

文章编号:1671-6833(2022)03-0059-08

水泥土搅拌桩加固黄土路基稳定性研究

邓友生, 孟丽青, 蔡梦真, 孙雅妮, 李 龙, 郑云方

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 针对黄土地区降雨入渗条件下路基稳定性问题, 采用水泥土搅拌桩作为地基加固处理方法加固黄土路基。以黄土的基础土工试验和不同掺入量的粉煤灰、煤矸石改性水泥土的无侧限抗压强度测试结果作为依据, 根据摩尔库伦理论和降雨入渗条件下路基的荷载-沉降原理, 采用有限元分析软件 ABAQUS 构建降雨入渗条件下水泥土搅拌桩处理的路基模型, 结合数值模拟结果, 分析了水泥土搅拌桩加固黄土路基在不同的降雨时长、降雨强度和桩体弹性模量下黄土路基的荷载-沉降变化规律, 讨论了黄土路基的承载特性, 探索了降雨入渗对黄土路基稳定性的影响。研究表明: 水泥土搅拌桩在降雨入渗条件下对黄土路基竖向有着明显的加强作用, 路基坡脚的位移会随着降雨强度的增大及降雨时长的增长而增大; 在降雨强度为 2 mm/h、降雨时长为 18 h 的条件下, 路面沉降随着桩体弹性模量的增大而减小; 桩体的弹性模量为 300 MPa 时, 水泥土搅拌桩对黄土路基的加固效果最佳。

关键词: 降雨入渗; 黄土; 水泥土; 路基加固; ABAQUS

中图分类号: TU44 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.03.009

0 引言

公路是带动区域经济发展的重要交通枢纽, 2019 年末, 中国公路总里程已达到 501.25 万公里, 仍呈平稳增长态势。公路建设会遇到各种不同的地质情况, 常用的路基处理方法有换填法、强夯法、水泥搅拌桩法、碎石桩法、真空预压法、袋装砂井排水法、塑料板排水法、组合加固法等^[1]。其中, 水泥搅拌桩是利用深层搅拌机械, 在路基深处就地原位土和水泥或水泥系材料等固化剂强制搅拌, 组成具有整体性、水稳性和一定强度的水泥加固土体^[2-3]。该方法因设备简单、施工方便、噪音小、无振动、工期短、投资少、不污染环境、对相邻建筑物无不利影响等特点决定了其在软弱路基加固中的广阔发展前景^[4]。

中国西北地区广泛分布黄土, 其以粉粒为主, 富含碳酸钙等易溶于水的化学物质且孔隙发育。未浸水时, 具有较高强度和较低压缩性; 浸水后, 水分子进入土颗粒间的孔隙, 使得黄土在自重或者上部荷载作用下, 发生较大变形, 产生明显沉降且土体原有结构遭到水分子破坏, 抗剪强度迅速

降低, 对黄土路基上部的结构造成巨大危害^[5-8]。黄土疏松、孔隙多、易渗水、易沉陷和崩塌的特性, 使得在黄土地基上修建路基时, 若加固措施的选择不合理, 极易出现大面积沉降, 影响行车安全和公路运营寿命等。所以, 在黄土地区的公路建设中, 用水泥搅拌桩法进行路基处理的同时, 须考虑降雨入渗形成浸水带来的影响。

目前, 研究人员在应用水泥搅拌桩法进行黄土路基处理方面, 基本集中于计算模拟和试验研究水泥比、水泥取代、路基承载力和沉降分析等方面。例如, 叶傅^[9]研究了水泥剂量、压实度等对水泥改良黄土的强度的影响。邱擎^[10]通过 2 种方法计算结果的对比分析了影响降雨入渗路径以及渗透流场的因素, 提出对降雨渗入条件下分层总和法计算沉降量的改进。贾超^[11]通过现场检测和室内试验测得湿陷性黄土的力学参数, 分析了水泥土搅拌桩复合地基的承载力和沉降特性。赵利平等^[2]利用 ABAQUS 有限元软件建立三维模型发现水泥土搅拌桩桩间土沉降大小几乎与水泥掺入量无关, 水泥土搅拌桩复合地基在荷载较大的情况下不适用。闫富有等^[12]建立边界面双

收稿日期: 2021-07-20; **修订日期:** 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51878554, 41672308); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (2018JZ5012)

作者简介: 邓友生 (1969—), 男, 湖南桂阳人, 西安科技大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事基础工程及结构抗震防灾与减灾的教学与科研工作, E-mail: dengys2009@126.com。

