

文章编号:0253-9993(2013)04-0610-07

混凝土黏结面应力-渗流耦合试验装置研制及应用

陈晓祥¹,杜泽生²,陈金宇³,徐仪昌¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000;2. 煤炭科学研究总院 安全装备技术研究分院,北京 100013;3. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

摘 要:针对新老混凝土黏结面或混凝土与其它介质黏结面大都受到正应力作用的情况,研制了混凝土黏结面应力-渗流耦合试验装置,介绍了装置的主要功能、技术参数、系统组成及关键技术;采用该装置对四组钢板与混凝土黏结面进行了抗渗试验,获得了不同粗糙度的钢板与混凝土黏结面的渗透特性。试验结果表明,该装置完全能够保证测试需要的轴压和水压稳定,提出的电阻法测试渗透锋面的方法是可行的;钢板与混凝土黏结面具有良好的抗渗性能,采用钢质接茬板可保证井壁接茬的密封性能满足要求;在相同轴向应力状态下,钢板与混凝土黏结面的渗透系数大小与钢板表面粗糙度有关,钢板表面粗糙度越大,黏结面的渗透系数越小;装置具有较好的实用性和可靠性,为进一步研究应力作用下混凝土本体、新老混凝土黏结面以及混凝土与其它介质黏结面的渗透特性提供新的测试手段。

关键词:黏结面;应力-渗流;耦合试验;装置;研制

中图分类号:TD265

文献标志码:A

Development of test equipment for coupling stress-seepage on concrete adhesive interface

CHEN Xiao-xiang¹, DU Ze-sheng², CHEN Jin-yu³, XU Yi-chang¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Safety Equipment and Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In terms of the situation that the adhesive interfaces between new concrete and old concrete or between concrete and other media are mostly under normal stress, the coupling stress-seepage test equipment on concrete adhesive interface has been developed in this study. This paper will present the main functions, technical parameters, equipment system, key technologies and test results. The anti-penetrating test on four groups of the adhesive interfaces between steel plate and concrete was conducted using this newly developed equipment, and the permeability of adhesive interfaces between concrete and different roughness steel plate was obtained. Test results show that the test equipment can provide stable vertical pressure and water pressure needed for the test; and the resistance measurement of infiltration frontal area method proposed is feasible. The impermeability on the interface between concrete and steel plate is good and meets the requirement of waterproof lining. Under the condition of the same axial stress, the permeability coefficient of the adhesive interfaces between steel plate and concrete is related to the roughness of steel surface, more the roughness of steel surface, smaller the permeability coefficient. The equipment has good usability and reliability, and provides a new mean for testing the permeability of the concrete noumenon and adhesive interfaces between new concrete and old concrete or between concrete and other media under stress.

Key words: adhesive interface; stress-seepage; coupling test; equipment; development

收稿日期:2012-05-02 责任编辑:常琛

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAB16B01);河南省教育厅自然科学研究计划资助项目(2009B560004);河南理工大学博士基金资助项目(648234)

作者简介:陈晓祥(1979—),男,江苏淮安人,副教授,博士。E-mail:chenxxiang@163.com

近年来采用的复合井壁,存在着结构复杂尤其是壁厚日益增大的趋势,由此出现了一种新型单层冻结井壁^[1],该单层井壁从改变接茬方式和防止井壁开裂两方面着手解决井壁的漏水问题,一方面,通过在井壁接茬处设置水平宽度大于高度的卧式接茬板,部分或全部地变上、下段井壁的新老混凝土直接接触为混凝土与接茬板接触;另一方面,通过采取补偿混凝土的收缩变形,以及约束混凝土的竖向变形,使井壁混凝土内始终不产生竖向拉应力,从而保证井壁不会产生贯穿性裂纹,确保井筒安全使用。但此种新型单层井壁接茬的渗透机理、钢板与混凝土接茬黏结面层面力学参数与渗透系数的关系等却仍不清楚,在渗透理论和渗透机理方面还需进行大量细致、深入的理论与实验研究。

