

基于有限元极限分析的桩基础荷载下边坡稳定性

彭文哲, 赵明华[†], 杨超炜

(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:为探讨桩基础荷载作用下边坡稳定性变化的一般规律,提出相应的稳定性系数计算方法.首先,概述有限元极限分析方法,并引入某陡坡段桩基础工程实例,验证了该数值分析方法的合理性;其次,通过对桩顶水平荷载、黏聚力、桩坡相对位置等因素进行归一化处理,给出了不同工况时桩基础荷载下边坡稳定性系数计算方法,并将其以表格形式表示;然后,在探究桩基础荷载下边坡破坏模式的同时,引入荷载影响因子表征桩顶水平荷载对边坡稳定性系数的影响,并提出了桩基础荷载下边坡稳定性系数半理论半经验方法;最后,探讨了桩顶水平荷载、边坡坡比、内摩擦角、黏聚力及桩坡相对位置对边坡稳定性系数的影响.结果表明边坡稳定性系数与内摩擦角及黏聚力正相关,与桩顶水平荷载负相关.以上分析可为陡坡段桥梁工程设计提供参考,具有一定的理论及工程应用价值.

关键词:桥梁工程;桩基础;边坡;稳定性系数;有限元极限分析

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Study on Slope Stability under Loads Induced by Pile Foundations Based on Finite Element Limit Analysis

PENG Wenzhe, ZHAO Minghua[†], YANG Chaowei

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper aims to investigate the general law of slope stability under pile foundation-induced loads and propose a calculation method of corresponding stability coefficients. Firstly, the finite element limit analysis method is introduced and verified by the case for the pile foundation in sloping ground. Next, some factors (e.g. lateral load atop the pile, cohesion, and the relative position between pile and slope) are normalized, and the calculation method of stability coefficients of the slope subjected to pile foundation-induced loads under various conditions is presented and expressed in tabular form. Then, the load impact factor is presented to characterize the effect of lateral loads atop piles on slope stability factors, while slope failure modes are explored, and the semi-experiential and semi-theoretical method of slope stability coefficient under loads induced by pile foundations are presented. Finally, the effect of lateral loads atop piles, the slope inclination, internal friction angle of soils, cohesion, and pile position on slope stability factors are discussed. The results show that the slope stability factors are positively correlated with internal friction angle and cohesion, and negatively correlated with lateral loads atop the pile. These above-

* 收稿日期:2021-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108317,51908208), National Natural Science Foundation of China(52108317,51908208)

作者简介:彭文哲(1993-),男,湖南邵阳人,湖南大学助理研究员,博士

[†] 通信联系人, E-mail: mhzhaohd@21cn.com

mentioned analyses can provide references for bridge engineering design in the sloping ground, which are of certain theoretical and engineering application value.

Key words: bridge engineering; pile foundation; slope; stability coefficient; finite element limit analysis

为积极响应“一带一路”政策,一些高速公(铁)路以桥梁形式穿越我国中西部山区^[1-4].在桥梁施工或运营过程中,上部结构水平荷载(车辆制动及强风甚至地震惯性力等)将通过桩基础传递至边坡(简称“桩基础荷载”),该荷载与滑坡推力存在较大区别,但依旧会导致边坡稳定性降低甚至失稳破坏^[5-7].

桩基础荷载下边坡稳定性研究鲜有报道.Uto等^[5]提及两例水平受荷桩引起的砂质及软岩边坡失稳案例.Nakasima等^[6]通过假定破坏楔几何形状,提出了边坡局部稳定性分析方法.随后,Ng等^[7]基于有限元法,探究从桩基础向边坡的荷载传递机理以及边坡失稳的演化过程,并通过强度折减法评价水平受荷桩对边坡局部及整体失稳的影响.近年来,一些学者开始基于强度折减有限元法探究陡坡段桩基对边坡稳定性的影响^[8-11].雷国辉等^[8]针对长江防洪堤边坡,对比分析原边坡与桩基承载后边坡的稳定性,提出了将桩位设在合适持力层可利用桩基存在抵消桩基础荷载的影响;邹振兴^[9]与申启坤^[10]模拟山店江大桥边坡,研究表明桩位由坡脚向坡顶靠近的过程中,边坡稳定性系数呈现先增大后减小的趋势;于德顺^[11]建立西南某岩质边坡工程FLAC3D计算模型,探究了不同桩长对岩质边坡稳定性的影响.

综上,桩基础荷载下的边坡稳定性分析已开始受到关注;然而,现有研究大多通过初步对比原边坡及桩基承载后边坡的稳定性,提出一些规律性结论:如桩基将一定程度上提高边坡稳定性,但桩顶承受水平荷载后,边坡稳定性将会降低,并未给出适用于工程初步设计的桩基础荷载下边坡稳定性计算方法;《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 3363—2019)^[12]虽对桩基础荷载下的边坡安全系数作出要求,但尚未形成较为系统的稳定性系数计算方法^[13],有待科研工作者进一步地探究.

基于此,本文将以桩基础荷载下的边坡为研究对象:①概述本文采用的数值分析方法,并引入陡坡段桩基础算例验证其合理性;②对桩顶水平荷载、黏聚力、桩坡相对位置等因素进行归一化处理,给出了不同工况时桩基础荷载下边坡稳定性系数计算方

法;③探究桩基础荷载下边坡破坏模式的同时,提出桩基础荷载下边坡稳定性系数半理论半经验方法;④探讨桩顶水平荷载、内摩擦角、黏聚力及桩坡相对位置对边坡稳定性系数的影响.

