

# 碾压混凝土压剪强度分析

宋玉普<sup>1</sup>, 闻 伟<sup>1</sup>, 王怀亮<sup>2</sup>

(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. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 针对碾压混凝土受压剪作用问题, 制作三级配本体、含层面试件和二级配本体、含层面试件, 对试件进行单剪和双轴压剪试验, 得到不同侧压应力下碾压混凝土的剪切强度。试验结果表明, 施工层面削弱了碾压混凝土的抗剪性能; 而侧压应力使碾压混凝土的抗剪能力显著提高, 压应力越大, 抗剪强度越高。根据双剪强度理论处理分析得到碾压混凝土的压剪强度曲线, 该曲线与试验数据吻合, 说明双剪强度理论真实反映了压剪破坏强度规律。

**关键词:** 碾压混凝土; 压剪强度; 双剪强度理论

中图分类号: TV642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0044—04

## Analysis on Compression-shear Strength of Roller Compacted Concrete

SONG Yu-pu<sup>1</sup>, WEN Wei<sup>1</sup>, WANG Huai-liang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian,

Liaoning 116024, China; 2. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

**Abstract:** According to the compression-shear action of roller compacted concrete (RCC), the fault-included specimens of three and two graded-aggregate noumena were produced and used for uniaxial sheared and biaxial compression-shear experiments, so as to get the shear strength with different lateral compression stress. The experimental results prove that the construction-faults would weaken the shear capacity of RCC. However, the lateral compression stress would remarkably improve the shear strength of RCC, moreover, the greater the compression stress, the higher is the shear strength. Based on the twin shear strength theory, the compression-shear strength curves would be calculated and obtained. All the curves would coincide with test data. It is verified that the twin shear strength theory could truly reflect the law of compression-shear failure strength.

**Keywords:** roller compacted concrete; compression-shear strength; twin shear strength theory

## 0 引 言

20世纪80年代初, 中国开始进行碾压混凝土筑坝技术的研究。相对于传统的混凝土施工技术, 碾压混凝土筑坝技术具有施工快、水泥用量少、工程质量可靠度高、工艺简单、机械化程度高、工程造价低等特点, 具有巨大的经济效益<sup>[1-3]</sup>。

在碾压混凝土坝体内, 不同体量区域所处的应力状态也有很大差别, 在局部会出现二维甚至三维复合应力状态, 一般处于此受力状况的碾压混凝土

都比较危险, 此时使用单轴拉、压、剪强度理论设计和验算得到的结果与工程实际受力情况有很大差异。因此, 为了满足工程实际的需要, 有必要对碾压混凝土进行复杂应力状态下性能的理论探索和研究。

经过三十多年的研究, 碾压混凝土工程技术和理论取得了长足的发展。林长农等<sup>[4]</sup>研究了不同层面类型和本体碾压混凝土的抗剪、抗压、劈拉、拉伸及抗渗性能, 通过比较论证了使用水泥砂浆作为层面处理材料的可行性; 王怀亮等<sup>[5]</sup>对两种级配的本

体、层面碾压混凝土进行了单轴拉压应力下的动态试验,得出了在不同应变速率下碾压混凝土的应力-应变全曲线及其表达式,为开展碾压混凝土坝的地震响应分析打下了基础。王怀亮、宋玉普<sup>[6-7]</sup>对碾压混凝土在侧向应力下的多轴剪切作用进行过试验分析,建立了不同应力状况下的抗剪强度破坏准则。

目前对碾压混凝土的研究大多集中在单轴拉、压、剪受力状况下,对其在多轴复合应力状态下的强度及变形性能的分析比较少,没有对大骨料三级配碾压混凝土压剪作用的分析。本文仅就两种级配碾压混凝土双轴压剪受力状态进行研究,通过单剪和双轴压剪试验,得到三级配本体、含层面试件和二级配本体、含层面试件的强度关系。研究工作对工程实践具有一定的指导和借鉴意义。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试件制作

