

城市明挖隧道抗浮设计思考与研究

饶欣频, 陈伟

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 随着城市土地资源的集约型发展,为缓解城市交通压力,在城市地面向上发展受约束和考虑周边环境景观要求的背景下,城市下沉式隧道越来越多地应用于交叉口相交或道路主线下穿工程中。结合近些年广东地区明挖隧道设计经验,对明挖隧道的抗浮设计进行思考和研究,为其他类似工程实践提供有益参考和借鉴。

关键词: 城市明挖隧道;抗浮;抗浮桩;敞口段;闭口段

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0251-04

0 引言

随着城市经济发展,土地资源日益稀缺,为缓解城市交通压力,便于车辆快捷化通过道路交叉口、广场或密集开发区域等,城市隧道的应用日趋广泛。下沉式隧道既能满足交通功能,又能兼顾周边环境和景观,具有较好的经济效益和社会效益。

广东地区城市车行隧道受地形地貌、用地红线、覆土深度、地下管线和地铁等因素影响,以浅埋明挖隧道形式居多。由于广东属亚热带季风气候,水资源丰富,降水充沛。因此,隧道抗浮问题不容忽视,尤其是隧道洞口附近的几个 U 型敞口节段和浅埋闭口节段为抗浮设计的重点区域,否则由于抗浮设计不当,容易造成隧道稳定性失衡,底板不均匀变形、隆起、开裂、冒浆溢水,甚至节段上浮等严重问题。

因此,本文结合城市明挖隧道设计工作实践经验,针对抗浮设防水位、抗浮措施选用和抗浮设计等进行研究探讨,为地下水丰富区域的城市隧道抗浮设计提供参考。

1 抗浮设防水位

抗浮设防水位的取值是抗浮计算的重要参数。抗浮设防水位过高,导致隧道抗浮长度增加,抗浮措施投入加大,增加工程造价。设防水位过低,导致隧道存在节段上浮、涌水、底板开裂等风险,增加加固维修费用,影响行车安全,降低隧道使用年限。现行规范中关于抗浮设防水位的确定主要参照《建筑工

程抗浮技术标准》(JGJ 476—2019)第五章和广东省标准《建筑地基基础设计规范》(DBJ 15-31-2016)第 4.3.11 的规定^[1-2]执行。抗浮设防水位应结合地下水勘察成果、水位预测咨询报告、地下水长期观测资料、历史最高水位等因素综合分析。实际工作中,在缺乏水位预测咨询报告情况下,使用期抗浮设防水位通常采用与设计使用年限相同时限的场地历史记录最高水位或长期观测最高水位与设计隧道外地坪高程相比的高值。

2 抗浮安全系数

针对隧道抗浮安全系数,现行有多本行业和地方规范进行了论述。《公路水下隧道设计规范》(JTG/T 3371—2022)主要针对钻爆法、盾构法、沉管法和堰筑法施工的水下道路隧道,使用阶段的抗浮安全系数根据不同施工工艺取值为 1.05、1.15 和 1.2。上海市《道路隧道设计标准》和浙江省《城市道路隧道设计标准》^[3-4]指出,明挖隧道使用阶段抗浮安全系数不考虑侧墙土体摩阻力时取 1.05,考虑摩阻力时取 1.10。

现行《建筑工程抗浮技术标准》规定,抗浮工程为甲级的建筑工程时,考虑所有抗浮抗力条件下使用期安全系数 K_w 为 1.10;广东省《建筑地基基础设计规范》指出抗浮安全系数为 1.05,不宜考虑地下室侧壁及底板结构与岩土接触面的摩擦作用和黏滞作用。

这些规范主要由于行业、地域、隧道施工工艺以及抗浮是否考虑侧摩阻力等因素导致使用阶段抗浮安全系数取值有所不同。通过比较分析,参照上海市、浙江省地方规范中城市明挖隧道的论述,结合广东省地基基础地方规范,均支持城市明挖隧道在不考虑侧

