

抗滑桩应变特征与内力非线性研究

任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 吴鑫培, 陈 斌

A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile

REN Qingyang, ZHAO Mengyuan, XIE Zhongwei, WU Xinpei, and CHEN Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究

A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide

向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 叶丹, 姜雷 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 125-131

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

扁铲探头贯入干砂的位移特征试验研究

An experimental study of the displacement characteristics of dry sand under dilatometer penetration

陈忠清, 吴天宇, 高彦斌, 吕越, 刘帅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 119-125

基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology

刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119-125

滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究

A study of the similar material characteristics of fragmenting rock mass physical model

任占强, 宋章, 林棋文, 程谦恭, 刘毅, 邓凯丰, 蒙浩, 涂津 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 132-142



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004034

抗滑桩应变特征与内力非线性研究

任青阳^{1,2}, 赵梦园², 谢忠伟³, 吴鑫培², 陈 斌²

(1. 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 3. 广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院, 广西南宁 530023)

摘要: 为探究抗滑桩实际内力与变形间的规律, 特别是桩土相互作用下桩体受力、变形、稳定性等特征, 通过抗滑桩大型物理模型试验, 结合 MATLAB 拟合推导实现从桩表面应变散点数据到桩身挠度分布的求解。对比同桩长不同加载条件与同加载条件不同桩长两种情况下桩表面应变、桩身弯矩、剪力及挠度, 分析抗滑桩的应变特征与内力变化规律。研究表明: 单调与循环加载条件下抗滑桩工作阶段划分为三个阶段, 即未开裂阶段、混凝土开裂-钢筋屈服阶段、钢筋屈服-桩体破坏阶段。未开裂阶段一、二级荷载下由于土的压密性桩体略微回弹, 桩表面应变、桩身弯矩、受荷段剪力及挠度出现较小的负值(绝对值约为破坏时的 1%)。混凝土开裂-钢筋屈服阶段应变、弯矩、剪力、挠度增速明显加快。钢筋屈服-桩体破坏阶段应变、弯矩、剪力、挠度呈非线性增长, 桩体的破坏模式均为弯剪破坏。随着自由端长度的增加, 破坏时应变、弯矩增大, 而剪力减小, 破坏时应变增长约 10%, 弯矩增长约 3%, 剪力减少约 20%; 相对于单调加载, 循环加载下最大弯矩值和最大挠度均有增大, 最大弯矩增长约 2%, 最大挠度增长约 1%。

关键词: 抗滑桩; 模型试验; 内力分布; 应变特征; 非线性分析

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0114-11

A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile

REN Qingyang^{1,2}, ZHAO Mengyuan², XIE Zhongwei³, WU Xinpei², CHEN Bin²

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Guangxi Water & Power Design Institute, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract: This paper presents an investigation of regularity between the internal force and deformation of anti-slide pile under the actual stress condition, places its emphasis on the regularity of force characteristics, deformation and stability of pile body under the interaction between anti-slide pile and soil. Based on experimental data of large physical model tests of anti-slide pile, and fitting the data with MATLAB, the solution from the strain data of pile surface to the deflection diagram of pile body is realized. The regularity between the strain characteristics and internal force variation of anti-slide pile are analyzed by comparing the strain of pile surface, bending moment of pile body, shear and deflection in the two conditions: different loading conditions under the same pile length and different pile lengths under the same loading condition. The results demonstrate that the working stage of anti-slide pile under the condition of monotone and cyclic loading is divided into three stages: the uncracked stage, concrete cracking-steel yield stage and steel yield-pile destroying stage. Under the first and

收稿日期: 2020-04-11; 修订日期: 2020-07-14

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2016YFC0802206-3); 国家自然科学基金资助项目(41472262); 重庆市高校创新研究群体项目(CXQT19021); 交通运输行业高层次技术人才培养项目(2018-26)

第一作者: 任青阳(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程防灾减灾、滑坡演化与控制、岩土本构关系数值建模研究。

E-mail: qyren@cqjtu.edu.cn

second load levels in the uncracked stage, the stain surface of pile, the bending moment of pile body, the shear force of the load section and deflection appear smaller negative values due to the slight rebound of the compaction pile body of the soil, and the absolute values of the smaller negative values are about 1% the values at the pile destroying stage. The growth rates of strain, bending moment, shear force and deflection of concrete cracking-steel yielding stage are obviously accelerated. Strain, bending moment, shear force and deflection of steel yielding-pile destroying stage show nonlinear growth, and the failure modes of pile body are all bending and shear failure. As the length of the free end increases, strain and bending moment increase by about 10% and 3% at the pile destroying stage, while the shear force decreases by about 20%. Compared with the monotonic loading, the maximum bending moment and maximum deflection increase by about 2% and 1% respectively under cyclic loading.

Keywords: anti-slide pile; model test; internal force distribution; strain characteristics; nonlinear analysis

抗滑桩在各类边坡防护与滑坡治理工程中得到了广泛的研究与应用, 现已成为主要治理措施之一^[1-3]。然而目前抗滑桩应用中理论设计中经验成分较多, 桩身实际内力与变形间的规律研究尚不完善, 特别是桩土相互作用下桩体受力、变形、稳定性等研究^[4-5], 这导致抗滑桩在实际设计中出现桩身配筋过大, 安全系数过高, 截面抗弯能力不能完全发挥, 造成工程造价偏高, 因此深入开展抗滑桩内力与变形研究是当前迫切需要研究的课题之一^[6-8]。

近年来, 国内外研究学者在抗滑桩内力及变形方面已有相关研究成果, 如仵磊等^[9]针对滑坡治理过程中抗滑桩结构设计及滑动面上下桩身内力、变形分析, 给出均布及线性荷载下桩的挠曲微分方程, 不同位移、桩底约束条件及转角边界条件下桩身变形; 祝廷尉等^[10]基于嵌岩桩物理模型试验得出桩受力特征、变形破坏模式及桩身弯矩分布规律; 雷文杰等^[11]进行了深埋桩模型试验, 研究了深埋桩加固滑坡体的作用机制, 分析得出不同桩长下抗滑桩承载能力及桩后推力变化情况; 刘洪佳等^[12]基于悬臂式抗滑桩模型试验, 研究了滑坡推力分布及土体抗力变化情况; 易靖松等^[13-14]基于现场和室内试验通过分析桩身弯矩、应力等研究了加复合排水技术下及不同截面状态下的空心抗滑桩支挡效果; 高波等^[15]开展了现场模型试验, 研究了不同自由段长度下的抗滑桩受力及变形特性; 方景成等^[16]基于数值模拟研究了不同桩土刚度比及布桩位置下桩身内力分布情况; 费鸿禄等^[17]利用 MATLAB 拟合工具对试验测的桩身变形离散数据拟合求得了抗滑桩的剪力和弯矩。目前已有的研究成果主要通过物理模型试验和数值模拟两种手段来探究抗滑桩工作时内力、变形等规律, 但多集中在理论或单一工况, 对于不同工况桩-土相互作用下桩的应

