

節点積分を応用したひび割れ進展解析法による混合モード破壊の再現解析

東北大学工学部 学生員 ○ 橋詰 知尚
東北大学大学院 正 員 車谷 麻緒
東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎
東北大学大学院 正 員 京谷 孝史

1. はじめに

コンクリートや岩盤などの準脆性材料の力学挙動を正確に評価するには、具体的かつ適切なひび割れ進展を再現可能な解析手法が必要である。また、コンクリートのような非均質複合材料のひび割れ進展を解析するには、母材・介在物の破壊や剥離面が混在する問題を扱わなければならないので、効率性・安定性・簡便性を有する解析手法の適用が望まれる。本稿では、車谷・寺田が開発したFEMベースひび割れ進展解析手法¹⁾を用いて混合モード破壊の試験に対する再現解析を行うことにより、提案された解析手法の実験再現性について検証する。

2. 節点積分を応用したひび割れ進展解析

2.1 概要

FEMベースひび割れ進展解析手法は、ひび割れ進展解析で重要とされるひび割れの発生位置・方向・ひび割れ長さに関して、従来のひび割れ進展解析の手法の問題点をバランスよく改善した簡便かつ安定な解析手法で、以下に示すような特徴を有する。

2.2 Cohesive crack モデル

コンクリートなどの準脆性材料の非線形破壊挙動を適切に表現するために Cohesive crack モデルを用いている。本解析手法では以下の式で表面力 - 開口変位関係を与える。

$$\|t^{\text{coh}}\| = -f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} \kappa\right) \leq 0 \quad \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \quad (1)$$

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 は載荷履歴における最大開口変位である。求解に際しては、割線探索法による陽的近似を行っているためひび割れが多発するケースや有限変形問題の場合でも安定して解析を行うことができる²⁾。

2.3 節点積分の応用

FEMでのひび割れ進展解析を行う際、ひび割れ発生の判定応力の評価、ひび割れ発生位置の特定、ひび割れ形成の長さの特定が非常に困難となる。このような有限要素に関する弊害は既往の一般化有限要素法によるひび割れ進展解析手法でも問題となっている。これらの問題点を解決するために、提案された手法¹⁾では、以下の式を用いてFEMにおける節点積分の考え方を応用し、要素ごとに求まる応力やひずみを節点量に変換することで節点を規準としたひび割れ進展解析手法を実現している。

$$\bar{\sigma}_N = \frac{1}{\bar{A}_N} \sum_{e=1}^{M_N} (\alpha_e^N A_e \sigma_e) \quad (2)$$

ここで M_N は節点 N に関わる要素数、 A_e は要素 e の面積、 α_e^N は A_e における節点 N を含む部分の面積の割合であり、

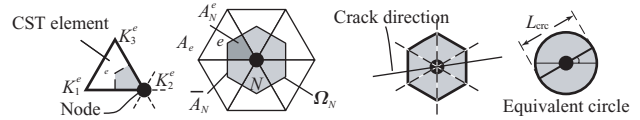


図-1 節点積分の応用

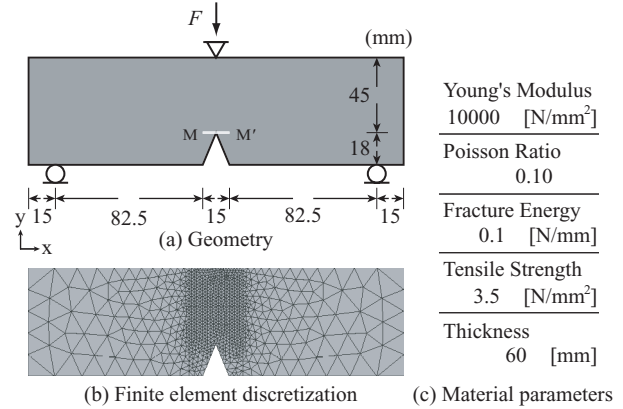


図-2 3点曲げ試験

面積 $\bar{A}_N$ は次式を満たす節点 N 周りの多角形面積である(図-1)。

$$\bar{A}_N = \sum_{e=1}^{M_N} A_e^N = \sum_{e=1}^{M_N} \sigma_e^N A_e \quad (3)$$

