

ひび割れを含む RC 部材の平均引張剛性の経時変化と乾燥収縮の影響

東京大学 学生会員 ○久末賢一

東京大学 正会員 前川宏一

東京大学 正会員 半井健一郎

1. はじめに

コンクリート構造物が高応力持続荷重を受けると、塑性・損傷は急速に進行するため、大変形領域での数値解析精度の一層の向上には、信頼性の高い時間依存変形の予測技術が必要である。Elkashif¹⁾らは高応力並びに圧縮軟化域における塑性・損傷の時間進行モデルを提案しており、曲げが卓越する部材の非線形クリープ挙動を用いて検証を行った。一方、ひび割れ以後の平均引張剛性(tension stiffness)のクリープモデルについては、既往の実験研究をもとに考案された簡易モデルはあるが、外環境の変動の影響は考慮されていない。本研究では環境条件(乾燥・湿潤)と持続応力レベルの両者から、ひび割れ以後の平均引張剛性の時間依存モデルの適用性の検討を行った。

2. 平均引張剛性モデル

ひび割れ以後の平均引張剛性モデルに岡村らの双曲線関数モデルを用い、これに時間依存性と繰り返し効果を導入した。平均引張剛性に表れる非線形性は主としてひび割れに依存することから、引張塑性変形の時間依存性は無視し、平均応力-平均歪関係を $\sigma = K \cdot E_0 \cdot \varepsilon$ と定式化した。ここで、 E_0 :初期弾性係数、 K :破壊パラメータである。破壊パラメータの増分は以下の式で標記される。

$$dK = Fdt + Gd\varepsilon + Hd\varepsilon \quad (1)$$

$Hd\varepsilon$ の項は岡村らの Tension stiffness²⁾から求められる損傷の進行率をあらわし、以下の式で与えられる。

$$H = -(1 + \alpha) \left(\frac{f_t}{E_0} \right) \varepsilon_{cr}^\alpha \cdot \varepsilon_{max}^{-(\alpha+2)}, \text{ when } \varepsilon_{max} < \varepsilon_{cr} \quad (2)$$

$$H = 0, \text{ when } d\varepsilon \leq 0 \quad \text{or} \quad \varepsilon < \varepsilon_{max} \quad (3)$$

ここで、 ε_{cr} : ひび割れ発生ひずみ($= 2f_t E_0$)、 ε_{max} : 過去に経験した最大引張りひずみである。Fdt 項は時間依存による損傷を表した項であり、既往の実験から次式を得た。

$$F = -0.0001 \cdot 10^{20(S-1.0)}, \text{ when } \varepsilon_{max} < \varepsilon_{cr} \quad (4)$$

$$F = -10^{-6} \cdot S^6, \text{ when } \varepsilon_{max} \geq \varepsilon_{cr} \quad (5)$$

$$S \equiv \frac{E_0 K \varepsilon}{f_t} \quad (6)$$

ここで f_t : 引張り強度である。Gd\varepsilon項は疲労による損傷を表

した項であり、繰り返しを受ける引張軟化及び高サイクル引張疲労試験結果をもとに次式で与えることとした。

$$Gd\varepsilon = 10^6 \cdot K_T^{-9} (1 - K_T)^4 \cdot d\tilde{\varepsilon} \quad (7)$$

$$d\tilde{\varepsilon} = 0, \text{ when } d\varepsilon \geq 0 \quad (8)$$

$$d\tilde{\varepsilon} = 9 \cdot \gamma^8 \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{\varepsilon_o} \right), \quad \gamma = -\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{max}}, \text{ when } d\varepsilon < 0 \quad (9)$$

ここで、 ε_{tp} は折り返し点のひずみである。

3. 実験概要

3.1 試験体

実験に用いた試験体を図 1 に示す。試験体は、断面 15×15cm、長さ 297.5cm、鉄筋比 1.26%(D19)である。使用した鉄筋の降伏強度は 380MPa、弾性係数は 202GPa である。表 1 にコンクリートの配合、表 2 に強度試験結果、図 2 に載荷状況の写真を示す。

3.2 実験方法

試験体は図 1 に示す実験用試験体 2 体、自由乾燥収縮測

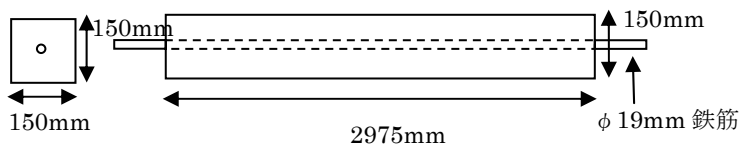


図 1 試験体

表 1 コンクリートの示方配合

単位量 (kg/m ³)					
水	セメント	砂	粗骨材	細骨材	減水剤
176	334	814	433	836	0.836

表 2 強度試験結果

材齢	圧縮強度	引張強度	弾性係数
28 日	51MPa	4.05MPa	33.7GPa



図 2 載荷状況

キーワード：引張クリープ、乾燥収縮、時間依存変形、非線形解析

〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3 番 1 号 工学部 1 号館 4 階 406 号室 TEL 03-5841-6146