收稿日期: 2022-07-20

作者简介: 饶欣频(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁隧道设计工作。

墙土体摩阻力情况下,使用阶段抗浮安全系数取值为1.05。

3 抗浮措施及设计

目前地下结构的抗浮措施从治理方法上主要有两大类。第一类是控制、减小水浮力作用,采用排水、泄水和隔水等措施减少水浮力。这类方法对周边环境、构筑物受力影响较大,需要长期维护、监测确保使用年限的效果。主要应用于空旷区域或隧道周围有较大地势高差,容易形成排水路径的环境^[5]。

第二类是抵抗水浮力作用,采用压重、结构抗浮或锚固等措施抵抗水浮力。这类方法充分考虑了周边水位变化,技术安全可靠,抗浮措施费用可控,在广东地区城市明挖隧道中普遍应用。结合第二类抗浮措施工程实践,重点谈谈明挖隧道抗浮设计的方法和相关问题。

3.1 压重抗浮法

压重抗浮法通过增加隧道顶板、底板或墙趾处压重荷载从而达到抗浮目的,适用于抗浮力与浮力相差较小的节段。在采用这类抗浮措施时,需注意:(1)墙趾填料压重荷载水下接触部分应采用饱和容重。(2)在使用增加墙趾长度或顶、底板压重措施时,应注意经济性和施工难度的对比。因为增加底板宽度和深度,虽然减少抗浮成本但容易增加基坑的造价。常用压重抗浮隧道敞口段如图1所示。

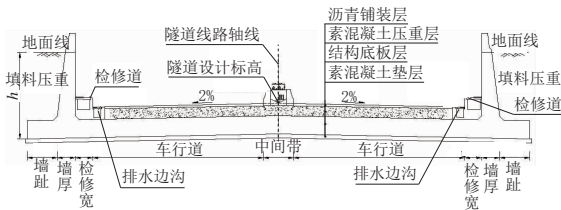


图1 压重抗浮隧道敞口段

3.2 支护桩联合抗浮法

支护桩联合抗浮法是抗浮设计时为节省抗浮措施成本,充分利用基坑支护两侧排桩的抗拔力来抵抗水浮力的设计方法。实际工程中主要有两种施工工艺。第一种是支护桩压顶抗浮^[6-7],如图2所示,通过扩大支护桩冠梁截面,使得冠梁压住隧道侧墙,从而达到抵抗上浮力效果。第二种是支护桩增设牛腿抗浮,通过在隧道墙趾顶面增设支护桩牛腿,利用牛腿反压隧道底板达到抗浮效果,如图3所示。

采用支护桩联合抗浮设计时,支护桩的抗浮计算与抗拔桩计算方法类似,后续抗拔桩抗浮章节中再叙述。需要注意的是:(1)支护桩设计除满足支护

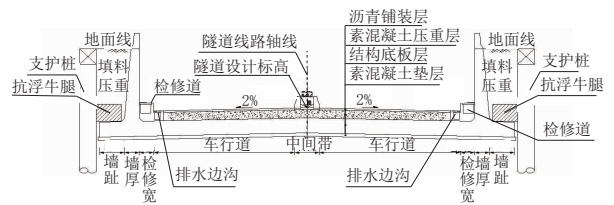


图2 支护桩压顶抗浮

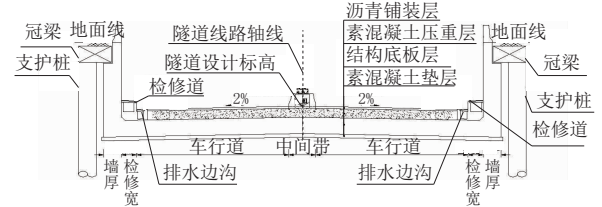


图3 支护桩增设牛腿抗浮

结构抗弯要求外,需按永久结构考虑其抗拔力和抗裂设计要求。(2)考虑支护桩与侧墙之间回填中粗砂或石屑的密实性问题,建议支护桩抗拔力在回填部分侧摩阻力作为抗浮安全储备不予计入,仅考虑支护桩开挖底面以下的桩侧摩阻力。(3)冠梁或牛腿结构除构造要求外,需考虑抗弯和抗剪设计。

