

GFRP 静压桩挤土效应模型试验研究*

杨果林^{1†}, 魏赛赛¹, 关耀², 余文华²

(1.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2.中建五局土木工程有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:为掌握 GFRP 桩-土相互作用机理及压桩动态力学效应, 开展 GFRP 静压桩模型试验研究, 对表土隆起量和径向挤土压力进行分析. 分析表明: 表土隆起量在径向距离在 $1.8D$ (桩径) 处达到峰值. 此峰值随沉桩深度的增加而减小, 数值最终大致稳定在 $0.05D$; 径向挤土压力随沉桩深度的增加而先增大后减小, 当沉桩深度大致等于测点深度时, 测点处径向挤土压力达到峰值; 峰值径向挤土压力 P_m 随着径向距离的增大不断衰减. 当径向距离达到 $3D$ 时, P_m 衰减至峰值径向挤土压力的最大值 P_{mm} 的 30% 以下; P_{mm} 出现在桩身中下部, 数值大致与桩径成正比.

关键词:模型试验; 挤土效应; 玻璃纤维增强复合材料桩; 表土隆起量; 径向挤土压力
中图分类号: TU47 **文献标志码:** A

Model Test Research on Squeezing Effect of Jacked GFRP Pile

YANG Guolin^{1†}, WEI Saisai¹, GUAN Yao², YU Wenhua²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Civil Engineering Co Ltd, China Construction Fifth Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to investigate the interaction between GFRP pile and soil as well as dynamical mechanics effect in driving pile, model test of jacked GFRP piles was conducted, and the heave of topsoil and radial squeezing pressure were analyzed. The results show that the heave of topsoil reaches the maximum value when the radial distance is equal to 1.8 times the pile diameter. The maximum value decreases with the increase of the depth of piling and eventually stabilizes at about 5 percent of pile diameter. Radial squeezing pressure in a certain depth first increases and then decreases with the increase of the depth of piling, and reaches the maximum value when the depth of piling is equal to the depth of measure point. The maximum value of radial squeezing pressure, P_m , decreases with the increasing radial distance. When the radial distance increases to be three times of the pile diameter, P_m reduced to thirty percent of P_{mm} (i.e., the peak value of P_m) or less. P_{mm} appears at the lower part of the pile, whose value is roughly in proportion to the pile diameter.

Key words: model tests; squeezing effect; glass fiber reinforced polymer (GFRP) pile; heave of topsoil; radial earth pressure

* 收稿日期: 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478484, 51778641), National Natural Science Foundation of China(51478484, 51778641); 中建五局土木工程有限公司立项项目(02012016YN77, 02012016YN89), Civil Engineering Co Ltd of China Construction Fifth Engineering Bureau(02012016YN77, 02012016YN89)

作者简介: 杨果林(1963-), 男, 湖南桃江人, 中南大学教授, 博士生导师
通讯联系人, E-mail: yangguolin6301@163.com

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)是由高性能纤维和树脂基体按比例混合加工而成的一种新型复合材料,当所用加强纤维为玻璃纤维时便称作玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP),具有轻质高强、耐腐蚀、耐疲劳的特点^[1].在工程结构中使用 GFRP 材料可以很大程度减少传统材料由于腐蚀等造成各种破坏和损失,具有广阔的应用前景和经济效益^[2-6].

美国在 20 世纪 80 年代就开始使用 GFRP 桩,但大部分是用于海岸防护桩,轻型结构桩基和试验桩^[7].由于缺乏足够的研究、现场工程实例和设计施工规范,GFRP 桩还没有在工程上被广泛地应用^[8].国外学者对 GFRP 桩的性能进行了一些研究.如:Giraldo 等^[9]利用模型试验研究了 FRP 管桩在原状粘性土中的竖向和横向承载力性能,并与钢管桩进行了对比,试验结果表明 FRP 桩可以作为承重桩使用;Guades 等^[10]利用试验研究了 FRP 桩在沉桩冲击荷载下影响 FRP 材料损伤的因素,并利用能量分析理论预测 FRP 桩在冲击荷载下 FRP 材料的损伤,对 FRP 桩沉桩具有指导作用;Iskander 等^[11]应用数值模拟分析了 FRP 桩的沉桩性能,结果表明材料本身的比重和模量是影响沉桩性能的关键因素.