变特征及其内力的关系还有待进一步研究。

本文基于抗滑桩大型物理模型试验, 借助 MTS 伺服机加载装置加载, 深入研究同桩长不同加载条件与同加载条件不同桩长两种工况下抗滑桩变形特征与内力关系, 总结抗滑桩工作时变形特征与内力非线性关系, 为最大程度发挥抗滑桩承载能力提供依据。

1 试验设计

1.1 试验概况

本试验模拟马家沟滑坡实际防治工程抗滑桩。马家沟滑坡位于秭归县吒溪河左岸支沟马家沟与卡子湾滑坡之间, 滑坡纵向长度为 538 m, 前缘高程为 135 m, 后缘高程为 280 m, 平均坡度为 15°, 前后缘宽度分别为 150, 210 m。基岩主要以石英砂岩和粉砂质泥岩为主, 滑体主要由包含松散碎石块、碎土块的残坡堆积层构成。试验探究同桩长不同加载条件和同加载条件不同桩长两种工况下抗滑桩变形特征与内力关系, 总结抗滑桩在工作时变形特征与内力的非线性关系。

室内物理模型试验共进行 3 组, 每组包括工况(1)单调加载、工况(2)循环加载, 具体为: 1.6 m 桩长的单调加载及循环加载试验; 1.8 m 桩长的单调加载及循环加载试验; 2.0 m 桩长的单调加载及循环加载试验。

1.2 试验准备

实际工程抗滑桩断面尺寸为: $h \times b = 2\,000\text{ mm} \times 1\,500\text{ mm}$, 长约 40 m。试验在自行设计的模型箱里进行, 尺寸为 $2.0\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 箱内浇筑 0.8 m 厚混凝土用于模拟基岩, 距模型箱后边界 40 cm 处预留矩形洞用于放置预制抗滑桩。根据本试验中场地条件及加荷条件, 取几何相似为 $\lambda_L = 1:20$, 模型桩断面尺寸为: $h \times b = 150\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 桩长分别为 1.6, 1.8,

2.0 m, 桩体埋置方式为全埋式, 使用 4 根 $\phi 6$ 和 1 根 $\phi 10$ 的光圆钢筋作为受拉钢筋与架立筋, 箍筋 $\phi 6@200$, 保护层厚度 15 mm, 混凝土等级为 C30, 钢筋牌号为 HPB300。滑床和滑体均采用实际工程附近的土, 模型填筑采用人工夯实, 每填 20 cm 夯实一次, 夯实后取土进行室内压缩试验、直剪试验、含水率试验, 测试得到土体参数如表 1 所示。

表 1 模型试验土体实测参数

Table 1 Measured parameters of the model soil

参数	含水率/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa
数值	18.25	17	26	7.1

1.3 试验装置系统

模型试验装置系统主要由加载装置、固定支撑装置与监测装置组成。加载装置包含 MTS 伺服加载试验系统、反力墙、推力分散门, 固定装置包含桩体、土箱固定装置、位移计固定架, 监测装置包括各类数据采集仪 (钢筋计, 应变片等)、数据接收仪、监测 PC、高清摄像头、单反相机。模型试验现场见图 1, 试验装置三维模型见图 2。



图 1 模型试验现场图

Fig. 1 Site of model test

钢筋计布置于 $\phi 10$ 钢筋之上, 每根桩均布置有 2 个, 位置相同, 布设位置从桩底开始依次间隔 0.332, 0.468 m, 具体布置方式见图 3。应变片在桩前、后均有布置, 从桩顶至嵌固端以下 0.2 m 到桩顶, 每隔 0.1 m 贴一个, 用 502 胶水将应变片粘在桩体相应位置处, 用透明胶带包裹, 用塑料保鲜膜将桩包裹, 防止水进入影响应变片工作。具体布置方式见图 4。

1.4 试验加载方式

试验使用 MTS 伺服机对抗滑桩进行加载, 假定滑

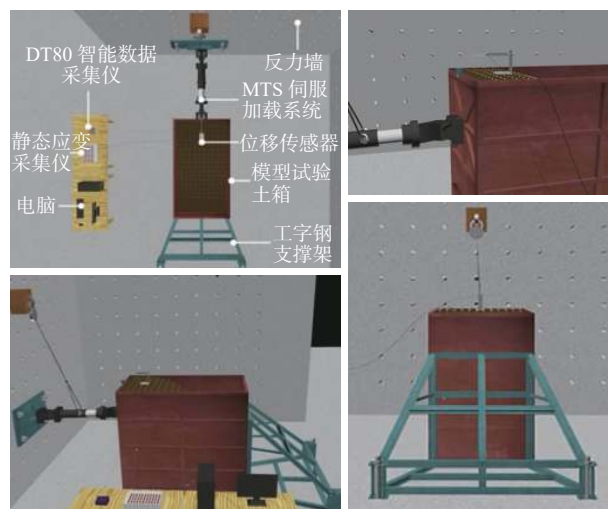


图 2 试验装置三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of the test device

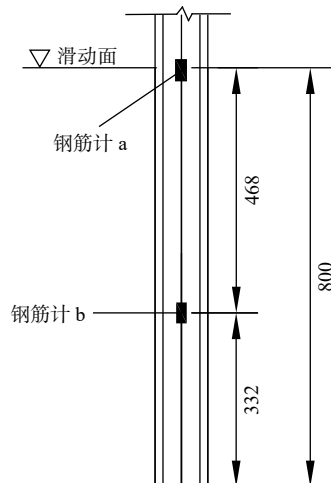


图 3 钢筋计布置示意图 (单位: mm)

Fig. 3 Sketch of arrangement of the reinforcement meter (unit: mm)

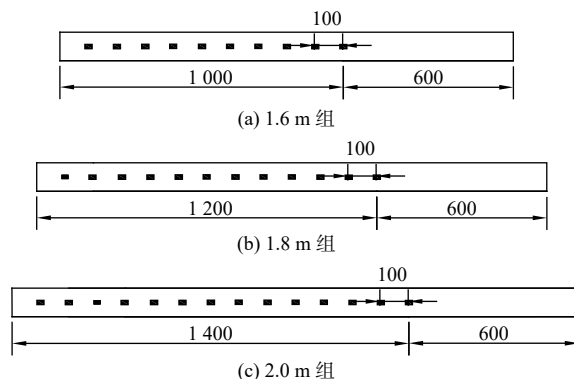


图 4 应变片布置示意图 (单位: mm)

Fig. 4 Sketch of arrangement of the strain gauge (unit: mm)

