

全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验

刘承斌¹, 应健², 陈勇^{*1}, 王激扬¹, 冉杨¹, 麻坚²

(1. 浙江大学 土木工程学系, 杭州 310058; 2. 金华电力设计院有限公司, 金华 321016)

摘要: 提出了采用全玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋混凝土电缆排管代替传统的钢筋混凝土电缆排管, 该结构形式具有减少能耗的优点。通过对小尺寸和足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管试件进行抗弯性能试验, 研究其抗弯能力、变形及破坏特征等。试验结果表明, GFRP 筋混凝土电缆排管具有与普通钢筋混凝土梁相似的力学特征, 以混凝土开裂为分界点, 位移-荷载曲线表现为双线性, 排管侧面拉应力分布不均匀, 部分区域出现了较高拉应力。提出了 GFRP 筋混凝土电缆排管的抗弯设计计算方法, 理论计算结果与试验测试结果较为吻合。

关键词: 混凝土电缆排管; 玻璃纤维增强树脂; 弯曲试验; 抗弯性能; 设计方法

中图分类号: TB332; TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)01-0070-11

Experimental study on flexural performance of concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer bars

LIU Chengbin¹, YING Jian², CHEN Yong^{*1}, WANG Jiyang¹, RAN Yang¹, MA Jian²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Jinghua Electric Power Design Co., LTD., Jinghua 321016, China)

Abstract: A concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars was proposed. The newly developed cable duct is capable of reducing the energy dissipation and can be used to take place of traditional concrete cable duct which is reinforced with steel bars. The bending tests were conducted for several small and full size specimens of GFRP concrete cable duct and the bearing capacity of bending, deformation and failure characteristics were investigated. It is found that the mechanical characteristics of the GFRP concrete cable duct are similar with that of the concrete cable reinforced with steel bars. The loading-deflection curve is bi-linear with a cut-off point corresponding to the cracking of the concrete. The distribution of tension stresses on the side of the cable duct is not uniform and relatively high tension stresses are detected in some local regions. An appropriate calculation and design method was presented to capture the flexural capacity of the GFRP concrete cable duct. The theoretical predictions agree well with the experimental results.

Keywords: concrete cable duct; glass fiber reinforced polymer; bending test; flexural performance; design method

随着国民经济的快速发展, 为解决城市电网建设与土地供求的矛盾以及考虑到环境景观需求, 电网由架空线形式转入地下电缆形式, 其敷设方式主要有电缆沟、排管、电缆隧道等形式。其中电缆排管以可预制、施工快速、结构形式合理等特点得到了广泛认同和使用^[1-5]。

这里所提出的采用纤维增强树脂基复合材料

(FRP)筋混凝土电缆排管, 可以解决现役钢筋混凝土电缆排管使用金属件引起的能量损耗问题, 从而提高电缆载容量。全 FRP 筋混凝土电缆排管的设计计算方法目前还没有相关的报道。包括中国在内的多个国家虽已制定了相关的 FRP 筋混凝土规范, 但这些规范均针对实心混凝土结构, 它们是否适合电缆排管的设计计算还需深入研究。

收稿日期: 2017-01-03; 录用日期: 2017-03-01; 网络出版时间: 2017-03-22 14:39
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170322.1439.002.html>
基金项目: 国家电网科技项目(WJ-03)
通信作者: 陈勇, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为结构工程及风工程 E-mail: cecheny@zju.edu.cn.

引用格式: 刘承斌, 应健, 陈勇, 等. 全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1): 70-80.
LIU Chengbin, YING Jian, CHEN Yong, et al. Experimental study on flexural performance of concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer bars[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(1): 70-80 (in Chinese).

与钢筋混凝土结构相比,FRP 筋混凝土结构的研究历史较短,大部分文献发表于上世纪 90 年代后。文献综述仅限于 FRP 筋混凝土梁的抗弯承载力研究方面。Brown 等^[6]以及 Al-Salloum 等^[7]通过对简支梁的试验研究发现,玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋混凝土梁的正截面抗弯性能与钢筋混凝土梁相近,其设计承载力可采用钢筋混凝土梁的设计方法计算,在相同荷载下,GFRP 筋梁的竖向挠度值更大。Benmokrane 等^[8]通过试验比较了钢筋混凝土梁和 FRP 混凝土梁受弯时的多项性能指标,包括裂缝、挠度、刚度等,指出仅需对美国钢筋混凝土规范相关计算公式中的若干参数作简单调整,即可将其用于 FRP 混凝土梁的计算。Theriault 等^[9]指出,超过平衡配筋率后,FRP 筋混凝土梁的正截面承载力随着配筋率的降低而降低,其下限值为混凝土受压破坏时的承载力。Toutanji 等^[10]的试验表明,对美国规范 ACI 440.1R-01^[11]中公式参数进行调整后,单排配置 GFRP 筋混凝土梁的正截面抗弯承载力计算方法同样适用于双排配置 GFRP 筋的情况。Vijay 等^[11]用能量吸收的概念揭示了 GFRP 筋混凝土梁受弯时的受力机制。El-Nemr 等^[12]对采用高强混凝土的 GFRP 筋混凝土梁受弯性能进行了试验研究,结果表明采用高强混凝土后能提高刚度及开裂弯矩,更高的混凝土强度和配筋率使裂缝条数更多更细小。最近,Goldston 等^[13]研究了在冲击荷载作用下 GFRP 筋混凝土梁的动态承载力性能。

国内学术界早期较为关注 FRP 加固,近年来涌现出 FRP 筋混凝土结构的报道。高丹盈等^[14]通过试验研究发现,配筋率对 GFRP 筋混凝土梁的开裂弯矩影响有限,并提出了开裂弯矩的计算方法。张海霞等^[15]指出,FRP 筋混凝土梁在开裂前与配筋率相对无关,而开裂后其极限承载力随配筋率提高而增加,并与 GFRP 筋梁的实验结果进行了对比验证。张海霞等^[16]指出 GFRP 筋混凝土梁的破坏模式表现为受拉破坏、平衡破坏和受压破坏三种,并通过总结 2005 年前的部分国内外试验数据,推导得到正截面极限承载力计算公式。郑永峰等^[17]建议采用超筋设计方法,使 FRP 筋混凝土构件受弯时发生受压破坏,同时认为发生受拉破坏时,其极限抗弯承载力计算关键在于合理选取 FRP 筋名义抗屈服强度,一般建议取极限强

