

重粉质黄土淤地筑坝特性研究

张慎强, 朱首军*, 刘玉兰

(西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 试验以陕西省白水縣西武村附近流域的黄土作为研究对象,按照土工试验规程(SL237-1999)进行分类、击实、剪切、压缩等各项试验,对试验结果进行了统计分析。分析结果表明,该流域黄土的 $C_u>5$, $C_c\in(1,3)$; 小于 0.005 mm 的土粒、有机质和可溶性盐的百分含量分别为 24.5%、2.4%和 4.5%;最大干密度 ρ_{dmax} 和最优含水率 ω_p 的均值 μ 的 95% 的置信区间分别为 [1.76, 1.78] 和 [15.18, 16.36];施加压力接近 110 kPa 时,曲线出现拐点且压缩系数 a_v 等于 0.1 MPa⁻¹ 是高压缩性和低压缩性的分位点;渗透系数介于 $8.8\times10^{-5}\sim3.9\times10^{-5}$ 之间;直剪试验结果表明,该地区土料粘聚力 C 和内摩擦角 φ 分别为 50.20 kPa 和 25.96°;而三轴剪切试验结果是:粘聚力 C 介于 48~88 kPa,内摩擦角 φ 为 23.54°。由此得出该地区重粉质壤土粒径分布不均匀且级配良好,是合适的工程填料;能满足水坠坝规范要求;在最优含水率前后,压实质量受含水率的影响敏感性具有同等程度;当压力大于 110 kPa,压力增大而土体的体积基本保持不变;该地区重粉质壤土适用于均质坝的防渗土料,也可作为水坠坝的填料;在边坡稳定演算时内摩擦角采用 23.54°。

关键词: 重粉质黄土;淤地筑坝;土工特性

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)03-0119-08

近年来黄土高原快速发展起来的坝系农业,拓展了水坠坝的发展空间。然而水坠坝地修筑仍然受到地域土壤特性的限制,特别在黄土高原南部,群众建造水坠坝,对土壤仅仅凭借肉眼和手感进行野外鉴别,施工过程中造成坐滑和流滑等不必要事故,使水坠坝在该地区的推广受到很大的阻力。

据现有资料表明,该地区土壤最优含水率、压缩性、渗透性和强度等指标的实验研究十分缺乏,为了解决这些问题,进一步论证黄土高原南部重粉质壤土作为修建水坠坝材料的可行性,开展了以下科研工作。

1 重粉质壤土的形成机理

重粉质壤土的三相物质的成分、相互关系和作用是十分复杂和各不相同的。其主要原因是重粉质壤土的生成条件和生成历史有其独特性。

重粉质壤土是地壳表层的岩石长期经受风化作用和水流、冰川、风等自然力的剥蚀、搬运及堆积作用而形成的松散沉积物,其历史在地质年代中一般较短,多数是在一百万年内,即属于第四纪沉积。就土的沉积类型而言,黄土高原南部重粉质壤土属于风积土。是由于风力的地质作用,包括风夹带砂砾对岩石的打磨和风对岩石碎屑的吹扬、搬运及沉积作用而形成的。其主要特点是大空隙、垂直节理发

育、可溶盐胶结、不同程度湿陷。受沉积年代的影响,一般生成年代越久,压缩性就越小。反之,新近沉积的土质较松软,工程性质较差^[1]。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验材料取自黄土高原南部陕西白水縣尧禾镇西武村附近大沟流域。料场占地面积大,地势平缓,可用层深厚而稳定,土层结构简单,属“Ⅰ”类料场^[2]。

2.1.1 现场探坑布置与抽样方法 首先铲除 1 m 厚的清基层,使表面的杂草、树根及腐殖质土和其它杂物彻底清除,然后以“S”型物探线布置 5 个探坑,探坑间距 50 m,每个探坑分 2 层(用 N_{ij} 表示第 i 号探坑的第 j 层,其中 $i=1,2,\dots,5$; $j=1,2$) 取样,层间间距 2 m。此文中用变量 KW 表示不同的探坑位置,变量 CW 表示不同层的位置。探坑借助人工完成,所有操作严格按照《原状土取样技术标准》(JGJ89-92)要求实施,所用取土器为环刀。现场土层较为均匀,浅黄色,含有少量结核,崩解速度为 25 min,其主要物理性质见表 1^[3]。对不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 和小于 0.005 mm 土粒含量的试验结果用 SPSS 15.0 (本文统计分析均由该软件完成)进行单因变量多因素方差分析,结果见表 2^[4]。

