

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.122



在役高速公路深厚软基滑移病害 微型桩处治分析

顾绍付^{1,2}, 刘维正¹, 石志国¹, 徐林荣¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 苏交科集团广东检测认证有限公司, 广州 510800)

摘要:针对在役高速公路深厚软基段出现失稳滑移的问题,提出桩顶带连系梁的微型桩快速处治方法。结合开阳高速公路 K3202+577~K3202+640 段软基加固抢险实际工程,介绍微型桩和连系梁的加固方案和施工工艺。加固后实测的深层水平位移和路基沉降变形大幅减小,表明该方法可有效处治软基滑移病害。采用 Plaxis 3D 软件建立深厚软基连系梁微型桩加固变形的数值分析模型,通过与实测值对比分析,验证了模型的合理性;研究了桩间距、桩排距、连系梁布设形式对滑移处治效果的影响,结果表明:水平位移随着桩间距增大而增大,桩间距超过 10 倍桩径后,土体侧移增大速度明显加快;水平位移随排间距增大会先减小后增大,排间距不宜超过 10 倍桩径;加设连系梁能减小路基土体侧移和优化微型桩受力,桩顶不同形式连系梁的处治效果排序为:双向交叉连系梁>单向交叉连系梁>斜向连系梁>纵向连系梁。

关键词:在役高速公路;软基滑移;微型桩;数值模拟;参数分析

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)06-0043-09

Stability analysis of micropile treatment deep soft foundation for in-service highway against sliding

Gu Shaofu^{1,2}, Liu Weizheng¹, Shi Zhiguo¹, Xu Linrong¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China;

2. JSTI Group, Guangdong Test and Certification, Guangzhou 510800, P. R. China)

Abstract: Aiming at the instability and slip in the deep soft foundation section of in-service highway, a quick treatment method of micropile with coupling beam at pile top is proposed. Combined with the actual project of soft foundation reinforcement in Kaiyang highway from mileage K3202 + 577 to K3202 + 640, the reinforcement techniques micropile and coupling beam are introduced. The measured deep horizontal displacement and settlement of soft subgrade are greatly reduced after reinforcement, indicating that this method can effectively mitigate sliding. The numerical analysis model for the deformation of deep soft foundation reinforced by coupling beams and micropiles is established by Plaxis 3D. The rationality of the model is verified by comparison with the field measured data, with influences of spacing, row spacing and

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51208517, 51778634); 湖南省自然科学基金(2019JJ40344)

作者简介: 顾绍付(1978-), 男, 博士生, 高级工程师, 主要从事软土工程特性及地基处理研究, E-mail: gsf140@jsti.com.

Received: 2019-04-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51208517, 51778634); Hunan Province Natural Science Foundation Project (No. 2019JJ40344)

Author brief: Gu Shaofu(1978-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: soft engineering characteristics and foundation treatment, E-mail: gsf140@jsti.com.

form of coupling beam on treatment effect investigated. The results show that the lateral displacement increases with the increase of pile spacing, and when the pile spacing exceeds 10 times pile diameter, the soil lateral displacement increases obviously. The addition of coupling beam can reduce the lateral displacement of subgrade soil and optimize the stress of micropiles. The treatment effect of different types of coupling beams is ranked as follows: bidirectional cross coupling beam, followed by unidirectional cross coupling beam, then oblique coupling beam, while longitudinal coupling beam is the least. The conclusions can provide reference for the optimization design of similar projects.

Keywords: in-service highway; soft foundation sliding; micropile; numerical simulation; parameter analysis

中国沿江、沿海地区广泛分布着含水率高、孔隙比大、强度低、压缩性高、渗透性低的软土,这些地区同时也是高速交通密集建设区。部分开通运营的高速公路由于建设期地基处理措施针对性不强、运营期周边环境扰动与交通荷载作用,加上软土显著的蠕变性和触变性,先后出现不同程度病害:过渡段不均匀沉降^[1-2]、局部失稳沉降^[3]、侧向滑移破坏^[4-7]等,严重影响运营安全。因此,采取合理、有效和快速的方法对在役高速公路软基病害进行处治尤为重要。

针对路基不均匀沉降问题,吕若冰等^[8]提出高压旋喷桩可有效处治高速公路不均匀沉降;王安辉等^[9]提出侧向辐射注浆技术并成功应用于连盐高速路基不均匀沉降处治;徐前卫等^[10]在高速铁路中采用注浆技术进行差异沉降处理。针对路基局部失稳沉降,李文等^[11]在填方段和挖方段采用不同的花管注浆处治措施,张森^[12]提出采用竖向和水平向花管注浆结合的方法处治高速公路沉降。针对路基侧向滑移破坏,荆伟伟等^[13]利用反压护道的方式解决低矮路堤滑移问题;董志勇等^[14]采用“开挖回填+CFG桩+反压护道”方案处治高速公路软基路堤大面积侧向滑移问题。然而,在受到现场施工条件和工期要求限制时,上述方法并不适用。