坡所受推力分布形式为矩形, 即滑坡推力为均布荷载。伺服机只能施加集中荷载, 故特制了一个推力分

散门安装在土的受力面上,使集中力分散为均布荷载。单调加载采用分级加载,直接加载致模型桩体破坏。循环加载先加载至一定荷载,再卸载至 0,最后重新分级加载至桩体破坏。加载步长均设置为 6 kN,每级加载时间均为 5 min,维持时间为 25 min,具体加载方案见表 2。

表 2 各组试验单调、循环加载方案

加载级次	工况(1): 单调加载/kN			工况(2): 循环加载/kN		
	1.6 m	1.8 m	2.0 m	1.6 m	1.8 m	2.0 m
1	0~6	0~6	0~6	0~6	0~6	0~6
2	6~12	6~12	6~12	6~12	6~12	6~12
3	12~18	12~18	12~18	12~18	12~18	12~18
4	18~24	18~24	18~24	18~24	18~24	18~24
5	24~30	24~30	24~30	24~30	24~30	24~30
6	30~36	30~36	30~36	30~24	30~36	30~36
7	36~42	36~42	36~42	24~18	36~30	36~30
8	42~48	42~48	42~48	18~12	30~24	30~24
9	48~54	48~54	48~54	12~6	24~18	24~18
10	54~60	54~60	54~60	6~0	18~12	18~12
11	60~66	60~63	60~66	0~6	12~6	12~6
12	66~72		66~69	6~12	6~0	6~0
13	72~78			12~18	0~6	0~6
14	78~84			18~24	6~12	6~12
15	84~90			24~30	12~18	12~18
16	90~96			30~36	18~24	18~24
17	96~102			36~42	24~30	24~30
18				42~48	30~36	30~36
19				48~54	36~42	36~42
20				54~60	42~48	42~48
21				60~66	48~54	48~54
22				66~72	54~60	54~60
23				72~78	60~66	60~66
24				78~84	66~70	66~72
25				84~90		

2 试验结果分析

2.1 桩表面应变及钢筋应力分析

图 5、图 6、图 7 分别为不同桩长两种加载条件下的桩前后应变分布,图 8 为各工况破坏时桩前后应变对比分布。1.6, 1.8, 2.0 m 桩自由段长度分别为 0.8, 1.0, 1.2 m, 固定段长度都为 0.8 m。由图 8 可知,桩前后表面变形集中分布于滑动面上下 0.2 m 范围内,同工况下桩后拉应变均大于桩前压应变。

应变分布曲线试验前期较集中,相邻两级差值较小,前两级由于土的压实导致桩体回弹应变数值为负,抗滑桩处于混凝土未开裂阶段。试验中期每级荷

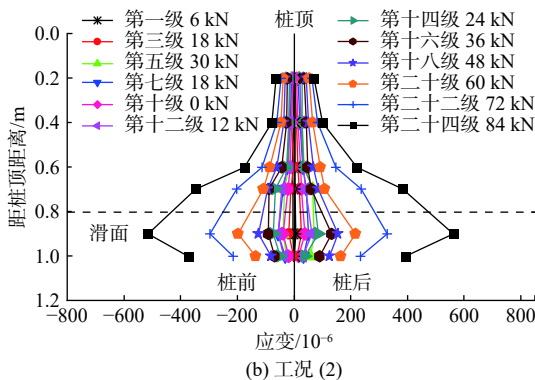
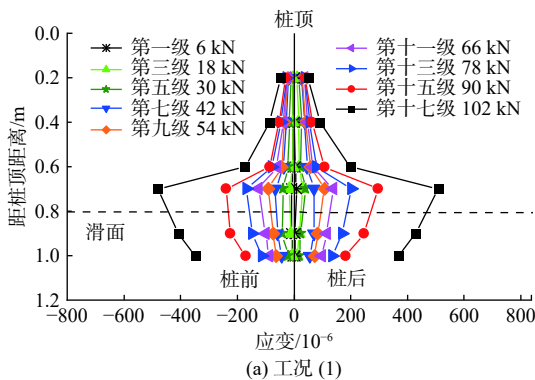


图 5 1.6 m 桩前、后应变分布图

Fig. 5 Strain diagram of the front and back of 1.6 m pile

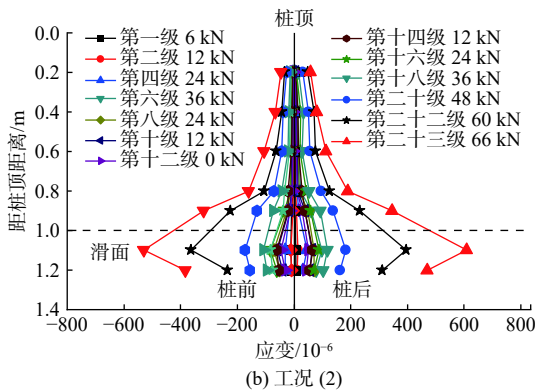
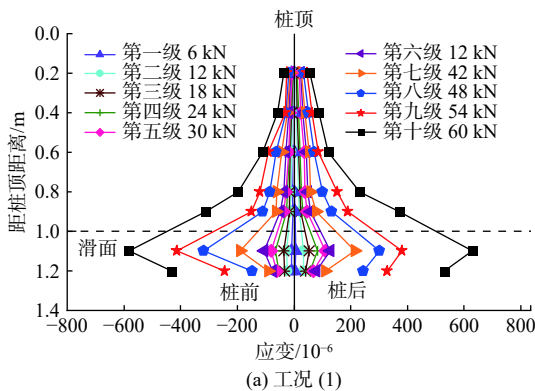


图 6 1.8 m 桩前、后应变分布图

Fig. 6 Strain diagram of the front and back of 1.8 m pile

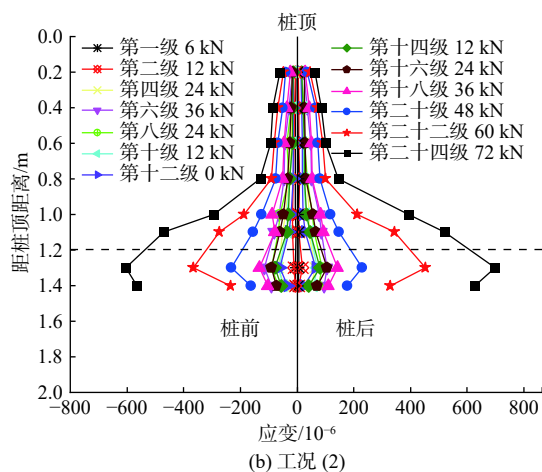
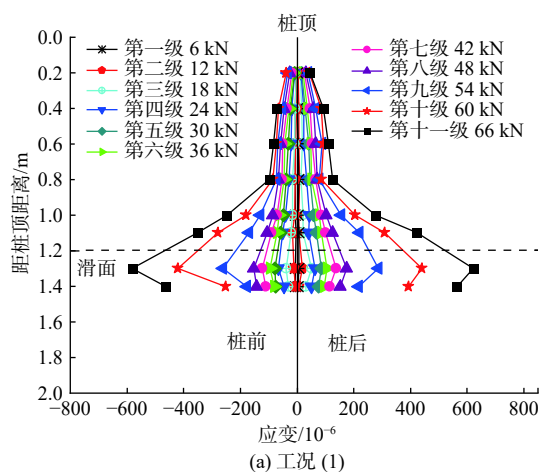