收稿日期: 2008-11-30
基金项目: 西北农林科技大学科研创新团队支持计划; 陕西省水土保持局淤地坝建设基金(K332020806)
作者简介: 张慎强(1977—), 男, 甘肃靖远人, 在读硕士, 研究方向为水利工程。
* 通讯作者: 朱首军(1965—), 男, 江苏沛县人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: zhushoujun@mwsuaf.edu.cn.
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 试验土料的物理性指标

Table 1 Physical indicators of the experimental soil material

土壤类型 Soil type	土样编号 Number	比重 Specific gravity G_s	液限 Liquid limit W_L	塑限 Plastic limit W_P	塑性指数 Plasticity index I_P	颗粒组成(%) Grain size			限制粒径 Limit grain size		有效粒径 Effective grain size	C_U	C_C
						砂粒 Sand 2~0.075	粉粒 Silt 0.075~0.005	粘粒 Clay <0.005	d_{60} (mm)	d_{30} (mm)			
											d_{10} (mm)		
低液限粘土 CL	N_{11}	2.7	31.0	16.5	14.5	1.0	80.0	19	0.027	0.0098	0.0022	12.273	1.617
	N_{12}	2.7	33.2	16.5	16.7	0.8	69.2	30	0.017	0.0050	0.0012	14.167	1.225
	N_{21}	2.7	32.2	16.0	16.2	3.0	67.0	30	0.020	0.0050	0.0009	22.222	1.389
	N_{22}	2.7	32.4	18.0	14.4	2.6	71.4	26	0.023	0.0065	0.0011	20.909	1.670
	N_{31}	2.7	33.1	18.6	14.5	0.8	71.2	28	0.016	0.0057	0.0009	17.778	2.256
	N_{32}	2.7	31.0	19.5	11.5	2.2	71.8	26	0.021	0.0064	0.0012	17.500	1.625
	N_{41}	2.7	32.1	17.0	15.1	3.6	75.4	21	0.024	0.0086	0.0013	18.462	2.371
	N_{42}	2.7	31.3	16.4	14.9	1.6	79.4	19	0.024	0.0086	0.0019	12.632	1.622
	N_{51}	2.7	30.0	18.2	11.8	2.3	74.7	23	0.025	0.0082	0.0012	20.833	2.241
	N_{52}	2.7	30.1	17.0	13.1	3.3	73.7	23	0.025	0.0082	0.0013	19.231	2.069

表 2 各土样不均匀系数、曲率系数和小于 0.005 mm 的土粒含量的统计分析

Table 2 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' nonuniform coefficient, curvature coefficient and soil particle content (<0.005 mm)

项目 Analysis item	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean Square	F 值 F value	概率值 Sig.
不均匀系数 Coefficient of nonuniformity	KW	90.490	4	22.622	5.124	0.071
	CW	3.622	1	3.622	0.820	0.416
曲率系数 Coefficient of curvature	KW	0.802	4	0.200	2.401	0.208
	CW	0.276	1	0.276	3.310	0.143
<0.005 mm 的土粒含量 The percentage of soil grain	KW	82.000	4	20.500	1.145	0.449
	CW	0.900	1	0.900	0.050	0.834

从探坑位置和分层位置两个主效应的 F 检验结果的概率 P 值看,均大于 0.05,由此得出两者对因变量不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 和小于 0.005 mm 的土粒含量在 0.05 水平上的效应是不显著差异。所以可以通过所采土样对整个料场土料的不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 和小于 0.005 mm 的土粒含量的均值 μ 进行区间估计和点估计。

经统计分析,整个料场土料的不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 和小于 0.005 mm 的土粒含量的均值 μ 的 95% 的置信区间分别为 [15.09, 20.11]、[1.53, 2.09] 和 [21.54, 27.46]。其点估计分别为 1.81、17.60 和 24.5。显然 $C_u > 5$, $C_c \in (1, 3)$, 小于 0.005 mm 的土粒含量小于 30%。

