



砂土地基密封墙室内配合比试验研究

冯刚¹,牛飞^{2,3}

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
3. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 砂土中掺入泥浆、膨润土、水泥可降低砂土的渗透系数, 通过室内配合比试验, 可得到满足密封墙渗透性能要求的配合比。在成层土平均渗透系数理论的基础上, 建立砂土密封墙渗透系数理论。混合土的渗透系数由细粒土的渗透系数及厚度控制, 膨润土通过吸水膨胀作用, 主要改变混合物的渗透系数; 水泥与土中孔隙水发生水化反应, 主要改变细粒土的渗透系数。结果表明, 根据砂土密封墙渗透系数理论可计算出混合土的细粒土厚度、掺入膨润土后混合土中混合物的渗透系数、掺入水泥后混合土中细粒土渗透系数。

关键词: 密封墙; 砂土; 泥浆; 膨润土; 水泥; 渗透系数

中图分类号: TU 43; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0233-05

Experimental study on indoor mix proportion of sand soil foundation sealing wall

FENG Gang¹, NIU Fei^{2,3}

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

3.CCCC Key Laboratory of Environmental Protection & Safety of Communications Foundation Engineering, Guangzhou 510230, China)

Abstract: The permeability coefficient of sand soil can be reduced by mixing mud, bentonite, and cement, meanwhile the mix proportion meeting the permeability requirements of the sealing wall can be obtained by the indoor mix proportion test. Based on the theory of average permeability coefficient of layered soil, the theory of permeability coefficient of the sand sealing wall is established. The permeability coefficient of the mixed soil is controlled by the permeability coefficient and thickness of the fine-grained soil. The permeability coefficient of the mixture is mainly changed by the water absorption and expansion of the bentonite, and the hydration reaction between cement and pore water in the soil mainly changes the permeability coefficient of the fine-grained soil. The results show that the thickness of fine-grained soil, the permeability coefficient of the mixture with bentonite, and the permeability coefficient of fine-grained soil mixed with cement can be calculated by the theory of permeability coefficient of sand sealing wall.

Keywords: sealing wall; sand; mud; bentonite; cement; permeability coefficient

沿海地区的开发需要大量的土地资源, 围海造陆及软基处理是获取工程建设用地的常用工程手段。充填砂袋围堰具有施工效率高、成本低、质量可靠等优点, 是快速围海的重要措施。真空预压法具有成本低、加载快、加载时无剪切变形、可采用无砂垫层等优点, 已成为沿海地区大面积

地基处理的常见方法。

在围海造陆工程中, 通常同时采用充填砂袋围堰和真空预压法, 为保证地基处理效果, 便需要在砂土地基上设置密封墙。充填砂袋内的充填料为砂土, 砂土具有颗粒大、渗透性好的特点, 而真空预压的密封墙需要良好的密封性能, 此时需要采取一

定的工程措施降低砂土地基的渗透性。为了保证密封墙的施工质量，须在室内进行配合比设计。

为降低砂土的渗透性，可掺入适量的泥浆、膨润土、水泥等^[1]，拌和后混合土的渗透系数可满足墙的密封性能。采用现有的砂土渗透系数理论及黏性土渗透系数的理论均不能合理地解释或推定混合土的渗透系数，孔令伟等^[2]引入粒间状态参量概念，探讨砂土渗透系数的细粒效应及其与表征砂土各种状态参数的相互关联性，从宏观上解释细粒对砂土渗透系数的影响。

本文分别在粗砂、中砂、细砂中掺入不同质量的泥浆、膨润土、水泥，并测定其渗透系数。在粗砂、中砂、细砂中掺入不同质量的泥浆，进行固结试验，固结完成后，测定其渗透系数。在成层土的平均渗透系数理论的基础上，对砂土掺入泥浆、膨润土、水泥的渗透系数理论进行探讨。

