



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403384

引用格式: 乔建刚, 胡恩乾, 陶瑞, 等. 基于装配式桥梁界面黏结层的力学性能分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(10): 4326-4333.

Qiao Jiangang, Hu Enqian, Tao Rui, et al. Analysis of mechanical properties of interface bonding layer based on assembled bridges[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4326-4333.

## 基于装配式桥梁界面黏结层的力学性能分析

乔建刚, 胡恩乾, 陶瑞\*, 杨海洋  
(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要** 装配式桥梁具有施工简便、环境污染小特点,越来越受到交通建设的重视,为了保证装配式桥梁结构连接的安全性和可靠性,以桥梁工程、结构力学为基础,对不同种类的界面剂进行强度试验设计,分析不同水泥标号、水灰比、灰砂比的力学性能,得到不同种类的界面剂与不同龄期下抗压强度变化规律,明确了水泥砂浆前期强度较后期增长更快;得到不同种类的界面剂与不同龄期下抗压强度变化规律,构建了水泥砂浆不同龄期与强度的关系预估模型,从折压比角度提出 SS-III 的力学性能最优;通过开发黏结劈裂抗拉强度试验装置,试验并分析不同界面剂与黏结劈裂抗拉强度的关系,得到相同水泥标号条件下,水泥砂浆的黏结性能要优于水泥净浆,不同水泥标号条件下,高标号水泥黏结性能更优,确定了 SS-III 为装配式桥梁界面黏结剂其黏结性能最优,最后从黏结层的折压比、黏结性两个维度提出了 SS-III 即 P. O52.5 水泥、水灰比为 0.4、灰砂比为 2.4 的水泥砂浆作为装配式桥梁界面剂较为合理,为装配式桥梁界面连接的安全性和可靠性分析提供了一种新的研究思路。

**关键词** 装配式桥梁; 界面剂; 力学性能; 折压比; 黏结性能

**中图分类号** U443.22; **文献标志码** A

### Analysis of Mechanical Properties of Interface Bonding Layer Based on Assembled Bridges

QIAO Jian-gang, HU En-qian, TAO Rui\*, YANG Hai-yang

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**[Abstract]** In order to ensure the safety and reliability of the structural connection of assembled bridges, the strength test design of different types of interface agents was carried out based on bridge engineering and structural mechanics, and the mechanical properties of different cement grades, water-cement ratio and ash-sand ratio were analyzed. The change law of the strength of cement mortar in the early stage is faster than that in the later stage. The change law of the compressive strength of different types of interface agents with different ages was obtained, the prediction model of the relationship between different ages and strength of cement mortar was constructed, and the optimal mechanical properties of SS-III were proposed from the perspective of the bending-compression ratio. The relationship between different interface agents and the tensile strength of adhesion splitting was tested and analyzed by developing the test device of adhesion splitting tensile strength. The bonding performance of SS-III was determined to be the best interface bonding agent for assembled bridges from the perspective of the bending ratio and bonding properties. cement mortar as the interface agent for assembled bridges is more reasonable, which provides a new research idea for the safety and reliability analysis of the interface connection of assembled bridges.

**[Keywords]** assembled bridges; interface agent; mechanical properties; compression ratio; adhesive properties

近年来随着中国公路发展由平原逐步转向山区,在山区道路建设中桥隧比逐渐增加。中国桥梁建设中桥墩施工多采用现浇施工工艺,这种方法现场湿法作业多、施工周期长、影响周围环境<sup>[1]</sup>。因此预制装配技术成为现在的一种趋势,它提升机械

化施工水平、降低劳动强度、有利于保护环境<sup>[2-3]</sup>。相较于桥梁上部结构,下部结构预制拼装技术的发展相对滞后<sup>[4]</sup>。

桥墩与承台、盖梁的连接处是装配式桥梁结构受力的薄弱部位,在多种因素的共同作用下易造成

收稿日期: 2024-05-08; 修订日期: 2025-01-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278342)

