

预应力管桩处理傍山路段软基分析

郑江¹, 俞琴云¹, 高钰², 王金昌²

(1. 杭州路达公路工程总公司, 浙江 杭州 310004; 2. 浙江大学 交通工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 预应力管桩是处理软基的有效措施之一, 浙江省某大桥及接线工程在傍山路段设计使用预应力管桩进行处理, 但仍出现裂缝、失稳滑移破坏等问题。本文针对该项目傍山失稳路段和深厚软土路段, 基于 PLAXIS 软件进行路段处理前后的稳定性分析和沉降计算, 结果表明: 对于高填方软基抗滑处理措施可以采用多种处理方式相结合的方法; 对于管桩处理的软土地基, 连梁可以有效的提高路堤的整体性从而降低沉降值, 并且管桩应打穿至持力层以下; 相比于实际监测沉降数据和传统规范计算方法, 有限元软件可以较为准确的进行建模分析。

关键词: 软土地基; 预应力管桩; 滑移; 沉降; 有限元分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)01-0013-08

Analysis of prestressed pipe pile treatment of soft soil foundation adjacent to mountain road section

ZHENG Jiang¹, YU Qin-yun¹, GAO Yu², WANG Jin-chang²

(1. Hangzhou Luda Highway Engineering Corporation, Hangzhou 310004, China;

2. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Prestressed pipe pile is one of effective measures to deal with soft soil foundation. In the design of a bridge and its connection project in Zhejiang Province, prestressed pipe pile was used to in the design of a mountain pass section. However, there were still some problems such as crack, slip and failure. Based on PLAXIS software, stability analysis and settlement calculation were carried out before and after the treatment. The results showed that the anti-sliding treatment measures for the soft foundation with high fill can be combined with multiple treatment methods. For the soft soil foundation treated by pipe pile, connecting beam can effectively improve the integrity of embankment and also reduce the settlement value. The pipe pile can be driven below the bearing layer. Hence, with this comparison of the monitored settlement and the standard calculation, it can be proven that the finite can give better and more accurate predictions.

Key words: soft soil foundation; prestressed pipe pile; slip; displacement; finite analyses

0 引言

由于软土本身天然含水量高、孔隙比高、压缩性高、强度低等特点, 在软土地基上修筑的公路竣工运营后会出现工后沉降过大、路基纵向开裂甚至路堤滑塌等问题, 因此选择合适的软基处理方法, 从根本上解决沉降开裂问题至关重要。

近年来软土地基处理技术发展迅速, 预应力管桩技术凭借其施工速度快、沉降和侧向变形小以及稳定性高等优点而广泛应用于桥头路段和深厚软

土路段^[1-2], 在实际工程中取得了良好的效果, 如沪宁高速公路部分软基路段采用预应力管桩处理, 有效解决了软基段新老路基沉降差问题, 沉降很小或基本无沉降^[3]; 申嘉湖高速公路工程通过实际应用分析, 证明在深厚软基处理中管桩较之别的桩体有不可替代的优势, 能较好解决公路竣工后沉降问题^[4]; 苏浙高速公路部分桥头和桥头过渡路段软基采用预应力管桩处理, 没有出现明显裂缝和桥头跳车现象, 预应力管桩处理效果最优^[5]。

然而采用预应力管桩也会出现工程质量问题,

如广珠高速公路桥头软基采用预应力管桩为主体进行处理,在填筑过程中发生滑移,管桩并没有起到良好的侧向抗滑作用^[6],对类似工况进行分析有利于预应力管桩更好的推广使用。本文依托浙江省某大桥及接线工程,该工程位于滨海相软土深厚的台州地区,采用预应力管桩进行傍山路段处理但仍出现裂缝和失稳现象,针对失稳路段采用 PLAXIS 软件进行改进措施前后路堤总位移、水平位移和沉降情况的对比分析,指出在该案例应用中传统管桩的不足,从而在管桩设计方面提出建议,为以后相关工程中软基抗滑处理措施提供参考。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

