

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202211032024081966

文章编号:1674-599X(2024)04-0116-06

引用格式:刘淑贤,柳磊,黄敦文,等.疲劳荷载下水泥砂浆中氯离子渗透行为研究[J].交通科学与工程,2024, 40(4): 116-121.

Citation: LIU Shuxian, LIU Lei, HUANG Dunwen, et al. Study on chloride permeation behavior in cement mortar under fatigue load[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 116-121.

疲劳荷载下水泥砂浆中氯离子渗透行为研究

刘淑贤¹, 柳磊¹, 黄敦文¹, 粟森¹, 彭晖^{1,2}

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2.长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为了探讨疲劳荷载作用下混凝土中氯离子的传输行为,自行设计装置开展了砂浆疲劳和氯盐共同作用试验,运用比裂缝面积表征试件损伤,分析了不同疲劳荷载水平下的砂浆损伤和氯离子传输性能,探讨了砂浆损伤与氯离子传输的相关性。研究表明:当疲劳上限小于0.4倍试件强度时,氯离子扩散系数增长缓慢;当疲劳上限大于0.4倍试件强度时,氯离子扩散系数增长加快,且随着疲劳荷载水平的增大,砂浆损伤不断增加。

关键词:疲劳荷载;氯离子渗透;比裂缝面积;损伤

中图分类号:O319.56

文献标志码:A

Study on chloride permeation behavior in cement mortar under fatigue load

LIU Shuxian¹, LIU Lei¹, HUANG Dunwen¹, SU Miao¹, PENG Hui^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.National-Local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The self-designed device carried out the mortar fatigue and chloride salt joint action test to explore the chloride ion transport behavior in concrete under fatigue load. The specific crack area was used to characterize the damage of the specimen and analyze the mortar damage and chloride ion transport performance under different fatigue load levels. The correlation between mortar damage and chloride ion transport was discussed. The results indicated that when the upper limit of fatigue is less than 0.4 times the strength of the specimen, the chloride diffusion coefficient increases slowly. When the upper limit of fatigue is greater than 0.4 times the strength of the specimen, the growth of chloride diffusion coefficient accelerates. The mortar damage increases with the increase of fatigue load level.

Key words: fatigue load; chloride ion permeation; specific crack area; damage

混凝土结构在服役过程中常受到疲劳荷载作用,进而导致材料内部损伤的产生及表面裂缝的发展。结构的内部损伤、表面裂缝是氯离子等侵蚀介质的快速进入通道,会引发混凝土内钢筋和预应力

筋锈蚀,加剧结构的破坏。疲劳荷载作用下混凝土中氯离子的传输行为虽已有部分研究^[1-2],但多为疲劳荷载作用后氯离子渗透性能研究,难以满足日益完善的结构设计要求。混凝土结构使用年限较长,

收稿日期:2022-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578078)

通信作者:黄敦文(1990—),男,副教授,主要从事桥梁高性能材料与新结构体系研究工作。E-mail:dw.huang@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

研究疲劳荷载作用下混凝土的损伤发展过程和氯离子侵蚀传输行为对于评估混凝土结构的服役性能和剩余寿命具有重要意义。

为改变先疲劳荷载作用后开展氯离子渗透的试验思路,柳磊等^[3]、禹卓杰^[4]改良了试验装置,可实现疲劳荷载和氯盐共同作用下的氯离子传输行为捕捉,但缺乏有效的混凝土损伤表征手段。CT扫描^[3-4]、超声波^[5-7]等技术都可以描述混凝土的损伤,但较难量化损伤。LOO^[8]最早提出了基于轴向应变和横向应变测量的比裂缝面积,以此估算轴压混凝土的微裂缝扩展情况,这种方法实现了混凝土内部的微裂缝量化。万小梅等^[9]、陆文攀等^[10]、刘洪珠等^[11]尝试通过比裂缝面积来评价混凝土的扩展微裂缝,但仅研究了持续荷载作用对混凝土微裂缝和渗透性能的影响,尚缺乏疲劳荷载作用下的氯离子传输行为量化分析。

