

悬臂式圆形抗滑桩桩顶变形及其影响因素研究

陈云生, 孟繁贺

(广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029)

摘要:借助 FLAC^{3D} 软件建立悬臂式圆形抗滑桩的数值模型,通过改变悬臂段岩土的内摩擦角、黏聚力、嵌固段岩土强度、嵌固段长度、桩间距、桩径 6 大因素,模拟出内摩擦角与黏聚力、嵌固段岩土强度与嵌固段长度及桩径与桩间距两两组合下对应的桩顶位移,绘制出桩顶位移曲线规律图,同时得出以下主要结论:内摩擦角与黏聚力对桩顶变形的影响是突变的,内摩擦角对桩顶变形的敏感度高于黏聚力,提高嵌固段岩土强度可有效减少桩顶位移曲线平缓段位移,距径比相同的情况下减少桩间距对抑制桩顶变形的贡献不及增加桩径贡献大。

关键词:悬臂式抗滑桩;变形;桩顶位移;边坡;FLAC^{3D} 软件

1 前言

抗滑桩工程由于具有处治效果好、布设灵活、适应条件广等多方面的突出优点而成为边坡或滑坡灾害治理中的常用方法,圆形抗滑桩相比方桩具有无需人工挖孔、施工安全、成桩效率高等特点,近年来被大量使用,随着抗滑桩的广泛使用,抗滑桩变形失效事故也随之增多,常见的变形有折断、剪断、倾倒、整体滑动、桩顶溢出等。作者在从事公路建设过程中亲身经历了多处悬臂式抗滑桩失效事故,而桩顶出现较大变形是悬臂式抗滑桩出现失效的宏观体现,因此,对桩顶变形的研究十分重要。

中国对抗滑桩桩体力学特征、土拱效应、弯矩、稳定性等已有了大量的研究,但对变形及其影响因素研究不够深入,对圆形抗滑桩的研究更是少之又少,大多数研究是基于刚体极限平衡理论,但是这些方法由于其计算不确定性,不能考虑桩土联合作用,已越来越不能适应工程建设的发展需要。近 3 年来少部分学者开始通过模型试验研究抗滑桩变形,王旋等基于三峡库区堆积层滑坡工程地质特征,建立了大型物理试验模型,获取了滑坡坡表与桩顶位移数据,定量分析了体系位移场变化特征;李哲等通过抗滑桩现场缩尺模型试验,研究了在滑坡推力作用下抗滑桩受力变形至破坏过程的桩顶水平、竖向位移值。除了模型试验,基于

FLAC^{3D} 软件的抗滑桩研究方法因其在三维、本构模型及后处理方面相比传统方法更加优越,已逐步成为复杂工程的辅助计算方法,然而利用其进行变形分析的文献则屈指可数,何文野等在基于 FLAC^{3D} 的基础上对抗滑桩的支护参数进行正交设计,研究了其对边坡稳定性的影响;王晓芳结合 FLAC^{3D} 软件探讨了抗滑桩的布设位置、弹性模量等因素对边坡整体稳定的影响;张祝安等通过 FLAC^{3D} 对煤系地层边坡悬臂抗滑桩桩身位移控制技术进行了研究;谢明星通过数值模型分析了抗滑桩的部分参数对联合支挡结构中抗滑桩水平位移的影响。然而上述研究均针对方形抗滑桩,且部分仅以单因素对边坡、桩体的变形影响进行分析,部分仅在特定的地质条件及影响因素不变的情况下进行变形分析,又或仅考虑多因素组合情况下的边坡稳定性,未考虑多因素组合对变形的影响。鉴于此,该文在前人研究的成果上借助 FLAC^{3D} 分析悬臂式圆形抗滑桩桩顶变形的的主要影响因素及两两因素组合下的桩顶变形规律,研究成果可为今后工程设计及研究人员提供参考。

2 计算模型

为了研究圆形抗滑桩桩顶变形的影响因素,该文采用的三维计算模型见图 1,建模时边坡的影响范围目前没有统一的规范,陈和群在文献[10]中指出:假设

收稿日期:2020-12-08(修改稿)

