

DOI: 10.116544/j.cnki.cn43-1494/u.20220119001

文章编号: 1674-599X(2023)02-0080-07

引用格式: 唐晖, 陈仕松, 曹峰. 钢-UHPC组合结构大直径栓钉抗剪性能有限元分析[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 80-86, 104.

Citation: Tang Hui, CHEN Shisong, CAO Feng. Finite element analysis of shear behavior of large diameter stud in steel-UHPC composite structure [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 80-86, 104.

# 钢-UHPC组合结构大直径栓钉抗剪性能有限元分析

唐晖<sup>1</sup>, 陈仕松<sup>2</sup>, 曹峰<sup>3</sup>

(1. 中铁交通投资集团有限公司, 广西 桂林 541000; 2. 湖南省湘西公路桥梁建设有限公司, 湖南 吉首 416000;

3. 新田县农村公路管理站, 湖南 永州 425000)

**摘 要:**为研究超高性能混凝土(UHPC)中大直径栓钉剪力连接件的静力性能,采用混凝土材料的损伤塑性模型,通过有限元数值模拟方法,对10组不同参数的栓钉剪力连接件的静力性能进行了对比和分析。研究参数包括栓钉直径、栓钉的长径比、混凝土强度和混凝土板的厚度。研究表明:装配大直径栓钉的普通钢混组合试件的混凝土板在测试中出现了大面积损伤,而装配大直径栓钉的UHPC板在测试中出现损伤的区域则较小;在UHPC板中,栓钉直径为30 mm的抗剪强度比栓钉直径为22 mm的抗剪强度高出约40%。栓钉长径比对试件静力性能的影响比混凝土板厚度对试件静力性能的影响更小。在参与测试的不同长径比的大直径短栓钉剪力连接件中,长径比为2.3的大直径短栓钉剪力连接件的抗剪性能最好。

**关键词:** UHPC; 大直径栓钉连接件; 静力性能; 参数分析

中图分类号: U441 文献标志码: A

## Finite element analysis of shear behavior of large diameter stud in steel-UHPC composite structure

TANG Hui<sup>1</sup>, CHEN Shisong<sup>2</sup>, CAO Feng<sup>3</sup>,

(1. China Railway Communications Investment Group Co., Ltd., Guilin 541000, China;

2. Hunan Xiangxi Highway Bridge Construction Co., Ltd., Jishou 416000, China;

3. Xintian County Rural Road Management Station, Yongzhou 425000, China)

**Abstract:** To investigate the static performance of large diameter stud shear joints in ultra-high performance concrete (UHPC), the static performance of 10 sets of stud shear joints with different parameters was compared and analyzed by using a finite element numerical simulation method and by introducing a damage plasticity model of the concrete material. The parameters include the diameter of the studs, the length-to-diameter ratio of the studs, and the concrete strength and thickness of the concrete slab. The results show that the concrete slabs with large-diameter studs of the normal steel-mixed composite specimens showed extensive damage in the tests, while the UHPC slabs with large-diameter studs showed less damage in the tests; in the UHPC slabs, the shear strength of the 30 mm-diameter studs was approximately 40% higher than that of the 22 mm-diameter studs. The effect of the stud's length and diameter parameters on the static properties of the specimens was less than the effect of the concrete slab thickness parameters on the static properties of the specimens. Among the tested large-diameter short-stud shear joints with different length-to-diameter ratios, the large-diameter short-stud shear joints with a length-to-diameter ratio of 2.3 had the best shear resistance.

**Key words:** UHPC; large diameter stud joint; static performance; parameter analysis

收稿日期: 2022-01-19

作者简介: 唐晖(1970—), 中铁交通投资集团有限公司高级工程师。

近年来,由于钢混组合结构既能利用钢结构的抗拉性能,又能利用混凝土的抗压性能,实现较好的设计效果,因此其在桥梁工程中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。圆柱头焊钉通常作为剪力连接件来传递钢与混凝土界面的纵向剪力,是组合结构设计的关键<sup>[2]</sup>。

