

結合力クラックモデルを用いた 準脆性材料の破壊エネルギー評価法の提案

A method for evaluating fracture energy of quasibrittle materials using cohesive crack model

湯本 達也*・車谷 麻緒**・山田 真幸***・寺田 賢二郎****・京谷 孝史†
Tatsuya YUMOTO, Mao KURUMATANI, Masaki YAMADA, Kenjiro TERADA
and Takashi KYOYA

*学生会員 東京工業大学 理工学研究科 国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区 2-12-1)

**正会員 博 (工) 日本学術振興会 特別研究員 PD・法政大学 理工学部 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

***正会員 博 (工) 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

****正会員 Ph.D. 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

†正会員 工博 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

We propose a new method for evaluating fracture energy, which characterizes the fracture toughness of quasibrittle materials, by means of the method of crack propagation analyses with the cohesive crack model. In the proposed method, after three-point-bend experiments are conducted on mortar beam specimens with a single notch, the fracture energy is determined as a material parameter in crack propagation analyses so that the actual fracture behavior is well simulated. Since the analysis method enables us to properly attain the energy balance in both the equilibrium and the crack opening, the identified fracture energy is independent of specimen sizes, as opposed to the other conventional evaluation methods. Therefore, the proposed method enables to solve the problem of size effect on a fracture energy.

Key Words : *fracture energy, cohesive crack model, size effect in quasibrittle structures, fracture toughness, crack propagation analysis*

1. はじめに

近年、コンクリートや岩盤などからなる社会基盤施設において、要求される耐震性能の定量化、設計の高度化等の要求の高まりを背景として、これらの破壊靱性を定量的に把握することが求められている。コンクリートや岩盤などの曲げあるいは引張破壊においては、微細なひび割れが成長しながら破壊が進行する現象により、伝達される応力が減少する軟化が生じる特徴を有し、これらは準脆性材料と呼ばれる。

準脆性材料の引張軟化に関する定量的な指標としては、Hillerborg ら¹⁾により定義された破壊エネルギーが挙げられる。破壊エネルギーは、ひび割れを形成・進展させるのに必要な単位面積あたりのエネルギーであり、材料固有の物性値と考えられる。破壊エネルギーは最大引張応力発生後の挙動、すなわちポストピークの破壊挙動に大きな影響を与えると考えられ、その適切な評価方法の確立は重要な課題である^{2),3)}。

破壊エネルギーの評価方法はいくつか提案されている。JCI⁴⁾やRILEM⁵⁾が推奨する方法では、ノッチを有する梁の3点曲げ試験を行い、得られた結果の荷重-変位関係もしくは荷重-開口変位関係のグラフの面積をひび割れ面積で除することで、見かけの破壊エネルギーを算定している。しかしながら、算定した破壊エネルギーには供試体の外形寸法に関する依存性が認められることが指摘されている^{6),7),8)}。

また、試験結果に対してひび割れ解析による逆解析を行い、引張軟化曲線を同定して破壊エネルギーを求

める方法も提案されているが⁹⁾、解析に際してひび割れ形成の過程で消費される力学的エネルギーの扱いについては疑問が残る。加えて、準脆性材料を扱った試験はセンシティブで、少なからず実験方法に起因した誤差が含まれていることも考慮すべきである。

そこで本研究では、準脆性材料におけるひび割れ現象とそれに伴う引張軟化挙動を適切に表現しうる、結合力クラックモデルを組み込んだひび割れ進展解析手法¹⁰⁾を用いて、3点曲げ試験で得られた供試体の挙動をキャリブレーションすることにより、破壊靱性を表す材料物性値としての破壊エネルギーを評価する方法を提案する。

本提案に際して採用したひび割れ進展解析手法¹⁰⁾は、構造全体の変形と局所破壊の双方に関する力学的なエネルギー収支をできる限り正確に評価できるよう開発されたもので、準脆性材料の破壊靱性を特徴づけるポストピーク挙動の再現性を保証する上で重要な役割を担っている。本論文では、まずこのひび割れ進展解析手法を概説し、準脆性材料の特徴である寸法効果の再現解析を通してその特徴を例示する。次に、準脆性材料の破壊靱性試験としてモルタルの3点曲げ試験を行い、従来法により算定した見かけの破壊エネルギーと、得られた荷重-変位関係におけるピークおよびポストピーク挙動について考察する。最後に、採用したひび割れ進展解析により実験結果をキャリブレーションすることで、逆解析的に材料物性としての破壊エネルギーを同定する手法を提案する。

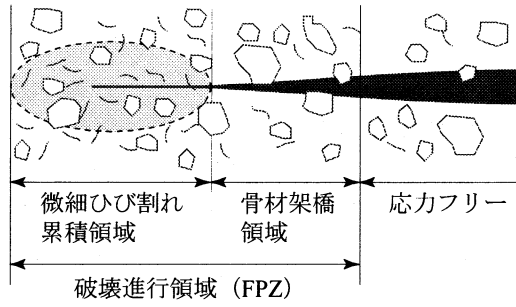


図-1 準脆性材料の破壊進行領域

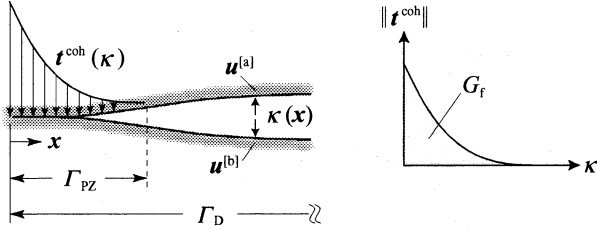


図-2 結合カクラックモデル (Cohesive crack model)

2. 結合カクラックモデルとひび割れ進展解析

本節では、はじめに結合カクラックモデルの概要について述べ、車谷・寺田¹⁰⁾が提案した結合カクラックモデルを導入したひび割れ進展解析手法の特徴について概説する。そして、準脆性材料の特徴である寸法効果の再現解析を行い、物性値としての破壊エネルギーとポストピーク挙動の関連について議論する。

2.1 結合カクラックモデル (Cohesive crack model)

