

# 黄河冲（淤）积粉质二灰土的压实特性研究

姚占勇<sup>1,3</sup>, 练继建<sup>1</sup>, 艾贻中<sup>2</sup>, 商庆森<sup>3</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300192; 2. 山东高速集团, 山东 济南 250061; 3. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 试验研究了黄河冲（淤）积粉质二灰土的压实特性。用电子显微镜分析了黄河冲淤积粉质土的微观结构；研究了压实度和压实含水率对二灰土强度的影响；分析了影响压实的关键因素及其影响规律。通过现场试验，提出了合理的施工压实工艺。研究认为，由于水的长距离搬运作用，黄河冲（淤）积粉土颗粒具有高的磨圆度和低的表面强度，加之粉煤灰中球状粉粒的大量存在，碾压时二灰土颗粒间难以形成有效的嵌挤，表现出较差的压实性状；低的压实度和高的碾压含水率使二灰土的强度明显降低；对于黄河冲（淤）积粉质二灰土，土中<0.005 mm的粒级是反映土的填充作用的界限粒级，该粒级和二灰的含量对二灰土的最佳含水率与最大干密度具有显著的影响，而二灰比（1：4~1：2）的影响不显著；二灰稳定粉土对振幅和频率是敏感的，高频率强振可使其压实度达到98%。

**关键词:** 黄河；粉粒；二灰土；压实

中图分类号：TU441

文献标识码：A

文章编号：1000-4548(2007)05-0664-07

作者简介：姚占勇(1966-)，男，博士，从事路基路面材料研究。E-mail: zhanyong-y@sdu.edu.cn。

## Compaction properties on Yellow River silty soil stabilized with lime-flyash

YAO Zhan-yong<sup>1,3</sup>, LIAN Ji-jian<sup>1</sup>, AI Yi-zhong<sup>2</sup>, SHANG Qing-sen<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300192, China; 2. Shandong Express Highway Corporation, Jinan 250061,

China; 3. College of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Through the experiment, the compaction characteristics of Yellow River silty soil stabilized with lime-flyash were studied, and the microstructure of Yellow River silty soil was analyzed with the electronic microscope. The influence of compactness and compaction water ratio to the strength of lime-flyash soil was studied, and the key factors to compaction and the influence were analyzed. The reasonable compaction craft of construction was put forward through the in-situ tests. It was indicated that grain of Yellow River silty soil was of high pseplicity and low surface strengths because of the long transport function of the water and a great deal of sphericity silty particle in flyash. It was difficult to form available contact between grains and to be rolled well. The low degree of compaction and the high compaction water ratio could reduce the strength of lime-flyash soil obviously. As for the Yellow River silty soil stabilized with lime-flyash, the grain size of 0.005 mm was the limiting grade that reflected the function of filling. The content of <0.005 mm grain and lime-flyash could influenced the optimum water content and the maximum dry density significantly, but the influence of lime-flyash ratio (1 : 4~1 : 2) was not obvious. Silt stabilized with lime-flyash was sensitive to amplitude and frequencies of vibration, and high frequency and hard oscillation could attain the degree of compaction of 98%.

**Key words:** Yellow River; silt; lime-flyash soil; compaction

## 0 引 言

黄河冲淤积平原区广泛分布着黄河近代冲（淤）积粉质土，其颗粒级配差，黏粒含量少，塑性指数低，胶体活性差。石灰稳定该类土，不仅强度低，抗水、抗冻性也差<sup>[1-2]</sup>。二灰稳定土因具有较高的后期强度、良好的水稳性、一定的抗冻和抗干缩性能，在公路基层中被广泛采用。美国的詹姆斯 F.迈耶斯等的专著《粉煤灰——一种公路建筑材料》中对石灰粉煤灰料在道路基层中的应用进行了较为全面的论述，但二灰稳

定粉粒土的研究很少，二灰稳定材料的原理及有关理论分析涉及更少。其后的研究主要集中于二灰稳定土强度规律的分析，以指导配合比的设计<sup>[3-6]</sup>。商庆森等对黄河冲（淤）积粉质二灰土的强度机理和规律进行了试验研究<sup>[7]</sup>。关于二灰土压实方面的报道多集中于现场施工工艺和检测的研究<sup>[8-11]</sup>。对于二灰稳定土压

