

コンクリートの破壊靱性評価に関する研究 — J積分と破壊エネルギーとの関連 —

正会員○村上 聖^{*1}、同 岸谷孝一^{*2}、同 平居孝之^{*3}

1. 序論

コンクリートのような複合脆性材料に対して、非均質性による主ひび割れの安定成長のクライテリオンとして破壊エネルギー (fracture energy、以下 G_f と略称する) が注目されている。また、 G_f を直接実験的に求める手法についてもこれまでにいくつか提案されているが、そのうちの 하나가最近RILEM 50-FMC委員会により推奨案として報告されている¹⁾。

ところで、主に金属のような弾塑性材料を対象として発展してきた破壊力学では、き裂が単位面積だけ進展するのに必要なエネルギーとしての物理的意味をもつJ積分が、き裂進展開始のクライテリオンとして有用なパラメーターとなっているのに対して、 G_f はき裂進展開始以後も包括するき裂進展のクライテリオンとして位置づけられている点に大きな特徴がある。これは、外力のなした仕事の一部が熱となって消失するような塑性体と異なり、ほとんど塑性変形を伴わず外力仕事の主として微細ひび割れの表面エネルギーに変換されるようなコンクリートの場合には、 G_f がひび割れの進展に必要なエネルギーとしての物理的意味を失わないことに基づいているものと考えられる。

そこで本研究では、以上の点について実験的検討を行い、き裂進展開始以後のパラメーターとしての G_f の位置づけをJ積分との対応から明らかにするものである。

2. 評価方法

2.1 J積分

J積分評価方法には、Begley-Landesによる実験的方法やRice式による半解析的方法があるが、ここでは既報²⁾のJ等価Dugdaleモデルによる解析的方法に基づいてJ積分を評価した。本モデルは、き裂先端前方の細長い塑性域の進展を仮想のき裂面にその開口に抵抗する力 (結合力) が作用するものとして近似したモ

デルであり、任意の結合力-き裂開口変位関係とその曲線下の面積 (J積分を表す) が等価になるように一定の結合力が作用するモデル (Dugdaleモデル) に置き換えて、非線形問題を線形化する手法である。従って、その解析の逆解法により、実験的に得られる荷重-変位曲線から結合力-き裂開口変位関係を一意的に求めることができる。

2.2 破壊エネルギー

ひび割れが微小面積 dA だけ進展するのに必要なエネルギー $G_f dA$ は、その間に外力がなした仕事と弾性ひずみエネルギーの変化の双方から供給される、すなわち

$$G_f dA = Pdu - dU \quad (1)$$

ここに、 P : 荷重, u : 載荷点変位, U : 弾性ひずみエネルギーである。

コンクリートの場合には、主ひび割れ先端前方に微細ひび割れの累進的発生に起因する破壊過程域が形成されるので、ひび割れ進展以後の $G_f dA$ は、不可逆変形を考慮して、図-1に示す斜線領域の面積 (ひび割れが dA だけ進展するときの損失エネルギーの変化を表す) として評価される。従って、

$$G_f dA = Pdu - dU \\ = Pdu - \left\{ \frac{1}{2} (P+dP)^2 (\lambda + d\lambda) - \frac{1}{2} P^2 \lambda \right\}$$

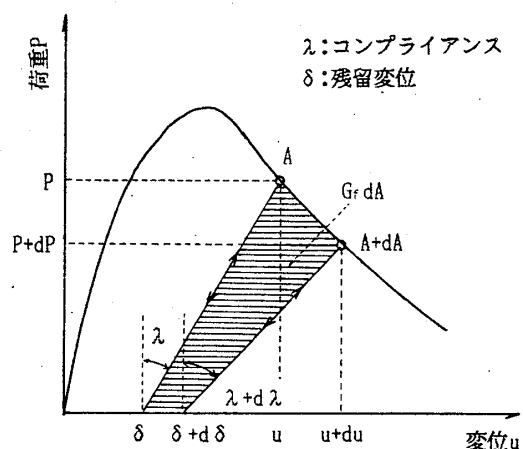


図-1 破壊エネルギーの評価

(*1 熊本大学 講師・工博、*2 日本大学 教授・工博 (東京大学名誉教授)、*3 大分大学 教授・工博)

$$=Pdu - \frac{1}{2} P^2 d\lambda - P\lambda dP$$

ここで、 $P\lambda = u - \delta \therefore du = d\delta + d(P\lambda)$ だから

$$=Pd\delta + P(Pd\lambda + \lambda dP) - \frac{1}{2} P^2 d\lambda - P\lambda dP$$

