

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.03.32

紫外线与冻融循环作用下的混凝土耐久性研究

徐帆¹, 贺新星², 王瑞骏¹, 缙彦强¹, 李阳¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 分别制作3种不同水灰比的面板混凝土试件,在紫外线辐射试验的基础上,以未经紫外线辐射的试件作为对照组,对各组经相同时间紫外线辐射后的试件进行冻融循环试验,并每隔一定的冻融次数测定试件的质量及动弹性模量,根据试验结果,进行拟合分析,建立了考虑紫外线辐射的冻融循环损伤度模型。结果表明:在一定冻融循环次数下,水灰比越小,质量损失率越小,相对动弹性模量越高,混凝土的抗冻性越好;相较于未经紫外线照射的对照组,经过紫外线照射的试件在经过一定循环次数的冻融后,其质量损失率更大;紫外线辐射对低强混凝土的质量损失率影响主要是在冻融循环的早期表现出来,而对高强混凝土则是在冻融循环的晚期表现出来;获得的冻融循环损伤度模型能够较好地反映经过紫外线辐射作用的面板混凝土的冻融循环损伤演变规律。

关键词: 紫外线辐射; 面板混凝土; 水灰比; 冻融循环; 质量损失率; 冻融循环损伤模型; 混凝土耐久性
中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)03-0188-06

Study on durability of concrete under ultraviolet radiation and freeze-thaw cycles

XU Fan¹, HE Xinxing², WANG Ruijun¹, GOU Yanqiang¹, LI Yang¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. China Three Gorges Projects Development Corporation Limited, Chengdu 610000, China)

Abstract: Three kinds of concrete panel specimens with different water cement ratio were made respectively, on the basis of the ultraviolet radiation test, specimens without uv radiation were used as a control group, and the freeze-thaw cycle test on each specimen irradiated with ultraviolet radiation at the same time for each group. The quality and dynamic modulus of the specimens are measured at regular intervals. According to the results of the test, a freeze-thaw cycle damage degree model considering ultraviolet radiation is established by the fitting analysis. The results showed that under a certain number of freeze-thaw cycles, the smaller the water-cement ratio and the lower the mass loss rate is, the higher the relative dynamic elastic modulus is, the better the frost resistance of the concrete is. Compared to the control group without ultraviolet radiation, the mass loss rate was greater after a certain number of cycles of freezing and thawing. Ultraviolet radiation effect on low strength concrete mass loss is mainly reflected in the early days of the freeze-thaw cycle, and of high strength concrete is expressed in the late stage. The obtained freeze-thaw cycle damage model is a good way to reflect the evolution of the frozen and melt cycle of the concrete with ultraviolet radiation.

Key words: ultraviolet radiation; face slab concrete; water-cement ratio; freeze-thaw cycle; the mass loss rate; freeze-thaw cycle damage model; concrete durability

目前国内外对水工大体积混凝土的耐久性研究较为深入,而对面板混凝土耐久性研究还处于初级阶段,工程界目前关于面板混凝土的耐久性影响研

究,仍大多局限于单一因素,然而在实际的工程环境中,有些地区面板混凝土不可能仅仅受到一种破坏^[1]。西部地区特有的强紫外线辐射、高寒的气候

收稿日期:2017-10-28; 修回日期:2018-01-02

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS092)

作者简介:徐帆(1993-),男,安徽合肥人,在读硕士研究生,主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者:王瑞骏(1963-),男,陕西宝鸡人,博士,教授,主要从事坝工应力研究。

条件及存在大量盐湖地区的自然地理条件,对水工混凝土的耐久性会产生很大影响^[2]。近年来相关学者对硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下混凝土耐久性进行了复合损伤机理和混凝土劣化规律研究,并取得丰硕的成果。张云清等^[3]对混凝土在硫酸镁溶液中的抗冻性进行了研究,指出不同性能的混凝土,受硫酸镁溶液的影响程度不同。苑立冬等^[4]研究了不同溶液与冻融共同作用下混凝土损伤试验,得出硫酸盐溶液对混凝土冻融破坏既存在抑制作用,又存在促进作用。李阳等^[5]研究了不同水灰比的面板混凝土在硫酸钠溶液中单一冻融循环、单一硫酸盐侵蚀及冻融循环及硫酸盐侵蚀交替试验下面板混凝土的质量损失率及相对动弹模量变化规律和特点,并得出相应规律。