代表的な土木材料であるコンクリートは、曲げあるいは引張破壊時にガラスなどの脆性材料とは異なり、軟化挙動を示す準脆性的な材料として知られている。軟化挙動とは、図-1に示すように、ひび割れの生じていない弾性領域と完全なひび割れ部分との中間に存在する破壊進行領域 (Fracture Process Zone; FPZ) において、ひび割れ幅の増大に伴い応力伝達が小さくなる現象である。コンクリートの非線形破壊現象には、この軟化挙動が大きく関わることが指摘されている^{11),12),13)}。

Hillerborg¹⁾が考案した結合カクラックモデルは、FPZの力学的な挙動をモデル化した代表的なものであり、図-2のようにFPZの全体を1本の仮想ひび割れに置換し、FPZでの応力伝達を仮想ひび割れ面上の結合力 (表面力) で代用するモデルである。この表面力の大きさは、開口変位と表面力の関係を表した引張軟化曲線により定められ、引張軟化曲線下の面積は破壊エネルギーと呼ばれている。このモデルは、線形破壊力学におけるひび割れ先端部での応力特異性を考慮することなく、準脆性材料のひび割れ進展問題に適用可能であることに加え、つり合い方程式に表面力の項を付与するだけであるのでFEMと相性が良い。

本研究では、次式で表されるような、破壊エネルギー

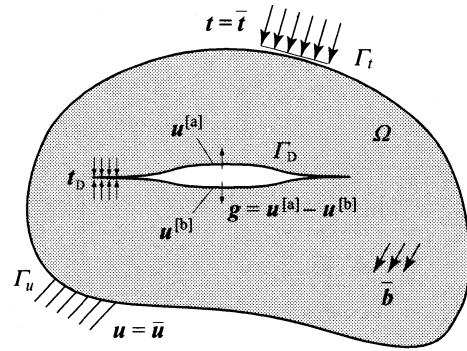


図-3 不連続面を含む準脆性構造体の物理問題

を材料パラメータとして直接考慮可能で、かつ実験結果と整合性の良い指数関数型の表面力-開口変位関係¹⁴⁾を与えることとする。

$$\|t^{\text{coh}}\| = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} \kappa\right) \quad \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \quad (1)$$

ここで、 $\|t^{\text{coh}}\|$ 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 は载荷履歴における最大開口変位である。

結合カクラックモデルに従い、不連続面の開口を取り扱う際、本研究では不連続面における相対変位ベクトル g を定義する。

$$g = u^{[a]} - u^{[b]} \quad \text{on } \Gamma_D \quad (2)$$

ここで、 $u^{[a]}$, $u^{[b]}$ は図-3に示されるような不連続面における変位ベクトルである。また、不連続面 Γ_D 上での表面力ベクトル t_D は、次のように与えられる (図-2を参照)。

$$t_D = \sigma n = \begin{cases} t^{\text{coh}} = \|t^{\text{coh}}\| m^{\text{coh}} & \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \\ 0 & \text{on } \Gamma_D \setminus \Gamma_{\text{PZ}} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 m^{coh} は相対変位ベクトル g の単位ベクトルであり、次式で表される。

$$m^{\text{coh}} = \frac{g}{\|g\|} \quad \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \quad (4)$$

なお、本研究では、式(1)における履歴変数 κ は $\|g\|$ で定めることとする¹⁰⁾。

2.2 結合カクラックモデルをバネで近似した弱形式

本研究では、図-3に示すような、不連続面 Γ_D を含む脆性構造体の準静的なつり合い問題を対象とする。このような構造体に対する、結合カクラックモデルを考慮した一般的な弱形式のつり合い方程式は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \nabla \delta u : \sigma \, d\Omega + \underbrace{\int_{\Gamma_D} \delta g \cdot t_D \, d\Gamma}_{\text{結合カクラックモデルの項}} \\ = \int_{\Omega} \delta u \cdot \bar{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta u \cdot \bar{t} \, d\Gamma \quad \forall \delta u \quad (\forall \delta g) \end{aligned} \quad (5)$$

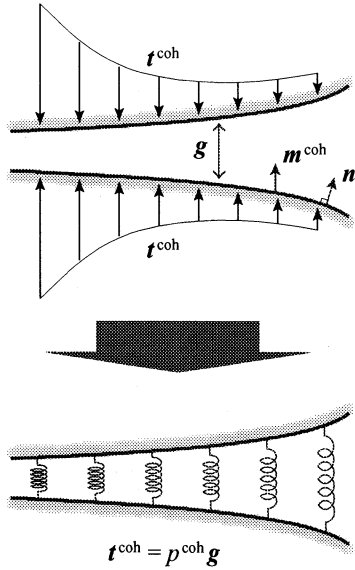


図-4 バネの反力でモデル化した結合力クラックモデル

ここで、 σ は Cauchy 応力テンソル、 Ω は物体領域、 Γ_I は Neumann 境界、 $\bar{b}$ と $\bar{t}$ はそれぞれデータとして与えられる物体力ベクトルと分布外力ベクトルである。式 (5) を見て分かるように、一般的な結合力クラックモデルの項 (左辺第 2 項) は、分布外力の項 (右辺第 2 項) と同様の形式となっており、FEM の数値解析の特徴から荷重制御型の解析に近いものとなることから、安定的に解が得られる保障はなく、複雑なひび割れ進展が発生するケースや 3 次元解析において問題となる。

そこで、車谷・寺田¹⁰⁾は、図-4 および次式に示すように、結合力クラックモデルで与えられる結合力をバネの反力で書き換えることを提案した。

$$t^{\text{coh}} = p^{\text{coh}} g \quad \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \quad (6)$$

ここで、 p^{coh} は不連続面での相対変位方向の結合を表すバネ剛性であり、 $g \approx 0$ の場合には一般的なペナルティ法におけるペナルティ係数と同一視できる。式 (6) は、式 (3) と式 (4) より、次のように書き換えられる。

$$p^{\text{coh}} = \frac{\|t^{\text{coh}}\|}{\|g\|} \quad (7)$$

以上より、結合力クラックモデルに関する式 (5) および式 (3) は、ペナルティ法と同様の形式で、次のように表される。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \nabla \delta u : \sigma \, d\Omega + \underbrace{\int_{\Gamma_D} p_D \delta g \cdot g \, d\Gamma}_{\text{結合力クラックモデルの項}} \\ &= \int_{\Omega} \delta u \cdot \bar{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_I} \delta u \cdot \bar{t} \, d\Gamma \quad \forall \delta u \, (\forall \delta g) \quad (8) \end{aligned}$$

$$p_D = \begin{cases} p^{\text{coh}} & \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \\ 0 & \text{on } \Gamma_D \setminus \Gamma_{\text{PZ}} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 結合力クラックモデルを導入したひび割れ進展解析

