重さ関係

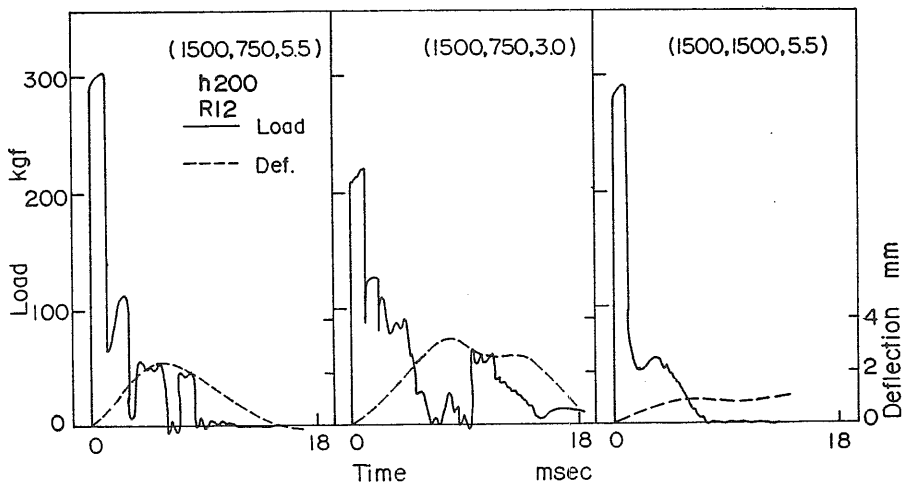


図-8 荷重と撓みの時系列波形 { (1500,750,3.0/5.5)、(1500,1500,5.5) }

大きさが異なっても、打撃時の荷重の最大値は変わらなかった。平板の大きさよりも板厚の影響が顕著であった。

3. 3. 2 打撃棒の重さが最大荷重と撓みに及ぼす影響

最大荷重 $P_{max.}$ 及び撓み δ と打撃棒の重さに落下高さを乗じた値 Wh との関係を図-9 に示す。最大

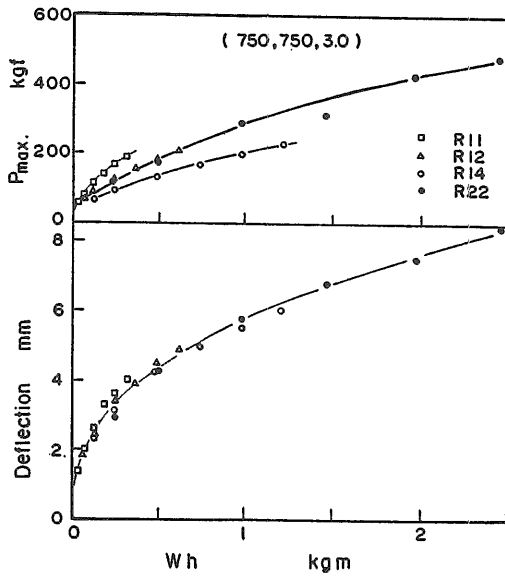


図-9 最大荷重、撓み、打撃棒の重さと落下高さ(Wh)の関係

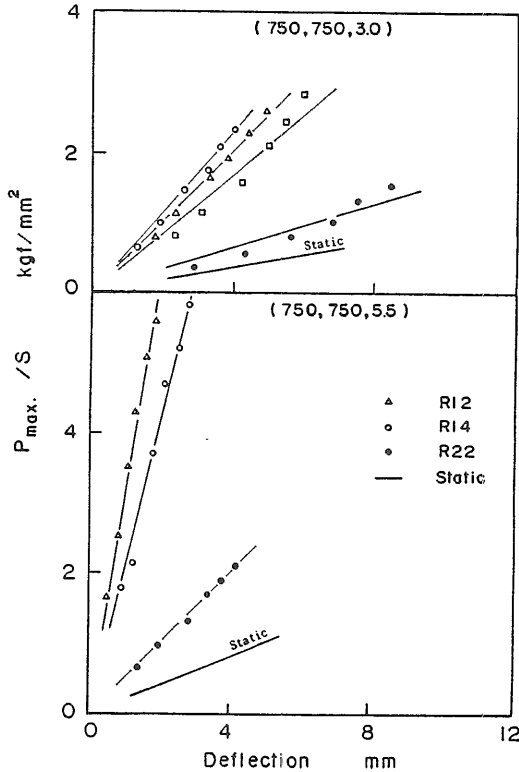


図-10 静的及び動的試験に於ける最大荷重/打撃棒の断面積($P_{max.}/S$)と撓みの関係(750,750,3.0/5.5)

荷重については打撃棒の重さにより異なった放物線となるが、撓み波形は打撃棒の重さに関係なく1本の放物線で示すことができる。

最大荷重を棒の断面積 S で除した値 $P_{max.}/S$ と撓みの関係を求め、正方形板 (750,750,3.0)、(750,750,5.5) については図-10に、長方形板 (1500,750,3.0)、(1500,750,5.5) を図-11に、正方形板 (1500,1500,5.5) を図-12に示す。実験値は概ね直線関係があり、実験

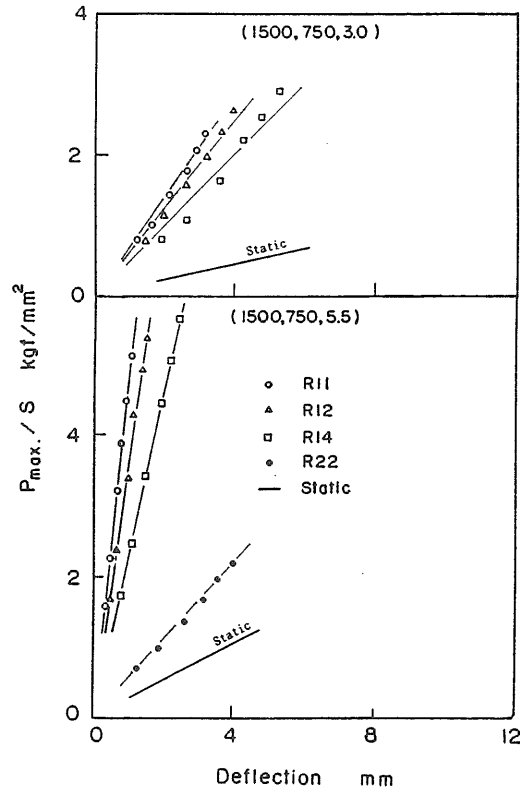


図-11 静的及び動的試験に於ける最大荷重/打撃棒の断面積($P_{max.}/S$)と撓みの関係(1500,750,3.0/5.5)

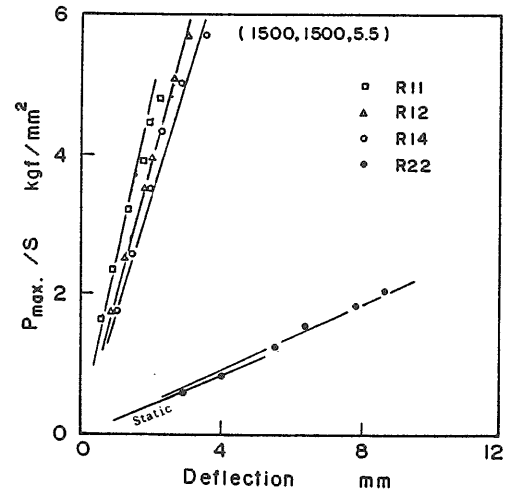


図-12 動的試験に於ける最大荷重/打撃棒の断面積($P_{max.}/S$)と撓みの関係(1500,1500,5.5)

式 $P_{max}/S = A \delta$ で表示できた。比例定数 A は、正方形板 (750,750,3.0) では $R12$ は 0.5、 $R22$ は 0.2 kgf/mm² となり、正方形板 (750,750,5.5) では $R12$ は 3.1、 $R22$ は 0.5 kgf/mm² となった。長方形板 (1500,750,3.0) では $R12$ は 0.6 kgf/mm²、長方形板 (1500,750,5.5) では $R12$ は 3.5、 $R22$ は 0.6 kgf/mm²、正方形板 (1500,1500,5.5) では $R12$ は 1.9、 $R22$ は 0.2 kgf/mm² となった。平板の面積の大きいものほど、比例定数 A は小さく (勾配は小さく) なる傾向を示したが、板厚の影響の方が顕著であった。実線は静的試験に於ける荷重と撓みの関係であるが、比例定数は動的試験のものより小さい値を示した。

3.3.3 動荷重係数 (DLF)

平板を 1 自由度のばね-質量系に置き換え、変動する動 (的) 荷重の最大値に等しい静 (的) 荷重が作用したときの静撓みと動荷重に対する撓みの比は動荷重係数 (DLF) と呼ばれている^{15,16,17)}。

