



# Notched Cylinder を用いたモルタルの破壊靱性試験

尾崎, 叡司

---

(Citation)

神戸大学農学部研究報告, 19(2):135-141

(Issue Date)

1991-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00200528>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00200528>



## Notched Cylinder を用いたモルタルの 破壊靱性試験

尾 崎 叡 司\*

(平成2年8月10日受理)

### FRACTURE TOUGHNESS TEST OF NOTCHED MORTAR CYLINDER

Eiji OZAKI

#### Abstract

The experimental investigations were carried out to examine the influence of notch length, size of cross section and length of cylindrical specimen on the fracture toughness  $K$  of mortar. The fracture toughness values obtained from both the three point bending tests by mean of a single notch beam and the splitting tests by mean of a notched cylinder are compared.

From the experimental results, fracture toughness  $K$  of mortar is influenced by these test factors slightly but the scattering of the values obtained from notched cylinder tests was smaller than the values obtained from another test.

It is considered that notched cylinder is adequate specimen for fracture toughness test with many advantages, and it has a strong potential for standardization.

#### 1 緒 言

コンクリートが各種の外力を受け破壊に至るまでの挙動は初期の弾性的性質を示す線形挙動部分に続いて、非線型挙動を示す部分が現われる。この原因の多くは外力の増加に伴ってコンクリート内部空隙や欠陥に生ずる応力集中により微細なひびわれが発生し、これらのひびわれが累積し、さらに生長連結することに主として基づいていると考えられている。特にコンクリートやモルタルでは圧縮強度に比して引張強度が極めて弱いため、引張、曲げ、剪断力などが作用する場合には、内部応力がある限界値に達すると急速なひびわれ伝播が起り部材が破壊する。このような現象は急速なひびわれ伝播に基づくため、平均的な応力の評価による従来から用いられてきた破壊基準では合理的な解析ができないことから、主として金属材料に対して発展してきた破壊力学的手法のコンクリートやモルタルへの応用が研究されてきている。

NEVILLE (1959)<sup>1)</sup> KAPLAN (1960)<sup>2)</sup> がコンクリート

に破壊力学的検討を加えてから既に30年が経過したが、実験において供試体挙動に対する切り欠き長さ等の影響や、実験に基づいて求められた破壊靱性値 (Fracture Toughness) 等の各種の破壊力学的パラメーターと破壊過程との定量的関係は十分解明されてはいない。コンクリートに破壊力学を適用するためにはコンクリートの破壊過程が破壊力学成立の基礎となっている前呈条件に合致するものでなければならないが、詳細なコンクリートの破壊過程の観察によれば、コンクリートは勿論モルタルにおいてもその破壊過程において切り欠き先端領域にいくつかの安定な微細ひびわれが不連続的に発生し、ある瞬間にそれらのひびわれを縫うような形でひびわれが伝播することが明らかとなった。又、多くの場合ひびわれは一本でなく分岐して滑らかなひびわれ面を形成しないことが観察されている。従って供試体に外力が加わる時には、ある応力・ひずみレベルまで供試体内部にひずみエネルギーが蓄えられ、このエネルギーが破壊面を新しく形成するエネルギーとして一度に消費されるのではなく、切り欠きあるいはひびわれ先端部に形成される微小ひびわれに徐々に使用されることになる。このよ

\* 土地利用工学研究室

うな微細ひびわれが累積されることにより形成される破壊過程領域(Fracture Process Zone)が存在するため、ひびわれの進展長さを明確に評価することが困難であり、非線型領域の形成される範囲が大きいことにより線型弾性破壊力学の前提である非線型領域が供試体に比して十分小さいという条件が満たされず、線型弾性破壊力学のコンクリートへの直接の応用が適切でないことになる。従って、ひびわれ長さ等の評価や破壊に至るまでの破壊過程領域を直接考慮することを回避してコンクリートの破壊を考えることがこの問題の一つの解決方法である。

今、新しいひびわれ面が形成されるために必要なエネルギーは外力の作用中に為した仕事量とそれまでに物体中に蓄えられた弾性ひずみエネルギー減少量の和を考えることにより、荷重-変位曲線で囲まれる面積から新しくひびわれが生じるための単位面積当りのエネルギーを求める方法が考えられ、これによってひびわれ長さや破壊過程の影響に無関係なコンクリートの3点曲げ試験による破壊エネルギー評価法が提案された。RILEN Recommendation<sup>3)</sup>と呼ばれるもので次式で示されている。

$$GF = \frac{W_o + Mg \cdot U_o}{A}$$

ただし、 $W_o$ ：荷重変位曲線で囲まれる面積から求めた仕事量、 $Mg$ ：供試体自重、 $U_o$ ：最大変位、 $GF$ ：新しいひびわれの生長を引き起こすために必要な単位面積当りのエネルギー

