

江垵大坝碾压混凝土的渗透规律初探

速宝玉, 詹美礼, 刘俊勇, 舒世馨, 张祝添

(淮海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 对湖南省江垵碾压混凝土大坝部分芯样渗透性的室内试验研究揭示了碾压混凝土渗透性的基本规律. 长时间、多状态下的碾压混凝土渗透性试验结果表明: 碾压混凝土渗透规律在较高水力梯度范围内仍服从线性达西定律; 在恒定水头作用下, 碾压混凝土的渗透具有时效自密性; 在变水头作用下, 当水力梯度达到某一上限后, 碾压混凝土渗透存在偏离达西渗流的现象. 经过对试验资料的统计分析, 提出了描述碾压混凝土渗透性的经验关系, 即渗流量随时间变化的负指数关系.

关键词 碾压混凝土; 渗透性; 达西定律; 时效自密性

中图分类号 :TV642.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2000)02-0007-05

碾压混凝土坝由于其作业面积大、分层铺筑碾压施工而存在着薄弱层面或局部缺陷集中的现象. 自碾压混凝土问世以来, 其渗透性一直是人们最为关注的问题之一. 国内外许多学者采用不同的研究方法或从不同角度试图对碾压混凝土渗透性加以描述, 尤其是我国在“八五”和“九五”期间, 在这方面做了许多研究工作. “八五”期间, 有人认为碾压混凝土坝渗透具有强各向异性和不均匀性, 由此建立了等效隙宽与不相关随机数学模型^①. “九五”期间, 人们更侧重于试验研究, 如: 武汉水利电力大学对碾压混凝土在不同渗透历时、不同水力梯度作用下的渗透特性进行的研究表明, 碾压混凝土不同配合比、不同龄期、不同水力梯度下, 其渗透规律有明显不同^②; 中南勘测设计研究院的研究表明, 碾压混凝土的渗透性和施工碾压的间隔时间、层面处理方式及胶凝材料用量有关^③; 长江科学院的试验研究表明, 碾压混凝土的层面抗渗性能随层面间隔时间的延长而降低^[1], 等等. 这些研究成果在一定程度上可以从不同角度反映出碾压混凝土的渗透特点. 笔者通过对江垵工程碾压混凝土芯样进行的渗透特性试验分析研究, 也得出了一些有意义的结论.

1 达西定律的适用范围^[2]

达西定律是多孔介质渗流分析中公认的、最有普遍意义的理论基础, 适用于线性阻力关系的层流运动 (雷诺数 $Re < 5$), 其基本表达式为

$$v = kJ \tag{1}$$

式中: v ——渗流速度, cm/s ; k ——渗透系数, cm/s ; J ——水力比降.

达西定律适用范围具有下限和上限, 超出达西定律适用范围的流动称为非达西流动或非线性阻力流动. 达西定律有效范围的下限为微小流速的渗流 (例如粘土中的渗流). 这种渗流存在着起始水力坡降 J_0 , 其渗透表达式为

$$v = k(J - J_0) \tag{2}$$

达西定律的上限是紊渗流, 紊渗流的 $J - v$ 表达式为

$$v = kJ^m \tag{3}$$

其中 m 为指数.

收稿日期: 1999-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59879004); 水利部水利技术开发基金资助项目(97472603).

作者简介: 速宝玉(1937—), 女, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土渗流及控制研究.

① 速宝玉等. 龙滩碾压混凝土重力坝坝基及坝体渗流与排水对大坝安全影响的研究. 河海大学, 1995. 32~34.

② 熊文标等. 碾压混凝土在不同水力梯度作用下的溶蚀和渗透特性研究. 武汉水利电力大学, 1998. 1~6.

③ 孙君森等. 碾压混凝土的性能研究. 中南勘测设计研究院, 1998. 4~7.

2 试验设备及方法简介

2.1 渗透试验装置

渗透试验是在 KS—50B 型多功能高压渗透仪上进行的,其额定最大水压力为 5 MPa,管路、阀门、仪器筒的安全系数为 10.0.压力水库为两个连续交替供水的高压水箱,压力由高压氮气瓶供给,压力可长时间维持稳定,精度较高.

