

Reprinted from
JOURNAL OF
THE SOCIETY OF MATERIALS SCIENCE
JAPAN
Vol. 47, No. 1, pp. 20 ~ 25
JAN. 1998

材 料 別 冊
第 47 卷 第 1 号
20 ~ 25 ページ
平成 10 年 1 月

感圧紙を用いた衝撃力の可視化*

小 川 欽 也*

Visualization of Impact Force by Using Pressure Sensitive Paper

by

Kinya OGAWA*

感圧紙を用いた衝撃力の可視化*

小川 欽也*

Visualization of Impact Force by Using Pressure Sensitive Paper

by

Kinya OGAWA*

To characterize damage and deformation in an impacted area of structure caused by flying foreign objects, it is fundamentally needed to measure the acting force and its distribution over the area. In the present experiments, it was attempted to identify visually the impact force using the pressure sensitive paper 'Prescale'. A split Hopkinson pressure bar method was used to evaluate the sensitivity of the paper under impact loading. It is found that the pressure sensitive paper instantaneously responds even for the impact loading of which duration is several hundred microseconds, while the sensitivity is significantly reduced when compared to the quasi-static loading. Hertzian impact tests were tried to visually evaluate pressure distributions using the pressure sensitive paper, and the experimental results were discussed.

Key words: Visualization, Impact force, Pressure sensitive paper, Split-Hopkinson bar, Duration of impact

1 緒 言

飛来物によって構造物に引き起こされる変形や損傷を明らかにするためには、衝突面に働く衝撃力を知ることが基本的に必要であり、圧電フィルムを用いることなどが試みられているが¹⁾、2次元的な圧力状態を直接測定することは極めて困難であり、有効な手段は未だに開発されていない。マイクロカプセルを塗布した感圧紙^{2), 3)}はノーカーボン複写紙として広く用いられ、Fig. 1 に示すように、内包されていた発色剤が浸潤して顕色剤と反応し発色する。ここに取り上げた感圧紙は、種々の粒度のマイクロカプセルを調合することによって圧力値と発色濃度の関係を広範囲に変化させ、発色濃度を測定することによって逆に圧力値を算定しようとするものである。Fig. 2 には、フィルム上に塗布された低圧力測定用のマイクロカプセルの SEM 写真を示し、それらの粒度分布を Fig. 3 に示す。これらのマイクロカプセルは測定する圧力域に応じて、種々のバインダーによって結合され、フィルム上に塗布される。静的な加圧によって発色するこれらの感圧紙をゴルフクラブや野球のバットなどの打撃面に貼付し、打撃点を知るなど、衝撃圧の場合にも利

用することが進められてはいるが、衝撃力を定量的に把握するまでには至っていない。マイクロカプセルの破壊は、温度、湿度などの環境条件に加えて、圧力の負荷速度、その持続時間にも依存すると考えられるから、これらの力学的条件での発色濃度と圧力の関係を求めることが衝撃力を推定するためには必要となる。そこで、本論文においては、衝撃によって発生する最高圧力を感圧紙によって可視的に検知することを目指し、圧縮型ホプキンソン棒法⁴⁾を利用して衝撃圧下での感圧紙の応答性と感度を調べ、衝撃圧の可視化測定における問題点を明らかにする。

2 試料および試験方法

用いた感圧紙はプレスケール (富士写真フィルム製) であり、低圧用 LW、中圧用 MW および MS、高圧用

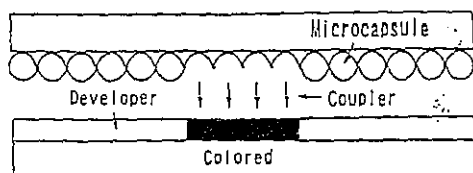


Fig. 1. Structure and mechanism of pressure sensitive paper.

