

横浜国立大学大学院 学生会員 府川 徹

横浜国立大学工学部 正会員 椿 龍哉

横浜国立大学工学部 正会員 池田 尚治

1. まえがき

FEM解析に用いられるひび割れモデルは、大きく2つに分類できる。すなわち、分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルである。分散ひび割れモデルは、ひび割れ直角方向の要素剛性を低下させることによってひび割れを表現するものであり、解析上扱い易いが、ひび割れ幅の算定が困難である。一方、離散ひび割れモデルは、リンク要素を用いて各有限要素を結合することによってひび割れを表現するものであり、ひび割れ幅の算定は容易であるが、ひび割れ方向をあらかじめ設定する必要があるため、実用面に問題がある。そこで、本研究では、両モデルの長所を合わせ持つと考えられるクラック要素を用いて、一軸引張り、単純せん断、曲げについてFEM解析を行い、分散ひび割れモデルを用いたFEM解析結果と比較し、クラック要素の適用性を検討した。

2. クラック要素による解析手法

本研究で用いたクラック要素は、図-1に示す様に、4個の定ひずみ三角形要素と2個のリンク要素から構成される。外部節点1～3（添字Aを用いる）は、要素分割に応じて入力データとして与えられる。また、内部節点4～8（添字Bを用いる）は、ひび割れ発生時に導入される。以下に、6個の要素剛性を組み立てて得られる剛性方程式と、内部節点の自由度を消去した剛性方程式を示す。^{1, 2)} なお、外力は外部節点のみに働くとして、 $F_B = 0$ としてある。

$$\begin{Bmatrix} F_A \\ F_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BA} & K_{BB} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} U_A \\ U_B \end{Bmatrix} - (1) ; \quad \{F_A\} = [K_{AA} - K_{AB} K_{BB}^{-1} K_{BA}] \{U_A\} - (2)$$

3. 数値計算例

一軸引張りと単純せん断は、図-2(a), (b)に示す無筋コンクリート平板を対象として、また、曲げは、図-2(c)に示すRCはりを対象として、FEM解析を行った。コンクリートの構成則には歪弾性モデル³⁾を、また鉄筋の構成則には完全弾塑性バイリニアモデルを用いた。材料定数は、表-1に示した。

表-1. 材料定数表

	コンクリート		鉄 筋
圧縮強度	~29.8 Kgf/cm ²	降伏応力	380.0 Kgf/cm ²
引張強度	24.9 Kgf/cm ²	初期ヤング率	2.1×10 ⁶ Kgf/cm ²
初期ヤング率	2.35×10 ⁶ Kgf/cm ²	ひずみ硬化係数	1.0×10 ⁻¹⁰
ポアソン比	0.174		

リンク要素		
	K_n (Kgf/cm ²)	K_t (Kgf/cm ²)
I: $U_i < 0.0$	3×10^8	3×10^8
II: $0.0 \leq U_i \leq 0.005$	3×10^{-2}	3×10^8
III: $0.005 \leq U_i \leq 0.05$	3×10^{-2}	$0.1693 \sqrt{f_c / U_i^{0.9}}$
IV: $0.05 \leq U_i$	3×10^{-2}	3×10^{-2}

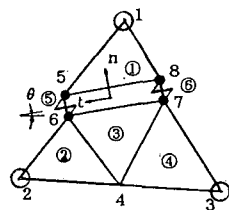


図-1 クラック要素

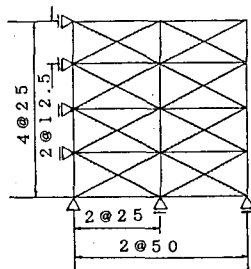


図-2(a) 一軸引張を受ける平板

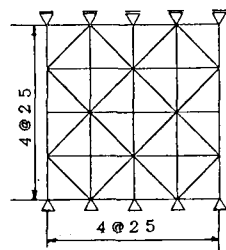
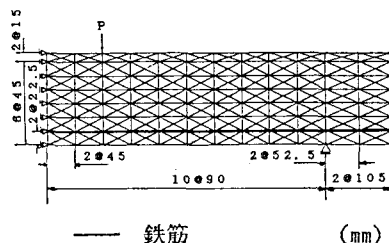


図-2(b) 単純せん断を受ける平板



鉄筋 (mm)

