

結合力クラックモデルを用いた破壊エネルギーの寸法依存性に関する考察

○東北大学工学部 学生会員 湯本 達也
東北大学大学院 正会員 車谷 麻緒
東北大学大学院 正会員 山田 真幸
東北大学大学院 正会員 寺田 賢二郎
東北大学大学院 正会員 京谷 孝史

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の設計の複雑化や、メンテナンスの重要性の高まりから、コンクリートに破壊力学を適用し、その破壊挙動を定量的に把握することが求められている。破壊挙動を支配する材料パラメータとして、Hillerborg *et al.*¹⁾ により定義された破壊エネルギーが挙げられる。しかし、これまで実験的な方法や数値解析を併用した破壊エネルギーの評価方法が提案されてきたが、いずれも構造のつり合い問題と破壊現象の双方の力学的なエネルギー収支を考慮しておらず、評価された破壊エネルギーは厳密な材料物性を表しているとは言い難い。本稿では、モルタルの3点曲げ試験を行い、破壊現象のエネルギー収支を適切に表現する結合力クラックモデルを用いた有限要素解析による逆解析を行い、破壊エネルギーの評価方法およびその寸法依存性について考察する。

2. 結合力クラックモデルとひび割れ進展解析

結合力クラックモデル (Cohesive crack model) とは、図-1に示すような、破壊進行領域 (FPZ) における十分に開口していない損傷過程での不連続変形を、不連続面同士の結合力 (表面力) でモデル化するものである。具体的には、次式で与えられる非線形な表面力-開口変位の関係を、FPZに対する仮想的な不連続面 Γ_{PZ} に結合力として付与するものである²⁾。

$$\|t^{coh}\| = -f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f}\kappa\right) \leq 0 \text{ on } \Gamma_{PZ}$$

ここで、 $\|t^{coh}\|$ は結合力ベクトルの大きさ、 f_t は引張強度、 G_f は破壊エネルギー、 κ は載荷履歴における最大開口変位である。

車谷・寺田³⁾ は、複雑なひび割れ進展問題でも安定的に解析が可能な結合力クラックモデルの求解アルゴリズムを考案し、構造の静的つり合い問題と破断面の両者の力学的エネルギー収支を適切に考慮した、ひび割れ進展解析手法を提案している。本研究ではこのひび割れ進展解析手法を用いて破壊エネルギーのキャリブレーションを行う。

3. 3点曲げ試験による破壊エネルギーの同定

コンクリートの破壊エネルギーを求めるための JCI 基準の試験法⁴⁾ に準拠し、図-2に示すような、幅が一定で、表面の寸法が相似的に異なる3つのモルタル供試体に対して3点曲げ試験を行った。Sサイズの1.5倍をMサイズ、2倍をLサイズとした。ノッチ高さは梁高さの0.3倍とし、供試体の数は各5本とした。載荷試験は、供試体が湿潤状態の下で材齢14日に行った。図-3に示すように、支点および荷重点は丸鋼とし、MTS試験機により変位制御の下、

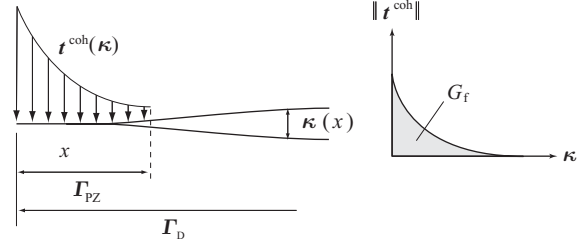


図-1 結合力クラックモデル (Cohesive crack model)

