

ECC-钢桥面铺装层槽钢连接件承载力分析

常先睿, 许荣盛, 单庆婷

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 铺装层与钢桥面在周期性交通荷载作用下展现出较差的抗剪切能力, 易产生推移、拥包等病害损坏。针对此, 提出基于槽钢连接的 ECC-钢桥面铺装结构, 通过有限元软件模拟槽钢推出试验, 并结合正交试验研究 ECC 材料中槽钢力学性能。结果表明: 槽钢连接件在 ECC 中的破坏模式以剪切断裂为主, 槽钢尺寸对抗剪承载力的影响排序为槽钢长度 > 腹板厚度 > 翼缘厚度 > 槽钢高度, 并提出了槽钢剪力影响域概念。最后通过对模拟结果进行函数拟合得到槽钢承载力修正系数, 用于计算 ECC 材料中槽钢连接件的抗剪承载力。

关键词: 桥梁工程; 抗剪承载力; 有限元分析; 组合桥面板; 槽钢连接件; 工程水泥基复合材料

中图分类号: U443

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)03-008-10

Bearing Capacity Analysis of Channel Steel Connectors in ECC-Steel Deck Pavement

CHANG Xianrui, XU Rongsheng, SHAN Qingting

(College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The pavement and steel deck exhibit poor shear strength under cyclic traffic loading and are susceptible to diseases such as shoving and bumps. Therefore, an ECC-steel deck pavement structure based on channel steel connection is proposed. The mechanical properties of channel steel in ECC materials are investigated by simulating channel steel launch tests with finite element software and orthogonal tests. The results show that the failure of channel steel connectors in ECC is mainly shear fracture. The influence of channel steel size on the shear bearing capacity is ranked from largest to smallest as channel steel length, web thickness, flange thickness and channel height and the concept of shear affected domain of channel steel is proposed. Then, the correction coefficients of the channel steel bearing capacity is obtained by the function fitting of the simulation results, which is used to calculate the shear bearing capacity of channel steel connectors in ECC materials.

Keywords: bridge engineering; shear behavior; finite element analysis; composite bridge deck; channel steel connector; engineered cementitious composite

正交各向异性钢桥面板(OSD)由于自重轻、承载力高和建造周期短等优点成为钢桥建造的首要选择^[1-2],然而由于OSD焊缝较多,在长期交通荷载作用下会出现明显的疲劳裂纹^[3]。为避免OSD过早产生疲劳问题,通常用混凝土铺装与钢面板形成复合结构,延长钢桥疲劳寿命周期^[4-5]。常

用混凝土铺装材料有热拌沥青、改性沥青和环氧沥青等。由于沥青混凝土温度稳定性差,高低温环境中铺装层与钢桥面抗剪强度不足,导致铺装层发生开裂、脱层及推移等破坏^[6-8]。因此,基于断裂力学理论设计的工程水泥基复合材料(ECC)得到了研究人员关注。ECC属于纤维增强混凝土,通过向混

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 安徽建筑大学博士启动基金项目(2020QDZ25)

作者简介: 常先睿(1996-),男,硕士研究生,研究方向: 道路与桥梁工程。

混凝土材料中添加聚乙烯醇纤维(PVA)或聚丙烯纤维(PP)提高混凝土韧性,其显著特征是在应力下的应变硬化响应和高延展性^[9-11]。此外,国产PVA纤维单位成本是环氧沥青的六分之一^[12],显著降低了工程造价,是一种理想的钢桥面板铺装材料。

ECC在桥梁工程中的应用主要集中在两方面:一方面是增强钢-混凝土组合梁桥的负弯矩区域;另一方面作为OSD的铺装层减轻疲劳损伤。现阶段OSD和铺装层的复合作用主要通过粘结剂实现,但粘结性能易受外界环境影响,对粘附作用提供的抗剪机制也尚无明确的结论^[13-15]。因此,Liu^[15]提出采用剪力连接件将OSD和铺装层连接形成钢-ECC复合桥面板。Qian和Li^[16]研究了嵌入ECC的螺栓连接件,结果表明OSD和铺装层展现出了优越的复合性能。Shervin Maleki^[17]针对混凝土中槽钢剪力连接件(CSC)的研究发现,CSC适合作为钢-混凝土复合结构的连接件,可提供比螺栓连接件更强的承载能力。Masoud Paknahad^[18]通过CSC在高强度混凝土(HSC)中的行为提出了适用于HSC的CSC抗剪承载力公式。Zhao^[19]通过

对比试验发现铺装层中钢筋网对CSC抗剪承载力的提升无明显影响。现阶段CSC抗剪性已得到较多关注,但主要集中在嵌入普通混凝土中的槽钢,对CSC在纤维增强混凝土中的性能研究较少。纤维增强混凝土已经成为混凝土研究热点,并在钢-混凝土组合结构中得到运用。因此,研究槽钢在纤维增强混凝土中的受力性能是必要的。

由于CSC具有剪力重分布性能,且承载力高、焊接方式可靠,有助于减少连接件的布置数量^[20-21]。因此,本文对PVA-ECC中影响CSC承载力的因素进行参数分析,并引入正交试验对槽钢尺寸进行敏感性分析;最后与《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)对比,提出承载力修正系数,用于计算嵌入PVA-ECC中CSC极限承载力。

1 试验模型

采用有限元软件ABAQUS分析计算槽钢剪力件在PVA-ECC的极限承载力。剪力件承载力的梁式试验成本高、难度大,综合时间和资金成本,剪力件承载力的推出试验成为首要选择^[22]。参

