

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.016



早龄混凝土的压缩与拉伸徐变及其研究现状

汪建群^{1,2}, 许巧¹, 方志³, 马占飞⁴, 罗许国¹, 祝明桥¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制
制省部共建教育部重点实验室, 长沙 410004; 3. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082
4. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 昆明 650041)

摘要:早龄混凝土的拉伸、压缩徐变规律及其结构徐变应力计算方法是对早期裂缝进行有效预测并控制的关键。既有的徐变研究主要侧重于成熟混凝土,而早龄混凝土徐变相关的科学研究还有待进一步深入。对早龄混凝土的压缩和拉伸徐变研究成果、测试方法及其徐变应力计算方法进行了详细综述。研究表明:目前混凝土早龄期拉伸、压缩徐变试验测试尚无规范可循,相关试验数据较为缺乏;混凝土早龄期徐变预测模型基本未考虑其在低应力水平下的非线性性质;早龄混凝土结构非线性徐变应力理论分析方法亦不尽完善。基于系统试验研究和固化徐变理论建立混凝土非线性徐变理论模型,对早龄混凝土结构采用同时考虑受拉和受压不同应力松弛特性的非线性徐变应力理论计算方法,应可提高早龄结构的有限元仿真精度。

关键词:早龄混凝土;拉伸徐变;压缩徐变;固化理论;徐变应力

中图分类号:U444 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)05-0122-08

Literature review of compressive/tensile creep of early age concrete

Wang Jianqun^{1,2}, Xu Qiao¹, Fang Zhi³, Ma Zhanfei⁴, Luo Xuguo¹, Zhu Mingqiao¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China;
2. Key Laboratory of "Bridge Engineering Safety Control" Built by Hunan Province and Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, P. R. China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 4. Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd. Kunming, 650041, P. R. China)

Abstract: The regularities of early age tensile creep and compressive creep and theories of calculation method for creep stress are key factors for the crack prediction and prevention. Currently, the study on concrete creep focuses on matured concrete, while for early age concrete further study is still needed. The research status, test method and creep stress calculation method of compression and tensile creep for early age concrete are summarized in detail. The results demonstrate that: (1) At present, there is no standard for

收稿日期:2016-03-09

基金项目:国家自然科学基金(51408218, 51378202);长沙理工大学桥梁工程安全控制省部共建教育部重点实验室开放基金(13KB02);湖南省教育厅资助项目(12C0135)

作者简介:汪建群(1982-),男,博士,主要从事大跨桥梁设计基本理论研究,(E-mail) 121095359@qq.com。

Received:2016-03-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51408218, 51378202); Foundation of Key Laboratory of "Bridge Engineering Safety Control", Built by Hunan Province and Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology (No. 13KB02); Education Department Foundation of Hunan Province(No. 12C0135).

Author brief: Wang Jianqun(1982-), PhD, main research interest: the basic design theory of large-span bridge, (E-mail) 121095359@qq.com.

the test of tensile and compressive creep for early age concrete, and the test data is relatively short. (2) The nonlinear property at low stress level for early age concrete has not been considered in the creep prediction model. (3) The nonlinear creep stress analysis method for early age concrete structures is inadequate. Based on systematically experimental research and solidification creep theory, the nonlinear creep model for early age concrete can be established. With early age tensile creep and compressive nonlinear creep stress considered, finite element simulation accuracy of early age structure should be improved.

Keywords: early age concrete; tensile creep; compressive creep; solidification theory; creep stress

混凝土的徐变是指在持续应力作用下,其应变随时间而持续增长的特性^[1]。徐变是混凝土固有的材料特性。一般将混凝土徐变据结构受拉/压不同的受力状态定义为拉伸徐变和压缩徐变;据不同的加载龄期又可分为早龄期徐变和成熟后的徐变^[2]。一般认为养护龄期在 7 d 以内的混凝土为早龄混凝土^[2-4]。

已有研究表明,成熟后的混凝土其压缩、拉伸徐变规律大致相同,但早龄混凝土的压缩、拉伸徐变却有较大差别^[1-2]。既有的混凝土徐变研究主要针对于成熟混凝土的压缩徐变,早龄混凝土的压缩徐变并未得到关注,其规律并不明确^[5]。此外,混凝土在早龄期硬化期间的抗拉性能试验不易实现,故目前国内外相关研究较少。由于混凝土早龄期拉伸、压缩徐变预测模型不足,在对结构进行受力分析时,常以成熟混凝土的压缩徐变代替其早龄期拉伸、压缩徐变。此举将导致结构应力求解精度低,甚至出现不可信的结果^[4-6]。