本研究では、微小変形問題を仮定し、材料の挙動は線形弾性に従うものとする。また、破壊モードとひび割れ進展経路が既知の問題を対象とするので、簡易なひび割れ進展解析法として知られる、ひび割れ発生位置にインターフェイス要素を用いる離散ひび割れモデルを適用する。具体的には、インターフェイス要素にペナルティ法を適用することにすれば、ひび割れ発生時点でペナルティ係数をバネ係数とみなせるので、弱形式 (8) の形式をそのまま利用することができ、ひび割れの発生前から発生後までを一貫して追跡可能な手法を構築することができる¹⁰⁾。

すなわち、ひび割れが発生する前の弾性解析では、弱形式 (8) に対して、次式のように、通常のペナルティ法を適用する。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \nabla \delta u : \sigma \, d\Omega + \underbrace{\int_{\Gamma_D} p_0 \delta g \cdot g \, d\Gamma}_{\text{ペナルティ項}} \\ &= \int_{\Omega} \delta u \cdot \bar{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_I} \delta u \cdot \bar{t} \, d\Gamma \quad \forall \delta u \, (\forall \delta g) \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、 p_0 はペナルティ係数であり、構成材料の Young 率の 10^4 倍と設定する。ペナルティ係数は、「変位拘束を課するための物理的に意味のない係数」であるが、相対変位を許容した時点で「相対変位を小さく抑えるための物理的に意味のある大きなバネ係数」とみなすことができる。したがって、本研究ではペナルティ係数をバネ係数と読みかえることとし、式 (6) と同様に、ここでのペナルティ法における拘束面上の表面力 λ は、バネ係数 p_0 の反力として次式により計算する。

$$\lambda = p_0 g \quad \text{on } \Gamma_D \quad (11)$$

本研究では、この表面力を用いて、破壊の発生基準を次のように定めることにする。

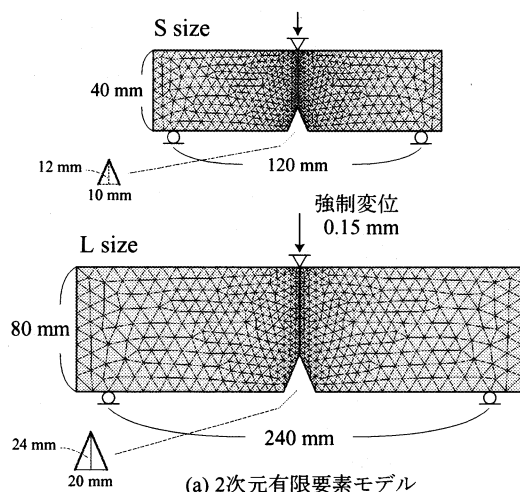
$$\lambda \cdot n > 0 \quad \text{and} \quad \|\lambda\| - f_t = 0 \quad (12)$$

ここで、 n は Γ_D における外向き単位法線ベクトルである。この式で破壊が判定されれば、式 (11) と式 (6) が同形式であることから、式 (10) を式 (8) に置き換えることにより、結合力クラックモデルによる引張軟化の非線形解析へとスムーズに移行できる¹⁰⁾。

以上の定式化に対して、標準的な FEM による離散化と、結合力クラックモデルのための割線法による反復解法を適用することにより、構造の変形と局所破壊の双方に関する力学的なエネルギー収支を考慮したひび割れ進展解析を可能にしている¹⁰⁾。

2.4 寸法効果の再現解析例

コンクリートなどの非均質な準脆性材料の供試体が示す強度は、その供試体の寸法が大きくなるほど低下することが知られており、この現象は強度の寸法効果と呼ばれる¹³⁾。以下では、これまでに説明した結合力クラックモデルを導入したひび割れ進展解析手法を用いて寸法効果の数値解析例を示すとともに、構造の寸



Young 率	Poisson 比	引張強度
1000 MPa	0.30	1.0 MPa

(b) 解析パラメータ

	サイズ	破壊エネルギー
S-Gf	S size	0.01 N/mm
L-Gf	L size	0.01 N/mm
L-2Gf	L size	0.02 N/mm

(c) 解析ケース

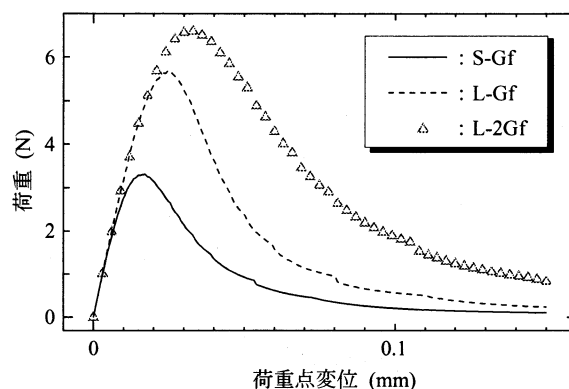
図-5 ノッチを有する梁の2次元有限要素モデル

法と破壊エネルギーが破壊挙動へ与える影響について検討しておく。

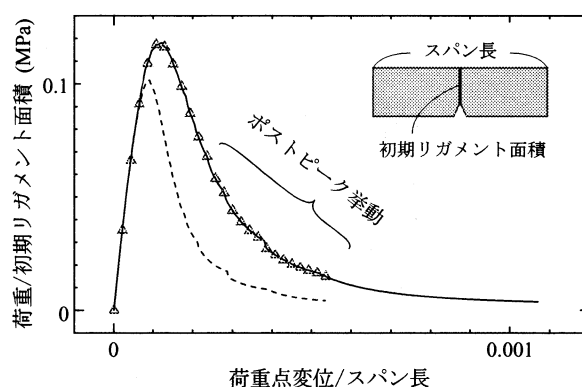
ここでは、ノッチを有する梁の3点曲げ試験を模擬した数値シミュレーションを行う。図-5に有限要素モデル、解析パラメータおよび解析ケースを示す。スパン中央に三角形のノッチを有する梁を想定し、メッシュ分割数が等しく、単純にサイズのみが異なるS、Lサイズの有限要素モデルを作成する。また、解析ケースは図中(c)のように、寸法と破壊エネルギーを変化させた3つのケースを対象とし、それぞれ平面ひずみ条件下の変位制御によるひび割れ進展解析を行う。