混凝土是一种复杂的非均质混合材料,疲劳荷载作用下损伤的产生、发展,直至破坏的过程非常复杂,影响因素众多。已有研究表明,由于粗骨料强度较高,疲劳荷载作用下混凝土内部裂缝多萌生于浆-骨界面过渡区并主要在硬化浆体中发展^[12]。考虑到砂浆相较于混凝土有着更好的均质性,损伤形成的规律性强,为了简化分析,本研究先行选择砂浆,分析不同疲劳荷载水平和疲劳次数下砂浆中的氯离子渗透性能,探讨试件损伤与氯离子扩散系数的相关性。

1 试验方案

1.1 试验参数

本文试验采用100 mm×100 mm×100 mm尺寸的砂浆试件,材料配合比如表1所示。疲劳上限取0.3、0.4、0.5、0.6倍试件强度^[13-14],疲劳下限取0.2倍疲劳上限,振动频率取3 Hz。在0万次、20万次、50万次、100万次、150万次疲劳荷载循环后测试同一疲劳上限应力水平下的应变值。朱红光等^[15]研究发现氯盐质量分数达到9%时,氯离子在混凝土中的渗透性能不随氯盐质量分数的变化而变化,故本文试验取10%的氯盐质量分数。由于本文试验研究对象是饱和状态下的砂浆,因此砂浆强度在吸水饱水后测定。本文试验测定的标养28 d砂浆在饱水后的极限荷载为382 kN,对应的立方体抗压强度为36 MPa。

表1 砂浆试件材料配合比

Table 1 Mix proportion of mortar specimen kg/m³

水	水泥	砂	减水剂
0.159 8	0.564 8	0.261 9	0.013 5

根据砂浆强度,定义了试验组,见表2。

表2 试验组

Table 2 Experimental group

试验组	疲劳下限/ MPa	疲劳上限/ MPa	疲劳次数/ 万次
试验组0	0.00	0.0	0
试验组1	2.16	10.8	150
试验组2	2.88	14.4	150
试验组3	3.60	18.0	150
试验组4	4.32	21.6	150

1.2 试验方法

为了便于表征砂浆的损伤,试件除渗透面和加载面外余下三个面打磨光滑后,采用以下方式及位置用环氧树脂粘贴应变片(图1)。在粘贴应变片之前,先将试件除渗透面和加载面外的三个面打磨光滑;然后在打磨表面涂抹环氧树脂以填充砂浆表面孔隙,待环氧树脂胶固化后再打磨平整;最后用环氧树脂在打磨填平后的砂浆表面粘贴应变片并密封。考虑到砂浆应变数据测量的代表性,选择标距为50 mm的应变片,应变片贴完后需将试件置于真空饱水机内饱水22 h。为保证砂浆内氯离子的渗透为一维扩散,采用凡士林对非渗透面进行防水处理,同时用锡箔纸包裹在试件表面,这样既能使试件一直处于饱水状态,也能有效地阻止氯离子从非扩散面渗入。最后将包裹好的试件放置在装有10%氯化钠溶液的铁盒中,用50 t的电液伺服疲劳机开始加载试验,具体如图2所示。其间,当试件分别完成0万次、20万次、50万次、100万次、150万次循环时卸载,然后用压力机施加同一疲劳上限应力,采用静态应变仪测试相应的应变值,应变测完后,再继续加载试验。

当所有加载完成后,对砂浆试件进行钻孔取粉,根据程小康等^[16]及本课题组以往的试验经验,每5 mm设定为一层,钻深30 mm,收集每层烘干后的粉末20 g,加入200 mL蒸馏水配置成溶液,静置24 h后过滤砂浆溶液,用Metrohm 848型自动电位滴定仪完成氯离子质量分数的测量。