近年来,微型桩由于施工简单、对土体扰动小、承载力较高、施工周期短的特点,在抢险加固工程中得到广泛应用。杨波^[15]通过理论分析发现微型桩处治粉粘土路基差异沉降效果较好;黄斌^[16]通过试验研究发现微型桩能有效加固软弱岩溶路基,减少路基工后沉降;陈伟志等^[17]基于非饱和膨胀土地区铁路路基基床现场试验,指出长短微型桩能有效减弱地基隆起变形;Sun等^[18]将微型桩成功用于青海省某堤防滑坡处治;Zhang等^[19]通过数值模拟表明微型桩-加筋土挡墙结构能显著减小路面不均匀沉

降和水平位移。但微型桩技术在营运高速公路软基病害处治工程中应用研究不多。

本文依托某沿海高速公路软基加固抢险工程,基于其滑移病害特点,提出采用带连系梁微型桩快速处治在役高速公路深厚软基失稳的方法,通过现场监测证实了该方法合理有效,采用Plaxis 3D软件建立实际工程数值分析模型,分析软基滑移病害微型桩处治效果,并研究不同因素对深厚软基水平位移的影响。

1 工程概况及病害分析

1.1 工程概况

开阳高速公路于2003年9月建成通车,2004年9月路面出现裂缝。本文依托的软基病害段K3202+577~K3202+640,位于路基左幅,路堤填高为6.5~7.0 m,软土厚度最深处达7.2 m,建设期采用浅层换填60 cm厚砂层进行处理。该段路面在2005年—2007年多次加铺,仍产生较严重的工后沉降,于2008年采用孔径89 mm、间距2.5 m的钢花管注浆进行加固处治。但在2013年10月,路面出现了连通的弧形裂缝,路基呈现侧向滑移趋势。

1.2 工程地质条件

根据2007年补充勘察的3个钻孔,该病害路段内主要土层有以下几种。路基填土:褐红色,呈粘黏土及夹碎块,厚6.5~7.0 m;粉质黏土:黄褐色,黏性较好,硬塑状,厚1.3~2.0 m;淤泥:灰黑色,饱和,软塑~流塑状,富含有机质,含量为5.9%~35.6%,平均为18.1%;淤泥质粉质黏土:灰黑色,软塑,含大量有机质。病害路段地质纵剖面图如图1所示。

图2为K3202+610断面坡脚处水平位移、两处路表工后沉降的历时曲线。从现场监测结果可看出,截至2013年10月,累计水平位移已达105 mm,其中,5月至10月变形速率更是达到8.8 mm/月;路

表工后沉降逐年增加,并呈现继续增加的趋势,且存在较大的横向差异沉降。造成该段路基反复出现病害的原因是:1)路基底存在厚达 7.2 m 的淤泥层,其含水率和孔隙比高、渗透性极低、有机质含量高、压缩性大,固结与次固结历时长;2)路堤填高达到 6.5 m,且建设期仅采用浅层换填的方式处理,地基屈服强度低,导致在较大附加荷载下,固结沉降与残余变形大。软土强度低、路基荷载大和地基处理措施弱导致过大的工后变形,从而引发路基深层滑移破坏。

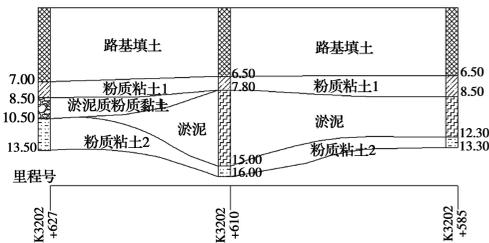


图 1 病害路段地质纵剖面图

Fig. 1 Geological longitudinal section of the diseased section

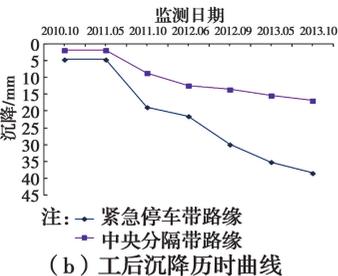
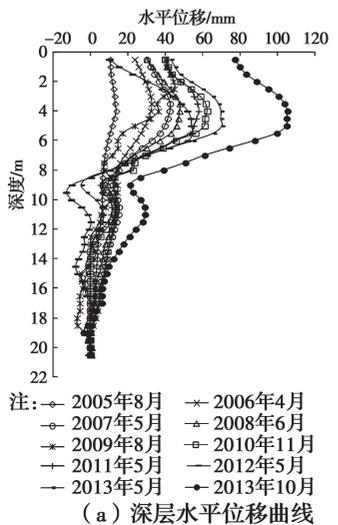


