

碾压混凝土层面拉伸破坏试验研究

黄志强^{1,2}, 宋玉普^{*1}, 王学志¹

(1.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;
2.沈阳工业大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110024)

摘要: 碾压混凝土软弱层面的断裂破坏是高碾压混凝土坝稳定性研究的一个重要方面. 对6种层面处理工况的碾压混凝土层面进行了楔入劈拉断裂试验研究,采用电测法测得碾压混凝土层面裂缝的起裂荷载,确定了碾压混凝土层面裂缝的双K断裂参数. 研究表明,层面的起裂荷载与失稳荷载的比值 $P_{\text{ini}}/P_{\text{lim}}$ 在 57.7% ~ 74.2%. 在6种层面处理工况中,下层碾压混凝土终凝后施工缝或冷缝的处理方式,其所形成的层面的拉伸断裂参数最大,其断裂路径曲折,断裂面凹凸不平,因此这种层面处理方式最为有效.

关键词: 碾压混凝土; 层面裂缝; 楔入劈拉; 起裂荷载; 双K断裂参数
中图分类号: TV 313 **文献标识码:** A

碾压混凝土作为一种超干硬性无坍落度振动压实的材料,由于具有可以大仓面快速施工、减少水泥用量、简化温控措施等优点,在水利工程中得到了广泛应用. 碾压混凝土重力坝采用大仓面分层碾压连续上升的施工方法,大约 30 cm 厚一层,大量的层面易产生隐状的层状结构,影响层面的粘结强度,往往使水平层面变为弱面^[1,2]. 碾压混凝土层间缺陷直接影响坝体的整体性,这些层面是结构上的薄弱环节,使得碾压混凝土重力坝沿夹层破坏的可能性很大,因此沿碾压混凝土重力坝体,特别是高碾压混凝土重力坝的水平施工层面的安全稳定成为人们普遍关注和急待研究的一个课题,对碾压混凝土层间断裂破坏的研究也变得十分重要.

我国针对正在建设和即将建设的碾压混凝土重力坝的碾压混凝土层间的断裂破坏进行了试验和数值模拟研究,取得了很好的成果,为大坝层面的设计与施工提供了可靠的依据. 其中文献[3-4]针对两种层面处理方式,利用三点弯曲法、四点弯曲法进行了碾压混凝土层面的 I型、I-II复合型断裂试验,通过试验看到碾压混凝土本体试件的断裂能要大于有层面试件的断裂能;文献[5]结合直剪试验,进行了碾压混凝土层面 II型断裂

的数值模拟分析;文献[6]采用钝裂纹带模型进行了碾压混凝土 I型断裂的数值模拟分析;此外文献[7]在细观层次上将水泥砂浆层面的碾压混凝土试件看成是由硬化水泥粉煤灰砂浆、粗骨料及二者之间的粘结带及水泥砂浆中间层面形成的非均质复合材料,以随机骨料模型代表碾压混凝土的细观结构,应用非线性有限元法模拟试件的细观损伤断裂,通过模拟分析,得出其碾压混凝土的断裂破坏更容易从层面发生.

但是对碾压混凝土层面断裂破坏的研究还不全面、不系统,对碾压层面破坏准则的研究大多采用强度理论,碾压混凝土层面的 I型、II型、I-II复合型断裂目前还有待进行深入试验和数值分析方面研究.

本文对由于不同层面间隔时间及处理方式所形成的碾压混凝土层面进行楔入劈拉断裂破坏试验,采用电测法测试其层面裂缝的扩张规律,寻找裂缝的起裂荷载,得出不同工况碾压混凝土层面的拉伸断裂判据,从断裂力学的角度比较确定碾压混凝土坝层面处理方法的优劣.

1 试验情况

本次试验拟采用 6种层面处理工况的碾压混凝土楔入劈拉试件进行层面拉伸断裂试验.

