

[87] セメントペースト・モルタルの破壊靱性に及ぼす空隙率の影響

正会員 大岸佐吉 (名古屋工業大学)
 正会員 小野博宣 (中部大学工学部)
 正会員 棚橋 勇 (名古屋工業大学)
 正会員 〇山田兼義 (名工大 大学院)

1. まえがき

潜在的微小欠陥における応力集中に始まるき裂伝播過程において、構造体の破壊に至る脆性破壊^{1)~4)}の機構は材料力学的手法では評価され難いものであり、この破壊の評価方法として破壊靱性(Fracture toughness)が考えられている。Irwin^{5)~7)}の理論において不均質性によるエネルギー吸収を限界ひずみエネルギー解放率Gcに含めて考えれば、コンクリート材料の破壊靱性も破壊力学的手法により評価できるとの考えをKaplan⁸⁾が提出して以来その適用性が種々検討^{9)~11)}されている。元来、破壊靱性パラメータに使われる線形破壊力学のGc,限界応力拡大係数K_{1c},き裂先端開口変位CTODおよび非線形破壊力学の平面歪み破壊靱性J_c等は、均質等方性弾性材料に対して考慮されたものであり、き裂伝播過程でき裂の分岐を起こす不均質性複合材料であるコンクリートに、これらを適用するには吟味と補正が必要である。

本研究は、コンクリートの破壊機構を明らかにするための基礎的研究として、比較的不均一性が小さいセメントペーストとモルタルのK_{1c}値に及ぼす空隙率の影響を、実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 破壊靱性の評価方法

破壊靱性の評価には種々の方法があるが、筆者等¹²⁾は既に図1に示す(a)ノッチビーム法、(b)ダブルトーション法、(c)シェブロンノッチ法の三方法において同一条件下で試験をし、同じ値の限界応力拡大係数K_{1c}を得ることを確認しているため、本実験では(c)の4点曲げノッチビーム法によった。なお、K_{1c}の解析はW.F.Brown and J.E.Srawley¹³⁾の解析による式(2・1)で求められ、同式中の形状係数Yは式(2・2)で与えられる。本研究での供試体寸法は全て40X40X160(mm)。また、S₁,S₂,B,Dは各々120,30,40,40(mm)とした。

$$K_{1c} = \frac{3P(S_1 - S_2)\sqrt{a}}{2BD^2} Y \quad (2 \cdot 1)$$

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

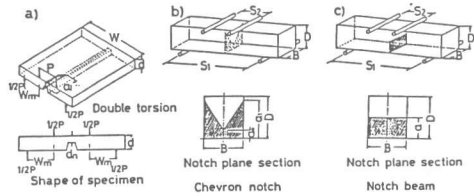


図1. K_{1c}の試験方法の三例

表1. 試験条件とK_{1c}の実験結果

Mixing condition		DK1	DK2	DK3	NOAE	AE1	AE2	AE3	
Air void in paste (%)		0.4	1.2	42.9	1.6	7	12	22	
Paste C/W=1/0.30	wet	0.05 [2]	17.0		15.4		13.0		
		0.10 [4]	19.9		18.9		15.0		
		0.25 [10]	20.5	21.5	20.7	18.9	16.7	14.0	
a/D [a (mm)]	dry	0.50 [20]	20.6		21.4		16.8		
		0.25 [10]	11.1	10.5	9.5	9.68	8.20	11.0	12.8
		Air void in mortar (%)		0.2	0.8	1.0	1.4	6	11
Mortar C/W/S=1/0.45/1	wet	0.05 [2]	17.6		15.1		12.5		
		0.10 [4]	21.4		19.2		14.7		
		0.25 [10]	22.6	23.2	23.0	19.7	17.4	13.0 10.5	
a/D [a (mm)]	dry	0.50 [20]	24.7		23.9		20.1		
		0.25 [10]	27.2	22.1	23.1	25.8	24.9	20.4	14.0

