



基于敏感性分析方法的地下室外墙渗漏风险判别

程小春¹, 傅 军², 徐煜佳², 李 洁², 叶文韬²

(1. 浙江广厦建设职业技术大学建工学院, 浙江东阳 322106; 2. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了准确判别地下室外墙渗漏风险, 采用敏感性分析方法对易渗漏部位以及地下水渗流规律进行分析, 并提出了渗漏风险判别方法以及部分定量预防措施。首先对已有研究进行归纳, 并根据工程案例实测数据, 采用帕累托分析法对渗漏影响因素进行排序以确定主要影响因素; 然后根据分层复合材料渗流理论推导地下水在地下室外墙中的分层渗流规律, 从材料组成和密实度两方面判别地下室的渗漏风险; 最后根据敏感性分析结果从多维度提出风险预防措施。研究表明: 基于数据统计的帕累托分析法可以确定易漏部位及风险排序, 从而采取针对性的设计、施工和监管措施; 基于分层渗流规律计算的判别方法可以明确渗漏风险主控因素, 如调整外墙厚度、采取更高抗渗等级的混凝土、在敏感性部位增加表层砂浆等。该方法可以为地下室外墙渗漏预防措施给出部分定量分析结论。

关键词: 地下室外墙渗漏; 敏感性分析; 帕累托分析法; 分层渗流规律; 预防措施

中图分类号: TU91

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 05-0452-06

Identification of basement exterior wall leakage risks based on sensitivity analysis method

CHENG Xiaochun¹, FU Jun², XU Yujia², LI Jie², YE Wentao²

(1. School of Construction Engineering, Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Dongyang 322106, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to accurately identify the leakage risks of basement exterior wall, the sensitivity analysis method was used to study the vulnerable parts and the groundwater seepage law, and the identification methods of leakage risks as well as some quantitative preventive measures were put forward based on the research results. Firstly, the existing research was summarized, and the leakage influencing factors were ranked using the Pareto Analysis based on the actual measurement data of the engineering case, so as to determine the main influencing factors. Then, the layered seepage law of underground water in the basement exterior wall was inferred according to the theory of layered composite material seepage theory, and the leakage risks of the basement were identified from two aspects of the material composition and compactness. Finally, risk prevention measures were proposed from multiple dimensions based on the sensitivity analysis results. The results show that the Pareto Analysis based on data statistics can determine the vulnerable parts and risk ranking, so as to adopt targeted design, construction and supervision measures; the identification method based on the calculation of the layered seepage law can clarify the main controlling factors of leakage risks, such as adjusting the thickness of the exterior wall,

收稿日期: 2021-10-16 网络出版日期: 2022-03-18

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGF18E080016); 浙江省教育厅科研项目(Y202147759)

作者简介: 程小春(1985—), 女, 浙江东阳人, 工程师, 硕士, 主要从事工程管理、施工技术方面的研究。

通信作者: 傅 军, E-mail: fujunfujun@163.com

adopting concrete with a higher impermeability level, adding surface mortar in sensitive parts, etc. The proposed methods can provide some quantitative analysis conclusions for the preventive measures of basement exterior wall leakage.

Key words: basement exterior wall leakage; sensitivity analysis; Pareto Analysis; layered seepage law; preventive measures

0 引言

随着中国建筑行业不断发展,地下室工程占比逐年增加。地下室能增加建筑使用面积,提高用地效率。然而,由于受地下水及建造过程的影响,地下室外墙容易发生渗漏,引发墙体受潮腐烂、混凝土内钢筋锈蚀等问题,从而严重影响地下室使用功能,降低了建筑物的安全性^[1-4]。关于地下室外墙渗漏问题的防治,当前研究主要是在定性分析的基础上对地下室外墙实施渗漏预防和修补两类措施。王赫等^[5]研究了地下室混凝土墙的裂缝成因,分析了地下室混凝土墙裂缝的主要特征,并根据工程实例从设计、材料、施工三个方面提出了预防建议;白宇飞等^[6]通过改进浇注方法减少水平施工缝,从而增强防水混凝土结构的整体性和密实度;朱朝晖等^[7]针对出现开裂且发生渗漏的地下室混凝土外墙,提出了由内侧向外侧低压注入无机修补材料的防水方法;徐启鹏等^[8]对地下连续墙止水帷幕实施声呐渗流检测,反演绘制了三维可视化渗流场,该方法可准确定位地下连续墙薄弱部位;侯聚玲等^[9]、尚鹏飞等^[10]在工程实例的基础上,对裂缝成因进行分析,从材料和施工工艺等方面提出了预防措施。上述研究者大多基于实际工程,对实践中的渗漏问题提出相应的定性预防措施,部分尚缺少理论研究工作的支撑。

