

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.010

泥浆压滤处理技术理论分析及试验研究

楼春晖, 张忠苗, 房凯

(浙江大学岩土工程研究所, 杭州 310058)

摘要: 钻孔桩废弃泥浆处理已成为城市建设过程中的面临的重要难题之一, 压滤技术作为一种新型的处理方式取得了很好的效果。为了探究压滤过程中的时间、压力以及最终压滤效果之间的关系, 建立了合理的计算模型, 经过推导给出压滤公式, 并通过现有数据对公式的正确性进行了验证。通过对压滤公式中的参数以及变量的分析, 说明: 增加压力有利于压滤的快速完成, 但当压力超过一定值以后, 对压滤时间的影响很小; 同时压滤压力越大, 最终泥饼的渗透系数越小。最后进行了泥浆压滤的室内试验, 试验结果进一步验证了所给出的压滤压力、压滤时间以及压滤效果之间的关系。

关键词: 泥浆; 压滤; 孔隙比; 渗透系数

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)06-0057-05

Theoretical and Experimental Analysis on the Pressure Filtration Technology in Slurries Treatment

LOU Chunhui, ZHANG Zhongmiao, FANG Kai

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: Treatment of waste drilling slurries has become one of the important problems encountered in urban construction. The application of pressure filtration technology brings significant advantages in slurries treatment. In order to give a better insight into the mechanism of pressure filtration, a model was introduced to analyze the relationship between filtration pressure, time and treatment results. The proposed model was validated using existing data. The parametric studies of the model show that the increase of the filtration pressure can reduce the filtration time and the permeability coefficient of the filter cake, While filtration time decreases very slowly beyond a certain extent. In addition, the relationship among filtration pressure, time and treatment results is further validated by test results.

Key words: slurries; pressure filtration; void ratio; permeability coefficient

泥浆在钻孔灌注桩施工过程中起着至关重要的作用, 被称之为钻孔桩的“血液”。但是多余的泥浆以及废弃泥浆的处理始终是困扰钻孔桩施工的重要难题。近年来, 随着城市建设对环境的要求越来越高, 产生了各种不同的泥浆处理方式^[1-5], 压滤技术作为一种新型的处理方式已被应用于废弃泥浆处理当中, 并取得了很好的处理效果^[6]。

压滤处理是一种固液分离方式, 这种固液分离方式现已广泛应用于选矿、冶金、化工、环保等部门, 成功实现了各种污水、矿渣、钻井泥浆等的处理^[7-10]。目前关于压滤技术的研究较少, 李庆斌等人通过固结理论得出了滤饼内局部液压在过滤压密期间的分布规律^[11], 但是没有给出压滤压力、压滤时间等参数的关系。Bolton 和 McKinley 通过水泥

收稿日期: 2012-03-05

作者简介: 楼春晖(1989-), 男, 博士生, 主要从事土木工程研究, (E-mail)158860104@qq.com。

浆的压滤固结试验对压滤技术中的各项参数的关系作出了初步的分析总结^[12],为泥浆的压滤作出了很好的参考。由于在压滤技术方面的理论研究的不足,在其运用过程中仍然存在很多问题亟待解决,本文将通过模型分析对压滤时间、压滤压力等参数的选取提供一定的依据。

1 压滤机工作原理

压滤机固液分离的基本原理是:混合液流经过滤介质(滤布),固体停留在滤布上,并逐渐在滤布上堆积形成过滤泥饼。而滤液部分则渗透过滤布,成为不含固体的清液。随着过滤过程的进行,滤饼过滤开始,泥饼厚度逐渐增加,过滤阻力加大。过滤时间越长,分离效率越高^[6]。

在压滤过程中,压滤压力、压滤时间等参数的选择对压滤的效果有着直接且重要的影响^[13-14]。通过本文的试验以及理论模型对压滤机理进行研究,可以为钻孔桩泥浆压滤中参数的选择提供一定的依据。

2 压滤计算模型与假定

为了探究泥浆在压滤机内受压排水的具体过程以及与压滤结果有关的各项参数之间的关系,本文对压滤机内部进行了简化模拟,建立了压滤计算模型,如图 1 所示,泥浆在压力作用下进行一维压缩,上部为不透水活塞,下部为过滤介质,允许水分自由排出。

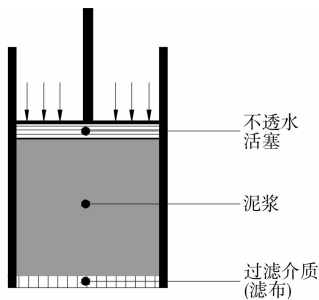


图 1 泥浆压滤计算模型

该理论模型的基本假定如下:

- 1) 泥浆是均质的,由土颗粒和水构成的悬浊液。
- 2) 泥浆中的土颗粒是不可压缩的。
- 3) 泥浆的压缩和泥浆中水的渗流只沿竖向发生,是单向一维的。
- 4) 泥浆中水的渗流服从达西定律。
- 5) 外荷载是一次瞬时施加的。
- 6) 在压滤过程中,壁效应作用所引起的滤饼不均匀堆积部分可忽略。

对于压滤的过程,本文假定其分为 2 个阶段,第 1 阶段为泥浆中多余水分的排出,第 2 阶段在压力作用下,泥浆孔隙比进一步减小。

第 1 阶段如图 2 所示,设此阶段滤饼的厚度为 L_c ,滤饼内孔隙比由上至下呈线性变化,顶部孔隙比为 e_g ,底部为 e_c (将第 1 阶段滤饼称作半滤饼),上层部分则为孔隙比为 e_g 的均质泥浆层,随着压滤的进行,上层泥浆逐渐减少,半滤饼厚度逐渐增加,当泥浆通过压滤均成为半滤饼后(即泥浆受压达到孔隙比均小于 e_g 的临界状态时),压滤第 1 阶段结束。

第 2 阶段压滤基本原理与第 1 阶段相同,如图 3 所示,但第 2 阶段时假定最终滤饼为渗透系数为 k_c ,孔隙比为 e_c 的统一均匀层,上层部分为孔隙比为 $(e_g - e_c)/2$ 的半滤饼层,当半滤饼全部成为最终滤饼后压滤完全结束, d_f 为最终滤饼厚度。

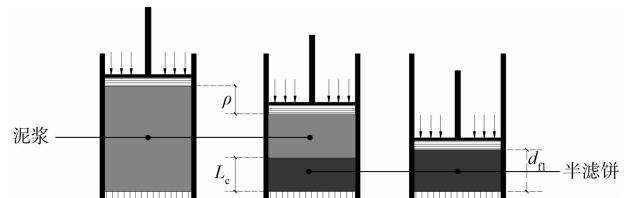


图 2 压滤第 1 阶段示意图

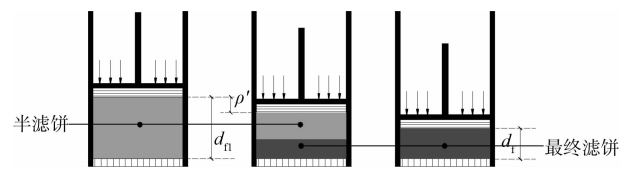


图 3 压滤第 2 阶段示意图

3 压滤公式推导

第一阶段时,活塞位移

$$\rho = L_c \frac{e_g - e_c}{2 + e_g + e_c} \quad (1)$$

式中: e_c 为滤饼的孔隙比; e_g 为水泥浆的孔隙比; L_c 为固结测试的滤饼厚度。

由于假定半滤饼孔隙比线性变化(如图 4),则距离液面 x 处的孔隙比为:

$$e_x = e_c + \frac{x}{L_c}(e_g - e_c) \quad (2)$$

大量实验得出渗透系数与孔隙比存在对数关系,据研究^[15]得此对数关系可用式(3)表示。

$$\frac{e_x - e_1}{c_k} = \log_{10} \left(\frac{k_x}{k_1} \right) \quad (3)$$

则由式(2)、(3)得:

$$k_x = k_c \cdot 10^{x \cdot (e_g - e_c) / (L_c \cdot c_k)} \quad (4)$$

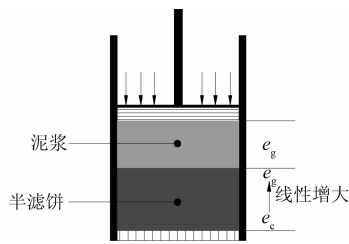


图 4 压滤第 1 阶段孔隙比假定示意图

式中 k_c 为滤饼渗透系数

由垂直渗流等效渗透系数公式得滤饼处

$$k_v = \frac{k_c \cdot (e_g - e_c) \ln 10 / c_k}{1 - \frac{1}{1 - 10^{(e_g - e_c) / c_k}}} \quad (5)$$

当第 1 阶段结束时, $L_c = d_{f1}$ 。

由达西定律关联沉降量与压出的水分得出第 1 阶段压滤时间

$$t_1 = \frac{d_{f1}^2 \cdot \gamma_w}{2 \cdot k_v \cdot \sigma} \left(\frac{e_g - e_c}{2 + e_g + e_c} \right) \quad (6)$$

