

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.006



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



重复荷载作用后海工高性能混凝土梁刚度退化 试验研究

陆春华¹, 吴小龙¹, 蔡启明¹, 张菊连²

(1. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013; 2. 上海宏信建筑科技有限公司, 上海 201800)

摘要:在荷载长期作用下,钢筋混凝土受弯构件的变形是一个重要的评价指标,也是构件正常使用极限状态的验算内容之一。为了研究经历重复荷载后海工高性能混凝土梁的变形发展规律,设计制作了10根试验梁,分别进行了重复荷载试验、氯盐干湿试验以及两者的共同作用试验;通过四点受弯试验对梁的跨中挠度及刚度退化进行评价,提出了梁短期刚度规范计算公式的修正方法。研究表明:荷载水平按梁纯弯段弯矩等于 $0.4M_u$ 确定时,施加30次重复荷载后混凝土的损伤程度接近15%;对于仅进行氯盐干湿循环的试验梁,其跨中挠度发展要慢于参照梁;施加重复荷载后,试验梁的跨中挠度发展要快于参照梁;对施加重复荷载后的试验梁再进行氯盐干湿循环,梁的刚度退化更为显著。结合试验结果,采用损伤效应折减系数对梁短期刚度计算公式进行修正,并验证了修正公式的合理性和有效性。

关键词:重复荷载;海工混凝土梁;损伤度;氯盐环境;弯曲刚度

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)03-0171-09

Experimental analysis of bending stiffness degradation of marine high-performance concrete beam after action of repeated loads

LU Chunhua¹, WU Xiaolong¹, CAI Qiming¹, ZHANG Julian²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China;

2. Shanghai Horizon Construction Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, P. R. China)

Abstract: Under long-term loading, the deformation of reinforced concrete flexural members is an important evaluation index and it is one of the checking contents of the serviceability limit state. To study the degradation law of bending stiffness of marine high-performance concrete beams after action of repeated loads, a total of 10 test beams were designed and fabricated. After exposure to the repeated load test, the chloride solution dry-wet cycle test and their coupled test, the mid-span deflection development and stiffness degradation of the test beams were evaluated using the four-point bending test. A modified method for the code formula of beam short-term stiffness is proposed. The test results indicate that when the load level is determined according to the moment of the beam's pure bending section equal to $0.4M_u$, the damage degree in concrete approaches 15% after 30 cycles of repeated load. For the test beams exposed only to the chloride solution dry-wet cycles, their

收稿日期:2021-10-22

基金项目:国家自然科学基金(51878319)

作者简介:陆春华(1979-),男,博士,教授,主要从事混凝土结构长期性能研究,E-mail:lch79@ujs.edu.cn.

Received: 2021-10-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878319)

Author brief: LU Chunhua (1979-), PhD, professor, main research interest: long-term performance of concrete structures,

E-mail: lch79@ujs.edu.cn.

mid-span deflection develops slower than that of the reference beam. After the action of repeated loads, the mid-span deflection of these test beams develops faster than that of the reference beam. When the damaged beams were exposed to chloride solution dry-wet cycles, their degradation of bending stiffness became more obvious. Based on the experimental results, the damage effect reduction factors were proposed to revise the calculation formula of beam's short-term stiffness. The rationality and effectiveness of the revised formula are verified by the test data.

Keywords: repeated load; marine concrete beam; damage degree; chloride environment; bending stiffness

处于沿海环境下的混凝土桥梁,不仅要承受各种重复荷载的作用,还会遭受海洋环境侵蚀作用,导致其服役寿命远低于设计使用年限^[1]。在荷载作用下,结构混凝土会出现不同程度损伤以及由此引起的开裂;裂缝的存在,给外界氯离子侵入混凝土内部提供了便捷的通道,加快混凝土内钢筋锈蚀^[2]。锈蚀不仅会造成钢筋力学性能的下降,还会削弱混凝土与钢筋之间的粘结性能,从而对钢筋混凝土梁的受弯性能产生影响^[3]。

针对海洋环境下混凝土构件的耐久性劣化问题,学者们对持续荷载与氯盐环境耦合作用下钢筋混凝土梁的受弯性能进行了大量研究。Hariche等^[4]和Du等^[5]的研究表明,荷载的存在将加快混凝土内钢筋的锈蚀,且钢筋锈蚀会改变梁的受弯破坏模式以及降低其受弯承载力。Dong等^[6]研究了梁在加载和钢筋锈蚀(通电锈蚀)情况下的受弯性能,发现当钢筋锈蚀率在2%~3%时,梁受弯承载力下降不明显,但锈蚀对梁的延性影响较大。Li等^[7]认为当持续荷载水平在0%~15%内时,氯盐环境下混凝土梁内钢筋锈蚀率变化不大;当荷载水平增至30%时,锈蚀程度急剧上升;但当荷载水平增加到60%后,由于裂缝宽度变化不显著,故钢筋锈蚀率变化不大。Yin等^[8]发现当持续水平超过0.2时,荷载越大,梁的初始裂缝越宽,海洋环境中的氯离子更容易侵入混凝土内部,从而引起梁的刚度和承载力降低。