相比之下,紫外线辐射与冻融共同作用对混凝土耐久性研究文献相对较少^[6-10],紫外线辐射对混凝土的劣化机理还未有深入研究,仅通过老化试验得到混凝土的力学性能和一些微观结构的变化,劣化机制尚未彻底揭示,目前很少有学者建立相关的耐久性预测模型^[11]。因此,本文在前人研究的基础上考虑冻融循环因素,通过研究紫外线辐射在内的多因素作用下面板混凝土的耐久性,为预测混凝土面板的寿命以及工程设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料及混凝土配合比

试验材料的选取按照 SL228-2013《混凝土面板堆石坝设计规范》^[12]要求,本次试验采用普通硅酸盐水泥,强度等级为 42.5R;粉煤灰采用渭河电厂

Ⅱ级粉煤灰;骨料采用河砂及粒径 5~35mm 的天然卵石;外加剂采用聚羧酸高效减水剂以及三萜皂甙高效引气剂;水采用普通自来水。试验设计了 3 组不同水灰比的配合比混凝土试件^[13],每组设置 1 组试验组(S)与 1 组对照组(D)。混凝土 28d 抗压强度测定时,不同配合比取 3 个试件的平均值。混凝土配合比及力学性能见表 1,由表 1 可知 3 组试件的 28 d 抗压强度均满足规范要求。

1.2 试件制作及试验方法

制作 3 组规格为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的长方体混凝土试件,制作完成后将试件放入标准养护箱中养护 28 d,到达试验龄期前的 4 d,将试件从养护箱中取出,试验组试件放入紫外线老化试验箱中进行紫外线辐射试验;对照组则在相同温度的养护箱内进行养护,试验结束后,将所有试件擦去表面积水,用电子称测量初始质量,并用动弹仪测量初始自振频率,同时进行相关的外观描述及拍照。

1.2.1 紫外线辐射试验 本试验采用型号为 SC/ZN-PA 紫外线老化试验箱模拟紫外线照射环境,将养护到一定龄期的混凝土试件放入试验箱进行紫外线辐射试验,箱内温度保持在 35℃。在每组试验进行的同时设置 1 组对照组,在同样 35℃ 的混凝土养护箱内进行养护,用以比较紫外线辐射对混凝土试件造成的影响,试验过程如图 1、2 所示。

1.2.2 冻融循环试验 将测试完毕的试验组试件放入冻融循环机的试件盒内(如图 3、4 所示),按照 GB/T82-09《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[14]进行冻融试验,每 25 次结束时,测量试件的质量损失率及相对动弹性模量。

表 1 混凝土配合比及力学性能

编号	水泥	水	砂	石	粉煤灰/%	引气剂/%	减水剂/%	水灰比	28d 抗压强度/MPa
A	295	129	691	1234	20	0.03	1.0	0.35	35.6
B	258	129	716	1251	20	0.03	1.0	0.40	32.6
C	229	129	738	1261	20	0.03	1.0	0.45	27.6



图 1 紫外线老化试验箱

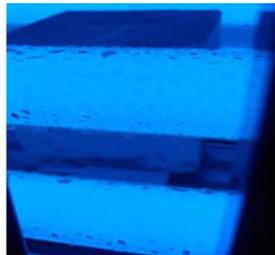


图 2 紫外线辐射试验过程



图 3 混凝土冻融试验机



图 4 冻融循环机内试件摆放情况

1.3 试验结果的整理与分析方法

本次冻融循环试验的结果以混凝土质量损失率、相对动弹模量为标准,具体整理及分析方法按 SL191-2008《水工混凝土试验规程》^[15] 要求。紫外线辐射对于质量损失率的影响显著性采用方差分析,方差分析(analysis of variance,简称 ANOVA),是一种实用、有效的处理试验数据的统计检验方法,能用于检验试验过程中有关因素对试验结果影响的显著性,其中双因素试验的方差分析(two-way analysis of variance)是讨论两个因素对试验结果影响的显著性,根据两个因素每种组合水平上的试验次数,可以分为无重复试验和重复试验的方差分析,本次试验结果数据处理中用到的是无重复试验方差分析。

