

袖阀管劈裂注浆加固粉土路基实验研究

朱登元^{1,2}, 管延华^{1*}, 刘惠忠³, 王倩³, 张庆涛¹

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 临沂大学建筑学院, 山东 临沂 276005; 3. 济南市公路管理局, 山东 济南 250014)

摘要: 通过室内大型模拟实验, 对粉土路基强度、刚度在毛细水作用下的衰减规律和袖阀管劈裂注浆加固路基的效果进行研究。实验模拟新建路基、潜水位 20 cm/50 cm 的毛细水作用路基、袖阀管注浆劈裂土体加固路基等 4 个工况, 得到粉土路基土体含水率的分布规律和物理力学指标; 在分级循环卸荷载的作用下, 得到路基模型总体刚度、受力和变形的特性; 挖除路基模型, 观察袖阀微桩及浆液扩散的形态。结果表明: 毛细水作用可使粉土路基模型总体刚度降低 70%, 土体抗剪强度下降, 路基竖向塑性变形随荷载增大快速增加; 水平分层劈裂土体凝固的浆液不仅阻断了毛细水的上升通道, 而且与底端扩大的微桩形成空间骨架与土体共同作用, 骨架与土体各承担荷载大约 50%, 袖阀管加固粉土路基效果显著。

关键词: 粉土路基; 袖阀管桩法; 劈裂注浆; 稳定性衰减; 室内模拟实验

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)08-1425-07

作者简介: 朱登元(1971-), 男, 山东沂南人, 研究员, 博士研究生, 主要研究方向为路基路面结构与材料。E-mail: zhudengyuan@lyu.edu.cn.

Model tests on fracture grouting reinforcement of silt embankment by using Soletanche method

ZHU Deng-yuan^{1,2}, GUAN Yan-hua¹, LIU Hui-zhong¹, WANG Qian³, ZHANG Qing-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Linyi University, Linyi 276005, China; 3. Ji'nan Highway Administration, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Based on large-scale indoor model tests, the attenuation law of strength and stiffness of silt embankment under the action of capillary water and the reinforcement effect of the embankment by using the Soletanche method are studied. Four working conditions, newly constructed embankment, attenuated embankments affected by the capillary water with different groundwater levels (20 and 40 cm) and fracture grouting reinforced embankment, are simulated. Moisture content distribution, physical and mechanical properties of the silt embankment are detected. General stiffness, force and deformation characteristics of the embankment model are obtained under grading cyclic loading and unloading conditions. Micro-piles and fracture grouting spread forms are observed during the excavation of the embankment model. The test results indicate that the general stiffness of the silt embankment will reduce by 70% because of the capillary water, the shear strength of embankment soil will decline, and the vertical plastic deformation of the embankment increases rapidly with the increasing load. The horizontal layered fracture grouting not only blocks the rising channels of capillary water, but also forms a space frame with the bottom expansion micro-piles to bear the load with soil together, of about 50%. The reinforcement effect of the embankment by means of the Soletanche method is significant.

Key words: silt embankment; Soletanche method; fracture grouting; stability decay; model test

0 引言

道路工程中的粉土路基由于强烈的地下毛细水作用, 其强度和刚度会产生衰减, 稳定性降低, 对路面的支承作用下降, 从而导致路面结构在环境因素和行车荷载作用下的破坏, 严重影响了道路工程的质量和使用寿命, 稳定性衰减路基的处理技术成为道路工程

养护大修的关键技术。袖阀管劈裂注浆作为失稳路基的处理技术之一, 在粉土路基加固中得到了越来越多的应用, 该方法最早由法国 Soletanche 灌浆公司开发

基金项目: 国家自然科学基金项目(50178222)

收稿日期: 2011-10-24

*通讯作者

利用，在 20 世纪 90 年代被引入中国，逐渐被推广应用到珠三角地区基坑帷幕、地基及坝区加固等工程中。相比强夯法、置换法和碎石桩挤密法等地基与基础的处理方法，袖阀管劈裂注浆加固路基的处治方法突出的优点是对环境无污染、对周围建筑物和构筑物影响小、施工工艺简单和价格相对低廉等。