度的 70%~80%。翁春光等^[18]通过试验研究指出,GFRP 筋混凝土梁承受弯曲荷载时可不考虑受压区的 GFRP 筋作用,提出开裂弯矩的计算公式。薛伟辰等^[19]针对 FRP 筋混凝土梁的正截面抗弯承载力提出了较为系统的设计理论,引入了 FRP 筋“名义屈服强度”的概念与相应确定方法,并被规范所采用。王作虎等^[20]对有粘结和无粘结两种预应力 FRP 筋混凝土梁的抗弯性能进行了研究,并推导了相关的抗弯承载力计算方法。朱虹等^[21]对 FRP 筋混凝土梁的刚度进行了试验研究,并指出现有规范高估了 FRP 筋混凝土梁的短期抗弯刚度。

本文设计制作了多个小尺寸电缆排管试件,对 GFRP 筋应用于混凝土电缆排管后的构件正截面抗弯承载力进行相关试验研究,包括应变分布规律、开裂弯矩、极限承载力、裂缝宽度等。分析了配筋率对承载力的影响规律,并提出了相关的 GFRP 筋混凝土电缆排管的承载力计算方法,最后通过足尺电缆排管试件的抗弯试验,验证了该计算方法的可靠性。研究成果为该类型新型排管在今后工程中的推广与应用奠定了基础。

1 实验方法

试验主要研究 GFRP 筋混凝土电缆排管的抗弯性能,当出现电缆排管受拉区玻璃纤维筋断裂或受压区混凝土压碎现象时,终止加载。制作了小尺寸的 GFRP 筋混凝土电缆排管试件(4 种不同配筋率)以及足尺的多回路 GFRP 筋混凝土电缆排管试件。小尺寸试件的截面尺寸为 300 mm×425 mm,详细的几何尺寸和配筋规格如图 1 和表 1 所示,其中 B 为电缆排管的截面宽度, h 为截面高度。足尺试件的截面尺寸为 1 250 mm×1 000 mm,相应的详细几何尺寸和配筋规格如图 2 和表 1 所示。以图 1 中 2GFRP12 为例,其表示该 GFRP 筋的直径为 12 mm,数量为 2 根。在表 1 中,2 Φ 6 表示 2 根直径为 6 mm 的 GFRP 筋, Φ 10@60 则表示箍筋直径为 10 mm,间距为 60 mm。小尺寸试件的箍筋内部净空尺寸为 220 mm×345 mm,箍筋的弯折半径为 50 mm。足尺件的箍筋内部净空尺寸为 920 mm×1170 mm,箍筋的弯折半径为 50 mm。

浇筑混凝土试件的同时还制作了试块,养护条件与试件相同。由于采用分批浇筑,因此,小尺寸试件和足尺试件的混凝土材料性能参数有所不同。

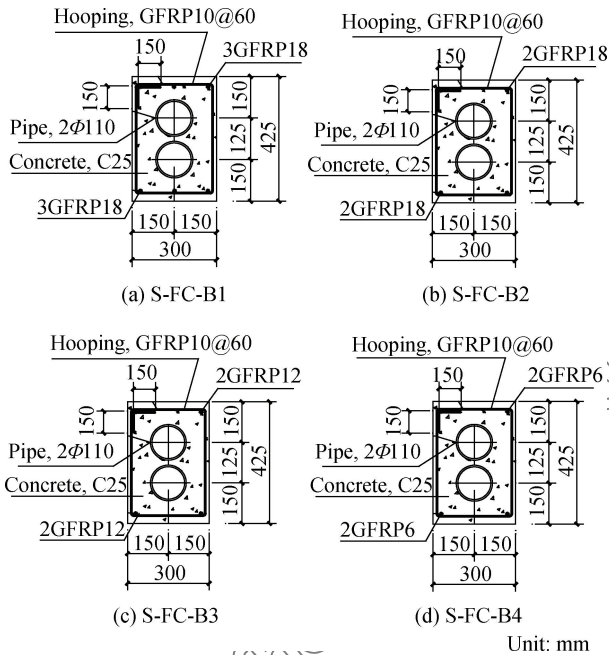


图 1 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管试件几何尺寸及配筋
Fig. 1 Geometric dimensions and reinforcement specifications for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

小尺寸试件和足尺试件的轴心抗压强度 f_{ck} 分别为 24.6 MPa 和 19.5 MPa，抗拉强度 f_{tk} 分别为 2.7 MPa 和 2.0 MPa，弹性模量 E_c 分别为 30.6 GPa 和 25.6 GPa。试验所采用 GFRP 筋共有 $\Phi 6$ 、 $\Phi 10$ 、 $\Phi 12$ 、 $\Phi 18$ 等 4 种规格，取每种规格各 3 根进行材料性能拉伸试验，测得各个规格的抗拉强度 f_{tu} 平均值顺序分别为 845.0 MPa、550.9 MPa、524.4 MPa 和 379.0 MPa，各个规格的弹性模量 E_t 平均值顺序分别为 55.7 GPa、35.9 GPa、42.0 GPa 和 46.3 GPa。

采用作动器对小尺寸试件进行加载，利用力传感器测读荷载值，足尺试件则采用杭州邦威机电控制有限公司生产的 YAW-10000F 型电液伺服试验机进行加载。在加载过程中，均考虑了构件自重的影响，试验采用分级加载，每级荷载约为预估极限

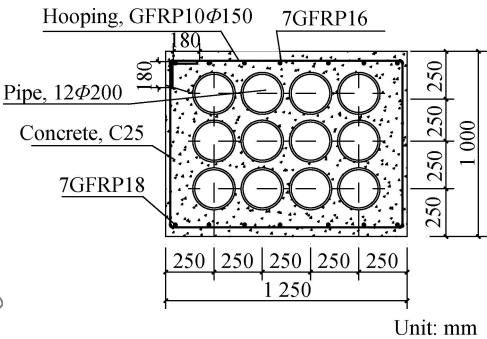


图 2 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管试件几何尺寸及配筋
Fig. 2 Geometric dimensions and reinforcement specifications for the full scale specimen of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

荷载的 1/10，在混凝土开裂荷载值和构件极限荷载值附近，适当进行细分。当观测到电缆排管主裂缝宽度达到 1.5 mm 时，将加载方式从力加载转换为位移加载，直至试件完全破坏。

挠度测量采用数字位移计，混凝土应变测点采用 100 mm×3 mm 的电阻应变片。数据采集装置使用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH3816 静态应变测试系统。裂缝宽度测读采用北京瑞科科技有限公司生产的 DJCK-2 型裂缝测宽仪，裂缝分布及发展记录采用数码摄像装置。

试件的加载示意图见图 3，分配梁的间距根据试件预估的抗弯与抗剪承载能力进行调整。

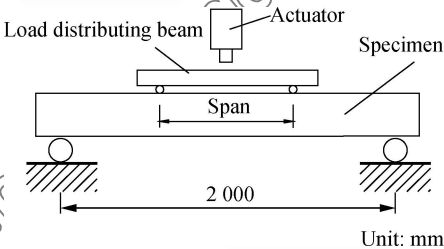


图 3 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管试件试验加载示意图
Fig. 3 Loading sketch for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

表 1 GFRP 筋混凝土电缆排管试件几何尺寸和配筋规格

Table 1 Geometric dimensions and reinforcement specifications for specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

Specimen	B/mm	h/mm	D/mm	Pipe layout	Longitudinal bar	Hooping
S-FC-B1	300	425	110	2×1	3Φ18	Φ10@60
S-FC-B2	300	425	110	2×1	2Φ18	Φ10@60
S-FC-B3	300	425	110	2×1	2Φ12	Φ10@60
S-FC-B4	300	425	110	2×1	2Φ6	Φ10@60
ZC-FC-B1	1250	1000	200	3×4	7Φ18	Φ10@150

Notes: B —Section width; h —Section height; D —Diameter of pipe; 2Φ18—Two 18 mm GFRP bars; Φ10@60—60 mm distance between 10 mm GFRP bars.

