

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.002



玻璃纤维增强复合桩水平承载特性 试验与数值模拟

徐宁, 张建伟, 李荣翔

(河南大学 土木建筑学院; 岩土与轨道交通工程研究所, 河南 开封 475004)

摘要: 玻璃纤维增强复合材料(GFRP)具有轻质、抗拉强度高、耐腐蚀性和抗疲劳等优点, 广泛应用于土木工程领域。GFRP 复合桩是一种通过在普通混凝土桩身外包 GFRP 纤维布以增强其抗弯性能的新型桩。通过开展室内模型试验, 分别得到了水平荷载下 RC 桩和 GFRP 复合桩桩顶位移、桩身弯矩的试验结果, 对比分析了两者的水平承载特性。利用有限元分析软件 ABAQUS 对水平荷载作用下的 GFRP 复合桩进行数值模拟, 试验结果与数值模拟结果拟合较好。结果表明: GFRP 复合桩与 RC 桩的桩身弯矩分布规律基本一致, 最大弯矩在 $1/4 \sim 1/3$ 桩长处, GFRP 复合桩的水平承载特性优于 RC 桩; 不改变桩身截面, 仅在一层 GFRP 单向布的约束下, GFRP 复合桩的弹性模量、极限水平承载力均有一定的提高。

关键词: 玻璃纤维复合材料; 承载能力; 约束混凝土; GFRP 复合桩; 数值分析

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0009-07

Test and numerical study on the bearing capacity of GFRP composite pile under lateral loadings

Xu Ning, Zhang Jianwei, Li Rongxiang

(School of Civil Engineering and Architecture; Institute of Geotechnical and Rail Transport Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, P. R. China)

Abstract: Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) was widely used in civil engineering considering its advantages of lightweight, high tensile strength, corrosion resistance and fatigue resistance, etc. GFRP composite pile is a new type of pile reinforced by GFRP upon RC pile to enhance its bending resistance. The lateral displacement and bending moment of the RC pile and GFRP composite pile were obtained and analyzed via the model test. The lateral bearing capacity of both two pile types were compared and analyzed. The GFRP composite pile under lateral loadings was simulated by the FEA software ABAQUS. The experimental results are in good agreement with the numerical simulation results, both showing that the bending moment distribution of GFRP composite pile was consistent with the RC pile, and the

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51508163, 51608071); 河南省科技厅产学研合作项目(132107000025)

作者简介: 徐宁(1992-), 男, 主要从事桩基工程研究, E-mail: 837879576@qq.com.

张建伟(通信作者), 男, 副教授, E-mail: zjw101_0@163.com.

Received: 2017-10-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51508163, 51608071); Industry-University-Research Collaboration by Science & Technology of Henan Province(No. 132107000025)

Author brief: Xu Ning (1992-), main research interest: pile foundation engineering, E-mail: 837879576@qq.com.

Zhang Jianwei(corresponding author), associate professor, E-mail: zjw101_0@163.com.

maximum bending moment occurred nearby the depth of 1/4 to 1/3 pile length. However, the horizontal load-bearing capacity of GFRP composite pile was much greater. The elastic modulus and lateral ultimate capacity of GFRP composite pile covered with a layer of GFRP unidirectional fabric can be improved to a certain extent.

Keywords: GFRP; bearing capacity; confined concrete; GFRP composite pile; numerical analysis

传统桩基主要以承受竖向荷载为主,但在港口码头、基坑以及边坡支护等工程中,桩基往往以承受水平荷载为主,为提高桩基水平承载力,传统方法往往是增大桩基横截面尺寸,不仅增加了水泥等材料的用量,并且加大了施工难度和经济投入量。FRP 材料有着优异的工程特性,FRP 复合桩是将 FRP 材料与混凝土桩相结合,发挥 FRP 材料的工程特性。

