

淤泥水泥土和填筑黄土的物理力学特性试验研究^{*}

韩苏建^{1, 2}, 李 宁¹, 郭敏霞², 李元婷²

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 全过程采用水泥砂浆试验设备和方法, 研究了水灰比、水泥掺量、养护龄期对水泥固化淤泥土和填筑黄土试块的物理力学特性影响。结果表明, 随水灰比和水泥掺量的增加, 淤泥水泥土密度变化不大, 而填筑黄土密度降低; 淤泥水泥土随水泥掺量的增大, 其无侧限抗压强度和抗剪强度明显增大; 填筑黄土水泥土随水泥掺量的增大, 无侧限抗压强度和抗剪强度值出现波动现象。随龄期的增加, 2 种水泥土抗压强度都在增长, 且规律比较接近。研究还表明, 掺加水泥后, 2 种土渗透性能改善比较显著。

[关键词] 淤泥土; 填筑黄土; 水泥固化土; 力学特性

[中图分类号] TU 432

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)05-0097-04

利用水泥作固化剂, 通过强制搅拌将水泥浆注入软土基础, 使水泥和软土间产生一系列物理化学反应, 形成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土, 从而可以有效地提高被搅拌软土的强度和变形模量, 该项技术在工程加固处理中使用比较普遍。经过水泥加固改性的土体, 其物理力学特性对复合基础的承载力、变形以及稳定性有很大的影响, 很多学者对此展开了深入研究^[1~3]。目前, 该方法在南方的道路、港口软基中应用比较多, 但对北方地区的黄土用水泥固化处理的报道还未见到。本研究以某病险水库加固处理坝前淤积层的清淤工程为依托, 对淤泥土和填筑黄土 2 种不同类型土体, 按不同配比进行人工水泥土室内拌制固化, 全程采用水泥砂

浆试验设备和方法对该固化土试块的物理力学特性进行了室内试验, 探讨了 2 种土料生成的水泥固化土的物理力学特性与水灰比、水泥掺量和龄期的关系, 以及 2 种固化土力学特性差异的原因所在, 以期作为北方地区水泥固化处理工程提供参考。

1 试件制备与试验方法

1.1 试件制备与养护

试验所用的土料有 2 种, 即坝前淤泥土和填筑黄土。淤泥土取自陕西关中西部某病险水库上游坝前淤积层, 埋深为 3~4 m; 填筑黄土取自该库上游淤积层下, 埋深 8~9 m。其基本性质见表 1。

表 1 土料基本性质

Table 1 Earth basic properties

土类 Soil class	液限/% L in it of liquidity	塑限/% L in it of plastic	塑性指数 Plastic index	含水率/% Moisture content of soil
淤泥土 Mud	36.2	18.6	17.6	62.0
填筑黄土 Filling loess soil	32.0	17.9	14.1	20.0

经过初步拌合并参照以往的试验成果^[1~3], 对水泥固化淤泥土, 设计的水灰比为 0.40, 0.45 和 0.50, 水泥掺量分别为 80, 120, 160, 200 g/kg, 进行室内成型; 对水泥固化填筑黄土, 设计的 3 个水灰比为 1.61, 1.66 和 1.71, 水泥掺量同上, 进行室内成型。成型时尽量与实际施工情况相类似, 先将水泥与

水及外加剂按设计好的比例搅拌成水泥浆, 然后与土按比例搅拌均匀, 并放入试模中插捣密实, 在温度为 20℃左右, 相对湿度为 50% 以上的环境中放置 24 h 后退模, 并移至混凝土标准养护室养护(养护时将成型好的试件置于塑料袋中, 扎紧袋口放在水中)至试验龄期。

^{*} [收稿日期] 2003-04-14

[作者简介] 韩苏建(1964-), 男, 江苏泗洪人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事材料结构研究。

1.2 试验方法

- 1.2.1 水泥土密度试验 用天平称取试件质量,用
量积法测量体积,然后计算出单位体积的质量,即密
度。
- 1.2.2 无侧限抗压强度试验 无侧限抗压强度试
件采用 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 正方体,每组
3 个试件,试验在万能材料试验机上进行。
- 1.2.3 抗剪强度试验 抗剪强度采用夹具法^[4],利
用楔形剪切仪在万能材料试验机上进行加压试验,
试件的夹具和受力情况见图 1。