目前对袖阀管劈裂注浆加固软土路基的研究还较少，且大多数是对设备、材料和工艺等工程应用技术的研究^[1-5]，或者对注浆劈裂土体机理的研究^[6-8]以及对粉土路基吸水特性及强度衰减规律的研究^[9]。本文通过室内大型模拟实验，对粉土路基毛细水上升导致其稳定性衰减和对其进行袖阀管桩劈裂注浆加固效果进行研究，探讨加固机理。研究结果对失稳路基的维修加固和运行安全具有参考意义。

1 袖阀管劈裂注浆施工方法简介

袖阀管劈裂注浆的设备主要有：钻孔机械、注浆泵、压注浆管路系统和制浆设备、袖阀注浆管及花管等。采用浆液材料为 42.5 普通硅酸盐水泥（4：1 掺加粉煤灰），水灰比为 0.45~0.55。施工顺序为钻孔→下花管→封孔→下注浆管→注浆。其施工工艺见图 1。

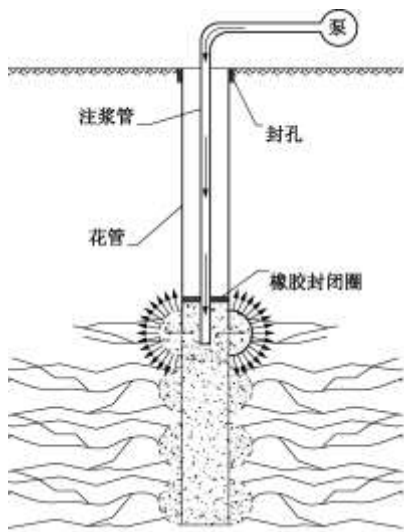


图 1 袖阀管劈裂注浆施工工艺图

Fig. 1 Embankment reinforcement by using Soletanche method

2 室内模拟实验

2.1 实验内容及目的

(1) 粉土路基模型毛细水上升实验，确定路基模型土体中含水率的分布及物理力学指标。

(2) 粉土路基模型稳定性衰减实验，研究稳定性衰减路基在荷载作用下的受力及变形特性。

(3) 袖阀管劈裂注浆加固实验，研究衰减粉土路基加固后的受力变形特性，加固效果和机理。

2.2 实验模型及方法

在室内实验槽中分层夯实填筑长 3 m×宽 5 m×深 2.5 m 的粉土路基模型，底层铺设 20 cm 厚的碎石过水层并注水模拟潜水位及毛细水上升，顶部通过反力架、千斤顶和承载板施加荷载。土体中埋设了分层沉降仪、土壤水分计、土压力盒、侧向位移计等监测设备，顶面安装了百分表监测荷载作用下模型顶面的沉降。实验模型加载系统见图 2。模拟潜水位及毛细水上升模型见图 3。检测仪器布置见图 4。



图 2 实验模型加载系统

Fig. 2 Loading system of test model

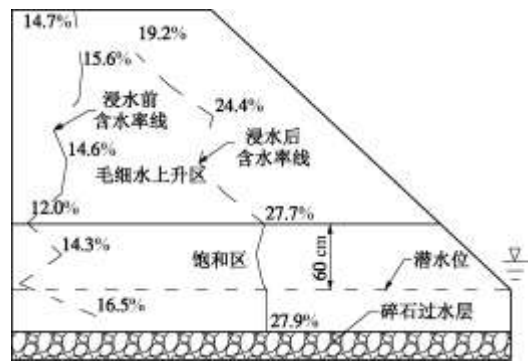


图 3 毛细水作用区域及含水率分布

Fig. 3 Action area of capillary water and distribution of moisture content

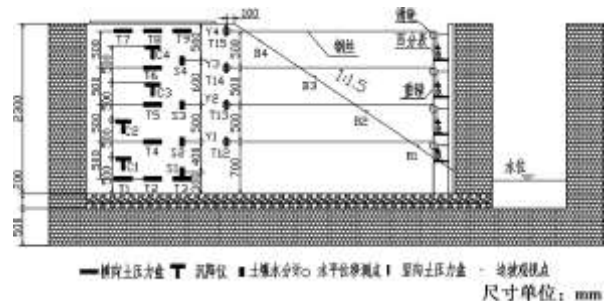


图 4 仪器布置

Fig. 4 Arrangement of equipments

分层填筑时采用环刀法测量每层填土的压实度，烘干法测量其含水率，采用 H-4140 GeoGuge 土壤刚度测试仪测量每层填土的弹性模量；依据填筑时的压实度和含水率制件进行三轴压缩试验，测定其抗剪强