静的荷重と動的荷重を比較するために図-10~12に静的データを加えた。動的試験では打撃直後に荷重が最大となったが、その時点では撓みは小さく (例えば図-5)、荷重と撓み関係で静的に負荷した場合と大きく異なった。撓みを同じ荷重レベルで比べると動的な

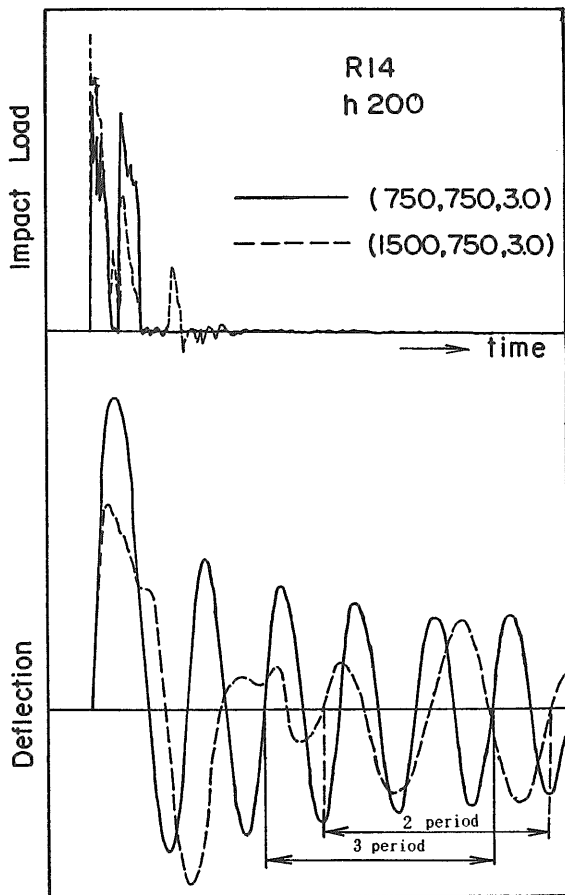


図-13 正方形板、長方形板に於ける荷重及び固有振動周期

値は静的な値より小さくなり、打撃棒が重いほど撓みは大きくなった^{15,16,17)}。静的及び動的撓みへの形状の影響は、長方形板 (1500,750,3.0/5.5)、正方形板 (750,750,3.0/5.5) の間には殆どなかった。(図-10~12)

打撃棒の落下高さを変えて衝突させると、打撃棒は平板から跳ね返った瞬間から平板は自由に振動した。その時の撓みを長時間計測すると、落下高さに拘らず周期は一定になった。このことから、これを平板の固有振動周期とした。正方形板 (750,750,3.0) のときは図-13に示すように正弦波形が得られた。長方形板 (1500,750,3.0) の波形は乱れる場合もあったが、規則的に変化している波形の何周期かの平均から固有周期を求めた²⁰⁾。固有周期は表-1に示したが、13.2から48.7mscになり、計算値より大きくなった。

3.3.4 力積

力積に関しては平板の最大荷重、最大撓みが弾性範囲の場合には計測値と計算値の間には良い相関が認められている^{10,11)}。

力積 I を打撃棒の断面積 S で除した値 I/S と撓み δ の関係を正方形板 (750,750,3.0) について図-14に示すが、2次双曲線 $I/S = B \delta^2$ で示され、打撃棒が重いほど双曲線の立ち上がりは緩くなり、定数 B は打撃棒 $R12$ では 0.434、 $R22$ では 0.165、 $R32$ では 0.044、 $R42$ では 0.022 (kgf.ms/mm⁴) となった。

3.3.5 等価荷重と等価撓み

打撃エネルギーと平板の歪エネルギーが等しいとして、衝撃による等価荷重を $P_{s.e.q.} = \sqrt{2Wh/k}$ 、等価撓みを $\delta_{s.e.q.} = \sqrt{2Wh/k}$ で示した。ここで W は打撃棒の重量、 k は平板の撓み剛性である^{10,11,12)}。図-15に示すように、 $R11$ 、 $R12$ 、 $R14$ 、 $R22$ について、落下高さの低い領域では等価荷重と最大荷重及び等価撓みと最大撓みとの間には直線関係が認められた^{12,13)}。

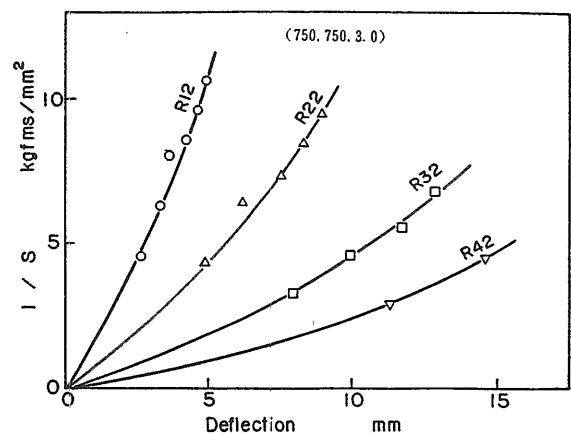


図-14 力積/打撃棒の断面積 (I/S) と撓みの関係

3. 4 防撓板の衝撃応答

3. 4. 1 打撃点が防撓材上の場合

3. 4. 1. 1 防撓材1本を溶接した防撓板

防撓材1本を溶接したAtypeの枠なし防撓板(PA)と枠付き防撓板(FA)に打撃棒R22、R62を落下衝突させた時の荷重及び撓みの時系列波形を図-16に示す。

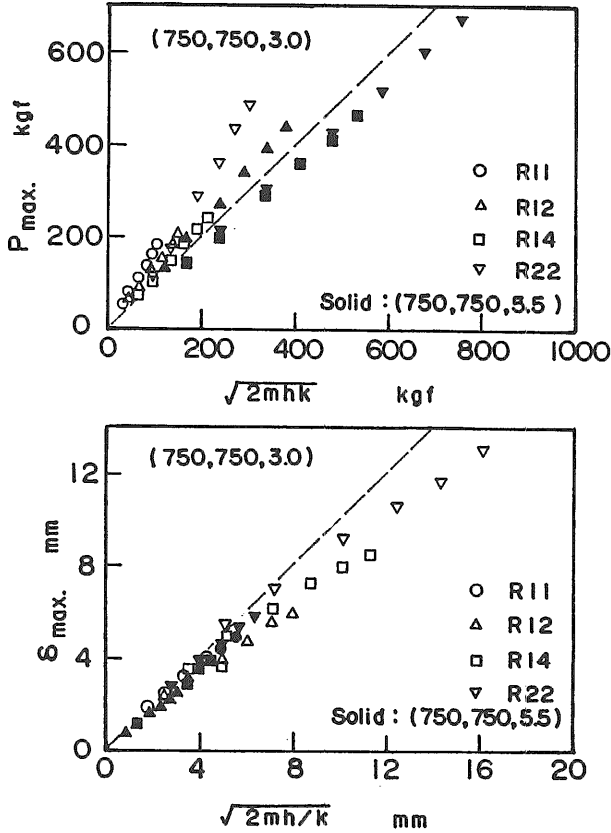


図-15 最大荷重 (P_{max}) と等価荷重 ($\sqrt{2mh/k}$)、最大撓み (δ_{max}) と等価撓み ($\sqrt{2mh/k}$) の関係

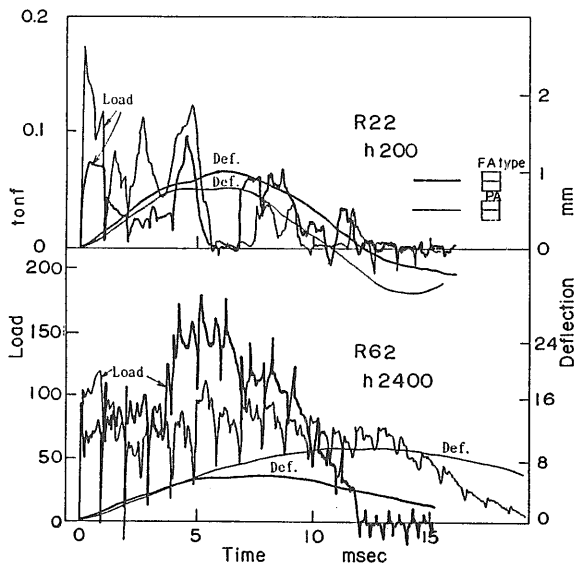


図-16 荷重と撓みの時系列波形 (FA, PA type)

打撃棒R22、落下高さh20の荷重の最大値は枠なし防撓板(PA)では枠付き防撓板(FA)に比べて、荷重の最大値は大きくなったが、撓みの最大値は小さく、その周期は短くなった。荷重波形は枠なし防撓板ではモード1、枠付き防撓板ではモード2となった。打撃位置に変形が残らない弾性範囲では荷重と撓みは直線関係が認められた^{12,13,14}。