解析結果を図-6に示す。図中(a)は載荷点における荷重-変位関係を表しており、(b)は荷重-変位関係を寸法の影響を除くために正規化したものである。図-6の(a)よりL-GfとL-2Gf(図中の破線と△)を比較すると、破壊エネルギーを2倍にしたL-2Gfの方がポストピーク後の挙動が緩やかになり、破壊靱性が向上している。一般的に、荷重-変位関係下の面積が外力仕事に相当するが、破壊エネルギーを増加させたことにより荷重-変位関係下の面積が大幅に増加し、破壊面を形成するのにより大きな外力仕事を必要とする粘り強い材料になったと解釈できる。

また、図-6の(b)より、破壊エネルギーが等しいS-



(a) 荷重-変位関係



(b) 正規化した荷重-変位関係

図-6 解析結果の荷重-載荷点変位関係

GfとL-Gf(図中の実線と破線)を比較すると、L-Gfの方がピーク荷重が小さくなり、強度の寸法効果が再現されている。それに対して、ポストピーク挙動の形状は、モデルのサイズに関わらず変化しないことが分かる。これは、破壊エネルギーが一定であれば、モデルの寸法が異なる場合でも破壊挙動を一意に表現できることを意味しており、破壊エネルギーは破壊靱性を表す材料物性値として評価しようと推察される。

さらに、S-Gfの2倍の破壊エネルギーをもつL-2Gfは、正規化するとS-Gfの結果と等しくなることが示されている。すなわち、モデルの寸法が半分になることで、見かけの(構造としての)破壊靱性は2倍になることを表している。

このように、本研究で採用した結合力クラックモデルを導入したひび割れ進展解析手法によれば、モデルの寸法と破壊エネルギーがその破壊挙動に与える影響を定量的に評価することが可能になることが分かる。

3. 3点曲げ試験による破壊エネルギーの同定

ここでは、準脆性材料の破壊エネルギーおよび軟化挙動を含む破壊靱性を得ることを目的として、モルタル供試体の3点曲げ試験を行う。3点曲げ試験は、破壊エネルギーを求めるための方法としてJCIが推奨しているJCI-S-001-2003⁴⁾に従い試験を行う。

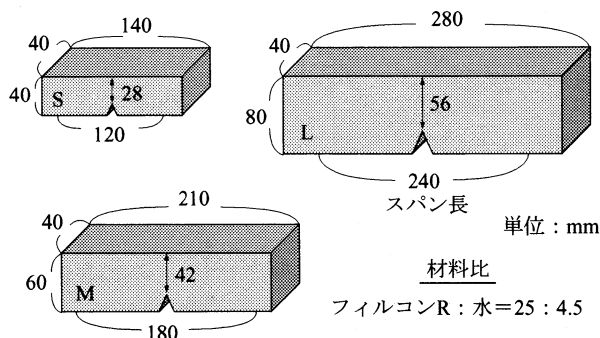


図-7 寸法の異なるモルタル供試体

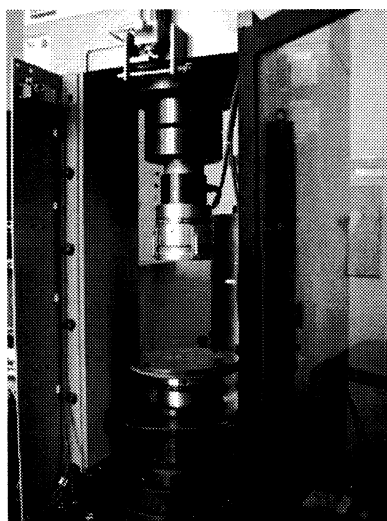


図-8 MTS 試験機

3.1 モルタル供試体

破壊エネルギーの寸法依存性について検討することを意図して、図-7に示すような3種類の寸法をもつ供試体を用いた。これらは幅が一定で表面の寸法が相似的に異なっており、Sサイズの1.5倍をMサイズ、2倍をLサイズと呼ぶこととする。各供試体の梁高さとスパンの比は1:3に設定し、スパン中央に梁高さの30%の三角状ノッチを作成する。供試体数は各サイズ5体とした。

使用材料は、水和反応時の体積変化による供試体内の引張応力の発生を抑制することを目的として、無収縮モルタルとする。ここではグラウト用のフィルコンR（プレミックスタイプ）を使用した。材料比は図-7中に示すとおりである。打設後1日で脱型を行い、室温20度の恒温室内で水中養生を13日間行った。また、試験時の供試体の状態は材齢14日の湿潤状態とした。

3.2 3点曲げ試験

試験機は、図-8に示す精密な変位制御の載荷試験が可能なMTS社製のコンピュータ制御油圧サーボ式高剛性試験機を使用した。3点曲げ試験は、図-9および図-10に示すような載荷支持条件の下で行う。支点は、JCI⁴⁾が推奨している水平移動が可能な丸鋼（φ17mm）

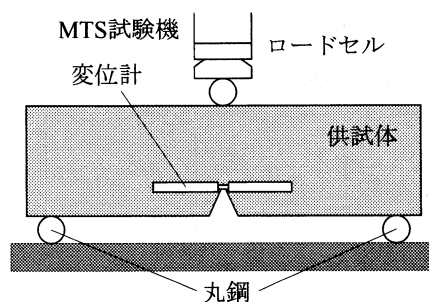


図-9 ノッチを有する梁の3点曲げ試験

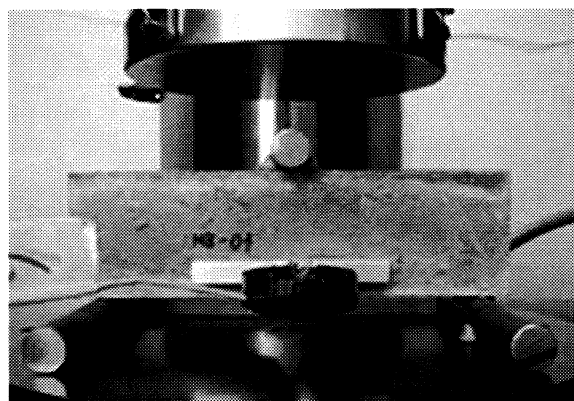


図-10 3点曲げ試験の様子

を使用し、載荷点にも同様の丸鋼を使用する。載荷速度は各サイズとも0.03mm/minとする。測定項目は荷重-載荷点変位関係およびノッチ先端の開口変位であり、供試体が破断するまで計測を行う。以上のような条件の下で、モルタル供試体に対して変位制御の3点曲げ試験を行う。

