

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.018

土体-水下不分散混凝土-桩身混凝土间的 界面黏结性能试验研究

刘祥胜¹, 李虹岑^{2,3,4}, 纪厚强¹, 刘锦程², 洪丽^{2,3,4}, 詹炳根^{2,3,4}

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 4. 安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究水下不分散混凝土与土体及桩身混凝土间界面的黏结性能, 文章设计一系列界面黏结受拉和受剪试验, 试验特别考虑了不同粉煤灰掺量对水下不分散混凝土的界面黏结破坏形态及力学性能的影响。结果表明: 水下不分散混凝土与土体的受拉、受剪破坏均在土体的同一侧; 水下不分散混凝土与桩身混凝土间界面的受拉、受剪破坏均位于两者界面处。其中, 当粉煤灰掺量为20%时, 水下不分散混凝土的性能相对较好。

关键词:界面黏结抗拉; 界面黏结抗剪; 水下不分散混凝土; 桩身混凝土; 土体

中图分类号: TU528.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)10-1422-06

Experimental study on interfacial bonding performance between underwater non-dispersible concrete and soil/pile concrete

LIU Xiangsheng¹, LI Hongcen^{2,3,4}, JI Houqiang¹,
LIU Jincheng², HONG Li^{2,3,4}, ZHAN Binggen^{2,3,4}

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 4. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the interfacial bonding performance between underwater non-dispersible concrete and soil/pile concrete, a series of interfacial bonding tensile and shear tests were designed, and the effects of different fly ash content of underwater non-dispersible concrete on the failure forms and mechanical properties of the interfacial bonding specimens were considered. The test results show that the tensile and shear failure of underwater non-dispersible concrete and soil occurs on the soil side. The tensile and shear failure of the interface between underwater non-dispersible concrete and pile concrete initiates at the interface. Notably, the performance of underwater non-dispersible concrete is relatively superior when the fly ash content is 20%.

Key words: tensile strength of interfacial bonding; shear strength of interfacial bonding; underwater non-dispersible concrete; pile concrete; soil

迄今为止, 在水下工程中混凝土仍然是最主要和用量最大的建筑材料之一, 混凝土的性能将

直接影响水下工程的质量和进度。水下不分散混凝土是在普通混凝土中添加外加剂, 并将水泥颗

收稿日期: 2023-09-13; 修回日期: 2023-11-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909901); 合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2020JSKF0615)

作者简介: 刘祥胜(1971—), 男, 安徽合肥人, 安徽省交通控股集团有限公司高级工程师;

洪丽(1985—), 女, 安徽宣城人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: hongli2014@hfut.edu.cn;

詹炳根(1964—), 男, 安徽庐江人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

粒、集料等吸附在一起,提高混凝土拌合物颗粒间的凝聚作用,大大提高混凝土拌合物的抗水洗能力,使其能够直接在水中浇筑,提高水下混凝土强度和保证水下混凝土工程质量,从根本上解决了新拌混凝土的遇水分离问题。因此,水下不分散混凝土的性能研究愈来愈受到工程技术界的重视^[1]。

文献[2]研究表明:粗集料中石粉质量分数在不超过 5%的情况下,有助于改善新浇筑混凝土-基体混凝土界面黏结性能;适当减小新浇筑混凝土中粗集料最大粒径能有效提高新浇筑混凝土-基体混凝土 28、90 d 界面黏结性能;在新浇筑混凝土中掺入钢纤维和聚合物乳液有助于改善新浇筑混凝土-基体混凝土界面黏结性能,且钢纤维和聚合物乳液复掺效果优于单掺。

文献[3]研究新、老自密实混凝土的黏结强度,从试验结果可知当新老混凝土采用同类型粗骨料(刚度相同),与使用不同粗集料相比,使用相同粗集料的斜抗剪强度提高了 15%;在自密实混凝土中加 5%和 10%的胶乳可以提高混凝土的抗剪黏结强度。

文献[4]研究基体混凝土表面粗糙度-界面黏结性能的相关性,结果显示,基体混凝土表面分形维数对新浇筑混凝土-基体混凝土界面黏结抗折强度具有显著影响;文献[5]研究界面粗糙度对修补砂浆-基体混凝土间的黏结强度,结果表明,界面粗糙时,界面间剪切强度是光滑时的 1.26 倍;文献[6]在水下不分散混凝土中掺入粉煤灰,研究表明粉煤灰可以改善混凝土的流动性,增加混凝土流动性的保持时间;文献[7]发现只要粉煤灰取代水泥量不大于 50%,粉煤灰能降低混凝土的氯离子渗透性。

