

中粉质壤土泥浆排水固结规律研究

杨锋¹, 张武俊², 刘长涛³, 朱首军¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西省水土保持局, 陕西 西安 710004; 3. 延安市志丹县水务局, 陕西 延安 717599)

摘要: 泥浆的排水固结变化对水坠坝筑坝过程中坝体排水系统的合理布设具有重要的指导作用。将中粉质壤土以 1:1, 1.5:1 和 2:1 的土水比制成泥浆, 并将制得泥浆分别填充在高度为 50, 100, 150 和 200 cm 的聚乙烯波纹管中, 对其排水量、上析水量、下渗水量和固结沉陷量等指标进行测定。结果表明, 同一土水比的泥浆, 上述指标随着泥浆填充高度的增加而增大; 同一泥浆填充高度, 上述指标随着土水比的增大而减小。泥浆的排水量、固结沉陷量主要集中于前 24 h, 排水量最大可占总排水量的 89.48%, 固结沉陷量最大可占总固结沉陷量的 93.24%。因此, 在实际筑坝过程中土水比较小时, 应注重坝体泥浆的前期排水, 并加强表层排水; 土水比较大, 充填高度较小时, 可考虑不布设坝体泥浆表层排水措施, 而要加强下渗水的排水措施。

关键词: 中粉质壤土; 排水固结; 泥浆

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0044-06

中图分类号: S276.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.010

Water Drainage and Consolidation for Mud of Moderate Silty Loam

YANG Feng¹, ZHANG Wu-jun², LIU Chang-tao³, ZHU Shou-jun¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Soil and Water Conservation Bureau of Shaanxi Province, Xi'an,

Shaanxi 710004, China; 3. Zhidan County Water Authority, Yan'an, Shaanxi 717599, China)

Abstract: The change of mud drainage and consolidation plays an important role in reasonable arrangement of drainage system in the construction process of hydraulic fill dam. By taking moderate silty loam as the research object, mud was separately packed at three soil-water ratios (1:1, 1.5:1 and 2:1) in four polyethylene corrugated pipes of 50, 100, 150 and 200 cm in height and indexes for quantity of water discharge, up-water separating, penetration and the amount of consolidation-subsidence were measured. Results show that all the indexes increased with increasing mud height at the same soil-water ratio. However, the indexes decreased with increasing soil-water ratio in the same height mud. The amount of discharged water and subsidence were mainly observed in the first 24 h, with the maximum 89.48% and 93.24% in total quantity, respectively. Therefore, in practice, it is necessary to enhance the previous up-water discharge at low soil-water ratio and meanwhile, no arrangement of drainage systems in surface mud is needed except enhancing the drainage measures of penetrating water.

Keywords: moderate silty loam; drainage and consolidation; mud

黄土高原丘陵沟壑区是中国乃至世界水土流失最严重的地区, 作为该区水土流失治理重要措施之一的淤地坝, 在生态效益、社会效益和经济效益等方面均产生了显著作用^[1-3]。

目前, 中国淤地坝的修筑方式主要有水坠和碾压两种方式, 其中水坠法具有工效高, 利用时间长, 效益

高, 投资少的特点^[4-5], 使其得到了快速发展。水坠坝体的脱水固结是筑坝的关键^[6], 而直接判别坝体泥浆脱水固结快慢的依据是坝体排水效果是否显著。为了加快坝体泥浆的脱水固结, 在实践中采用无纺土工织物包裹聚乙烯微孔波纹管的排水系统, 它是排水反滤的较佳结合^[7-10], 因其具有施工方便, 成本低廉, 加

收稿日期: 2013-10-30

修回日期: 2013-11-21

资助项目: 陕西省水土保持局重点科研项目“泥浆泵筑坝技术试验研究”(0020701)

作者简介: 杨锋(1987—), 男(汉族), 陕西省洋县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。E-mail: 670022526@qq.com。

通信作者: 朱首军(1965—), 男(汉族), 江苏省沛县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持工程、小流域综合治理等方面的教学及科研工作。E-mail: zhushoujun@nwsuaf.edu.cn。

速排水等特点而被广泛使用。此外,动力排水固结法在软土排水方面得到了成功而广泛的应用^[11]。但坝体泥浆的排水规律研究较少,直接影响了坝体聚乙烯微孔波纹管道的合理布设。

本文通过研究泥浆排水固结随着泥浆土水比、填充高度的变化规律,为工程实践确定合理的排水措施,布设合理的排水管道结构提供重要的理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究供试土样取自延安市志丹县顺宁镇任坪村前拐沟村泥浆泵筑坝项目现场。泥浆泵筑坝是在水坠坝的基础上发展而成的一种新型筑坝工艺,是将

