

# 某道路工程临海边坡滑坡实例及原因分析

应宏伟<sup>1,2,3</sup>, 黄兆江<sup>1,2,3</sup>, 周建<sup>1,2,3</sup>, 朱成伟<sup>1,2,3</sup>, 唐远东<sup>4</sup>, 沈华伟<sup>4</sup>

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 4. 中国电建集团华东勘测设计院有限公司, 浙江 杭州 311100)

**摘要:**介绍了某滨海景观道路工程的背景和桩基施工过程中发生的临海水下边坡滑坡现象,初步讨论了导致滑坡的可能原因。基于极限平衡理论,分别对平均潮位、退潮时水位骤降、坡上桩基施工钢套管锤击振动导致浅海饱和软黏土强度降低的三种工况,采用 Geostudio 软件进行了临海岸坡的稳定性分析。分析结果表明,考虑退潮引起的水位骤降因素后,该边坡稳定安全系数下降,接近临界稳定状态,潜在滑动面发生在上层强度较低的高灵敏度淤泥质软黏土层。在同时考虑退潮水位骤降和坡上桩基施工扰动的工况下,边坡稳定安全系数小于1,即岸坡处于不稳定状态,滑动面仍位于软黏土层但滑动深度有所减小。研究成果较好地解释了此次滑坡事故的触发机理,可为类似工程提供参考,避免类似滑坡事故再次发生。

**关键词:**临海岸坡; 水位骤降; 施工扰动; 极限平衡法; 稳定性分析

中图分类号: TU434

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0048-05

**作者简介:**应宏伟(1971-),男,副教授,博士,主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

## Case study and cause analysis of landslide of coastal slope of a road project

YING Hong-wei<sup>1,2,3</sup>, HUANG Zhao-jiang<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2,3</sup>, ZHU Chen-wei<sup>1,2,3</sup>; TANG Yuan-dong<sup>4</sup>; SHEN Hua-wei<sup>4</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China; 3. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** This paper describes the background of a landscape road project and the landslide of coastal slope during pile foundation construction, and discusses the possible causes of landslide. Based on limit equilibrium theory, the stability of coastal slope is analyzed by Geostudio software under three conditions: average tide level, sudden drop of water level during ebb tide, and strength reduction of shallow saturated soft clay caused by hammering vibration of steel casing during pile foundation construction on slope. It is shown that the safety factor of slope stability decreases after the sudden drop of water level caused by the ebb tide, and the slope is close to the critical stability state. The potential sliding surface occurs in the soft clay layer with low upper strength and high sensitivity. Under the condition of considering the sudden drop of tide level and disturbance of pile foundation construction on the slope, the safety factor of slope stability is less than 1, that is, the bank slope is in an unstable state, and the sliding surface is still in the soft clay layer, but the sliding depth decreases. The research results reveal the triggering mechanism of the landslide, and can provide reference for similar projects and avoid landslide hazards.

**Key words:** coastal slope; water level drop; construction disturbance; limit equilibrium method and stability analysis

## 0 引言

近年来,随着滨海临江城市现代化建设的大力推进,相继出现大量沿海工程如沿海高速公路、滨海观景平台等,其中一些工程需建设在临海岸坡之

上,临海岸坡失稳是导致类似工程产生事故的主要原因,与陆上边坡和内陆水库岸坡不同的是,此类

收稿日期: 2019-07-12

临海岸坡会受到海面潮波循环涨退的影响, 此外, 若存在坡上工程施工的扰动作用, 如植桩扰动, 将进一步促使产生滑坡灾害。

目前极限平衡法仍是边坡稳定性分析的主要方法, 对于陆上边坡, 陈东升<sup>[1]</sup>采用 Geostudio 中的 SLOPE/W 模块进行分析得出边坡在天然和暴雨两种工况下的稳定性系数和潜在最危险滑动面。对于水下岸坡, 王晓鸿<sup>[2]</sup>采用极限平衡法评价了龙羊峡水库岸坡的稳定性, 张龙飞<sup>[3]</sup>采用 Geostudio 软件分析了降雨和库水涨落作用下岸坡的变形与稳定性响应规律。

