

# 含黏粒砂土颗粒级配对渗透性的影响研究

许兆栋<sup>1</sup>, 李鸣<sup>1</sup>, 洪昌伟<sup>2</sup>, 胡其志<sup>2</sup>

(1. 中交路桥南方工程有限公司, 北京市 101149; 2. 湖北工业大学 土建学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:**广西宾阳地区广泛分布着含黏粒砂土,是常用的路基填方材料,在其中加入一定量黏粒可以改变土体的颗粒级配特性,获得较好的填方效果,但也会对土体的渗透特性产生影响进而影响路基填方质量。通过对掺加黏粒的砂土进行颗粒级配分析试验,获得不同黏粒含量砂土的不均匀系数和曲率系数;对具有不同级配指标的含黏粒砂土进行变水头渗透试验,分别得到不均匀系数、曲率系数与渗透系数之间的关系。试验结果表明:随着含黏粒砂土的不均匀系数逐渐增大,其渗透系数不断减小;而随着曲率系数的逐渐增大,渗透系数出现由小到大的渐变变化过程;不均匀系数的增大使土颗粒的限定粒径增大,在相同空隙率下能填充的粒径也越多,孔隙填充更充分,进一步减小渗透系数,降低渗透性。

**关键词:** 含黏粒砂土; 级配指标; 渗透试验; 路基填方

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

含黏粒砂土早期被归为红土一类,直至20世纪90年代才作为区域性特殊土进行研究。含黏粒砂土在中国东南地区分布十分广泛,特别是在广西宾阳地区,该地区修建高速公路常用含黏粒砂土作为路基填筑材料,但该地区丰富的降雨量容易造成含黏粒砂土路基出现砂土流失,严重时容易产生路基不均匀沉降,从而破坏路基。因此,分析含黏粒砂土路基渗透机理,研究影响其渗透性的因素,是改善含黏粒砂土路基稳定性的主要途径。一些学者就含黏粒类砂性土的渗透性做了一系列的研究。周毅等<sup>[1]</sup>通过对不同颗粒成分的含黏粒砂土进行渗透试验,研究了不同颗粒成分对含黏粒砂土渗透性、强度等影响规律;苏立君等<sup>[2]</sup>通过对不同粒径砂土的渗透特性进行试验研究,讨论了不均匀系数和曲率系数等级配参数对砂土渗透性的影响;齐俊修等<sup>[3]</sup>通过试验验证和理论分析结合的方法,对不均匀系数 $C_u \leq 5$ 的无黏性土的渗透变形类型进行了统计分析研究;马显东等<sup>[4]</sup>采用渗透试验和强度对比试验研究了生态护坡中不同配比的基质强度与渗透性之间的关系;朱崇辉等<sup>[5]</sup>通过对不同级配粗粒土进行渗透试验和相关性分析,指出不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 与粗粒土渗透系数之间存在较强相关性,并将太沙基公式修正为与级配参数相关的表达式;杨兵等<sup>[6]</sup>通过常水头渗透试验,研究了不均匀系数和曲率系数等级配参数对砂土渗透系数的影响;杨永亮

等<sup>[7]</sup>对掺加不同含量偏高岭土的砂质水泥土进行了渗透试验,研究了不同龄期对其渗透特性的影响;任玉宾等<sup>[8]</sup>通过对钙质砂进行常水头渗透试验和SEM扫描电镜试验,探究了不均匀系数和曲率系数对钙质砂渗透性的影响,并对其颗粒形状进行了定量描述;金建立<sup>[9]</sup>利用大三轴试验系统对藏东南地区粗颗粒土的渗透特性进行了研究,讨论了不同级配、不同应力水平下土体的渗透特性变化规律;刘勇等<sup>[10]</sup>通过室内渗透试验研究了颗粒级配、粒径等对砂土渗透系数的影响。通过室内渗透试验研究土颗粒粒径、级配等对砂土渗透系数的影响规律;王力等<sup>[11]</sup>通过对不同黏粒含量黄土进行饱和和渗透试验和SEM扫描电镜试验,研究黏粒含量和初始含水率对黄土渗透性的影响,并结合微观结构解释其影响机理;郭庆国<sup>[12]</sup>通过对含粗细料无黏性土的渗透试验研究,发现了粗细粒相对含量对无黏性土渗透性强弱和渗透稳定性评判具有十分重要的作用;杨靖等<sup>[13]</sup>通过对砂性土进行渗透试验和颗粒分析,研究了颗粒级配分维值与不均匀系数之间的关系。

综上所述,针对广西宾阳地区的含黏粒砂土掺加黏粒进行改良,并对改良后的级配指标与渗透特性研究较少。实际上,在广西宾阳地区,添加一定黏粒含量的砂土常常用于高速公路的路基填方工程,其渗透性直接影响填方质量。对于填方材料需要适当的颗粒级配指标,而对于黏粒混合砂土的混合土体,其渗透性与

