

超高性能混凝土组合桥面板集群化 短焊钉抗疲劳特性

徐 晨¹, 肖 涵¹, 王 巍²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 进行 4 个单钉和 2 个群钉疲劳推出试验, 将短焊钉疲劳寿命与国内外规范中的焊钉 S-N 曲线进行比较, 并结合塑性损伤有限元模型展开分析。结果表明: 短焊钉疲劳破坏表现为根部剪断和周围超高性能混凝土(UHPC)局部压溃; 集群化短焊钉疲劳寿命较单钉减少 26.9%, 在疲劳加载过程中抗剪刚度退化显著快于单钉, 当加载次数达到疲劳寿命的 12.0% 附近时, 抗剪刚度比减小至 16% 左右; AASHTO 规范有较大的安全储备, 相比之下日本规范(JSCE)与试验结果最为接近, 安全富余较少。此外, 疲劳荷载下集群化短焊钉根部循环应变幅大于单钉, 而且周边 UHPC 的塑性损伤累积分布更大。

关键词: 钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面板; 短焊钉; 集群布置; 疲劳性能; 推出试验; 有限元分析(FEA)

中图分类号: U433.33

文献标志码: A

Anti-fatigue Characteristics of Short Grouped-stud in Ultra-high Performance Concrete Composite Bridge Decks

XU Chen¹, XIAO Han¹, WANG Wei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Four single-stud and two grouped-stud fatigue push-out tests were conducted. The fatigue test results of studs were compared with the stud fatigue S-N curve in domestic and international codes, and the finite element analysis based on material plastic damage model was done. It is shown that: the stud root fracture and local UHPC crush around the stud root are the main failure mode; compared with single-stud specimen, the fatigue life of grouped-stud specimen is reduced by 26.9%, and the shear stiffness of grouped-stud specimen degrades

more rapidly during cyclic loading; particularly, the stud shear stiffness ratio decreases to 16% when loading cycles reach 12.0% of fatigue life; the AASHTO based evaluation has the largest safety redundancy among the codes while the JSCE based evaluation is closest to the test results but with a low level of safety redundancy. In addition, the finite element analysis results show that the maximum cyclic strain amplitude at stud root obtained from grouped-stud model is larger than that obtained from single-stud model, and the plastic accumulation damage of UHPC around stud root in grouped-stud model is severer than that in single-stud model.

Key words: steel-ultra-high performance concrete (UHPC) composite bridge deck; short stud; grouped-stud; fatigue performance; push-out test; finite element analysis (FEA)

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种具有超高强度、高韧性、高耐久性的新型水泥基复合材料, 其抗压强度约是普通混凝土的 3 倍, 表征弯拉韧性的抗折强度约是普通混凝土的 10 倍^[1]。在传统的正交异性钢桥面板上, 铺装 UHPC 结构层并用剪力连接件连接, 可以极大地提高桥面板局部刚度, 从而减少桥面结构病害^[2]。

然而, UHPC 早期收缩发展快, 并且以自收缩为主, 前 24 小时的自收缩可达到 $698 \mu\epsilon$ ($\mu\epsilon = 10^{-6}$), 占早期收缩的 69.2%^[3]。UHPC 浇筑后, 收缩受到组合桥面板界面约束时会引发较大次应力, 对结构的安全性和耐久性产生不利影响。张渤雨^[4]提出了将焊钉集群化布置, 先浇筑无连接件部分的 UHPC, 待 UHPC 早期收缩完成后再浇筑有连接件部分, 称之

收稿日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51978501)

第一作者: 徐 晨(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁以及功能复合材料的开发与应用。E-mail: xuchenprc@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

为后结合钢-UHPC组合桥面板。此外,在装配化组合桥面板中,焊钉集群化布置也比较常见。由于组合桥面板中UHPC板厚度较小,因此焊钉的高度也较小,一般为35~50 mm,焊钉直径约为13 mm,高径比小于4,在尺寸特性方面显著不同于组合梁中高径比远大于4的焊钉。

目前,针对钢-UHPC组合结构焊钉的研究以单钉形式为主,包括了静力和疲劳2个方面。Kim等^[5]针对UHPC中高度为50~100 mm的焊钉进行了一系列推出试验。由于采用UHPC和短焊钉,因此试件破坏模式均为短焊钉根部被剪断。实测静力承载力比AASHTO规范^[6]建议公式的计算值高10%左右,比Eurocode 4^[7]建议公式的计算值高30%左右。Dieng等^[8]通过推出试验获得了短焊钉的荷载-滑移曲线,试件破坏模式为焊钉根部被剪断。Cao等^[9]通过UHPC中焊钉高度为35 mm试件的疲劳推出试验发现,随着疲劳荷载作用次数的增加,钢-UHPC界面滑移表现为快速增长、稳定增长和快速下降3个阶段。

对于常规混凝土中的焊钉,Xu等^[10]对高度为80 mm、直径为13 mm的群钉进行了疲劳推出试验。结果表明:试件破坏模式为焊钉根部剪断,群钉试件在疲劳荷载下的刚度退化、滑移发展等都快于单钉试件;群钉试件的疲劳寿命小于单钉试件,但2种试件的疲劳寿命都大于各国规范S-N曲线的计算值。Lee等^[11]研究了高度为155 mm,直径分别为25、27、30 mm焊钉的疲劳性能。结果表明:直径越大的焊钉疲劳性能越差;与Eurocode 4和AASHTO规范比较后认为,大直径焊钉疲劳设计规范需要优化。黄侨等^[12]对高度为70 mm、直径为13 mm的单钉试件进行了疲劳推出试验。结果表明:疲劳荷载下,推出试件的各项剩余力学指标均呈非线性退化,退化趋势显著;随着加载的进行,承载力不断降低,刚度不断退化,延性也不断下降,连接件的破坏模式从延性破坏逐渐向脆性破坏发展。赵根田等^[13]研究了低周往复荷载下高度为120 mm,直径分别为13、16、19 mm群钉连接件的劣化过程和退化机理。低应力循环加载时,试件较早出现损伤累积,损伤累积速度随焊钉直径的增大而增加;高应力循环加载时,试件表现出损伤累积滞后现象,在第3个循环开始出现损伤快速累积。青宇等^[14]研究了不同排数、不同间距预制-装配式群钉的力学性能,焊钉多层排列时焊钉传力不均匀,靠近加载端的焊钉承担的剪力大于其他焊钉。石璐等^[15]研究了多键群下的剪力件折减效

应,键群间受力不均匀现象随荷载增大而逐渐明显,滑移呈现出下方大上方小的分布规律,表现为明显的不均匀性。

综上所述,现有焊钉疲劳研究针对常规混凝土长焊钉的较多,但专门针对钢-UHPC组合桥面板中短焊钉抗疲劳性能的则相对有限,有关集群化短焊钉(下文简称群钉)的成果就更少。由于焊钉长径比的显著差异,长焊钉的抗剪性能并不能完全适用于短焊钉,实际上群钉的抗疲劳特性是影响钢-UHPC组合桥面板整体受力性能的关键,因此明确相关性至关重要。设计并制作了6个短焊钉试件进行疲劳推出试验,考察了群钉的疲劳损伤发展特征。结合有限元分析,研究短焊钉破坏模式、钢-UHPC界面滑移发展以及刚度退化等指标,并将试验结果与各国规范中的S-N曲线进行比较。

