

真空联合堆载预压软土路基失稳分析

徐晓斌¹, 肖广平², 王清³, 何宝石¹, 张敏¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广州 510600; 3. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130026)

摘要: 在对广东某高速公路桥路连接段软土路基采用真空联合堆载预压法进行处治的过程中, 该路基发生了整体失稳滑移。为了对路基滑移的原因进行分析, 结合对路基滑移后的现场勘察, 并根据工程设计、监测等数据资料, 对滑体进行了稳定性分析计算, 得出了路基处于极限稳定状态时所对应的填土高度为 4 m。并对在勘察、设计、监测及施工时需要注意的几个方面的问题进行探讨, 为真空联合堆载预压处理软基稳定性控制积累了一定的经验。

关键词: 软土路基; 真空联合堆载预压; 路基滑移; 稳定性分析

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)S1-0107-04

Instability Analysis of Soft Foundation with Vacuum-Surcharge Preloading

XU Xiaobin¹, XIAO Guangping², WANG Qing³, HE Baoshi¹, ZHANG Min¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663;

2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510600;

3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026)

Abstract: Vacuum-surcharge preloading was adopted to deal with the soft foundation of a bridge and road connection section of a highway in Guangdong Province, during which an overall instability and slippage of the foundation occurred. In order to analyze the cause of subgrade slippage, based on engineering design, observation and investigation after glide, this paper made an analysis and calculation of the stability of land-slide body, it is concluded that the filling height of the embankment in the limit state is 4 m. The problems which need to be paid attention in the process of investigation, design, monitoring and construction were also discussed, which accumulate certain experience for stability control of applying vacuum-surcharge preloading to deal with soft foundation.

Key words: soft foundation; vacuum-surcharge preloading; undation slippage; stability analysis

随着经济的快速发展, 高速公路建设也日益增多, 而在东南沿海地区一般为软土地基, 当高速公路修建在软土地基上时, 在桥路连接段会出现“桥头跳车”现象, 因此, 对该段路基进行处理显得尤为重要。在对路基进行地基处理的方法中, 传统的堆载预压法成本较低, 但需要较长的工期; 采用复合地基时造价较高; 而采用真空联合堆载预压法对软土路基进行处理时, 即能起到较好的加固效果,

造价也介于前两者之间, 很多学者采用该方法对软土地基进行处理时^[1-5], 取得了较好的效果。

广东某高速公路全长 58.39 km, 双向四车道, 设计行车速度为 120 km/h, 路基宽度 26 m。在路基沿线地表地层均为淤泥和淤泥质土, 呈软塑~流塑状态, 含水量较大, 孔隙比较大, 压缩性较高, 渗透系数小, 为欠固结土, 因此不适宜作路基的天然持力层。

要在这软土地基上修建路基, 就需要对软土地基进行处理, 从而减少地基的工后沉降。在某桥路连接段采用真空联合堆载预压法对地基进行处理, 以控制该路桥结合段的差异沉降。在施工后期, 长约 108 m 的路堤由路中向两侧发生了整体滑移, 造成的损失较大。

收稿日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172236)

作者简介: 徐晓斌(1981), 男, 贵州织金人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力工程勘察设计研究工作 (e-mail) xuxiaobin2005@163.com。

本文在现有的勘察、设计、施工、监测等资料的基础上,结合对发生滑移后的路基的现场勘察,对路基发生滑移的原因进行了初步地分析与探讨,对类似的软土路基稳定性治理有一定的参考意义。

1 滑坡描述

施工后期填土至最后一层时,该路段左幅路基发生整体滑移,滑移方量约为 $10\,500\text{ m}^3$,最大塌陷达 6 m ,纵向裂缝宽达 $40\sim 120\text{ cm}$,滑舌伸向路基外侧稻田,形成约 2 m 的滑坡鼓丘。 1 h 后,右幅路基也发生整体滑移,滑移方量约为 $10\,400\text{ m}^3$,塌陷最大达 5 m ,纵向裂缝宽达 $30\sim 70\text{ cm}$,滑舌伸向路基外侧鱼塘,形成约 1 m 的滑坡鼓丘。滑坡发生前,施工填土仍在进行。滑移路段长 108 m ,宽 50 m ,如图1所示。