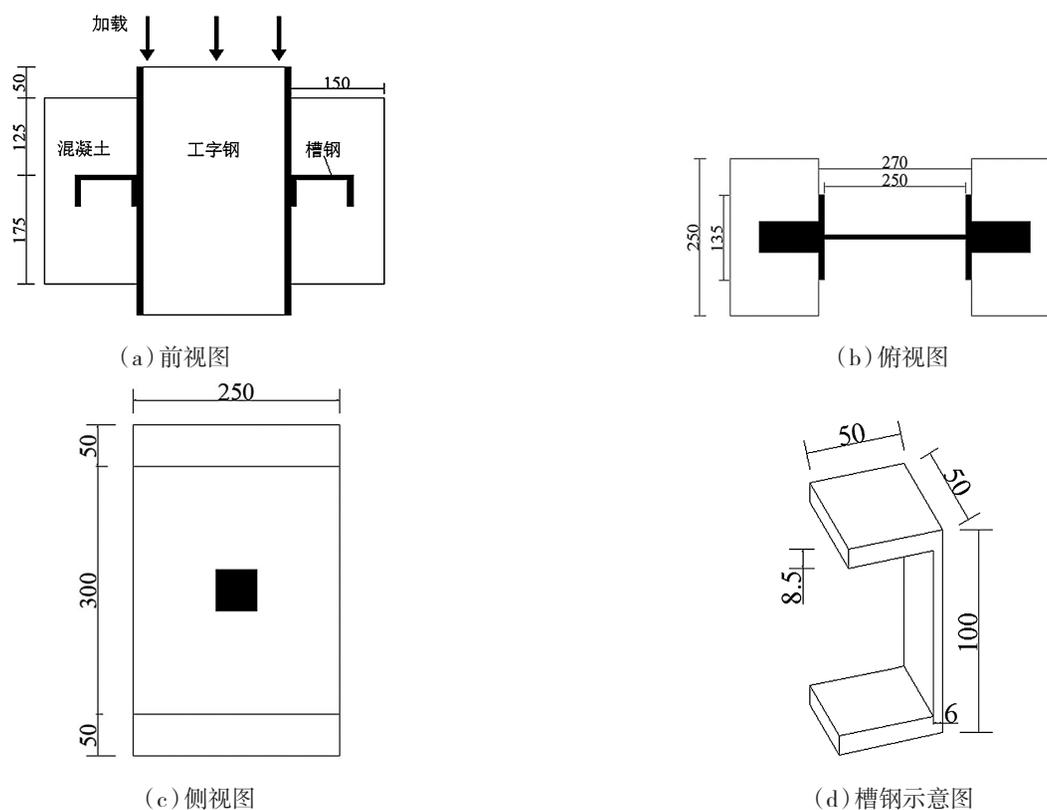


图1 推出试验构造

考 Shervin Maleki 的研究^[17],设计相应推出试验模型,其中工字钢规格为 IPE270,混凝土板尺寸为 300 mm × 250 mm × 150 mm,槽钢剪力件高度 100 mm,腹板 6 mm,上下翼缘厚度取 8.5 mm,详细尺寸如图 1 所示。混凝土抗压强度采用文献[17]中试件 ECC-1 的抗压强度值 33.5 MPa。由于推出试件具有对称性,可以取试件的 1/4 建立有限元模型,其中工字钢仅起到传递荷载至槽钢的作用,可不为工字钢建模,直接将荷载施加在槽钢和工字钢相连的翼缘^[23]。

2 有限元模型

2.1 材料本构模型

2.1.1 混凝土本构模型

混凝土受压本构模型采用徐世焱^[24]提出的单轴压缩应力-应变本构关系模型,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \varepsilon \leq \varepsilon_0 & \sigma = \sigma_0 \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \\ \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u & \sigma = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} (\varepsilon_u - 0.2\varepsilon_0 - 0.8\varepsilon) \\ \varepsilon \geq \varepsilon_u & \sigma = 0.2\sigma_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_0 和 ε_0 分别为峰值应力和应变, ε_u 是应力降低到峰值应力的 20% 时的应变。混凝土本构模型如图 2(a),峰值应力 σ_0 取混凝土轴心抗压强度 f_c ,峰值应力对应的应变 ε_0 取 0.005,混凝土弹性模量取 18 GPa;在拉伸状态下,混凝土受拉应力-应变模型采用理想弹塑性模型,其抗拉强度 f_t 取

$0.63f_c^{0.5}$ 。

2.1.2 钢材本构模型

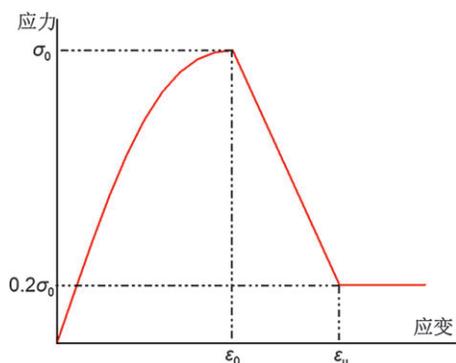
钢材本构关系采用双线性随动强化模型(BKIN),如图 2(b)所示。其中弹性模量为 206 GPa,屈服应力 f_{ys} 和应变 ε_{ys} 取 240 MPa 和 0.001 2,极限应力 f_{us} 和应变 ε_{us} 取 360 MPa 和 0.2。

