

· 地基与基础 ·



某船闸基坑自动化监测技术可靠性分析^{*}

陈明杰^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 针对人工监测效率不高、监测频率无法满足极端天气下基坑的监测要求等问题, 采用自动化监测方法进行监测, 并辅以人工监测进行定期比对。结果表明, 静力水准仪与电子水准仪监测结果相近, 固定式测斜仪与滑动式测斜仪监测结果曲线非常吻合, 曲线变化形态与现场施工状况相符。自动化监测用于基坑监测具有良好的可靠性, 面对受力复杂、恶劣天气频繁的基坑, 在成本可控状态下应尽量采用自动化监测。

关键词: 自动化监测; 人工监测; 方差分析; 监测结果对比

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0151-06

Reliability analysis of automatic monitoring technology for foundation pit of lock

CHEN Ming-jie^{1,2}

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2.CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China)

Abstract: To tackle the problems that the efficiency of manual monitoring is not high, and its monitoring frequency cannot satisfy the requirement of foundation pit monitoring under extreme weather, we test the reliability of an automatic monitoring method, with manual monitoring adopted for regular comparison. The results show that the monitoring values of the static level are similar to those of the electronic level. The resulting curve of the fixed inclinometer is nearly the same as that of the sliding inclinometer, and the curve shape is consistent with site construction conditions. The automatic monitoring has good reliability in foundation pit monitoring. For foundation pits subject to complex stress states and frequent bad weather, automatic monitoring should be the first choice for their monitoring in the case of a controllable cost.

Keywords: automatic monitoring; manual monitoring; analysis of variance; comparison of monitoring results

随着城市化进程的推进, 各种超高层建筑如雨后春笋, 无论是出于使用目的(如停车和人防工程), 还是考虑受力情况(如倾覆和地基土承载力), 建筑物在施工初期基本上都离不开基坑, 因此基坑监测愈加普遍, 也越来越重要。《建筑基坑工程监测技术标准》^[1]列出基坑应加密监测的若干

情形, 如监测数据报警、基坑及周边大量积水、长时间连续降雨、监测速率加快、支护结构开裂或其他异常等, 当有危险事故预兆时, 甚至要求实时跟踪监测。按照传统的人工监测不可能达到实时监测, 且在恶劣天气下, 单纯依靠传统光学仪器很难完成现场监测工作。《高大模板支撑系统

收稿日期: 2021-05-24

*基金项目: 广州市珠江科技新星专项资助项目(201806010162); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)河口海岸与岛礁工程创新团队建设项目(311020009)

作者简介: 陈明杰(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事地基、桩基检测, 基坑监测及相关科研工作。

实时安全监测技术规范》^[2] 规定, 为达到监测数据连续的目的, 建议自动化测量设备监测频率不低于 2 次/min。这也从另一个角度反映了连续实时对于采集频率的要求, 而这么高的采集频率, 人工监测无法满足要求。因此, 如何提高监测频率, 并保证在极端天气下能顺利实施是摆在监测人员面前亟待解决的难题。自动化监测的频率可根据工程重要性、危险性随时设置, 最高频率甚至达到 1 Hz, 完全满足连续实时监测的频率要求, 而且自动化的实施节省了人工成本, 长期效益显著, 同时对保障监测人员安全, 保证更及时地反映施工信息, 对项目实施者更快做出决策和判断具有重大意义。

目前, 自动化应用研究方向在基坑、铁路^[3]、地铁车站^[4]等方面, 孙元帝等^[5]对基坑自动化监测可靠性方面做了相关阐述, 但仍停留在理论分析层面, 论述较为笼统; 《基坑工程自动化监测技术规范》^[6]明确自动化监测必须进行比对测量, 比对测量周期应视基坑支护结构安全等级和周边环境风险等级情况确定, 在基坑自动化监测过程中宜 1~2 个月 1 次, 且给出各自动化监测项目具体对应的人工比对方法。《建筑基坑施工监测技术标准》^[7]也明确自动化监测宜与人工监测进行对比, 相互验证, 存在差异时进行原因分析。每一个监测工程均存在与其他工程不同的地方, 比对的方法也不尽相同, 针对特定工程, 将自动化基坑监测与人工基坑监测对比分析, 采用单因素方差分析方法, 从监测结果上评价自动化监测的可靠性更加科学。