目前,钢-混组合梁桥中常用的栓钉直径通常小于22 mm。《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433—2002)对直径为10~25 mm栓钉的细部尺寸与质量进行了规定。在高剪切区域中,为保证组合结构的抗剪切力,需要布置大量的栓钉连接件,但过于密集的栓钉可能会导致群钉效应<sup>[3]</sup>,产生栓钉受力不均匀及焊接量增大等问题。大直径栓钉能提供更大的抗剪切力,在一定程度上提高了组合结构的抗剪性能,较好地解决这些问题。但是当栓钉直径过大时,其下方混凝土的横向劈裂力也会随之增大,导致混凝土发生开裂破坏<sup>[4]</sup>。超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)材料具有较高的抗拉强度与极限拉应变能,能有效避免混凝土的开裂<sup>[5]</sup>,为大直径栓钉抗剪性能的发挥提供保证。近年来,研究人员对UHPC中栓钉的使用进行了大量研究。邵旭东等<sup>[6]</sup>通过试验发现:在抗压强度为80 MPa的高性能混凝土中使用的栓钉的承载能力比在普通混凝土(C50)中所使用的栓钉的承载能力高42%。KIM等<sup>[7]</sup>对15组UHPC中直径分别为16、22 mm的栓钉进行了推出试验,试验发现:即使当UHPC的保护层厚度低于《美国公路桥梁设计规范》的建议值时,也不会对其承载能力造成太大影响。CAO等<sup>[8]</sup>通过推出试验发现钢-UHPC组合构件的破坏形式主要为栓钉剪断,而在UHPC板则未见明显损伤。张士红等<sup>[9]</sup>对轻型组合桥面板的中小型栓钉的静力性能进行了研究,发现在UHPC薄层中小型栓钉的承载力主要受栓钉的直径和屈服强度的影响。李萌等<sup>[10]</sup>对直径分别为13、16 mm的短栓钉的抗剪切性能进行了研究,通过有限元计算发现考虑焊环比的栓钉的承载力比不考虑焊环比的栓钉的高出约93%。肖亚鑫等<sup>[11]</sup>通过数值模拟发现相较于栓钉直径的增大,UHPC抗压强度的提高对栓钉承载能力的提升影响较小。这些研究大多针对直径为13~22 mm的小直径栓钉。目前,鲜有对UHPC中大直径栓钉力学性能的研究。因此,本研究对带有栓钉焊环的钢-UHPC结构进行推出试验,对其建立精细化有限元模型,对比和分析不同尺寸

的栓钉的静力学性能以及混凝土参数对模型的影响,以期类似工程实践提供参考。

## 1 推出试验模型

WANG等<sup>[12]</sup>学者对18组配备直径分别为22、30 mm栓钉的钢-UHPC组合构件进行了推出试验。本研究在该试验研究的基础上,增加了对直径为25 mm栓钉的钢-UHPC组合试件进行推出试验,并对其进行有限元分析。该试件的尺寸如图1所示。其中,UHPC混凝土板的厚度、宽度、高度分别为150、400、500 mm,试验采用250 mm×250 mm×14 mm×14 mm的H型钢。在UHPC板中布置HPB 300的热轧光圆钢筋作为构造钢筋,其中,纵向钢筋直径为10 mm,横向钢筋直径为8 mm,在H型钢两侧各布置两个栓钉,其间距为120 mm,推出试件分组见表1。

表1 推出试件分组表

Table 1 Derive the grouping table of specimens

试件 编号	混凝土 种类	栓钉直径/ mm	栓钉长度/ mm	混凝土板 厚度/mm	栓钉长 径比
A1	C50	22	100	150	4.5
A2	UHPC	22	100	150	4.5
A3	UHPC	22	80	150	3.6
A4	C50	25	100	150	4.0
A5	UHPC	25	90	150	3.6
A6	UHPC	25	100	150	4.0
A7	C50	30	100	150	3.3
A8	UHPC	30	120	150	4.0
A9	UHPC	30	70	150	2.3
A10	UHPC	30	70	100	2.3

## 2 建模及验证

### 2.1 模型建立

本研究使用有限元软件Abaqus对试件建立有限元模型,采用该软件的Explicit模块对其进行计算分析,该模型由UHPC板(或普通混凝土板)、栓钉连接件、工字型钢板及构造钢筋组成。该模型考虑了各

材料的非线性本构及各个构件之间的接触关系。为简便计算,根据模型的对称性,取1/4的推出试件进行建模,并在对称平面上施加对称约束。在工字型钢板上方施加位移荷载模拟推出试验的加载。工字型钢板与栓钉及焊环之间均采用共节点的耦合方式。工字型钢板及栓钉与UHPC之间的采用表面接触,摩擦系数设为0.4。

在有限元模型中,采用三维实体单元C8DR模

拟UHPC板(或普通混凝土板)、工字型钢板和栓钉,采用桁架单元T3D2模拟普通钢筋单元。有研究表明,栓钉焊环对栓钉的抗剪切承载能力有更大影响<sup>[10]</sup>。因此,该有限元模型对栓钉焊环进行了精细化建模,其具体尺寸参照《电弧螺柱焊用圆柱头栓钉》(GB/T 10433—2002)的规定,钢-UHPC组合试件推出试验的精细化有限元模型,如图2所示。