2.2 渗透试验试件的制备

现场取回的芯样需首先预制成渗透试件,然后才能正式开始渗透试验.试件基本尺寸为 $\varnothing 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$.制备程序如下(a)打毛(b)浸泡(c)入模,放在模子正中,在试件与模壁间的空隙中充填丙乳砂浆(d)拆模(e)养护(f)封蜡,把试件压入渗透试验筒,水流方向沿层缝面(放模示意图见图 1),每 6 个试件为 1 组.蜡液凝固后(很快)制作完毕,即可进行渗透试验.

2.3 基本试验方法

试验中,试件面积 A 和试件长度 L 都是常数,改变水头 H ,测定流过碾压混凝土试件流量 Q ,再根据式(4)求其渗透系数 k .

2.4 渗透系数的确定

本次试验中渗透系数 k 大小按下列公式确定:

$$k=\eta_T\frac{QL}{A\Delta H}$$

(4)

式中: k ——渗透系数, cm/s ; η_T ——温度修正系数; Q ——通过试件断面的渗流量, cm^3/s ; L ——渗径长度, cm ; A ——有效渗水面积, cm^2 ; ΔH ——压力水头, cm .

3 碾压混凝土的渗透性评述

为了研究碾压混凝土的渗透规律,我们对 3 # 变 P—Ⅱ(变态混凝土)、23 # 缝 P—Ⅲ(二级配)、1 # 层 P—2(二级配)、10 # 缝 P—Ⅰ(三级配)、7 # 缝 P—Ⅳ(三级配)几个试件在 2.8 MPa 水压力下持续加压 1 个月,6 # 本 P—2 和 6 # 本 P—4 两个试件在 2.0 MPa 水压力下持续加压 1 个月.其中“变”表示变态混凝土;“本”表示本体试件;“层”“缝”表示含层、缝试件,1 #、3 #...表示钻孔孔号.渗透试验结果点绘于图 2~图 5 中.

从图 2 可以看出,在渗透的初期阶段,在变水头作用下,试件的流量是随着时间逐渐增大的,当水压力加到 2.8 MPa 或 2.0 MPa 并在其持续作用下,试件的流量随着历时延长都呈递减趋势,并逐渐达到稳定,碾压混凝土渗透性具有随时间的延长而降低的特性(即碾压混凝土渗透性的自密性).分析其原因,主要是因为随着渗透时间的延长,胶凝材料继续水化,尤其是碾压混凝土中大量的未水化粉煤灰不断吸收 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成新的水化产物,水流经毛细孔时,新生成物蒙上吸附水,同时发生膨胀,减小了渗透的有效孔径^①.

假设流量随时间的变化满足负指数函数,则其基本表达式如下:

$$Q=Ae^{-st}+Q_{\infty}$$

(5)

式中: A ——流量衰减幅度, cm^3/s ; Q_{∞} ——渗透达到稳定时的流量, cm^3/s ; s ——衰减速度.

这里认为参数 A 、 Q_{∞} 、 s 与碾压混凝土的配合比、压实度、水流作用时间等因素有关,参数 Q_{∞} 需经试验确定,本文取加压持续 20 d 后的流量平均值.

采用式(5)对图 3 A 中曲线进行拟合,拟合参数列于表 1.

表 1 拟合参数 Q_{∞} 、 A 、 s 值

Table 1 The values of fitting parameters A and s

参数	3 # 变 P—2	10 # 缝 P—1	23 # 缝 P—3	1 # 层 P—1	7 # 缝 P—2	6 # 本 P—2	6 # 本 P—4
Q_{∞}	2.160×10^{-4}	1.680×10^{-4}	2.310×10^{-4}	4.240×10^{-4}	1.100×10^{-4}	0.356×10^{-4}	0.395×10^{-4}
A	1.109×10^{-4}	1.086×10^{-4}	1.336×10^{-4}	1.061×10^{-4}	1.140×10^{-4}	0.431×10^{-4}	2.139×10^{-4}
s	0.7376	0.8248	0.7323	0.2636	0.8195	0.0968	0.1490

① 熊文标等.碾压混凝土在不同水力梯度作用下的溶蚀和渗透特性研究.武汉水利电力大学,1998.1~6.

表 1 中参数 Q_{∞} 、 A 、 s 亦体现出碾压混凝土自身的离散性. 因此, 式(5)尚不能揭示碾压混凝土时效现象中的 Q_{∞} 、 A 、 s 的规律. 故此, 不同的碾压混凝土必须通过试验确定 Q_{∞} 、 A 、 s 后才能应用于实际计算分析.