面模型,比较不同种类、不同水泥掺量的水泥固化土的模拟与试验结果,揭示水泥固化土在循环荷载作用下的主要应力-应变特征。

另外,研究人员发现粉煤灰、煤矸石等工业废弃物在加固黄土路基时可以取代部分水泥,节约资源保护环境的同时降低了对水泥的需求^[13-15],且粉煤灰、煤矸石在西北地区产量丰富。但是,在降雨条件下黄土发生的较大变形会对其上部的建筑物产生较大影响。现有的研究成果基本忽略了降雨入渗对在天然黄土上修筑的公路等基础设施的恶劣影响,因此,研究粉煤灰、煤矸石取代部分水泥形成水泥土试块的强度,用作水泥土搅拌桩加固黄土路基,并以试验结果为基础,利用ABAQUS有限元软件模拟在降雨入渗下水泥土搅拌桩对路基加固效果的分析,既是合理利用工业废料,又为今后工程应用提供了一种思路。

1 试验材料与方法

1.1 黄土特性测试

根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[16]对白鹿原鲸鱼沟自然风景区取回的黄土土样进行颗粒分析试验、界限含水率试验、直剪试验和渗透试验等基本土工试验。

1.1.1 颗粒分析

采用筛析法与密度计法筛析土样,风干土样过 2 mm 筛子,得到图 1 的土样颗粒粒径分布曲线。由图 1 可知,土样中沙粒(粒径>0.075 mm)、粉粒(粒径为 0.005~0.075 mm)、黏粒(粒径<0.005 mm)的质量分数分别为 12.8%、80.5%、6.7%。

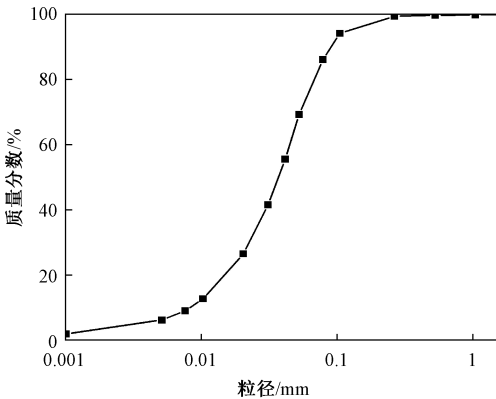


图 1 黄土颗粒粒径分布曲线

Figure 1 Loess particle size distribution curve

1.1.2 击实试验

界限含水率采用 LG-100D 数显式土壤液塑限联合测定仪测试。将风干后过 0.5 mm 筛的 800 g 土样,分 3 份分层压实放入盛土杯,记录锥

入深度,重复后误差小于 0.05 mm,取平均值即可。将 2 个 15 g 的土样分别放入铝盒,测其含水率,计算平均含水率。得到土样的液限、塑限、含水率分别为 27.1%、16.4%、20.6%。

根据界限含水率试验中测出的液限,采用四分法制备土样,利用轻型击实法将土样击实,取土样中心处的代表性土样测含水率,得到的最优含水率为 16.3%,最大干密度为 1.780 g/cm³。

1.1.3 直剪试验

采用 TKA-DDS-4A 四联直剪仪实现重塑土土样的直剪试验,根据线弹性 M-C 模型,对直剪试验结果(图 2(a))进行数据拟合,得到图 2(b)。拟合直线在 y 轴上的截距是土体的黏聚力 c,斜率为内摩擦角 φ 的正切值,取 4 组测试数据的平均值,得到土体的抗剪强度参数 c 为 44.2 kPa,φ 为 27.3°。

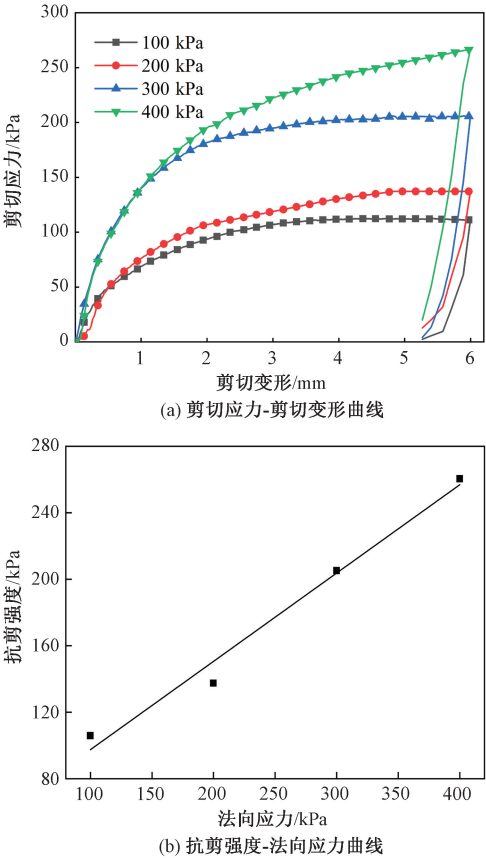


图 2 直剪试验

Figure 2 Direct shear test

1.1.4 渗透试验

利用 SLB-1A 应力-应变控制式三轴剪切渗透试验仪,采用变水头渗透法测定重塑土土样渗透系数。试样直径为 61.8 mm,高度为 125 mm。测得土体渗透系数为 5.15×10⁻⁶~5.38×10⁻⁶ m/s,取平均值为 5.27×10⁻⁶ m/s。

