

盾构隧道同步注浆浆液上浮力试验研究

张连凯

(上海城建投资发展有限公司, 上海 200122)

摘要: 盾构隧道掘进过程中, 未凝固的同步注浆浆液会对盾构管片产生上浮力作用。目前, 针对同步注浆浆液上浮力的模型试验研究较少。为了进一步探究盾构隧道同步注浆浆液产生的上浮力特性, 本文在不同注浆浆液配合比的条件下, 开展隧道管片上浮模型试验, 以探究管片上浮力随时间变化的规律。管片在新拌好的浆液中受到的浮力满足阿基米德定律, 浆液上浮力随时间逐渐减小, 基本满足四阶段变化规律: 快速减小段、稳定不变段、二次减小段、减小为负值并趋向稳定段。随着浆液材料反应的不断进行, 浆液逐渐从液体变成固体, 浆液强度不断增长, 抵抗隧道上浮的能力越来越强, 隧道管片受到的浆液上浮力逐渐减小。

关键词: 盾构隧道; 同步注浆浆液; 上浮力; 模型试验

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)05-0361-05

Experimental study on buoyancy of synchronous grouting slurry in shield tunnel

ZHANG Lian-kai

(Shanghai Urban Construction Investment Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: During the process of shield tunnelling, the non-hardening synchronous grouting slurry exerts an upward buoyancy force on the shield tunnel segment. At present, there are a few model tests for measuring the buoyancy of synchronous grouting slurry. To further analyse the buoyancy characteristics generated by synchronous grouting slurry, this paper carried out model tests under different grouting slurry mix proportions, in order to explore the variation of buoyancy on the shield segments with time. The buoyancy force received by the tube in the newly mixed slurry meets Archimedes' law, and the upper buoyancy gradually decreases with time, by basically undergoing four stages: rapid decreasing stage, stable stage, secondary decreasing stage and negative value stage. As the reaction of grout material continues, the grout gradually changes from liquid state to solid state, and the grout strength keeps increasing. Hence, the ability of grout to resist the buoyancy becomes stronger.

Key words: shield tunnel; synchronous grouting slurry; buoyancy force; model test

0 引言

随着城市地下空间的开发与利用, 隧道开挖工程技术也相应得到快速发展。盾构法施工凭借其机械化程度高、质量好、对城市日常生活影响小、环境效应小等优点, 逐渐成为隧道施工的主流技术。隧道开挖过程中, 盾构机外径大于隧道管片的外径, 脱出盾尾的管片不能得到周围地层的有效支承与约束, 悬空于已挖好的孔洞内, 这为管片发生位移提供了足够的空间。管片与周围土体之间的间隙常常采用同步注浆的方式进行填充。而浆液发生凝

结形成强度需要一定的时间, 且盾构机不断向前推进, 所以总有一定长度的管片处于浆液未凝固区, 受到浆液的上浮力作用。当管片受到的浮力大于管片自身重力与其他抗浮力之和, 管片将会上浮^[1-4]。盾构管片的整体上浮不仅会使隧道偏离设计路线, 还会造成管片的局部损伤和接头渗漏等现象, 从而使隧道结构的安全性和使用性能下降, 所以需要对该问题进行深入研究。

在隧道管片上浮问题研究中, 为较好反映上浮规律, 模型试验凭借其易于观测、变量便于控制等优点被广泛运用。目前, 上浮模型试验主要用于测

定管片所受到的浆液浮力、土体变化等。向科等^[5]在纯水、饱和砾石、中砂、细砂、粉土和黏性土等不同土层环境下,研制了一套测定结构底板所受浮力的模型试验系统,为测量管片受到的动态变化的浆液浮力提供了参考。杨方勤等^[6]开展了上海长江隧道抗浮模型试验,建立隧道管片受力平衡等式,通过抽水方式改变模型重量来确定不同龄期下的浆液上浮位移,以此为基础确定了隧道纵向模型计算参数,并对上海长江隧道进行了计算分析。周俊宏等^[7]利用透明土设计了盾构隧道上浮缩尺试验装置,拉动钢拉杆来模拟隧道上浮与控制上浮量大小,得到了不同上浮量下的抗浮力大小,同时利用机器视觉技术实现了非接触式地观测隧道上浮过程中的土体运动与位移。从既有文献可知,针对盾构同步注浆方面,浆液上浮力时变特性的相关研究还较少。