度和模量;采用土壤水分计和钻孔取样测量路基模型毛细水上升不同区域的含水率;采用测力计控制施加的荷载;采用百分表、分层沉降仪及侧向位移计测量模型的变形;采用 JMZX-50BT 土压力盒测量土体应力。

2.3 实验方案及工况

荷载方案为分级循环加载,第 1 级加载至 100 kN,第 2 级加载至 140 kN,第 3 级加载至 180 kN,第 4 级加载至 220 kN,测量记录各级荷载加载和卸载后的各监测指标的数值。

加固方案为桩间距 60 cm×80 cm、桩径 10 cm、桩长 1.8 m 的袖阀管劈裂注浆,注浆压力 1.2~1.5 MPa,灌浆压力稳定 30 min 后即终止灌浆。加固区域为粉土路基实验模型的饱和、流塑区。

实验研究 4 个工况,比较分析新建粉土路基模型、稳定性衰减路基模型、加固后路基模型的受力和变形特性。工况 1 为新建粉土路基模型;工况 2 为潜水位 20 cm 时毛细水上升稳定性衰减模型;工况 3 为潜水位 50 cm 时毛细水上升稳定性衰减模型;工况 4 为袖阀管劈裂注浆加固粉土路基模型,潜水位 50 cm。

3 实验结果及分析

3.1 物理力学指标分析

依据粉土路基模型填筑时的试验结果,每层填土的物理力学指标见表 1。各层填土各指标沿深度分布比较均匀,模型顶部路床区注意控制了其压实度。袖阀管桩加固路基模型在完成加载试验,拆除路基模型时对各层土的物理力学指标进行了试验测量,每层土的物理力学指标见表 2。

各层填土的物理指标发生了明显的变化,由于注浆压力和水泥浆液的凝结硬化反应,注浆区土体压实度得到提高,弹性模量增大,黏聚力有所提高;由于毛细水上升带来含水率的增大,使土体的内摩擦角减小,饱和区土体黏聚力降低,抗剪强度有所下降。

(1) 含水率

测绘的含水率沿深度分布见图 5, w_1 为新建路基模型含水率分布, w_2 为潜水位 50 cm 毛细水上升致稳定性衰减路基模型的含水率分布, w_3 为袖管桩加固后路基模型的含水率分布。从图 5 得出,相比新建路基模型,衰减模型含水率沿深度明显增大,在 1.4 m 以下为饱和区,潜水位以上 60 cm 范围内为毛细水作用近饱和区,含水率达 27.5%;在深 0~1.4 m 的范围内,衰减模型比新建模型含水率平均高出 7.2%,说明粉土路基的毛细水作用十分强烈。袖阀管桩加固路基模型的含水率相比衰减模型降低了 3.7%,这有助于加固模型承载能力的提高。

表 1 新建路基模型土的物理指标

Table 1 Physical and mechanical properties of silt of newly constructed embankment model

深度/m	含水率/%	湿密度/(g cm ⁻³)	干密度/(g cm ⁻³)	压实度/%	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
0~0.2	14.7	1.853	1.626	95.6	67.98		
0.2~0.4	15.1	1.887	1.632	96.6	64.47		
0.4~0.6	15.6	1.889	1.635	96.7	63.14		
0.6~0.8	15.4	1.383	1.598	94.6	61.21		
0.8~1.0	13.8	1.785	1.569	92.8	52.78		
1.0~1.2	14.6	1.768	1.543	91.3	52.55	8.2	40.1
1.0~1.4	14.2	1.804	1.580	93.5	53.35		
1.4~1.6	12.0	1.748	1.561	92.4	51.90		
1.6~1.8	14.3	1.787	1.562	92.4	48.14		
1.8~2.0	11.3	1.742	1.575	93.2	48.94		
2.0~2.3	16.5	1.825	1.568	92.8	47.92		

表 2 加固后路基模型土的物理指标

Table 2 Physical and mechanical properties of silt of reinforced embankment model

