

RILEM 法による破壊エネルギーの試験体寸法依存性に関する考察

CONSIDERATION ON SIZE DEPENDENCE OF FRACTURE ENERGY BY MEANS OF RILEM METHOD

村上 聖*, 平居孝之**
Kiyoshi MURAKAMI and Takayuki HIRAI

In this study, a verification of the past hypotheses concerning the size dependence of specific fracture energy by means of the RILEM recommendation method was conducted, and the new evaluation of fracture energy according to the RILEM method was suggested. The present evaluation is based on the physical meaning of fracture energy which consists of elastic and non-elastic energy release rates. As a result, it was shown that the size dependence of fracture energy may be caused by the increase in the non-elastic energy release rate as the main crack grows.

Keywords: Fracture energy, RILEM method, Size effect, J-integral, Cohesive force model, Non-elastic energy release rate

破壊エネルギー, RILEM 法, 寸法効果, J 積分, 結合力モデル, 非弾性エネルギー解放率

1. はじめに

コンクリートへの破壊力学の適用に関して、破壊進行領域の非線形性を考慮した仮想ひび割れモデル（あるいは、結合力モデル）が Hillerborg ら¹⁾によって初めてコンクリートへ適用されたのが 1976 年、また、1985 年に仮想ひび割れモデルの構成法則としての引張軟化曲線と関係づけられた破壊エネルギーの実験的評価法²⁾が RILEM によって提案されて以来、すでに四半世紀を過ぎようとしている。その間のコンクリートの数値破壊力学解析技術は飛躍的な進歩を遂げている。しかし、ひび割れ進展のクライテリオンに関しては、RILEM による破壊エネルギー評価法の適用妥当性について、これまでに世界的規模で実験的検討が行われてきたものの、依然として混沌とした状況にあるのが現状である。例えば、仮想ひび割れモデル解析は、コンクリートの曲げ強度の寸法効果を合理的に説明する手段として期待されているが、図 1 に示すように³⁾⁻⁸⁾、その解析と関連づけられた RILEM 法による破壊エネルギー（以下、規準破壊エネルギーと呼ぶ）に無視しえない寸法効果が存在することはよく知られている。

この規準破壊エネルギーの試験体寸法（特に、リガメント寸法）依存性については、これまでにいくつかの説明が試みられてきた。その解釈を大別すれば、破壊エネルギーの寸法依存性は、RILEM 法における試験条件や評価法の影響によるものであり、その影響を除去すれば、試験体寸法に依存しない破壊エネルギーが得られるとするものと、破壊エネルギーの寸法依存性はコンクリートに固有の材料特性であるとするものである。そこで、本報では、規準破壊エネ

ルギーの試験体寸法依存性に関して、これまでの提案の仮説を検証するとともに、前報⁹⁾で示した破壊エネルギーのエネルギー解放率としての物理的意味に基づく RILEM 法に準拠した新たな破壊エネルギー評価法の提案を目的に考察を行った。

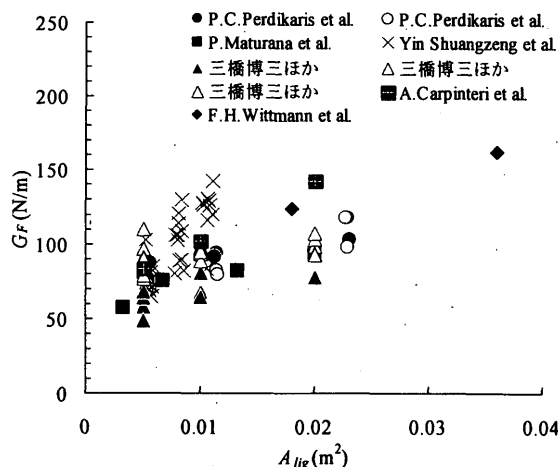


図 1 規準破壊エネルギー G_f に及ぼすリガメント面積 A_{lig} の影響

2. 規準破壊エネルギーの寸法依存性の解釈

規準破壊エネルギーに及ぼす試験条件の影響に関しては、試験体形状寸法に関係した不安定なひび割れ進展、曲げ支承部の拘束や支点および載荷点でのめり込み変位に関係したエネルギー消費、試験

* 熊本大学大学院自然科学研究科環境共生科学専攻
助教授・工博

** 日本文理大学工学部建築デザイン学科 教授・工博

Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.,
Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Designs, Faculty of Eng., Nippon Bunri Univ., Dr. Eng.