土和水按一定的体积比例,经机械设备搅拌后所成的浆体用泥浆泵输送至坝面,脱水固结后所形成的泥浆坝。通过土工试验^[12]测定,粒径小于 0.005 mm 的土粒含量为 18.81%,不均匀系数 C_u 为 12.7,曲率系数 C_c 为 2.0;最大干密度 ρ_{dmax} 和最优含水率 ω_{op} 的均值 μ 的 95% 置信区间分别为 $[1.68, 1.70 \text{ g/cm}^3]$ 和 $[15.83\%, 17.85\%]$;渗透系数为 $1.78 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$;液限 ω_L 为 27.9,塑限 ω_P 为 18.9,塑性指数 I_p 为 9.0。据《水坠坝技术规范》(SL302—2004)关于水坠坝土料分类的界定,当满足小于 0.005 mm 的土粒含量 $\in [15\%, 20\%]$,液限 $\omega_L \in [26\%, 42\%]$,塑性指数 $I_p \in [7\%, 17\%]$ 时为中粉质壤土,所以,本试验所采用的土壤为中粉质壤土,其粒径分布不均匀且级配良好,可以作为水坠坝的修筑土料(表 1)。

表 1 试验土料的物理性质

土 壤	天然干容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土粒密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	颗粒组成/%		
			细粒(<0.005 mm)	粉粒(0.005~0.075 mm)	砂粒(0.075~2.0 mm)
中粉质壤土	1.50	2.71	18.81	66.68	14.51

1.2 泥浆制备

本试验模拟泥浆泵现场筑坝泥浆,采用人工方式进行泥浆的制备,且每次搅拌泥浆的时间保持一致。采用烘干法测定土样含水量,按照公式(1)和(2)^[4]计算配置不同土水比的泥浆时土样所需水的质量。

$$K_n = \frac{r_n - 1}{A_1 - B_1(r_n - 1)} \quad (1)$$

式中: K_n ——泥浆土水比; r_n ——泥浆容重(g/cm^3); A_1, B_1 ——计算常数, $A_1 = (1 - \frac{1}{G_s})r_d, B_1 = (\frac{1}{G_s} + \omega)r_d$; r_d ——土的干容重,可用土料自然状态的干容重或坝体设计时的干容重(g/cm^3); ω ——土料的天然含水率; G_s ——土料相对密度。

$$\omega_0 = \frac{1 - \frac{r_n}{G_s}}{r_n - 1} \quad (2)$$

式中: ω_0 ——泥浆含水率; r_n ——泥浆容重(g/cm^3); G_s ——土料相对密度。

1.3 试验装置制作与安装

采用直径 30 cm 的聚乙烯波纹管,分别截成 50, 100, 150 和 200 cm 4 种高度,将其竖直固定在特制的铁皮桶中,铁皮桶底部边缘安装阀门;在铁皮桶内放置圆形铁支架,圆形支架与铁皮桶内壁紧贴。在波纹管一开口端包裹一层无纺土工布并用尼龙绳扎紧,再在无纺土工布外包裹钢丝网,并将此开口端向下套入铁皮桶中,竖立放置在支架上,铁皮桶内壁与波纹管外壁紧贴,并在铁皮桶与波纹管接缝处用透明胶带将

其和波纹管密封,以防止蒸发。

1.4 充填泥浆与测定

配置土水比为 1:1, 1.5:1 和 2:1 的泥浆,将每一种土水比的泥浆分别充填在不同高度的聚乙烯波纹管中。为了减少误差,同一土水比泥浆在充填不同高度聚乙烯波纹管时,要求充填泥浆起止时间相同,一次性充填完毕,准确记录时间。聚乙烯波纹管顶部用塑料布加盖密封,防止水分蒸发损失和下雨时水分进入。

定期使用量筒对泥浆下渗水量和表层上析水量进行测定,用直尺(精度 1.0 mm)对泥浆的沉陷量进行测定。对泥浆初期下渗水量的测量时段为 30 min,随着下渗水量的逐渐减少,测量时段逐渐调整为 6 h。对泥浆表层析水量以及泥浆面的沉陷量测量时段为 24 h。当其中的 3 个试验泥浆上析水量和下渗水量同时为 0 时停止观测。

2 结果与分析

2.1 土水比和泥浆高度对排水量的影响

试验中泥浆水分分别通过表层析水和下渗两个途径排出。泥浆填筑完成后,在自重的作用下,土颗粒与水分进行重新分配,部分水分转移到泥浆体表层析出,即上析水;部分水分在自身重力和上层泥浆压力的双重作用下逐渐渗出,即下渗水。