在试件的 1/4 跨、跨中和 3/4 跨处共布设 3 个位移计,用于测试挠度曲线,另在试件两侧端部各布置 2 个位移计,用于测量支座沉降。在试件跨中侧面位置,沿着高度方向等间距布置了水平应变测点,同时在另一侧面布置千分表测点进行辅助校核,测试时考虑了测试现场的温度补偿。图 4 及图 5 分别给出了小尺寸和足尺试件的位移及应变测点布置。

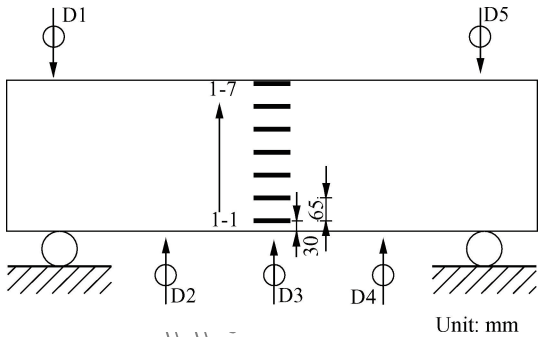


图 4 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管试件试验测点布置图

Fig. 4 Layout of displacement transducers and strain gauges for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

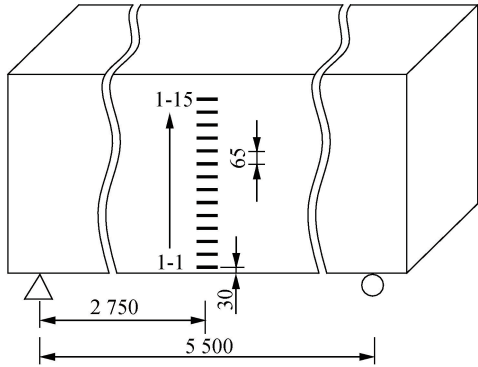
2 结果及分析

2.1 GFRP 筋混凝土电缆排管荷载-跨中挠度曲线

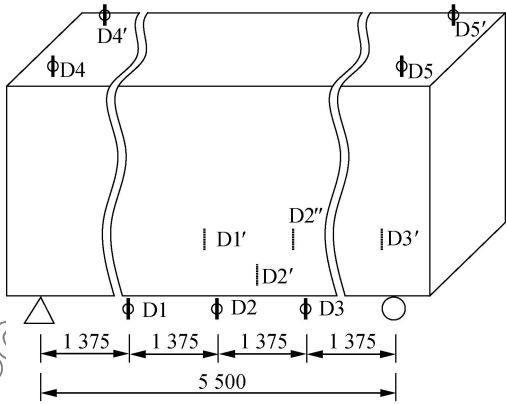
图 6 给出了不同配筋 GFRP 筋混凝土电缆排管的荷载-跨中挠度曲线。可见,不同配筋率下的曲线均表现为双线性特征,即在开裂前的刚度和开裂后的刚度均分别基本保持不变,且开裂后的刚度小于开裂前刚度。开裂前的刚度则基本不受配筋率的影响;开裂后的刚度大小与配筋率相关,其值随配筋率的增加而增加。另外,不同的配筋率下的开裂弯矩基本相同,即约为 $18\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。表明开裂弯矩和配筋率的相关性较小。对于少筋情况下的 GFRP 筋混凝土结构,其延性显然是不能满足要求的,例如只配置了 $2\Phi 6$ 的 GFRP 筋的电缆排管,当挠度为 $0.005l$ 时,结构已接近破坏。而对于具有较高配筋率的梁,其延性均较高。以上现象和文献[14, 16]中 FRP 筋混凝土矩形梁受弯时的现象类似。

2.2 GFRP 筋混凝土电缆排管应变分布

图 7 给出了不同 GFRP 筋配置下的两种典型应变随高度分布情况。由图 7(a)可见,当配筋率较高时,中性轴位置在开裂前基本保持不变,与截面对称轴基本重合。当构件开裂后,中性轴随荷载增大而逐渐上移,同时梁顶的压应变也急剧增大。开



(a) Strain measuring points



(b) Displacement measuring points

Unit: mm

图 5 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管试件试验测点布置图

Fig. 5 Layout of displacement transducers and strain gauges for the full scale specimen of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

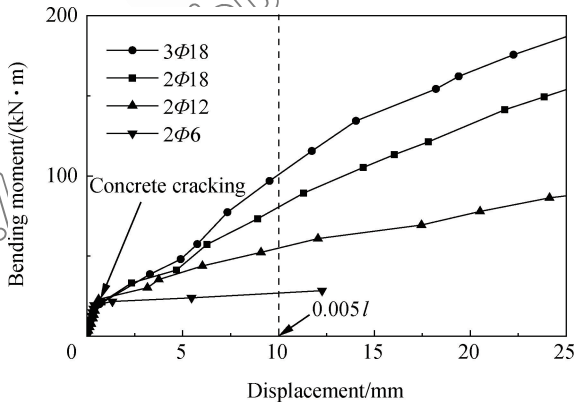


图 6 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Loading-deflection curves of midpoint for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

裂后,受压区应变仍基本保持为线性,而受拉区混凝土应变则呈现出局部增大的特征。从图 7(b)可发现,当配筋率较低时,开裂前的应变分布特征与较高配筋率下的情形一致,但开裂后构件快速破

