

## 深厚砂砾层下沉式隧道临近河道安全施工控制技术研究

段春明

(长沙广恒桥梁技术咨询有限公司,湖南长沙 410000)

**摘要:**以富水砂砾层某城市下沉式隧道深基坑临近河道施工工程为背景,借助FLAC<sup>3D</sup>软件建立深基坑三维数值计算模型,研究河道不同水位作用下深基坑围护结构稳定性变化规律,并研究深基坑坑外加固措施对基坑围护结构稳定性的控制效果。研究表明:富水砂砾层下地下水水位变化对深基坑围护结构稳定性影响显著,地层未加固时深基坑施工安全水位宜控制在地下9 m,高于安全水位时,需采用坑外加固措施;坑外加固措施能够有效地减小基坑围护结构水平位移,显著提高围护结构的抗倾覆稳定性,深基坑坑外加固的合理宽度为6 m,深度为24 m;增加加固深度对控制基坑稳定性影响较宽度更为有效,在实际注浆设计时应以控制注浆加固深度为主;采用坑外加固措施后基坑施工完成时监测围护结构最大水平位移为25.5 mm,基坑变形控制在安全范围以内。

**关键词:**富水砂砾层;下沉式隧道;深基坑;坑外加固;稳定性控制

随着中国城市交通建设的快速发展,城市交通网越来越密集,不可避免地会遇到城市主干道路交叉情况,城市下沉式隧道作为一种解决交叉问题有效的交通方式已在各大城市中被广泛应用,但隧道明挖基坑施工安全性受基坑周边地层及环境影响较大,特别是

对于深厚富水砂砾层中临近河道修建深基坑工程,由于富水砂砾层具有空隙率大、高渗透性的特点,该地层下基坑围护结构稳定性受地下水水位变化影响较大,砂砾层厚度大导致基坑四周水压力增大,会引起较大的围护结构变形,影响基坑的安全性。为了减小地下水

$m \leq B < 6.9$  m 桥宽范围。

(2) 采用中国规范的抗剪设计满足欧洲规范要求。

(3) 简支梁跨中钢束用量:仅  $6.4 \text{ m} \leq B < 6.9 \text{ m}$  桥宽下,欧洲规范中梁钢束用量比中国规范多出 6%~29%,其他情况增加不超过 11%。

(4) 3 跨及以上连续梁边跨跨中钢束用量:仅  $6.4 \text{ m} \leq B < 6.9 \text{ m}$  桥宽,欧洲规范边跨中梁钢束用量比中国规范多出 12%~25%,其他增加不超过 10%。

(5) 3 跨及以上连续梁中跨跨中钢束用量:仅  $6.4 \text{ m} \leq B < 6.9 \text{ m}$  桥宽,欧洲规范中跨中梁钢束用量比中国规范多出 6%~20%,其他增加不超过 5%。

(6) 3 跨及以上连续梁中支点钢束用量:欧洲规范钢束用量比中国规范多出 7%~34%。

(7) 欧洲规范标准值组合下的边支座反力比中国规范超出 15%~29%,中支座超出 13%~26%。

## 参考文献:

[1] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[2] EN 1991-2, 2003 Actions on Structures Part 2: Traffic Loads on Bridges[S].

[3] 李国豪,石洞.公路桥梁荷载横向分布计算[M].2版.北京:人民交通出版社,1984.

[4] 姚玲森.桥梁工程[M].2版.北京:人民交通出版社,2008.

[5] JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[6] EN 1991-1-5, 2003 Actions on Structures Part 1-5: General Actions—Thermal Actions[S].

[7] EN 1990—Annex A2, 2005 Application for Bridges (Normative)[S].

[8] EN 1991-1-1;2002 Actions on Structures—Part 1-1 General Actions—Densities, Self—Weight, Imposed Loads for Buildings[S].

[9] 丁少凌,周国玲,易蓓,等.中欧规范混凝土构件承载能力对比[J].中外公路,2017(2).

[10] EN 1992-1-1, 2004 Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings[S].

