

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.016

引用格式:刘龙武,黄振兴,邱祥.水泥改性土湿化成型施工工艺参数研究及工程应用[J].公路与汽运,2025,41(2):74-79.

Citation:LIU Longwu, HUANG Zhenxing, QIU Xiang. Research on technical parameters of wet forming of cement-modified soil and its engineering application[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(2): 74-79.

水泥改性土湿化成型施工工艺参数研究及工程应用*

刘龙武, 黄振兴, 邱祥

(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 改性土湿化成型工艺是一种可采用高含水量的软塑状水毁滑坡堆积体作为填料, 利用挖掘机进行掺拌水泥灰和压实成型的改性土施工工艺, 该工艺无须采用最佳含水量下传统碾压施工工艺, 具有施工便利、经济性和环保性好的优势, 尤其适用于水毁滑坡治理。文中从水泥改性土复合胶凝作用机理出发, 通过室内试验研究湿化成型施工工艺的适宜含水量和水泥掺量, 通过团粒化效应试验分析得出复合胶凝作用是湿化成型施工工艺改性土强度增长的核心因素; 结合湿化成型工艺在长沙市紫苑路某路堑边坡水毁治理中的应用, 说明改性土湿化成型工艺的工程应用可行性, 并通过改性土挡土墙修筑, 实现利用高含水量的软塑状水毁滑坡土体作为主材进行滑坡治理的施工技术突破, 为路堑边坡水毁治理提供思路。

关键词: 公路; 水毁滑坡; 湿化成型工艺; 水泥改性土; 改性土挡土墙; 团粒化效应

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2025)02-0074-06

1 改性土湿化成型施工工艺的提出

长沙市紫苑路某3级路堑边坡, 道路修筑1年后, 在降雨入渗水的饱和及软化作用下, 坡脚土岩界面处软弱夹层(见图1)的抗剪强度降低, 造成浅层滑坡变形破坏(见图2、图3)。滑坡舌的滑动上抬活动导致右幅道路路面、人行道、排水沟、排水井等隆起变形, 埋深2 m的消防井上抬变形量达1 m(见图4)。该处为变坡点部位, 而右行道从低往高爬坡, 该破坏路段为司机盲点区, 滑坡给道路行驶安全造成严重威胁, 须进行快速、有效治理。

类似水毁滑坡常发生在道路修筑2~3年后, 由于水毁滑坡体呈软塑状, 锚固和强力支护相结合的治理方案达不到加固效果, 不适合; 重力式挡土墙方

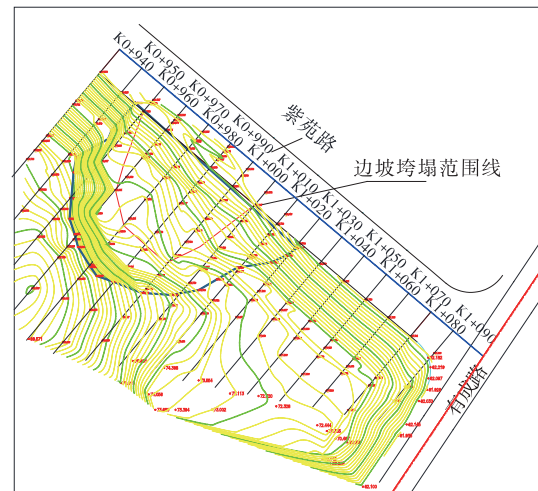


图2 浅层水毁滑坡破坏平面图



图1 坡脚土岩界面处软弱夹层

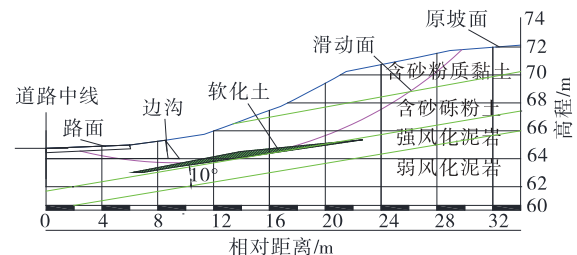


图3 水毁滑坡破坏典型断面图

* 基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30035); 湖南省教育厅自然科学青年项目(21B0317)



