

引文格式:占玉林,王吉坤,邵俊虎,等.组合梁栓钉对高性能混凝土约束收缩效应研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):49-57.
ZHAN Yulin, WANG Jikun, SHAO Junhu, et al. Research on restrained shrinkage effect of composite beam stud on high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 49-57.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03142

组合梁栓钉对高性能混凝土约束收缩效应研究

占玉林^{1,2}, 王吉坤¹, 邵俊虎³, 沈东⁴, 荆国强⁵, 贾银钧¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程材料研究所, 四川 成都 610031;
3. 成都大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106; 4. 温州市七都大桥北汉桥建设有限公司,
浙江 温州 325052; 5. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘要:为探究高性能混凝土在栓钉约束作用下的收缩特征及开裂行为,制作了钢-混凝土组合构件,通过试验研究了不同栓钉因素对高性能混凝土约束收缩应变、约束度及开裂风险的影响规律,运用正交试验方法研究了栓钉直径、间距、高度对高性能混凝土约束收缩的影响,得到了主要敏感因素。结果表明:高性能混凝土较普通混凝土的约束收缩应变发展趋势更为平滑;各栓钉因素对约束收缩的敏感性影响的主次顺序依次为直径、间距、高度;混凝土收缩在组合梁高度方向上呈现出一定的收缩梯度,混凝土约束收缩应变随高度增加而增大,但栓钉高度在30 mm处、间距在75 mm处、直径在150 mm处对高性能混凝土约束收缩几乎没有影响;栓钉对混凝土的约束作用可定义为3个阶段,即约束增强阶段、约束下降阶段和约束稳定阶段;组合梁构件最大开裂风险发生在栓钉的根部,当栓钉间距由150 mm减少到75 mm,直径由13 mm增加到22 mm时,最大开裂风险分别增加了20.03%和36.05%,栓钉高度的改变对最大开裂风险没有影响;采用高性能混凝土以及直径小、高度高的栓钉布置方式可以有效减小混凝土的收缩及开裂风险。

关键词:钢-混组合梁;栓钉;高性能混凝土;正交试验;约束收缩;开裂风险

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)02-0049-09

Research on restrained shrinkage effect of composite beam stud on high performance concrete

ZHAN Yulin^{1,2}, WANG Jikun¹, SHAO Junhu³, SHEN Dong⁴, JING Guoqiang⁵, JIA Yinjun¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Institute of Civil Engineering Materials, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
3. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, Sichuan, China;
4. Wenzhou Qidu Bridge North Branch Bridge Construction Co., Ltd, Wenzhou 325052, Zhejiang, China;
5. China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd, Wuhan 430034, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the shrinkage characteristics and cracking behavior of high performance concrete under stud restrained, steel-concrete composite components were made, and the effects of different factors of studs on the shrinkage strain, restrained degree and cracking risk of high performance concrete were analyzed through experiments. The effect of stud

收稿日期: 2023-03-29

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878564); 四川省科技计划项目(2021JDTD0012);

四川省留学回国人员科技活动项目(川人社办发[2021]29号)

作者简介: 占玉林(1978-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: yulinzhan@swjtu.edu.cn.

diameter, spacing and height on restrained shrinkage of high performance concrete was study by orthogonal test, and the main sensitive factors were obtained. The results show that the development trend of restrained shrinkage strain of high performance concrete is smoother than that of ordinary concrete. The sensitivity of each factor to restrained shrinkage is in the order of diameter, spacing and height. The concrete shrinkage presents a certain shrinkage gradient in the height direction, and the restrained shrinkage strain increases with the increase of height. But the stud height changing at 30 mm, spacing changing at 75 mm, diameter changing at 150 mm have little effect on restrained shrinkage. The restrained effect of studs on concrete can be defined as three stages, namely, the restrained enhancement stage, the restrained descent stage and the restrained stability stage. The maximum cracking risk of composite beam members occurs at the root of studs. When the stud spacing decreases from 150 mm to 75 mm, and the diameter increases from 13 mm to 22 mm, the maximum cracking risk increases by 20.03 % and 36.05 %, respectively. But the change of stud height has no effect on the maximum cracking risk. The shrinkage and cracking risk of concrete can be effectively reduced by using high performance concrete and stud arrangement with small diameter and high height.

Key words: steel-concrete composite beam; stud; high performance concrete; orthogonal test; restrained shrinkage; cracking risk

Author resume: ZHAN Yulin(1978-), male, PhD, professor, E-mail: yulinzhan@swjtu.edu.cn.

0 引言

钢-混凝土组合梁如今广泛应用于工程结构中,组合梁中由于剪力连接件和钢筋的存在,混凝土不能自由地收缩,使混凝土在收缩过程中受到约束作用,构件内部产生收缩拉应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时,混凝土将会发生开裂^[1-3],影响混凝土的强度和耐久性。

随着混凝土材料的逐步发展,具有优良力学性能及耐久性的高性能混凝土被越来越多地应用到组合梁桥中。由于高性能混凝土具有较低的水胶比^[4-5],使得早期的水化反应消耗混凝土内大量的自由水,极易造成自干燥,从而导致混凝土发生较大的自由收缩。相比于普通钢筋混凝土梁桥,组合梁桥混凝土受到剪力连接件、钢板及钢筋的约束作用,会产生更高的开裂风险^[6-7],因此研究高性能混凝土约束收缩是有必要的。