1 有限元极限分析及验证

常用的边坡稳定性分析方法中:极限平衡法^[14-15]的前提是假定土体为理想刚塑性体,未能考虑土体内部的应力-应变状态;有限元法^[16]适应性较广,但用在工程设计时量化边坡稳定性则较为繁琐;极限分析法^[17]较适用于工程设计,但需事先假定破坏面的位置.有限元极限分析兼具有限元法及极限分析法的优势,能自动搜索出最危险滑动面,并且只需计算极限状态下的边坡稳定性系数,兼顾计算精度与效率,适用于岩土工程稳定性分析^[18].本文选用有限元极限分析软件OptumG2求解边坡稳定性系数时,采用的是强度折减法.通过同比例降低土体强度指标,可定义其稳定性系数为土体实际强度指标和边坡刚好失稳时的土体强度指标之比.

某水平受荷桩位于边坡坡度为 32° ,高度为15 m的全风化花岗岩边坡上,岩体内摩擦角为 35° ,黏聚力为10 kPa,弹性模量为50 MPa,泊松比为0.3,重度为 18 kN/m^3 .该桩桩长为30 m,直径为2 m,埋深为22.5 m;桩身混凝土弹性模量为26 GPa,泊松比为0.2,重度为 24 kN/m^3 .根据British Standards Institution建议,混凝土桩的极限抗剪强度为 $F_v=0.85f_c^{0.5}A$,其中 f_c 为混凝土抗压强度, A 为桩身横截面积.采用OptumG2建立数值模型(图1),边坡土体采用基于Mohr-Coulomb准则的弹塑性本构模型,桩基础采用线弹性材料模拟.边界条件为标准边界条件,即模型两侧约束横向位移,模型底部完全固定.采用强度折减极限分析及自适应网格划分(图2),单元数量及初始单元数量设置分别为10 000及1 000,进行3次自适应迭代,控制变量选为剪切耗散.采用本文数值方法对不同工况下边坡稳定性系数进行计算,将其结果与参考文献值进行对比,如表1所示.

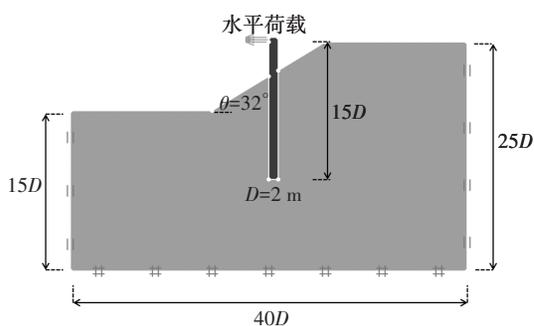


图 1 数值模型

Fig.1 Numerical modeling

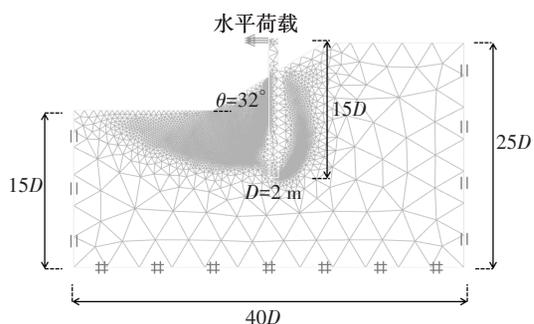


图 2 自适应网格划分

Fig.2 Adaptive remeshing technique

表 1 桩基础荷载下边坡稳定性系数计算结果对比
Tab.1 Comparisons of stability coefficients of slope under pile foundation-induced loads

| 工况 | 水平荷载 F/F_u | 边坡稳定性系数 | | | |
|----|--------------|------------------------|------|-------------|---------------------|
| | | N_g 等 ^[7] | 本文值 | 简化 Bishop 法 | Morgenstern-Price 法 |
| 无桩 | — | 1.90 | 1.84 | 1.84 | 1.83 |
| | 0 | 2.00 | 2.07 | — | — |
| 有桩 | 0.12 | 1.20 | 1.22 | — | — |
| | 0.36 | <1.00 | 0.76 | — | — |

由表 1 可知:基于有限元极限分析的稳定性系数与其他理论及数值结果相差不大,表明本文方法能较好地评估桩基础荷载下的边坡稳定性.当考虑桩基础的存在时,边坡稳定性系数从 1.9 提升至 2.0,说明桩基础将一定程度上提高边坡稳定性.随着桩顶水平荷载的增大,边坡稳定性系数逐渐降低;当荷载达到 $0.36F_u$ 时,受文献[7]计算方法的局限性,参考文献得出此时的边坡稳定性系数小于 1.00.

此外,引入经典边坡案例^[14]:边坡坡度为 30° ,坡高为 13.7 m,土体内摩擦角 φ 为 10° ,黏聚力 c 为 23.94 kPa,重度 γ 为 19.63 kN/m^3 ,抗滑桩位于距离坡

脚 $s=13.7 \text{ m}$ 处,桩长为 25 m,桩径为 $D=0.91 \text{ m}$,桩体重度为 24 kN/m^3 ,弹性模量为 $E_p=30 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.2$.数值建模过程与前述过程一致,其区别在于桩顶不存在水平荷载.将抗滑桩加固前后的边坡稳定性系数数值计算结果与参考文献[14-17]结果进行对比(表 2)可知,本文数值计算模型用于分析桩-坡系统的稳定性系数是可行的.

表 2 抗滑桩加固边坡的稳定性系数计算结果对比

Tab.2 Comparisons of stability coefficients of slope reinforced by piles

| 工况 | 边坡稳定性系数 | | | | |
|-----|----------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|------|
| | 极限平衡法 | | 有限元法 ^[16] | 极限分析法 ^[17] | 本文值 |
| | 摩擦圆法 ^[14] | 简化 Bishop ^[15] | | | |
| 加固前 | 1.08 | 1.12 | 1.11 | 1.11 | 1.11 |
| 加固后 | 1.82 | — | 1.42 | 1.5 | 1.45 |

2 边坡稳定性系数计算方法

为探讨桩基础荷载下边坡稳定性的一般规律(边坡坡比 V/H 、桩顶水平荷载 F 、土体内摩擦角 φ 、黏聚力 c 及桩坡相对位置 s 等因素),首先对 F 、 c 和 s 进行归一化处理,即 F/F_u 、 $c/\gamma D$ 和 s/H .其中, V 和 H 分别为边坡垂直及水平投影, s 为基桩到坡脚的水平距离.以文献[7]为例,通过计算不同工况下边坡稳定性系数,可提出桩基础荷载下边坡稳定性系数计算方法,将其以表格形式表示(表 3~表 5),其余工况可通过插值确定.