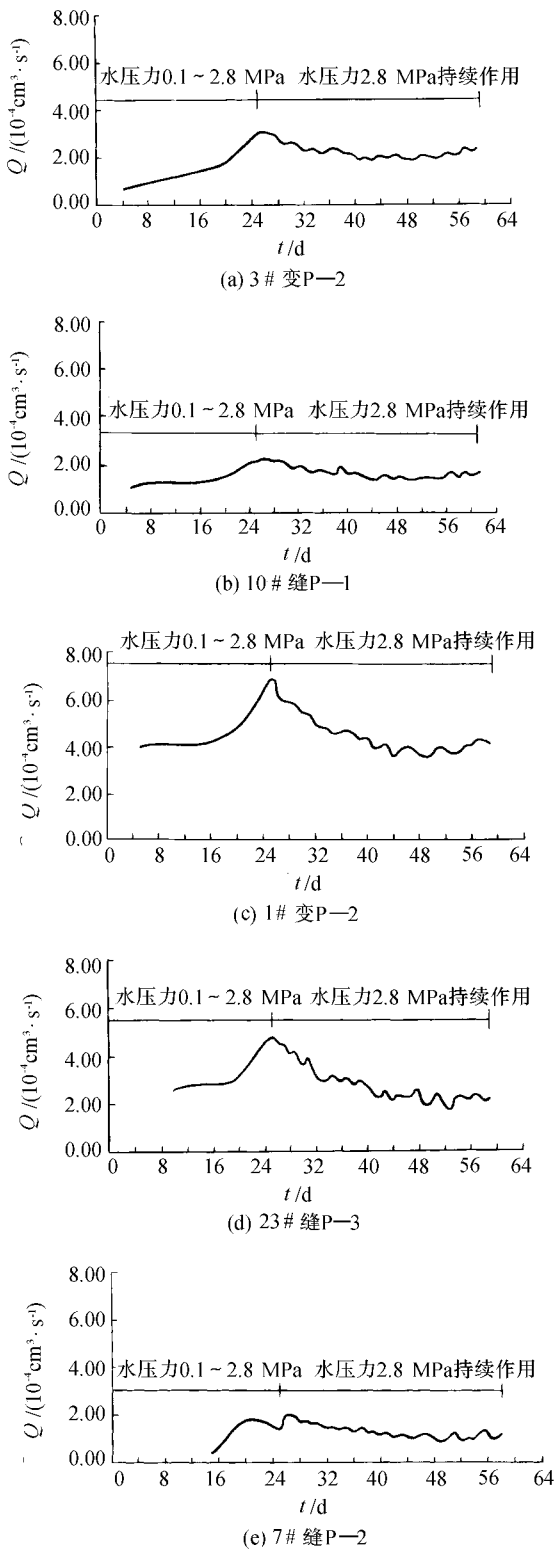


图 2 整个渗透试验中流量 Q 过程曲线
Fig.2 Hydrograph of the whole permeability test

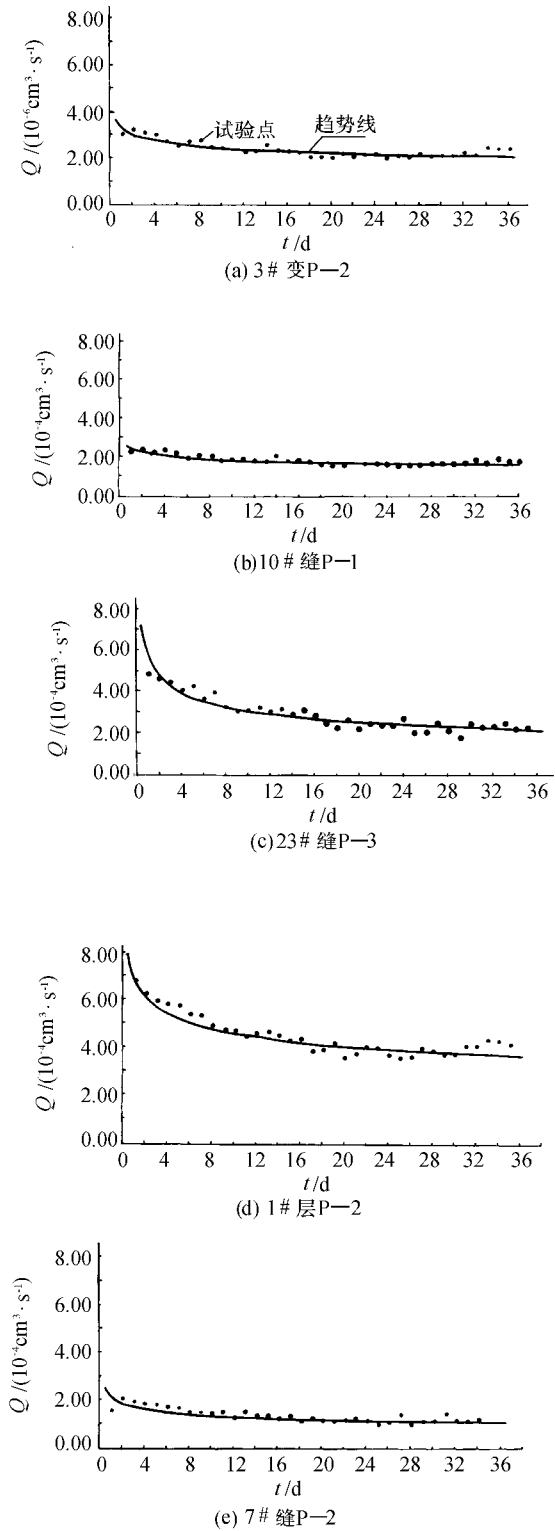


图 3 2.8 MPa 水压力作用下流量 Q ~ 持续时间 t 拟合关系曲线
Fig.3 Fitting curve of flux(Q) with time(t) under 2.8 MPa water pressure

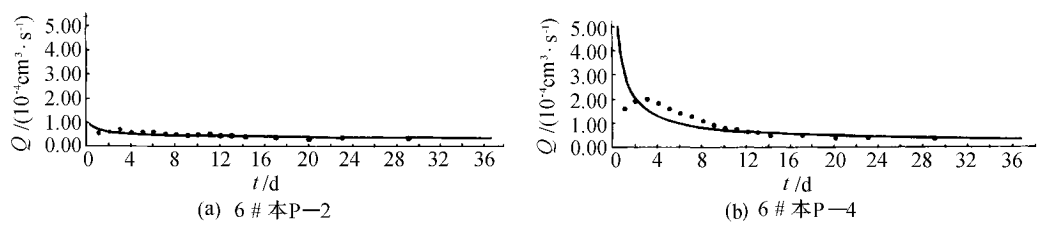


图 4 2.0 MPa 水压力作用下流量 Q ~ 持续时间 t 拟合关系曲线