3.3 試験結果と考察

試験から得られた荷重-載荷点変位関係を図-11に、荷重-開口変位関係を図-12に、代表的なひび割れ進展の様子を図-13に示す。図中、Mサイズについては5本、SサイズとLサイズについては試験の成否を判断した結果、各4体の試験結果を示している。

次に、これらの3点曲げ試験の結果から直接的に破壊エネルギーを算定する。代表的な算定法としては、RILEM⁵⁾およびJCI基準の推奨法⁴⁾があるが、これらの方法は、外力により加えられたエネルギーは全てひび割れの形成に費やされたものとみなし、それをひび割れ面積で除すことにより、破壊エネルギーを算定する方法である。ここで求めた破壊エネルギーを、以降の議論で用いる材料物性値としての破壊エネルギーと区別する意味で、見かけの破壊エネルギーと称する。

図-11の結果からはRILEMの推奨法により、図-12からはJCI基準により、それぞれ見かけの破壊エネルギー G_f^{RIL} と G_f^{JCI} を求めた結果を図-14に示す。図-14より、供試体のサイズが大きくなるとともに両者の値は変化しており、試験結果から求めた見かけの破壊エネルギー G_f^{RIL} と G_f^{JCI} には寸法依存性が認められる。

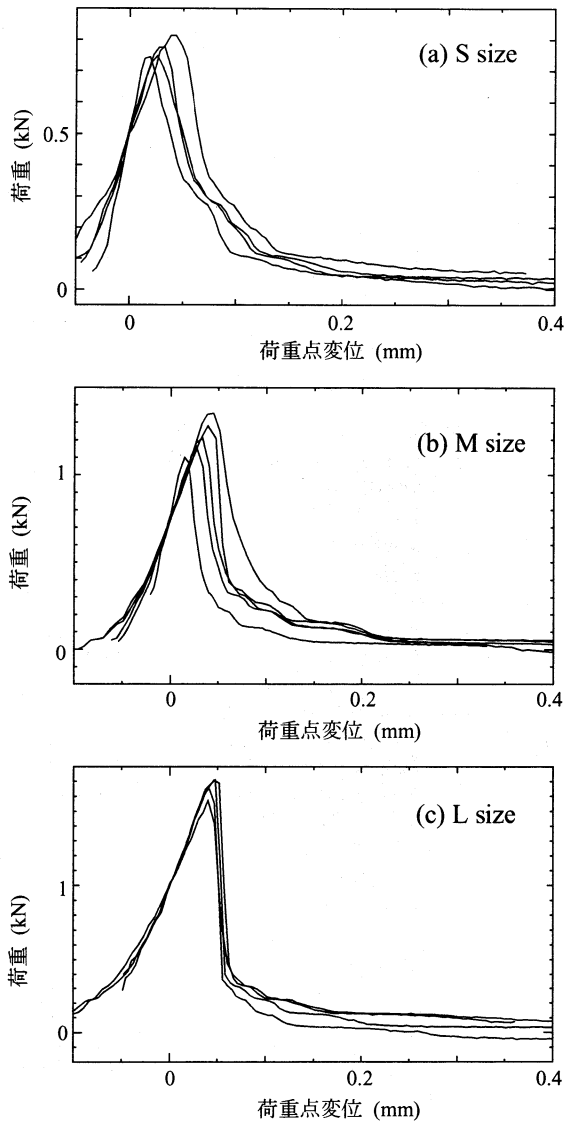


図-11 荷重－載荷点変位関係（実験結果）

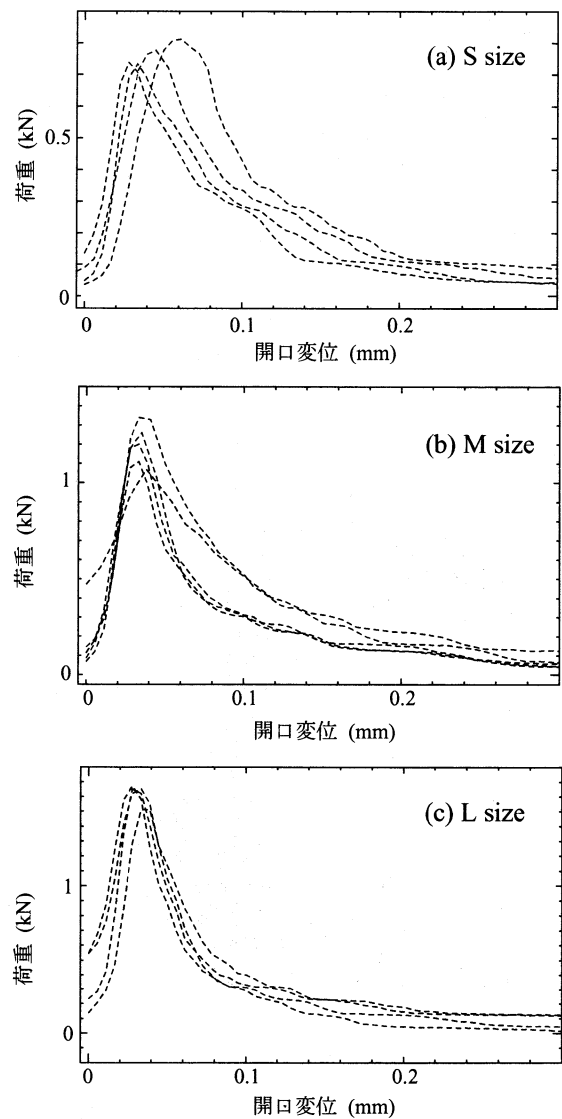


図-12 荷重－開口変位関係（実験結果）

また、 G_f^{RIL} と G_f^{JCI} で寸法依存性の傾向が異なることについては、RILEM の推奨法では荷重－変位関係下の面積を外力仕事として見かけの破壊エネルギー G_f^{RIL} を算定しているのに対して、JCI の推奨法では荷重－開口変位関係下の面積を外力仕事として、さらにその外力仕事に低減係数を乗じた値から見かけの破壊エネルギー G_f^{JCI} を求めているという評価方法の違いが主要因として挙げられる。

