

コンクリートの曲げ引張破壊過程に関する エネルギー的考察

ENERGY APPROACH ON THE FRACTURE PROCESS OF CONCRETE IN FLEXURE

岡田 清*・小柳 洽**・六郷 恵哲***

By Kiyoshi OKADA, Wataru KOYANAGI and Keitetsu ROKUGO

1. ま え が き

多相材料であるコンクリートの破壊に対しては、微視的立場や巨視的立場に立って各方面からの研究がなされている。近年、コンクリート内部におけるエネルギーの変換に注目してコンクリートの破壊過程を取り扱った研究^{1)~7)}が行われるようになってきた。

一般に、外力によりコンクリート供試体に加えられたエネルギーは、除荷と同時に供試体から系外へ取り出さ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粘性摩擦などに消費される非回復性の損失エネルギーとに変換されると考えられる。したがって、コンクリート供試体に加えられた外力仕事⁸⁾が供試体内部でどのように分配・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である。

筆者らは、前に、コンクリートの圧縮破壊過程について上述のようなエネルギー変換過程として検討した結果を報告した^{9),10)}。ここでは、圧縮破壊よりはるかに少数のひびわれ進展によって系の破壊を生じ、破壊がより不安定である引張破壊と直接関係づけられるコンクリートの曲げ引張破壊過程を対象とし、エネルギー変換過程として検討した結果を報告する。

コンクリートのような多相材料の破壊過程は、内部ひびわれの段階的な増加過程である。したがって、荷重を受ける材料の内部における応力やひずみの状態は、材料を弾性体と仮定した場合の応力やひずみの状態と比べて大きく異なっている。

このため、コンクリートのような材料の破壊過程をエネルギーの変換過程として検討しようとする場合には、

材料の試験で得られる荷重と変位とを直接用いるか、あるいは、この荷重と変位をみかけの平均応力と平均ひずみに換算して用いる必要がある。

本研究においては、曲げ引張破壊過程をエネルギーの変換過程として取り扱うことをめざしているので、供試体の荷重方向の変位とその荷重とを用いる方が、平均ひずみや平均応力を用いるよりもエネルギー的取り扱いが容易である。したがって、本研究では、主として荷重と変位を用いて曲げ供試体の破壊過程を取り扱う。

引張荷重下だけでなく圧縮荷重下やせん断荷重下においても、コンクリートの微視的な破壊は、コンクリート内部の微細な欠陥周辺における局所的な引張応力によって進展すると考えられる。したがって、これらの荷重によってコンクリートが破壊する際のエネルギー吸収能力などを検討し評価しようとする場合には、まず、引張破壊に要するエネルギーを定量化しておくことが望まれる。しかし、引張荷重下でのコンクリートの破壊は、圧縮荷重下での破壊に比べて不安定である。直接引張試験においては、ひびわれの進展速度を制御することが一般に困難である。したがって、本研究においては、直接引張試験よりも安定で制御しやすい曲げ引張試験を行った。

通常の曲げ引張試験においては、ひびわれの発生する位置を発生以前にあらかじめ予測することは困難である。また、ひびわれ進展時のひずみエネルギー解放速度を制御できない場合は、曲げ引張破壊過程は不安定となる。そこで、本研究における曲げ引張試験では、ひびわれの発生する領域をあらかじめ限定してひびわれ量の定量化を容易にするとともに、ひびわれ進展に伴うエネルギー解放速度を小さくし載荷試験時の制御を容易にする目的で、引張縁に切欠けをつけた曲げ供試体を用いた。

本論文においては、強度種別ならびに含水量の異なる砕石コンクリートの曲げ供試体について、最大耐力点以後も含めた荷重変位曲線を求め、曲げ引張破壊過程にお

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 岐阜大学教授 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

ける各種エネルギーの定量化を行い、求められた損失エネルギーと曲げひびわれ深さとの関係について検討する。さらに、岩質材料に対して開発・実用化されつつある AE (アコースティック・エミッション) 手法^{8),9)}を、コンクリート供試体の曲げ破壊過程に適用して、ひびわれ発生源を探索するとともに AE 発生数を計測し、これらの測定結果と損失エネルギー量との関係について考察する。

2. 実験概要

(1) 試験項目

コンクリートの曲げ引張破壊過程に大きく影響を与えると考えられるコンクリートの種類や供試体の形状を変化させて、次の5項目の試験を行った。

I. 曲げ供試体の荷重変位曲線

コンクリートの強度種別や含水量の違い、あるいは供試体引張縁につけた切欠けが、曲げ供試体の荷重変位曲線に及ぼす影響について検討した。

II. エネルギー変位曲線

荷重変位曲線から求めた損失エネルギーや弾性ひずみエネルギーを用いて、コンクリート供試体の曲げ破壊過程をエネルギーの変換過程として考察する。

III. 圧縮破壊過程と曲げ破壊過程

コンクリート供試体の荷重変位曲線やエネルギー変位曲線を用いて、圧縮破壊過程と曲げ破壊過程とを比較検討する。

IV. ひびわれの進展に関するエネルギー的考察

曲げ供試体内のひびわれ面を着色して求めたひびわれ深さと、荷重変位曲線から求めた損失エネルギーとの関係を調べる。

V. 曲げ破壊過程における AE の検出

AE の検出によって、曲げ供試体内のひびわれ発生源の探索を行う。また、AE の発生数と、供試体の変位や損失エネルギーとの関係についても考察する。

(2) 使用材料と配合

本研究においては、表-1 に示す4種類の配合(A, B, C, D)の砕石コンクリートを用いた。中強度コンクリート(配合A)に対比させて、低強度コンクリート(配合

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	試験項目との対応				
			W	C	S	G		I	II	III	IV	V
A	64	40	219	343	696	1 053	15	○	○	○	—	—
B	65	40	162	250	788	1 186	9	○	○	○	○	○
C	49	38	200	410	658	1 082	5	○	—	—	○	○
D	63	57	240	380	950	725	20	—	—	—	—	○