图7 2.0 m 桩前、后应变分布图

Fig. 7 Strain diagram of the front and back of 2.0 m pile

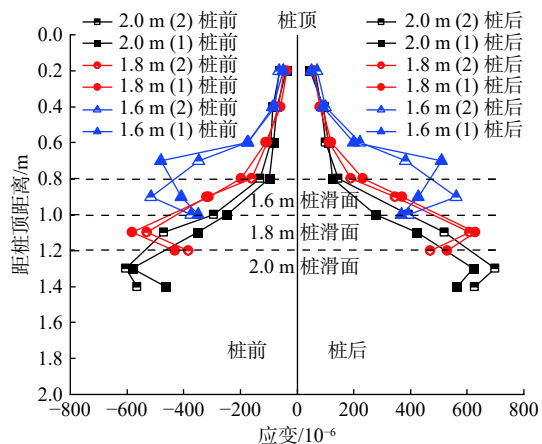


图8 各工况破坏时桩前后应变对比分布图

Fig. 8 Contrast of strain diagram of the front and back of pile after damage under various conditions

载间应变增速略微加快,抗滑桩处于混凝土开裂-钢筋屈服阶段。试验后期特别是破坏前三级,每级增量快速增加,曲线较为分散,呈现出非线性,桩体进入钢筋屈服-混凝土破坏阶段。

不同桩长下应变突变集中在滑动面上下 0.2 m 范围内,与开挖填土后观测的桩体裂缝分布一致,除 1.6 m 组工况(1)的最大应变位于滑动面以上 0.1 m 处,其他最大应变都位于滑动面以下 0.1 m 处,最大应变分布位置区别明显,分析原因如下:1.6 m(1)试验最先进行,夯土过程夯击数把握不准导致滑动面土体过于紧实;桩前模型土箱封闭导致桩前至模型土箱边缘间土体在加载过程中形成土柱,增加了嵌固段的深度,使 1.6 m(1)工况最大应变位置上移。由图 8 可知破坏时应变从滑动面附近向桩体两端递减,由此趋势分析得桩体的破坏模式均为弯剪破坏,与开挖填土后观测到桩体破坏形式一致。随着自由段长度增加,破坏时桩前后应变增大,相较于单调加载,循环加载破坏时应变大,说明桩长增加,截面抗弯性能得到更充分利用,且循环加载更有利于抗滑桩承载能力发挥。

分别取各组试验滑动面上下约 0.2 m 范围内的三处较明显的桩后应变值作应变增量曲线图,同时与受拉区钢筋拉力增量曲线进行联合分析。

图 9、图 10、图 11 分别为不同桩长两种加载条件

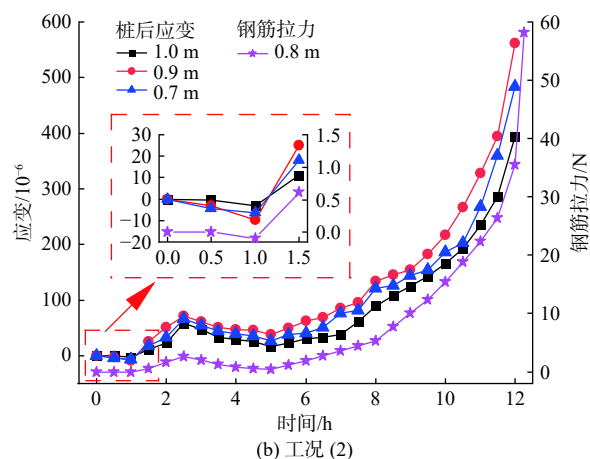
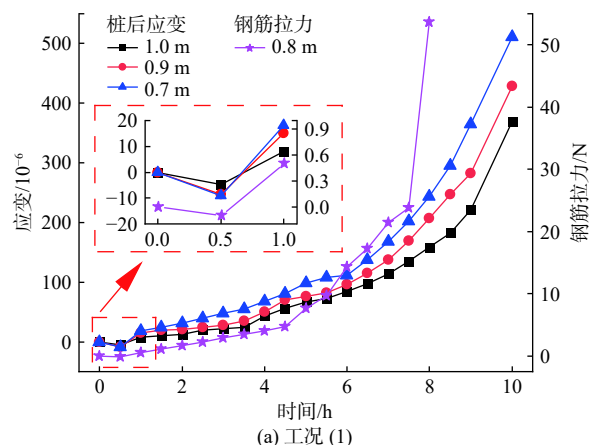


图9 1.6 m 桩应变、钢筋应力增量曲线图

Fig. 9 Increment curve of strain and steel stress of 1.6 m pile

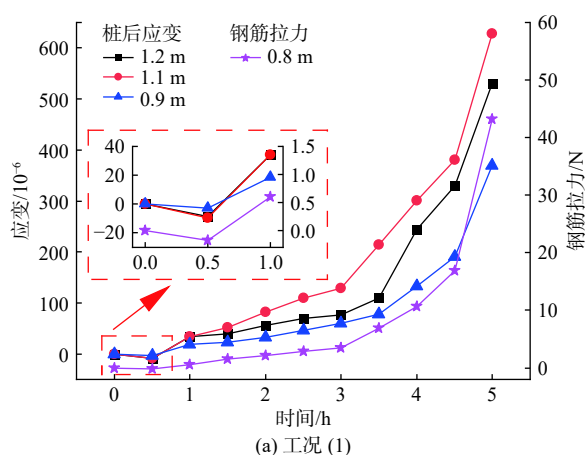


图 10 1.8 m 桩应变、钢筋应力增量曲线图

Fig. 10 Increment curve of strain and steel stress of 1.8 m pile

下应变、钢筋应力增量曲线图。由图可知, 钢筋拉力增量曲线呈平缓-加速-拉升的分段线性变化, 应变增量曲线整体呈平缓-加速变化, 其分段性较钢筋拉力增量曲线表现性差, 故采用两者联合分析。试验前期, 应变、钢筋拉力增量曲线呈平缓线性增长, 此时混凝土未开裂, 钢筋、混凝土共同承载, 抗滑桩处于未开裂阶段, 其中, 试验最开始一个多小时内, 即前几级加载下, 应变、钢筋拉力增量曲线均出现一小段下凹现象, 应变、钢筋拉力值由 0 先变为负值再增长, 这是由于土的压实导致桩体回弹。试验中期, 钢筋拉力增量曲线加速增长, 应变增量曲线较试验前期斜率稍增但整体仍呈平稳增长状态, 此时混凝土开裂, 使拉力逐渐由钢筋独自承担, 抗滑桩处于混凝土开裂-钢筋屈服阶段。试验后期, 钢筋拉力增量曲线呈拉升增长状态, 应变增量曲线加速增长, 此时钢筋经过屈服阶段进入强化阶段, 拉力短时间内急剧上升, 抗滑桩处于钢筋屈服-桩体破坏阶段。

