DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.03.015 2013,30(03):71-74

溪洛渡水电站大坝混凝土层面结合及原位抗剪试验研究

彭尚仕,石 妍,杨华全
(长江科学院 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心,武汉 430010)

摘要:采用溪洛渡大坝实际原材料及配合比,在工程现场进行常态混凝土层间结合面的原位抗剪试验。结果表明:混凝土各层间结合工况的f'在1.44~0.97之间,c'在3.00~1.85 MPa之间,不含层面连续浇筑的本体混凝土f'为1.80,c'为3.145 MPa;最大法向应力σ为7.12 MPa时,本体混凝土极限抗剪强度$\tau_{极限}$为15.96 MPa,各层间结合工况的$\tau_{极限}$在9.67~12.11 MPa之间;除混凝土本体外,层间铺砂浆的$\tau_{极限}$最高;层面露粗砂且铺砂浆的层面处理方式效果最佳,上层混凝土采用富浆配合比的层间结合效果也较好;层间结合试件的剪切破坏都发生在层面,剪切面普遍平坦,但本体试件剪切破坏面起伏大,大部分特大石被剪断,擦痕分散不匀。试验成果可为溪洛渡水电站大坝混凝土工程质量控制提供依据。

关 键 词:溪洛渡水电站;混凝土;原位抗剪试验;抗剪特性参数;抗剪强度
中图分类号:TV642.42 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)03-0071-04

1 工程概况

溪洛渡水电站位于金沙江下游河段梯级开发规划的第3个梯级,水电站枢纽由285 m高的混凝土双曲拱坝、左右岸引水发电系统和泄洪建筑物等组成。水电站主体及导流工程混凝土总量1 296万m^3,其中大体积混凝土约700万m^3。

溪洛渡大坝混凝土分层浇筑而成,坝内存在大量的水平施工缝,形成众多的水平层面。如果层面间歇时间欠妥、处理不当,可能会成为混凝土坝渗流集中通道和抗滑稳定的相对薄弱面。资料表明[1],配合比适当且施工精良的混凝土坝透水性是很小的,渗透系数平均值为10^{-9} cm/s。然而如果施工层面处理不当,将成为强透水层面,沿层面切线方向的渗透系数可达10^{-2} cm/s,甚至更大。因此,混凝土坝的层面结合是施工控制的关键。混凝土层面结合的处理方式一般有凿毛、铺砂浆或铺净浆等;而凿毛又有露粗砂、露小石及深凿毛之分,其中露粗砂、铺砂浆是最常用手段。

目前关于常态混凝土层面结合及原位抗剪的资料较少,笔者在溪洛渡水电站工程现场进行相关试验,测定常态混凝土及层面的抗剪强度,确定常态混凝土抗剪特性参数,为优化溪洛渡水电站大坝混凝土层间处理措施、评估坝体结构稳定性提供可靠的依据。

2 试验原材料及配合比

采用大坝A区混凝土实际浇筑的原材料及配合比,进行原位抗剪试验块的混凝土浇筑。原材料包括华新中热42.5硅酸盐水泥、华珞Ⅰ级粉煤灰、马家河灰岩人工砂、塘房坪玄武岩人工碎石,以及JM-Ⅱ(C)缓凝高效减水剂和ZB-1G引气剂。

原位抗剪试验块混凝土的配合比见表1,均为大坝A区的$C_{180}40$常态混凝土施工配合比,包括四级配、三级配基准,以及二级配混凝土。在施工中,三级配混凝土采用砂率加大2%富浆以及砂率加大4%富浆的2种方式。

3 试验布置与试件制作

试验场地位于溪洛渡工程左岸EL610平台,处于缆机吊运作业区内。试验块分A和B两区,A区布置6组不同层间结合方式的抗剪试件,B区布置1组本体抗剪试件,每组均为5块试件,以满足5级不同法向应力的试验要求。7组原位抗剪试件的层间结合工况见表2。

