

同步注浆浆液抗浮性能试验研究

侯永茂¹, 彭加强², 龚晓南^{3,4}, 俞建霖^{*3,4}, 甘晓露^{3,4}, 张晓笛^{3,4}

(1. 上海隧道工程有限公司, 上海 200082; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

3. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 首先对同步注浆浆液中的管片上浮进行力学分析, 研究浆液抗剪强度与其抗浮性能之间的关系。之后利用室内十字板剪切仪, 对三种不同配比下的注浆浆液进行抗剪强度测试, 得到浆液抗剪屈服强度随时间的变化规律。研究结果表明: 浆液抗浮临界时间可综合反映浆液抗浮性能, 临界时间越小, 浆液竖向浮力梯度以及浮力影响范围越小; 在浆液拌制完成后的 24 h 之内, 三种配比的抗剪强度值强度增长情况不同; 随着浆液配比中水泥含量的增加, 浆液抗剪强度增长速率增大, 临界时间减小, 浆液抗浮性能逐渐增加。本文研究成果可为相关盾构工程同步注浆施工提供参考。

关键词: 同步注浆; 隧道抗浮; 抗剪强度试验; 室内十字板剪切仪

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0053-04

作者简介: 侯永茂 (1981 -), 男, 山东莱州市人, 博士, 高级工程师, 主要从事隧道工程、基坑工程的研究工作。E-mail: 54128380@qq.com。

Experimental study on anti-floating performance of synchronous grout

HOU Yong-mao¹, PENG Jia-qiang², GONG Xiao-nan^{3,4}, YU Jian-lin^{*3,4}, GAN Xiao-lu^{3,4}, ZHANG Xiao-di^{3,4}

(1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 311122, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4.

Engineering Research Center of Urban Underground Development, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The mechanical analysis of the segment uplift in the synchronous grout is carried out to study the relationship between the shear strength of the grout and its anti-buoyancy property. The shear strength of the grout in three different proportions is tested by indoor vane shear instrument, and the variation of the shear yield strength of the grout with time was obtained. The results show that the anti-buoyancy critical time of the grout can reflect the anti-buoyancy property comprehensively. The influence range of the buoyancy and the vertical buoyancy gradient decrease with the decrease of the critical time. Within 24 hours after the completion of the grout mixing, the shear strength growth of grout in three proportions is different. As the cement content of grout increases, the increase rate of the shear strength increases, and the critical time decreases, which means the anti-buoyancy capacity of the grout gradually increases. The research results can provide reference for the synchronous grouting construction of related projects.

Key words: synchronous grouting; tunnel anti-floating; shear strength test; indoor vane shear instrument;

0 引言

随着中国经济的快速发展, 城市地下空间发展方兴未艾。为了缓解城市交通拥挤问题, 城区地下空间中兴建了快速通道和轨道交通隧道, 这些城市隧道多利用盾构法进行施工。由各地的盾构施工监测数据可知, 无论盾构处于地层条件较差的软土地层, 还是处于地层条件较好的砂质、岩质地层, 都在不同程度上出现了由于同步注浆

浆液浮力而产生的管片上浮问题^[1-2]。盾构管片的整体上浮会造成管片的纵向错台, 环缝张开, 螺栓孔位置处混凝土碎裂等现象, 影响工程施工质量, 最终造成一定的经济损失, 所以需要对该问

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (16QB1403400); 国家自然科学基金项目 (No.5177858575); 浙江省重点研发计划项目 (2019C03103);

收稿日期: 2019-07-15

*通讯作者 (E-mail: yujianlin72@126.com)