基金项目:交通运输行业重点科技项目(编号:2019-ZD5-026)

作者简介:陈云生,男,硕士,高级工程师, E-mail:417489487@qq.com

边坡的开挖深度为 h ，则边坡平面上的影响范围为 $2h \sim 3h$ ，固本边坡模型长 84 m，宽 20 m，高 40 m。模型边界距离坡顶水平距离为 50 m，模型底部距离坡底 20 m，整个模型单元数(zones)为 72 400 个，节点数(grid—points)为 78 729 个，开挖面及抗滑桩附近的网格要

比其他网格密，前后左右界面设置法向约束，下边界为固定铰支。

FLAC^{3D} 中抗滑桩采用 pile 单元模拟，桩间挡板采用面层 shell 单元模拟，建立 pile 单元及 shell 单元时自定义为结构单元之间彼此独立，但实际中挡土板的受力是可以传递到抗滑桩单元，因此此次模拟通过 Fish 语言实现挡土板与抗滑桩之间的链接，先释放 pile 单元及 shell 单元对应节点与岩土的连接，再通过“sel link attach”命令将 pile 单元的节点与面层 shell 单元对应的节点链接起来。

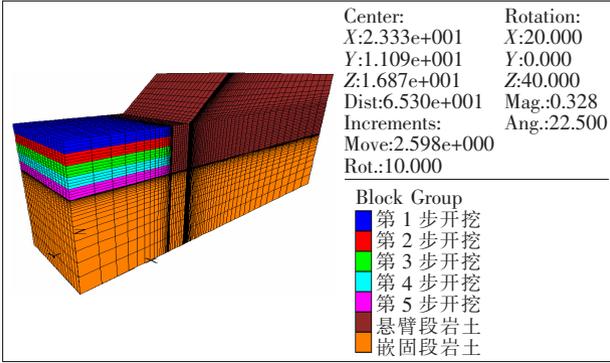


图 1 计算模型

3 物理力学参数及动态模拟过程

计算采用摩尔—库仑本构模型，物理力学参数及结构尺寸见表 1~3。

表 1 岩土体物理力学参数

岩(土)名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	
悬臂段岩土	19.5	80.00	0.30	5~50	5~35	
软塑状黏土	18.9	3.50	0.35	22	12	
硬塑状黏土	19.2	100.00	0.30	26	25	
嵌固段岩	碎石土	19.0	220.00	0.28	24	28
土	软质泥岩	21.5	300.00	0.26	28	26
	密实漂石	22.5	400.00	0.25	5	40
	较坚硬砂岩	24.5	9 500.00	0.24	120	42
	坚硬砂岩及灰岩	26.6	11 500.00	0.22	200	50

表 2 抗滑桩参数

桩形	桩径/ m	间距/ m	悬臂段/ m	嵌固段/ m	弹性模量/ GPa	泊松比
圆形	1.8~2.6	3.5~6.0	10	4.0~20.0	30	0.2

表 3 挡土板参数

弹性模量/GPa	泊松比	厚度/m
20	0.22	0.4

土层开挖顺序见图 2，工况计算过程如下：

生成初始应力场→设置抗滑桩→开挖桩前土(第 1 步开挖)→设置顶部 2 m 挡土板，基底应力逐步释放，第 1 步计算→继续开挖桩前土(第 2 步开挖)→继续设置 2 m 高挡土板，基底应力逐步释放，第 2 步计算→…→开挖最后桩前土(第 5 步开挖)→设置底部 2 m

挡土板，基底应力逐步释放，第 5 步计算。

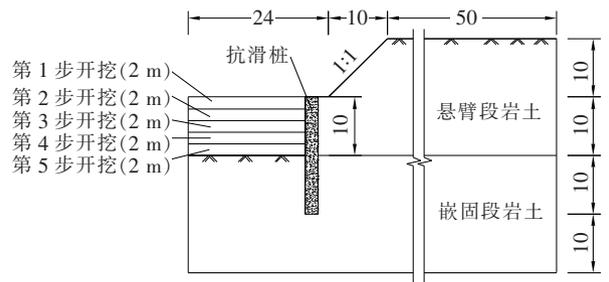


图 2 边坡开挖顺序(单位:m)

