

## 第2章 コンクリート材料の動的引張・圧縮特性

### 評価のための衝撃および急速載荷試験方法

ここでは、衝撃載荷と急速載荷の相違について明らかにするとともに、各種の衝撃荷重によって鉄筋コンクリート構造物の構成材料に生ずる概略のひずみ速度の関係を示し、本論文でコンクリートの動的圧縮・引張特性を調べるために対象とする載荷速度の範囲を明示している。また、高ひずみ速度下のコンクリート材料の動力学的特性を把握するための試験方法について概説するとともに、本論文の各種試験に用いる急速載荷装置の作動原理についても述べる。

#### 2. 1 衝撃載荷と急速載荷の定義

「衝撃」とは、運動している物体が静止中の別の物体に衝突する、あるいは運動している物体同士が互いに衝突する現象であり、衝突によって物体相互に衝撃力が作用する。爆発物の爆破によって発生する爆圧の作用も、衝撃の分野に含めて取り扱われることがある。ただし、構造物の衝撃問題を考える場合、「物体の衝突による衝撃」と「爆発による衝撃」とは基本的に異なる。前者の場合、衝突体や被衝突体の質量や剛性、衝突速度の相互関係によって衝撃力特性（大きさ、作用時間、波形形状など）が定まる。後者の場合は、爆破源（薬種・薬量またはガス等の種類・濃度等）自体の諸元と構造物との離隔距離によって算定できる。すなわち、構造物の解析・設計に用いる衝撃荷重の大きさがあらかじめ特定できるかどうかという点に相違がある。しかしながら、衝突による衝撃力も爆破による爆圧力も作用時間が極めて小さく（瞬時的）、その大きさが極めて大きい、という共通の特徴がある。いずれの場合も、構造物に衝撃力が作用すると構造材料には応力波によるひずみ速度効果が生じる。

衝撃によって材料内部に生じる衝撃応力に関しては、初等力学の書にも記述されている。すなわち、高さ  $h$  から重量  $W$  の物体を落下させる（衝撃載荷）と、材料には次式で与えられる衝撃応力  $\sigma_d$  が生じる。

$$\sigma_d = \sigma_0 \left( 1 + \sqrt{1 + 2h/\lambda_0} \right)$$

ここに、 $\sigma_d$ ：衝撃応力、 $\sigma_0$ ：静的載荷による応力、 $\lambda_0$ ：静的載荷による材料の伸びまたは縮み量、である。上式で、 $h=0$  の場合（物体が材料に接している）は、

$$\sigma_d = \sigma_0 (1 + 1) = 2\sigma_0$$

であり、衝撃応力は静荷重作用時の応力の2倍となることがわかる。このとき ( $h=0$ ) の荷重の作用は、物体と材料が接触した状態からの急激な負荷であり「急速載荷」と呼んでいる。

## 2. 2 衝撃実験と急速載荷試験の区別

衝撃実験は、主として衝撃力を受ける構造物あるいは部材の衝撃現象や耐衝撃性を確認する目的で行われることが多い。衝撃荷重の負荷は、一般に、重錘の自由落下あるいは高圧ガス・ばねの弾性エネルギーにより重錘等を試験体に衝突させて行う方法が用いられている。この実験では、衝突によって発生する応力波や慣性力およびひずみ速度等の影響が混在するため、実験の結果から材料の動的特性を把握することは困難である。

構造部材（はり，板など）あるいは材料（コンクリート，鋼など）に生じる変形と抵抗力（応力とひずみ）に及ぼす動的効果（ひずみ速度効果）を調べるために、急速載荷試験が行われる。この試験は、載荷治具を試験体に接触させた状態から、油圧またはガス圧等を利用して急速に治具を変位させ、試験体に急速荷重を負荷するものである。負荷速度の大きさに応じて、概ね、低速（0.1m/sec以下）・中速（0.1～1.0m/sec）および高速（1.0m/sec以上）の3段階に区分している。例えば、載荷速度が4.0m/secの場合は、高速度急速載荷試験（便宜上、高速載荷試験）と呼んでいる。