在实际工程中,沿海混凝土结构更多承受的是重复荷载,如汽车荷载、波浪荷载等;重复荷载作用会造成混凝土结构出现粘结性能降低、变形过大、裂缝过宽及发生低于静载强度的脆性破坏现象^[9-10]。目前,一些学者对重复荷载与氯盐环境耦合作用下钢筋混凝土梁受弯性能进行了试验研究。刘子键等^[11]的研究表明,当疲劳荷载水平大于0.24时,海水环境下钢筋混凝土梁的极限弯矩和初始刚度下降明显;王鑫等^[12]研究了重复荷载历史与海水干湿循环对钢筋混凝土梁受弯性能的影响,发现重复荷载水平越高,钢筋混凝土梁的受弯性能下降越明显。上述研究表明,重复荷载作用后,钢筋混凝土

梁在海水环境下的承载性能和正常使用性能均会出现不同程度的变化。随着海工高性能混凝土在沿海混凝土结构的推广应用^[13-15],经历重复荷载作用后该类混凝土梁的受弯性能退化机理值得关注和进一步研究。

笔者以海工高性能混凝土梁为研究对象,对部分试验梁施加一定次数的重复荷载,其荷载水平按梁纯弯段弯矩等于 $0.4M_u$ 确定^[16]。通过试验对比分析了重复荷载作用、氯盐干湿循环作用以及两者共同作用下,海工高性能混凝土梁的弯曲刚度退化特性;并将试验结果与规范GB 50010—2010^[17]中给出的短期刚度计算结果进行了比较,对重复荷载作用后氯盐环境下混凝土梁的刚度计算公式进行了修正。

1 试验研究

1.1 材料及试件设计

参照已有文献中海工高性能混凝土的设计方法^[13-14],选用大掺量粉煤灰和矿粉替代水泥,按混凝土强度等级C50进行配合比设计,具体见表1。胶凝材料中,水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥、粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰、矿粉为S95级矿粉;粗骨料为粒径5~25 mm的碎石;细骨料为细度模数为2.4的中砂;减水剂采用聚羧酸类高效减水剂。经28 d标准养护(温度 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度95%)后,测得该海工混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为53.06 MPa(见表1)。此外,梁内受拉钢筋选用直径为12 mm的HRB500级钢筋,箍筋和架立筋选用直径为8 mm的HRB400级钢筋,两者的力学性能见表2。

设计制作了10根海工高性能混凝土试验梁(见表3),梁截面高度约为长度的1/10,具体尺寸为150 mm×200 mm×1 800 mm。同时,在确定保护层厚度时,考虑《混凝土结构设计规范》(GB 51001—2010)^[17]中的三a类海风环境^[17]以及箍筋的直径,主筋的最小保护层厚度在50 mm左右;由于试验梁截面高度比实际工程混凝土梁要小,故按比例缩小取主筋保护层厚度为25 mm,相应的配筋率为0.89%。箍筋仅在弯剪段设置,其间距为100 mm;

表 1 混凝土配合比
Table 1 Concrete mix ratio

水胶比	水/ (kg/m ³)	胶凝材料/(kg/m ³)			石子/ (kg/m ³)	砂/ (kg/m ³)	高效减水剂/ (kg/m ³)	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa
		水泥	粉煤灰	矿粉				
0.4	160	200	80	120	1 140	700	0.8	53.06

注: f_{cu} 是 3 个标准立方体试块在 28 d 时测得的抗压强度平均值。

表 2 钢筋力学性能
Table 2 Mechanical properties of reinforcement

钢筋种类	直径 d /mm	伸长率 $\delta_{10}/\%$	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa
HRB500	12	17.10	591.53	673.79
HRB400	8	19.64	455.25	598.27

注: δ_{10} 是指钢筋试件量测标距取为 $10d$ 时的断后伸长率。

表 3 试验梁工况及参数
Table 3 Conditions and parameters of test beams

序号	梁编号	重复荷载次数	氯盐溶液侵蚀			试件数量	备注
			浓度/ $\%$	方式	周期/次		
0	B					1	28 d+84 d 后测定极限弯矩 M_u
1	B-0-0	0				1	参照梁
2	B-0-20	0	5	4:3 干湿	20	1	仅氯盐侵蚀
3	B-0-40	0	5	4:3 干湿	40	1	仅氯盐侵蚀
4	B-10-0	10				1	仅重复荷载
5	B-10-20	10	5	4:3 干湿	20	1	先加载后侵蚀
6	B-10-40	10	5	4:3 干湿	40	1	先加载后侵蚀
7	B-30-0	30				1	仅重复荷载
8	B-30-20	30	5	4:3 干湿	20	1	先加载后侵蚀
9	B-30-40	30	5	4:3 干湿	40	1	先加载后侵蚀

