

# 含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程 に関するエネルギー的考察

ENERGY APPROACH ON THE FRACTURE PROCESS OF CONCRETE  
IN COMPRESSION RELATED TO ITS WATER CONTENT

岡田 清\*・小柳 洽\*\*・六郷 恵哲\*\*\*

By Kiyoshi OKADA, Wataru KOYANAGI and Keitetsu ROKUGO

## 1. ま え が き

コンクリートのような多相材料の破壊に関する研究にはいわゆる微視的な立場と巨視的な立場がある。

いわゆる微視的な立場では、材料内部の微細な欠陥の周辺において、応力集中によって生ずる局部的な引張応力、引張ひずみ、あるいはエネルギーに注目し、これらの値が限界に達したときにひびわれは急速に伝播し系が破壊すると考えている。微視的な立場に立った、Griffith や Irwin らのきれつ伝播に対する力学的取り扱い、材料を等方均質な連続体と仮定して導かれている。したがって欠陥の大きさに比べ比較的均質な材料とみなしうるような材料では、引張応力下での不安定な脆性破壊の挙動の予測に対し、Griffith らの破壊仮説は役立つものである。

しかしながら、コンクリートは骨材や水和生成物や空隙などの種々の構成要素からなる多相材料であって、極度に不均質な材料である。また、コンクリートの圧縮破壊過程においては、単一ひびわれの伝播が系の崩壊に直接結びつくことは少なく、むしろ伝播したひびわれが拘束され、さらに新しい安定状態にはいるという過程を続けて崩壊にいたる場合が多いと考えられる。したがって、Griffith の示す概念は、コンクリートの破壊を取り扱う場合の出発点としては有効であるが、この概念をコンクリートの圧縮破壊過程の説明に直接適用することは困難である。

一方、いわゆる巨視的な立場では、材料の試験から得られる荷重と変位をそれぞれ系の断面積と長さで割って、みかけの平均応力と平均ひずみに換算し、平均応力、平均ひずみ、あるいはこれらから得られる平均エネ

ルギーによって破壊条件を表わしている。巨視的な破壊条件における平均応力（またはひずみ）は、材料を等方均質な連続体と仮定した場合の応力（またはひずみ）と同一となる。巨視的な取り扱いは、主としてコンクリートの系としての強度と関連づけられており、コンクリートに対して提案されている主な巨視的破壊仮説としては、最大主応力（またはひずみ）説、Mohr の破壊説、破壊曲面表示などがある。

しかし、コンクリートの圧縮破壊過程を把握するには、従来主として用いられている巨視的な平均応力や平均ひずみだけでなく、巨視的な平均エネルギーをもあわせて活用すべきであると考えられる。以下、本研究においては、巨視的な平均応力、平均ひずみ、ならびに平均エネルギーを、それぞれ単に、応力、ひずみ、エネルギーとよぶ。

コンクリートが崩壊にいたる過程において供試体に加えられる外力仕事は、ポテンシャルエネルギーとして供試体に蓄えられる回復性の弾性ひずみエネルギーと、内部ひびわれの進展や液相内の粘性摩擦などに消費される非回復性の損失エネルギーに変換されると考えられる。したがって、コンクリートに加えられた外力仕事は供試体内でどのように分配・消費されているかを調べることによって、エネルギーの変換過程としてコンクリートの破壊過程をとらえることが可能となる。

近年、剛性試験機の性能の向上に伴って、岩質材料についても最大耐力点以後の挙動が次第に明らかにされてきたが、特に上述したようなエネルギー的な立場に立って岩石の圧縮破壊過程を追跡した研究<sup>2)</sup>が行われるようになった。

一方、コンクリートの乾燥に伴う圧縮強度の増加や、持続荷重下での水分の移動に伴う変形などにみられるように、コンクリート中の水分はコンクリートの力学的挙動に対して影響をおよぼしている。

そこで、本研究においては、含水量の異なる数種のコ

\* 正 会 員 工 博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正 会 員 工 修 京都大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 学生会員 工 修 京都大学大学院博士課程

ンクリートについて、その圧縮破壊過程をエネルギー変換過程としてとらえることを試みる。

## 2. 実験概要

### (1) 実験計画

本実験は A シリーズならびに B シリーズからなる。A シリーズでは、コンクリートの圧縮破壊過程における弾性ひずみエネルギーと損失エネルギーの定量化の方法について検討する。B シリーズでは、乾燥方法と供試体の含水量が異なる 6 種類のコンクリートについて、力学特性を明らかにするとともに、弾性ひずみエネルギーと損失エネルギーの定量化を行い、損失エネルギーの内容について検討する。

### (2) 使用材料と配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材には砂岩砕石（比重：2.64，吸水率：0.67%，最大寸法：15 mm）を用い、細骨材にはセメント試験用標準砂（豊浦砂）を使用した。コンクリートの配合ならびにスランブを表-1 に示す。材令 28 日における目標圧縮強度が約 300 kg/cm<sup>2</sup> となるように配合を定めた。

表-1 配合とスランブ

| W/C (%) | S/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | スランブ (cm) |
|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|-----------|
|         |         | C                        | W   | S   | G    |           |
| 63      | 40      | 343                      | 216 | 698 | 1063 | 5         |