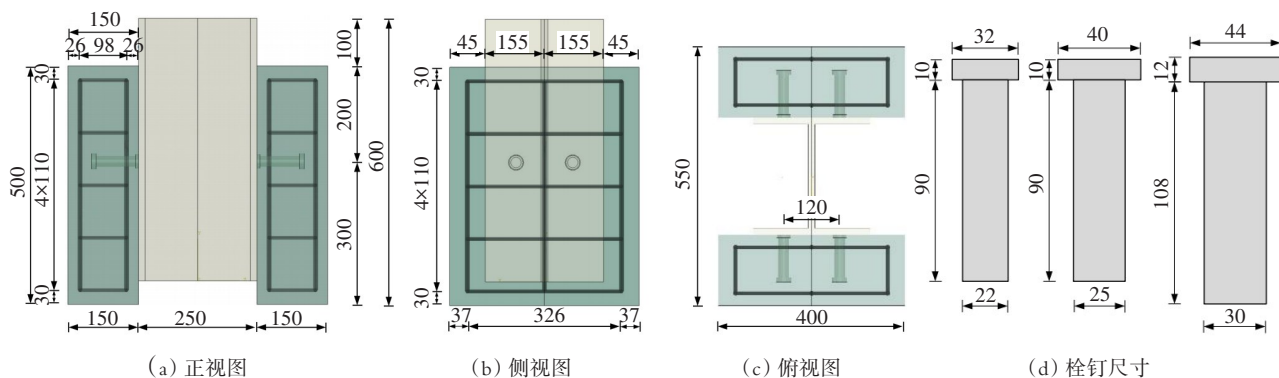


图1 试件布置及几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Layout and geometric dimensions of the specimen (unit:mm)

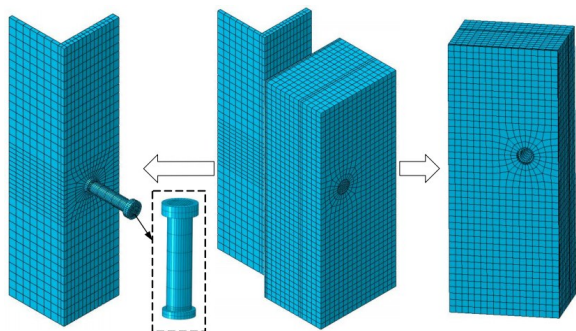


图2 钢-UHPC组合试件的精细化有限元模型

Fig. 2 Refined finite element model of steel-UHPC composite specimen

## 2.2 材料本构

为有效模拟组合结构的抗剪切能力,先对栓钉及混凝土材料的参数进行定义。试验发现,栓钉先承受弹性受力,然后硬化,最终发展至塑性阶段。在此过程中,栓钉经历了一个较显著的屈服阶段。因此,可通过三折线弹塑性本构对其进行模拟。对于UHPC及普通混凝土材料,采用Abaqus有限元软件中的混凝土损伤塑性模型模拟其开裂与破坏<sup>[13]</sup>。普通混凝土的受拉曲线和受压应力-应变曲线参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。其中,UHPC的受压应力-应变曲线<sup>[14]</sup>、受拉应力-应变曲线<sup>[15-16]</sup>分别如图3~4所示。图3中曲线对应的方程为式(1)。从图3可以

看出,UHPC的受压应变过程分为两个阶段,即曲线的I、II段。图4中曲线对应的方程为式(2)。从图4可以看出,UHPC的受拉应变过程分为三个阶段,即曲线的I、II、III段。

$$\sigma_c = \begin{cases} \frac{f_c \cdot \xi}{2(\xi - 1)^2 + \xi}, & \varepsilon > \varepsilon_0 \\ \frac{f_c \cdot (n\xi - \xi^2)}{1 + (n - 2)\xi}, & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \begin{cases} E_t \varepsilon, & \varepsilon_{t_0} > \varepsilon \geq 0 \\ f_t, & \varepsilon_{t_p} > \varepsilon \geq \varepsilon_{t_0} \\ \frac{f_t}{\left[1 + (\varepsilon_t - \varepsilon_{t_p})l_c/w_p\right]^n}, & \varepsilon \geq \varepsilon_{t_p} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_c$ 为压应力值; $f_c$ 为抗压强度; $\xi$ 为应变与受压峰值应变的比值; $\varepsilon$ 为应变值; $n$ 为初始弹性模量和峰值点的割线模量的比值; $\varepsilon_0$ 为受压峰值应变; $\sigma_t$ 为拉应力值; $E_t$ 为受拉弹性模量; $f_t$ 为应变硬化阶段的平均应力; $\varepsilon_{t_0}$ 为受拉峰值应变; $\varepsilon_{t_p}$ 为受拉极限应变; $l_c$ 为试件测量的引伸标距; $p$ 为试验拟合点的一个参数; $w_p$ 为应力降低至 $2^{-p}f_t$ 时的裂缝宽度。