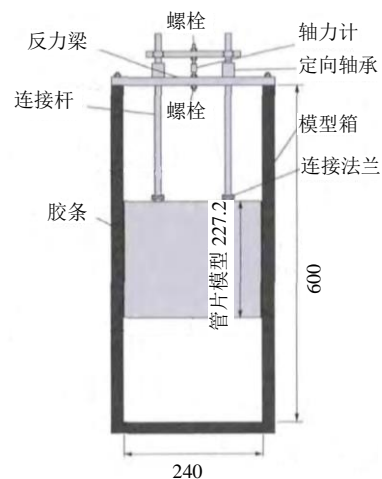
为了进一步探究盾构隧道同步注浆浆液产生的上浮力特性,本研究在不同注浆浆液配合比的条件下,开展隧道管片上浮模型试验,测量管片受到的浆液浮力,通过分析测量数据,对比不同浆液配比下浮力作用的差异,探究管片上浮力随时间变化的规律。

1 试验原理

施工期盾构隧道的上浮受到盾构工法与掘进参数、同步注浆、土层特性等因素的综合作用。其中,管片脱出盾尾后被浆液包裹,随着时间的推移,浆液体内各组分之间不断发生物理、化学反应,强度逐渐增大,通过理论推导管片受到浆液的上浮力存在很大的困难,而试验在反映现象规律上具有较大的优势。所以,通过试验来确定浆液本身的上浮力,建立管片受到浆液的上浮力随时间变化的规律是极其重要的。

试验箱采用 500 mm×240 mm×600 mm 的箱子,周边不透水边界可模拟透水性较差的软黏土,长边与一短边方向采用高强度耐腐蚀的军工材料 5A06,保证箱壁不至于在浆液压力作用下发生较大的变形;另一短边采用较厚的钢化玻璃,方便观察浆液情况。并在内壁张贴低摩擦系数的塑料材料并涂抹工业凡士林,以减小模型管片上浮过程中与箱壁之间的摩擦。模型隧道管片采用钢制封闭圆筒,外径 227.2 mm,相当于原型隧道管片外径(5.68 m)的 1/50;长 240 mm,相当于 6 环管片长度(12 m)。由于管片环间接缝造成的抗弯刚度折减效应在本

试验中影响较小,试验忽略管片环间接缝的影响,将其简化为均匀管片。在模型管片的顶部通过连接法兰连接 2 根钢筋立杆,再通过连接梁连接称重传感器。称重传感器固定于连接梁与反力梁之间。后通过数采仪与传感器相连,将采集到的信息转化为电压信号。模型装置示意图及实物如图 1 所示。管道受到的上浮力大于其重力时,管道开始上浮,通过连接杆和定向轴承将力传递到传感器上,利用传感器所测数值,以此推算模型管片所受浮力。所用浆液配比见表 1。



(a) 设计图(单位: mm)



(b) 实物

图 1 试验模型设计图及实物

Fig. 1 Design drawing and real object of test model

未注浆液时,在管片自重作用下传感器受压,为管片提供向上的作用力 F_1 。管片自重为 G ,管片两端与模型箱壁之间的摩擦为 f_1 ,管片受力如图 2(a) 所示,建立受力平衡:

$$F_1 + f_1 - G = 0 \quad (1)$$

注满浆液后,管片受到的浆液上浮力 $F_{\text{浮}}$ 的作用,传感器受拉,为管片提供向下的作用力 F_2 。为简化分析,假设浆液凝固过程中,管片端部所受摩擦力 f_2 保持管片受力如图 2(b) 所示,模型管片受

表 1 试验浆液配合比 (1 m³)
Tab. 1 Mix proportion of the slurry

配比编号	砂/kg	水/kg	生石灰/kg	粉煤灰/kg	膨润土/kg	水泥/kg	添加剂/kg
1	1 180	300	80	300	50	0	3
2	1 180	300	80	300	50	25	3
3	1 180	300	80	300	50	50	3