## 2. 3 載荷速度とひずみ速度の相違

載荷速度とは、急速載荷試験における載荷治具の変位速度である。載荷治具によって強制変位される結果、部材・材料は強制的な変形が生じる。このとき変形する部材・材料の速度が、変形速度またはひずみ速度と呼ばれる。載荷速度および変位速度はm/sec等の単位で、ひずみ速度は1/secの単位で表される。なお、載荷速度とひずみ速度の大きさは必ずしも1対1には対応しない。

## 2. 4 載荷速度の設定

衝撃外乱の事象ならびに載荷速度とそれによって被衝突体である鉄筋コンクリート構造物の構成材料に生ずるひずみ速度を概略関連付けたものを表-2.1に示す<sup>1)</sup>。この表から、土木・建築分野において対象となる衝撃問題に対応するひずみ速度は $10^{-1}$ ～ $10^2$ (1/sec)程度の範囲にあることがわかる。本論文では、このことを踏まえ、また後述する急速載荷装置の性能上の制約を考慮して表-2.1に表示したひずみ速度レベルに対してコンクリートの動力学的特性を明らかにすることを目的としている。第3章および第4章の急速一軸引張載荷試験では、ひずみ速度が $2 \times 10^{-6}$ (1/sec)を静的載荷、 $10^{-3}$ (1/sec)オーダーを低速載荷、 $10^{-2}$ (1/sec)オーダーを中速載荷、 $10^{-1}$ (1/sec)オーダーを高速載荷とそれぞれ称している。また同様に、第5章および第6章の急速一軸およ

表-2.1 衝撃現象の特性

載荷・衝突速度 (m/sec)	0	10 <sup>0</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>											
衝撃現象 (衝撃外乱)		波浪・地震動 船舶の衝突 キャスク・重量物の落下 土石流・落石 車両の衝突 タービンミサイルの衝突 航空機の衝突		危険物の爆発 (油, LNG, 火薬, ガス)												
ひずみ速度 (1/sec)	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	
試験法																
本論文における 載荷速度区分																

び三軸圧縮載荷試験では、ひずみ速度が  $1.2 \times 10^{-6}$  (1/sec) を静的載荷、 $10^{-2}$  (1/sec) オーダーを低速載荷、 $10^{-1}$  (1/sec) オーダーを中速載荷、 $10^0$  (1/sec) オーダーを高速載荷とそれぞれ呼んでいる。

## 2. 5 コンクリートの動力学的特性に関する試験方法

表-2.1 に示したように土木・建築分野で対象とする衝撃外乱によって、鉄筋コンクリート構造物の主構成材料であるコンクリートのひずみ速度は  $10^{-1} \sim 10^2$  (1/sec) 程度に達すると考えられる。この範囲のひずみ速度下におけるコンクリート材料の力学的特性を調べるために既往の実験的研究では種々の載荷装置が開発され使用されている。これらの載荷装置は、供試体への負荷方式の違いによって衝撃力載荷方式と急速載荷方式の2つに大きく分類できる。以下に、それぞれの載荷方式の特徴を述べるとともに、それらに属する載荷装置の説明を行う。