式(2)で、節点応力を周辺要素を用いて平均化し、要素寸法による影響を軽減したうえで求めた節点の最大主応力 $\bar{\sigma}_1$ を算出し、ひび割れ判定基準として用いている。

3. 3点曲げ試験の再現解析

本節では、本手法のモードI破壊に対する実験の再現性を検証する目的で、3点曲げ試験の再現解析を行う。解析対象は筆者らが行った片側切欠き付きモルタル供試体3点曲げ試験で、形状、材料特性値、解析メッシュは図-2に示すとおりである。ヤング率、ポアソン比、引張応力は実験により得られた値を用い、実験、数値解析ともに変位制御で行い、解析では平面ひずみ状態を仮定した。

数値解析結果として、実験及び解析終了時の変形図と最大主応力の分布、荷重 - 開口変位関係を実験値と併せて図-3に示す。ここで、開口変位は切欠き先端M-M'の2点間の相対変位を表す。本手法を用いた数値解析結果は実験を十分に再現することができ、モードI破壊のみに支配されるひび割れ進展解析に対しては適用可能性であるといえる。

4. 混合モード破壊の再現解析

モードI・モードII破壊が混在した混合モード破壊における提案手法の実験再現性について検証するために、Nooru

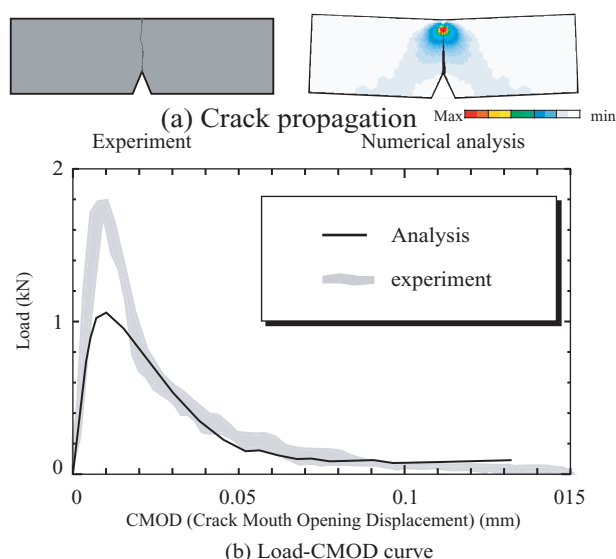


図-3 3点曲げ試験の数値解析結果

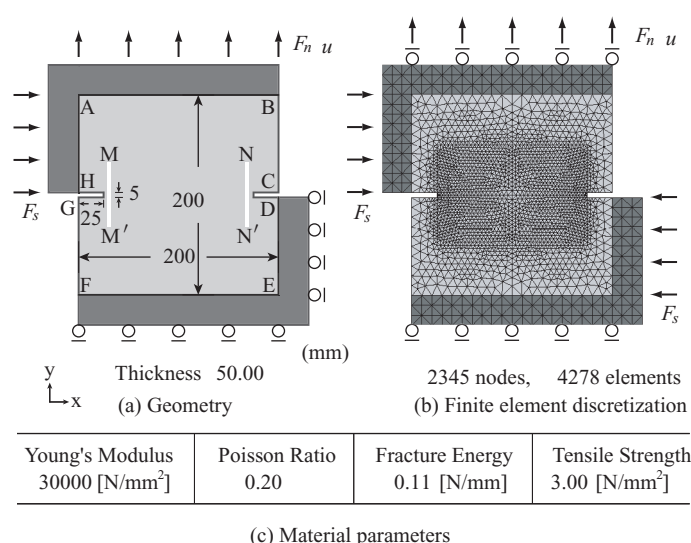


図-4 混合モード破壊

Mohamed が行った、両側切欠き付きモルタル供試体の引張せん断試験³⁾のうち、載荷経路 Lp4a, Lp4b, Lp4c を対象に再現解析を行う。

4.1 実験の詳細

実験で用いられた供試体の形状、境界条件、材料特性値を図-4に示す。載荷経路 Lp4a, Lp4b, Lp4c では、まず、せん断荷重を面 AH に規定値 (Lp4a, Lp4b, Lp4c: それぞれ 5kN, 10kN, 27.5kN) まで変位制御で載荷し、荷重制御に切り替え、 F_s を規定値に保った状態にする。次に上面 (面 AB) に引張荷重を変位制御で与える。

