

## コンクリートの破壊力学に関する研究

## その2 J積分評価における直接および間接的方法

正会員 岸 谷 孝 一\*  
 正会員 村 上 聖\*\*  
 正会員 平 山 善 吉\*\*\*  
 正会員 平 居 孝 之\*\*\*\*

## 1. 序 論

コンクリートの破壊靱性評価に線形破壊力学（以下、LEFM と略記する）を単純に適用することはできない。それは、破壊靱性試験において切欠き先端前方の非線形破壊過程領域の存在が、通常用いられる中・小型供試体では（破壊靱性の大きな材料では実大構造寸法に対しても）一般に無視できないためである。一方で、マイクロクラックの累進的発生を伴う破壊過程域の進展を主ひび割れの安定成長とみなし、その影響を受けない破壊靱性試験形態（例えば、双片持ちばり〈double cantilever beam〉試験体ではり高さを適当な曲線形状にすることにより、き裂長さによらず一定の応力拡大係数が得られる変断面 DCB）を利用することによって、破壊過程域を直接扱うことなしに、コンクリート破壊靱性を適切に評価することができるとする見解もある<sup>1)</sup>。しかし、その妥当性は、破壊過程域の進展を主ひび割れの安定成長とみなせるのかどうかに決定的に依存している。これに関して通常の破壊靱性試験は、ノッチ形状の2次元クラックを想定して行われるので、切欠き先端前方の3次元の態様で発生する不連続マイクロクラックを同列に扱うことはできないように思われる。

したがって、コンクリートへのLEFMの適用性は、破壊過程域が切欠き深さや他の構造寸法（例えば、リガメント長さなど）に比べて十分に小さいことが要求され、それが満足されないときには、破壊過程域に起因する非線形現象を考慮した取り扱いが必要になる。コンクリートの場合、その高度の非均質性により破壊過程域は無視できないほどの大きさに発達することが、アコースティック・エミッション法によるマイクロクラック発生

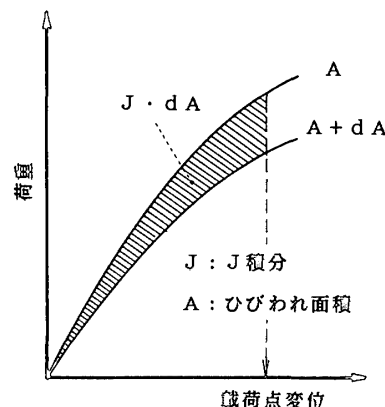
源の探査などで明らかにされている<sup>2)</sup>。さらに、繊維補強コンクリートにおいては、ひび割れ面での繊維のブリッジングや引き抜けなどに起因した非線形領域の定量化が、脆性マトリックスに対する繊維補強機構の解明に重要な課題となっている。

その方法として、これまでに金属に適用されているJ積分評価法をコンクリート系材料に応用し、非線形効果の定量化が試みられている<sup>3)~7)</sup>。その際に、J積分の実験的評価において得られる結果が、J積分値を評価する点の選定に強く依存することが指摘されている<sup>3)</sup>。したがって、コンクリートのような非均質複合材料の場合には、そのひび割れ進展過程は一様でないことから、ひび割れ発生点を検出するための測定技術や精度上の問題を含めて、今後その適用性が議論されるものと考えられる<sup>8)</sup>。

本研究では、その1で既報の<sup>9)</sup>破壊過程域の損傷解析に基づく間接的方法と、金属に適用されているJ積分評価法との比較検討を行う。

## 2. J積分評価法

金属に適用されているJ積分評価方法には、Begley-Landesによる直接実験的方法ならびにRiceの簡便式を用いる半解析的方法などがあり、コンクリート系材料に対してこれらの方法が試みられている。



図一1 J積分の物理的意味

本論文の一部は、昭和60年度日本建築学会大会学術講演会で発表した。

\* 東京大学 教授・工博  
 \*\* 熊本大学 助手・工博  
 \*\*\* 日本大学 助教授  
 \*\*\*\* 大分大学 教授・工博  
 (昭和61年8月19日原稿受理)