3 边坡破坏模式及稳定性分析

3.1 破坏模式

图 3 为不同工况下的边坡剪切耗散云图,颜色由暗色转为亮色,表明剪切耗散逐渐增大.据此,可归纳总结桩基础荷载下边坡典型破坏模式:当桩基础位于边坡中部时[图 3(a)和 3(b)],坡脚侧浅层土体将发生局部失稳,而边坡发生整体失稳,破坏面自坡脚延伸至坡顶;当荷载由 $\alpha=0.06$ 增大至 $\alpha=0.12$,坡脚侧土体局部失稳加剧[图 3(b)].当桩基础位于坡顶时,边坡潜在滑动面位置受到桩基础的限制[图 3(c)],但随着水平荷载的增大,坡顶处土体将因桩基变形过大的缘故而发生局部破坏[图 3(d)].

表3 桩基础荷载下边坡稳定性系数($V:H=1:2$)
 Tab.3 Stability coefficients of slope under pile foundation-induced loads($V:H=1:2$)

| $\alpha/\%$ | s/H | $\varphi/(^\circ)$ | $c/\gamma D$ | | | | $\varphi/(^\circ)$ | $c/\gamma D$ | | | |
|-------------|-------|--------------------|--------------|------|------|------|--------------------|--------------|------|------|------|
| | | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 3 | 1/4 | 15 | 0.84 | 1.10 | 1.36 | 1.62 | 20 | 1.04 | 1.31 | 1.57 | 1.83 |
| | 1/2 | | 0.92 | 1.21 | 1.50 | 1.80 | | 1.14 | 1.44 | 1.74 | 2.04 |
| | 3/4 | | 1.03 | 1.35 | 1.67 | 2.00 | | 1.28 | 1.60 | 1.92 | 2.25 |
| | 1 | | 1.20 | 1.56 | 1.92 | 2.28 | | 1.50 | 1.86 | 2.22 | 2.59 |
| | 1/4 | 25 | 1.26 | 1.53 | 1.79 | 2.05 | 30 | 1.49 | 1.77 | 2.03 | 2.29 |
| | 1/2 | | 1.38 | 1.68 | 1.98 | 2.27 | | 1.64 | 1.94 | 2.24 | 2.54 |
| | 3/4 | | 1.54 | 1.87 | 2.20 | 2.53 | | 1.83 | 2.16 | 2.49 | 2.83 |
| | 1 | | 1.81 | 2.18 | 2.55 | 2.92 | | 2.10 | 2.49 | 2.88 | 3.27 |
| 6 | 1/4 | 15 | 0.55 | 0.71 | 0.87 | 1.03 | 20 | 0.70 | 0.85 | 1.00 | 1.16 |
| | 1/2 | | 0.65 | 0.84 | 1.04 | 1.24 | | 0.81 | 1.01 | 1.20 | 1.40 |
| | 3/4 | | 0.75 | 0.98 | 1.22 | 1.46 | | 0.94 | 1.17 | 1.40 | 1.64 |
| | 1 | | 0.91 | 1.19 | 1.47 | 1.76 | | 1.15 | 1.43 | 1.71 | 1.99 |
| | 1/4 | 25 | 0.85 | 1.00 | 1.16 | 1.31 | 30 | 1.02 | 1.17 | 1.33 | 1.48 |
| | 1/2 | | 0.99 | 1.19 | 1.38 | 1.58 | | 1.18 | 1.37 | 1.56 | 1.76 |
| | 3/4 | | 1.14 | 1.37 | 1.60 | 1.84 | | 1.36 | 1.59 | 1.82 | 2.05 |
| | 1 | | 1.39 | 1.67 | 1.95 | 2.23 | | 1.65 | 1.93 | 2.21 | 2.50 |
| 9 | 1/4 | 15 | 0.43 | 0.53 | 0.64 | 0.74 | 20 | 0.55 | 0.65 | 0.75 | 0.85 |
| | 1/2 | | 0.51 | 0.65 | 0.79 | 0.93 | | 0.65 | 0.78 | 0.92 | 1.06 |
| | 3/4 | | 0.59 | 0.77 | 0.95 | 1.13 | | 0.75 | 0.92 | 1.09 | 1.27 |
| | 1 | | 0.74 | 0.95 | 1.16 | 1.39 | | 0.92 | 1.13 | 1.35 | 1.57 |
| | 1/4 | 25 | 0.68 | 0.78 | 0.88 | 0.98 | 30 | 0.82 | 0.92 | 1.02 | 1.12 |
| | 1/2 | | 0.79 | 0.92 | 1.06 | 1.20 | | 0.95 | 1.08 | 1.22 | 1.35 |
| | 3/4 | | 0.92 | 1.09 | 1.26 | 1.43 | | 1.10 | 1.26 | 1.43 | 1.60 |
| | 1 | | 1.12 | 1.34 | 1.55 | 1.77 | | 1.34 | 1.55 | 1.76 | 1.98 |
| 12 | 1/4 | 15 | 0.37 | 0.44 | 0.51 | 0.59 | 20 | 0.47 | 0.54 | 0.62 | 0.70 |
| | 1/2 | | 0.43 | 0.53 | 0.64 | 0.75 | | 0.55 | 0.65 | 0.76 | 0.86 |
| | 3/4 | | 0.50 | 0.63 | 0.77 | 0.91 | | 0.64 | 0.77 | 0.90 | 1.04 |
| | 1 | | 0.61 | 0.78 | 0.96 | 1.14 | | 0.78 | 0.95 | 1.13 | 1.30 |
| | 1/4 | 25 | 0.59 | 0.66 | 0.74 | 0.81 | 30 | 0.71 | 0.78 | 0.86 | 0.94 |
| | 1/2 | | 0.67 | 0.77 | 0.88 | 0.98 | | 0.81 | 0.91 | 1.01 | 1.11 |
| | 3/4 | | 0.78 | 0.91 | 1.05 | 1.18 | | 0.94 | 1.07 | 1.20 | 1.33 |
| | 1 | | 0.95 | 1.12 | 1.29 | 1.46 | | 1.14 | 1.30 | 1.47 | 1.64 |

