

コンクリート供試体の下降域を含む荷重-変位曲線の 自動計測システム

AUTOMATIC MEASURING SYSTEM OF LOAD-DISPLACEMENT CURVES INCLUDING POST-FAILURE REGION OF CONCRETE SPECIMENS

小柳 治*・六郷恵哲**・大野定俊***

By Wataru KOYANAGI, Keitetsu ROKUGO and Sadatoshi ŌNO

A stiff testing machine is generally used to measure load-displacement curves having falling branch of concrete specimens. However, when the failure of specimens is unstable (uncontrollable), the stiff testing machine is insufficient to measure the load-displacement curves having falling branch. In this paper, the unstable failure of specimens was discussed from viewpoint of catastrophic theory, and a new system to measure automatically the load-displacement curves having falling branch was proposed. The load-displacement curves of compressive specimens ($\phi 10 \times 20$ cm) of high strength concrete and high strength light-weight concrete were measured by the new system.

1. ま え が き

従来コンクリートの力学的性質は圧縮強度で代表されてきた。その大きな理由の1つは、セメントペーストで骨材を結合したコンクリートというものの材料特性の範囲が鉄鋼材料などに比してかなり狭いものであったこと、もう1つはコンクリート構造部材の設計においては許容応力度設計で、しかも圧縮強度を利用することが中心であったことによるものと考えられる。しかしながら、最近では軽量コンクリートを始めとして圧縮強度が1000 kgf/cm²(約100 MPa)をこえる高強度コンクリート、鋼繊維補強コンクリート、レジンコンクリートなど、種々の性能をもつコンクリートが開発されてきたことにより、これら種々のコンクリートの性能評価のうえでは、圧縮強度あるいはその他の強度特性を考えるだけでは不十分であり、変形特性あるいは靱性の評価が必要となっている。また、コンクリート部材の設計においても、限界状態設計法の採用もあって、部材の終局破壊に至るまでの逐次的な過程を明確にする必要が生じ、最大耐力点

に至るまでのみならず下降域を含むコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係、より一般的には下降域を含むコンクリート圧縮供試体の荷重-変位関係を計測する必要性が生じてきた。この最大耐力点以後の荷重変位曲線の形状は、供試体内部の局所的な破壊域の広がりによって支配されるため、材料特性だけでなく供試体寸法の影響を大きく受けると考えられる^{1),2)}。

コンクリートの下降域を含む荷重-変位関係を求めるうえで剛性試験機が一般に用いられるが、供試体の破壊が不安定となる場合には剛性試験機を使用するのみでは不十分であり、加力エネルギーの低減を含めた調節による適切な破壊現象の制御が必要であることが明らかにされている¹⁾⁻³⁾。なお、本研究においては、安定な破壊とは載荷試験時の制御が可能な破壊を意味し、不安定な破壊とは制御が不可能な破壊を意味する。

上記の加力エネルギーの調節を手動によって行い下降域を含む荷重-変位曲線を計測した結果はすでに報告しているが^{1),2)}、通常の試験において供試体が爆裂するような高強度コンクリートにおいても、加力エネルギーの調節による載荷を行えば供試体の破壊時の爆裂飛散が生じないため、試験者に対して危険がなくきわめて安全な方法であり、また供試体の爆裂に伴う試験機への衝撃的な力の作用や試験機周辺への供試体破片の飛散の影響を

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 竹中工務店技術研究所
(〒136 東京都江東区南砂2-5-14)

なくすることができる。加力エネルギーの調節を手動で行うことは可能であるが、若干の熟練度を必要とするため、自動計測システムの開発が重要となる。

本研究は、圧縮強度試験を対象として破壊現象の安定性についてカタストロフィー理論の観点から考察するとともに、これに基づいて下降域を含む荷重-変位曲線を確実にかつ安全に自動計測するシステムの開発について述べたものである。また、この開発されたシステムを用いて、高強度コンクリート供試体の荷重-変位曲線を計測した結果を示し、計測方法の妥当性と有利性について検証したものである。

2. 破壊現象の安定性とその計測

(1) 荷重方法と不安定破壊

コンクリート供試体の圧縮荷重試験において、最大耐力点以後に爆裂現象のような不安定な破壊が起こる場合について考えてみる。コンクリート供試体は1つの構造系と考えられ、破壊の安定性には材料特性ばかりでなく供試体寸法などの要因も影響を及ぼすものである^{1)~3)}。