颗粒级配具有一定的相关性,都是影响填方质量的关键指标。因此,该文针对不同红黏土掺量时的含黏粒砂土进行一系列室内试验,研究不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  对含黏粒砂土渗透性的影响,为含黏粒砂土在丰雨地区的路基填方工程提供相关理论和工程实践指导。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验用含黏粒砂土和红黏土均取自广西宾阳贵龙高速公路 GLC-TJ4 合同段。在现场选取具有代表性的大面积地段开挖,挖开深度 2~4 m,取出新鲜土体并用保鲜膜包裹放到试验室备用。在试验室内风干后的土样如图 1 所示。对风干后的土样分别进行基本物理指标测试,结果见表 1。红黏土和含黏粒砂土级配曲线如图 2 所示。

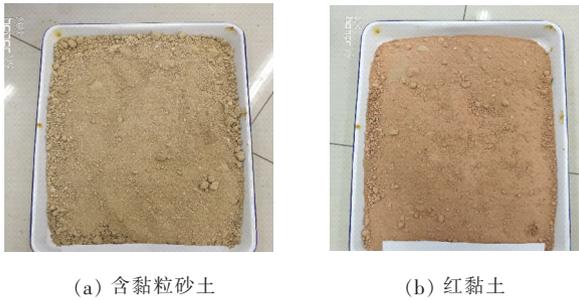


图 1 含黏粒砂土和红黏土

表 1 试验材料的物理指标

试验土样	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最优含 水率/ %	最大干 密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
红黏土	46.8	23.5	23.3	13.8	1.79
含黏粒砂土	34.8	18.2	16.6	8.4	2.00

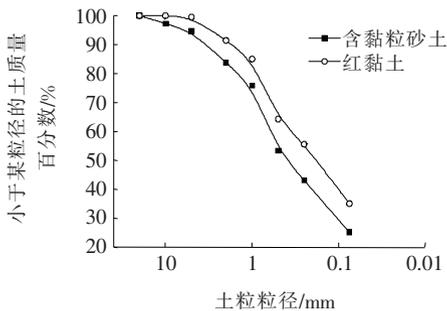


图 2 红黏土和含黏粒砂土的颗粒级配曲线

含黏粒砂土具有高孔隙比、低含水量、低液塑限等良好的物理特性,还具有高强度和低压缩性的力学特性;天然红黏土具有高孔隙比、高含水量、高液塑限与塑性指数较高,但同时又具有高强度、低压缩性等良好力学性质<sup>[14]</sup>。将两者进行合理配比,可以获得较好的密实度和适宜的渗透特性,对保证填方路基的质量具有重要意义。

### 1.2 试样制备

取一定量的含黏粒砂土和红黏土风干土样,在含黏粒砂土中分别掺加 20%、30%、40%、50%、60% 的红黏土,将混合后的土样充分搅拌均匀备用。不同黏粒含量的土样分别编号为 A、B、C、D、E 共 5 组,每组准备 5 个相同的试样,每个试样的编号分别为 1~5,一共 25 个试样。试样编号如表 3 所示。对每组混合土样按 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行标准筛分试验,测得掺加不同红黏土的混合土样的不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  如表 2 所示。

表 2 颗粒级配系数随红黏土掺量变化的相关数值

红黏土掺量/%	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
20	3.13	1.05
30	3.53	0.95
40	3.54	0.87
50	3.59	0.76
60	3.67	0.62

按照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》,采用 YDT-I 击实仪对试样进行标准击实试验,得到 5 组混合土体的最大干密度和最优含水量,见表 3。

表 3 试样制备分组

组别	试件编号					最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最优含 水率/%
A	A1	A2	A3	A4	A5	2.02	8.0
B	B1	B2	B3	B4	B5	1.99	9.0
C	C1	C2	C3	C4	C5	1.97	9.6
D	D1	D2	D3	D4	D5	1.94	10.8
E	E1	E2	E3	E4	E5	1.90	11.9

取每组土样若干,在击实仪上进行标准击实。每组土样(相同压实度)击实后制成 5 个  $\phi 61.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的标准试样。将制备好的试样放在真空气缸内进行抽气饱和和处理,饱和 4 h 并浸水饱和 12 h,获得饱和试样用于变水头渗透试验。

1.3 渗透试验

将制备好的不同黏粒含量、不同级配指标但具有相同压实度的5组共25个试样分别进行渗透试验。渗透试验时同时测量渗透水流的温度。根据变水头渗透试验所测出来的数据,按式(1)计算渗透系数:

$$K_T = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \quad (1)$$

式中: $K_T$ 为试验水温下试样的渗透系数(cm/s); $a$ 为变水头管的横截面过水面积( $\text{cm}^2$ ); $A$ 为试样横截面面积( $\text{cm}^2$ ); $L$ 为水渗流的流程,即试样高度(cm); $t_1$ 、 $t_2$ 分别为测读水头起始、终止时间(s); $H_1$ 、 $H_2$ 分别为起始、终止水头高度(cm)。