3.3 抗浮锚杆抗浮法

抗浮锚杆是锚固抗浮的一种形式,锚杆主要为永久性拉力型锚杆,由杆体与土层或岩层的摩阻力提供结构抗浮,根据其受力及工艺特点,在城市车行隧道某些特殊环境下具有一定应用价值。由于锚固体直径小,提供的抗浮力小,锚杆抗浮一般在隧道底面采用面状均匀布置,适用于隧道底板位于岩石或坚硬土层区,或者受电塔或高架桥净空限制不具备抗拔桩施工作业面的局部隧道节段。锚杆抗浮如图4所示。

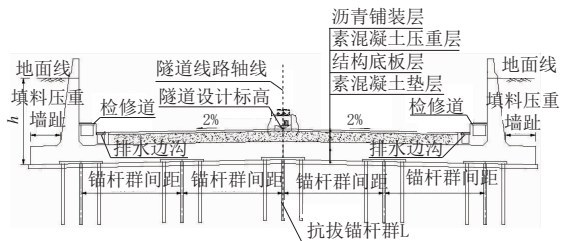


图4 抗浮锚杆抗浮

抗浮锚杆抗浮计算主要根据《建筑工程抗浮技术标准》和《建筑边坡工程技术规范》,重点计算锚杆的锚固长度、抗拔承载力和锚杆筋体的截面面积。另外,考虑锚杆耐久性使用要求,需要计算锚固体的抗裂验算,同时构造设计上做好锚杆的防腐保护技术要求、锚杆与隧道底板连接的防水要求。

3.4 抗拔桩抗浮法

抗拔桩抗浮法作为锚固抗浮的主要形式,被广泛应用于城市明挖隧道抗浮中。该方法具有布桩形

式灵活、受场地和地质条件影响小、结构受力合理、抗浮效果明显、后期维护成本低等优点。敞口段抗拔桩抗浮如图5所示。其抗浮设计主要考虑:(1)单桩或群桩的抗拔承载力;(2)抗拔桩的合理布置及隧道底板的抗浮受力计算;(3)桩身的配筋、抗裂验算及裂缝宽度计算。关于隧道抗拔桩的设计和应用,笔者结合实际工作在设计计算中有几点思考。

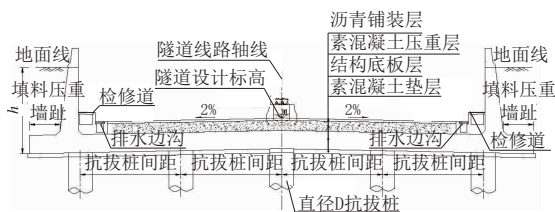


图5 敞口段抗拔桩抗浮

3.4.1 抗拔桩承载力计算

关于抗拔桩承载力标准值计算,一类是建筑行业规范《建筑工程抗浮技术标准》和《建筑桩基技术规范》,以单根抗浮桩极限承载力特征值计算公式为:

$$Q_{ik} = \frac{1}{2} \pi d \sum \lambda_i q_{sik} l_i$$

式中: λ_i 为抗拔系数,根据土类不同取值为0.5~0.8; q_{sik} 为桩侧土黏结强度标准值。

另一类是交通行业规范《公路桥涵地基与基础设计规范》,摩擦型单桩轴向受拉承载力特征值计算公式为:

$$R_i = 0.3 \pi d \sum_{i=1}^n \alpha_i q_{ik} l_i$$

式中: α_i 为不同土层桩侧摩阻力系数,钻孔桩取1; q_{ik} 为桩侧土摩阻力标准值。

以钻孔灌注桩为例计算抗浮极限承载力特征值,对比两个公式计算结果,黏性土、粉土层计算出的抗浮力建筑规范值稍高,砂土层计算出的抗浮力两类规范相接近。建议实际设计时根据地勘报告按两种规范计算取小值为宜。

