

地下连续墙成槽泥浆试验研究与应用

王宇

(上海远方基础工程有限公司,上海市 200436)

摘要: 地下连续墙施工受膨润土泥浆影响极大,膨润土泥浆的质量控制是地下连续墙成槽中槽壁稳定性保证的关键。膨润土泥浆的质量主要受膨润土种类、制浆用水质量以及膨润土掺量的影响。基于苏州某项目地下连续墙围护工程,对该工程泥浆进行试验研究。首先,对该地区井水、自来水制浆进行泥浆性能对比,选取了山东潍坊马营钠土粉、辽宁黑山中粉、辽宁黑山高粉3种膨润土进行制浆试验,确定该地区在3%膨润土掺量下井水制浆无法满足成槽要求;然后,选取5个厂家的膨润土进行不同掺量下膨润土井水制浆试验,检测并记录了各掺量下膨润土泥浆充分水化24 h后的比重、黏度参数以及8~48 h内的胶体率变化情况;最终确定了7%掺量的浙江安吉超润膨润土进行泥浆施工,并在当前的13幅地下连续墙施工中有效使用。

关键词: 地下连续墙;膨润土泥浆;膨润土掺量;泥浆性能;试验

中图分类号: TU473.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0253-05

0 引言

地下连续墙是按照设计的幅段,在施工过程中采用成槽机、铣槽机等专用的成槽设备,沿施工轴线开挖狭长的槽段,在浇筑混凝土后形成的一种单元连续的深基坑围护结构^[1]。

地下连续墙施工中,泥浆发挥重要作用,泥浆在槽段开挖过程中能够携渣,即沉渣可以悬浮在泥浆中,在正循环或反循环清孔施工中可将沉渣带离槽段,实现槽内沉渣清理,并且,泥浆在槽壁上形成的泥皮具有护壁、防渗的作用^[2],因此,泥浆质量对地下连续墙施工影响较大^[3]。在配比确定时,影响泥浆质量的因素主要有两种,其一为膨润土类型,其二为地下水质量。其中,膨润土种类主要分为钠基膨润土与钙基膨润土,相较于钙基膨润土,钠基膨润土交换性阳离子含量高,并以 Na^+ 为主,含量大于50%,具有较高的胶质价以及黏性,属于优质膨润土;地下水对泥浆性能影响的根本原因在于,地下水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较大会造成泥浆中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量超标,导致泥浆黏度降低,不利于膨润土泥浆携渣以及护壁作用的发挥^[4-5]。

目前,根据我司实际施工项目澳门妈阁站、崇太过江隧道明挖段、海太隧道明挖段以及天津津滨铁

路四标等皆受到地下水影响。依托我司苏州某超深地下连续墙项目,对地下连续墙成槽泥浆进行试验研究,并对该项目泥浆具体实施情况进行介绍。

1 工程概况

苏州某超深地下连续墙项目位于苏通大桥下游海门与太仓间汽渡附近,北接南通海门,南连苏州太仓、常熟。该项目地下连续墙单元厚度包括0.8、1.0、1.2、1.5 m 4种,槽段深度32.5~69.5 m不等,接头形式采用H型钢接头,整体划分为明挖敞开段、明挖暗埋段及工作井及后续段,区段划分情况见图1。

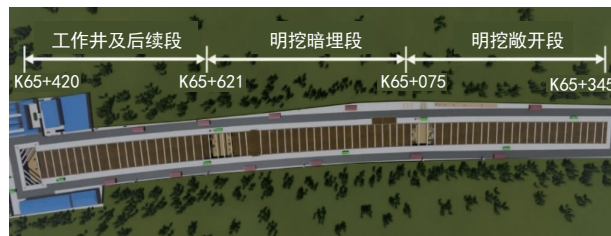


图1 区段划分

1.1 地质概况

该项目地层主要包括有①₁层杂填土、①₂层素填土、②₁层黏土、③₅层粉土夹粉砂、④₁淤泥质粉质黏土夹粉砂、④₂层粉质黏土夹粉土、④₃₋₁层粉砂、⑤₂层粉砂、⑤₃层粉细砂,具体地层见图2所示。