综上所述,该土的粒径分布不均匀且级配良好,使得较大土粒间的孔隙可有较小土粒填充,易被压实,是合适的工程填料。

2.1.2 化学成分 所采土样的化学成分主要为氧化硅和氧化铝,其含量分别为 59%~60% 和 12%~13%;其次为氧化铁(4.5%~5%)和氧化钙(6%~

7%)。粘粒部分的 SiO_2/RO 为 2.7~2.8,全剖面变化不大。粘土矿物以伊利石为主,高岭石、赤铁矿次之。土壤有机质含量较低(<1%),全氮量在 0.01% 以下,磷、钾含量较丰富,分别为 0.12%~0.18% 和 1.5%~2.3%。全剖面呈强石灰性反应,pH 值在 7.8~8.2。有机质和水溶盐的含量分别为 2.4% 和 4.5%^[5]。

2.2 试验方法^[5]

2.2.1 试样制备 试样制备按照《土工实验规程》(SD-128-84)严格进行。

2.2.2 击实试验 试验按国家标准进行,试验采用南京土壤仪器厂生产的 JDS-1 型数控电动击实仪,击实分三层装土,每层击实功能为 25 击。对每一个探坑的每一层随机抽取一个样共 10 组样进行试验。

2.2.3 压缩试验 试验按国家标准进行,试验仪器采用南京土壤仪器厂生产的 WG-1A 型三联固结仪。试验分四级加荷,分别为 0.5、1.0、2.0 和 4.0 kg/cm²,土样所承受的最大压力为 400 kPa。

2.2.4 渗透试验 试验按国家标准进行,试验采用南 55 型渗透仪变水头法,对每个探坑的每一层随机

抽取一个样共 10 组样进行试验。

2.2.5 直剪试验 试验按国家标准进行,采用 EDJ—1 型二速电动等应变直剪仪快剪方法。对每一个探坑的每一层随机抽取 4 个样共 40 组样分别在不同垂直压力 100, 200, 300, 400 kPa 进行直接快剪平行试验。

2.2.6 三轴剪切试验 试验按国家标准进行。为了模拟建筑物施工速度快、土体渗透系数较低而排水条件又差的实际情况,采取不固结不排水(UU)剪切试验。对 40 组样分别施 4 组不同围压 100, 200, 300, 400 kPa 进行平行试验。

2.2.7 孔隙水压力消散 试验按国家标准进行。试验采用由南京土壤仪器厂生产的 SLB—1 型应力

应变控制式三轴剪切渗透试验仪。仪器各部分采用单片机控制,各部分与计算机数据交换,集中自动完成数据采集与处理。试验共 4 个土样,每个土样孔隙水压力消散围压 σ_1 分别为 100、200、300、400 kPa。消散度不同,消散系数也不同,本试验按试样实际消散度 $D_c=50\%$ (即 $T_{50}=0.38$)来推算消散系数。

3 试验结果分析

3.1 重粉质壤土的干密度

通过击实试验的数据结果,确定出 10 组试样的最大干密度和最优含水率。见表 3。

分别对最大干密度和对应的最优含水率进行单因变量多因素方差分析,分析结果见表 4。

表 3 各土样的最大干密度与最优含水率
Table 3 The maximal dry density and optimum moisture content of all soil samples

项目 Analysis items	土样编号 Soil samples number									
	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}	N_{31}	N_{32}	N_{41}	N_{42}	N_{51}	N_{52}
最大干密度 Maximum dry density (g/cm^3)	1.80	1.75	1.76	1.75	1.77	1.75	1.80	1.77	1.76	1.78
最优含水率 Optimum moisture content (%)	15.5	16.2	16.7	16.2	15.8	16.3	14.8	16.7	14.2	15.3

表 4 各土样的最大干密度与最优含水率的统计分析

Table 4 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' maximal dry density and optimum moisture content

项目 Analysis item	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
最大干密度 Maximum dry density	KW	0.001	4	0.000	0.851	0.560
	CW	0.001	1	0.001	2.418	0.195
最优含水率 Optimum moisture content	KW	3.176	4	0.794	2.068	0.250
	CW	1.369	1	1.369	3.565	0.132