基金项目：山东省交通科技基金资助项目（2002A107）

收稿日期：2006-04-12

表1 土的颗粒组成与塑性指数

Table 1 Particle size distribution and plasticity index

土样 编号	颗粒百分含量/%					$d_{60}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{10}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$	$I_p/\%$
	粒径范围 (mm)										
	>0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005						
T <sub>128</sub>	0.3	5.6	50.5	15.9	27.7	0.016	0.012	0.001	16.00	2.250	17.5
T <sub>214</sub>	0.3	13.8	65.3	7.0	13.6	0.032	0.026	0.003	10.66	2.667	12.6
T <sub>325</sub>	0.2	6.4	55.0	13.8	24.7	0.020	0.015	0.001	20.00	2.450	13.5
T <sub>408</sub>	1.7	28.3	57.4	4.5	8.1	0.043	0.037	0.007	6.143	2.076	11.5
T <sub>518</sub>	0.4	7.1	61.8	12.8	18.0	0.025	0.019	0.002	12.50	2.000	12.2
T <sub>630</sub>	0.3	3.7	47.9	18.2	29.9	0.014	0.011				15.2

注: 土样编号 T<sub>xyz</sub>, x 表示合同段, yz 表示土中<0.005 mm 的颗粒含量 (%), 以下同。

实机理、关键影响因素、压实质量控制指标以及合理的碾压振幅和频率的研究很少。

充分的压实是稳定土获得高强度的基本保障和重要措施之一<sup>[12]</sup>。土与粉煤灰颗粒的级配和微观结构, 混合料的二灰比、二灰含量, 施工压实的工艺和方法等直接影响二灰土的压实质量。本文通过室内和现场试验, 对影响黄河冲(淤)积粉质二灰土压实的关键因素及其影响规律进行了研究, 并提出了合理的现场碾压工艺。研究认为, 由于水的长距离搬运作用, 黄河冲(淤)积粉土颗粒具有高的磨圆度和低的表面强度, 加之粉煤灰中球状粉粒的大量存在, 使得碾压时二灰土颗粒间不能形成有效的嵌挤, 难以碾压; 低的压实度和高的碾压含水率会使二灰土强度明显降低; 土中<0.005 mm 的粒级是反映黄河冲(淤)积粉质二灰土的填充作用的界限粒级, 该粒级和二灰的含量对二灰土的最佳含水率与最大干密度具有显著的影响, 而二灰比(1:4~1:2)的影响不显著; 二灰稳定粉土对振幅和高频率是敏感的, 高频率强振可使其压实度达到 98%。

### 1 黄河冲(淤)积粉土的特性

试验采用 I 级钙质石灰和高钙粉煤灰, 材料质量符合《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034—2000)的要求。粉土取自青银高速公路德齐段沿线, 为典型的黄河冲(淤)积粉土。

#### 1.1 土的物理指标与颗粒级配

液塑限、颗分试验执行《公路土工试验规程》(JTJ051—93)。试验结果见表 1 和图 1。

表 1 和图 1 显示, 土质类型为低液限黏土, 土颗粒级配较好。粉粒含量高, 变化在 82.1%~95.2%之间。粉性土塑性指数为 10.9~11.5, 粉质黏土塑性指数为 12.2~17.5。

图 2 显示了塑性指数与较细粒级(小于 0.002 mm, 0.005 mm)含量的关系。由图 2 可见, <0.005 mm 的颗粒含量对塑性指数的影响, 与<0.002 mm 的颗粒含量的影响表现出相似的规律。这是因为 0.005 mm 颗

粒是黏粒与胶粒的过渡粒级, 0.005~0.002 mm 的颗粒已具有了薄膜水的吸附作用, 也能反应土与水相互作用的性质, 在黄河冲(淤)积粉质土的颗粒级配中属于填充粒级, 对土的可塑性指标与压实性质影响很大。因此, 把它当作该类土的特征粒级来判断二灰土的压实形状。

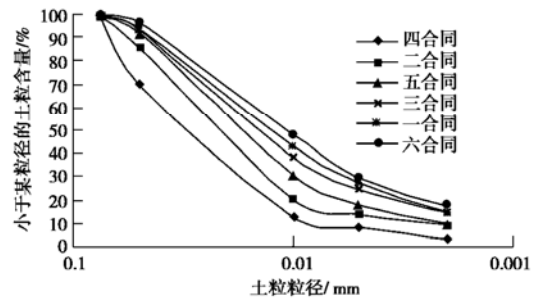


图1 土的颗粒分布曲线

Fig. 1 The particle size distribution curve

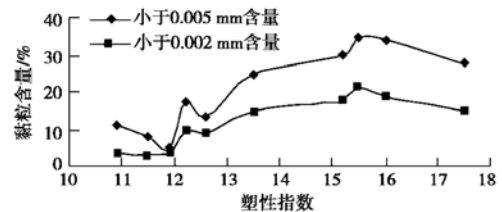


图2 较细颗粒含量与土的塑性指数的关系

Fig. 2 The relation between the content of the fine grain and the plasticity index