4.2 解析について

解析に使用した境界条件、解析メッシュを図-4(b)に示す。解析では、せん断荷重は荷重制御で与え、引張荷重は変位制御で与え、平面応力状態を仮定し、対称に解析を行えるように原点对称にメッシュ作成し、面 DE にも反力としてのせん断荷重を与えた。また、実験での面 AH と面 DE を平行に保った載荷を再現するために図-4(b)に示すような鋼板を介して載荷した。

数値解析結果の 1 例として、載荷経路 Lp4b における変形図と最大主応力分布及び、引張荷重に対する変位関係を実験値と併せて図-5に示す。ここで変位は、analysis(a)では、図-4(a)に示す 2 点間 (M-M', N-N') の相対変位の平均値とし、analysis(b)では、上面の変位 u とした。また、他の解析手法による引張荷重 - 上面変位関係も併せて示す⁴⁾。本手法を用いた数値解析結果は、ひび割れ進展経路及び荷重相対変位関係どちらに関しても良好に実験値を再現していることがわかる。

5. おわりに

本研究では、節点積分を応用した FEM ベースひび割れ進展解析手法の性能を評価する目的で、モード I 破壊及び混合モード破壊の再現解析を行った。モード I 破壊はもちろん、混合モード破壊においてもひび割れ進展及び荷重相対変位関係をほぼ正確に再現でき、提案手法は混合モード

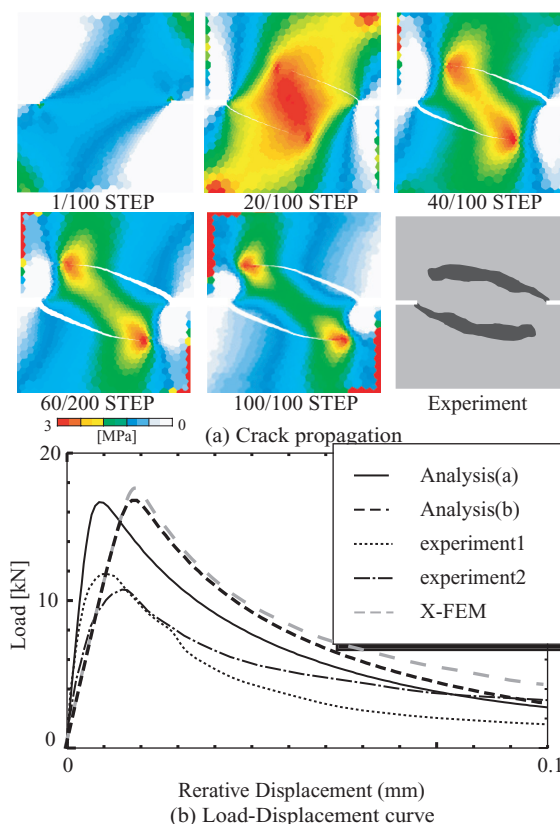


図-5 混合モード破壊の数値解析結果

破壊に関しても十分適用可能であることを例示した。

参考文献

- 1) 車谷 麻緒, 寺田 賢二郎, “節点積分を応用した簡易な FEM ベースのひび割れ進展解析手法”, Transactions of JSCES, Vol. 2008, 20080002, (2008).
- 2) 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.
- 3) Nooru-Mohamed MB.: Mixed-mode fracture of concrete: an experimental aproach, *Ph.D.Thesis*, Technische Universiteit Delft, 1992.
- 4) Peter Dumstorff and Günther Meschke: Crack propagation criteria in the framework of X-FEM-based structural analyses, *Int. J. Numer. Meth. Geomech.*, Vol31, pp.239-259, 2006.