图 4 道路设施的隆起破坏

案的施工周期过长,不能快速治理,不适合;对高含水量的滑坡土料按传统工艺掺水泥进行改性,经控制最佳含水量的碾压压实施工形成改性土挡土墙的治理方案,因土料含水量太高,降低土料的含水量须在较大场地和有利天气条件下反复翻晒,经济性和工期难以保证,不适合。2019 年为处理长沙卓伯根大楼基坑软土化地基,刘龙武等对高含水量的软塑状地基软化土使用湿化成型的改性土快速施工工艺,经掺水泥改性后,快速形成了具有一定地基承载力的人工地基^[1]。本文对该施工工艺加以改进,通过室内土工试验和施工现场试验,研究用高含水量的软塑状水毁滑坡堆积体为填料,借助挖掘机进行掺水泥和压实成型形成改性土挡土墙的湿化成型施工工艺,为采用改性土挡土墙快速有效治理水毁滑坡提供参考。

2 湿化成型施工工艺参数的室内试验研究

掺入水泥对土进行改性,从作用机理来看,可界定为复合胶凝和填充增强作用^[2-3]。复合胶凝作用主要体现为团粒化作用^[4-5]。因此,本文从水泥改性土复合胶凝作用机理出发,开展湿化成型施工工艺参数室内试验研究。

2.1 湿化成型施工工艺适宜施工含水率的确定

含水率、水泥掺量均对复合胶凝作用的发挥起重要作用,是改性土湿化成型施工工艺的重要参数。由于相同含水率、不同水泥掺量改性土的强度与相同水泥掺量、不同含水率改性土的强度存在差异,为简化试验研究方案,先以抗剪参数中黏聚力来表征粒间胶凝作用,通过正交试验研究改性土含水率、水泥掺量对黏聚力的影响,进而分析复合胶凝作用的效果,确定合适的湿化成型施工含水率。试验方案如下:

(1) 试验土料。从水毁滑坡现场取得含粉砂质黏土,其主要物理力学性质见表 1。水泥采用海螺牌 425[#] 袋装商业水泥,其主要成分见表 2。

表 1 试验土料的主要物理力学性质

项目	指标	项目	指标
天然含水量/%	39.8	抗压强度/kPa	40
塑性/%	23.9	黏聚力/kPa	14
液限/%	52	内摩擦角/(°)	16
天然密度/(g·cm ⁻³)	1.91		

表 2 水泥的主要成分

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
SiO ₂	21.4~22.2	CaO	64.4~66.2
Al ₂ O ₃	4.8~5.9	MgO	1.1~2.1
Fe ₂ O ₃	3.3~3.9		

(2) 正交试验方案。根据水毁滑坡堆积体含水率范围及改性土挡土墙的强度及经济性要求,试验含水率取 32%~40%,水泥掺量(质量百分比)取 4%~15%,采用 L₂₅(2⁵) 正交设计,共得到 25 组试验方案。两因素水平选择见表 3,部分试验组的参数选择见表 4,其他组的参数以此类推。

表 3 正交试验两因素水平选择

水平	含水率(A)/%	水泥掺量(B)/%	水平	含水率(A)/%	水泥掺量(B)/%
1	32	4	4	38	12
2	34	8	5	40	15
3	36	10			

表 4 部分正交试验的参数选择

试验组号	含水率(A)/%	水泥掺量(B)/%	试验组号	含水率(A)/%	水泥掺量(B)/%
1	32	4	5	32	15
2	32	8	6	34	4
3	32	10	7	34	8
4	32	12			

(3) 试验过程。1) 制备试样。将烘干土样用机械打磨机破碎成粉状颗粒,过 2 mm 筛,获得试验土料。取干土料 1 000 g,水泥、蒸馏水按表 4 称取,先将土料与水泥混合并拌和均匀,再在混合土料中加入蒸馏水,用机械搅拌器搅拌均匀,密封静置 1 h 使水分迁移均匀;通过静压制备直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀试样;将试样在标准养护条件[温度(20±2)℃,相对湿度≥95%]下养护 7 d。为减

