

基于有限元的混凝土收缩徐变参数敏感性分析

高道来^{*}, 王琼芬[#]

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月9日; 发布日期: 2024年11月20日

摘要

混凝土是当前应用最广泛的建筑材料, 其徐变特性对结构的耐久性和安全性有显著影响。因此, 混凝土徐变的预测已成为结构设计中不可或缺的环节。本文基于JTG3362-2018中的收缩徐变模型, 对ABAQUS软件进行二次开发, 编写相应的子程序以计算结构的收缩徐变。并探讨不同湿度与混凝土强度对构件徐变效应的影响。结果显示, 这两种条件对混凝土的收缩和徐变都有显著影响。其中, 徐变对混凝土强度变化的敏感性更为突出, 而收缩则对环境湿度变化表现出更强的敏感性。

关键词

ABAQUS用户子程序, 收缩, 徐变, 参数敏感性

Research on Creep Behavior and Parameter Sensitivity of Concrete Based on Finite Element Analysis

Daolai Gao^{*}, Qiongfeng Wang[#]

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 9th, 2024; published: Nov. 20th, 2024

Abstract

Concrete is the most widely used building material today, and its creep characteristics have a

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

significant impact on the durability and safety of structures. As a result, predicting concrete creep has become an essential aspect of structural design. This paper utilizes the shrinkage and creep model from JTG3362-2018 and involves a secondary development of ABAQUS software, where specific subroutines are created to calculate the shrinkage and creep of structures. Furthermore, the study investigates how different humidity levels and concrete strength influence the creep behavior of components. The findings indicate that both factors significantly affect the shrinkage and creep of concrete. Notably, creep is more sensitive to changes in concrete strength, while shrinkage shows a stronger sensitivity to variations in environmental humidity.

Keywords

ABAQUS User Subroutine, Shrinkage, Creep, Parameter Sensitivity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代建筑材料研究中,混凝土的徐变现象引起了广泛关注。徐变是指在长期荷载作用下,混凝土逐渐发生的变形,这一特性直接关系到结构的稳定性和耐久性。随着建筑规模的扩大和使用要求的提高,准确预测混凝土的徐变行为变得尤为重要。因此,深入探讨混凝土的徐变特性及其影响因素,对于优化设计和延长结构使用寿命具有重要意义。因此国内外学者对混凝土构件做了大量的徐变试验与分析。Arangjelovsk T [1]和Ban H [2]等分析了组合梁在不同荷载作用下以及滑移情况下的徐变效应。曹国辉等[3]对素混凝土及钢筋混凝土柱进行了收缩徐变试验,并采用国内外多种收缩徐变预测模型对实测数据进行拟合回归分析,对比分析了不同预测模型之间的差异。张望喜[4]分析了考虑钢筋影响的混凝土收缩徐变。

尽管上述研究已经分析了多种情况下构件的徐变效应,但湿度和泊松比对徐变的影响仍需进一步探讨。为此,笔者使用 ABAQUS 软件进行二次开发,编写计算子程序,以 JTG 3362-2018 收缩徐变模型为基础,计算同一构件下考虑不同湿度和混凝土强度对收缩徐变的总应变影响。

2. 预测模型的选取

对混凝土徐变预测模型的准确描述直接决定了在缺乏试验资料情况下混凝土徐变系数的正确计算。目前影响较大,应用较多的有 CEB-FIP 系列模型、ACI209 系列模型、BP 系列模型以及 GL-2000 模型等。

不同模型考虑的影响因素不尽相同,考虑方式也存在较大差异。然而上述徐变模型中,均考虑了水泥类型、截面尺寸、加载龄期、荷载保持时间、相对湿度等因素,这表明这些因素对混凝土徐变有很大影响。其次,由于各模型考虑因素不同,适用条件也不同,本文参考了 CEB-FIP 系列的 JTG 3362-2018 模型,此模型考虑因素全面且公式简单实用。

3. 基于 ABAQUS 的计算过程

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元软件之一,具有广泛的模拟性能,但现实中的情况非常复杂,许多问题无法直接通过软件内置的功能解决,需要使用其提供的用户自定义子程序,徐变就属于此类问题。因此本文二次开发了 USDFLD 和 UEXPAN 两个子程序用以实现计算过程[5] [6]。

