

論文
[1071] コンクリートの破壊靱性 (K_{IC} , G_{IC} , J_{IC}) に及ぼす
骨材種別の影響

正会員 ○小野博宣 (中部大学工学部)

正会員 大岸佐吉 (名古屋工業大学)

1. まえがき

コンクリートの破壊事象の解明が求められており、中でも破壊靱性に関する研究が進展しつつある[3-12]。破壊靱性は、特に脆い材料について重視されており、材料の破壊力学的特質を表わす指標として重要である。コンクリートのように構成素材や、調合による品質が異なる材料では、破壊靱性値に及ぼす因子は多岐にわたり、まだ不明な点が多い。

本研究の目的は、コンクリートの限界応力拡大係数 (K_{IC})、限界ひずみエネルギー解放率 (G_{IC})、弾塑性破壊靱性 (J_{IC}) におよぼす、骨材種別の影響を、川砂・川砂利、砕砂・砕石、人工軽量骨材、高炉スラグ骨材の4種類について、実験的に検討したものである。

2. 破壊靱性 (K_{IC} , G_{IC} , J_{IC}) の解析法

本研究では、 G_{IC} を異なる2種類の方法、つまり a) K_{IC} からの誘導法と、b) 解析的方法により求めた。以下に解析法を述べる。

2.1 限界応力拡大係数 K_{IC} (Fracture toughness: critical stress intensity factor)

4点曲げの切り欠きはりでは、 K_{IC} は式(1)で得られる。

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

但し、 $Y = 1.99 - 2.47(a/D) + 12.47(a/D)^2 - 23.17(a/D)^3 + 24.8(a/D)^4$
ここに、 S_1 ; 梁スパン、 S_2 ; 荷重間隔、 P ; 全荷重、 a ; ノッチ深さ、 B ; 梁幅、 D ; 梁高さ。

2.2 限界ひずみエネルギー解放率 G_{IC} (critical strain energy release rate)

a) K_{IC} からの誘導法
$$G_{IC} = \frac{1 - \nu^2}{E} K_{IC}^2 \quad (2)$$

b) 解析的方法
$$G_{IC} = \frac{(1 - \nu^2) \sigma_n^2 (D - a)}{E} f(a/D) \quad (3)$$

但し、 $f(a/D) = \pi(a/D)(1 - a/D)^3$, $\sigma_n = 3P(S_1 - S_2)/2B(D - a)$ である。
ここに、 P , S_1 , S_2 , D , a は、上記式(1)と同様である。 ν ; ポアソン比、 E ; ヤング係数である。

2.3 弾塑性破壊靱性 J_{IC} (J-integral)

Rice-Paris¹⁰⁾ は、比較的深い切欠き供試体の J_{IC} 積分が次式で求められることを示した。

$$J_{IC} = \frac{2}{B(D-a)} \int_0^{\delta_{cmax}} P(d\delta_c) = \frac{2}{B(D-a)} A = \frac{2}{B(D-a)} (A_T - A_U) \quad (4)$$

式(4)において $A_U \ll A_T$ の場合は、 $A_U = 0$ とみなして式(4)は、式(5)の如く表わしうる。

$$J_{IC} = \frac{2}{B(D-a)} A_T \quad (5)$$

ここに、 B , D , a は(1)式と同様の値を示し、 A_T は梁の荷重・変位曲線から求められた面積を表わす。

3. 実験方法

3.1 使用材料

普通ポルトランドセメント ($\rho = 3.16$), 骨材は、川砂・川砂利、砕砂・砕石骨材、人工軽量骨材(メサライト、以下 A.L.A. と記す)、高炉スラグ骨材(以下 Slag と記す)の4種類を用いた。骨材の物理的性質を表-1に示す。

3.2 試験項目と調合(配合)