由图 1a 可知,同一土水比的泥浆,随着填充高度的增加,其排水量亦增加。土水比为 1:1 时,填充高

度 100, 150, 200 cm 的泥浆排水量分别是填充高度 50 cm 排水量的 2.0, 3.0 和 3.9 倍; 土水比为 1.5 : 1 时, 分别是 2.3, 3.6, 4.7 倍; 土水比为 2 : 1 时, 分别是 2.1, 3.4, 5.3 倍。由于泥浆填充越高, 泥浆体积越大, 泥浆含水量越多, 相应排水量越大。同一泥浆填充高度下, 土水比越小, 其排水量越大。泥浆填充高度

50 cm 时, 土水比 1 : 1 的泥浆排水量分别是土水比 1.5 : 1, 2 : 1 的 1.7 和 3.6 倍; 泥浆填充高度 100 cm 时, 分别是 1.4 和 3.4 倍; 泥浆填充高度 150 cm 时, 分别是 2.3 和 3.2 倍; 泥浆填充高度 200 cm 时, 分别是 1.4 和 2.7 倍。土水比越小, 泥浆本身初始含水率越大, 泥浆所含的自由水量越大, 排出的水量也越多。

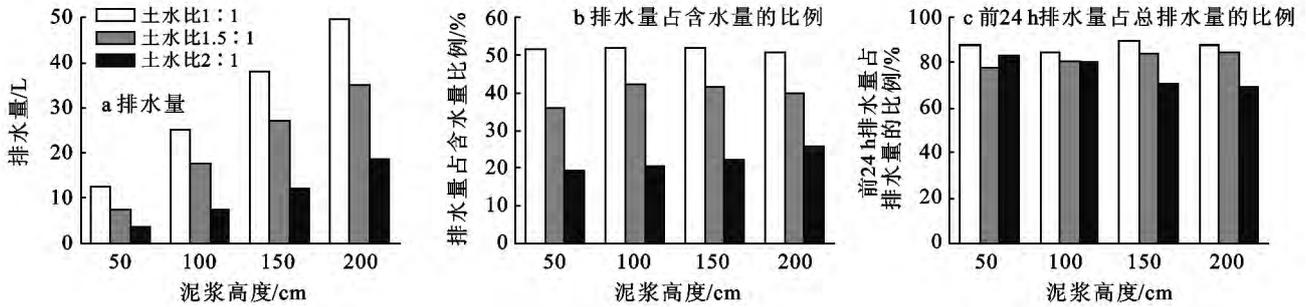


图 1 不同土水比、泥浆高度与排水量的关系

由图 1b 可知, 对于同一土水比, 随着泥浆填充高度的增大, 泥浆排水量占泥浆含水量的比例变化较小。土水比为 1 : 1 时, 4 种泥浆高度下泥浆排水量占含水量的比例为 50.64% ~ 51.92%, 平均 51.48%; 土水比为 1.5 : 1 时, 比例为 36.12% ~ 42.32%, 平均 39.99%; 土水比为 2 : 1 时, 比例为 19.28% ~ 25.56%, 平均 21.82%。对于同一泥浆填充高度, 土水比越大, 其排出水占泥浆含水量的比例越小。泥浆填充高度为 50 cm 时, 土水比 1 : 1, 1.5 : 1 和 2 : 1 的泥浆其排出水的比例分别为 51.56%, 36.12% 和 19.28%; 泥浆填充高度为 100 cm 时, 分别是 51.82%, 42.34% 和 20.35%; 泥浆填充高度为 150 cm 时, 分别是 51.92%, 41.51% 和 22.10%; 泥浆填充高度为 200 cm 时, 分别是 50.64%, 39.99% 和 25.56%。出现上述变化规律主要是土水比越小, 泥浆初始含水率就越大, 密度就越小, 相应的浆体孔隙比就越大, 浆体的透水性亦越大, 水分容易排出。

由图 1c 可知, 在泥浆的排水量中, 前 24 h 的排水量占总排水量的比例最大。在土水比为 1 : 1 时, 前 24 h 排出水占总排水量的比例为 84.26% ~ 89.48%, 平均 87.33%; 土水比为 1.5 : 1 时, 上述比例为 77.77% ~ 84.57%, 平均 81.80%; 土水比为 2 : 1 时, 上述比例为 69.44% ~ 82.87%, 平均 75.79%。由于在泥浆的拌合过程中, 彻底破坏了原状土结构, 泥浆体开始受黏粒胶凝作用, 胶结成稳定的团块, 孔隙比大, 开始时排水速度快, 但随着泥浆的排水, 浆体中的孔隙水压力将逐渐消散使孔隙变小, 浆体越来越密实, 其排水性能也相应的降低^[13]。