收稿日期:2020-06-17(修改稿)

作者简介:段春明,男,大学本科,工程师. E-mail:573099152@qq.com

压力对基坑围护结构稳定性的影响,需要在坑外采取加固措施,因此研究富水砂砾层下深基坑临近河道施工围护结构稳定性及坑外加固措施设计至关重要。

国内外已有不少学者通过数值计算、试验及理论分析研究了基坑加固对基坑稳定性的影响。张文超等通过理论分析、现场实测及数值计算研究了基坑坑外加固对基坑稳定性的控制效果;李卓峰等主要从基坑坑内加固形式及加固参数等方面切入,通过有限元数值计算,研究了基坑坑内加固对基坑周边建构物稳定性的控制效果。目前针对基坑加固研究主要集中在软土地层坑内加固方面,而对于深厚富水砂砾层临近河道深基坑施工围护结构稳定性及坑外加固措施设计研究甚少,有必要对其开展深入研究。

该文以富水砂砾层临近河道某城市下沉式隧道深基坑工程为背景,基于FLAC<sup>3D</sup>有限元软件,建立三维深基坑数值计算模型,研究不同地下水位作用下深基坑稳定性变化规律,并分析高水位作用下坑外加固措施对地连墙变形及抗倾覆稳定性的影响。

## 1 工程概况

某隧道位于城市快速路上,为双向四车道下沉式隧道,隧道左右双线同时下穿某城市主干干道,交叉角

度为78°,隧道左右线采用整体式箱形结构,施工工法采用明挖法施工,隧道基坑深度为25.5 m,基坑宽度为24.5 m,基坑围护结构采用1 m厚地下连续墙,围护墙深度为32 m,连续墙嵌入深度为6.5 m,墙底位于强风化砂岩,基坑竖向设置4道混凝土支撑(第1道为1 m×1 m,其余支撑为1.2 m×1.2 m),然而深基坑南侧临近河道,河道深度为12.5 m,距河道最小距离为43.8 m,周边存在较厚的砂砾层,最大厚度为16 m,透水性强,基坑与河道水位连通,基坑水位变化主要为地下4~12 m,河道地下水位的大幅度升高会极大地增加基坑施工风险,现场施工拟对基坑四周地层进行坑外加固,以减少河道水压力对基坑围护结构的影响,其中地连墙外深度为28 m,加固宽度为8 m,基坑具体设计方案如图1、2所示。

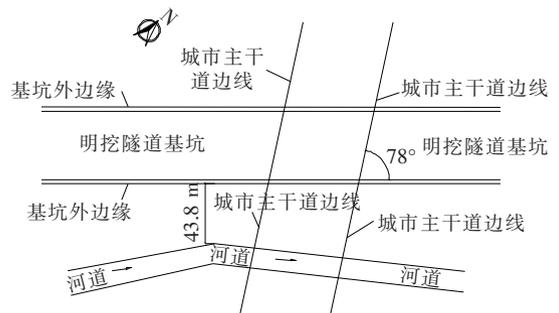


图1 工程平面位置图

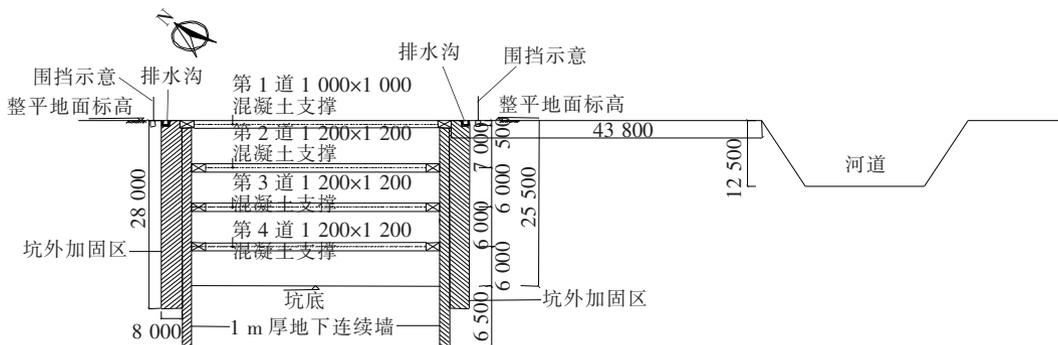


图2 基坑支护横断面图(单位:mm)