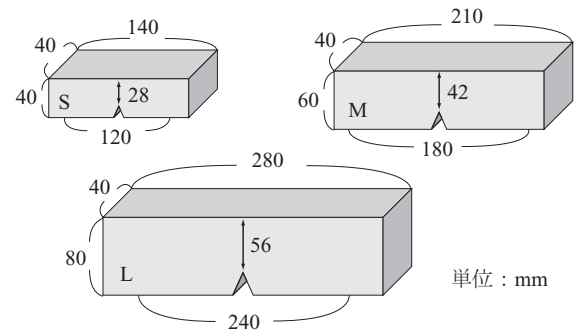


図-2 寸法の異なる供試体

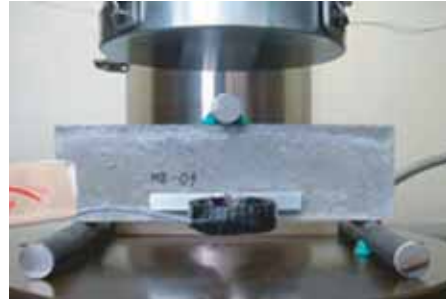


図-3 モルタル供試体の3点曲げ試験

荷重-変位関係の計測を行った。また、ノッチ先端にクリップゲージを取り付けることにより、同時にひび割れの開口変位も計測した。

実験結果を図-5および図-6に示す。図-5より、供試体の寸法が大きくなるにつれピーク荷重は増加するが、ポストピークの挙動は脆性的になることが分かる。また、図-6の荷重-開口変位関係から、JCI基準により破壊エネルギー G_f^{exp} を求めた結果を図-7に示す。供試体サイズが大きくなるにつれ、 G_f^{exp} は減少しており、実験結果から求めた破壊エネルギー (図中の G_f^{exp}) に寸法依存性が認められることが分かる。

4. 数値解析による破壊エネルギーの同定

4.1 キャリブレーションによる逆解析

図-4に示すようなメッシュ分割数が等しく、単純にサ

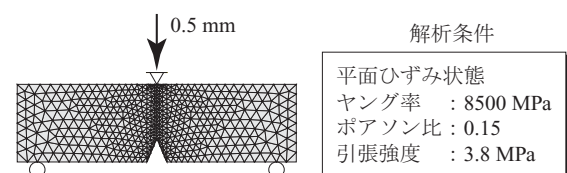


図-4 供試体の有限要素モデル

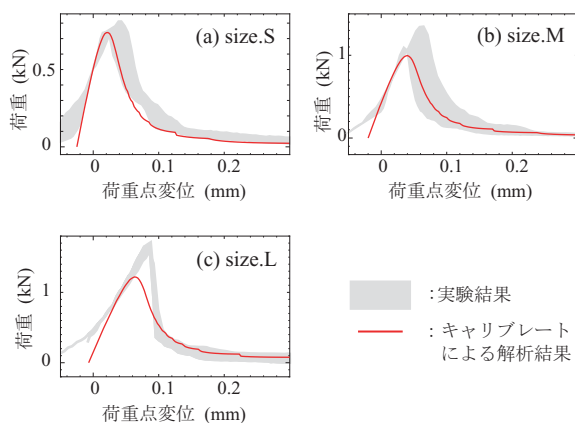


図-5 実験結果と解析結果の荷重－変位関係

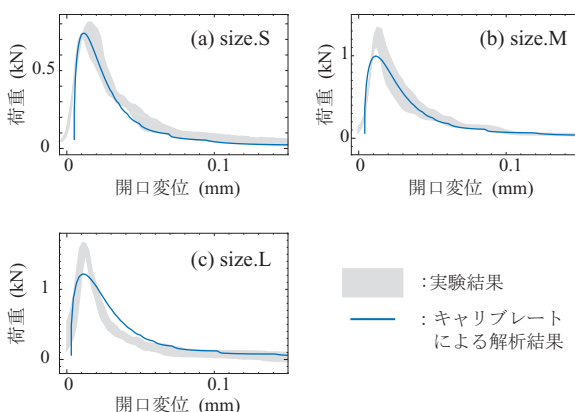


図-6 実験結果と解析結果の荷重－開口変位関係

イズのみが異なる S, M, L サイズの有限要素モデルを作成し、結合力クラックモデルを用いたひび割れ進展解析を行った。解析パラメータはモルタルの物性試験の結果を参考に、図-4 に示すような値を用いて、平面ひずみ状態を仮定して2次元解析を行った。キャリブレーションによる逆解析は、はじめに M サイズの実験結果に対してポストピーク挙動が一致するように G_f^{coh} をキャリブレートし、定まった G_f^{coh} を用いて S サイズ、L サイズに対して数値解析を行った。

