

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.06.020

新老碾压混凝土粘结强度的影响因素分析

吴冠宇¹,董政良²,余志坚²,郑刚峰³,张晓飞²

(1. 陕西省水利水电工程咨询中心,陕西 西安 710109;

2. 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;

3. 浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310000)

摘要: 为了探究影响新老碾压混凝土粘结强度的因素,以新老混凝土为研究对象,采用标准的混凝土试块边长为150 mm立方体试件,强度等级分别为C20、C30、C40的新碾压混凝土和强度等级为C30的老碾压混凝土试件,以新老碾压混凝土所使用水泥净浆及不同掺比的固结剂(HEC)作为界面剂,对试件进行劈拉试验,得出粘结强度随新老碾压混凝土强度等级及HEC界面剂掺量变化的规律,并且建立新老碾压混凝土粘结模型,对模型施加一定的荷载进行计算,以试验数据为基准与模拟仿真值进行对比验证。结果表明:在一定范围内新老混凝土粘结劈拉强度随着新混凝土强度的增大而增大,但增大的程度不明显,而随着HEC界面剂掺量的增加,其粘结强度逐渐增大,但过大的HEC界面剂掺量反而会使粘结强度降低:40% > 50% > 30% > 20% > 10% > 水泥净浆。

关键词: 碾压混凝土(RCC); 粘结强度; 水泥净浆; 劈拉试验; HEC界面剂; 数值模拟

中图分类号: TV698.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0136-07

Influencing Factors of Bond Strength of New and Old RCC

WU Guanyu¹, DONG Zhengliang², YU Zhijian², ZHENG Gangfeng³, ZHANG Xiaofei²

(1. Shaanxi Water Conservancy and Hydropower Engineering Consulting Center, Xi'an, Shaanxi 710109, China;

2. School of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Zhejiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: The bonding quality of concrete surface is the key of engineering repair and reinforcement, which determines the success or failure of engineering repair and reinforcement. In order to explore the factors affecting the bond strength of new and old RCC, 150mm cube specimens were designed with new and old concrete as the research object. The new RCC specimens with strength grades of C20, C30 and C40 and the old RCC specimens with strength grades of C30, respectively, and the cement paste and mixing ratio used for new and old RCC were as follows: 10%, 20%, 30%, 40% HEC reagent was used as the interface agent, and the splitting test was carried out on the specimen. The law of bond strength change with the strength grade of new RCC and the content of HEC interface agent was obtained. In addition, the bond model of new and old RCC was established, and a certain load was applied to the model for calculation. The test data is compared with the simulation value. The results show that the bond splitting tensile strength of new and old concrete increases with the increase of new concrete strength, but the degree of increase is not obvious, and with the increase of HEC interfacial agent content, the bond strength increases gradually, however, excessive amount of HEC interfacial agent will reduce the bonding strength: 40% > 50% > 30% > 20% > 10% > cement paste.

Keywords: roller compacted concrete(RCC); bond strength; cement paste; splitting test; HEC interface agent; numerical simulation

收稿日期:2023-05-06

修稿日期:2023-06-11

基金项目:国家自然科学基金(51479168);陕西省水利厅科技计划项目(2020slkj-12)

