

低液限粉土路基复掺改良试验研究

张明敏

(怀化市公路路政管理支队, 湖南 怀化 418000)

摘要: 采用正交试验和极差分析法, 对低液限粉土进行复掺改性试验, 结果表明掺加膨润土能明显改善粉土的密实度, 掺量为 9% 时干密度和回弹模量达到最大值; 对低液限粉土进行强度及压缩性复掺改良试验, 并通过极差分析计算, 确定低液限粉土的最佳改良掺比为水泥 4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰 4%+聚丙烯纤维 0.3%; 在复掺配比的基础上进行掺入和未掺入膨润土物理力学参数对比, 掺入 9% 膨润土后粉土的抗弯沉性能更佳, 最佳复掺配比为水泥 4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰 4%+聚丙烯纤维 0.3%+膨润土 9%。

关键词: 公路; 低液限粉土; 底基层; 改性试验

中图分类号: TU416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0055-03

低液限粉土直接应用于路面底基层容易产生弯沉问题, 对粉土进行改性是当前处理低液限粉土地基的主要手段之一。但由于低液限粉土具有孔隙率高、级配不良、抗剪强度低、压缩性大等特性, 单掺水泥或双掺水泥+粉煤灰等均不能达到预期改良效果。因此, 对低液限粉土进行复掺改性试验成为工程界的热门课题。张笑峰等采用正交试验法, 对不同粉煤灰、石灰、纤维掺量及纤维长度下改良粉土进行对比试验, 根据试验结果建立了最佳配比的经验公式。姜冲等以水玻璃模数为变量, 分析 2.6~2.9 和 3.1~3.4 两种模数下粉土改良效果, 发现 3.1~3.4 模数下改良土早期强度更大, 而 2.6~2.9 模数下土强度的改良效果更佳。封喜波分析不同掺入比下石灰、水泥对粉土强度的改良效果, 认为改良低液限粉土时石灰最佳掺量为 6%、水泥为 4%。李志涛等开展纯石灰和石灰水泥混合物改良低液限粉土试验研究, 通过对比得出纯石灰改良效果更佳, 其最佳掺量为 7%。该文采用掺膨润土改良粉土密实度低、级配不良的特性, 选择水泥、水玻璃、氯化钙、石灰及纤维复掺改良粉土低强度、压缩性大的特性, 对低液限粉土减小底基层弯沉值进行复掺改性对比试验, 为低液限路基底基层加固材料选取提供参考。

1 试验概况

1.1 试验原材料

试验粉土取自某高速公路路基, 根据室内试验结果(见表 1)判断其为级配不良、中等压缩的低液限粉土。

表 1 试验粉土的物理力学参数

项目	数值	项目	数值
不均匀系数	17.5	黏聚力/kPa	6.1
曲率系数	4.5	内摩擦角/(°)	21.1
液限/%	26.0	压缩系数/MPa ⁻¹	0.135
塑限/%	16.6	>0.075 mm 粒径含量/%	≤25
塑性指数	9.3		

其他试验材料: 1) 膨润土。其主要化学成分包括 SiO₂、Al₂O₃。2) 水泥。采用普通硅酸盐水泥, 标号为 PO42.5。3) 水玻璃。其波美度为 50, 比重约为 1.52 g/cm³, 模数为 2.6~2.9。4) 氯化钙。采用无水氯化钙颗粒, 溶于水后形成溶液再掺入粉土。5) 石灰。采用生石灰, 其主要成分为氧化钙。6) 纤维。采用聚丙烯纤维, 长度 9 mm。

1.2 试验配比设计

试验共分为 3 个部分: 1) 密实度改良试验。该试验的外掺料为膨润土, 其具有良好的膨胀性、吸附性和黏结性, 能增强粉土颗粒之间的黏结性能, 提高粉土的整体密实度。膨润土掺比分别为 0、3%、6%、9% 和 12%。2) 强度和压缩性改良试验。该试验采用水泥、水玻璃、氯化钙、石灰及聚丙烯纤维复掺进行正交改良, 试验配比见表 2。3) 通过上述 2 项试验结果进行配比改良试验, 得到最佳配比。

2 试验结果分析

2.1 密实度改良结果

不同膨润土掺量在最佳含水率下的击实干密度和回弹模量见图 1。

表2 正交试验配比

试验组号	水泥/%	水玻璃:氯化钙	石灰/%	聚丙烯纤维/%
1	2	2:1	2	0.2
2	2	3:1	3	0.3
3	2	3:2	4	0.4
4	3	2:1	3	0.4
5	3	3:1	4	0.2
6	3	3:2	2	0.3
7	4	2:1	4	0.3
8	4	3:1	2	0.4
9	4	3:2	3	0.2