2.2 模型边界条件及接触关系

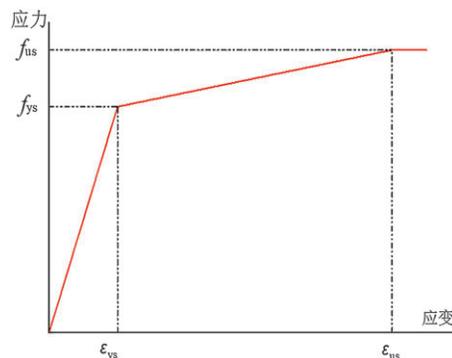
考虑到模型对称性,约束图 3(a)面 1 上 Y 方向节点,推出试验中混凝土块固定在试验台上,因此约束面 2 上 X 方向的位移面。由于混凝土块与槽钢下表面和工字钢焊接在一起,所以面 3 上结点的 Z 向位移被约束^[23]。槽钢与混凝土间的接触与摩擦是导致模型结构非线性的主要因素,在进行推出试验时,为减小摩擦对试验的影响,会在槽钢表面涂油,因此在有限元建模时,槽钢表面和混凝土接触关系设定为切向无摩擦,法向硬接触。主从面关系定义原则是主面刚度大于从面刚度,此处将混凝土面定义为主面,槽钢表面定义为从面。考虑到模型接触复杂、模型结构非线性高,为便于收敛,在槽钢翼缘面以位移形式施加荷载。

2.3 网格划分及单元选取

网格划分是有限元建模的重要组成部分。为保证模拟结果准确性,对连接件应力集中部位的网格加密处理。推出模型建模难点在于接触,线性减缩积分单元 C3D8R 和非协调单元 C3D8I 都适合接触分析。考虑到 C3D8R 对位移和大变形的求解结果更加精确,网格产生大变形时对分析精度影响较小^[25],因此单元采用 C3D8R。



(a) 混凝土本构模型



(b) 钢材本构模型

图 2 材料本构模型

2.4 模型验证

为验证模型的准确性,将有限元计算结果与文献[17]中试件 ECC-1 的试验数据进行对比,得到图3所示的荷载位移曲线和槽钢应力云图。从荷载位移曲线可以看出,槽钢在剪力作用下发生变形,承载力却没有迅速降低,这表明 CSC 的剪力重分布性能有助于剪跨内 CSC 均匀受力,减少 CSC 的数量并分段均匀布置,便于设计和施工。从槽钢应力云图中可知,槽钢在腹板根部截面率先屈服,并最终在此截面发生破坏,这与推出试验结果一致。验证结果表明,所建有限元模型可以较准确地反映推出试验的实际受力及变形破坏过程,计算结果如表1所示。可以看出,有限元分析的模拟值低于试验实测值,误差低于10%,符合推出试验要求。

表1 结果对比

试件	推出试验结果	有限元	中国标准	有限元 / 试验	有限元 / 标准
ECC-1	128.5 ^[17] kN	123.4 kN	116.1 kN	0.96	1.06

3 参数分析

利用验证后的有限元模型进行 CSC 承载力参数分析,讨论 PVA-ECC 中 CSC 抗剪性能影响因素。计算公式采用国家标准《钢结构设计标准》(GB50017-2017,以下简称国家标准)给出承载力计算公式(2)^[26]:

$$Q = 0.26(t + 0.5t_w)L_c\sqrt{Ef_c} \quad (2)$$

式中: t —槽钢翼缘的平均厚度,mm;

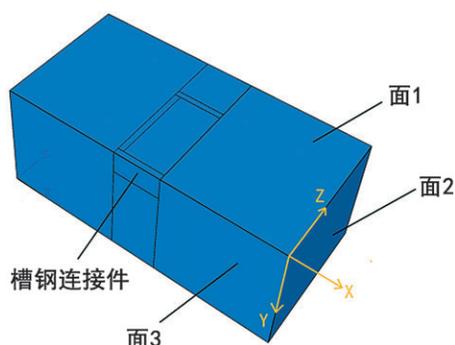
t_w —槽钢腹板的厚度,mm;

f_c —混凝土抗压强度设计值,MPa;

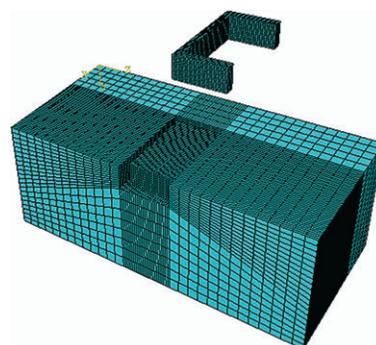
E —混凝土弹性模量,MPa;

L_c —槽钢剪力连接件长度,mm。

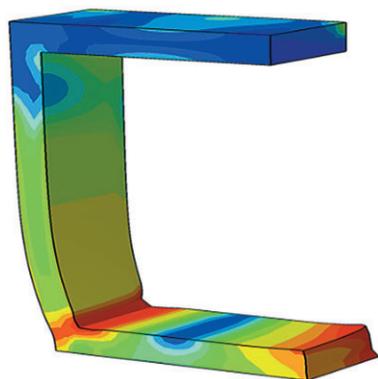
针对 CSC 在 PVA-ECC 的受力性能,本文采用有限元模拟分析槽钢尺寸和混凝土强度对连接件抗剪性能的影响,并与国家标准对比,参数计算结果如表2所示。其中,槽钢基准尺寸为高度100 mm,翼缘厚度8.5 mm,翼缘宽度50 mm,



