

I-357

1、2次クラックを考慮した材料構成則モデル

オリエンタル建設 正員 鄭 慶玉
 大阪大学工学部 正員 大谷恭弘
 大阪大学工学部 正員 福本嘸士

1. はじめに コンクリート構造物に地震等による交番荷重が作用した場合、最初に発生した1番目のクラック(1次クラック)に交差して2番目のクラック(2次クラック)が発生することが知られている。コンクリート梁に横荷重が作用した場合にも、曲げよる1次クラックの発生後、せん断による2次クラックが発生する場合があることが知られている。

1・2次クラックの有限要素法への適用を可能にするためには、クラックに対して明確な取り扱いを行った材料モデルが必要となる。1・2次クラックを考慮した材料のモデル化を行うにあたっては、1次クラックと2次クラックの間の相互効果、開・閉口基準及び最小交差角の取り扱いが重要となり、これらを考慮することが必要である。

Rots¹⁾²⁾等はクラックの発生したコンクリート要素の全体ひずみをコンクリートのひずみとクラック面におけるひずみの和とし、それぞれの独立した応力-ひずみ関係から要素の応力-ひずみ関係を導くことを提案した。この応力-ひずみ関係をスミアードクラックモデルを適用することにより、1次クラックのみならずそれに斜交して発生する2次クラック、3次クラックへの適用が可能となる。

ここでは、1次・2次クラックの発生を想定した交番荷重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後の取扱いには、寸法効果(SIZE EFFECT)を考慮した応力-ひずみ曲線を用いた。また、1次・2次クラック発生時に考慮すべき開・閉口基準を定義し、上述の最小交差角 α の検討も行うことにした。

2. モデルの概要 コンクリート材料の破壊モードを圧縮型破壊モードと引張型破壊モードの2種類に分類して取り扱う。以下では引張型破壊モードの構成則モデルについて述べる。

Rankineの破壊基準を用いクラックの発生を定義する。最大引張強度以前は線形弾性と仮定し、最大引張強度以降の軟化部分は要素の寸法効果を考慮した線形軟化と仮定する。クラックのモデル化としてスミアードクラックモデルを用い、クラック状態を以下の4つの状態に分類して取り扱うことにした。

- ・ 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)・再載荷(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。

各状態に対するクラック直角方向剛性、クラック面せん断剛性を以下のように取り扱う。

①クラック直角方向剛性

<p>・ CRACKING</p> $E^{cr} = E_{open}^{cr} = -\frac{\sigma_{tp}}{\epsilon_0}$ <p>・ CRACKED</p> $E^{cr} = 0$	<p>・ CLOSING</p> $E^{cr} = E_{close}^{cr} = \frac{\sigma_{tp}(\epsilon_0 - \epsilon_{nr}^{cr})}{\epsilon_0 \epsilon_{nr}^{cr}}$ <p>・ CLOSED</p> $E^{cr} = E_0$
--	--

②クラック面せん断剛性

<p>・ CRACKING・CRACKED・CLOSING</p> $\beta = \frac{G^{cr}}{G_0} = \frac{\epsilon_0}{4\epsilon_{nr}^{cr} + \epsilon_0}$ <p>・ CLOSED</p> $G^{cr} = G_0$	<p>σ_{tp} : クラック直角方向最大応力</p> <p>ϵ_0 : 軟化領域終了ひずみ</p> <p>ϵ_{nr}^{cr} : クラック直角方向ひずみ</p> <p>E_0 : 初期クラック直角方向剛性</p> <p>β : せん断剛性低下パラメーター</p> <p>G_0 : 初期せん断剛性</p>
---	---

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定する。すなわち、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とした。全

体のひずみ増分からクラック直角方向成分を求めるに当たっては、Rots等の提案した以下の式を用いた。

$$d\epsilon^{cr} = (D^{cr} + T^T D^{co} T)^{-1} T^T D^{co} d\epsilon$$

ここで、

- D^{cr} : クラック面剛性マトリックス
- D^{co} : コンクリートの剛性マトリックス
- T : ひずみ座標変換マトリックス
- $d\epsilon$: 要素の全体座標系ひずみ増分ベクトル
- $d\epsilon^{cr}$: クラック面ひずみ増分ベクトル

