

GFRP 箍筋弯折强度试验及理论研究^{*}汪国贤¹, 李明², 张黎飞³, 李斌⁴, 胡勇²(1.珠海鹤港高速公路有限公司, 广东 珠海 519000; 2.深圳海川新材料科技股份有限公司, 广东 深圳 518000;
3.东莞理工学院, 广东 东莞 523808; 4.江苏海川新材料科技有限公司, 江苏 句容 212400)

摘要: 为研究不同弯折角度 GFRP 筋强度变化规律, 为 FRP 筋作为箍筋或砼护栏筋提供强度理论基础, 通过砼折角 GFRP 筋强度试验, 研究 FRP 筋强度变化过程和破坏机理。结果表明, GFRP 筋折角对强度影响较大, 90°弯折角 GFRP 筋强度衰减 76.8%; 折角 GFRP 筋为脆性复合破坏, 首先折角内侧基体开裂, 筋材折角处有效面积减小, 进而引起强度衰减。重点讨论 GFRP 筋折角强度, 对比分析现有带折角 GFRP 筋强度预测公式, 结果显示现有预测方法偏保守, 其中 GB 50608—2010 和 ACI 440.1—06 预测结果偏差较大, 且上述方法只能进行弯折 90°FRP 筋材的强度预测。结合 GFRP 筋折角破坏机理, 提出折角处筋材有效面积等物理过程, 建立任意弯折角度 GFRP 筋在砼中的强度预测公式。

关键词: 桥梁; GFRP 筋; 弯折强度; 强度预测; 理论模型

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0131-06

纤维增强复合材料(FRP)为脆性材料, 采用 FRP 作为箍筋或异形构件时, 折角处 FRP 箍筋会形成应力集中, 故 FRP 折角处筋材强度直接影响 FRP 筋砼构件的工作性能。FRP 筋折角加工过程中, 弯折造成 GFRP 筋内外纤维受力不均匀, 导致应力集中, 由于 GFRP 筋不能进行应力重分布, 导致强度降低。现有做法是控制筋材应变水平低于 0.4%~0.5%或提高箍筋用量, 但会引起 FRP 箍筋经济性能下降。为此, 在 GFRP 箍筋剪切计算中将箍筋贡献强度按照需要进行折减, 避免出现剪切破坏, 这就造成 FRP 箍筋的高配筋率。因此, 需明确带折角 FRP 箍筋强度变化规律。Ehsani M. R. 等研究发现, 当 r_b/d_b (弯折半径/筋材直径) 减小时, 折角处筋材强度衰减, 同时指出 FRP 折角应避免 $r_b/d_b < 3$ 的情况, 以降低折角处应力集中程度。EI-Sayed A. K. 等研究发现, ACI 规范中关于 FRP 折角强度的计算模型过高地估计了 FRP 筋折角强度。Morphy R. 的研究表明 FRP 箍筋种类、弯曲半径和砼强度等均对箍筋强度有影响, FRP 箍筋强度随弯折半径减小而显著降低。Currier J. 等的研究表明 FRP 箍筋弯折强度衰减 77%。各国学者对 FRP 箍筋强度受弯折角影响的初步规律已形成了较统一的意见, 但现有研究主要针对 90°折角箍筋, 对不同角度 FRP 箍筋强度和破坏机理尚不明确。

为研究 GFRP 筋折角强度随弯折角度变化的规律及带折角箍筋的破坏机理, 该文设置 4 组 GFRP 筋带折角试验研究不同 GFRP 筋折角强度, 通过分析筋材折角处破坏模式研究破坏机理, 根据折角筋破坏物理开裂过程, 阐述不同弯折角度时 GFRP 筋材的强度衰减规律和过程, 建立带角度 GFRP 筋强度预测模型。

1 试验设置

设置 4 组试验、21 个试件, 为考虑带折角 FRP 筋的离散性, 每组折角筋试验设置 6 个试件, 直筋试验设置 3 个试件(见表 1)。FRP 带折角筋试验方法采用美国标准 ACI 440.3R—04 中对工程用 FRP 材料的 B.5 弯折箍筋试验方法(见图 1)。直筋强度试验见图 2。

表 1 试件设置

筋材角度/(°)	试件数量/个	筋材直径/mm
0	3	12
30	6	12
60	6	12
90	6	12

试验采用砼保护 GFRP 筋折角筋, 试件包括锚固端和试验端, 锚固端全部浇筑砼, 试验端在筋材纵向方向设置脱黏区域, 使荷载能直接传递到折角位

^{*} 基金项目: 句容市重点研发计划项目(ZY2018004); 深圳市重点研发计划项目(JSGG20180504170029625)