混凝土材料以其良好的经济性而广泛应用于现代土木工程。但许多混凝土结构在施工养护期间即有不同程度的开裂现象。混凝土早期裂缝对结构的安全性和耐久性造成了严重影响,已成为结构最主要的病害之一^[7]。混凝土早龄期拉伸与压缩徐变规律尚不明确,以及结构徐变应力理论计算方法的不完善,是混凝土结构早期开裂无法进行准确的数值模拟、预测并控制的主要原因^[3-8]。

早龄混凝土徐变特性比成熟混凝土的压缩徐变更为复杂。其主要特点为:1)加载龄期早:大体积混凝土在水化期间由于自身水化放热会导致较大的温度应力,该温致应力甚至会致使结构开裂^[9];另一方面由于其他因素如较大的收缩、支座沉降等不利因素均会导致结构过早受载^[10],因此,混凝土在养护期间即较早地参与结构受力;2)影响因素众多:混凝土配有钢筋,且一般外掺粉煤灰,这些因素均会影响早龄混凝土的徐变^[11]。3)计算理论不完善:一方面早龄混凝土拉伸和压缩徐变发展规律不同,计算时需

同时考虑二者不同的徐变效应^[5];另一方面,早龄混凝土结构徐变应力计算应考虑不可恢复徐变的影响,需采用非线性徐变理论计算方法^[12]。

本文对早龄混凝土的压缩和拉伸徐变研究成果、测试方法及其徐变应力计算方法进行了详细综述。基于既有研究成果,对早龄混凝土的压缩和拉伸徐变测试方法、预测模型以及非线性徐变应力计算提出建议,可为早龄混凝土的徐变研究提供参考。

1 混凝土早龄期压缩徐变及其预测模型

自 Hatt 于 1907 年发现混凝土徐变现象以来,众多学者对这一问题进行了长期研究,形成了诸多徐变理论、徐变预测模型和计算理论,并已反映到相关设计规范中。这些研究成果基本上是针对于成熟混凝土的压缩徐变^[13-14]。研究表明,成熟混凝土的压缩徐变与混凝土强度等级、加载龄期、持荷时间、体表比、养护温度、湿度、配筋和粉煤灰掺量等因素相关^[15-17]。

目前,混凝土早龄期压缩徐变并未引起足够重视,其关注度甚至不及早龄拉伸徐变,相关研究成果极少。早龄混凝土的压缩徐变与成熟混凝土徐变影响参数基本相同,有可能对某些影响参数更敏感^[18]。Li 等^[19]基于 3 d 加载的压缩徐变试验发现混凝土早龄期压缩徐变与其强度发展速率存在一定的相关性,而与自身的设计强度等级关系不大。祁广星^[20]对加载龄期为 1、3、7 d 的密封混凝土早龄徐变进行了试验研究,结果表明其压缩徐变较成熟混凝土明显偏大。祝昌墩等^[21]研究了掺硅粉混凝土在常温常湿条件下 2 d 内加载的压缩徐变,基于试验结果对 MC-90 徐变预测模型进行了修正。谢楠等^[22]对喷射混凝土进行了 2、5、7、15 d 加载龄期的压缩徐变试验研究,基于试验结果修正了 GL2000 徐变预测模型。试验概况详见文献^[22]的相关试验结果如表 1 所示,由表 1 可知,在徐变发展规律方面,配合比 1 和配合比 2 的徐变试件 5 d 加载持荷

30 d 时徐变度为 2 d 加载试件的 57.8%和 55.4%；7 d 加载分别 2 d 加载试件的 46.4%和 47.9%；16 d 加载分别 2 d 加载试件的 30.3%和 28.6%。这说明早龄混凝土的徐变度要远大于成熟混凝土。在徐变预测方面，配合比 1 和配合比 2 的徐变试件 2 d 加载时，其徐变度实测值与 GL2000 模型预测值误差分别为 49.3%和 27.4%，误差不可接受；5 d 加载时误差值分别为 35.6%和 13.7%；16d 加载时误差值分别为 16.2%和 3.3%。这说明既有的徐变预测模型不适用于早龄混凝土的压缩徐变预测。

