

水泥-膨润土泥浆固结体渗透性与微观结构的关系

徐超¹, 李丹¹, 黄亮²

(1. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市基础工程公司, 上海 200002)

摘要: 采用压汞试验测定了水泥-膨润土泥浆固结体的孔隙结构特征, 通过室内渗透试验测定了固结体的渗透系数. 在试验结果基础上, 分析了水泥、膨润土用量及固结体微观孔隙特征参数与其渗透性之间的联系. 研究表明: 水泥-膨润土泥浆固结体的渗透性主要受其临界孔径的控制, 临界孔径越小, 抗渗性越好. 其余孔隙结构特征参数与固结体的渗透特性关系不大. 随着水泥、膨润土用量的增加, 固结体的临界孔径会逐步减少, 并且, 水泥用量对临界孔径的影响比膨润土更显著.

关键词: 水泥-膨润土泥浆固结体; 微观结构; 临界孔径; 渗透系数; 压汞试验

中图分类号: TU 411.92

文献标识码: A

Relationship Between Permeability and Microstructure of Cement Bentonite Slurry Concretion

XU Chao¹, LI Dan¹, HUANG Liang²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Foundation Engineering Co., Shanghai 200002, China)

Abstract: The structure of pores in the concretion of cement bentonite slurry is measured by mercury-injection method, and the permeability coefficient of the concretion is measured by permeability test. According to the test results, the connections between the permeability and pore structure as well as the dosage of cement and bentonite in the cement bentonite slurry are analyzed. The analysis reveals that the permeability of cement-bentonite slurry concretion is controlled mainly by critical size of pores in the concretion. The smaller the critical size of pores, the stronger the permeability resistance of the concretion is, and other pore structure parameters have little influence on the permeability of the concretion. With the increase of the dosage of cement

and bentonite, the critical pore size of the concretion will gradually decrease, and the dosage of cement has greater influence on the critical size of pores than that of bentonite.

Key words: cement-bentonite slurry concretion; microstructure; critical size of pores; permeability coefficient; mercury-injection method

垂直防渗墙在水利工程和环境岩土工程应用比较广泛, 如防洪大堤加固治理中的垂直防渗墙; 垃圾填埋场和尾矿坝周围防止渗滤液扩散的地下径流垂直隔断墙. 水泥-膨润土泥浆隔断墙 (cement-bentonite slurry cutoff wall) 是垂直防渗墙中应用最为普遍的一种. 这种墙体以水泥和膨润土为基本材料, 有时也掺入粉细砂或当地素土, 固化后的泥浆固结体具有较好的力学与防渗特性^[1].

作者曾对水泥-膨润土固结体的微观孔隙结构进行分析, 发现固结体的总孔隙体积、最可几孔径和临界孔径等孔结构特征与膨润土和水泥的用量密切相关^[2]. Plee 曾进行水泥-膨润土泥浆的微观结构、渗透系数和流动性能的研究, 发现水泥中大量 Ca^{2+} 和混合液的高 pH 值都会影响泥浆的宏观特性^[3]; Schoenfelder 利用核磁共振方法分析了不同配合比的水泥-膨润土泥浆的硬化特征及渗透性能^[4]; Rafalski 和 Jefferis 也曾对欧美等国垃圾填埋场采用的水泥、膨润土、粉煤灰泥浆墙的防渗性能进行过研究^[5-6].

水泥-膨润土泥浆固结体的孔隙结构特征与其宏观特性存在内在的关联性, 因此研究固结体的微观孔隙结构特征对从机理上认识水泥-膨润土固结体的渗透特性有着重要意义. 本文主要分析浆液材料构成对临界孔径的影响, 探讨固结体微观结构特

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 上海市重点学科建设项目(B308)

第一作者: 徐超(1965—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为地基加固与土工合成材料的应用.

E-mail: c_axu@tongji.edu.cn

征与其渗透性能之间的关系,为水泥-膨润土泥浆防渗墙的实际工程应用提供一定的依据和借鉴.进一步揭示水泥-膨润土泥浆固结体的物质构成与固结体临界孔径之间的关系,可以为通过调整原材料配比控制固结体的临界孔径进而提高固结体的抗渗能力提供依据.