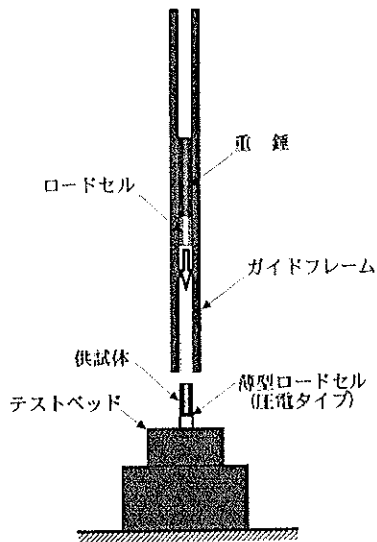


図-2.1 重錘落下型衝撃载荷装置

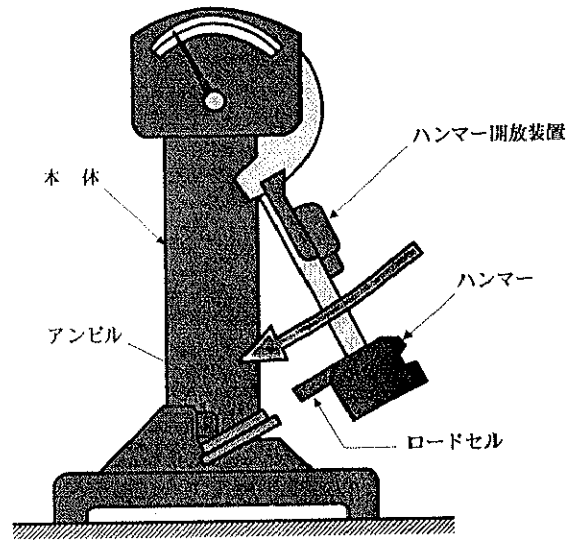


図-2.2 シャルピー試験装置

### 2. 5. 1 衝撃力载荷方式

衝撃力载荷方式は、ある程度の質量を持った物体(衝突体)を供試体に衝突させて衝撃荷重を負荷することによって大きなひずみ速度を供試体に作用させるもので、重錘落下型衝撃载荷装置、シャルピー試験装置および Split-Hopkinson Pressure Bar 装置(以後 SHPB 装置と呼ぶ)等がある。この载荷方式では、物体を供試体に衝突させるために応力波や慣性力の影響が問題となる。すなわち、この種の载荷装置を用いて得られた試験結果には、応力波、慣性力および速度効果等の影響が混在するため、コンクリートの力学的特性に载荷速度が及ぼす影響を定量的に評価するためには適切な実験上の配慮やデータ処理等を行わなければならない点に注意する必要がある。

続いて、この载荷方式に属する载荷装置の概要を述べる。

#### (1) 重錘落下型衝撃载荷装置<sup>2)~5)</sup>

重錘落下型衝撃载荷装置は、質量 50~200kg 程度の重錘をある高さから自由落下させ供試体に衝撃力を加える装置である。2~6m 程度の落下高さで 6~10m/sec 程度の衝突速度が得られ、供試体には最大で  $1 \times 10^4$  (1/sec) 程度のひずみ速度まで加えることが可能とされている。供試体の衝突面にゴム等の緩衝材を挿入して衝撃力の継続時間を調整することで载荷速度を変えている実験も見られる<sup>4)</sup>。この载荷方式は、単純かつ安価であることが最大の利点である。

図-2.1 に Perry と Bischoff がコンクリートの圧縮試験に用いた重錘落下式衝撃载荷装置を示す<sup>2),3)</sup>。この種の载荷装置は、図にも見られるように確実に供試体に衝撃力を加えるためにガイドレールを備えているのが一般的である。彼らは、重量 78.3kgf の重錘を高さ 5m 程度のところから落下させ  $10^0$  (1/sec) オーダーのひずみ速度を得て

いる。重錘落下型の載荷装置では、応力波や慣性力の影響が無視できなくなるために、供試体の変形あるいはひずみを計測する位置と荷重を計測する位置は極力近いことが望まれる。そこで、彼らは独自に考案した極めて薄型の圧電材料を用いたロードセルを試作し供試体の直下に設置して試験を行っている。

### (2) シャルピー試験装置

シャルピー試験装置は、従来から金属材料などの衝撃試験に広く使用されている。この装置は、振り子の振り下ろし高さ、試験体に衝突後振り子がどの高さまで振り上がるかを計測することにより材料の破壊時における吸収エネルギーが簡単に求められることが特徴である。最大衝突速度は、数 m/sec 程度までとされている。

図-2.2 に Mobasher と Shah が繊維補強コンクリート梁の3点曲げ載荷に用いたシャルピー試験装置を示す。振り子の質量は不明であるが衝突速度 1.3m/sec で 0.5(1/sec)程度のひずみ速度を得ている。