多数学者对不同混凝土的界面性能开展了深入研究,但关于土体-水下不分散混凝土-桩身混凝土间界面黏结性能的研究并不多,而水下不分散混凝土与土体间的有效黏结又是保证桩身混凝土水下浇筑的关键。粉煤灰作为一种常见的工业废弃物,将其掺入混凝土中,不仅可以调节混凝土的流动性、硬化时间等性能,还可以降低环境污染并减少资源消耗。

本文旨在研究水下不分散混凝土与土体和桩身混凝土间的界面黏结性能在不同粉煤灰掺量下的变化情况,揭示了水下不分散混凝土作为结构保护层,与土体和桩身混凝土间的界面黏结机理。

1 试验材料与配合比设计

1.1 试验材料来源

絮凝剂 HPMC 购于上海臣启化工科技有限公司;DQ-6018 有机硅消泡剂购于广东百年宏图化工科技有限公司;HL-900 聚羧酸减水剂购于湖南中岩建材科技有限公司;F 类 II 级粉煤灰购于马鞍山正圆实业有限公司;海螺 P·O42.5 普通硅酸盐水泥购于芜湖南方水泥有限公司;粗骨料(粒径 5~25 mm)购于泾县晏公采石场,细集料 II 区中砂购于南昌赣昌砂石有限公司;试验用水采用普通自来水;试验土样为工地某基坑开挖岩土。

水泥与粉煤灰的化学成分及其质量分数见表 1、表 2 所列,其粒度分布如图 1 所示。

表 1 水泥的化学成分及其质量分数 %

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
质量分数	50.11	16.31	6.86	22.95	2.74	1.23	0.83

表 2 粉煤灰的化学成分及其质量分数 %

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O
质量分数	37.06	27.00	5.20	3.51	1.81	1.29	1.22

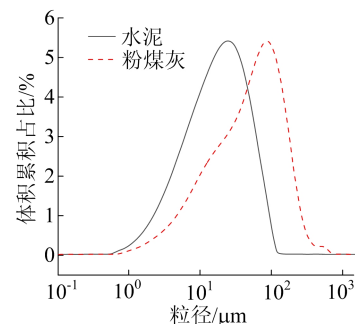


图 1 粒度分布

1.2 水下不分散混凝土的配合比

水下不分散混凝土的配合比设计主要考虑以下因素:水灰比、单位用水量、絮凝剂品种和掺量、外加剂及掺和料的品种与掺量等^[8]。为分析粉煤灰掺量对界面黏结性能的影响,本文共设计 3 种不同粉煤灰掺量的水下不分散混凝土,其细骨料砂率均为 45.2%,编号分别为 A、B、C,配合比见表 3 所列。

另外,为了进一步研究桩身混凝土与水下不分散混凝土之间的界面黏结性能,本文设计了桩身混凝土(细骨料砂率为 43%)配合比,见表 4 所列。

表 3 水下不分散混凝土配合比 单位:kg/m³

组分	粗骨料	砂	水	水泥	粉煤灰	絮凝剂	消泡剂	高效减水剂
A	899	743	255	417	46	2.1	1.4	11.6
B	899	743	255	370	93	2.1	1.4	11.6
C	899	743	255	324	139	2.1	1.4	11.6

表 4 桩身混凝土配合比 单位:kg/m³

组分	水泥	粗集料	细集料	粉煤灰	水	高效减水剂
配合比	316	1 025	774	79	166	3.95

2 试件设计与试验方法

2.1 界面黏结抗拉试件

土体-水下不分散混凝土界面黏结试件首先制作土体试块,将原状土体经过晒干、粉碎、过筛 3 个程序,按含水率 10% 掺水拌合,并将模具中的土分 4 层击实,每层击实次数相同,为确保水分均匀,制备完成后静置 1~2 d 再脱模,完成土体试块的制作。制作抗拉试件时,在土体试块上方摆放 PVC 管,并在 PVC 管中浇筑水下不分散混凝土,如图 2 所示。试件制作完成均放室内常温养护。



