

砂类土的干压实特性及振动碾压施工控制研究

童申家¹, 杨眉², 随素珍¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西国际商贸学院信息与工程学院, 陕西 咸阳 712046)

摘要:为研究内蒙古西北地区三种土样的干压实特性,开展了室内击实试验和干压实下土样密度与击实功的对应关系分析.试验结果表明:三种土样均具备了干压实和湿压实双重特性;土样在一定范围内随着击实功的增大,密度也随之增大,提出了干压实下三种土样的最佳击实次数和对应的最大密度.基于室内干压实试验与现场施工机具的转换关系,提出了不同吨位下振动碾压机具的碾压控制指标.通过变换松铺厚度值,得出不同吨位下振动碾压机具的碾压遍数.

关键词:道路工程; 碾压遍数; 室内干压实试验; 干压实; 击实功

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0328-05

Research on dry compaction characteristics and construction control of vibration rolling in sand

TONG Shenjia¹, YANG Mei², SUI Suzhen¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Information and Engineering, Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang 712046, China)

Abstract: In order to identify the dry compaction characteristics of 3 types of soil samples in Northwest region of Inner Mongolia, the indoor compaction test and the corresponding relation between the density and compaction work in the case of dry compaction were analyzed. The results show that the 3 types of soil samples have dual characteristics of dry compaction and wet compaction. To some extent, the density increases with increasing compaction work, so the optimal number of compaction and corresponding maximum density for the 3 soil samples was proposed. Based on the study above, the conversion relationship were carried out based on indoor dry compaction test and the field construction machines in order to investigate the rolling control index of the vibratory roller with different tonnage. The rolling times of vibratory roller with different tonnage can be obtained through transforming slackly lay thickness.

Key words: road engineering; rolling times; the Indoor compaction Test; dry compaction; compaction work

内蒙古西北地区气候干燥,水资源匮乏,但常用的路基湿压实技术消耗大量水资源,造成经济浪费.而路基的干压实技术是在含水量较低的情况下对土进行压实,并达到较好的压实效果,取得了较好的经济效益.针对干压实问题,陈忠达^[1]、李万鹏^[2]、杨人凤^[3]和袁玉卿^[4]等一些学者也进行了大量研究,证明了风积沙干压实和湿压实双重特点,验证了干压实技术实现的可能性.风积沙的干压实理论已经相对成熟,然而针对其他土样是否具有类似的干压实特点的问题,相关的研究和文献比较少,本文通过室内击实试验,验证了内蒙古西北地区的土样也具有干压实特性.进而通过室内干压实试验对该地区三种土样干压实性能进行研究,并结合碾压施工机具的衡量给出相适应的碾压遍数,以期对今后相似地区的路基修建与施工提供借鉴.

1 土样基本特性

1.1 土样的颗粒组成

本文中三种土样均采自依托工程沿线,土样1

取自赛汉陶来-三道明水路段,土样2取自苏宏图-雅干路段,土样3取自乌力吉-苏宏图路段,采用筛分试验对三种土样进行对比分析可得,土样1的砾粒组质量百分数为32.4%,土样2为24.9%,土样3为35.4%,均小于总质量的50%,由此可得本文中的三种土样均为砂类土.

筛分法得三种土样的粒径级配累计曲线如下图1所示.

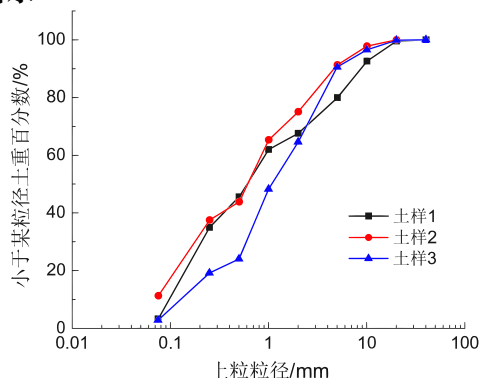


图1 土样1, 2, 3的粒径级配累计曲线

Fig.1 The particle size cumulative curve of soil sample 1, 2, 3

根据筛分结果以及不均匀系数、曲率系数的计算结果对三种土样进行分析可得, 土样1属于级配不良砂, 记为SP; 土样2称为含细粒土砂, 记为SF; 土样3属于级配良好砂, 记为SW.