对于混凝土本体,我国目前评价其渗透性能的标准主要有3种^[2-3],即“抗渗标号法”、“渗透系数法”和“渗水高度法”,这些方法大都适合于具有较高渗透性的混凝土,随着混凝土外加剂的发展,混凝土的水灰比越来越小,混凝土的密实性越来越高,导致水压法测量混凝土的渗透性出现水压不够或者渗透深度小等问题,因此,混凝土的渗透系数难以测得准确。后来,出现电法^[4-5]和气体渗透法^[5]来测试混凝土渗透性,往往也存在一定的局限性。对于新老混凝土黏结面或混凝土与其它介质黏结面抗渗性能的研究报道较少^[6-12],且他们大都采用我国现行规范^[2-3]规定的测试混凝土本体渗透性能的试验装置来评价新老混凝土黏结面的渗透性能,受水压较小条件限制较为明显,且在建筑和水工研究中,新老混凝土的黏结面渗透性能研究大都是在不受正压力的情况下,而在新型单层井壁中采用膨胀混凝土,由于混凝土膨胀就会在井壁内部产生一定的预压应力,且井壁施工完成后,由于井壁自重,井壁混凝土和其它介质黏结面均会受到轴向正应力的作用,在正应力作用下新老混凝土以及混凝土与其它介质黏结面的渗透性能研究却鲜见报道。

在新老混凝土黏结面以及混凝土与其它介质黏结面渗透性能测试装置研发方面,只检索到张亦涛等^[13]设计的一种可以长时间稳压的试验装置来测量混凝土在轴向受压时混凝土侧向的渗透性能,该试验是把混凝土做成圆柱筒状,在筒内部加水压,外部用量筒接受并测量通过混凝土渗透的水量来评价混凝土的渗透性。该装置的水压是加在混凝土筒内部,根据弹性力学理论,这将导致圆筒外侧环向受拉,和井壁的实际受力状况(内外侧环向都受压)不符,另外,新型单层井壁混凝土以及混凝土与接茬黏结面的抗渗性能要

求很高,水一般不能通过混凝土渗透出来或者渗透量相当小,因此,该装置将不能模拟井壁的实际受力状况,也不能测定出井壁高性能混凝土的渗透性能。

因此,研制混凝土本体或与其它介质接触面抗渗性能测试装置并进行新老混凝土或混凝土与其它介质黏结面的渗透机理的试验研究就具有十分重要的意义。基于以上分析,笔者自主研发了一种能测试存在正应力条件下混凝土本体或新老混凝土黏结面以及混凝土与其它介质黏结面渗透性能的试验装置,该装置能模拟井壁轴向的压应力并长时稳压,能较为真实的模拟井壁的实际受力状况^[14]。本文主要介绍该装置的技术原理、主要性能参数及应用其开展的混凝土与钢板黏结面渗透性能的试验研究^[15-19]。

1 试验装置的主要功能及其技术参数

混凝土与其它介质黏结面抗渗试验装置主要用于不同轴向应力、不同水头压力条件下的混凝土本体、新老混凝土黏结面以及混凝土与其它介质黏结面的渗透试验,该装置可通过测试黏结面上不同位置处相距非常近的两点的电阻实时判断渗透锋面位置,也可待试验结束后剖开混凝土本体或者黏结面从而判断渗透锋面位置,装置中央还设有观察孔,对于渗透性较强的混凝土或者黏结面,也可以通过观察孔适时观察水头是否透过混凝土或黏结面,该装置为研究新型单层井壁接茬的渗透参数以及存在轴向应力条件下混凝土本体、新老混凝土黏结面或混凝土与其它介质黏结面的渗透力学参数提供理论基础。

装置最大法向荷载为1 000 kN;法向荷载测量精度为 $\pm 0.5\%$;最大水压为10 MPa;水压测量精度为 $\pm 0.5\%$;装置尺寸为 $\phi 300\text{ mm} \times 500\text{ mm}$;加载控制方式为力控制和水压控制。

2 试验装置系统组成及其关键技术

2.1 试验装置主体结构

本试验装置主体结构如图1所示,主要包括底座、一端开口的承压筒、承压环、承压环上部的千斤顶、荷重传感器以及反力盖板等。其中,承压筒体上开有进水孔,进水孔位于承压筒的下部,测试开始时从装置下部注水,上部的承压环上开有出气孔,装置注满水后用一水压表将其密封。承压筒底面中部还开有观察孔,这主要是为观察渗透性较大的混凝土或者混凝土与其它介质黏结面渗透水量或者渗透锋面而设定的。承压筒口部设有承压环,与承压环接触处的承压筒内壁设有两道密封槽,密封槽内装有O型密封圈,此处的密封性是设计过程中的一个技术重点