打撃棒R62、落下高さh240の荷重波形にはパルス状の矩形波が生じた。荷重の最大値は枠付き防撓板(FA)は枠なし防撓板(PA)より大きく、枠付き防撓板(FA)では撓みの最大値は荷重の最大値の発生時刻とほぼ一致したが、枠なし防撓板(PA)では撓みの最大値と一致せず大幅に遅れた。荷重波形はモード3となった。枠付き防撓板の1本の防撓材の高さを20、40、60mmと高くし、防撓板の撓み剛性を増すと、荷重波形の形状は変わらなかったが、荷重の最大値は大きくなった¹⁷。枠なし防撓板に比べ枠付き防撓板には細かい振動が重畳した。

3. 4. 1. 2 防撓材を十字に溶接した防撓板

防撓材を十字に溶接したBtypeの防撓板の時系列波形を図-17に示す。打撃棒R22、h20の荷重波形の最大値は殆ど一致したが、時間が経過するにつれて、枠なし防撓板(PB)は枠付き防撓板(FB)より遅れた。一方、撓みの最大値はPBはFBより大きく、その周期は長くなった。

打撃棒R62、h80では荷重波形の最大値はPBはFBより小さくなり、枠なし防撓板の撓みの最大値の発生

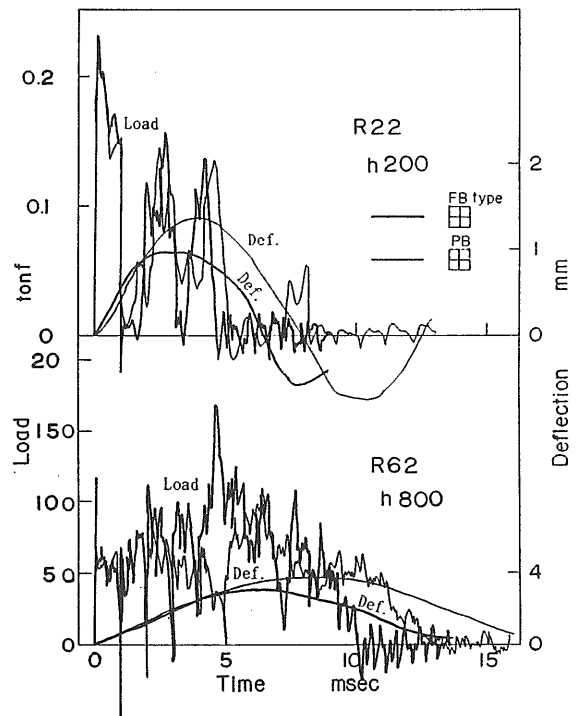


図-17 荷重と撓みの時系列波形 (FB, PB type)

時刻は枠付き防撓板より遅れ、その撓み量はゼロに戻らなかった。

打撃位置が防撓材上の場合、1本の防撓材の高さが20、40、60mmの枠付き防撓板(FA)と防撓材が十字の防撓板(FB)の場合は打撃棒R22ではモード1、2となり、R62ではモード3の荷重波形を示した。防撓材が十字の防撓板の荷重の最大値は防撓材1本の高さを大きくした時の荷重の最大値より大きくなった。

上述のように、防撓板B typeの荷重波形の最大値はA typeより大きくなった。R22ではB typeの撓み波形の最大値はA typeより大きくなった。また、打撃棒R62の荷重波形上に、パルス状に現れている。これは応力波が打撃棒内を往復した時間に相当する。平板の対角線上に塑性関節ができ、A、B typeの防撓板では打撃位置に円形の圧痕は残らないが、防撓材の中央部はともに折れ曲がっていた¹¹⁾。

3. 4. 2 打撃点が防撓材上でない場合

3. 4. 2. 1 防撓材を2本平行に溶接した防撓板

防撓材を2本平行に溶接したC typeの防撓板の時系列波形を図-18に示す。枠付き防撓板(FC)及び枠なし防撓板(PC)は打撃棒R22、h 20では打撃時の荷重の最大値は殆ど同じ値であったが、時間が経過するにつれて、荷重波形はPCはFCより遅れた。荷重波形はモード3であった。

打撃棒R62、h 160では荷重波形はモード3を示し、打撃時の荷重は枠なし防撓板(PC)は枠付き防撓板(FC)より大きくなり、その最大値の発生時刻は殆ど同じ値であった。荷重及び撓み波形は枠付き防撓板が枠なし防撓板より早く減衰した。撓みの最大値の発生時刻は荷重の最大値の発生時刻より多少遅れ、撓みは元に戻らなかった。打撃位置に円形の圧痕が残り、2

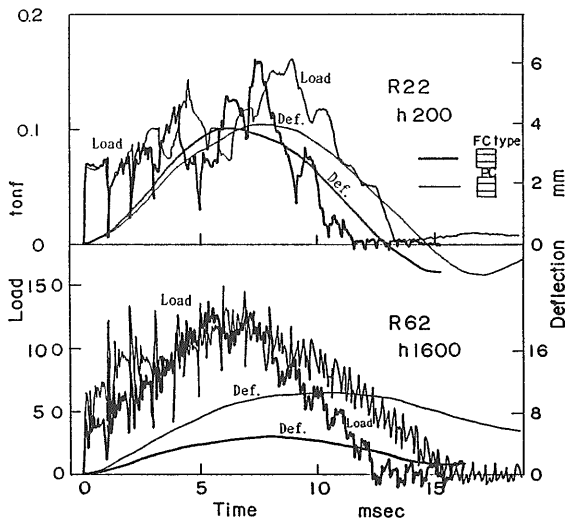


図-18 荷重と撓みの時系列波形 (FC, PC type)

本の防撓材のために対角線から離れた位置及び防撓材に平行に塑性関節ができた¹²⁾。

3. 4. 2. 2 防撓材を井形に溶接した防撓板

井形に溶接したD typeの防撓板の時系列波形を図-19に示す。枠付き防撓板(FD)及び枠なし防撓板(PD)は打撃棒R22、h 20では打撃時の荷重はPDがFDより大きな荷重を示し、荷重撓み波形はモード3であった。荷重の最大値はほぼ同じ値を示し、枠なし防撓板は枠付き防撓板より早く減衰した。撓みの最大値は荷重の最大値の発生時刻とほぼ一致した。

打撃棒R62、h 365では打撃時の荷重は殆ど同じ値を示した。FDの荷重の最大値はPDより大きくなり、荷重波形はモード3を示した。FDの荷重と撓みの最大値の発生時刻は一致したが、PDでは荷重の最大値の発生時刻は撓みの最大値の発生時刻より遅れ、0点に戻らなかった。また、打撃位置には円形の圧痕が残った。

打撃棒R22の場合、打撃位置が防撓材上のA、B typeではモード1、C、D typeではモード3を示した。R62では打撃位置が防撓材上、防撓材上でない場合にかかわらず、モード3を示した。

打撃位置が防撓材上でない場合、R22では防撓材が2本平行な防撓板(FC, PC)及び防撓材が井形の防撓板(FD, PD)では荷重波形は複雑に変化した。打撃位置が防撓材上でない場合の防撓板(FC, PC, FD, PD)は防撓材上の場合の防撓板(FA, PA, FB, PB)の撓み量より大きく、防撓材間の平板の撓み剛性に依存した。R62では撓み波形の最大値と荷重波形の最大値の発生時刻は枠付き防撓板(FC, FD)ではほぼ一致し、枠なし防撓板(PC, PD)では遅れた。

枠なし防撓板(P)、枠付き防撓板(F)では打撃位置

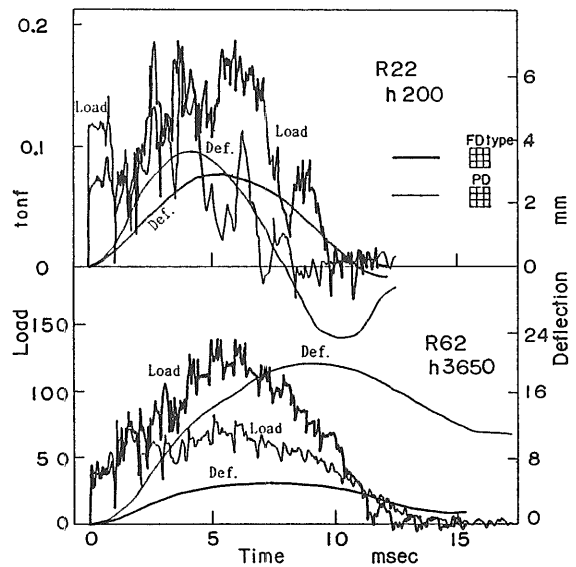


図-19 荷重と撓みの時系列波形 (FD, PD type)