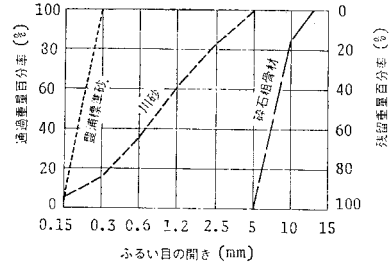


図-1 骨材の粒度曲線

B)と高強度コンクリート(配合C)を用いた。配合A, B, Dのコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを使用した。配合Cのコンクリートでは、高強度を得るために、早強ポルトランドセメントを使用し、トリアジン系の減水剤をセメント重量の1%の割合で加えた。配合A, B, Cのコンクリートでは、染色によるひびわれ検出を容易にするために、細骨材として、粒径の小さいセメント試験用豊浦標準砂を使用した。配合Dのコンクリートでは、細骨材として愛知川産川砂を使用した。川砂は、比重:2.59, 吸水量:2.6%, F.M.:3.04であった。粗骨材としては、すべて砂岩砕石を用いた。砂岩砕石は、比重:2.64, 吸水率:0.67%, 最大寸法:15mmであった。骨材の粒度曲線を図-1に示す。コンクリートは強制練りミキサー(容量100l)で練り混ぜた。実測スランプを表-1に示す。

前節で述べた5種類の試験項目I~Vと、使用したコンクリートとの相対関係を○印で表-1に併記する。

(3) 供試体作成とコンクリート強度

曲げ供試体は、図-2に示すような、中央引張縁に正三角形形状(高さ1cm)の切欠けをもつ角柱供試体(4.7×10×39cm)である。

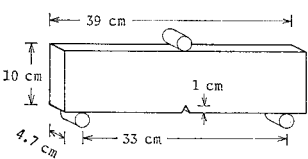


図-2 曲げ供試体

これと対比する目的で、切欠けのない曲げ供試体も作成した。また、AEの計測を行った配合Dのコンクリートでは、測定精度に及ぼす供試体の寸法効果を調べるために、切欠けのある大型曲げ供試体(10×20×79cm)を作成した。圧縮試験用としては円柱供試体(φ10×20cm)を作成した。

曲げ供試体は、材令1日で脱型した後、20°Cの水中で養生した。供試体を湿潤状態で試験する場合には、載荷試験の直前に供試体を養生水から取り出し、表面を布でふいた状態で試験した。乾燥状態で試験する場合には、所定の材令で供試体を養生水槽から取り出し、試験材令まで実験室内に放置した。圧縮試験に用いた円柱供

表-2 実験条件とコンクリートの強度

グループ名	実験条件			強度と耐力						
	水中養生期間 (日)	試験材令(日)		圧縮強度 σ_c (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)		曲げ耐力 (kg)		強度比	
		曲げ試験	圧縮試験		切欠けあり σ_{bn}	切欠けなし σ_b	切欠けあり P_{bn}	切欠けなし P_b	σ_c/σ_b	σ_{bn}/σ_b
AW	13~16	14~16	17	254	43.7	48.7	339	464	5.2	0.90
BW	42~48	43~49		135	28.0	31.9	215	304	4.2	0.88
BD	13	43~49		162	34.0	—	262	—	—	—
CW	13~16	17	14	591	67.9	82.6	526	787	7.2	0.82
DD	0	84*)	—	—	35.5	—	273	—	—	—

*) ただし、2個の大型曲げ供試体の試験材令は 60 日と 118 日

試体の取り扱い、キャッピングの取り扱いを除いて、曲げ供試体と同じである。AE の計測を行った配合Dの2個の大型曲げ供試体は、脱型後そのまま室内に置き、材令 60 日と 118 日で載荷試験を行った。

配合Bのコンクリートは、供試体の乾燥の影響を調べる目的で、湿潤状態(Wet)と乾燥状態(Dry)で試験した。湿潤状態で試験した供試体のグループ名を BW とし、乾燥状態で試験した供試体のグループ名を BD とする。BD グループの曲げ供試体では、乾燥による水分減少量と重量減少率が、それぞれ -82 g と 2.5% であった。配合 A, C のコンクリートは、湿潤状態で試験しており、グループ名をそれぞれ AW, CW とする。配合 D のコンクリートは乾燥状態で試験しており、グループ名を DD とする。5 グループのコンクリートの水中養生期間と試験材令を表-2 に示す。

同一実験条件に対して、それぞれ 4 個以上の供試体を用い、強度試験結果はそれらの平均値で示す。コンクリートの圧縮強度(σ_c)、切欠けのある場合とない場合の曲げ強度(σ_{bn} , σ_b)、ならびにそれらの強度比 σ_c/σ_b , σ_{bn}/σ_b を表-2 に併記する。曲げ試験結果については、曲げ強度に換算する前の曲げ耐力も示す。

(4) 載荷試験機

載荷試験には、サーボ制御によって試験機のみかけの剛性を高めた電磁油圧式剛性試験機¹⁰⁾と、従来の万能試験機の2本の横フレームを $\phi 32$ mm の PC 鋼棒で連結して試験機剛性を高めた改良型試験機とを用いた。

改良型試験機を図-3 に示す。曲げ供試体にかかる荷重は、PC 鋼棒にかかる荷重の 1/10~1/20 であった。供試体にかかる荷重を検出するための荷重変換器(図中でA)は、取り付け金具(B)を介して、PC 鋼棒(C)の下端に直接取り付けられた。

BW, BD, DD グループの曲げ載荷試験には改良型試験

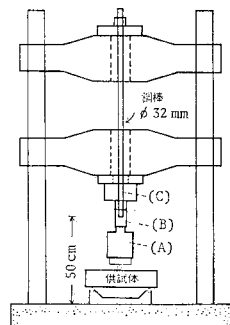


図-3 改良型試験機

機を用いた。AW, CW グループの曲げ載荷試験と、すべての圧縮載荷試験には、電磁油圧式剛性試験機を用いた。

曲げ引張試験では、中央載荷点の荷重方向の変位速度を原則として 0.05~0.5 mm/分 とした。ただし、AE の検出によりひびわれ発生源の探査を行った実験では、AE 計測装置が記憶した波形を記録用紙に再現させる操作に 10~20 秒かかるため、その間、供試体の変位速度を零に近づけ、載荷を休止した。したがって、AE の計測を行った場合には、1 個の供試体の載荷試験が終了するまでに 2~3 時間を要した。

曲げ供試体の試験では、支点間距離を 33 cm として中央集中載荷を行った。なお、大型曲げ供試体では、支点間距離を 66 cm とした。

(5) 変位計測

曲げ供試体の中央載荷点下のたわみ計測には、片持ばりの変位計(定格変位 5 mm, 感度 1260×10^{-6} /mm)を用いた。支点の沈下や載荷点での破損などによって生ずる変位を計測から除外するために、変位計測装置は点支持で直接供試体に取り付けた。供試体に取り付けた変位計測装置の様子を図-4 に示す。図-4 に示すように、中央の固定点は、曲げひびわれの発生・進展に影響を与えないよう、中央載荷点下から支点の側へ少し寄せた。中央固定点を移動させたことによって生ずる変位計測の誤差については別途検討したが、その差はほとんど認められなかった。