1.2 水文概况

该项目主要受地表水与地下水影响,其中,本区域最大地表水体为长江,距离本工点0.45 km;地下

收稿日期: 2023-10-07

作者简介: 王宇(1980—),男,大专,助理工程师,主要从事岩土工程施工管理工作。

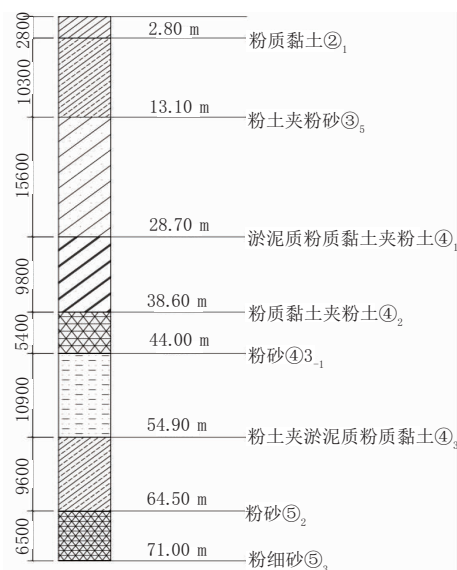


图 2 标准地层剖面图(单位:mm)

水主要有潜水和承压水,潜水主要分布在①层填土、②层粉土及③层粉砂层中,含水层厚度 5.1~12.8 m。

承压水主要赋存在深部⑤₂粉砂、⑤₃粉细砂、⑤₄含砾中粗砂、⑥₂粉细砂中,测区含水层厚度 72~81 m。上部的④层主要为淤泥质土、粉质黏土,是相对隔水层,构成承压水含水层的顶板。承压水水位高程 -1.82~0.46 m。

2 不同水源对现场制浆的影响

项目初期施工过程中,对分别采用井水、自来水两种水源制浆进行了研究,按照水:膨润土=1 000:30 的配比进行配置。初期实际配置过程中,采用了 3 种膨润土进行配比试验,分别为山东潍坊驸马营钠土粉、辽宁黑山中粉、辽宁黑山高粉,表 1 给出了同

一温度(20℃)、同一配比两种水源所制膨润土泥浆随时间变化的情况。试验结果表明:(1)采用当地井水制浆对所得膨润土泥浆比重无影响;(2)在黏度方面采用井水制浆将降低膨润土泥浆黏度,对于驸马营钠土粉及黑山中粉所制得的膨润土泥浆黏度降低并不明显,而对于黑山高粉膨润土泥浆的黏度有较大影响,降低其黏度达到 33%;(3)采用井水制浆对膨润土泥浆的胶体率有很大的影响,驸马营钠土粉、黑山中粉、黑山高粉膨润土泥浆其胶体率较自来水制浆在 48 h 分别降低 37%、58%、49%,中粉膨润土制浆所得膨润土泥浆受井水制浆影响最大,胶体率最低。实际井水配置结果与自来水配置结果见图 3、图 4。

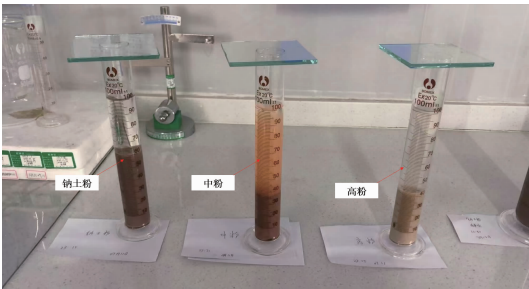


图 3 井水制浆结果

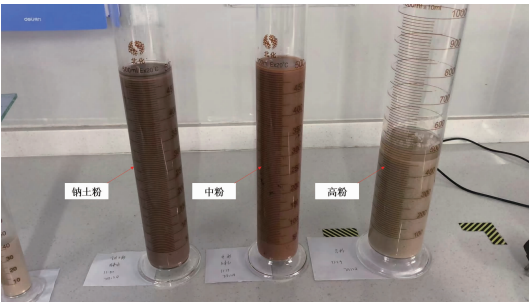


图 4 自来水制浆结果

表 1 不同水源对驸马营钠土粉制浆的影响

水源	泥浆比重	泥浆黏度	8 h 胶体率 /%	24 h 胶体率 /%	33 h 胶体率 /%	39 h 胶体率 /%	48 h 胶体率 /%
井水	1.03	19.23	88	68	62	59	57
自来水	1.03	20.13	98	98	96	94	94