### (3) 供試体の作製と養生条件

供試体は直径 10 cm，高さ 20 cm の円柱供試体で、打設時の締固めは突棒で行った。打設供試体数は、A シリーズが 1 バッチ 60 個であり、B シリーズが 2 バッチ 120 個である。供試体は材令 1 日でセメントペーストによるキャッピングを行い、材令 2 日で脱型した。養生は、脱型後、材令 21 日まで 20°C 水中とした。A シリーズの供試体は、材令 21 日から試験材令 (40±2 日) まで実験室内の気中に放置した。B シリーズの供試体は、水中から取り出し恒温恒室中(温度 20°C，湿度 95%)に 1 日おいた後、材令 22 日から試験材令 (52±3 日) まで図-1 に示すような環境においた。試験時における供試体の含水量の違い、ならびに乾燥方法の違いにより、図-1 に示すように B シリーズの供試体を 6 種類 (P-250, P-170, P-0, Q-90, Q-10, Q-0) に分ける。高温乾燥 (70~105°C) を経た供試体を P グループとし、準常温乾燥 (20~40°C) を経た供試体を Q グループとする。供試体 (重さ：約 3.7 kg) の水分減少量の

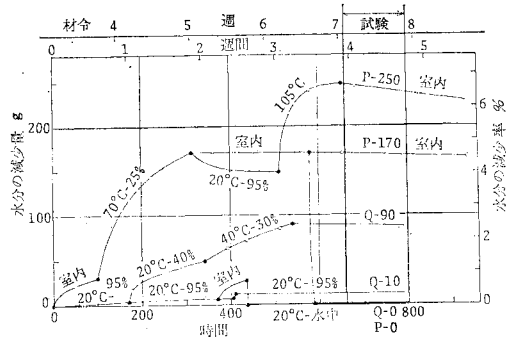


図-1 載荷試験までの各グループの環境条件

測定は、供試体を水中から取り出し表面の水滴を乾いた布で十分ふき取った直後の状態を基準として行った。たとえば図-1 中の P-250 グループの供試体は、高温乾燥を経て水分減少量が約 250 g であることを示している。供試体を水中から取り出して約 1 年ほど室内に放置しておく、水分減少量は 100 g 程度となる。供試体の乾燥には、循環送風式恒温恒湿槽 (温度能力：-40~80°C，湿度能力：20~95%) と電熱乾燥炉 (温度能力：30~200°C) を用いた。

なお、同一環境温度においても、相対湿度の相違によって生ずる水分の減少速度の差は明確なことが、図-1 からわかる。

### (4) 試験機とひずみ計測方法

載荷試験には電磁油圧式剛性試験機 (島津製作所製) を用いた。本試験機はサーボ制御によって試験機のみかけの剛性を高めたものである<sup>3)</sup>。本試験機では、圧盤間の変位速度を 0.01~2 mm/min の間で一定に保つことが可能であり、コンクリートの最大耐力点以後の下降域においても安定した応力ひずみ曲線が得られた。

A シリーズのひずみ計測には、後で述べる供試体変位からひずみを求める方法ならびに試験機の圧盤間変位からひずみを求める方法を用い、載荷速度はひずみ制御 (後述) とした。B シリーズでは、圧盤間変位からひずみを求める方法ならびに電気抵抗線ひずみゲージからひずみを求める方法を用い、載荷速度はひずみ制御または応力制御とした。

供試体変位によるひずみ計測は、供試体の三重対称点に 3 個の差動トランス型変位計をとりつけて行った。取り付け位置は供試体上下端面よりそれぞれ 9 mm の位置であり、182 mm の間の相対変位を測定した。ひずみは変位の平均値を検長で除して求めた。変位の計測は、最大耐力点以後においても変位計の取付部が破壊するまでは安定して行うことが可能であった。ひずみの記録は X-Y レコーダで行った。

圧盤間変位によるひずみ計測は、1 個の差動トランス

型変位計を試験機の圧盤間に取り付けて行うもので、載荷試験でひずみ制御を行う場合には圧盤間変位によって載荷速度を制御した。検長は200 mmであり、測定した変位をこの検長で除してひずみに換算した。ひずみの記録はX-Yレコーダで行った。

電気抵抗線ひずみゲージによるひずみ計測には、供試体の二重対称点に検長67 mmのひずみゲージを2枚1組として貼布し、直列につないでひずみの計測を行った。計測には2組のひずみゲージを用い、一方のひずみはX-Yレコーダで記録し、他方のひずみは直接インジケータから読みとった。後者は、繰り返し載荷と持続載荷の制御に使用した。

3種類のひずみ計測結果の一例を図-2に示す。図-2は、コンクリートの圧縮強度が約300 kg/cm<sup>2</sup>、ひずみ速度が170×10<sup>-6</sup>/secの場合の測定結果である。図中の実線は供試体変位から求めたひずみであり、一点鎖線は圧盤間変位から求めたひずみであり、破線は電気抵抗線ひずみゲージによって求めたひずみであって、図中に示すように、それぞれひずみⅠ、ひずみⅡ、ひずみⅢとする。

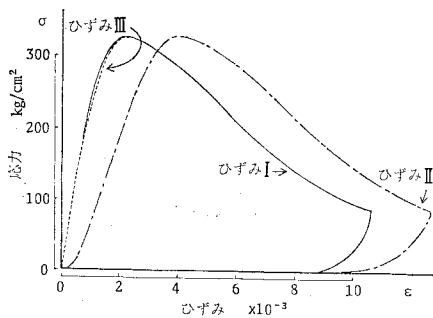


図-2 3種類のひずみ計測方法

図-2 からわかるように、最大耐力点にいたるまでは、供試体変位から求めたひずみの計測結果とひずみゲージから求めたひずみの計測結果はよく一致している。また、圧盤間変位から求めたひずみは供試体変位から求めたひずみよりも大きくなる。最大耐力点以後の両者の増分は等しい。最大耐力点までの両者の差異は、主として供試体と圧盤の間で供試体端面の微小な凹凸が圧潰するために圧盤間変位が大きくなるとして説明される。したがって、載荷速度を圧盤間の変位速度で制御する場合には、最大耐力点以前での供試体のひずみ速度は最大耐力点以後のひずみ速度よりも小さな値となる。しかし、最大耐力点付近ならびに下降域においては、ひずみ速度は一定となる。

