

桥梁施工缆索吊装系统地锚单桩数值模拟与分析

肖正恩¹, 周海发¹, 王寿武², 朱莎莎²

(1. 云南云桥建设股份有限公司, 云南昆明 650101; 2. 昆明理工大学, 云南昆明 650051;)

摘要: 为研究桥梁施工缆索吊装系统中的地锚桩稳定性, 以某斜拉桥项目为工程背景, 利用 FLAC 3D 对桩身受极限荷载作用下的水平位移进行数值模拟并与计算结果对比, 在验证数值模拟方案可靠性的基础上, 研究了桩长、桩径和拉力角度改变对水平位移大小变化的影响, 对比三种工况, 即 (1) 桩径、拉力角度不变, 改变桩长; (2) 桩长、拉力角度不变, 改变桩径; (3) 桩长、桩径不变, 改变拉力角度。结果表明: 单桩受拉产生的最大水平位移值在安全范围内; 增大单桩的桩长、桩径或拉力角度, 可以减小桩身变形, 从而在一定程度上提高桩身的稳定性; 桩径大小改变对水平位移值的影响大于桩长和拉力角度。

关键词: 桥梁施工缆索吊装系统; 地锚桩; FLAC 3D; 水平位移

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2022) 06—0149—03

桥梁施工缆索吊装系统的桩式地锚施工简单, 效果明显, 但其稳定性易受周围土体性质影响^[1-2]。桩式地锚在受力时有竖直方向和水平方向运动趋势, 在竖直方向上的受力作用类似于抗拔桩, 受上拔荷载的影响, 在水平方向上的受水平拉力的影响。目前, 国内对于桩式地锚的受力变形计算大多借鉴抗压桩的理论, 且由于群桩效应^[3-5]的存在, 在理论验证时大多采取验证单桩的方法。随着计算机程序的快速发展, 各种数值模拟软件被大量开发并投入应用, 使得实际工程可以通过模型的形式比较形象地展现在设计者面前^[6]。林峰^[7]对桩式地锚的设计理论和施工流程做了介绍, 说明了桩式地锚在桥梁的缆索吊装中的适用性和优越性; 姜成潼^[8]利用理论计算和数值模拟方法对某边坡工程采取的桩锚-框锚支护结构的受力机理进行研究, 将得到的桩顶水平位移值与一般支护结构对比, 证明了桩锚-框锚支护结构能够更好地平衡剩余边坡滑力。本文在前人研究的基础之上, 基于实际工程背景, 运用理论计算和数值模拟相结合的方法对某斜拉桥施工缆索吊装系统地锚施工方案中的单桩进行稳定性进行验证, 并分别改变单桩的桩长、桩径和拉索角度, 分析单桩因素改变对桩身位移的影响。

1 工程背景

1.1 工程概况

斜拉桥项目位于云南省某高速公路上, 全程 1330 米, 主桥为双塔三跨钢箱斜拉桥。施工缆索吊装系统布置如图 1 所示。根据钻孔勘探资料可知土层大致分为三

种, 根据粒径和含量多少可知研究点土层岩性多属于漂石粒组和卵石粒组的巨粒土, 还有部分粗粒组即细砂, 因此认为力学性质主要按照碎石土分类, 具体分层参数见表 1。

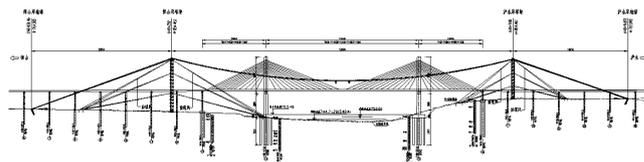


图 1 缆索吊装系统布置图

1.2 桥梁施工缆索吊装系统地锚施工方案

桥梁施工缆索吊装系统地锚采用桩式地锚, 桩长 16m, 桩径 2.0m, 共 9 根, 梅花型双排桩布置, 采用 C30 钢筋混凝土钻孔灌注桩。群桩桩顶设置 C30 混凝土承台, 承台尺寸 25 × 10 × 2m。布置如图 2 所示。

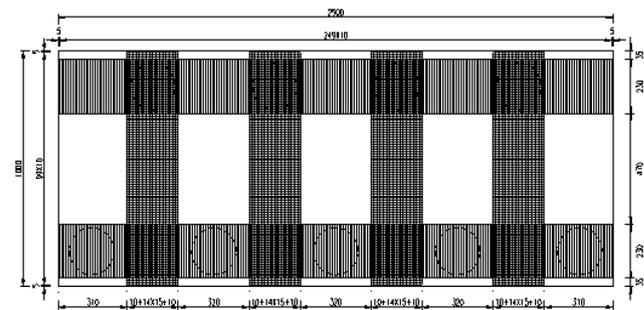


图 2 桩式地锚布置图 (cm)