表 2 不同水源对黑山中粉制浆的影响

水源	泥浆比重	泥浆黏度	8 h 胶体率 /%	24 h 胶体率 /%	33 h 胶体率 /%	39 h 胶体率 /%	48 h 胶体率 /%
井水	1.03	17.16	41	38	37	37	36
自来水	1.03	18.88	96	96	94	94	94

表 3 不同水源对高粉制浆的影响

水源	泥浆比重	泥浆黏度	8 h 胶体率 /%	24 h 胶体率 /%	33 h 胶体率 /%	39 h 胶体率 /%	48 h 胶体率 /%
井水	1.03	20.78	44	42	42	42	42
自来水	1.03	30.40	92	92	91	91	91

经检验,该地区井水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 含量较高,分别为 132.74、39.03、158.36 mg/L。该结果表明,井水中 Ca^{2+} 含量过高,是一般水中 Ca^{2+} 含量(80 mg/L) 165.9%, Ca^{2+} 含量超标是导致试验中胶体率较低的主要原因。因此,该场地不适宜直接采用当地井水制浆。具体井水化学成分分析结果见表 4 所列。

表 4 井水化学成分分析结果 单位:mg/L

样品 编号	取样深 度 /m	Al 铝	Ca 钙	Fe 铁	K 钾	Mg 镁	Mn 锰	Na 钠	P 磷	Ti 钛
1	15	0.168 804 558	134.619 756 1	0.180 991 048	5.904 767 14	39.933 514 2	0.418 296 956	158.560 492 6	0.099 685 296	0.003 257 127
2	40	0.1328 097 86	133.423 979 9	0.020 560 23	5.778 931 628	39.053 696 7	0.295 146 863	159.255 798 7	0.017 453 537	0.005 544 036
3	70	0.104 027 429	130.182 657 1	0.093 611 395	5.858 730 802	38.122 859 08	0.319 981 719	157.274 821 9	0.034 070 149	0.002 893 991

3 膨润土泥浆试验及检测

由于自来水制浆成本较高,为适配出可利用于该项目的以井水制成的膨润土泥浆,降低制浆成本,现场进行了不同膨润土不同配比的研究。试验中,取用了五种不同厂家膨润土,分别是苏州派惠特、辽宁黑山中粉、辽宁黑山高粉、浙江安吉超润以及山东潍坊驹马营。试验中统一采用井水制浆,泥浆制备后,对不同膨润土掺量下泥浆比重黏度、胶体率、pH 值、失水率、泥皮厚度 6 项指标进行了监测。

3.1 苏州派惠特膨润土泥浆制备及检测

该试验在膨润土泥浆制备充分水化 24 h 后进行检测,所取膨润土含量范围为 3%~8%,泥浆配置结果见图 5,检测结果见表 5。检测结果表明,地下水拌

制派惠特膨润土泥浆,在膨润土掺量 4%~5%时泥浆黏度为 26.11~44.84 s,满足新拌泥浆的黏度要求。但泥浆胶体率只有 79%~98%,不满足新拌泥浆胶体率 $\geq 98\%$ 要求,并且,采用膨润土 GB/T 20973 试验方法测得的泥皮厚度在膨润土掺量 $\geq 6\%$ 时大于 3 mm,不满足使用要求,因此不建议使用。