GFRP 桩属于挤土桩,挤土桩在沉桩过程中,尤其是在软土地区会产生明显的挤土效应,对工程造成不良影响^[12].但目前关于 GFRP 静压桩挤土效应的试验研究较少.罗战友等^[13]、赵明华等^[14]和雷华阳等^[15]通过数值模拟发现桩-土界面摩擦参数是影响静压桩挤土效应的重要因素;Giraldo 等^[16]通过直剪试验发现 FRP-黏土界面摩擦角要比钢材-黏土界面摩擦角大 5%~19%,比混凝土小 12%~23%,所以有理由认为 GFRP 桩的挤土效应与混凝土桩和钢管桩有着不同的发展规律.因此,本文通过模型试验对 GFRP 桩的挤土效应进行研究,以求为 GFRP 桩作为承重桩的设计起指导作用.

1 试验方案设计

1.1 试验模型箱

试验采用的模型箱以角钢为骨架,长宽高尺寸为 100 cm×100 cm×150 cm,底部及四侧壁均为钢板焊接.为保证模型箱侧壁的刚度,外侧壁在竖向和横向上正交地焊接槽钢,在一对对称的外侧壁上焊接槽钢加高模型箱,并在同一高度水平焊接角钢,

用来在压桩时提供反力.

1.2 模型桩

Ashford 等^[17]通过现场试验发现 FRP 桩相对较低的动刚度限制了沉桩深度,由此本试验中模型桩的长径比控制为 10~25.

模型桩为 3 根 GFRP 桩,直径分别为 38,75 和 92 mm,壁厚依次为 4,6 和 8 mm.桩长均为 100 cm,使用电动液压千斤顶匀速沉桩加载,加载速度为 100 N/min,单次沉桩深度为 15 cm,共沉入 90 cm.

1.3 试验土样

试验土样采用重塑黏土.为保证填土均匀,填土时逐层填铺,每层铺设 15 cm,总填土高度 120 cm.每层土填铺时,先采用落雨式填土方式把固定质量(260 kg)的土粒均匀地撒入模型箱,找平后,击实到指定高度.土体填筑完成后静置 24 h,再进行压桩试验.模型箱中土体主要物理力学参数见表 1.

表 1 模型用土的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil in model

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙 比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$
22	1.77	0.53	61	27	10.7	6.1

为防止产生界面效应,在上层土体铺设前,把下层击实面刮毛.填筑过程中将土压力盒按照试验方案埋设在相应位置,导线归至一处并从模型箱内侧壁引出.模型箱中土样在进行单根桩的压桩试验后,需清理干净,再次填土后方可进行下一个模型桩的沉桩试验.

1.4 监测点布设

试验拟量测 2 类数据:1)表土隆起量,由百分表测得.2)水平挤土压力,由土压力盒测得.测量仪器参数见表 2,具体布置见图 1.

表 2 测量仪表参数

Tab.2 Parameters of measuring instruments

百分表			土压力盒		
型号	量程/mm	灵敏度/mm	型号	量程/MPa	灵敏度/MPa
LINKS/ 哈量/ 18-35	10	0.01	JMZX- 5006AT	0.6	0.001

2 试验结果分析

2.1 表土隆起量分析

为研究沉桩过程中表土隆起量的变化规律,在

以桩外壁为起点,径向距离分别为 5, 10, 15, 25 和 35 cm 处架设百分表进行量测,具体布置见图 1.