力平衡为:

$$F_{\text{浮}} - (G + f_2 + F_2) = 0 \quad (2)$$

假设管片上浮前与上浮后受到的摩擦力 f_1 与 f_2 大小相等, 方向相反, 联立式 (1) 和式 (2) 可得:

$$F_{\text{浮}} = F_1 + F_2 + 2f_2 \quad (3)$$

其中, f_1 通过水浮力测试进行标定。

当 $F_{\text{浮}} > 0$ 时, 表明浆液浮力大于抗浮力; 当 $F_{\text{浮}} = 0$ 时, 表明浆液浮力等于抗浮力, 浆液对管片无作用; 当 $F_{\text{浮}} < 0$ 时, 表明浆液浮力小于抗浮力, 浆液能够较好地约束管片位移。

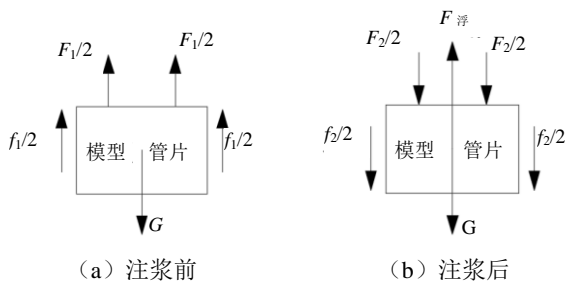


图 2 模型管片受力示意图

Fig. 2 Force diagram of the model segment

2 试验步骤

(1) 在试验开始之前, 利用管片自重对传感器进行标定, 检测传感器的测量误差与测量灵敏程度。

(2) 在往模型箱内注入浆液之前, 先进行水浮力测试, 以检验试验装置和传感器性能。初始水位位于管片底部, 然后逐渐往模型箱内注水, 直至淹没管道 1/4、1/2、3/4、1 倍的模型隧道体积, 记录数采仪读数, 对模型管道端部受到的摩擦力 f_1 进行标定。

(3) 按照浆液配比拌制浆液 0.06 m³, 先填充浆液至管片底部, 记录读数 F_1 ; 然后填充浆液至管片顶部以上 20 mm, 在 24 h 内每隔 1 h 记录数采仪读数 F_2 , 按照式 (3) 计算得到管片在浆液中所受的上浮力。

(4) 试验结束后, 拆除模型箱前板, 清理箱内的浆液凝固体, 取出模型管片并进行清洗, 之后再进行一次试验。

3 试验步骤

3.1 上浮力与浆液龄期之间的关系

(1) 无水泥配比 (配比 1)

图 3 为模型管片在配比 1 浆液中受到的上浮力随时间变化曲线。模型管片受到的浆液上浮力随浆液龄期的增长而逐渐减小, 15 h 后将趋向于水产生的浮力。刚拌制好的浆液基本呈流体状态, 当模型管片处于刚拌制好的浆液中时, 所受到的上浮力为 159.15 N, 近似等于按照阿基米德定律计算得到的浮力 171.64 N, 其中, 密度采用浆液密度, 误差为 7.8%。

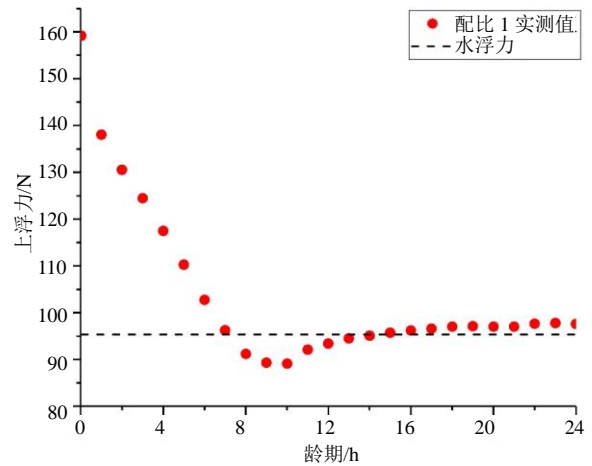


图 3 模型管片在配比 1 浆液中受到的上浮力随龄期的变化曲线

Fig. 3 Buoyancy force on model segment in slurry with proportion 1 varies with age

如图 3 所示, 浆液上浮力变化趋势可分为 2 个阶段: 首先, 浆液注入模型箱后会有一定程度的离析, 密度大的砂、膨润土、粉煤灰与石灰体会往下沉, 不断发生挤密固结, 浆液强度增长, 而水分会在浆液表面析出, 液体密度不断减小, 导致浆液上浮力不断减小。之后, 由于浆液各组分之间的反应不消耗水或者耗水量较小, 浆液中的水分不能够