本文所依托工程地处浙江东南沿海区域,全长为 54.5 km,穿越海积平原、冲海积平原区,特殊性岩土为软土,在平原区软土厚度一般为 10~30 m,山前平原及傍山路段的软土纵横向厚度变化

较大,厚度为 1.3~22.8 m,典型地质纵断剖面如图 1 所示。软土的岩性为淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土,主要为②₁、②₂层,分布于场地上部,特点是压缩性高、含水量高、孔隙比大、强度低、固结缓慢等,地质条件较差。土层的主要物理力学参数如表 1 所示,其中 c 、 φ 均通过直剪试验得出,灵敏度 S_i 用来表征软土的触变性,该地区软土灵敏度值较高,极易受到扰动发生结构破坏。

1.2 软基处理设计情况

由工程地质条件可得,项目所在地区软土较为深厚且分布不均匀,在傍山路段为避免不均匀沉降采用预应力管桩并结合堆载预压和土工格栅进行处理,管桩为正方形布置,外径为 400 mm,管壁厚不小于 60 mm,混凝土强度等级不小于 C60,桩身轴心受压承载力不小于 1 000 kN,桩顶桩帽尺寸为 100 cm×100 cm×35 cm,采用 C30 现浇钢筋混凝土板。路段的路基宽度均为 26 m,边坡坡率均为 1:1.5,软基处理典型设计图如图 2 所示。

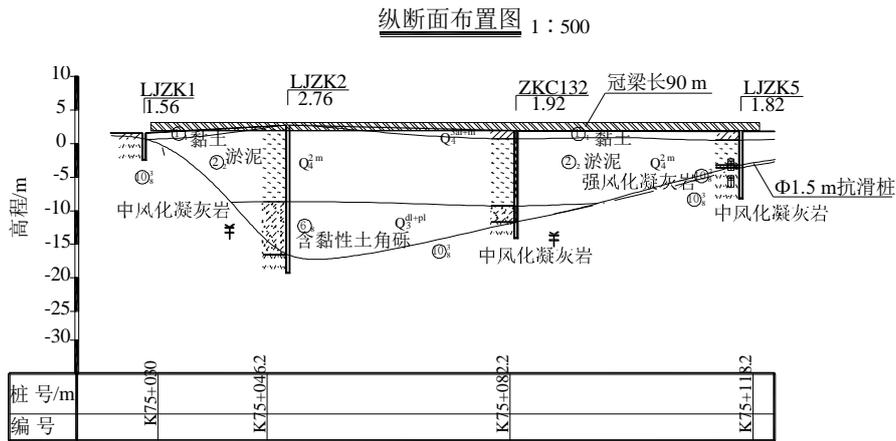


图 1 K75+030~K75+130 路段地质纵断面图

Fig. 1 Geological longitudinal section of K75+030~K75+130 section

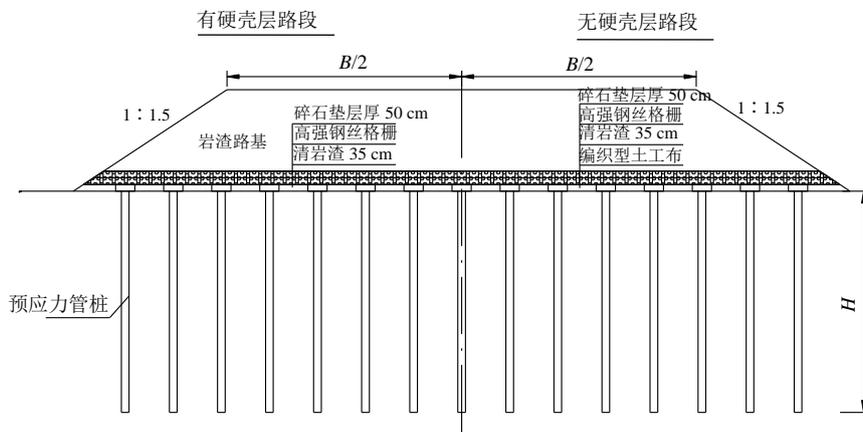


图 2 软基处理典型设计图

Fig. 2 Typical design of soft foundation treatment

表 1 土层的主要物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the main soft soil layer