题进行深入研究。张庆贺等^[3]从盾构开挖面平衡状态着手,推导了盾构开挖工作面水土压力与土舱内压力动态平衡公式,得到了盾构隧道上覆土体稳定所需的最小覆土厚度。叶飞等^[4]研究了盾构隧道施工期管片上浮原因,分析了同步注浆对隧道上浮的影响,并提出了盾构隧道的抗浮计算模型和计算方法。王道远等^[5]基于弹性地基等效梁,获得了盾构隧道纵向上浮的理论解析解,计算模型中考虑了上浮力、浆液力学性质随时间变化特性和上部土层压缩等因素。杨方勤等^[6]利用模型试验确定了盾构隧道动态上浮力,并以此为基础提出了隧道上浮稳定机理,提出了隧道上浮计算模型。

已有文献中,同步注浆浆液抗浮性能的相关研究鲜有报道。浆液的抗剪强度与浆液的抗浮性能密切相关,明确浆液抗剪性能的时变性规律,可进一步对浆液抗浮性能进行评估。本文先通过理论手段,对管片上浮进行力学分析,明确浆液抗剪强度与其抗浮性能之间的关系。之后利用室内十字板剪切仪,对三种同步注浆配比进行抗剪强度测试,得到浆液抗剪屈服强度随时间的变化规律。

1 管片上浮力学分析

浆液中的管片会受到来自同步注浆浆液的压力作用,盾构管片自身重量一般小于相应体积浆液重量,处于未凝固状态的浆液会对管片产生浮力作用。注浆浆液压力分布主要由注浆管初始注浆压力和注浆孔位置决定,假定注浆浆液为宾汉姆流体,具有一定的抗剪强度。当管片受到浮力产生上浮位移时,会挤压周围的浆液向下流动。如图1所示,根据Bezuijen等^[7]的研究,当考虑浆液的抗剪强度为 τ 时,每延米管片受到的浮力 F_b 可表示为:

$$F_b = \rho_g g \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\tau D^2}{s} \quad (1)$$

式中, ρ_g 为浆液密度, g 为重力加速度, s 为注浆层厚度, D 为隧道直径。

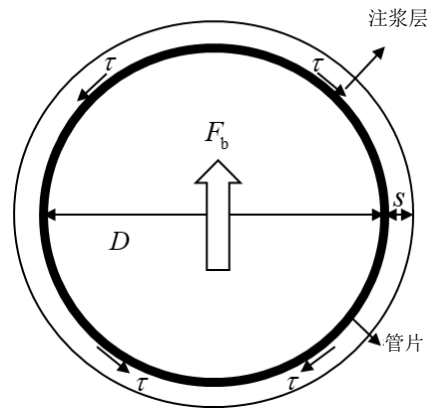


图1 管片上浮力学分析示意图

Figure 1 Mechanics analysis of the tunnel uplift

由式可得竖向浮力梯度 γ_b :

$$\gamma_b = \rho_g g - \frac{4\tau}{\pi s} \quad (2)$$

由式(2)可知,浆液竖向浮力梯度与浆液抗剪强度、注浆层厚度密切相关,浆液抗剪强度增加或减小管片底部注浆层厚度可降低浆液竖向浮力梯度,进而减小隧道上浮。当注入盾尾间隙的浆液抗剪强度经过时间 T 后增长至某一临界值,浆液浮力与管片自身重力可达到平衡状态,管片在浆液中的上浮得到有效控制,上浮量会逐渐趋于稳定,临界抗剪强度的表达式为:

$$\tau_c = \frac{(\rho_g g \frac{\pi D^2}{4} - G_1)s}{D^2} \quad (3)$$

式中, G_1 为管片自身重量,可由下式表示:

$$G_1 = \gamma_c (1 - (1 - \delta_c)^2) \pi D^2 / 4 \quad (4)$$

式中, γ_c 为混凝土管片重度,一般取值为 25 kN/m^3 ; δ_c 为管片厚度与管片半径的比值,一般取值为 $0.08 \sim 0.10$ ^[8]。

临界时间 T 可综合反映浆液抗浮性能, T 越小,浆液竖向浮力梯度以及浮力影响范围越小。在明确了浆液抗浮临界时间后,可结合经济性和注浆管泵送能力,选择合适的浆液进行同步注浆。

