

FEM 解析を用いた RC 構造物の乾燥収縮ひび割れの予測  
(その 1)解析手法

Prediction of Shrinkage Cracks of RC Structures Using FEM Analysis  
(Part 1) Analysis Method

○ 橋本天平<sup>1</sup>, 加藤舜也<sup>2</sup>, 田嶋和樹<sup>3</sup>, 長沼一洋<sup>3</sup>, 佐藤裕一<sup>4</sup>

\*Tenpei Hashimoto<sup>1</sup>, Shunya Kato<sup>2</sup>, Kazuki Tajima<sup>3</sup>, Kazuhiro Naganuma<sup>3</sup>, Yuichi Sato<sup>4</sup>

Abstract: : The objective of this study is to construct an analysis method to precisely reproduce long term behavior from early age. For that purpose, we predict shrinkage cracks by FEM and confirm applicability of our method. In Part 1, we show material constitutive laws and the analysis method for predicting shrinkage cracks. Also, a method for calculating crack width is described.

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造(以下 RC 造)建物では、長期間に渡って生じる乾燥収縮が懸念されつつある。コンクリートが収縮する際に、内部の鉄筋や隣接する他部材からの拘束を受けることで引張応力が発生し、収縮ひび割れが生じることが考えられる。このような収縮ひび割れが RC 造建物の耐震性能に影響を及ぼすことが考えられる。例えば、Chijiwa ら<sup>[1]</sup>は 6 層の壁式 RC 造建物を対象とした長期的な時間依存シミュレーション解析を実施しており、材齢 50 年後の建物は初期剛性の約 40%まで性能が低下することを報告している。このことから、収縮ひび割れの影響を定量的に把握するためには、建物レベルで検証することが望ましいが、実大規模では膨大な実験コストや時間的制約が問題になる。

そこで、本研究では若材齢から長期的な挙動まで精密に再現するための解析手法を構築することを目的とし、FEM 解析を用いて収縮ひび割れの予測を行い、本解析手法の適用性を確認する。(その 1)では、収縮ひび割れを予測するための解析手法について示す。

2. 解析手法

コンクリートの力学的性質は、材齢に伴い変化するため、材齢依存性を考慮する必要がある。本解析では、圧縮強度を ACI-209R<sup>[2]</sup>式、弾性係数を CEB-FIP Model Code1990<sup>[3]</sup>式を使って材齢依存性を与える。また、引張強度は野口ら<sup>[4]</sup>の提案式を使って算出する。Fig.1 に引張応力-ひび割れ幅関係を示す。破壊エネルギー $G_F$ は土木学会コンクリート標準示方書<sup>[5]</sup>の式を用いて算出した。以下に式を示す。

$$G_F = 10 \cdot d_{max}^{1/3} \cdot f_c^{1/3} \quad (1)$$

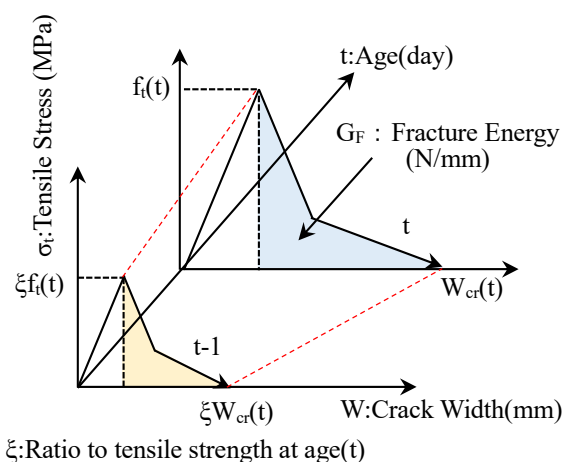


Fig.1 Tension Softening Characteristic

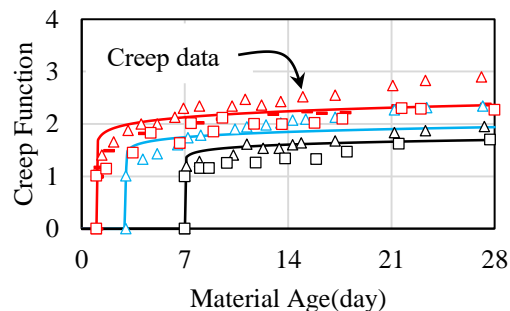


Fig.2 Creep Function(Up to 28 days)

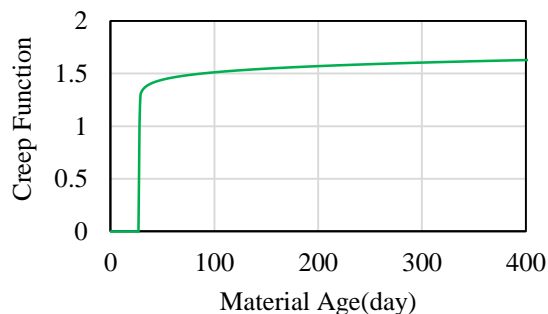


Fig.3 Creep Function(After 28 days)