1 推出试验

1.1 试件设计与制作

设计并制作了6个试件,包括2个群钉试件(PFG1和PFG2)和4个单钉试件(PFN1-PFN4)。参考Eurocode 4^[7]中标准试件尺寸,如图1所示。试件长600 mm、宽364 mm、高535 mm。一般而言,群钉效应主要是指在承担界面剪力过程中焊钉之间出现了应力叠加、整体刚度下降的情况。单钉间距减小至这种现象出现时,可视为群钉。根据《钢-混凝土组合桥梁设计规范》^[16]中的焊钉布置间距要求以及“后结合”工艺和受力特点,试验中群钉试件焊钉按3×3布置,横向、纵向间距分别为50、65 mm;单钉试件焊钉按2×2布置,横向、纵向间距分别为120、170 mm。群钉试件采用后结合浇筑方法,为模拟组合桥面板的浇筑特点,将钢构件平放后开始浇筑UHPC。试验中所采用的UHPC的材性试验结果如表1所示。焊钉直径为13 mm,高度为35 mm,焊脚高度为3 mm,焊钉材性试验结果显示,极限强度为599 MPa。试件钢结构部分采用12 mm厚钢板,材性试验结果显示其屈服强度为470 MPa,极限强度为562 MPa。

UHPC与钢板接触面未做任何表面防黏结处理,UHPC浇筑后静置覆膜常温养护28 d。

1.2 加载方式与测试方案

疲劳推出试验加载方式如图2所示。试件上部设有分配梁,作动器与分配梁之间设有荷载传感器和球铰支座,分别确保荷载和竖直加载的精确记录。

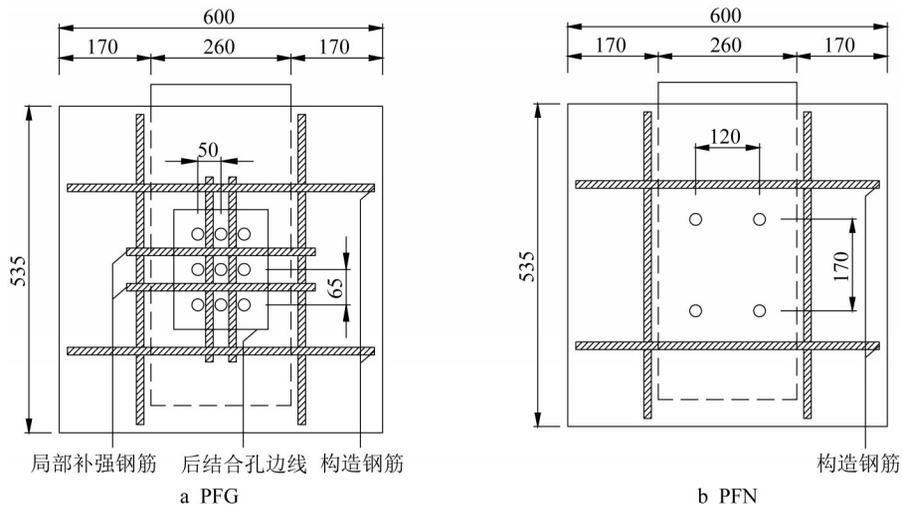


图1 疲劳推出试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometric parameters of fatigue push-out specimen(unit: mm)

表1 UHPC材性

Tab. 1 Material properties of UHPC

养护龄期/d	抗折强度/MPa	抗拉强度/MPa	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
7	30.1	7.2	97.2	92.2	42.4
28	26.5	8.3	96.1	110.6	51.9

试件放置于硬钢块上,中间铺设砂层以减少偏载带来的影响。采用作动器加载,钢与UHPC间的相对滑移通过滑移计采集,滑移计精度为0.01 mm。试验时将滑移计固定在钢翼缘上,并将滑移计的顶针放置于如图3所示的角钢上,从而采集钢翼缘与UHPC间的相对滑移。

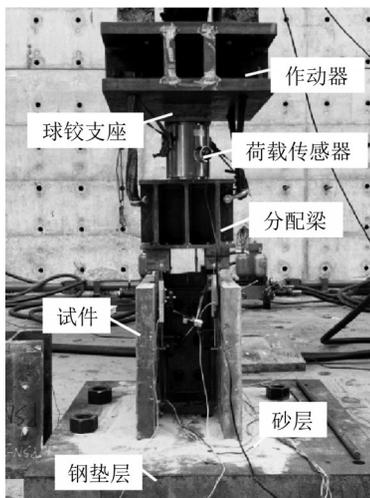


图2 试验加载设备

Fig. 2 Test equipment for loading

正式加载前,进行一次预加载,用于设备调试和试验装置预紧。正式加载过程如图4所示。图4中, ΔP 为荷载幅值, P_p 为荷载峰值, P_v 为荷载谷值, P_m 为荷载均值, P_u 为极限荷载, N_0 、 N_i 和 N_f 分别为第1次

