

[66] セメントペーストおよびモルタルの破壊靱性におよぼす試験因子について

正会員○大岸佐吉 (名古屋工業大学)

高津 学 (名古屋工業大学)

正会員 小野博宣 (中部大学工学部)

武田祥志 (名古屋工業大学)

1. まえがき

近來、材料の破壊に対する抵抗性を強度以外の面で評価する試みが行われており、靱性破壊の分野が先導して発展してきた。等方性均質材料の破壊評価のパラメータとして破壊靱性(Fracture toughness)が考えられている。線形破壊力学では、き裂のある線形弾性体のき裂周辺の力学状態を完全に記述する量として応力拡大係数 K が用いられ、また他の評価方法としてひずみエネルギー解放率 G_c 、き裂成長抵抗 R 曲線法などが提起されている。弾塑性破壊力学では、塑性応力拡大係数 K_{ps} 、平面ひずみ破壊靱性 J_c 、き裂先端開口変位(CTOD)などの検討が進んでいる。元来 K_{IC} は均質等方性弾性材料に対するものであるから、不均質材料では吟味と補正を必要とする。

本研究はセメントペーストおよびモルタルの限界応力拡大係数 K_{IC} に及ぼすノッチ深さ比(a/D)、ノッチ厚(t)の影響を実験的に明らかにし、また K_{IC} に及ぼす試験体はり高(D)ならびに細骨材の粗粒率(FM)の影響をも明確にすることを目的とする。ペースト、モルタル、コンクリートの K_{IC} に関し既に若干の研究例がある。

2. 破壊靱性の解析法

破壊靱性の評価には種々の方法があるが、(a) Notch beam 法、(b) Double torsion 法、(c) Chevron 法の三方法について同一条件下で試験し同じ値を得ることを確認したので、本研究では図1に示す4点曲げノッチビームによった。この場合の限界応力拡大係数 K_{IC} は式(2.1)で求められ、同式中の Y は式(2.2)で得られる。

$$K_{IC} = \frac{3 P (S_1 - S_2) \sqrt{a}}{2 B D^2} \cdot Y \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Y = 1.99 - 2.47 (a/D) + 12.97 (a/D)^2 - 23.17 (a/D)^3 + 24.80 (a/D)^4 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

3点曲げ試験方法では、式(2.1)

で $S_2 = 0$ として、

式(2.2)の右辺は

全く同一形式である。ただ $S_1 = 4D$

の場合において5

つの各定数は前か

ら順に、

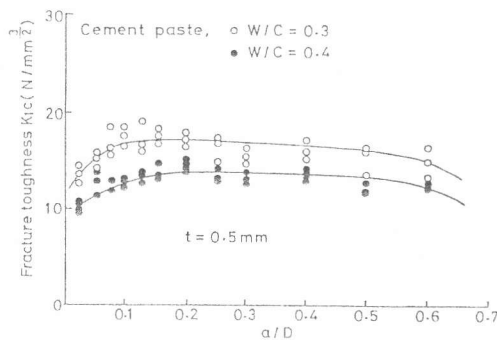


図2. セメントペーストの a/D と K_{IC} 。

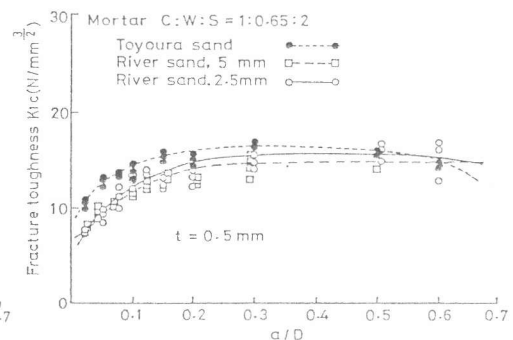


図3. モルタルの a/D と K_{IC} の関係。

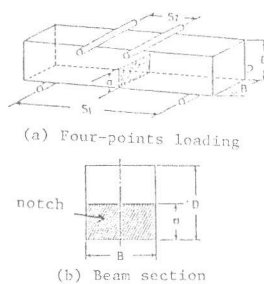


図1. ノッチビーム法。

表1 各種ノッチ厚み下でのノッチ深さと K_{IC} の実験結果。 K_{IC} (N/mm^{3/2})