同工况不同桩长情况下, 破坏时的应变随自由段

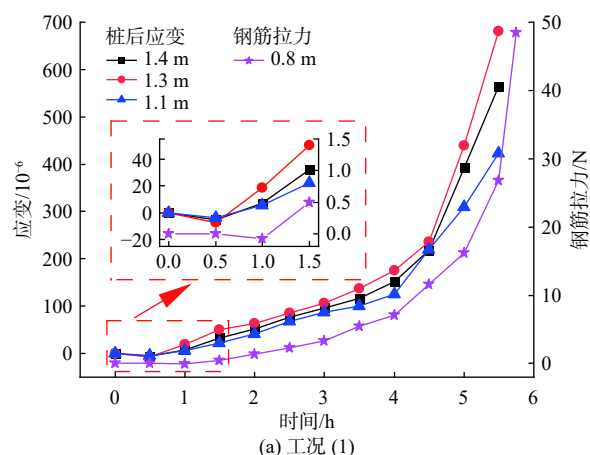


图 11 2.0 m 桩应变、钢筋应力增量曲线图

Fig. 11 Increment curve of strain and steel stress of 2.0 m pile

增长而增大; 同桩长下, 工况(2)循环加载较工况(1)单调加载下, 破坏时应变增大, 与前文应变分布图分析一致。在试验前期, 工况(1)单调加载下包括回弹段及单调加载段, 工况(2)循环加载下包括回弹段、一次加载段、卸载段及二次加载段, 其中卸荷至 0 时两类增量曲线均未归 0, 表明桩身已产生了永久变形。

2.2 桩身弯矩、剪力及挠度求解与分析

(1) 桩身弯矩、剪力及挠度求解实现

计算流程见图 12。

① 桩身弯矩的求解

开裂区弯矩通过钢筋频率数据换算拉力值, 从而算得对应监测截面处的弯矩^[18], 计算公式为:

$$T+T'=\alpha_1 f_c b x \quad (1)$$

$$M=\alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + T'(h_0 - a'_s) \quad (2)$$

式中: T ——受拉区钢筋拉力/N;

T' ——受压区钢筋拉力/N;

α_1 ——等效矩形应力图系数, 对于强度等级小于

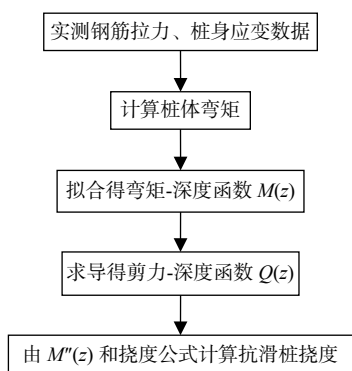


图 12 抗滑桩挠度计算流程图

Fig. 12 Computation of process of deflection of anti-slide pile

等于 C50 的混凝土, 其值取 1;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值/(N·mm⁻²);

b ——桩截面宽度/mm;

x ——混凝土受压区高度/mm;

M ——桩身弯矩/(N·m);

h_0 ——受拉区钢筋合力点至截面受压区边缘的距离/mm;

α'_s ——受压钢筋合力点至截面受压区边缘的距离/mm。

未开裂区弯矩根据材料力学中的弹性梁的弯曲理论计算而得^[19-20], 计算公式为:

$$M = \frac{EI(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2h} \quad (3)$$

式中: I ——抗滑桩惯性矩/m⁴;

E ——桩体弹性模量/Pa;

ε_1 、 ε_2 ——桩前、后应变;

h ——桩截面高度/mm。

利用 MATLAB 最小二乘法对计算出的桩身弯矩散点数据进行拟合, 得到深度-弯矩拟合函数:

$$M(z) = \sum_{i=0}^n a_i z^i = a_0 + a_1 z^1 + \cdots + a_n z^n \quad (4)$$

其中, a_0 、 a_1 、……、 a_n 为拟合的待定系数。

② 桩身剪力、挠度的求解

由式(4)经过求导即可求得抗滑桩任意埋深 z (m) 处的横截面剪力 $Q(z)$:

$$Q(z) = M'(z) \quad (5)$$

再对式(5)求导即可求得推力在桩身上的分布集度 $F_\phi(z)$:

$$F_\phi(z) = M''(z) \quad (6)$$

由式(6)可得出滑坡推力在桩上的分布情况, 再由挠度计算公式即可得出抗滑桩的挠度值。

(2) 桩身弯矩拟合及结果分析

经试算, 对于 1.6 m 桩采用 3 次拟合效果最优, 可得桩身弯矩-深度拟合函数为:

$$M_{i,1.6}(z) = \sum_{j=1}^4 a_{ij} z^j = a_{i1} + a_{i2} z^1 + a_{i3} z^2 + a_{i4} z^3$$

相对于 1.6 m 桩, 1.8, 2.0 m 桩在滑动面上下 0.3 m 范围内弯矩值变化趋势更明显, 这导致采用单一拟合效果不佳, 具体为: 低次拟合弯矩变化趋势不明显, 高次拟合曲线龙格效应明显, 故对于 1.8, 2.0 m 桩分别以桩深 0.7, 0.8 m 为临界点采用 3 次、4 次分段拟合, 临界点以上部分采用 3 次拟合求导, 以下部分采用 4 次拟合求导, 可得 1.8, 2.0 m 桩桩身弯矩-深度拟合函数分别为:

$$M_{i,1.8}(z) = \begin{cases} \sum_{j=1}^4 a_{ij} z^j = a_{i1} + a_{i2} z^1 + a_{i3} z^2 + a_{i4} z^3 & 0.2 \leq z \leq 0.7 \\ \sum_{j=1}^5 a_{ij} z^j = a_{i1} + a_{i2} z^1 + a_{i3} z^2 + a_{i4} z^3 + a_{i5} z^4 & 0.7 < z \leq 1.0 \end{cases}$$

$$M_{i,2.0}(z) = \begin{cases} \sum_{j=1}^4 a_{ij} z^j = a_{i1} + a_{i2} z^1 + a_{i3} z^2 + a_{i4} z^3 & 0.2 \leq z \leq 0.8 \\ \sum_{j=1}^5 a_{ij} z^j = a_{i1} + a_{i2} z^1 + a_{i3} z^2 + a_{i4} z^3 + a_{i5} z^4 & 0.8 < z \leq 1.0 \end{cases}$$

