

(23) 高速載荷および高速衝突実験装置の開発

防衛大学校土木工学科 内田 孝
防衛大学校土木工学科 ○ 大野 友則
榎前川試験機製作所 鈴木 輝夫
防衛大学校土木工学科 高橋 芳彦

1. まえがき

落石、車両の衝突、航空機の墜落、爆発事故などに起因する載荷速度が非常に大きい外乱に対して構造物の安全性を検討する場合、構造物や部材の耐衝撃性を定量的に評価する必要がある。弾性から塑性を経て破壊に至るまでの動力学特性を把握する場合、一般に解析的方法と実験的方法がある。実験には、衝突現象を調べるための衝突・爆発実験、構造部材や材料の動力学特性を調べるための高速載荷実験などがある。従来から使用されている高速載荷装置は、載荷機構に油圧を用いたものである。しかしながら、この方式で大荷重容量および高載荷速度を保有する装置とするためには、極めて巨大な施設・設備が必要である。そこで、油圧方式にみられる欠点を新機構の採用によって補い、最大荷重50tonf、最大載荷速度4.0m/secを有する装置を開発したものである。また、衝撃力を受ける構造部材の応答問題を調べるため、高速載荷装置の載荷能力を利用して重量約0.5kgfまでの物体を200m/secで衝突させる高速衝突装置も開発したので報告する。

2. 高速載荷実験装置の概要

高速載荷装置を開発するにあたっては、以下の4つの条件を満足するように性能を決定している。すなわち、①試験体が破壊に達するような、大きな変位容量(150mm)を有すること。②載荷にともなう慣性力の影響を取り除いて載荷速度(ひずみ速度)の影響が定量的に評価できるように、載荷は一定の変位速度であること。③実際の衝撃荷重によって部材に生じる変形速度(数m/sec)に対応する速度での載荷が可能であること。④構造部材に対する実験が可能のように、比較的大きな荷重容量(50tonf)を有すること、などである。

2.1 最大荷重50tonfおよび最大載荷速度4.0m/secの設定

図-1は、国内外における油圧式高速載荷装置の性能(荷重～載荷速度)の比較を示したものである¹⁾。一般に、荷重と載荷速度の両方の性能を高めることは、技術的には可能であるが経済的に困難であると言われている。したがって、試験の目的に応じて荷重か載荷速度のいずれかを重視した試験装置が製作されている。通常行われている静的載荷に対する材料試験およびはりやスラブ部材の寸法・諸元に基づいて、高速載荷時の荷重を検討した結果、最大荷重・荷重能力が50tonfあれば従来の静的載荷実験との比較・検討が可能であることが認められた。また土木・建築の分野において対象とすべき構造物や外乱の条件を考えると、材料や部材の変形速度となる載荷速度は4.0m/sec程度あれば対応できるものと考えた²⁾。国内では、現在のところ最大荷重が50tonf、載荷速度が1.0m/sec以下の性能を有する装置しか見あたらない。したがって、本装置を開発することにより、当面問題となる高速変形挙動について検討することは十分であると考えられる。