Notch Depth a (mm)	a/D	Cement Paste W/C = 0.35 Notch Thickness: t (mm)					Cement Mortar W/C = 0.45 S/C = 1.0 Notch Thickness: t (mm)				
		0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0
4	0.1	14.57	14.55	13.69	14.95	14.79	14.21	16.79	15.16	15.45	16.77
6	0.15	13.78	15.03	13.96	14.80	14.31	18.37	18.91	17.37	18.80	16.78
10	0.25	14.49	14.96	15.42	14.16	14.58	19.32	20.80	18.79	21.21	20.06
15	0.37	14.27	15.76	15.66	14.23	14.98	20.55	20.91	20.36	21.87	21.33
20	0.5	14.09	15.40	15.60	14.69	14.78	22.39	22.05	20.77	22.25	21.90
25	0.62	14.11	15.65	15.87	15.48	15.15	22.88	24.83	21.13	24.13	23.60

Specimen: 40 x 40 x 160 (mm), Ordinary portland cement, Toyoura standard sand,

表2 K_{IC} の供試体寸法依存に関する実験結果 (4点法)

Specimen D × B × S (mm) (cf. Fig. 1)	Span S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Notch a (mm)	a/D	Cement Paste $\bar{K}_{IC}$ (N/mm ^{3/2})	Cement Mortar $\bar{K}_{IC}$ (N/mm ^{3/2})
30 × 30 × 120	22.5	90	15	0.5	9.59	17.45
40 × 40 × 160	30.0	120	20	0.5	14.25	20.62
50 × 50 × 200	37.5	150	25	0.5	13.26	20.01
60 × 60 × 240	45.0	180	30	0.5	13.60	19.74
70 × 70 × 280	52.5	210	35	0.5	13.79	19.99
140 × 140 × 560	150.0	420	70	0.5	5.16	19.48
240 × 240 × 960	180.0	720	140	0.5	---	23.25

D : B : S : S₁ : S₂ = 1 : 1 : 4 : 3 : 0.75
Cement Paste : W/C = 0.35, Cement Mortar : W/C = 0.45 S/C = 1.0

1.93, - 3.07, 14.53, - 25.11,
+ 25.80 とする。以上は、
W. F. Brown and J. E. Sraw
-ley (ASTM, STP 410, PP.
13~14, 1967) の解析結果によ
ったものである。

3. 実験方法

3.1 使用材料、調合

使用セメントは普通ポルト
ランドセメント (比重 3.16), 細骨材は豊浦標準砂 (比重 2.64, 吸水
率 0.2%), K_{IC} の F M 依存性のみ大井川産砂 (2.65) を粒度調整して
使用した。実験に供したセメントペーストとモルタルの重量調合を表
1~表4に示す。各試験用供試体寸法も同表中に掲げた。

3.2 試験項目と試験要項

セメントペースト (P) とモルタル (M) の K_{IC} に関し次の4項を試験。

- (1) 各種ノッチ厚みでの K_{IC} のノッチ深さ依存 [P, M] 四点ビーム法
- (2) 一定ノッチ深さでの K_{IC} の供試体断面寸法依存 [P, M] 同上
- (3) 一定ノッチ深さでの K_{IC} のはり成寸法依存 [P, M] 同上
- (4) 一定の寸法条件での K_{IC} の砂の粗粒率依存 [M] 同上

ノッチは、混練り材料を型枠に充填した1~2時間後、プラスチック
薄板を所定寸法に裁断したものの両面にシリコングリスを塗布し
セメントとの付着をなくして、所定の位置に充填材内に埋め込むこと
により導入した。20°C室内で1日間、その後28日まで水中養生す。
上記4試験とも湿潤試験体について4点曲げノッチビーム法によった。
クロスヘッドスピードは総て一定値 0.1 (mm/min) とした。4個の平均。