(5) 実験条件と供試体数

本実験では図-3に示すような5種類の載荷方法を用いた。図-3(a)に示すような、一定の上限応力で載荷

を持続させた場合の載荷を持続載荷とする。図-3(b)に示すような、上限応力を一定として載荷除荷を繰り返した場合の載荷を繰り返し載荷とする。持続載荷ならびに繰り返し載荷における載荷・除荷速度は応力制御とした。図-3(c)に示すような、特定の折り返し点Pまで単調に載荷し折り返し点で除荷した場合の載荷を折り返し載荷とし、その応力ひずみ曲線を折り返し曲線とする。折り返し点までの応力ひずみ曲線を載荷曲線とし、折り返し点以後を除荷曲線とする。図-3(d)に示すような、数回の載荷除荷を繰り返した場合の載除載荷を、上限応力一定の繰り返し載荷と区別するために、載除載荷とよび、その応力ひずみ曲線を載除曲線とし、折り返し点を結ぶ曲線(図中点線)を包絡線とする。図-3(e)に示すような、単調にひずみを増加させた場合の載荷を単調載荷とする。折り返し載荷、載除載荷、単調載荷に

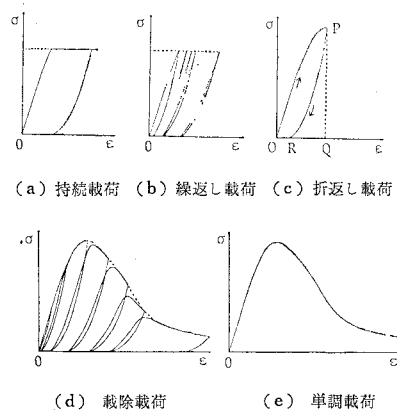


図-3 載荷方法

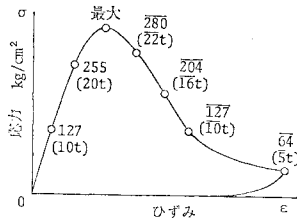
表-2 実験条件と供試体数

(a) Aシリーズ

| 折り返し載荷 | ひずみ速度 34×10 <sup>-6</sup> /sec |                      |    |                     |    |                      |    |   |
|--------|--------------------------------|----------------------|----|---------------------|----|----------------------|----|---|
|        | 折り返し点荷重 (t)                    | 10                   | 20 | 最大                  | 20 | 16                   | 10 | 5 |
|        | 供試体数                           | 4                    | 4  | 4                   | 4  | 4                    | 4  | 4 |
| 載除載荷   | ひずみ速度 (1/sec)                  | 6.8×10 <sup>-6</sup> |    | 34×10 <sup>-6</sup> |    | 170×10 <sup>-6</sup> |    |   |
|        | 供試体数                           | 4                    |    | 4                   |    | 4                    |    |   |

(b) Bシリーズ

| グループ名 | 水分の減少量 (g) | 水分の減少率 (%) | 載荷方法                           |      |                                |        |
|-------|------------|------------|--------------------------------|------|--------------------------------|--------|
|       |            |            | ひずみ速度 34×10 <sup>-6</sup> /sec |      | 応力速度 5 kg/cm <sup>2</sup> /sec |        |
|       |            |            | 単調載荷                           | 載除載荷 | 持続載荷                           | 繰り返し載荷 |
| P-250 | 250        | 6.5        | 4                              | 4    | 4                              | 4      |
| P-170 | 170        | 4.5        | 4                              | 4    | 4                              | 4      |
| P-0   | 0          | 0.         | 4                              | 4    | 4                              | 4      |
| Q-90  | 90         | 2.4        | 4                              | 4    | 4                              | 4      |
| Q-10  | 10         | 0.3        | 4                              | 4    | 4                              | 4      |
| Q-0   | 0          | 0.         | 4                              | 4    | 4                              | 4      |



図—4 折り返し点の応力と荷重

における載荷・除荷速度はひずみ制御とする。

A シリーズの実験条件と各実験条件での供試体数を表—2 (a) に示す。表—2 (a) の折り返し点の応力（または荷重）は図—4 に示すとおりであり、最大耐力点以後の折り返し点には一印を冠した。

B シリーズの実験条件と供試体数を表—2 (b) に示す。表—2 (b) の P-0 グループならびに Q-0 グループでは、供試体を容器の中の水中につけた状態で載荷試験を行った。P-0 グループの試験では、ひずみゲージの絶縁不良のためインジケータによるひずみ計測ができず、したがって上限応力の設定が困難となり持続載荷と繰り返し載荷に対する実験データは得られていない。

本実験においては、同一実験条件に対してそれぞれ 4 個の供試体を用いており、実験結果は原則として 4 個の平均値で示す。

### (6) エネルギー定量化の方法

図—3 (c) に示すように、折り返し点 P において除荷した場合、点 P において外荷重によって供試体に加えられたエネルギー  $E_t$  (OPQ の面積) は、弾性ひずみエネルギー  $E_r$  (RPQ の面積) と損失エネルギー  $E_i$  (OPR の面積) に変換される。すなわち、 $E_t = E_r + E_i$  となる。応力ひずみ曲線上のすべての点で、エネルギー  $E_t$ ,  $E_r$ ,  $E_i$  を求めることによって、コンクリートが崩壊にいたる過程におけるエネルギー配分の様子を知ることができる。