### (3) Split - Hopkinson Pressure Bar 装置<sup>7)~9)</sup>

SHPB 装置は、図-2.3 に示すように供試体を非常に長い入力棒と出力棒の間に挟み、ガスやゴムばね等によって加速された打撃棒によって衝撃力を入力棒の左端に作用させることで弾性パルス波を励起させ、この弾性パルス波を供試体に作用させることで極めて大きなひずみ速度[ $10^1 \sim 10^3(1/sec)$ 程度]を供試体に加えることができる装置である。一般に、供試体に作用する応力ならびに供試体のひずみは、入力棒・出力棒にそれぞれ貼付したひずみゲージによって入射波・反射波および透過波をそれぞれ計測し、一次元の波動理論を適用することによって求めている。この方法では、入力棒・出力棒の直径を大きくすると波動の3次元分散効果によって半径方向の変位分布が一樣でなくなり一次元の波動理論が適用できなくなるため、一般には直径 50mm 程度の入力棒・出力棒が用いられている。よって供試体の直径も 50mm 程度に制限されることから、コンクリートの最大粗骨材寸法は 10mm 程度が限界となる。供試体の応力とひずみは、供試体中を応力波が数回往復した後にはほぼ一樣になるような状態が理想とされる。そのため供試体の長さは短ければ短いほど良いとされる。しかしながら、コンクリートのような脆性材料の場合、端面摩擦の影響を顕著に受けるのでこの点を考慮して供試体の長さは入力棒・出力棒の直径と同程度にしているものが多い。

図-2.4 に白井ら<sup>9)</sup>が開発した高速載荷試験装置を示す。この載荷装置は油圧式の急速載荷装置と SHPB 装置の2種類の載荷方式を有している点が特徴である。供試体への負荷は、比較的ひずみ速度の小さい領域[ $10^{-3} \sim 10^{-1}(1/sec)$ ]では油圧式の急速載荷装置によって、大きなひずみ速度の領域[ $10^0 \sim 10^2(1/sec)$ ]では SHPB 装置によってそれぞれ行われる。一次元の波動理論を適用する場合、入力棒・出力棒の直径は 50mm 程度が限界とされているが、白井らは打撃棒と入力棒の間に緩衝材を入れることで入射波を凸状の滑らかな波形とした結果、直径 100mm という比較的大きな入力棒・出力