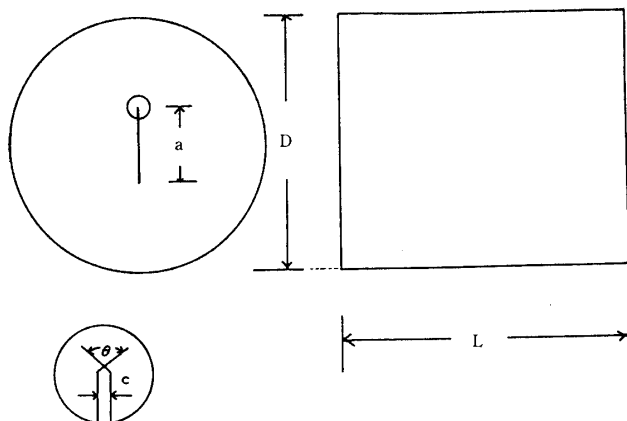
この方法によって求められた $GF$ 値はばらつきが多く、特にコンクリートの場合には骨材の破壊面との位置関係やその大きさが $GF$ 値に影響することが認められ、又 $U_o$ の値のばらつきが大きいことに依存していることが問題点となっている。今、骨材に関係する点は別に考えて、これ以外の問題点はこの試験方法が3点曲げ試験によっていることによるものと考えられ、より一様な応力場でより滑らかな破壊面を生ずる円柱供試体の割裂試験の応用がより合理的結果を与えるものと予想される。このような観点から切り欠きスリットを有する円柱供試体による割裂試験を適用して破壊力学パラメーターの検討を行ったので報告する。

## 2 実験方法

本実験に使用した材料はコンクリートに比して不均質性の低いモルタルであって、その配合比はセメント：砂＝1：2であり、又水セメント比  $W/C = 0.65$  のものである。基本的には直径10.0cm、長さ20.0cm円柱体

で、長さに関しては30mmから150mmまで30mm間隔で変化させた。

又、円柱供試体の中心軸に沿って直径上に長さ20.5、31.1、41.6、50.9mmの切り欠き長さをもつ幅2.0mm先端角は約100°のスリットを設けたものを使用した。材令28日のものを供試した。



|        |              |                        |
|--------|--------------|------------------------|
| 供試体直径  | D (mm)       | 100                    |
| 供試体長さ  | L (mm)       | 30～150 (約30mmきざみ)      |
| 切り欠き長さ | a (mm)       | 20.5, 31.1, 41.6, 50.9 |
| Vノッチ角  | $\theta$ (°) | 約100°                  |
| 切り欠き幅  | c (mm)       | 2                      |

図1 Notched Cylinder供試体の外観

載荷方法はひずみ制御方式により、0.3mm/minの一定速度で載荷し、7秒間隔で測定し荷重及び変形量は自動計測して記録している。又、従来から行ってきた一連のモルタルの破壊力学的実験において実施してきた Acoustic Emission の計測<sup>4)</sup>を同時に行ない、破壊の進行領域の観察を行ない限界荷重の決定を行なうのに利用した。AE計測システムは図-2の通りである。

## 3 実験結果を考察

コンクリートの破壊力学実験に多く用いられている3点曲げ試験方法では切り欠き先端部から破断面部分での応力分布が複雑であり、破断面途中から応力が引張から圧縮に変化し、その応力の大きさも変化して一定ではない。この影響が破壊進行領域の形成にも関係し、応力-ひずみ曲線の形状が破壊荷重、変位量のばらつきの一つの主原因になっているものと考えられる。一方円柱供試体の割裂試験においては、スリットを含む直径上の応力分布は二軸応力状態になるが径に垂直な応力は一定値となり、剪断力は零となる。即ち