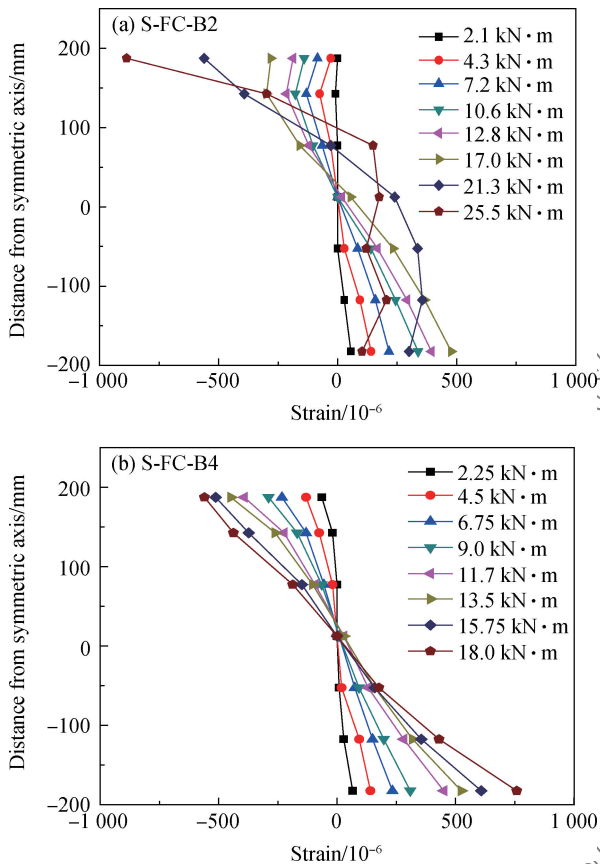


图7 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管跨中截面应变分布随弯矩变化

Fig. 7 Variation of strain distribution with bending moment for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

坏,延性相对较差。

应变分布规律表明,在混凝土开裂前可按照弹性构件进行开裂弯矩的计算,而在混凝土开裂后计算极限承载力时,可仅考虑 GFRP 筋承受拉力而忽略受拉区混凝土作用,这与各国规范^[22-23]的力学假定相一致。从应变的试验结果可以看出,GFRP 筋混凝土电缆排管受弯时基本上符合平截面假定。

2.3 GFRP 筋混凝土电缆排管裂缝开展和破坏

图 8 给出了两种不同 GFRP 筋配置情况下的构件破坏模式比较。可以看出,其裂缝开展情况与普通钢筋混凝土梁的裂缝情况类似,破坏时表现为具有多个间距约为 10 cm 的弯曲竖向裂缝。随着荷载增加,裂缝逐渐伸展和加宽。不同 GFRP 筋配置下的破坏情况有所不同,当配筋率较高时,构件的破坏最终表现为混凝土压碎破坏;而配筋率较低时,开裂后的承载力增加并不明显,而裂缝则快速发展,最终发生整体开裂破坏。

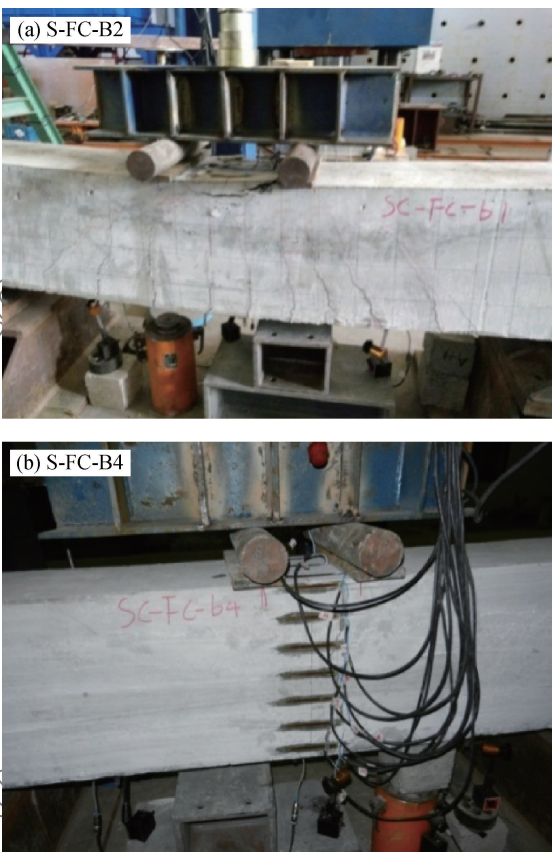


图8 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管裂缝开展及破坏
Fig. 8 Development of crack and failure for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

2.4 GFRP 筋混凝土电缆排管挠曲线

图 9 给出了两种不同 GFRP 筋配置率下,由试验所测得的电缆排管挠曲线图。可以发现,该挠曲线图和普通混凝土梁的挠曲线图基本相似,表明多排孔的 GFRP 排管的整体受力情况与普通梁的整体受力情况类似^[6]。

2.5 GFRP 筋混凝土电缆排管足尺试件试验结果

对足尺的全 GFRP 筋混凝土电缆排管试件,进行了相应的试验研究。当跨中弯矩达到 1 179.4 kN·m 时,试件发生破坏。图 10 显示了破坏时的裂缝开展情况,可以看出,其与普通梁的裂缝开展情况相类似。图 11 给出了试件的荷载-位移曲线情况,可以看出,曲线仍表现为双线性特征,刚度拐点对应于开裂弯矩。开裂后至结构破坏期间,存在较长的变形段。图 12 给出了试件跨中处侧面水平应变分布随弯矩变化情况,此时弯矩引起的裂缝宽度小于 1.5 mm。可以看出,电缆排管的截面应变分布与普通混凝土梁的分布并不相同,由于孔洞产生的应力集中现象较为严重,局部区域会

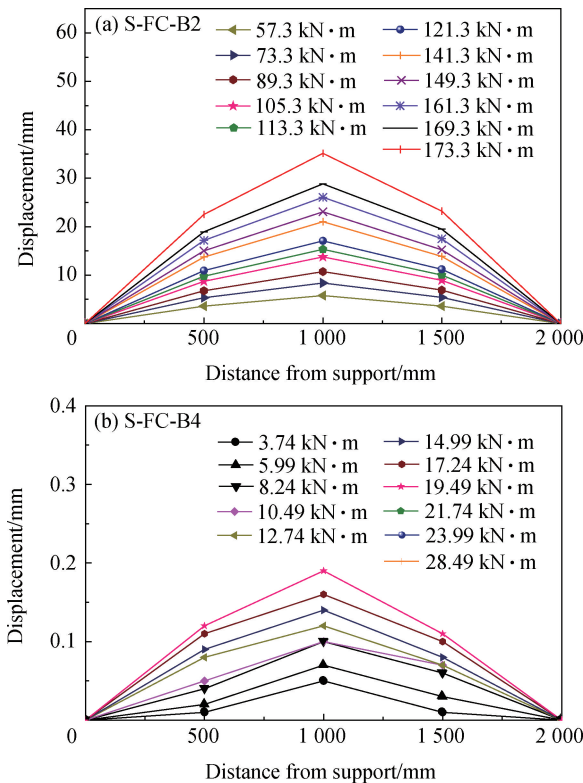


图 9 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管挠曲线随弯矩变化
Fig. 9 Variation of deflection curve with loading for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

