(V －43) 引張強度のばらつきを考慮したコンクリートの破壊シミュレーション

武蔵工業大学学生　学生員　小泉善美
武蔵工業大学工学部　正会員　吉川弘道
(株)トータル・インフォメーション・サービス　正会員　金刀督純

1. まえがき

分布ひび割れモデルによる無筋コンクリートの非線形解析(FEM)に際しては、破壊進行の局所化をどのように再現するかがポイントとなる。本研究では、引張強度にばらつきと距離相関を考慮しコンクリート単軸引張部材の破壊解析について考察するものである。

2. 引張破壊と等価エネルギー要素[1]

コンクリート部材が引張力を受け、応力が材料の引張強度に達するとひび割れを生じるが、部材全体にわたって分布するのではなく、ある部分に局所的に集中する。これを分布ひび割れモデル(smeared crack model)によって有限要素で表現する場合、要素の大きさによって解析結果が異なることがある。しかし、実際の挙動に近い仮想ひび割れモデル(fictitious crack model)と、ここで用いる分布ひび割れモデルとの等価性を考えることにより対処できる。そこで、次のような要素寸法を考慮した引張軟化曲線($\sigma \sim \varepsilon$関数)を採用する。

$$\sigma(\varepsilon) = f_t \cdot \eta^{\frac{\varepsilon-\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_f}} \quad , \quad \eta = \exp\left\{\varepsilon_f \cdot \left(\frac{f_t}{2E_c} - \frac{G_f}{l_e \cdot f_t}\right)^{-1}\right\} \qquad ①$$

ここで、f_t:ひび割れ発生強度、ε_{cr}:応力がf_tのときのひずみ、η:残留応力比とε_f:基準ひずみは降下曲線を表す係数とし、$\varepsilon=\varepsilon_f+\varepsilon_{cr}$のとき$\sigma=\eta \cdot f_t$($\eta<1$)となる。
また、G_f:材料の破壊エネルギー、l_e:要素寸法、E_c:コンクリートのヤング率とする。

3. 距離相関を考慮した引張強度の割り付け

コンクリートの部材が引張破壊するとき、その部材に分布する微小要素のうち、最弱部分からひび割れが発生し、局所化する。そこで、標準偏差S、平均値Mなる正規分布N(S,M)に従う乱数によって、各要素に引張強度を割り付けるが、各要素内の相対的距離に応じた相関特性を導入する。まず、2要素間の相関特性を表現するため次のような2次元のExponential関数[2]を採用する。

$$\rho(i,j) = \rho(j,i) = \exp\left\{-\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{B}\right)^2}\right\} \qquad ②$$

ここで、$\rho(i,j)$:i要素とj要素の距離相関係数、Δx:i要素とj要素の水平方向の相対距離, Δy:i要素とj要素の鉛直方向の相対距離、A,B:係数(Aは水平方向、Bは鉛直方向の相関性を表し、大なるほど相関性が強まる。)

ただし、$\rho(i,j) = 1 \quad (i=j), \quad \rho(i,j) = 0 \sim 1 \quad (i \neq j)$

次に、要素間の相関性を表す共分散マトリックス:[Cov(i,j)]は、

$$[Cov(i,j)]=S^2 \cdot [\rho(i,j)] \qquad ③$$

のように表される。ここで、有限要素の総数をm個とすると、これらはm×mの正方マトリクッスとなる。さらに、共分散マトリックスをコレスキー分解して、$S^2[\rho(i,j)] = S[C] \cdot S[C]^t$のようにすると、次式が成立する[4]。

$$\{Z_c\}= [C] \cdot \{Z_s\} \qquad ④$$

ここで、$\{Z_s\}$:正規分布N(S,M)に従う相互に独立なサンプリング値、$\{Z_c\}$:相関性を持つサンプリングとなり、いずれもm×1のベクトルである。すなわち、無相関なサンプリング値が式④の一次変換によって、相関特性

が与えられることになる。

4.FEMシミュレーションおよび考察

厚さ1cm、長さ50cmの一様引張部材を考える。全要素を非線形領域(ひび割れ進行可能)とし、図.1のような要素幅l_e:2.5cm、節点数231、要素数200のようにレイアウトし、左端節点固定、右端を強制変位させた。解析種類は平面応力、計算はRC汎用コード[3]で行った。各諸条件については、表.1にまとめる。図.2に荷重～変位曲線を示し、図中の1～3がFEM計算結果であり、1:無相関、2:係数A=1,B=10、3:係数A=1,B=15を示し、一方、4はf_t=18.0kgf/cm^{2}としたときの解析解である。