图 2 K3202+610 断面路基工后变形

Fig. 2 Post construction deformation of K3202+610 section

1.3 病害情况分析

2 微型桩滑移处治技术应用

2.1 方案选择

根据裂缝分布特征及监测数据分析,路堤已发

生滑移失稳,并处于蠕变、挤压变形阶段。对软土路基稳定性控制应用较多的处理方法有高压旋喷桩、钢花管注浆、管桩、CFG 桩、微型桩等。考虑到工程为运营高速公路,车流量大,施工不能对路面造成太大破坏,而且路基已处于临界失稳状态,在处理过程中不能对淤泥层扰动过大,选用高压旋喷桩、管桩、CFG 桩均不合适。由于淤泥含水率高,渗透系数小,加之其具有结构性,灌浆压力会扰动土体结构,土体强度反而降低,所以,注浆法也不适合淤泥,而且在 2008 年已证明其处治效果不理想。而微型桩具有施工操作方便、对行车影响小、桩身抗剪强度高、施工快速且质量易控制等优点,综合考虑采用微型桩技术进行滑移病害处治。

2.2 微型桩设计

在路基横断面不同区域进行针对性布桩。坡脚外侧为 I 区,布置两排桩,桩距、排距均为 1.5 m,桩径 300 mm;路基边坡为 II 区,布置四排桩,桩距、排距均为 1.5 m,桩径 150 mm;路面部位为 III 区,布置四排桩,二、三排排距为 1.8 m,其余桩距、排距均为 1.5 m,桩径 150 mm。K3202+610 段断面微型桩布置如图 3 所示,各区域均按梅花形布桩。I 区和 II 区的微型桩均通过纵梁连接,且 I 区沿纵向每 3 m 再设置横梁,II 区设置斜梁,连系梁截面为正方形, I 区和 II 区连系梁边长分别为 350 mm 和 250 mm,连系梁平面布置图,如图 4 所示。

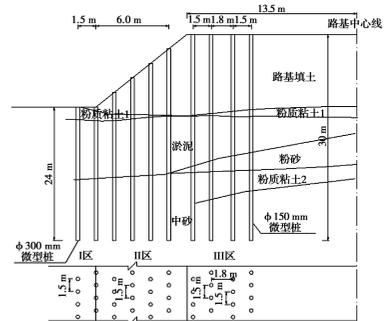


图 3 K3202+610 段微型桩布置图

Fig. 3 Layout of micropile in K3202+610 section

2.3 微型桩施工

2.3.1 钢筋笼制作安装 微型桩钢筋笼制作采用主筋,主筋采用 $\Phi 18$ mm HRB325 螺纹钢,箍筋采用 $\Phi 6$ mm 圆钢,截面呈三角形,箍筋与主筋采用点焊焊接。I、II 区钢筋笼顶部至地面与连系梁相连,III 区钢筋笼顶部进入路基填土至路面以下 30 cm。

2.3.2 填灌及注浆 钢筋笼下放完毕后,直接在孔内注入水泥浆液,采用 32.5R 号普通硅酸盐水泥。

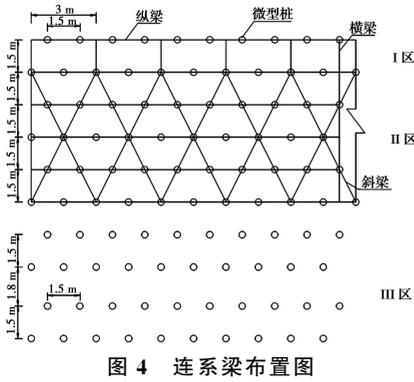


图 4 连系梁布置图

Fig. 4 Layout of coupling beam

其中,在 I 区钢筋笼下放完毕后,要在其中填入 10~25 mm 粒径碎石。注浆过程分两次进行,注浆压力为 0.5~1.0 MPa。III 区注浆至桩顶即路面标高, I、II 区在桩顶预留 25 cm 不注浆,以便连系梁钢筋搭接。

2.3.3 连系梁施工 I、II 区微型桩施工完成后,进行连系梁施工,纵梁、横梁、斜梁钢筋笼与微型桩桩顶钢筋笼绑扎搭接后浇筑 C25 混凝土。钢筋笼采用 4 根 $\Phi 18$ mm HRB325 螺纹钢作主筋,箍筋采用 $\Phi 6$ mm 圆钢,每 20 cm 设置一道箍筋。钢筋笼截面为正方形,边长 15 cm。