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

本次试验工作在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室和先进土木工程材料教育部重点实验室中完成.试验中,泥浆原材料采用 425# 矿渣硅酸盐水泥和人工钠基膨润土.原材料的实测基本性能指标见表 1.

1.2 试验方案与试验方法

根据前期研究工作和实践经验^[1],经过初步配比试验,确定了本次试验研究的配比范围:每 1 000 g 水中所需的膨润土为 300~390 g,水泥为 140~230 g.具体配合比方案见表 2.在此方案中,按每 1 000 g 水中加入的膨润土的质量分为 A,B,C,D 四组;各组内,按水泥用量又分为 1,2,3,4 四种情况.每个配比制备 2 组试样,每组 6 个试件,试件采用室内标准养护,每组配比试件均测定 28 d 和 60 d 的渗透系数,再切取部分试件碎块进行压汞试验.渗透试验采用测定土体渗透系数的 QYI-2 型土工渗压仪,压汞试验采用美国康塔公司的 Autoscan 60 型自动压汞仪,孔半径测定范围:0.002~213 μm .本次压汞试验采用液氮冷冻真空升华干燥法(简称冻干法)对试件进行干燥,尽可能减小因失水而导致的固结体孔隙结构变化,降低试验误差.

表 1 水泥-膨润土泥浆原材料的性能指标

Tab.1 Behaviour indexes of raw materials for cement-bentonite slurries

项目	水泥			膨润土			
	SO ₃ 含量/%	细度/%	安定性	胶质价/ (mL·15 ⁻¹ ·g ⁻¹)	膨胀容/ (mL·g ⁻¹)	吸蓝量/ (mmol·100 ⁻¹ ·g ⁻¹)	含水率/ %
指标	2.12	3.6	合格	96.0	14.0	95.62	9.5

表 2 试验配合比方案及渗透试验结果

Tab.2 Mixing ratios of raw materials for cement-bentonite slurries and results of permeability test

编号	膨润土/ g	水泥/ g	水/ g	渗透系数/ (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)		编号	膨润土/ g	水泥/ g	水/ g	渗透系数/ (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	
				28 d	60 d					28 d	60 d
A1	300	140	1 000	3.90	1.90	C1	360	140	1 000	4.00	1.70
A2	300	170	1 000	2.30	0.76	C2	360	170	1 000	2.90	0.89
A3	300	200	1 000	2.20	0.65	C3	360	200	1 000	1.40	0.62
A4	300	230	1 000	1.00	0.69	C4	360	230	1 000	0.66	0.43
B1	330	140	1 000	2.90	2.00	D1	390	140	1 000	4.90	2.00
B2	330	170	1 000	2.00	0.73	D2	390	170	1 000	2.70	0.79
B3	330	200	1 000	1.80	0.63	D3	390	200	1 000	1.20	0.57
B4	330	230	1 000	0.82	0.53	D4	390	230	1 000	0.39	0.33

2 试验结果

2.1 水泥-膨润土泥浆固结体渗透试验结果

水泥-膨润土泥浆固结体的渗透试验结果见表 2,不同龄期泥浆固结体试样渗透系数随水泥用量变化情况见图 1~图 2.可以看出:各组试件中,渗透系数均随水泥用量的增加而降低;对比图 1~图 2 可

以发现随着固结体龄期的增长,其渗透系数随之减小.减小的幅度在 15.3%~71.2%,平均减小了 52.1%.

2.2 水泥-膨润土泥浆固结体压汞试验结果

压汞试验进汞压力范围约为 0.172 4~214.997 MPa,测得孔径的分布范围为 3.25~4266 nm.随着进汞压力的增大,汞液被压入的孔隙尺寸越小,进汞压力的增长速率也越缓,直至进汞压力趋于恒定.在