2 单桩数值模拟分析

2.1 基本假定和模型

基本假定和模型如下: ①忽略水流对土体开挖的影响, 不考虑土体流失对桩土体产生的影响; ②岩土体

为均匀地质；③群桩桩顶与承台刚性连接；④假设9根桩平均受拉；⑤土体模型采取圆柱形隧道外围渐变网格（radcylinder），本构关系为莫尔库伦；桩体建模采用柱体网格（cylinder），本构关系为弹性。桩土之间的相互作用采取接触面（interface）来模拟受力^[9]。以桩心为原点在FLAC 3D中建立以x、y、z三轴为方向的坐标系，x轴向右为正，z轴向下为负，按照地层厚度建立三维模型。有限差分计算域为8m×8m×27m。

表1 土层参数

层号	名称	厚度 (m)	密度 (kg/m ³)	泊松比	弹模 (MPa)	内摩擦角 (°)
1	地层①: 漂石: 灰白色, 次棱角状, 块径为20-35cm, 含量约90%;	2.3	1600	0.20	150	35
2	地层②: 细砂: 灰白色, 松散状, 砂粒径大于0.075mm约占85%;	2.2	1400	0.15	100	30
3	地层③: 卵石: 灰黄色, 亚圆状, 粒径2-12cm, 含量约60%;	1.4	1800	0.20	180	40
4	地层④: 细砂: 灰白色, 松散状, 砂粒径大于0.075mm约占85%;	4.0	1400	0.15	100	30
5	地层⑤: 卵石: 灰黄色, 亚圆状, 粒径2-12cm, 含量约60%;	6.1	1800	0.20	180	40
6	地层⑥: 漂石: 灰白色, 次棱角状, 块径为20-35cm, 含量约90%。	9.0	1600	0.20	150	35

2.2 模拟结果分析

图3是单桩受极限拉力作用下在水平方向产生的桩土位移云图。图4是隐藏土层，只显示单桩水平位移的模拟图。从图中可知受极限拉力后，单桩在靠近桩顶附近的区域产生较大的水平位移值，最大数值为5.05mm，在接近桩底附近的范围，水平位移值较小，平均水平位移值为2.8mm。随着桩深的增加，水平位移值逐渐减小，可知来自上部的荷载从桩顶到桩底再到土层达到了较好的传递受力效果。根据规范^[10]中允许敏感性桩身的最大水平位移小于或等于6mm时桩身不开裂，说明模拟结果相对安全。

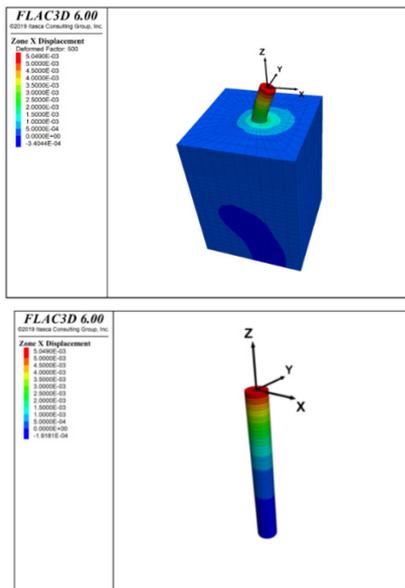


图4 单桩模拟水平位移云图

3 水平位移理论计算与分析

已知最大拉力合力T=11048.285KN，则水平推力，竖直上拔力。地基比例系数m取常数为20000KN/m⁴，则桩身计算宽度和变形系数为^[11]：

$$b_1 = k \times k_f(d+1) = 2.7m \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_1}{0.8EI}} = 0.3101/m \quad (2)$$

式中：k为基础形状的换算系数，k_f为平面工作条件的系数，EI为桩身抗弯刚度，由于α×h=4.96>2.5，故按照弹性桩计算^[9]。

将水平拉力平均分配给9根桩基，桩头弯矩M₀是水平拉力的0.3倍，A_x表示单位水平力产生的桩顶水平位移，B_x表示单位弯矩产生的桩顶水平位移，根据弹性桩规定^[11]查表可得数值，最终得到桩顶x轴向位移：

$$X_0 = \frac{H_{k平均}}{\alpha^3 EI} \times A_x + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \times B_x = 5.2mm \quad (3)$$

数值模拟得到的最大水平位移值为5.05mm，而理论计算结果为5.2mm，都在规范^[10]的安全范围内且两者的误差仅约为2.88%。存在的误差是因为数值模拟在程序计算中将更多的地质参数代入了计算，所以使得计算结果偏小。

4 不同工况下桩身最大水平位移分析

为研究单桩在受极限荷载作用下桩长、桩径和拉力角度分别改变对单桩水平位移产生的影响，将模拟不同工况下单桩桩身位移并对这些具体的数值进行分析对比。分三种工况：①桩径、拉力角度不变，改变桩长；②桩长、拉力角度不变，改变桩径；③桩长、桩径不变，改变拉力角度。

在FLAC 3D中监测不同工况下桩身受拉产生的最大水平位移，三种工况的监测数据如图5、图6、图7所示。

(1)从图5可知，在改变桩长，不改变其他条件的情况下，桩长以12m为初始值，每隔1m递增，直到19m结束，发现桩身最大水平位移值随桩长增加而减小且均小于6mm并在5mm左右上下浮动，桩长在12~19m之间，桩身未产生开裂^[10]现象，单桩处于较稳定状态。