图 2 土体-水下不分散混凝土界面抗拉试件

混凝土界面黏结抗拉试件如图 3 所示。其制作步骤为:① 先在模具中浇筑水下不分散混凝土试件,待其凝固成型;② 将 PVC 塑料套筒(内径为 50 mm,高为 50 mm)平稳放置在水下不分散混凝土试件表面;③ 在 PVC 塑料套筒中浇筑桩身混凝土后进行振捣,将试件静置 24 h,搬运至养护室养护。

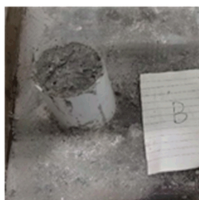


图 3 水下不分散混凝土-桩身混凝土界面抗拉试件

在界面黏结试件制作过程中为测试桩身混凝土和 水下不分散混凝土立方体抗压强度,根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,每种混凝土制作 3 个尺寸为 100 mm×

100 mm×100 mm 的立方体试块。在养护室养护 28 d 后,采用 SANS-300 t 压力机(测量精度为 ±1%)测得桩身混凝土的抗压强度平均值为 53.9 MPa,A、B、C 这 3 组水下不分散混凝土立方体抗压强度平均值分别为 34.0、29.1、25.1 MPa。这是由于在掺入少量粉煤灰后,能够减少混凝土中的孔隙,在一定程度上提高了混凝土的抗压强度,与文献[9]研究结论一致。

2.2 界面黏结抗剪试件

土体-水下不分散混凝土界面黏结抗剪试件制作流程同上,土体试块制作完成后将其放入模具并在两边浇筑水下不分散混凝土,如图 4 所示。试件制作完成后放室内常温养护。

混凝土界面黏结抗剪试件(图 4b)的制作步骤为:① 先浇筑水下不分散混凝土试块(100 mm×100 mm×100 mm),待其凝固脱模;② 将试块放入模具中间,在两边浇筑桩身混凝土;③ 待试件凝固脱模,搬运至养护室进行养护。



(a) 土体-水下不分散混凝土抗剪试件



(b) 水下不分散混凝土-桩身混凝土抗剪试件

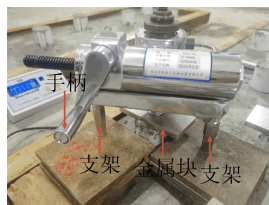
图 4 界面黏结抗剪试件

2.3 界面黏结抗拉、抗剪性能试验方法

采用合肥工业大学安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心的 SHJ-40 界面黏结强度检测仪进行界面黏结抗拉试验,仪器安装如图 5 所示。界面黏结抗拉试验的测试步骤如下:① 仪器安装就位,并进行校核,在圆柱体顶部固定钢锭,连接

检测仪的拉杆与钢锭(图 5a);② 接通压力数值显示器开关并将示数清零,顺时针转动手柄,直至试件发生破坏,记录压力表峰值(图 5b),依次重复上述步骤测试下一个试件。

采用合肥工业大学水泥基材料低碳技术与装备工程研究中心的 SANS-300 t 压力试验机进行界面黏结抗剪试验。具体步骤为:① 试验前用游标卡尺测量试件的承压面尺寸,精确至 0.02 mm,擦拭上下承压面,不得有颗粒杂物;② 将试件放置于在加载平台中心位置,为实现界面黏结抗剪破坏,分别将刚性垫板置于试件不同位置,如图 6 所示;③ 待上下承压面与压板均匀接触后开始试验,试验过程均匀加荷,直至破坏,记录峰值荷载。依次重复上述步骤测试下一个试件。



