

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る，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

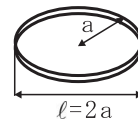


図 - 1 コイン型のクラック

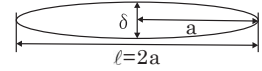


図 - 2 断面図

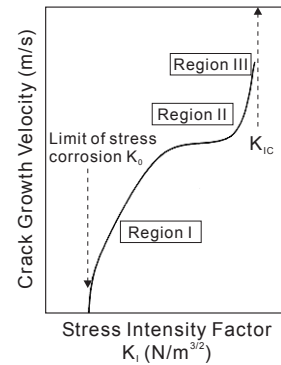


図 - 3 応力拡大係数と進展速度

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。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

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靱性 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、

$$\frac{dl}{dt} = R(K_I)^n \quad (2)$$

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 $\bar{\delta}$ (図 - 2 参照) は、次式で表される¹²⁾。

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

ここで、 E および ν 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 $\bar{\varepsilon}_{ij}$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV = \frac{1}{V} \int_V \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) dV \\ &= \frac{1}{V} \int_S \frac{1}{2}(u_i n_j + u_j n_i) dS\end{aligned}\quad (4)$$

ここで、 V と 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 $\bar{\varepsilon}_n^c$ は、式 (3) を式 (4) に代入して、

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_n^c &= \frac{N}{V} \int_{S^c} \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \bar{\sigma} dS \\ &= \frac{N\pi a^2}{V} \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \bar{\sigma}\end{aligned}\quad (5)$$

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。

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

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、与えられた応力 $\bar{\sigma}$ に対して経過時間とともにクラックが進展し、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

力/引張強度比は 0.29、0.52、0.63 となっている。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 ($\bar{\sigma}$) 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、 $\bar{\sigma}=0.8$ 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 を定義すると以下ようになる。

$$\rho = \frac{NV^c}{V}\quad (7)$$

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、 $V^c = \pi a^2 \bar{\delta}$ 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 ($\bar{\delta}_0$) を用いると次式が得られる。

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

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 ~ 5 μ m⁹⁾ であることから、本解析では 0.1 μ m 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、 $R = 6.0 \times 10^{-7}$ 、 $n = 0.4$ とし、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

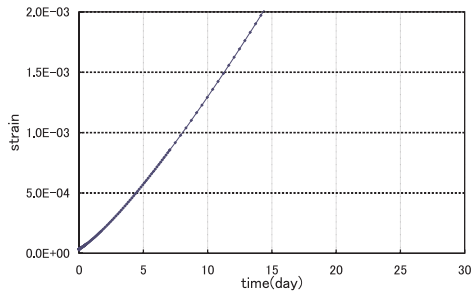


図 - 4 ひずみ曲線 (全体がクリープ要素)

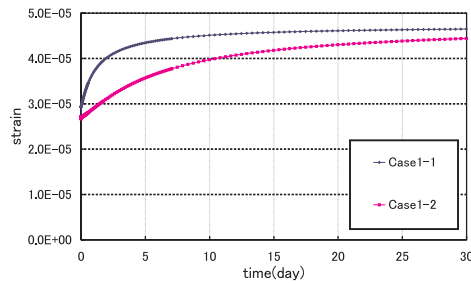


図 - 5 ひずみ曲線 (Case1, 密度を変化)

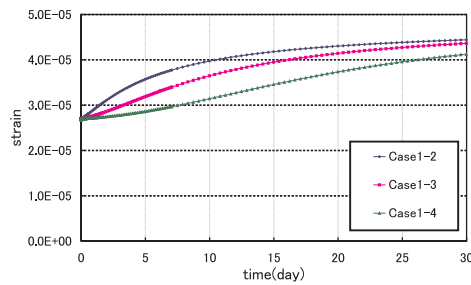


図 - 6 ひずみ曲線 (Case1, n を変化)

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

	$\bar{\sigma}$	R	n	ρ_0
Case1-1	0.8	6.0×10^{-7}	0.4	1.0×10^{-5}
Case1-2	0.8	6.0×10^{-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	6.0×10^{-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	6.0×10^{-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	1.0×10^{-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 1.6N/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/mm^2 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/mm^2 で、全要素に対してクリープ要素が 20% の場合 (Case2) にお