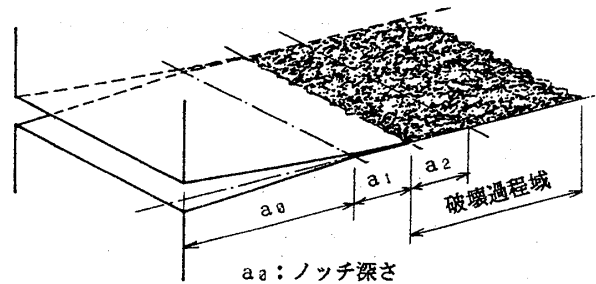
$$=Pd\delta + \frac{1}{2} P^2 d\lambda$$

$$\therefore G_r = \frac{1}{2} P^2 \left(\frac{d\lambda}{dA} \right) + P \left(\frac{d\delta}{dA} \right) \quad (2)$$

上式の第1項は、弾性体のエネルギー解放率の評価に際してのコンプライアンス・キャリブレーション法の基礎となっている式であり、第2項はひび割れの進展に起因する不可逆変形のために生じる付加項（非弾性エネルギー解放率と呼ばれる）である。

この方法は、オフセット破壊エネルギー法と呼ばれそれぞれのひび割れ進展深さで G_r を式(2)により評価し、ひび割れの進展に伴う G_r の変化、すなわちひび割れ進展抵抗曲線（R-カーブと呼ばれる）が求められる。この方法によれば、唯一本の繰り返し荷重-変位曲線からR-カーブが求められるとともに、破壊エネルギーに占める弾性寄与分と非弾性寄与分を分離して評価することができるので、弾性エネルギー解放率としてのJ積分との対応が明らかになる利点がある。ただし、この方法の場合には、それぞれの除荷段階で主ひび割れ進展深さを評価しなければならないが、直接実験的に測定することは困難であるので、以下の方法により解析的に求めた。

除荷・再載荷曲線の勾配から解析的にひび割れ進展深さを計算することができるが、そのときに求められるひび割れ進展深さ a は見かけのものであり、実際的主ひび割れ進展深さ a_1 とは異なるが、 a は a_1 と破壊過程域における損傷による剛性の低下に等価な仮想の主ひび割れ進展深さ a_2 の和とみなせる（図-2）。ところで、オフセット破壊エネルギー法において必要な量は主ひび割れ進展深さの増分 Δa_1 であるから、いま損傷の程度が主ひび割れ進展深さによらずほぼ一定であると仮定すれば $\Delta a_2 = 0$ とみなせるので、解析的に求められる見かけのひび割れ進展深さの増分 Δa は実際的主ひび割れ進展深さの増分 Δa_1 とほぼ一致するものと考えられる。



- a_0 : ノッチ深さ
- a_1 : 主ひび割れ進展深さ
- a_2 : 損傷による剛性低下に等価な仮想の主ひび割れ進展深さ
- λ_0 : 初期コンプライアンス
- λ_1 : 主ひび割れ進展 a_1 によるコンプライアンス増加
- λ_2 : 損傷による剛性低下によるコンプライアンス増加