本文依托某船闸基坑监测工程, 针对主体结构基坑边坡进行自动化监测, 并每月进行 1 次人工监测比对, 其中采用徕卡电子水准仪人工监测与静力水准仪自动化监测进行比对, 采用滑动式测斜仪人工监测与固定式测斜仪自动化监测进行比对。目前自动化基坑监测技术并不很成熟, 各监测单位对其了解不深刻, 且规范跟进较晚, 本文的比对方法可为类似工程提供指导和参考。

1 测试原理

固定式测斜仪主要由伺服倾斜传感器、金属杆身、卡入测斜管凹槽的滑轮、用于固定式测斜仪相互之间连接的钢丝绳、四芯屏蔽电缆等组成, 使用双绞屏蔽聚氨酯电缆线可提高固定测斜仪使用过程中的抗干扰、防雷击的能力, 保证监测数据采集的准确性和传输的及时性、安全性。安装时多支固定式测斜仪通过钢丝绳串联吊挂在测斜管内, 利用不同高程位置金属杆身内部的倾斜传感器, 测出相应测斜管段的倾斜角, 通过相应测斜管段长度与倾斜角正弦值的乘积换算水平位移量, 再将水平位移自下而上进行累加, 即可得到整根测斜管的变形, 通过对比两个不同时刻的不同形态可得到不同深度位置的变化量。固定式测斜仪应用范围广泛, 在边坡、基坑等工程多有使用, 且易于回收再利用, 有利于降低成本。其输出为 RS485 信号, 经过参数设置或公式编辑可输出水平位移量, 利于自动化采集。采集系统可智能识别连接到采集仪的传感器编号、对应参数等, 数据采集后通过 4G 卡发射信号, 存储在云端, 登录云平台即可查看监测数据。该系统在基坑监测中的计算公式如下:

$$S_i = L_i \sin(a + bF_i + cF_i^2 + dF_i^3) \quad (1)$$

$$S_n = \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

式中: L_i 为第 i 支测斜仪的代表标距 (mm), 取第 $i-1$ 与第 i 支测斜仪间距的一半加上第 i 与第 $i+1$ 支测斜仪间距的一半, 最顶部和最底部的测斜仪间距取全部; F_i 为第 i 支测斜仪某一时刻的加速度测试信号, 无量纲; a 、 b 、 c 、 d 为第 i 支测斜仪的率定系数, 无量纲; S_n 为各测点的水平位移量 (mm), 一般自下而上对每测段水平变形进行累加得到。

磁电式静力水准系统由若干储液容器组成, 其互相连通, 形成连通器。储液容器利用磁致伸缩杆的磁致伸缩效应、感应储液容器内浮球的上下变动确定液位高度变化。储液容器用通气管相

连，整个系统气压相等，确保液位变化是由重力引起。使用时，其中一个储液容器置于基准点，假设其高程测试过程中保持不变，其他储液容器置于待测位置上，当液面稳定时，所有储液容器的液面位于同一高程，通过液面变化量可求出待测位置上沉降变化量。影响液位变化的因素包括振动、仪器位置高程、气压、温度、液体密度。由于静力水准仪采用均质防冻液，依靠通液管相连。各静力水准仪之间，顶部通过通气管相连，内部气压相等且与外界气压隔绝，所有的静力水准仪均在同一环境工作，一般认为气压、温度、液体密度相等，只有振动、仪器位置高程是主要的影响因素。在应用过程中，测点埋设安装均是在基坑边坡成型后进行，施工振动忽略不计，可认为液面变化来自于仪器位置高程变化。本文使用的磁电式静力水准仪量程为 300 mm，精度为 0.01 mm。系统输出 RS485(MODBUS) 数字信号，采用自动化数据采集仪接入多支静力水准仪，可实现基于物联网的远程数据采集，并通过 4G 手机卡发送至云端，管理者可随时随地通过网络查看监测数据。该系统在基坑监测中的计算过程为：为便于公式推导，在初始时刻，假设基准点位置的静力水准仪的液面高度读数为 h_0 ，液面刻度为 0 的位置高程为 H_0 ，测点位置的静力水准仪的液面高度读数为 h_i ，液面刻度为 0 的位置高程为 H_i ；任意时刻，基准点位置的静力水准仪的液面高度读数为 h'_0 ，液面刻度为 0 的位置高程仍为 H_0 ，测点位置的静力水准仪的液面高度读数为 h'_i ，液面刻度为 0 的位置高程为 H'_i ，则有如下等式：

