

文章编号: 1001-4888(2024)04-0507-11

碾压混凝土原位抗剪试验及其抗剪强度破坏准则研究*

司政¹, 鲍新新¹, 段彬², 吴文博², 汤荣平³, 张会员³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西西安 710048; 2. 中国电建集团 西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065;

3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南昆明 650200)

摘要: 碾压混凝土(RCC)原位抗剪试验可以充分体现实际工程中碾压混凝土的层间结合特性。本文利用原位抗剪试验设备对4种工况下碾压混凝土试件进行现场原位试验,对比不同法向应力和层间间隔时间对试件抗剪强度的影响。结果表明:含层面碾压混凝土试块的抗剪强度随着法向正应力的增大而增大;碾压混凝土抗剪强度随层间间隔时间的增加而减小;在所有试块中,层间间隔8h且法向正应力为3MPa时,碾压混凝土抗剪强度达到最高值,且相较层间间隔72h情况下,抗剪强度增大0.83MPa。选择Weibull-过镇海全曲线模型对荷载-位移曲线进行拟合,全曲线模型与实测曲线吻合较好;在八面体强度理论的基础上,提出考虑层间间隔时间的强度破坏准则。本文研究结果可以为碾压混凝土原位抗剪本构模型及破坏准则的建立提供理论依据。

关键词: 碾压混凝土; 原位抗剪; 层间间隔; 全曲线模型; 八面体强度

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-161

0 引言

碾压混凝土(RCC)作为一种超干硬性混凝土材料,具有温控措施简单、造价低且施工进度迅速等优势^[1],因此碾压混凝土坝被广泛应用于水电工程建设中。对于碾压混凝土而言,由于其成层碾压的特点,通常会形成许多厚度为30cm的层间节理^[2-4]。碾压混凝土坝在分层施工过程中层与层之间压实不足或长时间暴露,可能会形成施工冷缝,层间结合处在水压力作用下成为大坝的薄弱部位,导致大坝强度降低,渗透性增加,从而影响大坝的稳定性^[5-7],因此,层间抗剪强度成为控制碾压混凝土坝整体稳定性的主要性能指标。

大量学者对碾压混凝土层间抗剪开展了研究工作。孔祥芝等^[8]对溶蚀作用下碾压混凝土试件的抗剪强度进行研究,得到了层面抗剪强度的衰减规律。娄亚东^[9]对不同层面处理方式的碾压混凝土进行研究,得到了层间间隔时间对碾压混凝土抗剪强度的影响规律。LIU等^[10]对不同层间间隔时间下碾压混凝土的抗剪强度进行对比,发现层间间隔时间对抗剪强度在初凝时间之前影响相对较小,在初凝和终凝时间之间影响比较明显,在终凝时间之后影响最大。王怀亮等^[11]对碾压混凝土本体和含层面试件的抗剪强度进行研究,并提出多轴剪切条件下碾压混凝土的强度破坏准则。SHEN等^[12]对不同层间间隔时间下碾压混凝土进行抗剪强度试验,得到碾压混凝土层间抗剪强度随层间间隔时间的变化规律。

* 收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879217)

通信作者: 司政(1981-),男,教授,博士生导师。研究方向为水工混凝土材料及结构应力分析。Email: sz123hlz@163.com

通过对上述文献及与碾压混凝土层间抗剪强度相关的文献进行分析,发现大部分抗剪强度参数是通过室内试验获得的,实验室试验最大限度地消除了外生变量对试验结果的影响,所以它的环境与真实环境相差甚远,从而降低了它的预测效力,而且在实验室浇筑或在试验段中钻芯取样的试件,尺寸较小,不足以充分体现实际工程中碾压混凝土的抗剪强度特性。由于室内试验存在诸多局限性,因此通过现场原位试验确定碾压混凝土层间抗剪参数,对大坝的整体稳定性进行评价十分重要^[13]。本文对含层面的碾压混凝土试件进行原位抗剪试验,分析其不同层间间隔时间和法向压应力下的变形性能和极限抗剪强度变化规律,以便为确定碾压混凝土原位抗剪本构模型及破坏准则提供理论依据。

1 试验设计

1.1 原材料

采用级配连续且粒径为5mm~20mm、20mm~40mm、40mm~80mm的碎石作为粗骨料,粗骨料特性见表1。细骨料采用级配良好的人工砂,细度模数为2.6,石粉含量19.6%。胶凝材料采用葛洲坝石门特种水泥有限公司生产的中热硅酸盐42.5水泥,重庆开州区白鹤电厂生产的F类Ⅱ级粉煤灰;三级配碾压混凝土骨料比例为小石:中石:大石=30:40:30。外加剂采用石家庄市长安育才建材有限公司生产的缓凝型高效减水剂和引气剂,引气剂用大于50℃的温水溶解为1:99的溶液,引气剂掺量以达到含气量控制要求为准。

表1 粗骨料特性

Tab.1 Coarse aggregate characteristics

粒径/mm	表观密度/(kg/m ³)	吸水率/%	含泥量/%	压碎指标/%	中径筛余率/%
5~20	2690	0.76	0.2	7.3	56
20~40	2710	0.46	0.4	—	43
40~80	—	0.27	0.1	—	53

1.2 配合比与试件设计

试验采用三级配混凝土,对配合比进行多次适配和调整,得到碾压混凝土配合比见表2。碾压混凝土拌合物性能及强度见表3。碾压工艺试验场地面积为405m²(22.5m×18m),自下而上共计碾压5层,压实厚度为30cm,总高度为1.5m(图1)。试验基于实际工程,某水利枢纽最大坝高132m,实测碾压混凝土密度为2440kg/m³,根据计算可得本文试验最大法向应力为132m×2440kg/m³×9.8N/kg≈3.15MPa,考虑到实际上坝顶截面小于坝底,试验正应力按照0~3.0MPa施加。考虑不同层间间隔时间(8h、24h、48h和72h)和不同法向正应力(0.6MPa、1.2MPa、1.8MPa、2.4MPa和3.0MPa)共20组碾压混凝土试件,每组试验取3个试件,共制作60个500mm×500mm×300mm的原位抗剪试件。