分层代号	地层名称	w/%	e	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_{s1-2}/MPa	c/kPa	$\phi/^\circ$	S_t
① ₁	黏土	31.7	0.882	0.330	5.70	41.01	9.5	—
② ₁	淤泥质黏土	52.6	1.492	1.250	2.11	8.60	2.5	4.05
② ₂	淤泥	57.4	0.600	1.460	1.83	6.80	2.4	4.17
② ₃	粉质黏土	34.8	0.960	0.505	3.88	17.5	7.5	—
③ ₁	粉质黏土	28.2	0.807	0.310	6.11	20.0	5.0	—
④ ₂	粉质黏土	32.1	0.918	0.382	5.46	28.5	12.9	—

注: 表中物理性质指标取统计平均值, 力学性质指标取统计标准值。

2 路段病害情况

该项目多采用预应力管桩和素混凝土桩进行软基处理, 大部分路段的沉降预测比较准确, 但在几个工况较为不利的路段出现了裂缝甚至路基滑移, 其中 K75+030~K75+130 傍山路段在填筑完宕渣以后, 于 4 月 25 日上午在路堤左侧产生裂缝以及错台, 路基边上的农田出现了隆起现象, 如图 3 平面图所示虚线部分为滑移范围, 但该路段在失稳前的沉降监测结果均满足规范沉降变化速率^[8]要求, 随后施工单位对该路段进行卸载处理, 并进行进一步软土层的补勘。

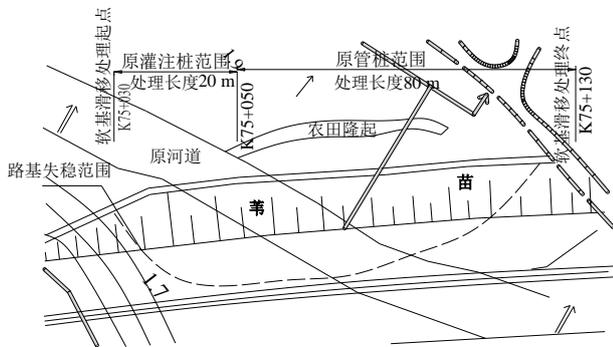


图 3 路基失稳范围平面图

Fig. 3 Plan of the range of subgrade instability

K75+700~K75+800 傍山路段是基层施工完成开放交通以后, 于 2018 年 7 月 5 日发现右幅路基水泥稳定碎石基层顶面有两道纵向裂缝, 现场裂缝情况如图 4 所示。该路段在施工过程中的填筑速率、监测沉降速率以及压实度均符合规范^[8]要求, 裂缝发现以后对产生裂缝路段进行取芯来判断路段开裂情况, 水泥稳定碎石层芯样照片如图 5 所示, 裂缝第一层宽度小于 1 mm, 第二层小于 0.6 mm。

从现场芯样照片看出裂缝扩展较深, 路面结构施工过程中的振动压实可能对下方土层有扰动, 从表 1 中可见该地区软土层的灵敏度值较高, 极易被

扰动发生结构破坏, 进而可能导致表层路面结构出现裂缝。



图 4 现场裂缝情况照片

Fig. 4 Photo of crack condition at site



图 5 现场取芯芯样照片

Fig. 5 Core sample photos of on-site core removal

K75+700~K75+800 路段于通车以后出现纵向裂缝, 而 K75+030~K75+130 路段则是在施工时期就出现滑移现象, 因此选择这两个典型路段通过软件 PLAXIS 进行病害机理分析和改进措施分析。