试验后将室温下测得的渗透系数,按照式(2)换算成20℃标准水温下的渗透系数:

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (2)$$

式中: $\eta_T$ 、 $\eta_{20}$ 分别为试验水温时、标准温度为20℃时水的动力黏滞系数( $\text{kPa} \cdot \text{s}$ )。

2 试验结果分析

表4为参加不同红黏土,具有不同颗粒级配指标的含黏粒砂土渗透系数值。

表4 各组试样的渗透系数值

组号	试样编号	$K_T / (10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$T / ^\circ\text{C}$	$\eta_T / \eta_{20}$	渗透系数/ ( $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
					$K_{20}$	$\bar{K}_{20}$
A	A1	28.30	13.5	1.176	3.33	3.35
	A2	27.40	13.5	1.176	3.22	
	A3	27.50	13.4	1.180	3.25	
	A4	30.00	13.3	1.183	3.55	
	A5	27.40	11.3	1.250	3.42	
B	B1	14.20	13.4	1.180	1.68	1.84
	B2	15.30	13.4	1.180	1.81	
	B3	14.80	13.4	1.180	1.75	
	B4	17.20	13.3	1.183	2.04	
	B5	16.30	13.3	1.183	1.93	
C	C1	11.60	13.4	1.180	1.37	1.23
	C2	9.41	13.4	1.180	1.11	
	C3	10.60	13.3	1.183	1.25	
	C4	10.70	13.3	1.183	1.27	
	C5	9.04	11.3	1.250	1.13	

续表4

组号	试样编号	$K_T / (10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$T / ^\circ\text{C}$	$\eta_T / \eta_{20}$	渗透系数/ ( $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
					$K_{20}$	$\bar{K}_{20}$
D	D1	10.70	13.4	1.180	1.26	1.18
	D2	9.80	13.0	1.194	1.17	
	D3	10.40	13.0	1.194	1.24	
	D4	9.33	12.7	1.200	1.12	
	D5	8.86	11.9	1.230	1.09	
E	E1	8.86	12.9	1.197	1.06	1.09
	E2	9.92	13.4	1.180	1.17	
	E3	8.60	12.9	1.197	1.03	
	E4	9.50	12.7	1.200	1.14	
	E5	8.54	11.9	1.230	1.05	

2.1 不均匀系数  $C_u$  对渗透性的影响

取每组中5个试样渗透系数的平均值,获得渗透系数与不均匀系数  $C_u$  的关系曲线如图3所示。

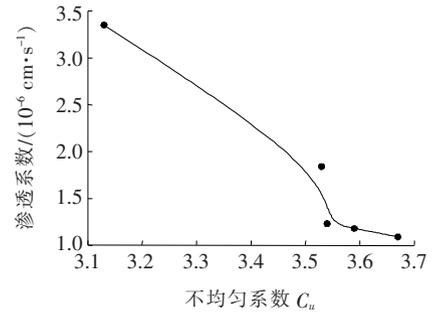


图3 渗透系数与不均匀系数  $C_u$  关系曲线

由图3可知:随着不均匀系数的增大,含黏粒砂土的渗透系数出现减小趋势,且减少幅度开始较大,稍后逐渐平缓。不均匀系数增大较多时,其渗透系数减小较多; $C_u$  增大较少时,其对应的渗透系数减小不明显。

分析其原因,颗粒级配中不均匀系数  $C_u$  主要反映的是土体中土颗粒的离散程度。当红黏土掺量越多,由于红黏土粒径较小,混合土体中粒径的变化范围也就越大,导致土体中限定粒径与有效粒径的比值增大,含黏粒砂土的不均匀系数就越大,最终颗粒级配曲线就表现为更加连续。不同红黏土掺量下的含黏粒砂土不均匀系数  $C_u$  均小于5,说明其级配不良。在此情况下,颗粒级配曲线越连续,粒径大小相差越大。因此,含黏粒砂土中骨架颗粒间的孔隙被红黏土中的黏粒颗粒填充得更加完全,致使含黏粒砂土中的孔隙减小,渗透系数也减小。

