

# 吹填土场地加固中水泥土施工技术试验研究

郁亮, 吴文虎, 孙常海

(中交浚浦建筑科技(上海)有限公司, 上海 201601)

**摘要:** 为提高在吹填土地中, 水泥土施工技术的应用效能, 以上海地区吹填土地加固工程为依托, 设计了含水率控制方法, 通过试验研究了延迟击实时间和碾压方式对水泥土应用效果的影响。试验结果中, 延迟击实时间超过4 h, 水泥土7 d无侧限抗压强度降低44.3%~47.1%, 故工程中延迟击实时间不应超过4 h。对比了2种碾压方式下的场地收面效果和压实度, 确定了最佳碾压施工工艺。文中研究的成果不仅可为本工程建设提供支撑, 也可为同类工程施工及质量控制提供借鉴。

**关键词:** 水泥土; 最佳含水率; 延迟击实; 碾压施工技术

中图分类号: U655.4; TU472

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2024)03-0075-05

doi: 10.7640/zggwjs202403014

## Experimental study on cement-solidified soil construction technology in reinforcement of dredger fill site

YU Liang, WU Wen-hu, SUN Chang-hai

(CCCC JunPu Architecture Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201601, China)

**Abstract:** In order to improve the application efficiency of cement-solidified soil construction technology in dredger fill site, a water content control method was designed based on the reinforcement project of dredger fill site in Shanghai. The effects of delayed compaction time and rolling method on the application effect of cement-solidified soil were studied through experiments. In the test results, the 7 d unconfined compressive strength of cement-solidified soil will decrease by 44.3%~47.1% when the delayed compaction time exceeds 4 hours. So the delayed compaction time in engineering should not exceed 4 hours. By comparing the surface finishing effect and compaction degree of the site under two rolling methods, the optimal rolling construction process was determined. The research results can provide support for the construction of this project, and provide reference for the construction and quality control of similar projects.

**Key words:** cement-solidified soil; optimal water content; delayed compaction; rolling construction technology

### 0 引言

振华重工长兴智能港口装备产业项目位于上海市长兴岛, 其工程建设场地主要为吹填土构成, 土质松软。在自动化总装场地单项工程中, 设计采用水泥土施工技术对吹填土地进行加固。目前对于水泥土的研究有很多, 其基本的力学性能<sup>[1-6]</sup>和实际工程应用价值<sup>[7-10]</sup>已经得到了充分地证明。而实际工程中, 水泥土应用效果受多方因素影响, 如碾压施工前场地的含水率难以控制, 导致工程应用中难以达到试验室水泥土最大干密度; 碾压

施工过程持续时间较长, 且延迟击实时长对水泥土压实后强度影响较大; 碾压施工工艺不成熟, 场地收面效果和压实度难以控制。因此, 为保证工程质量, 本文将从施工前场地的含水率控制、延迟击实时长对水泥土压实后强度的影响及碾压施工工艺对场地收面效果和压实度的影响3个方面分别对水泥土施工技术进行试验研究。

### 1 材料参数

工程中设计选用的水泥型号为P·S·A32.5, 初凝时间为340 min, 终凝时间为480 min。

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2023-12-01

作者简介: 郁亮 (1975—), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 副总经理, 港航工程专业。E-mail: 825758522@qq.com

通过对工程现场的素土进行液塑限、筛分和击实试验，得到素土的各项材料参数见表1。

表1 素土材料参数

Table 1 Material parameters of plain soil

项目	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
参数值	35.9	21.8	14.1	1.68	16.5

## 2 土方含水率控制

结合施工时间及工况，采取第1天洒水—静置12h—第2天制作水泥土的方式进行施工。考虑到水分蒸发等因素影响，为使原土方在撒布水泥拌和前达到最佳含水率，先进行土方含水率控制试验，以掌握土方含水率的控制方法。

### 2.1 试验思路

土方含水率控制方法的思路为：首先，第1天在原土上划分7个相同大小的1m×1m地块，对其中6个地块(1个地块不洒水，作为对照组)分别洒水。通过计算得出不同洒水量，以使各地块达到不同含水率。然后静置12h，第2天测量各地块的含水率变化情况。最后，通过拟合得到第2天土方含水率与第1天洒水量的关系。

### 2.2 划分地块

在原有土地的同—区域上划分7个1m×1m地块，并编号为WC0—WC6，其中WC0为不洒水对照组，WC1—WC6为洒水试验组。为减小地块间含水率的相互影响，相邻地块边缘距离1m，如图1所示。