(a) 安装仪器



(b) 压力表测试

图 5 界面黏结抗拉试验

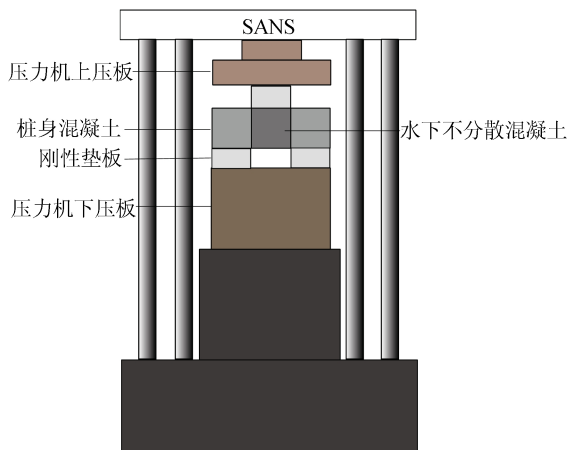


图 6 界面黏结抗剪试验

3 试验结果与分析

3.1 界面黏结抗拉性能

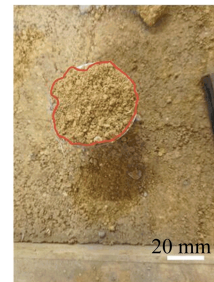
3.1.1 抗拉试件破坏形态

土体-水下不分散混凝土间界面黏结抗拉试

件的破坏发生在靠近界面的土体材料一侧,说明土体的抗拉强度低于界面黏结抗拉强度,从而导致受拉时土体材料开裂破坏,破坏形态如图 7a~图 7c 所示。水下不分散混凝土-桩身混凝土界面黏结抗拉试件的破坏形态如图 7d 所示,可以看出,破坏发生在二者间界面处,而水下不分散混凝土或桩身混凝土本身并未出现破坏。



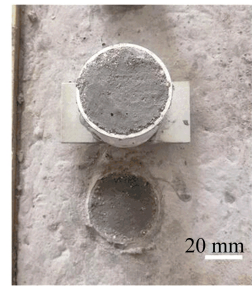
(a) 土体与A组水下不分散混凝土



(b) 土体与B组水下不分散混凝土



(c) 土体与C组水下不分散混凝土



(d) 土体与D组水下不分散混凝土

图 7 界面黏结抗拉试件的受拉破坏形态

3.1.2 界面黏结抗拉强度

根据试验测得的界面黏结抗拉破坏荷载 P 和界面的面积 A , 计算得到界面的抗拉强度 f_{it} 为:

$$f_{it} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

水下不分散混凝土中粉煤灰的掺量对黏结界面抗拉性能的影响如图 8 所示。

由图 8a 可知,随着水下不分散混凝土中粉煤灰掺量的增加,土体水下不分散混凝土界面黏结抗拉强度也在不断提高。这是由于粉煤灰的掺入一方面起到物理分散剂的作用;另一方面粉煤灰也充当起部分减水剂载体的作用,维持液相中减水剂的浓度,同时粉煤灰的滚珠轴承作用依然存在,再加上粉煤灰的密度小于水泥,等量取代水泥时,相同质量的固体材料体积将会增加,使得混凝土增加了 28.9% 的浆体体积,赋予拌合料更好的流动性^[9]。故而随着粉煤灰掺量的增加,混凝土的浆体质量分数和流动性都会增大。

相较于水下不分散混凝土,土体具有更高的孔隙率,即存在更多的空隙和孔洞。随着粉煤灰掺量的增加,混凝土的流动性增大,浆体质量分数也更多,使得有足够的水下不分散混凝土浆体能更容易地进入土体的孔隙从而裹挟更多土体。由于土体和水下不分散混凝土力学性能的差异性,使得破坏界面均发生在土体一侧,混凝土并不会产生破坏,即土体-水下不分散混凝土界面黏结抗拉强度随着界面处混凝土浆体裹挟的土体体积的增大而提高。这也解释了抗拉试件破坏形态中粉煤灰掺量为 30% 的水下不分散混凝土柱下附着黏土最多,20% 组次之,10% 组最少。

