

荷载作用下带裂缝砼梁氯离子渗透性能研究

李鹏飞¹, 阮猛², 王之强³

(1.陕西建工集团有限公司, 陕西 西安 710003; 2.西安市轨道交通集团建设分公司, 陕西 西安 710000;

3.陕西建工机械施工集团有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过对梁试件加载促使其在弯曲荷载作用下产生裂缝, 对受拉表面进行氯离子扩散试验。试验结果表明, 随着主裂缝宽度增加氯离子扩散深度扩大, 主裂缝对梁周无裂缝区域氯离子扩散深度有明显影响, 且随着主裂缝宽度增加对周边无裂缝区域的影响增大, 主裂缝宽度为 0.3 mm 时靠近主裂缝区域自由氯离子浓度增加 12.21%, 主裂缝宽度达到 0.5 mm 时同深度自由氯离子浓度增加 32.18%; 远离主裂缝处的无裂缝区域氯离子扩散系数能使用 Fick 第二定律求解, 但在裂缝处, 由于氯离子扩散包含纵、横 2 个方向, 需引用修正系数对扩散系数进行调整; 现有关于裂缝宽度的修正系数不能很好地拟合主裂缝处氯离子扩散系数, 其原因可能是未考虑荷载的影响。

关键词: 桥梁; 砼梁; 荷载作用; 氯离子渗透性能; 裂缝宽度

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0115-04

氯离子侵蚀是造成砼钢筋锈蚀的主要原因。钢筋锈蚀产物的体积比原有体积增大 2~4 倍, 最终导致砼保护层剥落, 结构承载力降低, 严重损害结构耐久性。正常使用中砼结构常伴随着裂缝的存在, 而且随着结构服役时间的增加, 裂缝数量和宽度有所增加。裂缝的产生为氯离子向内部侵入提供了通道, 使氯离子更易到达钢筋表面。了解砼结构在使用中产生的裂缝对氯离子向砼内部扩散的影响对于评估、改善砼结构的耐久性非常重要。

Djerbi A. 等对带裂缝的不同类型砼进行氯离子稳态扩散试验, 结果表明, 裂缝宽度大于 80 μm 时, 裂缝内氯离子扩散系数与溶液中扩散系数相等; Lim C. C. 等研究单轴压缩条件下砼中氯离子的扩散行为, 发现微裂缝面积对氯离子扩散系数存在影响; Marsavina L. 等对存在预置裂缝的砼试件进行氯离子非稳态扩散试验, 发现当裂缝深度增大时, 氯离子扩散深度增大; 万小梅等对砼试块施加不同压应力, 发现氯离子扩散系数随着压应力的增加呈先下降后上升的趋势; 何世钦等对 (100×100×400) mm 砼试块施加弯曲应力, 发现拉应力能增强氯离子的扩散能力, 但只有应力较高时效果才明显。这些研究大都使用不明显裂缝或人为预制裂缝试件, 不能完全符合砼结构实际状况。针对荷载作用下不同裂缝宽度时砼构件的渗透试验更便于观察实际中氯离子渗透行为, 为砼结构耐久性把控提供依据。该文进行荷载作用下带裂缝砼梁氯离子渗透性能研究。

1 试验方案

砼梁在实际使用中通常是荷载与裂缝共存的状态, 除明显的表面裂缝外, 砼中还存在着许多不可见的微裂缝。为使试验中梁状态与使用状态更贴近, 试验中利用逐级施加的荷载生产指定宽度的裂缝, 并对梁在对应荷载持续作用下进行氯离子渗透试验, 观察不同区域、不同深度的氯离子浓度。

1.1 试件设计

试验采用的钢筋砼梁尺寸为长 1 100 mm、宽 100 mm、高 160 mm、净跨 1 000 mm, 内部钢筋布置见图 1。只在梁受拉区布置纵筋, 纵筋采用直径 12 mm 的 HRB335 钢筋; 梁两侧 350 mm 范围内布置箍筋, 箍筋使用直径 8 mm 的 HRB225 钢筋, 间距为 150 mm; 砼使用 C30 砼。试验梁同批浇筑, 防止砼差异对试验造成影响。

