

桩基快速荷载试验技术在新加坡柔佛捷运项目中的应用

李建军, 黄天坤

(中交第三航务工程局有限公司, 上海 200030)

摘要: 针对传统桩基承载力静载试验时间长、场地占用大、施工安全风险大的问题, 在新加坡柔佛捷运项目引入桩基快速荷载试验法(Rapid Load Test, 简称RLT)。简述了RLT的基本原理, 进行试验桩的RLT和静载对比关联试验。试验结果表明RLT试验下沉量比静载试验小, 所以在项目工程桩工作荷载检测时如使用RLT替代静载试验, 应进行相关性修正; 嵌岩桩进行RLT试验与静载试验得到的摩擦力和端承力有差异性分布, RLT试验中摩擦力相较静载试验偏集中于底部, 摩擦力和端承力总值与静载结果相当。在新加坡Bukit Timah Granite地质条件下使用RLT试验替代静载试验具有可行性。

关键词: 新加坡荷载检测; 准静态桩基检测法; 快速荷载试验

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0079-06

doi:10.7640/zggwjs202410014

Application of rapid load test technology on pile foundation in Johor Bahru-Singapore Rapid Transit System project

LI Jian-jun, HUANG Tian-kun

(CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: In view of the problems that traditional static load test (SLT) takes a long time, large site occupied and high risk, the Rapid Load Test (RLT) method was introduced in Johor Bahru-Singapore Rapid Transit System project. The basic theory of RLT was introduced, and RLT and SLT correlation tests were conducted on test piles. The results show that the settlement under RLT test is smaller than that under static load test, so correlation correction should be carried out if RLT is used to replace SLT in the working load test of piles in the project, the skin friction and end bearing forces obtained from RLT and SLT of rock socketing piles are differentially distributed, and friction force in the RLT test is relatively more concentrated at the bottom compared to the SLT, while the total values of friction and end bearing forces are comparable to the results of the static load. It is feasible to use the RLT test as an alternative to the static load test in the geological condition of Bukit Timah Granite in Singapore.

Key words: Singapore load test; quasi-static load test method; rapid load test

0 引言

目前国内桩基竖向承载力检测的方法主要有3种: 1) 静载试验, 通过在桩顶与反力架之间设置千斤顶对桩顶加载, 得到荷载-位移曲线, 然后根据曲线推算求出单桩竖向抗压承载力特征值等参数; 2) 高应变试验, 基本原理是在桩顶施加一

个冲击力, 使桩产生足够的贯入度, 实测由此产生的桩身质点应力和加速度的响应, 通过波动理论分析, 判定单桩竖向抗压承载力及桩身完整性的检测方法; 3) 自平衡法, 在桩身中预埋荷载箱, 利用桩身自重、桩侧阻力及桩端阻力互相提供反力的试验方法^[1]。静载试验适用性最广, 但需

要的场地大、时间长、安全风险大；高应变试验对于大直径扩底桩和预估荷载-沉降曲线具有缓变型特征(端承桩一般为缓变型)的大直径灌注桩不适用^[2]；自平衡法对于岩石强度很大的嵌岩桩，如果嵌岩深度不够，桩长范围内无法找到平衡点，且在工作荷载检测时无法支持随机选桩。

桩基快速荷载试验(Rapid Load Test, 简称 RLT)具有场地占用小、试验时间短、成本低等优点，该试验方法在美国、日本等国家已有较为标准化的试验规范和要求。本文结合新加坡—马来西亚柔佛捷运工程项目(简称新柔捷运)，通过极限荷载试验桩进行桩基快速荷载检测技术与静载试验的对比关联试验，获得该工程范围内地质条件下的相关系数，用于项目后续工程桩的工作荷载检测，由工作荷载试验结果说明该技术的适用性。

1 快速荷载试验原理

快速荷载试验方法属于介于静态法和动态法之间的准静态法，是动静试验法的一种^[3]，将静载的加载、卸载时间大幅缩短，通过重锤冲击桩顶，调整锤垫获得需要的荷载持续时间进而实现加载和卸载过程。