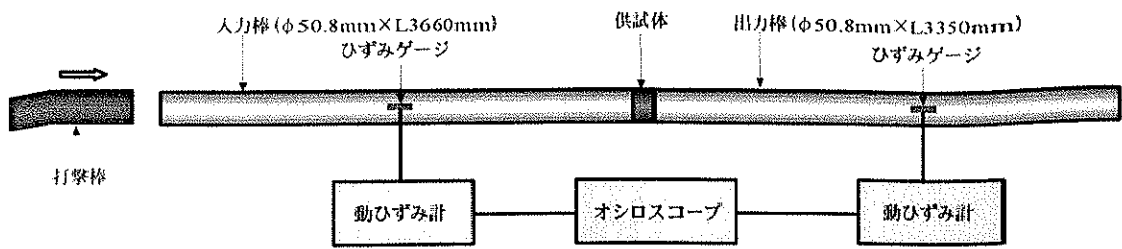


図-2.3 SHPB装置

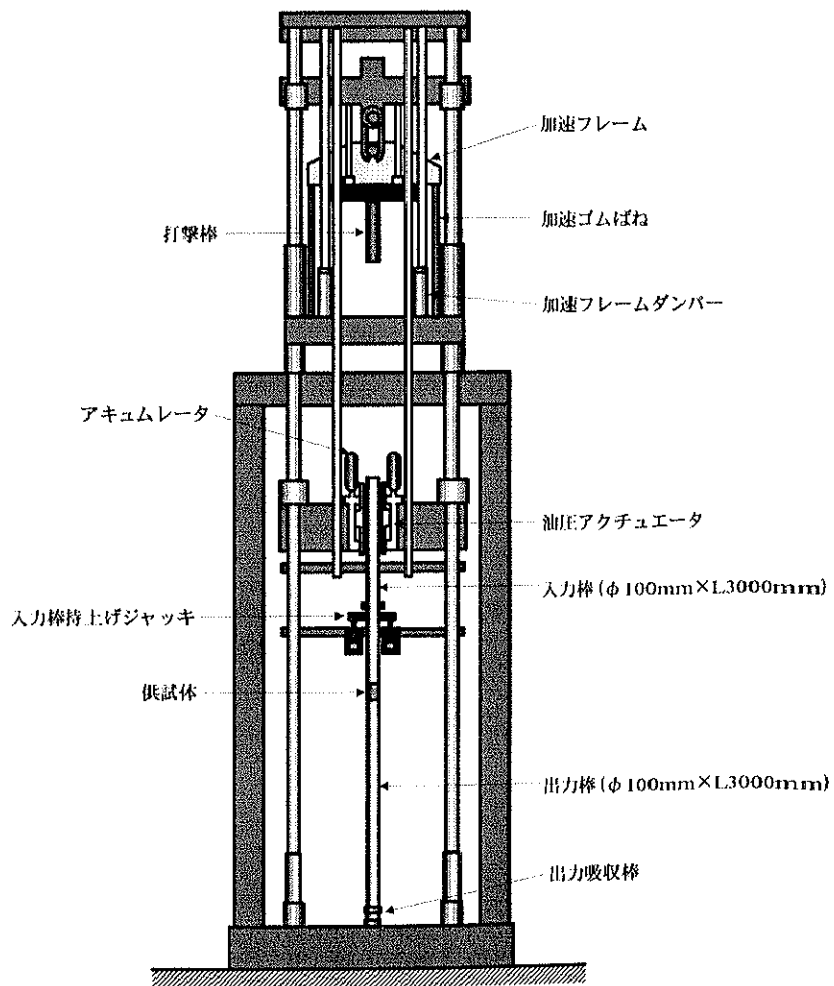


図-2.4 白井らが開発したSHPB装置

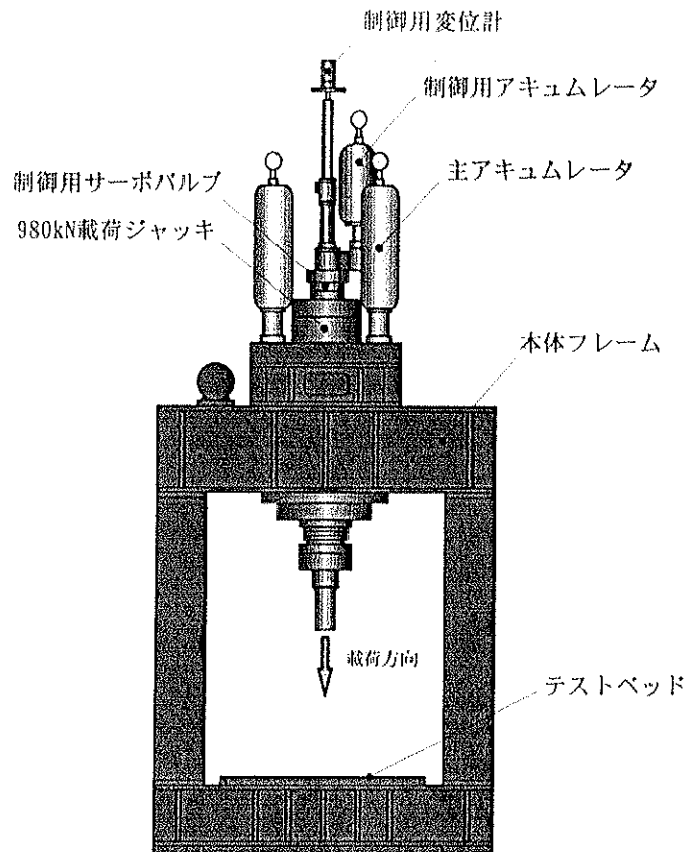


図-2.5 980kN急速載荷試験装置の概要

棒内の面内変位分布を一様にすることに成功している。これによって SHPB 装置ではこれまで不可能とされてきた大きさの供試体(直径 100mm, 高さ 100mm の円柱供試体)を用いた試験を可能にしている。現在、この載荷装置は世界的にみても最も広範囲なひずみ速度に渡ってコンクリート材料の動的試験を行うことのできる装置である。