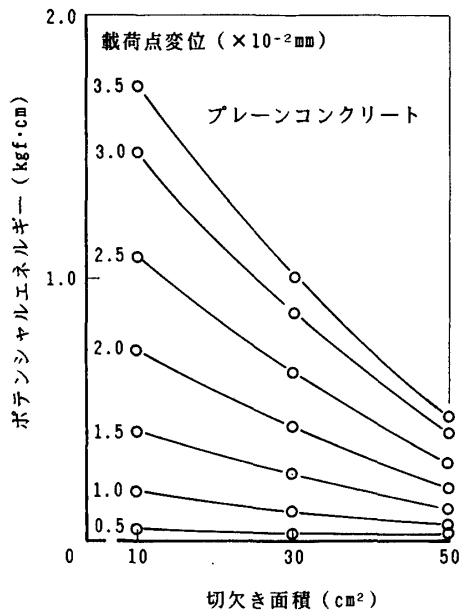


図-2 Begley-Landes による実験的方法

前者の方法は、 $J$  積分が非線形弾性材料に対してき裂長さの変化に伴うポテンシャルエネルギーの変化を示すことをもとに、わずかにき裂長さの異なる供試体について荷重-載荷点変位曲線を実験により求め、それらの間のポテンシャルエネルギーの差が、図-1 に示すように  $J \times dA$  に等しいことから  $J$  積分値を評価するものである。本研究では、切欠き深さの種々異なる供試体から求められた外力仕事量を切欠き面積に対してプロットすることにより得られる曲線（本実験結果の 1 例を図-2 に示す）の接線こう配から  $J$  積分値を評価した。

後者の方法は、き裂が深く、荷重-変位曲線が主としてリガメント長さのみに依存するという前提のもとで、特に切欠き曲げ供試体に対して有効である次式に基づく評価である。

$$J = \frac{2}{B \times L} \int_0^{A_c} P d\Delta$$

ここに、 $B$ ：はり幅、 $L$ ：リガメント長さ、 $P$ ：荷重、

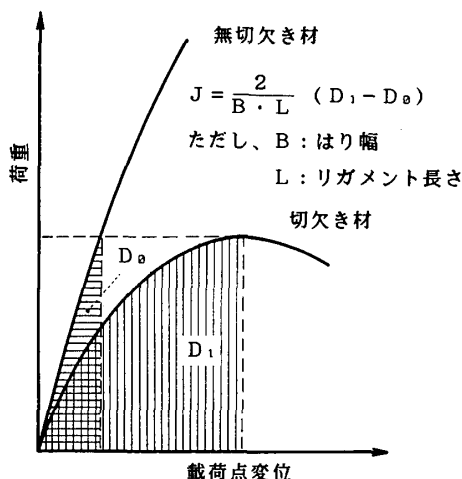


図-3 Rice 式を用いる半解析的方法

表-1 Dugdale モデル解析結果  
 中点曲げ載荷 (スパン・高さ比 = 3)

$a/W$	$\omega/W$	Y	X	D	
0.1	0.05	0.616	0.114	1.961	
	0.10	0.835	0.239		
	0.15	0.988	0.388		
	0.20	1.119	0.564		
	0.25	1.237	0.779		
	0.30	1.349	1.049		
	0.35	1.452	1.379		
0.3	0.40	1.553	1.809	4.759	
	0.45	1.649	2.354		
	0.05	0.362	0.126		1.870
	0.10	0.513	0.280		
	0.15	0.629	0.480		
	0.20	0.729	0.733		
	0.25	0.818	1.053		
0.30	0.902	1.478			
0.35	0.981	2.054			
0.5	0.40	1.057	2.866	6.590	
	0.45	1.128	3.950		
	0.05	0.210	0.133		2.274
	0.10	0.301	0.314		
	0.15	0.373	0.578		
	0.20	0.436	0.956		
	0.25	0.494	1.523		
0.30	0.550	2.440			
0.35	0.600	4.000			
0.40	0.645	7.333	16.24		
	0.45	0.681		16.86	

ここで、  
 $Y = \sigma_b / \sigma_y$   
 $X = (E \cdot \phi) / (\sigma_y \cdot W)$   
 $D = (E \cdot \delta) / (\sigma_y \cdot W)$   
 $\sigma_b$ ：公称曲げ応力度  
 $\sigma_y$ ：降伏強度  
 $\phi$ ：き裂開口変位、C O D  
 $\delta$ ：載荷点変位  
 $E$ ：縦弾性係数  
 $W$ ：はりせい

$\Delta_c$ ：載荷点変位のうちき裂があるために生じる変位成分。

上式の評価過程を図式的に示すと、図-3 のようである。

間接的評価としては、その 1 で述べた方法により、荷重-変位曲線の測定値との一致から、破壊過程域内部の結合力-開口変位関係を逆推定し、 $J$  積分値はその曲線下の面積として間接的に求められた。ここで、載荷点変位に関する Dugdale モデル解析結果を表-1 に示す。ただし、後述する実験方法に準じて、載荷点変位として、たわみ測定用治具を取り付けた位置を基準に測ったアングル状切片接着位置の変位を採用した。