为防止钢-混凝土组合梁因混凝土收缩而发生开裂,首先需要了解约束对混凝土收缩的影响,迄今为止,国内外学者对混凝土在内约束下的收缩行为进行了多方面研究,并得到了许多有意义的结果。Huang 等^[8]研究了钢筋配置对高性能混凝土收缩性能的影响,结果表明,随着钢筋间距的增大,钢筋对混凝土收缩的抑制作用减小。Sun 等^[9]对不同配筋率的混凝土收缩徐变进行了研究,结果表明,钢筋

对混凝土收缩的抑制作用随着配筋率的增加而增强。李聪等^[10]研究发现,在混凝土中掺入钢纤维以及降低混凝土的约束程度能够有效减小混凝土的开裂风险。Khan 等^[7]对两种内部约束钢筋混凝土进行收缩开裂分析,结果表明,两种混凝土的早期收缩并无明显差异,但混凝土抗拉强度的发展是影响开裂试件的主要因素。程新等^[11]利用圆环试验探究了玄武岩纤维体积掺量与长径比对泡沫混凝土收缩开裂的影响,结果表明,玄武岩纤维体积掺量为 0.3%、长度为 10 mm 时能够显著降低泡沫混凝土的收缩开裂。

目前国内外对混凝土的约束收缩行为研究大多集中在钢筋约束及圆环试验上^[12-14],对栓钉约束下混凝土的收缩开裂行为研究较少。为数不多的研究中,Huang 等^[11]采用控制变量的试验方法研究了钢板和栓钉对高性能混凝土的收缩和开裂能力的影响,结果表明,随着钢板厚度、栓钉直径、高度和数量的增加,高性能混凝土的收缩减小,潜在开裂风险增加。该高性能混凝土中没有添加纤维及膨胀剂,且栓钉对高性能混凝土的收缩影响是一种复杂的现象,并不是由栓钉各因素独立控制的,需要综合考虑栓钉各因素之间的耦合。

为贴合温州市七都大桥工程实际,减少高性能混凝土的收缩,本文试验采用添加了玄武岩纤维和膨胀剂的高性能混凝土,同时考虑上述耦合效应,通

过正交试验的方式研究栓钉间距、直径、高度对高性能混凝土的约束收缩影响,对早强低收缩混凝土的自由收缩性能、试件约束收缩的应变、试件表面多个位置的收缩应变和早强低收缩混凝土的开裂潜力进行评估。

1 试验概况

1.1 试验原材料

本文设计一种早强低收缩的高性能混凝土,混凝土配合比如表 1 所示。水泥采用浙江虎山 P. O52. 5 普通硅酸盐水泥;矿粉采用山东日照生产的 S95 级矿粉;膨胀剂采用 HEA 型,比表面积为 $20\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$;外加剂采用浙江永健 KC-NF-1 聚羧酸减水剂,减水

率为 16. 2%;粗骨料选用 5~25 mm 连续级配碎石;细骨料为细度模数为 2. 6 的河砂。玄武岩纤维由浙江金石公司生产,其纤维特征参数如表 2 所示。钢板采用 Q235 型钢板,栓钉采用 ML15AL 材质的圆柱头焊钉,具体材料性能如表 3 所示。

1.2 试验环境

环境中的温度和湿度是影响混凝土收缩行为的重要因素,为避免环境温、湿度对本次试验的影响,在整个试验过程中,温度变化范围控制在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,湿度变化范围控制在 $60\%\pm 2\%$ 内。即环境的温、湿度变化很小,因此本试验并没有着重区分早期温度收缩、塑性收缩及自收缩,只分析混凝土总体的收缩。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mixture proportions of concrete

材料	水泥	细骨料	粗骨料	外加剂	水	矿粉	膨胀剂	玄武岩纤维
掺量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	465	673	1 010	12. 96	153	75	54	7. 95

表 2 玄武岩纤维特征参数
Table 2 Characteristic parameters of basalt fiber

长度/mm	直径/ μm	质量/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
20	16	2. 65	81	4 300	3. 1

表 3 钢板和栓钉的材料性能
Table 3 Material properties of steel plate and stud

材料	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%
Q235 钢板	398. 7	572. 6	210	20. 70
ML15AL	332. 5	426. 9	194	14. 87

1.3 试验方法

研究高性能混凝土早期收缩时,可以通过试验来评估其基本力学性能,主要包括关键龄期下的抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量 3 个主要试验项目。基本力学性能测试均严格按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[15]中所规定的方法进行,测试时间为相同养护条件下的 3、7、28 d,试件按不同龄期分为 3 组,每组 3 个。其中,抗压强度测试和劈裂抗拉强度测试采用边长 150 mm 的立方体试件;弹性模量测试采用 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的棱柱体试件。

试件设计为钢-混凝土组合结构,尺寸为 $400\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 的长方体,底部为 10 mm 厚的钢板,上部为 150 mm 厚的混凝土板,两者通过剪力钉有效连接,同时为忽略钢板界面约束,在钢板上涂抹脱模剂并铺上聚四氟乙烯薄膜。此外设置 $400\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的素混凝土块作为对照组。试件设计尺寸如图 1 所示。