1.2 土样的各项物理力学性能

根据《公路土工试验规程》^[5]的相关规定, 分别采用烘干法、直剪法以及液限和塑限联合测定法对三种土样的含水率、粘聚力、内摩擦角等各项物理力学指标进行测定与计算, 结果如表1所示. 根据表1的结果可得到以下结论:

(1) 三种土样的天然含水率和风干含水率均很

小, 这与内蒙古西北地区干旱少雨的气候特征有关;

(2) 土样1、3符合砂土的特性, 粘聚力 c 值近似为0, 内摩擦角 φ 值也较为接近, 而土样2较为特殊, 粘聚力 c 值较大, 内摩擦角 φ 值较土样1、3偏小, 这与土样2细粒组含量多有关;

(3) 根据《公路自然区划标准》(JTJ003-86)的相关规定, 内蒙古西北地区属于VI区, 该区土质砂干燥状态路基的下限稠度 $w_{c0}=2.00$, 对比3种土样的天然稠度值可得, 该依托工程沿线的路基均处于干燥状态.

表1 土样的各项物理力学指标
Tab.1 The physical and mechanical indexes of soil sample 1, 2, 3

土样编号	天然含水率 $w/\%$	风干含水率 $w'/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	天然稠度 $w_c/\%$
1	1.3	0.64	0	31	23.63	14.47	2.44
2	4.2	1.89	19.634	25	29.94	17.72	2.11
3	0.9	1.58	0.065	37	24.62	16.49	2.92

1.3 土样的击实试验

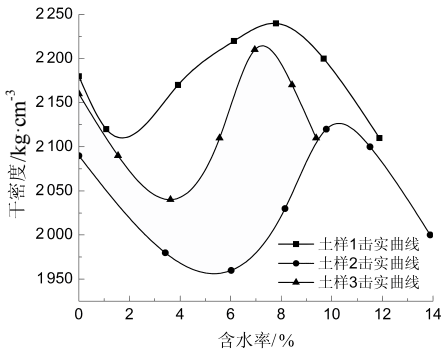


图2 土样1, 2, 3击实曲线
Fig.2 The compacting curve of soil sample 1, 2, 3

根据《公路土工试验规程》^[5]规定的方法, 路基的室内击实试验均采用重型击实试验, 其中土样1、3采用II-2类别(大筒击实), 击实次数为98次, 分3层, 土样2采用II-1类别(小筒击实), 击实次数为27次, 分5层, 试验结果如上图2.

对试验结果进行分析, 可以看出: 以上三种土样的击实曲线呈横写S型, 随着含水率的增大, 土的干密度出现了两个峰值, 说明这三种土样均有类似于风积沙的特性, 具有干压实和湿压实双重特点. 内蒙古地区气候干燥, 水资源匮乏, 这三种土样的击实特性为干压实技术的实现提供理论依据.

2 室内干压实试验

击实曲线的双峰性说明土样具有干压实特性,

而针对干压实技术的具体实现、如何能达到更大的压实度的问题, 本文通过室内干压实试验来进行研究, 使土样在节省水资源消耗的前提下, 获得较好的压实效果, 从而提高经济效益.

2.1 击实次数(击实功)的影响

击实功是影响击实效果的重要因素之一, 而击实功与击实筒的尺寸、锤重、落高、分层制样的层数和每层锤击数等技术参数有关, 单位体积击实功的表达式为式(1)^[6]:

$$E_c = \frac{W_e H N_b N_e}{10V} \tag{1}$$

式中: E_c 为单位体积击实功, kJ/m^3 ; W_e 为击锤重量, N ; $W_e = \text{锤重}(\text{kg}) \times \text{重力加速度}(\text{N}/\text{kg})$; H 为击锤落高, cm ; N_e 为土层数; N_b 为每层土的击数; V 为击实筒体积, cm^3 .