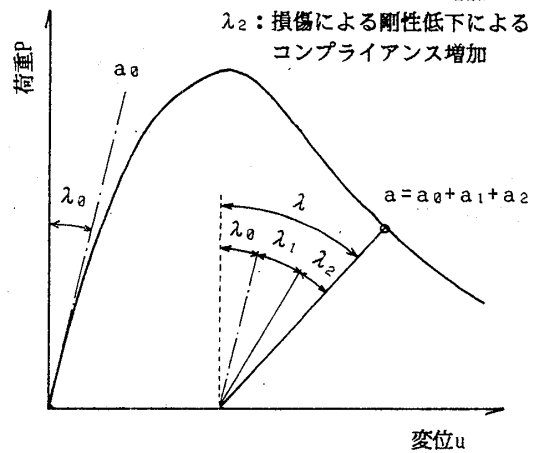


図-2 ひび割れ進展深さの評価

セメント	普通ポルトランド
細骨材	大井川産砂 表乾比重=2.62 最大寸法=5mm 粗粒率 =2.85
粗骨材	大井川産砂利 表乾比重=2.65 最大寸法=15mm 粗粒率 =6.50

表-1 使用材料

表-2 使用調合

シリーズ	調合	圧縮強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kg/cm ²)
豊浦標準砂モルタル	水セメント比=60% C:S=1:2(重量比)	276	2.09
川砂モルタル	水セメント比=50% C:S=1:2.14	328	2.49
川砂利コンクリート	水セメント比=50% C:S:G=1:2.14:2.89	482	3.36

3. 実験方法

使用材料及び調合を表-1,2に示す。ここでは、豊浦標準砂モルタル、川砂モルタル及び川砂利コンクリートの3種類について検討した。破壊靱性試験は、寸法10X10X40cmのノッチつきはりの3点曲げ（スパン・高さ比=3）で行い、ノッチ深さは3cmの1種類とした。供試体は、荷重点変位を計測するために材令=21日（水中養生）後7日間空中で乾燥し、供試体両側面の荷重点下にアングル状切片を接着した。測定方法は、図-3に示すとおりであり、荷重と変位との関係はX-Yレコーダーにより自動記録した。

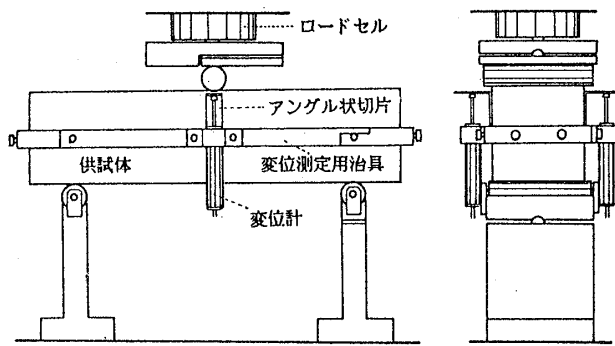


図-3 測定方法

4. 結果及び考察

図-4に、豊浦標準砂モルタル、川砂モルタル及び川砂利コンクリートに関する、荷重-荷重点変位曲線の測定値、解析的に求められたひび割れ進展深さにおける除荷・再載荷曲線の勾配、J等価Dugdaleモデルに

より推定されたJ積分-変位関係、及びオフセット破壊エネルギー法により得られた G_f -変位関係を示す。この図から、ひび割れ進展以後 G_f とJ積分との間に差が生じているが、 G_f に占める弾性寄与分はほぼJ積分と一致していることから、その差は非弾性寄与分であることがわかる。また、 G_f に占める非弾性寄与分の比率は、コンクリートの種類によらずほぼ一定であり、約50~60%程度であった。このことは、非均質性が大きくなるほど G_f は増加するが、それに占める弾性寄与分と非弾性寄与分の相対的比率は非均質性によらずほぼ一定であることを示している。