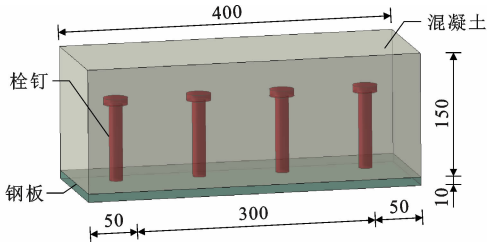


图 1 试件设计尺寸(mm)
Fig. 1 Design sizes of specimen (mm)

正交试验^[16]是一种设置多因素多水平试验的有效方法,其原理是根据正交性从全面试验中挑出有代表性的点进行分析,以达到高效、快速和经济的目的。本文按照正交试验方法建立了栓钉三因素三水平表,详见表 4。根据表 4 进行试验方案的设计,具体参数见表 5。

待混凝土浇筑 24 h 后进行拆模,用游标卡尺测量混凝土的原长,在试件端部布置位移观测点,并使用位移传感器对混凝土的整体收缩变形进行测量。此外,为进一步分析试件在高度方向的收缩应变分

表 4 正交试验因素水平

Table 4 Orthogonal test factor level

水平	因素		
	间距 A/mm	直径 B/mm	高度 C/mm
1	75	13	80
2	100	16	100
3	150	22	120

表 5 正交试验方案

Table 5 Orthogonal test program

试件编号	间距/mm	直径/mm	高度/mm
S-0			
S-1	75	13	80
S-2	75	16	120
S-3	75	22	100
S-4	100	13	100
S-5	100	16	80
S-6	100	22	120
S-7	150	13	120
S-8	150	16	100
S-9	150	22	80

布,在每个试件顶面和侧面布置应变片,采集龄期 1 d 到 28 d 的收缩数据。位移测点与应变片的布置及编号见图 2,其中“B-75”代表应变片位置距离混凝土底面 75 mm 高度处,其余类同。

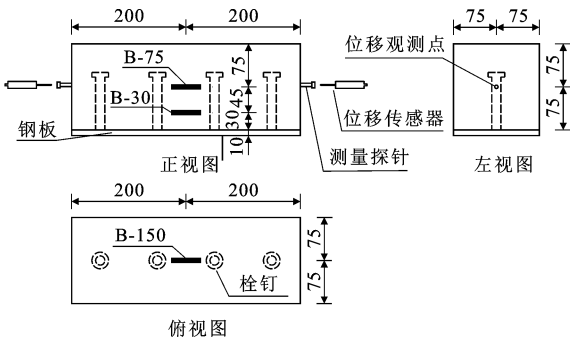


图 2 测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of measuring points (unit:mm)

2 结果与讨论

2.1 基本力学性能分析

表 6 为混凝土基本力学性能测试结果。可以看出:高性能混凝土的抗压强度在早期发展迅速,3 d 的强度已经达到 28 d 强度的 73%,7 d 强度达到了 28 d 强度的 84%,7 d 之后发展速度大幅度减小;弹性模量测试结果与抗压强度规律一致,3 d 及 7 d 的弹性模量分别达到 28 d 弹性模量的 81%和 93%;劈裂抗拉强度早期发展迅速,3 d 后发展缓慢,7 d 后有小幅度增长,3 d 及 7 d 的劈裂抗拉强度分别是

表 6 基本力学性能

Table 6 Basic mechanical properties

龄期/d	3	7	28
抗压强度/MPa	66.0	75.3	90.1
弹性模量/GPa	36.1	41.3	44.6
劈裂抗拉强度/MPa	3.49	3.62	5.05

28 d 强度的 69%和 72%。

2.2 自由收缩

将本文中的早强低收缩混凝土(S-0)与文献[17]中的普通硅酸盐混凝土(C-1)及钢纤维混凝土(C-2)的自由收缩应变随龄期的变化规律进行对比,如图 3 所示。

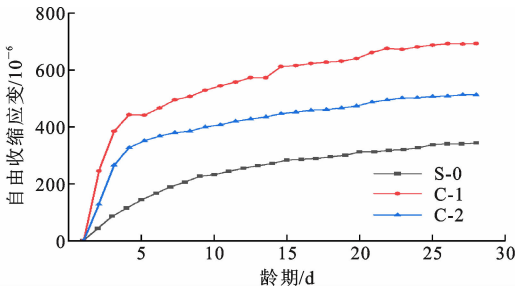


图 3 不同龄期混凝土的自由收缩

Fig. 3 Free shrinkage of concrete at different ages

从图 3 可以看出:在前 3 d 中 C-1 和 C-2 收缩发展很快,随后发展速度逐渐减缓至稳定,而 S-0 在整体收缩发展过程中处于平滑增长状态。C-1 的最终收缩应变为 691.98×10^{-6} ,C-2 的最终收缩应变为 512.06×10^{-6} ,S-0 的最终收缩应变为 342.84×10^{-6} ,S-0 的 28 d 收缩应变分别是 C-1、C-2 的 49.54%、66.95%。这是由于本试验中的混凝土加入了玄武岩纤维,相当于在水泥凝结硬化过程中形成大量微配筋,约束了混凝土的收缩,同时混凝土中还加入了膨胀剂,使得混凝土产生适度的膨胀,抵消一部分收缩变形。通过对比可知,本试验中的早强低收缩混凝土不仅早期收缩发展平稳增长,而且有着更小的收缩应变。