D/D = 8.0 : Size ratio of beam depth to max. aggregate
 a/D : Relative notch depth
 A.V. : Character meaning air-void-percentage of hard cement
 DK1~3 : Character meaning exhaust-degrees on mixing, DK[1,2,3]=[750,400,150] (mmHg)
 NOAE : Character meaning normal mixing condition
 AE1~3 : Character meaning entrained-air-degrees on mixing, AE[1,2,3]=[5,10,20] (%)
 ‡ : Mark of irregular point
 Specimen size : 40x40x160 (mm)
 Test age : 28 days
 Curing in water 20 °C (wet - for 28 days, dry - for 25 days)
 Notch thickness : t = 0.5 mm
 Fineness modulus : F.M. = 2.48

(a)ダブルトーション法 (c)ノッチビーム法
 (b)シェブロンノッチ法

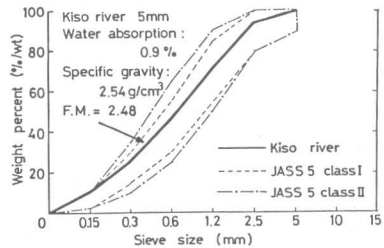


図2. 使用骨材の粒度分布

3. 実験方法

使用セメントは普通ポルトランドセメント(比重3.16)。細骨材は図2に示す木曽川産砂0~5mm(比重2.48,吸水率0.9%)を使用した。実験に供したセメントペーストおよびモルタルの重量割合はC/W=1/0.30とC/W/S=1/0.45/1の各一種類である。混練り条件,養生条件,硬化後の供試体の実測空隙率および K_{Ic} の試験結果を表1と同表脚注に掲げる。空隙率の測定は硬化供試体の単位容積重量から求めた計算値である。空隙率0.2~1.2%/vol.をもつ供試体は減圧ミキサーを用いて脱気混練りにより作製した。

プラスチック薄板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,打ち込み後0.5~1時間に,試料中央部に挿入してノッチを形成した。翌日脱型し,材令28日まで水中養生した。その後湿潤重量を測定し飽水状態で,2点集中曲げ荷重法により破壊試験を行った。

4. 実験結果および考察

4・1 空隙率別にみる K_{Ic} のノッチ深さ比依存性

限界応力拡大係数 K_{Ic} とノッチ深さ比(a/D)の関係を異なる空隙率において調べた結果をペーストおよびモルタルについて図3,図4および図5,図6に示す。なお,空隙率0.4,0.2%の硬化ペーストとモルタルの供試体は脱気混練りによる。1.6,1.4%のものは通常混練りにより,さらに12,11%はAE剤添加量の調整により各々作製したものである。 K_{Ic} に及ぼすC/W比,C/S比,ノッチ深さ比および骨材最大粒径を検討した,既往の研究^{11),12),15)}において K_{Ic} は,a/D=0.15付近に変曲点を示し,変曲点を越えてa/D=0.5までの範囲でペーストでは一定の値を示す。モルタルでは緩い直線勾配で増大することを示している。本研究における異なる空隙率をもつセメント系硬化体についても同様の傾向を得た。 K_{Ic} 値はa/D=0.15~0.05において,一定値の直線から離れて大きく低下することは他にも報告¹¹⁾があり,a/Dのこの領域で K_{Ic} を評価することは不適當である。つまり,この変曲点を示すノッチ深さ比a/Dは K_{Ic} を評価できる限界の最小ノッチ深さ比である。

図4にみる如く,減圧により充分に脱泡した空隙率0.4,0.2%では,変曲点がa/D=0.10付近に移動し K_{Ic} を評価できる範囲が若干拡大することを認めた。図4と図6に示すように, K_{Ic} 評価に適用できる変曲点を越えてa/D=0.5までの範囲で,ペーストの K_{Ic} 値は空隙率1.6%に比較して空隙率12%の値は4/5程度である。また,モルタルの K_{Ic} 値は空隙率1.4%に比べ空隙率11%のものは約3/4程度である。ペーストおよびモルタルの脱気脱泡による空隙率0.4および0.2%の K_{Ic} 値は,通常混練りの潜在空気量1.6%および1.4%に比べやや低い値を示すが,これは空隙率を極度に減少させた結果,セメント硬化体が,より脆性的性質に変わったものと