第一作者: 乔建刚(1963—),男,汉族,山西太谷人,博士,教授。研究方向:道路交通安全。E-mail:qiaojg369@126.com。

\*通信作者: 陶瑞(1995—),女,汉族,吉林长春人,博士研究生。研究方向:智慧交通。E-mail:599193516@qq.com。

结构性破坏,连接处的稳定性决定了结构的整体安全性和可靠性。因此,中外学者针对混凝土界面材料展开了一系列研究。Zhang 等<sup>[5]</sup>通过 1:3 比例的准静态试验对嵌入式钢管混凝土 (concrete-filled steel tube, CFST) 预制柱-盖梁承插连接的抗震性能进行研究,预制柱和盖梁采用超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 灌浆整合,以改善界面黏结行为和横向约束。赵同峰等<sup>[6]</sup>进行混凝土界面剂配合比及劈拉试验,研究发现普硅-硫铝-石膏三元体系可以获得较高的强度,水灰比越大,界面剂力学性能越差。连德攀等<sup>[7]</sup>研究材料特征对新浇筑-基体混凝土界面黏结性能得影响,发现在新浇筑混凝土中加入刚纤维和聚合物乳液有助于改善界面黏结性能。乔建刚等<sup>[8]</sup>研究了不用界面剂对湿接缝混凝土黏结性能影响,结果发现环氧树脂界面剂和掺 8% 硅灰水泥净浆界面剂对湿接缝黏结性能提升效果较为明显。乔连朋等<sup>[9]</sup>对不同界面剂对黏结抗冻性能及抗水渗透性能的影响变化规律和机理进行分析,研究发现涂刷新型改性环氧界面剂的新老混凝土黏结试件的抗冻性能和抗水渗透性能均优于水泥净浆。李建伟等<sup>[10]</sup>对中国目前建筑工程中使用的界面剂进行分类,对应用于不同基面、不同类型的界面剂应如何选择进行了系统的总结和阐述。王丹薇<sup>[11]</sup>通过室内实验发现,使用界面剂有利于提升新老混凝土界面承载力。李逢林等<sup>[12]</sup>指出新老混凝土结合面是整体受力的关键。李权恒<sup>[13]</sup>指出新老混凝土结合面是受力薄弱区域,而适当的使用界面剂可以有效改善新老混凝土结合面强度。目前中外学者主要针对新老混凝土界面剂类型、黏结机理、性能等进行了研究,并取得了相应的研究成果,对于“老-老”混凝土界面的连接相关研究还较少,并且对“老-老”混凝土的界面剂种类以及用量罕有研究。

因此,现通过设计不同种类的界面剂,进行抗折试验、抗压试验、黏结劈裂抗拉试验综合分析不同界面剂的力学性能,优选出合理的界面材料;现有研究对界面剂的黏结厚度及用量提及较为模糊,本次试验通过限位装置确定界面剂的黏结厚度,并采用体积密度法确定界面剂剂量。

## 1 试验设计

### 1.1 试验原材料

装配式桥梁拼接过程中,桥墩与承台、盖梁界面之间需要合理的界面剂进行连接。根据 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(以下简称规程)并结合依托工程选取材料。试

验用水为普通自来水;水泥采用河北省涞水金隅冀东环保科技有限公司生产的标号 42.5 和 52.5 的普通硅酸盐水泥,各指标均符合 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》要求,可用于试验研究;试验用砂为中国 ISO 标准砂符合标准 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度试验》;混凝土黏结试件选用尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体。

### 1.2 工况设计

选取界面剂的水泥标号、水灰比为自变量进行试验工况设计。结合预试验以及黏结强度要求,采用水灰比为 0.3 和 0.35 的水泥净浆,水灰比为 0.4 和 0.45 的水泥砂浆作为界面剂进行界面连接;依托实际工程黏结厚度设定为 20 mm。试验因素水平如表 1 所示,具体工况设计如表 2 所示。

表 1 试验因素水平表  
Table 1 Test factor level table

水平	因素			
	界面剂 类型	水泥 标号	水泥净浆 水灰比	水泥砂浆 水灰比
水平一	水泥净浆	P. 042.5	0.30	0.40
水平二	水泥砂浆	P. 052.5	0.35	0.45

表 2 试验工况设计  
Table 2 Test condition design

试验编号	界面剂种类	水泥标号	水灰比	灰砂比
SJ-A	水泥净浆	P. 042.5	0.30	—
SJ-B	水泥净浆	P. 042.5	0.35	—
SS-C	水泥砂浆	P. 042.5	0.40	2.4
SS-D	水泥砂浆	P. 042.5	0.45	2.7
SJ-I	水泥净浆	P. 052.5	0.30	—
SJ-II	水泥净浆	P. 052.5	0.35	—
SS-III	水泥砂浆	P. 052.5	0.40	2.4
SS-IV	水泥砂浆	P. 052.5	0.45	2.7

注: SJ 为水泥净浆; SS 为水泥砂浆; A、I 为水灰比 0.3; B、II 为水灰比 0.35; C、III 为水灰比 0.4; D、IV 为水灰比 0.45。

## 2 抗折、抗压试验力学性能研究

### 2.1 试验方法

界面剂的抗折、抗压强度试验根据规程中水泥胶砂强度试验方法进行。参看装配式桥梁墩底垫层砂浆性能提升技术<sup>[14]</sup>,每个配合比试件养护设定 3 个龄期即 1、3、28 d,每组 3 个试件。试件养护至相应龄期进行强度试验。强度试验结果如表 3 所示。

根据工程实际要求,界面剂为水泥净浆时,前期的强度不能过低,28 d 的抗折强度不应小于 10 MPa,抗压强度不应小于 60 MPa;界面剂为水泥砂浆时,T/CECS 728—2020《装配式城市桥梁工程技术规程》要求水泥砂浆的 28 d 抗压强度不应小于 60 MPa,1 d 抗压强度不应小于 30 MPa。