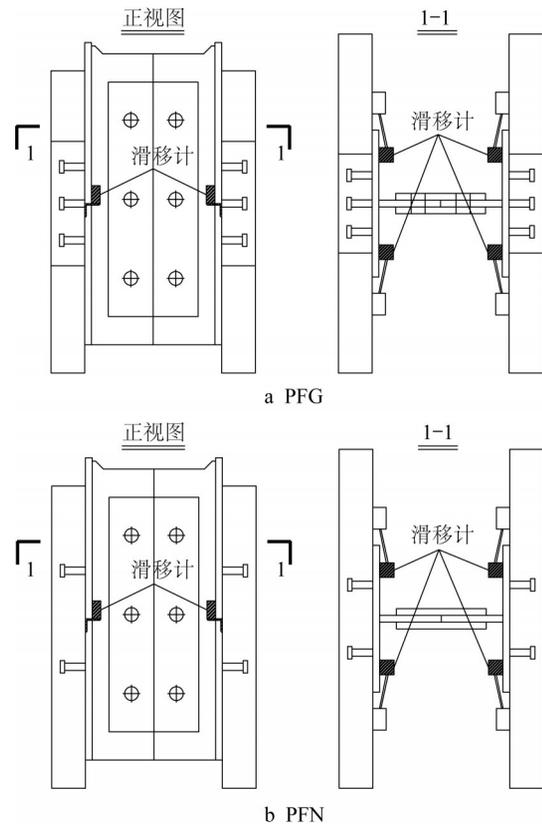


图3 滑移计布置

Fig. 3 Layout of slip sensors

循环荷载、第*i*次循环荷载和疲劳寿命。各试件的疲劳加载参数如表2所列。单钉和群钉试件的静力加载峰值分别为174 kN和353 kN。疲劳加载频率为

4 Hz。试验过程中间隔一定次数的疲劳荷载循环后进行一次静力加载试验,以观察静力抗剪刚度退化及滑移蠕变。

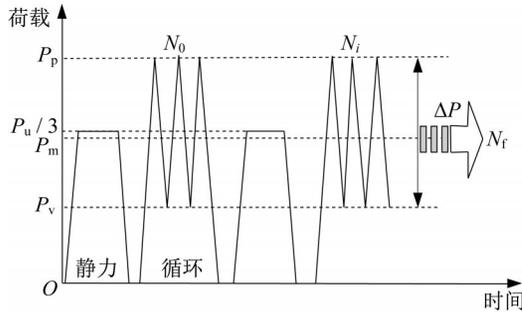


图4 加载过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading process

表2 疲劳加载参数

Tab. 2 Fatigue loading parameters

试件编号	P_p /kN	P_v /kN	P_m /kN	ΔP /kN	焊钉剪应力幅 $\Delta\tau$ /MPa
PFN1	185	45		140	132
PFN2	180	50	115	130	122
PFN3	195	35		160	151
PFN4	200	30		170	160
PFG1	390	125	258	265	111
PFG2	404	112		292	122

2 试验结果分析

2.1 疲劳破坏模式与疲劳寿命

图5为PFN1—PFN4和PFG2焊钉根部区域UHPC板破坏情况。PFG1经循环加载500万次后未发生显著破坏。表3为各试件UHPC板压溃区域面积。PFN1($\Delta\tau=132$ MPa)和PFN3($\Delta\tau=151$ MPa)的压溃区域面积分别为 3.8 mm^2 和 7.5 mm^2 ,与PFN1的相比,PFN3的增大了50%,表明UHPC板的压溃区域面积与施加的焊钉剪应力幅成正相关。由图5e可见,PFG2的UHPC板出现了大面积浅层脱落破坏,这可能和试件制作质量有关,也可能由于集群布置的焊钉间距较小,导致UHPC板的损伤重叠,破坏范围增大。

图6为焊钉破坏情况。第1种类型,如图6a所示,在焊钉的破坏面上可以清晰地看到2个不同光滑度的截面。较为光滑的是疲劳破坏面,反映了疲劳破坏的累积过程;较为粗糙的是瞬时破坏面,反映了疲劳破坏的最终瞬时过程。2个截面间有一道明显的分界线。这种破坏模式反映出焊钉破坏有2个阶段:第一阶段,焊钉疲劳损伤,材料性能随着循环

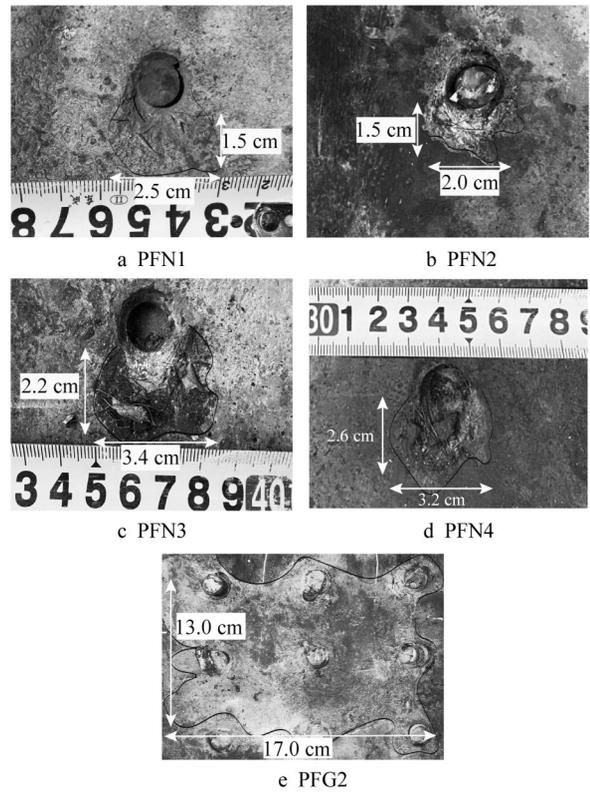


图5 UHPC破坏模式

Fig. 5 Failure mode of UHPC

表3 极限荷载下UHPC板破坏面积

Tab. 3 Failure area of UHPC plate under ultimate loading

试件标号	焊钉剪应力幅/MPa	UHPC板压溃区域面积/ mm^2
PFN1	132	3.8
PFN2	122	3.0
PFN3	151	7.5
PFN4	160	8.3
PFG1	111	—
PFG2	122	221.0

次数的增加而平稳下降;第二阶段,当焊钉材料性能下降到一定值后,继续疲劳加载,焊钉材料性能急速下降,直至试件破坏。第2种类型,如图6b所示,焊钉靠近焊圈处剪断,并伴随焊圈的部分破坏。这种破坏模式中焊钉的破坏面是较光滑的疲劳破坏面。第3种类型,如图6c所示,焊钉根部剪断,同时钢翼缘母材被撕裂。试验结果表明,单钉试件焊钉破坏主要为前2种类型,而群钉破坏主要为第3种类型。由图6可知:单钉受力均匀,焊钉表现出的疲劳破坏现象更为明显;由于群钉较单钉间距更小,钢板局部受力集中并产生叠加现象,因此钢板在焊钉疲劳剪断时更容易发生破坏。

总体来说,6个推出试件的破坏模式表现为焊钉根部剪断及其周围UHPC局部压溃。

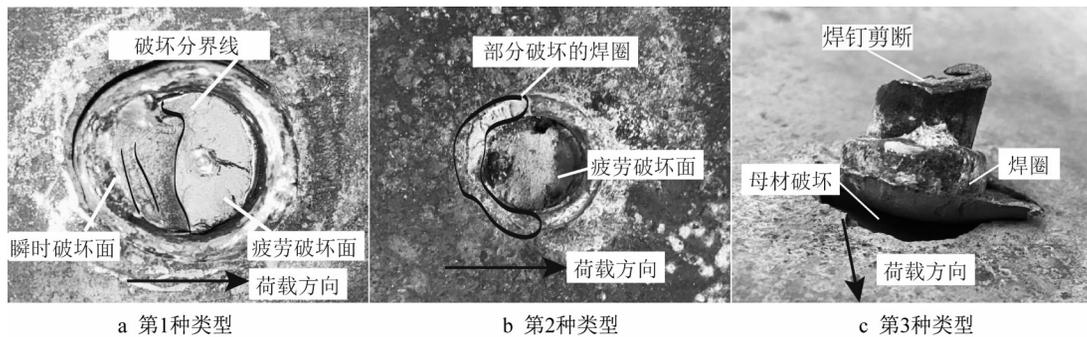


图6 焊钉破坏模式

Fig. 6 Failure mode of short studs

表4为所有短焊钉的疲劳寿命。PFG1试验加载500万次仍未破坏。由表4可知,剪应力幅增大,试件疲劳寿命下降。同时发现,PFG2疲劳寿命比PFN2低73%。

表4 短焊钉疲劳寿命

Tab. 4 Fatigue life of short stud

试件编号	焊钉剪应力幅/MPa	疲劳寿命/万次
PFN1	132	119.0
PFN2	122	166.1
PFN3	151	154.8
PFN4	160	52.3
PFG1	111	>500.0
PFG2	122	44.7