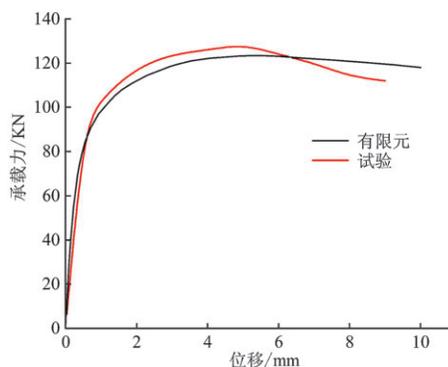
(a) 1/4 有限元模型



(b) 网格划分模型



(c) 100 mm 槽钢应力云图



(d) ECC-1 位移荷载曲线

图3 数值模拟结果

表 2 参数计算结果

变量	f_c (MPa)	H (mm)	t (mm)	t_w (mm)	L (mm)	有限元 /kN	国家标准 /kN	有限元 / 国家标准
f_c (MPa)	20	100	8.5	6	50	101.2	89.7	1.13
	25	100	8.5	6	50	110.4	100.3	1.1
	30	100	8.5	6	50	119.7	109.9	1.09
	33.5	100	8.5	6	50	123.4	116.1	1.06
H (mm)	33.5	50	8.5	6	50	128.5	116.1	1.11
	33.5	60	8.5	6	50	127.7	116.1	1.1
	33.5	80	8.5	6	50	127.7	116.1	1.1
	33.5	100	8.5	6	50	123.4	116.1	1.06
t (mm)	33.5	100	6	6	50	96.9	90.9	1.07
	33.5	100	7	6	50	109.8	101.0	1.09
	33.5	100	8	6	50	114.8	111.0	1.03
	33.5	100	8.5	6	50	123.4	116.1	1.06
t_w (mm)	33.5	100	8.5	3	50	93.3	101.0	0.92
	33.5	100	8.5	4	50	111.0	106.0	1.05
	33.5	100	8.5	5	50	115.9	111.0	1.04
	33.5	100	8.5	6	50	123.4	116.1	1.06
L (mm)	33.5	100	8.5	6	30	94.7	69.7	1.36
	33.5	100	8.5	6	40	109.5	92.9	1.18
	33.5	100	8.5	6	50	123.4	116.1	1.06
	33.5	100	8.5	6	60	136.8	139.8	0.98

腹板厚度 6 mm, 长度 50 mm, 混凝土抗压强度 33.5 MPa, 表 2 中参数均在基准尺寸上修改。

3.1 混凝土抗压强度影响

图 4 展示了在不同混凝土抗压强度下 CSC 抗剪承载力变化情况, CSC 的抗剪承载力随着抗压强度的增加而提高。通过与国家标准对比, 发现有限元分析的模拟值高于国家标准计算值, 这是由于添加的 PVA 纤维产生桥联效应, 将混凝土中的裂缝细化, 抑制裂缝开展, 提高抗剪强度。

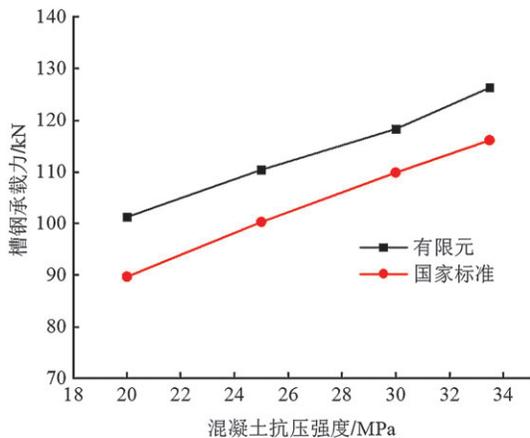


图 4 不同混凝土强度下 CSC 抗剪承载力

3.2 槽钢尺寸影响

由现有研究可知^[19-24], 槽钢高度、槽钢腹板厚度、槽钢翼缘厚度和槽钢长度对槽钢承载力均会产生影响。根据表 2 参数计算结果绘制槽钢参数对承载力影响如图 5-图 8 所示。从图 5 可以看出, 当槽钢高度为 50 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm 时, CSC 承载力并没有发生明显变化, 表明在 PVA-ECC 中槽钢高度对承载力没有影响, 这与国家标准一致, 主要原因在于剪力通过下翼缘和下翼缘焊缝传递给槽钢腹板, 并沿槽钢高度方向应力递减, 从应力云图也可知槽钢腹板变形主要发生在腹板中下部, 因此槽钢高度对承载力基本无影响。由图 6 和图 7 看出有限元模拟结果和国家标准数值一致性较高, 且 CSC 的承载力随着腹板和翼缘厚度的增加而增加。从图 8 可以看出, 槽钢长度为 CSC 承载力影响的最主要因素。随着长度的增加, 抗剪承载力呈线性增长, 但是当槽钢长度达到 60 mm 时, 可以观察到槽钢承载力低于国家标准, 这是由于槽钢屈服是从槽钢长度方向边缘向槽钢中间的过程, 并最终在槽钢长度方向上各点应力相同, 长