深度/m	含水率/%	湿密度/(g cm ⁻³)	干密度/(g cm ⁻³)	压实度/%	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
0~0.2	18.8	1.89	1.59	93.9	67.79	42	33
0.2~0.4	20.8	1.90	1.57	93.1	68.39	40	30.5
0.4~0.6	19.2	1.96	1.65	97.5	64.13	41	31
0.6~0.8	19.4	1.95	1.63	96.7	69.45	18	34.1
0.8~1.0	19.5	1.95	1.63	96.4	69.66	18	34
1.0~1.2	20.8	1.95	1.61	95.4	70.64	15.7	31.8
1.2~1.4	22.0	1.98	1.62	95.8	68.15	15.3	31
1.4~1.6	22.4	1.96	1.6	95.2	67.45	15	30
1.6~1.8	23.3	1.95	1.58	93.5	60.93	7	32

1.8~2.0	24.4	1.97	1.61	95.2	55.47	0	33.9
2.0~2.3	25.1	1.99	1.59	94.1	54.36	0	33

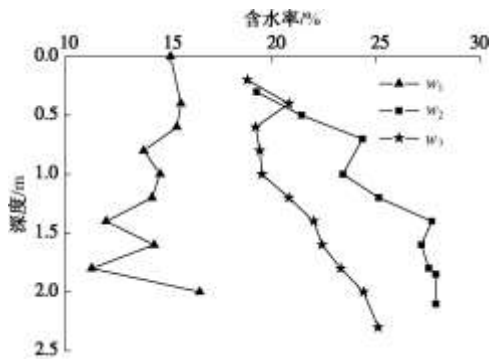


图5 含水率沿路基模型深度分布

Fig. 5 Distribution of moisture content along depth of embankment model

(2) 压实度

测绘新建路基模型与加固路基模型土体的压实度沿深度分布对比见图6, D_1 为新建路基模型土体的压实度, D_2 为加固后路基模型土体的压实度。

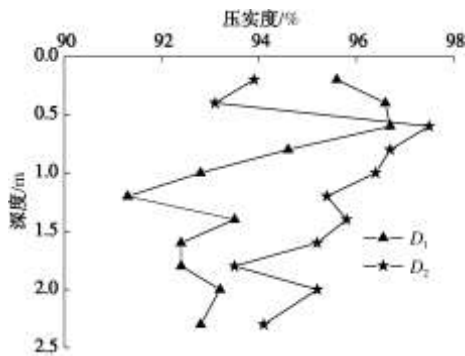


图6 压实度沿路基模型深度分布

Fig. 6 Distribution of degree of compaction along depth of embankment model

从图6得出, 相比新建路基模型, 袖管桩劈裂注浆加固模型40 cm以下土体的压实度得到提高, 加固注浆区域平均提高了1.35%, 说明浆液对路基模型有挤密作用; 40 cm以上土体由于设备安装的扰动和没有有效覆盖层的约束作用, 压实度有所下降。

(3) 弹性模量

测绘新建路基模型与加固路基模型土体的弹性模量沿深度分布对比见图7, E_1 为新建路基模型土体的弹性模量, E_2 为加固后路基模型土体的弹性模量。

从图7得出, 相比新建路基模型, 与压实度的提高相对应, 袖管桩劈裂注浆加固模型的土体由于劈裂注浆的挤密作用, 加固路基模型弹性模量得到提高, 平均提高了9.46 MPa。

(4) 抗剪强度

测绘新建路基模型与加固路基模型土体的抗剪强

度指标沿深度分布对比见图8, c_1, ϕ_1 为新建路基模型土体的抗剪强度指标, c_2, ϕ_2 为加固后路基模型土体的抗剪强度指标。

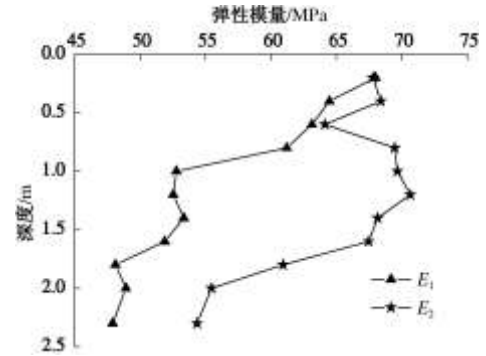


图7 衰减模型与加固模型土体弹性模量对比

Fig. 7 Comparison of elastic moduli between strength decay and reinforced embankment models