2 试验结果与分析

2.1 质量损失率试验结果分析

2.1.1 质量损失率试验结果 各组试件的质量损失率试验结果见表 2,各组试件在不同冻融次数下的质量损失率变化趋势如图 5 所示。其中 A、B、C 分别为水灰比不同的 3 组试件, A(S)、B(S)、C(S) 表示各组试件中的试验组(经过紫外线辐射), A(D)、B(D)、C(D) 表示各组试件中的对照组(无紫外线辐射)。

表 2 各组试件质量损失率 %

冻融次数	试件组					
	A		B		C	
	A(S)	A(D)	B(S)	B(D)	C(S)	C(D)
0	0	0	0	0	0	0
25	-0.04	-0.03	0.22	0.16	0.87	0.38
50	-0.04	-0.03	0.44	0.40	0.99	0.62
75	-0.03	-0.02	0.62	0.51	1.20	0.82
100	-0.02	-0.01	0.74	0.56	1.42	1.21
125	0.02	-0.01	0.94	0.75	1.59	1.44
150	0.24	0.06	1.25	1.12	2.22	2.25
175	0.49	0.18	1.71	1.72	2.85	2.76
200	0.70	0.58	1.83	1.72	3.32	3.56
225	0.73	0.66	2.14	2.20	3.95	3.79
250	0.83	0.79	2.50	2.35	4.50	4.25
275	0.92	0.88	2.85	2.88	4.80	4.72

2.1.2 质量损失率结果分析

(1)在不同水灰比条件下,C 组试件的质量损失率最大,A 组试件的质量损失率最小,可以得出:

在一定冻融循环次数下,水灰比越大,质量损失率越大,混凝土的抗冻性越差。

(2)随着冻融循环次数增加,3 组试件的质量损失率逐渐增大,但质量损失率增长的速度却有所差异。对照组的 3 组试件,其质量损失率增速基本上都呈现出先加速后减速的趋势。但试验组的 3 组试件中,C 组试件在冻融循环试验的早期阶段,其质量损失率增速就已经达到较高的程度,整体上呈现趋势为先减速后匀速。通过分析该现象,可能由于紫外线辐射对 C 组试件的表面砂浆造成不利影响,使其在冻融循环试验早期便形成了冻融损伤。

(3)在冻融循环次数低于 125 次时,A 组试件(W/C=0.35)对照组与试验组的质量损失率没有明显差异,在循环次数 125~200 次阶段之间时,试验组的质量损失率相较于对照组更大,在循环次数 200 次之后,试验组与对照组的质量损失率基本保持一致;在冻融循环次数低于 175 次时,B 组试件(W/C=0.40)试验组的质量损失率相较于对照组更大,在冻融循环次数大于 175 次后,试验组与对照组的质量损失率基本保持一致;在冻融循环次数低于 150 次,C 组试件(W/C=0.45)试验组的质量损失率相较于对照组更大,在循环次数大于 150 次后,试验组与对照组的质量损失率基本保持一致。

从以上分析结果可知,紫外线辐射对低强混凝土的抗冻性影响主要体现在冻融循环的早期,而对高强混凝土影响,却需要经历一定次数的冻融循环后方能表现出来。

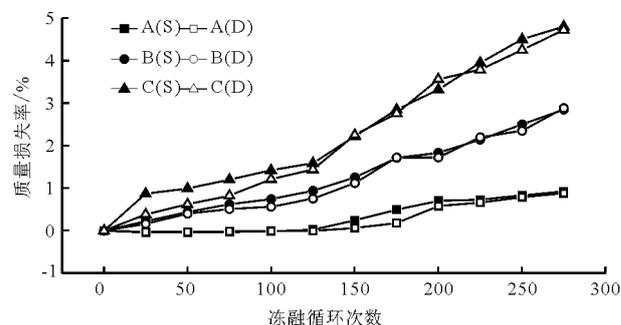


图 5 各组试件的质量损失率

2.1.3 方差分析 从表 2 中虽可得出水灰比与冻融循环次数对质量损失率有明显的影响,但紫外线辐射对质量损失率是否有明显的影响难以直接判断,因此采用方差分析的方法来检验紫外线辐射对于质量损失率的影响是否显著。