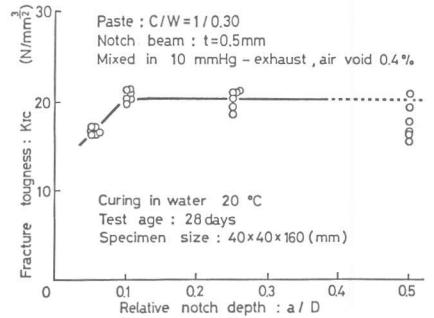


図3. ペーストの K_{Ic} とノッチ深さ比

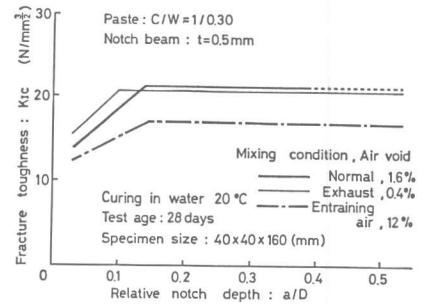


図4. ペーストの K_{Ic} とノッチ深さ比

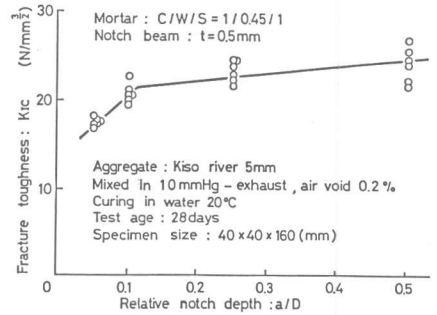


図5. モルタルの K_{Ic} とノッチ深さ比

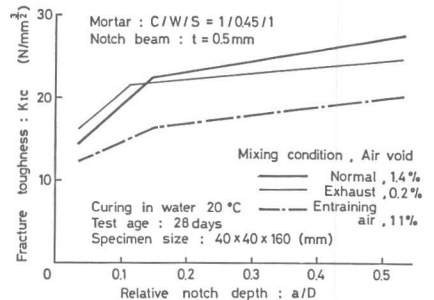


図6. モルタルの K_{Ic} とノッチ深さ比

解される。一方図6のモルタルでは $a/D=0.15\sim0.5$ の範囲で空隙率1.4,11%が示す若干の直線増加勾配 $K_{Ic}/(a/D)\approx 12N/mm^{3/2}$ が脱気脱泡の空隙率0.2%では $K_{Ic}/(a/D)\approx 8N/mm^{3/2}$ の勾配に低下している。これは空隙が減少したことにより、マトリクス中および骨材間に生じるマイクロクラックやボンドクラックが、減じたためと考えられる。

4・2 ノッチ深さ比別にみる K_{Ic} の空隙率依存性

限界応力拡大係数 K_{Ic} に及ぼす空隙率の影響を明らかにするために、ペーストとモルタルの空隙率を0.2~26%の広い範囲で7段階または11段階に変化させ検討した。その結果を図7~図14に示す。但しノッチ深さ比(a/D)のピックアップは $a/D=0.05, 0.1, 0.25, 0.5$ の四段階とした。

図7と図8に示すようにペーストおよびモルタルの各ノッチ深さ比別にみる K_{Ic} は、空隙率に対して同じ傾向を与えている。即ちノッチ深さ比が大きいほど、同一の空隙率における K_{Ic} 値が高くまたAE剤添加によって空気を連行させた空隙率3~26%の範囲の K_{Ic} は、空隙率の増大に伴い大きく低下する。また、空隙率2~0.2%の範囲では、ノッチ深さ比別に K_{Ic} 値は各々一定である。当初減圧混練りにより脱泡することで K_{Ic} 値が高まると予測したがその事実は認められていない。

図9に曲げ・圧縮両強度と空隙率の関係を示す。強度の空隙率依存性は、 K_{Ic} の場合とは異なり、空隙率が増すほど曲げ・圧縮両強度は共に低下し、大空隙率ほど低下が顕著である。空隙率が3%から0.2%に減ると K_{Ic} 値が一定であるが強度は約10%増す。

図10はモルタルの曲げ強度のパラツキを示すワイブル分布係数 m の空隙率依存性を示す。ワイブル係数 m が大きいほど強度のパラツキが小さく均質であることを意味する。通常混合による潜在空気量1~3%を境界に、約4~17%の範囲で空隙率の増大に伴い m 値は上昇する。空隙率20%以上において m 値は低下する。他方脱気脱泡によって空隙率3~0.4%の範囲で m 値はきわめて高く、均質度を増す。以上のように、空隙率が限界応力拡大係数 K_{Ic} 、曲げ・圧縮両強度とワイブル分布係数 m に及ぼす影響は、各々全く異なる固有の傾向をもつことがわかる。