作者简介:吴冠宇(1973—),男,高级工程师,主要从事水利工程施工管理工作。E-mail:594846702@qq.com

通讯作者:张晓飞(1978—),男,教授,主要从事水工结构应力分析方面的研究工作。E-mail:zhangxiaofei_lgd@163.com

混凝土坝裂缝、坑槽等问题频繁出现,这些问题的存在会大大降低结构的安全性和耐久性^[1],从而大幅缩短混凝土工程的使用年限。国家政府每年投入大量的资金对存在问题的混凝土工程进行修补和加固,混凝土结合面是加固维修中十分重要的环节^[2]。通常来说,老碾压混凝土是指已经超过 28 d 龄期的混凝土,老混凝土一般已经达到终凝,新混凝土是指浇筑在老混凝土上的混凝土,是一个相对的概念。新老混凝土的粘结面是一个质量相对较差的薄弱面,它使得混凝土整体的力学性能均有所下降。其结合面的粘结性能决定着工程修补加固的成败,因此整个坝工界对这个问题十分关注^[3]。实际上,混凝土表面粘结质量是当前工程修补加固的关键,是能否使破损的工程重新恢复功能并能持续安全运行的重要基础,界面剂、混凝土设计强度以及粘结面的粗糙程度都是影响粘结性能的主要因素^[4]。柴敏等^[5]将测试新老混凝土粘结强度的方法进行了总结:有劈拉强度试验法、粘结抗裂强度试验法、剪切强度试验法和抗折强度试验法等。吴吉昊等^[6]发现当需要提高新老混凝土的早期剪切和劈拉强度时可以使用硅灰替代水泥基灌浆作为界面剂。曹宏亮^[7]通过在水泥浆中掺入粉煤灰用作界面剂对新老混凝土粘结试件开展劈裂抗拉试验,发现其可以提升粘结面的粘结强度。张振超等^[8]使用聚丙烯纤维丙烯酸溶液等制成聚合物砂浆用作界面剂,通过劈拉实验发现聚合物砂浆可以提升粘结强度。张建仁等^[9]认为新混凝土的浇筑方向会对新老混凝土界面粘结抗剪强度产生一定的影响。Huang Dunwen 等^[10]发现新混凝土的强度等级会影响新老混凝土粘结面的抗剪强度。张静^[11]试验发现水泥净浆可以提高新老混凝土的劈裂抗拉强度,添加 302 界面剂后新老混凝土抗折抗拉强度明显增加。金宇松^[12]运用 Ansys 软件对新老混凝土粘结进行分析,通过模型验证了界面剂的种类会影响应力。

现有的大多数试验都是针对普通硅酸盐混凝土

土,缺乏对其他类型混凝土的研究,正因如此,研究老碾压混凝土面-界面剂-新碾压混凝土面的耦联粘结机制是非常有必要的。本试验以不同掺比的一种高强度高耐水性的无机胶凝材料(High Strength and Water StabilityEarth Consolidator, 以下简称为 HEC)界面剂为例,研究不同强度等级的新浇筑碾压混凝土以及不同掺比的 HEC 界面剂对新老混凝土粘结强度的影响。首先进行新老碾压混凝土劈拉试验,然后采用 ABAQUS 有限元软件建立新老碾压混凝土粘结模型,以试验数据为基准,并与模拟仿真值进行对比验证,得出新浇筑混凝土强度等级以及掺有 HEC 试剂对新老碾压混凝土粘结强度的提升规律,并提出粘结强度的合适掺比。

1 试验材料与方法

1.1 材料

本次实验设计边长为 150 mm 的立方体新老碾压混凝土试件 7 组,每组有体积同等的立方体试件 3 个,试件共计 21 个,采用原材料有减水剂、水、硅酸盐水泥、粉煤灰、中砂细骨料、二级配铜川碎石粗骨料以及 HEC 界面剂。水选用普通生活用水,在选择水泥的时候,考虑工程的一般性,选用比较常见的混凝土,因此本次试验选择的水泥为普通硅酸盐水泥,型号为 P. O42.5,其基本参数见表 1。粉煤灰采用的是西安宏源生产的 II 级粉煤灰。试块中采用周至县所出产的中砂细骨料,其细度模数可达 2.5,含泥量低于 2.0%,同时具有均匀的级配。本次碾压混凝土使用粗骨料最大的粒径为 4 cm,为铜川碎石,二级配。本试件采用的外加剂是西安宏达生产的 JC-04 萘系高效减水剂,它可以改善拌合物的粘聚性、抗离析性,它对混凝土影响性能见表 2。界面剂主要采用的是 HEC 固结剂。并且与水泥净浆之间按照一定的比例来配比掺和,新老碾压混凝土的配合比例如表 3 所示^[13-14]。7 组试件分类如表 4 所示。

表 1 普通硅酸盐水泥基本参数

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		烧失量 /%	三氧化硫 /%	氧化镁 /%	氯离子 /%	细度 /(m ² ·kg ⁻¹)
	3 d	28 d	3 d	28 d					
42.5	≥17	≥42.5	≥3.5	≥6.5	≤5.0	≤3.5	≤5 ^a	≤0.06 ^c	≥300