本報告の自動計測システムの開発の意義を明確にする意味で、著者らが先に示した論議¹⁾を含めて破壊の安定性について概要を述べる。ここでは油圧式の試験機を対象として述べるが、他の形式の試験機でも基本的な概念は変わらない。

通常の油圧式荷重試験機は、油の吐出量を調節してラムを動かすことにより荷重するものである。このような試験機で荷重速度を一定にするような制御方法を行うとすると、供試体の荷重-変位曲線上に最大耐力以上の荷重点が存在しないので、試験機の油の吐出量を最大にしても、荷重速度は最大耐力点で零となる。このため、荷重制御による荷重試験では、どのようなコンクリート供試体でも最大耐力点で爆裂するはずである。

変位速度を一定とする制御方式による荷重試験では、試験機剛性が破壊の安定性に関与する。周知のように、荷重時には供試体同様、試験機にも油の圧縮性やフレームの弾性に起因する変位が生ずる。油の吐出量を増減して変位速度を一定とする制御方式では、両者の和を制御

していることになる。供試体変位および試験機変位と荷重の関係を図-1に示す。最大耐力点のM点までは試験機剛性の大きさにかかわらず、供試体変位と試験機変位の和 δ_{mH} 、または δ_{mL} は単調に増加する。最大耐力点以後の供試体の剛性よりも大きな試験機剛性をもつ試験機では、 δ_{mH} は曲線Aのように最大耐力点以後も単調に変位が増加し続けるので、変位制御方式によれば下降域を含む荷重-変位曲線の計測が可能となる。しかし、試験機剛性が最大耐力点以後の供試体剛性よりも小さい場合には、 δ_{mL} は最大耐力点の直後を極大値として一度減少し、曲線Bのような形状となる。このため、油の吐出量を調節して正の方向（荷重方向）の変位を制御する方法では、荷重-変位曲線を計測することはできず、最大耐力点で供試体はやはり爆裂する。

ところで、上述のような変位制御方式でかつ試験機剛性がきわめて高い場合でも、荷重-変位曲線を計測できない場合がある。すなわち、供試体自身の荷重-変位曲線が試験機剛性のいかににかかわらず図-1の曲線Bのような形状となる場合である。著者らは、図-2に示すように、最大耐力点以後、荷重除荷の操作を手動で繰り返し、破壊に消費されるエネルギーを制御する方法により、曲線Bの形状の荷重-変位曲線の例をいくつか報告している。図-3は、断面：7.5×7.5 cm、荷重スパン長：30, 60, 90 cmのモルタル曲げ供試体（圧縮強度 $\sigma_c=45$ MPa）の荷重-変位曲線の計測結果¹⁾を示したものである。荷重スパン長が長くなるにつれて最大耐力点以後に荷重も変位もともに減少する現象（曲線Bの形状）が顕著となった¹⁾。図-4は断面：7.5×7.5 cm、供試体高さ：7.5 (M-1), 15 (M-2), 30 (M-4), 45 (M-6) cmのモルタル圧縮供試体（ $\sigma_c=66$ MPa）の荷重-変位曲線の計測結果²⁾を示している。寸法比（供試体高さ／断面寸法）が6の場合（M-6）には、荷重-変位曲線が曲線Bの形状となった²⁾。

荷重スパン長あるいは供試体高さが大きくなっても、供試体の破壊は破壊域に集中するため、供試体の破壊に消費されるエネルギーはほとんど増加しない。一方、破壊の生じていない非破壊域に蓄えられる弾性ひずみエネルギーは著しく増加する。すなわち、荷重スパン長あるいは供試体高さが高くなると、供試体の破壊に必要なエ