体および載荷治具等の自重補正などの影響が指摘されているが、これらの影響を除去した場合も破壊エネルギーの寸法依存性が認められており、直接的な要因にはならないものと考えられる。また、評価法の影響に関しては、進展するひび割れが試験体背面の自由境界表面に近づく、破壊進行領域が十分に発達しないことが規準破壊エネルギーの寸法依存性の要因であるとする仮説¹⁰⁾が有力視されている。すなわち、リガメント領域上で破壊エネルギーは局所的に分布し(局所破壊エネルギーと呼ばれる)、試験体背面の自由境界表面の存在によりその近傍で破壊進行領域が十分に発達しないために局所破壊エネルギーが減少し、その影響が相対的に大きくなるリガメント寸法が小さい試験体ほど、リガメント領域上で平均的に評価される規準破壊エネルギーは小さくなるというものである。ただし、破壊進行領域が十分に発達したかどうかは、その領域長さではなくひび割れ幅であり、仮想ひび割れモデル解析においても試験体背面の自由境界表面の存在により、ひび割れの進展とともに破壊進行領域長さは前方に圧縮されていく様相が観察される。

一方、破壊エネルギーの寸法依存性がコンクリートに固有の材料特性であるという解釈は、ひび割れの進展とともに破壊進行領域が拡大し、その領域内部で消費されるエネルギーも増加することが破壊エネルギーの寸法依存性の要因とするものであり、一定の微視破壊エネルギーを仮定したラチスモデルや粒子モデル解析^{11),12)}、非局所理論やレオロジーモデルに基づく有限要素解析^{13),14)}などによって破壊進行領域の進展挙動と規準破壊エネルギーの変化について考察が行われている。ここで、破壊エネルギーを主ひび割れの進展に伴って解放されるエネルギーとして捉えたと、解放エネルギーは、破壊進行領域内部でのマイクロクラックの累進的発生により解放されるエネルギーと、主ひび割れの進展に伴って弾性領域で解放される弾性ひずみエネルギーに区分される。前者のマイクロクラックの発生により解放されるエネルギーも微視的には弾性ひずみエネルギーではあるが、3次元の形態のマイクロクラックや介在物の相互干渉を考慮しながら、それをまともに計算することは困難であり、金属における転位の累積エネルギーを塑性ひずみエネルギーとして扱うのと同様に、巨視的に非弾性ひずみエネルギーと扱えば、破壊エネルギーは、弾性エネルギー解放率としてのJ積分と非弾性エネルギー解放率の和として表示される。従って、ひび割れの進展に伴って破壊進行領域内部の非弾性エネルギー解放量がリガメント寸法に依存して変化することが規準破壊エネルギーの寸法依存性の要因であるというのが前報⁹⁾で示した筆者らの解釈である。なお、非弾性エネルギー解放率という言葉は破壊力学では一般的用語ではないが、弾性エネルギー解放率と区別するために文献15)を参考に引用した。

3. 局所破壊エネルギー分布仮説の検証

ここでは、前述の規準破壊エネルギーの寸法依存性の解釈として有力視されている仮説¹⁰⁾について、広範囲の試験条件に関してRILEM法による破壊エネルギーの測定値が明記されている文献16)の実験データに基づいて検証を行う。この仮説の基本的概念を図2に示す。リガメント領域上で破壊エネルギーは一定ではなく、局所的に分布すると仮定し、この局所破壊エネルギー(g_F)分布をリガメント領域上で平均化したものが規準破壊エネルギー(G_F)とするものである。すなわち、

