

文章编号: 0451-0712(2006)07-0100-05

中图分类号: U443.15

文献标识码: B

陡坡地段桥梁桩基的施工监测和有限元分析

余继东¹, 马炽藩¹, 汪益敏², 陈页开², 严飞淞²

(1. 广东梅河高速公路有限公司 梅州市 514571; 2. 华南理工大学交通学院 广州市 510640)

摘要: 通过对某高速公路建造在陡坡地段的桥梁桩基从施工到通车全阶段开展监测, 分析了在施工荷载作用下桥梁桩基和陡坡土体的位移分布和变化规律。然后利用弹塑性有限元模型, 分析了桩身位移的分布规律, 并与监测结果进行了比较, 得出有限元模型能较好地模拟桩土之间的相互作用; 还分析了坡顶荷载和桩身最大弯矩之间的关系, 提出了临界施工荷载对控制桥梁桩基稳定性的重要意义。

关键词: 陡坡; 桥梁桩基; 有限元; 侧向荷载

在山谷和丘陵地区, 公路桥梁的基础多采用桩基础的形式, 由于需要跨越谷地, 不少桥梁桩基布设在陡坡上。这些桩基一方面要承受从上部结构传来的垂直荷载; 另一方面由于施工时破坏了坡体原有的天然稳定结构, 它又要受到桩周土体在自重或外荷载作用下发生变形或移动而引起的侧向压力。在施工的过程中, 由于斜坡上经常要铺设施工便道和架设重型的施工设备, 且施工车辆多为重型货车, 满载后车重可达 50 t 以上, 这样更增加了桩基上方边坡土体的下滑力, 加大了土体作用在桩基上的侧压力。因此, 对此类桥梁桩基在土侧压力作用下的性状进行分析是十分必要的。

针对被动桩的受力特点, 我们对广东省某高速公路建造在陡坡地段的桥梁桩基从施工到通车全阶段开展了监测。并将监测结果与有限元计算结果进

行了分析比较, 由此探索此类桥梁桩基的受力和变形规律, 为陡坡地段的桥梁桩基设计提供参考。

1 现场试验

1.1 工程概况

水坑大桥位于广东省龙川县境内, 为一座跨山间谷地, 并连接两山腰的大桥, 桥台两端地势陡峭, 为山麓斜坡, 山坡植被发育; 桥中段为山间谷地, 现为居民住宅区, 谷底为水坑河。场区属剥蚀丘陵地貌, 呈“V”型状, 地形起伏大, 高差 125.30 m。

本文以水坑大桥 7 号墩桩基为研究对象。7 号桥墩布设在南西向坡体之上, 桩基承台尺寸为 3.0 m × 3.0 m × 3.0 m, 承台下为一根长 38 m, 直径 2 m 的人工挖孔灌注桩。边坡土层分布及其主要物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 土的主要物理力学指标

土层名称	土层厚度/m	干重度/(kN/m ³)	天然重度/(kN/m ³)	泊松比	弹性模量/MPa	压缩模量/MPa	内聚力 C/MPa	内摩擦角/(°)
亚粘土	1.6~6.0	16	19.2	0.30	—	8	23.40	13.60
强风化变余砂岩	0.7~26.2	17	21	0.28	350	—	3	25
弱风化变余砂岩	0.8~25.2	21	22.5	0.2	1 200	—	7	28

1.2 现场监测布置及监测方法

现场埋设的监测仪器包括用于测量桩周土压力的电阻应变式土压力盒, 用于测量桩身混凝土应变的混凝土应变计以及用于测量桩身水平位移和土体深层位移的深孔测斜管, 各监测元件的分布如图 1

所示。

土压力盒和混凝土应变计的布置为沿桩身深度方向每 3 m 设置一组, 每组包括在主动土压力区设置一个土压力盒, 在被动土压力区设置一个土压力盒和一个混凝土应变计, 设置范围为由桩顶直到桩