4 模拟结果分析

4.1 悬臂段岩土内摩擦角及黏聚力对桩顶变形的影响

为了模拟悬臂段内摩擦角及黏聚力对抗滑桩桩顶变形的影响,假定抗滑桩悬臂及嵌固段均为 10 m,嵌固段为软质泥岩,桩径 2.2 m,桩间距 4.5 m,坡高 20 m,悬臂段岩土黏聚力分别取 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 kPa,悬臂段岩土内摩擦角分别取 5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°,利用 Fish 语言编制程序,自动计算各种组合工况下的桩顶变形,计算结果见图 3~5。

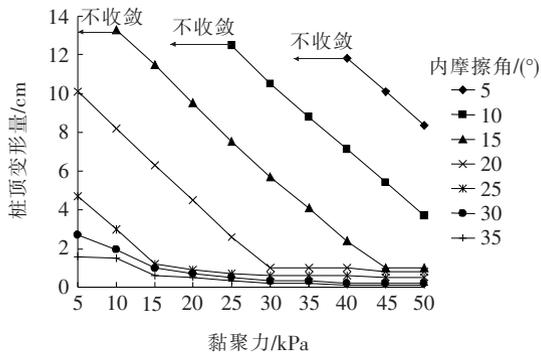


图3 不同内摩擦角及黏聚力组合下 FLAC^{3D} 计算结果

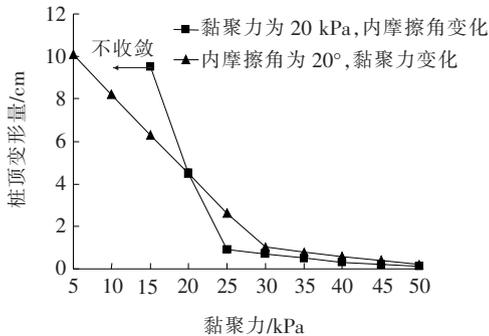


图4 抗剪强度指标对桩顶变形的影响

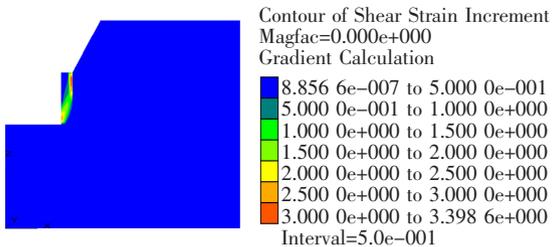


图5 已贯通的剪应变增量云图

($c = 35 \text{ kPa}$, $\varphi = 5^\circ$, 抗滑桩被剪断)

由图 3 可知:当悬臂段岩土内摩擦角 $\leq 10^\circ$ 时,随着悬臂段岩土黏聚力的增加,桩顶位移线性减小,当内

摩擦角 $> 10^\circ$ 时,随着黏聚力的增加,桩顶的位移先线性减小后逐渐平缓,说明黏聚力增加到一定程度后对桩顶变形影响极小;由图 4 可知:随着悬臂段岩土内摩擦角的增大,桩顶位移减小,当内摩擦角超过一定值时,位移减小曲线逐渐平缓,说明内摩擦角增加到一定程度后对桩顶位移影响较小;由图 3 可知:当内摩擦角为 5° 且黏聚力 $< 40 \text{ kPa}$ 或内摩擦角为 10° 且黏聚力 $< 25 \text{ kPa}$ 时,计算不收敛;图 5 为破坏后贯通的典型剪应变云图,说明此时模型已产生大变形,桩体防护失效,设计应通过调整桩间距、增加桩径等措施防止安全事故发生;由图 4 可看出:当黏聚力为 20 kPa、内摩擦角按 5° 增加的桩顶位移降幅值要大于内摩擦角为 20° 、黏聚力按 5 kPa 的降幅值,因此内摩擦角对桩顶位移的敏感度要高于黏聚力,在内摩擦角低的路段设置抗滑桩需对桩的安全进行充分论证,如从图 3 可以看出该模型中当内摩擦角为 5° 时,黏聚力需达到 40 kPa 及以上方能保证抗滑桩不产生结构性破坏。