### 3. 実験方法

破壊靱性試験は、寸法 100×100×400 mm の切欠き曲げ供試体の中点載荷 (スパン・高さ比=3) で行った。切欠きは、厚さ 1.0 mm のアクリル板を先打ちする方法で入れ、その深さは、はりせいに対する比で 0.1, 0.3, 0.5 の 3 種類とした。載荷点変位を計測するために、供試体は材令 21 日 (20°C 水中養生) 後 7 日間空气中で自然乾燥し、供試体の両側面の載荷点下にアングル状の金具を接着した。また、支承部のめり込みによる変位を除去するために、たわみ測定用治具はピン支持で直接供試体に取り付けた。測定方法は図-4 に示すとおりであり、

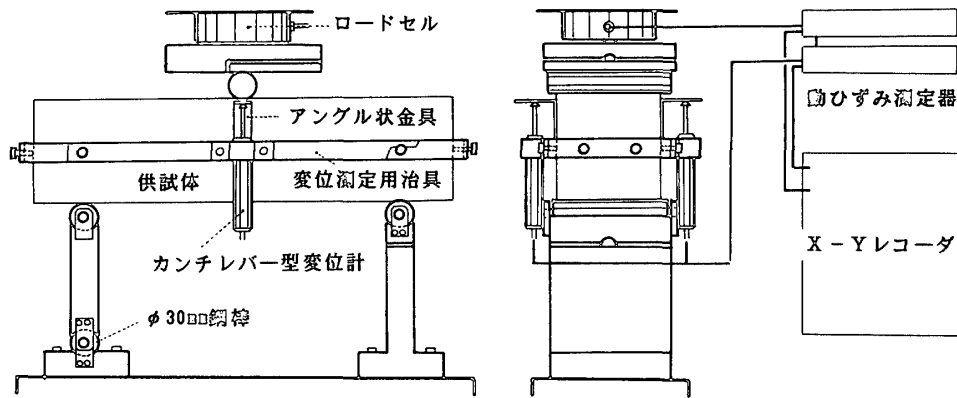


図-4 測定方法

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランド
細骨材	大井川産川砂 表乾比重=2.62 最大寸法=5.0mm F. M. =2.85
粗骨材	大井川産川砂利 表乾比重=2.65 最大寸法=15.0mm F. M. =6.50
鋼繊維	市販のせん断ファイバー 寸法=0.5×0.5×30mm

表-3 使用調査

シリーズ	割合	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	弾性係数 kgf/cm <sup>2</sup>
モルタル A	水セメント比=60% C:S=1:2 (容積比) 砂: 登瀛製砂 材令(日)=21 (20°C) 水中養生)+7 (空气中)	19.9	2.09×10 <sup>5</sup>
モルタル B	水セメント比=50% C:S=1:2.14 (容積比) 材令(日)=21 (20°C) 水中養生)+7 (空气中)	27.8	2.49×10 <sup>5</sup>
プレーン コンクリート	水セメント比=50% C:S:G=1:2.14:2.89 (容積比) 材令(日)=21 (20°C) 水中養生)+7 (空气中)	32.8	3.36×10 <sup>5</sup>
鋼繊維補強 コンクリート	水セメント比=50% C:S:G=1:2.14:1.86 (容積比) 細骨材容率=53.8% 繊維体積率=1.0% 材令(日)=21 (20°C) 水中養生)+7 (空气中)	38.9	3.41×10 <sup>5</sup>

