

GRF 基础承载机制试验研究

文松霖, 徐文强

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: GRF 基础是一种新型桩基础, 首先开发应用于日本, 与普通直桩相比, 该基础不仅可以节约材料、降低成本, 而且可以大幅度地提高承载力, 具有广阔的应用前景。通过模型试验, 分析了锚杆间距、锚杆长度以及锚杆数量对 GRF 基础承载力的影响, 初步探讨了 GRF 基础的承载机制。得到以下结论: GRF 基础的承载性状和直桩不同; 锚杆不仅可以提高 GRF 基础的侧阻力, 在一定程度上对端阻力也有增强作用; 在相同的桩顶荷载作用下, GRF 基础的位移远小于直桩的位移; 与同体积的大直径桩相比, GRF 基础可以大幅度地提高基础承载力、减少沉降; 在一定的锚杆间距范围内, 锚杆间距对极限承载力的影响较小, 但对极限侧阻力影响较大; 存在一个锚杆临界长度, 当锚杆长度为临界值时, 锚杆利用效果最佳; GRF 基础的极限承载力随锚杆数量而变化, 适当地增加锚杆数量, 可以获得满意的承载力增量。

关 键 词: GRF 基础; 模型试验; 承载力; 承载机理

中图分类号: TU 473.1+1

文献标识码: A

Experimental research on bearing mechanism of geo-reinforcement foundations

WEN Song-lin, XU Wen-qiang

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,
Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Geo-reinforcement foundation is a new type of pile foundation that is firstly developed and utilized in Japan. Compared with normal straight pile, this type of foundation can not only save materials and cut cost, but also can increase the bearing capacity greatly; so its application prospect is wide. Through model tests, the influences of anchor space, anchor length and anchor number on the bearing capacity of geo-reinforcement foundation are analyzed; and some preliminary studies of the bearing mechanism of geo-reinforcement foundation are made. The conclusions are as follows: the bearing behavior of geo-reinforcement foundation is different from that of straight pile; the anchor can not only increase the side resistance of geo-reinforcement foundation, but also increase the tip resistance to some extent. When the load on the pile top is the same, the displacement of geo-reinforcement foundation is much less than that of normal straight pile; compared with large diameter pile with the same volume, geo-reinforcement foundation can greatly improve the foundation bearing capacity, reduce the settlement; when the anchor space is in some range, it effects the ultimate bearing capacity smally, while functions greatly on the ultimate side resistance; existing a critical anchor length, when anchor length is the critical length, its utilization effect is best; the ultimate bearing capacity of geo-reinforcement foundation varies when the anchor number is different; and we can gain a satisfying bearing capacity increment by increase the anchor number appropriately.

Key words: geo-reinforcement foundation; model test; bearing capacity; bearing mechanism

1 前 言

GRF 基础 (Geo-Reinforcement Foundation) 是一种新型桩基础, 首先开发应用于日本, 根据有关资料显示, 与普通直桩相比, 该基础不仅可以节约材料、降低成本, 而且可以大幅度地提高承载力, 可

作为一桩一柱结构的基础, 为大直径桩基的发展开辟了新道路, 具有广阔的应用前景^[1-3]。GRF 基础的基本思路就是在桩的周围土体中打入锚杆并通过锚杆将桩周土体和直桩连接为一个整体, 从而改善桩-土之间的相互作用机制, 达到提高桩基承载力的目的, 故将这种高承载力桩称为 GRF 基础, 它的概

为直桩的 2.5~2.8 倍。

GRF 基础的承载性状比较复杂,它主要包括桩端阻力、桩侧阻力以及锚杆对承载力的贡献,为了便于研究,将锚杆对承载力的贡献视为侧阻力的一部分,认为 GRF 基础的承载力也由桩端阻力和桩侧阻力两部分组成。