圧縮供試体の圧縮変位は、供試体の三重対称点に3個の差動トランス型変位計を取り付けて計測した。

荷重変位曲線は X-Y レコーダーで記録した。

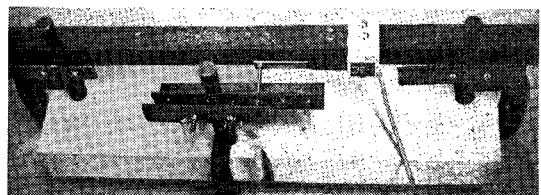


図-4 変位計測装置

3. 実験結果と考察

(1) 曲げ供試体の荷重変位曲線

本研究は曲げ試験の荷重変位曲線をもとにしてコンクリートの破壊過程のエネルギーの検討を行ったものである。最初に各試験に対応した荷重変位曲線の特性と、この実験曲線の取り扱いについて述べる。

まず曲げ試験においては、ひびわれの発生する領域を限定するために、主として切欠けのある供試体を用いた。切欠けが供試体の荷重変位曲線に及ぼす影響を検討するため、供試体に切欠けがある場合とない場合の荷重変位曲線を低強度の BW グループから求め、それぞれ図-5 と 図-6 に示す。これらの図からわかるように、供試体に切欠けをつけたことにより最大耐力は減少し、また、荷重変位曲線の最大耐力点以後の負の勾配が緩やかになるが、これはひびわれ進展に伴うエネルギー解放速度が小となることを示している。

低強度の BW グループよりも曲げ強度が大きい他のグループの場合、切欠けのない曲げ供試体では、最大耐力点以後の負の勾配が大きいため、本実験で用いたような試験機の剛性では最大耐力点以後の変位を十分には制御できず、急激な破壊を生じた。そこで、以下、コンクリートの曲げ破壊過程における荷重変位曲線を比較する場合には、切欠けのある曲げ供試体から求めた曲線を用いることとする。

供試体の含水量の違いが荷重変位曲線に及ぼす影響を検討する目的で求めた BD グループの荷重変位曲線を図-7 に示す。図-5 と 図-7 からわかるように、乾燥した BD グループでは、湿潤状態の BW グループに比較して、曲げ耐力は増加している。

ここで荷重変位曲線の取り扱いについては次のように考えた。すなわち図-5 にみられるように、実験条件が同一であっても、各供試体から求めた荷重変位曲線は、材料固有と考えられる強度ならびに変形応答のばらつきなどのために同一曲線とはならない。図-6, 7 においても曲線は同様にばらついている。このため、荷重変位曲線からエネルギー曲線を求めたり、その相对比较を行う上で荷重変位曲線の代表値を求めることが必要となる。

ここでは、これらの曲線の中央を通る曲線をもって、各条件に対する荷重変位曲線の代表値として取り扱う。さらに本研究においては、曲げ引張破壊過程において損失エネルギーや弾性ひずみエネルギーの値がどのように推移するかを調べるのが目的の一つである。そこで、次節においては、載荷除荷を数回繰り返したいわゆる漸増繰り返し（荷重変位）曲線を用いてこれらのエネルギー

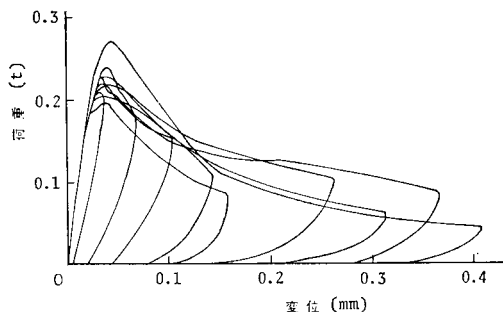


図-5 切欠けのある曲げ供試体の荷重変位曲線

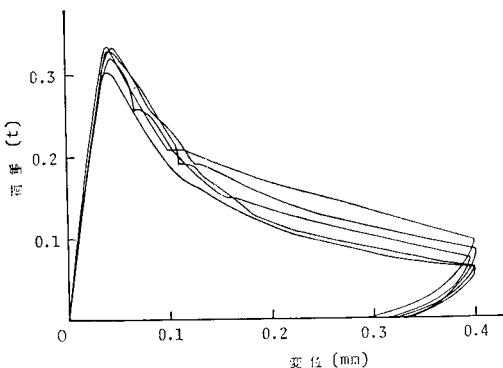


図-6 切欠けのない曲げ供試体の荷重変位曲線

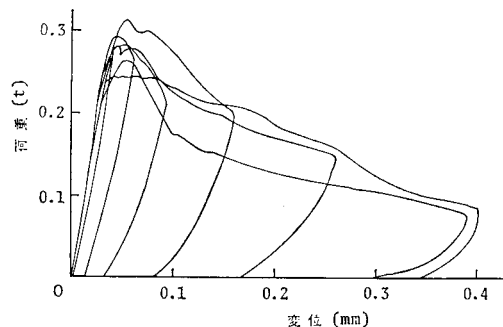


図-7 乾燥曲げ供試体の荷重変位曲線

ーの定量化を行っている。ここでは、漸増繰り返し曲線について検討するために、その一例として AW グループのものを図-8 に示す。図-8 では、漸増繰り返し曲線の包絡線を点線で示す。

AW グループのコンクリートについて、漸増繰り返し曲線の包絡線（5本）の代表値と、単調に変位を増加させて求めた単調増加（荷重変位）曲線（10本）の代表値を、図-9 にそれぞれ点線と実線で示す。図-9 からわかるように、漸増繰り返し曲線の包絡線は単調増加曲線よりもわずかに変位が大きいが、図-5~7 に示した曲線のばらつきに比べれば両者の差は小さく無視しうる。したがって、以下においては、両者を同一の群とみなして、包絡線をも含めた群から同一実験条件に対する