单位击实功的表达式中的各个技术参数均会影响击实功的大小. 本文室内干压实试验采用改变 N_b (每层土的击数)的方式来改变击实功的大小, 从而得到击实次数与土样的密度的关系. N_b (每层土的击数)越大, E_c (单位体积击实功)越大.

2.2 室内干压实试验结果及分析

土样均采用风干土进行干压实, 土样1、3采用II-2类别标准重型击实, 击实层数为3层, 大筒. 土样2采用II-1类别标准重型击实, 击实层数为5层, 小筒. 保持风干土的含水率不变, 通过改变每层土

的击数来变化击实功的大小,得出风干土的干密度与击数(击实功)的关系.

土样1、3的试验结果见表2及图3.可以看出,在一定的范围内随着每层土的击数的增大,即击实功的增大,土的密度也随之增大.超过范围后,土样的密度恒定在某值,不再随着击实次数的增大而变化.由试验数据得出,土样1的最佳击实次数为110次,此时对应的密度达到最大值2.18 g/cm³,击实功为3 008.2 kJ/m³.土样3的最佳击实次数为90

次,此时对应的密度达到最大值2.15 g/cm³,击实功为2 461.3 kJ/m³.

表3和图4给出了土样2密度随每层土的击数的变化.可见,密度随着每层土的击数先增大,达到最大值后又有一定幅度下降,呈现“橡皮现象”,这与土样2中<0.075 mm的颗粒较多有关.由试验数据得出,土样2的最佳击实次数为25次,此时对应的密度达到最大值2.07 g/cm³,击实功为2 488.1 kJ/m³.

表2 土样1、3击实试验(风干状态)
Tab.2 The compacting test of soil sample 1 and 3(in the weathered state)

每层土的击数	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
击实功/kJ·m ⁻³	546.9	820.4	1 093.9	1 367.4	1 640.8	1 914.3	2 187.8	2 461.3	2 734.7	3 008.2	3 281.7	3 555.1
土样1密度/g·cm ⁻³	1.95	2.02	2.06	2.09	2.12	2.14	2.14	2.15	2.16	2.18	2.17	2.18
土样3密度/g·cm ⁻³	1.82	1.90	1.96	2.05	2.08	2.11	2.13	2.15	2.14	2.14	--	--

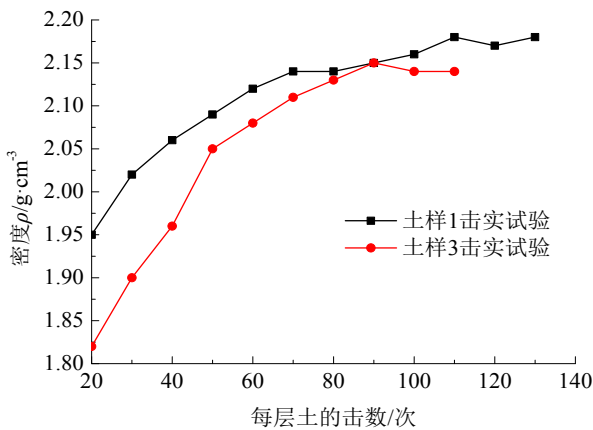


图3 土样1、3击实试验(风干状态)
Fig.3 The compacting test of soil sample 1 and 3 (in the weathered state)

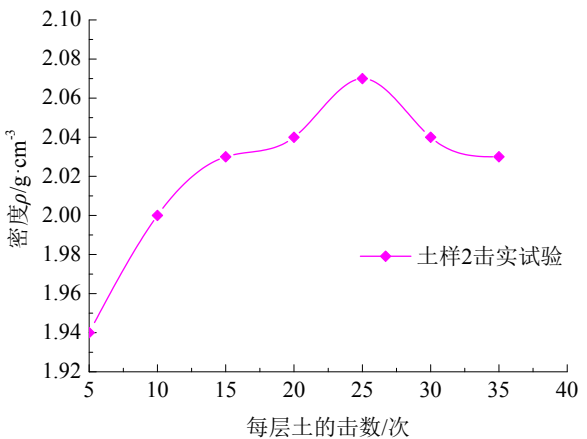


图4 土样2击实试验(风干状态)
Fig.4 The compacting test of soil sample 2 (in the weathered state)