收稿日期:2012-05-10;**修回日期**:2012-08-24
基金项目:国家自然科学基金项目(51139001,51109015);国家科技支撑计划(2011BAE27B00);中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2011018/CL)
作者简介:彭尚仕(1969-),男,湖南岳阳人,高级工程师,硕士,主要从事水工建筑材料方面的研究及现场检测,(电话)027-82829753(电子信箱)pengss@mail.crsri.cn。

表 1 原位抗剪试验块混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete in the shear test

部位	设计指标							
	水胶比	级配	粉煤灰/%	砂率/%	用水量/(kg·m^{-3})	骨料级配(特大石:大石:中石:小石)	外加剂/%	
							JM-Ⅱ(C)	ZB-1G
大坝 A 区 $C_{180}40$	0.41	四	35	24	82	30:25:23:22	0.6	0.013
		三	35	27	90	-:50:30:20	0.6	0.013
		二	35	34	107	-: -:60:40	0.6	0.013

表 2 原位抗剪试件层面结合工况

Table 2 Shear specimens with different cases of layer surface bonding

区号	组号	下部混凝土	层面处理	层间垫层料	上部混凝土	备注
A 区	A1	四级配	露粗砂	$M_{180}45$ 砂浆铺设 30mm 厚	四级配	
	A2		露粗砂	—	二级配	
	A3		露粗砂	—	富浆三级配	砂率加大 2%
	A4		露粗砂	—	富浆三级配	砂率加大 4%
	A5		微露小石	—	富浆三级配	砂率加大 4%
	A6		深凿毛	—	富浆三级配	砂率加大 4%
B 区	B	本体抗剪试件: 四级配 $C_{180}40$ 混凝土				

首先浇筑 A 区一期下部混凝土,均为四级配,组号为 A1—A6,共 6 组,一次浇筑完成。16 d 后,进行 A 区二期上部混凝土的浇筑。首先按照不同要求对下部硬化混凝土表面进行层面处理,然后在经过不同层面处理后的 6 个区域浇筑 6 组 500 mm × 500 mm × 300 mm 的原位抗剪试件,共 30 块。每个试件顶面抹平处理,以便法向加荷。A 区二期混凝土浇筑的同期,进行 B 区混凝土的浇筑。B 区布置本体抗剪试件,试件一次性浇筑完成。以上浇筑的混凝土及砂浆均由高线拌和系统生产。

4 原位抗剪试验方法

参照 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》的规定,进行常态混凝土原位抗剪试验。采用平推法,推力方向与层面平行。每组 5 块试件,由于受垂直反力系统的限制,层间结合试件的最大法向应力取6.0 MPa,分1.2,2.4,3.6,4.8,6.0 MPa 5 个等级;本体试件的最大法向应力取3.6 MPa,分1.2,1.8,2.4,3.0,3.6 MPa 5 个等级。

水平剪切荷载的施加采用多点峰值法,开始按照预估最大荷载的 10% 施加,每加一次荷载,立即读取并记录一次剪切变形,隔 5 min 再读取并记录一次,按上述加载量和测读方法,直到当次施加的荷载所引起的剪切变形为前次荷载所产生变形的1.5 倍时,剪切荷载按预估最大荷载的 5% 施加,直至剪断。剪断后,在垂直荷载不变的情况下,继续分次施加剪切荷载,当水平位移不断增加,而作用的水平荷载连续 3 次保持不变时,该水平荷载下的剪切强度,即为残余抗剪强度。将水平荷载分 4 级退零,剪切试验结束。

剪切试验结束后,进行摩擦试验。将剪断推出的上半块试件复位,重新安装和调整垂直、水平加荷系统及位移测量系统,按原法向应力等级施加垂直荷载,根据残余抗剪荷载分级施加水平荷载,当水平位移不断增加,而作用的水平荷载连续 3 次保持不变时,该水平荷载下强度,即为摩擦强度。