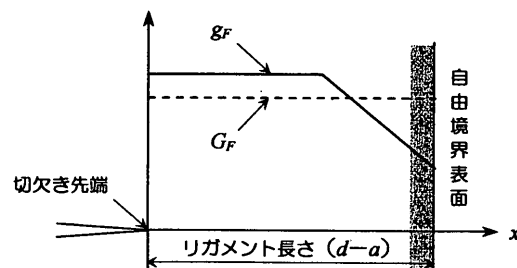


図2 局所破壊エネルギー分布仮説の基礎概念

$$G_F(a) = \frac{1}{d-a} \int_0^{d-a} g_F(x) dx \quad (1)$$

ここに、 a : 切欠き長さ

d : 試験体のせい

$d-a$: リガメント長さ

x : 切欠き先端から測ったひび割れ進展方向の座標軸

従って、自由境界表面の存在により、ひび割れが試験体背面に近づくにつれ、破壊進行領域が局所化されるために、局所破壊エネルギーが減少し、規準破壊エネルギーもその影響を受けることになる。また、自由境界表面からある程度離れた領域上で局所破壊エネルギーは、寸法依存性のない材料特性値となるとしている。さらに、規準破壊エネルギーの測定値から、局所破壊エネルギー分布を次式により計算する方法を示している。なお、 $g_F(a)$ は、切欠き長さ a に独立であると仮定し、切欠き先端での局所破壊エネルギーを表す¹⁰⁾。

$$g_F(a) = G_F(a) - (d-a) \frac{dG_F(a)}{da} \quad (2)$$

既往の実験データ¹⁶⁾に基づいて、上式により求められた局所破壊エネルギーの計算結果を図3に示す。なお、計算では、 $G_F(a)$ の測定値を2次多項式により回帰した結果を用いた。図3-1は、この仮説の適用妥当性を検証するためにKarihalooら¹⁶⁾が引用した実験データに基づく結果であるが、これを見る限りでは、 a/d が約0.7まで局所破壊エネルギーはほぼ一定値を示し、それ以上で直線的に減少する傾向が伺える。しかし、図3-2に示す他の実験データに基づく結果では、上述のような明瞭な傾向は見られなかった。

4. 破壊エネルギーの物理的意味に基づく新たな評価法

前報⁹⁾では、破壊エネルギーの物理的意味が、非弾性体に対するエネルギー解放率であるという解釈から(ここで、エネルギー解放率は、材料の構成法則によらない「ひび割れが単位面積だけ進展する間に物体-外力系より失われる力学的に有効なエネルギー」と定義される¹⁷⁾)、繰り返し荷重-載荷点変位曲線によるオフセット破壊エネルギー評価式を誘導し、その適用性について実験的検討を行い、主ひび割れの進展に伴い非弾性エネルギー解放量が増加するために破壊エネルギーも増加することを示した。ただし、オフセット法の場合には、繰り返し荷重-載荷点変位曲線の各除荷時点での主ひび割れ進展面積の評価が必要であり、その点に方法論上の課題が

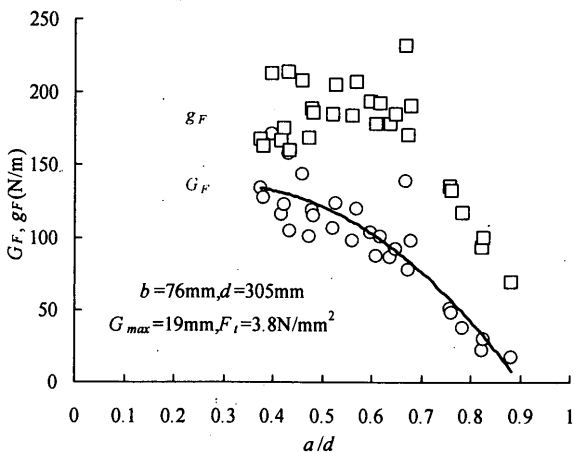
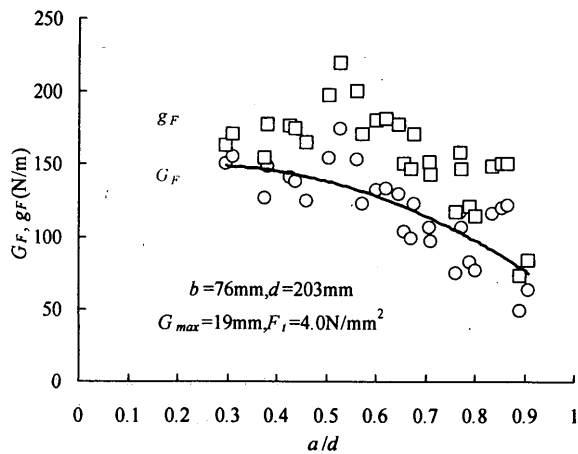


図 3-1 局所破壊エネルギーの計算結果
(Karihaloo らが引用した実験データに基づく)