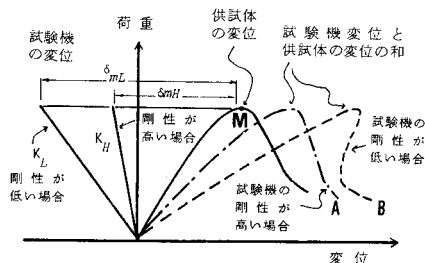


図-1 試験機剛性と供試体の荷重-変位曲線との関係

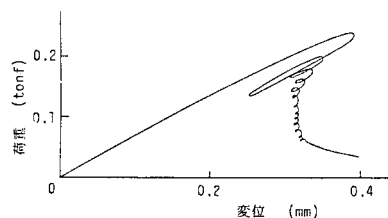


図-2 手動制御による荷重-変位曲線の計測例¹⁾

エネルギーに比べ、破壊の生じていない弾性域に蓄えられる弾性ひずみエネルギーが大きくなるため、最大耐力点以後に荷重も変位もともに減少する現象が顕著に現われてくる。

最大耐力点以後に荷重も変位もともに減少するような荷重-変位曲線の計測は変位速度を制御する方法では計測できない。Hudson, Crouch, Fairhurst²⁾らは破壊に対し単調に増加する他の現象量を取り出し、これを制御すれば下降域を含む荷重-変位曲線が得られると説明している。彼らはクローズドループ・サーボコントロール方式の試験機を用いて、岩石の圧縮供試体では横ひずみを、曲げ供試体ではひびわれの開口変位をフィードバック信号として、この種の荷重-変位曲線を得ている。著者らの研究では、破壊現象に伴う単調増加信号としてAE発生累積頻度数や消散エネルギー量が有効であることを明らかにしている¹⁾。

(2) 破壊の安定性と制御方法

最大耐力点以後に爆裂現象のような不安定な破壊が生じるのは、前節で述べたように(1) 載荷方式が荷重制御である場合、(2) 載荷方式が変位制御方式で、最大耐力以後の供試体の剛性よりも試験機剛性が小さい場合、(3) 試験体の系の破壊に必要な全消散エネルギーに比べ、破壊の生じていない弾性域に蓄えられる弾性ひずみエネルギーが大きくなる場合と考えられる。(1)および(2)に対しては試験機剛性を高めた変位制御方式を採用することによって、また(3)に対しては、破壊現象に伴って単調増加する信号をフィードバック信号として試験機の油圧を制御することにより不安定な破壊現象を回避することができる。

本節では、下降域を含む荷重-変位曲線を計測するための実用的な方法について検討するため、カタストロフィー理論⁴⁾の観点から考察することにする。荷重-変位曲線の下降域の形状に影響を与える要因としては、前述のように供試体の弾性域に蓄えられる弾性ひずみエネ

ルギー W_e や系の破壊に必要な全消散エネルギー W_d などが考えられる。このほかにも種々の要因が荷重-変位曲線の形状に影響を及ぼすが、破壊の安定性を一義的に表わすうえで供試体の系の破壊に必要な全消散エネルギー W_d に対する供試体の健全な部分に蓄えられる弾性ひずみエネルギー W_e の比 W_e/W_d が指標として有用である。 W_e に対して、試験機に蓄えられる弾性ひずみエネルギーを含めて考えれば、試験機剛性の問題を同時に考慮することも可能である。

いま、X軸に変位、Y軸に荷重、Z軸に W_e/W_d をとって表わした荷重-変位曲面の概念図を図-5に示す。以下、荷重-変位曲面を曲面 M_F とよぶ。 M_F はQ点でスカートのひだのように折れ曲がっており、 W_e/W_d がQ点より大きい位置では、荷重-変位曲面は最大耐力点以後に荷重も変位も減少する領域をもっている。曲面 M_F には荷重と変位という2つのコントロール点が存在するので、曲面 M_F 上には折り目およびクサビのカタストロフィーとよばれる2種類の不連続現象が出現することが知られている。折り目のカタストロフィーは荷重制御によって載荷試験を実施したときに現われる不安定現象に相当する。一方、クサビのカタストロフィーは W_e/W_d がQ点の値より大きくなるような供試体、もしくは材料を用いて、変位制御によって載荷試験を実施したときに現われる不安定現象に相当する。

次に、X軸、Z軸に平行な平面 R^2 をとり、この平面をコントロール平面とよぶことにする。変位速度を一定とするような載荷方法は、 R^2 平面上、変位軸と平行な直線上をコントロール点 e が正方向に一定速度で移動することに一致している。 W_e/W_d の値がQ点の値より小さい範囲では、コントロール点 e の変化に対して、対応する曲面 M_F 上で不連続な現象が生じないが、 W_e/W_d の値がQ点より大きくなるとコントロール点は $A'Q'B'$ で囲まれるクサビ形の領域を横切ることになり、このと

