

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.055



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 双向荷载下组合剪力键的剪切机理及抗剪强度计算模型

马亚飞, 胡涛, 章拔超, 周彪, 王磊, 张建仁  
(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 长沙 410114)

**摘要:**为研究双向荷载作用下组合剪力键的剪切性能,建立组合剪力键有限元模型,并结合试验进行验证;对比双向和单向推出荷载作用下组合剪力键的破坏形态,研究双向荷载与组合剪力键抗剪强度比的关系,量化混凝土强度和贯穿钢筋直径对组合剪力键抗剪强度的影响;揭示组合剪力键的剪切破坏机理,通过多变量回归分析,建立双向荷载作用下组合剪力键抗剪强度计算模型。结果表明:侧压荷载有效抑制了混凝土横向膨胀,混凝土板出现一条纵向主裂缝和少量横向微裂纹,单向推出荷载作用下,组合剪力键因混凝土板劈裂裂缝贯通而失效;侧压荷载能增加组合剪力键抗剪强度,但混凝土强度较高且贯穿钢筋直径较大时,双向荷载效应较小,抗剪强度比仅为 1.05;双向荷载作用下,抗剪强度随混凝土强度和贯穿钢筋直径的增加而显著增加。

**关键词:**钢-混组合梁;剪力键;双向荷载;剪切机理;荷载-滑移

中图分类号:TU398 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)03-0171-09

## Shear mechanism and shear strength calculation of composite shear connectors under biaxial load

MA Yafei, HU Tao, ZHANG Bachao, ZHOU Biao, WANG Lei, ZHANG Jianren

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114,  
P. R. China)

**Abstract:** To investigate the shear performance of composite shear connectors under biaxial load, a finite element model was established and verified by experimental tests. The failure modes of composite shear connectors under biaxial load and unidirectional push-out load were compared, and the relationship between biaxial load and shear strength ratio was also analyzed. The effects of concrete strength and through reinforcement diameter on the shear strength under biaxial load were clarified. The shear mechanism of the composite shear connector was revealed. A shear strength model of composite shear connector under biaxial load was established by multivariable regression analysis. The results show that lateral compression can effectively prevent the transverse expansion of concrete, and a longitudinal main crack and some transverse microcracks appear in the concrete slab. Under the action of unidirectional push-out load, the composite shear connector fails due to the penetration of splitting cracks in the concrete slab. Lateral compression increases the

收稿日期:2023-02-07

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600900);湖南省自然科学基金创新研究群体项目(2020JJ1006)

作者简介:马亚飞(1984-),男,博士,教授,主要从事桥梁可靠性及耐久性研究,E-mail: yafei.ma@csust.edu.cn。

Received: 2023-02-07

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2600900); Science Fund for Creative Research Groups of Hunan Province(No. 2020JJ1006)

**Author brief:** MA Yafei (1984- ), PhD, professor, main research interests: bridge reliability and durability, E-mail: yafei.ma@csust.edu.cn.

shear strength of composite shear connectors, but the biaxial load effect is small when the concrete strength is high and the diameter of the continuous reinforcement is large (shear strength ratio is 1.05). The shear strength of composite shear connector significantly increases with the increase of concrete strength and through reinforcement diameter under biaxial loading.

**Keywords:** steel-concrete composite beam; connector; biaxial load; shear mechanism; load-slip

钢-混组合梁由钢主梁和混凝土桥面板组成,发挥了钢材抗拉和混凝土抗压的力学性能<sup>[1-3]</sup>。剪力键是保证钢主梁和混凝土桥面板协同受力的关键构件,焊钉和开孔钢板剪力键(PBL)为常见的柔性剪力键。组合剪力键为一种新型剪力键,具有延性好、强度高等优点<sup>[4]</sup>,在外部压力作用下,其处于双向受压状态<sup>[5]</sup>,剪切性能发生明显变化。因此,有必要对双向荷载作用下组合剪力键的剪切性能展开研究。

一些学者已对剪力键剪切性能进行了研究。Ding 等<sup>[6]</sup>对混凝土强度、焊钉屈服强度和长径比等参数进行分析,建立了焊钉剪力键抗剪强度数值分析模型。Nguyen 等<sup>[7]</sup>、Shim 等<sup>[8]</sup>通过推出试验和有限元模拟,研究了大直径焊钉剪力键抗剪强度和荷载-滑移行为。焊钉剪力键延性好、传力机理明确,但易疲劳且抗剪强度低<sup>[9-11]</sup>。与焊钉剪力键相比,PBL 剪力键剪切刚度大,有较好的抗疲劳性能<sup>[12-13]</sup>。Wang 等<sup>[14]</sup>研究了贯穿钢筋直径、肋板孔径、混凝土强度和横向配筋率对抗剪强度的影响,建立了 PBL 剪力键抗剪强度数值回归模型。Zhang 等<sup>[15]</sup>揭示了多孔 PBL 剪力键内力传递机理。Duan 等<sup>[16]</sup>研究了高性能混凝土 PBL 剪力键破坏机理和裂缝发展过程,提出了基于弹性地基梁法的单孔 PBL 剪力键初始剪切刚度表达式。然而,PBL 剪力键荷载传递方向单一且延性低。组合剪力键由焊钉和开孔钢板组成,兼具焊钉和 PBL 剪力键的优点<sup>[17]</sup>。马亚飞等<sup>[18]</sup>改进了一种承压型组合剪力键,研究了组合剪力键的破坏模式和受力机理。上述试验和有限元分析主要研究单向荷载作用下剪力键的静力性能,针对双向荷载工况研究较少。