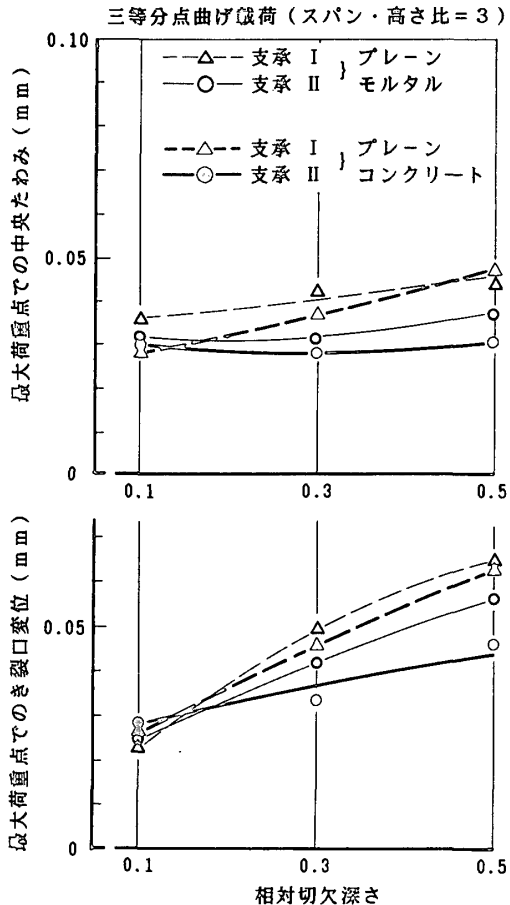


図-5 支承部の拘束が試験結果に及ぼす影響

荷重と載荷点変位との関係は、X-Yレコーダにより自動記録した。使用材料および割合は、それぞれ表-2および3に示すとおりで、供試体は同一条件ごとに各3個ずつ作製した。

ところで、本実験に先立ち、曲げ支承部の拘束が試験結果に及ぼす影響について予備実験を行った。これに関して小林らは、繊維補強コンクリートの曲げ強度試験において支承部の拘束が試験結果に顕著な影響を与えることを示している<sup>10)~12)</sup>。このことは、切欠きが深くなると供試体は変形しやすくなることから、破壊靱性試験においても同様に変形を拘束するような支承構造を用いると、試験結果に大きな影響に及ぼすことを予想させる<sup>13)</sup>。予備実験では、通常のローラー支承（以下、支承Ⅰと称する）と、図-4に示すように片側の支承脚底に直径30mmの鋼棒を挿入し、軸方向の自由回転により水平移動の拘束を低減した支承構造（以下、支承Ⅱと称する）の2種類を用いて、破壊靱性試験を行った。

その結果として、両支承構造ともにローラー接点によ

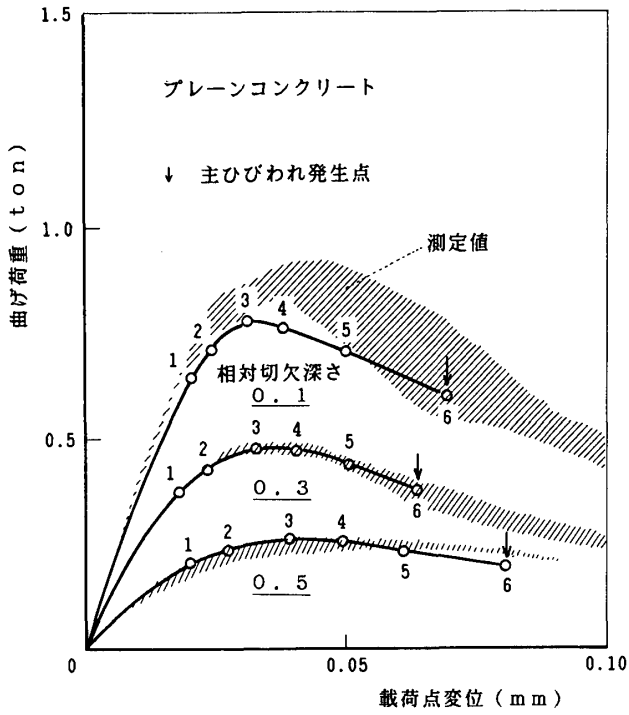


図-6 荷重-載荷点変位曲線に関する測定値および計算値の比較

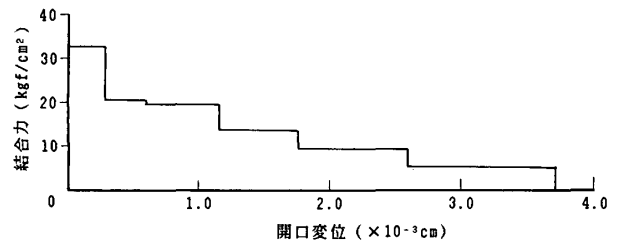


図-7 推定された結合力-開口変位関係

表-4 各選点で評価された J 積分値

選点番号	$\sigma_y$	$\phi$	J	$\sigma$
1	32.8	0.27	8.86	32.8
2	26.2	0.58	15.2	20.5
3	23.0	1.15	26.5	19.7
4	19.7	1.76	34.7	13.5
5	16.4	2.58	42.3	9.30
6	13.1	3.71	48.6	5.60