表 1 砂样的颗粒组成

| 砂样 | 土粒组成/% | | | | | |
|----|--------|-----------|------------|------------|--------------|----------------|
| | >10 mm | 5.0~10 mm | 2.0~5.0 mm | 0.5~2.0 mm | 0.25~0.50 mm | 0.075~0.250 mm |
| 粗砂 | 1.5 | 5.7 | 14.5 | 38.7 | 29.0 | 10.6 |
| 中砂 | 0.0 | 1.5 | 17.4 | 19.0 | 33.0 | 29.2 |
| 细砂 | 0.0 | 0.3 | 5.3 | 6.5 | 32.7 | 55.1 |

表 2 砂样的物理性质指标

| 砂样 | 平均粒径 d_{50}/mm | 有效粒径 d_{10}/mm | 不均匀系数 C_u | 曲率系数 C_c | 渗透系数 $k_{20}/(10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------|------------|--|
| 粗砂 | 0.62 | 0.25 | 3.0 | 0.90 | 41.10 |
| 中砂 | 0.37 | 0.12 | 3.8 | 1.13 | 7.24 |
| 细砂 | 0.22 | 0.09 | 2.9 | 0.96 | 5.95 |

采用常水头试验，粗砂、中砂、细砂的渗透系数分别为 4.11×10^{-2} 、 7.24×10^{-3} 、 $5.95 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ，渗透系数明显大于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，不满足 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》的要求。

1.2 试验方案

为降低砂样渗透系数，分别对粗砂、中砂、

1 试验方案与试验结果

1.1 砂样的物理性质指标

砂样为纯净的粗砂、中砂、细砂，依据 SL 237—1999《土工试验规程》对砂样进行颗粒分析及渗透试验，砂样的颗粒组成见表 1，砂样的物理性质指标见表 2，粒径分布曲线如图 1 所示。

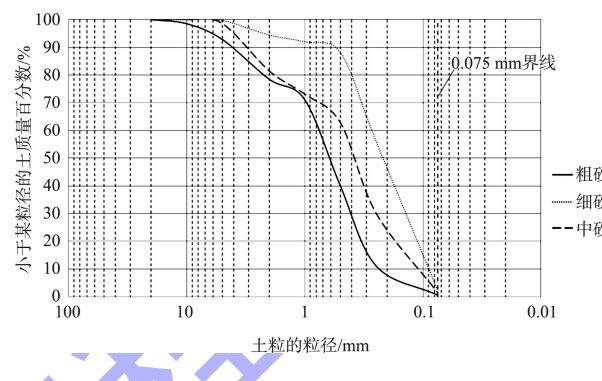


图 1 砂样粒径分布曲线

表 3 室内配合比试验方案

| 砂样 | 方案 | | | |
|----------|-------|------------------|--------------|------------|
| | 掺入泥浆 | 掺入泥浆+固结 | 掺入泥浆+膨润土 | 掺入泥浆+水泥 |
| 粗砂、中砂、细砂 | 35%泥浆 | 35%泥浆+25kPa 固结压力 | 40%泥浆+5%膨润土 | 40%泥浆+3%水泥 |
| | 40%泥浆 | 40%泥浆+25kPa 固结压力 | 40%泥浆+8%膨润土 | 40%泥浆+5%水泥 |
| | 45%泥浆 | 45%泥浆+25kPa 固结压力 | 40%泥浆+10%膨润土 | 40%泥浆+7%水泥 |

细砂中掺入泥浆、泥浆+固结、泥浆+膨润土、泥浆+水泥，共 36 组试验，具体方案见表 3。均匀搅拌，静置 24 h，采用变水头法测定混合料的渗透系数。

1.3 试验结果

不同泥浆掺量砂土渗透系数试验结果见图 2。砂土掺入 35%~45% 的泥浆后, 随着泥浆掺入量的增加, 试样的渗透系数呈变小趋势, 渗透系数降低为 $5.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s, 约比纯净砂减小两个数量级; 当泥浆掺入量超过 40% 以后, 试样的渗透系数变化不大。砂土+泥浆在 25 kPa 压力下进行固结, 固结完成后, 试样渗透系数降低为 $8.0 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ cm/s。

