鉛板の落下衝撃試験*

泉 四郎** 坂田正登** 満田博宣**

The Dropping Impact Test of Lead Plate

Shirô Izumi, Masato Sakata, Hironobu Mitsuda

This is the third report succeeding the former two, which were about the mathematical analysis of the behaviour of metal plate under the lateral impact. This report resumes and puts in order, the development and the results of the experiments carried out for several years for the orientation of the problem, to pursue the research. Every effort have been made to relate as precisely as possible the main subject of it in order. It is advocated that there is a good reason to regard especially lead (Pb) as the representative of the general metallic material, as far as the impact deformation is concerned. Therefore, the tension-strain relation $S = K(1 + \epsilon)$ can be regarded as the base of motion of metal plate under lateral impact, because the results of the experiments agree in their profile form well with those of the theory which has been previously constructed upon the same assumption. This is the present report, and after this, the more strict research has been carried out by considering ϵ -wave more precisely. In that case, the relation $S = K(1 + \epsilon)$ becomes the 1st approximation formula. These will be reported next.

1. 緒 言

本篇は、横衝撃を受けた板の二次元変形につき過去 2 回の報告^{1), 2)} に続く第 3 回目として、これまではもっぱら理論を述べてきたが、これはそれと平行に進めた実験をまとめたものである³⁾。理論では一方向性の方形波衝撃に対する解を導いているので、その検証実験にも同じ条件が望ましい。一方向性にした意味は数学的にそれが簡単なことと落下法で手軽に実現できるからである。とくに方形波を選んだのは衝撃波の実態を当時までは握できずまず簡単な解を求めて見たままである。その後引き続き波形を実測して見た結果、初めに方形的から後には中高の波形へと移行して行なった。後の図 7 に実測の日付を入れてその変せんの模様が示されている。衝撃変形の高速度映画記録は、幸いにもその方形波があまりくずれない段階に行なわれている。さて、理論と実験との比較は、曲げヒンヂ点の曲率 κ と、曲げ波通過後の静止部分の傾角 α について、理論式からの算出値と実測した値とを対比によったが、およそ妥当な一致をえている。

本研究の目的は衝撃変形機構の解明であったが、この研究を推進することによって爆発圧着の機構解明の大きな手掛りをつかむことができると考えられることである。それには先ず、伸びと曲げとがどのような分担で変

形を完了していくかを明らかにしなければならない。

なお、この実験をとおして、金属の衝撃変形研究の材料としての鉛の価値が明らかにされた。考案されたプロセスの模擬実験にこれを用いるときは、熱処理の下要、装置も動力も軽便ですむ。すなわち、最良の見通しを、種々のテストを行ないながら、迅速・確実・安全かつ経済的につかむことができる。

2. 試料としての鉛

一般の金属を対象とする理論を検証するために鉛を材料に選ぶことは、つぎの事実から一応問題になる。すなわち、文献⁴⁾によれば、金属の再結晶開始温度は、鉄 450°C、金・銀・銅ともに 200°C、アルミ 150°C 等に比し、鉛では -3°C となっている。ところが本篇中の実験での温度条件は後述のごとく 23°C~18°C であるから、鉛と他の金属とは再結晶開始温度がその相反する側にある。そして Nadai^{5), 6)} は homologous temperature (ある金属の絶対溶融点を現在の絶対温度で割った比の値) を提唱し、同一の $h \cdot t$ をもつ金属は機械的性質を同じくするにしている。たとえば 20°C における鉛は 597°C における赤熱の鉄に相当することになる。

この立場においての材料鉛の問題点は、結局、再結晶温度域内にある金属が、それ以下にある固体金属には見られないクリープや応力緩和の流動性を帯びた現象を呈することに要約される。そしてこれから起こる支障は、観測対象におけるひずみ速度が、材料本来のクリープや