試験項目は、1) はり断面寸法効果 (7.5×7.5 、 10×10 、 15×15 、 20×20 cmの4通り) 2) 粗骨材容積比効果 ($V_g/V_c = 0 \sim 0.58$ 間の4水準)、3) 水セメント比効果 ($W/C = 0.52$ 、 0.60 、 0.70 の3水準) 4) 粗骨材最大粒径効果 ($5 \sim 10$ mm、 $10 \sim 20$ mm、 $30 \sim 40$ mmの3水準)。表-2にコンクリート種別毎の、試験項目、調合、スランプ(一部フロー値)、空気量、単位容積重量、硬化後のヤング係数、ポアソン比を示した。供試体は一試験条件につき6本とした。コンクリートの基本配合は、骨材の種別に関係なく、各材料の容積比が一定となるように計画した。

3.3 実験方法

コンクリート供試体は、林令28日まで水中養生後、供試体底面中央部に刃の厚み2.3mmの回転式カッターにより、所要の深さ比($a/D = 0.2$)となるように正確にノッチを入れた。はりの曲げ試験は4点曲げノッチビーム法により行い、荷重ははり上側に取り付けたロードセルを介して載荷し、曲げたわみは、変位計(差動トランス型)により検出した。油圧万能試験機を用い、変形曲線の下降域の正確を期すためにPS鋼棒($\phi 31.2$ mm)2本により、試験機の剛性を増大した。

表-1 骨材種別と物理的性質

Kinds of aggregate		Specific gravity (ρ)	Absorption capacity (%) by wt.	Maximum size (mm)	Fines modulus (F.M.)
River	sand	2.53	0.86	5	2.72
	gravel	2.65	0.84	25	6.02
Crushed	sand	2.71	0.44	5	2.64
	gravel	2.67	0.92	25	6.90
Artificial light weight	sand	1.85	14.3	5	2.69
	gravel	1.65	27.0	20	6.32
Blast fur. slag	sand	2.61	0.51	2.5	2.14
	gravel	2.66	2.72	25	6.76

表-2 コンクリートの調合(試験要因) 諸物性

Kinds of concrete	Factors of test	Mixing proportion by weight C / W / S / G	Slump (cm)	Content air (%)	Weight unit/V (kg/l)	Young's modulus $\times 10^5$ (kgf/cm ²)	Poisson's ratio
River sand, gravel conc.	Size of specimens *1	1 / 0.53 / 1.80 / 2.70	19.1	0.6	2.4	3.51	0.21
Crushed sand, gravel conc.	Size of specimens *1	1 / 0.59 / 1.64 / 2.44	16.0	0.4	2.3	2.63	0.20
Artificial light weight sand, gravel concrete	Size of specimens *1	1 / 0.59 / 1.21 / 1.58	18.1	2.5	1.7	1.63	0.22
	W / C	1 / 0.60 / 1.28 / 1.68	19.9	3.8	1.7	1.53	0.21
		1 / 0.70 / 1.28 / 1.68	23.2	2.8	1.6	1.48	0.22
	V_g/V_c { 0 0.2 0.58	1 / 0.52 / 1.21 / 0.0	(243mm)*2	1.6	1.8	1.61	0.24
		1 / 0.52 / 1.21 / 0.63	22.2	2.2	1.8	1.45	0.23
		1 / 0.52 / 1.21 / 3.54	15.0	5.6	1.6	1.54	0.21
Blast furnace slag sand, gravel concrete	Size of specimens *1	1 / 0.60 / 1.70 / 2.47	19.6	3.7	2.3	2.84	0.23
	V_g/V_c { 0 0.2 0.58	1 / 0.60 / 1.87 / 0.0	(213mm)*2	3.0	2.1	2.46	0.23
		1 / 0.60 / 1.87 / 1.09	21.4	3.7	2.2	2.83	0.23
		1 / 0.60 / 1.70 / 5.53	0.2	4.0	2.4	2.95	0.21
	Max. gravel size { 10 20 40	1 / 0.60 / 1.74 / 2.62	11.5 16.4 -	4.3 4.3 4.4	2.3 2.3 2.2	2.95 2.92 2.80	0.23 0.24 0.27

*1 Size of specimens: 7.5x7.7x30, 10x10x40, 15x15x60, 20x20x80 (cm), *2 Flow value