1.3 砂浆损伤的比裂缝面积表征

本文试验采用比裂缝面积来表征砂浆的疲劳损伤。比裂缝面积定义为由裂缝引起的面积变化

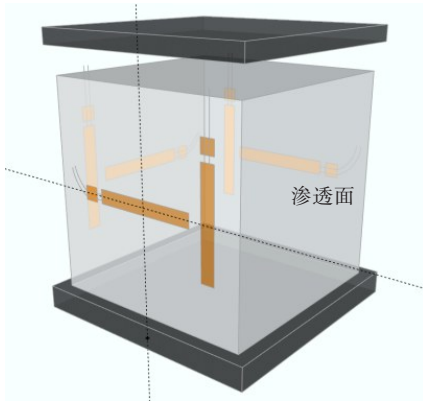


图1 应变片粘贴示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strain gauge pasting

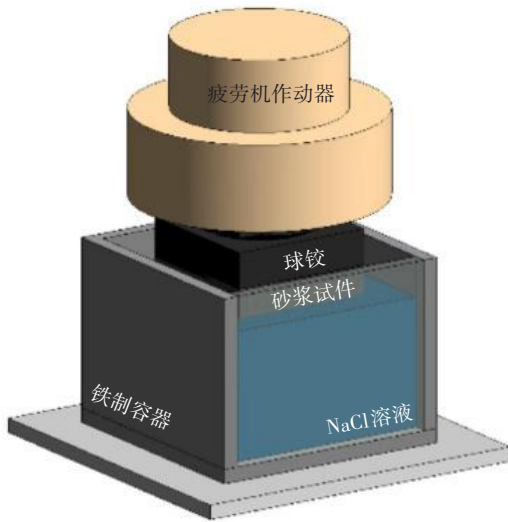


图2 加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading

与原截面积的比值。在荷载作用下,砂浆试件侧面面积会发生变化,主要由裂缝引起的非弹性变化和由泊松比引起的弹性变化组成,如图3所示。因此,侧面面积的变化量减去由泊松比引起的面积变化量,可以得到由裂缝引起的面积变化量,具体的公式如下:

$$\Delta A_T = \Delta A_C + \Delta A_{PR} \quad (1)$$

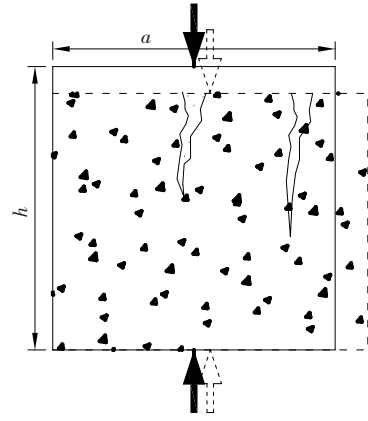
$$\Delta A_T = (a + a\varepsilon_x)(h - h\varepsilon_y) - ah \quad (2)$$

$$\Delta A_{PR} = (a + \mu_e \varepsilon_y)(h - h\varepsilon_y) - ah \quad (3)$$

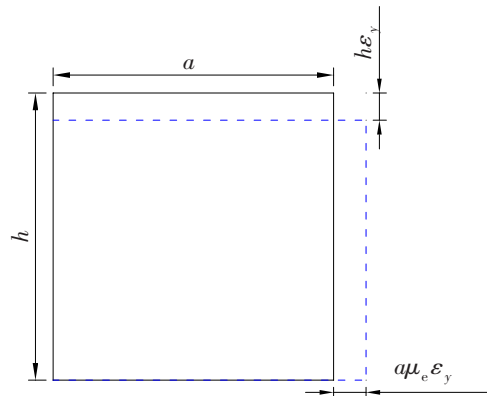
$$\Delta A_C = \Delta A_T - \Delta A_{PR} \approx ah(\varepsilon_x - \mu_e \varepsilon_y) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\Delta A_C}{ah} \approx \varepsilon_x - \mu_e \varepsilon_y \quad (5)$$

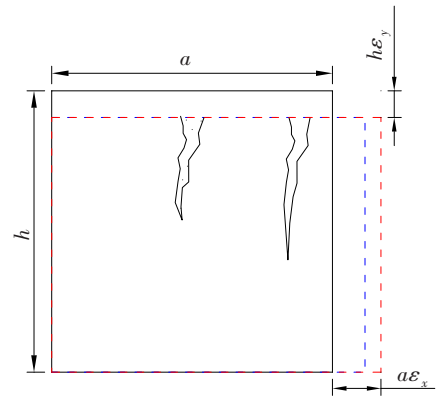
式中: ΔA_T 为侧面面积变化量; ΔA_C 为裂缝引起的面积变化量; ΔA_{PR} 为泊松比引起的面积变化量; ε_x 、 ε_y 为横向、纵向应变; a 、 h 为边长、高; ε_{cr} 为比裂缝面积; μ_e 为泊松比,取0.1、0.2、0.3倍试件强度加载时横、纵向应变比值的平均值。