和难点之一,因为承压环在轴向应力的作用下要向下运动,此处既要保证密封又要保证承压环能够自由上下运动。承压筒口部设有法兰,法兰上穿有 12 根螺栓,螺栓上部连接反力钢板,螺栓为对称布置的 10.9 级高强螺杆,螺母与螺杆配合处套有弹簧垫。承压筒的底面内部和承压环的下部均设有轴向密封圈槽,采用 O 型圈对其进行密封,确保试验进行过程中水能够从混凝土本体或与其它介质黏结面渗透。

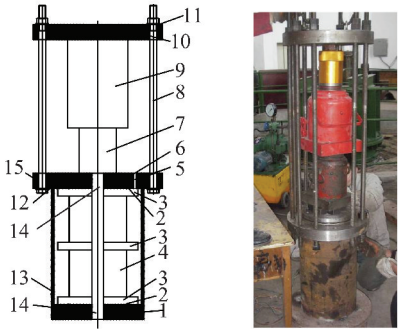


图 1 抗渗装置

Fig. 1 Anti-penetrating equipment

1—承压筒;2—密封圈;3—与混凝土黏结的其它介质;4—待测试混凝土;5—进出水气孔(接水压表);6—承压环;7—荷重传感器;8—高强螺栓;9—千斤顶;10—反力盖板;11—弹簧垫;12—承压筒内壁的密封圈;13—进水孔;14—观察孔;15—法兰

考虑到千斤顶量程,装置的设计最大压力为 100 t,装置工作时由千斤顶对反力盖板加压,利用反力盖板作为反力架,从而达到对混凝土轴向加压的目的,压力值大小则由荷重传感器读出,到达规定压力值时停止加压,由于高强螺杆受混凝土变形等因素的影响很小、保压性能良好并且应力损失小、不受外部断电等干扰因素的影响,故可以进行长时间压应力状态下混凝土渗透性能的研究。

2.2 试验加载及量测系统

试验加载系统由千斤顶和供水水泵组成,试块围压由作用在井壁与筒体间的水压力提供,其大小通过水泵对水量的控制来实现。

本试验需要量测的量主要是混凝土本身和混凝土与钢板接触面上的渗透锋面位置随时间变化情况,从而得到相对渗透系数等规律。因此,沿接茬钢板径向布置一组测点,每个测点布置两个探针,利用 Data Taker515 连续测量两个测点之间的电阻。为了使测量结果准确,在水中加入一种强电解质,该物质加入水中后一旦渗透到测点位置,Data Taker515 即能及时显示两测点电阻的变化。

2.3 试验监控及数据采集

试验中各传感器数据均由监控与数据采集系统自动采集,该系统由荷重传感器、水压表、数据采集器

Data Taker515 和计算机等组成。数据采集器 Data Taker515 通过传感器可实时监控记录试验水压和轴压大小,利用该套试验系统,混凝土本体及钢板与混凝土的结合面的渗透性能可以同时测定。

3 钢板与混凝土黏结面抗渗性能试验

由于目前设计和使用的新型单层井壁接茬材料均选用强度较大的钢板,此处仅介绍利用该装置对钢板与混凝土黏结面的抗渗性能进行了初步测试的结果。

3.1 试验内容及试验方案

鉴于试验时间和试验成本的控制,本试验主要研究钢板表面粗糙度和法向应力对钢板与混凝土黏结面以及混凝土本体的渗流特性的影响规律,而不考虑水压对其的影响,水压统一取 6 MPa,试验规划见表 1。

表 1 试验规划

Table 1 Experimental layout

钢板位置	钢板表面粗糙度/ μm	龄期/d	埋深/m
钢板在上	1.53	28	约 600
	5.36	28	约 600
钢板在下	1.53	28	约 600
	5.36	28	约 600

3.2 测点布置

本试验中在钢板表面同一直径方向布置 14 个测点,均匀分布在某一直径两侧,两侧测点相对黏结钢板中心点错开 5 mm 的距离,钢板测点布置及实物如图 2 所示。浇筑好的试块如图 3 所示,安装试验试块过程如图 4 所示。

