土木学会第59回年次学術講演会(平成16年9月)

マイクロメカニクスに基づくコンクリートの引張クリープのモデル化

香川大学 正会員 吉田 秀典 , 非会員 宇田 圭一 芝田化工設計 非会員 福原 健司

1. 緒言

近年,原子力施設や燃料貯蔵施設などにおいて,その構造物の大規模化かつ高機能化が図られ,様々な観点から引張 クリープに関する関心が高まりつつある.従来のクリープに関する議論の多くは圧縮クリープ試験の結果に基づくもの がほとんどであるが,最近の研究により,圧縮側と引張側ではクリープのメカニズムが異なることが指摘されている¹⁾. 構造物に対して高い信頼性が要求される場合は構造物に起こりうる現象を正確に予測する必要があるが,こうした場合, 現象論的なアプローチではなく,メカニズムに立脚した予測手法の開発が必要不可欠となる.メカニズムに立脚した予測 手法の開発としては,熊野ら²⁾は,引張持続応力がコンクリートの微細構造に与える影響を観察した上で,引張クリー プの予測式を提案している.この予測式は,マイクロクラックの挙動を線形破壊力学と熱力学を組み合わせてモデル化 しており,従来の現象論的なものとは異なる.実験結果などの再現性も良いが,楕円型クラックの長径と短径との関係 に関する類推や,マイクロクラックの進展則を実験結果から逆解析で求めている点などに関しては議論の余地もある.

そこで本研究では,可能な限り類推/仮定などを導入せずに,理論式のみを用いて引張クリープのモデル化を行い, それを有限要素解析コードに組み込むことで,解析を通してクリープ変形のメカニズムを考察することとした. 2. クリープモデル

マイクロクラック進展のモデル化としては,熊野ら²⁾は熱力学をベースとしているが,本研究では,応力腐食割れを ベースとした. 脆性材料中に存在するクラックの先端では,引張力が臨界値以下でもそのクラックが進展することがあ る. これはサブクリティカルなクラック進展と言われるが,この中でも,引張力の助けを借りた環境中に含まれる腐食 種(水分,化学種)による化学反応によって引き起こされるものを応力腐食割れと言う.応力腐食割れは,一般的には 金属の分野で研究が進んできたものであるが,岩石などの脆性材料でも確認されている³⁾.

ここで,図1に示すように,半径 a のコイン型のクラック(その断面 は図2)が存在し,無限遠方において,クラック面に対して垂直となる 方向に引張一様応力 σ が作用していると仮定する.この場合,クラック 先端近傍における応力拡大係数 K₁ は,以下のように表される.

(m/s)

Growth Velocity

Crack

Limit of stress

corrosion K



Region III

Region II

また,応力拡大係数とクラック進展速度の間には,図3に示すような関係がある.すなわち,クラックの進展速度 dℓ/dt は応力拡大係数の関数として,

 $\frac{d\ell}{dt} = R(K_I)^n \quad \dots \qquad (2)$

で与えられる.ここで, $R \ge n$ は実験より定まる材料定数で, 温度・含水率・pH といった環境条件によって変化する.これより, 与えられた応力に対してクラック長と時間の関係が得られる.また, クラックの平均開口変位量 $\overline{\delta}$ (図2参照)は, 次式で表される⁴⁾. $\overline{\delta} = \frac{16(1-\nu^2)a}{2\pi} \times \overline{\sigma}$(3)

 $3\pi E$ ここで,E およびu はコンクリートの弾性係数およびポアソン比である.

K₁ (N/m³²) 図 3 応力拡大係数と進展速度

Stress Intensity Factor

Region I

3. クリープ解析

本研究では,前章の手順で導かれた構成モデルを有限要素解析コードに組み込み,任意の形状/境界条件におけるコンクリート材料のクリープ解析を可能にした.解析例としては,文献²⁾にて実施している実験を参考に解析を行ったが,紙面の都合より,本稿では,載荷応力(σ)の1.6 N/mm²の場合のみを掲載することとした.弾性係数は静弾性試験より27.0 kN/mm²とし,ポアソン比に関しては文献に情報が無かったため,コンクリートとして一般的な0.2 を採用した.また,文献によれば,クラックの初期長に関しては,引張クリープに影響を及ぼす空隙の細孔直径が0.1 ~ 5 μ mであると結論づけていることから,本解析では0.1 μ mを採用した.クリープ係数(R,n)やクラックの初期密度(ρ_0)に関しては調査が難しいため,実験結果に近いものになるように設定した.