2.4 处治效果实测分析

为观察微型桩处治效果,在处治路段新设监测斜管和沉降监测点来观察路基变形情况,监测点平面布置图如图 5 所示。路基水平位移与沉降,如图 6~图 7 所示。

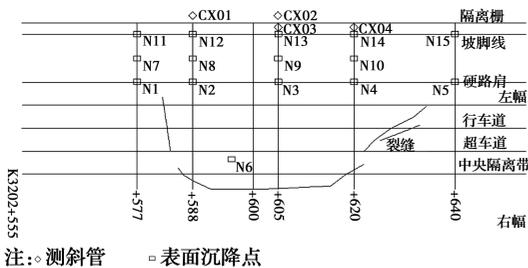
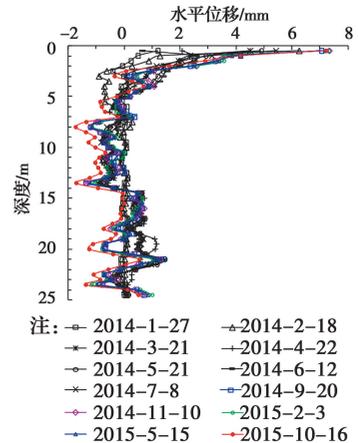


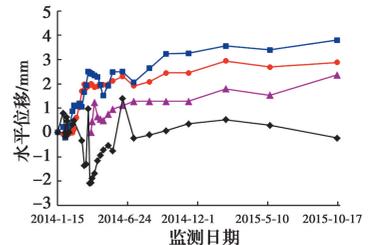
图 5 监测点平面布置图

Fig. 5 Layout plan of monitoring points

从图 6(a)可以看出,CX02 测点水平位移最大值出现在上层土体位置,深层水平位移基本在 0 附近波动;微型桩施工完成后,路基水平位移增长明显减慢,经过 21 个月左右,水平位移增长基本趋于稳定,最大水平位移增加不到 8 mm。从图 6(b)可以看出,CX01、CX02、CX03 测点在 3 m 深度水平位移均为正值,即向坡体外侧移动,其中,CX02 测点位移



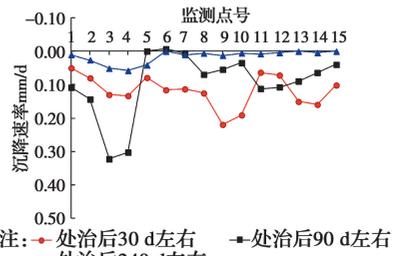
(a) CX02 测点深层水平位移



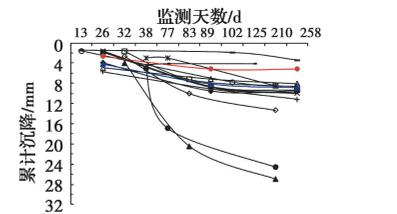
(b) 不同测点 3 m 深度水平位移

图 6 深层水平位移图

Fig. 6 Deep horizontal displacement



(a) 平均沉降速率



(b) 累计沉降

图 7 路基沉降监测结果

Fig. 7 Monitoring results of subgrade settlement

值最大,为 3.8 mm,而 CX04 测点水平位移为负值,即向坡体内侧移动。出现这种情况的原因是 CX02 测点处淤泥层最厚,CX04 测点处则没有淤泥层,在上部路堤荷载作用下,淤泥层厚度对水平位移有明显影响。可以看到,使用微型桩后,土体深层水平位移较小,以上分析表明微型桩处治路基滑移效果

显著。

从图 7(a)可以看出,随着处治时间的增长,大部分测点平均沉降速率逐渐减小,在处治 240 d 后,各监测点平均沉降速率几乎为 0,路基沉降基本达到稳定;从图 7(b)可以看到,除了 N3 和 N4 测点外,其余测点累计沉降均小于 12 mm,其中,N3 测点累计沉降值最大,最大值也仅 27 mm,表明微型桩对减小路基沉降效果较好。

3 数值模型建立与验证

3.1 数值模型建立

选取典型断面 K3202+610,利用大型有限元软件 Plaxis 3D 建立三维数值模型。路面宽 27 m,填土高度 6.5 m,路堤边坡比为 1:1.5。由于路基左侧出现滑移,所以,取左侧路基进行分析,为消除边界效应的影响,模型宽度取 30 m,地基土深度取 30 m,沿纵断面方向取 7.5 m。地基土上表面设为透水边界,地基地部及两侧均为不透水边界,地下水位在地基面以下 0.5 m 处。模型网格采用 10 节点四面体单元,共生成 25 404 单元,39 213 节点,网格划分如图 8 所示。