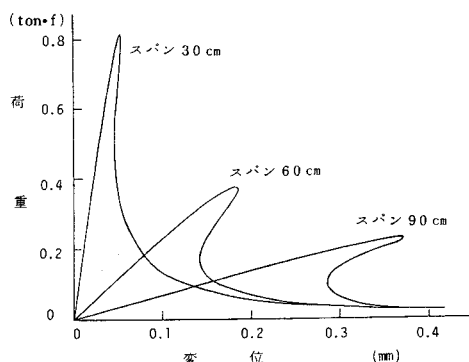


図-3 モルタル曲げ供試体の荷重-変位曲線¹⁾

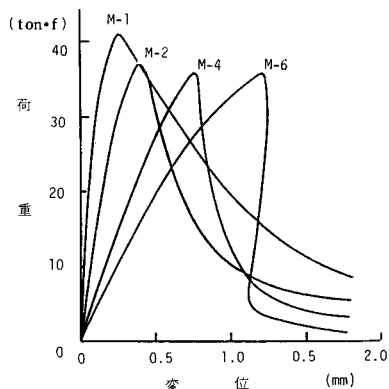


図-4 モルタル圧縮供試体の荷重-変位曲線²⁾

き荷重-変位曲面 M_F 上では不連続な現象が生ずる。すなわち、コントロール点 e が R^2 平面上で正の方向に移動し、 $B'Q'$ 線上に達すると、対応する M_F 曲面上の点は b 点に位置することになり、それ以上コントロール点が移動すると、 M_F 曲面上でコントロール点に対応すべき連続な点が存在しなくなる。このため、 M_F 曲面上では b 点から c 点への不連続な変化が起こる。これは、破壊現象が急激に進行することを意味しており、これによって供試体の爆裂、飛散等の現象が生じる。

荷重-変位曲面 M_F 上で不連続な点の移動を生じさせないためには、 $A'Q'B'$ で囲まれるクサビ形の不連続領域が現われないコントロール平面上にコントロール点を置くことが考えられる。その1つの方法が破壊に対し単調増加する新たな変量を取り、この変量と平行に位置する平面をコントロール平面とする方法である。

図-5のコントロール平面 R^2 を W_e/W_d 軸を中心として回転することによっても、クサビ形の不連続領域が出現しないコントロール平面 $R^{2'}$ が得られる。この方法は、載荷試験時に計測する変量が従来の制御方法と同様、荷重と供試体の軸方向変位のみでよいという点で実用的であると考えられる。 R^2 平面について、もう少し簡単に説明するため W_e/W_d を一定値とすると、この問題は2次元問題に帰着する。図-6に示すように、最大耐力点以後に荷重も変位も減少する荷重変位曲線を、変位軸に平行な直線上のコントロール点で制御すれば、最大耐力点で不連続な変化が起こる。しかし原点を中心として時計回りに x 軸、 y 軸を θ だけ回転させるような座標変換を行った後、コントロール点を新座標軸 X に平行にとると、コントロール点の正方向の増加に対し荷重-変位曲線は1対1に対応するので不連続な現象は生じな

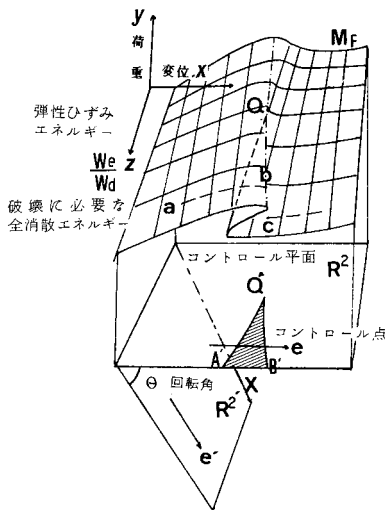


図-5 荷重-変位曲面とコントロール平面

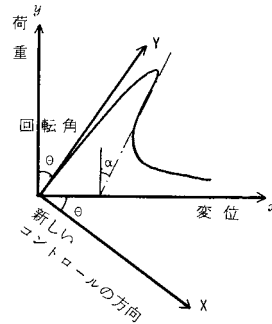


図-6 荷重-変位曲線の座標変換

い。新座標軸への座標変換は次式によって表わされる。

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x : 変位、 y : 荷重、 θ : 回転角、 X, Y : 座標変換後の新しい座標系、 X は新しいコントロール変数となる。

なお、 θ の大きさは図-6に示す荷重-変位曲線の下降域における接線と y 軸のなす角度 α より大きくする必要があり、しかし、初期接線の傾きを s (荷重/変位) とすると、 α が $\tan^{-1}(1/s)$ より通常は大きくならないので、 θ は $\tan^{-1}(1/s)$ の値を超えない範囲で、これになるべく近い値とするのが実用的である。

新しく制御すべきコントロール信号は式(2)中の X の値として表わされるが、 θ は荷重-変位曲線の形状に応じて定められるので、 X は変位 x から荷重 y の定数倍を差し引いた値となる。よって、実際には変位と荷重の差信号をフィードバック信号とするサーボ制御方式の試験機を用いることにより、あるいは、他の方法で X の値が単調増加となるようにシリンダー内の油量を調節することにより、完全な荷重-変位曲線の計測が可能になる。