2.3 约束收缩

2.3.1 约束收缩应变

通过位移传感器测得混凝土整体轴向收缩变形,将其与试件原长相比得到约束收缩应变。图 4 为不同栓钉水平组合下混凝土早期约束收缩变形发展曲线。可以看出,在 28 d 龄期内,内置栓钉的试件收缩应变基本上都比无约束下的素混凝土收缩应变小,且随着不同栓钉因素组合所得到的收缩应变各不相同。结果表明,在混凝土中配置栓钉会对混凝土收缩产生抑制作用,但栓钉的不同布置方式会

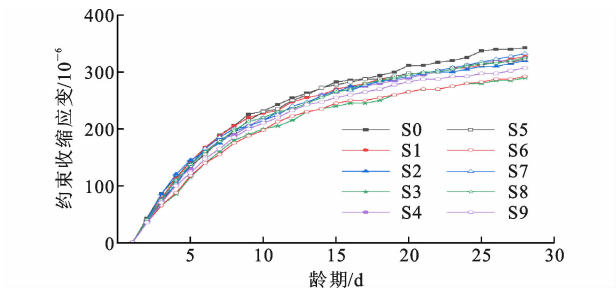


图 4 各试件的约束收缩应变

Fig. 4 Restrained shrinkage strain of each specimen

影响这种抑制作用的大小,S-3 试件在试验过程中是约束效果最显著的,比素混凝土收缩小 15.41%。

表 7 混凝土 28 d 的约束收缩应变

Table 7 Restrained shrinkage strain of concrete in 28 d

试件编号	S-0	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9
约束收缩应变/ 10^{-6}	342.84	327.50	320.00	290.00	325.00	322.50	292.50	332.50	3250	307.50

基于试验设计表,采用正交分析理论计算每个因素对应的平均约束收缩应变。对于 A 因素,在栓钉间距为 75 mm 的水平下,其平均约束收缩应变 \bar{K}_{A1} 为

$$\bar{K}_{A1} = \frac{\epsilon_{S-1} + \epsilon_{S-2} + \epsilon_{S-3}}{3} = \frac{327.5 + 320 + 290}{3} \times 10^{-6} = 312.5 \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: ϵ_{S-1} 、 ϵ_{S-2} 、 ϵ_{S-3} 分别为试件 S-1、S-2、S-3 的约束收缩应变值。

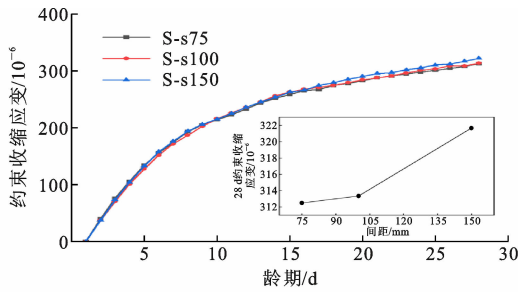
同理,可得到 A 因素其他水平下的平均约束收缩应变 $\bar{K}_{A2} = 313.3 \times 10^{-6}$ 与 $\bar{K}_{A3} = 321.7 \times 10^{-6}$ 。根据正交试验的特性,对于 A1、A2、A3 来说,3 组试验除了因素 A,其余因素以及试验条件均一致,因此可以对其进行直接比较,分析各因素对混凝土约束收缩的影响。同理可以得到因素 B 和因素 C 各水平下的混凝土平均约束收缩应变值。三因素三水平下随龄期发展的平均约束收缩应变值如图 5 所示。本文对正交试验方案进行数据处理,下面图例编号与试验方案编号有所不同,其中“S”代表收缩,“s”代表栓钉间距,“d”代表栓钉直径,“h”代表栓钉高度,如“S-s75”表示剪力钉间距为 75 mm 时的混凝土约束收缩应变。

本试验采用的混凝土是低收缩混凝土,试验测得的约束收缩应变都比较小,导致各水平之间的相对变化差别不明显。由图 5(a)可以看出,当栓钉间距增加时,混凝土约束收缩应变逐渐增大。间距为 75 mm 的收缩应变终值是 312.5×10^{-6} ,分别比间距 100 mm 和 150 mm 的约束收缩应变低了 0.26%、

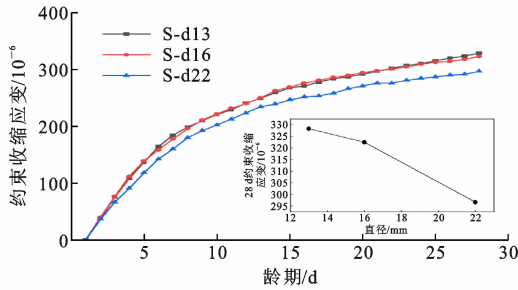
同时从整体发展规律的趋势可以看出,栓钉的约束作用只会影响最终的收缩应变值大小,布置栓钉的混凝土试件的变形规律与素混凝土一致。内置栓钉混凝土收缩应变随着龄期增长而连续增长,表现为早期发展速度较快,中期发展速度减缓,后期收缩速率进一步减小并趋向稳定。

2.3.2 剪力钉不同参数对高性能混凝土收缩影响

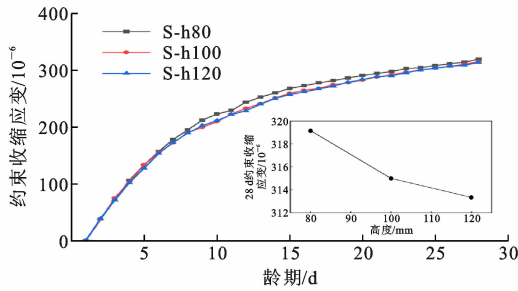
将试块按照试验规范要求养护 28 d 后测量约束收缩变形值,计算得各试验方案 28 d 约束收缩应变值如表 7 所示。