基于能量等价原理,通过式(3)定义UHPC中的受拉及受压的损伤因子 $D^{[17]}$ 。钢筋和H型钢板实际并不易发生破坏,假定钢筋和H型钢板的应力均随塑性应变的增大而线性增大。钢材的弹性模量均为

$2.06 \times 10^5$  MPa。栓钉直径为 22 mm 的屈服强度、极限强度分别为 400.9、482.6 MPa, 钢筋的屈服强度、极限强度分别为 328.5、470.6 MPa。普通混凝土的抗拉强度、立方体抗压强度分别为 4.1、49.0 MPa, 其弹性模量为 33.0 GPa; UHPC 抗拉强度、立方体抗压强度分别为 6.7、124.0 MPa, 其弹性模量为 48.0 GPa。钢材和 UHPC 材料的泊松比分别为 0.3、0.2, 试件其他材料参数参考文献[12]。

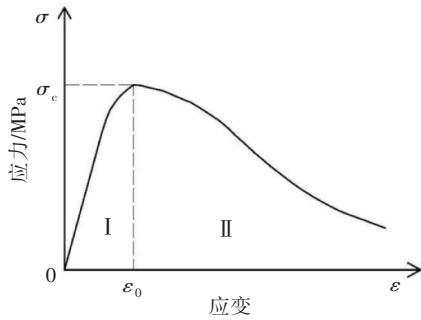


图3 UHPC受压应力-应变曲线

Fig. 3 Compression stress-strain curve of UHPC

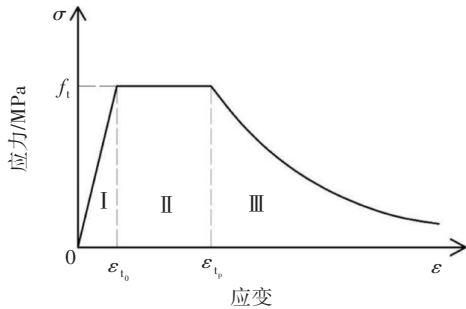


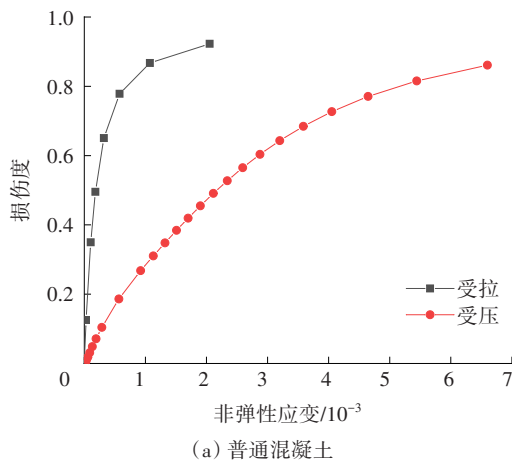
图4 UHPC受拉应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve of UHPC

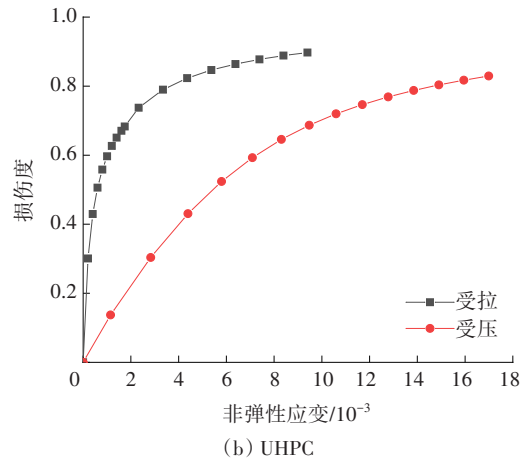
$$D = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \varepsilon}} \quad (3)$$