1.2 水泥土强度试验

研究结果^[3,17]表明,水泥质量分数(下同)在大于 10% 时有明显的加固效果。以掺入 20% 的水泥作为对照组,分别用粉煤灰和煤矸石取代 20%、40%、60% 的水泥,探索粉煤灰、

煤矸石取代水泥时水泥土强度的变化。试验所用水泥为陕西秦岭海螺牌 PO 42.5R 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为陕西省某发电厂生产,煤矸石粉未经高温煅烧,质地偏灰。所用材料的化学成分见表 1。

表 1 煤矸石、粉煤灰及水泥的化学成分
Table 1 Chemical composition of coal gangue, fly ash and cement %

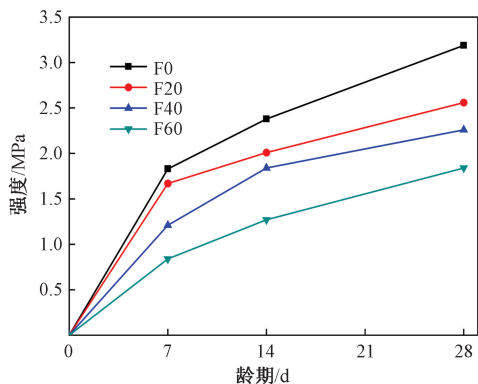
材料	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{R}_2\text{O})$
煤矸石	47.23	34.89	5.36	7.12	0.86	2.79	1.75		
粉煤灰	62.76	23.73	4.02	3.56	2.62			2.79	0.52
水泥	21.66	5.63	3.79	63.84	1.62			2.79	0.67

按试验设计的水泥土配合比,准确称取各种材料(水、水泥、粉煤灰、煤矸石均为 $\pm 0.5\%$),根据无侧限抗压强度试验规范,将水泥土拌合物倒入尺寸为 70.7 mm \times 70.7 mm \times 70.7 mm 的模具,每组试样 3 个。在实验室养护 48 h 后,脱模放入标准养护箱。标准养护箱中取出的水泥土试块要立即进行无侧限抗压强度测试。以 0.01 kN/s 的速率均匀施加垂直荷载,直到试验机荷载强度不再增加且逐渐减小,记试块承受的最大荷载为破坏荷载,并精确至 0.01 kN。

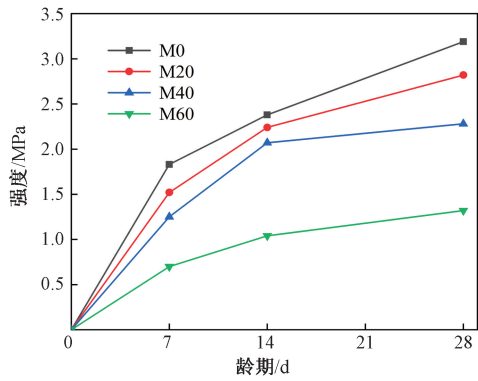
2 水泥土强度试验结果与分析

根据无侧限抗压强度试验结果,分别绘制不同掺量粉煤灰(F)和煤矸石(M)取代部分水泥的试块强度曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,掺入粉煤灰或煤矸石,水泥土试块强度都显著低于原水泥土的强度,强度随着龄期的增长而增加,但增大幅度逐渐减小。粉煤灰、煤矸石的弱碱性能促进水化反应。所以在 0~7 d,水泥与粉煤灰、煤矸石的共同反应使 2 种水泥土试块强度增加幅度较大。但由于粉煤灰、煤矸石中疏松多孔的细小颗粒对水泥土的强度有一定的降低作用,取代率为 0% 的水泥土试块强度始终高于其他试块的强度,且 2 种水泥土试块的强度随取代率的增大而减小。

水泥取代率为 20% 时,在 0~7 d,粉煤灰水泥土强度比煤矸石水泥土的强度增加幅度大,7 d 后煤矸石水泥土的强度增加逐渐超过粉煤灰水泥土的强度。在水泥土中粉煤灰的碱性促进水泥水化反应,强度增加迅速。而未水化的煤矸石包裹水泥矿物颗粒形成的较大团粒阻碍了水泥的完全水化,但随着养护时间的延长,团粒消散,水泥熟料进一步水化,加快了煤矸石水泥土的强度增加速度。



(a) 粉煤灰水泥土



(b) 煤矸石水泥土

图 3 不同取代率下龄期-抗压强度曲线
Figure 3 Curves of age-compressive strength under different replacement rates