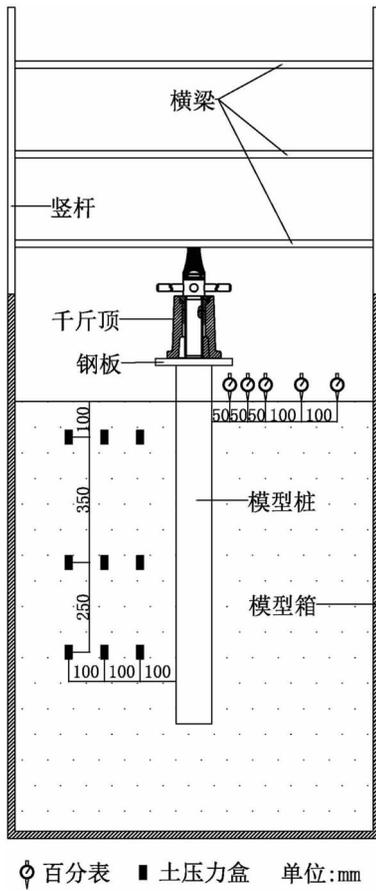
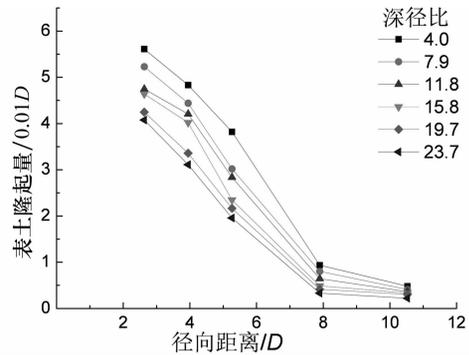


图 1 模型箱
Fig.1 Model box

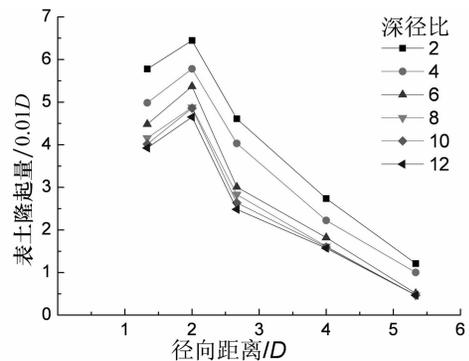
为研究挤土效应的一般规律,分析数据前,对沉桩深度、径向距离和表土隆起量按照桩径进行归一化处理.为描述沉桩动态的过程引入变量深径比 λ , 定义为沉桩深度与桩径的比值,即 $\lambda = h/D$.图 2 为各个桩径的 GFRP 桩沉桩到不同深度时,表层土体的隆起量.

由图 2 可知,经归一化处理后,直径 75 mm 和 92 mm 模型桩的表土隆起量都呈单峰分布,且都在径向距离为 $1.8D$ (桩径) 时达到峰值.对于 38 mm 模型桩,由于缺少较小径向距离处的表土隆起量测量值,所以无法看到其数据呈单峰分布,但是可以看到数据的衰减段.因此,有理由把 75 mm 模型桩和 92 mm 模型桩的表土隆起规律当作一般模式进行分析.

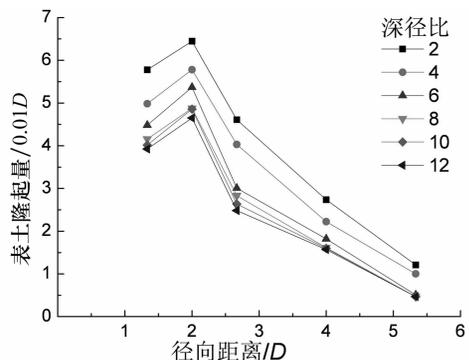
观察发现,表土隆起量的发展趋势类似于数理统计中的 F 分布. F 分布函数在统计学中代表随机变量的分布规律.抛开其数学意义不谈,它的函数图像与表土隆起量的分布相似.因此可以把 F 分布函



(a) 38 mm 模型桩



(b) 75 mm 模型桩



(c) 92 mm 模型桩

图 2 表土隆起量沿径向分布图

Fig 2 Radial distribution of heave of topsoil

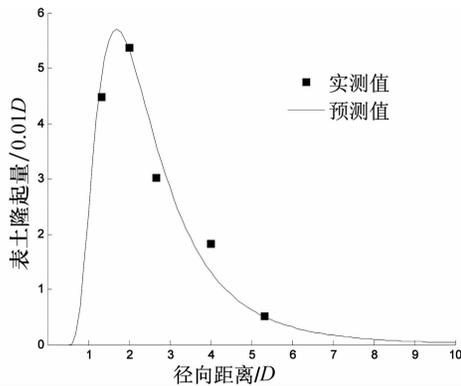
数作为一种拟合函数,对表土隆起量进行拟合,通过对拟合系数的分析,发现表土隆起量的某些固定规律.