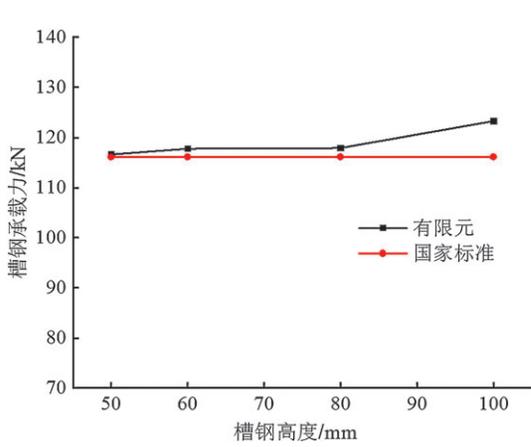


图 5 不同槽钢高度 CSC 抗剪承载力

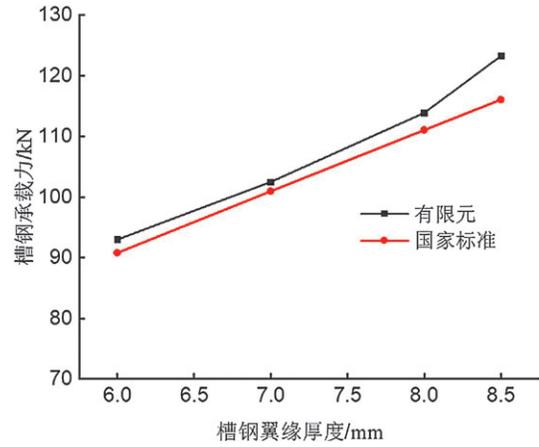


图 6 不同翼缘厚度 CSC 抗剪承载力

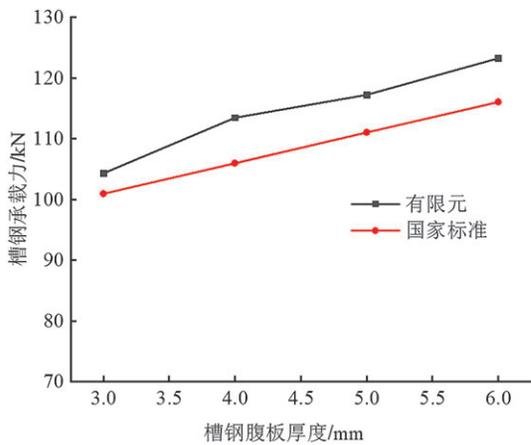


图 7 不同槽钢腹板厚度 CSC 抗剪承载力

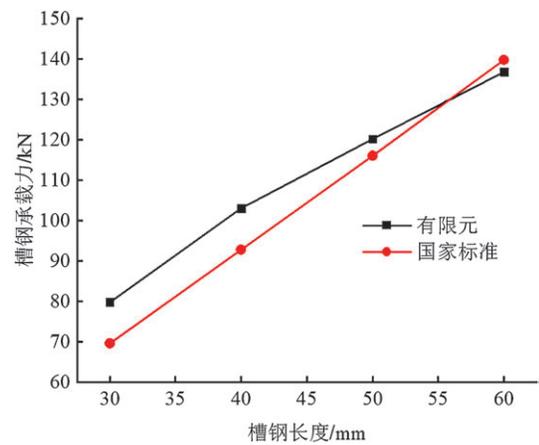
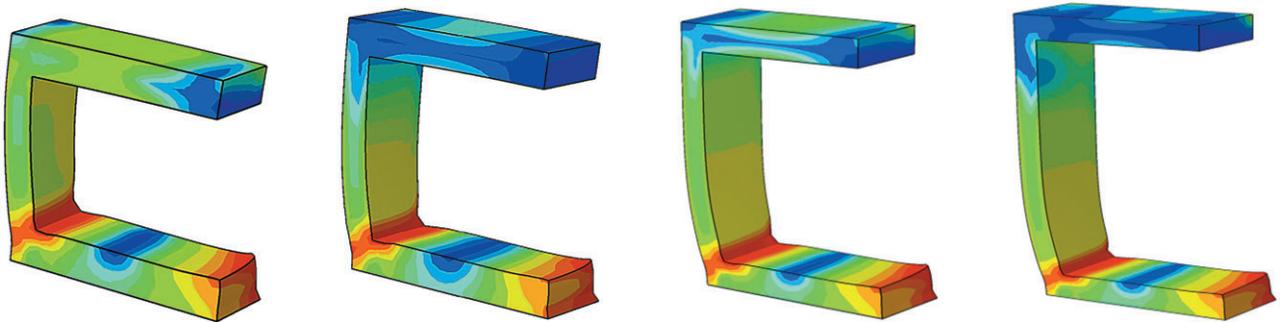


图 8 不同槽钢长度下 CSC 抗剪承载力



(a) 50 mm 应力云图

(b) 60 mm 应力云图

(c) 80 mm 应力云图

(d) 100 mm 应力云图

图 9 不同槽钢长度应力云图

度过长可能导致槽钢长度两边率先破坏而槽钢中间部位并未屈服,造成槽钢承载力未完全利用。

从图 9 可以看出,在槽钢高度为 50 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm 时,应力都集中在 CSC 根部并从根部率先屈服,在槽钢高度方向上荷载传递有限且逐渐递减,槽钢高度对 CSC 抗剪承载力影

响很小,荷载主要沿槽钢长度方向传递。综合槽钢高度和槽钢长度分析可以得出,荷载沿槽钢长度和高度的传递存在槽钢剪力影响域(剪力对槽钢作用的影响范围称为槽钢剪力影响域,主要受槽钢长度影响),槽钢连接件可通过减小高度减少钢材用量。

3.3 敏感性分析

由表 2 知, CSC 承载力受多种因素影响。为此, 本文引入正交试验法, 进行槽钢高度、槽钢长度、槽钢腹板厚度和槽钢翼缘厚度关于承载力的敏感性分析。通过正交表计算出多个试验的指标后, 采用极差分析法分析敏感性大小^[27]。