表2 试验配合比

Tab.2 Test mix ratio

设计强度等级	水胶比	材料用量/(kg/m ³)								
		水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石	减水剂	引气剂
C9020F50W2 ^{2h}	0.45	85	76	113	740	431	575	431	1.13	0.034

注:C9020表示龄期为90d,强度等级为C20;F为混凝土抗冻等级;W为混凝土抗渗等级。

表3 碾压混凝土性能及强度

Tab.3 Roller-compacted concrete performance and strength

稠度 VC值/s	含气量/%	实测密度/(kg/m ³)	拌合物工作性能	抗压强度/MPa	
				7d	28d
3.0	3.0	2440	流动性、黏聚性、保水性好	15.2	24.5

1.3 加载装置与加载方案

试验采用规范《水工碾压混凝土试验规程》(DL/T 5433—2009)^[14]中平推法原位抗剪试验加载方案,试验设备由水平加载系统、垂直反力系统和位移量测系统组成。水平加载系统主要由分离式电动油压千斤顶构成。垂直反力系统由地锚、反力架、滚轴排和手动油压千斤顶等组成。位移量测系统由测表支架、磁性表座及千分表等组成(图 2)。其中,竖向荷载与水平推力分别用型号为 QW200 手动油压千斤顶和 QF200-20b 分离式电动油压千斤顶施加。试验前,在室内按《液压千斤顶》(JJG 621—2012)^[15]的方法对千斤顶进行率定,以保证力的计量符合要求。两种千斤顶的率定结果与出厂合格证书一致,稳压器油压表的最小刻度均为 0.1MPa,对应两种千斤顶的力值分别为 5.83kN 和 3.05kN。手动油压千斤顶操作简单,一旦进入稳压状态不需要进行速率操控;电动油压千斤顶加载速度快,在操作过程中需要进行速率控制,所以本文试验结合两种油泵的优点,在实际加载过程中配合交替使用,同时位移采集周期为 1s,这样既能保证试验数据的准确性,又能大大提高试验效率。

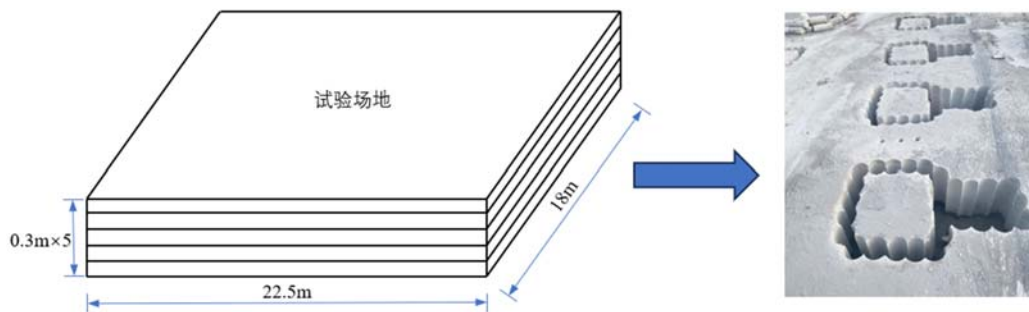


图 1 试件制备

Fig. 1 Test piece preparation

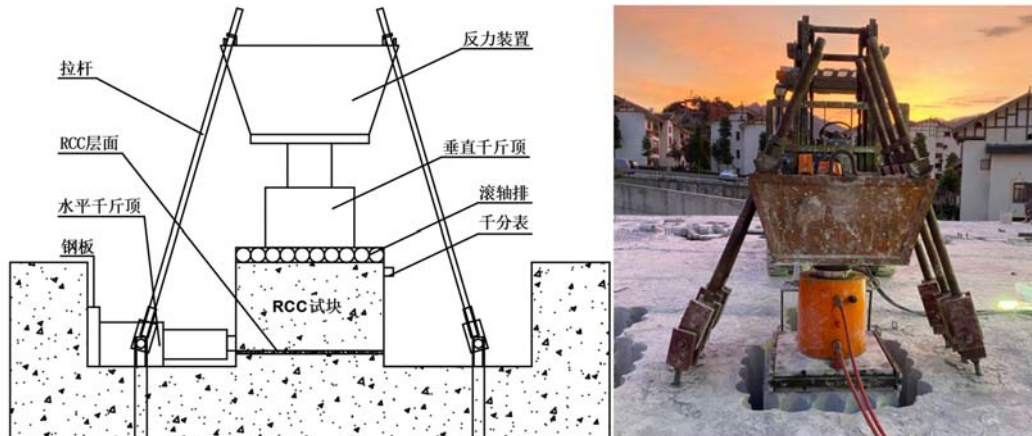


图 2 原位抗剪试验装置

Fig. 2 Diagram of the in-situ shear test device

试验正式开始后,每个试件对应一级正应力。将相应的竖向荷载分级加载到试件上,每次增加量为正应力(σ)的 20%。竖向荷载施加完毕后,即开始逐级加载水平荷载。水平荷载采用多点峰值法加载,每级荷载大小为预计破坏荷载的 10%,每 5min 加载一级。每加一次荷载,读取并记录一次剪切变形,当水平位移不断增加,而作用的水平荷载达到稳定水平值时,将水平荷载分 4 级退零,剪切试验结束。