水泥取代率为 40% 时,在 0~7 d,2 种水泥土的强度增加大致相同。在 7 d 后,煤矸石水泥土增长速度略大。在 14 d 时煤矸石水泥土试块的强度较高,由于煤矸石在促进水泥的水化反应的同时,部分未发生化学反应的煤矸石形成的较大团粒结构随养护时间的增加逐渐消散,促进水泥熟料水化趋于完全。但粉煤灰中高含量的碱性化学物持续发挥作用,28 d 时 2 种水泥土试块的强度相差不大。

水泥取代率为 60% 时,28 d 的无侧限抗压强

度会进一步降低。但在反应过程中,粉煤灰中含量较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 催化水泥充分发生化学反应,同时部分粉煤灰填充水泥土间隙,所以取代率为 60% 时,相较于煤矸石水泥土,粉煤灰水泥土试块强度略大。

3 降雨入渗下黄土路基稳定性分析

陕西等西北黄土地区,难免会遇到路基强度不足的情况,因黄土的特殊性,降雨入渗是影响黄土地区路堤稳定性的重要因素。以上述土工试验结果和前人研究成果为基础,运用 ABAQUS 有限元软件,结合摩尔-库伦模型和降雨条件下非饱和土体的变形特性,对降雨强度与时长对水泥土搅拌桩加固黄土路基时的变形

和稳定性进行分析,并研究不同桩体弹性模量条件下,黄土路面坡脚及水泥土搅拌桩桩体水平位移的变化。

3.1 计算模型

计算算例为一黄土路基,路面宽 7.5 m,路堤坡度为 1:1.5,路基土体厚度为 20 m,填土高度为 6 m,桩径为 0.6 m,桩长为 8 m,桩间距为 1.2 m。如表 2 所示,土体、桩的材料参数是依据前述试验确定的。在 ABAQUS 中建立路基和桩部件,装配效果如图 4 所示。在该模型中,由于接触面较多,通过查询解除对的方式对整个模型进行查询快速建立接触面,在接触属性中创建法向接触模型和切向接触模型。在相互作用特性离散化方法中,选择面对面离散,设定滑移方式为有限滑移。

表 2 路基模型参数设置
Table 2 Model parameter settings of roadbed

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
填土	16.8	0.35	1.76	25.0	25.0
地基土	9.8	0.30	1.74	27.3	44.2
水泥土搅拌桩	100.0	0.20	1.78		

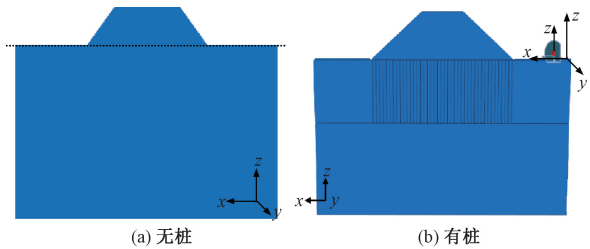


图 4 路基模型图

Figure 4 Model diagram of roadbed

边界条件设定:约束地基地底部 3 个方向的位移,左右两侧的水平位移。模型荷载为自身重力以及模拟降雨条件的表面渗流。路堤两侧和路面为降雨面,路面降雨强度为 q ,路堤两侧降雨强度为 $q\cos\alpha$, α 为路堤倾角。根据气象部门的降雨强度标准,模型中降雨按照小雨、中雨、大雨设置,对应强度 q 分别为 0.2、1、2 mm/h。降雨模式为连续降雨,降雨时间分别设置为 6、12、18 h。

3.2 计算方案

为研究不同降雨时长和强度对水泥土搅拌桩加固黄土路基效果的影响,以上述水泥土试块无侧限抗压强度试验结果为依据,参考文献[11],按照 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》^[18] 确定桩的弹性模量分别为 100、200、300、400 MPa,设置计算方案,如表 3 所示。

表 3 路基稳定性的计算方案表

Table 3 Calculation plan table of roadbed stability

桩弹性模量/MPa	降雨时间/h	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
100	6、12、18	0.2
	6、12、18	1
	6、12、18	2
200	6、12、18	0.2
	6、12、18	1
	6、12、18	2
300	6、12、18	0.2
	6、12、18	1
	6、12、18	2
400	18	2

由于结构自身存在重力以及模拟降雨而加载的表面渗流荷载,土体选择孔隙流体/应力耦合单元 CPE4 单元。桩体选择三维应力 C3D8 单元桩体,不考虑渗透的影响,只考虑桩体力与位移的变化。与桩接触部分的土体结构比较复杂,故单元形状采用了六面体网格,并采用扫掠的划分技术和进阶算法,如图 5、6 所示。