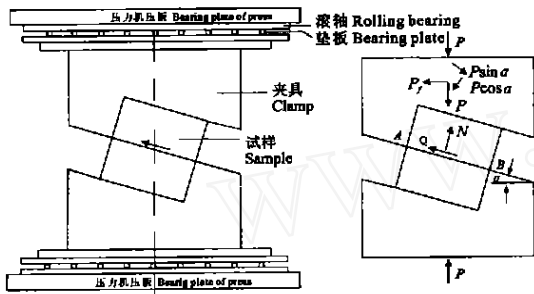


图 1 试验装置及试件受力图
Fig. 1 Experimental device and
specimen forced diagram

将水泥土样制备成 5 cm×5 cm×5 cm 的正方
体试样,每组试验 9 个试样,α 分别取 50°、60 和
70°;当达到破坏荷载时即可得出其对应的正应力 σ
和剪应力 τ,进而绘出 σ~τ 曲线,从图中可得到其粘
聚力 c 和内摩擦角 φ。抗剪试验的计算公式如下:

$$\sigma = \frac{P}{A} (\cos \alpha + f \sin \alpha) \tag{1}$$

$$\tau = \frac{P}{A} (\sin \alpha - f \cos \alpha) \tag{2}$$

式中,σ 为正应力,MPa; τ 为剪应力,MPa; P 为剪切
面上总荷重,kN; A 为剪切面积,cm²; f 为圆柱形柱

- 子滚子与上下盘压板的磨擦系数; α 为试件倾角。
- 1.2.4 抗渗试验 水泥土的渗透系数用砂浆渗透
仪进行测定。渗透试模为上下口直径有一定差值的
截头圆锥形,试模厚度为 30 cm。试验前将成型好,
并养护到龄期的试样首先进行抽真空饱和,然后用
黄油涂抹周边,装入试模中,再装到渗透仪上加压至
一定的水头,并保持该水头不变,待渗透稳定后开始
计时,并记录水位,经过 t 时间后,用量筒量取渗透
水量,用(3)和(4)式计算渗透系数:

$$K_T = \frac{QL}{A H t} \tag{3}$$

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_t}{\eta_{t0}} \tag{4}$$

式中, K_T 为水温为 T °C 时试样的渗透系数, cm/s;
Q 为时间 t 秒内的渗透水量, cm³; L 为平均水位差,
cm; K₂₀ 为标准温度(20 °C)时的渗透系数, cm/s; η_t
为 T °C 时水的动力粘滞系数, cPa·s; η_{t0} 为 20 °C 时
水的动力粘滞系数, cPa·s; t 为时间, s。

2 结果与分析

2.1 水泥土密度试验

水泥掺量、水灰比与水泥土密度的关系如表 2
所示。由表 2 可知,填筑黄土水泥土的密度明显高于
淤泥水泥土,这是因为填筑黄土的天然密度本身就
大于淤泥土,因此在同样的水泥掺量下,水泥搅拌填
筑黄土的密度也必然高于搅拌淤泥土。对淤泥水泥
土,随着水灰比和水泥掺量的增加,其密度分别存在
有减小和增大的趋势,但变化并不明显。对填筑黄
土水泥土,随着水灰比和水泥掺量的增加,其密度均
有减小的趋势,减小幅度的最大值分别为 0.04 和 0
g/cm³。

表 2 水泥掺量、水灰比与水泥土密度的关系

Table 2 Relation between cement content, cement water ratio and density of soil-cement										g/cm ³	
土类 Soil class	水灰比 Cement- water ratio	水泥掺量/(g · kg ⁻¹) Cement content				土类 Soil class	水灰比 Cement- water ratio	水泥掺量/(g · kg ⁻¹) Cement content			
		80	120	160	200			80	120	160	200
淤泥土 Mud	0.40	1.62	1.63	1.65	1.64	填筑黄土 Filling loess soil	1.61	1.82	1.79	1.75	1.74
	0.45	1.62	1.63	1.64	1.64		1.66	1.80	1.78	1.74	/
	0.50	1.61	1.63	1.63	/		1.71	1.80	1.77	1.74	1.70

2.2 无侧限抗压强度试验

水泥土的无侧限抗压强度与水泥砂浆一样,与
龄期有着密切的关系。随着龄期的延长,水泥水化更
趋充分,水化产物的不断增加促进了水泥对土颗粒
胶结强度的增长,所以无侧限抗压强度增大。从 3 种
水灰比和 4 个水泥掺量 33 个试件的试验结果可知,

相对于 90 d 龄期强度,淤泥水泥土 14 d 和 28 d 的
强度增长分别为 18% 和 27%; 填筑黄土水泥土 14 d
和 28 d 的强度增长分别为 20% 和 25%。