図11にみる如く脱気を高めるとポア径10~30nmの細孔が減ることを確かめ

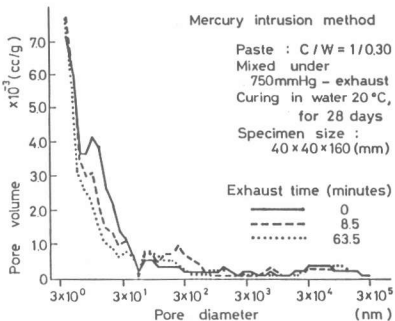


図11. 脱気による脱泡効果

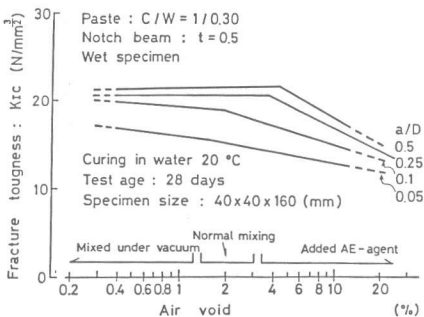


図7. ペーストの K_{Ic} と空隙率

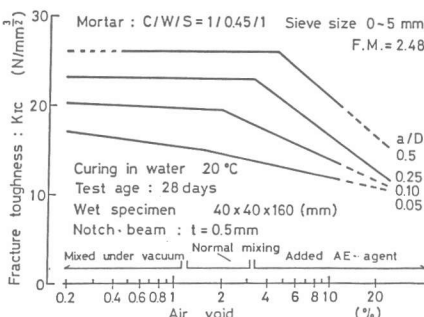


図8. モルタルの K_{Ic} と空隙率

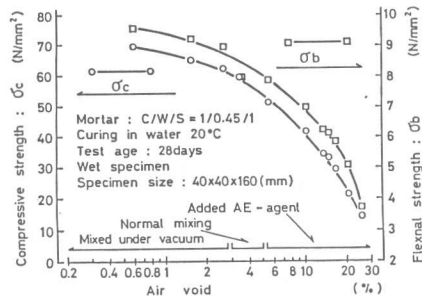


図9. 曲げ圧縮両強度と空隙率

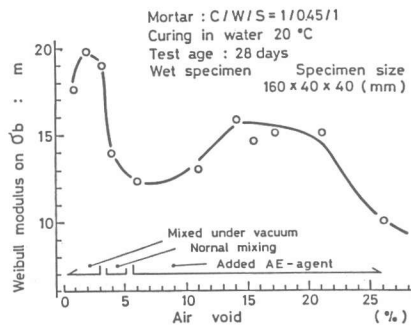


図10. モルタルの m 値と空隙率

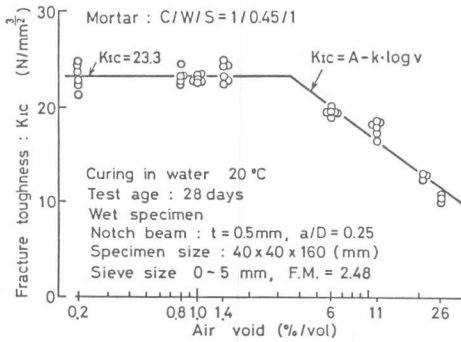


図12. ベーストの K_{1c} と空隙率の関係

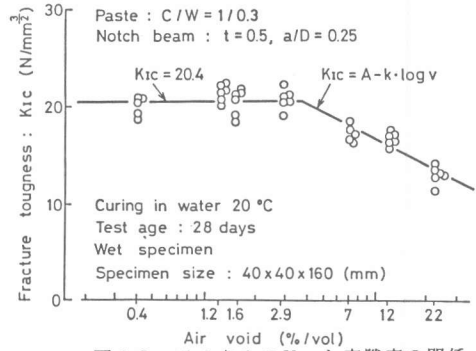


図13. モルタルの K_{1c} と空隙率の関係

た。しかし、この径の気孔は K_{1c} に関係しないことが図7と図8からわかる。他方、図14はAEペーストの細孔分布の頻度を示す。図7、図8の降下直線部分は、気孔径 $3 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4 \text{ nm}$ の細孔量の増大が K_{1c} の低下をもたらすと考えられる。