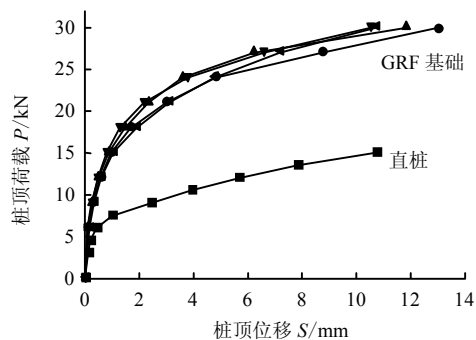
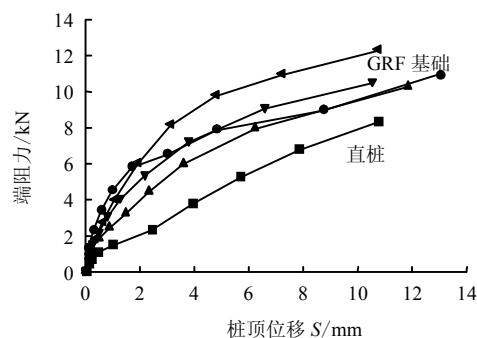
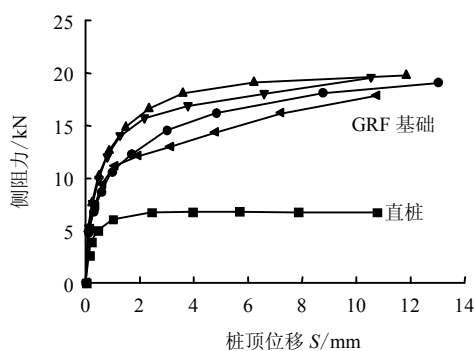


图 4 直桩与 GRF 基础的 P - S 曲线对比图
Fig.4 Comparison between of P - S curves



(a)



(b)

图 5 端阻和侧阻随桩顶位移的变化曲线
Fig.5 Curves of tip resistance and shaft resistance vary with the displacement of pile top

根据试验结果(图 5(a)),在相同的桩顶位移下,GRF 基础的端阻力相比直桩也有一定程度的提高;这一现象可以解释如下:根据 Terzaghi 的桩端承载力理论,桩端破坏时将会产生如图 6 所示的滑

裂面;由极限平衡理论求得桩端极限承载力。对于普通直桩,作用于桩端平面的上覆压力为 rL ;而对于 GRF 基础,由于桩侧锚杆的存在,随着桩沉降量的增大,锚杆对桩端平面所产生的附加应力逐渐增大,因此,GRF 基础桩端平面所受到的上覆压力大于直桩的,从而表现出相对较大的极限端阻力。

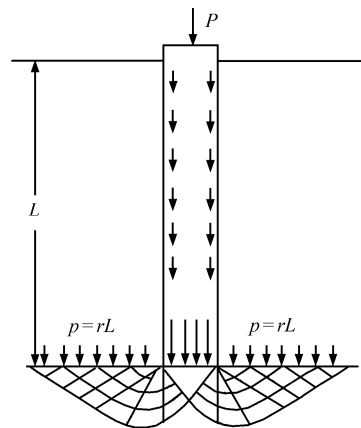


图 6 Terzaghi 桩端承载力理论
Fig.6 The theory of pile tip bearing capacity by Terzaghi

3.2 锚杆间距对 GRF 基础承载力的影响

锚杆间距分别取为 14.4 cm(间距/桩径=0.9)和 16 cm(间距/桩径=1.0),沿桩体分 4 排布置,每排布置 6 根锚杆,其中最下面一排固定,具体布置如图 7 所示。

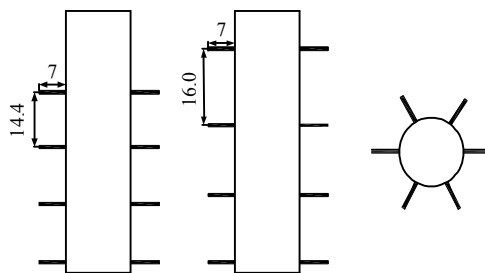


图 7 不同锚杆间距的 GRF 基础示意图
Fig.7 Sketch of geo-reinforcement foundation with different anchor spaces