ここで図-11 に注目すると、供試体のサイズが大きくなるにつれて、ピーク直後に急激に耐力が落ちる傾向が見える。この理由として、材料の非均質性に起因してひび割れが図-13 のように平面的に進展しないことや、ピーク荷重付近でのひび割れ面同士のかみ合いによるせん断伝達作用の発生が考えられ、かみ合わせが外れると急激にひずみエネルギーが解放されることで脆性的な破壊挙動になったと考えられる¹⁵⁾。また、L サイズでそれが顕著になる理由として、寸法が大きくなると破壊が局所化するために、剛な破断面が比較的瞬時に形成され、引張軟化が卓越せずせん断伝達作

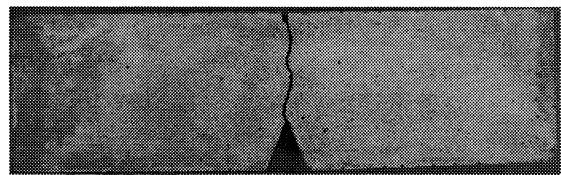


図-13 ひび割れ進展の様子（実験結果）

用が支配的になったと考えられる。

以上より、RILEM, JCI の推奨法ともに、実験結果から直接的に見かけの破壊エネルギーを求めると、計測精度の影響を強く受けることに加え、ひび割れの進展で消費される以外のエネルギーを見積もってしまうことから、評価値は寸法に依存する傾向を示すと考えられる。したがって、このような評価方法では材料物性としての破壊エネルギーを一意に定めることは難しいといえる。

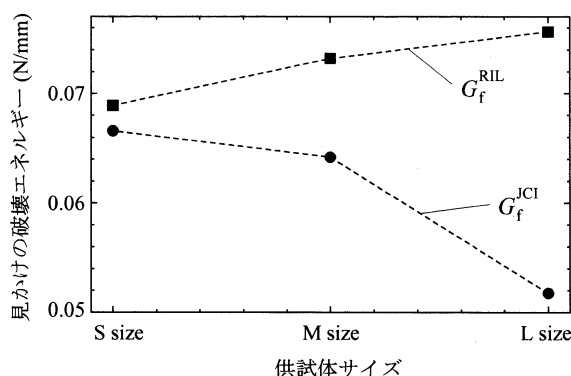


図-14 試験結果から求めた見かけの破壊エネルギー

4. 結合力クラックモデルを用いた数値解析による破壊エネルギーの評価方法の提案

本節では、結合力クラックモデルを導入したひび割れ進展解析を3点曲げ試験で得られた供試体の挙動にキャリブレーションすることにより、破壊靭性を表す材料物性値として破壊エネルギーを評価する方法を提案する。

4.1 破壊エネルギーの新たな評価手法

2.4節において、本研究の数値解析で得られる荷重-変位関係のポストピーク挙動の形状は、解析パラメータである破壊エネルギーにより支配されることが示された。また3.3節では、3点曲げ試験から得られた荷重-変位関係において、ピーク荷重付近の挙動はせん断伝達作用の影響を受けており、これから直接的に求めた見かけの破壊エネルギーには、ひび割れの形成・進展で消費される以外のエネルギーが見積もられてしまう可能性を指摘した。

そこで本研究では、3点曲げ試験結果に対し、本研究で用いた結合力クラックモデルを導入したひび割れ進展解析の結果が軟化現象を表すポストピークの挙動において一致するように破壊エネルギー G_f^{coh} を逆解析的に材料特性値として同定する。利用する試験結果は、本研究で用いる数値解析が構造物全体でのエネルギー収支を考慮するものであるため、荷重-開口変位関係ではなく荷重-載荷点変位関係とする。提案手法の概念図を図-15に模式的に示す。

4.2 キャリブレーションによる破壊エネルギーの同定

提案手法を実際の試験結果に適用し、その妥当性の検証を行う。前節の3点曲げ試験と同様のモルタル供試体を、2次元の有限要素メッシュでモデル化したものを図-16に示す。各モデルはメッシュ分割数が等しく、単純にサイズのみが異なるS, M, Lサイズの有限要素モデルを作成した。解析パラメータは、Young率・Poisson比・引張強度・破壊エネルギーの4つがあるが、破壊エネルギー以外の解析パラメータは強度物性試験の結果を参考に図-16内に示すような値として定めた。このようなモデルに対し、平面ひずみ条件下で変位制御のひび割れ進展解析を行う。