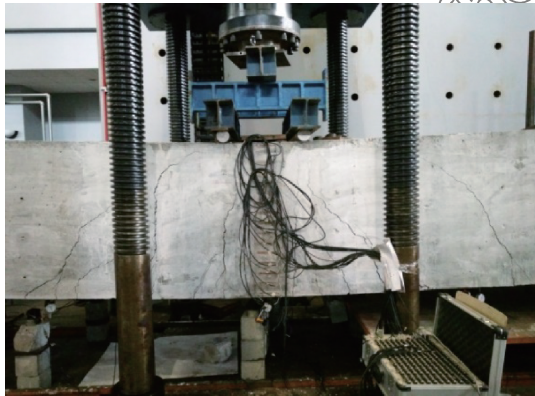


图 10 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管裂缝开展情况
Fig. 10 Development of crack for the full scale specimen of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

出现较大的拉应力。

3 正截面承载力建议计算方法

试验结果表明，全 GFRP 筋的电缆排管受弯特性与普通梁特性相近。从偏安全考虑，受拉区混凝土的作用可不计入正截面承载力计算。中国 FRP 工程应用技术规范^[22]（以下简称中国规范）仅给出了矩形截面梁的正截面抗弯承载力设计公式，下面

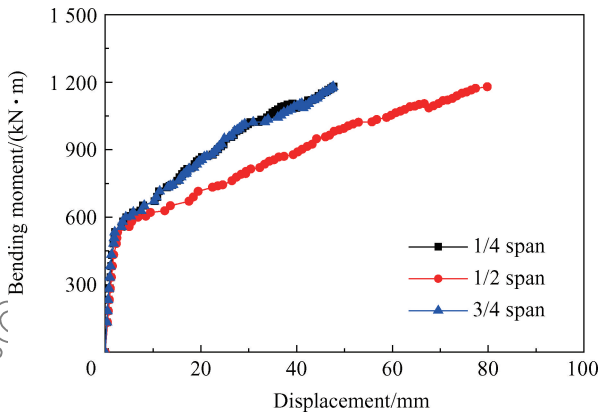


图 11 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管挠度随弯矩变化
Fig. 11 Variation of deflection versus bending moment for the full scale specimen of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

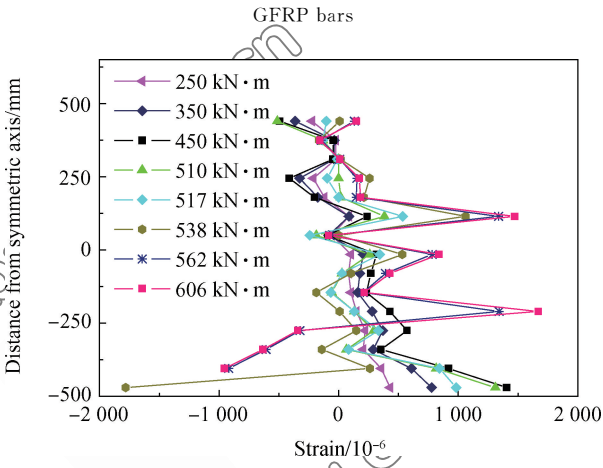


图 12 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管应变分布随弯矩变化
Fig. 12 Variation of strain distribution with bending moment for the full scale specimen of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

给出的正截面承载力计算方法则是针对 GFRP 筋混凝土电缆排管。

3.1 GFRP 筋混凝土电缆排管的换算工字型截面

如图 13 所示的具有 m 排 n 列孔道的电缆排管，其截面宽度为 B ，高度为 h ，可将其等效为工字

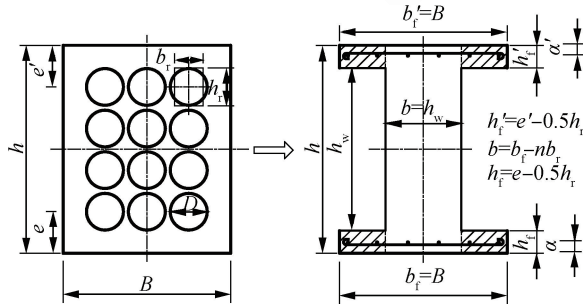


图 13 GFRP 筋混凝土电缆排管的换算工字型截面
Fig. 13 Equivalent I-shaped cross section of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

型截面。首先,按照截面面积和惯性矩相等的原则将圆孔折算成矩形孔,则该矩形孔的高 h_r 及宽 b_r 为

$$h_r = \frac{\sqrt{3}}{2}D, b_r = \frac{\sqrt{3}\pi D}{6} \quad (1)$$

式中, D 为圆孔直径。上翼缘高度 h'_f 为第一排孔中心离上边缘的距离 e' 扣除 $0.5 h_r$, 下翼缘高度 h_f 可利用第 m 排孔中心离下边缘的距离 e 扣除 $0.5 h_r$ 求得。工字型截面的腹板宽度 b 为折算前截面宽度 b_f 扣除 n 个矩形孔宽度 b_r 获得。即

$$h'_f = e' - 0.5h_r, h_f = e - 0.5h_r, b = b_f - nb_r, h_w = h - 2h_f \quad (2)$$

式中, h_w 为腹板高度。这种处理忽略了相邻排的孔间部分混凝土面积,获得的工字型截面略偏于保守。

3.2 全 GFRP 筋混凝土电缆排管正截面承载力

极限状态下的工字型截面受力如图 14 所示。工字型截面的 GFRP 筋配筋率为

$$\rho_f = \frac{A_f}{bh_0} \quad (3)$$

式中: A_f 为 GFRP 筋的截面积; h_0 为有效高度; b 为如图 14 所示工字型截面的腹板宽度。平衡破坏时的相对界限受压区域高度为

$$\xi_{fb} = \beta_1 \frac{\epsilon_{cu}}{f_{fd}/E_f + \epsilon_{cu}} \quad (4)$$

因此,平衡配筋率为

$$\rho_{fb} = \begin{cases} \frac{\alpha_1 f_c}{f_{fd}} \left[\xi_{fb} + \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0} \right], & \xi_{fb} h_0 \geq h'_f \\ \frac{\xi_{fb} \alpha_1 b'_f f_c}{b f_{fd}}, & \xi_{fb} h_0 < h'_f \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中的 α_1 及 β_1 可按照中国规范 GB 50608—2010^[22] 确定。

$$M_u = \begin{cases} \alpha_1 f_c b'_f x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right), & x \leq h'_f \\ \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right), & x \geq h'_f \end{cases} \quad (9)$$

在普通钢筋混凝土梁在抗弯设计计算时,由于钢筋存在屈服点,通常采用适筋设计,此时普通钢筋混凝土梁中的承载力主要由钢筋的屈服控制,构件的破坏表现为平衡破坏。而在 GFRP 筋混凝土梁受弯时,由于 GFRP 筋没有明显的屈服点,难以清晰界定受拉和受压破坏,薛伟辰等^[6]指出配筋率

