

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.004

动态压剪作用下碾压混凝土强度和变形研究

王怀亮^{1,2}, 田平²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为了研究碾压混凝土材料在地震作用下的动态力学参数指标变化对大型碾压混凝土结构抗震动力反应和破坏过程的影响,使用改造后的液压伺服压剪试验系统对两种尺寸的碾压成型试块进行不同加载速率下的压剪试验,系统研究了二、三级配本体和层面试件在有法向压应力存在的状态下动态抗剪强度和变形性能。结果发现,碾压混凝土的峰值剪切强度随着剪切速率的增大而增大,增大幅度随着正应力的增大有减小趋势,残余剪切强度则随着剪切速率的增大略有减小,在试验基础上,建立了考虑不同试件类型和加载速率的破坏准则,为地震区的大型碾压混凝土结构层面受动态压剪组合荷载作用的动态分析提供了试验基础。

关键词: 碾压混凝土;压剪受力;地震动;剪切变形曲线;破坏包络线

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0018-07

Strength and Deformation Characteristics of RCC Under Dynamic Compressive-shear Loading

WANG Huailiang^{1,2}, TIAN Ping²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Civil and Architectural Engineering College, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract: In order to study the effect of dynamic behavior of RCC (Roller Compacted Concrete) to the dynamic response and failure mechanism of RCC structures under the seismic action, compression-shear loading tests on RCC specimens with two kinds of sizes were carried out at different loading rates using a retrofitted servo-hydraulic compression-shear testing machine. These specimens are of two kinds: body specimens and interface specimens. Considerable emphasis was laid on the dynamic strength and deformation properties of two-graded and three-graded RCC. The shear stress-deformation curves under various normal confining pressures were analyzed and discussed at each loading rate. Test results indicated that both the peak shear strength and its corresponding deformation increased significantly with the confining pressure. Based on the experimental results, a unified formula was derived to demonstrate both the effects of loading rate and the effect of normal stress on the peak shear strength of RCC under combined compressive and shear loadings.

Keywords: RCC; compression-shear; seismic; shear deformation curve; failure envelop

混凝土材料作为明显的率相关材料,极限强度随应变率或者加载速率的增加而增加,不同混凝土材料率相关特性可能会有所区别,并且在不同的应力状态下如拉应力、压应力甚至剪应力作用下,同一种混凝土也会表现出不同的率敏感性。碾压混凝土作为一种超干硬性混凝土材料,由于其施工进度迅

速、造价节省和温度控制措施简单易行,往往是修筑道路和大坝的首选材料和施工方案。我国西部地区水资源丰富,规划和建设了一大批碾压混凝土高拱坝和重力坝,而西部地区属于高烈度地震频发地区,为了这些碾压混凝土结构的抗震安全性,有必要对地震动作用下碾压混凝土的动态力学参数指标进行

收稿日期:2015-11-27

修稿日期:2015-12-30

基金项目:河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(201349811);辽宁省自然科学基金(2015020593);大连大学大学生创新项目(2015030)

作者简介:王怀亮(1979—),男,河南郑州人,副教授,主要从事混凝土结构试验研究方面的工作。E-mail:whuailiang@163.com

专门的研究。文献[1-2]针对龙滩碾压混凝土重力坝的筑坝材料,进行了碾压混凝土抗拉强度和抗压强度的率相关特性研究,发现碾压混凝土的率相关性规律与普通混凝土相差不大。但值得注意的是,与常规混凝土不同的是,碾压混凝土结构是逐层碾压而成,除了关注其动态抗拉强度和抗压强度之外,还应该关注碾压混凝土本体或者层面的动态抗剪特性,但目前这一特性的研究基本上还处于空白状态,这不利于碾压混凝土高拱坝的抗震安全评价。

基于目前的状况,本文拟对工程上常用的三级配和二级配碾压混凝土本体试件和层面试件进行动态压剪特性的试验研究,详细分析其不同加载速率下峰值抗剪强度、残余剪切强度以及变形性能等的变化规律,为进一步建立精确而又实用的碾压混凝土动态本构关系提供必要的试验依据。