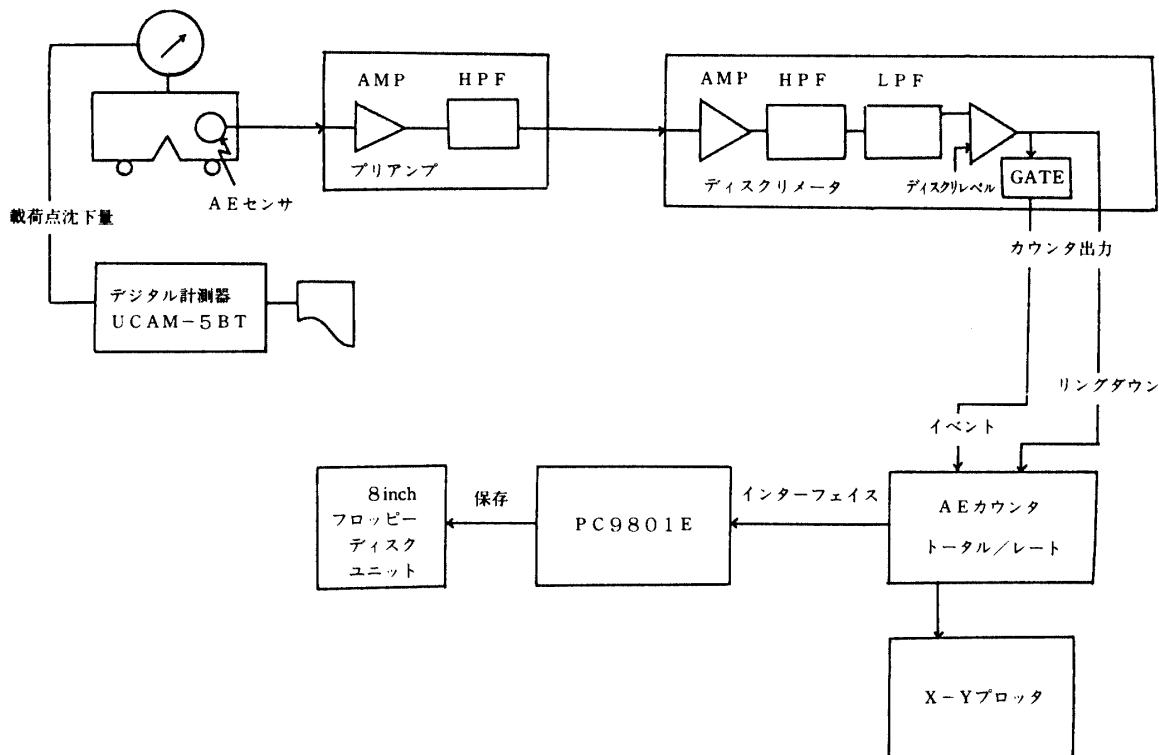


図2 AE計測システムのブロック・ダイアグラム

$$\sigma_x = \frac{2p}{\pi D}, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (1)$$

この解析結果は平面ひずみ状態を考えることにより二次元的に求めたものである。円柱供試体においては

$$p = \frac{P}{L} \quad (2)$$

であるから、従って供試体の引張強度  $\sigma_t$  は次式で与えられることになる。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3)$$

ただし、 $P$  : 供試体に作用する全線荷重、 $L$  : 供試体の長さ、 $p$  : 単位長さ当りの荷重強度、 $D$  : 供試体直径

(3)式は理想的に線荷重が作用した場合の結果であり、実際の割裂試験においては荷重が帯状となり、この影響による補正係数が筆者等によって求められている。今、補正係数を  $g(t)$  とすれば

$$g(t) = 2\sqrt{1-t^2} - \frac{1}{t} \sin^{-1}(t) \quad (4)$$

ここに  $t = \frac{2a}{D}$  で  $2a$  は帯状荷重幅である。

通常の割裂試験においては  $t = \frac{1}{15} \sim \frac{1}{12}$  であるので  $g(t)$  の値は 1.99 ~ 1.98 となる。従って  $t = 1/12$  のとき

$$\sigma_t = \frac{1.98P}{\pi DL} \quad (5)$$

で求められる。(5)式で与えられる上下帯状荷重重間の直径平面上の引張応力は、その面積の約80%以上で様な応力となる。直径平面上に切り欠きスリットを設けた供試体を使用する本実験においては3点曲げ試験における破壊面近傍の応力場に比してより一様な引張応力場で試験が行われるものと考えてよい。

本実験での荷重( $p$ )～変位( $d$ )曲線の一つが図-3に示される。載荷初期段階では変位(沈下)量は小さく、ほぼ線型関係を示す。強度の小さい切り欠き長さの大きい供試体ほど非線型性を示す領域が早く現れる。このような傾向は切り欠きを有する梁の3点曲げ試験において