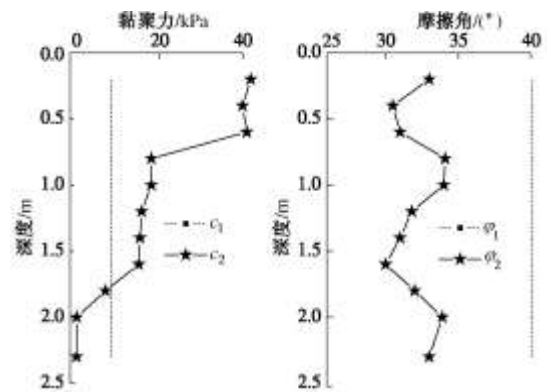


图8 衰减模型与新建模型抗剪强度对比

Fig. 8 Comparison of shear strengths between strength decay and new construction models

从图8得出, 劈裂注浆加固区(1.8 m以上)粉土路基土体抗剪强度黏聚力指标得以提高, 平均提高了10 kPa, 而未加固区(1.8 m以下)黏聚力指标在水的作用下降低。内摩擦角指标并没有提高, 较之新建路基模型降低了8°, 并且沿深度分布较均匀。

3.2 受力分析

分析4个工况在140 kN荷载作用下的应力分布与大小。如图9, $\sigma_{V1}, \sigma_{V2}, \sigma_{V3}, \sigma_{V4}$ 分别对应1, 2, 3, 4工况在同级荷载(140 kN)作用下的竖向应力分布。

从图9得出, 在1.5 m路床范围内, 竖向应力较大, 其下较小。衰减模型中土体的竖向应力沿深度分布变小, 在1.1 m深处减小了32 kPa; 而加固后模型中土体的竖向应力最小, 在1.1 m深处减小了38 kPa。

如图10, $\sigma_{H1}, \sigma_{H2}, \sigma_{H3}, \sigma_{H4}$ 分别对应1, 2,

3, 4 工况在同级荷载 (140 kN) 作用下的水平应力分布。

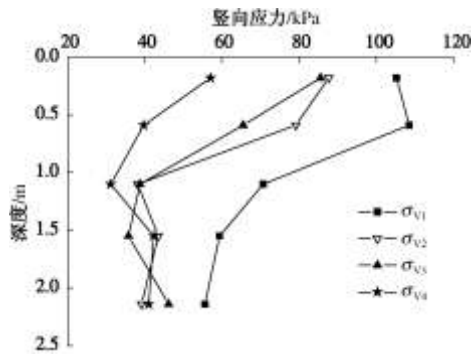


图 9 竖向应力分布对比图

Fig. 9 Comparison of vertical stress distribution among 4 working conditions

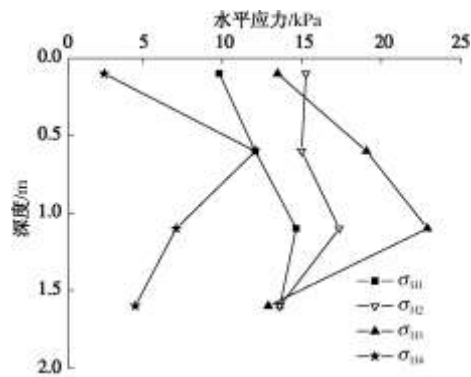


图 10 水平应力分布对比图

Fig. 10 Comparisons of horizontal stress distribution among 4 working conditions

从图 10 得出, 在 1.5 m 路床范围内, 相比新建路基模型, 衰减模型路基土体中的水平应力增大, 在 1.1 m 深处增大了 8.2 kPa; 而加固模型路基土体中的水平应力最小, 在 1.1 m 深处减小了 7.5 kPa。

从土体的竖向应力与水平应力在 4 个工况中的大小及分布可以得出, 相比新建路基模型, 衰减路基模型的竖向应力分量减小而水平应力分量增大, 应力分量的变化反应了路基模型边坡有侧滑破坏的趋势; 袖阀管劈裂注浆加固路基模型中土体的竖向应力及水平应力都显著减小, 减小的部分由劈裂土体的凝固浆液与微桩形成的骨架承担, 形成了土体与骨架共同作用, 各承担荷载大约 50%。

3.3 变形分析

分析 4 个工况在 140 kN 荷载作用下的位移分布与大小。如图 11, Δ_{v1} , Δ_{v2} , Δ_{v3} , Δ_{v4} 分别对应 1, 2, 3, 4 工况在同级荷载 (140 kN) 作用下的竖向位移分布与大小。