本文利用 $F(10, 10)$ 的密度函数,通过纵横轴伸缩及图像的平移,对图 2(c) 的图像进行拟合.用如下函数对 92 mm 模型桩在 6 种深径比时的表土隆起量进行拟合.

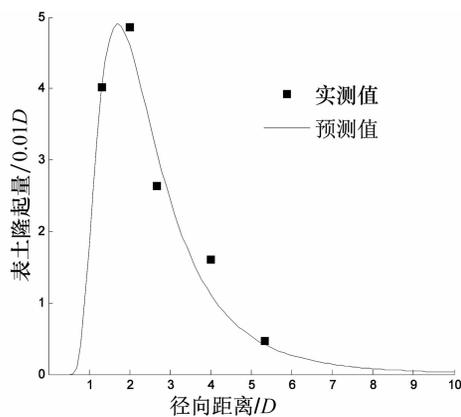
$$S = A \cdot F[B \cdot (x - C)]$$

式中: S 为表土隆起量; A 为纵坐标伸缩系数; $F(x)$ 为 $F(10, 10)$ 的概率密度函数; B 为横坐标伸缩系数; x 为经桩径归一化后的径向距离,即径向距离/桩径; C 为横坐标平移量.拟合结果为: $A = 15.5/\lambda + 5$, $B = 0.57$, $C = 0.52$.为了检验此拟合结

果的一般性,用此结果预测 75 mm 模型桩的表土隆起量,如图 3 所示。



(a)75 mm 模型桩(深径比为 6.0)



(b)75 mm 模型桩(深径比为 10.0)

图 3 预测值与实测值对比图

Fig.3 Comparison between predicted and measured values

拟合系数 B 和 C 为固定值,说明 GFRP 桩的挤土效应有着固定的发展规律.其中 B 决定着表土隆起量的径向分布规律, B 和 C 共同决定了表土隆起量峰值出现的位置.从拟合数据中可以看出,3 根试验桩的表土隆起量峰值均出现在径向距离为 $1.8D$ 处,且径向距离为 $4D$ 时表土隆起量已衰减至峰值的 30%.因此为防止沉桩时造成群桩中的临近桩被拉断,应设置桩心距不小于 4 倍桩径。

拟合系数 A 随着沉桩深度的增大而减小,但减小速度越来越慢,最终趋近于 5. A 决定了表土隆起量的峰值及其在时间上的发展规律.从拟合系数 A 中可以看出:沉桩速度的合理设置可以在一定程度上控制表土隆起量的发展,但沉桩速度与表土隆起量的发展并非简单的线性关系。

表 3 为各文献中表土隆起量的分布规律.各文献中的表土隆起量均有着相似分布规律,仅在峰值大小和出现位置上有所差异.对比可以发现:开口

管桩可以有效减小表土隆起量峰值;GFRP 桩及木桩的峰值出现位置较混凝土桩近,这可能是由桩-土界面摩擦参数的不同造成的。

表 3 表土隆起量分布规律

Tab.3 Distribution of heave of topsoil

文献资料	桩型	表土隆起量峰值	出现位置
文献[18]	混凝土桩	$0.060D$	$2.00D$
文献[19]	混凝土桩	$0.038D$	$4.00D$
文献[20]	木桩	$0.071D$	$1.65D$
文献[21]	混凝土开口管桩	$0.026D$	$2.50D$
本文	GFRP 桩	$0.050D$	$1.80D$

2.2 径向挤土压力分析

为研究静压沉桩过程中土体各处径向挤土压力的变化规律,在径向距离分别为 10 cm,20 cm 和 30 cm 处埋设土压力盒,共埋设 3 层,埋深分别为 10 cm,45 cm 和 75 cm.具体布置见图 1.图 4 为桩径 38 mm 的 GFRP 模型桩沉桩过程中,径向挤土压力随沉桩深度的变化曲线.图 4 中的有序数对代表测点位置,其中第 1 个数字代表径向距离,第 2 个数字代表竖向埋深.桩径 75 mm 和 92 mm 模型桩的测量数据有着相似的规律,此处不予列出。