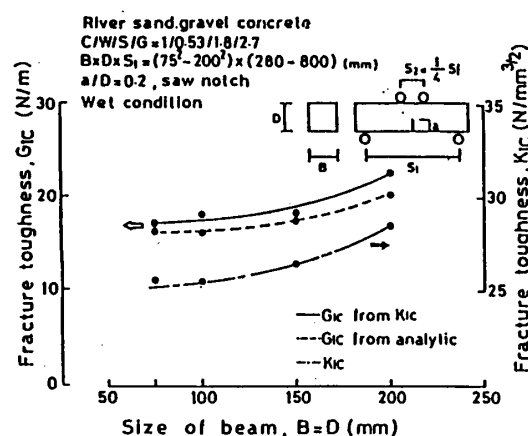
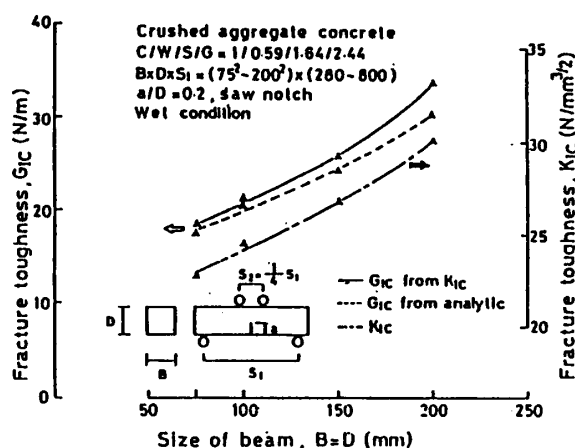


図-1 G_{IC} 、 K_{IC} とはり断面寸法(砕石) 図-2 G_{IC} 、 K_{IC} とはり断面寸法(川砂利)

4. 結果と考察

4.1 K_{IC} 、 G_{IC} におよぼすはり断面寸法効果

図-1、図-2は、それぞれ砕石コンクリート、川砂・川砂利コンクリートにおける K_{IC} 、 G_{IC} に及ぼすはり断面寸法の影響を示す。両図ともに、はり断面寸法が増加するにつれ、靱性値も増加する傾向が明らかである。そして、砕石コンクリートの靱性値の D 依存が川砂利コンクリートよりも顕著であることが知られる。また、 G_{IC} の解析二方法による値を比較すると K_{IC} 誘導法による値が、全般に解析的方法に比べ大である。供試体断面寸法が 200×200 mmと大きい場合にはその差がより明確である。この傾向は骨材がA.L.A., Slagの場合でも同様である。

一方、図-3、図-4は、 K_{IC} と G_{IC} に及ぼす骨材別のはり断面寸法効果を示したものである。骨材種別により、 K_{IC} 値は大きく異なり、その値は、川砂利>砕石>Slag>A.L.A.の順に小さくなっている。また、A.L.A.では、はり断面寸法が約2.7倍になっても K_{IC} 値は、約1割程度の増大にとどまり、変化が小さい。一方、 G_{IC} については、はり断面が7.5~10 cmの比較的小さい場合には、その値は骨材の種別に関係なく接近した値であるが、15~20 cmと断面が増大すると、その差異が大となること、特に、砕石骨材の G_{IC} 値が、他の骨材と比べ格段に高い値(A.L.A.の2倍値)を示すことが注目される。Mindess¹¹⁾、Carpinteri⁴⁾らも G_{IC} が断面寸法の増大につれ増えることを示し、本実験と同様の傾向にある。 K_{IC} 、 G_{IC} ともに骨材種別に大きく依存する。

