

# 水泥土渗透系数试验模拟分析

刘浩<sup>1</sup>, 孟凡兰<sup>2</sup>, 邢晓明<sup>2</sup>

(1.山东省水利工程试验中心有限公司, 山东 济南 250220; 2.山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250014)

**【摘要】**为更好地指导工程实践,研究不同水泥掺入比、不同养护龄期和不同类型的土对水泥土渗透系数的影响,进行了水泥土渗透性室内试验。选取3种黏粒含量不同的细粒土和普通硅酸盐水泥,选择不同水泥掺入比12%、16%、20%,采用分层击实法制备水泥土试件,分别进行7 d、28 d、90 d标准养护,进行渗透试验,并分析渗透系数在不同条件下的变化规律。

**【关键词】**水泥土;渗透系数;水泥掺入比;养护龄期

**【中图分类号】**TV41

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1009-6159(2025)-09-0053-03

## Simulation and Analysis of Cement-Soil Permeability Coefficient Test

LIU Hao<sup>1</sup>, MENG Fanlan<sup>2</sup>, XING Xiaoming<sup>2</sup>

(1. Shandong Testing Center of Water Conservancy Project Co., LTD., Jinan, Shandong 250220, China;

2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy co., Ltd, Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract:** In order to better guide engineering practice, indoor tests on cement-soil permeability were carried out to study the effects of different cement mixing ratios, different curing ages, and different types of soil on the permeability coefficient of cement-soil. Three types of fine-grained soils with different clay particle contents and ordinary Portland cement were selected. Different cement mixing ratios of 12%, 16%, and 20% were adopted, and the layered compaction method was used to prepare cement-soil specimens. The specimens were subjected to standard curing for 7 days, 28 days, and 90 days respectively, and permeability tests were conducted to analyze the variation law of permeability coefficient under different conditions.

**Key words:** Cement-soil; Permeability coefficient; Cement mixing ratio; Curing age

水泥土是一种以土为主,掺入一定量的水泥、水,按一定比例配制成的建筑材料。其原理是水泥在水的作用下胶凝硬化,与土颗粒固结,填充孔隙。水泥土具有坚固、防渗、防冻等作用。早在1958年,我国就开始使用水泥土建造沼气池,达到防渗、坚固的目的,后被广泛应用于护坡、加固地基、渠道衬砌等各种工程。然而随着工程日益复杂,对水泥土渗透性的要求逐渐提高,因此国内外众多学者对水泥土渗透系数进行了一系列试验模拟分析。张雷<sup>[1]</sup>等研究了不同水泥掺入比(11%、13%、15%、17%)对渗透系数的影响;郑刚<sup>[2]</sup>研究了不同养护龄期(7 d、28 d)对渗透系数的影响;苏玉杰<sup>[3]</sup>等研究了压实度对水泥土渗透系数的影响;袁荣宏<sup>[4]</sup>研究了水泥土渗透系数随

围压变化的关系;夏正兵<sup>[5]</sup>研究了不同pH(pH=4和pH=11)下渗透系数的变化。

该试验依托山东省东平湖某工程,根据经验及工程设计要求,选取了不同水泥掺入比12%、16%、20%,进行不同养护龄期下的水泥土渗透试验,为工程实践提供参考。

## 1 渗透试验

### 1.1 试验材料

试验用土为工程拟加固土,选取黏粒含量不同的3种细粒土,用密度计法进行颗粒分析,其颗粒组成见表1;试验用水泥选用符合《通用硅

收稿日期:2025-04-21

作者简介:刘浩(1999—),男,助理工程师

酸盐水泥》(GB 175—2023)的普通硅酸盐水泥 P·O 42.5;试验中,拌合水泥土的水为自来水,渗透试验用水为纯水。

表 1 试验用土样的颗粒组成

土样类型	颗粒含量/%		
	粉粒		黏粒
	0.075~0.05 mm	0.05~0.005 mm	
粉质砂壤土	18.8	71.7	9.5
壤土	25.5	49.6	24.9
黏土	14.3	40.8	44.9

### 1.2 试验方法

渗透试验按照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)进行。现场取回的试验土样经自然晾晒风干,放在橡皮板上用木碾碾散,过 5 mm 筛。用轻型击实法测得最优含水率和最大干密度,并按照设计要求 0.95 压实度计算出风干土样质量、水泥质量、水质量。风干土样和水泥先均匀混合,再加水搅拌至均匀。采用分层击实法压实水泥土,击实筒内径 102 mm,筒高 116 mm,锤质量 2.5 kg,落高 305 mm。用脱模机将试样从击实筒内推出。将试模内壁涂一层凡士林,用试模在垂直土样层面切取试件。每一种土均按照不同水泥掺入比、不同养护龄期共制备 27 组试件,每组试验设置 3 个平行样,共计 81 个试件。

