

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.10.013

干湿交替环境下氯盐侵蚀混凝土徐变试验研究

陶志仁^{1,2}, 龙煜³, 廖鹏飞^{1,2,4}, 彭建新^{*1,2}

(1. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南天筑六建混凝土有限公司, 湖南 长沙 410000;

4. 湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410022)

摘要: 为准确预测干湿交替氯盐侵蚀环境作用下混凝土结构的徐变行为, 通过开展干湿交替环境下氯盐侵蚀混凝土的徐变试验, 研究了在氯盐侵蚀环境和轴压荷载耦合作用下, 加载龄期、荷载水平对C50混凝土棱柱体试件徐变的影响。研究表明: 7 d龄期加载时, 氯盐环境下 $0.2f_c$, $0.3f_c$ 荷载水平对应的混凝土徐变系数在持荷120 d前与常规环境接近, 持荷120 d后较常规环境大, $0.4f_c$ 荷载水平对应的徐变系数在持荷20 d后大于常规环境; 28 d龄期加载时, 两种不同环境下的混凝土徐变十分接近, 持荷后期氯盐环境下的徐变系数略大于常规环境, 早龄期加载时氯盐侵蚀导致混凝土性能的劣化, 较高轴压荷载水平加速劣化; 荷载水平在 $0.2f_c \sim 0.4f_c$ 范围内时, 常规环境下混凝土的徐变为线性徐变, 氯盐环境下混凝土徐变系数随荷载水平的增大先略减小后增大, 呈现非线性徐变行为, 这与轴压荷载影响氯盐侵入混凝土的速率, 进而影响氯盐侵蚀混凝土导致其性能劣化的进程有关。基于试验数据, 针对氯盐侵蚀环境, 对JTG 3362—2018徐变预测模型提出了参数建议值。模型参数修正后的徐变系数计算值与试验数据吻合良好, 可为预测C50混凝土在干湿交替氯盐侵蚀环境下的徐变行为提供参考。

关键词: 桥梁工程; 徐变; 试验研究; 混凝土结构; 氯盐侵蚀; 轴压荷载

中图分类号: U444

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 10-0112-08

Experimental Study on Chloride Eroded Concrete Creep in Dry-wet Circulation Environment

TAO Zhi-ren^{1,2}, LONG Yu³, LIAO Peng-fei^{1,2,4}, PENG Jian-xin^{*1,2}

(1. Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

3. Hunan Tianzhu Liujian Concrete Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China;

4. Hunan Provincial Expressway Group Limited, Changsha, Hunan 410022, China)

Abstract: To accurately predict the concrete structure creep behavior in dry-wet circulation chloride erosion environment, the creep test was carried out for the concrete in dry-wet circulation chloride erosion environment. The influence of loading stages and loading levels on the creep of C50 concrete prism specimens under the coupling effect of chloride erosion and axial compression load was studied. The result indicates that in the chloride erosion environment, when loading at the 7th day, the creep coefficients with $0.2f_c$ and $0.3f_c$ (f_c is the concrete axial compressive strength) loads are similar to those in the conventional environment within 120 days; but exceeding after 120 days. The creep coefficient with $0.4f_c$ load surpasses the coefficient

收稿日期: 2022-09-05 修改日期: 2024-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078056); 长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金重点项目 (14KB01); 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放基金项目 (BHSKL20-07-GF); 长沙理工大学研究生科研创新项目 (CXCLY2022036)

作者简介: 陶志仁 (1999-), 男, 湖南常德人, 博士研究生. (tzhiren30@163.com)

* 通讯作者: 彭建新 (1978-), 男, 江西安福人, 博士, 教授. (jianxinpeng@csust.edu.cn)

in conventional environment after 20 days. At the 28th day of loading, the concrete creep behaviors in both environments are similar. The chloride erosion environment shows slightly higher creep coefficients in later stages. Chloride erosion accelerates the concrete performance deterioration, particularly at higher levels of axial compression. In conventional environments, with loads between $0.2 f_c$ and $0.4 f_c$, the creep is linear. The concrete creep coefficient in chloride salt environment decreases slightly at first and then increases with the increase of load level, showing the nonlinear creep behavior. This is related to the influence of axial load on the chloride intrusion rate into concrete and on the concrete performance deterioration. Based on the test data, the creep prediction model parameters in the relevant standards are suggested according to the chloride erosion environment. The calculated values of creep coefficient with modified model parameters are in good agreement with the experimental data, providing the reference for predicting creep behavior of C50 concrete in the dry-wet circulation environment.