残されている。一方、RILEM 法の場合には、主ひび割れ進展面積の評価を必要としない（すなわち、リガメント面積が主ひび割れ進展面積である）点に方法論上の優位性があるものの、主ひび割れの安定成長の過程で破壊エネルギーが一定値をとることを前提とするために、規準破壊エネルギーの寸法依存性を合理的に説明することができない。そこで、以下では、RILEM 法による規準破壊エネルギーの実験結果を基に、破壊エネルギーを弾性エネルギー解放率と非弾性エネルギー解放率に分離して評価する方法について考察を行う。

いま、図 4 に模式的に示す荷重-載荷点変位曲線の測定値と結合力モデル（あるいは、仮想ひび割れモデル）解析による計算値との対応について考える。その解析は、仮想ひび割れ面での移動境界値問題として線形弾性論の重ね合わせの原理により基礎方程式が誘導されることから、引張軟化曲線下の面積は、仮想ひび割れ面での応力伝達を介して周囲の弾性領域で解放されるエネルギー、すなわち弾性エネルギー解放率としての J 積分を表している。従って、切欠き面積のわずかに異なる試験体を負荷したときのポテンシャルエネルギーの差は、 $J_c A$ （ここに、 J_c ：限界 J 積分、 A ：切欠き面積）、また、結合力モデル解析による荷重-変位曲線下の全面積（全仕事量）は、 $J_c A_{lig}$ （ A_{lig} ：リガメント面積）で表される。一方、実際の荷重-変位曲線は、主ひび割れ発生後のひび割れの安定成長の過程で

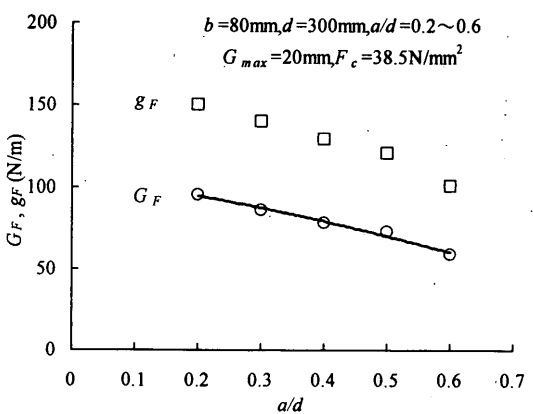
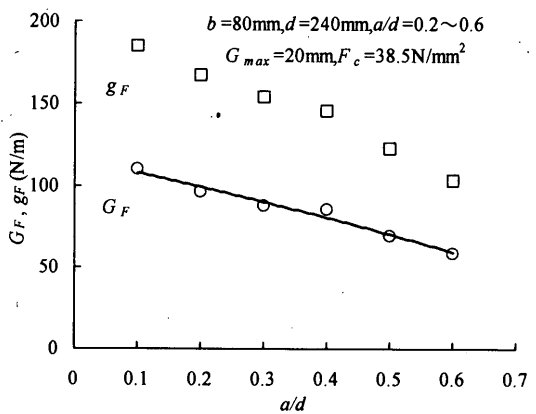
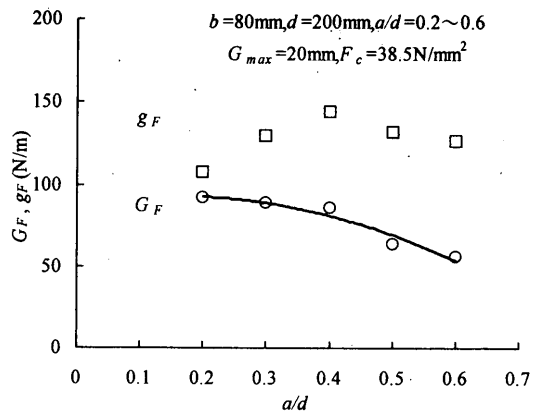
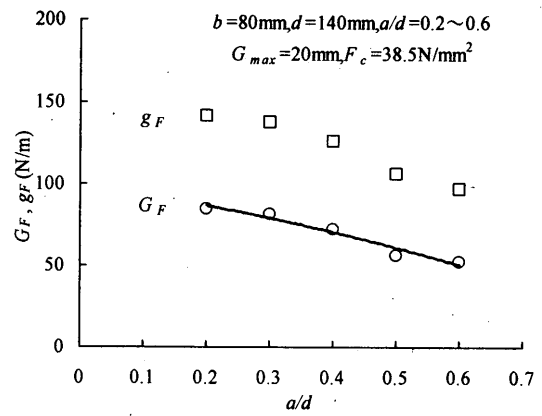


