論文 応力腐食割れ型のクラック進展則に基づく引張クリープモデルの提案

吉田 秀典 *1・宇田 圭一 *2・福原 健司 *3

要旨: 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り,特に,メカ ニズムに立脚した予測式が求められている。そこで本研究では,応力腐食割れタイプのク ラック進展則に基づいて,引張応力下にあるコンクリートのクリープモデルを構築した。ま た,構築したモデルを有限要素プログラムに組み込み,クラックの進展にともなって生じ る応力再配分を考慮することで,より現実に近いクリープ挙動が再現可能であることを示 し,さらに,解析パラメータの感度について検討を行った。

キーワード: 引張クリープ,応力腐食割れ,クラック進展則,応力再配分,有限要素解析

1. はじめに

社会基盤整備における資源の有効利用が課題 となっているが、資源効率の向上という観点よ り、構造物の長寿命化を図ることが求められて いる。構造物の長寿命化、つまりその長期的な 使用性・安全性を確保するためには、設計段階に おける十分な安全性・耐久性はもとより、クリー プに代表されるような時間依存的な挙動につい ても検討しておくことが重要となる。こうした ことから、ACI209 委員会¹⁾、CEB-FIP²⁾ およ び阪田³⁾は、膨大な数の計測データを体系的に まとめ、コンクリートのクリープ挙動に関する 予測式を提案している。

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^{4),5),6)}。こうしたこと から,引張クリープに関する研究も行われるよ うになり、例えば、小澤ら⁷⁾は、高強度コンク リートに関する若材齢時のクリープ試験を実施 し、引張/圧縮クリープの特性を検討している。 また丸山ら⁸⁾は、低水セメント比のコンクリー トにおける若材齢時のひび割れ発生条件を定量 的に抽出するために独自の実験方法を提案し、そ れに基づいて実験を行っている。しかしながら、 いずれの研究においても、実験より得られるク リープ特性について現象論的な考察を加えてい るものの、引張クリープの挙動機構そのものを 明らかにするには至っていない。構造物の長寿 命化を図るには、構造物に起こりうる現象を正 確に予測する必要があり、それには、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。

こうした中で,熊野ら⁹⁾は,引張応力がコン 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に着目し,その 挙動を線形破壊力学と熱力学を組み合わせてモ デル化するという,いわゆるメカニズム立脚型

*1 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 助教授 博士(工学)(正会員) *2 香川大学 大学院工学研究科 安全システム建設工学専攻 大学院生

*3 芝田化工設計(元 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 学部学生)

のモデルで、従来の現象論的なものとは大きく 異なる。実験の再現性も良いが、空隙の長径(ク ラックの長さ)と短径(クラックの開口変位)と の関係に関する類推や、微細ひび割れ進展則を 実験結果から逆解析で求めており、こうした類 推/仮定の妥当性につい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

前述の通り、引張クリープと圧縮クリープで は、その挙動機構が異なるということから、引張 クリープに関する研究も実施されてはいるもの の、必ずしもその挙動機構は明らかになってい ないのが現状である。そこで熊野ら⁹⁾は、コン クリートの引張クリープを支配しているメカニ ズムは空隙構造の変化であると考え、持続的に 引張応力を受けるコンクリート供試体について, 細孔直径分布を計測を行った。その結果、細孔 直径がある範囲に存在する空隙については、そ の細孔容積が増大しており、その変化分と引張 クリープひずみとの相関が強いことから、こう した空隙を起点とした微細ひび割れの発生およ び進展がクリープのメカニズムの1つと結論付 けている。そこで本研究でも、こうした実験事 実に基づいて、引張応力下におけるコンクリー トのクリープ現象のモデル化を行った。

クラックの進展をモデル化するにあたって,熊 野ら⁹⁾は熱力学をベースとする応力依存型速度 過程を用いているが,本研究では,応力腐食割れ の考え方に基づいてモデル化を行うこととした。 脆性材料の内部にあるクラック先端に生じる引 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。こうしたクラック進展はサブクリティ カルなクラック進展(subcritical crack growth) 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(stress corrosion)割れと言う¹⁰⁾。応力