移动荷载、结构自重和纵向预应力等导致剪力键实际受纵向层间剪切力和侧向压力的双向荷载影响。为研究侧向压力对剪力键剪切性能的影响,Xu 等<sup>[19-21]</sup>揭示了双向荷载下焊钉刚度退化规律,量化了钢-混层间摩擦和混凝土双向压缩对提高剪力键强度的影响。宋瑞年等<sup>[22]</sup>建立了 PBL 剪力键抗剪强度增量与侧压力的关系。Zhan 等<sup>[23]</sup>基于约束混凝土强度理论改进了 PBL 剪力键抗剪强度计算方法<sup>[24]</sup>。Karam 等<sup>[25]</sup>研究了不同侧压力下 PBL 剪力键内部失效过程。上述研究表明,侧向压力可提升

混凝土板的整体性和钢-混界面摩擦力,进而提高剪力键抗剪强度,考虑侧向压力可减少剪力键布置数量,降低施工难度,提升施工质量。然而,已有研究主要集中于侧向压力对焊钉和 PBL 剪力键剪切性能的优化,组合剪力键力学性能与传统剪力键差异较大,双向荷载作用下组合剪力键剪切性能尚未明确,亟待建立相应的抗剪强度计算模型。

笔者建立 48 个组合剪力键有限元模型,通过开展剪力键推出试验,验证数值分析模型的有效性。根据试验和数值分析结果,对比单向推出荷载与双向荷载作用下组合剪力键剪切性能的差异,研究混凝土强度和贯穿钢筋直径对侧压力下组合剪力键抗剪强度的影响,揭示双向荷载作用下组合剪力键受力机理,提出双向荷载作用下组合剪力键抗剪强度计算表达式。

## 1 有限元建模及试验验证

### 1.1 试件设计

根据欧洲 Eurocode 4 相关规定<sup>[26]</sup>,标准推出试件构造如图 1 所示。组合剪力键由 H 型钢、开孔肋板、焊钉和混凝土板组成。混凝土内部钢筋笼对称分布在剪力键两侧。肋板嵌入混凝土深度为 100 mm,高度为 300 mm,厚度为 12 mm,肋板孔径为 50 mm;焊钉直径为 19 mm,长度为 90 mm。

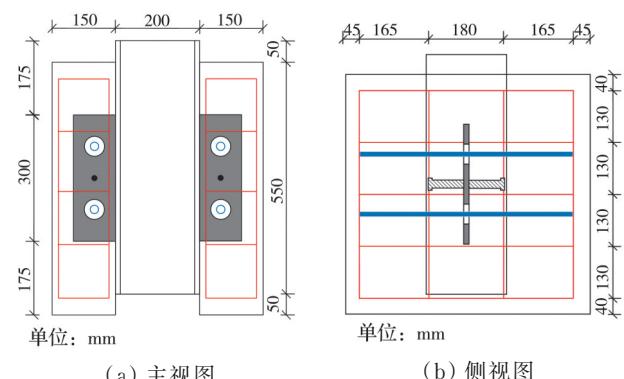


图 1 推出试件设计

Fig. 1 Design of push-out specimen

为研究侧压荷载对组合剪力键剪切性能的影响,采用有限元软件 ABAQUS 对 4 组 GA-GD 共 48 个组合剪力键进行实体建模,双向加载如图 2 所示。试件编号规则为:混凝土强度、组别和侧压力大小,

如C30GBP1表示组合剪力键采用C30混凝土,属于GB组,侧压力为P1。具体参数设计如表1所示,其中d为贯穿钢筋直径,f<sub>cu</sub>为混凝土抗压强度,P为侧压力。

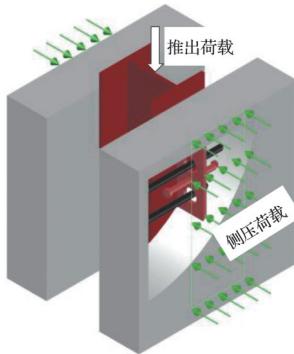


图2 双向加载模型

Fig. 2 Bidirectional loading model

表1 推出试件参数设计

Table 1 Parameter design of push-out specimens

组别	模型			f <sub>cu</sub> /MPa	d/mm
	P=0 MPa	P=0.8 MPa	P=1.05 MPa		
GA	C30GAP0	C30GAP1	C30GAP2	30	
	C40GAP0	C40GAP1	C40GAP2	40	
	C50GAP0	C50GAP1	C50GAP2	50	0
	C60GAP0	C60GAP1	C60GAP2	60	
GB	C30GBP0	C30GBP1	C30GBP2	30	
	C40GBP0	C40GBP1	C40GBP2	40	
	C50GBP0	C50GBP1	C50GBP2	50	20
	C60GBP0	C60GBP1	C60GBP2	60	
GC	C30GCP0	C30GCP1	C30GCP2	30	
	C40GCP0	C40GCP1	C40GCP2	40	
	C50GCP0	C50GCP1	C50GCP2	50	25
	C60GCP0	C60GCP1	C60GCP2	60	
GD	C30GDP0	C30GDP1	C30GDP2	30	
	C40GDP0	C40GDP1	C40GDP2	40	
	C50GDP0	C50GDP1	C50GDP2	50	30
	C60GDP0	C60GDP1	C60GDP2	60	

## 1.2 本构模型

混凝土采用塑性损伤(CDP)模型,混凝土本构关系由式(1)、式(2)控制<sup>[27]</sup>,其中σ<sub>c</sub>(σ<sub>t</sub>)为混凝土压(拉)应力;ε<sub>c</sub>为混凝土压应变;E<sub>c</sub>为混凝土弹性模量;η为应变与峰值应变之比,η=ε<sub>c</sub>/ε<sub>cp</sub>,ε<sub>cp</sub>=0.0025;w为裂缝宽度;w<sub>c</sub>为应力完全释放时的裂缝宽度;k为塑性值,k=E<sub>c</sub>×ε<sub>cp</sub>/f<sub>c</sub>;f<sub>c</sub>为混凝土圆柱体抗压强度;f<sub>t</sub>为混凝土抗拉强度;常数项c<sub>1</sub>=3,c<sub>2</sub>=6.93。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \epsilon_c, & 0 \leq \epsilon_c \leq 0.4 f_c \\ f_c (k\eta - \eta^2) [1 + (k-2)\eta], & 0.4 f_c < \epsilon_c \leq f_c \\ (1 - 4.76 \epsilon_c) f_c - \epsilon_{cp}, & \epsilon_{cp} < \epsilon_c \leq 13.6 \epsilon_{cp} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left[ 1 + \left( c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \cdot e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \cdot e^{-c_2} \quad (2)$$