#### 1.2 土的微观结构

采用 JXA-8800R 型电子探针对 T<sub>408</sub> 土和取自济南地区的山前洪冲积粉土(筛除细粒)进行颗粒微观结构分析。颗粒微观结构照片见图 3(放大 2000 倍)。

传统上认为, 粗粒土经水流的长距离搬运作用, 其磨圆度会明显提高, 而细粒土由于其质量较轻, 搬运过程中随水流悬浮前进, 碰撞的机会较少, 碰撞时的动能较小, 磨圆度变化不大<sup>[13]</sup>。但图 3 显示, 与普通粉土相比, 黄河冲(淤)积粉土颗粒磨圆度较高。由此可以判断, 尽管粉粒属于细粒组, 在长距离的水流搬运过程中, 由于粉粒相对黏粒具有较大的质量、

粒径, 颗粒间仍会产生足够的碰撞能量, 并获得较高的磨圆度。与普通粉土相比, 黄河冲(淤)积粉土针片状颗粒少; 经长时间水的浸泡侵蚀、颗粒撞击和水流冲刷作用, 颗粒表层破碎、剥落严重, 强度较低。

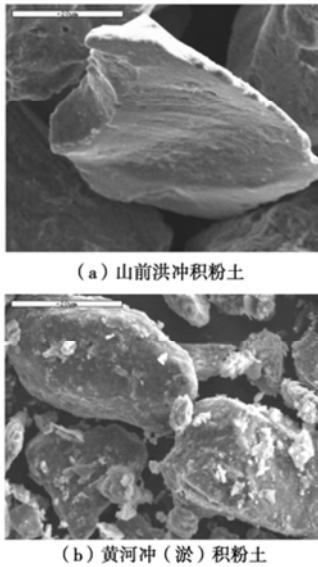


图3 粉土的微观结构

Fig. 3 Microstructure of the silt

黄河冲(淤)积粉土颗粒磨圆度高, 粒度均匀, 颗粒表面强度低, 碾压时颗粒间难以形成有效的颗粒嵌挤, 在外力作用下容易发生颗粒间的相互错动。粉煤灰主要由粉粒组成, 小于 0.002 mm 的颗粒极少, 空心的微珠颗粒含量 > 70%, 实心 and 空心球状颗粒占很大的比例, 颗粒较为均匀、单一, 比重轻、多孔隙、液限高、毛细作用强烈<sup>[14-16]</sup>, 粉煤灰的加入更增加了碾压的困难程度。因此, 黄河冲(淤)积粉质二灰土表现出难以压实的性状。

## 2 压实指标对二灰土强度的影响

### 2.1 压实度对强度的影响

二灰稳定土碾压工艺的合理与否直接影响着二灰土的压实度, 而压实度显著影响着二灰土的强度(图4)。由图4可知, 二灰稳定 T<sub>214</sub> 土的压实度从 95% 提高到 98%, 强度增加约 25%, 相同二灰含量、不同二灰比的二灰土提高的幅度大致相等。对早期强度, 压实度每提高一个百分点, 强度约增加 8%。说明提高不同土类、不同二灰比的二灰土压实度, 早期强度都能显著增加。二灰土 180 d 的强度, 压实度从 95% 提高到 96%, 二灰稳定 T<sub>325</sub> 和 T<sub>408</sub> 的强度分别提高 16% 和 17%; 从 96% 提高到 97%, 强度分别提高 6% 和 10%; 从 97% 提高到 98%, 强度增加不明显。因此, 压实是提高黄河冲(淤)积粉质二灰土强度的关键。对早期

强度, 压实度的影响明显; 对于后期强度, 压实度提高到 97% 以上时, 强度增加不再显著。

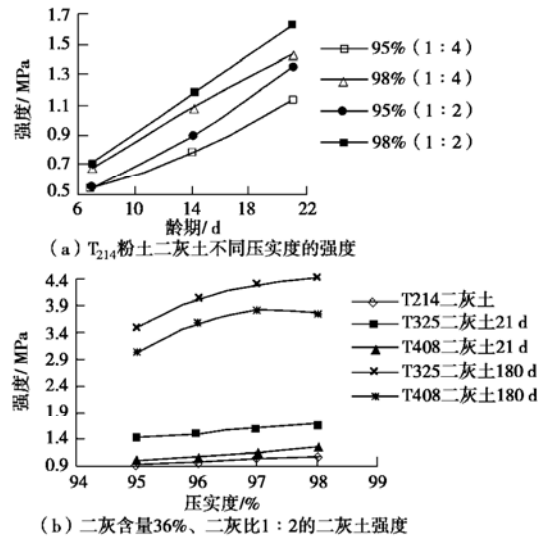


图4 二灰土压实度对强度的影响

Fig. 4 The effect of compactness on strength of lime fly-ash soil

### 2.2 压实含水率对强度的影响

高于最佳含水率 3% 以后, 二灰土振动易液化, 碾压过程中易出现沾轮、翻浆、反弹现象, 并且养生后强度有所下降(表2)。含水率小于最佳含水率, 由于粉煤灰发达的毛细湿润能力, 二灰土碾压过程中表层水易蒸发散失, 二灰土表面变得松散且很难压实。因此, 尽管黄河冲(淤)积粉质二灰土击实曲线驼峰较宽, 二灰土碾压含水率范围控制仍很关键。

