

DOI : 10.11779/CJGE2014S2048

临海浅埋富水地层明挖隧道抗浮稳定性研究

刘继国¹, 郭小红¹, 程勇¹, 王啟铜², 陈卫忠³

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 港珠澳大桥珠海连接线管理中心, 广东 珠海 519030;
3. 中科院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 根据港珠澳大桥珠海连接线的关键控制工程拱北隧道的特点, 对海域明挖基坑深度较浅段落, 通过建立三维复杂数值计算模型, 考虑桩土的相互作用, 模拟抗拔桩的实际负摩阻力工作机理, 分析了抗拔桩在不同参数方案下的变形和受力特征, 得到以下结论: 考虑底板抗拔桩不同参数方案, 抗拔桩在底板抵抗扬压力上浮时发挥的作用显著, 能有效的降低底板隆起最大值; 增加桩长和桩径都能够有效提高抗拔桩提供的抗浮效果, 增加抗拔桩的桩长在控制底板在扬压力作用上浮隆起效果更加显著; 抗拔桩的不同参数对连续墙的水平位移以及地表沉降槽的影响很小, 抗拔桩对抵抗基底隆起的作用比较大。

关键词: 港珠澳大桥; 临海浅埋富水地层; 明挖隧道; 抗浮

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0274-05

作者简介: 刘继国(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的设计与研究工作。E-mail: liujiguog@163.com.

Floatation-resistant stability of open excavation tunnels in offshore shallow stratum

LIU Ji-guo¹, GUO Xiao-hong¹, CHENG Yong¹, WANG Qi-tong², CHEN Wei-zhong³

(1. China Second Highway Survey, Design and Research Institute of Communications, Wuhan 430056, China; 2. Zhuhai Connecting Line Managerial Center of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, Zhuhai 519030, China; 3. Institute of rock and Soil Mechanics, China academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: According to the characteristics of the key project, Gongbei tunnel of Zhuhai connecting line of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, a three-dimensional numerical model is established. The working mechanism of uplift piles is simulated for the shallow part of open excavation ditch considering the interaction between the piles and the soils. The characteristics of deformation and stress of the uplift piles are analyzed according to different parameters and concepts. Some conclusions are drawn.

Key words: Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; offshore shallow stratum; open excavation tunnel; floatation resistance

0 引言

拱北隧道为港珠澳大桥珠海连接线的关键控制工程, 是继港珠澳大桥主桥之后又一世界级工程, 位于珠海市香洲区, 毗邻澳门。隧道左线长度 2741 m, 右线长度 2375 m, 由海域明挖段、口岸暗挖段、陆域明挖段 3 部分组成。海域明挖段采用先岛后隧的施工方^[1], 即先在海域人工回填筑岛, 然后在人工岛上进行明挖隧道施工。

海域段土层主要为淤泥层、粉质黏土层、砂土层、砂、砾质黏土层, 下覆岩层, 且海域段水位受潮汐变化的影响较多, 沿线地下水位普遍偏高, 结构受地下水影响明显。因此, 隧道整体的抗浮稳定性问题尤为突出。对于拱北隧道海域段的特殊环境地质条件, 本

文通过三维有限元数值模拟方法来分析复杂地质条件及高水位下的抗浮设计的抗浮效果, 抗浮安全性及抗拔桩的在施工过程以及正常运行时的力学行为特性。

抗拔桩是抗拔基础的一种主要结构形式, 利用桩体的自重与桩侧的侧摩擦阻力来提供抗拔力。抗拔桩不同于一般的基础桩, 有其自身的独特性, 桩体主要承受拉力, 受力大小随地下水位变化而变化, 设置抗拔桩时, 施工对周围的土体扰动小, 土体强度和变形性质与原状土相差不大。

抗拔桩的抗拔力取决于桩身材料强度以及桩土之间的抗拔摩擦阻力, 而上拔时在桩底端形成的桩端

收稿日期: 2014-07-28

真空力, 不予考虑。目前, 国内外关于抗拔桩的抗浮设计方面的研究文献资料并不是很多, 关于抗拔桩的已有研究, Reese 通过试验表明: 坚硬黏土中钻孔桩的侧阻力在相对位移为 0.5% ~ 2% 时达到其峰值, 也即是说侧摩阻力达到其峰值所需要的桩顶上拔量与桩径有关。Kulhawy 所领导的研究小组曾研究表明: 等截面桩的主要破坏形态是沿着桩土侧壁界面上发生的圆柱形剪切破坏, 一般使侧阻力达到最大值所需要的桩土相对位移不超过 13 mm (通常控制在 6 ~ 10 mm)。在工程实践中, 对桩基的允许变形要求较严, 往往以最大允许变形量最为设计标准, 根据拱北隧道的地质条件, 控制抗拔桩的最大上拔量在 10 mm 以内。

通过三有限元的数值模拟计算隧道的开挖施工过程, 研究隧道从开挖到施工结束过程中的抗拔桩力学行为特性的变化趋势, 以控制抗拔桩最大上拔位移量判断抗拔桩的工作状态, 具体分析研究了拱北隧道海域敞开区抗拔桩的力学行为特征以及抗拔桩在不同的施工阶段的工作状态。

1 桩土接触本构模型

由于桩土材料性质相差很大, 桩体与周围土体间的接触关系直接影响桩体受力, 为了更好的模拟抗拔桩的效果, 需采用合理的桩土接触模型^[2]。目前常用的桩土接触模型有 Goodman 单元模型, 薄层单元模型和摩擦接触模型。其中 Goodman 单元模型较为复杂且参数很难确定, 薄层单元模型的接触厚度难以确定, 且不能反映切向和法向耦合作用的影响^[3], 故本文采用无厚度的硬接触摩擦模型来反映桩与土的相互作用。

桩土的硬接触模型包括桩土间的法向作用和切向作用两个方面^[4]。其法向的相互关系满足: 当接触对的分开距离当 $U_{open} = 0$ 时, 桩土之间建立接触关系; $U_{open} > 0$ 时, 桩土之间接触关系解除。

假设硬接触关系的接触对之间切向相互作用满足修正的 Coulmb 模型, 即: 当 $\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} < \tau_{crit}$ 时, 接触面处于黏结状态; 当 $\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} = \tau_{crit}$ 时, 接触面处于滑动状态。其中, τ_i 为 i 方向的滑动力, τ_{crit} 为临界滑动力, 且 $\tau_{crit} = \mu p$ 。其中, μ 为桩土之间摩擦系数, p 为法向接触力。

为了验证上述硬接触模型应用于抗拔桩桩土接触的合理性, 本节建立了如图 1 所示的计算模型。模型中桩、土均采用四节点单元, 其中桩假设为弹性, 土体采用弹塑性本构模型。桩侧、桩底与周围的土均建立硬接触。

计算过程中所取参数: 密度 $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, 压缩模量 $E_s = 3.14 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.42$, 黏聚力 $c = 17 \text{ kPa}$, 摩擦角 $\varphi = 25^\circ$, 桩土摩擦系数 $\mu = 0.2$ 。

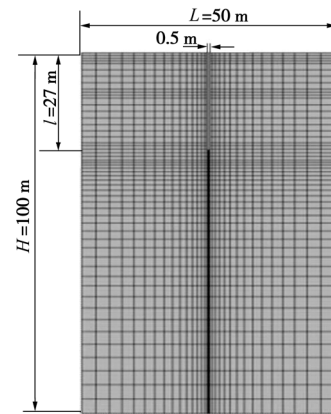


图 1 抗拔桩平面计算模型

Fig. 1 Computational model for uplift piles

计算得到的抗拔桩 $Q-S$ 曲线如图 2 所示, 从图中可以看出, 在加载初期, 随着加载位移的增大, 桩的抗拔力不断增大, 两者基本呈线性关系, 当加载位移达到一定值之后, 桩体抗拔力不再增大, 抗拔桩失效, 这种现象符合抗拔桩陡降型破坏的特点。可以看出, 在抗拔桩上部所受拉力最大, 随着桩深的增大, 桩体所受拉力以摩擦力的型式转移到土体之中, 桩轴力逐渐减小, 这与实际工程中测得的抗拔桩的轴力一致, 说明文中建立的硬接触模型可以很好的模拟抗拔桩的变形和受力特征。

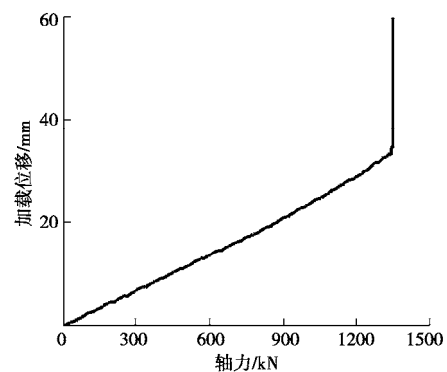


图 2 抗拔桩 $Q-S$ 曲线

Fig. 2 $Q-S$ curve of uplift piles

2 计算模型及工况

选取海域段 ZK1+900—ZK1+940 标段为抗拔桩抗浮研究对象, 基坑开挖深 15.0 m, 宽度 18 m, 模型长 40 m, 宽 140 m, 高 100 m。模型如图 3 所示。

在模型中, 地下连续墙采用 4 节点壳单元, 考虑施工时连续墙分幅, 在建模过程中相邻槽段之间的作用通过建立接头单元来模拟。支撑和冠梁采用三维梁单元进行模拟, 与地下连续墙的壳单元采用共用节点的耦合方法处理, 以保证两者在交界处应力和弯矩的有效传递。桩身与桩周土之间、桩底与桩底土之间及连续墙与土体之间均设置接触关系, 来模拟桩土、墙

土之间的相互作用。土体、桩及结构均采用8节点实体单元。计算过程中，模型的底面和四周均采用法向约束，顶面为自由面。

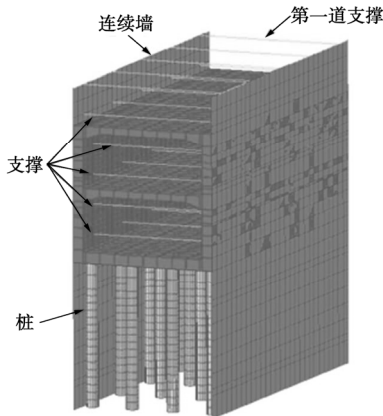


图3 隧道三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model for tunnel

模拟过程按照如下步骤进行：地应力平衡；施作地基旋喷加固、冠梁、连续墙成槽，浇筑；地层清表，施加第一道支撑，进行第一步开挖；施加第二道支撑，进行第二步开挖；施加第三道支撑，进行第三步开挖；施加第四道支撑，进行第四步开挖；施加第五道支撑，进行第五步开挖；施工底板，拆除第五道支撑；施工第五道与第四道支撑之间结构，拆除第四道支撑；施工第四道与第三道支撑之间结构，拆除第三道支撑；施工第三道与第二道支撑之间结构，拆除第二道支撑；施工第二道与第一道支撑之间结构，拆除第一道支撑。

为研究不同支护参数对明挖基坑及其支护结构的整体抗浮稳定性的影响规律，提出适合不同地段技术、经济性能较优的抗浮施工方案，对9种不同参数的设计方案进行对比，通过对比分析不同抗拔桩参数研究抗拔桩参数对围护结构、桩身内力以及上拔位移、底板上浮位移等影响。不同参数的对比方案如表1。

表1 设计方案

Table 1 Design schemes

方案	设计方案(一)					设计方案(二)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
直径 D/m	0	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0
桩长 L/m	0	18	20	22	18	20	22	18	20	22

3 计算成果分析

选定如图4所示、号桩体为研究对象，分析各方案下抗拔桩在施工过程中的轴力、上拔位移变化规律以及对围护结构的影响。

3.1 抗拔桩位移

抗拔桩发挥抗拔效果是在底板施工完成以后，结束排水地下水会对底板产生很高的扬压力而后底板在

水压力作用下会产生上浮趋势，造成底板的隆起，此时抗拔桩发挥抗拔其作用，依靠自身重力以及桩侧负摩阻力来共同抵抗底板的上浮，抗拔桩产生相应的上拔轴力、上拔位移。为研究抗拔桩在开挖的不同时期，对开挖的力学不同反应，选择方案7来做具体分析研究，总结施工过程对抗拔桩的影响规律；然后比较不同的抗浮方案参数对桩身上拔位移、桩身变形、桩身轴力的影响规律。不同的抗拔桩参数影响抗拔桩的自重和抗拔桩与桩周土的负摩阻力值，继而会表现在底板上浮隆起位移的量值上，所以抗拔桩的上抬位移受到抗拔桩不同参数的影响。

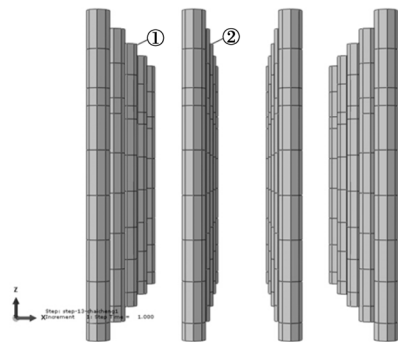


图4 研究桩体

Fig. 4 Piles of study

从图5,6中可以看出，靠近基坑边缘的抗拔桩上抬量要明显小于基坑中间的抗拔桩上抬量，这是因为在水压力作用下，由于连续墙对底板的约束作用，底板的隆起最大值点位于底板的中间。不同的方案下，方案2的最大上抬量最大是3mm，方案10的最小上抬量最小是2mm，增大桩径和桩长可有效地降低抗拔桩的最大上抬量。

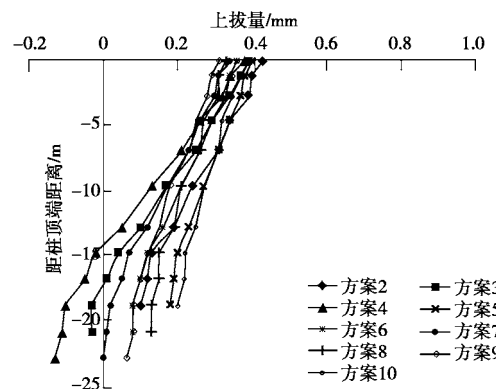


图5 号桩上抬量对比

Fig. 5 Comparison of uplift displacements of pile 1

3.2 抗拔桩轴力

抗拔桩在发挥抗拔作用时，在上拔力、自身重力以及侧摩阻力的作用下，主要受到拉应力。随着基坑的开挖，抗拔桩轴力由开始的全部压应力慢慢过渡到上部受拉下部受压的应力状态，在底板施工结束以后，抗拔桩全部承受拉应力，且此时拉应力达到最大值，随

着拆撑的进行抗拔桩轴力呈现变小的趋势,且均是桩身上部轴力大,桩下端轴力趋于零的应力分布。抗拔桩的轴力最大值出现在底板施工完成后,拆除支撑前。

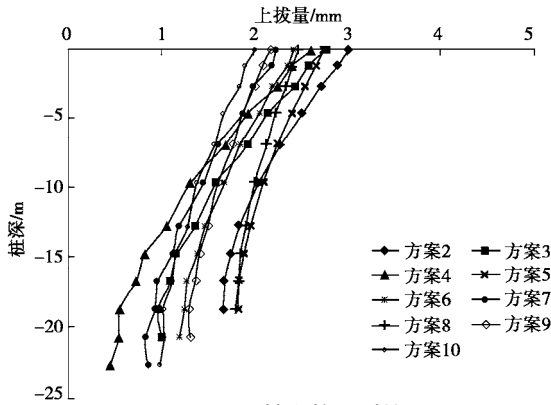


图6 号桩上抬量对比

Fig. 6 Comparison of uplift displacements of pile 2

图 7, 8 可看出,不同参数下的抗拔桩,基坑中间的号桩轴力最大的是方案 10,最大值为 2418 kN。通过逐个对比发现,抗拔桩的直径和桩长越大,抗拔桩的桩身轴力值越大。同直径情况下增加桩长,轴力稍有增大,但是随着直径的增加,抗拔桩的轴力明显增大,因为直径增大抗拔桩的自身重力增加以及桩土接触面积增加侧摩阻力增大,造成抗拔桩轴力增大。

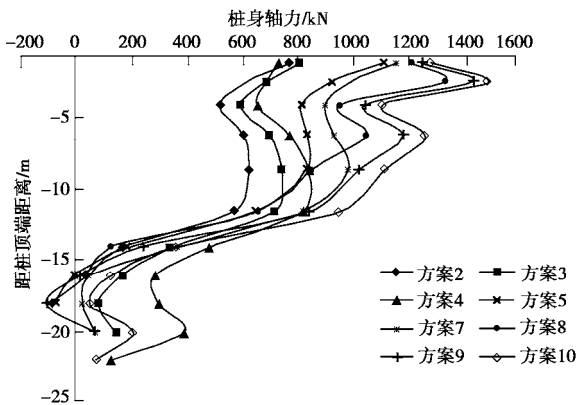


图7 号桩的轴力对比

Fig. 7 Comparison of axial forces of pile 1

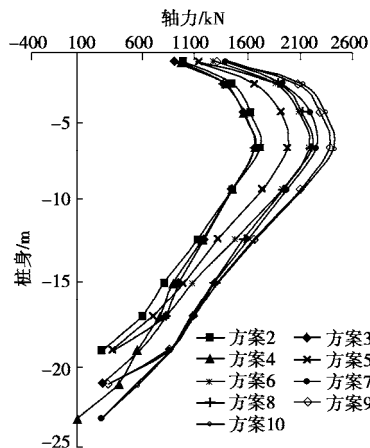


图8 号桩的轴力对比

Fig. 8 Comparison of axial forces of pile 2

3.3 对地连墙的影响

基坑开挖会破坏地下连续墙内外土压力的平衡状态,使得围护结构产生水平向位移。由图 9 可以看出,九种方案下连续墙水平变形趋势基本一致:由于连续墙顶部土压力较小,连续墙的水平位移很小;随着连续墙深度的增加,土压力随之增大,水平位移也逐渐增大,在墙深 16 m 即接近坑底处,连续墙水平位移达到最大;而后由于连续墙下部受到坑底土体的约束,土压力平衡破坏较小,产生的土压力也较小,故墙体水平位移慢慢减小,总体来说连续墙水平位移大体上呈现出两端小中间大的变形形态。

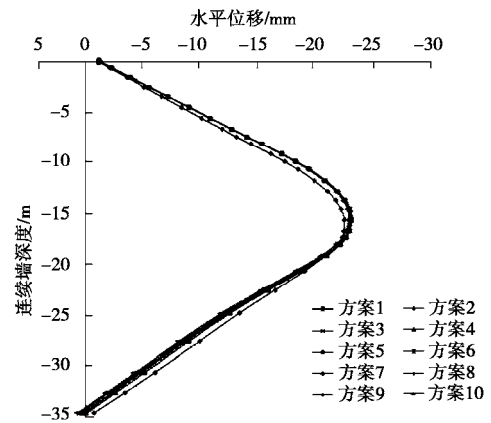


图9 连续墙水平位移对比

Fig. 9 Comparison of horizontal displacements of continuous concrete wall

3.4 对底板上浮的影响

底板施工完成以后,排水结束地下水位升高,底板受到的扬压力变大,底板上浮隆起,底板两侧受到连续墙的约束限制,只能有很小的位移,底板中间竖直方向会产生较大位移,这种约束导致底板的上浮表现为隆起。抗拔桩依靠自重和负摩阻力抵抗底板产生的上拔力,约束底板隆起。在抗拔桩的作用下,底板的上浮得到有效的控制,有抗拔桩作用位置底板上浮位移明显降低,即抗拔桩所在位置的周边位移要小于远离抗拔桩位置。

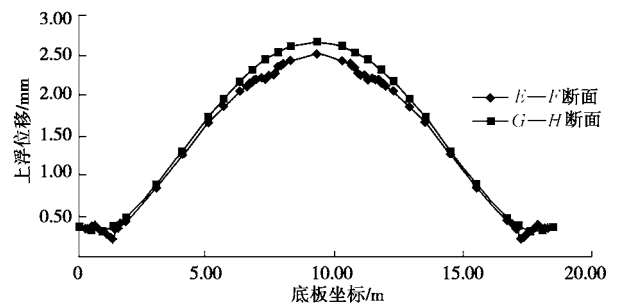


图10 同一方案底板上浮位移对比

Fig. 10 Comparison of uplift displacements of bottom plate wall under same scheme

通过图 10, 11 对比可看出,有抗拔桩的断面最大

上浮位移是 2.54 mm，两排抗拔桩中间的断面最大上浮位移 2.68 mm，两个断面相比降低了 5.2%。对比分析可见，和不加抗拔桩相比，有抗拔桩的时候能够大幅度降低底板的上浮隆起值。最小降低幅度如方案 2，为 27.39%，最大降低幅度如方案 10，达到 52.17%。因此抗拔桩对控制底板上浮发挥了非常显著的作用。

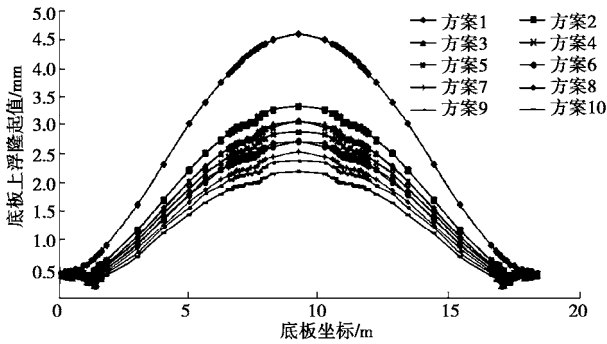


图 11 不同方案底板上浮位移对比

Fig. 11 Comparison of uplift displacements of bottom plate under different schemes