## 2.2 曲率系数 $C_c$ 对渗透性的影响

图 4 为含黏粒砂土渗透系数与曲率系数  $C_c$  的变化曲线。

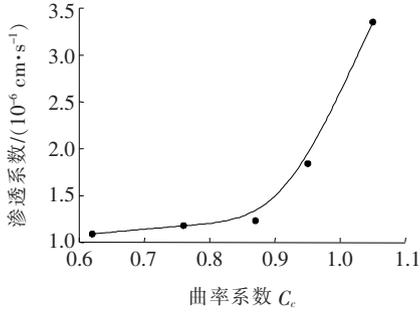


图 4 渗透系数随曲率系数  $C_c$  变化曲线

由图 4 可知:随着曲率系数的增大,含黏粒砂土的渗透系数逐渐增大,趋势是先平缓后陡峭。 $C_c=1$  是渗透系数变化分界线, $C_c$  从大于 1 减小到 1 时,含黏粒砂土渗透系数减小约 1 倍, $C_c$  在区间(0,0.9)内减小时,其对应的渗透系数减小不明显。

分析其原因,颗粒级配指标曲率系数  $C_c$  主要是反映土体颗粒组成中粒径大小的数值是否连续。曲率系数过大或者过小都会反映在级配曲线上,表现出曲线的斜率不连续,在级配曲线上出现若干个平台段。这种曲线表明了含黏粒砂土中某一粒径的颗粒过多,或者说缺乏某一粒径区间的土粒。在含黏粒砂土中,随着红黏土掺量的增加,曲率系数减小,两种颗粒组成的级配曲线连续性越好,使含黏粒砂土颗粒间的孔隙能得到有效填充,致使土体间的孔隙体积减小,使得含黏粒砂土的渗透系数减小,渗透性降低。

## 2.3 颗粒粒径的影响

含黏粒砂土在颗粒组成成分近似的情况下,随着红黏土掺量的增加,其黏土颗粒也增加。由于含黏粒砂土的不均匀系数随着红黏土掺量的增加而增大,在有效粒径不变的情况下使限定粒径也在不断增大。一定体积的含黏粒砂土,随着限定粒径的增大,粒径区间在增大,在相同空隙率下能填充的粒径也越多,孔隙填充得更充分,空隙率也越小,从而进一步减小渗透系数,降低渗透性。

## 3 结论

通过对不同红黏土掺量获得不同颗粒级配的含黏粒砂土进行变水头渗透试验,并对级配曲线中不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  进行分析,得出以下主要

结论:

(1) 掺加一定量的红黏土可以有效改善含黏粒砂土的压实特性,获得质量较好的路基填方材料。但掺加红黏土后,改变后的含黏粒砂土级配指标对土体的渗透性有一定的影响。

(2) 不同掺量的含黏粒砂土中,随着级配指标不均匀系数的增大,含黏粒砂土的渗透系数不断减小,二者呈负相关关系;随着级配指标曲率系数的增大,含黏粒砂土的渗透系数逐渐增大,二者呈正相关关系。

(3) 掺加红黏土可以改变混合土体中颗粒粒径组成,通过改变限定粒径的值从而影响孔隙的填充,进一步减小渗透系数,降低渗透性。

## 参考文献:

- [1] 周毅,吴梦丽,龙志东.不同颗粒成分对花岗岩残积土路堤边坡稳定性的影响[J].公路与汽运,2019(4):62-64,69.
- [2] 苏立君,张宜健,王铁行.不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(5):1289-1294.
- [3] 齐俊修,赵晓菊,刘艳,等.不均匀系数  $C_u \leq 5$  的无黏性土的渗透变形类型统计分析研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(12):2554-2562.
- [4] 马显东,刘强,褚保镇,等.预制基质客土的强度及渗透性试验研究[J].中外公路,2019,39(4):243-247.
- [5] 朱崇辉,刘俊民,王增红.粗粒土的颗粒级配渗透系数的影响规律研究[J].人民黄河,2005(12):79-81.
- [6] 杨兵,刘一飞,万奋涛,等.级配特性对砂土渗透系数影响试验研究[J].西南交通大学学报,2016,51(5):855-861.
- [7] 杨永亮,王鹏云,王林浩,等.偏高岭土对水泥砂土渗透性的影响研究[J].中外公路,2018,38(6):232-234.
- [8] 任玉宾,王胤,杨庆.颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J].岩土力学,2018,39(2):491-497.
- [9] 金建立.藏东南地区粗粒土三轴渗透试验研究[J].中外公路,2020,40(4):261-263.
- [10] 刘勇,赵燕容.砂土渗透系数影响因素试验研究[J].江苏建筑,2017(5):88-90,106.
- [11] 王力,李喜安,何军,等.不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究[J].水土保持通报,2018,38(2):95-101.
- [12] 郭庆国.粗粒土的工程特性及应用[M].郑州:黄河水利出版社,1998.
- [13] 杨靖,汪吉林.砂性土渗流的分型特征研究[J].煤田地质与勘探,2010,38(2):42-45.
- [14] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等.广西原状红粘土力学性状与水敏性特征[J].岩土力学,2003,24(4):568-572.