3 K75+030~K75+130 路段分析

该傍山路段横向地质均一性差, 地下起伏变化较大。在发生滑移以后对该路段软土层做了进一步详堪, 结果表示该路段软土横向分布不均匀, 容易产生侧向位移。

3.1 断面信息

选择典型断面 K75+090 进行计路段病害机理分析, 该截面路堤填高约为 7.0 m 左右, 原始处理方案设计图如图 2 所示, 其中管桩平均桩长为 8.0 m, 桩间距为 2.0 m。路段发生滑移后, 为确保

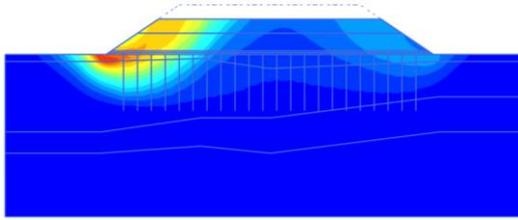


图 7 K75+090 断面总位移云图

Fig. 7 Total displacement nephogram of the K75+090 section

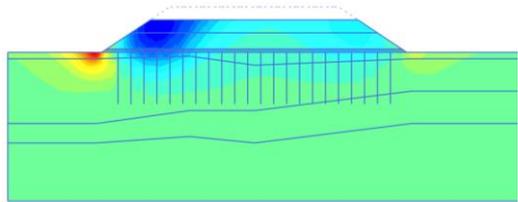


图 8 K75+090 断面沉降云图

Fig. 8 Settlement nephogram of the K75+090 section

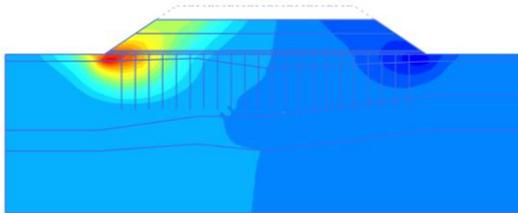


图 9 K75+090 断面水平位移云图

Fig. 9 Horizontal displacement nephogram of the K75+090 section

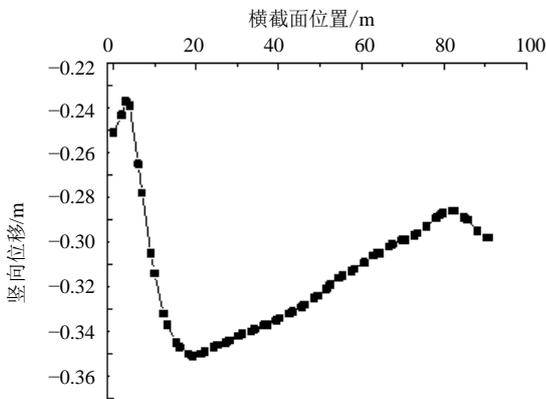


图 10 模型沉降计算结果

Fig. 10 Settlement calculations

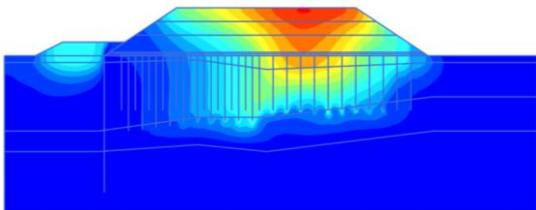


图 11 K75+090 断面改进后总位移云图

Fig. 11 Total displacement nephogram of the K75+090 section after treatment

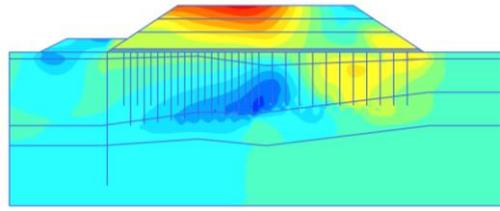


图 12 K75+090 断面改进后水平位移云图

Fig. 12 Horizontal displacement nephogram of the K75+090 section after treatment

