

文章编号:0559-9350(2005)05-0602-06

新老混凝土粘结面渗透性能试验研究

李平先^{1,2}, 张雷顺¹, 赵国藩², 李冰¹

(1. 郑州大学 环境与水利学院, 河南 郑州 450002;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:对 96 个圆台柱体试件的新老混凝土粘结面渗透性进行了试验研究, 分析了界面处理方法、界面剂类型以及粗糙度等对粘结面渗透性能的影响, 并对粘结面的渗流特性及层面力学参数, 如粘结面等效水力隙宽、渗透系数以及渗透规律进行了初步探讨。结果表明, 新老混凝土粘结面的渗透性大于新老混凝土本体的渗透性, 粘结面是其渗水的主要通道, 界面剂可改善粘结面的抗渗性能。在粘结面渗水高度量测的基础上, 根据渗透压力和渗水高度, 推导了粘结面的等效水力隙宽及渗透系数的计算公式, 粘结面的渗流基本上属于层流渗流, 粘结面的等效水力隙宽在 $0.11 \sim 0.27 \mu\text{m}$ 之间, 渗透系数多数在 $1.1 \times 10^{-10} \sim 4.8 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 之间, 个别高达 $1.8 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

关键词:新老混凝土; 界面处理; 界面剂; 抗渗性能; 渗透系数; 水力隙宽

中图分类号:TV122.21

文献标识码:A

混凝土的抗渗性能是指混凝土抵抗外部介质入侵的能力, 是评价混凝土耐久性的重要指标之一。由于绝大多数对水泥混凝土有害的流动水、溶液和气体等介质均是从水泥混凝土的孔隙进入其内部, 从而造成混凝土溶蚀、结构松散、密实度下降, 甚至结构的破坏。因此, 水泥混凝土抗渗性能的好坏, 直接影响到混凝土结构的耐久性。

在对水工混凝土结构的补强加固中, 特别是混凝土坝坝体加高一类的工程^[1], 新、老混凝土由于施工时间上的差异和老混凝土的硬化以及老混凝土粘结表面存在的各种缺陷和新混凝土硬化过程中的体积收缩, 使得粘结面成为抗裂、抗滑和抗渗的薄弱环节, 关系到加固工程的成败和结构的安全性。而且, 如果粘结面处理不当, 将成为渗水的主要通道。文献[2]曾对龄期为三天的老混凝土与新混凝土的粘结面抗渗等级进行了试验, 结果发现, 粘结面不做任何处理、涂抹水泥浆和水泥砂浆时的抗渗等级可分别达到 S0、S7 和 S6。但迄今为止, 有关新老混凝土粘结面渗流特性研究的报道很少, 而多数文献集中在对普通混凝土和高性能混凝土本体的渗透性^[3,4]以及碾压混凝土层面渗流特性的研究上^[5-8]。本文分析了界面处理方法、界面剂类型及粗糙度对新老混凝土粘结面力学性能和渗流特性的影响。

1 试验概况

1.1 渗透试验 我国混凝土抗渗性试验方法为水压强法^[9,10], 分为抗渗等级的逐级加压法和渗水高度或相对渗透系数的一次加压法。逐级加压法费时费工, 而且对低渗透性的高性能混凝土, 有时无法获得试验结果, 一次加压法对渗水高度较小的混凝土误差较大。本文采用一次加压法。

1.2 新老混凝土粘结面渗透试件的设计 根据国内外混凝土渗透性试验方法并结合我国现行混凝土抗渗试验规程和试验设备, 本文试验采用新老混凝土复合圆台体(如图 1 所示)作为渗透试验的试件(每组 6 个)。

收稿日期:2004-04-14

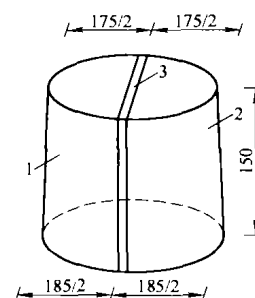
基金项目:国家自然科学基金资助项目(59778045)