定性方法基于观察和逻辑分析,利用研究者的经验直接对观察对象作出定性的判断结论,存在主观性较强的缺点。而定量方法则根据对象的特征,利用理论手段进行综合分析并获取相对客观的结论。本文提出了一种地下室外墙渗漏风险判别方法,该方法将理论研究与实际工程相结合,采用敏感性分析法,对地下室外墙易渗漏部位以及地下水渗流规律进行分析,以此确定影响地下室外墙渗漏的因素排序及主控方法,在此基础上从定量角度提出判别和预防措施,可以更加客观准确地预防地下室外墙渗漏。

1 地下室外墙渗漏影响因素概述

影响地下室外墙渗漏的因素较多,需要从多维

度进行分类分析。本文对文献进行了综述,从理论研究、工程实践等方面对影响地下室外墙渗漏的原因进行分析。

在理论研究方面,已有研究认为,地下室外墙渗漏的主要原因之一是温差导致混凝土开裂,从而引发渗漏^[11-12]。混凝土浇筑后,水化反应产生的热能导致其内部温度上升并发生膨胀,但由于混凝土的传热性能差,导致其内、外部膨胀不均,此时混凝土外部会产生拉应力,当其超过临界值后就会产生裂缝。在外部服役环境中,混凝土会受外界温度的影响,内外环境温差较大,也会导致混凝土外部收缩,而混凝土内部抵制其外部收缩,当拉应力超过临界值时产生裂缝。

在工程实践方面,地下室外墙常见的渗漏部位主要有施工缝、后浇带、墙根、穿墙管道部位、对拉螺栓部位、预留洞口等^[13-18],具体渗漏原因主要有:

a)施工缝、后浇带渗漏原因。未按照施工规范及方案进行施工或者外贴防水卷材出现了破损、开裂等。

b)墙根渗漏原因。混凝土水灰比过大,导致水泥凝结硬化时间过长;自由水过多,水与水泥分离的时间过长,导致混凝土泌水,浇筑时分层离析,造成烂根或外墙防水砂浆不密实等现象^[19]。

c)管道孔洞渗漏原因。预埋套管外侧未作防水密封处理;脚手架管洞封堵不密实;对拉螺栓端部未进行有效封堵;预留洞口未按规范要求采用刚性防水套管且不密实等。

d)其他因素。部分墙材本身存在裂缝,当混凝土坍落度、胶凝材料用量和砂率过大时,都会增加混凝土收缩,降低其抗裂性;配合比不同导致混凝土渗透性不同也会造成墙体渗漏^[20-23];地下室外墙未及时回填,长期暴晒加剧混凝土干燥收缩,导致外壁产生大量裂缝;工人施工技术差或未按规范施工,导致混凝土密实度不够,进而产生疏松,孔洞、蜂窝,甚至形成渗漏通道^[24-25];混凝土保湿养护时间不足,导致抗渗性能差;受季节性降水的影响,建筑物外围的地表水未及时排走而渗入地下,导致外墙长期受水,从而引发地下室外墙防渗薄弱点渗水问题。

综上所述,影响地下室外墙渗漏原因繁多,不易分清主次,目前主要采用定性方法指导实践。本文为了更加准确判别风险,基于敏感性分析方法对影响地下室外墙渗漏的因素进行分析。

2 易渗漏部位敏感性分析

在多因素情况下,可以采用统计方法对影响因素进行排序分析。帕累托分析法根据事物不同的主要特征进行分类排列。该方法要求分清主次,并将管理对象划分为A、B、C三类。其中:A类因素发生累计频率为0~80%,是主要影响因素;B类因素发生累计频率为80%~90%,是次要影响因素;C类因素发生累计频率为90%~100%,是一般影响因素^[26]。利用该方法可以统计出影响地下室外墙渗漏的主次因素,从而针对性地进行预防或者补救。

本文以浙江新昌莲花大厦建筑群为工程实例,对部分已建建筑地下室外墙渗漏情况进行了实地观测和记录,各类质量缺陷统计表见表1。对观测数据运用帕累托分析法,将已建工程地下室外墙渗漏问题进行分类及排列,结果如图1所示。