从 F 检验结果的 P 值看, $P>0.05$, 由此得出探坑位置和分层位置对因变量最大干密度和最优含水率在 0.05 水平上的效应是不显著差异。根据统计学原理,可以得出整个料场土料的最大干密度 $\rho_{d\max}$ 和最优含水率 ω_p 的均值 μ 的 95% 的置信区间分别为 [1.76, 1.78] 和 [15.18, 16.36]。通过 10 组击实试验数据结果的整理汇总求均值,作出干密度 ρ_d 与含水率 ω 的关系曲线(见图 1),可见最大干密度 $\rho_{d\max}$ 为 $1.77 \text{ g}/\text{cm}^3$, 最优含水率 ω_p 为 15.77%。击实曲线也表明:达到最优含水率前和达到最优含水率之后,含水率对干密度的影响程度很相似,说明达到最优含水率前和达到最优含水率之后,压实质量受含水率的影响敏感性具有同等程度^[6]。

3.2 重粉质壤土的压缩性

由试验得到的不同级压力下的孔隙比见表 5。分别对每一压力下,每一个探坑的每一层共 10 组样的孔隙比 e 进行方差分析。把每一压力下,探坑位置

和分层位置两个主效应的 F 检验结果汇总,见表 6。

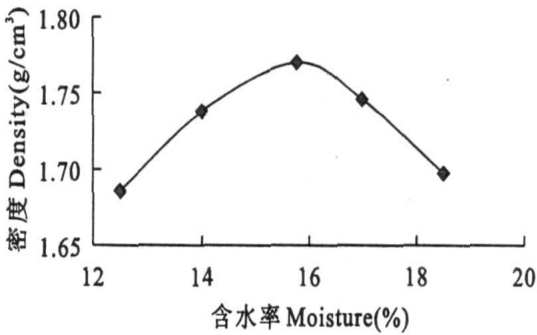


图 1 击实曲线
Fig.1 Compaction curve

统计结果显示,在不同压力下,探坑位置和分层位置两个主效应的 F 检验结果的 P 值都远远大于 0.05,可见探坑位置和分层位置对因变量孔隙比 e 在 0.05 水平上的效应是不显著差异。所以可以根据所采土样分别在压力 50、100、200、400 kPa 下的试

验结果,估计整个料场土料在对应的压力下孔隙比 e 的均值 μ 的可信区间。经统计分析,压力为0、50、100、200、400 kPa 对应的孔隙比 e 的均值 μ 的95%的置信区间分别为 $[0.62, 0.63]$ 、 $[0.61, 0.62]$ 、 $[0.60, 0.61]$ 、 $[0.59, 0.60]$,相应的点估计分别为0.64、0.62、0.62、0.61、0.59。据压缩试验的统计结果绘制整个料场土料的空隙比与压力的关系曲线对比图见图2^[7]。

表 5 各土样所受压力与对应的空隙比
Table 5 Pressure exerted on all soil samples and corresponding porous ratio

压力 Pressure (kPa)	孔隙比 Coid ratio									
	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}	N_{31}	N_{32}	N_{41}	N_{42}	N_{51}	N_{52}
0	0.640	0.640	0.640	0.640	0.640	0.640	0.640	0.640	0.640	0.640
50	0.621	0.634	0.627	0.624	0.627	0.622	0.632	0.622	0.623	0.616
100	0.616	0.630	0.620	0.617	0.620	0.614	0.627	0.615	0.617	0.610
200	0.605	0.622	0.611	0.607	0.611	0.598	0.617	0.604	0.611	0.600
400	0.587	0.605	0.590	0.590	0.594	0.580	0.597	0.585	0.598	0.586

表 6 各土样所受压力与对应的空隙比的统计分析

Table 6 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' pressure and corresponding porous ratio

压力 (kPa) Pressure	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
50	KW	8.16×10^{-5}	4	2.04×10^{-5}	0.505	0.738
	CW	1.44×10^{-5}	1	1.44×10^{-5}	0.356	0.583
100	KW	0.000	4	2.68×10^{-5}	0.544	0.715
	CW	1.96×10^{-5}	1	1.96×10^{-5}	0.397	0.563
200	KW	0.000	4	2.71×10^{-5}	0.334	0.843
	CW	5.76×10^{-5}	1	5.76×10^{-5}	0.710	0.447
400	KW	8.56×10^{-5}	4	2.14×10^{-5}	0.235	0.905
	CW	4.00×10^{-5}	1	4.00×10^{-5}	0.440	0.544