を中心に凹状になることは同じであるが、枠の取り付けで拘束した防撓板では、その変形量は枠なし防撓板より少なくなった。

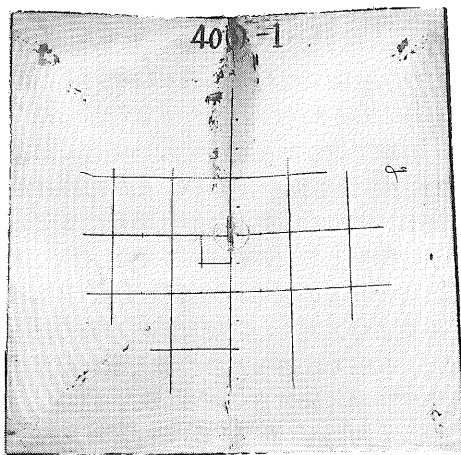
打撃位置が防撓材上の場合には防撓材と平板の溶接部より離れた対角線上に塑性関節が生じた。打撃位置が防撓材間の場合、防撓板では2本の防撓材の間及び防撓材の中央から対角線方向に塑性関節が現れた。防撓板は井形の防撓材の外側では対角線方向及び溶接止端部より防撓材の中央に向かって複雑に塑性関節が生じた¹²⁾。また、枠なし防撓板の方が塑性関節が大きかった。

A、B、D typeの防撓板では対角線方向に、C typeの防撓板では防撓材の中間に平行及び防撓材中央に向かって対角線よりそれて塑性関節が生じた¹²⁾。防撓板の変形状況のモワレ縞の代表例を写真-3に示す。

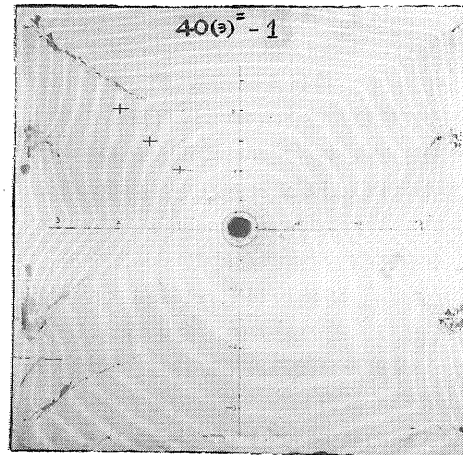
3. 4. 3 荷重と撓みの関係

枠付きと枠なし防撓板の荷重の最大値と撓みの最大値との関係を図-20に示す。打撃棒はR12、R22、R32、R42、落下高さは200から1200mmであるが、この範囲では防撓板の残留変形は比較的少なく、枠の影響はほとんど認められなかった。実線は各防撓板の静的試験から求めた荷重と撓みの関係で、打撃位置に防撓材のあるA、B typeでは衝撃試験結果と一致した。打撃位置が防撓材上でない場合のC、D typeでは変位量約7mmを越えると衝撃試験結果は直線からずれるが、破線で示す有限要素法による計算結果と良くあった。これらのことから、防撓板の変形が小さい範囲では衝撃荷重及びそれに伴う最大撓みを静的試験の撓み剛性を利用して推定できることがわかった¹⁴⁾。

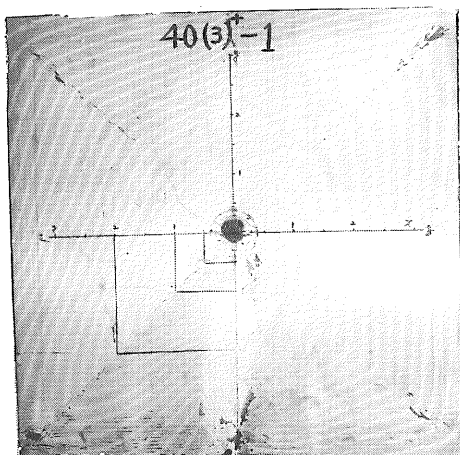
(㊦) PA type



(㊦) PC type



(㊦) PB type



(㊦) PD type

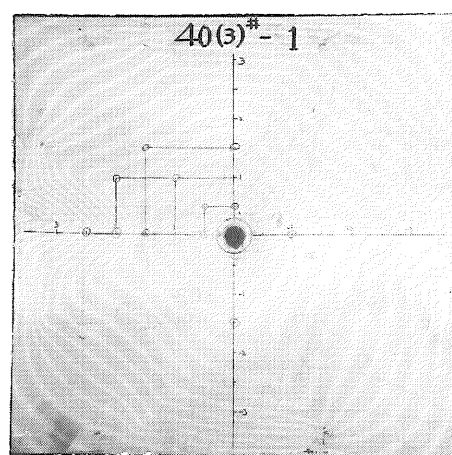


写真-3 防撓板のモワレ縞分布

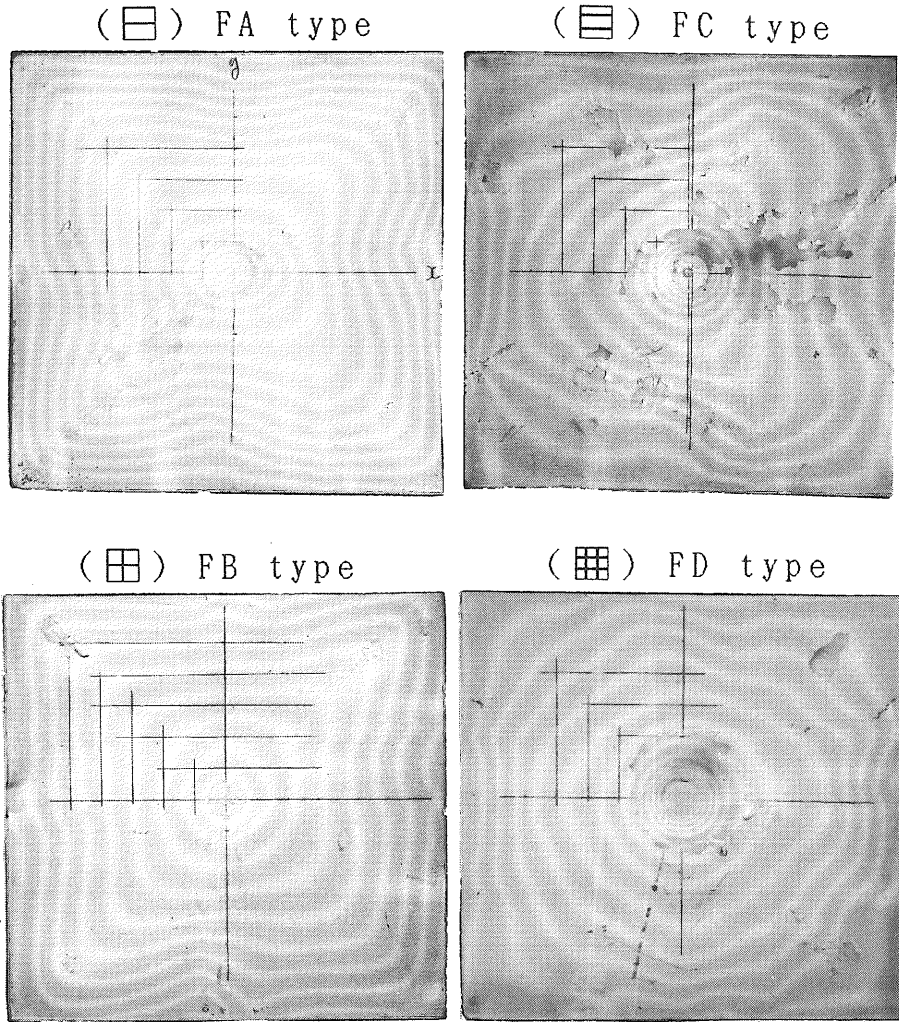


写真-3 防撓板のモワレ縞分布

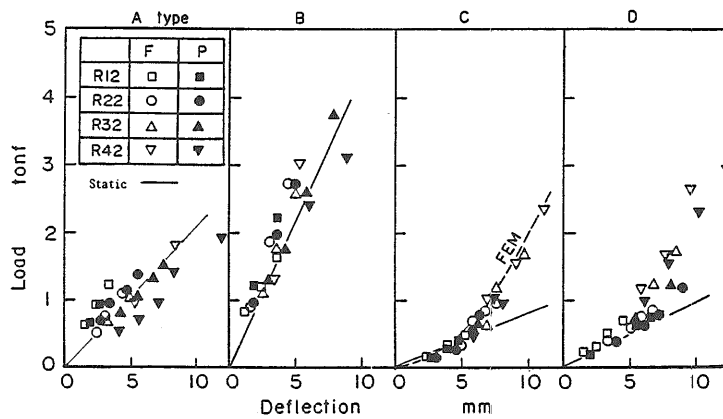


図-20 衝撃荷重の最大値と撓みの関係

3. 4. 4 大変形時の力積

打撃位置が防撓材上のA、B type及び防撓材上でないC、D typeの防撓板に、打撃棒R12からR62を落下高さh10からh365の時の力積を求めた。力積を打撃棒の断面積で除した値I/SとWhとの関係をもとめ図-21～24に示す。I/Sの値はWhが大きくなると、打撃棒

