

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 22

隧道支护双排栓钉组合结构大偏心受压性能研究

苗志豪¹, 杨跃飞², 路军富¹, 张旭华²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中铁九局集团第五工程有限公司, 成都 611700)

摘要: 针对应力集中带、破碎构造带等不良地质下隧道初期支护体系承载性能不足的问题, 提出一种在型钢与混凝土界面布设栓钉剪力件的组合支护结构, 针对隧道支护结构的受力特点开展大偏心受压试验来探究组合支护结构的破坏模式和承载特性, 并通过数值模拟分析不同偏心距条件下组合结构承载性能。结果表明: 当无栓钉剪力件时, 工字型钢与喷射混凝土发生分离破坏, 当布设栓钉剪力件时, 型钢混凝土结构破坏模式表现为混凝土开裂和压溃, 栓钉剪力件有效地限制了型钢与混凝土接触界面间的相对滑移; 相较于自然粘结工况, 布设双排形栓钉剪力件试件的极限承载力增长了 14. 79%, 侧向挠度减小了 22. 94%, 试件表现出较好的韧性、承载能力和抗弯刚度; 在相同偏心距下, 布设栓钉剪力件能有效提高结构的极限承载力, 并且随着偏心距的增大, 栓钉剪力件对试件的大偏压承载性能的提升效果逐渐增强。研究成果可为隧道初期支护技术提供理论支持。

关键词: 型钢-喷射混凝土组合结构; 大偏心受压; 承载能力; 栓钉剪力件; 极限承载力

中图分类号: U451. 5

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0603-08

Study on Large Eccentric Compression Performance of Double-Row Stud Composite Structure of Tunnel Support

Miao Zhihao¹, Yang Yuefei², Lu Junfu¹, Zhang Xuhua²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China; 2. The China Railway No. 9 Group Fifth Engineering Co., Ltd, Chengdu 611700, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient bearing capacity of tunnel primary support system under unfavorable geology, such as stress concentration zone and broken structural zone, a composite support structure with stud shear connectors arranged at the interface between steel and concrete is proposed. According to the stress characteristics of tunnel support structure, a large eccentric compression test is carried out to explore the failure mode and bearing characteristics of composite support structure, and the bearing capacity of composite structure under different eccentricity conditions is analyzed by numerical simulation. The results show that when there is no stud shear specimen, the separation failure occurs between I-shaped steel and shotcrete. When the stud shear is arranged, the failure mode of steel reinforced concrete structure is concrete cracking and crushing, and the stud shear effectively limits the relative slip between the contact interface of steel and concrete. Compared with the natural bonding condition, the ultimate bearing capacity of the specimens with double-row stud shear connectors increased by 14. 79%, and the lateral deflection decreased by 22. 94%. The specimens showed better toughness, bearing capacity and bending stiffness. Under the same eccentricity, the arrangement of stud shear connectors can effectively

收稿日期: 2024-12-04(修改稿)

作者简介: 苗志豪 (1999—), 男, 四川绵阳人, 硕士, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。

E-mail: 319785876@qq.com

通讯作者: 路军富 (1978—), 男, 河南新乡人, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。

E-mail: lujunfu@126.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978088); SKLGP 国家重点实验室自主课题(SKLGP2021Z007)

improve the ultimate bearing capacity of the structure, and with the increase of eccentricity, the effect of stud shear connectors on the bearing capacity of the specimen under large eccentric compression is gradually enhanced. The research results can provide theoretical support for the initial support technology of tunnel.

Keywords: steel-shotcrete composite structure; large eccentric compression; bearing capacity; stud shear connector; ultimate bearing capacity

0 引言

当隧道工程穿越通过应力集中带与破碎构造带等不良地质条件时,由于围岩应力释放引发的变形压力,常导致型钢与喷射混凝土界面产生滑移,导致喷层开裂剥落、钢支撑扭曲变形等结构性损伤,最终引发支护体系承载力衰减甚至完全失效^[1-4]。因此,针对复杂地质条件下隧道支护结构面临的界面滑移问题,开展隧道初期支护体系承载性能的提升方法研究,为同类工程提供理论支撑。

近年来,部分学者^[5-8]通过改变型钢混凝土结构材料本身的参数来提升结构的承载能力,通过提高型钢和混凝土参数,并开展偏心试验,得出提高混凝土强度能有效地增强结构的承载性能;通过在高强混凝土中掺入钢纤维等材料,也能进一步提高结构的承载能力。在结构内部配置箍筋,调整箍筋间距等参数,结合数值模拟与室内试验对型钢混凝土结构的力学性能进行研究,得出在型钢混凝土结构内部配置箍筋以及调整箍筋间距,能有效地约束核心混凝土,从而提高试件的整体承载能力^[9-10]。

一些学者通过在型钢与混凝土间布设栓钉剪力件有效地增强了型钢与混凝土的粘结强度,从而提高组合结构的承载性能。董宏英等^[11]通过推出布设螺栓剪力件型钢混凝土试件的试验,有效地改善了型钢混凝土接触界面的粘接性能,从而改善试件的承载能力。王威等^[12]通过研究带栓钉的波形钢板混凝土组合结构,改变栓钉的长度,考虑波形钢板混凝土界面间的粘结滑移,研究其对承载性能的影响。Lu 等^[13]通过室内试验发现在型钢腹板焊接栓钉剪力件能有效地抑制结构界面间的相对滑移,从而提高试件的承载能力。陈宗平等^[14]通过研究发现在型钢不同位置布设栓钉剪力件在一