虽然近年来学者们对 FRP 材料在桩(柱)方面的研究有一定的发展,但在水平承载力研究方面还相对较少。Mirmiran 等^[1]在 1996 年就提出了采用 FRP 壳代替钢管的 FRP 复合桩以用于腐蚀环境和地震带地区,并用模型分析验证了 FRP 材料能够提高桩的强度和延性。Zyka 等^[2]对 FRP 空心钢管桩进行了试验分析研究,Murugan 等^[3]对 GFRP 复合桩在粘质砂土中进行了水平荷载下极限承载能力研究,实验表明 GFRP 材料能够提高桩的水平承载能力。戴国亮等^[4]利用理论计算分析方法,将 FRP 复合桩作为一个横向的弹性地基梁,采用文科尔地基模型研究桩在水平作用下的挠度曲线,通过挠曲线微分方程的解答,给出了 FRP 复合桩的截面承载力计算应力模型。徐岱^[5]通过模型试验,得出了圆形截面 GFRP 筋混凝土受弯构件的正截面承载力计算方法,并且通过室内试验和有限元分析对 GFRP 筋的受力性能及 GFRP 筋混凝土构件的受弯性能进行了研究。舒光波^[6]对 FRP 管桩在双向水平循环作用下与土的相互作用进行了研究,以模型试验为主要手段,对水平循环荷载作用下加载频率、循环次数、基桩埋深、加载方式对 FRP 基桩的桩土相互作用影响进行了试验研究,得出 FRP 基桩在水平循环荷载作用下表现出的桩土相互作用和常规桩的规律基本一致。此外,很多学者也对 FRP 复合桩进行了一定的研究^[7-12]。

通过室内试验研究了普通钢筋混凝土桩与 GFRP 复合桩的水平承载特性,对相同条件下两种试验桩的桩顶水平位移和桩身弯矩进行了探讨,研究结果对 GFRP 材料的进一步应用提供一定参考。

1 室内试验

1.1 试验设备

1) 试验槽与加载系统 试验在河南大学结构实验室内进行,试验槽由 4 块厚度 6 mm 的钢板以及 4 根角钢通过螺栓拼接而成,尺寸大小为 4 m×2 m×2 m,能够满足试验要求。水平加载通过钢绳利用滑轮装置引导,将桩头与吊篮连接,利用砝码逐级施加水平荷载,达到规范要求时停止加载。



图 1 试验槽和数据采集装置

Fig. 1 Test tank and data acquisition device

2) 试验桩 试验桩采用钢筋混凝土预制桩、GFRP 布加固的钢筋混凝土预制桩(以下简称复合桩)。采用内径 70 mm,长 1 500 mm 的 PVC 管作为试验桩模具浇筑。钢筋笼采用 4 根直径 6 mm 的钢筋绑扎,箍筋采用直径 2 mm 的铁丝代替,桩身的混凝土采用细粒石作为骨料,标号 325 普通矿渣硅酸盐水泥和中粗砂,质量配合比为水泥:水:砂子:石子=1:0.48:1.68:3.44,抗压强度为 C20。用某公司产 E44 型环氧树脂和 T31 固化剂将养护后的普通桩按照规范要求^[13],用 GFRP 布对混凝土桩进行缠绕包裹,其中,纤维方向沿着桩身纵向粘贴。

表 1 GFRP 布物理参数

Table 1 Physical parameters of GFRP fabric

厚度 d/mm	抗拉强度 σ_b/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率 $\delta/\%$
0.167	2 039	7.6×10^4	2.3

3)试验桩的埋置 试验土采用某基坑开挖土,土质为粉质砂土。采用分层填筑法将试验桩埋置入试验槽内,最终填土体积为 2 m×2 m×2 m。试验桩直径 $\phi 70$ mm,约为试验槽内土体的高度及宽度的 1/28,尺寸比例合适,可忽略边界条件对试验的影响。

表 2 土的物理参数
Table 2 Physical parameters of soil

密度 ρ / ($g \cdot cm^{-3}$)	内摩擦 角 φ /($^{\circ}$)	压缩模量 E_s /MPa	粘聚力 c / kPa
1.95	21	12.5	4.3