表2 不同含水率时二灰土的 7 d 无侧限抗压强度

Table 2 Unconfined compressive strength of the lime fly-ash soil with different water contents

稳定土	二灰含量 32%	粉质黏土二灰含量 36%
	二灰比 1:2	二灰比 1:3
$w_{opt}$	5.73	5.81
$w_{opt}+2\%$	5.19	5.66
$w_{opt}+4\%$	5.10	4.59

## 3 二灰土的室内击实试验研究

二灰含量和二灰比分别采用 24%, 32%, 36%, 40%, 48% 和 1:4, 1:3, 1:2, 组成 40 组二灰稳定土混合料进行室内重型击实试验。试验操作执行《公路无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ057—94)。

### 3.1 影响二灰土最大干密度与最佳含水率因素的显著性分析

(1) 二灰比、二灰含量对黄河冲(淤)积粉质二灰土压实性能的影响

对同一种土(T<sub>214</sub>), 采用不同二灰含量和二灰比进行击实试验。试验结果见表3。

表 3 不同二灰含量、二灰比时二灰稳定 T<sub>214</sub> 土的最佳含水率与最大干密度

Table 3 The optimum water content and the maximum dry density of the lime-flyash soil (T<sub>214</sub>) with different lime-flyash contents and different lime-flyash ratios

指标	二灰比	二灰含量				
		24%	32%	36%	40%	48%
最佳含水率 $w_{opt}/\%$	1:4	18.8	20.2	21.0	20.5	22.0
	1:3	19.0	20.0	20.5	21.0	22.0
	1:2	19.4	19.8	20.3	21.5	21.5
最大干密度 $\rho_{max}/(g \cdot cm^{-3})$	1:4	1.595	1.541	1.501	1.479	1.445
	1:3	1.584	1.542	1.497	1.489	1.439
	1:2	1.584	1.550	1.495	1.492	1.442

对试验结果进行双因子方差分析。二灰含量、二灰比分别记为因子 A, B。

对最大干密度的影响,  $F_A=310.2 > F_{0.95}(4, 8)=3.84$ , 而  $F_B=0.3 < 1$ , 说明在  $\alpha=0.05$  显著性水平下, 因子 A 的不同水平对试验结果有显著影响, 而因子 B 的不同水平对试验结果没有显著性影响。

对最佳含水率的影响,  $F_A=21.8 > F_{0.95}(4, 8)=3.84$ ,  $F_B=0$ , 说明二灰含量对二灰土最佳含水率的影响具有显著性, 二灰比的影响很小。

由于粉煤灰的干密度小, 质量轻, 二灰中关键是粉煤灰的颗粒级配和颗粒结构影响着二灰土压实过程中的嵌挤、排列与填充作用, 因此, 二灰含量对黄河冲(淤)积粉质二灰土的压实影响大。二灰比变化在 1:4~1:2 之间, 粉煤灰含量变化梯度不大, 对二灰土压实的影响相对较小。因此可忽略二灰比对黄河冲(淤)积粉质二灰土最大干密度与最佳含水率的影响。