根据土水比、泥浆高度与排水量的统计分析结果

表明, 对于同一土水比, 其排水量和泥浆高度呈现线性关系, 且相关性显著。回归分析结果如表 2 所示。

表 2 排水量与泥浆高度回归关系

土水比	回归方程	R^2
1 : 1	$y = 247x + 516$	0.999 3
1.5 : 1	$y = 184.27x - 1 199.5$	0.996 5
2.0 : 1	$y = 99.775x - 2 083$	0.987 6

注: y 为排水量 (ml); x 为泥浆高度 (cm)。

2.2 土水比和填筑高度对上析水量的影响

在试验过程中发现, 泥浆填充后 24 h 将表层析水排出后, 随着时间的推移, 泥浆表面不再有水分析出, 即泥浆的上析水在泥浆填充后 24 h 之内可以全部析出, 并且在泥浆的表面形成了一个致密的泥皮。

由图 2a 可知, 同一土水比, 随着泥浆填充高度的增加, 其上析水量也在增加。土水比为 1 : 1 时, 填充高度 100, 150, 200 cm 的泥浆上析水量分别是填充高度 50 cm 时上析水量的 2.4, 3.9 和 5.4 倍; 土水比为 1.5 : 1 时, 分别是 2.6, 5.0, 6.8 倍; 土水比为 2 : 1 时分别是 3.9, 8.8, 16.3 倍。对于同一泥浆填充高度, 土水比越小, 其上析水量越大。泥浆填充高度 50 cm 时, 土水比 1 : 1 的泥浆上析水量分别是土水比 1.5 : 1, 2 : 1 的 13.2 和 6.6 倍; 泥浆填充高度 100 cm 时, 分别是 7.9 和 4.4 倍; 泥浆填充高度 150 cm 时, 分别是 5.9 和 3.8 倍; 泥浆填充高度 200 cm 时, 分别是 4.4 和 2.8 倍。产生这一现象的原因与泥浆排水量变化规律的原因一样, 即泥浆本身初始含水率大, 泥浆所含的自由水的量大, 上析的水量也就多。

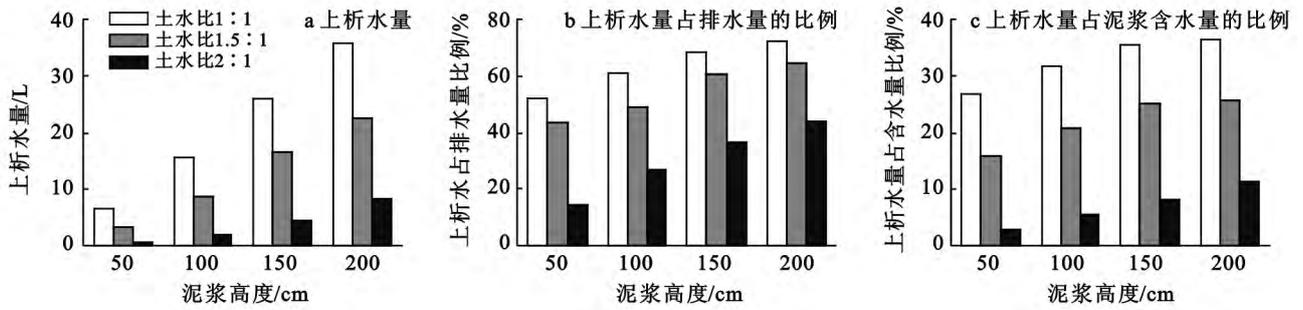


图 2 不同土水比、泥浆高度与上析水量的关系

由图 2b 可知,同一土水比,泥浆上析水量占排水量的比例随着泥浆充填高度的增加而增大。土水比为 1:1 时,填充高度 50,100,150,200 cm 的泥浆上析水量占排水量的比例分别是 52.24%,61.08%,68.26%和 72.12%;土水比为 1.5:1 时,比例分别是 43.85%,49.02%,60.67%和 64.37%;土水比为 2:1 时,比例分别是 14.31%,26.72%,36.50%和 43.91%。值得注意的是当土水比为 2:1,泥浆充填高度为 50 cm 时,上析水量很少,仅为 500 ml,占总排水量的比例仅为 14.31%。同一泥浆充填高度,泥浆上析水量占排水量的比例随着土水比的增大而减小。对于土水比为 1:1,1.5:1 的泥浆,初始含水较大,泥浆的密度较小,孔隙比较大,随着泥浆的排水,孔隙比变小,但变化率小,而对于土水比为 2:1 的泥浆,初始泥浆的孔隙比较小,随着泥浆的排水,孔隙比变小,且变化率较大,孔隙比的迅速变小,使上析水量也相应迅速减少;此外,土水比为 2:1 的泥浆,因其孔隙比较小,可以在泥浆表层较快的形成一层泥皮,泥皮具有明显的截渗作用^[14],从而阻碍了泥浆中水分