3. 荷重-変位計測システム

本試験には閉回路機構(クローズド・ループ)を有するサーボ制御方式の油圧試験機(島津製作所製)を用いた。本試験機は動的な試験も可能であり、容量は動的試験時は100 tf、静的試験時は200 tfである。試験機のブロック図を図-7に示す。試験機は図-7に示すように、アクチュエータ部、コントロール部、油圧源およびデータ処理装置に分けることができる。コントロール部分は電源装置のほか、荷重や変位等の測定機器のアンプ、フィードバック信号の選択部、プログラム信号の生成装置等が組み込まれている。油圧源の最大吐出能力は250 kgf/cm²(約25 MPa)、吐出量は51 l/minである。データ処理部はマイクロ・コンピューターが用いられてお

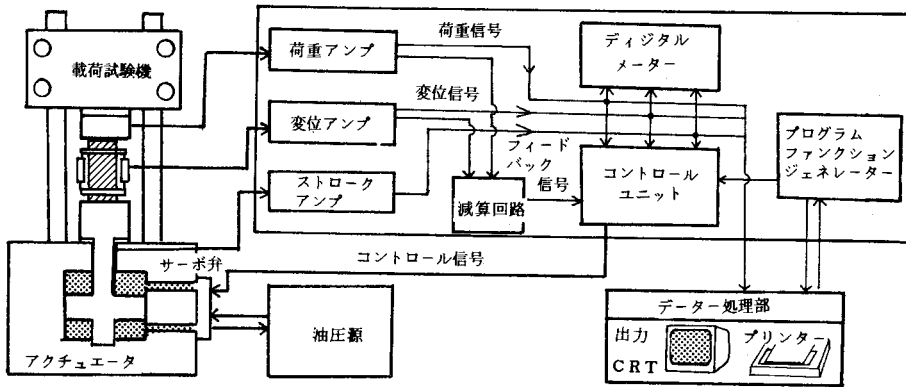


図-7 荷重-変位計測システムのブロック図

り、試験中に得られる荷重、変位等のアナログデータをAD変換して取り込み、CRTに荷重-変位曲線を出力するほか、任意のデータ処理が可能となっている。なお、データ処理部からもプログラム信号の切り換えや試験の停止など一部の制御が可能である。試験機のフレーム剛性は圧盤間隔300mmにおいて約200tf/0.45mmであり、普通コンクリート圧縮供試体の載荷試験ではラムの変位制御により下降域を含む荷重-変位曲線が計測できるような仕様となっている。

(1) 閉回路(クローズドループ)制御方式

サーボ試験機における閉回路機構の基本的概念を図-8に示す。閉回路機構とは図に示されるように、試験時に測定されるフィードバック信号とあらかじめプログラムされた信号とを比較し、それらの信号に差があれば常にその差をなくすように作動するシステムである。本試験機ではラムシリンダ内のピストンを上下させるためにアクチュエータにバルブが2つ付いた機構となっており、フィードバック信号とプログラム信号とに差があれば、サーボコントローラが作動することによりピストンが上下して調節するようになっている。

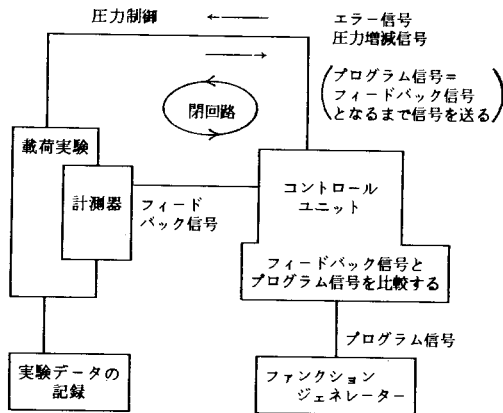


図-8 閉回路(クローズド・ループ)制御の概念図

(2) フィードバック信号

通常の載荷試験ではフィードバック信号として、ロードセルによって検出される荷重信号や、変位計によって検出されるラムあるいは供試体の変位信号が用いられる。本試験機はこれらの信号のほか、任意の外部信号がフィードバック信号として入力可能である。

最大耐力点以後に爆裂現象を生ずるような材料の荷重-変位曲線を安定して計測するためには、フィードバック信号として破壊現象に伴って単調増加する信号を与えればよい。本研究では2.で詳述したように変位と荷重の差信号をフィードバック信号として与える方法を採用した。