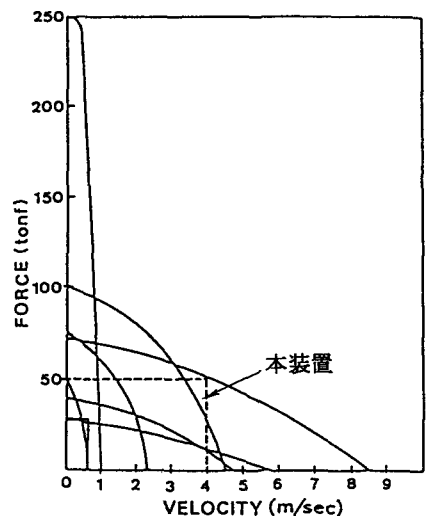


図-1 油圧式高速載荷装置の性能比較

2.2 装置各部の基本設計

(A) 最大圧縮力50tonfの荷重出力に要する油圧源

ラム径が170mmのピストンを用いるとすると、油圧の必要圧力は約220kgf/cm²である。このピストンが最大4.0m/secで動くと、単位時間当りの流量は約5448ℓ/minとなる。この必要流量を確保するためには、管内での粘性抵抗などを考慮すれば、単位時間当りの必要流量が約7627ℓ/minとなる。これだけの油量を1分間当りに送油するためには、約2750KWの動力を有する油圧ポンプが必要である。仮に、比較的能力の大きい出力100KW程度の油圧ポンプを用いることにすれば、上記油量を送るために28台(2750KW/100KW=27.5)のポンプが必要となる。数台の油圧ポンプを連結した多連装油圧式高速載荷装置は国内で数例みられるが、最大荷重が30tonf、最大載荷速度が1.0m/sec以下の性能である。一方、最大荷重が50tonf、最大載荷速度4.0m/secの性能とするには、上記のように28台のポンプを同時に運転しなければならない。しかしながら、これらを運転するための電力設備、施設は極めて巨大なものとなり、またポンプ用電動機の高速回転による騒音や振動による計測機器への影響も無視できない。

(B) 荷重保有蓄圧装置の導入

ピストン・ラムが変位すると、アクチュエータ・シリンダ内の油量は減少する。体積の変化にともなう圧力の低下(PV=const.)を避けるためには、この分の油量を瞬時に補充しなければならない。大容量の油圧ポンプの代用あるいは補助として、一般に用いられているのがアキュムレータと呼ばれる蓄圧装置である。市販されているポンベの規格品で、窒素ガス封入用ゴム袋の最大容積は18.5ℓ/本である。容積18.5ℓのゴム袋に110kgf/cm²の窒素ガスを封入すれば、最大50tonfに対して油圧が約220kgf/cm²だから、そのときのゴム袋の容積は9.25ℓとなる。すなわち、1本あたり18.5-9.25=9.25(ℓ)の油をポンベ内に送り込めばよい。本装置では、余裕のためにポンベ4本を装備する。所定の圧力に保たれた油は、主アクチュエータ・シリンダ内および蓄圧ポンベ内に満たされており、主アクチュエータが変位するとポンベから常に変化分の油が供給される。したがって、最大150mmの変位まで主アクチュエータの荷重は一定に保たれることになる。

(C) 載荷速度の設定

(1) フライ・ホイールの回転数と速度の関係

電磁クラッチを作動してフライ・ホイールの回転をピニオン・ギヤに伝達させることにより、ギヤが回転しバランス・アクチュエータ内のギヤ軸が下方に引き下げられる(図-2)。本装置では、フライ・ホイールの回転数が約1000r.p.m.のときにピストンの移動速度が4.0m/secとなるように設定した。回転数を変えることによって、0~4.0m/secの範囲で任意の載荷速度を設定することができる。

(2) 回転エネルギー伝達機構

載荷前のアクチュエータの制御バルブは、4個のサーボ孔を介して約220kgf/cm²の圧力で円周方向にホールドされている。すなわち、約15tonfの力で軸直角方向に拘束されている。これを下方に引き下げるためには、ピストン管内面の摩擦係数を0.01とすると、約15kgfの力が必要である。径88mmのピニオン・ギヤを用いてこの力を加えるためには、約7kgf・m以上