定程度上提高了试件的粘结强度,同时提高了试件的整体承载性能。

但由于上述研究大多应用于房屋建筑与桥梁等地上结构领域,相较隧道及地下工程,结构形式差异较大(地上结构配置纵向钢筋等),且隧道初期支护采用的喷射混凝土与常规规模混凝土材料力学性能有较大差异。

因此,本文针对软弱围岩隧道支护结构复杂受力特征,提出一种在型钢腹板两侧对称布置双排栓钉剪力件的组合支护体系,通过开展大偏心受压试件试验,研究其承载性能。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验设计自然粘结和布设双排形栓钉 2 组试件进行大偏心受压试验,试件设计参数如表 1 所示。试件长度均为 1 180 mm,截面尺寸 $b \times h = 260 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$,试件规格和截面,如图 1 所示。

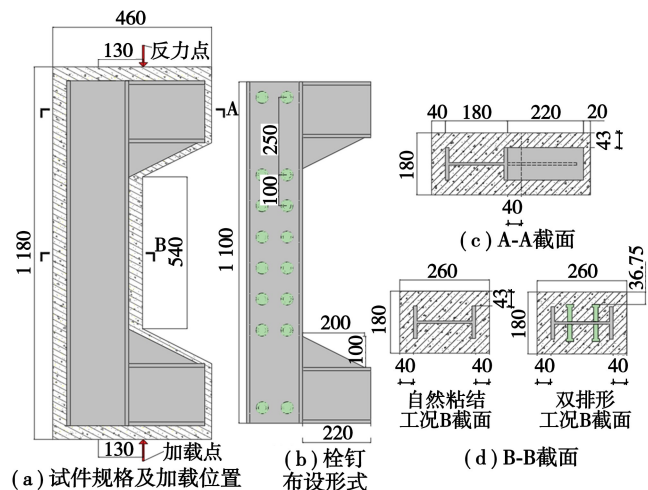


图 1 试件规格及截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen specification and section size (unit: mm)

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimen

| 工况 | 混凝土强度级别 | 型钢型号 | 试件高度/mm | 荷载偏心距/mm | 栓钉尺寸/mm | 栓钉布置形式 | 栓钉横纵间距/mm |
|------|---------|------|---------|---------------|---------|--------|-----------|
| SRC1 | C20 | I18 | 1 180 | 182 | - | - | - |
| SRC2 | | | | $(e_0/h=0.7)$ | 13×50 | 双排平行布设 | 80×100 |

在型钢腹板上按照一定间距焊接栓钉后,人工浇筑取自隧道施工现场初期支护的喷射混凝土,并在浇筑过程中不断振捣密实喷射混凝土,制作完成后对试件表面人工抹平,最后,在标准养护 28 d 后,对试件开展大偏心受压试验。

1.2 材料性能

型钢采用 I18,强度等级为 Q235B,栓钉采用等级为 ML15,尺寸为 13 mm×50 mm 的圆柱型栓钉,试验采用的喷射混凝土强度等级为 C20。钢材及喷射混凝土材料参数,如表 2 和表 3 所示。

表 2 混凝土材料参数

Table 2 Concrete material parameters

| 混凝土强度级别 | 抗压强度 /MPa | 劈裂抗拉强度 /MPa | 弹性模量 /MPa |
|---------|-----------|-------------|--------------------|
| C20 | 18.2 | 1.60 | 1.98×10^4 |

表 3 钢材材料参数

Table 3 Steel material parameters

| 钢材类别 | 屈服应力 /MPa | 极限应力 /MPa | 弹性模量 /MPa |
|------|-----------|-----------|--------------------|
| 型钢翼缘 | 239.4 | 405.5 | 20.5×10^4 |
| 型钢腹板 | 243.5 | 410.6 | 20.4×10^4 |
| 栓钉 | 236.2 | 404.7 | 20.5×10^4 |

1.3 加载方案及测点布置

采用长柱压力试验机进行大偏心受压试验加载,为了满足偏心受压试验的加载条件,在试件两端设置铰支座,通过移动铰支座来调节荷载偏心矩,达到双向偏压效果,并在试件与支座之间放置钢垫块,以保证试件均匀受力,试验装置,如图 2 所示。试验采用单调静力加载,先预加 5% 的极限承载力预估值,保证试件各部分接触良好,以速率为 0.5 mm/min 的位移控制速率持续加载,直至受压侧喷射混凝土出现剥落破坏时终止加载。

采用 VIC-2D 全场应变测量系统对试件的受压破坏模式与破坏过程进行监测,如图 2(b) 所示。在试件受拉侧采用五点法布置位移传感器,间距 20 cm,用于监测试件侧向挠度变形,如图 2(a) 所示。为测量试件的应变和栓钉的受力情况,在试件中部混凝土表面、型钢中部表面和中部截面两侧栓钉根部(图 3 中①所示)上下表面布设应变片。