(a) 力的示意图



(b) 弹性阶段



(c) 塑性阶段

图3 试件变形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of specimen deformation

2 试验结果分析

2.1 氯离子质量分数及扩散系数分布规律

测试的不同疲劳上限下砂浆的氯离子质量分数分布如图4所示。观察图4数据可以发现:各疲劳荷载水平下,氯离子质量分数都随表面深度的增加而逐渐递减,且氯离子表层质量分数明显比内部的大;随着疲劳上限水平的增大,同一深度处砂浆

中氯离子的质量分数呈增长趋势;存在临界疲劳上限,当疲劳上限水平低于0.4倍试件强度时,氯离子质量分数与未施加荷载下砂浆中氯离子质量分数相当,而当疲劳上限大于0.4倍试件强度时,氯离子质量分数较无荷载下氯离子质量分数增长明显。

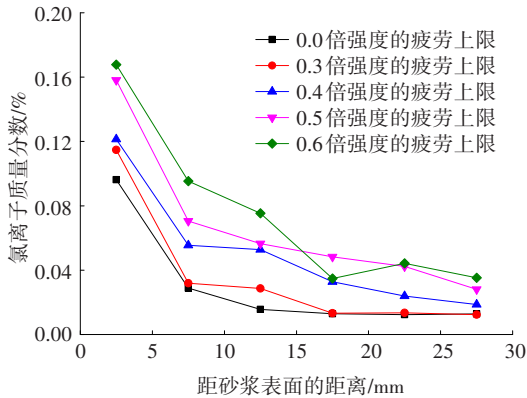


图4 氯离子质量分数分布曲线

Fig. 4 Distribution of chloride mass fraction

为了更直观地分析氯离子传输行为,根据氯离子质量分数沿深度的分布计算出氯离子扩散系数^[17],如图5所示。同样发现,当疲劳上限低于0.4倍试件强度时,氯离子扩散系数曲线趋于平缓,而高于0.4倍试件强度时,氯离子扩散系数增长较快。原因可能是疲劳上限较低时,砂浆内部孔隙和裂缝发展缓慢,氯离子扩散系数随表层深度增长缓慢;而当疲劳上限高于0.4倍试件强度时,疲劳裂缝发展较快并开始贯通,逐渐形成较大的损伤,为氯离子在砂浆内部的传输提供了顺畅的通道,氯离子扩散系数随表层深度的增加陡然增大。