以冻融循环次数与紫外线辐射为影响因素进行双因素无重复试验的方差分析,对于紫外线因素,F 服从

自由度为(1,11)的 F 分布,方差分析结果见表 3。

表 3 方差分析结果

试验编号	F	F _{α/2}	显著性
A	5.60	4.84/0.05	显著
B	8.80	4.84/0.05	显著
C	7.51	4.84/0.05	显著

由表 3 可以看出,紫外线辐射对 A、B、C 组混凝土质量损失率试验结果均有显著影响。

2.2 相对动弹性模量试验结果分析

2.2.1 相对动弹性模量试验结果 各组试件的相对动弹性模量试验结果见表 4,各组试件在不同冻融次数下的动弹性模量变化趋势如图 6 所示。

表 4 各组试件相对动弹性模量 %

冻融次数	试件组					
	A		B		C	
	A(S)	A(D)	B(S)	B(D)	C(S)	C(D)
0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.42	100.24	99.32	100.12	94.56	95.25
50	99.79	99.65	95.56	96.32	91.20	92.53
75	97.21	97.81	93.55	95.32	88.32	89.65
100	93.20	93.12	90.90	91.52	87.20	87.32
125	91.35	91.25	88.66	89.56	84.52	85.12
150	89.32	90.41	86.32	84.90	81.52	84.32
175	86.52	87.93	84.21	83.87	79.54	78.99
200	87.53	88.12	81.52	80.32	75.54	74.98
225	87.36	86.55	77.52	77.80	74.32	74.12
250	85.65	86.23	76.65	75.90	71.25	70.30
275	84.59	84.50	74.32	75.32	68.45	67.32

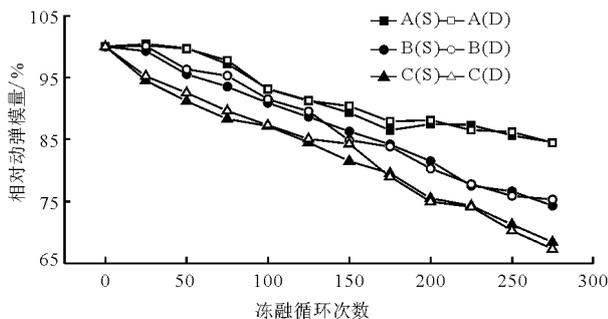


图 6 各组试件的相对动弹性模量

2.2.2 相对动弹性模量结果分析

(1)在不同水灰比条件下,在对照组试件中,C 组试件的相对动弹性模量下降最多,A 组试件的相

对动弹性模量下降最少。可以得出:在一定冻融循环次数下,水灰比越小,相对动弹性模量越高,混凝土的抗冻性越好,这与质量损失率试验结果相吻合。

(2)在不同紫外线辐射条件下,3 组试件中考虑紫外线辐射的试验组试件相较于未考虑紫外线辐射的对照组试件,其动弹模量的变化规律有所区别,且在不同的冻融试验阶段,相对动弹模量随着水灰比的不同而有所差异。其中,A 组试件在冻融循环试验的中期阶段,试验组的相对动弹模量相较于对照组更低,而在试验的其他阶段试验组与对照组的相对动弹模量基本一致;B 组与 C 组试件在冻融循环试验前期阶段,试验组的相对动弹模量相较于对照组更低,在试验的其他阶段,试验组与对照组的相对动弹模量没有明显区别。