表 4 边坡稳定性系数($V:H=5:8$)
 Tab.4 Stability coefficients of slope under pile foundation-induced loads($V:H=5:8$)

| $\alpha/\%$ | s/H | $\varphi/(\text{°})$ | $c/\gamma D$ | | | | $\varphi/(\text{°})$ | $c/\gamma D$ | | | |
|-------------|-------|----------------------|--------------|------|------|------|----------------------|--------------|------|------|------|
| | | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 3 | 1/4 | 15 | 0.83 | 1.09 | 1.35 | 1.61 | 20 | 1.03 | 1.29 | 1.55 | 1.81 |
| | 1/2 | | 0.87 | 1.15 | 1.43 | 1.71 | | 1.09 | 1.37 | 1.65 | 1.93 |
| | 3/4 | | 0.94 | 1.24 | 1.55 | 1.85 | | 1.16 | 1.46 | 1.77 | 2.07 |
| | 1 | | 1.10 | 1.48 | 1.83 | 2.17 | | 1.32 | 1.68 | 2.03 | 2.39 |
| | 1/4 | 25 | 1.24 | 1.51 | 1.78 | 2.04 | 30 | 1.47 | 1.75 | 2.01 | 2.27 |
| | 1/2 | | 1.31 | 1.59 | 1.87 | 2.16 | | 1.56 | 1.84 | 2.13 | 2.42 |
| | 3/4 | | 1.40 | 1.71 | 2.01 | 2.32 | | 1.66 | 1.97 | 2.27 | 2.58 |
| | 1 | | 1.62 | 1.98 | 2.33 | 2.69 | | 1.84 | 2.21 | 2.58 | 2.95 |
| 6 | 1/4 | 15 | 0.57 | 0.74 | 0.91 | 1.09 | 20 | 0.72 | 0.89 | 1.05 | 1.22 |
| | 1/2 | | 0.61 | 0.80 | 0.99 | 1.19 | | 0.77 | 0.96 | 1.15 | 1.34 |
| | 3/4 | | 0.68 | 0.90 | 1.11 | 1.33 | | 0.84 | 1.05 | 1.27 | 1.48 |
| | 1 | | 0.84 | 1.14 | 1.39 | 1.65 | | 1.00 | 1.27 | 1.53 | 1.80 |
| | 1/4 | 25 | 0.88 | 1.04 | 1.21 | 1.38 | 30 | 1.06 | 1.22 | 1.38 | 1.55 |
| | 1/2 | | 0.94 | 1.12 | 1.31 | 1.50 | | 1.14 | 1.33 | 1.54 | 1.70 |
| | 3/4 | | 1.03 | 1.24 | 1.45 | 1.66 | | 1.24 | 1.45 | 1.65 | 1.86 |
| | 1 | | 1.25 | 1.51 | 1.77 | 2.03 | | 1.42 | 1.69 | 1.96 | 2.23 |
| 9 | 1/4 | 15 | 0.45 | 0.56 | 0.68 | 0.80 | 20 | 0.58 | 0.69 | 0.80 | 0.92 |
| | 1/2 | | 0.48 | 0.62 | 0.76 | 0.91 | | 0.63 | 0.76 | 0.89 | 1.03 |
| | 3/4 | | 0.52 | 0.68 | 0.85 | 1.01 | | 0.66 | 0.83 | 0.99 | 1.16 |
| | 1 | | 0.63 | 0.83 | 1.06 | 1.29 | | 0.77 | 0.99 | 1.22 | 1.44 |
| | 1/4 | 25 | 0.71 | 0.82 | 0.93 | 1.04 | 30 | 0.85 | 0.96 | 1.07 | 1.19 |
| | 1/2 | | 0.77 | 0.89 | 1.01 | 1.14 | | 0.82 | 1.06 | 1.19 | 1.33 |
| | 3/4 | | 0.82 | 0.96 | 1.10 | 1.24 | | 0.99 | 1.14 | 1.30 | 1.45 |
| | 1 | | 0.96 | 1.16 | 1.37 | 1.57 | | 1.13 | 1.35 | 1.56 | 1.78 |
| 12 | 1/4 | 15 | 0.39 | 0.47 | 0.56 | 0.64 | 20 | 0.50 | 0.58 | 0.66 | 0.74 |
| | 1/2 | | 0.42 | 0.53 | 0.64 | 0.75 | | 0.55 | 0.64 | 0.74 | 0.84 |
| | 3/4 | | 0.46 | 0.59 | 0.72 | 0.85 | | 0.58 | 0.71 | 0.84 | 0.97 |
| | 1 | | 0.57 | 0.74 | 0.93 | 1.13 | | 0.69 | 0.88 | 1.06 | 1.25 |
| | 1/4 | 25 | 0.61 | 0.69 | 0.78 | 0.86 | 30 | 0.74 | 0.82 | 0.90 | 0.98 |
| | 1/2 | | 0.67 | 0.77 | 0.88 | 0.98 | | 0.79 | 0.89 | 1.00 | 1.10 |
| | 3/4 | | 0.72 | 0.84 | 0.96 | 1.08 | | 0.86 | 0.98 | 1.10 | 1.22 |
| | 1 | | 0.86 | 1.04 | 1.23 | 1.41 | | 1.00 | 1.18 | 1.37 | 1.55 |