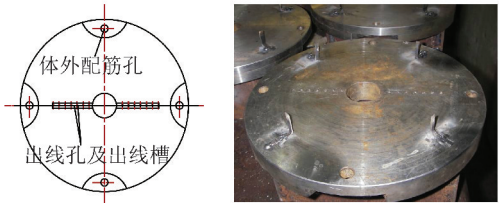


图 2 钢板测点布置

Fig. 2 Arrangement of measuring point on armor plate



图 3 浇注完的试块

Fig. 3 Poured test block



图4 安装试验试块

Fig. 4 Load up test block

4 试验结果及分析

试验结果并没有像想象的那样水完全沿着钢板表面布置的测点依次渗透,而是存在部分跳跃着前进的状况,分析认为,主要是因为钢板与混凝土黏结面浇注过程中没有充分振捣,黏结面内存在气泡,导致黏结面内各点的钢板与混凝土黏结效果离散性较大造成的。尽管如此,试验数据仍具有一定的规律性。试验水压(P_w)、轴压(P)-时间(t)曲线如图5所示,测试过程中部分测点的电阻(R)变化如图6所示,测

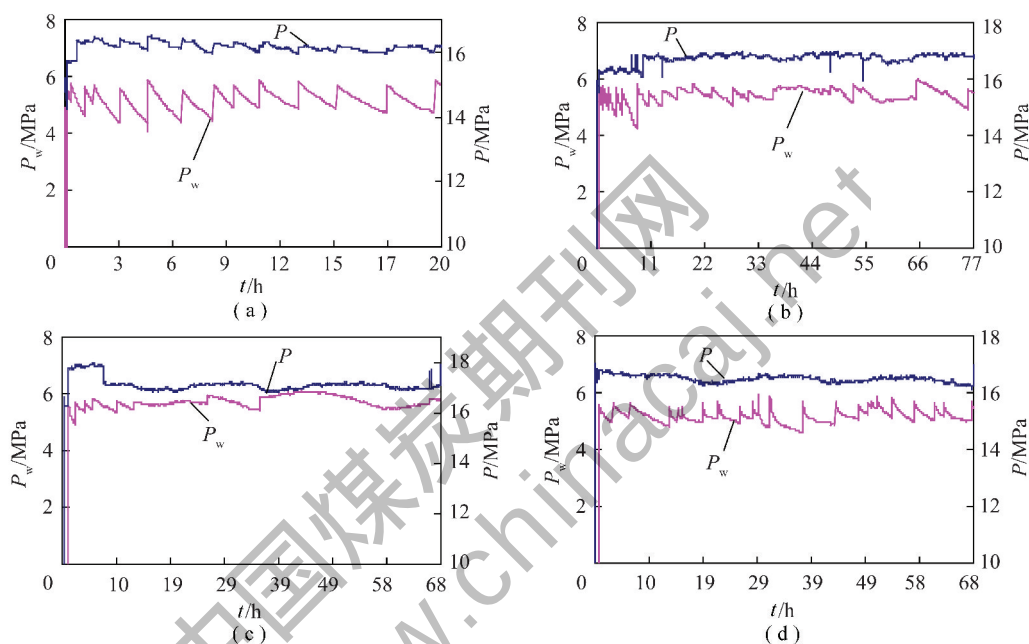


图5 试块水压、轴压与时间的关系

Fig. 5 The figure of water pressure, vertical pressure-time of test block

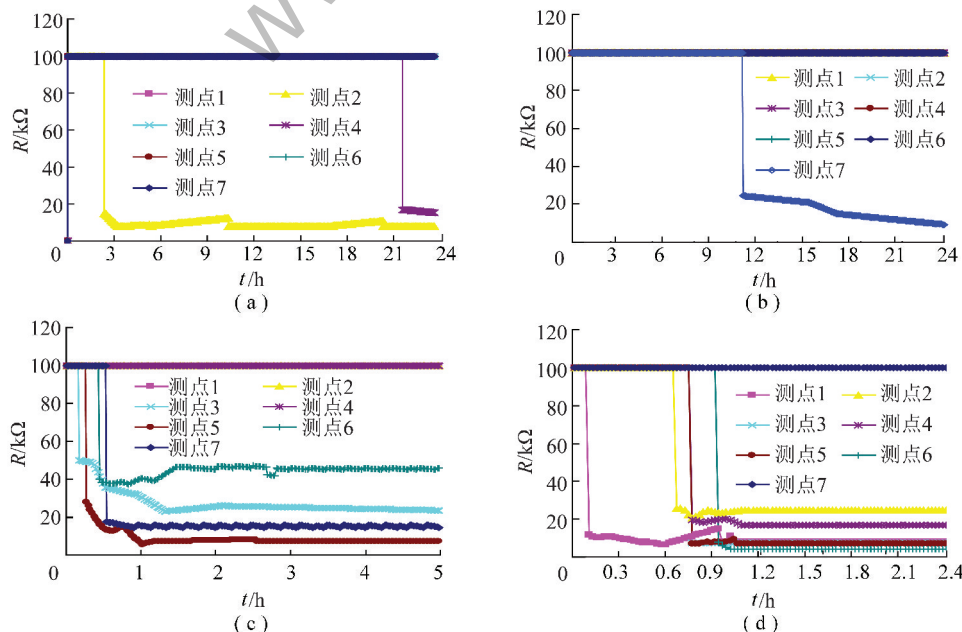


图6 接茬板下、上表面窄侧测点电阻变化

Fig. 6 Resistance variation of lower and above surface points of borehole wall

点渗透结果见表 2~5,表中行程和历时为 0,说明是开始加压时间。

表 2 1 号试块试验结果(钢板表面粗糙度 1.53 μm)

Table 2 Test results of No. 1 test block (surface roughness of steel plate is 1.53 μm)

位置	开始时间	行程/mm	历时/s	类相对渗透系数 $K_r/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
下表面窄侧	22:20:40	0	0	2.368×10^{-13}
	0:45:30	17	8 690	
	19:18:30	27	75 470	
下表面宽侧	9:21:50	41.5	39 670	1.064×10^{-12}
	22:32:00	27	680	5.557×10^{-11}
上表面窄侧	22:37:00	47	980	
	22:46:20	57	1 540	
	22:53:40	67	1 980	
上表面宽侧	22:21:50	11.5	70	$8.553 44 \times 10^{-11}$
	22:29:40	21.5	540	