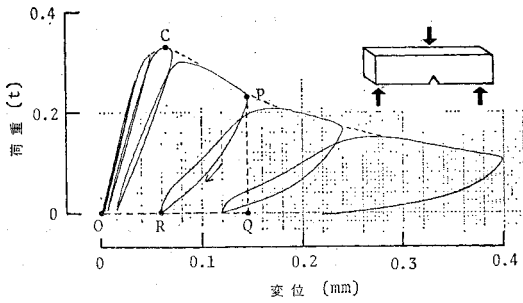


図-8 曲げ供試体の漸増繰り返し曲線

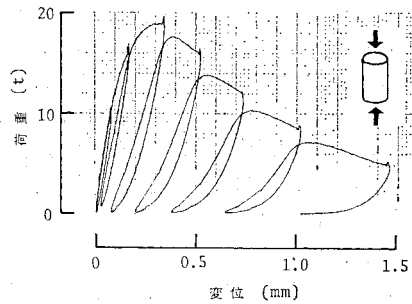


図-12 圧縮供試体の漸増繰り返し曲線

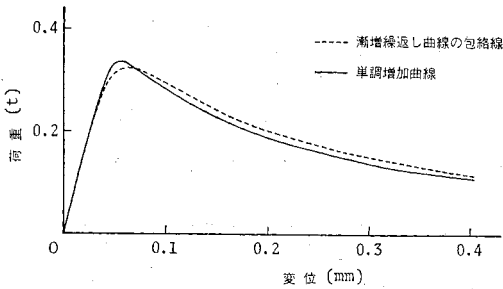


図-9 漸増繰り返し曲線の包絡線と単調増加曲線

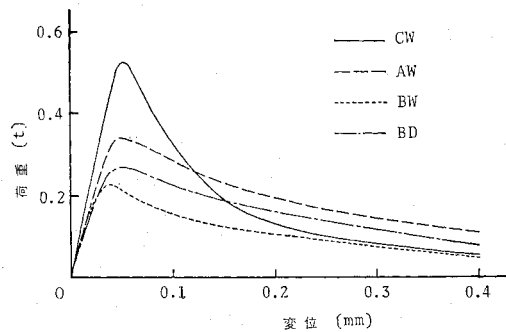


図-10 各グループを代表する荷重変位曲線

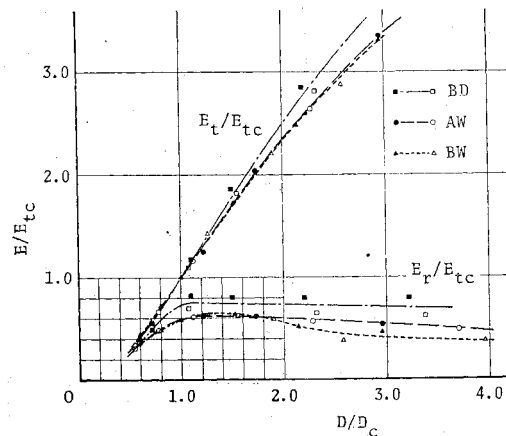


図-11 曲げ供試体のエネルギー変位曲線

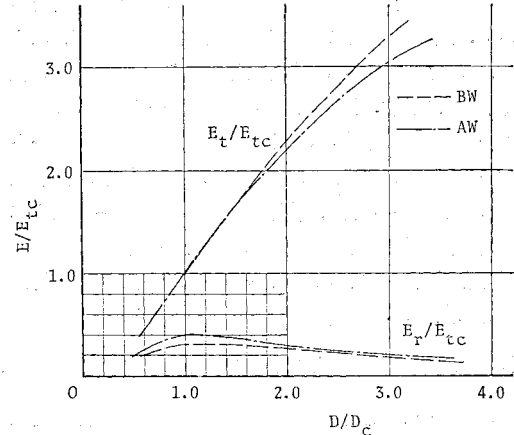


図-13 圧縮供試体のエネルギー変位曲線

荷重変位曲線の代表値を求めることとする。

4グループ(AW, BW, BD, CW)のコンクリートについて、切欠けのある曲げ供試体から求めた荷重変位曲線の代表値を 図-10 に示す。荷重変位曲線における最大耐力点以後の負の最大勾配は、曲げ耐力の大きいコンクリートほど大となる傾向にある。

(2) エネルギー変位曲線

外荷重によって供試体に加えられたエネルギー E_t は、弾性ひずみエネルギー E_r と損失エネルギー E_i に変換される。すなわち、 $E_t = E_r + E_i$ となる。

図-8 に示す漸増繰り返し曲線において、折返し点の1つである点Pについて考えると、損失エネルギー E_i は載荷曲線の包絡線 OCP と除荷曲線 PR と変位軸 OR とによって囲まれる領域 (OCPR) で表わされる。一方、弾性ひずみエネルギー E_r は、除荷曲線 PR の下側の領域 (RPQ) によって表わされる。それぞれの折返し点でエネルギー E_t , E_r , E_i を求めることにより、コンクリートの曲げ破壊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。ここでは、漸増繰り返し曲線の図において該当する領域の面積をプランメーターで測定してそれぞれのエネルギーを定量化した。

3グループ (AW, BW, BD) のコンクリートについ

て、それぞれ2本ずつの漸増繰返し曲線を用いて定量化したエネルギー E_i と E_r とを、変位量に対応させて図-11 に示す。図-11 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_i と E_r とを規準化した値を示し、横軸は、最大耐力点での変位 D_c によって変位 D を規準化した値を示す。図-11 に示すような曲線をエネルギー変位曲線とよぶこととする。

図-11 からわかるように、曲げ供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギー E_r は、最大耐力点 ($D/D_c=1$) を少し過ぎたところ ($D/D_c=1.1\sim 1.3$) で最大値をとっている。最大耐力点における E_r と E_r/E_{tc} の値、ならびに、 E_r と E_r/E_{tc} の最大値とそのときの D/D_c の値を表-3 に示す。湿潤状態のコンクリート (AW, BW グループ) の E_r/E_{tc} の値は乾燥状態のコンクリート (BD グループ) の値よりも小さい。すなわち、湿潤状態のコンクリートでは、乾燥状態のコンクリートに比べて、曲げ供試体に加えられたエネルギー E_t の中で、最大耐力点以前に損失エネルギー E_i に変換される割合が相対的に大きい。

(3) 圧縮破壊過程と曲げ破壊過程

コンクリート供試体の圧縮破壊過程における荷重変位曲線やエネルギー変位曲線については、別に報告を行っている^{6),7)}。ここでは、荷重変位曲線やエネルギー変位曲線を用いて、曲げ破壊過程と圧縮破壊過程とを比較検討する。

円柱供試体を圧縮試験して求めた漸増繰返し曲線の一例として AW グループのものを図-12 に示す。同じ AW グループの曲げ供試体を曲げ引張試験して求めた図-8 の漸増繰返し曲線と図-12 とを比べることにより、曲げ破壊過程と圧縮破壊過程との比較ができる。これらの図および表-3 によれば、曲げ破壊過程では、圧縮破壊過程に比べて、最大耐力点までの荷重変位曲線に直線部分が多く、かつ、最大耐力点以前において損失エネルギーの割合が小さいことがわかる。

