

PSV-6 クラックひずみ法による鉄筋コンクリートの非線形解析

機関組技術研究所 正会員 吉川弘道
名古屋大学工学部 正会員 田辺忠顕

1. ひびわれモードの分類

ひびわれ界面における力学的挙動は、Sモード(nonfrictional separation mode 剥離状態)とFモード(frictional contact mode 摩擦接触状態)に大別することができる(図-1)。Sモードは、比例負荷を受ける部材が、主としてひびわれ直交方向に引張力を受け、界面にせん断力が生じない場合である。Fモードでは、ひびわれ界面に沿ってせん断力によるすべりが生じるとともに、界面直角方向に圧縮力の増大、もしくはひびわれ幅の開口(交叉効果)が励起される。いわゆるtension stiffening効果はSモードのひびわれを対象とするもので〔3〕,〔4〕、せん断伝達、クラックダイラタンシーはFモードひびわれのモデル化で取り扱われる〔5〕,〔6〕。

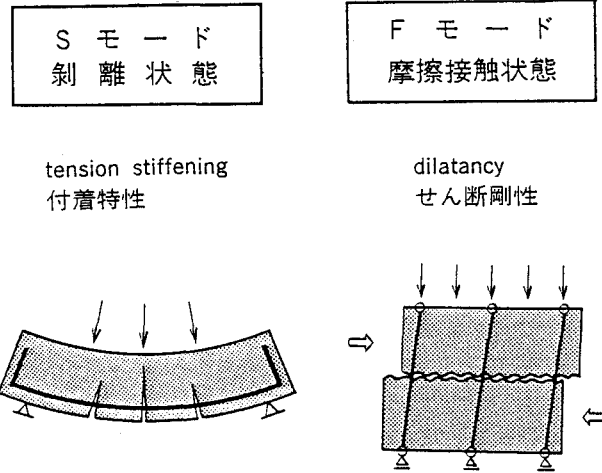


図-1 ひびわれモードの分類

2. クラックひずみを用いた構成方程式〔1〕,〔2〕

ひびわれの生じているRC部材のある領域における鉄筋とコンクリートのひずみベクトルを、各々 $\{\epsilon_s\}$, $\{\epsilon_c\}$ とすると、ひびわれの発生および鉄筋とコンクリート間の相対的すべりにより、これら両者は必ずしも等しくない。すなわち、全ひずみ(total strain)を $\{\epsilon\}$ とすれば、鉄筋のひずみ $\{\epsilon_s\}$ はこれと等しく、コンクリートのひずみ $\{\epsilon_c\}$ の各成分は全ひずみと等しいか小さい値とならなければならない。この差をクラックひずみ $\{\epsilon_{cr}\}$ と仮定する。そうすると、図-2に示すように、これら3者のひずみ関係は次のように記述することができる。

$$\{\epsilon_c\} = \{\epsilon\} - \{\epsilon_{cr}\} \quad \text{for concrete} \quad (1)$$

$$\{\epsilon_s\} = \{\epsilon\} \quad \text{for reinforcement} \quad (2)$$

コンクリートと鉄筋の応力ベクトルを $\{\sigma_c\}$, $\{\sigma_s\}$ 、剛性マトリックスを $[D_c]$, $[D_s]$ とし、各々の材料構成則を次式で表す。

$$\{\sigma_c\} = [D_c] \{\epsilon_c\} = [D_c] (\{\epsilon\} - \{\epsilon_{cr}\}) \quad (3)$$

$$\{\sigma_s\} = [D_s] \{\epsilon_s\} = [D_s] \{\epsilon\} \quad (4)$$

次に、作用外力 $\{\sigma\}$ と材料応力 $\{\sigma_c\}$ 、 $\{\sigma_s\}$ との釣合条件は、 $\{\sigma\} = \{\sigma_c\} + \{\sigma_s\}$ のように記述することができ、式(3),(4)を代入すると次式が得られる。

$$\{\sigma\} = ([D_s] + [D_c]) \{\epsilon\} - [D_c] \{\epsilon_{cr}\} \quad (5)$$