2 滑移段滑前勘察、设计、监测及施工状况及滑后勘察

2.1 滑前勘察、设计

滑移路段桩号为 $\text{K6}+819.3\sim\text{K6}+927.3$,根据早期勘察报告,此路段软土层为淤泥,厚度为 $11.35\sim 16.50\text{ m}$;下卧层为粉砂及粉质粘土,厚度为 $1.90\sim 10.80\text{ m}$,土质均匀,属中等压缩性土,地基承载力为 $120\sim 220\text{ kPa}$;其下为风化基岩。

该段路堤设计填土高度为 4.96 m ,采用真空联合堆载预压对路基进行治理,采用袋装砂井并作竖向排水体,间距为 $1.10\sim 1.30\text{ m}$,设计砂井井底距砂层 $1.0\sim 2.0\text{ m}$ 。

2.2 监测与施工状况

为及时了解对该段路基的稳定安全、固结度、

垂直变形、侧向变形等状况,在 $\text{K6}+820$ 路基右侧与 $\text{K6}+910$ 路中分别设置沉降观测点。

施工前期填土高度 3.02 m ,平均填土速率为 0.045 m/d ;为尽早进行大桥施工,施工后期 8 d 填土 1.94 m ,平均填土速率为 0.25 m/d ,如图2所示。

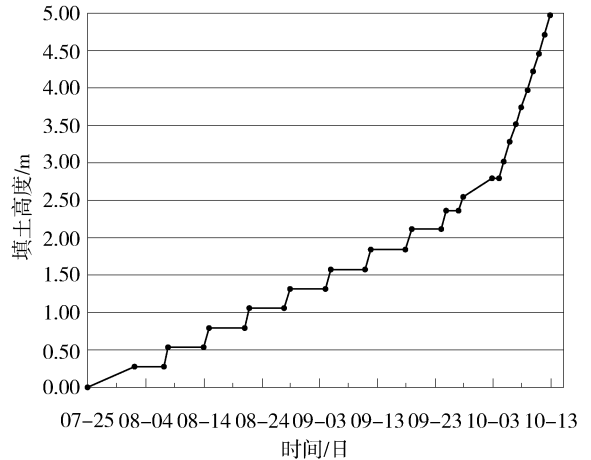


图2 填土高度-时间曲线

Fig. 2 Curve of the filling height and time

2.3 滑后勘察

为查明滑坡情况及原因,在已有勘察资料基础上,进行滑移后的工程勘察。

滑后勘察共布设4个原状取土孔,8个静力触探孔,2个十字板剪切试验等14个勘探点,如图1所示。揭露范围内路基地层自上而下分为4个地层单元,分述如下:层①为淤泥层,饱和,流塑~软塑状,原状土十字板强度 $8\sim 24\text{ kPa}$,高压缩性,层厚 $8.20\sim 16.50\text{ m}$;层②为粉砂及粉质粘土层,软塑~硬塑状,地基容许承载力为 $120\sim 220\text{ kPa}$,



注:●表示静力触探试验点;⊖表示钻孔取土点;⊕表示十字板试验点

图1 路基滑移现场及滑后勘察布置图

Fig. 1 The subgrade sliding site and the survey layout

层厚 1.30 ~ 5.50 m; 层③为淤泥层, 饱和, 软塑状, 原状土十字板强度为 12 ~ 29 kPa, 高压缩性, 层厚 0.20 ~ 10.10 m; 层④为粉质粘土, 地基容许承载力为 220 ~ 280 kPa, 层厚 4.20 ~ 13.40 m, 以下为风化岩。滑坡前后各土层物理力学指标如表 1 所示。