传统高应变和 RLT 的荷载持续时间和应力波在桩长为 L 的桩基内传播的特征曲线如图 1 所示。

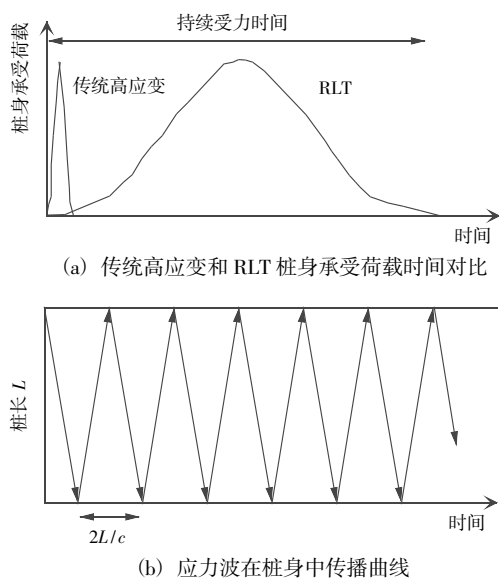


图 1 传统高应变和 RLT 桩身承受荷载时间对比及桩身中应力波传播特征曲线

Fig. 1 Comparison of pile loading duration between traditional high strain test and RLT and characteristic curves of stress wave propagation in piles

传统高应变的荷载持续时间 t_L 为 5~10 ms,

RLT 的荷载持续时间 t_L 为 50~100 ms, 由此可以得出应力波在荷载持续时间内来回传播的次数 R_T ^[4]。

$$R_T = t_L / (2L/c)$$

式中： t_L 为荷载持续时间； L 为桩长； c 为应力波沿桩身的传播速度。

根据 Nishimura 1998 年提出的理论，当 $R_T \geq 5$ 时，应力波效应可以被忽略，所以桩基可以考虑为刚体^[5]。RLT 的荷载加载时间比传统高应变长， $R_T > 5$ 的高应变检测可以被定义为 RLT^[3]，可以通过调整锤重、下落高度和不同材质的锤垫实现。

2 项目概况与地质条件

新柔捷运是跨越柔佛海峡连接马来西亚新山和新加坡的地铁线路，总长约 4 km。起点位于新加坡中北部地区，新加坡境内为隧道+陆域高架+水上高架的结构形式，新柔捷运新加坡段三维模型图见图 2。典型地质钻孔柱状图见图 3。

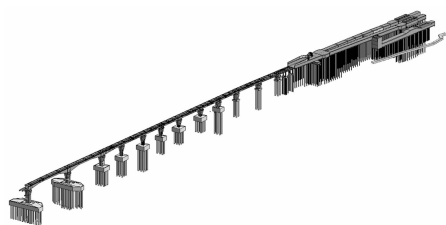


图 2 新柔捷运新加坡段三维模型

Fig. 2 3D model of the Singapore section of Johor Bahru-Singapore Rapid Transit System

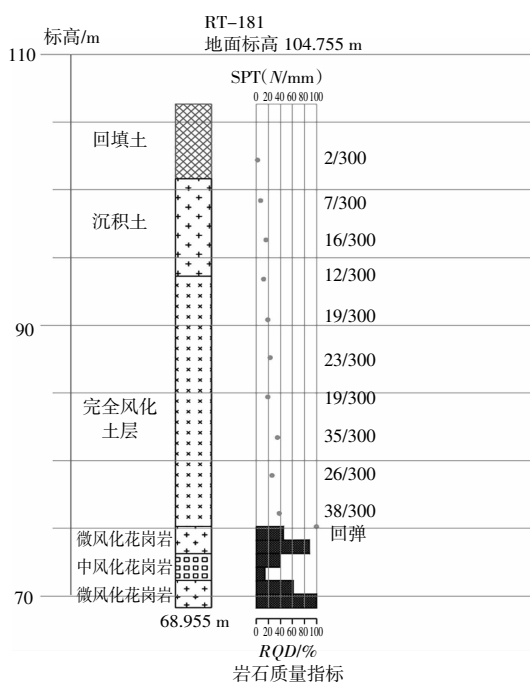


图 3 典型钻孔柱状图

Fig. 3 Typical bored log

项目所处地区土层包括表层软土、坚硬的砂质粉土和不同风化程度的花岗岩, 隧道桩基采用直径 0.8~1 m 钻孔灌注桩, 平均嵌岩深度 2 m; 高架承台桩基采用直径 2 m 钻孔灌注桩, 平均嵌岩深度 3.5 m。工程范围内岩基为花岗岩, 中风化层无侧限抗压强度达到 100 MPa。