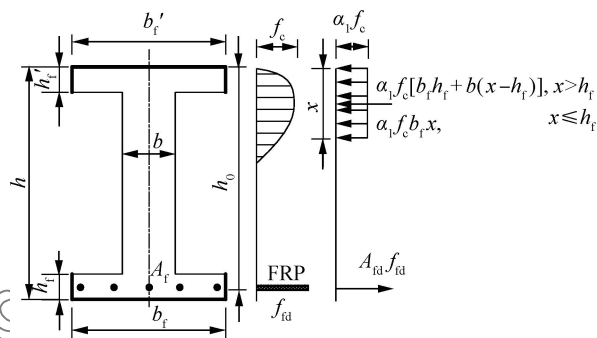


图 14 GFRP 筋混凝土电缆排管极限状态下截面受力

Fig. 14 Forces acting on cross section of concrete cable duct reinforced with GFRP bars in case of ultimate limit state

3.2.1 受拉破坏

受拉破坏时的正截面承载力 M_u 计算方法可根据薛伟辰等^[19] 给出的计算理论,即

$$M_u = \gamma_f f_{fe} A_f h_0 \quad (6)$$

这里的 γ_f 为内力臂系数,薛伟辰等^[19] 针对矩形截面梁建议取 0.94,中国规范^[22] 则取 0.9。 f_{fe} 则为 GFRP 筋的有效设计应力,其计算方法为

$$f_{fe} = \begin{cases} f_{fd}, & \rho_f < \rho_{fb} \\ [1 - 0.211(\rho_f/\rho_{fb} - 1)^{0.2}] f_{fd}, & \rho_{fb} < \rho_f < 1.5\rho_{fb} \\ (\rho_f/\rho_{fb})^{-0.5} f_{fd}, & 1.5\rho_{fb} < \rho_f \end{cases} \quad (7)$$

式中, f_{fd} 为 GFRP 筋的设计强度。

3.2.2 受压破坏

根据文献[11],可不考虑电缆排管压区 GFRP 筋的作用。因此,由图 14 可得

$$x = \frac{1}{b} \left[\frac{f_{fd} A_f}{\alpha_1 f_c} - (b'_f - b) h'_f \right] \quad (8)$$

中国规范^[22] 在针对矩形截面梁时, GFRP 筋的设计强度取有效应力值即 f_{fe} 。故 GFRP 电缆排管的正截面抗弯承载力计算公式为

大于平衡配筋率时,仍会发生受拉破坏。因此 GFRP 筋的设计计算公式中引入了有效设计应力^[22] 的概念,有效设计应力相关计算公式则通过试验数据回归得到。对 GFRP 筋电缆排管进行工程设计时,可利用本文公式对受拉和受压破坏下的正截面承载力进行计算,并取最小值为设计承

载力。

4 理论计算与试验结果对比

4.1 GFRP 筋混凝土电缆排管的极限承载力

由第 3 节可发现,适当选取参数值,针对 GFRP 电缆排管的正截面承载力计算公式,可退化为与中国规范^[22]一致的矩形截面梁的正截面承载力计算公式。美国规范 ACI 440.1R—06^[23]针对矩形截面梁也给出了相关的计算方法,即

$$M_u = \begin{cases} A_f f_{fd} h_0 (1 - 0.5 \xi_{fb}), & \rho_f < \rho_{fb} \\ \rho_f f_f (1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f_c}) b h_0^2, & \rho_f \geq \rho_{fb} \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_f 为 GFRP 筋的拉力,即

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \leq f_{fd} \quad (11)$$

式中: ϵ_{cu} 取 0.003,当 f_c 小于 28 MPa 时, β_1 取 0.85,当 f_c 超过 28 MPa 时,每增长 7 MPa, β_1 下降 0.05, β_1 最小值为 0.65。

为便于将理论计算和试验结果进行比较,采用强度标准值进行相关计算。表 2 给出了分别采用本文建议的计算方法和美国规范计算得到的承载力,以及相应的试验结果。由于美国规范只针对矩形截面梁,因此利用其计算工字型截面的抗弯承载力时,忽略了翼缘作用,即梁宽取腹板宽度,这与美国规范进行抗剪计算时的处理方法相同。由表 2 可发现,采用本文计算公式和利用美国规范计算得到的结果较为接近。若将 1.5 mm 裂缝宽度时的试验荷载视为梁的抗弯承载力,可以看到计算结果和试验值较为接近。这表明本文所提出的建议公式适用

于计算 GFRP 筋混凝土电缆排管的抗弯承载力。另外,表 2 还给出了 GFRP 筋混凝土电缆排管发生破坏时的试验荷载,可以发现其值远高于计算得到的抗弯承载力,这表明利用本文建议公式计算时,具有较高的安全裕度。本文试验结果表明,各试件安全裕度值大于 1.8,当配筋率超过平衡配筋率时,安全裕度值大于 2.0。

4.2 GFRP 筋混凝土电缆排管的开裂弯矩

根据中国规范^[22],开裂弯矩 M_{cr} 计算方法为

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0 \quad (12)$$

式中: f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; W_0 为截面模量; γ 为混凝土构件的截面抵抗矩影响系数,按 GB 50010—2010^[24]规定选取,应用于本文的混凝土电缆排管后有

$$\gamma = \begin{cases} 1.4, b_f/b > 2 \text{ 且 } h_f/h < 0.2 \\ 1.5, \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

美国规范^[23]中的开裂弯矩计算方法为

$$M_{cr} = 2 \gamma W_0 \quad (14)$$

$$f_r = 0.62 \sqrt{f_c} \quad (15)$$

表 3 给出了分别根据中国和美国规范计算的结果与试验结果。可以看出,由两国规范公式计算得到的开裂弯矩值均大于试验结果。

4.3 GFRP 筋混凝土电缆排管的裂缝宽度

4.3.1 中国规范^[22]

梁抗弯设计时需进行裂缝宽度控制。根据中国规范^[22]的规定,梁裂缝宽度的计算方法为

$$w_{\max} = 2.1 \psi \frac{\sigma_{fk}}{E_s} (1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (16)$$

式中: σ_{fk} 为荷载效应标准组合下 GFRP 筋的应力;

表 2 小尺寸 GFRP 筋混凝土电缆排管试件正截面承载力

Table 2 Moment capacity for small specimens of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

Specimen	Experimental results/(kN·m)		Theoretical results/(kN·m)	
	1.5 mm crack width	Failure load	Recommended method	ACI 440.1R—06
SC-RC-B1	103.1(1.5)*	188.3	99.6	96.4
SC-FC-B2	89.3(1.7)*	173.3	63.2	62.2
SC-FC-B3	35.4(1.5)*	99.2	40.9	39.9
SC-FC-B4	24.0(2.0)*	28.5	15.9	16.4

Note: *—Crack width value in brackets is the one actually measured.