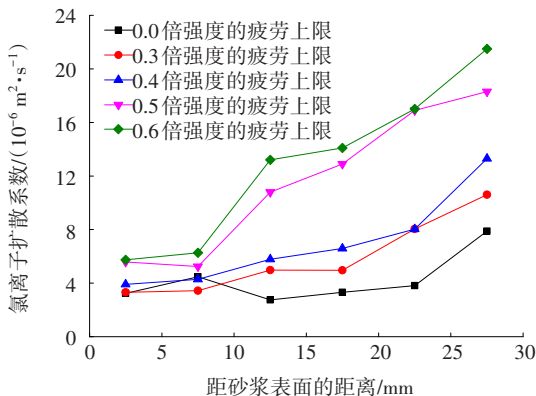


图5 氯离子扩散系数分布曲线

Fig. 5 Distribution of chloride diffusion coefficient

2.2 疲劳荷载下砂浆损伤的比裂缝面积表征

疲劳上限与比裂缝面积关系曲线见图6,观察图中的线形发现,随着疲劳上限的增大,比裂缝面积均呈现增长趋势,并且就同一疲劳加载上限而

言,随着疲劳次数的增大,比裂缝面积也在逐渐增大。这种变化趋势对于不同的疲劳上限表现出了—致性,但不同的疲劳上限或者疲劳次数下,比裂缝面积的增长幅度不一致,这说明比裂缝面积的增长幅度不仅取决于疲劳上限的大小,还与疲劳次数有关。当疲劳上限较低时(0.3倍和0.4倍极限应力水平),随着疲劳次数的增加,比裂缝面积增大得并不明显,增幅也没有很大差距。当疲劳上限较高时(0.5倍和0.6倍极限应力水平),疲劳循环100万次之前,随着疲劳次数的增长,比裂缝面积的增幅不大,但疲劳循环100万次以后,比裂缝面积增加明显。

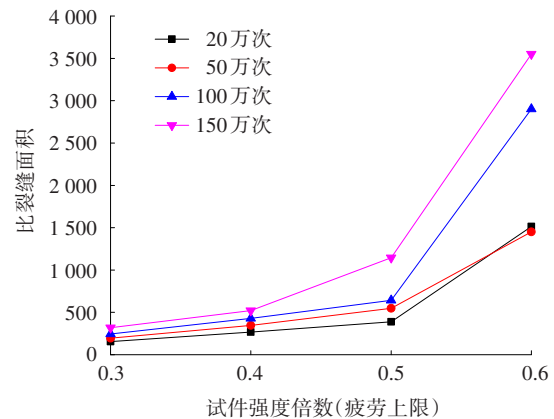


图6 疲劳上限与比裂缝面积关系曲线

Fig. 6 Relation curve of fatigue stress level-specific fracture area

上述现象说明在疲劳荷载水平较低时,砂浆的损伤主要与疲劳上限有关,表现为随着疲劳上限的增大,比裂缝面积逐渐增大;当作用在砂浆上的疲劳上限较大时,砂浆的损伤不仅与疲劳上限水平有关,还与疲劳次数有关,表现为高疲劳次数下比裂缝面积的增长幅度明显大于疲劳次数较低的情况。这和氯离子扩散系数在不同疲劳上限下的变化规律一致,说明氯离子扩散系数变化是由疲劳荷载产生的损伤引起的,比裂缝面积较好地反映了砂浆中裂缝的发展,高疲劳上限下比裂缝面积大,氯离子扩散系数也大。因此,用比裂缝面积表征砂浆内部损伤具有很好的适用性。

2.3 比裂缝面积与氯离子扩散系数的相关性

疲劳循环150万次后距砂浆表面2.5、7.5、12.5、17.5、22.5、27.5 mm深度下氯离子扩散系数与比裂缝面积的关系如图7所示。观察图7发现,不同表层深度处氯离子扩散系数随着疲劳损伤的增大整体呈现出增大的趋势,就同一疲劳损伤而言,随着