3.3 结果与分析

3.3.1 降雨强度与时长对路堤坡面稳定性的影响

降雨强度为 0.2 mm/h 时(图 7),水泥土搅

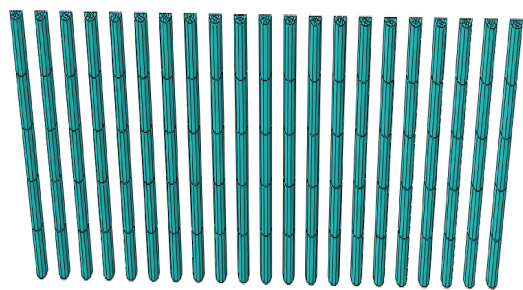


图 5 桩网格划分
Figure 5 Pile grid division

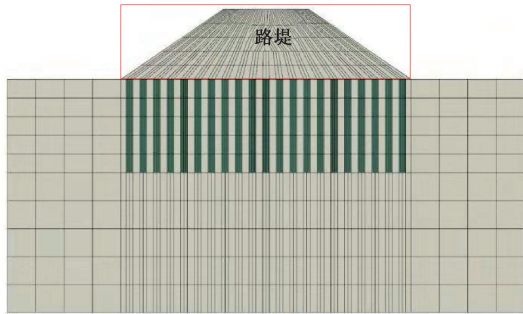


图 6 有桩土体网格划分
Figure 6 Grid division of piled soil

拌桩加固的情况下,降雨 6、12、18 h 对应坡脚水平位移分别为 10.66、11.07、11.91 mm。在小雨的模式下,坡脚水平位移增长速度较慢,坡脚水平位移与降雨时长呈正相关。水平位移的产生源于土颗粒间含水量的变化导致土颗粒间黏结强度降低,土体软化,路堤坡面变形。对比无桩时的路

基,坡脚位置因没有横向约束,有桩路基坡脚位置的水平位移要比无桩的水平位移值大。但有桩时的路基坡脚位置的沉降位移要比无桩时的沉降位移值小。经水泥土搅拌桩加固后黄土路基强度增加,阻挡坡脚处土体发生沉降变形,沉降位移减小。

降雨强度为 1 mm/h 时,如图 8 所示,降雨 6、12、18 h 对应的坡脚水平位移分别为 12.59、13.01、13.23 mm。在中雨模式下坡脚水平位移变化不明显。随降雨时间的持续,路基土层孔隙水压力增大,土层渗透性提高,降雨入渗速率降低。降雨很难渗透到地基深处,在地基表面土层饱和和后形成径流。坡脚处的水平和沉降位移与小雨模式下的规律基本一致。

降雨强度为 2 mm/h 时,如图 9 所示,降雨 6、12、18 h 对应坡脚水平位移分别为 30.02、39.39、44.52 mm。大雨降雨模式下,土体基质吸力变小,表层土体很快达到饱和后被破坏,导致雨水入渗程度增大,坡脚水平位移增大,与降雨时长呈正相关关系,而有桩和无桩的沉降位移值相差不大。但坡脚处土体因持续时间足够长的降雨发生较大破坏,加固路基发生较大变形。

降雨入渗下水泥土搅拌桩对黄土路基能够起到明显的竖向加强作用,而坡脚位置因没有横向

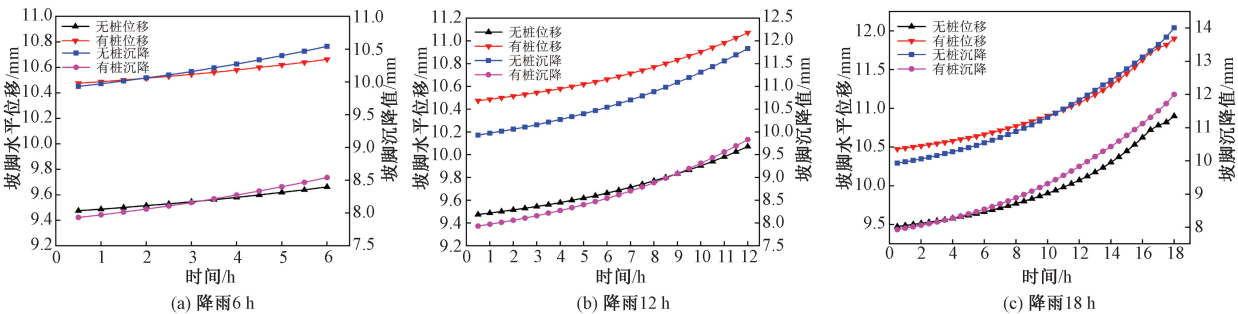


图 7 降雨强度为 0.2 mm/h 的坡脚水平位移和沉降值

Figure 7 Horizontal displacement and settlement value of the slope toe with a rainfall intensity of 0.2 mm/h