	22:30:50	31.5	610	
	22:31:00	41.5	620	
	22:33:20	51.5	760	

表 3 2 号试块试验结果(钢板表面粗糙度 1.53 μm)

Table 3 Test results of No. 2 test block (surface roughness of steel plate is 1.53 μm)

位置	开始时间	行程/mm	历时/s	类相对渗透系数 $K_r/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
下表面窄侧	21:32:30	0	0	3.228×10^{-13}
	21:33:00	17	30	
	21:49:20	27	1 010	
	20:08:00	47	167 730	
下表面宽侧	21:43:50	21.5	680	7.144×10^{-11}
	21:47:30	41.5	900	
	21:47:40	51.5	910	
上表面窄侧	5:30:50	17	28 700	3.324×10^{-13}
	16:05:10	57	239 560	
上表面宽侧	5:34:20	11.5	28 910	1.121×10^{-13}

从图 5 可以看出,试验过程中轴压基本按设计值给定,且波动较小;水压相对轴压来说,波动稍大,这是由于试验过程中注水泵稳压效果不好,经常开泵补压造成的,以后的试验中,可选择稳压效果更好的水泵进行。总体来说,该装置能够保证试块的轴压和水压稳定,完全能够按预计的试验规划进行混凝土黏结面的抗渗透试验。

从图 6 可以看出,渗透锋面到达测点时,测点两探针之间的电阻迅速下降,电阻测法试完全能够满足测试需要。

表 4 3 号试块试验结果(钢板表面粗糙度 5.36 μm)

Table 4 Test results of No. 3 test block (surface roughness of steel plate is 5.36 μm)

位置	开始时间	行程/mm	历时/s	类相对渗透系数 $K_r/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
下表面窄侧	17:02:00	0	0	1.234×10^{-13}
	8:58:20	17	57 380	
下表面宽侧	完全没有水		259 200	1.145×10^{-12}
上表面窄侧	17:04:30	17	15	
	21:22:00	27	15 600	
上表面宽侧	17:48:30	11.5	2 790	7.160×10^{-12}
	21:20:40	21.5	15 520	
	21:53:40	71.5	17 500	

表 5 4 号试块试验结果(钢板表面粗糙度 5.36 μm)