R62では放物線状に増大した。放物線の立上がり部分は塑性変形しない領域であり、放物線の飽和領域が打撃位置の塑性変形が増大する領域である。枠付き防撓板のI/Sは枠なし防撓板より大きくA、B typeではその差は大きかった。B typeの防撓板はA typeより立上がり勾配はきつく、その値のバラツキも大きくなっ

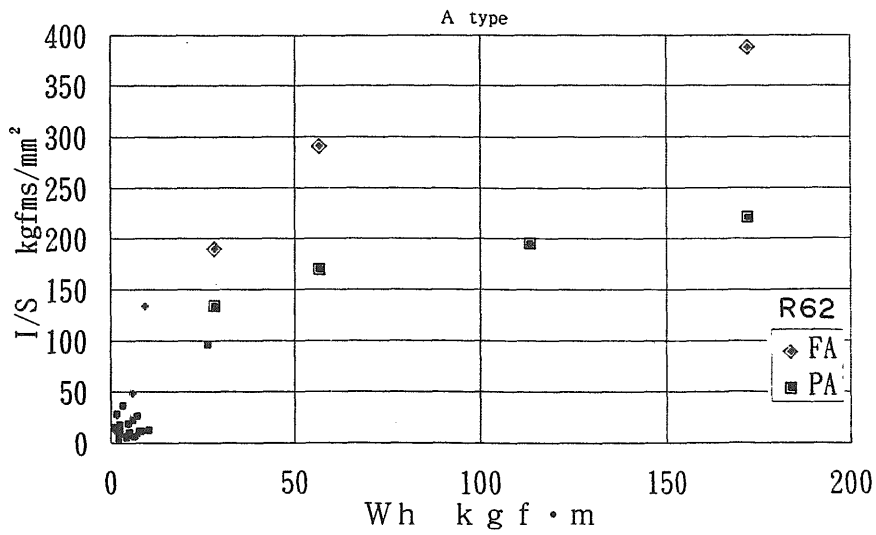


図-21 力積/打撃棒の断面積 (I/S) と打撃棒の重さ×落下高さ (Wh) の関係 (FA,PA type)

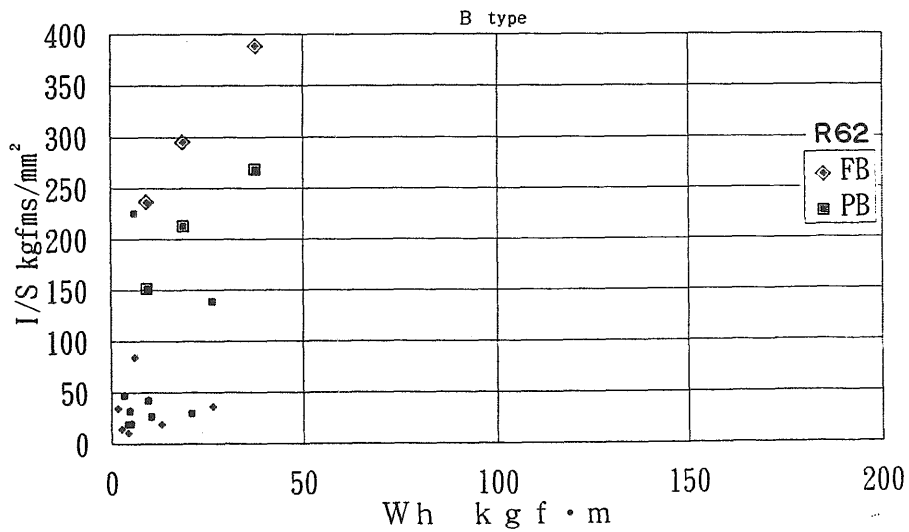


図-22 力積/打撃棒の断面積 (I/S) と打撃棒の重さ×落下高さ (Wh) の関係 (FB,PB type)

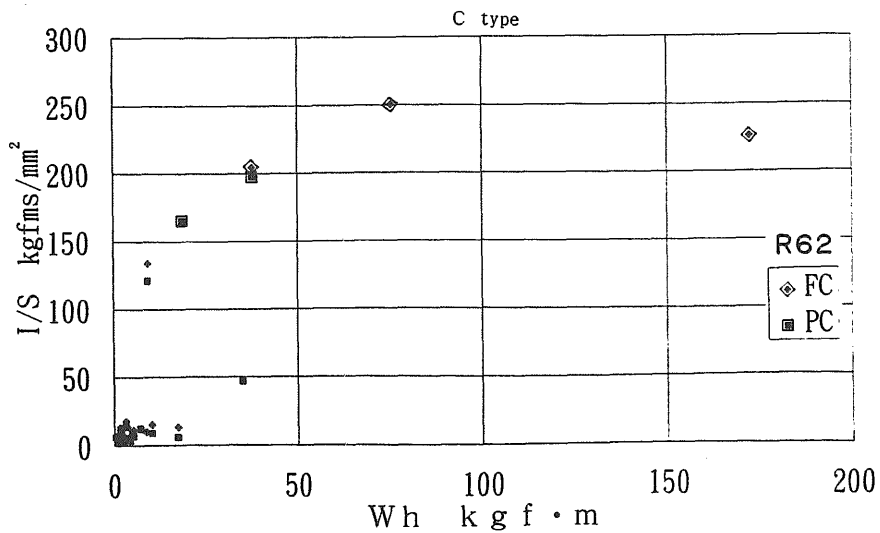


図-23 力積/打撃棒の断面積 (I/S) と打撃棒の重さ×落下高さ (Wh) の関係 (FC,PC type)

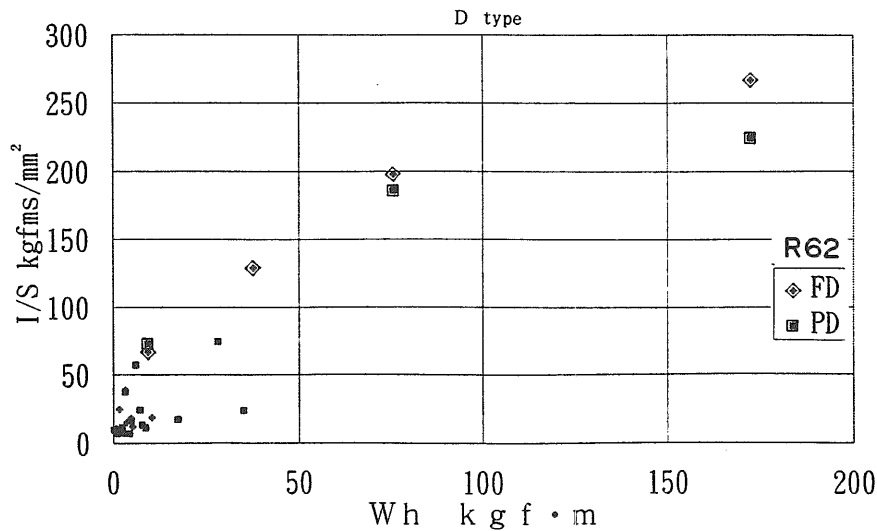


図-24 力積/打撃棒の断面積 (I/S) と打撃棒の重さ×落下高さ (Wh) の関係 (FD,PD type)

た。打撃位置が防撓材上でないC、D typeの防撓板ではC typeの防撓板の立上がり勾配はD typeより大きかった。D typeでは枠付きと枠なし防撓板のI/Sの値の差は小さかった。打撃棒R12からR32では防撓板の打撃位置に残留変形は殆ど残らなかった。今回の実験範囲では落下高さより打撃棒の重さの影響が大きかった。

3. 4. 5 衝撃による振動の影響

打撃棒の重さを変えて、枠付きと枠なし防撓板の上に打撃棒を落下衝突させた時の荷重波形には振動成分が重畳していた。荷重波形の振幅の平均値 P_{mean} と最大値 P_{max} との比 P_{mean}/P_{max} と Wh との関係を求めると、図-25のようになる。枠なし防撓板の荷重波形に重畳している振動成分は枠付き防撓板のそれより大きい。 P_{mean}/P_{max} の比は最小の値で枠付きで0.62、枠なし防撓板で0.56になった。枠付き防撓板では P_{mean}/P_{max} の平均値は0.85、枠なし防撓板では0.84となった。