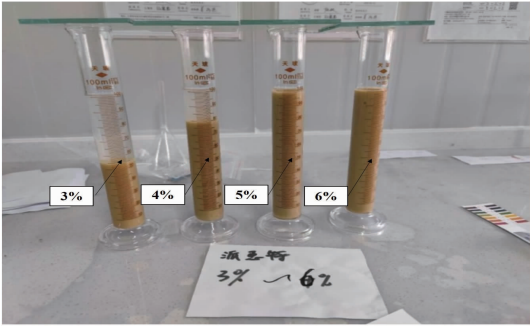


图 5 派惠特膨润土泥浆制备结果

表 5 派惠特膨润土泥浆性能检测报告

序号	膨润土 掺量 /%	相对比重 (<1.05)	黏度 (>35)	胶体率 (≥ 98)/%	pH8~10	公路桥涵施工规范试验方法		膨润土 GB/T20973 试验方法	
						失水量 / ($\text{cm}\cdot 30\text{ min}^{-1}$)	泥皮厚度 / ($\text{cm}\cdot 30\text{ min}^{-1}$)	滤失量 ($<20\text{ mL}$)/ mL	泥皮厚度 ($<3\text{ mm}$)/ mm
1	3	1.015	20.39	53%	8	>3.54	0.5	—	—
2	4	1.023	26.11	79%	8	>4.01	1.26	—	—
3	5	1.029	44.84	98%	9	>4.04	2.05	20.4	2.88
4	6	1.037	222.47	100%	9	$=4.20$	2.94	16	3.74
5	7	1.044	$>300\text{ s}$	100%	9	$=3.65$	5.06	14	4.44
6	8	1.047	$>300\text{ s}$	100%	9	$=3.15$	6.48	—	—

3.2 辽宁黑山中粉膨润土泥浆制备及检测

该膨润土泥浆同样在泥浆制备充分水化 24 h 后进行检测,所取膨润土含量范围为 3%~10%,泥浆配置结果见图 6,检测结果见表 6。该膨润土泥浆在在膨润土掺量 7%~10%时泥浆黏度为 22.29~45.25 s,泥浆胶体率为 99%~100%,满足新拌泥浆的黏度及胶体率要求。同时比重、pH 值、滤失量也满足规范要求,但其泥皮厚度相对较薄,建议使用时,开槽前将新浆膨润土掺量选择为 8%~9%。

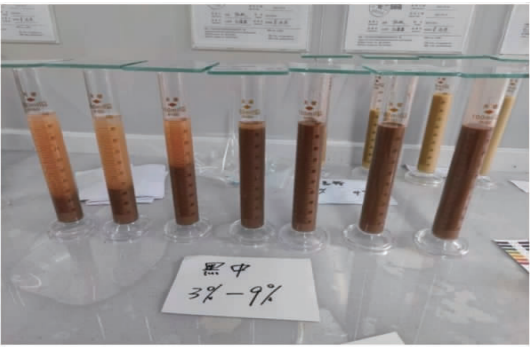


图 6 辽宁黑山中粉膨润土泥浆制备结果

表6 辽宁黑山中粉膨润土泥浆性能检测报告

序号	膨润土 掺量	相对比重 (<1.05)	黏度 (>35)	胶体率 (≥98%)/ %	pH8~10	公路桥涵施工规范试验方法		膨润土 GB/T20973 试验方法	
						失水量/ (cm·30 min ⁻¹)	泥皮厚度/ (mm·30 min ⁻¹)	滤失量(<20 mL)/ mL	泥皮厚度(<3 mm)/ mm
1	3%	1.013	16.06	25	8	>3.33	0.57	—	—
2	4%	1.022	16.72	35	8	>3.16	0.31	—	—
3	5%	1.030	17.53	59	8	>3.55	0.85	—	—
4	6%	1.035	19.63	95	9	>3.73	1.12	19.2	1.34
5	7%	1.038	22.29	99	9	>3.65	1.29	17.2	1.14
6	8%	1.044	25.88	100	9	>3.56	1.47	—	—
7	9%	1.049	33.94	100	9	=3.82	1.97	14	1.62
8	10%	1.055	45.25	100	9	=3.81	2.3	—	—

3.3 辽宁黑山高粉膨润土泥浆制备及检测

该膨润土泥浆同样在泥浆制备充分水化 24 h 后进行检测,所取膨润土含量范围为 3%~10%,泥浆配置结果见图 7,检测结果见表 7。

经检测,该膨润土泥浆在膨润土掺量 7%~8%时泥浆黏度为 29.47~43.72 s,满足新拌泥浆的黏度要求。但泥浆胶体率只有 87%~96%,不满足新拌泥浆胶体率≥98%要求,且泥皮厚度在达到 8%时大于 3 mm,因此,不建议使用该膨润土进行制浆。