作者简介:李平先(1962-), 男, 河南巩义人, 工学博士, 教授, 主要从事水工混凝土结构基本理论与耐久性方面的研究。

1.3 新、老混凝土的材料及配合比 新、老混凝土均采用 32.5 普通硅酸盐水泥、中粗河砂(细度模数 2.93)、碎石(粒径 5~20mm)配制而成。配合比见表 1。

1.4 老混凝土的制作和粘结面的处理 在抗渗副模中间放置一块 5mm 厚的梯形有机玻璃板,然后浇筑混凝土,在振动台上振捣成型,试件拆模后成为半圆台体的试块,用钢丝刷刷去两端的水泥浆膜,用塑料薄膜覆盖,洒水自然养护 28d 后,贮存作为老混凝土试件,一年以后进行新老混凝土粘结复合圆台体的制作。

采用以下 4 种方法对老混凝土粘结面进行处理:(1)B-1 型界面。对老混凝土的自然光滑面仅用钢丝刷刷毛后作为粘结面,清除表面的污物和浮浆,并用清水清洗干净。(2)B-2 型界面。在老混凝土拆模的同时,将粘结面用钢丝刷刷毛,使粘结面形成比 B-1 型界面更加均匀、粗糙的粘结面。(3)C 型界面。对老混凝土的表面采用人工凿毛,凿去老混凝土表面的浮浆和部分水泥石,露出粗骨料,使表面形成凹凸不平状,以增加粘结面的接触面积和机械咬合力。(4)S 型界面。将整体圆台体老混凝土试块用压力试验机从中间劈开,用其断裂面作为粘结面,同时清除断裂面松动和开裂部分,从而得到粗糙度更大的粘结面。



1. 老混凝土;2. 新混凝土;
3. 粘结面

图 1 新老混凝土试件

表 1 新老混凝土配合比

设计强度等级	坍落度/cm	水灰比	砂率 S_p (%)	混凝土材料用量/(kg/m ³)			
				水泥	砂	石子	水
C25	3~5	0.54	36	361	664	1180	195
C30	2~4	0.47	34	415	609	1181	195

1.5 粘结面的粗糙度 采用上述方法处理的老混凝土粘结面,用灌砂法量测平均灌砂深度 Δh (mm),作为粘结面的粗糙度指标。经测定:B1 型界面的 $\Delta h = 0.23 \sim 0.58$ mm; B2 型界面的 $\Delta h = 0.98 \sim 1.26$ mm; C 型界面的 $\Delta h = 2.1 \sim 3.07$ mm; S 型界面的 $\Delta h = 4.0 \sim 6.9$ mm。

1.6 界面粘结剂类型 为比较不同界面处理方法和不同界面剂类型之间渗透性能的差异,试验采用以下 4 种界面剂:(1)无界面剂。在老混凝土粘结面上直接浇筑新混凝土;(2)水泥净浆。采用与新混凝土相同水泥标号的水泥浆,水灰比为 0.4;(3)水泥砂浆。与新混凝土相同的砂,在水泥净浆中掺入与水泥相同重量河砂的水泥砂浆,水泥:砂:水 = 1.0:1.0:0.4;(4)水泥膨浆。用 10% UEA 膨胀剂代替水泥净浆中相应重量水泥的水泥净浆(简称水泥膨浆)。

1.7 复合圆台体试件的制作与试验 (1)将浇筑的半圆台柱体老混凝土试件,按上述界面处理方法对粘结面进行处理(此时老混凝土的龄期都在一年以上);(2)将处理过的老混凝土试块放入水中浸泡 12h 以上,取出清洗干净,并放在通风处干燥;(3)将粘结面涂抹界面剂(厚度 0.5~2.0mm),置于抗渗副模中,侧向浇筑新混凝土,振捣成型;(4)试件成型 24h 后拆模,用钢丝刷刷去两端的水泥浆膜,洒水并覆盖塑料薄膜,自然养护 28d;(5)将试件擦拭干净,待晾干后,在新老混凝土粘结复合圆台体试件的侧面均匀涂抹一层水泥黄油密封材料。然后将试件装入抗渗主膜中,并安装在抗渗仪上;(6)试验在国产 ZH-201 型自动控制渗透仪上进行,将抗渗仪的水压一次加到 0.8MPa,恒压 24h 后在压力机上沿粘结面将试件劈开,量测渗水高度并计算相对渗透系数。