*原稿受付 昭和45年3月23日。昭和43年度秋季大会学術講演会(昭和43年11月3日)にて発表。

**正 会 員 熊本大学工学部(熊本市黒髪町)

応力緩和のひずみ速度に対し極端に大きければ、一応無視して差しつかえない。換言すれば、鉛のような材料もその場合は他の固体金属と同列に取扱うことができる。そこで衝撃試験中の鉛のひずみ速度は 10^3 sec^{-1} の程度で、静的引張り試験中のそれは 10^{-2} sec^{-1} 程度であるから、その比は 10^4 よりも大きいのでその点は保証されている。

なお、鉛には他金属に見られない独特の長所がある。

a) 試験片調製後の残留ひずみ除去の熱処理は不要。

b) 比重 ρ はとくに大きく、硬化率 K はとくに小さいので、曲げ波速度 $c = \sqrt{K/\rho}$ は金属中でもとくに小さい。また衝撃速度 U に対し曲げ波背後の静止部分傾角 $\alpha = \tan^{-1}(U/c)$ は大きい方が観測しやすい。そこで α を指定すると U は c に比例して定まる。 c の大きな他金属は危険で面倒な火薬を必要とするにもかかわらず、鉛は落下衝撃法で十分である。

c) c と U がともに小さくてすむので、現象は緩慢となり、現象の記録も手軽な高速カメラで十分となる。

d) とくに本研究では、一方向衝撃を用いて数理解析を簡単にしたが、その条件は落下衝撃法でもっとも楽に実現できる。理論と実験の一致をとくに望む本研究における鉛の価値は、したがって絶大である。

3. 落下衝撃装置の原理

質量 ∞ の静止球の直上から質量 m の落下球（ともに弾性球）が衝突して跳返るとき、接触時点（0 とする）の落下速度を u_1 （これを速度の正方向にとる）、離脱時点 T の速度を u_2 とし、落下球のたとえば中心においてこれと直結する座標系を選ぶと、その系は正方向に $U = u_1 - u_2$ の速度変化を受ける。いま時点 t における速度を u 、 $u_1 - u$ を t の関数 $\Phi(t)$ と表わすと、 $t = T$ で $u = u_2$ 、 $\Phi(T) = U$ となる。そこで新しく関数 $\varphi(t)$ を定義し、 $(0, T)$ の間では $\Phi(t)$ 、他の t での値を 0 とすれば、これは上記直結座標系で静止する質点系の単位質量ごとに働らく鉛直下向（ u の正方向）力であって、理論の運動方程式右辺の入力関数 $f(t)^{1)}$ および $\varphi(t)^{2)}$ に相当する。この静止球の代りに衝撃受台を、落下球の代りに落下体（図 1 の試料取付けわく）を、それぞれおき換えるとうよい。

4. 実験装置

4.1 衝撃発生装置

4.1.1 落下体

落下体は、本体、試料押えの小片およびその締付けねじよりなるが、図 1 にその本体を示す。250φ の S55C 丸棒の輪切りからの削出しであるが、性能上の要請（衝撃時間 T の短縮）からぜい肉の除去で軽量化を計った。衝撃点付近は HRC 60~65 に焼入れしてある。

図 1 落下体設計図

4.1.2 落下装置と受台

最高落下高度 14 m の火の見櫓式鉄塔で、断面 $80 \times 80 \text{ cm}^2$ 、頂に四角すいの帽子を被せ、地面から頂までの高さは 15 m あまりとなる。基底部に $4.5 \times 4.5 \text{ m}^2$ の実験室を設け、塔ともども薄鉄板の外被で風雨をさける。図 2 はその内部を示し、脚の開いた塔基底中央に、受台・二本のガイド線に挟まれた落下体（受台頭上）が見える。受台支柱は軟鋼丸棒（ $100 \phi \times 700 \text{ mm}$ ）でその約半分が地中に埋もれ、下端で 200 kg の金敷上に乗る。金敷の下はぐり石を敷き地下約 90 cm の深さまでコンクリートで固めてある。受台頭部は S 55 C、仕上外径 140ϕ 、高さ約 150 mm、衝撃面は半径 680 mm の球面、すそから約 55 mm の深さまでねじを切った穴が入込むので、衝撃受け頭部の肉厚は 100 mm、その穴底で支柱頭面に密着する。衝撃点の焼入硬度 HRC 60~65。ガイド線は 5ϕ ビアノ線 2 本、その中心間隔 195 mm、上下両端で 2 本とも大地から電気的に絶縁されている。