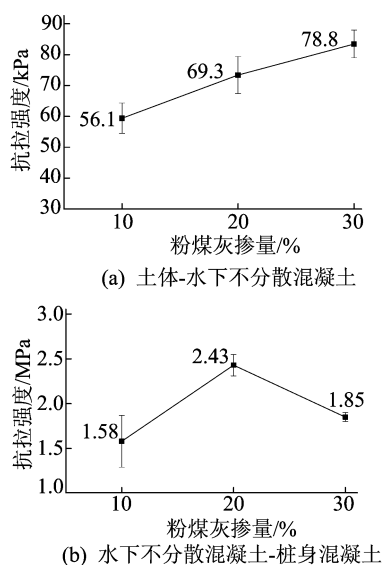


图 8 粉煤灰的掺量对界面黏结抗拉强度的影响

由图 8b 可知,随着粉煤灰掺量增加,水下不分散混凝土-桩身混凝土界面黏结抗拉强度先增加后减小。当粉煤灰掺量为 10%、20%、30% 时,界面抗拉强度分别为 1.58、2.43、1.85 MPa,当粉煤灰掺量从 10% 增加到 20%、30% 时,界面抗拉强度分别增加 54%、17%。试件根据实际施工顺序,先浇筑水下不分散混凝土,待其凝固后再浇筑桩身混凝土,故界面的力学性能主要由不同水下不分散混凝土与桩身混凝土的接触面决定。由于粉煤灰具有一定胶凝性,填充了水泥水化后产生的微小孔隙,使混凝土密实度得以提高^[10],即随着粉煤灰掺量的增加水下不分散混凝土试块总的孔隙度下降。另外,在养护初期,由于粉煤灰的活性较低,仅当粉煤灰掺量不大于 20% 时,粉煤灰还能与水泥形成良好级配的凝胶体系;当粉煤灰掺量大于 20% 时,多余的粉煤灰不仅无法与水泥形

成良好级配凝胶,也不能进行水化^[11],故而在界面处将会残留更多的粉煤灰颗粒。因此粉煤灰掺量为 20% 的水下不分散混凝土接触面,在拥有一定数量孔隙的同时还存在部分未水化的粉煤灰颗粒,能够与浇筑的桩身混凝土产生足够的机械咬合力,实现较高的结合强度;30% 掺量的水下不分散混凝土则拥有更多未水化的粉煤灰参与水化反应,从而提高界面的机械咬合力。

3.2 界面黏结抗剪性能

3.2.1 抗剪试件破坏形态

通过试验发现,所有界面黏结抗剪试件的破坏均为脆性破坏,一旦界面或材料出现裂缝,试件立即破坏,破坏前无明显预兆。通过观察破坏面,可以发现试件的破坏均发生在靠近界面的土体一侧,属于土体材料破坏,这说明界面黏结抗剪强度超过了土体自身的抗剪强度,故而材料被破坏,破坏界面如图 9 所示。



图 9 土体-水下不分散混凝土抗剪破坏界面

水下不分散混凝土-桩身混凝土间界面黏结抗剪试件的破坏发生在界面处,说明 2 种混凝土间的界面黏结抗剪强度是比较薄弱的,破坏界面如图 10 所示。

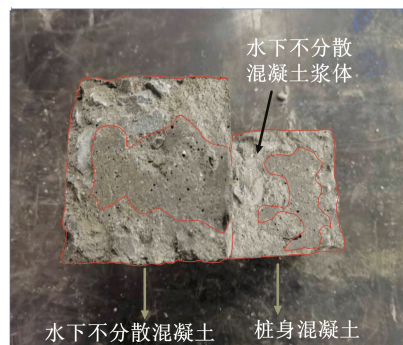


图 10 水下不分散混凝土-桩身混凝土抗剪破坏界面

3.2.2 界面黏结抗剪强度

根据试验测得的界面黏结抗剪破坏荷载 F 以及界面面积 A ,可得界面黏结抗剪强度 τ 为:

$$\tau = F/A \quad (2)$$

水下不分散混凝土中粉煤灰的掺量对黏结界面的抗剪性能的影响如图 11 所示。

由图 11a 可知,随着粉煤灰掺量增加,土体-水下不分散混凝土界面黏结抗剪强度在不断减小。当掺量为 10%、20%、30%时,界面抗剪强度分别为 83、65、61 kPa,当掺量从 10% 提高到 20%、30%时,界面抗剪强度分别降低 21.7%、26.5%。这是因为粉煤灰等量取代水泥时,使混凝土增加了 28.9% 的浆体体积,同时混凝土的流动性也将提高,所以将会有更多的浆体与土体接触,使得土体可以从水下不分散混凝土中吸取更多水分,降低界面的抗剪强度,这与文献[10,12]研究一致。