式中:  $D$  为损伤因子;  $\sigma$  为应力;  $\varepsilon$  为应变。

根据式(1), 绘制普通混凝土及 UHPC 的受压、受拉时的损伤度-非弹性应变关系曲线, 如图5所示。



(a) 普通混凝土



(b) UHPC

图5 损伤度-非弹性应变关系曲线

Fig. 5 Damage degree-inelastic strain curve

### 2.3 计算结果验证

为验证模型的可靠性, 将本研究计算得到的荷载-滑移曲线与文献[12]试验得到的曲线进行对比, 如图6所示。图6的试件 A1、A2 分别代表了普通混凝土与 UHPC 中直径为 22 mm 的栓钉, 试件 A8 则代表了 UHPC 中直径为 30 mm 的栓钉。从图6可以看出, 本研究提出的模型计算得到的栓钉抗剪性能与试验结果较为吻合。其中, 经试验得到的试件 A1、A2、A8 的栓钉极限抗剪强度分别为 195、221、387 kN, 而由有限元模型计算得到的试件 A1、A2、A8 的栓钉极限抗剪强度结果分别为 186、218、369 kN, 各试件试验结果与有限元模型计算结果的相对误差均在 5% 以内。这表明本研究考虑了焊环的栓钉抗剪强度的模拟方法是可行的。计算得到的荷载-滑移过程主要分为弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段 3 个阶段。其中, 在弹塑性阶段, 荷载与滑移量基本呈正比; 在塑性阶段, 荷载与滑移量呈非线性增长, 增长速率逐渐减小; 在最后的破坏阶段, 荷载基本不变, 滑移量增加, 这一过程也与试验结果基本一致。前期栓钉的变形随荷载的增大呈线性增加的趋势; 然后, 栓钉进入变形较快的塑性阶段; 最后, 当栓钉变形达到其所能承受的荷载峰值后, 栓钉被破坏。从图6还可以看出, 普通混凝土的 A1 试件的直径为 22 mm 的栓钉与 UHPC 材料 A2 试件的直径为 22 mm 的栓钉的荷载滑移曲线间存在差异, 而 UHPC 中直径为 30 mm 的栓钉的极限承载能力远大于直径为 22 mm 的栓钉的。

## 3 栓钉抗剪切能力分析

### 3.1 计算结果

从图6还可以看出, 改变栓钉直径可显著地改

善栓钉的静力性能,相同直径的栓钉在 UHPC 中的抗剪强度要比在普通混凝土中的更高。目前,研究人员对普通混凝土中栓钉的承载能力进行了大量研究,《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64—01—2015)(以下简称规范)基于大量试验数据,给出了普通混凝土中栓钉抗剪切承载力的计算方法,即式(4)。根据式(4),可计算出直径分别为 22、25、30 mm 栓钉的抗剪切承载力分别为 128、166、216 kN。由有限元模型计算得到各试件的栓钉抗剪切承载力见表 2。由表 2 可知,根据规范计算的 UHPC 中栓钉的抗剪切承载力远低于该模型计算的结果。因此,对 UHPC 中大直径栓钉的抗剪切承载力的计算还有待进一步研究。

$$P_u = 0.43A_s\sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s f_u \quad (4)$$

式中: $P_u$ 为栓钉的抗剪切承载力; $A_s$ 为栓钉的横截面积; $E_c$ 为混凝土的弹性模量; $f_u$ 为栓钉的抗拉强度。

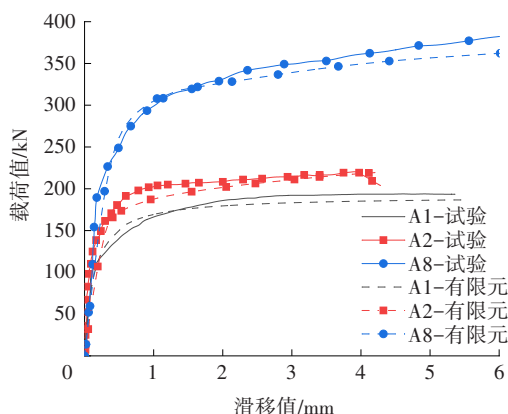


图 6 栓钉荷载滑移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load slip curves of studs

表 2 栓钉抗剪切承载力计算结果对比

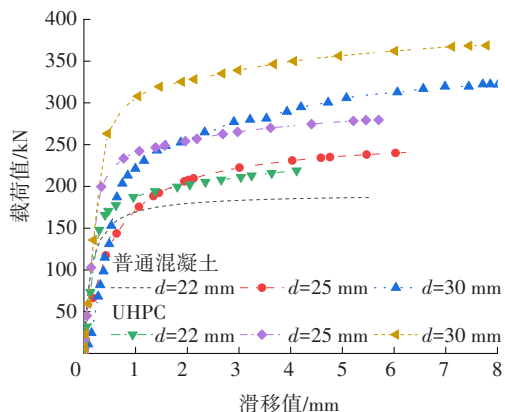
Table 2 Comparison of calculation results for shear resistance of stud connectors

试件编号	栓钉直径/mm	有限元模型的栓钉抗剪切承载力/kN	按式(4)计算的栓钉抗剪切承载力/kN
A1	22	186	128
A2	22	218	128
A3	22	216	128
A4	25	241	166
A5	25	270	166
A6	25	274	166
A7	30	322	216
A8	30	369	216
A9	30	367	216
A10	30	357	216