混凝土受压损伤d<sub>c</sub>、受拉损伤d<sub>t</sub>分别与塑性应变ε<sub>c</sub><sup>pl</sup>和塑性裂缝宽度w<sub>c</sub><sup>pl</sup>相关,混凝土塑性损伤因子可表示为<sup>[27]</sup>

$$d_c = 1 - \sigma_c / \left[ E_c \cdot \epsilon_c^{pl} \left( \frac{1}{b_c} - 1 \right) + \sigma_c \right] \quad (3)$$

$$d_t = 1 - \sigma_t / \left[ E_t \cdot w^{pl} \left( \frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t \right] \quad (4)$$

式中常数项b<sub>c</sub>=0.7,b<sub>t</sub>=0.1。

箍筋和贯穿钢筋分别采用HPB300和HRB400钢筋,H型钢和肋板采用Q345结构钢。如图3所示,钢材应力-应变曲线采用考虑硬化的理想弹塑性三折线模型,水平屈服阶段应变范围为ε<sub>y</sub>~10ε<sub>y</sub>(ε<sub>y</sub>为弹性应变),极限应变ε<sub>u</sub>为0.2。钢材的力学性能测试结果如表2所示。

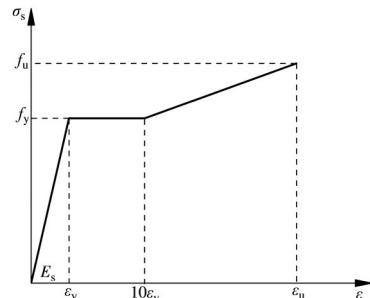


图3 钢材本构模型

Fig. 3 Constitutive model of steel

表2 钢材力学性能

Table 2 The mechanical properties of steel

钢材类型	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
Q345	374	521	210
HPB300	351	469	200
HRB400	472	632	200

## 1.3 边界设置与网格划分

1/4设计试件的有限元模型如图4所示,采用动力显式分析法求解。对面1、面2施加对称边界条件,混凝土块底部施加固端约束。剪力键与混凝土板切向摩擦系数取0.7,法向设置为“硬”接触<sup>[27]</sup>。双向加载过程中,第1个分析步施加侧压荷载,第2个分析步施加推出荷载,单轴加载过程仅包含竖向推出荷载。加载过程如表3所示。

表3 加载流程

Table 3 Load application process

分析步	单轴加载	双向加载	
		推出荷载	推出荷载 侧压荷载
1	启动		启动
2	持续	启动	持续

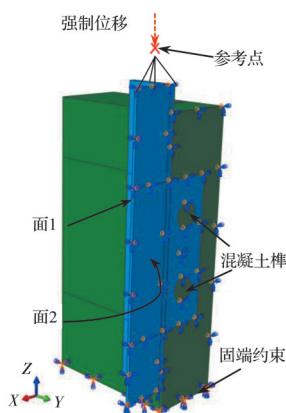
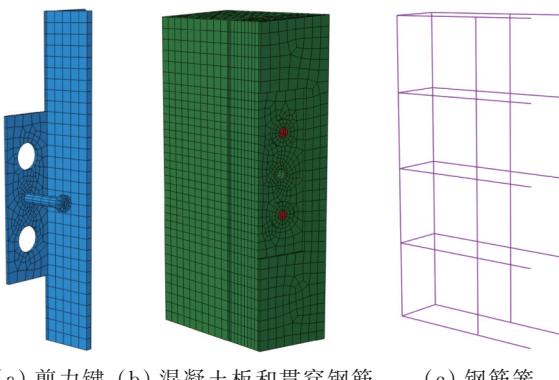


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

剪力键、混凝土板、贯穿钢筋和 H 型钢采用三维八节点减缩积分单元(C3D8R)，箍筋采用三维桁架单元(T3D2)。网络全局种子设置为 15~20 mm，剪力键与混凝土板接触区域进行局部网格加密，网络划分如图 5 所示。



(a) 剪力键 (b) 混凝土板和贯穿钢筋 (c) 钢筋笼

图 5 不同构件网格划分

Fig. 5 Meshing of different components

#### 1.4 模型试验验证

为验证有限元模型的可靠性，对模型 C30GAP0 和 C30GAP1 分别进行单调及双向加载试验，试验在 500 t 长柱压力试验机上进行，如图 6 所示。使用两根对拉螺杆将侧压装置固定在模型 C30GAP1 的混凝土板上，接触区尺寸为 550 mm × 200 mm，对拉螺杆两侧分别安装千斤顶和传感器以调节预紧力。加载前，侧压荷载调至 88 kN，加载方式为单调分级加载，加载过程中混凝土板膨胀，侧压荷载增加。推出荷载与侧压力相对变化值和滑移量的关系如图 7 所示。图中 FC30GAP0 和 FC30GAP1 为模拟值，TC30GAP0 和 TC30GAP1 为试验值。由图 7 可知，侧压力增加值小于 5%，混凝土板侧压应力维持在 8.8 MPa，数值分析和组合剪力键试验破坏过程相吻合，抗剪强度差值小于 4%。由于混凝土采用了 CDP 本构关系，计算过程中混凝土单元并未失效，