1 试验设计

1.1 试验设备

试验方法采用岩石力学中常用的剪切盒加载方案,对原有的混凝土静、动电液伺服三轴试验机进行了局部改造,增设了对试件可进行水平剪切的加载头及防止试件受剪切过程中扭转的拉压板,试验装置示意图 1。加载过程中,荷载大小由电测式荷载传感器和配套的放大器测量,剪切位移和法向位移由安装在加载头上的 LVDT 和相应配套的放大器测量,荷载以及位移分别通过各自的采集通道输入计算机存储和处理,法向压应力和切向剪切应力的采集是相互独立的,可以同步按比例施加,也可以先后依次施加,相互之间不会有干扰,保证了试验的准确性和可靠性^[3-6]。

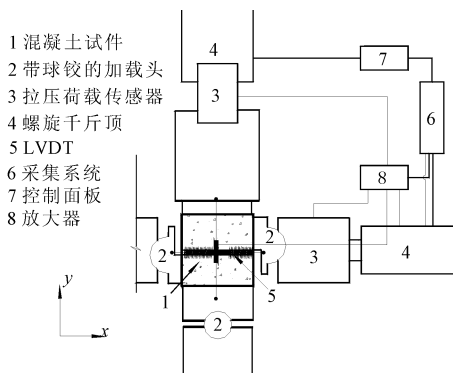


图 1 压剪试验装置

由于坝体设计中,一般垂直层面方向的法向压应力起控制作用,所以在本文的压剪试验中,压应力垂直于层面,而剪力方向与层面平行。其中,压应力

方向采用最大压力为 2.5×10^3 kN 的作动器,荷载传感器量程为 50 t,而剪切方向采用最大压力为 3×10^2 kN 的作动器,荷载传感器量程为 30 t,能够确保所采集到荷载值的精度。两向作动器最大行程以及响应频率均可达到地震动作用的加载速率要求,采集到的荷载以及位移数据控制精度为 1.5%,最小采集周期为 $2 \mu\text{s}$ 。以上条件均能保障本文动态剪切试验的顺利进行。

1.2 试件的制备

按照相应规范规程^[7-8]的有关规定,仿照现场碾压混凝土结构逐层碾压施工的碾压机械,设计了专门的实验室用平板振捣器,即用振捣电动机下焊接支杆,在支杆上安装具有一定刚度的钢板来实现碾压,如图 2 所示。本次试验三级配碾压混凝土最大粗骨料粒径为 80 mm,试件尺寸为边长 250 mm 的立方体,须采用平板尺寸为 $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 的大型平板振捣器,其频率为 50 Hz 左右,功率为 1 kW,振幅 5 mm;而二级配碾压混凝土最大粗骨料粒径为 40 mm,试件尺寸为边长 150 mm 的立方体,可采用平板尺寸为 140 mm 的小型平板振捣器,其振动频率为 50 Hz 左右,功率为 1 kW,振幅 3 mm。现代碾压混凝土施工技术基本可以保证在混凝土凝结时间之前,就开始碾压下一层,并且层面之间处理良好,但在实验室中仍考虑两种极限状况,一种为含层面试块,层面设置在试块一半高度处(125 mm 或者 75 mm 处);一种为本体试块,一次浇筑振实成型。

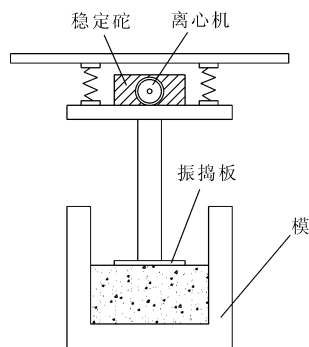


图 2 平板振捣器示意图

与普通混凝土相比,碾压混凝土水泥用量非常少^[9-10],本试验研究使用的碾压混凝土采用大掺量粉煤灰和较大的砂率来减小水泥用量,水胶比定为 0.5,所用水泥为 R32.5 硅酸盐水泥,粉煤灰按照国家标准为 II 级,砂子为天然河砂,中砂,砂率为 33% 左右,其配合比见表 1。其他材料如试验用水为生活用自来水,粗骨料为三级配和二级配石灰岩碎石,二级配中小石:中石比例为 30:40,三级配中小石:

中石:大石比例为 30:40:30;外加剂采用 DK-5 型混凝土低引气高效复合减水剂,掺量均为 0.75%。所有试件在钢模中成型,在养护至少 48 h 后拆模,由于碾压混凝土为水工大体积混凝土,通常采用 90 d 的抗压强度作为设计强度,因此本次试验在试验龄期 90 d ~ 100 d 后才开始进行。

表 1 碾压混凝土配合比 单位:kg/m³

粗骨料种类	不同材料用量				
	水量	水泥	粉煤灰	砂	骨料
二级配	91	91	91	700	1398
三级配	83	83	83	697	1499

1.3 试验过程

试验过程中的法向压应力由竖向加载头施加,为了测得真实的压应力数据,一般要对试件受压面与加载板之间采取减摩措施,根据本课题组的以往做法,采用三层塑料薄膜间夹二层甘油,然后在加载板与塑料薄膜间再夹一层甘油的做法减摩效果最好。在试验时将试件安装在压剪试验机的剪切盒内,安装试件时,应保证法向荷载和剪切荷载通过预

定剪切面的几何中心,并且试件中间的预定剪切面应正好对准主动剪切加载板下边缘。正式加载时,边对中边施加法向(竖向)荷载,使剪切板正好对准预设的剪切面,并固定竖向荷载数值至预设的法向压应力值;以设定的加载速率施加剪切荷载,直至试件剪切破坏。法向压应力加载量级分别为 0 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa 和 6 MPa。剪切加载速率量级分别为 0.1 mm/s(标准静态加载速率)、1 mm/s 和 10 mm/s。为保证试件的试验结果在允许的偏差内,每种应力状态和加载速率下试验 3 到 4 个试块,如果出现个别试验结果离散较大,则可个别增加某个压应力值和加载速率下的试块个数。

2 试验结果及分析

本文对二、三级配本体和含层面碾压混凝土在压剪状态下的动态抗剪强度特性及变形特性进行了研究,图 3 至图 6 为试验测得的部分代表性试样在不同法向压力下的剪切应力-位移($\tau-s$)关系曲线,限于篇幅,这里只给出了部分加载速率下的试验结果。