表1 质量缺陷统计表

序号	渗漏因素	频数	频率/%	累计频率/%
1	施工缝渗漏	25	50	50
2	后浇带处渗漏	15	30	80
3	外墙根部渗漏	5	10	90
4	穿墙管道处渗漏	3	6	96
5	对拉螺栓处渗漏	1	2	98
6	其他渗漏	1	2	100
合计		50	100	—

注:频数指对应渗漏因素出现的次数;频率指频数与合计渗漏次数的百分比;累计频率指该渗漏因素所对应的频率与其前面渗漏因素所对应频率的总和。

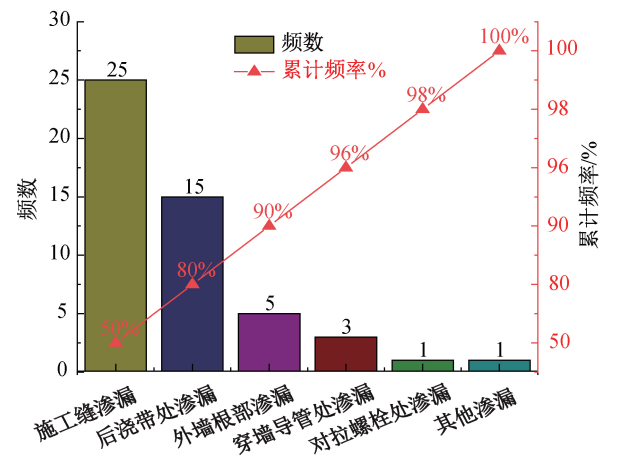


图1 渗漏问题频数及累计频率

从图1可以看出,影响地下室外墙渗漏的主要因素是施工缝、后浇带渗漏,此两项的累计频率之和达到了80%,为A类因素,应该重点加强对这两方面的控制,同时B类、C类因素如外墙根部渗漏等为次要影响因素和一般影响因素,也不能忽视。

按照上述分析方法,对各类地下室工程的渗漏查验可以参考同类结构的影响因素敏感性分析的结果,预判易漏部位及确定风险排序。

3 外墙复合层渗流规律分析

服役期间的地下室墙体通常由基层墙体与防水砂浆面层共同抵抗渗漏,其材料分层的密实度和厚度直接影响渗漏情况,因此需分析复合层渗流规律,从而判别地下室渗漏风险。

3.1 计算方法

地下室外墙承载地下水压力,将外墙视为由材料A和材料B组成的双层复合材料(命名为C),具体剖面构造如图2所示。当渗漏发生时,水先被材料A吸收,经过 t_j (水刚好渗透至A、B材料交界处所经过的时间)时间后,作用于两种材料的交界处,即在 $0\sim t_j$ 这段时间内,水在复合材料中的渗流过程完全取决于A材料的性质。 t_j 时间段以后,开始受材料B影响。

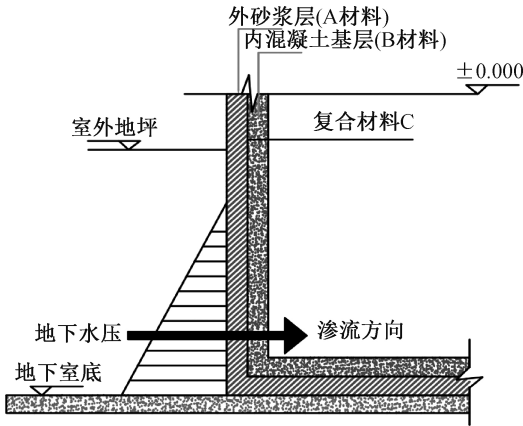


图2 地下室外墙剖面构造示意图

根据分层复合材料的渗流理论^[27-29],复合材料C的吸渗量 i 可由式(1)与式(2)计算得出:

$$i_c = S_A t^{\frac{1}{2}}, t \leq t_j \tag{1}$$

$$i_c = S_B \left[t + L^2 \left(\left(\frac{f_B}{S_B} \right)^2 \left(\frac{K_B}{K_A} \right)^2 - \left(\frac{f_A}{S_A} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} + L \left(f_A - f_B \frac{K_B}{K_A} \right), t > t_j \tag{2}$$

其中: i 为吸渗量,表示水被吸收渗入材料的累计深度,mm; S 为吸渗率,表示材料依靠毛细力吸收液

体能力的量度, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1/2}$; t 表示时间, min ; K 为渗透系数, 表示单位水力梯度下的单位流量, mm/min ; f 为孔隙率, 表示材料内部孔隙的体积占材料总体积的比值; L 为材料 A 的长度, mm 。