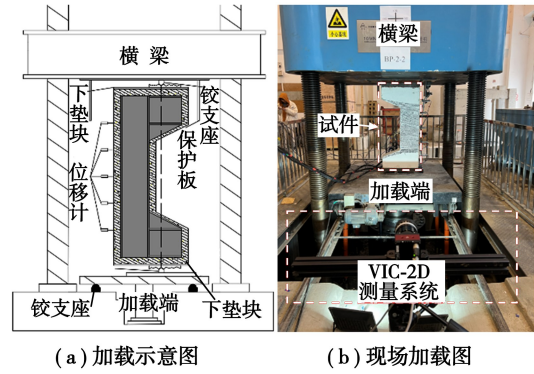


图 2 试验装置

Fig. 2 Test device

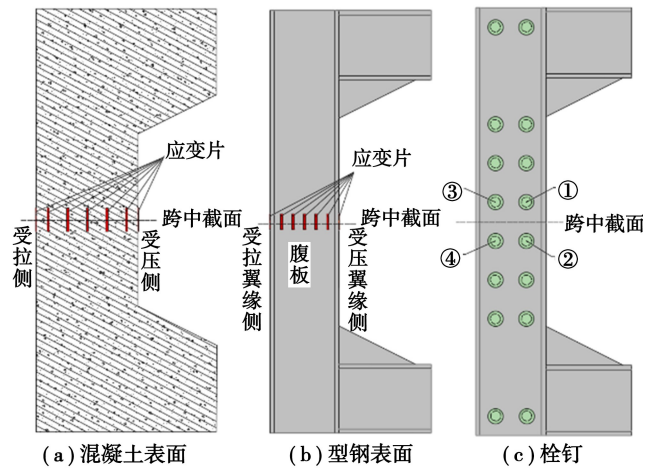


图 3 试件应变片布设

Fig. 3 Layout of strain gauges for specimens

2 试验结果及分析

2.1 加载过程与破坏模式

2.1.1 自然粘结试件

通过 VIC-2D 全场应变测量系统测得型钢与喷射混凝土在自然粘结工况下试件的破坏情况,如图 4 所示。加载前期,试件表面未发生明显的变化,当加载至 $0.14N_u$ (N_u 为峰值荷载) 时,试件跨中截面受拉侧开始出现横向裂缝,主应变范围 $0.00790 \sim 0.00950$,如图 4(a) 所示。当加载至 $0.57N_u$ 时,受拉侧裂缝不断横向发展,裂缝宽度与深度不断增大,裂缝周围出现应力集中,主应变范围 $0.01501 \sim 0.01740$,如图 4(b) 所示。当加载至 $0.80N_u$ 时,受压侧混凝土开始出现竖向受压裂缝,应力集中出现在跨中截面附近的受压侧区域,主应变范围 $0.01445 \sim 0.01660$,如图 4(c) 所示。当试件加载至 N_u 时,受压侧混凝土有较多压溃裂缝,受压区局部区域混凝土已压溃剥落,如图 4(d) 所示。混凝土最终的破坏在受压区,受拉侧型钢翼缘

已屈服,符合大偏心受压破坏特征。

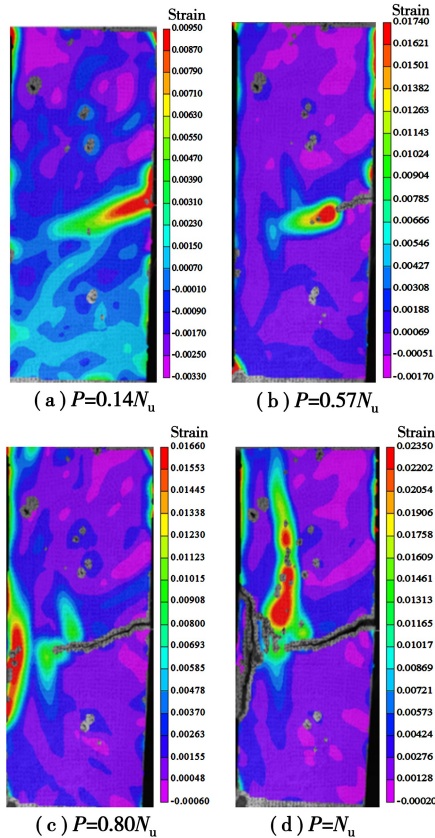


图 4 最大主应变(左为受压侧、右为受拉侧)
Fig. 4 Maximum principal strain (the left is the compressive side and the right is the tensile side)

在自然粘结条件下,试件大偏心受压的破坏形态与失效模式分析,如图 5 所示。

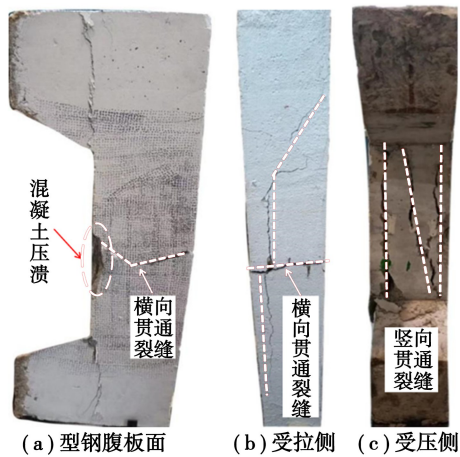


图 5 最终破坏图
Fig. 5 The final destruction diagram

由图 5(a)可知,自然粘结试件中部侧面混凝土存在一条受拉贯通裂缝,裂缝宽度达到 9 mm,横向延伸至受拉区,该区域混凝土压溃剥落;由图 5(b)可知,试件四周混凝土与型钢存在滑移分离

现象,部分混凝土已剥落,受拉侧横向主裂缝内型钢翼缘清晰可见;由图 5(c)可知,受压侧混凝土除局部压溃剥落外,表面还存在 3 条竖向贯通裂缝,混凝土与型钢翼缘表面发生滑移分离。自然粘结工况下的试件的破坏与实际隧道支护结构破坏一致,由于型钢与混凝土接触界面之间没有有效连接,混凝土发生大面积滑移分离导致其与型钢无法共同承载。