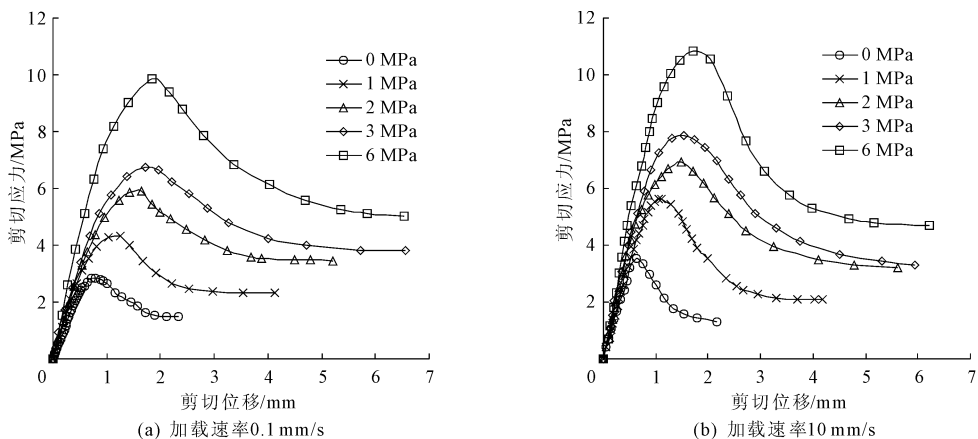


图 3 不同加载速率下三级配本体试件剪切应力-位移曲线

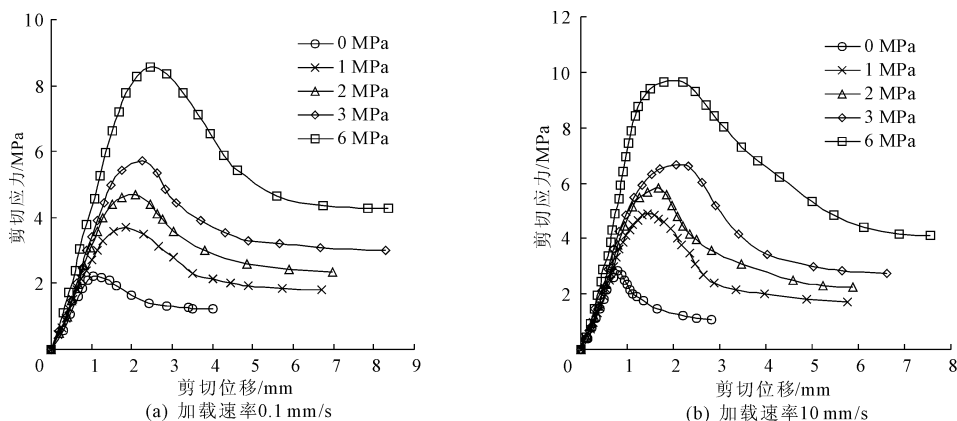


图 4 不同加载速率下三级配层面试件剪切应力-位移曲线

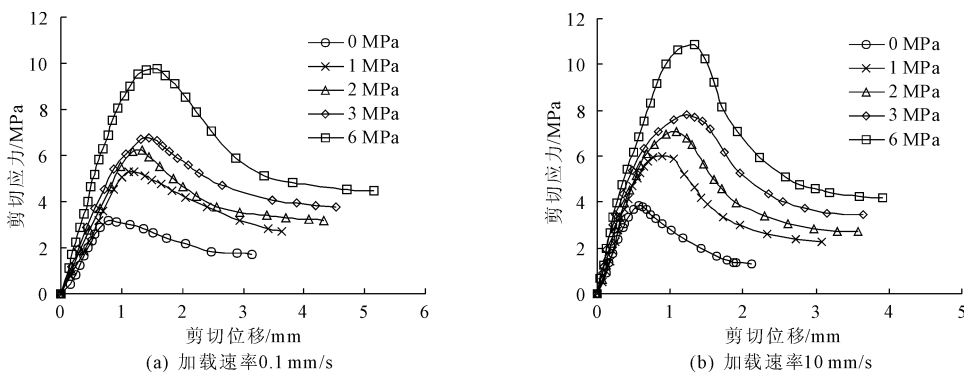


图 5 不同加载速率下二级配本体试件剪切应力 - 位移曲线

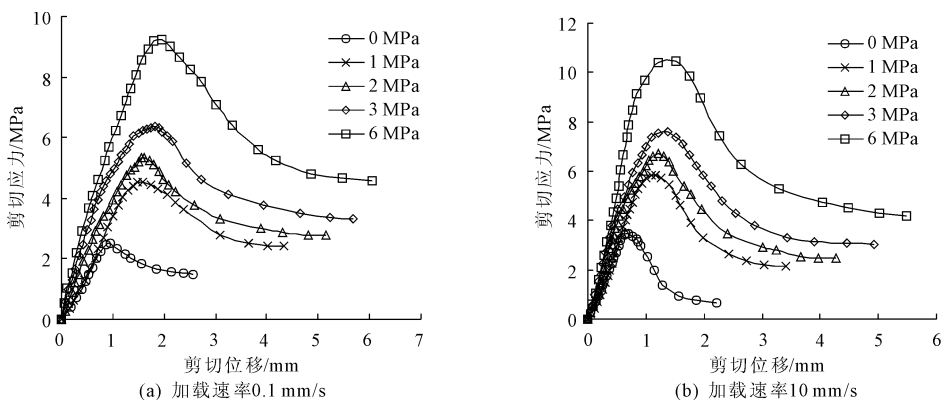


图 6 不同加载速率下二级配层面试件剪切应力 - 位移曲线

2.1 变形特性

从图 3 至图 6 可以看出,总体上剪切应力 - 位移曲线同拉压曲线一样,包括上升段和下降段两部分,剪应力比较小时,剪切层面处于弹性阶段,剪应力 - 位移曲线也处于线性段;随着剪切力的增大,剪切应力 - 位移曲线表现为非线性;当达到峰值剪应力值时,曲线表现出很强的非线性,剪切位移先是小幅度增加,然后再迅速增大,曲线进入了缓慢的下降软化段,由于试验机刚度比较大,剪切应力 - 位移曲线下降段尾部出现了平缓段,即最终应力基本稳定在某一水平,这个强度称为残余剪切强度。此时对应的试验现象是层面完全处于剪断滑动状态。曲线下降段差别比较大,显然残余剪切强度与法向压应力的大小有关。法向压应力存在的情形下,曲线在峰值以后下降段较平缓,剪应力并没有直接降为 0,这与岩石力学的试验现象不同。尽管碾压混凝土材料和中硬性岩石材料一样属于准脆性材料,但碾压混凝土内部是由粗骨料、水泥砂浆体、未水化水泥颗粒及气孔等多相复合材料组成的,属于高度非均质材质,并且成型方法是逐层碾压而成,即使是本体试块,也属于正交各向异性材料。由于垂直于碾压方向和平行于碾压方向上,材料物理力学性能相差

较大,RCC 试块剪断时,各方向不是骤然同时破坏,而是首先平行于碾压方向上发生剪断,并且断裂路径穿过粗骨料与水泥砂浆体的界面层,还有可能穿过材质疏松的大石骨料;一些质量较好的中石和小石粗骨料不会被剪断,产生骨料咬合作用,故而形成这种曲线,以上说明碾压混凝土层面的破坏是一个渐进过程。