收稿日期: 2006-05-10; 修回日期: 2007-03-04.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50179002).
作者简介: 黄志强 (1971-), 男, 博士, E-mail: h_zh@163.com; 宋玉普* (1944-), 男, 教授, 博士生导师.
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.1 原材料

采用大连水泥厂生产的普通硅酸盐 42⁵ 水泥,大连华能热电厂生产的国家二级粉煤灰.砂子为河砂,细度模数 2.6~ 2.8.石灰岩石子粒径

为 5~ 20 mm,外加剂为 DK-5混凝土低引气高效减水剂.根据龙滩碾压混凝土重力坝的碾压混凝土配合比^[1 2],试验的配合比如表 1所示,而碾压混凝土的层面初凝时间在 5.5~ 6.0 h^[8 9].

表 1 碾压混凝土及层面处理用的粉煤灰水泥砂浆配合比

Tab. 1 Proportion of mixture for rolled compacted concrete and layer surface disposal fly ash mortar

	$d/(kg \cdot m^{-3})$					外加剂
	水	水泥	粉煤灰	砂	石子	
碾压混凝土	100	108	72	832	1 358	0.75%
粉煤灰水泥砂浆	237	404	120	1 109	—	—

1.2 试件的制作

试件参数如下:试件尺寸 150 mm× 150 mm× 150 mm,预制裂缝缝深 60 mm,缝厚 3 mm.根据施工过程中可能出现的层面间隔时间和处理方式及以往从强度的角度研究出现的层面处理形式,试验中所用试件共分为 7种工况.每种工况的试件个数为 4~ 6个,其具体间隔时间和处理方式如表 2所示.

表 2 试件的工况

Tab. 2 Engineering situation of specimen

工况编号	层面间隔时间	层面处理方式
W S	无间隔	—
W SB2h	2 h	不处理
W SC4h	4 h	铺 10 mm 的粉煤灰水泥砂浆
W SB7h	7 h	不处理
W SC7h	7 h	铺 10 mm 的粉煤灰水泥砂浆
W SSC24h	24 h	刷毛冲洗露出骨料后,铺 10 mm 的粉煤灰水泥砂浆
W SSC72h	72 h	刷毛冲洗露出骨料后,铺 10 mm 的粉煤灰水泥砂浆

试件在 150 mm× 150 mm× 150 mm钢模中碾筑.所有试件分两次来振捣成型,每次成型厚度约为 7.5 mm,采用了预埋钢片的成缝方式,每种试件的间隔时间及处理方式不同.从层面间隔时间和层面处理方式两方面来看,可认为 W SB2h 试件属于实际水利工程中的层面“热缝”,W SC7h 试件属于实际水利工程中的层面“温缝”,W SSC24h和 W SSC72h试件属于实际水利工程中的层面“冷缝”^[10].

1.3 测试内容

1.3.1 试验装置 楔入劈拉试验在 5 000 kN 的压力试验机上进行,试验加载及受力情况如图 1所示,其试验装置的制作与安装详见文献^[11].

采用 BLR-1 /5000型拉压式荷载传感器,其量程范围为 0~ 50 kN;裂缝口张开位移 $CMOD$ 采用夹式引伸仪测量;起裂点荷载的确定采用电阻应变片.其竖向荷载、裂缝口张开位移及缝端应变变化的数据记录通过计算机数据采集系统来完成.

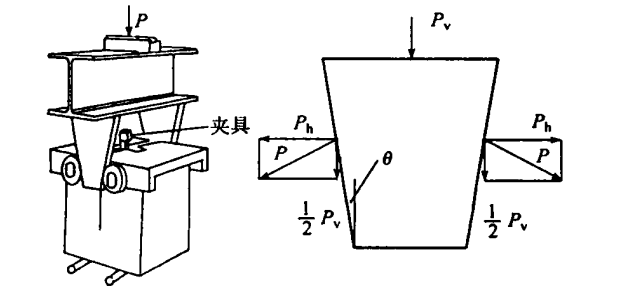


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of test equipment

1.3.2 电测法测试碾压混凝土层面裂缝的起裂荷载 电阻应变片的测点布置在试件的主拉应力方向,从预裂缝尖端开始,以预裂缝为对称轴成对布置,测点的连接桥路由两片工作片和两片补偿片组成全桥进行测量(如图 2所示).这种布置方式由于避开了预制缝的中心线,可完整地测试到测点处的应变变化规律.