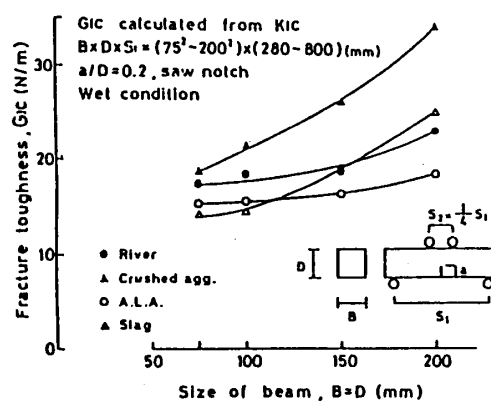
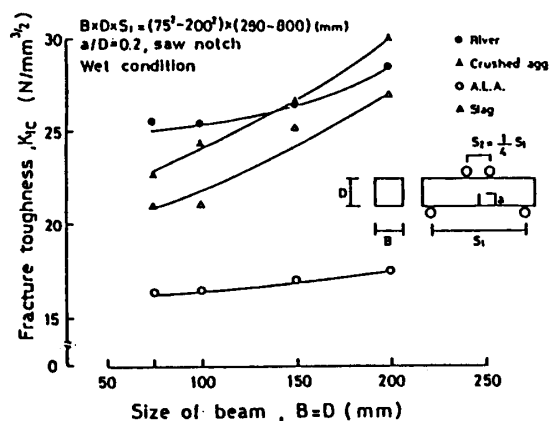


図-3 骨材別 K_{IC} とはり断面効果

図-4 骨材別 G_{IC} とはり断面寸法

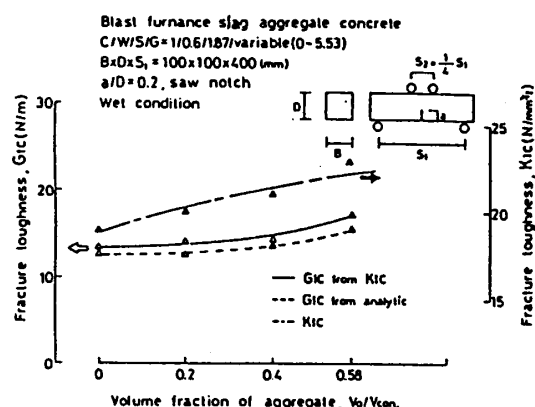
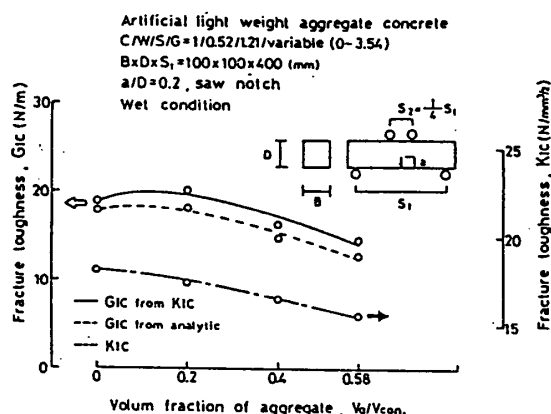


図-5 A.L.A. Conc.の G_{IC} と (V_g/V_c) 関係 図-6 Slag Conc.の G_{IC} と (V_g/V_c) 関係

4.2 K_{IC} 、 G_{IC} におよぼす粗骨材容積比 (V_g/V_c) 依存性

試験コンクリートの粗骨材容積比 (V_g/V_c) は4水準であり、図-5、図-6にA.L.A.コンクリート、Slagコンクリートのそれぞれの結果を示す。これらによれば、両骨材の靱性 K_{IC} と G_{IC} の (V_g/V_c) 依存性が互に逆の傾向を示しており、注目すべき事である。また、図-7は K_{IC} の (V_g/V_c) の影響を、図-8は G_{IC} の (V_g/V_c) の効果を示したものである。両図中の川砂利コンクリートのデータは文献1)から引用比較したものである。筆者らの既往の研究¹⁾や、小柳⁶⁾、Peterson⁹⁾らの報告においても G_{IC} が (V_g/V_c) の増大につれて低下することが示されており、本実験結果のSlagコンクリートは特異な結果となっている。ただし、戸川ら⁷⁾は G_{IC} の (V_g/V_c) 効果について、川砂利、碎石、A.L.A.コンクリートで三様の異なる結果を得ている。一般に、コンクリート中の粗骨材量が増すほどコンクリートのマトリックスと骨材の付着力の総体が低下し、破壊までのポテンシャルエネルギーが減少する。このため G_{IC} が低下するものと思われる。しかし、コンクリートの配合、骨材の品質、形状などにより、逆に骨材量を増すと破壊亀裂進展を抑制させる働きを生じ、Slagコンクリートのように (V_g/V_c) の増加と共に、 G_{IC} 値が増大するものと考えられる。A.L.A.コンクリートの K_{IC} の (V_g/V_c) 依存性は戸川ら⁷⁾の報告と類似の傾向を示している。これらの理由の一因として、供試体の破断様相の相違があげられる。即ち、図-11に示す如くA.L.A.では、骨材自体が破断したものが多く、マトリックスよりも弱い骨材では (V_g/V_c) の増加につれ K_{IC} 値が低下すると考えられる。