4.2 衝撃測定装置

① 落下体 ② 変形した試料 ③ 受台頭
④ 受台支柱 ⑤ ガイド線 ⑥ 光電リレー光源
⑦ 光電リレー ⑧ ひずみ測定用ブリッジヘッド

図 2 落下塔の基底部

図 3 電流導通系統図 (図 2 参照)

衝撃関数 $\varphi(t)$ を探知するために下記のような間接方法を選んだ（直接測定の方法がないので）。

4.2.1 電流法

$\varphi(t)$ を方形波と仮定すると衝撃時間 T を知ればすべて決定される。いま図 3 のような落下体と受台の接触で閉じる電気回路を考えると、時間 T だけシンクロスコープ入力端子間抵抗の両端に一定電圧が現われ、目的の方形波がえられる。ただしガイド線と落下体ガイドみぞの電気的接触は完全と仮定する。ここに問題がある（後述）。

4.2.2 受台法

受台法の回路は図 4 に示される。衝撃点での受台の圧縮波形〔測定しうる最高近似の $\varphi(t)$ 〕をできるだけ正確に記録するためストレングージを図示の位置にはる。波形は広帯域アンプを通してシンクロスコープに入れる。

4.2.3 落下体法

落下体法の回路を図 5 に示す。ゲージ張付位置も図示されている。衝突によりそのビームは下から突き上げられてゲージの側で伸びる。衝撃点の圧力が $\varphi(t)$ を示すとすれば、ビームの曲げがそれに比例すると仮定するとき、第一波は $-\varphi(t)$ を記録するはずであるが、落下体の弾性振動はもう少し複雑な上、塑性変形も多少ながら加わる。

4.3 高速度カメラ記録装置

図 6 はその信号および動力の系統を示す。図中シンクロナイザは、落下体吊上げの電磁石用スイッチを切る時点に始動、吊上高度相応のタイミングでカメラが動くように時間調節し、長さ 10 m のフィルムが約 $2/3$ 巻き取られ毎秒 8000 のコマ送り速度になる時点以後に目的の

図 4 受台法系統図

図5 落下体法系統図

図6 高速度カメラ装置系統図

現象が記録される。タイマはネオン管の放電で毎 10^{-8} 秒に光点をフィルム縁に刻む（図10a参照）。カメラは米国 Photo-Kinetics Inc. の James Ippolito & Co. Inc. 製 Waddell 式でその電源を改造。AC 200V を降圧し、DC 130 V に変換してカメラ駆動に用いる。フィルムはコニパン SSS 16 mm. 一巻 30.5 m の終り近くで 1 万コマ以上の速度となるが、それを約 10 m の 3 本に切り、それを往復二度に用いると多少のコマ数犠牲で能率は 6 倍となる。撮影には、試料縁カメラ正面開口に螢光塗料を施し 10 mm 間隔に黒の標尺目盛を入れ、500 W 電球 3 個で照明した。

1970年12月

シンクロスコープの掃引時間 100 μ s/cm
受台ゲージ (S104) 張付位置, 中心よりの
距離 60 mm (41.2.17 実験)

(a) 落下高さ 1 m

シンクロスコープ掃引時間 50 μ s/cm
受台ゲージ (F102) 張付位置, 中心よりの
距離 35 mm (43.2.5 実験)

(b) 落下高さ 1.5 m

シンクロスコープ掃引時間 50 μ s/cm
受台ゲージ (F102) 張付位置, 中心よりの
距離 22.5 mm (43.7.1 実験)