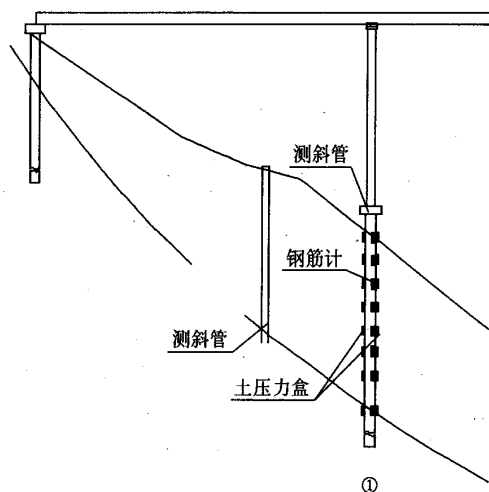


图1 监测断面布置示意

底。用于测量桩身水平位移的测斜管埋设在桩体内部,深度由桩顶直到桩底;用于测量桩基上方边坡土体深层位移的测斜管埋设在桩位上方3 m的边坡体内部,深度与桩深同深。

1.3 现场监测试验结果及分析

1.3.1 桩身及边坡土体位移

在桥梁承台、桥墩、盖梁等主体结构的施工过程中,对桩身位移进行了持续的监测,监测结果如图2所示。图中为近6个月的施工期间桩身位移随深度的变化曲线,桩身位移的整体变化趋势为随深度增大逐渐减小,同一深度处的位移则随着施工阶段的不断推进逐渐变大。

由监测结果也可以看出,在桥梁上部结构施工进行到后期时,桥梁桩基位移的变化值明显减小。通过相等时间间隔(14 d)的观测,发现在桥梁的盖梁和T形主梁施工阶段(2005年2月期间),实测值与14 d前相比,桩基在9.5 m深处的位移值达到了6.06 mm。但在主梁铺设完毕后的桥面铺装阶段(2005年4月期间),实测值与14 d前相比,桩基在同一深度处(9.5 m)的位移值仅为2.24 mm。

由现场记录可知,在主梁施工阶段坡顶的施工便道上经常会行驶满载的货车,并且设有造桥机等重型设备。在桥面铺装阶段,便道上货车数量明显减少,重型施工设备也已经撤离。由此可知,坡顶荷载的减小,直接导致了坡体中桥梁桩基位移的减小。

测量边坡土体位移的测斜管是在桥梁主梁架设完成后埋设的,监测结果显示在桥梁主体结构施工末期土体位移变化不显著,平均位移的变化值小于

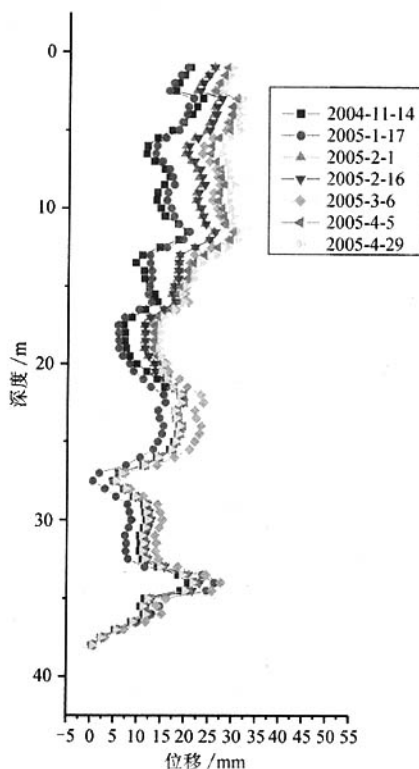


图2 桩身位移监测结果

1 mm。这也表明在桥梁主体结构施工结束后边坡土体处于一个比较稳定的状态。

1.3.2 桩身混凝土应变及桩周土压力

桩身混凝土应变和桩周土压力的变化都不明显,主要有2个方面原因:(1)边坡土层为薄层状风化砂岩,与边坡面呈反倾向,作用在桩身的土侧压力较小;(2)土压力盒与混凝土应变计是在人工挖孔灌注桩的混凝土护壁施工完后,打穿护壁进行埋设的,土压力盒四周用标准砂和泥浆回填。受现场条件限制,土压力盒较难按要求紧密接触边坡土体和混凝土灌注桩,导致测量结果受到一定影响,在施工各个阶段监测结果数值变化不大。