2 碾压混凝土原位抗剪力学性能研究

2.1 试件破坏形态

由于浇筑后剪切面暴露时间较长,上层碾压混凝土与下层碾压混凝土黏结力降低,在剪切作用下,试件上下两层之间容易发生相对滑移。在不同法向压力下剪切时,碾压混凝土试件均沿着层间薄弱

面被切断,试件剪切破坏时的断裂界面非常平整、清晰,随着压应力的增大,边缘有压坏痕迹。较低正应力作用下 RCC 试块的剪切破坏形态差别不大,破坏面整体上比较平整(图 3),断面处被剪断的粗骨料比例较大,是由于试件本身存在微裂缝所致。随着正应力的增大,一些试件可能会沿垂直层面方向产生裂纹。此外,随着法向应力的增大,层间断裂界面处会产生细小的划痕。

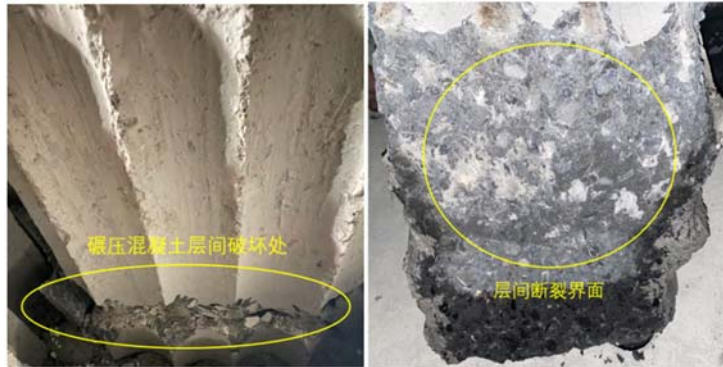


图 3 典型断面破坏图

Fig. 3 Typical cross-sectional failure diagram

2.2 变形特性

在法向荷载恒定的情况下,记录不同剪切荷载下的位移值。实测荷载-位移($F-S$)关系曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,荷载-位移曲线总体上分为上升段和下降段两个阶段。在较小剪应力下,剪切层面处于弹性阶段,荷载-位移曲线处于线性阶段;当剪切荷载增大到一定程度时,砂浆和骨料沿剪切层面出现滑移,曲线进入非线性阶段;在达到峰值荷载时,曲线表现出较强的非线性,剪切荷载骤然下降,试件出现了明显的宏观裂缝。随后,曲线进入缓慢的下降软化段,在下降段尾部荷载趋于某一稳定水平值,此时碾压混凝土层面处于剪断滑移状态。由于存在法向压应力,荷载在达到峰值点之后并没有快速降为 0,而是出现较平缓的下降段,形成了明显的分段荷载-位移曲线。这是由于碾压混凝土是逐层碾压形成的高度非均质多相复合材料,具有明显的正交各向异性特征,在垂直和平行于碾压方向上,碾压混凝土性能有很大差异,试块层间被剪断时,平行于碾压方向上首先发生剪断,并且当断裂路径穿过剪切层面时,材质疏松的大石骨料也有可能被剪断,同时一些质量较好的中石和小石骨料之间存在较强的骨料咬合作用,不会被剪断,故而形成这种分段曲线。从荷载-位移曲线可以看出碾压混凝土的层面破坏是一个不断累积的过程^[1,16]。

2.3 抗剪强度分析

抗剪强度参数是评价混凝土物理性能的关键指标,能直观反映混凝土层间的结合质量。图 5 为不同层间间隔时间和正应力下 RCC 的峰值切应力。一般碾压混凝土抗剪强度服从莫尔-库仑准则,莫尔-库仑准则可以直接测得碾压混凝土的摩擦系数和黏聚力^[17],抗剪强度 τ_p 和正应力 σ 的关系为

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

式中: μ 为摩擦系数; c 为黏聚力,MPa。

分别对 4 种层间间隔下的试验数据进行回归分析,具体表达式如下:

三级配层间间隔 8h 时, $\tau_p = 1.18\sigma + 1.37$; 三级配层间间隔 24h 时, $\tau_p = 1.12\sigma + 1.30$; 三级配层间间隔 48h 时, $\tau_p = 1.08\sigma + 1.14$; 三级配层间间隔 72h 时, $\tau_p = 1.05\sigma + 0.98$ 。

由图 6 可以看出,试验结果基本在各自回归直线附近分布,且相关度均在 0.98 以上。由 4 种层间间隔时间下碾压混凝土莫尔-库仑准则表达式可以看出,试件抗剪强度随层间间隔时间的增加而减小,同时黏聚力和摩擦系数的减小也验证了这一结论。

从图 4~图 6 可以看出,碾压混凝土试件的抗剪强度有以下特点:在不同工况下,碾压混凝土峰值抗剪强度和残余抗剪强度均随法向正应力的增大而增大;碾压混凝土抗剪强度随时间间隔跨度的增大呈减小趋势,这是因为时间间隔越长,碾压混凝土胶凝材料的水化反应越充分,层面处缺陷越多,因此整体黏结性降低。所有试块类型中,层间间隔 8h 且法向正应力为 3MPa 时,碾压混凝土抗剪强度达到最