図 3-2 局所破壊エネルギーの計算結果
(その他の実験データに基づく)

の不可逆変位のために、結合力モデル解析による荷重-変位曲線から次第に逸脱し、図中の斜線部分の面積で表される非弾性エネルギーが消費され、次式で与えられる。

$$\int_0^{A_{lig}} \left(P \frac{d\delta}{dA} \right) dA \quad (3)$$

ここに、 P : 荷重

δ : 不可逆変位

A : 主ひび割れ進展面積

従って、実際の荷重-変位曲線下の全面積（全仕事量）は、主ひび割れ進展面積がリガメント面積に達するまでに解放されるエネルギーを表すので、そのときの破壊エネルギーを前記の規準破壊エネルギー G_F および局所破壊エネルギー g_F と区別するために、 G_f と表記すると、次式が得られる。

$$\int_0^{A_{lig}} G_f dA = \int_0^{A_{lig}} J_c dA + \int_0^{A_{lig}} \left(P \frac{d\delta}{dA} \right) dA \quad (4)$$

$$\therefore G_f = J_c + P \frac{d\delta}{dA}$$

ここに、 $\int_0^{A_{lig}} G_f dA = \int_0^{u_{max}} P du$: 全仕事量

u_{max} : 最大変位

上式は、前報⁹⁾で誘導されたオフセット破壊エネルギー評価式と基本的に同じであり、破壊エネルギーが弾性エネルギー解放率としての限界J積分と不可逆変位に起因する非弾性エネルギー解放率の和で表され、図5に示すように、RILEM法により測定されるリガメント面積の各種異なる試験体の全仕事量から評価されることを示している。図より、全仕事量とリガメント面積の関係の接線勾配として本提案の破壊エネルギー G_f が、また割線勾配として規準破壊エネルギー G_F が評価され、その関係が直線であれば、 $G_f = G_F = J_c$ となること分かる。また、 $A = A_{lig} = 0$ での初期接線勾配が J_c となり、全仕事量とリガメント面積の関係を $A = A_{lig} = 0$ まで外挿することにより求めることができ、 G_f における弾性エネルギー解放率 J_c と非弾性エネルギー解放率を分離して評価することが可能になる。

図6には、既往の実験データを用いて、本評価法により推定された破壊エネルギーを示す。なお、全仕事量とリガメント面積の関係は、2次多項式により回帰したが、同一コンクリートでは、試験体寸法が異なる場合でも全仕事量とリガメント面積との間に高い相関があることが分かる。また、この2次多項式を微分することにより直線式として破壊エネルギー G_f が求められ、定数項が限界J積分 J_c を、変数項が非弾性エネルギー解放率をそれぞれ与える。また、図中には、2次多項式をリガメント面積で除して得られる規準破壊エネルギー G_F の計算結果も併記しているが、実験結果と良い対応を示している。