式中 γ_w 为水的容重。

而第 1 阶段结束时的滤饼厚度

$$d_{f1} = d_f \frac{2 + e_g + e_c}{2(1 + e_c)} \quad (7)$$

第 2 阶段活塞位移

$$\rho' = d_f \cdot \frac{e_g - e_c}{2 + 2e_c} \quad (8)$$

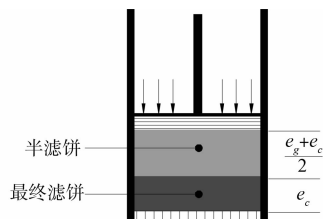


图 5 压滤第 2 阶段孔隙比假定示意图

根据第 2 阶段假定(如图 5),同理由达西定律得出第 2 阶段压滤时间

$$t_2 = \frac{d_f^2 \cdot \gamma_w}{4 \cdot \sigma \cdot k_c} \cdot \frac{e_g - e_c}{1 + e_c} \quad (9)$$

综合式(5)、(6)、(7)、(9)得出总压滤时间

$$t_f = \frac{d_f^2 \gamma_w}{4\sigma k_c (1 + e_c)} \cdot$$

$$\left[\frac{c_k}{\ln 10} \left(1 - \frac{1}{10^{(e_g - e_c) / c_k}} \right) \frac{e_g + e_c + 2}{2(1 + e_c)} + (e_g - e_c) \right] \quad (10)$$

4 模型验证

为了验证本文建立的理论模型与公式的正确性,引用 Bolton 和 McKinley 对水泥浆的压滤试验数据^[12]。其试验为水泥浆的单向压滤试验,采用单

面排水模型(实验水泥浆的 d_s 为 2.71),可见建立的模型与压滤公式即公式(10)仍然适用于此试验,具体数据见表 1。其中 c_k 的取值是由其试验数据通过公式(3)反推得到的平均值, $c_k = 1.2$ 。

表 1 水泥浆压滤试验数据

Test	w_c	d_f /mm	w_g	σ /kPa ($10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_c /$	实测 t_f /s
1	0.44	97.8	0.6	11.2	0.56	1 491
2	0.45	68.7	0.6	5.1	0.45	1 867
3	0.44	57.8	1.0	15.2	0.48	1 330
4	0.46	39.3	1.0	15.2	0.67	420
5	0.43	24.1	1.0	12.6	0.60	232
6	0.37	36.1	0.6	25.3	0.51	150
7	0.42	49.6	0.8	5.1	0.64	1 630
8	0.42	46.2	0.8	15.2	0.59	518
9	0.39	47.2	0.8	25.3	0.38	561
10	0.42	38.8	0.8	20.2	0.77	209
11	0.41	37.5	1.0	58.4	0.44	176
12	0.39	23.3	1.0	39.0	0.35	136
13	0.30	55.0	0.6	22.3	0.48	607
14	0.39	61.9	0.57	5.6	0.79	1 007
15	0.35	65.3	0.6	22.3	0.50	634
16	0.32	71.3	0.61	33.5	0.49	615

此试验数据中的 w_c 在 0.30 至 0.46 之间,取平均值 0.41, k_c 在 0.43 至 $1.47 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 之间,取平均值 $0.72 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,然后将数据代入本文的压滤公式(式(10))后,得出预测的压滤时间 t_f ,然后与实测 t_f 进行比较得出结果如图 6 所示。

由图 6 可见,试验数据点大部分落在 1:1 线附近,但在压滤时间较长时,预测结果普遍小于实测结果。从理论上分析,随着时间的增加,滤饼的孔隙比逐渐减小,由于泥浆实际状态与假设的横观均一稳定有一定差别,在小型试验的情况下,泥浆中的凝块、少量杂质以及壁效应对渗流的影响累加增大,导致实际压滤速度无法达到在假定下的理论速度,测试时间越长,其影响越显著,故造成了如上结果的差异。若当试验设备尺寸以及滤过压能增大到接近于实际工程机械时,压滤时间会进一步缩短,且其他因素的影响也会减小,使得结果更为接近实际。可见所建立的模型能够对压滤进行较好的模拟。