对于同一种试件,峰值剪切应力以及剪切应力 - 位移曲线上上升段的斜率均随着加载速率的提高而增加,这说明随着加载速率的增加,混凝土材料初始剪切模量有增加的趋势,而峰值应力处对应的位移值有下降的趋势;从整体趋势上看,加载速率对碾压混凝土剪切位移曲线形状的影响不大。在同一种加载速率下,随着垂向压力的增大,试件峰值抗剪强度、初始斜率和对应于峰值强度的剪切位移均有很大程度的增加。由于实际水工结构中,混凝土处在压剪状态下,法向压应力一般都不会太大。所以,以上规律可以适用于一般的水工混凝土结构。

试件类型不同,剪切应力位移曲线差别不大,三级配大试件所测曲线的初始斜率、峰值变形绝对值都要比小试件大些,而线性段范围相对较短;本体试块和层面试块剪切应力 - 变形曲线也略有不同,同

样压剪状态,对于曲线的上升段,层面试件初始斜率较小,峰值剪切位移较大,其全曲线的线性段范围要小于本体试块。而这几种试件受加载速率影响的变形规律基本一致。

2.2 动态剪切强度及残余强度分析

从图 3~图 6 中可以看出,所有类型试件的动态抗剪强度及残余抗剪强度有以下特点:

(1) 同一批试件在相同法向压力作用下,动态抗剪强度要大于静态值,随着荷载速率增大,剪切强度会有一定程度的增加,由于碾压混凝土本体与一般常态混凝土无太大差别,这一结论同样适用于一般大坝混凝土。目前的研究中鲜有对混凝土材料动态抗剪强度的研究,本文的结果与其他资料中混凝土动态拉压强度试验结果相比,剪切强度的率敏感性介于抗拉强度和抗压强度两者之间。

(2) 在静力荷载和动力荷载作用下,残余剪切强度均随着峰值剪切强度的增加而增加,两者基本成线性关系。但加载速率的增加对残余强度影响不大,随着速率增大,残余强度仅有微小减小的趋势。

(3) 无论本体试块和层面试块,RCC 抗剪强度均随着法向正应力的增加而增加,所有试块类型中,无层面的 RCC 本体试件在法向正应力为 6 MPa 时,抗剪强度达到最高值。在不同的恒定法向压力下,碾压混凝土剪切强度对不同加载速率的敏感程度不同,在较高的法向应力下的率敏感性降低,无法向压应力即纯剪切状态下,碾压混凝土剪切强度的率敏感性最高。