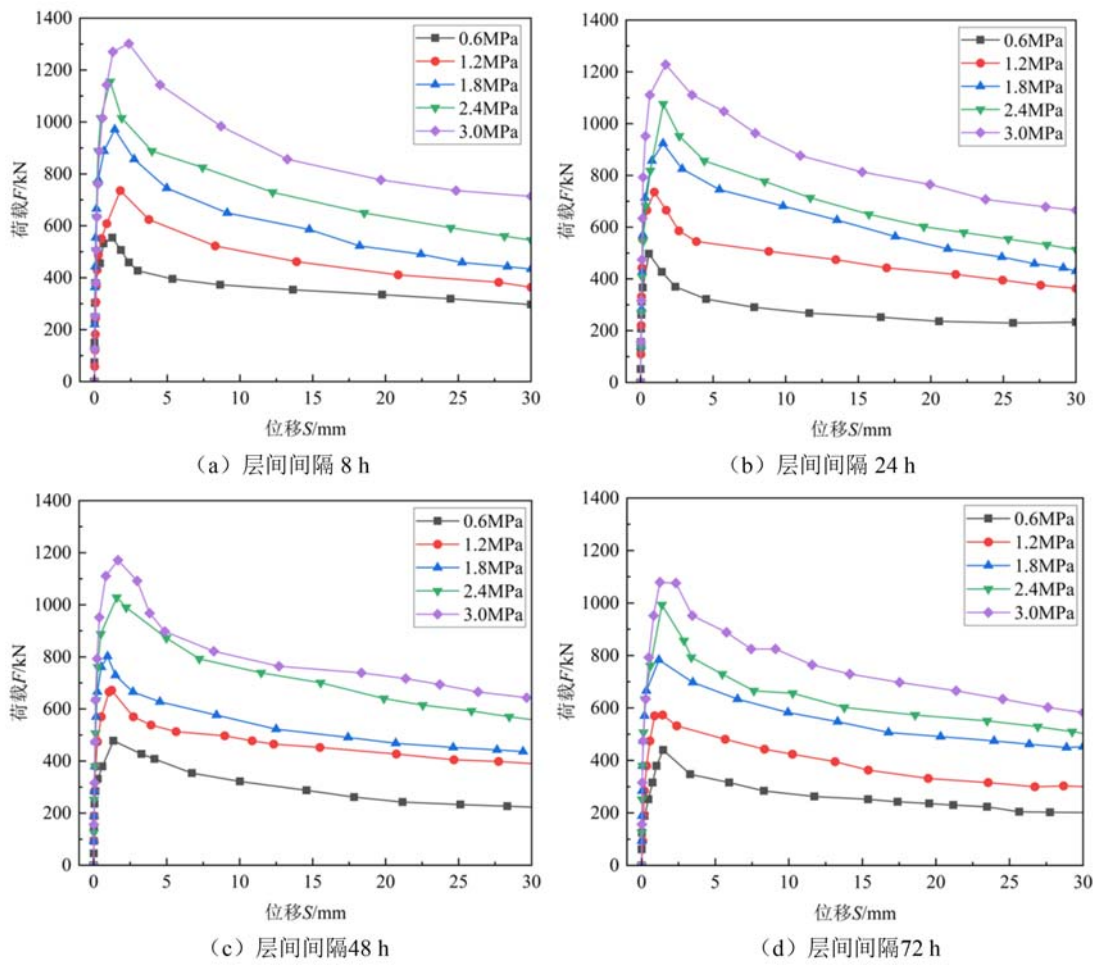


图 4 剪切荷载-位移实测曲线

Fig. 4 Measured curve of shear load-displacement measured curve

高值, 相较层间间隔 72h 情况下, 抗剪强度增加 0.83MPa。

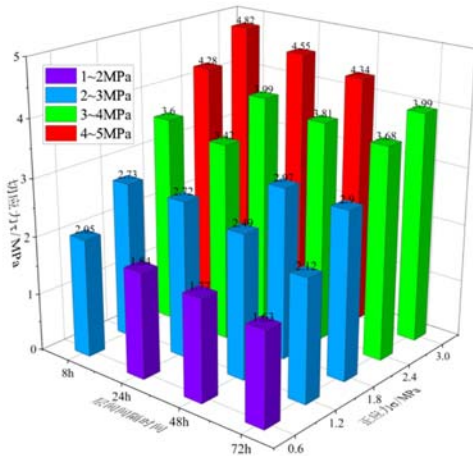


图 5 不同层间间隔时间和正应力下 RCC 的峰值切应力

Fig. 5 Peak shear stress of RCC under different interlayer interval times and normal stress

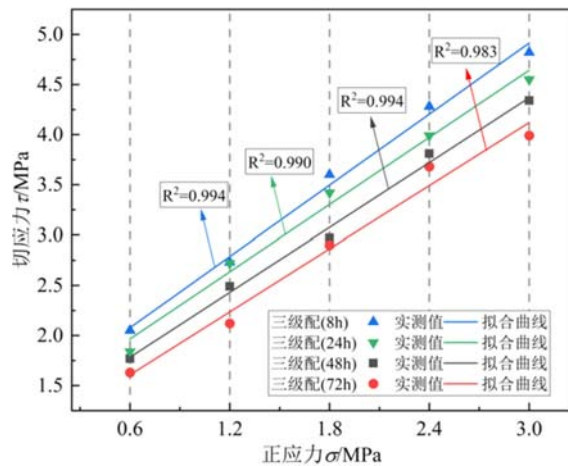


图 6 不同工况下切应力与垂直正应力的关系

Fig. 6 Relationship between shear strength and vertical normal stress under different working conditions

3 原位剪切全曲线模型及强度破坏准则研究

3.1 全曲线模型

现场原位试验得到的碾压混凝土剪切荷载-位移关系比较准确,但成本较高。建立合理的模型来预测碾压混凝土的荷载-位移特性,不仅可以降低试验成本,提高研究效率,而且可以为复合应力下碾压混凝土本构模型的建立提供依据^[18-19]。

由连续损伤力学中等效应变假说可知^[20]:在压-剪共同作用下,碾压混凝土的损伤关系为

$$F = (1 - D_\tau) G_0 S \quad (2)$$

式中: F 为剪切荷载; D_τ 为损伤变量; G_0 为初始变形模量,其值取荷载-位移曲线峰值剪切荷载 35%~45%切线斜率; S 为荷载下碾压混凝土任一点的总变形。

