

土凝岩的掺量和龄期对稳定土渗透系数的影响

付延凯¹,刘经强^{1,2*},荣云杰¹,李明雷²,李海燕²

1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018

2. 山东农业大学勘察设计研究院, 山东 泰安 271018

摘要: 土凝岩是利用粉煤灰、煤矸石等工业废弃物研制出的一种材料, 公路工程中应用较为广泛, 水利工程应用于截渗墙和软弱地基置换等。本文通过变水头试验, 探讨了土凝岩掺量和龄期(饱和累计时间)两个因素对稳定土渗透系数的影响规律并提出较为可行的掺量方案。试验结果表明: 土凝岩掺量为15%的土, 前期渗透系数下降较快, 后期渗透系数可达到 2.10×10^{-8} cm/s, 符合《水利工程施工规范》要求, 较适合在截渗墙工程中推广应用。

关键词: 土凝岩; 掺量; 龄期; 渗透系数

中图分类号: TV42+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)02-0292-04

The effect of Dosage and Age on Permeability Coefficient of Stabilized Soil Mixing with Soil Condensate Rock

FU Yan-kai¹, LIU Jing-qiang^{1,2*}, RONG Yun-jie¹, LI Ming-lei², LI Hai-yan²

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering/Shandong Agriculture University, Taian 271018, China

2. Survey and Design Institute of Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

Abstract: Soil condensate rock is a material with fly ash, coal gangue and other industrial wastes to be widely used in highway construction and water conservancy applications such as cutoff wall and replacement of weak foundation. This paper explored the effect law of different dosage and saturation cumulative time (age) on the stabilized soil's permeability coefficient through the variable head permeability test and put forward a feasible plan. The results showed that the permeability coefficient of stabilized soil with 15% soil condensate rock decreased rapidly in earlier stage and then it went up to 2.10×10^{-8} cm/s, which could satisfied with water conservancy engineering construction standard's requirements and was suitable for application to a cutoff wall.

Keywords: Soil condensate rock; dosage; age; permeability coefficient

土凝岩材料是利用粉煤灰、赤泥、煤矸石、等工业废弃物, 基于地质成岩原理, 研制出的可以替代水泥、石灰等应用于公路等基础建设工程的材料。资料数据表明, 如果用土凝岩代替 10000 t 水泥, 将减少约 5200 t CO₂ 气体的排放, 节省煤炭约 2400 t, 减少优质石灰石资源开采 10000 t 左右, 从而节约资源, 保护环境^[1]。

在水利工程建设领域, 土凝岩的应用主要有地基加固(软弱地基置换)和建筑物防渗处理(截渗墙), 截渗墙对渗透系数要求较高^[2-8]。论文采用变水头试验的方法, 探讨了土凝岩掺量和龄期(饱和累计时间)两个因素对稳定土渗透系数的影响规律, 并根据对结果的分析比较, 提出较为可行的掺量方案。

1 试验设计

1.1 试验方案设计

截渗桩墙施工中, 采用建筑施工手册推荐的型钢水泥土搅拌墙工程施工工艺方法较好, 与这次试验有关的核心工艺流程为: 拌制水泥浆→钻机钻进喷浆、搅拌下沉、提升→成桩, 其中渗透系数的影响因素主要为掺量^[9]。密实度主要依靠搅拌和喷浆的时间长短、上提喷浆管的速度和喷浆量的均匀程度来控制。通过试验数据分析后发现, 龄期也是重要影响因素。

渗透试验方法采用变水头试验。压实度指标用环刀内干土质量相等的方法控制, 并用最优含水率 17%控制含水率, 容重采用原有土工试验结果。每份土样 0.4 kg, 土凝岩掺量范围为 0%~20%, 共分 0%、4%、6%、8%、10%、12%、15%、20%八个不同掺入比。

收稿日期: 2015-08-25

修回日期: 2015-10-28

作者简介: 付延凯(1991-),男,在读硕士研究生,研究方向为水利工程. E-mail:eyd163yx@163.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:13705489158@163.com

1.2 试验步骤设计

1.2.1 制备试样 过筛→烘干→称量→制备土样→含水率试验→放置一昼夜→进行试验

原土样取土地点为山东省平邑县夫子山水库土坝,基本物理指标见表 1,原土样颗粒百分比见表 2,土样颗分曲线图见图 1。

表 1 原土样基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of original soil sample

比重 Specific gravity	孔隙比 Void ratio	渗透系数(cm/s) Permeability coefficient	塑限 Plastic limit	Cu	Cc	d ₁₀	含水率 Moisture content	干密度(g/cm ³) Dry density	I _p	I _L	液限 Liquid limit	d ₆₀	d ₃₀
2.71	0.753	1.03E-05	21.3	28.0	2.29	0.001	23.70%	1.56	14.4	0.14	35.4	0.028	0.008