ところで、結合力モデルは非線形弾性体モデルであるから、その可逆性からひび割れ進展以後の荷重-変位曲線は、き裂を順次切断し、さらに再負荷したときの荷重-変位曲線を包絡する曲線を描くはずであるが、実際はひび割れ進展以後の不可逆変形のために図-5に示すように包絡線から次第に逸脱し、その差である斜線部分の面積にあたる非弾性エネルギーが余分に消費されると考えられる。従って、結合力モデルの適用は、破壊過程域において結合力が完全に展開されて主ひび割れがまさに進展する時点でのクライテリオンを与えるのには、すなわちき裂進展開始のクライテリオンとしてのJ積分の評価には有効であるが、ひび割れ進展以後の解析には不可逆変形を考慮した非弾性解析が必要になり、そのときのクライテリオンとして非弾性エネルギー解放率を含む G_f が有効になるものと思われる。

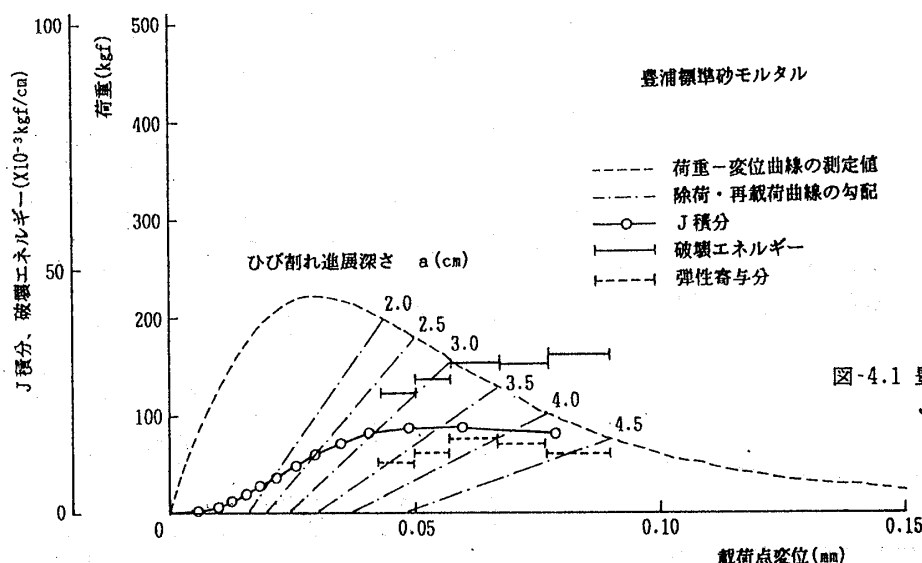