2. 1. 2 双排形栓钉试件

通过 VIC-2D 全场应变测量系统测得布设双排型栓钉工况下试件的破坏形态和演化情况,如图 6 所示。加载初期,双排形栓钉试件与自然粘结试件变化情况基本一致。当加载至 0. 19Nu 时,试件受拉侧首先出现两条细微横向裂缝,主应变范围 0. 005 62~0. 006 45,如图 6(a)所示;当加载至 0. 69Nu 时,受拉侧混凝土不断出现新的横向裂缝,且裂缝横向发展,宽度逐渐增大,裂缝深度不断加深,裂缝周围出现应力集中,主应变范围 0. 008 98~0. 010 25,如图 6(b)所示;当加载至 0. 86Nu 时,受压侧出现应力集中,混凝土开始出现细微竖向裂缝,主应变范围 0. 013 24~0. 015 10,如图 6(c)所示;当加载达到 Nu 时,受压侧混凝土有较多压溃裂缝,局部混凝土剥落。混凝土最终的破

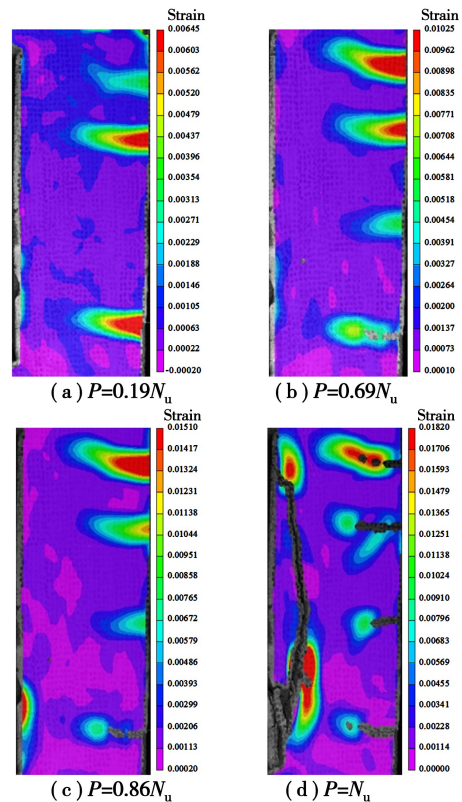


图 6 最大主应变(左侧受压、右侧受拉)
Fig. 6 Maximum principal strain (compression on the left side, tension on the right side)

坏在受压侧,受拉侧型钢翼缘已屈服,符合大偏心受压破坏特征,如图6(d)所示。

布设双排栓钉剪力件的型钢-喷射混凝土组合试件在大偏心受压荷载下的破坏特征,如图7所示。由图7(a)可知,布设双排形栓钉试件型钢腹板侧共存在4条受拉裂缝且以跨中截面对称分布,主裂缝沿水平方向发展至型钢腹板中部,裂缝最大宽度达到约6 mm,受压侧混凝土被压溃;由图7(b)可知,受拉侧混凝土存在4条明显的横向裂缝,且型钢受拉翼缘表面保护层混凝土与型钢翼缘发生分离,主裂缝内型钢翼缘清晰可见;由图7(c)可知,受压侧混凝土除局部压溃剥落外,同时存在一条竖向贯通裂缝,且型钢翼缘表面混凝土也已被竖向裂缝分割成左右两块,与型钢翼缘表面发生分离。相较于自然粘结试件,双排形栓钉试件在加载过程中混凝土裂缝宽度与深度减小,并且由于栓钉剪力件的存在,型钢与混凝土接触面间的相对滑移得到了有效的抑制,增强了型钢与混凝土的协同工作能力,混凝土未出现整块剥落的现象。

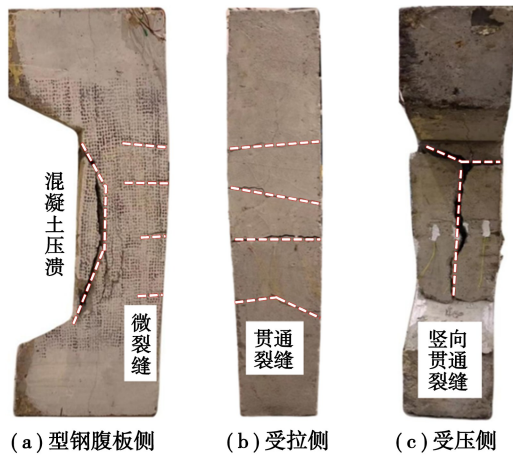


图7 最终破坏图

Fig. 7 Final destruction diagram

2.2 荷载-竖向位移曲线

两种工况的大偏心受压的荷载-竖向位移曲线如图8所示,试件极限承载力,如表4所示。由图8分析可知,两种工况试件的荷载-竖向位移曲线可分为以下几个阶段:

(1)弹性阶段(OA段):在此阶段两种工况试件的荷载-竖向位移曲线表现出较好的线性相关性,型钢与混凝土共同受力。

(2)弹塑性阶段(AB段):荷载逐渐增大,曲线斜率逐渐减小,试件表面出现裂缝,但由于栓钉的布设,有效地抑制了结构界面间的粘结滑移,从而增强了双排形栓钉试件的极限承载力。