由图 4(a)可以看出:同一埋深处的径向挤土压力随着径向距离的增加而迅速衰减.由图 4(b)可以看出:径向挤土压力随着沉桩深度的增加而先增大后减小,当沉桩深度大致等于测点埋深时,此测点处的径向挤土压力达到峰值。

过大的峰值挤土压力可能使已施工的桩产生水平位移,甚至造成桩身破坏,对周围环境产生危害^[22].因此,有必要研究峰值径向挤土压力的分布规律.记任一点处出现的峰值径向挤土压力为 P_m 。

根据各测点处的峰值径向挤土压力,使用 Matlab 画出等值线灰度图,即可直观地反映出地基土中 P_m 的分布规律,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在水平方向上, P_m 随着径向距离的增大而迅速衰减;在竖直方向上, P_m 在桩身中下部出现最大值(记为 P_{mm});当径向距离达到 $3D$ 时, P_m 已衰减至最大值的 30% 以下。

图 6 为峰值径向挤土压力的最大值 P_{mm} 与桩径的关系图.由图 6 可知,静压桩的 P_{mm} 与桩径大致成正比,即 GFRP 桩的径向挤土压力并不具有明显的尺寸效应。

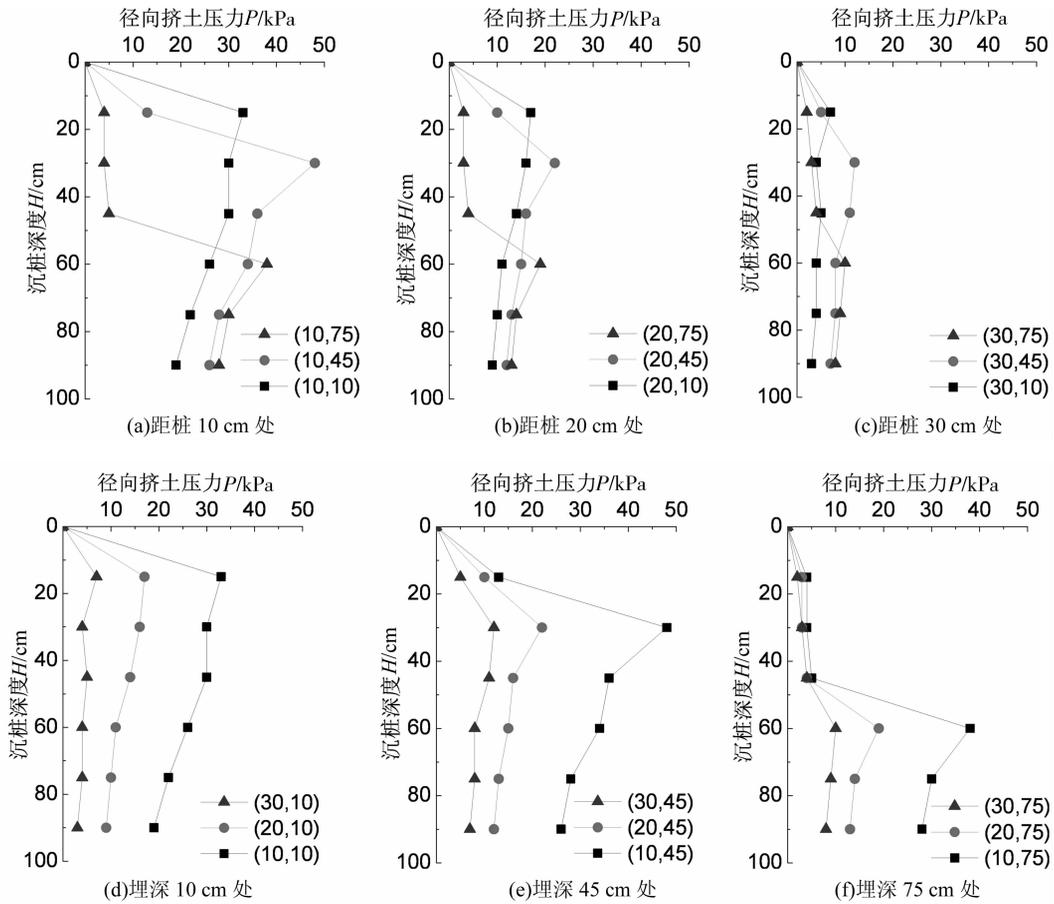