的析出,使其上析水量占排水量的比例总体较小。

由图 2c 可知,同一土水比,泥浆上析水量占含水量的比例随着泥浆充填高度的增加而增大;对于同一泥浆充填高度,随着土水比的增大,其泥浆上析水量占含水量的比例减小。土水比为 1:1 时,填充高度 50,100,150,200 cm 泥浆的上析水量占含水量的比例分别是 26.93%,31.65%,35.44%和 36.52%;土水比为 1.5:1 时,比例分别是 15.84%,20.76%,25.18%和 25.74%;土水比为 2:1 时,比例分别是 2.76%,5.44%,8.07%和 11.23%。值得注意的是当土水比为 2:1,泥浆充填高度为 50 cm 时,上析水量占含水量的比例就仅为 2.76%,这说明在土水比较大时且泥浆充填高度较低时,泥浆表层析水较少,泥浆主要依靠下渗来排水。

根据泥浆高度与土水比、上析水量、上析水量占排水量的比例关系统计分析结果表明,对于同一土水比,其上析水量、上析水量占排水量比例与泥浆高度呈现线性关系,且相关性显著。回归分析结果如表 3 所示。

表 3 泥浆高度与上析水量、上析水量占排水量比例的回归关系

土水比	上析水量回归关系		上析水量占排水量比例回归关系	
	回归方程	R ²	回归方程	R ²
1:1	$y=195.85x-3535$	0.999 0	$f=0.1337x+46.713$	0.972 4
1.5:1	$y=131.24x-3662.5$	0.994 8	$f=0.1464x+36.172$	0.960 8
2.0:1	$y=50.646x-2583$	0.960 8	$f=0.1972x+5.7129$	0.987 3

注:y为上析水量(ml);x为泥浆高度(cm);f为泥浆上析水量占排水量的比例(%)。

2.3 土水比和填筑高度对下渗水量的影响

由图 3a 可知,同一土水比泥浆,下渗水量随着泥浆高度的增加而增加。土水比为 1:1 时,填充高度 100,150,200 cm 的泥浆下渗水量分别是填充高度 50 cm 下渗水量的 1.6,2.0 和 2.3 倍;土水比为 1.5:1 时,分别是 2.1,2.5,3.0 倍;土水比为 2:1 时,分别是 1.8,2.5,3.5 倍。对于同一泥浆填充高度,下渗水量随着土水比的减小而增加。泥浆填充高度 50 cm 时,土水比 1:1 的泥浆下渗水量分别是土水比 1.5:1,

2:1 的 1.4 和 2.0 倍;泥浆填充高度 100 cm 时,分别是 1.1 和 1.8 倍;泥浆填充高度 150 cm 时,分别是 1.1 和 1.6 倍;泥浆填充高度 200 cm 时,分别是 1.1 和 1.3 倍。下渗水量较上析水量明显减少。产生这一现象的原因与泥浆排水量变化规律的原因一样,即泥浆本身初始含水率大,泥浆所含的自由水的量大,下渗的水量也就多,而下渗水量的明显减少与泥浆较低的渗透性有关^[15]。