(3)承载力下降阶段(BC段):自然粘结试件

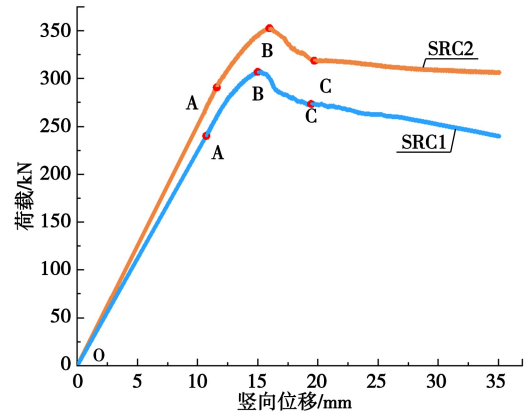


图8 荷载-竖向位移曲线

Fig. 8 Load-vertical displacement curve

达到峰值荷载后,混凝土出现大面积滑移剥落,使得试件承载力出现陡降,相较于自然粘结试件,布设双排形栓钉剪力件试件在达到峰值荷载后,曲线未出现陡降,且试件的剩余承载力也高于自然粘结试件,其表现出较好的承载能力。

由表4分析可知,相较于自然粘结工况 SRC1 试件,添加栓钉剪力件的工况 SRC2 试件的 A 点(弹性极限)提高了 21.1%,使得型钢与混凝土之间并没有过早的产生相对滑移,试件在 A 点时的变形较小,整体刚度更高,布设栓钉剪力件延缓了弹塑性阶段的开始。工况 SRC1 和 SRC2 试件的 B 点(极限承载力)分别为 307.28 kN 和 352.75 kN,工况 SRC2 试件的极限承载力相较于工况 SRC1 提升了 14.79%。工况 SRC1 和 SRC2 试件的 C 点(剩余承载力)分别为 239.78 kN 和 306.57 kN,相较于极限承载力分别保持在 78.03% 和 86.91% 左右。由此说明,栓钉剪力件的存在使得试件的整体承载力和韧性得到较大的提升,因此栓钉剪力件的布设能有效的提升型钢和混凝土的粘结性能,从而提高试件的共同承载力。

表4 试件承载力

Table 4 Ultimate bearing capacity of specimens

| 工况 | 加载偏心距/mm | 栓钉布设 | A点承载力/kN | B点承载力/kN | C点承载力/kN |
|----------------------|----------|------|----------|----------|----------|
| SRC1 | 182 | 自然粘结 | 240.13 | 307.28 | 239.78 |
| SRC2 ($e_0/h=0.7$) | | 双排形 | 290.71 | 352.75 | 306.57 |

2.3 侧向挠度分析

两组工况试件大偏心受压时的侧向挠度曲线,如图9所示,各试件跨中挠度,如表5所示。

由图9分析可知,两组工况试件的最大侧向挠度均发生在跨中位置。当荷载达到极限荷载的0.5之前,试件侧向变形与荷载的呈线性正相关,且侧向变形均较小,表现出良好的协同工作性能。

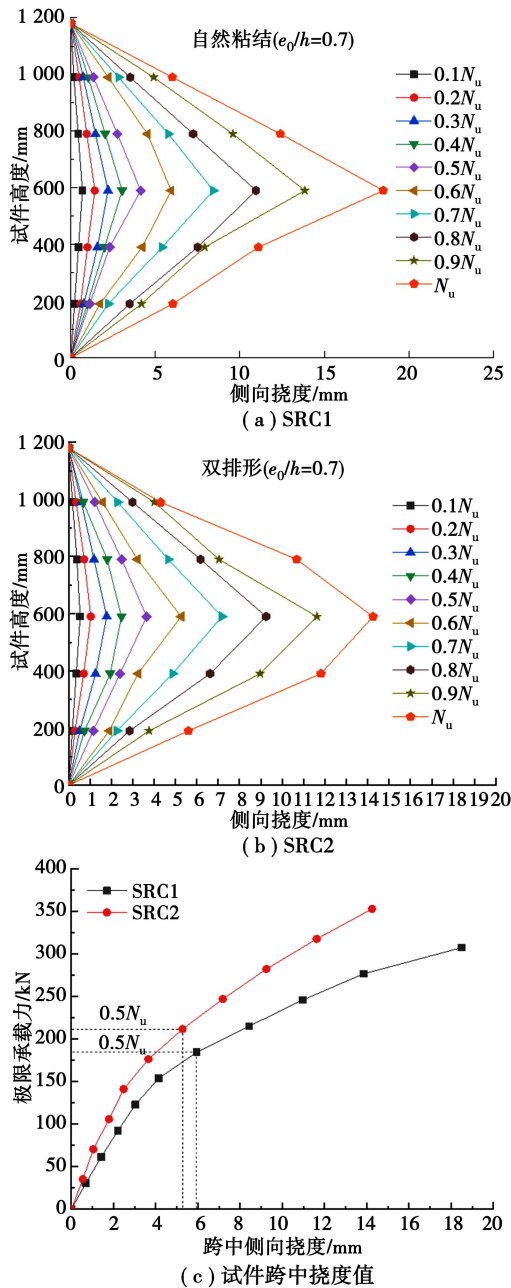


图 9 侧向挠度曲线

Fig. 9 Lateral deflection curves

表 5 试件跨中挠度

Table 5 Mid-span deflection of each specimen

| 工况 | 加载偏心距/mm | 栓钉布置 | 极限承载力 N_{ut} /kN | 减小百分比/% |
|----------------------|----------|------|--------------------|---------|
| SRC1 | 182 | 自然粘结 | 18.489 | — |
| SRC2 ($e_0/h=0.7$) | | 双排形 | 14.248 | -22.94 |

当荷载达到极限荷载 0.5 之后,自然粘结工况试件受拉区混凝土出现开裂,且裂缝进入加速发展阶段,部分混凝土退出工作。试件侧向挠度不再随着荷载的增加而线性变化,侧向挠度开始加速增长。相较于自然粘结试件,双排形栓钉工况试件,由于