表3 强度试验结果

Table 3 Test strength result

试验编号	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
	1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d
SJ-A	1.9	4.0	7.0	8.5	18.8	49.6
SJ-B	1.3	3.8	6.7	7.7	18.1	47.0
SS-C	12.2	14.0	15.3	37.9	45.9	63.6
SS-D	10.0	12.5	14.5	33.1	43.8	60.2
SJ-I	2.8	4.9	9.3	13.6	26.5	54.7
SJ-II	2.1	4.3	8.5	11.0	23.0	52.5
SS-III	12.3	14.5	16.7	37.0	44.6	69.1
SS-IV	10.2	12.7	15.0	32.5	42.7	62.9

由表3可知,不同界面剂的强度随着龄期的增长不断增长。从强度试验结果分析,水泥净浆的强度不符合强度指标要求,对于水泥砂浆,强度满足指标要求。因此对水泥净浆的力学性能分析不予考虑,只针对水泥砂浆的力学性能从不同水泥标号、水灰比进行分析。

## 2.2 抗折试验结果分析

不同种类水泥砂浆抗折强度试验结果如图1所示,强度随龄期变化率如图2所示。

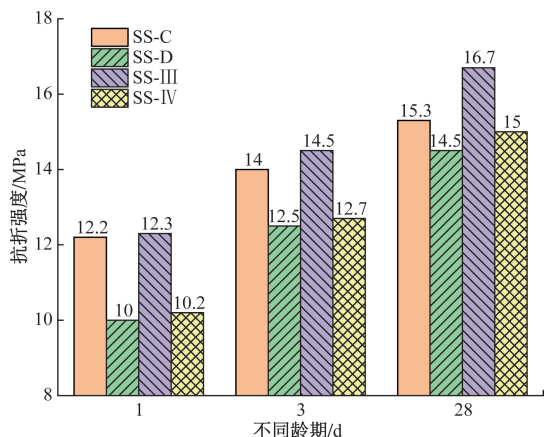


图1 不同龄期下抗折强度关系

Fig. 1 Flexural strength relationship at different ages

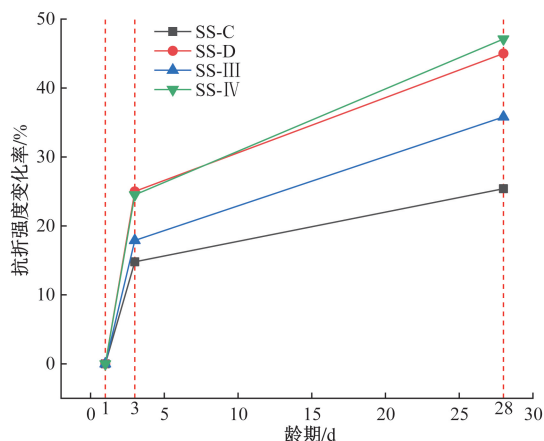


图2 不同龄期下抗折强度变化率关系

Fig. 2 Relation of bending strength change rate at different ages

由图1得出,不同龄期的抗折强度大小关系均为:SS-III > SS-C > SS-IV > SS-D。其中SS-III组的28 d强度值可达16.7 MPa,较SS-C、SS-D、SS-IV分别高了9.2%、15.2%、11.3%;不同水泥标号、相同水灰比条件下,SS-III组的强度值较SS-C分别高了0.8%、3.5%、9.2%,SS-D组的强度值较SS-IV分别低了2%、1.6%、3.4%,说明水泥砂浆的抗折强度随水泥标号的增大而增大,水泥标号增加,其细度增加,水泥水化后与砂形成的胶凝材料具备更强的黏结能力;相同水泥标号、不同水灰比条件下,SS-III组的强度值较SS-IV分别高了20.6%、14.2%、11.3%,SS-D组的强度值较SS-C分别低了22%、12%、5.5%,说明水泥砂浆的抗折强度随着水灰比的降低强度而提升,水泥水化需要适量的水。

由图2得出,不同种类砂浆抗折强度随着龄期增长不断增长。对于SS-C、SS-D、SS-III、SS-IV组,相较于1 d龄期,龄期为3 d时,抗折强度增长率分别为7.4%、12.5%、8.95%、12.25%;相较于3 d龄期,龄期为28 d时,抗折强度增长率分别为0.4%、0.8%、0.72%、0.9%。说明不同类型水泥砂浆前期强度较后期增长更快,前期水泥水化迅速,满足前期强度的要求,后期水化基本完成。

## 2.3 抗压试验结果分析

不同种类水泥砂浆抗压试验结果如图3所示,强度随龄期变化率如图4所示。

由图3得出,龄期为1、3 d时,不同种类砂浆的抗压强度的大小关系均为:SS-C > SS-III > SS-D > SS-IV,不同水泥标号、相同水灰比条件下,SS-III组的强度值较SS-C分别低了2.4%、2.9%,SS-IV组的强度值较SS-D分别低了1.8%、2.8%;龄期为28 d时,不同水泥砂浆的抗压强度大小关系为:SS-III > SS-C > SS-IV > SS-D,其中SS-III组的强度值最高,值为69.1 MPa,较SS-C、SS-D、SS-IV分别高了8.6%、