渗透的深入,氯离子扩散系数也在逐渐增大,这与姚昌建等^[18]、李鹏飞等^[19]研究得到的混凝土中氯离子扩散系数随深度变化的规律一致。

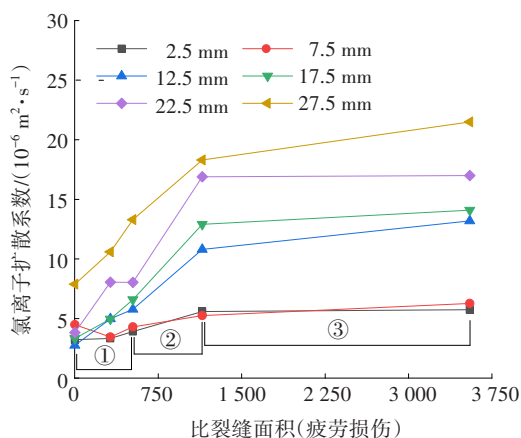


图7 氯离子扩散系数-疲劳损伤的关系曲线

Fig. 7 Relation curve of chloride diffusion coefficient-fatigue damage

分析每一层氯离子扩散系数的变化规律可发现,氯离子扩散系数的增长速率大致分为三个阶段(图7):扩散系数增长较慢、扩散系数增长较快、扩散系数缓慢增长或保持不变。损伤形成的第一阶段对应的疲劳上限为0.3倍和0.4倍强度,此时的疲劳荷载水平较小,砂浆内部孔隙处于发展缓慢或者被压密阶段,但在循环疲劳荷载的作用下损伤在逐渐累积,整体表现为氯离子扩散系数不大,增速不快。损伤形成的第二阶段对应0.5倍强度的疲劳上限,此时的损伤累积较快,氯离子扩散系数增速加快,这个阶段是氯离子扩散最快的阶段。损伤形成的第三阶段对应0.6倍强度的疲劳上限,此时的砂浆损伤严重,理论上表层氯离子的扩散应该加快,但由于表层有大量的宏观裂缝,氯离子在砂浆表面的传输方式发生变化,由开始的自由扩散逐渐转变为对流,因此,表层氯离子扩散系数整体不大,并且增速不大。

3 结论

本文试验研究了疲劳荷载作用下砂浆中氯离子的传输行为,运用比裂缝面积表征了砂浆的疲劳损伤,分析了不同疲劳上限水平下砂浆损伤及氯离子传输性能,结论如下:

1) 0.4倍试件强度的疲劳上限为疲劳荷载作用下砂浆中氯离子传输的分水岭。当疲劳荷载上限小于0.4倍试件强度时,氯离子扩散系数增长缓慢,

而大于0.4倍试件强度后,砂浆内部损伤迅速形成,氯离子扩散系数增长加快。

2) 砂浆损伤不仅与疲劳荷载水平有关,还与疲劳次数有关。在疲劳荷载水平较低时,砂浆的损伤主要与疲劳上限有关;当疲劳上限较大时,疲劳上限和疲劳次数对砂浆的损伤均有较大的影响。

3) 比裂缝面积能较好地表征砂浆的疲劳损伤,与氯离子扩散系数具有相关性,随着疲劳荷载水平的增大,砂浆损伤逐渐发展,不同表层深度处氯离子扩散系数随疲劳损伤的增大呈现出增大的趋势。

参考文献(References):