2 同步注浆浆液强度试验

在明确了浆液抗剪强度与抗浮性能间的关系之后,本文针对常见配比下的注浆浆液进行室内十字板抗剪强度测试,三种同步注浆浆液配比如表1所示。由表1可知,在本次试验中,三种配比之间的区别体现在水泥掺入量,可反映惰性浆液(无水泥掺入)和可硬性浆液(有水泥掺入)抗浮性能的不同。

表 1 注浆浆液配比表

Table 1 The mix proportion of the synchronous grout

编号	砂 /(kg·m ³)	石灰 /(kg·m ³)	膨润土 /(kg·m ³)	粉煤灰 /(kg·m ³)	水泥 /(kg·m ³)	添加剂 /(kg·m ³)	水 /(kg·m ³)
1	1000	80	60	300	0	3	350
2	1000	80	60	300	25	3	350
3	1000	80	60	300	50	3	350

图 2 为拌制完成的浆液 24 h 内的十字板抗剪强度变化情况, 如图 2 所示, 浆液抗剪强度随时间呈逐渐增长的趋势。配比 1 与配比 2、3 相比, 其强度的增长主要依靠石灰与粉煤灰之间的化学反应。当熟石灰中的 Ca(OH)₂ 形成薄膜覆盖在粉煤灰颗粒表面上, 就开始发生火山灰反应, 生成水化硅酸钙与水化硅酸铝等产物, 但由于 Ca(OH)₂ 薄膜与粉煤灰颗粒间存在着水解层, 钙离子需要通过水解层才能与粉煤灰中的活性组分反应, 反应物在层内逐渐聚集, 因此当水解层未被火山灰反应产物充满到一定程度时, 不会使浆液抗剪强度有较大增长^[9], 最终导致浆液 24 h 抗剪屈服强度仍然较低。配比 2 和 3 在浆液中添加水泥, 其作为一种快速胶凝材料能迅速与水发生水化反应以形成具有一定强度的化合物。对于配比 1 和 2, 不含水泥或水泥含量较少, 在 2~8 h 之间, 抗剪屈服强度增长过程存在稳定台阶; 而对于配比 3, 抗剪屈服强度一直呈现快速增长趋势。

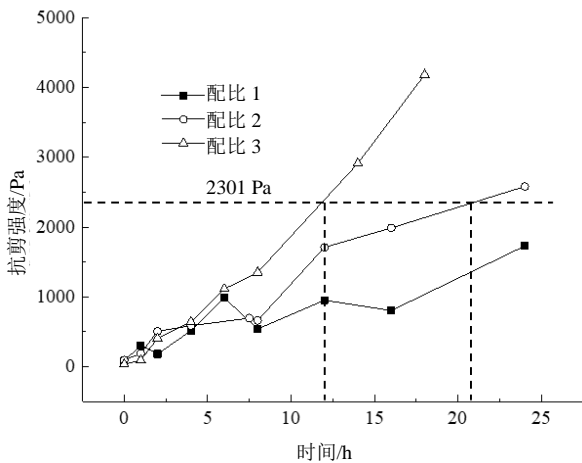


图 2 浆液抗剪强度随时间变化情况

Figure 2 Variation of shear strength of grout with time

在 0~5 h 之间, 三种配比的抗剪强度值和强度增长速率基本相同, 抗剪强度从 0 Pa 增长至 550 Pa 左右。当浆液抗浮临界时间处在 0~5 h 间, 即临界强度在 0~550 Pa 之间时, 三种配比的浆

液抗浮性能接近, 增加水泥并不会增加浆液的抗浮能力, 即可硬性浆液与惰性浆液的抗浮性能差别不大。而在 5 h 之后, 三种配比的抗剪强度值增长速率发生变化, 随着水泥用量的逐渐增加, 抗剪强度增长速率增大。浆液抗浮临界时间较小, 管片上浮会在更快的时间内得到控制, 说明此时可硬性浆液的抗浮性能优于惰性浆液。图 3 为浆液抗剪屈服强度随水泥加入量的变化情况, 如图 3 可知, 随着时间的增长, 三种配比下抗剪强度之间的差异不断增大, 说明水泥的凝结作用是随时间逐步显现。