针对岸坡水位骤降的因素, 李壮壮等<sup>[4]</sup>采用 Geostudio 软件模拟了库水位下降条件下水库岸坡的稳定性, 结果表明岸坡稳定性系数随库水位下降速率的增大而减小。江赵平<sup>[5]</sup>在类似条件下用样的方法分析了滑坡体深层和浅层的稳定性, 结果表明库水位下降速率越大, 滑坡体内部孔压下降幅度与下降速率越大, 滑坡体下部浅层发生失稳, 然后引起深层整体滑动。王力<sup>[6]</sup>采用 Geostudio 软件分析库水位骤降条件下滑坡体不同区段的稳定性, 发现库水位作用于滑坡体的下滑段时, 滑坡体稳定系数随库水位下降而下降, 库水位下降速度越大, 稳定系数下降越快, 但若最终库水位一致, 滑坡稳定性系数相差不大。文献<sup>[7-9]</sup>采用 Bishop 法、Janbu 法 etc 对类似问题进行分析, 分析同样得出, 库水位骤降会严重降低边坡的稳定系数, 随着库水位下降速率的增大, 稳定系数降低更多的结论, 以上研究都未考虑施工扰动的影响。

关于施工扰动对高灵敏性软黏土强度的影响, 前人已经做过了大量的研究<sup>[10-15]</sup>。M. Bozozuk 等<sup>[12]</sup>对高灵敏度土群桩施工现场进行土体强度监测, 测试结果表明经过植桩后, 现场土体剪切强度下降约 15%, Bengt 等<sup>[13]</sup>通过现场测试, 指出经过植桩施工, 土体内产生显著的超孔隙水压力, 施工后立即进行的十字板强度试验表明土体剪切强度下降约 15%。关于扰动区的范围, 张咏梅等<sup>[14]</sup>在观测沉桩时, 桩周一定范围内的形成一个半径为  $r_f$  的扰动区, 区内任意点的孔隙压力均达到最大值。据实测资料表明,  $r_f$  可达 16 倍桩径。随着离桩表面距离的增加, 超孔隙水压力急剧降低且消散也比较迅速。Roy<sup>[15]</sup>通过试验发现孔压在桩下沉到 4 倍桩径时达到峰值, 在距地面以下 6 m、距桩中心 3 倍桩径处, 土中的

超静孔压达上覆有效应力的 1.5 倍, 距桩中心 15 倍桩径以外几乎监测不到超静孔压, 得出植桩对软黏土强度降低的影响范围主要在 3 倍桩径范围以内的结论。以上研究仅针对于水平地基上植桩扰动对软黏土强度的影响, 但没有考虑边坡上土体软化对边坡稳定性的影响。

本文详细介绍了某滨海景观道路工程的背景和临海岸坡在桩基施工过程中发生滑坡的事故过程, 从极限平衡理论出发, 考虑退潮时水位骤降、坡上桩基施工扰动作用对边坡稳定性的影响, 采用 Geostudio 软件对该临海岸坡进行稳定性分析, 深入探讨了引发滑坡的原因。

## 1 工程背景

某拟建于海岸边的滨海大道工程道路全长 5.9 km, 拟建道路宽 28 m, 双向 4 车道。工程沿线根据地形情况, 部分区段利用已有道路或海堤、部分区段需进行海域回填, 部分道路和景观平台位于临海岸坡之上, 采用高桩梁板结构和钻孔灌注桩基础。典型临海边坡剖面的简化示意图如图 1 所示。