栓钉剪力件的存在,有效地限制了型钢与混凝土接触界面间的相对滑移,试件加载至极限承载力时,型钢与混凝土仍能保持共同承载。

由表 5 分析可知,与自然粘结工况相比,在型钢腹板布置钉剪力件有效的抑制了了型钢与混凝土之间的相对滑移,使得型钢腹板区域混凝土基本没有剥落,从而增强了试件中部的抗弯刚度,使得试件加载至极限承载力时的侧向挠度值减少了 22.94%。

2.4 栓钉受力规律分析

试件加载至发生偏心受压破坏的过程中的荷载-栓钉应变曲线,如图 10 所示。

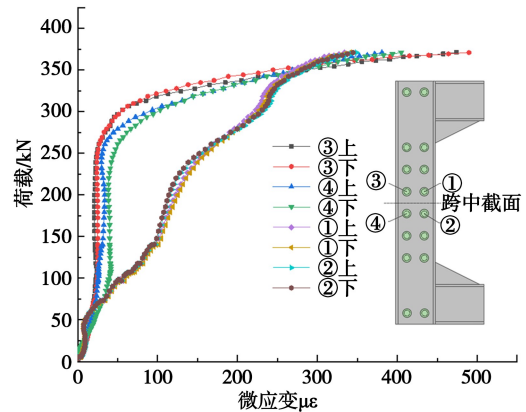


图 10 栓钉应变曲线

Fig. 10 Stud strain curves

由图 10 分析可知,位于结构受压侧的①和②栓钉在荷载加载至 $0.7N_u$ 前,受压区型钢与混凝土受力状态良好,栓钉应变值未发生明显变化,此时栓钉未参与工作。但随着荷载增大,受压侧混凝土开裂导致①和②栓钉应变值持续增大,栓钉开始提供剪力直至试验结束,但未达到屈服荷载 235 MPa。在大偏心受压情况下,受拉区混凝土较受压区混凝土较快出现裂缝,位于结构受拉侧的③和④栓钉的应变值较①和②栓钉较快出现变化,并且随着荷载的增大,受拉区混凝土裂缝不断发展延伸,③和④栓钉应变值逐渐增大,但同样未达到屈服荷载 235 MPa,说明在试件开裂前,③和④栓钉未参与工作,当试件开裂后,受拉侧③和④栓钉持续提供剪力直至试验结束。

因此,在型钢腹板区域焊接栓钉剪力件,其受力较小,不会发生明显变形或受剪断裂。栓钉剪力件可以“固结”住相当一部分的混凝土直至试验结束,避免型钢腹板侧混凝土的整体滑移和剥落,有效地抑制了结构界面的相对滑移,对大偏心受压承载性能的提升发挥了极大的作用。

3 有限元模拟分析

采用有限元软件 ABAQUS 建立数值模型并进

行计算,与对比试验结果进行对比分析,并在其他参数相同的条件下,通过改变试件偏心距,分析不同偏心距对型钢-喷射混凝土组合结构大偏心受压承载性能的影响。

3.1 模型的建立

有限元模拟赋予的参数均与试验材料参数相同,如表2和表3所示。喷射混凝土、工字型钢、栓钉、钢垫块均采用三维实体单元(C3D8R)模拟,为防止出现应力集中,不设置三角钢板,采用混凝土损伤塑性模型模拟混凝土,本构关系参照《混凝土结构设计规范》,钢材选取理想线性强化弹塑性模型进行计算分析,喷射混凝土与型钢之间的粘结性能通过定义滑移刚度系数 1.275 MPa/mm 、最大粘结力 0.459 MPa 和总位移/损伤初始 22 mm 进行模拟,组合结构的网格划分,如图11所示。