注:梁编号“B-aa-bb”中,数字 aa 表示重复荷载次数,数字 bb 表示氯盐干湿循环周期数。

具体构造如图 1 所示。同时,试验还准备了 9 组(每组 3 个)混凝土标准立方体试块;其中 2 组用于评定混凝土内部损伤,另外 7 组用于测定混凝土抗压强

度。试块编号统一为“C-aa-bb”,其中 C 表示立方体试块,数字 aa 和 bb 表达的含义与梁编号相同。

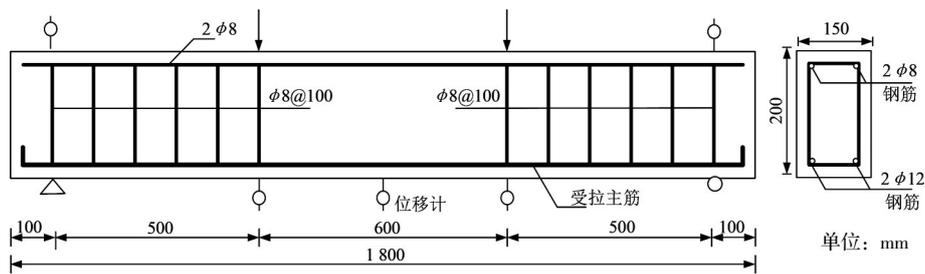


图 1 梁构造详图
Fig. 1 Detailed view of beam structure

1.2 重复荷载作用

正常使用状态下,混凝土结构的荷载水平一般在 0.4 左右^[16];鉴于此,荷载水平按梁纯弯段弯矩等于 $0.4M_u$ 确定(M_u 为试验梁 B 的极限弯矩实测值),对部分试验梁施加一定数量的重复荷载(见表 3),具体加载方案见图 2、图 3。在确定试验梁 B 的 M_u 时,为了使矿物掺合料得到充分水化、混凝土强度比较稳定,将已养护 28 d 的试验梁在室内自然环

境下再放置 84 d 后进行试验,最终测得梁 B 的极限弯矩 M_u 为 22.25 kN·m,相应的纯弯段加载弯矩为 $M=0.4M_u=8.90$ kN·m,此时,千斤顶荷载为 35.6 kN。对于序号为 4~9 的试验梁(见表 3),所有重复荷载作用在 3 d 内完成。

由于试验梁内配有钢筋,无法对施加重复荷载后梁中受压区混凝土损伤程度进行直接测定。故近似取相同的荷载水平,对混凝土标准立方体试块

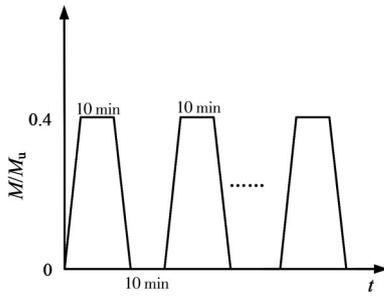


图 2 重复荷载施加机制

Fig. 2 Loading mechanism of repeated load



图 3 试验梁加载图

Fig. 3 Diagram of beam loading setup

施加一定次数的重复荷载(加载方案同图 2),通过测定试块混凝土的损伤来近似评价梁中混凝土的损伤。采用超声波法(见式(1))评价混凝土的损伤度 D ,具体结果见图 4(在图 4(a)中,数字①~③表示 3 个试块)。

$$D = (1 - E_{rd}) \times 100\% \quad (1)$$

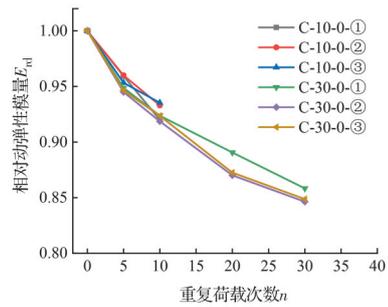
式中: E_{rd} 为混凝土试块的相对动弹性模量, $E_{rd} = (v_n / v_0)^2$;其中, v_0 、 v_n 分别为重复荷载作用前后混凝土的超声波波速。

从图 4 可以看出,在初期的重复加载过程(n 小于 10 次)中,相对动弹性模量下降较快,说明混凝土试块内部新产生的微裂缝发展比较快速,相应地损伤也发展较快;随着重复荷载次数增大至 30 次,试块相对动弹性模量下降速率逐渐降低,说明混凝土试块内部损伤发展速率趋于稳定;这与文献[18]的试验结果相一致。经 30 次重复加载后,受压混凝土的平均损伤度在 15% 左右。为了给出损伤度 D 和循环次数 n 之间的关系,采用指数函数进行拟合分析,结果如图 4(b) 所示;可以看出,拟合曲线能很好地反映两者的关系,具体表达式见式(2),相关系数 R^2 为 0.983。

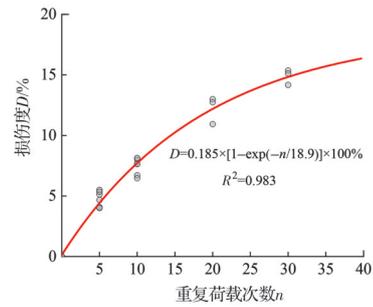
$$D = 0.185 \times [1 - \exp(-n/18.9)] \times 100\%, n \leq 30 \quad (2)$$