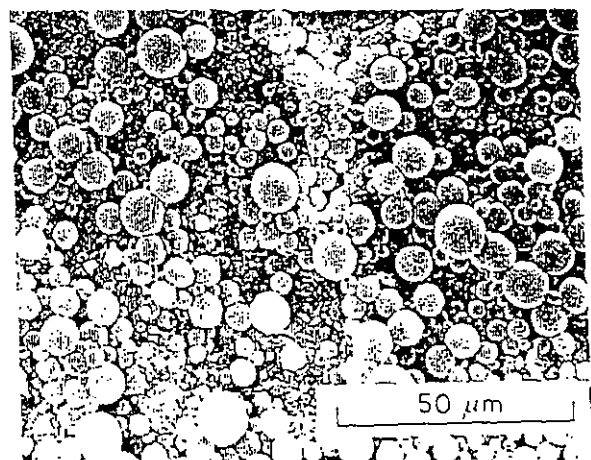


Fig. 2. Microstructure of "Prescale" by SEM.

† 原稿受理 平成9年5月6日 Received May 6, 1997

* 正会員 京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Div. of Aero- & Astron., Grad. School of Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

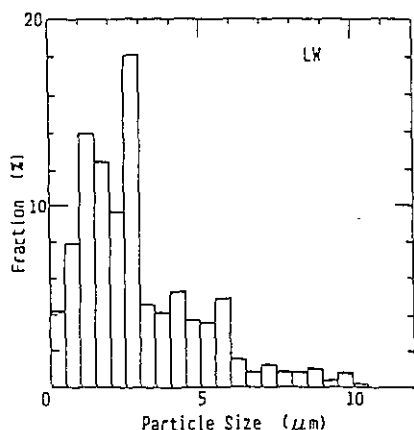


Fig. 3. Size distribution of microcapsules.

HS の合計四種類である。LW と MW は発色剤を内包するマイクロカプセルを塗布したフィルムと、顕色剤を塗布したフィルムとの二枚のシートを組み合わせて圧力を測定するツーシートタイプ、MS と HS はマイクロカプセルと顕色剤とを混合して一枚のフィルムに塗布したモノシートタイプであり、いずれのフィルムも厚さは $(90 \pm 5) \mu\text{m}$ である。与えられた圧力と発色濃度関係を確認するために行った静的な加圧試験には万能試験機（オートグラフ）を用い、端面を研削仕上げした直径 20mm の円板状の圧盤間に二枚の PET（ポリエチレンテレフタレート）製保護シート（厚さ $70\mu\text{m}$ ）に挟まれた感圧紙を挿入して加圧した。所定の値まで昇圧するに要した時間は 2 分であり、所定の圧力に 2 分間保持後、5~10 秒以内に減圧した。

衝撃的な加圧には Fig. 4 に示すホプキンソン棒型衝撃圧縮試験装置を用いた。端面を十分に平滑に仕上げた入出力棒を用いても、一様な衝撃圧を試験面に負荷することは一般に極めて難しく、各棒の軸芯を高度に一致させる必要がある。また、入出力棒に曲げ衝撃の生じることも防止しなければならない。そこで、真直性と真円度の高いスライドシャフト（S45C 製、表面硬質クロムメッキ、直径 20mm）を応力棒として用い、支持部にはスライドベアリングを設置して応力棒の軸方向への滑らかな動きを確保するとともに曲げの発生を防止した。また、長さ 500mm の打ち出し棒先端を曲面に加工し、入力棒端面の中心が衝突点となるようにした。次に、試験面である入力棒（長さ 1250mm）と出力棒（長さ 1000mm）の端面間に感圧紙を挿入し、衝撃を加えて発色痕を調べ、支持部を微動しながら最適な加圧状態になるまで調整を繰り返した。入力棒と出力棒に貼付したひずみゲージによって入射波 σ_I 、反射波 σ_R 、透過波 σ_T を捉え、入出力棒間に挿入した感圧紙に加わった衝撃圧 P を次式によって算出した。