表5 边坡稳定性系数计算表格($V:H=3:4$)
 Tab.5 Stability coefficients of slope under pile foundation-induced loads($V:H=3:4$)

| $\alpha/\%$ | s/H | $\varphi/(\text{°})$ | $c/\gamma D$ | | | | $\varphi/(\text{°})$ | $c/\gamma D$ | | | |
|-------------|-------|----------------------|--------------|------|------|------|----------------------|--------------|------|------|------|
| | | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| 3 | 1/4 | 15 | 0.78 | 1.03 | 1.28 | 1.52 | 20 | 0.98 | 1.22 | 1.46 | 1.71 |
| | 1/2 | | 0.84 | 1.11 | 1.38 | 1.66 | | 1.04 | 1.32 | 1.59 | 1.86 |
| | 3/4 | | 0.92 | 1.22 | 1.53 | 1.83 | | 1.15 | 1.45 | 1.76 | 2.06 |
| | 1 | | 1.03 | 1.36 | 1.69 | 2.03 | | 1.28 | 1.61 | 1.95 | 2.29 |
| | 1/4 | 25 | 1.18 | 1.42 | 1.68 | 1.92 | 30 | 1.40 | 1.64 | 1.89 | 2.14 |
| | 1/2 | | 1.26 | 1.53 | 1.80 | 2.08 | | 1.50 | 1.77 | 2.04 | 2.32 |
| | 3/4 | | 1.38 | 1.69 | 2.00 | 2.31 | | 1.64 | 1.94 | 2.24 | 2.56 |
| | 1 | | 1.47 | 1.83 | 2.19 | 2.55 | | 1.66 | 2.05 | 2.44 | 2.84 |
| 6 | 1/4 | 15 | 0.54 | 0.70 | 0.86 | 1.01 | 20 | 0.69 | 0.84 | 0.99 | 1.14 |
| | 1/2 | | 0.61 | 0.80 | 0.99 | 1.17 | | 0.76 | 0.94 | 1.12 | 1.31 |
| | 3/4 | | 0.68 | 0.90 | 1.12 | 1.35 | | 0.86 | 1.08 | 1.30 | 1.52 |
| | 1 | | 0.78 | 1.03 | 1.28 | 1.53 | | 0.98 | 1.23 | 1.48 | 1.73 |
| | 1/4 | 25 | 0.84 | 0.99 | 1.14 | 1.29 | 30 | 1.00 | 1.15 | 1.30 | 1.45 |
| | 1/2 | | 0.93 | 1.11 | 1.29 | 1.48 | | 1.11 | 1.29 | 1.47 | 1.65 |
| | 3/4 | | 1.04 | 1.26 | 1.48 | 1.69 | | 1.24 | 1.46 | 1.67 | 1.88 |
| | 1 | | 1.18 | 1.43 | 1.68 | 1.93 | | 1.41 | 1.66 | 1.91 | 2.15 |
| 9 | 1/4 | 15 | 0.43 | 0.54 | 0.64 | 0.74 | 20 | 0.55 | 0.65 | 0.76 | 0.86 |
| | 1/2 | | 0.48 | 0.62 | 0.76 | 0.89 | | 0.61 | 0.74 | 0.87 | 1.01 |
| | 3/4 | | 0.55 | 0.72 | 0.89 | 1.05 | | 0.69 | 0.85 | 1.01 | 1.18 |
| | 1 | | 0.63 | 0.82 | 1.02 | 1.22 | | 0.80 | 0.99 | 1.18 | 1.37 |
| | 1/4 | 25 | 0.68 | 0.78 | 0.88 | 0.98 | 30 | 0.81 | 0.91 | 1.02 | 1.12 |
| | 1/2 | | 0.75 | 0.88 | 1.01 | 1.14 | | 0.90 | 1.03 | 1.16 | 1.29 |
| | 3/4 | | 0.85 | 1.01 | 1.17 | 1.33 | | 1.02 | 1.18 | 1.34 | 1.49 |
| | 1 | | 0.97 | 1.16 | 1.35 | 1.53 | | 1.15 | 1.34 | 1.53 | 1.71 |
| 12 | 1/4 | 15 | 0.37 | 0.44 | 0.51 | 0.59 | 20 | 0.47 | 0.54 | 0.62 | 0.70 |
| | 1/2 | | 0.41 | 0.51 | 0.62 | 0.72 | | 0.52 | 0.62 | 0.73 | 0.83 |
| | 3/4 | | 0.47 | 0.60 | 0.73 | 0.86 | | 0.59 | 0.72 | 0.85 | 0.97 |
| | 1 | | 0.54 | 0.69 | 0.85 | 1.00 | | 0.68 | 0.83 | 0.98 | 1.13 |
| | 1/4 | 25 | 0.58 | 0.65 | 0.73 | 0.81 | 30 | 0.71 | 0.78 | 0.86 | 0.94 |
| | 1/2 | | 0.65 | 0.75 | 0.85 | 0.95 | | 0.78 | 0.88 | 0.97 | 1.07 |
| | 3/4 | | 0.73 | 0.85 | 0.97 | 1.10 | | 0.87 | 0.99 | 1.11 | 1.24 |
| | 1 | | 0.83 | 0.98 | 1.13 | 1.27 | | 0.99 | 1.14 | 1.29 | 1.43 |