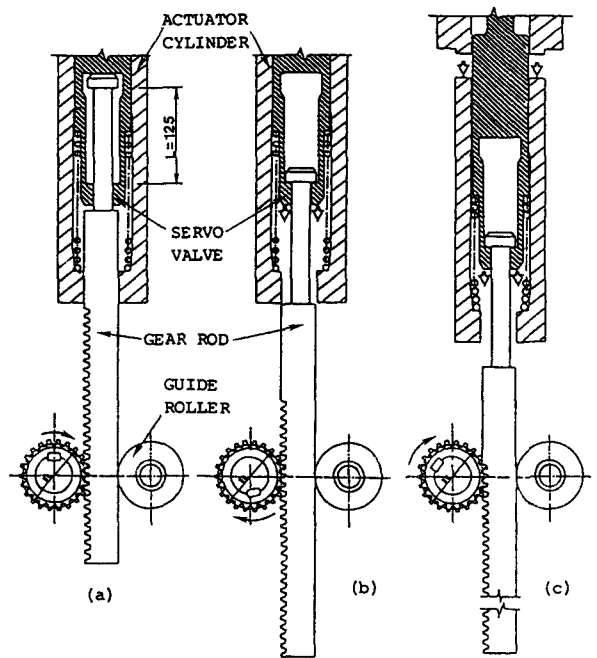


図-2 ギヤ軸の下降原理

のトルク能力を有する電磁クラッチを用いればよい。電磁クラッチが伝達板に接触して約7kgf・m以上のトルクがピニオン・ギヤに有効に伝達されるまでには、クラッチ板面が伝達板に接触する時間とクラッチの滑りおよび動作特性のため時間遅れが生じる。そこで本装置では、クラッチによる有効トルク発生までの立上りを速くするために、過励磁による励磁方法を用いている。また設定した電磁クラッチの回転エネルギーを有効に制御バルブに伝達するために、制御バルブのギヤ軸とバルブを分離してギヤ軸の助走時間をとれるようにした。すなわち、バルブ内にギヤ軸を通してバルブ管内に遊びのための余長をとり、電磁クラッチの作動開始後ある時間経過した段階でバルブ管を押し下げる機構とした。この機構により、アクチュエータはほぼ設定した速度で下降する。

(D) 荷重装置本体フレームの剛性

荷重装置のフレームは、荷重にともなう反力をすべてそれ自体で受け持つ構造とする。すなわち図-3に示すように、耐力基礎はり、耐力柱および耐力上ばりから成るラーメン構造である。耐力上ばりに取り付けられた主アクチュエータで試験体に加力すると、フレーム各部材には反力によって曲げモーメントを生じる。この結果、加力直後にフレームの各部材にたわみが生じるので、試験体に対する加力の荷重速度はたわみの分だけ時間遅れが生じる。つまり、荷重の立上りが緩となる。言い換えれば、加力にともなう荷重の立上りの時間を小さくするためには、フレームにたわみが生じないようにその剛性を極めて大きくする必要がある。

一方図-4は、主アクチュエータの荷重を加力ビームを介して左右2つの反力アクチュエータ（バランス・アクチュエータと呼ぶ）で保持する機構を示している。加力ビームおよびフレームにはたわみが当然生じるが、バランス・アクチュエータが下降して主アクチュエータの荷重が試験体に加力される時点あるいはそれ以降の段階では、フレームに不必要な変形はそれ以上生