图 13、图 14、图 15 分别为不同桩长在两种加载条件下的弯矩-深度拟合曲线。由图可知, 各级弯矩-深度拟合曲线分布规律与应变分布曲线大致相同, 说明整体拟合计算效果良好。桩身弯矩主要分布于距桩顶 0.2 m 到滑动面以下 0.2 m 范围内, 除 1.6 m(1) 工况, 其余工况桩身最大弯矩值均位于滑动面以下约 0.1 m 处, 与桩表面应变分布一致。1.6 m(1) 工况桩身最大弯矩值与其他工况分布不同的原因已在桩表面应变分析部分解释, 不再赘述。

在加载前期和中期弯矩分布曲线相差较小, 曲线分布密集, 由于这两个阶段经土传递到桩上的荷载较小, 对内力分布形式未产生影响, 一、二级荷载下由于桩体回弹均出现较小的负值, 与上文应变分布曲线及应变、钢筋拉力增量曲线分析一致, 加载前期和中期, 抗滑桩分别处于混凝土未开裂阶段、混凝土开裂-钢筋屈服阶段。加载后期各深度处弯矩值急剧增长, 抗滑桩处于钢筋屈服-混凝土破坏阶段。

在整个加载过程中, 6 根桩的弯矩曲线在深度上均呈现非线性变化, 弯矩分布集中在距桩顶 0.2 m 到滑动面以下 0.2 m 范围内。循环加载条件下, 卸荷段弯矩减小, 但卸荷至 0 时, 弯矩值不为 0, 这是因为桩

身已发生永久变形。滑动面上下 0.2 m 范围的弯矩增幅最大, 与桩体裂缝主要分布位置相对应, 说明该范围为主要抗弯段。相对于单调加载, 循环加载下最大

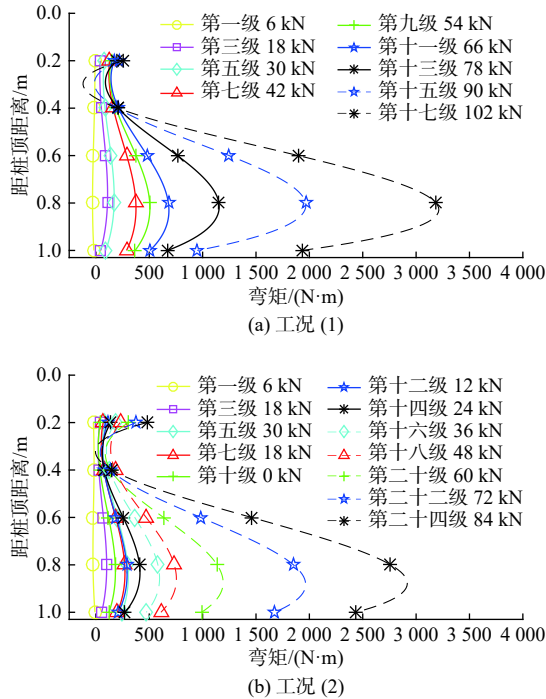


图 13 1.6 m 桩弯矩-深度函数拟合曲线

Fig. 13 Fitted curves of the bending moment-depth function of 1.6 m pile

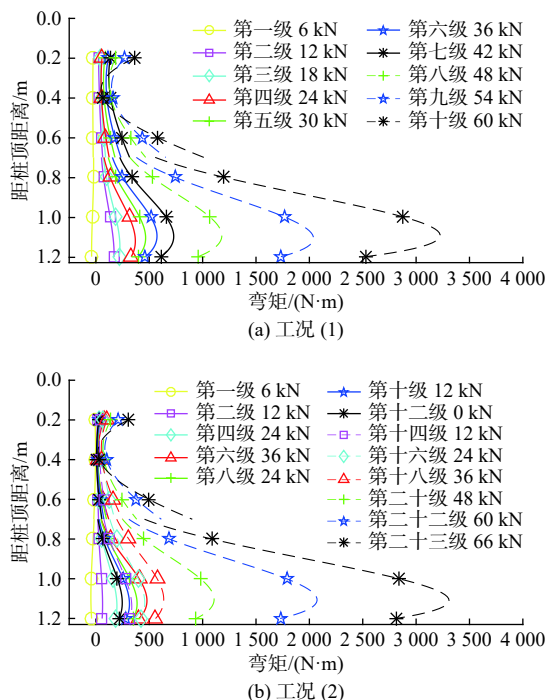


图 14 1.8 m 桩弯矩-深度函数拟合曲线

Fig. 14 Fitted curves of the bending moment-depth function of 1.8 m pile

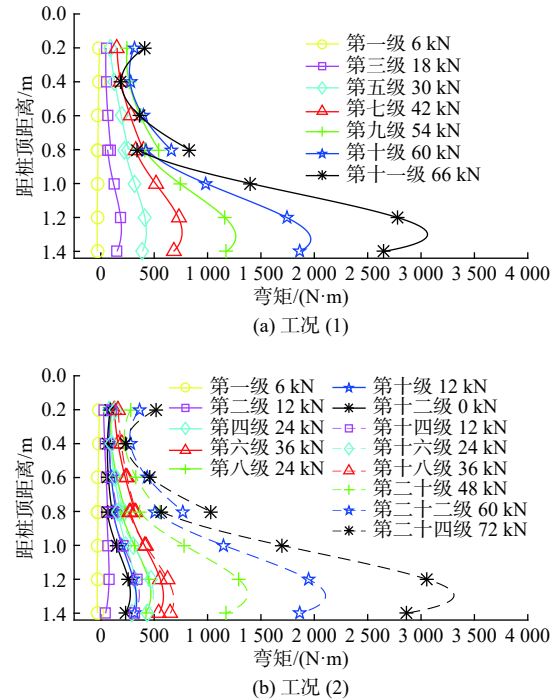


图 15 2.0 m 桩弯矩-深度函数拟合曲线

Fig. 15 Fitted curves of the bending moment-depth function of 2.0 m pile

弯矩值增大, 说明循环加载条件下截面抗弯性能利用更充分, 有利于抗滑桩承载能力发挥。

(3) 桩身剪力结果分析

图 16、图 17、图 18 分别为不同桩长在两种加载条件下的桩剪力分布。由图可知, 剪力集中分布在滑动面上下 0.4 m 范围内, 该范围剪力大致呈抛物线型, 在距桩顶 0.3 m 左右的剪力由负号变为正号, 是由于弯矩-深度拟合函数拟合时在距桩顶约 0.3 ~ 0.4 m 处产生了微弱的龙格现象, 且龙格现象随该处的弯矩值增长而增大, 故导致剪力求解时此部分出现了剪力值的正负性变化。