本试验采用三级配和二级配两种混凝土材料(配合比见表1、表2)。由于常用碾压混凝土中二级

配和三级配混凝土的最大骨料粒径通常分别为40 mm和80 mm,根据试件尺寸应不小于最大骨料粒径三倍的要求,二级配混凝土试件尺寸采用150 mm×150 mm×150 mm,三级配混凝土试件尺寸采用250 mm×250 mm×250 mm<sup>[3]</sup>。其中,每种配合比试件又分为含层面碾压混凝土和本体碾压混凝土两种类型。本体碾压混凝土试件一次浇筑完成;而含层面碾压混凝土分两次浇筑,先将下半部分浇筑、碾压成型,间隔6 h~8 h后,对浇筑面作凿毛处理并铺上一层约1 cm厚粉煤灰水泥砂浆(配合比见表3),再浇筑、碾压上半部分。根据《水工碾压混凝土试验规程》<sup>[8]</sup>的相关规定,试验采用平板振捣器法。振捣器振幅为0.8 mm±0.1 mm,频率约为47 Hz。

实验采用普通自来水,水泥为R32.5硅酸盐水泥,其他材料还包括:天然河砂、三级配石灰岩碎石粗骨料、国家Ⅱ级粉煤灰、大连建筑科学研究院出品的DK-5高效减水剂。试件采用钢模成型,养护48 h后拆模,拆模后在标准环境下养护28 d,实验用试件龄期为90 d~100 d。

表1 三级配混凝土配合比

用水量 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥 /(kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比 W/(C+F)	砂率 /%	砂 /(kg·m <sup>-3</sup> )	骨料 /(kg·m <sup>-3</sup> )	复合型外 加剂/%
83	83	83	0.5	32	697	1499	0.75

注:骨料中小石:中石:大石比例为30:40:30。

表2 二级配混凝土配合比

用水量 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水泥 /(kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰 /(kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比 W/(C+F)	砂率 /%	砂 /(kg·m <sup>-3</sup> )	骨料 /(kg·m <sup>-3</sup> )	复合型外 加剂/%
91	91	91	0.5	38(33)	700	1398	0.75

注:骨料中小石:中石比例为30:40。

表3 砂浆配合比

单位:kg/m <sup>3</sup>			
水	水泥	粉煤灰	砂
237	404	120	1109

### 1.2 试验方法

实验设备采用静动三轴液压伺服系统。在压剪试验中,压应力垂直于浇筑面,剪力方向与浇筑面平行并与施工层面对中。为了减小加压板与试件之间的摩擦力,在它们中间放置减摩层,减摩层由三层聚乙烯塑料薄膜夹涂硫化钼油膏制成,以达到降低端部约束的效果。试验前,先使用打磨机去掉受压表面的薄弱灰浆层,并使其平整,以保证两个承压面平行。在试验系统加压方向加载头上安装加压板,通过加压板对试件施加压应力;同时在剪切方向加载

头上安置剪切加载板,通过其施加剪切力。试验机上带有荷载和位移的测量、采集系统,并能自行处理和存储试验数据。

试验采用定侧压加载方式,即先将压应力加载到一个定值,保持恒定,然后再加载剪切力,直至试件破坏。压应力选用5个水平值,分别为0 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa、6 MPa,每个压应力水平取5个试件进行试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏形态

二级配和三级配碾压混凝土的破坏特征相似,试件破坏截面与剪应力方向基本平行,说明试件主要是在剪切变形达到极限状态下破坏的,属剪断型

破坏。如图 1 中所示,含层面试件基本都沿砂浆层面破坏,破坏面比较平整,而本体试件的破坏截面相对较粗糙、凹凸不整。随着侧压应力的增大,破坏时试件沿压应力方向出现斜裂缝(如图 2),且斜裂缝数量逐渐增多,裂缝宽度增大。说明随侧压应力不断增大,试件的受压破坏特征越来越显著。