Fig.4 Fitting curve of flux(Q) with time(t) under 2.8MPa water pressure

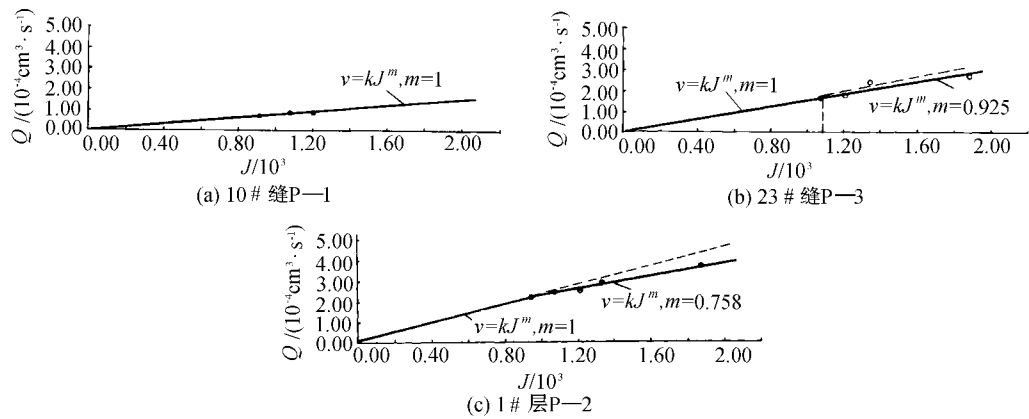


图 5 流速 v ~ 水力梯度 J 拟合关系曲线
Fig.5 Fitting curve of flow velocity(v) with hydraulic gradien(J)

从图 5 流速 v ~ 水力梯度 J 拟合关系曲线可以看出 ,尽管碾压混凝土的渗透性很小 ,但在变水头、高水力梯度作用下仍会出现偏离达西渗流的现象. 分析其原因 ,是因为压力增长对混凝土结构造成破坏 ,试件有新的毛细孔开放 ,有更多的毛细孔参与渗透^①. 为了说明这种现象对渗透系数的影响程度 ,采用式 (3) 对图 5 的直线与曲线段分别进行计算 ,求解渗透系数 k_1 和 k_2 ,结果见表 2.