图4 38mm桩径向挤土压力随沉桩深度的变化曲线

Fig.4 Development of radial earth pressure with the piling of 38 mm pile

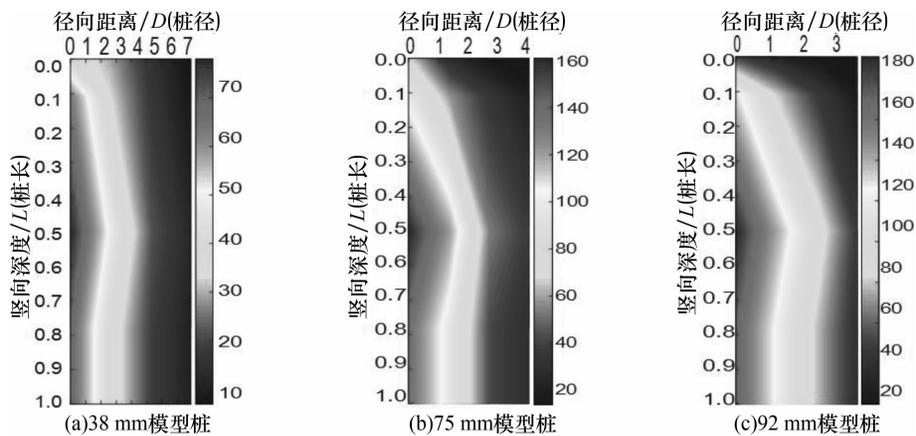


图5 P_m 分布图(kPa)

Fig 5 Distribution of P_m (kPa)

3 结论

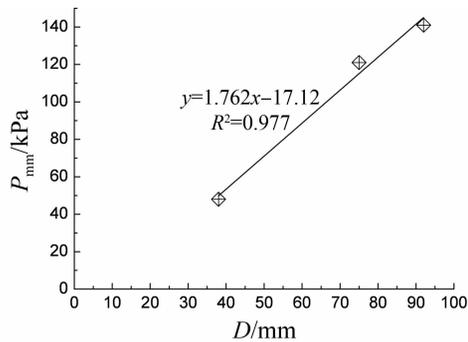
通过模型试验,研究 GFRP 静压桩的挤土效应,分析表土隆起量和径向挤土应力,得出以下结论:

1)表土隆起量随着径向距离的增加先增大后

减小,峰值出现在径向距离 $1.8D$ 处,此峰值随着沉桩深度的增加而减小,数值最终稳定在 $0.05D$ 左右.

2)径向挤土压力随沉桩深度的增加而先增大后减小,当桩端下沉至测点附近时,此处径向挤土压力达到峰值 P_m .

3)随着径向距离的增大,峰值径向挤土压力不断衰减.当径向距离达到 $3D$ 时,峰值径向挤土压力

图 6 $P_{m\max}$ 与桩径的关系图Fig.6 Relationship between $P_{m\max}$ and diameter of pile