AW, BW グループのコンクリートの圧縮破壊過程におけるエネルギー変位曲線を、曲げ破壊過程の場合に用いたと同様の方法によって求め、図-13 に示す。図-13 からわかるように、圧縮破壊過程においては、ほぼ

最大耐力点 ($D/D_c=1$) で、供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギーは最大となる。圧縮破壊過程のエネルギー変位曲線から、最大耐力点における弾性ひずみエネルギー E_r とエネルギー比 E_r/E_{tc} を求め、表-3 に併記する。表-3 からわかるように、 E_r/E_{tc} の最大値は、曲げ破壊過程の方が圧縮破壊過程よりも約 1.5 倍大きい。

コンクリートの圧縮破壊過程においては、最大耐力点以前の比較的荷重の小さな段階からひびわれが発生し、発生したひびわれが拘束されてさらに新しい安定状態に入るという過程を続けるのに対して、曲げ破壊過程では、比較的高い荷重レベルでひびわれが発生し、発生したひびわれが供試体の崩壊に結びつきやすいと考えられている¹¹⁾。荷重変位曲線ならびにエネルギー変位曲線を比較した本研究の結果からも、こうした圧縮破壊過程と曲げ破壊過程の機構的な差異が説明される。

(4) ひびわれの進展に関するエネルギー的考察

コンクリート供試体の荷重変位曲線から定量化した損失エネルギーは、主として内部ひびわれの形成すなわち表面エネルギーとして消費されるものであり、コンクリートの内部組織の破壊の度合を定量的に表わしていると考えられるが、この物理的な意義づけを実験的に確認することを目的として、曲げ供試体内のひびわれ深さと損失エネルギーとの関係について検討する。

載荷により曲げ供試体に生じたひびわれは、除荷後に、黒かっ色の多環アロマ系のコンクリート用混和剤を染料として用いて着色した。この染料が十分乾燥した後に曲げ供試体を再載荷して破断し、破断面での着色部分の面積からひびわれ進展深さを測定した。

破断面の一例を図-14 に示す。どの供試体の破断面においても、だいたいにおいて、先の載荷により生じていたひびわれ面の先端付近に、再載荷による別のひびわれ面は生じていなかった。したがって、再載荷した際には、ほぼ先に生じていたひびわれ面の先端からひびわれが進展したと考えてよいであろう。

BW, BD, CW グループのコンクリートの曲げ供試体について、荷重変位曲線から求めた損失エネルギーと、

表-3 弾性ひずみエネルギー E_r の値

グループ名	曲げ供試体					圧縮供試体	
	最大耐力点 ($D/D_c=1$) における値		E_r が最大のときの値			最大耐力点 ($D/D_c=1$) における値	
	E_r (kg·cm)	E_r/E_{tc}	E_r (kg·cm)	E_r/E_{tc}	D/D_c	E_r (kg·cm)	E_r/E_{tc}
AW	0.86	0.59	0.92	0.63	1.2	172	0.40
BW	0.37	0.59	0.41	0.65	1.3	115	0.31
BD	0.52	0.73	0.53	0.75	1.1	—	—

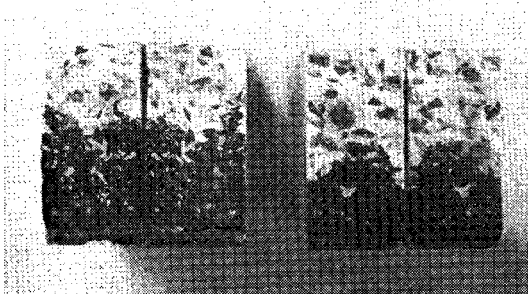


図-14 曲げ供試体の破断面

供試体破断面の着色部分から求めたひびわれ深さととの関係を図-15に示す。切欠け高さが1cmなので、ひびわれ深さの最大可能値は9cmとなる。

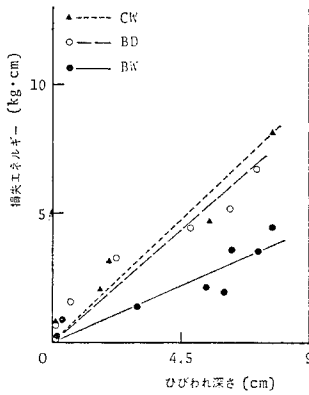


図-15 ひびわれ深さと損失エネルギー

図-15 からわかるように、いずれのグループについても、ひびわれ深さが約4cm以下の場合には、損失エネルギーの割

合に比べてひびわれ深さの割合は若干小さくなる傾向にある。しかし、総じて、どのグループについても、切欠けのあるコンクリート供試体の曲げ破壊過程においては、切欠けからのひびわれ深さは損失エネルギーとはほぼ比例関係にあるとみなすことができよう。この結果から、荷重変位曲線から求めた損失エネルギーによって、巨視的にコンクリートの内部組織の破壊の度合(内部ひびわれ量)の定量化が可能であることが知られる。なお、最大耐力以前の荷重レベルまでの載荷の場合、ここで用いた染色による方法では供試体のひびわれは検出できなかった。なお3.(3)に述べたように、最大耐力点以前に生じたひびわれ量は、供試体破断時の最終的なひびわれ量に比較して相対的に小さい。以上のことから、曲げ破壊過程におけるひびわれは、主として最大耐力を過ぎる時点から急激に進展することがわかる。

(5) 曲げ破壊過程における AE の検出

BD グループの曲げ供試体 1 個 (AE-1 とよぶ) と DD グループの大型曲げ供試体 2 個 (AE-2, AE-3 とよぶ) を用いて、AE 発生源の探査、すなわち、ひびわれ発生源の探査を行った。曲げ供試体 AE-3 については、曲げ破壊過程における AE の発生数を求めた。

本実験で用いた、AE の検出によるひびわれ発生源の探査方法、ならびに AE 発生数の計測方法についての詳しい説明や測定精度についての検討は、それぞれ文献 8) と 9) で行われているので、ここでは、これらの方法の概略のみを記す。

曲げ供試体内の AE 発生源の位置は、4 か所のピックアップで検出した 10~300 kHz の周波数帯の AE 波の到達時間差から求めた。3 個の曲げ供試体についてピックアップのはりつけ位置を 図-16~18 に示す。ペンレコーダーで記録した AE 波の一例を 図-19 に示す。図-19 に示すような AE 波の記録紙上で、ピックアッ