可在限制条件下尽量使拉力角度大一点。

5 结论

(1) 通过对比数值模拟与理论计算的结果可知：桩长 16m，桩径 2.0m，拉力角度为 23° 时的单桩模拟最大水平位移约为 5.05mm，计算最大水平位移约为 5.2mm，均在 6mm 之内，单桩桩身不会开裂，两种方法的误差也在合理范围，该桥所采用的缆索吊装系统地锚方案可行；

(2) 通过单方面地去增大桩长、桩径或拉力角度都可以在一定程度上减小单桩桩身的水平位移，以达到使桩身更加稳定的目的，考虑到施工成本和其他因素的影响，要有效选取较为合适的设计参数；

(3) 通过对比桩长、桩径和拉力角度分别改变后的桩身水平位移可知桩径改变对位移的影响较大。

参考文献：

[1] C.K. Ali Mubarak, Akhil Upadhyay, Stability of continuous welded rail on steel bridge subjected to thermal loading, Structures, 2021(34): 4524-4531.

[2] 李海军. 不同因素对桩锚支护边坡稳定性影响研究. 公路交通科技 (应用技术版), 2019, 15 (10): 5-7+33.

[3] 孟媛媛. 桥梁桩基群桩效应分析. 工程建设与设计, 2021 (21): 108-111.

[4] 李龙起, 邓小雪, 张帅等. 非均匀地基中倾斜群桩竖向承载特性及群桩效应研究. 工程科学与技术, 2020, 52(04): 97-107.

[5] 马晓东. 群桩布置形式及非均匀沙对局部冲刷影响的研究 [硕士学位论文]. 北京交通大学, 2020.

[6] 詹智麒, 徐光黎. 不同布桩方式对 h 型双排桩支护结构影响的数值模拟. 安全与环境工程, 2020, 27(03): 193-199.

[7] 林峰. 桩式地锚在缆索吊装系统中的应用 [J]. 西部交通科技, 2010(08):25-28.

[8] 姜成潼. 桩锚—框锚边坡组合支护结构力学特性研究及优化设计 [硕士学位论文]. 武汉工程大学, 2019.

[9] 陈育民, 徐鼎平. FLAC 及 FLAC3D 基础与工程实例 (第二版). 北京: 中国水利水电出版社出版社, 2009:254-259.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范》. 2008-10-01.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 《JGD60-2015 公路桥涵设计通用规范》. 2015-12-01

基金项目：昆明理工大学实验室建设与管理研究项目 (SYYJ28)

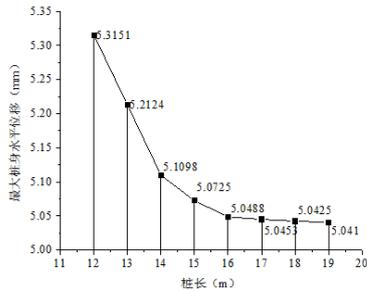


图5 不同桩长最大水平位移监测图

(2) 在改变桩径，不改变其他条件的前提下，桩径以 1.5m 为起始值，按照 0.05m、0.15m、0.25m 或者 0.5m 不定值增加，以 3m 为结束值，从图 6 可知随着桩径逐渐增大，最大桩身水平位移值逐渐减小，两者呈负相关关系。桩径为 1.5m 和 1.75m 时，最大桩身水平位移值超过了 6mm，按规范^[10]判断，该单桩有可能会发生桩身开裂现象，此时的两个桩径值不能被作为桩径设计值，桩径值在 1.90~3.0m 之间，最大水平位移值在规定的安全区间，可以被作为设计值选取使用，考虑到施工成本的问题，尽可能在保证安全的前提下选择较小桩径值。

图4 单桩模拟水平位移云图

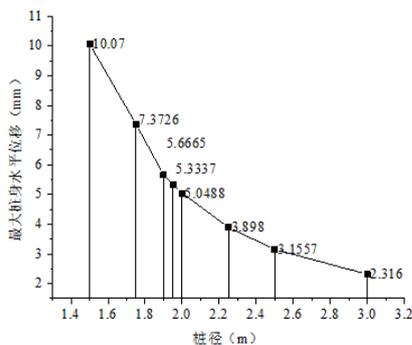


图6 不同桩径最大水平位移监测图

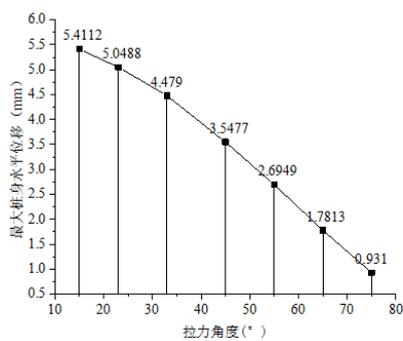


图7 不同拉力角度最大水平位移监测图

(3) 从图 7 可知，在改变拉力与单桩倾角，不改变其他条件时，拉力角度与最大桩身水平位移的关系近似成直线型下降趋势，可见适当增大拉力角度能够有效减小桩身的水平位移，但是限于施工现场拉索布置要求以及其他结构的布置，拉力角度不能够自由变化，所以