表 2 JC-04 萘系高效减水剂对混凝土影响性能表

减水率 /%	泌水率比 /%	含气量 /%	凝结时间差/min		抗压强度比/%				对钢筋 腐蚀作用
			初凝	终凝	1 d	3 d	7 d	28 d	
≥15	≤90	≤3.0	-90 ~ +120	-90 ~ +120	≥145	≥140	≥130	≥120	无腐蚀

表 3 不同强度等级下的碾压混凝土配合比例

碾压混凝土 强度等级	单位: kg/m ³				
	水	水泥	粉煤灰	砂子	粗骨料
C20	143.0	120.0	99.0	869.0	1441.0
C30	143.0	154.0	110.0	847.0	1452.0
C40	143.0	198.0	110.0	780.0	1485.0

表 4 7 组试验试件分类

组别	界面剂种类
第 1 组	基准试件
第 2 组	水泥净浆
第 3 组	HEC(10%) + 水泥净浆
第 4 组	HEC(20%) + 水泥净浆
第 5 组	HEC(30%) + 水泥净浆
第 6 组	HEC(40%) + 水泥净浆
第 7 组	HEC(50%) + 水泥净浆

1.2 试件的成型与处理

取料拌和后将混凝土泥浆倒入一半进磨具,振捣养护后形成老碾压混凝土,然后涂抹界面剂,再浇筑新碾压混凝土,如图 1 所示。由于试验的自变量为新碾压混凝土的等级以及 HEC 界面剂的掺量,所以需要将其影响粘结强度的因素排除。首先需要对试件的粘结面进行凿毛处理以提升其粗糙度,再按照实验要求在新老混凝土结合面处涂刷界面剂,而界面剂的厚度一般为 2 mm~4 mm,因此选取 3 mm 作为本试验的涂刷厚度。新碾压混凝土浇筑方向,同样会影响其粘结强度。查阅文献[15-17]可知:浇筑方式与新混凝土本身的重力方向所形成的角度越小,粘结强度越好。所以在本试验中新碾压混凝土的浇筑方式为水平浇筑。



图 1 新碾压混凝土试样

1.3 劈拉实验

试验的机器型号为 WAW-3000C,按照《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)操作试验。该试验机中油源液压系统的主要构成包括了油泵、电机、阀块、伺服阀、电控柜等。计算机测控系统的构成涵盖了传感器、控制器与微机。该系统将计算机作为核心平台,借助于智能数字控制器来对试验机进行智能化控制。控制器还能传感设备提供高精度的电压,同时还能确保检测结果的精准性。电器控制系统中提供了诸多保护模块,譬如过流与过压保护,此外还提供了在试验操作过程中互锁保护,这样就能有效提升试验的安全性,同时也能增强控制系统的使用年限,有效提升了试验台的工作稳定性。

本次所选的测控软件系统可以对速度、参数、试验力值等指标进行相应的调控,可以按照具体的试验要求对本次的劈拉试验进行动态调控,同时还能按照用户需求对试验过程进行编制,对诸多步骤进行设定,进而开展不同类型的力学试验。最后可以结合数据分析结果输出相应结果,并得出相应的数据报表与试验报告。

控制万能机以 0.05 MPa/s 的速度对试件加载,如果有较为清脆的断裂声传出,看到试验力曲线发生突变,则可以确定试件达到了断裂效果。劈裂试验见图 2。

观察试件断裂面可知:无论使用多少掺比的 HEC 界面剂,多高强度的新混凝土,试件劈裂位置都处于混凝土粘结位置,表明若粘结面没有骨料掺入的话,那么新老混凝土样件在受压之下粘结面就是其薄弱面。仔细对比各新老混凝土的粘结面发现,其粘结面处只有一些新混凝土和老混凝土的水泥浆体紧密附着,没有在碎屑中发现有粗骨料,同时其粘结面上的水泥浆体越多,试件的劈拉强度越大。

1.4 结果与分析

本试验所需材料为不同掺量比例(50%、40%、30%、20%、10%、0%)的 HEC 界面剂以及不同等级(C20、C30、C40)的新碾压混凝土,将两种变量影响下的劈拉强度与基准混凝土强度进行对比,同时引入相对强度 α 来表示。其劈拉强度平均值及相对强度 α 见表 5,关系图见图 3。