変位と荷重の差信号を得るには各種の方法が考えられるが、本研究では処理スピードと装置の関係から、アンプで増幅された荷重および変位の電気信号(電圧)を差動減算回路³⁾を用いてアナログ的に処理することにした。本試験機に組み込まれている荷重および変位アンプからの出力信号は±1V間の電圧変化として検出されるので、これらを上述の差動減算回路に接続すれば荷重および変位信号の任意の減算値が得られる。この減算値を外部入力の減算値として試験を実施した。

(3) プログラム信号

プログラム信号はフィードバック信号をコントロールする設定値を与えるもので、一定時間に直線増加するような設定をすれば定荷重制御や定変位制御が可能となり、正弦波等の設定をすれば繰り返し試験が可能となる。

本実験では載荷荷重の大きさに応じてフィードバック信号の増加速度を2~3段階に切り替える設定とした。すなわち、荷重が最大荷重の3分の1程度の弾性域と考えられる領域では、フィードバック信号の増加速度が $8 \times 10^{-4} \text{V/s}$ とし、それ以後の領域に対しては $2 \times 10^{-4} \text{V/s} \sim 4 \times 10^{-4} \text{V/s}$ 程度とした。実際の載荷速度はフィードバック信号の出力レベルにも依存するが、応力緩和やクリープの影響を極力避けることを考慮し、弾性域では

変位速度が約 $4 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ の値に、また最大耐力点近傍から下降域ではこの1~2倍の値に近くなるように設定した。

4. 荷重-変位曲線の計測

本章では、前章までに述べてきた下降域を含む荷重-変位曲線を計測するためのシステムの実際の性能を確認するとともに、圧縮試験において従来最大耐力以後の荷重-変位曲線の計測が困難であった高強度コンクリートおよび高強度軽量コンクリートの荷重-変位関係について検討した。また、得られた荷重-変位曲線をもとにして、下降域の形状およびエネルギー的な観点からコンクリートの破壊について考察した。

(1) 実験概要

高強度コンクリートおよび高強度軽量コンクリートを対象として荷重-変位曲線の計測を実施した。なお、ここで、試験時の含水状態、骨材の種類を主な要因として載荷実験を実施した。コンクリートの配合を表-1に示す。目標強度は高強度コンクリートが約 800kgf/cm^2 (約 80 MPa)、高強度軽量コンクリートが約 600kgf/cm^2 (約 60 MPa) である。試験時の含水状態の影響をみるため、試験材令まで水中養生したものと、一定期間水中養生した後、 20°C RH 60% の条件下に置いたものとの比較を行った。試験材令ならびに水中養生期間を表-1に示す。なお、配合 A, B の W/C と圧縮強度とは対応していないが、これは主として使用した骨材の種類と試験材令とが異なるためと考えられる。

圧縮試験の円柱供試体の寸法は $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ である。供試体の圧縮変位は供試体に直接取り付けられた検長 15 cm のコンプレッソメーター (差動トランス) によって計測した。

(2) 荷重-変位曲線の計測結果

本システムによって計測した高強度コンクリートおよび高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線の実測例をそれぞれ図-9、および図-10に示す。

変位と荷重の減算値をフィードバック信号とする本載荷方法では、圧縮強度が約 900kgf/cm^2 (約 90 MPa) の高強度コンクリートであっても最大耐力点で爆裂することなく、きわめて安全に荷重-変位曲線の計測ができた。なお、比較のために、供試体に直接取り付けられた変位計の変位信号をフィードバック信号として、この変位速度が一定となるような制御方法によっても荷重-変位曲線の計測を実施したが、いずれの供試体も最大耐力点で爆裂した。このように供試体の変位速度を制御することにより、見掛けの試験機剛性を高めた方法によっても計測の困難な場合があるため、本システムの有利性が確認

ことなく、きわめて安全に荷重-変位曲線の計測ができた。なお、比較のために、供試体に直接取り付けられた変位計の変位信号をフィードバック信号として、この変位速度が一定となるような制御方法によっても荷重-変位曲線の計測を実施したが、いずれの供試体も最大耐力点で爆裂した。このように供試体の変位速度を制御することにより、見掛けの試験機剛性を高めた方法によっても計測の困難な場合があるため、本システムの有利性が確認