导致理论荷载-滑移曲线破坏阶段高于试验结果。

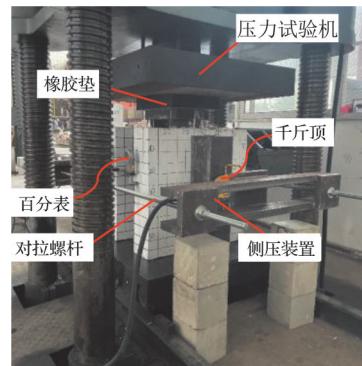


图 6 加载装置

Fig. 6 Load setup

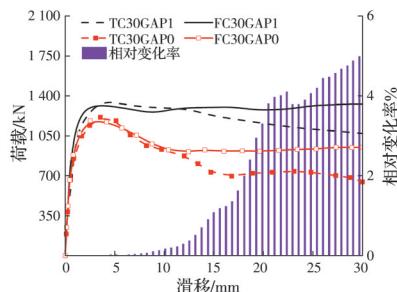


图 7 荷载-滑移曲线和侧压力相对变化趋势

Fig. 7 Load-slip curves and relative variation trend of the lateral pressure

## 2 结果与讨论

### 2.1 破坏形态

组合剪力键混凝土板的破坏形态如图 8、图 9 所示。在推出荷载作用下，由于混凝土板横向未受到有效约束，试件 C30GAP0 肋板端部承压端出现大面积端部劈裂裂缝，焊钉附近和肋板高度方向分别出现多条横向微裂纹和单条竖向裂缝。裂缝相互贯通，H 型钢与混凝土板分离，试件失效。在双向荷载作用下，混凝土板横向膨胀得到有效抑制，仅呈现由混凝土承压端纵向延伸的主裂缝，同时在横向出现少量微裂缝，剪力键发生了较大相对滑移，混凝土板与 H 型钢未发生明显分离，试件失效后残余承载力为抗剪强度的 79.2%，如图 7 所示。

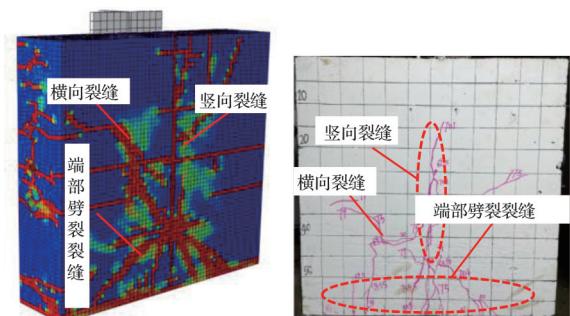


图 8 混凝土板破坏形态 (C30GAP0)

Fig. 8 Failure mode of concrete slab (C30GAP0)

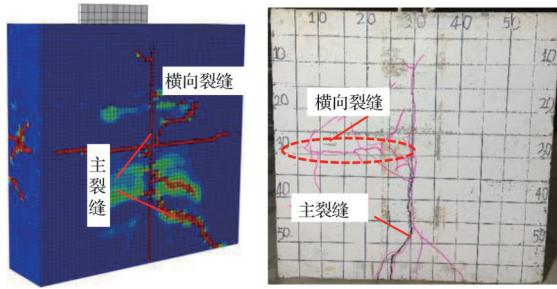


图9 混凝土板破坏形态(C30GAP1)

Fig. 9 Failure mode of concrete slab (C30GAP1)

剪力键破坏形态如图10、图11所示。单轴荷载作用下,剪力键除焊钉根部发生较大屈服变形外,其余部位均处于弹性阶段,肋板承压端内侧出现局部应力集中。双向荷载作用下,混凝土板与剪力键保持协同受力,且肋板和焊钉周围混凝土处于三向受压状态,混凝土抗压强度提高<sup>[28]</sup>,焊钉根部屈服段长度显著增加,肋板出现大面积高应力区。试验中发生剧烈声响,焊钉被剪断,肋板在承压端发生轻微屈曲变形。

## 2.2 荷载-滑移曲线和抗剪强度

为探究侧压荷载对组合剪力键破坏过程和抗剪强度的影响以及双向荷载下不同混凝土强度和贯穿钢筋直径等参数下的组合剪力键受力性能,提

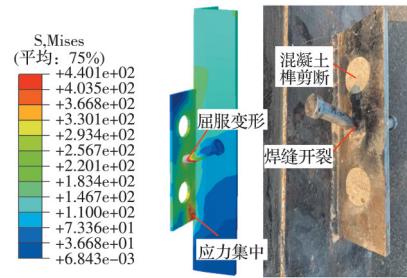


图10 剪力键破坏形态(C30GAP0)

Fig. 10 Failure mode of shear connector (C30GAP0)

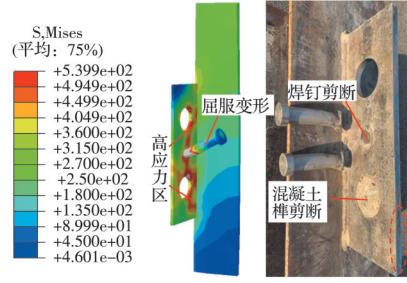


图11 剪力键破坏形态(C30GAP1)

Fig. 11 Failure mode of shear connector (C30GAP1)