解析結果を図-5 および図-6 に示す。S サイズ、L サイズの解析結果はポストピークが実験結果に比較的良好に対応しており、数値解析がピーク後の破壊現象をよく再現しているといえる。図-6 の (c) のポストピーク挙動が実験結果と若干乖離する理由については、図-5 の (c) のように L サイズの供試体は非常に脆的な破壊挙動となるので、ピーク直後の荷重と開口変位を正確に計測できなかったことが

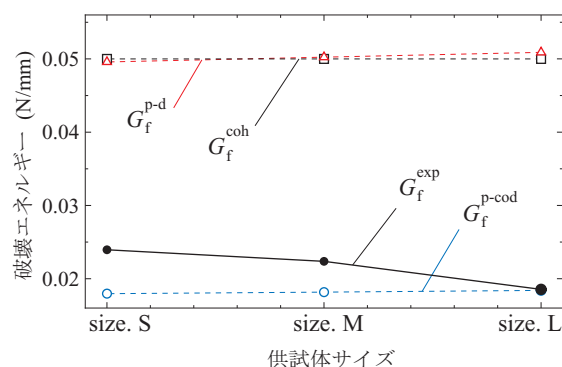


図-7 実験結果と解析結果から求めた破壊エネルギー

挙げられる。

4.2 破壊エネルギーの寸法依存性の検討

図-5 における解析結果の荷重－変位関係より、モデルに加えられた全エネルギーから、ひずみエネルギーなどの残存するエネルギーを除去し、それをリガメント面積で除した見かけの破壊エネルギー G_f^{p-d} を求めた。さらに、図-6 における解析結果の荷重－開口変位関係から、JCI 基準による破壊エネルギー G_f^{p-cod} を求めた。結果を図-7 にまとめる。実験から求めた破壊エネルギー G_f^{exp} は寸法依存性を示すのに対して、解析結果から求めた破壊エネルギーは寸法に依存しないことが分かる。

また、 G_f^{p-cod} と G_f^{p-d} の値に大きく差が出ることが見て取れる。これは、 G_f^{p-d} はエネルギーの収支を考慮した数値解析を用いることで、ひび割れの形成・進展に費やされたエネルギーを適切に求めたのに対して、 G_f^{p-cod} は JCI 基準の考え方から開口変位に依存してひび割れ発生を特定を行い、荷重－開口変位関係下の面積より経験式を用いて算定していることが原因と考えられる。以上の議論から、荷重－開口変位関係からは厳密な材料物性としての破壊エネルギーを求めることは難しいが、結合力クラックモデルを組込んだ数値解析を用いることで、寸法に依存しない適切な破壊エネルギーを評価できることが示唆される。

5. おわりに

本研究では、結合力クラックモデルを組み込み、構造の静的つり合い問題とひび割れ進展の両者の力学的エネルギーを適切に考慮したひび割れ進展解析を行うことにより、破壊挙動を表すパラメータである破壊エネルギーの新たな評価方法および寸法依存性について検討を行った。

参考文献

- 1) Hillerborg, A., Mod  r, M. and Petersson, P.-E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cem. Concr. Res.*, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 2) Wells, G.N. and Sluys, L.J.: A new method for modelling cohesive cracks using finite elements, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.50, pp.2667-2682, 2001.
- 3) 車谷麻緒, 寺田賢二郎: Cohesive crack モデルに対する陽的近似アルゴリズムの提案とその性能評価, 土木学会論文集, 投稿中.
- 4) JCI 基準: 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI-S-001-2003.