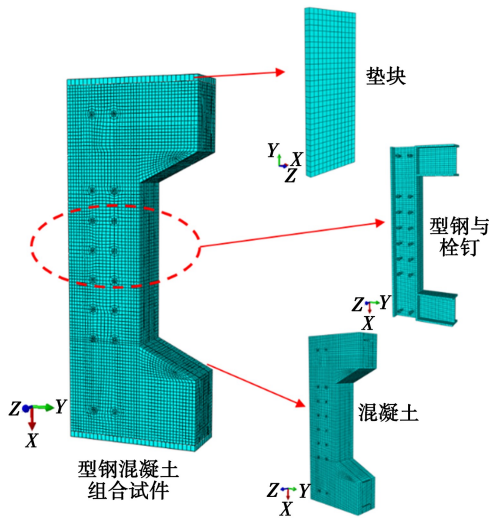


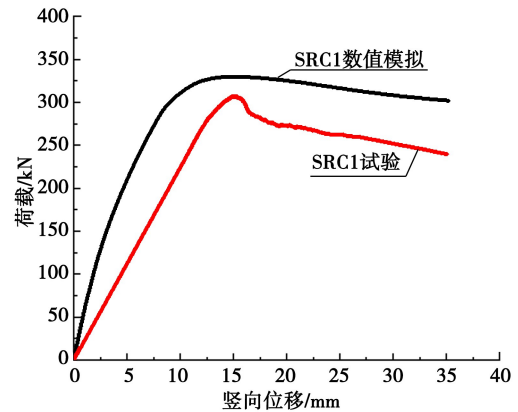
图11 网格划分图

Fig. 11 Grid division diagram

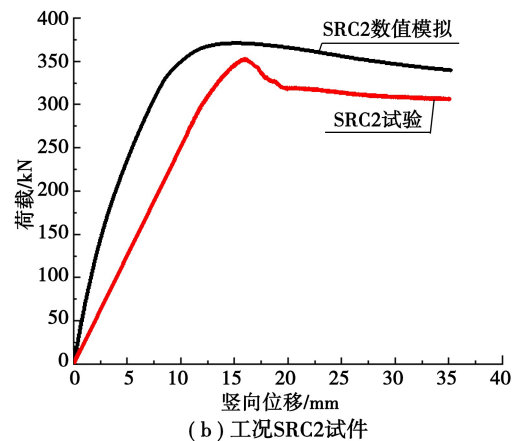
3.2 模型验证

通过试验实测与有限元模拟的荷载-位移曲线对比验证模型可靠性,进而揭示试件的力学特征,如图12所示,试验结果与模拟结果,如表6所示。

由图12和表6分析可知,各试件数值模拟承载力曲线与试验得到的承载力曲线形态基本一致,对比两者的极限承载力,误差分别为2.6%和2.7%。模拟结果均大于试验结果,其原因是由于模型太过于理想化,而实际进行试验时,存在着很多不确定因素的影响,且在试验过程中会发生混凝土剥落掉块现象,造成承载力的偏低。基于可靠的建模方法与参数校准,有限元模拟结果与试验数据吻合较好,能够较好地模拟组合结构的力学性能,为深入开展参数分析奠定基础。



(a) 工况SRC1试件



(b) 工况SRC2试件

图12 荷载-竖向位移对比

Fig. 12 Load-vertical displacement comparison

表6 极限承载力对比

Table 6 Comparison of ultimate bearing capacity

| 工况 | 栓钉布设 | 加载偏心距/mm | 模拟值 N_{us}/kN | 试验值 N_{ut}/kN | 误差 /% |
|------|------|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| SRC1 | 自然粘结 | 182 | 315.34 | 307.28 | 2.6 |
| SRC2 | 双排形 | ($e_0/h=0.7$) | 362.31 | 352.75 | 2.7 |

3.3 计算结果

基于已验证的有限元模型,为进一步研究偏心距对型钢混凝土组合结构偏心受压性能的影响,设计了偏心距分别为 $e_0/h=0.5$ 、 $e_0/h=0.6$ 、 $e_0/h=0.7$ 、 $e_0/h=0.8$ 共4种工况,各工况试件的设计参数及计算结果如图13所示。

由图13分析可知,在相同偏心距地条件下,相较于自然粘结试件,在型钢腹板区域布配置栓钉剪力件,能有效地抑制组合结构界面间产生的相对滑移,从而有效地增强型钢混凝土结构的共同承载能力。通过对4种不同偏心距工况下的组合结构模拟结果进行比较,分析发现随着偏心距的增大,栓钉剪力件的布设对试件的大偏压承载能力的提升效果逐渐增大,为后续试验提供借鉴意义。

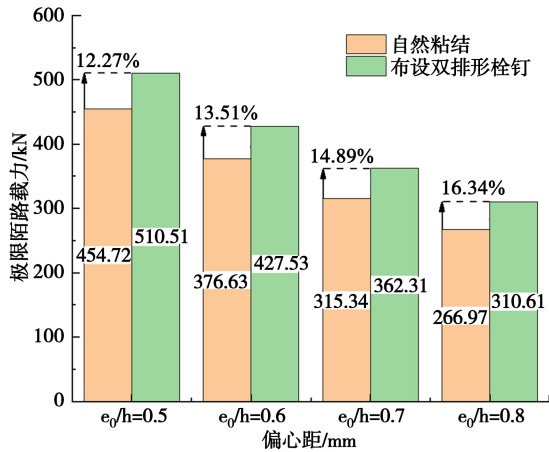


图13 计算结果

Fig. 13 Calculation results

4 结论

(1) 自然粘结工况下,试件受拉与受压侧出现横向及竖向裂缝,并迅速贯通,型钢与混凝土接触界面之间产生相对滑移,混凝土发生剥落破坏,最终导致结构丧失协同承载能力。型钢腹板上双排形栓钉的布置,极大地增强了型钢与混凝土界面的粘结性能,型钢-混凝土组合试件的承载性能得到了较大提升。

(2) 自然粘结工况下,试件加载至后期,因型钢与混凝土接触界面间产生滑移,型钢和混凝土无法共同承载,导致试验荷载加载至极限荷载后出现承载力陡降的情况。相较于自然粘结试件,布设双排形栓钉试件,极限承载力增加了14.79%,在加载至极限荷载后试件的承载力仍能维持在极限承载力的86%左右,栓钉剪力件有效的提升了型钢与混凝土界面间的粘结性能,从而增强了试件的韧性和极限承载能力。

(3) 相较于自然粘结试件,双排形栓钉试件侧向挠度增长较为缓慢,且侧向挠度值减小了22.94%,栓钉剪力件的存在有效的增强了试件的抗弯刚度。

(4) 通过试验结果与有限元模拟的对比分析,验证了数值模拟的可靠性,进一步研究表明,在相同偏心距条件下,栓钉剪力件能有效提高试件的极限承载力,偏心距对型钢混凝土组合结构的影响,在相同偏心距下,布设栓钉剪力件能有效提高试件的极限承载力,并且随着偏心距的增加,栓钉剪力件对试件的大偏压承载性能的提升效果逐渐增强。

参考文献 (References)

[1] 张军伟,陈云尧. 中国西南地区隧道施工事故特征分

析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1952-1957. (Zhang Junwei, Chen Yunyao. Accident characteristic analysis of tunnel construction in southwest China [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1952-1957. (in Chinese))

[2] 戴公连,王蒙,唐宇. 型钢混凝土界面试验研究及损伤分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(5): 77-84. (Dai Gonglian, Wang Meng, Tang Yu. Experimental study and damage analysis of interface of steel reinforced concrete [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(5): 77-84. (in Chinese))

[3] Meng L B, Li T B, Jiang Y, et al. Characteristics and mechanisms of large deformation in the Zhegu mountain tunnel on the Sichuan-Tibet highway [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37, 157-164.