不同水灰比及水泥掺量下水泥土 90 d 的强度
试验结果见表 3。由表 3 知,水灰比对水泥土强度的
影响不大。对淤泥水泥土而言,随水泥掺量的增加,

其强度明显增大,变化量为 2 31~ 2 70 M Pa。对填筑黄土水泥土而言,随水泥掺量的增加,在水灰比为 1 61 时,其强度呈增大趋势;但当水灰比增至 1 66 和 1 71 时,随着水泥掺量的增加,强度值出现波动。造成这一现象的原因可以从以下几方面进行分析:①随着水泥掺量增加,淤泥水泥土密度增大,而填筑黄土水泥土的密度减小,且减小幅度过大。密度减小

是造成无侧限抗压强度降低的原因之一。②一般情况下,对土体材料而言,随密度增加,其强度增大,但水泥土强度并不单纯取决于密度,还取决于水泥掺量,2 种情况同时在水泥土中存在,就会出现强度的波动。③土样不均匀及养护条件、水泥水化程度等诸多因素也对水泥土的强度有一定影响。

表 3 不同水泥掺量和水灰比下水泥土 90 d 的无侧限抗压强度

Table 3 90 days' unconfined compressive strength of soil-cement with different cement content and cement-water ratio

土类 Soil class	水灰比 Cement- water ratio	水泥掺量/(g · kg ⁻¹) Cement content				土类 Soil class	水灰比 Cement- water ratio	水泥掺量/(g · kg ⁻¹) Cement content			
		80	120	160	200			80	120	160	200
淤泥土 Mud	0 40	1 15	1 42	1 87	3 85	填筑黄土 Filling loess soil	1 61	3 00	3 39	3 74	4 40
	0 45	0 82	2 05	2 32	2 91		1 66	3 45	3 12	3 30	/
	0 50	0 82	1 75	3 13	/		1 71	3 40	3 27	3 42	3 76

2 3 抗剪强度试验

抗剪强度随龄期的变化情况如图 2 和 3 所示。由图 2、3 可见,随龄期增长,粘聚力(c)和内摩擦角(φ)均增大,且粘聚力在 28~ 90 d 时的增长幅度远大于 14~ 28 d。内摩擦角变化幅度均不大。

水泥土不同水灰比和水泥掺量下 90 d 的抗剪

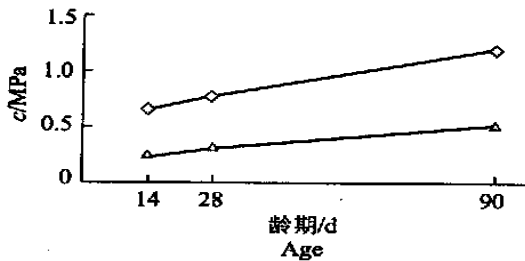


图 2 龄期与粘聚力的关系
- ◇ - . 填筑黄土; - △ - . 淤泥

Fig 2 Relation between age and cohesion
- ◇ - . Filling loess; - △ - . Mud

强度试验结果见表 4。由表 4 可见,影响抗剪强度的因素依然主要是水泥掺量,且水泥掺量对淤泥水泥土的影响程度远大于填筑黄土水泥土。这可能是淤泥水泥土和填筑黄土水泥土的无侧限抗压强度变化不一致所致。

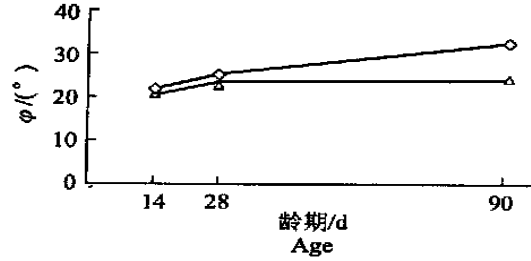


图 3 龄期与内摩擦角的关系
- ◇ - . 填筑黄土; - △ - . 淤泥

Fig 3 Relation between age and internal friction angle
- ◇ - . Filling loess; - △ - . Mud

表 4 水泥掺量、水灰比与水泥土抗剪强度试验结果

Table 4 The test results of share resistant strength of soil-cement with different cement content and cement-water ratio

土类 Soil class	水灰比 Cement- water ratio	水泥掺量/(g · kg ⁻¹) Cement content								土类 Soil class	水灰比 Cement- water ratio	水泥掺量/(g · kg ⁻¹) Cement content							
		80				120						160				200			
		c/ M Pa	φ (°)	c/ M Pa	φ (°)	c/ M Pa	φ (°)	c/ M Pa	φ (°)			c/ M Pa	φ (°)	c/ M Pa	φ (°)	c/ M Pa	φ (°)		
淤泥土 Mud	0.40	0.53	24.4	0.56	27.6	1.12	29.7	1.62	29.9	填筑黄土 Filling loess soil	1.61	1.21	32.7	1.00	29.3	1.45	26.9	1.48	30.0
	0.45	0.48	20.7	0.59	23.6	0.77	24.6	0.89	28.4		1.66	1.01	27.6	1.42	25.1	1.32	26.9	/	/
	0.50	0.37	25.7	0.94	26.0	1.43	29.9	/	/		1.71	/	/	1.55	23.0	1.32	25.0	1.15	26.1