表 1 文献[22]实测徐变度和 GL2000 预测徐变度
Table 1 The specific creep measured by reference [22]
and predicted by GL2000

加载龄期/ d	徐变度/(10 ⁻⁶ MPa ⁻¹)		
	项目	配合比 1	配合比 2
2	试验值	123.2	109.2
	理论值	82.5	85.7
	误差	49.3%	27.4%
5	试验值	71.2	60.5
	理论值	52.5	53.2
	误差	35.6%	13.7%
7	试验值	57.2	52.3
	理论值	47.1	44.5
	误差	21.4%	17.5%
16	试验值	37.3	31.2
	理论值	32.1	30.2
	误差	16.2%	3.3%

说明：误差=(试验值－理论值)/理论值×100%。

同时，上述两组试验均发现，相对于成熟混凝土压缩徐变而言，混凝土早龄期压缩徐变对加载龄期更敏感。有些参数对早龄期和成熟混凝土压缩徐变的影响甚至呈现相反的规律，这一点可由已有的研究成果可以看出。Alexander^[23]研究了粉煤灰对成熟混凝土徐变的影响，发现 10 d 加载持荷两年后 25%掺量的粉煤灰混凝土徐变度下降约 33%。而惠荣炎等^[24]的研究表明，掺 20%粉煤灰大坝混凝土 2 d 加载，持荷 180 d 的徐变比未掺试件增大 23%。这说明粉煤灰对成熟混凝土的压缩徐变有抑制作用，但增大了早龄期压缩徐变。

目前，成熟混凝土压缩徐变研究已取得了较为丰硕的成果，但混凝土早龄期压缩徐变却有待进一步研究。具体表现在：混凝土强度、粉煤灰掺量和加载龄期对混凝土早龄期压缩徐变影响相关的试验数

据不足；其他参数如构件尺寸效应(体表比)、温度和配筋率的影响规律亦少见相关研究；相关试验数据少，预测模型较为缺乏。

2 混凝土早龄期拉伸徐变及其预测模型

在国外，Illston^[25]和 Domorte^[26]较早地报道了混凝土早龄期拉伸徐变并展开了基础性研究。国外相关研究也只是近 20 年以来才逐渐活跃。Bissonnette 等^[27-28]的试验研究表明，混凝土拉伸徐变随加载龄期增大而逐渐减小，随环境湿度升高而降低。Nielsen^[29]认为应力强度比小于 0.6 时拉伸徐变与应力呈线性关系，应力强度比在 0.6~0.8 之间时，拉伸徐变与应力呈非线性关系。Ya 等^[30]对掺 30%矿渣的混凝土在 23℃、33℃和约束作用下早龄期拉伸徐变进行了试验研究，发现掺入矿渣和养护温度升高均加剧了混凝土早龄期拉伸徐变。在混凝土早龄期拉伸徐变预测模型方面，Forth 指出既有成熟混凝土的压缩徐变模型不能直接应用于早龄混凝土拉伸徐变预测^[31]。Muller 等^[32]基于试验结果在 CEB-FIP 1990 模型修正的基础上提出了高性能混凝土早龄期拉伸徐变预测模型。

在中国，惠荣炎等^[24]于 1986 年较早地报道了混凝土的拉伸徐变，对大坝混凝土进行了早龄期压缩(2 d 和 7 d 加载)和拉伸(7 d 加载)徐变试验，研究表明，压缩徐变随粉煤灰掺量增加而增大，而拉伸徐变随粉煤灰掺量增加而减小，粉煤灰掺量对混凝土早龄期拉伸和压缩徐变影响呈现相反的规律。中国相关研究近 10 年以来才逐渐展开。马新伟^[33]对高性能混凝土拉伸徐变特性进行了试验研究，发现混凝土在早龄期尤其是 1 d 以内其徐变系数要远大于成熟混凝土。汪伦焰等^[34]、李司晨^[35]等利用自制的拉伸徐变仪较系统的研究了水灰比、外掺物(如粉煤灰、矿渣等)掺量等因素对早龄混凝土拉伸徐变的影响。叶德艳^[2]的研究发现，0.5、0.75、1 d 加载的混凝土表现出较高的徐变能力，且具备很强的非线性特征。梁思明等进行了早龄混凝土的 1 d、3 d 和 7 d 试件拉伸徐变测试，基于 B3 徐变模型的修正提出了早龄混凝土拉伸徐变模型^[36]。杨杨等^[37]研究了不同水灰比、加载龄期、加载应力水平和养护温度等参数条件下的早龄期高性能混凝土拉伸徐变特性，并基于流变学原理修正了经典的 Burgers 模型，提出了评价混凝土早龄期拉伸徐变的 ZC 模型。以