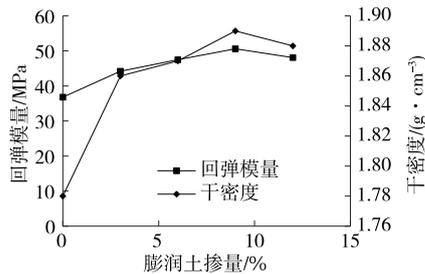


图1 密实度改良结果

从图1可以看出:随着膨润土掺量的增加,改良粉土的回弹模量和干密度呈先增大后减小的变化趋势,膨润土掺量为9%时回弹模量和干密度达到最大值,分别为50.6 MPa和1.89 g/cm³;与未掺入膨润土时相比,最大回弹模量从36.8 MPa增加至50.6 MPa,增幅36.96%,干密度从1.68 g/cm³增至1.89 g/cm³,增幅6.18%。掺入膨润土后,粉土的密实度明显提高,回弹模量也有较大幅度提升,对于减小基层弯沉值具有重要作用。由于膨润土颗粒较细,其高离子吸附性和黏结性能保证膨润土进入粉土孔隙中并紧紧吸附于粉土颗粒表面,从而使粉土密实度提高,回弹模量增大。

2.2 强度及压缩性改良结果

各试验组的抗剪强度参数(300 kPa下压实度97%)变化情况见图2,无侧限抗压强度和回弹模量

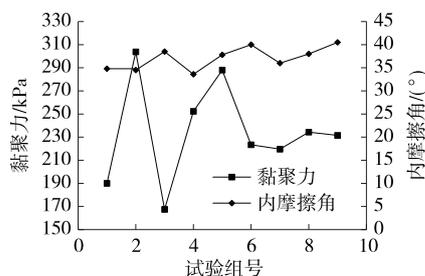


图2 抗剪强度试验结果

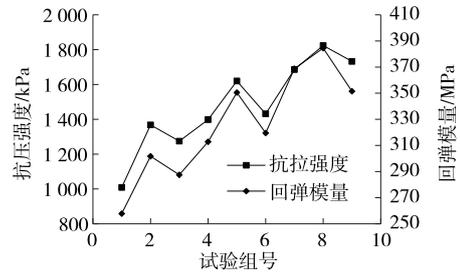


图3 抗压强度和回弹模量试验结果

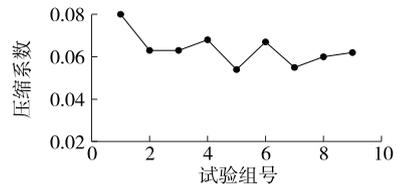


图4 压缩系数试验结果

变化情况见图3,压缩系数变化情况见图4。

从图2可以看出:9组试验中,试验组2的黏聚力最大,达303.8kPa,试验组3的黏聚力最小,仅为167.5 kPa;试验组9的内摩擦角最大,为40.5°,试验组4的内摩擦角最小,为33.6°。综合来讲,试验组2(水泥2%,水玻璃:氯化钙=3:1,石灰3%,聚丙烯纤维0.3%)和试验组5(水泥3%,水玻璃:氯化钙=3:1,石灰4%,聚丙烯纤维0.2%)的性能最佳,此时黏聚力和内摩擦角达到较高水平。

从图3可看出:9组试验中,抗压强度和回弹模量呈同一变化特征,即随着水玻璃:氯化钙比值的增加而变化,水玻璃:氯化钙的比值从2:1增至3:1时抗压强度和回弹模量逐渐增加,水玻璃:氯化钙的比值从3:1下降至3:2时抗压强度和回弹模量有所减小,表明改良粉土的强度和回弹模量主要取决于水玻璃:氯化钙的取值。在同一水玻璃:氯化钙比值下,水泥含量越高,强度和回弹模量越大,表明除水玻璃:氯化钙取值外,水泥也是影响改良粉土的重要因素。这是因为水泥、水玻璃和氯化钙在改良过程中会发生反应生成一定的凝胶产物,能对粉土的孔隙进行有效填充,同时由于胶凝物的强胶结能力使改良粉土的强度和模量均大幅提升。采用试验组8的配合比时,强度和回弹模量表现最佳。

从图4可看出:与低液限粉土的压缩系数相比,复掺各材料后各试验组的压缩系数均大幅下降,其中试验组5、7的压缩系数值最小,分别为0.054和0.055。这两组试验的石灰掺量均为4%,表明石灰对粉土压缩性的影响最大,其次为水泥。这是因为