3.3.1 极差分析法

(1) 计算 K_{ij} , 其为第 j 列上第 i 个水平的试验结果总和;

(2) 计算 \bar{K}_{ij} , 其为 K_{ij} 的平均值;

$$\bar{K}_{ij} = \frac{K_{ij}}{r} \quad (3)$$

式中: r ——第 j 列上水平 i 出现的次数。

(3) 计算出第 j 列的极差 R_j ;

$$R_j = \max\{\bar{K}_{ij}\} - \min\{\bar{K}_{ij}\} \quad (4)$$

根据 R_j 分析判断因素的敏感性程度, R_j 越大代表敏感性越高。

3.3.2 正交试验

选取槽钢高度 H 、槽钢长度 L 、槽钢翼缘厚度 t 和槽钢腹板厚度 t_w 共 4 个试验因素, 每种因素各选择 4 种水平, 试验指标为抗剪承载力 Q , 正交实验设计方案如表 3 所示。

表 3 正交试验设计方案及结果

试验编号	影响因素				试验指标 Q/MPa
	H/mm	L/mm	t/mm	t_w/mm	
S1	1(50)	1(30)	1(6)	1(3)	70.1
S2	1(50)	2(40)	2(7)	2(4)	107.5
S3	1(50)	3(50)	3(8)	3(5)	114.2
S4	1(50)	4(60)	4(8.5)	4(6)	135.1
S5	2(60)	1(30)	2(8)	3(4)	88.4
S6	2(60)	2(40)	1(8.5)	4(3)	97.1
S7	2(60)	3(50)	4(6)	1(6)	96.9
S8	2(60)	4(60)	3(7)	2(5)	117.1
S9	3(80)	1(30)	3(8.5)	4(5)	92.4
S10	3(80)	2(40)	4(8)	3(6)	104.6
S11	3(80)	3(50)	1(7)	2(3)	106.1
S12	3(80)	4(60)	2(6)	1(4)	112.1
S13	4(100)	1(30)	4(7)	2(6)	89.7
S14	4(100)	2(40)	3(6)	1(5)	100.1
S15	4(100)	3(50)	2(8.5)	4(4)	111.0
S16	4(100)	4(60)	1(8)	3(3)	120.6

使用极差分析法进行敏感性分析, 分析结果如表 4 所示。

表 4 极差分析结果

因素	Q			
	H	L	t	t_w
\bar{K}_{1j}	106.7	85.2	98.5	94.8
\bar{K}_{2j}	99.9	102.3	104.3	105.1
\bar{K}_{3j}	103.8	107.0	106.0	106.9
\bar{K}_{4j}	105.3	121.2	106.6	108.9
R_j	5.47	36.1	7.47	12.15

由表 4 可知, 影响承载力 Q 的极差大小顺序为 $R_2 > R_4 > R_3 > R_1$, 因此槽钢尺寸对承载力的影响从高到低排序为槽钢长度、槽钢腹板厚度、槽钢翼缘厚度、槽钢高度。对比槽钢翼缘厚度和槽钢腹板厚度指标可以发现, 两者对 CSC 抗剪承载力的影响较为相近, 且腹板厚度的影响略高于翼缘厚度的影响。在水平剪力的作用下, 应力主要集中在腹板的根部并且从根部沿高度和长度方向扩散, 槽钢翼缘主要起传递荷载的作用。由表 4 还可以得知, 增加槽钢长度可以显著提高 CSC 的抗剪承载力。槽钢长度的增加使得沿槽钢长度方向的腹板宽度增大、混凝土压应力区扩大, 同时也增加混凝土受力面与槽钢界面的摩擦力。

4 PVA 混凝土承载力评估

表 5 给出了不同槽钢尺寸下 CSC 承载力的大小, 并与国家标准对比分析, 发现有限元数值高于国家标准数值, 这是由于国家标准中对于 CSC 的抗剪承载力计算公式基于普通混凝土推出试验得出, 对于掺加 PVA 纤维混凝土并不适用。针对这种情况, 从有限元模拟计算出的 32 组数据中选取编号 1-24 的数据进行拟合, 编号 25-32 的数据进行验证, 拟合结果如图 10 所示。从图中可以看出承载力数据分布在拟合直线两侧, 拟合性较差。因此对长度 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm 的 CSC 承载力分别进行直线拟合, 得出斜率为 1.40、1.23、1.06、1.00。最后对四组斜率进行直线拟合, 得出图 11 所示的承载力系数拟合直线。从表 5 可知槽钢长度为 60 mm 时, 国家标准计算值和有限元模拟值一致性较好, 为了更好利用 CSC 抗剪承载力, 减少 CSC 布置数量, 设计时建议槽钢长度选用 60 mm 及以下, 若在实际工程中需要采用 60 mm 以上的 CSC, 可以按照普通混凝土中槽钢承载力计算公式

直接选取。因此在当槽钢长度为 60 mm 以上时,拟合系数取 1。承载力系数 A 如式(5)所示:

$$A = \begin{cases} -0.0137x + 1.789 & (30 \leq x < 60) \\ 1 & (x \geq 60) \end{cases} \quad (5)$$