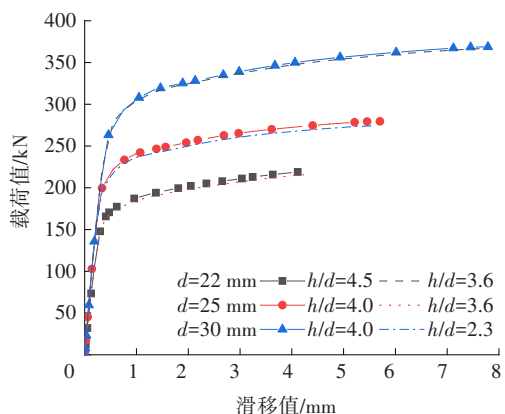
### 3.2 参数影响分析

通过分析可知,不同参数的栓钉的抗剪切性

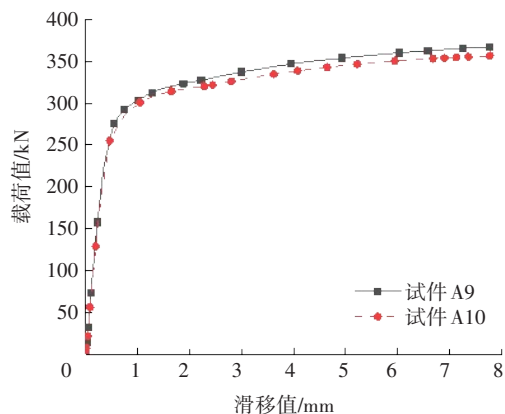
能存在一定差异。不同参数的栓钉的荷载-滑移曲线如图 7 所示,图 7 中的  $h/d$  为栓钉的长径比。由图 7 (a)可以看出,增大栓钉直径可以显著地改善栓钉的静力性能。将试件 A2 与 A8 进行比较可知,UHPC 中直径为 30 mm 的栓钉的抗剪强度比直径为 22 mm 的栓钉的提高了约 69%。



(a) 混凝土种类



(b) 长径比



(c) UHPC 板厚度

图 7 不同参数的栓钉荷载-滑移曲线图对比

Fig. 7 Comparison of load - slip curves of studs with different parameters

从图 7 (b)可以看出,当 UHPC 板中栓钉的长径比在[2.3,4.5]时,栓钉的长径比对其静力性能影响不太明显。《钢结构设计标准》(GB50017—2017)要

求栓钉的长径比需大于4,以保证栓钉具有足够的抗拉拔能力。根据本次计算结果发现,当栓钉直径为30 mm时,UHPC中长径比为2.3的栓钉连接件的静力性能与长径比为4.0的栓钉连接件的差别不大。对于钢-UHPC面板而言,通常要求UHPC板的厚度较小。由图7(c)可知,厚度为100 mm的UHPC中栓钉的抗剪强度比厚度为150 mm的UHPC中栓钉的抗剪强度只降低了3%。因此,只要保证了安全厚度,UHPC板的厚度对栓钉的抗剪切力影响并不明显。UHPC中直径为30 mm的不同长度栓钉的等效塑性应变的变化如图8所示。在图8中,当等效塑性应变超过0.2时,认为栓钉发生破坏。从图8可以看出,试件A8及A9中的栓钉破坏方式以及破坏区域基本一致。这表明:在UHPC中,长径比大于2.3的栓钉的抗剪切力得到了有效的发挥。从图8还可以发现,栓钉的变形集中在带有焊环区域的根部,即栓钉主要通过根部与混凝土之间传递剪力作用。因此,对于组合结构中的栓钉来说,在一定范围内,栓钉长径比对其抗剪切力影响不大。

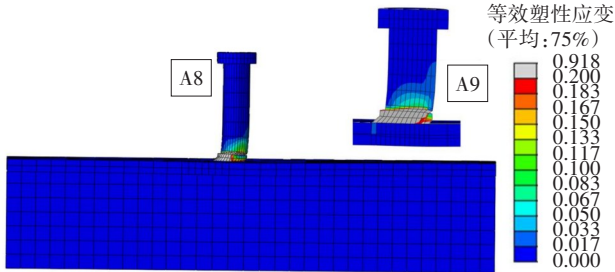


图8 不同长径比的栓钉有限元计算云图对比

Fig. 8 Comparison of finite element calculation cloud images of bolt with different aspect ratio