对不同处理的粘结界面和不同的界面剂组合情况,均制作了 6 个复合圆台体试件,同时对新老混凝土也分别制作了 6 个本体抗渗试件,以确定新老混凝土本体的渗透性。

2 试验结果及分析

新老混凝土本体的相对渗透系数 k_r 按下式计算^[9]。

$$k_r = \frac{nD_m^2}{2TH} \quad (1)$$

式中: k_r 为相对渗透系数; D_m 为平均渗水高度; H 为水压力, 以水柱高度表示; T 为恒压时间; n 为混凝土的吸水率, 一般为 $0.03^{[9]}$ 。

根据试验, 新、老混凝土本体的平均相对渗透系数分别为 $3.56 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ 和 $5.95 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ 。

粘结面抗渗试验结果见表 2。

表 2 新老混凝土粘结面抗渗性能

试件编号	界面处理	界面粘结剂	渗水高度/mm				等效水力 隙宽 $e/\mu\text{m}$	平均渗透系数 $k \times 10^{-9}/(\text{cm/s})$
			最小值	最大值	平均值 D_m	均方差		
B1N	B-1 型 界面	无界面剂	124.2	150.0	138.75	13.27	0.256	4.13
B1P		水泥净浆	70.9	94.9	88.12	12.64	0.163	1.84
B1M		水泥砂浆	55.9	82.7	70.38	11.64	0.123	1.11
B1U		水泥膨浆	90.3	150.0	130.06	26.87	0.240	3.72
B2N	B-2 型 界面	无界面剂	64.7	150.0	114.12	32.48	0.234	3.88
B2P		水泥净浆	65.4	95.7	70.10	13.58	0.130	1.17
B2M		水泥砂浆	70.1	98.2	69.64	13.21	0.129	1.12
B2U		水泥膨浆	46.4	98.8	60.68	26.79	0.112	0.95
CN	C 型 界面	无界面剂	83.1	150.0	119.16	30.18	0.220	3.18
CP		水泥净浆	133.8	150.0	146.76	7.24	0.271	4.59
CM		水泥砂浆	130.1	133.6	132.40	1.38	0.245	3.72
CU		水泥膨浆	110.2	150.0	141.30	17.46	0.261	4.30
SN	S 型 界面	无界面剂	150.0	150.0	150.00	0.00	59.380	2.21×10^5
SP		水泥净浆	128.2	150.0	142.98	10.07	0.261	4.26
SM		水泥砂浆	86.1	123.2	107.70	14.17	0.199	2.50
SU		水泥膨浆	83.8	100.2	100.04	15.80	0.185	2.17

注: SN 试件的平均渗水量为 45.35 ml/h

2.1 渗透现象 由表 2 可见, 在所试验的新老混凝土复合圆台体试件中, 除粘结面不做任何处理直接浇筑新混凝土的 SN 试件在新老混凝土粘结面有一渗流眼孔, 加压初期粘结面就开始渗水外, 其余试件在周边具有良好密封情况下, 其粘结面均表现出较好的抗渗性能, 但不同的界面处理方法和不同的界面剂类型, 粘结面的渗透性有较大差异。

图 2 为在垂直于粘结面方向将试件从中间劈开所见的粘结面渗水情况, 从图中可看到, 粘结面的渗水高度大于两侧新老混凝土本体的渗水高度。



图 2 粘结面渗水示意

2.2 结果分析 通过本文的渗流试验, 可以得到以下认识: (1) 新老混凝土粘结面的渗透性大于新老混凝土本体的渗透性, 从试验结果看, 两者一般相差一个数量级; (2) 新老混凝土粘结面不同于两块平板叠合时构成的平整接触面, 也不同于岩体的裂隙面, 而是新老混凝土相互具有一定嵌入的啮合面, 特别是

经过糙化处理的粘结面,尤为如此,与碾压混凝土的层面渗流有相似之处^[5,11]; (3)新老混凝土本体具有较好的抗渗性,粘结面的渗透性受多种因素影响,如界面处理方法、界面剂的类型、新混凝土的浇筑质量、渗流水头以及粘结面的孔隙分布和孔结构等。