Key words: bridge engineering; creep; experimental study; concrete structure; chloride salt erosion; axial compression load

0 引言

混凝土徐变是指在持续荷载作用下, 混凝土及其结构的变形随时间不断增加的现象^[1], 是影响评估混凝土结构物的开裂风险和预应力损失的重要因素^[2-3]。国内外曾多次发生由于徐变导致变形过大而影响混凝土结构正常使用的工程案例, 尤其在桥梁结构中。帕劳共和国 1977 年建成的 Koror-Babeldaob 预应力混凝土箱梁桥, 在运营 18 年后主跨挠度达到 1.61 m, 为下挠允许值的 5.3 倍, 在 1996 年实施张拉预应力等加固措施的 3 个月后, 桥梁突然垮塌, 造成 2 死 4 伤^[4]; 2000 年建成通车的广州丫髻沙大桥, 主跨达到 360 m, 为当时世界上主跨最长的钢管混凝土拱桥, 但在通车 1 a 后主拱肋即由于徐变产生了 120 mm 的竖向下挠^[5], 严重影响了桥梁的正常使用。由此可见, 准确地预测混凝土的徐变发展规律具有非常高的工程应用价值。

混凝土徐变受到的影响因素众多, 不仅受到原材料、配合比等内部因素的影响, 还受到复杂多变的外部环境影响。而不同的混凝土结构一般所处的环境各不相同, 氯盐侵蚀是混凝土结构所面临的最为恶劣的外部环境之一^[6-8]。干湿交替导致混凝土孔隙中湿度发生变化, 孔隙液未饱和, 处于非饱和状态, 这更加剧了氯盐侵蚀行为^[9-10]。针对外部腐蚀介质作用下的混凝土徐变, 有学者已进行了相应研究。Piasta 等^[11]对长期浸泡在硫酸钠溶液中混凝土轴心受压构件的长期变形进行了试验研究, 考虑应力级别、硫酸盐溶液浓度与构件尺寸的变化对混凝土徐变的影响, 试验结果表明, 相同龄期下, 混凝土徐变随应力级别增大而增加, 随腐蚀溶液浓度提

高而增大, 随构件有效尺寸的增大而减小; Torrenti 等^[12]开展了在 NH_4NO_3 溶液中腐蚀的混凝土柱徐变试验研究, 提出了腐蚀和荷载耦合作用的损伤模型; 曹健等^[13]将混凝土损伤力学理论研究与 B3 徐变模型相结合, 通过非线性回归建立了硫酸盐侵蚀下混凝土轴心受压构件的修正 B3 徐变预测模型; 曹国辉^[14-15]等先后开展了氯盐环境与荷载耦合作用下钢-混凝土组合梁长期变形研究和钢筋混凝土柱徐变试验研究, 分别提出了栓钉锈蚀条件下组合梁的长期挠度计算公式和修正的 ACI209R 徐变模型, 通过与试验数据进行对比, 组合梁长期挠度理论计算值和修正的徐变预测模型理论计算值均与试验实测值吻合良好; 何世钦等^[16]开展不同荷载水平与氯盐腐蚀环境耦合作用下钢筋混凝土梁的长期变形试验, 研究了腐蚀环境下梁长期挠度增长的规律, 基于试验数据, 对 ACI209R 预测模型进行了调整, 调整后的模型计算结果在钢筋锈蚀较小时与试验结果吻合较好; 熊良宵等^[17]开展了混凝土在压应力和海水侵蚀共同作用下的徐变特性试验, 研究了应力水平、侵蚀溶液的类型和质量分数对海水侵蚀下混凝土徐变特性的影响, 结果表明: 当侵蚀时间及压应力大小相同时, 浸泡在 Na_2SO_4 溶液中所产生的膨胀应变最大, 浸泡在水中的次之, 浸泡在 NaCl 溶液中的最小。以上研究成果均表明外部环境中的腐蚀介质对混凝土徐变以及结构长期性能劣化有着重要影响。

上述文献虽然对荷载与外部腐蚀介质耦合作用下混凝土的徐变行为进行了研究, 但针对轴压荷载与氯盐侵蚀耦合作用下混凝土徐变行为的研究还较少见, 即使有个别学者进行了相关研究, 也仅研究了轴压荷载与长期浸泡氯盐侵蚀耦合作用下饱和混

混凝土的徐变行为,对轴压荷载与干湿交替氯盐侵蚀耦合作用下非饱和混凝土徐变行为的研究鲜有报道。而在沿海工程中,混凝土结构服役期间同时受到压荷载和干湿交替氯盐侵蚀耦合作用的情况较为常见,且此时混凝土结构性能劣化严重。为此,本研究开展干湿交替环境下氯盐侵蚀混凝土棱柱体试件的徐变试验,研究氯盐环境与轴压荷载耦合作用下加载龄期和荷载水平对非饱和混凝土徐变的影响,为准确预测在干湿交替氯盐侵蚀环境与轴压荷载耦合作用下混凝土结构的徐变行为提供参考。

1 试验概括

1.1 混凝土原材料及配合比

试验试件混凝土等级为C50,配合比见表1。主要材料为P.O.42.5普通硅酸盐水泥,细骨料为普通河砂,粗骨料为碎石,水为自来水。

表1 混凝土配合比(单位:kg/m³)

