

DOI: 10.7672/sgjs2024150021

超深基坑岩溶超大突涌水封堵抢险治理技术*

古伟斌^{1,2}, 蔺青涛^{1,2}, 郭佰良¹, 钟国锋¹, 薛 炜^{1,2}

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广东 广州 510650;

2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广东 广州 510650)

[摘要] 在岩溶地区开挖超深基坑,当岩溶埋深较小且地下水较丰富时,基坑易发生底部突水、涌泥、涌砂等险情,严重时可能造成基坑坍塌,直接影响周边环境安全。在地质条件复杂、岩溶发育、突涌水量大且险情紧急的情况下,外围帷幕注浆结合内部突涌水点反压封堵的常规封堵抢险方法见效慢、耗时长、成本高,突涌水无法快速封堵,险情无法快速排除。为此结合广州市综合交通枢纽地铁车站 35m 深基坑底部岩溶发生 1 000m³/h 超大突涌水抢险工程,采用双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术,在基坑内对突涌水点直接进行钻孔注浆封堵,利用囊袋保证双液浆可快速凝固,第 1 层囊袋封堵钻孔和涌水点,第 2 层囊袋封堵钻孔旁的岩溶孔洞、裂缝等,上下层囊袋互相补充,并对溶洞底进行双液注浆堵漏,防止浆液流失。工程实践表明,治理大涌水量、高水压的基坑岩溶突涌水时,双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术具有易操作、直接、快捷、针对性强的特点,可实现快速有效注浆、快速抢险的目的。

[关键词] 基坑;岩溶;突涌水;双液注浆;囊袋;封堵;治理

[中图分类号] TU42

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)15-0021-05

Plugging and Emergency Treatment Technology for Ultra Deep Foundation Excavation Karst Super Large Water Inrush

GU Weibin^{1,2}, LIN Qingtao^{1,2}, GUO Bailiang¹, ZHONG Guofeng¹, XUE Wei^{1,2}

(1. Guangzhou Chemical Grouting Co., Ltd. CAS., Guangzhou, Guangdong 510650, China;

2. Guangdong Research and Development Center of Chemical Grouting Engineering Technology,

Guangzhou, Guangdong 510650, China)

Abstract: When excavating ultra deep foundation excavations in karst areas, when the karst burial depth is small and the groundwater is abundant, the foundation excavations are prone to dangerous situations such as bottom water inrush, mud gushing, sand gushing, etc. In severe cases, it can cause the foundation excavation to collapse, directly affecting the safety of the surrounding environment. In complex geological conditions, karst development, large water inrush and emergency situations, the conventional plugging and emergency treatment method of peripheral curtain grouting combined with internal water inrush point backpressure plugging is slow to take effect, time-consuming and costly. The water inrush cannot be quickly plugged, and the danger cannot be quickly eliminated. For this purpose, in conjunction with the emergency rescue project for the 1 000m³/h super large water inrush at the bottom of the 35m deep foundation excavation of the Guangzhou comprehensive transportation hub subway station, the two-shot grouting two-layer pockets internal plugging technology was adopted to directly drill and inject grout to plug the water inrush point in the foundation excavation. The pockets were used to ensure that the double liquid slurry could solidify quickly. The first layer pocket was used to plug the drill hole and water inrush points, and the second layer pocket was used to plug the karst holes, cracks, etc. next to the drill hole. The upper and lower pockets complemented each other, and two-shot grouting was used to plug the bottom of the cave to prevent the loss of slurry. Engineering practice shows that the two-shot grouting two-layer pockets internal plugging technology is easy to operate, direct, fast, and highly

* 广东省住房和城乡建设厅 2023 年科技创新计划:城市复杂富水水文地质条件下基坑渗漏涌水安全封堵治理新技术研究(2023-K5-283087)

[作者简介] 古伟斌,高级工程师,E-mail:gwb201@163.com

[收稿日期] 2024-04-18

targeted when plugging with large water inrush and high water pressure karst in foundation excavations, which can achieve the goal of rapid and effective grouting and emergency treatment.

Keywords: foundation excavation; karst; water inrush; two-shot grouting; pocket; plugging; treatment

1 工程概况

1.1 基坑概况

广州市某综合交通枢纽位于白云区,发生涌水的地铁车站位于国铁站房及枢纽场站配套下方,总体呈工字形布置。该地铁车站基坑长 276.7m、宽 25.9m、深约 35m,采用地下连续墙进行止水支护,设置 1 000,1 200mm 厚地下连续墙+8 道锚索+1 道混凝土土内支撑,如图 1 所示。基坑西侧毗邻其他地铁线,其盾构管片边线距本工程基坑约 90m。

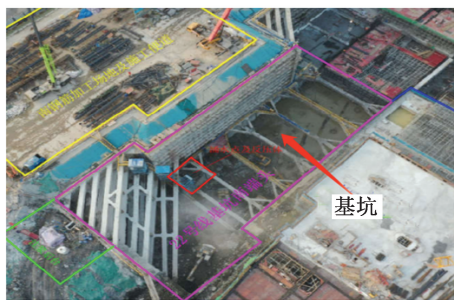


图 1 地铁车站基坑

Fig. 1 Subway station foundation excavation

1.2 工程地质与水文地质条件

该地铁车站基坑所处地层自上至下依次为杂填土、淤泥、粉细砂、中粗砂、全风化炭质页岩、强风化炭质页岩、强风化灰岩、中风化泥灰岩,基底主要位于强风化炭质页岩和中风化泥灰岩地层。

本场地灰岩属于二叠系栖霞组石灰岩,属覆盖型岩溶,见洞率为 27.72%,平均洞高 2.97m,最大洞高 10.1m,岩溶发育程度为强发育,溶洞高度变化大,无规律。以表层溶蚀发育为主要特点,分布规律性差,形态规模各异,岩溶洞体充填差,多呈未充填、半充填状,充填物以流塑~软塑状态的黏土为主,局部夹砂,工程性质软弱,易被水流冲蚀,充填率 35.98%,多属于不稳定洞体,对基坑稳定性不利。广州市区域地质图揭示此场地内有新市—嘉禾断裂,但地质勘察未揭示。

地下水按赋存方式分为第四系松散层潜水、基岩裂隙水及碳酸盐岩裂隙岩溶水。碳酸盐岩裂隙岩溶水主要赋存于灰岩中~微风化带、溶洞、基岩裂隙带中,该层水与其上砂层水连通,以潜水为主,局部为承压水,根据抽水试验资料显示,溶洞发育部位岩溶水水量丰富。

2 基坑突涌水情况

本工程地铁车站为地下 4 层,结构顶标高为 5.510m,基础底板底标高为 -25.270m。基础底板厚 1.4m,底板中间布置宽 1.6,3.2m 反梁。基坑面积约 7 200m²,地下主体结构由北至南分为 7 个施工段依次施工。

2022 年 6 月 1 日上午,第 7 段基坑底板基岩打凿及清底施工时,在距基坑南边界 33m、距基坑东边界 7m 处发生突涌水,初期突涌水量较小,出水口直径约 300mm,夹泥砂混浊水,出水点可探测约 2m 深的孔洞,设置水泵抽水,排水量约 25m³/h。

利用棉胎、尼龙网、砂包、石块等对出水点进行简单的堵塞反压,利用挖掘机清理基坑底部碎石和泥砂,以期快速浇筑底板结构垫层。同时,不断堆积反压砂包、石块,但突涌水量越来越大,水质逐渐变清,设置的水泵全开排水量已达 500m³/h,但水位不断上涨,如图 2 所示。6 月 1 日下午施工人员、作业挖掘机陆续撤离施工现场。



图 2 基坑水位上涨

Fig. 2 Rising water level in foundation excavation

加设水泵进行强排,最多时设 8 台 100WQ120-50-37 型水泵(功率 37kW,流量 120m³/h)和 7 台 100WQ80-50-22 型水泵(功率 22kW,流量 80m³/h),停水泵测得水位上升速度约为 140mm/h,坑内积水在水泵正常抽排下达到 3m 高左右时不再上涨,处于突涌出水与抽排水相对平衡状态,突涌水流量约为 1 000m³/h。

3 突涌水应急处治

人员机械撤离后,采用以下临时应急处治方法:①加大抽排力度,以保证水位达 3m 后不再上涨,以免突涌水涌入其他标段影响总体施工,预备 2 台功率 37kW 大流量水泵,以备应急使用;②利用起重机由外向内砌筑以突涌水点底部为中心、直径约 10m 的砂包、砂袋反压体,以减少突涌水量,反压体

高出水面约 1m;③在基坑顶外围东、南、西侧钻孔,以探明突涌水水路,钻孔深度以超过基坑底部 8m、钻穿溶洞且入完整岩石 2m 为准;④采用外围封堵方法,钻孔完成后在孔内进行双液注浆封堵抢险;⑤加强周边水位及基坑变形监测。

6 月 1 日晚分别调集 4,3,3 台钻机对应在基坑顶外围东、南、西侧进行钻孔,以找出溶洞或裂隙等与突涌水点相连的通道,然后进行双液注浆封堵突涌水通道,以达到止水目的。

至 6 月 3 日完成约 300m³ 砂包、砂袋堆放,形成高约 4m、直径约 10m 的砂包反压体。

6 月 6 日基坑顶钻孔及注浆情况表明,地层岩性均为灰岩,钻孔深度约 45m,最短成孔时间为 48h,对于应急抢险来说效率低,且钻孔虽发现了溶洞,但成孔和注浆时均未与突涌水点相通,注浆后的涌水量未明显减小,突涌水已发生 6d,对周边环境的影响越来越大,基坑西侧 90m 处紧邻正在运营的地铁站隧道管片出现不均匀沉降,且部分管片已出现挤压崩角现象,地铁车辆通过该段时被要求限速。为尽快排除险情,除继续在基坑顶外围钻孔寻找突涌水通道外,同时采用内堵法在基坑内利用水中反压平台对突涌水点进行钻孔注浆。

4 双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术

因基坑外围寻找突涌水通道效果不佳,为快速封堵,采用在基坑水中反压平台突涌水点正上方钻孔然后进行双液注浆抢险封堵的内封堵法。本钻孔深 17.8m,存在 2 个溶洞,溶洞高度分别为 2.3, 1.2m,与开始突涌水时人工探测到 2m 深度处有孔洞大致吻合。由本工程基坑不同开挖深度发生多次突涌水情况可知,本次特大突涌水是由岩溶水、浅表地下水及地表河涌水互相联系、相互作用造成的。

注浆封堵在动水、突涌水条件下施工,水泥-水玻璃双液浆需凝固并堆积后将突涌水通道封堵达到成功堵漏效果,双液浆虽可在较短时间内凝固,但如果水流大且水压高会造成双液浆来不及反应凝固无法停留堆积,进而被水流冲散,不仅浪费浆液,也达不到封堵目的。本次突涌水流量达 16.7m³/min,1 套双液注浆设备通常使用 2 台型号为 BWS200/10 的注浆泵,注浆流量约为 0.3m³/min,由于突涌水与注浆浆液流量相差大,如果采用常规双液注浆技术进行封堵,且突涌水口在水下,出浆时无法进行反压等,双液浆来不及固化即被岩溶突涌水冲出,无法成功封堵。为此,根据突涌水量、压力及溶洞等,为达到有效封堵、快速止水的目

的,采用先封堵孔口再灌注的双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术。

4.1 技术原理

双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术主要采用不同规格的囊袋、双液浆、专用注浆管(钢管)等,封孔如图 3 所示。

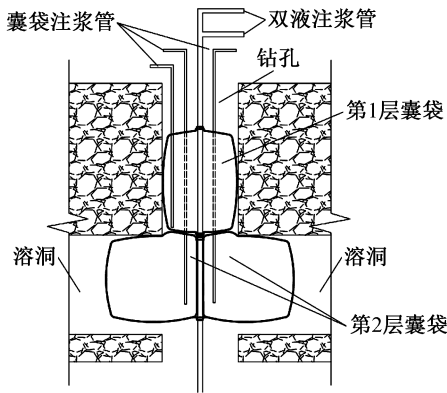


图 3 2 层囊袋封堵示意

Fig. 3 Two-layer pockets plugging

主要技术原理为利用注浆泵增加注浆压力,控制双液浆凝固时间,利用囊袋保证双液浆可快速凝固,第 1 层囊袋封堵钻孔和突涌水点,第 2 层囊袋封堵钻孔旁的岩溶孔洞、裂缝等,上下层囊袋互相补充,并对溶洞底进行双液注浆堵漏,防止浆液流失。

4.2 内封堵风险

本工程封堵的关键在于在 35m 深基坑内高水头压力、大突涌水量条件下封堵突涌水口,并保证封堵后不被冲破,不出现二次突涌水情况。采用内封堵法存在以下风险:①正对突涌水点钻孔如果将反压体砂包等破坏,突涌水量可能更大;②经钻孔水冲洗,突涌水通道可能更畅通,可能使突涌水量更大;③如果注浆时双液浆无法快速凝固被突涌水冲出,因在水中无法对浆液冲出处进行加强反压等,达不到抢险封堵目的;④内封堵法对双液注浆操作技术要求高,对双液浆配制要求高,否则灌注的双液浆会被突涌水冲出。

4.3 施工措施

针对内封堵风险采取以下应对措施:①采用套管跟进钻孔,且使用小管径套管;②套管埋入岩石中≥0.5m,在套管中钻孔,钻穿溶洞进入完整岩 5m;③采用双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术,达到快速封堵目的;④每次钻孔结束后马上埋设注浆管并进行注浆。

4.4 关键施工技术

4.4.1 注浆封堵

6 月 6 日下午开始安装钻机,6 月 7 日上午开始

钻孔,上部砂包反压体用 $\phi 108$ 套管跟进钻孔,且须入岩层 $\geq 0.5\text{m}$,注浆完成后拔出 $\phi 108$ 套管,然后用 $\phi 91$ 套管钻孔取岩芯至溶洞下完整岩 5m ,以判断地层及溶洞发育情况,为后续钻孔和注浆提供地质、地层信息。6 月 7 日下午钻完第 1 个孔(正对突涌水点),孔深 17.8m (超过基坑底部 $\geq 8\text{m}$),钻孔须穿过溶洞,入完整岩 5m ,钻孔后发现高 $2.3, 1.2\text{m}$ 双层溶洞。6 月 8 日下午开始埋设 2 层囊袋封口装置及 $\phi 48$ 双液注浆管,第 1 层囊袋长 1.5m 、直径 300mm ,在孔内 $7\sim 8.5\text{m}$ 深度处布置;第 2 层囊袋长 1.5m 、直径 600mm ,在双液注浆管两侧各布置 1 个,在孔内 $8.5\sim 10\text{m}$ 深度处布置,每个囊袋设 1 根 $\phi 20$ 铝塑管作为囊袋注浆管,并伸至囊袋底。基坑外围注浆无须设置囊袋封口,2 层囊袋注浆完成后马上利用双液注浆管注浆,注浆过程中发现在水中及反压体砂包旁不断冒出气泡,水质变浊,水中可见少量混浊水泥浆,采取间歇注浆、加大水泥浆及水玻璃浓度、调整双液浆配合比等速凝注浆施工措施,注浆过程中视压力、冒泡、出浆情况进行双液、单液、间歇注浆等,不间断注浆施工,至 6 月 9 日中午注浆结束,突涌水封堵完成。

4.4.2 注浆加固

本次突涌水量大,水头高,水压大,对周边影响大,范围广,为保证溶洞内空洞及裂隙充填饱满,并保证基坑开挖及封底安全进行,对反压体上部及基坑顶继续加固,补充钻孔和注浆,即在反压平台钻 6 个孔,在基坑东侧钻 11 个孔,在基坑南侧钻 10 个

孔,在基坑西南侧钻 5 个孔,在基坑西侧钻 5 个孔。6 月 17 日清理反压平台并进行基坑底部清理及垫层施工。

4.4.3 水位监测

对基坑内积水水位进行监测,结果如表 1 所示。由表 1 可知,囊袋注浆前水位不变,突涌水量与 14 台水泵排水量相当,2 层囊袋注浆后水位开始下降,说明突涌水量开始减少,囊袋注浆封堵完成并进行双液注浆约 1h 后突涌水量减少约 $400\text{m}^3/\text{h}$,双液注浆 2h 后至 6 月 8 日 24:00 水位下降 120mm ,水泵排水量约 $860\text{m}^3/\text{h}$,突涌水量已 $\leq 150\text{m}^3/\text{h}$,可知封堵效果明显。抽排水主要为基坑积水和施工用水,6 月 9 日中午水泵全停止 1h 水位仅上升 10mm ,突涌水量约为 $70\text{m}^3/\text{h}$,因基坑其他部位还有少量出水及钻孔用水,可判断本次基坑底部岩溶突涌水已成功封堵。

对地下水位进行监测,结果如表 2 所示。由表 2 可知,6 月 1 日基坑底部突涌水后地下水位大幅度下降,DSW93,DSW98 测点测得 6 月 2 日地下水位分别下降 $9.652, 9.778\text{m}$;采取反压体减缓水流、坑内蓄水降低水压、坑外注浆等抢险措施后地下水位下降并趋于稳定,6 月 7 日突涌水点钻孔后地下水位有所下降,说明采取措施得当,快速、及时、有效的封堵方法对于突涌水抢险至关重要;6 月 8 日晚采用双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术进行快速堵漏,封堵后 6 月 9 日地下水位迅速上升,DSW93,DSW98 测点测得地下水位上升幅度分别为 $5.916,$

表 1 基坑内积水水位监测结果

Table 1 Monitoring results of water level in foundation excavation						
日期/(月-日)	时间	22kW 水泵/台	37kW 水泵/台	水位/m	水位下降或上升/mm	备注
06-08	21:00	7	8	3.060	—	1 台备用
	21:00—22:00	7	7	3.060	0	囊袋注浆
	22:00—23:00	7	7	2.980	80	双液注浆
	23:00—24:00	7	7	2.860	120	—
06-09	0:00—1:00	7	7	2.710	150	—
	1:00—2:00	7	7	2.580	130	—
	2:00—3:00	7	7	2.440	140	—
	3:00—4:00	7	7	2.290	150	—
	4:00—5:00	7	7	2.150	140	—
	5:00—6:00	7	7	2.120	130	—
	6:00—7:00	7	7	1.970	150	—
	7:00—8:00	7	6	1.870	100	—
	8:00—9:00	7	1	1.850	20	—
	9:00—10:00	7	1	1.770	80	—
	10:00—11:00	7	0	1.690	80	—
	11:00—11:10	0	0	1.690	0	水泵全停
	11:10—11:30	0	0	1.690	0	水泵全停
	11:30—12:00	0	0	1.700	10	—

6. 230m,达到封堵抢险目的;6月11日后地下水位基本上升至正常水平。

表 2 地下水位监测结果

Table 2 Monitoring results of groundwater level mm					
日期/ (月-日)	DSW93 测点	DSW95 测点	DSW96 测点	DSW98 测点	DSW99 测点
05-29	9 511	10 129	6 800	7 458	5 256
05-30	8 573	9 357	5 966	6 561	3 879
05-31	8 216	8 989	5 610	6 191	3 952
06-01	7 950	8 800	5 434	5 896	5 586
06-02	-1 702	1 306	-2 822	-3 882	-1 900
06-03	-2 182	-980	-3 150	-4 285	-2 862
06-04	-1 853	-1 416	-4 618	-3 929	-2 895
06-05	-1 839	-1 344	-4 661	-3 925	-2 834
06-06	-2 055	-1 492	-4 795	-4 130	-2 961
06-07	-2 546	-1 692	-5 082	-4 502	-3 091
06-08	-2 919	-2 345	-5 536	-4 937	-3 389
06-09	2 997	3 122	-375	1 293	617
06-10	5 267	5 833	2 348	3 472	3 302
06-11	7 045	7 645	4 170	5 205	5 263
06-12	8 034	8 608	5 209	6 148	6 196
06-13	8 749	9 339	5 933	6 846	—
06-14	9 290	9 724	6 352	7 159	—
06-15	10 002	10 340	7 024	7 786	—
06-16	10 107	10 632	7 365	8 146	—
06-17	10 324	10 877	7 563	8 331	—
06-18	10 392	10 969	7 681	8 459	—

4.5 技术要点

4.5.1 钻孔要求

基坑顶钻孔根据已有突涌水治理情况,须根据地质溶洞分布及裂隙走向,有计划、有针对性、分批分序钻孔,以期尽快找到突涌水通道。对于基坑西侧锚索支护段,钻孔时须避开锚索,利用吊线布孔,多人多单位复核把关,严禁钻碰钢绞线危及基坑安全。

4.5.2 双液注浆要求

1)囊袋使用双液浆须承受 1.2MPa 以上的注浆压力,第 1、2 层囊袋注浆压力分别≤1.0、0.8MPa。

2)双液浆不建议使用钻灌一体机灌注,而使用大流量、高压注浆泵。注浆过程中双液浆混合段长度对凝固时间影响较大,要求混合段长度≥5m。水泥浆浓度对凝固时间和强度的影响较大,封堵时使浆液逆向进入突涌水通道中扩散,并尽快凝固不被突涌水冲出,冒浆时须调整浆液浓度和配合比。

3)采用 P·O 42.5R 硅酸盐水泥,水灰比为 (0.5~0.6):1,掺入 0.5%~1% 高效减水剂,水玻璃浓度为 39~41°Be,模数为 3.1~3.4。双液浆配合比(体积比)为水泥:水玻璃=1:(0.4~1),根据地层情况、突涌水量调整双液浆浓度、混合段长度、温度、添加剂等,双液浆出浆后固化时间为 10~120s。

4)确定注浆压力以不能掀动岩石、抬动连续墙体为原则,防止破坏岩石结构和原有地质条件,影响基坑安全。双液浆注浆压力控制在 1.2~2.0MPa,基坑外双液浆注浆压力取低值,基坑内双液浆注浆压力取高值,囊袋注浆压力≤1.0MPa。当压力过大时可适当调整浆液浓度、降低注浆速度、双液浆和单液浆交替注浆等,以达到连续注浆目的。

5 结语

1)岩溶地区地质情况复杂,超深基坑安全等级高,溶洞发育多且存在丰富岩溶水,岩溶水与浅表地下水、地表河涌等相互连通、相互作用,水压大,基坑开挖一旦发生突涌水,易发生砂土流失,造成险情,特别是开挖至基坑底部水头压力大时风险更大,岩溶基坑出现突涌水时须及时有效处理,采用双液注浆封堵是有效的方法。

2)对突涌水点堆载反压减缓水流后在基坑外围钻孔寻找突涌水通道并灌注双液浆是常用的封堵抢险方法,这种外围封堵法为主动封堵,可解决突涌水问题,但需寻找突涌水通道。对于突涌水量大、水压较高的基坑工程,采用内封堵法时在基坑内对突涌水点直接进行钻孔注浆,具有易操作、直接、快捷、针对性强的特点,对施工技术要求较高,可采用本研究提出的双液浆 2 层囊袋式内封堵注浆技术。

3)实际工程中可视溶洞发育情况或地质条件,采用双液浆+3 层以上囊袋式内封堵注浆技术,以实现快速有效注浆,达到快速抢险目的。

参考文献:

[1] 郭佑雄,李明,蒙长坤,等. 岩溶地质深基坑涌水封堵技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(3): 97-100.
GUO Y X, LI M, MENG C K, et al. Study on water plugging technology of deep foundation excavation in karst geology[J]. Construction technology, 2023, 52(3): 97-100.

[2] 李士锦,段晓平,张雷. 徐州地铁深基坑双液浆封堵技术应用研究[J]. 能源技术与管理, 2020, 45(2): 149-151.
LI S J, DUAN X P, ZHANG L. Study on the application of double slurry plugging technology in xuzhou metro deep foundation excavation[J]. Energy technology and management, 2020, 45(2): 149-151.

[3] 陈城,彭丽云,张振华. 超细水泥-水玻璃双液浆的性能研究及砂土注浆效果分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(12): 3883-3887.
CHEN C, PENG L Y, ZHANG Z H. Performance of superfine cement-water glass double slurry and effect analysis on sand grouting[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(12): 3883-3887.

(下转第 36 页)

- technology, 2022,51(1):41-43.
- [5] 李曙光,吴应明,王洪坤. 富水软土地区不同降水开挖工况下深基坑变形研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 26-31.
- LI S G, WU Y M, WANG H K. Deformation of deep foundation excavation under different precipitation excavation conditions in water-rich soft land area[J]. Construction technology, 2022,51(1):26-31.
- [6] 李爱地,李成勋,董莹. 淤泥质软土深基坑 SMW 工法桩围护结构施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 180-185.
- LI A D, LI C X, DONG Y. Research on construction techniques for an SMW retaining structure for a deep foundation pit in soft muddy soil [J]. Modern tunnelling technology, 2014,51(5): 180-185.
- [7] 顾祯雪,楼伟中,程钰博,等. 南京软土地区超长异形深基坑地连墙变形性状分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 182-189.
- GU Z X, LOU W Z, CHEN Y B, et al. Analysis on deformation behaviors of diaphragm walls of an extra-long special-shaped deep foundation pit in Nanjing soft soil area [J]. Modern tunnelling technology, 2021,58(1):182-189.
- [8] 徐江,龚维明,穆保岗,等. 软土区某地铁深基坑施工过程数值模拟及现场监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3):590-598.
- XU J, GONG W M, MU B G, et al. Numerical simulation and monitoring on construction process of deep pit of subway station in soft clay[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2017,47(3):590-598.
- [9] 康志军,黄润秋,卫彬,等. 上海软土地区某逆作法地铁深基坑变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(8): 1527-1536.
- KANG Z J, HUANG R Q, WEI B, et al. Deformation behaviors of deep top-down metro excavation in Shanghai soft clay[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2017,51(8):1527-1536.
- [10] 谭翼,康志军,卫彬,等. 上海软土地区某地铁风井深基坑案例分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(6): 1048-1055,1072.
- TAN Y, KANG Z J, WEI B, et al. Case study on deep excavation for metro ventilation shaft in Shanghai soft clay[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2016,50(6):1048-1055,1072.
- [11] MEI Y,ZHOU D B,WANG X Y, et al. Deformation law of the diaphragm wall during deep foundation pit construction on lake and sea soft soil in the Yangtze river delta[J]. Advances in civil engineering,2021(2):6682921. 1-6682921. 11.
- [12] 宋师奇,黄博文,潘乾通. 局部张拉预应力装配式地连墙受力及变形分析[J]. 混凝土,2019,360(10):125-129,134.
- SONG S Q, HUANG B W, PAN Q T. Analysis of the force and deformation of the partially prestressed precast underground continuous wall[J]. Concrete, 2019,360(10):125-129, 134.
- [13] YANG J H,KONG D Y. Deformation of deep and large foundation pit in soft soil of Fuzhou subway [J]. Arabian journal of geosciences,2020,13(10):445-451.
- [14] 高加云,顾倩燕,李小军. 软土地基大跨度双排钢板桩围堰结构稳定性研究[J]. 水运工程,2009(S1):50-55.
- GAO J Y, GU Q Y, LI X J. Stability analysis of large-span double sheet-piled cofferdam on soft ground[J]. Port & waterway engineering, 2009(S1):50-55.
- [15] WANG J F,XIANG H W, YAN J G. Numerical simulation of steel sheet pile support structures in foundation pit excavation [J]. International journal of geomechanics, 2019, 19(4): 5019002. 1-5019002. 12.
- [16] YAN Q Z, RAO J,XIE Z Q. Research and use of the steel sheet pile supporting structure in the Yellow River Delta [C]//Advances in Civil Engineering and Architecture, 2011.
- [17] 蒋红星,叶以挺,朱莉,等. 新型锁口钢板桩围堰在之江大桥施工中的应用[J]. 混凝土,2012,267(1):132-134,141.
- JIANG H X, YE Y T, ZHU L, et al. Applications of new locking steel pile cofferdam at Zhijiang Bridge [J]. Concrete, 2012,267(1):132-134,141.
- [18] ZHONG C H,KANG W Z,FENG C H. Application researches on lasso steel sheet pile based on foundation pit support close to railway bridge[J]. Applied mechanics and materials,2011,1448(195):414-417.
- [19] 郑国兵,黄朝焯,袁文喜,等. 深厚淤泥中双排钢板桩结构安全稳定性研究[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):71-76.
- ZHENG G B, HUANG C X, YUAN W X, et al. Research of safety and stability of double-row steel sheet pile structure in deep silt[J]. Advances in science and technology of water resources, 2020,40(4):71-76.
-
- (上接第 25 页)
- [4] 孟栋,徐壮,罗小刚,等. 岩溶发育区地铁站基坑突涌影响因素与处理技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(21): 133-138.
- MENG D, XU Z, LUO X G, et al. Influencing factors and treatment technology for foundation excavation inrush of subway station in karst development area[J]. Construction technology, 2022, 51(21):133-138.
- [5] 高学通. 水泥-水玻璃双液浆抗动水冲刷性能及灌注工艺研究[J]. 采矿技术,2020,20(2):99-101.
- GAO X T. Study on dynamic water erosion resistance and pouring technology of cement water glass double slurry [J]. Mining technology,2020,20(2):99-101.
- [6] 郜江俊,肖豹,蒋春桂,等. 场地岩溶发育特征规律研究及勘探技术优选[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(19): 19-22.
- HAO J J,XIAO B,JIANG C G, et al. Study on features of karst development and exploration technology optimization [J]. Construction technology,2022, 51(19):19-22.
- [7] 任青山,罗毅. 影响水泥-水玻璃注浆材料特性的关键因素研究[J]. 煤炭技术,2017,36(11):209-210.
- REN Q S, LUO Y. Key factors affecting characteristics of cement-water glass grouting materials research [J]. Coal technology,2017,36(11):209-210.