図-1 コイン型のクラック 図-2 断面図



図-3 応力拡大係数と進展速度

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¹¹⁾。

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 K_Iは、以下のように表される。

$$K_I = \overline{\sigma} \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

また,クラックの進展条件としては,応力拡 大係数が材料の固有の値である破壊靭性 *K_{IC}* に 達したときにクラックは脆性的に進展し,それ 以下の値では図-**3**に示されるような関係を満 足することが実験的に確認されている。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、

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

で与えられる。ここで, R と 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とが知られている。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 δ (図-2参 照)は,次式で表される¹²⁾。

$$\overline{\delta} = \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \times \overline{\sigma} \tag{3}$$

- 532 -

ここで,*E*および*v*はコンクリートの弾性係数 およびポアソン比である。

さらに, 平均ひずみ *ē*_{ij} は次式で定義される。

$$\overline{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_{V} \epsilon_{ij} dV = \frac{1}{V} \int_{V} \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) dV$$
$$= \frac{1}{V} \int_{S} \frac{1}{2} (u_{i}n_{j} + u_{j}n_{i}) dS \qquad (4)$$

ここで、 $V \geq S$ は供試体の体積と境界面、 u_i は 変位ベクトルの成分、 n_i はSにおける単位法線 ベクトルの成分である。上述したようなクラック が変形することにより生ずる法線方向ひずみ ε_n^c は、式 (3) を式 (4) に代入して、

$$\overline{\varepsilon}_{n}^{c} = \frac{N}{V} \int_{S^{c}} \frac{16(1-\nu^{2})a}{3\pi E} \overline{\sigma} dS$$
$$= \frac{N\pi a^{2}}{V} \frac{16(1-\nu^{2})a}{3\pi E} \overline{\sigma}$$
(5)

と表される。ここで、N は体積V 中に含まれる クラックの個数を表す。一般に、全体ひずみは弾 性ひずみとクリープひずみのような非弾性ひず みとの和となることから、次式が得られる。

$$\overline{\varepsilon}_n = \left(\frac{1}{E} + \frac{N\pi a^2}{V} \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E}\right)\overline{\sigma} \qquad (6)$$

これより,平均ひずみと平均応力の関係が得ら れ,こうした関係を有限要素解析コードに組み 込むことで,クリープに関する有限要素解析が 可能となる。これら一連の式は,与えられた応 カァに対して経過時間とともクラックが進展し, それと同時にその開口変位が増大するため,ク ラックを包含するコンクリートのクラック面と 直交する方向の等価な弾性係数は時間とともに 小さくなることを示唆している。

3. 有限要素解析

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⁹⁾ にて実施している実験を参考に解析を行った。供 試体の大きさは10cm×10cm×40cmの角柱体で、 載荷引張応力を0.8 N/mm²、1.2 N/mm² および 1.6 N/mm² の3ケースについて実験を行ってい る。なお、それぞれのケースにおける載荷引張応 カ/引張強度比は0.29, 0.52, 0.63 となってる。 載荷時材齢を3日とし,ひずみの測定は供試体 の両側面に埋め込んだプラグを介してホイット モア型ひずみ計により実施している。実験に関 する詳細は文献⁹⁾を参照されたい。

本稿では、紙面の都合より、載荷応力($\overline{\sigma}$)を 0.8 N/mm² および 1.6 N/mm² の 2 ケースに関 する解析結果を掲載することとした。両ケースに おける静弾性試験より得られた結果を参考にし て、 $\overline{\sigma}=0.8$ N/mm² および 1.6 N/mm² のケース の弾性係数をそれぞれ 30.0 kN/mm² および 27.0 kN/mm² とした。なお、文献にはポアソン比に 関する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。