Tab.1 Mix proportion of concrete (unit: kg/m³)

水泥	水	砂	石	减水剂
509	144	736	1 011	12.2

1.2 试件设计

徐变试验设计的混凝土棱柱体试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,所有试件同时浇注,试件成型后用塑料薄膜覆盖,放在温度为(20±5)℃,相对湿度大于50%的室内中静置1~2 d,拆模,然后放入标准养护室养护。徐变试验在干湿交替氯盐侵蚀环境和常规环境下进行,常规和氯盐环境下的混凝土徐变试验各需3组棱柱体混凝土试件,每组均包含2个试件,考虑3种应力水平(0.2f_c, 0.3f_c和0.4f_c)和2种加载龄期(7 d和28 d),具体试验方案见表2。在7 d和28 d龄期徐变加载前按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)的要求进行混凝土抗压强度试验,测得混凝土棱柱体轴心抗压强度f_c,以确定徐变试验需加荷载的大小。徐变试验同期还制作了和徐变试件相同的对比收缩试件。徐变加载时,对试件进行几何对中,保证试件对中对是关系到试验成败的关键,加载过程按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082—2009)要求进行。上述混凝土徐变试验在平均温度为20℃和相对湿度为60%的室内环境下进行,徐变试验荷载持续时间为190 d,考虑氯盐环境影响时的干湿交替机制为1:1,循环周期为4 d。

徐变加载仪器采用弹簧式压缩徐变仪,在试件

两侧对称安装千分表,测量标距为150 mm,用于测量变形。用玻璃胶将定制好的塑料槽粘在需侵蚀试件未安装千分表的两侧,湿周期时将浸有5%浓度氯化钠溶液的海绵放入槽中,干周期时取出海绵,从而达到对试件干湿交替侵蚀的效果。试验过程中通过压力传感器来观察荷载的变化,当荷载变化大于2%时予以调整,以保证试验全过程中荷载维持稳定不变。徐变试验装置示意图见图1。

表2 徐变试验方案

Tab.2 Creep test scheme

试验环境	数量/个	应力水平	加载龄期/d
常规	1×2	0.2f _c	7
常规	1×2	0.3f _c	7
常规	2×2	0.4f _c	7, 28
氯盐	1×2	0.2f _c	7
氯盐	1×2	0.3f _c	7
氯盐	2×2	0.4f _c	7, 28

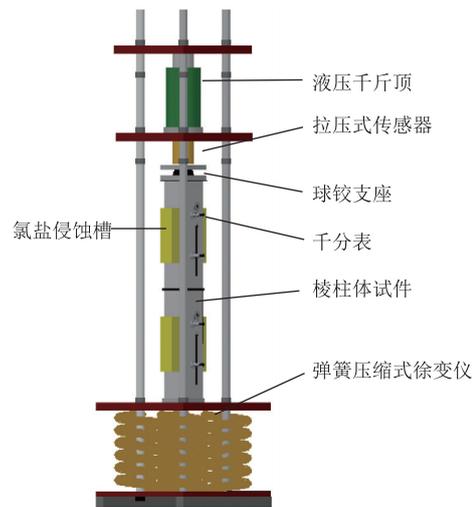


图1 徐变试验装置

Fig.1 Creep test device

2 试验结果及分析

2.1 轴压荷载水平对徐变的影响

针对在干湿交替氯盐侵蚀环境下轴压荷载水平对C50混凝土徐变的影响,分别在氯盐和常规环境下设置了0.2f_c, 0.3f_c和0.4f_c这3个荷载大小工况的徐变试验,徐变加载龄期均为7 d,试验结果如图2、图3所示。