复合材料的吸收速率 v 可由吸渗量求导后得出, 吸渗量求导可用式(3)与式(4)表示:

$$v_c = \frac{1}{2} S_A t^{-\frac{1}{2}}, t \leq t_j \tag{3}$$

$$v_c = \frac{1}{2} S_B \left[t + L^2 \left(\left(\frac{f_B}{S_B} \right)^2 \left(\frac{K_B}{K_A} \right)^2 - \left(\frac{f_A}{S_A} \right)^2 \right) \right]^{-\frac{1}{2}}, t > t_j \tag{4}$$

令:

$$\left(\frac{f_B}{S_B} \right)^2 \left(\frac{K_B}{K_A} \right)^2 - \left(\frac{f_A}{S_A} \right)^2 = X \tag{5}$$

$$f_A - f_B \frac{K_B}{K_A} = Y \tag{6}$$

其中: v 为吸收速率, 表示材料吸收液体速度的量度, mm/min ; X 与 Y 为常数项, 可根据材料的各项渗透参数求解。

渗透系数 K 的变化幅度远大于吸渗率 S , 在孔隙率基本一致的情况下, 以某类材料为例: S 的变化区间为 $0.99 \sim 4.60 \text{ mm}/\text{min}^{-1/2}$, 而 K 的变化区间却达到了 $1.50 \sim 1.50 \times 10^3 \text{ mm}/\text{min}$ 。故当 $S_A > S_B, K_A > K_B$ 时, X 为负值, Y 为正值; $S_A < S_B, K_A < K_B$ 时, X 为正值, Y 为负值。则式(2)与式(4)可简写为:

$$i_c = S_B [t - |L^2 X|]^{\frac{1}{2}} + |LY|, S_A > S_B \tag{7}$$

$$v_c = \frac{1}{2} S_B [t - |L^2 X|]^{-\frac{1}{2}}, S_A > S_B \tag{8}$$

3.2 结果分析

采用 Matlab 软件对三种不同长度(5、10、15 mm)材料 A 的复合材料渗流情况进行了算例分析, 并绘制了吸渗量时间变化曲线, 结果如图 3 所示, 其中单一材料 A 与 B 的吸收情况也绘于同一图中作为参考。算例各参数见表 2。

表 2 算例参数列表			
材料类别	$S/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1/2})$	f	K_B/K_A
A	3.70	0.30	0.20
B	1.50	0.20	

对比复合材料 C 与单一材料 B, 复合材料 C 的斜率取为 P , 单一材料 B 的斜率取为 P' , 如图 4 所示。从图 4 中 i_c 的斜率可以看出, 在湿润界面经过材料交界界面后, 水的吸收速率呈大幅下降趋势, 这可能与两种材料吸渗率差异有较大关联。通过对比

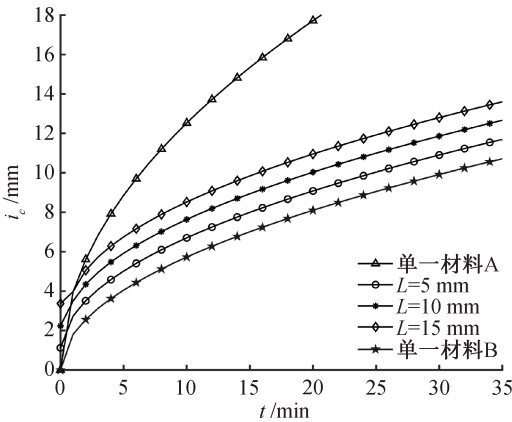


图 3 不同材料吸渗量时间变化曲线

式(3)与式(4)可知:

$$\frac{1}{2} S_B [t - |L^2 X|]^{-\frac{1}{2}} > \frac{1}{2} S_B t^{-\frac{1}{2}} \tag{9}$$