试件制备好后置于温度为 20 ℃、湿度为 95% 的恒温恒湿养护箱中进行标准养护,养护 24 h 后拆模,继续进行标准养护。分别养护至规定龄期后从养护室取出试件,用拧干的湿布擦拭试件表面水分。养护后的水泥土有干缩现象,会导致水泥土与试模内壁之间出现裂缝,因此需要对裂缝进行封堵,防止水沿裂缝渗出影响试验结果,该试验采用云石胶作为密封材料。将水泥土试件安装到渗透仪器上,按照步骤进行渗透试验。当试件表面有水均匀渗出后,开始读数并记录,同时记录水温。当渗水量稳定后,一次试验可以结束,每个试件至少测定 6 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果

水泥土渗透系数采用下列公式计算:

$$k_T = V / (iAt) \tag{1}$$

$$i = P / 100\gamma_w h \tag{2}$$

$$k_{20} = k_T (\eta_T / \eta_{20}) \tag{3}$$

式中: $k_T$ 为水温  $T$  ℃时试件的渗透系数,cm/s; $V$ 为经时间间隔  $t$  渗出的水量,mL; $i$ 为水力梯度; $A$ 为试件中部的横截面积,m<sup>2</sup>; $t$ 为时间间隔,s; $P$ 为施加的渗透压力,MPa; $\gamma_w$ 为水的重度,N/cm<sup>3</sup>; $h$ 为渗流路径,即试件高度,m; $k_{20}$ 为标准温度(20 ℃)时试件的渗透系数,cm/s; $\eta_T$ 为  $T$  ℃时水的动力黏滞系数,1×10<sup>-6</sup> kPa·s; $\eta_{20}$ 为 20 ℃时水的动力黏滞系数,1×10<sup>-6</sup> kPa·s。比值  $\eta_T / \eta_{20}$  与温度的关系按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)执行。

在每一个试件测得的结果中取 3~4 个在允许差值范围内的数据,求得其平均值,作为某水泥掺入比、养护龄期下水泥土的渗透系数。根据计算,得到 3 种细粒土在不同水泥掺入比下的渗透系数,见表 2。

表 2 水泥土室内渗透试验结果

土样类型	水泥掺入比	渗透系数/×10 <sup>-7</sup> cm/s		
		7 d	28 d	90 d
粉质砂壤土	12%	37.00	1.98	1.40
	16%	12.00	1.20	0.87
	20%	6.40	0.79	0.64
壤土	12%	25.00	1.50	0.85
	16%	6.70	0.80	0.62
	20%	4.70	0.60	0.45
黏土	12%	3.00	1.28	0.82
	16%	1.20	0.62	0.45
	20%	0.70	0.38	0.30

### 2.2 结果分析

根据试验结果,绘制 3 种不同土质的水泥土的渗透系数在不同龄期下随水泥掺入比变化的散点图,如图 1~3 所示,选取幂函数对数据进行非线性拟合,得到水泥土的渗透系数随水泥掺入比的变化趋势。

