

[32] J積分によるコンクリートの破壊靱性の評価

正会員 ○六 郷 恵 哲 (京 都 大 学)

Clyde E. Kesler (イリノイ大学)

Frederick V. Lawrence (イリノイ大学)

1. まえがき

コンクリートの破壊は一般に内部ひびわれの成長によって生ずる。したがって、各種コンクリートの破壊性状を比較し検討するためには、ひびわれ発生に対する抵抗能力を評価するための適当な指標が必要である。

コンクリートの場合、これを線形弾性と仮定できないことが多いため、線形破壊力学で用いられる限界エネルギー解放率 G_c などの靱性値の適用は困難である。しかし、J積分値は線形材料だけでなく非線形材料に対しても適用できるため、コンクリートの破壊挙動を把握するには限界J積分値 J_c の方が従来の G_c などより優れている。 J_c はコンクリートへの鋼繊維混入の効果をよく表す指標であることがすでに明らかにされている。¹⁾

本研究では、コンクリートの J_c を定量化する場合の試験方法ならびに供試体条件について検討するとともに、圧縮強度・骨材寸法・鋼繊維混入量の異なる各種コンクリートの靱性を J_c を用いて比較した。

2. J積分

Rice²⁾が提案したJ積分は次式で与えられる。

$$J = \int_{\bar{c}} [w dy - \bar{T} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds] \quad (1)$$

ここで、 \bar{c} は積分経路、 w はエネルギー密度、 \bar{T} はトラクションベクトル、 \bar{u} は変位ベクトル、 s は任意の境界長さ、 x はひびわれ進展方向の座標、 y はひびわれ面に直角な方向の座標である。(1)式は、ひびわれの進展によるエネルギーの解放を、このひびわれ先端を含む任意の領域(たとえば供試体全体)で評価できることを示す。

また、J積分は、初期ひびわれ長さがわずかに異なる2個の供試体のポテンシャルエネルギーの差と考えられ、

$$J = - \frac{1}{B} \frac{\partial W_t}{\partial a} \quad (2)$$

と表わせる。²⁾ここで、 W_t はポテンシャルエネルギー、 a は初期ひびわれ長さ(切欠深さ)、 B は供試体幅である。

Begleyら³⁾は、(2)式にもとづいて、初期切欠深さが異なる供試体を用いてJを定量化した。図-1(a)に示す荷重変位曲線から、供試体を変位 D_1, D_2, D_3 まで変位させるのに必要なポテンシャルエネルギーを計測する。これと切欠深さ a_1, a_2, a_3 との関係は、各変位量について図-1(b)のようになる。J積分値は図-1(b)の曲線の勾配で与えられる。このBegleyらの方法をB法とよぶ。

Riceら⁴⁾は、曲げ供試体を用いた場合、Jを次式から定量化できることを示した。

$$J = \frac{2W_n}{Bb} = \frac{2(W_t - W_u)}{Bb} \quad (3)$$

ここで、 W_n はポテンシャルエネルギー W_t のうち切欠の存在に起因する成分であり、 b は供試体高さ H から切欠深さ a を差し引いた残りである。切欠の存在に起因しない成分 $W_u (=W_t - W_n)$ は、無切欠供試体の荷重変位曲線から定量化する。

このRiceらの方法をR法とよぶ。

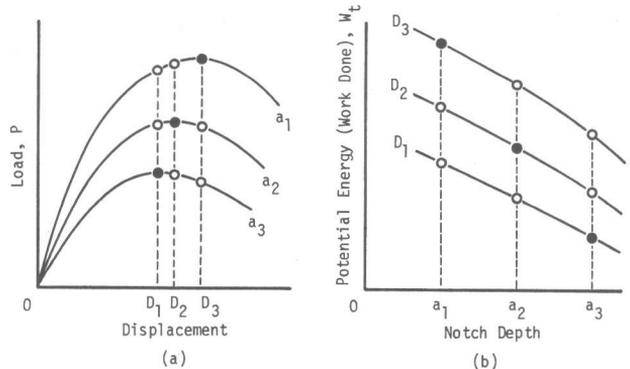


図-1 B法による J_{cb} の定量化

コンクリートの場合、最大耐力点で主ひびわれの伝播が始まる⁵⁾したがって、限界J積分値は最大耐力点で定量化される。B法を用いて定量化した限界J積分値を J_{cb} とし、R法によるものを J_{cr} とする。