表 2 $m = 1$ 和 $m \neq 1$ 两种情况下渗透系数的比较

Table 2 Comparison of permeability coefficients for $m = 1$ and $m \neq 1$

试件	水压力 /MPa	流量 Q ($\times 10^{-4} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	线性水力 比降 J	J^m ($m \neq 1$)	有效渗水断面 A / cm^2	$k_1 = \frac{Q}{AJ}$ ($\times 10^{-9} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_2 = \frac{Q}{AJ^m}$ ($\times \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
23 # 缝 P—3	1.6	2.67	1066.67	633.61	167.33	1.50	2.52×10^{-9}
	1.8	2.95	1200.00	706.59		1.47	2.50×10^{-9}
	2.0	3.19	1333.33	778.94		1.43	2.45×10^{-9}
	2.8	4.49	1866.67	1063.45		1.44	2.52×10^{-9}
1 # 层 P—2	1.6	4.07	1066.67	196.67	167.33	2.28	1.24×10^{-8}
	1.8	4.14	1200.00	215.02		2.06	1.15×10^{-8}
	2.0	4.77	1333.33	232.88		2.14	1.22×10^{-8}
	2.8	6.12	1866.67	300.49		1.96	1.22×10^{-8}

从表 2 可以得出 ,23 # 缝 P—3 和 1 # 层 P—2 两试件按线性达西定律计算的渗透系数相近 ,按非线性计算的渗透系数都偏大 ,其中 1 # 层 P—2 非线性渗透系数比按线性计算的渗透系数大了近 1 个数量级. 渗流偏离于达西定律的强弱程度主要体现在 m 值上 , m 越接近于 1 ,渗流速度与水力梯度之间越接近线性关系 ;反之 ,非线性越强. 指数 m 与碾压混凝土配合比和压实度等因素有关.

4 结 束 语

本文在江垭芯样渗透试验的基础上 ,对碾压混凝土的渗透规律作了进一步研究分析. 结果表明 ,一般情

① 熊文标等. 碾压混凝土在不同水力梯度作用下的溶蚀和渗透特性研究. 武汉水利电力大学 ,1998. 1 ~ 6.

况下 ,碾压混凝土的渗透规律仍满足线性达西定律 ,按达西渗透规律研究分析碾压混凝土的渗透性是合理的和可靠的 ;在恒定水头作用下 ,碾压混凝土渗透性确实具有时效自密性 ,渗透量随持续时间呈递减趋势 ;但变水头、高水力梯度作用下碾压混凝土其渗透规律会存在偏离达西渗透的现象 .

参考文献 :

[1] 杨华全 ,周守贤 .碾压混凝土的层面结合研究 [J].人民长江 ,1997 28(8) 32 ~ 35 .
[2] 毛昶熙 .渗流计算分析与控制 [M].北京 :水利电力出版社 ,1988.8 ~ 12 .

Research of Permeability of Roller-Compacted Concrete of Jiangya Dam

SU Bao-yu , ZHAN Mei-li , LIU Jun-yong , SHU Shi-xing , ZHANG Zhu-tian

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Laboratory permeability tests of core samples of Jiangya roller-compacted concrete dam (RCCD) located in Hunan province have been conducted . The basic permeability law of roller-compacted concrete (RCC) is deeply explored . The test results show that the permeability of RCC obeys Darcy's law under relatively high hydraulic gradient and the seepage through RCC reduces gradually with time . Under high hydraulic gradients , the permeability deviates from Darcy's law when the hydraulic gradient reaches some upper limit . Based on statistic analysis of test data , an empirical formula describing the permeability of RCC is put forward .

Key words :roller-compacted concrete ; permeability ; Darcy's law ; age densification