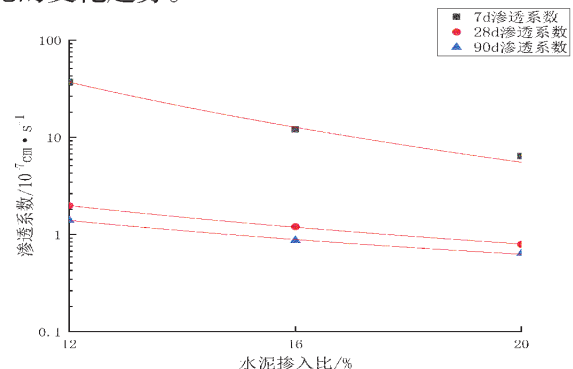


图 1 粉质砂壤土水泥土渗透系数与水泥掺入比关系

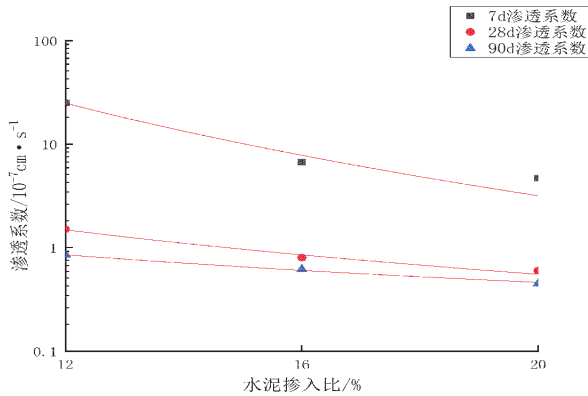


图2 壤土水泥石渗透系数与水泥掺入比关系

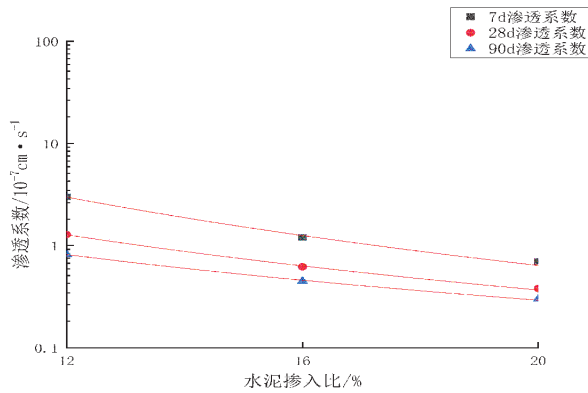


图3 黏土水泥石渗透系数与水泥掺入比关系

拟合公式为:

$$f(x) = ax^b \quad (4)$$

式中: $f(x)$ 为渗透系数, $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ;  $x$ 为水泥掺入比,%。拟合后结果见表3。由表3可知,精度较高,满足要求。

表3 渗透系数与水泥掺入比的回归方程

水泥石类型	参数	7 d	28 d	90 d
粉质砂壤土	a	376 779.95	164.67	68.99
	b	-3.71	-1.78	-1.57
	R <sup>2</sup>	0.995	0.999	0.996
壤土	a	551 016.10	180.74	17.13
	b	-4.03	-1.93	-1.21
	R <sup>2</sup>	0.972	0.977	0.990
黏土	a	5 413.28	548.25	121.53
	b	-3.02	-2.44	-2.01
	R <sup>2</sup>	0.995	0.998	0.998

1)水泥掺入比对渗透系数的影响。由图1~3可知,相同龄期下,随着水泥掺入比的增加,水泥石的渗透系数呈现降低的趋势。这是因为水泥凝胶体将土颗粒紧密胶结在一起,水化产物填充土体孔隙,减小渗流通道。水泥掺入比从12%到16%,渗透系数下降幅度最为显著,水泥掺入比从16%到20%,渗透系数下降趋势较之前相对较

缓,即水泥石渗透系数减小的幅度随水泥掺入比增大而逐渐减小。

出现上述现象的原因在于,在水泥掺入比较低范围内(12%→16%),水化产物优先填充大孔隙,对土体空间结构改变较大,渗透系数下降明显;在水泥掺入比较高范围内(16%→20%),水化产物主要细化微小孔隙,渗透系数下降速度变缓。推测随着水泥掺入比持续增大,水泥石渗透系数将在一定范围内趋于稳定。因此,适宜的水泥掺入能够有效改变土体结构,降低水泥石的渗透系数,提高水泥石的抗渗性。

2)养护龄期对渗透系数的影响。对比同一水泥掺入比下,不同龄期的水泥石的渗透系数,可以得出,养护龄期越长,水泥石的渗透系数越小。养护龄期从7 d到28 d,渗透系数下降幅度较为显著,粉质砂壤土和壤土渗透系数下降87%~95%,黏土渗透系数下降46%~57%。养护龄期从28 d到90 d,渗透系数仍持续下降,3种土的渗透系数下降19%~43%,下降幅度明显减小。水泥石渗透系数减小的幅度随养护龄期增大而逐渐减小,且随着水泥掺入比增加,龄期对渗透系数影响减小。

水泥的水化反应需要一定时间和适宜的环境,在更长龄期的养护过程中,适当的温度和湿度为水泥与水充分发生水化反应提供良好的条件,水化反应更充分,对土颗粒的胶结作用明显,对孔隙的填充效果更好;且湿润的养护环境可以维持水泥石内部的水分平衡,避免水泥石收缩应力过大,使水泥石保持较好的抗渗性,从而渗透系数较低。随着水泥掺量逐渐增加,28 d的水化产物可以填充大部分孔隙,即使28 d以后水化反应继续进行,水化产物对孔隙的填充效果不够明显,因此渗透系数的变化较缓。

3)土体结构对渗透系数的影响。分析试验结果可知,在相同水泥、相同水泥掺入比、相同养护龄期下,水泥石的渗透系数与土的种类有关。不同土体颗粒排列与级配、孔隙结构等结构不同,导致渗透系数有差异。从宏观角度看,土体孔隙主要是土颗粒之间的孔隙,其大小和形态复杂多样,当孔隙连通性较好时,土体的渗透系数较大;从微观角度看,主要是黏土矿物颗粒之间的微孔隙,微孔隙通常形态不规则,对水(下转第64页)