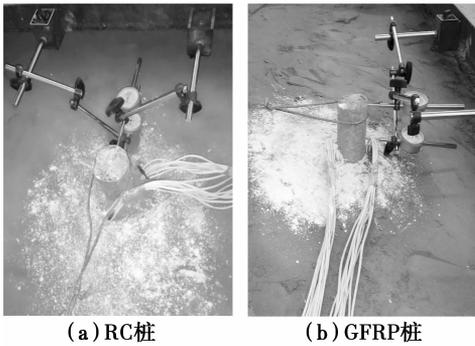


图 2 RC 桩与 GFRP 桩的布置

Fig. 2 The plan of RC pile and GFRP pile

4)试验元件 沿着水平荷载加载方向在桩身的前后黏贴应变片,每隔 15 cm 布置应变片,用以测量桩身弯矩。在埋置桩的时候桩头露出泥土表层 10 cm,在桩顶和泥面处各放置一个百分表,用以测量桩顶位移。

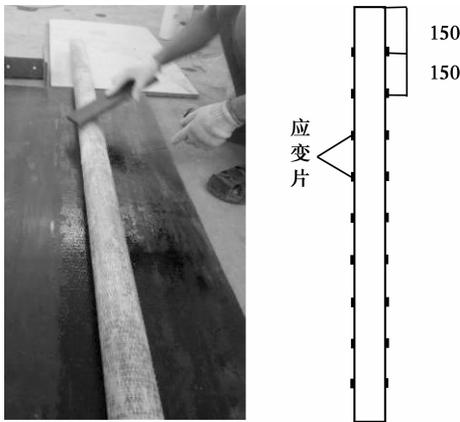


图 3 包裹 GFRP 布及应变片的布置

Fig. 3 Wrap GFRP fabric and the position of strain gauges

5)弹性模量的测试 在实验室利用反力架对两根桩进行了测试,通过对桩身施加已知的集中荷载,得到桩身各界面处的弯矩大小,然后,通过应变采集

系统收集桩身界面处的应变,最后根据强度理论得出桩身的弹性模量 E 。



图 4 弹性模量的测量

Fig. 4 Measurement of the elastic modulus

6)弹性模量的计算 在桩中点处施加集中力,并收集各桩身截面处的应变大小,经过计算求取平均值得出 RC 桩的弹性模量 $E = 2.55 \times 10^4$ MPa、GFRP 复合桩的弹性模量 $E = 2.99 \times 10^4$ MPa。GFRP 复合桩的弹性模量相比 RC 桩的弹性模量增大了 0.44×10^4 MPa,是 RC 桩的 1.17 倍。两根桩的截面直径差值很小,但 GFRP 桩的抗弯刚度更大,GFRP 布和环氧树脂胶层,贡献了一定的承载力。

1.2 试验结果

根据规范要求^[14-15],并对百分表和应变片采集的数据进行处理分析,得到试验桩的桩顶荷载-位移曲线和桩身弯矩分布曲线。

1)桩顶位移 由图 5 可以看出随着荷载的增大,水平位移逐渐增大,两种桩的水平位移差值也逐渐增大。当水平荷载达到 2 kN 时 RC 桩的水平位移为 10.03 mm,GFRP 复合桩的水平位移为 7.81 mm;试验结果表明 GFRP 复合桩相对于 RC 桩,2 kN 水平荷载作用下桩顶位移减少了 22.13%,是 RC 桩桩顶水平位移的 0.78 倍。

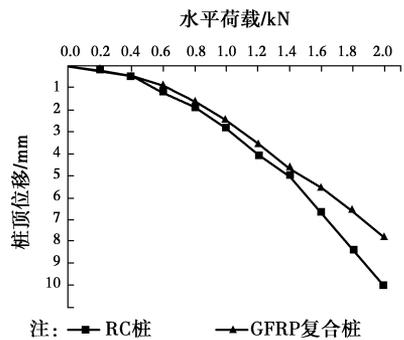


图 5 水平荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-horizontal displacement curves