4. 実験結果と考察

4.1 K_{IC} のノッチ深さ比 (a/D) 依存性

ノッチ厚みを $t = 0.2 \sim 1.0$ mm の5段階に変化した場合のセメントペ
ーストとモルタルの K_{IC} のノッチ深さ比 (a/D) = 0.1~0.62間での影響の
実験結果を表1に示す。これを図示したものが図4と図5である。

図9. モルタルでのノッチ厚み t と実験常数 α 。

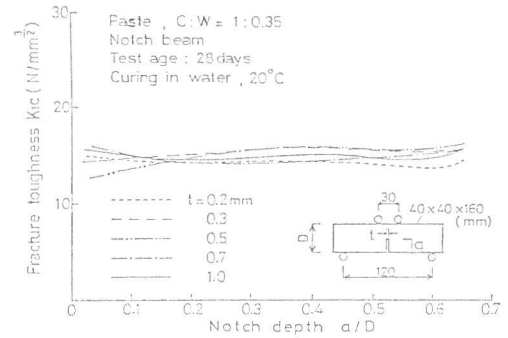


図4. セメントペーストの a/D と K_{IC} 。

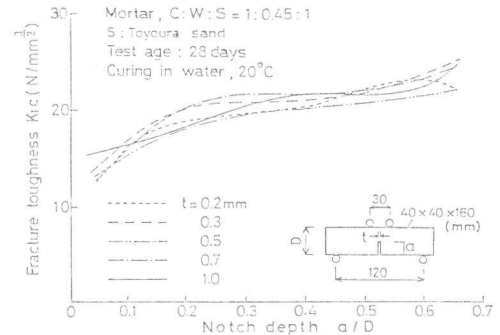


図5. モルタルのノッチ深さ比 a/D と K_{IC} 。

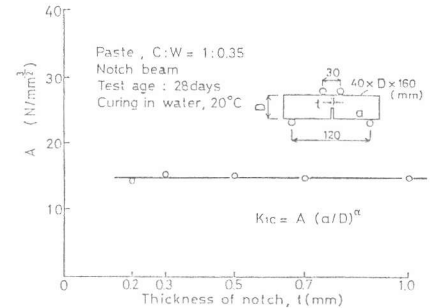


図7. ノッチ厚み t と実験常数 A。

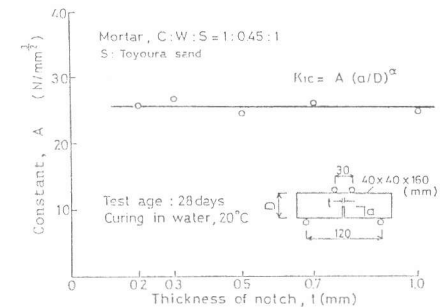


図8. ノッチ厚み t と実験常数 A。

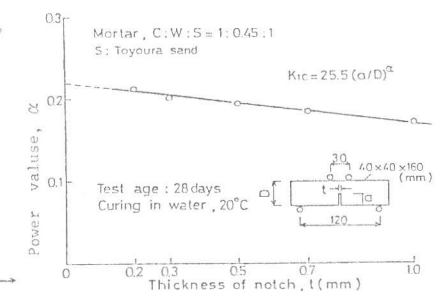


図4から実験されたノッチ厚の範囲では K_{IC} に大きな影響を及ぼさないことがわかる。また同図からペーストの K_{IC} は $(a/D) = 0.15 \sim 0.5$ 間ではほぼ一定しているといえる。このことは別の調査¹⁰⁾($W/C = 0.1$ と 0.4 のペーストに関する図1の実験結果によってさらに明確である。以上は他の文献の結果とも符合している。

モルタルでは図5にみる如く、 K_{IC} は (a/D) の増加により増大変化する。図5の関係を対数で書き直したものが図6である。これによればモルタルの K_{IC} は式(4.1)で表わされ、同式中の定数 A と α はそれぞれ図8と図9で示される。すなわち a はノッチ厚の関数として式(4.2)の如く表わされ、 β と γ は下の如く定まる。

$$K_{IC} = A (a/D)^\alpha \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで $A = 25.5 \dots$ (モルタル), $14.8 \dots$ (ペースト)

$$a = \beta - \gamma(t) \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\beta = 0.22, \gamma = 0.038$$