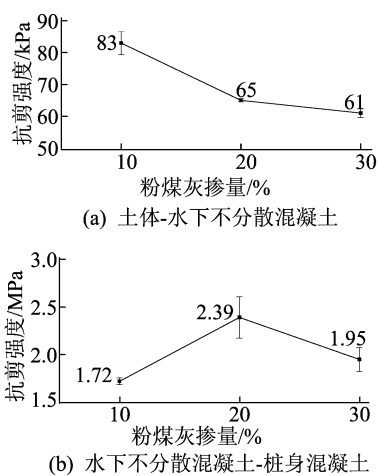


图 11 粉煤灰的掺量对界面黏结抗剪强度的影响

由图 11b 可知,随着粉煤灰掺量的增加,水下不分散混凝土-桩身混凝土界面黏结抗剪强度先增加后减小。当掺量为 10%、20%、30%时,水下不分散混凝土桩身混凝土界面抗剪强度分别为 1.72、2.39、1.95 MPa,当粉煤灰掺量从 10% 提高到 20%、30%时,界面抗剪强度分别提高 39.0%、13.4%。与界面黏结抗拉试验机理相同,相比于 10% 掺量的水下不分散混凝土,20%、30% 掺量的水下不分散混凝土与桩身混凝土黏结界面的机械咬合力。

4 结 论

通过比较不同粉煤灰掺量的水下不分散混凝土与土体和桩身混凝土的界面黏结抗拉及抗剪性能的试验,可得到以下结论:

1) 土体-水下不分散混凝土界面黏结抗拉和抗剪试件的破坏均为土体材料破坏;水下不分散混凝土-桩身混凝土界面黏结抗拉和抗剪试件的破坏均为界面破坏,即材料本身并未发生破坏。

2) 土体-水下不分散混凝土界面黏结抗拉性能随粉煤灰掺量的增加而提高,抗剪性能随粉煤灰掺量的增加而降低;水下不分散混凝土-桩身混凝土界面黏结抗拉和抗剪性能均随着粉煤灰掺量的增加而提高,其中 20% 掺量的水下不分散混凝土组试件的抗拉抗剪性能相对较好,30% 掺量的次之。

3) 粉煤灰掺量为 20% 的水下不分散混凝土,不仅其 28 d 抗压强度优于 10% 和 30% 掺量组,同时在界面试验中也都表现出良好的抗拉和抗剪性能,故该组分水下不分散混凝土在作为结构保护层材料时能较好地满足大直径桩的桩身施工要求。

[参 考 文 献]

- [1] 王朋硕. 高性能水下不分散混凝土的制备及配合比优化[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [2] 连德攀,郭广磊,梅迎军,等. 材料特征对新浇筑混凝土与基体混凝土界面黏结性能的影响[J]. 公路,2022,67(3):306-311.
- [3] DIAB A M, ELMOATY A M A E, ELDIN M R T. Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 130(15):7382.
- [4] 张雄,张蕾,张永娟,等. 新老混凝土粘结面人造粗糙度表征及性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(5):753-758.
- [5] 孟繁强,薛善彬,张鹏,等. 新旧水泥砂浆界面粘结性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(12):9.
- [6] 逢博,周宗辉. 纤维素醚和聚丙烯酰胺对海水水下混凝土性能的影响[C]//中国硅酸盐学会水泥分会中国硅酸盐学会水泥分会第五届学术年会论文摘要集. 北京:化学工业出版社,2014:53.
- [7] NAIK T R, SINGH S S, HOSSAIN M M. Permeability of concrete containing large amounts of fly ash[J]. Cement & Concrete Research, 1994,24(5):913-922.
- [8] 王文忠,韦灼彬,唐军务,等. 水下不分散混凝土配合比及其性能研究[J]. 中外公路,2012,32(1):265-267.
- [9] 牛季收,朱凯. 粉煤灰对水下不分散混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2008,27(4):875-880,887.
- [10] 路伟亚,刘松涛,王阳,等. 砂土混凝土界面剪切特性实验研究[J]. 广东建材,2023,39(3):74-76,32.
- [11] 程惠阳. 矿物掺合料对水下不分散混凝土性能的影响研究[J]. 福建建材,2022(12):1-4.
- [12] NARDELLI A, CACCIARI P P, FUTAI M M. Sand-concrete interface response; the role of surface texture and confinement conditions [J]. Soils and Foundations, 2019, 59(6):1675-1694.

(责任编辑 吴 亮)