小试验误差,相同条件下制作 3 组平行试样。2) 采用轻便直剪仪,按 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行直剪试验,以 3 组试样测试值的平均值作为最终试验结果。

正交试验的部分结果见表 5。将试验结果导入正交试验软件进行极差分析,结果见表 6。

表 5 部分正交试验结果

试验组号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	相关系数 R^2
1	14.89	64.38	0.984 9
2	21.91	89.80	0.999 5
3	23.23	101.65	0.994 7
5	56.56	36.67	0.998 9
6	29.59	15.01	0.995 6
10	16.23	103.69	0.995 4
11	16.48	38.70	0.979 3
13	46.37	16.10	0.999 0
17	20.52	51.59	0.998 2

表 6 两因素对改性土黏聚力影响的极差分析结果

水平	改性土的黏聚力/kPa	
	含水量	水泥掺量
1	76.31	42.00
2	61.93	50.66
3	44.00	68.55
4	56.86	81.21
5	62.06	66.72
极差值	32.31	37.22

根据正交试验理论^[5],一因素的极差越大,说明该因素的水平改变对试验指标的影响越大。由表 6 可知:水泥掺量的极差值略大于含水量的极差值,说明水泥掺量对水泥改性土黏聚力的影响略大于含水量的影响。

为更好地观察含水量、水泥掺量的不同水平对改性土黏聚力的影响,初步确定合适的施工参数,绘制图 5 所示两因素不同水平下改性土黏聚力折线图。由图 5 可知:随着含水率的增大,改性土黏聚力整体呈先减小后增大的趋势,A3 水平下黏聚力最小,A1 水平下黏聚力最大;黏聚力随水泥掺量的增加整体呈先增大后降低的趋势,水平在 B2 以上时增加明显,B4 水平下黏聚力最大,B4 水平对黏聚力

的影响最大,该水平下水泥掺量对复合胶凝作用的影响显著。由于水泥掺量相较于含水量对黏聚力的影响更显著,同时考虑到实际施工中其他因素会导致含水量损失,确定湿化成型施工工艺适宜施工含水量为 38%。

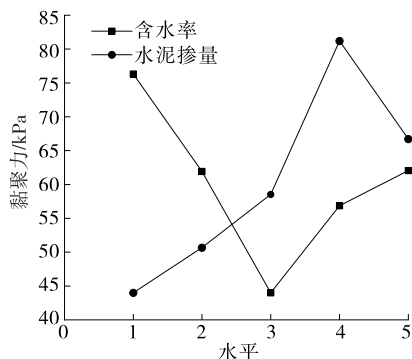


图 5 两因素的不同水平对改性土黏聚力的影响

2.2 湿化成型施工工艺适宜水泥掺量的确定

传统施工工艺中,水泥改性土可在最佳含水率条件下充分利用土料的压实作用形成改性土的强度^[6],而湿化成型施工工艺是在远超最佳含水量的适宜含水率条件下通过掺水泥改性,充分利用改性土的复合胶凝作用形成改性土的强度,其适宜水泥掺量大大超过传统施工工艺。本文通过湿化成型适宜施工含水量下不同水泥掺量的试样进行无侧限抗压强度试验,分析湿化成型施工工艺适宜水泥掺量。

采用表 1 所示土料和表 2 所示水泥,以湿化成型适宜施工含水量 38% 作为试样含水量,取土料 1 000 g,按表 7 所示水泥掺量制备试样进行无侧限抗压强度试验,结果见表 8 和图 6。水泥改性土的变形系数用 E_{50} (压缩应变为 50% 破坏应变时的割线模量) 来衡量^[6],根据试验结果计算得到的变形系数 E_{50} 见表 8 和图 7。

表 7 试样的水泥掺量

试样编号	水泥掺量/%	水泥质量/g	试样编号	水泥掺量/%	水泥质量/g
1	2	20	5	10	100
2	4	40	6	12	120
3	6	60	7	15	150
4	8	80			