置,然后浇筑砼。不同角度 GFRP 筋的安装见图 3。

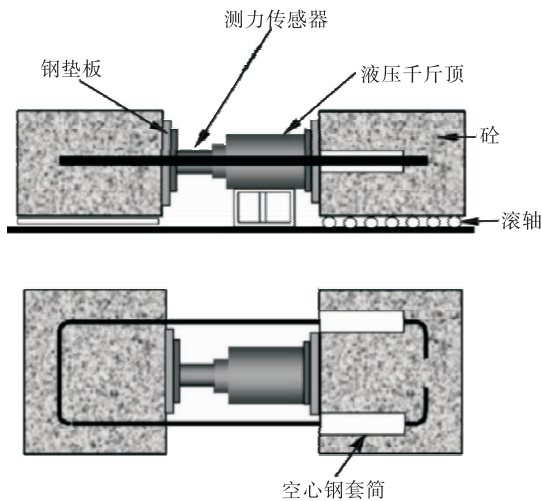


图 1 B.5 试验方法

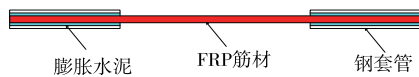


图 2 GFRP 筋直筋强度试验

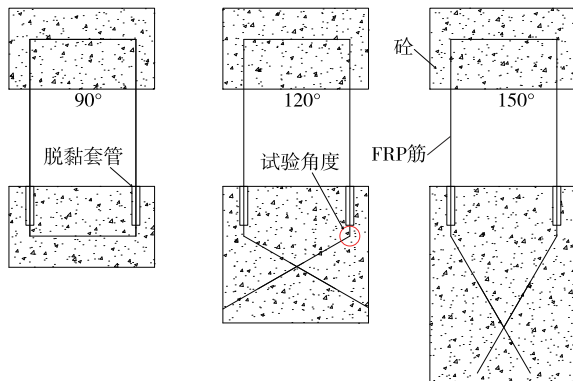


图 3 GFRP 筋带折角强度试件

GFRP 筋直筋试件中,为防止 GFRP 筋在试验机夹持力作用下发生破坏,端部安装锚固套筒,套筒与 GFRP 筋之间填充膨胀水泥进行锚固。试验采用直径 12 mm GFRP 筋,弹性模量 52 GPa,强度 805.27 MPa,砼强度 50 MPa,标准条件养护 28 d。GFRP 筋折角试验中,锚固端和试验端中间采用液压作动器进行加载,加载速度 1 mm/min,采用 TDS-530 静态应变采集器进行荷载数据采集,采集频率为 1 Hz(见图 4)。

2 试验结果与分析

不同折角 GFRP 筋的强度见表 2。由表 2 可知:筋材折角对强度影响较大,随着筋材弯折角增加,筋材强度迅速衰减,这是由于折角在受力时,内

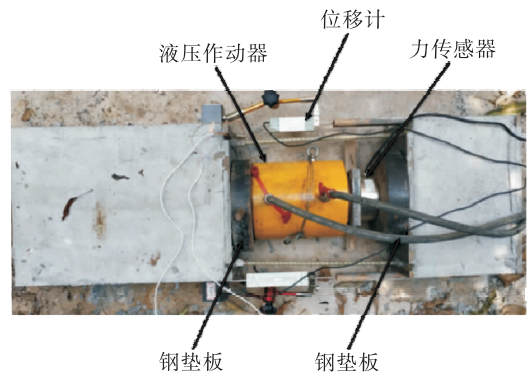


图 4 试件及试验装置

侧纤维在生产过程中产生褶皱,筋材玻璃纤维不能协同受力造成强度衰减。弯折角为 30°时,强度衰减 40.3%,说明折角在受力过程中出现应力集中,部分纤维受力高于受拉极限强度而提前破坏。筋材折角高于 60°时,筋材强度衰减速率降低,这是由于筋材弯折过程中,松弛纤维占比增加放缓,增加角度对应力集中现象的影响逐渐降低。GFRP 筋折角角度为 90°时,强度衰减 75.5%,强度平均值不足 200 MPa,带折角 GFRP 筋强度衰减较大,需根据实际工程进行合理设计,避免出现 GFRP 箍筋破坏。