下对 Burgers 模型(图 1)和 ZC 模型(图 2)进行阐述。

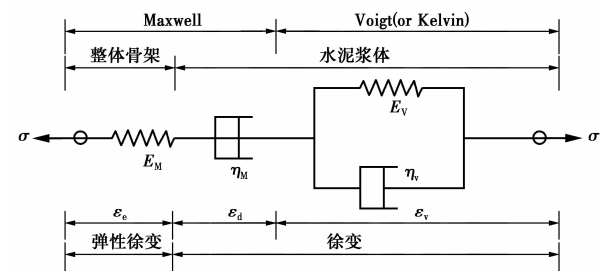


图 1 Burgers 模型
Fig. 1 The Burgers model

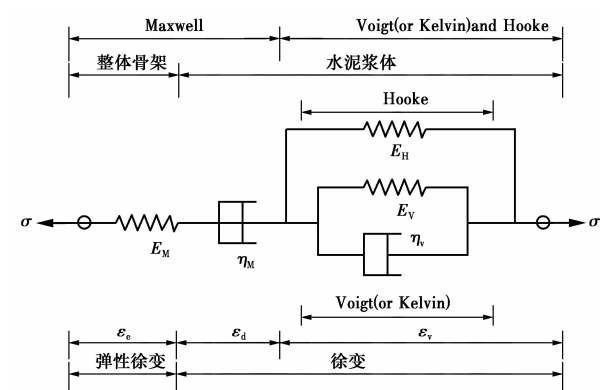


图 2 ZC 模型
Fig. 2 The ZC model

Burgers 模型由 Voigt 体 (Kelvin 体) 与 Maxwell 体串联而成。混凝土的变形是 Maxwell 体和 Voigt 体变形之和。当拉伸荷载 σ 在 t_0 时刻作用于模型时,将产生弹性应变 ϵ_e ; 持荷到 t_1 时刻时,徐变变形在增长,该变形包括 Maxwell 体中的粘性元件产生粘性流动 ϵ_d ; Voigt 体中粘性元件的变形在弹性元件的制约下产生可恢复的延迟弹性变形 ϵ_v 。当荷载 t_1 时刻卸除时, ϵ_e 立即恢复,随后便是徐变恢复。徐变成分中粘性流动 ϵ_d 在卸载后是不可恢复的。模型与混凝土在加载及卸载过程中所产生变形响应十分类似,但 Burgers 模型未被赋予明确的物理化学意义。在 ZC 模型中,引入了一个 Hooke 弹性元件[H],与 Voigt 体并联后,再与 Maxwell 体串联。在混凝土中,水和水泥形成的水泥石用 Voigt 体表示,水泥石中的结晶体部分是弹簧,凝胶体则是粘壶。当荷载持续不变的情况下,Voigt 体开始分担荷载,并随着时间而变形,这时结构内的应力将从 Voigt 体粘壶向弹簧转移,并发生应力重分布,同时发生的还有整个 Kelvin 体向单独的弹簧体[H] (代表集料)上的应力重分布^[37]。杨杨等利用 ZC 模型

模型预测了早龄混凝土的拉伸徐变,但并未用于早龄结构的徐变分析。

目前,早龄混凝土的拉伸徐变已逐渐成为研究热点,相关研究已取得了一定的成果。拉伸徐变主要研究方法为采用自制仪器在室内进行小试件试验研究,所关注的影响参数基本与压缩徐变相同。由于混凝土早龄期拉伸徐变研究起步较晚,尤其是国内在近 10 年才展开相关研究,试验数据和预测模型仍较缺乏,亦少见针对早龄混凝土材料力学特性建立的早龄期拉伸徐变预测模型。

3 混凝土早龄期徐变测试方法

由上述文献综述可知,早龄混凝土和成熟混凝土的徐变影响参数基本相同。因此,可借鉴成熟混凝土的徐变研究方法设计试验对混凝土早龄期拉伸、压缩徐变进行研究。成熟混凝土的徐变试验有标准试验方法,试验手段成熟^[38]。早龄混凝土的徐变试验尚无规范可循。此外,混凝土早龄期强度较低,拉伸及压缩徐变试验均不易进行,试验的关键在于早龄徐变仪。早龄混凝土的徐变试验装置应具备以下功能特点:为消除试件重力对测试结果的影响,徐变试件应卧置,且应采用有效手段减小试件和接触面间的摩阻力;能实现不同的应力水平加载,并具备良好的持荷能力;可自动、连续地采集试验数据。