1.3 氯盐干湿循环

按表 3 中的设计方案,待重复荷载施加完成后(混凝土龄期为 115 d),将部分试验梁放入浓度为 5% 的 NaCl 溶液中进行干湿循环试验,每个干湿循



(a) 相对动弹性模量



(b) 损伤度 D

图 4 重复荷载作用后混凝土的损伤评价

Fig. 4 Evaluation of concrete damage after applying repeated load

环周期为 7 d,干湿比为 4:3,共计 280 d。同时,在进行干湿循环前及其过程中,对混凝土的立方体抗压强度进行了测定,结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,完好试块(编号 C-0)在干湿前的强度为 59.19 MPa,比 28 d 龄期强度提高了 11.6%;在干湿循环过程中,混凝土强度又有了一定的提升,经过 20 次(龄期为 255 d)和 40 次(龄期为 395 d)循环后,混凝土强度比干湿前又分别提升了 15.1% 和 10.2%,且呈现先增后略降的趋势。此外,对于施加重复荷载的试块(编号 C-10 和 C-30),其强度变化趋势同完好试块,但提高幅度随重复次数增加而降低。

1.4 受弯性能试验

待重复荷载试验和氯盐干湿循环试验结束后,

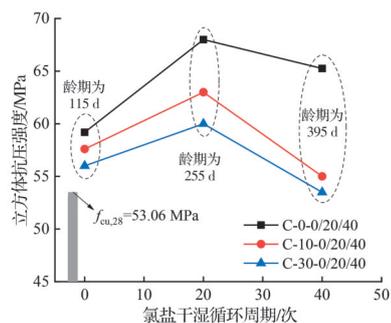


图 5 不同龄期混凝土抗压强度变化情况

Fig. 5 Variations of concrete compressive strength at different ages

对1~9号试验梁进行四点加载受弯性能试验。参照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[9],对试验梁进行分级单调加载,各级加载间隔10~15 min,直至试验梁破坏(以受压区混凝土被压碎为标志)。在此过程中,测量并记录试验梁的挠度、实时荷载等参数。试验梁加载装置如图3所示。

2 试验结果与分析

2.1 施加重复荷载时梁跨中挠度发展

图6给出了3根B-10试验梁以及3根B-30试验梁在施加重复荷载过程中的荷载-位移曲线;其中,对于B-10梁,给出了第1、4、7、10次加载-卸载过程跨中挠度变化情况;对于B-30梁,给出了第1、5、10、15、20、25、30次加载-卸载过程中跨中挠度变化情况。

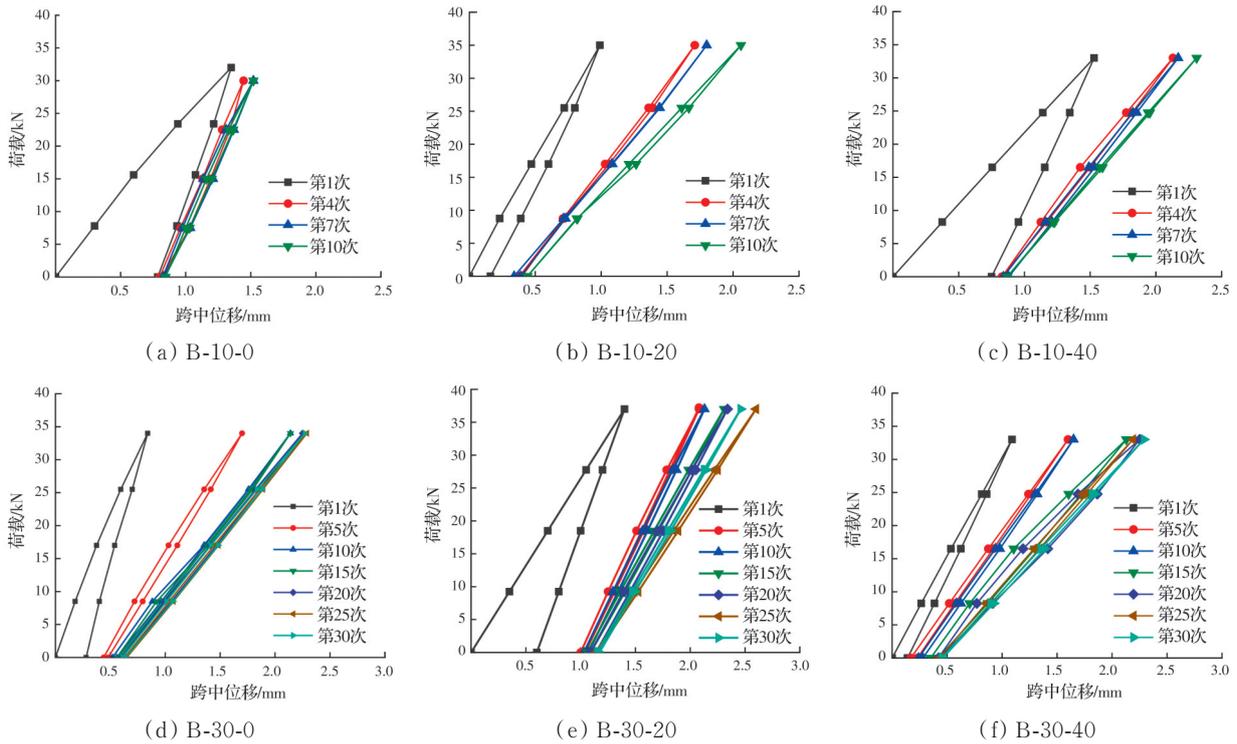


图6 重复荷载-跨中挠度曲线

Fig 6 Curve of repeated load and mid-span deflection

从图6可以看出,在首次加载-卸载过程中,两条位移曲线间隔较大;但随着重复荷载次数的增加,加载和卸载位移曲线趋于重合。上述结果表明,在首次加载-卸载过程中,梁产生较大的塑性变形,卸载后残余挠度较大;随后梁的跨中挠度发展近似处于弹性变形阶段,残余挠度较小。