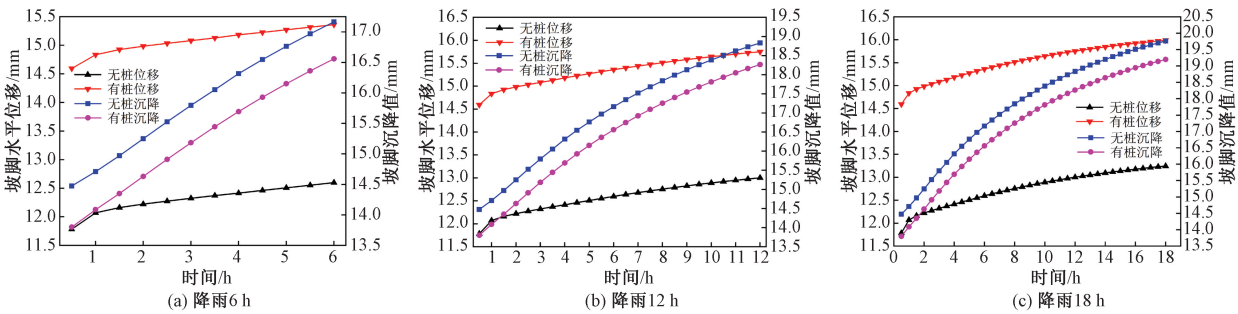


图 8 降雨强度为 1 mm/h 的坡脚水平位移和沉降值

Figure 8 Horizontal displacement and settlement value of the slope toe with a rainfall intensity of 1 mm/h

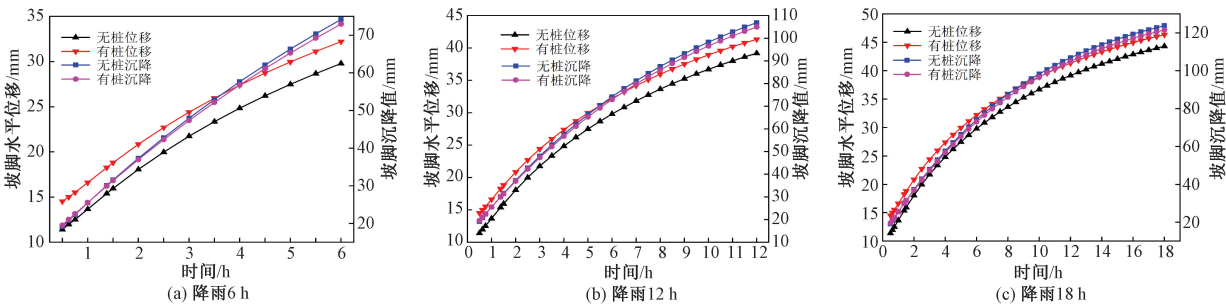


图 9 降雨强度为 2 mm/h 的坡脚水平位移和沉降值

Figure 9 Horizontal displacement and settlement value of the slope toe with a rainfall intensity of 2 mm/h

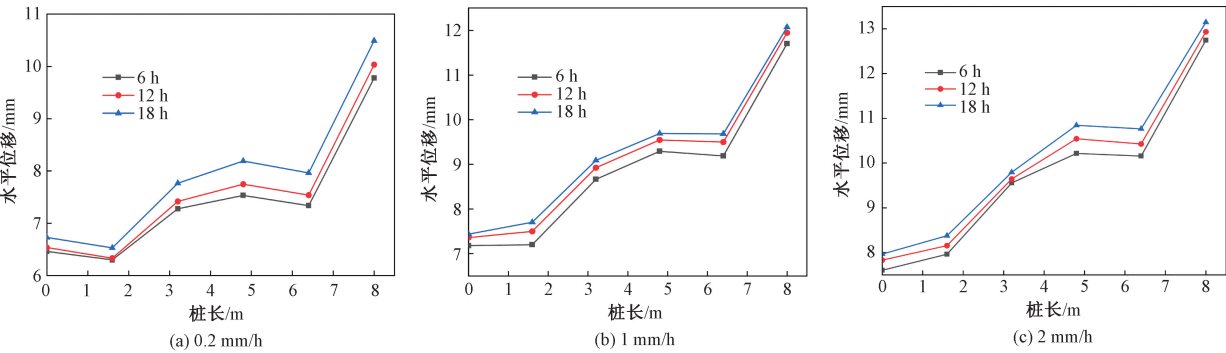


图 10 不同降雨强度下的沿桩身水平位移

Figure 10 Horizontal displacement along the pile with different rainfall intensities

加固措施,导致坡脚位置处的水平位移较大。一方面,当路基被处理后,路基承载力提高,且路基的弹性模量在桩的作用下得到一定程度的提高,路基刚度变大,沉降量减小。另一方面,路基土的竖向刚度变大,而路基坡脚在水平方向却没有采取约束措施,故路基土体在降雨作用下产生竖向变形时,坡脚的土体向路基两侧产生位移。故路基坡脚在有桩时,路基的水平位移较大。但在持续时间足够长的大雨模式下,加固路基极易发生破坏。