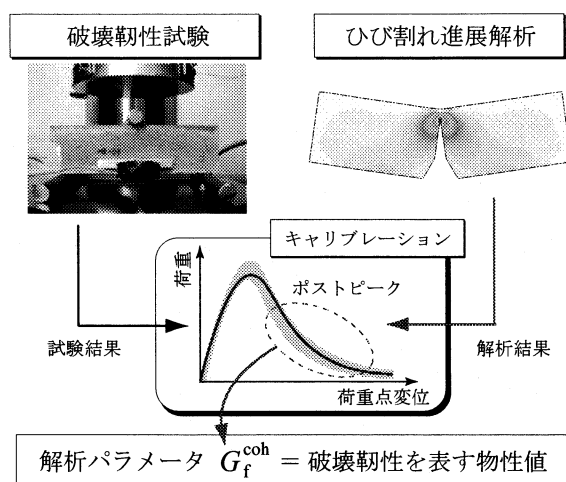


図-15 新たな破壊エネルギーの評価方法の概念図

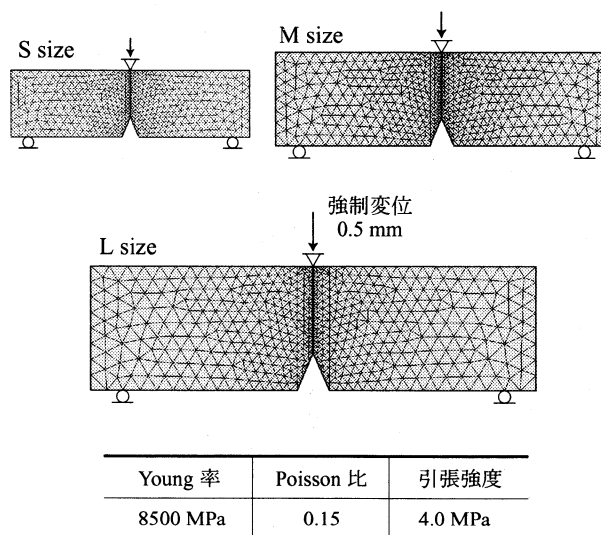


図-16 2次元有限要素モデルと解析パラメータ

図-17に提案手法の検証方法を示す。提案手法では、構造物全体の変形と局所破壊との力学的なエネルギー収支を適切に考慮できるひび割れ進展解析手法を採用しているため、サイズの違いによる破壊挙動の変化は自然に反映することが可能である。以下では、例としてMサイズの試験結果と解析結果の荷重-変位関係におけるポストピーク挙動が一致するように、解析パラメータである破壊エネルギー G_f^{coh} を同定する。そして、同定した G_f^{coh} をSサイズ、Lサイズのそれぞれのモデルに与えて数値解析を行い、それぞれのポストピーク挙動の整合性を確認する。

数値解析結果を図-18に示す。図中、薄墨太線は試験結果の変動幅を表しており、黒の実線は解析結果を表している。Mサイズに対してキャリブレーションを行った結果、破壊エネルギー G_f^{coh} は0.05 N/mmとなった。

次に、ここで定めた破壊エネルギー $G_f^{coh} = 0.05$ N/mmを用いてSサイズ、Lサイズのひび割れ進展解析を行った結果を図-18に示す。それぞれのポストピークの破

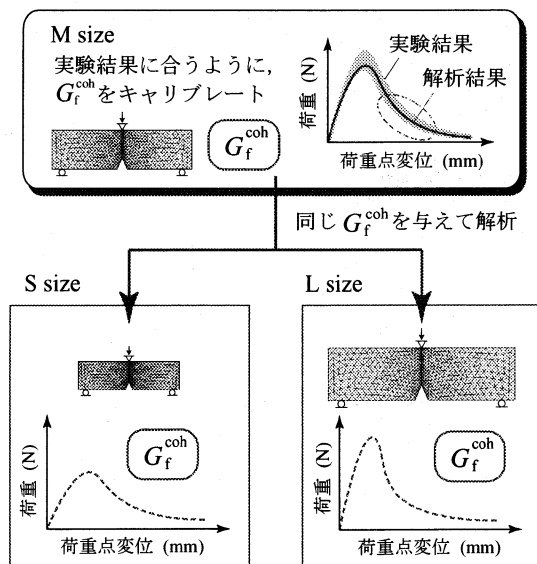


図-17 提案手法の検証方法

壊挙動は、試験結果によく対応していることが分かる。この結果は、提案手法により破壊エネルギー G_f^{coh} は寸法に依存せずに、破壊靱性を表す材料物性値として評価可能であることを例証している。

Lサイズの結果を見ると、試験結果と解析結果のピーク荷重が異なっているが、これは3.3節で考察したひび割れ面のせん断伝達の影響である。ピーク荷重の違いはあるが、材料の破壊靱性を特徴付けるポストピーク挙動は供試体寸法に左右されないため、結合クラックモデルを用いたひび割れ進展解析手法によりこの挙動をキャリブレーションすることで、物性としての破壊エネルギーを一意に定められる点が提案手法の大きな特長である。

4.3 数値解析による見かけの破壊エネルギーの算定

4.2節で行った数値解析の結果から、見かけの破壊エネルギーを算定する。図-18の解析結果の荷重-荷重点変位関係下の面積は、外力により加えられた全エネルギーである。試験終了時の数値解析モデルの全エネルギーからモデル内に残存するエネルギーを除去し、除去後のエネルギーをひび割れ面積で割ることにより、ひび割れを進展させるのに消費した単位面積あたりのエネルギー、すなわち見かけの破壊エネルギー $G_f^{\text{p-d}}$ を算定する。本解析手法ではひび割れの形成・進展にエネルギーを消費される以外はエネルギーの消散は考慮していないので、 $G_f^{\text{p-d}}$ は材料の破壊エネルギーを意味すると考えられる。求めた見かけの破壊エネルギー $G_f^{\text{p-d}}$ の結果を図-19に示す。図中の△が $G_f^{\text{p-d}}$ を表しており、解析パラメータである G_f^{coh} と、図-14の結果も併せて示している。図-19より、解析結果から算定した見かけの破壊エネルギー $G_f^{\text{p-d}}$ は、寸法に依存せずに解析パラメータである破壊エネルギー G_f^{coh} とよく一致することが分かる。