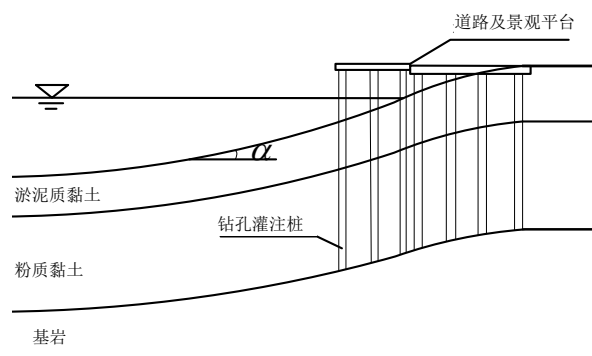


图 1 边坡典型剖面示意图

Figure 1 Typical profile of slope

该临海岸坡附近海域现状最大水深约 30 m, 地形坡度约为 10°, 海域多年平均年最高潮位 2.7 m, 多年平均年最低潮位 -2.1 m, 多年平均潮位 0.2 m。上部地层以淤泥质粉质黏土为主, 厚度约 14.0~35.0 m, 强度较低, 且表现为高灵敏性软黏土。下部主要为粉质黏土, 厚度较大, 约 32.0~75.0 m, 强度较高, 受扰动敏感性较低, 其下为基岩。主要岩土层的物理力学参数见表 1。

表1 岩土层物理力学参数

Table 1 Geotechnical Physical and Mechanical Parameters

土层编号	土层名称	天然重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	三轴 CU c'/kPa	三轴 CU $\varphi$ /°	十字板强度指标	十字板强度指标	灵敏度 $S_t$
					(原状土) $c_u$ /kPa	(重塑土) $c_u$ /kPa	
① <sub>2</sub>	淤泥	17.2	3	27.5			
② <sub>2</sub>	淤泥质粉质粘土	17.7	4	28	25.3	6.5	4.1
④ <sub>1-1</sub>	粉质粘土	19.7	24	30.5			
④ <sub>2</sub>	粉质粘土	19.1	24	30.5			
⑤ <sub>1</sub>	粘土	19.8	50	35			
⑤ <sub>3</sub>	砾砂	18.5	0	50			
⑥ <sub>1</sub>	粉质粘土	20.4	50	36			
0	基岩	-	-	-			

## 2 滑坡过程及初步原因分析

### 2.1 滑坡过程

该段道路和景观平台基础原设计采用直径 0.8 m 和 0.6 m 的钻孔灌注桩，均为摩擦桩，桩长 22~38 m，根据当地施工经验，海中桩基施工时桩机架于搭设在浅海中的平台上，先采用锤击方式将钢护筒振入地基土中，随后在护筒内进行常规钻孔灌注桩施工，钢护筒打入深度按穿过软黏土层控制。

桩基施工期间水下岸坡出现三次滑坡。最早一次在一根桩成孔后混凝土灌注至设计桩顶高程后，未凝固混凝土面突然下沉 6 m，间歇 40 分钟后再次灌注，仍然无法灌注至设计高程，随后该桩位桩附近约 20 余米长度范围的施工平台出现松动、滑移并坍塌，最终沉入海中，从平台出现松动到滑入海中约持续 25 分钟。约 50 天后，在同一区域附近又发生因退潮导致新浇筑的桩连同护筒随岸坡滑入海中及邻近数根已达强度的高桩朝海里倾斜的事件。这两次滑坡发生后，调整了基础桩的桩径和桩长，加大了钢护筒嵌固深度和护筒厚度，并延长了相邻桩施工的时间间隔。在 18 个月后该区域恢复桩基施工，但在某日清晨又发现上部作业平台和部分机械掉入海中，灌注桩均出现倾斜，倾斜角度在 3°~10° 之间，而且随时间推移，滑坡段灌注桩倾斜角度逐渐加大，最外侧桩倾斜角度达到 45°，偏离设计位置达到 14.5 m，桩顶已经在低潮位以下，靠近陆地侧高桩梁板位置灌注桩倾斜角度在 10° 以内，滑坡前、后的桩位倾斜情况对比见图 2。

事故发生前后现场均进行了水下地形的勘测，根据滑坡前后的水深地形图，绘制滑动前后的岸坡轮廓图如图 3 所示。如图所示，由于岸坡坡度较缓，坡度平均在 10° 左右，产生的是浅层的滑坡，滑裂