$$P = (\sigma_I + \sigma_R + \sigma_T) / 2 \quad (1)$$

加圧後の感圧紙上に残された発色痕をイメージスキャナによって記録し、圧力画像解析装置 FPD-901（富士写真フィルム製）によって圧力値の算出を行った。その

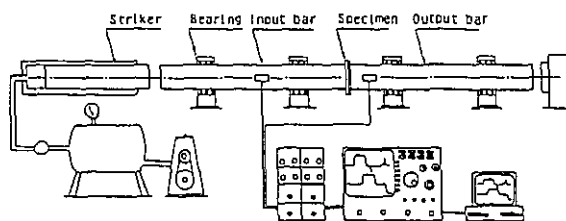


Fig. 4. Split-Hopkinson pressure bar apparatus and measuring devices.

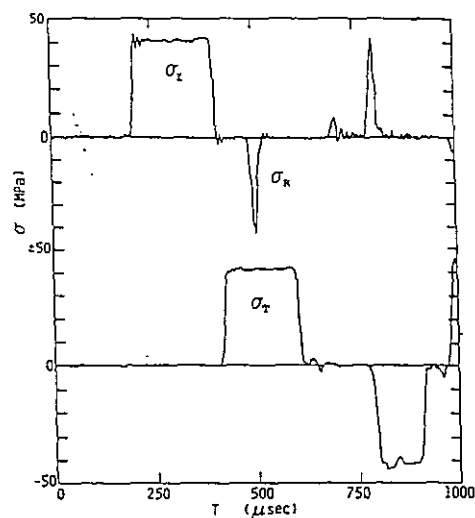


Fig. 5. Example of incident, reflected and transmitted stress waves.

際、各感圧紙に対して、静的な負荷の場合について予め与えられている発色濃度-圧力校正関係を用いた。このようにして算出された圧力値を以下では圧力値 P_e と呼び、負荷した圧力値 P_0 と区別して示す。

また、非一様に分布する衝撃圧の発生例としてヘルツ接触問題を取り上げ、入力棒と、先端を曲率半径 10mm の球面に加工した出力棒との間に長さ 20mm、直径 20mm の円柱状の試験片を設置し、感圧紙を試験片と出力棒間に挿入して衝突痕の可視化測定を行った。試験片としては、弾性係数が低く、かつヒステリシスが顕著ではないポリアセタールホモポリマーを用い、広い弾性接触面積を得ることを試みた。

3 試験結果および考察

3.1 衝撃圧での感度

Fig. 5 には衝撃加圧時の入射、反射、透過応力波の一例を示す。10~15μsec の鋭い立ち上がりをもった矩形状の応力波が感圧紙に入射し、ほぼ同一の応力波が透過している。このことから、一定な加圧状態が約 200μsec の間、持続していることが分かる。衝撃の初期にはごく僅かの反射波が観測されるが、これは感圧紙と応力棒の端面との間に若干の間隙が最初存在していたことを示している。

Fig. 6 (a) には中圧用感圧紙上に残された発色痕内の圧

力値 P_e の分布を、比較的低い圧力と高い圧力の場合についてそれぞれ多色表示した。いずれの場合でも持続時間 $200\mu\text{sec}$ の衝撃的な加圧に対しても、感圧紙が応答し、試験面の直径と比べると 1.5% 程度大きいが、ほぼ同寸法の明瞭な発色痕を生じている。加圧面内の圧力分布は完全な一様状態ではなく、圧力が偏った領域が若干