注:PFG1经循环加载500万次后未破坏,疲劳试验终止。

2.2 钢-UHPC界面滑移发展

图7为钢-UHPC界面滑移比与疲劳加载次数的关系。滑移比定义为疲劳荷载阶段最大滑移与临近破坏阶段最大滑移之比。可以发现,在循环加载次数为35万次时,PFN1—PFN3的界面滑移开始快速发展。在循环加载次数为10万次时PFG2的界面滑移开始快速增加。PFN2和PFG2的焊钉剪应力均为122 MPa,但PFG2的界面滑移发展快于PFN2。总体来看,试件的滑移发展随加载次数的增加而加快,群钉试件表现得更为显著,这也是群钉试件疲劳寿命低的原因。

2.3 抗剪刚度退化

图8为PFN1—PFN3和PFG2焊钉平均初始抗剪刚度。因力传感器问题PFN4和PFG1的未列出。由于静力加载时未记录加载历程数据,仅有持荷阶段数据,因此定义初始抗剪刚度为静力加载峰值与其对应的平均位移的比值。PFN1—PFN3的平均初始抗剪刚度平均值为343.0 kN·mm⁻¹,与PFN1—PFN3相比,PFG2的平均初始抗剪刚度下降约22.7%。

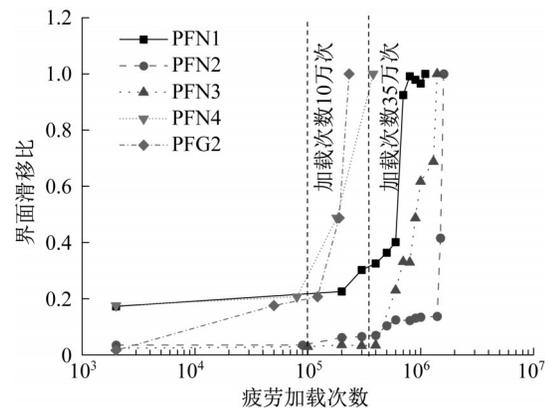


图7 界面滑移比与疲劳加载次数关系

Fig. 7 Relationship between interface slip ratio and fatigue loading times

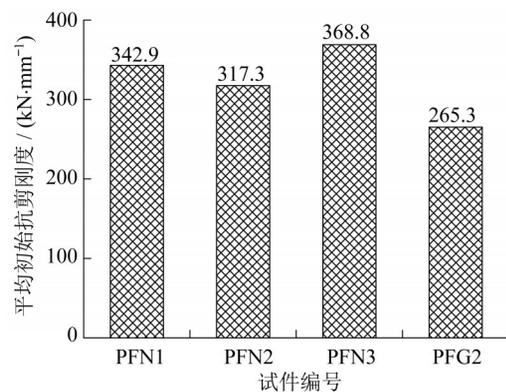


图8 焊钉平均初始抗剪刚度

Fig. 8 Mean initial shear stiffness of studs

为研究短焊钉抗剪刚度在循环荷载作用下的退化情况,定义抗剪刚度比为加载阶段刚度与初始刚度的比值。图9a为短焊钉抗剪刚度比与加载次数的关系。短焊钉的前期抗剪刚度比下降较缓,这与Xu等^[10]采用普通混凝土的现象有所不同,如图9b所示。在加载次数小于2.4×10⁵次时,普通混凝土中的焊钉抗剪刚度比很快便下降至0.5以下,而大多

数采用UHPC的试件却始终保持在0.5以上。这是由于采用UHPC后,加载早期混凝土局部破坏得以减缓,从而避免刚度的快速下降。

图10为抗剪刚度比和疲劳寿命比之间的关系,反映疲劳寿命全过程的损伤发展。与PFN2相比, PFG2抗剪刚度比在疲劳寿命比12%内下降更快, 这表明PFG2的层间静力相互作用破坏和UHPC局部损伤出现更早、发展更快。

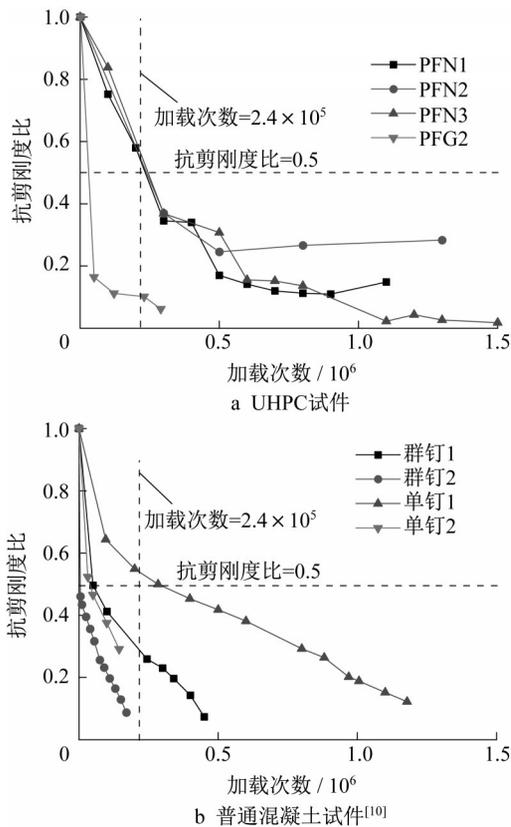


图9 抗剪刚度比与加载次数的关系

Fig. 9 Relationship between shear stiffness ratio and load cycle

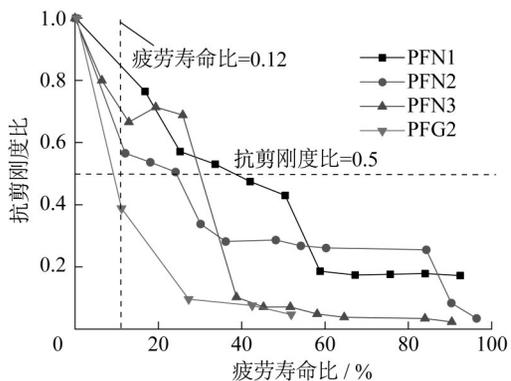


图10 疲劳寿命比与抗剪刚度比的关系

Fig. 10 Relationship between fatigue life ratio and shear stiffness ratio

3 短焊钉疲劳寿命分析

将疲劳推出试验结果与五部国内外主流规范中的焊钉疲劳S-N曲线进行对比(PFG1试件疲劳寿命取500万次),结果如图11所示。

(1)美国AASHTO(2012)规范^[6]