3. 5 緩衝材の影響

衝撃試験では荷重波形上に重畳する急峻なパルス状の波形を抑えるために、便宜的に緩衝材を敷く場合がある。本節で緩衝材の厚さの計測値への影響を調べた。

3. 5. 1 荷重、撓み及び歪の時系列波形

正方形板 (750,750,3.0) 上の打撃位置に緩衝材 (生ゴム) を敷くことにより、打撃棒と正方形板の衝突による荷重波形上に表れる急峻なパルス状の波形を軽減できる。打撃棒R22の落下高さh20一定で、生ゴムの厚さを1、2、3…30mmに変えた時の荷重、撓み及び歪の時系列波形の例を図-26、27、28に示す。荷重波形はモード1を示した。緩衝材を厚くすると、荷重波形の最大値は小さくなり、その周期は長くなった。

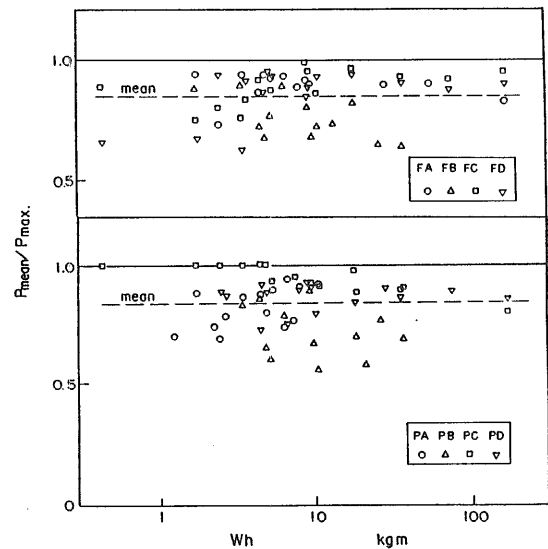


図-25 振動波形分の平均の荷重/最大荷重 (P_{mean}/P_{max}) と打撃棒の重さ×落下高さ (Wh) の関係

さらに荷重波形の立ち上がり勾配は緩くなり、波形の「窪み」部分が少なくなった。緩衝材の厚さが15mm以上になると、半波の正弦波形に近づいた。

撓み波形は緩衝材を厚くすると撓みの最大値は小さくなり、その周期は長くなった。波形の形状は正弦波形に近づいた。緩衝材が比較的薄い時は、荷重の最大値の発生時刻は撓みの最大値とは一致しなかった。しかし、緩衝材を厚くすると荷重と撓み波形は正弦波に近ずき、その最大値の発生時刻は一致した。

正方形板の打撃点裏面の歪ゲージで計測された歪波形は荷重波形に極めて近い形状を示した¹⁴⁾。このことにより打撃棒で計測された荷重により正方形板に負荷した荷重を推定出来ることが判明した。

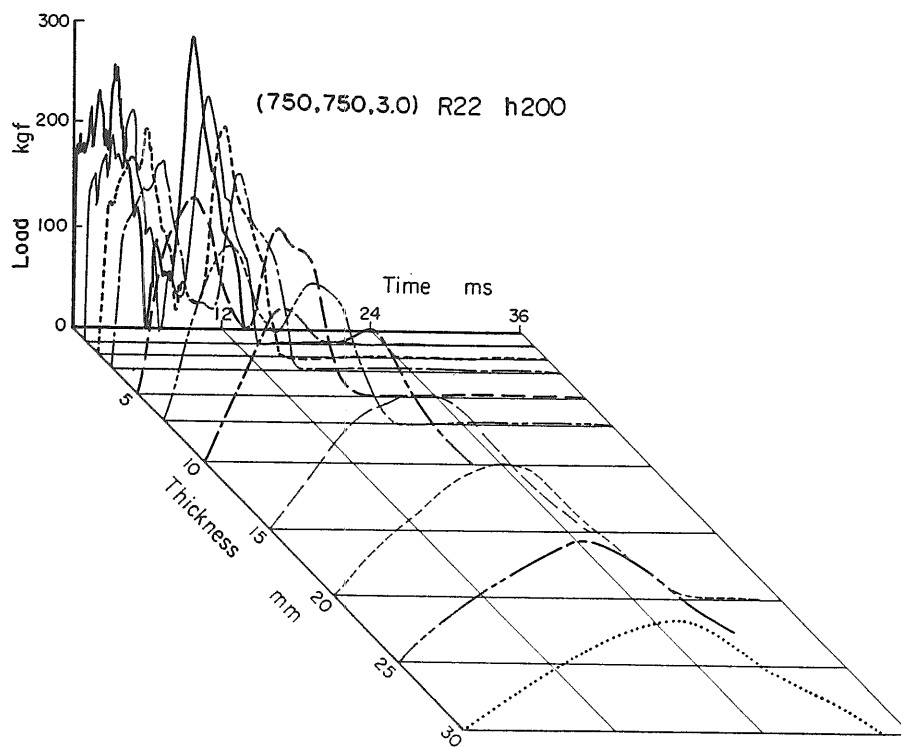


図-26 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形{(750,750,3.0) R22 h200}

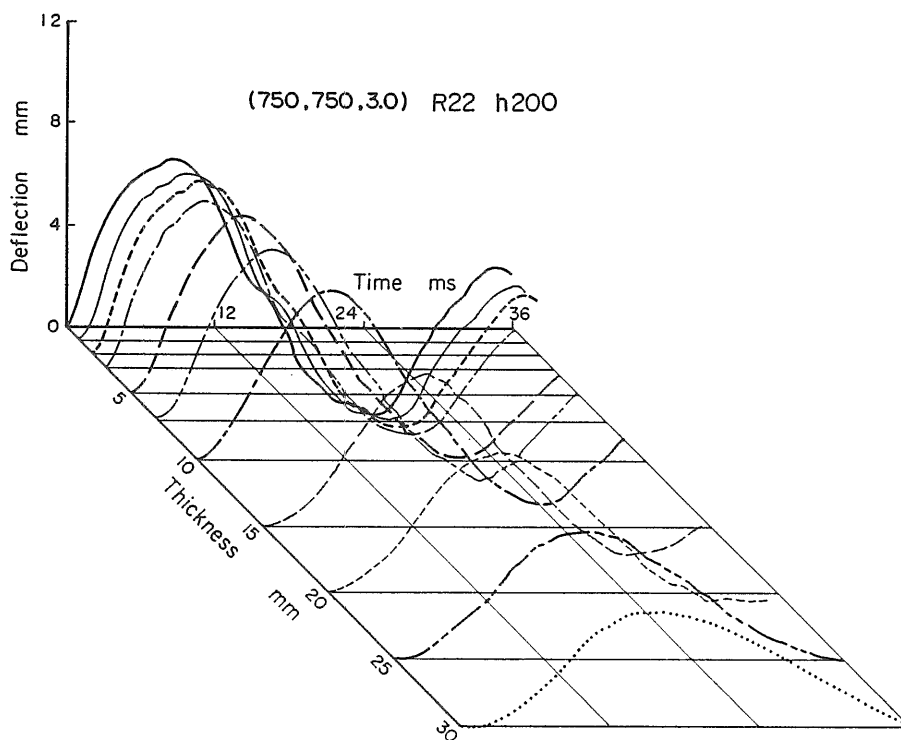


図-27 緩衝材の厚さを変えた時の撓みの時系列波形 {(750,750,3.0) R22 h200}

3. 5. 2 落下高さの影響

打撃棒R22の落下高さをh10、h30、h50と変えた場合の緩衝材の厚さと荷重波形を図-29、30、31に示す。緩衝材の厚さが比較的薄いときは落下高さを変えても、荷重波形はモード2を示し、荷重波形の形状は変わらなかった。緩衝材を厚くした場合には荷重波形の最大値は小さくなり、波形の「窪み」部分がうまり正弦波形に近づき、その周期は長くなった。

3. 5. 3 打撃棒の重さの影響

落下高さh20、打撃棒R12、R32、R42の場合の時系列波形を図-32、33、34に示す。R12では荷重波形はモード1であり、R32、R42ではモード2であった。衝突による負荷中に打撃棒が重いほど平板を押す力が強まり、平板の反発力が弱まるために「窪み」部分は小さくなった。その結果、2山の荷重波形で、後の荷重波形(●印)が大きくなり、打撃棒の重さと荷重の最