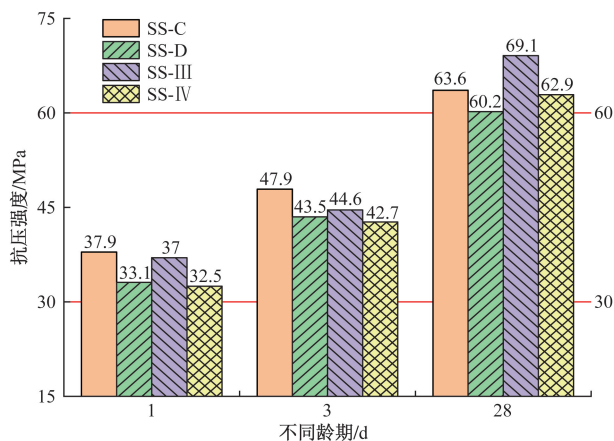


图3 不同龄期下抗压强度关系

Fig. 3 Compressive strength relationship at different ages

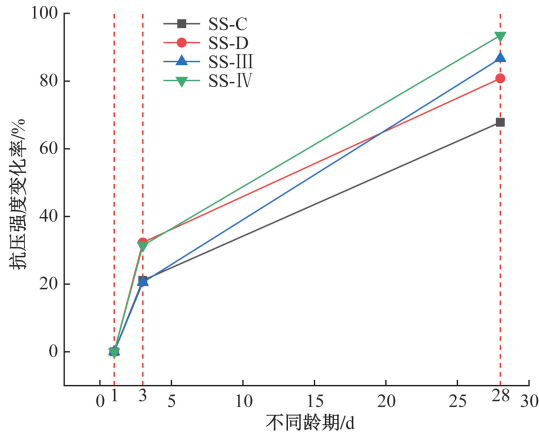


图4 不同龄期下抗压强度变化率关系

Fig. 4 Relation of compressive strength change rate at different ages

14.8%、9.9%,不同水泥标号、相同水灰比条件下,SS-III组的强度值较SS-C高了8.6%,SS-IV组的强度值较SS-D高了4.5%,说明52.5标号水泥前期水化与砂产生的胶凝材料少,黏结力较小,后期水泥水化程度更为充分,与砂产生的胶凝材料更多,强度随着大幅度提高。相同水泥标号、不同水灰比条件下,SS-III组的28d强度值较SS-IV提高了9.9%,SS-C组的28d强度值较SS-D提高了5.6%,说明随着水灰比增大,强度减小。不同种类砂浆的1d和28d强度值都满足指标要求。

由图4得出,不同龄期抗压强度随着龄期的增长逐渐增长。对于SS-C、SS-D、SS-III、SS-IV组,相较于1d龄期,龄期为3d时,抗压强度增长率分别为10.55%、16.15%、10.25%、15.7%;相较于3d龄期,龄期为28d时,抗压强度增长率分别为1.87%、1.94%、2.65%、2.48%。不同种类砂浆抗压强度前期增长更快,说明前期水泥水化与砂形成多的胶凝材料,后期强度增长变缓,说明后期水化反应基本完成。

为得到不同种类水泥砂浆抗压强度达到60MPa所对应的龄期,对龄期 $x$ 和抗压强度值 $y$ 的关系进行拟合,如图5所示。不同种类水泥砂浆强度曲线拟合公式如表4所示。

基于本次试验,通过 $F$ 检验得到相关性系数,显著相关,可得水泥砂浆不同龄期与强度的关系预估模型为

$$y = ax^b, \quad 0 < x \leq 28 \quad (1)$$

式(1)中: $x$ 为龄期,d; $y$ 为抗压强度,MPa; $a$ 、 $b$ 为常数,33.595 ≤  $a$  ≤ 38.347,0.152 ≤  $b$  ≤ 0.19。

由模型中得到,SS-C、SS-D、SS-III、SS-IV的抗压强度为60MPa时,分别对应的龄期为19、26、14、21d。通过试验验证模型的准确性,试验结果如表5所示。

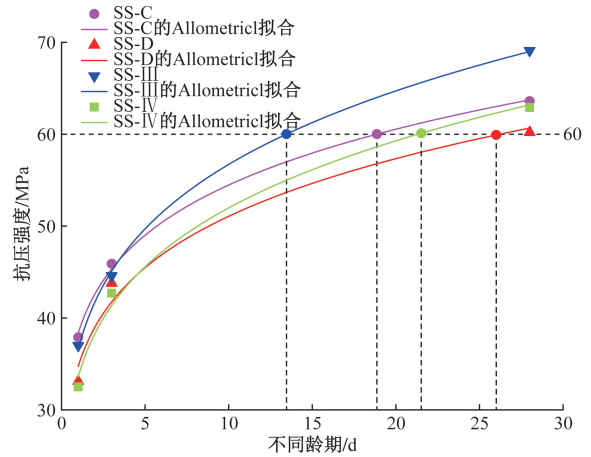


图5 不同龄期与抗压强度的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between different ages and compressive strength