3.2 参数选取

Plaxis 软件提供了多种土体本构模型及结构类

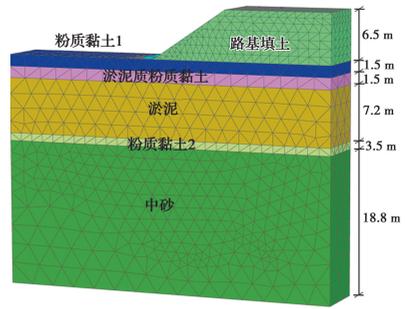


图 8 模型网格划分图

Fig. 8 Division of model meshing

型,其中,淤泥、淤泥质粉质黏土用软土模型,其余土体用摩尔-库伦模型,连系梁采用梁单元模拟,微型桩采用 Embedded 桩单元模拟,对应不同土层,桩侧摩阻力沿桩身方向定义为多段线性,模型具体参数取值见表 1。其中,弹性模量近似取 2~5 倍的压缩模量。

为准确模拟路基随时间的变形,采用分步施工模拟方法,分为路基填筑、通车运营和微型桩病害处治 3 个阶段。前两个阶段采用固结计算法进行路基变形分析;病害处治阶段采用塑性计算进行弹塑性变形分析,采用强度折减法对微型桩处治后的路基稳定性进行分析。为考虑行车荷载影响,在路面顶施加 10 kPa 的均布荷载。

表 1 模型参数取值

Table 1 Value of model parameters

材料	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙 比 e	粘聚力 c/kPa	摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 E/MPa	修正压缩 指数 λ^*	泊松 比 μ	渗透系数 $\kappa/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	桩侧摩阻力 $T/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
路基填土	22	0.5	25	10	15		0.2	0.25	13
粉质黏土 1	19.5	0.5	28	10	10		0.3	0.01	20
淤泥	14	2	19	6		0.15	0.3	0.000 8	8
淤泥质粉质黏土	16.5	1.5	22	5		0.08	0.2	0.04	10
粉质黏土 2	18.5	0.5	25	10	15		0.35	0.01	38
中砂	21	0.5	0	30	80		0.33	2	40
微型桩	23				25 000		0.2		
连系梁	25				33 000		0.2		

3.3 模型验证

为验证模型的合理性,将数值模拟结果与现场实测结果进行对比,其中,数值模拟水平位移结果取自坡脚处 CX02 测点对应位置,累计沉降结果取自路肩处 N3 测点对应位置。从图 9(a)可以看出,在地基面下 3 m 范围内,水平位移随着深度增加逐渐

增大,此后,随着深度增加,水平位移逐渐减小;由于实际深层土体中含有大量有机质,水平位移实测结果在 0 附近波动,而模拟结果深层水平位移基本为 0,综合分析,模拟结果与实测结果变化规律基本一致。从图 9(b)可以看出,累积沉降的数值模拟结果与实测结果较接近。上述分析表明数值模拟结果可行。

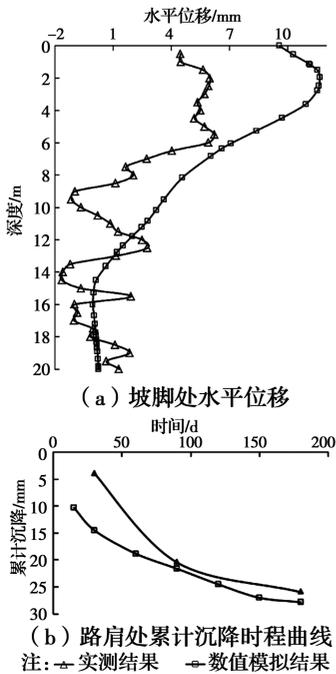


图 9 实测结果与数值模拟对比曲线

Fig. 9 Comparison curve between measured results and numerical simulation

3.4 处治效果分析

微型桩处治滑坡效果如图 10 和图 11 所示。从图 10 可以看到,未加桩时,路堤出现一个贯穿的滑动面,加微型桩后,路基增量位移主要出现在靠近路基中心处,未形成贯穿滑动面。从图 11 可以看到,土体水平位移主要发生在地基面以下 10 m 深度范围,集中在淤泥层内;未加微型桩时,土体最大水平位移达到 91 mm;使用单独微型桩和加连系梁微型桩时,最大水平位移分别降至 13.9 mm 和 9 mm,分别减小了 84% 和 90%,可见,使用微型桩能显著减小路基侧移。一方面,经压力注浆后,由于浆液的扩散与固结使桩周土体强度提高,桩体摩阻力增加,单桩抗滑效果增强;密布的注浆微型桩有一定的加筋效应,对桩间土能起到侧向约束作用,限制了桩间土的侧向位移。另一方面,由于连系梁将各桩连在一起,能发挥桩群整体抗弯性能,使各桩受力更均衡且受力更小,抗滑效果明显加强。从以上分析可知,利用微型桩技术处治深厚软基滑坡病害是一种比较有效的方法。