3 滑坡稳定性评价及滑移原因探讨

3.1 滑坡段稳定性评价

为了对该路基进行稳定性分析, 采用 c 和 φ 等直剪强度指标, 使用瑞典条分法^[6-7] 分别计算滑坡前不同填高路基的状态(如图 3 所示: 滑动面 1 表示填土高度为 3.02 m 时路基最危险滑动面; 滑动面 2 与滑动面 3 重合, 分别表示填土高度为 4.96 m 和 4.00 m 时路基最危险滑动面)的最小安全系数, 不同填土高度分析结果见表 2。计算公式如下:

$$K_{\min} = \frac{\sum F_i + C_i L_i}{\sum T_i}$$

式中: K_{\min} —最小安全系数; F_i —第 i 条块摩阻力; T_i —第 i 条块滑动力; $C_i L_i$ —第 i 条块粘聚力。

如表 2 所示: 当填土高度为 3.02 m, 即平均填土速率约为 0.045 m/d 时最小安全系数 $K_{\min} = 1.60$; 当填土高度为 4.96 m, 即平均填土速率约为 0.25 m/d 时最小安全系数 $K_{\min} = 0.97 < 1$, 而当路基处于极限稳定状态时($K_{\min} = 1.10$), 所对应的路堤填土高度为 4.00 m, 相当于极限填土速率为 0.12 m/d。显然, 在施工后期填土速率远远超出极限填土速率。

表 2 不同填土高度路基稳定性分析结果

Tab. 2 The results of stability analysis of roadbed with different filling heights

滑动面编号	填土高度/m	滑移半径/m	安全系数
1	3.02	8.20	1.60
2	4.96	14.20	0.97
3	4.00	14.20	1.10

3.2 滑移原因探讨

3.2.1 地层条件与设计

层①淤泥层厚 11.35 ~ 16.50 m, 下部有砂层, 袋装砂井设计深度为 10.41 ~ 12.31 m, 因淤泥层分布不均, 施工时很难控制砂井不进入砂层, 因此, 在没有密封措施的情况下, 难以保证真空压力不损失。滑移前, 停泵 6 h 后膜下真空度从 80 kPa 降到 4 kPa, 说明该真空预压段存在漏气部位, 面砂井可能进入砂层是导致真空压力损失原因之一。

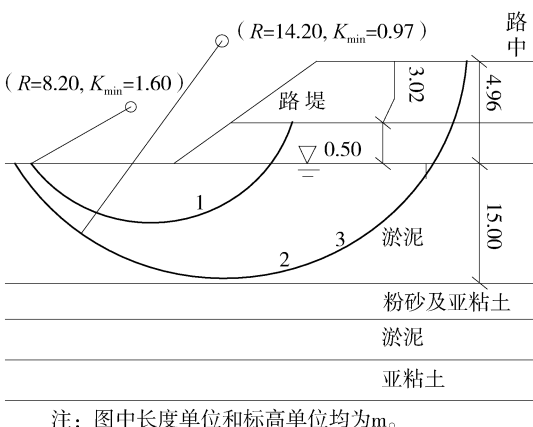


图 3 路基稳定性分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of roadbed stability analysis

表 1 各土层物理力学性质指标

Tab. 1 Physical and mechanical property indexes of each soil layer

取样阶段	土层	取样深度/m	含水量 W/%	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩系数 $A_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$
滑后 勘察	淤泥	8.70	63.0	15.8	1.67	99	40.3	28.0	12.3	13.0	2.1	1.51	1.77
	粉砂、粉质粘土	17.00	27.1	19.4	0.73	100	—	—	—	—	—	0.09	19.3
	淤泥	18.60	61.7	16.0	1.60	100	42.2	27.6	14.6	5.6	4.2	1.34	1.95
	粉质粘土	20.60	36.9	17.3	1.07	91	39.3	25.5	13.8	14.8	6.3	0.25	8.31
早期 勘察	淤泥	7.30	80.3	15.8	1.90	100	64.8	29.0	35.8	6.0	1.5	3.55	0.73
	粉砂及粉质粘土	17.90	33.3	19.5	0.82	100	43.5	23.3	20.2	12.0	4.0	0.40	4.40