(a) 不同间距



(b) 不同直径



(c) 不同高度

图 5 各因素的约束收缩应变

Fig. 5 Restrained shrinkage strain of each factor

2.93%。这是因为栓钉间距与单位长度内的栓钉数量、约束的连续性成反比,所以栓钉间距越小,越趋向于钢筋约束,约束作用就越强。由图 5(b)可以看

出,当栓钉直径增加时,混凝土约束收缩应变逐渐减小。直径为 13 mm 的收缩应变终值是 328.33×10^{-6} ,分别比直径 16 mm 和 22 mm 的约束收缩应变高了 1.81%、10.67%。这是由于栓钉直径越长,其对混凝土的约束范围越广,对混凝土的约束作用也越强。由图 5(c)可以看出,栓钉高度变化对混凝土约束收缩影响较小,但约束收缩应变总体趋势随着高度的增加而减小。高度为 80 mm 的收缩应变终值是 319.17×10^{-6} ,分别比高度 100 mm 和 120 mm 的约束收缩应变高了 1.32%、1.86%。原因是混凝土纵向收缩方向与栓钉高度方向垂直,所以对约束收缩影响较小,但栓钉高度增加,等效于试件的配筋率增加,增加了约束效应。综上所述,栓钉直径对约束收缩的影响较大。

通过分析各因素引起的数据波动与误差引起的数据波动的差异程度,来辨别哪个因素对指标的影响是最显著的。显著性水平 α 取 0.01、0.05、0.1,当显著性检验的指标值 $F \geq F_{0.01}$ 时,为高度显著影响;当 $F_{0.05} \leq F \leq F_{0.01}$ 时,为比较显著影响;当 $F_{0.1} \leq F \leq F_{0.05}$ 时,为一般显著影响;当 $F \leq F_{0.1}$ 时,为不显著影响。对栓钉因素正交试验数据进行方差分析^[18],结果见表 8。

表 8 栓钉因素方差分析

Table 8 Variance analysis of stud factors					
方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
间距	154.17	2	77.1	12.3	一般显著
直径	1 704.17	2	852.1	136.3	高度显著
高度	54.17	2	27.1	4.3	不显著
误差	12.50	2	6.3		
总计	1 925.01	8			
临界值	$F_{0.01}(2,2)=99.01, F_{0.05}(2,2)=19, F_{0.10}(2,2)=9$				

方差分析结果表明,误差因素的偏差平方和均小于各栓钉因素,说明误差因素对约束收缩应变影响小,栓钉因素的变化对指标的影响很大。栓钉直径的影响为高度显著,栓钉间距的影响为一般显著,栓钉高度为不显著影响。因此栓钉因素对高性能混凝土约束收缩应变的敏感性影响从大到小依次为直径、间距、高度。

2.3.3 剪力钉参数在高度方向对收缩应变的影响

图 6 给出了栓钉在间距、直径、高度影响下混凝土沿高度方向的约束收缩应变。图 6 中 S-s75-150 表示剪力钉间距为 75 mm 时,距离钢板 30 mm 处的混凝土约束收缩应变,其余类同。

从图 6(a)可以看出,栓钉间距的变化对距离试

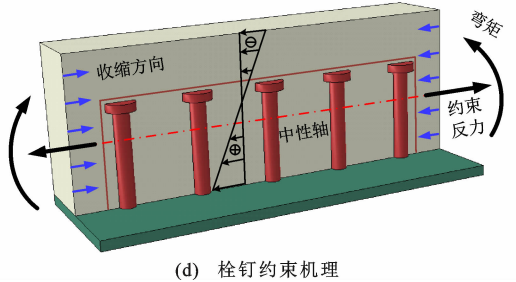
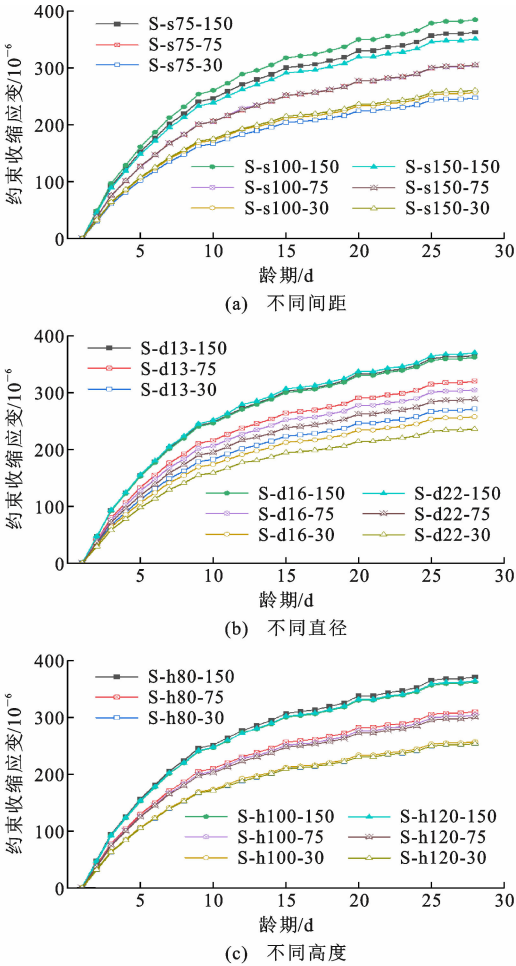