2.3 影响粘结面渗透性的主要因素 影响新老混凝土粘结面渗透性能的主要因素有老混凝土的龄期、层面处理方式、新混凝土的浇筑质量、浇筑时的气候条件等,还与渗流水头、粘结面的应力状态和混凝土配合比等有关,同时与粘结面内的孔径分布状态、含气量、密实度等密切相关^[2]。

2.3.1 界面剂的影响 图3为不同界面处理下新老混凝土粘结试件平均渗透系数的对比。从中可以看出,在同一界面处理方法中,无界面剂时的平均渗透系数一般最大,说明使用界面剂可以减小粘结面的渗透性,提高粘结面的抗渗性能。

2.3.2 界面处理方法的影响 从图3可以看出,不同界面处理方法下的平均渗透系数之间有较大的差异。对C型和S型粘结面,虽然界面的粗糙度较大,提高了粘结面的粘结强度^[12],但对粘结面的抗渗性能并没有很大改善。从试验结果看,这两种界面下的平均渗水高度大于B型界面情况下的平均渗水高度。该结论与碾压混凝土层面经处理后铺垫砂浆时的渗透性大于未经处理时粘结面的渗透性一致^[11]。

由于B型界面刷毛处理的均匀性好于C型和S型界面,因而其粘结面的平均渗水高度较小。在两种刷毛面中,B-2型界面是在老混凝土终凝后12h内进行刷毛处理,界面的粗糙度以及粗糙度的均匀性均好于B-1型界面,因而,在相同界面剂下的平均渗水高度小于B-1型界面相应情况下的平均渗水高度。

根据对粘结面的劈裂抗拉强度和剪切强度试验可知,S型界面的粘结性能较差^[12],从渗透试验可知S型界面的抗渗性能也较差,可能是劈裂界面造成粘结面损伤的缘故。

3 粘结面的渗流特性及层面力学参数探讨

普通混凝土本体渗透试验表明,普通混凝土本体的渗透系数约为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ cm/s。然而,新老混凝土粘结面本身是一个薄弱环节,存在大量孔隙和渗水通道,是混凝土结构修补加固工程中渗透的主要通道。试验发现,粘结面的渗透性差异较大,即使是同一批浇筑的混凝土、相同的界面处理方法、同样类型的界面粘结剂,粘结面的渗透性也存在较大差异(如图2所示)。由于混凝土的离散性,各粘结试件之间界面处理的差异性,界面剂厚度和新混凝土浇筑的不均匀性,造成了粘结面胶结的不均匀性,从而导致同一种试件的渗透性相差较大,使粘结面的渗流研究变得更加复杂。

3.1 粘结面渗流计算模型

3.1.1 粘结面平均水力隙宽 1868年俄国的著名流体学家布辛习涅斯基在粘性(牛顿液体)运动一般微分方程式的基础上,导出了液体在平行板缝隙中运动的理论公式^[13]。

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J \quad (2)$$

式中: q 为流体的单宽流量; g 为重力加速度; b 为缝隙的宽度; ν 为水流的运动粘滞系数,在水温 10°C , $\nu = 0.0131\text{cm}^2/\text{s}$; J 为水力梯度。

式(2)在岩体渗流中常被称之为立方定律。前苏联学者 Lomize^[14] 和 Romm^[15]、法国学者 Louis^[16] 分别以平行玻璃板(光学光滑)模拟裂隙,相继对单条裂隙水流在层流时的立方定律进行了验证。Romm还研究了微裂隙($10 \sim 100\mu\text{m}$)和极微裂隙($0.25 \sim 4.3\mu\text{m}$)的情况,认为只要裂隙宽度大于 $0.2\mu\text{m}$,立方定律总是成立的。我国学者对光滑裂隙渗流的试验研究^[13,17]及碾压混凝土层面渗流的试验研究^[15-8]结果表明,在层流范围内,立方定律总是成立的。