4 影响因素分析

影响微型桩处治效果的因素主要有桩间距、桩排距、连系梁形式等,利用有限元软件分析了这 3 个

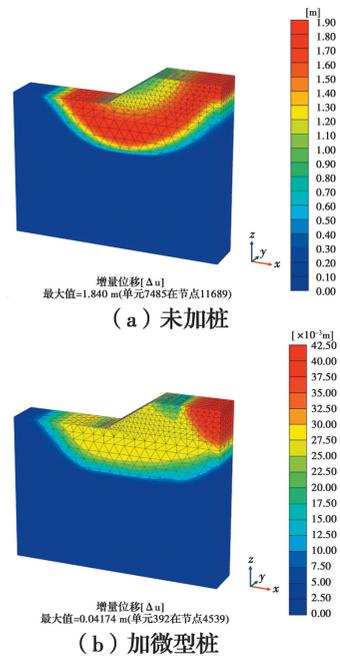


图 10 总位移增量云图

Fig. 10 Nephogram of total displacement increment

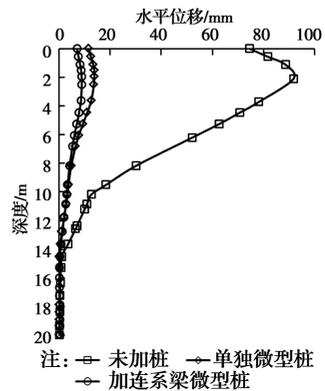


图 11 微型桩处治效果对比图

Fig. 11 Comparison of the treatment effect of micropiles

因素对软基滑坡的影响。不同工况控制参数见表 2,其中, d 为桩径,取 $d=150$ mm。

表 2 不同工况控制参数

Table 2 Control parameters under different working conditions

工况	桩间距/ d	桩排距/ d	连系梁形式
不同桩间距	$6d, 8d, 10d,$ $12d, 14d$	$10d$	双向交叉连系梁
不同排间径	$10d$	$6d, 8d, 10d,$ $12d, 14d$	双向交叉连系梁
不同连系梁	$10d$	$10d$	共 5 种,详见图 14

4.1 桩间距影响

微型桩采用不同桩间距时,坡脚处土体水平位移如图 12 所示。可以看到,随着桩间距的增大,土体水平位移逐渐增大。当桩间距 $S=6d$ 时,最大水平位移

为 8.3 mm;而当桩间距 S 增大到 $14d$ 时,最大水平位移已经达到 32 mm,增加了 2.9 倍。而且可以明显看出,桩间距 S 超过 $10d$ 后,水平位移增大速率明显加快,这是由于桩间距在一定范围内会产生土拱效应,桩间距过大时土拱效应明显减弱,造成土体位移迅速增大。因此,在布桩时利用土拱效应,选择合理的桩间距,既能保证处治效果又能减少用桩量。

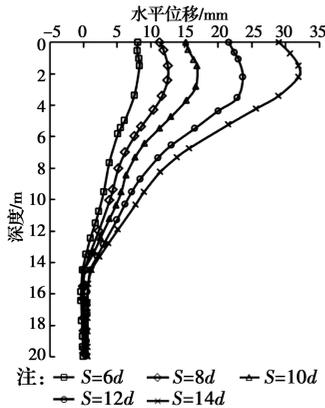


图 12 不同桩间距下深层土体水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of deep soil under different pile spacing

4.2 桩排距影响

微型桩采用不同桩排距时,坡脚处土体水平位移如图 13 所示。从图 13 中可以看出,桩排距 L 从 $6d$ 增加到 $10d$ 时,水平位移逐渐减小,最大水平位移从 24.2 mm 减小到 15.8 mm;桩排距超过 $10d$ 后,随着排间距增加,水平位移又逐渐增大,且增大速度明显加快,桩排距 $L=14d$ 时,最大水平位移达到 28.6 mm。这是因为微型桩与桩间土会形成一种复合结构共同抗滑,这种复合结构受排间距影响较大。在桩排距过小时,微型桩过于靠近坡脚,复合结构作用范围小,因此,水平位移较大;当桩排距过大时,桩与桩间土协同作用减弱,会造成水平位移增大。因此,在实际施工中,桩排距不宜超过 10 倍桩径,在工程条件较差情况下,可减小桩排距,增设几排桩。

4.3 连系梁影响

为研究不同形式连系梁对土体水平位移的影响,依据实际工程,在模型中 II 区斜坡上设置不同形式连系梁,连系梁示意图如图 14 所示,分析结果如图 15、图 16 所示。

由图 15 可以看出,连系梁能增强微型桩抗滑效果。无连系梁时,土体最大水平位移为 17.6 mm;单

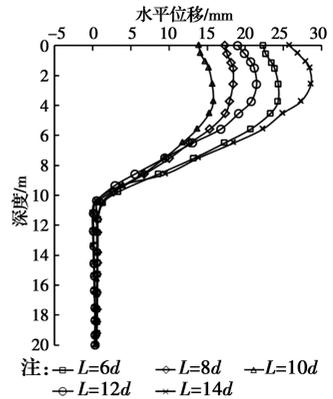


图 13 不同桩排距下深层土体水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of deep soil under different pile row spacing