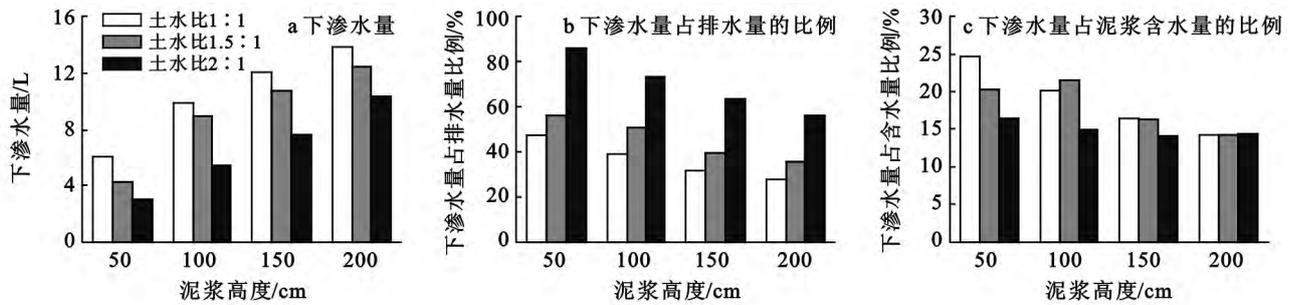


图 3 不同土水比、泥浆高度与下渗水量的关系

由图 3b 可知,对于同一土水比泥浆,下渗水量占排水量的比例随着泥浆高度的增加而减小。土水比为 1:1 时,填充高度 50,100,150 和 200 cm 泥浆的下渗水量占排水量的比例分别是 47.76%,38.92%,31.74%和 27.88%;土水比为 1.5:1 时,比例分别是 56.15%,50.98%,39.33%和 35.63%;土水比为 2:1 时,比例分别是 85.69%,73.28%,63.50%和 56.09%。随着泥浆填充高度的增加,底层泥浆在上层泥浆的重力作用下,泥浆内部孔隙变小,底层泥浆越来越密实,其下渗水量减小,占排水量的比例就越来越小。对于同一泥浆填充高度,下渗水量占排水量的比例随着土水比的增大而增大,且土水比为 2:1 时,较其他两个土水比的比值增大迅速。对于土水比 2:1 的泥浆,由于泥浆表层迅速的形成了一层泥皮,对上析水有截渗作用,泥浆中的水分只能在重力作用下以下渗为主,而土水比 1:1,1.5:1 的泥浆,表层泥皮形成较慢,上析水可以较顺畅的从表层排出,土

水比 2:1 的泥浆下渗水占排水量的比例较其余两个土水比的增大迅速。

由图 3c 可知,不同土水比泥浆之间其下渗水量占含水量的比例随着泥浆高度的增加,其变化较小。说明随着泥浆高度的增加,下渗水量受土水比的影响越来越小。因为泥浆本身渗透性就较低,此外,高度较小时,泥浆底层受到上层泥浆重力的作用较小,泥浆被压缩率较小,泥浆孔隙较大,再者,水分通过的距离较短,泥浆中水分下渗较快,而泥浆高度的增加,不仅使泥浆压缩率较大,泥浆孔隙减小,且水分通过距离也增大,导致不同土水比泥浆的下渗水量占含水量的比例趋于稳定,即变化不大。

根据泥浆高度与土水比、下渗水量、下渗水量占排水量的比例关系统计分析结果表明,对于同一土水比,其下渗水量、下渗水量占排水量的比例与泥浆高度呈现线性关系,且相关性显著。回归分析结果如表 4 所示。

表 4 泥浆高度与下渗水量、下渗水量占排水量比例的回归关系

土水比	下渗水量回归关系		下渗水量占排水量比例回归关系	
	回归方程	R^2	回归方程	R^2
1:1	$y=51.150x+4.051$	0.964 9	$f=-0.133 7x+53.287$	0.972 4
1.5:1	$y=53.032x+2.463$	0.928 4	$f=-0.146 4x+63.828$	0.960 8
2.0:1	$y=48.833x+500$	0.998 1	$f=-0.197 2x+94.287$	0.987 3

注: y 为下渗水量(ml); x 为泥浆高度(cm); f 为泥浆下渗水量占排水量的比例(%)。

2.4 土水比和填筑高度对固结沉陷量的影响

泥浆的固结沉陷量是判断泥浆的脱水固结和排水性能好坏较为直观的依据之一,也是判断坝体固结变形的依据之一。浆体的固结沉陷过程实质是泥浆含水率减小,密度增大,孔隙水压力逐渐消散的过程。试验过程中,泥浆的水分一部分通过表层析出,一部分通过下渗排出,由此逐渐降低浆体含水率,孔隙水压力也逐渐消散,浆体最终脱水而固结。

由图 4 可知,对于同一土水比,泥浆的固结沉陷量随着泥浆填充高度的增加而增加;对于同一泥浆填

充高度,泥浆的固结沉陷量随着土水比的增大而减小。这是因为泥浆体内含水量随着土水比的增加逐渐减小,相应的孔隙比逐渐减小,泥浆固结沉陷量也变小。由图 4 也可知,泥浆在前 24 h 的沉陷量远大于之后几天的沉陷量。土水比 1:1 时,泥浆前 24 h 的固结沉陷量可达总固结沉陷量的 90.91%~93.24%,平均 92.10%;土水比 1.5:1 时,可达 81.70%~85.68%,平均 83.27%;土水比 2:1 时,可达 77.10%~80.07%,平均 78.37%;反映了泥浆的固结沉陷和排水主要集中在前 24 h,以后趋于稳定。