试验结果如图 8、9 所示,由图可以看出,当间距/桩径=1.0 时,GRF 基础的极限位移约为 2.6 mm,极限承载力约为 21.88 kN,极限侧阻力和极限端阻力分别为 17 kN 和 4.8 kN;当间距/桩径=0.9 时,GRF 基础的极限桩顶位移约为 2.2 mm,极限承载力约为 19.72 kN,极限侧阻力和端阻力分别为 13.3 kN 和 6.2 kN。因此,增大锚杆间距可以适当地提高 GRF 基础的承载力。通过对比分析发现,虽然增大锚杆

间距可以明显地提高极限侧阻力(图 9(a)、提高值约为 3.7 kN), 但端阻力反而减少了(图 9(b)、减少值约为 1.4 kN)。对于这一试验现象可以理解如下: 本试验在调整锚杆间距时, 是固定最下面一排锚杆, 对以上各排锚杆进行调整布置(图 7), 当锚杆间距较大时, 能够调动的桩周抵抗土体的范围更大, 从而表现出较大的侧阻力; 对于桩端阻力而言, 锚杆间距较大时, 由于土层的扩散作用, 锚杆对桩端平面产生的附加正向应力相对较小, 结果表现出较小的桩端阻力。

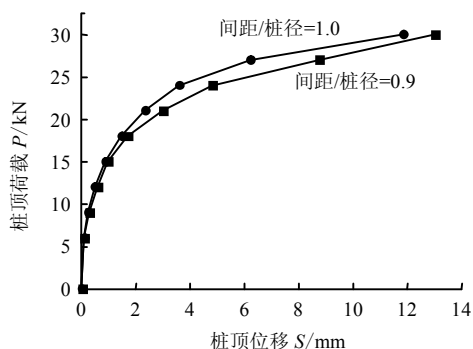
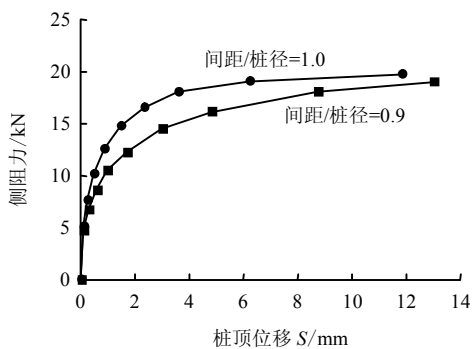
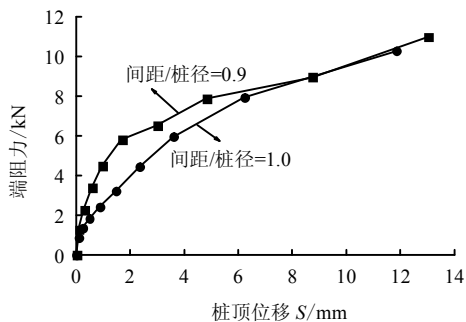


图 8 不同锚杆间距的 GRF 基础的 P - S 曲线
Fig.8 P - S curves of geo-reinforcement foundation with different anchor spaces



(a)



(b)

图 9 锚杆间距对 GRF 基础侧阻力和端阻力的影响
Fig.9 The influence of anchor space on shaft resistance and tip resistance of geo-reinforcement foundation

3.3 锚杆长度对 GRF 基础承载力的影响

锚杆长度分别取为 7 cm 和 4 cm, 即锚杆长度/桩径的值分别为 0.44 和 0.19。沿桩体分 4 排布置, 每排布置 6 根锚杆, 具体布置如图 10 所示。

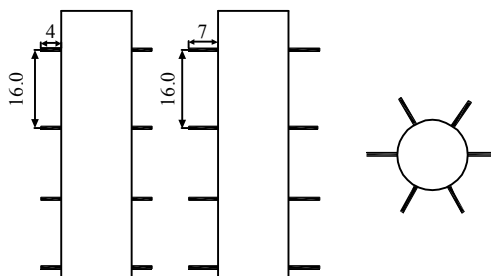


图 10 不同锚杆长度的 GRF 基础示意图
Fig.10 Sketch of geo-reinforcement foundation with different anchor lengths

试验结果如图 11、12 所示。由图 11 可以看出, 当长度/桩径=0.19 (锚杆长 4 cm) 时, GRF 基础的极限位移值约为 2.4 mm, 相应的极限承载力约为 21.63 kN, 当长度/桩径=0.44 (锚杆长 7 cm) 时, GRF 基础的极限位移值约为 2.6 mm, 相应的极限承载力约为 21.88 kN, 二者几乎一样。

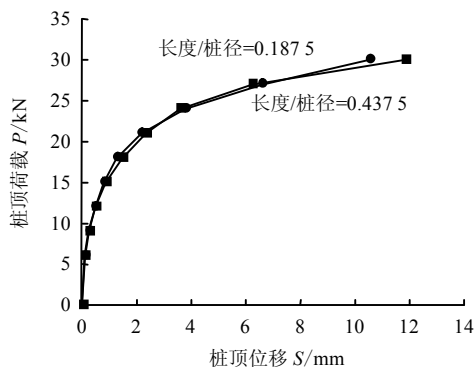
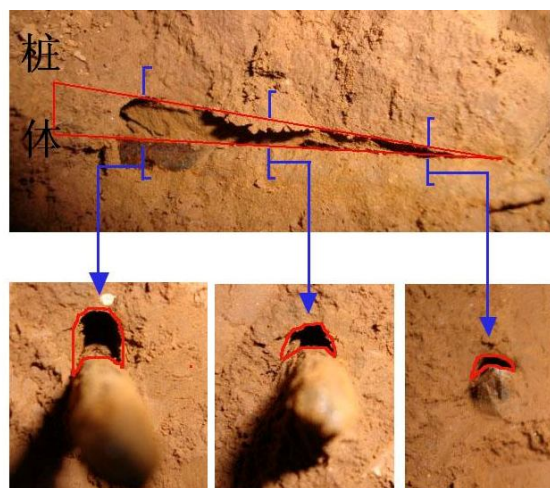


图 11 不同锚杆长度的 GRF 基础的 P - S 曲线
Fig.11 P - S curves of geo-reinforcement foundation with different anchor lengths

为了观察锚杆与土体的相对位移情况, 试验完成后, 对桩周土体进行全方位的渐进式开挖, 并拍摄照片。图 12 是锚杆长度为 7 cm 和 4 cm 时的锚杆周围裂缝开展比较图, 可以看出二者裂缝的开展形式不同, 当锚杆长度为 7 cm 时, 裂缝沿着锚杆越来越小, 在极限荷载作用下, 锚杆端部的裂缝仅为 0.5 mm 左右, 而锚杆根部却有 10 mm 左右; 当锚杆长度为 4 cm 时, 裂缝沿锚杆基本是均匀分布的, 卸载开挖后观察, 均达到了 10 mm 左右。由此可以

推断出锚杆长度存在一个临界值, 当锚杆长度小于该临界值时 (本试验约为 4 cm), 随着锚杆长度的增大, GRF 基础的承载力越来越大, 当超过该临界值时, 随着锚杆长度的增大, 锚杆的相对刚度减少, 锚杆根部所受弯矩增大, 锚杆产生弯曲, 对桩头位移的抑制效果减弱, 表现为 GRF 基础的承载力基本保持不变。这是因为: (1) 锚杆随着桩体下移, 土体会对锚杆产生一定的作用力, 锚杆相当于一根承受不均匀分布荷载的悬臂梁, 锚杆根部的弯矩最大, 当该弯矩超过锚杆所能承受的极限值时, 锚杆便产生了塑性弯曲, 以至于不能继续承载。(2) 锚杆可以视为悬臂梁, 在荷载作用下, 锚杆会产生一定的挠度, 在锚杆根部挠度为 0, 而在锚杆端部, 挠度最大; 锚杆随着桩体下移, 在根部桩土相对位移最大, 而在端部桩土相对位移最小; 当锚杆越长, 端部的桩土相对位移越小。据此, 可以判断, 锚杆材料的弹性模量越大, 尺寸越大, 锚杆的临界长度就越长。由图 12 可以看出, 当锚杆长度为 7 cm 时, 锚杆端部的位移很小, 即锚杆端部受到的土体作用力很小; 当锚杆长度为 4 cm 时, 锚杆端部的位移基本上和桩体的位移一致, 锚杆有效利用率高。



(a) 锚杆长 7 cm



(b) 锚杆长 4 cm

图 12 锚杆周围裂缝开展比较图

Fig.12 The comparison diagram of the cracks around anchor

3.4 锚杆数量对 GRF 基础承载力的影响

锚杆长度取为 4 cm, 锚杆间距为 1 倍桩径, 每排锚杆数量分别为 6 根和 4 根, 锚杆具体布置如图 13 所示。

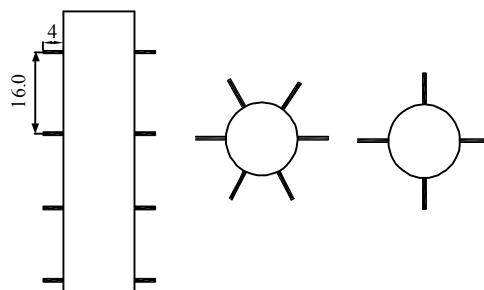


图 13 不同锚杆数量的 GRF 基础示意图

Fig.13 Sketch of geo-reinforcement foundations with different anchor numbers

试验结果如图 14 所示。由图可以看出, 当锚杆数量为 6、GRF 基础的极限位移值约为 2.4 mm 时, 极限承载力约为 21.63 kN; 当锚杆数量为 4、GRF 基础的极限位移值约为 2.4 mm 时, 极限承载力约为 19.72 kN。因此, 相同直径的 GRF 基础, 减少锚杆数量会使极限承载力有所降低; 可以反向推断适当地增加锚杆数量, 可以得到满意的承载力增量; 其影响机理有待通过数值敏感分析做进一步的研究。因此, 在设计 GRF 基础时必须选择合适的锚杆数量, 使锚杆利用效果最佳。

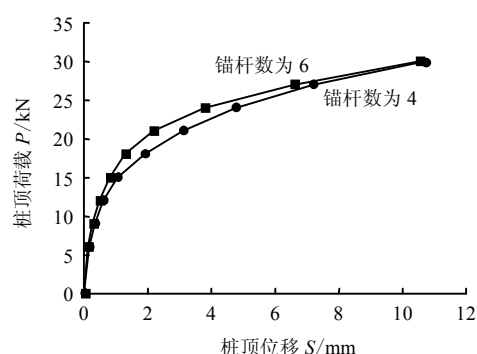


图 14 不同锚杆数量的 GRF 基础的 P-S 曲线

Fig.14 P-S curves of geo-reinforcement foundation with different anchor numbers

4 结 论

(1) 由于锚杆的存在, GRF 基础的承载性状与普通大直径桩有所不同。在相同的桩顶荷载作用下, GRF 基础的位移远小于直桩的位移; 与同体积的大直径桩相比, GRF 基础可以大幅度地提高地基承载

力、减少沉降(本试验的承载力增加率为 150%~180%)。

(2) 锚杆的存在不仅增大桩侧阻力;还会对桩端平面产生正向的附加应力使得桩端阻力有所增大。

(3) 在一定的锚杆间距范围内,增大锚杆间距可以适当地提高 GRF 基础的极限承载力;当间距较大时侧阻力有所增大,端阻力却有所减少。

(4) 存在一个与锚杆的抗弯性能有关的临界长度,当锚杆长度小于该临界长度时,随着锚杆长度的增加,GRF 基础的承载力越来越大;而当锚杆长度超过该临界长度时,GRF 基础的承载力基本保持不变;当锚杆为临界长度时,其利用效果最佳。

(5) 对于相同直径的 GRF 基础,减少锚杆数量会使得 GRF 基础的极限承载力有所降低(本试验减少率为 9%);可以反向推断适当地增加锚杆数量,可以获得满意的承载力增量,达到最佳的利用效果。