由数值分析结果可知:内摩擦角和黏聚力低于某一值时,桩顶位移敏感性大,当超过该值时,桩顶位移基本保持不变,说明内摩擦角和黏聚力改变对桩顶变形往往是突变的,变形迅速,实际施工过程中应做好边坡截排水措施,避免因水降低岩土力学参数而发生工程事故。

4.2 抗滑桩嵌固段长度及嵌固段岩土强度对桩顶变形的影响

在分析嵌固段岩体强度及嵌固深度对桩顶变形的影响时,假定悬臂段岩土内摩擦角为 15° ,黏聚力为 20 kPa,抗滑桩悬臂段为 10 m,桩径为 2.2 m,桩间距为 4.5 m,在嵌固段岩土分别为软塑状黏土、硬塑状黏土、碎石土、软质泥岩、密实漂石、较坚硬砂岩、坚硬砂岩及灰岩,以及嵌固段长度为 4~20 m 的情况下,利用 Fish 语言自动计算嵌固段岩体强度与嵌固深度相互组合下桩顶的变形。计算结果如图 6、7 所示。

由图 6、7 可知:① 嵌固段岩体类型固定时,桩顶变形随着嵌固段长度的增加而减小,且呈先急剧下降后逐渐平缓的趋势,桩顶位移急剧下降段与逐渐平缓段之间存在“拐点”,抗滑桩设计时嵌固段长度不宜超过“拐点”,应在“拐点”以内按位移控制选择最优嵌固段长度,超过最优嵌固段长度将造成工程浪费;② 随着嵌固段岩土强度的提高,桩顶位移急剧下降段与逐渐平缓段之间的“拐点”所对应的嵌固段深度越小,也就是嵌固段岩土强度越高,最优嵌固段长度越短;③ 对于软塑状黏土及硬塑状黏土,当嵌固段长度 $< 6 \text{ m}$

或 ≤ 5 m 时,计算不收敛,说明模型产生大变形,此时桩体防护失效,边坡产生滑塌;④ 桩顶位移达到平缓时的大小与嵌固段岩土强度有着密切关系,嵌固段岩土强度越高,位移越小,如软塑状黏土为 31.8 cm,坚硬砂岩为 3.7 cm,说明增加桩长对减少位移曲线平缓段的位移有限,可通过注浆、微型桩等措施增强嵌固段岩土强度来有效减少桩顶位移曲线平缓段的位移;⑤ 依据规范,坡顶不存在重要构筑物时,该模型的抗滑桩桩顶允许变形不宜超过 10 cm。而由计算可知对于软塑状黏土、硬塑状黏土及碎石土,桩顶位移达到平缓段时仍大于 10 cm,此时增加桩长对减少位移效果不明显,故需通过增大桩径、减少桩间距、加固嵌固段土等措施来使得结构满足规范要求;对于软质泥岩、密实漂石、较坚硬砂岩、坚硬砂岩及灰岩,嵌固段分别需达到 10、8、7、4 m,方能满足规范要求;⑥ 结合 3.2 节可知嵌固段岩土强度越高,桩体失效时的桩顶位移越小,容易产生结构性破坏;反之,桩体失效时的桩顶位移越大,容易产生倾倒变形。

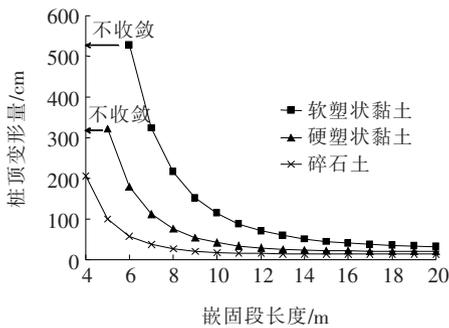


图 6 不同嵌固段岩土强度及嵌固段长度组合下 FLAC^{3D} 计算结果(1)