図12および図13は、ペーストおよびモルタルのノッチ深さ比 $a/D=0.25$ における、 K_{1c} と空隙率の関係を示す。両者は空隙率3.5%付近を境としてつぎの二直線式で表わされる。即ち、空隙率を v (%) として

$$K_{1c} = C \quad 0.4 \leq v < 3.5 \quad (\%) \quad (4.1)$$

$$K_{1c} = A - k \cdot \log(v) \quad 3.5 \leq v \leq 26 \quad (\%) \quad (4.2)$$

ここに C , A , k は材料と試験法で定まる定数。

但し ベースト : $C=20.4$ $A=25.5$ $k=8.9$
 モルタル : $C=23.3$ $A=30.5$ $k=13.1$

5. 結論

1) セメントペーストの空隙率を0.4, 1.6, 12%と変化させた結果、 K_{1c} 値はノッチ深さ比 $a/D=0.15 \sim 0.5$ において一定値20.5, 21.3, 16.7 $\text{N/mm}^{3/2}$ をとり、空隙率が大きいほど K_{1c} 値は低下する。モルタルも同様である。(図4, 図5)

2) ベーストとモルタルの K_{1c} は空隙率 3.5%を境界に、式(4.1)と(4.2)の二直線で表示できる。(図12, 13)

3) 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_{1c} 、曲げ・圧縮両強度 σ_b, σ_c およびワイプル係数 m は空隙率に対して、各々異なる固有の依存特性を示す。(図7, 図8, 図9, 図10)

4) ベーストおよびモルタルの K_{1c} 値は、脱気混合による脱泡の影響を受けない。しかし、空隙率3~22%の範囲で空気量を増すほど径約 $7.5 \times 10^4 \text{ nm}$ 前後の気孔量の増加により、 K_{1c} 値は低下する。(図11, 図14)

本研究は昭和60年度文部省科学研究費・総合研究(A)(60302070)に依ったものである。

文献

- 1) 岡村 弘之:破壊力学と材料強度講座1—線形破壊力学入門, 培風館 (1976).
- 2) 岩崎 訓明:コンクリート・セミナー1—コンクリートの特性 共立出版 (1975).
- 3) 村上 裕則, 大南 正瑛:破壊力学入門, オーム社 (1979).
- 4) 石田 誠:破壊力学と材料強度講座2—き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館 (1976).
- 5) Irwin, G.R.: Fracturing of Metals, ASM, p.152 (1948).
- 6) Irwin, G.R. and Kies, J.A.: Weld. J., Vol. 31, p. 551 (1952).
- 7) Irwin, G.R.: Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol. 24, p. 361 (1957).
- 8) Kaplan, M.F.: ACI Jour., Vol. 58, No. 5 pp. 591~610 Nov. (1961).
- 9) Munz, D., R.T. Bubsey and J.H. Shannon, Jour. of Fracture, Vol. 16, pp. 137~141 (1980).
- 10) 森田 興司:セメント技術年報 34号, pp. 246~249 (1980).
- 11) 森田 興司:セメント技術年報 35号, pp. 142~145 (1981).
- 12) Ohgishi, S., M. Takatsu, H. Ono and S. Takeda: Trans. of JCI, Vol. 6, pp. 271~278 (1984).
- 13) Brown, W.F. and Srawley, J.E. ASTM, STP 410, pp. 13~14 (1967).
- 14) 大岸 佐吉, 小野 博宣:日本建築学会東海支部研究報告, No. 24, pp. 17~20 (1985).

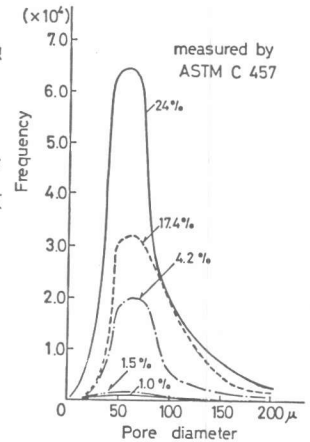


図14. 細孔分布