

「材料の衝撃挙動」

岸 田 敬 三*

工学や技術の進歩とは、人間の知識がさらに精密化したことの結果である。たとえば材料の強度についても、古くから行なわれている静的試験における降伏点とか引張強さだけでなく、衝撃荷重に対する材料の強度も必要となる。

材料の衝撃挙動を取扱うことは、必然的に応力波伝播の問題に直面する。弾性固体内部では膨脹波とせん断波が存在し、表面近くや境界には表面波や Love 波が生じる。また丸棒内の縦、ねじりと曲げ波の厳密解が与えられ、弾性波の伝播については、大体19世紀後半でかたがついている。

衝撃速度を上げていくと、やがて材料は塑性変形を起し塑性波が材料内を伝播する。この問題が、工学的立場から取扱われたのは第2次大戦中のことであって、主として軍事的目的のためであった。材料の衝撃塑性 (Dynamic Plasticity) の問題は、その後も活発に行なわれ、丸棒内の縦波だけでなく、衝撃曲げについても精密な実験が行なわれた。

実験結果を解析するために、塑性波伝播の計算も行なわれたが、この時材料の応力-ひずみ関係は普通の静的試験で得られる曲線を用い、いわばひずみ速度の影響を無視したものであった。普通の衝撃実験では、静的試験の場合の少くとも 10^6 倍のひずみ速度が生じる。この古典的理論では、現象を完全に説明することができず、実験が正確になるにつれて、理論との違いが明らかとなり、これは材料のひずみ速度依存性によるものと考えられた。材料の衝撃挙動を取扱うには、ひずみ速度の効果を考慮した材料の応力-ひずみ関係を明らかにすることが不可欠となる。

材料の動的応力-ひずみ関係を定めるには、

*岸田敬三 (Keizo KISHIDA), 大阪大学, 工学部, 精密工学科, 助教授, 工学博士, 材料力学

高速変形中の材料の応力、ひずみとひずみ速度の関係を実験によって、正しく測定することが必要である。衝撃荷重下の材料の応力-ひずみ関係を正しく求めるには、注意深い考慮が必要であって、静的試験における荷重計-試験片の組合せをそのまま用いることはできない。何故ならば、材料が衝撃的荷重をうけて塑性変形する場合、内部に応力波が発生し、その伝播と反射・干渉のために試料中で応力やひずみが一様でなく複雑な分布となるからである。したがって動的応力-ひずみ関係を正しく求めるには、試験片の1点において、応力とひずみを同時に測定しなければならない。衝撃塑性ひずみを試験片のほぼ1点で測定することは、現在ではさほど困難なことではない。抵抗線ひずみゲージのほか、光学的方法も種々開発されている。これに対して、塑性域における応力は一般には直接測定することは不可能であって、試験片に接続された弾性棒あるいは、他の応力変換器によって、間接的に測定しなければならない。

つぎの図は、このような基本的事項の上で具体化された応力-ひずみ関係の測定法の原理を示したものである。

(a)の方法は、現在まで最も広く用いられてきたもので、スプリットホプキンソン棒法と呼ばれている。この方法は、図から分るように試験片の1点で応力とひずみを測定するかわりに、試験片を短くして内部での応力波伝播の影響を少くし、平均応力と、平均ひずみの関係を求めようとするものである。他の3つの方法では、いずれもほぼ1点と見なしうる試料の端面で、応力とひずみを測定しているので、応力波伝播は問題にならない。(b)では、衝撃端に発生する応力は弾性波として弾性棒を伝播するので、これをひずみゲージで測定できるが、試験片端面のひずみは、変形後の永久ひずみしか測定でき