P_m 衰减至最大值 $P_{m\max}$ 的 30% 以下。

4) 峰值径向挤土压力的最大值 $P_{m\max}$ 出现在桩身中下部, 数值大致与桩径成正比。

参考文献

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36. (In Chinese)
- [2] 冯鹏, 叶列平, 孟鑫森. FRP 加固与增强金属结构的研究进展[C]//第 22 届全国结构工程学术会议论文集, 第 1 册. 北京: 工程力学杂志社, 2013: 61-80.
FENG Peng, YE Lieping, MENG Xinmiao. Progress in the study of FRP strengthened metallic structures[C]//The 22th National Conference on Structural Engineering. Beijing: Journal of Engineering Mechanics, 2013: 61-80. (In Chinese)
- [3] CHENG Y M, CHOI Y, YEUNG A T, *et al.* New soil nail material—Pilot study of grouted GFRP pipe nails in Korea and Hong Kong[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(3): 93-102.
- [4] 岳清瑞. 我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 23-26.
YUE Qingrui. Present status of research and application of strengthening and repairing technology with carbon fiber reinforced plastics(CFRP) and its outlook in China[J]. Industrial Construction, 2000, 30(10): 23-26. (In Chinese)
- [5] 李荣, 滕锦光, 岳清瑞. FRP 材料加固混凝土结构应用的新领域[J]. 工业建筑, 2004, 34(4): 5-10.
LI Rong, TENG Jinguang, YUE Qingrui. A new technique for strengthening concrete structures[J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 5-10. (In Chinese)
- [6] 周芬, 冷举良, 杜运兴. 基于纤维模型的 FRP 约束混凝土圆柱本构模型研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(5): 46-52.
ZHOU Fen, LENG Juliang, DU Yunxing. Research on the constitutive models of FRP confined concrete cylinder based on fiber models[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(5): 46-52. (In Chinese)
- [7] PANDO M A, EALY C D, FILZ G M, *et al.* A laboratory and field study of composite piles for bridge substructures[J]. Dissertation Abstracts International, 2006, 68(3): 1805-1808.
- [8] SAKR M, NAGGAR M H E, NEHDI M. Interface characteristics and laboratory constructability tests of novel Fiber-Reinforced Polymer/concrete piles[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(3): 274-283.
- [9] 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.
- [10] GUADES E, ARAVINTHAN T, ISLAM M, *et al.* A review on the driving performance of FRP composite piles[J]. Composite Structures, 2012, 94(6): 1932-1942.
- [11] ISKANDER M G, HASSAN M. State of the practice review in FRP composite piling[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(3): 116-120.
- [12] 何耀辉. 静压桩沉桩挤土效应研究及实测分析[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2005: 10-15.
HE Yaohui. The study of compacting effect by static piling driving and the analysis of measured data[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2005: 10-15. (In Chinese)
- [13] 罗战友, 王伟堂, 刘薇. 桩-土界面摩擦对静压桩挤土效应的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3299-3304.
LUO Zhanyou, WANG Weitang, LIU Wei. Influence analysis of friction between pile and soil on compacting effects of jacked pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3299-3304. (In Chinese)
- [14] 赵明华, 占鑫杰, 邹新军. 饱和软黏土中沉桩以及随后固结过程的数值模拟[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(2): 1-8.
ZHAO Minghua, ZHAN Xinjie, ZOU Xinjun. Numerical simulation of pile installation and subsequent consolidation in clay[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(2): 1-8. (In Chinese)
- [15] 雷华阳, 李肖, 陆培毅, 等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1006-1013.
LEI Huayang, LI Xiao, LU Peiyi, *et al.* Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1006-1013. (In Chinese)
- [16] GIRALDO J, RAYHANI M T. Influence of fiber-reinforced polymers on pile-soil interface strength in clays[J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2013, 2(1): 534-550.
- [17] ASHFORD S A, JAKRAPIYANUN W. Drivability of glass FRP composite piling[J]. Composite Construction, 2001, 5(1): 58-60.
- [18] COOKE R W, PRICE G. Strain and displacements around friction pile[C]// The 8th International Symposium on Mechanics of Foundation. Houston: Texas University, 1973, 2: 53-60.
- [19] HWANG J H, LIANG N, CHEN C H. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 939-949.
- [20] 徐建平, 周健, 许朝阳, 等. 沉桩挤土效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 235-239.
XU Jianping, ZHOU Jian, XU Zhaoyang, *et al.* Model test research on pile driving effect of squeezing against soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 235-239. (In Chinese)
- [21] 周火堍, 施建勇. 饱和软黏土中足尺静压桩挤土效应试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3291-3296.
ZHOU Huoyao, SHI Jianyong. Test research on soil compacting effect of full scale jacked-in pile in saturated soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3291-3296. (In Chinese)
- [22] 高广运, 周群立, 陈龙珠. 软土中静压桩挤土分析和防治措施[J]. 岩土力学, 2002, 23(S1): 65-68.
GAO Guangyun, ZHOU Qunli, CHEN Longzhu. Analysis of compacting effect and control for silent piling in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S1): 65-68. (In Chinese)