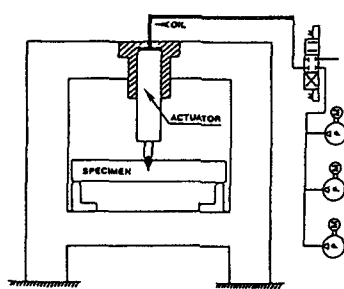


図-3 従来型式の荷重装置
本体フレーム

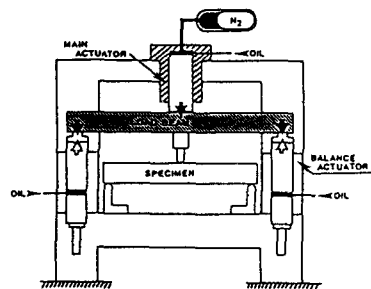


図-4 反力保持方式による
荷重装置本体フレーム

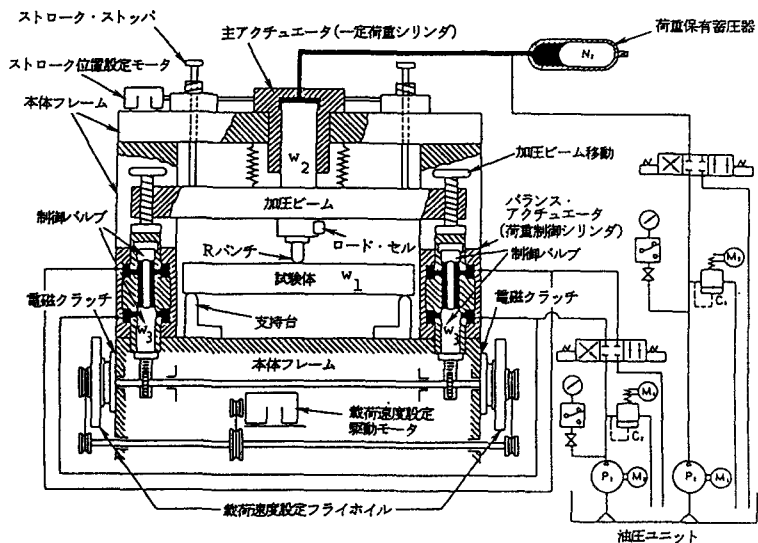


図-5 高速荷重装置の作動機構

しない。つまり、フレームの変形がある程度許容されるので、剛性はそれほど大きくする必要がない。すなわち、従来採用されていた載荷荷重の反力を装置本体の剛性で受ける方式に対して本方式を採用することにより、装置本体が小型で軽量化できる。

2.3 装置の作動原理

図-5に、装置の作動機構を示す。油圧ポンプ P_1 を運転して、油圧を定荷重バルブ C_1 を介して主アクチュエータに供給すれば、一定に保たれた荷重が試験体に直列に載荷される。この際、油圧ポンプ P_2 を運転して定荷重バルブ C_2 をバランス・アクチュエータに送る。ここで、試験体に載荷される荷重を W_1 、主アクチュエータの荷重を W_2 およびバランス・アクチュエータの荷重を W_3 とすると、 $W_1 = W_2 - W_3$ ($W_2 = W_3$ とすれば $W_1 = 0$)となる。 W_2 は一定であるので、 W_3 を制御すれば W_1 も制御できることになる。フレームに生じるたわみ(ひずみ)は、荷重 W_2 によるものであり、 W_1 の大きさが変動してもこの大きさは変化しない。 W_3 の制御は、バランス・アクチュエータに内蔵された制御バルブを機械的に一定速度で作動させることにより、所定の速度で載荷できる。

2.4 装置の構成および性能・諸元

本装置は主として、載荷装置本体(図-6)、油圧ユニット、試験制御装置および計測装置で構成される。主な装置の性能・諸元を表-1に示す。

3. 高速衝突装置の概要

本装置は、比較的軽量(約0.5kgfまで)の物体を高速(約200m/sec)で発射させる装置である。物体の発射に必要な衝撃力は、圧搾空気を利用している。空気圧を衝撃力として得るためには、空気圧を極めて短時間に所定圧力まで増圧する必要がある。すなわち、容器内にある一定の空気容積を短時間に圧縮して減少させなければならない。増圧には高速載荷装置を用い、増圧ジャッキの容器に取り付けられたピストンを最大速度400cm/secで変位させることにより

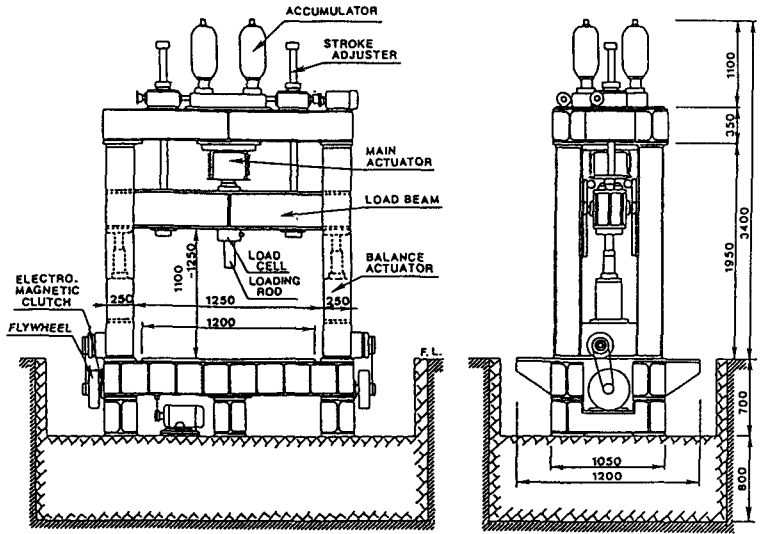


図-6 高速載荷装置本体の概要

シリンダー内の空気を高速圧縮した。なお、空気は厳密には圧縮性流体として取り扱う必要があるが、各部の設計にあたっては簡便のため単純な計算や仮定を用いた。装置の概要を図-7に、各部の諸元を表-2に示す。