[4] 张顶立,孙振宇,侯艳娟. 隧道支护结构体系及其协同作用[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 577-593. (Zhang Dingli, Sun Zhenyu, Hou Yanjuan. Tunnel support structure system and its synergistic effect. [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 577-593. (in Chinese))

[5] 陈嫣婷,杜咏,周汇凯. 120MPa 高强混凝土型钢组合构件受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 386-394. (Chen Yanting, Du Yong, Zhou Huikai. Experimental study on mechanical behavior of 12 MPa concrete encased steel composite members. [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 386-394. (in Chinese))

[6] 王吉忠,张硕,杨柳,等. 圆钢管约束型钢高强混凝土短柱的受压性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 21-32. (Wang Jizhong, Zhang Shuo, Yang Liu, et al. Experimental study and finite element analysis on compressive behavior of circular tubed steel-reinforced high-strength concrete short columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 21-32. (in Chinese))

[7] 赖柄霖,温安平,舒赣平,等. 超高强型钢混凝土组合柱受力性能及设计方法[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 139-148. (Lai Binglin, Wen Anping, Shu Ganping, et al. Structural performance and design method of ultra-high strength steel reinforced concrete composite columns [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(8): 139-148. (in Chinese))

(下转第 621 页)

- [14] 唐仁,林本海,梁鹏. 盾构下穿住宅楼直接切桩的安全性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增 2): 878-883. (Tang Ren, Lin Benhai, Liang Peng. Study on the safety of shield passing through the residential building and directly cutting pile foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15 (Supp. 2): 878-883. (in Chinese))
- [15] 曾力,刘一帆,李明宇,等. 盾构穿切过程中单桩复合地基动态响应的研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42 (12): 2006-2014. (Zeng Li, Liu Yifan, Li Mingyu, et al. Dynamic response of single pile composite foundation during shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(12): 2006-2014. (in Chinese))
- [16] Liu B, Li T, Han Y, et al. DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine [J]. Computers and geotechnics, 2022, 152: 105-136.
- [17] Li T, Liu B, Han Y, et al. Structural analysis of shield machine cutting monopile using p-y curve based finite element method[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 1-17.
- [18] 冯国杰. 变刚度桩复合地基模型试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (Feng Guojie. The model test research on variation rigidity composite foundation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [19] 侯思强. 刚性长短桩复合地基传力机制及设计理论研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020. (Hou Siqiang. Research on force-transferring mechanism mechanism and design calculation method of rigid long-short pile composite foundation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese))
- [20] 赵红琪. 基坑开挖对邻近柔性桩复合地基承载性状的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021. (Zhao Hongqi. Study on the influence of excavation of foundation pit on bearing behavior of adjacent flexible pile composite foundation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese))

(上接第 610 页)

- [8] 王钧,苏宇,赵金友,等. 高强 H 型钢混凝土组合柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 191-200. (Wang Jun, Su Yu, Zhao Jinyou, et al. Study on axial compression performance of high strength H-section steel reinforced concrete composite columns[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (9): 191-200. (in Chinese))
- [9] 常亚峰,师俊平,侯亚鹏,等. 箍筋约束超高性能混凝土短柱轴压承载力试验研究[J], 复合材料学报, 2022, 39 (7): 3451-3461. (Chang Yafeng, Shi Junping, Hou Yapeng, et al. Experimental study on the axial compression capacity of ultra-high performance concrete stub columns confined with stirrups [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3451-3461. (in Chinese))
- [10] 柯晓军,伍小萍,陈宗平,等. 配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱轴压性能试验研究[J], 实验力学, 2016, 31(5): 617-623. (Ke Xiaojun, Wu Xiaoping, Chen Zongping, et al. Experimental study of axial compression performance of SRHC short column confined by square spiral stirrup [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5): 617-623. (in Chinese))
- [11] 董宏英,赵翊舟,曹万林,等. 配置栓钉钢板与外包高强混凝土界面黏结-滑移性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (2): 122-130. (Dong Hongying, Zhao Yizhou, Cao Wanlin, et al. Interfacial bond-slip behavior between steel plate with studs and coated high-strength concrete [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 122-130. (in Chinese))
- [12] 王威,赵春雷,苏三庆,等. 带栓钉波形钢板混凝土组合构件粘结滑移性能与承载力试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 108-119. (Wang Wei, Zhao Chunlei, Su Sanqing. et al. Experimental study on bond-slip behavior and bearing capacity of corrugated steel plate concrete composite member with stud [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (9): 108-119. (in Chinese))
- [13] Lu J F, Li M H, Ran X, et al. Research on the bond-slip behavior and constitutive relationship between I-shaped steel and shotcrete in tunnel. Structural Concrete. 2023, 24(5): 6011-6024.
- [14] 陈宗平 陈宇良 钟铭. 焊接栓钉型钢混凝土梁抗扭性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 72-79. (Chen Zongping, Chen Yuliang, Zhong Ming. Experimental investigation on anti-torsion performance of welded stud steel reinforced concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51 (6): 72-79. (in Chinese))