(2) 土的特征粒级、二灰含量对二灰土最大干密度与最佳含水率的影响

相同二灰比(1:3), 不同土和不同二灰含量的 25 组二灰土的击实试验结果见表 4 和图 5。

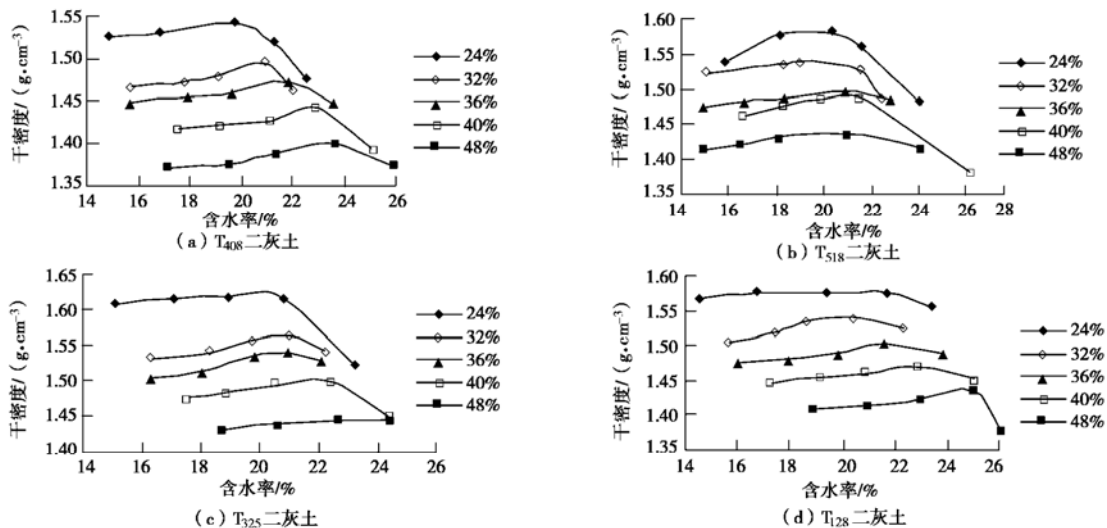


图 5 不同土质与不同二灰含量的二灰土的击实曲线

Fig. 5 Compaction curves of the lime flyash soil in differert soils with differert contents of lime-flyash

二灰含量、土类分别记为因子 A, B, 对试验结果进行双因子方差分析。

对最大干密度,  $F_A=75.8 > F_{0.95}(4, 20)=2.87$ ,  $F_B=44.1 > F_{0.95}(5, 20)=2.71$ , 说明在  $\alpha=0.05$  显著性水平下, 因子 A, B 的不同水平对试验结果都有显著影响。因而土的特征粒级、二灰含量对二灰土的最大干密度的影响都非常显著。

对最佳含水率,  $F_A=17.7 > F_{0.95}(4, 20)=2.87$ ,  $F_B=44.1 > F_{0.95}(5, 20)=2.71$ , 说明土的特征粒级、二灰含量对二灰土最佳含水率的影响都具有显著性。

表 4 二灰比为 1:3、不同土质和二灰含量时二灰土的最佳含水率与最大干密度

Table 4 The optimum water content and the maximum dry density in different soils with different lime-flyash contents (the lime-flyash ratio of 1:3)

击实指标	土类	二灰含量				
		24%	32%	36%	40%	48%
最佳含水率 $w_{opt}/\%$	T <sub>408</sub>	19.5	20.7	21.5	22.5	23.2
	T <sub>214</sub>	19.0	20.0	20.5	21.0	22.0
	T <sub>518</sub>	19.6	20.6	20.8	21.3	23.1
	T <sub>325</sub>	20.2	21.0	21.5	21.8	23.5
	T <sub>128</sub>	19.4	20.0	21.2	22.5	24.5
	T <sub>630</sub>	21.8	24.9	25.6	26.0	27.3
最大干密度 $\rho_{max}/(g \cdot cm^{-3})$	T <sub>408</sub>	1.54	1.50	1.47	1.44	1.40
	T <sub>214</sub>	1.58	1.54	1.50	1.49	1.44
	T <sub>518</sub>	1.63	1.57	1.54	1.50	1.44
	T <sub>325</sub>	1.62	1.56	1.54	1.50	1.45
	T <sub>128</sub>	1.58	1.54	1.50	1.47	1.44
	T <sub>630</sub>	1.52	1.49	1.47	1.45	1.39

因此, 土中<0.005 mm 颗粒的含量、二灰含量对二灰土最佳含水率与最大干密度的影响都非常显著。图 5 显示, 二灰土的最大干密度随二灰含量、土的黏粒(小于 0.005 mm 粒级)含量的增加而呈规律性的变化。随二灰含量的增大, 二灰土最佳含水率范围变宽, 其值增大, 最大干密度减小。随土的黏粒含量的

增加,二灰土的最佳含水率增大。对于最佳含水率的影响,土的黏粒含量比二灰含量更明显。对于最大干密度的影响,二灰含量比土的黏粒含量更明显。击实曲线还表明,由于黏粒矿物的双电层水理性质,二灰粉质黏土比二灰粉土、二灰黏性粉质土的最佳含水率范围更宽,含水率更高,而干密度稍低;黄河冲(淤)积粉质二灰土的击实曲线驼峰较宽,很难准确地确定二灰土最佳含水率点的位置。

### 3.2 二灰含量与二灰土最大干密度、最佳含水率的关系

对二灰土最大干密度、最佳含水率与二灰含量的关系进行一元线性回归,得回归参数见表5,6。

表5 二灰土最大干密度与二灰含量回归方程参数

Table 5 The maximum dry density of the lime flyash soil and the regression equation of lime flyash content