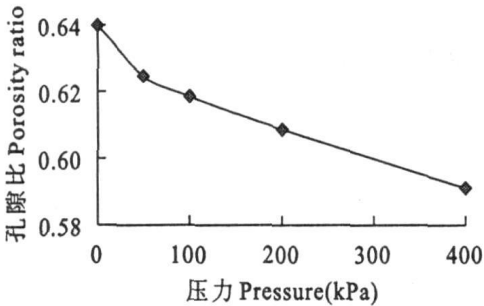


图 2 孔隙比与压力关系曲线
Fig.2 $e-p$ curves

如图所示,料场土料在加压初期,孔隙比 e 减小的速率较快,中期和后期孔隙比 e 的减小速率相对较慢,且基本呈线性递减。

压缩系数 a_v 与压力之间的对应关系见表7。分别对每一压力下,每一个探坑的每一层共10组样的压缩系数 a_v 进行方差分析。把每一压力下,探坑位置和分层位置两个主效应的 F 检验结果汇总,见表8。从表8可以看出,探坑位置和分层位置对因

变量压缩系数 a_v 在0.05水平上的效应是不显著差异。

所以,估计整个料场土料在50、100、200、400 kPa 压力下对应的压缩系数 a_v 的均值 μ 的95%的置信区间分别为 $[0.22, 0.38]$ 、 $[0.10, 0.14]$ 、 $[0.08, 0.12]$ 、 $[0.06, 0.11]$,相应的点估计分别为0.30、0.12、0.10、0.09。对压缩模量 E_s 的试验结果(见表9)作类似的统计分析,结果见表10。

估计整个料场土料在50、100、200、400 kPa 压力下对应的压缩模量 E_s 的均值 μ 的95%的置信区间分别为 $[4.15, 8.95]$ 、 $[11.40, 17.13]$ 、 $[13.76, 20.21]$ 、 $[14.87, 23.36]$,相应的点估计分别为6.55、14.26、16.99、19.11。

据压缩系数 a_v 和压缩模量 E_s 的样本统计结果,分别绘制料场土料在50、100、200、400 kPa 压力下对应的压缩系数 a_v 和压缩模量 E_s 曲线见图3。由图3可知,当所加压力接近110 kPa 时,曲线均出现了拐点,拐点之前,料场土料的压缩系数依次减小,压缩模量也依次增大,且二者的递减和递增速率

很大,即压缩性急剧减小;而在拐点之后,压缩系数仍然递减,压缩模量仍然递增,但二者的递减和递增速率明显变缓,即在拐点之后,压缩性基本稳定,即使压力再增大,土体的体积也不会发生太大的变化。

图 3 也表明,在拐点前压缩系数 a_v 等于或大于 0.1 MPa^{-1} ,具有高压缩性,而在拐点后压缩系数 a_v 小于 0.1 MPa^{-1} ,具有低压缩性。

表 7 各土样所受压力与对应的压缩系数

Table 7 Pressure exerted on all soil samples and corresponding compression coefficient

压力 Pressure (kPa)	压缩系数 Coefficient of volume compressibility $a_v(\text{MPa}^{-1})$									
	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}	N_{31}	N_{32}	N_{41}	N_{42}	N_{51}	N_{52}
50	0.3799	0.120	0.252	0.305	0.256	0.351	0.143	0.352	0.388	0.471
100	0.098	0.069	0.134	0.151	0.131	0.166	0.107	0.139	0.105	0.118
200	0.105	0.081	0.097	0.098	0.093	0.160	0.097	0.110	0.069	0.097
400	0.093	0.084	0.101	0.087	0.084	0.090	0.103	0.097	0.064	0.073

表 8 各土样所受压力与对应的压缩系数的统计分析

Table 8 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' pressure and corresponding compression coefficient

压力 (kPa) Pressure	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
50	KW	0.045	4	0.011	0.733	0.614
	CW	0.003	1	0.003	0.213	0.668
100	KW	0.005	4	0.001	4.141	0.099
	CW	0.000	1	0.000	1.410	0.301
200	KW	0.002	4	0.001	0.924	0.530
	CW	0.001	1	0.001	1.264	0.324
400	KW	0.001	4	$0.0004.89\times10^{-5}$	5.739	0.060
	CW	1.96×10^{-5}	1	1.96×10^{-5}	0.401	0.561

表 9 各土样所受压力与对应的压缩模量

Table 9 Pressure exerted on all soil samples and corresponding compression modulus