図-2(c) 曲げを受けるはり

U_i : ひび割れ幅(cm) ; f_c : コンクリート圧縮強度

K_n : ひび割れ法線方向の剛性

K_t : ひび割れ接線方向の剛性

4. 解析結果と考察

まず、一軸引張りと単純せん断について述べる。図-3(a)と図-4(a)に示す様に、太線のひび割れは、複数のひび割れが集中することによって支配的なひび割れを形成するので、ひび割れ幅も集中的に増加する。そのため、他のひび割れは、ほとんどひび割れ幅が増加しない。また、節点変位についても、支配的なひび割れが形成されたために、図-3(b)と図-4(b)に示す様に、変位が増加する節点とほとんど変位が増加しない節点が存在する。上記の挙動は、離散ひび割れモデルの挙動と類似であると言える。

次に、曲げについて述べる。クラック要素を用いた場合のひび割れ図を、図-5(a)に示す。この段階では、太線の曲げひび割れが0.1~0.2mm程度開いている他は、それより1オーダー以上狭くしか開いていない。また、さらに荷重を増加させた時のひび割れ図を、図-5(b)に示す。この段階では、曲げひび割れと斜め引張りひび割れが、0.1~0.3mm程度開いており、他のひび割れは、それより1オーダー以上狭くしか開いていない。以上の結果も、離散ひび割れモデルに類似した挙動であると言える。また、分散ひび割れモデルを用いた場合のひび割れ図を、図-5(c)に示す。図-5(b)と比較すると、若干ひび割れ分布に差異が見られる。

最後に、クラック要素を用いた場合と分散ひび割れモデルを用いた場合の荷重-変位曲線と実験値との対応が、図-6に示されている。

5. あとがき

クラック要素を用いることによって、分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルの長所を生かした解析ができ、ひび割れ幅が容易に算定できることが確認された。なお、この要素は、要素分割に敏感であることも確認されている。また、クラック要素内のひび割れ発生位置も、解に若干影響を与える傾向が見うけられた。これらは、今後検討すべき点であると思われる。

【参考文献】

- 1) T.Kawamoto and N.Takeda, "Analysis of Progressive Failure in Rock Slope", Third Int.Conf.on Num. Meth.in Geotechnics, /Aachen/, 2-6April, 1979
- 2) Y.Obata et.al, "Elastoplastic Analysis by Cracked Triangular Element", Proc.of the Int.Conf.on Finite Element Method, Shanghai, China, 1982
- 3) K.Bathe and S.Ramaswamy, "On Three Dimensional Analysis of Concrete Structures", Nuclear Engineering and Design, Vol 52, 1979

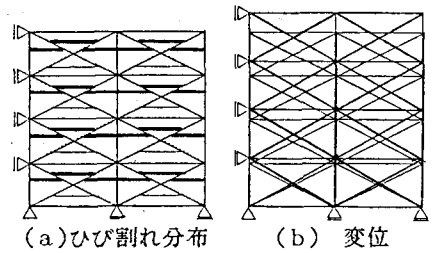


図-3. 一軸引張りを受ける平板

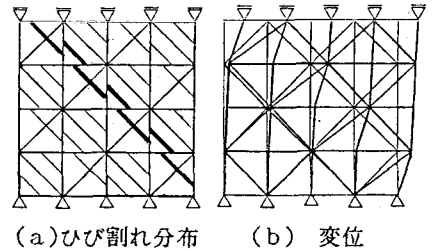
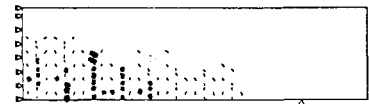
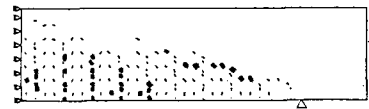


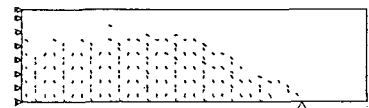
図-4. 単純せん断を受ける平板



(a)クラック要素(P=4.97tonf)



(b)クラック要素(P=6.38tonf)



(c)分散ひび割れモデル(P=6.47tonf)

図-5. 曲げを受けるはりのひび割れ分布

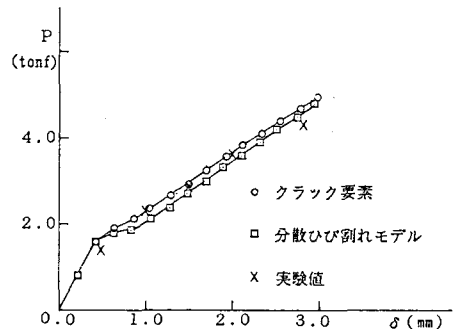


図-6. 荷重-変位曲線