3.2.2 监测

监测的目的是为了及时了解被加固地基的稳定状况、土体的固结程度,以及土体沉降和侧向变形情况,以指导施工建设,对于高填方的软土路基,监测更不可忽视。

该路段为高填方桥头过渡段,应是重点监测段,但根据现场调查,仅在与堆载预压处治连接路段 K6+820 左侧与 K6+910 的路中埋设沉降观测点,未布设孔隙水压力和侧向变形观测点,不能掌握超静孔隙水压力和路基侧向变形的变化。

3.2.3 施工

滑移发生前出现停电约 12 h,真空泵停止工作,该重要路段未设有备用电源。停电 6 h 后膜下真空度从 80 kPa 降到 4 kPa,这一迹象表明袋装砂井可能进入砂层导致漏气,同时上部密封措施可能未达到应须的密封效果,出现漏气现象。另外,软基处治施工后期,平均填土速率 0.25 m/d,超过极限填土速率 0.12 m/d。

4 结论

综上所述,对于采用真空联合堆载预压处治软土路基,在勘察、设计、监测及施工时必须对以下事项引起重视:

1) 采用真空联合堆载预压法处理软基时,须有可靠的密封措施,防止漏气。

2) 对于真空联合堆载预压法处治软基复杂路段,必须进行垂直变形、侧向变形、孔隙水压力等观测。另外,监测频率应根据工程进度进行调整,以及时地做好各阶段的预报工作。

3) 施工速度加快时,抽真空连续进行,保证超静孔隙水压力迅速消散。另外,填土速率的调整,应在安全填土速率范围之内。

4) 真空联合堆载预压法处理软土路基少有发生大面积整体滑移,但从这次滑移来看,设计时对该软基处路基进行定性评价是必要的。

参考文献:

- [1] 朱建才,陈兰云,龚晓南. 高等级公路桥头软基真空联合堆载预压加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2160-2165.
ZHU J C, CHEN L Y, GONG X N. Testing study on reinforcing soft foundation of highway bridge-head by vacuum combined with surcharge preloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2160-2165.
- [2] 王炳龙,杨龙才,宫全美,等. 真空联合堆载预压法加固软土地基的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 499-503.
WANG B L, YANG L C, GONG Q M, et al. Experimental study on soft soil reinforced by vacuum combined with fill preloading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(4): 499-503.
- [3] 吴春勇. 真空联合堆载预压软土路基稳定控制与沉降预测[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
WU C Y. Vacuum combined pile load preloading soft soil road-bed stability control and settlement prediction [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [4] 吴焕然,阎长虹,许宝田,等. 真空堆载联合预压加固软土地基效果分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 74-78.
WU H R, YAN C H, XU B T, et al. Analysis of reinforcing effect of soft clay foundation by vacuum-surcharge preloading method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 74-78.
- [5] 包惠明,黄显顺. 真空联合堆载预压法在某高速公路软土路基工程中的应用[J]. 路基工程, 2015(6): 44-47.
BAO H M, HUANG X S. Application of the method combined vacuum and surcharge preloading in a highway soft subgrade project [J]. Subgrade Engineering, 2015(6): 44-47.
- [6] 杨英华. 土力学[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
YANG Y H. Soil mechanics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [7] 戴自航,彭振斌. 土体滑坡治理的合理设计与计算[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2000, 31(2): 98-101.
DAI Z H, PENG Z B. The reasonable design and calculation of curing earth slides [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2000, 31(2): 98-101.

(责任编辑 李辉)