从上述劈拉实验发现:C20 的试验混凝土的基准试验劈裂抗拉强度值为 2.432 MPa,C30 的为 3.665 MPa,C40 则为 4.412 MPa。具体公式如式(1)所示:

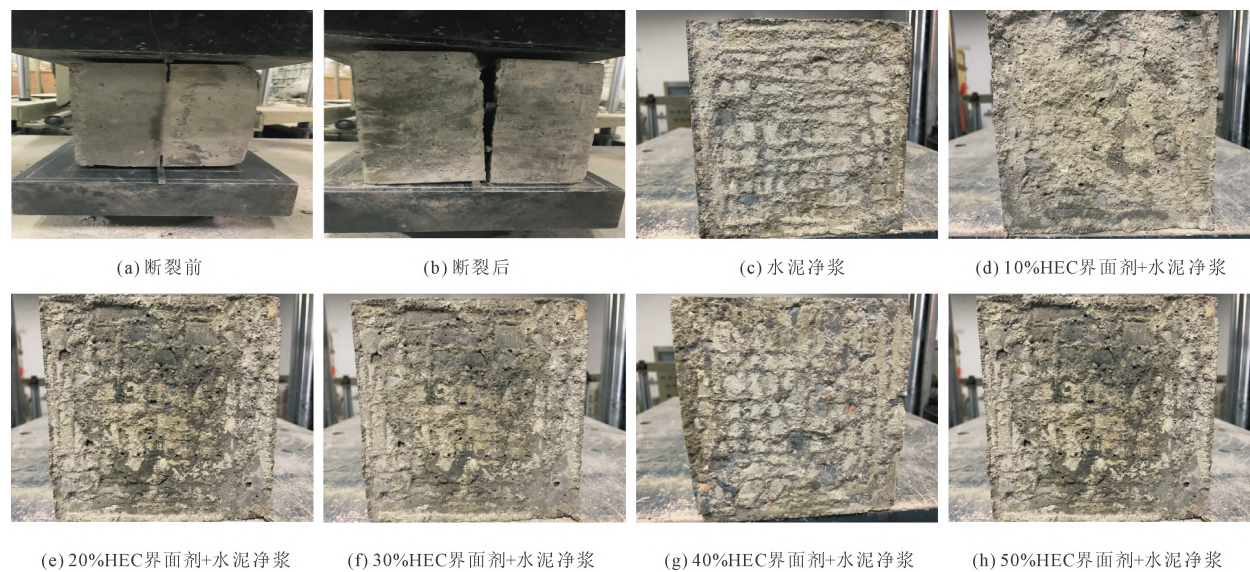


图 2 新老碾压混凝土劈裂试验试样外观

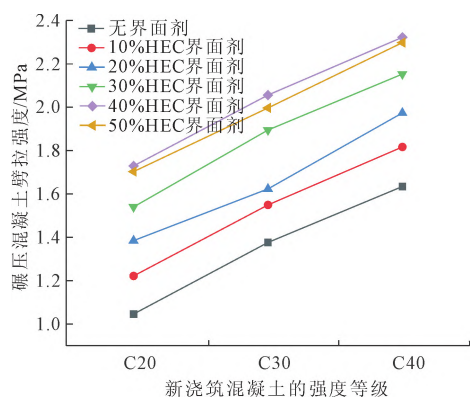


图 3 HEC 界面剂掺量及混凝土强度等级与混凝土劈拉强度关系图

表 5 两种影响因素下碾压混凝土的相对强度与劈拉强度平均值

界面剂种类	劈拉强度平均值/MPa			相对强度 $\alpha/\%$		
	C20	C30	C40	C20	C30	C40
基准试件	2.432	3.665	4.412	100.000	100.000	100.000
水泥净浆	1.046	1.376	1.634	43.000	37.500	37.100
HEC(10%) + 水泥净浆	1.222	1.549	1.817	50.220	42.130	41.250
HEC(20%) + 水泥净浆	1.385	1.623	1.974	56.910	44.130	44.720
HEC(30%) + 水泥净浆	1.540	1.895	2.153	64.310	51.520	48.740
HEC(40%) + 水泥净浆	1.729	2.056	2.323	71.120	56.030	52.610
HEC(50%) + 水泥净浆	1.703	1.997	2.298	68.952	54.329	51.770