在AASHTO规范中,相应的焊钉疲劳寿命评估公式如下所示:

$$\Delta\tau_R = \frac{4\alpha}{\pi} = 303 - 37.6\log N_R \quad (1)$$

式中: α 是与疲劳细节相关的参数; $\Delta\tau_R$ 是焊钉剪应力幅; N_R 是疲劳寿命。该公式只考虑剪应力幅对焊钉疲劳性能的影响,认为荷载峰值、混凝土强度和焊钉柔度等影响可以忽略不计。

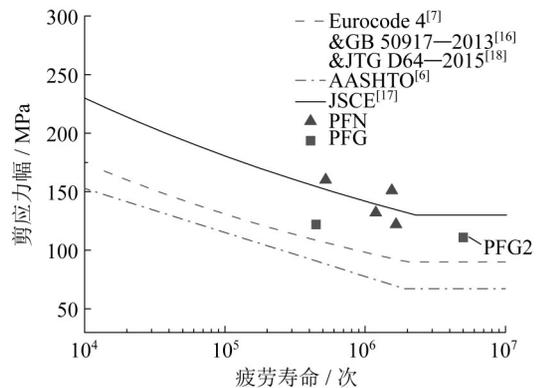


图11 钢-UHPC组合桥面板短焊钉疲劳寿命与常规焊钉疲劳寿命S-N曲线

Fig. 11 S-N curve of fatigue life of short studs and conventional studs for steel-UHPC composite bridge decks

(2)欧洲Eurocode 4(2005)规范^[7]

在Eurocode 4规范中,普通混凝土单个焊钉的疲劳寿命计算式如下所示:

$$\log N_R = a - m \log \Delta\tau_R \quad (2)$$

式中: m 是疲劳强度曲线的斜率,此处 $m=8$; a 为参数。

参数 a 可由下式得出:

$$a = \log N_c \Delta\tau_c^m \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau_c$ 是与疲劳细节有关的剪应力幅, $\Delta\tau_c=90$ MPa; $N_c=2\,000\,000$,表示剪应力90 MPa时疲劳寿命为2 000 000次。式(2)也只考虑剪应力幅对焊钉疲劳抗力的影响。

(3)日本JSCE(2014)规范^[17]

日本规范量化了混凝土强度、焊钉柔性和混凝土浇筑方向对焊钉疲劳寿命的影响,计算式如下所示:

$$\frac{V_{\text{srd}}}{V_{\text{suo}}} = 0.99N_{\text{R}}^{-0.105} \quad (4)$$

$$V_{\text{suo}} = \frac{31A_{\text{ss}}\sqrt{(h_{\text{ss}}/d_{\text{ss}})f'_{\text{cd}} + 10\,000}}{\gamma_{\text{b}}} \quad (5)$$

式中: V_{srd} 为荷载应力幅; V_{suo} 为焊钉剪应力设计值, 可由式(5)求得; A_{ss} 为焊钉横截面积; f'_{cd} 为混凝土抗压强度; h_{ss} 和 d_{ss} 分别为钉身长度和直径; γ_{b} 为抗力分项系数, 取 1.0。需要指出的是, 该规范中混凝土抗压强度的取值范围为 20~55 MPa, 焊钉高度取值范围为 60~150 mm。本研究中采用式(4)、(5)计算主要是为了讨论规范适用性。

(4) 中国《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)^[16]

《钢-混凝土组合桥梁设计规范》给出了焊钉疲劳寿命的计算式, 如下所示:

$$\Delta\tau_{\text{R}}^m N_{\text{R}} = \Delta\tau_{\text{c}}^m \times 2 \times 10^6 \quad (6)$$

该规范中焊钉的疲劳细节分类参考的是 Eurocode 4, 一般取 $\Delta\tau_{\text{c}} = 90$ MPa, $m = 8$ 。该规范也只考虑剪应力幅对疲劳寿命的影响。

(5) 中国《公路钢结构桥梁设计规范》(JTJ D64—2015)^[18]

《公路钢结构桥梁设计规范》给出了焊钉疲劳寿命的计算式, 如下所示:

$$\Delta\tau_{\text{R}}^m N_{\text{R}} = \Delta\tau_{\text{c}}^m \times 2 \times 10^6 \quad (7)$$

从图 11 可以看出, 不同规范之间焊钉的疲劳 S-N 曲线存在差异, 日本规范(JSCE)的疲劳 S-N 曲线中同等疲劳应力幅下焊钉的疲劳寿命最长。对比疲劳推出试验结果可以发现, 式(5)和式(6)对 UHPC 中短焊钉的疲劳寿命预测结果较为接近疲劳试验结果, 但疲劳安全设计富余下降, 甚至出现了高估的情况。日本规范(JSCE)考虑的混凝土强度、焊钉长径比, 都是针对普通混凝土和焊钉长径比大于 4 的情况, 所以在 UHPC 和短焊钉的组合桥面板中, 焊钉的疲劳规定需要进一步优化。AASHTO 规范、Eurocode 4 规范和两部中国规范均有一定的安全储备, 没有出现高估的情况。

以上规范大多针对普通混凝土中长焊钉的疲劳寿命计算, 近年来部分学者对钢-UHPC 组合桥面板短焊钉疲劳性能开展研究, 如张士红等^[19]、石广玉等^[20]基于断裂力学对组合桥面板短焊钉疲劳寿命进行了研究。将本研究与文献[19]中试件设计、加载情况相似的试验数据进行对比, 结果如表 5 所示。

表 5 疲劳寿命试验值与估算值对比

Tab. 5 Comparison of fatigue life between test and calculation results

试件编号	类型	$\Delta\tau$ /MPa	疲劳寿命/万次
PFN1	单钉	132	119.0
PFN2		122	166.1
PFN3		151	154.8
PFN4		160	52.3
PFG1	群钉	111	>500.0
PFG2		122	44.7
F-1 ^[19]	单钉	112	240.5
F-2 ^[19]		125	168.8
F-3 ^[19]		145	60.0

4 有限元分析

基于 Abaqus 软件建立有限元模型并开展有限元分析, 单钉模型和群钉模型分别编号为 PFN-A 和 PFG-A。

4.1 有限元模型及材料本构

由于短焊钉推出试件为双轴对称, 因此仅建立 1/4 几何模型进行模拟分析, 如图 12 所示(以 PFN-A 为例)。有限元模型中钢构件、UHPC 板及短焊钉均采用 C3D8R 模拟, 钢筋采用 T3D2 模拟。钢筋通过 embedded 嵌入 UHPC 中。模型中 UHPC 底部所有节点固定约束, 2 个对称面上采用对称约束。焊钉与焊钉孔之间采用 cohesive 接触。