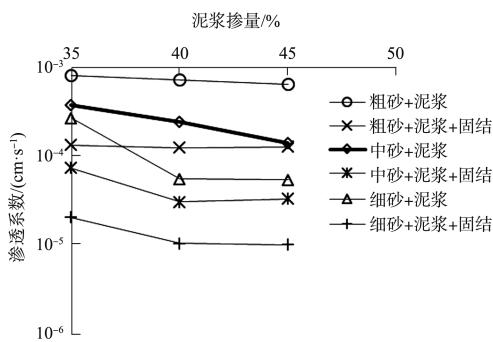


图 2 砂土渗透系数与泥浆掺量关系

对砂土+40% 泥浆试样掺入膨润土或水泥, 不同掺量的试样渗透系数试验结果如图 3 所示。粗砂+40% 泥浆掺入 5%~10% 膨润土后, 试样的渗透系数未有明显变化; 中砂+40% 泥浆、细砂+40% 泥浆掺入 5%~10% 的膨润土, 土样的渗透系数降低为 $6.6 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-5}$ cm/s, 随着膨润土掺入量的增加, 试样的渗透系数呈减小趋势。粗砂、中砂、细砂掺入 3%~7% 的水泥后, 土样渗透系数降低为 $1.5 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$ cm/s, 随着水泥掺入量的增加, 试样的渗透系数未有明显变化。砂土+40% 泥浆掺入 3%~7% 水泥或中砂+40% 泥浆、细砂+40% 泥浆掺入 5%~10% 膨润土的试样渗透系数小于 1×10^{-5} cm/s, 满足密封墙渗透性能的要求。

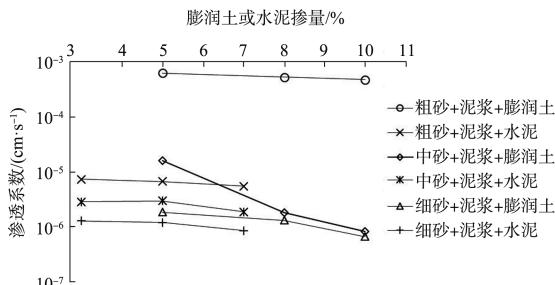


图 3 砂土+40% 泥浆土样渗透系数与膨润土或水泥掺量关系

2 现有粗粒土及细粒土渗透系数理论

室内试验、现场试验及工程实践表明, 土的渗透系数大小与颗粒粒径(尤其是有效粒径 d_{10})、土的孔隙比 e 和水的黏滞系数等有关。

Hazen 公式^[3]、Amer 公式^[4]、Terzaghi 公式^[5]中渗透系数与有效粒径 d_{10} 紧密相关, 主要适用于砂土。本文的配合比试验方案中泥浆掺量均超过 10%, 采用以上 3 个公式推算试样的渗透系数易产生较大的偏差。

对于软黏土, Taylor 提出土的孔隙比 e 与 $\lg k$ (k 为土的渗透系数) 成线性关系^[6]。由于配合比试验为粗粒土与细粒土的相互拌和过程, 而非试样在一定的压力作用下固结过程, 根据室内配合比试验结果, 孔隙比 e 与渗透系数 k 无明显相关性。

为指导砂土地基密封墙室内配合比试验, 须建立能够解释砂土中掺入泥浆、掺入泥浆+固结、掺入泥浆+膨润土、掺入泥浆+水泥降低土样渗透系数的理论。

3 室内配合比试验理论

3.1 成层土的平均渗透系数

对于平行于土层面(沿 x 方向)的渗透情况, 成层土沿 x 方向的平均渗透系数^[7]:

$$k_x = \frac{1}{H} (k_1 H_1 + k_2 H_2 + \dots + k_n H_n) \quad (1)$$

式中: k_x 为成层土沿 x 方向的平均渗透系数; k_1 、 k_2 、 \dots 、 k_n 为各层土的渗透系数; H 为各层土的平均厚度; H_1 、 H_2 、 \dots 、 H_n 为各层土的厚度。