从图2加载龄期为7 d的混凝土徐变应变图可以看出,混凝土在氯盐环境下的徐变随时间发展的规律与常规环境总体上相似,均为随持荷龄期的增长

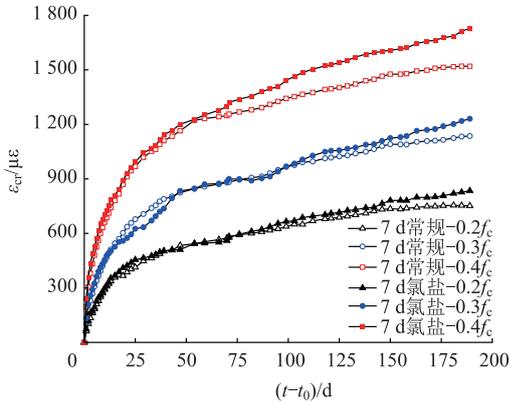


图 2 混凝土徐变应变

Fig. 2 Creep strain of concrete

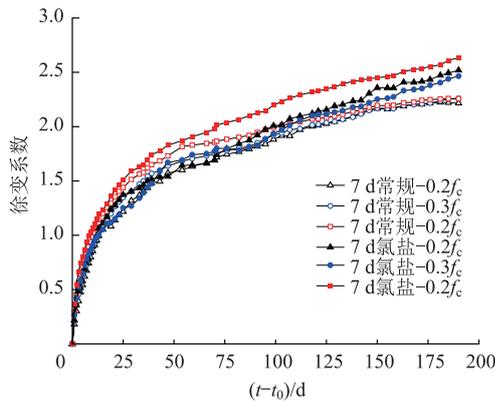


图 3 混凝土徐变系数

Fig. 3 Creep coefficient of concrete

而增大, 早期徐变发展较快, 后期逐渐趋于平缓。这是因为随着龄期的增长, 水泥水化反应进一步进行, 混凝土强度增大, 水灰比降低, 自由水减少, 从而混凝土徐变发展的趋势减弱, 徐变增长速率逐渐变缓。图 2 及图 3 中, 两种不同试验环境下的徐变曲线在试验早期十分接近, 但随着持荷时间的增长, 在试验后期氯盐环境下的徐变曲线要明显高于常规环境。这是因为在试验开始阶段, 氯盐是由混凝土表面逐渐向内部渗透的, 氯盐对混凝土的侵蚀和对其性能的劣化需要经历一段时间, 因此氯盐环境下的混凝土徐变随时间发展的规律相较于常规环境的不同需随着试验的进行才能逐渐显现出来。

图 2 中, 在不同轴压荷载水平下, 混凝土的徐变随荷载的增大而增大, 但在两种不同试验环境下, 徐变随荷载增大而变化的规律不同。从图 3 可以看出, 在常规环境下, 对应于 $0.2f_c$, $0.3f_c$ 和 $0.4f_c$ 这 3 个不同荷载水平的混凝土的徐变系数十分接近, 这表明当轴压荷载在 $0.2f_c \sim 0.4f_c$ 范围内时, 常规环境下的徐变呈现线性徐变行为。图 3 中, 氯盐环境下

$0.2f_c$, $0.3f_c$ 荷载水平对应的徐变系数在持荷 120 d 前与常规环境接近, 120 d 后均较常规环境大, 持荷 190 d 时, $0.2f_c$, $0.3f_c$ 对应的徐变系数分别大于 12.25% 和 9.84%; 而氯盐环境下 $0.4f_c$ 荷载水平对应的徐变系数在持荷 20 d 后就要大于常规环境, 持荷 190 d 时, 较常规环境大 17.37%。这说明氯盐侵蚀导致了混凝土的劣化, 而较高轴压荷载水平则加速了劣化。在氯盐环境下, 对应于 $0.2f_c$, $0.3f_c$ 和 $0.4f_c$ 这 3 个不同荷载水平的徐变系数不相同, 持荷 190 d 时, 徐变系数随荷载的增大是先略减小后增大, 因此在氯盐环境下, 当荷载水平在 $0.2f_c \sim 0.4f_c$ 范围内时, 混凝土的徐变行为为非线性徐变。

氯盐环境下混凝土徐变受到轴压荷载与氯盐侵蚀耦合作用的影响, 氯盐侵蚀导致混凝土性能劣化, 而轴压荷载大小影响氯盐侵蚀混凝土导致其性能劣化的进程, 从而造成不同轴压荷载大小下, 氯盐侵蚀导致混凝土性能劣化的严重程度不同, 因此呈现非线性徐变行为。从徐变系数的大小可以看出, 氯盐侵蚀导致混凝土性能劣化的严重程度为 $0.4f_c > 0.3f_c > 0.2f_c$ 。这是因为在轴压荷载作用下, 当压应力超过某个临界值时, 随着荷载的增大, 混凝土内部的微裂缝发展扩张, 孔隙之间连通增多, 孔隙率增大, 为氯离子的侵入提供了更多的路径, 加速了氯盐侵蚀混凝土, 导致其性能劣化的进程, 因此试验中 $0.4f_c$ 对应的徐变系数最大; 当压应力低于临界值时, 随着轴压荷载的增大, 混凝土中的部分微裂缝、空隙间的连通路程及毛细孔有可能部分闭合, 这就降低了混凝土的孔隙率及空隙之间的连通性, 阻碍了氯离子的侵入, 减缓了由于氯盐侵蚀混凝土导致其性能劣化的进程, 所以 $0.3f_c$ 对应的徐变系数要略小于 $0.2f_c$ 。其他学者研究也证明了压应力作用下氯离子在混凝土中运输的变化存在应力临界值, 当应力小于临界值时, 随着应力增大, 氯离子侵入速率减缓; 但应力高于临界值时, 随应力增大, 氯离子侵入速率增大^[18-19]。

2.2 加载龄期对徐变的影响

针对在干湿交替氯盐侵蚀环境下不同加载龄期对 C50 混凝土徐变的影响, 本研究徐变试验共在常规及氯盐环境下设置了 7 d 和 28 d 两个不同的加载龄期工况, 轴压荷载水平均为 $0.4f_c$, 试验结果如图 4 所示。