3 试验条件与仪器布置

为提高 RLT 在工程桩工作荷载检测的准确度, 对极限承载力试桩依次完成了 RLT 和静载试验进行对比试验, 并获取 RLT 的荷载-沉降曲线在此地质情况下的静载相关系数(Correlation factor)^[9]。考虑到 RLT 加载时间较短, 对桩体的压载沉降效应小, 所以先进行 RLT 检测试验, 再进行静载试验。桩基基本信息如表 1 所示, 试桩设计考虑的摩擦力系数及端承力系数见表 2。桩身布置 12 组应变片, 每组 4 个按 90°环形布置, 在不同标高设置 3 根引伸计用以测量不同标高的桩身应力和压缩量, 仪器布置见表 3。

表 1 试桩信息表

Table 1 Test pile information

项目	信息
桩基直径/mm	1 500
桩长/m	28.9
设计荷载/kN	9 535
试验荷载/kN	28 605
混凝土强度等级	C40
主筋	52H40
桩底注浆	是

表 2 试桩设计假设参数

Table 2 Assumed parameters for test pile design

土层分类	极限单位面积摩擦 力系数/(kN·m ⁻²)	极限单位面积端承 力系数/(kN·m ⁻²)	备注
回填土层	0		
沉积土层	50		
完全风化土层	150		
强风化花岗岩层	300		
中风化花岗岩层	550	8 000	需桩底 注浆
微风化花岗岩层	900	10 000	

表 3 测量仪器布置表

Table 3 Measuring instrument arrangement

编号		标高/m
应变片	SG Level 1	+76.46
	SG Level 2	+77.46
	SG Level 3	+78.46
	SG Level 4	+80.26
	SG Level 5	+83.26
	SG Level 6	+86.26
	SG Level 7	+89.26
	SG Level 8	+92.26
	SG Level 9	+94.76
	SG Level 10	+97.76
	SG Level 11	+100.76
	SG Level 12	+102.78
引伸计	Extensometer 1	+75.90
	Extensometer 2	+77.46
	Extensometer 3	+94.76

试桩施工完成待混凝土达到设计强度后, 先进行 RLT 试验, 共 3 轮, 见表 4。然后进行静载试验, 共 3 轮, 见表 5。

表 4 RLT 试验循环

Table 4 RLT testing cycle

加载循环	目标试验 荷载/kN	最大荷载/ kN	最大位移/ mm
第 1 轮循环(100%工作荷载)	9 535	13 108	7.48
第 2 轮循环(200%工作荷载)	19 070	22 286	10.79
第 3 轮循环(300%工作荷载)	28 605	31 137	17.68

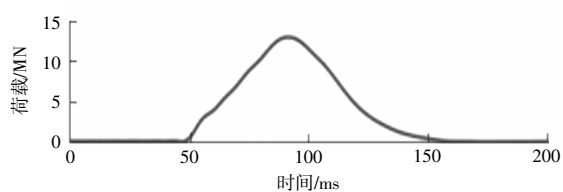
表 5 静载试验循环

Table 5 SLT testing cycle

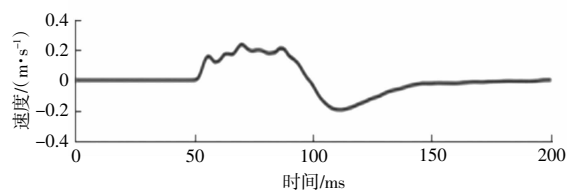
加载循环	目标试验荷载/kN	最大位移/mm
第 1 轮循环(100%工作荷载)	9 535	6.35
第 2 轮循环(150%工作荷载)	14 303	13.45
第 3 轮循环(300%工作荷载)	28 605	56.53

4 试验结果

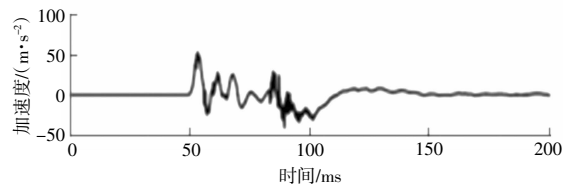
根据现场记录, RLT 荷载、速度、加速度和位移原始信号曲线如图 4、图 5 和图 6 所示, RLT 荷载-位移曲线如图 7 所示, 静载试验荷载-位移曲线如图 8 所示。