压力 Pressure (kPa)	压缩模量 Constrained modulus $E_s(\text{MPa})$									
	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}	N_{31}	N_{32}	N_{41}	N_{42}	N_{51}	N_{52}
50	4.329	13.699	6.494	5.376	6.410	4.673	11.494	4.651	4.854	3.483
100	16.67	23.81	12.20	10.87	12.50	9.90	15.39	11.77	15.63	13.89
200	15.63	20.20	16.95	16.67	17.54	10.26	16.95	14.93	23.81	16.95
400	17.70	19.51	16.19	18.87	19.61	18.18	15.94	16.95	25.81	22.35

表 10 各土样所受压力与对应的压缩模量的统计分析

Table 10 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' pressure and corresponding compression modulus

压力 (kPa) Pressure	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
50	KW	30.856	4	7.71	0.441	0.776
	CW	0.290	1	0.29	0.017	0.904
100	KW	100.53	4	25.133	2.433	0.205
	CW	0.27	1	0.269	0.026	0.880
200	KW	46.061	4	11.515	0.950	0.519
	CW	14.09	1	14.090	1.163	0.342
400	KW	69.362	4	17.340	5.446	0.065
	CW	0.041	1	0.041	0.013	0.915

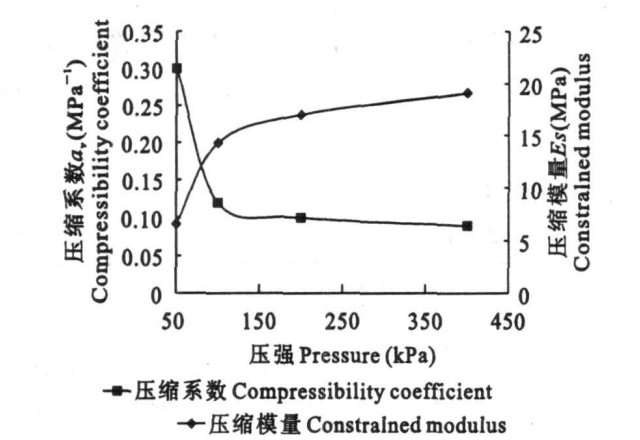


图 3 压力与压缩系数和压缩模量的关系曲线
Fig. 3 Relationship curve coefficient of pressure-compression modulus and pressure-compression coefficient

3.3 重粉质壤土的渗透性

渗透试验结果见表 11, 相应的统计分析结果见表 12^[7]。

从方差分析表的显著性概率得出, 探坑位置的

概率为 0.006, 小于 0.01。采样的不同层位置的概率为 1.000。因此可以得出结论, 渗透系数的差异是由于探坑布设的位置不同所致, 与某一探坑的不同层位置无关。也就是说, 在料场某一位置, 土料渗透系数随有用层的深度变化很不明显, 而不同断面的渗透系数差别很大。

3.4 重粉质壤土的抗剪强度

3.4.1 直剪试验结果与分析

试验和统计分析结果分别见表 13 和表 14。统计结果表 14 说明, 无论是粘聚力 C 还是内摩擦角 φ 受探坑位置和分层位置在 0.05 水平上的效应是不显著差异, 说明可以用采样的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 均值 μ 的估计来反映整个料场的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 。粘聚力 C 和内摩擦角 φ 的均值 μ 的 95% 的置信区间分别为 $[47.09, 53.31]$ 、 $[25.39, 26.53]$, 相应的点估计分别为 50.20、25.96。即整个料场的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 分别为 50.20 kPa、25.96°。

表 11 各土样的渗透系数 k (cm/s)
Table 11 Permeability coefficient of all soil samples

土样编号 Number	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}	N_{31}	N_{32}	N_{41}	N_{42}	N_{51}	N_{52}
渗透系数 Permeability coefficient (cm/s)	8.3×10^{-5}	8.8×10^{-5}	5.4×10^{-5}	4.9×10^{-5}	4.6×10^{-5}	3.9×10^{-5}	6.2×10^{-5}	6.9×10^{-5}	5.9×10^{-5}	5.1×10^{-5}

表 12 各土样的渗透系数的统计分析
Table 12 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' permeability coefficient