Table 5 Test results of No. 4 test block (surface roughness of steel plate is 5.36 μm)

位置	开始时间	行程/mm	历时/s	类相对渗透系数 $K_r/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
下表面窄侧	16:15:00	0	0	3.025×10^{-12}
	完全没有水		259 200	
下表面宽侧	16:17:30	21.5	150	3.025×10^{-12}
	20:35:00	51.5	15 600	
	3:07:20	61.5	39 140	
	3:45:20	71.5	41 420	
上表面窄侧	16:20:10	57	310	4.315×10^{-11}
	16:57:30	67	2 550	
上表面宽侧	完全没有水		259 200	

由于试验水压比水工混凝土试验规程(DL/T5150-2001)规定的试验水压大,本文利用其计算相对渗透系数的方法对钢板与混凝土黏结面的渗透系数进行计算,并称其为“类相对渗透系数”,试验结果见表 2~5。

从表 2~5 可以看出:

(1)4 组试块、16 个测试通道测试结果表明,钢板与混凝土黏结面的类相对渗透系数数量级一般在 $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-11}$ 之间,4 组试块测试结果相差不大,说明测试装置和测试结果是可靠的。

(2)在保证施工质量的情况下,钢板与混凝土黏结面具有良好的抗渗性能,从试验初期水压不易稳定而后期反而变得稳定可以判断,在轴向受压的情况下即使水头渗透经过黏结面到达试块内侧,仍不会形成流水。实际试验中 1~4 号试块很少有水完全渗透 7 个测点的,这表明黏结面的抗渗性能很好。因此,采用钢质接茬板可保证井壁接茬的密封性能满足要求。

(3)在相同的轴向应力状态下,钢板与混凝土黏结面的渗透系数大小与钢板表面粗糙度有关,钢板表面粗糙度越大,钢板与混凝土黏结性能越好,黏结面的渗透系数越小。

(4)在其他条件相同的情况下,钢板相对于混凝土上浇和下浇对钢板与混凝土黏结面的抗渗性能也有影响。钢板在下、混凝土从上往下浇注的黏结面渗透系数要比钢板在上、混凝土从下浇注的黏结面渗透系数小,这是因为混凝土从钢板下方浇注时,混凝土中的泌水和气泡在上移过程中被钢板阻隔而积聚在钢板下表面,不仅使界面附近新混凝土的局部水灰比远高于设计值,而且使得气孔和微裂隙在该区富集,形成大量缺陷造成的。

试验中的部分照片如图7所示。从图中可以看出:

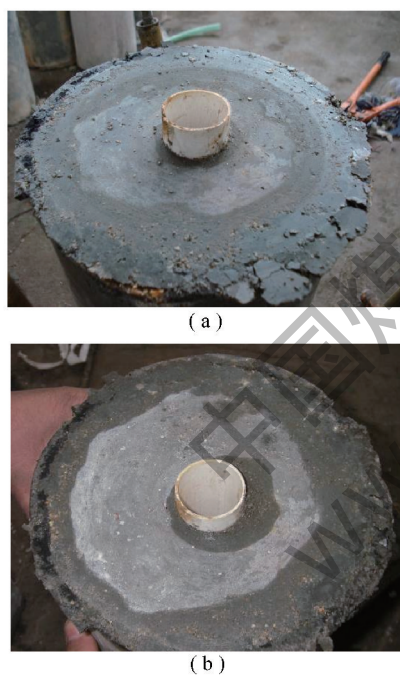


图7 黏结面渗透示意

Fig.7 Osmotic diagrammatic sketch of adhesive interface

(1)揭开的钢板与混凝土黏结面上水头分布情况较好的验证了电阻法测试渗透锋面的方法,说明该方法是可行的。

(2)试验结果表明,该装置具有较好的实用性和可靠性,为进一步研究混凝土本体、新老混凝土黏结面以及混凝土与其它介质黏结面的渗透特性提供新的测试手段。

5 结 论

(1)利用该装置进行了钢板与混凝土黏结面的抗渗性能试验,结果表明,该装置完全能够保证测试

需要的轴压和水压稳定,提出的电阻法测试渗透锋面的方法是可行的。

(2)在保证施工质量的情况下,钢板与混凝土黏结面具有良好的抗渗性能,采用钢质接茬板可保证井壁接茬的密封性能满足要求;即使在较高的压应力作用下,钢板与混凝土黏结面仍具有比相同性质的完整混凝土本体高得多的渗透系数。