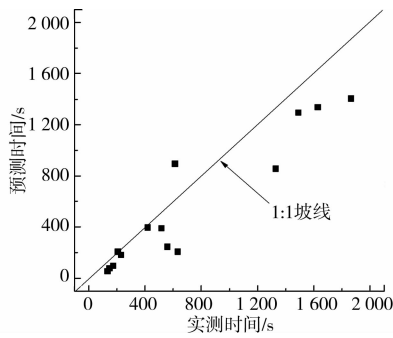


图 6 预测压滤时间与实测压滤时间比较图

5 参数分析

为了研究影响压滤过程的一些因素,本文选取了压滤公式中的几个重要参数进行了参数分析。图 7 给出了压滤压力与压滤时间的关系图,由图 7 可见,压滤时间随压滤压力的增大而减小,但减小的幅度逐渐降低。从原理分析,当压滤压力增大,泥浆排水速度增加,孔隙比降低速度加快,故压滤时间减小;同时当压滤压力增大时,孔隙比减小到最终滤饼的孔隙比的时间越来越短,故压滤时间减小的幅度也会随之降低。因此,增加压力有利于压滤的快速完成,但当压力超过一定值以后,对压滤时间的影响很小。

图 8 给出了不同 c_k 取值时,压滤压力对最终泥饼渗透系数的影响。由图可见, c_k 越大,在相同压力下最终泥饼达到的渗透系数越大;压滤压力越大,最终泥饼的渗透系数越小,说明压力越大,最终压滤效果越好。

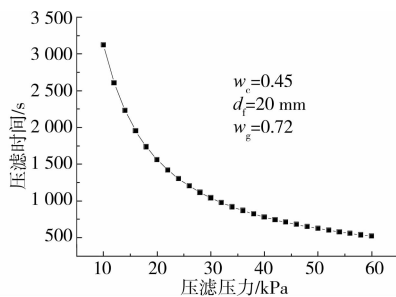


图 7 压滤压力和压滤时间关系图

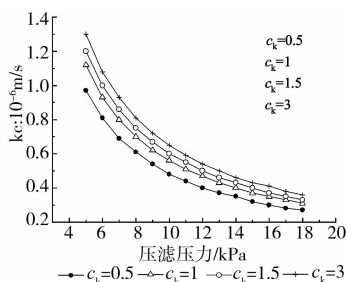


图 8 不同 c_k 取值下渗透系数关于压滤压力的曲线

6 压滤试验验证

为了验证模型的实用性,本文对泥浆进行了室内压滤试验,试验配置泥浆所使用的土样来自于杭州地区,属于粘质粉土,试验所用的土颗粒经测定得到颗粒级配曲线如图 9 所示。

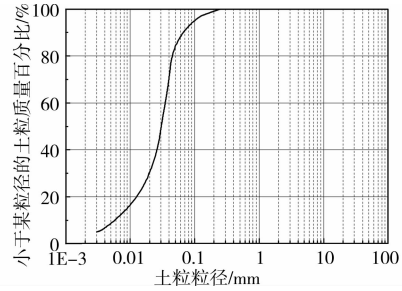


图 9 试验土的标准颗粒级配曲线

压滤试验所配置泥浆的初始含水率在 0.66—0.83 之间,通过室内试验得到关系式中 c_k 以及 k_c 的取值(其中 c_k 为 3.0, k_c 值见表 2)。试验过程中滤过压在 21.51~65.53 kPa 之间,具体数据如表 2 所示。

表 2 室内压滤试验数据

e_g	d_f /mm	σ /kPa	t_f /s	实测 k_c / ($10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	公式 推得 e_c	实测 e_c
2.22	17	43.04	678	0.019	1.27	1.35
2.22	18	43.04	857	0.015	1.35	1.28
1.95	20	32.27	1 049	0.012	1.42	1.19
1.84	15	43.04	326	0.019	1.27	1.18
1.84	18	37.66	778	0.010	1.40	1.24
1.79	22	26.89	1 297	0.012	1.38	1.23
2.14	23	65.53	902	0.021	1.08	1.26

由表 2 数据可见,在给定压滤时间情况下,由公式推算得到的滤饼孔隙比与实测值之间较接近,进一步验证了公式的实用性。

对于实际工程所关心的压滤压力、压滤时间以及压滤效果之间的关系可以通过本文的模型很好的给出。本文的研究对泥浆压滤技术的进一步发展应用提供了依据。

7 结论

1)通过研究压滤机原理,建立了合理的计算模型,推导出了压滤时间、压滤压力等重要参数之间的关系式。

2)通过水泥浆的压滤试验数据验证了本文压滤

公式的合理性。

3)通过对公式中的参数以及变量的分析,可以看出在同等条件下,增加压力有利于压滤的快速完成,但当压力超过一定值以后,对压滤时间的影响很小。同时压滤压力越大,最终泥饼的渗透系数越小,说明压力越大,最终压滤效果越好。