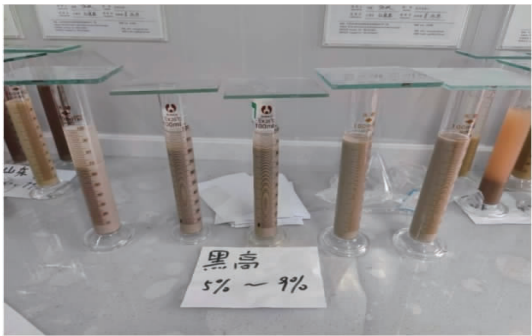


图7 辽宁黑山高粉膨润土泥浆制备结果

表7 辽宁黑山高粉膨润土泥浆性能检测报告

序号	膨润土 掺量 /%	相对比重 (<1.05)	黏度 (>35)	胶体率 (≥98%)/ %	pH8~10	公路桥涵施工规范试验方法		膨润土 GB/T20973 试验方法	
						失水量/ (cm·30 min ⁻¹)	泥皮厚度/ (mm·30 min ⁻¹)	滤失量(<20 mL)/ mL	泥皮厚度(<3 mm)/ mm
1	3	1.015	16.19	—	8	>3.42	0.24	—	—
2	4	1.021	16.5	—	8	>3.53	1.09	—	—
3	5	1.026	18.91	68	8	>3.65	1.06	—	—
4	6	1.033	21.96	84	9	>3.83	1.35	19.6	2.3
5	7	1.038	29.47	87	9	>3.96	1.92	17.6	2.8
6	8	1.043	43.72	96	9	>3.94	1.93	14.8	3.1
7	9	1.050	71.59	98	9	=3.99	1.98	—	—
8	10	1.057	111.69	100	8	=3.99	2.11	—	—

3.4 浙江安吉超润膨润土泥浆制备及检测

该膨润土泥浆所取膨润土含量范围为 3%~8%,泥浆配置结果见图 8,检测结果见表 8。

经检测,在膨润土掺量 6%~8%时泥浆黏度为 25.4~55.88 s,满足新拌泥浆的黏度要求。泥浆胶体率为 100%,满足新拌泥浆胶体率≥98%要求。同时比重、pH 值、滤失量以及泥皮厚度也满足规范要求。建议开槽前新浆浓度 7%~8%。

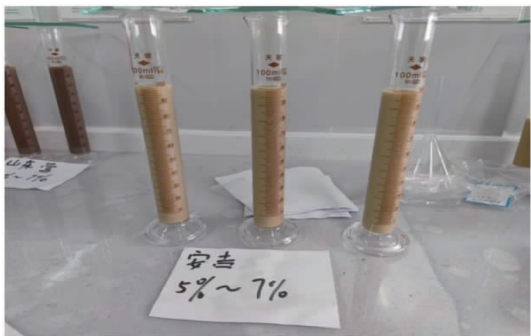


图8 浙江安吉超润膨润土泥浆制备结果

3.5 山东潍坊驹马营膨润土泥浆制备及检测

该膨润土泥浆所取膨润土含量范围为 3%~8%, 泥浆配置结果见图 9,检测结果见表 9。

表 8 浙江安吉超润膨润土泥浆性能检测报告

序号	膨润土 掺量 /%	相对比重 (<1.05)	黏度 (>35)	胶体率 (≥98%)/ %	pH8 ~ 10	公路桥涵施工规范试验方法		膨润土 GB/T20973 试验方法	
						失水量 / (cm·30 min ⁻¹)	泥皮厚度 / (mm·30 min ⁻¹)	滤失量 (20 mL) / mL	泥皮厚度 (<3 mm) / mm
1	3	1.016	16.22	—	8	>3.56	0.56	—	—
2	4	1.023	17.75	98	8	>3.73	0.81	—	—
3	5	1.027	20.69	100	8	>3.78	1.17	—	—
4	6	1.034	25.4	100	8	>3.87	1.29	17.2	2.5
5	7	1.037	34.93	100%	8	>3.94	1.49	16	2.7
6	8	1.044	55.88	100%	8	>4.05	2.62	—	3.3

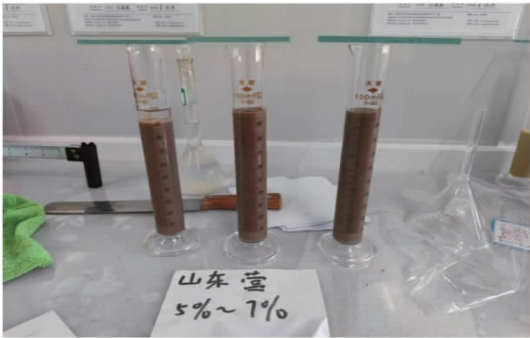


图 9 山东马营膨润土泥浆制备结果

经检测，在膨润土掺量 6%~7%时泥浆黏度为 26.56~40.22 s，满足新拌泥浆黏度及胶体率要求。泥浆比重、pH 值、滤失量、泥皮厚度也满足规范要求。但泥浆黏度与胶体率随膨润土掺量变化较为敏感，使用时应加强检测，及时调整泥浆指标，酌情使用。建议开槽前新浆浓度 6%~7%。

根据 5 种膨润土使用地下水拌制泥浆性能参数，结合现场所需泥浆指标性能，最终确定浙江安吉超润、辽宁黑山中粉膨润土适用本项目，山东潍坊附

表 9 山东马营膨润土泥浆性能检测报告

序号	膨润土 掺量 /%	相对比重 (<1.05)	黏度 (>35)	胶体率 (≥98%)/ %	pH8 ~ 10	公路桥涵施工规范试验方法		膨润土 GB/T20973 试验方法	
						失水量 / (cm·30 min ⁻¹)	泥皮厚度 / (mm·30 min ⁻¹)	滤失量 (20 mL) / mL	泥皮厚度 (<3 mm) / mm
1	3	1.017	16.53	—	7	>3.43	0.64	—	—
2	4	1.025	17.78	—	8	>3.70	0.67	—	—
3	5	1.030	21.4	91	9	>3.70	0.74	—	—
4	6	1.034	26.56	98	9	>3.89	1.20	16.8	2.6
5	7	1.036	40.22	100	10	>4.05	2.61	15.6	2.9
6	8	1.044	96.65	100	10	≈3.79	3.01	—	—

马营钠土粉需酌情使用，辽宁黑山高粉、苏州派惠特膨润土则不建议在该项目使用。

4 泥浆现场应用及调整

现场实际施工中，采用浙江安吉超润膨润土进行泥浆制作，膨润土掺量 7%，测得新制泥浆黏度为 36 s，胶体率为 100%，pH 值为 8。并且，由于成槽过程中泥浆不断循环置换，槽内泥浆质量不断变质，泥浆比重增加，黏度降低，胶体率亦随之下降，因此，在地下连续墙清底完成后，对槽段内所有泥浆进行置换，避免因槽内泥浆循环造成的泥浆性能下降而导致槽壁失稳的现象出现。

5 结 语

目前，该项目正在施工中，且已成功完成 13 幅槽段的施工，过程中未发生明显槽壁塌方及沉渣过厚现象，混凝土充盈系数皆在 1.01~1.03 范围内，证明在该配置下，膨润土泥浆的携渣及护壁作用皆满足现场施工要求。

地下连续墙施工场地复杂多样，地下水水质情况具有地区性，邻近海洋的地区地下水含盐量较高，并且随着潮汐的发生会导致地下水动态变化较为显著。因此，地下连续墙成槽泥浆也需根据实际地区的地层及地下水性质在试验后确定，否则会出现成槽

(下转第 261 页)

设定巡检航线,将检查范围覆盖整个项目施工区域。对于检查人员无法到达的部位,可以操作无人机进行针对性检查,检查过程中可随时采集影像数据用于留底及后续质量安全问题的整改处理。如果需要进一步提高项目质量安全的管控,可以将无人机倾斜摄影采集到的数据用软件进行处理,生成实景三维模型,通过对比分析不同时期的模型数据,及时发现施工过程中的质量问题和安全隐患。