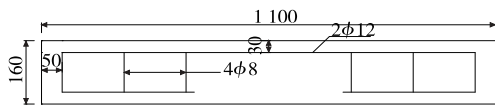


图 1 试验梁钢筋布置示意图(单位: mm)

1.2 试件加载

GB 50010—2010 中, 适用除冰盐、海风、海岸环境中砼允许最大裂缝宽度为 0.2 mm。SL 191—2008 中, 使用除冰盐、海水浪溅区、重度盐雾作用区环境中砼允许最大裂缝宽度为 0.15 mm。而实际使用中, 裂缝宽度往往不能很好地控制在这个范围。

因此,选取 0.3、0.5 mm 2 种宽度,并设置 1 个无裂缝的对照组,观察不同宽度下不同部位氯离子渗透深度的变化。

梁的加载方案见图 2。采用反向加载,有助于之后进行氯离子渗透试验。将梁架在反力架上利用千斤顶逐级加载,开裂前每级荷载取 2 kN,开裂后每级荷载取 1 kN。每级加载后利用裂缝观测仪查看并标记表面裂缝发展状况。

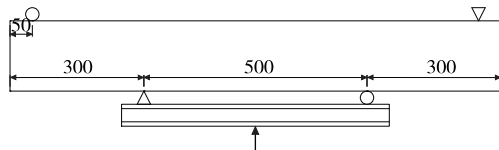


图 2 梁的加载示意图(单位:mm)

1.3 氯离子渗透试验

梁加载至指定裂缝宽度后,记录荷载,在梁受拉侧树立木模,以便氯离子溶液浸泡。浸泡区域包括纯弯区 500 mm 和两侧剪弯区各 100 mm,共 700 mm。采用蒸馏水和纯氯化钠配置质量分数为 10% 的氯化钠溶液,用免钉胶将木模与梁结合缝隙封堵后,先用蒸馏水浸泡 3 d,再倒入氯化钠溶液中渗透 30 d,每 3 d 观察一次荷载和氯化钠溶液浓度,保持荷载和浓度不变(见图 3)。

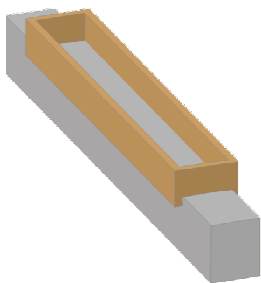


图 3 渗透试验示意图

1.4 氯离子浓度测量

渗透完毕,将梁卸载拆模,清理干净表面的免钉胶后进行钻孔取样。钻孔主要布置在裂缝上,无裂缝处纵向间距取 50 mm,横向取 2 个孔,竖向每 5 mm 为一层,每层取样深度用游标卡尺严格控制。

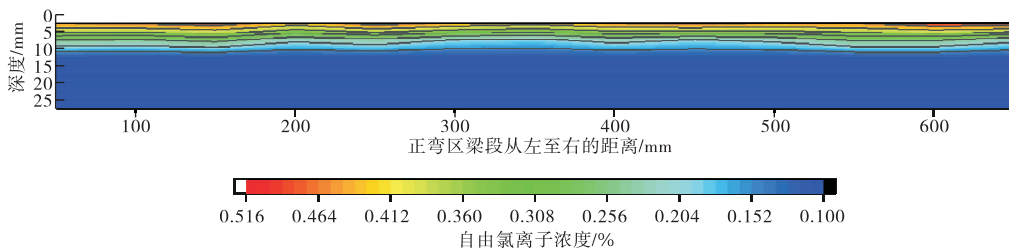


图 4 无裂缝梁氯离子扩散深度

采用酒精擦拭钻孔以保证每次取样的准确性。分层取样后过 80 目细筛,将粉末收集在准备好的离心管中。钻孔至钢筋表面,共 6 层。

将所得样品粉末放入烘干机中烘干,在 $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ 高温下烘干 24 h。取烘干后样品 2 g(精确到 0.001 g,重量记为 G),加 50 mL(V_1)蒸馏水摇晃配制成溶液,静置 24 h 至溶液澄清后备用。