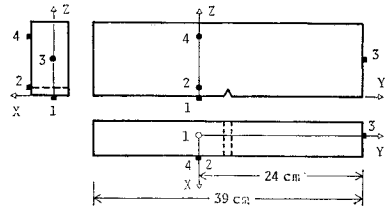


図-16 ピックアップはりつけ位置 (供試体 AE-1)

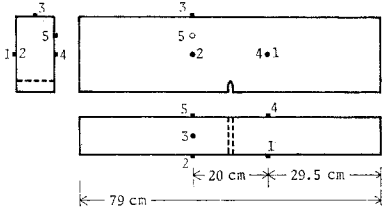


図-17 ピックアップはりつけ位置 (供試体 AE-2)

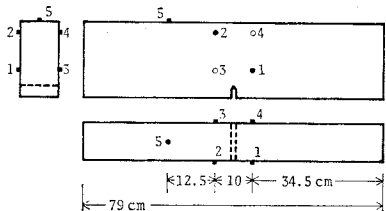


図-18 ピックアップはりつけ位置 (供試体 AE-3)

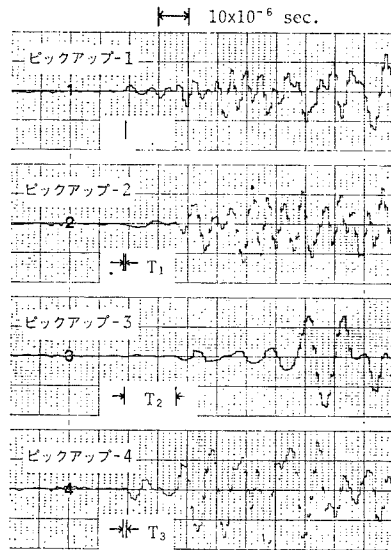


図-19 AE 波の記録例

プ-1 を基準として AE 波の到達時間差 T_i を求め、この到達時間差に AE 波の伝播速度 V をかけて、AE 発生源から各ピックアップまでの距離の差 $T_i V$ を計算した。ピックアップ-1 を原点とする座標系を考え、他のピックアップの座標を (a_i, b_i, c_i) で表わすと、AE 発生源の座標 (x, y, z) は次式を解いて得られる。

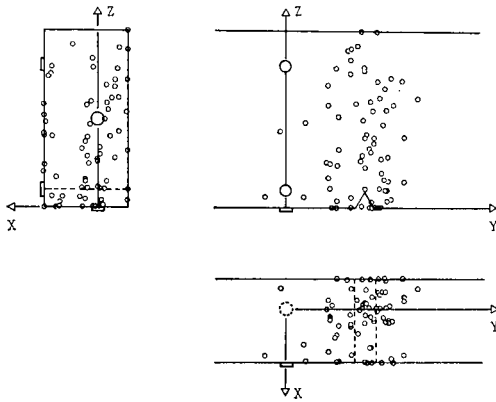


図-20 AE 発生源の位置 (供試体 AE-1)

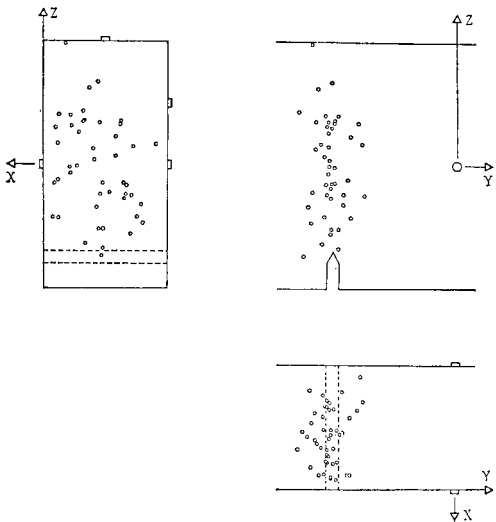


図-21 AE 発生源の位置 (供試体 AE-2)

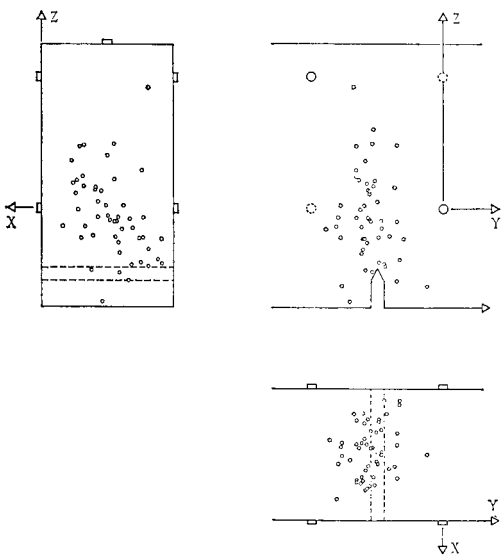


図-22 AE 発生源の位置 (供試体 AE-3)

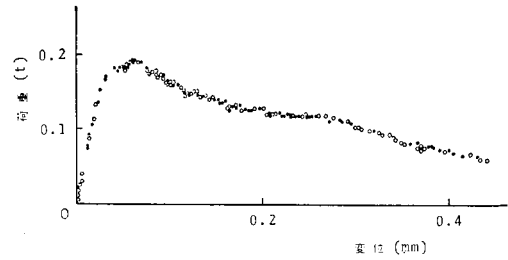


図-23 荷重変位曲線上での発生位置 (供試体 AE-1)

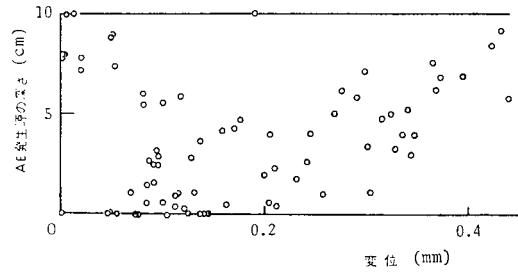


図-26 AE 発生時の供試体変位と AE 発生源の深さ (供試体 AE-1)

$$\sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2 + (z-c_i)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = T_i V \quad (i=1, 2, 3)$$

供試体 AE-1 の AE 波伝播速度は載荷試験前に測定した。供試体 AE-2 と AE-3 では、AE の発生 10 個ごとに、ピックアップ-5 に電流を流して発振させ、載荷試験の途中の各段階における AE 波伝播速度を求めた。

供試体 AE-3 の AE 発生数は、ピックアップ-1 で計測した。AE 発生数の計測では、60 dB に増幅した 20 ~ 300 kHz の周波数帯で 100 mV を越える AE をディスクリミネーターで検出し、10 秒ごとの個数を計数器で記録した。