$$P_{ft} = \alpha P_0 \tag{1}$$

式中： P_{ft} 为新老混凝土的劈拉强度，MPa； P_0 为基准

劈裂抗拉强度，MPa； α 为相对强度。
通过试验得到的数据，分析后可知：新老混凝土在不同影响因素下其强度的变化关系，同时从拟合公式中发现其关系符合线性关系，拟合公式如式(2)一式(4)所示。

C20 碾压混凝土：
$$P_{ft} = 0.017\beta + 1.047, R^2 = 0.9989 \tag{2}$$

C30 碾压混凝土：
$$P_{ft} = 0.017\beta + 1.358, R^2 = 0.9755 \tag{3}$$

C40 碾压混凝土：
$$P_{ft} = 0.017\beta + 1.6366, R^2 = 0.9997 \tag{4}$$

式中： β 为不同掺合比例的 HEC 界面剂，%。

由表 5 和图 3 可知，随着新浇筑的碾压混凝土强度等级逐渐增加，在掺界面剂相同的条件下，新老碾压混凝土本身的粘结劈拉强度也会发生相应的改变，当强度等级为 C40 时粘结强度最大。在新混凝土强度等级相同条件下，不同掺比 HEC 界面剂会对新老混凝土粘结劈拉强度造成影响：水泥净浆 $< 10\% < 20\% < 30\% < 50\% < 40\%$ 。同时新浇筑混凝土的强度也会随界面剂掺入发生变化，试验的粘结强度也随之改变，而且当掺比为 40% 时，新老混凝土的粘结强度最大。

2 模拟验证

2.1 模型建立与加载

利用有限元软件 ABAQUS 对本实验进行模拟研究，基于完成的试件来建立模型，将试件分为左、中、右三部分，左边代表的是老碾压混凝土，中间为 3 mm 的界面剂，对右边部分的模拟成新浇筑

的混凝土。混凝土模型尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm，对其施加轴向均布荷载。试件模型如图 4 所示。

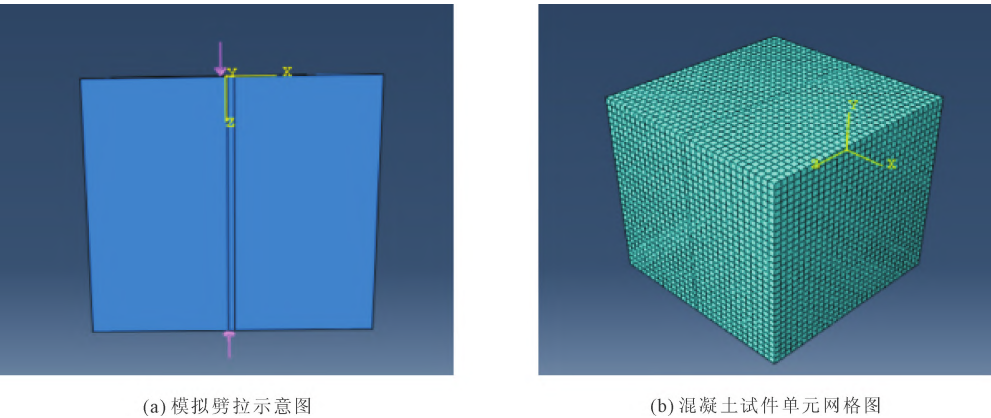


图 4 混凝土试件的模型示意图

若新混凝土的强度不一致,界面剂所掺水泥砂浆百分比不同,其混凝土的弹性模量值也会不同。故在加载之前需要通过对实际试件的三轴取芯,然后对其进行劈拉试验,可以得出试件的应力应变数值,计算后可得弹性模量值,将其与规范值整理后见表 6。而模拟弹簧单元中的刚度 K 则是应力应变之比,计算后整理可得表 7。然后将获得的实际弹性模量值使其带入有限元软件中,对模型进行劈拉加载。在此过程中,需以实际试验所得荷载曲线控制对于模型的荷载,另外还需要设置其余四个面作为模型的自由边界。