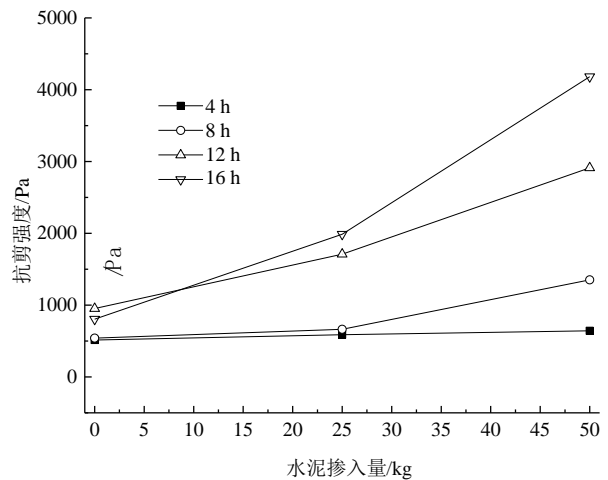


图 3 浆液抗剪强度随水泥掺入量变化情况

Figure 3 Variation of shear strength of grout with cement content

以某大直径盾构工程为例, 相关参数取值为 $\rho_g=1900 \text{ kg/m}^3$, $D=12 \text{ m}$, $G_f=449 \text{ kN}$, $s=0.2 \text{ m}$ 。由此可得临界抗剪强度为 2301 Pa。参考图 2 得到的浆液抗剪强度时变性规律, 若浆液在拌制完成后即注入盾尾间隙, 三种浆液配比下的抗浮临界时间各不相同。配比 2 和 3 的临界时间分别为 12 h 和 21 h, 而配比 1 的临界时间超过了 24 h, 说明随着水泥含量的增加, 浆液抗浮性能逐渐增加。相比于使用惰性浆液, 使用可硬性浆液可以更好的对隧道上浮进行控制。

3 结 论

本文通过理论手段,对同步注浆浆液中管片上浮进行力学分析,之后利用室内十字板剪切仪,对三种同步注浆配比进行抗剪强度测试,得到以下结论:

(1)当浆液经过抗浮临界时间后强度增长至临界强度时,管片在浆液中的上浮会逐渐趋于稳定。临界时间可综合反映浆液抗浮性能,临界时间越小,浆液竖向浮力梯度以及浮力影响范围越小。

(2)在浆液拌制完成后0~5 h之间,三种配比的抗剪强度值和强度增长速率基本相同;在5 h之后,三种配比的抗剪强度值增长速率发生变化,随着水泥用量的逐渐增加,抗剪强度增长速率增大。

(3)随着浆液配比中水泥含量的增加,浆液抗剪强度增长速率增大,临界时间减小,浆液抗浮性能逐渐增加。

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.
- [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.
- [3] 张庆贺,王慎堂,严长征,张伟.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.
- [4] 叶飞,朱合华,丁文其.基于弹性地基梁的盾构隧道纵向上浮分析[J].中国铁道科学,2008,29(4):65-69.
- [5] 王道远,袁金秀,朱正国,等.水下盾构隧道纵向上浮理论解及工程应用[J].岩土力学,2014,35(11):3079-3085.
- [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.
- [7] Bezuijen A, Talmon A, Kaalberg F, Plugge R. Field measurements of grout pressures during tunneling of the Sophia rail tunnel[J]. Soils Found., 2004, 44(1): 39-48.
- [8] Liu X Y, Yuan D J. Mechanical analysis of anti-buoyancy safety for a shield tunnel under water in sands[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2015, 47: 153-161.
- [9] 丁宇能.盾构隧道壁后注浆材料物理力学性质试验研究[D].南京:东南大学,2017.