5 试验结果及分析

5.1 试验结果

溪洛渡大坝混凝土不同工况下的原位抗剪试验结果见表 3。其中,f'为摩擦系数,c'为黏聚力。

根据库仑定律,抗剪强度 τ 与法向应力 σ 的关系式为 $\tau = \sigma f' + c'$。溪洛渡水电站大坝高度 285 m,混凝土密度大约 2 500 kg/m^3,那么,最大法向应力 σ 按7.12 MPa计算时,不同工况下的混凝土原位抗剪强度 τ 的计算结果见表 4 和图 1。

5.2 结果分析

5.2.1 不同工况的混凝土原位抗剪特性参数

溪洛渡大坝混凝土各层间结合工况的极限抗剪摩擦系数 f' 在1.44 ~0.97之间,极限抗剪黏聚力 c' 在3.00 ~1.85 MPa之间;而不含层面连续浇筑的本体混凝土的极限抗剪摩擦系数 f' 为1.80,极限抗剪黏聚力 c' 为3.145 MPa,均最高。除本体混凝土外,层面深凿毛的极限抗剪黏聚力最大,摩擦系数最小,而层间铺砂浆的极限抗剪黏聚力最小,摩擦系数最大。

从物理意义上[2],摩擦系数 f' 是材料常数,无因次量,其量值仅决定于材料和工艺;黏聚力 c' 是强度参数,其物理本质是受剪面上的内聚力,由硬化

表 3　不同工况下的混凝土原位抗剪试验结果

Table 3　Results of in-situ shear test in different cases

组号	工况	极限抗剪		残余抗剪		摩擦抗剪	
		f'	c'/MPa	$f'_{残余}$	$c'_{残余}$/MPa	$f'_{摩擦}$	$c'_{摩擦}$/MPa
A1	上下层均为四级配、层面露粗砂、层间铺砂浆	1.44	1.85	0.76	0.65	0.76	0.53
A2	上层二级配、下层四级配、层面露粗砂	0.98	2.69	0.75	0.60	0.73	0.53
A3	上层富浆三级配(砂率加大 2%)、下层四级配、层面露粗砂	1.17	1.89	0.74	0.58	0.74	0.35
A4	上层富浆三级配(砂率加大 4%)、下层四级配、层面露粗砂	1.11	2.50	0.77	0.67	0.82	0.25
A5	上层富浆三级配(砂率加大 4%)、下层四级配、层面微露小石	1.07	2.49	0.75	0.91	0.82	0.34
A6	上层富浆三级配(砂率加大 4%)、下层四级配、层面深凿毛	0.97	3.00	0.73	1.00	0.73	0.49
B	四级配、本体混凝土	1.80	3.14	0.91	1.24	0.78	1.21

表 4　不同工况下的混凝土原位抗剪强度

Table 4　In-situ shear strengths in different cases

组号	极限抗剪		残余抗剪		摩擦抗剪	
	$\tau_{极限}$/MPa	百分比/%	$\tau_{残余}$/MPa	百分比/%	$\tau_{摩擦}$/MPa	百分比/%
B	15.96	100.0	7.72	100.0	6.77	100.0
A1	12.11	75.9	6.07	78.6	5.95	87.8
A2	9.67	60.6	5.94	77.0	5.73	84.7
A3	10.23	64.1	5.85	75.8	5.62	83.1
A4	10.41	65.2	6.16	79.7	6.09	90.0
A5	10.11	63.3	6.25	81.0	6.18	91.3
A6	9.91	62.1	6.20	80.3	5.69	84.1