3 考虑紫外线辐射作用的冻融循环损伤模型研究

损伤度是用来描述材料受到荷载等外部因素以后,材料内部结构的受损伤状态以及这种状态对于材料的力学以及外观性能的影响。从损伤理论角度理解,混凝土结构中出现的各种微裂纹和微缺陷可以看作一个材料内连续分布的损伤场。相对动弹性模量指标在冻融循环试验中便于测量和分析,同时也是描述混凝土材料内部变化的一个重要指标,可以将相对动弹性模量用来定量地分析混凝土材料的内部损伤程度,因此损伤度 D_n (损伤变量) 定义如下:

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (1)$$

式中: D_n 为循环 n 次后混凝土的损伤度,%; E_n 为冻融循环 n 次后动弹模量值,MPa; E_0 为混凝土初始动弹模量值,MPa。

由于混凝土材料的特殊性以及混凝土结构复杂的荷载作用,想要建立一个能适用所有状态下混凝土结构损伤本构方程是非常困难的,所以很多研究人员在理论研究的过程中,通过相应的条件假设和近似分析,总结了各种状态下不同的损伤模型。本文在已有的一些冻融循环损伤模型研究基础上,通过数据拟合为本次试验结果建立合适的损伤模型。

(1) 修正的 Loland 混凝土损伤模型^[16]:

$$D = 1 - \left[(1 - D_0)^{\beta+1} - \frac{C(\beta + 1)\sigma_{\max}^\beta}{E^\beta} n \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (2)$$

式中: D 为冻融循环 n 次后混凝土的损伤度; D_0 为试验开始时的损伤度, $D_0 = 0$; β 为材料参数; σ_{\max}

为混凝土在一个冻融循环作用内所承受的最大平均静水压力; n 为冻融循环次数。

由于混凝土内部液相压力测量复杂,上式简化为:

$$D = 1 - [1 - pn]^k \quad (3)$$

式中: p, k 可由试验结果拟合确定。

将试验的数据代入上述损伤模型中,可以得到各组试件的冻融损伤模型,见表5。

各组拟合曲线与试验实测值的对比图见图7~12所示。

表5 各组试件拟合曲线公式

试件组	拟合曲线公式	相关系数 R
A(S)	$D = 1 - [1 + 0.007n]^{-1.06}$	0.9365
A(D)	$D = 1 - [1 + 0.004n]^{-1.82}$	0.9563
B(S)	$D = 1 - [1 + 0.003n]^{-3.33}$	0.9960
B(D)	$D = 1 - [1 + 0.002n]^{-4.57}$	0.9924
C(S)	$D = 1 - [1 + 0.012n]^{-1.25}$	0.9951
C(D)	$D = 1 - [1 + 0.004n]^{-3.54}$	0.9923