2)桩身弯矩 两种桩的桩身弯矩在各级水平荷载作用下随着埋深变化曲线如图 6、图 7 所示,可以

得出以下结论:两桩的桩身弯矩随着埋深的增加逐渐增大,在埋深达到 0.5 m(约 1/3 最大埋深)左右时弯矩达到最大,然后逐渐减小。需要指出的是,RC 桩在埋深达到 0.9~1.1 m(约 2/3 最大埋深)左右时出现弯矩零点,并且下部桩身所受弯矩不大;GFRP 复合桩的桩身弯矩零点位置明显靠下,GFRP 复合桩的桩身弯矩传递更为有效。

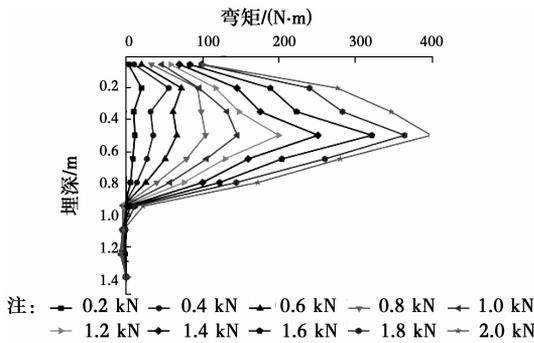


图 6 RC 桩桩身弯矩

Fig. 6 The moment distribution of RC pile

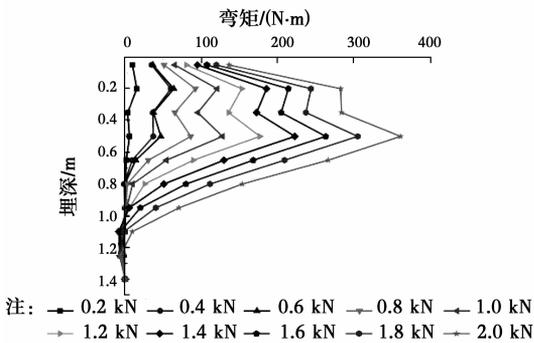


图 7 GFRP 桩桩身弯矩

Fig. 7 The moment distribution of GFRP pile

与 RC 桩相比,GFRP 复合桩在截面没有改变的情况下,仅利用环氧树脂胶将 GFRP 单向布与 RC 桩粘结在一起,水平承载能力有明显的提高。主要原因是 GFRP 布的抗拉强度远远高于混凝土的抗拉强度,GFRP 复合桩的抗弯刚度大于 RC 桩;在桩受到水平荷载作用时,GFRP 布能够分担一部分受拉区混凝土所受到的作用力。因此,相对于 RC 桩,GFRP 复合桩的水平承载能力有明显的提高。

2 三维有限元分析

有限元软件 ABAQUS 在处理非线性问题上具有独特的优势,张建伟等^[16]、黄艳等^[17]利用 ABAQUS 与试验结果进行了对比,数值分析均能较好的符合试验结果。

2.1 有限元模型

土体采用摩尔-库伦模型,混凝土材料采用混凝

土损伤模型^[18-19],均使用 C3D8R 八节点六面体单元;土体参数与试验参数保持一致,混凝土损伤塑性模型中应输入膨胀角 ψ 、偏心率 ϵ 、双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度之比 f_{b0}/f_{c0} 、拉伸子午面上和压缩子午面上的第二不变应力不变量之比 K 、粘性系数 μ 。模型参数选取如表 3 所示。

表 3 混凝土损伤塑性参数

Table 3 Parameters of concrete plastic damage

$\psi/(\circ)$	$\epsilon/\%$	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
30	0.1	1.16	0.67	0.001