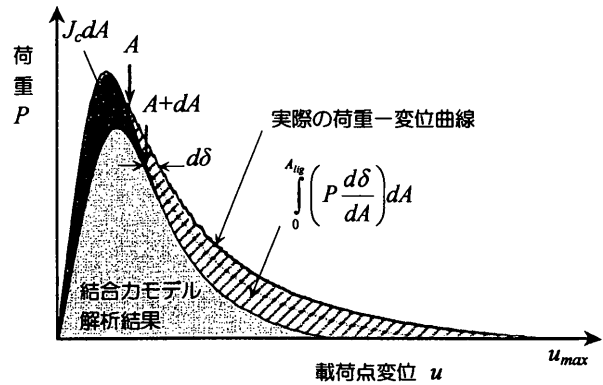


図4 荷重-荷重点変位曲線の測定値と結合力モデル解析結果

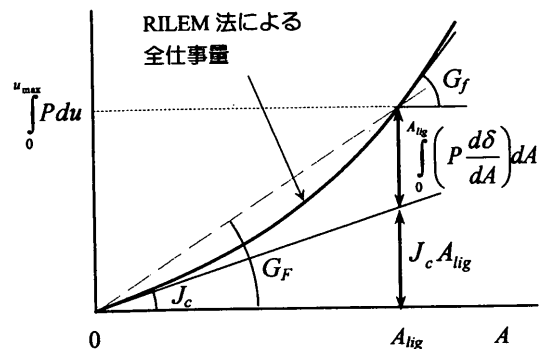


図5 全仕事量とリガメント面積の関係と破壊エネルギー評価

以上の結果から、破壊エネルギーの寸法依存性は、コンクリートに固有の材料特性であり、ひび割れの安定成長の過程で破壊エネルギーのうちの非弾性エネルギー解放率が主ひび割れ進展面積にほぼ比例して増加することがその要因であると推察される。ところで、本評価法による破壊エネルギーをそれでは仮想ひび割れモデルあるいは結合力モデル解析にどのように取り込めばよいのかは本報の考察の範囲外ではあるが、前述のように結合力モデル解析の定式化が純粋に線形弾性論に基づくことからひび割れ進展のクライテリオンは限界J積分であり、ここでいう非弾性エネルギー解放率を陽な形で解析に取り込むことは不可能である。また、それを形式的に引張軟化曲線の中に入れて扱うならば、ひび割れの進展とともに引張軟化曲線はもはや一定ではなく、寸法依存性を有することになる。

5. まとめ

本研究では、RILEM法による規準破壊エネルギーの試験体寸法依存性に関して、既往の仮説の検証ならびに破壊エネルギーのエネルギー解放率としての物理的意味に基づくRILEM法に準拠した新たな破壊エネルギー評価法の提案を行った。既往の仮説のうち、局所破壊エネルギー概念については、その評価に用いる実験データによっては理論に適合する結果が得られない場合があり、さらに検討が必要である。本評価法は、破壊エネルギーが非弾性体に対するエネルギー解放率であり、弾性エネルギー解放率としての限界J積分と主ひび割れの安定成長の過程での不可逆変位に起因する非弾性エネルギー解放率の和で表示されるという物理的意味に基づいて、RILEM法による実験結果を用いることによって両者を分離して評