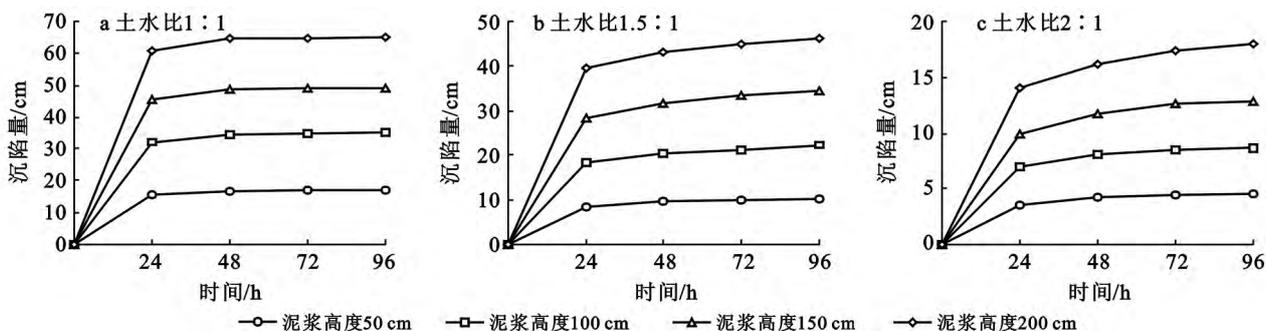


图 4 不同土水比、泥浆高度与固结沉陷量的关系

3 结论

(1) 同一土水比泥浆。排水量随着泥浆填充高度的增加而增大,泥浆排水量占泥浆含水量的比例随着土水比的增大而减小。泥浆的排水主要集中在前 24 h,可占总排水量的 69.44%~89.48%;上析水量、上析水量占排水量的比例均随着泥浆填充高度的增加而增大,泥浆上析水量占泥浆含水量的比例随着土水比的增大而减小。泥浆的上析水在泥浆充填后的 24 h 内全部析出;下渗水量随着泥浆高度的增加而增加,而下渗水量占排水量的比例则反之。随着泥浆充填高度的增加,土水比对下渗水量的影响越来越小;泥浆的固结沉陷量随泥浆填充高度的增加而增大,并且前 24 h 内增长速率较快,随后趋于稳定。

(2) 同一泥浆填充高度。排水量、泥浆排水量占含水量的比例均随着土水比的减小而增加;随着土水比的增加,上析水量、泥浆上析水量占排水量的比例以及泥浆上析水量占含水量的比例均减小;随着土水比的减小,下渗水量逐渐增加,而下渗水量占排水量的比例逐渐减小;泥浆的固结沉陷量随着土水比的增大而减小。泥浆前 24 h 的固结沉陷量最大,可占总固结沉陷量的 77.10%~93.24%。

目前,聚乙烯微孔波纹管作为水坠坝坝体的排水系统已经在实践中得到广泛的应用,筑坝实践中对排水管网的布设形式有立体网状、束网状以及网状^[8,16-18]。在软土地区,通过设置水平排水体和竖直排水体组成空间网状排水体系,从而促使软土加速排水固结^[19-20]。本研究发现,不同土水比、填充高度的泥浆排水固结有差异,这就要求在实际筑坝过程中根据实际情况有针对性的布设合理的排水措施,合理的排水管道结构。就本研究而言,泥浆土水比较小时,泥浆排水量大,且排水主要集中在前 24 h,并以上析水为主,因此,实际筑坝过程中,若筑坝泥浆土水比较小时,要注重充填泥浆的前期排水,且要加强布设泥浆表层排水措施,如在有管网排水措施时要增加竖向

排水管的数量,及时将表层水排出,或者采用水泵对表层水进行抽排。当泥浆土水比较大、每次充填高度较小时,如当土水比为 2 : 1,泥浆充填高度为 50 cm 时,下渗水量占总排水量的比例为 85.69%,此时主要以下渗水为主,则在实际筑坝工程中可以考虑不布设表层析出水的排水措施,而要加强下渗水的排水措施,如增加横向、纵向排水管道数量。

[参 考 文 献]