(c) 落下高さ 1 m

図7 上の波形は電流法, 下の波形は受台法

5. 実験の経緯と結果

5.1 衝撃波形測定概説

装置各部に衝撃の繰返しによる小さな塑性変形が蓄積される結果の波形変化は当然予想される。

図7は41年2月～43年7月間のその変化の模様を示す。ただし中間の42年5月に受台支柱を元の約半分 700 mm を切詰めたので、その影響らしいものが a), b) の間に見られる。その経緯はこうである。元来スチル写真に比べ映画画像の輪かくはぼけるが高速度映画の場合それが顕著である。Waddell 式には長い木製三脚が付い

ていて、モータ始動のショックがぼけを助長する可能性大と見られるので、鉄のアングルで短かく頑丈な脚を作り、受台をそれに合わせて切っただいである。さて a) 図の電流法(上)と受台法(下)の波形を比較すると、陪波を均し、減衰曲線を見れば[電流法波形末尾の減衰曲線は回路の CR が大きいために現われたもの] 両波形がこの時点では一致していたと考えてよい。すなわち衝撃波は希望通りの方形波であった。そのつぎの b) では、衝撃時間 T が全然一致しないし、受台法の基本波対陪波の振幅は $\frac{1}{2}$ a) と違って後者が大きくなっている。これは主として受台主柱の短縮による影響と考えられる。しかもなおこの時点までは a) に見られた方形波的性格がまだ保たれていたと見なす。つぎの c) になるともはや方形波と考えることはできない変ぼうをとげている。ここに a)~b)の間は 2 年、それに対する b)~c)の間は約 4 カ月にもかかわらずむしろ後者の変化が大きいことの裏には、前 2 年間に実験における落下高度は主に 1~1.5 m に対し、後 4 カ月間のそれはほとんど 3~6 m (時に 10 m) であったことをあげねばならない。これは要するに、陪波の基本波に対する相対的増大は主柱の短縮に起因し、基本波形の変化は落下体と受台とのひずみ硬化(主として後者)によるものとされる。

5.1.1 電流法の経過と結果

前項 4.2.1 の説明の最後に注意として述べた、ガイド線と落下体みぞとの間の接触不十分で、この方法に確実さのないことが明らかになった。図 8 a), b) はともに落下高度 1 m による電流法と受台法との波形比較。後者にほとんど変化が認められないのに前者では a) が b) の約 2 倍の T を与えている。

5.1.2 受台法の経過と結果

衝撃点からはなれて波形の間接測定を行なう場合、それら二点間の信号伝達特性のため、波形も T も実際より延びて測られる傾向にある。その予防には伝達方法の単純化を努力すべきである。伝達関数の数式化はまずこの際不可能として、その質的単純化は、測定点を衝撃点にできるだけ接近させることによってある程度実現できる。前項 4.2.2 と図 4 参照のこと。

さて、図 9 a) は落下高度 1.5 m, b) は同じく 3 m からの受台波形(上)と落下体波形(下)を同期させたもので、シンクロスコープのゲイン調整により落下体波形振幅を a) と b) とで大体一致させたため、同じものかと思えるくらいよく似ている。これは落下高度が衝撃時間 T ほどほとんど影響しないことを意味している。受台波形から T を推定することは困難であるが、つぎの方針に従うことにした。すなわち要するに、それと同等な方形波とし

a 上: 電流法波形 (2 V/cm), 下: 受台法波形 (5×10^{-6} /cm)

b 上: 電流法波形 (2 V/cm), 下: 受台法波形 (50×10^{-6} /cm)

落下高さ 1 m, シンクロスコープ掃引時間は a, b 共に $50 \mu\text{s}/\text{cm}$ (43.7.1 実験)

図 8 電流法と受台法, 両波形の同時記録

a 落下高さ 1.5 m, 上: 受台法波形 (100×10^{-6} /cm), 下: 落下体法波形 (1600×10^{-6} /cm)

b 落下高さ 3 m, 上: 受け台法波形 (100×10^{-6} /cm), 下: 落下体法波形 (2300×10^{-6} /cm)

シンクロスコープ掃引時間は a, b 共に $100 \mu\text{s}/\text{cm}$ (43.8.2 実験)

図 9 受台法と落下体法, 両波形の同時記録 (使用ゲージ F 102)