图 6 各栓钉因素在高度方向的约束收缩应变
Fig. 6 Restrained shrinkage strain of stud factors in height direction

件底面 75 mm 位置的约束收缩应变影响不大,28 d 的约束收缩都在 304×10^{-6} 左右,这是由于试件中点处的拉应力和压应力相互抵消所致。随着栓钉间距的减小,栓钉数量增多,等效的配筋率越大,使混凝土受到的约束越大,从而产生较小的约束收缩。在高度方向上,越靠近混凝土底部,受到的约束就越大,约束收缩应变从混凝土底部到顶部呈现出了梯度增加的现象。在距离底面 150 mm 距离时,栓钉间距为 100 mm 的试件约束收缩应变明显大于其他间距,这是由于应变片布置在试件表面中间位置,当栓钉间距为 100 mm 时,中间位置没有栓钉,对混凝土

土约束收缩的影响较小,因此约束收缩应变较大,对中间是否存在栓钉对收缩的影响还需进一步研究。当栓钉底部受到较大的约束时,栓钉会对混凝土产生约束反力,使得混凝土顶部产生较大的压应力,故间距为 75 mm 的试件约束收缩应变要比间距为 150 mm 的约束收缩应变大。

由于栓钉直径只在试件的宽度方向和长度方向发生变化,在试件的高度方向不发生变化,所以在直径变化时,试件的约束收缩应变在顶部不发生明显变化。从图 6(b)可以看出,在距底面 30 mm 距离时,S-d13、S-d16、S-d22 试件的 28 d 约束收缩应变分别为 270.78×10^{-6} 、 257.35×10^{-6} 、 235.56×10^{-6} ,直径 13 mm 和 16 mm 的栓钉试件约束收缩应变分别比直径 22 mm 的试件增大 14.95%、9.25%。在距底面 75 mm 距离时,S-d13、S-d16、S-d22 试件在 28 d 的约束收缩应变分别为 319.8×10^{-6} 、 304.67×10^{-6} 、 288.38×10^{-6} ,直径 13 mm 和 16 mm 的栓钉试件约束收缩应变分别比直径 22 mm 的试件增大 10.9%、5.65%。栓钉的径向约束范围随其直径增加而增大,而混凝土的约束效应也得以增强。此外,从混凝土高度方向来看,越接近混凝土底部,栓钉的约束作用越强,混凝土约束收缩应变越小。

从图 6(c)可以看出,随着栓钉高度的变化,在距离底面 30 mm 位置处的约束收缩应变几乎没有变化,这是由于不管栓钉高度如何变化,位于底面 30 mm 处的截面栓钉数量、直径没有改变,且约束范围没有改变,所以此处的收缩应变相差无几。在距底面 75 mm 距离时,S-h80、S-h100、S-h120 试件在 28 d 的约束收缩应变分别为 309.44×10^{-6} 、 303.64×10^{-6} 、 299.76×10^{-6} ,高度 80 mm 和 100 mm 的栓钉试件约束收缩应变分别比直径 120 mm 的试件增大 3.23%、1.29%。在距底面 150 mm 距离时,约束收缩应变相差甚微,最大收缩应变差值仅为 3.47×10^{-6} 。由上述现象可以看出,增加栓钉的高度对抑制约束收缩应变并没有显著的效果,仅在试件中间位置有较小的约束作用,由于栓钉高度的增大,增加了栓钉在高度上的约束范围,使得对中部混凝土的约束作用增强,因此混凝土的约束收缩应变减小。

2.4 约束度分析

约束度分析是研究混凝土约束收缩的重要指标之一,本次试验中的约束度^[19]可以通过式(2)进行计算。

$$R = \frac{(\Delta L_{sh} - \Delta L_r) / L}{\Delta L_{sh} / L} = \frac{\epsilon_{sh-r}}{\epsilon_{sh}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R 为约束度; ΔL_{sh} 为混凝土自由收缩变形值; ΔL_r 为混凝土在约束状态下的实测变形值; L 为试件原长; ϵ_{sh-r} 为混凝土受到约束作用而未自由收缩的应变值; ϵ_{sh} 为混凝土自由收缩应变值。

根据约束度公式(2)可以得到各组试件的约束度,不同栓钉因素组合下各试件约束度曲线如图 7 所示。

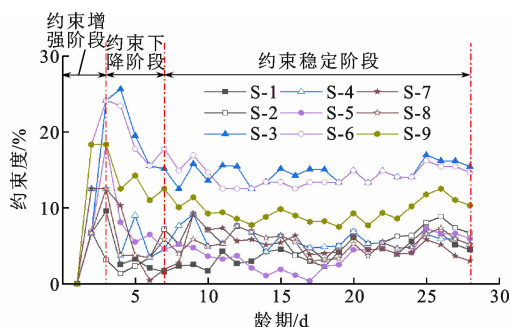


图 7 各试件的约束度曲线

Fig. 7 Restrained degree curve of each specimen

从图 7 可以看出,栓钉的约束作用可以分为 3 个阶段:

(1)第一阶段是约束增强阶段,发生在浇筑试件后的 3 d 内。在该阶段期间龄期的增加使得约束度迅速增加,持续时间较短。试件浇注之初,混凝土之间的整体性未发展成熟,核心混凝土(长度为 400 mm 且与栓钉等高、等宽的混凝土块)收缩时将会受到栓钉的阻挡,使得收缩应变减小,产生较大的约束。

(2)第二阶段是约束下降阶段,发生在试件养护的 3~7 d 内。栓钉的约束度在该阶段随龄期的增加下降较快,持续时间同样较短。随着龄期的增加,外围混凝土与核心混凝土的整体性增强,混凝土之间的黏结性增强,使得混凝土在收缩过程中,外围混凝土携带着核心混凝土继续收缩,从而使约束度降低。

(3)第三阶段是约束稳定阶段,发生在试件养护的 7 d 后。约束度随龄期的增加一般在某个范围内上下波动,约束效果比较稳定,且持续时间长。龄期继续增加时,混凝土与栓钉之间的黏结作用发展逐渐完善,栓钉的约束作用逐渐稳定。

2.5 开裂风险

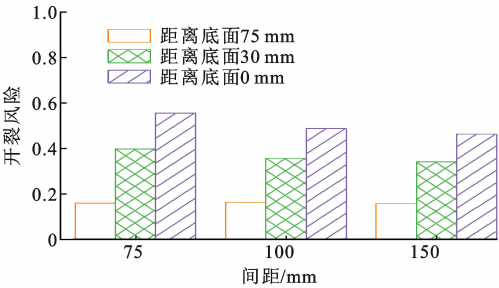
在未通过试验观察到开裂的情况下,确定开裂风险(衡量试样可能接近失效的程度)^[20]的能力可能尤其重要。混凝土的开裂风险可表示为

$$\Theta_{cr} = \frac{\sigma_t}{f_t} \tag{3}$$

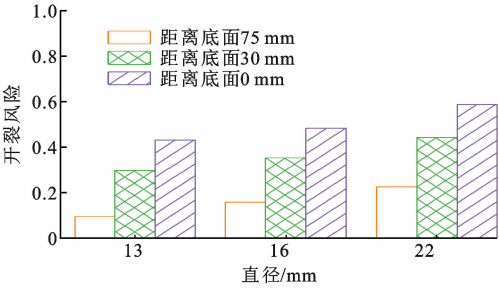
$$\sigma_t(t) = [\epsilon_{sh}(t) - \epsilon_r(t)] E_c(t) \tag{4}$$

式中： Θ_{cr} 为混凝土的开裂可能性； f_t 为混凝土 28 d 的抗拉强度； σ_t 为混凝土 28 d 的拉应力； $\epsilon_r(t)$ 为混凝土 28 d 的实测约束收缩应变； $E_c(t)$ 为混凝土 28 d 的有效弹性模量。

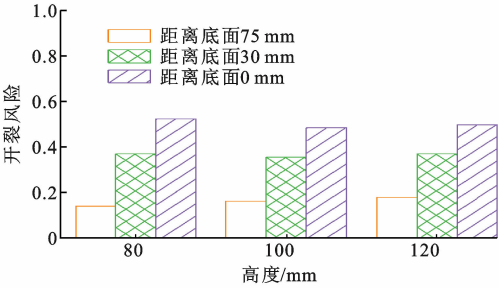
图 8 给出了不同栓钉因素下试件在 28 d 后的开裂风险。由于混凝土的开裂与拉应力息息相关，所以图 8 仅显示高度为 0、30、75 mm 处的开裂风险，其中 30、75 mm 处的应变是通过应变片测得的，0 mm 处的应变是通过 MATLAB 线性外推法预测得到的。



(a) 不同间距



(b) 不同直径



(c) 不同高度

图 8 混凝土 28 d 后的开裂风险

Fig. 8 Cracking potential of concrete after 28 d

从图 8 可以观察到，所有的计算开裂风险值都小于 1，即混凝土未开裂，这一结果与试验中并未发现裂缝的结论一致。开裂风险最大值发生在试件的最底部，随着栓钉间距从 150 mm 减小到 75 mm，最大开裂风险提高了 20.03%，当栓钉直径由 13 mm 增加到 22 mm 时，最大开裂风险提高了 36.05%，

且随着栓钉间距的缩小和直径的增大，开裂风险会逐渐提高。有趣的是，栓钉高度的变化并没有对混凝土底部的开裂风险产生明显改变。为降低高性能混凝土的最大开裂风险，在满足构造和配筋率的要求时，可采用较低直径和较高高度的栓钉布置方式。

3 结 语

(1)本试验中的早强低收缩混凝土由于掺加了玄武岩纤维和膨胀剂，使得该混凝土相比普通混凝土和掺加钢纤维的混凝土拥有更小的自由收缩变形。

(2)基于正交分析理论分析了栓钉直径、高度、间距 3 个因素对于混凝土约束收缩的影响。结果显示，直径越大、高度越高、间距越小，栓钉对于混凝土收缩的约束作用越大。各因素敏感性从大到小依次为直径、间距、高度。