石灰属于气硬性胶凝材料,具有保水性好等特点,通过反应生成的水硬物质强度高、水稳定性好,故压缩系数更小。

2.3 配合比优化

根据上文分析,水泥、水玻璃—氯化钙溶液、石灰及聚丙烯纤维对低液限粉土各项指标的改善均有一定贡献,但贡献情况各不相同,为确定其最佳改良配比,对试验数据进行极差分析。分别用 A、B、C、D 表示水泥、水玻璃—氯化钙溶液、石灰及聚丙烯纤维,用 K_i 表示各因素在相同水平下的和, k_i 表示各因素在相同水平下的平均值, R_i 表示各因素的极差,其值越大,对指标的影响程度越大。极差分析结果见表 3。从表 3 可看出:水玻璃—氯化钙溶液 B

对改良粉土抗剪强度指标(黏聚力和内摩擦角)的影响最大,其次为石灰 C、水泥 A 和聚丙烯纤维 D;各因素对抗压强度和回弹模量改良效果的影响程度依次为水泥 A、水玻璃—氯化钙溶液 B、石灰 C 和聚丙烯纤维 D;各因素对压缩系数改良效果的影响程度依次为石灰 C、水泥 A、水玻璃—氯化钙溶液 B 和聚丙烯纤维 D。回弹模量和压缩系数的最佳配比均为 A3B2C3D2,黏聚力、内摩擦角、抗压强度的最佳配比分别为 A2B2C2D2、A3B3C1D1 和 A3B2C3D3。从单个因素来看,A3 被选择 4 次,B2 被选择 5 次,C3、D3 分别被选择 3 次。综上,确定低液限粉土的最佳改良掺比为水泥 4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰 4%+聚丙烯纤维 0.3%。

表 3 极差分析结果

参数	黏聚力/kPa				内摩擦角/(°)				抗压强度/kPa				回弹模量/MPa				压缩系数/MPa ⁻¹			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
K_1	661.3	661.9	647.5	709.5	107.8	104.4	112.5	113.2	3 652.3	4 093.4	4 263.2	4 362.3	846.8	939.4	961.5	960.1	0.206	0.202	0.207	0.196
K_2	763.5	825.9	787.7	746.7	111.5	110.2	108.7	110.5	4 450.1	4 811.3	4 499.3	4 485.9	982.8	1036.5	966.3	989.7	0.189	0.177	0.195	0.184
K_3	685.3	622.3	674.8	653.7	111.4	118.8	112.2	110.1	5 241.4	4 439.1	4 580.9	4 495.51	104.5	958.5	1 006.8	984.7	0.175	0.193	0.170	0.191
k_1	220.4	220.6	215.8	236.5	35.9	34.8	37.6	37.8	1 217.4	1 364.5	1 427.1	1 454.1	282.3	313.2	320.5	320.1	0.069	0.067	0.068	0.065
k_2	220.4	220.6	215.8	236.5	37.1	36.7	36.2	36.8	1 483.4	1 603.8	1 499.8	1 495.3	327.6	345.5	322.1	329.9	0.062	0.059	0.064	0.060
k_3	228.5	207.4	224.9	224.8	38.1	39.6	37.4	36.7	1 747.1	1 479.7	1 527.0	1 498.5	368.2	319.5	322.1	328.2	0.058	0.065	0.056	0.065
R	34.1	67.9	46.4	31.0	2.3	4.8	1.2	1.1	529.7	239.3	99.9	44.5	85.9	32.4	15.1	9.9	0.010	0.008	0.012	0.004
排序	B>C>A>D				B>A>C>D				A>B>C>D				A>B>C>D				C>A>B>D			
优水平	A2	B2	C2	D2	A3	B3	C1	D1	A3	B2	C3	D3	A3	B2	C3	D2	A3	B2	C3	D2
优组合	A2B2C2D2				A3B3C1D1				A3B2C3D3				A3B2C3D2				A3B2C3D2			

结合上文分析得到的膨润土最佳掺量为 9%,对 A3B2C3D2+9%膨润土和 A3B2C3D2+不加膨润土的改良粉土的物理力学性能进行对比,结果见表 4。从表 4 可看出:与不掺膨润土时相比,掺加 9%膨润土后,改良粉土的最大干密度、黏聚力、内摩

擦角、抗压强度、回弹模量均有所提升;与只掺加膨润土时相比,干密度略有降低,但回弹模量大幅提升。综上,确定低液限粉土的最佳复掺配比为水泥 4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰 4%+聚丙烯纤维 0.3%+膨润土 9%。