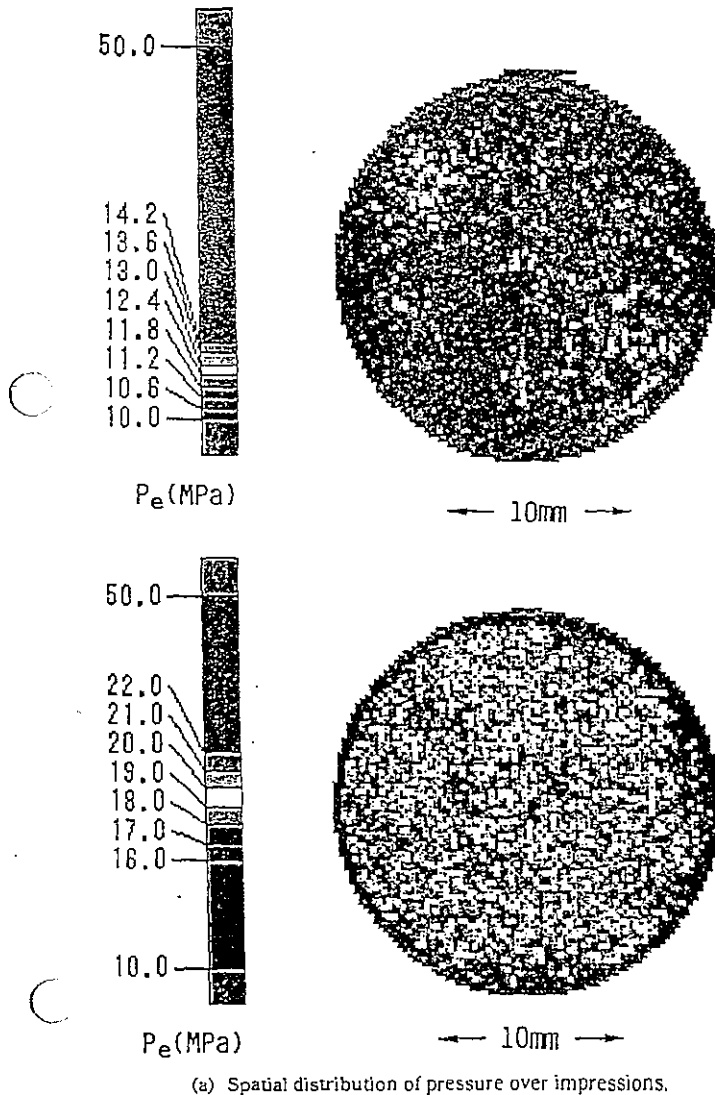


Fig. 6. Pressure distribution under impact loading.

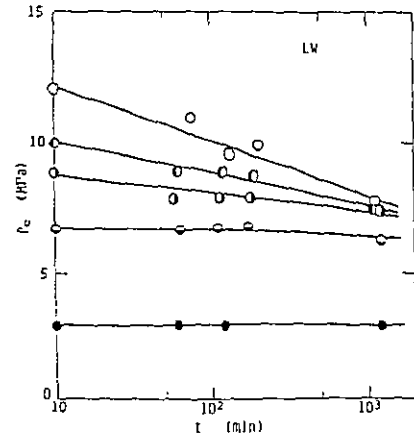


Fig. 7. Change in pressure sensitivity after elapsed time.

認められる。特に、圧力が高い場合には、中心付近の圧力が低く、中心より離れた部分に高い圧力が認められる。剛体壁に円柱が軸方向に衝突した場合、円柱表面で生じた半径方向への膨張波が円柱内部へ伝ばし、中心軸上に集中した時に軸方向に過剰な収縮が起こり、衝突面中心付近が壁から離れる現象が生じることが数値解析によって示されている^{5), 6)}。このような現象は衝突速度が大きいほど顕著となり、衝撃持続時間中何度か繰り返されるため、結果的に中心部での圧力の持続時間を短くすることになり、そこでの発色濃度を低下させていると考えられる。ただし、高圧領域が完全に同心円状に生じているわけではないことから、偏心荷重の影響も若干現れているものと考えられる。一方、周辺部に見られる低圧域は保護フィルムや、感圧紙のベースを介してマイクロカプセルを加圧しているため円柱の外側にも加圧域が広がったために生じたと考えられる。