2.2 受弯性能试验中梁跨中挠度的发展

2.2.1 仅施加重复荷载对梁跨中挠度的影响

对于仅施加重复荷载的试验梁,其受弯过程中的荷载-挠度曲线与参照梁之间的对比关系见图7。从图7可以看出,与参照梁B-0-0相比,施加重复荷载后试验梁跨中挠度曲线的斜率减小、挠度增大,这说明当梁受到重复荷载作用后,其刚度会有一定程度的降低。这是因为施加重复荷载后,混凝土损伤程度增大,且与钢筋之间粘结性能会有一定退化,从而导致梁挠度大于参照梁,即刚度逐渐下降^[20]。

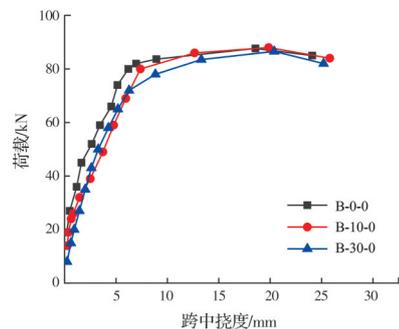


图7 施加重复荷载对梁荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 7 Effect of applied repeated loads on load-mid-span deflection curve of beams

2.2.2 仅氯盐干湿循环对梁跨中挠度的影响

图8给出了完好(未施加重复荷载)试验梁经氯盐干湿循环后的荷载-挠度曲线。从图8可以看出,在加载初期,经氯盐干湿循环作用后试验梁的跨中挠度发展与参照梁B-0-0相差不明显;但随着荷载

增大及梁底裂缝的快速发展,受干湿作用的梁 B-0-20 和梁 B-0-40 跨中挠度发展逐步慢于参照梁 B-0-0,即干湿作用后梁的抗弯刚度有所提升,且受弯承载力也有 20% 左右的提高。其主要原因在于^[21],混凝土内的矿物掺合料在氯盐溶液干湿循环作用下,其水化作用得到进一步发展,使混凝土抗压强度有一定的提升(见图 5),且混凝土与钢筋之间的粘结性能也会增强,从而提升梁的抗弯刚度和极限弯矩,减缓了挠度的发展^[22]。与梁 B-0-20 相比,梁 B-0-40 的挠度发展略微变快;这是因为当氯盐干湿循环持续进行后(从 20 次到 40 次),混凝土强度呈现下降的趋势(见图 5),从而使刚度有所降低^[23]。

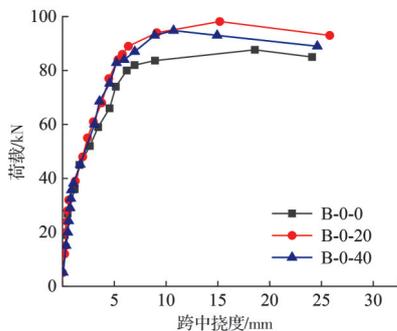


图 8 氯盐干湿循环对梁荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 8 Effect of chloride solution dry-wet cycles on load-mid-span deflection curve of beams

2.2.3 重复荷载作用后梁在氯盐干湿环境下的跨中挠度发展

以经历 40 次干湿循环的试验梁为例,经重复荷载历史与氯盐干湿循环共同作用后,试验梁的荷载-挠度曲线对比关系见图 9。对比图 9 可以看出:1) 在加载前期,梁 B-10-40 和 B-30-40 挠度变化速率较参照梁 B-0-0 略大;但随着荷载的增大,损伤梁挠度变化速率进一步增大,且远大于参照梁 B-0-0。2) 与图 7 给出的损伤梁跨中挠度发展相比,进行 40 次氯盐干湿循环后,损伤梁的跨中挠度发展更快。其主要原因在于,在氯盐干湿环境下,尽管混凝土抗压强度有一定的提升并且对抑制梁刚度的退化有作用,但随着受弯裂缝的发展,梁内部损伤产生的影响将逐步显现出来,使得梁刚度出现加速退化^[24-25]。此外,从图 7、图 9 中还可以看出,超过极限荷载(受压区混凝土被压碎)后,损伤梁的刚度退化速率要快于参照梁。

2.3 梁刚度退化分析

从图 7、图 9 中可以看出,当施加荷载与极限荷载的比值小于 0.8 时(一般认为处于正常使用阶段),试验梁的荷载-挠度曲线呈现近似的线性关系;因此,在此阶段内,可假定混凝土梁是近似弹性的。