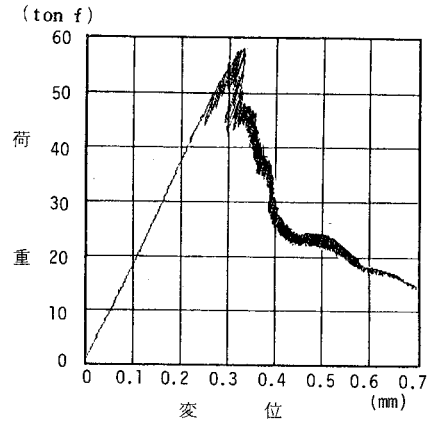


図-9 高強度コンクリートの荷重-変位曲線の実測例 (供試体 1 個)

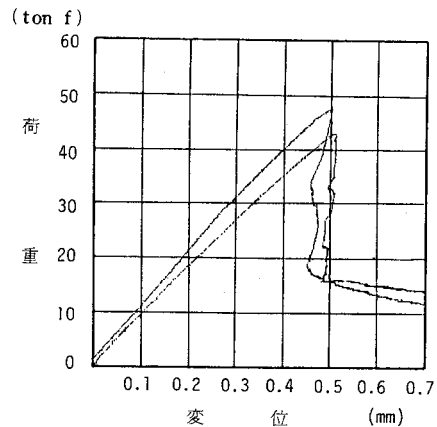


図-10 高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線の実測例 (供試体 2 個)

表-1 コンクリートの配合と強度

記号	種別	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m^3)	単位セメント量 (kg/m^3)	単位細骨材量 (kg/m^3)	単位粗骨材量 (kg/m^3)	単位高性能減水剤量 (kg/m^3)	水中養生期間 (日)		試験材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm^2)***	
									気乾状態	含水状態		気乾状態	含水状態
A	高強度コンクリート	28	38	154	553	647	1052	16.6	69**	89	90	986 [96.6]	849 [83.2]
B	高強度コンクリート	22.5	35	167	743	558	1004	18.8	7**	27	28	890 [87.2]	777 [76.1]
C	高強度軽量コンクリート	30	31	144	480	320*	568*	9.6	7**	27	28	630 [61.7]	603 [59.1]
D	高強度軽量コンクリート	30	31	144	480	513	568*	9.6	7**	27	28	551 [54.0]	580 [56.8]

* 軽量骨材を使用 ** その後試験材令まで気中 *** 3本の平均値を示す

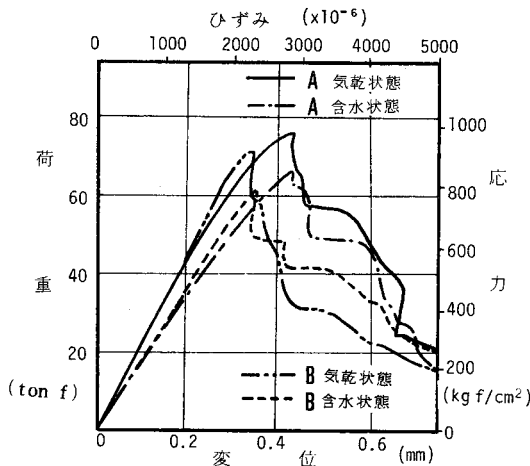


図-11 配合と含水状態が異なる高強度コンクリートの荷重-変位曲線 (1条件につき供試体1個)

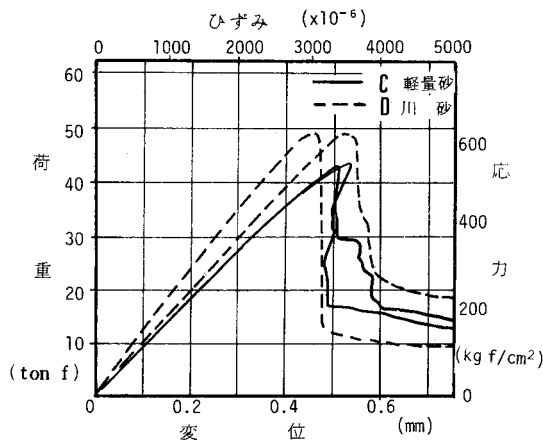


図-12 細骨材の種類が異なる高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線 (1条件につき供試体2個)

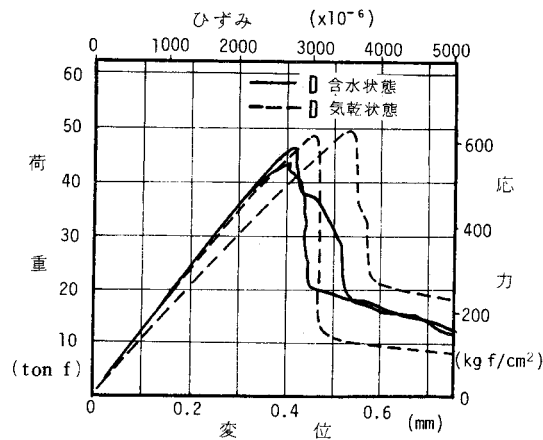


図-13 含水状態が異なる高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線 (1条件につき供試体2個)

