

## V-144 交番荷重下での2次クラックを考慮した材料モデル

建設省 正員 福島眞司  
 大阪大学工学部 正員 大谷恭弘  
 大阪大学工学部 正員 福本湧士

**1. はじめに** 地震等により構造物に作用する荷重の荷重方向が変化した場合、最初に生じたクラック（1次クラック）に交差して、第2番目のクラック（2次クラック）が発生する場合がある。構造物の継手部においても、荷重の繰返し作用等により2次クラックが発生することが考えられる。また鉄筋コンクリート梁において曲げひび割れ発生後に生じるせん断ひび割れも2次クラックである。

2次クラックを有限要素解析で取り扱うためには、2次クラックを考慮した材料モデルが必要である。2次クラックの発生荷重および方向に対しては、1次クラック面における応力伝達が大きく影響する。また、交番作用に対してはクラックの開・閉口判断基準、あるいは開・閉口に伴う荷重・除荷の取り扱いが重要である。材料のモデル化に際してはこれらを考慮する必要がある。

Rots等<sup>1)2)</sup>はクラックを有するコンクリート要素の平均的なひずみをコンクリートひずみとクラック面における疑似ひずみの和として定式化した応力-ひずみ関係を提案し、1次クラックのみならず、それに斜交して発生する2次・3次クラックの取り扱いにも有用であることを示している。

ここでは、交番作用を受けるコンクリート構造物の有限要素解析に適用可能な材料モデルの作成を試みた。特に引張応力領域におけるクラック発生以降の取り扱いに対してはRots等の提案する応力-ひずみ関係を用い、またクラックの開・閉口基準を定義して交番作用下での1次・2次クラックの開口・閉口を考慮した。

**2. モデルの概要** ここでは、コンクリート材料の構成則を圧縮応力領域（ $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 < 0$ ）と引張応力領域（ $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 > 0$ ）に分け取り扱う。以下では、引張応力領域における構成則モデルについて述べる。

クラックは Rankine の最大引張応力基準を乱した時点で初期化され、クラック形成に従って応力が解放されるものとした。クラック発生前は線形弾性として扱い、発生後はRots等の提案したSmearedクラックモデルを用いる。ここでは、クラックの状態を次の4つの状態に分類して取り扱うこととした。（図-1）；

- ・ cracking：クラック形成過程の状態、軟化領域における取り扱いを用いる
- ・ cracked：クラックが完全に形成された状態で、軟化領域終了後の取り扱いを用いる。
- ・ closing：除荷（閉口）・再荷重（開口）の状態、割線剛性を用いた取り扱いを行う。
- ・ closed：クラックが完全に閉じた状態で、初期弾性剛性を用いて取り扱う。

各状態に対してクラック直角方向の剛性 $E^{cr}$ 及びクラック面せん断剛性 $G^{cr}$ を以下のように仮定した。

①クラック直角方向の剛性 $E^{cr}$ 

・ cracking

$$E^{cr} = E_{open}^{cr} = - \frac{\sigma_{tp}}{\varepsilon_0}$$

・ cracked

$$E^{cr} = 0$$

・ closing

$$E^{cr} = E_{close}^{cr} = \frac{\sigma_{tp} (\varepsilon_0 - \varepsilon_n^{cr})}{\varepsilon_0 \varepsilon_n^{cr}}$$

・ closed

$$E^{cr} = E_0$$

②クラック面せん断剛性 $G^{cr}$ 

・ cracking, cracked, closing

$$\beta = \frac{G^{cr}}{G_0} = \frac{\varepsilon_0}{4 \varepsilon_n^{cr} + \varepsilon_0}$$

・ closed

$$G^{cr} = G_0$$

$\sigma_{tp}$ ：クラック直角方向最大応力

$\varepsilon_0$ ：軟化領域終了ひずみ

$\varepsilon_n^{cr}$ ：クラック直角方向ひずみ

$E_0$ ：初期弾性剛性

$\beta$ ：せん断剛性低下パラメータ

$G_0$ ：初期せん断剛性

与えられた増分ひずみに対するクラックの開・閉口の判定には、増分クラックひずみ成分の増減より判断する必要がある。一軸応力状態の場合  $E \varepsilon_{pen} + E^{cr} > 0$  の条件の下では、全ひずみ増分のクラック直角方向成分の増減は、クラックひずみ増分の増減と一致する。通常のコンクリートにおいて、この条件は十分に満足される。そこで1次クラックの開・閉口の判断として、ひずみ増分のクラック直角方向成分が増加していれば開口、減少していれば閉口であるとした。1・2次クラックの開・閉口の判定には、1次クラックのみの場合と同様に増分クラックひずみ成分を1・2次