本研究では、2 種類のエネルギー定量化の方法について検討した。

方法 A：それぞれの折り返し点での折り返し曲線を求め、プランメータを用いて面積を測り、それぞれの折り返し点に対応するエネルギー  $E_t$ ,  $E_r$ ,  $E_i$  を定量化する。

方法 B：載除曲線を求め、それぞれの折り返し点に対応するエネルギー  $E_t$ ,  $E_r$ ,  $E_i$  を定量化する。エネルギーの定量化に際しては、包絡線を、対象とする折り返し点にいたるまでの載荷曲線と仮定する。

本文では、応力ひずみ曲線から定量化したエネルギーの値 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) をすべて供試体 ( $1750 \text{ cm}^3$ ) 当りの値 ( $\text{kg}\cdot\text{cm}$ ) に換算して表わす。

## 3. 実験結果と考察

### (1) A シリーズ

#### a) エネルギーの定量化

供試体変位からひずみ（ひずみ I）を計測し、折り返し曲線（方法 A）から求めたエネルギー  $E_t$ ,  $E_r$ ,  $E_i$  を図—5 (a) に示す。図—5 において、縦軸は外荷重によって加えられたエネルギー  $E_t$  の最大耐力点での値  $E_{tc}$  を用いて  $E_t$  と  $E_r$  とを規準化した値を示し、横軸は最大耐力点でのひずみ  $\epsilon_c$  によってひずみ  $\epsilon$  を規準化した値を示す。なお、最大耐力点以前での折り返し点では、最大耐力点におけるエネルギー  $E_{tc}$  およびひずみ  $\epsilon_c$  を推定して規準化の計算を行った。図—5 に示すような曲線をエネルギーひずみ曲線とよぶ。供試体変位からひずみ（ひずみ I）を計測し、載荷除荷を繰り返した場合の応力ひずみ曲線（方法 B）から求めたエネルギーひずみ曲線を図—5 (b) に示す。圧盤間変位からひずみ（ひずみ II）を計測し、方法 A によって求めたエネルギーひずみ曲線を図—5 (c) に、方法 B によって求めたエネルギーひずみ曲線を図—5 (d) にそれぞれ示す。図—5 (a) と (c) の実験で用いた供試体数は、表—2 からわかるように、各折り返し点で 4 個ずつ、7 つの折り返し点で合計 28 個であり、一方、図—5 (b) と (d) の実験では合計 4 個の供試体を使用している。図—5 (b) と (d) において、同一方向の斜線をもつ点は同一供試体から求めた結果であることを示す。

図—5 より、最大耐力点 ( $\epsilon/\epsilon_c=1$ ) で、供試体に蓄えられた弾性ひずみエネルギーが最大値をとるとみなすことができる。すなわち、完全な応力ひずみ曲線上の最大耐力点は、供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギーが増加から減少へ向かう変曲点として特徴づけられる。外荷重の作用によってコンクリート供試体内の組織破壊が進行し、供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギーがもはや増加しえなくなった点が、その供試体の巨視的な最大耐力点であると考えられる。

圧盤間変位から求めた応力ひずみ曲線では、供試体端面の凹凸圧潰の影響のため、最大耐力点までに加えられた外系からのエネルギー  $E_{tc}$  が、供試体変位による場合の  $E_{tc}$  よりも大きくなる。このため、図—5 (c), (d) においては、エネルギー比  $E_r/E_{tc}$  が、図—5 (a), (b) での  $E_r/E_{tc}$  よりも若干小さな値を示す傾向にある。供試体の実変位によってエネルギーの定量化を行うのが望ましいが、変位計の取付部のコンクリートが壊れてひずみの計測結果が得られない場合には、この定量化の方法は適用できない。後でのべる B シリーズのエネルギー定