3.3.2 降雨强度与时长对桩体的影响

以桩底为原点,绘制图 10 所示的不同降雨强度下的沿桩身水平位移曲线图。由图 10 可以看出,桩体顶部的水平位移最大,桩底的水平位移最小。在小雨模式下,如图 10(a) 所示,降雨 6、12、18 h 对应的桩体顶部水平位移分别为 9.78、10.03、10.49 mm。图 10(b) 和 10(c) 表明,在降雨 18 h 时,中雨和大雨下的桩体顶部水平位移分别为 12.07、13.41 mm。随降雨时间和降雨强度的增加,桩体顶部水平位移均发生小幅度的增长,可见降雨入渗对桩体水平位移的影响有限。

3.3.3 桩体弹性模量对路堤加固效果的影响

选取降雨强度为 2 mm/h,降雨时长为 18 h

研究桩体弹性模量对路堤加固效果的影响,如图 11 所示。图 11 表明,不同桩体弹性模量下的路面最大沉降变形均发生在路面两端。在降雨作用下,土体的孔隙水压力升高,路基边坡的稳定性降低,路基边坡出现一定程度的滑动位移。而路基中部的土体不在滑动范围中,且降雨在路基中部的渗透量要少,造成的沉降会小,故路基边坡处的土体比路基中部土体的沉降大。桩体弹性模量 100、200、300、400 MPa 所对应的最大沉降量分别为 75.44、69.90、66.71、64.66 mm,对应的路面中心处的沉降量分别为 73.28、67.12、63.50、61.15 mm,对

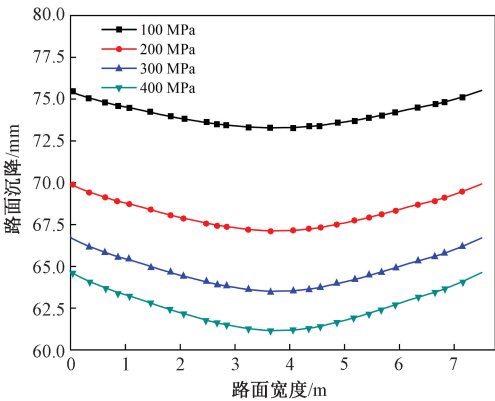


图 11 不同桩体弹性模量下的路面沉降变形

Figure 11 Pavement settlement deformation with different pile elastic modulus

应整个路面的沉降差最大值分别为 2.16、2.78、3.21、3.51 mm。可见路面的最大沉降值随着水泥土搅拌桩桩体弹性模量的增大而减小,而路面沉降差随桩体弹性模量增大而增大,说明桩体弹性模量增大能够分担更多荷载。弹性模量由 100 MPa 增加到 300 MPa 的过程中,沉降量变化较明显,所以桩体弹性模量为 300 MPa 时对路基的加固效果相对较好。

4 结论

以黄土的室内基本土工试验及粉煤灰、煤矸石改性水泥土试块强度的变化规律分析为基础,采用有限元软件 ABAQUS 模拟分析了降雨入渗对水泥土搅拌桩加固黄土路基稳定性的影响,得到以下结论。

- (1)水泥土中掺入粉煤灰和煤矸石会降低水泥土强度,适宜掺入量对应的强度仍能满足一些工程要求,可提高其经济性。
- (2)在大雨模式下,当降雨时间大于 18 h 时,水泥土搅拌桩对黄土路基竖向加强作用明显。但要注意加强路堤坡面的抗滑处理以及坡脚位置的水平约束,尤其是坡脚位置要适当加固,防止坡面在降雨条件下变形过大导致路堤的破坏。
- (3)在降雨强度为 2 mm/h、降雨时间为 18 h 的条件下,桩体弹性模量为 300 MPa 的水泥土搅拌桩对路基的加固效果较好。
- (4)降雨入渗对路基加固的影响显著,而实际路基加固工程规模大,需要考虑的因素众多。不论尺寸效应,还是土体结构性,试验与计算模拟都与工程实际存在一些差别。

参考文献:

[1] 许飞.公路软土路基加固处理及沉降分析[D].合肥:安徽建筑大学,2020.

[2] 赵利平,龙骁鹏,黄筱云.水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):30-36,70.

[3] 安芑芑,杨昱鑫.水泥土搅拌桩加固饱和黄土地基承载特性研究[J].兰州工业学院学报,2018,25

(6):7-11.

[4] 袁文俊,蔡梓淇,谢松,等.基于强度试验的水泥土搅拌桩施工综合参数研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(增刊1):46-51.

[5] LV Y Q,DENG L S,FAN W. Loess collapsibility characteristics of railway engineering sites using large-scale trial immersion pit experiments[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2021, 80(4): 3271-3291.

[6] 高英.西宁地区湿陷性黄土变形特性及微观机理研究[D].西宁:青海大学,2020.

[7] 刘博诗,张延杰,王旭,等.人工制备黄土湿陷性影响因素及微观机理研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(2):330-336,343.

[8] 崔靖萌,张吾渝,解邦龙,等.西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(增刊2):249-252.

[9] 叶傅.水泥改良黄土无侧限抗压强度试验研究[J].湖北理工学院学报,2019,35(3):48-52.