ペーストでは (a/D) にかかわらず安定した値をとる。この場合は式(4.2)で $\beta = 0, \gamma = 0$ とみなされる。

大約 K_{IC} はペーストで15、モルタルで $20 \text{ N/mm}^{3/2}$ である。

4.2 K_{IC} の供試体断面寸法依存性

多くの K_{IC} の研究例ではある定まった寸法の供試体についてのみ行われるものが多い。ここでは表2に示す7段階のはり断面について K_{IC} の寸法依存を調べた。この実験では各寸法比は次の如く一定とした。つまり $(a/D) = 0.5, (S_1/S_2) = 2.5, S_1/D = 7.5$

ペーストの K_{IC} のはり断面寸法依存の実験結果を図10に示した。 $40 \leq B = D \leq 70 \text{ mm}$ 区間で K_{IC} は安定した値を示す。 $B = 140 \text{ mm}$ でも多分同一値とおもわれるが試験体製作に不備があって乱れた。

図11はモルタルに関するはり断面寸法依存の結果を示す。この場合も $B = D = 40 \sim 140 (\text{mm})$ において一定値を示した。ペーストでは $K_{IC} \approx 14$ 、モルタルでは $K_{IC} \approx 20$ であり、前節の結果と殆んど同じ値をえた。

安定した K_{IC} を知るうえでノッチ付き試験ばりの成はコンクリートの場合23cm以上が必要であるとP.W. Walsh (Mag. Con. Res. 28, 94, Mar. PP.37~41, 1976)が指摘している。しかしペーストやモルタルでこのような大寸法の試験例はなく、また不必要と考えられる。

4.3 K_{IC} のはり高寸法依存性

セメントペーストとモルタルの試験体のはり高 (D) が K_{IC} に影響するかを調べるため、はり幅 $B = 40 \text{ mm}$ 一定、ノッチ深さ比 $(a/D) = 0.5$ 一定、 $S_1 = 30 \text{ mm}, S_2 = 120 \text{ mm}$ 各一定とし4点ビーム法により、表3に示す如く如く $D = 30 \sim 70 (\text{mm})$ 間について試験した。この場合の有効高は、 $(D - a) = 15 \sim 35 (\text{mm})$ である。

図12はペーストの、図13はモルタルのはりの有効断面(ノッチ部分を控除した断面)について求めた曲げ破壊強さのはり高寸法

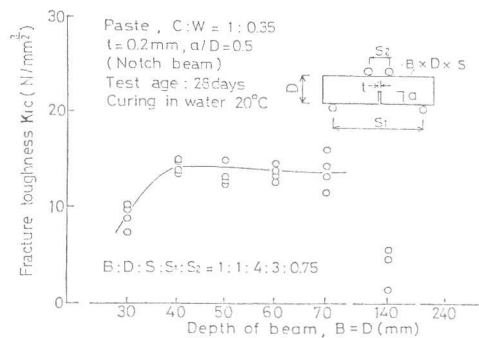


図10. ペーストの K_{IC} のはり断面寸法依存。

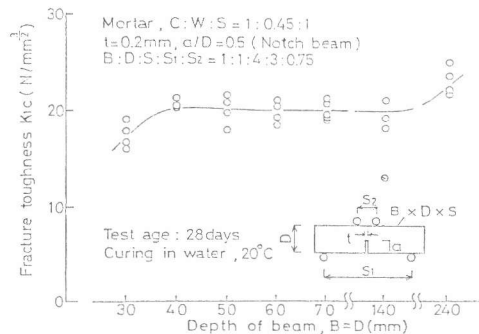


図11. モルタルの K_{IC} のはり断面寸法依存。

表3. K_{IC} のはり成寸法依存の実験条件。

Cement Paste W/C = 0.35						
Cement Mortar W/C = 0.45, S/C = 1.0						
D (mm)		30	40	50	60	70
a (mm)		15	20	25	30	35

Specimen: $D \times 40 \times 160, a/D = 0.5$ const.