(4) 同等法向应力和加载速率条件下,同一水胶比条件下,二级配 RCC(代表室内抗剪试验)所得的极限抗剪强度明显高于三级配 RCC(代表现场原位抗剪试验)的极限抗剪强度。这正反映了三级配大试件与二级配小试件的差别,三级配 RCC 中大石和中石骨料含量多,其内部包含更多缺陷,并且骨料与水泥砂浆黏结性能较差;而二级配中粗骨料所占比重,胶凝材料相对丰富,使层面结合的黏聚力增加。在本文的加载速率范围内,三级配 RCC 的动态强度增长系数(动态强度与静态强度的比值)要略大于二级配 RCC,层面试件的动态强度增长系数要略大于本体试件。

一般碾压混凝土静态抗剪强度服从莫尔-库仑准则^[11],以三级配层面试件数据为例,分别对不同加载速率下的压剪试验数据进行回归分析,并且引入摩擦系数 μ 和黏聚力 c (MPa),可得出剪切强度 τ_p 和正应力 σ 的关系:

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

具体表达式如下:

加载速率为 0.1 kN/s 时, $\tau_p = 1.14\sigma + 2.05$, 相关系数 $\gamma = 0.97$;

加载速率为 1.0 kN/s 时, $\tau_p = 1.11\sigma + 2.76$, 相关系数 $\gamma = 0.98$;

加载速率为 10 kN/s 时, $\tau_p = 1.04\sigma + 3.48$, 相关系数 $\gamma = 0.98$ 。

图 7 给出了试验结果和回归分析结果的对比,可见试验结果基本在各自回归直线附近分布。

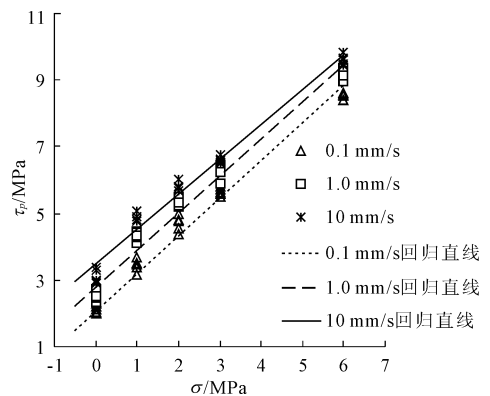


图 7 不同加载速率下剪切强度与垂直正应力关系

由回归式来看,试件动力抗剪强度比静态抗剪强度有较大幅度的增加,这同时表现在两个方面:黏聚力和摩擦系数。动力情况下黏聚力增加较大,摩擦系数变化不大,甚至反而减小。这说明对于混凝土岩石类脆性材料,其动态抗剪强度的增加主要是应变率效应对黏聚力的影响所致,这也解释了随着加载速度的增加,垂直向压应力对混凝土抗剪强度的提高作用削弱的原因。同样,如果对碾压混凝土残余剪切强度进行如同式(1)的回归分析,也可以发现剪断后残余剪切强度的降低也是由于黏聚力的大幅下降所致。

2.3 试件破坏现象

碾压混凝土试件在不同法向压应力条件下剪切时(如图 8 所示),试件均沿着中间剪切面上被切断,随着压应力的增大,边缘有明显的压坏痕迹;层面试件剪切破坏时的断裂界面非常平整和清楚,而本体试件切断面凹凸度较大。静动荷载作用下 RCC 试块的剪切破坏形态差别不大,只是同静力剪切面相比较,动力破坏面整体上比较平整,断面处被剪断的粗骨料比例明显增大,这种现象同拉压试验得出的结果相印证,即试件中本身存在微裂缝,在低加载速率情况下裂缝能够缓慢发展并沿胶结面或软弱面贯

通,而加载速率较大时,裂缝来不及沿弯曲裂缝缓慢扩展而直接穿过相对坚硬的骨料贯通过去。

如前所述,随着粗骨料粒径、骨料含量的增大,RCC 剪切强度随加载速度提高略有增加。从切断面可以看出随着加载速率提高,RCC 破坏时骨料断裂越来越多,因而强度提高。骨料粒径加大,骨料含量增多,内部开裂时穿过骨料的概率增大,骨料坚硬程度要高于水泥浆体,于是造成大试块速率敏感性增大。但由于本次试验骨料粒径变化范围较小,仅限于最大骨料粒径为 80 mm 的三级配和最大骨料粒径为 40 mm 的二级配,因此这个结论还有待于进一步验证。