[10] 邱擎.降雨入渗对灰土挤密桩处理山区人工填土地基的影响研究[D].郑州:郑州大学,2019.

[11] 贾超.水泥土搅拌桩对湿陷性黄土地基的加固效果研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.

[12] 闫富有,崔昊,李俊超,等.考虑胶结退化的水泥土边界面模型及参数研究[J].郑州大学学报(工学版),2021,42(1):63-69.

[13] 郭伟,李东旭,陈建华,等.煤矸石火山灰活性的快速评价方法[J].硅酸盐学报,2007,35(4):489-494.

[14] CHOO T F, SALLEH M A M, KOK K Y, et al. A study on the utilization of coal fly ash derived grog in clay ceramics[J]. Materials, 2020, 13(22):5218.

[15] YANG J J, SUN H J, PENG T J, et al. Study on the overall reaction pathways and structural transformations during decomposition of coal fly ash in the process of alkali-calcination[J]. Materials, 2021, 14(5):1163.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[17] 陈四利,侯芮,倪春雷,等.基于三轴压缩试验的水泥土力学特性研究[J].硅酸盐通报,2018,37(12):4012-4017.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

Research on Stability of Loess Roadbed Reinforced with Cement-soil Mixing Piles

DENG Yousheng, MENG Liqing, CAI Mengzhen, SUN Yani, LI Long, ZHENG Yunfang

(College of Civil and Architectural Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of the stability of roadbed in the condition of rainfall infiltration in loess area, cement-soil mixing pile was adopted as the foundation reinforcement treatment method. Based on the foundation geotechnical test of loess and the unconfined compressive strength test results of cement soil modified with different amounts of fly ash and coal gangue, according to the M-C criterion and the load-settlement principle of roadbed in rainfall infiltration conditions, the roadbed model treated with cement soil mixing pile in rainfall infiltration was constructed by using the finite element analysis software ABAQUS. Combined with the numerical simulation results, the load settlement variation law of loess roadbed reinforced with cement-soil mixing piles with different rainfall duration, rainfall intensity and pile elastic modulus was analyzed; the bearing characteristics of loess roadbed were discussed; and the influence of rainfall infiltration on the stability of loess roadbed was explored. The research results showed that the cement-soil mixing pile had a significant strengthening effect on the vertical direction of the loess roadbed in the condition of rainfall infiltration, and the displacement of the roadbed slope foot could increase with the increase of rainfall intensity and rainfall duration. In the condition that the rainfall intensity was 2 mm/h and the rainfall duration was 18 h, the road pavement settlement decreased with the increase of pile elastic modulus. When the elastic modulus of the pile was 300 MPa, the cement-soil mixing pile had the best reinforcement effect on the loess roadbed.

Keywords: rainfall infiltration; loess; cement-soil; roadbeds reinforcement; ABAQUS

(上接第 58 页)

Study on Rheological and Temperature Sensitive Properties of Recycled Asphalt from Furfural Extraction Oil

WU Wenliang, DAI Shenglin, SI Li

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to find out the regeneration effect of furfural extraction oil as asphalt regeneration agent on asphalt with different aging degrees, the rheological properties and temperature sensitivity of furfural extraction oil recycled asphalt were studied. By adding furfural extraction oil to asphalt with mild, moderate and severe aging degrees, the dynamic shear rheological tests and bending creep tests were used to study the influence of furfural extraction oil on the rheological properties and temperature sensitivity of aged asphalt, and the rheological properties and temperature sensitivity of recycled asphalt were evaluated with different indexes. The results showed that with the increase of furfural extraction oil content, the middle temperature fatigue resistance and low temperature crack resistance of aging asphalt were improved, and the high temperature deformation resistance was reduced. The performances of asphalt with different aging degree could be restored to the level of matrix asphalt under suitable furfural extraction oil content. The multiple stress creep test was more suitable for evaluating the high temperature deformation resistance of asphalt than the rutting factor. The evaluation results of the fatigue factor and linear scanning amplitude test on mesothermal fatigue resistance of asphalt were consistent. The temperature sensitivity of recycled asphalt had different performance in different temperature ranges. In the temperature range of 46-76 ℃, with the increase of furfural extraction oil content, the temperature sensitivity of three kinds of recycled asphalt was enhanced. In the temperature range of -18--6 ℃, the evaluation results of the creep rate index on the temperature sensitivity were better than those of the creep stiffness index. Temperature sensitivity of severe aging recycled asphalt increased with the increase of furfural extraction oil content, while the temperature sensitivity of mild and moderate aging recycled asphalt decreased. With the basic recovery of each index to the same as the virgin asphalt, the optimum content was determined as mild aging 4%, moderate aging 7%, severe aging 8%.

Keywords: furfural extraction oil; recycled asphalt; degree of asphalt aging; rheological properties; temperature sensitivity