表 2 带折角 GFRP 筋强度试验结果

筋材角度/(°)	强度/MPa	平均强度/MPa
0	801.00	805.27
0	788.50	
0	826.30	
30	549.40	480.48
30	454.70	
30	557.10	
30	464.80	
30	418.40	
30	438.45	
60	386.45	353.57
60	287.52	
60	412.23	
60	295.56	
60	397.45	
60	342.19	
90	215.68	197.13
90	192.92	
90	209.45	
90	182.78	
90	197.43	
90	184.50	

筋材强度随折角角度的变化见图 5。由图 5 可

知:筋材折角由 0° 增加至 30° 时,强度衰减速率高于更大角度,这是由 GFRP 筋的组成结构决定的。GFRP 筋包括玻璃纤维与基体,基体为脆性材料,抗拉强度远低于玻璃纤维,主要起保护、固定玻璃纤维的作用。玻璃纤维抗拉强度高,但抗剪性能弱,在基体内部受力时,需要基体提供侧向支撑。因此,GFRP 筋产生折角后,折角内侧纤维发生褶皱,根据 GFRP 筋折角处横截面受力平衡,弯折会造成较大范围的玻璃纤维褶皱松弛,因而弯折角度较小时对强度造成较大影响。GFRP 筋折角由 30° 增加至 90° 时,筋材折角强度近似为线性变化,说明 GFRP 筋角度增加至 30° 以上时筋材应力集中程度呈线性增加。

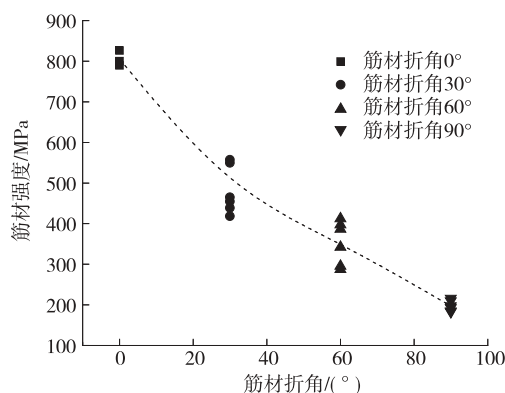


图 5 筋材强度随折角的变化

3 破坏机理分析

为研究 GFRP 筋折角部位断裂机理,对试件断裂处进行分析,GFRP 筋折角处破坏模式见图 6。由图 6 可知:GFRP 筋折角处破坏状态均为折角内部基体与纤维断裂,而后折角外侧纤维拉伸断裂。GFRP 筋折角内侧纤维断裂均为齐平状态,说明该处纤维基体并未协同受力变形,受力状态下基体首先出现开裂,然后纤维应力集中造成断裂。折角内部断裂面处纤维褶皱造成断裂面纤维受力不均,导致筋材折角内部断裂。折角内部断裂后,折角外侧纤维受力,但基体裂缝已发展到筋材外侧,纤维拉应力在折角处突变,导致强度衰减。这一现象在折角为 90° 时最明显,折角 30° 筋材的破坏形态与 GFRP 筋直筋破坏形态更接近。GFRP 筋折角破坏时,内侧基体首先开裂,该位置处纤维的参与受拉程度较低,因而出现折角内侧纤维整体断裂现象。根据 GFRP 筋折角位置实际破坏形态,折角内侧整体断裂程度与筋材角度有关,筋材角度增加,则断裂深度增加。带折角筋材内侧开裂后,外侧基体与纤维协

同受力,最终断裂。这一过程中,折角与纤维的有效面积与筋材强度相关。



(a) 30° 筋材折角断裂形态



(b) 60° 筋材折角断裂形态



(c) 90° 筋材折角断裂形态

图 6 折角处筋材断裂形态

筋材断裂面见图 7。由图 7 可知:在受力状态下,折角处内部基体应力集中,基体承担的应力比例较大,达到基体破坏强度时开裂,基体裂缝造成折角内侧纤维断裂。折角内侧纤维断裂,同时受到纤维约束,基体开裂深度较小。随着角度增加,基体裂缝进一步增大,开裂深度增大。折角内部断裂后,荷载主要由筋材外侧剩余面积承担。经过现场测量, 30° 、 60° 、 90° 折角筋有效面积平均值分别为 74.25 、 43.96 、 26.39 mm^2 ,计算得折角内侧基体开裂面积平均值分别为 38.85 、 69.14 、 86.71 mm^2 (见表 3)。