排出或消耗掉,且浆液内的火山灰反应缓慢,对于浆液强度的增长贡献有限,导致管片一直处于类似于饱和和砂土的环境中,所以浆液上浮力在很长一段时间内会与水浮力保持一致。从浆液龄期 1 h 到 24 h,模型浮力从 138.06 N 逐渐降低到 97.58 N。

(2) 含水泥配比(配比 2、3)

图 4 为模型管片在配比 2 及 3 的浆液中受到的上浮力随时间变化曲线。配比 2、3 水泥掺量分别为 25 kg/m^3 、 50 kg/m^3 ,管片受到的上浮力随浆液龄期的增长逐渐减小,直至上浮力为零。同样,当管片处于刚拌制好的浆液中时,所受到的浆液上浮力分别为 183.31 N、192.43 N,近似等于按照阿基米德定律计算得到的浮力 173.54 N 与 177.36 N,误差分别为 5.3%、7.8%。模型管片在配比 3 浆液中 16 h 上浮力便减小为零,而在配比 2 浆液中则需要达到 23.5 h。

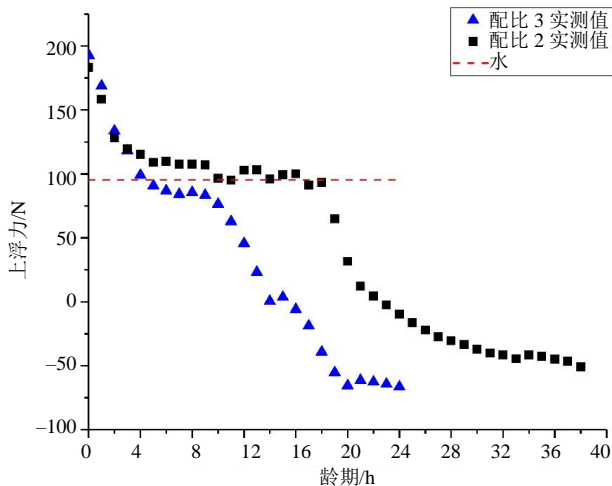


图 4 模型管片在配比 2、3 浆液中受到的上浮力随龄期的变化曲线

Fig. 4 Buoyancy force on model segment in slurry with proportion 2 and 3 varies with age

如图 4 所示,数据变化趋势可分为 4 段:(1)快速减小段:隧道管片受到的上浮力快速减小,在该阶段内,除了发生类似于配比 1 中的离析挤密,主要以水泥的凝结硬化为主,浆液内的水泥快速发生水化反应,包裹模型的浆液不断凝结并且凝结速度极快,水泥掺量越高,反应速度越快,上浮力减小越快。(2)稳定不变段:浆液上浮力变化幅度较小,基本与水浮力保持一致,可能是因为一些水化生成物覆盖在了胶凝材料的表面阻止了水化反应的继续进行,当反应物逐渐与水接触并积累到一定程度时,反应又继续发生。水泥掺量越高,稳定不变段时间越短。(3)二次减小段:浆液上浮力继续减小至零,此时浮力与抗浮力相等。该阶段内,少

量未水化的水泥继续反应,主要以火山灰反应为主,反应速度较水泥水化作用慢。两种浆液粉煤灰掺量相等,上浮力减小速率基本一致。(4)减小为负值并趋向于稳定段:固态的浆液体包裹在管片四周,对管片形成了加载作用,上浮力变成负值。浆液中的水分基本被反应消耗,浮力逐渐减小为零,抗浮力随着浆液强度的增大持续增大,直到浆液强度增长过程结束,此时浆液上浮力将保持稳定。对比图 3,水泥的加入可使管片受到的上浮力快速减小,形成浆液块体以约束管片的位移。

(3) 上浮力与浆液强度之间的关系

图 5 为管片上浮力随浆液抗剪强度的变化曲线。在浆液拌制好后的 24 h 内,浆液抗剪屈服强度随龄期的增长而不断增大。将管片受到的浆液上浮力进行归一化处理,即将实时测量的浆液上浮力 $F_{浮}$ 与初始浆液上浮力 F_0 相比,建立浆液上浮力与浆液强度之间的关系,如图 5 所示,随着浆液强度的增大,管片受到的浆液上浮力基本呈下降趋势。在浆液强度形成早期,较小的强度增长便会导致上浮力有较大的下降;之后,浆液强度继续增大,但上浮力的减小速率则变得缓慢。由此可见,增强浆液的早期抗剪屈服强度,对减小管片上浮力作用效果较显著。当浆液强度达到 2 500 Pa 左右时,浆液上浮力减小为零。