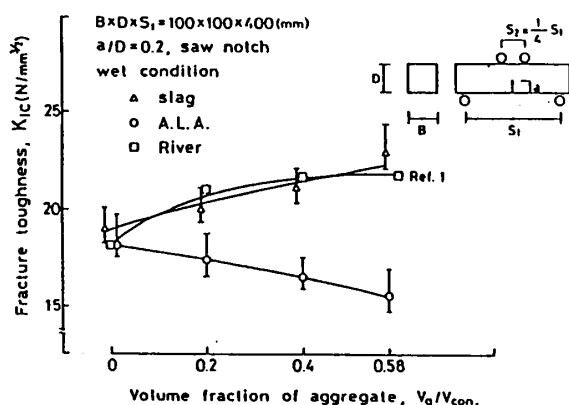


図-7 K_{IC} の (V_g/V_c) 依存性

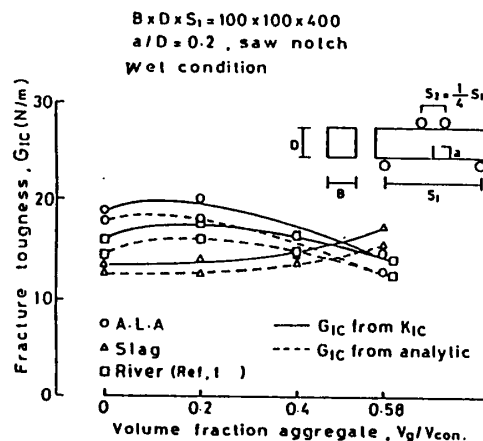
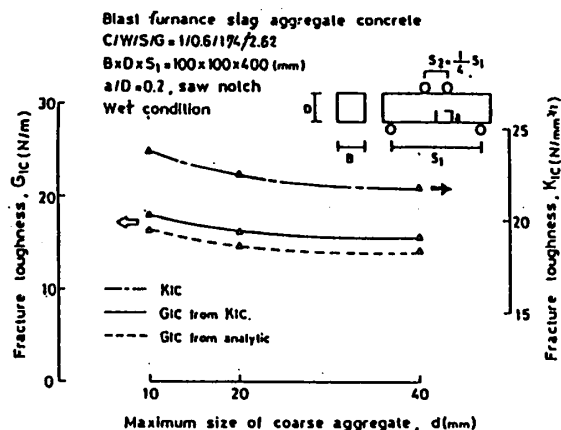
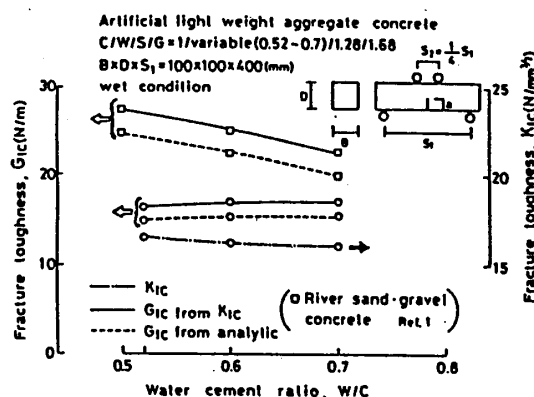