(3)间距变化对混凝土中部的约束收缩应变影响不大，直径变化对混凝土顶部的约束收缩应变影响较小，高度变化对混凝土底部的约束收缩应变几乎没影响。

(4)通过观察各组试件的约束度可知，栓钉的约束作用通常在早期较大，呈现较大的波动，随着龄期增加，约束度逐渐稳定在某个区间。因此可将栓钉的约束作用分为 3 个阶段：约束增强阶段、约束下降阶段和约束稳定阶段。

(5)为有效控制栓钉根部的约束应力，降低混凝土的开裂风险，宜采用直径小和高度高的栓钉布置方式。

参考文献：

References:

[1] 雷 瑛,梁腾飞.玄武岩纤维增强钢筋混凝土早期开裂及抗压强度分析[J].合成纤维,2021,50(2):54-57.
LEI Ying,LIANG Tengfei. Analysis of early cracking and compressive strength of basalt fiber reinforced concrete[J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(2): 54-57.
[2] ZHANG Y D, AFROZ S, NGUYEN Q D, et al. Analytical model predicting the concrete tensile stress development in the restrained shrinkage ring test[J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124930.
[3] GILBERT R I. Cracking caused by early-age deformation of concrete-prediction and control[J]. Procedia Engineering, 2017, 172: 13-22.

- [4] 马丽娜,贡金鑫,赵艳华.高性能混凝土约束收缩对氯离子扩散的影响[J].建筑科学与工程学报,2017,34(6):85-92.
MA Lina,GONG Jinxin,ZHAO Yanhua. Influence of constrained shrinkage cracking on chloride ion diffusivity of high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2017,34(6):85-92.
- [5] DEBOODT T,FU T F,IDEKER J H. Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete[J]. Construction and Building Materials,2016,119:53-60.
- [6] 王 钧,栾 奕,叶焕军.玄武岩纤维混凝土梁裂缝和变形试验研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(4):76-81.
WANG Jun,LUAN Yi,YE Huanjun. Experimental research on crack and deformation of basalt fiber reinforced concrete beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2016,33(4):76-81.
- [7] KHAN I,XU T F,CASTEL A,et al. Early-age tensile creep and shrinkage-induced cracking in internally restrained concrete members[J]. Magazine of Concrete Research,2019,71(22):1167-1179.
- [8] HUANG L P,HUA J M,KANG M,et al. Influence of reinforcement configuration on the shrinkage and cracking potential of high-performance concrete[J]. Construction and Building Materials,2017,140:20-30.
- [9] SUN G J,XUE S D,QU X S,et al. Experimental investigation of creep and shrinkage of reinforced concrete with influence of reinforcement ratio[J]. Advances in concrete construction,2019,7(4):211-218.
- [10] 李 聪,陈宝春,黄卿维.超高性能混凝土圆环约束收缩试验研究[J].工程力学,2019,36(8):49-58.
LI Cong,CHEN Baochun,HUANG Qingwei. Experimental research on shrinkage of ultra-high performance concrete under restrained rings[J]. Engineering Mechanics,2019,36(8):49-58.
- [11] 程 新,詹炳根,周 安.玄武岩纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(8):1114-1118.
CHENG Xin,ZHAN Binggen,ZHOU An. Effect of basalt fiber on shrinkage and cracking of foam concrete[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2019,42(8):1114-1118.
- [12] 李福海,文 涛,唐慧琪,等.干寒大温差下早龄期混凝土收缩特性及防裂技术[J].西南交通大学学报,2023,58(6):1405-1412.
LI Fuhai,WEN Tao,TANG Huiqi,et al. Shrinkage characteristics and anti-crack technology of early-age concrete under large dry-cold temperature difference [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2023,58(6):1405-1412.
- [13] 王 成,张立宇,姜怡林,等.混凝土圆环约束收缩性能试验研究[J].路基工程,2022(1):58-61.
WANG Cheng,ZHANG Liyu,JIANG Yilin,et al. Experimental research on ring-constrained shrinkage performance of concrete [J]. Subgrade Engineering,2022(1):58-61.
- [14] HOSSAIN A B,WEISS J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens[J]. Cement and Concrete Composites,2004,26(5):531-540.
- [15] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties:GB/T 50081-2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.
- [16] FU Q A,XU W R,BU M X,et al. Orthogonal experimental study on hybrid-fiber high-durability concrete for marine environment[J]. Journal of Materials Research and Technology,2021,13:1790-1804.
- [17] 王 婧.高强钢纤维混凝土收缩性能研究[J].硅酸盐通报,2017,36(8):2869-2873.
WANG Jing. Experiment study on the shrinkage behavior of high performance steel fiber reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(8):2869-2873.
- [18] 崔乃夫,崔宏环,刘卫涛,等.玄武岩纤维混凝土力学性能影响因素及机理分析[J].低温建筑技术,2018,40(5):1-4.
CUI Naifu,CUI Honghuan,LIU Weitao,et al. Analysis of influence factors of mechanical properties of basalt fiber concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology,2018,40(5):1-4.
- [19] 华建民,刘 琦,冯 超.高强混凝土收缩与栓钉内约束相互作用的影响研究[J].硅酸盐通报,2018,37(3):873-880.
HUA Jianmin,LIU Qi,FENG Chao. Interaction between high-strength concrete shrinkage and interior restraint of the stud [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2018,37(3):873-880.
- [20] HOSSAIN A B,WEISS J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens[J]. Cement and Concrete Composites,2004,26(5):531-540.