图1 含水率控制试验地块划分

Fig. 1 Division of water content control test plots

### 2.3 洒水

为计算理想状态下各地块需要的洒水量，洒水后的目标土方含水率 $\theta_{ga}$ 可表示为：

$$\theta_{ga} = \left( \frac{m_a - m_s}{m_s} \right) \times 100\% = \left( \frac{m + m_w - m_s}{m_s} \right) \times 100\% = \theta_g + \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\theta_{ga}$ 为洒水后的目标土方含水率，%； $m_a$ 为洒水后单位体积土壤的质量，g； $m_s$ 为单位体积原土的烘干后质量，g； $m$ 为单位体积原土的质量，g； $m_w$ 为单位体积原土的洒水质量， $m_w = \frac{\theta_{ga} - \theta_g}{100\%} \times m_s$ ，g； $\theta_g$ 为土方含水率，%。经测量，第1天原土方

含水率 $\theta_{g01}$ 为3%。

可得到试验地块的需洒水量 $V_w$ ：

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{(\theta_{ga} - \theta_g) / 100\% \times m_s}{\rho_w} \quad (2)$$

式中： $V_w$ 为单位体积原土需洒水量，L； $\rho_w$ 为水的密度，取1kg/L。

土的最大干密度为1.68g/cm<sup>3</sup>，取计算压实厚度0.25m，则 $m_s = (1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.25\text{m}) \times 1\,680\text{kg/m}^3 = 420\text{kg}$ 。同时，根据式(2)可计算出WC1—WC6地块所需的第1天洒水量，如表2所示。

表2 含水率控制试验地块编号

Table 2 Number of water content control test plots

项目	WC0	WC1	WC2	WC3	WC4	WC5	WC6
目标含水率/%	3	5	10	15	20	25	30
第1天洒水量/(L·m <sup>2</sup> )	0	8.4	29.4	50.4	71.4	92.4	113.4

### 2.4 含水率监测及分析

第2天对7个地块的含水率进行再次测量，得到第2天土方含水率如表3所示。

表3 各试验地块的第2天土方含水率

Table 3 Next day soil water content of each test plot

项目	WC0	WC1	WC2	WC3	WC4	WC5	WC6
第2天土方含水率/%	2.8	4.2	8.2	12.3	15.8	18.9	21.0

根据表3中各地块的含水率变化情况，采用三次多项式拟合的方法对试验地块2个时间点含水率之间的关系进行拟合，得到试验地块第1天含水率与第2天含水率的关系方程如式(3)。

$$Y = 0.622\,58 + 0.674\,91X + 0.012\,79X^2 - 0.004\,2X^3 \quad (3)$$

式中： $Y$ 为第2天土方含水率，%； $X$ 为第1天土方含水率，%。多项式方程及试验监测的含水率关系如图2所示。

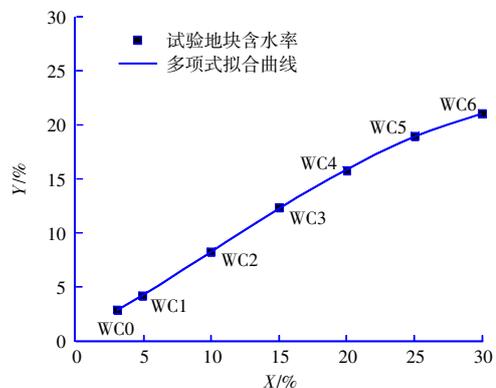


图2 试验地块含水率控制曲线

Fig. 2 Water content control curve of test plot

根据拟合曲线计算各地块第2天含水率,其结果与试验监测值之间误差最大为1.5%。综上,可认为式(3)能准确反映试验地块第1天含水率在3%~30%时,第1天含水率与第2天含水率的关系。

### 3 延迟击实时间影响研究

通过现有文献<sup>[6]</sup>得知,延迟击实时间对水泥土最大干密度影响显著。实际施工时,从水泥加入土中到最终碾压完毕大约需要4h。现有水泥加入土中3h以内完成击实的室内击实试验,显然这不足以代表现场施工场地的击实后最大干密度及抗压强度。所以需通过试验确定延迟击实时间对水泥土最大干密度及7d无侧限抗压强度的影响,以指导现场施工。

#### 3.1 延迟击实试验结果及分析

水泥土设计7d无侧限抗压强度需不小于0.5MPa,现对3%、6%和9%水泥掺量的水泥土分别进行不同时间段的击实试验,得到3种水泥土的最大干密度随延迟击实时间变化情况如表4—表6所示。

表4 3%水泥掺量的水泥土的延迟击实试验的检测数据

Table 4 Test data of delay compaction test of cement-solidified soil with 3% cement content