ばらつきを与えるだけでは不十分なときがあり、相関性を与えることにより現実に近い計算となり、引張強度の弱所、破壊の集中化を大略表現することができるが、乱数の与え方によりひび割れ進行箇所が数カ所に離れて出現し、そのため要素にひずみの回転が生じ不合理な挙動を示し、収斂しないことがあった。

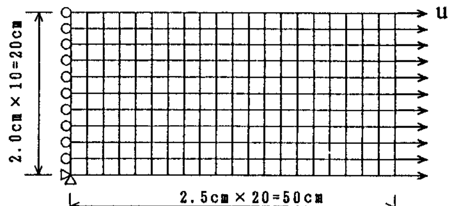


図.1 要素分割図

表.1 解析条件

破壊エネルギー:Gf(kgf/cm)	0.150
平均引張強度:ft(kgf/cm2)	20.0
ヤング率:Ec(kgf/cm2)	3.0×10^{5}
ポアソン比:ν	0.0001
基準ひずみ:εf	0.002
変動係数:V(%)	10.0
残留応比:η(%)	50.96

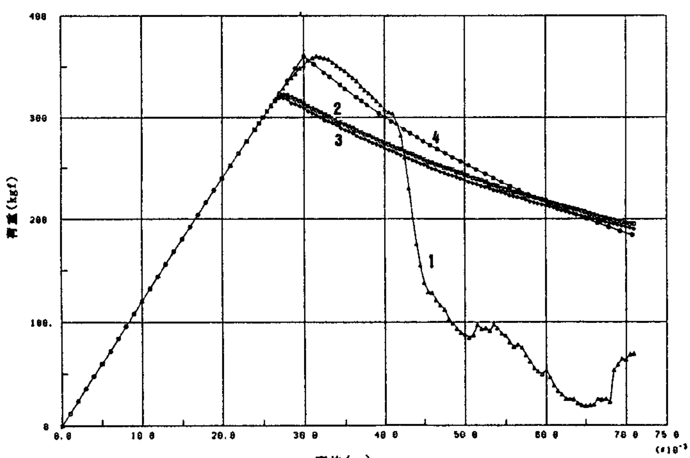
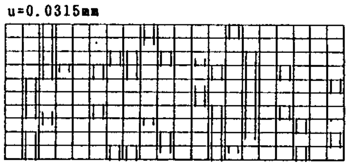


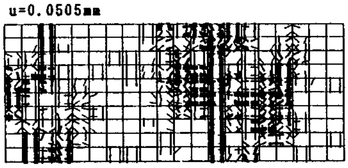
図. 2 荷重～変位曲線

1:<<無相関>> (クラック図)

u=0.0315mm

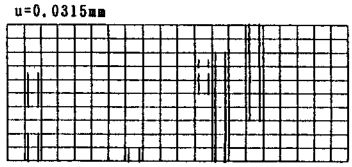


u=0.0505mm



2:<<A=1,B=10>> (クラック図)

u=0.0315mm



u=0.0505mm

謝辞:本論の展開について、本学、星谷研究室の皆様にご教示を受け、ここに謝意を表します。

参考文献

[1]長野竜馬・島山善治・吉川弘道:コンクリートの引張破壊と有限要素の寸法依存性,土木学会第48回年次学術講演会,pp.976～977,平成5年9月

[2]小川保・竹内友章・本田眞・鈴木誠:AICによる地盤物性値の空間分布に関する確率モデル選定, 第27回土質工学研究発表会,pp.133～134,平成4年6月

[3]材料非線形汎用3次元コード Total-RC v.3:理論マニュアル,昭和61年10月

[4]星谷勝・石井清:構造物の信頼性設計法,鹿島出版会,昭和61年5月30日発行

[5]西岡真帆・服部尚道・吉川弘道:コンクリート材料のひずみの局所化に関する基礎的考察,土木工学会第48会年次学術講演会,pp.972～973,平成5年9月