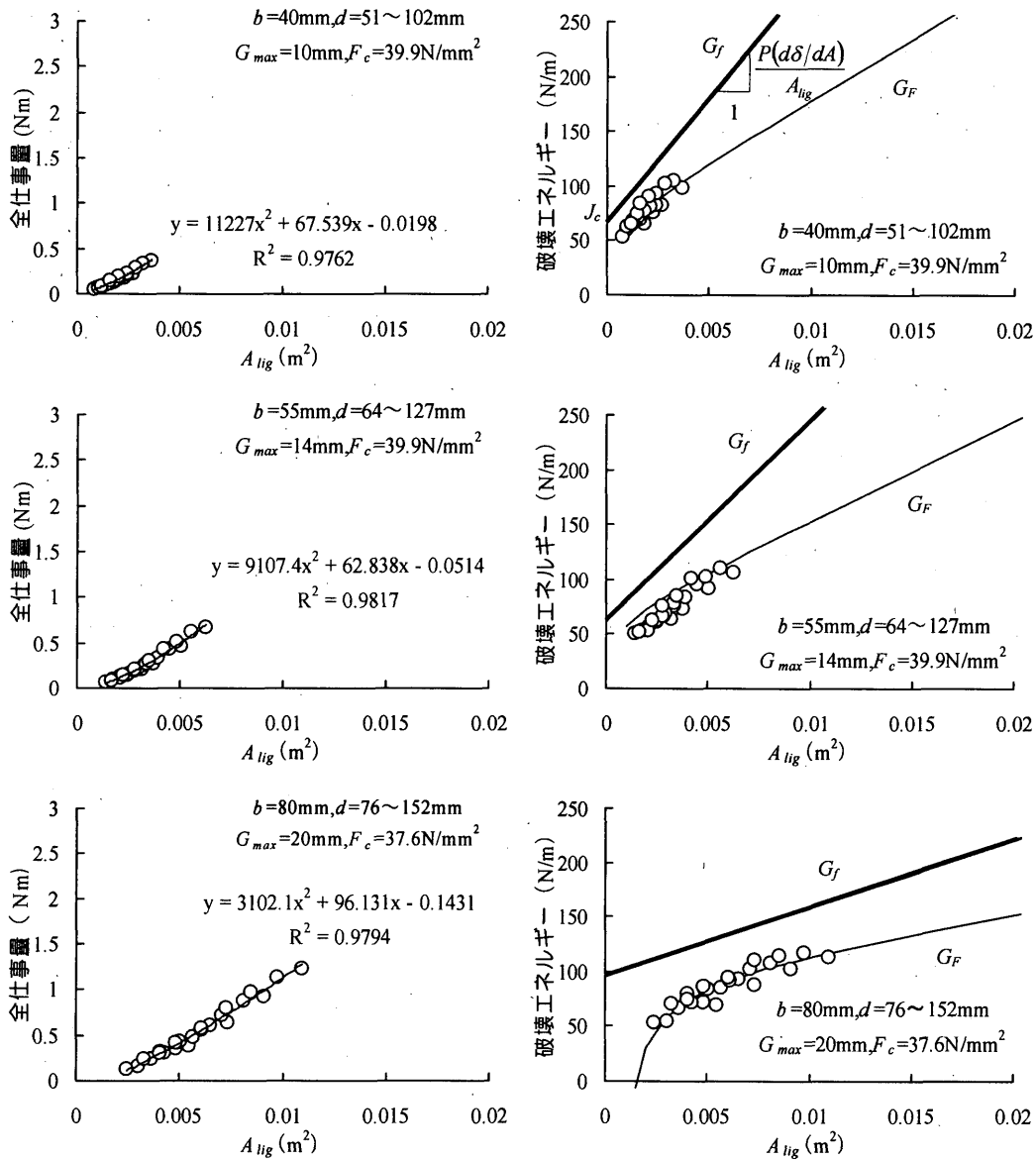


図6 RILEM法による全仕事量とリガメント面積の関係に基づく本評価法による破壊エネルギーの推定

価できることを示した。その結果として、ひび割れの安定成長の過程で非弾性エネルギー解放率がひび割れ進展面積にほぼ比例して増加することが破壊エネルギーの寸法依存性の要因であり、その寸法依存性はコンクリートに固有の材料特性であることが示唆された。

参考文献

- 1) A. Hillerborg et al.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, pp.773-782, 1976
- 2) 50-FMC Committee: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Materials and Structures, RILEM, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- 3) P. C. Perdikaris et al.: Effect on size and compressive strength on the fracture energy of plain concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures, FramCos1, Elsevier Applied Science, pp.550-555, 1992
- 4) P. Maturana et al.: Evolution of fracture behaviour of saturated concrete in the low temperature range, Engineering Fracture Mechanics, Vol.35, No.4/5, pp.827-834, 1990
- 5) Yin Shuangzeng et al.: A method in determination of the size effectiveness of fracture energy in concrete, Engineering Fracture Mechanics, Vol.35, No.4/5, pp.679-685, 1990
- 6) 三橋博三ほか：コンクリートの破壊力学特性と寸法効果に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.4、No.2、pp.57-68、1993.7
- 7) A. Carpinteri et al.: Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure, Materials and Structures, RILEM, Vol.27, No.174, pp.563-571, 1994
- 8) F. H. Wittmann et al.: Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens, Materials and Structures, RILEM, Vol.21, No.121, pp.21-32, 1988

- 9) 村上聖ほか：破壊エネルギーの物理的意味とその評価—コンクリートの破壊エネルギーに関する研究—、日本建築学会構造系論文報告集、第445号、pp.11-18、1993.3
- 10) X. Z. Hu et al.: Fracture energy and fracture process zone, *Materials and Structures*, RILEM, Vol.25, No.150, pp.319-326, 1992.7
- 11) J. E. Bolander et al.: Size effect mechanics in numerical concrete fracture, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, edited by F. H. Wittmann, Elsevier Applied Science, pp.535-542, 1995
- 12) 上岡響ほか：コンクリートのミクロマクロ破壊挙動解析（その2）骨材径および試験体寸法が異なるコンクリートの巨視的破壊特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.529-530、1998.9
- 13) 村上渉ほか：コンクリートのクラックバンドモデル解析における非局所条件について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.977-978、1992.8
- 14) W. Brameshuber et al.: Influence of ligament length and stress state on fracture energy of concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.35, No.1/2/3, pp.95-106, 1990
- 15) M. Wecharatana et al.: Double torsion tests for studying slow crack growth of Portland cement mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol.10, No.6, pp.833-844, 1980
- 16) B. L. Karihaloo et al.: A simple method for determining the true specific fracture energy of concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol.55, No.5, pp.471-481, 2003
- 17) 岡村弘之編：強度解析学[1]—連続体力学的アプローチ—、オーム社、1985

(2004年3月22日原稿受理, 2004年7月15日採用決定)