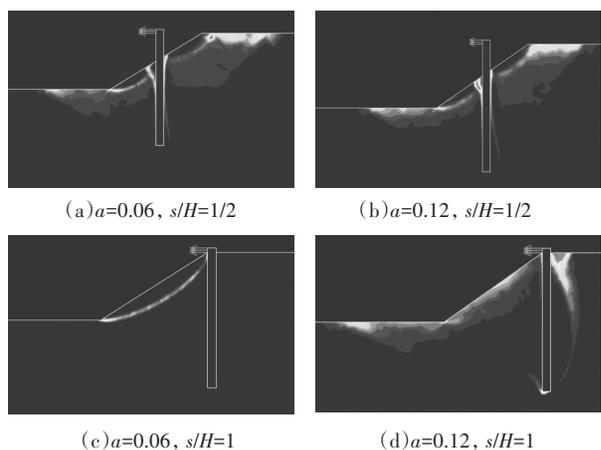


图 3 边坡破坏模式

Fig.3 Slope failure modes

3.2 边坡稳定性系数半理论半经验方法

为提出以理论分析为基础的边坡稳定性系数半理论半经验方法,定义荷载影响因子 η 为某水平荷载下边坡稳定性系数 β 与无荷载条件下边坡稳定性系数 β_0 之比,如式(1)所示.

$$\eta = \beta / \beta_0 \quad (1)$$

将数值计算结果中荷载影响因子 η -桩顶水平荷载系数 α 对应关系绘制成图 4.由此可见,边坡稳定性系数随桩顶水平荷载的增大均呈非线性减小,且不同桩位下的边坡稳定性系数变化趋势较为相似,均可采用两条三次函数包络线限定其取值范围.此外,荷载影响因子 η 主要与桩顶水平荷载系数及桩坡相对位置有关,受内摩擦角及黏聚力影响较小.

综上可知,桩基础荷载下边坡稳定性系数的复杂计算过程可简化为求解抗滑桩加固条件下边坡稳定性系数及荷载影响因子;针对前者,目前学术界与

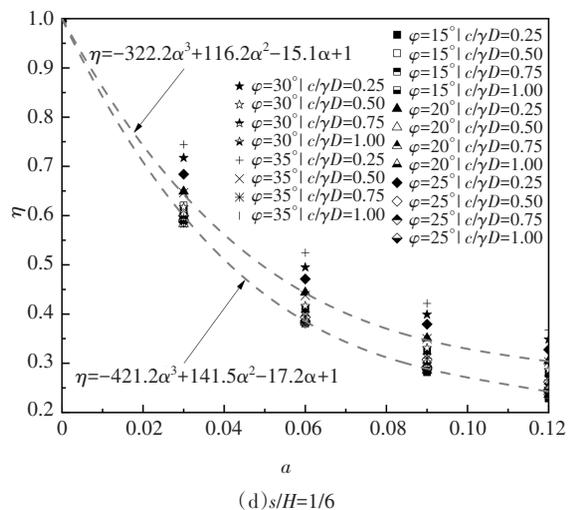
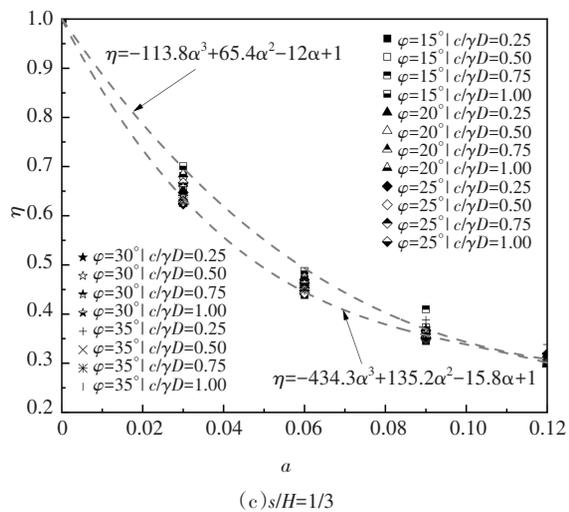
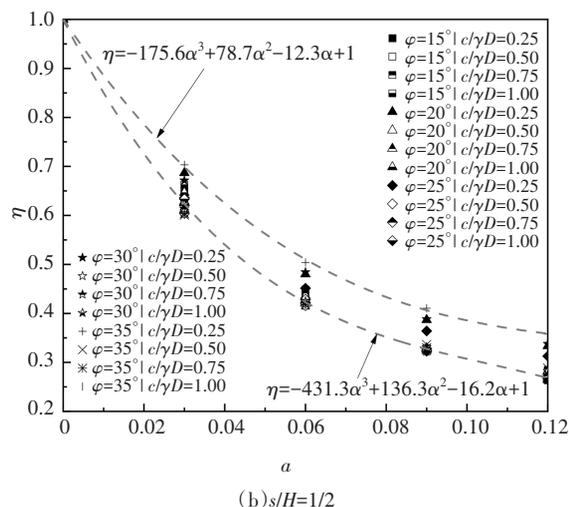
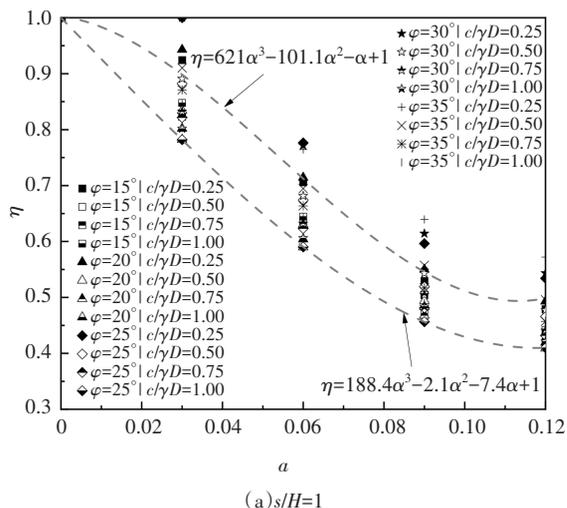


图 4 荷载影响因子与水平荷载关系
Fig.4 Relationship between load impact factors and lateral loads

工程界已有较为系统的计算方法,比直接求解桩基础荷载下边坡稳定性系数简单得多;而后者可通过本文数值结果(表 3~表 5)进行拟合(图 4)获得.