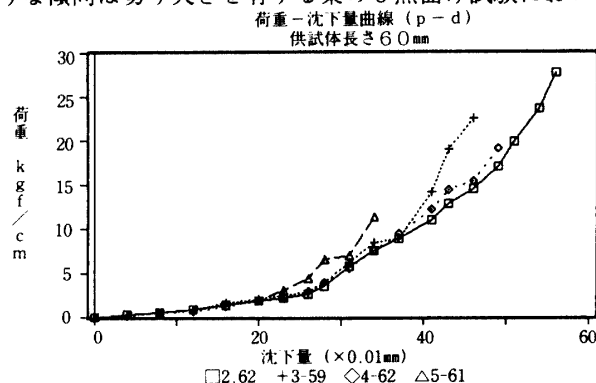


図3 Notched Cylinder による割裂実験のp-d曲線の例

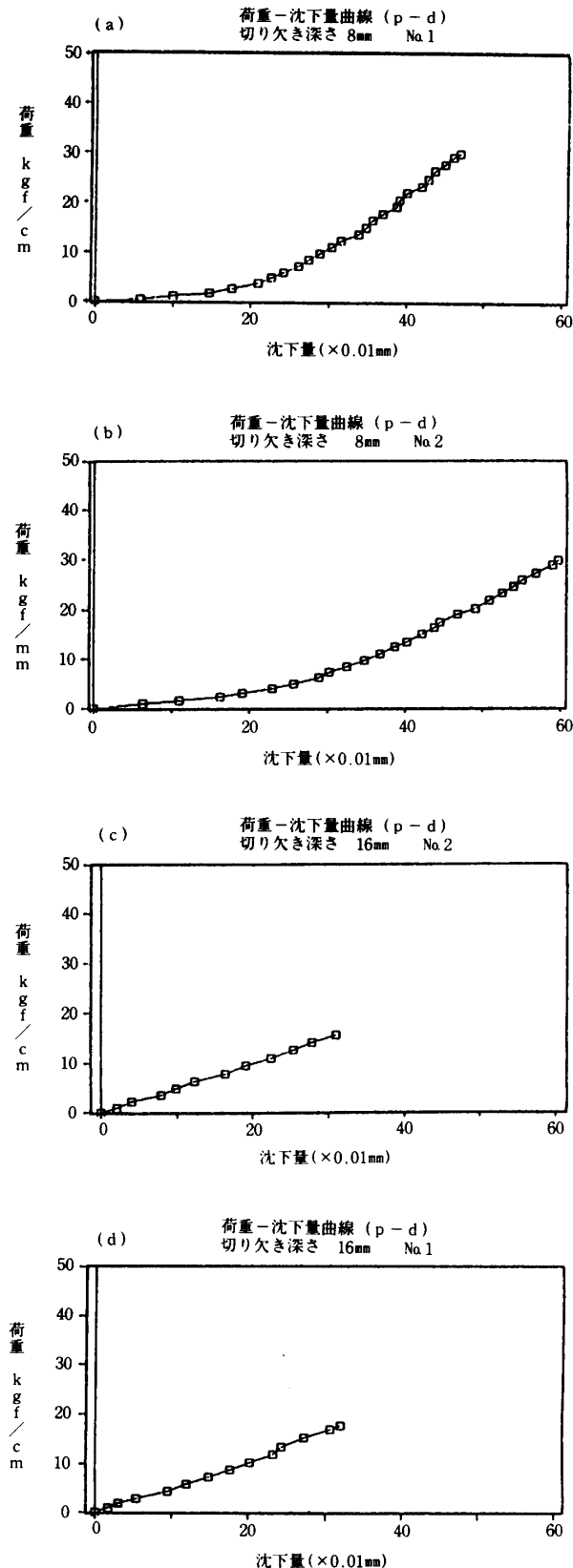


図4 (a)、(b)、(c)、(d)沈下速度一定下におけるV型 notch beamの3点曲げ試験のp-d曲線

もみられる (図-4)。

本実験においては切り欠きを有する梁の3点曲げ試験と切り欠きスリットを有する円柱供試体の割裂試験との比較が主たる目的であるため、破壊進行過程等の問題は後に検討することとして、AE計測値の安定ひびわれ成長の限界点より求めた限界荷重にもとづき次式で破壊靱性値 $K_{Ic}$ を次式から求めた<sup>6),7)</sup>。

$$K_{Ic} = \frac{2P_c}{LD} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \left| 0.9566 + 0.6779 \left( \frac{a}{R} \right) 0.9932 \left( \frac{a}{R} \right)^2 + 2.677 \left( \frac{a}{R} \right)^3 \right| \quad (6)$$

ここで、 $a$ ：切り欠きスリットの1/2の長さ、 $R$ ：供試体半径、 $P_c$ ：限界荷重、 $L$ ：供試体の長さ、 $D=2R$

その結果が表1～3である。上の(6)式はLEFMによるものであり、本来微小ひびわれの成長域が大きい場合には適用に問題があるが、試験はひずみ制御でほぼ荷重～時間関係が直線の部分、即ち荷重～ひずみ関係がほぼ直線の部分で限界荷重を考えている。これは先に実施した切り欠きを有する梁供試体における試験値と比較するため同一の限界荷重の採り方をしたためであり、続いて詳細に検討すべき事項であり、RILEMの方法での比較検討を進めている。

同一配合のモルタル供試体による3点曲げ試験と円柱割裂試験によって得られた破壊靱性値の例が図-5、6である。破壊靱性値は3点曲げ試験によるものの方がちがりが大きく、割裂試験の方がちがりは小さく、比較的一定値に近い値を与えている。この点から考えて、割裂試験の方が精度的にまさるものといえる。

破壊靱性値を求める際に必要となる限界荷重の決定方法であるが、AEの total count 曲線上での安定ひびわれ領域の終点に対応する荷重を限界荷重として採用している (図-7)。この方法は3点曲げ試験の場合と同様である。