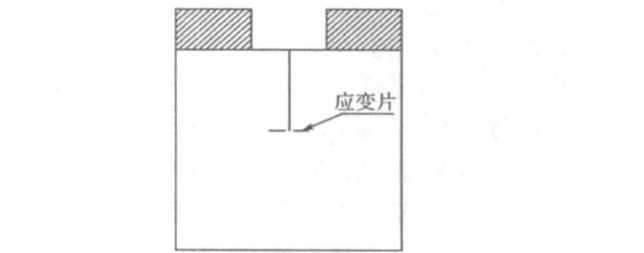


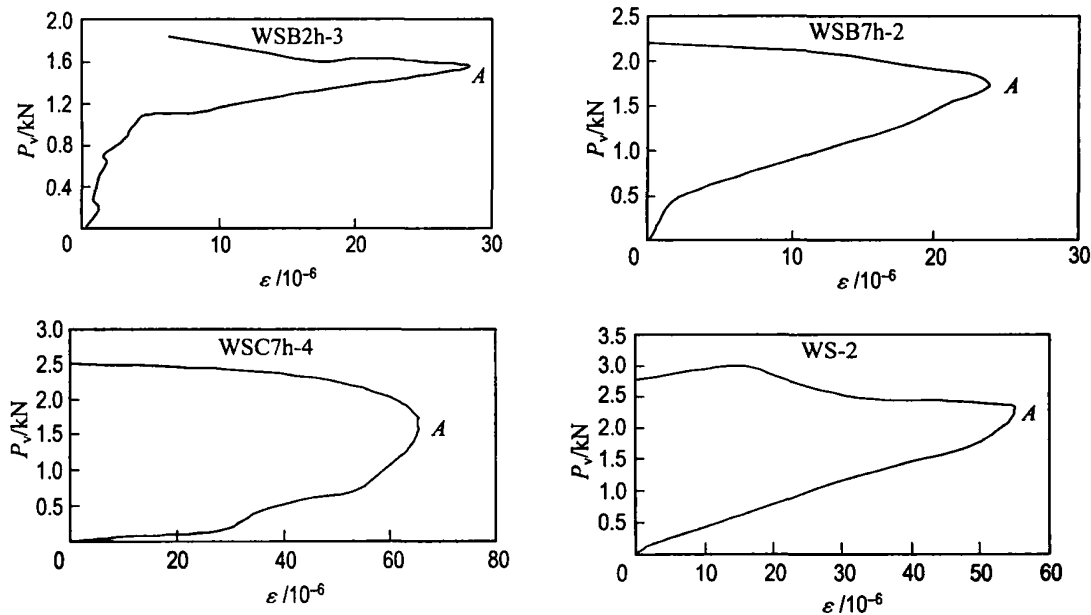
图 2 应变片布置方式

Fig. 2 Arrangement manner of strain gauge

选用的应变片标距较短,一方面是测点附近应变梯度较大,另一方面不需要测试测点处的真实应变,只需测试测点处应变发生转折时的荷载,从而确定裂缝的起裂和扩展。

2 试验测试结果

部分试件的竖向荷载 -应变关系曲线如图 3 所示。



注: 图中曲线 A 点所对应的荷载为起裂荷载

图 3 竖向荷载与裂缝尖端处的应变关系曲线

Fig. 3 Curves of vertical load to strain at crack tip

3 试验结果计算与分析

国内外大量的试验研究结果表明^[12 13],混凝土材料裂缝拉伸扩展过程可分为裂缝初始起裂、稳定扩展、失稳破坏 3 个明显不同的阶段。当 $K_I = K_I^{ini}$, 裂缝开始起裂; 当 $K_I^{ini} < K_I < K_I^u$, 裂缝处于稳定扩展阶段; 当 $K_I = K_I^u$, 裂缝开始失稳扩展。