加载前期, 各级荷载下剪力曲线分布密集, 沿桩长各处剪力值较小, 前两级剪力值正负性与以后各级剪力值正负性相反, 与前文试验结果分析一致, 抗滑桩处于混凝土未开裂阶段。加载中期, 各级荷载下剪力分布曲线间隔明显, 沿桩长剪力值有所增长, 抗滑桩处于混凝土开裂-钢筋屈服阶段。加载后期, 各级荷载下剪力分布曲线呈非线性趋势, 沿桩长各处剪力值达到较大值, 抗滑桩处于钢筋屈服-混凝土破坏阶段。

桩顶处及嵌固段未粘贴应变片, 导致桩顶、桩底附近的弯矩-深度曲线拟合结果存在较大误差, 该区域剪力求导结果与实际吻合较差, 故边界附近只取桩顶点、桩底点处的理论剪力值绘制分布曲线。在桩中部

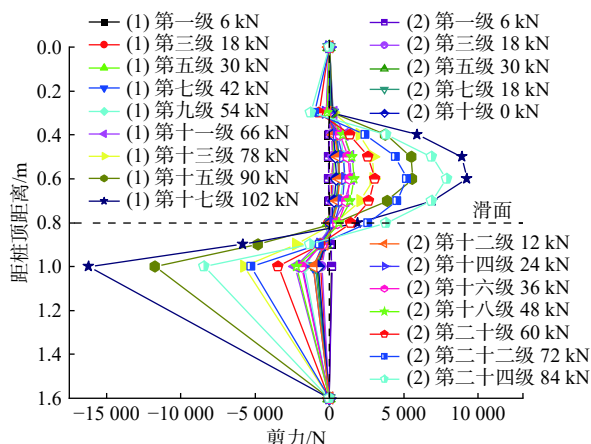


图 16 1.6 m 桩剪力分布图

Fig. 16 Shear diagram of 1.6 m pile

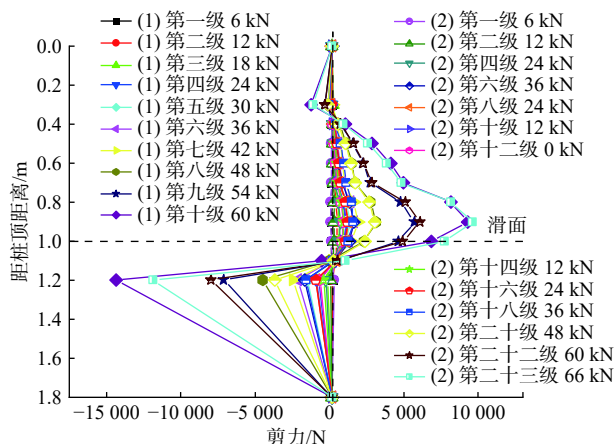


图 17 1.8 m 桩剪力分布图

Fig. 17 Shear diagram of 1.8 m pile

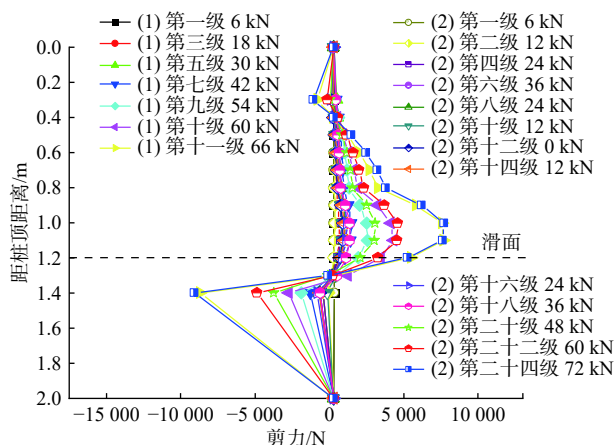


图 18 2.0 m 桩剪力分布图

Fig. 18 Shear diagram of 2.0 m pile

剪力集中分布区域求导结果相对准确,其中除 1.6 m 组工况(1)剪力分布曲线的反弯点位于滑动面处,其他剪力分布曲线反弯点都位于滑动面以下 0.1 m 处,与应变、弯矩趋势一致,区别明显的原因已在应变结

果分析中叙述。1.8, 2.0 m 桩分别在桩深 0.7, 0.8 m 处出现内凹点,此处为弯矩-深度拟合曲线 3 次、4 次分段拟合的临界点。不同桩长下只对比 1.8, 2.0 m 桩的剪力分布图,由图 17 和图 18 可得,自由段越长,剪力越小。

(4) 桩身挠度结果分析

图 19、图 20、图 21 分别为不同桩长在两种加载条件下的桩身挠度分布。桩体挠度沿桩长呈非线性分布,最大挠度值在 8~13 mm 范围内,桩顶处挠度值最大。

试验初期桩体回弹,挠度均出现较小负值,随着荷载的增加,桩身挠度变化缓慢,抗滑桩处于混凝土未开裂阶段。试验中后期挠度变化明显,尤其在最后三级呈非线性增长,抗滑桩分别处于混凝土开裂-钢筋屈服阶段、钢筋屈服-混凝土破坏阶段。