AE曲線上での変曲点は円柱割裂試験の場合の方が明確に判別できる場合が多い。3点曲げ試験においてAE曲線上の変曲点が明確に判別できる割合は平均34.4%であったのに対し円柱割裂試験の場合は70.0%に達した。又限界荷重の破壊荷重に対する比を同時に示したのが表-4である。又、この結果からも3点曲げ試験に比して円柱割裂試験の方が破壊力学的な試験法として優れているものと判断される。

図-5 (b)は切り欠き長さに対する破壊靱性値の関係を示しているから、切り欠き感度を表している。この図より切り欠き感度がほぼ一定であるから、今後の研究においてはより短い円柱供試体の使用可能なことを示唆し

表-1 No. 1 Notched Cylinder 供試体の破壊靱性値

| 供試体番号 | 破壊荷重 $P_f$ (kgf) | 限界荷重 $P_c$ (kgf) | $P_c/P_f$ (%) | 応力拡大係数による KIC (kgf/mm <sup>3/2</sup> ) |
|-------|------------------|------------------|---------------|----------------------------------------|
| 2-31  | 933.3            | 746.6            | 80            | 2.048                                  |
| 2-62  | 1723.4           | 1378.7           | 80            | 1.891                                  |
| 2-91  | 3651.8           | 3182.5           | 87            | 2.910                                  |
| 2-122 | 4557.2           | 3372.3           | 74            | 2.313                                  |
| 2-149 | 5382.8           | 4467.7           | 83            | 2.451                                  |
| 3-32  | 961.6            | 769.3            | 80            | 2.766                                  |
| 3-59  | 1334.9           | 1067.9           | 80            | 1.920                                  |
| 3-92  | 2525.0           | 1969.5           | 78            | 2.361                                  |
| 3-122 | 3656.7           | 3071.0           | 84            | 3.296                                  |
| 3-151 | 4702.4           | 4326.2           | 92            | 3.111                                  |
| 4-32  | 524.8            | 482.8            | 92            | 2.179                                  |
| 4-62  | 1188.2           | 950.6            | 80            | 2.145                                  |
| 4-91  | 1920.8           | 1459.8           | 76            | 2.169                                  |
| 4-122 | 2535.5           | 2408.7           | 95            | 2.718                                  |
| 4-152 | 3328.4           | 2362.9           | 71            | 2.133                                  |
| 5-31  | 300.1            | 240.1            | 80            | 1.336                                  |
| 5-61  | 688.6            | 550.9            | 80            | 1.532                                  |
| 5-92  | 1305.8           | 1188.3           | 91            | 2.203                                  |
| 5-121 | 1919.0           | 1535.2           | 80            | 2.135                                  |
| 5-150 | 2234.3           | 2100.2           | 94            | 2.336                                  |

表-2 No. 2 Notched Cylinder 供試体の破壊靱性値

| 供試体番号 | 破壊荷重 $P_f$ (kgf) | 限界荷重 $P_c$ (kgf) | $P_c/P_f$ (%) | 応力拡大係数による KIC (kgf/mm <sup>3/2</sup> ) |
|-------|------------------|------------------|---------------|----------------------------------------|
| 2-32  | 865.2            | 744.1            | 86            | 2.041                                  |
| 2-61  | 1536.1           | 1228.9           | 80            | 1.686                                  |
| 2-90  | 4206.3           | 3701.5           | 88            | 3.385                                  |
| 2-121 | 4256.2           | 3958.3           | 93            | 2.715                                  |
| 2-148 | 4836.3           | 3772.3           | 78            | 2.070                                  |
| 3-30  | 623.4            | 573.5            | 92            | 2.062                                  |
| 3-59  | 1125.2           | 855.2            | 76            | 1.538                                  |
| 3-91  | 2436.5           | 1949.2           | 80            | 2.336                                  |
| 3-120 | 3827.6           | 3176.9           | 83            | 2.856                                  |
| 3-151 | 4632.5           | 3428.1           | 74            | 2.465                                  |
| 4-30  | 473.2            | 378.6            | 80            | 1.709                                  |
| 4-61  | 1234.5           | 987.6            | 80            | 2.229                                  |
| 4-92  | 2064.5           | 1878.7           | 91            | 2.826                                  |
| 4-120 | 2635.2           | 1871.0           | 71            | 2.111                                  |
| 4-151 | 3827.5           | 3176.8           | 83            | 2.867                                  |
| 5-32  | 396.2            | 313.0            | 79            | 1.741                                  |
| 5-60  | 702.5            | 569.0            | 81            | 1.583                                  |
| 5-91  | 1102.5           | 882.0            | 80            | 1.635                                  |
| 5-119 | 1892.5           | 1760.0           | 93            | 2.447                                  |
| 5-152 | 2096.5           | 1635.3           | 78            | 1.819                                  |