1 : 日大理工・学部・建築 2 : 日大理工・院 (前)・建築 3 : 日大理工・教員・建築 4 : 京都大学工学・助教・建築

ここで、 $d_{max}$  : 最大骨材寸法[mm],  $f_{c28}$  : 材齢 28 日時圧縮強度[MPa]である。なお、コンクリートの力学的性質が変化することから破壊エネルギーの材齢依存性も考慮する必要が考えられるが、現状では実用的な予測式が提案されていないため、本解析では材齢の進行に伴う引張強度の変化に合わせて、引張軟化域で囲まれる面積を相似形で変化するように仮定している。

Fig.2 および Fig.3 にクリープ関数を示す。本解析では、Bazant と Osman<sup>[6]</sup>が提案する二重べき乗則を用いてクリープ関数 $J(t - \tau)$ の計算を行う。以下に式を示す。

$$J(t - \tau) = 1 + \alpha \tau^{-d} (t - \tau)^p \quad (2)$$

ここで、 $\tau$  : 載荷材齢[日],  $t$  : 材齢[日],  $\alpha$ ,  $d$ ,  $p$  : パラメータである。なお、パラメータは Bazant らが推奨する  $d = 0.33$ ,  $p = 0.125$  を採用し、 $\alpha$  はこれまで過去に実施されたクリープ試験の結果に適合するように決定した。ここでは  $\alpha = 0.9$  としている。

Fig.4 にクリープひずみの計算方法について示す。本解析では、クリープひずみは重ね合わせの原理が成り立つと仮定している。例えば、Step 1 でクリープひずみ  $\varepsilon_1$  が生じ、次のステップでクリープひずみ  $\varepsilon_2$  が生じた場合、前ステップで生じた  $\varepsilon_1$  分が足されるため、Step 2 で生じた総クリープひずみは、 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  となるように、過去のクリープひずみを逐次足し合わせて評価する。なお、弾性ひずみは増分を足し合わせる。

Fig.5 に付着応力-すべり関係を示す。本解析では、Ida ら<sup>[7]</sup>の付着応力-すべり関係を用いる。

### 3. ひび割れ幅計算方法

本解析モデルは分散ひび割れ型とし、ひび割れ幅の算出には筆者らの一部が提案した手法<sup>[8]</sup>を用いる。

### 4. まとめ

(その 1)では若材齢から長期的な挙動を予測するための解析手法およびひび割れ幅計算の方法について示した。(その 2)では本手法を用いて、柱梁付壁部材を対象とした長期的な時間依存解析を実施し、収縮ひび割れの幅、発生位置および発生時期の予測を行う。

### 参考文献

[1] Kurihara,R. and Chijiwa,N. and Maekawa,K. : Thermo-Hygral Analysis on Long-Term Natural Frequency of RC Buildings with Different Dimensions, ACT, Vol.15, pp.381-396, 2017

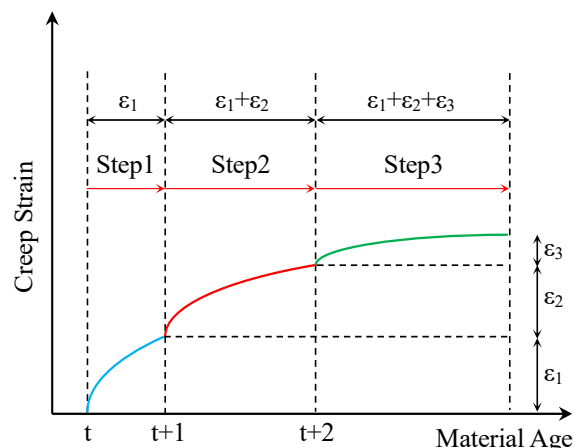


Fig.4 Creep Strain Superposition Method

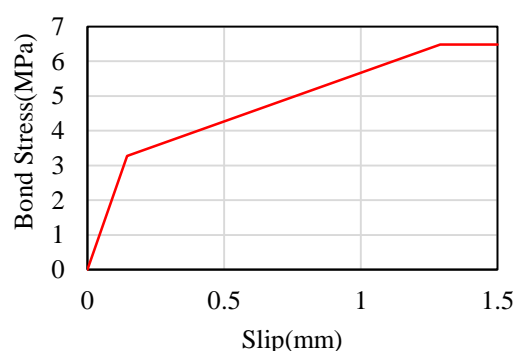


Fig.5 Bond Stress - Slip Relationship

[2] American Concrete Institute : Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92, 1997.

[3] Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990

[4] 野口貴文,友澤史紀 : 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性との関係,AIJ構造系論文集, 第472号, pp.11-16, 1995.6

[5] 土木学会 : コンクリート標準示方書 設計編, 2012

[6] Bazant,Z.P. and Osman.E. : Double power law for basic creep of concrete, Materials and Structures, RILEM, Paris, Vol.9, pp.3-11, 1976

[7] Ida,Y. and Hong,S. and Kimura,S. and Sato,Y. and Kaneko,Y. : Prediction of Drying Shrinkage Cracks of Steel Chip Reinforced Polymer Cement Mortar, ACT, pp.739-752, 2016

[8] Sato.Y. and Naganuma.K. : Discrete-Like Crack Simulation of Reinforced Concrete Incorporated with Analytical Solution of Cyclic Bond Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.140, Issue 3, March 2014