ここで、 $\sigma_y$  : 等価降伏強度(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\phi$  : き裂開口変位( $\times 10^{-3}$ cm)  
 J : J 積分値( $\times 10^{-3}$ kgf/cm)  
 $\sigma$  : 結合力(kgf/cm<sup>2</sup>)

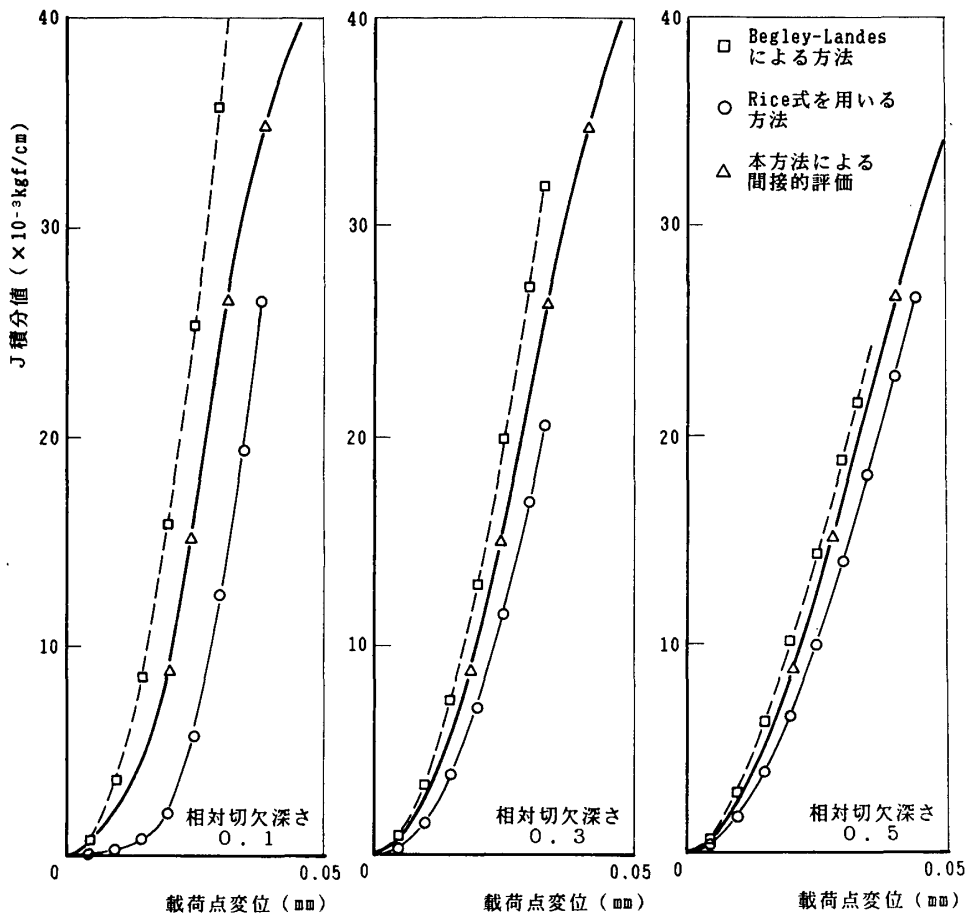


図-8 J 積分値-載荷点変位関係

り供試体の回転に対する拘束は低減されているが、支承Ⅰの場合には供試体の変形が進むにつれて支承部とのずれが生じ、水平方向の移動がかなり拘束されていることが観察された。また、図-5は、モルタルおよびプレーンコンクリートについて、支承ⅠおよびⅡを用いたときの最大荷重点における中央たわみおよびき裂口変位の測定値の比較を示したものである。この図から、支承ⅠはⅡよりも大きい測定値を与え、より延性的なプレーンコンクリートにおいて、また切欠きが深くなるほど、その傾向が著しくなることがわかる。

以上の結果から、切欠き曲げ供試体を利用する場合には、支承部拘束の影響に関して十分な注意が必要であり、拘束が大きくなると、得られる結果は見かけ上過大評価される可能性があることが予想される。したがって、本実験では、一貫して支承Ⅱの構造を用いて試験を行った。

4. 結果および考察

図-6は、荷重-載荷点変位曲線に関する測定値と計算値との比較を、プレーンコンクリートについて示したものである。解析は、相対切欠き深さ=0.3の供試体に関

する荷重-載荷点変位曲線の測定値との一致から、その1で述べた逆解法により破壊過程域内部の結合力-開口変位関係を推定した。その結果を図-7に示す。ただし、測定値との一致を調べた選点は、図-6中に○印で示す。また、その構成法則に基づいて、相対切欠き深さ=0.1および0.5の供試体に関して荷重-載荷点変位曲線が計算された。その結果は、測定値と妥当な一致が得られているようである。また、表-4は、各選点で評価されたJ積分値を示す。