AE の検出を行った 3 個の曲げ供試体について、計算で求めた AE 発生位置をそれぞれ 図-20~22 に示す。荷重変位曲線上での AE 発生位置を 図-23~25 に示す。これらの図において、○印は計算で AE 発生位置が求まったことを示し、●印は求まらなかったことを示す。供試体内における AE 発生点の深さと、AE 発生時の供試体変位との関係を 図-26~28 に示す。

供試体 AE-1 では、記録した AE 発生点 150 点のうち、計算の結果、AE 発生位置が供試体内に求まったものは 78 点であった。供試体 AE-2 では、記録した AE 発生点 102 点のうち、発生位置が供試体内に求まったものは 46 点であった。供試体 AE-3 では、記録した AE 発生点 124 点のうち、発生位置が供試体内に求まったものは 50 点であった。記録紙上で波形の立ち上がりが不鮮明な場合は、到達時間差を読みとれなかった。また、到達時間差を読みとった場合でも、雑音による波の立ち

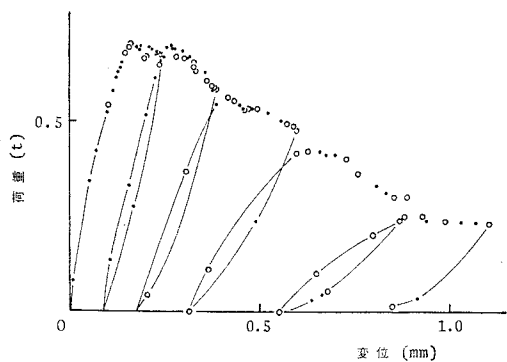


図-24 荷重変位曲線上での AE 発生位置
(供試体 AE-2)

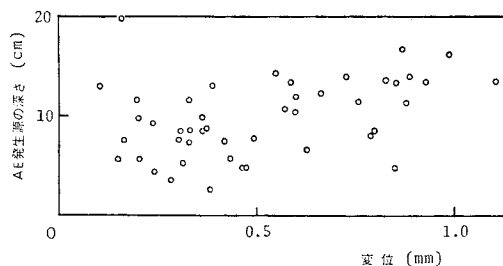


図-27 AE 発生時の供試体変位と AE 発生源の深さ
(供試体 AE-2)

上がりと混同した場合には計算結果を得られなかった。

図-20~22 からわかるように、AE 発生源の位置は供試体中心部で長手方向 (Y 方向) に 3~4 cm の幅で分散している。しかし、AE 発生源の探査精度が約 1 cm 以内であること⁸⁾や、ひびわれ面の凹凸が 1~2 cm あることを考慮すると、AE 発生源の長手方向 (Y 方向) の位置は、実際のひびわれ面にほぼ一致している。AE の発生がコンクリート内部でのひびわれ発生に起因するものであり^{8),9)}、ひびわれの発生が破壊過程におけるエネルギー消散と結びつけられることを考えると、計測の精度から、供試体の曲げ破壊に用いられたエネルギーは、少なくともひびわれ面のごく近傍で消費されていることがわかる。

図-23~28 からわかるように、荷重変位曲線の最初の立ち上がりの部分では AE はあまり発生せず、発生した AE は主として供試体上部中央の載荷点下での微小な凸部の圧壊によって生じている。また、AE 発生点の供試体内での深さは、供試体変位の増大に伴って、供試体の高さ方向 (Z 方向) にも分散しながら、全体として供試体下部から上部へ移行している。

供試体 AE-3 で計測した AE の発生数累計と、供試体の変位との関係を 図-29 に示す。

図-29 からわかるように、最大耐力点 (変位で 0.25 mm) 以前の AE 発生数は相対的に少なく、最大耐力

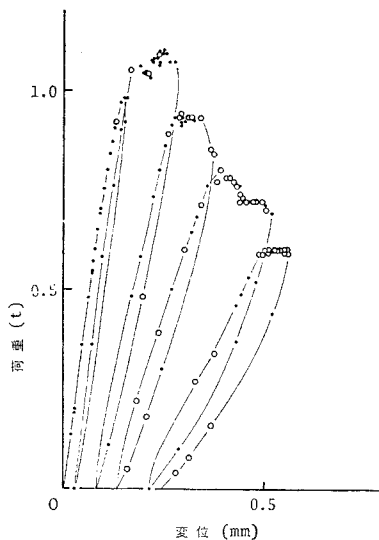


図-25 荷重変位曲線上での AE 発生位置
(供試体 AE-3)

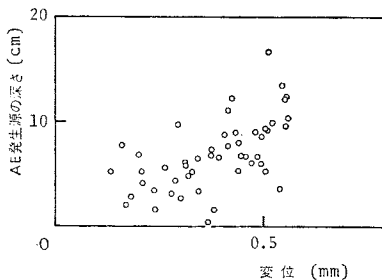


図-28 AE 発生時の供試体変位と AE 発生源の深さ
(供試体 AE-3)

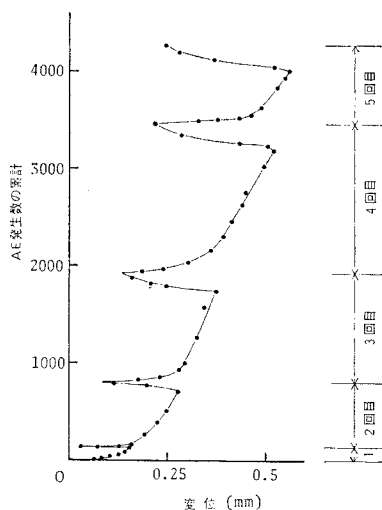
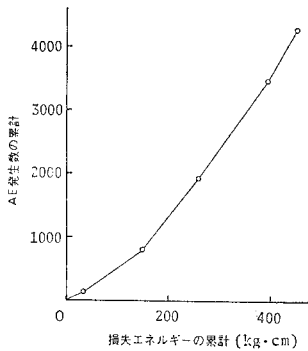


図-29 供試体変位と AE 発生数の累計

点以後において AE 発生数は急激に増加する。このことは、主として最大耐力点以後に曲げひびわれが進展することを示しており、着色によるひびわれ深さの観察結果や荷重変位曲線から求めた損失エネルギーの測定結果



図—30 損失エネルギーの累計と AE 発生数の累計

の示す傾向と一致している。

漸増繰り返し载荷において、途中の除荷および载荷中における AE 発生数は荷重変位曲線の包絡線に沿う区間での発生数に比して相対的に少なく、AE は主として荷重変位曲線の包絡線に沿う区間で発生しており、最大耐力点以後においても、いわゆるカイザー効果⁹⁾に類似した現象がみられる。