表4 不同龄期与抗压强度的关系模型

Table 4 Relationship model between different ages and compressive strength

试验编号	拟合公式	$R^2$	显著性
SS-C	$y = 38.347x^{0.152}$	0.998 5	显著
SS-D	$y = 34.747x^{0.167}$	0.980 9	显著
SS-III	$y = 36.588x^{0.190}$	0.999 2	显著
SS-IV	$y = 33.595x^{0.190}$	0.993 7	显著

注: $x$ 为龄期,d; $y$ 为抗压强度,MPa。

表5 模型验证的结果

Table 5 Results of model validation

试验编号	抗压强度/MPa	误差/%
SS-C	60.1	0.1
SS-D	59.9	0.1
SS-III	60.3	0.5
SS-IV	59.7	0.5

由表5得出,不同种类水泥砂浆在达到相对应龄期测出的试验结果与模型计算出的结果误差很小,说明模型建立准确。

## 2.4 折压比结果分析

由强度结果计算得到折压比,不同水泥砂浆折压比随龄期的关系如图6所示,折压比随龄期变化率如图7所示。

由图6得出,龄期为1、3d时,不同水泥砂浆的折压比大小关系为:SS-III > SS-C > SS-IV > SS-D,不同水泥标号、相同水灰比条件下,SS-III组的折压比较SS-C高出了3.1%、6.6%,SS-IV组的折压比较SS-D高出了4.0%、4.2%,说明随着水泥高标号的增加,水泥砂浆的柔性更好,反映出抗裂性能优良;相同水泥标号、不同水灰比条件下,SS-III组的折压比较SS-IV提高了5.7%、9.4%,SS-C组的折压比

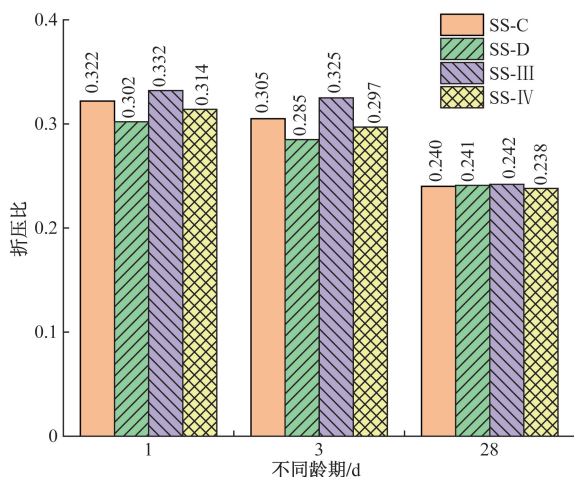


图6 不同种类水泥砂浆折压比与龄期的关系

Fig. 6 The relationship between folding ratio and age of different kinds of cement mortar

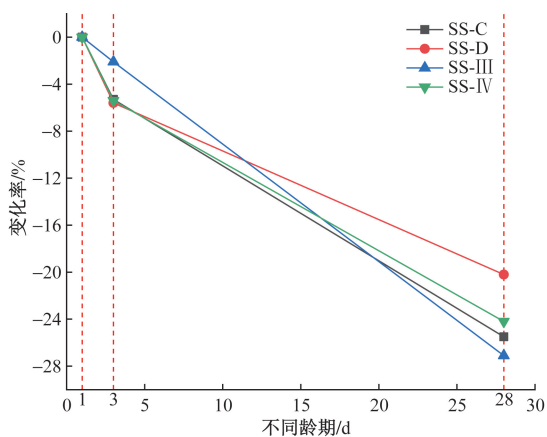


图7 不同龄期下折压比变化率关系

Fig. 7 Relation of bending ratio change rate under different ages

较 SS-D 提高了 6.6%、7%，说明随着水灰比的降低折压比随着增大，水灰比越大，水泥砂浆的强度更低，柔性更差。龄期为 28 d 时，不同种类水泥砂浆的折压比几乎趋于稳定，说明后期强度值增长缓慢，水泥水化程度基本完成，其中 SS-III 组的折压比值最大为 0.242，说明柔性更好，表现为力学性能更优。

由图 7 中得出，不同水泥砂浆的折压比随着龄期的增长逐渐衰减。对于 SS-C、SS-D、SS-III、SS-IV 组，相较于 1 d 龄期，龄期为 3 d 时，折压比衰减率分别为 -2.65%、-2.8%、-1.05%、-2.7%；相较于 3 d 龄期，龄期为 28 d 时，折压比衰减率分别为 -0.81%、-0.58%、-1%、-0.75%。前期斜率更大，折压比下降快，说明水泥砂浆的抗压强度增长变快，表现为柔性变差，后期斜率变缓，反映水泥水化基本完成，强度增长缓慢。