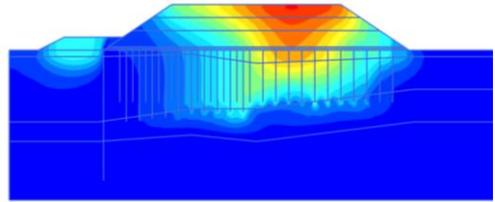


图 13 K75+090 断面改进后沉降云图

Fig. 13 Settlement nephogram of the K75+090 section after treatment

左侧路堤原先预应力管桩没有打穿软土层, 加固效果较差效果, 经过打穿到含碎石角砾层的高压旋喷桩加固以后, 沉降值明显降低, 证明加固措施十分有效; 反压护道和抗滑桩的添加使得左侧坡脚处的水平位移有效降低, 改善了原本坡脚的受力状态, 滑移面消失。

在加固之前, 每个管桩处于分离的状态, 加固以后将原来的管桩桩帽挖除在路堤中加上连梁, 起到将预应力管桩连接起来共同工作的作用, 将加固后的模型中去掉连梁与有连梁的结构进行沉降值对比分析, 结果如图 14 和图 15 所示, 从图中可得连梁可以使地基形成一个整体结构, 有效使得沉降和水平位移降低, 提高路堤结构的稳定性。

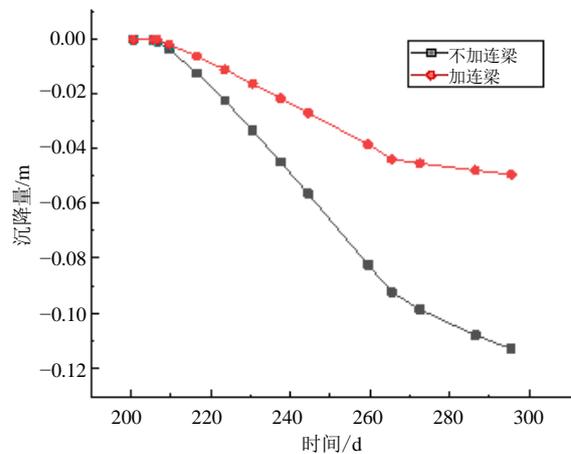


图 14 有无连梁沉降对比图

Fig. 14 Settlement with or without connecting beam

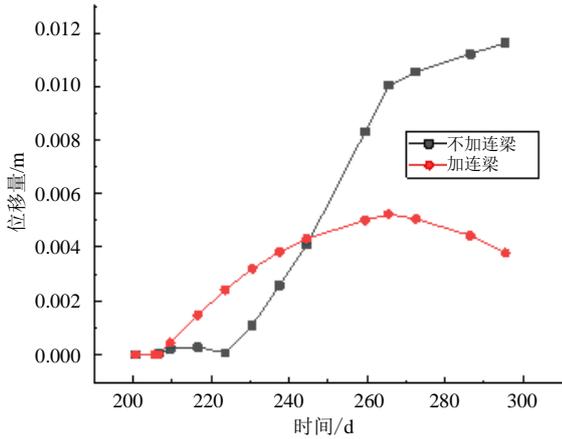


图 15 有无连梁水平位移对比图

Fig. 15 Horizontal displacement with or without connecting beam

4 K75+700~K75+800 路段分析

该傍山路段软土物理性质及力学指标与 K75+030~K75+130 路段基本相同, 但软土层横向分布较为均匀, 但纵向起伏较大, 软土最大深度可达 30 m 左右。

4.1 断面信息

选择典型断面 K75+760 进行建模分析, 路堤填高约为 5.0 m 左右, 原始处理方案设计图如图 2 所示, 其中管桩平均桩长为 30.0 m, 桩间距为 2.5 m。路段通车产生裂缝以后, 为确保路基的稳定性并满足工后沉降的要求, 在该路段采用高压旋喷桩来进行补强处理, 处理后的横断面图如图 16 所示。高压旋喷桩的桩径为 80 cm, 内侧的两排桩长为 12 m,