## 2 有限元模型建立

### 2.1 计算模型

选取下沉式隧道靠近河道最近的节段基坑作为模拟对象,通过FLAC<sup>3D</sup>软件建立三维基坑模型,采用三维实体单元模拟地连墙和土层,采用梁单元模拟各道支撑。基坑模型宽度为200 m,长度为80 m,高度为50 m,模型共划分50 000个网格,对模型左右边界两

侧Y方向位移进行约束,并对模型的底边界进行X方向和Y方向位移约束,对模型前后X方向位移进行约束,考虑基坑周边20 kPa施工超载,三维基坑数值计算模型如图3所示。

### 2.2 计算参数

根据地勘报告基坑周围地层分布为:第1层填土,第2层细砂,第3层砂砾,第4层强风化~微风化砂岩,土层的计算参数如表1所示。

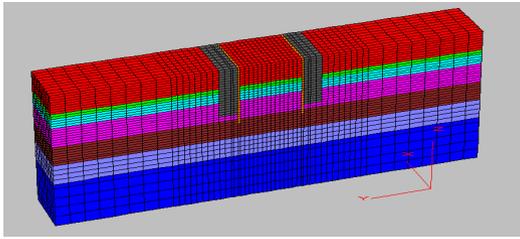


图 3 深基坑三维数值计算模型

表 1 各层土的计算参数

岩土名称	厚度/ m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	孔隙比	渗透系数/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
填土	2	1930	7.46	3.48	15.5	20.5	0.830	$2.5 \times 10^{-4}$
细砂	4	2 020	21.6	9.65	0	25.0	0.649	$3.2 \times 10^{-3}$
砂砾	16	2 050	22.7	11.8	0	28.0	0.877	$8.4 \times 10^{-3}$
强风化砂岩	11	2 300	76.8	39.3	250	38.0	0.100	$6.5 \times 10^{-5}$
中风化砂岩	14	2 550	189	125	1 000	43.0	0.034	$1.5 \times 10^{-5}$
微风化砂岩	10	2 680	486	329	2 600	45.0	0.006	$6.5 \times 10^{-6}$
加固体	—	2 280	920	468	34	35.0	0.110	$1.0 \times 10^{-6}$

与未加固情况下通过 6 种工况计算得到的基坑开挖到底时围护结构最大水平位移值(大量计算结果分析发现,不同计算工况下基坑开挖到底时围护结构最大水平位移位置变化不大,因此主要研究最大水平位移值变化)及基坑抗倾覆稳定系数,结果如图 4 所示。

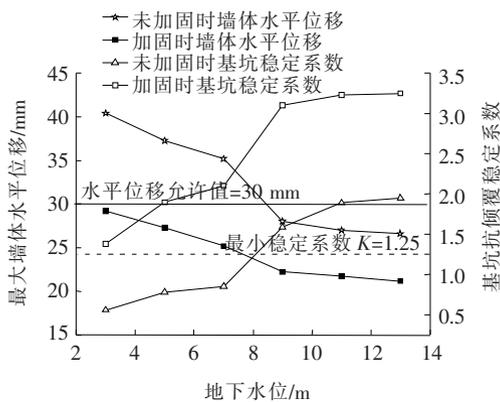


图 4 有无加固措施时水位变化对基坑变形及稳定性影响

由图 4 可知:

(1) 未采取加固措施时基坑地下水位变化对基坑变形及稳定性影响较为明显,当水位由地下 9 m 上升到地下 3 m 时,地下水位变化对基坑稳定性影响最为明显,且在水位上升到 9 m 时基坑已经接近危险状态,当地下水位高于地面以下 9 m 水位时,地下水位已危及基坑围护结构安全性,因此此时水位可视为高