需要注意的是,用倾斜摄影技术在路基土石方施工过程中保障工程质量安全虽然具有很多优势,但在实际应用中也存在一些局限性。例如,无人机的飞行高度和角度可能受到施工现场环境的影响,导致部分区域无法拍摄到清晰的影像。因此,在使用无人机倾斜摄影技术进行巡检时,需要结合实际情况进行灵活应用,并与其他巡检方法相结合,以确保路基土石方工程施工的质量和安

4 效益分析

4.1 经济效益分析

本道路工程路基土石方开挖采用无人机倾斜摄影及 BIM 技术,施工前按照施工作业计划对工程量、工期、劳动力、材料设备进行合理规划,再进行施工模拟,通过模拟找出不合理之处再进行优化,形成最佳的施工方案。采用该施工工艺施工,共降低施工成本 10.73 万元,其中人工成本降低 4.12 万元,材料成本降低 1.83 万元,机械成本降低 4.78 万元,节省大量机械设备和人工投入,为项目创造了良好的经济效益。

4.2 社会效益分析

用无人机航测获得的模型进行路基土石方开挖和路基填筑施工模拟,使得施工管理、劳动力、机械设备分工明确,各司其职,从而大幅提高了施工质量。由于通过施工模拟进行了合理的规划,装载机土石方运输路线和卸料位置都已明确,不会产生乱堆

乱放的现象,使道路工程施工和自然环境保护融合,创造出明显的社会效益。

5 结 语

本次研究以无人机和 BIM 技术作为工具,以道路路基土石方工程开挖及填筑为研究对象,首先使用无人机在施工现场采集原始地形三维实景数据,生成 BIM 模型,将工程原始地貌清晰准确的展示,为施工方案编制和测量放样提供依据;然后使用 BIM 技术对土石方工程量进行快速测算,为土石方工程造价估算和施工组织设计提供参考依据;最后使用施工模拟软件对路基土石方开挖及填筑施工过程进行了合理的规划,形成视频动画,为路基土石方施工提供了形象可靠的技术方案。与传统施工方法相比,本次研究的技术具有施工准备充分、施工迅速、人工和设备投入少的优点,可以为同类路基土石方工程施工提供参考。由于倾斜摄影技术的数据采集精度容易受到测量距离、飞行环境等因素影响,对数据精度要求非常高的场景可结合其他数据采集技术,如激光扫描、全站仪等,进行交叉验证和补充采集,以提高整体数据精度。

参考文献:

- [1] 辜超,赵十璧,郑钧予.RTK 配合全站仪法在土石方工程量计算中的应用[J].科技创新与应用,2019(8):172-173.
- [2] 周海波,罗洪军,周鲜明.不同测绘方法在土石方量计算中的应用与对比研究[J].测绘与空间地理信息,2022,45(4):184-186.
- [3] 王晓芳,杨洪图,李长洙.基于三维实景模型公路桥梁 BIM 正向设计研究[J].城市道桥与防洪,2023(8):75-79.
- [4] 颜明捷.无人机倾斜摄影技术在城市实景三维建模中的应用[J].科技创新与应用,2023,13(10):173-176.
- [5] 张懂庆,李智,张繁荣.基于 Context Capture 倾斜摄影空中三角测量技术优化研究[J].软件,2021,42(2):159-162.
- [6] 牛立军,韩涛.基于 BIM 技术河道地形处理分析研究[J].四川建材,2019,45(12):182-184.
- [7] 张伟光,鲍帆,王敬凌,等.机场道面不停航施工数字建模与影响评估[J].指挥信息系统与技术,2022,13(5):32-40.

~~~~~  
(上接第 257 页)

过后槽壁失稳现象以及沉渣过厚的现象。

### 参考文献:

- [1] 刘凤洲,谢雄耀.地铁基坑围护结构成槽施工对邻近建筑物沉降影响及监测数据分析[J].岩石力学与工程学报,2014(1):2901-2907.
- [2] 雷国辉,王轩,雷国刚.泥浆护壁开挖稳定性的影响因素及失稳机理

综述[J].水利水电科技进展,2006(1):82-86.

- [4] 资晓鱼,申玉生,连正,等.超深地下连续墙槽壁位移及泥浆配制技术研究[J].路基工程,2021(2):140-147.
- [5] 于泽溪.盐溶液对钠质膨润土工程特性的影响研究[D].杭州:浙江大学,2019.