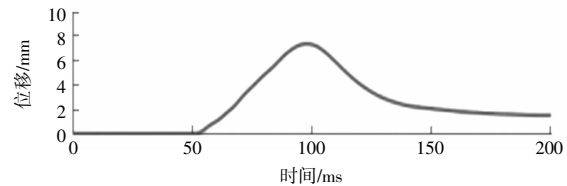
(a) 荷载-时间曲线



(b) 速度-时间曲线



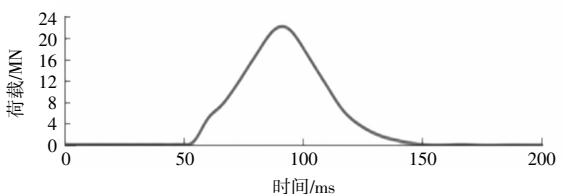
(c) 加速度-时间曲线



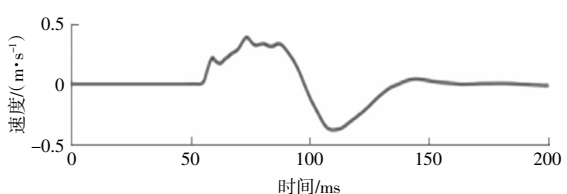
(d) 位移-时间曲线

图4 第1轮加载循环的原始数据

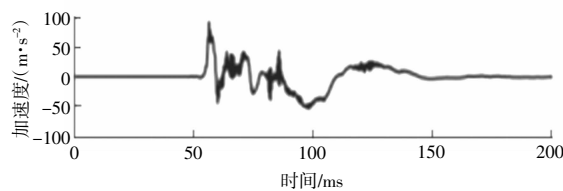
Fig. 4 Cycle 1st raw data



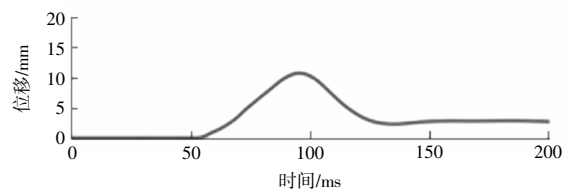
(a) 荷载-时间曲线



(b) 速度-时间曲线



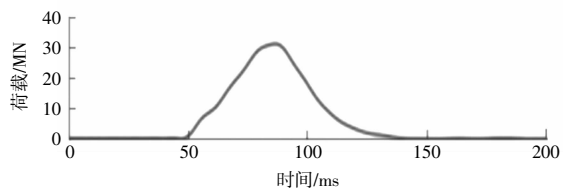
(c) 加速度-时间曲线



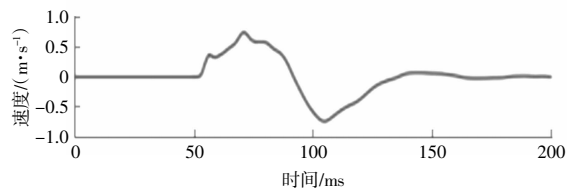
(d) 位移-时间曲线

图5 第2轮加载循环的原始数据

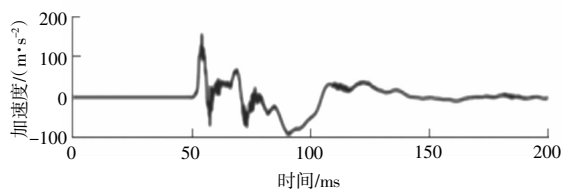
Fig. 5 Cycle 2nd raw data



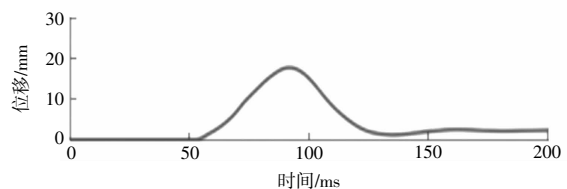
(a) 荷载-时间曲线



(b) 速度-时间曲线



(c) 加速度-时间曲线



(d) 位移-时间曲线

图6 第3轮加载循环的原始数据

Fig. 6 Cycle 3rd raw data

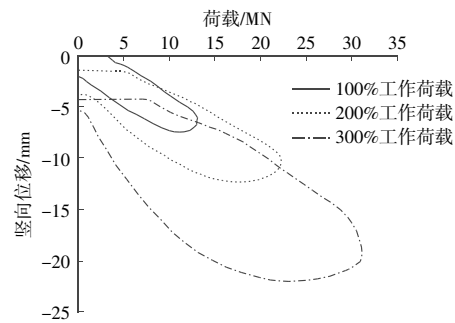


图 7 RLT 荷载-位移曲线
Fig. 7 RLT load-displacement curve

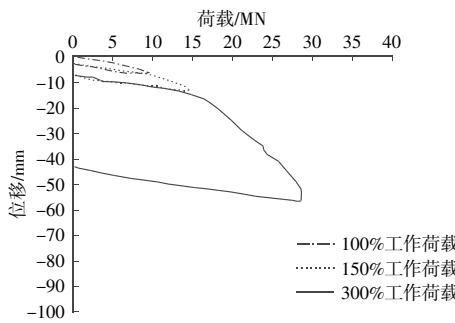


图 8 静载试验荷载-位移曲线
Fig. 8 SLT load-displacement curve

5 结果分析

5.1 荷载-位移曲线对比分析

对于砂土、碎石土、粉土中的试桩及嵌岩桩,多循环卸载点法均可获得较理想的结果^[7],使用 BS EN ISO 22477-10 中多循环卸载点法(Unloading Point Method)进行数据修正^[8],去除加速度的影响,将 RLT 的原始数据转换为等效静态荷载-位移曲线,公式如下:

$$R_{c,tw-max}=F_{c,tw-max}-(m\cdot a_{tw-max})$$

式中: t_{w-max} 为在重锤落下接触到桩基后桩基位移速度为 0 m/s 的时间点; $R_{c,tw-max}$ 为在卸载点处的