由图 6 和图 7 可知:水泥掺量大于 8% 时,水泥改性土的无侧限抗压强度突变性增大,从水泥掺量

表 8 各水泥掺量下水泥改性土的无侧限抗压强度和
变形系数 E_{50}

水泥掺 量/%	无侧限抗压 强度/MPa	变形系数 E_{50} /MPa	水泥掺 量/%	无侧限抗压 强度/MPa	变形系数 E_{50} /MPa
0	0.04	0.47	8	0.25	1.89
2	0.07	0.60	10	0.67	6.82
4	0.21	1.93	12	0.77	6.70
6	0.24	1.97	15	1.02	7.11

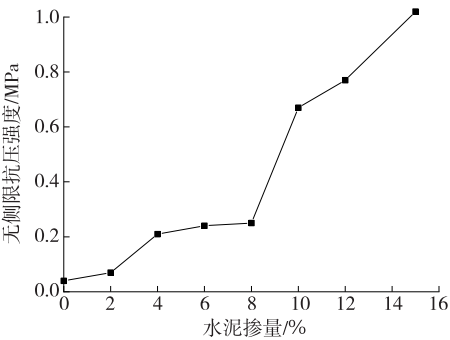


图 6 不同水泥掺量下水泥改性土的无侧限抗压强度

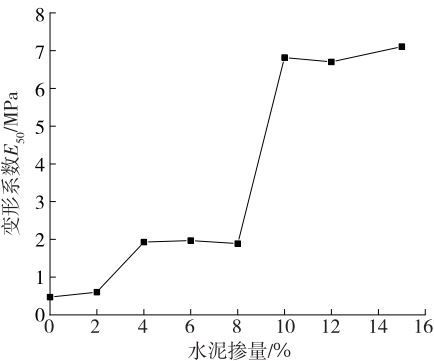


图 7 不同水泥掺量下水泥改性土的变形系数 E_{50}

8%时的 0.25 MPa 跃升到水泥掺量 10% 时的 0.67 MPa, 变形系数 E_{50} 也表现出同样的变化规律。水泥掺量大于 10% 的水泥改性土的强度出现质的飞跃, 湿化成型施工工艺下水泥掺量大于 10% 的水泥改性土的强度能满足改性土挡土墙强度大于 0.4 MPa 的要求。这是因为水泥掺量大于某值时, 水泥强度对掺量的变化变得敏感, 水泥增加会使其强度显著增大^[7-8]。

3 湿化成型施工工艺的复合胶凝作用研究

复合胶凝作用实际上是利用土颗粒间形成的块状体结构、孔隙间生成的纤维状水化物形成结构联接^[9], 构成湿化成型改性土的强度。由于团粒化作用是复合胶凝作用的主要表现形式, 可以用团粒化

效应来表征复合胶凝作用效应。另外, 特征粒径值是级配曲线上具有代表性的点, 能反映土颗粒整体粒径大小。因此, 以改性土的粒度分析为基础, 根据不同程度的团粒化作用会导致土颗粒团聚变粗或进一步形成块状体结构, 从而导致土颗粒粒径发生变化的原理, 通过分析掺入不同掺量水泥后各特征粒径的变化, 研究湿化成型施工工艺下, 水泥掺量大于 8% 的水泥改性土的复合胶凝作用是否会发生突变性增长。按表 7 制备试样, 焖料时间为 3 d^[10], 进行不同水泥掺量改性土筛分试验, 根据试验所得级配曲线, 得到不同水泥掺量下特征粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{50} 、 d_{60} (见表 9)。

表 9 不同水泥掺量下水泥改性土的特征粒径

水泥掺量/%	d_{10} /mm	d_{30} /mm	d_{50} /mm	d_{60} /mm
0	0.129 69	0.289 65	0.454 93	0.601 25
2	0.138 59	0.292 74	0.491 22	0.622 25
4	0.142 84	0.298 83	0.454 58	0.665 06
6	0.143 54	0.293 57	0.512 14	0.661 16
8	0.144 54	0.353 18	0.641 29	0.839 99
10	0.254 50	0.733 18	1.870 05	2.288 89
12	0.453 95	1.889 99	3.764 81	4.961 51
15	1.511 04	6.836 34	10.585 99	12.580 48