水泥掺量/%	延迟击实时间/h	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
3	0	1.92	16.5
	1	1.89	16.6
	2	1.86	16.8
	3	1.84	17.0
	4	1.82	17.0

表5 6%水泥掺量的水泥土的延迟击实试验的检测数据

Table 5 Test data of delay compaction test of cement-solidified soil with 6% cement content

水泥掺量/%	延迟击实时间/h	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
6	0	2.00	16.8
	1	1.96	17.0
	2	1.92	17.0
	3	1.89	17.2
	4	1.87	17.2

表6 9%水泥掺量的水泥土的延迟击实试验的检测数据

Table 6 Test data of delay compaction test of cement-solidified soil with 9% cement content

水泥掺量/%	延迟击实时间/h	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
9	0	2.05	17.0
	1	2.00	17.2
	2	1.95	17.2
	3	1.92	17.4
	4	1.89	17.4

根据表4—表6,可得到3%、6%和9%水泥掺量的水泥土最大干密度随延迟击实时间的变化情况,如图3所示。

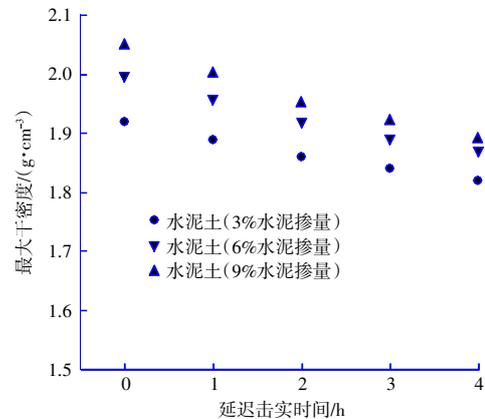


图3 最大干密度与延迟击实时间关系曲线

Fig. 3 Curves of maximum dry density and delay compaction time

图3中,3%、6%和9%水泥掺量水泥土的最大干密度随延迟击实时间的变化趋势一致,呈现为水泥土的最大干密度随延迟击实时间的延长而减小,且减小的趋势随延迟击实时间的延长有所降低。此外可以看出,水泥土最大干密度随水泥掺量的提高而增大,但增大效率有所降低。因此认为,适当提高水泥掺量和缩短延迟击实时间可有效提高水泥土的最大干密度。

#### 3.2 7d无侧限抗压强度试验结果分析

对3%、6%和9%水泥掺量的水泥土在不同击实时段击实后,得到的水泥土试块,分别进行7d无侧限抗压强度试验,试验结果如表7所示。

表7 水泥土7d无侧限抗压强度

Table 7 7d unconfined compressive strength of cement-solidified soil

水泥掺量/%	各延迟击实时间对应的水泥土7d无侧限抗压强度/MPa				
	0 h	1 h	2 h	3 h	4 h
3	0.97	0.81	0.68	0.60	0.54
6	1.10	0.91	0.76	0.67	0.60
9	1.19	0.99	0.83	0.71	0.63

根据表7可得到3%、6%和9%水泥掺量水泥土的7d无侧限抗压强度随延迟击实时间的变化情况,如图4所示。

图4中,3%、6%和9%水泥掺量水泥土的7d无侧限抗压强度随延迟击实时间延长而降低。在延迟击实时间为0时,即撒布水泥后立即击实,3%、6%和9%水泥掺量水泥土的7d无侧限抗压