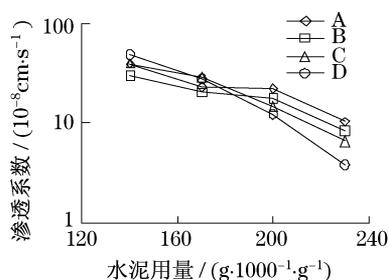


图1 28 d龄期试件渗透试验结果

Fig.1 Permeability test results of slurry concretion specimens on 28 d

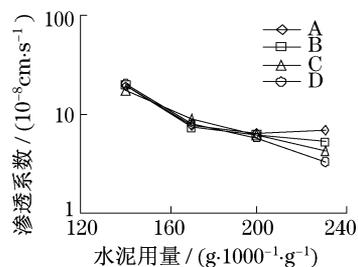


图2 60 d龄期试件渗透试验结果

Fig.2 Permeability test results of slurry concretion specimens on 60 d

一次完整的进汞曲线上(见图3),可得到泥浆固结体的孔隙特征参数,包括固结体的孔隙累计体积、孔径分布、最可几孔径、临界孔径等.累计孔隙体积是一次进汞过程中所探测到的不同孔径的孔隙总体积;临界孔径是指能够将较大孔隙连通起来的所有孔隙中最大尺寸孔隙的孔径^[7];最可几孔径即出现几率最大的孔径,孔径分布微分曲线峰值对应的孔径即为最可几孔径.在对压汞试验结果分析时发现,每1 000 g水的水泥掺量为170 g的部分试件压汞曲线未出现峰值,无法用于微观结构分析.其余12组配合比试样基于压汞试验结果得到的孔隙结构特征参数见表3.

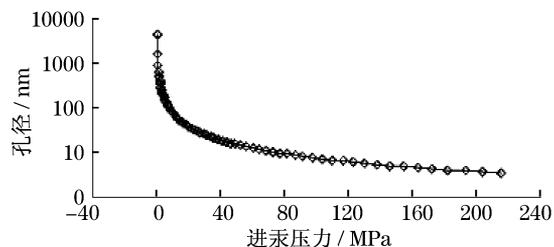


图3 进汞压力与孔径曲线

Fig.3 Mercury injection pressure and void size curve

表3 泥浆固结体孔隙结构特征参数

Tab.3 Structure parameters of pores in the concretions of slurries

编号	孔径分布百分比/%			孔隙累计体积/(mL·g ⁻¹)	最可几孔径/nm	临界孔径/nm
	<10 nm	10~100 nm	>100 nm			
A1	24.9	35.2	39.9	1.22	8.51	67.85
A3	24.4	36.0	41.1	1.16	9.13	65.02
A4	22.8	35.4	41.8	1.14	8.97	62.27
B1	24.1	29.3	46.6	1.16	7.86	68.15
B3	24.6	33.6	41.8	1.11	8.42	61.37
B4	24.7	37.0	38.3	1.18	8.46	57.81
C1	28.3	34.3	37.4	1.32	7.40	66.83
C3	29.8	34.7	35.5	1.27	7.56	59.36
C4	29.9	35.6	34.5	1.28	7.18	55.64
D1	32.6	35.5	31.9	1.47	7.10	65.35
D3	30.9	35.2	33.9	1.41	7.54	58.96
D4	31.9	38.3	29.8	1.31	6.03	53.36

3 试验结果分析与讨论

3.1 固结体微观孔隙结构特征与渗透性的关系

根据表2和表3的试验结果,以固结体渗透系数为纵坐标,分别绘制泥浆固结体孔隙累计体积、最可几孔径和临界孔径的散点图,如图4~图6所示.

这些散点图显示:固结体的渗透系数变化与孔隙累计体积和最可几孔径的相关性不显著,而渗透系数变化与临界孔径之间具有较强的相关性.渗透系数随着临界孔径的增大而增大,二者之间的关系曲线如图6所示.由于试验数据偏少,还难以给出二者的定量关系.

3.2 膨润土用量与水泥用量对临界孔径的影响

图7和图8分别表示了固结体的临界孔径随水泥、膨润土掺入量变化的情况.图7显示各组试样的临界孔径随着水泥用量的增加而减小,其中A组降幅最小,可能是A组中膨润土用量最少.图8显示临界孔径随着膨润土用量的减少而减小,尤其水泥用量最少的1组试样,膨润土用量对固结体的临界孔径影响最小.固结体的临界孔径与水泥和膨润土用量有关,但水泥用量的影响更大一些.此外,水泥和膨润土用量对泥浆固结体临界孔径的影响是交互的,表现在一种材料用量偏低时,另一种材料对临界孔径的影响也会降低,其原因文献^[2]已经作了分析和说明.