参数	$\beta_0$	$\beta_1$	$\sigma^2$	$R^2$
T <sub>128</sub>	1.7265	-0.6125	$1. \times 10^{-4}$	0.9744
T <sub>214</sub>	1.7460	-0.6500	$1. \times 10^{-4}$	0.9858
T <sub>408</sub>	1.6860	-0.6000	$2. \times 10^{-5}$	0.9931
T <sub>325</sub>	1.7905	-0.7125		0.9954
T <sub>518</sub>	1.8240	-0.8000	$1. \times 10^{-5}$	0.9981
T <sub>630</sub>	1.6575	-0.5375	$9. \times 10^{-5}$	0.9711

注:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ ,  $x$  为二灰含量,  $y$  为二灰土的最大干密度。

表6 二灰土最佳含水率与二灰含量回归方程参数

Table 6 The optimum water content of the lime flyash soil and the regression equation of lime flyash content

参数	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$
T <sub>128</sub>	13.510	0.226	0.946
T <sub>214</sub>	16.000	0.125	1.000
T <sub>408</sub>	15.675	0.161	0.976
T <sub>325</sub>	16.785	0.134	0.957
T <sub>518</sub>	16.040	0.140	0.946
T <sub>630</sub>	17.200	0.220	0.920

注:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ ,  $x$  为二灰含量,  $y$  为二灰土的最佳含水率。

由表5,6可见,二灰含量与二灰土的最大干密度和最佳含水率呈良好的线性关系。根据表5和表6,对黄河冲(淤)积粉质二灰土,只要得知土中小于0.005mm的颗粒含量,即可根据二灰含量算出二灰土的最大干密度和最佳含水率。这对指导击实试验和碾压施工中压实度的检测有重要的参考作用。

### 3.3 土的特征粒级与最大干密度的关系

表7 二灰土最大干密度与土中<0.005mm颗粒的含量的关系

Table7 The relationship between the maximum dry density and the content of the particle <0.005 mm

二灰含量/%	$a$	$b$	$c$	$d$	$R^2$
24	$-5 \times 10^{-5}$	0.0017	-0.0115	1.5446	0.9979
32	$-2 \times 10^{-5}$	0.0007	0.0024	1.4503	0.9784
36	$-4 \times 10^{-5}$	0.0015	-0.0133	1.4956	0.9770
40	$-1 \times 10^{-5}$	0.0003	0.0052	1.3832	0.9888
48	$-3 \times 10^{-5}$	0.0011	-0.0088	1.4173	0.8568

注:  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ,  $x$  为<0.005mm颗粒含量(%),  $y$  为二灰土的最大干密度。

二灰土最大干密度与土的塑性指数、土中<0.005mm颗粒含量的关系见图6和7。由图6和7可见,二灰土的最大干密度随土的塑性指数的增大呈多级驼峰变化,难以用塑性指数来反映它与二灰含量、二灰土干密度之间的关系。而二灰土最大干密度与土中<0.005mm颗粒的含量呈现良好的相关性。因此,对于黄河冲(淤)积粉质二灰土,土中<0.005mm粒级含量不仅是反映土的级配及活性的指标,也是反映土的填充作用的界限粒级。<0.005mm粒级含量在很大程度上反应了黄河冲(淤)积土的最佳碾压颗粒级配范围。对于不同二灰含量的黄河冲(淤)积粉质二灰土,土中<0.005mm颗粒含量在17%~27%时,二灰土混合料的最大干密度较高,二灰土压实性能较好。

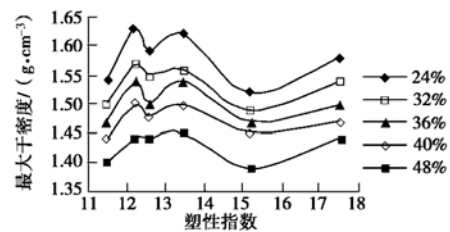


图6 最大干密度与土的塑性指数的关系

Fig. 6 The relation between the maximum dry density and the plasticity index

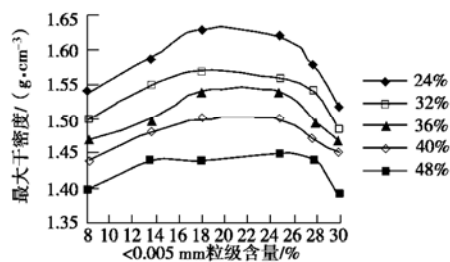


图7 最大干密度与土的<0.005mm颗粒含量的关系

Fig. 7 The relation between the maximum dry density and the content of the particle < 0.005 mm

对于黄河冲(淤)积粉质土,建议以土的小于0.005mm粒级含量作为判断二灰土压实性状的有效指标。当土中<0.005mm的颗粒含量较低时,可通过添加少量黏性土有效改善二灰土的压实性能。