表 2 原土样颗粒百分比

Table 2 Grain percentage of original soil sample

粒径(mm) Particle size	百分比(%) Percentage	粒径(mm) Particle size	百分比(%) Percentage
5~2	0.2	0.05~0.01	53.3
2~0.5	4.2	0.01~0.005	8.5
0.5~0.25	3.1	0.005~0.002	6.1
0.25~0.075	6.7	<0.002	18.8
0.075~0.05	7.5		

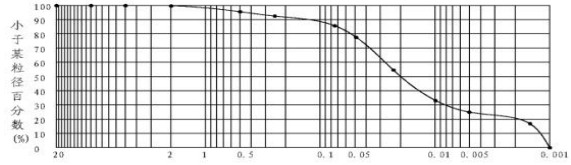


图 1 原土样颗粒曲线图

Fig.1 Analytic curve of original soil sample

1.2.2 含水率试验 制备试样时,利用剩下的混合土测定其含水率。按照土工试验规范(DL T 5355-2006)含水率试验的要求进行操作。

1.2.3 渗透性试验 按照土工试验规范(DL T 5355-2006)变水头渗透试验的要求进行操作即可,操作过程应注意以下几点:

- (1)试样应测量含水率和总土重。
- (2)不易透水的试样应用抽气饱和装置加速试样饱和,加快试验进度。
- (3)起始和终止的水头应从变水头管的液面到土样上表面。
- (4)试验以当不同开始水头下测定的渗透系数在允许差值范围内为结束的标志,记录完几组数据以后立即计算渗透系数,若误差太大应多重复几次。

变水头渗透系数应按下式计算: $k_T = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{H_1}{H_2}$

- 式中: A—变水头管的断面积 (cm²);
- 2.3—ln和log的变换因数;
- L—渗径,即试样高度 (cm);
- t₁, t₂—分别为测读水头的起始和终止时间 (s);
- H₁, H₂—起始和终止水头。

2 试验结果分析与讨论

2.1 含水率试验结果与分析

从表 3 中可以看出,相同土样含水率差别较小,在误差范围之内。但是当时考虑蒸发因素按照 18.5%计量水,实际含水率大约在 15.5%左右,与预期的 17%差别较大,并且差别 3%左右,误差较大,说明考虑因素不足,经验欠缺。分析原因应该是当时天气炎热加空调风大,使水分蒸发较快,含水率偏低。以后的制备土样应以实际情况考虑额外添加的水量,并且多动手以增加试验经验。

表 3 稳定土含水率计算表

Table 3 Percentage of moisture content in stabilized soil

土样 NO.	盒重(g) Box weight	盒加湿土(g) Box+wet soil	盒加干土(g) Box+dry soil	含水率 Percentage	平均 Average	土样 NO.	盒重(g) Box weight	盒加湿土(g) Box+wet soil	盒加干土(g) Box+dry soil	含水率 Percentage	平均 Average
1-1	22.4	69.29	64.05	12.60	12.20	1-5	22.4	69.54	64.58	11.80	11.80
	22.4	68.75	63.86	11.80			22.4	71.49	66.3	11.80	
1-2	22.4	66.64	61.26	13.80	14.30	1-6	22.4	66.34	60.6	15.00	15.10
	22.4	66.72	61	14.80			22.4	64.49	58.96	15.10	
1-3	22.4	66.97	62.05	12.40	12.60	1-7	22.4	67.38	61.44	15.20	15.10
	22.4	68.24	63.05	12.80			22.4	65.17	59.6	15.00	
1-4	22.4	69.51	63.83	13.70	13.70	1-8	22.4	71.67	65.81	13.50	13.40
	22.4	65.76	60.56	13.60			22.4	67.66	62.36	13.30	

2.2 不同掺量试验结果与分析

不同掺量下渗透系数试验结果见表 4。根据试验作出散点图见图 2。从图中能得出以下几点结论：

(1)掺入土凝岩放置一昼夜的情况下，掺入土凝岩以后土样的渗透系数都有所降低，由 2.23E-05 (cm/s) 下降到 0.5~1.5 E-05 (cm/s)，降低为原来的 22%~67%。

(2)掺入量与渗透系数的关系并不是简单的反比例关系，掺量大于 8%以后，近似是随着掺量增加渗透系数降低，但是掺量小于 8%时，渗透系数反而与掺量成正相关的关系，这是没有想到的。掺量为 20%时，渗透系数又有增大的趋势。