试验所得弹性模量值与规范值差别不大是因为掺入了一定量的粉煤灰,从而引发弹性模量的变化。

表 6 不同强度碾压混凝土弹性模量值

碾压混凝土 强度等级	试验值 /($\times 10^4$ MPa)	规范值 /($\times 10^4$ MPa)
C20	2.59	2.57
C30	2.97	3.03
C40	3.25	3.28

表 7 新浇筑混凝土强度等级不同时的劈拉试验刚度 K

界面剂种类	新浇筑混凝土的强度					
	C20		C30		C40	
	施加荷载 /GPa	弹性模量值 K/GPa	施加荷载 /GPa	弹性模量值 K/GPa	施加荷载 /GPa	弹性模量值 K/GPa
HEC(10%) + 水泥净浆	53.28	2.61	69.86	2.96	81.66	3.02
HEC(20%) + 水泥净浆	62.73	3.08	72.57	3.11	86.86	3.19
HEC(30%) + 水泥净浆	68.42	3.07	85.12	3.64	94.70	3.54
HEC(40%) + 水泥净浆	75.86	3.47	92.46	3.88	104.19	3.98
HEC(50%) + 水泥净浆	72.54	3.24	89.23	3.75	98.69	3.65

2.2 应力分布的效果图

模拟试验后可得应力分布图如图 5、图 6 所示。(C20-40,表示强度等级为 C20 的新浇筑混凝土,HEC 的掺比为 40%)。

分析应力云图可知最大应力都处于粘结面的边缘位置,应力沿着粘结面从外向内逐渐减小。这是因为在模拟混凝土劈裂抗拉试验时,施加的荷载集中在粘结面区域,因此其边缘位置应力普遍最大。其中当所施加的荷载逐渐增大时,由于粘结面为新老碾压混凝土的薄弱面,裂纹由粘结面处开始起裂至稳定扩展并积累能量。当荷载增长到临界值时,即其所释放的能量大于裂纹面积形成所需能量时,试件发生脆性断裂。

2.3 计算与分析

在程序进行模拟加载后可以得出劈拉强度的模拟值。然后将由不同变量制作的实际混凝土试件进行劈拉试验所得的试验值与模拟值进行对比,分析模型的可靠性,以及试验的准确性,将其整理后如表 8 所示。

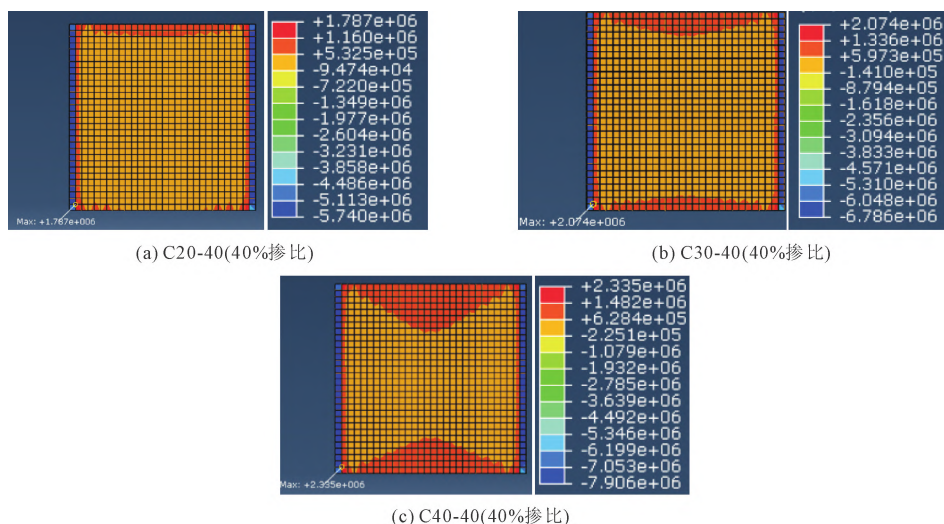


图5 劈裂抗拉面对应的应力云图(强度等级不同的新浇筑碾压混凝土)