2 4 抗渗试验

龄期为 28 和 90 d 时,对水泥土渗透系数的测定结果表明,淤泥水泥土的渗透系数为 9 25 × 10⁻⁹ ~ 2 04 × 10⁻⁹ cm/s 和 7 83 × 10⁻⁹ ~ 1 23 ×

10⁻⁹ cm/s,变化均在一个数量级内;填筑黄土水泥土的渗透系数为 7 48 × 10⁻⁹ ~ 2 06 × 10⁻⁹ cm/s 和 5 64 × 10⁻⁹ ~ 1 12 × 10⁻⁹ cm/s,变化亦在一个数量级内。该结果说明,水灰比、水泥掺量、龄期对水泥土

渗透系数影响不大,但相对于纯淤泥土和填筑黄土 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}^{[5]}$ 的渗透系数而言,掺加水泥后对提高土的抗渗透性能效果显著。

3 结 论

1) 填筑黄土水泥土的密度明显高于淤泥水泥土。对淤泥水泥土,随着水灰比和水泥掺量的增加,其密度分别存在减小和增大的趋势,但变化均不是很明显;对填筑黄土水泥土,随着水灰比和水泥掺量的增加,其密度均有减小的趋势,且降低幅度较大。

2) 水灰比对水泥土无侧限抗压强度和抗剪强度指标影响不明显,而水泥掺量对无侧限抗压强度和抗剪强度的影响则比较大。因此,增加水泥用量更容易提高水泥土的强度。

对淤泥水泥土,随着水泥掺量的增加,其无侧限抗压强度和抗剪强度指标明显增大,且变化较为明

显;对填筑黄土水泥土,随着水泥掺量的增加,其无侧限抗压强度和抗剪强度指标值变化不明显。

3) 水泥土渗透系数普遍较小,本试验结果虽未表明水灰比、水泥掺量、龄期和渗透系数的关系,但掺加水泥对于淤泥土和填筑黄土渗透性能的改善效果比较显著。

4) 从本研究可以看出,对淤泥水泥土而言,随水泥掺量的增加,其强度明显增大;对填筑黄土水泥土而言,随水泥掺量的增加,强度值出现波动现象。这与文献[1~3]报道的水泥掺量增加对软土基础更容易产生较为明显的效果这一结论一致。

5) 对于水泥固化土,目前还没有统一规范的试验方法,本试验探索性地采用全套水泥砂浆试验手段,研究了淤泥水泥土和填筑黄土水泥土的物理力学性能,就试验方法等方面对试验结果的影响则未做过多探讨,还有待今后工作的进一步完善。

[参考文献]

- [1] 陈 甦,宋少华,沈剑林,等.水泥粉喷桩桩体水泥黑土力学性质试验研究[J].岩土工程学报,2001,23(3):302-305
- [2] 汤怡新,刘汉龙,朱 伟,等.水泥固化土工程特性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(5):549-554
- [3] 何润芝,魏小胜,陈 庆,等.高压喷射注浆水泥固化机理[J].武汉理工大学学报,2002,24(9):31-33
- [4] 重庆建筑工程学院,同济大学.岩体力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1981
- [5] 刘祖典.黄土地力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997

Study on physical mechanical characters of cement stabilized mud and filling loess

HAN Su-jian^{1,2}, LI Ning¹, GUO M in-xia², LI Yuan-ting²

(1 School of Water Resources and Hydroelectric Power, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of

Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the entire research process, the effect of water-cement ratio, mix amount of cement and curing age on the physical and mechanical properties of mud and filling loess stabilized by cement is studied by means of the experimental device and method of cement mortar. The results show that the density of stabilized mud changes only a little and that of stabilized filling loess decreases with the rise of water-cement ratio and cement content, the unconfined compressive strength and share strength of stabilized mud all rise remarkably with the increase of cement content, and however those of stabilized filling loess fluctuate with the increase of cement content. Meanwhile, the compressive strengths of these two kinds of cement soil all increase and have the similar developing process with the rise of curing age. Moreover, the research shows that these two kinds of cement soil all have considerable improvement in permeability with the mixing of cement.

Key words: mud; filling loess; cement stabilized soil; mechanical character