$$H_i + h_i = H_0 + h_0 \quad (3)$$

$$H'_i + h'_i = H_0 + h'_0 \quad (4)$$

由式(3)(4)可得：

$$H_i - H'_i = (h'_i - h_i) - (h'_0 - h_0) \quad (5)$$

$$\Delta H_i = \Delta h_i - \Delta h_0 \quad (6)$$

式中： ΔH_i 为测点的下沉量，下沉时为正值，反之为负值； Δh_i 为测点的液面变化量； Δh_0 为基准点的液面变化量。式(6)表明，测点的沉降量与测点位置静力水准仪液面变化量、基准点位置静力水准仪液面变化量密切相关，为二者之差。

2 工程概况

某船闸工程基坑呈狭长形布置，基坑采用自然放坡的支护形式。由于主体结构施工工期长、地质情况复杂、汛期降雨量大、开挖深度大，基坑发生滑坡的风险较高。该边坡较远位置为弃土区，主体结构段开挖最大深度 28.4 m，又逢汛期，危险性较大，采用一般的人工监测，频率较低且极端天气下一般的光学测量仪器误差较大，测量实施难度大，测点基本位于基坑边坡，测量人员测试过程中风险较大，难以保障极端条件下基坑边坡的安全性，因此采用自动化监测并辅以人工监测对自动化监测结果进行复核。总共布设 5 个沉降监测点和 5 个深层水平位移监测点，根据现场情况，尽可能将二者布置在同一断面，可互相验证和校对，但由于客观因素无法布置在同一断面的，也尽可能使二者断面靠近，报警值见表 1，测点布置见图 1。

表 1 各监测点报警值

类型	测点编号	速率报警值/ (mm·d ⁻¹)	累计报警值/ mm
沉降监测点	CJ1	5	102.2
	CJ2	5	81.1
	CJ3	5	97.7
	CJ4	5	96.8
	CJ5	5	109.5
测斜监测点	CX1	10	102.2
	CX2	10	81.1
	CX3	10	97.7
	CX4	10	96.8
	CX5	10	109.5

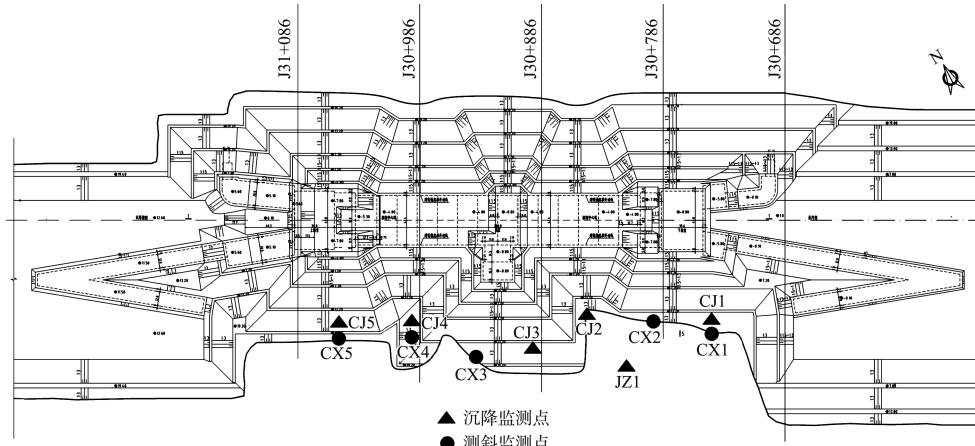


图 1 沉降、测斜监测点平面布置

蜀山枢纽处以桩号 J30+000 为界, 下游段(桩号 J29+530—J30+000)为弱膨胀土段, 上游段(桩号 J30+000—J32+100)为中膨胀土段, 典型地质地层分布见表 2。