循环加载卸荷段,桩体回弹挠度值减小,但卸荷至 0 时,挠度值不为 0,这是因为桩身已发生永久变形。挠度均在破坏一级发生突变,变化量远超上一

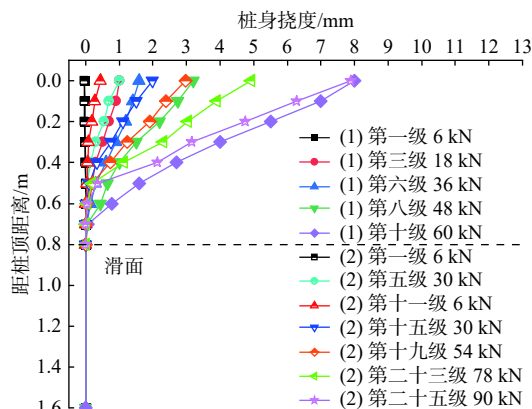


图 19 1.6 m 桩身挠度分布图

Fig. 19 Deflection diagram of 1.6 m pile

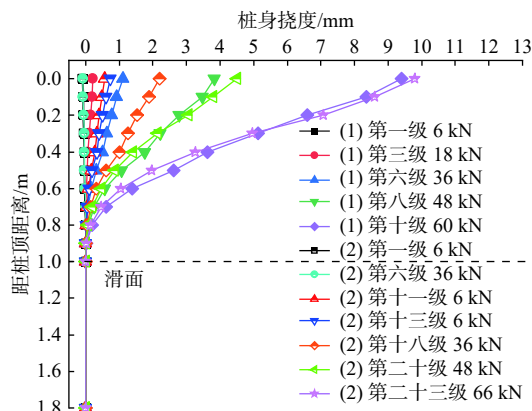


图 20 1.8 m 桩身挠度分布图

Fig. 20 Deflection diagram of 1.8 m pile

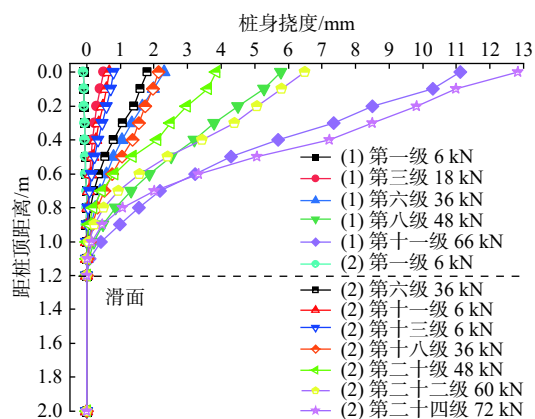


图 21 2.0 m 桩身挠度分布图

Fig. 21 Deflection diagram of 2.0 m pile

级。随着自由端长度增加,桩身挠度值增大,抗滑桩整体稳定性降低。

3 结论

(1)抗滑桩工作划分为三个阶段:未开裂阶段,包括桩体回弹及回弹后;混凝土开裂-钢筋屈服阶段,混凝土出现裂缝;钢筋屈服-桩体破坏阶段,受拉钢筋屈服进入强化阶段。

(2)不同桩长下桩身内力与变形的关系为:随着自由段增加,截面抗弯性能得到更充分的利用(截面抗弯性能提升约 3%),而抗剪能力减弱(抗剪性能下降约 20%)。

(3)不同加载方式下桩身内力与变形的关系为:在不同加载条件下,循环加载更有利于桩体发挥承载能力,相较单调加载约提升 2%。

参考文献 (References) :

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M]. 2版.北京:人民交通出版社,2010:432-446. [ZHENG Yingren, CHEN Zuyu, WANG Gongxian, et al. Engineering treatment of slope & landslide[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2010: 432-446. (in Chinese)]
- [2] 李海光.新型支挡结构设计工程实例[M]. 2版.北京:人民交通出版社,2011:227-272. [LI Haiguang. Design and engineering examples of new retaining structure[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2011: 227-272. (in Chinese)]
- [3] 张娟,李博融,曹升亮,等.黄土边坡原位直剪与抗滑桩模型试验[J].中国公路学报,2019,32(8):35-48. [ZHANG Juan, LI Furong, CAO Shengliang, et al.

Model test of vertical shear and anti-slide pile in situ on loess slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(8): 35-48. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 傅翔,谢强,张永兴,等.全埋式抗滑桩倾覆破坏的室内模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(8):2205-2211. [FU Xiang, XIE Qiang, ZHANG Yongxing, et al. Model experimental study of toppling failure of fully-embedded anti-sliding pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2205 - 2211. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 铁道部第二勘测设计院.抗滑桩设计与计算[M].北京:中国铁道出版社,1981:1-38. [The Second Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Design and calculation of anti-slide pile[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1981: 1-38. (in Chinese)]
- [6] 戴自航,张晓咏,邹盛堂,等.现场模拟水平分布式滑坡推力的抗滑桩试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(10):1513-1518. [DAI Zihang, ZHANG Xiaoyong, ZOU Shengtang, et al. Field modeling of laterally distributed landslide thrusts over anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (10): 1513 - 1518. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 戴自航.抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):517-521. [DAI Zihang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517 - 521. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王秀丽,金兆鑫,董文燕,等.舟曲锁儿头滑坡抗滑桩监测及分析[J].水文地质工程地质,2015,42(5):123-128. [WANG Xiuli, JIN Zhaoxin, DONG Wenyan, et al. Monitoring and analysis of anti-slide pile of the Suo'ertou large landslide in Zhouqu[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 123 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 仵磊,马丽英,冷曦晨,等.滑坡治理中的抗滑桩设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2002,32(2):162-165. [NIE Lei, MA Liying, LENG Xichen, et al. Anti-slide pile design in slope prevention[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2002, 32(2): 162 - 165. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 祝廷尉,胡新丽,徐聪,等.嵌岩桩抗滑特性的物理模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(增刊1):165-172. [ZHU Tingwei, HU Xinli, XU Cong, et al. Physical model test research on anti-sliding characteristics of rock-

- socketed pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (Sup1): 165 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 雷文杰, 郑颖人, 王恭先, 等. 沉埋桩加固滑坡体模型试验的机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1347 – 1355. [LEI Wenjie, ZHENG Yingren, WANG Gongxian, et al. Mechanism analysis of slope reinforcement with deeply buried piles with model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1347 – 1355. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等. 悬臂式抗滑桩模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 2960 – 2966. [LIU Hongjia, MEN Yuming, LI Xunchang, et al. Study of model test on cantilever anti-slide pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(10): 2960 – 2966. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 易靖松, 石胜伟, 张世林, 等. 基于大型现场试验的空心桩抗滑支挡加复合排水技术研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 95 – 100. [YI Jingsong, SHI Shengwei, ZHANG Shilin, et al. Research of the hollow anti-sliding pile retaining wall composite drainage technique based on large scale field test[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 95 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 易靖松, 张世林, 孙金辉, 等. 不同截面形态的空心抗滑桩支挡效果对比研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 121 – 128. [YI Jingsong, ZHANG Shilin, SUN Jinhui, et al. A comparative study of the retaining effect of hollow pile in different sections[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 121 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 高波, 石胜伟, 张世林, 等. 不同自由段长度的滑坡前缘抗滑桩受力变形特性的现场模型试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(5): 183 – 190. [GAO Bo, SHI Shengwei, ZHANG Shilin, et al. Study on model test of deformation characteristics of different free segment length of anti-slide piles at the front of landslides[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5): 183 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 方景成, 邓华锋, 李建林, 等. 桩土刚度比及布桩位置对桩身内力分布的影响研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(3): 487 – 493. [FANG Jingcheng, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Effect of pile-soil stiffness ratio and pile distribution on pile internal force distribution[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(3): 487 – 493. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 费鸿禄, 张国辉, 费聿鹏. MATLAB拟合工具在抗滑桩变形受力中的应用[J]. *世界科技研究与发展*, 2013, 35(1): 24 – 27. [FEI Honglu, ZHANG Guohui, FEI Yupeng. Application of MATLAB fitting tool in deformation and stress of landslide anti-slide piles[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2013, 35(1): 24 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 抗滑桩内力的监测与计算[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(5): 18 – 22. [SHEN Yongjiang, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Monitoring and calculation of anti-slide piles internal force[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(5): 18 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 雍睿, 胡新丽, 唐辉明, 等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 3018 – 3027. [YONG Rui, HU Xinli, TANG Huiming, et al. Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 3018 – 3027. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李寻昌. 滑坡与锚杆抗滑桩相互作用的大型物理模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. [LI Xunchang. Large physical model test on the interaction between the landslide and anchor anti-slide pile [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华