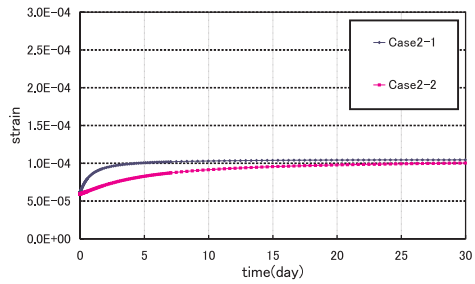


図 - 7 ひずみ曲線 (Case2, 密度を変化)

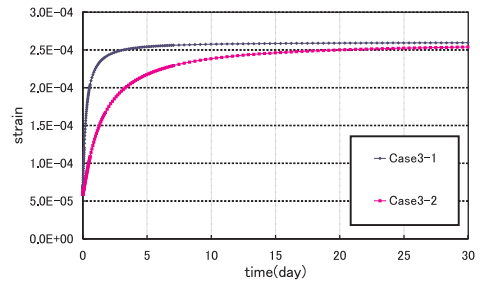


図 - 10 ひずみ曲線 (Case3, 密度を変化)

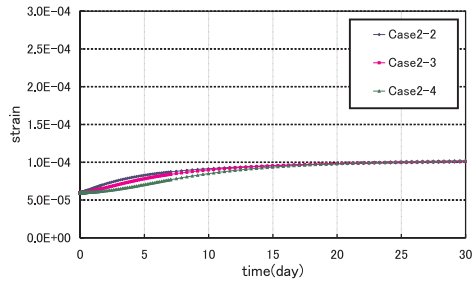


図 - 8 ひずみ曲線 (Case2, n を変化)

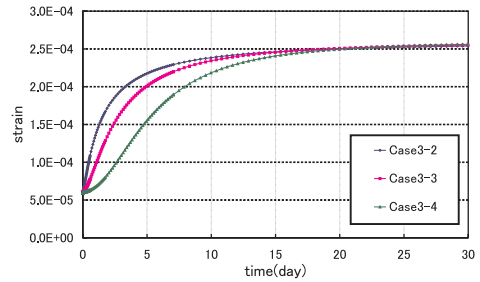


図 - 11 ひずみ曲線 (Case3, n を変化)

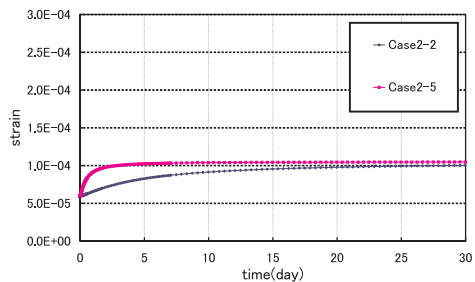


図 - 9 ひずみ曲線 (Case2, R を変化)

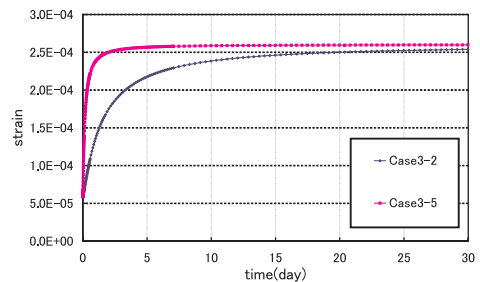


図 - 12 ひずみ曲線 (Case3, R を変化)

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 $1.6\text{N}/\text{mm}^2$ 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 (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 - 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、载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否かを確認するために、引張応力が $1.6\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $1.6\text{N}/\text{mm}^2$ では、Case3-3 が最も実験結果に近

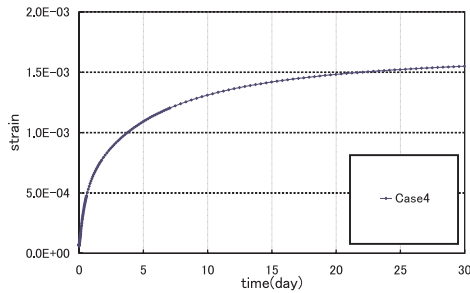


図 - 13 クリープひずみ (Case4)

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、それとともに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, Shrinkage and Temperature Effects on

Concrete Structures, ACiI-SP-76, 1982
 2) 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: 若材令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令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
 7) 小澤満津雄, 森本博昭, 国森亮平, 車戸勝巳: 若材令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
 8) 丸山一平, 朴 宣圭, 野口貴文: 疑似完全拘束実験による若材令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
 11) 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