从图 4 可知, 在持荷 190 d 时, 氯盐环境和常规环境下 28 d 龄期加载的混凝土徐变系数较 7 d 分别减小 25.06% 和 31.91%, 在两种不同试验环境下,

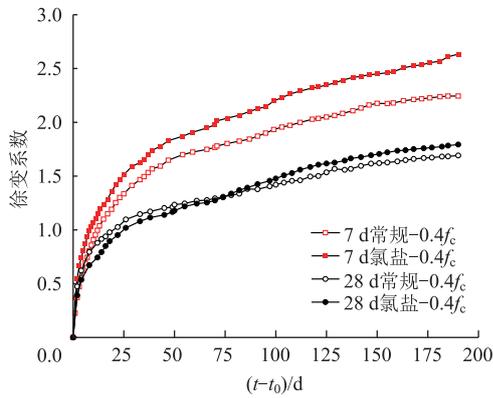


图4 不同加载龄期混凝土徐变系数

Fig. 4 Creep coefficient of concrete at different loading stages

混凝土在28 d龄期加载的徐变系数都要远小于7 d龄期加载。这是因为加载龄期越晚，水泥水化反应进行得越充分，混凝土强度越高，孔隙率越低，导致混凝土徐变变小。图4中，氯盐环境下7 d龄期加载的混凝土徐变系数从持荷开始时就比常规环境大，持荷190 d时，氯盐环境下的徐变系数比常规环境高出17.37%；而氯盐环境下28 d龄期加载的混凝土徐变系数在持荷80 d之后才比常规环境大，持荷190 d时，氯盐环境下的徐变系数比常规环境高出5.99%，略大于常规环境。这是因为在28 d龄期加载时，水泥水化反应进行得比较充分，混凝土中的孔隙率较7 d龄期的要低很多，导致氯盐对混凝土侵蚀效果不明显，在试验所经历的时间范围内，混凝土的性能没有因为氯盐侵蚀而发生较严重的劣化。

3 试验结果与常用混凝土徐变模型对比

3.1 混凝土徐变常用预测模型

徐变模型是计算混凝土结构长期变形、预应力损失等的基础，混凝土结构徐变效应分析的有效性关键在于徐变预测模型的合理选取。目前常用的徐变模型有：JTG 3362—2018模型、ACI 209R-2008、GL2000模型、fib-MC 2010等^[20-22]。这些徐变模型基本都是在标准实验室环境下得到的，而工程实践中，混凝土结构服役的环境非常复杂，需要考虑的环境影响因素众多。上述4种徐变预测模型所考虑的主要因素如表3所示。

由表3可以看出，虽然上述模型对混凝土的自身因素和外部因素的影响都有较为全面的考虑，但很少考虑外部腐蚀介质对混凝土徐变的影响，更没有考虑干湿交替氯盐侵蚀环境对混凝土徐变的影响。因此本研究将JTG 3362—2018，ACI 209R—2008，

表3 4种徐变预测模型考虑的主要因素

Tab. 3 Main factors considered in 4 creep prediction models

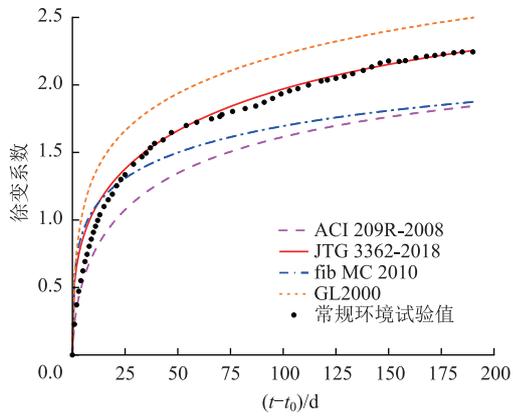
考虑因素	模型			
	JTG 3362—2018	ACI 209R—2008	GL2000	fib-MC 2010
细骨料/粗骨料		✓		
空气含量		✓		
水泥含量				
水泥品种	✓		✓	✓
内部因素		✓		
混凝土集度		✓		
骨料/水泥质量				
坍落度		✓		
水灰比				
构件形状、尺寸	✓	✓	✓	✓
外部因素				
加载龄期	✓	✓	✓	✓
干燥龄期		✓	✓	
加载时强度				
养护条件		✓		
28 d强度	✓	✓	✓	✓
弹性模量	✓	✓	✓	✓
环境相对湿度	✓	✓	✓	✓
环境温度			✓	

GL2000，fib-MC 2010模型计算所得徐变系数与试验值进行对比，选取其中最接近于试验值的模型，对其模型参数提出基于试验数据的参数建议值，以此来预测干湿交替氯盐侵蚀环境下C50混凝土的徐变行为。