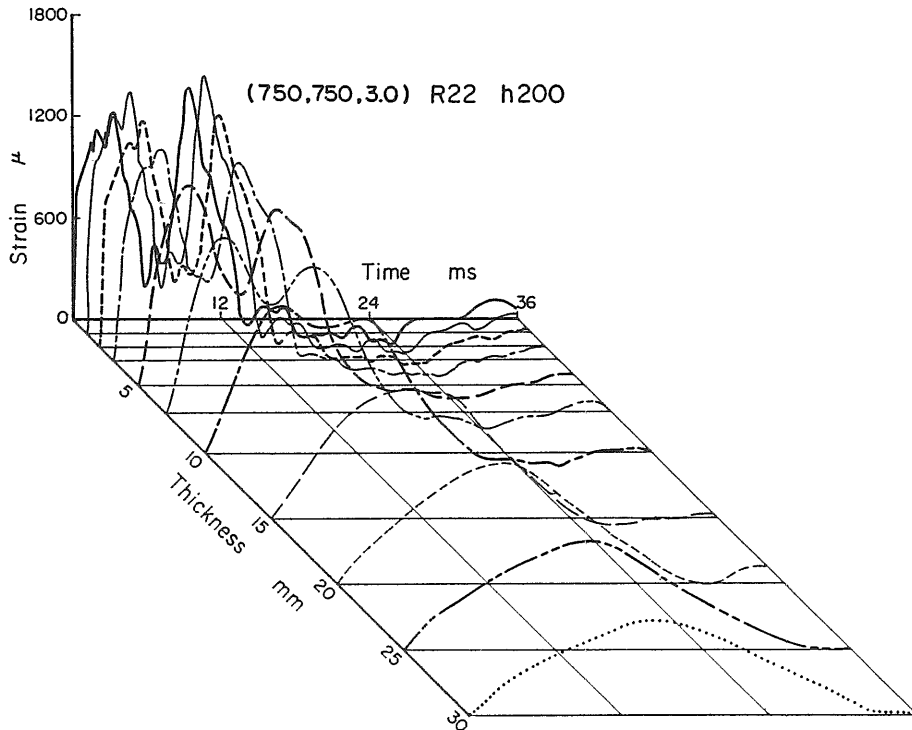


図-28 緩衝材の厚さを変えた時の歪の時系列波形{(750,750,3.0) R22 h200}

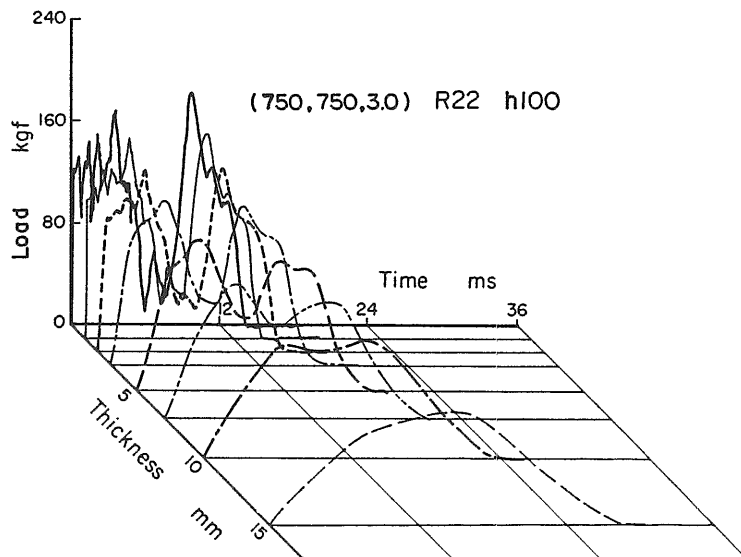


図-29 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形{(750,750,3.0) R22 h100}

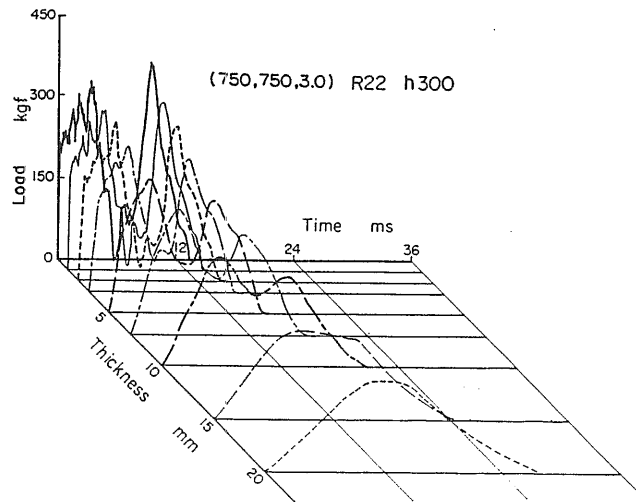


図-30 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形{(750,750,3.0) R22 h300}

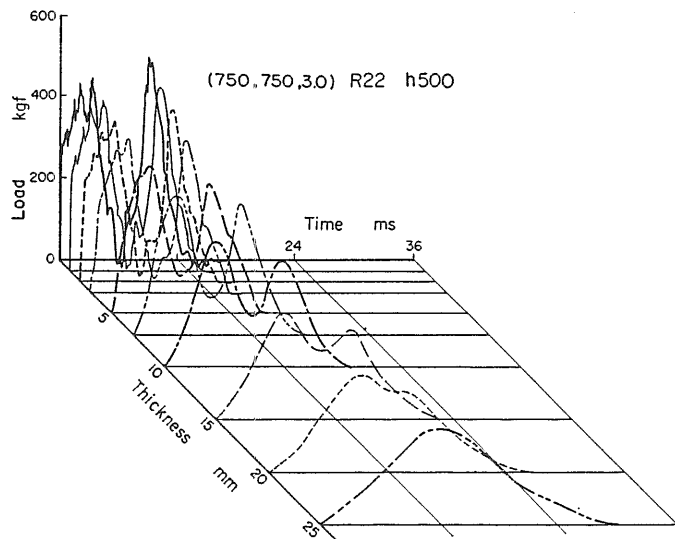


図-31 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形{(750,750,3.0) R22 h500}

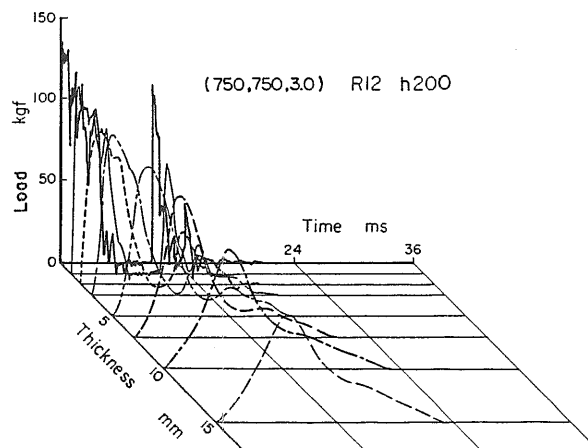


図-32 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形 {(750,750,3.0) R12 h200}

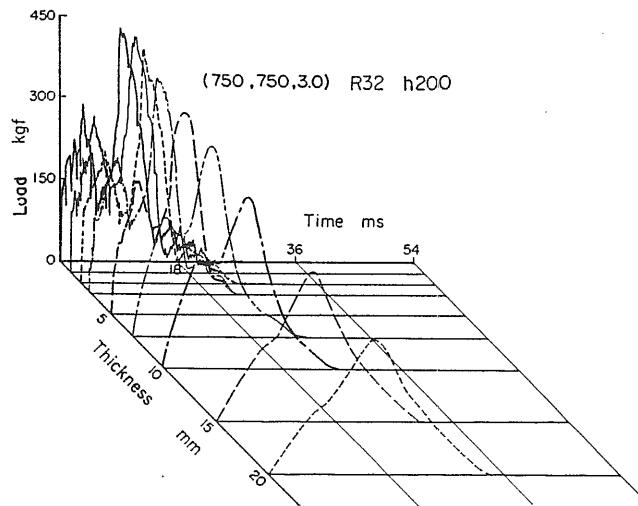


図-33 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形{(750,750,3.0) R32 h200}

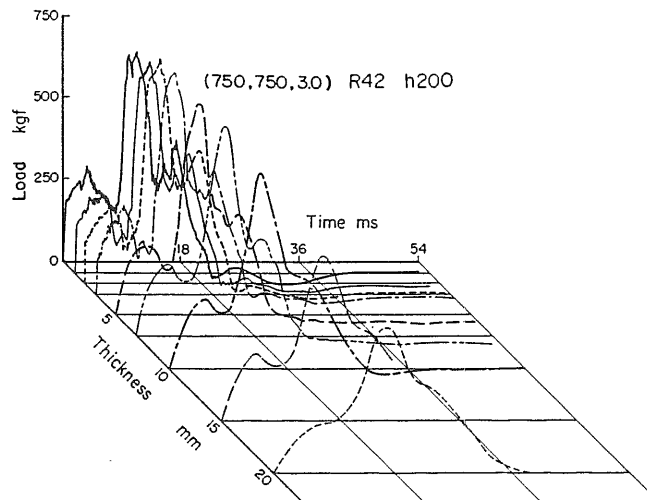


図-34 緩衝材の厚さを変えた時の荷重の時系列波形{(750,750,3.0) R42 h200}

大値とはほぼ比例することは図-7で示した。

荷重の最大値と緩衝材の厚さの関係を図-35に示す。打撃棒の落下高さをh10、h20、h40と高くした場合、緩衝材が厚いほど荷重の最大値は小さくなり、打撃棒が重いほど荷重の最大値は大きくなった。緩衝材の厚さ依存性を示した。