目前,混凝土徐变试验采用的试验仪器主要有以下 5 种:1)弹簧立拉式徐变装置^[38];2)杠杆立拉式徐变装置^[38];3)杠杆卧拉式徐变装置^[39];4)液压卧拉式徐变装置^[34,37];5)清华大学土木工程系建筑材料研究所研发的 TSTM 装置^[40]。上述各种仪器各有特点,其中,第 1、2 种装置只能用于晚龄期拉伸徐变试验。第 3~5 种装置可用于混凝土早龄徐变试验。

目前,早龄混凝土徐变测试方法较为缺乏,主要体现在:无规范可循、无标准试件尺寸、自制实验仪器昂贵、无法进行批量试验。

4 早龄混凝土结构徐变应力理论分析方法

混凝土结构在其施工期间的早期开裂现象较为普遍,这些裂缝对结构安全性和耐久性产生极为不利的影响。而早龄期结构开裂的有效预测并采取针对性控制措施依赖于对其应力的准确预测。随着计算机的普及和有限元法的广泛应用,复杂结构的徐

变应力求解成为可能。由于混凝土早龄期徐变预测模型的缺乏,以成熟混凝土的压缩徐变代替早龄期徐变进行混凝土结构受力分析,其误差较大^[3-5,41]。Kwak 等^[42]和 Cusson 等^[43]建议采用拉伸徐变模型对结构早龄期非荷载裂缝进行数值模拟分析。苏安双^[44]采用混凝土拉伸徐变模型对高性能混凝土早期收缩应力进行预测,获得了较好的结果。巨玉文等^[40]分别采用混凝土早龄期拉伸和压缩徐变预测模型对地下连续墙养护期间的水化热温致应力进行了对比分析,计算结果表明采用拉伸与压缩徐变预测模型其结果相差较大,在早龄期受拉应力状态下使用压缩徐变规律会得到偏于不安全的计算结果。

除了能反映混凝土材料性能的早龄期徐变预测模型外,适用的徐变应力理论分析方法亦尤为重要。目前,早龄混凝土结构徐变应力分析一般采用增量初应变法,即将混凝土徐变历程分为若干时步,每一计算时步采用上一时步的徐变应变增量计算徐变应力增量。Zienkiewicz 等^[45]提出了等时步条件下徐变增量的递推算法,对增量初应变法进行了简化。朱伯芳院士^[46]又提出了混凝土结构徐变应力分析的隐式解法。秦煜等^[47]采用初应变增量有限元法建立了混凝土箱梁水化热温致应力的弹性徐变隐式解法数值模型,据此得到的仿真分析结果与实测结果吻合较好。大型计算机的应用可方便的实现上述算法。

而徐变应力分析结果决定性因素为徐变计算理论。经典的徐变计算理论主要有老化理论、有效模量法、弹性老化理论、弹性徐变理论及继效流动理论等。上述算法及理论均假定混凝土徐变与应力呈线性关系,并服从叠加原理^[48]。线性徐变理论未考虑混凝土的不可恢复徐变在不同应力水平下的非线性性质^[49]。如大体积混凝土在水化时经历先升温后降温的过程,对徐变应力的求解需要考虑内力的加载和卸载时程,应采用相应的非线性徐变理论计算。由 Bazant 等^[50-51]提出的固化徐变理论可实现对早龄期结构的非线性徐变应力求解。混凝土固化徐变理论将弹性理论、粘弹性理论和流变理论结合起来,模拟混凝土宏观物理力学性质。Bazart 模型有非常清晰的物理意义,认为混凝土的基本徐变由老化粘弹性项徐变 $C^a(t,\tau)$ 、非老化粘弹性项徐变 $C^{na}(t,\tau)$ 、粘性流动项徐变(不可复徐变) $C^f(t,\tau)$ 组成^[48],即

$$C(t,\tau) = C^a(t,\tau) + C^{na}(t,\tau) + C^f(t,\tau) \quad (1)$$

采用混凝土固化徐变理论建立混凝土徐变度函

数,可据此建立混凝土非线性徐变应力求解的理论模型。张涛等^[12]在此方面做了一些研究工作,采用固化徐变理论对混凝土拱坝水化热温致应力场进行非线性徐变应力分析,取得了较好的效果。