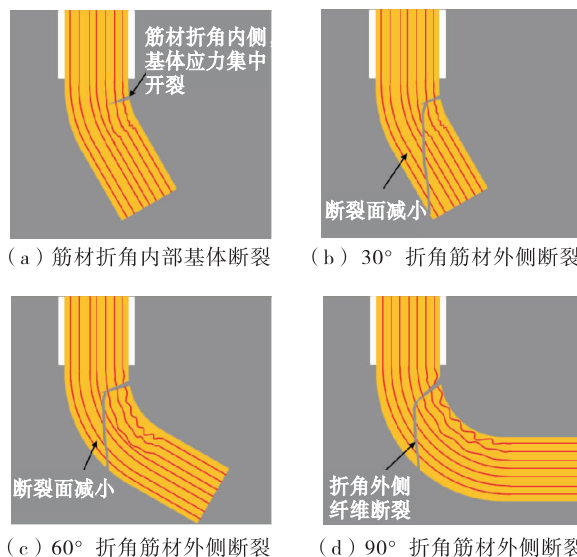


图 7 GFRP 筋折角筋断裂过程示意图

表3 折角筋有效面积试验结果

筋材角度/(°)	有效面积/mm ²	有效面积平均值/mm ²
0	113.1	
0	113.1	113.10
0	113.1	
30	71.23	
30	74.68	
30	75.47	74.25
30	72.89	
30	78.65	
30	72.58	
60	45.89	
60	47.23	
60	39.58	43.96
60	42.12	
60	43.52	
60	45.66	
90	25.68	
90	24.54	
90	28.45	26.39
90	26.97	
90	25.13	
90	27.55	

4 折角筋强度预测模型

日本规范 JSCE(1997)采用的 FRP 箍筋弯曲强度计算方法[见式(1)]被广泛使用,该方法采用 r_b/d_b 和筋材强度 f_{fu} 作为影响因素。

$$f_{fb} = \frac{(0.05r_b/d_b + 0.3)f_{fu}}{\delta} \quad (1)$$

式中: f_{fb} 为筋材弯折段强度; δ 为安全系数,日本采用的安全系数为 1.3,美国为 1.0,加拿大为 1.5。

各国规范中 FRP 箍筋弯曲强度计算方法的计算结果见表 4。由表 4 可知:各国规范均高估了筋材弯折强度,其中加拿大规范的计算结果与试验结果较接近。这是由于 FRP 弯折部分破坏机理并不清晰,未考虑弯折角在实际破坏过程中的基体应力集中。因此,需对计算方法进行修正。经过分析,选择安全系数为 1.9 能较准确地预测 GFRP 筋弯折角强度。

筋材折角处基体开裂面积决定筋材强度,筋材有效面积与筋材强度的关系见图 8。筋材有效面积与筋材折角关系的变化规律与强度相似。定义筋材有效面积为 A_e ,筋材有效截面积随筋材角度的变化规律见式(2),有效面积误差表达式见式(3),筋材有

表4 各国规范中 FRP 箍筋弯曲强度计算方法的计算结果对比

计算方法	f_{fu}/MPa	δ	r_b/d_b	f_{fb}/MPa
JSCE(1997)	805.27	1.3	3	278.75
GB 50608—2010	805.27	1.0	3	362.37
ACI 440.1—06	805.27	1.5	3	241.58
CAN/CSA—S6—06	805.27	—	3	197.13
试验结果	805.27	—	3	197.13

效面积 A_e 随角度的变化规律见式(4),筋材强度预测模型见式(5)。式(5)预测结果与试验结果的对比见图 9。

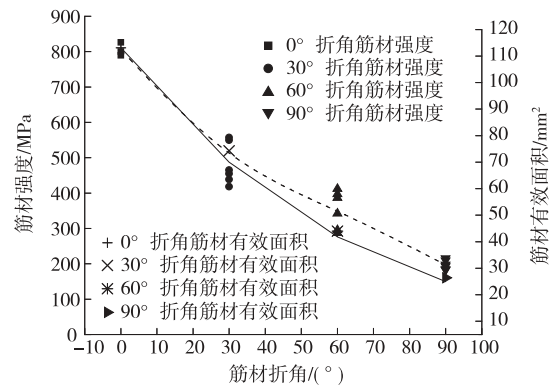


图8 筋材强度与筋材有效面积随角度的变化

$$A'_e(\theta) = 0.0073\theta^2 - 1.6325\theta + 112.93 \quad (2)$$

$$\Delta A_e(\theta) = 0.0001\theta^3 - 0.0194\theta^2 + 0.8526\theta \quad (3)$$

$$A_e(\theta) = A'_e(\theta) - \Delta A_e(\theta) \quad (4)$$

$$\sigma_e(\theta) = A_e(\theta)\sigma_{ini} \quad (5)$$

式中: A'_e 为筋材折角处有效面积试验值(mm^2); θ 为筋材折角($^\circ$); ΔA_e 为筋材折角处有效面积误差(mm^2); A_e 为筋材折角处有效面积(mm^2); σ_e 为带折角筋材有效强度预测(MPa); σ_{ini} 为带折角筋筋材初始强度(MPa)。