表 3 电缆排管的开裂弯矩

Table 3 Cracking moment of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

Experimental results/(kN·m)	GB 50608—2010			ACI 440.1R—06	
	γ	$f_{tk} W_0$ /(kN·m)	M_{cr} /(kN·m)	f_r /MPa	M_{cr} /(kN·m)
18.0	1.4735	25.3	37.3	3.07	53.0

Notes: f_{tk} —Characteristic value of concrete tensile strength; W_0 —Section modulus; γ —Sectional influence coefficient of concrete specimen; M_{cr} —Crack moment; f_r —Rupture strength of concrete.

ψ 为裂缝间纵向受拉 GFRP 筋应变不均匀系数, 对直接承受重复荷载的构件, 取 1.0; c 为最外层纵向受拉 GFRP 筋外边缘至受拉区底边的距离; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉 GFRP 筋的配筋率; d_{eq} 为受拉区纵向 GFRP 筋的等效直径。上述物理量的具体计算公式如下:

$$\sigma_{fk} = \frac{M_k}{0.9A_f h_{0f}} \tag{17}$$

$$\rho_{te} = \frac{A_f}{0.5bh + (b_f - b)h_f} \tag{18}$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_{fk}}, \text{ 且 } 0.2 \leq \psi \leq 1 \tag{19}$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \tag{20}$$

式中: M_k 为荷载效应标准组合下的弯矩; n_i 为受拉区第 i 种纵向 GFRP 筋的根数; d_i 为受拉区第 i 种纵向 GFRP 筋的公称直径; v_i 为受拉区纵向 GFRP 筋的相对钢筋粘结特性系数。根据 GFRP 筋表面特性不同, 参照试验数据, 取粘结试验所得的 GFRP 筋粘结强度与同条件带肋钢筋的粘结强度的比值。当 v_i 大于 1.5 时, 取 1.5; 无试验数据时, 可选用 $v_i = 0.7$; b_f 和 h_f 分别为受拉翼缘的宽度和高度; 中国规范^[22]建议裂缝的控制值为 0.5 mm。

4.3.2 美国规范^[23]

美国规范所规定的裂缝宽度计算方法为

$$w = 2 \frac{f_t}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \tag{21}$$

式中, f_t 为 GFRP 筋的应力, 计算方法为

$$f_t = \frac{M_k}{A_f h_0 (1 - k/3)} \tag{22}$$

$$k = \sqrt{2\rho_f E_f / E_c + (\rho_f E_f / E_c)^2} - \rho_f E_f / E_c \tag{23}$$

式中: d_c 为从混凝土的底面到最近的 GFRP 筋中心距离; s 为 GFRP 纵筋的间距。美国规范认为 β 是反映了粘结性能的一个系数, 对于具有和钢材同样粘结性能的 GFRP 材料, 该系数可取 1.0, 同时指出该值从 0.6 变化到 1.72。针对没有试验数据的情况, 美国规范建议取 1.4。 β 为中性轴到受拉底面的距离和中性轴到 FRP 筋质心的距离之比, 即

$$\beta = \frac{h - kh_0}{h_0 (1 - k)} \tag{24}$$

4.3.3 结果比较

最外层纵向受拉 GFRP 筋外边缘至受拉区底

边的距离 c 为 40 mm; v_i 取 0.7, 按中国规范计算公式获得的结果与试验结果比较如图 15(a) 所示。取 $k_b = 1.4$, 并按美国规范公式计算, 理论计算与试验结果比较如图 15(b) 所示。可以看出, 中国规范计算结果与试验结果的吻合度较高, 尤其是当裂缝宽度小于 1.0 mm, 且配筋率大于平衡配筋率时。当裂缝宽度大于 1.0 mm 时, 和试验结果相比, 依据中国规范公式得到的裂缝宽度相对较大。

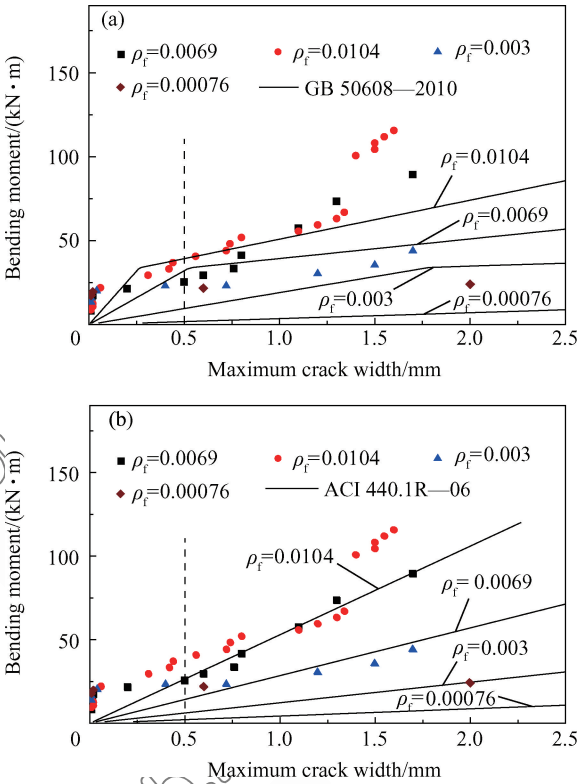


图 15 依据不同规范得到的 GFRP 筋裂缝宽度
Fig. 15 Width of cracks calculated of GFRP in terms of different codes

4.4 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管试验验证

表 4 给出了分别根据本文建议的计算方法和美国规范获得的足尺试件计算结果以及试验结果。其中极限承载力的试验值取裂缝宽度为 1.5 mm 时的结果。可以发现, 两种方法计算得到的承载力与试验结果较为接近, 且均小于试验值。基于建议方法获得的承载力计算结果偏于安全。美国规范给出的开裂弯矩大大超过试验结果, 而中国规范给出的开裂弯矩约为试验值的 0.78 倍, 表明工程设计时可采用中国规范进行开裂弯矩计算。足尺试验件的最终破坏荷载为极限承载力的 1.94 倍, 表明具有相当大的安全裕度。

表 4 足尺 GFRP 筋混凝土电缆排管试件的试验结果及理论值

Cracking moment/(kN·m)			Ultimate bearing capacity/(kN·m)			Failure load/(kN·m)
GB 50608—2010	ACI 440.1R—06	Experiment	Recommended method	ACI 440.1R-06	Experiment	
400	938	516	571	608	621	1 180