综上所述:混凝土早龄期徐变理论计算方法是实现对徐变应力准确求解的关键。目前国内外相关研究已取得了一定的成果。但对于早龄混凝土结构,在低应力水平条件下其徐变即表现出非线性性质。如何在早龄期徐变应力理论分析中,既反映其早龄期在受拉和受压时两种不同的松弛特性,又考虑其非线性特征,是有待深入研究的问题。

5 结 论

1)混凝土早龄期拉伸、压缩徐变测试方法无规范可循,试验数据较为缺乏。一方面早龄混凝土徐变测试仪较少,早龄期拉伸、压缩徐变试验研究较少,已有研究主要探讨了强度等级、加载龄期、应力水平等参数对混凝土早龄期徐变的影响,构件的尺寸效应(体表比)、粉煤灰掺量和配筋率等参数对混凝土早龄期徐变影响规律尚未明确。另一方面,已有研究多数只是单独进行拉伸或压缩徐变试验,混凝土早龄期拉伸、压缩徐变与成熟混凝土压缩徐变在数值上存在多大差别,发展规律有何不同,缺乏定量的报道,亦未引起足够重视。

2)混凝土早龄期拉伸、压缩徐变预测模型不足。目前混凝土早龄期徐变预测模型还少有比较明确的规定。少数几个修正模型基本上源于成熟混凝土压缩徐变模型的修正,未能反映混凝土早龄期物理力学性能的发展和徐变的不可恢复性。因此现有徐变规律并不能准确反映混凝土早龄期徐变性能。

3)早龄混凝土结构徐变应力理论分析方法不完善。早龄混凝土结构在受拉和受压时其应力具有不同松弛特性。此外,早龄混凝土结构的徐变应力理论计算方法应考虑其非线性特征。基于固化徐变理论,建立早龄混凝土结构同时考虑受拉和受压不同应力松弛特性的非线性徐变应力理论计算方法,应可满足该要求。

参考文献:

[1] 周履, 陈永春. 收缩徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 1-10.
ZHOU L, CHEN Y C. Shrinkage and creep[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994: 1-10. (in Chinese)

- [2] 叶德艳. 早龄期高性能混凝土拉伸徐变研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2008: 1-25.
YE D Y. Study on tensile creep of high performance concrete at early ages [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008:1-25. (in Chinese)
- [3] OSTERGAARD L, LANGE D A, ALTOUBAT S A, et al. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12): 1895-1899.
- [4] RANAIVOMANANA N, MULTON S, TURATSIONZE A T. Compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels [J]. Cement & Concrete Research, 2013, 52(10):1-10.
- [5] COSTA I, BARROS J. Tensile creep of a structural epoxy adhesive: Experimental and analytical characterization [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 59:115-124.
- [6] 巨玉文,李克非,韩建国. 混凝土早龄期拉伸徐变的试验与理论研究[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 43-49.
JU Y W, LI K F, HAN J G. Experimental and theoretical research on tensile creep of early age concrete [J]. Engineering mechanics, 2009, 26(9): 43-49. (in Chinese)
- [7] 吕志涛, 潘钻峰. 大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 70-76.
LV Z T, PAN Z F. Issues in design of long-span prestressed concrete box girder bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(1): 70-76. (in Chinese)
- [8] 杨铖, 童乐为, GRONDIN F. 早龄期混凝土徐变性能和损伤发展研究[J]. 结构工程师, 2015, 31(5):153-158.
YANG C, TONG L W, GRONDIN F. Research on creep performance and damage development of early-age concrete [J]. Structural Engineers, 2015, 31(5): 153-158. (in Chinese)
- [9] 王翠娟, 贺拴海, 张岗. 混凝土箱梁层水化热场时程分析与评价模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012(2): 65-69.
WANG C J, HE S H, ZHANG G. Time-dependent analysis and evaluation model of hydration heat temperature fields for concrete box girder layer casting [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012(2): 65-69. (in Chinese)
- [10] 汪建群, 方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥施工期腹板开裂研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(5): 1-7.
WANG J Q, FANG Z. Study on early crack in the web of long-span PC box girder bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2012, 39(5): 1-7. (in Chinese)
- [11] 潘钻峰, 吕志涛, 孟少平. 配筋对高强混凝土收缩徐变影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 11-16.
PAN Z F, LV Z T, MENG S P. Experimental study research on the influence of steel on high-strength concrete shrinkage and creep [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 11-16. (in Chinese)
- [12] 张涛, 黄达海, 王清湘. 沙牌碾压混凝土拱坝温度徐变应力仿真计算[J]. 水利学报, 2000(4): 1-7.
ZHANG T, HUANG D H, WANG Q X. Simulating analysis on temperature creep stress of Shapai RCC Arch Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(4):1-7. (in Chinese)
- [13] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures (209R-92) [S]. America Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1992.
- [14] CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1990 [S]. Comite Euro-international du Beton/Federation International de la Precon- strainte, Paris, 1990.
- [15] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(2): 159-167.
- [16] BAZANT Z P, BAWEJA. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures (Model B3) [R]. Northwestern University, submitted to ACI Comm 209, 1994.
- [17] 汪建群. 大跨预应力混凝土箱梁桥早期开裂与远期下挠控制[D]. 长沙:湖南大学, 2011:45-82.
WANG J Q. Early crack and long-term deflection control for long span prestress concrete box girder bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2011: 45-82. (in Chinese)
- [18] 魏亚, 姚湘杰. 早龄期水泥混凝土拉伸徐变实测与模型[J]. 工程力学, 2015, 32(3):104-109.
WEI Y, YAO X J. Measuring and modeling of tensile creep of early-age concrete [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(3):104-109. (in Chinese)
- [19] LI H, WEE T H, WONG S F. Early-age creep and shrinkage of blended cement concrete [J]. Materials Journal, 2002, 99(1): 3-10.
- [20] 祁广星. 密封混凝土早龄期徐变模型[D]. 北京:北京交通大学, 2014:36-52.
QI G X. The Creep Model in early age of sealed concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 36-