図-8は、前述のBegley-Landesによる直後実験的方法、Rice式を用いる半解析的方法および本手法による間接的評価により求められたJ積分値-載荷点変位関係を、相対切欠き深さ=0.1, 0.3, 0.5について示したものである。この図から、本手法による評価値は、他の2者の方法による値の中間に位置し、同一変位の比較で、Rice式を用いる方法<本手法<Begley-Landesによる方法の順に、J積分値は高目に評価されるが、切欠きの深い範囲で3者の方法の間に妥当な一致が得られている。特に、Rice式を用いる場合には切欠きの深いこと

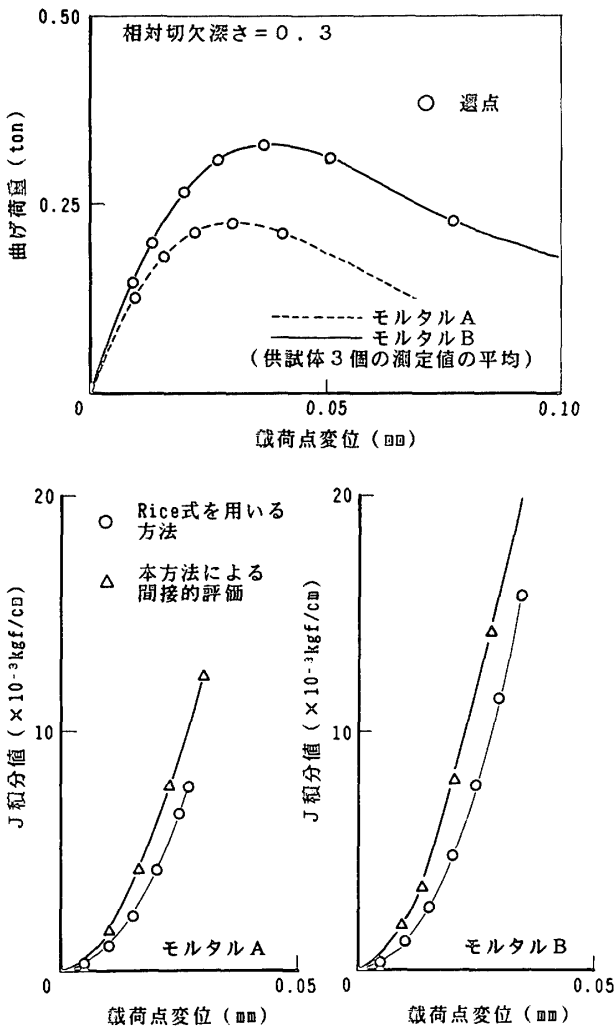


図-9 プレーンモルタルに関する荷重-載荷点変位曲線およびJ積分値-載荷点変位関係

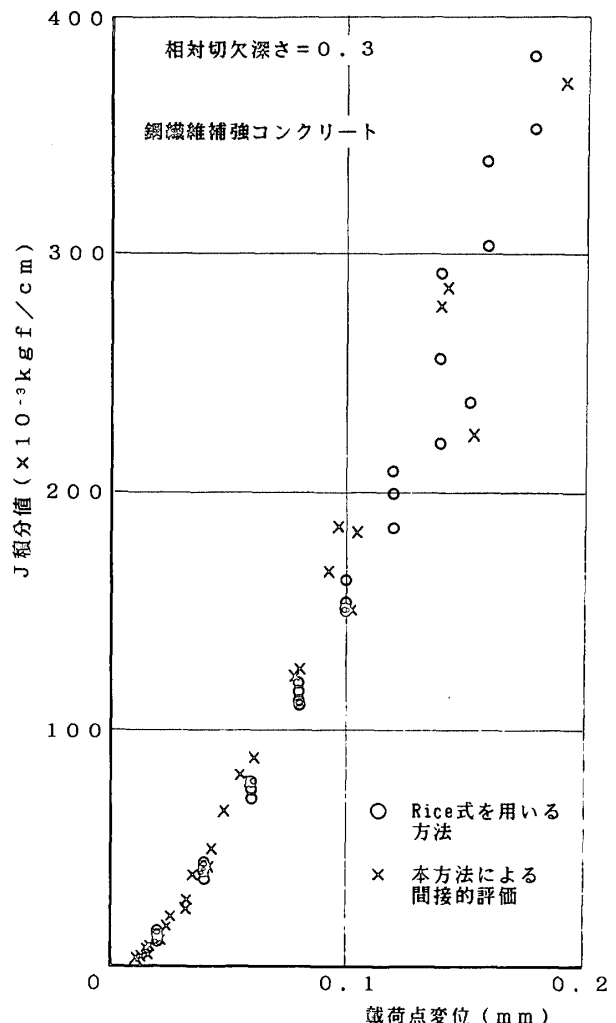


図-10 鋼繊維補強コンクリートに関するJ積分値-載荷点変位関係

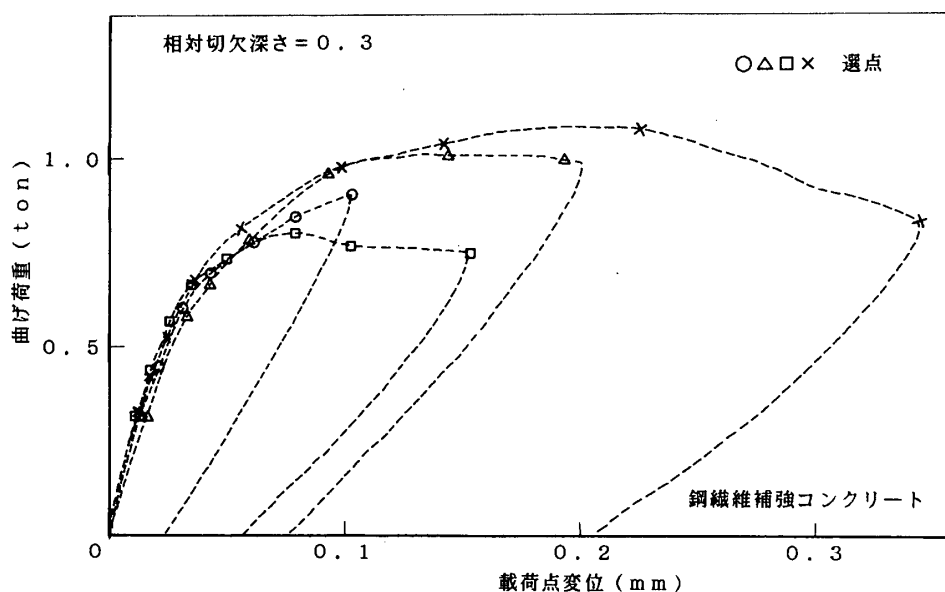


図-11 鋼繊維補強コンクリートに関する荷重-載荷点変位曲線

がその前提条件にあるので、切欠深さの小さい範囲で他の方法に比べて大きな差を生じていることは、ある程度予想される結果でもある。

図-9 および 10 は、モルタル A および B、ならびに鋼繊維補強コンクリートについて、Rice 式を用いる方法および本手法により求められた  $J$  積分値-載荷点変位関係をそれぞれ示す。ただし、繊維補強コンクリートについては個々の供試体に関して評価されている (図-11)。これらの図から、プレーンコンクリートの場合と同様に、両者の方法の間で比較的に良い一致が得られている。