Weibull 损伤模型^[21]能够较好地描述混凝土荷载-位移曲线上升段的损伤情况,但峰值强度后碾压混凝土存在残余应力阶段,由于正应力的存在,破坏面上下相互滑移时,存在一定摩擦力,Weibull 损伤模型对峰后荷载的描述具有局限性。杨海峰等^[22]对钢纤维混凝土压-剪复合性能及损伤本构关系进行研究时,以峰值剪切荷载作为分界点,前后段分别采用 Weibull 统计分布模型和过镇海损伤模型^[23]拟合荷载-位移曲线,这种模型被称为 Weibull-过镇海模型。本文选取 Weibull-过镇海模型对得到的碾压混凝土荷载-位移曲线进行拟合分析,表达式为

$$D_\tau = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{1}{m} \left(\frac{S}{S_{pk}}\right)^m\right], & \frac{S}{S_{pk}} \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_0}{a \left[\left(\frac{S}{S_{pk}} - 1\right)^b\right] + \frac{S}{S_{pk}}}, & \frac{S}{S_{pk}} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得到荷载-位移全曲线模型为

$$F = \begin{cases} S G_0 \exp\left[-\frac{1}{m} \left(\frac{S}{S_{pk}}\right)^m\right], & \frac{S}{S_{pk}} \leq 1 \\ \frac{S G_0 \rho_0}{a \left[\left(\frac{S}{S_{pk}} - 1\right)^b\right] + \frac{S}{S_{pk}}}, & \frac{S}{S_{pk}} > 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 和 ρ_0 为材料强度参数, $m=1/\ln(G_0 S_{pk}/F_{pk})$, $\rho_0 = F_{pk}/G_0 S_{pk}$; a 和 b 为下降段的形状控制参数; F_{pk} 为峰值剪切荷载; S_{pk} 为峰值剪切荷载下碾压混凝土任一点的总变形。

采用式(4)对荷载-位移曲线进行分段拟合,拟合结果如图 7 所示。全曲线模型与试验数据吻合度良好。材料参数 m 、 ρ_0 和参数 a 、 b 取值见表 4。

表 4 参数取值

Tab. 4 The value of the parameter

试件组	正应力/ MPa	m	ρ_0	a	b	试件组	正应力/ MPa	m	ρ_0	a	b
三级配 层间间隔 8h	0.6	0.383	0.0735	0.407	1.218	三级配 层间间隔 24h	0.6	0.631	0.2049	0.282	1.382
	1.2	0.573	0.1747	0.296	1.453		1.2	0.527	0.1502	0.268	1.365
	1.8	0.475	0.1217	0.238	1.550		1.8	0.563	0.1692	0.152	1.682
	2.4	0.732	0.2553	0.247	1.448		2.4	0.613	0.1957	0.261	1.489
	3.0	0.510	0.1405	0.302	1.457		3.0	0.752	0.2646	0.098	1.702
三级配 层间间隔 48h	0.6	0.395	0.0796	0.168	1.655	三级配 层间间隔 72h	0.6	1.414	0.4931	0.355	1.404
	1.2	0.446	0.1060	0.255	1.323		1.2	0.628	0.2035	0.122	1.699
	1.8	0.562	0.1685	0.224	1.389		1.8	0.483	0.1263	0.124	1.578
	2.4	0.641	0.2100	0.134	1.607		2.4	0.544	0.1590	0.329	1.359
	3.0	0.503	0.1371	0.312	1.350		3.0	0.751	0.2641	0.118	1.632