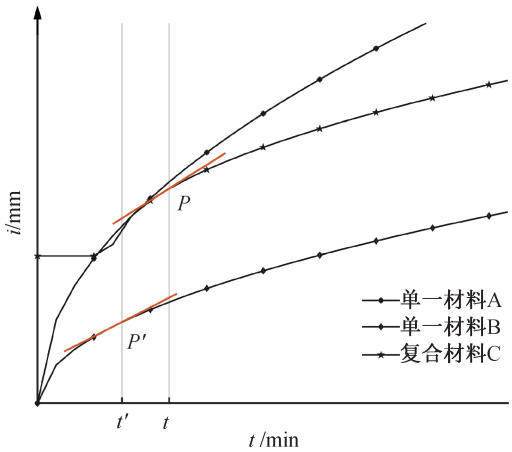


图 4 单一材料与复合材料吸渗曲线

当湿润界面经过材料交界界面时及经过以后, 若要使得两种材料斜率相同, 设此时复合材料所经过时间为 t , 单一材料 B 所经过时间为 t' , 则:

$$t' = t - |L^2 X| \tag{10}$$

其中: P 为复合材料 C 吸渗量在 t 时的斜率; P' 为材料 B 吸渗量在 t' 时的斜率。

一般认为一定长度的材料 A 可被等效为长度更短的材料 B。且随着时间 t 的增加, A 材料对复合材料整体渗流情况的影响会逐渐减弱, 直至复合材料的吸收速率与单一材料 B 完全相同(斜率相同), 故当 $t \gg |L^2 X|$ 时, 式(8)可以写为式(11):

$$v_c = \frac{1}{2} S_B t^{-\frac{1}{2}} \tag{11}$$

水从材料 B 端发生初渗时也可得到相同的结论。

从图 3 可以看出, 当材料 A 的长度增加时, 复合材料的整体吸渗量呈增加趋势, 且始终大于单一材料 B。这是因为相对材料 B 而言, 材料 A 具有更

大的吸渗率,在 $0 \sim t_j$ 时间段内可以吸收更多的水分,故最终的 $i_c > i_B$,由此可得到:

$$S_B [t - |L^2 X|]^{\frac{1}{2}} + |LY| > S_B t^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

当时间 $t \gg |L^2 X|$ 时,式(7)可以写为式(13)

$$i_c = S_B t^{\frac{1}{2}} + |LY| \quad (13)$$

式(13)表明,当作用时间较长时, i_c 比 i_B 多出的一部分为 LY ,该子项的大小仅与复合材料第一部分材料的长度 L 相关。 L 是表层砂浆的厚度,所以可以得到一个结论:增加表层砂浆的厚度可以提高墙体抗渗性能。

由最终渗流情况可知:无论 $S_A > S_B$ 或 $S_A < S_B$,当作用时间足够长时,复合材料的最终吸渗量均取决于其第二部分材料的水力性质。对于地下室外墙而言,防水砂浆为第一部分材料,基层墙体为第二部分材料,其服役期间常年受地下水浸渗,由此得到第二个结论:在保证表层砂浆具备一定抗渗性的同时,应重视提升基层墙体的各抗渗指标,如采用更高抗渗等级的混凝土、减小混凝土材料的吸渗率,才能更大幅度地减小复合材料整体的渗漏风险。

4 预防措施

根据帕累托分析法、分层复合材料的渗流理论以及对地下室外墙渗漏影响因素综述进行总结,从渗漏风险判别角度出发,对地下室外墙设计、施工阶段提出如下预防措施:

- a)确定地下室外墙主要渗漏因素,对易渗漏部位采取针对性的设计、施工和监管措施。
- b)合理设计分层材料的组成和构造以增强密实度,如定量调整外墙厚度、采取更高抗渗等级的混凝土、在敏感性部位增加表层砂浆的厚度等措施。
- c)加强工艺措施和防护方案以减小渗漏风险,如墙根部位混凝土避免因振捣不实出现烂根现象,保证墙根处抹灰密实;针对管道穿过墙体的情况,应预先埋设防水套管,并在套管上焊接止水环,并注意后期养护和日常使用监测。

5 结 论

本文为了准确判别地下室外墙渗漏风险并提出部分定量预防措施,采用帕累托分析法对工程实测数据进行分析,将影响渗漏的因素进行排序,并利用分层复合材料渗流理论推导地下水在地下室外墙中的分层渗流规律,得到以下主要结论:

- a)基于帕累托分析法的数据分析结果发现,施

工缝与后浇带渗漏的累计频率之和达到了 80%,是地下室外墙渗漏的主要影响因素,在设计、施工和监管阶段应重点关注。

b)基于分层渗流规律的分析结果发现,增加表层砂浆厚度可以提高墙体抗渗性能、提升基层墙体的各项密实度指标可以减小渗漏风险。因此,在设计阶段针对墙体易渗部位可增加表层砂浆厚度、使用更高抗渗等级的混凝土。

c)基于敏感性的地下室外墙渗漏风险判别分析方法在考量各影响渗漏因素重要性的同时,结合分层复合材料渗流理论,实现了定量的风险判别,为定量预防措施的提出奠定了基础,可进一步指导工程抗渗实践。