对于垂直于土层面(沿 y 方向)的渗透情况, 成层土沿 y 方向的平均渗透系数:

$$k_y = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n}} \quad (2)$$

式中: k_y 为成层土沿 y 方向的平均渗透系数。

由式(1)、(2)看出: k_x 由最透水的一层的渗透系数和厚度控制, k_y 由最不透水的土层的渗透系数和厚度控制。

3.2 砂土密封墙配合比渗透系数理论

在粗粒土中掺入一定量的细粒土, 经过充分

搅拌混合，部分细粒土填充在粗粒土之间的间隙中，形成厚度为 H_1 的砂土及泥浆混合物，部分细粒土仍相互黏结，形成厚度为 H_2 的细粒土。

根据成层土平均渗透系数理论，该混合土的渗透系数 k_y 由细粒土的渗透系数及 H_2 控制。

若将该混合土在一定的压力下进行固结，孔隙水排出，相互黏结的细粒土增加，细粒土厚度变大，混合土的渗透系数进一步降低。粗粒土掺入细粒土的模型见图 4a)。

在粗粒土中掺入一定量的细粒土后，再继续掺入低量的膨润土或水泥，混合物及细粒土的厚度无明显变化，混合物及细粒土的渗透系数发生明显变化。膨润土通过吸水膨胀作用，主要改变混合物的渗透系数；水泥与土中孔隙水发生水化反应，主要改变细粒土的渗透系数。粗粒土+细粒土掺入膨润土或水泥的模型见图 4b)。

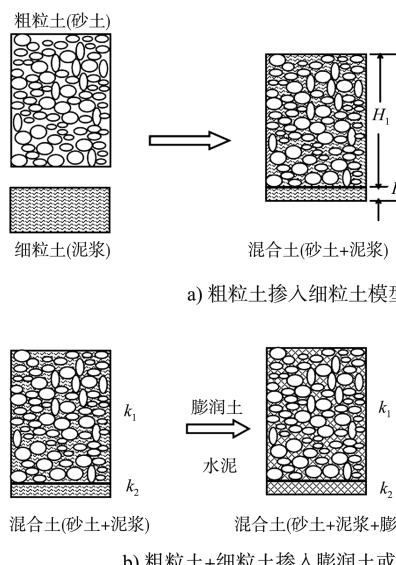


图 4 混合土模型

4 砂土密封墙渗透系数理论应用

4.1 砂土掺入泥浆+固结

粗砂、中砂、细砂掺入 40% 泥浆，通过砂土密封墙渗透系数理论，计算得混合土中细粒土的厚度为 $0.005H$ 、 $0.014H$ 、 $0.066H$ ，砂土粒径越小，细粒土的厚度就越大。掺入 40% 泥浆并固结，细粒土厚度增加至 $0.029H$ 、 $0.121H$ 、 $0.365H$ ，增大至原厚度的 6~8 倍。

表 4 掺入 40% 泥浆混合土的细粒土厚度

| 试样 | 掺入 40% 泥浆后的 渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 细粒土 厚度 H_1 | 掺入 40% 泥浆+固结后 的渗透系数/ ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 细粒土 厚度 H_2 |
|----|--|-----------------|--|-----------------|
| 粗砂 | 74.90 | $0.005H$ | 124.00 | $0.029H$ |
| 中砂 | 24.40 | $0.014H$ | 29.90 | $0.121H$ |
| 细砂 | 5.49 | $0.066H$ | 9.94 | $0.365H$ |

4.2 砂土掺入泥浆+膨润土

粗砂、中砂、细砂掺入 40% 泥浆+膨润土，通过砂土密封墙渗透系数理论，计算得混合物的渗透系数，粗砂混合物、中砂混合物、细砂混合物的渗透系数相差极大，可相差 4 个数量级，充分体现了膨润土靠吸水膨胀作用影响试样的渗透系数与试验的初始级配有极大的关系；随着膨润土掺量的增加，混合物的渗透系数逐渐减小。

表 5 掺入 40% 泥浆+膨润土混合土中混合物渗透系数

| 膨润土 掺量/% | 粗砂混合物 渗透系数/ ($10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 中砂混合物 渗透系数/ ($10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 细砂混合物 渗透系数/ ($10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-------------|--|--|--|
| 5 | 3.49 | 169.00 | 17.90 |
| 8 | 1.77 | 18.00 | 12.70 |
| 10 | 1.28 | 8.19 | 6.27 |