方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
修正模型 Corrected model	$2.17 \times 10^{-9} (a)$	5	4.35×10^{-10}	17.465	0.008
截距 Intercept	3.60×10^{-8}	1	23.60×10^{-8}	1445.783	0.000
KW	2.17×10^{-9}	4	5.42×10^{-10}	21.767	0.006
CW	0.000	1	0.000	0.000	1.000
误差 Error	9.96×10^{-11}	4	2.49×10^{-11}		
总计 Total	3.83×10^{-8}	10			
校正的总和 Corrected total	2.27×10^{-9}	9			

表 13 各土样的粘聚力和内摩擦角
Table 13 Cohesion and internal friction angle of all soil samples

土样编号 Number	N_{11}	N_{12}	N_{21}	N_{22}	N_{31}	N_{32}	N_{41}	N_{42}	N_{51}	N_{52}
粘聚力 Cohesion(kPa)	43	55	49	55	53	48	49	44	52	54
内摩擦角 Natural angle of repose($^{\circ}$)	27.9	25.8	25.4	25.9	26.3	25.4	25.0	26.3	25.9	25.7

3.4.2 三轴剪切试验结果与分析

为了更进一步地研究土料的抗剪性能, 采用了

三轴剪切试验。轴剪切试验可得出主应力值及抗剪强度参数 C 、 φ 值, 结果见表 15。统计分析结果见

表 16。

表 14 各土样的粘聚力和内摩擦角的统计分析

Table 14 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' cohesion and internal friction angle						
强度指数 Intensity index	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
粘聚力 Cohesion	KW	52.600	4	13.150	0.492	0.746
	CW	10.000	1	10.000	0.374	0.574
内摩擦角 Natural angle of repose	KW	2.044	4	0.511	0.600	0.683
	CW	0.196	1	0.196	0.230	0.656

表 15 各土样的粘聚力和内摩擦角

Table 15 Cohesion and internal friction angle of all soil samples						
土样编号 Number	σ_1 (kPa)				C (kPa)	φ ($^{\circ}$)
	$\sigma_1=100$ kPa	$\sigma_1=200$ kPa	$\sigma_1=300$ kPa	$\sigma_1=400$ kPa		
N ₁₁	299	436	502	725	48	24.0
N ₁₂	319	433	557	672	67	21.8
N ₂₁	302	369	560	604	61	21.1
N ₂₂	374	487	658	797	70	24.8
N ₃₁	290	507	633	747	52	25.5
N ₃₂	316	454	562	693	66	22.5
N ₄₁	316	445	608	716	52	25.0
N ₄₂	298	436	555	656	63	22.0
N ₅₁	333	513	643	802	59	25.8
N ₅₂	378	535	663	757	88	22.9

表 16 各土样的粘聚力和内摩擦角的统计分析

Table 16 Single dependent variable and multivariate variance analysis of all soil samples' cohesion and internal friction angle						
强度指数 Intensity index	方差来源 Source	偏差平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 Sig.
粘聚力 Cohesion	KW	384.400	4	96.100	3.013	0.155
	CW	672.400	1	672.400	21.078	0.010
内摩擦角 Natural angle of repose	KW	3.254	4	0.814	0.191	0.931
	CW	5.476	1	5.476	1.289	0.320

由表 16 可知,粘聚力的差异主要是由土层的深度不同导致的,而内摩擦角受探坑位置和分层位置在 0.05 水平上的效应是不显著差异。内摩擦角 φ 的均值 μ 的 95% 的置信区间为[22.33,24.75],相应的点估计为 23.54。即整个料场的内摩擦角 φ 为 23.54 $^{\circ}$ [7]。

4 结果与讨论

1) 该地区重粉质壤土的不均匀系数 C_U 和曲率系数 C_C 的均值 μ 的 95% 的置信区间分别为 [15.09, 20.11] 和 [1.53, 2.09], 显然 $C_U > 5$, $C_C \in (1, 3)$, 表明粒径分布不均匀且级配良好, 是合适的工程填料。小于 0.005 mm 的土粒、有机质和可溶性

盐的百分含量分别为 24.5%、2.4% 和 4.5%, 满足水坠坝规范的要求。

2) 该地区重粉质壤土的最大干密度 ρ_{dmax} 和最优含水率 ω_p 的均值 μ 的 95% 的置信区间分别为 [1.76, 1.78] 和 [15.18, 16.36]。在最优含水率前后, 压实质量受含水率的影响敏感性具有同等程度。