(3)渗透系数与掺量并不是简单地负相关的关系，有可能在掺量较少的范围内反而成正相关，增大到一定值以后，才开始成负相关的关系，随着掺量继续增加，渗透系数不降反增。

(4)得出的结论说明，土凝岩掺量只能说是影响渗透系数的一个因素之一，稳定土的渗透系数还受很多其他因素影响^[10]。

表 4 不同掺量下渗透系数表

Table 4 Permeability coefficients in different dosages					
编号	掺量	渗透系数 cm/s	编号	掺量	渗透系数 cm/s
NO.	Dosage	Permeability coefficient	NO.	Dosage	Permeability coefficient
1-1	0%	2.23E-05	1-5	10%	1.12E-05
1-2	4%	6.53E-06	1-6	12%	8.17E-06
1-3	6%	9.72E-06	1-7	15%	6.13E-06
1-4	8%	1.42E-05	1-8	20%	7.99E-06

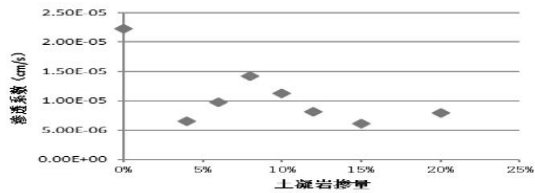


图 2 不同掺量下渗透系数图
Fig.2 Permeability coefficients in different dosages

2.3 养护 24 h 后试验结果与分析

由养护 24 h 后渗透系数与刚饱和时的渗透系数对比表 5 可以得出如下结论：

在养护了 24 h 以后，可以看出掺量为 12%~15%的稳定土渗透系数降低率最大，达到 94%。说明掺量太多或太少，都不利于渗透系数的降低。渗透系数在前期降低较快，对工程是有益的，可以加快工程进度。

由散点图 3 中我们能得到以下结论：

(1)掺量为 12%和 15%的稳定土在 24 h 后达到了 4.68E-07 cm/s 和 3.58E-07 cm/s 的渗透系数，是所有稳定土中渗透系数最小的两个，能达到 E-07 数量级的渗透系数，说明防渗效果极好。

(2)24 h 后的和刚开始的渗透系数与掺量的关系相比较，总体的规律没有变化，在掺量较小的范围内，渗透系数与掺量成正相关，之后成负相关，掺量的继续增大反而有上升的趋势。

(3)从工程的角度分析，掺入 12%~15%的土凝岩是比较合适的，渗透系数最小，并且比较经济，这个结论与水泥掺量经验值 15%是相一致的。

表 5 不同掺量下刚饱和与 24 h 后渗透系数对比表

Table 5 Comparison of permeability coefficients between the just saturation and after 24 h in different dosages							
编号	NO.	掺量(%)	Dosage percentage	渗透系数(cm/s)	Permeability coefficients	降低率(%)	Drop rate
1-2		4		6.53E-06	3.86E-06	41	
1-4		8		1.42E-05	9.76E-06	31	
1-6		12		8.17E-06	4.68E-07	94	
1-7		15		6.13E-06	3.58E-07	94	
1-8		20		7.99E-06	2.03E-06	75	

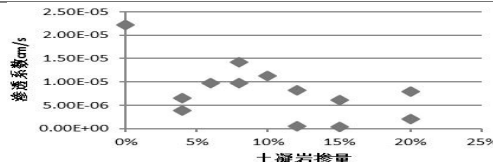


图 3 不同掺量下刚饱和与 24 h 后渗透系数对比图

Fig.3 Comparison of permeability coefficients between the just saturation and after 24 h in different dosages

2.4 渗透系数与饱和累计时间（龄期）之间的关系试验结果与分析

为了更好地研究渗透系数与饱和累计时间（龄期）之间的关系，根据试验数据，研究了累计时间（以分钟为单位）与渗透系数之间的关系，见图 4 和图 5。限于篇幅，以 1-6 和 1-7 土样为例，剩

余土样的规律相同。

从拟合的线性回归曲线可以得到以下结论:

(1)随着时间的延长,渗透系数是逐渐下降的,掺量 15%的土样,刚饱和时渗透系数 $8.30E-6$ cm/s, 24 h 达到 $3.86 E-6$ cm/s, 6 d 下降到 $7.33E-8$ cm/s, 10 d 下降至 $2.10E-8$ cm/s, 土凝岩掺入后对土渗透系数的降低有积极地促进作用, 并且最终达到 $2.10E-8$ cm/s, 符合水利工程施工规范要求。

(2)在测量的每一时间段内,渗透系数与时间近似线性关系,线性回归系数都在 0.95 以上,说明拟合较好,分段线性拟合是合适的。

(3)通过观察同一土样不同时间拟合函数的系数,发现随着时间延长,系数逐渐减小,每次模拟系数比上次减小两个数量级左右。这符合预计结果,即随着时间的延长,渗透系数的变化率越来越小,最终趋于稳定。