取了组合剪力键的荷载-滑移曲线和抗剪强度,分别如图12和表4所示。

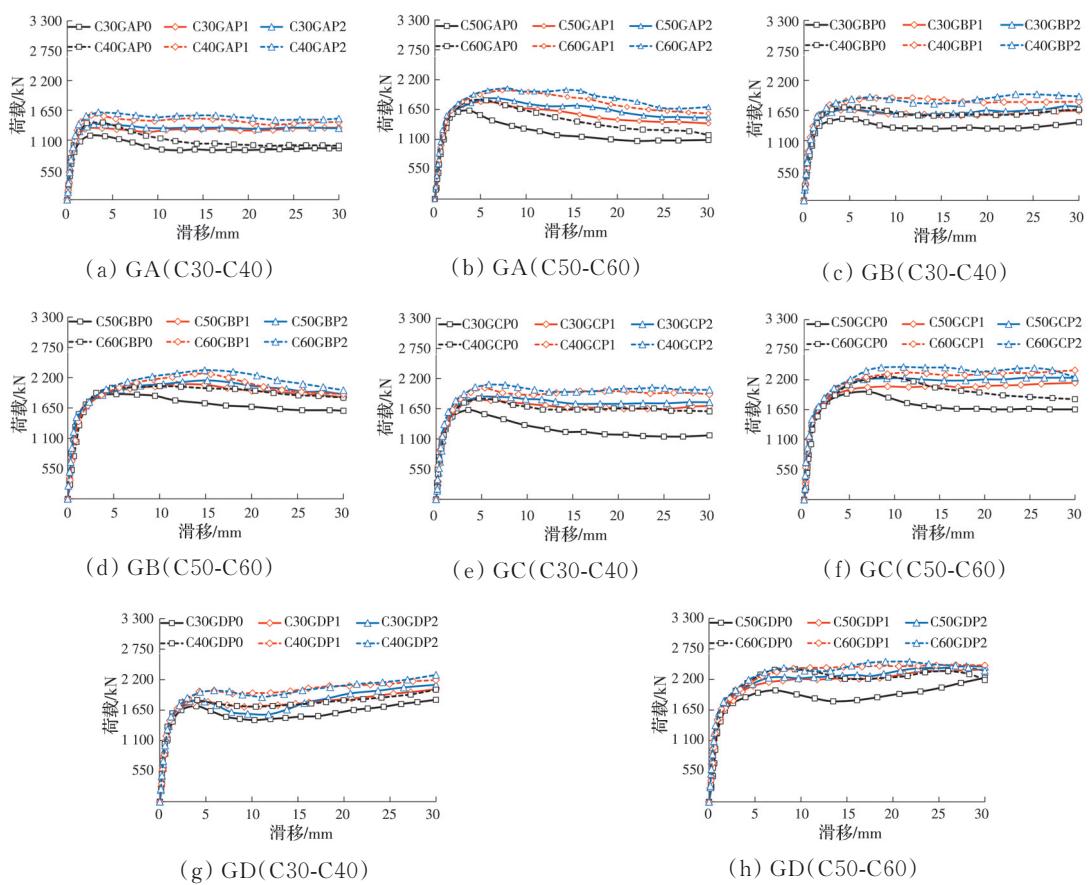


图12 荷载-滑移曲线

Fig. 12 Load-slip curves

表 4 剪力键抗剪强度  
Table 4 Shear strength of shear connectors

组别	抗剪强度/kN											
	C30			C40			C50			C60		
	P0	P1	P2	P0	P1	P2	P0	P1	P2	P0	P1	P2
GA	1 184	1 328	1 396	1 424	1 562	1 615	1 630	1 786	1 855	1 820	2 003	2 041
GB	1 494	1 662	1 728	1 708	1 878	1 946	1 902	2 080	2 151	2 046	2 270	2 336
GC	1 626	1 800	1 867	1 838	2 032	2 094	1 976	2 144	2 236	2 260	2 372	2 433
GD	1 837	2 026	2 107	2 020	2 192	2 286	2 231	2 381	2 440	2 400	2 460	2 520

### 2.2.1 侧压荷载影响

双向荷载与组合剪力键抗剪强度比的关系如图 13 所示, 抗剪强度比为剪力键在双向荷载与单轴荷载下抗剪强度的比值。由图 12、图 13 可知, 侧压荷载增强了组合剪力键抗剪强度, 抑制了破坏阶段推出荷载的下降速率(延性好), 这是因为侧压荷载提高了约束区混凝土强度和峰值应变, 增加了剪力键翼缘板与混凝土板间的摩擦效应。混凝土强度较高且贯穿钢筋直径较大(C60GD)时, 双向荷载效应不明显。C30GAP2 抗剪强度为 C30GAP0 的 1.18 倍, C60GDP2 抗剪强度为 C60GDP0 的 1.05 倍, 失效模式由混凝土劈裂破坏转变为剪力键肋板屈曲变形。

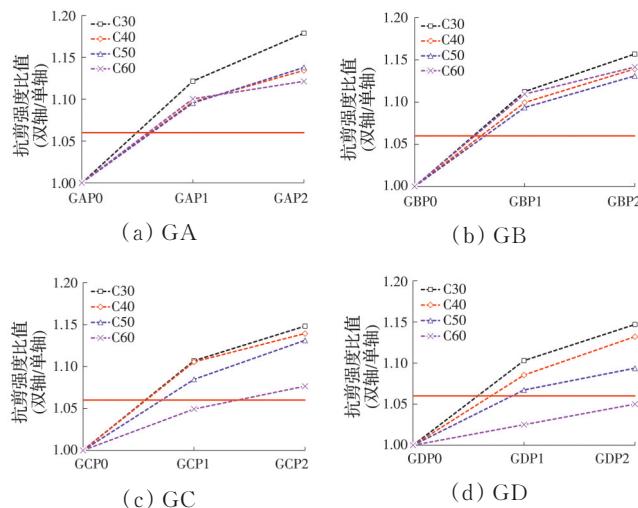


图 13 双向荷载下组合剪力键抗剪强度比

Fig. 13 Shear strength ratio of composite shear connector under biaxial load

### 2.2.2 混凝土强度影响

保持侧压荷载为 P1, 组合剪力键抗剪强度与混凝土强度的关系如图 14 所示。由图 14 可知, C60GAP1 抗剪强度为 C30GAP1 的 1.51 倍, C60GDP1 抗剪强度较 C30GDP1 提高了 21.4%。有限元分析结果表明, 提高混凝土强度有效降低了混凝土开裂, 肋板高应力区和屈曲变形程度增加。因此, 进行钢混组合梁设计时, 可采用高强混凝土