在UHPC板中的栓钉的抗剪强度均比在普通混凝土中的栓钉的抗剪强度更大,UHPC的弹性模量比普通混凝土的更大,这给栓钉提供了更大的承载力,提高了栓钉本身的抗剪承载力。大直径栓钉底部的横向劈裂力使普通混凝土板发生了开裂、剥落。混凝土损伤云图和有限元结果分别如图9~10所示。从图9可以看出,在对应的试验结果中,普通混凝土板产生了大面积的裂缝,而UHPC板几乎没有明显的开裂情况。因此,在选用大直径栓钉时,建议优先选用UHPC材料。从图10可以看出,普通混凝土出现的抗拉及抗压损伤的面积较大,而UHPC的损伤区域则较小。

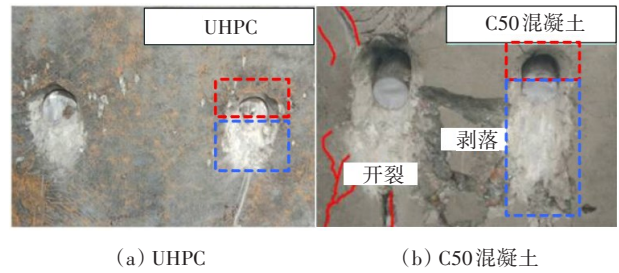
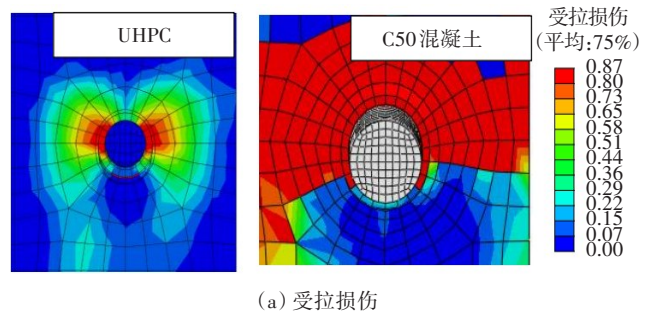
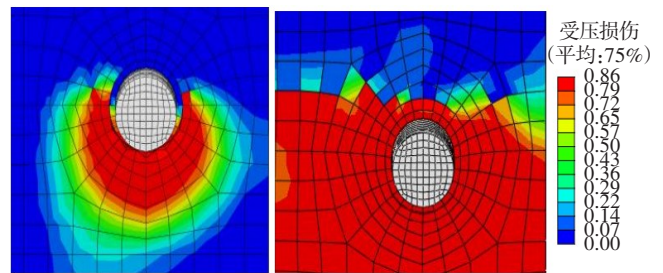


图9 混凝土损伤试验结果

Fig. 9 Concrete damage test results



(a) 受拉损伤



(b) 受压损伤

图10 混凝土损伤有限元结果

Fig. 10 Concrete damage finite element analysis results

## 4 结论

本研究通过建立带有栓钉焊接细节的精细化有限元模型,综合考虑栓钉直径、长径比以及混凝土强度的影响,对UHPC中的大直径栓钉的抗剪切能力进行了研究,得到结论:

1) 带有栓钉焊接细节的有限元模型可较好地模拟栓钉的抗剪切行为,该模型的计算结果与试验结果基本一致,且该模型能直观地观察到混凝土损伤的分布情况。

2) 通过对不同材料的大直径栓钉进行推出试验发现:UHPC材料的损伤分布较小;在普通混凝土中栓钉的下方,横向劈裂力导致了普通混凝土板出现了较大面积的损伤。因此,在普通混凝土材料中使用大直径栓钉存在一定风险。