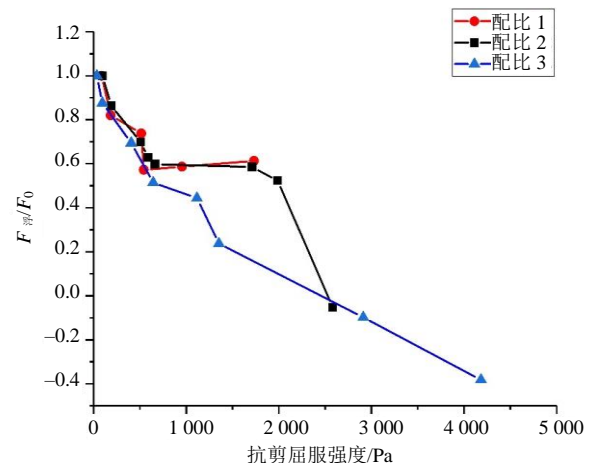


图 5 管片上浮力随浆液强度的变化曲线

Fig. 5 Variation of buoyancy force on model segment with strength of slurry

4 结 论

本文针对盾构隧道同步注浆浆液的上浮力时变特性开展了模型试验研究,得出了以下结论:

(1) 管片在新拌好的浆液中受到的浮力满足

阿基米德定律,浆液上浮力随时间逐渐减小,基本满足四阶段变化规律:快速减小段、稳定不变段、二次减小段、减小为负值并趋向稳定段。其中,对于掺有水泥的浆液,快速减小段主要受水泥水化凝结的影响,二次减小段则主要受粉煤灰的火山灰作用的影响;对于无水泥的浆液,快速减小段主要由浆液材料之间的挤密作用来控制。

(2)根据浆液强度发展与上浮力发展规律,探究了浆液上浮力与浆液强度之间的关系。随着浆液材料反应的不断进行,浆液逐渐从液体变成固体,浆液强度不断增长,抵抗隧道上浮的能力越来越强,隧道管片受到的浆液上浮力逐渐减小。

参考文献

- [1] 肖明清, 孙文昊, 韩向阳. 盾构隧道管片上浮问题研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1041-1045, 1056.
XIAO Ming-qing, SUN Wen-hao, HAN Xiang-yang. Research on upward moving of segments of shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1041-1045, 1056.
- [2] 林蔚劲, 张孟喜, 肖晓春, 等. 考虑浆液黏滞特性的大直径盾构隧道管片上浮机理分析[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 164-169.
LIN Wei-jin, ZHANG Meng-xi, XIAO Xiao-chun, et al. Analysis on floating mechanism of large-diameter shield tunnel segments considering the viscosity characteristic of slurry[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 164-169.
- [3] 张庆贺, 王慎堂, 严长征, 等. 盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 857-861.
ZHANG Qing-he, WANG Shen-tang, YAN Chang-zheng, et al. Tunnelling methods through river (lake, sea) bed under shallow covering by shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 857-861.
- [4] 侯永茂, 彭加强, 龚晓南, 等. 同步注浆浆液抗浮性能试验研究[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 53-56.
HOU Yong-mao, PENG Jia-qiang, GONG Xiao-nan, et al. Experimental study on anti-floating performance of synchronous grout[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(1): 53-56.
- [5] 向科, 周顺华, 詹超. 浅埋地下结构浮力模型试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 346-352, 357.
XIANG Ke, ZHOU Shun-hua, ZHAN Chao. Model test study of buoyancy on shallow underground structure[J]. Journal of Tongji University: Natural science, 2010, 38(3): 346-352, 357.
- [6] 杨方勤, 段创峰, 吴华柒, 等. 上海长江隧道抗浮模型试验与理论研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 454-459.
YANG Fang-qin, DUAN Chuang-feng, WU hua-qi, et al. Model experiment and theoretical study on stability against uplift of Shanghai Yangtze river tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 454-459.
- [7] 周俊宏, 宫全美, 周顺华. 基于透明土的隧道上浮过程结构与土相互作用模型试验[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(3): 1-6.
ZHOU Jun-hong, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Model test on upward moving tunnel and soil interaction using transparent soil[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(3): 1-6.