3.1 衝撃力の設定

図-8に示すように、発射管入口にトルク・リングで固定された物体後端までの空気容積は、増圧ジャッキ内のシリンダー容積 V_1 と発射管との連結管内の容積 V_2 の和である。容積($V_1 + V_2$)がピストンの移動により減少して($V_1' + V_2$)になれば、初圧 p_0 の空気は $p' = p_0 \cdot \{(V_1 + V_2) / (V_1' + V_2)\}$ となる。ここに、 $V_1' = V_1 - A_1 \cdot S$ 、 A_1 は増圧ジャッキのピストン断面積、 S はピストンの変位量である。 $p_0 = 7.0 \text{ kgf/cm}^2$ および $S = 15 \text{ cm}$ などの各値を代入すると、 $p' = 27.20 \text{ (kgf/cm}^2)$ となる。このとき発射管入口(断面積 $A_3 = 12.56 \text{ cm}^2$)にある物体に作用する力 F_2' は、 $387.1 \text{ (kgf)} (= A_3 \cdot p')$ である。一方、ピストンが15cm変位するのに要する

表-1 高速載荷装置の主な性能・諸元

型 式		性能・諸元		
載 荷 装 置 本 体	最大荷重容量	tonf	50	
	載荷速度	m/sec	0~4	
	載荷ストローク	mm	150	
	荷重立上り	msec	10	
	主アクチュエータ	ストローク	mm	150
		ラム戻し方式		スプリング式
	ハランス・アクチュエータ	ストローク	mm	150
		方式		油圧式サホ弁
	荷重保有蓄圧容量	ℓ	18.5×4本	
	ストロークストップ距離	mm	300	
載荷速度設定用フライホイール回転数	r.p.m.	100~1000		
油圧 ユニット	ポンプ 吐出量	主アクチュエータ用	ℓ/min	5
		ハランス・アクチュエータ用	ℓ/min	3
	ポンプ 電動機	主アクチュエータ用		3相200V2.2KW
		ハランス・アクチュエータ用		3相200V1.5KW

表-2 高速衝突装置各部の主要諸元

増圧ジャッキ	ピストン径 (φ ₁)	300 mm
	ストローク	170 mm
	耐圧力	70 kgf/cm ²
連結管	内 径 (φ ₂)	38 mm
	長 さ	1500 mm
	耐圧力	300 kgf/cm ²
発 射 管	内 径	40 mm
	長 さ (L)	2500 mm
	耐圧力	70 kgf/cm ²
コンプレッサ	作動圧力	5~7kgf/cm ²
	タンク容量	15 ℓ

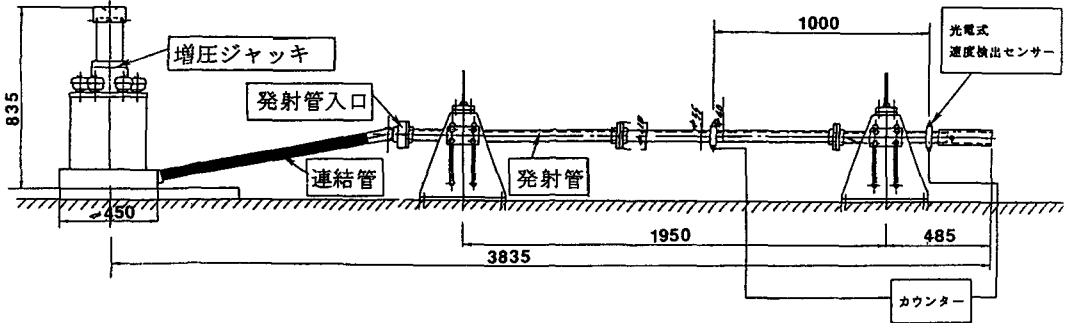


図-7 高速衝突装置の概要

時間は、 $t=0.0375$ (sec)である。すなわち、載荷開始後、 0.0375 secで物体に衝撃力 387.1 kgfが作用することになる。

3.2 発射速度の設定

衝撃力 F_2' を受けた重量 $W(=0.5$ kgf)の物体が得る初速度 v_0 は、 $v_0=(F_2' \times t \times g)/W=142.41$ (m/sec)で与えられる。次に、発射管内の空気圧は物体が発射管(長さ $L=2.5$ m)を飛び出すまで一定と仮定すれば、物体が得る発射速度 v は、 $v^2=v_0^2+(2 \times F_2' \times L \times g/W)=58216.41$ 、つまり $v=241.28$ m/secとなる。しかしながら、物体の移動にともなって発射管内の空気圧は減少し、また物体と管内面の間には摩擦抵抗が存在するので、実際にはこれよりも小さな速度になる。