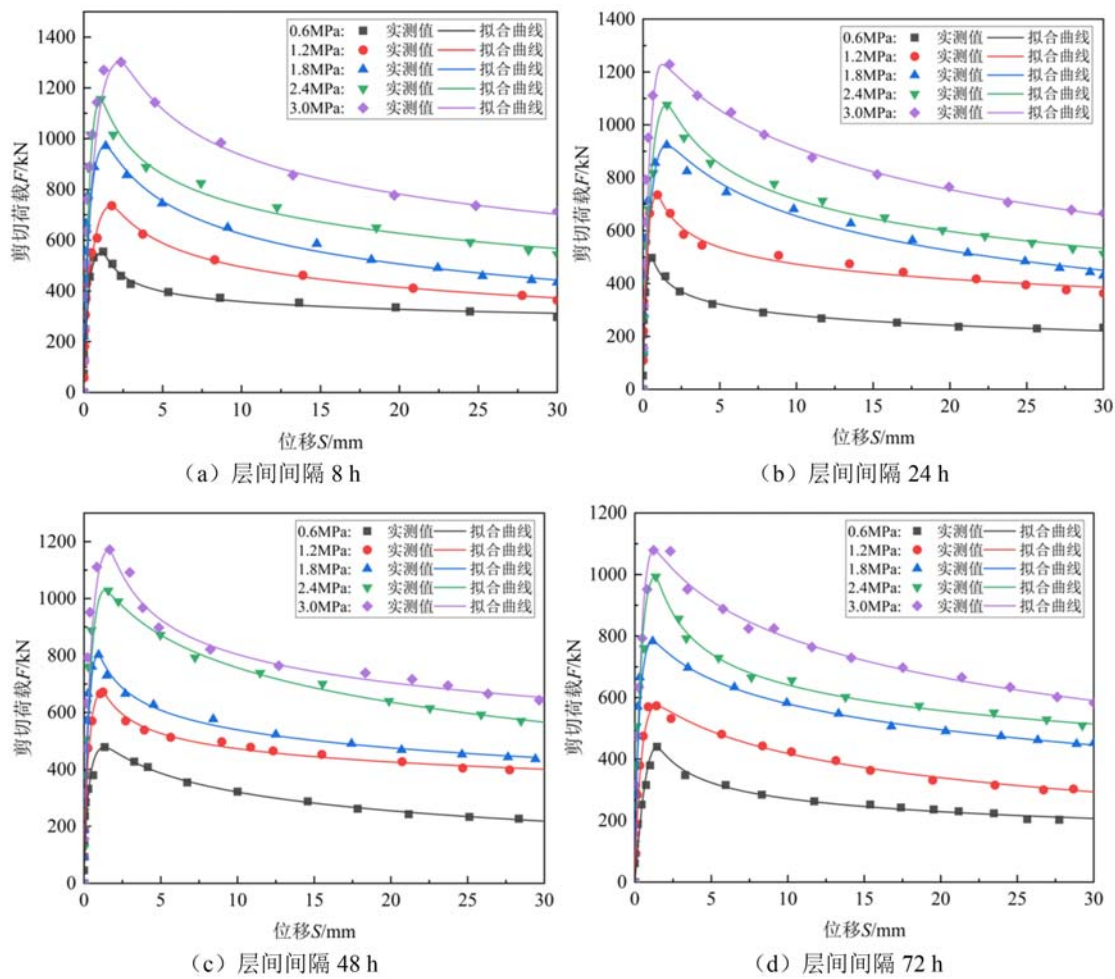


图 7 剪切荷载-位移拟合曲线

Fig. 7 The fitting curve of shear load-displacement

对参数 a 、 b 采用最小二乘法进行拟合, 得到不同层间间隔时间下碾压混凝土参数 a 、 b 随正应力 σ 大致呈三次抛物线关系, 不同层间间隔时间和不同正应力下对应的荷载-位移曲线中形状控制系数 a 、 b 可由表 5 公式计算得到。

表 5 参数与正应力关系

Tab. 5 The relationship between parameters and normal stress

层间间隔时间	参数 a 与正应力 σ 的关系	参数 b 与正应力 σ 关系
8h	$a=0.59-0.35\sigma+0.09\sigma^2-0.01\sigma^3$	$b=0.61+1.36\sigma-0.65\sigma^2-0.10\sigma^3$
24h	$a=0.53-0.58\sigma+0.34\sigma^2-0.07\sigma^3$	$b=1.17+0.40\sigma-0.16\sigma^2-0.03\sigma^3$
48h	$a=-0.31+1.20\sigma-0.78\sigma^2-0.15\sigma^3$	$b=2.94-3.13\sigma+1.87\sigma^2-0.34\sigma^3$
72h	$a=1.32-2.35\sigma+1.40\sigma^2-0.25\sigma^3$	$b=0.16+3.10\sigma-1.92\sigma^2-0.35\sigma^3$

3.2 基于八面体空间的强度破坏准则

八面体强度理论是一种表征复杂应力状态的简单而实用的理论, 该理论与经典强度理论和其他一些力学模型建立有机联系, 且此模型表达式较为简单, 并能将空间问题转化为平面问题。根据弹性理论, 碾压混凝土在压-剪共同作用时, 其压应力 σ 和切应力 τ 可以转化为 3 个主应力^[24], 见式(5), 主应力单元示意图如图 8(a) 所示。

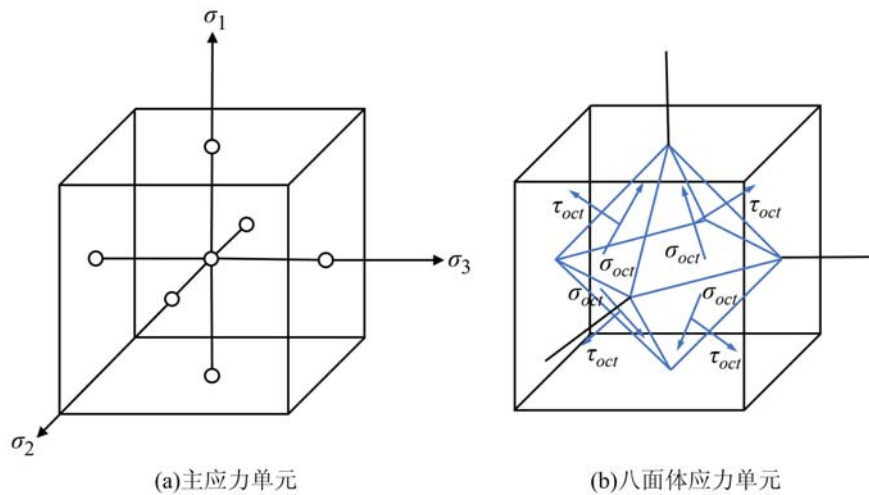


图 8 八面体强度理论示意图

Fig. 8 Schematic diagram of octahedral strength theory

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2} \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 3 个主应力。

针对组合应力下的混凝土, BRESLER 等^[25]提出了基于八面体空间的强度破坏准则模型, 该模型可以很好地表达混凝土在复杂应力下的破坏规律, 在八面体空间下, 混凝土的正应力和切应力可以由式(6)计算得到, 八面体应力单元示意图如图 8(b)所示。

$$\begin{cases} \sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ \tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_{oct} 、 τ_{oct} 分别为八面体空间下碾压混凝土所受的压应力与切应力。

将图 5 中的数据代入式(5)、式(6), 可以计算出试件在八面体空间下的正应力 σ_{oct} 和切应力 τ_{oct} 。

根据相关文献^[17], 基于八面体空间的混凝土压-剪破坏准则模型可用简洁的线性函数表示:

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = A + B \cdot \frac{\sigma_{oct}}{f_c} \quad (7)$$