面轮廓大致与原坡面平行，且滑坡仅涉及上层强度较低的高灵敏性浅海淤泥质黏土，而与其下覆的强度较高的粉质黏土层无关。



滑坡前

滑坡后

图 2 滑坡前、后桩的倾斜情况对比

Figure 2 Comparison of the inclination of piles before and after landslide

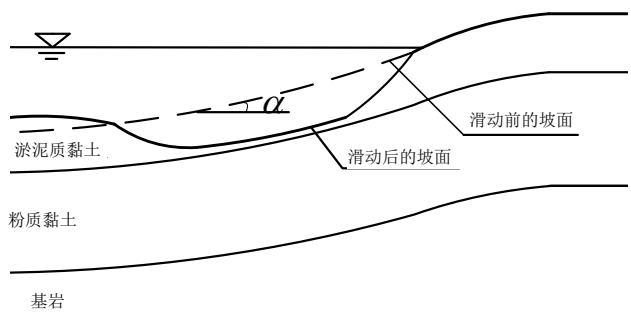


图 3 滑动前后的岸坡轮廓对比图

Figure 3 Contrast diagram of bank slope contour before and after sliding

### 2.2 初步原因分析

经调查，三次滑坡中有两次当天恰逢当地海域发生大潮，最大潮差近 4 m，滑移失效发生于退潮后的清晨，水位骤降将引起岸坡滑动力增大，导致岸坡稳定性下降，表明近海潮波退潮时产生的水位骤降可能是触发滑坡一大因素。

其次，岸坡浅部分布有高灵敏性软黏土，土体本身强度低且对扰动灵敏度大，虽然道路和景观平

台工程桩采用的是非挤土的钻孔灌注桩, 但由于海上桩基施工的特殊性, 需在岸坡上采用振动锤击钢护筒后再回旋钻成孔方式, 打设钢护筒的振动对深厚软黏土扰动而可能降低桩孔附近土体强度, 易引发施工阶段岸坡失稳, 新浇灌注桩顶混凝土面下降及海上施工平台坍塌、坡上桩基倾斜等均为水下岸坡失稳的表象, 说明坡上施工扰动也是滑坡的触发因素。

### 3 极限平衡分析

#### 3.1 分析模型

为定量分析各工况下临海边坡的稳定性, 采用软件 Geostudio 中的 SLOPE 模块进行岸坡稳定极限平衡分析, 根据在本工程中产生滑坡区域的地质剖面图, 建立分析模型, 通过软件内的定义滑动面出入口功能来进行滑弧搜索, 将靠近陆地的一侧定义为滑面入口, 靠近海洋的一侧定义为滑面出口, 划定出入口大致范围并在之中定义若干点, 对所有经过这些点的可能的圆弧滑面进行安全系数计算, 可以搜索出安全系数最小的, 即最危险的滑动面。

计算工况一, 建立天然岸坡的分析模型, 平均坡角约 9°, 初始模型的水位取平均潮水位, 如图 4 中水平蓝色虚线所示。滑坡区域地质情况较为复杂, 根据地质勘探结果, 岸坡包含多个地层, 大致呈上软下硬分布。

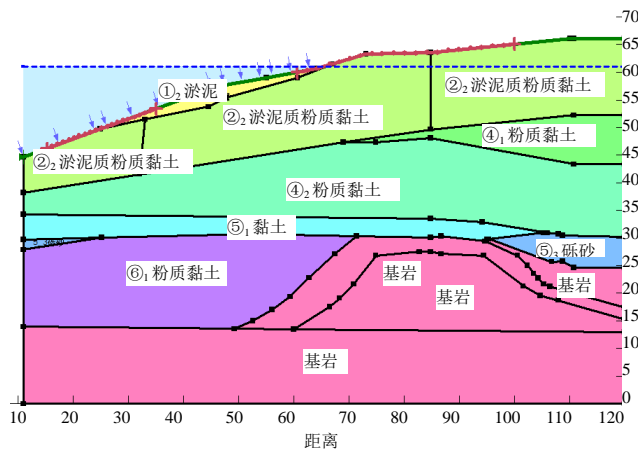


图 4 平均潮位下的稳定性分析模型

Figure 4 Stability analysis model at average tidal level

计算工况二, 考虑退潮水位骤降对边坡稳定性的影响, 考虑最大潮差 4 m 的最危险工况。

计算工况三, 同时考虑潮位骤降及坡上施工扰动影响。实际工程的施工扰动主要为动力锤击钢护筒, 使得护筒周围的浅海高灵敏性软黏土强度降低, 根据已有的挤土桩研究成果<sup>[10-15]</sup>, 将打桩引起的扰动影响范围确定为 3 倍桩径, 钢护筒锤击振动施工