表 4 膨润土掺入前后的物理力学参数对比

复掺配比	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含 水率/%	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	无侧限抗 压强度/MPa	压缩系数/ MPa ⁻¹	回弹模量/ MPa
A3B2C3D2+ 膨润土 9%	1.79	17.9	275.6	42.1	2.35	0.003 0	1 268.0
A3B2C3D2+ 不加膨润土	1.74	17.5	245.5	38.8	2.08	0.003 9	1 078.5

3 结论

(1) 膨润土具有高强离子吸附性和黏结性,对低液限粉土的密实度具有良好的改良效果,其最佳掺量为 9%。

(2) 低液限粉土的最佳改良掺配比列为水泥 4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰 4%+聚丙烯纤维 0.3%。

(3) 掺入 9%膨润土后,粉土的抗弯沉性能更
(下转第 60 页)

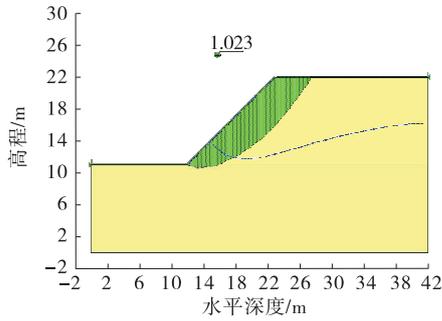


图5 降雨停止时边坡潜在滑动面及安全系数

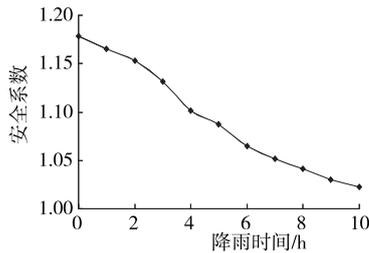


图6 边坡安全系数随时间的变化

4 结论

(1) 降雨入渗将导致边坡内土体基质吸力降低甚至消失,导致边坡抗剪强度减小。同时雨水入渗会增大入渗区域暂态水荷载。

(2) 在基质吸力降低与暂态水荷载增大的双重作用下,土质边坡安全系数明显下降。

(3) 短时强降雨天气下土质边坡容易发生失稳,在这些季节进行边坡施工应特别注意对边坡进行及时支护及监测。

参考文献:

[1] 孙广忠.中国典型滑坡[M].北京:科学出版社,1998.
 [2] 张有天.岩石高边坡的变形与稳定[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
 [3] 周桂云,李同春.饱和-非饱和和非稳定渗流作用下岩质边坡稳定性分析[J].水电能源科学,2006,24(5):79-82.
 [4] 毛昶熙.渗流数值分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
 [5] FREDLUND D G, VANAPALLI S K, XING A, et al. Predicting the shear strength function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve[C]//Proceedings of First International Conference on Unsaturated Soil(I).Paris: International Academic Publishers,1995:189-193.
 [6] FREDLUND D G.Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction[M]//Slope Stability. New York:Wiley,1987:113-144.
 [7] 黄润秋,戚国庆.非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J].工程地质学报,2002,10(4):343-348.

收稿日期:2019-10-15

 (上接第57页)

佳。低液限粉土的最佳复掺配比为水泥4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰4%+聚丙烯纤维0.3%+膨润土9%。

参考文献:

[1] 殷成胜.低液限粉土路基碾压施工技术研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,32(5):52-55.
 [2] 郑建东,刘典基,肖丽君.不同应力路径下低液限粉土力学特性三轴试验研究[J].工业建筑,2012,42(增刊1):368-373.
 [3] 张燕明,刘怡林,李小旋.基于统计分析的粉土区域变化规律及其物理力学性质研究[J].公路交通科技,2018,35(5):24-33.
 [4] 秦李林.低液限粉土路基填料施工技术研究[J].施工技术,2016,45(10):104-107+112.
 [5] 严筱,冯志超,黄国卿.高速公路低液限粉土路基施工

技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019(2):47-49.
 [6] 崔伟,吕高航,刘春阳.低液限粉土的力学性能改善及试验分析[J].科学技术与工程,2018,18(8):302-306.
 [7] 张笑峰,张艳美,刘锦程,等.纤维与粉煤灰改良粉土的正交试验分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(1):36-40.
 [8] 李志涛,吴子龙,邓永锋.江广高速公路低液限粉质黏土路用改性试验研究[J].公路与汽运,2015(1):98-101.
 [9] 姜冲,黄珂,杜伟,等.水玻璃改良低液限粉土的室内试验研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(4):42-46.
 [10] 封喜波.不同无机结合料改良低液限粉土工程特性试验研究[J].交通世界,2018(31):131-133.

收稿日期:2019-12-13