利用测试结果,在线弹性断裂力学的基础上直接计算了混凝土双 K 断裂参数中的起裂断裂韧度;运用基于裂缝粘聚力的断裂参数的计算方法计算了碾压混凝土层面拉伸和碾压混凝土本体拉伸的失稳断裂韧度。

3.1 碾压混凝土层面拉伸的双 K 断裂参数计算^[14]

层面裂缝尖端的应力强度因子按以下公式计

从荷载应变关系曲线上看到,随着荷载的增加,裂缝尖端的应变也随着增加,属于拉应变;当应变增加到峰值时,裂缝尖端处的混凝土产生应力集中而开裂,在曲线上反映为拉应变不再增加,而荷载继续增加。由于缝端混凝土的开裂,其附近的拉应力卸载,拉应变变小,甚至出现压应变。则应变峰值所对应的荷载即为起裂荷载。

算:

$$K_I = \frac{P_h}{t} \cdot \frac{h}{h} \cdot F(T); \quad 0.2 \leq T \leq 0.8 \quad (1)$$

式中: K_I 为层面裂缝的应力强度因子 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$);

$$F(T) = 3.675 [1 - 0.12(T - 0.45)] (1 - T)^{-3/2}$$

t 为试件厚度, $T = \frac{a + h_0}{h + h_0}$ 是裂缝的相对缝长, a 为裂缝的长度, h 为试件高度, h_0 为刀口厚度, 单位均为 m; P_h 为试件施加的水平荷载 (kN), $P_h = \frac{P_v + mg}{2 \tan \theta}$, P_v 为试验测得的竖向荷载 (kN), mg 为楔形加载架的重量, 这里为 0.214 kN, θ 为楔形加载架的楔面与纵轴的夹角, 这里 $\theta = 15^\circ$ 。

裂缝口张开位移与荷载的关系为

$$CMOD = \frac{P_h}{Et} [13.18(1 - T)^{-2} - 9.16] \quad (2)$$

对式 (2) 进行变换有

$$E = \frac{P_h}{tCMOD} \cdot \left[13.18 \left(1 - \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right)^{-2} - 9.16 \right] \quad (3)$$

将试验得到的竖向荷载 P_v 与裂缝口张开位移 $CMOD$ 之间的关系曲线上升段线性范围内任一点的值代入式 (3) 中可得到碾压混凝土层面处的弹性模量 E .

在试验过程中,当荷载达到最大值 P_{vmax} 时,对应的裂缝口张开位移、裂缝长度达到临界值,即 $CMOD_c$ 和 a_c .

由式 (2) 可得到

$$a_c = (h + h_0) \left[1 - \left(\frac{13.18}{\frac{tECMOD_c}{P_{hmax}} + 9.16} \right)^{1/2} \right] - h_0 \quad (4)$$

将试验得到的 P_{vmax} 及 $CMOD_c$,还有求得的碾压混凝土层面处的弹性模量 E 代入式 (4) 中,可得到临界裂缝长度 a_c .

将 P_{vmax} 和 a_c 代入式 (1) 中,就得到了双 K 断

裂参数中的碾压混凝土层面的失稳断裂参数

K_{lc}^{un} ,即 $K_{lc}^{un} = \frac{P_{vmax} + \frac{mg}{2 \tan T}}{t \cdot \frac{mg}{h}} \cdot F(T_c)$, $F(T_c) = 3.675[1 - 0.12(T_c - 0.45)](1 - T_c)^{-3/2}$,其中 $T_c = \frac{a_c + h_0}{h + h_0}$.