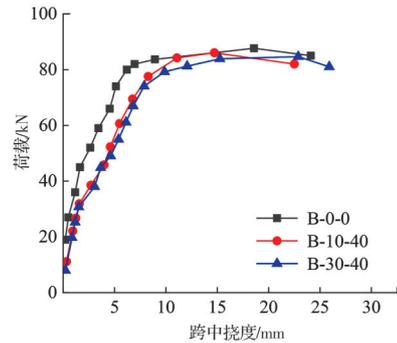


图 9 损伤梁在氯盐干湿循环作用下的荷载-跨中挠度曲线
Fig. 9 Load-mid-span deflection curve of damaged beams exposed to chloride solution dry-wet cycles

在此基础上,结合图 3 给出的梁四点受弯加载模式以及图 1 中的相关参数,运用结构力学求解弹性位移的方法(只考虑梁弯曲变形),可得到试验梁短期刚度 B_s 与跨中挠度 f_m 的计算关系,见式(3)。试验梁短期刚度实测值 B_s^m 的确定方法是,根据试验测得的梁跨中挠度 f_m 实测值,按式(3)计算 B_s^m 。

$$B_s = \frac{M(3L_0^2 - 4a^2)}{24f_m} = 108.7 \frac{ML_0^2}{f_m} \quad (3)$$

式中: L_0 为梁的计算跨度,m; a 为支座中线点至分配梁加载点的距离,m,此处 $a=5/16L_0$; M 为跨中截面弯矩, $N \cdot m$ 。

对于试验梁截面,由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[17]可得梁短期刚度 B_s 的计算公式,见式(4)。

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + 6\alpha_E \rho} \quad (4)$$

式中: E_s 、 A_s 分别为受拉钢筋的弹性模量和面积; h_0 为梁截面的有效高度; ρ 为受拉钢筋配筋率; α_E 为弹模比; ψ 为裂缝间受拉钢筋应变不均匀系数,按式(5)计算,其中 σ_s 为受拉钢筋所受拉应力, $\sigma_s=M/0.87h_0A_s$; ρ_{te} 为受拉钢筋有效配筋率, $\rho_{te}=A_s/0.5bh$ 。

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_t}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (5)$$

选取经历 40 次干湿循环的试验梁进行分析,由实测跨中挠度 f_m 经公式(3)推算得到不同工况下梁短期刚度实测值 B_s^m ,再按规范公式(4)计算得到预测值 B_s^p ,实测值与预测值的比较见图 10。从图 10(a)可以看出,在正常使用情况下,参照梁 B-0-0 的刚度实测值 B_s^m 与预测值 B_s^p 符合较好;而经历干湿循环后梁 B-0-40 的刚度实测值 B_s^m 要明显高于预测值 B_s^p ;其主要原因是规范计算公式中没有考虑干湿浸泡后混凝土抗压强度(见图 5)以及与钢筋之间粘结性能有所提升等这些有利因素,导致规范公式计算结果偏小。但从挠度控制的角度来看,采用规范公

式对该类混凝土梁构件的短期刚度进行分析是有一定的安全储备。

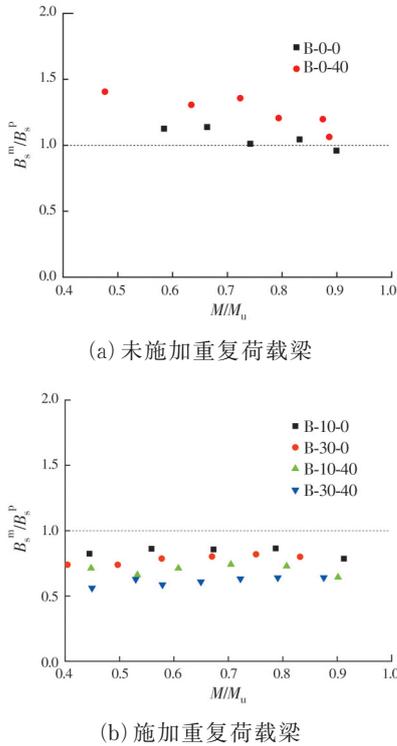


图 10 部分试验梁短期刚度实测值与预测值比较
Fig. 10 Comparison of measured stiffness and predicted stiffness of part test beams

从图 10(b)可以看出,重复荷载作用后梁抗弯刚度的规范公式预测值 B_s^p 已开始大于实测值 B_s^m (B_s^m/B_s^p 比值小于 1);当对这些损伤梁再进行氯盐干湿循环后,它们抗弯刚度的预测值 B_s^p 与实测值 B_s^m 的偏差变得更大。这主要是因为规范中未考虑到混凝土梁在荷载作用下内部损伤的积累,其刚度出现下降(与图 7 结果一致);并且在氯盐干湿循环过程中,虽混凝土强度有一定的提升,但由于裂缝的存在以及受拉钢筋应力不断增大,梁的刚度下降将更为明显,这也与图 9 给出的结果相一致。