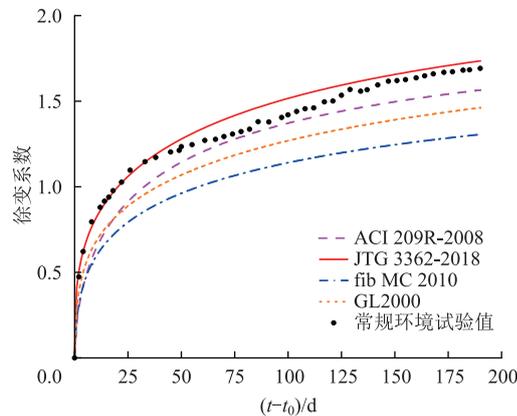
3.2 试验值与模型计算值对比

徐变系数是混凝土徐变变形与加载时瞬时弹性变形的比值，将JTG 3362—2018，ACI 209R—2008，GL2000，fib-MC 2010模型计算所得到的徐变系数与常规环境下混凝土的徐变系数试验值进行对比。由于上述模型均未考虑干湿交替氯盐侵蚀环境对混凝土徐变的影响，所以以常规环境下的徐变试验值为基准，分析4个模型对本试验中试验数据的适用性。

图5(a)为7 d龄期加载时常规环境试验值与模型预测值对比，可以看出，在7 d龄期加载时，GL2000模型的徐变系数计算值高于试验值，ACI 209R—2008和fib-MC 2010模型徐变系数计算值低于试验值，JTG 3362—2018模型计算得到徐变系数与常规环境试验值最为接近；图5(b)为28 d龄期加载时常规环境试验值与模型预测值对比，由图5(b)可知，在28 d龄期加载时，GL2000和fib-MC 2010模型的徐变系数计算值均远低于试验值，ACI 209R—



(a) 7 d 龄期加载



(b) 28 d 龄期加载

图 5 常规环境试验值与模型预测值对比

Fig. 5 Conventional environmental test values v. s. model prediction values

2008 模型徐变系数计算值略低于试验值, 而 JTG 3362—2018 模型的徐变系数计算值与试验值较接近。

综上所述, JTG 3362—2018 模型比其他 3 个模型能更准确地预测本试验中常规环境下混凝土的徐变行为, 因此本研究选取 JTG 3362—2018 徐变预测模型, 在考虑干湿交替氯盐侵蚀环境影响的情况下, 对该模型参数提出参数建议值。

3.3 基于 JTG 3362—2018 模型参数建议值

由图 4 可知, 在 28 d 龄期加载时, 两种不同环境下混凝土的徐变比较接近, 现有的模型能够较准确预测在试验持荷 190 d 时间内其徐变的发展趋势, 因此本研究仅对氯盐环境下 7 d 龄期加载的混凝土徐变提出模型参数建议值。JTG 3362—2018 模型徐变系数计算表达式如下:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0), \quad (1)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0), \quad (2)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{\frac{1}{3}}}, \quad (3)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3}, \quad (4)$$

式中, ϕ_0 为名义徐变系数; f_{cm} 为混凝土 28 d 龄期圆柱体抗压强度; RH 为环境年平均相对湿度; $RH_0 = 100\%$; h 为构件理论厚度; $h_0 = 100 \text{ mm}$; t 为计算考虑时刻的混凝土龄期; t_0 为收缩开始时的混凝土龄期; β_H 为年平均相对湿度相关的系数; ϕ_{RH} 和 β_c 分别是考虑环境相对湿度和混凝土在加载后徐变随时间发展的系数。

因为本试验是在干湿交替环境下进行的, 该环境对混凝土表面湿度有影响, 而氯盐侵蚀和轴压荷载耦合作用导致混凝土性能加速劣化, 改变了混凝土徐变随时间发展的趋势。因此本研究建议对系数 ϕ_{RH} 和 β_c 中的参数进行调整来考虑干湿交替氯盐侵蚀环境的影响, 假设:

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^a}, \quad (5)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^b. \quad (6)$$

因为氯盐环境下混凝土徐变在 $0.2f_c \sim 0.4f_c$ 范围内时为非线性徐变, 故根据氯盐环境下 7 d 龄期加载的不同荷载水平对应的试验实测值对上述公式进行非线性回归分析, 得到不同荷载水平下的参数建议值, 结果如表 4 所示。

表 4 考虑氯盐环境对系数 ϕ_{RH} 、 β_c 调整的参数建议值

Tab. 4 Suggested parameter values for coefficient ϕ_{RH} and β_c adjustment considering chloride salt environment

参数建议值	荷载水平		
	$0.2f_c$	$0.3f_c$	$0.4f_c$
a	0.824	0.737 3	0.831 2
b	0.408 2	0.398 8	0.352 6
R^2 (拟合优度)	0.991 1	0.995 1	0.997 8