扰动范围内的高灵敏性淤泥质黏土层的抗剪强度折减 15%。

#### 3.2 分析结果

平均潮位工况下的最危险滑动面如图 5 所示。此时潜在的滑裂面位于淤泥与淤泥质粉质黏土层, 潜在滑裂面最深处位于软、硬黏土层的交界面上。计算得安全系数  $K=1.243$ , 说明保持平均潮位不变时, 边坡处于稳定状态。

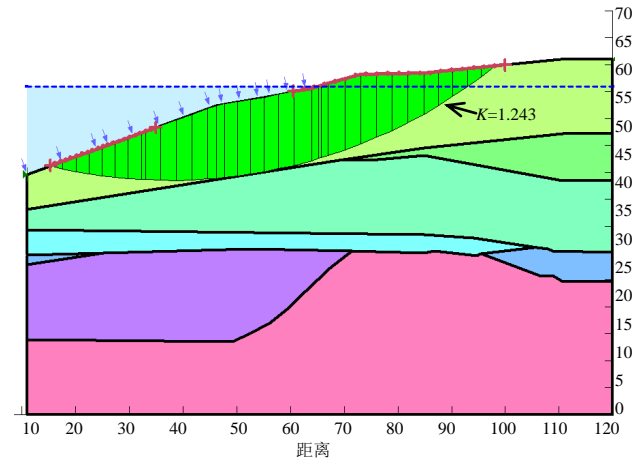


图 5 边坡保持平均潮位不变工况的稳定分析结果

Figure 5 Stability analysis results of slope under the condition of average tidal level

退潮水位骤降工况下的分析结果如图 6 所示。此时潜在的滑裂面与平均潮位不变工况相差很小, 最小安全系数为  $K=1.090$ , 较常水位情况的安全系数明显降低, 表明退潮水位骤降是该临海岸坡滑坡的重大诱因。

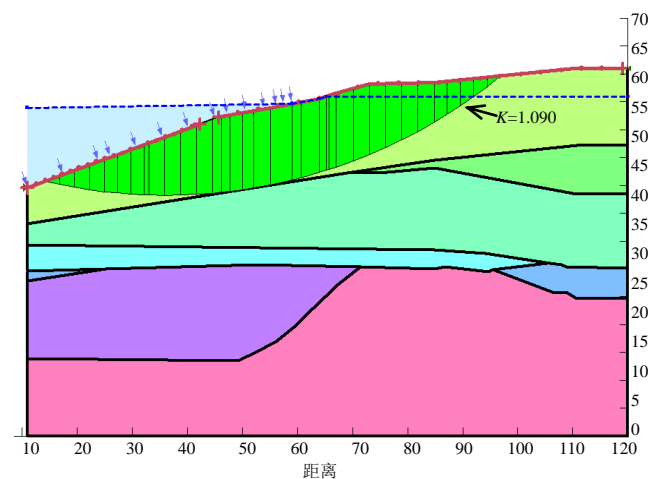


图 6 考虑退潮水位骤降的岸坡稳定分析结果

Figure 6 Analysis results of slope stability considering abrupt decline of tide level

在同时考虑退潮水位骤降及坡上桩基施工扰动的计算工况三条件下, 稳定性分析结果如图 7 所示。可以看出最小安全系数降低至  $K=0.964$ , 岸坡

已经处于不稳定状态,此时滑裂面虽然仍位于淤泥层,但滑动深度减小,与图2中的实测滑动面形状基本吻合。分析表明坡上打桩施工对高灵敏性软黏土的扰动是触发滑坡的重要因素,在施工过程中发生桩孔内新灌混凝土面急剧下降事件也证实了这一点,同时也说明类似临海边坡应尽量采用对土体扰动小的打桩方式。