図-8 G_{IC} の (V_g/V_c) 依存性

図-9 Slag conc. の骨材寸法と G_{IC} 、 K_{IC} 図-10 A.L.A. conc. の W/C と G_{IC} 、 K_{IC}

4.3 K_{IC} 、 G_{IC} におよぼす、粗骨材最大径の影響

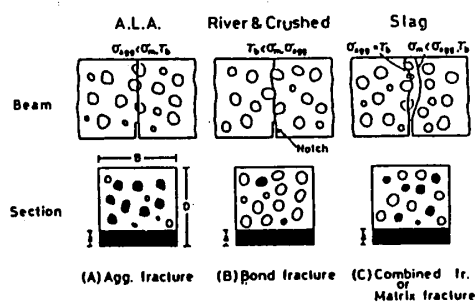
コンクリートの重量調合を一定として、使用骨材の最大径を10、20、40 (mm) の3水準で試験した。スラグ骨材の結果を図-9に示す。骨材の付着破壊型の川砂利コンクリートに関する筆者¹⁾、戸川⁷⁾、Peterson⁹⁾の諸研究が、骨材粒径 d の増大に伴い、 K_{IC} 、 G_{IC} が増すと報告している。これに対して本実験のスラグコンクリートでは、逆に径 d の増大につれ、靱性値が減少した。これは、図-11の破断形式(C)にみられる如くスラグ骨材では、マトリックス破断と付着破断の混合に基因したものと考えられる。

4.4 K_{IC} 、 G_{IC} におよぼす W/C 比の影響

A.L.A. コンクリートの $W/C = 0.52$ 、 0.60 、 0.70 の3水準における靱性値の試験結果を図-10に示す。同図中に筆者らの既報¹⁾の川砂利コンクリートの結果を参考のため示した。一般に、 W/C が大きいほど、強度値が低下した K_{IC} も低くなる。これは亀裂成長に対する抵抗性が減少するためと考えられるが、本実験では、 G_{IC} 値の W/C 依存が認められなかった。これは、曲げ破断面の類型化模式図(図-11)に示すようにA.L.A. コンクリートの破断パターン(A)の骨材破断タイプが多かった事によるものと考えられる。

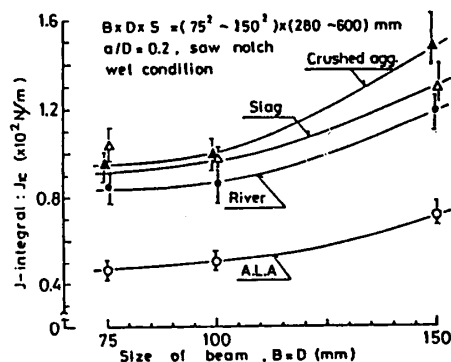
4.5 弾塑性破壊靱性 (J_{IC}) におよぼす、供試体寸法、粗骨材容積比、 W/C の依存性

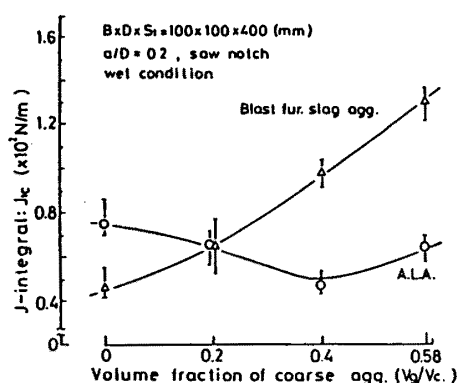
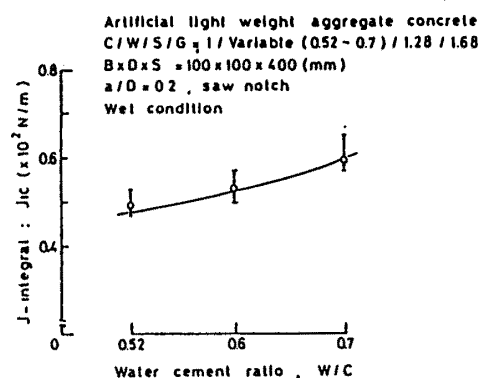
コンクリートの弾性破壊パラメーター K_{IC} 、 G_{IC} に対し、弾塑性破壊パラメーターには、 J_{IC} 、 G_F 、COD などがある。本研究で試験した Single edge notch beam (SEN) の曲げ荷重・変位曲線から J 積分値を式(5)により求めた。図-12は、 J_{IC} とはり断面寸法の関係を示す。どの骨材種別も、 $D > 100$ mm の範囲で J_{IC} が増大する傾向を示す。これにより J_{IC} 値は梁断面と骨材の種別に依存する。A.L.A. が他の骨材に比べ $1/2$ 程度と低く、 G_{IC} を含め明らかに他の骨材と量的に相違がみられる。次に、 J_{IC} の (V_g/V_c) 効果