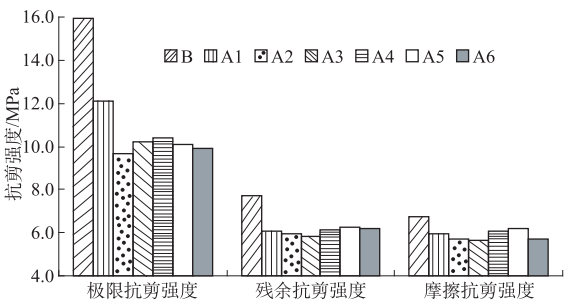


图 1　不同工况下的混凝土原位抗剪强度

Fig. 1　In-situ shear strengths in different cases

水泥浆强度和界面过渡区粘结强度等构成,不但决定于材料和工艺而且有尺寸效应。二者是相对独立的物理量,由库仑定律联系起来,计算抗剪强度 τ。摩擦系数 f' 和黏聚力 c' 均是随机变量,其试验工作量(样本数 n)应满足统计要求。

看似光滑的物体,其表面也有很多小凸起[3]。当 2 个接触面受压时,这些小凸起接触压紧,压紧处的局部应力很高,足以使材料产生塑性变形并彼此粘连。滑动时需拉开这些粘连点,摩擦力的最大值就是拉开这些粘连点时的阻力,其本质是分子凝聚力作用。当物体表面粗糙时,由于相互机械啮合产生阻碍滑动的阻力,这种啮合是弹塑性的,啮合程度取决于接触面上的压力。对于混凝土材料,由于表面粗骨料突起,使相对滑动的面首先产生上抬,越过骨料颗粒之后才能平移,也是一种啮合作用。因此,表面的啮合作用和分子凝聚力作用是产生摩擦力的 2 个主要物理原因。

5.2.2　不同工况的混凝土原位抗剪强度

由表 4 可见,大坝本体混凝土的极限、残余及摩擦强度均最高,极限抗剪强度 $\tau_{极限}$ 为15.96 MPa,各层间结合工况的极限抗剪强度 $\tau_{极限}$ 在 9.67 ~ 12.11 MPa之间。以本体混凝土的极限抗剪强度为 100%,则各层间结合工况的极限抗剪强度为 60.6% ~75.9%。因此,除了本体混凝土,层间铺砂浆(组号 A1)的极限抗剪强度最高,比层间无垫层料的其它工况提高了10.7% ~15.3%。

对比不同的层面处理方式,层面露粗砂且加铺砂浆效果最佳,其次是层面微露小石,最后是层面深凿毛,对极限抗剪强度的影响差别在 5% 以内。

对比不同配合比的上层混凝土,砂率加大 4% 的三级配混凝土(组号 A4)比砂率加大 2% 时(组号 A3)的极限抗剪强度高1.1%。而上层为三级配富浆混凝土(组号 A3、组号 A4)的极限抗剪强度比上层为正常二级配混凝土(组号 A2)的极限抗剪强度高3.5% 和4.6%。因此,上层混凝土采用富浆配合比时,层间结合效果较好。

与本体混凝土对比,各层间结合工况的残余抗剪强度为75.8% ~81.0%,各层间结合工况之间的差别为5.2%;各层间结合工况的摩擦抗剪强度为 84.1% ~91.3%,各层间结合工况之间的差别为 7.2%。除本体混凝土外,上层砂率加大 4% 的富浆三级配、层面微露小石(组号 A5)的混凝土残余及摩擦抗剪强度均最高。

5.2.3　剪切破坏后试件上下的剪切面状况

层间结合试件的剪切破坏都发生在层面,剪切面普遍平坦,面上有因剪切产生的混凝土碎片和摩擦产生的粉末,摩擦痕迹明显。本体试件剪切破坏面起伏大,高差 50 ~80 mm,大部分特大石被剪断,面上布满混凝土碎片,边缘混凝土破裂脱落,擦痕分散不匀。