表 2 典型断面地层分布

土层名称	层厚/m	土质
中、重粉质壤土	0.40~9.20	高压缩性土
淤泥质重粉质壤土	0.60~4.10	高压缩性土
重粉质壤土为主, 带少量粉质黏土	0.50~11.50	中等偏高压缩性土
轻、中粉质壤土	0.10~0.50	中等偏低压缩性土
中、细砂	1.00~4.70	低压缩性土
中、重粉质壤土为主, 含少量细砂	0.05~0.50	中等偏低压缩性土
全-强风化粉、细砂岩	最大 9.10	-
中等风化-新鲜粉、细砂岩	最大 24.90	-

3 监测结果分析

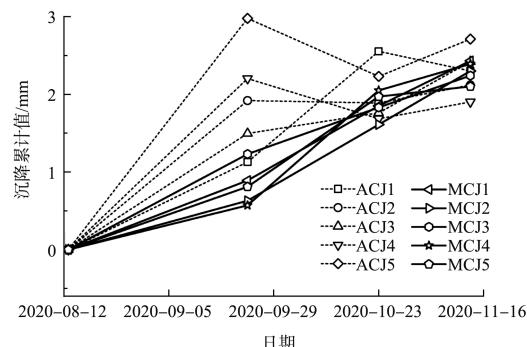
3.1 比对频率及仪器

根据《基坑工程自动化监测技术规范》, 比对测量在自动化监测过程中, 宜 1~2 个月 1 次, 竖向位移采用静力水准仪进行监测的宜使用水准仪进行比对测量; 深层水平位移采用固定式测斜仪进行监测的, 宜使用滑动式测斜仪进行人工监测比对测量。

3.2 沉降结果分析

为方便数据统计和分析, 数据的正负做统一规定, 其中正值表示下沉, 负值表示上升。自动化和人工监测沉降-时间曲线见图 2。可以看出, 在监测的初期, 人工监测结果相比自动化监测结果偏小, 其中 CJ5 点相差最大为 2.17 mm, 主要原因是该阶段降雨较频繁, 光学仪器受天气影响

较大, 也说明在极端天气下, 人工监测有自身的短板, 已不适用于该状态下的基坑监测; 监测中期, 二者结果缓慢趋近, 该阶段汛期已基本过去, 天气对监测结果的影响有限; 监测后期, 人工监测和自动化监测结果已非常接近。纵观整个监测过程, 人工和自动化监测结果相差均不大, 累计值变化较小, 曲线较为吻合, 说明采用静力水准仪进行基坑边坡沉降监测的结果可靠。



注: 首字母 A 表示自动化监测, M 表示人工监测。

图 2 自动化和人工监测沉降-时间曲线

为对比自动化监测和人工监测结果的差异, 采用单因素方差分析法(又称为变异分析法), 对每测点的人工和自动化监测累计沉降-时间曲线进行对比。首先假设显著性水平为 0.05, 该显著性水平下自动化监测和人工监测结果无差异, 通过计算二者方差检验值和临界值, 在检验值小于临界值时, 认为在假设的显著性水平下原假设可以接受, 此为假设检验的常用方法。

通过方差分析, 汇总相关评价参数见表 3。可

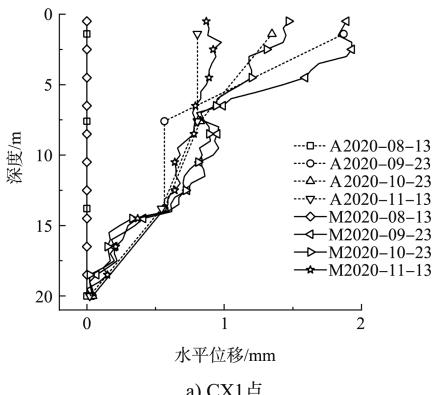
以看出，检验值均小于临界值，据此判断在置信度为95%时，自动化监测和人工监测结果无差异的假设是可接受的。

表3 自动化和人工监测方差分析结果

测点编号	假设显著性水平	检验值	临界值	置信度/%
CJ1	0.05	0.19	7.71	95
CJ2	0.05	0.89	7.71	95
CJ3	0.05	0.10	7.71	95
CJ4	0.05	0.20	7.71	95
CJ5	0.05	4.75	7.71	95