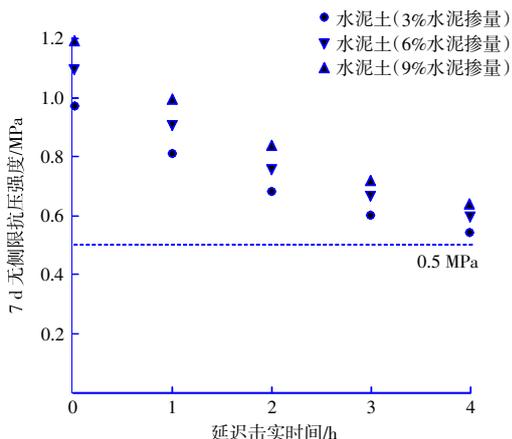


图4 7 d 无侧限抗压强度与延迟时间关系

Fig. 4 Relationship between 7 d unconfined compressive strength and delay time

强度分别达到最高，分别为 0.97 MPa、1.1 MPa 和 1.19 MPa，其强度差值为 0.22 MPa；在延迟击实时间为 4 h 时，即撒布水泥后静置 4 h 时再进行击实，3%、6%和 9%水泥掺量水泥土的 7 d 无侧限抗压强度分别为 0.54 MPa、0.6 MPa 和 0.63 MPa，其强度差值为 0.09 MPa。可以发现，随延迟击实时间的延长，水泥土的 7 d 无侧限抗压强度受水泥掺量的影响越小。3%、6%和 9%水泥掺量水泥土延迟 4 h 击实，其 7 d 无侧限抗压强度分别降低 44.3%、45.5%和 47.1%。可以看出，水泥掺量提高，水泥土 7 d 无侧限抗压强度随延迟击实时间延长而减低的幅度越大。根据设计需求，3%水泥掺量的水泥土在 4 h 内完成击实，其 7 d 无侧限抗压强度大于 0.5 MPa，满足强度要求。

### 4 碾压工艺

水泥土的碾压击实为施工过程中的重要工艺，直接影响场地的表现及物理性能。为此，制定 2 种碾压施工方案，通过试验择优选用。

#### 4.1 碾压方案

碾压遵循先快后慢原则，碾压过程连续紧凑，并保证在水泥初凝前完成碾压。碾压时，严禁压路机在碾压中和已成型的路基上掉头或急刹。根据使用机械以及施工工序的不同，制定 2 种碾压施工方案，碾压顺序及遍数为：

方案 1（普通压路机碾压）：16 t 压路机静压 1 遍（轮迹搭接 40 cm）→16 t 压路机弱振 1 遍（轮迹搭接半轮）→16 t 压路机弱振 1 遍（轮迹搭接 40 cm）→16 t 压路机弱振 1 遍→普通压路机收面。

方案 2（胶轮碾压）：16 t 压路机静压 1 遍（轮

迹搭接 40 cm）→16 t 压路机弱振 1 遍（轮迹搭接半轮）→16 t 压路机弱振 1 遍（轮迹搭接 40 cm）→16 t 压路机弱振 1 遍→胶轮压路机收面。

#### 4.2 碾压结果及分析

根据上述研究，实际选用 3%水泥掺量的水泥土，延迟击实时长 4 h，经 2 种施工方案碾压后的场地收面效果如图 5 所示。

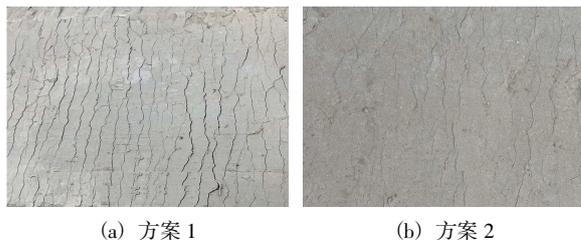


图5 场地收面效果图

Fig. 5 Renderings of site finishing

从图 5 可以看出，方案 1 的场地收面效果不理想，裂纹明显，最大裂纹宽度达 4 mm；方案 2 的场地裂纹细且少，最大裂纹宽度仅 1.5 mm，其场地收面效果对比方案 1 有较大提升。综上，针对水泥掺量 3%的水泥土延迟 4 h 击实，采用胶轮碾压后的场地收面效果更好。

2 种方案施工后的压实度检测情况见表 8 和表 9。

表 8 方案 1 现场检测数据

Table 8 Field test data of scheme 1

试点编号	含水量/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	压实度/%
1	17.1	1.52	93.5
2	16.9	1.50	93.0
3	16.9	1.50	94.5
4	16.8	1.58	94.8

表 9 方案 2 现场检测数据

Table 9 Field test data of scheme 2

试点编号	含水量/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	压实度/%
1	17.0	1.50	94.8
2	16.6	1.58	95.1
3	17.2	1.52	94.7
4	17.1	1.56	94.4

根据表 8 和表 9 中 2 种碾压方案的碾压后土方压实度可以算出，方案 1 的平均压实度为 93.95%，方案 2 的平均压实度为 94.75%，即采用胶轮碾压的方案 2 压实效果更好。

## 5 结语

本文基于实际工程需求,通过试验研究了土方的含水率控制方法、延迟击实时间对水泥土7d无侧限抗压强度的影响和碾压工艺对水泥土压实度的影响。根据试验结果得出以下结论:

1) 通过试验以及多项式拟合得到了洒水后和施工前2个时间点土方含水率之间的关系,为工程提供了施工依据。此外,本文中提出的对土方的含水率控制方法可为今后工程提供设计依据和施工方法。

2) 水泥土的最大干密度随延迟击实时间的延长而减小,随水泥掺量的提高而增大,即提高水泥掺量和缩短延迟击实时间可有效提高水泥土的最大干密度和抗压强度。结合本工程的设计强度要求,决定选用水泥掺量为3%的水泥土对场地进行加固。