3.1. USDFLD 子程序

USDFLD 子程序的核心作用在于描述与场变量变化相关的复杂材料特性。通过调用 GETVRM 子程序, 它能够从数据库中获取所需的轴向应力和应变数据, 为后续的膨胀应变计算奠定基础。此外, USDFLD 还创建了状态变量, 以供其他子程序进行调用。

3.2. UEXPAN 子程序

这个程序是分析收缩和徐变的核心组件, 主要负责计算状态变量导致的膨胀应变。利用这些膨胀应变, 能够有效模拟徐变和收缩对轴向应变的影响。

基于预测模型, 将计算收缩徐变的方法写入程序中, 其中对于收缩应变的计算公式为:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cs}(t, t_s) &= \varepsilon_{cs0} \beta_s(t - t_s) \\ \varepsilon_{cs0} &= \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \\ \varepsilon_s(f_{cm}) &= [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cm0})] \times 10^{-6} \\ f_{cm} &= 0.8f_{cu,k} + 8 \\ \beta_{RH} &= 1.55 \left[1 - (RH/RH_0)^3 \right] \\ \beta_s(t - t_s) &= \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5}\end{aligned}$$

而对于徐变的计算公式为:

$$\begin{aligned}\Phi(t, t_0) &= \Phi_0 \beta_c(t - t_0) \\ \Phi_0 &= \Phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \\ \Phi_{RH} &= 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{\frac{1}{3}}} \\ \beta(f_{cm}) &= \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \\ \beta(t_0) &= \frac{1}{1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \\ \beta_c(t - t_0) &= \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \\ \beta_H &= 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500\end{aligned}$$

式中: t 为计算时刻混凝土龄期, t_s 为开始收缩时混凝土龄期, t_0 为混凝土的加载龄期, β_{sc} 为与水泥种类有关的系数, h 为构件的理论厚度, $RH_0 = 100\%$, $h_0 = 100 \text{ mm}$, $t_1 = 1 \text{ d}$, $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$, $\Phi(t, t_0)$ 为从 t_0 时刻加载的 t 时刻混凝土的徐变系数, Φ_0 为名义徐变系数。

3.3. 子程序的调用方式

在 ABAQUS 的属性定义中, 为了使子程序加入运行, 需要引入一些新的选项, 主要包括用户自定义的膨胀(Expansion)、状态变量(Depvar)以及自定义场变量(User Defined Field)。在分析的 Job 模块, 需要在 General 选项中将子程序的路径添加进去, 以便 ABAQUS 能够调用子程序[7]。计算程序流程图如图 1 所示。

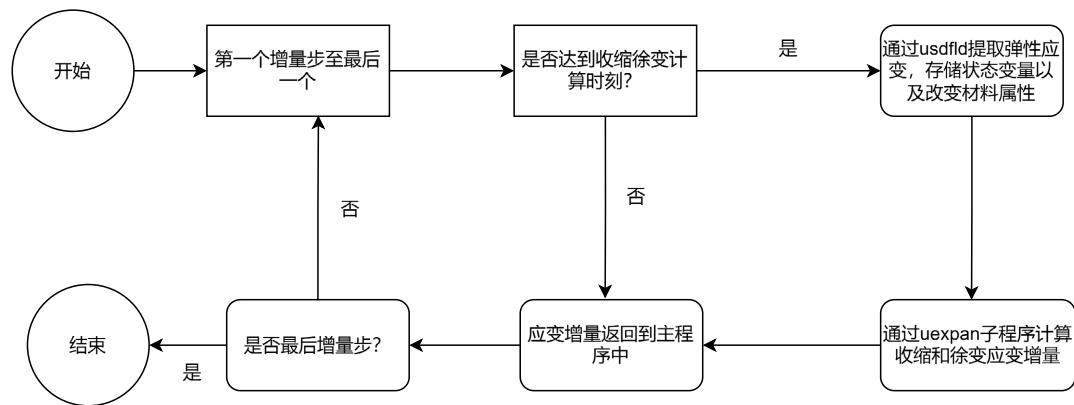


Figure 1. Flow chart of shrink and creep calculation program
图 1. 收缩徐变计算程序流程图

4. 程序准确性的验证

此次验证采用韩春秀老师[8]所做的受压素混凝土柱徐变模拟, 顶端施加 1000 N/mm^2 的面荷载, 混凝土等级为 C30, 弹性模量为 $3.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为 0.2, 年平均湿度 $\text{RH} = 75\%$, 加载龄期 $t_0 = 7$ 天, 考虑徐变和收缩影响, 计算试件的上表面应变随时间变化的情况, 观察天数为 600 天。图 2 为本文的模拟值与文献的应变结果对比图。