2 有限元计算与分析

为了进一步了解施工荷载作用下边坡土体与桩基共同作用的变形特征,本文结合现场监测结果,采用有限元法模拟计算坡顶荷载作用下边坡整体位移、桩身位移和弯矩分布情况。

2.1 有限元计算方法

2.1.1 桩土的等效模型

对于此类问题的有限元分析,通常采用的是一个纵向的平面应变截面作为计算分析对象。由于在边坡一桩基结构中桩周土的运动和桩的性状不符合平面应变假设。对此我们采用了等效薄壁桩墙方法^[2]进行处理,建立桩土的平面应变分析等效模型。

将垂直于截面的桩列结构表示成一种“等效薄壁桩墙”的形式(如图3所示)。此桩墙每单位宽度的抗弯刚度和其所取代的桩和土相同。通常情况下土对整体抗弯刚度的贡献非常小,一般可以忽略不计。因此,按照式(1)将桩基等效为薄壁桩墙,其中下标 p 表示桩, s 表示土, w 表示等效桩墙, s_l 为两桩轴心之间的距离。

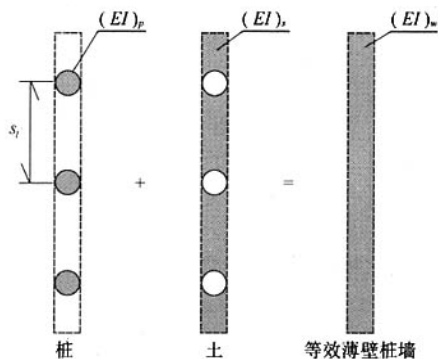


图3 等效薄壁桩墙示意

$$(EI)_p + (EI)_s = s_l(EI)_w \quad (1)$$

薄壁桩墙与土的结合可以采用“嵌入”梁单元到土体网格划分中桩列位置的方法,在桩墙与土之间再设置接触面单元,用来模拟桩土接触面的变形。

2.1.2 本构关系、边界条件与网格划分

在有限元分析中,土体本构关系采用理想弹塑性 Mohr-Coulomb 模型,其中土的物理力学指标如表1所示。模型左右边界 X 方向自由度固定,底边 X 、 Y 方向自由度均被固定,坡面和坡顶则完全自由,桩土界面采用无厚度 Goodman 单元进行模拟。坡体采用三角形六节点单元进行网格划分。根据施工现场的情况,坡顶计算范围取坡顶后100 m宽,坡底则取到坡角处为止。坡顶行车荷载和桩上桥梁上部结构的荷载均按照实际情况估算得出,在施工的高峰期坡顶荷载约为 20 kN/m^2 ,桩顶结构物约产生 10 kN/m 的集中荷载。几何模型和网格划分情况如图4所示。

2.2 计算结果及分析

2.2.1 桩身及边坡位移

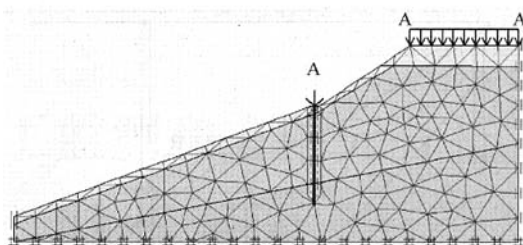


图4 几何模型和网格划分

作用在坡顶的施工荷载会引起坡顶土体的位移,桩在坡中则起到了阻止土体位移的作用,因而会产生被动的抗力。此抗力一方面改变了土体的位移模式,另一方面也导致了桩体自身的弯曲变形。图5为坡中土体位移的矢量图,从图中可以看出边坡土体的位移与土层的物理力学性质有直接的联系,土体的强度越高其位移越小。