定用の標準供試体 2 体を作製した。コンクリート打設後 28 日間湿潤養生を行い、その後乾燥状態(湿度:60±20%, 温度:20±5℃)で持続載荷したもの(以下, D シリーズ)と, 試験体の表面を濡れた布で巻き, その上をラップで多重に覆って飽水状態に保ちながら, 載荷を行ったもの(以下, W シリーズ)の 2 つの条件で実験を行った。D シリーズでは, 28 日間養生後, 最初のひび割れが観察された 5tf(破壊荷重の約 45%)で荷重を固定して持続載荷し, 変形が安定するまで計測を続けた。その後, 一旦除荷し, 6tf(破壊荷重の約 55%), 7tf(破壊荷重の約 64%), 8tf(破壊荷重の約 73%)と荷重を順次, 増加させながら各変形の増分が安定するまで載荷を継続した。W シリーズでは第一ひび割れが発生した 9tf(破壊荷重の約 82%), 10tf(破壊荷重の約 91%)で荷重を固定して, 変位の計測を行った。

4. 実験結果および考察

図4に無載荷標準供試体の自由ひずみの経時変化を, 図5にDシリーズ, Wシリーズそれぞれの変位実測値と解析値との比較を示す。なお, 湿潤状態で無載荷供試体のひずみの変動は, 温度の変動のみに対応している。図5に示すように, Wシリーズの解析結果は長期間の挙動と比較すると, 概ね全体の傾向を追跡しているといえよう。一方, Dシリーズでは40日までの載荷初期では, 比較的精度良く

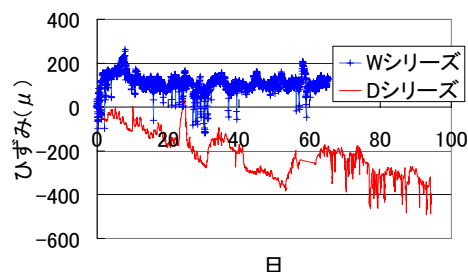


図4 無載荷標準供試体の自由ひずみ量

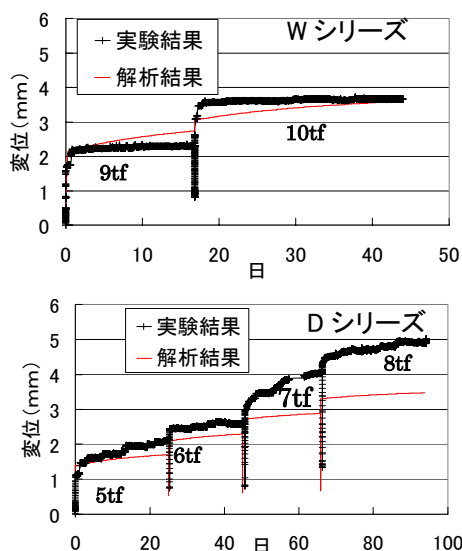


図5 載荷供試体の変位の経時変化

時間に依存する平均歪と引張剛性を追跡できているが, 徐々に実験が解析ひずみを上回った。2 章の解析モデルでは, 外部環境の変動を考慮していないため(気温と湿度が一定条件での実験からモデルが設定されている), 長期間の乾燥と高応力の持続のもとでは, 実験と解析で相違が生じている。しかし, 湿潤養生下で乾燥状態にない W シリーズでは, 載荷初期も後期も変形挙動を比較的精度良く追跡できている。

ここで W シリーズと D シリーズの実験結果を比較すると, W シリーズでは載荷初期の変位が卓越しており, その後変形の進行は観察されなかった。それに対して, D シリーズでは全体挙動が異なり, 載荷荷重を変化させると変形は持続的に進行し, ひび割れの進展もその間に複数観察された。乾燥環境と湿潤環境では, ひび割れ以後の平均引張クリープは大きく異なることが分かった。現在の解析モデルでは, 試験体表面での環境条件の違いを直接, モデルに取り込んだものとなっていない。しかし, 低応力レベル(破壊荷重の約 60%まで)では, 短い乾燥期間ではあるが, 乾燥状態においても挙動を追跡できている。半井らの実験においても乾燥環境下(温度:約 20℃, 湿度:約 60%)では一定の精度で解析は実験結果を追跡できている³⁾。以上から, 一般環境条件下で高応力下のコンクリート構造物の短期的挙動に関しては, ある程度の適用性は確保されているものと判断される。モデルの精度を高めるために, 乾燥収縮の影響を直接取り入れた平均引張剛性のクリープモデルの高度化を進める必要がある。

5. 結論

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 湿潤状態の平均引張剛性クリープに対して, 現行の構造クリープモデルは概ね適用可能である。
- (2) 低応力レベルでは, 乾燥状態であっても引張剛性クリープの挙動は提案モデルでほぼ追跡可能である。
- (3) 平均引張剛性への乾燥収縮の影響は大きく, 高応力レベルである程, その影響は非線形に顕著となる。

参考文献

- 1) El-Khashif, K. F. and Maekawa, K.: Time-Dependent Nonlinearity of Compression Softening in Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(2), pp. 233-248, 2004.
- 2) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.
- 3) 半井健一郎, 山下竜司, 前川宏一: 小型 RC 供試体による高応力曲げクリープ実験を解析, 土木学会全国大会(投稿中), 2005.