采用瑞士万通 848Titrino Plus 自动电位滴定仪测量样品中自由氯离子含量。取澄清后样品试液过滤,使用移液管去滤液分别取 2 mL(V_2)加入 2 个小烧杯中,各加入 2 滴酚酞溶液,使其呈微红色,用稀硫酸中和至无色后立即用 AgNO_3 溶液进行滴定,记录消耗 AgNO_3 溶液的体积(V_3)。样品中自由氯离子含量按下式计算:

$$P = \frac{C_{\text{AgNO}_3} V_3 \times 0.03545}{G \times V_2 / V_1} \quad (1)$$

式中: P 为样品中自由氯离子浓度; C_{AgNO_3} 为硝酸银溶液标准浓度(mol/L); G 为样品干重(g); V_1 为浸样品用的蒸馏水体积(mL); V_2 为每次滴定取的滤液体积(mL); V_3 为每次滴定消耗的硝酸银溶液体积(mL)。

2 试验结果与分析

2.1 氯离子渗透深度变化

根据滴定结果,利用 Origin 模拟不同裂缝宽度梁的氯离子扩散深度,结果见图 4~6。

由图 4~6 可知:1) 无裂缝梁的氯离子浓度变化范围较小,氯离子向砼内部渗透的深度较小,对深度大于 15 mm 的砼梁内部没有明显影响。2) 裂缝对氯离子向砼内部渗透有明显影响。裂缝宽度为 0.3 mm 时,氯离子扩散深度比无裂缝梁有所增加,但增加不多,裂缝处的氯离子扩散深度较周边有所增加,且对周边未开裂区域有一定影响,其原因可能是氯离子发生横向渗透;最大裂缝宽度达到 0.5 mm 时,氯离子扩散深度明显增加,且裂缝中横向扩散现象更明显。