ところで、Begley-Landes による方法および Rice 式を用いる方法の場合、それでは  $J$  積分値を一体どこで評価するのが適切であるかの判断は、直接的評価では破壊過程域内部の損傷レベルをブラックボックスとして扱っているために、別に検討しなければならない重要な課題になる。しかし、コンクリートの場合にはその高度の非均質性により、ひび割れ進展過程は一樣ではないことから、金属におけるように Rカーブ法、電位差法あるいは破面観察などに代表される精度の良いひび割れ検出法は、コンクリートにおいて見出されていないのが現状である。従来、コンクリートにおける  $J$  積分値の評価点として最大荷重点、AE 急増開始点あるいは荷重-変位曲線上の特異点などが採用されているものの、それらの点がコンクリートのひび割れ進展過程や破壊過程域の損傷程度とどのように関連しているのかは、直接的観察が難しいこともあって、十分に明らかにされていないといえない。

## 5. 結論

本研究において得られた知見を以下に述べる。

- 1) コンクリートに関して、金属に適用されている  $J$

積分評価法と、同じ  $J$  積分概念に基づいた結合力モデル解析による間接的評価との比較について実験的検討を行った。その結果として、Begley-Landes による直接実験的方法および Rice 式を用いる半解析的方法のような直接的評価と本手法の破壊過程域の損傷解析に基づいた間接的評価との間に、モルタル、プレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートについて  $J$  積分値-載荷点変位関係に関し妥当な一致が得られた。このことは、特に切欠深さの大きい範囲で真である。