图 6 为模型参数调整后的徐变系数计算结果与试验值的对比, 可以看出, 采用参数建议值调整后的模型得到的计算值与试验实测值吻合良好。同时从表 4 中也可以看到, 3 种不同荷载水平对应的拟合优度 r^2 均大于 0.99, 因此可以确定采用参数建议值后的模型能够准确地预测试验实测值, 精度满足要求。

4 结论

本研究开展了干湿交替环境下氯盐侵蚀 C50 混凝土棱柱体试件的徐变试验, 研究了氯盐环境与轴压荷载耦合作用下加载龄期和荷载水平对非饱和 C50 混凝土徐变的影响, 通过比较分析现有徐变系数计

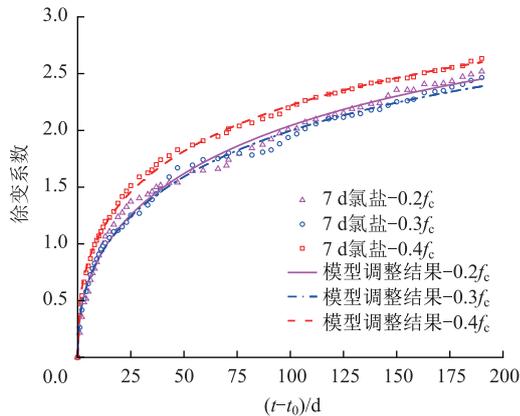


图6 JTG 3362—2018模型调整后预测值与试验值对比

Fig. 6 Prediction values v. s. test values with modified model due to JTG 3362—2018

算模型和试验结果,给出了JTG 3362—2018模型的修正参数建议值。得出以下结论。

(1) 7 d龄期加载时,氯盐环境下 $0.2f_c$, $0.3f_c$ 荷载水平对应的混凝土徐变系数在持荷120 d前与常规环境接近,120 d后较常规环境大,持荷190 d时, $0.2f_c$, $0.3f_c$ 对应的徐变系数分别增大12.25%和9.84%, $0.4f_c$ 荷载水平对应的徐变系数在持荷20 d后就要大于常规环境,持荷190 d时,较常规环境增大17.37%,说明早龄期加载时氯盐侵蚀导致了混凝土性能的劣化,较高轴压荷载水平加速了劣化;28 d龄期加载时,由于混凝土试件得到了较长时间养护,抗渗透能力增强,混凝土的性能没有因为氯盐侵蚀而发生较严重的劣化,因此氯盐环境下混凝土的徐变与常规环境接近。由此可见,混凝土结构在使用前进行充分的养护可有效提高其长期性能。

(2) 荷载水平在 $0.2f_c \sim 0.4f_c$ 范围内时,常规环境下混凝土的徐变为线性徐变,氯盐环境下为非线性徐变。持荷190 d时,氯盐环境下混凝土的徐变系数随荷载水平从 $0.2f_c$ 增加到 $0.4f_c$ 时呈现先略减小后增大的规律,这与干湿交替氯盐侵蚀环境和轴压荷载耦合作用有关。

(3) 为考虑干湿交替氯盐侵蚀环境对混凝土徐变的影响,本研究基于试验数据对JTG 3362—2018徐变预测模型提出了参数建议值,采用参数建议值后的徐变系数模型计算值与试验值吻合良好,可为预测C50混凝土在干湿交替氯盐环境下的徐变行为提供参考。

参考文献:

References:

[1] 黄国兴,惠荣炎,王秀军. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京:中国电力出版社,2012.

HUANG Guo-xing, HUI Rong-yan, WANG Xiu-jun. Creep and Shrinkage of Concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

[2] 李庶安,魏亚,徐飞萍,等. 早龄期混凝土压缩、拉伸和弯拉徐变与干燥徐变比较[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 63-69.

LI Shu-an, WEI Ya, XU Fei-ping, et al. Comparison of Compressive, Tensile and Flexural Creep of Early-age Concrete with Drying Creep [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(2): 63-69.

[3] 孙海林,叶列平,杨孚衡. 城市轨道交通预应力混凝土连续梁桥的收缩和徐变分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(1): 89-92.

SUN Hai-lin, YE Lie-ping, YANG Fu-heng. Analysis of Shrinkage and Creep for the Continuous PC Beam in an Urban Rail Transit Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(1): 89-92.

[4] 方志杨,寿浙坤,林星昀,等. 组合梁桥负弯矩区后张预制板抗裂技术研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 116-125.

FANG Zhi-yang, SHOU Zhe-kun, LIN Xing-yun, et al. Study on Anti-cracking Technology for Posttensioned Precast Panel in Negative Moment Zone of Composite Girders [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(2): 116-125.

[5] 黄永辉. 钢管混凝土拱桥拱肋病害机理与影响分析及吊杆更换技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.

HUANG Yong-hui. Mechanism and Effect of Arch Rib Disease and Suspender Replacement for Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[6] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2014.

JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Durability of Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2014.