それに対して、試験結果から直接的に求めた見かけの破壊エネルギー G_f^{RIL} と G_f^{JCI} は供試体寸法に依存す

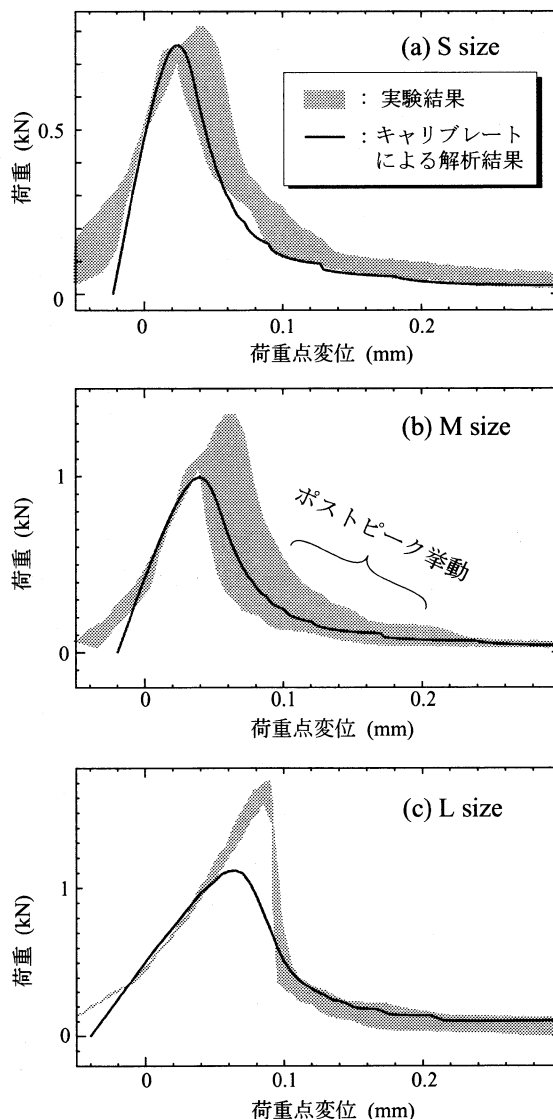


図-18 実験結果と解析結果の荷重-変位関係

る傾向を示し、材料物性値として扱うには不適切である。また、 G_f^{RIL} 、 G_f^{JCI} と解析から求めた $G_f^{\text{p-d}}$ には大きな差がある。この理由として、3.3節で指摘したひび割れ面上で発生するせん断伝達作用により、ひび割れの形成・進展で消費される以外のエネルギー（外力仕事）が多く見積もられていると考えられ、見かけの破壊エネルギー G_f^{RIL} と G_f^{JCI} は、 $G_f^{\text{p-d}}$ よりも大きな値となっている。このことから、見かけの破壊エネルギー G_f^{RIL} と G_f^{JCI} は、本研究で用いた数値解析結果と比較して過大に評価する傾向があり、材料の破壊靱性としては危険側の評価となることが分かる。

以上の議論から、試験結果のみから直接的に求めた破壊エネルギーを、材料物性値として扱うのは無理があるが、提案手法により定めた破壊エネルギー G_f^{coh} は、寸法に依存せず、破壊靱性を表す材料物性値としての扱いが可能であるといえる。すなわち、提案手法は従来問題とされてきた破壊エネルギーの寸法依存性を解消し、評価値に客観性を与える手法であるといえる。

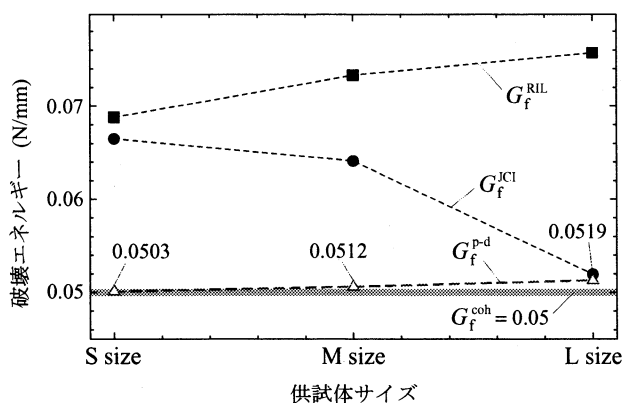


図-19 試験結果・解析結果から求めた見かけの破壊エネルギー

5. おわりに

コンクリートなどの準脆性材料は社会基盤施設に必要不可欠であり、そのポストピークの破壊挙動を適切に把握することは、構造物の設計の高度化・効率化を図るためにも大きな意義がある。しかし、破壊挙動を支配する定量的な指標となる破壊エネルギーは、従来の評価方法では寸法依存性が認められるなどの問題があり、材料物性として扱うには十分な客観性を有していなかった。

本論文では、準脆性材料の引張軟化挙動を表現可能な結合力クラックモデルを導入したひび割れ進展解析手法を用いて、力学的なエネルギー収支を適切に考慮した数値解析を適用することで、供試体寸法に依存することなく、破壊靱性を表す材料物性値として破壊エネルギーを評価する方法を提案した。この提案手法により破壊エネルギーの値に客観性を与えることができ、材料の破壊靱性を考慮した性能設計が可能になると期待される。

謝辞

東北大学大学院工学研究科の秋山充良 准教授には、破壊靱性試験の研究やコンクリートの試験方法に関する御助言を賜りました。久田 真 准教授・皆川 浩 助教にはセメント材料や供試体の作成方法に関する御助言をいただきました。また本研究は、第二著者が日本学術振興会特別研究員であった期間に行われ、特別研究員奨励費の援助により行われました。ここに記して感謝いたします。

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, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 2) 三橋博三, 六郷恵哲: コンクリートの破壊の力学: 魅力と展望, *コンクリート工学*, Vol.37, No.9, pp.4-10, 1999.
- 3) 中村成春, 橋高義典, 三橋博三, 内田裕市: コンクリートの引張軟化特性の標準試験方法に関する基礎的検討, *コンクリート工学論文集*, Vol.10, No.1, pp.151-164, 1999.
- 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.
- 5) 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.
- 6) 村上 聖, 岸谷孝一, 平居孝之: 破壊エネルギーの物理的意味とその評価, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.445, pp.11-18, 1993.
- 7) 村上 聖, 平居孝之: 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, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.585, pp.1-6, 2004.
- 8) Duan, K., Hu, X. and Wittmann, F.H.: Size effect on specific fracture energy of concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.74, pp.87-96, 2007.
- 9) 橋高義典: 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.469, pp.17-24, 1995.
- 10) 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 A*, Vol.64, No.3, pp.627-638, 2008.
- 11) 三橋博三, 白井伸明, 六郷恵哲: コンクリート構造への破壊力学の応用, *コンクリート工学*, Vol.30, No.6, pp.5-17, 1992.
- 12) 橋高義典: 引張破壊のモデル化と破壊力学パラメータ, *コンクリート工学*, Vol.37, No.9, pp.25-28, 1999.
- 13) Ba  ant, Z.P. and Planas, J.: *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, 1998.
- 14) Wells, G.N. and Sluys, L.J.: A new method for modelling cohesive cracks using finite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.50, pp.2667-2682, 2001.
- 15) 李 宝禄, 前川宏一: 接触面密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, *コンクリート工学*, Vol.26, No.1, pp.123-137, 1988.

(2008 年 4 月 14 日受付)