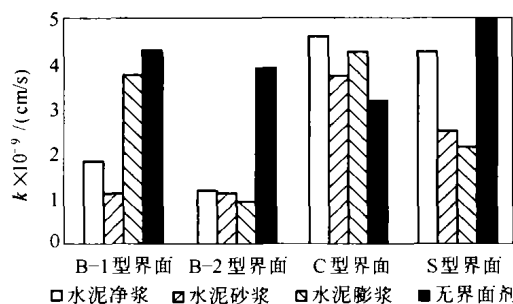


图3 不同界面处理下的平均渗透系数

新老混凝土粘结面与岩石裂隙既有相似之处即都是具有一定隙宽的渗水面,又有不同之处,粘结面是具有一定粗糙度的非光滑啮合面。因此,对新老混凝土粘结面来说,微观上,可将粘结面视为匀质透水材料,宏观上可看作与岩石裂隙和碾压混凝土层面的渗流特性相同,符合立方定律。因而粘结面的渗流速度可表达为

$$v_f = \frac{ge^2}{12\nu} J \quad (3)$$

式中: v_f 为粘结面的平均渗流速度; e 为粘结面的等效水力隙宽。

根据平均渗水高度 D_m 和试件底面渗透压力 p , 可导出粘结面等效水力隙宽为

$$e = D_m \sqrt{\frac{6n\rho}{pT}} \quad (4)$$

对于渗透性较大、可以直接量测渗流量的试件,可利用立方定律计算其等效水力隙宽,即

$$e = \sqrt[3]{\frac{12\nu L \rho Q}{Bp}} \quad (5)$$

式中: L 为渗流路径,即新老混凝土粘结试件的高度,本文试验中 $L = 150\text{mm}$; Q 为渗流量; ρ 为水的重力密度; B 为粘结面的渗水宽度,本文试验中 $B = 175\text{mm}$ 。

等效水力隙宽 e 的计算结果见表 2。

3.1.2 粘结面平均渗透系数 粘结面平均渗透系数为

$$k = \frac{ge^2}{12\nu} \quad (6)$$

将式(4)代入式(6),即可得到粘结面的平均渗透系数,计算结果见表 2。从表 2 可以看出,新老混凝土粘结层面的等效水力隙宽在 $0.11 \sim 0.27\mu\text{m}$ 之间,多数大于 $0.2\mu\text{m}$,基本上可以认为粘结面渗流在层流渗流范围内。另外,在上面公式推导过程中,将粘结面两侧的新老混凝土看作不透水面,而实际上,水在粘结面渗透过程中,新、老混凝土本体要吸收一部分水分,因此,本文公式具有一定的近似性。

3.2 新老混凝土粘结面渗流的主要特点 通过试验发现,新老混凝土粘结面的渗透性存在较大差异,即使是同一种方法处理的粘结面,在相同界面剂下同一批浇筑的混凝土,其粘结面的渗透性也存在较大差异。概括起来主要有以下特点:(1)粘结面的强透水性。新老混凝土粘结面本身是一个薄弱环节,存在大量孔隙和渗水通道,是混凝土结构修补加固工程中挡水建筑物渗透的主要通道。粘结面的渗透性明显大于两侧新、老混凝土本体的渗透性(如图 2 所示);(2)粘结面渗水的不均匀性。新老混凝土粘结面实际是在粘结新老混凝土有一定嵌入的啮合面,从图 2(a)可以看出,同一粘结面不同点之间的渗水高度具有较大的差异;(3)粘结面渗透问题的复杂性。由于影响新老混凝土粘结面渗透的因素较多,使得该问题的试验研究和理论分析显得更为复杂。