图 8 试件破坏形态

3 动态强度准则

3.1 碾压混凝土直剪动态强度准则

抗剪强度和抗压抗拉强度一样,均为混凝土的基本力学性能,目前混凝土单轴动态拉压强度试验已进行了很多,但是动态抗剪强度试验还进行的非常少,还未见到动态直剪强度准则。根据文献[12-14]对其他种类混凝土进行的静动强度试验,发现各种类型混凝土的动态强度增长系数与加载速率的对数都基本呈现出线性关系。本文完成的 RCC 变速率直剪强度试验结果随加载速率的变化情况,见图 9。图中,为了消除碾压混凝土不同骨料级配和不同层面特性的影响,将 RCC 动态直剪强度值除以相应的静态直剪强度值得出抗剪强度的动态强度增长系数,并建立动态强度增长系数与剪切加载速率对数之间的关系模型。从图 9 中可以看出,无论是何种层面和级配的碾压混凝土,随加载速率(应变速率)的增大,动态直剪强度 f_v^d 增大的趋势基本上是一致的。根据直剪强度试验结果,利用最小二乘法回归得到法向正应力为零,变速率直剪的情况下,直剪强度比与加载速率比对数之间的关系式及其相关系数

如下:

$$f_v^d/f_v^s = 1 + 0.15271g \frac{\tau^d}{\tau^s} \quad (2)$$

相关系数 $\gamma = 0.928$,式中: f_v^s 为静态直剪强度。图 9 中,试验数据分布在由式(2) 所得的计算直线结果附近,这说明动态抗剪强度的动态强度增长系数与加载速率的对数之间也呈现出了线性关系,这一结果也同样适用于常态混凝土材料。

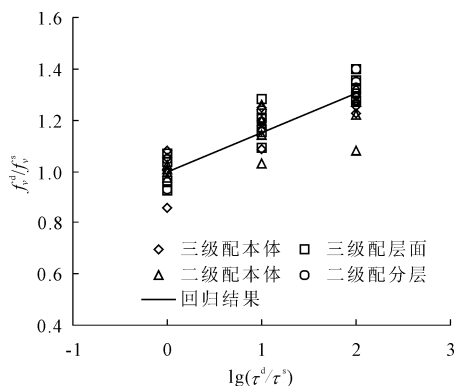


图 9 碾压混凝土动态直剪强度与加载速率的关系

3.2 压剪状态下碾压混凝土动态抗剪强度准则

大量试验结果表明,不同层面特性的 RCC 抗压强度差别不大,但抗拉强度和直剪强度差别比较大,鉴于此,为了得出真实的抗剪强度计算模型,在数学模型中应消除不同强度和不同层面特性对强度准则的影响。这里采用平面应力状态下的 Hoffman 准则公式形式^[15],同时考虑了垂直向压应力和剪切加载速率的影响,建立了如下式所示的 RCC 统一抗剪强度准则:

$$(\tau_p^d/f_v^s)^2 = a(\sigma/f_v^s)^2 + b(\sigma/f_v^s) + c \lg \frac{\tau^d}{\tau^s} + 1 \quad (3)$$

以上式中, σ 和 τ_p^d 分别为特定复杂应力状态下的正应力强度和剪切应力强度, f_v^s 为相应的直剪强度。

对所有试验数据采用多元回归分析的方法,解出回归系数为: $a = 0.68879$, $b = -3.80202$, $c = 0.88672$,求得的复相关系数 $r = 0.87$,变异系数 $\delta = 0.06$ 。将本文所得到的不同加载速率的压剪强度试验结果绘制图 10 中,并将上述统一破坏准则也表示到图上,从图 10 中曲面的变化趋势也能看出,加载速率较小时,法向压应力对混凝土抗剪强度提高较多,随着加载速率的增大,垂直向压应力对 RCC 抗剪强度的提高作用逐渐削弱;反之亦然,随着法向压应力的增加,RCC 剪切的速率敏感性降低。