为更直观地描述各特征粒径的变化, 以水泥掺量 8% 为界, 对每个特征粒径按水泥掺量 0~8% 与水泥掺量 8%~15% 两个区段进行线性拟合, 结果见图 8~11, 两区段特征粒径拟合曲线的斜率比较见表 10。

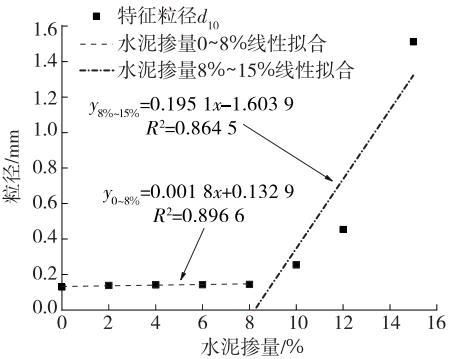


图 8 特征粒径 d_{10} 随水泥掺量的变化

由图 8~11 可知: 随着水泥掺量的增加, 特征粒径值增大, 说明水泥掺量增加会使团粒化作用增强, 导致土颗粒粒径增大, 与文献[11]的结论相同。

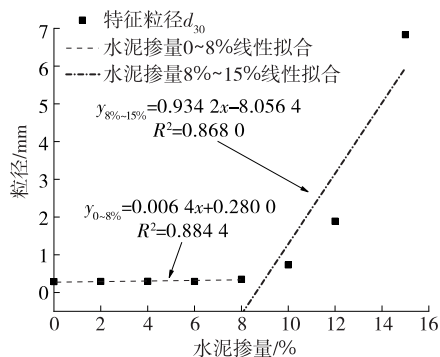
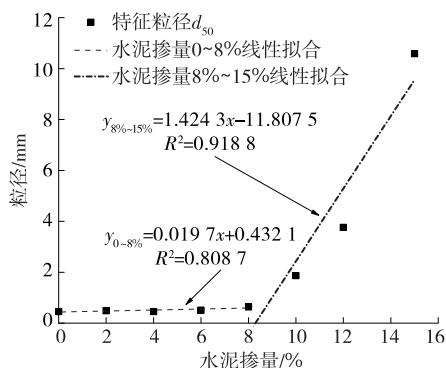
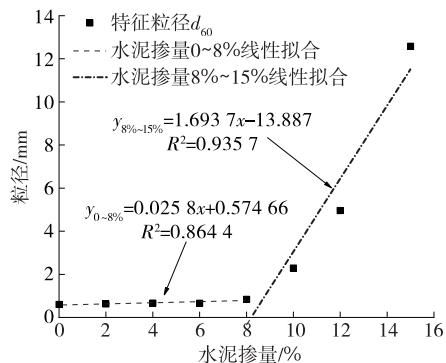
图 9 特征粒径 d_{30} 随水泥掺量的变化图 10 特征粒径 d_{50} 随水泥掺量的变化图 11 特征粒径 d_{60} 随水泥掺量的变化

表 10 各特征粒径拟合曲线的斜率比较

特征粒径	不同水泥掺量时拟合曲线的斜率		斜率比
	0~8%	8%~15%	
d_{10}	0.001 8	0.195 1	108.39
d_{30}	0.006 4	0.934 2	145.97
d_{50}	0.019 7	1.424 3	72.30
d_{60}	0.025 8	1.693 7	65.65

注:斜率比=水泥掺量 8%~15%区段各特征粒径拟合曲线的斜率/水泥掺量 0~8%区段对应特征粒径拟合曲线的斜率。

由表 10 可知:水泥掺量 8%~15%区段与水泥掺量 0~8%区段各特征粒径拟合曲线的斜率比为

65.65~145.97,平均值为 98.08。水泥掺量大于 8%时,团粒化作用将使土颗粒粒径迅速变粗,说明湿化成型施工工艺下,水泥掺量大于 8%时水泥改性土的团粒化作用将发生突变性增长。