表3 土样2击实试验(风干状态)
Tab.3 The compacting test of soil sample 2 (in the weathered state)

每层土的击数	5	10	15	20	25	30	35
击实功/kJ·m ⁻³	497.6	995.2	1 492.9	1 990.5	2 488.1	2 985.7	3 483.3
土样2密度/g·cm ⁻³	1.94	2.00	2.03	2.04	2.07	2.04	2.03

3 现场施工碾压控制

通过上述的室内干压实试验,分别得到了三种土样的最大干密度以及最佳击实功.而在实际路基工程施工过程中,如何根据振动压路机特性确定碾压合理的次数从而使路基土达到最大干密度,始终是路基工程中干压实技术领域亟待解决的问题.本

文将室内干压实试验中土样击实功转化为压路机振动压实能量,借此建立了室内干压实试验与现场施工机具的转换关系,得到了适用于不同吨位碾压机具的碾压方案.

3.1 施工机具型号及参数

以徐工集团生产的一组单钢轮振动压路机为例来进行分析,压路机型号及参数见表4.

表4 单钢轮振动压路机型号及参数
Tab.4 The types and parameters of single drum vibratory rollers

生产型号	XS142J	XS162J	XS183J	XS203J		XS223J		XS263J	
吨位/t	14	16	18	20		22		26	
振动频率/ <i>f</i> /Hz	28	28	28	28	33	28	33	27	32
理论振幅/ <i>A</i> /mm	1.9	1.9	1.9	1.9	0.95	1.86	0.93	1.9	0.95
激振力/ <i>kN</i>	274	290	320	353	245	374	290	405	290
振动轮分配质量/kg	6 700	7 700	9 000	10 000		11 000		13 000	
振动轮重/ <i>kN</i>	67	77	90	100		110		130	
振动轮宽度/ <i>B</i> /m	2.13	2.13	2.13	2.13		2.13		2.17	

注: 以上压路机的参数均满足GB/T8511-2005《振动压路机》^[7]规范中自行式压路机的相关规定

3.2 施工机具振动击实能量与室内干压实试验击实功转换

单钢轮振动压路机振动压实能量可根据式(2)计算^[8].

$$E = \frac{\eta K_p A_0 f n \left(3W_z + \frac{3}{4} \pi F_0 \right)}{v B h} \quad (2)$$

式中: E 为振动压实能量, kJ/m^3 ; η 为一种碾压时的重叠宽度系数, 取1.25; F_0 为激振力, kN ; W_z 为振动轮部分的重量, kN ; K_p 为振动作用力的作用系数; $K_p = 1.7 - F_0/10W_z$; A_0 为理论振幅, m ; f 为频率, Hz ; v 为行驶速度, 取 $v = 2 \text{ km/h} = 0.56 \text{ m/s}$; B 为振动轮宽度, m ; h 为每层松铺厚度, m ; n 为碾压遍数. 计算时忽略能量损失, 假定室内试验击实功 E_c = 振动压路机振动压实能量 E .

3.3 压实度选择

对于高速公路和一级公路而言, 路床土的压实度 $\geq 96\%$ ^[9], 上路堤土 $\geq 94\%$, 下路堤土 $\geq 93\%$ ^[10]. 实际施工中, 可根据不同层位进行选择与计算.

3.4 碾压遍数与松铺厚度分析

对公式(2)进行分析, 其中可变的参数为碾压遍数 n 与每层松铺厚度 h , 而这两个参数也是控制施工机具工作的重要参数. 根据《公路路基施工技术规范》^[11] 中对松铺厚度的规定, 本文选取松铺厚度范围为 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}$, 以 0.02 m 为递增区间. 根据下式(3)求出碾压遍数 n .

$$n = \frac{E v B h}{\eta K_p A_0 f \left(3W_z + \frac{3}{4} \pi F_0 \right)} \quad (3)$$

式中所有参数定义均见公式(2).