表-3 No. 3 Notched Cylinder 供試体の破壊靱性値

| 供試体番号 | 破壊荷重 $P_f$ (kgf) | 限界荷重 $P_c$ (kgf) | $P_c/P_f$ (%) | 応力拡大係数による KIC (kgf/mm <sup>3/2</sup> ) |
|-------|------------------|------------------|---------------|----------------------------------------|
| 2-31  | 811.3            | 665.3            | 82            | 1.825                                  |
| 2-60  | 1235.6           | 988.5            | 80            | 1.356                                  |
| 2-93  | 3652.4           | 3360.2           | 92            | 3.073                                  |
| 2-122 | 4251.6           | 3572.1           | 79            | 2.450                                  |
| 2-152 | 5271.6           | 4270.0           | 81            | 2.343                                  |
| 3-31  | 872.4            | 820.1            | 94            | 2.949                                  |
| 3-57  | 1251.5           | 1026.2           | 82            | 1.845                                  |
| 3-90  | 2635.4           | 1818.4           | 69            | 2.180                                  |
| 3-121 | 3235.4           | 2394.2           | 74            | 2.152                                  |
| 3-149 | 4295.4           | 3565.2           | 83            | 2.564                                  |
| 4-32  | 627.5            | 539.7            | 86            | 2.436                                  |
| 4-60  | 989.6            | 791.7            | 80            | 1.786                                  |
| 4-91  | 1826.4           | 1534.2           | 84            | 2.308                                  |
| 4-121 | 2321.4           | 1857.1           | 80            | 2.095                                  |
| 4-152 | 3526.4           | 2962.2           | 84            | 2.355                                  |
| 5-30  | 419.6            | 335.7            | 80            | 1.867                                  |
| 5-61  | 991.2            | 872.3            | 88            | 2.426                                  |
| 5-89  | 1326.4           | 1061.1           | 80            | 1.967                                  |
| 5-120 | 2132.4           | 1428.7           | 67            | 1.987                                  |
| 5-152 | 2562.1           | 2203.4           | 86            | 2.451                                  |