而对于碾压混凝土层面的起裂断裂初度 K_{lc}^{in} 的计算,试验中已经通过对裂缝尖端应变变化的分析确定了层面裂缝的起裂荷载 P_{ini} ,将其和初始裂缝长度 a 代入式 (1) 中可计算得到层面裂缝的起裂断裂初度 K_{lc}^{in} .

而碾压混凝土本体双 K 断裂参数的计算与上述计算过程相同.

通过以上计算,碾压混凝土本体及具有层面的碾压混凝土 6 种工况双 K 断裂参数的具体计算结果如表 3 所示.表中 P_{hini} 和 P_{hun} 分别为层面裂缝的起裂水平荷载和最大水平荷载, K_{lc}^{in} (解析计算) 是利用混凝土双 K 断裂理论的基于裂缝粘聚力的解析法得到的,其详细计算公式见文献 [14].

表 3 计算结果
Tab. 3 Calculated results

工况	P_{hini} /kN	P_{hun} /kN	K_{lc}^{in} /(MPa $\cdot$ m $^{1/2}$)		K_{lc}^{un} /(MPa $\cdot$ m $^{1/2}$)	P_{hini}/P_{hun}	K_{lc}^{in}/K_{lc}^{un}	
			试验	解析计算			试验	解析计算
WSB2h	3.086	4.745	0.411	0.515	1.109	65.0%	37.1%	46.4%
WSB7h	3.747	4.646	0.513	0.780	1.058	59.1%	48.5%	73.7%
W SC4h	3.528	4.753	0.422	0.642	1.205	74.2%	35.0%	53.3%
W SC7h	3.215	4.557	0.440	0.476	1.198	70.6%	36.7%	39.7%
W SSC24h	3.284	4.874	0.483	0.701	1.341	67.4%	36.0%	52.3%
W SSC72h	2.249	3.901	0.298	0.359	1.308	57.7%	22.8%	27.4%
本体	4.021	5.220	0.513	0.648	1.774	77.0%	28.9%	36.5%

3.2 计算结果分析

(1) 层面的起裂水平荷载与失稳水平荷载的比值 P_{hini}/P_{hun} 在 57.7% ~ 74.2% .

(2) 两种方法相比较来看,利用电测法测得的起裂荷载计算得到的值要小于运用基于裂缝粘聚力的解析方法所计算得到的值,差距在 20% ~ 30%,其主要原因在于前者测得的是试件表面裂缝的扩展,而后者计算得到的是在平面应力状态下裂缝的平均扩展.

由试验测得的起裂荷载计算得到的层面起裂断裂初度,由于在层面上存在较大的初始损伤,工况 W SSC72h 的值偏小,而工况 W SB7h 的值偏大,其原因是在裂缝的尖端存在较大的粗骨料.除了工况 W SB7h 以外,其余层面工况的层面的起裂断

裂初度在 0.4 ~ 0.5 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$,其中工况 W SSC24h,即下层混凝土成型 24 h,对其层面进行刷毛冲洗并铺设粉煤灰水泥砂浆,然后再成型上层混凝土的这种处理方式的层面起裂断裂初度较大.其变化规律与运用基于裂缝粘聚力的断裂参数计算方法所计算得到的层面起裂断裂初度变化规律一致.