从图 11 得出, 较之新建路基模型, 140 kN 荷载

作用下, 潜水位 20 cm 和 50 cm 的模型竖向位移响应明显增大。在深度约 1 m 以上, 水位越高竖向位移越大, 模型顶面最大竖向变形达 3 mm, 反映了随着潜水位的升高, 塑性屈服区域扩大。但在袖管桩加固后, 竖向位移明显减小, 在顶部比新建路基的竖向位移要小 0.07 mm, 说明加固效果好。

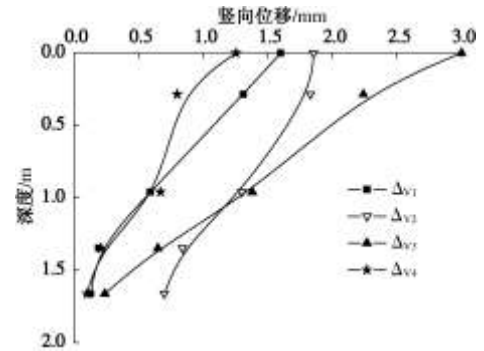


图 11 竖向位移分布图

Fig. 11 Comparison of vertical displacement distribution among 4 working conditions

如图 12, Δ_{H1} , Δ_{H2} , Δ_{H3} , Δ_{H4} 分别对应 1, 2, 3, 4 工况在同级荷载 (140 kN) 作用下的水平位移分布与大小。

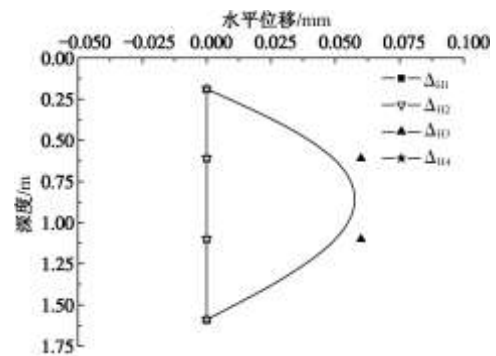


图 12 边坡水平侧移分布图

Fig. 12 Comparison of horizontal displacement distribution among 4 working conditions

从图 12 得出, 新建路基模型、潜水位在 20 cm 毛细水上升路基模型及加固模型均未监测到明显的水平位移, 但在潜水位 50 cm 毛细水上升模型, 140 kN 荷载作用下路基模型边坡的中部水平向发生明显的侧移, 达 0.06 mm, 与水平应力分量增大发生侧向滑移趋势相对应。

3.4 总体刚度及顶面塑性沉降分析

模型分 4 个工况进行分级循环加载, 第 1 级加载至 100 kN, 第 2 级加载至 140 kN, 第 3 级加载至 180 kN, 第 4 级加载至 220 kN, 测量各级荷载加载和卸载后的顶面沉降, 绘制的荷载 - 顶面沉降关系见图 13。

从图13路基模型4个工况在分级加卸载荷载竖向位移的响应,得到路基模型刚度的变化与塑性累积变形, K 为图形的斜率,反应了模型的总体刚度。新建路基模型的总体刚度 K_1 为 129.06, 潜水位 20 cm 时 K_2 为 117.46, 总体刚度为新建模型的 91%; 潜水位 50 cm 时 K_3 为 37.93, 总体刚度仅为新建路基模型的 29.4%; 而加固后总体刚度 K_4 达到了 149.38, 总体刚度为新建模型的 116%。加固后路基模型的总体刚度超出了新建路基模型。

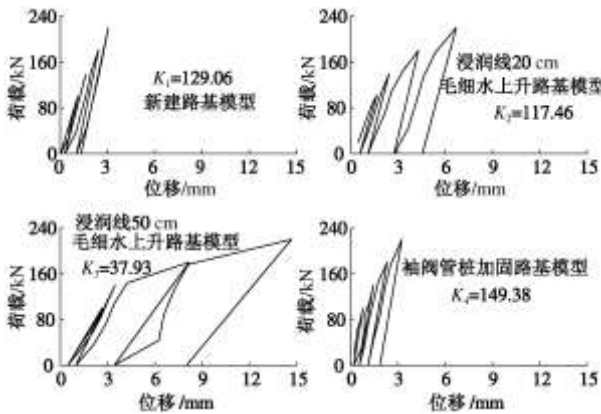


图 13 荷载与顶面竖向位移的响应

Fig. 13 Relation between loads and vertical displacements under 4 working conditions