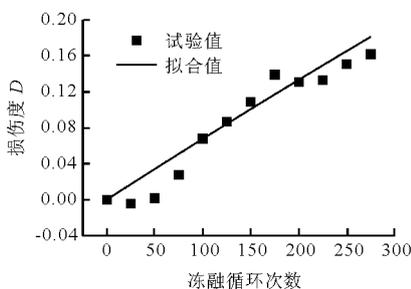


图7 A(S)组损伤度拟合曲线

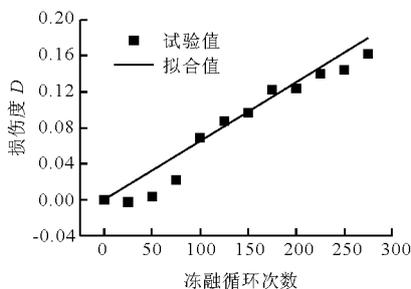


图8 A(D)组损伤度拟合曲线

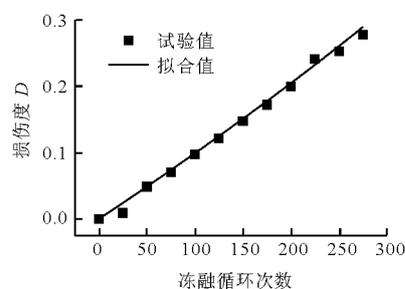


图9 B(S)组损伤度拟合曲线

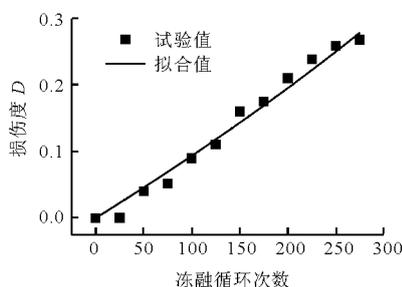


图10 B(D)组损伤度拟合曲线

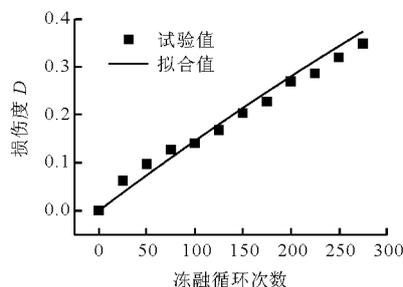


图11 C(S)组损伤度拟合曲线

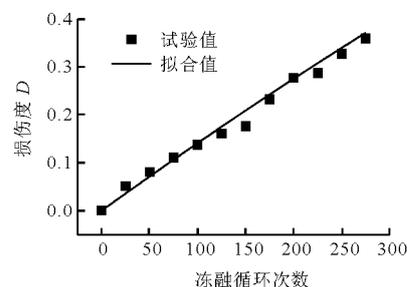


图12 C(D)组损伤度拟合曲线

由图7~12可知,A组试件的损伤度随着冻融循环次数的增加呈现出先加速后减速的趋势,而C组试件的损伤度在试验刚开始阶段增加较快,然后匀速增加。造成这种区别的原因可能是C组试件表面受到紫外线作用更为显著,在冻融循环开始阶段表面的砂浆就快速损伤,这与之前紫外线对低水灰比混凝土抗冻性的影响在更早的时段表现出来的结论相吻合。

各组拟合得到的损伤度模型与试验结果较为吻合,且相关系数 R 都在0.93以上,说明损伤模型与试验数据拟合精度较高,所以建立的冻融循环损伤度模型对本次试验结果来说是合理的。该损伤度模型对于试验组及对照组的拟合结果都较好,且没有较大区别,所以紫外线辐射因素造成的耐久性影响也处于该冻融循环损伤模型的合理范围内。

4 结论

本文通过对紫外线辐射与冻融循环试验方法的

设计,对不同水灰比的面板混凝土进行了紫外线辐射试验及冻融循环试验。通过对试验数据分析,得出以下结论:

(1)在其他条件一定的情况下,水灰比越低的混凝土抗冻性能越强,表现为质量损失率低,相对动弹性模量大,因此对于有抗冻性要求的混凝土选择合适的水灰比十分重要。

(2)经紫外线辐射的混凝土抗冻性能变差,且随着水灰比的不同在冻融循环试验的不同阶段表现出来。紫外线辐射对低强混凝土的抗冻性影响主要是在冻融循环的早期表现出来,而对高强混凝土在进行一定次数的冻融循环试验后才能表现出来。这可能是由于紫外线辐射对混凝土的表面砂浆造成了不利影响,使之在冻融损伤早期便快速剥落,而由水灰比不同,高强混凝土冻融损伤产生的时间更晚。在一定冻融循环次数后紫外线辐射对混凝土抗冻性的影响逐渐消失,本次试验在275次冻融循环后,经紫外线辐射的混凝土抗冻性与未经辐射的混凝土相同。

(3)本文选用的冻融循环损伤模型能较好地拟合考虑紫外线作用的冻融循环损伤。

参考文献:

- [1] 刘崇熙,汪在芹. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. 长江科学院学报,2000,17(2):18-21.
- [2] 叶奋,黄彭. 沥青紫外线老化仿真系统的建立[J]. 建筑材料学报,2005,8(5):567-571.
- [3] 张云清,余红发,孙伟,等. MgSO₄ 腐蚀环境作用下混凝土的抗冻性[J]. 建筑材料学报,2011,14(5):698-702.
- [4] 苑立冬,牛获涛,姜磊,等. 硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下混凝土损伤研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(6):1171-1176.
- [5] 李阳,王瑞骏,程金标,等. 冻融循环及硫酸盐侵蚀双因素下面板混凝土耐久性研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):177-181.
- [6] 李尧,刘厚元,郑康琳,等. 青藏高原混凝土梁桥的常见病害及工程对策分析[J]. 西部交通科技,2016(10):33-37+60.
- [7] 齐亚妮,王晓飞,张广泰,等. 新疆强紫外线地区橡胶沥青的光老化研究[J]. 公路,2010(11):175-179.
- [8] 王学川,孙红尧,申明霞,等. 混凝土用有机硅渗透剂耐紫外老化性能研究[J]. 水利水运工程学报,2016(5):96-102.
- [9] 崔璐. 纤维复合材料(FRP)加固混凝土抗紫外线老化性能试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2012.
- [10] 彭成,肖苗良,叶恒达,等. 再生混凝土耐久性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):126-130.
- [11] 王志刚,李鑫,刘数华. 紫外线辐射对水工混凝土耐久性影响研究与展望[J]. 水力发电,2013,39(5):46-47+54.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL228-2013 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [13] 杨绍林,田加才,田丽. 新编混凝土配合比使用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T82-09 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL191-2008 水工混凝土试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [16] 冀晓东,宋玉普,刘建. 混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 计算力学学报,2011,28(3):461-467.
- [7] PENG Y, XIA J X, CAO B, et al. Spatial configurations and particle transportation parameters of flexible hose in deep-sea Mining System[J]. Journal of the American Academy of Dermatology, 2015, 27(27):989-993.
- [8] 王刚,刘少军,李峰. 海洋采矿扬矿软管单元耦合建模方法与形态分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(s2):234-240.
- [9] RUAN Weidong, BAI Yong, CHENG Peng. Static analysis of deepwater lazy-wave umbilical on elastic seabed[J]. Ocean Engineering, 2014, 91:73-83.
- [10] 简曲,何永森,王明和. 大洋采矿输送软管动力特性的数值研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(2):59-64.
- [11] 张伟,覃振东. 环境荷载参数对钢悬链线立管动力响应的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3):99-105.
- [12] “十五”采矿海试系统总师组. 大洋多金属结核中试采矿系统1000m海上试验总体系统技术设计[R]. 北京:中国大洋协会研究报告, 2004:25-26.
- [13] 李艳. 基于三维离散元管线模型的深海采矿1000m海试系统整体联动动力学研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.
- [14] SON Y, LEE J H. Flapping dynamics of coupled flexible flags in a uniform viscous flow[J]. Journal of Fluids & Structures, 2017, 68:339-355.
- [15] HOSKING R J, DEWAR R L. Fundamental Fluid Mechanics and Magnetohydrodynamics[M]. Singapore: Springer Singapore, 2016.
- [16] HENCLIK S. A numerical approach to the standard model of water hammer with fluid-structure interaction[J]. Journal of Theoretical & Applied Mechanics, 2015, 53(3):543-555.
- [17] AHMADI A, KERAMAT A. Investigation of fluid-structure interaction with various types of junction coupling[J]. Journal of Fluids & Structures, 2010, 26(7):1123-1141.
- [18] 宋学官,蔡林,张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [19] 吴梓鑫,陈昆鹏. 波浪作用下柔性立管载荷响应数值分析[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2016, 39(4):14-21.
- [20] HUANG Weixi, CHANG C B, SUNG H J. An improved penalty immersed boundary method for fluid-flexible body interaction[J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230(12):5061-5079.
- [21] HUANG Weixi, CHANG C B, SUNG H J. Three-dimensional simulation of elastic capsules in shear flow by the penalty immersed boundary method[J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(8):3340-3364.
- [22] LEE J H, HUANG Weixi, SUNG H J. Flapping dynamics of a flexible flag in a uniform flow[J]. Fluid Dynamics Research, 2014, 46(5):055517.

(上接第187页)