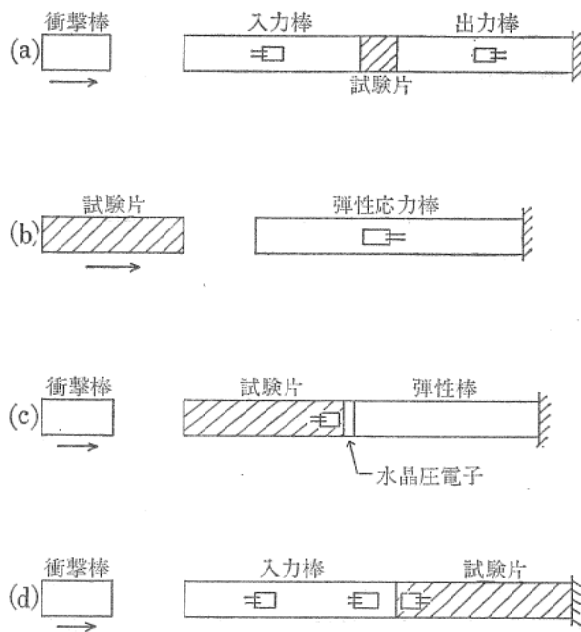


図1

ない。(c)と(d)は、応力変換器または弾性棒に接した試験片端面で、応力とひずみを同時に測定している。(d)の方法は、筆者の考案したもので原理的には(c)と同じであるが、測定点が試料の衝撃端であること、応力変換器を用いないことなどの点で有利である。この方法では、弾性入力棒上の2枚のゲージによって試験片への入射応力と境界面からの反射応力を独立に測定し、試料に透過する応力を求める。試験片端面の衝撃塑性ひずみを同時に測定し、まへの透過応力と対応させて、高速変形中の応力-ひずみ関係を求めることができるのである。

これらの方法によって、金属の応力-ひずみ関係を実際に求めてみると、ひずみ速度の増加に伴って応力が上昇するのがみられる。特に炭素量の少ない軟鋼では、高ひずみ速度下で、降伏点は静的な場合の2倍以上となり、銅やアルミニウムでも、ひずみ速度依存性が高いことが明らかにされた。

しかしこれらの実験的方法も万能とは言えない。図の(a)の方法では、有限長の試験片を用いるので、その中での応力波の伝播が問題となるような高速衝撃では、その結果は信用し難い。本来ひずみ速度依存性を有しない材料であっても、この方法で試験すれば、ひずみ速度の増加につれて、応力が上昇するかの如き誤った結果を導くことを理論的に指摘することもできる。他の3つの方法では、試料の1点で応力とひず

みを測定しているのに、応力波の伝播による誤差は入らないが、衝撃速度が大きくなると、試料の横方向慣性のため変形が、一次元的でなくなり、これを一軸変形と考えると、応力-ひずみ関係を導くと、やはり誤った結果を与える。高速変形中の材料の力学的性質を、ひずみ速度をパラメータとした応力-ひずみ曲線で表すことは必ずしも得策ではなく、もっと一般的な構成方程式の形で与えて、始めてつぎの展開が可能となるであろう。

動的応力-ひずみ関係を数式化した構成方程式は、最初半経験則的なものから導かれたが、現在では材料の塑性域における粘性、あるいは緩和過程として、または転位の運動理論などからも裏づけられて、弾-粘塑性の構成方程式として広く認められている。特に結晶内の転位の動力学の立場から導かれた構成方程式が、軟鋼の衝撃挙動をうまく説明しているのに、微視的理論の将来の有効性を暗示しているように思われる。応力波伝播の解析と(d)による実験結果から、実在の金属に対しては、弾-粘塑性-塑性型の構成方程式が、より適切であると考え、これを明らかにしたいと考えている。

以上は主に材料の衝撃変形について、材料の力学的性質をひずみ速度効果として研究する立場であったが、材料の破壊についても何んらかの速度効果が存在するものと考えられる。

最近目覚ましい発展をしている破壊力学では、主に静的荷重下の材料のクラックの挙動を扱うもので、衝撃荷重に対するものは殆んど見られないのが現状である。機械や構造物が衝撃荷重により破壊に至ることも少なくないので、実際上も重要な問題である。このような観点から、筆者はクラックを有する材料の衝撃引張りの実験を手がけている。その結果の1例をあげれば、アルミ合金では、衝撃速度とともにクラックの伝播速度が上昇すること、あるいは急速な破壊に先立つクラック先端の塑性変形量が衝撃速度の増加につれて減少すること、などが明らかとなった。これらはひずみ速度の増加とともに材料の靱性が低下することを示している。

衝撃荷重下の材料の高速塑性変形は、圧延や鍛造あるいは切削などの高速加工に関連し、また強度の面では、衝撃破壊や、衝撃疲れなど実際面でも重要な問題を含んでいる。