4)通过室内泥浆压滤试验得出在给定压滤时间情况下,可以由公式推算得到较为准确的滤饼孔隙比,验证了公式在实际工程中的实用性。

参考文献:

- [1] 刘敏林,王永贵. 泥浆处理技术在地铁盾构施工中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(5): 50-51.
LIU Minlin, WANG Yonggui. Mud treating technique in metro shield structure construction [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology.)
- [2] 龙莉波. 泥浆净化装置在钻孔灌注桩施工中的应用[J]. 建筑施工, 2007, 29(6): 392-394.
LONG Libo. Application of slurry depuration device to bored cast-in-place pile construction [J]. Building Construction, 2007, 29(6): 392-394.
- [3] Malachosky E, Shannon B E, Jackson L E. Offshore disposal of oil-based drilling fluid waste. A environmentally acceptable solution [C]//Proc First Int Conf Health Saf Environ Oil Gas Explor Prod, 1991: 465-473.
- [4] 范英宏,潘智,刘建华,等. 高速铁路桥梁施工废弃泥浆处理工艺研究[J]. 铁道建筑, 2009, 12: 21-23.
FAN Yinghong, PAN Zhi, LIU Jianhua, et al. Study and application of solidification treatment technology of waste drilling mud in high speed railway bridge construction [J]. Railway Engineering, 2009, 12: 21-23.
- [5] 胡承雄,马华滨. 京沪高速铁路废弃泥浆处理现场试验[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2009, 36(3): 112-115.
HU Chengxiong, MA Huabin. Field experiment on waste drilling field treatment of Beijing Shanghai high speed railway [J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 2009, 36(3): 112-115.
- [6] 张忠苗,房凯,王智杰,等. 泥浆零排放处理技术及分离土的工程特性研究[J]. 岩土工程学报 2011, 33(9): 1456-1461.
ZHANG Zhongmiao, FANG Kai, WANG Zhijie, et al. Zero discharge treatment technology of slurries and study of engineering properties of separated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1456-1461.
- [7] 董仕明,王平全,陈志勇,等. 油气田钻井废弃泥浆处理技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 87-89.
DONG Shiming, WANG Pingquan, CHEN Zhiyong, et al. Treatment technology of oil and gas fields waste drilling muds [J]. Tianranqi Gongye, 2008, 28(2): 87-89.
- [8] 董娅玮. 废弃钻井泥浆固化处理技术研究[D]. 长安大学, 2009.
- [9] 叶雅文,张建国,邓皓. 对国内废泥浆固液分离及后处理的研究[J]. 江汉石油学院学报, 1990, 12(1): 46-51.
YE Yawen, ZHANG Jianguo, DEN Hao. An experimental study on solid-liquid separation of some China's waste drilling muds and their follow-up treatment [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1990, 12(1): 46-51.
- [10] Malachosky E, Sanders R, Mcauley L. Impact of the use of dewatering technology on the cost of drilling waste disposal [J]. Society of Petroleum Engineering of A/ME, 1989: 97-110.
- [11] 李庆斌,孙赤,王中来,等. 压滤机过滤压密过程的解析[J]. 化工学报, 1987(2): 230-239.
LI Qingbin, SUN Chi, WANG Zhonglai, et al. Analysis of the Filter-Consolidation Stage in a Filter Press. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1987(2): 230-239.
- [12] Bolton M D, Mckinley J D. Geotechnical properties of fresh cement grout-depressure filtration and consolidation tests [J]. Geotechnique, 1997, 47(2): 347-352.
- [13] Bezuijen A, Sanders M P M, Denhamer D. Parameters that influence the pressure filtration characteristics of bentonite grouts [J]. Geotechnique, 2009, 59(8): 717-721.
- [14] Gustin E J G, Karim U F A, Brouwers H J H. Bleeding characteristics for viscous cement and cement-bentonite grouts [J]. Geotechnique, 2007, 57(4): 391-395.
- [15] 谢康和,郑辉,李冰和,等. 变荷载下成层地基一维非线性固结分析[J]. 浙江大学学报: 工程版, 2003, 37(4): 427-431.
XIE Kanghe, ZHENG Hui, LI Binghe, et al. Analysis of one dimensional nonlinear consolidation of layered soils under time-dependent loading. Journal of Zhengjiang University: Engineering Science, 2003, 37(4): 427-431.