合评估,增强其针对性、实用性、可操作性,确保在突发事件发生时能够有序应急。

2) 加强应急设备和物资储备。水库建有 600 m<sup>2</sup> 的防汛仓库,根据应急预案要求,足额配备各类应急设备和物资,由专人负责管理,定期进行维护保养。2024 年成功创建为省级水旱灾害防御物资储备规范化单位。

3) 加强应急值班值守。严格落实应急值班制度,明确值班人员职责和任务,以及应急处置流程和要求,每天由一名领导班子成员带班实行 24 h 值班值守,及时发现、报告和处置事故险情。

4) 加强应急救援协同。高崖水库自有应急专业队 47 人,与山东浩博水利建设有限公司高崖供水分公司部分人员共同组建 60 人的防汛常备队,由郟邵镇基干民兵和工人组成 100 人的防汛预备队,与 71602 部队进行联系对接,建立应急救援协同机制,充分依靠地方应急救援资源,实现信息共享和资源共享。

## 2.6 强化督查考核,健全风险责任机制

高度重视安全生产管理工作,成立安全生产

管理办公室,由专人负责安全生产各项工作的监督检查,全面落实全员安全生产责任制,确保安全风险管控工作持续推进。

## 3 结 语

高崖水库在“六项机制”建设过程中取得了显著的成效和经验做法。下一步,高崖水库将“六项机制”与“治本攻坚三年行动”及安全生产标准化建设深入结合起来,聚焦“八大行动”“四项整治”,严格管控重大风险,加快构建现代化水库运行管理矩阵建设,不断巩固提升水库安全管理水平,向“本质安全”目标坚实迈进。

### 参考文献

- [1] 王凤鹏,徐刚.水利安全生产标准化创建措施及成效[J].山东水利,2024(5):57-59.
- [2] 刘成栋,向衍,张士辰,等.水库大坝安全智能巡检系统设计与实现[J].中国水利,2018(20):39-41.
- [3] 侯效锋,张士辰,王建.水库大坝突发事件应急演练技术研究与实践综述[J].水利水运工程学报,2024(2):164-172.

(责任编辑 张玉燕)

(上接第 55 页)流的阻碍较大。试验中,黏土的黏粒含量最高,是壤土的 1.8 倍,是砂壤土的 4.7 倍,黏土的渗透系数最小。砂壤土不均匀系数为 6.60、曲率系数为 1.10,壤土不均匀系数为 17.00、曲率系数为 1.47,壤土的不均匀系数更大,大颗粒之间的孔隙能更好地被小颗粒填充,孔隙相对小且均匀,因此壤土较砂壤土的渗透系数更小。加入水泥后,水化产物优先填充较大孔隙,影响孔隙连通性,能有效防止渗流,因此黏粒含量低的土,其渗透系数变化速率快。在实际工程中,应根据防渗要求,选择合适的土体来配制水泥土。

## 3 结 论

1) 在试验研究范围内,水泥土渗透系数随着水泥掺入比增加而减小,但减小的幅度逐渐减小。在水泥掺入比较低范围内(12%~16%),渗透系数下降明显,在水泥掺入比较高范围内(16%~20%),渗透系数下降趋势相对较缓。随着水泥掺入比持续增加,渗透系数最终将在某一范围内趋于稳定。当渗透性满足工程需要时,需考虑经济效益选择适宜水泥掺入比。

2) 水泥土的渗透系数随着养护龄期增长而减小,但减小幅度逐渐趋于平缓。28 d 龄期以前渗透系数下降明显,粉质砂壤土和壤土渗透系数降低幅度显著,黏土渗透系数下降幅度相对前两种土较小;90 d 龄期下渗透系数下降幅度减小。

3) 水泥土的渗透性受土体颗粒级配、孔隙结构等影响。对于细粒土而言,在相同水泥掺入比和相同养护龄期条件下,黏粒含量越高,渗透性越小;对于级配良好的土而言,不均匀系数越大,渗透系数越小。

### 参考文献

- [1] 张雷,王晓雪,叶勇,等.水泥土抗渗性能室内试验研究[J].岩土力学,2006,27(S2):1192-1196.
- [2] 郑刚.水泥土抗渗性能研究[D].同济大学,2006.
- [3] 苏玉杰,何耀辉,陈式华.夯实水泥土抗渗性能试验研究[J].人民黄河,2011,33(12):126-128.
- [4] 袁荣宏,白杰,吴桂芬.水泥土渗透系数随围压变化的试验研究[J].水利水运工程学报,2012(5):13-17.
- [5] 夏正兵.水泥土渗透系数影响因素的试验研究[J].四川建筑科学研究,2018,44(3):68-71.

(责任编辑 崔春梅)