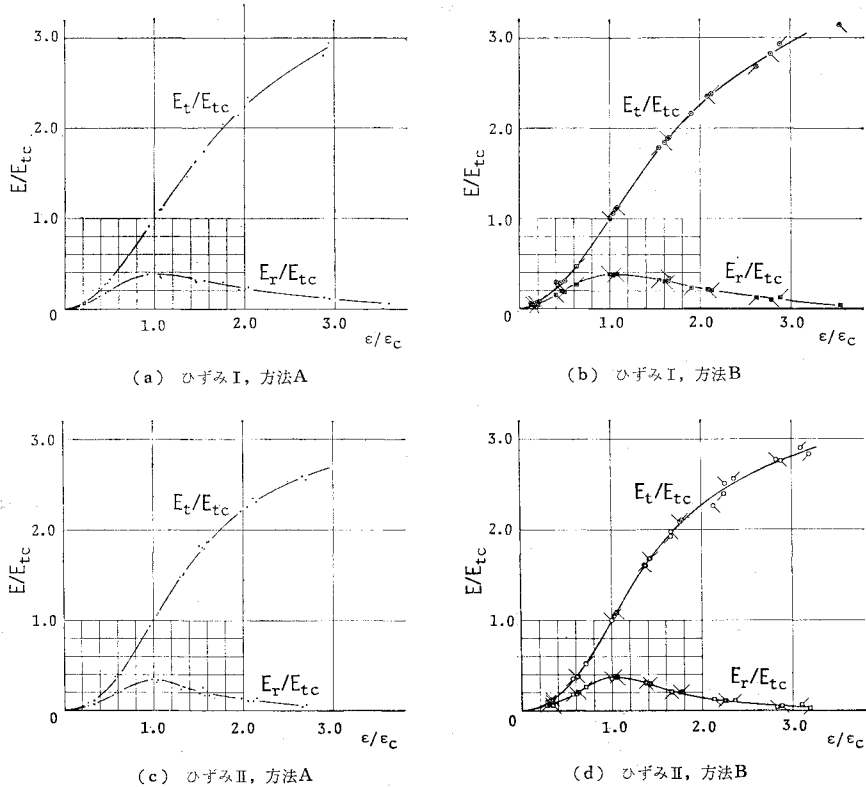


図-5 エネルギーひずみ曲線

最化の際には、圧盤間変位から求めた応力ひずみ曲線を用いた。

図-5 の (a) と (b), あるいは (c) と (d) は、互いにほぼ等しい曲線を示すが、このことから図-3 (d) に示すような載除曲線における除荷曲線に対して、それまでの除荷の影響を無視しうることがわかる。したがって、エネルギーひずみ曲線は、折り返し曲線 (方法 A) から求める代わりに、載除曲線 (方法 B) から求めることができる。

**b) エネルギー分配におよぼす載荷速度の影響**

最大耐力点での弾性ひずみエネルギー  $E_{rc}$  や外力により加えられたエネルギー  $E_{tc}$  は、エネルギー分配の傾向を表わす指標とみなすことができる。そこでエネルギーの分配におよぼす載荷速度 (ひずみ速度) の影響を調べた実験の結果として、3種の載荷速度に対する最大耐力点でのエネルギー  $E_{rc}$ ,  $E_{ic}$ ,  $E_{tc}$  ならびにエネルギー比  $E_{rc}/E_{tc}$  を表-3 に示す。それぞれの載荷速度で得られた最大耐力  $\sigma_{ult}$  を表-3 に併記する。

表-3 からわかるように、載荷速度が速くなるに従って最大耐力は増加する。また、載荷速度が速くなるに従って、弾性ひずみエネルギー  $E_{rc}$  は増加し、損失エネルギー  $E_{ic}$  は減少する傾向にあり、その結果エネルギー比  $E_{rc}/E_{tc}$  は増加している。外力によって加えられたエ

表-3 エネルギーの分配におよぼす載荷速度の影響

| ひずみ速度<br>(1/sec)     | エネルギーの値 (kg・cm) |          |          | エネルギー比          | 最大耐力<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------|-----------------|----------|----------|-----------------|-------------------------------|
|                      | $E_{rc}$        | $E_{ic}$ | $E_{tc}$ | $E_{rc}/E_{tc}$ |                               |
| $170 \times 10^{-6}$ | 460             | 708      | 1168     | 0.39            | 371                           |
| $34 \times 10^{-6}$  | 449             | 775      | 1224     | 0.37            | 341                           |
| $6.8 \times 10^{-6}$ | 412             | 743      | 1155     | 0.36            | 336                           |

ネルギー  $E_{tc}(=E_{rc}+E_{ic})$  はほぼ一定に保たれている。

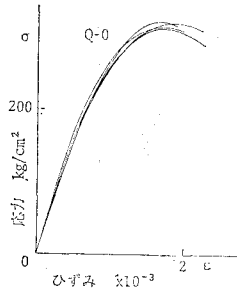
長期の持続載荷によるクリープひずみは、ゲル水の移動などによって生ずる時間依存性のひずみであって、損失エネルギーと関連すると考えられる。速い速度で載荷する場合には、最大耐力点までの載荷時間が短くなるため、最大耐力点に対応する全ひずみのうち時間依存性のひずみの占める割合が減ると考えられる。したがって、コンクリートはみかけ上、より弾性的な挙動を示し、最大耐力の増加が起これと考えられる。このことは、エネルギー  $E_{rc}$ ,  $E_{ic}$ ,  $E_{tc}$  の示す傾向と一致する。

**(2) Bシリーズ**

**a) 含水量の異なるコンクリートの力学特性**

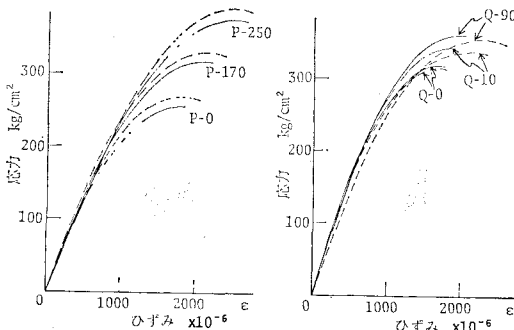
コンクリートの応力ひずみ曲線は、材料固有の強度ならびに変形応答のばらつきのため、配合、載荷速度、供試体の含水量などが等しくても、図-6 に一例を示すよ

うに、同一曲線とはならない。ここでは、これらの曲線の中央を通る曲線をもって、各条件に対する応力ひずみ曲線の代表値として取り扱うことにする。なお、**図-6**は、BシリーズのQグループの供試体について単調荷重を行い、ひずみゲージによってひずみを計測した場合の応力ひずみ曲線を示している。



**図-6** 応力ひずみ曲線の実測例 (Q-0グループ)

Pグループのコンクリートの応力ひずみ曲線を**図-7**(a)に、Qグループの応力ひずみ曲線を**図-7**(b)にそれぞれ示す。**図-7**における実線は単調荷重を行った場合の応力ひずみ曲線であり、破線は荷重除荷を行った場合の応力ひずみ曲線(載除曲線)の包絡線であって、ともに、ひずみゲージによりひずみを計測している。