- [1] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J].农业工程学报,2003,19(6):302-306.
- [2] 冉大川,罗全华,刘斌,等.黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究[J].水利学报,2004,35(5):7-13.
- [3] 刘震.黄土高原地区水土保持淤地坝规划概述[J].中国水土保持,2004(12):8-10.
- [4] 郑新民.水坠坝设计与施工[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [5] 黄自强.黄土高原地区淤地坝建设的地位及发展思路[J].中国水利,2003(9):8-11.
- [6] 黄文熙.水坠坝的固结理论及其应用[J].水利学报,1982(9):13-23.
- [7] 郭耿新,方开泽.水坠坝施工期脱水固结计算[J].河海大学:自然科学版,1991,19(3):78-85.
- [8] 赵昌军,扬瑞卿,崔峰,等.高黏土地区水坠坝立体网状排水技术研究[J].中国水土保持,2001(11):18-19,25.
- [9] 王伟,杨尧志.土工织物与微孔波纹管网状排水系统分析[J].江南学院学报,2000,15(2):64-68.
- [10] 王盼,朱首军,芦杰丰,等.重粉质壤土泥浆泵筑坝人工管网排水技术研究[J].水土保持通报,2012,32(2):127-131.
- [11] 雷学文,白世伟.动力排水固结法的研究及应用概况[J].土工基础,1999,13(4):9-11.
- [12] 中华人民共和国水利部.土工试验规程(SL237—1999)[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [13] Zhang Shenqiang, Zhu Shoujun, Liu Yulan, et al. Dynamic monitoring of the mud[J]. Agricultural Science & Technology, 2008,9(4):112-117.

- 2001,49(4):723-750.
- [17] 李洪建,王孟本,柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [18] 李锋瑞,赵松岭. 陇东黄土旱塬不同降水年型作物土壤水分的时空分异特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,1996(2):99-108.
- [19] Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2008,360(1):242-251.
- [20] 王满意,梁宗锁,杨超,等. 陕北丘陵沟壑区不同立地白羊草水分特征及群落生物量研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(1):93-100.
- [21] 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):196-202.
- [22] 王会梅,徐炳成,李凤民,等. 黄土丘陵区白羊草和柳枝稷适应性生长的比较[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):35-40.
- [23] 孙启忠,韩建国,桂荣. 科尔沁沙地达乌里胡枝子生物量研究[J]. 中国草地,2001,23(4):21-26.
- [24] 徐炳成,山仑,李凤民. 半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较[J]. 应用生态学报,2007,18(5):990-996.
- [25] 王淑芬,张喜英,裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(2):27-32.
- [26] Xu Bingcheng, Xu Weizhou, Huang Jin, et al. Biomass production and relative competitiveness of a C_3 legume and a C_4 grass co-dominant in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Plant and Soil, 2011,347(1/2):25-39.
- [27] 王京,徐炳成,高志娟,等. 黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播的光合生理日变化研究[J]. 草地学报,2012,20(4):692-698.

(上接第49页)

- [14] 李建军,邵生俊,杨扶银,等. 防渗墙粗粒土槽孔泥皮的抗渗性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(4):1087-1093.
- [15] 王盼,朱首军,马宁,等. 重粉质壤土区泥浆浓度对筑坝泥浆性能的影响[J]. 土壤通报,2013,44(3):543-550.
- [16] 谢颀,王海宁,马良军. 高黏粒黄土地区水坠坝应用聚乙烯微孔波纹管技术研究[J]. 青海科技,2001,8(3):40-43.
- [17] 王启睿,史海荣,梁振科,等. 聚乙烯微孔波纹管在堡子沟水坠坝排渗中的应用及效果[J]. 中国水土保持,1994(3):25-27,32.
- [18] 汤茗辉,曹善和,刘振声,等. 阳洼水坠坝聚乙烯微孔波纹管排渗试验研究[J]. 中国水土保持,1992(5):22-28.
- [19] 孟庆山,汪稔,雷学文,等. 动力排水固结法加固饱和软土地基效果研究[C]//全国岩土与工程学术大会论文集:下册. 2003.
- [20] 韩尚宇,洪宝宁,李红. 排水固结法处理软土路基的质量改善措施优选分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2009,33(2):223-226.

(上接第68页)

- [7] 杨佐涛. 戈壁与绿洲内的风向风速关系:以新疆策勒县为例[J]. 中国沙漠,1990,10(3):33-39.
- [8] 刘铭庭. 新疆策勒县绿洲外围固沙植物带的建设[J]. 中国沙漠,1994,14(2):74-77.
- [9] 陈智,麻硕士,赵永来,等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报,2010,26(1):118-121.
- [10] 刘目兴,刘连友. 农田休闲期作物留茬对近地表风场的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(9):295-299.
- [11] 赵哈林,赵学勇,张铜会. 我国北方农牧交错带沙漠化的成因、过程和防治对策[J]. 中国沙漠,2000,20(S):22-28.
- [12] 张春民,吴文奇,奈民夫. 半干旱区沙质农田土壤风蚀防治的效应研究[J]. 内蒙古林业科技,2009,35(1):9-12.
- [13] 何文清,赵彩霞,高旺盛,等. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究:以内蒙古武川县为例[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2092-2096.
- [14] 赵永来,陈智,孙越超,等. 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应实验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):38-42.
- [15] 唐玉龙,安志山,张克存,等. 不同结构单排林带防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠,2012,32(3):647-654.