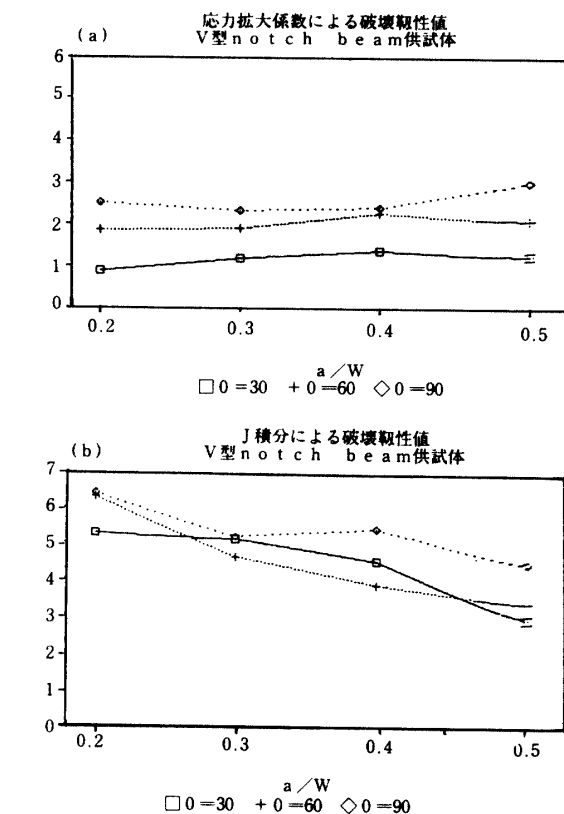


図5 (a), (b) 切り欠き深さと破壊靱性値の関係

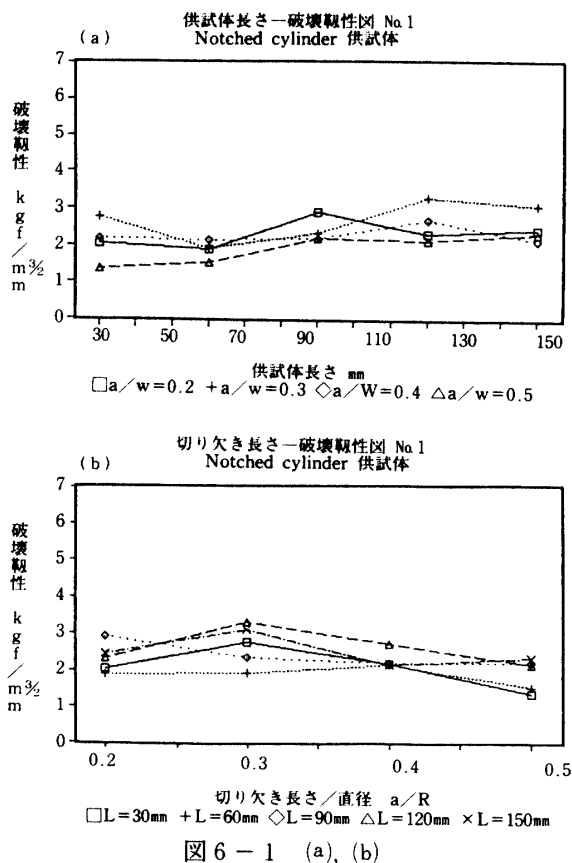
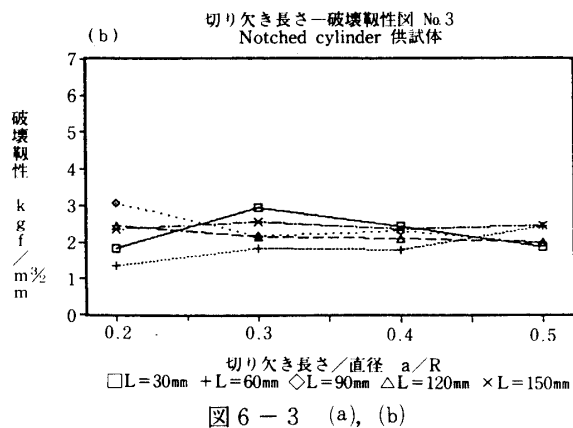
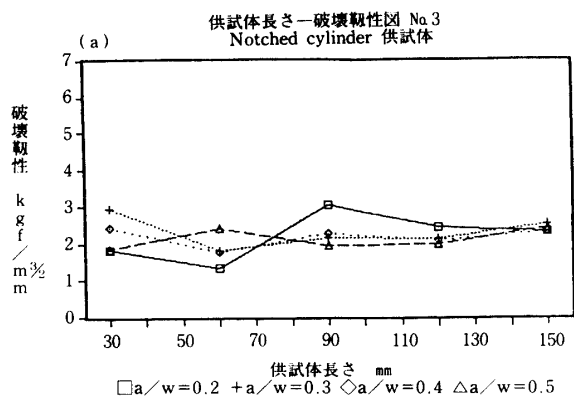
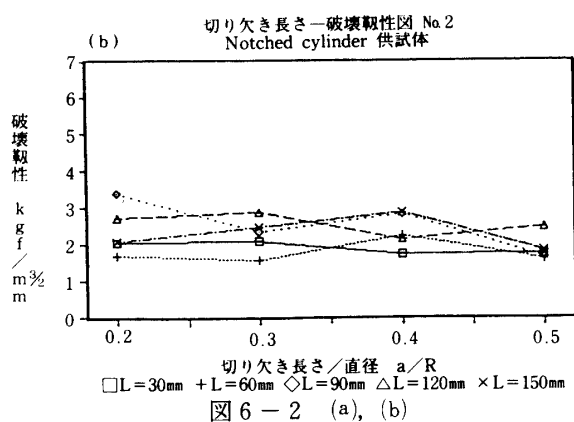
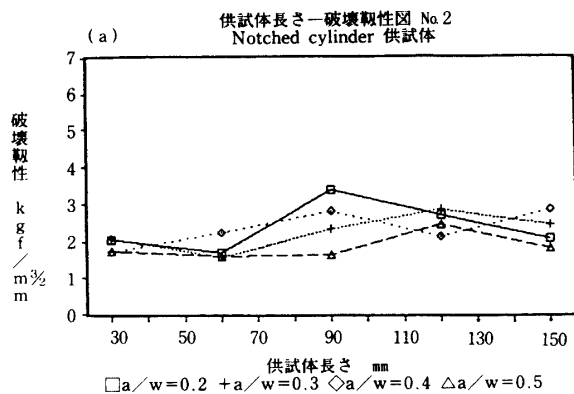
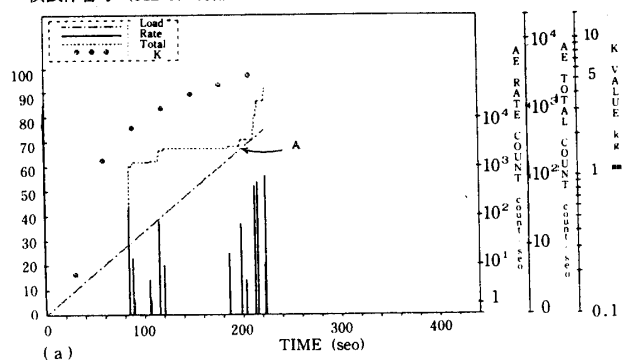


図6-1 (a), (b)