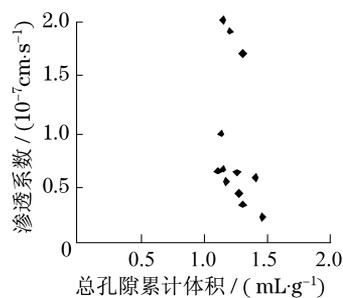


图 4 渗透系数与孔隙累计体积的散点图

Fig.4 Scatter diagram of permeability with the total pore volume

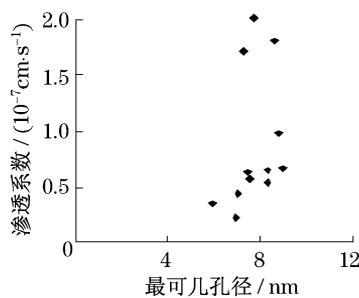


图 5 渗透系数与最可几孔径的散点图

Fig.5 Scatter diagram of permeability with the most probable pore diameter

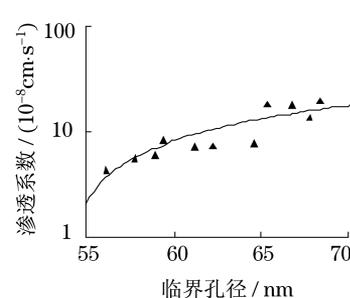


图 6 渗透系数与临界孔径的散点图

Fig.6 Scatter diagram of permeability with critical pore diameter

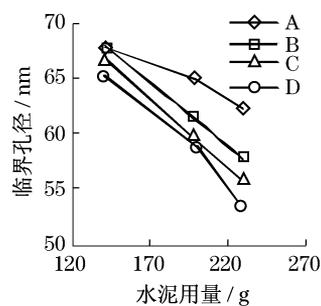


图 7 临界孔径与水泥用量关系曲线

Fig.7 Curve of critical void diameter with the amount of cement

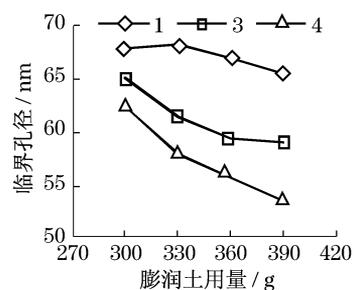


图 8 临界孔径与膨润土用量的关系曲线

Fig.8 Curve of critical void diameter with the amount of bentonite

3.3 固结体渗透性影响因素的机理分析

国内外关于混凝土的孔隙与渗透性间关系的研究^[8-10]表明:混凝土的渗透性一般随孔隙率的增加而提高,但孔隙率不是影响渗透性的主要因素.即使孔隙率相同的混凝土,渗透性能也会存在较大差别,只有孔径较大且孔隙连通才对渗透性产生影响.水泥-膨润土泥浆固结体具有良好的防渗效果,本次研究发现其渗透性与内部孔隙率、孔隙的孔径分布等关系不大,而主要与临界孔径有关.

图 9 说明了多孔材料的渗透性与孔隙率之间的

关系.如果多孔材料内部的孔隙都是球形或者虽然是管状但彼此互不连通且封闭,则渗透系数很小.即使是不封闭的管状孔隙,只要孔径小到一定程度,水也是不易通过的,同样表现出较低的渗透性.只有具有较大孔径的连通孔隙才会使得材料具有较大的渗透性.