まず, $R = 6 \times 10^{-7}$, $n = 0.4 \ge 0$,供試体全体にクリープ要素を配置した解析 を実施した.その際のひずみを図4にプロットする.なお,本解析では,供試体の 頂部中央における変位を抽出し,それを供試体の高さで除すことでひずみを求めて いる.また,0日の段階で生じてるひずみは弾性ひずみを意味し,その後の増分が クリープひずみに相当する.図より,クリープひずみは時間とともに増大し,収束 することはない.また,ひずみのレベルもかなり大きい.これは,式(1)よりクラッ クの進展とともに応力拡大係数が大きくなり,さらに,式(2)よりクラック進展速 度が増加するため,時間とともにクラックの開口変位は雪だるま式に大きくなる.

そこで,クラックを含むクリープ要素に対して,非クリープ要素(弾性要素) を配置し,応力再配分が生じる設定を考えた.全要素に対してクリープ要素を 50%(Case1)と75%(Case2)の2ケースを考え,それ以外を弾性要素として クリープ要素を包含するように配置した.Case1については,クリープ係数,ク ラック密度を変化させた感度解析を実施した.解析ケースの一覧を表1に示す.



図 4 ひずみ曲線(全てクリープ要素)

表1 解析ケース

	R	n	$ ho_0$
Case1-1	6×10^{-7}	0.4	1×10^{-5}
Case1-2	6×10^{-7}	0.4	1×10^{-6}
Case1-3	6×10^{-7}	0.8	1×10^{-6}
Case1-4	6×10^{-7}	1.2	1×10^{-6}
Case1-5	6×10^{-6}	0.4	1×10^{-6}
Case2	6×10^{-7}	0.4	1×10^{-5}

Case1 において,クリープ定数やクラックの初期密度の影響を考察するために,クリープひずみを図 5 から図 7 にプロットした.図より,密度が増加させることで初期段階よりクリープひずみが大きくなるが,クリープ要素から弾性要素へ応力が再配分されてクリープが停止するため,密度の大小に関わらず,最終的なクリープ量はそれほど変わらないことが分かる.また, $\rho_0 = 1 \times 10^{-6}$, $R = 6 \times 10^{-7}$ に固定してnを変動させた場合,それほど大きな変化がないことが分かる.さらに, $\rho_0 = 1 \times 10^{-6}$, n = 0.4に固定してRを変動させた場合,Rが大きいほど初期の段階のクリープひずみが大きく,傾向としては,密度を増加させた場合と同じである.



図 5 ひずみ曲線 (Case1,密度を変化)



図 6 ひずみ曲線 (Case1, n を変化)

ここで,クリープ要素の割合がクリープの収束値に与える影響を検討するために,全要素に対してクリープ要素が75%の場合(Case2)におけるクリープ ひずみを図8にプロットした.図より,クリープ要素の割合にクリープの収束 値は比例していない.クリープ要素のコンプライアンスはクラックの進展とと もに増大し,それにともなって応力は弾性要素へ再配分されるため,弾性要素 が全体に占める割合も最終的なひずみ量を決める重要な因子となる.



図 7 ひずみ曲線 (Case1, R を変化)



4. まとめ

本解析より(1)解析パラメータがクリープに及ぼす影響は,指数的に影響を与えるクリープ係数 n より,比例的に影響を与えるクリープ係数 R およびクラックの初期密度 ρ_0 の方が大きく,同時に,これらはひずみ速度を支配する(2) 供試体にクリープ要素と非クリープ要素を配置することで,ひずみが収束に向かうような解析結果が得られるが,これ は,クラックの進展によってクリープ要素のコンプライアンスが変化し,それにともなって応力再配分が生じるためで ある(3)最終クリープ量はクリープ要素と非クリープ要素の体積比に依存する,という知見を得た.

参考文献

- 1) 森本博昭,岩本隆裕,栗原哲彦,小柳 洽:若材令コンクリートの圧縮および引張クリープ特性,セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.356-359, 1993
- 2) 熊野知司,西林新蔵,井上正一,吉野 公:コンクリートの空隙構造の変化に基づく引張クリープ予測モデルに関する研究,土 木学会論文集, No.613 / V-42, pp.121-135, 1992
 3) Atokinson, B. K.: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research. Vol.89, No.B6,
- a) Atokinson, D. K.: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research. Vol.89, No.Bo, pp.4077-4114, 1984
 4) Horii, H. and Nemat-Nasser, S.: Overall Moduli of Solids with Microcracks: Load-Induced Anisotropy, J. Mech. Phys.
- Horii, H. and Nemat-Nasser, S.: Overall Moduli of Solids with Microcracks: Load-Induced Anisotropy, J. Mech. Phys. Solids, Vol.31, pp.155-171, 1983