(黒印は骨材破断, 白印は骨材の剝離を表わす)

図-11 骨材別の破断面模式図

図-12 骨材別 J_{IC} とはり断面寸法

図-13 J_{IC} と (V_g/V_c) 比図-14 A.L.A. conc. の J_{IC} と W/C

を図-13に示す。これより Slag と A.L.A. 両コンクリートの J_{IC} は、 G_{IC} の変化の様相と類似している。Slag の J_{IC} は (V_g/V_c) 比の増大につれ大きく、A.L.A. の場合は逆に減少する。また、図-14の如く、A.L.A. の J_{IC} は W/C の増加につれ増大する傾向を示した。A.L.A. コンクリートの G_{IC} は、 $W/C = 0.52 \sim 0.72$ の範囲で一定であるのと、明らかな相違がみられた。 J_{IC} は各種の試験要因に影響されることがわかった。

5. 結 論

川砂利、碎石、A.L.A.、高炉スラグの4種類の異なる骨材を用いたコンクリートの破壊靱性値に関する試験の結果は、次のようにまとめられる。

- 1) コンクリートの弾性破壊靱性 K_{IC} と G_{IC} は骨材種別とより断面寸法に依存する。断面寸法依存の大きさの順は碎石>スラグ>川砂利>A.L.A. である。
- 2) K_{IC} と G_{IC} におよぼす、単位粗骨材容積比 (V_g/V_c) および W/C の影響は、骨材の種別で異なり A.L.A. では (V_g/V_c) の増加につれ低下し、Slag では増大する。
- 3) コンクリートの弾塑性破壊靱性 J_{IC} は、骨材の種別とより断面寸法に依存する。依存の大きさの順は碎石>スラグ>川砂利>A.L.A. であり、 K_{IC} と G_{IC} の変化の様相に似ている。

《謝辞》本研究は文部省科学研究費・試験研究(61850105)によったものである。実験とまとめには、山田寛己技官、院生伊藤定文、学生山内高、西村俊也諸君の助力を得た。謝意を表す。

参考文献

- 1) 大岸佐吉、小野博宣；コンクリート工学、Vol. 26、No2、Feb. 103-118 (1988).
- 2) 大岸佐吉、小野博宣；コンクリート工学、Vol. 25、No12、Dec. 101-117 (1987).
- 3) Wittmann, F. H. edited; Fracture Mechanics of Concrete, Elsevier Pub., Amsterdam, 542-661 (1983).
- 4) Carpinteri, A. and A. R. Ingraffea; Fracture Mechanics of Concrete, Martinus Nijhoff Pub., Boston, 85-94 (1984).
- 5) Sih, G. C. and A. Ditommaso edited; Fracture Mechanics of Concrete, Martinus Nijhoff Pub., (1985).
- 6) 小柳 治、境 賢治；セメント技術年報、25、264-269 (1971).
- 7) 戸川一夫、佐藤、荒木；セメント技術年報、27、202-206 (1973).
- 8) Alford, N. M. and A. B. Poole; Cem. and Conc. Res., 9, 583-589 (1979).
- 9) Peterson, P. E.; Cem. and Conc. Res., 10, 91-101 (1980).
- 10) Rice, J. R., P. C. Paris and J. G. Merkle. ASTM. STP-536, 231-245 (1973).
- 11) Mindess, S., F. V. Lawrence and C. E. Kesler; Cem. and Conc. Res., 7, 6, 732-742 (1977).
- 12) 六郷恵哲、C. E. Kesler and F. V. Lawrence, 第2回コンクリート工学年次講演論文集、125-128 (1980).