以土样1为例, 假定土样主要用于上路堤的铺筑, 即压实度 $\geq 94\%$, 取 94% 进行计算. 室内干压实试验中最大密度为 2.18 g/cm^3 , 根据压实度计算公式, 可算得工地上实际达到的密度 ρ 工地 $= 2.18 \times 94\% = 2.05 \text{ g/cm}^3$, 此时对应的击实功 E_c 可取 1093.9 kJ/m^3 , 取整 $E_c = 1100 \text{ kJ/m}^3$, 根据能量转换假定取 $E = E_c = 1100 \text{ kJ/m}^3$. 其余参数均参照徐工单钢轮振动压路机参数进行计算, 计算结果如表5所示.

表5 不同吨位下机具的松铺厚度与碾压遍数
Tab.5 The slackly lay thickness and rolling times of construction machines with different tonnage

松铺厚度/m	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	备注	
												吨位/t	频率/Hz
碾压遍数	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	14	28
	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	16	28
	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	8	18	28
	4	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	20	28
	8	9	9	10	10	11	11	12	13	13	14	20	33
	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	7	22	28
	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	22	33
	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	26	27
	7	8	8	8	9	9	10	10	11	11	12	26	32

4 结论

对内蒙古西北地区的砂类土进行了室内干压实试验和现场施工碾压控制的研究,最后得到以下结论:

(1) 土样的击实曲线呈现S型,出现了两个峰值,这说明这三种土样均有类似于风积沙的特性,具备了干压实和湿压实双重特性.

(2) 在室内干压实试验中,得到了三种土样的最佳击实功以及最大干密度值,并得出土样1、3在一定的范围内随着每层土的击数的增大,即击实功的增大,土的密度也随之增大.土样2的击实曲线中,密度随着每层土的击数先增大,达到最大值后又有一定幅度下降,呈现“橡皮现象”.

(3) 建立室内干压实试验与现场施工机具的转换关系,将土样击实功转化为压路机振动压实能量,从而得到了适用于不同吨位碾压机具的最佳碾压方案.

参考文献 References

- [1] 陈忠达, 张登良. 塔克拉玛干风积沙工程特性[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(3): 1-4.
CHEN Zhongda, ZHANG Dengliang. The engineering property about aeolian sand in Takalimakan[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(3): 1-4.
- [2] 李万鹏. 风积沙的工程特性与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
LI Wanpeng. The engineering property and application research about aeolian sand[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [3] 杨人凤, 纪林章. 风积沙压实机理的研究[J]. 现代交通技术, 2010, 7(1): 4-7.
YANG Renfeng, JI Linzhang. Research on the compaction mechanism of aeolian sand[J]. Modern Transportation Technology, 2010, 7(1): 4-7.
- [4] 袁玉卿, 王选仓. 风积沙压实特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 360-365.

- YUAN Yuqing, WANG Xuancang. Experimental research on compaction characteristics of aeolian sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 360-365.
- [5] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40-2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Ministry of Communications of the P. R. China. Test methods of soils for highway engineering: JTG E40-2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [6] 王志坚, 叶阳升. 击实试验标准不同对试验结果的影响[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 53-57.
WANG Zhijian, YE Yangsheng. The effects of different hitting test standards on test results[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 53-57.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 振动压路机: GB/T8511-2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P. R. China. Vibratory roller: GB/T8511-2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [8] 曹周阳. 秦巴山区变质软岩路堤填料路用性能及振动压实工艺研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
CAO Zhouyang. Road engineering properties of meta-morphic soft rock used as embankment filling in Qin-Ba mountainareas and vibration compaction technology research[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [9] 中华人民共和国交通部. 公路路基设计规范: JTG D30-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Communications of the P. R. China. JTG D30-2004. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [10] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
DENG Xuejun. Road subgrade and pavement engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路路基施工技术规范: JTG F10-2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Ministry of Communications of the P. R. China. Technical specifications for construction of highway subgrades: JTG F10-2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.

(编辑 桂智刚)