钢筋采用弹性模型,T3D2 两点线性三维桁架单元内置嵌入混凝土模型中;GFRP 布采用 S4R 曲面薄壳单元,定义为材料为各向异性的复合层,与物理参数保持一致;用绑定(tie)的方法使 GFRP 和混凝土粘结^[17]。桩底与土的接触设置为硬接触(Hard),桩和 GFRP 布与土的接触法向作用设置为硬接触(Hard),切向作用采用摩尔-库伦罚函数,摩擦系数取 0.35^[20]。模型中土体底部边界条件设定为固定约束,侧向土体边界条件设置为转角-位移,荷载施加于桩顶中心。

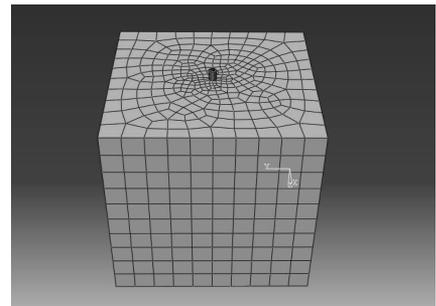


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

3 试验结果

3.1 水平位移

根据室内试验和数值模拟,得到两种桩的水平荷载-位移曲线如下:

由试验和数值模拟结果可知:室内试验为,RC 桩在水平荷载达到 2 kN 水平位移达到 10.03 mm,GFRP 复合桩在水平荷载 2 kN 时水平位移 7.81 mm;数值模拟的结果为,2 kN 水平荷载时 RC 桩的桩顶水平位移 9.66 mm,GFRP 桩的桩顶水平位移 7.48 mm。两桩的水平荷载-位移曲线如图 9 所示,可初步得出以下结论:

随着荷载的增大,水平位移逐渐增大,两种桩的

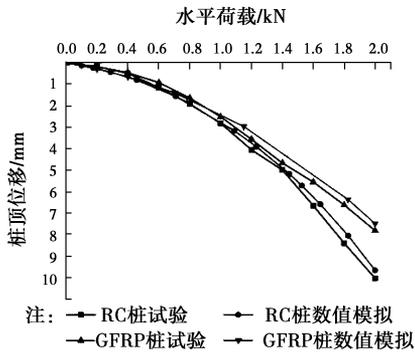


图9 水平荷载-位移曲线
Fig. 9 Horizontal load-displacement curves

水平位移差值也逐渐增大。室内试验表明 GFRP 复合桩相对于 RC 桩, 2 kN 水平荷载作用下桩顶位移减少了 22.13%, 是 RC 桩桩顶水平位移的 0.78 倍; 数值模拟下 GFRP 复合桩的位移减少了 22.57%, 是 RC 桩桩顶水平位移的 0.77 倍, 试验与数值模拟结果相差不大。并且, 从图中可以看出数值模拟与室内试验水平荷载-位移曲线虽有一定偏差, 但总体上能够较好的拟合在一起, 反映出实测结果与数值模拟结果相互印证。

3.2 弯矩对比

两种桩的桩身弯矩在 2 kN 水平荷载作用下随埋深变化的曲线如图 10 所示。

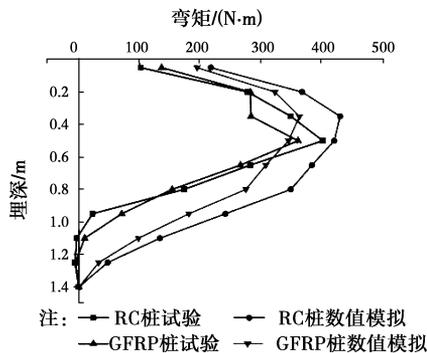


图 10 2 kN 水平荷载下桩身弯矩

Fig. 10 The moment distribution at 2 kN horizontal load

1) RC 桩和 GFRP 复合桩的试验曲线与数值模拟得到的桩身弯矩曲线拟合较好。考虑到试验桩本身不可避免的缺陷, 应变片与混凝土的粘结强度不如 GFRP 材料等外部因素, 总体上 GFRP 桩的桩身弯矩实测值与数值模拟的曲线图拟合更好。