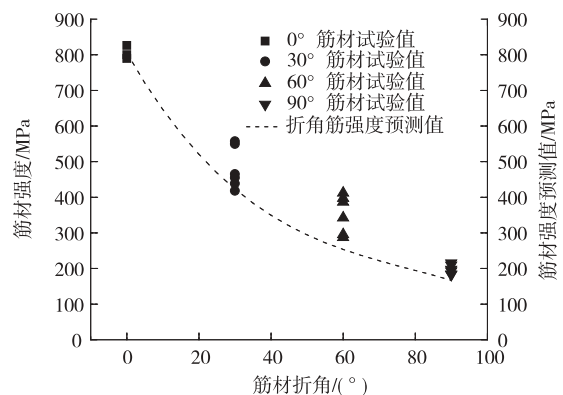


图9 试验结果与模型预测结果对比

基于 GFRP 筋材折角处有效面积,分析折角处筋材破坏机理。GFRP 折角筋加工过程中,首先进行筋材浸胶成型,然后根据角度需求进行弯折,造成筋材折角内侧纤维褶皱松弛。筋材在砼中受力时,两方面原因造成筋材强度降低,一是 GFRP 筋折角内侧纤维褶皱松弛,内折角受力主要由基体承担;二是折角内侧应力集中,受力时容易开裂。这 2 个原因相互促进,造成带折角筋材强度显著降低。根据 GFRP 筋破坏机理建立 GFRP 折角筋强度预测模型,对比预测结果与试验结果,该模型能准确预测不同角度 GFRP 筋的强度。

5 结论

针对 GFRP 筋,采用静力加载,研究不同折角 GFRP 筋的强度,分析 GFRP 筋折角处破坏机理,建立不同折角 GFRP 筋强度预测模型。结论如下:1) 由于 GFRP 筋弯折角内侧应力集中,GFRP 筋弯折角度对筋材强度影响明显。相比于 GFRP 直筋强度,30°、60°和 90°折角筋强度分别降低 40.3%、56.1%和 75.5%。2) GFRP 筋折角破坏时,内侧基体首先开裂,该位置处纤维的参与受拉程度较低,会出现折角内侧纤维整体断裂现象,且折角内侧整体断裂程度与筋材角度有关,筋材角度增加,则断裂深度增加。之后外侧基体与纤维协同受力,最终断裂。3) 折角筋实际受力的有效面积与筋材强度相关,基于筋材有效受力面积建立 GFRP 筋弯折强度预测模型,对比试验结果,该模型能准确预测不同弯折角度 GFRP 筋的强度。

文中研究针对玻璃纤维筋,后期需对不同弯折角度对玄武岩纤维和碳纤维筋的强度影响进行分析,研究不同纤维对弯折强度的影响。

参考文献:

- [1] 滕锦光.新材料组合结构[J].土木工程学报,2018,51(12):1—11.
- [2] 侯保荣.中国腐蚀成本[M].北京:科学出版社,2017.
- [3] 曾学,郭诗惠,戴理朝.界面增强 GFRP—组合板刚度分析与计算[J].公路与汽运,2017(4):124—129.
- [4] 曾勇.钢桥面铺装 FRP 性能及工程应用[J].公路与汽运,2013(3):193—197.
- [5] 马高,齐亮.BFRP 约束损伤混凝土柱轴压力学性能试验研究[J].中外公路,2019,39(1):94—100.
- [6] YU Z, YU G, PAN Y. Investigation of ultimate strengths of concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP bars [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 482—492.
- [7] FAN X C, ZHOU Z R, TU W L, et al. Shear behaviour of inorganic polymer concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups [J]. Composite Structures, 2020, 255: 112901.
- [8] SAID M, ADAM M A, MAHMOUD A A, et al. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars [J]. Construction Building Materials, 2016, 102: 574—91.
- [9] ISSA M A, OVITIGALA T, IBRAHIM M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(4): 04015083.
- [10] MOSTAFA El-Mogy, AMR El-Ragaby, EHAB El-Salakawy. Behaviour of continuous concrete beams reinforced with FRP bars [C]. Advances in FRP Composites in Civil Engineering, 2011: 283—286.
- [11] EHAB Abdul-Mageed Ahmed. Shear behaviour of concrete beams reinforced with fibre-reinforced polymer (FRP) stirrups [D]. University of Sherbrooke, 2009.
- [12] EMILE Shehata, RYAN Morphy, SAMI Rizkalla. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27: 859—872.
- [13] 林锋,江世永,李柄宏.混凝土梁中 BFRP 螺旋箍筋抗剪性能试验研究[J].施工技术,2011,40(337):84—87.
- [14] LEE Chadon, KIM Jun-Yeop, HEO Seo-Young. Experimental observation on the effectiveness of fiber sheet strip stirrups in concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(5): 487—497.
- [15] DOUGLAS Tomlinson, AMIR Fam. Performance of concrete beams reinforced with basalt FRP for flexural and shear [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 19(2): 04014036.
- [16] AHMED K El-Sayed, EHAB El-Salakawy, BRAHIM Benmokrane. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4): 352—362.
- [17] LEE C, KO M, LEE Y. Bend strength of complete closed-type carbon fiber-reinforced polymer stirrups with rectangular section [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18: 04013022.

- [18] CHOLOSTIAKOW S, BENEDETTI M D, PILAK-OUTAS K, et al. Experimental analysis of shear resisting mechanisms in FRP RC beams with shear reinforcement[J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(5).
- [19] DAVID T J, SHAMIM A S. Experimental investigation of glass fiber-reinforced polymer-reinforced normal-strength concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(6): 1165—1174.
- [20] ACI 440.1R—15. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [21] CSA S6—14. Canadian highway bridge design code[S]. Mississauga, Canada, 2014.
- [22] CSA S806—12. Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers[S]. Rexdale, Ontario, Canada, 2012.
- [23] ACI 440.1R—06. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars[S]. ACI Committee 440, 2006.
- [24] ACI 440.3R—04. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures[S]. ACI Committee 440, 2004.
- [25] 中国冶金建设协会. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [26] EHSANI M R, SAADATMANESH H, TAO S. Bond of hooked glass fiber reinforced plastic reinforcing bars to concrete[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(4): 391—400.
- [27] EI-SAYED A K, EI-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4): 352—362.
- [28] MORPHY R. Behaviour of fiber-reinforced polymer (FRP) stirrups as shear reinforcement for concrete structures[D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1999.
- [29] CURRIER J, FOGSTAD C, WALRATH D, et al. Bond development of thermoplastic FRP shear reinforcement stirrups[C]. Proceedings of the Third Materials Engineering Conference: Infrastructure, New Materials and Methods of Repair. San Diego, USA: ASCE, 1994.

收稿日期: 2021-07-01

(上接第 121 页)

- [3] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- 社, 2011.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冻土地区建筑地基基础设计规范: JGJ 118—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

收稿日期: 2021-01-25

(上接第 130 页)

箱梁的不断吊装, 线形逐渐变化为凸曲线, 进入吊装后期线形呈现为目标成桥线形。

(3) 每根吊索拉力都是该吊点的 2 根索力之和, 吊索拉力在钢箱梁吊装架设前期变化较大, 达到 1 930 kN; 随着钢箱梁的吊装, 吊索拉力变化逐渐趋于平缓并维持在 1 920 kN 左右; 吊装后期, 在合龙段处会呈现峰值突变现象, 达到 2 000 kN 左右。

参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [2] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社股份

- 有限公司, 2016.
- [3] 钟继卫. 大跨度悬索桥钢箱梁吊装精细化分析[J]. 桥梁建设, 2010, 40(6): 9—12.
- [4] 姜军, 忻刚明, 孙胜江. 大跨悬索桥加劲梁吊装阶段的施工控制[J]. 公路, 2009(12): 35—39.
- [5] 韦世国, 吴建强, 文武, 等. 润扬大桥悬索桥钢箱梁吊装技术[J]. 桥梁建设, 2004, 34(4): 40—43+46.
- [6] 刘晓涛. 大跨度悬索桥钢箱梁吊装控制分析[J]. 工程建设与设计, 2017(9): 172—174+177.
- [7] 李永乐, 侯光阳, 曹平辉, 等. 大跨度悬索桥施工过程加劲梁临时连接的有限元模拟研究[J]. 中国科技论文在线, 2010(7): 529—534.

收稿日期: 2020-10-28