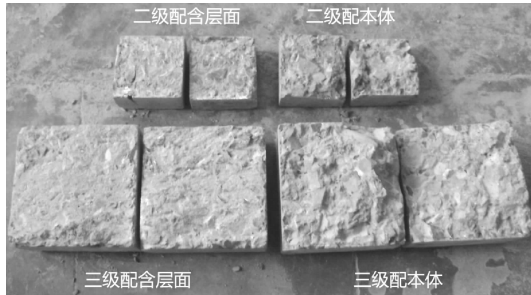


图 1 含层面和本体单剪破坏截面对比

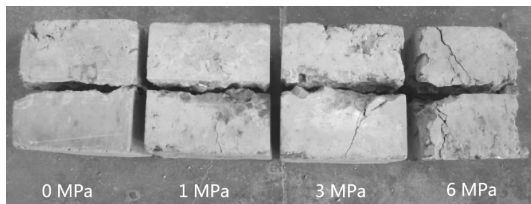


图 2 二级配合层面不同侧压应力下剪切破坏效果

## 2.2 剪切强度

由试验结果换算得到的试件平均剪切强度见表 4(剪应力为正、压应力为负)。

表 4 各压应力状态下碾压混凝土平均剪切强度

压应力 $\sigma/\text{MPa}$	三级配本体 剪切强度 $\tau/\text{MPa}$	三级配合 层面剪切 强度 $\tau/\text{MPa}$	二级配本体 剪切强度 $\tau/\text{MPa}$	二级配合 层面剪切 强度 $\tau/\text{MPa}$
0	2.82	2.14	3.16	2.62
-1	4.54	3.79	5.17	4.58
-2	5.80	4.75	6.20	5.37
-3	6.65	5.65	6.76	6.42
-6	9.72	8.53	9.79	9.27

从表 4 可知:各压应力水平下,二级配碾压混凝土剪切强度比三级配碾压混凝土剪切强度高,本体剪切强度比含层面剪切强度高。就单剪加载来说,三级配和二级配合层面试件剪切强度比本体分别降低 24% 和 17%;三级配本体比二级配本体剪切强度降低 11%;三级配合层面比二级配合层面降低 18%。在压剪情况下,三级配和二级配合层面试件比本体剪切强度分别降低 18% ~ 12% 和 12% ~ 5%;三级配本体比二级配降低 12% ~ 1%;三级配合层面比二级配降低 17% ~ 8%;并且随压应力的

增大,各种试件之间平均剪切强度值的差异幅度都有逐渐缩小的趋势。由以上分析可知:施工层面显著削弱了碾压混凝土平行层面方向的抗剪能力;三级配试件比相应的二级配试件抗剪强度低,反映了尺寸效应对碾压混凝土抗剪性能的影响<sup>[9]</sup>;随侧压应力的增大,尺寸效应和浇筑层面削弱对碾压混凝土剪切强度的影响逐渐降低。

最后,对比单剪和最大压应力状态下剪切强度得:各类型碾压混凝土试件中,6 MPa 侧压应力平均剪切强度为单剪强度的 3.10 ~ 3.99 倍,侧压应力显著提高了碾压混凝土的剪切强度。在低侧压应力条件下,压应力增大了碾压混凝土材料之间的摩擦作用,降低了材料内部裂缝的发展速度,从而提高了材料的抗剪强度;并且侧压应力越大,摩擦作用越大,材料抗剪强度也越高。

由表 4 中数据,对各型试件的侧压应力和平均剪切强度进行回归分析,可得到剪切强度  $\tau$  与压应力  $\sigma$  之间的关系

$$\tau = \mu\sigma + c \quad (1)$$

式中: $\mu$  表示摩擦系数; $c$  表示粘聚力(MPa)。各型试件的回归分析表达式为

$$\text{三级配本体} \quad \tau = -1.11\sigma + 3.24 \quad r = -0.9931 \quad (2)$$

$$\text{三级配合层面} \quad \tau = -1.03\sigma + 2.51 \quad r = -0.9943 \quad (3)$$

$$\text{二级配本体} \quad \tau = -1.04\sigma + 3.73 \quad r = -0.9855 \quad (4)$$

$$\text{二级配合层面} \quad \tau = -1.06\sigma + 3.12 \quad r = -0.9899 \quad (5)$$

式中: $r$  为各表达式的相关系数。由公式可知,碾压混凝土本体的粘聚力比含层面的大,二级配碾压混凝土的粘聚力比相应的三级配的大。

## 3 双剪强度理论分析

实验选用双剪强度理论对数据作进一步的分析,以方便我们更好地理解混凝土材料的破坏特性。其大致涵义为:当单元体上较大剪切应力和正应力构成的影响函数( $F_1, F_2$ ) 达到一定限值时,材料发生破坏<sup>[10]</sup>。压剪试验的双剪强度方程可写成如下形式<sup>[11]</sup>

$$F_1 = (3\beta + 1)\sigma + (\beta + 3)\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = 4C,$$

$$\sigma + \beta\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \geq 0$$

$$F_2 = (3\beta - 1)\sigma + (\beta - 3)\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = 4C,$$

$$\sigma + \beta \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq 0 \quad (6)$$

其中: $\tau$  是压剪强度; $\sigma$  是侧压应力; $C$  是材料强度系数; $\beta$  为压应力影响系数。

采用表 4 中的试验数据,通过双剪强度方程拟合可以得到各类型试件的参数  $\beta$  和  $C$ (见表 5)。

表 5 各类型试件双剪强度系数回归值

参数	试件类型			
	三级配本体	三级配含层面	二级配本体	二级配含层面
$\beta$	8.21	7.03	5.75	6.61
$C$	18.54	12.23	16.87	15.40