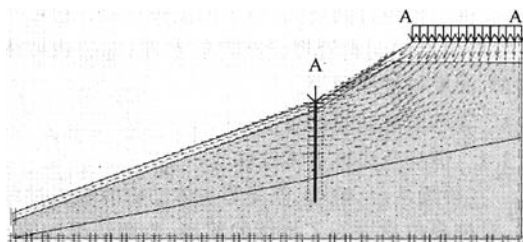


图5 土体位移的矢量图

在施工荷载的作用下,陡坡土层特别是浅层软弱土层会产生较大的水平位移,会对桩身产生明显的侧向土压力的作用,同时又有部分土体从桩间流动挤出形成土的绕流。而本文采用的平面应变有限元分析是用等效的板桩墙代替桩体及桩周土的,其抗弯刚度等于桩土的平均抗弯刚度,由于这种近似方法忽略了桩间土的错移和绕流,相当于因土体水平位移而产生的压力全部作用在了等效板桩上,这会使得有限元计算出的桩身水平位移值比实测值略大,而土体水平位移计算值则会偏小。图6为桩身水平位移沿深度的变化曲线。从图中可以看出,实测值与计算值的基本变化趋势是一致的,桩体最大位移都发生在桩顶,实测值为 25.7 mm ,略小于计算值的 28.7 mm 。

2.2.2 桩身弯矩

在土侧压力作用下桥梁桩基会发生弯曲变形,从而在桩体内部产生弯矩,桩身弯矩的大小直接影响了桥梁的安全性,也是判断桥梁桩基稳定性的

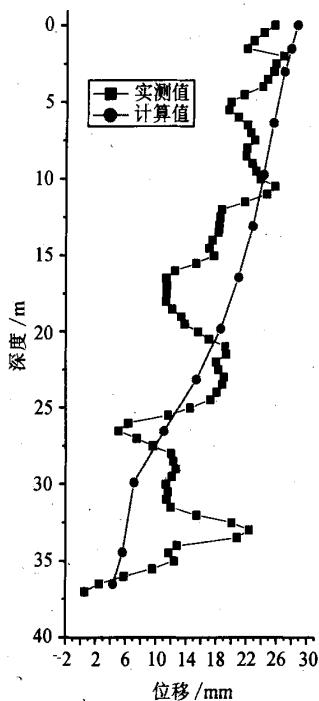


图6 桩身水平位移沿深度分布特征

一个重要指标。

在 20 kN/m^2 的坡顶荷载作用下桥梁桩基的弯矩分布如图7所示，图中弯矩的最大值为 $423 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，出现在 30 m 深处。根据现场钻探资料 30 m 深处为两土层的交界面，由于上下土层的强度差别较大就导致了交界面处桩身上的应力集中。

有限元计算得出了不同坡顶施工荷载作用下桩身最大弯矩的变化曲线(图8)。桩身最大弯矩随坡顶荷载增大呈两阶段线性增长。当荷载超过 40 kPa 时，桩身最大弯矩增长幅度显著变大。Stewart D P 等人^[2]曾指出桩身最大弯矩—荷载关系曲线中存在临界荷载(threshold load)，当荷载大于临界荷载时就会有部分土体进入塑性状态。从图8中可以看出在本文所分析的工况下临界荷载值约为 40.0 kPa ，当施工荷载大于临界荷载时，桩基上方部分边坡土体可能发生塑性变形。对施工高峰期各种不利施工荷载组合的分析表明，本工程最大的坡顶施工荷载约为 20 kPa ，小于临界荷载，因此本桥梁在施工过程中是安全的。

对于具体的工程而言临界荷载值的确定具有重要的意义。当荷载超过临界荷载值后，土体变形会逐渐进入塑性阶段，桩身的最大弯矩也会大幅度地增加，如果系统长期处于超过临界荷载的作用下，会对