52. (in Chinese)
- [21] 祝昌墩, 陈敏, 杨杨, 等. 高强混凝土的收缩和早期徐变特性[J]. 混凝土与水泥制品, 2005, 4(2): 3-6.
ZHU C D, CHEN M, YANG Y. Shrinkage and early age creep of high-strength concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2005, 4(2): 3-6. (in Chinese)
- [22] 谢楠, 杨成永, 欧阳杰, 等. 喷射混凝土早龄期徐变的试验研究及预测[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 365-370.
XIE N, YANG C Y, OUYANG J. Experimental research and prediction on shotcrete creep at early age [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 365-370. (in Chinese)
- [23] ALEXANDER K M. Range in concrete creep when cement content, curing temperature and fly ash content are varied [J]. Cement and Concrete Research, 1986, 16(2): 173-180.
- [24] 惠荣炎, 黄国兴, 易冰若. 粉煤灰混凝土的拉伸徐变与压缩徐变[J]. 水利水电技术, 1986(3): 1-5.
HUI R Y, HUANG G X, YI B R. Tensile and compress creep of fly ash concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1986 (3): 1-5. (in Chinese)
- [25] LLLSTION J M. The creep of concrete under uniaxial tension [J]. Magazine of Concrete Research, 1965, 51 (17): 77-84.
- [26] DOMORTE P L. Uniaxial tensile creep and failure of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1974, 88 (26): 144-152.
- [27] BISSONNETT B, PIGEON M. Tensile creep at early age of ordinary silica fume and fibre reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (5): 1075-1085.
- [28] BISSONNETTE B, PIGEON M. Tensile creep of concrete; study of its sensitivity to basic parameters [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104 (4): 360-368.
- [29] HAUGGAARD N. Mathematical modeling and experimental analysis of early age concrete [D]. Technical University of Denmark, 1997.
- [30] YA W, WILLI H S. Tensile creep behavior of concrete subject to constant restraint at very early age history [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25 (9): 1277-1284.
- [31] FORTH J P. Predicting the tensile creep of concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2014, 55: 70-80.
- [32] MULLER H S, KUTTNER C H. Creep of high-performance concrete characteristics and code type prediction model [C]// de Larrard F, Lacroix R. Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, 1996: 377-385.
- [33] 马新伟, 钮长仁. 高性能混凝土在约束条件下的受拉徐变特征[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 26-29.
MA W X, NIU C R. Tensile creep of high performance concrete under restrained condition [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(2): 26-29. (in Chinese)
- [34] 汪伦焰, 郭磊, 郭利霞. 混凝土早龄期拉伸徐变影响因素敏感性分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 896-900.
WANG L Y, GUO L, GUO L X. Sensitivity analysis of impact factors of concrete tensile creep at early ages [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 896-900. (in Chinese)
- [35] 李司晨, 张云升, 张国荣. 高性能混凝土的拉伸徐变特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(Sup): 40-44.
LI S C, ZHANG Y S, ZHANG G R. Study on tensile creep characteristics of high performance concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35 (Sup): 40-44. (in Chinese)
- [36] 梁思明, 魏亚. 基于水化程度的早龄期混凝土拉伸徐变模型研究[J]. 工程力学, 2016(1): 171-177.
LLANG S M, WEI Y. Research on tensile creep model based on degree of hydration for early-age concrete [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (1): 171-177. (in Chinese)
- [37] 杨杨, 吴炎平, 朱张丰, 等. 基于等效龄期与结构单元的 HPC 早龄期拉伸徐变评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(II): 43-49.
YANG Y, WU Y P, ZHU Z F. Evaluation of tensile creep of HPC at early ages based on equivalent age and internal structure [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(II): 43-49. (in Chinese)
- [38] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法 GB/T 50082—2009. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Test method for long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T50082-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [39] 刘宏伟, 马龙. 杠杆卧拉式徐变装置测定混凝土早期徐变试验研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2012, 25(3): 11-15.
LIU H W, MA L. Experimental research of concrete early creep by Using the lever device [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2012, 25(3): 11-15. (in Chinese)
- [40] 巨玉文, 李克非, 韩建国. 考虑拉伸与压缩不同徐变特