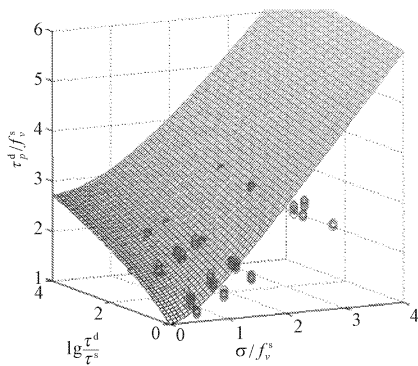


图 10 碾压混凝土动态压剪强度包络面

4 结 论

由于 RCC 与常态混凝土的不同特点,相对于常态混凝土的抗拉压强度而言,人们更加关注于 RCC 的抗剪强度指标,同样在地震动作用下,研究碾压混凝土尤其是其动态抗剪强度的变化规律不仅可以用于分析坝体尤其是碾压混凝土重力坝的动态抗滑稳定性,也有利于揭示碾压混凝土层面的动态剪切损伤机理,建立精确实用的动态本构方程。本文进行了两种级配碾压混凝土的动态压剪试验研究,试验结果表明:

(1) 较低速率加载下,RCC 剪断面主要发生在较大的粗骨料和水泥砂浆体的黏结界面处,剪断面突起基本与大石骨料颗粒外形相一致,而加载速率较快时的试件,RCC 剪断面相对平整,且剪断面上大石粗骨料被剪断的比例较大。

(2) 碾压混凝土的峰值剪切强度随着剪切速率的增大而增大,增大幅度随着正应力的增大有减小趋势,残余剪切强度则随着剪切速率的增大略有减小,设计中特别注意这一强度特性;同一加载速率下,碾压混凝土峰值剪切强度和残余剪切强度随法向应力的增大而增大,基本成线性关系。

(3) 从剪切应力-变形关系曲线来看,随着垂直向压力的增大,RCC 初始剪切模量和峰值剪切变形增大,但在正压力恒定时,随着加载速率的变大,碾压混凝土的峰值剪切变形略有减小,初始剪切模量略有增加,不同加载速率下的剪切变形曲线形状基本相似。

(4) 在试验研究的基础上,考虑到正应力、剪切速率及层面特性的影响,提出了统一的动态剪切强度破坏准则,具有实用价值。值得注意的是,本文进

行的是碾压混凝土动态剪切试验,但试验得到的规律性同样适用于大坝常态混凝土。

参考文献:

- [1] Zhang Chuhan, Wang Guanglun, Wang Shaomin, et al. Experimental tests of rolled compacted concrete and nonlinear fracture analysis of rolled compacted concrete dams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(2): 108-115.
- [2] 王怀亮. 双向应力下碾压混凝土动态力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 847-851.
- [3] 高文, 董伟, 吴智敏, 等. 大坝全级配与湿筛二级配混凝土力学性能试验研究及统计分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 9-14.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王怀亮, 宋玉普. 多轴应力状态下混凝土的动态强度准则[J]. 哈尔滨工业大学报, 2014, 46(4): 93-97.
- [7] American Concrete Institute. Roller-compacted mass concrete. ACI manual of concrete: ACI 207.5R-99[S]. [s.l.]: [s.n.], 1999.
- [8] 中华人民共和国水利部. 水工碾压混凝土试验规程: SL48-94[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994.
- [9] 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(5): 155-160.
- [10] 王怀亮, 任玉清, 宋玉普. 基于黏塑性理论的碾压混凝土动态剪切本构模型[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 120-125.
- [11] 王怀亮. 考虑库底淤积层作用的碾压混凝土重力坝地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 60-65.
- [12] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen A S T. Effect of strain rate on concrete strength[J]. ACI Material Journal, 1995, 92(1): 37-47.
- [13] Peng J, Zhao GuoFan, Zhu Yonghong. Study of multiaxial shear strength for Roller Compacted Concrete [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(2): 114-123.
- [14] Millard S G, Molyneaux T C K, Barnett S J, et al. Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(4): 405-413.
- [15] Hashagen F, Borst R D. Enhancement of the Hoffman yield criterion with an anisotropic hardening model[J]. Computers & Structures, 2001, 79(6): 637-651.