新旧混凝土接触界面存在一个类似于整体浇筑

混凝土中骨料与水泥石之间的界面过渡区,而这个过渡区是一个薄弱环节[4]。由于旧混凝土的亲水性,在已硬化混凝土基础上浇筑新混凝土时,会在旧混凝土表面形成水膜,使结合面处新混凝土的局部水灰比高于体系中的水灰比,导致界面钙矾石和氢氧化钙晶体数量增多,形态变大,形成择优取向,降低界面强度。且由于旧混凝土的阻碍,新混凝土中的泌水和气泡积聚在旧混凝土表面,不仅使得新混凝土局部水灰比更高,而且使得气孔和微裂缝在该区富集,显著降低界面强度。这是化学方面的原因,也是影响新旧混凝土结合本质的内因。

6 结 论

选用溪洛渡大坝 A 区实际采用的原材料及配合比,在工程现场进行不同工况条件下常态混凝土层间结合面的原位抗剪试验,结论如下:

(1) 混凝土各层间结合工况的f'在1.44 ~0.97之间,c'在3.00 ~1.85 MPa之间;而本体混凝土的f'为1.80,c'为3.145 MPa。

(2) 最大法向应力σ为7.12 MPa时,本体极限抗剪强度$\tau_{极限}$为15.96 MPa,各层间结合工况的极限抗剪强度$\tau_{极限}$在9.67 ~12.11 MPa之间。除本体混凝土外,层间露粗砂且铺砂浆的极限抗剪强度最高,上层混凝土采用富浆配合比时的层间结合效果也较好。因此,建议溪洛渡工程采用以上 2 种层面处理方式。

(3) 层间结合试件的剪切破坏都发生在层面,剪切面普遍平坦,但本体试件剪切破坏面起伏大,大部分特大石被剪断,擦痕分散不匀。

参考文献:

[1] 杨华全,任旭华. 碾压混凝土的层面结合与渗流[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999. (YANG Hua-quan, REN Xu-hua. Bond Between Layers and Seepage of RCC [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

[2] 涂传林. 抗剪断参数计算方法的探讨[J]. 水利学报,1998,(增刊):26 - 29. (TU Chuan-lin. Discussion on Calculation of Shearing Parameters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (Sup.):26 - 29. (in Chinese))

[3] 彭尚仕,王仲华,董维佳,等. 金沙江溪洛渡水电站混凝土原位抗剪试验报告[R]. 武汉:长江科学院,2010. (PENG Shang-shi, WANG Zhong-hua, DONG Wei-jia, *et al*. Report of Shear Test on Concrete of Xiluodu Hydropower Station[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2010. (in Chinese))

[4] 刘艳萌. 新旧混凝土粘结技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2006. (LIU Yan-meng. Technology of Bonding Between Fresh and Old Concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese))

(编辑:周晓雁)

In-situ Shear Test on the Bond Between Concrete Layers of Xiluodu Dam Concrete

PENG Shang-shi, SHI Yan, YANG Hua-quan

(Research Center of Water Engineering Safety and Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: To provide basis for the concrete quality control for Xiluodu dam, we carried out in-situ shear test on normal concrete layers which are poured from the raw material with mix proportion identical to the actual concrete of Xiluodu dam. Results showed that friction factor f' and cohesion c' of the bond surface between concrete layers were respectively between 1.44-0.97 MPa and 3.00-1.85 MPa, while f' and c' of concrete itself were 1.80 MPa and 3.145 MPa respectively. When the maximum normal stress σ_{max} was 7.12 MPa, the ultimate shear strength τ_{max} of concrete itself was 15.96 MPa, and τ_{max} of the bond surface between concrete layers was between 9.67-12.11 MPa. Except from the concrete itself, concrete layers connected with paved mortar has the highest ultimate shear strength. The treatment of exposing coarse sand on the old concrete surface then paving mortar worked best, and the effect of using rich mortar for the upper concrete was favorable. Shear failure of the specimens with concrete layers occurred on the bond surface, and the shearing plane was generally flat. But the concrete itself had uneven failure surface and most of the largest aggregates were sheared off.

Key words: Xiluodu hydropower station; concrete; in-situ shear test; shear parameters; shear strength