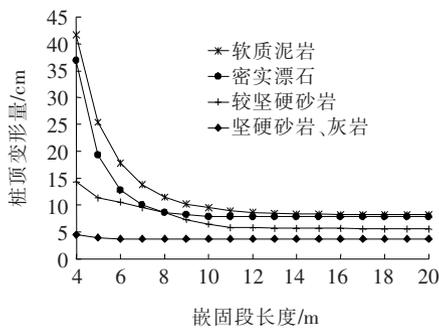


图 7 不同嵌固段岩土强度及嵌固段长度组合下 FLAC^{3D} 计算结果(2)

4.3 抗滑桩截面尺寸及抗滑桩间距对桩顶变形的影响

为了研究抗滑桩截面尺寸及抗滑桩间距对桩顶变形的影响,假定悬臂段岩体内摩擦角为 15° ,黏聚力为

20 kPa,抗滑桩悬臂段及嵌固段均为 10 m,嵌固段为软质泥岩,桩径分别取 1.8、2.0、2.2、2.4、2.6 m,桩间距分别取 3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 m,模拟两因素彼此组合工况下对桩顶位移的影响。结果如图 8~10 所示。

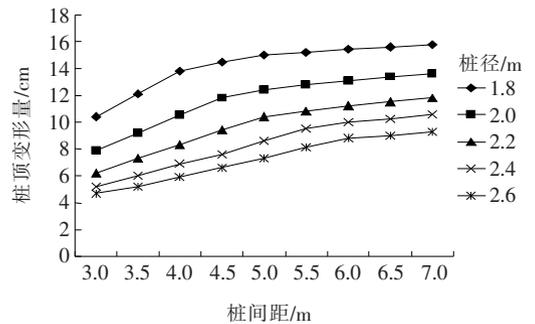


图 8 桩间距及截面尺寸组合下 FLAC^{3D} 计算结果

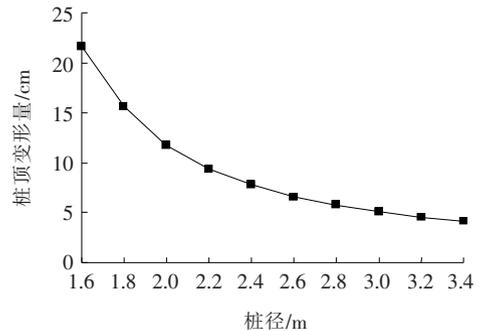


图 9 桩径变化对桩顶位移的影响(桩间距为 4.5 m)

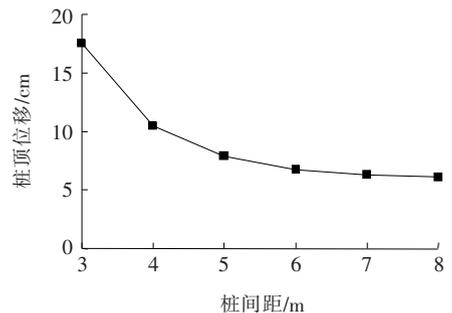


图 10 桩间距变化对桩顶位移的影响(桩间距与桩径之比为 2)

从图 8 可以看出:① 随着桩间距的增大,桩顶位移先呈线性增加,后趋于平缓,线性增加是因为下滑力等比例增加,后趋于平缓是因为 FLAC^{3D} 计算自动考虑了土拱效应,超出一定桩间距,桩间土将破坏挡土板,此时抗滑桩位移增加不大,桩间板位移将急剧增加并产生破坏,边坡将产生整体式绕桩滑动;② 该模型的桩间距达到 2.3 倍桩径时,土拱效应得到充分发挥,即以土拱效应发挥程度为控制条件下桩径分别为 1.8、2.0、2.2、2.4、2.6 m 对应的最优桩间距分别为