図-4.1 豊浦標準砂モルタルに関するJ積分及び破壊エネルギー

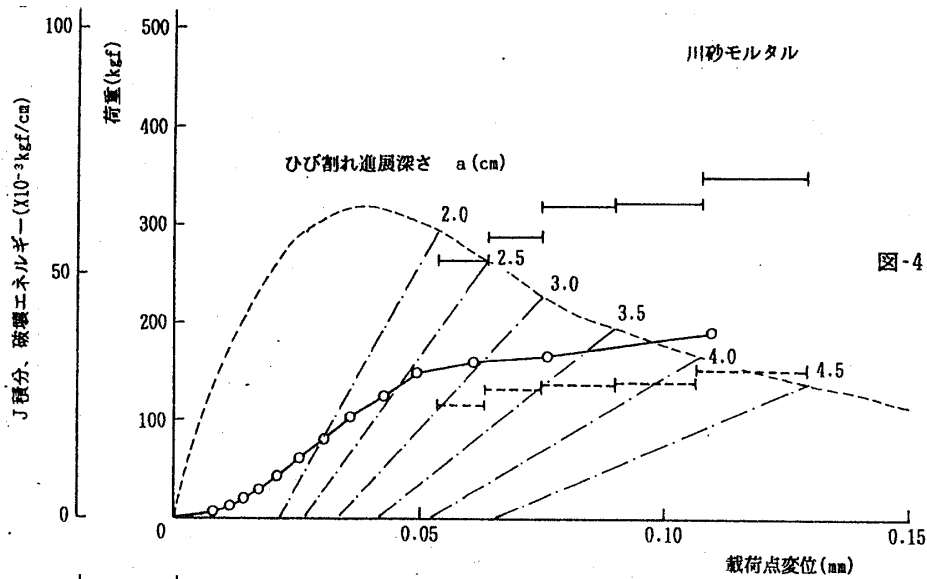


図-4.2 川砂モルタルに関する J積分及び破壊エネルギー

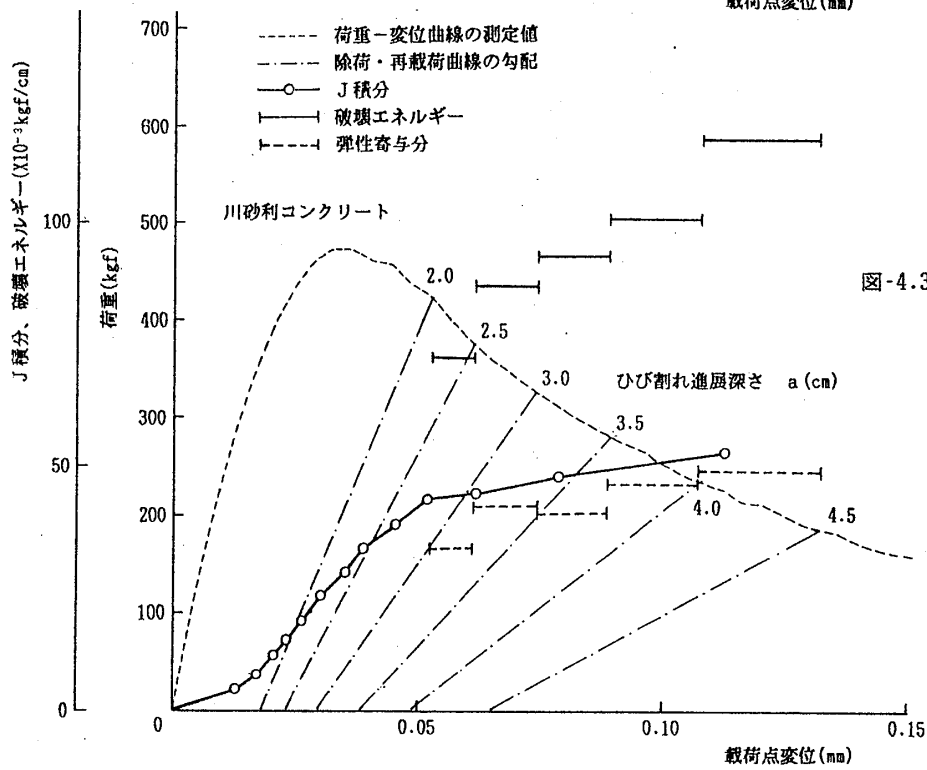
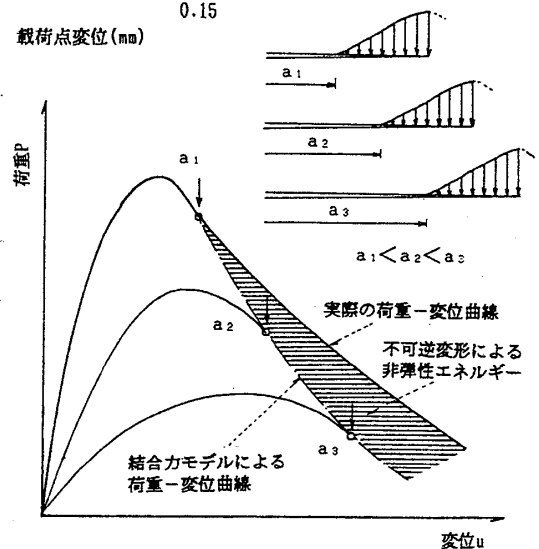


図-4.3 川砂利コンクリートに関する J積分及び破壊エネルギー

図-5 荷重-変位曲線による J積分と破壊エネルギーの考察



参考文献

- 1) 50-FMC Committee, Materials and Structures, RILEM Vol.18, No.106, 1985
- 2) 村上、熊本大学工学部研究報告, 第35巻, 第3号, 1986