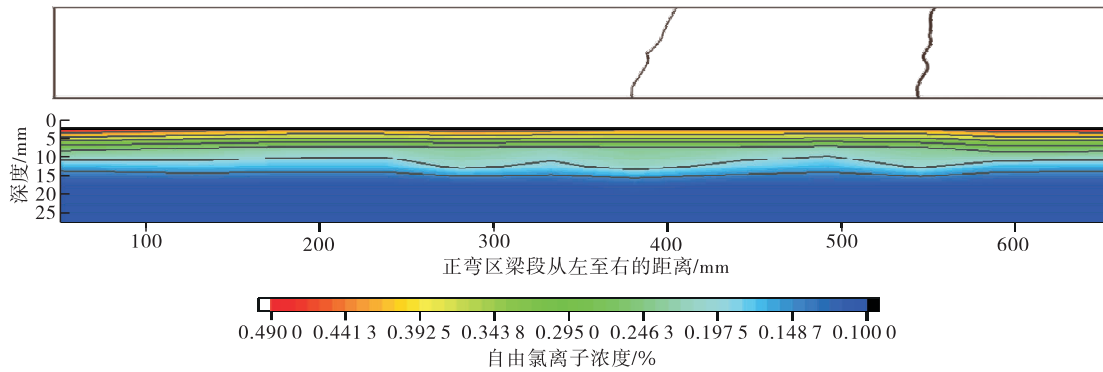


图 5 主裂缝宽度为 0.3 mm 时氯离子扩散深度

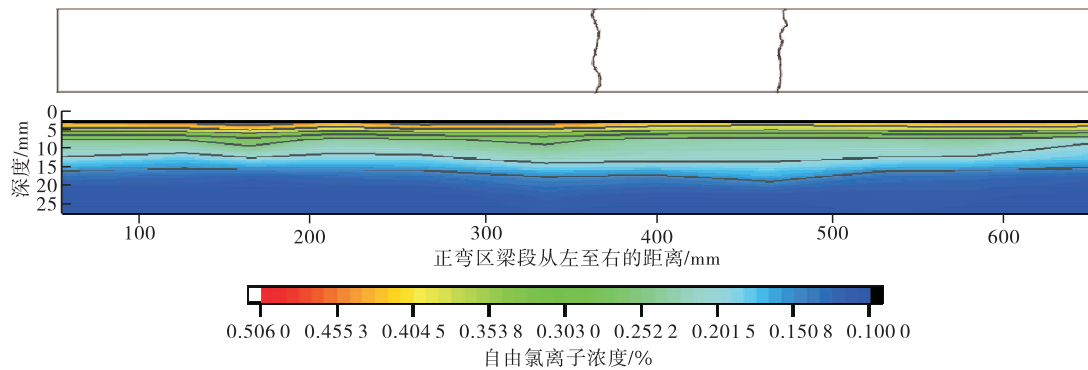


图 6 主裂缝宽度为 0.5 mm 时氯离子扩散深度

2.2 裂缝宽度对氯离子渗透深度的影响

如图 7 所示,对于无应力梁,自由氯离子浓度主要富集在表层 10 mm 左右,在深度 12.5 mm 处平均浓度几乎不受外界溶液的影响。而在主裂缝处,外界氯离子的影响显著增大,在深度 12.5 mm 处,裂缝宽度为 0.3 mm 时自由氯离子浓度比无裂缝时增加 74.83%,裂缝宽度为 0.5 mm 时自由氯离子浓度增加 108.03%。裂缝宽度越大,氯离子扩散深度越大。深度达到 22.5 mm 左右时,裂缝宽度为 0.3 mm 时自由氯离子浓度几乎与初始氯离子浓度相同,而裂缝宽度为 0.5 mm 时自由氯离子浓度仍旧提升 29.80%。

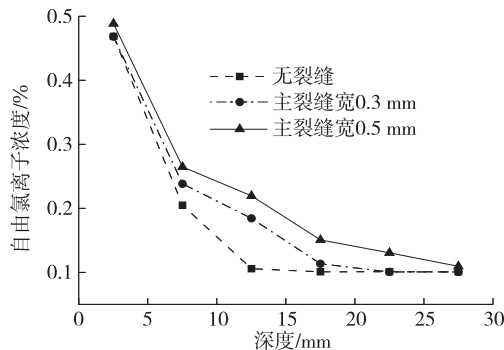


图 7 不同宽度裂缝下自由氯离子浓度

2.3 不同区域自由氯离子浓度分析

对于同一片梁,取同在正弯受力区域的点,除主裂缝处氯离子的扩散浓度显著加深外,周边无裂缝区域也会受到影响。如图 8 所示,同样是无裂缝区域,靠近裂缝区域的氯离子扩散深度比远离裂缝区域有所增加,无裂缝处氯离子扩散深度比无裂缝梁有所增加。其原因可能是梁底受拉应力的影响产生肉眼不可见的微观裂缝促进了氯离子扩散,而主裂缝的张开使浸泡溶液填充进入主裂缝内部,在裂缝内部发生横向扩散,使裂缝周围同深度的自由氯离子浓度增加,且主裂缝宽度越大,对裂缝周围自由氯离子浓度的影响越大。深度为 12.5 mm、主裂缝宽

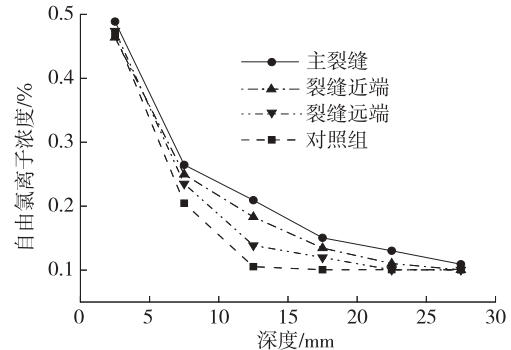


图 8 主裂缝宽度为 0.5 mm 时不同位置氯离子扩散深度

度为 0.3 mm 时,靠近裂缝处的自由氯离子浓度比远离裂缝处的自由氯离子浓度增大 12.21%;主裂缝宽度 0.5 mm 时,同深度自由氯离子浓度增大 32.18%。

不同主裂缝宽度梁远离裂缝区域的氯离子扩散深度对比见图 9。由图 9 可知:氯离子扩散深度随着梁最大裂缝宽度的增加而增加,无裂缝处自由氯离子浓度增幅比主裂缝处明显减小。深度为 12.5 mm 时,主裂缝宽度为 0.5 mm 时自由氯离子浓度增加 60.1%,主裂缝宽度为 0.3 mm 时自由氯离子浓度增加 32.2%,而且对深处砵的影响很小。