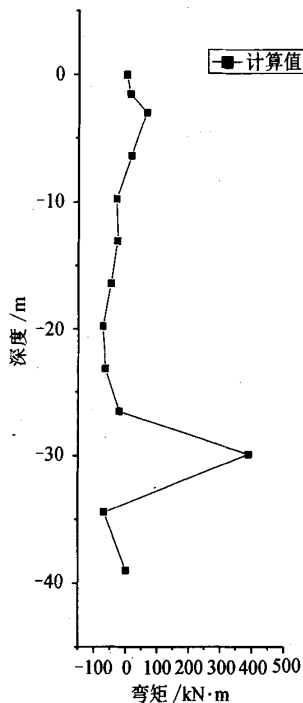


图7 桩身弯矩沿深度分布特征

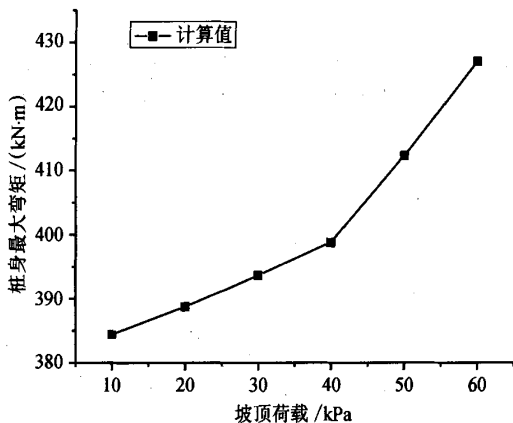


图8 桩身最大弯矩随荷载变化曲线

桩基的稳定性和其上部结构的安全性产生较大的影响。

3 结语

通过现场监测与有限元计算，对某高速公路陡坡地段桥梁桩基在施工荷载作用下的工程性状进行了分析。可以得出如下几点结论。

(1) 桩身及边坡土体的位移均随施工荷载的变化而变化，桩身位移的最大值出现在桩顶处。边坡土体的位移与土层本身的性质有关，土层强度越高，位

移就越小。

(2) 桩身最大弯矩发生在两土层的交界面处, 并随着坡顶施工荷载的增大而增大。当坡顶施工荷载增大到一个临界值后, 部分边坡土体会发生塑性变形, 导致桩身最大弯矩出现较大增长, 从而影响桥梁桩基的安全性。

(3) 有限元方法可以较好地模拟桩土之间的相互作用, 可以较好地分析侧向荷载作用下桩基的性状, 是一种比较理想的辅助设计方法。

参考文献:

- [1] Ellis E A, Springman S M. Modeling of soil-structure interaction for a piled bridge abutment in plan strain FEM analysis[J]. Computer and Geotechnics, 2001, 28.
- [2] Stewart D P, Jewell R J, Randolph M F. Numerical modeling of piled bridge abutments on soft ground [J]. Computer and Geotechnics, 1993, 15.
- [3] 桩基工程手册编委会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [4] 张建勋, 陈福全, 黄建华. 受堆载超载影响下的桩基性状分析研究[J]. 福建工程学院学报, 2003, 1(4).
- [5] 李仁平. 软土地基中被动桩与土体的相互作用及其工程应用[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2001.
- [6] 严人觉. 被动桩群的足尺试验[A]. 第四届土力学及基础工程会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

Construction Monitoring and FEM Analyses of Bridge Pile Bottom Constructed in Steep Slopes

YU Ji-dong¹ MA Chi-fan¹ WANG Yi-min² CHEN Ye-kai² YAN Fei-song²

(1. Guangdong Meihe Expressway Co. Ltd, Meizhou 514571, China;

2. College of Communications and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Through the bridge pile bottom constructed in steep slope of a certain expressway are monitored at the full stage from construction to opening traffic, the displacement distribution and change law of bridge pile bottom and slope soil under construction load are analyzed. The distribution law of body pile displacement is analyzed by elastic-plastic FEM model and the analytical results are compared with the field monitoring results. The results show that the FEM model can simulate pile-soil interaction better. The relationship between load of slope crest and maximum moment of body pile is also analyzed. The importance of critical construction load to control the stability of bridge pile bottom is presented.

Key words: steep slope, bridge pile bottom, FEM, lateral load

红水河罗天乐特大桥建设全面启动

连接黔桂两省区的红水河罗天乐特大桥工程建设项目施工招标开标, 红水河上的又一特大桥建设全面启动。

罗天乐特大桥是广西天峨、乐业两县通往贵州罗甸县跨越红水河的一座特大型桥梁。该桥桥长 748 m, 桥型为预应力混凝土 T 型连续刚构, 主桥桥墩高 121 m。该工程计划投资 1 亿元, 将于 2008 年 6 月建成。

罗天乐特大桥是经广西壮族自治区发展计划委员会批准立项, 并被列入 2006 年广西公路基本建设项目。该桥设计方案已于 3 月 28 日通过广西、贵州两省区交通厅联合审查, 目前相关工作已准备就绪。