4.3 砂土掺入泥浆+水泥

粗砂、中砂、细砂掺入 40% 泥浆+水泥，通过砂土密封墙渗透系数理论，计算得出细粒土的渗透系数在 1.61×10^{-7} ~ $4.64 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，与水泥土的渗透系数相接近；不同组类的细粒土的渗透系数相接近。

表 6 掺入 40% 泥浆+水泥混合土中细粒土渗透系数

| 膨润土 掺量/% | 粗砂组细粒土 渗透系数/ ($10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 中砂组细粒土 渗透系数/ ($10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 细砂组细粒土 渗透系数/ ($10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-------------|---|---|---|
| 3 | 2.14 | 3.45 | 4.64 |
| 5 | 1.96 | 3.59 | 4.40 |
| 7 | 1.61 | 2.27 | 3.12 |

5 结论

1) 砂土掺入 35% ~ 45% 泥浆后，随着泥浆掺入量的增加，试样的渗透系数呈变小趋势，渗透系数约比纯净砂减小两个数量级；当泥浆掺入量超过 40% 以后，试样的渗透系数变化不大。

2) 砂土+40% 泥浆掺入 3% ~ 7% 水泥或中砂+

40%泥浆、细砂+40%泥浆掺入5%~10%膨润土的试样渗透系数小于 1×10^{-5} cm/s, 满足密封墙渗透性能要求。

3)混合土的渗透系数 k_y 由细粒土的渗透系数及厚度控制, 膨润土通过吸水膨胀作用, 主要改变混合物的渗透系数; 水泥与土中孔隙水发生水化反应, 主要改变细粒土的渗透系数。

4)根据砂土密封墙渗透系数理论, 可计算混合土的细粒土厚度、掺入膨润土后混合土中混合物的渗透系数、掺入水泥后混合土中细粒土渗透系数。计算结果与膨润土吸水膨胀特性及水泥土渗透特性相符。

参考文献:

- [1] 李榕波, 周睿博, 曾子明, 等. 提高潮间带淤泥搅拌桩抗渗性能施工技术[J]. 华南交通工程技术, 2015, 37(4):

(上接第 205 页)

2)在系统的数据管理端开发通用接口, 实现了测绘、勘察软件数据的批量输入输出; 在图形端利用研发的建模工具并结合 EC Schema 技术, 实现了三维地质模型快速创建及属性信息的关联与传递。

3)依托某港口工程开展应用实践, 验证了系统的可行性和正确性, 有效提升了水运工程岩土勘察专业精细化设计水平, 为类似的工程需求提供借鉴和参考。

4)随着我国 BIM 技术的推广和普及, 为满足水运工程行业发展需求, 该技术在岩土勘察专业中应用的重要性日益凸显。笔者后续将进一步开展 BIM 技术在该领域的开发及应用探索, 以期挖掘模型数据更多的应用价值。

45-52.

- [2] 孔令伟, 李新明, 田湖南, 等. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 21-26, 41.
- [3] HAZEN A. Discussion of “dams on sand foundation” by A. C. Koenig [J]. Transactions American Society of Civil Engineers, 1911, 73: 199-203.
- [4] AMER A M, AWAD A A. Permeability of cohesion-less soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, 100(12): 1309-1316.
- [5] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [6] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1948.
- [7] 杨进良. 土力学[M]. 4 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

(本文编辑 王璁)

参考文献:

- [1] 倪寅. BIM 技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(4): 128-133, 166.
- [2] 李家华, 陈良志, 杨彪, 等. 三维地质模型在水运工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(10): 16-20.
- [3] 刘莉, 李国杰, 乔伟刚, 等. 基于 Civil 3D 的三维地质建模方法及应用[J]. 水运工程, 2018(8): 140-144.
- [4] 亢保军, 王頤, 任耿祥, 等. 基于奔特力平台的水运工程勘察 BIM 应用研究[J]. 港工技术, 2017, 54(6): 82-86.
- [5] 于凤树, 吕凤华, 刘宝华, 等. 基于 BIM 技术地质体三维模型构建关键技术的研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(8): 37-40, 50.
- [6] 郑豪, 宁豪杰. BIM 技术在岩土工程勘察中的应用[J]. 工程建设与设计, 2020(21): 181-183.

(本文编辑 武亚庆)