其余的桩长均为 22 m, 采用正方形布置桩间距为 2.5 m。

4.2 数值模拟分析

(1) 病害机理分析

在该路段右幅路基坡脚大约 5 m 处有一河塘每年都要进行一到两次的清淤处理, 可能会对路段软土层产生扰动影响, 路段于通车后路基右侧产生裂缝, 需要基于 PLAXIS 有限元数值分析软件, 进行车辆荷载对路基的影响分析。

根据断面信息和表 1 的土层物理力学参数建立模型, 表格中的 c 、 φ 值均为有效值, 网格化后对相应阶段可进行计算, 计算结果如图 17 所示。

道路通车以后总位移最大值为 0.300 m, 最大沉降值为 0.298 m, 发生在右侧路堤。选择路堤顶面截面, 进行通车前后的位移对比, 如图 18 所示, 道路通车以后增加了路堤沉降值和截面沉降变化趋势, 右侧路堤沉降值较大且变化较快, 容易产生裂缝, 所以该截面在距离路堤右端 5.6 m 处出现裂缝主要原因有开放交通后动载对路基的影响^[7]。

(2) 改进措施分析

采用处理后的横断面建模分析, 结果如图 19 所示, 右侧路堤经过高压旋喷桩的处理后沉降值较小, 效果显著, 提取出右侧路堤上一点的处理前后沉降值如图 20, 对比可得高压旋喷桩的加固效果显著; 模型竖向沉降最大值发生在左侧路堤顶面, 为 0.254 m, 相比于高压旋喷桩加固前的沉降值 0.291 m 来说降低了些, 说明高压旋喷桩也对左侧路堤具有一定的加固效果。

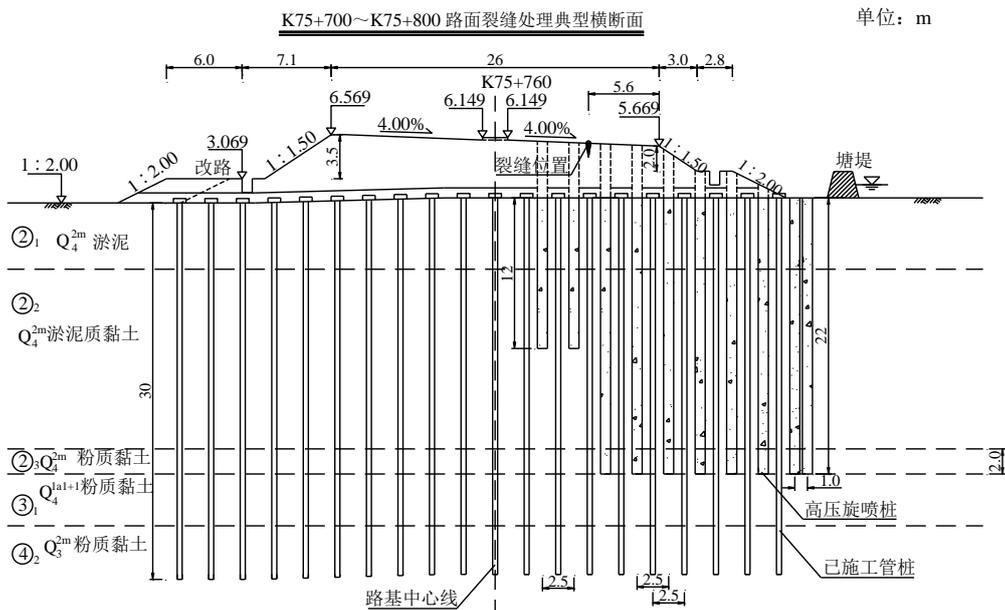


图 16 K75+760 高压旋喷桩方案处理横断面图

Fig. 16 Cross-sectional view of section K75+760 treated by the high-pressure jet grouting pile scheme