Fig. 6 (b) には面内の圧力分布頻度を示した。これより、半幅で圧力値 P_e の精度を表すと、圧力の低い場合には $\pm 1\text{MPa}$ 程度、高い場合には $\pm 2\text{MPa}$ 程度であることが分かる。このように、加圧面内での圧力分布には若干不均一性が見られるが、ここでは接触面にわたって平均した値を用いて P_e を求めた。

Fig. 7 には、感圧紙上の発色痕より求めた圧力値 P_e と加圧後の経過時間の関係を低圧用感圧紙 LW の場合について示す。負荷圧 P_e が大きい場合には、時間経過と共に圧力値は急激に低下することが分かる。このような現象が生じる原因は不明であるが、実用上は、負荷後、測定までに要した時間を明確にすることが圧力値算定のために極めて重要である。一方、負荷圧が大きくない場合には、時間の経過に対しても圧力値 P_e の変化は小さく、測定までの経過時間の影響はほとんど考慮しなくても良いことが分かる。

Fig. 8 (a), (b), (c), (d) には、 P_e と P_e の関係を各感圧紙の場合について示す。低圧用 LW、中圧用 MW のツーシートタイプでは負荷後の経過時間が $t = 10\text{min}$ での結果を黒丸で、 $t = 10^3\text{min}$ での結果を白丸で示すが、高負

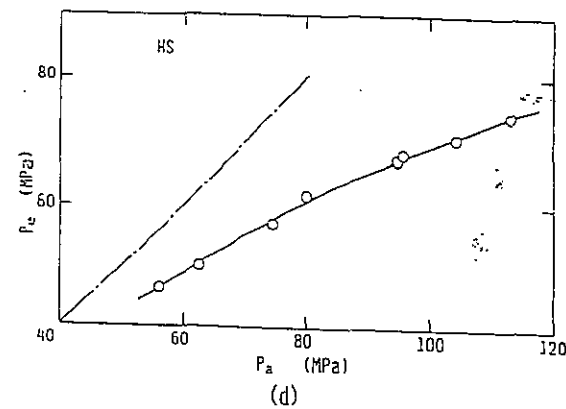
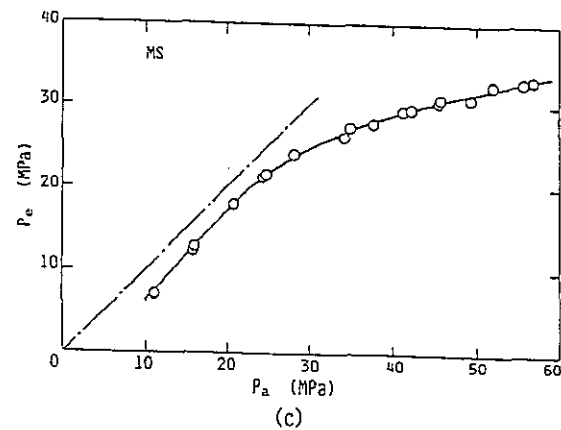
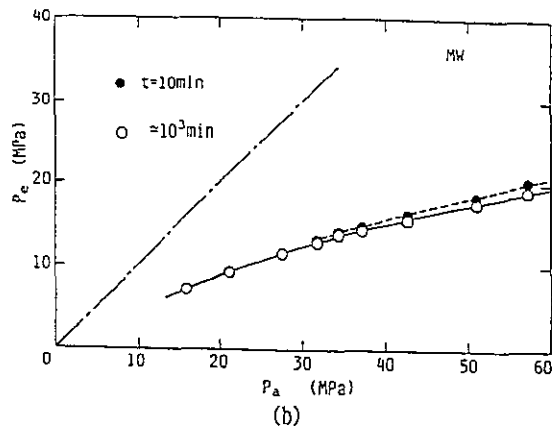
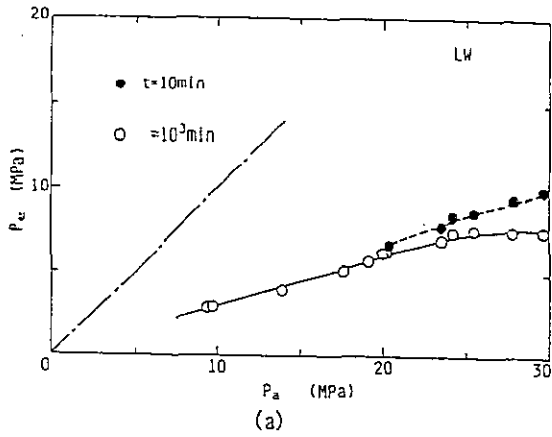