(3) 在层面的失稳断裂初度上,层面间隔时间相同的情况下,层面处理的要比层面不处理的大,后者为前者的 88.3%;在层面不处理情况下,下层混凝土层面暴露时间越短,其成型上层混凝土所形成的层面的失稳断裂初度就越大;而下层混凝土终凝后(即下层混凝土成型 24 h),对其层面进行刷毛冲洗并铺设粉煤灰水泥砂浆,然后再

成型上层混凝土的这种处理方式的层面失稳断裂韧度最大, 为本体试件的 75.6%。

4 结 论

对 6 种层面处理工况的碾压混凝土层面进行了楔入劈拉断裂试验研究, 采用电测法测得碾压混凝土层面裂缝的起裂荷载, 确定了碾压混凝土层面裂缝的双 K 断裂参数。研究表明, 层面的起裂荷载与失稳荷载的比值 $P_{\text{ini}}/P_{\text{un}}$ 在 57.7% ~ 74.2%。在 6 种层面处理的工况中, 对于下层碾压混凝土终凝后施工缝或冷缝的处理方式, 即对层面进行凿毛或冲毛处理, 铺设粉煤灰水泥砂浆, 再覆盖上层混凝土, 所形成的层面的拉伸双 K 断裂参数最大, 其破坏面比较破碎, 破坏消耗的能量较大, 因此这种层面处理方式最为有效。

参考文献:

- [1] 林长农, 金双全, 涂传林. 碾压混凝土层面强度特性试验研究 [J]. 红水河, 2000, 19(3): 9-13
- [2] 成 方, 安冬英, 林长农. 碾压混凝土层面极限拉伸试验研究 [J]. 红水河, 2001, 20(2): 62-65
- [3] 简 政, 黄松梅, 涂传林, 等. 碾压混凝土层面断裂试验研究 [J]. 西安理工大学学报, 1997, 13(2): 129-134
- [4] 简 政, 张浩博, 黄松梅. 碾压混凝土断裂性能研究 [J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(2): 152-156

- [5] 沈 英, 曾昭扬, 周立峰. 碾压混凝土坝层面剪切断裂分析 [J]. 力学学报, 1994, 26(6): 679-689
- [6] 赵中极, 张剑镜, 杨耀红. 碾压混凝土断裂的数值模拟分析 [J]. 华北水利水电学院学报, 1995, 16(3): 1-7
- [7] 彭一江, 黎保琨, 刘 斌. 碾压混凝土细观结构力学性能的数值模拟 [J]. 水利学报, 2001(6): 19-22
- [8] 李鹏辉, 许 维, 陈凤岐, 等. 碾压混凝土层面间隔时间宏细观试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2003(1): 12-14
- [9] 金庭节. 龙滩高坝碾压混凝土的层间抗剪强度参数 [J]. 红水河, 1995, 14(3): 12-17
- [10] 张仲卿. 碾压混凝土拱坝沿层面破坏机理研究 [J]. 水利学报, 2003(2): 61-65
- [11] 焦 辉. 混凝土 I 型裂缝断裂性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 1990
- [12] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则 [J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 32-38
- [13] XU Shi-lang, REINHARDT H W. A simplified method for determining double- K fracture parameters for three-point bending tests [J]. *Int J Fract*, 2000, 104: 181-209
- [14] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Determination of double- K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III Compact tension specimens and wedge splitting specimens [J]. *Int J Fract*, 1999, 98: 179-193

Experimental research on tensile failure process in rolled compacted concrete layer

HUANG Zhi-qiang^{1,2}, SONG Yu-pu^{* 1}, WANG Xue zhi¹

(1.State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2.School of Archit. Eng., Shenyang Univ. of Technol., Shenyang 110024, China)

Abstract Research on failure of soft stratum of rolled compacted concrete (RCC) is an important aspect of stability of high RCC dam. Six kinds of specimens with different interfaces were investigated by wedge splitting method. Initial load of RCC surface was obtained by electrometric method, and then double K fracture parameters were determined. It is indicated that ratio of initial fracture parameter and unsteady fracture parameter $P_{\text{ini}}/P_{\text{un}}$ is 57.7% -74.2%. It is shown that the approach of construction joint or old joint after RCC final set is the most efficient among the six cases, and its fracture parameter is the biggest among them. Its propagation path is sinuous, and the failure surface is relief.

Key words rolled compacted concrete (RCC); bedding plane crack; wedge splitting; initial load; double K fracture parameters