### 3 不同地下水位时基坑稳定性分析

由于基坑水位变化主要为地下 4~12 m,水位变化较大,有必要研究不同地下水位下基坑围护结构稳定性受地下水位变化影响规律,地下水位计算共设置为  $H=3, 5, 7, 9, 11, 13$  m 6 种工况(考虑一个计算工况中基坑开挖时地下水位保持不变),提取基坑在加固

水位,在没有采取注浆加固措施下,深基坑坑外的地下警戒水位在地下 9 m,因此为保证高水位下深基坑施工的稳定性,必须采取坑外加固措施以减小高水位对基坑稳定性的影响。

(2) 基坑施工时未采取坑外加固情况时围护结构出现最大水平位移为 42.5 mm,而对于采取加固措施时基坑围护结构出现最大水平位移为 28.8 mm,注浆加固以后墙体最大水平位移减小了近 33%,可见,在基坑施工时采取坑外加固措施能够有效减小围护结构变形,提高围护结构的稳定性。

### 4 坑外加固参数影响分析

由前文计算分析结果可知,坑外加固能够有效地控制基坑围护结构稳定性,为了进一步研究坑外加固参数对基坑稳定性的影响,优化加固参数,此次计算控制基坑最高水位  $H=4$  m 不变,在原加固方案基础上(加固宽度为 8 m,加固深度为 28 m),研究不同加固宽度(宽度取 2、4、6、8、10 m)与加固深度(深度取 18、20、22、24、26、28 m)时基坑围护结构变形稳定性变化规律,得到合理的加固参数。提取不同计算工况下基坑开挖到底时连续墙最大水平位移及基坑抗倾覆稳定系数,计算结果如图 5、6 所示。

由图 5 可知:当加固宽度逐渐增大时,围护结构的

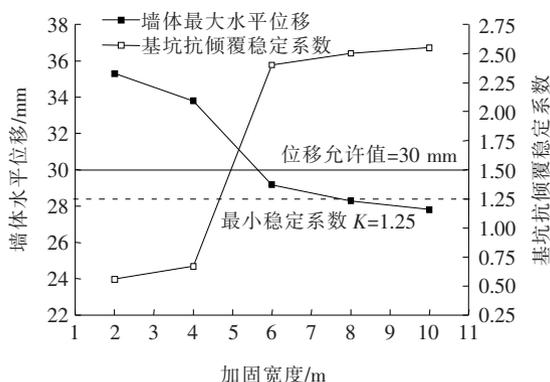


图5 加固宽度对基坑变形及稳定性影响

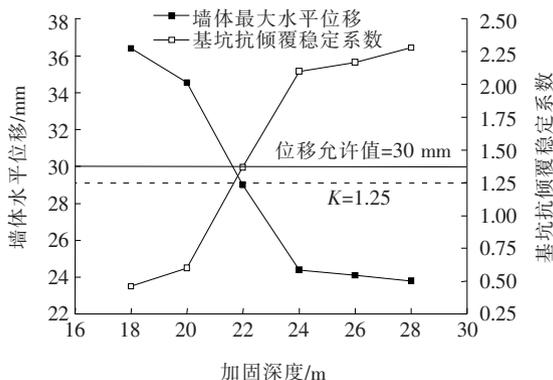


图6 加固深度对基坑变形及稳定性影响

最大水平位移出现先减小后稳定的趋势,基坑抗倾覆稳定系数随着加固宽度增加而增大,且加固宽度为4~6 m变化时,墙体最大水平位移及基坑抗倾覆稳定系数变化最为显著,且在加固宽度为4 m时,墙体最大位移值为34.48 mm,基坑稳定系数为0.62,远低于规范规定的基坑安全性要求。随着加固宽度的继续增加,墙体最大水平位移和基坑抗倾覆稳定系数变化幅度逐渐变小,由6 m增加到8 m变化幅度微小,且加固宽度为6 m时,基坑变形及稳定系数都在安全范围以内,考虑加固宽度对地连墙变形及稳定性的影响,基坑坑外加固宽度宜控制为6 m。

由图6可知:

(1) 当基坑加固深度由20 m增加到24 m时,地连墙的稳定系数及最大水平位移变化最为显著;加固深度由24 m增加到28 m时,地连墙的最大水平位移及稳定系数变化很小。加固深度增加到24 m时,加固区由砂质地层进入砂岩地层2 m,有效地增强了围护结构的抗变形能力;考虑加固深度对地连墙变形及基坑稳定性的影响,加固深度应控制为24 m。

(2) 将不同加固深度与加固宽度时基坑围护结构稳定性变化规律进行对比,当加固宽度由2 m增加到

6 m合理宽度时,墙体最大水平位移由35.3 mm减小到29.76 mm,减小幅度为15.69%,即平均每增加1 m加固宽度时,地连墙位移减小幅度为3.92%;而当加固深度由12.5 m增加到20 m合理深度时,墙体最大水平位移由36.69 mm减小到24.5 mm,减小幅度为33.22%,即平均每增加1 m加固深度时,地连墙位移减小幅度为4.43%;可见增加加固深度对于控制基坑变形效果比增加宽度要好,在一定条件下实际工程注浆设计时应以控制注浆加固深度为主,控制加固宽度为辅。

## 5 现场注浆加固效果分析

现场施工时为了减少地下水对基坑开挖稳定性影响,将优化后的加固参数应用于深基坑加固,基坑四周地连墙外加固宽度为6 m,深度为24 m。根据基坑实际情况,现场对基坑连续墙水平位移进行监测,监测时间为2017年2月至2017年7月20日,监测点布置如图7所示,该文选取靠近河道最近的节段基坑断面测点A001和A012,连续墙变形监测结果如图8所示。

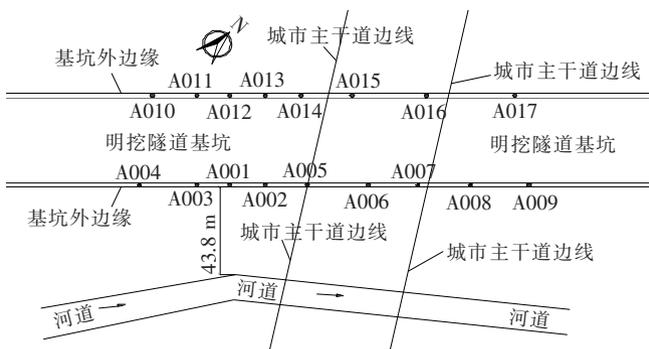


图7 连续墙水平位移监测点布置图

由图8可知:加固方案优化后在基坑开挖完成时,地下连续墙测点A001最大水平位移为25.5 mm,A012最大水平位移为21.8 mm,基坑南侧地下连续墙水平位移要大于北侧,这是由于基坑南侧靠近河道导致南侧地下连续墙承受水压力要大于北侧;基坑施工过程中基坑围护结构最大位移均未超过预警值30 mm,说明坑外加固措施保证了基坑施工的安全进行。