(4)掺量为 15%的土样 1-7, 24 h 以后模拟曲线斜率达到 $-1E-10$, 14000 min 即 10 d 左右,斜率降低到 $-9E-12$, 其物理意义是每分钟渗透系数下降 $-9E-12$ cm/s, 每天渗透系数下降 $1.3E-8$ cm/s。

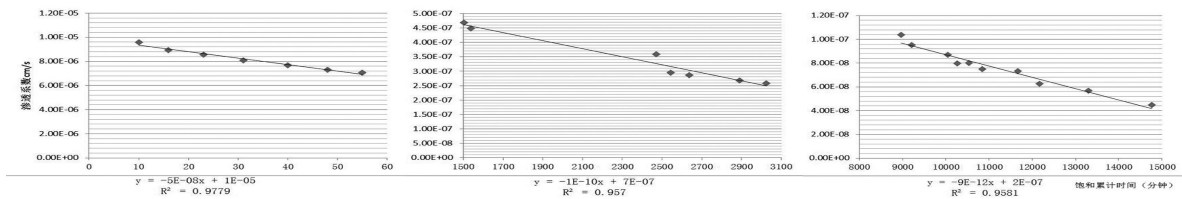


图 4 土样 1~6 饱和累计时间 (龄期) 与渗透系数线性关系回归

Fig.4 The linear regression of the cumulative saturation time and permeability coefficients in sample 1-6

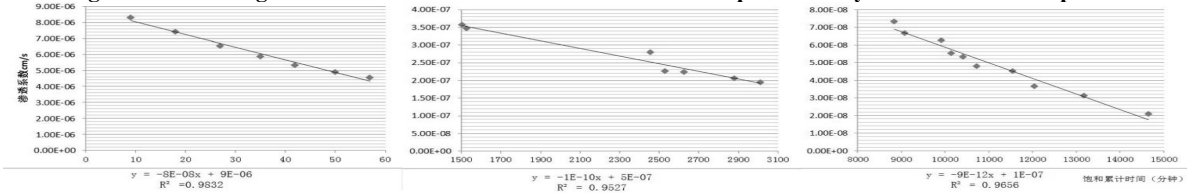


图 5 土样 1~7 饱和累计时间 (龄期) 与渗透系数线性关系回归

Fig.5 The linear regression of the cumulative saturation time and permeability coefficients in sample 1-7

3 结论

(1)试验从工程实际应用出发,寻找可能影响实际施工效果的因素,在实际试验的过程中通过前期结果分析,对影响因素的考虑逐步全面,分别研究了土凝岩的掺入量和饱和累计时间(龄期)对稳定土渗透系数的影响。在试验过程中也发现了实际操作中的一些可能影响试验精度的因素,提出来并应该在以后的设计中多考虑,操作中尽量避免。

(2)以 15%的掺入量掺入土凝岩时,渗透系数最小,24 h 后达到 $3.58E-07$ cm/s, 10 d 下降至 $2.10E-8$ cm/s, 并且 24 h 内渗透系数降低幅度最大,达到 94%,是比较适合实际工程施工要求的。

(3)渗透系数随着龄期增加不断降低,降低的速率也是逐渐变缓的,掺量 15%左右 10 d 后每分钟渗透系数降低 $9E-12$ cm/s 左右,基本是稳定的。

(4)土凝岩应用到截渗桩墙等对渗透性要求较高的工程,从渗透系数这一方面考虑,是可行的,经济并且效果较好的掺入比推荐为 15%。

参考文献

- [1] 董磊.一吨水泥的“节能减排”空间[N].经济日报,2010-3-13(6)
- [2] 张改玲.高围压下砂土的渗透特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(10):2748-2754
- [3] 孙文静,刘仕卿,孙德安,等.饱和高庙子膨润土的渗透特性[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):115-119
- [4] 胡汉兵,胡胜刚,刘芳.粉细砂水泥土力学与渗透特性试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(10):48-53
- [5] 雷红军,卞锋.黏土大剪切变形中的渗透特性试验研究[J].岩土力学,2010,31(4):1130-1133
- [6] 侯永峰,龚晓南.水泥土的渗透特性[J].浙江大学学报:工学版,2000,34(2):189-193
- [7] 曾森财.水泥土薄墙截渗技术的研究及实践[D].吉林:吉林大学,2004
- [8] 徐立波.水泥土截渗墙在水利工程中的应用[J].建筑技术开发,2011,38(4):18-21
- [9] 姜淑芳.小型水利工程基础处理中水泥土的应用[J].水利科技,2014(11):145
- [10] 曹智国,章定文.水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3446-3453