需指出的是,为了便于和试验比较,表 4 及本文其他相关计算均采用材料强度标准值计算。实际工程设计时以极限承载力设计理论为依据,应采用材料设计强度进行承载力计算。

5 结 论

(1) 全玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)筋混凝土电缆排管的初始裂缝出现在受荷早期,表明其服役时一般处于带裂缝工作状态。

(2) GFRP 筋混凝土电缆排管的荷载-位移曲线表现为双线性,以混凝土开裂为分界点,开裂后刚度较小。开裂弯矩及刚度与配筋率基本无关,开裂后刚度随配筋率增加而增加。电缆排管的整体变形表现为普通梁的变形特征。

(3) 电缆排管孔洞对构件截面受拉区的应力分布存在一定影响,使排管侧面部分区域拉应力增大。建议在其侧面布置构造加强筋以消除局部应力集中。

(4) GFRP 筋混凝土电缆排管抗弯设计时,可按普通梁考虑,其截面可采用换算工字型截面。小尺寸试件和足尺试件的试验结果表明,采用该工字型截面进行承载力、开裂弯矩及裂缝宽度的计算均能满足精度要求。

(5) 本文针对工字型截面提出了 GFRP 筋混凝土构件正截面承载力计算方法,该方法适用于 GFRP 筋混凝土电缆排管的承载力计算。小尺寸和足尺试件的试验结果均表明,该计算方法满足工程设计以及经济合理性的要求。

参考文献:

[1] 姜晓敏,张峥,季彤天. 预制装配技术在电缆排管工程中的应用[J]. 华东电力, 2008, 36(7): 104-106.
JIANG X M, ZHANG Z, JI T T. Application of pre-manufacturing and assembling technologies to cable piping projects [J]. East China Electric Power, 2008, 36(7): 104-106 (in Chinese).

[2] 梁永春,王忠杰,刘建业,等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高压电技术, 2007, 36(3): 763-768.
LIANG Y C, WANG Z J, LIU J Y, et al. Numerical calculation of temperature field and ampacity of cables in ducts[J].

High Voltage Engineering, 2007, 36 (3): 763-768 (in Chinese).

[3] 俞瑾华,周毓捷. 电力电缆排管合理敷设长度的遗传算法[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 861-863.
YU J H, ZHOU Y J. Genetic algorithm for reasonable laying length of power cable piping[J]. East China Electric Power, 2012, 40(5): 861-863 (in Chinese).

[4] 丁一波,穆松,王玖凯. 基于灰色关联度的电缆排管工程施工质量评价[J]. 华东电力, 2010, 38(4): 542-545.
DING Y B, MU S, WANG J K. Evaluation on construction quality of cable conduit project based on grey correlation[J]. East China Electric Power, 2010, 38(4): 542-545 (in Chinese).

[5] 陈斌,房祥玉,郎需军,等. 电力电缆的排管敷设方式[J]. 电力建设, 2011, 32(3): 121-123.
CHEN B, FANG X Y, LANG X J, et al. Electric power laid in pipes[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(3): 121-123 (in Chinese).

[6] BROWN V L, BARTHOLOMEW C L. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(1): 34-39.

[7] AL-SALLOUM A Y, ALSAYED S H, ALMUSALLAM T H, et al. Some design considerations for concrete beams reinforced by GFRP bars[C]. First International Conference on Composite in Infrastructure. Tucson: TRIS, 1996: 318-331.

[8] BENMOKRANE B, CHAALLAL O, MASMOUDI R. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars[J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(1): 46-55.

[9] THERIAULT M, BENMOKRANE B. Effects of FRP reinforced ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(1): 7-15.

[10] TOUTANJI H, DENG Y. Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(1): 69-74.

[11] VIJAY P V, GANGARAO H V S. Bending behavior and deformability of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete members[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6): 834-842.

[12] EL-NEMR A, AHMED E A, BENMOKRANE B. Flexural behavior and serviceability of normal-and high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(6): 1077-1088.

[13] GOLDSTON M, REMENNIKOV A, SHEIKH M N. Ex-

- perimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading [J]. *Engineering Structures*, 2016, 113: 220-232.
- [14] 高丹盈, 朱海堂, 李趁趁. 纤维增强塑料筋混凝土梁正截面抗裂性能的研究[J]. *水力发电学报*, 2003(4): 54-59.
- GAO D Y, ZHU H T, LI C C. Research on the cross-sectional anti-cracking behavior of concrete beam with fiber reinforced polymer bars[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2003(4): 54-59 (in Chinese).
- [15] 张海霞, 朱浮声. FRP 筋混凝土梁非线性全过程分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(10): 1009-1012.
- ZHANG H X, ZHU F S. Nonlinear full-range analysis of concrete beam reinforced with FRP rods [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(10): 1009-1012 (in Chinese).
- [16] 张海霞, 朱浮声, 李纯. FRP 筋混凝土梁正截面极限抗弯承载力的性能研究[J]. *混凝土*, 2005(12): 14-17.
- ZHANG H X, ZHU F S, LI C. Calculation method and ultimate flexural capacity of concrete beam reinforced with FRP rods[J]. *Concrete*, 2005(12): 14-17 (in Chinese).
- [17] 郑永峰, 徐新生. 纤维聚合物筋混凝土梁正截面承载力的计算方法[J]. *高科技纤维与应用*, 2006, 31(6): 31-36.
- ZHENG Y F, XU X S. Calculation method of flexural capacity of FRP-reinforced concrete beam [J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2006, 31(6): 31-36 (in Chinese).
- [18] 翁春光, 祁皓. FRP 筋混凝土简支梁试验研究[J]. *福建建筑*, 2007, 108(6): 37-39.
- WENG C G, QI A. Experimental studies on mechanical behavior of concrete beam reinforced with FRP bars[J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2007, 108(6): 37-39 (in Chinese).
- [19] 薛伟辰, 郑乔文, 杨雨. FRP 筋混凝土梁正截面抗弯承载力设计研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(1): 79-85.
- XUE W C, ZHENG Q W, YANG Y. Design recommendations on flexural capacity of FRP-reinforced concrete beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(1): 79-85 (in Chinese).
- [20] 王作虎, 杜修力, 詹界东. 有粘结和无粘结相结合的预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯承载力研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(3): 67-74.
- WANG Z F, DU X L, ZHANG J D. The flexural capacity of concrete beams prestressed with bonded and/or unbonded FRP tendons[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(3): 67-74 (in Chinese).
- [21] 朱虹, 董志强, 吴刚, 等. FRP 筋混凝土梁的刚度试验研究和理论计算[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(11): 44-53.
- ZHU H, ZHU Z Q, WU G, et al. Experimental study and theoretical calculation on flexural stiffness of concrete beams reinforced with FRP bars[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(11): 44-53 (in Chinese).
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011 (in Chinese).
- [23] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1R-06[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese).