

跨海隧道深基坑穿越临海断裂带处理方案优化

万波

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘要:以深圳前海某跨海隧道深基坑穿越临海断裂带项目为例,通过现场勘察、数值模拟分析以及降水试验,将采用断裂带帷幕注浆的原设计方案优化为仅采取降水处理断裂带,实施效果良好,可为后续类似工程提供借鉴经验。

关键词:临海断裂;深基坑;降水;数值模拟

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)04-0236-06

0 引言

随着城市建设的不断发展,可利用的土地资源日益减少,越来越多的土地开发转向临海地区,而以临海区域大规模地下交通改善城市交通已成为一种必然^[1]。在这一背景下,对断层碎裂带地区进行超深基坑施工难以完全避免。针对此类特殊地层条件下开挖深基坑,防止开挖过程中出现涌水、涌砂,甚至坑底突涌,确保基坑安全,减小对周边环境的影响是目前基坑工程设计施工中面临的一大难题^[2]。

本文以妈湾跨海通道某盾构始发井为例,阐述在破碎带地层实际施工中,如何结合基坑的现场情况,对基坑防涌水措施进行设计、优化,为今后类似工程提供指导和借鉴。

1 工程概况

妈湾跨海通道某盾构始发井距离前海湾约180 m,位于临海大道与妈湾大道交叉口北侧。工作井采用明挖顺作法,基坑里程K2+126—K2+282,基坑长156 m,宽46.2~58.5 m,深28.4~40.1 m,开挖土石方量约281 000 m³,图1所示



图1 工作井位置图

收稿日期: 2021-11-24

作者简介: 万波(1979—),男,硕士,高级工程师,从事大型盾构法隧道、深基坑等市政工程施工。

基坑深度范围存在填石、淤泥、砂层、黏性土、全~微风化岩层,采用1.2 m厚地下连续墙的围护形式,墙深随地质条件和开挖深度渐变,深度40.25~44.37 m之间,最深处进入微风化约16 m,槽段间接头洞门圈位置采用铰接法接头,其他位置采用H型钢接头。支撑采用钢筋混凝土,最深处设置有8道支撑,如图2所示。

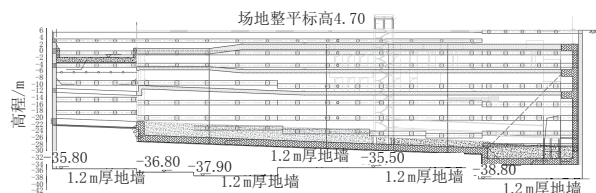


图2 工作井纵断面示意图

2 工程水文、地质条件

2.1 地质条件

根据勘察报告,本工程场地勘察深度范围内主要分布岩土层从上至下依次为:人工填土,第四系全新统海陆交互沉积淤泥,全新统冲洪积黏土、中粗砂,上更新统湖沼沉积淤泥质黏土,冲洪积细砂(含淤泥)、黏土、粗砂,中更新统残积砂质黏性土、构造岩及全~微风化蓟县系的混合花岗岩,见图3。

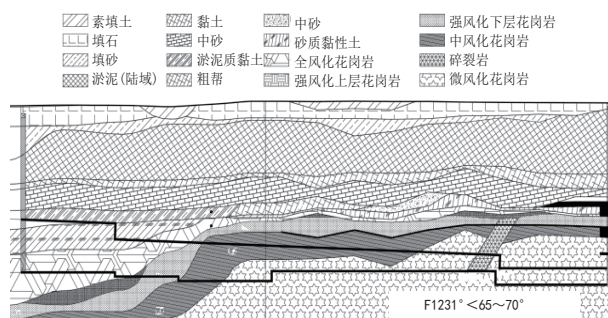


图3 工程地质断面图

根据详勘结合补勘、工程物探资料以及区域地质资料对F1断裂带描述如下:

(1)该段为盾构始发井明挖基坑,主要地层为人工填土、第四系全新统海积层淤泥、全新统冲洪积层黏土、中砂、中更新统残积层砂质黏性土、蓟县系变质岩混合花岗岩的全、强风化层。

(2)位于线路K2+160—K2+270盾构始发井明挖基坑范围内断裂F1隶属于蛇口断裂带,走向北西 $30^{\circ}\sim 44^{\circ}$,倾向南西,倾角约 $65^{\circ}\sim 70^{\circ}$,影响宽度约10~20 m,以压扭性为主、局部反扭。岩体在断裂影响范围内,岩性体现为构造破碎带、碎裂岩,构造裂隙等特征,其多为压扭闭合裂隙;由于反扭作用,可能存在少量微张裂隙。前者透水性较弱,后者透水性相对来说较强^[3]。

(3)基坑开挖后,由于地下连续墙阻隔,地下水主要为基岩裂隙水,赋存于中风化带及构造碎裂岩中,其渗透性受岩体完整性、断裂构造影响,体现为各向异性。勘察期间未发现地下水涌出孔口等水位异常现象,该区段地下水性质为微承压^[4]。

(4)根据注浆加固先导孔地层揭露情况,推测了受断裂(F1)影响的大致平面范围和钻孔影响深度范围,见图4、图5。

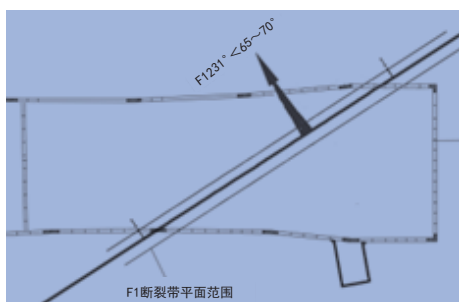


图4 断裂带平面范围

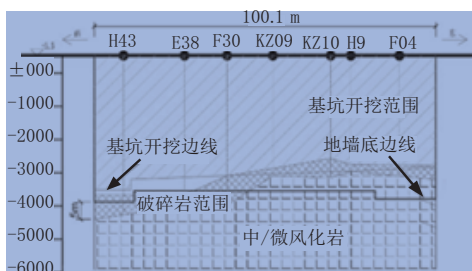


图5 断裂带1-1纵断面图

2.2 水文条件

根据工程勘察资料,场区内地下水分为上层滞水、孔隙承压水和基岩裂隙水三种。第一种为上层滞水:主要赋存表层素填土、填砂、填石层中,水量小,主要靠大气降水补给,水位因季节、降雨情况而异。

第二种为孔隙承压水:主要赋存于第四系全新统冲洪积细砂层,第四系上更新统冲洪积粗砂及砾砂层中,主要靠大气降水补给,具承压性,与海水有一定的水力联系,孔隙承压水水位高程为0.2 m,水位变幅为2~5 m。第三种为基岩裂隙承压水:主要赋存于基坑范围内的断裂带中,水位高程为-0.5 m,水位变幅为1~3 m。

3 断裂带处理方案选择

根据妈湾跨海通道工程勘察成果等相关资料揭露的情况,对K2+160—K2+270段断裂F1工程地质条件得到进一步结论如下:

断裂(F1)构造裂隙多为压扭闭合裂隙,透水性较弱,仅局部出现张裂隙,透水性相对较强,结合相关工程经验,出现“形成承压水渗透通道”情况可能性甚微。所以,考虑将原设计注浆方案变更为仅采用降水方式进行基坑开挖。

3.1 原设计方案

根据详勘报告中对于断裂带的平面位置、范围、渗透系数、水头高度的描述,为防止基坑开挖期间由于断裂带水量及压力过大出现坑底突涌等风险,原设计方案是在基坑内的断裂带范围内进行帷幕注浆,注浆平面范围为断裂带平面范围,注浆深度为基坑底至断裂带底部以下1 m,如图6、图7。

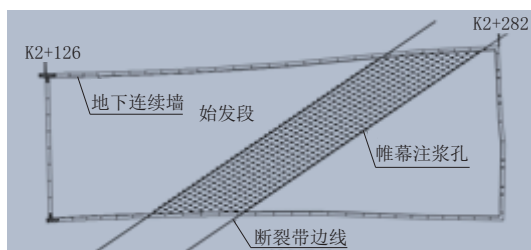


图6 帷幕注浆布置范围

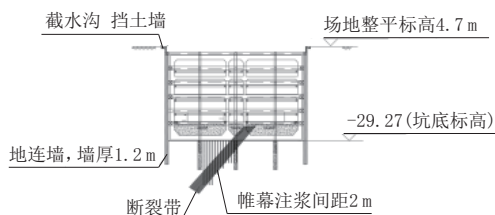


图7 帷幕注浆横断面

注浆相关设计参数详见表1。

根据设计图纸要求,帷幕注浆先施工先导孔,先导孔按三角形布置,排内孔距为16~24 m。先导孔施工完成后,及时将先导孔探查的断裂带分布情况反馈给勘察单位和设计单位,然后设计单位根据勘察

表 1 帷幕注浆参数表

序号	名称	设计参数
1	孔距	2 m
2	孔深	断裂带以下 1 m 且进入微风化 1 m
3	注浆深度	底板至孔底
4	浆液类型	普通水泥浆
5	注浆孔	部覆盖层用 $\phi 108$ mm 钻头开孔,采用套管护壁,孔径钻至完整基岩后,改用 $\phi 73$ mm 钻头钻至终孔
6	结束注浆标准	当灌浆段在最大设计压力下,注入率不大于 1 L/min 后,继续关注 30 min,可结束灌浆

单位确认的断裂带分布动态布置注浆钻孔,再实施注浆。

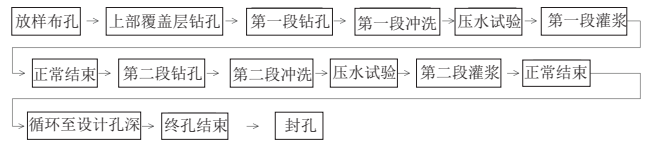


图 8 帷幕注浆施工流程

3.2 优化后方案

(1)设计原则

根据断裂带情况拟采用加深 F1 构造断裂带范围内疏干井深度进行疏干降压的处理方式,其中 K2+120—K2+160 段地墙未隔断基坑内外基岩裂隙水,且中风化带与断裂带存在一定的水力联系,易形成补给通道,故此区域坑内疏干井深度以揭穿中风化岩进入下部⑩4 微风化基岩面顶部控制,以降低基岩裂隙水向坑内的径流补给。并在断裂带区域基坑内增加备用兼观测井,加强抽水,降低断裂带基岩裂隙水至基坑开挖面以下。

(2)设计方案

a. 降水井数量及深度

经勘察先导孔确认,东侧地墙已隔断断裂带,西侧地墙未完全隔断断裂带,根据上述设计思路,设置基坑内断裂带降水井,共 14 口,其中 12 口为混合井,2 口为降压井;基坑外断裂带降水井共设置 7 口,6 口位于基坑西侧,1 口位于东侧,都为降压井,如图 9 所示。坑内断裂带降水井深度为进入底板以下 5 m 或到断裂带底。坑外断裂带降水井深度为进入地墙底以下 5 m。

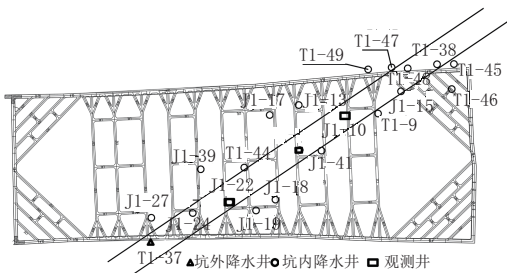


图 9 断裂带降水井平面布置图

b. 降水井结构

混合井除底部 1 m 与顶部 2 m 为实管外,其他范围均为滤管,同时作为降坑内地层潜水与基岩裂隙水的作用。降压井除在断裂带范围内为滤管外,其他范围均为实管,仅作为降断裂带基岩裂隙水使用,如图 10 所示。

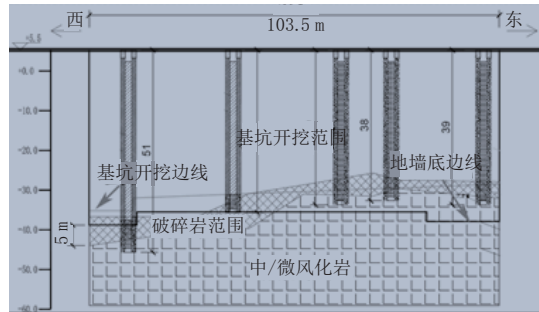


图 10 断裂带降水井纵断面示意图

3.3 优化方案数值模拟分析

本工程围护结构对地下水具有绕流作用,渗流条件复杂,解析公式已无法满足计算要求,而数值法通过程序化运算可模拟不同复杂条件下的地下水流状况,能有效解决因隔水帷幕对地下水流动造成的影响。本次利用《Visual ModFlow》软件,建立本工程地下水三维渗流数值模型,对降水进行计算分析。

(1)模型建立及网格划分

根据已有的岩土工程勘察报告、水文地质条件、钻孔资料,本次以基坑各边向外扩展约 500 m 作为本次的模拟边界,模拟范围为 2 000 m × 2 000 m。剖面上,利用勘探钻孔资料,将场区在垂向上概化为 10 个模拟层,见图 11。

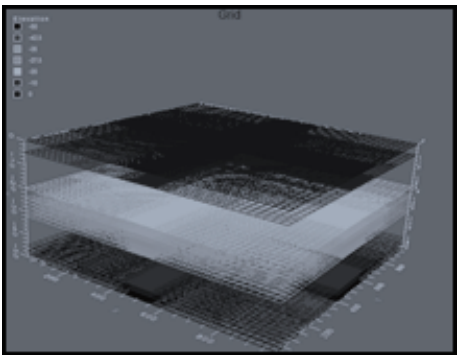


图 11 地层剖面分层示意

对研究区进行三维剖分,将其划分为规则的 40 × 40 有限差分网格。为了取得更精细的模拟结果,对包含拟建基坑的敏感区网格进行加密剖分。最终将研究区在平面上剖分为 192 × 216 个网格单元,见图 12。

(2)参数设置

a. 地层渗透系数

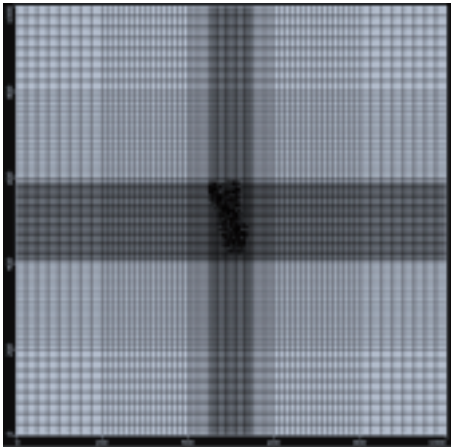


图 12 网格划分示意图

地下水流数学模型涉及的模型参数主要为渗透系数(K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz}),其值的大小直接决定概念模型与实际水文地质模型的拟合程度以及基坑涌水量预测的大小。各地层渗透系数如表 2。

表 2 模型参数取值表

序号	地层	$K_{xx}=K_{yy}$ $/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	K_{zz} $/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
1	表层素填土、填砂、填石层	15	8
2	③ ₁ 淤泥(陆域)、③ ₄ 黏土	0.01	0.005
3	⑤ ₂ 中砂、⑥ ₂ 细砂(含淤泥)、⑥ ₄ 粗砂	25	12
4	⑩ ₂₋₁ 强风化岩	1	0.5
5	中风化、微风化岩	0.3	0.3

b. 地下连续墙

地下连续墙在模型中可利用 Wall 模块表示,可设置墙的厚度及渗透性能,以赋予墙体渗透性,模拟墙体可能出现的渗漏,地墙模型如图 13。



图 13 地连墙三维立体概化图

c. 模型抽水井及观测井设定

按照降水方案中降水井的剖面构造对模型的抽水井进行设定,共设置坑内抽水井 43 口,坑外 6 口。模型抽水井和观测井的平面位置见图 14,单井抽水速率设定为 $48.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

d. 边界条件

场地周边为大海,海水与地下水存在直接水力联系,为定水头补给边界。根据地勘资料、对各土层

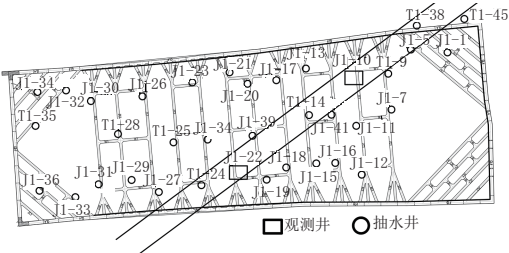


图 14 模型抽水井及观测井平面布置

分别根据经验赋予其不同的初始水头埋深,具体如下表 3。

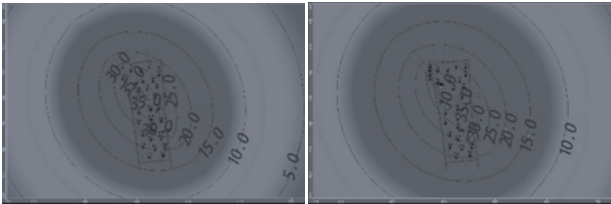
表 3 各地层初始水头参数

层位	①层	②层	③层	④层	⑤层	⑥层	⑦层	⑧层	⑨层	⑩层
初始水头/m	-0.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.5	-5.0

(3)模型计算结果

在上述条件设定及其他各项模型条件设定完成后,选择适当的求解引擎运行并输出可视化结果。本次模拟了在拟建项目基坑内设置 43 口降水井同时运行 30 d 的工况,模拟结果如下:

a. 在持续抽水 7d 后,基坑内断裂带处的水位降深为 30.0~35.0 m,对应水位埋深约为 35.0~40.0 m;在持续抽水 30 d 后,基坑内断裂带处的水位降深为 35.0~40.0 m,对应水位埋深约为 40.0~45.0 m。具体见图 15。



(a)抽水 7 d (b)抽水 30 d

图 15 数值模拟水位降深等值线图

b.在持续抽水 7 d、30 d 后,将观测井 OB1、OB2 的测压水头统计如表 4,水头下降曲线如图 16。

表 4 模拟期观测井水头降深统计表

观测井编号	抽水 7 d 水位降深/m	抽水 30 d 水位降深/m
OB1	34.75	35.74
OB2	33.32	34.33

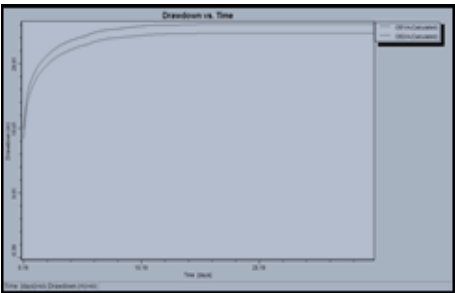


图 16 观测井 OB1、OB2 水位降深曲线

c. 在持续抽水 30 d 后, 受降水影响基坑外地表沉降约为 0.0~5.5 mm, 如图 17。

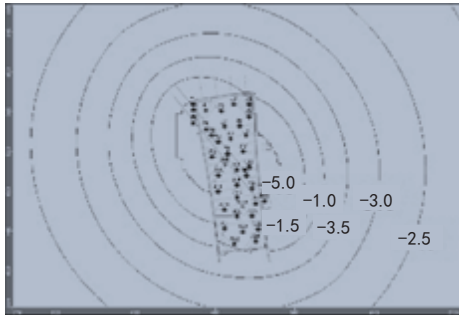


图 17 抽水 30 d 坑外地表沉降

综上, 根据数值模拟结果降水深度以及地表沉降可以满足规范要求, 方案初步具备可行性。

3.4 降水实验验证

(1) 静水位观测

根据静止水位观测结果, 试验前混合水静止水位埋深为 4.31~6.03 m, 相应标高为 +0.37~+0.83 m。试验前断裂带基岩裂隙水静止水位埋深为 4.90~7.14 m, 相应标高为 -0.35~-0.92 m。

表 5 静止水位观测结果统计表

井号	孔口标高 /m	水位埋深 /m	水位标高 /m	地下水类型
T1-9	+5.72	5.35	+0.37	混合水
J1-10	+6.78	6.03	+0.75	
J1-14	+5.26	4.79	+0.47	
J1-16	+5.14	4.31	+0.83	
J1-22	+4.65	4.90	-0.35	断裂带基岩裂隙水
J1-41	+6.22	7.14	-0.92	
T1-38	+4.79	5.42	-0.73	

(2) 单井降水实验

a. 抽水约 18 h, 抽水井水位稳定在 29.7 m, 水位降深 25.05 m, 实际出水量约 1.7 m³/h, 观测井水位下降 1.0 m。

b. 停止抽水约 2 h 后, 抽水井水位恢复上升 15.5 m, 观测井水位恢复上升 75 cm, 水位恢复比较迅速; 停止抽水约 24 h 后, 抽水井水位基本恢复至初始水位, 如图 18 所示。

(3) 群井试验

a. 抽水历时约 4 d, 24 口抽水井水位降深基本稳定, 抽水历时约 10 d, 观测井水位基本稳定, J1-22 水位降至 28 m, J1-10 水位降至 27 m。

b. 停止抽水约 2 h 后, 抽水井水位平均恢复上升约 5 m, 水位恢复比较缓慢; 停止抽水约 24 h 后, 抽水井水位基本恢复稳定, 水位稳定在地面以下 22 m, 如图 19 所示。

(4) 结论

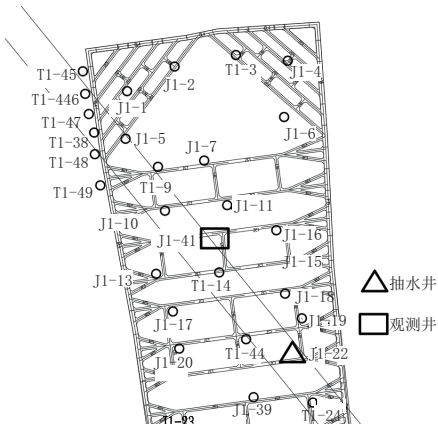


图 18 单井实验井位

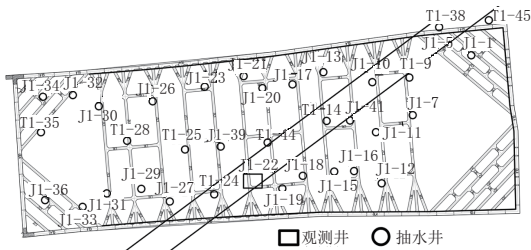


图 19 群井实验井位

根据单井降水实验以及群井降水实验结果, 断裂带补水速度相对缓慢, 同时仅采取降水井的方式可以有效的将坑内水位下降, 降水方案技术上基本可行。

3.5 方案工期成本对比分析

经对比分析(见表 6), 工期成本优化后方案具有显著优势, 同时, 数值分析结合前期现场情况, 优化后方案具有可行性, 后续现场决定采取优化后方案。

表 6 工期成本对比表

对比内容	原方案	优化后方案
工期	原帷幕注浆方案施工需 60 d, 检测需 35 d, 工期长, 影响始发段基坑开挖	坑内降水井施工仅需 28 d, 坑外降水井施工不影响坑内第一层土方开挖及支撑施工, 工期短, 不影响始发段基坑开挖
处理效果	帷幕注浆施工质量难以保证, 完成后难以保证断裂带不再渗水, 仍需打设降水井	采用降水井及盲沟明排的方式可有效解决基坑开挖及结构施工期间基岩裂隙水的问题
成本	帷幕注浆施工造价约 550 万元	断裂带降水井施工造价约 118 万元

4 现场实施效果

4.1 工期分析

施工机械设备选用工程钻机及其配套设备。成孔时采用反循环回转钻进成孔工艺。具体施工过程如图 20 所示, 根据现场统计数据, 成井平均工效为 19 h/口, 断裂带内全部降水井施工总计 45 d, 比计

划工期多 17 d,但比原方案计划工期节约 50 d,施工过程详见图 20。

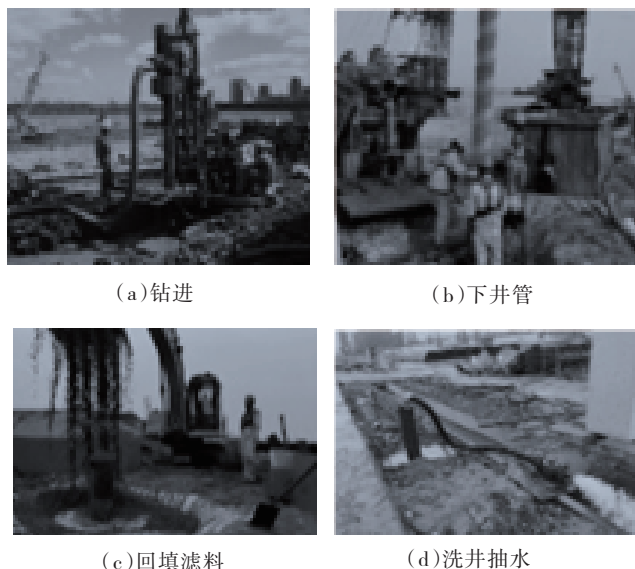


图 20 成井现场照片

4.2 降水效果分析

(1) 开挖前群井实验

a. 观测井水位

由于现场施工进度与数值模拟时有所出入,进而现场降水井开启数量需根据实际开挖深度以及现场情况综合确定,导致观测井水位在降水同等天数时水位有所却别,但可以发现在降水井全面开启时,观测井 J1-22 水位基本与数值模拟结果吻合。J1-22 与数值模拟结果偏差相对较大,主要是该处地墙未完全隔断地下水,补水速度相对较快,导致在数值模拟中未能有效模拟,具体见图 21。

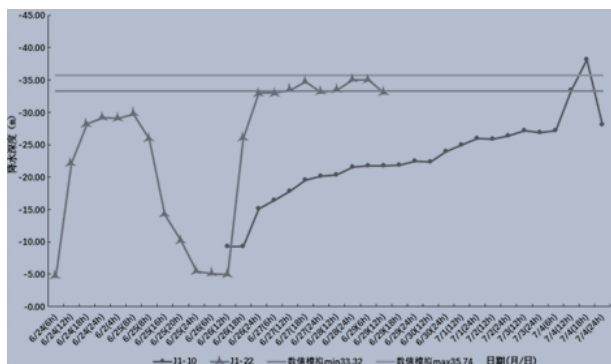


图 21 观测井实测结果与数值模拟对比

b. 周边地面沉降

降水过程中对周边地面进行地表沉降观测,由于监测是从基坑开挖时进行检测的,所以仅选取前期开挖一个月的数据与数值模拟进行对比分析,尽量减少开挖带来的沉降对观测结果的影响。

根据监测结果:

一是基坑临边监测点(即 MWD-DBC1-1~MWD-

DBC1-10)除个别点位以外,沉降量基本在 5 mm 以内,与数值模拟结果基本吻合。

二是径向地表沉降规律与数值模拟不同,未呈现由基坑边向外沉降逐渐减少的规律。主要因为部分地层为填石层地层,且骨架间填土较少,开挖扰动该地层带来的不均匀沉降导致,而数值模拟中对该地层难以有效模拟导致呈现规律不一致。

由于监控点较多,仅提取部分监测点数据进行分析,见图 22 及图 23,具体监测点位布置如图 24 所示。

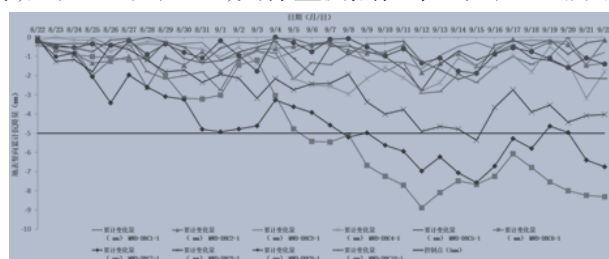


图 22 基坑临边监测点地表沉降数据 1

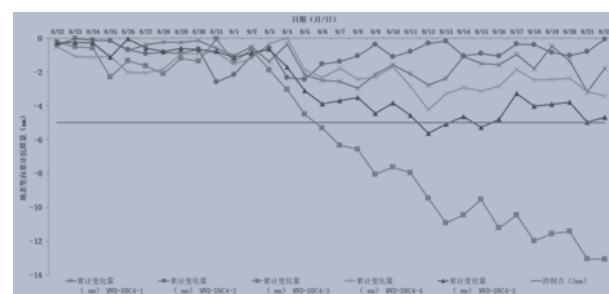


图 23 基坑径向监测点地表沉降数据 2

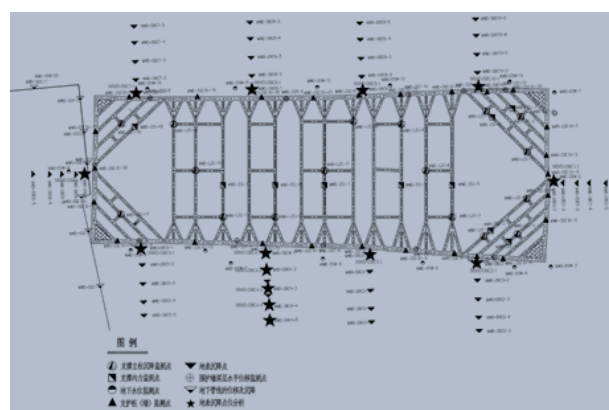


图 24 监测点位置

(2) 开挖过程降水效果

将观测井实测结果与开挖深度曲线对比后可以发现,基坑开挖过程中降水水位一直在开挖线以下两米,优化后方案实施效果良好,如图 25 所示。

5 结论

(1)在断裂带处理过程中注重地质勘查工作,在原有地勘及设计资料的基础上进一步分析断裂带的性质以及水力联系情况,进而优化断裂带处理方案。

(下转第 248 页)

的投标报价中突出了该组织必须具备的组织管理水平和评标技术能力,因此两者的不同之处主要在于中标施工机构招标方向竞争对手选取中标方案最佳的工程施工招标机构究竟是哪家中标施工机构,才真正可以从成本根源上有效减少中标工程造价管理成本。

(5)做好审核方法的选择,严格控制施工成本

对于不同类别的工程而言,施工的过程中,所使用的方法、公路所需要的材料以及工程造价的预算等等都有着不同的差异,对于每一项工程而言,其工程造价的适用方法也都会有所不同。因此,对于不同的公路工程而言,要根据工程的实际情况,选择较为实际的审核方式,以此,来加大审核的效率,在最大限度上来保证审核的质量以及精准性。

3 结 语

管理公路工程建设造价成本关系涉及到整个公路工程的顺利投入实施,是有效降低公路工程建设成本、减少工程资源大量浪费的主要政策手段,施工阶段合理准确控制和有效管理工程造价成本能够有效提升公路工程项目投资的施工科学性与政策合理性,从而能够使得公路工程建设发挥巨大的带动作用。

参考文献:

- [1] 杨圣明.路桥工程造价影响因素及控制措施分析[J].砖瓦世界, 2020(6):254.
- [2] 张相涛,刘小平.公路工程造价的影响因素及有效对策[J].建材发展导向, 2020, 18(16):32-33.
- [3] 曾翠花,王希辉.建筑工程造价的影响因素及对策研究[J].信息周刊, 2020(3):1.

(上接第 241 页)

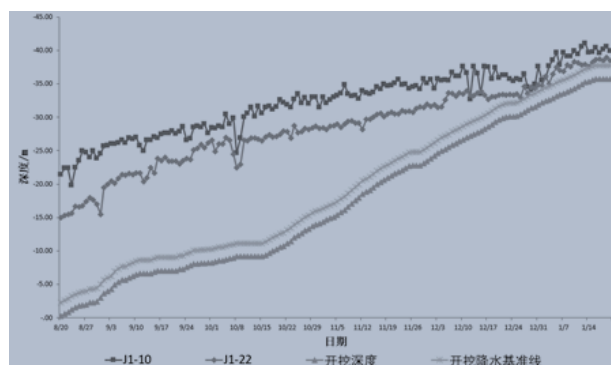


图 25 观测井实测结果开挖深度对比

(2)对于以压扭性为主、局部反扭的断裂带而言,可考虑采用纯降水方式进行断裂段处理,工期、成本方面对比注浆具有一定优势,同时处理效果可满足

施工以及规范要求。

(3)Visual ModFlow 数值模拟计算结果与现场实测结果有较好的吻合性,可以在一定程度上指导现场施工,验证方案可行性,地表沉降误差在 10%以内。

参考文献:

- [1] 金鲍,李俊才,江天玺,等.岩溶及断层破碎带地层基坑设计与坑底突涌治理[J].人民长江, 2017, 48(19):85-90.
- [2] 李志鹏,李亚璇,张立,等.车站基坑揭露断层带注浆加固效果数值模拟研究[J].隧道建设(中英文), 2018, 38(S2):120-128.
- [3] 李凌宜.断层及岩溶地带地下连续墙成槽工艺研究与应用[J].施工技术, 2015(17):3.
- [4] 闫宏斌.沪昆客专哪旁隧道岩溶地段施工方法[J].铁道建筑, 2016, 505(3):83-85.