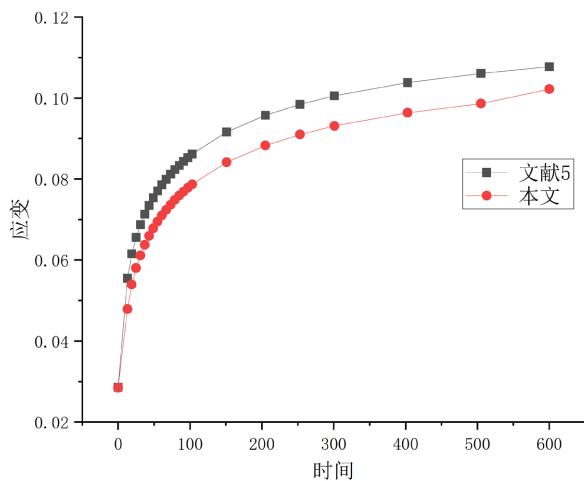


Figure 2. Strain correlation curve on the upper surface
图 2. 上表面应变对比曲线

由图可知, 应变的整体趋势较为接近, 最大应变分别为 1077×10^{-4} 和 1002×10^{-4} , 误差为 6.9%, 在工程容许范围内, 可能与分析软件和徐变预测模型的不同有关。总体看来此子程序能较好地模拟收缩徐变, 证明计算方法是可行的。

5. 钢筋混凝土简支梁收缩徐变效应分析

5.1. 模型参数

采用 ABAQUS 软件建立钢筋混凝土简支梁有限元模型, 并计算不同湿度与混凝土强度下梁的收缩应变与徐变应变, 计算时长取 2000 d。此结构长 \times 宽 \times 高为 $350 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$, 钢筋保护层厚度

为 6.5 cm, 纵筋采用 4C12, 箍筋采用 A6@250。混凝土选用实体单元 C3D8R, 为一阶缩减积分, 此类单元计算快, 不过缺点为可能会存在沙漏, 钢筋选用桁架单元 T3D2, 共计 11232 个单元。钢筋与混凝土之间以 EMBEDDED 将其绑定在一起, 如图 3 所示。

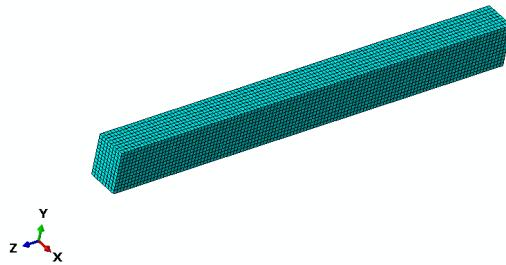


Figure 3. Finite element model of beams
图 3. 简支梁有限元模型

5.2. 混凝土强度和环境湿度对收缩徐变效应的影响

根据图 4 的应变计算结果, 分析表明: 随着混凝土强度从 C30 增加到 C60, 收缩和徐变的程度均有所减小。在低强度混凝土中, 强度变化对徐变的影响更为显著, 而收缩则未表现出同样的趋势。这表明强度的提升对混凝土的徐变行为具有更明显的影响。

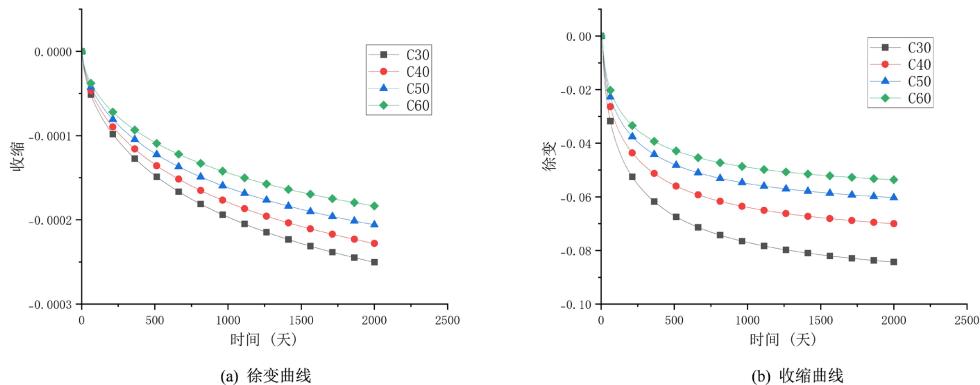


Figure 4. Shrinkage and creep curves of beams with different strengths
图 4. 不同强度的梁收缩徐变变化曲线