作为剪力槽填充材料, 减少组合剪力键数量, 缩减焊接次数并降低桥面板组装难度。

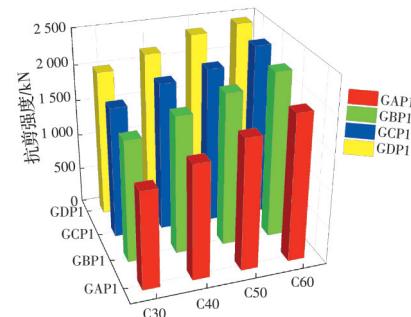


图 14 混凝土强度影响

Fig. 14 Influence of concrete strength

### 2.2.3 贯穿钢筋直径影响

双向荷载作用下(侧压荷载为 P1)贯穿钢筋直径对组合剪力键抗剪强度的影响如图 15 所示。由图 15 可知, 组合剪力键抗剪强度随贯穿钢筋直径的增加而增加, 混凝土强度较低时, 这种影响更显著。由表 4 可知, 贯穿钢筋直径由 0 增至 30 mm, C30P1 和 C60P1 抗剪强度分别增加 52.6% 和 22.8%, 抗剪强度的差值由 50.8%(GAP1)降至 21.4%(GDP1)。

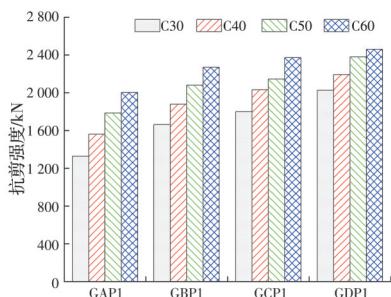


图 15 贯穿钢筋直径影响

Fig. 15 Influence of through reinforcement diameter

贯穿钢筋对剪力键荷载传递影响机理模型如图 16 所示。双向荷载作用下, 荷载作用区域 A 处于三向受压状态, 随着推出荷载的增加, 混凝土最大剪应力  $|\sigma_1 - \sigma_3|/2$  大于抗拉强度时, 在混凝土侧面形成斜剪裂缝。孔内贯穿钢筋增强了 A 区的约束效应, 承担了混凝土榫剪应力。贯穿钢筋约束效应和自身抗弯能力有效提升了剪力键抗剪强度。对于

高强混凝土,贯穿钢筋主要依靠自身抗弯能力提高剪力键抗剪强度,因此,模型C60P1的抗剪强度增长速率最小。

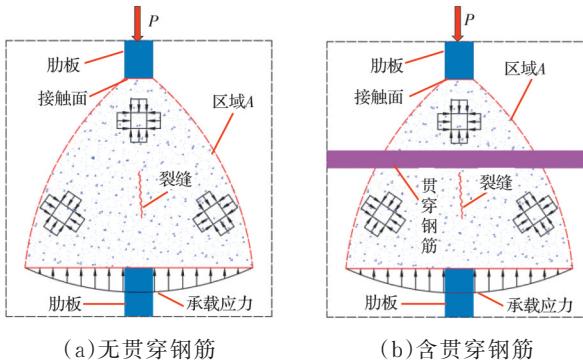


图 16 荷载传递力学模型

Fig. 16 Mechanical model of load transfer

### 3 剪力键抗剪强度计算模型

#### 3.1 组合剪力键剪切机理

组合剪力键剪切机理分析模型如图 17 所示。图中  $P$  为推出荷载,肋板端部混凝土抗压、贯穿钢筋抗弯、开孔处混凝土榫抗剪、焊钉机械阻力和钢-混结合面处切向摩擦分别为  $P_{s1}$ 、 $P_{s2}$ 、 $P_{s3}$ 、 $P_{s4}$  和  $f$ 。推出荷载  $P$  可表示为

$$P = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + f \quad (5)$$

$$f = \mu F_N \quad (6)$$

式中: $\mu$  为摩擦系数,取 0.7; $F_N$  为侧压荷载。

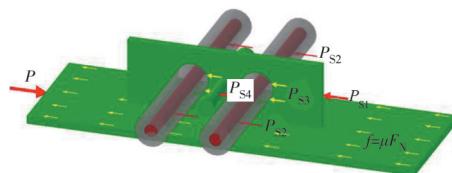


图 17 剪力键剪切机理分析

Fig. 17 Shear mechanism analysis of connector

以试件 C30GBP1 为例,对组合剪力键受力过程进行分析,如图 18 所示,  $P_p$  为双向荷载下开孔钢板承受荷载,  $P_p = P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + f$ ,  $P_{s4}$  为焊钉承受荷载。由图 18 可知,弹性阶段开孔钢板和焊钉承受荷载均随滑移量的增加呈线性增加;进入破坏阶

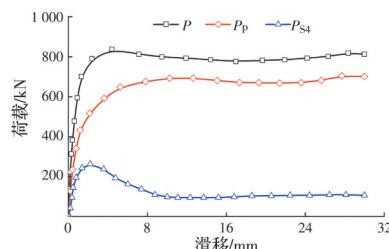


图 18 剪力键受力过程分析

Fig. 18 Loading process analysis of connector

段,侧压荷载有效抑制了混凝土板开裂与分离,  $P_p$  保持相对稳定,焊钉发生较大屈服变形被剪断,  $P_{s4}$  迅速下降。

#### 3.2 组合剪力键抗剪强度计算模型

侧压装置产生的外压力相当于箍筋在法向上的围压效应。侧压荷载下组合剪力键受力状态如图 19(a)所示,侧压力沿虚线分布,中部混凝土处于三向受压状态。根据等效刚度法将侧压力等效为混凝土板中的横向普通钢筋,如图 19(b)所示。横向钢筋等效面积为<sup>[23]</sup>

$$A_r = n l_r / (2 A_t l_r) \quad (7)$$

式中: $A_r$  和  $A_t$  分别为横向钢筋和对拉螺杆面积;  $n$  为侧压区等效钢筋数量,取 8;  $l_r$  和  $l_t$  分别为等效钢筋和对拉螺杆长度。