2) 数值模拟结果表明两桩身最大弯矩发生在埋深 0.35 m (约 1/4 最大埋深) 处, 两桩的桩身弯矩曲线变化趋势基本相同。2 kN 水平荷载下 GFRP 复合桩的桩身最大弯矩约是 RC 桩的 0.85 倍。GFRP 桩的桩身弯矩明显小于 RC 桩, 这是由于在粘结牢

固的情况下 GFRP 布在桩身发生变形时发挥出其优秀的抗拉能力, 承受了一部分的弯矩, 在不改变桩身截面大小的情况下, GFRP 复合桩的弯矩减小, 降低桩身的变形。

4 结论

GFRP 复合桩是利用 GFRP 布与普通 RC 桩相结合的一种组合桩, 为了探究其水平承载特性, 通过室内试验与数值模拟将其与截面面积相同的圆型普通 RC 桩进行了对比, 主要结论如下:

1) 室内试验结果表明, 在 GFRP 布的约束作用下, GFRP 复合桩的弹性模量是 RC 桩的 1.17 倍, 2 kN 水平荷载作用下, GFRP 复合桩的水平位移是 RC 桩的 0.78 倍, 桩身最大弯矩为 RC 桩的 0.90 倍。利用 GFRP 布对桩进行约束后, GFRP 复合桩能够有效的发挥 GFRP 材料的物理特性, 减少水平荷载作用下混凝土桩的变形与开裂, 试验桩的水平承载能力得到明显的提升。

2) 数值模拟的结果与室内试验有些许差别, 2 kN 水平荷载作用下, GFRP 复合桩的水平位移是 RC 桩的 0.77 倍, 桩身最大弯矩是 RC 桩的 0.85, 数值模拟结果同样能够体现出 GFRP 复合桩优秀的水平承载特性。ABAQUS 软件建模过程中部件的大小属于无量纲, 模型结果不仅能够反应室内试验的结果, 同样能够体现出在实际工程中相同长细比下 GFRP 复合桩的水平承载能力, 能够计算不同桩在各种条件下的变形状况。

3) 室内试验与数值模拟的水平荷载-位移曲线、桩身弯矩变化曲线均能够较好的拟合。桩顶水平位移随着荷载的增大逐渐增加; 弯矩随着埋深的增大逐渐增大, 室内试验在桩长约 1/4 处达到最大, 数值模拟在桩长约 1/3 处达到最大, 而后逐渐减小。两者均符合弹性长桩的变化规律, 并且两者能够相互印证, 进一步提高了试验和数值模拟的可信度。