なお、本研究では限界エネルギー解放率 G_c を次式で求め、 J_c と比較した。

$$G_c = K_c^2 (1 - \nu^2) / E \quad (4)$$

$$K_c = f_{rg} a [1.122 - 1.40(a/H) + 7.33(a/H)^2 - 13.08(a/H)^3 + 14.0(a/H)^4]$$

ここで、Eは弾性係数、
 ν はポアソン比(=0.18)、
 f_{rg} は全断面(B×H)で計算

したみかけの曲げ引張強度である。

3. 実験概要

モルタルと2種類の鋼織
 維補強コンクリートを含む
 合計12シリーズのコンクリ
 ートを用いた。各シリーズ
 の試験条件を表-1に示す。

表-1からわかるように、
 3種類の供試体寸法、3種

類の骨材最大寸法、3種類のコンクリート強度(圧縮強度で約180kg/cm²、320kg/cm²、440kg/cm²)を用いた。鋼織維補強コンクリートには、アスペクト比60の鋼織維(寸法:0.25×0.56×25.4mm)を用いた。

各シリーズは、4個以上の圧縮試験用供試体と20個の曲げ試験用供試体からなる。曲げ供試体は、H/2切欠、H/3切欠、H/6切欠、ならびに無切欠の供試体をそれぞれ5個づつとした。たとえばH/2切欠供試体とは、切欠深さaが供試体高さHの1/2の供試体をさす。切欠は、先端が約30°で厚さ約3mmの鋼板をコンクリート中に埋めこみ、硬化後に取除く方法で加工した。

曲げ載荷試験は、湿潤状態で、3分点載荷により行なった。載荷スパンは供試体長の90%とした。載荷点変位は2個の変位計の平均値として検出した。

4. 結果と考察

4-1 計測結果

各シリーズのコンクリートの圧縮強度 f_c と曲げ引張強度 f_r は表-1に示すとうりである。有効断面(B×b)で計算した曲げ引張強度 f_{rn} と強度比 f_{rn}/f_r 、ならびに、最大耐力点でのポテンシャルエネルギー W_{tp} を表-2に示す。表-2の各測定値は平均値で表わし、括弧内には供試体数と変動係数とを示す。

表-1 実験条件

Series	Specimen Size mm	Type of Concrete	Steel Fiber Content vol. %	Maximum Aggregate Size mm	Compressive Strength f_c , kg/cm ²	Modulus of Rupture f_r , kg/cm ²	Modulus of Elasticity E , x10 ³ kg/cm ²
BS-POM3	76x76x381*	Plain	0	10	314	50.5	293
BM-POM3	76x152x381	Plain	0	10	303	50.3	333
BL-POM3	102x152x508	Plain	0	10	320	49.0	309
BS-POM6	76x76x381	Plain	0	20	322	52.2	354
BM-POM6	76x152x381	Plain	0	20	305	47.1	340
BL-POM6	102x152x508	Plain	0	20	321	48.7	355
BM-POH3	76x152x381	Plain	0	10	447	59.8	380
BM-POH6	76x152x381	Plain	0	20	439	58.5	366
BM-POL3	76x152x381	Plain	0	10	179	36.1	235
BM-MOMO	76x152x381	Mortar	0	5	317	48.9	302
BM-F1M3	76x152x381	Fiber	1	10	315	49.6	262
BM-F2M3	76x152x381	Fiber	2	10	312	59.9	342

*Height, width and length.

表-2 有効断面曲げ引張強度と最大耐力点でのポテンシャルエネルギー

Series	Notch Depth a, cm	Net Section Mod. of Rupt. f_{rn} , kg/cm ²	f_{rn}/f_r	Potential Energy at Peak Load W_{tp} , kg·cm
BS-POM3	1.27	43.0 (5*, 2.9%**)	0.852	1.01 (5, 14.8%)
	2.54	43.9 (5, 10.7%)	0.855	0.684(5, 19.7%)
	3.81	44.6 (5, 5.2%)	0.884	0.432(5, 9.0%)
BM-POM3	1.27	42.0 (5, 4.7%)	0.835	1.87 (5, 11.4%)
	2.54	47.2 (5, 5.2%)	0.939	1.98 (5, 4.1%)
	3.81	47.0 (5, 1.0%)	0.934	0.776(5, 7.4%)
BL-POM3	1.69	42.0 (5, 3.3%)	0.857	2.91 (5, 14.1%)
	3.39	42.2 (5, 2.9%)	0.861	1.98 (5, 4.1%)
	5.08	43.0 (5, 4.6%)	0.878	1.24 (5, 12.8%)
BS-POM6	1.27	46.8 (5, 11.3%)	0.900	1.00 (5, 34.0%)
	2.54	47.5 (5, 4.3%)	0.910	0.788(5, 24.1%)
	3.81	50.0 (5, 8.2%)	0.958	0.406(5, 17.6%)
BM-POM6	1.27	47.2 (5, 5.4%)	1.003	2.44 (5, 16.5%)
	2.54	47.3 (5, 5.5%)	1.004	1.51 (5, 12.9%)
	3.81	43.9 (5, 3.0%)	0.931	0.785(5, 14.8%)
BL-POM6	1.69	45.6 (5, 4.0%)	0.935	3.72 (5, 10.6%)
	3.39	45.3 (5, 7.0%)	0.931	2.12 (5, 13.9%)
	5.08	42.3 (5, 13.5%)	0.867	1.15 (5, 38.2%)
BM-POH3	1.27	48.0 (5, 4.8%)	0.803	2.42 (5, 14.3%)
	2.54	48.9 (5, 4.6%)	0.817	1.54 (5, 8.7%)
	3.81	49.0 (5, 4.6%)	0.819	0.914(5, 9.3%)
BM-POH6	1.27	55.0 (5, 4.1%)	0.940	2.90 (5, 13.4%)
	2.54	51.5 (5, 5.5%)	0.881	1.73 (5, 21.0%)
	3.81	51.8 (5, 5.0%)	0.886	0.908(5, 8.7%)
BM-POL3	1.27	33.3 (5, 5.1%)	0.922	1.57 (4, 10.0%)
	2.54	32.8 (5, 5.3%)	0.907	0.881(5, 18.8%)
	3.81	32.7 (5, 5.5%)	0.905	0.535(5, 17.9%)
BM-MOMO	1.27	38.6 (5, 4.0%)	0.789	1.66 (5, 10.5%)
	2.54	40.4 (5, 3.5%)	0.825	1.09 (5, 7.8%)
	3.81	39.9 (5, 2.7%)	0.816	0.697(5, 13.1%)
BM-F1M3	1.27	47.1 (5, 12.1%)	0.950	4.71 (5, 36.0%)
	2.54	47.3 (5, 3.4%)	0.955	4.33 (5, 40.8%)
	3.81	51.7 (4, 14.2%)	1.044	3.01 (4, 70.6%)
BM-F2M3	1.27	73.6 (5, 16.8%)	1.229	25.5 (5, 44.6%)
	2.54	66.1 (5, 7.8%)	1.103	14.9 (5, 20.2%)
	3.81	60.1 (5, 12.0%)	1.004	8.89 (5, 35.2%)

*Number of specimens. **Coefficient of variation.

J_c の算定に用いる W_{tp} の変動係数は、中型曲げ供試体(7.6×15.2×38.1 cm)で最小となった。鋼繊維補強コンクリートの場合、普通コンクリートに比べて f_{rn} の変動係数は大差ないが、 W_{tp} の変動係数は極めて大となった。

曲げ強度比 f_{rn}/f_r は、切欠深さの変化にともなって変動しているものの、コンクリート強度の増加ならびに骨材寸法と鋼繊維混入量の減少にともなって減少する傾向にある。

荷重変位曲線の例として、BM-POM3シリーズでH/3切欠供試体のものを図-2に示す。 J_c を定量化する場合には、図-2にみられるような曲線群を図上で平均して求めた代表曲線を用いた。BM-POM3シリーズの各切欠深さについての代表荷重変位曲線を図-3に示す。

無切欠供試体の荷重変位曲線において最大耐力の1/3の荷重に対応する点までの曲線の初期勾配から弾性係数Eを計算し、表-1に付記する。表-1に示すEの値は、圧縮試験でひずみゲージを用いて得られる通常のEの値とほぼ同一である。したがって、R法でJを定量化する場合に必要な無切欠供試体のポテンシャルエネルギー W_u は、これを実験的に計測する代わりに、計算により推定した値で代用することが可能である。

4-2 J_c の定量化

B法ならびにR法で定量化した各シリーズの限界J積分値 J_{cb} ならびに J_{cr} を表-3に示す。H/3切欠供試体から求めた J_{cr} とH/2切欠供試体から求めた J_{cr} はほぼ等しいが、H/6切欠供試体の J_{cr} は、他の切欠深さの場合より小さくなる傾向にある。一方、 J_{cb} は、切欠深さが深くなるにつれて減少し J_{cr} の値に近づく傾向にある。H/3切欠供試体の場合、 J_{cb} は J_{cr} よりも約1.5倍大きい。

J_{cr} は J_{cb} よりも切欠深さの影響を受けにくいことから、 J_c を定量化するにはR法の方がB法より優れている。

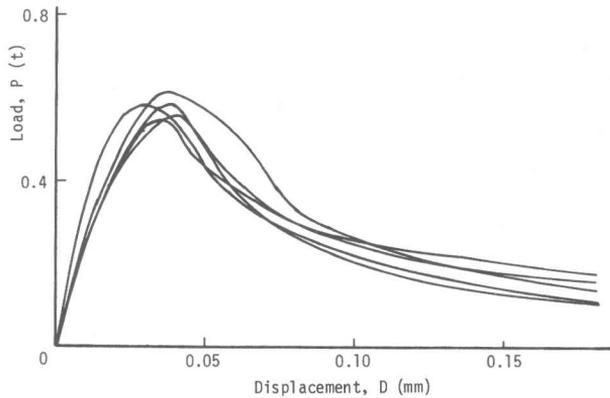


図-2 BM-POM3シリーズの各供試体の荷重変位曲線(H/3切欠)

表-3 破壊靱性値

Series	Notch Depth a, cm	J_c		G_c , kg/m	$\frac{J_{cb}}{J_{cr}}$	$\frac{G_c}{J_{cr}}$
		J_{cb} , kg/m	J_{cr} , kg/m			
BS-POM3	1.27	3.52	1.86	1.20	1.89	0.65
	2.54	3.04	2.21	1.21	1.37	0.55
	3.81	2.55	2.09	1.07	1.22	0.51
BM-POM3	1.27	2.43	1.80	1.14	1.35	0.63
	2.54	2.52	2.05	1.50	1.23	0.73
	3.81	2.57	2.00	1.18	1.29	0.59
BL-POM3	1.69	3.70	1.50	1.52	2.46	1.01
	3.39	3.34	2.14	1.57	1.56	0.73
	5.08	3.38	2.38	1.30	1.42	0.55
BS-POM6	1.27	3.30	1.73	1.25	1.91	0.72
	2.54	3.43	2.63	1.36	1.31	0.52
	3.81	2.52	2.14	1.16	1.18	0.54
BM-POM6	1.27	3.95	2.38	1.29	1.66	0.54
	2.54	3.36	2.50	1.32	1.34	0.53
	3.81	2.88	2.09	0.91	1.38	0.44
BL-POM6	1.69	3.41	2.46	1.61	1.38	0.65
	3.39	2.93	2.29	1.64	1.28	0.72
	5.08	3.16	2.25	1.13	1.40	0.50
BM-POMH3	1.27	4.59	2.45	1.25	1.88	0.51
	2.54	3.46	2.61	1.30	1.33	0.50
	3.81	2.09	2.34	1.09	0.89	0.47
BM-POMH6	1.27	4.73	2.46	1.68	1.92	0.68
	2.54	3.82	2.64	1.52	1.45	0.58
	3.81	2.80	2.64	1.25	1.06	0.47
BM-POL3	1.27	2.16	1.07	0.96	2.02	0.90
	2.54	1.63	1.29	0.96	1.26	0.74
	3.81	1.52	1.30	0.80	1.16	0.62
BM-MOMO	1.27	2.80	1.34	1.00	2.09	0.75
	2.54	2.34	1.70	1.11	1.38	0.65
	3.81	2.36	1.80	0.89	1.31	0.49
BM-F1M3	1.27	9.34	6.07	1.73	1.54	0.29
	2.54	10.6	9.02	1.80	1.17	0.20
	3.81	8.13	8.91	1.70	0.91	0.19
BM-F2M3	1.27	50.5	38.7	3.23	1.31	0.08
	2.54	43.6	34.0	2.73	1.28	0.08
	3.81	41.4	28.8	1.75	1.44	0.06

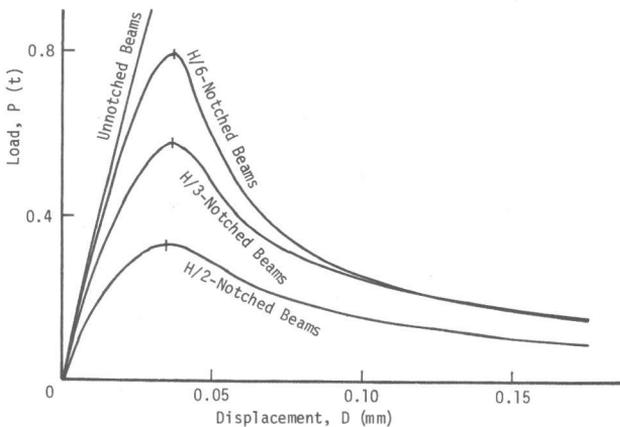


図-3 BM-POM3シリーズの代表荷重変位曲線

一般に、切欠は浅い方が、供試体作成時の取扱いが容易であり、破断部の有効断面積を大きくとれる。したがって、 J_{CR} を定量化する場合の切欠深さとしては、 $H/3 \sim H/2$ 程度が適当である。

本研究では3種類の供試体寸法しか用いていないが、この程度の供試体寸法の範囲では、 J_{CR} は供試体寸法の影響をほとんど受けない。 J_{CR} の定量化に用いる供試体の寸法としては、 J_{CR} の計算に必要な最大耐力点でのポテンシャルエネルギー W_{TP} のばらつきが最小となる中型供試体(7.6×15.2×38.1cm)がよい。

4-3 各種コンクリートの靱性値

限界エネルギー解放率 G_C を表-3に併記する。普通コンクリートの場合、 G_C は J_{CR} の約60%であったが、高荷重レベルで著しい非線形性を示す鋼繊維補強コンクリートでは、両靱性値の差はさらに拡大した。

表-3に示すBM-POL3, BM-POM3, BM-POH3シリーズの J_{CR} を比較することにより、コンクリート強度の増加につれて、 J_{CR} も増加することがわかる。

骨材の最大寸法と J_{CR} との関係を図-4に示す。骨材寸法が増加するにつれて J_{CR} も増加した。

鋼繊維混入量と靱性値 J_{CR}, G_C との関係を図-5に示す。混入量の増加にともなって、 J_{CR} は著しく増加するが、 G_C はほとんど増加しない。すでに報告されているように、¹⁾鋼繊維混入の効果を評価するための指標としては、 J_{CR} は G_C より優れている。

5. 結論

本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) コンクリートの J_C を定量化する場合の手法としては、切欠深さの影響が少ない点で、Riceらが提案した方法の方が、Begleyらが提案した方法よりも適していた。
- (2) J_C の定量化に用いる供試体の形状としては、本研究で用いた寸法のうち、供試体幅が高さの2倍のもの(7.6×15.2×38.1cm)が、結果のばらつきが小さいという点で優れていた。切欠深さは、供試体高さの1/3~1/2が適当であった。
- (3) コンクリート強度の増加、骨材最大寸法の増加、ならびに鋼繊維混入量の増加にともなって J_C は増加した。

参考文献

- 1) Mindess, S., Lawrence, F. V. and Kesler, C. E.: Cement and Concrete Research, Vol.7, 1977, pp.731-742.
- 2) Rice, J. R.: Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.35, June 1968, pp.379-386.
- 3) Begley, J. A. and Landes, J. D.: Fracture Toughness, STP 514, ASTM, 1972, pp.1-20.
- 4) Rice, J. R., Paris, P. C. and Merkle, J. G.: Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, STP 536, ASTM, 1973, pp.231-245.
- 5) 岡田清, 小柳治, 六郷恵哲: 土木学会論文報告集, 第285号, 1979年5月, pp.109-119.

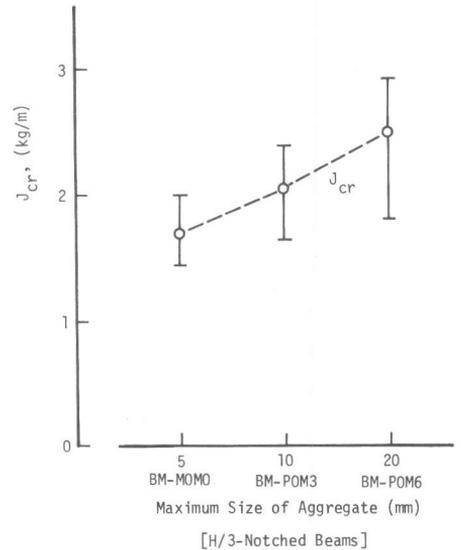


図-4 骨材最大寸法と J_{CR}

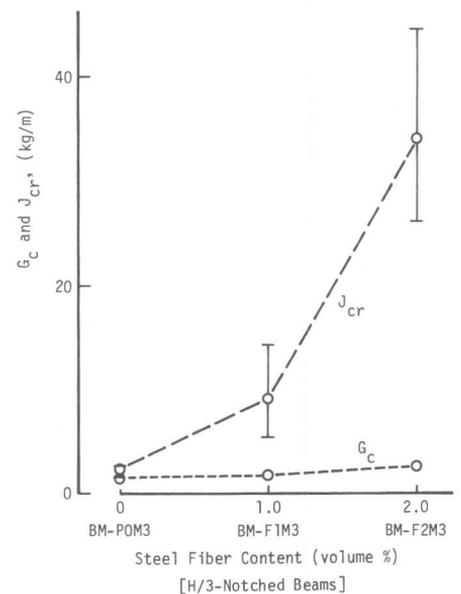


図-5 鋼繊維混入量と J_{CR}