緩衝材の厚さを30mm迄厚くした場合の最大荷重と撓み曲線の関係を図-36に示す。落下高さをh10からh50まで変えた時に、荷重の最大値は小さくなり、撓み量は10mm位までは大きくなったが、それ以上になると小さくなった。緩衝材の厚さが5mm以上になると定量的な評価は困難であると思われる。

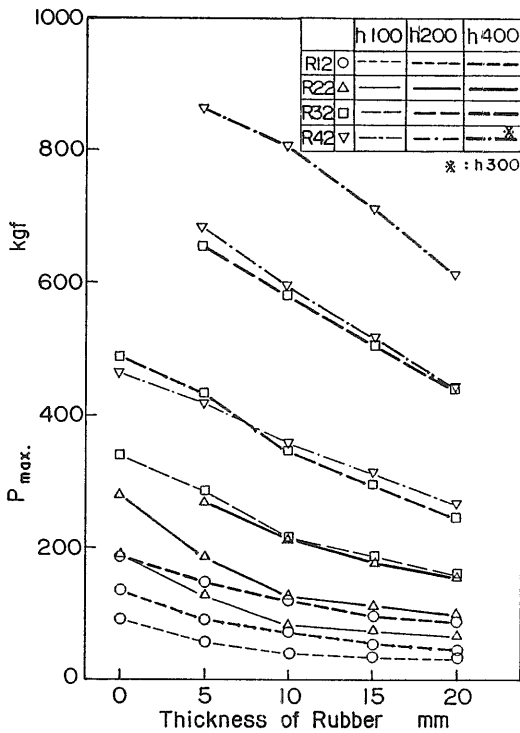


図-35 打撃棒の重さと落下高さを変えた時の荷重と緩衝材の厚さの関係

4. 結 論

平板及び防撓板の衝撃試験及び静的試験を行い、衝撃荷重、撓み及び歪の動的応答を調べた。さらに緩衝材を敷いた場合についても実験を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 平板の撓み剛性により、荷重と撓み波形は3種類に分類される。
- (2) 弾性範囲では動荷重係数(DLF)は1.0を越えない。
- (3) 打撃棒が軽い場合の荷重及び撓み波形は、打撃位置が防撓材上にある場合は打撃時の荷重が最大値を示しモード1となり、撓み最大値の発生は荷重より遅れた。打撃位置が防撓材上でない場合はモード3を示し、荷重と撓みの最大値はほぼ一致した。荷重の大きさは打撃位置が防撓材上にある場合の方が大きくなる。
- (4) 打撃棒の重さと落下高さの低い領域では、荷重と撓み波形の最大値は比例した。静的撓み剛性から、衝撃荷重及び撓み量を推定できる。
- (5) 打撃棒が重い場合の荷重は枠付き防撓板は枠なし防撓板の値と同じかそれより大きくなった。枠付き防撓板の荷重と撓みの最大値は概ね一致し、モード3を示した。枠なし防撓板の撓みの最大値が荷重の最大値より遅れた。枠なし防撓板は枠付き防撓板より大きな変形が残り、防撓材の配置により特有の塑性関節を示すことが判明した。

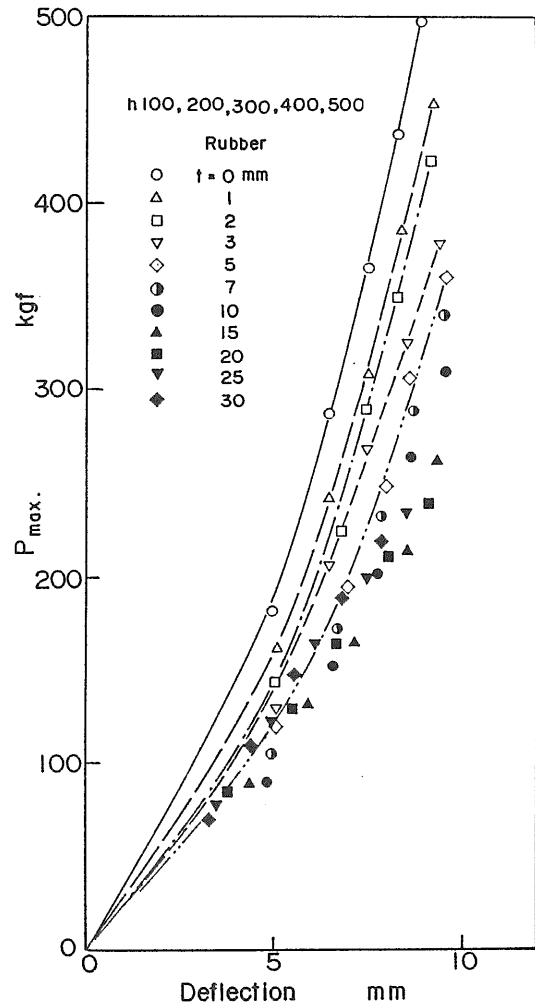


図-36 緩衝材の厚さと落下高さを変えた時の荷重と撓みの関係

- (6) 打撃棒の重量が2~47kgf、落下高さが100~3650mmの範囲では、打撃棒の落下高さより棒の重さが防撓板に与える影響が大きい。
- (7) かなりの報告では波形の振幅の平均値をもって最大値としている。本実験では荷重の最大値と波形の振幅の平均値との間には約15%の誤差があることが判明した。
- (8) 緩衝材を敷くと衝撃応答波形に影響を及ぼした。応答波形の衝撃値は緩衝材の厚さに概ね比例したが、定量的な評価は困難であった。

参考文献

- 1 松本浩之、三室弘、松森保雄、中原一郎：縦衝撃を受けた丸棒に生ずる応力およびその伝播、機械学会論文集、29巻、197号
- 2 松本 浩之、中原 一郎、菊川 貴之、黒川 裕：衝突による衝撃荷重、非破壊検査、第32巻 第11号(昭和58年11月)
- 3 北村 茂、青木元也：丸棒の圧縮縦衝撃における応力およびその伝播、船舶技術研究所報告、第23巻、第3号
- 4 佐久間正明、北村茂、青木元也、前中浩：縦衝撃による丸棒不連続部の応力の伝播、船舶技術研究所報告、第25巻、第3号
- 5 U.S.Lindholm：SOME EXPERIMENTS WITH THE SPLIT HPKINSON PRESSURE BAR. J. Mech. Phys. Solids. 1964. Vol.12
- 6 A.F.Conn：ON THE USE OF THIN WAFERS TO STUDY DYNAMIC PROPERTIES OF METAL. J.Mech.Phys. Solids. 1965 Vol.13
- 7 渋谷寿一、小泉堯、津田純嗣、奥屋嗣之：梁に作用する衝撃力の測定、非破壊検査、第25巻、第12号
- 8 佐久間正明、北村茂、前中浩：梁の曲げ衝撃応答、第49回 船研研究発表会講演集
- 9 松本浩之、中原一郎、木村正則：衝撃荷重の直接測定法と間接測定法、非破壊検査、第31巻、第4号
- 10 北村 茂、佐久間 正明、前中 浩、青木 元也：S R C (Steel Reinforced Cement) 工法による平板要素の耐衝撃試験、船研報告 第28巻 第1号
- 11 北村茂、佐久間正明、前中 浩、青木元也：平板の横衝撃荷重に対する応答、第51回船研研究発表会講演集
- 12 前中 浩、北村茂、佐久間正明、青木元也：防撓板の衝撃荷重に対する応答、第53回船研研究発表会講演集
- 13 佐久間正明、北村茂、青木元也、前中浩：衝撃荷重に対する構造要素の動的応答、第55回船研研究発表会講演集
- 14 前中 浩、北村茂、佐久間正明、青木元也：落重試験による構造要素の衝撃強度評価、造船学会論文集、第169号、p 355
- 15 北村 茂、佐久間 正明：フェロセメント船殻の衝撃特性について、船研講演集、平成6年度春季(第63回)
- 16 中原 一郎：衝撃応力問題の研究の動向、機械学会誌、68、552(1965)、7.
- 17 青木元也：防撓板の動的応答倍率、第53回 船研研究発表会講演集
- 18 CYRIL M.HARRIS and CHARLES E. CREDE：SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK. Engineering Design and Environmental Conditions.
- 19 岸 徳光、松岡 健一、大沼 博志、能町 純雄：四辺単純支持R C矩形板の重錘落下衝撃試験、構造工学論文集、Vol.38A(1992年3月)
- 20 造船設計便覧、海文堂