## 6 结论与建议

基于FLAC<sup>3D</sup>软件分析了富水砂砾层临近河道下沉式隧道深基坑施工时坑外加固措施对深基坑变形及

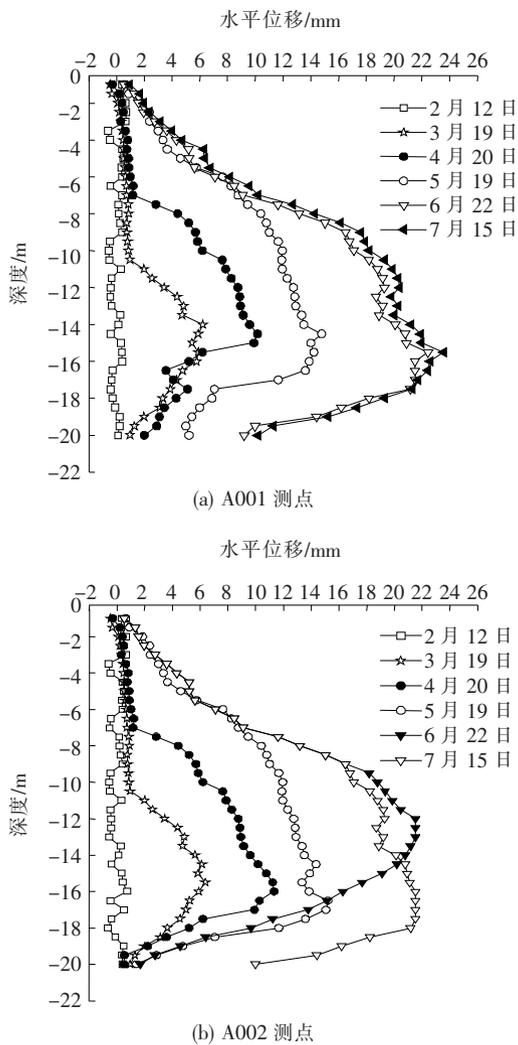


图8 地连墙 A001 和 A012 测点水平位移监测结果

稳定性的影响,并研究坑外加固参数(加固深度与加固宽度)变化对基坑变形稳定性的影响,得到以下结论:

(1) 富水砂砾层基坑地下水位变化对基坑围护结构变形稳定性影响较大,地层未加固时深基坑施工安全水位宜控制在地下 9 m,当地下水位高于安全水位时,施工需采用坑外加固措施。

(2) 在高水位作用下坑外加固措施能够有效地减小基坑围护结构水平位移,显著地提高围护结构的抗倾覆稳定性,深基坑坑外加固的合理宽度为 6 m,深度

为 24 m;增加加固深度对控制基坑稳定性影响较宽度更为有效,在一定条件下,实际注浆设计时应以控制注浆加固深度为主。

(3) 采用坑外加固措施后基坑施工完成时围护结构最大水平位移为 25.5 mm,基坑变形控制在安全范围以内,加固措施保证了基坑施工的安全进行。

#### 参考文献:

- [1] 金生吉,陈华,于贺. 沈阳快速干线隧道深基坑施工监测与分析[J]. 中外公路,2018(1).
- [2] 宫赛,唐鹏. 公路隧道泵房深基坑支护设计方案改进及验算[J]. 中外公路,2016(1).
- [3] 张文超,薛炜,于方. 主动区土体加固对深基坑的影响[J]. 地下空间与工程学报,2015(s1).
- [4] 胡承军,刘燕,刘涛. 坑外搅拌桩加固对基坑变形的影响分析[J]. 岩土工程学报,2006(B11).
- [5] 侯新宇,刘松玉,童立元. 主、被动土压区加固对地铁深基坑变形影响的数值分析[J]. 铁道标准设计,2012(7).
- [6] 李卓峰,林伟岸,朱瑶宏,等. 坑底加固控制地铁基坑开挖引起土体位移的现场测试与分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2017(8).
- [7] 李宝健. 复杂条件下锚碇深基坑开挖安全控制技术[J]. 中外公路,2014(1).
- [8] 罗桂军,罗光财,郭庶. 基底加固对地铁基坑变形风险控制分析[J]. 采矿技术,2018(5).
- [9] 马郎,屈若枫,周兴涛,等. 基坑被动区加固参数对支护结构位移影响分析[J]. 岩土工程学报,2012(s1).
- [10] 江杰,胡何,冯野,等. 坑中坑土体加固对悬臂式支护结构的影响分析[J]. 长江科学院院报,2017(3).
- [11] 康志军,谭勇,邓刚,等. 被动区土体加固对深基坑变形影响的研究[J]. 长江科学院院报,2017(6).
- [12] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社,2005.
- [13] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [14] GB 50597—2009 建筑基坑监测技术规范[S].
- [15] 许桂生. 大跨浅埋暗挖隧道近接桥桩施工扰动影响及控制技术[J]. 中外公路,2019(1).
- [16] 彭智勇,杨秀仁. 基坑分块开挖参数对临近地铁盾构隧道的变形影响分析[J]. 中外公路,2019(2).