(3)在相同的轴向应力状态下,钢板与混凝土黏结面的渗透系数大小与钢板表面粗糙度有关,钢板表面粗糙度越大,黏结面的渗透系数越小;在其他条件相同的情况下,钢板在下、混凝土从上往下浇注的黏结面渗透系数要比钢板在上、混凝土从下浇注的黏结面渗透系数小。

(4)该抗渗试验装置结构简单,加工成本低,具有较好的实用性和可靠性,操作方便,可进行不同正应力、不同水压条件下混凝土与钢板黏结面的抗渗特性试验,为应力作用下新老混凝土或混凝土与其它介质黏结面抗渗试验提供了更为可靠的试验手段。

参考文献:

- [1] 杨维好,黄家会,王衍森.带接茬板的单层井壁及其施工方法[P].中国专利,200610088128.3,2006-6-27.
- [2] 南京水利科学研究院,中国水利水电科学研究院.水工混凝土试验规程(DL/T5150-2001)[S].北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 城乡建设环境保护部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法(GB/T50082-2009)[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [4] 刘嘉璐.高性能混凝土工作性及渗透性评价方法研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [5] Liu Jialu. Study on the evaluation of workability and permeability for high performance concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [6] 路新瀛,李翠玲,陈美霞,等.混凝土渗透性的电学评价[J].混凝土与水泥制品,1999(5):12-14.
- [7] Lu Xinying, Li Cuiling, Chen Meixia, et al. The electrodiagnostic evaluation of concrete permeability[J]. China Concrete and Cement Products, 1999(5):12-14.
- [8] 石晶,杨向东,陈利.混凝土的渗透性能及抗渗对策[J].建筑技术,2000,31(4):261-262.
- [9] Shi Jing, Yang Xiangdong, Chen Li. Concrete permeability and seepage resistance measures[J]. Architecture Technology, 2000, 31(4): 261-262.
- [10] 李平先.新老混凝土黏结面抗冻和抗渗性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2004.
- [11] Li Pingxian. Experimental research on freeze-thaw resistance property and impermeability for adherence of new-old concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [12] 李冰.新老混凝土黏结面渗透试验研究[D].郑州:郑州大学,2004.
- [13] Li Bing. Experimental study on permeability of fresh-old concrete bonding interface[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.

- [9] 叶金蕊. 约束状态下硬化的混凝土渗透性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- Ye Jinrui. Study of hardened concrete permeability with the condition of constraint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.
- [10] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992.
- [11] 李军华. 大坝渗流监测系统设计及渗流计算机模拟[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- Li Junhua. The design of dam seepage monitoring system and the seepage simulation with computer[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.
- [12] 蒙富强. 基于 ANSYS 的土石坝稳定渗流场的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- Meng Fuqiang. Numerical simulation with ANSYS on stable seepage field of earth rock-fill dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [13] 张亦涛. 应力作用下水泥基材料碳化和渗透特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- Zhang Yitao. The influence of external stress to the water permeability and carbonation character of cement-based materials[D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
- [14] 陈晓祥. 新型单层冻结井壁关键技术与设计理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- Chen Xiaoxiang. Research on the key technology and design theory of the new type of monolayer freezing shaft lining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007.
- [15] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤岩细观剪切试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 677-686.
- Xu Jiang, Peng Shoujian, Yin Guangzhi, et al. Development of meso-shear test equipment for coal rock containing gas and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 677-686.
- [16] 赵阳升, 万志军, 张渊, 等. 20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 1-8.
- Zhao Yangsheng, Wang Zhijun, Zhang Yuan, et al. Research and development of 20 MN servo-controlled rock triaxial testing system with high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 1-8.
- [17] 夏才初, 王伟, 王筱柔. 岩石节理剪切-渗流耦合试验系统的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1285-1292.
- Xia Caichu, Wang Wei, Wang Xiaorou. Development of coupling shear-seepage test system for rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1285-1292.
- [18] Jiang Y, Tanabashi Y, Xiao J, et al. An improved shear-flow test apparatus and its application to deep underground construction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(S1): 170-175.
- [19] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2253-2259.
- Jiang Yujing, Wang Gang, Li Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2253-2259.