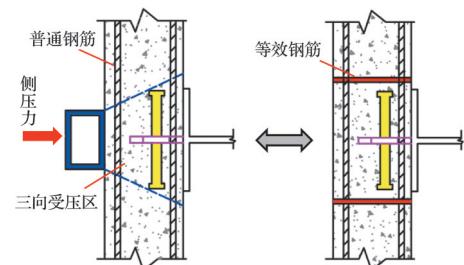


图 19 混凝土板三向受压区力学模型

Fig. 19 Mechanical model of three-dimensional compression zone of concrete slab

采用 Mander 模型<sup>[29]</sup>计算约束区混凝土抗压强度,C30、C40、C50、C60 的约束混凝土抗压强度分别为 30.33、38.36、46.34、54.29 MPa。

双向荷载作用下,考虑肋板端部混凝土承压、贯穿钢筋抗弯、混凝土榫抗剪和钢-混界面摩擦,开孔钢板抗剪强度可表示为<sup>[23]</sup>

$$P_p = 4.5 h f_{cc} + 0.91 (A_{tr} + A'_{tr}) f_y + 3.31 n d^2 \sqrt{f_{cc}} + \mu F_N \quad (8)$$

式中: $h$  为剪力键高度;  $t$  为肋板厚度;  $A_{tr}$ 、 $A'_{tr}$  分别为贯穿钢筋和普通横向钢筋截面积;  $f_y$  为钢筋屈服强度,取 290 MPa;  $n$  为肋板开孔数;  $f_{cc}$  为约束混凝土抗压强度。

引入焊钉机械阻力<sup>[30]</sup>,组合剪力键抗剪强度可设置为

$$P_p = \lambda_1 [4.5 h f_{cc} + 0.91 (A_{tr} + A'_{tr}) f_y + 3.31 n d^2 \sqrt{f_{cc}} + \mu F_N] + 2 \lambda_2 [0.45 A_s \sqrt{f_{cc} E_c}] \quad (9)$$

式中: $A_s$  为焊钉横截面积;  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为待定系数。

为确定待定系数  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,对 GA-GC 三组数值计算结果进行多变量线性回归分析,式(9)可进一步写为

$$P = 0.86 \left[ 4.5 h t_{cc} + 0.91 (A_{tr} + A'_{tr}) f_y + 63.31 n d^2 \sqrt{f_{cc}} + \mu F_N \right] + 2 \times 0.668 \left[ 0.45 A_s \sqrt{f_{cc} E_c} \right] \quad (10)$$

采用式(10)得到的计算结果与 GA-GC 组数值仿真结果对比如图 20(a)所示,91.6% 的样本点落在 95% 置信区间(CI),理论计算与有限元分析结果比值的均值为 1.001,标准差为 0.029,二者吻合较好。另外,结合 GD 组仿真分析和试验值分别对拟合公式进行验证,如图 20(b)所示,93% 的样本点落在 95% CI,进一步验证了提出的双向荷载下组合剪力键抗剪强度计算模型的有效性。

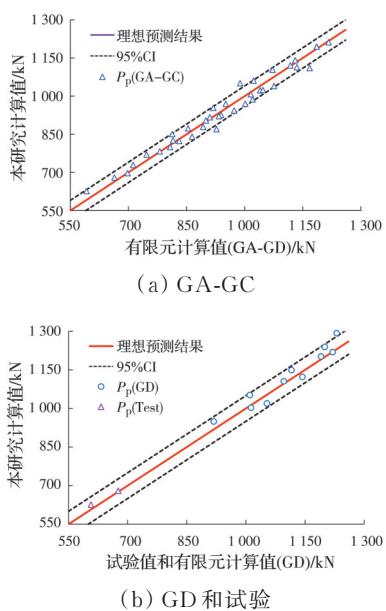


图 20 抗剪强度对比

Fig. 20 Comparison of ultimate shear capacity

## 4 结论

通过推出试验和数值分析研究了双向荷载作用下组合剪力键抗剪切性能,主要结论如下:

1) 明确了双向和单向荷载下组合剪力键的破坏机理和特征。双向荷载作用下,剪力键协同受力性能较好且延性高,混凝土板破坏时呈现纵向延伸的主裂缝和少量横向微裂纹,开孔钢板出现大面积高应力区,焊钉被剪断;单向推出荷载作用下,混凝土板劈裂裂缝相互贯通,试件失效,剪力键除焊钉发生屈曲变形外,其余部位均处于弹性阶段。

2) 组合剪力键抗剪强度随侧压荷载的增加而增加,C30GAP2 的抗剪强度为 C30GAP0 的 1.18 倍;混凝土强度较高且贯穿钢筋直径较大(C60GD),双向荷载效应不明显,C60GDP2 的抗剪强度仅比 C60GDP0 提高 5%。

3) 提高混凝土强度和贯穿钢筋直径可有效增强组合剪力键双向荷载作用下的抗剪强度。混凝土强度由 C30 增至 C60,贯穿钢筋直径由 0 增至 30 mm,组合剪力键抗剪强度分别增加 21.4% 和 22.8%;贯穿钢筋直径对 C30 P1 抗剪强度的影响为 C60P1 的 2.3 倍。