[7] 李强,陈志林,刘龙龙,等. 炎热海洋环境下混凝土桥梁抗氯离子侵蚀耐久性研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 72-77.

LI Qiang, CHEN Zhi-lin, LIU Long-long, et al. Study on Durability of Concrete Bridge against Chloride Ion Erosion in Hot Marine Environment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(5): 72-77.

[8] 徐强,宋建永. 氯盐浸泡环境下混凝土中氯离子扩散的时间与压应力依赖性[J]. 公路交通科技, 2023, 40(增1): 232-239.

XU Qiang, SONG Jian-yong. Time and Compressive Stress

- Dependence of Chloride Diffusion in Concrete Exposed to Immersion Chloride Environment. [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (S1): 232-239.
- [9] 程小康, 肖林发, 吴婷婷, 等. 饱和状态下混凝土中氯离子扩散试验研究 [J]. 交通科学与工程, 2020, 36 (2): 73-78.
CHENG Xiao-kang, XIAO Lin-fa, WU Ting-ting, et al. Experimental Study on Chloride Ion Diffusion in Saturated Concrete [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (2): 73-78.
- [10] 陈伟康, 刘清凤. 干湿交替下混凝土中水分和多离子耦合传输的数值研究 [J]. 水利学报, 2021, 52 (5): 622-632.
CHEN Wei-kang, LIU Qing-feng. Moisture and Multi-ions Transport in Concrete under Drying-wetting Cycles: A Numerical Study [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (5): 622-632.
- [11] PIASTA W G, SCHNEIDER U. Deformations and Elastic Modulus of Concrete under Sustained Compression and Sulphate Attack [J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22 (1): 149-158.
- [12] TORRENTI J M, NGUYEN V H, COLINA H, et al. Coupling between Leaching and Creep of Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38 (6): 816-821.
- [13] 曹健, 王元丰. 硫酸盐侵蚀混凝土轴心受压构件徐变分析 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14 (4): 459-464.
CAO Jian, WANG Yuan-feng. Creep Analysis of Axially Compressed Concrete Member under Sulphate Attack [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14 (4): 459-464.
- [14] 曹国辉, 廖世杰, 彭鹏, 等. 腐蚀与荷载耦合作用下钢-混凝土组合梁长期变形研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55 (1): 32-40.
CAO Guo-hui, LIAO Shi-jie, PENG Peng, et al. Long-term Deformation of Steel-concrete Composite Beams Subjected to Coupling Effect of Corrosion and Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55 (1): 32-40.
- [15] 曹国辉, 王礼彬, 张展维. 氯盐环境与荷载耦合作用下加载龄期对钢筋混凝土柱徐变影响 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (6): 275-283.
CAO Guo-hui, WANG Li-bin, ZHANG Zhan-wei. Study on Effect of Loading Age on Creep of Reinforced Concrete Columns under Coupled Action of Chloride Environment and Load [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (6): 275-283.
- [16] 何世钦, 曹泽阳, 刘伟杰, 等. 长期荷载和氯盐环境耦合作用对钢筋混凝土梁挠度的影响 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2019, 59 (11): 902-909.
HE Shi-qin, CAO Ze-yang, LIU Wei-jie, et al. Influence of Long-term Load and Chlorine Corrosion on Reinforced Concrete Beam Deflection [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59 (11): 902-909.
- [17] 熊良宵, 陈聪. 海水侵蚀下混凝土徐变性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34 (5): 1440-1444.
XIONG Liang-xiao, CHEN Cong. Experimental Study on Creep Property of Concrete Corroded by Sea Water [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34 (5): 1440-1444.
- [18] 俞秋佳. 受损结构混凝土的耐久性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YU Qiu-jia. Study on Durability of Damaged Structure Concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [19] 王海龙, 张晓龙, 俞秋佳, 等. 压荷载持续作用状态对混凝土中氯离子输运规律的影响 [J]. 水利学报, 2015, 46 (8): 974-980.
WANG Hai-long, ZHANG Xiao-long, YU Qiu-jia, et al. Influence of Different Sustained Compressive Loads on Chloride Transportation in Concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (8): 974-980.
- [20] 刘掌红. C60 低收缩低徐变高性能混凝土收缩徐变效应及影响研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
LIU Zhang-hong. Research on Shrinkage and Creep Effect of C60 Low Shrinkage and Low Creep High Performance Concrete and Influence [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [21] 汪建群, 吕鹏, 许巧, 等. 混凝土徐变计算模型及其实用性评述 [J]. 工程力学, 2018, 35 (增1): 156-160.
WANG Jian-qun, LÜ Peng, XU Qiao, et al. Calculation Model for Concrete Creep and Its Practical Application [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35 (S1): 156-160.
- [22] Al-MANASEER A, PRADO A. Statistical Comparisons of Creep and Shrinkage Prediction Models Using RILEM and NU-ITI Databases [J]. ACI Materials Journal, 2015, 112: 125-135.