供試体 AE-3 では、図—25 に示すように、载荷・除荷を合わせて 5 回行っている。各回での損失エネルギーを定量化し、この損失エネルギーの累計と、AE 発生数の累計との関係を 図—30 に示す。図—30 からわかるように、AE 発生数が増加するにつれて、損失エネルギーも単調に増加している。したがって、同一の条件のもとであれば、AE の発生数の総和によっても、コンクリートの内部組織の破壊の度合を定量的に把握することが可能であろう。しかしながら AE 計測は、ピックアップの特性、ディスクリレベル等に支配されるため、現在のところ AE 計測結果は絶対値として取り扱うよりむしろ 1 つの系の破壊過程を相対的に検討するうえでの量的尺度であると考えられる。この意味から AE 計測については発生数ばかりでなく AE の周波数と発生源の位置の探査を含めてデータを蓄積することによって、幅の概念を含めたひびわれとの対応をより明確にしうるものとする。

5. 結 言

コンクリートの曲げ引張破壊過程をエネルギーの変換過程として検討することを目的とした本論文の結果をまとめると次のとおりである。

(1) 剛性を高めた試験機を用いて、切欠けのある曲げ供試体について、最大耐力点以後の下降域も含めた荷重変位曲線を計測した。曲げ供試体の荷重変位曲線における最大耐力点以後の負の最大勾配は、曲げ耐力の大きいコンクリートほど大となる傾向にあった。

(2) 曲げ供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギー

E_r は、最大耐力点 ($D/D_c=1$) を少し過ぎたところ ($D/D_c=1.1\sim 1.3$) で最大値をとった。湿潤状態のコンクリートでは、乾燥状態のコンクリートに比べて、曲げ供試体に加えられたエネルギー E_t の中で、最大耐力点以前に損失エネルギー E_i に変換される割合は、相対的に大きい。

(3) 曲げ引張破壊過程では、圧縮破壊過程に比較して、最大耐力点までの荷重変位曲線に直線部分が多く、かつ最大耐力点以前において、に加えられたエネルギー E_t に占める損失エネルギー E_i の割合 E_i/E_t が小さい。圧縮破壊過程に比べて曲げ引張破壊過程では、比較的高い荷重レベルでひびわれが発生し、発生したひびわれが供試体の崩壊に結びつきやすいことが、この結果からも説明される。

(4) 曲げ供試体内のひびわれ面を着色して求めたひびわれ深さは、荷重変位曲線から求めた損失エネルギーにほぼ比例する。荷重変位曲線から求めた損失エネルギーによって、コンクリートの内部組織の破壊の度合 (内部ひびわれ量) の定量化が可能である。

(5) 荷重変位曲線から求めた損失エネルギーや、ひびわれ面を着色して求めたひびわれ深さや、AE の発生数ならびに AE の検出によって求めたひびわれ発生源の位置に関する実験結果から、曲げ引張破壊過程におけるひびわれは、主として最大耐力点を過ぎる時点から急激に進展する。

(6) AE の検出によって求めたひびわれ発生源の位置は、実際のひびわれ面とほぼ一致している。このことから、供試体の曲げ引張破壊に使われた損失エネルギーは、ひびわれ面のごく近傍で消費されていることがわかる。

(7) 漸増繰り返し载荷においては、AE は主として荷重変位曲線の包絡線に沿う部分で発生しており、途中の除荷および载荷中における AE 発生数は少ない。すなわち、コンクリートの曲げ引張破壊過程の最大耐力点以後の領域においても、いわゆるカイザー効果に類似した現象が認められた。

6. あとがき

AE 発生数の計測ならびに AE の検出によるひびわれ発生源の探査に関する実験で終始協力していただいた大津政康 京都大学助手に深く謝意を表す。さらに実験ならびに実験結果の整理にあたって協力していただいた大谷賢司氏 (現・住友建設) に感謝する。なお本研究の一部は文部省科学研究費 (一般研究 C) による。

参 考 文 献

- 1) Spooner, D.C. and Dougill, J.W. : A quantitative as-

- essment of damage sustained in concrete during compressive loading, *Mag. Con. Res.*, Vol. 27, No. 92, pp. 151~160, Sept., 1975.
- 2) Spooner, D.C., Pomeroy C.D. and Dougill, J.W. : Damage and energy dissipation in cement pastes in compression, *Mag. Con. Res.*, Vol. 28, No. 94, pp. 21~29, March, 1976.
 - 3) Ashbee, R.A., Heritage, C.A.R. and Jordan, R.W. : The expanded hysteresis loop method for measuring the damping properties of concrete, *Mag. Con. Res.*, Vol. 28, No. 96, pp. 148~169, Sept. 1976.
 - 4) Testa, R.B. and Stubbs, N. : Concrete failure related to constituent properties, *Proc. ASCE*, Vol. 102, No. EM 3, pp. 515~529, June, 1976.
 - 5) Phipps, M.E. : The strain capacity of compression-zone concrete subjected to short-term loading, *Mag. Con. Res.*, Vol. 28, No. 95, pp. 85~100, June, 1976.
 - 6) 岡田 清・小柳 洽・六郷恵哲 : 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, *土木学会論文報告集*, 第 248 号, pp. 129~136, 1976 年 4 月.
 - 7) Okada, K., Koyanagi, W. and Rokugo, K. : Fracture process of concrete in compression, *Proc. 2nd Int. Conf. Mech. Behav. Mat.*, Boston pp. 1358~1362, Aug., 1976.
 - 8) 丹羽義次・小林昭一・大津政康 : アコースティック・エミッションによる破壊源探査, *土木学会論文報告集*, 第 276 号, pp. 135~147, 1978 年 8 月.
 - 9) 丹羽義次・小林昭一・大津政康 : コンクリート構造物のアコースティック・エミッション特性に関する基礎的研究, *土木学会論文報告集*, 第 261 号, pp. 101~112, 1977 年 5 月.
 - 10) 平松良雄・岡田 清・岡 行俊・小柳 洽・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, pp. 447~454, 1975 年 5 月.
 - 11) たとえば, Glücklich, G. : Fracture of plain concrete, *Proc. ASCE*, Vol. 89, No. EM 6, pp. 127~138, Dec., 1963.
小柳 洽 : コンクリートの破壊, *コンクリートライブラリー*, 第 34 号, 土木学会, p. 103.

(1977.11.29・受付)