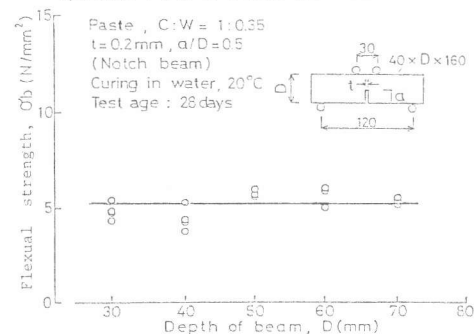


図12. ペーストの曲げ強度のはり成依存。

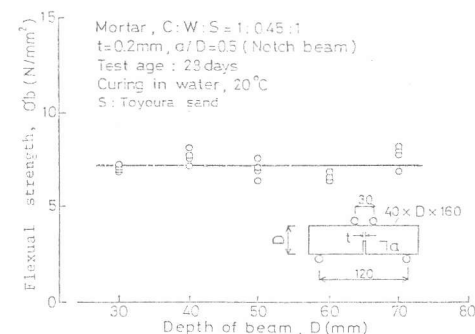


図13. モルタル曲げ強度のはり成依存。

依存性を示す。この
両図によればペース
トとモルタルの曲げ
強度は $D = 30 \sim 70$ mm
の範囲では D に依
存せず一定値をとる。

ついで図14はペ
ーストの $K_{IC} \sim D$ 、図15
はモルタルの $K_{IC} \sim$
 D の関係を図示した

ものである。以上の結果によればペーストは $D \geq 50$ mm で、モルタルでは $D \geq 40$ mm において K_{IC} は安定する。しかしこれ以下の小寸法では K_{IC} は D と共に減少し、寸法依存をうけるものとみられる。したがって通常 4 cm 以上の成が必要である。

4・4 モルタルの K_{IC} と砂のFM値の関係

この試験に用いたモルタルの細骨材の粗粒率(FM)の値を表4に示す。同表中 0.99 は豊浦標準砂、1.62 から 2.65 は大井川産砂を調整したもの。試験結果を図16に示す。本実験のFMの範囲では、 K_{IC} にほとんど影響しない事が認められる。このことは別の調合のモルタルに関する実験結果の図3の線群の接近状況からもわかる。²⁾ D. J. Naus²⁾の研究ではコンクリートの粗粒材のFMが大きいほど K_{IC} が若干増大するという。

5. 結 論

以上セメントペーストとモルタルの限界応力拡大係数にかかわる実験諸要因の結果は、次の如く要約される。

- 1) モルタルの限界応力拡大係数 K_{IC} は、ノッチ深さ比 (a/D) とノッチ厚 (t) に依存し (図6)、三者間の関係は式 (4・1) で表わされる。しかしペーストではこの2因子にかかわりなく安定した値となる (図4)。
- 2) ペーストおよびモルタルの K_{IC} は、正方形断面ばりの寸法の大小に関係なく、幅 $\times$ 高 $= 40 \times 40 \sim 140 \times 140$ (mm) 間で一定値である (図10、図11)。ペーストとモルタルの K_{IC} は各々約 15 と 20 ($N/mm^{3/2}$) である。
- 3) セメントペーストおよびモルタルの K_{IC} は、はり高の寸法が $D = 40 \sim 50$ (mm) 以上で安定した値を示す。しかしこれ以下の小寸法では K_{IC} の値は小となり、寸法の影響がみられる。
- 4) 細骨材の粗粒率が、 $0.99 \leq F.M. \leq 2.65$ の範囲において、モルタルの K_{IC} は F.M. に依存せず、ほぼ一定値 ($K_{IC} = 22.5$) をとる。(図16)
- 5) 破壊靱性 K_{IC} は元来材料定数と考えられるものであるが、以上に示した如くこの値は、調合、骨材寸法等に影響される面があり、各種のモルタル、コンクリートの K_{IC} を比較するには試験条件に留意する必要がある。