从不同水泥标号、不同水灰比综合分析不同种类水泥砂浆的抗折强度、抗压强度及折压比，得到 SS-III 组的强度值最大，说明力学性能最优；对试验结果进行拟合，得到不同种类水泥砂浆抗压强度与龄期的关系预估模型，通过试验验证模型建立合理。

### 3 黏结劈裂抗拉试验黏结性能研究

#### 3.1 试验方法

桥墩及盖梁通过工厂预制运输到现场安装，连接处采用界面剂进行连接<sup>[15]</sup>，老混凝土是指养护龄期超过 28 d 的混凝土。试验模拟拼接过程，采用“老-老”混凝土中间通过界面剂进行黏接。根据规程制作黏结试件，养护至 28 d 进行劈拉强度试验。

#### 3.2 剂量的确定

为确定试件黏结时界面剂的用量，采用体积密度法来测定界面剂的密度，经过体积换算成剂量。测量结果如表 6 所示。

表 6 测量结果

Table 6 Measuring result

试验编号	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	界面剂剂量/g
SJ-A	2.058	926.10
SJ-B	2.000	900.00
SS-C	2.259	1 016.55
SS-D	2.242	1 008.90
SJ-I	2.001	900.45
SJ-II	1.980	891.00
SS-III	2.254	1 014.30
SS-IV	2.242	1 008.90

#### 3.3 限位装置

试验为确定黏结的厚度，设计一个限位装置如图 8 所示。将劈裂后的两个半块混凝土试块放置 150 mm × 150 mm × 550 mm 的试模中，按照设计要求调整好尺寸即为界面剂黏结的厚度，用 40 mm × 40 mm × 160 mm 的钢模对其进行限位。



图8 试件限位装置

Fig. 8 Test piece limiting device

### 3.4 试验结果及数据分析

从破坏形态来看,黏结试件达到极限拉应力瞬间破坏,表现为界面处破碎或者出现若干条贯穿裂缝;从破坏位置来看,对于不同种类界面剂,试件的劈裂位置均产生在黏结面,说明没有粗骨料嵌入的黏结面是混凝土界面连接处受拉状态下的薄弱部位。

黏结劈裂抗拉强度按式(2)计算,试验结果如表7、图9~图11所示。

$$f_b = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (2)$$

式(2)中: $f_b$ 为劈裂强度,MPa; $F$ 为破坏荷载,N; $A$ 为试件劈裂面面积, $\text{mm}^2$ 。

表7 黏结劈裂抗拉试验结果  
Table 7 Bond splitting tensile test results

试验编号	最大力值/ kN	劈裂抗拉强度/ MPa	平均值/ MPa
SJ-A	63.36	1.79	1.64
	54.65	1.55	
	55.52	1.57	
SJ-B	62.22	1.75	1.69
	58.05	1.64	
	59.34	1.68	
SS-C	85.32	2.42	2.64
	95.02	2.69	
	99.42	2.82	
SS-D	87.24	2.47	2.50
	92.54	2.62	
	84.62	2.40	
SJ-I	60.05	1.70	1.68
	59.69	1.69	
	58.28	1.65	
SJ-II	61.85	1.75	1.80
	63.37	1.79	
	65.79	1.86	
SS-III	101.21	2.87	2.75
	91.19	2.58	
	98.84	2.80	
SS-IV	94.22	2.67	2.59
	91.13	2.58	
	89.01	2.52	

#### 3.4.1 不同种类水泥净浆结果分析

由图9得出,不同水泥净浆的黏结强度大小关系为SJ-II > SJ-B > SJ-I > SJ-A,其中SJ-II组的黏结强度最大,值为1.8 MPa,较SJ-I、SJ-A、SJ-B分别高出了7.1%、9.8%、6.5%。不同水泥标号、相同水灰比条件下,随着水泥标号增大,黏结强度随着提高,SJ-I、SJ-II组的黏结强度分别较SJ-A、SJ-B高了2.4%、6.5%,说明水泥标号越大,细度较细,与水接触面积更大,反应时更加充分,产生的水泥

浆体黏结效果较好;相同水泥标号、不同水灰比条件下,SJ-II组的黏结强度较SJ-I提高了7.1%,SJ-B组的黏结强度较SJ-A提高了3%,说明随着水灰比的增大,水泥净浆的黏结强度随着增加,表现为黏结性能更好。

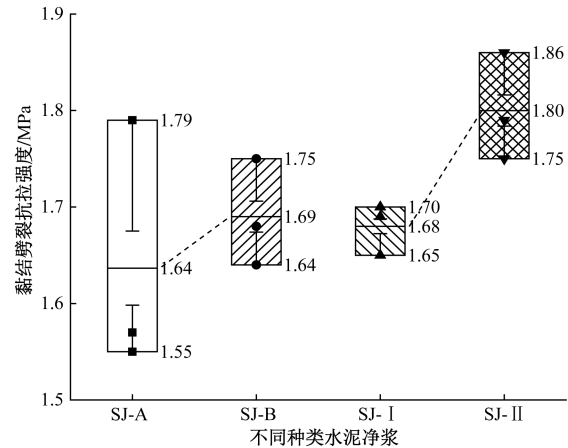


图9 不同种类水泥净浆与黏结劈裂抗拉强度的关系

Fig. 9 Relationship between different kinds of cement paste and bond splitting tensile strength