因此,本文提出以理论分析为基础的边坡稳定性系数半理论半经验方法,如式(2)所示.

$$\eta_l \cdot \beta_0 \leq \beta \leq \eta_u \cdot \beta_0 \quad (2)$$

式中: η_l 和 η_u 分别为荷载影响因子的下包络线和上包络线,均可表示为三次函数,即 $\eta_l=A_l\alpha^3+B_l\alpha^2+C_l\alpha+1$ 和 $\eta_u=A_u\alpha^3+B_u\alpha^2+C_u\alpha+1$, A_l 、 B_l 、 C_l 和 A_u 、 B_u 、 C_u 为荷载影响因子的拟合系数,见表6.由图4可知,本文荷载影响因子上、下包络线的差值基本都小于0.1,因此,依据式(2)对桩基础荷载下边坡稳定性系数进行计算是可行的.

表6 荷载影响因子的拟合系数

Tab.6 Fitting coefficients of load impact factor

| 工况 | A_l | B_l | C_l | A_u | B_u | C_u |
|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| $s/H=1$ | 188.4 | -2.1 | -7.4 | 621.0 | -101.1 | -1.0 |
| $s/H=1/2$ | -431.3 | -136.3 | -16.2 | -175.6 | 78.7 | -12.3 |
| $s/H=1/3$ | -434.3 | 135.2 | -15.8 | -113.8 | 65.4 | -12.0 |
| $s/H=1/6$ | -421.2 | 141.5 | -17.2 | -322.2 | 116.2 | -15.1 |

3.3 参数分析(桩坡相对位置)

图5为桩基础荷载下边坡稳定性系数的一般规律.由图5可知:1)当 s/H 等于或接近0时,边坡受桩基础荷载影响较小,可视为桩基础未处在边坡影响范围内.此外,随着桩基础自坡脚向坡顶移动,边坡稳定性系数逐渐增加,其原因在于桩基入土深度增大,抵抗桩基变形的土体随之增多,也有利于抵抗边坡的潜在滑动趋势,因而,当桩长及桩顶高度确定时,应尽量选择靠近坡顶的桩位.2)边坡稳定性系数随内摩擦角及黏聚力的增大而增大,因此,应尽可能选择土体强度较高的边坡段,若强度难以达到设计要求,可考虑采用注浆等措施提高其强度.

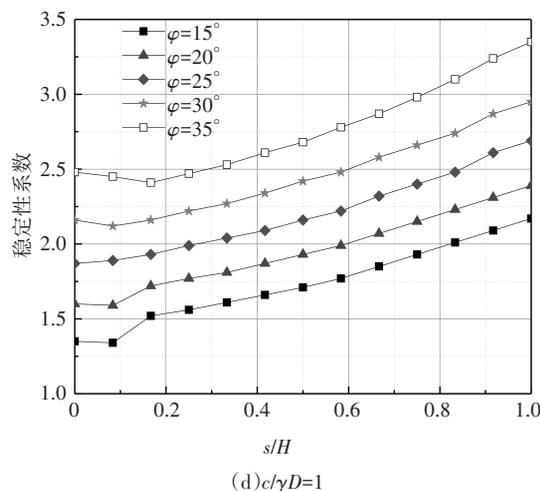
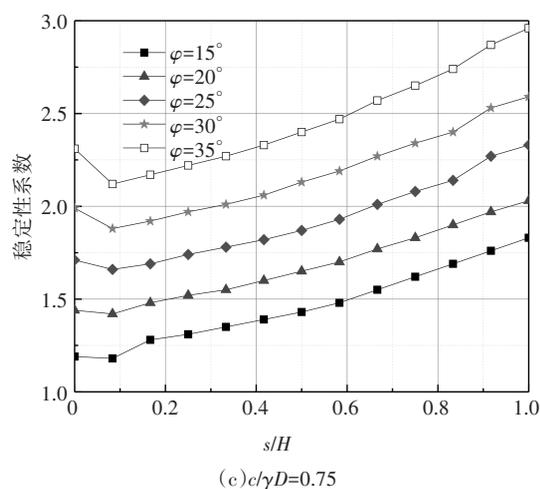
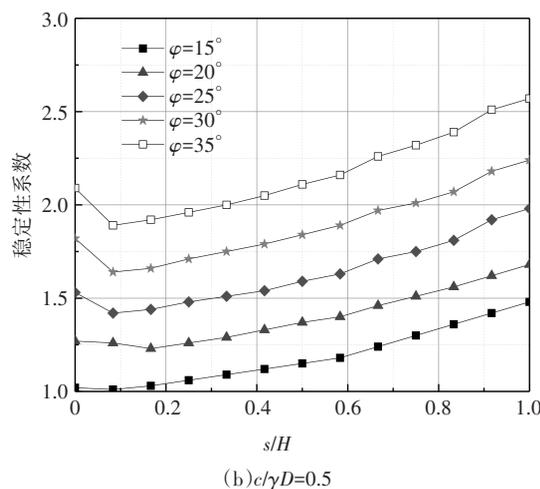
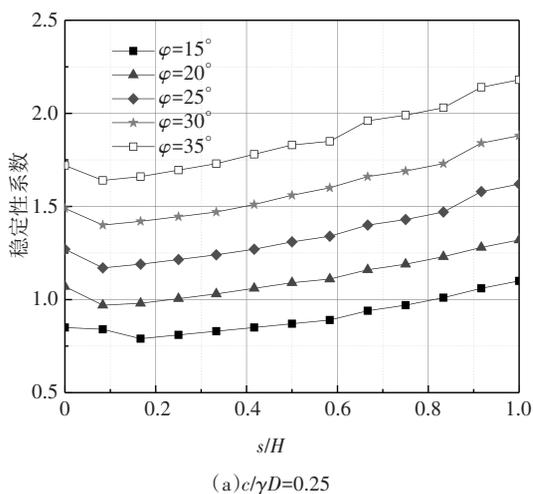