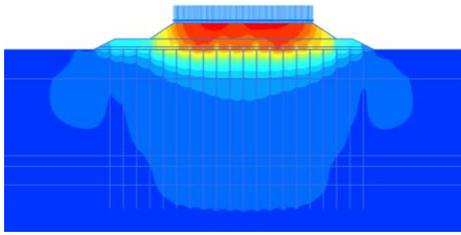


图 17 K75+760 断面沉降云图

Fig. 17 Settlement nephogram of the K75+760 section

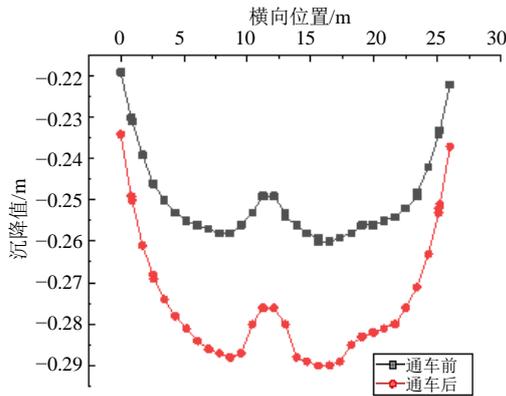


图 18 通车前后路堤顶部沉降对比图

Fig. 18 Settlement of embankment top before and after opening to traffic

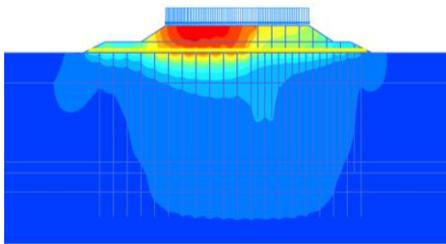


图 19 K75+760 断面处理后沉降云图

Fig. 19 Settlement nephogram of the K75+760 section after treatment

5 结论和建议

本文以浙江省某大桥及接线工程为依托, 针对几个典型失稳路段采用有限元软件进行计算分析, 具体结论和建议如下:

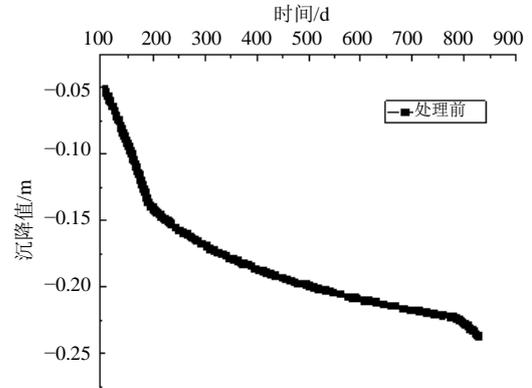
(1) 计算分析发现, 传统预应力管桩的设计每个管桩相互独立, 连梁可以将独立的管桩连接起来共同受力, 从而提高路堤的整体稳定性, 并且设计管桩时其桩长应打穿软土层到持力层以下 1 m 左右, 从而降低沉降值。

(2) 对于软土层不均匀路段, 应进行详细土层勘察, 避免出现桩基不能打穿软土层的情况, 导致下卧土层分布不均匀而产生滑移。

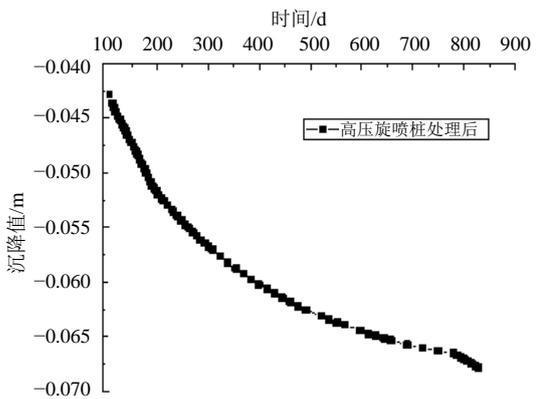
(3) 相比于实际监测数据和传统规范方法, 有限元方法能够较准确分析软基沉降和稳定性问