#### 3.4.2 不同种类水泥砂浆结果分析

由图10可得,不同水泥砂浆的黏结强度大小关系为SS-III > SS-C > SS-IV > SS-D,其中SS-III组的黏结强度最高,为2.75 MPa,表现为黏结性能最优,较SS-IV、SS-C、SS-D分别高了6.2%、4.2%、10%。不同水泥标号、相同水灰比条件下,SS-III、SS-IV组的黏结强度分别较SS-C、SS-D高了4.2%、3.6%,说明水泥标号越大,细度较细,水泥比表面积小,有利于水泥水化反应完全,与砂形成的胶凝材料具备更好的黏结性;相同水泥标号、不同水灰比条件下,SS-IV组的黏结强度较SS-III降低了6.2%,SS-D组的黏结强度较SS-C降低了5.6%,说明随着水灰比的减小,水泥砂浆的黏结强度随着增大,水泥水化与砂形成黏结能力更强的胶凝材料。

#### 3.4.3 不同界面剂对比分析

由图11得出,不同水泥标号条件下,水泥砂浆的黏结强度较水泥净浆高。因为水泥水化后的水泥浆体会具备一定的黏结强度,而水泥与砂结合产生的胶凝材料具有更高的黏结能力,从黏结性能方面,界面剂材料不宜采用水泥净浆。当界面剂为水泥净浆时,不同水泥标号,随着水灰比的增大,黏结强度随着增强,当界面剂为水泥砂浆时,则相反;不同种类的界面剂中,SS-III组的黏结强度最大,值为2.75 MPa,表现为黏结性能最优。参考已有研究<sup>[5,8-10]</sup>及工程实际要求,对于水泥净浆黏结强度一般达到1.5 MPa,水泥砂浆黏结强度一般达到

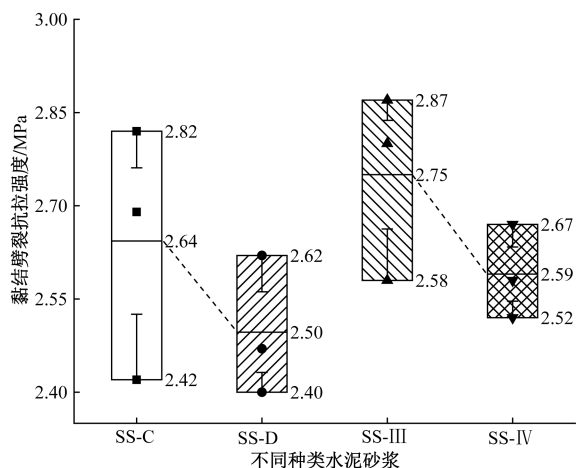


图 10 不同种类水泥砂浆与黏结劈裂抗拉强度的关系

Fig. 10 Relationship between different types of cement mortar and bond splitting tensile strength

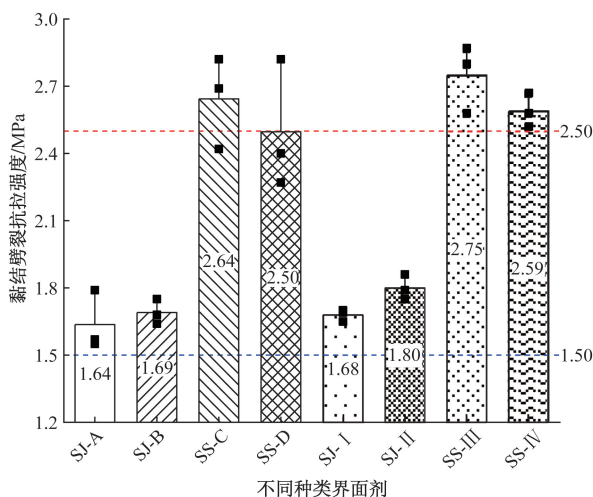


图 11 不同界面剂与黏结劈裂抗拉强度的关系

Fig. 11 Relationship between different interfacial agents and bond splitting tensile strength

2.5 MPa,因此设计的界面剂均满足经验值要求。综合分析,选用 SS-III 作为合理的界面剂材料。

## 4 结论

通过试验设计采用不同水泥标号、不同水灰比配制界面剂进行界面处的连接,综合分析力学性能。得到以下结论。

(1)通过强度试验结果可以得出,不同种类界面剂的强度随着龄期的增长不断提高,折压比随着龄期的增长逐渐降低。龄期为 28 d 时,SS-III 组的水泥砂浆强度值最高,表现为力学性能最优;不同种类水泥砂浆的折压比趋于稳定,其中 SS-III 组的折压比最大为 0.242,表现为柔性最好。