## 2. 5. 2 急速載荷方式

急速載荷方式は、油圧アクチュエータを用いてサーボ制御あるいはフライホールの回転慣性を利用した機械的制御により供試体を定速度で強制変形させるものである。通常、この種の載荷装置ではアクチュエータを高速で動作させるためにアキュムレータと呼ばれる蓄圧器を装備している。一般にこの方式の試験装置は、急速載荷試験装置(Rapid loading machine)と呼ばれている。急速載荷方式では、載荷のための治具(載荷棒)を供試体に接触させた状態から油圧によりある速度で荷重を作用させるために、載荷時に応力波の発生が比較的少なく慣性力の影響も小さいことが特徴として上げられる<sup>10)</sup>。衝突によって生じる応力波や慣性力の影響を分離して、コンクリート材料に生じる変形と抵抗力に及ぼす載荷速度の効果を調べることを目的とした場合には最良の試験装置であると言える。ただし、急速載荷装置によって供試体に加えることがで

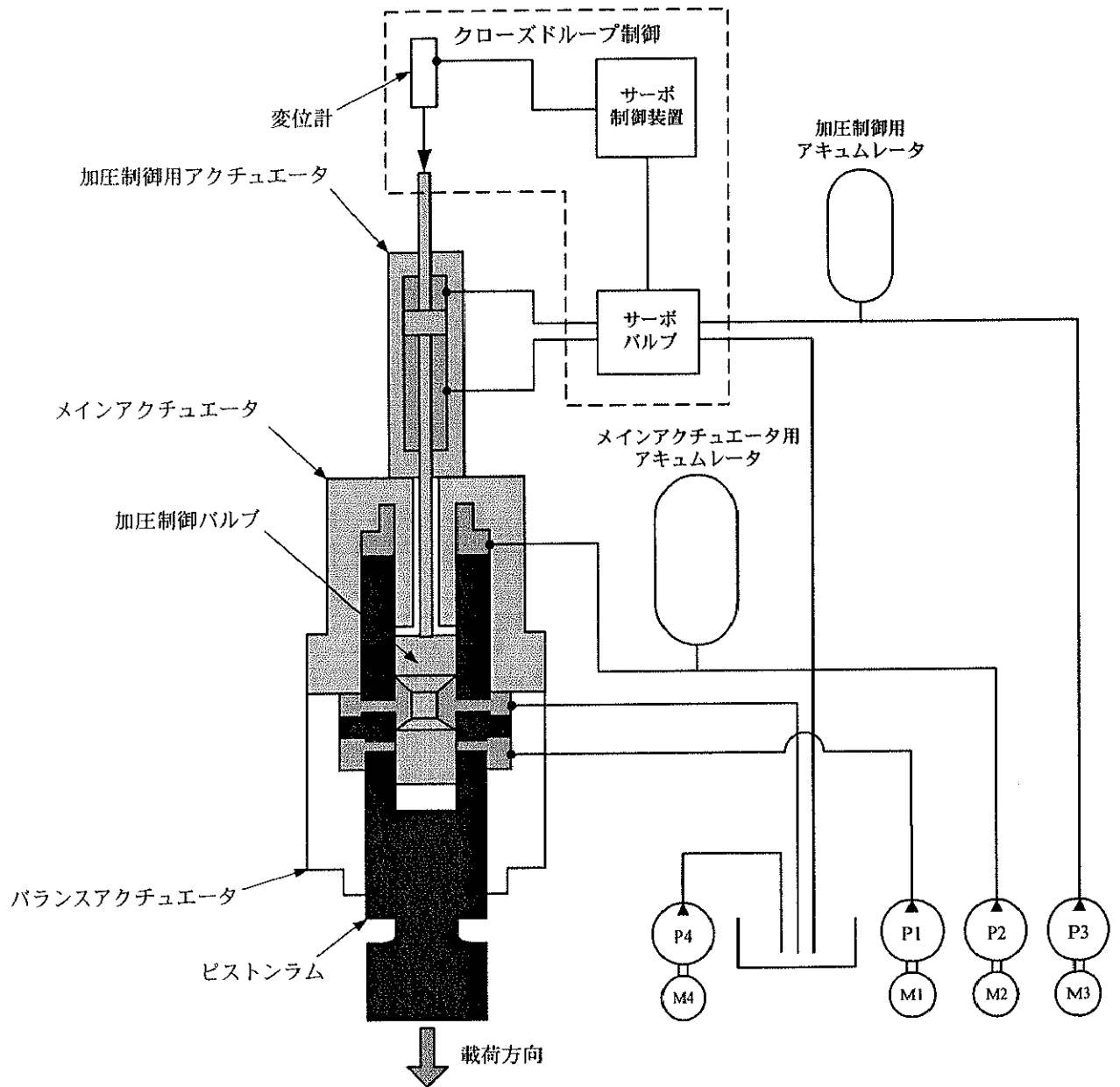


図-2.6 急速载荷装置の作動原理

きる最大ひずみ速度は  $10^0$  (1/sec)オーダーが限界である。本論文中の各種試験には、この急速载荷装置を用いている。

## 2. 6 急速载荷装置の作動原理

本論文では、コンクリートの動的圧縮・引張特性を調べるための試験に荷重容量 490kN、最大载荷速度 4m/sec の急速载荷装置と荷重容量 980kN、最大载荷速度 4m/sec の急速载荷装置を用いている。両装置の作動原理は、概ね類似しているのでここでは荷重容量 980kN の急速载荷装置を例に取り、その作動原理を示す。



荷重容量 980kN の急速載荷装置を図-2.5 に示す。急速載荷装置は、本体フレーム、980kN 載荷ジャッキ、制御用サーボバルブ、アキュムレータ、油圧ポンプユニットおよび載荷制御装置等から構成されている。

980kN 載荷ジャッキの作動原理を図-2.6 に示す。載荷ジャッキは、メインアクチュエータ、バランスアクチュエータおよび加圧制御用アクチュエータの3つから組み立てられている。急速載荷の載荷機構は、載荷開始前にメインアクチュエータの荷重(980kN)をバランスアクチュエータで保持させ、載荷時にはクローズドループ方式でサーボ制御された加圧制御用アクチュエータによって加圧制御バルブを一定速度で作動させ、バランスアクチュエータの油圧を抜くことによって所定の速度で急速載荷するものである。

【第2章の参考文献】

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，pp.57-73，1993.12.
- 2) Perry, S. H. and Bischoff, P. H. : Measurement of the compressive impact strength of concrete using a thin loadcell, Magazine of Concrete Research, Vol.42, No.151, pp.75-81, June, 1990.