剪力键在组合梁桥施工阶段长期外露,运营阶段混凝土板开裂和氯离子侵蚀易导致剪力键锈蚀。组合剪力键在锈蚀环境下的抗剪强度、变形能力和使用寿命退化规律,仍需日后进一步研究。

## 参考文献

- [1] HE S H, GUAN P D, WANG Q, et al. Investigation on structural performance of perfobond strip connector group in steel-concrete joints [J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112571.
- [2] WANG W A, YI Z H, TIAN B, et al. Nonlinear finite element analysis of PBL shear connectors in hybrid structures [J]. Structures, 2021, 33: 4642-4654.
- [3] AL-SHUWAILI M A. Analytical investigations to the specimen size effect on the shear resistance of the perfobond shear connector in the push-out test [J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 13: 1924-1931.
- [4] DENG W Q, GU J C, LIU D, et al. Study of single perfobond rib with head stud shear connectors for a composite structure [J]. Magazine of Concrete Research, 2019, 71(17): 920-934.
- [5] 孙建营, 占玉林, 皮泽龙, 等. 考虑正压作用剪力连接件的受力分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(7): 39-42.
- SUN J Y, ZHAN Y L, PI Z L, et al. Stress analysis of shear connector considering positive pressure [J]. Railway Engineering, 2017, 57(7): 39-42. (in Chinese)
- [6] DING F X, YIN G A, WANG H B, et al. Static behavior of stud connectors in bi-direction push-off tests [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 120: 307-318.
- [7] NGUYEN H T, KIM S E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10/11): 1909-1920.
- [8] SHIM C S, LEE P G, YOON T Y. Static behavior of large stud shear connectors [J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1853-1860.
- [9] GATTESCO N, GIURIANI E, GUBANA A. Low-cycle fatigue test on stud shear connectors [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(2): 145-150.
- [10] JOHNSON R P. Resistance of stud shear connectors to fatigue [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 56(2): 101-116.

- [11] 刘诚, 樊健生, 聂建国, 等. 钢-超高性能混凝土组合桥面系中栓钉连接件的疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 139-146.
- LIU C, FAN J S, NIE J G, et al. Fatigue performance research of headed studs in steel and ultra-high performance concrete composite deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 139-146. (in Chinese)
- [12] 杨勇, 陈阳, 蔡军伟. 开孔钢板剪力连接件静力性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 255-263.
- YANG Y, CHEN Y, CAI J W. Experiment on static behavior of perfobond shear connectors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 255-263. (in Chinese)
- [13] 张建东, 顾建成, 邓文琴, 等. 装配式组合梁桥开孔钢板连接件抗剪性能[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 71-80.
- ZHANG J D, GU J C, DENG W Q, et al. Shear behavior of perfobond rib shear connectors for pre-fabricated composite bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 71-80. (in Chinese)
- [14] WANG Z H, LI Q A, ZHAO C H. Ultimate shear resistance of perfobond rib shear connectors based on a modified push-out test [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(4): 667-680.
- [15] ZHANG Q H, JIA D L, BAO Y, et al. Analytical study on internal force transfer of perfobond rib shear connector group using a nonlinear spring model [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(10): 04017081.
- [16] DUAN M J, ZHANG S Y, WANG X, et al. Mechanical behavior in perfobond rib shear connector with UHPC-steel composite structure with coarse aggregate [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(4): 1255-1267.
- [17] 邓文琴, 张建东, 刘朵, 等. 开孔板和栓钉连接件抗剪性能试验研究及承载力计算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 463-469.
- DENG W Q, ZHANG J D, LIU D, et al. Experimental behaviors and shear bearing capacity calculation of perfobond rib with head stud connectors [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(3): 463-469. (in Chinese)
- [18] 马亚飞, 周彪, 王磊, 等. 承压型组合剪力键剪切性能试验与承载力计算[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 120-129.
- MA Y F, ZHOU B, WANG L, et al. Shear performance test and bearing capacity calculation of compressive composite shear connector [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(11): 120-129. (in Chinese)
- [19] XU C, SUGIURA K, WU C, et al. Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 84-96.
- [20] XU C, SUGIURA K, MASUYA H, et al. Experimental study on the biaxial loading effect on group stud shear connectors of steel-concrete composite bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(10): 04014110.
- [21] XU C, SUGIURA K. Analytical investigation on failure development of group studs shear connector in push-out specimen under biaxial load action [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 37: 75-85.
- [22] 宋瑞年, 王潇碧, 占玉林, 等. 侧向压力作用下PBL剪力键的抗剪性能[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 34-37.
- SONG R N, WANG X B, ZHAN Y L, et al. Shear performance of PBL shear connector under lateral pressure [J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 34-37. (in Chinese)
- [23] ZHAN Y L, YIN C, LIU F, et al. Pushout tests on headed studs and PBL shear connectors considering external pressure [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(1): 04019125.
- [24] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. A parametric study of perfobond rib shear connectors [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(4): 614-625.
- [25] KARAM M S, YAMAMOTO Y, NAKAMURA H, et al. Numerical evaluation of the perfobond (PBL) shear connector subjected to lateral pressure using coupled rigid body spring model (RBSM) and nonlinear solid finite element method (FEM) [J]. Crystals, 2020, 10(9): 743.
- [26] Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 2: General rules and rules for bridges (Swedish Standard): SS-EN 1994-2: 2005 [S]. Swedish Standards Institute, 2005.
- [27] ZHENG S J, LIU Y Q, YODA T, et al. Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117: 64-80.
- [28] 姜磊, 刘永健, 侯蓓蓓. 钢管混凝土拱肋轴力-应变关系[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 90-98.
- JIANG L, LIU Y J, HOU B B. Axial force-strain relationship of concrete-filled steel tube arch rib [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11): 90-98. (in Chinese)
- [29] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [30] 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Code for design of steel and concrete composite bridges: GB 50917—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)