如图 14, PE_1, PE_2, PE_3, PE_4 分别对应 1, 2, 3, 4 工况在分级循环荷载作用下的顶面竖向塑性变形。

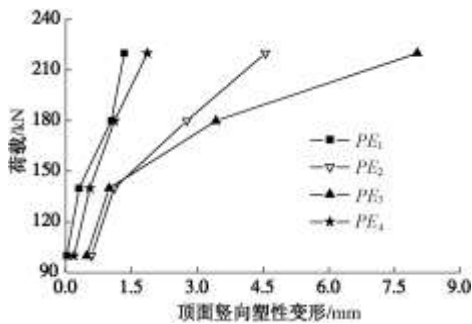


图 14 荷载与顶面竖向塑性变形

Fig. 14 Loads and vertical plastic deformation

从图 14 得到, 在 140 kN 荷载作用时, 各工况顶面塑性变形速率相差不大, 但衰减模型的塑性变形大于新建及加固模型。但在超载作用时, 衰减模型的塑性累积变形随着荷载的增大而快速增加, 潜水位 50 cm 的衰减模型增加最快, 在 220 kN 荷载时顶面竖向塑性变形累积达到了 8.02 mm。袖管桩劈裂注浆加固模型在 220 kN 荷载时, 顶面竖向塑性变形累积为 1.86 mm, 与新建模型的 1.34 mm 相近。

从模型总体刚度及顶面塑性累计变形分析, 说明模型稳定性衰减, 而微桩加固效果明显。

3.5 成型微桩及浆液扩散形态分析

对袖阀管劈裂注浆加固的粉土路基模型进行挖除, 分层测定土体、微桩及凝固浆液的物理力学指标, 观察袖阀微桩及浆液扩散的形态, 见图 15, 16。

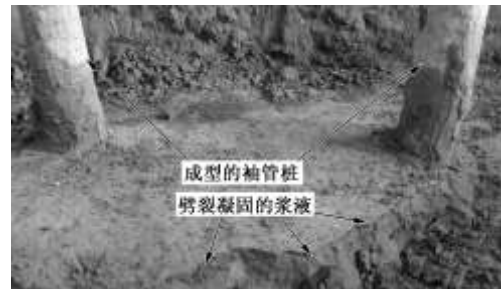


图 15 袖阀管成型桩及劈裂凝固的浆液

Fig. 15 Micro-piles and fracture grouting forms



图 16 袖阀管桩的底部

Fig. 16 Foot of a micro-pile

从图 15 看出, 浆液劈裂土体水平成层, 并不与被注路基模型土体渗透掺混。成型的袖阀管桩与劈裂土体凝固的水泥浆液形成了骨架受力的空间结构, 与被劈裂的土体共同承担荷载; 袖阀管桩的底部在压力的作用下, 形成了扩大端, 这有利于桩的受力, 见图 16。

袖阀管劈裂注浆过程复杂, 利用了流体传压的特性, 是渗流场与应力场流固耦合的结果。土体劈裂注浆过程中的浆液扩散规律与土体的性质及钻孔周围应力场密切相关, 当致密土体中大小主应力比值较大时容易定向劈裂, 劈裂面发生在阻力最小的小主应力面^[7]。由于正常固结和欠固结地基的小主应力是水平向的, 因此初始劈裂面应是垂直的。进一步增大注浆压力, 则水平应力转化为被动土压力状态。这时, 最大主应力呈水平向, 裂缝面也由垂直向转化为水平向。凝固浆液水平成层的形态分布也证明了这一点。

从上述实验结果和分析可知, 对粉土路基进行袖阀管劈裂注浆加固, ①对土体有挤密作用, 可改变土的物性指标, 如压实度提高, 含水率降低等; 可提高土的抗剪强度指标, 如黏聚力的提高。②桩土复合作用, 依靠桩身摩擦力和和桩底扩大端的支撑力把荷载传递到深层。③空间骨架作用, 水平成层的劈裂凝固

浆液与微桩形成骨架与土体共同受力,沿桩身的支撑反力使土中应力方向和大小发生重分布并减缓了应力集中,有利于路基土体的稳定。此外,水平成层的凝固浆液阻断了毛细水上升的通道,使加固后路基的强度、刚度不会再次衰减。