- [1] 李炜, 蒋林华, 王永亮, 等. 疲劳作用对混凝土中氯离子扩散系数影响的研究[J]. 混凝土, 2014(1): 31-34. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2014.01.009.
LI Wei, JIANG Linhua, WANG Yongliang, et al. Research on the effect of fatigue on chloride diffusion coefficient in concrete [J]. Concrete, 2014 (1): 31-34. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2014.01.009.
- [2] 禹卓杰, 秦想姣, 刘杰, 等. 疲劳荷载作用下混凝土中氯离子渗透性能的研究进展[J]. 中外公路, 2017, 37 (2): 281-288. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579.2017. 02.063.
YU Zhuojie, QIN Xiangjiao, LIU Jie, et al. Research progress of chloride ion permeability in concrete under fatigue load [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (2): 281-288. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579.2017.02.063.
- [3] 柳磊, 吕毅刚, 禹卓杰, 等. 疲劳荷载与氯盐耦合作用下混凝土中氯离子扩散行为的试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32 (4): 517-524. DOI: 10.7520/1001-4888-17-141.
LIU Lei, LYU Yigang, YU Zhuojie, et al. Experimental study on diffusion behavior of chlorine ion in concrete subjected to fatigue loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4): 517-524. DOI: 10.7520/1001-4888-17-141.
- [4] 禹卓杰. 疲劳荷载作用下混凝土中氯离子渗透性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
YU Zhuojie. Chloride ion penetration in concrete under fatigue loadings [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [5] 廖杰洪, 陆洲导, 余江滔. 超声波检测混凝土构件循环荷载下的损伤[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 149-153. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2012.05.026.
LIAO Jiehong, LU Zhoudao, YU Jiangtao. Ultrasonic test on damage of concrete members under cyclic loading [J]. Structural Engineers, 2012, 28(5): 149-153. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2012.05.026.
- [6] 樊秀峰, 简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 557-563. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.03.016.
- FAN Xiufeng, JIAN Wenbin. Experimental research on fatigue characteristics of sandstone using ultrasonic wave velocity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 557-563. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.03.016.
- [7] SUARIS W, FERNANDO V. Ultrasonic pulse attenuation as a measure of damage growth during cyclic loading of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(3): 185-193. DOI: 10.1016/0040-6090(87)90255-0.
- [8] LOO Y H. A new method for microcrack evaluation in concrete under compression [J]. Materials and Structures, 1992, 25(10): 573-578. DOI: 10.1007/BF02472225.
- [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, 35(1): 104-110. DOI: 10.3969/j.issn. 1674-4764.2013.01.017.
- WAN Xiaomei, SU Qing, ZHAO Tiejun, et al. Microcracking and chloride penetration of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 104-110. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.017.
- [10] 陆文攀, 赵铁军, 马志鸣, 等. 荷载损伤对混凝土微裂缝和氯离子侵蚀的影响研究[J]. 混凝土, 2015(6): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2015.06.013.
- LU Wenpan, ZHAO Tiejun, MA Zhiming, et al. Influence of higher stress on chloride ion corrosion in concrete[J]. Concrete, 2015(6): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2015.06.013.
- [11] 刘洪珠, 赵铁军, 曹承伟, 等. 轴压荷载作用对混凝土微裂缝和渗透性影响研究[J]. 混凝土, 2016(3): 1-4, 11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2016.03.001.
- LIU Hongzhu, ZHAO Tiejun, CAO Chengwei, et al. Research on the micro-crack and permeability of concrete under axial compressive load[J]. Concrete, 2016(3): 1-4, 11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2016.03.001.
- [12] 陈红帅. 细观层次混凝土中氯离子扩散机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- CHEN Hongshuai. Study on chloride diffusion mechanism in concrete at meso-scale [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [13] 钟美秦, 江加蔚. 混凝土疲劳强度的研究[J]. 铁道建筑, 1996, 36(9): 25-29. DOI: CNKI: SUN: TDJZ.0.1996-09-009.
- ZHONG Meiqin, JIANG Jiawei. Study on fatigue strength of concrete[J]. Railway Engineering, 1996, 36(9): 25-29. DOI: CNKI: SUN: TDJZ.0.1996-09-009.
- [14] 李朝阳, 宋玉普, 车轶. 混凝土的单轴抗压疲劳损伤累积性能研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 38-40. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2002.02.006.
- LI Chaoyang, SONG Yupu, CHE Yi. Study on cumulative damage behavior of concrete under uniaxial cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 38-40. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X.2002.02.006.
- [15] 朱红光, 易成, 孙辅延, 等. 氯盐浓度对混凝土中氯离子渗透的影响规律[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 725-729. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.04.020.
- ZHU Hongguang, YI Cheng, SUN Fuyan, et al. Influence of chloride concentration on chloride ion penetration in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 725-729. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.04.020.
- [16] 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. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.012.
- CHENG Xiaokang, XIAO Linfa, WU Tingting, et al. Experimental study on chloride ion diffusion in saturated concrete [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 73-78. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.012.
- [17] 柳磊. 疲劳荷载耦合氯盐作用下混凝土中氯离子渗透性能的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- LIU Lei. Experimental study on chloride ion penetration in concrete subjected to fatigue load coupling with chloride[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.
- [18] 姚昌建, 金伟良, 王海龙, 等. 海工混凝土氯离子扩散系数随深度的变化规律[J]. 水利水运工程学报, 2008(4): 14-18. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2008.04.005.
- YAO Changjian, JIN Weiliang, WANG Hailong, et al. Change of chloride diffusion coefficient in marine concrete with depth[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(4): 14-18. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2008.04.005.
- [19] 李鹏飞, 阮猛, 王之强. 荷载作用下带裂缝砼梁氯离子渗透性能研究[J]. 公路与汽运, 2022(1): 115-118, 123. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.030.
- LI Pengfei, RUAN Meng, WANG Zhiqiang. Study on chloride ion permeability of concrete beams with cracks under load [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(1): 115-118, 123. DOI: 10.3969/j.issn. 1671-2668.2022.01.030.

(责任编辑:熊怡;英文编辑:冯硕)