另外,桩基自重计入抗浮力时应注意地下水位以下桩基应取浮容重计算。

3.4.2 隧道底板抗浮受力计算

在隧道抗浮设计中,确定采用抗拔桩作为抗浮措施后,对于抗拔桩的桩径、桩长和数量应根据地质条件和结构布置形式,采用初拟条件值经试算、优化比较后综合考虑确定^[8],但是有几个问题需要引起足够重视:

(1)抗拔桩的横向布置情况与隧道底板的受力密

切相关^[9-10]。抗拔桩作为刚度较大的支承约束,通过横断面的布置可以减少隧道板条单元的跨径,从而影响隧道底板的正负弯矩值。一般情况下,抗拔桩布置在隧道底板的两边侧墙附近和跨中位置。底板宽度较大时,根据抗浮要求,可在边桩与中桩之间再加密布置。

(2)同一隧道横断面在水浮力工况下,边桩所受的抗拔力远小于中桩。因此,每个隧道节段抗拔桩根数不仅要满足整体抗浮计算,而且要复核中桩最不利工况的抗拔力是否小于单根抗浮桩极限承载力特征值,防止局部中桩抗拔力不足。

(3)隧道底板进行抗浮工况计算时,常采用弹性地基梁有限元法模拟,地基采用只受压土弹簧模拟,抗拔桩采用m法模拟双向弹性桩。隧道结构模拟有按每延米梁单元简化计算,也有按实际节段采用板单元模拟计算。经计算对比,梁单元简化计算的反力、内力与板单元计算结果相差不大。主要原因是梁单元不能模拟隧道结构的纵向受力和约束,导致隧道底板的板中和支点内力差异性。两种模拟计算都可用于实际工程设计,且采用梁单元模拟可以初步快速地确定抗浮设计方案。

以一实际工程为例,某一双向6车道的敞口车行隧道节段,节段长度为28m,侧墙、底板厚度为1.0m,墙趾宽度为1.0m,两侧墙净距28.6m,底板总宽为32.6m;地面至底板顶面侧墙平均高度为7m。地下水位标高按低于地面0.5m计算考虑,隧道底板位于粉质黏土层 $q_{ik}=50$ kPa,隧道底板上压重荷载为20 kN/m。经计算,节段上浮力为68 460 kN,节段自重及压重为55 692 kN,上浮力大于自重拟采用抗拔桩联合抗浮。如果考虑隧道横向截面在两侧墙和跨中共设置3排直径1m钻孔灌注桩,纵向间距为4m共7排,合计设置21根抗拔桩,整体计算每根桩基平均抗拔力特征值为771 kN。