水泥掺量 6%~12%的改性土试样见图 12。由图 12 可知:水泥掺量小于 8%时,土颗粒表现为团聚变粗;水泥掺量大于 8%时,土颗粒中出现空间联结结构。湿化成型施工工艺下,水泥掺量大于 8%的水泥改性土,团粒化作用可促使土颗粒形成块状体结构,孔隙间可见纤维状水化物生成。

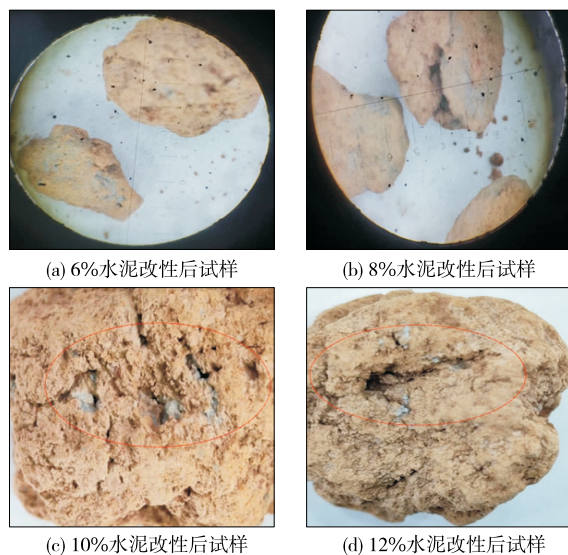


图 12 水泥掺量 6%~12%的水泥改性土试样

4 湿化成型工艺的施工试验及工程应用

为进一步研究湿化成型施工工艺的可行性和室内试验所得工艺参数的适宜性,采用湿化成型适宜施工含水率 38%、水泥掺量 10%的工艺参数,在长沙市紫苑路路堑边坡水毁治理现场进行湿化成型工艺施工试验。施工试验步骤如下:

(1) 初次现场拌和。取天然土料,按照水泥掺量 4%计算水泥用量,并将其倒入土中;采用 2 台 220 型挖掘机进行初次现场拌和,准备工作 1 h,拌和时间不低于 2 h。

(2) 二次现场拌和。对初次现场拌和的土料进行焖料,焖料时间不低于 2 h,之后按初次拌和方法进行二次现场拌和。二次现场拌和前,将初次拌和的土料转入另一拌料场,按适宜施工含水率 38%计算加入水量,以初次拌和时天然土料土方量的 6%计算加入水泥量。

(3) 回填压密施工。完成二次现场拌和后开始

填筑,填筑工艺流程为将填料回填至开挖区底部,进行第1分层摊铺、碾压、拍实找平,以50 cm厚度为一分层,重复进行摊铺、碾压、拍实找平。

(4) 强度检验。施工完成1 d后,现场抽芯取样进行无侧限抗压强度试验。对采用湿化成型工艺施工的改性土进行10组无侧限抗压强度试验,试验结果分别为0.43 MPa、0.40 MPa、0.35 MPa、0.51 MPa、0.39 MPa、0.35 MPa、0.45 MPa、0.43 MPa、0.41 MPa、0.50 MPa,平均值为0.422 MPa,满足挡土墙强度不低于0.40 MPa的要求,说明室内试验确定的湿化成型施工工艺参数适宜,也证实了湿化成型施工工艺的可行性。

2023年3月18—29日,采用湿化成型工艺在长沙市紫苑路水毁滑坡现场进行水泥改性土挡土墙施工。水泥改性土挡土墙采用含水率32%~40%的软可塑状松散滑坡含砂砾粉质黏土为土料,采用湿化成型适宜施工含水率38%、水泥掺量10%的工艺参数按湿化成型工艺施工,11 d(其中阴雨天6 d)顺利完成4 m宽、6 m高、50 m长的水泥改性土挡土墙修筑,实现了利用高含水量的软塑状水毁滑坡土体为主材进行滑坡治理的施工技术突破。工程实践表明,采用湿化成型工艺修筑水泥改性土挡土墙进行水毁滑坡治理,可就地取材,采用高含水量软塑状滑坡土体为挡土墙的主材,利用湿化成型工艺的快速施工特性,实现对水毁滑坡的快速、环保和经济的治理。