对二灰土最大干密度与土中<0.005mm颗粒含量的关系进行多元回归,得回归参数见表7。

表8 碾压方案及检测结果  
Table 8 Roll project and test results

碾压工艺	碾压遍数	压实度
低频振压	稳压 2 遍	85.7
	稳压 2 遍+双向弱振 1 遍+静压 1 遍	89.7
	稳压 2 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍	91.3
	稳压 2 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍+单向强振 1 遍+静压 2 遍	96.7
中频振压	稳压 3 遍	87.2
	稳压 3 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍	88.7
	稳压 3 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍+单向强振 1 遍+静压 2 遍	96.7
高频振压	稳压 4 遍	90.4
	稳压 4 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍	90.8
	稳压 4 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍+单向强振 1 遍+静压 2 遍	99.2

注: 弱振的频率: 13.2 (低频)、16.5 (中频)、21.1 (高频); 强振的频率: 21.1 (低频)、26.5 (中频)、30.2 (高频)。

#### 4 碾压工艺的优化

现场对不同土质的黄河冲(淤)积二灰土进行碾压工艺优化试验。以二灰稳定 T<sub>214</sub> 土为例。配合比为 12:24:64, 最大干密度为 1.54 g/cm<sup>3</sup>, 最佳含水率为 20.5%。压路机采用 YZ18 振动压路机(自重 18 t)和英格索兰 175 压路机(自重 20 t)。

碾压方案及试验结果见表 8。表 8 显示, 二灰稳定粉质土仅靠弱振(小振幅)难以达到 95% 以上的压实度。在低频率下强振(大振幅)能使压实度提高到 95%, 高频率下强振可使压实度提高到 98%, 二灰稳定粉土对振幅和频率是敏感的。此外, 对于振动碾压工艺, 过多遍数的稳压对二灰土的压实没有明显的作用。压实度在 85% 左右开始弱振碾压, 压实度大于 90% 开始强振碾压, 二灰土可获得较好的表面平整度。建议采用以下施工工艺: 稳压 2 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍+单向强振 1 遍+静压 2 遍。

#### 5 结 论

(1) 经水的长距离搬运, 黄河冲(淤)积粉土颗粒磨圆度高, 颗粒表面强度低。而粉煤灰主要由粉粒组成, 空心的微珠颗粒含量 > 70%, 实心 and 空心球状颗粒占很大的比例。高圆度、均质粉粒的大量存在, 使得黄河冲(淤)积粉质二灰土碾压时颗粒间难以形成有效的嵌挤, 在外力作用容易发生颗粒间的相互错动, 表现出难以压实的性状。

(2) 压实度和压实含水率对黄河冲(淤)积粉质二灰土的强度具有显著影响。对早期强度, 压实度每提高一个百分点, 强度约增加 8%; 对于后期强度, 压实度达 97% 以上时, 压实度的提高对强度的影响不再明显。

(3) 黄河冲(淤)积粉质二灰土, 二灰比为 1:4~1:2, 二灰比的变化对二灰土最大干密度和最佳含水率的影响不显著, 可不考虑对稳定土压实的影响。

(4) 二灰含量和土的黏粒含量对二灰土的最佳含水率与最大干密度都具有显著的影响, 且呈规律性变化。二灰含量与二灰土的最大干密度和最佳含水率呈良好的线性关系。利用这一关系, 可以推算出二灰土的最大干密度和最佳含水率。这对指导击实试验和碾压施工中压实度的检测有重要的参考作用。

(5) 对于黄河冲(淤)积粉质二灰土, 土中 < 0.005 mm 粒级不仅是反映土的级配及活性的重要指标, 也是反映土的填充作用的界限粒级。< 0.005 mm 的粒级含量在很大程度上反应了黄河冲(淤)积土的最佳碾压颗粒级配范围。对于不同二灰含量的黄河冲(淤)积粉质二灰土, 土中 < 0.005 mm 颗粒含量在 17%~27% 时, 二灰土混合料的最大干密度较高。当土中 < 0.005 mm 含量较低时, 添加少量黏性土可有效地改善二灰土的压实性能。

(6) 仅靠弱振, 黄河冲(淤)积粉质二灰土难以达到 95% 以上的压实度。在低频率下强振, 能使其压实度提高到 95%, 高频率强振可使压实度提高到 98%。二灰稳定粉土对振幅和频率是敏感的。对于振动碾压工艺, 过多遍数的稳压对二灰土的压实没有明显的作用。建议采用“稳压 2 遍+双向弱振 1 遍+静压 2 遍+单向强振 1 遍+静压 2 遍”施工工艺。