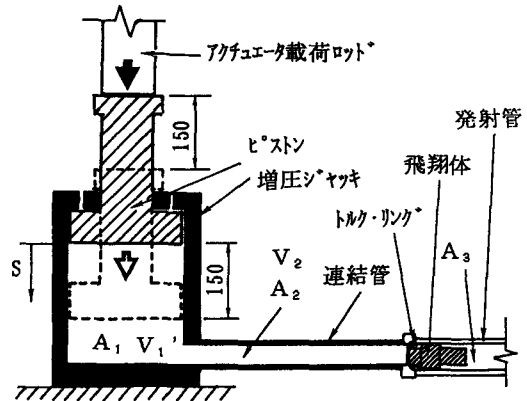


図-8 空気の高速度圧縮の原理

3.3 物体の発射速度の制御

初圧 p_0 を大きくすれば物体に作用する衝撃力 F_2' が増加するので、初速度が上昇する。本装置で与圧に用いたコンプレッサの圧縮容量は最大 7kgf/cm^2 であるため、与圧を増大して発射速度を増す方法は適用できない。一方、物体の重量 W を軽くすれば初速度および発射速度が増大するので、重量を調整することにより任意の速度が設定できる。また上述した計算は、物体が約 387kgf の力で発射管内に拘束されているものとしている。拘束力が小さければより小さな衝撃力で発射されることになり、発射速度も当然減少する。もし拘束力を 200kgf に設定すれば、そのときのシリンダー内の空気圧 p' は $17.64(\text{kgf/cm}^2)$ であり、その初速度は $59.78(\text{m/sec})$ となる。したがって、発射速度は $v=92.0\text{m/sec}$ となる。

3.4 速度の計測

発射管内を通過する物体の速度は、発射管の出口およびその位置から 1m 離れた位置に光電式速度検出センサーを設置し、物体がこの2点を通過する時刻の差から算定した。またターゲットに対する衝突時の速度は、ターゲットに取り付けた加速度計を用いて、加速度の発生時刻と発射管出口を通過する時刻との差から算定した。なお本装置による実験において、重量が 0.43kgf の物体を用いて実測した結果、衝突速度 v は約 200m/sec であった。

4. あとがき

高速載荷装置の完成後、種々の材料試験（圧縮・引張）および構造部材（RC、鋼・コンクリート合成はり、RCスラブなど）に対する高速載荷実験を行ってきた。その結果、ひずみ速度の影響を考慮した材料や部材の動力学特性や終局限界性能に関する有用な成果が得られている。また高速衝突装置は、高速載荷装置が開発されたことによって可能になったもので、高速載荷装置の主性能である大荷重容量と高速の載荷速度を利用して空気を高速圧縮し物体の発射エネルギーとして用いているのが特徴である。一般に、火薬類を用いる方式の発射装置²⁾は、薬量の調整により非常に高速（数百～数千 m/sec ）で物体を発射することが可能であるが、取扱上の安全性に問題がある。これに対し空気を利用した本装置は、実験を行う上で比較的安全であり、取扱いも容易である。性能においても、物体の高速衝突による材料や小型部材の応答および局部破壊の問題を基礎的に調べる目的からは十分対応できると考える。

参考文献

- 1) Limberger, E. and Struck, W.: Servohydraulic Equipment for Testing Reinforced Concrete Structural Members and Components under Impulsive Loading, Proceedings of RILEM-CEB-IABSE-IASS-Interassociation Symposium, Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, Berlin (BAM), pp.213~223, 1982.6.
- 2) Muto, K. et.al : Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part 3:Full-Scale Tests, Proc. of 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, pp.271~278, 1989.