2) 本手法との比較から、Begley-Landes による方法および Rice 式を用いる方法の場合には、 $J$  積分値を求める点をどこに定めるかの判断は、特にコンクリートのような非均質複合材料ではひび割れ発生点を検出するための測定技術や精度上の問題を含めて、別に検討されなければならない重要な課題になる。

3) 直接的評価においてブラックボックスとして扱われている破壊過程域内部の損傷解析に基づいて、破壊靱性を評価する本手法のような間接的方法は、その領域内部の損傷レベルと対応させて、評価点の選定を直接扱うことができる特長をもつ。

## 謝 辞

本論文は、筆者の一人が学位論文としてとりまとめたものの一部であり、御便宜をたまわりました熊本大学工学部建築学科 三井宜之教授に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 和泉正哲, 三橋博三, 野村希晶, 海老沢弘道: DCB 法によるコンクリート材料破壊じん性評価に関する基礎的研究, 第 5 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983
- 2) 岡田 清, 小柳 治, 六郷恵哲: コンクリートの曲げ引張破壊過程に関するエネルギー的考察, 土木学会論文報

- 告集, 第 285 号, 1979
- 3) G. Velazco, K. Visalvanich, S.P. Shah : Fracture Behavior and Analysis of Fiber Reinforced Concrete Beams, Cement and Concrete Research, Vol.10, No.1, 1980
  - 4) 寺村敏史, 槻山興一, 青山 幹, 堀 長生, 我妻信行 : けい酸カルシウム系人造木材に関する研究 (その 2; 破壊靱性からみた諸材料との比較), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984
  - 5) 六郷恵哲, C.E. Kesler, F.V. Lawrence :  $J$  積分によるコンクリートの破壊靱性の評価, 第 2 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1980
  - 6) A. Carpinteri : Static and Energetic Fracture Parameters for Rocks and Concretes, Materials and Structures (RILEM), Vol.14, No.81, 1981
  - 7) S. Mindess, F.V. Lawrence, C.E. Kesler : The  $J$ -integral as a Fracture Criterion for Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 7, 1977
  - 8) 小柳 治, 六郷恵哲 : コンクリートの破壊と靱性評価, コンクリート工学, Vol.20, No.4, 1982
  - 9) 岸谷孝一, 村上 聖, 平居孝之 : コンクリートの破壊力学に関する研究 その 1. 破壊過程域の損傷解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 368 号, 昭和 61 年 10 月掲載予定
  - 10) 小林一輔, 岡村雄樹, 梅山和成 : 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度試験法に関する実験的研究, 東京大学生産研究報告, Vol. 31, No.11, 1979
  - 11) 小林一輔 : 繊維補強コンクリート 特性と応用, オーム社, 1981
  - 12) 小林一輔, 魚本健人, 趙 力采 : 繊維補強コンクリートの力学的諸性質の試験方法に関する研究, 東京大学生産研究報告, Vol. 31, No.1, 1984
  - 13) O. E. Gjrv, S. I. Srensen, A. Arnesen : Notch Sensitivity and Fracture Toughness of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 6, No. 3, 1977
  - 14) 岸谷孝一, 村上 聖, 平居孝之 : コンクリートの破壊靱性評価 ( $J$  積分評価法) に関する研究, セメント技術年報, Vol. 39, 1985

---

## SYNOPSIS

UDC : 691.32 : 691.059.22

### STUDY ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE

#### Part 2 Association of direct and indirect methods in the estimation of $J$ -integral

by Dr. KOICHI KISHITANI, Professor of University of Tokyo,  
Dr. KIYOSHI MURAKAMI, Assistant of Kumamoto University,  
ZENKICHI HIRAYAMA, Assistant Professor of Nihon University,  
Dr. TAKAYUKI HIRAI, Professor of Oita University, Members of A. I. J.

The association of the  $J$ -integral estimations which are applied to metal and the indirect method by means of a cohesive force model analysis based on the same  $J$ -integral concept was experimentally investigated.

As a result, the reasonable agreement was obtained concerning a relation of  $J$ -integral value and deflection among the experimental method by Beglay-Landes, the semi-analytical method using the Rices formula and the present method based on an analysis of damage of the fracture process zone.