された。

なお、高強度コンクリートの荷重-変位曲線において、荷重が高くなると、システムは自動的に載荷、除荷を繰り返しながら荷重-変位曲線を計測していることがわかる。繰り返しの荷重幅は制御信号の設定値、荷重レベル、供試体の材料特性に依存しており、供試体の破壊の進行速度とシステムの応答速度によって変わるものと考えられる。本研究では、この種の荷重-変位曲線に対しては、包絡線で示される曲線を荷重-変位曲線とした。供試体の破壊の進行と試験機の応答速度の関係等、載荷試験時における時間依存性の効果については今後の検討課題である。

図-11に配合と含水状態が異なる高強度コンクリートの荷重-変位曲線を示す。また図-12、図-13にそれぞれ細骨材の種類が異なる場合と含水状態が異なる場合に於て高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線を示す。高強度コンクリートの荷重-変位曲線は最大耐力点直後に荷重が減少するとともに、変位もわずかながら減少している。その後、徐々に耐力を失いながら変位が増加している。これに対し、高強度軽量コンクリートになると、最大耐力点直後に急激に耐力を失う。特に、粗骨材および細骨材ともに軽量骨材を使用したCでは、最大耐力点以後に荷重も変位もともに減少する曲線となった。

一方、試験時の供試体の含水状態の影響は、図-11、13に明らかなように気乾状態にある方が強度が高くなり、全消散エネルギー(荷重-変位曲線によって囲まれる面積で表わされる)もわずかに大きくなる傾向が認められる。しかし、最大耐力点以後の荷重-変位関係には大きな差は認められなかった。

最大耐力点以後に荷重も変位もともに減少するような荷重変位関係さえも自動計測が可能となったことにより、今後、荷重変位関係(あるいは応力ひずみ関係)をもとにした材料の靱性評価の手法が確立されるとともに、材料の靱性と部材あるいは構造物の靱性との関係が一層明確にされていくものと考えられる。

5. まとめ

本研究ではコンクリート供試体の載荷試験において、破壊の安定性とその制御との関係についてカストロフィー理論の観点から検討し、最大耐力点以後を含む荷重-変位関係を自動計測する実用的な方法を提案した。さらに、この自動計測システムの妥当性を検証するため、高強度コンクリートおよび高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線の計測例を示した。得られた結論を以下に示す。

(1) 載荷試験時のコンクリート供試体の不安定な破

壊現象は、供試体の弾性域に蓄えられる弾性ひずみエネルギー W_e と供試体の系の破壊に必要な全消散エネルギー W_d の比 W_e/W_d を指標として導入することにより、カタストロフィー理論によって説明された。

(2) 変位と荷重の差信号をフィードバック信号とする閉回路システムによる載荷方法を採用すれば、従来計測の困難であった最大耐力点以後に荷重および変位の両者がともに減少するような荷重-変位曲線を計測できることを破壊の安定性と制御方法に関する考察に基づいて、理論的に明らかにした。

(3) 上記の方法により、高強度コンクリートおよび高強度軽量コンクリートの荷重-変位曲線を計測した結果、最大耐力点近傍で供試体が爆裂飛散することなく、きわめて安全に下降域を含む荷重-変位関係が自動計測できた。

(4) 計測された高強度コンクリートおよび高強度軽

量コンクリートの荷重-変位関係は最大耐力以後に荷重も変位も減少する領域を含んでいた。

参 考 文 献

- 1) 小柳 治・六郷恵哲・内田裕市：コンクリートの破壊現象の安定性とその計測，コンクリート工学，Vol. 20, No. 6, 1982年6月.
- 2) 小柳 治・六郷恵哲・内田裕市：コンクリートの圧縮靱性，セメント技術年報，37, 昭和58年.
- 3) Hudson, J. A., Crouch, S. L. and Fairhurst, C. : Soft, Stiff and Servo Controlled Testing Machines, A Review with Reference to Rock Failure, Dept. of Civil and Mineral Eng. Univ. of Minnesota, 1971.
- 4) 野口 広：カタストロフィー，サイエンス社，昭和52年.
- 5) 北川一雄：オペアンプIC実験と工作マニュアル，オーム社，昭和49年.

(1984. 6. 8・受付)