表 1 受台法による T_s の測定

落下高さ	気 温	実験日付	静定時間	$T_s(\mu s)$	平均 T_s
1.5 m	2°C	43.2.5	310.5	234.0	233
	//	//	310.0	233.4	
	//	//	309.0	231.8	
	36°C	43.7.24	340.0	240.0	242
	//	43.8.2	348.6	244.2	
3.0 m	36°C	43.7.24	337.0	240.2	245
	//	43.8.2	349.5	249.5	
6.0 m	23°C	43.7.1	333.5	244.6	245
	36°C	43.7.24	340.0	248.8	249

表 2 落下体法による T_D の測定

落下高さ	実験日付	$T_D(\mu s)$	平均 T	調整 T
1.5 m	43.8.2	210	207	204
		210		
		210		
		210		
		205		
		208		
		204		
		200		
3.0 m	43.8.2	220	215	212
		218		
		220		
		216		
		214		
		214		
		217		
		210		
6.0 m	—	—	—	—

て、受台波形と立上がり点および重心の一致するものを考えることである。いま図 8 a) の例(落下高度 6 m)をとると、立上がり点(ブラウン管中央の縦軸を基準に $-73 \mu s$)に関する面積のモーメントから計算した重心位置は、立上がり点から $122.3 \mu s$ となるので、 T_s (受台法 T) としてはその 2 倍の $244.6 \mu s$ をとる。表 1 にこの方法で処理した結果をまとめてある。表中の静定時間は同じ例でいうと、 $260.5 \mu s$ 以後は陪波だけになると見て、 $260.5 - (-73) = 333.5 \mu s$ として計算した時間のことである。なお表から見て、気温とともに T は延びる傾向をもつと思われる。

5.1.3 落下体法の経過と結果

高さ 1.5 m と 3 m からの落下体法衝撃時間を T_D として表 2 にまとめた。8 月 2 日(室温 36°C) 測定の T_D が、逆に 2 月 5 日(室温 2°C) の T_s に比べてもさらに

短縮しているので、5.1.2 の初めの注意も考慮すると一般に：

$$T_s > T_D \geq T \text{ (真の衝撃時間)}$$

ということになる。そこで他に方法もないので T_D の平均値を T の代りに用いることにする。

表 2 の T は落下高度とともに長くなる傾向を示す。いま衝撃が完全弾性的とし、また局部的な材料ひずみを考慮からはずすと、 T は落下体の幾何学的形状による固有モードの周期で高度に関係なく定まる理屈だし、これに局部ひずみを加味すれば T はかえって高度により短縮すべきだから、それが長くなる事実は、落下体(衝撃装置中もっともせんな構造をもつ)に塑性変形が起こっていることを暗示する。それは実際の落下体で確認できてる。

なお表 2 の平均 T は日間平均気温 32°C での測定値であるから、同平均 20°C での実験資料の整理に用いるに

図 10

表 3 実験結果と理論解の比較検討

落下高さ	T (μ s)	U (m/sec)	c (m/sec)	$\tan^{-1}\left(\frac{U}{c}\right)$	α	$\frac{U}{Tc^2}$	κ (mm^{-1})
1.5m	204	7.7	28.0	15.°4	17.°5	0.048	0.044
3.0m	212	11.0	30.2	20.°0	22.°0	0.057	0.054
6.0m	223	15.0	32.8	24.°6	27.°5	0.063	0.060

注) 表 3 は 43 年度秋季大会前刷³⁾の表 2 を一部修正したものである。前刷表 2 の記号 $\theta_0, k_0; \theta, k$ に対し, 表 3 では $\alpha, \kappa; \tan^{-1}(U/c), U/Tc^2$ と改め, また前刷で一率に $T=200 \mu\text{s}$ としたのを表 3 では本文の方法によるものを, また θ_0 に変形途中の端末傾角を適用したのに対し表 3 の α は同じく本文説明の方法によって定めた。