式中: x ——槽钢长度。

将承载力系数 A 应用于国家标准公式,可有效计算 CSC 抗剪承载力。因此基于国家标准,综合计算结果提出了用于 PVA-ECC 中槽钢连接件的承载力公式,如式(6)所示:

$$Q = 0.26A(t + 0.5t_w)L_c\sqrt{Ef_c} \quad (6)$$

表 5 有限元与国家标准结果对比

编号	槽钢长度 /mm	腹板厚度 /mm	翼缘厚度 /mm	有限元 /kN	国家标准 /kN	有限元 /国家标准
1	30.00	6.00	8.50	94.7	69.7	1.36
2	30.00	5.00	8.50	89.7	66.6	1.35
3	30.00	4.00	8.50	86.2	63.6	1.36
4	30.00	6.00	8.00	93.3	66.6	1.40
5	30.00	6.00	7.00	89.7	60.6	1.48
6	30.00	6.00	6.00	82.4	54.5	1.51
7	40.00	6.00	8.50	109.5	92.9	1.18
8	40.00	5.00	8.50	105.9	88.8	1.19
9	40.00	4.00	8.50	103.1	84.8	1.22
10	40.00	6.00	8.00	106.8	88.8	1.20
11	40.00	6.00	7.00	103.5	80.8	1.28
12	40.00	6.00	6.00	99.4	72.7	1.37
13	50.00	6.00	8.50	123.4	116.1	1.06
14	50.00	5.00	8.50	115.9	111.0	1.04
15	50.00	4.00	8.50	111.0	106.0	1.05
16	50.00	6.00	8.00	114.8	111.0	1.03
17	50.00	6.00	7.00	109.8	101.0	1.09
18	50.00	6.00	6.00	96.9	90.9	1.07
19	60.00	6.00	8.50	136.8	139.3	0.98
20	60.00	5.00	8.50	132.2	133.3	0.99
21	60.00	4.00	8.50	128.7	127.2	1.01
22	60.00	6.00	8.00	130.2	133.3	0.98
23	60.00	6.00	7.00	120.2	121.1	0.99
24	60.00	6.00	6.00	117.6	109.0	1.08
25	30.00	4.00	8.00	84.1	60.6	1.39
26	30.00	5.00	8.00	87.7	63.6	1.38
27	40.00	3.00	8.50	97.1	80.8	1.20
28	40.00	4.00	7.00	98.4	72.7	1.35
29	50.00	5.00	8.00	114.2	106.0	1.08
30	50.00	5.00	7.00	104.5	95.9	1.09
31	60.00	3.00	8.00	120.6	115.1	1.05
32	60.00	5.00	7.00	117.7	115.1	1.02

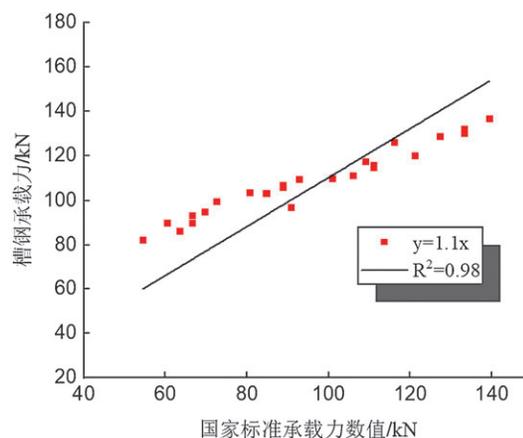


图 10 抗剪承载力拟合直线

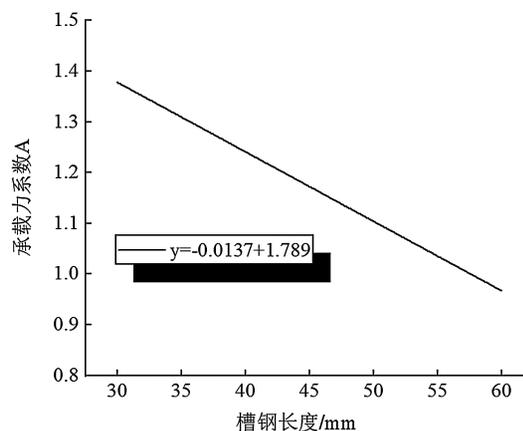


图 11 承载力系数拟合直线

为提高公式可信度,将六组有限元模拟结果和 ECC-1 试件试验结果^[17]代入式中对比,结果如表 6 所示。通过对比发现,公式(6)与有限元结果非常接近,因此公式(6)计算槽钢剪力连接件的承载力可信。

5 结论

本文通过有限元软件 ABAQUS 对推出试验进行建模分析,并和试验结果与国家标准进行对比,可以得到以下结论:

(1) 槽钢连接件在 PVA-ECC 的实际受力及变形破坏过程可以通过有限元模拟分析,且结果可靠。影响 CSC 抗剪承载力的最主要因素是槽钢长度,其次是槽钢腹板厚度和槽钢翼缘厚度。增加 CSC 承载力主要通过增加槽钢长度实现。

(2) 通过荷载位移曲线和槽钢应力云图可知,CSC 在 PVA 混凝土中有较好的延性,产生剪力重

表 6 公式(6)与有限元结果对比

槽钢长度 /mm	腹板厚度 /mm	翼缘厚度 /mm	有限元结果 /kN	试验结果 /kN	公式(6)结果 /kN	国家标准结果 /kN	有限元(试验) /国家标准	有限元(试验) /公式(6)
50 ^[17]	6	8.5	—	128.50 ^[17]	128.2	116.1	1.11	1.00
30	4	8	84.1	—	83.5	60.6	1.39	1.01
30	5	8	87.7	—	87.6	63.6	1.38	1.00
40	3	8.5	97.1	—	100.2	80.8	1.20	0.97
40	4	7	98.4	—	90.2	72.7	1.35	1.09
50	5	8	114.2	—	117.0	106.0	1.08	0.98
50	5	7	104.5	—	105.9	95.9	1.09	0.99
60	3	8	120.6	—	115.1	115.1	1.05	1.05
60	5	7	117.7	—	115.1	115.1	1.02	1.02