等效静态荷载; $F_{c,tw-max}$ 为在卸载点处的桩基承受荷载; m 为桩基质量; a_{tw-max} 为在卸载点处的桩基加速度。

RLT 沉降数据经过处理后得到等效静态荷载-位移曲线,见图 9。

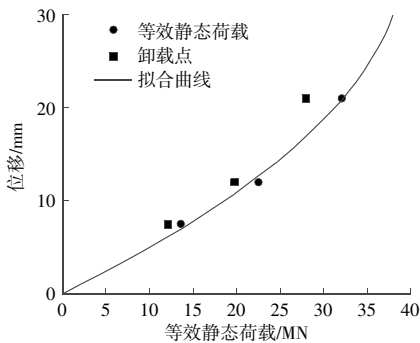


图 9 等效静态荷载-位移拟合曲线
Fig. 9 Equivalent static load-displacement fitted curve

由表 6 数据可知,等效静态荷载-位移曲线和静载荷载-位移曲线在相同荷载下的位移区别很大,这是由于加载时间、维持荷载时间的不同导致。

表 6 静载位移和 RLT 等效静载位移

Table 6 Static load displacement and RLT equivalent static displacement

荷载	荷载值 (静态荷载)/kN	静载位移/mm	RLT 等效静载 位移/mm
100%工作荷载	9 535	6.35	5.30
150%工作荷载	14 303	13.45	8.20
200%工作荷载	19 070	22.37	11.50
300%工作荷载	28 605	56.53	18.90

5.2 摩擦力和端承载力对比分析

根据桩身内应变片数据,经计算得每个区间内桩身摩擦力和端承载力,300%工作荷载下数据结果对比见表 7。

表 7 RLT 和静载试验下的计算所得单位面积摩擦力和端承载力

Table 7 Unit area friction and end bearing force calculated under RLT and SLT

土层	土质	SPT/击	单位面积摩擦力/kPa		单位面积端承载力/kPa	
			RLT	静载试验	RLT	静载试验
SG Level 12-11	回填土	2	19	27		
SG Level 11-10	沉积土	2	6	24		
SG Level 10-9	沉积土	10	11	27		
SG Level 9-8	完全风化土层	12	13	15		
SG Level 8-7	完全风化土层	13	16	12		
SG Level 7-6	完全风化土层	19	22	25		
SG Level 6-5	完全风化土层	35	48	51		
SG Level 5-4	完全风化土层	26	36	49		
SG Level 4-3	完全风化土层	38	160	152		
SG Level 3-2	中风化花岗岩层		757	843		
SG Level 2-1	微风化花岗岩层		932	792	8 217	8 256