参考文献

- [1] 大日本土木株式会社. GRF 工法(地盤補強型基礎工法)[M]. [S. 1.]: [s. n.], 2006.
- [2] 大日本土木株式会社, 東京電力株式会社. GRF 工法 TYPE II (地盤補強型基礎工法)技術資料[M]. [S. 1.]: [s. n.], 2006.
- [3] 文松霖, 徐文强, 任佳丽. GRF 桩基承载力增强技术及应用展望[C]//第九届全国桩基工程学术会议论文集. 兰州: 中国建筑工业出版社, 2009: 468—471.
- [4] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. *Ground Engineering*, 1985, (5): 9—15.
- [5] 李景涛. 钻孔灌注桩后压浆技术探讨[J]. 西部探矿工程. 2006, 6: 36—39.
LI Jing-tao. Study on the post grouting technology for bored pile[J]. *West China Exploration Engineering*, 2006, 6: 36—39.
- [6] 李书涛. 浅析后压浆技术提高灌注桩承载力[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 386—390.
LI Shu-tao. Analysis on improving the bearing capacity of the boring pile by post-grouting[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(4): 386—390.
- [7] PIVEN V G. Pedestal piles in swelling soils[J]. *Foundation Engineering*, 1977, (6): 377—380.
- [8] 文松霖. 扩底桩承载力空间屈服包络面的基本特性[J]. 岩土力学, 2006, (8): 1229—1234.
WEN Song-lin. Three dimensional failure envelope behavior of pedestal piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, (8): 1229—1234.
- [9] 廖荣. 大孔径扩底桩设计计算[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2007, 14(4): 40—42.
LIAO Rong. The design of expanding stake of the big diameter[J]. *Journal of Lanzhou Polytechnic College*, 2007, 14(4): 40—42.
- [10] 祝卫东, 张瑛颖, 韩同春, 等. 支盘灌注桩承载特性的试验研究[J]. 建筑施工, 2002, (4): 271—274.
ZHU Wei-dong, ZHANG Ying-ying, HAN Tong-chun, et al. Experimental research on bearing capacity of dry-bored pile with enlarged footings[J]. *Building Construction*, 2002, (4): 271—274.
- [11] 邓友生, 龚维明, 韩金生, 等. 挤扩支盘灌注桩承载特性试验研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(6): 122—127.
DENG You-sheng, GONG Wei-ming, HAN Jin-sheng, et al. Experimental study on bearing characteristic of compaction-under reamed bored pile[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2005, 27(6): 122—127.
- [12] 黄齐武, 张晓玲, 王贵和. 多支盘桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程师, 2003, 15(4): 7—14.
HUANG Qi-wu, ZHANG Xiao-ling, WANG Gui-he. Experimental research on bearing mechanism of multi-branch piles[J]. *Geotechnical Engineer*, 2003, 15(4): 7—14.
- [13] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 371—375.
QIAN De-ling. Study on loading transfer law and FEM simulation of squeezed branch pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 371—375.
- [14] 陆见华, 陆小曼. Y 型-异形沉管灌注桩的试验研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, 14(4): 40—42.
LU Jian-hua, LU Xiao-man. Field test and study of Y-shaped pile, an unusual type of driven cast-in-situ concrete pile[J]. *Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College*, 2002, 14(4): 40—42.
- [15] 陆见华. Y 型沉管灌注桩静载对比试验报告[J]. 岩土工程界, 2002, 5(1): 27.
LU Jian-hua. Static load comparison test report of Y-shaped driven cast-in-place pile[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2002, 5(1): 27.
- [16] 张晓健, 刘汉龙, 高玉峰, 等. PCC 单桩性状室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1495—1498.
ZHANG Xiao-jian, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Model test study on properties of PCC single pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 1495—1498.
- [17] 刘汉龙, 王新泉, 陈永辉, 等. Y 型沉管灌注桩加筋路堤力学性状试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 297—304.
LIU Han-long, WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, et al. Field experimental study of mechanical performance of Y-shaped vibro-pile reinforced embankments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 297—304.
- [18] 王新泉, 陈永辉, 刘汉龙. Y 型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 615—623.
WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, LIU Han-long. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped vibro-pile[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 615—623.