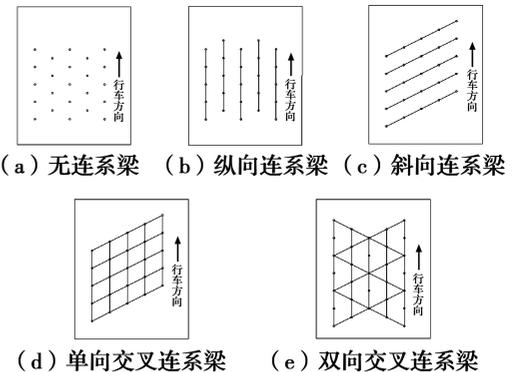


图 14 不同形式连系梁示意图

Fig. 14 Schematic diagram of different forms of coupling beams

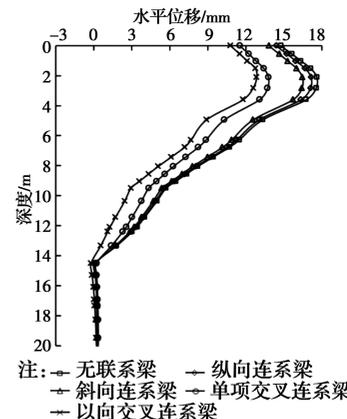


图 15 不同形式连系梁下深层土体水平位移

Fig. 15 Horizontal displacement of deep soil under different forms of coupling beams

独使用纵向连系梁和斜向连系梁时,水平位移减小幅度有限,分别减小了 0.5 mm 和 1.1 mm,这是由于单独形式的连系梁只将每排桩相连,未能发挥微型桩整体抗滑作用;使用组合形式连系梁时,各排桩能有效连在一起,水平位移比无连系梁时明显减小,

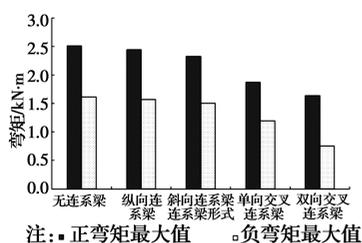


图 16 不同形式连系梁下桩身弯矩

Fig. 16 Bending moments of piles under different forms of coupling beams

使用单向交叉连系梁和双向交叉连系梁时,最大水平位移减少了 3.8 mm 和 4.7 mm,分别减小了 22% 和 28%。

从图 16 可以看出,无连系梁时,微型桩最大正弯矩和最大负弯矩为 2.51 kN·m 和 -1.62 kN·m;使用纵向连系梁和斜向连系梁时,微型桩弯矩均有小幅降低;使用单向交叉连系梁时,最大正弯矩和最大负弯矩降低为 1.87 kN·m 和 -1.19 kN·m,分别降低了 25.6% 和 26.1%;使用双向交叉连系梁时,最大正弯矩和最大负弯矩减小为 1.64 kN·m 和 -0.75 kN·m,分别减小了 34.8% 和 53.7%。综上,组合形式连系梁效果明显好于单独形式连系梁,具体排序为:双向交叉连系梁>单向交叉连系梁>斜向连系梁>纵向连系梁。

5 结论

1) 针对沿海在役高速公路软基段出现的侧向滑移病害,提出了采用连系梁微型桩技术进行处治的新方法。现场实测结果表明,微型桩能大幅减小软基水平位移和路面累积沉降,是处治深厚软基滑移病害的一种有效方法。

2) 选取深厚软基滑移病害段典型断面,采用 Plaxis 3D 有限元程序建立了高速公路深厚软基连系梁微型桩加固变形分析模型,结果表明:深层水平位移与路表沉降数值计算结果与现场实测数据较吻合;加设微型桩阻止了贯穿滑动面的形成,使用单独微型桩和加连系梁微型桩时,最大水平位移分别比未加微型桩时减小了 84% 和 90%。

3) 分析桩间距、桩排距和连系梁不同形式对微型桩处治效果的影响。结果表明,随着桩间距的增大,土体侧移逐渐增大,桩间距超过 10 倍桩径后,增长速度加快;随着桩排距的增加,土体侧移出现先减

小后增大的现象,桩排距不宜超过 10 倍桩径;桩顶设置连系梁能减小土体位移与优化微型桩受力,不同形式连系梁的微型桩处治效果排序为:双向交叉连系梁>单向交叉连系梁>斜向连系梁>纵向连系梁。

参考文献:

- [1] 王欢,王选仓,高志伟. 高速公路软基过渡段均衡沉降处治[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(7): 50-54.
WANG H, WANG X C, GAO Z W. Treatment of highway soft foundation transition section isostatic settlement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(7): 50-54. (in Chinese)
- [2] SHAN Y, ZHOU S H, SHU Y. Differential settlement and soil dynamic stress of a culvert-embankment transition zone due to an adjacent shield tunnel construction [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(7): 2325-2333.
- [3] TASHIRO M, NGUYEN S H, INAGAKI M, et al. Simulation of large-scale deformation of ultra-soft peaty ground under test embankment loading and investigation of effective countermeasures against residual settlement and failure [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(2): 343-358.
- [4] KITAZUME M, MARUYAMA K. Collapse failure of group columns type deep mixing improved ground under embankment [C]//Proceedings of the International Conference on Deep Mixing, Stockholm, ASCE, 2005: 245-254
- [5] CHAI J C, CARTER J P. Simulation of the progressive failure of an embankment on soft soil [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(6): 1024-1038.
- [6] 刘吉福,郑刚,安关峰. 刚性桩复合地基路基绕流滑动稳定分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(6): 17-22.
LIU J F, ZHENG G, AN G F. Stability analysis of flow-slide of embankment on rigid-piles composite ground [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(6): 17-22. (in Chinese)
- [7] CHEN J F, LIU J X, XUE J F, et al. Failure analyses of a reinforced embankment by strength reduction and limit equilibrium methods considering hardening of soft clay [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(7): 2043-2050.

- [8] 吕若冰,孔纲强,沈扬,等.既有高速公路高压旋喷桩施工现场监测与数值模拟分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(6):752-757,762.
LV R B, KONG G Q, SHEN Y, et al. Construction monitoring and numerical simulation of existing expressway soft foundation treatment by high pressure jet grouted pile technique [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 752-757,762. (in Chinese)
- [9] 王安辉,丁选明,章定文.在役高速公路软基不均匀沉降病害注浆处治技术[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(2):397-403.
WANG A H, DING X M, ZHANG D W. Grouting reinforcement technology for soft ground differential settlement disease of in-service highway[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2017, 47(2): 397-403. (in Chinese)
- [10] 徐前卫,苏培森,唐卓华,等.软土路基沉降病害治理的注浆加固技术及其试验研究[J].土木工程学报,2015,48(Sup2):268-273.
XU Q W, SU P S, TANG Z H, et al. Numerical analysis on the settlement mechanism of high-speed railway subgrade and the reinforcement by grouting [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup2): 268-273. (in Chinese)
- [11] 李文,蒋丽君,李振存,等.花管注浆法在半填半挖路基沉陷处治中的应用研究[J].中外公路,2014,34(2):75-78.
LI W, JIANG L J, LI Z C, et al. Application research of steel pipe grouting method in treatment of subsidence of semi-filled and semi-excavated roadbed [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(2): 75-78. (in Chinese)
- [12] 张森.高速公路路基沉陷注浆处治技术研究[D].长沙:中南大学,2014.
ZHANG M. Research on grouting treatment technology for subsidence in saturated highway subgrade[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [13] 荆伟伟,朱益军,施颖,等.滨海深厚软土路堤滑移病害处治技术研究[J].科技通报,2015,31(1):253-256.
JING W W, ZHU Y J, SHI Y, et al. Study on treatment techniques of embankment sliding on deep soft-soil foundation in Seaside area [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(1): 253-256. (in Chinese)
- [14] 董志勇,周国玲,顾双春.CFG桩在高速公路软基路堤滑坡处理中的应用[J].中外公路,2015,35(3):45-48.
DONG Z Y, ZHOU G L, GU S C. Application of CFG pile in soft foundation embankment landslide treatment of highway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(3): 45-48. (in Chinese)
- [15] 杨波.微型桩在青银高速公路(河北段)沉降病害治理中的应用研究[D].西安:西安科技大学,2014.
YANG B. Application research on the micro piles for treatment sedimentation of Qingdao-Yinchuan (Hebei) highway [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 黄斌.高速公路岩溶路基树根桩加固试验研究[J].公路工程,2016,41(6):204-208.
HUANG B. The research on strengthening expressway karst roadbed by root pile[J]. Highway Engineering, 2016, 41(6): 204-208. (in Chinese)
- [17] 陈伟志,李安洪,蒋关鲁,等.铁路路基下膨胀土长短微型桩抗隆起研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):409-423.
CHEN W Z, LI A H, JIANG G L, et al. Study on resisting upheaval of long-short micropiles of expansive soils under railway subgrade [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 409-423. (in Chinese)
- [18] SUN S W, ZHU B Z, WANG J C. Design method for stabilization of earth slopes with micropiles[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(4): 487-497.
- [19] ZHANG Z C, CHEN Y M, LIU H L. Numerical investigation on the impact resistance of road barriers of Micropile-MSE Wall for subgrade[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 82: 249-265.