**図-7** 各グループを代表する応力ひずみ曲線

**図-7**からわかるように、供試体の含水量が減少するに従って、最大耐力は大となり、最大耐力点に対応するひずみも大となる傾向にある。

単調荷重と載除荷重を比較した場合、**図-7**(a)に示す高温乾燥を経たPグループのコンクリートでは、最大耐力点以前の2回の荷重除荷履歴によって最大耐力が

増加している。一方、**図-7**(b)に示す準常温乾燥を経たQグループでは、荷重除荷履歴による最大耐力の増加はみられない。

荷重履歴に伴う最大耐力の増加が特定の荷重条件のもとで起こりうることはすでにいくつか報告されているが<sup>4),5)</sup>、本実験では供試体数が少ないため、**図-7**(a)にみられる高温乾燥と少数回履歴の複合効果としての強度増加現象に関しては、さらに追加実験を行う必要があると思われる。

繰り返し荷重ならびに持続荷重に対する各グループのコンクリートの応答を**表-4**(a)に示す。[上限応力  $\sigma_{max}$ ]/[最大耐力  $\sigma_{ult}$ ]=0.9に対応するひずみ  $\epsilon_1$  から全体のひずみが  $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 500 \times 10^{-6}$  に達するまで、その上限応力  $\sigma_{max}$  で繰り返し荷重または持続荷重を継続させた。荷重・除荷中の応力速度は  $5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$  に保った。各グループのひずみ  $\epsilon_1, \epsilon_2$  の値を**表-4**(a)に併記する。

**表-4**(a)において、応力比  $\sigma_{max}/\sigma_{ult}$  がほぼ同程度のP-170とQ-0、あるいはQ-90とQ-10を比べることにより、供試体の含水量が減るに従って、上限応力に対応するひずみを  $500 \times 10^{-6}$  増加させるに必要な繰り返し荷重の繰り返し回数ならびに持続荷重の持続時間がともに増大することがわかる。また、高温乾燥を経たPグループの供試体の方が、準常温乾燥を経たQグループの供試体よりも、持続荷重での持続時間の増大が著しい。特にP-250グループでは、繰り返し荷重によってひずみは増加するが、持続荷重によってはひずみが一定値から増加しなくなる現象がみられた。すなわち、繰り返し荷重を行ったPグループの4個の供試体では、4個とも15回前後(6~25回)の繰り返し荷重によって所定の上限ひずみ ( $\epsilon_1 = 1800 \times 10^{-6} \rightarrow \epsilon_2 = 2300 \times 10^{-6}$ ) が進行したが、持続荷重を行った4個の供試体では、4個とも持続荷重の途中でひずみの進行がほとんど止まったため、試験開始後30分で試験を中止した。中止時の上限ひずみは  $\epsilon = 2000 \times 10^{-6}$  程度であった。

繰り返し荷重では、荷重除荷の繰り返しに伴ってコンクリート内部で応力の変動が起こっており、この内部で

**表-4** Bシリーズの実験結果

| グループ名 | 水分の減少量 (g) | 最大耐力 $\sigma_{ult}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | (a) 繰り返し荷重と持続荷重   |   |                                 |              |              |             |                                     | (b) エネルギーの分配                     |  |                 |                      | (c) 損失エネルギーの内容         |                          |                            |                            |                   |
|-------|------------|---|---|---|---------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|-----------------|----------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
|       |            |   | 繰り返し荷重と持続荷重の制御 (ひずみ) $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$ ( $\times 10^{-6}$ ) | $\epsilon_1$ の応力 $\sigma_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 応力比 $\sigma_{max}/\sigma_{ult}$ | 繰り返し荷重回数 (回) | 持続荷重持続時間 (分) | 持荷重持続時間 (分) | 最大耐力点での値                            |                                  |  |                 | 損失エネルギーの総和           |                        | 初回の載除荷での値                |                            |                            |                   |
|       |            |   |   |   |                                 |              |              |             | $E_{rc}$ 弾性ひずみエネルギー (kg $\cdot$ cm) | $E_{lc}$ 損失エネルギー (kg $\cdot$ cm) | $E_{lc} = E_{rc} + E_{lc}$ (kg $\cdot$ cm) | $E_{rc}/E_{lc}$ | 持続荷重 (kg $\cdot$ cm) | 繰り返し荷重 (kg $\cdot$ cm) | $F_{II}$ (kg $\cdot$ cm) | $F_{crac}$ (kg $\cdot$ cm) | $E_{tric}$ (kg $\cdot$ cm) | $E_{crac}/E_{tr}$ |
| P-250 | 250        | 373                                       | 1800→2300   | 334   | 0.90                            | 14.7         | $\infty$     | 0           | 616                                 | 683                              | 1299                                       | 0.47            | —                    | 931                    | 203                      | 163                        | 40                         | 0.80              |
| P-170 | 170        | 315                                       | 1400→1900   | 286   | 0.91                            | 19.2         | 31.6         | 0.61        | 450                                 | 633                              | 1083                                       | 0.42            | 316                  | 840                    | 162                      | 125                        | 37                         | 0.77              |
| P-0   | 0          | 255                                       | —   | —   | —                               | —            | —            | —           | 336                                 | 393                              | 729  | 0.46            | —                    | —                      | —                        | —                          | —                          | —                 |
| Q-90  | 90         | 360                                       | 1400→1900   | 305   | 0.85                            | 20.0         | 8.6          | 2.32        | 460                                 | 851                              | 1311                                       | 0.35            | 349                  | 961                    | 165                      | 125                        | 40                         | 0.76              |
| Q-10  | 10         | 339                                       | 1200→1700   | 292   | 0.86                            | 8.6          | 3.5          | 2.48        | 416                                 | 697                              | 1113                                       | 0.37            | 317                  | 559                    | 154                      | 98                         | 56                         | 0.64              |
| Q-0   | 0          | 319                                       | 1150→1650   | 290   | 0.91                            | 7.4          | 2.6          | 2.79        | 409                                 | 589                              | 998  | 0.41            | 284                  | 457                    | 107                      | 58                         | 49                         | 0.54              |