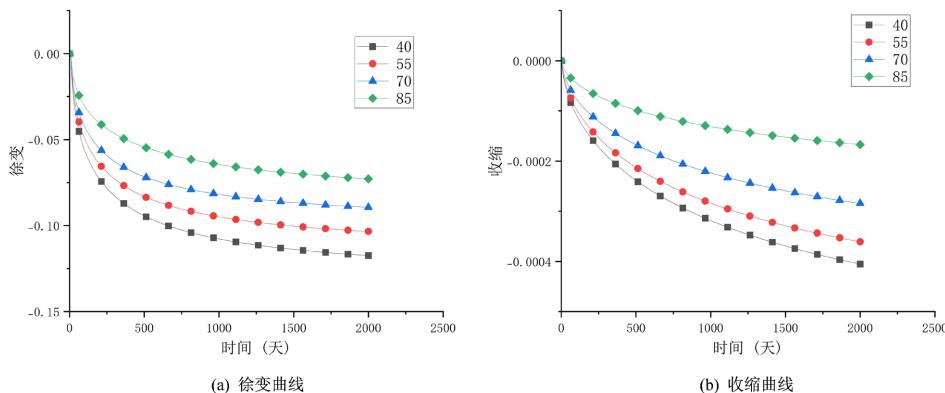


Figure 5. Beam shrinkage and creep curves with different ambient humidity
图 5. 不同湿度的梁收缩徐变变化曲线

而对于湿度分别为 40%, 55%, 70% 和 85% 的计算结果则如图 5 所示, 通过此图, 可知随着湿度的上升, 收缩徐变均呈下降趋势, 其中徐变曲线的差值基本相同, 而收缩则随着湿度增加变化更为显著, 这说明收缩在低湿度条件下更容易发生。

6. 结论

- 1) 以大型通用有限元软件 ABAQUS 为平台, 基于 FORTRAN 语言二次开发了分析程序。算例验证结果表明, 计算结果可靠, 能够广泛适用于混凝土结构的徐变效应分析。
- 2) 根据上述分析可知, 湿度和混凝土强度对混凝土的收缩和徐变均有显著影响。具体而言, 徐变对混凝土强度变化的敏感性更高, 而收缩则对环境湿度变化表现出更强的敏感性。这一发现为混凝土结构的设计与维护提供了重要的指导意义。

参考文献

- [1] Ban, H., Uy, B., Pathirana, S.W., Henderson, I., Mirza, O. and Zhu, X. (2015) Time-Dependent Behaviour of Composite Beams with Blind Bolts under Sustained Loads. *Journal of Constructional Steel Research*, **112**, 196-207. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.004>
- [2] Arangjelovski, T., Markovski, G. and Mark, P. (2014) Influence of Repeated Variable Load on Long-Term Behavior of Concrete Elements. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, **8**, 302-314. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2014.03.005>
- [3] 曹国辉, 胡佳星, 张锴. 配筋对混凝土圆柱体长期徐变的影响[J]. 建筑结构, 2015, 45(8): 54-58.
- [4] 张望喜, 谢宏涛, 王雄, 等. 基于 ABAQUS 考虑钢筋影响的混凝土构件收缩徐变分析[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(11): 64-78.
- [5] 赫飞宇. 深中通道钢壳混凝土沉管组合结构收缩和徐变分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [6] 高权. 考虑徐变恢复的变荷载作用下徐变计算模型及试验分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2022.
- [7] 李鹏. 混凝土徐变 B4 模型有限元实现及应用[J]. 广东建材, 2024, 40(4): 99-102.
- [8] 韩春秀. 钢-混凝土组合梁徐变和收缩效应的理论与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.