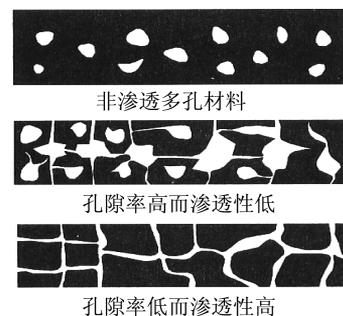


图 9 多孔材料的渗透性与孔隙率关系示意图

Fig.9 Diagram for the relationship between porosity and permeability of porous materials

从水力联系的角度,临界孔径反映材料中孔隙的连通程度和渗透路径的曲折程度,这应该是渗透性与临界孔径相关的本质.因此认识固结体临界孔径及其变化对水泥-膨润土泥浆固结体抗渗性能的影响和控制作用具有重要意义,可以从降低临界孔径的角度控制固结体的渗透能力.随着水泥用量的增加,水泥水化产物增多,固结体的骨架结构更为完整;在一定水泥用量前提下,膨润土用量增加,遇水膨胀,固结体的大孔隙减少,微观孔隙则增多,临界孔径会进一步减小,连通的孔隙数量也会减少.本次试验结果显示,当水泥用量控制在每 1 000 g 水 200~230 g 范围内时,膨润土用量每 1 000 g 水 360~390 g,泥浆固结体的临界孔径就减小到 60 nm 以下,渗透系数减小至 10^{-8} 数量级.

4 结论

本文从水泥-膨润土泥浆固结体的材料配比对临界孔径的影响着手,根据水泥-膨润土泥浆固结体的渗透试验和压汞试验结果,分析了泥浆固结体的渗透性与孔隙结构之间的关系,可以得出如下结论:

(1) 随着水泥、膨润土用量的增加,水泥-膨润土泥浆固结体的临界孔径会逐渐减小. 水泥和膨润土对临界孔径存在交互影响,其中水泥用量对临界孔径的影响比膨润土要显著.

(2) 在水泥-膨润土泥浆固结体的微观结构参数中,临界孔径与渗透性显著相关. 临界孔径越小,渗透系数越小. 本文定性分析了临界孔径与渗透系数之间的关系,建立孔隙参数与渗透系数之间的数量关系还需要更多的试验研究工作.

(3) 本文获得的配制泥浆的水泥、膨润土较佳用量范围可以为实际工程提供依据.

参考文献:

- [1] 费培云,季嵘,张道玲,等. 上海老港垃圾卫生填埋场隔离墙材料特性室内试验研究[J]. 上海地质,2005(4):51.
FEI Peiyun, JI Rong, ZHANG Daoling, et al. Laboratory research on the properties of containment wall material of shanghai laogang municipal sanitary waste landfill[J]. Shanghai Geology, 2005(4):51.
- [2] 徐超,冯颖彦,黄亮. 水泥-膨润土泥浆固结体的微观结构特征[J]. 水文地质工程地质,2009,36(4):90.
XU Chao, FENG Yingyan, HUANG Liang. Microstructure features of voids in cement-bentonite slurries[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4):90.
- [3] Plee D, Lebedenko F, Obrecht F, et al. Microstructure, permeability and rheology of bentonite-cement slurries [J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(1):45.
- [4] Schoenfelder W, Dietrich J, Märten A, et al. Studying diffusive water transport in bentonite cement mixtures of very low hydraulic conductivity[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(4):582.
- [5] Rafalski L. Designing of composition of bentonite-cement slurry for cut-off walls constructed by the monouhase method [J]. Archives of Hydroengineering & Environmental Mechanics, 1994, 41(3-4):7.
- [6] Jefferis S A. Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs [C]// Proc 10th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm: SMFE, 1981, 1: 425-440.
- [7] 唐明,王甲春,李连君. 压汞测孔评价混凝土材料孔隙分形特征的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报,2001,17(4):272.
TANG Ming, WANG Jiachun, LI Lianjun. Research on fractal characteristics of concrete materials pore with MIP[J]. Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute, 2001, 17(4):272.
- [8] 陈立军,王永平,尹新生,等. 混凝土孔径尺寸对其抗渗性的影响[J]. 硅酸盐学报,2005(4):500.
CHEN Lijun, WANG Yongping, YIN Xinsheng, et al. Effect of aperture size on impermeability of concrete[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2005(4):500.
- [9] 李淑进,赵铁军,吴科如. 混凝土渗透性与微观结构关系的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2004(2):6.
LI Shujin, ZHAO Tiejun, WU Keru. Relationship between permeability and microstructure of concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(2):6.
- [10] Christensen B J, Mason T O, Jennings H M. Comparison of measured and calculated permeabilities for hardened cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(9):1325.