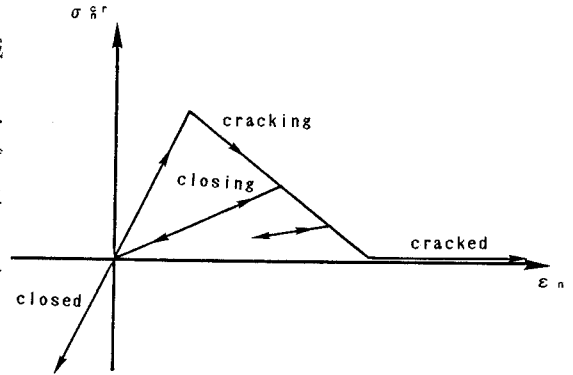


図-1 応力-ひずみ関係のモデル化

クラックに対して計算することにより判定する必要がある。しかしながら、ひずみ成分の分解は容易ではなく、また1次クラックのみの場合と異なり、それぞれのクラックひずみ成分が相互効果を及ぼし合うため、厳密には開・閉口基準に相互効果の影響を考慮する必要があると思われる。しかし、ここでは簡易化のため相互効果の影響を無視し、全ひずみ増分のそれぞれのクラック直角方向成分の増減により判定した。

**3. モデルの検証** 1次及び2次クラックのモデル化に対する照査を主たる目的として、繰返し荷重を受ける簡易な鉄筋コンクリートシャイベの有限要素解析を行った。図-2に解析モデルを示す。構造的安定性を保つため節点をトラス要素で結んでいる。解析は強制変位を与えることにより行った。荷重経路は第1段階として1方向から載荷し、1次クラックが発生した後第2段階として逆方向に載荷を行い、2次クラックの発生を期待した。図-3にクラックの進展状況を示す。STEP1は第1段階載荷の終点で、太い破線はcracking状態を示す。STEP3は強制変位を0に戻した点で、細い実線はclosed状態を示す。STEP4,6はさらに逆方向に変位を与えたもので、2次クラックが徐々に発生しており、1次クラックはclosed状態であることを示す。

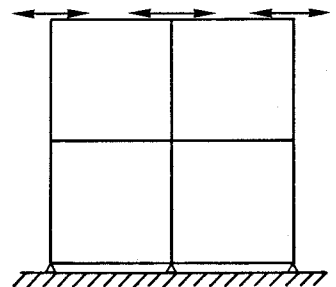


図-2 解析モデル

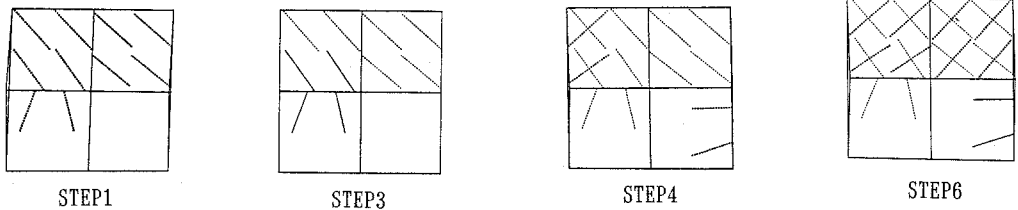


図-3 クラックの開・閉口

**4. まとめ** 交番作用下での2次クラックを考慮した材料モデルを作成し、その妥当性を簡易な解析モデルにより照査した。その結果、2次クラックの発生及び1次、2次クラックの閉口、開口挙動が確認できた。今後、より実際的な構造物へのモデルの適用を試みて、当日は、その結果について報告する予定である。

- 参考文献**
- 1) Rots, J.G. et al., "Smeared Crack Approach and Fracture Localization in Concrete," *Heilon*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-48, 1985.
  - 2) Rots, J.G., R. de Borst, "Analysis of Mixed-Mode Fracture in Concrete," *Proc. of ASCE*, Vol. 113, No. EM11, pp. 1739-1759, Nov., 1987.