式中: f_c 为碾压混凝土抗压强度; A 和 B 为两个拟合参数。

将试验数据代入式(7), 通过拟合可得到压剪复合作用下碾压混凝土的抗剪破坏准则(图 9)。采用八面体强度破坏准则对试验数据进行拟合时, 发现不同层间间隔下的参数 A 相差不大, 为了进一步研究层间间隔时间对峰值应力的影响, 将参数 A 固定为平均值 0.0382, 用最小二乘法得到不同层间间隔与参数 B 的关系如图 10 所示, 层间间隔时间与参数 B 大致成抛物线关系, 其表达式为

$$B = -3.237 + 0.001h - 0.00073h^2 \quad (8)$$

将式(8)和参数 A 代入式(7), 可得到碾压混凝土原位抗剪考虑层间间隔时间的八面体应力空间破坏准则模型:

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = 0.0382 + (-3.237 + 0.001h - 0.00073h^2) \cdot \frac{\sigma_{oct}}{f_c} \quad (9)$$

该模型在八面体强度理论的基础上, 考虑了时间间隔对碾压混凝土层间抗剪强度的影响, 为进一步研究碾压混凝土层间间隔时间与抗剪强度的关系提供了理论依据。

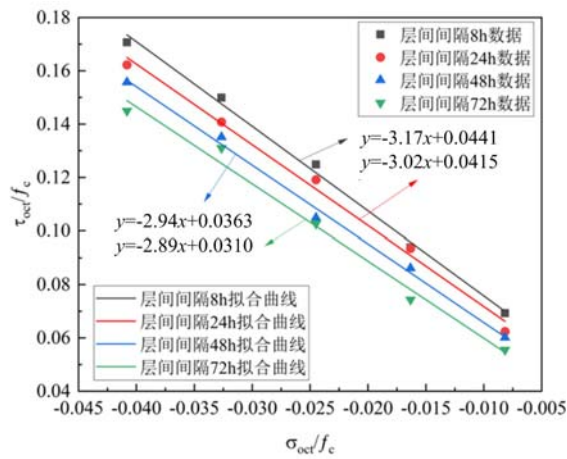


图 9 碾压混凝土抗剪八面体强度理论破坏准则
Fig. 9 Diagram of the theoretical failure criterion of shear octahedral strength of RCC

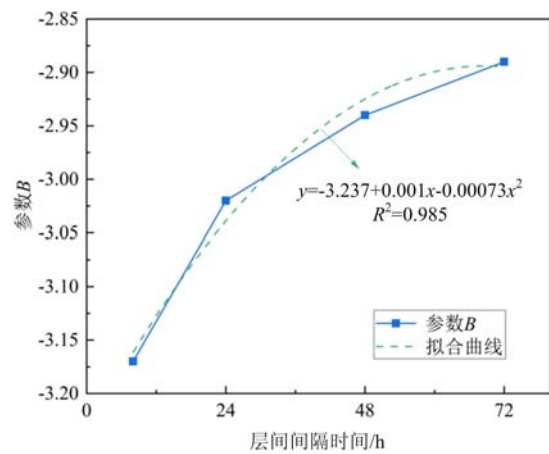


图 10 层间间隔时间与参数 B 关系曲线
Fig. 10 Relation of interlayer interval time and parameter B

4 结论

碾压混凝土具有成层碾压的特点,研究碾压混凝土层间抗剪强度的变化规律不仅可以用于分析坝体的抗滑稳定性,还有利于揭示碾压混凝土层面的剪切破坏机理,建立精确实用的本构模型和破坏准则。本文以正应力和层间间隔时间为变化参数,对含层面碾压混凝土的抗剪特性进行研究,得到以下结论:

- (1) 碾压混凝土峰值抗剪强度和残余抗剪强度随法向正应力的增大而增大,基本呈线性关系;随层间间隔时间的增大,碾压混凝土峰值抗剪强度降低。
- (2) 从荷载-位移关系曲线来看,在正应力恒定时,不同层间间隔时间下的剪切变形曲线形状基本相似;对荷载-位移曲线进行拟合时,发现 Weibull-过镇海全曲线模型与原位抗剪实测曲线吻合较好。
- (3) 在试验研究的基础上,提出考虑层间间隔时间的八面体强度理论破坏准则模型,该模型可以对不同层间间隔时间下碾压混凝土的抗剪强度进行预测。

参考文献:

[1] 王怀亮,田平. 动态压剪作用下碾压混凝土强度和变形研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2):18-24 (WANG Huiliang, TIAN Ping. Study on strength and deformation of compacted concrete under dynamic compression shear[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(2): 18-24 (in Chinese))

[2] 覃茜,徐千军. 成层混凝土的剪切强度和 II 型断裂韧度[J]. 工程力学, 2019, 36(9):188-196 (QIN Xi, XU Qianjun. Shear strength and type II fracture toughness of laminated concrete[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9):188-196 (in Chinese))

[3] KELES O F, AKPINAR M V. Strength properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) under different curing methods[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324:126530.

[4] NIU X J, LI Q B, LIU W J, et al. Effects of ambient temperature, relative humidity and wind speed on interlayer properties of dam concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260(12):119791.

[5] LUO D N, LU S H, HU C, et al. Experimental and numerical investigation on interlayer fracture process of roller compacted concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 342:127998.

[6] TSILOULOU Q T, LAMPROPOULOS A P, DRITSOS S E. Experimental investigation of interface behaviour of RC beams strengthened with concrete layers[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:50-59.