RLT 与静载试验在相同荷载下端承力区别不大, 但 RLT 检测中桩的摩擦力主要集中在桩底部, 这是由于桩身在锤击作用下产生位移速度较大导致。

5.3 RLT 荷载-位移曲线的修正

由于 RLT 试验下位移比静载试验小, 所以在工程桩工作荷载检测时如使用 RLT 替代静载试验, 应进行相关性修正, 确定在 150% 工作荷载下 RLT 位移的修正系数, 使用 BS EN ISO 22477-10 卸载点法中的公式对静载试验下的荷载-位移曲线进行拟合:

$$F = w / (w(t_c) / R_c(t_c) + w / (\eta \cdot R_c(t_{w-\max})) - w \cdot w(t_c) / (R_c(t_c) \cdot w(t_{w-\max})))$$

式中: F 为荷载; w 为位移; η 为修正系数; $R_c(t_c)$ 、 $R_c(t_{w-\max})$ 分别为 t_c 时间点、 $t_{w-\max}$ 时间点的等效静态荷载; $w(t_c)$ 、 $w(t_{w-\max})$ 分别为 t_c 时间点、 $t_{w-\max}$ 时间点的位移。

调整 η 值使得曲线匹配静载试验下的荷载-位移曲线, 如图 10 所示。150% 工作荷载下的修正系数为 0.8, 工程桩 RLT 在 150% 工作荷载下的等效静态位移除以 0.8 即可用作试验沉降结果。

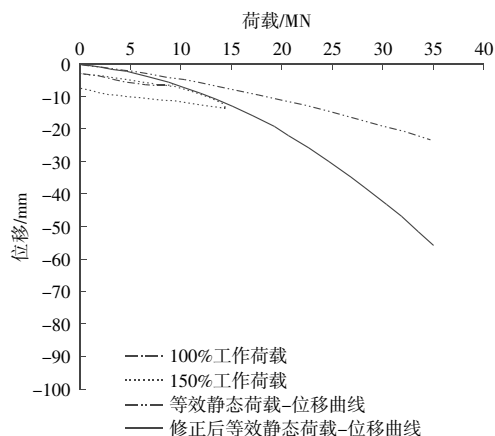


图 10 修正后等效静态荷载-位移曲线

Fig. 10 Corrected equivalent static load-displacement curve

6 结语

1) 根据试验结果, 在新加坡 Bukit Timah Granite 地质条件下, 嵌岩桩使用 RLT 进行荷载检测合理可行。RLT 同等荷载下的沉降值比静载试验下的沉降值小, 需要在荷载检测之前在工程范围内进行 RLT 和静载试验对比关联试验, 确定关联系数 η 用于 RLT 沉降值修正。

2) 嵌岩桩进行 RLT 与静载试验得到的摩擦力和端承力分布有差异, 相较于静载试验 RLT 试验中桩身由于锤击作用产生的位移速度较大, 使桩身摩擦力相对集中于桩底部, 但摩擦力和端承力总值与静载试验差别不大。

3) 快速荷载试验中关键和核心是控制加载时间, 可通过改变锤垫的材料和厚度针对不同的设计承载力进行调整, 锤垫、锤重和承载力的关系属于专业试验公司核心机密, 国内发展此方法需进行试验积累数据。

参考文献:

- [1] JGJ/T 403—2017, 建筑基桩自平衡静载试验技术规程[S].
- [2] JGJ 106—2014, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [3] JGS 1815—2002, Standard of Japanese geotechnical society for vertical load tests of piles[S].
- [4] MATSUMOTO T. Rapid load test of piles[N]. IPA News Letter, 201-06-02(4).
- [5] NISHIMURA S, SHIBATA A, YAMASHITA K, et al. One dimensional stress wave simulation analysis of static load test[M]. Proceedings the 2nd static seminar. 1998: 337-344.
- [6] APPBCA—2021-17, Guidelines on adoption of rapid load tests for foundation piles[S].
- [7] 朱建明, 龚维明, 赵学亮, 等. 单桩轴向抗压承载力检测之快速荷载试验[J]. 中外公路, 2021(4): 47-51.
- [8] BS EN ISO 22477-10: 2016, Geotechnical investigation and testing [S].