繰り返される応力変動の有無が繰り返し载荷と持続载荷に対する抵抗性の違いに関連し、特に高温乾燥 (105°C, 6日間) を経た P-250 グループにこの違いがはっきりと現われたものと考えられる。こうした疲労破壊過程とクリープ破壊過程における破壊現象の違いとその要因に関しては、今後さらに研究される必要がある。

b) 含水量の異なるコンクリートのエネルギーひずみ曲線

A シリーズにおいてエネルギー定量化の方法に関する検討を行ったが、ここでは、圧盤間変位によりひずみを計測し載除曲線によってエネルギーの定量化を行う方法を用いて、含水量の異なる6種類のコンクリートのエネルギーひずみ曲線を求めた。代表例として P-250 と Q-10 グループのエネルギーひずみ曲線を図-8 に示す。

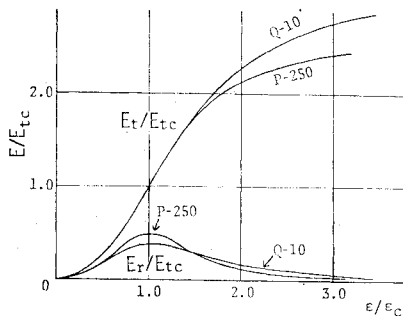


図-8 エネルギーひずみ曲線の例 (P-250, Q-10 グループ)

エネルギー分配の様子を明らかにするため、最大耐力点 ( $\epsilon/\epsilon_c=1.0$ ) における、それぞれのエネルギー  $E_{ic}$ ,  $E_{re}$ ,  $E_{tc}$  の値ならびにエネルギー比  $E_{re}/E_{tc}$  を表-4 (b) に示す。

表-4 (b) からわかるように、Q グループにおいて、含水量の少ないコンクリートほど、最大耐力点での損失エネルギー  $E_{ic}$  と弾性ひずみエネルギー  $E_{re}$  とが大きく、特に  $E_{ic}$  の増加が著しい。したがって、エネルギー比  $E_{re}/E_{tc}$  は主に損失エネルギー  $E_{ic}$  に左右されている。P グループにおいても同様の傾向が認められるが、P-250 グループについては、105°C の高温乾燥を経ているため P-170 や P-0 グループ (70°C 乾燥) に比べて若干異なった結果を示している。

乾燥によって、コンクリートの内部で応力をうけもつ個々の構成粒子が互いに接近すると、内部摩擦抵抗力は高まり<sup>6)</sup>内部結合エネルギーが増加する<sup>7)</sup>ため、最大耐力が増加すると考えられている。このような内部状態の変化は、乾燥したコンクリートほど最大耐力点におけるそれぞれのエネルギーが大きという表-4 (b) の結果をよく説明する。

c) 損失エネルギーの内容

外力により供試体に加えられたエネルギー  $E_t$  は、回

復性の弾性ひずみエネルギー  $E_r$  と非回復性の損失エネルギー  $E_i$  とに変換される。さらに非回復性の損失エネルギー  $E_i$  を、構成粒子を引き離す仕事に使われるエネルギー  $E_{crac}$  と構成粒子をすべらせる仕事に使われるエネルギー  $E_{fric}$  とに分けることができる。 $E_{crac}$  は主に表面エネルギーに変換され、結果として内部ひびわれが形成されると考えられ、 $E_{fric}$  は主に液相での粘性摩擦や固相でのずれにおいて熱エネルギーに変換され、最終的には系外へ放出されると考えられる。

P グループならびに Q グループのコンクリートについて、ひずみゲージでひずみを測定した場合の応力ひずみ曲線から、繰り返し载荷の各回における損失エネルギーの測定を行ったが、その一例として Q-90 グループの結果を図-9 に示す。

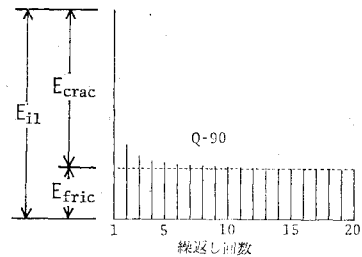


図-9 繰り返し载荷の各回における損失エネルギーの例 (Q-90 グループ)