供試体番号 (612-9) 材齢28日



供試体番号 (320-10) 材齢28日

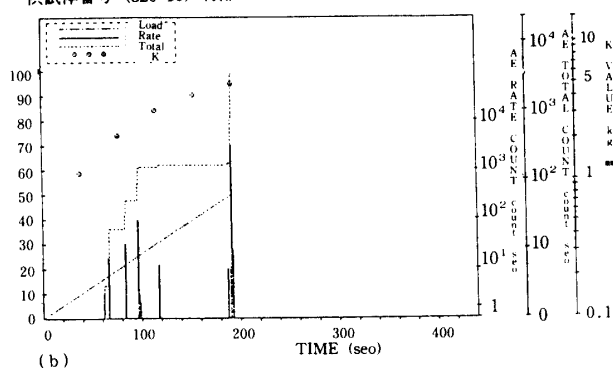


図 7 (a), (b)

表-4 (a) V型 notch beam による3点曲げ試験の場合

| 切り欠き<br>深 さ | AE TOTAL COUNT の指数的な増<br>加が確認できるものの割合 | $P_c/P_f \times 100$<br>(%) |
|-------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 8mm         | 52.2%                                 | 86%                         |
| 12mm        | 30.4%                                 | 84%                         |
| 16mm        | 26.1%                                 | 91%                         |
| 20mm        | 28.7%                                 | 88%                         |

表 4 (b) Notched cylinderの割裂試験の場合

| 切り欠き<br>深 さ | AE TOTAL COUNT の指数的な増<br>加が確認できるものの割合 | $P_c/P_f \times 100$<br>(%) |
|-------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 20mm        | 73.3%                                 | 81.8%                       |
| 30mm        | 80.0%                                 | 81.8%                       |
| 40mm        | 66.7%                                 | 82.3%                       |
| 50mm        | 60.0%                                 | 84.1%                       |

ており、実験上の利益は大きい。この実験結果は破壊進行領域（緩速ひびわれ伝播）の影響を含んでいる。供試体の長さ（ $L$ ）と直径（ $D$ ）の比にも破壊靱性値はあまり影響されず、ほぼ一定の値を示すから、上述の限界荷重の決定方法が不相当であるとは必ずしも云えない。緩速ひびわれ伝播がはじまる点、即ち破壊進行領域の影響を全く取り除くとすれば、AE累積曲線が一定値を示し始める初期の変曲点に対応する荷重を限界荷重と考えなければならないが、この限界荷重は破壊荷重に対して極めて小さく、従ってこの限界荷重により決定される破壊靱性値は現実的には有意義ではないと考えられる。又、AE計測から判断されるところでは、緩速ひびわれ伝播は荷重～ひずみ関係が線型関係を示す領域において、既にはじまっていると考えられることにも依る。

破壊靱性値が完全に一定値を示さず、ちらばりが生じる原因の一つに供試体作製時の不均質さが挙げられる。

このような原因は完全に取り除くことは不可能であるが、供試体長さの大きいものから適宜切り取る等の方法によりちらばりを減少させることができる。

#### 4 結 論

モルタルの破壊靱性値を求める方法として提案された RILEM Recommendation の 3 点曲げ試験法による場合に比して円柱供試体を用い割裂試験方法の方が得られた結果のちらばりが小さく、多くの利点をもつため有望な方法と考えられる。破壊靱性値が供試体の長さ（ $L$ ）と直径（ $D$ ）の比  $L/D$  に依存せず、又切り欠き感度もほぼ一定値を示すことがその主たる理由である。

本実験においても得られた破壊靱性値は完全に妥当な

一定値ではなくかなりのちらばりがあった。これは LEFM による計算式を用いたことによるとも考えられるが、少なくとも破壊に至るまでの微小ひびわれ量やひびわれの伝播速度によるところが多いであろう。従って今後の大きい検討課題として、破壊進行領域と破壊靱性値の間の詳細な検討が必要不可欠であり、一つの方法として破壊進行領域を含めたエネルギーによる検討が考えられる。この方針に従った実験を行ないつつ次回に報告する。

#### 5 結 語

本研究を実施するに当り林茂樹（現特許庁）、松岡浩司（現兵庫県）両君の労に負うところが大きい。ここに記して感謝の意を表する。

#### 6 文 献

- 1) NEVILLE, A. M. : *Civil Eng.*, 54, 1153, 1959.
- 2) KAPLAN, F. M. : *Jour. ACI.*, 58, 192~610, 1961.
- 3) RILEM Draft Recommendation : *Materials and Structures*, 18 (106), 285~290, 1985.
- 4) 尾崎勲司 : 神大農研報, 18 (2), 181~185, 1989.
- 5) 尾崎勲司, 増川 晋, 菊池一雄, 北浦豊明 : 神大農研報, 16 (2), 427~434, 1985.
- 6) ROOK, D. P., Cartwright, D. J. : *Her Majesty's Stationary office*, London U. K., 1976.
- 7) OJEDROVIC, R. P., PETROSKI, H. J. : *Jour. Eng. Mech.*, ASCE, 113 (10), 1551~1564, 1987.