图 3、图 4 是由双剪强度理论回归分析得到的压剪强度曲线与实测数据的对比图。

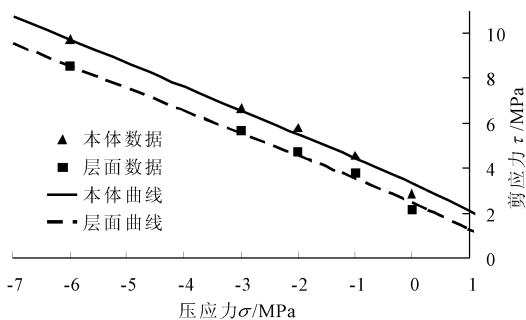


图 3 三级配本体和含层面数据及曲线对比

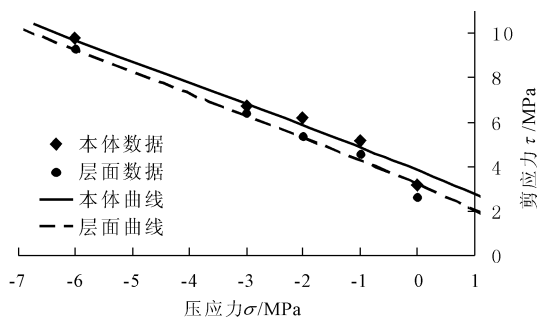


图 4 二级配本体和含层面数据及曲线对比

从图 3、图 4 中可以看出,各曲线与实验实测数据比较接近,能够基本吻合;各本体压剪强度要大于相应含层面的压剪强度。综上所述,说明双剪强度理论能够真实地反映压剪破坏强度规律。

由于机器设备、操纵习惯等对试验的影响,部分数据(如单剪强度)与理论值有一定的差异,因此相关实验应该注意对试验设备、方案及步骤等的完善和改进。同时,受实验条件所限,暂时未进行拉剪破坏试验的研究,所以无法由双剪强度理论得到压(拉)剪破坏强度完整曲线,此处还待后续研究。

## 4 结 论

(1) 施工层面显著削弱了碾压混凝土平行层面方向的抗剪能力,在工程实践中要注意考虑层面对材料抗剪强度的影响。三级配试件比相应的二级配试件抗剪强度更低,反映尺寸效应对碾压混凝土抗剪性能的影响。

(2) 随侧压应力的增大,尺寸效应和浇筑层面对碾压混凝土剪切强度的影响会逐渐降低。侧压应力能显著提高碾压混凝土的抗剪强度,并且较低压应力情况下,侧压应力越大,材料抗剪强度也越高,因此其对剪切作用是有益的。

(3) 通过双剪强度理论计算出的压剪强度曲线与试验实测数据接近,能够较好地吻合;同时,曲线显示各本体试件压剪强度大于相应含层面试件压剪强度。双剪强度理论能够真实地反映压剪破坏强度规律。

### 参考文献:

- [1] 李传章. 碾压混凝土研究及其发展[J]. 企业技术开发, 2011, (8): 135-136.
- [2] Kenneth D H. Roller compacted concrete: a civil engineering innovation concrete[J]. International Design & Construction, 1996, 18(3): 25-31.
- [3] 李建伟, 苗隆德, 王国强, 等. 混凝土面墙技术在碾压混凝土重力坝中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(3): 98-100.
- [4] 林长农, 金双全, 涂传林. 龙滩有层面碾压混凝土的试验研究[J]. 水力发电学报, 2001, 20(3): 117-129.
- [5] 王怀亮, 闻伟. 碾压混凝土单轴动态力学性能研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 155-160.
- [6] 王怀亮, 宋玉普. 双轴复合应力作用下碾压混凝土特性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 115-119.
- [7] 王怀亮, 宋玉普. 多轴应力条件下碾压混凝土层面抗剪强度试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1095-1101.
- [8] 中国水利水电科学研究院. DL/T 5433 - 2009. 水工碾压混凝土试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] 屈彦玲, 彭一江, 杜立峰. 碾压混凝土试件抗剪强度尺寸效应的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 22-24.
- [10] 郭艳华, 刘建红, 李志业. 钢纤维混凝土压剪破坏研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(2): 152-156.
- [11] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.