#### 参考文献:

- [1] 商庆森, 姚占勇, 刘树堂. 黄河三角洲地区道路用土的特性研究[J]. 公路交通科技, 1996, 13(3): 10 - 15. (SHANG Qing-sen, YAO Zhan-yong, LIU Shu-tang. Research on the characteristics of soils for road engineering in the Yellow River delta region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1996, 13(3): 10 - 15. (in Chinese))
- [2] 姚占勇, 商庆森, 刘树堂, 等. 生石灰粉稳定黄河冲(淤)积粉土的可行性探讨[J]. 山东工业大学学报(自然科学版), 1999, 2: 78 - 80. (YAO Zhan-yong, SHANG Qing-sen, LIU



- Shu-tang, et al. Inquiry of feasibility to stabilize the Yellow River silt by quick lime powder[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science edition), 1999, 2: 78 - 80. (in Chinese))
- [3] 沙爱民, 张登良. 稳定土火山灰作用的热力学原理及应用研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 39 - 43. (SHA Ai-min, ZHANG Deng-liang. Principle and application of pozzolanic reaction thermodynamics in lime-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 1995, 17(3): 39 - 43. (in Chinese))
- [4] 杨锡武. 粉煤灰混合料半刚性基层的微结构研究[J]. 中国公路学报, 1994, 3: 36 - 40. (YANG Xi-wu. A study of the semi-rigid base microstructure of fly-ash mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 1994, 3: 36 - 40. (in Chinese))
- [5] 张宏, 张伯平. 养护龄期对二灰土工程特性的影响试验研究[J]. 人民长江, 2004, 35(12): 25 - 26. (ZHANG Hong, ZHANG Bo-ping. Test and study of influence of curing time on features of a lime-fly ash soil project[J]. Yangtze River, 2004, 35(12): 25 - 26. (in Chinese))
- [6] 张登良, 许永明, 沙爱民. 石灰、粉煤灰稳定土的早强试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 1995(1): 17 - 24. (ZHANG Deng-liang, XU Yong-ming, SHA Ai-min. Experimental research on early strength of lime and fly ash stabilized soil[J]. Comprehensive Exploitation of Fly-ash, 1995(1): 17 - 24. (in Chinese))
- [7] 商庆森, 刘树堂, 姚占勇. 二灰稳定黄河冲(淤)积粉土的研究[J]. 公路交通科技, 1998(4): 8 - 11. (SHAN Qing-sen, LIU Shu-tang, YAO Zhan-yong. Reserch on the stabilization of the Yellow River alluvial silts with lime and fly ash[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1998(4): 8 - 11. (in Chinese))
- [8] 熊保恒, 陆春, 郭洪福. 高速公路石灰粉煤灰稳定土底基层的机械化施工[J]. 筑路机械与施工机械化, 2001, 118(3): 46 - 50. (XIONG Bao-heng, LU Chun, GUO Hong-fu. The mechanical construction of lime-fly-ash stabilize soil subbase course of the highway[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2001, 118(3): 46 - 50. (in Chinese))
- [9] 赵淑敏. 二灰土现场试验检测方法探讨[J]. 公路, 2003(4): 123 - 124. (ZHAO Shu-min. The spot test method inquiring of lime-fly-ash[J]. Highway, 2003(4): 123 - 124. (in Chinese))
- [10] 邱国峰, 傅光奇. 高速公路二灰土底基层配合比的确定与施工[J]. 广州大学学报, 2004, 3(2): 168 - 171. (QIU Guo-feng, FU Guang-qi. The highway mixture ratio determination and construction of lime-fly-ash stabilized soil[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science edition), 2004, 3(2): 168 - 171. (in Chinese))
- [11] 龚廉溟, 高吉才. 粉土用于二灰土底基层施工工艺控制[J]. 交通科技, 2004(6): 49 - 51. (GONG Lian-min, GAO Ji-cai. Control of workmanship of the lime fly-ash stabilized soil subbase course used powder soil[J]. Transportation Science and Technology, 2004(6): 49 - 51. (in Chinese))
- [12] 沙庆林. 公路压实与压实标准[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. (SHA Qing-lin. The Highway compaction and compacting criteria[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980: 8 - 13. (The River Sediment Engineering Teaching Section of Water and Electric College of Wuhan. River sediment engineering[M]. Beijing: Water and Electric Power Press, 1980: 8 - 13. (in Chinese))
- [14] LAV A Hilmi. Microstructural development of stabilized fly ash as pavement base material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 2(1): 157 - 163.
- [15] YUAN R Z, GAO Q Y. Influence of structure features of slags on their activity[J]. Silicates Industrials, 1982, 12: 142 - 145.
- [16] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (QIAN Jue-shi. The characteristic of fly-ash and fly-ash concrete[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))