分布现象。

(3) 通过 PVA 混凝土中 CSC 抗剪承载力影响因素的敏感性分析得知, 相比槽钢翼缘厚度, CSC 抗剪承载力对槽钢腹板厚度更加敏感, 槽钢高度对 CSC 抗剪承载力没有影响, 并提出槽钢剪力影响域的概念。

(4) 在系统进行有限元分析的基础上, 基于国家标准, 提出了一个修正系数并得出修正方程, 用以预测添加 PVA 纤维混凝土中的 CSC 抗剪承载力。

参考文献:

- [1] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 65-77.
- [2] Liu Y M, Zhang Q H, Bao Y, et al. Fatigue behavior of orthotropic composite deck integrating steel and engineered cementitious composite[J]. Engineering Structures, 2020, 220: 111017.
- [3] van den Berg N, Xin H H, Veljkovic M. Effects of residual stresses on fatigue crack propagation of an orthotropic steel bridge deck[J]. Materials & Design, 2021, 198: 109294.
- [4] Shao X D, Yi D T, Huang Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5): 417-428.
- [5] Zhang S H, Shao X D, Cao J H, et al. Fatigue performance of a lightweight composite bridge deck with open ribs[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(7): 04016039.
- [6] Wei H. Epoxy asphalt concrete paving on the deck of long-span steel bridges[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2391.
- [7] 黄卫, 林广平, 钱振东, 等. 正交异性钢桥面铺装层疲劳寿命的断裂力学分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 112-116, 122.
- [8] 丁贝. 基于栓钉连接的 ECC 钢桥面铺装结构界面特性分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [9] Zhang Z G, Ma H, Qian S Z. Investigation on properties of ECC incorporating crumb rubber of different sizes[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2015, 13(5): 241-251.
- [10] Qin F J, Zhang Z G, Yin Z W, et al. Use of high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) to enhance the flexural performance of reinforced concrete beams[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101746.
- [11] 徐世焱, 刘问. 超高韧性水泥基复合材料疲劳损伤模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 1-8.
- [12] Ma H, Zhang Z G, Ding B, et al. Investigation on the adhesive characteristics of Engineered Cementitious Composites (ECC) to steel bridge deck[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 679-691.
- [13] Walter R, Olesen J F, Stang H, et al. Analysis of an orthotropic deck stiffened with a cement-based overlay[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 350-363.
- [14] Saiidi M, Gordaninejad F, Wehbe N. Behavior of graphite/epoxy concrete composite beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(10): 2958-2976.
- [15] Liu Y M, Zhang Q H, Bao Y, et al. Static and fatigue push-out tests of short headed shear studs embedded in Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 29-38.
- [16] Qian S Z, Victor C L. Influence of concrete material ductility on shear response of stud connections[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(1): 60-66.
- [17] Maleki S, Bagheri S. Behavior of channel shear connectors, Part I: experimental study[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(12): 1333-1340.

- [18] Paknahad M, Shariati M, Sedghi Y, et al. Shear capacity equation for channel shear connectors in steel-concrete composite beams[J]. *Steel and Composite Structures*, 2018, 28(4): 483-494.
- [19] Zhao Q, Du Y, Peng Y F, et al. Shear performance of short channel connectors in a steel-UHPC composite deck[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(1): 300-310.
- [20] 林宗凡. 钢-混凝土组合结构[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [21] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [22] Russell M J, Clifton G C, Lim J B P. Vertical and horizontal push tests on specimens with a Trefoil decking profile[J]. *Structures*, 2021, 29: 1096-1110.
- [23] Maleki S, Bagheri S. Behavior of channel shear connectors, Part II: analytical study[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(12): 1341-1348.
- [24] 徐世焱, 蔡向荣, 张英华. 超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力-应变全曲线试验测定与分析[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(11): 79-85.
- [25] 彭云帆. 钢-UHPC组合桥面板连接件抗前性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [27] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 基于正交试验法的埋地钢管参数敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(8): 97-103.

(上接第7页)

- [4] 相宏伟. 支座预偏心对独柱墩弯桥抗倾覆性能的影响分析[J]. *交通世界(运输车辆)*, 2015(4): 41-43.
- [5] 彭卫兵, 朱志翔, 陈光军, 等. 梁桥倾覆机理、破坏模式与计算方法研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(12): 104-113.
- [6] Dan D H, Yu X W, Yan X F, et al. Monitoring and evaluation of overturning resistance of box girder bridges based on time-varying reliability analysis[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(1): 04019101.
- [7] 刘思峰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [8] 苏宁. 独柱墩连续梁桥抗倾覆非线性分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [9] 曾桑平. 独柱墩箱梁桥抗倾覆影响因素分析及加固方法探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [10] 权长青, 焦楚杰, 杨云英, 等. 混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 363-370.
- [11] 曹景, 刘志才, 冯希训. 箱形截面直线桥及曲线桥抗倾覆稳定性分析[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(03): 69-74.
- [12] 周子杰, 阮欣, 石雪飞. 梁桥横向稳定验算中倾覆轴的选取[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(5): 907-910.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362-2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [15] 潘凯. 考虑自重扭矩和剪切变形影响的曲线梁桥的受力分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.