すなわち、式(5)の右辺第一項は全断面有効時の応答で、第二項はひびわれれによる応力緩和を示すものである。

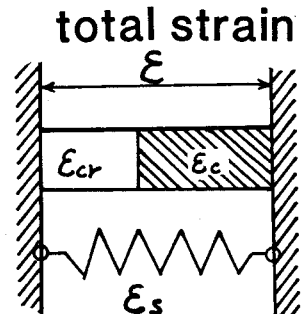


図-2 クラックひずみと材料ひずみとの関係

また、クラックひずみベクトルがさらに、 $\{\varepsilon_{cr}\} = [S] \{\sigma\}$ のように、作用外力 $\{\sigma\}$ の関数として表される場合、式(5) は次式のようにも書き換えられる。

$$\{\sigma\} = ([I] + [D_c] [S])^{-1} ([D_s] + [D_c]) \{\varepsilon\} \quad (6)$$

$[I]$ は単位マトリックスを示す。ここで、式(6) の右辺のうち、

$$[D_{RC}] = ([I] + [D_c] [S])^{-1} ([D_s] + [D_c]) = [\Phi] ([D_s] + [D_c]) \quad (7)$$

ただし、 $[\Phi] = ([I] + [D_c] [S])^{-1}$

とすると、これはひびわれ状態にある RC 部材の等価剛性マトリックスと解釈することができ、係数マトリックス $[\Phi]$ はひびわれ発生・進展に伴う剛性低下を表す無次元量に他ならない。

このような定式化によって、クラックひずみ $\{\varepsilon_{cr}\}$ またはその係数 $[S]$ を介することにより、ひびわれを含む鉄筋コンクリートをただ唯一の構成方程式で合理的に記述することが可能となる。

さらに、著者らの提唱するクラックひずみ法における構成方程式を分類・体系化し、表-1 に一覧する。（ただし、表中の諸式は増分形で記してある）。

表-1 クラックひずみ法と用いる構成則の分類・体系化

手 法	分 類	構 成 則	Sモード	Fモード	No.
クラックひずみ法	クラックひずみベクトル [初期ひずみ法]	I: 応力増分で表わしたもの $(d\varepsilon_{cr}) = [S] (d\sigma)$	○	—	1
		$(d\varepsilon_{cr}) = [F] (d\sigma_c)$	—	○	2
		II: 全ひずみ増分で表わしたもの $(d\varepsilon_{cr}) = [A] (d\varepsilon)$	○	○	3
	等 価 剛 性 [剛性変化法]	III: ひびわれコンクリートのみ $[D_{crk}] = [D_c] ([I] - [A])$	○	○	4
		IV: ひびわれコンクリート + 鉄 筋 $[D_{RC}] = [\Phi] ([D_c] + [D_s])$	○	—	5
		$[D_{RC}] = [\Phi'] [D_c] + [D_s]$	—	○	6

3. まとめ

クラックひずみ法は、これまで個別に議論されてきた引張硬化、せん断伝達、ダイラタンシー効果などの諸現象をクラックひずみベクトルによって統一的・合理的に取扱うことができ、いわゆる smeared モデルをも表現することが可能である。さらに、有限要素解析に際しては、初期ひずみ法または剛性変化法によって、従来の非線形 FEM コードを大きな変更なしに適用することができる。最終的には、クラックひずみベクトルをどのように定式化するかがキーポイントであり、著者らは、Sモードに対して、文献[3],[4]、Fモードに対して文献[5],[6] で詳述した。

<クラックひずみ法に関する著者らの主要論文>

- [1] クラックひずみを導入したコンクリート構造物の有限要素モデル、RCFEM 研究会、JCI、昭59.12
- [2] A Finite Element Model for Cracked Concrete, 日米セミナー、ASCE, ST Div., 昭60.5
- [3] 鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究、土木学会論文集、第366号/V-4, 昭61.2
- [4] ひびわれを有する鉄筋コンクリート板の平面応力場における構成方程式、JCI 論文、昭61.6
- [5] コンクリート部材のひびわれ界面における力学的挙動に関する解析的研究、土木学会論文集、昭61.8
- [6] 不連続面の力学挙動に関する構成モデル、第19回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、昭62.2