3.5 对地表沉降的影响

支护结构的侧向变形使主动土压力区的土体向坑内移动，导致主动土压力区的土体水平应力减小，剪力增大，出现塑性区，支护结构外侧发生地层损失，从而引起连续墙背后一定区域内的土体产生沉降，表现为地表沉降。基坑开挖引起的地表沿横向沉降变形如图 12 所示，从图中可以看出，9 种方案下地表变形趋势基本一致：在明挖隧道施工附近，地表沉降表现为先增大后减小，并随着远离施工范围，其位移逐渐趋于稳定。在离连续墙 10 m 处地表沉降值达到最大。

从不同方案下地表横向沉降的大小看，随着桩长和桩径的增大，地表的横向沉降值逐渐减小。不加抗拔桩时沉降值最大为 8.48 mm，而桩长 22 m、桩径 1 m 时的方案 10 沉降变形最小为 8.1 mm，与之相比地表沉降值减小近 4.75%，可以看出通过坑底的加固可以起到很好的控制地表的沉降。因此在地表沉降控制严格的地区，适当增加桩长或桩径可以起到很好的控制地表沉降的作用。

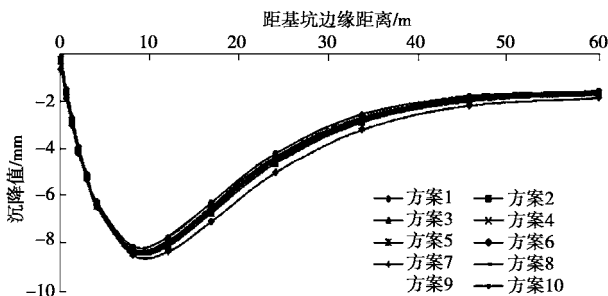


图 12 基坑周边地表沉降对比

Fig. 12 Comparison of surface settlements around foundation ditch

4 结论与建议

通过建立三维复杂数值计算模型，考虑桩土的相互作用，研究了港珠澳大桥拱北隧道临海浅埋富水基坑抗拔桩的实际负摩阻力工作机理，分析了抗拔桩在不同参数方案下的变形和受力特征，得到以下结论：

(1) 根据底板抗拔桩桩径从 0.6 ~ 1.0 m、桩长从 18 ~ 22 m 的 10 种方案的对比，可以看出抗拔桩在底板抵抗扬压力上浮时发挥的作用显著，能有效的降低底板隆起最大值，降幅一般能达到 27% ~ 52%。

(2) 增加桩长和桩径都能够有效提高抗拔桩的抗浮效果，增加抗拔桩的桩长控制底板上浮隆起效果更加显著，建议合理桩长为 22 ~ 20 m，桩径 0.8 m。

(3) 不同的抗拔桩直径及长度对连续墙的水平位移以及地表沉降槽的影响很小，抗拔桩对抵抗基底隆起的作用比较大，在抗拔桩四周有限区域内，土体隆起值要明显小于远离抗拔桩的土体。

参考文献：

- [1] 中交第二公路勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥珠海连接线控制性工程拱北隧道施工图设计[R]. 武汉: 中交第二公路勘察设计院有限公司, 2013. (CCCC Second Highway Consultants Co, Ltd. Design of construction drawing to key project gongbei tunnel of Zhuhai connecting line of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[R]. Wuhan: CCCC Second Highway Consultants Co, Ltd. 2013. (in Chinese))
- [2] 寿旋, 徐肖华, 孙苗苗, 等. 软土地区深基坑被动土体加固高度改进研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊): 104 - 108. (SHOU Xuan, XU Xiao-hua, SUN Miao-miao, et al. Reinforcement height of passive zone of deep foundation pits in soft clay regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(增刊): 104 - 108. (in Chinese))
- [3] 范巍. 大面积深基坑开挖过程中桩基受力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (FAN Wei. Behavior of pile foundation during large-scale deep excavation[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [4] 范巍, 王建华, 陈锦剑. 连续墙与土体接触特性对深基坑变形分析的影响[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2118 - 2121. (FAN Wei, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jia. The evaluation of deformation induced by excavation considering the properties of diaphragm-soil interface[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(12): 2118 - 2121. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)