2.4 梁刚度修正计算

由上述结果可知,对于有荷载作用经历的损伤混凝土梁,在大气或氯盐环境下,其弯曲刚度均会出现明显的退化,即按 GB 50010—2010 规范公式计算的预测值会偏大,需要对规范公式进行修正。现基于规范公式(4),引入考虑荷载作用经历的损伤效应函数 $\lambda(D)$;并针对氯盐干湿环境,引入环境劣化系数 K ;修正后的梁短期刚度 B_s' 计算公式为

$$B_s' = \lambda(D) \cdot K \cdot B_s \quad (6)$$

借助有荷载作用经历的损伤混凝土梁试验结果,通过回归分析得到损伤效应函数 $\lambda(D)$ 和环境劣化系数 K 的拟合结果(见图 11),相应的回归公式见

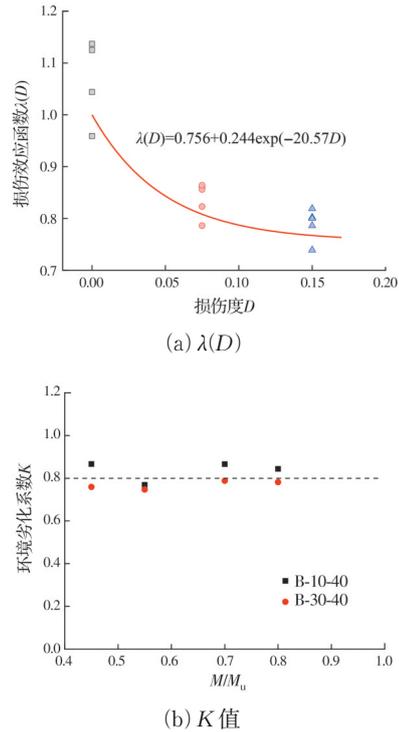


图 11 损伤效应函数 $\lambda(D)$ 和环境劣化系数 K 拟合结果
Fig. 11 Fitting results of damage effect function $\lambda(D)$ and deterioration coefficient K

式(7)、式(8)。将上述梁刚度的实测值 B_s^m 与修正后的刚度计算公式预测值 B_s^p 进行对比分析,结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出,修正后的刚度计

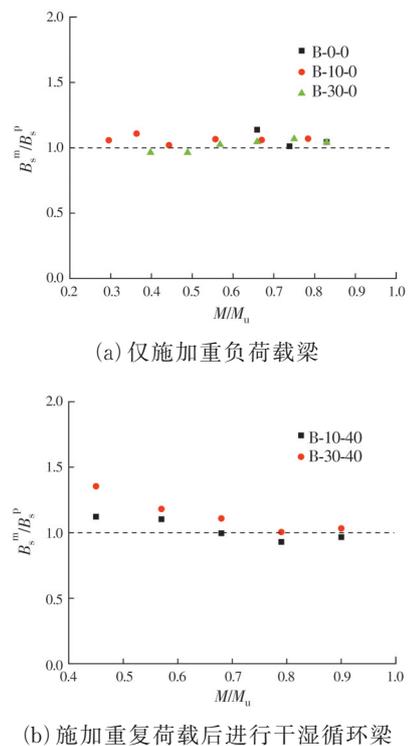


图 12 梁跨中刚度实测值与修正后计算值的对比
Fig. 12 Comparison of tested value and calculated value of mid-span stiffness after correction

算结果与试验实测结果符合较好, B_s^m/B_s^p 的均值为 1.093, 标准差为 0.083。

$$\lambda(D) = 0.756 + 0.244 \exp(-20.57D) \quad (7)$$

$$K = 0.8 \quad (8)$$

3 结论

1) 在短期氯盐干湿循环作用下, 混凝土强度将有一定的提升, 使得经氯盐干湿后受弯梁的跨中挠度发展比参照梁要慢, 即梁的抗弯刚度有所提升; 经历短期重复荷载作用后, 损伤梁的跨中挠度发展明显快于参照梁, 且混凝土损伤度(15%以内)越大, 梁弯曲刚度退化越明显。

2) 对于经历重复荷载作用的损伤梁, 经氯盐干湿循环作用后混凝土强度有所提升, 但由于裂缝的存在以及受拉钢筋应力不断增大, 梁内部损伤产生的影响将逐步显现出来, 梁刚度出现加速退化。

3) 对于经历重复荷载作用的海工混凝土梁, 其实际弯曲刚度已小于按 GB 50010—2010 规范公式(梁短期刚度)得到的预测值; 基于试验结果, 引入损伤效应函数 $\lambda(D)$ 和环境劣化系数 K 对短期刚度计算公式进行了修正, 调整后的模型能较好预测一般及氯盐环境下损伤海工混凝土梁的刚度退化。