Fig. 8. Relationship between the applied pressure, P_a , and the estimated pressure, P_e , for LW in (a), MW in (b), MS in (c), and HS in (d), respectively.

荷圧域では経過時間の影響が見られる。これに対して、中圧用 MS、高圧用 HS のモノシートタイプでは全圧力域に渡って経過時間による感度の変化はほとんど見られない。それぞれの感圧紙についてデータ点を連ねると、それぞれ一本の滑らかな曲線が得られ、衝撃圧に対する P_e - P_a 関係が一意的に決定できる。従って、これらの関係に基づいて、発色濃度から衝撃圧を知ることができ、可視的に衝撃力を捉えることができる。いずれの感圧紙の場合も、負荷した圧力 P_a に対して圧力値 P_e は低く、圧力値 P_a が大きくなるにしたがって発色濃度の変化が小さくなり、結果的に圧力値 P_e がほとんど変化しなくなるため、その食い違いは大きくなる。特に、ツーシートタイプの場合には全圧力域に渡って著しい。これは、ツーシートタイプでは発色剤と顕色剤との反応に必要な接触時間に比べて衝撃持続時間が短いため、発色が十分に行われなかったためと考えられる。このように、衝撃圧の場合には、静的な負荷圧力の場合について求められた発色濃度-圧力関係に基づいて評価した圧力 P_e は実際に負荷された圧力値を著しく過小評価することになり、負荷時間を考慮した発色濃度-圧力関係を用いる必要があることが分かる。

ここに示した関係は負荷持続時間が $200\mu\text{sec}$ の場合であるが、一般的な衝突現象においては衝撃圧の大きさは時間的に変化する。衝撃圧を受ける領域も時間的に変化するため、それぞれの領域での衝撃圧の持続時間も異なる。

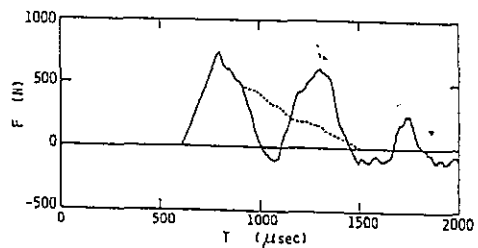


Fig. 9. Transmitted stress wave form and loading history for impulsive point contact.

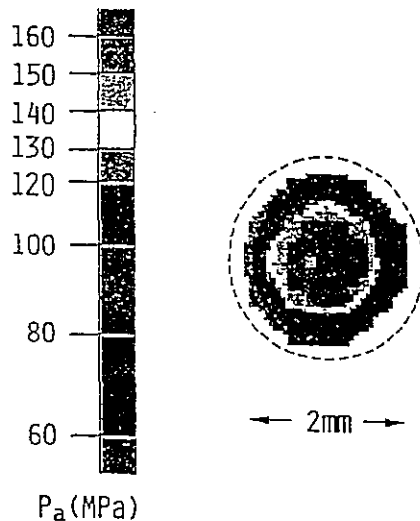


Fig. 10. Dynamic impression and pressure distribution caused by impulsive point contact.