分别采用每延米梁单元和整个节段板单元模拟计算,抗拔桩反力和隧道内力如图6~图9所示。

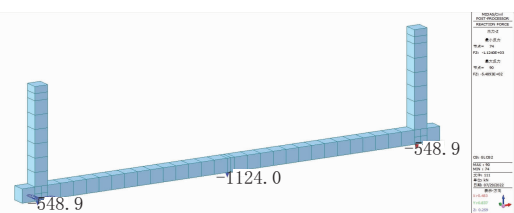


图6 梁单元抗浮反力图

具体模型计算结果见表1。从表中可以看出两种模型计算的反应力结果相差不大,中桩的反应力大约为

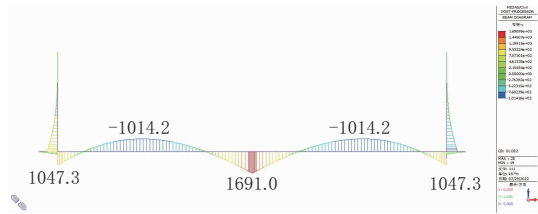


图7 梁单元抗浮弯矩内力图

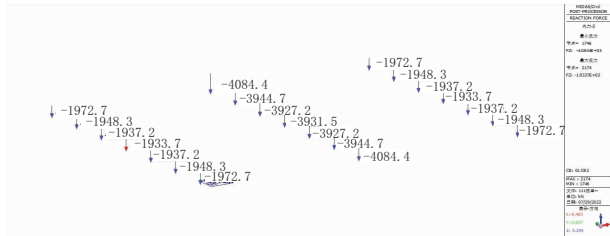


图8 板单元抗浮桩反力图

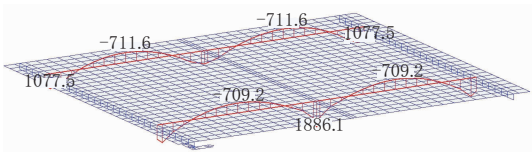


图9 板单元抗浮横向弯矩图

边桩反力的2倍,且远大于整体计算的桩基平均抗拔力771 kN。一方面是边桩、中桩受力分配不同引起的,另一方面由于侧墙受土推力作用导致边桩承受抗拔力增加。因此,隧道抗浮计算时,桩基抗拔力不仅要进行整体抗浮验算,而且要根据计算模型验算边桩、中桩在抗浮工况下的单桩抗拔力。在经济性对比时,可将隧道横断面单排中桩改为等间距的双排桩基配置,使单根抗浮桩受力和桩长更合理,同时优化隧道底板的正负弯矩和配筋。

表1 抗浮计算结果汇总

编号	反力或弯矩	梁单元	板单元桩基处断面	板单元桩中处断面
1	边桩反力/kN	549 × 4=2 196	1 972.7	—
2	中桩反力/kN	1 124 × 4=4 496	4 084.4	—
3	边桩弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	1 047.3	1 319.6	1 077.5
4	跨中弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	-1 014.2	-709.23	-711.6
5	中桩弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	1 691.0	1 886.1	952.5

两种模型计算的隧道底板横断面弯矩图趋势相同,梁单元正负弯矩绝对值比板单元桩中处截面稍

大,梁单元桩基支点处弯矩比板单元稍小。主要原因是板单元可以考虑纵横向受力和桩基支点处板单元内力。

4 结 语

通过对城市明挖隧道抗浮设计参数的研究、实际采用的抗浮措施经验总结,以及工程实例计算的分析,得出以下几点经验:

(1)对比现行多本规范的抗浮系数,均支持城市明挖隧道在不考虑侧墙土体摩阻力情况下,使用阶段抗浮安全系数取值为1.05。

(2)城市明挖隧道的抗浮措施手段多样,在进行实际抗浮设计时,应根据周边环境、地质情况、基坑开挖方式和施工技术条件,选择技术安全可靠、抗浮费用经济合理、后期维护便利可控的隧道抗浮方案。

(3)抗拔桩抗浮作为城市明挖隧道锚固抗浮的主要形式,需要合理的确定抗拔桩的布置、桩径、桩长和数量。抗拔桩的横向布置不仅影响边桩与中桩的反力,还影响隧道结构底板的受力。因此在进行整体抗浮验算基础上,需要建立隧道结构模型,根据抗浮工况下的桩基反力和结构内力进行隧道抗浮的优化设计。

参考文献:

[1] JTJ 476—2019, 建筑工程抗浮技术标准[S].
 [2] DBJ 15—31—2016, 建筑地基基础设计规范[S].
 [3] DG/TJ 08—2033—2017, 上海市工程建设规范:道路隧道设计标准[S].
 [4] DB33/T 1256—2021, 城市道路隧道设计标准[S].
 [5] 贾志清.明挖隧道结构抗浮设计新思路[J].铁道建筑技术, 2011(5): 21-24.
 [6] 周倩茹.城市地下隧道抗浮设计与分析[J].城市道桥与防洪, 2019(5):298-301.
 [7] 乔长兴.隧道围护桩兼用抗拔桩的应用研究[J].城市道桥与防洪, 2018(6):311-315.
 [8] 尤潇,王君鹭,刘罡,等.城市下穿隧道抗浮桩标准化设计研究[J].筑路机械与施工机械化, 2020(3): 67-69.
 [9] 罗永磊.城市下穿隧道明挖段抗浮桩设计的关键问题探讨[J].广东土木与建筑, 2019(3):58-64.
 [10] 李松柏,李宏泉.城市立交隧道结构抗浮设计与计算分析[J].公路隧道, 2008(2):18-21.