図-9 において、繰り返しの初回における損失エネルギーは初回が最も大きく、2回目以降は徐々に一定値に落ち着いているが、このことは初回の载荷で内部ひびわれが進展し、2回目以降の载荷によるひびわれの増加は比較的少ないというひびわれ観察結果<sup>9)</sup>と一致する。一定値に落ち着いた損失エネルギーのほとんどは液相内の粘性摩擦や固相内のずれなどに使われ、熱エネルギーに変換されたものと考えられる。初回においても、ほぼこれに等しいエネルギーが熱エネルギーに変換されたと仮定すると、初回の載除荷による損失エネルギー  $E_{i1}$  を、ひびわれの進展に使われたエネルギー  $E_{crac}$  と液相での粘性摩擦などに使われたエネルギー  $E_{fric}$  とに分離できる。この方法によって、含水量の異なるコンクリートについて、繰り返し载荷の初回の載除荷で消費された損失エネルギー  $E_{i1}$  や  $E_{crac}$ ,  $E_{fric}$  ならびに  $E_{crac}/E_{i1}$  を求め、表-4 (c) に結果を示す。繰り返し载荷あるいは持続载荷によって所定のひずみ量 ( $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$ ) を発生させるに必要な損失エネルギーの総和を表-4 (c) に併記する。

表-4 (c) より、含水量の少ないコンクリートほど、初回の載除荷中にひびわれ進展に使われたエネルギー  $E_{crac}$  が大となり、初回での損失エネルギー  $E_{i1}$  に占める  $E_{crac}$  の割合も大となる。含水量の少ないコンクリ

トでは、水分子の吸着が減ることによりひびわれ進展に必要な表面エネルギーが増加すること、あるいは固相間からしぼり出される吸着水が少ないことなどによって、水分の移動などに基づく変形よりも微小ひびわれの進展に基づく変形が卓越し、ひびわれ進展に消費されるエネルギーが増すと考えられる。

#### 4. 結 言

(1) コンクリートの圧縮破壊過程において供試体に蓄えられた弾性ひずみエネルギー  $E_r$  は最大耐力点 ( $\epsilon/\epsilon_c=1$ ) で最大値を示す。すなわち、外荷重による組織破壊の進行に伴って供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギー  $E_r$  が増加しえなくなった点が、その供試体の最大耐力点であると考えられる。

(2) 載荷除荷を少数回 (本実験では7回程度) 繰り返した場合の図-3 (d) に示すような応力ひずみ曲線 (載除曲線) での除荷曲線に対して、それまでの除荷の影響を無視しうる。したがって、エネルギー配分の様子を示すエネルギーひずみ曲線は、載除曲線から求めることができる。

(3) 載荷速度が速くなるに従って、最大耐力点における弾性ひずみエネルギー  $E_{rc}$  は増加し、損失エネルギー  $E_{ic}$  は減少し、外力によって加えられたエネルギー  $E_{tc}$  ( $=E_{rc}+E_{ic}$ ) はほぼ一定に保たれる傾向にある。載荷速度の増大に伴うコンクリートの最大耐力の増加は、時間依存性の変形が減り、コンクリートがみかけ上より弾性的な挙動を示すことに起因することが、エネルギー  $E_{rc}$ ,  $E_{ic}$ ,  $E_{tc}$  の示す傾向によって説明される。

(4) コンクリートの含水量が減少するに従って、最大耐力点における弾性ひずみエネルギー  $E_{rc}$  と損失エネルギー  $E_{ic}$  ならびに外力によって加えられたエネルギー  $E_{tc}$  ( $=E_{ic}+E_{rc}$ ) がすべて増加し、特に損失エネルギー  $E_{ic}$  の増加が著しい。乾燥によるコンクリートの最大耐力の増加は、内部摩擦抵抗の増加や内部結合エネル

ギーの増加によって起こることが、エネルギー  $E_{rc}$ ,  $E_{ic}$ ,  $E_{tc}$  の示す傾向によって説明される。

(5) コンクリート供試体の含水量が減るに従って、繰り返す載荷ならびに持続載荷に対する抵抗性が增大する。高温乾燥 (105°C, 6日間) を経たコンクリートでは、特に持続載荷に対する抵抗性が著しく増大し、疲労破壊過程とクリープ破壊過程の違いが顕著となる。

(6) 含水量の少ないコンクリートほど、繰り返す載荷の初回の載除荷中にひびわれ進展に使われたエネルギー  $E_{crac}$  は大となり、初回での損失エネルギー  $E_{i1}$  に占める  $E_{crac}$  の割合も大となる。すなわち、コンクリートの含水量が減少するに従って、水分の移動などに基づく変形よりも微小ひびわれの進展に基づく変形が卓越し、ひびわれ進展に消費されるエネルギーが増すと考えられる。

最後に、京都大学工学部資源工学教室の剛性試験機を使用したことを記し、感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば、丹羽義次・小林昭一：ぜい性材料の破壊条件に関する考察，材料，第16巻，第160号，1967.1，pp. 1~7.
- 2) 西松裕一・松木浩二・小泉昇二：岩石の圧縮破壊過程，材料，第23巻，第248号，1974.5，pp. 374~379.
- 3) 平松良雄・岡田 清・岡 行俊・小柳 治・水田義明：剛性試験機の設計・製作とコンクリートの剛性試験結果について，材料，第24巻，第260号，1975.5，pp. 447~454.
- 4) 桜井春輔：セメントモルタルのクリープ変形と破壊に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 217，1973.9，pp. 65~76.
- 5) 小柳 治・面谷幸男・六郷恵哲・日下部史明：載荷履歴を受けたコンクリートの組織変化について，セメント技術年報，第28巻，1974，pp. 207~210.
- 6) 堀 素夫：セメントおよびコンクリートの破壊現象に関する確率論的研究，小野田セメント株式会社中央研究所，1961.2.
- 7) Cook D.J. and Haque M.N.: The Effect of Sorption on the Tensile Creep and Strength Reduction of Desiccated Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 4, No. 3, 1974, pp. 367~379.

(1975.7.9・受付)