文 献

- 1) Kaplan, M.F., ACI Jour., Vol. 58, No. 5 PP. 591-610 Nov. (1961).
- 2) Naus, D.J. and J.L. Lott, ACI Jour. June pp. 481-489 (1969).
- 3) Brown, J.H., Mag. of Concrete Research, Vol. 24 pp. 185 (1972).
- 4) Naus, D.J. and J.L. Lott, Jour. of Fracture Mechanics of Ceramics, Vol. 2 pp. 469-489 (1974).
- 5) Naus, D.J. and J.L. Lott, Jour. of ACI pp. 481-489 June (1969).
- 6) Kesler, C.K., D.J. Naus and J.L. Lott, Mechanical Behavior of Materials, ICM-1, Japan Vol. 4 pp. 113-124 (1972).
- 7) Munz, D., R.T. Bubsey and J.H. Shannon, Jour. of ACS, Vol. 63 pp. 300-305 (1980).

記：本研究の一部は文部省科学研究費よったものである。

- 8) Munz, D., R.T. Bubsey and J.H. Shannon, Jour. of Fracture, Vol. 16, pp. 137-141 (1980).
- 9) Morita, K., CAJ Review of the 34th, pp. 246-249 (1980).
- 10) Morita, K., CAJ Review of the 35th, pp. 142-145 (1981).
- 11) Izumi, M. and H. Mihashi, Jour. of Cement and Concrete, (in Japanese) No. 423 pp. 2-10 (1982).
- 12) Takatsu, M. and I. Takahashi, Gypsum and Lime, (in Japanese) No. 173 pp. 15-21 (1981).
- 13) Koyanagi, W. and K. Rokugo, Concrete Jour. of JCI, Vol. 20 pp. 8-14 (1982).

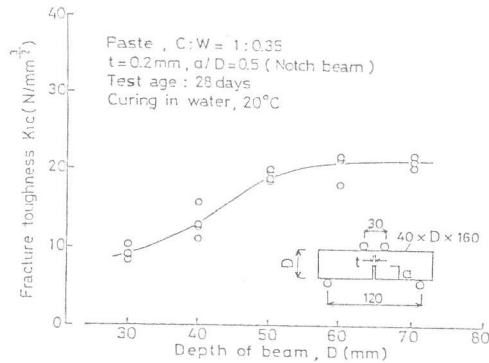


図14. ペーストの K_{IC} のはり成依存性。

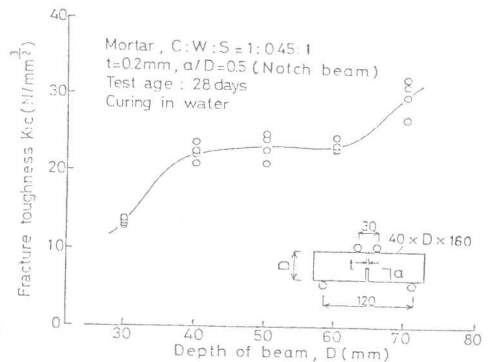


図15. モルタル K_{IC} のはり成依存性。

表4. K_{IC} のF.M. 依存試験に用いた砂の粗粒率。

Cement Mortar W/C = 0.45, S/C = 1.0, a/D = 0.5					
F.M.	0.99	1.62	2.25	2.49	2.65

Specimen : $40 \times 40 \times 160$

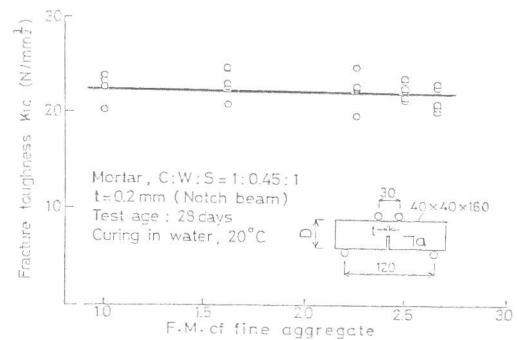


図16. モルタルの K_{IC} の砂の粗粒率依存性。