- 征的混凝土连续墙早龄内应力分析[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 80-87.
- JU Y W, LI K F, HAN J G. Early-age stress analysis of concrete diaphragm wall trough tensile and compressive creep modeling [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (11): 80-87. (in Chinese)
- [41] HILAIRE A, BENBOUDJEMA F, DARQUENNES A, et al. Modeling basic creep in concrete at early-age under compressive and tensile loading [J]. Nuclear Engineering & Design, 2014, 269(4):222-230.
- [42] KWAK H G, HA S J, KIM J K. Non-structural cracking in RC walls part I. finite element formulation [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(4): 749-760.
- [43] CUSSON D, HOOGEVEEN T. An experimental approach for the analysis of early-age behavior of high-performance concrete structures under restrained shrinkage [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(2): 200-209.
- [44] 苏安双. 高性能混凝土早期收缩性能及开裂趋势研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008:25-43.
- SU A S. Study on early-age shrinkage performance and cracking tendency of high performance concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 25-43. (in Chinese)
- [45] ZIENKIEWICZ O C, WATSON M. Some creep effects in stress analysis with particular reference to concrete pressure vessels [J]. Nuclear Engineering and Design, 1966(4): 38-47.
- [46] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 199-205.
- ZHU B F. Temperature stress and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Power Press, 1999: 199-205. (in Chinese)
- [47] 秦煜, 刘来君, 张柳煜, 等. 混凝土箱梁水化热温度徐变应变分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43 (8): 3250-3256.
- QIN Y, LIU L J, ZHANG L Y. Thermal creep strain of hydration heat on concrete box girder[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(8): 3250-3256. (in Chinese)
- [48] 郭磊, 朱岳明, 吉顺文, 等. 混凝土固化徐变理论在拱坝徐变试验成果中的应用分析[J]. 水利学报, 2007, 10 (Sup): 210-213.
- GUO L, ZHU Y M, JI S W. Analysis on solidification theory for concrete creep at the arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 10 (Sup): 210-213. (in Chinese)
- [49] 黄达海, 宋玉普, 赵国藩. 碾压混凝土坝温度徐变应力仿真分析的进展[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 97-100.
- HUANG D H, SONG Y P, ZHAO G F. Advancement of thermal creep stress analysis for RCC dam [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 97-100. (in Chinese)
- [50] BAZANT Z P, SANTOSH PRASANAN. Solidification theory for concrete creep, I: formulation [J]. Journal for Engineering Mechanics, 1989, 115 (8): 1691-1703.
- [51] BAZANT Z P, SANTOSH PRASANAN. Solidification theory for concrete creep II. Verification and application [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115 (8): 1704-1725.

(编辑 胡玲)