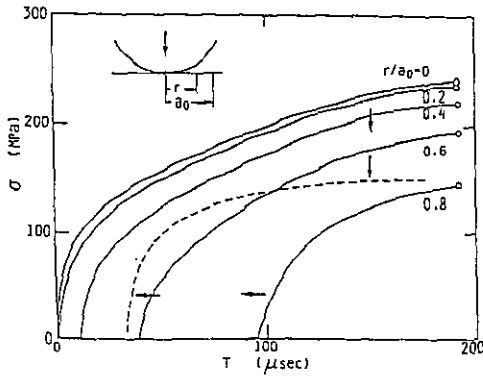


Fig. 11. Pressure history for Hertzian contact.

ってくる。そこで、このような場合について上に得られた P_0-P_c 関係を用いて衝撃圧の測定が可能であるか否かを調べる。

3・2 変動衝撃圧の測定

本研究で行ったように、一様な棒の先端を球面にし、これを平面に衝突させる場合には、ヘルツ接触点での全荷重をこれより離れた一様棒の部分で検出した荷重によって近似的に評価することができる。⁷⁾

Fig. 9 には、出力棒で観察された透過応力波形を実線で示し、自由端よりの反射波を考慮して求めた全荷重履歴を破線で示す。最高荷重値に達するまでの時間は約 200 μsec であり、ほぼ同程度の除荷過程が続く。Fig. 10 には、その際感圧紙上に残された圧痕を示すとともに、先に求めた衝撃圧での P_0-P_c 関係を用いて求めた圧力分布を示す。この圧力分布より求めた荷重値は Fig. 9 での最高荷重値のおよそ 1/2 となり、大きな食い違いが見られた。また、ほぼ円形の圧痕の半径は、以下に述べるヘルツの弾性接触論から予測される、最高荷重値での接触円の半径 (図中に破線で示す) に比べて小さい。

いま、ターゲットとして用いた試験片ポリアセタールが弾性変形のみを生じており、静的な取り扱いができると仮定すると、接触点の中央から半径 r での圧力 P は次式で与えられる。⁸⁾

$$P = \left(3F / (2\pi a_0^2) \right) \sqrt{1 - (r/a_0)^2} \quad (2)$$

ここで、 F は荷重、 a_0 は最高荷重値での接触面の半径であり、次式で与えられる。⁹⁾

$$a_0 = 1.4645 \sqrt[3]{3F(\delta_1 + \delta_2)R/4} \quad (3)$$

$$\delta_1 = (1 - \mu_1^2) / (E_1\pi), \delta_2 = (1 - \mu_2^2) / (E_2\pi)$$

R は球面の半径 (10mm) であり、 $E_1, \mu_1; E_2, \mu_2$ は試験片と棒のそれぞれヤング率とポアソン比である。試験片については実測値、 $E_1 = 3\text{GPa}$ 、 $\mu_1 = 0.22$ を、棒については $E_2 = 2.06 \times 10^3\text{GPa}$ 、 $\mu_2 = 0.3$ を用い、Fig. 9 での増荷重時の圧力変化を (r/a_0) をパラメータにして Fig. 11 に示す。各位置での圧力は時間遅れを伴いながら初期には急激に増加したのち、引き続き暫増してゆく。ここには最高荷重までの計算を示したが、弾性的な除荷

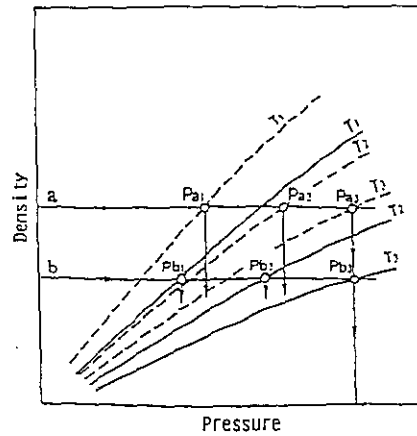


Fig. 12. Schematic presentation of dual-sheet method to simultaneously evaluate duration and magnitude of impact.