4.0、4.5、5.0、5.5、6 m。由图9可知:随着桩径的增大,桩顶变形量先迅速减小,当增大到一定值后,桩顶位移减幅不大,说明随着桩径的继续增加,对桩顶位移的影响逐步减小,桩径大小不宜在桩顶位移平缓段选择,可在快速下降段由位移控制选择最优桩径。由图10可以看出:在桩间距与桩径之比保持不变的情况下,随着桩间距的减小,桩顶位移逐步增大,说明减少桩间距对抑制桩顶变形的贡献不及增加桩径贡献大,这与文献[12]考虑方桩时所得出的结果是相反的,说明圆桩增大桩径的防护效果要比方桩增加相同桩宽度的效果好。

5 结论

(1) 随着内摩擦角或黏聚力的增大,桩顶位移曲线先线性减小后近似于直线,内摩擦角对桩顶变形的敏感度要高于黏聚力,内摩擦角和黏聚力对桩顶变形的影响具有突变性。

(2) 桩顶位移曲线随着嵌固段长度的增加先急剧下降后逐渐平缓,桩顶位移急剧下降段与逐渐平缓段之间存在“拐点”,设计可在“拐点”以内按位移控制选择最优嵌固段长度;增加桩长对减少位移曲线平缓段的位移有限,通过注浆、微型桩等措施提高嵌固段岩土强度可有效减少桩顶位移曲线平缓段的位移。

(3) 桩顶位移随着桩间距的增大呈线性增加后趋于平缓,随着桩径的增加先急剧减少后趋于平缓,可在线性增加段或急剧减少段按位移控制选择最优桩间距或最优桩径,距径比相同的情况下减少桩间距对抑制桩顶变形的贡献不及增加桩径贡献大。

参考文献:

[1] 乔文号,汤华,尹小涛,等.降雨和地震耦合作用下老南瓜

塘边坡稳定性分析[J].公路工程,2020(4).

- [2] 李铁洪,刘永才.抗滑桩的破坏形态与有限元设计方法[J].中外公路,2009(2).
- [3] 冯文娟,琚晓冬.基于FLAC3D的抗滑桩设计方法研究[J].岩土工程学报,2011(增2).
- [4] 王旋,胡新丽,周昌,等.基于物理模型试验的滑坡—抗滑桩位移场变化特征[J].地质科技通报,2020(4).
- [5] 李哲,朱振国,张娟,等.黄土边坡悬臂式与全埋式单桩抗滑桩现场模型试验[J].公路交通科技,2020(8).
- [6] 何文野,范荣全,唐杨,等.抗滑桩参数对边坡稳定性影响研究[J].人民长江,2020(1).
- [7] 王晓芳,夏玲琼.基于抗滑桩强度和桩位因素对边坡稳定性影响研究[J].水利水电技术,2020(8).
- [8] 张祝安,李昌龙.公路煤系地层基座边坡悬臂抗滑桩桩身位移控制设计分析[J].公路,2019(1).
- [9] 谢明星,郑俊杰,曹文昭,等.联合支挡结构中抗滑桩设计参数分析与优化[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019(7).
- [10] 陈和群.有限元微机程序与图形处理[M].南京:河海大学出版社,1992.
- [11] TB 10025—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S].
- [12] 杨明,姚令侃,王广军.抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J].岩土工程学报,2007(10).
- [13] 钮洪亮,王敏.扶壁结构在抗滑桩倾斜治理工程中的应用[J].中外公路,2019(6).
- [14] 周德泉,黎冬志,冯晨曦,等.路堤重复加卸载下坡脚倾斜摩擦桩变位规律试验研究[J].中外公路,2019(1).
- [15] 王会永.锚索抗滑桩在太长高速公路的运用与对比研究[J].中外公路,2018(4).
- [16] 张鹏元.公路隧道洞口滑坡分析与综合治理[J].中外公路,2018(1).
- [17] 彭洋.抗滑桩模型试验研究评述[J].建筑工程技术与设计,2020(13).
- [18] 李哲,朱振国,张娟,等.黄土边坡悬臂式与全埋式单排两桩抗滑桩原位模型试验[J].中国公路学报,2020(4).