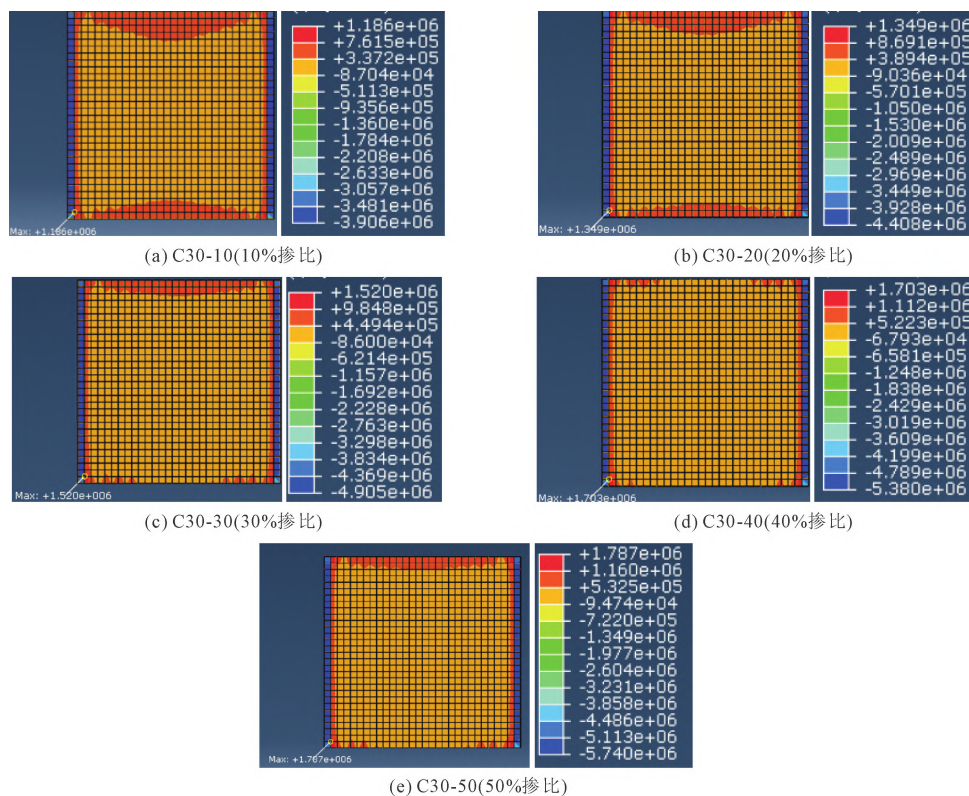


图6 不同掺比的 HEC 界面剂劈裂抗拉面的应力云图

由表 8 可以看出,劈裂抗拉试验所得的试验值与仿真模拟值大部分均比较接近。同时每组数据之间的差距也相对比较小,误差主要保持在 0~6% 之内,可以确定其试验值与模拟值之间的劈裂抗拉强度以及实际变化规律基本保持一致。

通过仿真模拟结果可以看出:(1)随着新浇筑混凝土强度等级的增加,粘结面的劈拉强度随之增大;(2)随着 HEC 界面剂掺量的增加,劈拉强度同样随之增大,但过大的掺量会使劈拉强度降低。

3 结 论

(1)新老碾压混凝土的粘结效果受到水泥净浆以及水泥净浆中 HEC 界面剂的掺合比的影响。不同掺量下的 HEC 界面剂会影响新老碾压混凝土粘结劈拉强度:水泥净浆 < 10% HEC < 20% HEC < 30% HEC < 50% HEC < 40% HEC。