参考文献

- [1] 金伟良, 夏晋, 毛江鸿. 混凝土结构耐久性电化学方法: 防护、修复、提升和控制[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
JIN W L, XIA J, MAO J H. Electrochemical technology for durability of concrete structures in protection, repair, enhancement and control [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [2] 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 S Q, CAO Z Y, LIU W J, 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. (in Chinese)
- [3] 崔钊玮, 刘荣桂, 陆春华, 等. 干湿循环与受弯裂缝共同作用下海工砼梁内氯离子侵蚀及耐久性寿命预测[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 344-351.
CUI Z W, LIU R G, LU C H, et al. Chloride ion erosion and durability life prediction of marine concrete beams under combined action of dry-wet cycle and flexural cracks [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 344-351. (in Chinese)
- [4] HARICHE L, BALLIM Y, BOUHICHA M, et al. Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(10): 1202-1209.
- [5] DU Y G, CULLEN M, LI C K. Structural effects of simultaneous loading and reinforcement corrosion on performance of concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2013, 39: 148-152.
- [6] DONG J F, ZHAO Y X, WANG K, et al. Crack propagation and flexural behaviour of RC beams under simultaneous sustained loading and steel corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 208-219.
- [7] LI H D, LI B, JIN R Y, et al. Effects of sustained loading and corrosion on the performance of reinforced concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 179-187.
- [8] YIN S P, NA M W, YU Y L, et al. Research on the flexural performance of RC beams strengthened with TRC under the coupling action of load and marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 251-261.
- [9] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SONG Y P. Fatigue behavior and design principle of concrete structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 曾帅. 带损伤混凝土梁腐蚀和疲劳作用下疲劳寿命试验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016.
ZENG S. Research on damage of concrete beam in fatigue life under the action of corrosion and fatigue load [D]. Beijing: North China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 刘子键, 郑晓宁, 刁波. 疲劳荷载与海水侵蚀作用下钢筋混凝土梁耐久性试验[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 171-177.
LIU Z J, ZHENG X N, DIAO B. Durability experiment of reinforced concrete beam under combined actions of seawater corrosion and fatigue loading [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 171-177. (in Chinese)
- [12] 王鑫, 庞森, 刁波, 等. 海水干湿环境下循环荷载损伤混凝土梁的力学性能劣化[J]. 工业建筑, 2017, 47(2): 67-70, 140.
WANG X, PANG S, DIAO B, et al. Mechanical performance degradation of RC beams damaged by different levels of cycle loading under seawater wet-dry environment [J]. Industrial Construction, 2017, 47(2): 67-70, 140. (in Chinese)
- [13] 刘家海, 于定勇, 李中会. 海工高性能混凝土含气量经时变化规律[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(8): 104-109.

- LIU J H, YU D Y, LI Z H. Time-dependent compressive air content of marine high performance concrete [J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(8): 104-109. (in Chinese)
- [14] 张敏杰, 蒋亚清, 赵越. 海工高性能混凝土配制及耐久性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(6): 1-5.
ZHANG M J, JIANG Y Q, ZHAO Y. Research on preparation and durability of marine engineering high-performance concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2017(6): 1-5. (in Chinese)
- [15] JALAL M, POULADKHAN A, HARANDI O F, et al. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 90-104.
- [16] 马宏强, 易成, 朱红光, 等. 煤矸石集料混凝土抗压强度及耐久性能[J]. 材料导报, 2018, 32(14): 2390-2395.
MA H Q, YI C, ZHU H G, et al. Compressive strength and durability of coal gangue aggregate concrete [J]. Materials Review, 2018, 32(14): 2390-2395. (in Chinese)
- [17] 混凝土结构设计规范 2015年版: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [18] 李永靖, 潘铖, 张淑坤, 等. 循环荷载对煤矸石混凝土损伤试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2531-2535.
LI Y J, PAN C, ZHANG S K, et al. Experimental study on damage of coal gangue concrete under cyclic load [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(8): 2531-2535. (in Chinese)
- [19] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [20] 万翱宙. 损伤钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
WAN A Z. Experimental study on fatigue behavior of the damaged reinforced concrete beam [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [21] 钟小平, 彭蓝鸽, 袁承斌, 等. 氯盐-锈蚀耦合损伤混凝土抗压强度试验[J]. 工业建筑, 2020, 50(12): 69-75.
ZHONG X P, PENG L G, YUAN C B, et al. Experimental research on compressive strength of concrete damaged by coupling of chlorine-corrosion [J]. Industrial Construction, 2020, 50(12): 69-75. (in Chinese)
- [22] 金伟良, 袁迎曙, 卫军. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
JIN W L, YUAN Y S, WEI J. Durability theory and design method of concrete structures in chloride environment [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [23] 李隽, 高培伟, 刘宏伟, 等. 混凝土在浸泡和干湿循环作用下的抗氯盐侵蚀性能[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(5): 666-670.
LI J, GAO P W, LIU H W, et al. Study on concrete resistance to chloride salt corrosion under full soaking and wet-dry cycling condition [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(5): 666-670. (in Chinese)
- [24] 莫齐伟, 商怀帅, 徐芹文. 加速锈蚀与持续荷载对钢筋混凝土粘结性能的影响[J]. 建筑结构, 2021, 51(14): 112-116, 93.
MO Q W, SHANG H S, XU Q W. Research on bonding performance between steel bar and concrete under accelerated corrosion and sustained load [J]. Building Structure, 2021, 51(14): 112-116, 93. (in Chinese)
- [25] 邹正浩, 杨国姣, 吴瑾, 等. 钢筋锈蚀再生混凝土梁刚度退化规律及计算方法研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(4): 86-90, 64.
ZOU Z H, YANG G J, WU J, et al. Degradation law and calculation method of stiffness of recycled concrete beams with corroded rebars [J]. Building Structure, 2021, 51(4): 86-90, 64. (in Chinese)

(编辑 胡玲)