3) 对2种场地碾压施工工艺进行试验对比,结果显示胶轮碾压的施工方案场地收面效果更好,且压实度更稳定,因此在水泥土施工过程中,建议采用胶轮碾压。

本项目通过对水泥土施工技术的应用,证明了水泥土施工工艺用于加固吹填土地地的可靠性,同时保证了本项目的施工质量。振华重工长兴智能港口装备产业项目中,水泥土的压实度、7d无侧限抗压强度检测全部合格,道堆场地已交验完成。希望本文中采用的土方含水率控制方法、延迟击实试验方法以及碾压工艺参数可对今后类似工程提供参考。

### 参考文献:

[1] 刘俊霞,张晶,曹玉鹏,等.基于灰水比指数的水泥土无侧限抗压强度[J].中国港湾建设,2023,43(6):1-5.  
LIU Jun-xia, ZHANG Jing, CAO Yu-peng, et al. Unconfined compressive strength of cement-solidified soil based on water-cement ratio index[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(6): 1-5.

[2] 陈昌富,吕晨阳,蔡焕,等.不同应力养护条件对水泥土力学性能影响试验研究[J/OL].铁道科学与工程学报,2023-06-09.  
[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HboJJBuTKtRq1QUTrYpM9iSmXL6ESStxCzRD-FqutCRlo2LtYuQFs3sGXjCLGV14ihkVOxRRLqLUp93344rzmPHC9JPb\\_clPIYqdHzmBFIoWzrUdPNxSJQ==](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HboJJBuTKtRq1QUTrYpM9iSmXL6ESStxCzRD-FqutCRlo2LtYuQFs3sGXjCLGV14ihkVOxRRLqLUp93344rzmPHC9JPb_clPIYqdHzmBFIoWzrUdPNxSJQ==)

&uniplatform=NZKPT.

CHEN Chang-fu, LÜ Chen-yang, CAI Huan, et al. Experimental study on mechanical properties of cement soil under different stress curing conditions[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023-06-09. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HboJJBuTKtRq1QUTrYpM9iSmXL6ESStxCzRD-FqutCRlo2LtYuQFs3sGXjCLGV14ihkVOxRRLqLUp93344rzmPHC9JPb\\_clPIYqdHzmBFIoWzrUdPNxSJQ==&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HboJJBuTKtRq1QUTrYpM9iSmXL6ESStxCzRD-FqutCRlo2LtYuQFs3sGXjCLGV14ihkVOxRRLqLUp93344rzmPHC9JPb_clPIYqdHzmBFIoWzrUdPNxSJQ==&uniplatform=NZKPT).

[3] 陈庚,林民国,吴勇强,等.水泥土拌合均匀度量化方法及其试验研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):504-512.  
CHEN Geng, LIN Min-guo, WU Yong-qiang, et al. The quantification method and verification tests of the mixing uniformity of cement soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 504-512.

[4] 王志勇,杜广印,章定文,等.引江济淮白山船闸水泥土强度试验[J].长江科学院院报,2023,40(6):147-153.  
WANG Zhi-yong, DU Guang-yin, ZHANG Ding-wen, et al. Experimental study on the strength of cemented soil in Baishan navigation lock of Yangtze-Huaihe water diversion project[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 147-153.

[5] 余静.水泥土力学试验及工程应用研究[D].杭州:浙江大学,2019.  
YU Jing. Cement-stabilized soil mechanics performance test and its engineering application research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[6] SULLIVAN W G, HOWARD I L. Time delay effects on compactability of soil-cement materials during proctor testing[J]. Transportation Research Record, 2021, 2675(8): 036119812199870.

[7] TAKAHASHI H, SATO I, MORIKAWA Y, et al. Long-term durability of cement-treated soil used in offshore airport island construction[J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8081.

[8] JOSE E M B, ALEJANDRO R S Q, AZIZ N T, et al. Cement stabilized soil field samples: Quality control for bases and sub-bases[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(7): 4169-4184.

[9] 王方圆,肖瑜,于春亮.水泥土的工程特性研究[J].水利技术监督,2023(7):105-108.  
WANG Fang-yuan, XIAO Yu, YU Chun-liang. Research on engineering characteristics of cement soil[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023(7): 105-108.

[10] 单宇昂.水泥土路用性能研究与工程应用[J].施工技术(中英文),2023,52(9):137-141.  
SHAN Yu-ang. Research and engineering application of cement soil road performance[J]. Construction Technology, 2023, 52(9): 137-141.