题, 在本案例中失稳前的沉降监测结果均满足规范沉降变化速率要求, 但路堤仍发生失稳滑移, 通过有限元方法则可以得出较为准确的计算结果。

对于高填方软基抗滑处理措施可以采用多种方案结合的方法, 如本工程案例中的反压护道+抗滑桩+高压旋喷桩+连梁的方式。



(a)



(b)

图 20 K75+760 断面处理前后沉降对比图

Fig. 20 Settlement comparison diagram of K75+760 section before and after treatment

参考文献

[1] 郑俊杰, 曹文昭, 董同新, 等. 中低压压缩性土地区桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1549-1555.
ZHENG Jun-jie, CAO Wen-zhao, DONG Tong-xin, et al. Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment on soils with medium-low compressibility[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1549-1555.

[2] 陈福全, 吕艳平, 侯永峰. 桩承加筋式路堤的承载机理研究[J]. 铁道学报, 2007(4): 74-79.
CHEN Fu-quan, LV Yan-ping, HOU Yong-feng. Mechanisms of load transfer in geosynthetic-reinforced

- pile supported embankment over soft soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2007(4): 74-79.
- [3] 丁林江, 严晓生. 预应力管桩在沪宁高速公路拓宽工程软基处理中的应用[J]. 公路, 2009(8): 95-99.
DING Lin-jiang, YAN Xiao-sheng. Application of prestressed pipe pile to soft foundation treatment of huning expressway extension project[J]. Highway, 2009(8): 95-99.
- [4] 颜永华, 魏健. 预应力混凝土薄壁管桩在申嘉湖高速公路深厚软土路基中的应用[J]. 公路, 2010(9): 106-109.
YAN Yong-hua, WEI Jian. Application of prestressed concrete thin wall pipe pile in deep soft soil subgrade of Shenjiahu expressway [J]. Highway, 2010(9): 106-109.
- [5] 吴昌胜, 朱志铎. 沪苏浙高速公路软基处理评价[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 105-109.
WU Chang-sheng, ZHU Zhi-duo. Evaluation of soft ground treatment in Shanghai-Jiangsu-Zhejiang highway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 105-109.
- [6] 朱旭华, 舒国明. 广珠北新围高架桥桥头路基滑移原因分析[J]. 中外公路, 2006(4): 27-29.
ZHU Xu-hua, SHU Guo-ming. Analysis on the cause of subgrade slip of Guangzhu beixinwei viaduct[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006(4): 27-29.
- [7] 安笑, 岳强, 徐金涛. 冻融循环与动载耦合作用下低路堤路基沉降数值研究[J]. 公路, 2015, 60(11): 25-30.
AN Xiao, YUE Qiang, XU Jin-tao. Numerical research on low embankment settlement subjected to freeze-thaw cycle and dynamic vehicle loading actions[J]. Highway, 2015, 60(11): 25-30.
- [8] 浙江交通规划设计研究院. 公路软土地基路堤设计规范: DB33/T 904—2013[S]. 杭州: 浙江省质量技术监督局, 2013.

【简 讯】

2021年岩土工程西湖论坛（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2021）拟定于2021年10月23—24日在杭州花家山庄召开。

计算与分析在岩土工程设计规划、运维管控、防灾减灾等全生命周期各个阶段皆发挥着不可或缺的作用，因此，本次会议主题设定为岩土工程计算与分析。会议旨在加强土木工程各行业间的交流，促进我国岩土工程计算与分析水平不断提高，开发拥有自主知识产权的岩土工程计算分析软件，更好地为我国工程建设服务。会前将围绕该主题组

织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第5册《岩土工程计算与分析》，并在中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与。

联系人：宋秀英

联系电话：0571-88208775

电子邮件：xysong2020@163.com

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址：

<http://www.zjdxyt.com>