通过室内试验研究了 GFRP 复合桩的水平承载特性, 并采用数值模拟的方法进行验证, 说明 GFRP 复合桩在实际工程中运用的可行性。虽然, GFRP 复合桩相对于 RC 桩的造价较高, 但实际工程中 GFRP 复合桩可以通过缩减直径在一定程度上减少混凝土的用量, 并且在一些特殊的腐蚀环境和海洋工程中, GFRP 复合桩更能发挥其优良的防腐性和耐久性, 具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. A new concrete-filled hollow FRP composite column [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1996, 27(3): 263-268.
- [2] ZYKA K, MOHAJERANI A. Composite piles: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 107: 394-410.
- [3] MURUGAN M, NATARAJAN C, MUTHUKKUMARAN K. Experimental investigation on GFRP strengthened RC piles under lateral loads [J]. *India Geotechnical Journal*, 2014, 2(1): 15-28.
- [4] 戴国亮, 周香琴, 龚维明. FRP 钢管混凝土复合灌注桩水平承载力分析 [C]// 中国土木工程学会、全国 FRP 及工程应用专业委员会. 工业建筑 (2009·增刊): 第六届全国 FRP 学术交流会论文集, 郑州, 2009: 5.
- DAI G L, ZHOU X Q, GONG W M. Bearing capacity analysis under horizontal force of FRP composite concrete-filled steel tube pile [C]// China Civil Engineering Society, FRP Application Committee of CCES. *Industrial Construction (2009·Supplement)-The Sixth National FRP Academic Conference Proceedings*, Zhengzhou, 2009: 5. (in Chinese)
- [5] 徐岱. GFRP 筋混凝土圆截面构件抗弯性能研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- XU D. Study on flexural behavior of concrete beam of circular section reinforced with GFRP bars [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [6] 舒光波. 双向水平循环荷载作用下 FRP 复合桩-土相互作用试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2013.
- SU G B. Experimental research on FRP composite pile-soil interaction under bidirectional horizontal cyclic loading [D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese)
- [7] WANG W, SHEIKH M N, HADI M N S, et al. Behaviour of concrete-encased concrete-filled FRP tube (CCFT) columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 256-268.
- [8] GIRALDO J, RAYHANI M T. Load transfer of hollow Fiber-Reinforced Polymer (FRP) piles in soft clay [J]. *Transportation Geotechnics*, 2014, 1(2): 63-73.
- [9] VIJAY P V, SOTI P R, GANGARAO H V S, et al. Repair and strengthening of submerged steel piles using GFRP composites [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(7): 04016038.
- [10] 顾冬生, 吴刚, 吴智深, 等. FRP 加固钢筋混凝土圆柱侧向变形能力研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2011(1): 17-23, 30.
- GU D S, WU G, WU Z S, et al. Deformation capacity of FRP confined reinforced concrete circular columns under simulated seismic loading [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental*, 2011(1): 17-23, 30. (in Chinese)
- [11] 胡波, 王建国. FRP 约束混凝土柱强度和极限应变模型比较 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2009(5): 9-15.
- HU B, WANG J G. Comparison of strength and ultimate strain models of concrete columns confined with FRP [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental*, 2009(5): 9-15. (in Chinese)
- [12] 周长东, 白晓彬, 吕西林, 等. 环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱应力-应变关系 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, (Sup1): 179-185.
- ZHOU C D, BAI X B, LU X L, et al. Stress-Strain relationship of circular concrete columns Confined with lateral pre-tensioned FRP [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental*, 2012 (Sup1): 179-185. (in Chinese)
- [13] 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程: CECS 146: 2003 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2007.
- Technical Specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforces polymer laminate: CECS 146: 2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)
- [14] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 建筑地基基础设计规范: GB 5007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of buildings foundations: GB 5007—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 张建伟, 刘汉龙, 陈育民. PCC 桩水平承载特性足尺模型试验与数值模拟 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(3): 289-294.
- ZHANG J W, LIU H L, CHEN Y M. Full-scale model tests and numerical simulation on behavior of cast-in-place concrete pipe piles with large diameter under lateral loads [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(3): 289-294. (in Chinese)
- [17] 黄艳, 亓路宽. FRP 布约束混凝土圆柱轴心受压性能非线性有限元分析 [J]. *中国铁道科学*, 2008(1): 46-50.
- HUANG Y, QI L K. Nonlinear finite element analysis

- of axially loaded FRP confined concrete cylinder[J]. China Railway Science, 2008(1): 46-50. (in Chinese)
- [18] 刘劲松,刘红军. ABAQUS 钢筋混凝土有限元分析[J]. 装备制造技术, 2009, 1(6): 69-70.
LIU J S, LIU H J. ABAQUS finite element analysis of reinforced concrete [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009, 1(6) : 69-70. (in Chinese)
- [19] SIMULATE CO D S. ABAQUS analysis user's manual [M]. USA: Providence RI, 2008.
- [20] 胡明源,张建伟,王宏权,等. 复杂荷载下斜坡上单桩水平承载特性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 584-590.
HU M Y, ZHANG J W, WANG H Q, et al. Study on the bearing characteristics of pile on slope under complex loads [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2017, 47(5): 584-590. (in Chinese)

(编辑 胡玲)