5 结论

(1) 以改性土黏聚力来表征粒间胶凝作用的效果,通过含水率及水泥掺量正交试验和直剪试验,得到38%含水率对黏聚力的影响最大,38%含水率对复合黏聚作用的影响显著,湿化成型工艺下试验土料改性土挡土墙的适宜施工含水率为38%。

(2) 湿化成型工艺下,水泥改性土的无侧限抗压强度、变形系数 E_{50} 从水泥掺量8%的0.25 MPa、1.89 MPa分别跃升为水泥掺量10%的0.67 MPa、6.82 MPa,水泥掺量8%为突变点;水泥掺量大于10%的水泥改性土的强度能满足改性土挡土墙强度大于0.40 MPa的要求,湿化成型工艺下试验土料水泥改性土挡土墙的适宜施工水泥掺量为10%。

(3) 水泥掺量8%~15%区段与0~8%区段的特征粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{50} 、 d_{60} 与水泥掺量拟合曲线的斜率比平均值为98.08。水泥掺量低于8%时,团粒

化作用以颗粒增粗为主;水泥掺量高于8%时,团粒化作用除表现为颗粒增粗外,颗粒间还有纤维状水化物生成,说明水泥掺量大于8%时,复合胶凝作用更敏感。水泥掺量大于8%的水泥改性土无侧限抗压强度的突变性增长是水泥掺量大于8%时复合胶凝作用更敏感造成的。

(4) 按适宜施工含水率38%、水泥掺量10%的工艺参数在长沙市紫苑路水毁滑坡现场开展湿化成型工艺施工试验,试验形成的改性土芯样的无侧限抗压强度平均值为0.422 MPa,大于改性土挡土墙无侧限抗压强度不低于0.40 MPa的要求,验证了湿化成型工艺参数及采用湿化成型施工工艺修筑改性土挡土墙治理路堑边坡水毁滑坡的可行性。以高含水量软塑状滑坡土体为挡土墙的主材,利用湿化成型工艺的快速施工特性,能实现路堑边坡水毁滑坡的快速、环保和经济的治理。

参考文献:

- [1] 刘龙武,宁泽宇,李俊,等.半固化可塑土应急填筑工艺研究[J].施工技术(中英文),2022,51(3):54-58.
- [2] 何艳春,成岗,冻融循环作用下水泥改良膨胀土力学性能和胀缩特性研究[J].公路与汽运,2023(3):61-65+72.
- [3] 李迎春,钱春香,刘松玉,等.粉土固化稳定机理研究[J].岩土工程学报,2004,26(2):268-271.
- [4] 李俊才,高国瑞,赵泽三.粉喷法加固软土地基的机理探讨[J].南京建筑工程学院学报(自然科学版),1994(1):8-14.
- [5] 张春雷.基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D].南京:河海大学,2007.
- [6] 陈卫平,陈丽萍,夏玲.益马高速高液限土水泥改良处治及工后沉降分析[J].公路与汽运,2021(2):61-63.
- [7] 高国瑞,李俊才.水泥加固(改良)软土地基的研究[J].工程地质学报,1996,4(1):45-52.
- [8] 龚子龙,孙刚臣,胡跃发,等.水泥加固红粘土的强度特征及微观结构分析[J].土工基础,2018,32(6):633-636.
- [9] 张维刚.水泥加固软土路基的强度特征及微观结构分析[J].北方交通,2006(7):31-34.
- [10] 曹玮,俞瑾,王光达,等.水泥改性土砂化试验研究[J].治淮,2014(8):23-25.
- [11] 龚德峰.改性土砂化机理研究及砂化度评价方法应用[D].长沙:长沙理工大学,2021.