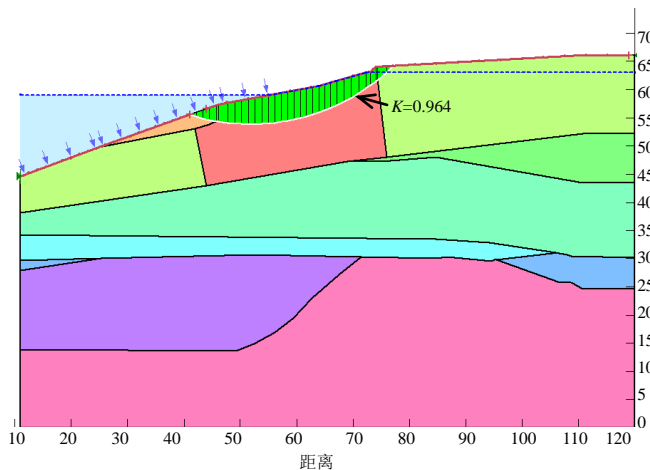


图7 考虑退潮水位骤降及打桩施工扰动的岸坡稳定性分析结果

Figure 7 Analysis results of slope stability considering abrupt decline of tide level and disturbance of piling construction

## 4 结 论

结合某景观道路工程临海边坡的滑坡实例,分别对平均潮位常水位、退潮水位骤降、同时考虑水位骤降和坡上打桩施工降低软黏土强度的三种工况,进行水下岸坡稳定性的极限平衡分析,深入探讨了引发滑坡的原因,得到以下结论:

(1) 考虑退潮水位骤降影响,临海边坡的稳定安全系数降低,岸坡接近临界稳定状态,潜在滑动面位于浅层的高灵敏性淤泥质软黏土;

(2) 同时考虑退潮水位骤降和坡上桩基施工扰动影响,边坡已经处于失稳状态,滑裂面仍位于淤泥层但滑动深度有所减小,坡上桩基施工扰动是诱发滑坡的重要因素,临海边坡应尽量采用对土体扰动小的打桩方式。

需要说明的是,浅海土体经受长期潮波循环作用,其强度变化规律和对临海边坡稳定性的影响非常复杂,本文尚未考虑这一因素的影响。

## 参考文献:

- [1] 钱玲玲,薛宝恒,范柱国,宋尚鑫. 极限平衡法在分析滑坡稳定性中的应用[J]. 矿山测量, 2014, 6: 73-75.
- [2] 王晓鸿,龙羊峡库岸水-岩相互作用及其环境效应研究[M]. 成都理工大学. 1996.
- [3] 张龙飞,杨宏伟,李曜男,李嘉祺,吴益平,库水与降雨对凉水井滑坡变形及稳定性的影响[J]. 水利水电工程学报, 2019, 2: 16-24
- [4] 李壮壮,张勇,程英建. 库水位骤降条件下滑坡稳定性分析[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 489-494.
- [5] 江赵平,谢东亚. 库水位骤降条件下某土质滑坡渗透稳定性分析[J]. 水利水电快报, 2019, 40(3): 45-52.
- [6] 王力,王世梅. 库水位骤降条件下动水压力型滑坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 117-120
- [7] 樊任华,程建设,樊义永. 库水位骤降作用下库岸滑坡形成机理研究[J]. 运行管理, 2018, 38(5): 59-63.
- [8] 何善国. 快林水库水位骤降与土坝内坡滑坡相关性分析[J]. 水利规划与设计, 2015, 10: 55-60.
- [9] 蒋秀玲,张常亮. 三峡水库水位变动下的库岸滑坡稳定性评价[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 38-42.
- [10] Lerouell S, Tavenas F, Brucy F, La Rochelle P, Marius Roy. Behavior of destructured natural clays[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105: 759-778.
- [11] Kaare Flaate. Effects of pile driving in clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971, 9(81): 81-87.
- [12] Bozozu M. Soil disturbance from pile driving in sensitive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 346-361.
- [13] Bength Fellenius, Laval Samson. Testing of drivability of concrete piles and disturbance to sensitive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1976: 13(2): 139-160.
- [14] 张咏梅,张善明. 打桩施工引起的孔隙水压力[J]. 土工基础, 1982, 2: 58-64.
- [15] Roy M, Blanchet R, Tavenas F, La Rochelle P. Behaviour of a sensitive clay during pile driving[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(1): 67-85.