この式を用いることにより、1次・2次クラックのひずみ成分が及ぼし合う相互効果の影響を考慮することになる。最小交差角 α については妥当な角度を検討するため、 $\alpha=10^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の3つのケースを設定した。

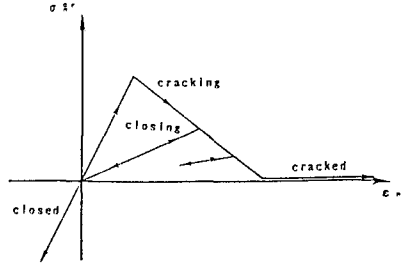


図-1 応力-ひずみ関係のモデル化

3. モデルの検証 複鉄筋のコンクリート片持ちばりに交番荷重を作用させる方向で解析を行い、1次及び2次クラックモデル化に対する妥当性を照査する。図2に解析モデルを示す。コンクリート要素には8節点アイソパラメトリック要素を用い、鉄筋要素には3節点トラス要素を用いた。解析は梁先端の17節点に等しい強制変位を与えることにより行った。載荷経路は、まず鉛直下方に変位を与える。一端、変位を0に戻した後は、鉛直上方に逆の変位を与え、2次クラックの発生を期待した。最小交差角 $\alpha=10^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の3ケースについて行い、比較検討の結果 60° が適当であると判断できた。よって、図3に $\alpha=60^\circ$ の場合のクラックの進展状況を、図4に荷重-変位曲線を示す。STEP1はクラックの発生した段階、STEP2は鉛直下方に最大変位を与えた段階、STEP3は変位を0に戻した段階、STEP4は鉛直上方に最大変位を与えた段階をそれぞれ示す。図中の太い破線はCRACKING状態、細い破線はCRACKED状態、太い実線はCLOSING状態、細い実線はCLOSED状態を示す。STEP2でCRACKING, CRACKED状態のものが、STEP3ではほとんどCLOSED状態に変化した。STEP4では先に発生した1次クラックに交差する形で、2次クラックが発生するのが確認できた。

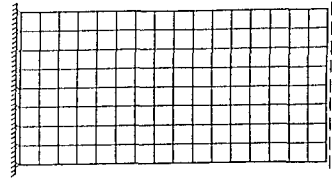


図-2 解析モデル

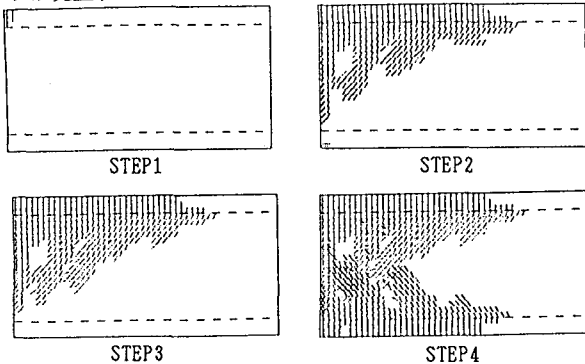


図-3 クラックの進展状況

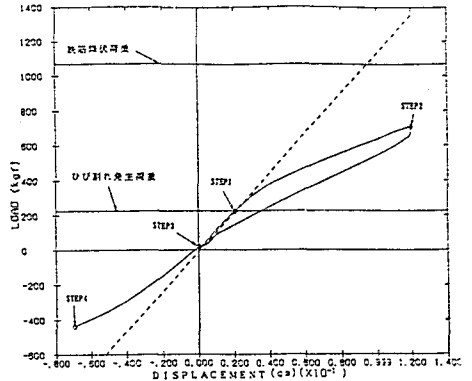


図-4 荷重-変位曲線

4. まとめ 1次・2次クラックを考慮した材料モデルを作成し、そのモデルを簡易な解析モデルにより照査した。その結果、実際構造物の実験結果とほぼ同じ1次クラック、2次クラックの進展状況を確認することができた。又、1次・2次クラックの最小交差角 α が 60° が妥当であると結論づけることができた。

参考文献 1) Borst, N and P. Nauta : Smearred Crack Analysis of Reinforced Concrete Beams and Slabs Failing in Shear, Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Pineridge Press Swansea, United Kingdom, pp. 261-273
 2) Rots, J.G. and J. Blaauwendraad : Crack Models for Concrete : Discrete or Smearred ? Fixed, multi-direction or rotating ?, Heron, Vol. 34, No1 1989