参考文献:

- [1] 颜庆智,刘晓辉,李春宝,等.新型双结构层地下室外墙防水结构施工工艺[J].科学技术与工程,2015,15(9):239-242.
- [2] 李伟力.地下连续墙漏水原因分析及处理措施[J].施工技术,2010,39(S1):410-412.
- [3] 李舜.地下连续墙施工及常见渗漏水治理探讨[J].铁道标准设计,2010,54(S1):127-131.
- [4] 姜兴平.基于地下外墙的防水施工研究[J].山西建筑,2018,44(19):79-80.
- [5] 王赫,吴伟,吴波.混凝土地下室墙裂缝渗漏的分析与处理方法[J].建筑技术,2001,32(6):386-387.
- [6] 白宇飞,何威.地下防水混凝土施工工艺[J].工业建筑,2007,37(S1):1051-1053.
- [7] 朱朝晖,刘秀江.地下室混凝土墙渗漏外防水膜修补技术的开发[J].施工技术,2016,45(6):110-113.
- [8] 徐启鹏,倪汉杰,王玥.地下连续墙接缝渗漏检测及防治技术[J].隧道建设(中英文),2019,39(S2):372-378.
- [9] 侯聚玲,彭云林,张威扬,等.地下室外墙裂缝防治措施的成效分析[J].施工技术,2017,46(S2):1121-1123.
- [10] 尚鹏飞,朱炜,刘平相,等.建筑工程地下室防渗漏施工技术探析[J].科学技术创新,2021(18):144-145.
- [11] 吴林妹.超高性能混凝土早期收缩性能与长期稳定性研究[D].长沙:湖南大学,2019:13-15.
- [12] 周宁彬.地下室外墙早期温度应力研究与裂缝控制[D].西安:长安大学,2020:8-9.
- [13] 王公胜,孙文,张志江.建筑地下结构渗漏原因与控制措施分析[J].建筑结构,2021,51(2):103-107.
- [14] 段先军,程欣荣,苏振华,等.超大平面混凝土工程裂缝控制技术[J].建筑技术,2018,49(9):928-931.
- [15] 李凯文.地下室结构渗漏原因分析及防治措施[J].建筑结构,2012,42(1):120-123.
- [16] 周国锋.关于地下室外墙渗水成因及处理措施的探讨

[J].混凝土,2012(9):140-141.

[17] 路沙沙,麻凤海,邓飞.橡胶颗粒掺量、粒径影响橡胶混凝土性能的试验分析[J].硅酸盐通报,2014,33(10):2477-2483.

[18] 曹征富.建筑外墙常见渗漏原因与治理技术[J].中国建筑防水,2015(21):36-41.

[19] 李志勇. C60 高流态泵送砼压力泌水及其性能试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学,2006:33-35.

[20] 杨斌,王志军.地下室墙体抗渗混凝土的施工[J].混凝土,2019(10):140-141.

[21] Paul J C, Panigrahi B. Fly ash: An alternative cheap source material for seepage control in soil conservation structure[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 17(2):111.

[22] 吕军在. 新型添加剂对混凝土及混合砂浆面层抗渗性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学,2015:3-5.

[23] 张红州,张志允.兼做永久墙的地下连续墙防水设计和施工控制要点[J].建筑结构,2020,50(S2):779-782.

[24] 张日升.住宅小区地下室渗漏水成因分析及治理措施[J].安徽建筑,2021,28(7):227-228.

[25] 平克祥.地下室渗漏原因分析与预控处理方案[J].中国建筑防水,2018(21):22-24.

[26] Fageha M K, Aibinu A A. Prioritising project scope definition elements in public building projects [J]. Construction Economics and Building, 2014, 14(3): 18-33.

[27] Wilson M A, Hoff W D, Hall C. Water movement in porous building materials; XIII. Absorption into a two-layer composite[J]. Building and Environment, 1995, 30(2): 209-219.

[28] 戴葵,戴云松,王丽芳,等.渗流力对地下室结构裂缝影响研究[J].武汉轻工大学学报,2017,36(3):59-62.

[29] 王春波,丁文其,陈志国,等.超深基坑工程渗流耦合理论研究进展[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(2):238-245.

(责任编辑:康 锋)