[7] QIAN P, XU Q J. Experimental investigation on properties of interface between concrete layers[J]. Construction

- and Building Materials, 2018, 174 (20):120–129.
- [8] 孔祥芝, 陈改新, 李曙光, 等. 渗漏溶蚀作用下碾压混凝土层(缝)面抗剪强度衰减规律试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9):1082–1088 (KONG Xiangzhi, CHEN Gaixin, LI Shuguang, et al. Experimental study on attenuation law of shear strength of compacted concrete layer (joint) surface under leakage and dissolution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9):1082–1088 (in Chinese))
- [9] 娄亚东. 碾压混凝土层面处理对层间结合性能影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015 (LOU Yadong. Study on the influence of roller-compacted concrete layer treatment on interlayer bonding performance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese))
- [10] LIU G H, LU W B, LOU Y D, et al. Interlayer shear strength of roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166:647–656.
- [11] 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, 1109 (WANG Huailiang, SONG Yupu. Experimental study on shear strength of roller-compacted concrete under multiaxial stress conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9):1095–1101, 1109 (in Chinese)).
- [12] SHEN M X, ZHAO Y, BI J, et al. In situ experimental study on mechanical properties of interlayer in roller compacted concrete (RCC) dam[J]. Construction and Building Materials, 2023, 379:131268.
- [13] 魏博文, 徐镇凯, 徐宝松. 碾压混凝土坝层面影响带黏弹塑性流变模型[J]. 水利学报, 2012, 43(9):1097–1102 (WEI Bowen, XU Zhenkai, XU Baosong. Viscoelastic-plastic rheological model of influence zone at the level of compacted concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9):1097–1102 (in Chinese))
- [14] 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 (DL/T 5433–2009, Test code for hydraulic roller compacted concrete[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009 (in Chinese))
- [15] JIG 621–2012, 液压千斤顶[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012 (JIG 621–2012, Hydraulic jacks[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (in Chinese))
- [16] 梁辉, 彭刚, 田为, 等. 循环孔隙水压下混凝土常规三轴压缩损伤破坏特性分析[J]. 实验力学, 2015, 30(6):802–809 (LIANG Hui, PENG Gang, TIAN Wei, et al. Analysis of failure characteristics of conventional triaxial compression damage of concrete under circulating pore water pressure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):802–809 (in Chinese))
- [17] YU Z P, TANG R, LI F R, et al. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio[J]. Construction and Building Materials, 2021, 288:123105.
- [18] DU X Q, SI Z, LI Y L, et al. Dynamic compressive behavior of freeze-thaw damaged roller-compacted concrete and establishment of constitutive model[J]. Construction and Building Materials, 2023, 365:130095.
- [19] 贾彬, 陶俊林, 王汝恒, 等. 混凝土高温动态力学特性与本构方程[J]. 实验力学, 2013, 28(6):723–731 (JIA Bin, TAO Junlin, WANG Ruheng, et al. High temperature dynamic mechanical properties and constitutive equations of concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(6):723–731 (in Chinese))
- [20] 龙广成, 刘赫, 马昆林, 等. 考虑冻融作用的混凝土单轴压缩损伤本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8):1884–1892 (LONG Guangcheng, LIU He, MA Kunlin, et al. Uniaxial compression damage constitutive model of concrete considering freeze-thaw[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(8):1884–1892 (in Chinese))
- [21] 张社荣, 宋冉, 王超, 等. 碾压混凝土的动态力学特性分析及损伤演化本构模型建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1):130–138 (ZHANG Sherong, SONG Ran, WANG Chao, et al. Analysis of dynamic mechanical characteristics of roller-compacted concrete and establishment of damage evolution constitutive model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1):130–138 (in Chinese))
- [22] 杨海峰, 杨超, 蒋毅, 等. 钢纤维混凝土压-剪复合性能及损伤本构关系[J]. 工程力学, 2023, 40(4):144–151 (YANG Haifeng, YANG Chao, JIANG Yi, et al. Compressive-shear composite properties and damage constitutive relationship of steel fiber concrete[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(4):144–151 (in Chinese))
- [23] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982(1):1–12 (GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. Experimental study on stress-strain full curve of concrete[J]. Journal of Building Structures, 1982(1):1–12 (in Chinese))

- [24] 孙立国, 韩旭, 谢发祥. 疏浚砂混凝土的压剪性能和破坏准则的试验研究[J]. 水运工程, 2022(12):48—54 (SUN Ligu, HAN Xu, XIE Faxiang. Experimental study on compression shear performance and failure criteria of dredged sand concrete[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(12):48—54 (in Chinese))
- [25] BRESKLER B, PISTER K S. Strength of concrete under combined stresses[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1958, 55(9):321—345.

Study on in-situ shear test of roller-compacted concrete and its shear strength failure criterion

SI Zheng¹, BAO Xinxin¹, DUAN Bin², WU Wenbo², TANG Rongping³, ZHANG Huiyuan³

(1. Institute of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shannxi, China;

2. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shannxi, China;

3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650200, Yunnan, China)

Abstract: The in-situ shear test of roller-compacted concrete is a reliable method for evaluating the shear strength characteristics of this type of concrete in real-world engineering applications. This study conducted in-situ tests on roller-compacted concrete specimens under four different working conditions using specialized equipment for shear test. The aim was to compare the shear characteristics of the specimens under varying levels of compressive stress and interlaminar interval time. The test results were used to generate load-displacement curves, which were then fitted using the Weibull-GUO Zhenhai full curve model. The ultimate shear strength was determined using the octahedral strength failure criterion. The findings indicate that the shear strength of the concrete test blocks with layers increases as the normal positive stress increases. Conversely, the shear strength of compacted concrete decreases with the increase of interlayer interval time. Among all the test blocks, the highest shear strength of roller-compacted concrete was observed when the interlayer interval time was 8 hours and the normal stress was 3MPa. This shear strength value was 0.83MPa higher than that observed at an interlayer interval time of 72 hours. The load-displacement curve was well-fitted by the Weibull-GUO Zhenhai full curve model, demonstrating good agreement between the model and the measured curves. Additionally, a strength failure criterion considering the interval time between layers was proposed based on the octahedral strength theory. These results provide a necessary theoretical foundation for determining the in-situ shear constitutive model and failure criterion of roller-compacted concrete.

Keywords: roller-compacted concrete; in-situ shear resistance; interlayer spacing; full curve model; octahedral strength