(2)对抗压强度与龄期进行拟合,得到关系预估模型,并通过试验验证模型的准确性,试验结果

与模型计算结果相差很小,模型建立合理。

(3)为确定界面剂的黏结厚度及剂量,通过设计限位装置确定厚度,采用体积密度法测量密度并经体积换算成剂量。

(4)对于“老-老”混凝土界面的连接,从黏结性能方面,水泥砂浆的黏结性较水泥净浆的强,不易将水泥净浆作为界面剂材料。界面剂为水泥砂浆时,相同水泥标号条件下,随着水灰比的增大,黏结强度随着减小;相同水灰比条件下,高标号水泥砂浆的黏结强度更高。其中 SS-III 组的黏结强度最高为 2.75 MPa,表现为黏结性能最优。综合分析选用 SS-III 作为合理的界面剂材料,为装配式桥梁界面连接的安全性和可靠性分析提供了一种新的研究思路。

## 参考文献

- [1] 孙策. 城市桥梁预制装配化绿色建造技术应用与发展[J]. 世界桥梁, 2021, 49(1): 39-44.  
Sun Ce. Application and development of green construction technology for prefabrication of urban bridges[J]. World Bridge, 2019, 49(1): 39-44
- [2] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 1-27.  
Xiang Yiqiang, Zhu Sheng, Zhao Yang. Research progress of rapid bridge construction [J]. China Journal of Highway, 2018, 31(12): 1-27.
- [3] 王志刚, 余顺新, 陈亚莉. 桥梁快速建造技术[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 184-188.  
Wang Zhigang, Yu Shunxin, Chen Yali. Rapid bridge construction technology[J]. Chinese and Foreign Highways, 2018, 38(4): 184-188.
- [4] Shim C S, Dang S N, Park S. Three-dimensional information delivery for design and construction of prefabricated bridge piers[J]. Structural Engineering International, 2018, 28(1): 6-12.
- [5] Zhang G D, Han Q, Xu K, et al. Quasi-static tests of CFST embedded RC column-to-precast cap beam with socket connection[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112443-112443.
- [6] 赵同峰. 混凝土界面剂配合比优化试验研究[J]. 混凝土, 2020(3): 164-167.  
Zhao Tongfeng. Experimental study on optimization of mix ratio of concrete interfacial agent[J]. Concrete, 2020(3): 164-167.
- [7] 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.  
Lian Depan, Guo Guanglei, Mei Yingjun, et al. Effect of material characteristics on interface bonding properties of newly poured concrete and matrix concrete[J]. Highway, 2022, 67(3): 306-311.
- [8] 乔建刚, 王琦森, 徐阳, 等. 不同界面剂对湿接缝混凝土黏结性能影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(6): 2540-2546.  
Qiao Jiangang, Wang Qisen, Xu Yang, et al. Effect of different interfacial agents on bonding properties of wet joint concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(6): 2540-2546.

- [9] 乔连朋,袁群,冯凌云. 新型界面剂作用下新老混凝土黏结的耐久性能[J]. 公路, 2020, 65(7): 33-37.  
Qiao Lianpeng, Yuan Qun, Feng Lingyun. The bonding durability of new and old concrete under the action of new interfacial agent [J]. Highway, 2020, 65(7): 33-37.
- [10] 李建伟,马炎,刘俊霞,等. 界面剂在建筑工程中的应用现状及适用标准探讨[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(10): 25-28.  
Li Jianwei, Ma Yan, Liu Junxia, et al. Application status and applicable standards of interfacial agents in building engineering[J]. New Building Materials, 2022, 49(10): 25-28.
- [11] 王丹薇. 冻融循环和界面剂对新老混凝土接触面抗剪性能的影响[J]. 吉林水利, 2022(9): 55-58.  
Wang Danwei. Effect of freeze-thaw cycle and interfacial agent on shear resistance of new and old concrete contact surface[J]. Jilin Water Resources, 2022(9): 55-58.
- [12] 李逢林,唐亚东,王苏,等. 凿毛植筋新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(8): 72-77.  
Li Fenglin, Tang Yadong, Wang Su, et al. Experimental study on shear performance of new and old concrete joint surface with chiseled wool reinforced reinforced[J]. Railway Construction, 2024, 64(8): 72-77.
- [13] 李权恒. 界面剂和粗糙度对新老混凝土粘结性能的影响试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
Li Quanheng. Experimental study on the influence of interface agent and roughness on the bond performance of new and old concrete[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [14] 王冬,张金康,祝烨然,等. 装配式桥梁墩底垫层砂浆性能提升技术[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(8): 43-46.  
Wang Dong, Zhang Jinkang, Zhu Yeran, et al. Performance improvement technology of mortar for bottom cushion of prefabricated bridge pier[J]. New Building Materials, 2021, 48(8): 43-46.
- [15] 黄伟,方张平. 冻融条件下新老混凝土粘结后抗折性能[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(5): 745-749, 767.  
Huang Wei, Feng Zhangping. Bending resistance of new and old concrete bonded under freeze-thaw conditions[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(5): 745-749, 767.