图5 边坡稳定性系数与桩坡相对位置的关系($\alpha=3\%$)
Fig.5 Relationship curves between slope stability coefficients and pile positions ($\alpha=3\%$)

4 结论

1) 针对桩基础荷载作用下的边坡稳定性,采用有限元极限分析方法探讨其破坏模式,并通过数值分析给出了不同工况时桩基础荷载下边坡稳定性系

数计算方法,将其计算结果以表格形式表示,以期为同类工程提供一定的参考。

2) 提出荷载影响因子,将其定义为某水平荷载作用下边坡稳定性系数与无桩顶荷载条件下边坡稳定性系数之比;将桩基础荷载下边坡稳定性系数的复杂计算过程简化为求解抗滑桩加固条件下边坡稳定性系数及荷载影响因子,提出以理论分析为基础的边坡稳定性系数半理论半经验方法。

3) 桩基础自坡脚向坡顶移动的过程中,边坡稳定性系数逐渐增加;边坡稳定性系数随内摩擦角及黏聚力的增大而增大,与天然边坡的变化规律相同;随着桩顶水平荷载的增大,边坡稳定性系数出现明显下降。

参考文献

- [1] NIMITYONGSKUL N, KAWAMATA Y, RAYAMAJHI D, *et al.* Full-scale tests on effects of slope on lateral capacity of piles installed in cohesive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(1): 04017103.
- [2] 赵明华, 杨超炜, 杨明辉, 等. 基于有限杆单元法的陡坡段桥梁基桩受力分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(6): 51-58.
ZHAO M H, YANG C W, YANG M H, *et al.* Mechanical analysis of bridge foundation in high and steep slopes based on finite bar element method [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(6): 51-58. (In Chinese)
- [3] 尹平保, 贺炜, 张建仁, 等. 斜坡基桩的斜坡空间效应及其水平承载特性研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(4): 94-101.
YIN P B, HE W, ZHANG J R, *et al.* Study on spatial effect of slope and horizontal bearing behavior of piles in sloping ground [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(4): 94-101. (In Chinese)
- [4] 杨明辉, 聂华杰, 赵明华. 边坡段水平受荷桩桩前土抗力折减效应的模型试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(3): 114-121.
YANG M H, NIE H J, ZHAO M H. Model testing study on effect of predicament resistance reduction on laterally loaded pile near slope[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(3): 114-121. (In Chinese)
- [5] UTO K, MAEDA H, YOSHII Y, *et al.* Horizontal behavior of pier foundations in a shearing type ground model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1987, 24(3): 113.
- [6] NAKASIMA E, TABARA K, MAEDA Y, *et al.* Theory and design of foundations on slopes [J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1985, 355(2): 46-52.
- [7] NG C W, ZHANG L M, HO K K, *et al.* Influence of laterally loaded sleeved piles and pile groups on slope stability [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(3): 553-566.
- [8] 雷国辉, 雷国刚, 胡新元. 桩基工程对长江防洪堤边坡稳定性的计算分析[J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(2): 49-52.
LEI G H, LEI G G, HU X Y. Calculation and analysis of effect of piling on slope stability of a flood dike of Yangtze River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(2): 49-52. (In Chinese)
- [9] 邹振兴. 高陡边坡桥梁高墩设计与施工若干关键问题研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011: 11-27.
ZOU Z X. Research on some key issues in design and construction of high-steep slope bridge high piers [D]. Changsha: Central South University, 2011: 11-27. (In Chinese)
- [10] 申启坤. 车-桥耦合振动作用下高速公路高陡边坡动力响应研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014: 41-54.
SHEN Q K. Dynamic response research of tall and steep highway slope under action of vehicle-bridge coupled vibration [D]. Changsha: Central South University, 2014: 41-54. (In Chinese)
- [11] 于德顺. 建筑岩质边坡桩基受力特性及边坡稳定性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 63-76.
YU D S. Mechanics characteristics and slope stability analysis of pile foundation in rock slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 63-76. (In Chinese)
- [12] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020. (In Chinese)
- [13] 苏永华, 李诚诚. 间歇性强降雨下基于 Green-Ampt 入渗模型的边坡稳定性分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(3): 28-36.
SU Y H, LI C C. Slope stability analysis based on Green-Ampt infiltration model under intermittent heavy rainfall [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(3): 28-36. (In Chinese)
- [14] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 125(10): 314-323.
- [15] HULL T S, POULOS H G. Discussion of "design method for stabilization of slopes with piles" [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(10): 911-913.
- [16] 年廷凯, 栾茂田, 杨庆, 等. 基于强度折减弹塑性有限元法的抗滑桩加固边坡稳定性分析 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(S1): 558-562.
NIAN T K, LUAN M T, YANG Q, *et al.* Stability analysis of slope reinforced with piles by using strength reduction FEM [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(S1): 558-562. (In Chinese)
- [17] AUSILIO E, CONTE E, DENTE G, *et al.* Stability analysis of slopes reinforced with piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28(8): 591-611.
- [18] 彭文哲, 赵明华, 肖尧, 等. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(5): 23-30.
PENG W Z, ZHAO M H, XIAO Y, *et al.* Stability analysis of anti-slide pile reinforced slope and determination of optimal pile position [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(5): 23-30. (In Chinese)