前章で示したクリープモデルの解析パラメー タは、上述した弾性定数の他に、クラックの初 期長 ($\ell_0 = 2a_0$)、クリープ定数 (R, n)、そし てクラックの個数 (N) である。ここで、供試体 全体の体積 V に占めるクラックの密度 ρ を定義 すると以下のようになる。

$$\rho = \frac{NV^c}{V} \tag{7}$$

ここで、 V^{c} はクラック1個の体積であり、本研 究では、コイン型のクラックを仮定しているこ とから、 $V^{c} = \pi a^{2} \overline{\delta}$ となる。全体の体積 V とク ラックの個数 N は変化しないので、載荷直後に おけるクラックの密度 (ρ_{0})、半長 (a_{0})および 平均開口変位 ($\overline{\delta}_{0}$)を用いると次式が得られる。

$$\frac{N}{V} = \frac{\rho}{V^c} = \frac{\rho_0}{V_0^c} = \frac{\rho_0}{\pi a_0^2 \bar{\delta}_0}$$
(8)

なお,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0.1~5µm⁹⁾ であることから,本解析では0.1µmを採用した。 また,クリープ定数(*R*, *n*)については,岩石 の結果ではあるが文献¹¹⁾より類推した。その他 のパラメータ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、 $R = 6.0 \times 10^{-7}$, $n = 0.4 \ge 0$,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。しがたって、 全領域にクリープ要素を配置してしまうと、ク ラックの進展にともなう応力再配分を期待する ことができず、領域全体が同等にクリープして 大きなひずみを生じることとなる。

そこで、クラックを含むクリープ要素に対し て、クリープを含まない部分(弾性要素)を配置 し、応力再配分を考慮することとした。引張応力

表-1 解析ケース

	$\overline{\sigma}$	\overline{R}	n	ρ_0
Case1-1	0.8	$6.0 imes 10^{-7}$	0.4	1.0×10^{-5}
Case1-2	0.8	$6.0 imes 10^{-7}$	0.4	1.0×10^{-6}
Case1-3	0.8	6.0×10^{-7}	0.8	1.0×10^{-6}
Case1-4	0.8	$6.0 imes 10^{-7}$	1.2	1.0×10^{-6}
Case2-1	1.6	6.0×10^{-7}	0.4	1.0×10^{-5}
Case2-2	1.6	6.0×10^{-7}	0.4	1.0×10^{-6}
Case2-3	1.6	6.0×10^{-7}	0.8	1.0×10^{-6}
Case2-4	1.6	6.0×10^{-7}	1.2	1.0×10^{-6}
Case2-5	1.6	6.0×10^{-6}	0.4	1.0×10^{-6}
Case3-1	1.6	$6.0 imes 10^{-7}$	0.4	1.0×10^{-5}
Case3-2	1.6	6.0×10^{-7}	0.4	1.0×10^{-6}
Case3-3	1.6	6.0×10^{-7}	0.8	$1.0 imes 10^{-6}$
Case3-4	1.6	6.0×10^{-7}	1.2	1.0×10^{-6}
Case3-5	1.6	6.0×10^{-6}	0.4	1.0×10^{-6}
Case4	1.6	6.0×10^{-7}	0.4	1.0×10^{-5}

が $0.8N/mm^2$ の場合 (Case1)は、全要素に対し てクリープ要素を20%、弾性要素を80%とした。 解析では、一辺 Lの立方体の中央に一辺 0.59Lの立方体のクリープ要素を,その外側にクリー プ要素を包含するように弾性要素を配置した。引 張応力が $1.6 N/mm^2$ の場合は、全要素に対して クリープ要素が20% (Case2)、50% (Case3)お よび75% (Case4)とし、Case1と同様に配置し た。このような場合分けをした上で、さらに、各 ケースにおいてクリープ定数 (R, n)およびク ラック密度 (ρ_0)を変化させて感度解析を実施し た。解析ケースの一覧を表-1に示す。

まず,引張応力が 0.8N/mm² の場合 (Case1) における密度 (ρ_0) およびクリープ定数 n の影 響を考察するために,ひずみを図-**5** と図-**6** にプロットする。図より,密度を増加させること 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 てクリープがほぼ停止するため,密度の大小に 関わらず,30 日以降のクリープ量はそれほど変 わらないことが分かる。また, $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-6}$, $R = 6.0 \times 10^{-7}$ に固定して n を変動させた場合, 今回設定した範囲では,上述した密度を変動さ せた場合に比べ,変化が穏やかである。