4 结论

根据以上对新老混凝土粘结面渗透性试验的结果分析以及粘结面渗透参数的初步探讨,得出以下结论:(1)新老混凝土粘结面的渗透性大于新、老混凝土本体的渗透性,其渗透系数一般相差一个数量级。因此,对承受水压力作用的新老混凝土粘结面,如果处理不当会形成薄弱面,成为比混凝土本体渗透能力大得多的透水层;(2)根据渗水压力和渗水高度推导的粘结面的等效水力隙宽及渗透系数的计算公式可用来估算粘结面的隙宽和渗透系数。本文试验中新老混凝土粘结面的等效水力隙宽在 $0.11 \sim 0.27\mu\text{m}$ 之间,渗透系数多数在 $1.1 \times 10^{-10} \sim 4.8 \times 10^{-9}\text{cm/s}$ 之间,个别高达 $1.8 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-4}\text{cm/s}$;(3)在新老混凝土粘结面涂抹界面剂可提高新老混凝土粘结面的抗渗能力,界面的粗糙处理虽能提高粘结面的粘结强度,但对粘结面的抗渗能力并没有多大的改善,反而在粘结面粗糙度较大时会加大粘结面的渗透性。因此,建议在实际工程中对粘结面采取刷毛并铺水泥净浆或水泥砂浆界面剂进行处理;(4)新老混凝土粘结面的渗透性受诸多因素影响,其中最基本的是粘结面的处理和界面剂的使用,粘结面的

渗透性具有明显的不均匀性和离散性,因而使粘结面渗透问题的研究更加复杂,各因素影响程度的量化有待进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 周伟,常晓林,程德虎.丹江口混凝土重力坝后期加高新老混凝土结合问题研究[J].水利水电技术,2003,34(5):13-16.
- [2] 管大庆,陈章洪,石韞珠.界面处理对新老混凝土粘结性能的影响[J].混凝土与水泥制品,1994,(4):23-24.
- [3] 杨英姿,冯奇,范征宇,巴恒静.负温混凝土抗渗性的试验研究[J].建筑技术,2002,33(10):738-739.
- [4] 赵铁军.高性能混凝土的渗透性研究[D].北京:清华大学,1997.
- [5] 沈洪俊.碾压混凝土层面渗流特性的试验研究[J].河海大学学报,1996,24(5):53-59.
- [6] 柴军瑞,仵彦卿.碾压混凝土坝层(缝)面渗流及其对坝体应力的影响[J].水电能源科学,2001,19(1):55-58.
- [7] 任旭华,李浩军,夏颂佑,沈洪俊.碾压混凝土坝的渗流特性和渗流控制[J].水力发电,2000,(3):22-25.
- [8] 任旭华,夏颂佑,张世强.碾压混凝土重力坝的渗流特性[J].河海大学学报,1997,25(2):15-20.
- [9] DL/T 5150-2001.水工混凝土试验规程[S].
- [10] JTJ 053-94.公路工程水泥混凝土试验规程[S].
- [11] 朱岳明,黄文雄.碾压混凝土及碾压混凝土坝的渗流特性研究[J].水利水电技术,1995,(12):49-57.
- [12] 李平先,赵国藩,张雷顺.受冻融损伤混凝土与新混凝土的粘结剪切性能试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(5):111-117.
- [13] 速宝玉,詹美礼,赵坚.光滑裂隙水流模型实验及其机理初探[J].水利学报,1994,(5):19-24.
- [14] Lomize G M. Flow in Fractured Rocks[M]. Russian, Gosemergoizdat, Moscow, 1951.
- [15] Romm E S. Flow in Fractured Rocks[M]. Russian, Moscow: Nedra Publishing House, 1966.
- [16] Louis C. A Study of Ground Water Flow in Jointed Rock and Its Influence on the Stability of Rock Mass[A]. Edited by Muler L., London: Rock Mech., 1969.
- [17] 王媛,速宝玉,徐志英.粗糙裂隙渗流及其受应力作用的计算机模拟[J].河海大学学报,1997,25(6):80-85.

Experimental study on permeability of fresh-old concrete bonding interface

LI Ping-xian^{1,2}, ZHANG Lei-shun², ZHAO Guo-fan¹, LI Bing²

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The permeability of fresh-old concrete bonding interface in 96 cylindrical specimens is studied experimentally. The influences of surface cleaning measure, bonding agent and surface roughness on the permeability are investigated and the characteristics and mechanical parameters of bonding interface are analyzed. The results show that the impermeability of the interface is lower than the impermeability of concrete and the bonding agent can improve the impermeability of the interface. The formulas for calculating permeability coefficient and equivalent width of hydraulic fracture of the interface are proposed based on the experimental data.

Key words: fresh-old concrete bonding interface; surface cleaning measure; bonding agent; impermeability; permeability coefficient

(责任编辑:王冰伟)