3) 通过增大栓钉直径能有效地增加栓钉的抗

剪切能力,UHPC 中直径为 30 mm 的栓钉的剪切强度比直径 22 mm 的栓钉的高出约 69%。

4) 栓钉长径比及 UHPC 板厚度均对栓钉的静力性能没有明显影响,长径比超过 2.3 的栓钉在 UHPC 板中已经提供了足够的强度。

### 参考文献(References):

- [1] 刘永健,高诣民,周绪红,等. 中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析[J]. 中国公路学报,2017,30(3): 1-13.  
LIU Yongjian, GAO Yimin, ZHOU Xuhong, et al. Technical and economic analysis in steel-concrete composite girder bridges with small and medium span [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (3):1-13.
- [2] 王一博,刘世忠,栗振锋,等. 钢-混组合结构桥梁连接件发展趋势研究[J]. 公路交通技术,2021,37(2):45-52.  
WANG Yibo, LIU Shizhong, LI Zhenfeng, et al. Research on the development trend of steel-concrete composite structure bridge connectors[J]. Technology of Highway and Transport,2021,37(2):45-52.
- [3] 邓文琴,胡楷文,刘朵,等. 集簇式焊钉连接件抗剪承载力试验及计算方法[J]. 中国公路学报,2022,35(10): 194-204.  
DENG Wenqin, HU Kaiwen, LIU Duo, et al. Experimental study and calculation method of shear capacity of cluster stud connectors[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(10):194-204.
- [4] SHIM C S, LEE P G, YOON T Y. Static behavior of large stud shear connectors[J]. Engineering Structures, 2004, 26 (12):1853-1860.
- [5] 陈宝春,季韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.  
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31 (3):1-24.
- [6] 邵旭东,周环宇,曹君辉. 钢-薄层 RPC 组合桥面结构栓钉的抗剪性能[J]. 公路交通科技,2013,9(4):34-39,64.  
SHAO Xudong, ZHOU Huanyu, CAO Junhui. Shear behavior of studs of composite deck system composed of steel and ultra-thin RPC layer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 9 (4):34-39,64.
- [7] KIM J S, KWARK J, JOH C, et al. Headed stud shear connector for thin ultrahigh-performance concrete bridge deck[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 108:23-30.
- [8] CAO J, Shao X, Deng L, et al. Static and fatigue behavior of short-headed studs embedded in a thin ultrahigh-performance concrete layer [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(5):04017005.
- [9] 张士红,邵旭东,黄细军,等. 轻型组合桥面板中小栓钉连接件的静力及疲劳性能[J]. 公路交通科技,2016,33 (11):111-119.  
ZHANG Shihong, SHAO Xudong, HUANG Xijun, et al. Static and fatigue behaviors of small stud shear connector for lightweight composite bridge deck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(11):111-119.
- [10] 李萌,邵旭东,曹君辉,等. UHPC 中短栓钉抗剪性能试验及理论分析[J]. 中国公路学报,2021,34(8):191-204.  
LI Meng, SHAO Xudong, CAO Junhui, et al. Performance of experimental and theoretical analysis on shear short headed studs embedded in UHPC [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8):191-204.
- [11] 肖亚鑫,鲁乃唯,陈方怀. 钢-超高性能混凝土组合板连接件的抗剪性能[J]. 交通科学与工程,2020,36(1):44-49.  
XIAO Yaxin, LU Naiwei, CHEN Fanghuai. The shear capacity of steel-ultra-high performance concrete composite board connectors [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1):44-49.
- [12] WANG J, QI J, TONG T, et al. Static behavior of large stud shear connectors in steel-UHPC composite structures [J]. Engineering Structures, 2019, 178:534-542.
- [13] 张玉平,高树威,李传习,等. 基于钢纤维混凝土弹塑性损伤模型的钢混结合段吊装分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4):32-41,84.  
ZHANG Yuping, GAO Shuwei, LI Chuanxi, et al. Hoisting analysis of steel-concrete joint section based on steel fiber reinforced concrete elastoplastic damage model [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4):32-41,84.
- [14] 杨剑,方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. 混凝土,2008(7):11-15.  
YANG Jian, FANG Zhi. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete [J]. Concrete, 2008 (7):11-15.

(下转第 104 页)

- [13] LI X, WANG M. Study on fuzzy comprehensive evaluation of integrated development of transportation and postal service in Hunan Province[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 831(1): 12055.
- [14] LI L X, WANG X, REZAEI J. A Bayesian best-worst method-based multicriteria competence analysis of crowd sourcing delivery personnel[J]. Complexity, 2020, 2020: 4250417.
- [15] 户佐安, 蒲政, 包天雯, 等. 基于TOPSIS法和灰色理论的交通信息网络布局优选[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(3): 38-45.
- HU Zuo'an, PU Zheng, BAO Tianwen, et al. Optimization of multi-attribute traffic information network layout model based on TOPSIS method and grey theory [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(3): 38-45.
- [16] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method; Some properties and a linear model[J]. Omega, 2016, 64: 126-130.
- [17] MOHAMMADI M, REZAEI J. Bayesian best-worst method; A probabilistic group decision making model[J]. Omega, 2020, 96: 102075.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 刘至真)

(上接第86页)

- (7): 11-15.
- [15] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
- ZHANG Zhe, SHAO Xudong, LI Wenguang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58.
- [16] 叶华文, 唐诗晴, 段智超, 等. 钢纤维混凝土-正交异性组合桥面板疲劳性能试验研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 115-121.
- YE Huawen, TANG Shiqing, DUAN Zhichao, et al. Experimental study on fatigue performance of steel fiber reinforced concrete-orthotropic composite bridge deck [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 115-121.
- [17] 项贻强, 郭树海. 复杂应力条件下快速施工钢-混组合梁群钉推出试件参数分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 246-254.
- XIANG Yiqiang, GUO Shuhai. Parameter analysis of push-out specimens with different group studs in accelerated bridge construction steel-concrete composite beams under complicated stress condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 246-254.
- (责任编辑: 李脉; 校对: 罗容; 英文编辑: 栗森)