3.3 深层水平位移结果分析

为方便数据统计和分析，数据的正负作统一规定，其中正值表示向基坑内移动，负值表示向基坑外移动。对于自动化监测，由于固定式测斜仪价格相对昂贵，一般按照一定竖向间距进行布置，本工程20 m以下已经进入岩层，分别在1.4、7.6、13.8、20.0 m深度位置进行布置，而人工监测只用1支滑动式测斜仪，额外增加少量人工，费用较少、易于操作且每月只测试1次进行比对，竖向测试点可密集一些，按照0.5 m测读1次。CX1~CX5自动化和人工监测水平位移-深度曲线见图3。可以看出，自2020-08-13开始初值测量完成后，深层水平位移曲线缓慢发展，各监测点变化较小，其中变形最快的为CX3点，自动化监测累计最大变形为-24.57 mm，人工监测累计最大变形为-24.66 mm，二者相差很小。对比各深层水平位移监测点，同一天自动化监测和人工监测数据吻合非常好，再次说明采用固定式测斜仪进行深层水平位移监测，其结果可靠性较好，能满足信息化施工要求。



a) CX1点

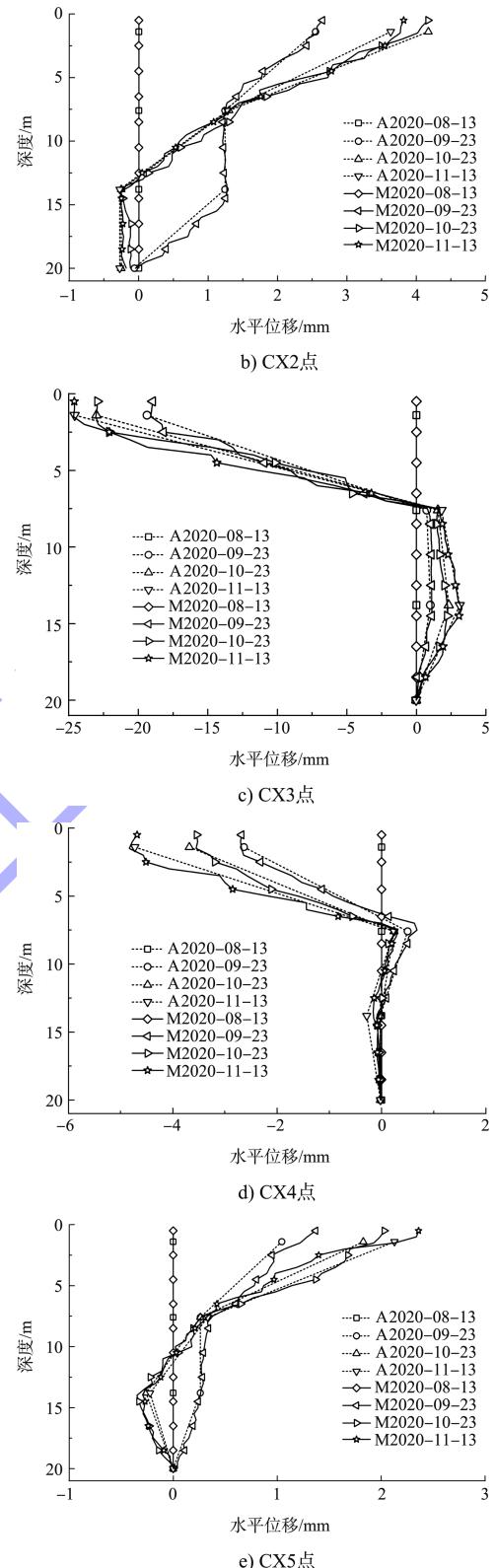


图3 自动化和人工监测水平位移-深度曲线

《水运工程地基基础试验检测技术规程》^[8]明确了滑动式测斜仪的竖向间距可取0.5或1.0 m，为建议性规定；固定式测斜仪竖向间距应根据工程需要选取，宜为1.5~3.5 m，为推荐

性规定。该规定可用于指导人工监测的测试点密度和自动化监测传感器布置的间距。本工程考虑了自然放坡的支护方式，并节约成本，布置 4 支固定式测斜仪已能满足安全要求。由图 3 可以看出，虽然每个测斜孔沿深度只布置 4 支固定式测斜仪，但已能够反映基坑的变化形态。因此，从曲线的吻合程度来看，固定式测斜仪沿深度布置 4 个测点是合理和可行的。

文献[7]归纳了 8 种深层水平位移典型曲线形态，分别为喇叭状、中鼓状、底部鼓状、反向位移、不规则变形、土层错动状、底部转动、底部始齿状。根据深层水平位移发展变化形态，分析产生原因和土层受力情况更有助于指导现场施工和制定应对措施。从曲线变化形态分析，CX1、CX2、CX5 监测点对应水平位移-深度曲线均为典型的喇叭状变化，其特点是自上而下基本呈由大到小的渐变曲线，曲线类似于张开的半喇叭口状，既没有中鼓也没有底鼓，为典型的无支撑自然放坡变形特点。CX3、CX4 监测点则呈反向位移变化，即均向基坑外移动，主要原因是 CX3 位置在基坑外存在深约 7 m 的蓄水池塘，且 CX3、CX4 监测点基坑外侧有弃土，压路机也在碾压，边坡偏压受力，导致测斜管弯向受力的一侧。从曲线变化规律和曲线变化形态上分析，与现场施工状态吻合。

对每个监测点分别在 2020-09-23、2020-10-23、2020-11-13 的曲线进行自动化和人工监测的结果进行方差分析，其方法与沉降分析中的类似，不再赘述。通过方差分析，汇总评价参数见表 4。可以看出，检验值均小于临界值，说明在置信度为 95% 时，二者无明显差异。

表 4 自动化和人工监测方差分析结果

测点 编号	假设显著 性水平	检验值			临界 值	置信 度/%
		2020-09-23	2020-10-23	2020-11-13		
CX1	0.05	0.14	0.01	0	7.71	95
CX2	0.05	0	0.02	0.01	7.71	95
CX3	0.05	0.02	0	0	7.71	95
CX4	0.05	0.01	0	0.10	7.71	95
CX5	0.05	0.15	0	0	7.71	95

4 结语

1) 根据现场测试结果分析，静力水准仪测试

结果与电子水准仪测试结果存在微小差异，可能是由于电子水准仪对天气较为敏感引起，且二者均远小于累计报警值，说明静力水准仪用于自动化监测可靠性较好，测试结果能满足现场信息化施工要求。

2) 固定式测斜仪与滑动式测斜仪测试曲线吻合良好，相同位置、相同时间的测试值相近，证明固定式测斜仪用于自动化监测可靠性良好。

3) 固定式测斜仪曲线形态与现场施工状态相符，表明固定式测斜仪结果反映了基坑边坡实际变化，再次证明固定式测斜仪测试结果可靠。

4) 对静力水准仪和固定式测斜仪与人工监测进行方差检验的结果表明：在置信度为 95% 时，自动化监测和人工监测结果无差异的假设是可接受的。

参考文献：

- [1] 济南大学, 荣华建设集团有限公司, 同济大学, 等. 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [2] 广州市建设工程质量安全检测中心. 高大模板支撑系统实时安全监测技术规范: DBJ/T 15-197—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [3] 左常敏, 宫建岗. 地铁车站暗挖施工中自动化监控系统的应用研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(S1): 144-146.
- [4] 范红波. 铁路施工便梁沉降自动化监控系统开发与应用[J]. 铁道勘察, 2012, 38(1): 103-105.
- [5] 孙元帝, 孟凡明, 孙志铖, 等. 自动化监测系统在深基坑监测中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(5): 59-60.
- [6] 广州市建设工程质量安全检测中心. 基坑工程自动化监测技术规范: DBJ/T 15-185—2020[S]. 北京: 中国城市出版社, 2020.
- [7] 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司. 建筑基坑施工监测技术标准: DBJ/T 15-162—2019[S]. 北京: 中国城市出版社, 2019.
- [8] 中交天津港湾工程研究院有限公司, 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程地基基础试验检测技术规程: JTS 237—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)