次に,引張応力が1.6N/mm²で,全要素に対してクリープ要素が20%の場合(Case2)におけ



る密度 (ρ_0) およびクリープ定数 (R, n) の影 響を考察するために,ひずみを図-7から図-9 にプロットする。図より,他のパラメータを固定 させ密度あるいはnを変動させた場合,ひずみの レベルこそ異なるが,その傾向は Case1 と同じ ことが分かる。また, $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-6}$,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。

さらに、引張応力が1.6N/mm²で、全要素に 対してクリープ要素が50%の場合(Case3)にお ける密度(ρ₀)およびクリープ定数(*R*, *n*)の影 響を考察するために、ひずみを図-10から図-12にプロットする。パラメータに関する感度と しては、Case1あるいはCase2と同じであるが、 載荷応力が同じである Case2 と比較すると、ク



リープ要素数が増加した分だけクリープの収束 値が増加していることが分かる。ここで、クリー プ要素の数にクリープの収束値が比例するのか 否かを確認するために、引張応力が1.6N/mm² で、全要素に対してクリープ要素が75%の場合 (Case4)におけるひずみを図-13にプロットす る。図より、必ずしもクリープ要素の数にクリー プの収束値が比例していないことが分かる。こ れは、式(6)より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体積もひずみ量を決める 重要な因子となるからである。

なお、全要素に対してクリープ要素が 50% の場合の解析と実験結果が近く、引張応力が 1.6N/mm²では、Case3-3 が最も実験結果に近



かった。適当なクリープ要素の割合および解析 パラメータを用いることで実験結果との合致が 見られることから,提案したモデルにも挙動を 説明できる因子が含まれているものと思われる。

4. まとめ

本研究では、応力腐食割れの考え方に基づい て引張クリープの予測式を構築し、それを有限 要素解析コードに組み込むことで、任意の境界 条件に対するクリープ解析を可能にした。一連 の解析より、以下のような知見を得た。

(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定数のnが
1.0より小さいため、比例定数である密度および
クリープ定数 R 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,主としてクラックの 初期密度,載荷応力およびクリープ要素と非ク リープ要素の体積比に依存する。

本研究では、クリープに影響を与える温度、湿 度、および新規亀裂の発生などを考慮していな いため、今後は、他の要因を考慮して、より再 現性の高いモデル構築を目指したい。

参考文献

1) ACI Committe 209 : Prediction of Creep, Shirinkage and Temperature Effects on Concrete Structures, ACiI-SP-76, 1982

- CEB-FIP : Model Code 1990, Comite Euro-International du Benton (Draft), 1990
- 3) 阪田憲次:コンクリートの乾燥収縮およびク リープの予測,コンクリート工学,Vol.31, No.2, pp.5-14, 1993
- 4) 森本博昭, 岩本隆裕, 栗原哲彦, 小柳 治: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
- 5) 吉武 勇,中村秀明,永井泉治,浜田純夫: 若材齢コンクリートの水和反応進行の影響 を考慮した引張クリープ推定式の提案,土木 学会論文集,No.634/V-45, pp.43-53, 1999
- 6) 吉武 勇,浜田純夫,中村秀明,永井泉治: 水和反応を抑制した若材齢コンクリートの 圧縮・引張クリープ比較,土木学会論文集, No.641/V-46, pp.263-268, 2000
- 小澤満津雄,森本博昭,国森亮平,車戸勝巳: 若材齢高強度コンクリートのクリープ特性 に関する基礎的研究,コンクリート工学年 次講演論文集,Vol.22,NO.2, pp.631-636, 2000
- 約、丸山一平,朴 宣圭,野口貴文:疑似完全拘 東実験による若材齢コンクリートの時間依 存的力学特性,コンクリート工学年次論文 集,Vol.24,No.1,pp.357-362,2002
- 9) 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
- 10) 工業技術院資源環境技術総合研究所編:資源 環境技術総合研究所/80年史(CD-ROM), pp.46-54,2001
- Atokinson, B. K.: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research. Vol.89, No.B6, pp.4077-4114, 1984
- 12) 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

- 536 -