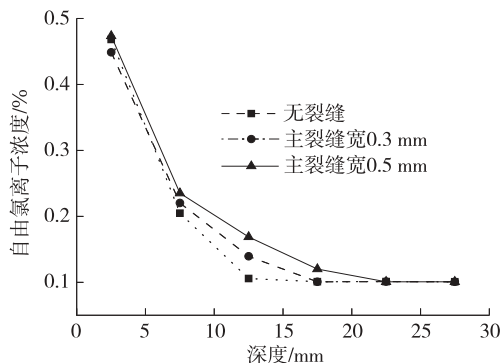


图 9 不同梁无裂缝处氯离子扩散深度

2.4 裂缝处氯离子渗透系数模拟

对于砵中氯离子扩散,通常使用 Fick 第二定律来计算。对不同梁上远离裂缝处测试结果采用 MATLAB 软件进行模拟,得到氯离子扩散系数(见表 1)。各梁的拟合系数均在 0.95 以上,说明拟合结果较好。由表 1 可知:随着主裂缝宽度的加大,氯离子扩散系数增大。从无受力梁到主裂缝宽度 0.3 mm,扩散系数增大 2.16 倍,说明受力后砵氯离子扩散显著增强;主裂缝宽度为 0.5 mm 时氯离子扩散系数增大 1.41 倍,说明受力状态下氯离子扩散系数会随拉应力的增大而增大。

表 1 不同裂缝宽度下氯离子扩散系数

主裂缝宽度/mm	氯离子扩散系数 $D/[10^{-6}(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})]$	拟合系数
0.0	0.369 4	0.984 8
0.3	0.799 0	0.964 9
0.5	1.130 5	0.967 7

Fick 第二定律是基于氯离子在砵中扩散为一维来分析的,在远离主裂缝的无裂缝区域可以适用,而在裂缝处,氯离子的扩散不仅包括纵向扩散,还包括横向扩散,不能完全适用 Fick 第二定律。叶梦琦等基于双重孔隙介质模型,以裂缝宽度为氯离子在

砵试块中扩散的主要诱因,并设想通过完整砵的氯离子扩散系数和裂缝宽度的相关关系合理表达带裂缝砵的平均氯离子扩散系数,通过试验数据模拟得到关于裂缝宽度的氯离子扩散系数的修正公式:

$$f(w) = -10.474w^3 + 5.224w^2 + 8.3439w + 0.9862 \quad (2)$$

式中: w 为裂缝宽度。

Kwon S. J. 等对码头砵进行现场测试,得到存在早期裂缝的砵中氯离子等效扩散系数与裂缝宽度的关系式:

$$f(w) = 31.61w^2 + 4.73w + 1 \quad (3)$$

使用式(2)、式(3)计算主裂缝处氯离子扩散系数,结果见表 2。

表 2 主裂缝处氯离子扩散系数拟合结果

主裂缝宽度/mm	模拟公式	氯离子扩散系数 $D/[10^{-6}(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})]$	拟合系数
0.3	式(2)	1.358 2	0.957 1
	式(3)	1.944 5	0.713 3
0.5	式(2)	1.904 2	0.942 1
	式(3)	4.162 2	0.421 6

由表 2 可知:使用叶梦琦等提出的裂缝宽度修正系数公式得到的系数具有更高的可靠性。但当裂缝宽度增大时,其可靠度有所下降,其原因可能是没有考虑外荷载对氯离子扩散的影响,需进一步进行试验研究。

3 结论

通过对荷载耦合裂缝梁下氯离子自由扩散试验,模拟实际使用中梁的氯离子渗透状态,得到以下结论:

(1) 随着主裂缝宽度的增加,梁整体氯离子扩散深度增加;主裂缝宽度达到 0.5 mm 时,裂缝处氯离子能穿过保护层影响到钢筋表面。

(2) 对比主裂缝附近及主裂缝远端无裂缝区域氯离子扩散深度,发现裂缝对周边区域自由氯离子浓度有明显影响,且裂缝宽度越大,对周边区域自由氯离子浓度的影响越大。

(3) 随着主裂缝宽度的增大,远离主裂缝的无裂缝区域氯离子渗透系数增大。主裂缝处由于氯离子渗透包括纵向和横向 2 个方向,Fick 第二定律已不再适用。采用叶梦琦等提出的裂缝宽度修正系数在裂缝宽度较小时较吻合,但在裂缝宽度较大时不

(下转第 123 页)

(2) 对钢构件防锈漆脱落、锈蚀处,除锈后重新涂刷防锈漆。

(3) 修补吊杆及系杆套管破损、开裂、起皮处。

(4) 对吊杆上、下锚头及系杆两端锚头进行除锈、防锈处理,并更换破损的吊杆下锚头保护罩,对锚头重新涂刷黄油。

(5) 对 T 梁、拱座、桥墩横系梁裂缝予以封闭。

(6) 对桥面铺装纵、横向裂缝及网裂采用改性沥青封闭,对桥面铺装及伸缩缝锚固砣破损处进行修补。

8 结语

根据淞澧洪道桥的检测结果,结合设计资料进行对比分析,对其主要病害进行分析,对桥梁总体技术状况进行评估,并提出病害修补及防治措施。检测结果表明该桥主桥桥面板、纵横梁、边跨拱肋及墩台、拱座存在局部砣破损和锈胀露筋,吊杆及系杆的套管、吊杆上下锚头保护罩存在轻微锈蚀,部分吊杆实测频率与设计频率百分比为 5%~10%,其他吊杆实测频率与设计频率百分比均不超过 5%,吊杆

整体受力良好。桥梁整体状态良好,初步说明大跨度飞燕式系杆拱桥具有较好的耐久性和稳定性。

参考文献:

- [1] 张志明.大跨度飞燕式系杆拱桥结构参数优化和地震响应分析[D].成都:西南交通大学,2014.
- [2] 李闯,唐英.某飞燕式钢管混凝土系杆拱桥动力特性分析[J].铁道建筑,2012(1):14-16.
- [3] 陆军,肖春.某飞燕式系杆拱桥的设计简介[J].城市道桥与防洪,2012(2):34-37.
- [4] 张磊,张振伟.飞燕式钢管混凝土系杆拱桥稳定性分析[J].低温建筑技术,2020,42(2):80-83.
- [5] 王强.钢管混凝土系杆拱桥病害分析与维修加固[J].能源与环保,2017,39(4):185-190.
- [6] 丁岩.中承式混凝土系杆拱桥的常见病害及加固方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015(8):14-16.
- [7] 毛建方,曹鹏飞.结合实例的系杆拱桥吊杆病害分析及更换方案应用[J].特种结构,2014,31(3):84-86+36.

收稿日期:2021-07-13

(上接第 118 页)

再适用。

参考文献:

- [1] ZHANG J H, LING X Z, GUAN Z G. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 487-499.
- [2] 赵羽习,金伟良.钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J].水利学报,2005,36(8):939-945.
- [3] WIN P P, WATANABE M, MACHID A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7): 1073-1079.
- [4] QI C Q. Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement[D]. West Lafayette: Purdue University, 2003.
- [5] GERARD B, MARCHAND J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials: Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 37-43.
- [6] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence

of traversing cracking crack on chloride diffusion into concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6): 877-886.

- [7] LIM C C, GOWRIPALAN N, SIRIVIVATNANON V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression[J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(5): 353-359.
- [8] MARSAVINA L, AUDENAERT K, DE SCHUTTER G, et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 264-269.
- [9] 万小梅,苏卿,赵铁军,等.单轴受压混凝土的微裂缝和氯离子侵入性[J].土木建筑与环境工程,2013(1):104-110.
- [10] 何世钦,贡金鑫.弯曲荷载作用对混凝土中氯离子扩散的影响[J].建筑材料学报,2005,8(2):134-138.
- [11] 叶梦琦,李扬.开裂混凝土氯离子扩散性能研究[J].湖北工业大学学报,2020,35(2):88-91.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

收稿日期:2021-01-30