は温度調整が必要である。すなわち表 2 右端の調整 T 欄には表 1 の温度の影響を勘案して 1.5 m と 3 m の T (それぞれ 1.5% 減) と, 同じ 36°C の平均 T_s の高度による変化に合わせて 1.5 m と 3 m の調整 T から 6 m まで外挿法による延長を 223 μs として落下高度 6 m の衝撃時間とした。

5.2 映画記録と運動方程式の解との比較

映画記録は 42 年 9 月 19 日 (日間平均気温 23°C) ~ 10 月 23 日 (平均 18°C) に行なわれ, その間の平均気温は約 20°C, フィルムには鉛板の瞬間のプロフィールと 同撮影時点が記録されている。図 10 a) は現象の一部を示し, α (曲げ波通過後の静止角) と, κ (板の曲げヒンズ点曲率) とはこれから直接測られる。 U (水平部分の降下速度) と c (曲げヒンズ点の水平速度) とは図 10 b) の方法で計算される。ただし T は記録されないので前項表 2 の調整を採用する。さらに細かい点では α 測定の際, 図 9 の陪波に見られる落下体の弾性振動が板の両端から伝ばしてとくに初期段階の α を変動させるので, 変形終段に曲げ波が中央で相会する時点の α を測った。また各落下高度についてそれぞれ 10 回の映画記録からえた数値の平均が表 3 には記入されている注)。

さて, 理論解²⁾では $\alpha = \tan^{-1}(U/c)$ および $\kappa = U/Tc^2$ となっているので, 実測平均値 U, c および T を用いてそれらを計算したものと, 直接測定によるその値とを比較して理論の当否を判定できる。表 3 はそれであるが, 一応妥当な線に達していると思う。この事実はまだ理論の基本仮定²⁾ $S = K(1 + \epsilon)$ にさかのぼってその妥当性を

証明するものと考えてよからう。しかし後の伸びに関するより精密な研究結果によれば, これを張力ひずみ関係の第一近似式とすべきことが分るが, そのことについては第四報以後に譲る。

6. 結 言

1. 金属の衝撃変形に関する問題の実験研究材料としての鉛の優秀性を推称する。a) 試料調製が楽で熱処理は不要。b) 変形エネルギーは軽小でよい。c) 観測装置は手軽なもので十分精密な結果がえられる。d) その結果はまた良好なシミュレーションとなる。

2. とくに本篇の実験では, 落下法により理論の要求する一方向 (方形波) の衝撃条件を実現し, 結果を大体純粋な形で理論のそれと比較できた。

3. 板厚 0.6 mm の鉛板を用い, 実験の結果は理論式からの計算結果と妥当な一致を示す。この事実は理論の基本仮定 $S = K(1 + \epsilon)$ の妥当性を証明するものと見なされる。

4. 伸び ϵ に関するその後のより精密な研究結果により, $S = K(1 + \epsilon)$ は張力ひずみの関係の第一近似式としなければならないことが明らかになるが, そのことは第四報以後に詳しく報告したいと思う。

なお本研究については熊本大学の清田堅吉教授から実験上多大の便宜と貴重なアドバイスを賜りました。また東京大学の前田禎三教授には始終ご指導を賜わり, 度重なる困難と行詰まりから救出していただきましたことを, ここに併せて深く感謝いたします。

文 献

- 1) 泉 四郎: 精密機械, **33**, 10 (1967) 663.
- 2) 泉 四郎, 坂田正登: 精密機械, **35**, 6 (1969) 396.
- 3) 泉 四郎, 坂田正登: 薄板の落下衝撃試験について, 昭和 43 年度精機学会秋季講演会前刷, 244.
- 4) 日本機械学会編: 機械工学便覧, 改訂第 4 版, 1.1.5.
- 5) A.L. Nadai: Plasticity, Mc. Graw-Hill (1931) 275.
- 6) A.L. Nadai: Theory of Flow & Fracture of Solids 2, Mc. Graw-Hill, 45750, 17, 513.
- 7) S. Timoshenko & T.N. Goodier: Theory of Elasticity, 2nd Edition, Asian Student's Edition, Kogakusha (1951) 383~384.