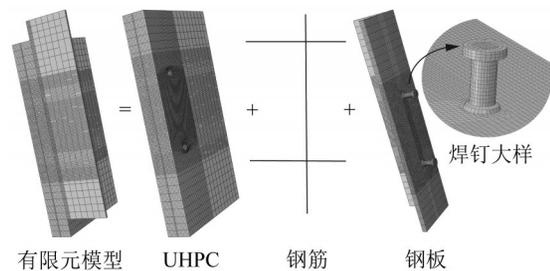
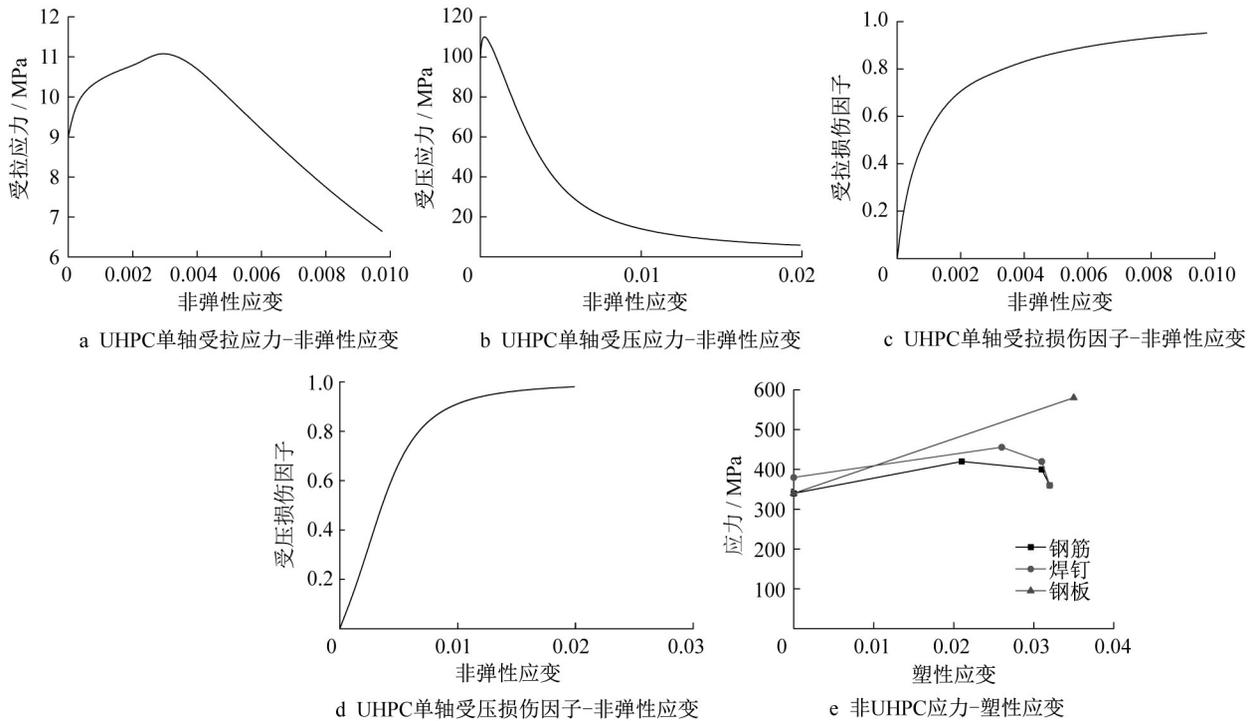


图 12 推出试件有限元模型

Fig. 12 Finite element model of push-out specimen

考虑往复循环荷载下的混凝土损伤情况, 对 UHPC 采用弹塑性损伤模型, 张渤雨^[4]总结的相关参数如图 13a~d 所示。材料本构模型中设置的混凝土受压损伤最大值为 0.83, 受拉损伤最大值为 0.91。此外, 参考 Xu 等^[10]、Nasrin 等^[21]、Kmiciek 等^[22]的相关研究, 最终确定有限元模型中膨胀角为 35°、双轴受压与单轴受压极限强度比 $f_{b0}/f_{c0} = 1.16$ 、流势偏心率为 0.1。模型中假定钢材为理想弹塑性材料, 钢板屈服强度为 470 MPa, 弹性模量为 210 000 MPa, 泊松比为 0.3。

图 13 材料本构与塑性损伤模型^[4]Fig. 13 Material constitutive and plastic damage model^[4]

4.2 循环加载方案

由于疲劳试验加载次数多、时间长,采用有限元模型对疲劳试验全过程分析难以实现。为此,通过施加较少次数循环荷载研究群钉疲劳性能下降的趋势与机理。针对有限元分析中疲劳荷载的施加,在Abaqus软件中建立1个分析步,步长取2,同时利用荷载幅曲线实现模型的循环加载,如图14所示。最终确定施加20次疲劳循环荷载。疲劳循环荷载平均值取焊钉相应抗剪强度的30%,PFN-A和PFG-A的名义剪应力幅为122 MPa,分别对应疲劳推出试验中的PFN2和PFG2试件。荷载以面荷载(Pressure)施加在钢翼缘的上表面。

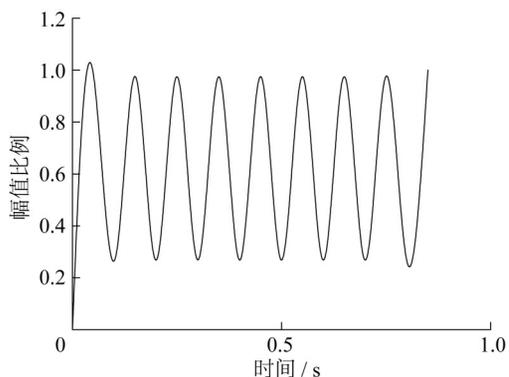


图 14 有限元模型循环加载过程

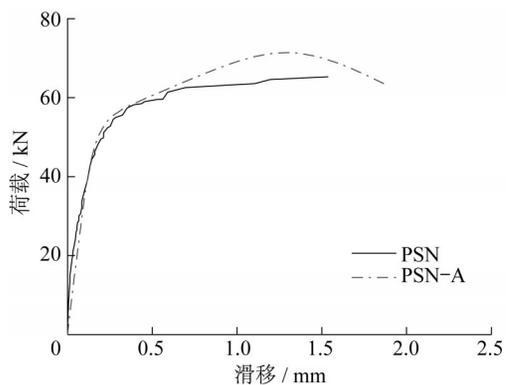
Fig. 14 Process of cyclic loading in finite element model