3) 该地区重粉质壤土施加压力接近 110 kPa 时, 曲线出现拐点, 拐点之前, 料场土料的压缩系数快速递减, 压缩模量快速递增, 而在拐点之后, 二者递减和递增速率明显变缓, 并基本趋于稳定, 即压力增大而土体的体积基本保持不变。压缩系数 a_v 等于 0.1 MPa $^{-1}$ 是高压压缩性和低压压缩性的分位点。

4) 该地区重粉质壤土的渗透系数介于 8.8 $\times$

$10^{-5} \sim 3.9 \times 10^{-5}$ 之间,适用于均质坝的防渗土料,也可作为水坠坝的填料。

5) 直剪试验结果表明该地区土料粘聚力 C 和内摩擦角 φ 分别为 50.20 kPa、25.96°;而三轴剪切试验结果是:粘聚力 C 介于 48~88 kPa,内摩擦角 φ 为 23.54°。可以根据工程实际情况选取相应的参数。建议在水坠坝边坡稳定演算时内摩擦角采用 23.54°^[8~10]。

本实验严格按照国家规范和标准执行,虽然误差难以避免,但通过统计分析,得到了更有代表意义的实验结果,结果表明用黄土高原南部的重粉质壤土作为建水坠坝的材料是可行的。

参考文献:

[1] 张伯平,党进谦.土力学与地基基础[M].西安:西安地图出版

社,2001:73-75.

- [2] 中华人民共和国水利部.SL251-2000 水利水电工程天然建筑材料勘察规程及其说明[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [3] 中华人民共和国水利部.GBJ145-90 土的分类标准[S].北京:中国水利水电出版社,1991.
- [4] 卢纹岱.SPSS for windows 统计分析(第3版)[M].西安:陕西人民出版社,1998.
- [5] 中华人民共和国水利部.SL237-1999 土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [6] 郭婷婷,张伯平,田志高.黄土二灰土工程特性研究[J].岩土工程学报,2004,26(5):719-721.
- [7] 张永双,曲永新.万家寨引黄工程大梁段砂黄土的工程特性研究[J].岩土工程学报,2004,26(2):229-233.
- [8] 中华人民共和国水利电力部.SD122-1984 水坠坝设计及施工暂行规定[S].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [9] 郑新民.水坠坝设计与施工[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [10] 中华人民共和国水利部.SL302-2004 水坠坝技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2004.

Studies on engineering properties of soil-retaining dam on heavy sitty loess

ZHANG Shen-qiang, ZHU Shou-jun, LIU Yu-lan

(College of Resource & Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Loess near the Xiwu Village in Baishui County of Shaanxi Province was regarded as test object. All tests, such as classification, hit-solid, shearing and compression, were conducted according to geotechnical test specification. Then the test results were analyzed. The results were as follows: $C_u > 5$, $C_c \in (1, 3)$, the percentage content of soil particle which was smaller than 0.005 mm, organic matter and soluble contamination were 24.5%, 2.4% and 4.5%, respectively. The 95% confidence interval of the average maximum dry density and the optimum moisture content were 1.76~1.78 and 15.18~16.36 respectively. When the pressure was near 110 kPa, there was a inflection point in the curve, and the compressibility which was 0.1 MPa^{-1} was the quantile of high-compressibility and low-compressibility. And the permeability coefficient lay between $8.8 \times 10^{-5} \sim 3.9 \times 10^{-5}$. The results of direct shear test showed that the cohesive force and the internal friction angle of soil material in this area were 50.20 kPa and 25.96°, respectively. What's more, the results of tri-axial shear test showed that cohesive force lay between 48~88 kPa, and the internal friction angle was 23.54°. According to all the results, the particle size distribution of heavy silt loam was uneven and had a good gradation so that soils in this area were suitable engineering filler, and could meet the demand of sluicing-siltation dam specification. The influential sensibility of moisture on compaction quality had the equal degree pre and post of the optimum moisture content. When the pressure was greater than 110 kPa, the soil volume remained almost the same with the pressure increasing. The heavy silt loam in this area not only was suitable for impervious soil of homogeneous dam, but also could be the filler of sluicing-siltation dam. When slope stability calculation was conducted, the internal friction angle should be 23.54°.

Keywords: heavy sitty loess; soil-retaining dam; geotechnical properties