- 3) Perry, S. H. and Bischoff, P. H. : Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression, Journal of Engineering Mechanics, Vol.121, No.6, pp.685-693, June, 1995.
- 4) Watstein, D. : Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete, ACI J., Vol.49, pp.729-744, 1953.
- 5) Hughes, B. P. : Concrete subjected to high rates of loading in compression, Magazine of Concrete Research, Vol.24, No.78, pp.25-36, March, 1972.
- 6) Mobasher, B. and Shah, S. P. : Test parameters for evaluating toughness of glass-fiber reinforced concrete panels, ACI Materials Journal, V.86, No.5, pp.448-458, Sep.-Oct., 1989.
- 7) Ross, C. A., Tedesco, J. W. and Kuennen S. T. : Effects of strain rate on concrete strength, ACI Materials Journal, V.92, No.1, pp.37-47, Jan.-Feb., 1995.
- 8) Zielinski, A. J. and Reinhardt, H. W. : Impact stress-strain behavior of concrete in tension, Proc. of Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, RILEM,CEB,IABSE,IASS Int. Symp., Berlin, pp.112-124, June, 1982.
- 9) 白井孝治，島村和夫，實晃司，伊藤千浩，大沼博志：コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化－ホプキンソン棒法式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果－，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1793-1804，1998.3.
- 10) 竹田仁一，立川博之，藤本一男：コンクリートと衝撃－衝撃を受けるコンクリートの性状と実験－，コンクリート工学，Vol.14，pp.1-11，April,1977.