が引き続き起こるとすると、ここに示したと同じ過程が逆に進行することになる。従って、中心部では高い圧力を長時間受けるが、周辺部に近付くにつれて衝撃圧は低くなり、その持続時間は極端に短くなる。

実際には試験片表面には永久的な圧痕が認められ、塑性変形が生じていることを示している。従って、塑性変形を生じた部分での圧力は計算結果に比べて低下し、より広い領域での変形を引き起こす。そのため、破線で定性的に示したように、各領域はより低い圧力を、より長時間負荷されることになる。それにも拘わらず、感圧紙上の圧痕が小さく、かつ、予測される荷重値が実際に負荷した荷重に比べて著しく低いのは、接触部の周辺に近い領域では、衝撃圧の持続時間が短く、それに伴って感圧紙の発色濃度が低下し、結果的に感度が低下しているものと考えられる。このため、広い面積を占めるこのような領域での圧力評価の違いが荷重算出に際して大きな誤差をもたらしたものと考えられる。

このように、衝撃圧の測定にプレスケールを利用して衝撃力の可視化を実現するためには、持続時間をパラメータにした感度補正関係を実験的に求める必要がある。その際、重要な点は、そのような補正関係が求められたとしても、注目する場所での衝撃圧の持続時間を同時に求めることが必要になる点である。このような問題を解決する一つの手法としては、二種類の感圧紙を用いることが考えられる。即ち、Fig. 12 に示すように、持続時間による衝撃圧の感度変化が異なった二種類の感圧紙 (実線と破線で示す) を重ね合わせて圧力測定を行い、それぞれの発色濃度 a, b が得られたとする。このとき、両方の感圧紙は同じ衝撃圧を同じ持続時間経験しているから、持続時間をパラメータとして T_1, T_2, T_3, \dots と変化させながら、圧力値を算定してゆけば、図中に示すように、二種類の感圧紙について同一の持続時間と同一の衝撃圧を与える点 (図では持続時間 T_3 、衝撃圧 $Pa_3 = Pb_3$ の点) が必ず存在し、これらを求めることが出来るはずである。

4 結 論

感圧紙プレスケールを用いて衝撃力の可視化を実現するため、衝撃圧下での感度と応答性を調べた。得られた結果は以下の通りである。

(1) 感圧紙プレスケールは数百 μsec の持続時間の衝撃圧に対しても応答し、衝撃圧を可視的に捉えることができる。

(2) 衝撃圧下での発色濃度は静的な加圧の場合に比べ低下するが、衝撃圧と濃度との間には感圧紙の種類に応じて一意的な関係が成立する。

(3) これらの関係の持続時間に対する依存性を明らかにすることが、時間的に変化する衝撃力を可視的に測定するために必要である。

本研究を遂行する上で、感圧紙プレスケールと圧力画像解析装置の提供をいただいた(株)富士写真フィルム情報記録紙部に対し深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) A. L. Smith and D. J. Mee, *J. Strain Anal. Engr. Design*, 31, 463 (1996).
- 2) 森賀弘文, "入門 特殊紙の化学", p.29 (1975) 高分子刊行会.
- 3) 中村孝一, 紙技術協会誌, 29, 9 (1975).
- 4) F. E. Hauser, J. A. Simmons and J. E. Dorn, "Response of Metals to High Velocity Deformation", Ed. by P. G. Shewmon and V. F. Zackay, p.93 (1961) Interscience Pub..
- 5) C. H. Karnes and L. D. Bertholf, "Inelastic Behavior of Solids", Eds. M. F. Kanninen, W. F. Alder, A. R. Rosenfield and R. I. Jaffee, p.501 (1970) McGraw-Hill.
- 6) 田中吉之助, 黒川知明, 上田和永, 材料, 34, 1390 (1985).
- 7) W. Goldsmith, "Impact", p.98 (1960) Arnold Pub..
- 8) W. Goldsmith, "Impact", p.88 (1960) Arnold Pub..
- 9) M. Kornhauser, *J. Appl. Mech.*, 18, 251 (1951).