4 结 论

针对粉土路基强烈的毛细水作用,通过室内大型模拟实验,研究其稳定性衰减的规律,并进行了袖阀管桩劈裂注浆加固研究。由试验结果分析,可得到如下4点结论。

(1) 粉土具有强烈的毛细水作用,毛细水作用导致路基土体含水率增大,潜水位以上60 cm可近饱和状态,饱和区含水率可达27.5%,毛细水作用区比新建路基时的含水率平均高出7.2%,使粉土路基的总体刚度降低70%,土体的抗剪强度下降,粉土路基的稳定性衰减;超载作用时,路基顶面竖向塑性累积变形随着荷载的增大而快速增加,呈破坏趋势。

(2) 袖阀管劈裂注浆加固稳定性衰减的粉土路基效果显著,可使衰减路基的总体刚度提高到新建路基的116%,衰减路基土体的压实度、弹性模量由于浆液的挤密作用和水化反应得到提高,加固区土体的黏聚力有所提高,含水率下降。

(3) 相比新建路基模型,衰减路基模型的竖向应力分量减小而水平应力分量增大,应力分量的变化反应了路基模型边坡有侧滑破坏的趋势;袖阀管劈裂注浆加固路基模型中土体的竖向应力及水平应力都显著减小,减小的部分由土体中的凝固浆液与微桩形成的骨架承担,土体与骨架共同作用各承担荷载大约50%。

(4) 浆液劈裂土体水平成层,并不与被注浆粉土路基土体渗透渗混;袖阀管桩的底部在压力的作用下,形成了扩大端,有利于桩的受力;水平成层的凝固浆液阻断了毛细水上升的通道,使加固后的粉土路基不再因毛细水的作用而发生含水率增加,加固路基的强度、刚度得到保证。

参考文献:

- [1] 刘长生. 袖阀管注浆法在公路路基病害处治中的应用[J]. 山西建筑, 2008, **34**(13): 308 - 309. (LIU Chang-sheng. The application of sleeve-valve-pipe grouting in road foundation disease management [J]. Shanxi Architecture, 2008, **34**(13): 308 - 309. (in Chinese))
- [2] 许 岩. 袖阀管劈裂注浆在道路工程软基处理中的应用[J]. 山西建筑, 2011, **37**(20): 156 - 157. (XU Yan. Application of sleeve valve barrel fracturing grouting method in road engineering soft foundation processing[J]. Shanxi Architecture, 2011, **37**(20): 156 - 157. (in Chinese))
- [3] 曹少谦. 劈裂注浆在太祁跨线桥地基加固工程中的应用[J]. 山西交通科技, 2002, **152**(增刊1): 85 - 88. (CAO Shao-qian. The application of splitting grouting to taiqi crossover ground strengthening engineering[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2002, **152**(S1): 85 - 88. (in Chinese))
- [4] 何永华, 李治国. 钢花管劈裂注浆施工技术[J]. 施工技术, 2008, **37**(增刊1): 254 - 256. (HE Yong-hua, LI Zhi-guo. Construction technology of steel floral tube fracturing grouting[J]. Construction Technology, 2008, **37**(S1): 254 - 256. (in Chinese))
- [5] 马丽娜, 严松宏. 劈裂注浆模拟试验设计及工程应用[J]. 路基工程, 2010(5): 67 - 69. (MA Li-na, YAN Song-hong. Simulation test design and engineering application of fracture grouting[J]. Embankment Engineering, 2010(5): 67 - 69. (in Chinese))
- [6] 白 云, 侯学渊. 软土地基劈裂注浆加固的机理和应用[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(2): 89 - 93. (BAI Yun, HOU Xue-yuan. The mechanism and application of fracture grouting method in soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **13**(2): 89 - 93. (in Chinese))
- [7] 孙 锋, 张顶立, 陈铁林, 等. 土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 474 - 480. (SUN Feng, ZHANG Ding-li, CHEN Tie-lin, et al. Meso-mechanical simulation of fracture grouting in soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 474 - 480. (in Chinese))
- [8] 张忠苗, 邹 健. 桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 181 - 184. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian. Penetration radius and grouting pressure in fracture grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 181 - 184. (in Chinese))
- [9] 宋修广, 张宏博, 王松根, 等. 黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1594 - 1602. (SONG Xiu-guang, ZHANG Hong-bo, WANG Song-gen, et al. Hydrophilic characteristics and strength decay of silt roadbed in Yellow River alluvial plain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1594 - 1602. (in Chinese))