4.3 有限元模型可靠性验证

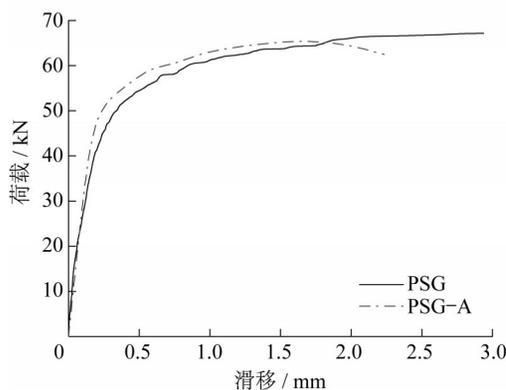
为验证有限元模型的可靠性,还进行了2组短焊钉静力推出试验,试件的材料、尺寸和制作过程与前文所述疲劳试件一致,分别记为PSN和PSG。将试验结果与有限元模型计算结果(PFN-A和PSG-A)对比,如图15所示。从图15可见,试验得到的荷载-滑移曲线与有限元模型计算曲线吻合较好,说明有限元模型计算结果可靠。

4.4 UHPC疲劳累积损伤

图16为有限元模型中焊钉根部处UHPC计算结果。由图16可见,焊钉根部受压区域附近UHPC损伤较为严重,这与试验现象一致。计算结果表明,PFN-A的受压损伤最大值为18.2%,而PFG-A的受压损伤最大值为28.3%,相比PFN-A增大了35.7%,并且损伤区域比PFN-A更大。以上结果表明,在相同荷载下,同一时刻群钉试件UHPC板的破坏比单钉更严重。这是由于群钉试件刚度退化要快于单钉试件,导致疲劳寿命低于单钉试件,与试验现象一致。群钉模型中处于不同高度位置的短焊钉周围UHPC损伤沿荷载方向依次减小,这表明群钉连接件中不同位置处焊钉受力不均匀。由此可见,群钉连接件中不同位置处焊钉受力不均匀是其受力性能下降的主要原因。随着群钉中焊钉数量的增多,UHPC损伤区域重叠愈发明显,这也是引发群钉受力性能下降的重要因素。



a 单钉试件与有限元模型



b 群钉试件与有限元模型

图 15 荷载-滑移曲线的试验结果与有限元模型计算结果对比

Fig. 15 Comparison of load-slip curve between test and FEA results

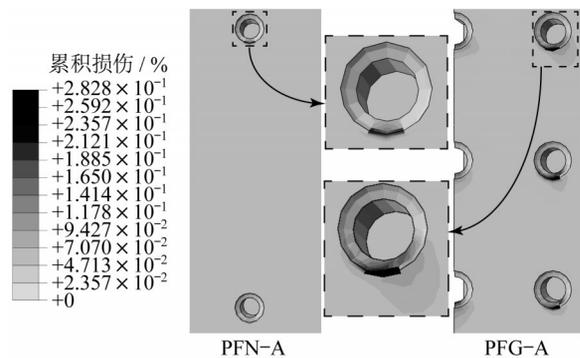


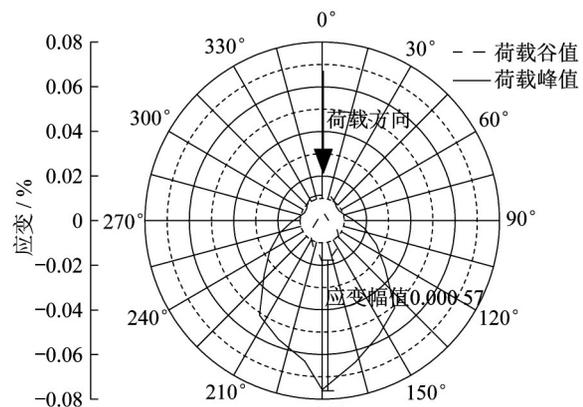
图 16 焊钉根部处 UHPC 疲劳累积损伤有限元模型计算结果(受压损伤)

Fig. 16 FEA results of UHPC fatigue cumulative damage distribution at stud root (compression damage)

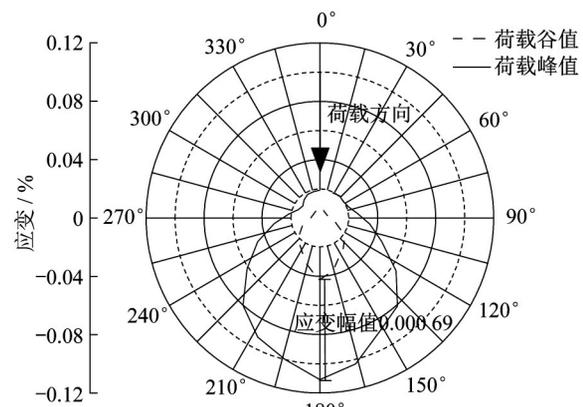
4.5 焊钉根部循环应变分布

试验中焊钉的破坏往往发生在根部,为此计算每个模型中应变水平相对较高的焊钉根部的最大主拉应变分布,如图 17 所示。 0° 对应焊钉根部截面的顶部, 180° 对应底部。由图 17 可以发现,焊钉根部

180° 位置疲劳剪应力幅最大,是疲劳损伤热点位置。与 PFN-A 相比, PFG-A 焊钉根部 180° 位置荷载峰值和荷载谷值的应变分别提高 31.7%、55.1%。与 PFN-A 相比,群钉试件应变幅增大了 17.4%。较大的疲劳应变值和应变幅值解释了群钉试件疲劳寿命低以及前期刚度下降较快的原因,也进一步说明了群钉受力不均匀导致的 UHPC 损伤范围与焊钉根部应变增大相互关联,共同引起群钉疲劳性能的下降。



a PFN-A



b PFG-A

图 17 焊钉根部荷载峰值和荷载谷值时最大主拉应变分布
Fig. 17 Maximum principal tensile strain distribution at stud root under cyclic load peak and valley

5 结论

(1)短焊钉疲劳推出试验结果表明,疲劳破坏主要表现为焊钉根部剪断,短焊钉周边 UHPC 局部压溃。除此之外,在部分疲劳试验中还出现了焊钉根部母材撕裂、焊钉焊缝破坏等现象。相比单钉,群钉的疲劳寿命下降。根据试验结果,在焊钉名义剪应力幅为 122 MPa 时,群钉疲劳寿命仅为单钉疲劳寿

命的27%。

(2)短焊钉疲劳推出试验结果表明,群钉试件的滑移蠕变及抗剪刚度退化要比单钉试件快。当疲劳加载次数达到疲劳寿命的12%时,群钉的抗剪刚度退化到50%以下,而此时单钉保持在50%以上。

(3)对比Eurocode 4规范、日本规范(JSCE)、ASSHTO规范以及两部中国规范中的焊钉疲劳S-N曲线可以发现,AASHTO规范有较大的安全储备,而日本规范(JSCE)与试验结果最为接近,安全富余较少。

(4)基于材料塑性损伤模型的有限元模拟分析结果表明:群钉UHPC的局部最大损伤比单钉大35.7%,而且损伤区域更广;群钉根部的应变峰值和应变谷值比单钉分别大31.7%、55.1%,应变幅大17.4%。这与试验中所得群钉疲劳寿命显著下降现象是一致的。

作者贡献声明:

徐晨:试验设计,数据分析,论文写作与修改。

肖涵:试验设计,数据分析,论文初稿的写作与修改。

王巍:理论分析。

参考文献:

- [1] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J].材料导报,2017,31(12):33.
SHAO Xudong, QIU Minghong, YAN Banfu, *et al.* Research and application progress of ultra high-performance concrete in bridge engineering at home and abroad [J]. Materials Reports, 2017, 31 (12): 33.
- [2] 丁楠,邵旭东.轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J].土木工程学报,2015,48(1):74.
DING Nan, SHAO Xudong. Fatigue behavior of light composite deck[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2015, 48(1): 74.
- [3] 胡功球.不同养护条件下超高性能混凝土(UHPC)的收缩性能研究[D].长沙:湖南大学,2015.
HU Gongqiu. Research on the shrinkage performance of ultra-high-performance concrete under different curing conditions [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [4] 张渤雨.后结合钢-UHPC组合桥面板收缩效应及静力性能试验研究[D].上海:同济大学,2020.
ZHANG Boyu. Experimental study on shrinkage effect and static performance of steel UHPC composite deck [D]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [5] KIM J S, KWARD 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.
- [6] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [7] Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, Part 2: general rules and rules of buildings (EN 1994-1-1) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] DIENG L, MARCHAND P, GOMES F, *et al.* Use of UHPFRC overlay to reduce stresses in orthotropic steel decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 30.
- [9] CAO J H, SHAO X D, DENG L, *et al.* Static and fatigue behavior of short-headed studs embedded in a thin ultra-high performance concrete layer [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(5): 1.
- [10] XU C, SUGIURA K, SU Q T. Fatigue behavior of the group stud shear connectors in steel-concrete composite bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(8): 1.
- [11] LEE P G, SHIM C S, CHANG S P. Static and fatigue behavior of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(9): 1270.
- [12] 黄侨,汪炳,刘小玲,等.重复荷载作用后栓钉连接件的剩余力学性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(6):54.
HUANG Qiao, WANG Bing, LIU Xiaoling, *et al.* Residual mechanical properties of stud connectors under cyclic loading [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 54.
- [13] 赵根田,侯智译,高鹏,等.拟静力作用下群钉连接件抗剪性能研究[J].工程力学,2020,37(7):201.
ZHAO Gentian, HOU Zhiyi, GAO Peng, *et al.* Study on shear performance of group connector under quasi-static load [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 201.
- [14] 青宇,范亮,周丹.考虑先后浇筑界面黏结变形的装配式剪力键力学行为分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2021,43(1):54.
QING Yu, FAN Liang, ZHOU Dan. Analysis of the mechanical behavior of the assembled shear key considering the bonding deformation of the successively poured interface [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(1): 54.
- [15] 石璐,范亮.预制-装配式多键群剪力键力学行为试验研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文).[2021-06-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20201219.1719.006.html>.
SHI Lu, FAN Liang. Experimental study on the mechanical behavior of prefabricated and assembly-type multi-band group shear bonds [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering. [2021-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20201219.1719.006.html>.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢-混凝土组合桥梁设计规范:GB 50917—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel-concrete composite bridges: GB 50917—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

- [17] Committee of Hybrid Structure, JSCE. Standard specification for hybrid structures [S]. Tokyo: Japanese Society of Civil Engineers, 2014.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [19] 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. 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 Transportation Research and Development, 2016, 33(11): 111.
- [20] 石广玉, 李广耀. 基于断裂力学的钢-UHPC组合结构中栓钉的疲劳寿命评估[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 102. SHI Guangyu, LI Guangyao. Evaluation of fatigue life of stud in steel-UHPC composite structure based on fracture mechanics [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(2): 102.
- [21] NASRIN S, IBRAHIM A. Finite-element modeling of UHPC hybrid bridge deck connections [J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2018, 10(3): 199.
- [22] KMIĘCIK P, KAMIŃSKI M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11(3): 623.

~~~~~

(上接第 629 页)

- Press, 2014.
- [4] YANG H, HUANG H J. Mathematical and economic theory of road pricing [M]. Oxford: Elsevier, 2005.
- [5] ANDERSON R M, MAY R M, ANDERSON B. The mathematics of infection (book reviews: infectious diseases of humans. dynamics and control) [J]. Science, 1991, 254(2): 591.
- [6] BAILEY N. The mathematical theory of infectious diseases and its applications[J]. Immunology, 1978, 34(5): 955.
- [7] HETHCOTE H W. The mathematics of infectious diseases [J]. SIAM Review, 2000, 42(4): 599.
- [8] BOTA A, GARDNER L, KHANI A. Identifying critical components of a public transit system for outbreak control [J]. Networks and Spatial Economics, 2017, 17: 1137.
- [9] DUDAS G, CARVALHO L M, BEDFORD T, *et al.* Virus genomes reveal factors that spread and sustained the Ebola epidemic[J]. Nature, 2017, 544(7650): 309.
- [10] FARIA N R, QUICK J, CLARO I M, *et al.* Establishment and cryptic transmission of Zika virus in Brazil and the Americas [J]. Nature, 2017, 546(7658): 406.
- [11] WERTHEIM J O, LEIGH B A J, LANCE H N, *et al.* The global transmission network of HIV-1 [J]. Journal of Infectious Diseases, 2014, 209(2): 304.
- [12] 谢驰, 陈志斌, 郑太秀, 等. 防止新冠疫情扩散的城市交通系统与出行活动管控策略[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(1): 1. XIE Chi, CHEN Zhibin, ZHENG Taixiu, *et al.* Control strategy of urban transportation system and traffic to prevent COVID-19 from spreading [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(1): 1.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 突发公共卫生事件交通应急规定 [J]. 中国卫生法制, 2004, 12(2): 44. National Health Commission of the People's Republic of China. Traffic emergency regulations for public health emergencies [J]. China Health Law, 2004, 12(2): 44.
- [14] KITTHAMKESORN S, CHEN A. A path-size weibull stochastic user equilibrium model [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2013, 57(11): 378.
- [15] 黑龙江省通报 48 起聚集性疫情, 其中 45 起是家庭聚集 [EB/OL]. [2020-02-08]. [https://www.sohu.com/a/371369428\\_428290](https://www.sohu.com/a/371369428_428290). Heilongjiang Province reported 48 epidemic cases, of which 45 were family gatherings [EB/OL]. [2020-02-08]. [https://www.sohu.com/a/371369428\\_428290](https://www.sohu.com/a/371369428_428290).
- [16] 2019 年: 共享出行站在十字路口上 [EB/OL]. [2019-02-24]. [https://www.sohu.com/a/297328911\\_120024082](https://www.sohu.com/a/297328911_120024082). 2019: ridesharing travel mode stands at the intersection [EB/OL]. [2019-02-24]. [https://www.sohu.com/a/297328911\\_120024082](https://www.sohu.com/a/297328911_120024082).
- [17] 刘金焯. 出行共享平台运营模式及补贴策略研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. LIU Jinxuan. Research on operation mode and subsidy strategy of ridesharing platform [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.