(2)混凝土等级越大,等效强度系数 α 越小,劈拉强度越大,最大为 C40。以 C40 混凝土为例,加了

表 8 碾压混凝土劈拉强度的平均值与模拟值
误差统计表

编号	HEC 掺比/%	新混凝土 强度等级	试验值 /MPa	模拟值 /MPa	误差 /%
C20-(10%)	10	C20	1.226	1.316	4.93
C20-(20%)	20	C20	1.402	1.411	0.69
C20-(30%)	30	C20	1.584	1.596	0.74
C20-(40%)	40	C20	1.732	1.825	3.31
C20-(50%)	50	C20	1.715	1.803	4.88
C30-(10%)	10	C30	1.550	1.537	0.71
C30-(20%)	20	C30	1.633	1.708	3.19
C30-(30%)	30	C30	1.967	1.967	0.79
C30-(40%)	40	C30	2.112	2.126	0.98
C30-(50%)	50	C30	2.004	2.056	2.50
C40-(10%)	10	C40	1.986	1.977	1.38
C40-(20%)	20	C40	1.999	2.089	2.49
C40-(30%)	30	C40	2.199	2.255	3.21
C40-(40%)	40	C40	2.359	2.386	0.59
C40-(50%)	50	C40	2.297	2.353	2.38

10%、20%、30%、40%、50% 的 HEC 界面剂,其劈拉强度相较与水泥净浆分别提高了 11.20%、20.81%、31.76%、42.17%、40.64%,从水泥净浆到 50% HEC 组,等效强度系数 α 分别为 37.1%、41.2%、44.7%、48.7%、52.6%、51.8%。由此可以看到,当 HEC 的掺比达到 40% 的时候,新老混凝土的粘结强度达到峰值。

(3) 在 HEC 界面剂掺合比保持不变的条件下,混凝土等级的提升,会使得其增大,但是增加的幅度不明显。

(4) 通过有限元软件 ABAQUS 进行数据模拟的过程中,其模拟结果与试验所得数值的误差大小在 0~6% 之间,这说明模拟所得结果与试验所得结果相匹配,并且得出的结果较为合理,这使本次模拟所建立的劈裂抗拉强度模型得到了验证,而且其本身的准确性以及可靠性均可获得相应的保障。

参考文献:

[1] 丁建新,黄艳艳.大体积混凝土结构温度场冷却水管

模拟的叠单元法[J].水利与建筑工程学报,2023,21(2):95-100,136.

- [2] 曹宏亮,史长城,郭旭东,等.第二龄期老混凝土与新混凝土粘结劈拉强度研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):102-106,238.
- [3] 云辉.新老混凝土结合界面粘结性能研究综述[J].中国水运(下半月),2022,22(10):159-160.
- [4] 郑英国.环氧界面剂对新老混凝土黏结性能影响的试验研究[J].水利建设与管理,2021,41(8):50-52,7.
- [5] 柴敏.新老混凝土界面粘结机理与强度分析[J].福建建材,2018(4):19-21.
- [6] 吴吉昊,李志华,张聪.硅灰掺量对水泥基灌浆料与老混凝土界面粘结强度的影响[J].硅酸盐通报,2018,37(12):3989-3995.
- [7] 曹宏亮,史长城,郭旭.第二龄期老混凝土与新混凝土粘结劈拉强度研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):102-106.
- [8] 张振超.聚合物砂浆对新旧混凝土粘结强度影响的试验研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2018.
- [9] 张建仁,罗育明,张旭辉,等.自密实混凝土浇筑成型方向对新老混凝土界面黏结抗剪强度的影响[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):744-751.
- [10] Huang Dunwen, Wei Jun, Liu Xiaochun. Experimental study on long-term performance of steel-concrete composite bridge with an assembled concrete deck[J].2019,214:606-618.
- [11] 张静.新旧混凝土结合面强度性能试验研究[J].低温建筑技术,2018,40(9):26-39.
- [12] 金宇松.混凝土重力坝加高新老混凝土粘结有限元分析[D].郑州:郑州大学,2019.
- [13] 李战国,张浩,王子赓,等.基于正交试验的超高层泵送混凝土配合比优化研究[J].混凝土,2022(12):110-116.
- [14] 王育军.混凝土现浇楼板裂缝的成因和控制[J].水利与建筑工程学报,2007,19(3):102-105.
- [15] 刘志威.碾压混凝土重力坝裂缝防治质量监督要点分析[J].水利科技,2020(1):42-44.
- [16] 郑刚峰. HEC 界面剂对第三龄期碾压混凝土粘结强度的影响[D].西安:西安理工大学,2020.
- [17] 熊图耀.拱坝新老混凝土结合面处理技术措施[J].红水河,2019,38(5):5-9.